

CARLANDER

KOMPENDIUM I ELMASKINER (ÅK 4):

TRANSFORMATORN

## TRANSFORMATORN.

1. Växelströmsmagnetisering av spolar med järnkärna.
2. Järnförluster vid vs-magnetisering.
3. Resistansförhållanden vid lik- och växelström
4. Magnetsieringsström och magnetiseringseffekt vid sinusformat flöde.
5. Elementär transformort teori.
6. Den fysikaliska transformatorn. Beräkningsschema.
7. Några viktiga transformatorprov.
8. Transformatorns spänningsförluster vid belastning.
9. Krafttransformatorns märkning.
10. Procentuella och relativa storheter.
11. Transformatorns förluster och verkningsgrad.
12. Trefastransformatorns uppbyggnad och koppling.
13. Typeffekt och genomgångseffekt för olika kopplade lindningar. *91*
14. Parallellkoppling av transformatorer. *91*
15. Snedbelastning av transformatorer.
16. Sparkoppling av transformatorer.
17. Speciella transformatorer.
- (18. Driftövervakning. )
- (19. Spänningsstyrning vid transformatorer. )
20. Mättransformatorer.
21. Några viktiga mättransformatorkopplingar.

## Växelströmsmagnetisering av spolar med järnkärna.

### 1. Introduktion.

En spole, som konstruerats för att användas p.g.a. sina induktiva egenskaper (induktans) kallas allmänt induktor. Äldre alternativa benämningar är reaktor och drossel. Drossel synes speciellt avse spolar med järnkärna. Om spolen är avsedd att användas vid låg frekvens (exempelvis kraftfrekvens), förses den i allmänhet med järnkärna. Därigenom ökar induktansen väsentligt eller blir spoldimensionerna betydligt mindre vid given induktans.

Järnkärnan innebär emellertid även nackdelar. Järnförluster i kärnan orsakar sålunda uppvärmning. De icke-linjära magnetiska egenskaperna hos järn gör induktansen variabel. Sistnämnda olägenhet kan delvis motverkas genom lämpliga luftgap i järnkärnan (magnetkretsen lineariseras). I vissa tillämpningar avstår man helt från järnkärna även vid låga frekvensar.

En tomgående transformator är helt enkelt en spole med järnkärna. Den fortsatta framställningen gäller därför såväl induktorer som tomgående transformatorer.

### 2. Samband mellan inducerad spänning, sammanlänkat flöde och flödesalstrande ström

Utgå från en krets enligt figur 1. Spolens resistiva egenskaper representeras av resistansen  $R$ , som är något större än den likströmsmätta p.g.a. bl.a. strömförträngning och tillsatsförluster i ledarens inre.

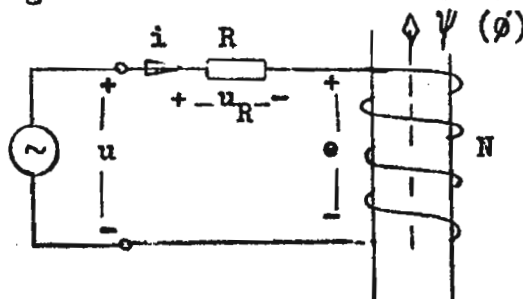


Fig. 1.

Med referenser enligt figur 1 fås spänningsekvationen

$$u = u_R + e ;$$

där

$$u_R = R \cdot i \quad \text{och} \quad e = \frac{d\psi}{dt} = N \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

alltså

$$u = R \cdot i + N \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

..... (1)

Ekv. (1) är den grundläggande relationen vid studium av växelströmsmagnetiserade spolar med järnkärna. I de följande avsnitten skall vi framför allt studera förhållanden av intresse för krafttekniska tillämpningar.

### 3. Samband mellan matningsspänningens och det inducerande flödets kurvform.

Låt oss anknyta till ekv. (1) å föregående sida. Inom krafttekniken strävar man i allmänhet efter små resistanser i såväl ledningar som apparater (undantag exvis värmespiraler ...). Spänningen  $u_R = R \cdot i$  är därför i en vettigt konstruerad induktor eller trafo endast någon procent av den påtryckta matningsspänningen  $u$ . Vår grundläggande spänningsekvation kan därför vid krafttekniska förutsättningar med god approximation skrivas:

$$u \approx e = N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad \dots (2)$$

Krafttekniska förutsättningar innebar  $R \cdot i \ll u \approx e$ .

Av ekv. (2) drar vi följande väsentliga slutsats:

Den påtryckta spänningen  $u$  "balanseras" i varje ögonblick av en inducerad spänning  $e$ . Detta sker genom att spolen genomflytes av ett flöde med viss tidvariation.

Vi omformar ekv. (2) enligt nedan

$$d\phi = \frac{1}{N} \cdot e \cdot dt \approx \frac{1}{N} \cdot u \cdot dt$$

Härur fås

$$\phi(t) = \frac{1}{N} \int e \cdot dt \approx \frac{1}{N} \int u \cdot dt \quad ; \quad \dots (3)$$

Ekv. (3) innebär följande viktiga resultat:

Med krafttekniska förutsättningar bestäm flödets kurvform av den påtryckta klämspänningen.

Att observera:

1. Om  $Ri \ll e$  bestäms  $e$  av  $\phi(t)$  av enbart  $u$ .
2.  $e$  bestäms alltid av  $\phi(t)$  enligt induktionslagens  $e = N \cdot \frac{d\phi}{dt}$

### 4. Sinusformad matningsspänning. Sinusformat flöde.

Vi håller oss fortfarande till krafttekniska förutsättningar. Detta innebär att nätspänningar normalt är sinusformade. Enligt avsnitt 3 ovan betyder sinusformad matningsspänning  $u$  att vi erhåller sinusformigt flöde. Sinusformigt varierande flöde är alltså ganska normalt i krafttekniska apparater med vs-magnetisering.

Låt oss anta  $\phi = \hat{\phi} \cdot \sin \omega t$

Då får vi

$$u \approx e = N \cdot \frac{d\phi}{dt} = \omega \cdot N \cdot \hat{\phi} \cdot \cos \omega t \quad \dots (4)$$

som även kan skrivas

$$u \approx e = \hat{e} \cdot \cos \omega t = \hat{e} \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) \quad \dots (5)$$

där

$$\hat{u} \approx \hat{e} = -w \cdot N \cdot \hat{\phi}$$

..... (6)

Vi konstaterar att med vårt referensval kommer den inducerade spänningen att ligga  $90^\circ$  före flödet .

Tiddiagram och visardiagram framgår av figur 2.

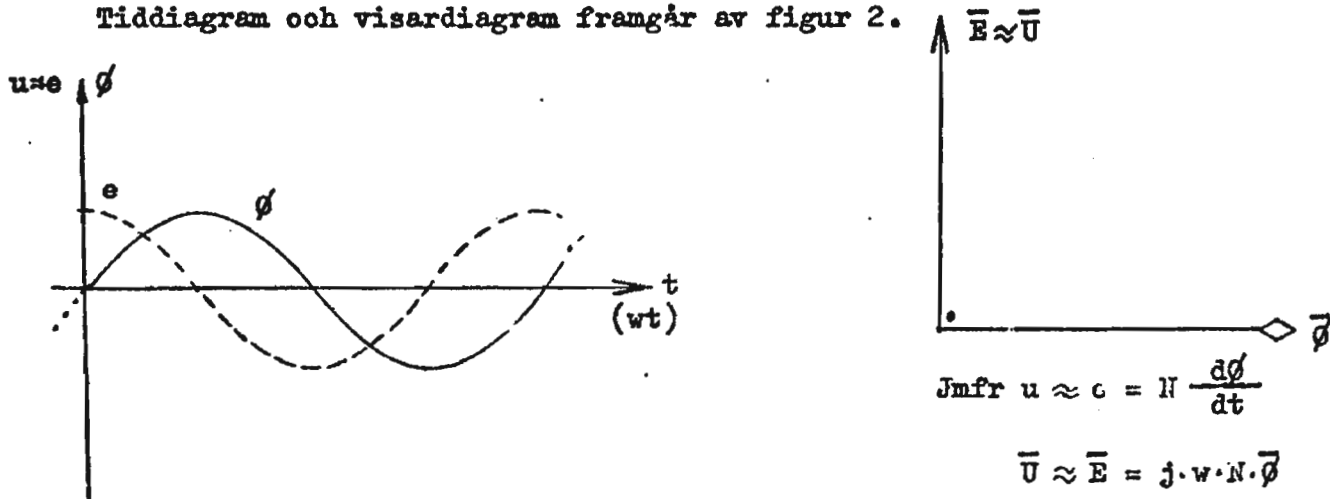
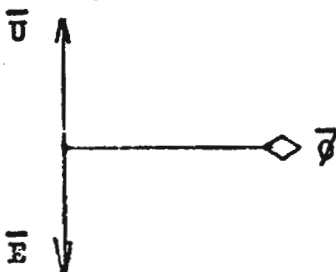


Fig. 2.

Ann. Om vi i stället valt referenser för  $e$  rakt motsatt vad figur 1 visar hade vi fått:  $u \approx -e$  och  $e = -N \cdot d\phi/dt$  d.v.s.  $u \approx -e = N \cdot \frac{d\phi}{dt}$ .

Med  $\bar{\phi}$  som riktfas hade visardiagrammet fått utseendet



Som väntat ettcanorlunda utseende än i figur 2 eftersom referenserna delvis valts annorlunda.

### 5. Transformatorformeln.

Enligt ekv. (6) gäller  $\hat{e} = w \cdot N \cdot \hat{\phi}$

Med  $w = 2\pi \cdot f$ ,  $\hat{\phi} = A_{Fe} \cdot \hat{B}$  och  $E = \hat{e} : \sqrt{2}$  fås vid insättning i ekv. (6)

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 2\pi f \cdot N \cdot A_{Fe} \cdot \hat{B}$$

som efter hyfsning antar utseendet

$$\begin{aligned} E &= \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot N \cdot A_{Fe} \cdot \hat{B} \\ E &= 4,44 \cdot f \cdot N \cdot A_{Fe} \cdot \hat{B} \end{aligned}$$

$E = 4,44 \hat{B} RAN$

..... (7)

Relationen (7) kallas transformatorformeln och är kanske den allra viktigaste inom teorin för vs-magnetiserade apparater.

Vi observerar att  $U$  och  $E$  är effektivvärden av matningsspänning respektive inducerad spänning.  $A_{Fe}$  är den effektiva järnarean.  $\hat{B}$  är flödestäthetens toppvärde.

Det är praktiskt lämpligt att använda effektivvärden för aktuella spänningar. På samma sätt är det lämpligt att använda flödestäthetens toppvärde eftersom järnförlusterna i kärnor med vs-magnetisering är proportionella mot  $\hat{B}^2$ . Jämför avsnitt om järnförluster!

Vid den fortsatta diskussionen intresserar ibland den s.k. varvspänningen, som definieras

$$\frac{U}{N} \approx \frac{E}{N} = \sqrt{2} \cdot \tilde{f} \cdot N \cdot A_{Fe} \cdot \hat{B}.$$

Observera att transformatorformeln med våra förutsättningar även kan skrivas med  $U$ , alltså

$$U \approx E = \sqrt{2} \cdot \tilde{f} \cdot N \cdot A_{Fe} \cdot \hat{B}.$$

Några kommentarer:

1. Observera att  $B$  är beroende av kärnans längd, av kärnamaterial, av ev. luftgap. Så länge krafttekniska förutsättningar gäller bestäms  $B$  av nätspänning, nätfrekvens, lindningsvarvtal samt av kärnans area.
2. Om krafttekniska förutsättningar ej skulle vara för handen får vi icke-sinusformigt varierande flöde. Med bibehållen symmetrisk magnetisering gäller i så fall följande form för transformatorformeln:

$$E_m = 4 \cdot f \cdot N \cdot A_{Fe} \cdot B_{\max}$$

där  $E_m$  är den inducerade spänningens medelvärde (beloppsmedelvärde) och  $B_{\max}$  flödestäthetens maxvärde. Om vi inför formfaktorn  $k_f = \frac{E}{E_m}$  kan

transformatorformeln skrivas  $E = k_f \cdot 4 \cdot f \cdot N \cdot A_{Fe} \cdot B_{\max}$ .

Vid sinusform blir  $k_f = 1,11$  och  $B_{\max} = \hat{B}$  varvid vi känner igen ekv. (7).

3. Hitintills har vi med våra förutsättningar ej behövt bekymra oss om strömmens storlek och karaktär, eftersom den försvunnit ur våra ekvationer genom antaganden om krafttekniska förutsättningar. Uppenbart är emellertid att en magnetiseringsström måste flyta för att driva fram flödet genom järnkärnan. Därvid kommer järnkärnans längd, järnkvalitet, ev. luftgapslängd med i bilden. Detta inses lätt om A:s o-lag tillämpas på den magnetiska kretsen i ett viss ögonblick:

$$H_{Fe} \cdot l_{Fe} + H_{\delta} \cdot \delta = N \cdot i \quad ;$$

$$\hat{H}_{Fe} \cdot l_{Fe} + \hat{H}_{\delta} \cdot \delta = N \cdot \hat{i} \quad ;$$

## 6. Transformatorformelns användning.

Ur transformatorformeln kan vi direkt utläsa flera viktiga och intressanta förhållanden. Låt oss belysa dess användning genom några frågeställningar i form av exempel.

Ex. Utgå från given reaktor. Antag att  $U$  ändras. Hur ändras därvid  $B$  ?

För given konstruktion gäller  $U \approx E = c \cdot B$  eller  $B = k \cdot E \approx k \cdot U$ .

$B$  är alltså direkt proportionell mot påtryckt spänning. Ökande spänning innebär alltså ökande flödestäthet och därmed ökande förluster.

Ex. Utgå från given konstruktion, konstant nätspänning men varierande nätfrekvens. Hur ändras  $B$  med varierande frekvens ?

Med givna förutsättningar gäller:  $U = c \cdot f \cdot B$  och alltså  $B = K \cdot \frac{1}{f}$ .

Ökar  $f$  minskar alltså  $B$  och tvärtom.

Ex. Hur påverkas  $B$  i en reaktorkärna om Du tar upp ett luftgap vid i övrigt oförändrade förhållanden? Krafttekniska förutsättningar antages gälla såväl före som efter luftgapets tillkomst ?

Med givna förutsättningar är  $B$  proportionell mot  $U$  och påverkas alltså ej av luftgapets tillkomst.

Ex. Är strömmen som fordras för att driva runt inducerande flödet också oberoende av luftgapets tillkomst ? Fundera själv igenom frågeställningen !

Ex. En spole med järnkärna anslutes till en ls-källa. Påverkas flödestätheten i detta fall om Du tar upp ett luftgap i järnkärnan ? Fortvarighetstillstånd avses.

Ex. Gäller transformatorformeln endast för spolar med järnkärna ?

Förutom användning enligt ovan givna exempel är transformatorformeln direkt användbar vid konstruktion av växelströmsmagnetiserade apparater.

Vi återkommer härtill i samband med studium av transformatorn.

### Lik- och växelströmsmagneter. Några viktiga skillnader.

Vad som nedan sägs gäller bl.a. kontaktorer, reläer av elektromagnetiskt utförande, drag- och lyftmagneter, ventilmagneter etc.

Magneterna är allmänt uppbyggda av en fast kärndel och ett rörligt ankare. Magnetlindningen kan antingen vara utförd för likströms- eller växelströms-matning.

### Likströmsmagneter.

Då ström flyter genom magnetlindningen (spolen) uppstår ett magnetiskt flöde som sluter sig genom kärna och ankare. Flödet ger upphov till en kraft som strävar att dra ankaret mot kärnan ( för att bilda en magnetisk krets med så liten reluktans som möjligt ). Flödet bestäms av sambandet

$$\phi = \frac{N \cdot i}{R_m}$$

Strömmen bestäms vid ls-magneter av påtryckt spänning och lindningsresistansen i fortvarighetstillstånd, alltså

$$I = \frac{E}{R}$$

Vid tillslag eller fränslag antar strömmen annat värde. F.g.a. induktionsverkan erhålles vid tillslag en emk som försöker motverka strömmens tillväxt och som vid fränslag strävar att upprätthålla strömmens värde. Från elläran är bekant att följande ekvation gäller vid tillslag:

$$L \frac{di}{dt} + R i = E$$

Lösningen blir , om begynnelsevillkoret är  $i(0) = 0$  ,

$$i = \frac{E}{R} ( 1 - e^{-t/T} )$$

där  $\frac{E}{R}$  = strömmens stationära värde och  $T = \frac{L}{R}$  är spolens tidskonstant.

Observera att strömmens stationära värde efter tillslag är oberoende av om magnetankaret har rört sig eller ej.

Tidskonstanterna varierar med magneternas storlek. Vid kontaktorer rör sig uppmagnetiseringstiden ( den tid det tar för strömmen att nå fortvarighetsvärdet och som rör sig om 4 till 5 gånger  $T$  ) om något 10-tal millisekund. Ju större magnet, desto större uppmagnetiseringstid. Om man till uppmagnetiseringstiden lägger rörelsetiden för ankaret kommer tillslagstiden vid ls-kontaktorer att bli ganska lång, omkring 50 - 100 ms för mindre och 200 - 300 ms för större kontaktorer. För kontaktorer manövrerade med växelström rör sig tillslagstiden om 10 - 75 ms.

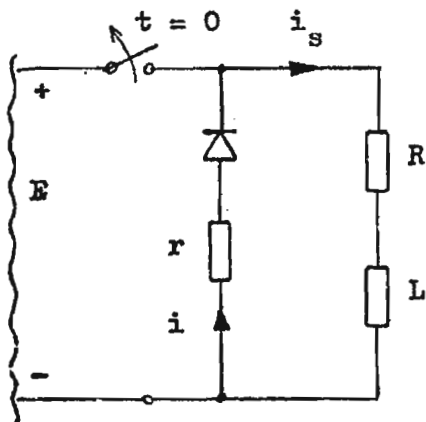
Falltiden är omkring 50 - 100 ms för ls- och 10 - 20 ms för vs-manövrerade kontakter.

### Problem vid brytning av ls-magneters manöverkrets.

Vid brytning av spolströmmen vill den emk som uppstår genom induktionsverkan upprätthålla spolströmmens värde varvid en mer eller mindre svår ljusbåge uppstår vid den brytande kontakten. Ljusbågen ger upphov till "sår" i kontaktytorna och tvingar så småningom till kontaktbyte.

Dessutom visar det sig att den inducerade spänningen kan bli så stor att spolisoleringen kan skadas. Detta gäller framför allt vid större magneter. För att reducera ljusbågsverkan och de höga inducerade spänningarna kopplas ofta ett urladdningsmotstånd parallellt med spolen. Därigenom kan strömmen genom spolen söka sig vägen genom urladdningsresistorn då manöverkontakten öppnas. Vanligt är också att man inkopplar en frivägsdiod.

Se figur nedan ! (Jämför också elläran behandling av motsvarande problem)



$$\text{Stationärt är } i_s = I_0 \Rightarrow \frac{E}{R}$$

$$\text{efter öppning av kontakten är } i = i_s \Rightarrow I_0 \cdot e^{-t/T_b}$$

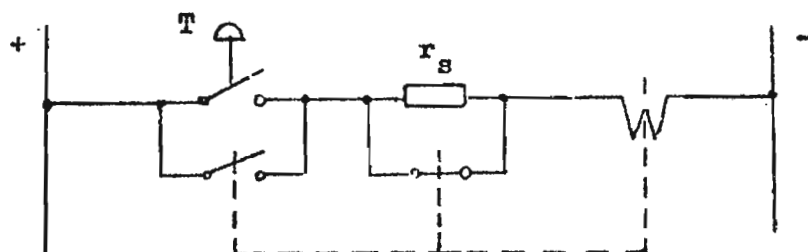
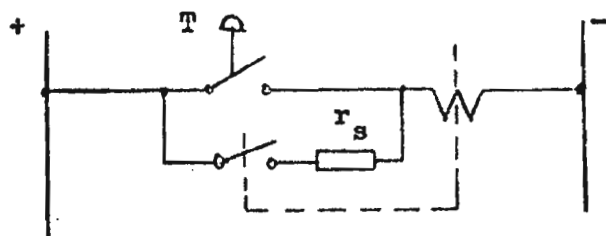
$$\text{där } T_b = \frac{L}{R + r}$$

Spänningen över spolen har sitt största värde för  $t = 0$  och är då

$$r \cdot i(0) \Rightarrow r \cdot \frac{E}{R}$$

### Sparkoppling av ls-manövrerade magneter.

Den ström som går genom magnetiseringsspolen måste ge upphov till ett flöde som är tillräckligt stor för att kraften på magnetankaret skall bli tillräcklig. Eftersom strömmen i fortvarighet är densamma oavsett ankaret har rört sig eller ej inser vi att flödet måste vara större vid draget ankare (sluten magnetisk krets). Detta betyder att man vid ls-magneter normalt har ett flöde som är betydligt större än vad som behövs då ankarct är draget. Spolströmmen borde kunna reduceras väsentligt efter att ankarct dragit. Detta innebär möjligheter att minska spolens dimensioner och pris. En reduktion av spolströmmen enligt ovan är möjlig genom att en s.k. spärresistor (sparmotstånd) inkopplas. Detta kan antingen ske via hållkontakten eller via en särskild hjälpkontakt som figurerna överst på nästa blad visar.



Nackdelen med det övre utförandet är att spolen riskerar att bli överhettad om tryckknappen hålls inne för länge. Vid ett utförande enligt den nedre figurdelen bortfaller denna olägenhet. Storleken på  $r_s$  anpassas så att flödet genom magnetkretsen vid draget ankare är tillräckligt stort. Observera att mekaniska hinder för ankaret kan resultera i att ankaret aldrig rör sig så långt att de nödvändiga hjälpkontakterna fungerar på avsett sätt. Därvid föreligger självfallet risk för överhettning.

### Vs-magneter.

Flöde och därmed erforderlig spolström varierar i takt med nätfrekvensen. Dragkraften som är proportionell mot flödets kvadrat kommer därvid att variera med dubbla nätfrekvensen. För att bl.a. minska vibrationer och därvid åtföljande oljud och tendenser till gnistbildning vid kontakter används s.k. dämplindning (ibland även kallad skärmlindning) som består av kortslutna ledare placerade i polytorna och omslutande ca 2/3 av polytan. Vid vs-magneter bestäms flödet väsentligen av den påtryckta spänningen oberoende av ankarets läge, varför dragkraften är ganska konstant och densamma vid såväl öppet som draget ankare. Vad som däremot i högsta grad beror av luftgapet i magnetkretsen är den ström som erfordras för att pumpa flödet runt i magnetkretsen. Denna ström är betydligt större vid öppet ankare än vid slutet. Normalt dimensioneras spolen för att kontinuerligt tåla den ström som fordras vid draget ankare. Spolen tål därför ej den ström som flyter vid öppet ankarläge under någon längre tid. Skulle ankaret ej gå till p.g.a. exempelvis mekaniskt fel eller p.g.a. otillräcklig matningsspänning förstörs troligen spolen av överhettning.

Vid fränslagning av spolströmmen vid vs-magneter kvarstår alltid ett visst s.k. remanensflöde. För att denna remanens ej skall bli så stor att magnetankaret hindras att gå ifrån bygger man den magnetiska kretsen så att den även vid drget ankare innehåller ett permanent luftgap. Detta kan exempelvis ske genom att ett bleck av omagnetiskt material ("remanensbleck") inläggs i flödeskretsen. Blecktjockleken behöver oftast inte vara större än ca 0,1 mm.

#### Förluster vid ls- och vs-magneter.

Förlusterna i ls-magneter är de resistiva förluster som uppstår i spolen och uppvärmer densamma.

Vid vs-magneter har vi följande förlustslag att beakta:

strömvärmeförluster i magnetspolens resistans

hysteresförlusterna i kärna och ankare (hålls nere genom högklassigt kärnmaterial)

virvelströmsförluster i kärna och ankare (hålls nere genom laminering av kärnan)

förluster i dämplindningen (resistiva förluster som ofta ger ganska hög temperatur i dämplindningen. Temperaturen kan uppgå till 150 - 200 °C)

## Järnförluster vid vs-magnetisering.

Från elläran är bekant att i järnkärnor som utsätts för tidvarierande magnetflöden uppträder s.k. järnförluster.

Järnförluster omfattar två slag av förluster, nämligen hystereseförluster och virvelströmsförluster.

### 1. Hystereseförluster.

Om kärnor utsätts för växelfält eller roteras i konstanta fält utsättes järnets elementarmagneter för krafter som strävar att vrida in dem i det resulterande fältets riktning. Vid invridningen åtgår ett visst inre friktionsarbete. Man talar om ommagnetiseringsförluster eller hystereseförluster. Förlusterna är aktiva och resulterar i uppvärmning av kärnan.

Vid symmetrisk och homogen magnetisering kan vi skriva

$$P_H = c_H \cdot f \cdot B^n$$

där n för moderna material inom normala variationsområden för B kan sättas = 2, varvid vi alltså får

$$P_H = c_H \cdot f \cdot B^2 \quad [W/kg] \quad \dots (1)$$

### 2. Virvelströmsförluster.

Då järnkärnor utsätts för tidvarierande flöden uppstår genom induktionsverkan inducerade spänningar i slutna banor inom kärnan. Dessa spänningar driver strömmar, som i sin tur förorsakar aktiva värme-förluster. Man talar om virvelströmsförluster. För att reducera virvelströmsförluster lamineras eller bladas i allmänhet kärnorna d.v.s. de uppbyggs av tunna från varandra väl isolerade plåtar.

Vid symmetrisk, homogen vs-magnetisering kan vi skriva

$$P_V = c_V \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot t^2 \quad [W/kg] \quad \dots (2)$$

där t står för plättjockleken.

### 3. De totala järnförlusterna.

Summan av hysteres- och virvelströmsförluster utgör de totala järnförlusterna  $P_{Fe}$ , för vilka alltså gäller

$$P_{Fe} = P_H + P_V$$

$$P_{Fe} = c_H \cdot f \cdot B^2 + c_V \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot t^2 \quad [W/kg] \quad \dots (3)$$

Då plåttillverkarna önskar upplysa om järnförluster för ett visst material anger de materialets förlustsiffror. Detta är de totala järnförlusterna i W/kg vid uppgiven frekvens och flödestäthet.

Normalt avses  $f = 50 \text{ Hz}$  om inget annat anges. Vad flödestätheten beträffar brukar dels ett värde svarande mot  $\hat{B} = 1,0 \text{ T}$  uppges, dels ett svarande mot  $\hat{B} = 1,5 \text{ T}$ . Respektive siffror brukar skrivas  $P_{1,0}$  resp.  $P_{1,5}$ .

Med kvadratisk variation med  $\hat{B}$  skulle en av de angivna förlustsiffrorna vara tillräcklig. I verkligheten varierar dock ej förlusterna exakt kvadratisk som vi tidigare förutsatt. Det är hysteresförlusterna som avviker något. Genom att ange två förlustsiffror kan köparen bilda sig en uppfattning om nyss antydda förhållanden. ( Hur ? ) Vid noggrann förlustbestämning hänvisas till fabrikanternas materialkataloger. Vi tillåter oss i fortsättningen att betrakta järnförlusternas variation med  $\hat{B}$  som kvadratisk.

Förutom förlustsiffror intresserar vid användning av kärnor vid olika frekvens även proportionerna mellan hysteres- och virvelströmsförluster vid given frekvens. Änjo hänvisas till fabrikanternas kataloger.

Vid normal kraftfrekvens dominerar i regel hysteresförlusternas andel. Som avslutning redovisas i tabell nedan exempel på förlustsiffror för olika material. Observera speciellt orienterat materials gynnsamma egenskaper om det utnyttjas så att magnetfältet får passera i företrädesriktningen (valsriktningen).

Exempel på förlustsiffra  $P_{1,0}$  för olika plåtmaterial.

| Plåtkvalitet              | Plåttjocklek<br>mm | Förlustsiffra<br>W/kg |
|---------------------------|--------------------|-----------------------|
| Låglegerad plåt           | 0,50               | 3,6                   |
| " "                       | 0,35               | 3,1                   |
| Medellegerad "            | 0,50               | 1,8                   |
| " "                       | 0,35               | 1,4                   |
| Höglegerad "              | 0,50               | 1,2                   |
| " "                       | 0,35               | 1,0                   |
| Orienterad "<br>(SURA M6) | 0,35               | 0,48 1,37 x)          |

x) vid magnetisering i tvärriktning.

Den låglegerade plåten med kiselhalt 0,5 - 1,5 % kallades dynamoplåt och användes tidigare ofta i roterande maskiner.

Medel- och höglegerad plåt med 1,5 - 3,8 resp. 3,8 - 5,3 % Si kallades transformatorplåt.

Numera används så gott som undantagslöst orienterad plåt vid all transformatorstillverkning. Även vid roterande maskiner utnyttjas numera orienterad plåt.

#### 4. En apparats totala järnförluster.

Vid angivande av förlustsiffror avsågs totala järnförluster i W/kg. För en given konstruktion med någorlunda homogena magnetiseringsförhållanden inom hela kärnan kan vi genom multiplikation med totala massan lätt erhålla apparatens totala järnförluster uttryckt som effektförluster. Med massan inbakad i proportionalitetskonstanterna  $c_H$  och  $c_V$  kan vi skriva

$$\begin{aligned} P_{Fe} &= P_H + P_V \\ P_{Fe} &= c_H \cdot f \cdot B^2 + c_V \cdot f^2 \cdot B^2 \end{aligned} \quad [W] \quad \dots (4)$$

Om vi utnyttjar transformatorformeln kan vi uttrycka förlusterna med inducerade spänningens storlek den påtryckta matningsspänningens och nätfrekvens, vilka är de i praktiska sammanhang varierande storheterna. Vi får med  $U \approx E = c \cdot f \cdot B$  insatt i ekv. (4)

$$\begin{aligned} P_{Fe} &= k_H \cdot \frac{E^2}{f} + k_V \cdot E^2 \\ &\approx k_H \cdot \frac{U^2}{f} + k_V \cdot U^2 \end{aligned} \quad [W] \quad \dots (5)$$

#### 5. Reduktion av järnförluster.

Med given kärna och givna magnetiska arbetsvillkor ( $f$  och  $B$ ) kan hysteresförluster göras små genom att ett magnetiskt mjukt material väljes. Virvelströmsförlusterna kan reduceras genom att man väljer tunna från varandra väl isolerade plåtar av högresistivt material (kisellegerat material). Främställningskostnader, liksom svårigheter att hantera och bearbeta tunna plåtar gör att plåttjocklekar under 0,20 mm sällan används. 0,35 till 0,50 mm är förhärskande tjocklekar. I vissa tillämpningar används tjocklekar upp till 1,0 mm.

Intressant är att notera att mekanisk bearbetning som klippring, stansning etc. åstadkommer inre spänningar i orienterat material med åtföljande förhöjda förluster. Genom att avspänningsglöda efter bearbetningen erhålls förbättrade förlustförhållanden.

På frågan om man inte allmänt bör använda material med lågt  $B$  och därtill arbeta med låg frekvens bör man komma ihåg att detta visserligen är gynnsamt ur förlustsynpunkt men att apparaterna samtidigt tenderar att öka sina volymer vid givna effektstorlekar. Endast vid speciella tillämpningar arbetar man med låg flödestäthet i kärnorna inom krafttekniken. Ett exempel är vid strömtransformatorer. Därvid är emellertid inte förlustsynpunkter avgörande.

# 6. Separering av järnförluster genom mätning.

De totala järnförlusterna kan skrivas ( se ekvation 4 sidan J31)

$$P_{Fe} = c_H \cdot f \cdot B^2 + c_V \cdot f^2 \cdot B^2$$

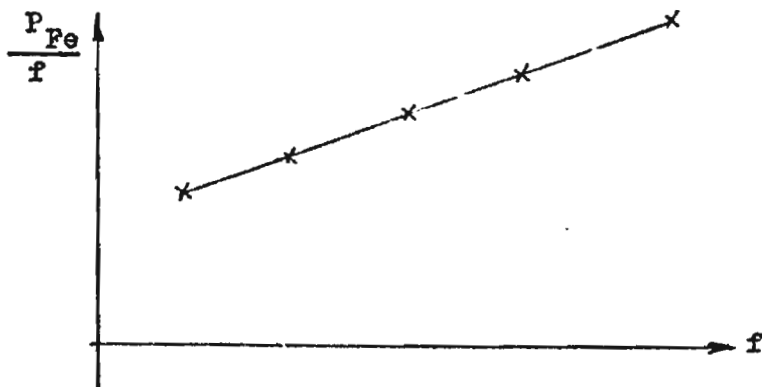
Om  $B$  antages konstant förenklas nyss givna uttryck till

$$P_{Fe} = K_1 \cdot f + K_2 \cdot f^2$$

Genom att utföra förlustmätningar vid varierande frekvens men hela tiden med samma  $B$  ( kan åstadkommas genom att variera påtryckt spänning i samma proportion som frekvensen ) kan vi bestämma funktionen

$$\boxed{\frac{P_{Fe}}{f} = K_1 + K_2 \cdot f} \quad ;$$

Om vi ritar grafen svarande mot detta funktionsuttryck blir den en rät linje. Se figur nedan! Ur linjen kan såväl  $K_1$  som  $K_2$  bestämmas . ( Hur ? ) När  $K_1$  och  $K_2$  är kända kan järnförlusterna separeras i sina beståndsdelar eftersom både hysteres- och virvelströmsförluster kan uppskattas vid vilken frekvens som helst.

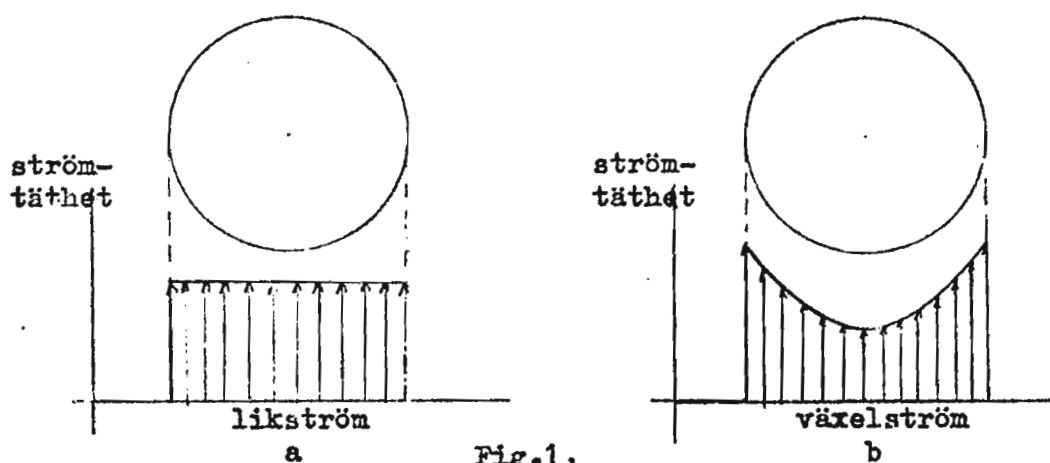


## Resistansförhållanden vid lik- och växelström.

### 1. Strömfördelning vid lik- och växelström i massiva ledare. Strömförträngning.

Om vi betraktar en ensam lång ledare som för likström skall vi finna att strömmen fördelar sig likformigt över tvärsnittet d.v.s. strömtätheten är konstant över ledartvärsnittet. Figur 1 a åskådliggör detta förhållande.

Studeras på liknande sätt strömfördelningen vid en lång ensam ledare som för växelström finner vi att den ej är likformig. Se figur 1b, som åskådliggör fördelningen i radiell led. Vid växelström är strömtätheten vid ledarens yta större än i dess inre. Man talar om strömförträngning (skineffekt-yteffekt...).



Strömförträngningens verkan är att strömmen ej utnyttjar hela ledartvärsnittet varför resistansen ökar utöver det värde som gäller vid likström i ledaren. I många sammanhang är nyss antydda resistansökning icke önskvärd. Det finns å andra sidan tillämpningar där man avsiktligt förstör strömförträngningen för att uppnå vissa önskade resultat. Ett exempel härpå är s.k. strömförträngningsrotorer i asynkrommotorer, den vanligaste och viktigaste typen av växelströmsmotorer. Genom att använda strömförträngningsrotorer erhålles bättre startmoment.

Fysikaliskt är strömförträngningsfenomenet ett induktivt fenomen. Vid växelström i en ledare blir ledarens inre magnetfält ett växelfält. Enligt induktionslagen induceras därvid inre spänningar i ledaren, vilka i sin tur strävar att driva inre strömmar. Dessa har till följd att den induktionsalstrande strömmen (ledarströmmen) motverkas i ledarens centrumdelar men förstärks ut mot ledarens yta.

Som varande ett induktivt fenomen bör strömförträngningen vara frekvensberoende. Så är också fallet. Resistansen ökar med ökande frekvens. Strömförträngningen beror också av ledartvärsnittets storlek. Vid små areor och kraftfrekvens är den relativt obetydlig men blir helt märkbar vid större ledarareor. För att motverka alltför kraftig strömförträngning

är det brukligt att dela upp en stor area på många mindre areor ( flera från varandra isolerade ledare som parallellkopplas vid ledningens början och slut ). Vid höga frekvenser används ihåliga ledare (rörledare) ibland även med rektangulärt tvärsnitt (vågledare vid mycket höga frekvenser).

Vid studium av roterande maskiner har vi ofta med höga massiva ledare i spår att göra. Därvid uppstår p.g.a. induktiv verkan en ensidig strömförträngning mot luftgapet. Figur 2 visar ett sådant fall.

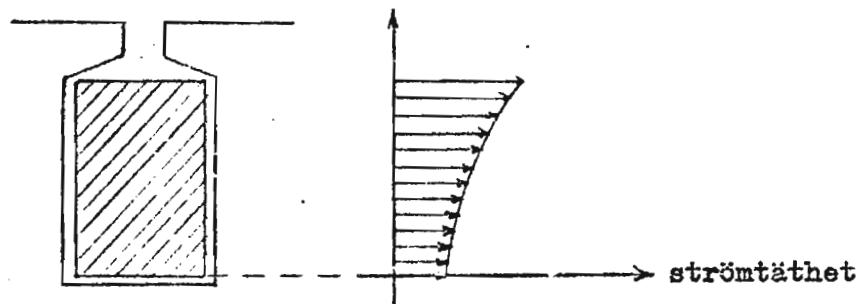


Fig.2.

Botemedel är uppdelning i mindre från varandra isolerade sektioner och platsbyte mellan de olika delarna i olika spår s.k. transponering.

Vid skensystem påverkas ofta strömfördelningen av närbelägna ledare genom att de olika skenströmmarnas magnetfält påverkar de närbelägna ledarnas inre fältförhållanden. Genom påverkan av strömfördelningen fås tillsatsförluster och ökad uppvärmning. Se figur 3! Man talar om närverkan.

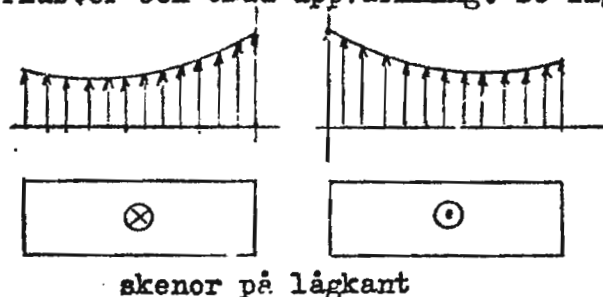


Fig.3.

Montering av skenor på högkant i stället för som i figur 3 har visat sig fördelaktigare. Ytterligare förbättring erhålles om ledningen uppdelas i flera fram- och återledare placerade som figur 4b visar. Detta förfaringsätt tillämpas vid matning av speciellt strömkrävande belastningar ( ugnar ), speciellt om de arbetar med högfrekventa växelströmmar (högfrekvensugnar).

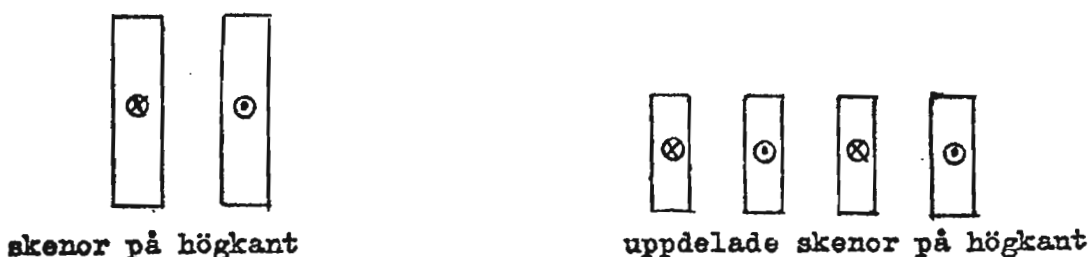


Fig.4.

## 2. Förluster p.g.a. strömförträngning - tillsatsförluster.

Vid analytisk beskrivning av resistansförhållandena vid växelström är det vanligt att uttrycka den effektiva resistansen eller växelströmsresistansen  $R$  som summan av två delar: en likströmsdel  $R_1$  (den likströmsmätta resistansen) och en tillsatsdel  $R_t$  p.g.a. strömförträngningens verkan. Vi skriver alltså

$$R = R_1 + R_t \quad \text{..... (1)}$$

Om vi uttrycker  $R_t$  som en viss bråkdel av  $p$  av  $R_1$ , alltså  $R_t = p \cdot R_1$ , får vi efter insättning i ekv.(1) :

$$R = (1 + p) R_1 \quad \text{..... (2)}$$

Ibland sammanfattas  $1 + p$  till en enda faktor  $k$ , varvid vi skriver

$$R = k \cdot R_1 \quad \text{..... (3)}$$

$k$  kallas vanligen resistansfaktorn och  $p$  analogt tillsatsresistansfaktorn.

De strömvärmeförluster vi får, uttryckta som effektförluster, framgår enkelt om vi multiplicerar ekv.(1) :s båda led med  $I^2$ . Resultatet blir

$$R \cdot I^2 = R_1 \cdot I^2 + R_t \cdot I^2$$

eller

$$P_b = P_1 + P_t \quad \text{..... (4)}$$

där vi kallar  $P_b$  de resulterande växelströmsförlusterna,  $P_1$  likströmsförlusterna och  $P_t$  tillsatsförlusterna.

(index  $b$  i  $P_b$  avser s.k. belastningsförluster, vilket är den vanliga benämningen på resulterande växelströmsförlusterna i ledare vid maskiner)

På samma sätt som vi uttryckt samband mellan delresistanserna medelst resistansfaktorer kan vi skriva samband mellan motsvarande effekter:

$$P_b = (1 + p) \cdot P_1 \quad \text{..... (5)}$$

respektive

$$P_b = k \cdot P_1 \quad \text{..... (6)}$$

där  $p$  och  $k$  har samma innebörd som i ekv. (2) och (3)

## 3. Resistanskomponenternas (förlustdelarnas) temperaturberoende.

Från elläran är bekant hur de flesta ledarmaterial ökar sin resistivitet med ökande temperatur. Bekant är också hur resistans omräknas från en temperatur till en annan. Sådan omräkning kan direkt tillämpas på likströmsdelen av den totala växelströmsresistansen.

För tillsatsdelen gäller följande resonemang; Då temperaturen ökar, ökar resistiviteten i strömledaren varigenom virvelströmsförlusterna i ledarens inre måste minska vid oförändrad ledarström.

Eftersom vi valt att representera tillsatsförlusterna med en ekvivalent serieresistans  $R_t$  måste denna minska då temperaturen ökar. Tillsatsdelen måste därför omräknas omvänt jämfört med likströmsdelen.

Om vi utgår från koppar som ledarmaterial och kända resistansvärden vid temperaturen  $\vartheta^\circ\text{C}$ . och önskar räkna om resistansvärdena till driftvarmt tillstånd,  $75^\circ\text{C}$  enligt normerna, sker detta på följande sätt: (resistansdelarna kan uppmätas vid viss temperatur genom särskilda prov till vilka vi återkommer vid studiet av de olika maskinsalgen)

$$\frac{R_{175}}{R_{1\vartheta}} = \frac{310}{235 + \vartheta} ; \quad \frac{R_{t75}}{R_{t\vartheta}} = \frac{235 + \vartheta}{310} ;$$

Härur fås växelströmsresistansen vid  $75^\circ\text{C}$  som

$$R_{75} = R_{1\vartheta} \frac{310}{235 + \vartheta} + R_{t\vartheta} \frac{235 + \vartheta}{310} \quad \dots (7)$$

Efter multiplikation med  $I^2$  fås

$$P_{75} = P_{1\vartheta} \frac{310}{235 + \vartheta} + P_{t\vartheta} \frac{235 + \vartheta}{310} \quad \dots (8)$$

Observera att vi förutsatt samma ström vid temperaturerna  $\vartheta$  och  $75^\circ\text{C}$  vad det gäller effektrelationerna enligt ekv. (8). Observera också att det numeriska värdet 235 i  $235 + \vartheta$  respektive  $235 + 75 = 310$  avser koppar (inverterade värdet av  $t_k$  för koppar hänfört till utgångstemperaturen  $0^\circ\text{C}$ ) I dagens läge är aluminium på stark frammarsch inte bara som ledarmaterial i luftledningar och kablar utan även i maskiner som exempelvis transformatorer och asynkrommotorer. Därvid måste annat värde på temperaturkoefficienten användas. Se materialtabeller ! Skillnaden är ganska liten!

#### 4. Ytterligare orsaker till ökade förluster vid växelström, som kan beaktas genom en tillsatsresistans.

Förutom resistansökning genom strömförträngning i ledares inre enligt föregående avsnitt förekommer ofta tillsatsförluster i form av främst virvelströmsförluster i olika detaljer i ledarnas omgivning. Speciellt framträdande är dess förluster då ledarna för stora strömmar. Dessa tillsatsförluster kan beaktas genom en ekvivalent tillsatsresistans i serie med ledarnas egna resistanser.

Som ett viktigt exempel på nyss antydda förhållanden kan nämnas en ensam ledare placerad i centrum av ett metallrör. Då ledaren genomflytes av växelström uppstår ett magnetiskt växelfält som bl.a. sluter sig genom röret och där ger upphov till virvelströmmar åtföljda av en uppvärmning av röret. Detta faktum kan beskrivas som en ökning i själva ledarens resistans.

Är röret av järn (ferromagnetiskt) blir uppvärmningen särskilt kraftig (starkare magnetfält och därtill även hysteresförluster). Direkt tillämpning på nu beskrivna är exempelvis järnbandsarmerade kablar. Se figur 5!

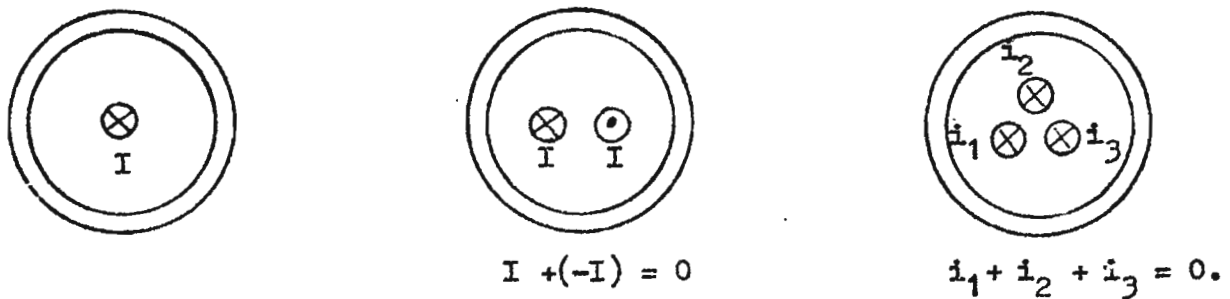


Fig.5.

Om både fram- och återledare finns inom samma kabel eller alla tre fasledarna vid en trefaskabel är tillsatsförlusterna klart mindre. Detta beror naturligtvis på att fram- och återledares magnetiserande strömmar väsentligen upphäver varandra. Vid enledarkablar för växelström används speciell armering av icke-magnetiskt, högresistivt material eller måste man helt undvara armeringen. Vid likströms enledarkablar finns ej motsvarande problem (konstanta flöden inducerar inga spänningar som kan driva virvelströmmar).

I K.S.F. anges att alla till samma strömkrets hörande ledare skall ligga inom samma hölje. Vid indragning av ledningar i plaströr är denna bestämmelse ej lika väsentlig som vid användning av metallrör. I det senare fallet uppstår nämligen betydande tillsatsförluster om nämnda bestämmelse ej följs. Därtill ökar kretsens reaktans med åtföljande förhöjt spänningsfall.

(En krets med isärdragna ledare och järnkärna har större reaktans än en med tätliggande ledare och utan järnkärna.)

Då stora strömmar skall ledas till och från maskiner sker detta normalt via s.k. genomföringar. Vid dessas passage genom järnlock etc. uppstår virvelsträmsförluster som ger uppvärmning. Genom att använda omagnetiskt material och genom att slitsa upp locken enligt figur 6 nedan kan beskrivna förluster reduceras avsevärt.

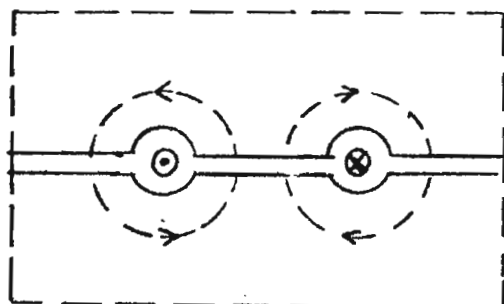


Fig.6.

Magnetiseringsström och magnetiseringseffekt vid sinusformat flöde.I1. Introduktion.

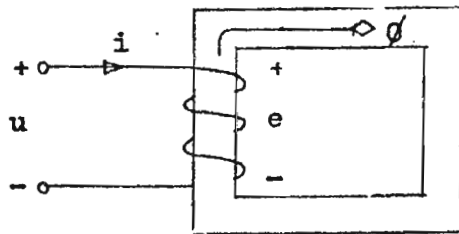
Det flöde, som fysikaliskt existerar i en kärna då en spollindning på densamma anslutes till en godtycklig matningsspänning, fordrar i varje ögonblick en bestämd mmk d.v.s. en bestämd magnetiseringsström för att kunna passera runt den magnetiska kretsen.

Antag att vi har en järnkärna, där vi kan bortse från luftgap vid bladning av kärnan, och att virvelströmmarnas eget fält i kärnan är försumbart.

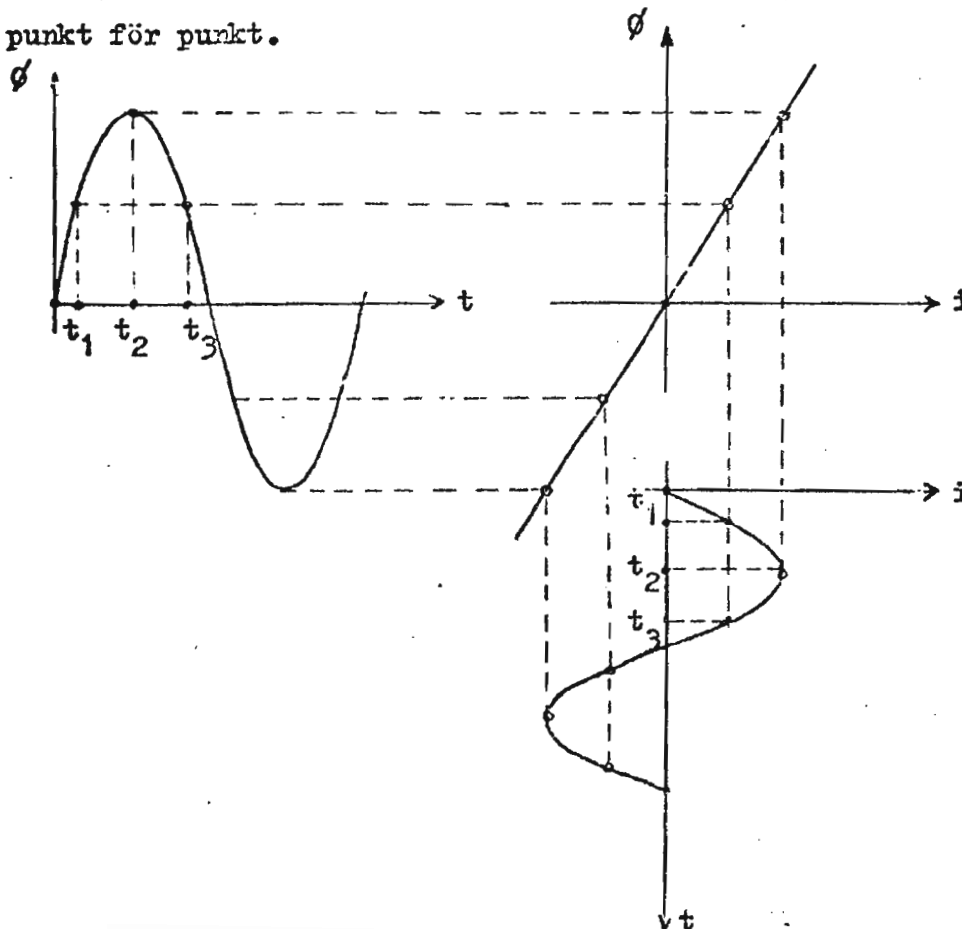
Sambandet mellan flödet  $\phi$  och strömmen  $i$  kan då anses givet genom den statiska magnetiseringskurvan  $B = f(H)$ , där vi enkelt ändrar axlarnas skalor och låter samma kurva representera  $\phi = \phi(i)$ . ( $\phi = B \cdot A$  och  $H \cdot l = N \cdot i$ )

Vår fortsatta diskussion gäller symmetrisk växelströmsmagnetisering och utgår från sådana krafttekniska förutsättningar att flödet kan anses sinusformat.

Referenser framgår av figuren nedan och är desamma som dem vi tidigare använt.

I2. Strömmens kurvform vid linjär magnetiseringskurva.

Av figuren nedan framgår hur vi på grafisk väg kan konstruera erforderlig ström punkt för punkt.

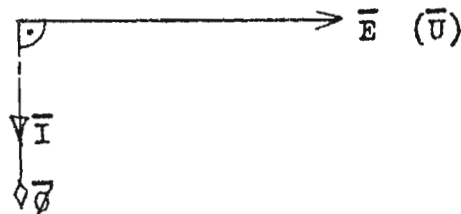


För fallet med linjär magnetiseringskurva kan samma resultat lätt erhållas analytiskt på följande sätt:

|                                |                                                                                        |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Magnetsieringskurvans ekvation | $\phi = k \cdot i$                                                                     |
| Flödets momentanvärdesuttryck  | $\phi = \hat{\phi} \cdot \sin \omega t$                                                |
| Härur fås                      | $k \cdot i = \hat{\phi} \sin \omega t$                                                 |
| och alltså                     | $i = \frac{\hat{\phi}}{k} \cdot \sin \omega t \Rightarrow \hat{i} \cdot \sin \omega t$ |

Vi konstaterar;

1. Sinusformad flödesvariation ger sinusformad ström.
2. Med vårt referensval är flöde och ström samtidiga ( i fas ).
3. Ett visardiagram kan ritas och får utseendet;



4. Den effekt som tillföres spolen blir:

$$S = E \cdot I$$

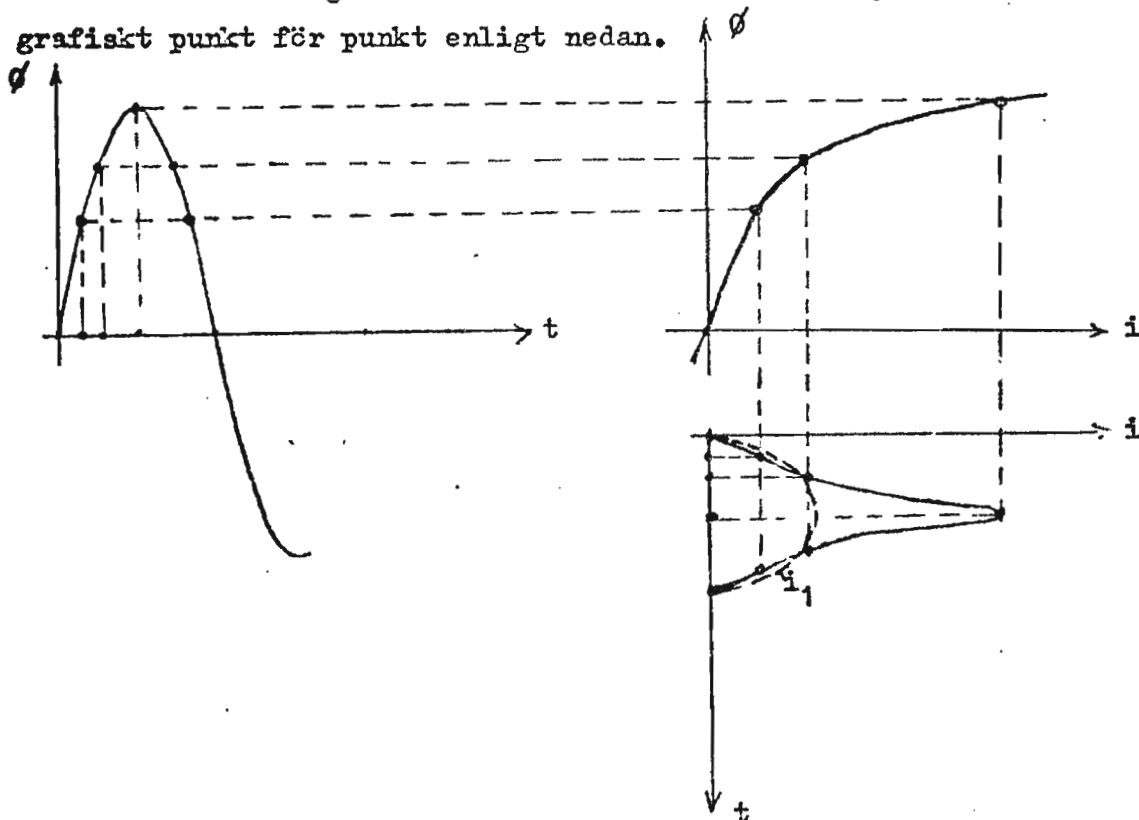
$$P = E \cdot I \cdot \cos \phi \Rightarrow E \cdot I \cdot 0 \Rightarrow 0$$

$$Q = E \cdot I \cdot \sin \phi \Rightarrow E \cdot I \cdot 1 \Rightarrow E \cdot I$$

Spolen förbrukar alltså endast reaktiv effekt för att upprätthålla erforderligt flöde.

### I3. Strömmens kurvform vid envärdig icke-linjär magnetiseringskurva.

Vi beaktar mättnings inverkan men bortser från hysteres. Strömkurvan konstrueras grafiskt punkt för punkt enligt nedan.

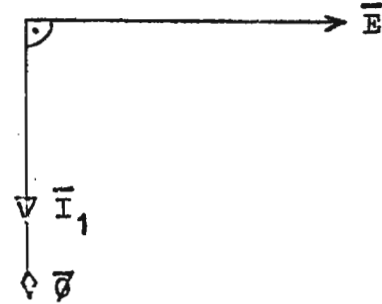


Vi konstaterar:

1. Strömkurvan blir i detta fall deformerad. Deformationen blir alltmer utpräglad ju högre upp i mättat område vi arbetar.
2. Enligt teorin för Fourieranalys kan strömmen uppdelas i sinuskomponenter. Grundtonen  $i_1$  blir därvid faslik med  $\phi$ . Övertonerna p.g.a. avvikelserna från sinusform ökar strömmens effektivvärde.
3. Enligt växelströmlärens definition av medeleffekt kan man visa att endast spänningar och strömmar av samma frekvens ger medeleffekt. Den av spolen förbrukade effekten blir:

$$P = 0$$

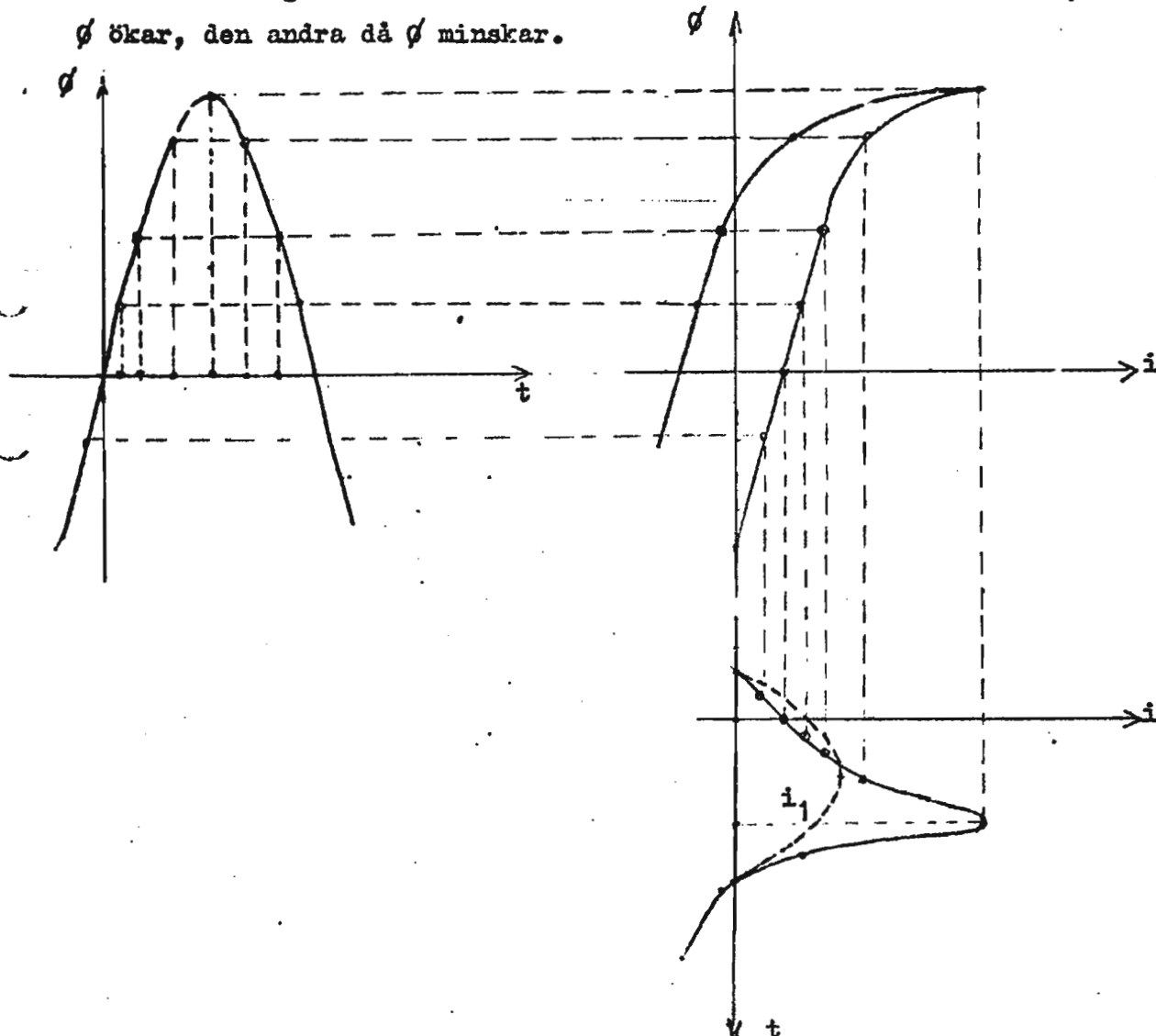
$$Q = E \cdot I_1 \cdot 1$$



Spolen förbrukar alltså endast reaktiv effekt för att upprätthålla sitt flöde.

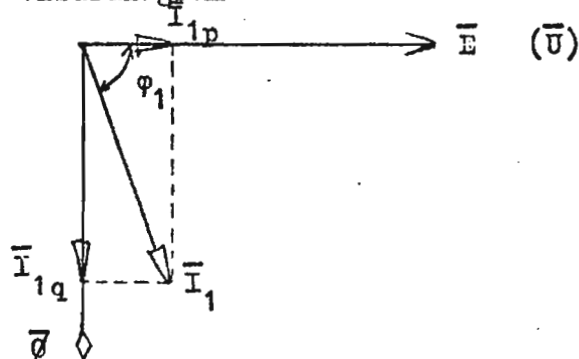
#### I 4. Beaktande av hysteres och mättning vid bestämning av strömmens kurvform.

Obs. Vid den grafiska konstruktionen används ena branschen av hystereskurvan då  $\phi$  ökar, den andra då  $\phi$  minskar.



Vi konstaterar.

1. Strömkurvan blir deformerad och symmetrisk på ett annat sätt än i föregående avsnitt.
2. En Fourieruppdelning visar att strömmens grundton  $i_1$  ej längre är faslik med flödet. Vi ritar ett visardiagram:



3. Ur visardiagrammet ser vi att en aktiv strömkomponent erhållits. Detta är helt i sin ordning eftersom vi måste tillföra spolen viss aktiv effekt för att täcka en aktiv effektförlust svarande mot hysteresförlusterna.

$$P = E \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \Rightarrow E \cdot I_{1p}$$

$$Q = E \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 \Rightarrow E \cdot I_{1q}$$

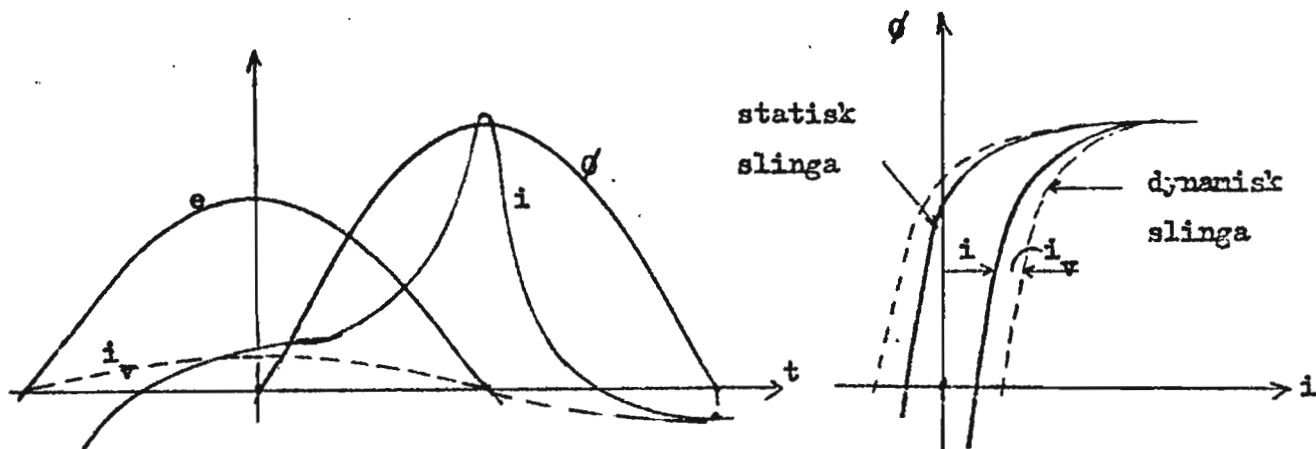
Spolen förbrukar alltså både reaktiv och aktiv effekt för att klara sin magnetisering.

#### 15. Beaktande av inverkan från virvelströmmarnas fält i kärnan.

Hänsyn till virvelströmmarnas inverkan kan tas på följande sätt. Virvelströmmarna är proportionella mot flödets tidsderivata och kommer alltså att variera sinusformigt och i fas med den inducerade spänningen ( resistiva strömbanor förutsättes). Virvelströmmarnas riktning är enligt Lenz' lag sådan att deras fält motverkar varje yttre mmk som strävar att ändra det primära flödet. För att flödet skall bli oförändrat och kunna inducera erforderlig emk trots virvelströmmarna måste en sinusformad strömkomponent tillföras lindningen för att kompensera virvelströmmarnas fältförsvagande inverkan. Denna komponent  $i_v$  är i fas med inducerad emk  $e$ . Se figur nedan !

