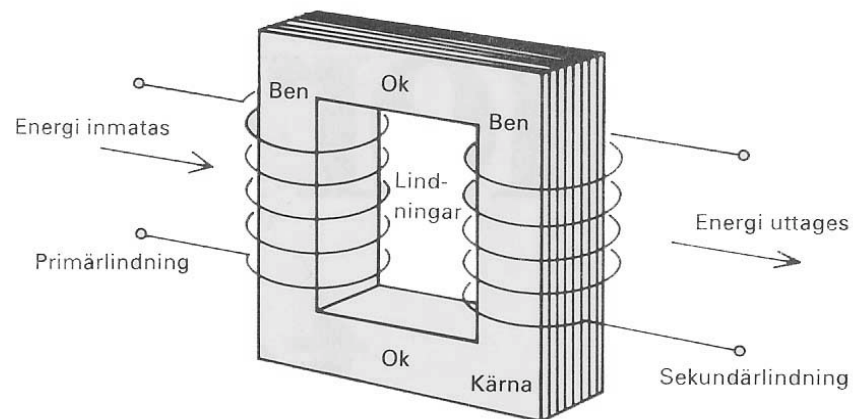
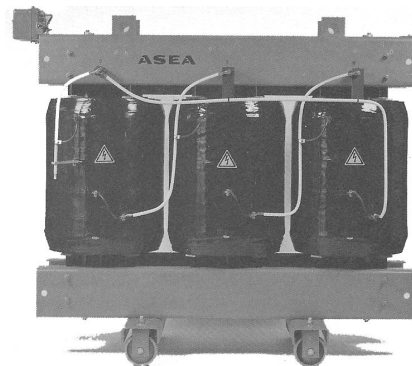
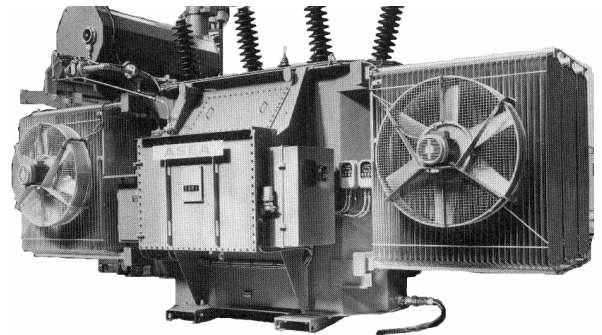
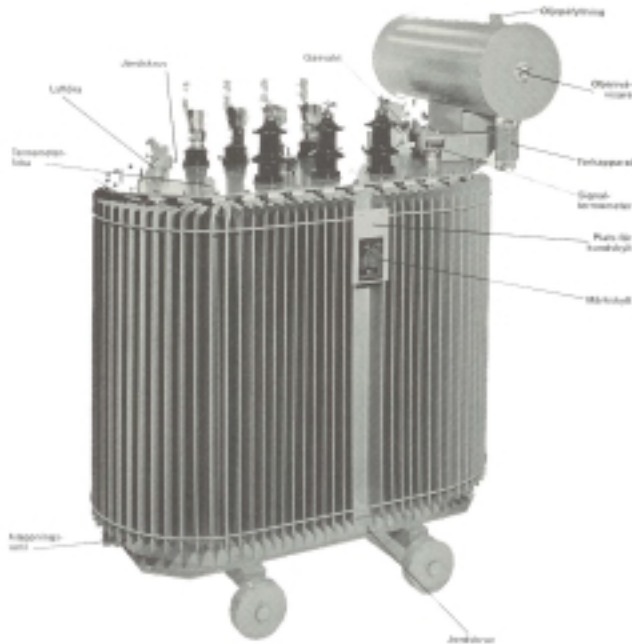