Virvelströmmarnas inverkan på hystereskurvan är intressant. Eftersom virvelströmmarna i kärnan motverkar ändringar i det primära kärnflödet måste komponenten  $i_v$  hela tiden vara så riktad att den förstärker kärnflödet lika mycket som virvelströmmarna försvagar det. Om komponenten  $i_v$  ( som i varje ögonblick är proportionell mot  $\frac{d\phi}{dt}$  ) adderas till abskissan för hystereskurvan enligt figur överst på nästa sida fås en s.k. dynamisk hysteres slinga.

Den statiska slingans yta är proportionell mot hysteresförlusterna per period. Den dynamiska slingans yta kan visas vara proportionell mot de totala kärnförlusterna per period. Härav följer att den dynamiska slingans yta är frekvensberoende.



# 16. Magnetiseringsströmmens ekvivalenta sinusström.

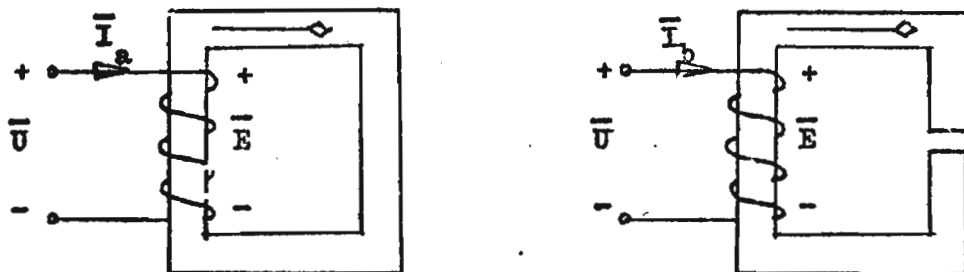
I många fall spelar den egendomliga kurvformen hos magnetiseringsströmmen en avgörande roll för förklaring och förståelse av uppträdande fenomen.

I andra sammanhang åter är den egendomliga kurvformen oväsentlig. I fortsättningen uppehåller vi oss huvudsakligen vid sådan problemställningar där vi kan bortse från strömkurvans deformation. Vi behandlar därvid magnetiseringsströmmen på följande sätt;

Vid mätningar mäter vi alltid med effektivvärdesvisande instrument och räknar med strömmen som vore den sinusformad och med ett effektivvärde = uppmätt värde. Därmed har vi ignorerat kurvformens avvikelse från sinusform men beaktat övertonernas inverkan på effektivvärdet. Den ström vi på detta sätt använder kallas i fortsättningen kort endast magnetiseringsströmmen. Ibland ser man benämningen den ekvivalenta sinusströmmen. Som symbol för strömmen använder vi ofta  $I_0$ .

# 17. Ett luftgaps inverkan på magnetiseringsströmmen.

Studera de två spolarna nedan. Alla data är identiska så när som på att den ena kärnan innehåller ett luftgap.

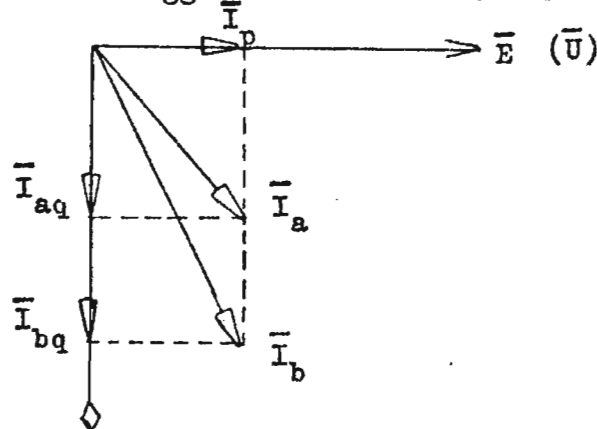


Samma påtryckta spänning resulterar i samma  $B$  ( så länge  $U \approx E$  ).

Järnförlusterna är alltså desamma för båda kärnorna och därmed den aktiva strömkomponenten. Den reaktiva strömkomponenten måste däremot öka eftersom det fordras större ström att driva ett flöde genom en krets med luftgap än genom en med sluten järnkärna. Den extra strömkomponent som fordras p.g.a. luftgapets

tillkomst är reaktiv.

I visardiagrammet nedan åskådliggöres ovan diskuterade förhållanden.



Genom att luftgapet svarar mot en linjär magnetisk reluktans kan man genom att införa ett luftgap linearisera spolen med sin kärna d.v.s. undertrycka de icke-lineära egenskaperna. Detta sker givetvis på bekostnad av strömmen, som ökar (induktansen minskar).

#### 18. Ersättningschema för den växelströmsmagnetiserade spolen med järnkärna.

Efter att fysikaliskt ha studerat en viss elektrisk apparat försöker man ofta att bygga upp en s.k. ersättningskrets med ledning av erhållna ekvationer.

En sådan krets består av koncentrerade parametrar, om möjligt helst konstanta sådana. Då man lyckats åstadkomma en sådan ersättningskrets blir behandlingen av apparaten ifråga ett renodlat kretsproblem.

En ersättningskrets bör naturligtvis uppföra sig så lika den apparat som den symboliserar som möjligt. Vid viss spänning bör således ström- och effektförbrukning vara densamma i den fysikaliska apparaten och i ersättningskretsen.

Ofta är det svårt att erhålla perfekt ekvivalenta kretsar till en given apparat. Man försöker att bygga upp en modell som är likvärdig med avseende på de för tillfället väsentliga egenskaperna. Modellen eller ersättningskretsen kan ofta användas endast inom vissa variationsområden för den ena eller andra storheten. Ersättningskrets är därför ett bättre uttryck än det ofta använda ekvivalent krets.

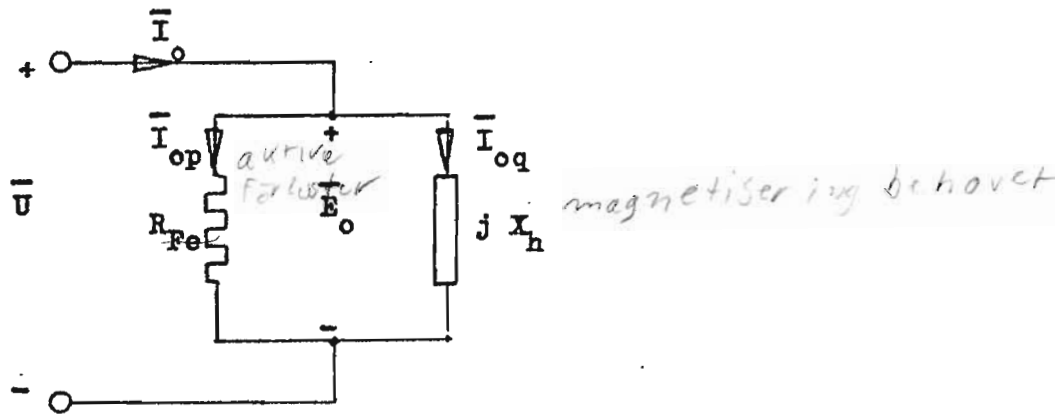
I de fall vi kan bortse från järnets icke-lineära egenskaper representerar man bäst den växelströmsmagnetiserade spolen med järnkärna med en parallellkrets enligt nedan.

Ur schemat ser vi bl.a.

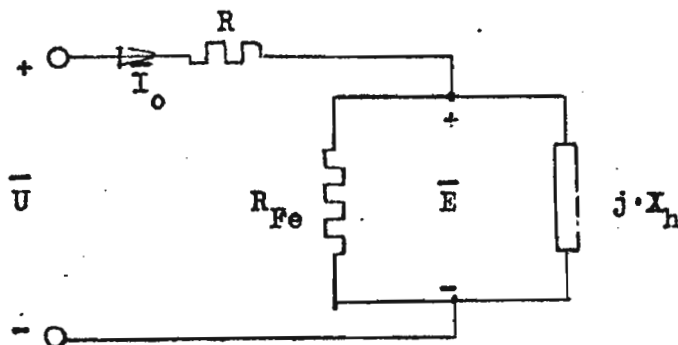
$$U \approx E \quad . \quad P = U \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0 \Rightarrow \frac{U^2}{R_{Fe}} \quad ; \quad Q = U \cdot I_0 \cdot \sin \varphi_0 \Rightarrow \frac{U^2}{X_h} \quad ;$$

$R_{Fe}$  kallas järnförlustresistansen .

$X_h$  kallas huvudreaktansen eller magnetiseringsreaktansen.

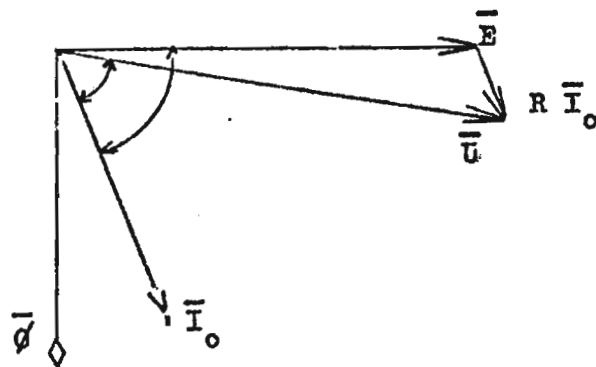


Om man så vill kan man förfinat schemat ovan något genom att införa lindningens (spolens) resistans. Schemat kommer då att se ut.



I anknytning till schemat får vi spänningsekvationen  $\bar{U} = \bar{E} + R \cdot \bar{I}_0$

Visardiagrammet ser ut;



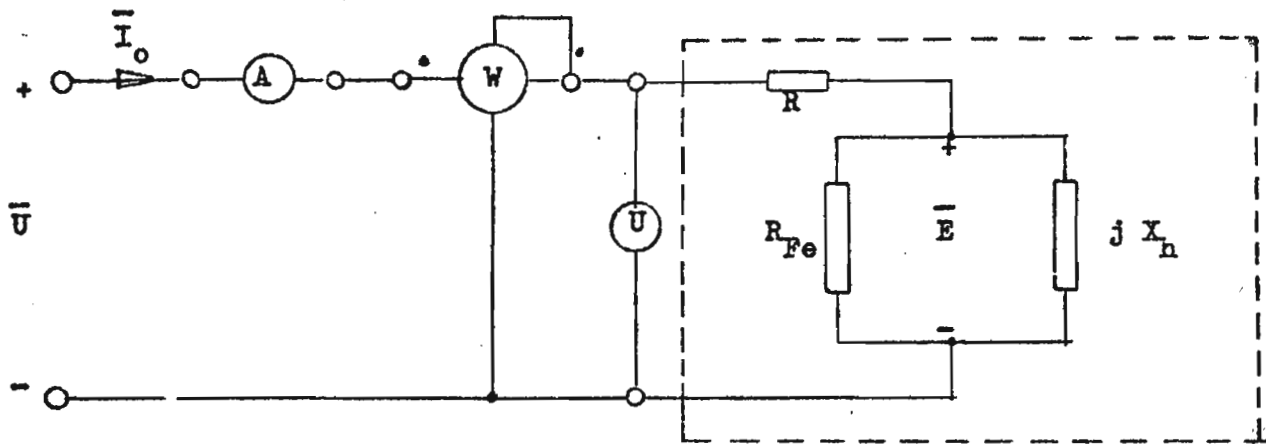
Observera att vinkeln mellan  $\bar{U}$  och  $\bar{E}$  i krafttekniska tillämpningar är mycket liten liksom skillnaden i storlek.

Observera att  $\bar{I}_0$ 's komponent i fas med  $\bar{U}$  ej är densamma som dess komponent i fas med  $\bar{E}$ . Samma förhållanden gäller självfallet komponenten vinkelrätt mot respektive spänningar.

### 19. Bestämning av ersättningskretsen genom mätning.

Uppmät först med likström spolens lindningsresistans,  $R$ .

Inkoppla därefter wattmeter, voltmeter och effektivvärdeskännande amperemeter enligt schema överst på nästa sida.



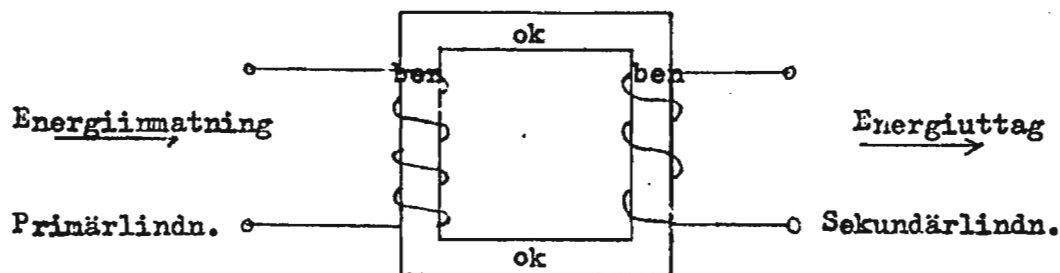
Om vi mäter  $U$ ,  $I_0$  och  $P$  erhålles :

$$P - R \cdot I_0^2 = P_{Fe} \quad \text{Oftast } P_{Fe} \approx P \text{ som ger } R_{Fe} = \frac{E^2}{P} \approx \frac{U^2}{P} ;$$

$$\text{Med } S = U \cdot I_0 \text{ fås } Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad \text{som ger} \quad X_h = \frac{E^2}{Q} \approx \frac{U^2}{Q} ;$$

Elementär transformator-teori.1. Trafons principiella uppbyggnad.

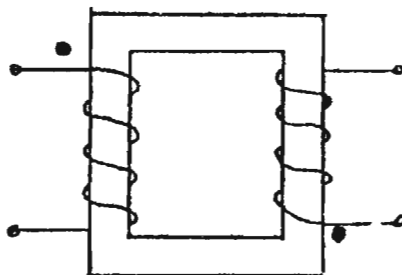
En trafo utgöres i sitt enklaste utförande av en sluten järnkärna, som försetts med två från varandra isolerade lindningar. Kärnan består av två ben och två ok. Lindningarna i en verklig trafo är i regel koncentriskt anbragta på båda benen men ritas för åskådligghets skull en på varje ben enligt figuren nedan. Lindningsriktningen är i en verklig trafo densamma för samtliga lindningar.



Den lindning, som anslutes till det matande nätet och alltså mottar energi kallas primärlindning. Den lindning till vilken belastningen anslutes och som alltså avger energi, kallas sekundärlindningen. En och samma lindning kan vid visst tillfälle utnyttjas som primärlindning, vid annat tillfälle som sekundärlindning. Oavsett energiriktningen kallas lindningen för den högre spänningen upplindning, lindningen för den lägre nedlindning. Andra alternativa benämningar är uppsida - nedsida, högspänningssida - lågspänningssida.

2. Innebörden i polaritetsmarkeringar.

Studera figuren nedan !

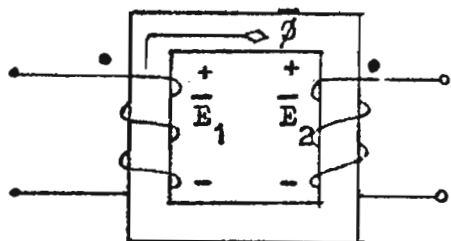


De med polaritetsmarkering försedda uttagen, ett för varje spole, säges vara likvärdiga lindningsuttag. De icke markerade uttagen är också likvärdiga. Polaritetsmarkeringarna är utsatta på sådant sätt att de har följande innebörd;

- 1) Strömmar som antingen går in i eller ut ur polaritetsmarkerade uttag hos ett spolar ger samverkande mmk ( flödeskomponenter ).
- 2) För den av det resulterande flödet inducerade spänningen gäller att det märkta uttaget alltid har samma fysikaliska polaritet relativt det omärkta i båda spolarna.

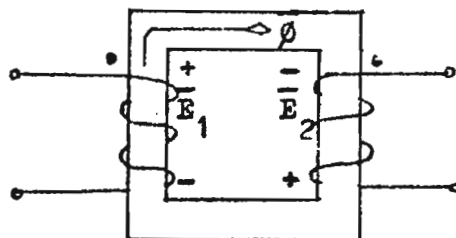
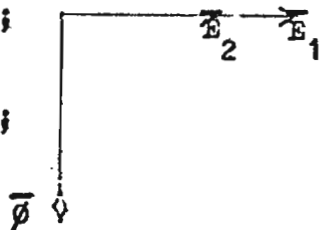
Väljes referenserna för inducerad spänning på samma sätt för båda lindningarna

m.a.p. de likvärdiga uttagen blir de inducerade spänningarna faslika ( samtidiga ).



$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} ;$$

$$e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} ;$$



$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} ;$$

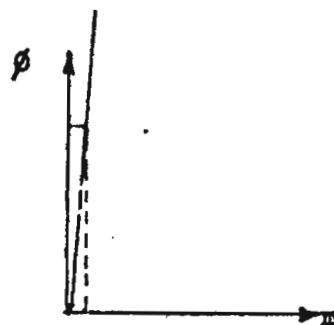
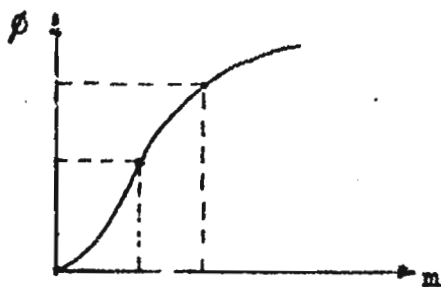
$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} ;$$



### 3. Mmk-behov i en trafo.

Oavsett transformatorn arbetar i tomgång ( = ingen belastning ansluten till sekundärsidan ) eller är belastad ( = belastning inkopplad till sekundärsidan ) måste i den lindring, som anslutes till det matande nätet, en spänning induceras, som håller jämvikt med den påtryckta (  $U \approx E$  ).

Detta innebär att det resulterande flödet i varje ögonblick måste anta visst värde ( egentligen flödets derivata ). Därmed måste även den resulterande mmk för den magnetiska kretsen i varje ögonblick anpassa sig till erforderligt flöde. I den idealiserade trafon med högvärdigt kärnmateriel ( stort värde på permeabiliteten ) kan man anse det resulterande mmk-behovet försumbart litet även vid maximalt flödesvärde.



### 4. Den ideella trafon i tomgång och belastning.

Trafon är i normalutförande en elektrisk maskin, som vid många överläggningar och problemställningar kan betraktas som ideell. Vi skall utgå från idealiserade förhållanden, då det gäller att introducera trafons verkningsätt och väsentliga egenskaper.

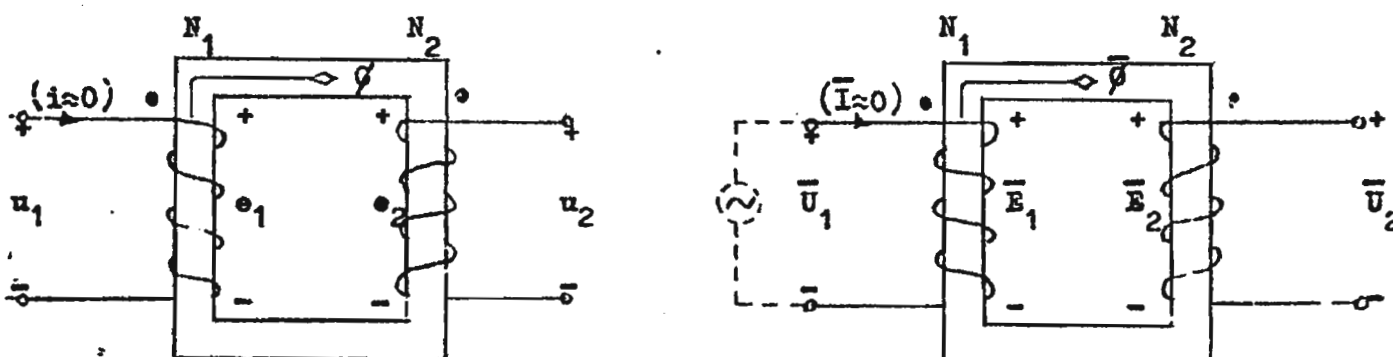
Idealiseringen innebär bl.a. ;

1) Vi bortser från lindningsresistanser, varför inducerad spänning och klämspänning i en lindning är lika. Vidare har vi inga strömvärmeförluster i lindningen.

- 2) Vi bortser från magnetisk läckning d.v.s. alla lindningsvarv genomgås av samma flöde och känner samma flödesvariation. Därmed blir den inducerade spänningen densamma i samtliga lindningsvarv.
- 3) Vi negligerar järnförlusterna. Vi förutsätter alltså mycket smal hysteres-slinga och kan tänka oss kärnan uppbyggd av mycket tunna plåtar av högresistivt material.
- 4) Vi antar att kärnmaterialet har mycket hög permeabilitet ( brant magnetiseringskurva ), varför resulterande mmk-behovet i varje ögonblick approximativt kan sättas 0. Magnetiseringsströmmen är alltså försumbart liten.

#### 4.1. Den tomgående trafon. Spänningslagen.

Primärlindningen anslutes till ett matande nät. Sekundärlindningen lämnas öppen. Storheter, som tillhör primärsidan anges med index 1, som tillhör sekundärsidan med index 2. Referenser framgår av figuren nedan! Om sinusformade storheter antages kan vardiagrammet eller komplex metod användas.



Trafon anpassar sitt flöde så att den inducerade spänningen balanserar den påtryckta.

$$u_1 = e_1 = N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} ;$$

$$\bar{U}_1 = \bar{E}_1 = j \cdot \omega \cdot N_1 \cdot \bar{\Phi} ; \quad ( U_1 = E_1 = \sqrt{2} \cdot \hat{\Phi} \cdot f \cdot N_1 \cdot A \cdot B )$$

Förutom den primärt inducerade spänningen erhålles en inducerad spänning även i sekundärlindningen.

$$u_2 = e_2 = N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} ;$$

$$\bar{U}_2 = \bar{E}_2 = j \cdot \omega \cdot N_2 \cdot \bar{\Phi} ; \quad ( U_2 = E_2 = \sqrt{2} \cdot \hat{\Phi} \cdot f \cdot N_2 \cdot A \cdot B )$$

Genom division fås lätt följande samband;

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} ;$$

$$\frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2} = \frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} ;$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} ;$$

Inramade uttryck sammanfattas under benämningen spänningslagen.

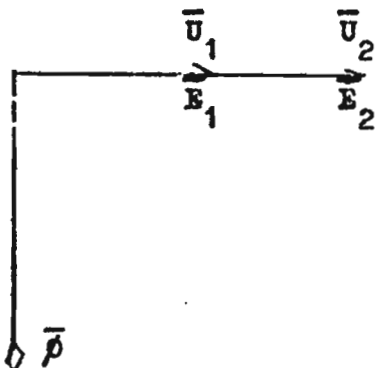
Spänningslagen är ett uttryck för trafons spänningsomvandlande egenskaper.

Förhållandet

$$a = \frac{N_1}{N_2}$$

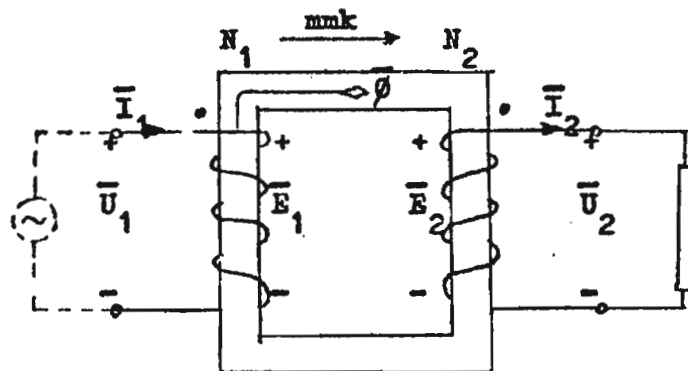
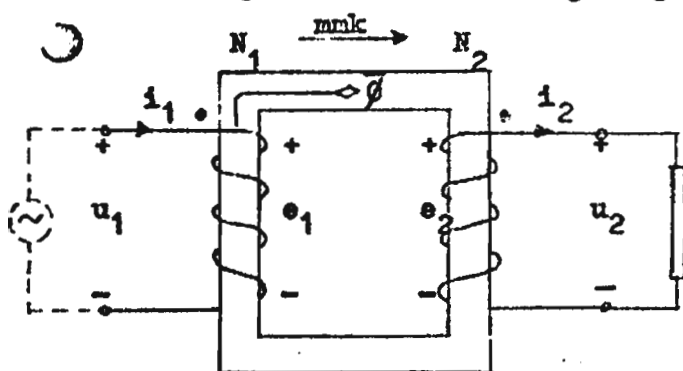
kallas trafons omsättningsförhållande eller kort bara omsättningen.

Med använda referenser observeras att primär- och sekundärspänningar är faslika.



#### 4.2. Den belastade trafon. Strömlagen.

Vi väljer referenser enligt figurer nedan.



Då sekundärkretsen belastas kommer den sekundärt inducerade spänningen att driva en ström genom sekundärkretsen. Sekundärkretsen ger då ett ampervärde -  $N_2 \cdot i_2$  respektive -  $N_2 \cdot \bar{I}_2$  med given referensriktning för mmk.

Det resulterande flödet skall vara oförändrat från tomgång till belastning ty den i primärlindningen inducerade spänningen skall fortfarande balansera den påtryckta. Den resulterande mmk måste därför vara densamma såväl i tomgång som vid belastning. För att möjliggöra detta tar trafon vid belastning primärt upp en strömkomponent (belastningskomponent)  $\bar{I}_1$  ( $i_1$ ) som ger en mmk  $N_1 \cdot \bar{I}_1$  ( $N_1 \cdot i_1$ ).

Vi får en resulterande mmk

$$m_{\text{res}} = N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2 ;$$

$$\bar{m}_{\text{res}} = N_1 \cdot \bar{I}_1 - N_2 \cdot \bar{I}_2 ;$$

Enligt antagandet om magnetiseringskurvans branthet skall  $m_{\text{res}} \approx 0$ . Vi får

$$N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2 = 0 ;$$

$$N_1 \cdot \bar{I}_1 - N_2 \cdot \bar{I}_2 = 0 ;$$

eller

$$N_1 \cdot i_1 = N_2 \cdot i_2 ;$$

$$N_1 \cdot \bar{I}_1 = N_2 \cdot \bar{I}_2 ;$$

$N_1 \cdot i_1$  ( $N_1 \cdot \bar{I}_1$ ) balanserar i varje ögonblick  $N_2 \cdot i_2$  ( $N_2 \cdot \bar{I}_2$ ). Man talar om mmk-balans.

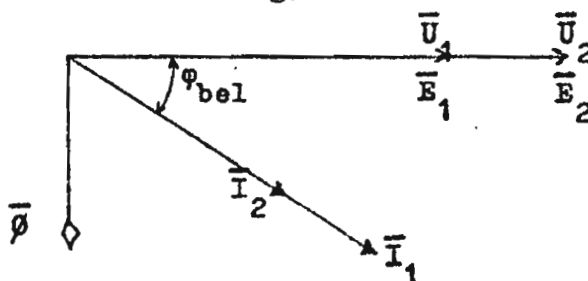
Ur relationerna ovan fås:

$$\boxed{\begin{aligned} \frac{i_1}{i_2} &= \frac{N_2}{N_1} ; \\ \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} &= \frac{N_2}{N_1} ; \\ \frac{I_1}{I_2} &= \frac{N_2}{N_1} ; \end{aligned}}$$

Inramade uttryck sammanfattas under benämningen strömlagen. Strömlagen är ett uttryck för trafons strömmvandlande egenskaper.

Med använda referenser är primär- och sekundärström faslika.

Exempel på visardiagram.(ind.-res. belastning).



4.3. Effektlagen.

Ur spännings- och strömlagen  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$  resp.  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$

fås genom ledvis multiplikation

$$\frac{U_1 \cdot I_1}{U_2 \cdot I_2} = \frac{N_1 \cdot N_2}{N_2 \cdot N_1} = 1 ;$$

Härur fås

eller

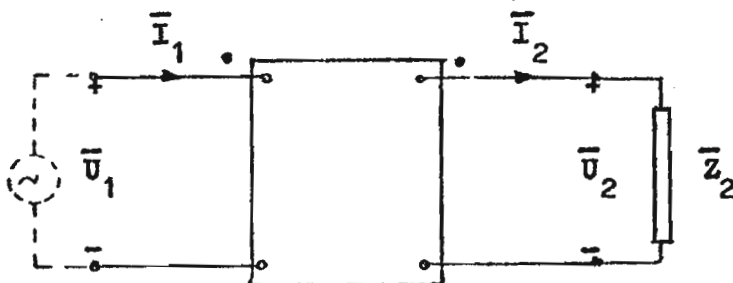
$$\begin{aligned} U_1 \cdot I_1 &= U_2 \cdot I_2 \\ S_1 &= S_2 \end{aligned}$$

som kallas effektlagen.

Detta resultat skulle man ha kunnat inse direkt medelst energiprincipens hjälp. Effektlagen är ett uttryck för att spännings- och strömomvandling sker vid i stort sett oförändrade effekt- och energinivåer.

4.4. Impedanslagen.

Härledningen göres för komplexa kvantiteter.



Ur  $\frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2} = \frac{N_1}{N_2}$  och  $\frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} = \frac{N_2}{N_1}$  fås genom ledvis division

$$\frac{\bar{U}_1}{\bar{I}_1} : \frac{\bar{U}_2}{\bar{I}_2} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad \text{vilken relation kan omskrivas till}$$

$$\frac{\bar{U}_1}{\bar{I}_1} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot \frac{\bar{U}_2}{\bar{I}_2} = a^2 \cdot \frac{\bar{U}_2}{\bar{I}_2} ;$$

Med  $\frac{\bar{U}_2}{\bar{I}_2} = \bar{Z}_2$  och  $\frac{\bar{U}_1}{\bar{I}_1} = \bar{Z}_{\text{ekv}}$  fås

$$\bar{Z}_{\text{ekv}} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot \bar{Z}_2 = a^2 \cdot \bar{Z}_2 ;$$

vilken lag kallas impedanslagen.

Impedanslagen kan uppfattas sålunda:

Primärnätet uppfattar kombinationen transformator plus belastning som en ekvivalent impedans. Transformatorn har impedansomvandlande egenskaper.

#### 4.5. Sammanfattning av trafons egenskaper.

En transformator omvandlar

- 1) spänningar i direkt proportion till respektive lindningsvarvtal,
- 2) strömmar i omvänd proportion till respektive lindningsvarvtal,
- 3) impedanser i kvadratisk proportion till respektive lindningsvarvtal,
- 4) effekt- och energinivåer ändras ej.

Omvandlingarna ovan gäller tidsvarierande förlopp.

Dessutom isolerar transformatorn med skilda lindningar, fulltrafon, galvaniskt två kretsar från varandra.

## 1. Introduktion.

En teori, som är någorlunda fullständig, bör ta hänsyn till de faktorer vi försummat vid studiet av den ideella transformatorn.

Vi bör alltså beakta

### a) Lindningsresistanserna.

Lindningsresistanserna är de effektiva växelströmsresistanserna

$$R_1 = R_{1l} + R_{1t} \text{ och } R_2 = R_{2l} + R_{2t} .$$

Genom att införa dessa resistanser tar vi hänsyn till effektförlusterna

$$R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 \text{ samt de spänningsfallkomponenter som svarar mot } R_1 \cdot I_1 \text{ och } R_2 \cdot I_2 .$$

De effektiva resistansernas delar liksom temperaturberoende har tidigare genomgått ganska noggrant.

### b) Järnförlusterna.

Järnförlusternas beståndsdelar och variation med driftvillkor har tidigare behandlats.

### c) Magnetiseringsbehovet.

Att ett magnetiseringsbehov finnes innebär att  $m_{\text{res}} \neq 0$  . Vi anser alltså ej längre att kärnmaterialet har oändlig permeabilitet.

### d) Den magnetiska läckningen.

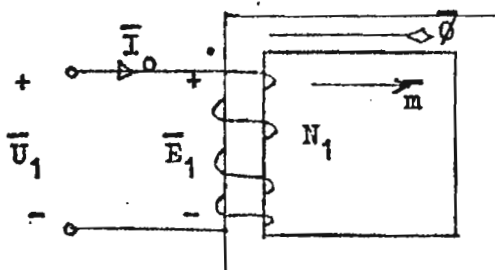
Den magnetiska läckningen behöver endast beaktas vid belastad trafo ( ej i tomgång ). Den magnetiska läckningen innebär att vissa flödeslinjer genomgår endast den primära lindningen men ej den sekundära och vice versa.

## 2. Magnetiseringsbehovet.

### Tomgång:

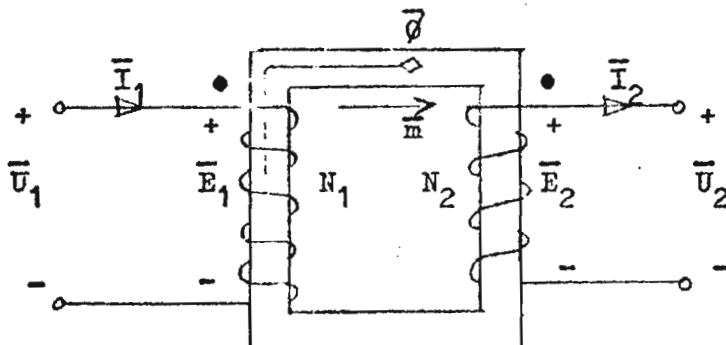
I tomgång finns endast en strömförande lindning. Strömmen i denna,  $i_0$  , ( index 0 anger tomgång ) måste i varje ögonblick anpassa sig så att den resulterande mmk förmår driva aktuellt flöde runt i kärnan. Om vi räknar med den ekvivalenta sinusströmmen kan vi ( referenser enligt figur nedan ) skriva

$$\bar{m}_{\text{res}} = N_1 \cdot \bar{I}_0$$



### Belastning:

Observera referensvalet för strömmarna! Vi använder detta rakt igenom hela studiet av trafon. Vi visar även referensval för spänningarna i figuren, ehuru dessa ej är aktuella för diskussion i detta avsnitt.



Med givna referenser erhålles

$$\bar{m}_{\text{res}} = N_1 \cdot \bar{I}_1 - N_2 \cdot \bar{I}_2 = I_0 \cdot N_1$$

Observera; Oavsett transformatorn arbetar i tomgång eller går belastad måste gälla att den i primärlindningen inducerade spänningen i stort måste hålla jämvikt med den påtryckta nätspänningen.

(  $R_1 \cdot I_0$  i tomgång respektive  $R_1 \cdot I_1$  är båda med krafttekniska förutsättningar små irvid inducerad lindningsspänning )

Nyss säga innebär att man anser  $\bar{m}_{\text{res}}$  oförändrad från tomgång till belastning, alltså

$$N_1 \cdot \bar{I}_0 = N_1 \cdot \bar{I}_1 - N_2 \cdot \bar{I}_2 \quad \dots\dots (1)$$

Härur fås

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \frac{N_2}{N_1} \bar{I}_2 \Rightarrow \bar{I}_0 + \bar{I}_{1b} \quad \dots\dots (2)$$

där alltså

$$\bar{I}_{1b} = -\frac{N_2}{N_1} \cdot \bar{I}_2 \quad \dots\dots (3)$$

$\bar{I}_{1b}$  kallas primärströmmens belastningskomponent . Denna komponent är helt enkelt sekundärströmmen omtransformerad till primärsidan enligt strömlagen. Fysikaliskt är denna strömkomponent den reaktion som primärsidan erfar då vi ansluter en sekundär belastning med åtföljande sekundärström.

Primärströmmens belastningskomponent håller i varje ögonblick mmk-balans med sekundärströmmen. Detta svarar mot att vi skriver ekvation (3) under formen

$$N_1 \cdot \bar{I}_{1b} = N_2 \cdot \bar{I}_2$$

Den andra komponenten i primärströmmen är den s.k. tomgångskomponenten  $\bar{I}_0$  som har en aktiv komponent för att täcka järnförlusterna och en reaktiv för att driva fram flödet.  $\bar{I}_0$  är i stort sett oförändrad från tomgång till belastning.

### Sammanfattning:

I den belastade fysikaliska trafon kan primärströmmen anses bestå av två komponenter, en belastningskomponent och en tomgångskomponent.

Belastningskomponenten håller i varje ögonblick mmk-balans med sekundärströmmen.

Tomgångskomponenten täcker såväl aktiva som reaktiva magnetiseringseffekterna.

### 2. Den magnetiska läckningen.

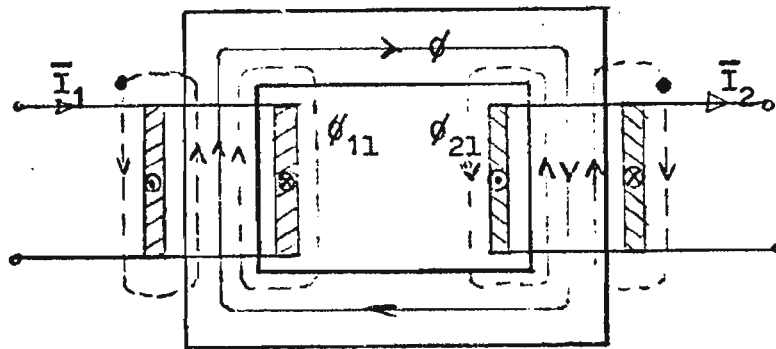
I tomgång är läckningen försumbar.

Vid belastad transformator med stora lindningsströmmar (relativt tomgångsströmmen) omger sig lindningarna med egna magnetfält, varvid många flödeslinjer ej kommer att vara sammanlänkade med båda lindningarna.

Att utreda läckflödenas fördelning i detalj är en ganska komplicerad uppgift. Vi skall här genomföra ett något schematiserat betraktelsesätt. Dock skall vi tillägna oss en viss fysikalisk uppfattning om flödesfördelningen och framför allt komma fram till ett sätt att beakta läckningens inverkan vid räkningar på fysikaliska transformatorer.

(Det betraktelsesätt vi här tillämpar kan i princip tillämpas även på roterande maskiner.)

Vi utgår från den schematiska figuren nedan.



$\phi$  är det s.k. huvudflödet, som genomgår samtliga primära och sekundära lindningsvarv. Det är huvudflödet som svarar för den magnetiska kopplingen mellan primär- och sekundärsida och därmed även den tillhörande energiöverföringen.

$\phi_{11}$  = det primära läckflödet

$\phi_{21}$  = det sekundära läckflödet.

Läckflödena enligt figuren får närmast anses som medelvärden för samtliga primära respektive sekundära lindningsvarv. Som medelvärden är de närmast matematiska begrepp för att beskriva läckningens "medelverkan". I en fysikalisk

transformator med koncentriskt arrangerade primär- och sekundärlindningar på varje ben är det ej möjligt att göra en uppdelning i vad vi vill kalla primärt och sekundärt läckflöde. Vi har då att göra med ett enda fysikaliskt läckfält härrörande från båda lindningarnas samverkan.

Då vi trots detta gör en sådan uppdelning är det för åskådlighets skull.

Vi skall så småningom finna att vi genom mätningar kan bestämma den resulterande läckningens inverkan ( kortslutningsprov ).

Med flödesbegrepp enligt ovan skriver vi

$$\phi_1 = \phi + \phi_{11}$$

$$\phi_2 = \phi - \phi_{21}$$

där  $\phi_1$  och  $\phi_2$  är medelvärden för de flöden som tänkes passera samtliga primära respektive sekundära lindningsvarv. (  $-\phi_{21}$  p.g.a. referensriktningen )

Att observera för fortsättningen ;

Läckflödena går huvudsakligen fram genom luft, vilket innebär linjära magnetiska förhållanden.

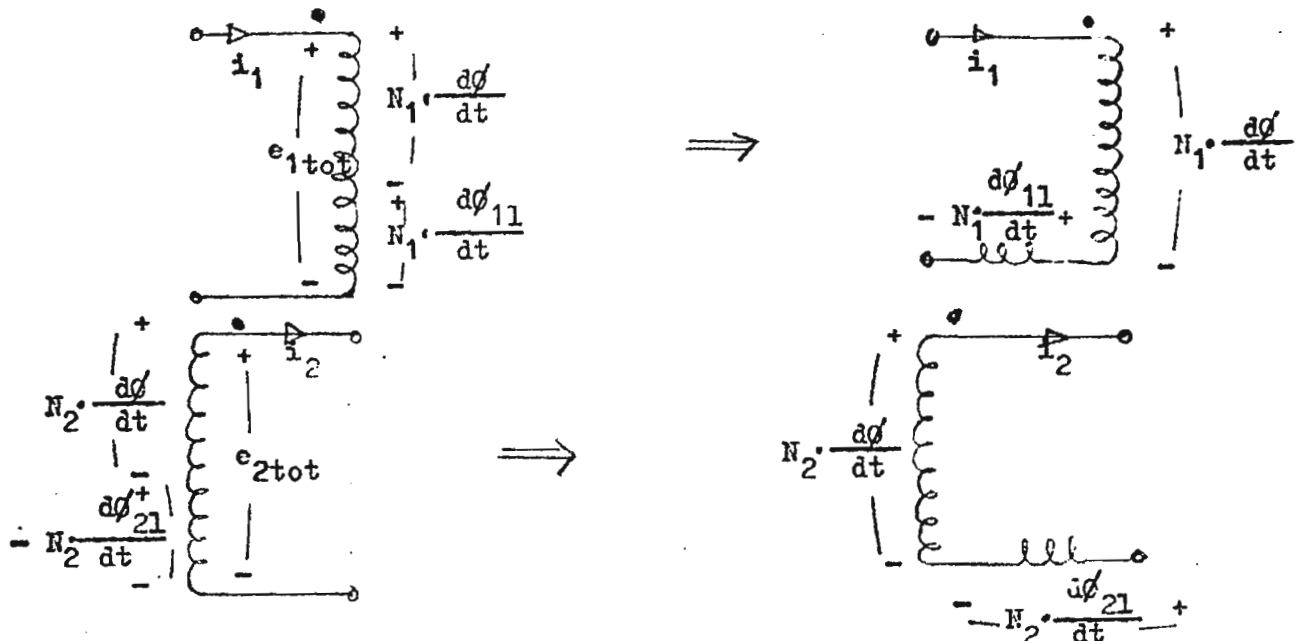
Läckflödena beror i hög grad på lindningarnas utförande och kan därför påverkas på konstruktiv väg.

Den i lindning 1 totalt inducerade spänningen blir

$$e_{1tot} = \frac{d\psi_1}{dt} \Rightarrow N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} + N_1 \cdot \frac{d\phi_{11}}{dt}$$

$$e_{2tot} = \frac{d\psi_2}{dt} \Rightarrow N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} - N_2 \cdot \frac{d\phi_{21}}{dt}$$

Dessa uttryck svarar mot referens för inducerad spänning enligt en vänster-skruv relativt positiv flödesriktning .



Eftersom läckflödena huvudsakligen framgår genom luft blir de proportionella mot de orsakande strömmarna. Vi inför den primära och sekundära läckinduktansen definierade ur relationerna

$$\begin{aligned} L_{11} \cdot I_1 &= N_1 \cdot \phi_{11} \\ L_{21} \cdot I_2 &= N_2 \cdot \phi_{21} \end{aligned}$$

Läckinduktanserna  $L_{11}$  och  $L_{21}$  kan betraktas som konstanta.

De av läckflödena inducerade spänningarna kan skrivas

$$N_1 \cdot \frac{d\phi_{11}}{dt} = L_{11} \cdot \frac{di_1}{dt}$$

$$N_2 \cdot \frac{d\phi_{21}}{dt} = L_{21} \cdot \frac{di_2}{dt}$$

Om vi övergår till sinusstørheter och komplex form får vi

$$\begin{aligned} j \cdot \omega \cdot N_1 \cdot \bar{\phi}_{11} &= j \cdot \omega \cdot L_{11} \cdot \bar{I}_1 \Rightarrow j \cdot X_{11} \cdot \bar{I}_1 \\ j \cdot \omega \cdot N_2 \cdot \bar{\phi}_{21} &= j \cdot \omega \cdot L_{21} \cdot \bar{I}_2 \Rightarrow j \cdot X_{12} \cdot \bar{I}_2 \end{aligned}$$

där  $X_{11}$  och  $X_{21}$  är den primära respektive sekundära läckreaktansen.

För de av huvudflödet inducerade spänningarna gäller

$$\begin{aligned} \bar{E}_1 &= j \cdot \omega \cdot N_1 \cdot \bar{\phi} \\ \bar{E}_2 &= j \cdot \omega \cdot N_2 \cdot \bar{\phi} \end{aligned}$$

Vi kan rita våra lindningar med läckspänningsfallen utanför de av huvudflödet inducerade spänningarna, som figuren nedan visar.

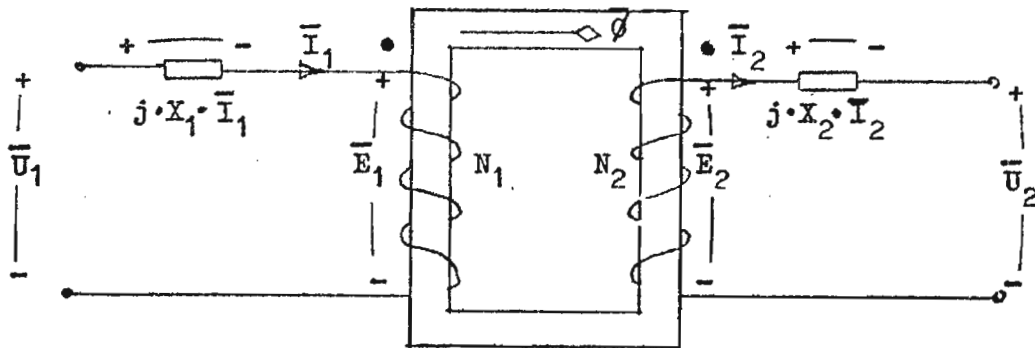
### Sammanfattning:

Den magnetiska läckningens inverkan beaktas genom att vi inför läckreaktanserna  $X_{11}$  och  $X_{21}$ . ( I fortsättningen skriver vi ofta bara  $X_1$  och  $X_2$  då missförstånd ej kan uppstå ).

Dessa reaktanser placeras "utanför" de av huvudflödet inducerade spänningarna  $\bar{E}_1$  och  $\bar{E}_2$ . För de inducerade spänningarna gäller

$$\frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

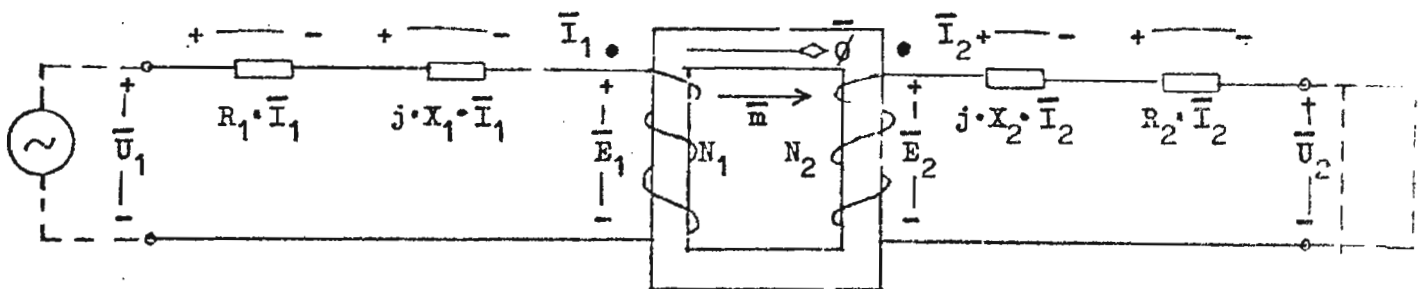
I figur ritas vi som nedan.



### 4. Spänningsekvationer och ekvivalent schema ( ersättningsschema ) för den fysikaliska transformatorn.

I detta avsnitt skall vi steg för steg skaffa oss ett ersättningsschema för den fysikaliska trafon.

Med hänsyn till resistans och läckreaktans ritas vi ett schema:



Enligt KII kan vi uppställa följande spänningsekvationer

$$\bar{U}_1 = \bar{E}_1 + ( R_1 + j \cdot X_1 ) \cdot \bar{I}_1 \quad \dots\dots (1)$$

$$\bar{U}_2 = \bar{E}_2 - ( R_2 + j \cdot X_2 ) \cdot \bar{I}_2 \quad \dots\dots (2)$$

Enligt tidigare diskussioner skall också gälla

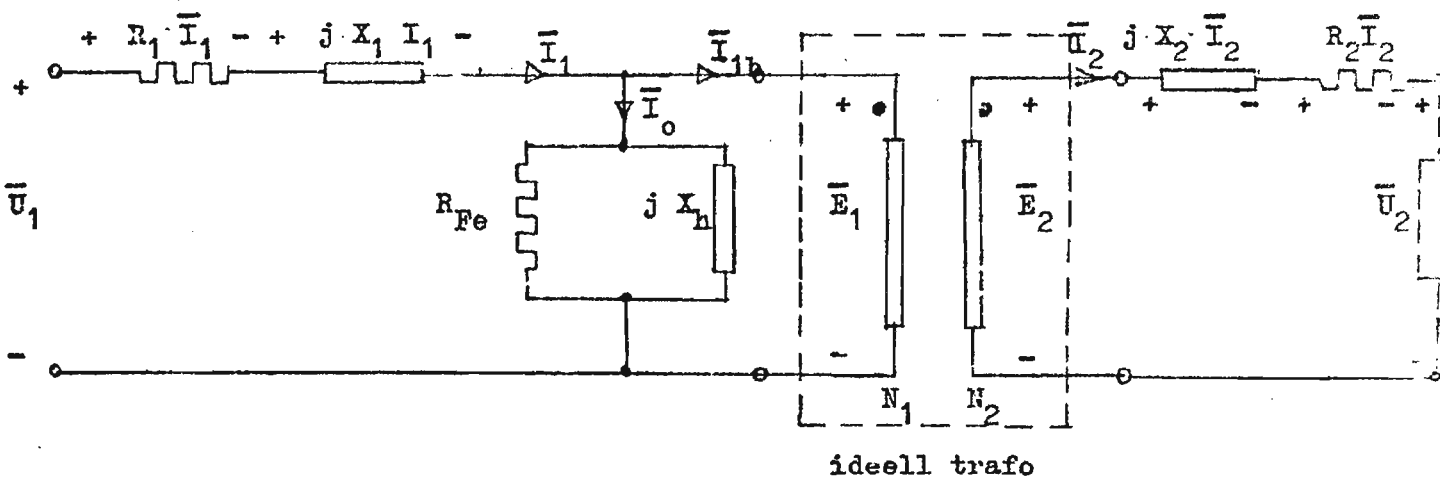
$$\bar{I}_2 = \frac{\sqrt{(U_1 \cos \varphi + R I)^2 + (U_1 \sin \varphi + X I)^2}}{Z}$$

$$\frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \dots\dots (3)$$

$$N_1 \cdot \bar{I}_{1b} = N_2 \cdot \bar{I}_2 \quad \dots\dots (4)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}_{1b} \quad \dots\dots (5)$$

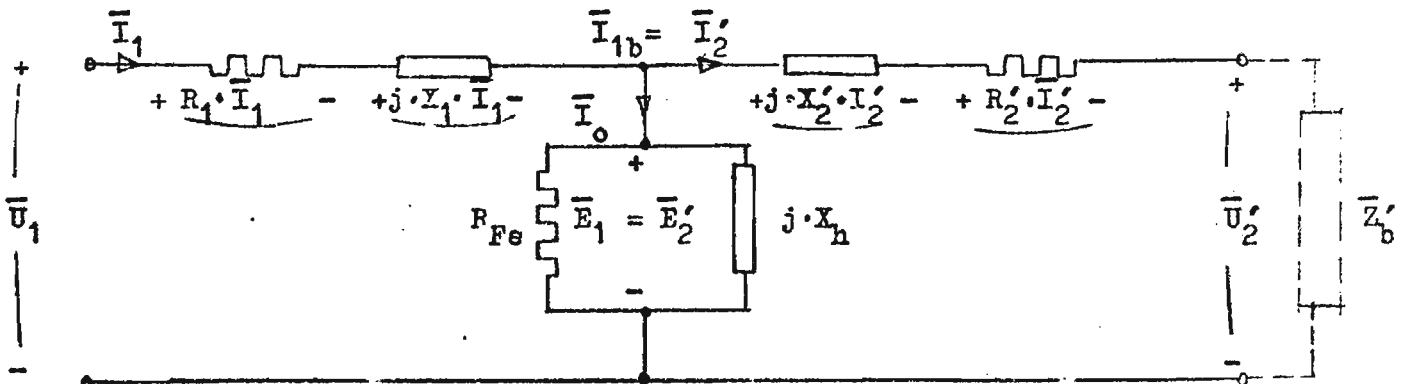
De ovan givna ekvationerna (1) - (5) kan tänkas svara mot en krets enligt nedan, där "transformatorlådan" är att betrakta som en ideell trafo.



ideell trafo

5. Ersättningsschema hänfört till en sida. Visardiagram.

Nackdelen med schemat ovan ur praktisk synpunkt är att det innehåller en ideell trafo. Med kännedom om den ideella trafons egenskaper kan vi undvika komplikationen att ha en trafo i ersättningsschemat. Vi hänför alla storheter till en sida, primär- eller sekundärsidan. Vi erhåller då ett ersättningsschema hänfört till primärsidan (eller sekundärsidan). Schemat kommer att se ut:



Till primärsidan reducerade storheter markeras ' . ( Till sekundärsidan reducerade storheter markeras " )

För schemat ovan gäller:

$$R_2' = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot R_2 ; \quad X_2' = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot X_2 ; \quad Z_b' = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot Z_b ;$$

$$\bar{U}_2' = \frac{N_1}{N_2} \cdot \bar{U}_2 ; \quad \bar{E}_2' = \frac{N_1}{N_2} \cdot \bar{E}_2 \equiv \bar{E}_1 \quad \text{Jmfr spänningslagen !}$$

$$\bar{I}_2' = \frac{N_2}{N_1} \cdot \bar{I}_2 \equiv \bar{I}_{1b} \quad \text{Jmfr strömlagen och mmk-balans !}$$

Observera att impedanser reduceras kvadratisk med omsättningen, spänningar i direkt proportion och strömmar i omvänd proportion mot omsättningen, precis som i den ideella trafön.

Låt oss studera effekter och energier i det reducerade schemat och jämföra med motsvarande storheter på den verkliga sidan ( fysikaliska sidan ).

$$\text{Ex. } R_2' \cdot \bar{I}_2'^2 = R_2' \cdot \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot \bar{I}_2 \cdot \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 \Rightarrow R_2 \cdot \bar{I}_2^2$$

$$\text{Ex. } \bar{U}_2' \cdot \bar{I}_2' \cdot \cos \varphi_2 = \bar{U}_2 \cdot \frac{N_1}{N_2} \cdot \bar{I}_2 \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot \cos \varphi_2 \Rightarrow \bar{U}_2 \cdot \bar{I}_2 \cdot \cos \varphi_2$$

Ur de två exemplen konstaterar vi att effekter och därmed energier är oförändrade vid jämförelse mellan reducerad sida och verklig sida.

Sist givna förhållande har praktiskt intresse vid beräkningar innefattande reducerade schema.

För det fullständiga, reducerade schemat gäller

$$\bar{E}_2' = \bar{U}_2' + ( R_2' + j \cdot X_2' ) \cdot \bar{I}_2'$$

$$\bar{U}_1 = \bar{E}_1 + ( R_1 + j \cdot X_1 ) \cdot \bar{I}_1$$

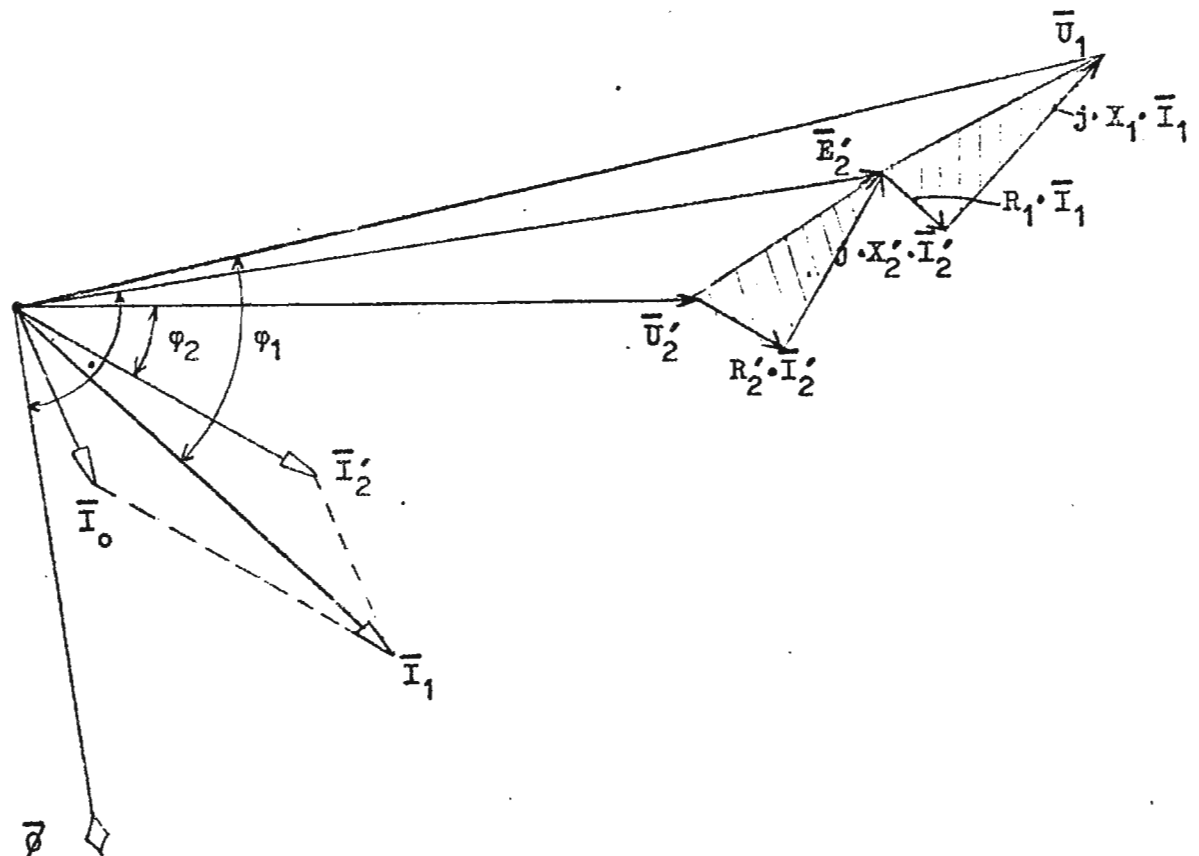
$$\bar{E}_2' = \bar{E}_1$$

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2' + ( R_2' + j \cdot X_2' ) \cdot \bar{I}_2' + ( R_1 + j \cdot X_1 ) \cdot \bar{I}_1$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}_2' \Rightarrow \bar{I}_0 + \bar{I}_{1b}$$

I anslutning till ekvationerna kan ett visardiagram ritas.  $\bar{U}_2'$  väljes som riktfas och  $\bar{I}_2'$  antages vara induktivt färförskjuten relativt  $\bar{U}_2'$ .

Följ upp konstruktionen noggrannt. Diagram överst å nästa sida.



## 6. Praktiska (approximativa) ersättningskretsar för den fysikaliska transformatorn.

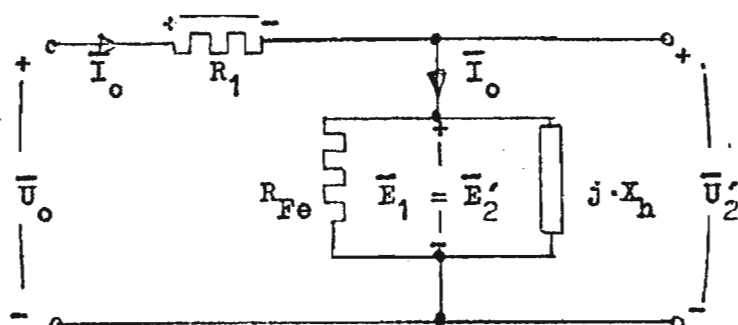
I föregående avsnitt har vi gått igenom det fullständiga ekvivalenta schemat. Detta schema torde vara det som bäst ansluter sig till de verkliga förhållandena. Det bör användas vid noggranna undersökningar av transformatorn som elmaskin. I många fall ingår transformatorn som en länk i ett större system. Därvid är det ofta lämpligt och tillåtet att något förenkla det fullständiga schemat och på så sätt förenkla beräkningarna. Nedan ges beskrivning av tre olika schemor, avsedda att användas vid olika beräkningsfall.

### 6.1. Tomgångsschema.

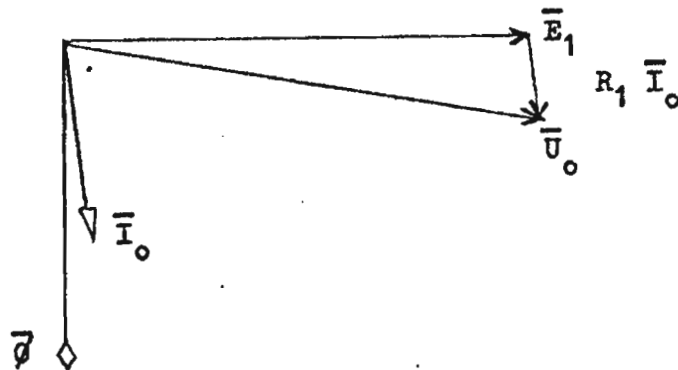
Läckningen försummas. Ofta kan även resistansen i lindningen negligeras. Ersättningskrets ser ut som nedan. Spänningsekvationen med de givna referenserna blir

$$\bar{U}_1 = \bar{E}_1 + R_1 \bar{I}_0$$

I anslutning till ekvationen kan ett visardiagram ritas.



$$I_2' = 0$$

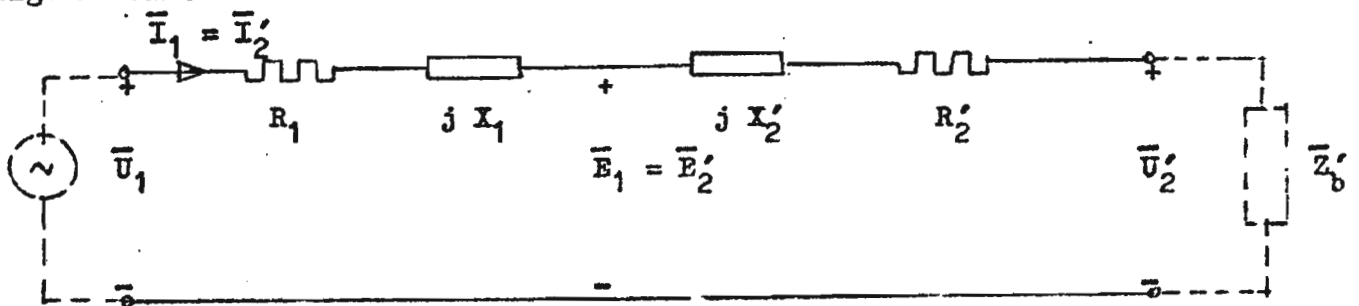


## 6.2. Schema för belastat tillstånd och sekundär kortslutning.

Om belastningen ej är alltför liten kan  $I_0$ 's verkan försummas så att

$$\bar{I}_1 \approx \bar{I}'_2 = \bar{I}_{1b}$$

Vi försummar i detta fall den s.k. tomgångsadmittansen och får ett enkelt schema enligt nedan.



Vi slår samman de två resistiva komponenterna liksom de två reaktiva och introducerar följande viktiga begrepp:

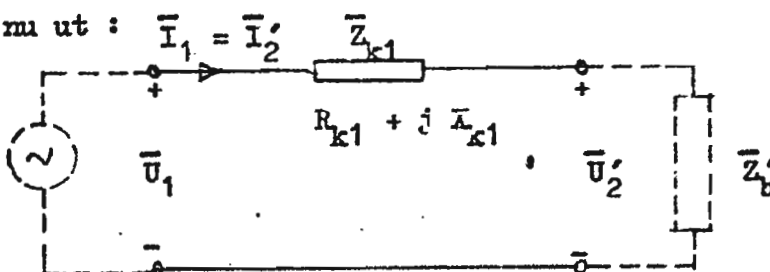
$$R_{k1} = R_1 + R_2' \quad \text{kortslutningsresistansen hänförd till primärsidan}$$

$$X_{k1} = X_1 + X_2' \quad \text{kortslutningsreaktansen} \quad " \quad " \quad "$$

$$\bar{Z}_{k1} = R_{k1} + j \cdot X_{k1} \quad \text{kortslutningsimpedansen} \quad " \quad " \quad "$$

För beloppet av  $\bar{Z}_{k1}$  gäller självfallet  $Z_{k1} = \sqrt{R_{k1}^2 + X_{k1}^2}$

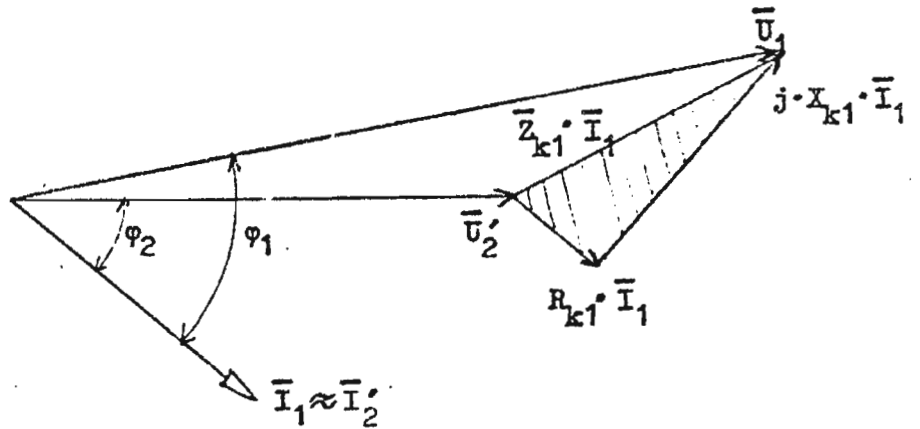
Schemat ser nu ut :



Spänningsekvationen blir

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \bar{U}_2' + \bar{Z}_{k1} \cdot \bar{I}_2' \\ &= \bar{U}_2' + (R_{k1} + j \cdot X_{k1}) \cdot \bar{I}_2' \end{aligned}$$

Visardiagram kan ritas enligt figur överst på nästa sida.



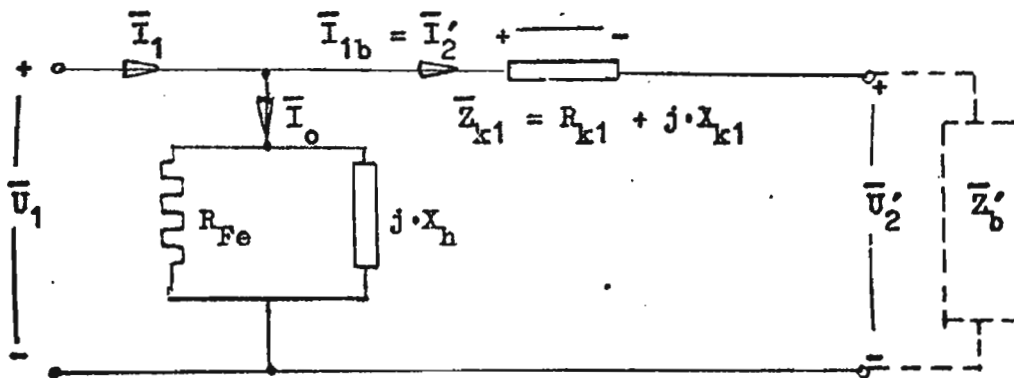
Anmärkning:  $R_k$ ,  $X_k$  och  $Z_k$  kan erhållas antingen från trafons märkplåt eller bestämmas genom prov.

För stors trafon gäller ofta att  $\bar{Z}_k \approx j \cdot X_k$  d.v.s.  $R_k \ll X_k$ .

Schemat enligt ovan är det normala vid spänningsfallberäkningar och kortslutningsberäkningar.

### 6.3. Schema för förlust- och verkningsgradberäkningar.

Vid förlust- och verkningsgradberäkning skall såväl belastningsförluster som tomgångsförluster ( järnförluster ) beaktas. Därvid måste magnetiseringsadmittansen tas med i schemat. Brukligt är därvid emellertid att den placeras i direkt anknytning till primärklämmorna enligt figuren nedan.



Den approximation vi gjort är att vi försummat  $I_0$ 's inverkan på spänningsfall och belastningsförluster i  $R_j$ .

## NÅGRA VIKTIGA TRANSFORMATORPROV.

Vi har i föregående avsnitt diskuterat fram den fysikaliska trafons beräkningsschema (ersättningsschema). I detta avsnitt skall vi främst diskutera hur man på olika sätt kan bestämma beräkningsschemats parametrar (karaktäristiska storheter). Väsentligen föreligger tre olika möjligheter:

1. Genom beräkning på konstruktionsstadiet. Så sker framför allt då kund och tillverkare överenskommer om vissa data.
2. Genom att utnyttja data på trafons märkplåt. Enligt normer och definitioner har olika data innebörd med vars hjälp beräkningsschemat kan bestämmas.
3. Genom prov, som utföres bl.a. i samband med leveransk kontroll men som också kan utföras i andra sammanhang.

Nedan skall vi uppehålla oss vid olika prov. Det visar sig att två, relativt enkla prov är tillfyllest för att bestämma schemats parametrar. De åsyftade proven kallas tomgångs- och kortslutningsprov.

I allmänhet kombineras tomgångsprovet med en omsättningsmätning och kortslutningsprovet kompletteras oftast med bestämning av lindningarnas likströmsresistanser av skäl som framgår av fortsättningen.

### 1. Tomgångsförluster och tomgångsprov.

#### 1.1. Tomgångsförluster.

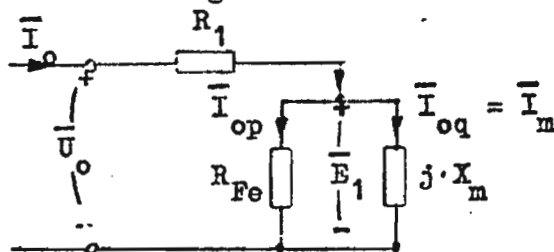
I samband med diskussionen av växelströmsmagnetisering av spolar med järnkärna klargjordes att den tomgående trafo belastar nätet med en tomgångsström  $\bar{I}_0$ , vars aktiva komponent svarar mot en viss aktiv tomgångseffekt  $P_0$  och vars reaktiva strömkomponent  $\bar{I}_{0q}$  (ibland betecknad  $\bar{I}_m$  och då ofta kallad magnetiseringsström) motsvarar en viss reaktiv tomgångseffekt  $Q_0$ . Ur beräkningsschemat nedan framgår att:

$$P_0 = P_{Fe} + R_1 \cdot \bar{I}_0^2 \approx P_{Fe}.$$

$$Q_0 = Q_m.$$

Tomgångsströmmen uppgår normalt till några få procent av märkströmmen, varför den från nätet upptagna effekten  $P_0$  väsentligen

är järnförluster,  $P_{Fe}$ . Dielektriska förluster i isolermaterialen kan helt försummas i sammanhanget.



I tomgång är den magnetiska läckningen obetydlig, varför den från nätet upptagna reaktiva effekten utgör magnetiseringseffekt, som fordras för att åstadkomma erforderligt flöde.

(Ur strömsynpunkt fås en påtaglig induktiv fasförskjutning relativt spänningen, vilket effektmässigt är likvärdigt med förbrukning av reaktiv effekt, magnetiseringseffekt)

När man normalt talar om tomgångsförlusterna avses den aktiva tomgångseffekten. Om inget annat sägs avses dessutom förlusterna vid märkspänning. För att skilja förlusterna vid märkspänning från dem vid godtycklig spänning skriver vi för de förra  $P_{on}$  och för de senare  $P_o$ . Av schemat framgår att  $P_o \approx P_{Fe}$  är konstanta så länge  $U_1 = U_o$  är konstant. Vid varierande tomgångsspänning  $U_1$  kommer  $P_{Fe}$  att variera kvadratisk med spänningen d.v.s.

$$\frac{P_{Fe}}{P_{Fen}} = \frac{U_1^2}{U_{1n}^2} = \frac{P_o}{P_{on}}$$

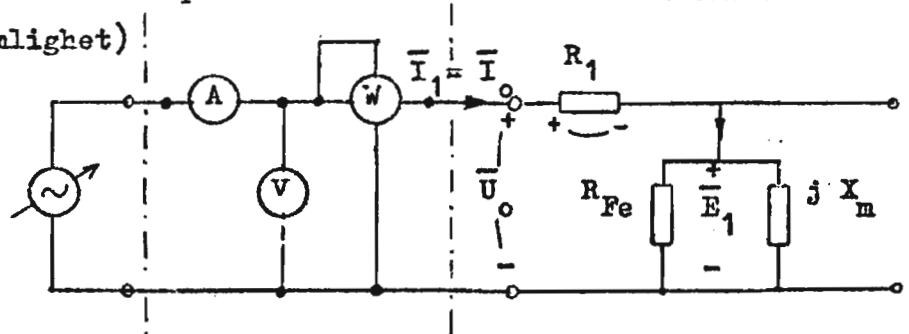
eftersom

$$P_{Fe} = U_1^2 : R_{Fe}$$

där  $R_{Fe}$  kan anses relativt konstant så länge frekvensen är konstant.

## 1.2. Tomgångsprov.

Uppkoppling för tomgångsprov framgår av schemat nedan, som ur instrument-synpunkt är ett kopplingsschema men ur trafosynpunkt ett beräknings-schema. (Vi tillåter oss att på detta sätt kombinera två olika schematyper av ren bekvämlighet)



Transformatorns ena lindning lämnas öppen och den andra ansluts till en sinusformad matningsspänning av märkfrekvens. Man mäter spänning, ström och effekt med volt-, ampere- resp. wattmeter.

Ampermetern skall vara effektivvärdeskännande (vridjärns- eller elektrodynamisk typ) eftersom vi arbetar med ekvivalent sinusström, d.v.s. bortser från tomgångsströmmens kurvform, som i verkligheten ej är sinusformad. Eftersom  $I_o$  är liten relativt märkströmmen kommer  $R_1 \cdot I_o \ll U_o$ , varför  $U_o \approx E_1$ .

Ett fullständigt tomgångsprov brukar omfatta flera mätningar vid varierande primärspänning  $U_1$  ( $U_0$ ). Normalt bör spänningarna ligga i området 80 - 120 % av märkspänningen och en mätning bör helst ske vid  $U_1 = U_{1n}$  alltså vid märkspänning på den sida från vilket provet görs.

Praktiskt är det lämpligt att utföra tomgångsprovet på lågspänningssidan, eftersom man då får arbeta med lägre spänningar. (I vissa fall är denna aspekt utan praktisk betydelse).

Effektfaktorn  $\cos\varphi_0$  är normalt låg, av storleksordningen 0,10 - 0,30, varför det är önskvärt med wattmeter, som gör fullt utslag för ett nominellt  $\cos\varphi_n$ , som är lågt, lägre än det vanliga värdet 1,0.

För bestämning av tomgångsdelen i beräkningsschemat ( $R_{Fe}$  och  $X_m$ ) används mätvärdena på nedan angivet sätt (jämför bestämning av beräkningsschemat för en spole med järnkärna samt lösta övningsuppgifter):

$$\bar{U}_0 \approx \bar{E}_1; \quad U_0 \approx E_1; \quad \cos\varphi_0 = \frac{P_0}{U_0 \cdot I_0};$$

$$R_{Fe} = \frac{E_1^2}{P_{Fe}} \approx \frac{U_0^2}{P_0};$$

$$Q_m \approx Q_0 = \sqrt{(U_0 \cdot I_0)^2 - P_0^2}; \quad (\text{andra sätt att få fram } Q_0 \text{ finns})$$

$$X_m = \frac{E_1^2}{Q_m} \approx \frac{U_0^2}{Q_0};$$

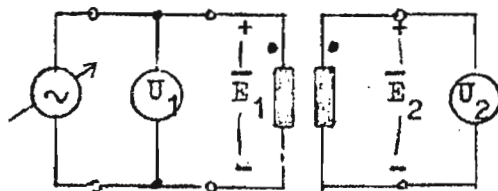
Ann. Så som transformatorer är stämplade kommer kärnan att utsättas för samma flödesvariationer oberoende av på vilken sida man applicerar märkspänning eller viss bräddel därav. Detta innebär att  $P_{on}$  är oberoende av från vilken sida bestämningen görs.  $R_{Fe}$  och  $X_m$  däremot beror självfallet av från vilken sida provet sker eftersom märkspänningarna är olika. Omräkning från en sida till den andra sker på samma sätt som för alla andra impedanser d.v.s. kvadratiskt med lindningsomsättningen.

### 1.3. Omsättningsmätning.

Tomgångsprov kombineras lämpligen med omsättningsmätning. Eftersom primärsidans klämspänning med god approximation kan sättas lika med inducerad primärspänning ( $R_1 \cdot I_0 \ll U_1 \approx E_1$ ) och sekundärsidans klämspänning = inducerad sekundärspänning ( $U_2 \approx E_2$ ) är det lämpligt att bestämma lindningsomsättningen som

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2}$$

Genom att göra flera mätningar och använda medelvärdet på omsättningen kan bestämningens noggrannhet ökas. Höghmrig spänningsmätning förutsättes. Kopplingsschemat, som är enkelt, ses i figuren nedan.



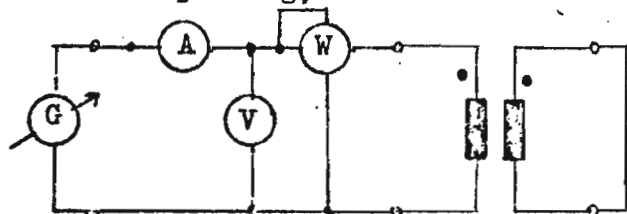
## 2. Kortslutningsprov. Belastningsförluster.

### 2.1. Kortslutningsprov.

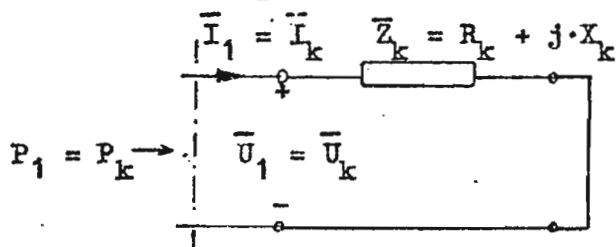
Kortslutningsprov tillgår så att transformatorns ena sida kortsluts varefter den andra sidan matas med en reducerad spänning av sinusform och med märkfrekvens. Se kopplingsschemat nedan!

Den primärt anslutna spänningen uppgår normalt till storleksordningen 5 - 10 % av märkspänningen på den sida ifrån vilket provet sker (mätningarna utföres). Genom att påtrycka en reducerad spänning kommer strömmarna i lindningarna ej att överstiga märkström.

Man mäter spänning, ström och effekt .



Eftersom den påtryckta spänningen är liten jämfört med märkspänningen (säg 5 %) kommer järnförlusterna också att bli små jämfört med normala driftförhållanden ( $P_{Fe} \sim B^2 \sim U_1^2$  som ger  $P_{Fek} = 0,0025 \cdot P_{Fen}$ ) varför de saklöst kan försummas intill strömvärmeförlusterna i lindningen. Därtill är även magnetiseringskomponenten försumbart liten vid den låga spänning, som är aktuell. Detta förklarar beräkningsschemats enkla utseende vid kortslutningsprov. Se schemat nedan !



I allmänhet är det fördelaktigt att utföra provet på trafons högspännings-sida eftersom man där har mindre strömmar att hantera än på lågspännings-sidan. Normalt utföres flera mätningar med varierande ström inom inter-vallet 80 - 120 % av märkströmmen på den sida provet sker. Önskvärt är att en ström motsvarar märkströmsvärdet d.v.s.  $I_1 = I_k = I_{1n}$ .

Se dock anmärkningen inom parentes nedan!

Genom att lindningarna värms av strömmarna under mätningen måste man planera sina mätningar så att dessa kan kombineras med likströmsbe-stämning av lindningsresistanserna och omräkning till driftvarmt tillstånd. Se avsnitt 2.2 och 2.3 ! Det kan vid kortslutningsprov ibland vara nödvändigt att mäta vid reducerad ström av storleksordningen 30 - 40 % av märkströmmen eller att genomföra sina mätningar snabbt för att undvika besvärande temperaturändring.

På samma sätt som vid tomgångsprov uppvisar trafon en ganska låg effekt-faktor  $\cos\varphi_k$ , varför en speciell wattmeter är önskvärd.

De uppmätta värdena används på följande sätt (alternativa beräkningsvägar är tänkbara) :

$$\begin{aligned} Z_{k1} &= \frac{U_k}{I_k} ; \\ R_{k1} &= \frac{P_k}{I_k^2} ; \\ X_{k1} &= \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos\varphi_k &= \frac{P_k}{U_k \cdot I_k} ; \\ R_{k1} &= Z_{k1} \cdot \cos\varphi_k ; \\ X_{k1} &= Z_{k1} \cdot \sin\varphi_k ; \end{aligned}$$

Beräknade värden hänför sig till den sida på vilken mätningarna gjorts. och gäller för den temperatur som lindningarna har under provet.

Omräkning till transformatorns andra sida sker på vanligt sätt.

I de fall inget missförstånd eller någon tvekan råder om till vilken sida angivna impedansvärden hänför sig utelämnas ofta index 1 (alternativt index 2 vid omräknade värden). alltså  $Z_k$ ,  $R_k$ ,  $X_k$ .

I stället för att sätta index 1 alternativt 2 på impedanssymbolerna förekommer att man anger ' och '' för att antyda hänfört till primär-respektive sekundärsida, alltså  $Z'_k$ ,  $R'_k$ ,  $X'_k$  alternativt  $Z''_k$ ,  $R''_k$ ,  $X''_k$ .

## 2.2. Belastningsförluster.

Med belastningsförluster i en trafo avses de strömvärmeförluster som uppstår i lindningarnas effektiva växelströmsresistanser, alltså

$$P_b = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 \triangleq R_1 \cdot I_1^2 + R_2' \cdot I_2'^2 ;$$

Vid kortslutningsprov blir, eftersom  $I_0$  kan försummas p.g.a. den låga inspänningen,  $I_2' = I_1$ , varför vi kan skriva

$$P_b = I_1^2 \cdot (R_1 + R_2') = I_1^2 \cdot R_{k1} ;$$

Denna effekt är ingenting annat än den effekt  $P_k$  som trafon tar upp från det matande nätet under kortslutet tillstånd.

Det är uppenbart att  $P_b$  beror av vilken ström som är aktuell och den temperatur som råder, eftersom resistanserna är temperaturberoende.

Då man talar om en trafos belastningsförluster utan att närmare precisera ström och temperatur avses förlusterna vid märkström och driftvarmt tillstånd, som enligt trafonormerna innebär  $75^\circ\text{C}$ , om inget annat sägs.

Vi skriver de nu avsedda förlusterna  $P_{bn}$  ( $P_b$  med extra index n), alltså

$$\begin{aligned} P_{bn} &= R_1 \cdot I_{1n}^2 + R_2 \cdot I_{2n}^2 \\ &= R_{k1} \cdot I_{1n}^2 \\ &= R_{k2} \cdot I_{2n}^2 \end{aligned}$$

Observera att då vi har märkström i den ena lindningen har vi samtidigt märkström i den andra.

## 2.3. Resistansmätning med likström. Omräkning till driftvarmt tillstånd.

De tidigare omnämnda resistanserna  $R_1$  och  $R_2$  liksom  $R_{k1}$  alternativt  $R_{k2}$  avser lindningsresistanserna för växelström och består av likströmsdel och tillsatsdel. Eftersom dessa delars temperaturberoende ej är lika (se tidigare avsnitt om resistansförhållanden vid lik- och växelström samt temperaturberoende) måste vi separera växelströmsresistanserna innan omräkning till driftvarmt tillstånd kan ske. Därför bestäms lindningarnas likströmsresistanser exempelvis med VA-metoden eller någon lämplig bryggmetod (vid mindre trafon). Därvid bör beaktas att mätströmmen ej ger alltför kraftig uppvärmning. På så sätt kan mätningen anses svara mot en temperatur = det omgivande rummets under förutsättning att transformatorn befunnit sig i mättrummet under tillräckligt lång tid och att rummets temperatur varit någorlunda konstant under samma tid.

För stora trafon kan den erforderliga tiden uppgå till dygn medan mindre trafon antar omgivningens temperatur på några timmar eller ännu kortare tid.

Efter likströmsmätningen sker omräkning till driftvarmt tillstånd enligt nedan beskriven rutin:

Omräkna de likströmsmätta resistanserna till en sida, exempelvis primärsidan, vid kortslutningsprovet. Antag att temperaturen varit vid likströmsmätningen. Vi erhåller på så sätt den till primärsidan hänfödda likströmsdelen av kortslutningsresistansen  $R'_{lv}$ .

Denna resistans jämföres med kortslutningsprovets resistans, som antages vara känd vid samma temperatur,  $R'_{kv}$ .

( Om likströmsmätning och kortslutningsprov skett vid olika temperaturer omräknas likströmsmätta värdet till kortslutningsprovets temperatur innan jämförelsen sker.)

Jämförelsen resulterar i att vi kan bestämma tillsatsresistansen som

$$R'_{tv} = R'_{kv} - R'_{lv}$$

Omräkningen sker nu till driftvarmt tillstånd -  $75^{\circ} \text{C}$  om inget annat sägs - på sätt som tidigare redovisats, alltså

$$R'_{k75} = R'_{lv} \frac{235 + 75}{235 + \theta} + R'_{tv} \frac{235 + \theta}{235 + 75} ;$$

Kortslutningsreaktansen kan anses helt temperaturoberoende, medan däremot  $Z_k$  som ju också beror av  $R_k$ , ändras med temperaturen. I driftvarmt tillstånd fås

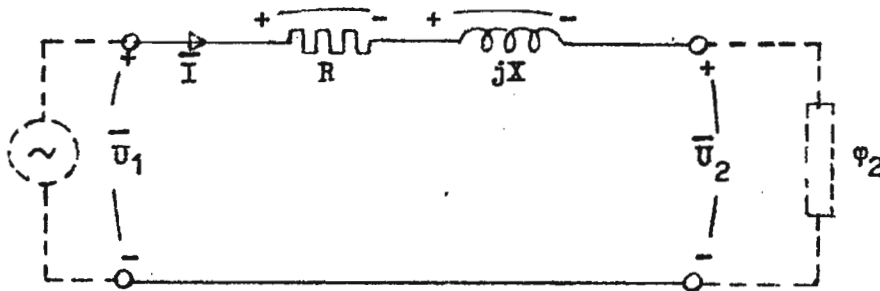
$$Z'_{k75} = \sqrt{R_{k75}^2 + X_k^2} ;$$

# Transformatorns spänningsfall vid belastning.

## S1. Allmänna begrepp och definition av spänningsfall.

Jämför ellärans och den elektriska anläggningsteknikens behandling av spänningsfall i växelströmskretsar.

Studera överföringen enligt figur nedan. Överföringen tänkes innehålla resistansen  $R$  och reaktansen  $X$  totalt i fram och återledare.



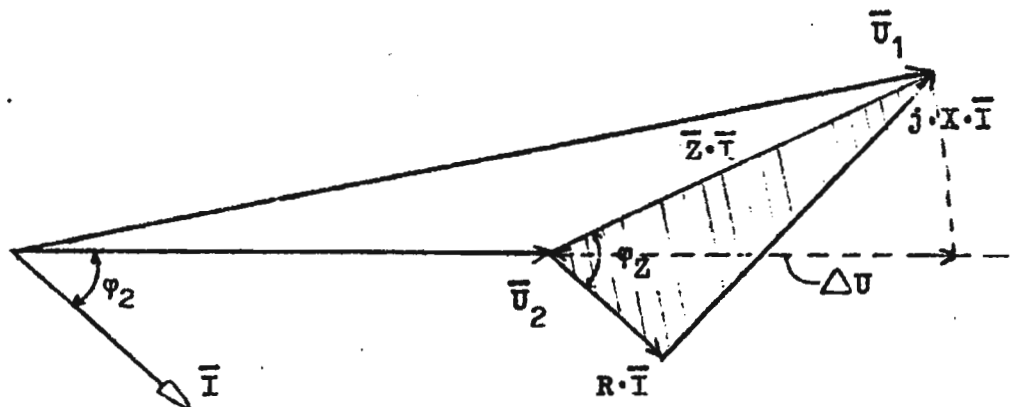
Med referenser enligt figur blir spänningsekvationen

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2 + \bar{Z} \cdot \bar{I}$$

eller

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2 + (R + j \cdot X) \cdot \bar{I}$$

Ett vektordiagram med  $\bar{U}_2$  som riktfas och med antagen induktiv fasförskjutning mellan  $\bar{U}_2$  och  $\bar{I}$  ser ut;



I anslutning till diagrammet inför vi följande benämningar;

Spänningsfalltriangeln, streckad ovan.

Resistansspänningsfallet  $\bar{U}_R = R \cdot \bar{I}$  med storleken  $R \cdot I$

Reaktansspänningsfallet  $\bar{U}_X = j \cdot X \cdot \bar{I}$  med "  $X \cdot I$

Impedansspänningsfallet  $\bar{U}_Z = \bar{Z} \cdot \bar{I}$  " "  $Z \cdot I = \sqrt{R^2 + X^2} \cdot I$

Linjeimpedansens fasvinkel  $\varphi_Z$  " "  $\arctg \varphi_Z = \frac{X}{R}$

Vi definierar nu

1. Impedansspänningsfallet eller det vektoriella spänningsfallet  $\bar{U}_Z$  som

$$\bar{U}_Z = \bar{U}_1 - \bar{U}_2 \equiv \bar{Z} \cdot \bar{I}$$

Observera ordningsföljden mellan  $\bar{U}_1$  och  $\bar{U}_2$  !

2. Spänningsfallet  $\Delta U$  som

$$\Delta U = U_1 - U_2$$

Observera alltså att spänningsfallet helt enkelt är skillnaden mellan de båda spänningarnas effektivvärden som de kan mätas med voltmeter och alltså oberoende av spänningarnas faslägen.

I allmänhet är  $U_Z = |\bar{Z} \cdot \bar{I}|$  ej lika med  $\Delta U$

Då man talar om spänningsfallet i en växelströmsöverföring menas alltid  $\Delta U$ .

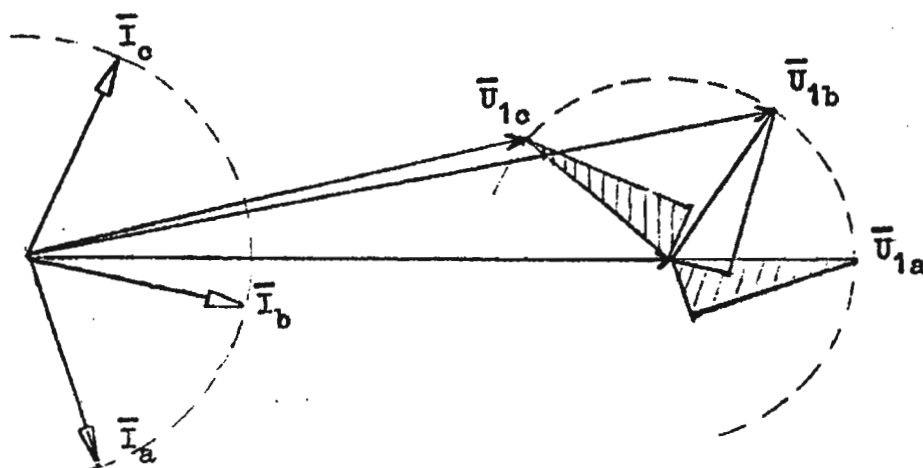
Observera ordningsföljden mellan  $U_1$  och  $U_2$  i definitionsekvationen.

I figuren på föregående sida åskådliggöres de båda spänningsfallbegreppen enligt ovan.

## S2. Spänningsfallets beroende av $\cos \varphi_2$ ( $\varphi_2$ ).

För att studera den inverkan belastningens effektfaktor har antat vi för enkelhets skull konstant  $U_2$  och  $I_2$  men varierande  $\cos \varphi_2$  och undersöker  $U_1$  för de olika fallen. Förhållandena framgår av visardiagram nedan.

Belastningen antages passiv så att  $|\varphi_2| < 90^\circ$ .



Ur diagrammet drar vi slutsatsen att  $\Delta U = U_1 - U_2 \geq 0$ .

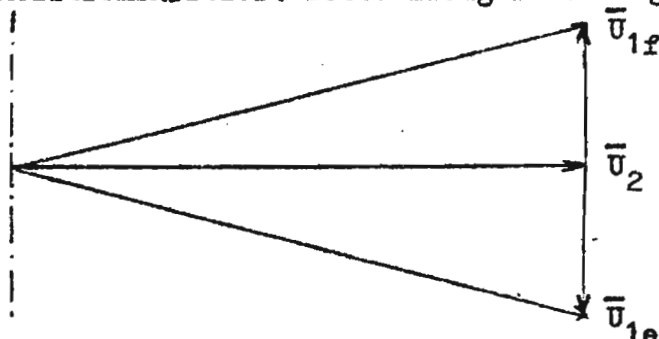
Negativt  $\Delta U$  innebär att utspänningen  $U_2$  är större än inspänningen  $U_1$ , vilket inträffar vid tillräckligt kapacitiv fasförskjutning.

Självfallet bestäms spänningsfallet även av den inbördes relationen mellan  $R$  och  $X$  samt av strömmen  $I$ 's storlek.

Att spänningsfallet kan bli noll eller negativt är en viktig skillnad jämfört

med likströmskretsar där ett spänningsfall alltid är positivt.

Om endast resistans ( och ingen reaktans ) finns i överföringen blir alltid  $\Delta U > 0$  även i växelströmskretsar. Detta framgår av diagrammet nedan.



### S3. Definition av spänningsregleringen.

Då man vill beskriva en överförings spänningsfallegenskaper brukar man stundom studera spänningsändringen från tomgång ( = ingen belastning ansluten till utsidan ) till full belastning i belastningsändan ( = utänden ).

Ändringen brukar uttryckas i relation till den spänning som fanns före förändringen. Man talar om den relativa spänningsändringen vid tillslag respektive frånslag av belastningen.

Vi erhåller följande uttryck för de två sist givna begreppen

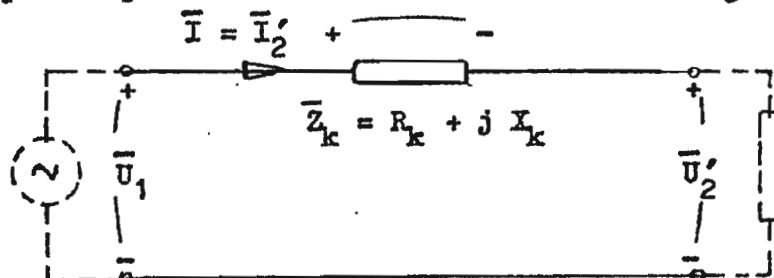
$$\epsilon_T = \frac{\Delta U}{U_1} = \frac{U_1 - U_2}{U_1}$$

$$\epsilon_F = \frac{\Delta U}{U_2} = \frac{U_1 - U_2}{U_2}$$

Den relativa spänningsändringen vid tillslag<sup>slag</sup> av belastningen brukar ibland kallas spänningsregleringen. Skilj detta begrepp från spänningsreglering, som är ett allmänt sammanfattande begrepp för olika sätt att styra eller reglera spänningens värde i olika nätpunkter.

### S4. Transformatorns spänningsfall.

Vid beräkning av transformatorns spänningsfall beräknas normalt  $\Delta U$  hänfört till en sida exempelvis primärsidan. Ekvivalent schema enligt nedan användes.



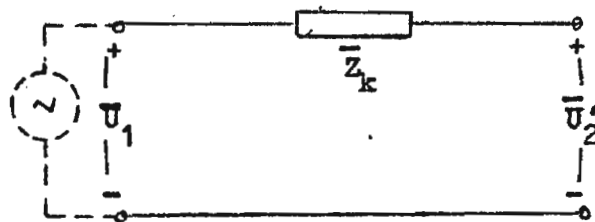
Man erhåller  $\Delta U' = U_1 - U_2'$  hänfört till primärsidan.

Om vi i stället reducerar till sekundärsidan fås

$$\Delta U'' = \frac{N_2}{N_1} \cdot \Delta U' \approx U_1' - U_2$$

Om erhållet spänningsfall uttryckes i relation till märkspänningen på den sida till vilken spänningsfallet hänförs blir det relativa spänningsfallets värde oberoende av sidan. Vi genomräknar ett illustrerande exempel nedan. Utgå från en trafo med märkomsättningen 400/200 V. Vid belastning antar vi att belastningen är sådan att  $\Delta U' = 25$  V.

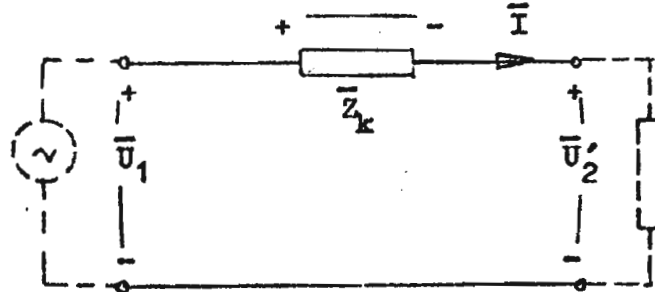
Tomgång;



$U_1 = 400$  V. Då blir  $U_2' = U_1 = 400$  V. och alltså  $\Delta U' = 0$ .

Verklig sekundärspänning blir:  $U_2 = \frac{200}{400} 400 = 200$  V.

Belastning;



$U_1 = 400$  V.  $\Delta U' = 25$  V. Då blir  $U_2' = U_1 - \Delta U' \approx 400 - 25 \approx 375$  V.

Verklig sekundärspänning blir ;  $U_2 = \frac{200}{400} \cdot 375 \approx 187,5$  V.

Spänningsfallet hänfört till sekundärsidan kan antingen erhållas som

$$\Delta U'' = \frac{200}{400} \cdot 25 \approx 12,5 \text{ eller } \Delta U'' = U_1' - U_2 \approx 200 - 187,5 \approx 12,5$$

Det relativa spänningsfallet blir primärt  $\frac{25}{400} = 0,0625$  eller 6,25 %

Det relativa spänningsfallet blir sekundärt  $\frac{12,5}{200} = 0,0625$  eller 6,25 %

Det relativa spänningsfallet är alltså oberoende av vilken sida beräkningarna hänförs till.

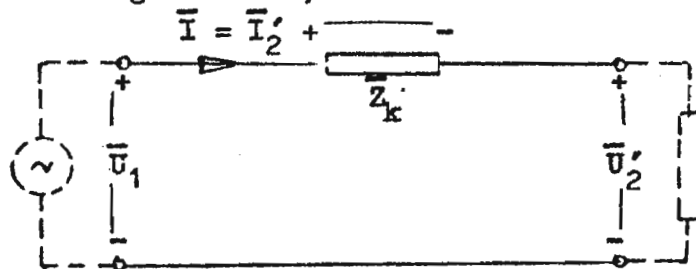
Nyss beräknade relativa spänningsfall är vad vi tidigare också kallat spänningsregleringen eller relativa spänningsändringen vid tillslag av belastningen.

För relativa spänningsändringen vid fränslag av belastningen fås

$$\varepsilon_F = \frac{25}{375} = 0,0667 \text{ eller } \frac{12,5}{187,5} = 0,0667$$

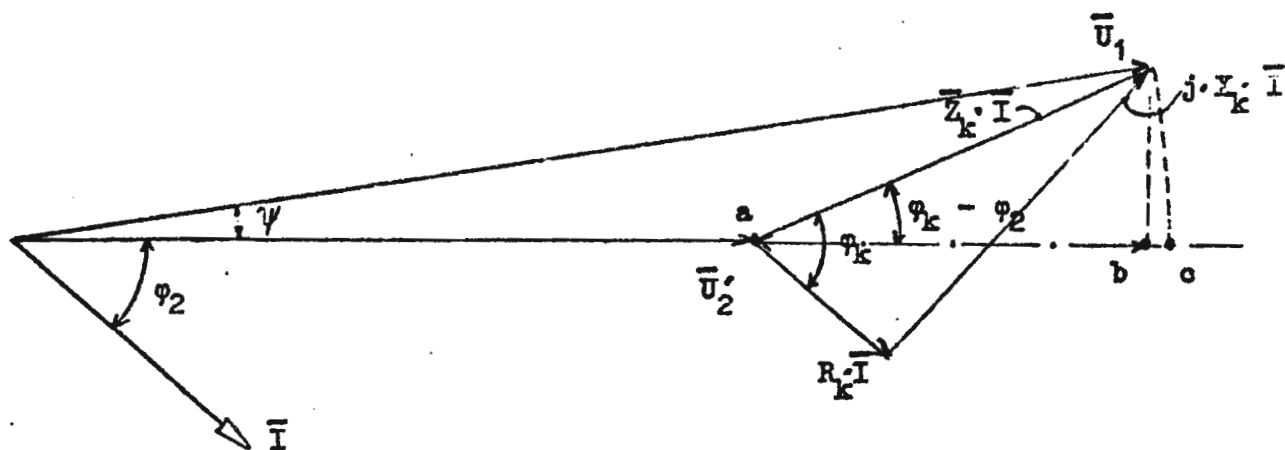
#### S4. Praktiskt uttryck för transformatorns spänningsfall.

Utgå från ersättningsschemat ;



Spänningsekvationen blir  $\bar{U}_1 = \bar{U}_2' + (R_k + j \cdot X_k) \cdot \bar{I}$

Visardiagrammet kan ritas:



Vid de praktiskt förekommande transformator konstruktionerna gäller att sträckan  $\bar{ab} \approx \bar{ao}$  d.v.s vinkeln  $\psi$  är liten.

Detta gäller vid både induktiv och kapacitiv belastning även vid fullastström ( ehuru självfallet med något sämre approximation vid kapacitiva fallet ).

Med denna approximation blir alltså

$$\Delta U' = U_1 - U_2' \approx \bar{ab}$$

Sträckan  $\bar{ab}$  kan uppfattas som projektionen av  $Z_k \cdot I$  på den horisontella riktningen.

$$\Delta U' = Z_k \cdot I \cdot \cos(\varphi_k - \varphi_2)$$

Med utveckling av det trigonometriska funktionsuttrycket erhålles

$$\Delta U' = Z_k \cdot \cos \varphi_k \cdot I \cdot \cos \varphi_2 + Z_k \cdot \sin \varphi_k \cdot I \cdot \sin \varphi_2$$

$$= R_k \cdot I \cdot \cos \varphi_2 + X_k \cdot I \cdot \sin \varphi_2$$

$$\Delta U' \approx R_k \cdot I_p + X_k \cdot I_q$$

där  $I_p$  respektive  $I_q$  är aktiv och reaktiv strömkomponent hos belastningsströmmen relativt belastningsspänningen.

På vanligt sätt skall  $\varphi_2$  räknas positiv vid induktiv belastningskaraktär och negativ vid kapacitiv, varvid  $I_q$  blir positiv respektive negativ.

Några kommentarer:

Vid stora transformatorer dominerar  $X_k$  över  $R_k$ , varvid spänningsfallet i stort bestäms av andra termen i uttrycket för  $U'$ .

Om  $\varphi_2 = \varphi_k$  blir spänningsfallet maximalt vid given ström. Endast i detta fall är  $\Delta U' =$  impedansspänningsfallets belopp  $Z_k \cdot I$ . (Rita visardiagram för detta fall!) I vissa beräkningar används impedansspänningsfallet vid given ström som mått på spänningsfallet under ogynnsammaste förutsättningar.

Observera att ovan givet uttryck för spänningsfallet även utnyttjas inom anläggningstekniken. Därvid tillåtes emellertid ofta betydligt större värden på  $R_k \cdot I$  och  $X_k \cdot I$  ( $R_k$  och  $X_k$  står för en överförings impedansegenskaper) relativt nominell bruksspänning, varför approximationen som regel är sämre än vid normalt konstruerade transformatorer. Framför allt bör man vara försiktig vid kapacitiva belastningsförhållanden.

### S5. Spänningsfallet i relativmått.

Vi definierar det relativa spänningsfallet som  $\Delta U : U_n$  varvid spänningsfall och märkspänning hänförs till samma sida.

Den relativa strömbelastningen eller belastningsgraden ur strömsynpunkt definierar vi som  $i = I : I_n$  varvid båda strömmarna skall vara hänförs till samma sida. Vi kan då skriva:

$$\Delta U = R_k \cdot I \cdot \cos \varphi_2 + X_k \cdot I \cdot \sin \varphi_2$$

$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{R_k \cdot I_n}{U_n} \cdot \frac{I}{I_n} \cdot \cos \varphi_2 + \frac{X_k \cdot I_n}{U_n} \cdot \frac{I}{I_n} \cdot \sin \varphi_2$$

$$\Delta u = i ( u_r \cdot \cos \varphi_2 + u_x \cdot \sin \varphi_2 )$$

eller

$$\Delta u = i \cdot u_k \cdot \cos ( \varphi_k - \varphi_2 )$$

## KRAFTTRANSFORMATORNES MÄRKNING.

När man diskuterar märkning och normer för transformatorer bör man observera att normerna skiljer på olika slag av transformatorer. I inledningen till normerna för krafttransformatorer anges särskilt att normerna ej gäller för bl.a. :

- a) Småtransformatorer ( 3 kVA vid enfasigt utförande och 5 kVA för trefasigt utförande.)
- b) Transformatorer med kontinuerligt variabel omsättning (vridtransformatorer, läckfältstransformatorer) .
- c) Strömriktartransformatorer.
- d) Starttransformatorer.
- e) Transformatorer för provningsändamål.
- f) Svetstransformatorer.
- g) Ugnstransformatorer.

Om särskilda svenska normer saknas för ovan nämnda slag av transformatorer eller för andra speciella trafon, kan krafttransformatornormerna helt eller delvis användas alltefter överenskommelse mellan leverantör och beställare.

### Driftförutsättningar för normernas giltighet:

De data och anvisningar, som lämnas av normerna om transformatorernas användning och utnyttjning, förutsätter vissa driftbetingelser för att åga giltighet. De förhållanden som vi i detta sammanhang framför allt intresserar oss för är kylmediernas temperaturer. Om driftbetingelserna ej är uppfyllda i detta avseende måste eventuellt transformatorns tillåtna belastning i kontinuerlig drift reduceras i förhållande till märkdata.

För luftkylda transformatorer förutsättes att lufttemperaturen ej överstiger + 40°C och ej understiger - 40°C. Härtill kommer vissa krav på luftens dygnsmedeltemperatur ( mindre än 30°C ) och årsmedeltemperatur ( mindre än 20° C ).

För vattenkylda transformatorer förutsättes att det tillförda kylvattnets temperatur är  $\leq 25^{\circ}\text{C}$ .

Den matande spänningens kurvform skall vara sinusformad.

Vid trefasiga transformatorer, som behandlas senare, förutsättes att systemspänningen är symmetrisk.

### Transformatorns märkdata.

De arbetsförhållanden för vilka en transformator är konstruerad - samma förhållanden gäller även för andra elektriska maskiner - bestämmer de s.k. märkvärdena. Dessa värden utgör också för leverantören bindande referensvärden för garantier m.p.konstruktion och prestationsförmåga. Märkvärdena anges på en särskild märkplåt eller märkskylt. Transformatornormerna anger närmare vad som bör finnas på skylten, som skall vara utförd av korrosionsbeständigt material. Texten skall vara varaktigt angiven genom exempelvis etsning eller gravering.

Bland de upplysningar vi finner på märkskylten skall vi här diskutera märkeffekt, märkspänningar, märkströmmar och omsättning.

#### Märkeffekten $S_n$ .

Den skenbara effekt vilken transformatorn är konstruerad för kallas märkeffekten. Märkeffekten avser kontinuerlig drift om inget annat anges. Om transformatorn har alternativa kylformer anges en märkeffekt för varje kylart. (Kylarter diskuteras i ett senare sammanhang!)

Allmänt begränsas märkeffekten för en elektrisk apparat av den uppvärmning isolationsmaterialet utsättes för till följd av det förlustvärme, som utvecklas i apparatens (maskinens) lindningar och järnkärnor. I allmänhet betyder därvid lindningarnas strömvärmeförluster mest. De omnämnda förlusterna bestäms väsentligen av aktuell spänning och ström oberoende av effektfaktorn. Det är därför brukligt att vid ett stort antal växelströmsmaskiner ange märkeffekten som en skenbar effekt i VA, kVA eller MVA.

#### Märkspänningarna $U_{1n}$ och $U_{2n}$ .

Märkspänningarna, en primär och en sekundär, är de spänningar som stämpats på märkskylten och vilka spänningar man ej bör överskrida under längre tid. Märkspänningen för en lindning avser spänningen mellan lindningens uttag och bestämmer den högsta flödestäthet för vilken kärnan är konstruerad. (En transformator skall för att vara normenlig kunna drivas med 5 % överspänning vid märkfrekvens och full märkeffekt utan att kärnan skadas vare sig genom överhettning eller onormal vibration. Härvid är driftströmmen lägre än märkströmmen och de totala förlusterna blir i allmänhet lägre än vid märkdrift.) Om en lindning påtryckes märkspänning i tomgång uppträder samtidigt märkspänning över övriga lindningar.

Om en lindning har flera uttag skall varje uttag ha sin märkspänning. Vanligen anges då märkspänningen för det s.k. huvudläget medan övriga lägens spänningar i allmänhet anges som ett procentuellt tillskott eller avdrag räknat i % av huvudlägets värde. Ex.  $140 \pm 10\% / 44 \text{ kV}$ .

Om en transformator är omkopplingsbar mellan olika märkspänningar skall varje kopplingssätt ha sin skylt.

Märkströmmarna  $I_{1n}$  och  $I_{2n}$ .

Märkströmmarna, en primär och en sekundär, är de strömmar som anges på märkskylten och vilkas värden man kontinuerligt ej bör överskrida.

Enligt normerna gäller följande samband mellan märkeffekt, märkström och märkspänning:

$$S_n = U_{1n} \cdot I_{1n} = U_{2n} \cdot I_{2n}$$

Märkströmmar uppträder samtidigt i en tvålindningstransformators båda lindningar. Vid alternativa kylarter anges märkströmmarna för varje kylart separat.

Vid lindningar med flera uttag brukar en konstant märkeffekt gälla ned till ett visst s.k. gränsläge det s.k. gränsläget för konstant effekt. Från detta och nedåt anges i stället en konstant märkström, vilket innebär att märkeffekten avtar i samma proportion som märkspänningen för motsvarande lindningsuttag.

#### Omsättningen.

Man har stundom intresse av att tala om olika slags omsättning för transformatorer. Normerna definierar endast ett omsättningsbegrepp nämligen förhållandet mellan den högre och lägre av de båda lindningarnas märkspänningar i en tvålindningstransformator. Nyss definierade omsättning kallas stundom för tydlighets skull märkspänningsomsättningen.

Vi har tidigare även talat om lindningsomsättningen som förhållandet mellan lindningsvarvtalen. För krafttransformatorer gäller att lindningsomsättningen kan beräknas som märkspänningarnas förhållande.

## PROCENTUELLA OCH RELATIVA STORHETER.

Då man diskuterar och jämför strömmar, spänningar, effekter och impedanser hos olika maskiner och system sker detta lämpligen genom att de olika storheternas värden anges i procent av eller i relation till vissa s.k. basstorheter (referensstorheter). När så sker talar man om den aktuella storhetens procentuella eller relativa värde. (De procentuella och relativa värdena skiljer sig åt endast genom att mätetalet för den procentuellt uttryckta storheten är 100 gånger mätetalet för den relativa storheten.)

I engelsk-språkig litteratur talar man vid relativangivelse om p.u. som står för per unit = räknat per enhet. Man talar om ett p.u.-värde.

När det gäller val av basstorheter för de fyra nämnda storhetstyperna kan man välja två av dem godtyckligt, varefter de övriga är bestämda enligt ellärans kända lagar.

Om vi exempelvis väljer basströmmen  $I_b$  och basspänningen  $U_b$  kommer vår baseffekt att bestämmas som  $S_b = U_b \cdot I_b$  och vår basimpedans som  $Z_b = U_b : I_b$ . Vid elektriska maskiner är det ofta lämpligt att välja märkspänningen  $U_n$  som basspänning och märkströmmen  $I_n$  som basström. Då blir baseffekten  $S_b = U_n \cdot I_n$  och basimpedansen  $Z_b = U_n : I_n$ .

I ett konsekvent genomfört relativsystem kan man räkna med alla ellärans kända lagar. Enda nackdelen är att man ej kan genomföra enhets- och dimensionsanalyser eftersom alla storheter är dimensionslösa.

Vår avsikt är inte att utnyttja relativangivelser i nyss antytt sammanhang utan vi vill utnyttja relativangivelser för att introducera ytterligare intressanta märkstorheter för transformatorer.

### Transformatorns relativa (procentuella) storheter.

För transformatorer har vi olika basvärden (med undantag för effekten) beroende på vilken sida vi arbetar. De olika sidornas basstorheter förhåller sig på samma sätt som primära och sekundära storheter enligt tidigare genomgångna transformationslagar.

$$\frac{U_{1b}}{U_{2b}} = \frac{N_1}{N_2} ; \quad \frac{I_{1b}}{I_{2b}} = \frac{N_2}{N_1} ; \quad \frac{Z_{b1}}{Z_{b2}} = \left[ \frac{N_1}{N_2} \right]^2 ; \quad S_{b1} = S_{b2} ;$$

Basimpedansen, som vi ofta kommer att använda oss av i fortsättningen, kan alltså skrivas

$$Z_b = \frac{U_n}{I_n} = \frac{U_n^2}{U_n \cdot I_n} = \frac{U_n^2}{S_n}$$

I anslutning till spänningsförlusttriangeln definierar vi vid märkström  $I_n$

resistansspänningen  $U_{rn} = R_k \cdot I_n$  ;

reaktansspänningen  $U_{xn} = X_k \cdot I_n$  ;

impedansspänningen  $U_{zn} = Z_k \cdot I_n$  ;

$Z_k \cdot I_n$  brukar ofta även kallas kortslutsspänningen och symboliseras  $U_{kn}$  .

Vi uttrycker nu de ovan givna spänningarna i relativmätt med den aktuella sidans märkspänning som basspänning, varvid vi får följande relativa storheter:

den relativa resistansspänningen  $u_r = \frac{R_k \cdot I_n}{U_n}$  ;

den relativa reaktansspänningen  $u_x = \frac{X_k \cdot I_n}{U_n}$  ;

den relativa impedansspänningen  $u_z = \frac{Z_k \cdot I_n}{U_n}$  ;

eller om vi så önskar

den relativa kortslutningsspänningen  $u_k = \frac{Z_k \cdot I_n}{U_n}$  ;

Man bör observera att de relativa storheterna är oberoende av på vilken sida man arbetar.

Ur uttrycken ovan får vi bl.a.

$$\begin{aligned} R_k &= u_r \cdot \frac{U_n}{I_n} = u_r \cdot Z_b ; \\ X_k &= u_x \cdot \frac{U_n}{I_n} = u_x \cdot Z_b ; \\ Z_k &= u_k \cdot \frac{U_n}{I_n} = u_k \cdot Z_b ; \end{aligned}$$

Mellan de relativa storheterna råder samma formella samband som mellan  $R_k$ ,  $X_k$  och  $Z_k$ , alltså:

respektive

$$\begin{aligned} u_k &= \sqrt{u_r^2 + u_x^2} ; \\ u_r &= u_k \cdot \cos \varphi_k ; \\ u_x &= u_k \cdot \sin \varphi_k \end{aligned}$$

$$F = 9,44 \cdot 10^8 \text{ FAN} \cdot (??)$$

63 R1

## NÅGRA SPECIELLA TRANSFORMATÖRFÖRHÅLLANDEN UTTRYCKTA MED RELATIVA STORHETER.

### 1. Transformatorns relativa spänningsförlust.

Transformatorns relativa spänningsförlust  $\Delta u$  definieras som kvoten mellan spänningsförlusten  $\Delta U$  och märkspänningen  $U_n$  hänfödda till samma sida, alltså

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_n}$$

Låt oss på liknande sätt definiera den relativa strömmen  $i$  som kvoten mellan den aktuella strömmen och märkströmmen båda hänfödda till samma sida, alltså

$$i = \frac{I}{I_n}$$

Som ett uttryck för spänningsförlusten  $\Delta U$  använder vi tidigare diskuterat uttryck, nämligen

$$\Delta U = R_k \cdot I \cdot \cos \varphi_2 + X_k \cdot I \cdot \sin \varphi_2$$

och skriver

$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{R_k \cdot I_n}{U_n} \cdot \frac{I}{I_n} \cdot \cos \varphi_2 + \frac{X_k \cdot I_n}{U_n} \cdot \frac{I}{I_n} \cdot \sin \varphi_2 ;$$

eller

$$\Delta u = i \cdot (u_r \cdot \cos \varphi_2 + u_x \cdot \sin \varphi_2)$$

vilket uttryck är oberoende av på vilken sida vi utför våra beräkningar.

Om vi använt det alternativa skrivsättet för  $\Delta U$ , nämligen

$$\Delta U = Z_k \cdot I \cdot \cos(\varphi_k - \varphi_2)$$

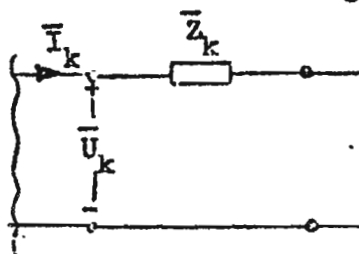
antar uttrycket för den relativa spänningsförlusten utseendet:

$$\Delta u = i \cdot u_k \cdot \cos(\varphi_k - \varphi_2)$$

### 2. Egenskaper hos transformatorn i stationär kortslutning.

#### 2.1. Erforderlig spänning för att få märkström i lindningarna vid kortsluten transformator (kortslutningsprov).

Vi önskar skaffa oss en uppfattning om hur stor matande spänning vi behöver applicera på primärsidan vid ett kortslutningsprov. Utgå från beräkningsschemat i figuren.



Allmänt gäller  $U_k = Z_k \cdot I_k$

Speciellt fås om  $I_k = I_n$

$$U_{kn} = Z_k \cdot I_n$$

Vi uttrycker  $U_{kn}$  i relativmätt med märkspänningen  $U_n$  som basspänning, alltså

$$\frac{U_{kn}}{U_n} \Rightarrow \frac{Z_k \cdot I_n}{U_n} \Rightarrow u_k$$

Härur fås

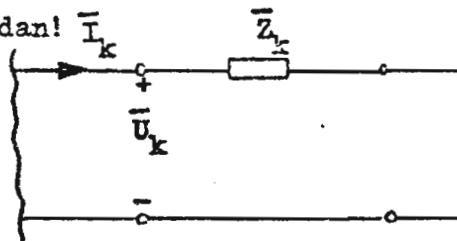
$$U_{kn} = u_k \cdot U_n$$

vilket resultat kan formuleras: För att erhålla märkström i lindningarna vid en kortsluten trafo skall man ansluta en primärspänning (matningsspänning) som är bråkdelen  $u_k$  av märkspänningen på matningssidan.

## 2.2. Kortslutningsströmmen genom en transformators lindningar om transformatorn matas med märkspänning.

I samband med bedömning av kortslutningsströmmars storlek och verkan intresserar ofta frågan hur stor kortslutningsströmmen blir om transformatorn primärt matas av ett oändligt starkt nät med en spänning = transformatorns märkspänning och sekundärt kortslutes.

Utgå från beräkningsschemat i figuren nedan!



Med  $U_k = U_n$  fås  $I_k = \frac{U_k}{Z_k} \Rightarrow \frac{U_n}{Z_k}$

Låt oss uttryck kortslutningsströmmen i relativmätt med märkströmmen som basström, alltså

$$i = \frac{I_k}{I_n} \Rightarrow \frac{U_n}{Z_k \cdot I_n} \Rightarrow \frac{1}{u_k}$$

Härur fås

$$I_k = \frac{1}{u_k} \cdot I_n$$

2.3. Den skenbara effekt som en transformator förbrukar vid kortslutning om den primärt matas med märkspänning.

Vid kortslutningsberäkningar i elektriska nät har man ofta användning av begreppet delkortslutningseffekten för en transformator. Härmed menas helt enkelt den skenbara effekt som transformatorn förbrukar om den primärt matas med märkspänning och sekundärt kortslutes.

Vi får enkelt utgående från tidigare härledda resultat :

$$S_k = S_{kn} \Rightarrow U_n \cdot I_{kn} \Rightarrow U_n \cdot \frac{I_n}{u_k} \Rightarrow \frac{S_n}{u_k} \quad \text{alltså}$$

$$S_{kn} = \frac{S_n}{u_k}$$

### Normaldata för krafttransformatorer.

Man kan ej ange generella data för krafttransformatorer, eftersom utförandet oftast anpassas från fall till fall efter föreliggande önskemål. De i fortsättningen angivna data får därför endast fattas som mycket grova medelvärden.

#### Tongångsström:

|                       |      |      |      |       |
|-----------------------|------|------|------|-------|
| Storlek kVA           | 10   | 100  | 1000 | 10000 |
| $I_o : I_n$ vid $U_n$ | 0,10 | 0,05 | 0,02 | 0,015 |

Vid kallvalsad plåt fås 5 - 10 % lägre värden.  $I_o$  är visserligen, som tidigare framhållits ganska liten relativt  $I_n$  men summa tongångsströmmar från många transformatorer i ett nät kan ha stor betydelse för de reaktiva effektförhållandena.

#### Tongångsförluster: ( $P_o \approx P_{Fe}$ )

|             |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| $S_n$ kVA   | 10    | 100   | 1000  | 10000 |
| $P_o : S_n$ | 0,015 | 0,006 | 0,003 | 0,002 |

För  $S_n$  större än 10 kVA fås förluster mindre än 0,002.

Dessa förluster är viktiga vid bedömning av transformatorns ekonomi. Effektfaktorn i tongång är av storleksordningen 0,05 - 0,25, alltså ett lågt värde.

#### Reaktans :

Reaktansen varierar dels med märkeffekten  $S_n$ , dels med högsta märkspänningen  $U_n$  så att den ökar med ökande  $S_n$  och  $U_n$ .

Med transformatorns reaktans menas vad man vill kalla dess naturliga reaktans, d.v.s. det reaktansvärde man erhåller vid beräkning av den

67  
mest ekonomiska transformatorn utan att eftersträva viss reaktans.

Högsättningstransformatorer får alltid större  $X_x$  och därmed större  $u_x$  ty vid högre spänningar tar lindningarna större utrymme på g.s. ökad isolation. Härvid erhålles ökande läckfält och därmed större naturlig reaktans. Det är alltid dyrare att beställa en transformator med annan reaktans än den naturliga.

Reaktansen har stor betydelse för kortslutningsströmmar, stabilitet i driften, spänningsförhållanden, parallelldrift mellan transformatorer.

|                      |                 |
|----------------------|-----------------|
| Små transformatorer  | $0,01^x - 0,02$ |
| Medelstora trafon    | $0,03 - 0,05$   |
| Stora trafon         | $0,10 - 0,12$   |
| Kycket stora trafon  | $0,16 - 0,17$   |
|                      |                 |
| Trafon för 6 - 10 kV | $0,025 - 0,060$ |
| 20 kV                | $0,045 - 0,070$ |
| 30 kV                | $0,060 - 0,080$ |
| 40 kV                | $0,07 - 0,10$   |
| 60 kV                | $0,08 - 0,11$   |
| 120 kV               | $0,09 - 0,14$   |
| 230 kV               | $0,11 - 0,16$   |

De svenska trafona för 230 kV har specialbeställts med  $u_x = 0,10$ .

Belastningsförluster:

|                     |      |      |       |       |
|---------------------|------|------|-------|-------|
| $S_n$ kVA           | 10   | 100  | 1000  | 10000 |
| $P_{bn}: S_n = u_r$ | 0,03 | 0,02 | 0,015 | 0,007 |

För  $S_n$  större än 10 MVA fås  $u_r$  mindre än 0,004.

## TRANSFORMATORS FÖRLUSTER OCH VERKNINGSGRAD.

Då man talar om en transformators förluster menas om inget annat sägs aktiva förluster. Man skiljer på tomgångsförluster ( $P_o$ ) och belastningsförluster ( $P_b$ ). Till dessa förluster kommer vissa dielektriska förluster. Dessa är dock i allmänhet relativt små jämfört med de ovan nämnda förlustslagen, varför de försummas i den fortsatta diskussionen.

Summan av tomgångs- och belastningsförluster kallas de totala förlusterna ( $P_f$ ).

### 1. Tomgångsförlusterna $P_o$ .

Med tomgångsförlusterna  $P_o$  hos en transformator menas den aktiva förlusteffekt, som en transformator förbrukar när primärlindningen påtryckes en spänning lika med märkspänningen och med märkfrekvens, varvid övriga lindningar är öppna.

Med krafttekniska förutsättningar är de av tomgångsströmmen orsakade strömvärmeförlusterna i primärlindningen ( $R_1 \cdot I_o^2$ ) i regel så små att de helt kan försummas invid järnförlusterna ( $P_{Fe}$ ), som är det helt dominerande förlustslaget i tomgång :

$$P_o = P_{Fe} + R_1 \cdot I_o^2 \approx P_{Fe}$$

Tomgångsförlusterna bestäms vid märkspänning och märkfrekvens vid ett tomgångsprov, varvid spänningen skall vara sinusformad. Stundom överenskommes att motsvarande förluster bestäms även vid andra spänningar.

Tomgångsförlusterna anges ofta i relativmått med märkeffekten som baseffekt. Beroende på transformatorns storlek ( märkeffekt ) varierar relativvärdet så att det minskar med ökande transformatorstorlek. Storleksordningar från 0,01 vid 10 kVA och mindre än 0,002 vid storlekar större än 10 MVA är normalt förekommande mätetal. Se vidare avsnittet om normaldata för krafttransformatorer!

Vid konstant primärspänning kan  $P_o$  anses konstant enligt transformatornormerna. ( Egentligen bestäms  $P_{Fe}$  av  $B^2$  vid konstant frkvens, varvid  $B$  bestäms av  $E$  enligt transformatorformeln. Den lille variation i  $P_{Fe}$  som beror på ändringen i primärlindningens spänningsförlust vid varierande belastning anses försumbar.)

Vid varierande primärspänning får tomgångsförlusterna anses variera kvadratisk med primärspänningen :

$$\frac{P_{o2}}{P_{o1}} = \left[ \frac{U_2}{U_1} \right]^2$$

Ekonomiskt spelar tomgångsförlusterna ofta en stor roll, speciellt vid vid transformatorer med liten utnyttjningstid.

Vid större transformatorer utnyttjas stundom förlustvärmets till uppvärmning av lokaler.

## 2. Belastningsförlusterna $P_b$ .

Belastningsförlusterna är de förluster som uppstår då transformatorn belastas och det flyter ström i transformatorns lindningar. Om inget annat sägs menar man med belastningsförlusterna de förluster, som uppträder vid märkström av märkfrekvens och med sinusform. För att understryka att förlusterna gäller vid märkström indiceras de ofta med ett extra n, alltså  $P_{bn}$ . Belastningsförlusterna är i regel märkbart större än de förluster, som svarar mot de likströmsmätta lindningsresistansernas effektförbrukning vid samma ström. Förlustökningen härrör från de s.k. tillsatsförlusterna ( $P_t$ ).

Vi skriver

$$P_b = P_{Cu} + P_t$$

varvid  $P_{Cu}$  står för de rena kopparförlusterna eller som de också kallas likströmsbestämda förlusterna.

Tillsatsförlusterna härrör dels från strömförträngning i lindningarna, dels från virvelströmsförluster i massiva konstruktionsdetaljer, huvudsakligen av järn. Dessa virvelströmsförluster orsakas av lindningsresistansernas läckflöden och beror i hög grad av transformatorns kapsling. Det bör påpekas att transformatorn bör provas nedsänkt i sin oljelåda för att representativa tillsatsförluster skall uppmätas.

Tillsatsförlusterna i normala transformatorer är av storleksordningen 10 % av de likströmsbestämda förlusterna men kan vid olämpliga lindningsarrangemang uppgå till mångdubbla värdet.

Belastningsförlusterna bestäms lämpligen ur ett kortslutningsprov som

$$P_b = R'_k \cdot I_1^2 = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2$$

där  $R_1$  och  $R_2$  är lindningarnas effektiva växelströmsresistanser.

Genom att i samband med kortslutningsprovet likströmsmätta lindningsresistanserna och omräkna dem till samma sida från vilken kortslutningsprovet utförts kan tillsatsförlusterna beräknas som skillnaden mellan  $P_b$  och  $P_{Cu}$  ;

$$P_b = P_{Cu} + P_t = (R_{11} + R'_{21}) \cdot I_1^2 + P_t$$

där  $R_{11}$  och  $R_{21}$  är respektive lindningars likströmsmätta resistansvärden.

Enligt normerna förutsättes att belastningsförlusterna hänföres till driftvarmt tillstånd. Därvid måste oftast en temperaturomräkning ske, varvid likströms- och tillsatsförluster omräknas på tidigare diskuterat sätt.

Vid varierande belastning och därmed ström, anses förlusterna variera kvadratisk med belastningsströmmen :

$$P_{bn} = R_k \cdot I_n^2 \quad \text{och} \quad P_b = R_k \cdot I^2$$

ger

$$\frac{P_b}{P_{bn}} = \left( \frac{I}{I_n} \right)^2$$

Belastningsförlusterna vid märkström anges på samma sätt som tomgångsförlusterna i relativmätt med märkeffekten som baseffekt. De relativa belastningsförlusterna avtar med ökande transformatorstorlek från ca 0,03 vid 10 kVA till mindre än 0,004 vid storlekar större än 10 MVA. Se avsnittet om normaldata för krafttransformatorer.

Ur definitionen av  $P_{bn}$  följer:

$$\frac{P_{bn}}{S_n} = \frac{R_k \cdot I_n^2}{U_n \cdot I_n} = \frac{R_k \cdot I_n}{U_n} = u_r$$

som i sin tur ger

$$P_{bn} = u_r \cdot S_n$$

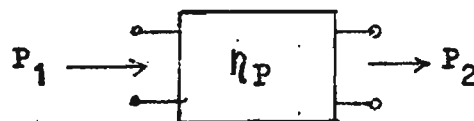
vilket samband är synnerligen bekvämt att använda vid beräkning av  $P_{bn}$  ur en transformators märkdata.

### 3. Two different efficiency concepts.

När man talar om verkningsgraden för en transformator skiljer man på

a) effektverkningsgraden

$$\eta_P = \frac{P_2}{P_1};$$



b) energiverkningsgraden

$$\eta_W = \frac{W_2}{W_1} = \frac{\int_0^{T_d} P_2 \cdot dt}{\int_0^{T_d} P_1 \cdot dt};$$



Observera att energiverkningsgraden alltid avser en viss tid, drifttiden  $T_d$ . I det allmänna fallet är  $\eta_P$  och  $\eta_W$  ej lika till måttal. Endast om  $P_2$  och  $P_1$  är konstanta under hela den aktuella drifttiden blir  $\eta_W = \eta_P$ .

I fortsättningen diskuterar vi framför allt effektverkningsgraden. Vad som därvid säges är i vissa delar tillämbart även på energiverkningsgrad.

#### 4. Bestämning av verkningsgraden genom förlustsummering.

Enligt normerna skall verkningsgraden bestämmas genom förlustsummering. Detta innebär att man mäter endera av  $P_1$  eller  $P_2$  samt förlusterna  $P_o$  och  $P_b$ , varefter nedan givna samband utnyttjas (det som passar) :

$$\eta_P = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_f}{P_1} = 1 - \frac{P_f}{P_1} = 1 - \frac{P_f}{P_2 + P_f}$$

där  $P_f = P_o + P_b$  = de totala förlusterna.

Orsaken till att denna metod används är att  $P_2$  och  $P_1$  skulle bli mycket lika varandra p.g.a. en transformators normalt små förluster. Detta i sin tur skulle medföra relativt dålig noggrannhet i den bestämda verkningsgraden. Metoden med förlustsummering används även vid andra elmaskiner.

#### 5. Beräkning av verkningsgraden vid varierande belastningsgrad.

##### a. Olika driftförhållanden för transformatorer.

Vid diskussion av verkningsgraden vid varierande uttagen belastning bör man för att ge entydighet åt beräkningarna först definiera transformatorns driftförhållanden. Allt efter transformatorns plats och användning i kraftsystemet kan man därvid särskilja följande fall:

- 1) Transformatorn arbetar med konstant primärspänning men, om styrmöjligheter saknas, med varierande sekundärspänning allt efter uttagen belastning. Ett exempel härpå skulle en transformator för upptransformering i en generatorstation kunna vara.
- 2) Transformatorn arbetar med konstant sekundärspänning men med varierande primärspänning då belastningen varierar, om extra regleruttag saknas. Ett sådant driftfall skulle man kunna tänka sig existera då transformatorn används som distributionstransformator i ett lågspänningsnät.
- 3) Ett slag blandad funktion där såväl primär- som sekundärspänning varierar med belastningen.

##### b. Förutsättningar för den följande beräkningen av verkningsgrad.

Vi antar då vi i fortsättningen skall diskutera verkningsgradförhållanden vid varierande belastning att vi hela tiden håller sekundärspänningen konstant. Därvid får vi också enligt normerna anse tomgångsförlusterna konstanta. Vi förutsätter vidare att den sekundära spänningen = märkspänning, varför  $P_o = P_{on}$ .

Vi definierar belastningsgraden  $x = \frac{S_2}{S_n}$  d.v.s. som förhållandet mellan

den uttagna skenbara effekten och märkeffekten. Belastningsgraden skulle också kunna kallas den uttagna relativa skenbara effekten.

Med våra förutsättningar innebär belastningsgraden också

$$x = \frac{U_{2n} \cdot I_2}{U_{2n} \cdot I_{2n}} = \frac{I_2}{I_{2n}}$$

d.v.s. den är ett uttryck för den relativa strömmen.

Belastningsförlusterna vid belastningsgraden  $x$  kan därför skrivas

$$P_{bx} = x^2 \cdot P_{bn}$$

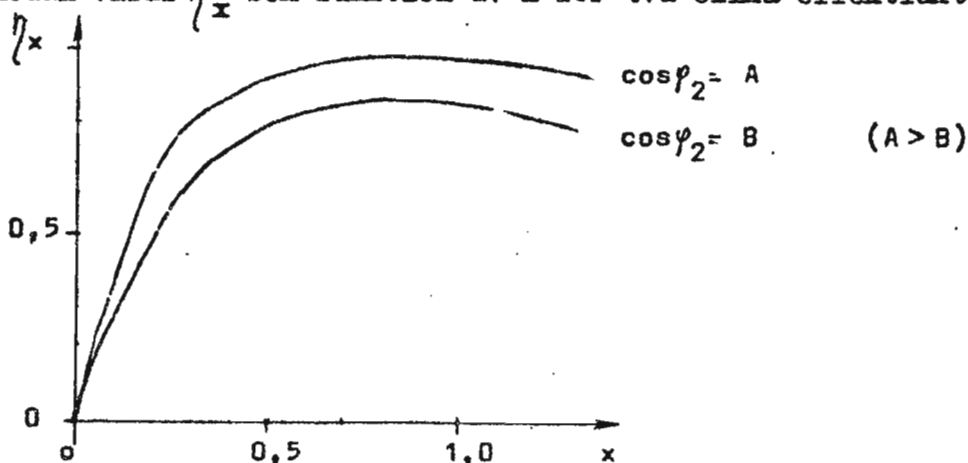
c. Uttryck för effektverkningsgraden vid belastningsgraden  $x$ .