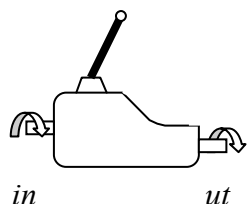
Transformatorn



ENFASTRANSFORMATORN

Introduktion transformatorn

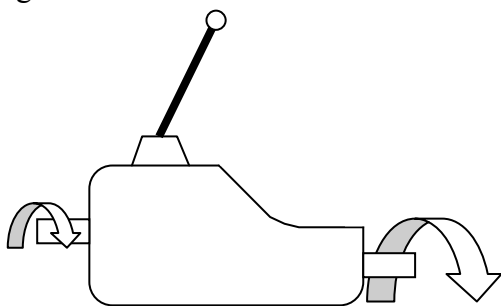
En transformator kan jämföras med en växellåda till en bil. En växellåda växlar ned eller upp ett varvtal. Varvtalet på ingående axel driver kugghjulen i växellådan och på utgångsaxeln får man ut det nya varvtalet, antingen ett lägre eller högre varvtal.



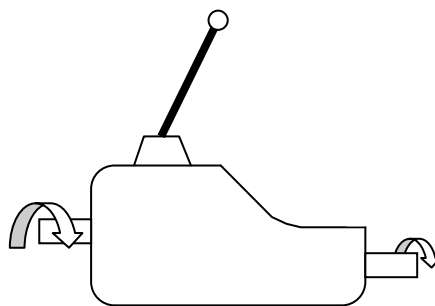
Om det ingående varvtalet växlas ned kraftigt får erhåller man ett betydligt högre vridmoment på utgående axel.

Om istället växlar upp det ingående varvtalet erhåller man ett lägre vridmoment på utgående axel.

Energin ”bärs” från inaxel till utaxel via kugghjul.



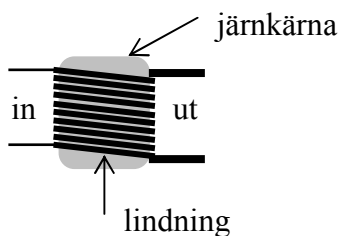
Lågt utgående varvtal = högt moment



Högt utgående varvtal = Lågt moment

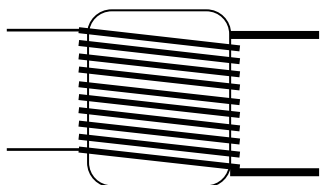
På samma sätt kan man likna en transformator med en växellåda. Varvtalet får representera transformatorns spänning och vridmomentet transformatorns ström. Växellådans kugghjul får ersätta lindningarna i transformatorn.

Detta innebär för en transformator som matas med en spänning:

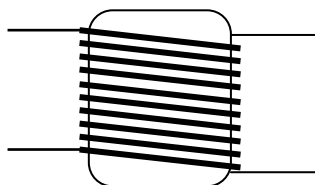


Om inkommande spänningen omsätts till en lägre utspänning erhåller man ett betydligt högre strömuttag på utsidan.

Om man stället omsätter den inkommande spänningen till en lägre på utsidan får man ett lägre strömuttag.



Låg utspänning = hög ström



Hög utspänning = låg ström

Oftast är det fråga om nedtransformering av spänning, d v s. att man gör om en högre spänning till en lägre.

Överallt omges vi av transformatorer:

- spänningen i vägguttaget matas från en distributionstransformator (10 000V till 400V)
- mobiltelefonen laddas via ett nätaggregat (230V till 4,5V)
- datorns nätaggregat (230V till 12 resp. 5 V)

Men ibland är det fråga om en spänningsökning. Vid t ex. kärnkraftverk levererar generatoren (som drivs med ånga) spänningen ca. 20 000V. Denna spänning transformerar man upp till 400 000V innan den skickas ut på stamnätet (de stora luftledningar man kan se i landskapet). Anledningen till att man gör så här beror på att man vill reducera effektförlusterna i ledningarna så långt det är möjligt. Detta kan enkelt bevisas med formel:

$$P = R \times I^2$$

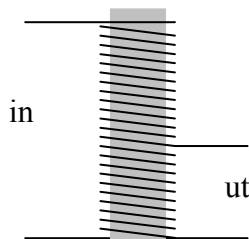
P=effektförlusterna

R=ledningens resistans

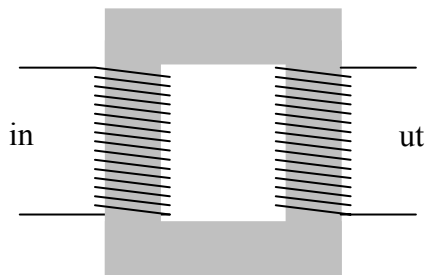
I=strömuttaget *Vid en given last erhåller man en lägre ström om spänningen höjs.*

I princip talar man om 2 typer av transformatorer.