För effektverkningsgraden vid belastningsgraden  $x$  kan vi skriva

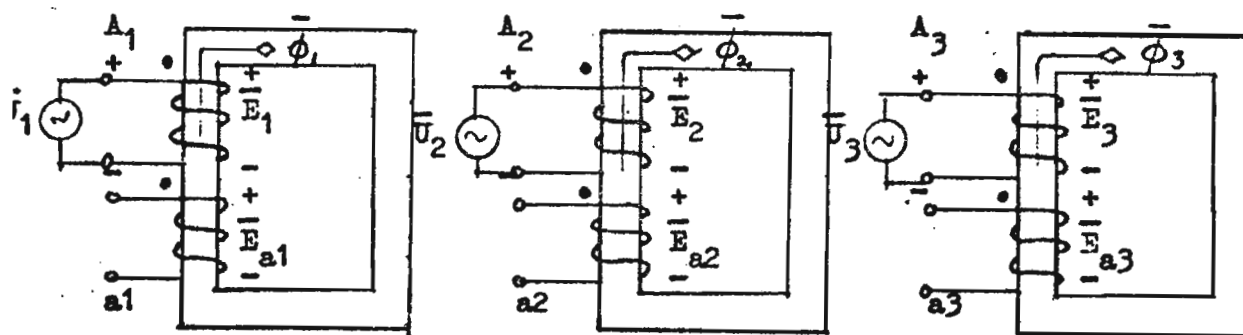
$$\eta_x = \frac{P_{2x}}{P_{1x}} = \frac{P_{2x}}{P_{2x} + P_o + P_{bx}} = \frac{U_{2n} \cdot I_2 \cos \varphi_2}{U_{2n} \cdot I_2 \cos \varphi_2 + P_o + P_{bx}}$$

$$\eta_x = \frac{x \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2}{x \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2 + P_o + x^2 \cdot P_{bn}}$$

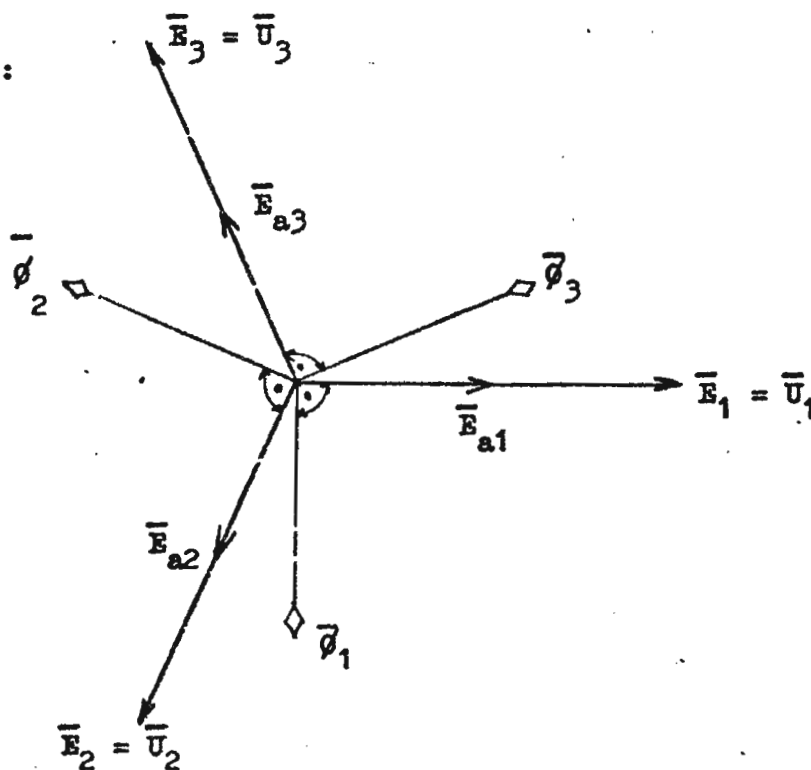
I figuren nedan visas  $\eta_x$  som funktion av  $x$  för två olika effektfaktorer.



I tomgång är självfallt verkningsgraden 0 för att därefter öka till ett maximum. Genom att derivera  $\eta_x$  m.a.p.  $x$  vid konstant effektfaktor fås att maximum inträffar för  $x = \sqrt{P_o : P_{bn}}$  vilket innebär att vi får maximum för den belastningsgrad vid vilken  $P_{bx} = x^2 \cdot P_{bn} \Rightarrow P_o$  d.v.s. vid den belastningsgrad för vilken belastningsförluster och tomgångsförluster är lika. Denna belastningsgrad kan påverkas konstruktivt genom avvägning mellan  $P_o$  och  $P_{bn}$ . Vanligen inträffar maximum för  $x$  något mindre än 1.

1. Principiell uppbyggnad.

Visardiagram:



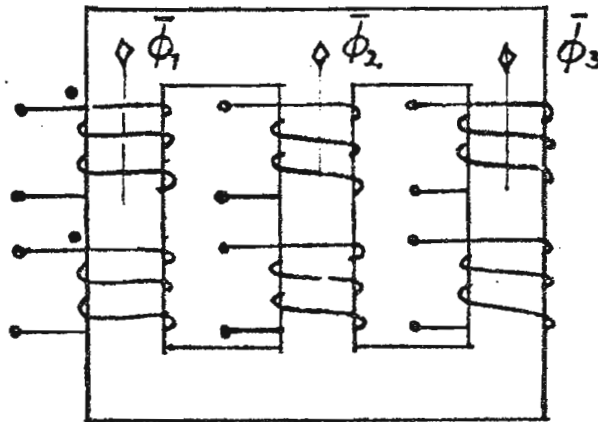
Vi har utgått från tre identiska enfastransformatorer, vars lindringar  $A_1$ ,  $A_2$  och  $A_3$  har anslutits till ett symmetriskt trefassystems spänningar  $\bar{U}_1$ ,  $\bar{U}_2$  och  $\bar{U}_3$ . Vi har antagit trafona ideella t.v.

De tre enheternas förhållanden är identiska så när som på fasförskjutningen. Vi observerar p.g.a. symmetrin att

$$\bar{\phi}_1 + \bar{\phi}_2 + \bar{\phi}_3 = 0$$

De tre återledande benen skulle alltså kunna slås samman till ett enda ben. Detta var ett mellanled i utvecklingen mot moderna trefastransformatorer. Det gemensamma återledande benet skulle också kunna utelämnas eftersom momentana summan av de tre flödena i varje ögonblick är noll. (De tre benen tjänstgör som återledare för varandra i olika tidögonblick! Jämför liknande förhållanden i ett tretråds trefassystem!)

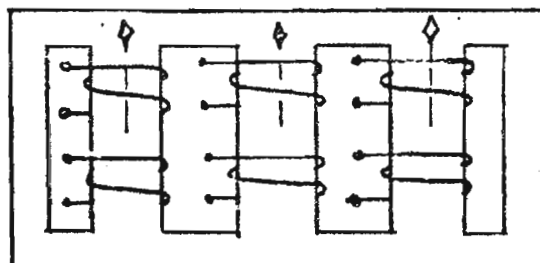
En trebent trefastransformator ser principiellt ut som figuren överst å nästa blad visar.



Flödena bestäms av de påtryckta spänningarna enligt transformatorformeln. De strömmar som fordras för att driva fram flödena i de olika benen blir ej riktigt lika stora eftersom ytterbenens flöden har att gå något längre väg. Detta märks väl vid tomgångsmätning av strömmarna.

I trefastransformatorn ovan kan varje ben betraktas som en enfastransformator. För varje ben gäller alltså de samband vi tidigare gått igenom för enfastransformatorn. Detta utnyttjar vi vid beräkningar på symmetriska trefastransformatorer. Ur driftsympunkt föreligger vid normala och symmetriska belastningsförhållanden inga väsentliga skillnader mellan tre enfaseenheter och en trefaseenhet. Möjligen kan påpekas att man med fyra enfaseenheter har en enhet i reserv för någon av de övriga tre, vilket skulle innebära vissa fördelar ur driftsympunkt.

Vid onormala, osymmetriska driftförhållanden ( även vid vissa osymmetriska belastningsförhållanden ) föreligger dock skillnader så tillvida att flödena ej uppfyller summavillkoret att vara 0 i varje ögonblick. Då har trefaseenheten enligt ovan ej någon returväg för flödena på samma sätt som varje enfaseenhet har. Därvid tvingas flödena utanför kärnan, d.v.s. läckningen och därmed läckreaktansen kan öka vilket påverkar bl.a. förluster och spänningsfall. Beroende på sådana drifttekniska fordringar, konstruktionstekniska problem, ekonomiska aspekter och vid stora krafttransformatorer även transporttekniska problem, utföras trefastransformatorer bl.a. fembenta enligt figur nedan.



Den trebenta trafon har mindre kärna, volym och vikt än de övriga alternativen och är därmed även klart prisbilligare.

## 2. De normala kopplingssätten av trefastransformatorer.

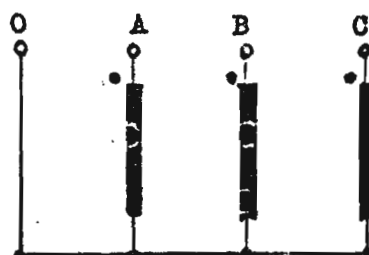
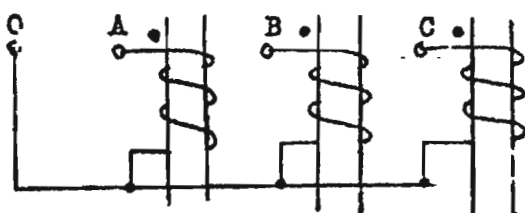
T3

De till samma sida hörande lindningarna (högspänningslindningarna resp. lågspänningslindningarna) kopplas normalt på något av följande sätt :

1. Y-koppling
2. D-koppling
3. Z-koppling. (mindre vanligt kopplingssätt)

### Y-koppling.

Likvärdiga lindningsuttag hopkopplas till en stjärnpunkt. Stjärnpunkten (nollpunkten) förses ofta med ett uttag. Detta symboliseras Y-0 .



Normerat, alternativt ritsätt.

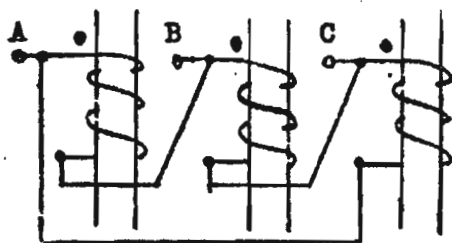
Ann. Man skulle lika väl ha kunnat sammankoppla A, B och C till nollpunkt.

Detta har inverkan på sekundärsidans faslägen. Vi återkommer till

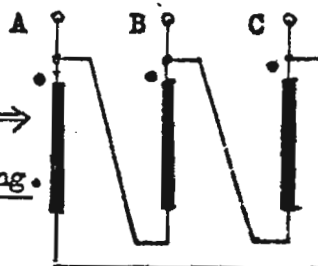
detta i samband med visardiagram och diskussion av olika kopplingsgrupper.

### D-koppling.

"Början" på en lindningsfas kopplas till "slutet" på nästa eller tvärtom.



annat sätt  
att koppla  $\Rightarrow$   
en D-koppling.

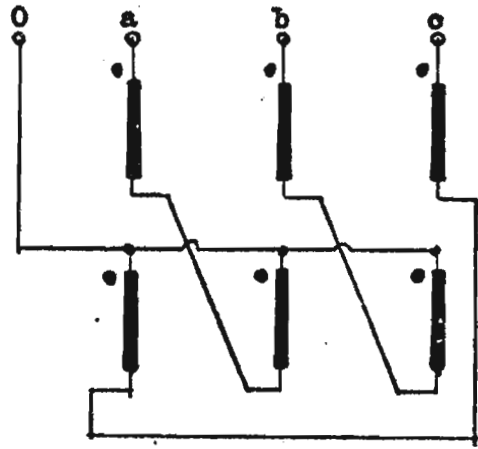
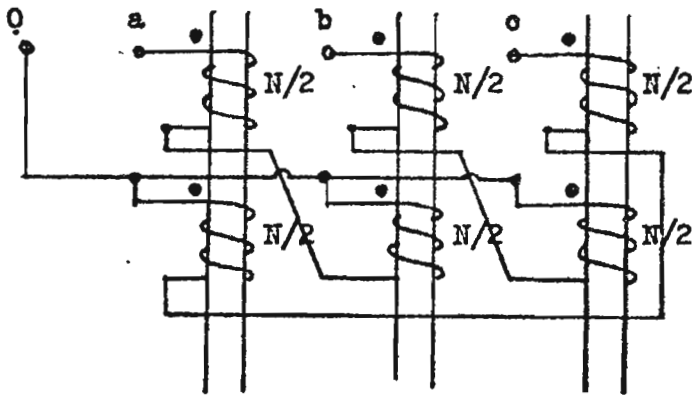


Ann. Flera olika kopplingssätt är tänkbara. Skillnaderna återkommer i sekundärspänningarnas faslägen. Jämför vad som sagts i ann. till Y-koppling ovan!

### Z-koppling.

Z-koppling förekommer endast på sekundärsidan av transformatorer, vars primärsida Y-kopplas. Man uppnår därvid vissa önskvärda förhållanden ur snedbelastningssympunkt. Z-koppling förekommer också som "provisorisk" koppling vid spänningsomläggning.

Förutsättning för Z-koppling är att varje fas har två identiska lindningshalvor. (Vid en Y-koppling skulle dessa halvor seriekopplas )



Ovan har samma Z-koppling ritats "utförligt" och på normerat, förenklat sätt. Alternativa kopplingsätt för Z-koppling är tänkbara.

### 3. Exempel på olika trefaskopplingar och tillhörande visardiagram (spänningsdiagr.)

Vi skall nedan studera några olika exempel på trefaskopplingar och deras tillhörande spänningsdiagram.

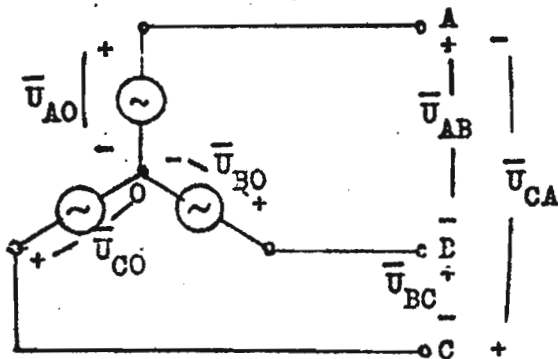
Lindningarna ritas symboliskt som rektanglar enligt exempel ovan.

Relativa polariteten på lindningändar anges genom polaritetsmarkeringar.

Om polaritetsmarkeringar ej är utsatta förutsättes enligt normerna att ändar som ritas åt samma håll är likvärdiga ur polaritetssynpunkt.

I samtliga exempel förutsätter vi att primärsidan anslutes till en given, symmetrisk trefasspänning: fasspänningarna  $\bar{U}_{AO}$ ,  $\bar{U}_{BO}$  och  $\bar{U}_{CO}$  samt huvudspänningarna  $\bar{U}_{AB}$ ,  $\bar{U}_{BC}$  och  $\bar{U}_{CA}$ . Det givna systemets visardiagram med  $\bar{U}_{AO}$  som riktfas visas nedan.

I varje exempel tar vi till uppgift att med kännedom om kopplingsätt och lindningsomsättning bestämma sekundärsidans spänningsdiagram.



#### 1. Y/Y-0 koppling.

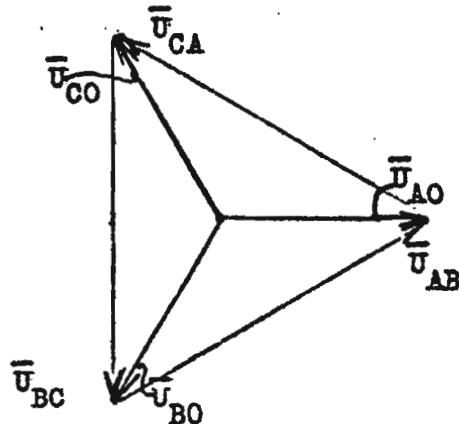
Två alternativ enligt särskilt blad.

#### 2. D/Y-0 koppling.

Två alternativ enligt särskilt blad.

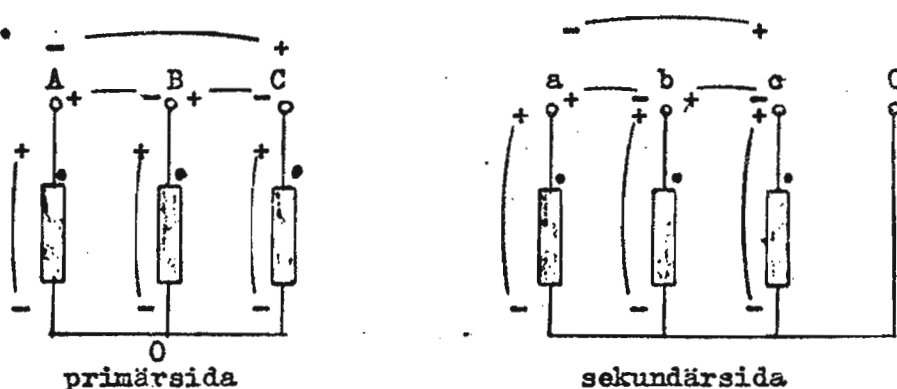
#### 3. Y/Z-0 koppling.

Se särskilt blad!



# 1. Y/Y-0 koppling.

Alt. 1.



Referensval för spänningarna på sekundärsidan (små bokstäver) framgår av figur ovan.

Mellan huvud- och fasspänningar på sekundärsidan råder sambanden (enl. XII.)

$$\bar{U}_{ab} = \bar{U}_{a0} - \bar{U}_{b0} ; \quad \bar{U}_{bc} = \bar{U}_{b0} - \bar{U}_{c0} ; \quad \bar{U}_{ca} = \bar{U}_{c0} - \bar{U}_{a0} ;$$

Plats för visardiagram:

Obs! spänningar över lindningar på samma ben är faslika om referensvalet är likvärdigt med hänsyn till polaritetsmärkena.

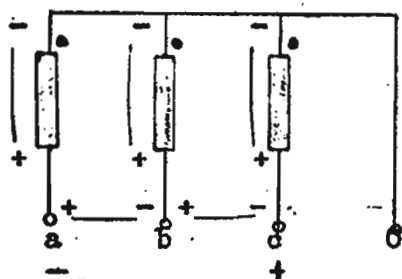
Alt. 2.

Samma primärsida som ovan men sekundärsidan enligt nedan.

Observera vi kallar linjeuttagen på sekundärsidan a, b och c.

Visardiagram kan ritas nedan till höger eller ev. ovan.

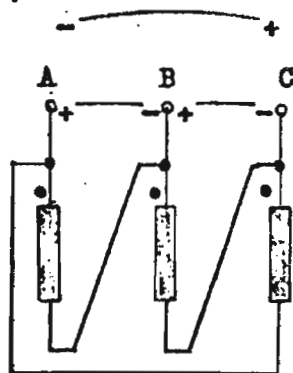
sekundärsida



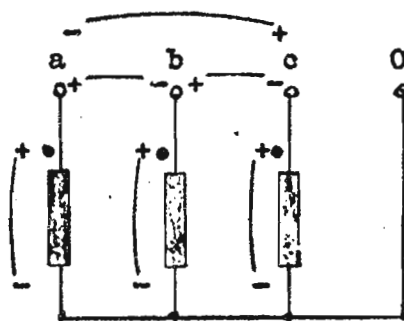
P.s.s. som ovan fås  $\bar{U}_{ab} = \bar{U}_{a0} - \bar{U}_{b0}$  etc.

2. D/Y-0 koppling.

Alt. 1.



primärsida



sekundärsida

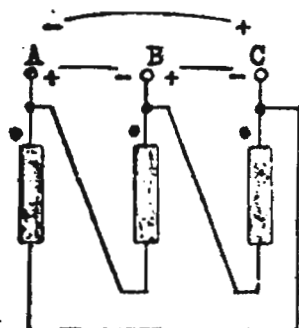
Referensval enligt ovan. Mellan fas- och huvudspänningar fås samband för sekundärsidan på samma sätt som i föregående exempel.

Plats för visardiagram:

Alt. 2.

Primärsidan kopplas enligt figur nedan medan sekundärsidan antages oförändrad.

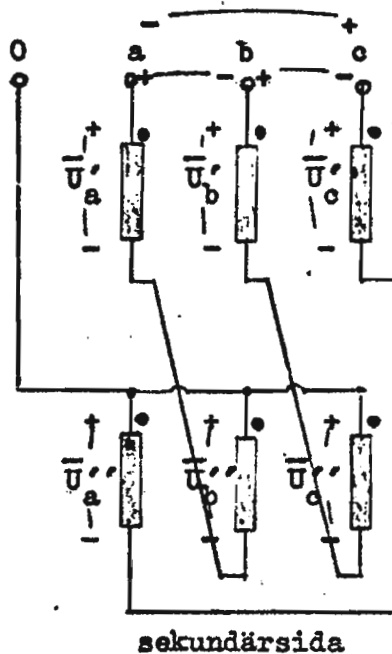
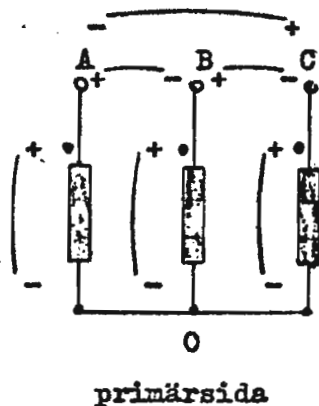
Visardiagram kan ritas nedan till höger eller ev. ovan.



primärsida

### 3. Y/Z-0 koppling.

T7 79



Teckna uttryck för spänningarna  $\bar{U}_{a0}$ ,  $\bar{U}_{b0}$  och  $\bar{U}_{c0}$  innehållande de i de enskilda lindningarna inducerade spänningarna.

$$\bar{U}_{a0} = \quad ; \quad \bar{U}_{b0} = \quad ; \quad \bar{U}_{c0} = \quad ;$$

Teckna uttryck för huvudspänningarna sekundärt innehållande de ovan tecknade fasspänningarna.

$$\bar{U}_{ab} = \quad ; \quad \bar{U}_{bc} = \quad ; \quad \bar{U}_{ca} = \quad ;$$

Plats för visardiagram:

Vilket samband råder mellan huvudspänning och fasspänning ?

Vilket samband råder mellan huvudspänning och den i en "sjättedelslindning" uppträdande spänningen ?

Kopplingsart och uttagmärkning.

1. Bokstavsbeteckningar för trefaskopplingar.

Trefaskopplingar betecknas med bokstäver enligt följande.

Stora bokstäver används för uppspänningslindningen, små bokstäver för övriga lindningar.

|                               |     |   |
|-------------------------------|-----|---|
| Y-koppling (stjärnkoppling)   | Y   | y |
| D-koppling (triangelkoppling) | D   | d |
| Z-koppling (sicksackkoppling) | (Z) | z |
| V-koppling                    | V   | v |

Om nolluttag finns tillägs N eller n enligt nyss given regel.

2. Kopplingsart för trefastransformatorer.

I samband framför allt med parallellkoppling har man stort intresse av att känna sekundärspänningarnas faslägen relativt det matande nätets spänningar. För att snabbt kunna avgöra faslägena indelas olika kombinationer av trefaskopplingar i s.k. kopplingsarter.

Kopplingsart anges med beteckning för uppspänningslindningens trefaskoppling enligt mom. 1. ovan följt av - i ordning efter fallande märkspänning - beteckningarna för övriga lindningars trefaskoppling (såväl två- som tre-lindningstransformatorer är vanliga) och fasläge.

När man talar om fasläge hos en trefaslindning avser man fasläget hos fasspänningsvisarna (y-fas) för lindningen ifråga i förhållande till fasspänningsvisaren (Y-fas) för uppspänningslindningen, varvid uttag med motsvarande märkning (A-a, B-b etc.) avses. Den påtryckta spänningens fasföljd skall överensstämja med fasuttagens märkningsföljd.

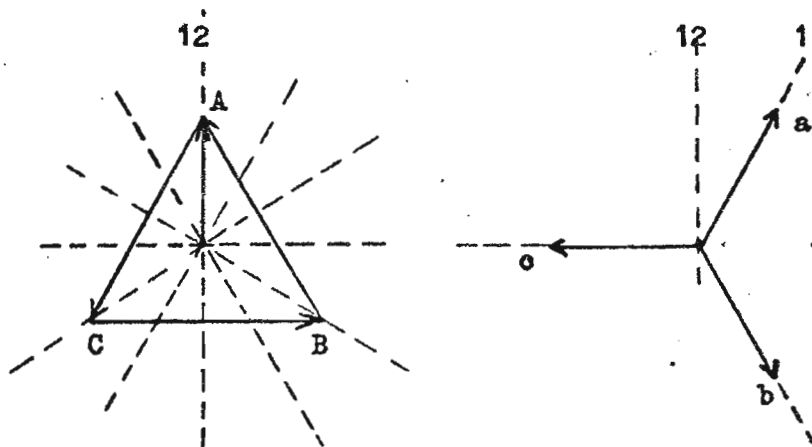
Fasläget uttrycks med den s.k. klockmetoden, d.v.s. som det klockslag vilket på en urtavla anges av fasspänningsvisaren (timvisaren) för lindningen ifråga när uppspänningslindningens fasspänningsvisare (minutvisaren) med motsvarande bokstavsbeteckning står på klockan 12. Se exempel nedan !

Ex. En trefastransformator med märkspänningarna 150 kV D-koppling och 60 kV Y-koppling där Y-lindningens fasspänningar ligger 30° efter D-lindningens visare (ekvivalent Y-fas) betecknas:

Dy1 ( D= uppsidans lindning D-kopplad. y = nedsidans lindning Y-kopplad  
1= fasvisaren för exvis fas a visar på klockan 1 då fas A visar på kl.12)

Om nedsidans lindning är försedd med nolluttag betecknas kopplingen:

Dyn1.



I normerna ritas visarna utan spetsar!

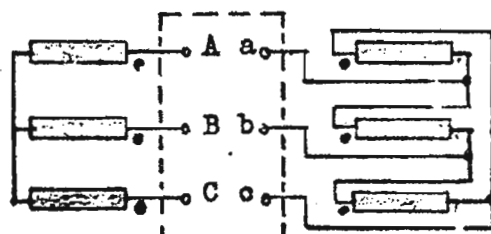
Angiv kopplingsart enligt ovan genomgångna metod för de exempel vi arbetat igenom tidigare genom att rita spänningsdiagram.

### 3. Uttagsmärkning.

Uppspänningslindnings uttag märks med stora bokstäver.

Vid enfastransformator märks uttagen A1 - A2, eller om det ena uttaget är nolluttag A2N.

Vid en flerfasig transformator märks fasuttagen A, B, C... och nolluttag N. Det längst till vänster belägna fasuttaget betecknas A (A1), varvid man tänker sig stå på uppsidan med ansiktet mot transformatorn. Se figur nedan! Övriga lindningar betecknas med små bokstäver.



Schemasymbolen ovan tänkes svara mot transformatorlocket sett uppifrån. Lindningarna antages samtliga ha samma lindningsriktning, varvid av oss använda polaritetsmarkeringar alltid tänkes placerade vid uttag vänt mot locket. (eller genomgående i den andra lindningsändan).

### 4. Rena och blandade trefaskopplingar.

Om båda sidor i en trefas tvålindningstransformator har samma kopplingssätt talar man om en ren koppling (Yy, Dd).

Vid olika kopplingssätt talar man om blandad koppling. (Yd, Dy, Iz)

### 5. Trefastransformatorns omsättning.

Vid trefastransformatorer skiljer man på olika slag av omsättning.

Omsättningen eller spänningsomsättningen; förhållandet mellan huvudspänningarna (i ordningen den större märkspänningen genom den mindre).

Lindningsomsättningen; förhållandet mellan lindningsvarvtalen hos lindningar

på samma ben.

Vid rena kopplingar är spännings- och lindningsomsättning samma sak.

Vid blandade kopplingar är mätetalen olika för spännings- och lindningsomsättning.

OBS ! Vid beräkningar gällande symmetriska förhållanden är det i allmänhet lämpligast att tänka sig en Y/Y koppling oavsett de verkliga kopplingssätten. Därvid intresserar spänningsomsättningen = omsättningen:

$$\frac{U_{1hn}}{U_{2hn}} = \frac{U_{1fn}}{U_{2fn}}$$

#### 6. Exempel på kopplingsarter och tillhörande visardiagram.

Å separat blad visas exempel på de vanligaste kopplingsarterna för trefastransformatorer. Ett stort antal andra kombinationer förekommer.

Schemasymbolerna visar transformatorlocket sett uppifrån som tidigare påpekats. Nolluttag kan förekomma i samtliga Y- och Z-kopplade lindningar men har ej visats i exemplen.

Arm.1. Yy kopplad transformator förses ofta med en D-kopplad utjämningslindning.

Arm.2. Kopplingsart Yz11 och Dz10 förekommer särskilt vid omkopplingsbara distributionstransformatorer, där högspänningslindningen kan omkopplas under lock mellan 10 kV i Y-koppling och 6 kV i D-koppling. Isolationen är sådan att en sådan omkoppling kan tillåtas.

## Nya beteckningar

| Kopplingsart     | Visardiagram | Schemasymbol | Äldre beteckning |
|------------------|--------------|--------------|------------------|
| Yy0<br>(Ann. 1)  |              |              | A2               |
| Dy5              |              |              | C1               |
| Yd5              |              |              | C2               |
| Dz10<br>(Ann. 2) |              |              |                  |
| Dyn11            |              |              | D1               |
| Yd11             |              |              | D2               |
| Yz11<br>(Ann. 2) |              |              | D3               |

## Visar- och kopplingsdiagram för trefastransformatorer

| Kopplings-<br>grupp | Koppling<br>enl. IEC | Visardiagram |             | Kopplingsbild    |                  |
|---------------------|----------------------|--------------|-------------|------------------|------------------|
|                     |                      | Högspänning  | Lågspänning | Hög-<br>spänning | Låg-<br>spänning |
| 0                   | Dd 0                 |              |             |                  |                  |
|                     | Yy 0                 |              |             |                  |                  |
|                     | Dz 0                 |              |             |                  |                  |
| 5                   | Dy 5                 |              |             |                  |                  |
|                     | Yd 5                 |              |             |                  |                  |
|                     | Yz 5                 |              |             |                  |                  |
| 6                   | Dd 6                 |              |             |                  |                  |
|                     | Yy 6                 |              |             |                  |                  |
|                     | Dz 6                 |              |             |                  |                  |
| 10                  | Dd 10                |              |             |                  |                  |
|                     | Dz 10                |              |             |                  |                  |
|                     | Dy 11                |              |             |                  |                  |
| 11                  | Yd 11                |              |             |                  |                  |
|                     | Yz 11                |              |             |                  |                  |

Märkspänningen är huvudspänning =  $U_{hn}$  ;

Märkströmmen är linjeströmmen =  $I_n$  ;

Märkeffekten är total trefaseffekt =  $S_n$  ;

Enligt överenskommelse gäller  $S_n = \sqrt{3} \cdot U_{hn} \cdot I_n$  ;

Vid beräkningar vari transformatorer ingår räknas lämpligen med impedansvärden per linjefas (Y-fas) då symmetriska förhållanden är för handen.

Som basstorheter väljs därför lämpligen  $U_{fn}$  = märkspänningens fasvärde vid Y- eller ekvivalent Y-koppling samt  $I_n$  = linjeströmmen.

Vi får då följande bas- eller enhetsimpedans:

$$Z_e = \frac{U_{hn} \cdot \sqrt{3}}{I_n} = \frac{U_{fn}}{I_n} = \frac{U_{hn}^2}{\sqrt{3} \cdot U_{hn} \cdot I_n} = \frac{U_{hn}^2}{S_n} \quad \Omega/\text{linjefas}$$

Härur fås som vid enfastransformatorn

$$R_k = u_r \cdot Z_e \quad \Omega/\text{linjefas}$$

$$X_k = u_x \cdot Z_e \quad \Omega/\text{ " -}$$

$$Z_k = u_k \cdot Z_e \quad \Omega/\text{ " -}$$

Vi får bl.a. vidare att  $P_{bn} = u_r \cdot S_n$  , totala förluster. ( Visa dettal )

Vid beräkning av spänningsfall räknas lämpligen per fas, Y-fas. Det därvid beräknade spänningsfallet uttryckes som volt fasspänning.

Genom multiplikation med  $\sqrt{3}$  fås samma spänningsfall uttryckt som volt huvudspänning. Om uttryck för relativa spänningsfallet användes blir detta detsamma, om man uttrycker det i relation till märkspänning, i ena fallet fasspänning, i andra huvudspänning.

$$\Delta U = R_k \cdot I \cdot \cos \varphi_2 + X_k \cdot I \cdot \sin \varphi_2 \quad \text{volt fasspänning}$$

$$\frac{\Delta U}{U_{fn}} = \frac{R_k \cdot I_n \cdot I}{U_{fn} \cdot I_n} \cos \varphi_2 + \frac{X_k \cdot I_n \cdot I}{U_{fn} \cdot I_n} \sin \varphi_2 \quad ; \text{ volt fasspänning.}$$

$$\Delta u_f = i( u_r \cdot \cos \varphi_2 + u_x \cdot \sin \varphi_2 ) ; \text{ volt fasspänning.}$$

Om vi skriver  $\Delta U_h = \sqrt{3} \cdot \Delta U_f$  och sätter detta i relation till  $U_{hn}$

får vi

$$\Delta u_h = \frac{\sqrt{3} \cdot \Delta U_f}{\sqrt{3} \cdot U_{fn}} = \frac{\Delta U_f}{U_{fn}} = \Delta u_f$$

## 6.7 Transformatorlindningars typeffekt, genomgångseffekt och utnyttjning.

Enligt SEN avser uppgiften om märkspänning för en viss lindning spänningen mellan lindningens änduttag, uppgiften om märkström strömmen genom lindningen. En lindning är alltså gjord för en viss spänning och ström eller med andra ord för en viss skenbar effekt. Denna skenbara effekt kallas lindningens typeffekt (eg. lindningens märkeffekt).

Beroende på sättet att koppla olika lindningar till varandra är det ej säkert att den effekt en transformator transformerar ( totalt inmatad effekt och totalt uttagen effekt ) motsvarar summan av de olika dellindningarnas typeffekter. Man talar om den transformerade effekten eller genomgångseffekten. Några exempel må belysa de genomgångna begreppen.

Exempel 1. Enfas fulltransformator.

Vardera lindningens typeffekt är  $U_{1n} \cdot I_{1n} = U_{2n} \cdot I_{2n} = S_n$

Maximalt inmatad effekt =  $U_{1n} \cdot I_{1n}$ .

Maximalt uttagen effekt =  $U_{2n} \cdot I_{2n}$ .

I detta fall är alltså genomgångseffekten = typeffekten.

Vi kan då transformera en effekt = märkeffekten utan att överbelasta någon av de två lindningarna.

Man talar stundom om den s.k. apparatutnyttjningen  $k_u$  som definieras som kvoten mellan genomgångseffekt och typeffekt. I detta exempel blir  $k_u = 1$ .

Exempel 2. En D-kopplad lindning.

Typeffekten för en lindningsdel är  $U_n \cdot I_n$ .

Typeffekten för de tre dellindningarna är tillsammans  $3 \cdot U_n \cdot I_n$ .

Största möjliga inmatade eller uttagna effekt ( genomgångseffekt för lindningsgruppen ) utan att någon av delarna överbelastas blir:

$$\sqrt{3} \cdot U_h \cdot I_l = \sqrt{3} \cdot U_n \sqrt{3} \cdot I_n = 3 \cdot U_n \cdot I_n .$$

Typeffekten ( den totala ) är alltså lika med genomgångseffekten och alltså  $k_u = 1$ .

Exempel 3. En Y-kopplad lindning.

Typeffekt för varje lindningsdel är  $U_n \cdot I_n$ .

Total typeffekt är  $3 \cdot U_n \cdot I_n$ .

Maximalt inmatad eller uttagen effekt blir :

$$\sqrt{3} \cdot U_h \cdot I_l = \sqrt{3} \cdot U_n \sqrt{3} \cdot I_n = 3 \cdot U_n \cdot I_n .$$

Total typeffekt är alltså lika med genomgångseffekten och  $k_u = 1$ .

Exempel 4. En Z-kopplad lindning.

Visardiagram enligt tidigare avsnitt:

Typeffekt för varje dellindning är  $U_n \cdot I_n$ .

Total typeffekt är  $6 \cdot U_n \cdot I_n$ .

Maximalt inmatad eller uttagen effekt blir utan att någon del överbelastas:

$$\sqrt{3} \cdot U_h \cdot I_l = \sqrt{3} \cdot 3 U_n \cdot I_n = 3 \cdot \sqrt{3} U_n \cdot I_n .$$

Genomgångseffekten ( transformerad effekt ) är alltså skiljd från totala typeffekten. Apparatutnyttningen blir

$$k_u = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n}{6 U_n \cdot I_n} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,866.$$

Vi observerar alltså att trots att varje lindningsdel utnyttjas fullt får vi inte igenom lika stor effekt som den totala typeffekten. Anledningen är naturligtvis den fasförskjutning som finns mellan de två delspänningar som utgör varje fasspänning.

Exempel 5. Se särskilt avsnitt om V - koppling av transformatorer.

Exempel 6. Se särskilt avsnitt om s.k. sparkopplade transformatorer, där  $k_u$  kan anta värden som är större än 1, vilket innebär att vi kan transformera effekt än varje lindningsdels typeffekt.

#### 6.8. Ekvivalent schema för trefastransformatorn vid symmetriska förhållanden.

Eftersom vid symmetriska förhållanden de tre faserna är identiska så när som på den normala fasförskjutningen i trefassystem, kan och bör man så gott som alltid utföra sina beräkningar per linjefas ( Y-fas ). Schemat för en sådan fas är identiskt med det för enfastransformatorn.

Observera !  $U_{1f}$  och  $U_{2f}$  är fasspänningar och mäts i V fasspänning.

$Z_k$ ,  $R_k$  och  $X_k$  är impedanser i  $\Omega$  per linjefas. (  $\Omega$ /ekvivalent Y-fas )

I är strömmen i A/linjefas eller som man också säger A linjeström.

### Drifftekniska synpunkter på olika trefaskopplingar.

Vid symmetrisk belastning samt osymmetrisk belastning utan nollledarström är samtliga kopplingar likvärdiga med hänsyn till att mmk-balans automatiskt inställer sig för lindningar på samma ben utan onormala läckflöden. Valet av koppling dikteras då av hänsyn till relativt fasläge hos primära och sekundära spänningarna för exempelvis parallelldrift, vidare av möjligheten att eventuellt kunna systemjorda en nollpunkt samt av de ekonomiska och utrymmesbestämmande faktorerna vid konstruktionen.

I detta sammanhang förekommer i första hand olika kombinationer av Y- och D-kopplingar, Y/D och D/Y med eller utan uttagen nollpunkt. Den rena D/D-kopplingen har bl.a. den fördelen att, om tre enfasenheter användes, en av dessa kan bortkopplas och driften trots detta upprätthållas, dock med reducerad genomgångseffekt. Man talar därvid om öppen koppling eller vanligare V-koppling.

Den rena Y/Y-kopplingen användes mera sällan på grund av vissa svårigheter härrörande från magnetiseringsfenomenets icke-linearitet.

Med åtminstone en D-kopplad lindning på kärnan kan dessa speciella övertonsfenomen undertryckas.

Vid osymmetrisk belastning med nollledarström (belastningen uttages mellan nolla och fasledare och ej mellan två fasledare) är endast vissa kopplingar användbara, enär vid övriga mmk-balans ej inställer sig utan onormala läckflöden blir följden. Härvid fås ökade tillsatstofluster och höga läckspänningsfall till följd av den ökade läckreaktans vi får p.g.a. de onormala läckflödena.

Osymmetrisk belastning enligt ovan förekommer ofta i distributions-system för lågspänning.

De kopplingar, som i första hand kommer ifråga, är D/Y-0 och Y/Z-0. Vid valet mellan de två angivna kopplingarna gäller att en primärlindningen är högspänd bör den Y-kopplas, varför Y/Z-0 koppling bör föredras. Nackdelen med kopplingen är naturligtvis att typeffekten är större än genomgångseffekten för den Z-kopplade delen.

Vid lägre primärspänningar väljer man normalt D/Y-0 kopplingen.

Kopplingen Y/Y-0 är direkt olämplig i detta fall.

Jämför avsnittet om snedbelastning av transformatorer.

Äm. I överföringar (ej detaljdistribution) inträffar stundom att man önskar Y/Y-koppling. Detta innebär ingen nackdel ur belastningssynpunkt, eftersom dessa överföringar är symmetriskt belastade. Ur övertonssynpunkt förses emellertid en sådan transformator med en tredje, kortsluten D-lindning. Samma sak gäller för jordfelskontroll.

90

Konstruktiva synpunkter på de vanliga kopplingsätten för trefastransformatörer.

Y-kopplingen.

Y-kopplingen är den vanligaste kopplingen och bör komma ifråga i första hand vid lindningar för högre spänningar. För lågspända lindningar med stor effekt kan i vissa fall konstruktionen av en Y-kopplad lindning bli otymplig på grund av den erforderliga ledningsarean, varför man i sådana fall eventuellt bör överväga en D-kopplad lindning med en ström genom själva lindningen som är  $1:\sqrt{3}$  gånger den vid Y-koppling och oförändrad linjeström.

D-kopplingen.

D-kopplingen bör undvikas vid högre spänningar och samtidigt små effekter på grund av att den kräver  $\sqrt{3}$  gånger så många lindningsvarv som en Y-koppling för samma spänning. Om märkströmmen uppgår till storleksordningen 40 A eller däröver medför i allmänhet ej D-koppling någon nämnvärd fördyring av transformatorn.

Användning av D-koppling kan vara konstruktivt direkt fördelaktig för lindningar med mycket hög märkström ( 1500 A eller större ), särskilt vid kärntransformatorer. I synnerhet gäller detta en lindning som är försedd med regleringsuttag anslutna till omsättnings- eller lindningskopplare, då det kan vara av synnerlig fördel att kunna utföra kontaktorganen i dessa för den vid D-koppling i proportionen  $\sqrt{3} : 1$  minskade strömmen.

Z-kopplingen.

Z-kopplingen kräver ett i proportionen  $2 : \sqrt{3}$  ökat kopparbehov i förhållande till Y- och D-kopplingen. På grund av den komplicerade uppbyggnaden bör den ej utan tungt vägande skäl användas vare sig vid hög märkspänning eller hög märkström. Dess rätta användningsområde är för spänningar om några hundratals volt och några hundratals amper, d.v.s. i normala distributionstransformatörer för lägre spänning. Den bör ej heller i dessa fall användas annat än om blandad koppling är önskvärd och ej kan erhållas på billigare sätt.

V-koppling.

V-koppling är en ofullständig trefaskoppling, som kan utföras med två enfastransformatörer. Kopplingen tillgripes i nödfall för att med två transformatorer ( enfas ) kunna distribuera trefaschergi, exempelvis då av tre enfas krafttransformatorer i D/D-koppling den ena måste tagas ur drift för reparation. Belastningsförmågan sjunker till 58% av de tre D-kopplade enheternas belastningsförmåga. För spänningstrafon är V-koppling vanlig.

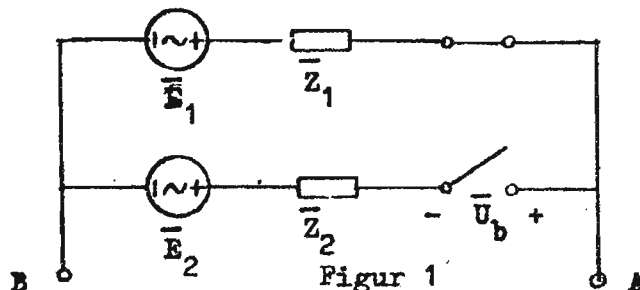
# 1. Några problemställningar vid parallellkoppling av elenergikällor för växelström

Som en inledning till diskussionen om parallellkoppling av transformatorer skall vi diskutera några allmänna problem vid parallellkoppling av elenergikällor för växelström (aktiva växelströmstvåpoler). Diskussionen äger tillämpning även på förhållanden som är aktuella vid parallellkoppling av roterande elenergikällor (vs-generatorer).

Låt oss utgå från figur 1, som visar en aktiv tvåpol 1 till vilken en annan aktiv tvåpol 2 skall parallellkopplas med hjälp av en elkopplare (brytare).

De båda elenergikällorna antages ha samma frekvens. Vi studerar fortvarighets-tillstånd och förutsätter inledningsvis att tvåpolen AB är obelastad.

Allmänt kallar vi en hopkoppling av två elenergikällor (nätdelar eller elsystem) med samma frekvens för parallellning till skillnad från fasning som egentligen innebär samma slags hopkoppling av elenergikällor men där källorna har eller kan ha viss skillnad i frekvens. Det har visat sig lämpligt att införa de två ovan nämnda begreppen för vanligt förekommande hopkopplingar med i vissa avseenden väsentligt skilda förutsättningar. Fasning behandlas mera ingående i samband med genomgången av synkronmaskinen.



## 1.1. Förhållanden vid öppen elkopplare.

KII tillämpad på maskan i figur 1 ger  $\bar{U}_b - \bar{E}_1 + \bar{E}_2 = 0$  eller

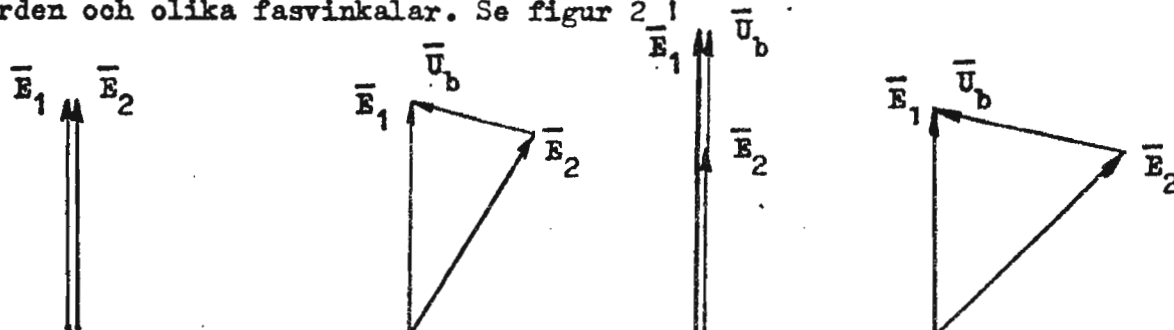
$$\bar{U}_b = \bar{E}_1 - \bar{E}_2$$

$\bar{U}_b$  = spänningen över elkopplaren,  $\bar{E}_1$  och  $\bar{E}_2$  är de båda spänningsgeneratorernas emk-värden.

Låt oss studera några olika fall med villkor på  $\bar{E}_1$  och  $\bar{E}_2$ .

a)  $\bar{E}_1 = \bar{E}_2$  d.v.s. de båda spänningsgeneratorerna har samma belopp och samma fasvinkel.  $\bar{U}_b = 0$  innebär ingen som helst spänning mellan elkopplarens poler. Även momentant gäller  $u_b = 0$  i varje ögonblick. En hopkoppling kommer inte att märkas på något sätt. Parallellningen kan sägas ske på ideala villkor (under ideala förhållanden). Se figur 2!

b)  $\bar{E}_1 \neq \bar{E}_2$  d.v.s.  $\bar{U}_b \neq 0$ . Att de båda spänningsgeneratorernas emk ej är lika kan härledas från det förhållandet att  $E_1 = E_2$  men att deras fasvinklar  $\beta_1$  och  $\beta_2$  ej är lika. Man kan också tänka sig  $\bar{U}_b \neq 0$  genom att  $E_1 \neq E_2$  men med samma fasvinklar  $\beta_1$  och  $\beta_2$  eller kan man ha en kombination av olika E-värden och olika fasvinklar. Se figur 2!



$\bar{E}_1 = \bar{E}_2$  ger  $\bar{U}_b = 0$ .

$\bar{E}_1 \neq \bar{E}_2$ .

$\bar{E}_1 \neq \bar{E}_2$ .

$\bar{E}_1 \neq \bar{E}_2$ .

Figur 2.

$E_1 = E_2$

$E_1 \neq E_2$

$E_1 \neq E_2$

$\beta_1 \neq \beta_2$

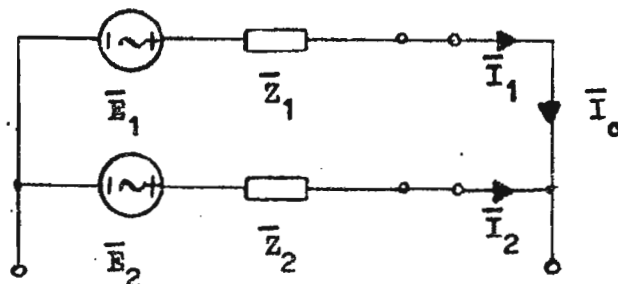
$\beta_1 = \beta_2$

$\beta_1 \neq \beta_2$ .

Observera i de fall då  $\bar{U}_b \neq 0$  att momentana värdet för  $u_b$  naturligtvis är noll två gånger per cykel men att effektivvärdet  $\neq 0$ .

### 1.2. Förhållanden vid slutet elkopplare.

Vi antar fortfarande att yttre belastning saknas. Strömreferenser enligt 3 införes.



Figur 3.

K I ger  $\bar{I}_2 = -\bar{I}_1 = -\bar{I}_0$ .

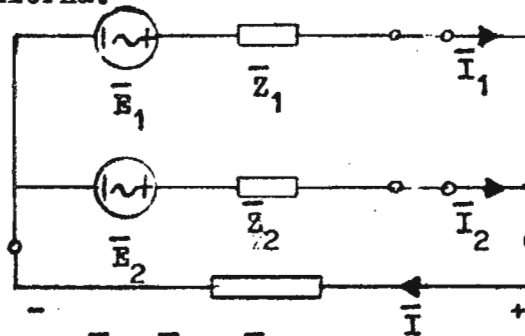
$$\text{KII ger } \boxed{\bar{I}_0 = \frac{\bar{E}_1 - \bar{E}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} \Rightarrow \frac{\bar{U}_b}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2}}$$

Vi konstaterar att om  $\bar{E}_1 = \bar{E}_2$  d.v.s.  $\bar{U}_b = 0$  (före hopkopplingen) får vi ingen ström genom eller mellan de två parallellade elenergikällorna. Är däremot  $\bar{E}_1 \neq \bar{E}_2$  d.v.s.  $\bar{U}_b \neq 0$  kommer vi att erhålla vad vi kan kalla en cirkulerande ström  $\bar{I}_0$ , som ger upphov till bl.a. effekt- och energiförluster. Notera alltså att vi mycket väl kan ha en cirkulerande ström mellan energikällorna trots att vi inte tar ut någon effekt till en belastning.

Beroende på i vilket ögonblick av  $u_b$  :s cykel inkopplingen sker kan momentant stora strömvärden erhållas (övergångsförlopp) som eventuellt löser ut befintliga överströmsskydd. Även den stationära cirkulerande strömmen  $I_0$  kan vara otillåtet stor.

### 1.3. Strömförhållanden vid slutet elkopplare och yttre last.

Vi antar nu att en yttre belastning är ansluten till de två parallellarbetande elenergikällorna. Av intresse är nu att bestämma de två strömmarna  $\bar{I}_1$  och  $\bar{I}_2$  (se figur 4) eftersom detta avgör belastningsfördelningen mellan de parallellarbetande elenergikällorna.



$\bar{Z}$  = bel. -impedans .

$\bar{U}$  = bel. -spänning.

K I och K II ger

$$\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 \quad \dots (1)$$

$$\bar{U} = \bar{Z} \cdot \bar{I}$$

$$\bar{E}_1 - \bar{Z}_1 \cdot \bar{I}_1 = \bar{U} \quad \dots (2)$$

$$\bar{E}_2 - \bar{Z}_2 \cdot \bar{I}_2 = \bar{U} \quad \dots (3)$$

Ekvationerna ger om vi löser ut  $\bar{I}_1$  och  $\bar{I}_2$  ;

$$\bar{I}_1 = \bar{I} \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} + \frac{\bar{E}_1 - \bar{E}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} \Rightarrow \bar{I}_{1b} + \bar{I}_0 \quad \dots (4)$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I} \frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} - \frac{\bar{E}_1 - \bar{E}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} \Rightarrow \bar{I}_{2b} - \bar{I}_0 \quad \dots (5)$$

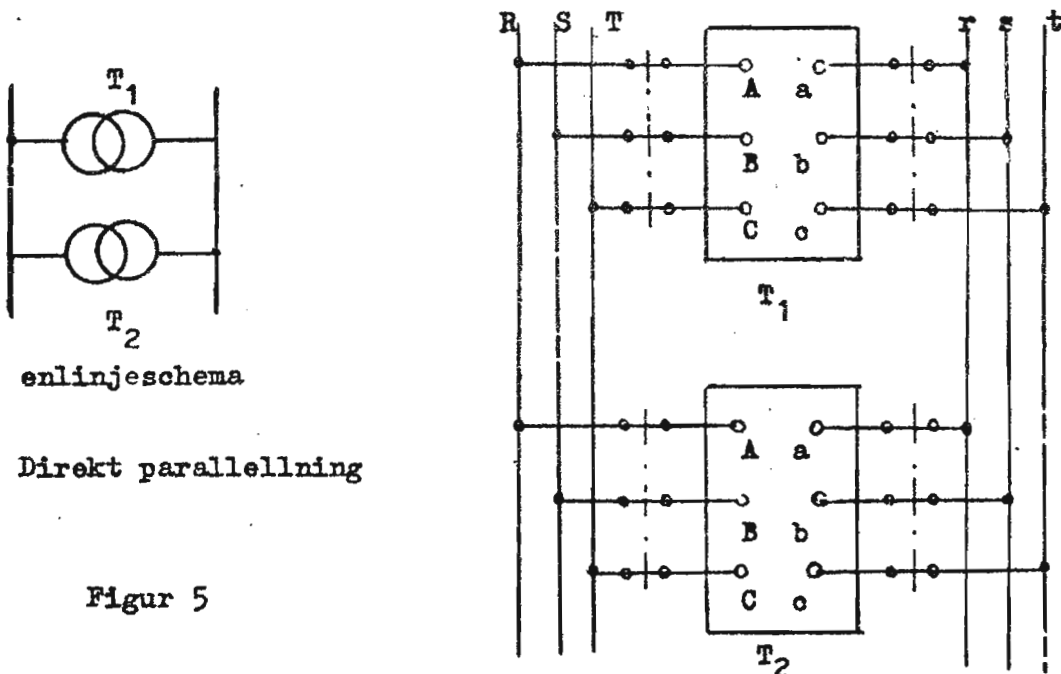
$\bar{I}_{1b}$  och  $\bar{I}_{2b}$  är de strömkomponenter vi får genom vanlig strömdelning och som skulle flyta ensamma om  $\bar{E}_1 = \bar{E}_2$  . Strömmen  $\bar{I}_0$  är däremot en överlagrad cirkulerande ström p.g.a. att  $\bar{E}_1 \neq \bar{E}_2$  och som skulle flyta även om vi inte tog ut ström till någon yttre last. Jämför moment 1.2 !

## 2. Parallellkoppling av transformatorer.

Vid parallellkoppling av trafon skiljer vi på följande två fall :

- a) Direkt parallellkoppling (parallellning) och b) Indirekt parallellkoppling.

Direkt parallellkoppling innebär att de båda trafona parallellkopplas till en gemensam samlingsskena på såväl primär- som sekundärsidan utan andra mellanliggande impedanser än trafonas kortslutningsimpedanser. Se figur 5 !

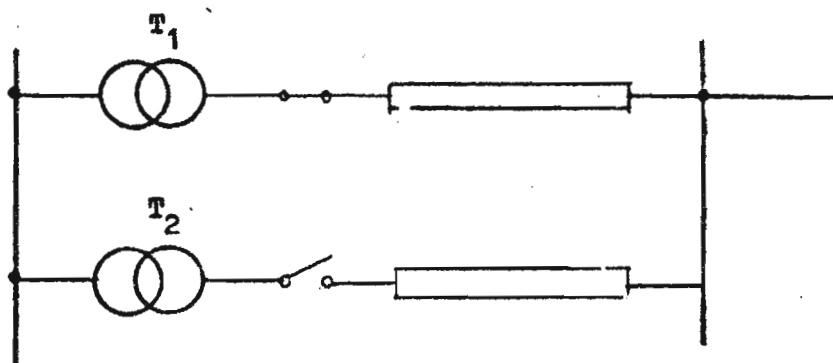


enlinjeschema

Direkt parallellning

Figur 5

Indirekt parallellkoppling innebär att sekundärsidan ej ansluts direkt till en samlingsskena utan att parallellningen sker via en eller flera ledningar. Se figur 6 !



Indirekt parallellning via ledning,

Figur 6.

Sistnämnda fallet förekommer relativt ofta i distributions- och fördelningsnät.

### 3. Varför parallellkoppling? För- och nackdelar.

Den normala orsaken till parallellkoppling torde vara ökad belastning p.g.a. utökad anläggning, som kräver större överföringskapacitet. Även andra skäl kan tala för parallellkoppling, alltså av karaktären fördelaktiga skäl.

#### a) Driftsäkerhetsaspekter.

Med flera parallella enheter kan driften åtminstone säkerställas i viss utsträckning. I vissa speciella sammanhang begärs att hela den aktuella driften skall vara säkerställd genom extra parallellkopplad trafo.

#### b) Verkningsgradförhållanden.

Vid anläggningar med starkt varierande belastningsgrad kan det vara fördelaktigt att vid låglast låta en trafo ensam arbeta i närheten av fullast och därmed god verkningsgrad och att vid hög last låta ytterligare en trafo arbeta i parallell för att klara den ökade belastningen.

#### c) Konstruktiva synpunkter.

Genom att dela upp den totalt transformerade effekten på flera trafon kan man undvika alltför höga strömmar och därav betingade konstruktiva svårigheter.

#### d) Transport- och uppställningstekniska problem.

Inte bara fördelar följer med parallellkoppling. Bland nackdelar märks:

#### a) Ökade kortslutningseffekter.

Genom parallellkopplingen minskar den resulterande impedansen varigenom kortslutningseffekterna ökar med de konsekvenser detta medför.

#### b) Krav på ställverksutrymmen.

Vid flera parallellkopplade trafon blir kravet på ställverksutrymmen inklusive utrymmen för manöver- och övervakningsutrustningar större än för en enda stor enhet.

#### c) Ökade kostnader för ställverks-, manöver- och övervakningsutrustning.

### 4. Villkor för parallellkoppling.

För att uppfylla vissa driftkrav fordras att vissa villkor bör vara uppfyllda. (Vi talar i fortsättningen som om vi bara har två trafon i parallell. Diskussionen gäller emellertid i de flesta fall oberoende av antalet parallellade enheter).

- a. Transformatorerna skall ha samma omsättning. Detta innebär normalt att trafona har samma märkspänningar.
- b. Sekundära spänningar mellan lika märkta uttag ( skall normalt hopkopplas med varandra ) skall ha samma fasläge.
- c. De båda trafona bör ha i det närmaste lika  $u_k$ .  
Detta villkor är ej nödvändigt för själva parallellkopplingen men viktigt när det gäller belastningsfördelningen.

## 5. Inkopplingskontroll.

Då man står i begrepp att parallellkoppla två trafon kan man från märkplåtarna få viktig information om möjligheterna till parallellkoppling.

Om märkspänningarna är lika primärt och sekundärt är självfallet omsättningen lika hos båda trafona. Tänkbara är dock sådana fall där omsättningen kan vara lika utan att märkspänningarna är det. I så fall begränsar den lägsta märkspänningen den högsta spänning som kan påtryckas kombinationen.

Lika fasläge hos sekundärspänningar som skall "hopkopplas" fastställs enklast genom att man kontrollerar att båda trafona tillhör samma kopplingsgrupp d.v.s. har samma klockslag på märkplåten. Vid samma klockslag skall uttag med samma märkning hopkopplas. Dock finns vissa möjligheter till parallellkoppling av trafon med olika klockslag. Om klockslagen skiljer sig 4 eller 8 timmar ( $120^\circ$  el eller  $240^\circ$  el) kan den ena sidans uttag på den ena trafon förskjutas cykliskt ett steg. På liknande sätt kan trafon med beteckningarna 5 och 11 parallellas om vissa inkopplingsregler iakttages. Transformatornormerna SEN 27'01'01 ger detaljerade anvisningar.

Även om man på nu antytt sätt konstaterat att parallellkoppling är möjlig gör man alltid i samband med idrifttagningen vissa extra kontrollmätningar. Dessa sammanfattas under benämningen inkopplingskontroll och bör omfatta följande mätningar:

### a. Kontroll av omsättningen.

De sekundära huvudspänningarna mäts då trafona sekundärt är fria från varandra men primärt är matade från samma nät. Lika huvudspänningar antyder lika omsättning. Uppmätt skillnad i trafonas omsättning bör ej överstiga 1 % av största uppmätta omsättning. Det är tillfylllest att kontrollmäta huvudspänningarna.

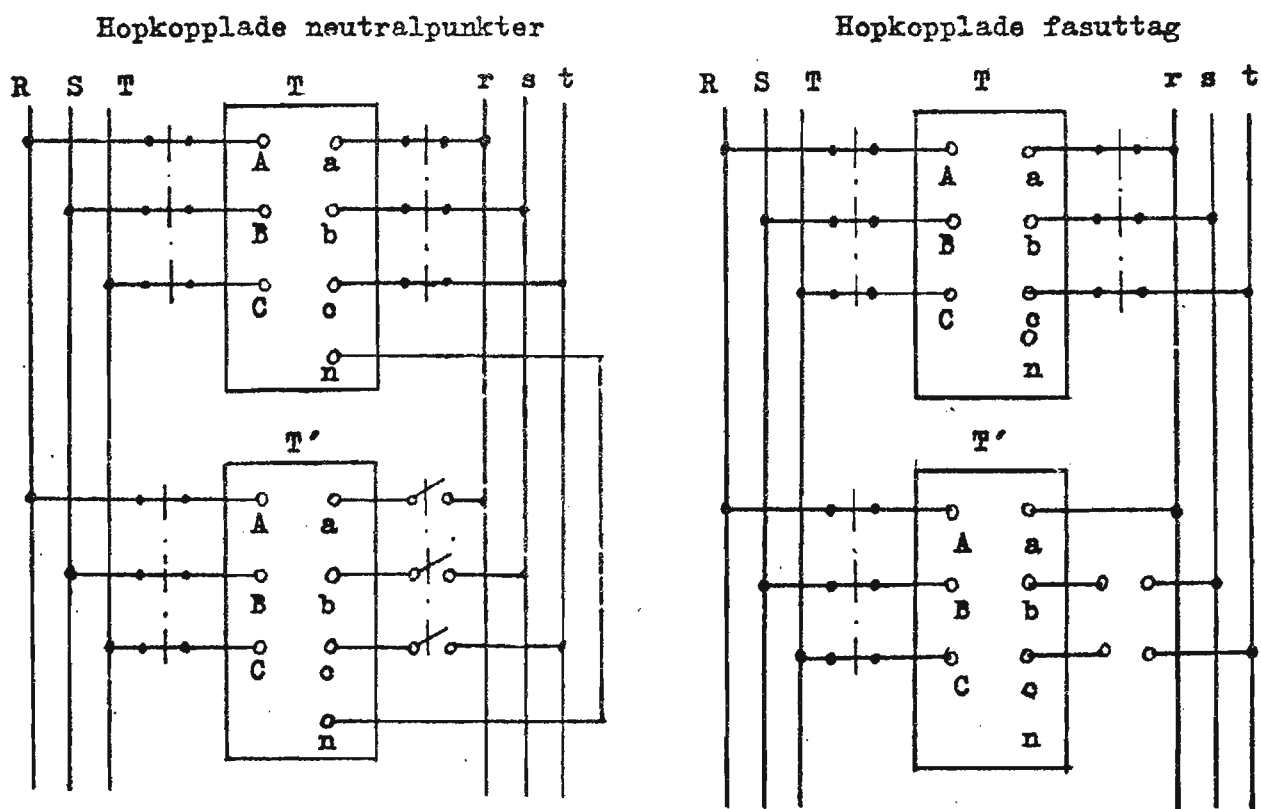
### b. Kontroll av faslägena.

En enda gemensam punkt sekundärt förutsättes och anslutning till gemensamt primärnät. Den gemensamma punkten kan fås genom hopkoppling av neutralpunkterna (om sådana finnes) eller genom hopkoppling av vilka två likvärdiga punkter som helst, en från vardera trafon, vilka senare är avsedda att parallellkopplas.

Se figur 7 ! Efter hopkoppling av två likvärdiga punkter till en enda gemensam sekundärpunkt spänningarna mellan de uttag som skall kopplas samman. Uppmätta spänningar bör helst bli noll, vilket innebär åsyftad faslikhet.

Vid mätningar på trafon med höga spänningar måste eventuellt mätningarna ske via mättransformatorer. Detta gäller även vid omsättningskontrollen. Om de kontrollerade förhållandena ej skulle svara mot ställda krav och parallellning trots detta sker uppstår dels utjämningsströmmar (övergångsförlopp) dels stationära cirkulerande strömmar.

OBS ! Se upp med valet av mätområde för voltmeteren. Vid eventuell felaktig koppling och därmed felaktigt fasläge kan vid ren motfas den dubbla förväntade spänningen erhållas.



En enda sekundärpunkt får vara hopkopplad, en från vardera trafon.

Observera att eventuell systemjordning i neutralpunkterna innebär hopkoppling via jord. Trafocna skall vara helt fria sekundärt.

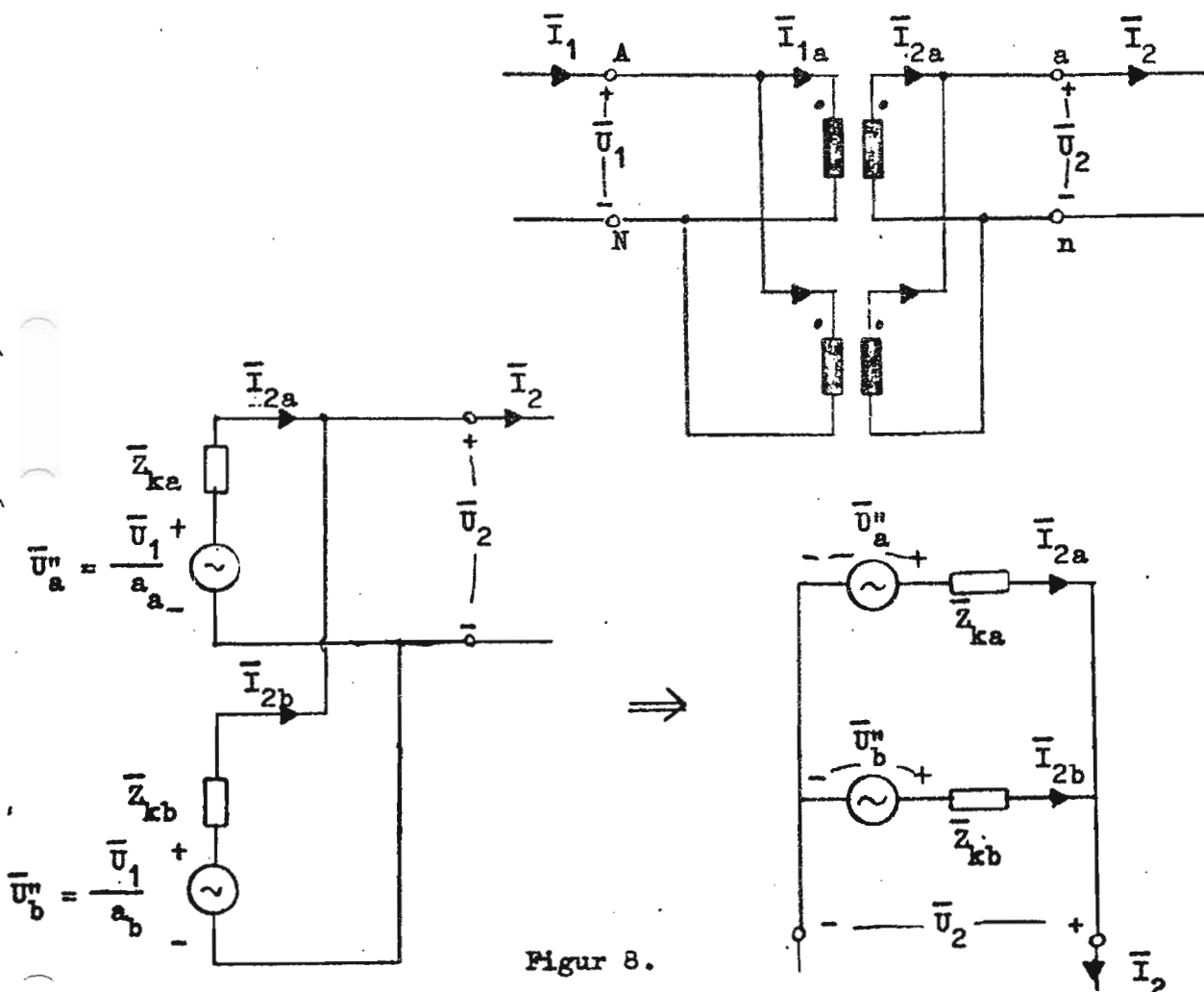
Figur 7.

## 6. Teoretiskt studium av parallellkoppling.

### 6.1. Framtagning av beräkningsschema.

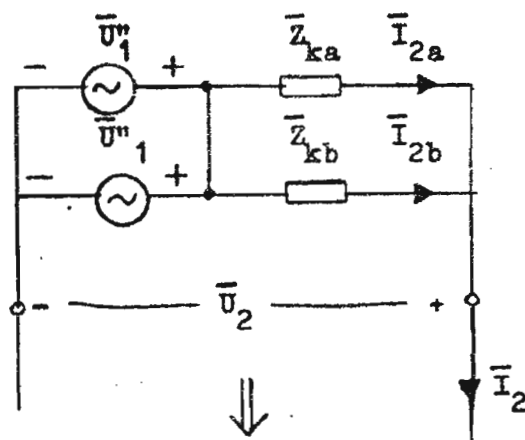
För undersökningen av de grundläggande problemen vid parallellkoppling av trafon behöver vi skaffa oss beräkningsschema. Vi utgår därför ifrån två enfaseenheter kopplade i parallell som figuren överst på nästa sida visar. De två enfaseenherna kan även anses motsvara var sin fas i en trefastrafa.

De ersättningschema vi använder för varje trafo förutsättes hänföra till sekundärsidan. Magnetiseringsströmmarna (tomgångsströmmarna) försummas, varför varje trafo representeras med sin kortslutningsimpedans.



Figur 8.

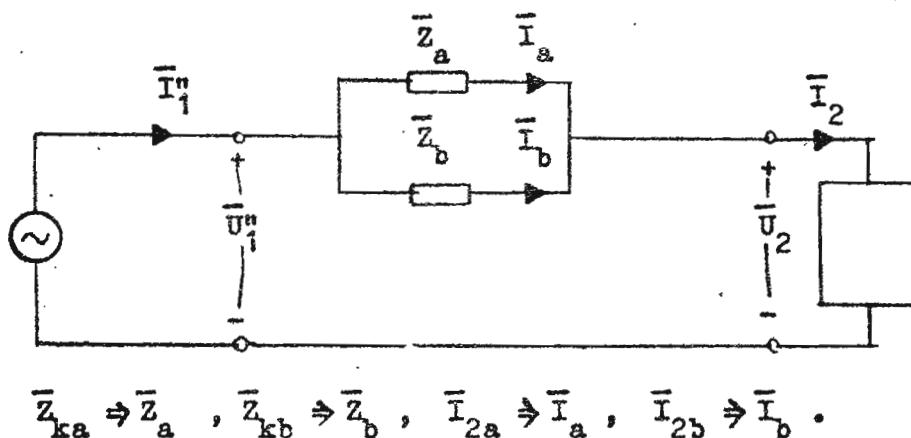
Om vi tomgång har  $\bar{U}_a'' \neq \bar{U}_b''$  kommer vi att erhålla en cirkulerande ström, vilken ej är önskvärd. Vi antar därför att omsättningarna är lika så att  $\bar{U}_a'' = \bar{U}_b''$  och att faslägena också är lika, alltså  $\bar{U}_a'' = \bar{U}_b''$ . I detta fall får vi ingen cirkulerande ström. Om vi kallar de båda lika till sekundärsidan reducerade spänningarna  $\bar{U}_1''$  kan vi rita om schemat ovan som figurerna 9a och 9b nedan visar.



$\bar{U}_a'' = \bar{U}_b'' = \bar{U}_1''$   
d.v.s. samma omsättning

Figur 9a

se figur 9b



Figur 9b

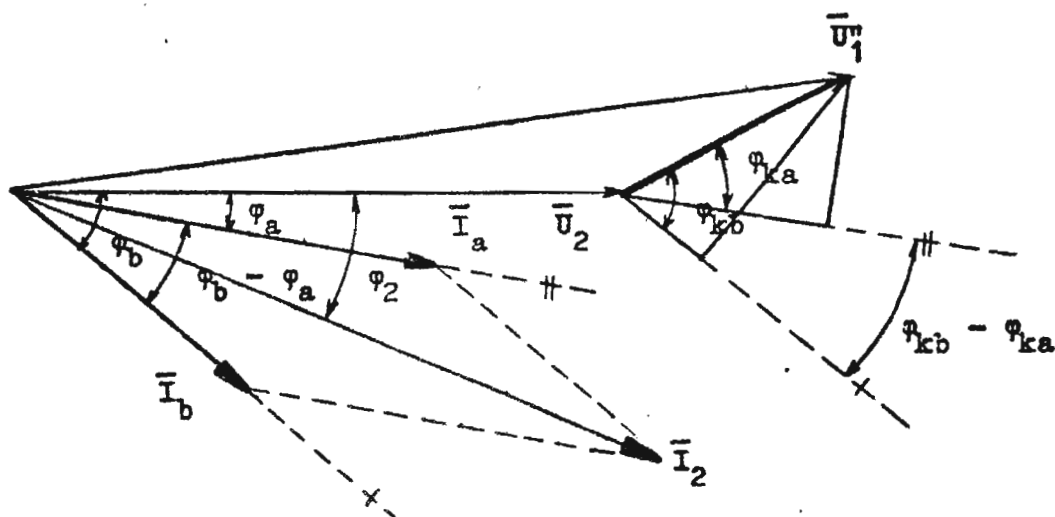
## 6.2. Grundläggande uttryck för studium av belastningsfördelningen.

I anslutning till beräkningsschemat kan med de förutsättningar för vilka detta gäller (lika omsättning) följande ekvationer uppställas:

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_2 = \bar{Z}_a \cdot \bar{I}_a = \bar{Z}_b \cdot \bar{I}_b = \dots = \bar{Z}_p \cdot \bar{I}_p$$

Vi har här indicerat de olika kortslutningsimpedanserna med bokstäver som anger till vilken trafo respektive impedans hör. Den normala indexbokstaven k = kortslutnings- har vi av bekvämlighetsskäl utelämnat. Vi har vidare tänkt oss flera än två parallellkopplade trafon trots att schemat i figur 9 bara ritats för två parallella trafon a och b.

Till ekvationerna svarar ett visardiagram enligt figur 10.



Figur 10.

Några kommentarer till visardiagrammet.

1.  $\bar{U}_1$  och  $\bar{U}_2$  är lika för alla trafona genom parallellkopplingen. Alltså är även visaren  $\bar{U}_1 - \bar{U}_2 = \dots = \bar{Z}_p \bar{I}_p$  lika för alla trafona.
2.  $\varphi_2$  som ger riktningen för  $\bar{I}_2$  bestäms av belastningens impedansvinkel.

3. Fasdifferensen mellan de två strömmarna ( $\varphi_b - \varphi_a$ ) är bestämd av skillnaden mellan impedansvinklarna hos de båda trafona ( $\varphi_{kb} - \varphi_{ka}$ ). Detta framgår klart av visardiagrammet.

Observera ! Om sekundärströmmarna  $\bar{I}_a$  och  $\bar{I}_b$  ( gäller även  $\bar{I}_p$  ) skall vara faslika inbördes måste alla trafona ha samma impedansvinkel hos kortslutningsimpedanserna. Andra sätt att uttrycka samma sak är att säga ;

$\frac{X_k}{R_k}$  skall vara lika för alla trafona eller  $\frac{u_x}{u_r}$  skall vara lika (alternativt  $u_r/u_k$  lika eller  $u_x/u_k$  lika ).

Vi vill nu omforma likheterna på föregående sida under följande, rimliga antaganden: Sekundärsidans spänning antages konstant och lika med märkspänningen som är densamma för alla trafona.

Beloppsmässigt gäller:

$$Z_a \cdot I_a = Z_b \cdot I_b = \dots = Z_p \cdot I_p$$

Vi multiplicerar nu varje led på det sätt som nedan visas för trafo med index p. Observera att index n anger märkvärde för trafo n ifråga.

$$Z_p \cdot I_p \cdot \frac{I_{pn}}{I_{pn}} \cdot \frac{U_n}{U_n^2} \Rightarrow \frac{Z_p \cdot I_{pn}}{U_n} \cdot \frac{U_n \cdot I_p}{U_n \cdot I_{pn}} \Rightarrow u_{kp} \cdot \frac{S_p}{S_{pn}}$$

där  $u_{kp}$  är den relativa kortslutningsimpedansen för trafo p  
 $S_p$  är den avgivna skenbara effekten för trafo p  
 $S_{pn}$  är märkeffekten för trafo p.

Förfares på samma sätt för övriga trafona kommer vi fram till följande viktiga grunduttryck för belastningsfördelningen mellan de olika trafona:

$$u_{ka} \cdot \frac{S_a}{S_{an}} = u_{kb} \cdot \frac{S_b}{S_{bn}} = \dots = u_{kp} \cdot \frac{S_p}{S_{pn}}$$

Vi använder oss på de fortsatta sidorna av nu härlett uttryck ehuru vi i principdiskussionen håller oss till två trafona a och b.

### 6.3. Belastningsfördelningens beroende av de olika $u_k$ -värdena.

Låt oss först anta lika  $u_k$  för de två transformatorerna a och b.

Lika  $u_k$  ger

$$\frac{S_a}{S_{an}} = \frac{S_b}{S_{bn}}$$

Detta innebär samma relativa utnyttjning av de båda trafona. Om exempelvis  $S_a = k \cdot S_{an}$  måste kvoten  $k$  även gälla för transformator b, d.v.s.  $S_b = k \cdot S_{bn}$ .  $k = 1$  innebär fullbelastad transformator och vi ser att båda transformatorerna blir fullbelastade samtidigt vid lika  $u_k$ .

Låt oss så antaga olika  $u_k$ , exempelvis  $u_{ka} > u_{kb}$ . Eftersom likheten

$$u_{ka} \cdot \frac{S_a}{S_{an}} = u_{kb} \cdot \frac{S_b}{S_{bn}} \text{ gäller måste } \frac{S_a}{S_{an}} < \frac{S_b}{S_{bn}}. \text{ Om transformator}$$

b är fullastad ( $S_b : S_{bn} = 1$ ) kan ej transformator a vara fullbelastad samtidigt. Vid olika  $u_k$  blir transformatorerna ej utnyttjade lika.

Den transformator som har minst  $u_k$  blir först fullbelastad.

Vi kan konstatera att  $u_k$  har stor betydelse för den relativa belastningsfördelningen. Lika  $u_k$  är ett önskvärt förhållande. Ingen trafos  $u_k$  bör avvika mer än  $\pm 10\%$  av medelvärdet för  $u_k$  hos samtliga trafos.

### 5.4. Den från transformatorerna totalt avgivna skenbara effekten.

Vi har i den föregående diskussionen ej alls intresserat oss för förhållandet  $X_k : R_k$  hos de olika transformatorerna. Man kan mycket väl tänka sig samma  $Z_k$  för två transformatorer utan att det antydda förhållandet är lika. Uttryckt på annat sätt kan  $u_k$  mycket väl vara lika utan att  $u_x : u_r$  behöver vara lika.

Vad detta innebär (d.v.s. olika impedansfasvinkel  $\varphi_k$ ) framgår av fortsättningen:

a) Samma  $X_k : R_k$  d.v.s. samma  $u_x : u_r$  eller samma  $\varphi_k$  och lika  $u_k$ .

Om vi ritat visardiagram inser vi att alla belastningsströmmarna genom de olika transformatorerna är faslika. Samma  $u_k$  betydde även samma relativa utnyttjning. Låt oss antaga att de olika transformatorerna är fullbelastade. Den totala sekundära strömmen  $I$  kan då beräknas genom algebraisk addition, eftersom alla strömmarna var faslika:

$$I = I_{an} + I_{bn} + \dots + I_{pn};$$

Om båda leden multipliceras med  $U_n$  fås

$$U_n \cdot I = U_n \cdot I_{an} + U_n \cdot I_{bn} + \dots + U_n \cdot I_{pn} \text{ eller}$$

$$S = S_{an} + S_{bn} + \dots + S_{pn};$$

Skenbara effekter få adderas om de är faslika! (Komplex effekt!)

Vår slutsats blir att om inledningsvillkoren gäller kan man från transformatorerna taga ut en total sekundär skenbar effekt som är lika med summan av de enskilda transformatorernas märkeffekter.

b) Olika  $X_k : R_k$  d.v.s. olika  $u_x : u_r$  eller olika  $\varphi_k$  men samma  $u_k$ .

Antag att båda transformatorerna är fullbelastade. Lika  $u_k$  möjliggör detta samtidigt. Ur visardiagrammet nedan framgår tydligt att de olika transformatorströmmarna ej kan vara faslika. Den totala sekundära strömmen fås därför som den vektoriella summan, alltså

$$\bar{I} = \bar{I}_{an} + \bar{I}_{bn} + \dots + \bar{I}_{pn} ;$$

Detta betyder att  $U_n \cdot I < S_{an} + S_{bn} + \dots + S_{pn}$ .

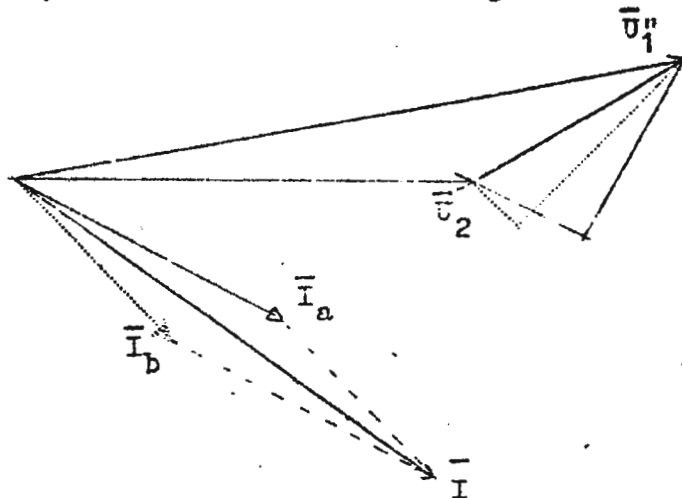
Den resulterande komplexa effekten blir

$$\bar{S} = \bar{S}_{an} + \bar{S}_{bn} + \dots + \bar{S}_{pn} ;$$

Skenbara effekter med olika fasvinkel får ej adderas algebraiskt.

Vi konstaterar alltså en reducerad total sekundär märkeffekt till följd av fasförskjutningen mellan de olika transformatorernas strömmar. Jämför den reducerade skenbara effekten från en Z-kopplad transformatorlindning, vars orsak är densamma.

Om man studerar den inverkan olika  $\varphi_k$  har på en grupp parallellkopplade transformatorer visar det sig att kravet på lika  $\varphi_k$  ej på långa vägar är så viktigt som kravet på lika  $u_k$  för gynnsamt parallellarbete. Jämför de olika övningsexemplen! Vid trafon med märkeffekter över 100 kVA dominerar reaktansen klart i kortslutningsimpedansen. Den inverkan olika  $\varphi_k$  har är därvid försumbar och strömmar (skenbara effekter) kan adderas som om de låge i fas.



Snedbelastning av en transformator innebär att den belastas osymmetriskt. Sådan belastning kan förekomma både vid trefastransformatörer och vid speciella utföranden av enfastrafon (en-till-tvåfastransformering). Låt oss först studera snedbelastning av trefastransformatörer.

### Snedbelastning av trefastransformatörer.

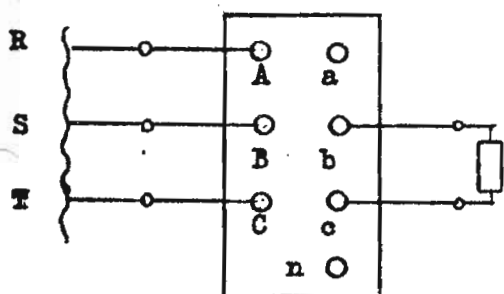
Trefastransformatörer är primärt kopplade i antingen Y eller D medan sekundärsidan kan vara kopplad i Y, D eller Z. Olika kombinationer av koppling primärt-sekundärt ger upphov till ett stort antal kopplingsarter.

Vid symmetrisk belastning uppvisar samtliga kopplingskombinationer full ampervarvsbalans på varje ben. Detta betyder att det resulterande ampervarvtalet approximativt är noll räknat per ben, vilket i sin tur innebär vissa gynnsamma driftförhållanden. Se utförligare förklaring nedan!

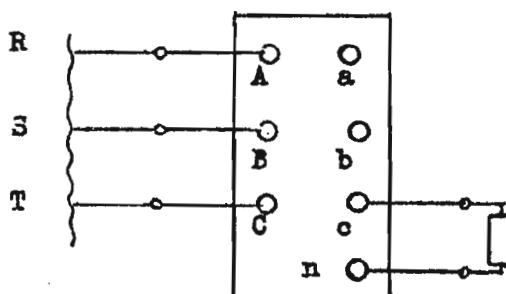
Vid osymmetrisk belastning kan vissa kombinationer av koppling primärt-sekundärt uppvisa icke önskade egenskaper. Viktigt i det osymmetriska fallet är att skilja på två olika slag av snedbelastning:

- a) snedbelastning fas - fas
- b) snedbelastning nolla - fas

I figuren nedan åskådliggörs de två fallen. Observera att vi valt att åskådliggöra snedbelastningen som en enfasig belastning. I det verkliga fallet är ofta alla tre faserna belastade ehuru i olika grad. Figurfallen motsvarar "värsta" fallet.



snedbelastning fas-fas

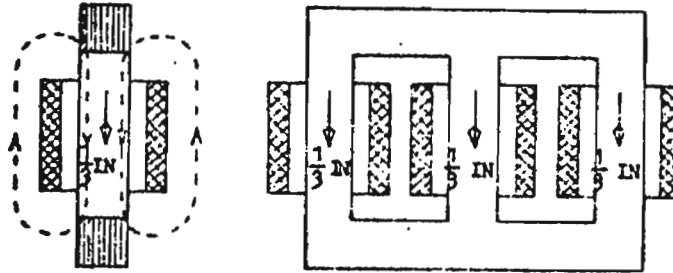


snedbelastning fas-nolla

Vid snedbelastning fas-fas visar sig alla kopplingskombinationer likvärdiga så tillvida att man erhåller full ampervarvsbalans på varje ben, precis som vid symmetrisk belastning. Om man däremot snedbelastar nolla-fas (förutsätter Y- eller Z-kopplad sekundärsida med uttagen nolla) kan vid olämplig kopplingskombination mmk-balansen per ben utebli. Detta i kombination med kärnutförandet (tre enfaseenheter, trebent trefaseenhet eller fembent trefaseenhet) kan innebära ökade läckflöden genom att de olika benen i den trebenta trefaseenheten flödesmässigt ej kan tjänstgöra som återledare åt varandra.

De ökade läckflödena får som följd : ökade tillsatsförluster, ökade spänningsförluster samt sneda spänningar (spänningsosymmetri) på sekundärsidan.

(Om de olika benen ej kan utgöra returväg för de olika benflödena tvingas flödena att söka sig tillbaka i luft utanför kärnan, vilket är likvärdigt med ökade läckflöden. Se figuren nedan ! Jämför också exempel 2 på nästa sida! )

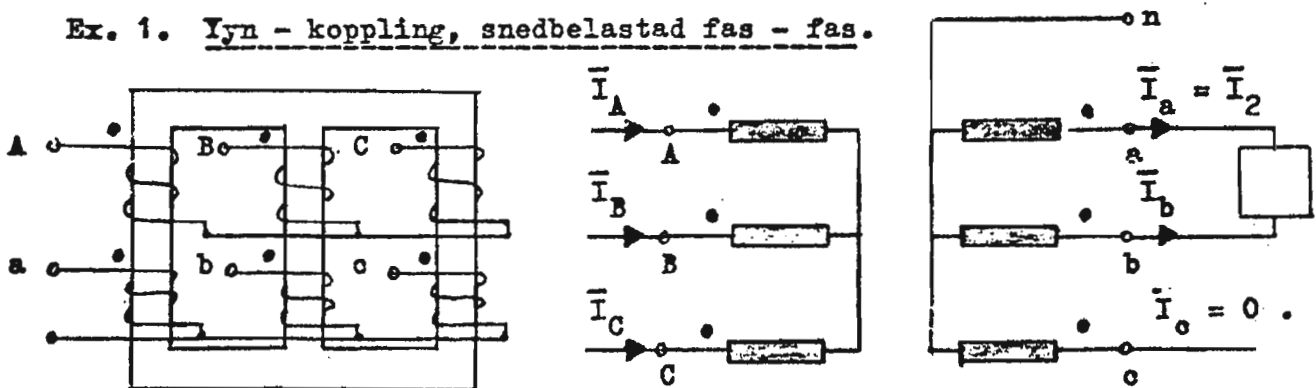


Vid lämpliga kopplingskombinationer primärt- sekundärt uppstår ej ökade läckflöden med de konsekvenser detta innebär. Den allmänna regeln är :

Finns möjligheter till mmk-balans på varje ben så inställer den sig alltid. Som lämpliga kopplingar kan nämnas Dyn och Yzn. Direkt olämplig är däremot Yyn såvida man inte kompletterar den med en tredje d-kopplad lindning, en s.k. hjälp- eller utjämningslindning.

Nedan skall vi studera några olika kopplingar m.a.p. på snedbelastningsmöjligheter. En fullständig diskussion genomföres bara för enstaka fall. I övriga fall redovisas resultatet av likvärdiga beräkningar.

Ex. 1. Yyn - koppling, snedbelastad fas - fas.



I anslutning till schemat fås följande ekvationer.

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0 \quad \dots (1)$$

$$\bar{I}_a = I_2 \quad \dots (2)$$

$$\bar{I}_b = -I_2 \quad \dots (3)$$

$$N_1 \cdot \bar{I}_A - N_2 \cdot \bar{I}_a - N_1 \cdot \bar{I}_B + N_2 \cdot \bar{I}_b = 0 \quad \dots (4)$$

$$N_1 \cdot \bar{I}_B - N_2 \cdot \bar{I}_b - N_1 \cdot \bar{I}_C = 0 \quad \dots (5)$$

Ekvationerna (4) och (5) innebär helt enkelt att vi tillämpat Ampers

oirkulationslag på två slutna magnetiska kretsar (varje krets uppbyggd av två benpar):  $\sum H_k \cdot l_k = (N I)_{\text{tot}}$ . Om vi förutsätter goda magnetiska egenskaper kommer  $\sum H_k \cdot l_k$  att vara ungefärligen lika med 0 d.v.s. vi försummar magnetiseringsbehovet.

Insättes  $\bar{I}_a$  och  $\bar{I}_b$  enligt (2) och (3) i ekvationerna (4) och (5) kan vi ur det återstående systemet lösa ut  $\bar{I}_A$ ,  $\bar{I}_B$  och  $\bar{I}_C$  uttryckta i  $\bar{I}_2$ .

Man får till resultat :

$$\bar{I}_A = -\frac{N_2}{N_1} \cdot \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_B = -\bar{I}_A = \frac{N_2}{N_1} \cdot \bar{I}_2$$

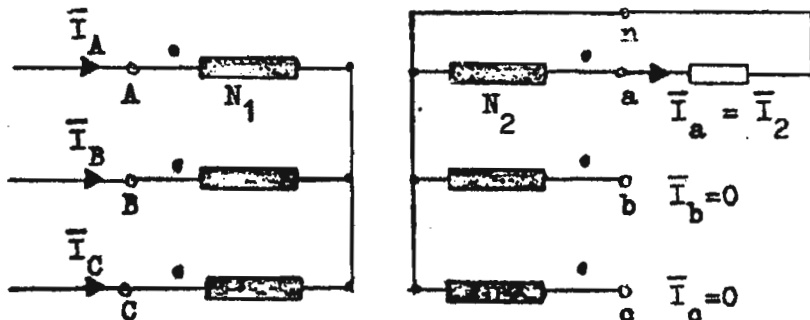
$$\bar{I}_C = 0$$

Strömmen till trafon primärt flyter alltså tillbaka i en fas (B) medan den tredje primärfasen är strömlös. Om man undersöker resulterande amper-varvtalet på de tre benen finner man att det blir noll, vilket är liktydigt med mmk-balans på benet.

Liknande resultat fås för alla förekommande kopplingskombinationer när det gäller snedbelastning fas-fas.

### Ex. 2. Yyn - koppling, snedbelastning fas- nolla.

Utgående från schemat nedan fås ett ekvationssystem snarlikt det i ex.1.



$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0 \quad \dots (1)$$

$$\bar{I}_a = \bar{I}_2 \quad \dots (2)$$

$$\bar{I}_b = \bar{I}_c = 0 \quad \dots (3) \text{ och } (4)$$

$$N_1 \cdot I_A - N_2 \cdot I_a - N_1 \cdot I_B = 0 \quad \dots (5)$$

$$N_1 \cdot I_A - N_2 \cdot I_a - N_1 \cdot I_C = 0 \quad \dots (6)$$

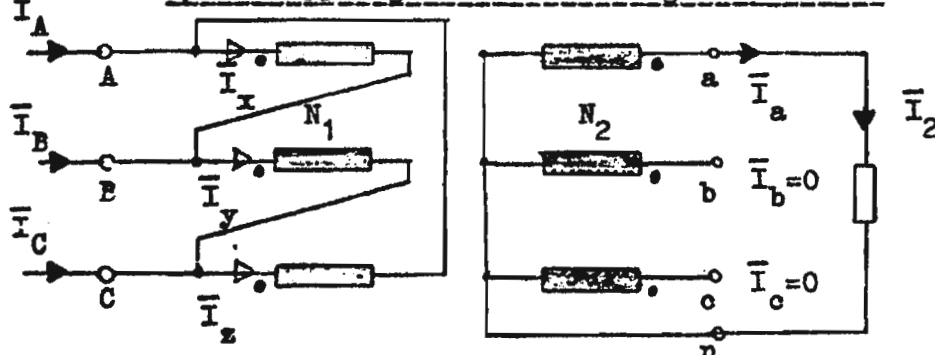
Lösning av ekvationssystemet ger till resultat:

$$\bar{I}_A = 2 \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{\bar{I}_2}{3}$$

$$\bar{I}_B = \bar{I}_C = -\frac{\bar{I}_A}{2} \Rightarrow -\frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{\bar{I}_2}{3}$$

I detta fall flyter den primära "tillströmmen"  $\bar{I}_A$  tillbaka med hälften av sitt värde i vardera av faserna B och C. Eftersom inga strömmar flyter sekundärt i faserna b och c kan vi alltså ej erhålla mmk-balans i de två ben som bär dessa faser. Undersöker vi benet som bär fas A och a finner vi att vi inte heller i detta ben får mmk-balans. Resultande mmk  $\neq 0$ . Denna koppling är alltså direkt olämplig vid snedbelastning.

Ex. 3. Dyn - koppling. Snedbelastning nolla-fas.



Uppställning av ekvationssystem och lösning av detsamma ger:

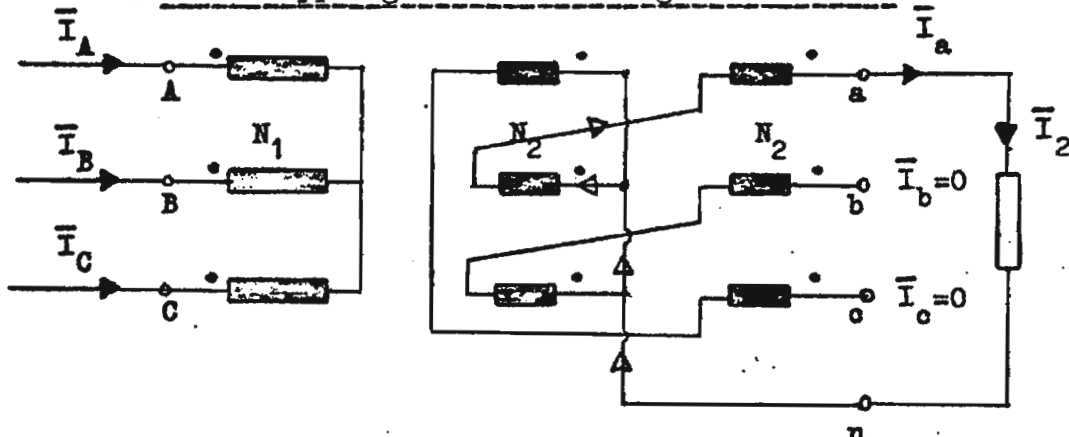
$$\bar{I}_A = \frac{N_2}{N_1} \cdot \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_B = -\bar{I}_A \Rightarrow -\frac{N_2}{N_1} \cdot \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_C = 0 \text{ liksom } \bar{I}_y = \bar{I}_z = 0.$$

Vi konstaterar i detta fall att de två faser som sekundärt ej för någon ström ej behöver föra ström i de primära delar som ligger på samma ben eftersom D-kopplingen har vägar på vilka den primära strömmen kan "smita" förbi. Den nu diskuterade kopplingen är alltså en lämplig koppling ur snedbelastnings-synpunkt vid snedbelastning nolla - fas.

Ex. 4. Yzn - koppling. Snedbelastning fas - nolla.



Lösning av ekvationssystem, som fås på samma sätt som tidigare ger :

$$\bar{I}_A = \frac{N_2}{N_1} \cdot \bar{I}_2$$

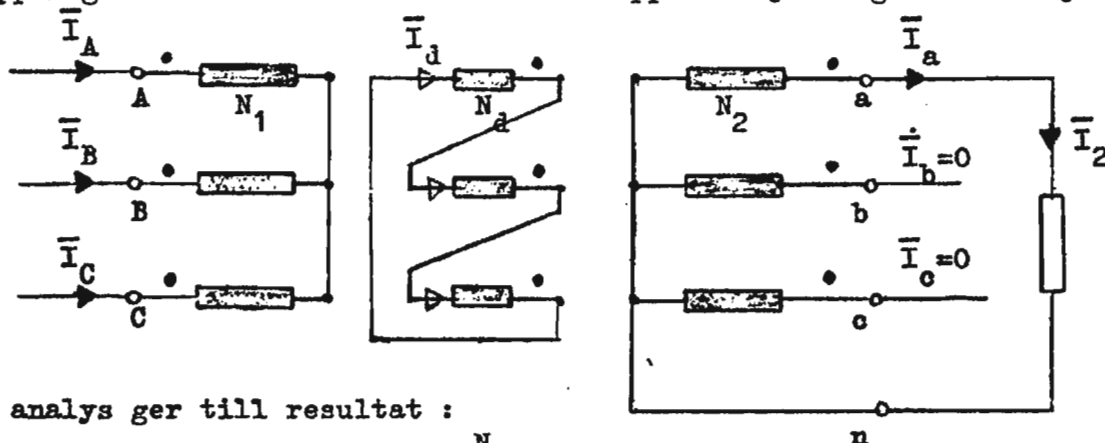
$$\bar{I}_B = -\bar{I}_A = -\frac{N_2}{N_1} \cdot \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_C = 0$$

Denna koppling kan ge mmk-balans på varje ben och gör det också. Sekundärt består en fas av två delar från två olika ben. Dessa delar för ström vid den aktuella snedbelastningen. Primärt för motsvarande bens lindningsfaser ström. Detta är alltså en lämplig koppling ur snedbelastningssynpunkt.

#### Ex.5. Y d yn - koppling. Snedbelastning nolla - fas.

Kopplingen är försedd med en extra D-kopplad utjämnings- eller hjälplindning.



En analys ger till resultat :

$$\bar{I}_A = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{2}{3} \cdot \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_B = \bar{I}_C = -\frac{\bar{I}_A}{2} \Rightarrow -\frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{1}{3} \cdot \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_d = -\frac{N_2}{N_d} \cdot \frac{\bar{I}_2}{3}$$

Genom att en s.k. utjämningsström flyter i D-lindningen kan mmk-balans erhållas på alla tre benen. Kopplingen kan därför användas vid snedbelastning nolla - fas. Den extra D-lindningen kan också utnyttjas för samtidig effektutmatning till exempelvis lokalkraft. Den har också gynnsam verkan m.a.p. på övertensproblem ( i första hand tredje övertensproblem ).

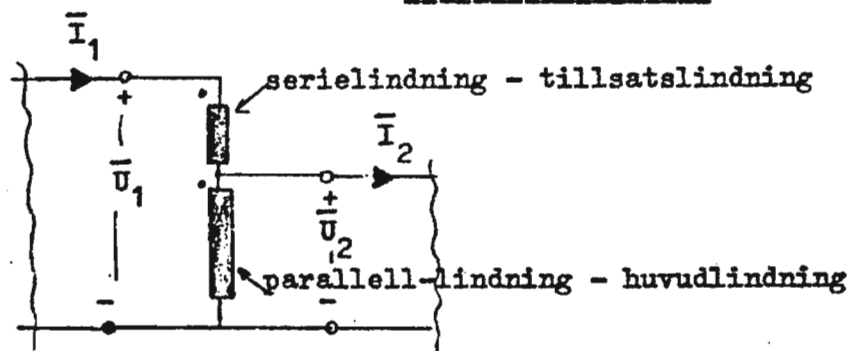
## SPARKOPPLING AV TRANSFORMATORER.

### 1. Inledning.

Tidigare har vi diskuterat den s.k. fulltransformatorn, som i tvålindningsutförande har primär- och sekundärsidan helt åtskilda ur ledande synpunkt (ingen metallisk förbindelse mellan de två sidorna). I detta avsnitt skall vi studera den sparkopplade transformatorn eller autotransformatorn. Vi skall därvid finna att denna koppling har metallisk förbindelse mellan den primära och sekundära sidan. Ur säkerhetssynpunkt är detta en stor olägenhet, vilket begränsar trafons användbarhet i många sammanhang. Att kopplingen går under benämningen sparkopplad motiveras av att den medför en betydande materialbesparing och därmed också en avsevärt mindre kostnad än vanligt fulltrafo-utförande.

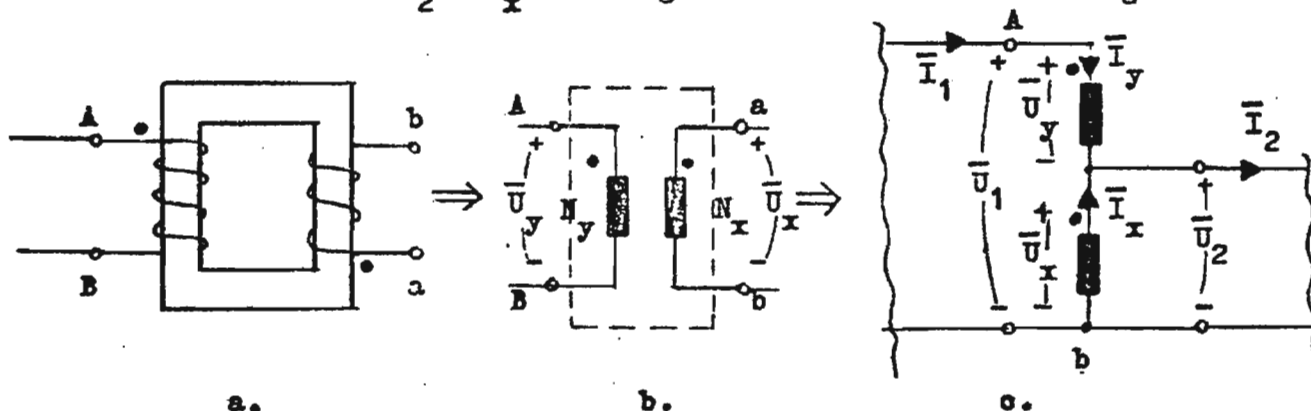
Den sparkopplade trafons båda lindningar är delvis gemensamma. Se figur 1! Den gemensamma lindningsdelen kallas huvudlindningen eller parallell-lindningen medan den del, som ej är gemensam, kallas tillsatslindningen eller serielindningen.

Figur 1.



### 2. Den sparkopplade trafons arbetsprincip.

För att förstå den sparkopplade trafons arbetssätt torde det vara enklast att utgå från en ideal tvålindningsträfo i fulltrafo-utförande. Denna tänker vi oss sedan omkopplad som figur 2 visar. Observera de likvärdiga uttagens placering vid hopkopplingen. På primärsidan kan vi uppfatta den sparkopplade trafon som en trafo med  $N_1 = N_x + N_y$  lindningsvarv och på sekundärsidan som en trafo med  $N_2 = N_x$  lindningsvarv. Se även fortsättningen nedan!



Figur 2.

## 2.1. Spänningsförhållanden.

Ur fig. 2c och kända transformationslagar fås :

$$\frac{\bar{U}_y}{\bar{U}_x} = \frac{N_y}{N_x} ; \quad \begin{cases} \bar{U}_1 = \bar{U}_x + \bar{U}_y ; \\ \bar{U}_2 = \bar{U}_x ; \end{cases} \quad \begin{cases} U_1 = U_x + U_y ; \\ U_2 = U_x ; \end{cases} \quad (\text{beloppsrelationer})$$

Eftersom  $\bar{U}_y$  och  $\bar{U}_x$  är faslika med givet referensval (induceras också av samma flöde) kommer  $\bar{U}_1$  att bli faslik med  $\bar{U}_2$ .

Genom division fås

$$\frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2} = \frac{\bar{U}_x + \bar{U}_y}{\bar{U}_x} \Rightarrow 1 + \frac{\bar{U}_y}{\bar{U}_x} \Rightarrow 1 + \frac{N_y}{N_x} \Rightarrow \frac{N_x + N_y}{N_x} \Rightarrow \frac{N_1}{N_2}$$

d.v.s. en spänningslag fås som lyder

Observera att  $\boxed{U_y = U_1 - U_2}$ .

$$\boxed{\frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2} = \frac{N_1}{N_2}}$$

## 2.2. Strömförhållanden.

Vid strömbelastad trafo gäller att de två lindningarnas mmk balanserar varandra. Ur fig. 2c och kända lagar fås med de givna referenserna:

$$N_x \cdot \bar{I}_x = N_y \cdot \bar{I}_y \quad \begin{cases} \bar{I}_1 = \bar{I}_y \\ \bar{I}_2 = \bar{I}_x + \bar{I}_y \end{cases} \quad \begin{cases} I_1 = I_y \\ I_2 = I_x + I_y \end{cases} \quad (\text{beloppsrelationer})$$

Eftersom  $\bar{I}_x$  och  $\bar{I}_y$  är faslika varandra med givna referenser kommer även  $\bar{I}_2$  att bli faslik  $\bar{I}_1$ .

Genom division fås

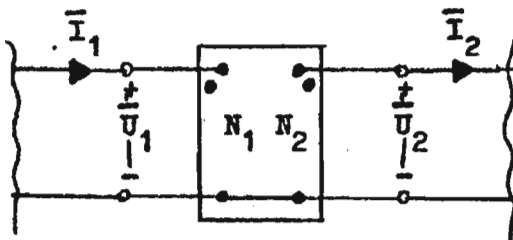
$$\frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_1} = \frac{\bar{I}_x + \bar{I}_y}{\bar{I}_y} \Rightarrow 1 + \frac{\bar{I}_x}{\bar{I}_y} \Rightarrow 1 + \frac{N_y}{N_x} \Rightarrow \frac{N_x + N_y}{N_y} \Rightarrow \frac{N_1}{N_2}$$

d.v.s. vi får en strömlag

$$\boxed{N_1 \cdot \bar{I}_1 = N_2 \cdot \bar{I}_2}$$

Observera att  $\boxed{I_x = I_2 - I_1}$  !

Vi har alltså visat att de kända lagarna från fulltrafon gäller även vid sparkopplad trafo.



$$N_1 = N_x + N_y ; \quad N_2 = N_x ;$$

### 2.3. Effektförhållanden.

#### Transformerad effekt eller genomgångseffekt.

Den effekt som primärt imatas till transformatorn blir enligt fig 2c

$S_1 = U_1 \cdot I_1$ . Med hjälp av härledd spännings- och strömlag omvandlas  $S_1$  till:

$$S_1 = U_1 \cdot I_1 \Rightarrow \frac{N_1}{N_2} \cdot U_2 \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 \Rightarrow U_2 \cdot I_2.$$

Härav följer att vi tar ut en lika stor skenbar effekt. Vi kallar  $S_1 = S_2$  den transformerade effekten eller genomgångseffekten.

Att  $S_1 = S_2$  kunde vi ha insett direkt eftersom vi utgått från ideala förhållanden vilket innebär att  $p_1 = u_1 \cdot i_1$  måste vara lika med  $p_2 = u_2 \cdot i_2$ .

Vid sinusformade förhållanden och i fortvarighetstillstånd leder detta till  $S_1 = S_2$ .

#### Typeffekt hos huvud- och serielindning.

Låt oss förutsätta att serielindningen (y-lindningen) är konstruerad för typeffekten  $S_{typ} = U_{yn} \cdot I_{yn}$  d.v.s. högsta kontinuerliga spänning är  $U_{ymax} = U_{yn}$  och högsta tillåtna kontinuerliga ström  $I_{ymax} = I_{yn}$ .

Det är lätt att visa att  $S_y = S_x$  eller  $U_y \cdot I_y = U_x \cdot I_x$ . Huvudlindningen bör vara och är så konstruerad att den utnyttjas i samma grad som serielindningen (bl.a. fullastade samtidigt). Detta betyder att dess typeffekt är densamma som serielindningens alltså:  $S_{typ} = U_{yn} \cdot I_{yn} \stackrel{\Delta}{=} U_{xn} \cdot I_{xn}$ .

#### Transformerad effekt i relation till typeffekten.

Allmänt gäller att  $S_1 = U_1 \cdot I_1 \Rightarrow (U_x + U_y) \cdot I_1$ .

Den högsta effekt vi kan mata in och ta ut d.v.s den högsta transformerade effekt vi kan åstadkomma vid den sparkopplade trafon blir då

$$S_n = (U_{xn} + U_{yn}) \cdot I_{yn} \Rightarrow (U_{xn} + U_{yn}) \cdot I_{1n}$$

Detta uttryck omformar vi lätt på följande sätt till

$$S_n = \frac{U_{xn} + U_{yn}}{U_{yn}} \cdot U_{yn} \cdot I_{1n} \Rightarrow \frac{N_1}{N_y} \cdot S_{typ} \Rightarrow \frac{N_1}{N_1 - N_2} \cdot S_{typ}.$$

alltså

$$\boxed{\frac{S_n}{S_{typ}} = \frac{N_1}{N_1 - N_2} \Rightarrow \frac{U_1}{U_1 - U_2}}$$

Av uttrycket framgår att den transformerade effekten  $S_n$  är större än typeffekten för vardera serie- och huvudlindning. Speciellt stort blir förhållandet ju närmare 1 den sparkopplade trafons omsättning ligger eftersom då  $U_2$  närmar sig  $U_1$ .

$U_1 - U_2$  går då mot 0 samtidigt som  $\frac{S_n}{S_{typ}}$  går mot oändligheten.

Praktiskt vanligast och med bäst ekonomi får man då  $\frac{U_1}{U_2} \leq 2$  till 3 vilket innebär  $\frac{U_x}{U_y} \leq 1$  till  $\frac{1}{2}$  som i sin tur ger  $S_n = (2 \text{ till } 1,5) \cdot S_{typ}$ .

### 3. Jämförelse mellan fulltrafo och sparkopplad trafo med samma märkdata.

För att belysa den materialbesparing och därmed minskade tillverkningskostnader som en sparkopplad trafo innebär skall vi göra en jämförelse mellan en fulltrafo och en sparkopplad med samma märkdata.

Vi beräknar helt enkelt vikten av Cu för att linda transformatorerna.

Vikten är proportionell mot  $A_{Cu}$  = ledarens area och  $l_{Cu}$  = ledarens längd.

$A_{Cu}$  i sin tur beror av strömmen  $I$  genom lindningen eftersom man tillåter viss strömtäthet och  $l_{Cu}$  är proportionell mot lindningsvarvtalet  $N$ , som i sin tur beror på spänningen  $U$  och varvspänningen.

Härav följer att för en lindning gäller:  $m_{Cu} = k_1 \cdot A_{Cu} \cdot l_{Cu} \Rightarrow k \cdot N \cdot I$ .

(Vi anser att alla lindningsvarven är genomsnittligt lika långa)

$$\begin{array}{ll} \text{Fulltransformator:} & \text{primärt } m_{1Cu} = k \cdot N_1 \cdot I_1 \\ & \text{sekund. } m_{2Cu} = k \cdot N_2 \cdot I_2 \Rightarrow k \cdot N_1 \cdot I_1 \quad \text{ty } N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2 \\ & \text{totalt } m_{CuF} = 2 \cdot k \cdot N_1 \cdot I_1 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{Sparkopplad trafo:} & \text{seriel. } m_{1Cu} = k(N_1 - N_2) \cdot I_1 \\ & \text{huvudl. } m_{2Cu} = k \cdot N_2(I_2 - I_1) \Rightarrow (N_1 - N_2) \cdot I_1 \cdot k \\ & \text{totalt } m_{CuA} = 2 \cdot k \cdot (N_1 - N_2) \cdot I_1 \end{array}$$

Av ovan givna uttryck fås

$$\frac{m_{CuA}}{m_{CuF}} = \frac{N_1 - N_2}{N_1} \Rightarrow 1 - \frac{N_2}{N_1}$$

Materialbesparingen blir alltså större ju mer  $N_2$  närmar sig  $N_1$  d.v.s. ju mer  $U_2$  närmar sig  $U_1$ . Förklaringen ligger naturligtvis i det faktum att man slipper en hel lindning vid sparkoppling och att serielindningen endast behöver dimensioneras för spänningen  $U_1 - U_2$  medan huvudlindningen endast behöver dimensioneras för strömmen  $I_2 - I_1$ . Numeriska värden ges i samband med övningsräkning.

### 4. Fördelar och nackdelar med sparkopplade trafon.

Utan någon mera ingående diskussion redovisas här några för- och nackdelar med sparkopplade trafon.

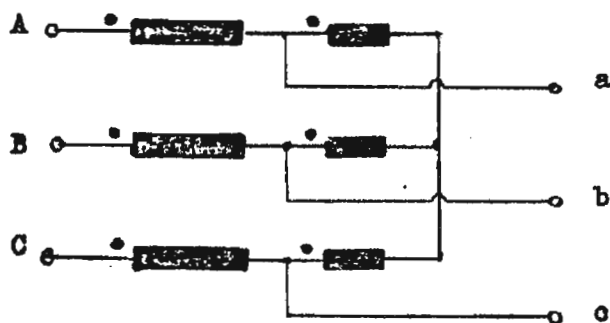
Fördelar : 1. Mindre storlek än fulltrafon vid samma märkdata. 2. Lägre kostnad  
3. Bättre verkningsgrad till följd av mindre belastningsförluster.

#### 4. Mindre spänningsförluster.

Nackdelar: 1. Större kortslutningsströmmar. 2. Metallisk förbindelse mellan hög- och lågspänningssida.

#### 5. Trefasiga sparkopplade transformatorer.

Sparkopplade trafon kan även utföras i trefasutförande, varvid Y-kopplingen är den vanligaste. Se figur 4 !



trefasig sparkopplad trafo.  
y-koppling.

#### 6. Den sparkopplade transformatorns användning.

Sparkopplade transformatorer kan användas i alla sådana sammanhang där den metalliska förbindelsen mellan hög- och lågspänningssida ej spelar någon roll.

I enfasigt utförande är sparkopplingen bl.a. vanlig som vridtransformator. En rörlig kontakt släpar utefter lindningen och ger en variabel utspänning. För internmatning i olika sammanhang är också utförandet vanligt.

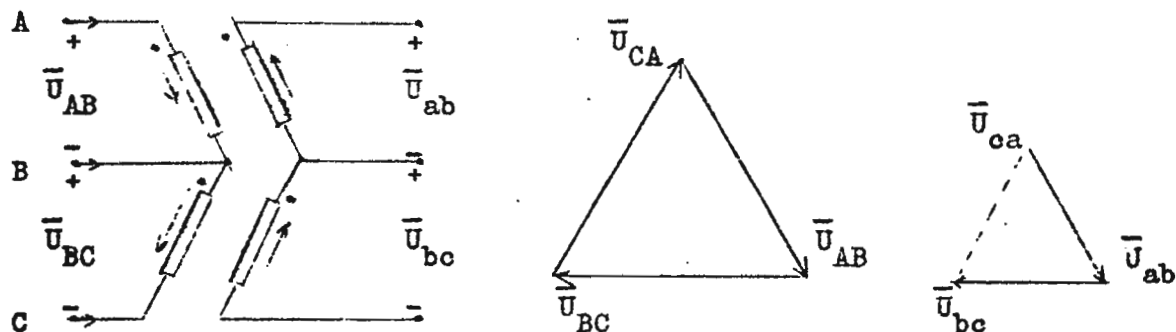
I trefassammanhang och vid större effekter används den bla. som starttransformator och som s.k. reglertransformator i kraftnät. Även då det gäller att sammankoppla nät med olika men ändå relativt lika spänningar utgör den sparkopplade trafon ett prisvärt alternativ.

### V-koppling.

Ett viktigt exempel på en osymmetrisk koppling för transformering av trefaseffekt utgör den s.k. V-kopplingen. Denna koppling använder endast två enfaseenheter och kan anses härröra från en ordinär D-koppling, varifrån en enhet bortkopplats. Som redan påpekats i annat sammanhang kan trefaseffekt transformeras med reducerad effekt.

Kopplingen har stor användning vid spänningstransformatorkopplingar (mättransformatorer), då man kan spara in på kostnader. Förutom som nödfallsåtgärd, förekommer stundom att man installerar två enfaseenheter i V-koppling då man räknar med att en anläggning kan växa och så småningom kompletteras med en tredje enhet.

Kopplingsschema framgår av figuren nedan, som också visar visardia-gram för primär- och sekundärsida.



Om spänningsfallen är försumbara erhålles symmetrisk trefasspänning på både primär- och sekundärsida, vid såväl tomgång som belastning. Detta förutsätter också att det matande nätet är styvt.

Om spänningsfallen i transformatorn ej kunna försummas, erhålles osymmetri i det sekundära spänningssystemet. Endast i tomgång och vid svag belastning kan spänningssymmetrin bibehållas. Spänningstransformatorer i mätkretsar uppfyller i allmänhet detta villkor mycket väl.

Som uttryck för utnyttningen, d.v.s. förhållandet mellan genomgångseffekt och total typeffekt, får vi vid matning av symmetrisk belastning

$$k_u = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n}{2 \cdot U_n \cdot I_n} = 0,866 ;$$

Uttryckes genomgångseffekten vid V-koppling i förhållande till genomgångseffekten vid ordinär D-koppling fås

$$\frac{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n}{3 \cdot U_n \cdot I_n} = 0,58 ;$$

## SPECIELLA TRANSFORMATORER.

### 1. Skyddstransformatorer.

För speciella ändamål och med hänsyn till elfaran föreskrivs i gällande föreskrifter nedsatt bruksspänning. Nedsättning av spänningen sker vanligen genom nedtransformering.

Spänningar med ett högsta värde om 50 V benämns klenspänning. Den anses ofarlig vid beröring i normala fall och är därför föreskriven för anslutning av sladdlampor och bruksföremål vid användning i mycket trånga utrymmen med ledande golv och väggar som i cisterner och liknande.

En transformator i syfte att nedsätta spänningen enligt ovan skall vara väl isolerad och speciellt godkänd för ändamålet (SEMKO 115 - 1969)

Överledning av ström från den matande primärsidan skall vara väl förebyggd. Transformatorn kallas då skyddstransformator. Nedsidans märkspänning får vara högst 42 V. Vanliga märkspänningar är 6, 12 och 24 V. Det är tomgångsspänningen som får vara högst 50 V. (Småtransformatorer märks efter andra principer än krafttransformatorer. Bl.a. gäller att märkningen alltid avser viss effektriktning vilket innebär att primär- och sekundärsida är fastlagda en gång för alla. Märkningen i övrigt avser värden som gäller vid märkdrift d.v.s. då transformatorn primärt är ansluten till en spänning med märkspänningsvärdet och sekundärt belastas rent resistivt så att skenbar märkeffekt tas ut. Den primärt immatade skenbara effekten är därvid större än märkeffekten.) Skyddstransformatorer för ringledningar och leksaksutrustningar får ha en högsta tomgångsspänning om 33 V (det teoretiskt högsta värdet då alla lindningar på nedsidan är seriekopplade och medverkande). Högsta tillåtna märkeffekt är 10 kVA. Betydligt vanligare är dock märkeffekter i området 100 VA till 1 kVA.

Skyddstransformator skall vara så utförd att den antingen är obegränsat kortslutningssäker eller begränsat kortslutningssäker och försedd med smältsäkring eller annat utlösningsorgan till skydd mot överhettning eller fel. Den förra gruppen karaktäriseras av relativt stor kortslutningsimpedans och alltså relativt stor skillnad mellan tomgångs- och märkspänning.

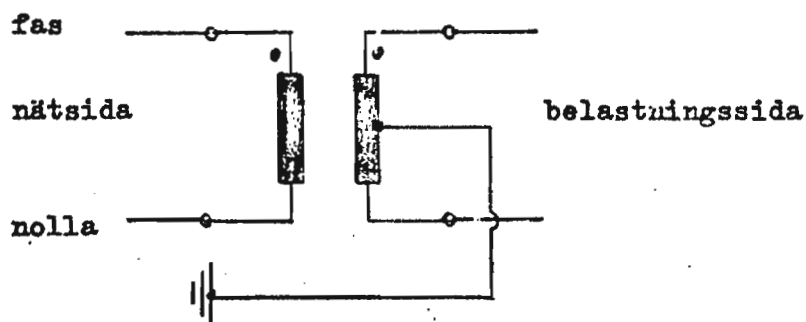
### 2. Mellantransformatorer för skyddsändamål.

Transformatorer för nedsättning av spänningen till värden mellan 50 V och 125 V av säkerhetsskäl kallas mellantransformatorer för skyddsändamål. Nedsidans märkspänning får vara högst 115 V och den högsta tomgångsspänningen 125 V. Användningsområdet är oftast matning av handverktyg i speciella miljöer. Fordringarna på utförandet är väsentligen desamma som för skyddstrafon.

Såväl skydds- som mellantrafon för skyddsändamål får anslutas till nät med högst 600 V, om den är fast uppställd eljest till max. lågspänning.

Krav på systemjordning:

Används en särskild transformator (gäller både skyddstrafon och mellantrafon för skydd) för varje enskilt bruksföremål behövs ingen systemjordning (direktförbindelse med jordtag). Är transformatorn däremot gemensam för flera bruksföremål skall trafon dels vara fast uppställd, dels ha jordad mittpunkt vid enfasutförande respektive jordad neutralpunkt vid trefasigt utförande. Jordning skall ske till det matande systemets nolledning genom särskilt utdragen skyddsledare. Se figuren nedan !



## Spänningsreglering med transformatorer

Omsättningskopplare. För att en transformators sekundärspänning skall kunna hållas konstant vid varierande primärspänning och varierande belastning utför man ofta transformatorn med reglerbar omsättning. Detta sker i regel så, att man medelst en omkopplare ändrar antalet verksamma lindningsvarv på primär- eller sekundärlindningen. Vanligen anordnas regleruttagen på högspänningslindningen, enär denna ligger ytterst på kärnans

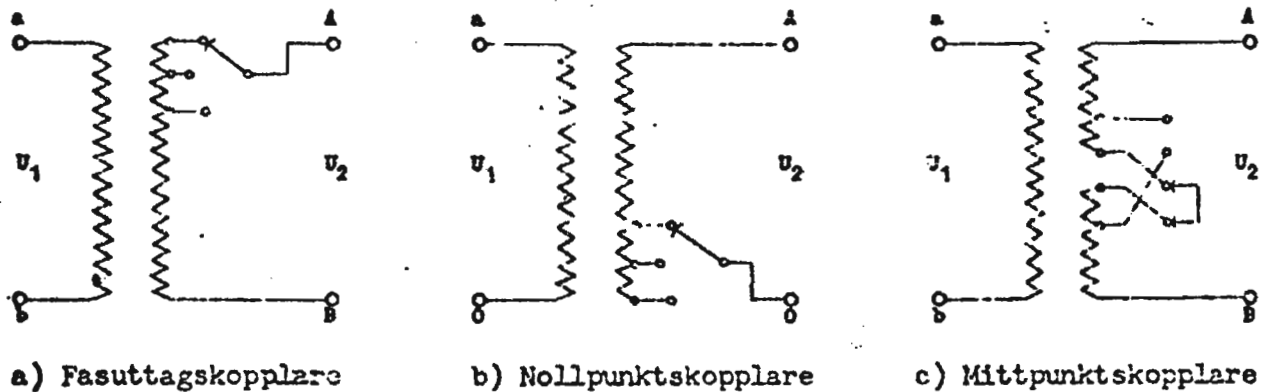
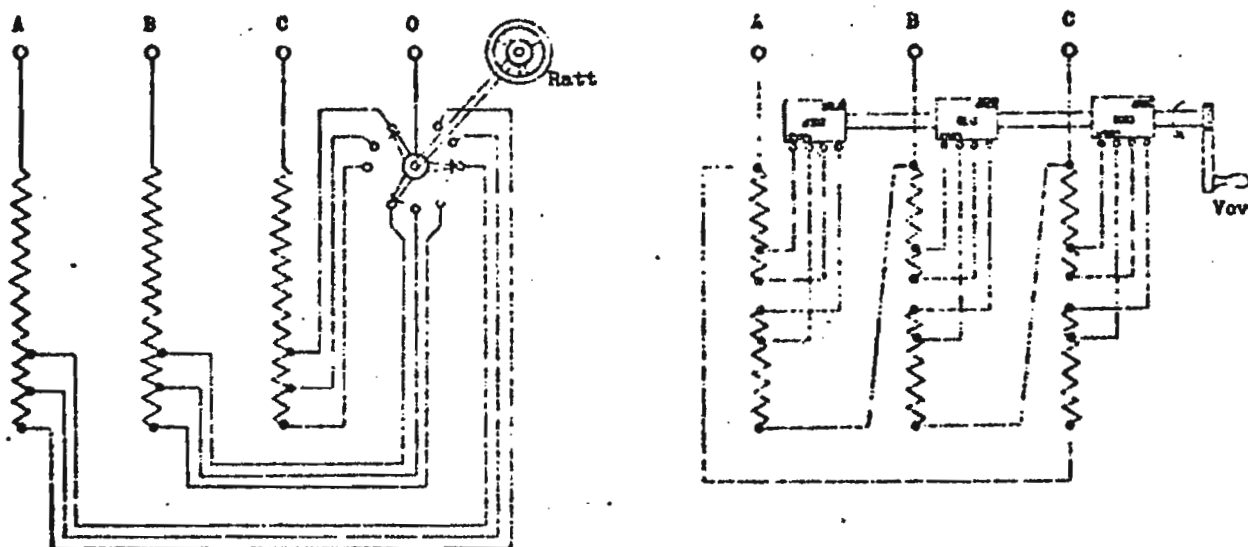


Fig. 32a-c. Principen för omsättningsreglering.

ben och således är lättast åtkomlig samt har den lägsta strömstyrkan. Regleruttagen kan uttagas vid lindningens fasuttag, lindningens nollpunkt eller vid lindningens mittpunkt (fig. 32). Hos större transformatorer fördelas reglervarven utmed hela benet.

Om lindningsomsättningen skall ändras endast sällan och i spänningslöst tillstånd, användes en enkel omsättningskopplare i varje fas. Med en dylik regleras omsättningen vanligen i tre steg med  $+5\%$ ,  $0\%$  och  $-5\%$  av lindningens märkspänning resp. märkvarvtal. Vid 3-fastransformatorer



a) Y-koppling

b) D-koppling

Fig. 33a-b. Exempel på trefasiga omsättningskopplare.

användes en 3-polig omsättningskopplare, som är placerad omedelbart under transformatorlådans lock och manövrerbar med ratt eller vev från lockets utsida. Omkopplaren består av tre kontaktarmar eller kontaktvalsar på en gemensam axel (fig. 33).

Lindningskopplare. För att omkoppling skall kunna ske under drift med belastningsström användes en lindningskopplare, som verkställer omkopplingen mellan två uttag utan vare sig strömbavbrott eller kortslutning. En

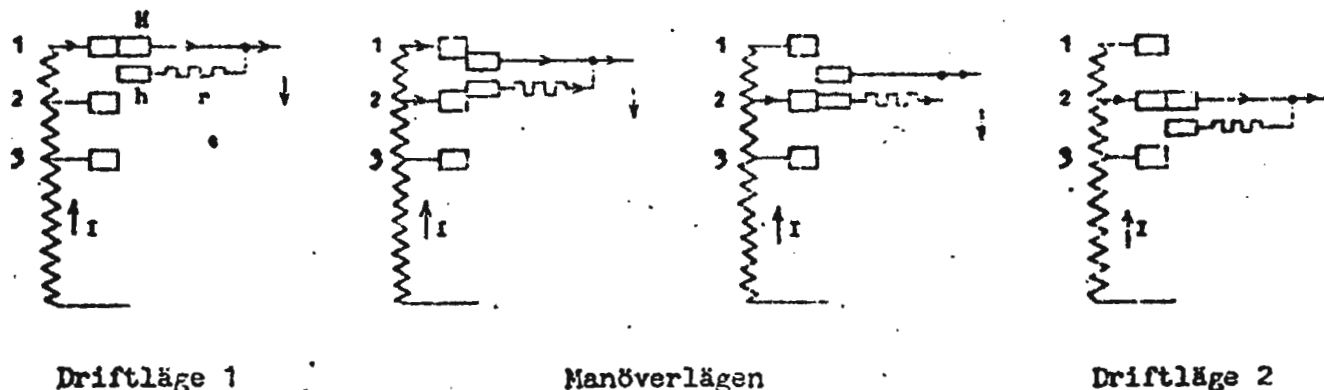


Fig. 34. Principen för lindningskopplaren och förloppet vid omkoppling ett steg.

dylik omkopplare består i princip av en huvudkontakt H, en hjälpkontakt h och ett dämpmotstånd  $r$  på en gemensam kontaktslåde (fig. 34). Ett flertal konstruktioner av lindningskopplare finnes. Ett vanligt utförande visas i fig. 35. Omkopplaren K är mekaniskt kopplad till väljarna  $V_1$  och  $V_2$ , så att

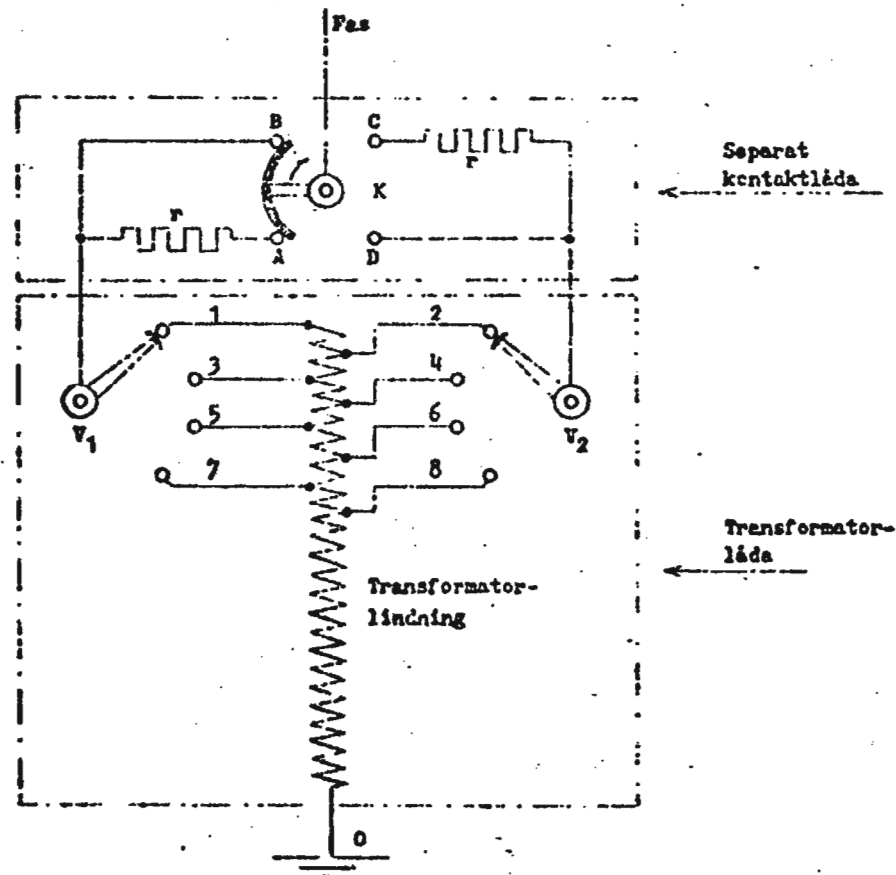
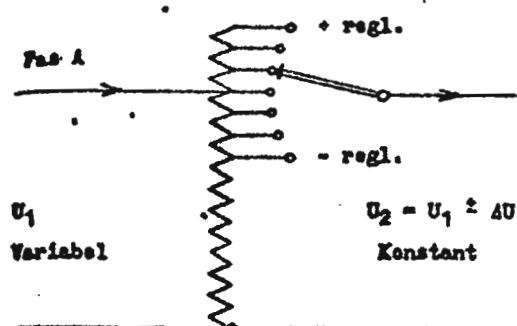


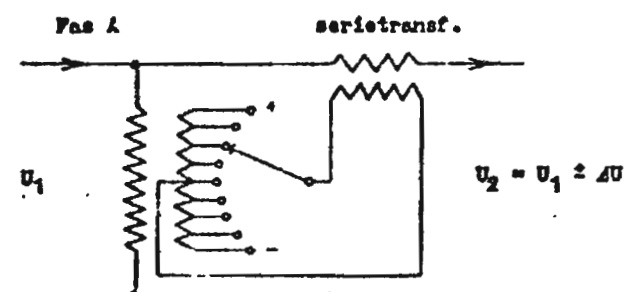
Fig. 35. Exempel på lindningskopplare.

dessas växelvis flyttas ett steg för varje varv K manövreras. För omkopplaren K är lägena A-B och C-D driftlägen samt lägena B-C och D-A manöverlägen. Emedan väljarna  $V_1$  och  $V_2$  kopplar i strömlöst tillstånd och alltså kopplar utan ljusbågar, är de inbyggda i transformatorlådan. Omkopplaren K däremot ger någon gnistbildning och därmed sotning av oljan, varför omkopplaren är placerad i en separat och oljefylld kontaktlåda.

Reglertransformatorer. Om man vill skona den dyrbara huvudtransformatorn från försvagande lindningsuttag eller om man önskar reglera spänningen i en punkt av ett kraftnät, där ingen huvudtransformator med regleruttag finnes, användes separata reglertransformatorer (fig. 36). Dessa



a) Sparkkopplad reglertransformator

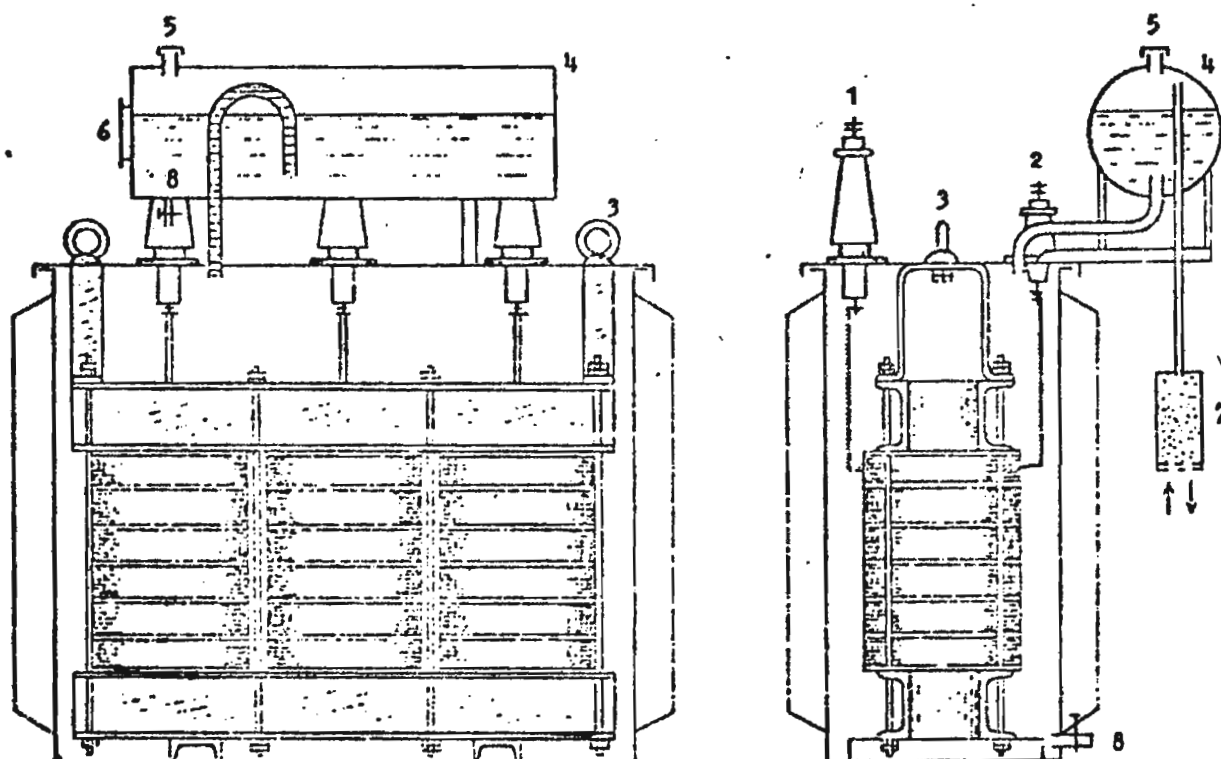


b) Tillsatstransformator

Fig. 36a-b. Exempel på reglertransformatorer.

utföres vanligen med sparkoppling eller med tillsats - serietransformator för plus - minusreglering. För reglering under drift användes lindningskopplare.

thns skolat.



1 = hap.-genomföring  
2 = lsp.-genomföring  
3 = lyftögla  
4 = expansionskärl

5 = oljefyllningshål  
6 = oljenivåvisare  
7 = lufttorkningsapparat  
8 = avtappningskran

**Fig. 44.** Sektion av trefas oljetransformator.

ofta korrugerad eller försedd med kylrör. De spänningsförande ledarna föres genom locket via isolerande genomföringar. I locket anbringas dessutom lyftögla, explosionsventil, rör till expansionskärl etc. För att oljan vid uppvärmning och avkylning skall få möjlighet att ändra sin volym förses större transformatorer med ett expansionskärl. Förbindelsen mellan luftkudden i kärlet och fria luften drages ibland genom en lufttorkningsapparat, som innehåller vattenabsorberande kemikalier, t.ex. kalciumklorid eller silica-gel.

#### d) Kylning

Kylningsmetoder. Vid användningen uppstår i transformatorns kärna och lindningar vissa effektförluster, vilka omsättes till värme. Detta måste föras bort av något elektriskt isolerande kylmedium, som omspolar lindningarna, så att de termiskt ömtåliga isolationerna ej blir för varma. Med hänsyn till transformatorns kylmedium skiljer man därför mellan luftkylda transformatorer och oljekylda transformatorer.

Luftkylda transformatorer användes endast för små effekter och låga spänningar. De indelas enligt SEN 4 i självkylda lufttransformatorer, där kylningen sker endast genom den omgivande luftens fria cirkulation, samt fläktkylda transformatorer, där en särskild fläkt driver en kylande luftström genom transformatorn.

Oljekylda transformatorer, som är det vanliga, indelas enligt SEN 4 i följande grupper:

- 1) Självkylda oljetransformatorer
- 2) Fläktkylda oljetransformatorer
- 3) Vattenkylda oljetransformatorer
- 4) Tryckoljekylda oljetransformatorer

Förlustvärmets från kärnan och lindningarna upptages av oljan, som härvid uppvärms. Den varma oljan stiger uppåt och avkyles, varefter den sjunker nedåt utefter lådans väggar (fig. 45). På så sätt uppstår en kraftig självcirkulation av oljan inuti transformatorlådan.

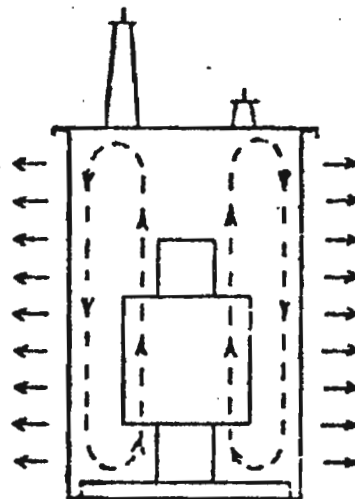


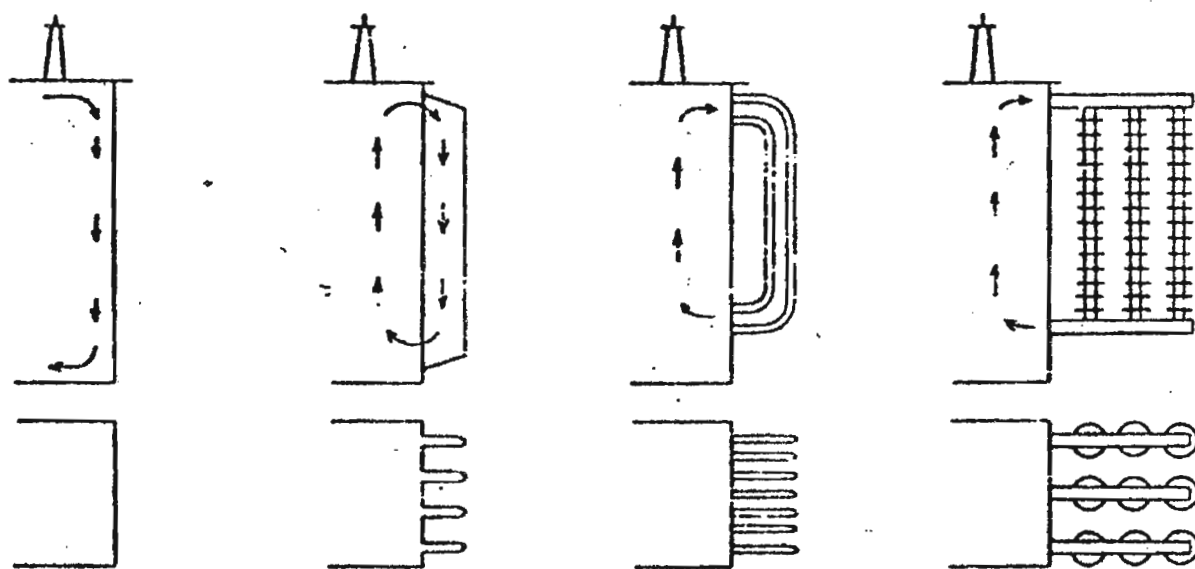
Fig. 45. Oljans cirkulation inuti transformatorlådan.

Kylanordningar. Avkylningen av kärnan och lindningarna underlättas av inre kylkanaler, som ger större kylyta (= beröringsyta med oljan), så att oljan lättare kan upptaga förlustvärmets. Avkylningen av oljan sker oftast genom den omgivande luften, varvid transformatorlådan måste givas erforderlig kylyta.

Självkylda oljetransformatorer utföres vid små effekter med lådans väggar helt släta. Vid medelstora transformatorer utföres lådans väggar korrugerade (veckade), varigenom värmeavgivningen kan fördubblas (fig. 46 a-b). Vid stora transformatorer räcker ej korrugering, utan man måste tillgripa släta eller kamflänsförsedda kylrör, genom vilka oljan självcirkulerar (fig. 46c-d).

Fläktkylda oljetransformatorer är försedda med en fläkt, från vilken kylluft får svepa längs lådans sidor, som då vanligen är korrugerade. Ibland omges oljelådan av en yttre kylmantel.

Vattenkylda oljetransformatorer är i oljelådans övre del försedda med inbyggda kylrör, genom vilka kylvatten pumpas. På grund av risken för läckage etc. frångås detta system dock alltmera.



a) Slät yta

b) Korrugering

c) Kylrör

d) Kamflänsrör

Fig. 46a-d. Olika utföringsformer av oljelådans kyltor.

Tryckoljekyllda oljetransformatörer har i stället fått stor användning. Här pumpas oljan kontinuerligt från övre delen av oljelådan genom en utanför denna placerad oljekylare tillbaka in i lådans nedre del (fig. 47). Oljekylaren utföres antingen för kylning med luft från en fläkt eller med vatten från en kylvattenpump.

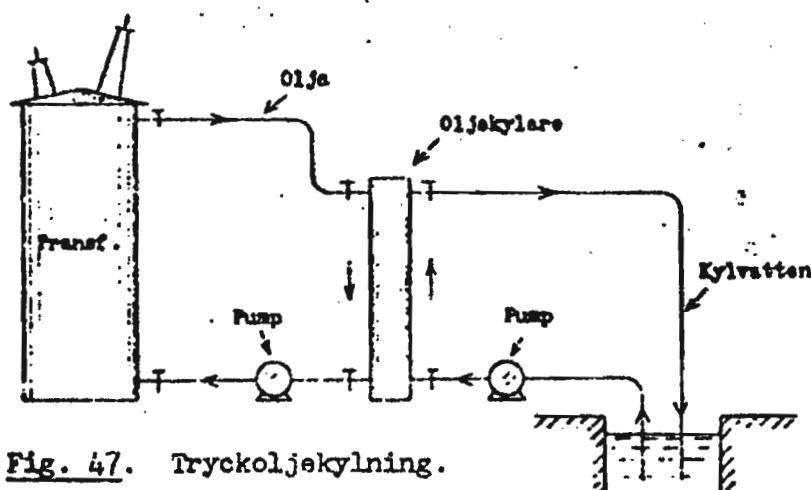


Fig. 47. Tryckoljekylning.

### e) Driftövervakning

Temperaturkontroll. Om man antar en högsta temperatur hos kyl Luft en av  $35^{\circ}\text{C}$ , så blir enligt SEN 4 vid normala oljetransformatörer högsta tillåtna temperaturen hos lindningarna och kärnan  $95^{\circ}\text{C}$  och hos oljan  $85^{\circ}\text{C}$ . För kontroll av oljetemperaturen användes termometrar i översta oljeskiktet (toppoljan). Hos större transformatorer kontrolleras vanligen även lindningstemperaturen. När någon termometer ej kan anbringas direkt på lindningen, användes en kompenserad termometer. En strömtransformator i en lindningsfas ger en mot belastningsströmmen proportionell ström, som värmer

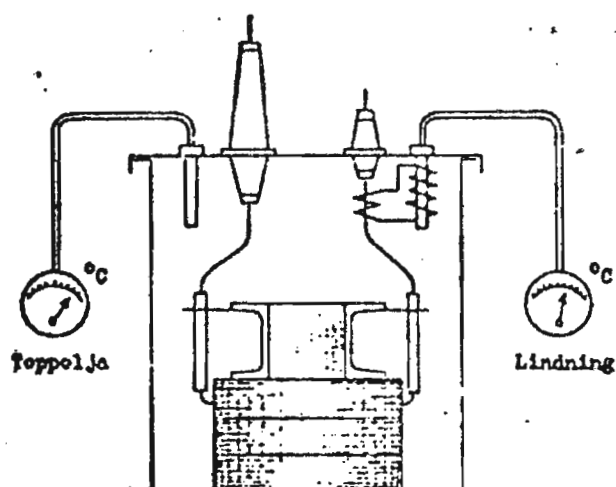


Fig. 48. Temperaturkontroll.

som gasbildning. Dylåka inre fel kan upptäckas medelst en gasvakt (fig. 49). Den består av en behållare, som är inmonterad i rörledningen mellan transformatorlocket och expansionskärlet samt innehåller upptill en flottörkontakt och nedtill en skärmkontakt. Kontakterna utgöres av kvicksilvervippor. Behållaren är normalt fylld med olja. Vid små fel samlar sig oljegas upptill

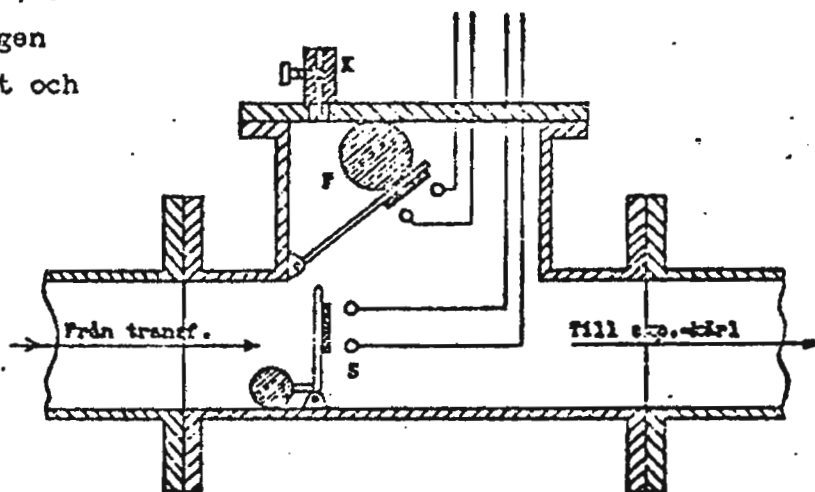
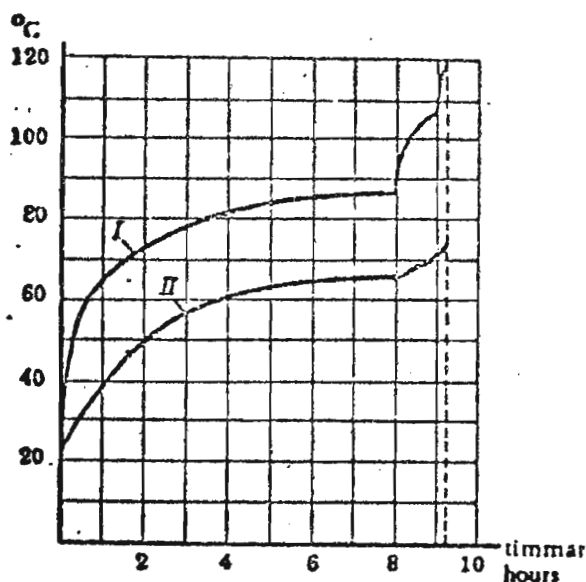


Fig. 49. Gasvakt.

i behållaren, varvid övre flottörkontakten F sjunker och sluter en signalströmkrets. Vid större fel (kortslutningar, ljusbågar, gasexplosioner etc.) växer oljetrycket i transformatorn och pressar en kraftig oljeström mot expansionskärlet. Härvid slår skärmkontakten S undan och sluter en utlösningströmkrets, varigenom transformatorn bortkopplas. Den i behållaren samlade gasen kan släppas ut genom en kran K. Av gasens färg och övriga egenskaper kan man ofta fastställa felets art. Gasvakten ger signal och bortkopplar transformatorn, om oljeståndet i expansionskärlet blir för lågt. Endast större transformatorer utrustas med gasvakt.

Hastiga belastningsändringar inverkar mycket långsamt på oljetemperaturen under det att lindningstemperaturen når sitt fortvarighetstillstånd avsevärt tidigare. Nedanstående diagram visar temperaturkurvorna för en transformators lindning och olja. Transformatorn antas i början ha samma temperatur som kylmediet,  $20^{\circ}\text{C}$ . Vid denna temperatur kopplas transformatorn in med normal belastning. Efter 8 timmar har lindning och olja antagit konstant temperatur. Transformatorn överbelastas därefter med  $35\%$  under 1 timme och sedan med  $70\%$  under 15 minuter. Som framgår av diagrammet har oljetemperaturen under överbelastningsperioderna ökat med  $7^{\circ}\text{C}$  under det att lindningstemperaturen ökat med  $33^{\circ}\text{C}$ .



Temperaturdiagram för transformator.

I Lindningens temperatur i varmaste punkten

II Oljans temperatur i varmaste skiktet.

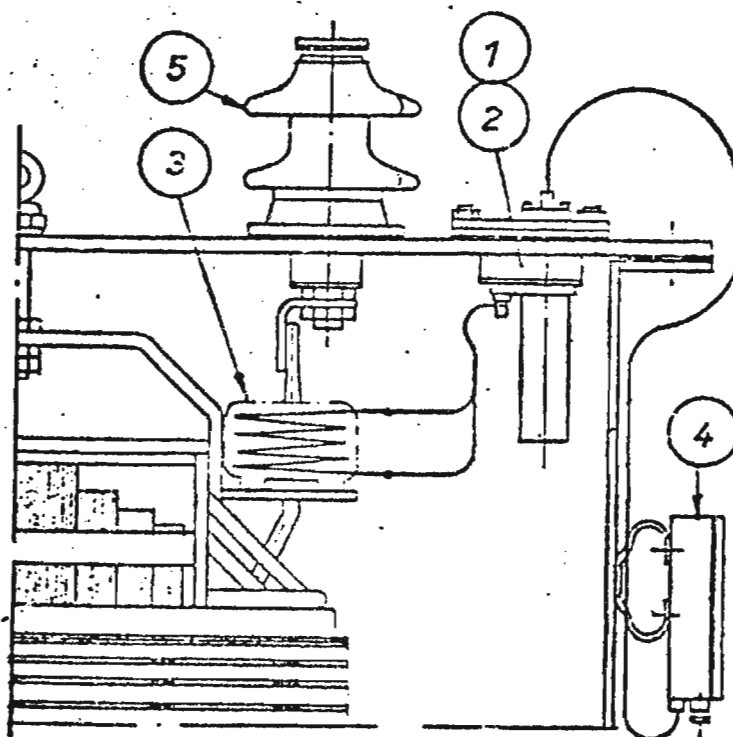
**ALLMÄLT**

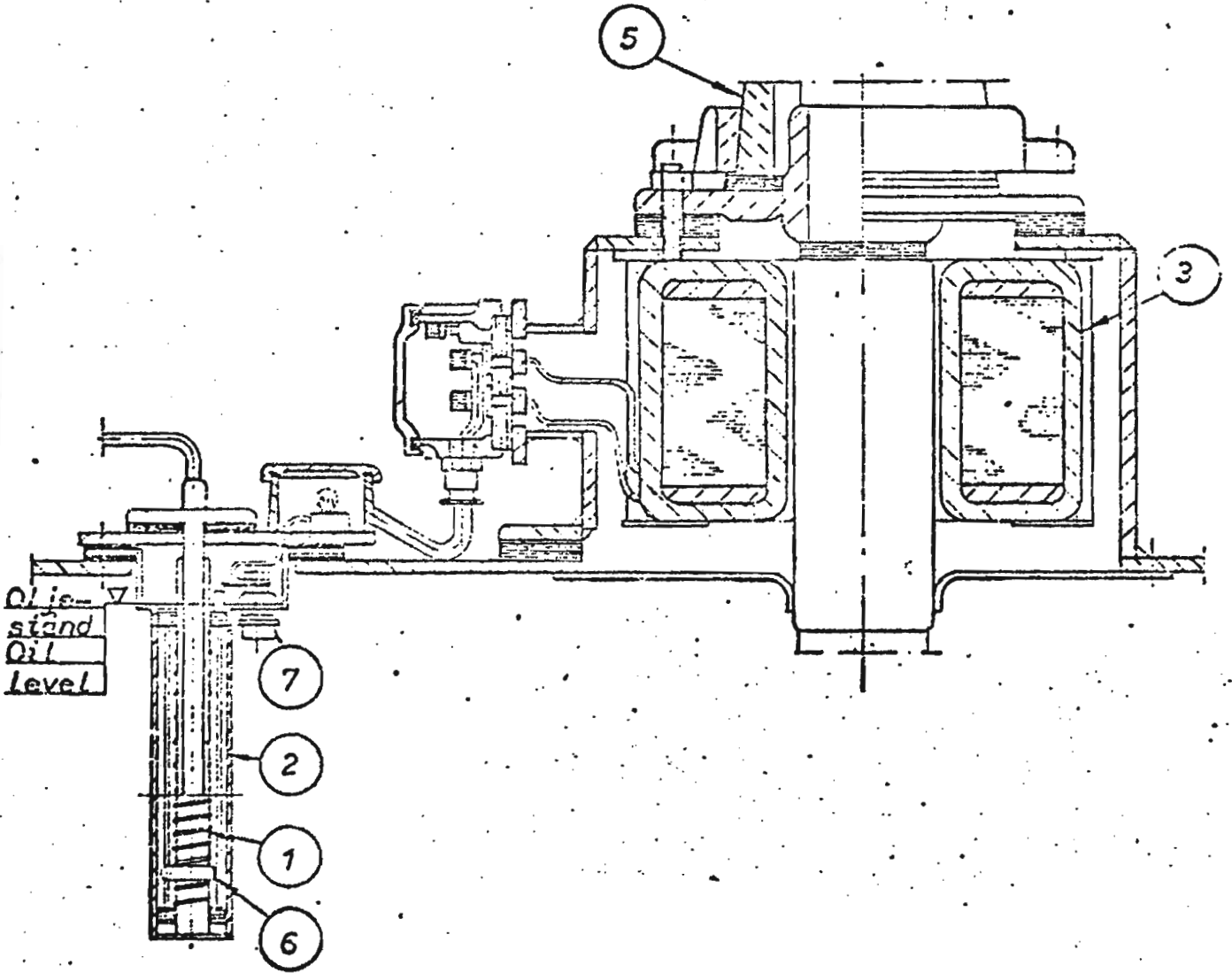
Oljeterperaturen i en transformator ändras endast relativt långsamt när belastningen varierar under det att lindningstemperaturen når sitt fortvarighetstillstånd över oljan avsevärt mycket hastigare. Den termiska tidskonstanten för oljan räknas i timmar, men för lindningen rör det sig endast om minuter.

Då temperaturfallet lindning-olja ökas nästan kvadratisk med belastningen kan temperaturen enbart i toppoljan ej ge någon riktig bild av temperaturen i de inre delarna av transformatorn.

I normala fall är det ej möjligt att applicera någon anordning för temperaturmätning direkt på transformatorns lindningar. ASEA använder i stället en metod, vid vilken man mäter en på artificiell väg erhållen temperatur, som följer temperaturen i en av transformatorns lindningar i dess variationer. Anordningen fungerar enligt följande, se fig. 1 och 2.

Värmeelementet 1 som är monterat i en oljefylld termometerficka 2 i transformatorns lock, uppvärms av strömmen från en strömtransformator 3 kopplad i serie med en av transformatorns lindningar. Strömmen genom värmeelementet kommer

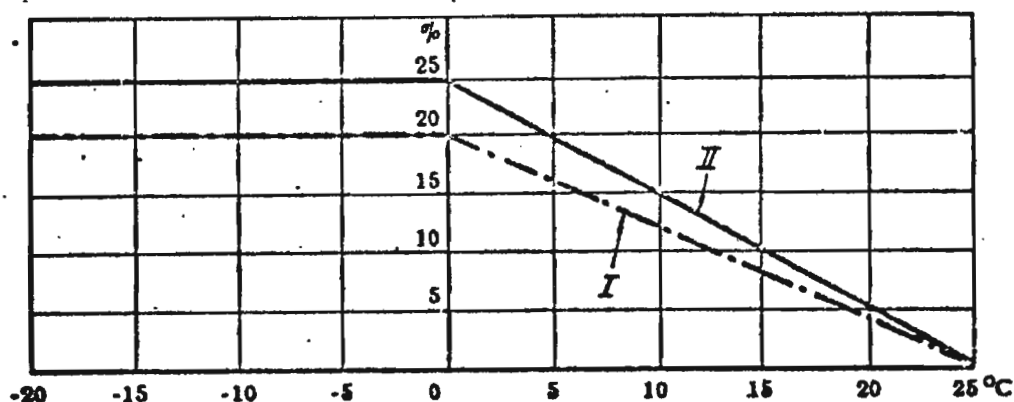




## Temperaturen

En transformators livslängd är i hög grad beroende av den temperatur som uppträder i lindningarna och kärnan under drift. Det är därför viktigt att hålla temperaturen under fortlöpande kontroll. De tillåtna temperaturstegringarna är angivna i standardnormerna för transformatorer och bestämmelserna varierar något för olika länder. Svensk standard enligt SEI 4 tillåter en temperaturhöjning av  $50^{\circ}\text{C}$  för oljan och  $60^{\circ}\text{C}$  för lindningarna. Dessa värden är baserade på en maximitemperatur hos kylmediet av  $35^{\circ}\text{C}$  för luft och  $25^{\circ}\text{C}$  för vatten.

Med en låg temperatur på kylmediet kan transformatorn överbelastas. Den tillåtna överbelastningen får dock ej bestämmas endast på basis av oljans temperaturstegring över kylmediet, då temperaturfallet lindning-olja ökar med 1,6:te potensen av belastningsökningen. Nedanstående diagram, som kan tjäna som en mera allmän anvisning, visar överbelastningsförmågan vid temperaturer på kylmediet mellan  $+25^{\circ}\text{C}$  och  $0^{\circ}\text{C}$ . Kurva I hänför sig till tryckoljekyllda transformatorer, kurva II till självkyllda och fläktkyllda. Temperaturen i den varmaste punkten i lindningen har antagits vara  $+95^{\circ}\text{C}$ .



Överbelastningsförmåga i procent vid varierande temperatur hos kylmediet.

I Tryckoljekyllda transformatorer

II Självkyllda och fläktkyllda transformatorer

GASVAKT  
 OLJENIVÅVISARE MED KONTAKTDON  
 TERMOMETER FÖR OLJETEMPERATUR  
 MOTSTÅNDESELEMENT FÖR INDIKERING AV LINDNINGSTEMPERATUR (100 Ω)  
 MOTSTÅNDESELEMENT FÖR INDIKERING AV LINDNINGSTEMPERATUR (100 Ω)  
 MOTSTÅNDESELEMENT FÖR INDIKERING AV LINDNINGSTEMPERATUR (100 Ω)  
 TRYCKVAKT  
 VÄRMEELEMENT FÖR MOTSTÅNDESELEMENT  
 VÄRMEELEMENT FÖR MOTSTÅNDESELEMENT  
 VÄRMEELEMENT FÖR MOTSTÅNDESELEMENT  
 PUMP  
 MANÖVERCENTRAL  
 MOTORMANÖVERDON  
 EXPANSIONSKÄRL  
 TORKAPPARAT  
 MÄRKSKYLT  
 KONTROLLTERMOMETERFICKA  
 TERMOMETERFICKA FÖR OLJETEMPERATUR  
 AVTAPPNINGSVENTIL  
 FILTERVENTIL  
 AVSTÄNGNINGSVENTIL  
 AVLÜFTNINGSVENTIL  
 LYFTDON FÖR LYFTNING AV LOCK  
 LYFTDON FÖR LYFTNING AV KOMPLETT TRANSFORMATOR  
 DRAGHÅL D  
 ANBRINGNINGSPUNKT FÖR DOMKRAFT  
 TRALLRÅM LÖSTAGSAR MED OMSTÄLLBARA HJUL  
 KOPPLINGSLUCKA  
 JORDDON  
 GENOMFÖRING LF 123 113-B  
 GENOMFÖRING LF 123 015-B  
 GENOMFÖRING 2761 036-A  
 SKYDDSHUV FÖR KABELANSLUTNINGAR  
 LINDNINGSKOPPLARE  
 PROVVENTIL FÖR TRYCKVAKT  
 KYLARBATTERI  
 KYLARBATTERI  
 STEGE  
 ANSLUTNINGSGÄPPNING STORLEK FL 33  
 UTÅGSLADA FÖR STRÖMTRANSFORMATOR



### Varför torrisolerade transformatorer ?

Enligt KSF skall transformatorers utförande vara avpassat efter uppställningsplatsens beskaffenhet dvs efter byggnadens beskaffenhet och det ändamål för vilket transformatorn är avsedd.

Bl.a. skall brandfaran förebyggas i skälig grad, brandskydd ordnas och utrymningsmöjligheter säkerställas. Speciellt ställs krav på vätskeisolerade transformatorer vad det gäller nivåövervakning och möjligheter att uppfånga och oskadliggöra utrunnen vätska.

I Sverige avses med vätskeisolerad transformator väsentligen oljeisolerad transformator, i vilken man utnyttjar oljans goda isoleregenskaper samt därtill dess förmåga att kyla lindningar och kärna. I st.f. olja kan icke brännbar vätska (exvis askarel = klorerad difenyl) förekomma, vilket dock fortfarande är ovanligt i vårt land.

När föreskrifter och lokala bestämmelser omöjliggör eller andra omständigheter antyder att det är olämpligt och ofördelaktigt att använda oljeisolerade transformatorer, har torrisolerade sådana sin givna plats. Därvid minskas brandfaran väsentligt eftersom torrisolerade trafon är svårantändliga och ofta självblocknande. Man kan på så sätt undvika eljest erforderliga och ofta omfattande brandskyddsåtgärder och behöver ej heller riskera vätska, som förutom att sprida brand i oljefallet, även kan läcka ut och förorena grundvatten.

Rent ekonomiskt är det ofta lämpligt att kunna placera en transformator i belastningens centrum och överföra energin med högspänningskabel (6 - 10 kV) fram till transformatorn i st.f. att nödgas dra långa kablar för lågspänning från en transformator utanför exvis en fabriksbyggnad. Både lednings- och förlustkostnader utfaller betydligt gynnsammare i det förstnämnda alternativet. På grund av sin placering i belastningens centrum väljes transformatorn torrisolerad.

På marknaden saluföres idag trefasiga, torrisolerade fulltransformatorer med märkeffekter upp till 4 - 5 MVA och med spänningar upp till 30 kV på uppsidan. Transformatorerna kan utföras helt öppna, insatta i ett plåtskåp i en fördelningscentral och vara självkylda. De kan också förses med fläktkyllning och därmed ges förhöjd belastningsförmåga. Även helt kapslat utförande förekommer.

Som ett specialutförande saluför idag vissa tillverkare torrisolerade trafon med gjuthartsisolerade (epoxiplastingjutna) lindningar. Härigenom skyddas lindningarna i stor utsträckning mot mekanisk åverkan och blir okänsliga för damm och fukt, vilket är fördelaktigt inte minst i tropiskt klimat med hög fuktighetshalt. Trafon i detta utförande kan stå fränkopplade under obegränsad tid och därefter åter tas i drift utan föregående torkning. Gjuthartsisoleringer ger dessutom ökad säkerhet vid kortslutningar och stötspänningspåkänningar och lindningar fria från partiella urladdningar.

Som exempel på användningsområden förr torrisolerade trafon kan nämnas sjukhus, skolor, varuhus, höghus, hotell, samlingslokaler, driftrum, fabrikslokaler.

ASEA:s katalog L del 1 flik 2 behandlar torrisolerade självkylda trefastransformatorer typ TLE, 200 - 2000 kVA, 50 Hz.

# Normenliga transformatorprov, sammanfattning.

I gällande SEN - normer för olika transformator kategorier (krafttransformatorer, distributionstransformatorer etc...) föreskrivs olika prov och ges även anvisningar om provens genomförande liksom tolkning av mätresultaten.

Man skiljer på allprov, som alla transformatorer skall genomgå, och typprov, som utföres på enstaka exemplar i en tillverkningsserie eller på särskild begäran från kund.

Proven enligt ovan utföres lämpligen av tillverkaren i samband med leveranskontrollen. Provresultaten bifogas leveransen som ett särskilt provningsprotokoll. Vid idrifttagning är proven enligt ovan normalt ej aktuella.

Allproven är enligt SEN 27 01 01 följande:

1. Kontroll av lindningspolariteter (för riktig uttagsmärkning), omsättning och kopplingsart.
2. Likströmsmätning av lindningsresistanser.
3. Mätning av belastningsförluster och kortslutningsimpedans genom ett kortslutningsprov.
4. Mätning av tomgångsström och aktiv tomgångseffekt genom ett tomgångsprov.
5. Isolationsprov med inducerad växelspanning med dubbla märkspänningsvärdet och förhöjd frekvens under en minut.
6. Isolationsprov med separat växelspanningskälla, 50 Hz, under 1 minut och med spänning svarande mot erforderlig isolationsnivås normerade värde.

Typproven omfattar:

1. Värmeprov vid märkström.
2. Stötspänningsprov med fastställd stötkarakteristik och med spänning svarande mot normerad isolationsnivå.  
Torrisolerade transformatorer utföres normalt utan fordran på stötspänningsprov.

Utnär

Utöver de normenliga proven ovan kan ytterligare prov genomföras på begäran. Hit hör bl.a:

Stötströmsprov, varvid den kortslutna transformatorn matas med strömstötter om 25 gånger märkströmsvärdet i varje fas och med en varaktighet om 0,5 sek. Provet utföres ett antal gånger och omfattar varje gång tre stötter.

Bestämning av nollföljdsimpedans.

Ljudprov.

Glimningsprov.

..

..

**THIS SKOLIST.**

31.723 y 19.072 H31 200.000 0-0-1.2

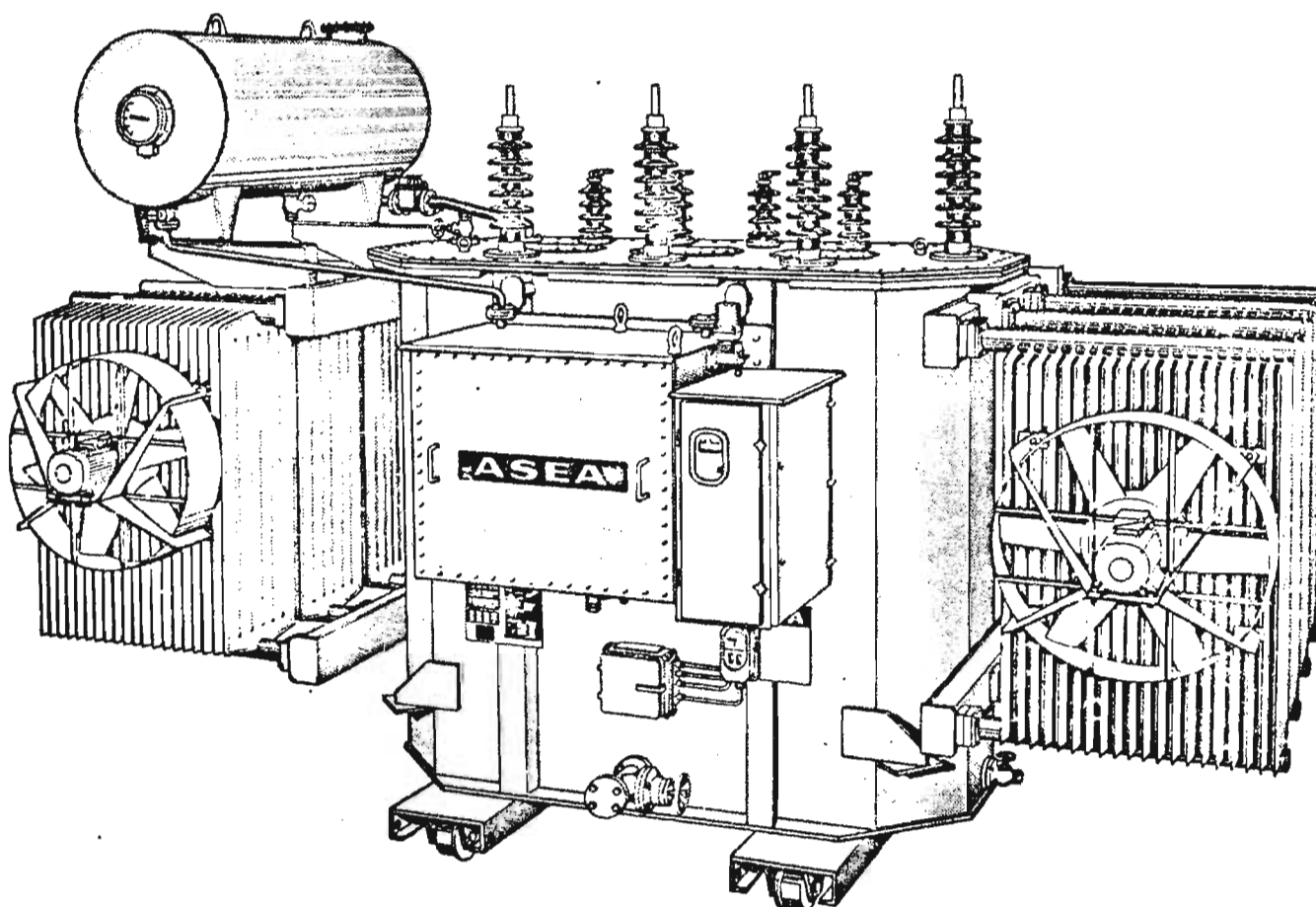
Åtgärd:  
Inspektion och avläsning  
Rengöring och undersökning  
Oljeprov, provning  
Filtrering  
Smörjning  
Manöverprov  
Prov av elektriska kretsar  
Meggerprov av elektriska  
kretsar  
Inspektion av kontakter  
Utbyte av kontakter

**L**

# KRAFTTRANSFORMATORER

**3.15-25 MVA**

**Med lindningskopplare**



Denna katalog omfattar självkylda oljeisolerade transformatorer med märkeffekter 3.15-25 MVA och med märkspänning 21, 42 och 55 kV på

högspänningssidan. Transformatorerna är utrustade med lindningskopplare för spänningsregiering.

# Krafttransformatorer med lindningskopplare

Märkeffekter 3.15, 4, 5, 6.3, 8, 10, 12.5, 16, 20 och 25 MVA

## BESKRIVNING

Kärnan är tillverkad av 0.30 mm orienterad plåt med ett värmebeständigt isolationsskikt. Hörnen är bladdade med 45° fogar. Plåten efterglödgas efter skärningen för borttagning av mekaniska spänningar, vilka eljest kan förorsaka extra förluster.

Högspänningslindningen har en separat reglerdel, bestående av slingor utefter benets hela längd, varigenom en symmetrisk amperevarvsfördelning bibehålls vid in- och urkoppling av reglervarv.

Lindningskopplaren är av typ UZNLB, som är snabbbrytande och som ger möjlighet till linjär omkoppling i 16 steg. Kontakterna manövreras av ett motorfjäderdon, varigenom en påbörjad omkoppling alltid slutförs, även om drivmotorn skulle bli strömlös. Lindningskopplaren är monterad i en separat låda på transformatorns ena långsida.

Oljan i lindningskopplarlådan står i förbindelse med transformatorns expansionskärl via ett filter, som förhindrar förorening av oljan i expansionskärlet. Lindningskopplarens drivdon är monterat på lindningskopplarlådans högra sida och omfattar motorfjäderdon, handmanöverdon, växel, lägesindikator samt värmeelement. Automatisk spänningsreglering kan erhållas på begäran mot merpris.

Lindningskopplaren är dimensionerad för 140 % ström kontinuerligt och 160 % ström kortvarigt.

Låda och lock är tillverkade av varmvalsad stålplåt och är dimensionerade för en oljenivå lika med dubbla lådhöjden. Mot merpris kan lådan dimensioneras för fullt vakuum.

Ytbehandlingen omfattar sandblästring, grundlackering och täcklackering i blågrå färg. Färgskiktets tjocklek är ca 100 µm.

Kylutrustningen består av varmförzinkade radiatorer. Dessa ansluts till samlingslådor placerade på transformatorns gavlar. Radiatorerna är försedda med ventiler och kan vid behov demonteras. Transformatorerna kan förses med fläktar typ PMA, som monteras på radiatorerna och som driver en horisontell luftström mot radiatorerna. Härigenom kan transformatoreffekten ökas med 30 %.

Genomföringarna för isolationsnivåer t.o.m. 150–55 är av porslinstyp och för högre isolationsnivåer av kondensatortyp. Samtliga genomföringar kan bytas utan att locket behöver lyftas. Genomföringar för isolationsnivåer t.o.m. 150–55 har horisontella eller vertikala uttagsplattor med frigående hål medan genomföringar för högre isolationsnivåer har anslutningstapp av koppar eller aluminium. Se måttskiss på s. 11.

## Tillbehör

Följande tillbehör medlevereras som standard:

Expansionskärl försett med påfyllningshål, luftventil, avtappningskran och oljenivåvisare med kontakter för signal vid för hög eller för låg oljenivå.

Lufttorkningsapparat med silikagel och oljelås på expansionskärlets översida.

Gasvakt och avstängningsventil i ledningen mellan oljelådan och expansionskärlet. Gasvakten har kontakter för signalering vid långsam gasutveckling och för utlösning vid hastig gasutveckling. Gasvakten är försedd med förbigångsledning.

Distanstermometer för mätning av oljetemperaturen i transformatorns övre oljeskikt. Termometern har tre skilda kontakter, som var för sig kan inställas på olika temperaturer och kan användas för signalering, utlösning och start av eventuell fläktutrustning. På transformatorlocket finns även en sluten oljeficka för kontrolltermometer. Mot merpris kan transformatorn förses med temperaturindikator för indirekt mätning av lindningstemperaturen.

Kopplingslåda på transformatorlådans framsida för anslutning av signalledningar.

Avtappningsventil, jordningsklämma och kranar för anslutning till oljerensningsaggregat. Kranarna är placerade diagonalt, en på locket och en vid oljelådans botten. På transformatorlocket finns vidare erforderliga luckor för inspektion och omkopplingar.

Lyftappar och lyftöglor för lyftning av komplett oljefyllt transformator, samt för lyftning av kärna och låda var för sig. Transformatorlådans är dessutom försedd med konsoler för lyftning med domkraft.

Tralla med flänshjul för 1435 mm spårvidd, hjulen är omställbara för längs- eller tvärakning.

# TEKNISKA DATA

## Normer

Transformatorerna i denna katalog uppfyller fordringarna enligt SEN 27 01 01-1968 "Krafttransformatorer". Transformatorerna har gränsläget för konstant märkeffekt vid huvudreglerlågets märkspänning -10 % enligt punkterna 7.3 och 7.5 i ovanstående normer.

## Märkspänningar och kopplingsart

Transformatorerna kan erhållas med tre olika märkspänningar på högspänningssidan: 21, 42 och 52 kV. Transformatorerna har ett stort reglerområde, varför dessa märkspänningar täcker de allra flesta krav. Högspänningslindningen är Y-kopplad och har uttagen nollpunkt.

Lågspänningslindningens märkspänning kan väljas mellan 10-11 kV och 20-22 kV Y-koppling med uttagen nollpunkt. De olika spänningsalternativen framgår av datatabellerna. Lågspänningslindningen kan erhållas omkopplingsbar från Y till D. Denna omkoppling utförs genom luckor i locket.

Kopplingsgruppen vid Y-koppling på både hög- och lågspänningssidan är YNyn0. Vid Y-koppling på högspänningssidan och D-koppling på lågspänningssidan är kopplingsgruppen YNd11.

## Spänningsreglering

Genom den i högspänningslindningen inkopplade lindningskopplaren kan spänningsreglering utföras under drift. Transformatorerna utförs med reglerområdet  $\pm 8 \times 1.67 \%$ .

## Isolationsnivå

Transformatorns isolering uppfyller fordringarna för inre och yttre isolering enligt SEN 21 05 och SEN 27 01 01.

| Märkspänning<br>kV | Högsta driftspänning<br>enl. SEN<br>kV | Spänning vid stötprov, amplitudvärde |             | Spänning vid växelspanningsprov 50 Hz, 1 minut, effektivvärde |             |
|--------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------|-------------|
|                    |                                        | inre<br>kV                           | yttre<br>kV | inre<br>kV                                                    | yttre<br>kV |
| 10-11              | 12                                     | 75                                   | 95          | 28                                                            | 35          |
| 20-22              | 24                                     | 125                                  | 150         | 50                                                            | 55          |
| 42                 | 52                                     | 250                                  | 250         | 95                                                            | 105         |
| 55                 | 72                                     | 325                                  | 325         | 140                                                           | 140         |

## Provning

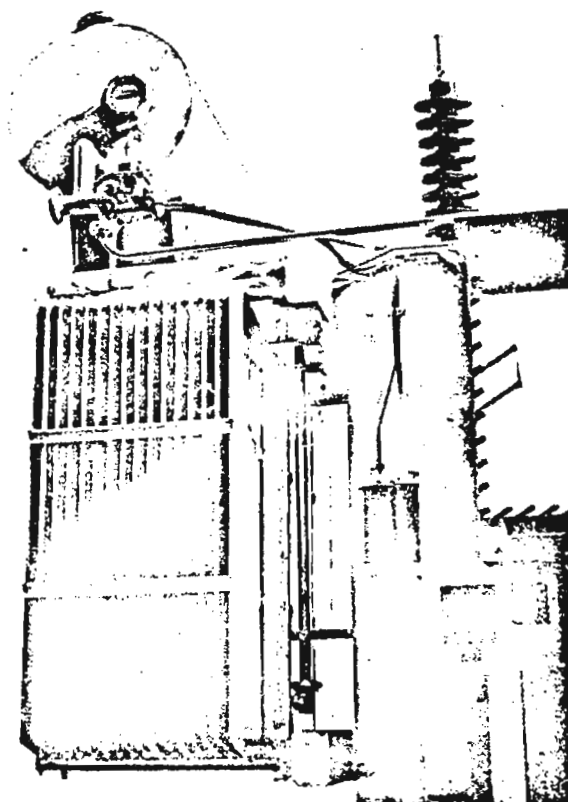
Före leveransen genomgår transformatorerna nedanstående allprov enligt SEN 27 01 01, varöver protokoll upprättas.

Kontroll av polaritet, kopplingsart och omsättning.

Mätning av lindningsresistans.

Mätning av belastningsförluster och kortslutningsspänning.

Mätning av tomgångsförluster och tomgångsström.



(L 17830)

Isolationsprov med inducerad växelspanning vid dubbla märkspänningen och förhöjd frekvens.

Isolationsprov med växelspanning, 50 Hz, 1 minut från separat spänningskälla vid provspänning enligt föregående tabell.

Signalledningar provas med 50 Hz, 1 minut, 2.5 kV.

Speciella prov kan utföras på begäran, t.ex. värmeprov och stötspanningsprov.

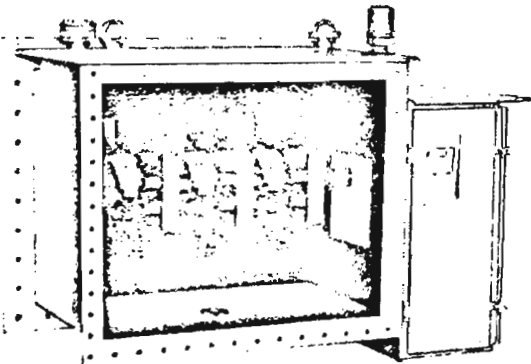
## Anvisningar för datatabeller över garantidata m.m.

Transformatorerna har gjorts mycket flexibla för att kunna tillfredsställa olika önskemål. I tabellerna anges några grundtyper. Varje beställningsnummer representerar sålunda flera nära lika transformatorer. Ytterligare uppgifter måste anges för att transformatorn skall vara entydigt bestämd (se "Uppgifter vid beställning").

Av datatabellerna framgår vidare att varje grundtyp dessutom kan erhållas med olika förluster. Anledningen till detta är att förlustvärderingen varierar mycket beroende på hur transformatorn utnyttjas och var i överföringssystemet den är placerad.

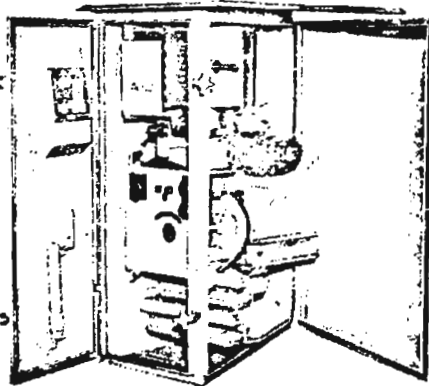
I datatabellerna anges lågspänningslindningens märkspänning med U. De märkspänningar som kan väljas framgår av nedanstående tabell.

|                   | Spänning som kan väljas |      |       |
|-------------------|-------------------------|------|-------|
| U <sub>11</sub> : | 10                      | 10.5 | 11 kV |
| U <sub>22</sub> : | 20                      | 21   | 22 kV |



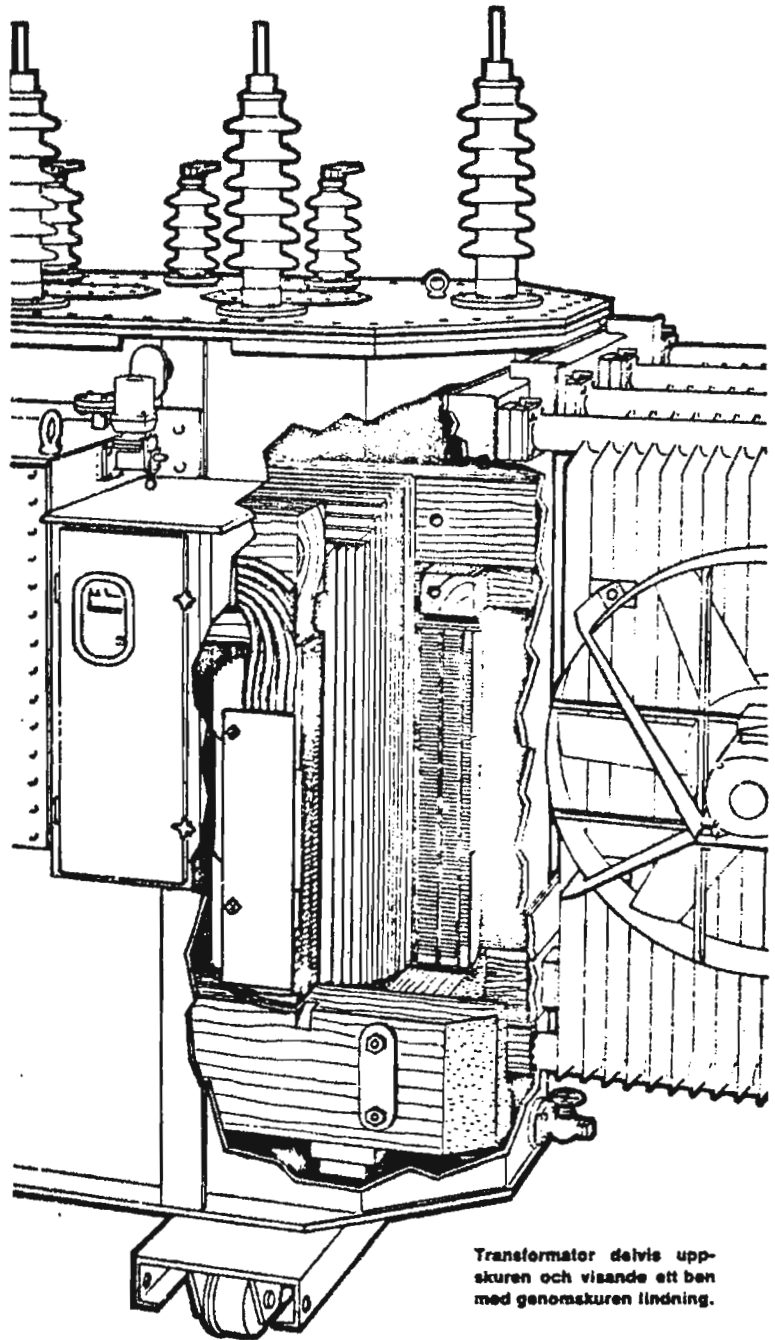
(64013)

Lindningskopplare typ UZB för oljeisolerad trefastransformator.



(64014)

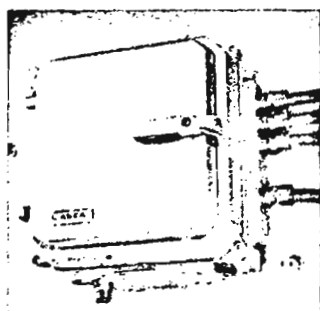
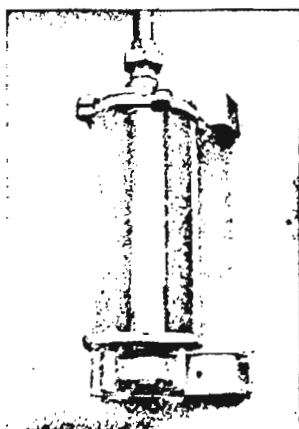
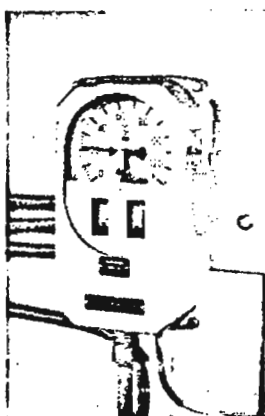
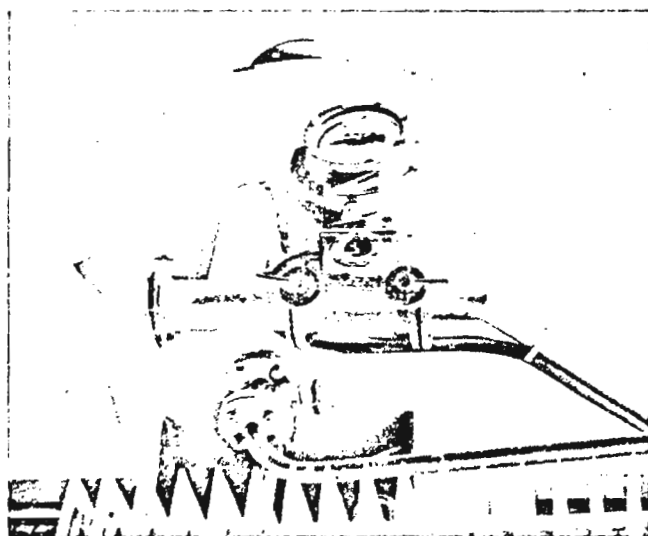
Manöverskåp till lindningskopplare typ UZB.



Transformator delvis uppskuren och visande ett ben med genomskuren lindning.

## UPPGIFTER VID BESTÄLLNING

- 1 Beställningsnummer
- 2 Märkeffekt MVA
- 3 Märkespänning kV för högspänningslindningen
- 4 Lågsöppningslindningens märkespänning och koppling vid leveransen
- 5 Utförandeform A (lågspänningssidan framsida) eller B (högspänningssidan framsida)
- 6 Expansionskärllets placering, till höger eller till vänster (sett från framsidan)
- 7 Anslutningstappar av koppar eller aluminium för genomföringar med isolationsnivå 250–105 och högre
- 8 Spänning och strömart för motorer och manöverutrustning
- 9 Fläktutrustning
- 10 Termometer för lindningstemperatur
- 11 Speciella prov (värmeprov, stötprov)
- 12 Utrustning för automatisk spänningsreglering
- 13 Låda dimensionerad för fullt vakuum



(L 17831, L 17833, L 17832, L 17834, L 17835, L 17811)

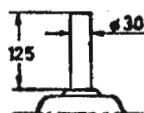
## UTRUSTNING

enligt måttskiss på s. 12

- 1 Oljenivåvisare med signalkontakter
- 2 Gasvakt
- 3 Ficka för oljetermometer
- 4 Ficka för kontrolltermometer
- 5 Termometer för temperaturen i översta oljeskiktet
- 6 Termometer för lindningstemperatur (ingår ej)
- 7 Tryckvakt
- 8 Filtrekran 1 1/2"
- 9 Avtappningskran 1 1/2"
- 10 Avtappningskran 3"
- 11 Torkapparat
- 12 Märkplåtar
- 13 Lyftapp
- 14 Domkraftskonsol
- 15 Lyftögla för lock
- 16 Lindningskopplare
- 17 Motormanöverdon
- 18 Kopplingslåda
- 19 Jorddon
- 20 Fläktar (ingår ej)

## GENOMFÖRINGSUTTAG

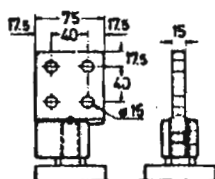
Isolationsnivå  $\geq 250-105$



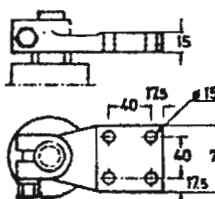
Hsp-  
genomföring



Isolationsnivå  $\leq 150-55$



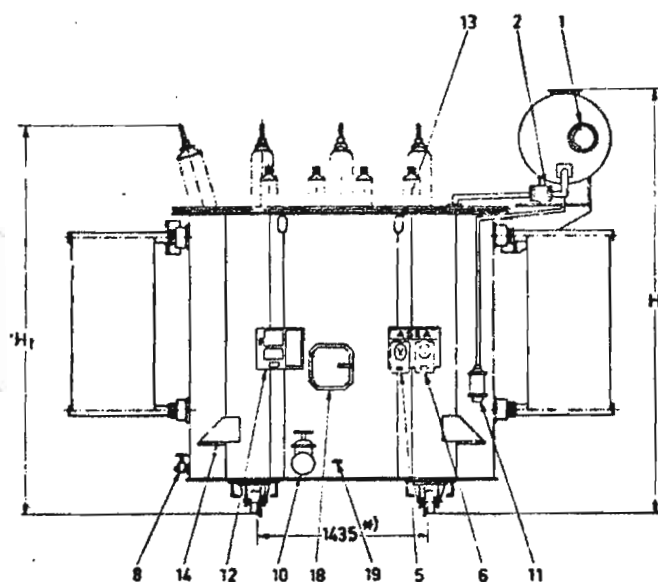
Lsp-  
genomföring med  
vertikal uttagsplatta  
för max. 2000 A



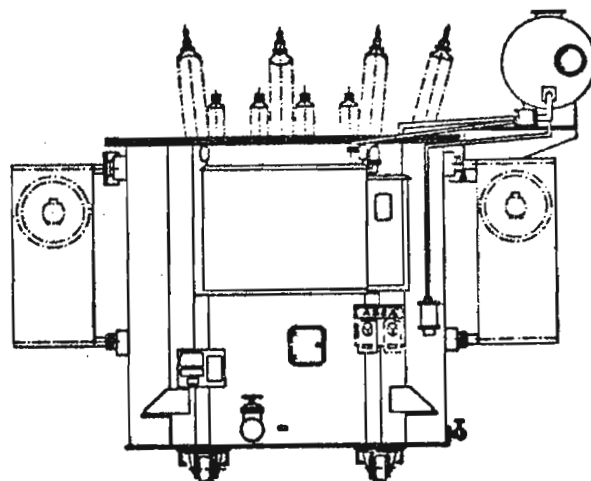
Lsp-  
genomföring med  
horisontell uttags-  
platta för max.  
2000 A

2744 208

## MÄTTSKISS

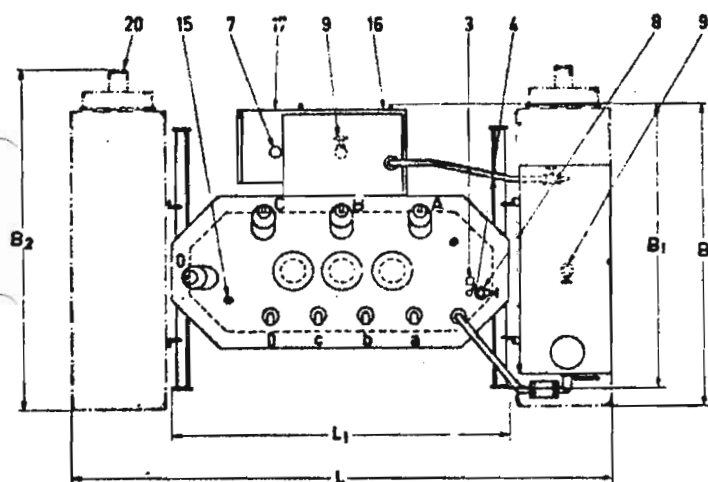


Utförande A. Lsp-sidan framsida  
\*) Spårvidd vid längs- och tvärräkning



Utförande B. Hsp-sidan framsida

För både utförande A och B gäller att expansionskärlet kan placeras antingen till höger eller till vänster (sett från framsidan).



## RELÄSKYDD FÖR TRANSFORMATORER

### 1

#### Inledning

Skydden för krafttransformatorer består dels av reläskydd och dels av vakter.

Det dominerande reläskyddet är differentialskyddet. Vakterna har för krafttransformatorer större betydelse än för övriga elektriska maskiner.

Reläskydden är huvudsakligen elektroniska, dvs de är uppbyggda med statiska reläer.

Reläskydden för transformatorer skiljer sig från övriga elektriska maskiners skydd på så sätt att de måste ta hänsyn till följande omständigheter som saknas för t ex generatorer:

- a) Att strömmarna mätes på skilda spänningsnivåer varav endera sidan dessutom kan vara reglerad, såg med  $\pm 10\%$ .
- b) Att strömtransformatorerna har olika omsättningar och även oftast olika karakteristika, vilket differentialskyddet måste ta hänsyn till.
- c) Att inkopplingsströmstöten uppträder som en differentialström i differentialskyddet.
- d) Att övermagnetiseringsströmmen uppträder <sup>?</sup> ~~likaså~~ som en differentialström i differentialskyddet.

Inkopplingsströmstöten uppträder med olika storlek i de olika faserna (och eventuellt nollpunkt) och uppstår när en spänningslös transformator inkopplas till ett aktivt elektriskt nät.

Inkopplingsströmstöten

Strömstöten storlek kan i den värst utsatta fasen uppgå till 10 à 20 ggr märkströmmen beroende på om det är en högspännings- eller lågspänningssida inkopplingen sker på.

Strömstöten utseende, storlek och varaktighet beror av följande faktorer:

- o Transformatorns storlek (märkdata)
- o Nätets kortslutningseffekt, resistans och reaktans
- o Kärnmaterialets magnetiska egenskaper
- o Kärnans magnetiska begynnelsevärde (remanensen)
- o Inkopplingsögonblicket

Maximal inkopplingsströmstöt uppträder om följande villkor är uppfyllda för en viss transformator:

- o Att kärnan har en maximal magnetisk remanens
- o Att inkopplingsögonblicket är exakt vid spänningens nollgenomgång och i rätt "magnetisk riktning". Med rätt "magnetisk riktning" menas att den påbörjade induktionen får samma tillväxtriktning som det remanenta flödet har.

Varaktigheten hos inkopplingsströmstöten varierar med de faktorer som testats ovan men som tumregel kan sägas att efter det den maximala stöten passerat antas strömmens toppvärden med ca 20 % per period.

|        |   |     |      |      |      |      |        |     |
|--------|---|-----|------|------|------|------|--------|-----|
| Period | 0 | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    | 6      | ... |
| Tid    | 0 | 20  | 40   | 60   | 80   | 110  | 120 ms | ... |
| Faktor | 1 | 0,8 | 0,64 | 0,51 | 0,41 | 0,33 | 0,26   | ... |

Inkopplingsströmstöten karakteristiska utseende visas i figurbilaga 1, figur 1.

Att inkopplingsströmstöten, som är en magnetiseringsström, kan få den storlek och det utseende som figur 1 i figurbilaga 1 visar beror på att det nya påbörjade flödet adderas till det redan befintliga magnetiska flödet så mycket att mättningsgränsen överskrids. Magnetiseringsströmmen ökar då till det belopp som nätets impedans, transformatorns resistans och kvarvarande reaktans tillåter. Detta gäller den positiva halvperioden. Den negativa halvperioden ger inget mättnadsflöde och därför ingen motsvarande magnetiseringsström. Därav detta karakteristiska utseende som visas i figur 1 på figurbilaga 1.

Strömmens dämpning beror på kretsens tidskonstant ( $L/R$ ) som kommer att variera allt eftersom transformatorns induktans ( $L$ ) återupprättas.  $L$  blir större allt eftersom den magnetiska remanensen försvinner.

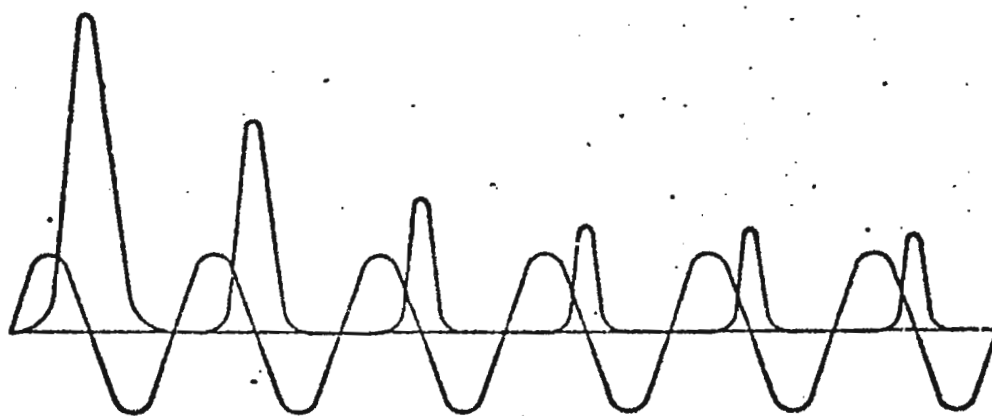
Strömmen uppträder i form av en likström med en överlagrad serie växelströmmar varav grundtonen och andra deltonen är markanta. Strömmen återfinns i alla 3 faserna men även i nollpunkten. I nollpunkten uppträder också likström med en överlagrad serie nollföljdsströmmar. Nollströmmen i den inkopplade transformatorn återfinns fördelad på systemets övriga nollpunkter enligt nollföljdsimpedansernas fördelning.

I en närbelägen parallellgående transformator uppträder en motsvarande inkopplingsströmstöt beroende på att likströmmen från den inkopplade transformatorn mättar kärnan i den parallellgående som då får en  $180^\circ$  vriden motsvarande strömstöt. Strömstötens dämpning blir då mindre än normalt, varvid strömmens varaktighet blir längre än normalt.

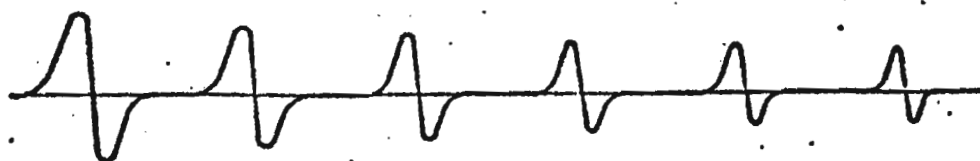
För en deltakopplad transformators fasar blir strömstötens utseende annorlunda än för en Y-kopplads beroende på att fasströmmen sammansättes av strömmar från två lindningar som har sinsemellan  $60^\circ$  fasförskjutna spänningar. Strömmens utseende blir då enligt figur 2 i figurbilaga 1.

Sannolikheten för att den maximala strömstöten kan inträffa är låg men en mer eller mindre stor stöt erhålles oftast. Man räknar med att med en snabb brytare har man en stor chans att få en stor (ej maximal) stöt inom 6-10 konsekutiva inkopplingar.

Den teoretiska bakgrunden kan studeras i litteraturen samt diverse tekniska meddelanden som TM 5064. - Se litteraturförteckningen.



Figur 1. Inkopplingsströmstötens utseende.



Figur 2. Strömstöten i en fas vid inkoppling av en deltalindning hos en transformator till starkt nät.

### 3 Översikt

#### 3.1

Transformatorer av mindre storlekar ( $\leq 5$  MVA) kan förses med följande skydd:

- o Överlastskydd
- o Överströmsskydd
- o Jordfelsskydd
- o Överslagsskydd (till lsp-lindningar)
- o Nollpunktspänningsskydd (för lsp-lindningar)

Gasvakt och övriga vakter saknas då transformatorerna inte har oljetank. Se figurblad 2, figur 1.

#### 3.2

Transformatorer av storlekar över 5 MVA eller sådana som måste göras oljekyllda kan förses med följande skydd:

- o Differentialskydd
- o Överströmsskydd
- o Nollpunktsströmsskydd
- o Jordfelsdifferentialskydd
- o Övermagnetiseringsskydd
- o Överslagsskydd för transformatorgenomföringar
- o Tankskydd

och med följande utlösande vakter:

- o Gasvakt
- o Tryckvakt för lindningskopplare
- o Hög oljetemperatur

och med signalerande vakter:

- o Gasvakt
- o Oljenivåvakter
- o Temperaturvakter

Se figurblad 2, figur 2.

Ytterligare översikt av reläskydd för större transformatorer, som närmare anknyter till svensk praxis för mottagningsstationer, kan läsas i information KD 91-104 som utgör ett särtryck ur ASEA tidning 1972:51 sid 105-108 förf Anders Alm avd FKCK.

De elektriska fel som kan uppträda i en stor 3-fas transformator kan sammanfattas i följande:

- Isolationsgenombrott från fas till kärna eller mellan faserna beroende på:
  - dålig isolering vid konstruktionen
  - isolationsförsvagning genom dålig oljekvalitet (fuktbemängd olja)
  - överspänningar på grund av åsknedslag, brytförlopp etc.
- Isolationsgenombrott som ovan men beroende på:
  - strömkrafter vid genombående höga strömmar = konstruktionssvaghet.
  - strömkrafter vid inkoppling till starkt nät vid uppträdande hög inkopplingsströmstöt
- Gasexplosion beroende på:
  - försämrad oljekvalitet med åtföljande gasansamlingar.
  - pyrande elektriskt fel med stark uppvärmning av oljan med åtföljande gasansamlingar
  - direkt elektriskt fel med explosionsartad gasbildning
- Järnbrand, vilket betyder lokala starka virvelströmsuppvärmningar med temperaturer så höga att järnet skadas. Lindningarna behöver inte ta skada. Järnbrand kan uppträda i transformatorer med dåligt konstruerat plåtpaket.
- Övermagnetisering, vilket betyder att flödestätheten i järnet överskrider mättningsgränsen. Det åtgår då mer ström att magnetisera järnet, vilket ökar kopparförlusterna i transformatorn. Vidare följer flödet inte järnkärnan utan kanaliseras via övriga järndetaljer som tankplåten etc och värmer upp dessa otillåtet.

Skador:

- Direkta elektriska kortslutningar och jordslutningar enligt ovan ger svåra materiella skador då lindningarna blir avbrända, isolationen nedbränd och järnet brännskadat.

Vidare orsakar den hastigt expanderande förgasade oljan ett inre övertryck som deformerar oljetanken eller fläcker upp plåten med åtföljande skador på omgivningen.

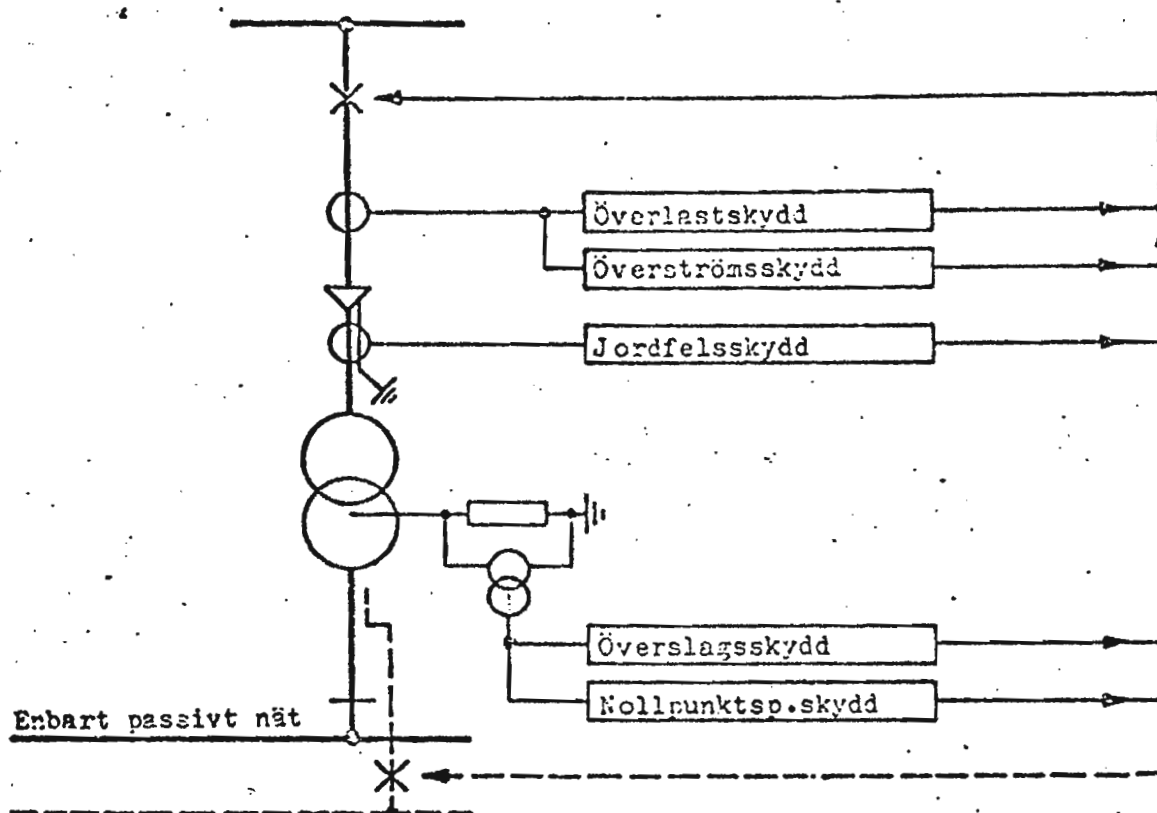
- o Isolationsfel mellan hsp- och lsp-lindningen ger galvanisk förbindelse med lindningarna. Lsp-systemet får då en helt otillåten hög spänning emot jord med direkt fara för ytterligare isolationsgenombrott i underliggande system. Skadorna kan bli omfattande.

I paragraf 5 c i Kommerskollegii säkerhetsföreskrifter föreskrives skydd däremot.

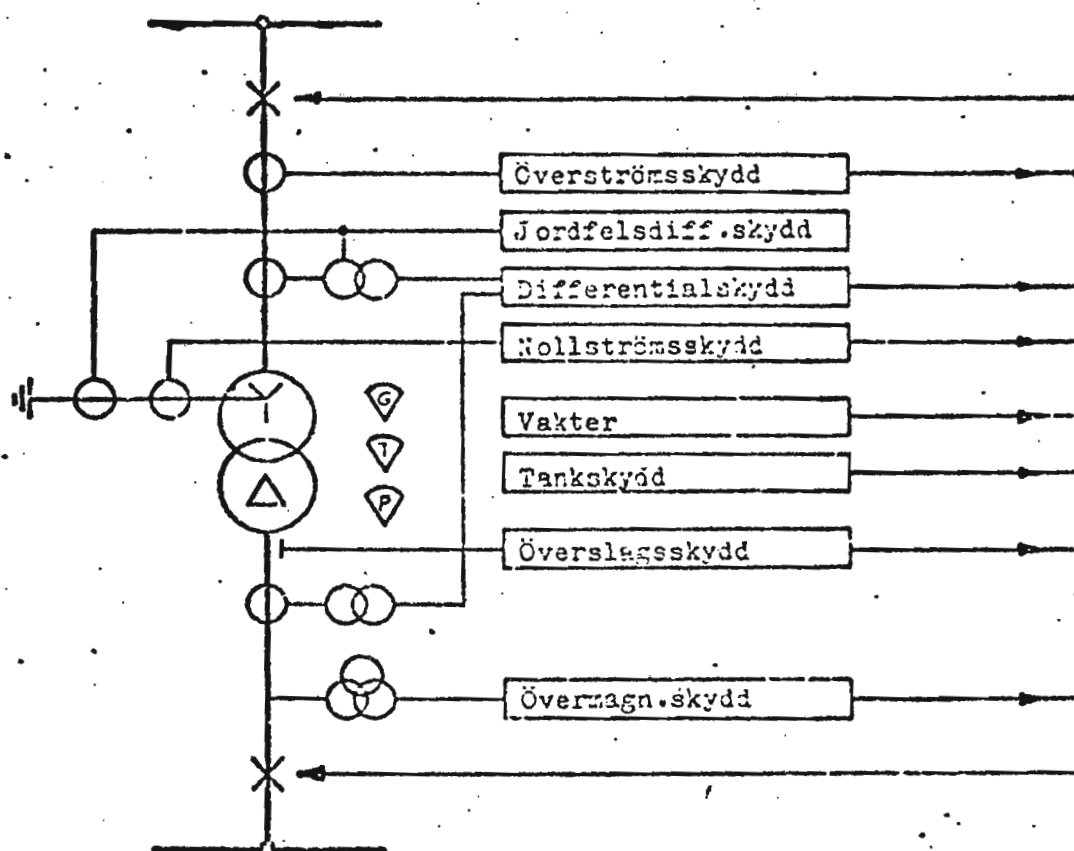
- o Isolationspunkteringar beroende på högspänningstransienter och atmosfäriska vågor kan orsaka en direkt påföljande större jord- eller kortslutning mellan lindningarna. Skadorna blir då lika omfattande som nämnts ovan.
- o Uppkommen järnbrand sprider sig och förstör successivt järnpartiet med åtföljande temperaturstegring och utvidgning till isolationsfel och ev gasexplosion.

Materiella skadorna blir omfattande.

- o Övermagnetisering av järnet flyttar ut delar av flödet att passera omgivande järn som värms upp och kan skadas. Det föreligger ingen omedelbar skada vid övermagnetisering utan skadan uppstår efter en längre tids exponering.



Figur 1. Skydd för transformatorer av mindre storlekar.



Figur 2. Skydd för större transformatorer.

1. Huvudslag av mättransformatorer. Viktiga användningssätt.

Mätning av höga spänningar, stora strömmar eller måttliga strömmar på hög potentialnivå relativt jord sker lämpligast och fördelaktigast med s.k. mättransformatorer. Dessa är transformatorer speciellt avsedda för att mata mätinstrument, olika slag av mätare och skrivare, reläer och liknande apparater. Mättransformatorer, som är användbara för växelförlopp, indelas i ström- och spänningstransformatorer, de förra för ström-, de senare för spänningsmätningar. Mättransformatorer har som väsentliga uppgifter och fördelar bl. a. att

- a transformera strömmar och spänningar från vanligtvis stora (höga) värden till värden av sådana storleksordningar som är praktiskt användbara för instrument och reläer (innebär utökning av mätområden)
- b isolera mätkretsarna från de oftast på hög potential arbetande (högspända) huvudkretsarna (säkerhetstekniska problem)
- c möjliggöra standardisering av instrument, mätare, reläer etc. till en eller några få märkströmmar alternativt märkspänningar. (underlättar också service och lagerhållning).

Mättransformatorer utnyttjas dels för mätningar avseende driftförhållanden under normala betingelser (i fortsättningen kort kallat enbart mätning), dels för mätningar avseende onormala driftförhållanden (i fortsättningen kort kallat reläskyddsmätning eller enbart mätning för skydd). Beroende på användningssättet - mätning eller skydd - ställs olika krav på mättransformatorerna. Primärt önskemål är vid båda användningssätten godtagbar mätnoggrannhet men därtill kommer ofta ytterligare önskemål allt efter skyddets speciella uppbyggnad och funktion. Hithörande problem diskuteras i senare avsnitt.

2. Den ideala mättransformatorns arbetssätt.

Mättransformatorer är att uppfatta som specialutföranden av transformatorer av fulltraf utförande. För mättransformatorer gäller därför de tidigare genomgångna transformationslagarna, som gäller för transformatorer allmänt. Från behandlingen av den ideala trafon erinrar vi oss:

$$\frac{\bar{I}_p}{\bar{I}_s} = \frac{N_s}{N_p}$$

$$\frac{\bar{U}_p}{\bar{U}_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

(strömlagen) ... (1)

(spänningslagen) ... (2)

p anger primär storhet , s sekundär. Alternativt kan index 1 och 2 användas för primära respektive sekundära storheter.

Strömtransformatorn, som bygger på ekv (1), är i sitt ideala arbetstillstånd en transformator med kortsluten sekundärsida (den sekundära klämspänningen är noll) medan spänningstransformatorn, som bygger på ekv (2), i sitt ideala arbetstillstånd är en tomgående trafo (den sekundära belastningsströmmen är noll).

I normerna definieras en strömtransformator allmänt som en mättransformator för vilken gäller att sekundärströmmen , under normala användningsförhållanden, väsentligen är proportionell mot den primära strömmen och i vilken fasdifferensen mellan sekundärström och primärström approximativt är noll vid riktigt kopplingssätt (förutsätter visst referensval).

För en spänningstransformator gäller på motsvarande sätt att den sekundära spänningen väsentligen är proportionell mot den primära spänningen (vid normala användningsförhållanden) och att fasdifferensen approximativt är noll vid riktig koppling (förutsätter visst referensval).

Ekv (1) och (2) på föregående sida förutsätter referensval som ger fasdifferensen ungefärligen noll i stället för  $180^\circ$  .

I praktiken uppnås aldrig ovan beskrivna idealtillstånd. Trafona är ej ideala till sin konstruktion utan behöver bl.a. en viss tomgångsström dels för att täcka de aktiva järnförlusterna, dels för att driva runt flödet i den magnetiska kretsen. Lindningarna innehåller såväl resistans som läckreaktans. Till detta kommer att vi vid användningen av mättransformatorer belastar dem sekundärt med vissa impedanser - strömtrafon med lågohmiga och spänningstrafon med högohmiga - i form av ledningar, instrument, reläer etc.

Avvikelserna från idealtillstånden resulterar i mätfel . Vi återkommer till dessa i ett senare avsnitt.

### 3. Mättransformatorers inkoppling och belastning.

#### 3.1. Inkoppling och belastning av strömtransformatorer.

En strömtransformators primära uttag ( $P_1$  och  $P_2$ ) skall inkopplas i den primära huvudkretsen på samma sätt som en direktinkopplad amperemeter d.v.s. i serie med den strömbana vars ström man önskar mäta. Se figur 1 !

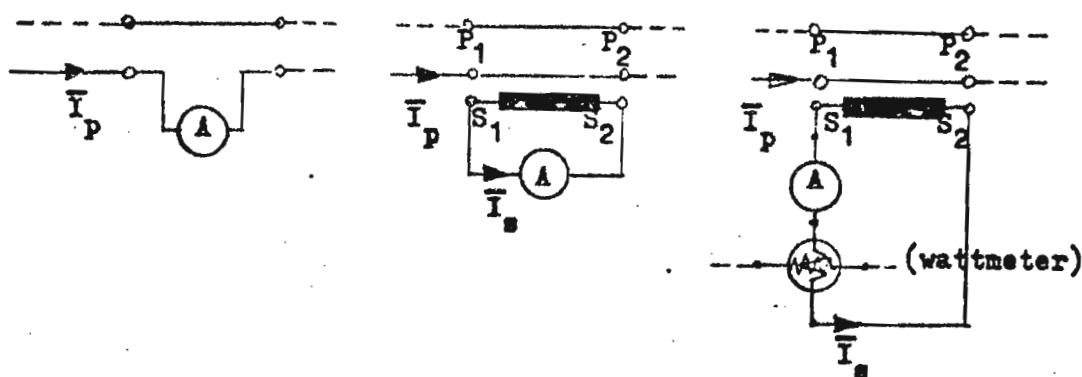
Ann: I vissa tillämpningar är det ej likgiltigt hur de primära uttagen vänds i förhållande till det matande nätet (nätsidan) alternativt relativt belastningssidan, eftersom en omkastning av primäranslutningarna innebär  $180^\circ$  omkastat fasläge på sekundärsidan. Kretsschema ger erforderlig information om riktigt inkopplingssätt.

Sekundärt skall det strömkännande organet ( tvåpoler med låg impedans såsom ampermetrar, strömspolar hos wattmetrar eller wattimmätare, strömreläer etc. ) anslutas till sekundäruttagen S1 och S2. Om flera sekundära tvåpoler samtidigt skall känna samma ström måste de inkopplas i serie. Hur många seriekopplade tvåpoler som helst kan ej tillåtas eftersom man då avlägsnar sig alltmer från det ideala tillståndet, som innebär kortsluten strömtrafo sekundärt.

Arm. Även vid anslutning av olika tvåpoler sekundärt är det i vissa fall (exvis wattmetrar och wattimmätare, riktningskännande reläer ) inte likgiltigt hur tvåpolen ansluts till de två sekundärklämmorna. Även i detta fall utgör schema erforderlig information.

I detta sammanhang inför vi begreppet sekundärkrets , som är hämtat direkt ur normerna. Med sekundärkrets menas (kanske olycklig formulering i normerna) den yttre krets , en eller flera seriekopplade tvåpoler, som ansluts till och matas av sekundärlindningen.

(Eftersom krets innebär något i sig slutet ligger det nära tillhands att uppfatta sekundärkretsen som den totala sekundära sidan bestående av lindning och yttre belastning. Normerna avser emellertid endast den yttre delen.)



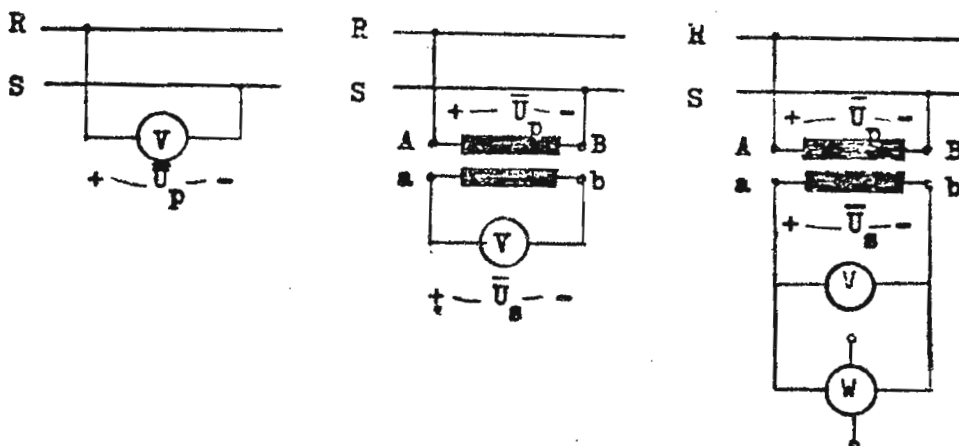
Figur 1.

### 3.2. Inkoppling och belastning av spänningstransformatörer.

En spänningstransformators primära uttag (A och B) skall inkopplas till det primära nätet på samma sätt som en direktinkopplad voltmeter d.v.s. direkt till de två punkter mellan vilka man önskar mäta spänningen. Se figur 2 ! Sekundärt skall den spänningsmätande eller spänningskännande tvåpolen (voltmeter, spänningsspole hos wattmeter eller wattimmätare, spänningsrelä..) anslutas till uttagen a och b, de två sekundäranslutningarna.

På samma sätt som vid strömtransformatorer är det ofta ej likgiltigt hur man gör den primära respektive sekundära anslutningen eftersom en växling innebär 180° omkastat fasläge. Kretsschema ger erforderlig information om riktig inkoppling.

Om flera spänningsmätande tvåpoler skall känna samma spänning samtidigt skall de inkopplas parallellt med varandra. Hur många tvåpoler som helst i parallellkoppling kan dock ej tillåtas eftersom vi vid ökat antal parallellkopplade tvåpoler alltmer avlägsnar oss från idealtillståndet för en spänningstransformator, som är öppen sekundärkrets.



Figur 2.

#### 4. Begreppet börda.

Mycket viktigt vid studium och användning av mättransformatorer är att känna till den totala belastning, inklusive ledningar, som ansluts till mättransformatorns sekundärsida. Vi kallar den totalt anslutna impedansen för transformatorns börda. Enligt gällande normer skall bördan Z anges i  $\Omega$  med därtill fogad upplysning om bördans effektfaktor.

I tidigare gällande normer och numera som ett alternativ till bördan i  $\Omega$  gäller att bördan också kan uttryckas som en skenbar effekt i VA med därtill fogad upplysning om bördans effektfaktor. Därvid avses den aktuella bördans, inklusive ledningar, skenbara effektförbrukning vid sekundär märkström ( $I_{sn}$ ) respektive sekundär märkspänning ( $U_{sn}$ ), alltså

$$S = U_s \cdot I_{sn} \Rightarrow Z \cdot I_{sn}^2 \quad (\text{strömtrafon}) \quad \dots (3)$$

där

$U_s$  = sekundärspänningen

$Z$  = impedansen hos den anslutna belastningen inklusive ledningar (sekundärkretsens impedans, den yttre)

$I_{sn}$  = strömtrafons sekundära märkström.

$$S = U_{sn} \cdot I_s \Rightarrow \frac{U_{sn}^2}{Z} = U_{sn}^2 \cdot Y \quad (\text{spänningstrafon}) \quad \dots (4)$$

där

$I_s$  = den sekundära strömmen

$Z$  = impedansen och  $Y$  = admittansen hos den anslutna belastningen

$U_{sn}$  = sekundär märksp. inklusive ledningar

Genom att ange bördan som en skenbar effekt vinner man fördelen att få samma uttryckssätt i ord vid både ström- och spänningstransformatörer. Observera nämligen att om vi använder bördan uttryckt i  $\Omega$  så kommer en ökning av  $Z$  att innebära ökad börda och avvikelse från idealtillståndet vid en strömtrafo medan en ökad börda  $Z$  vid en spänningstrafo skulle innebära ett närmande till idealtillståndet för denna sort av mättrafo. Används däremot bördan uttryckt i VA innebär en ökning respektive minskning ett avlägsnande respektive närmande till idealtillståndet för båda huvudslagen av mättransformatorer.

Den enligt ekv (3) respektive (4) bestämda bördan bör uppgå till högst den för mättrafon ifråga uppgivna märkbördan eller märkeffekten, om den av tillverkaren garanterade mätnoggrannheten skall uppnås.

Vid vissa typer av mättransformatorkopplingar (differentialskydd för att ge ett exempel) är bördan för en strömtransformator inget entydigt begrepp utan varierar med kopplingssättet för mellanströmtransformatorer liksom med feltypen. Ofta fordras därvid särskild kontrollbestämning av bördan i enlighet med tillverkarens instruktioner för det speciella skyddet.

Bördan beror också på om reläskyddet har fungerat eller ej.

Även för spänningstransformatörer kan liknande bördaförhållanden vara aktuella.

## 5. Sekundärjordning (systemjordning) och användning av säkringar vid mättransformatorer.

I samband med användning av mättransformatorer skall vissa skyddsåtgärder vidtagas både med hänsyn till utrustning och person.

### 5.1. Sekundärjordning av mättransformatorer.

Enligt KSF skall anläggning vara så utförd att skadlig spänning till sina verkningar begränsas, om möjligt förebyggs. Därför skall varje metalliskt hopkopplat system innehållande sekundärsidor av mättransformatorer vara systemjordat d.v.s. en punkt i varje sådant system skall vara jordförbunden. Det är därvid viktigt att observera att endast en punkt i varje system får jordas. Om av misstag flera punkter jordas kan vid vissa känsliga skydd obehörig funktion erhållas till följd av utjämningsströmmar.

Fabrikanter och konstruktöres kretsschema ger anvisning om vilka lämpliga punkter som bör systemjordas.

Mättransformatorers systemjordning placeras antingen i uttagslådan på mättrafon eller på plint i ställverksfackens kopplingslådor.

## 5.2. Användning av säkringar vid mättransformatorer.

### a) Strömtransformatorer.

I en strömtransformators sekundärkrets får ej finnas apparat eller annan anordning för brytning av sekundärkretsen. Säkringar får alltså aldrig förekomma på en strömtransformators sekundärsida. Var också försiktig med mätinstrument som kan innehålla inbyggda säkringar och alltså ej får inkopplas sekundärt till en strömtrafo. Överhuvud taget får sekundärsidan ej öppnas då primärsidan är strömförande.

Vid provring av reläskydd används ofta s.k. provningshandtag som medger rutimprovning under pågående drift. Det är därvid angeläget att tillse att provningshandtagets provstift är ordentligt rengjorda så att ej risk för dålig förbindning i sekundärkretsen behöver befaras p.g.a. medföljande smuts. Om sekundärsidan öppnas med strömförande primärsida kan ampervarvsbalans ej erhållas ( $N_p \cdot I_p \neq N_s \cdot I_s$ ). Den primära strömmen ger då ett magnetiserande varvtal  $N_p \cdot I_p$ , som är många gånger större än det vid normal drift resulterande ampervarvtalet som är ungefär = 0, egentligen  $N_p \cdot I_{op}$ . Följden blir att järnet går i mättning (maximala flödestätheten blir stor). Härvid erhålles ökade järnförluster och dessutom vid strömtrafon med stora kärnor och många sekundära lindningsvarv höga inducerade sekundära klämspänningar enligt transformatorformeln ( $> 100$  kV är teoretiskt tänkbart). Både kärna och lindningsisolation liksom person kan ta allvarlig och bestående skada. Det må här vara på sin plats att påpeka (trots att påpekandet naturligt ej hör hemma här) : en strömtransformators primär- och sekundärsida bör ej byta plats (funktion). Det går alltså ej att transformera upp ström med en strömtrafo som med en krafttrafo. En konsekvens blir i stället att den ekvivalenta impedansen av trafo plus belastning blir mycket höghmig i primärkretsen. i stället för att ha ett värde i närheten av noll.

### b. Spänningstransformatorer.

Spänningstransformatorer måste alltid skyddas sekundärt med säkringar eller momentanutlösare (dvärgbrytare) placerade så nära sekundäruttagen som möjligt. Kortslutningsströmmen på sekundärsidan blir nämligen ganska stor p.g.a. att spänningstransformatorer måste konstrueras med liten läckreaktans och låg lindningsresistans för att ge tillräcklig mätnoggrannhet.

På primärsidan blir vid sekundär kortslutning strömmarna så små (1 - 2 A) att högspänningssäkringar som skyddar för så små strömmar ej tillverkas. Trots detta förekommer primära säkringar för att ge selektiv bortkoppling vid kortslutningar på spänningstransformatorns primärsida.

## 6. Olika slag av mätfel och deras orsaker vid mätning med mättransformatorer.

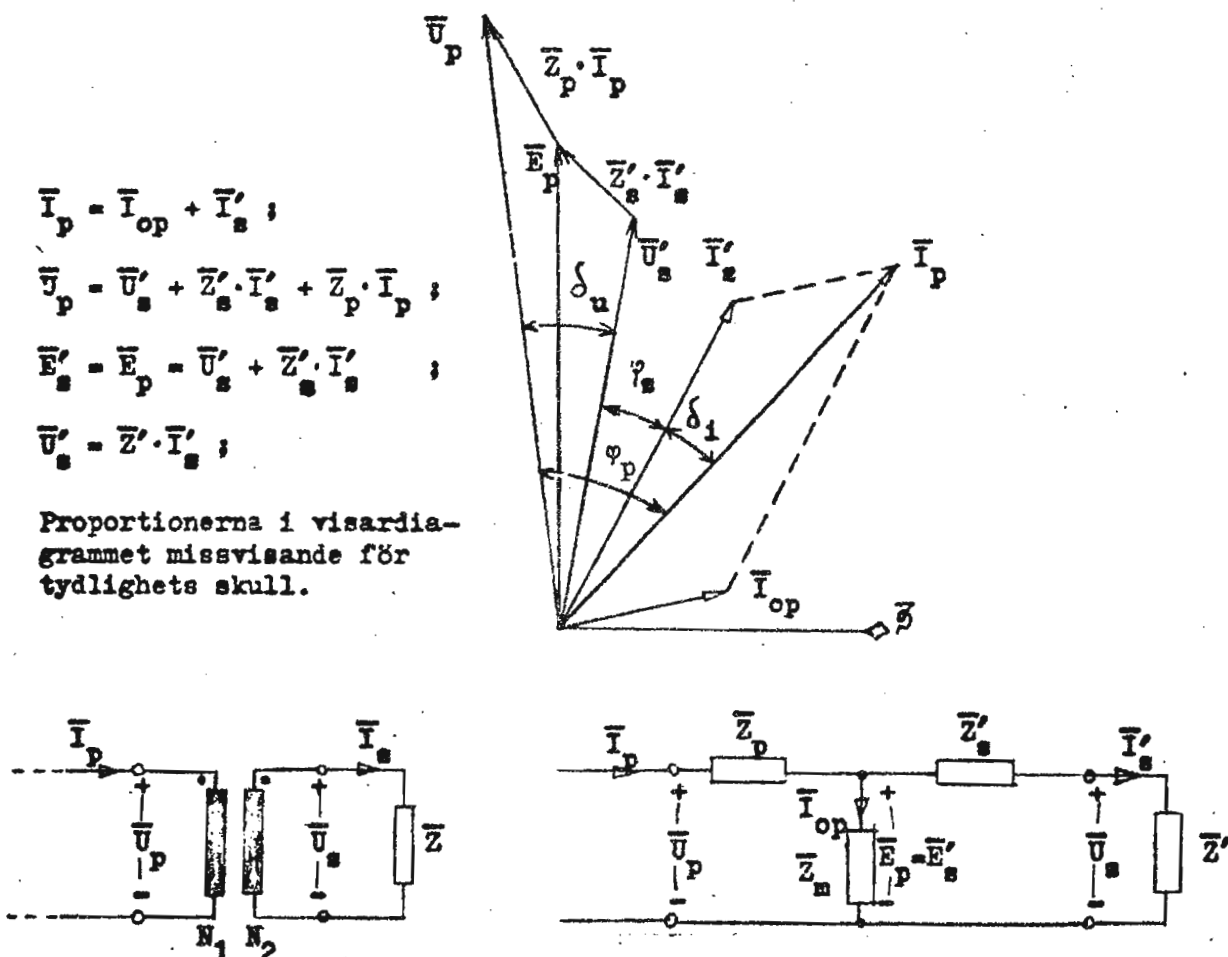
### 6.1. Omsättningsfel och vinkelfel vid mättransformatorer.

Redan på sidan M2 omnämndes att avvikelser från ideala arbetsförhållanden för mättransformatorer leder till mätfel.

Låt oss studera beräkningsschemat med referenser och tillhörande visardiagram i figur 3 nedan. Att vi ritat visardiagram innebär att vi antagit stationära sinusförhållanden. Detta betyder att vi utgått från linjära magnetiska förhållanden. Detta är en viss approximation som vi dock tillåter oss i detta sammanhang.

Schemat och visardiagrammet kan användas vid diskussion av såväl strömtransformatorers som spänningstransformatorers mätfel, om man blott låter  $U_s \approx 0$ , då det är fråga om en strömtransformator.

(Schemat och visardiagrammet i figur 3 är hänfört till primärsidan. Naturligtvis skulle man ha kunnat rita schema och diagram hänfödda till sekundärsidan lika gärna)



Figur 3.

Av uttrycken för omsättningsfelet framgår att om man räknar ut den primära strömmen (spänningen) genom att utgå från den aktuella sekundära strömmen  $I_s$  (spänningen  $U_s$ ) och multiplicera med märkomsättningen  $K_n$  så erhålles ett värde som avviker från den aktuella, verkliga primära strömmen (spänningen). Den verkliga eller aktuella omsättningen är då skild från märkomsättningen. Beroende på konstruktion och belastningsförhållanden kan omsättningsfelet  $\geq 0$ .

Vinkelfelet  $\delta$ , som också kan vara  $\geq 0$  beroende på konstruktion och belastningsförhållanden räknas positiv då den sekundära storheten (ström eller spänning) ligger före den primära storheten i visardiagram enligt figur 3.

Observera att visardiagrammet i figur 3 förutsätter referensval enligt beräkningsschemat i figur 3.

Vid enbart ström- eller spänningsmätning intresserar endast omsättningsfelet (storleksfelet). Vid effekt- och energimätningar (kan även gälla reläskyddsmätningar) intresserar både omsättnings- och vinkelfel. Se fasdifferenserna  $\varphi_p$  och  $\varphi_s$  i figur 3!

För att få små mätfel skall man tydligen göra  $I_{op}$  liten vid strömtransformatorer och vid spänningstransformatorer  $Z_p \cdot I_p$  och  $Z'_s \cdot I'_s$  små. Fundera själv på hur man därvid bör gå tillväga!

## 6.2. Visarfel vid strömtransformatorer. Feltriangel.

Vid strömtransformatorer för reläskyddsmätning inför normerna ytterligare ett felbegrepp (utöver de i föregående moment införda omsättnings- och vinkelfelen) nämligen det s.k. visarfelet  $\epsilon_o$ . I engelskspråkig litteratur talar man om "composite error" = sammansatt fel, vilket förklarar index  $\epsilon_o$ . Något förenklat definieras visarfelet helt enkelt som beloppet av visarskillnaden mellan den primära strömmen och sekundärströmmen multiplicerad med märkomsättningen ( $K_n \bar{I}_s = \bar{I}'_s$ ). Om vi studerar figur 3 finner vi att visarfelet helt enkelt är beloppet av  $\bar{I}_{op}$ . Vanligt är att det uttrycks i % av primärströmmen, alltså:

$$\epsilon_o (\%) = \frac{|\bar{I}_p - \bar{I}'_s|}{I_p} \cdot 100 \Rightarrow \frac{|\bar{I}_p - K_n \cdot \bar{I}_s|}{I_p} \cdot 100 \Rightarrow \frac{I_{op}}{I_p} \cdot 100 \quad \dots (9)$$

Med hjälp av visardiagrammet på föregående sida konstaterar vi för båda slagen av mättransformatorer dels ett storleksfel eller omsättningsfel, dels ett fasläges- eller vinkelfel.

Omsättningsfelet innebär att den sekundära strömmen respektive spänningen omräknad med märkomsättningen  $K_n$  ej ger mätetal som motsvarar respektive primära storheters värden (skillnader i visarlängder). Fasläges- eller vinkelfelet innebär helt enkelt att vi får fasdifferenser mellan primära storheter och till primärsidan reducerade storheter.

Med hjälp av diagrammen kan vi också konstatera orsakerna till de konstaterade felen:

Vid strömtransformatorer är det tongångsströmmen  $\bar{I}_{op}$  som gör att  $\bar{I}_p \neq \bar{I}_s$ . Vore  $\bar{I}_{op} = 0$  skulle vi ha  $\bar{I}_p = \bar{I}_s$  (lika till både storlek och fas).

Vid spänningstransformatörer orsakas mätfelet av impedansspänningarna  $\bar{Z}_p \cdot \bar{I}_p$  och  $\bar{Z}_s \cdot \bar{I}_s$ . Om dessa vore noll d.v.s. om vi ej hade läckreaktanser resistanser i lindningarna skulle vi ha  $\bar{U}_p = \bar{U}_s$  (lika till storlek och fas).

Normerna för mättransformatorer definierar dels ett omsättningsfel  $\varepsilon$  (%), dels ett vinkelfel  $\delta$  (i centiradianer eller minuter som vanliga enheter). För att särskilja ström- och spänningsträffon åt, då så är påkallat, kan felstorheterna lämpligen indiceras i respektive u.

För omsättningsfelet gäller vid strömtransformatorer :

$$\varepsilon_i = \frac{K_n \cdot I_s - I_p}{I_p} \cdot 100 \quad (\%) \quad \dots (5)$$

$$\text{d.v.s. } I_s = \frac{I_p}{K_n} \cdot (1 + \varepsilon_i)$$

och för spänningstransformatörer gäller motsvarigt :

$$\varepsilon_u = \frac{K_n \cdot U_s - U_p}{U_p} \cdot 100 \quad (\%) \quad \dots (6)$$

$$\text{d.v.s. } U_s = \frac{U_p}{K_n} \cdot (1 + \varepsilon_u)$$

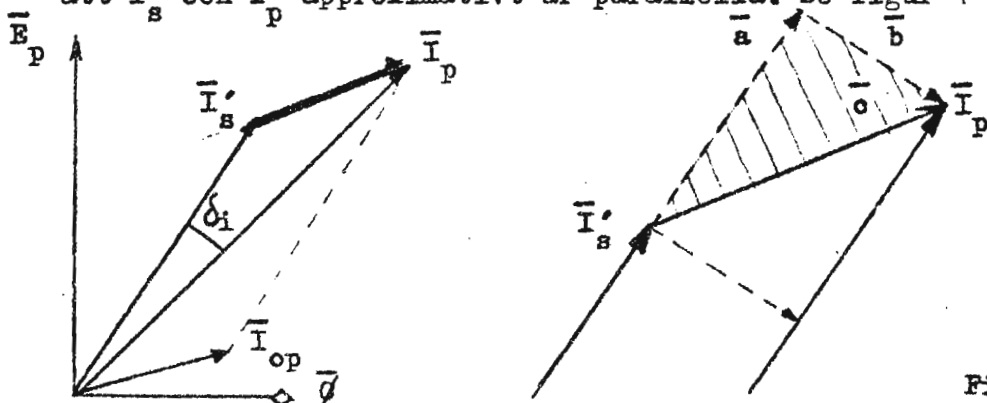
där  $K_n$  är märkomsättningen för respektive transformator och anger förhållandet mellan primär och sekundär märkström respektive primär och sekundär märkspänning, alltså

$$K_{ni} = \frac{I_{pn}}{I_{sn}} \quad \dots (7)$$

$$K_{nu} = \frac{U_{pn}}{U_{sn}} \quad \dots (8)$$

Genom att rita om figur 3 (strömtrafodelen) i förstörad skala kan vi visa på vilket sätt visarfelet har samband med omsättnings- och vinkelfel.

Vid omritningen utnyttjar vi det faktum att  $i_1$  praktiskt är så litet att  $\bar{I}'_s$  och  $\bar{I}_p$  approximativt är parallella. Se figur 4 !



Figur 4.

Vi projicerar nu storheten  $\bar{c}$ , ett mått på visarfelet, dels på  $\bar{I}_p$ 's riktning dels på en riktning vinkelrät däremot. Vi finner då

$$\bar{c} = \bar{b} + \bar{a}$$

Visarfelet kan alltså uppfattas som ett sammansatt fel.

Låt oss närmare studera beloppen av de två visarna  $\bar{a}$  och  $\bar{b}$ . Figur 4 ger

$$a = I_p - I'_s \Rightarrow I_p - K_n \cdot I_s \Rightarrow -\epsilon_1 \cdot I_p ;$$

eller

$$\epsilon_1 = -\frac{a}{I_p} ;$$

$a$  är alltså ett direkt mått på det tidigare definierade omsättningsfelet.

För storheten  $b$  fås:

$$b \approx \delta_1 \cdot I_p ;$$

eller

$$\delta_1 \approx \frac{b}{I_p} ;$$

$b$  är alltså ett mått på det tidigare definierade vinkelfelet.

Den triangel i figur 4 ovan som visar hur visarfelet är sammansatt av ett omsättningsfel och ett vinkelfel kallas feltriangeln.

Av diskussionen ovan framgår att visarfelets belopp alltid är större än eller eventuellt lika med endera omsättnings- eller vinkelfelet. Visarfelet kan alltså sägas ange det största tänkbara omsättnings- eller vinkelfelet i en aktuell mätsituation.

## 7. Uttagsmärkning och lindningspolaritet hos mättransformatorer.

Enligt normerna skall uttagsmärkningen av mättransformatorer ske enligt vissa principer och med användande av anvisade bokstavssymboler. Riktig uttagsmärkning innebär bl.a. att lindningsändarna skall framdragas till uttagsplint och märkas på sådant sätt att de primära och sekundära lindningsändarna med likvärdig relativ polaritet ges viss inbördes placering på plinten.

Märkningen skall bestå av bokstäver åtföljda av (eller där så är nödvändigt även föregångna) siffror.

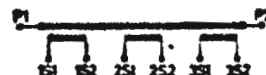
### Strömtransformatorers märkning:

För strömtransformatorer skall de normala primär- och sekundäruttagen märkas på i figuren nedan angivet sätt. (Figuren är hämtad ur SEN 270811 "Strömtransformatorer").

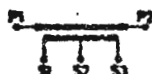
För normala primär- och sekundärlindningar skall uttagen märkas enligt följande:



Figur 1 Strömtransformator med en kärna  
Current transformer with one core



Figur 2 Strömtransformator med flera kärnor med var sin sekundärlindning  
Current transformer with several cores each with one secondary winding



Figur 3 Strömtransformator med extra uttag på sekundärlindningen  
Current transformer with an intermediate tapping on the secondary winding



Figur 4 Strömtransformator med extra uttag på primärlindningen  
Current transformer with an intermediate tapping on the primary winding



Figur 5 Strömtransformator med primärlindning i två delar för omkoppling till två olika omsättningsvärden (serie/parallellkoppling)  
Current transformer with primary winding in two sections intended for reconnection to two different ratios (series/parallel connection)



Figur 6 Strömtransformator med primärlindning i fyra delar för omkoppling till tre olika omsättningsvärden (serie/parallellkoppling)  
Current transformer with primary winding in four sections for reconnection to three different ratios (series/parallel connection)

### Figur

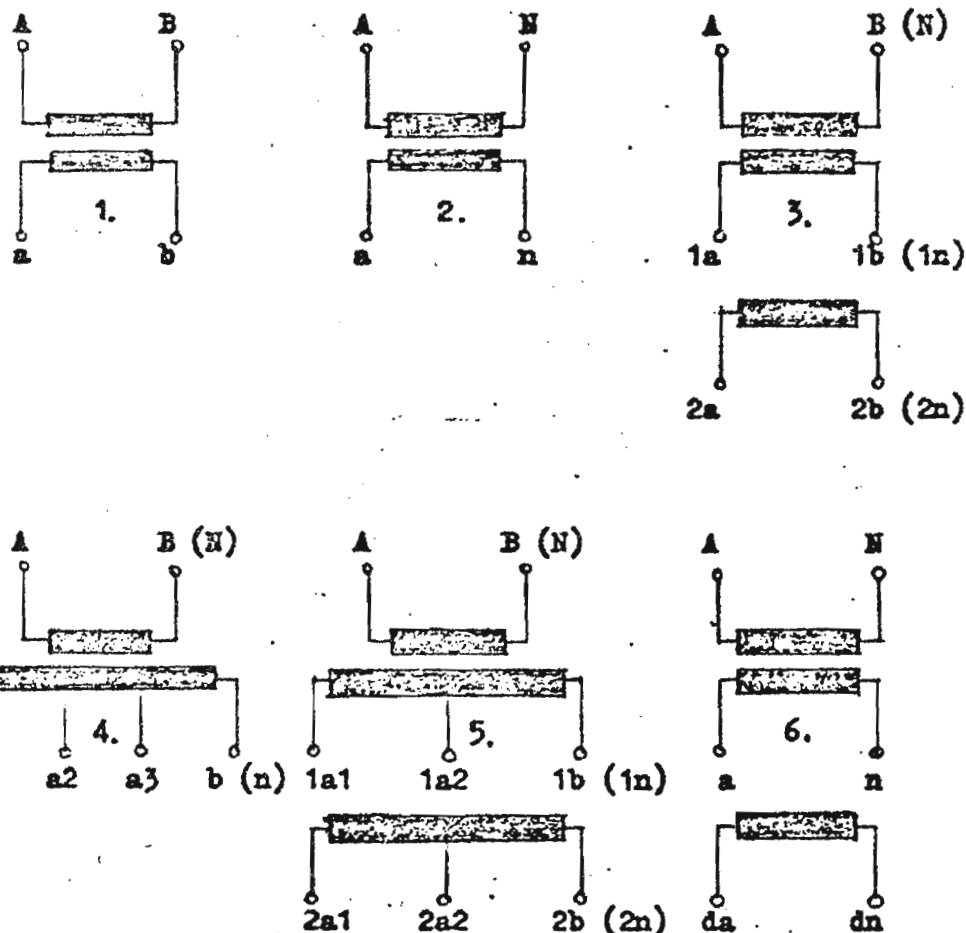
Observera att "stora bokstäver" (versaler) används på både primär- och sekundärsida.

### Spänningstransformatorers märkning

För spänningstransformatorer skall märkningen ske enligt figurerna nedan. Observera att de primära uttagen märks med "stora bokstäver" och de sekundära med "små bokstäver" (gemena) A, B, C etc. betecknar uttag med full isolering medan N anger uttag avsett att jordas och därför normalt har isolering av lägre nivå än det (de) andra uttaget.

Beteckningarna da och dn anger uttag hos lindning för jordfelsövervakning.

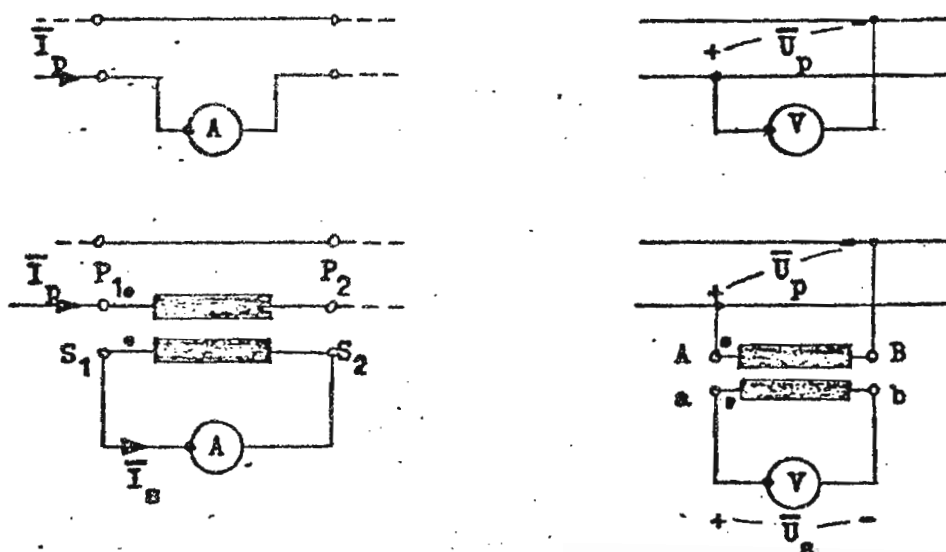
1. Enfastrafo med fullt isolerade uttag och en sekundärlindning.
2. Enfastrafo med primäruttag för anslutning till jord = reducerad isolation. En sekundärlindning.
3. Enfastrafo med två sekundärlindningar.
4. Enfastrafo med en sekundärlindning försedd med flera uttag.
5. Enfastrafo med två sekundärlindningar, båda försedda med flera uttag.
6. Enfastrafo med en sekundärlindning avsedd för mätning och en avsedd för koppling i öppet delta för jordfelsövervakning.



Figur

### Relativ lindningspolaritet

Lindningsändar med samma relativa lindningspolaritet skall märkas med samma index eller bokstavesymbol och placeras så på uttagsplinten att strömmen genom (alternativt spänningen över) belastningsobjektet (instrument, relä etc.) flyter i samma riktning (spänningen har samma polaritet) vare sig belastningen är direkt ansluten till primärnätet eller är ansluten till mättransformatorns sekundäruttag. Figuren nedan visar innebörden i det nyss sagda.



Vid strömtrafon skall uttag med samma relativa lindningspolaritet vara märkta med samma sifferindex. I figur gäller att uttag märkta  $P_1, S_1, C_1, C_3, C_5$  alla skall ha samma relativa lindningspolaritet. Vid spänningstransformatorer skall uttag märkta med samma bokstav, stor primärt och liten sekundärt ( $A-a, B-b$ , etc) ha samma relativa lindningspolaritet.

I schematiskt ritade figurer, även reläskydd utan bokstavs-symboler kan likvärdiga lindningsändar markeras med en punkt in-vid lindningsuttaget (punktmarkering, polaritetsmarkering) som i figur 3.5.3 eller förutsätts stillatigande att lindningsändar ritade åt samma håll är likvärdiga ur polaritetssynpunkt. Sist nämnda överenskommelse följs dock ej alltid konsekvent.

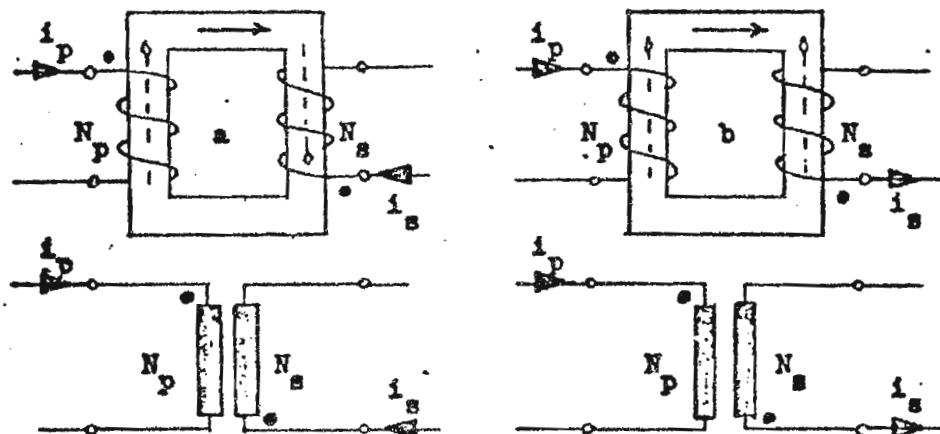
Vilka lindningsuttag som har samma relativa polaritet kan bestämmas genom särskilt prov. Se avsnitt 4.2.1!

#### Ann:

Begreppet relativ lindningspolaritet kan ges flera olika tolkningar utöver den ovan.

Ytterligare, mera fysikaliskt anknutna tolkningsätt, är (gäller både kraft- och mättransformatorer och kan utnyttjas vid kontroll av lindningspolariteten);

1. Om strömmar samtidigt antingen går in i eller ut ur respektive lindningar vid ändar med likvärdig lindningspolaritet samverkar strömmarna med varandra ur magnetisk synpunkt (vill driva flöde åt samma håll). I andra fall motverkar de varandra.



Vid analytiskt studium innebär nyss sagda att vid referensriktningar (positiva riktningar) enligt figur del a resp. b gäller (tomgångsströmmen  $\approx 0$ )

$$a. N_p i_p - N_s i_s \approx 0$$

$$N_p \cdot \bar{i}_p - N_s \bar{i}_s \approx 0 \text{ eller } \frac{\bar{i}_p}{\bar{i}_s} = - \frac{N_s}{N_p}$$

$$(i_p \Rightarrow \bar{i}_p \text{ vid sinusformade förlopp})$$

$$(i_s \Rightarrow \bar{i}_s \text{ vid sinusformade förlopp})$$

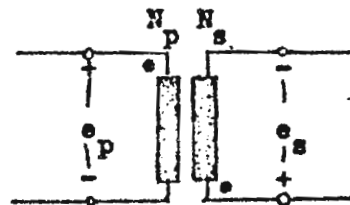
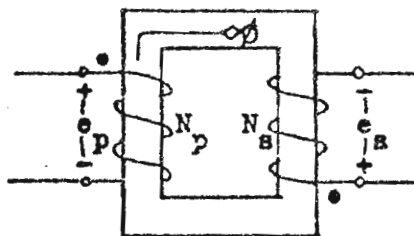
$$b. N_p i_p - N_s i_s \approx 0$$

$$N_p \cdot \bar{i}_p - N_s \bar{i}_s \approx 0 \quad \text{eller} \quad \frac{\bar{i}_p}{\bar{i}_s} = \frac{N_s}{N_p};$$

I visardiagram blir då  $\bar{i}_p$  och  $\bar{i}_s$  i motfas resp. faslika för fall a resp. b. Detta i sin tur innebär att i ett ögonblick då strömmen  $i_p$  fysikaliskt går in i primärlindningen vid markerat uttag går strömmen  $i_s$  fysikaliskt ut ur sekundärlindningen vid markerat uttag och tvärtom.

Om tomgångsströmmen  $\neq 0$  gäller ovan sagda med viss approximation.

2. De spänningar som induceras i de båda lindningarna av det resulterande huvudflödet i kärnan kommer fysikaliskt att ha samma polaritet vid likvärdiga uttag.



Analytiskt gäller  $e_p = + N_p \frac{d\phi}{dt}$ ;  $\bar{E}_p = j\omega N_p \cdot \bar{\phi}$ ;

$$e_s = + N_s \frac{d\phi}{dt}; \quad \bar{E}_s = j\omega N_s \cdot \bar{\phi};$$

som ger

$$\frac{e_p}{e_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad \text{respektive} \quad \frac{\bar{E}_p}{\bar{E}_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

d.v.s.  $e_p$  och  $e_s$  (alt  $\bar{E}_p$  och  $\bar{E}_s$ ) är faslika med de i figuren ovan visade polariteterna.

$$(e_p = \bar{E}_p \text{ vid sinusformade förlopp})$$

$$(e_s = \bar{E}_s \text{ vid sinusformade förlopp})$$

8. Speciella problem och förhållanden vid användning av strömtransformatorer.8.1. Faktorer som påverkar en strömtransformators mätfel.

När vi i detta avsnitt specialstuderar förhållanden av speciellt intresse vid användningen av strömtransformatorer skall vi noga skilja på strömtransformatorer för mätändamål och för reläskydd. Vi understyrker samma skillnad även då vi talar om strömtrafo med mätkärna respektive med reläkärna. (Praktiskt förekommer strömtrafoutföranden där flera olika kärnor för olika ändamål sammanbyggs till en konstruktiv enhet.)

Medan strömtrafon för mätning skall mäta riktigt under normala driftförhållanden skall reläkärnorna mäta riktigt vid onormala driftförhållanden. I första hand åsyftas i detta sammanhang med onormala förhållanden sådana drifttillstånd som innebär stora primära strömmar, ofta många gånger större än den primära märkströmmen. Sådana strömförhållanden kan exempelvis inträffa vid kortslutningar, jordslutningar i direktjordade nät, inkopplingsströmskott vid transformatorer, startströmmar för stora motorer.

Vid mätkärnor begärs i sådana fall att mättrafona i viss utsträckning skall skydda anslutna mätinstrument medan alltså reläkärnorna skall avbilda de primära strömförhållandena riktigt för att vissa skyddsfunktioner ej skall äventyras.

8.1.1. Tomgångsströmmen som bär i dramat.

Från den grundläggande transformatorläran vet vi att följande samband gäller

$$N_s \cdot \bar{I}_s = N_p \cdot (\bar{I}_p - \bar{I}_{op}) \Rightarrow N_p \cdot \bar{I}_{pb}$$

där  $\bar{I}_{pb}$  är primärströmmens belastningskomponent.

Ur relationen ovan följer också

$$\bar{I}_s = \frac{N_p}{N_s} \cdot (\bar{I}_p - \bar{I}_{op})$$

Om tomgångsströmmen kan försummas får vi

$$\bar{I}_s = \frac{N_p}{N_s} \cdot \bar{I}_p \Rightarrow K \cdot \bar{I}_p$$

Den sist redovisade proportionaliteten mellan primär- och sekundärström gäller inte med oförändrad god noggrannhet under vilka betingelser som helst. Om  $\bar{I}_{op}$  ökar genom ökat  $\hat{B}$  i kärnan kommer "avtappningen" från primärströmmen att bli så stor att den verkliga omsättningen märkbart avviker från lindningsomsättningen (märkomsättningen). Speciellt påtagligt är detta, om  $\hat{B}$  ökar så att vi hamnar i mättat område.

### 8.1.2 Primärströmmens och bördans betydelse.

Då vi utnyttjar strömtransformatorer kan vi i de flesta fall utgå från primärströmmen som en sinusformad strömgenerators ström d.v.s. vi kan ej genom inkoppling av mättransformator och sekundärt inkopplade tvåpoler påverka dess värde. Detta innebär samtidigt att primärströmmen tvingar fram en sekundärström bestämd av den givna omsättningen. (Vi förutsätter till en början linjära magnetiska förhållanden varvid  $I_s = \frac{N_p}{N_s} \cdot I_p$ )

För att kunna driva strömmen genom sekundärkretsen (den totala) fordras en inducerad spänning (emk)  $E_s$  som bestäms dels av  $I_s$ , dels av den totala impedans sekundärströmmen har att passera.

$$E_s = I_s \cdot \left| \bar{Z}_s + \bar{Z} \right| = \frac{N_p}{N_s} \cdot I_p \cdot \left| \bar{Z}_s + \bar{Z} \right|$$

där  $\bar{Z}_s$  = sekundärlindningens impedans (väsentligen resistiv) och  $\bar{Z}$  = bördan d.v.s. den anslutna yttre belastningens impedans.  $\bar{Z}_s$  är given genom konstruktionen och kopplingen av strömtransformatorn medan  $\bar{Z}$  kan påverkas.

Ju större primärström är och ju större börda vi har desto större  $E_s$  fordras.

Detta innebär i sin tur en ökad flödestäthet i kärnan, vilken kan bestämmas med transformatorformeln:

$$E_s = \sqrt{2} \cdot \omega \cdot N_s \cdot A_{Fe} \cdot B$$

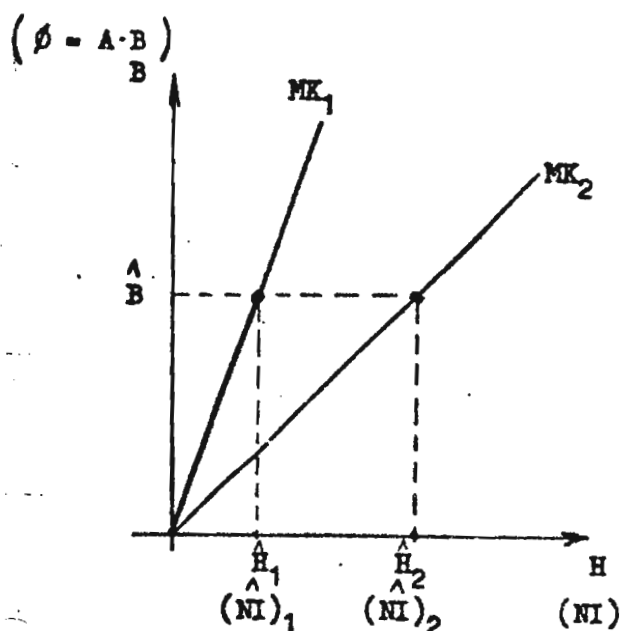
### 8.1.3. Kärmmaterialets och den magnetiska kretsens betydelse.

Sedan vi konstaterat att den maximala flödestätheten bestäms av primärströmmen och bördan är nästa fråga av intresse hur detta påverkar tomgångsströmmen. För att kunna ge svar på den frågan måste vi dels ha uppfattning om kärmmaterialets egenskaper, dels om den magnetiska kretsens uppbyggnad varvid i sistnämnda fallet medelväglängden  $l_j$  och längden av ett eventuellt luftgap  $l_g$  intresserar. Erforderligt ampervarvtal för att driva runt det aktuella flödet fås med hjälp av Ampers cirkulationslag tillämpad på den magnetiska kretsen. Se figur på nästa sida!

$$(NI) = (NI)_j + (NI)_g \Rightarrow H \cdot l_j + H_g \cdot l_g$$

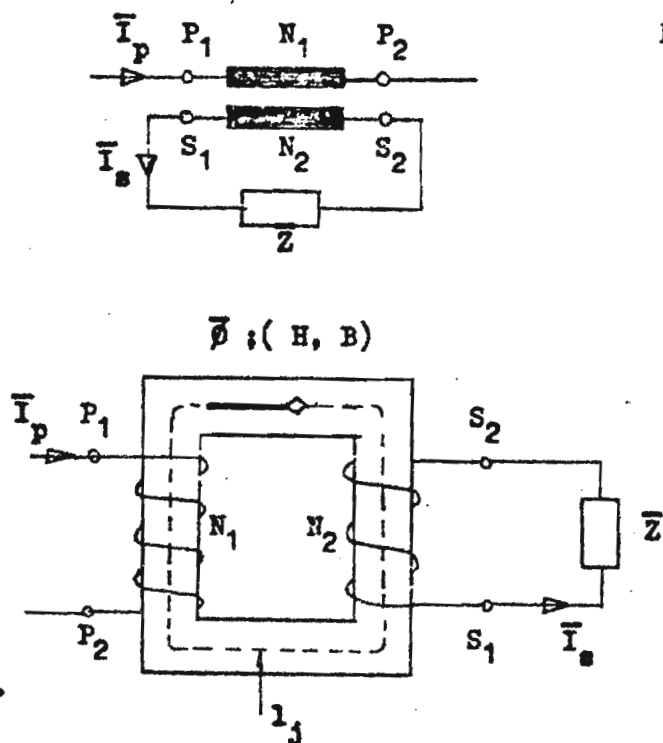
$H$  och  $H_g$  bestäms med hjälp av  $B$  och magnetiseringskurvan MK resp.  $H_g = \frac{B}{\mu_0}$ .

Med känt (beräknat)  $(NI)$  fås  $I_{op} \approx \frac{(NI)}{N_p} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$  om linjär MK förutsättes.



Olika MK beror av materialvalet.

Erforderligt ampervarvtal beror förutom av  $B$  även av kärnans geometriska utformning (area, järnlängd, ev. luftgapslängd).



#### 8.1.4. Inverkan av magnetisk mättnings. Överströmstal.

Om av flera olika orsaker enligt ovan flödestätheten  $B$  blir tillräckligt stor kommer kärnmaterialet att mättas, vilket som bekant innebär att MK avviker från ett linjärt förlopp. Den maximala flödestäthet vid vilken kärnan mättas kallar vi mättningsvärdet  $\hat{B}_s$ . ( $s \Rightarrow$  saturation  $\hat{A}$  mättnings) Väl uppe i mättat område inträffar flera väsentliga förändringar i strömtransformatorns arbetssätt.

I mättat område gäller ej längre proportionalitet mellan  $I_p$  och  $I_s$  enligt strömlagen p.g.a. att tomgångsströmmen ökar mycket påtagligt även för en relativt obetydlig höjning av flödestätheten (eller den inducerade spänningen  $E_s$  som också är ett mått på  $\hat{B}$ ). Detta betyder att den verkliga omsättningen  $I_p : I_s$  drastiskt ändras (minskar) d.v.s. omsättningsfelet ökar snabbt, vilket i hög grad påverkar den aktuella mätningen.

Ändringen av omsättningen - uttryckt som en kvot mellan primär- och sekundärströmmarnas effektivvärden - är också en följd av att kurvformen hos sekundärströmmen ändras (ej längre sinusformad) genom att vi går in i och ut ur mättat område under varje växelströmscykel. I det mättade området med approximativt horisontell MK kan nämligen ingen spänning induceras ( $N_s \frac{d\phi}{dt} = 0$ ), varför transformeringen går förlorad under de tidintervall trafo arbetar i mättat område.

Man skiljer på växelströmsmättnings (symmetrisk mättnings åt båda hållen) då man efter primärströmmens nollgenomgångar vid minskande ström återfår strömtransformeringen under viss tid och likströmsmättnings (osymmetrisk

mättning) då den primära strömmen innehåller en likkomponent.

Vid starkt utpräglad likkomponent förmår ej säkert växelkomponenten att få transformatorn ut ur mättat område (dit den bringats av likkomponenten) förrän efter viss tid, då likkomponenten dämpats ut i tillräcklig omfattning. Eftersom ingen strömtransforering sker då trafon befinner sig i mättat område kan skydd som matas av strömtransformatorn eventuellt ej fungera på avsett sätt. Antingen måste man vidtaga åtgärder så att skyddet fungerar innan kärnan går i mättning (innebär kort funktionstid) eller måste man acceptera en förlängd funktionstid.

Remanens i en kärna kan ge likartade problem.

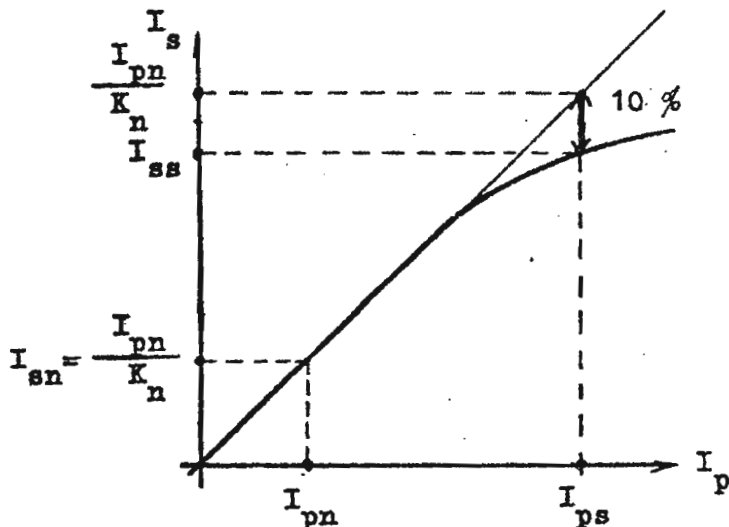
Anm. I närheten av stora generatorer får man vid kortslutningar ofta mycket stora likkomponenter vid kortslutningar. Därvid måste man ofta välja strömtrafon med luftgap som förhindrar att kärnorna går alltför kraftigt in i mättning.

När vi ovan har talat om mättning bör vi observera att den vanligtvis inte intäder så skarpt att det är berättigat att tala om ett mättningsknä eller en skarpt markerad mättningspunkt. Snarare är det fråga om ett mättningsområde med relativt mjuk övergång från det linjära området. S.k. my-metall, en Fe - Ni - legering, uppvisar reellt skarpt markerat mättningsområde.

### Överströmstal.

För att beskriva mättningsens inverkan och definiera en "mättningspunkt" inför normerna ett s.k. överströmstal. Detta definieras genom att man anger mättningspunkten som den punkt där omsättningen minskat till 90 % av märkomsättningen vid angiven börda och sinusformad primärström.

Normerna skiljer på överströmstal för mätkärna och överströmstal för reläkärna. Den allmänna innebörden av överströmstal framgår av fortsättningen. Studera figuren nedan !



För en primär ström  $I_{ps} = n \cdot I_{pn}$

gäller att  $I_{ss} = 0,90 \frac{I_{ps}}{K_n}$

$n =$  överströmstalet .

Figuren på föregående sida visar att vid ökande primärström följer till en början  $I_s$  med i direkt proportion. Så småningom gör sig emellertid mättningen påmind, varvid  $I_{op}$  blir så stor att proportionaliteten går förlorad.  $I_s$  kommer att öka långsammare än i direkt proportion.

Vid en viss primär märkström  $I_{ps}$  - den s.k. primära mättnings- eller gränsströmmen har omsättningsfelet blivit -10 % d.v.s. den aktuella sekundärströmmen  $I_s$  är 10 % mindre än den skulle ha varit om proportionaliteten bestått. Den aktuella sekundärström vid vilket detta inträffar skrivs  $I_{ss}$ , den sekundära mättningsströmmen eller gränsströmmen.

För mätkärnor respektive reläkärnor gäller därvid :

märköverströmstalet  $n_s$  för mätkärna (eller säkerhetsfaktorn för mätkärna) anger den multipel av den primära märkströmmen, vid vilket strömvärde ( $I_{ps}$ )

$$K_n \cdot I_{ss} \leq 0,9 \cdot I_{ps} \quad \text{d.v.s.} \quad n_s = \frac{I_{ps}}{I_{pn}}.$$

märköverströmstalet  $n_a$  för reläkärna anger på samma sätt den multipel av den primära märkströmmen vid vilket strömvärde  $I_{ps}$ ,  $K_n \cdot I_{ss} \geq 0,9 \cdot I_{ps}$

$$\text{d.v.s.} \quad n_a = \frac{I_{ps}}{I_{pn}}.$$

Märköverströmstalet för mätkärna skulle också kunna kallas den noggrannhetsbegränsande faktorn.

Observera att man då man anger märköverströmstalet för en strömtrafo alltid förutsätter märkbörda och sinusformad primärström.

Sammanfattningsvis anger alltså överströmstalet den multipel av den primära märkströmmen vid vilken den verkliga omsättningen gått ned till  $0,9 \cdot K_n$ .

Observera härvid att för mätkärnor garanteras omsättningen vara mindre än eller lika med  $0,9 K_n$  medan vid reläkärnor omsättningen garanteras vara större än eller lika med  $0,9 K_n$ . Detta förklarar också de alternativa benämningarna säkerhetsfaktorn respektive noggrannhetsbegränsande faktorn. Standardiserade värden på överströmstal finns ej.

Allmänt bör mätkärnor ha relativt lågt överströmstal, varigenom anslutna instrument kommer att skyddas genom att omsättningen går ned kraftigt redan vid relativt måttliga primära överströmmar. Det bör i detta sammanhang påpekas att mätkärnor normalt är olämpliga för mätning av primärströmmar vid exempelvis upptagning av startström-tidkurvor liksom vid studier av kortslutningsströmmar

Reläkärnor bör ha relativt högt överströmstal eftersom det garanterar en viss mätnoggrannhet vid stora primära strömmar då det är angeläget att olika slags skydd mäter riktigt.

### 8.1.5. Överströmstal vid annan börda än märkbördan.

I föregående moment har understrukits att märköverströmstalen avser märkbörda och sinusformad primärström. Vid annan börda (ansluten belastning) erhålles ett annat överströmstal, vilket enligt normerna får beräknas enligt uttrycket:

$$n \approx \frac{a}{Z + b}$$

där  $a$  = en konstant i ohm, bestämd av trafons dimensionering och mätfrekvens  
 $b$  = sekundärlindningens impedans ( resistans) i ohm  
 $Z$  = den vid den aktuella mätningen existerande impedansen i ohm  
 och för vilken överströmstalet skall bestämmas.

Om  $Z$  i uttrycket ovan sätts lika med märkbördan ger  $n$  märköverströmstalet.  $Z$  bestäms förutom av sekundärkretsens impedans (ledning + relä) även av den koppling av trafon som mättrafon ingår i samt av feltypen. Överströmstalet enligt ovan får användas både för mät- och reläkärnor. Märköverströmstalet liksom konstanterna  $a$  och  $b$  skall återfinnas på strömtransformatorns märkplåt eller i katalog.

## 8.2. Normer. Noggrannhetsklasser.

De svenska normerna för strömtransformatorer SEN 27 08 11, som till väsentliga delar överensstämmer med IEC 185, har som normer i övrigt till uppgift att definiera begrepp, klassificera och standardisera.

### 8.2.1. Noggrannhetsklasser.

Vid mätkärnor inför normerna ett antal noggrannhetsklasser, kort ofta bara kallade klasser. Mot varje klass svarar normalt vissa användningsområden. Dessutom ställs för varje klass en serie krav som strömtransformatorn måste uppfylla under givna betingelser. Se tabeller nedan !

| Klass   | Användningsområde                                                  |
|---------|--------------------------------------------------------------------|
| 0,1     | Laboratoriemätningar                                               |
| 0,2     | Noggrann effektmätning och vid större energibeloppmätningar        |
| 0,5     | Normal debiteringsmätning                                          |
| 1,0     | Effektmätning och statistikmätning, övervakning och kontrollinstr. |
| 3 och 5 | Mätning där någon högre noggrannhet ej fordras.                    |

Felgränser : Se tabeller överst på nästa sida !

**Felgränser:**

| Klass | ± procentuell omsättningsfel vid procent av märkström |      |     |     | Vinkelfel vid procent av märkström (centirad) |      |      |      |
|-------|-------------------------------------------------------|------|-----|-----|-----------------------------------------------|------|------|------|
|       | 10                                                    | 20   | 100 | 120 | 10                                            | 20   | 100  | 120  |
| 0,1   | 0,25                                                  | 0,2  | 0,1 | 0,1 | 0,3                                           | 0,24 | 0,15 | 0,15 |
| 0,2   | 0,5                                                   | 0,35 | 0,2 | 0,2 | 0,6                                           | 0,45 | 0,3  | 0,3  |
| 0,5   | 1,0                                                   | 0,75 | 0,5 | 0,5 | 1,8                                           | 1,35 | 0,9  | 0,9  |
| 1,0   | 2,0                                                   | 1,5  | 1,0 | 1,0 | 3,6                                           | 2,7  | 1,8  | 1,8  |

1 centirad = 34,4 min

| Klass | Procent omsättningsfel vid |                 |
|-------|----------------------------|-----------------|
|       | 50 % märkström             | 120 % märkström |
| 3     | 3                          | 3               |
| 5     | 5                          | 5               |

Ovanstående felgränser skall innehållas för bördor mellan 25 % och 100 % av märkbördan för klasserna 0,1-1,0, och mellan 50 % och 100 % av märkbördan för klasserna 3 och 5.

Märkbördan skall ha effektfaktorn 0,8 och vara induktiv utom för bördor mindre än 5 VA, där effektfaktor 1,0 skall användas.

Ovanstående innebär exempelvis man skall tolka 30 VA klass 0,5 :

Mellan 30 VA och 7,5 VA får felen icke överstiga 1,0 % resp. 1,8 grad vid en ström om  $0,1 \cdot I_n$  samt 0,5 % resp. 0,9 grad vid såväl  $I_n$  som  $1,2 \cdot I_n$ .

För reläskyddsklasserna som är 5P och 10P (P = protectiv) gäller:

| Klass | Oms-fel vid märkström | Vinkelfel vid märkström | Visarfel (vid ALF x märkström) |
|-------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 5 P   | I 1 %                 | I 60                    | 5 %                            |
| 10 P  | I 3 %                 | -                       | 10 %                           |

**8.2.2. Standardiserade primära och sekundära märkströmmar.**

Följande standardiserade primära märkströmsvärden finns :

10 - 12,5 - 15 - 20 - 25 - 30 - 40 - 50 - 60 - - 75

samt 10- och 0,1 multiplar därav. Understrukna värden rekommenderas i första hand.

Som standardvärden för sekundär märkström anges 1, 2 och 5 A.

5 A rekommenderas i första hand.

### 8.2.3. Korttidsström $I_{th}$ och stötström $I_{dyn}$ .

Korttidsströmmen är effektivvärdet av den primära ström som transformatorn skall tåla under 1 sek utan att skadas av uppvärmningen. Index th anger thermal current = termisk ström som i svenska normerna benämns korttidsström. Vid godtycklig kortslutningsström  $I_k$  sker omräkning till tillåten tid för utlösning enligt välkänt uttryck från anläggningstekniken:

$$I_k^2 t = I_{th}^2$$

som ger antingen  $I_k$  eller t alltefter den aktuella problemställningen .

Stötströmmen eller den dynamiska strömmen  $I_{dyn}$  är det högsta momentana strömvärde som strömtransformatorn tål utan att skadas mekaniskt av uppstående ström-krafter. Normalt gäller att  $I_{dyn}$  är 2,5 gånger  $I_{th}$  för normala strömtrafutföranden.

### 8.2.4. Märkskylt och märkdata.

Strömtransformatorer skall för att vara normenliga vara försedda med märkskylt med åtminstone följande märkdata :

Tillverkarens namn, typ och helst serienummer, primär och sekundär märkström d.v.s. märksättning , märkfrekvens, märkeffekt för olika kärnor, noggrannhetsklass för olika kärnor, högsta tillåtna systemspänning (nätspänning) , märkisolationsnivå.

Förutom ovan specificerade obligatoriska data bör även anges :

Märkkorttidsström samt märkstötström om den sistnämnda  $\neq$  2,5 gånger märkkorttidströmmen. Konstanterna a och b med vars hjälp omräkning av överströms-tal kan ske.

## Några viktiga mättransformatorkopplingar.

Nedan diskuteras några av de viktigaste mättransformatorkopplingarna för mätning dels under normala driftförhållanden, dels vid onormala .

De olika kopplingssätten finns sammanställda på separata figurblad till vilken hänvisning sker i texten nedan.

### a. Enkel ström- och spänningsmätning.

Kopplingssätt framgår av figur på blad 3 där grundläggande principer för inkoppling och belastning visas.

### b. Strömmätning i trefassystem under normala driftförhållanden.

Strömmätning i trefassystem under normala driftförhållanden sker vanligen med tre eller två strömtrafon enligt figurblad F1.

Fallet med tre strömtransformatorer fordrar ingen närmare kommentar.

Då man endast utnyttjar två strömtrafon kan man med lämplig instrumentkoppling mäta alla tre primärströmmarna om så önskas. Se figurblad F1 !

Mycket ofta förekommer dock att man nöjer sig med endast två strömtransformatorer varvid kopplingssättet är detsamma som i fallet med tre strömtrafon varvid en exempelvis den i mellanfasen tagits bort. Skälet är rent ekonomiskt.

Med två trafo klarar man effekt- och energimätningar samt strömkontroll.

Mycket vanligt är att strömtransformatorer innehåller flera kärnor inom samma hölje, varvid en kärna används för normala mätningar och alltså har

lågt överströmstal medan den andra kärnan är avsedd för strömmätning under onormala strömförhållanden (kortslutningsskydd) och har högt överströmstal.

Vid studium av reläskyddsteknik i elanläggningar diskuteras dessa frågor mera ingående.

### c. Spänningsmätning i trefassystem under normala driftförhållanden.

För spänningsmätning i trefassystem finns ett flertal olika tänkbara kopplingar. På figurblad F2 visas de viktigaste alternativen.

Fall a utnyttjar en trefasig spänningstransformator, vilket också framgår av uttagsmärkningen, medan man i fall b tänkt sig tre enfasiga spänningstransformatorer. N respektive n som tillägg efter symbol för uttag avser att nämnda uttagsändar bör jordförbindas.

Fallet c svarar mot s.k. V-koppling varvid endast två spänningstransformatorer med primär märkspänning = primärnätets spänning (huvudspänning) erfordras. I fallen a och b ligger under normala förhållanden endast primärnätets fasspänning över var och en av faserna hos spänningstransformatorn.

På samma sätt som vid strömtrafo finns flera sekundära lindningar på vissa utföranden av spänningstransformatorer. Därvid används emellertid endast en kärna till skillnad mot strömtrafo, vilket gör att de olika sekundärlindningarna ej är oberoende av varandra som i en flerlindningstransformator.

Dock förhåller det sig så att de olika sekundärlindningarna utnyttjas så att den ena är överksam då den andra fungerar och tvärtom varför de båda lindningarnas återverkan endast är en skenbar olägenhet.

#### d. Effekt- och energimätningar.

Vid effekt- och energimätningar skiljer man på helt indirekt mätning = användning av både ström- och spänningsträfo och halvindirekt mätning = endast användning av strömtransformator. Det senare är framför allt fallet i lågspända anläggningar med relativt höga strömmar. På figurbladen F3 - F4 visas några kopplingsfall för mätning av enbart aktiv effekt. Från tidigare diskussion torde dock vara bekant att energimätande utrustningar kopplas principieillt på samma sätt. Skillnaden ligger i själva instrument-principen genom den integration energimätarna är i stånd att utföra. Även inkoppling av  $VA_r$  - och  $kVA_h$ - mätare liksom effektfaktormetrar följer samma inkopplingsprinciper. I normerna finns ett flertal olika kopplingsfall exemplifierade. Figurbladen F3 - F4 är utdrag ur nämnda normer.

#### e. Summa - och skillnadströmmätningar.

De mätningar som skall diskuteras i detta sammanhang har kopplingsutföranden enligt figurblad F5.

Summamätning innebär allmänt att man vill bilda två strömmars summa och mäta densamma på enkelt sätt. Om mättransformatorerna tilldelas olika omsättning kan man erhålla en summa innehållande multiplikation med en konstant före själva summationen.

Den viktigaste summaströmkopplingen torde vara den trefasiga summaströmkopplingen. Dess princip framgår av figurblad F6. Eventuellt bör detaljerat studium av denna koppling anstå till dess jordfel diskuteras i elanläggningen.

Under normala symmetriska förhållanden mäter den trefasiga summakopplingen summan = 0 . Både belastningströmmar och kapacitiva strömmar från ledningskapacitanserna är då noll.som summa betraktat(genom symmetriska förhållanden.)

Vid s.k. enpoligt jordfel blir emellertid förhållandena annorlunda. Figurblad F7 beskriver de grundläggande förhållandena. De kapacitiva felströmmarnas summa blir ej längre noll i det allmänna fallet (beror på placeringen av mätpunkten) och summaström erhålles, vilket alltså är en karakteristisk strömreaktion vid enpoligt jordfel. För att den kapacitiva summaströmmen skall kunna användas för jordfelsindikering och användes för lämpliga åtgärder fordras viss karaktär på ledningssystemet (ledningsslag och systemjordning via impedans = s.k. isolerad nollpunkt). Summaströmmätning är ej alltid det lämpligaste sättet att indikera jordfel.

Skillnadsströmmätning tillgår i princip som figurblad F5 visar.

Användningsområden är bl.a. övervakning av parallella ledningar. Vid alltför stor avvikelse från önskade strömfördelningar fås skillnadsström.

Mätsättet som visas på figurbladet går stundom under benämningen tvärdifferentialmätning. till skillnad från den s.k. längsdifferentialmätningen.

Den senare mätkopplingens princip visas längst ned på sidan F5.

Kopplingen används bl.a. som skydd för kablar, generatorer, motorer och transformatorer vid inre fel. Ett problem är att man vid stora felströmmar utanför skyddsobjektet kan erhålla s.k. obefogade skillnadsströmmar p.g.a. olikheter i mättransformatorernas omsättning.

Vid inkoppling av tomgående transformatorer måste spärr mot obefogad utlösning av skydd anordnas.

På figurblad 8 visas speciellt utförande av summaströmsmätning vid kablar med s.k. kabelströmtransformator, en utföringsform som under senare år kommit till stor användning just vid kablar. Den besitter flera fördelar. Man behöver sålunda inte anskaffa en tredje strömtransformator (två antages redan installerade för strömmätning) som normalt är många gånger dyrare än kabelströmtrafon. Vidare behöver man inte vid trefasiga kortslutningar med stora fasströmmar räkna med obefogad summaström, vilket oftast är fallet med tre separata strömtrafon. Härigenom kan man undvika spärranordningar och särskilt tidrelä. Flera kabelströmtransformatorer är vidare tillverkade så att de kan monteras kring en redan förlagd och boxad kabel.

Vissa viktiga moment vid montage måste dock iakttas. Kabelboxen bör sålunda isoleras från jord (= monteras på speciellt underlag) och den jordlina som förbinder kabelbox och blymantel med jord måste dras genom transformatorn. Se figurblad F8 !

På samma figurblad visas också en summaströmkoppling för känslig jordfelsindikering i exempelvis lågspända förbrukningsanläggningar. Summamätningen via strömtransformatorn och den åtföljande urkopplingen via brytorgan sker i en apparat av bekvämt format. Siemens har lanserat nämnda utrustning på den svenska marknaden ganska nyligen. Fördelen är bl.a. känsligheten som är så stor att felströmmen ej behöver uppgå till strömmar, som är riskabla för människor. Vidare kan jordtagsresistanser tillåtas att anta betydligt högre värden än vad som är normalt utan dessa jordfelskyddsbrytare.

#### f. Spänningsmätning med s.k. öppen D-koppling.

Det är inte alltid som summaströmmätning är möjlig eller lämplig som indikering av jordfel. Ett alternativt sätt att påvisa jordfel är att utnyttja de karaktéristiska spänningsändringar som äger rum vid enpoligt jordfel.

På figurblad F9 finns schema med underlag för den fortsatta diskussionen. Vi förutsätter isolerad nollpunkt (= höghög impedans mellan transformatorns nollpunkt och jord - transformatorn är här primärnätets strömkälla) samt s.k. fullt utbildat jordfel (= ingen begränsande resistans i felstället - detta är ej alltid fallet i praktiska sammanhang).

Med hjälp av schemat, ekvationer (alternativt visardiagram) sammanfattar vi karakteristiska spänningsändringar vid fullt utbildat jordfel:

a. Transformatorns (strömkällans) nollpunkt antar fasspänning till jord ( $U_0$ )

Vid ostörd drift är nämnda spänning 0.

b. De s.k. friska faserna antar huvudspänning till jord.

Vid ostörd drift har alla tre faserna fasspänning till jord.

Man bör vidare notera att huvudspänningarna mellan de tre faserna är intakta, varför driften mycket väl kan upprätthållas om visca i KSF uppfyllda villkor är uppfyllda.

Ett sätt att mäta eller indikera jordfel är alltså att mäta nollpunktspänningen. Detta är relativt enkelt eftersom jordningen av systemet ofta sker via en mättransformator (spänningstrafo) som ger sekundär utspänning så fort primärspänningen ( $U_0$ ) är skiljd från noll. Metoden förutsätter dock att man befinner sig i den station där huvudtransformatorn är placerad eller att man på konstgjord väg skaffar sig en nollpunkt. I stället för aistnämnda väg brukar man oftast utnyttja mätning med s.k. öppen D-koppling. Se F9 ! I allmänhet är den lindningsuppsättning som D-kopplas en av två lindningsuppsättningar. I figur har dock bara D-gruppens lindningar utritats. Den andra uppsättningen är i allmänhet Y-kopplad och avsedd för mätningar under normala driftförhållanden.

Låt oss studera D-kopplingens spänningsförhållanden!

Normal drift :  $\bar{U}_s = \bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C = \frac{1}{m} \cdot (\bar{U}_{RJ} + \bar{U}_{SJ} + \bar{U}_{TJ}) = 0$ .

Enpoligt jordfel:

$$\begin{aligned}\bar{U}_s &= \bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C = \frac{1}{m} \cdot (\bar{U}_{RJ} + \bar{U}_{SJ} + 0) = \frac{1}{m} (\bar{U}_{RJ} + \bar{U}_{SJ}) \\ &= \frac{1}{m} \cdot \bar{U}_s'\end{aligned}$$

eller

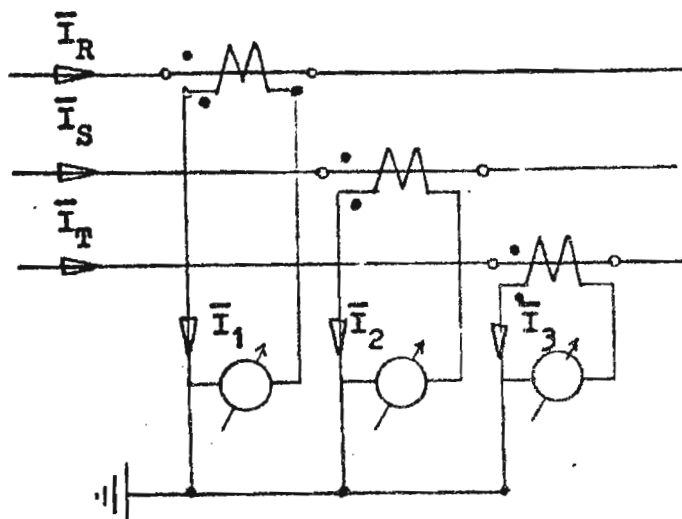
$$\bar{U}_s = \frac{1}{m} \cdot (\bar{U}_{SO} + \bar{U}_O + \bar{U}_{RO} + \bar{U}_O + \bar{U}_{TO} + \bar{U}_O) = \frac{1}{m} \cdot 3 \bar{U}_O$$

Beloppsmässigt gäller alltså

$$U_s = \frac{1}{m} \cdot U_h \sqrt{3} \Leftrightarrow \frac{1}{m} \cdot 3 \cdot U_0$$

Strömmätning i trefassystem.

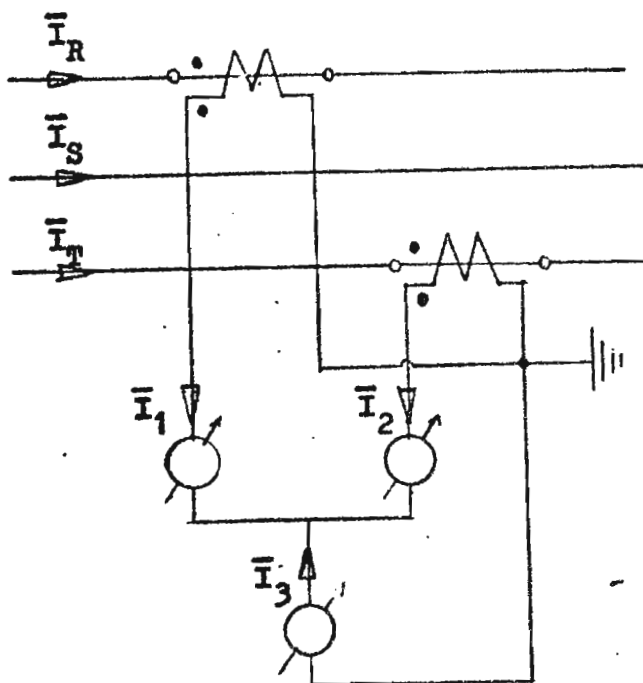
a. Med 3 strömtransformatorer



$$\bar{I}_1 = \frac{1}{m} \cdot \bar{I}_R$$

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \text{omsättningen}$$

b. Med 2 strömtransformatorer.



$$\bar{I}_3 = -(\bar{I}_1 + \bar{I}_2)$$

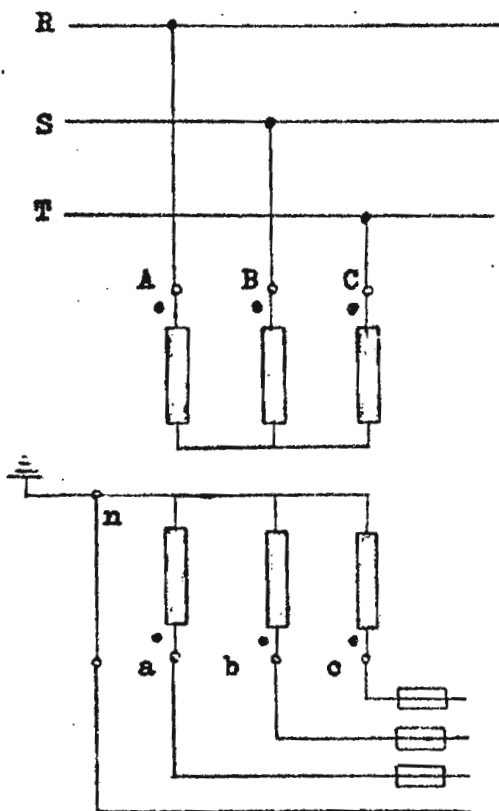
$$= -\frac{1}{m} \cdot (\bar{I}_R + \bar{I}_T)$$

$$= -\frac{1}{m} \cdot (-\bar{I}_S) = \frac{1}{m} \cdot \bar{I}_S$$

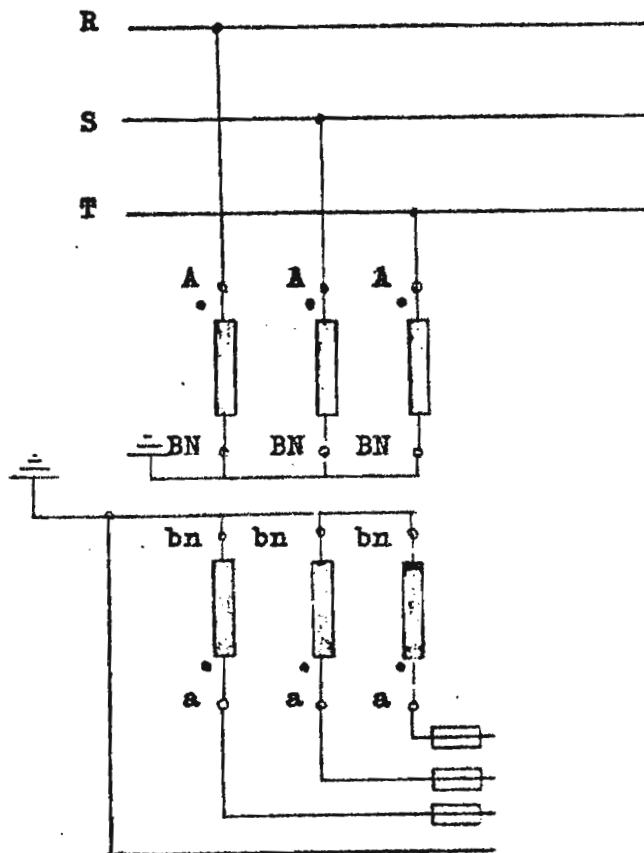
# Spänningsmätning i trefassystem.

F2/74

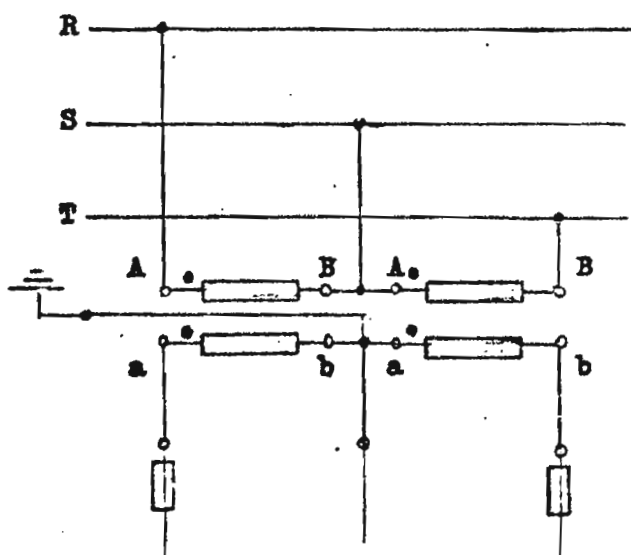
a. Trefasig spänningstransformator

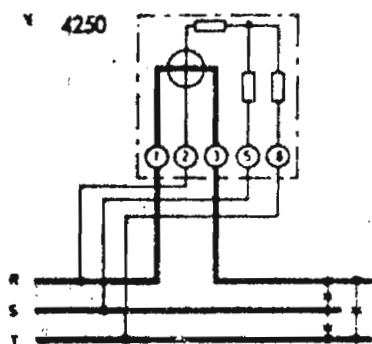


b. Tre enfasiga spänningstransformatorer.

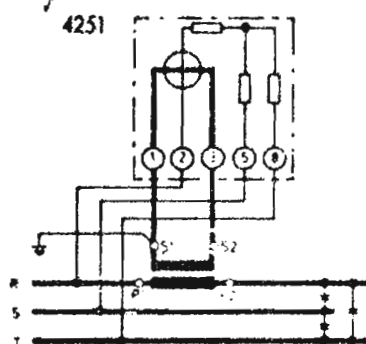


c. Två enfasiga spänningstransformatorer i V-koppling.

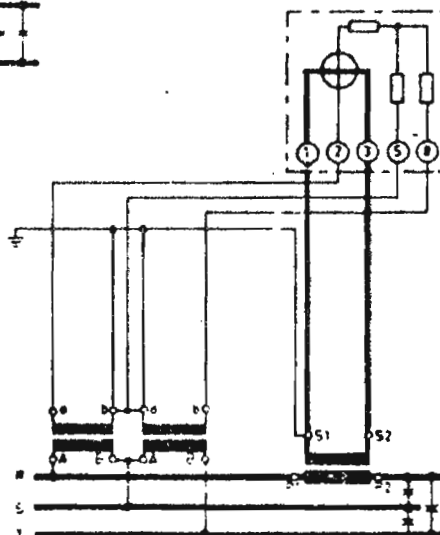
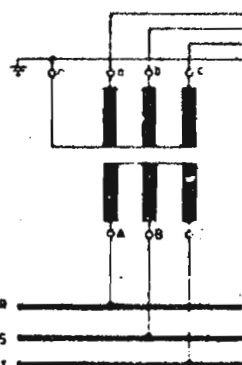
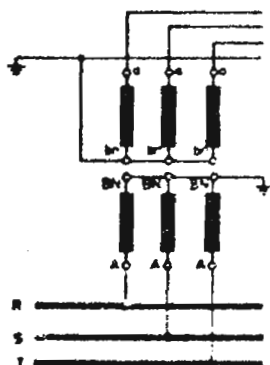




direkt anslutning

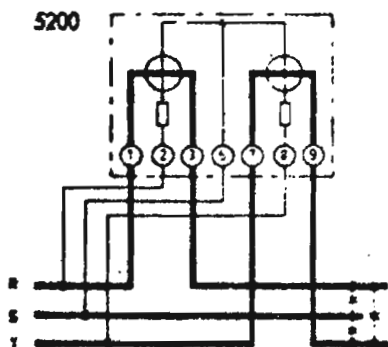


med strömtransformator

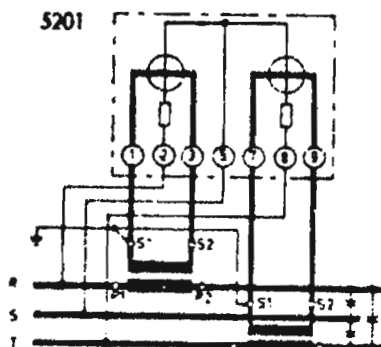


med ström- och spänningstransformator

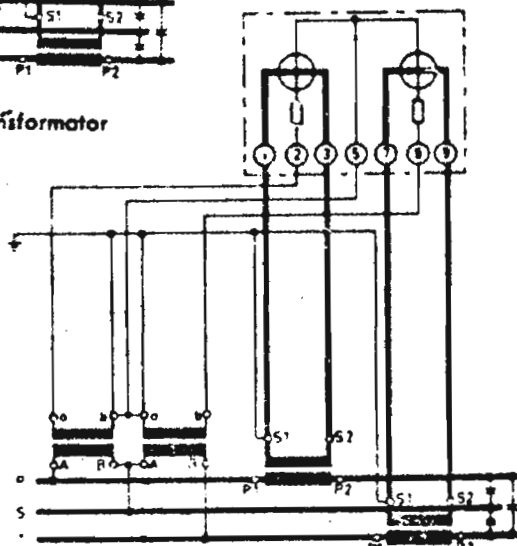
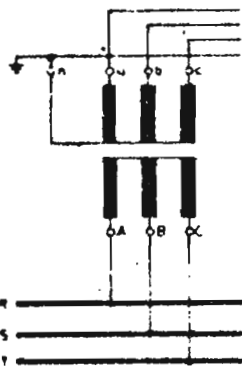
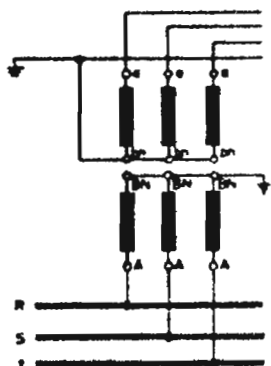
Ensystemig wattmeter för trefas växelström utan nollledare,  
symmetrisk belastning, med inbyggt nollpunktsmotstånd



direkt anslutning

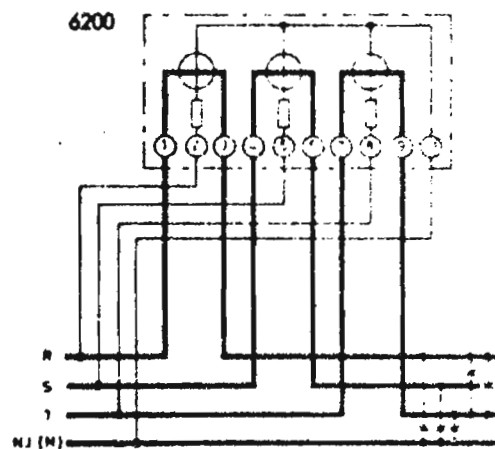


med strömtransformator

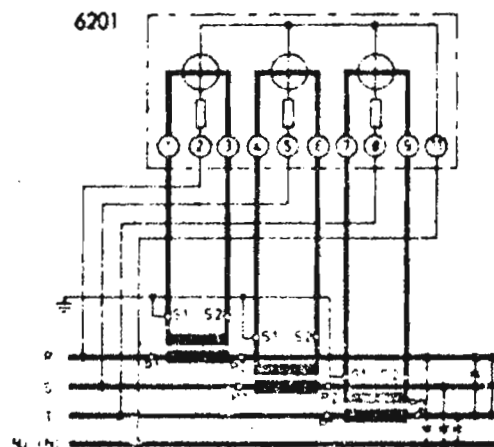


med ström- och spänningstransformator

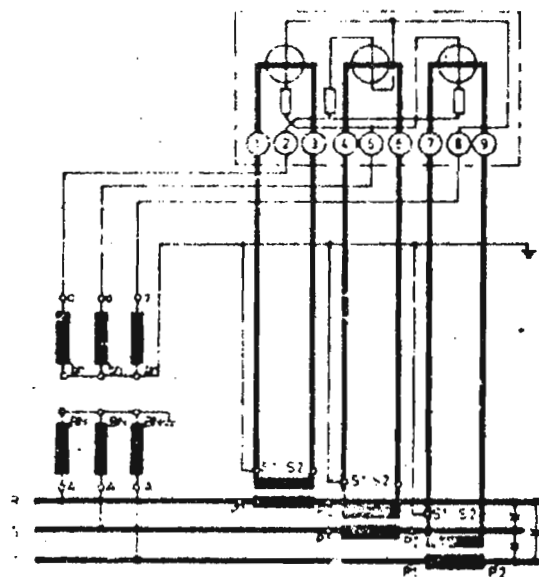
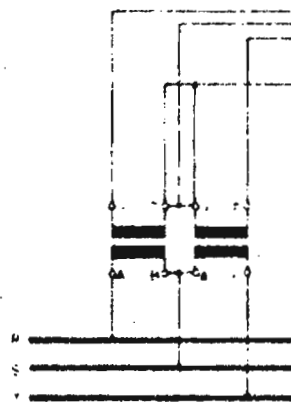
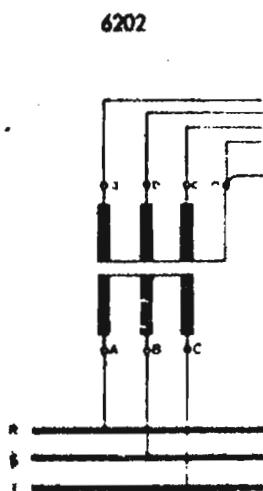
Trefasystemig wattmeter för trefas växelström utan nollledare.



direkt anslutning



med strömtransformatorer

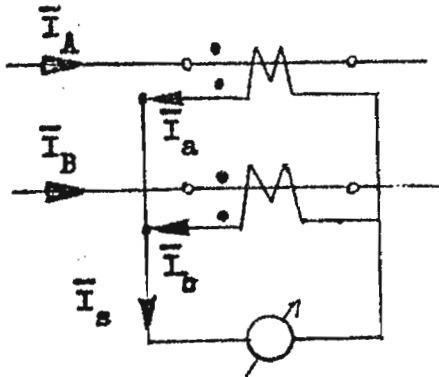


med ström- och spänningstransformatorer i högspänningssystem utan nollledare

Tresystemig wattmeter för trefas växelström med eller utan nollledare,  
" osymmetrisk belastning

Summa- och skillnadströmmätningar.

a. Summaströmmätning.

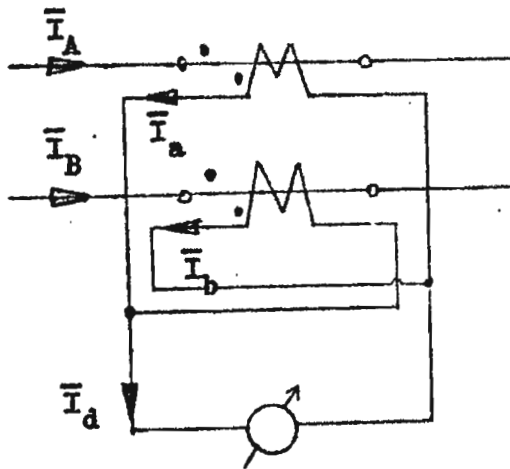


$$\bar{I}_a = \frac{1}{m} \bar{I}_A$$

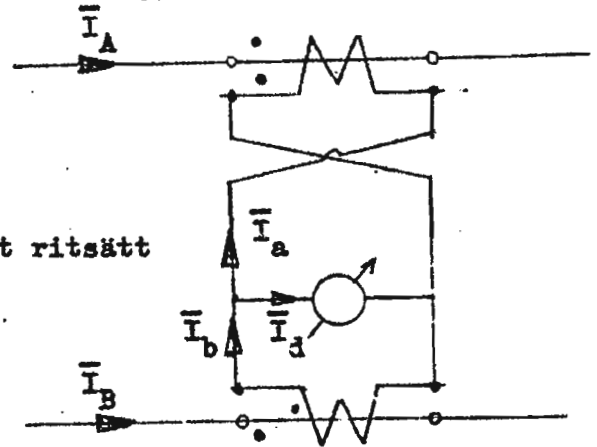
$$\bar{I}_b = \frac{1}{m} \bar{I}_B$$

$$\bar{I}_s = \bar{I}_a + \bar{I}_b = \frac{1}{m} (\bar{I}_A + \bar{I}_B)$$

b. Skillnadströmmätning (Differentialströmmätning)

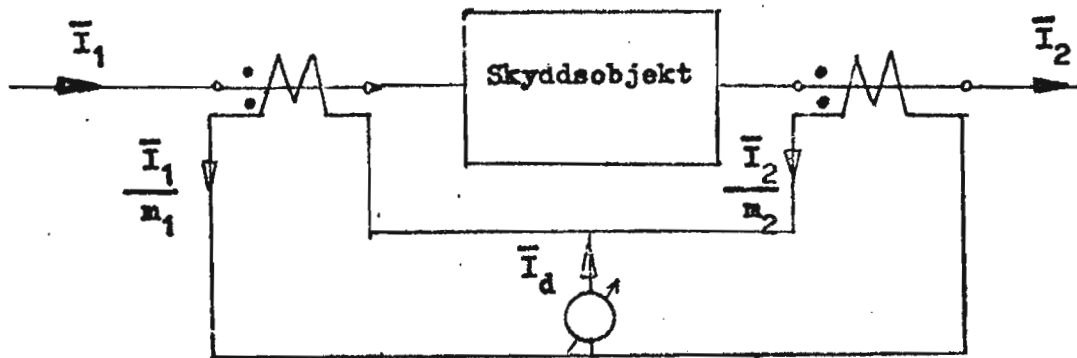


alternativt ritsätt



$$\bar{I}_d = \bar{I}_a - \bar{I}_b = \frac{1}{m} (\bar{I}_A - \bar{I}_B)$$

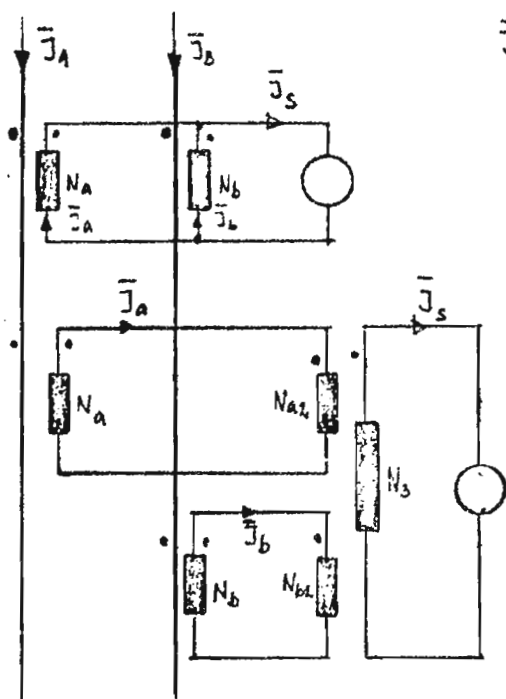
c. Längsdifferentialmätning.



$m_1$  antages lika med  $m_2$  så att båda kan sättas  $= m$ .

Normal drift :  $\bar{I}_1 = \bar{I}_2$  ger  $\bar{I}_d = \frac{1}{m} (\bar{I}_1 - \bar{I}_2) = 0$ .

Onormal drift ;  $\bar{I}_1 \neq \bar{I}_2$  ger  $\bar{I}_d \neq 0$

Summenmessung.

$$\bar{I}_S = \bar{I}_A + \bar{I}_B$$

$$= \frac{N_1}{N_A} \bar{I}_A + \frac{N_1}{N_B} \bar{I}_B \Rightarrow \frac{N_1}{N_S} [\bar{I}_A + \bar{I}_B]$$

$$N_3 \bar{I}_S - N_{A2} \bar{I}_A - N_{B2} \bar{I}_B = 0 ;$$

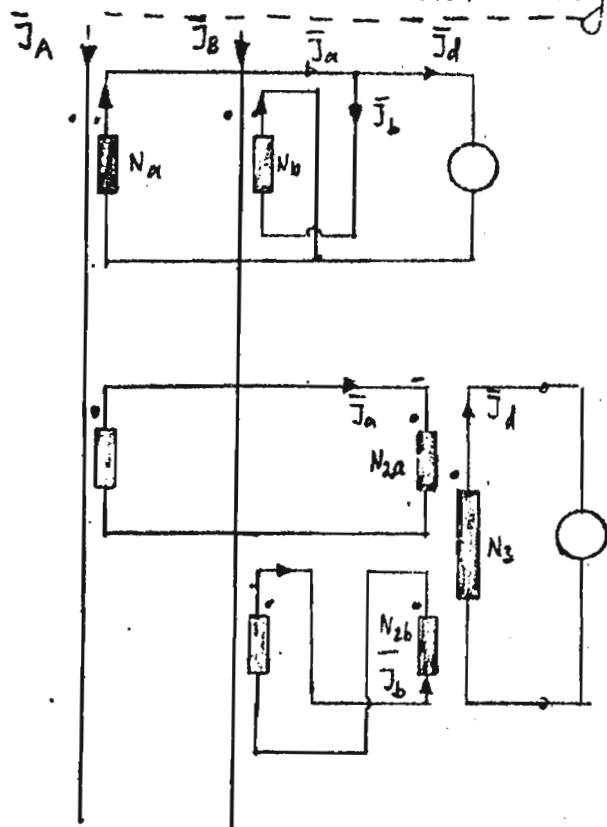
$$\bar{I}_S = \frac{1}{N_3} [N_{A2} \bar{I}_A + N_{B2} \bar{I}_B] ; \quad N_{A2} = N_{B2} \text{ für}$$

$$\bar{I}_S = \frac{N_A}{N_S} \cdot [\bar{I}_A + \bar{I}_B] ;$$

$$\bar{I}_A = \frac{N_1}{N_A} \bar{I}_A \quad ; \quad \bar{I}_B = \frac{N_1}{N_B} \bar{I}_B$$

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B = \frac{N_1}{N_A} \bar{I}_A + \frac{N_1}{N_B} \bar{I}_B \Rightarrow \frac{N_1}{N_S} [\bar{I}_A + \bar{I}_B] ;$$

$$\therefore \bar{I}_S = \frac{N_2}{N_3} \cdot \frac{N_1}{N_S} [\bar{I}_A + \bar{I}_B] ;$$

Shieldungsmessung. ("dissymmetrie"-messung): (Träsdifferenzialmäte)

$$\bar{I}_d = \bar{I}_A - \bar{I}_B$$

$$= \frac{N_1}{N_A} \bar{I}_A - \frac{N_1}{N_B} \bar{I}_B$$

$$\bar{I}_d = \frac{N_1}{N_S} [\bar{I}_A - \bar{I}_B] ;$$

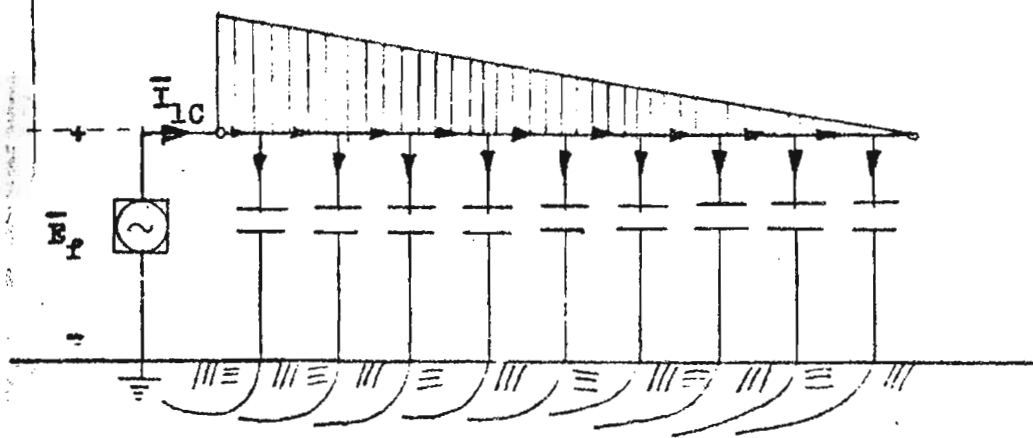
$$N_3 \bar{I}_d - N_{2a} \bar{I}_A + N_{2b} \bar{I}_B = 0 ;$$

$$\bar{I}_d = \frac{N_{2a}}{N_3} \bar{I}_A - \frac{N_{2b}}{N_3} \bar{I}_B ;$$

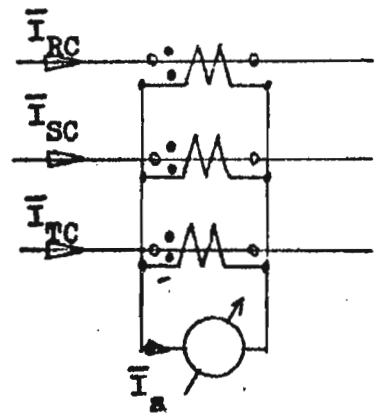
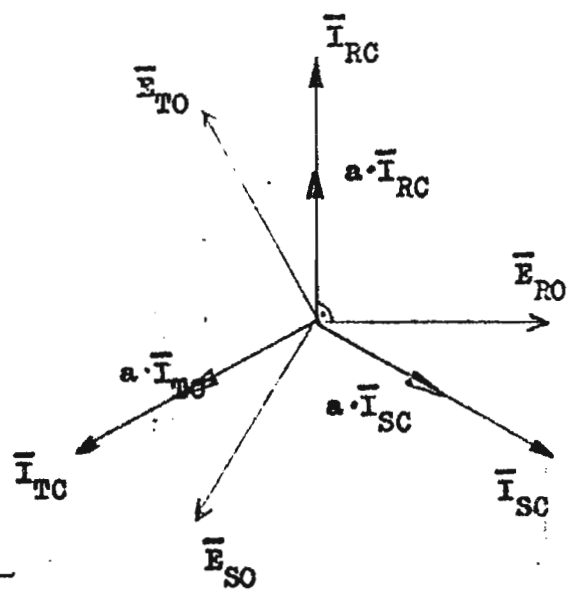
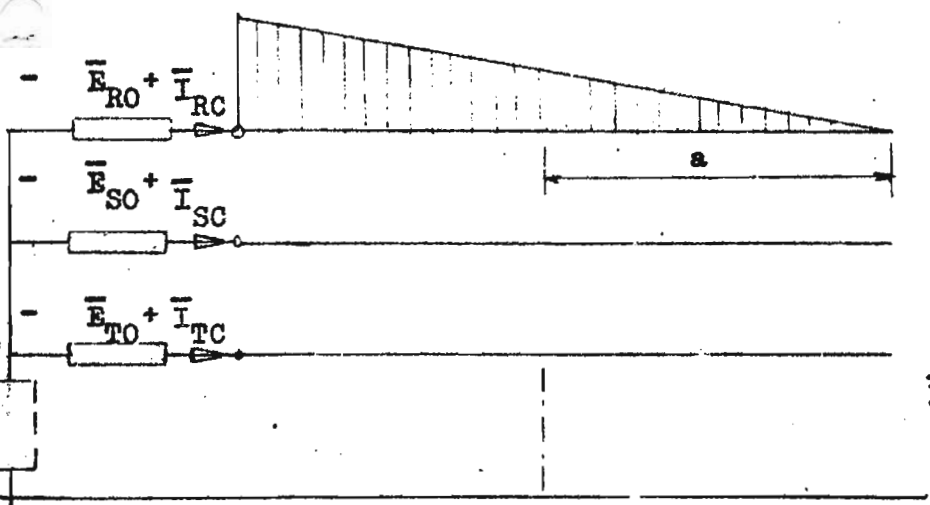
$$\bar{I}_d = \frac{N_2}{N_3} [\bar{I}_A - \bar{I}_B]$$

$$\bar{I}_d = \frac{U_2}{N_3} \cdot \frac{N_1}{N_S} [\bar{I}_A - \bar{I}_B] ;$$

Kapacitiva strömförhållanden i en ledning. (Normala symmetriska förhållanden)

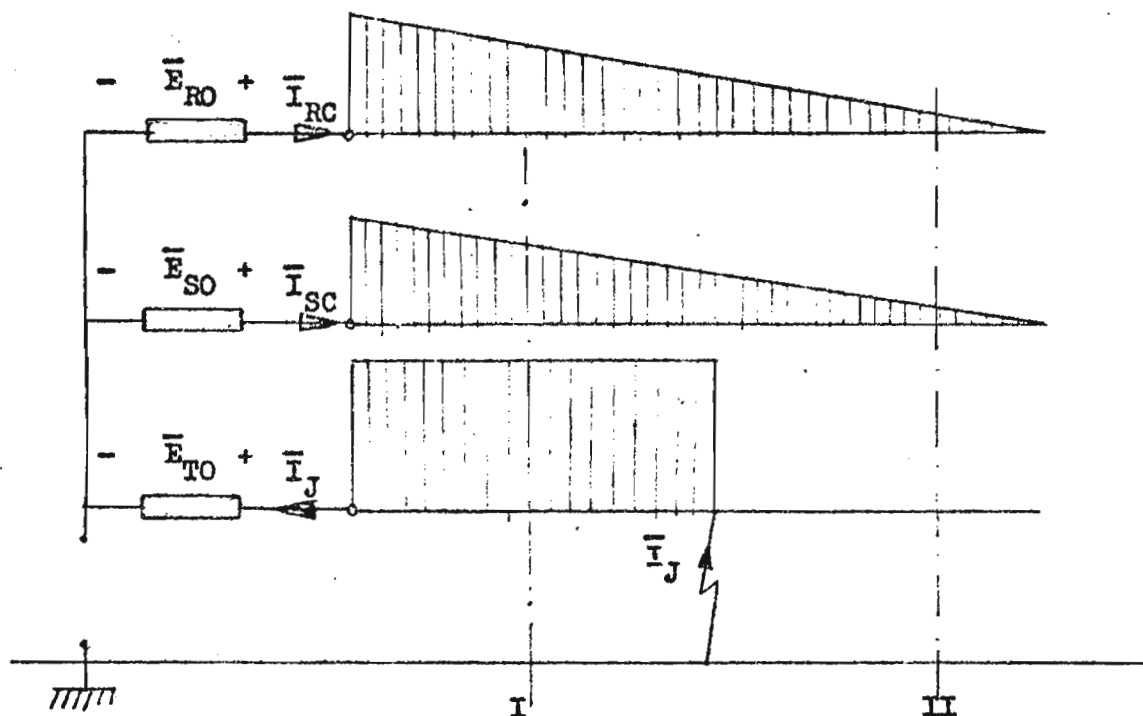


Thnis skolat.



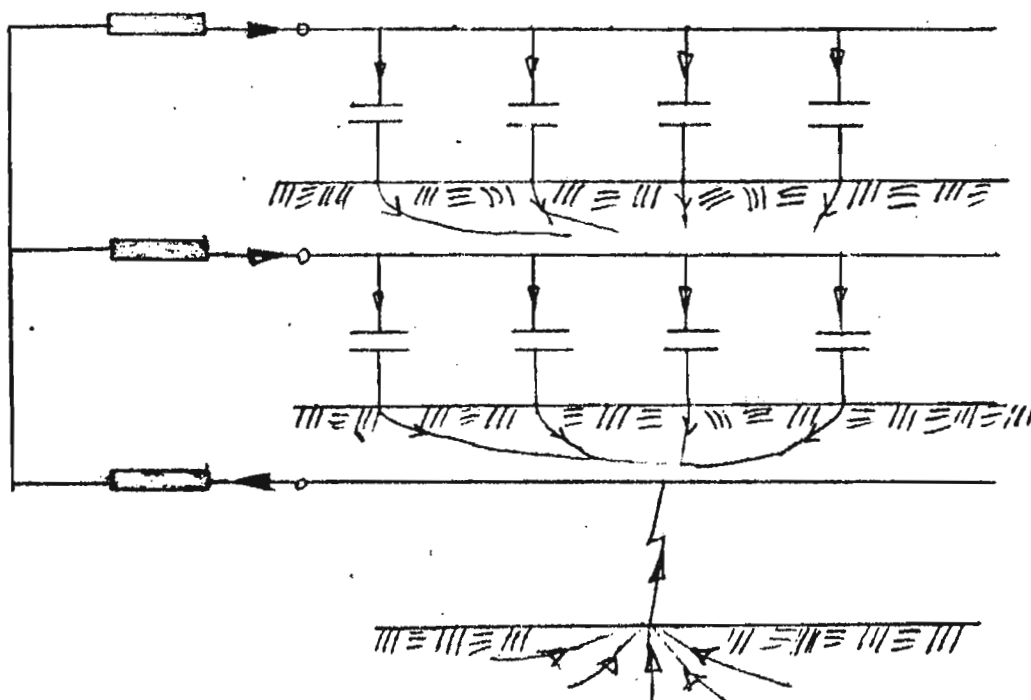
$$\bar{I}_a = \frac{1}{m} \cdot a \cdot (\bar{I}_{RC} + \bar{I}_{SC} + \bar{I}_{TC}) = 0.$$

Kapacitiva strömförhållanden i en ledning vid enpoligt jordfel.



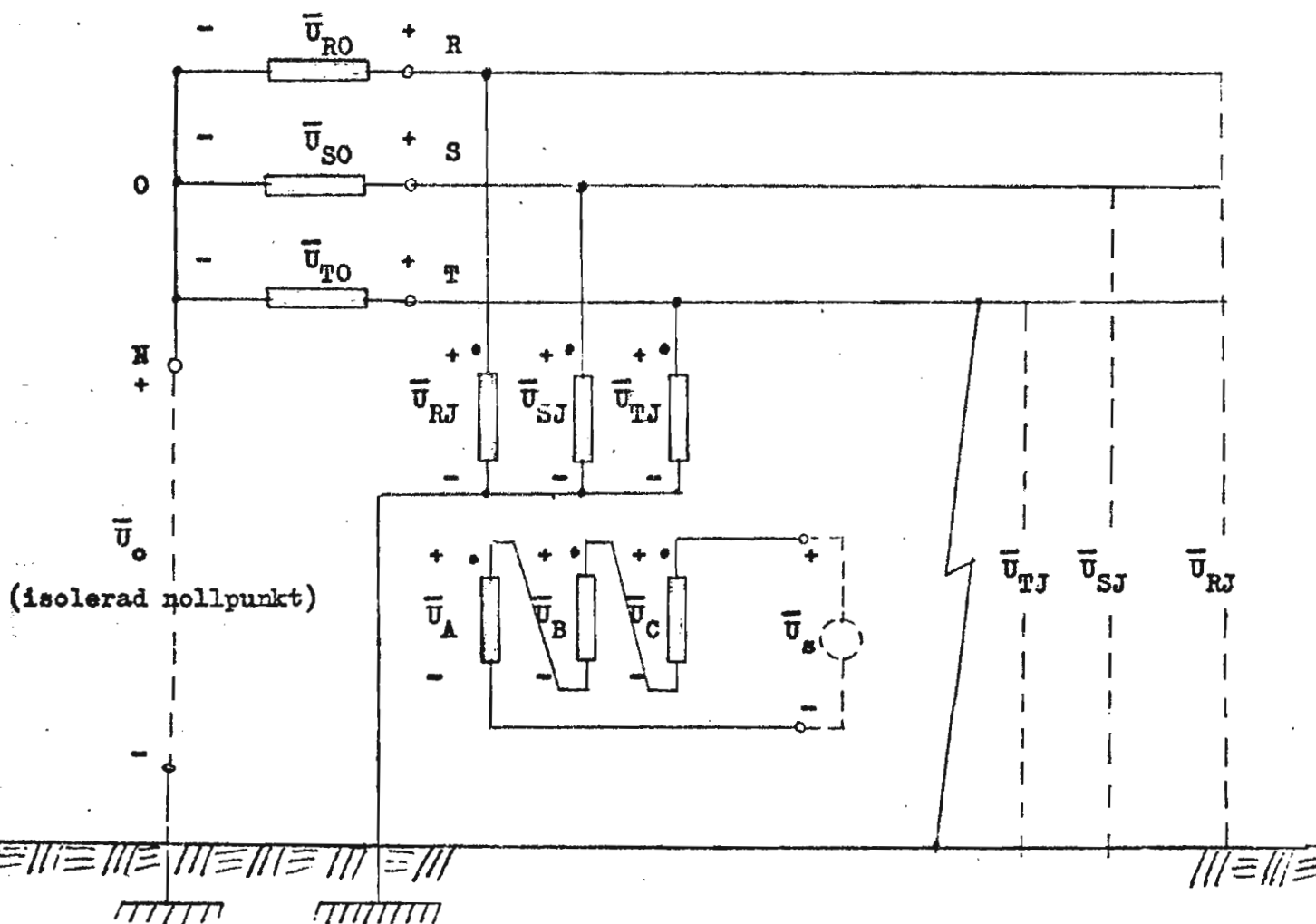
Summamätning i snitt I ger :  $\bar{I}_s = \frac{1}{m} (a_1 \bar{I}_{RC} + a_1 \bar{I}_{SC} - I_j)$   
 varvid  $\bar{I}_j = \bar{I}_{RC} + \bar{I}_{SC}$  som ger  

$$\bar{I}_s = \frac{1}{m} (a_1 - 1) \cdot \bar{I}_j$$



Summamätning i snitt II ger :  $\bar{I}_s = \frac{1}{m} \cdot a_2 (\bar{I}_{RC} + \bar{I}_{SC}) = \frac{1}{m} \cdot a_2 \bar{I}_j$

Observera att jordslutningsströmmen  $I_j$  är oberoende av var jordfelet inträffar, alltså en konstant strömstorhet för det aktuella systemet. Fullt utbildat jordfel har antagits.



Normal drift:

$$\begin{cases} \bar{U}_{RJ} = \bar{U}_{RO} \\ \bar{U}_{SJ} = \bar{U}_{SO} \\ \bar{U}_{TJ} = \bar{U}_{TO} \end{cases}$$

$$\bar{U}_o = 0$$

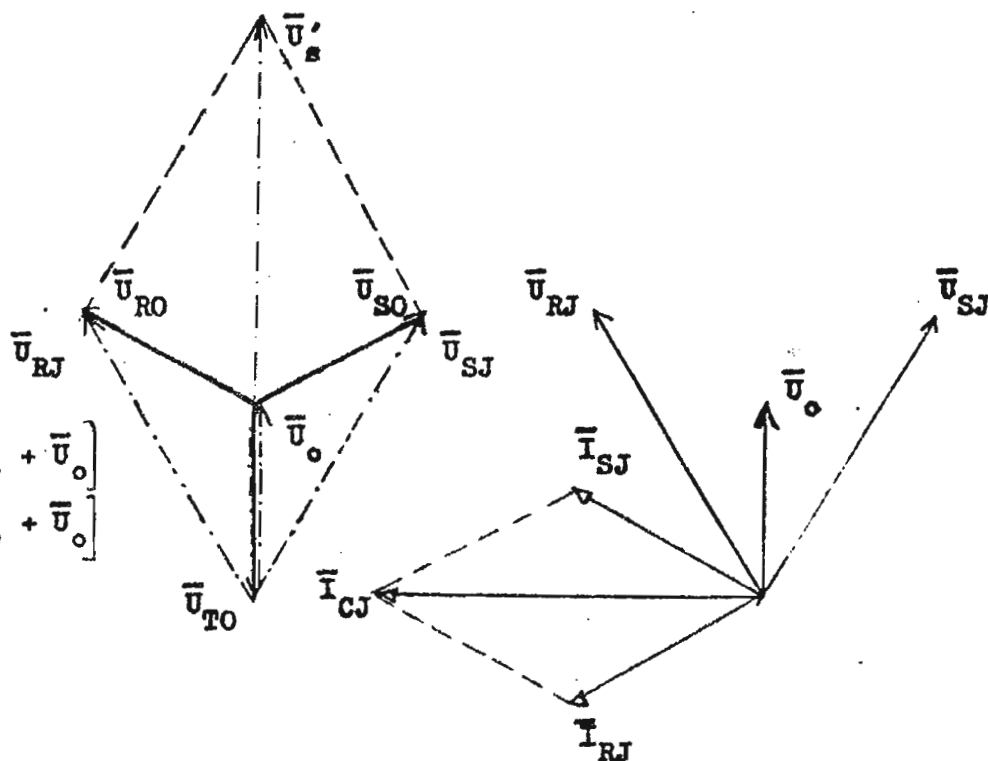
Enpoligt jordfel:

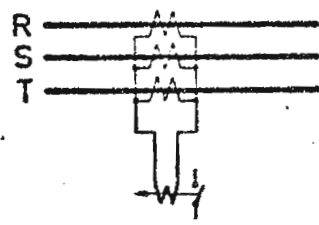
$$\bar{U}_{TJ} = 0$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_{SJ} &= \bar{U}_{SO} + \bar{U}_{TO} \\ \bar{U}_{RJ} &= \bar{U}_{RO} - \bar{U}_{TO} \end{aligned} \quad \begin{cases} \bar{U}_{SO} + \bar{U}_o \\ \bar{U}_{RO} + \bar{U}_o \end{cases}$$

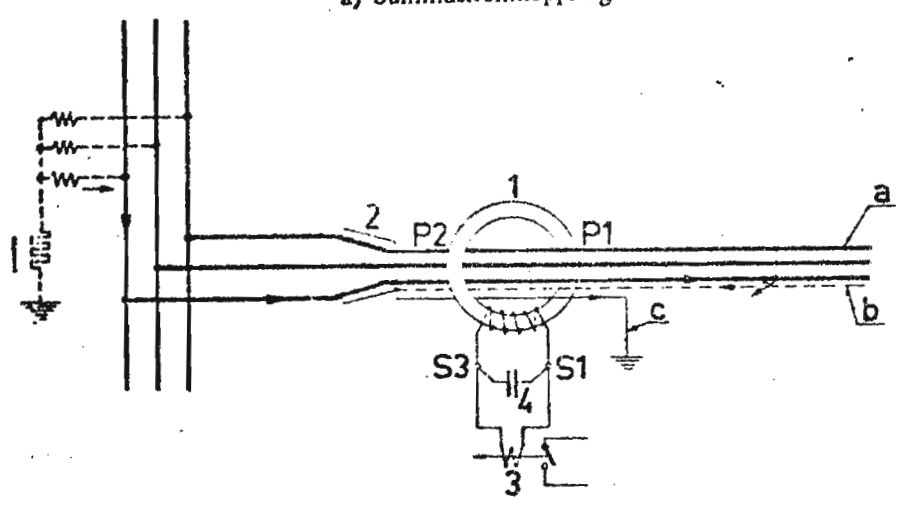
$$\bar{U}_o + \bar{U}_{TO} = \bar{U}_{TJ} = 0$$

$$\bar{U}_o = -\bar{U}_{TO}$$

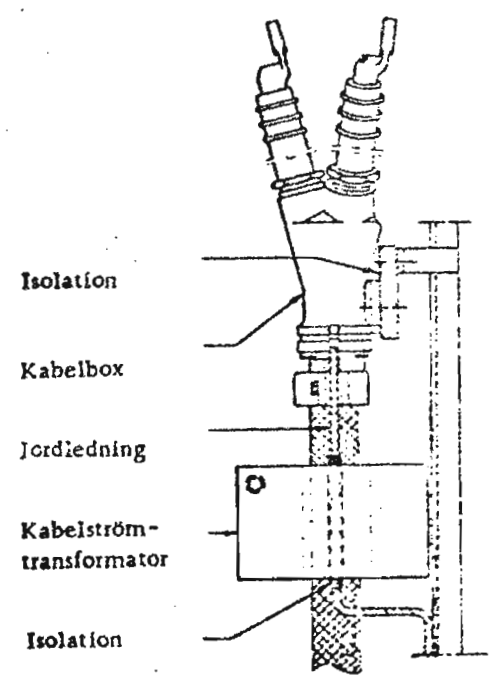




a) Summaströmkoppling



b) a Kabelns fasledare  
b Kabelmantel  
c Jordledning



c) Montering

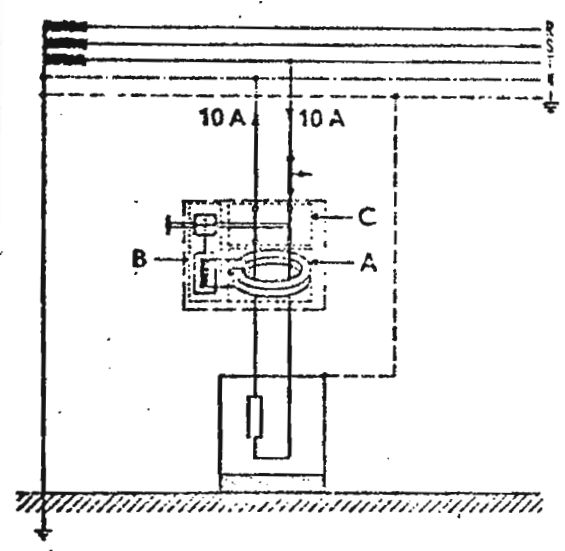


Bild 1

Jordfelsbrytarens principiella uppbyggnad framgår av bild 1. Den består av en strömtransformator A vars primärlindning genomflyts av strömmen i samtliga faser och nollledare. Om ström avledes till jord, se bild 2, kommer det i den aktuella fasen att flyta en tilläggsström lika stor som den avledda  $I_{\Delta}$  (i detta fall 0,5 A). Eftersom  $I_{\Delta}$  går via skyddsledaren till transformatorns N-punkt och inte via N-ledaren så uppstår en strömskillnad

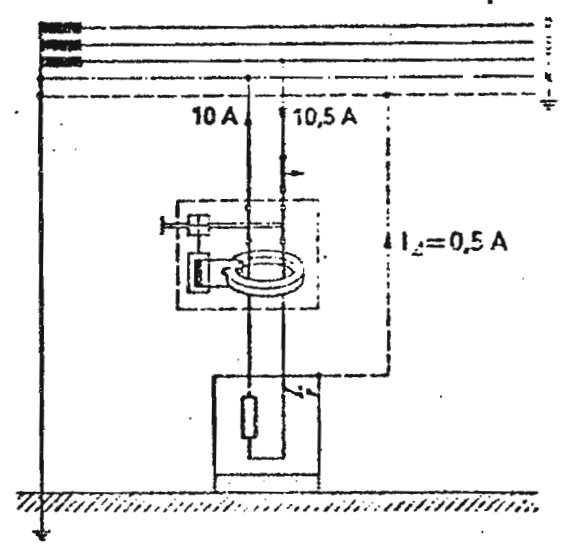


Bild 2

mellan i fasen utgående ström och i N-ledaren återgående ström. Denna strömskillnad magnetiserar ringkärnan och en ström induceras i sekundärlindningen. Denna ström påverkar magnetlåsaren B som träder i funktion och med hjälp av en mekanisk momentutlösare bryter huvudkontaktsgruppen C, förutsatt att  $I_{\Delta}$  överstiger jordfelsbrytarens märkelström  $I_{\Delta N}$ .

Thnis skolst.