- Spartransformatorn
- Fulltransformatorn (även kallad isolertransformator)



En spartransformator består endast av en lindning, därav namnet ”spar”. På utsidan ansluter man sig någonstans på lindningen. Denna typ av transformator används i regel som vridtransformatorer vid laborationer samt för finjustering av en spänning. Transformatorn kan i vanliga tillämpningar bli livsfarlig.

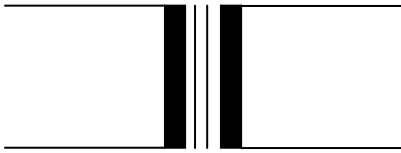


En fulltransformator däremot har två lindningar, en för inkommande matning och en för den utgående. Dessa är elektriskt åtskilda. Järnkärnan fungerar som en slags transmission av den elektriska energin från den ena lindningen till den andra. Denna transformertyp är en relativt säker konstruktion.

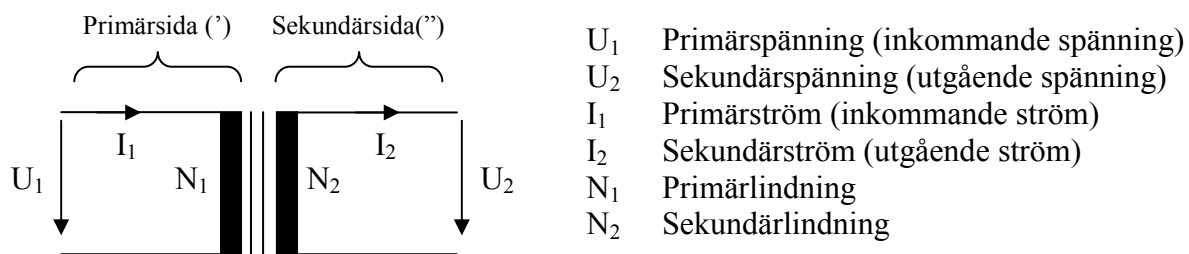
I en transformator är det det magnetiska flödet som ”bär” energin från ena sidan till den andra. Det magnetiska flödet leds i järnkärnan, det är därför viktigt att denna har goda magnetiska ledaregenskaper. Bra magnetiska ledaregenskaper är bl a.

- Laminerat järn
- Få vassa kanter

En fulltransformator ritas enligt:



Sätter vi in lite beteckningar får vi



Primärsidan betecknas också med tecknet ' vilket uttalas [*prim*]
 Sekundärsidan betecknas också med tecknet " vilket uttalas [*biss*]

Till detta kommer vi senare i detta kompendie.

För en ideal (existerar inga förluster) gäller följande:

Ideal transformator

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (\text{Ideal transformator})$$

Exempel:

En transformator som har 100 varv på primärlindningen och 50 på sekundärlindningen och som ansluts till 230V på primärsidan ger sekundärspänningen 115V. Om strömmen på sekundärsidan då blir 10A blir den 5A på primärsidan.

Bevis:

$$U_1 = \frac{N_1 \times U_2}{N_2} \Rightarrow U_1 = \frac{100 \times 115}{50} \Rightarrow U_1 = 230V$$

För en ideal transformator är verkningsgraden 1,0 (100%)

$$I_2 = \frac{U_1 \times I_1}{U_2} \Rightarrow I_2 = \frac{230 \times 5}{115} \Rightarrow I_2 = 10A$$

Så enkelt det vore om man kan tillämpa detta, då skulle vi kunna sluta här. Men en verklig transformator har som sagt förluster som gör det lite mer omfattande att räkna på.

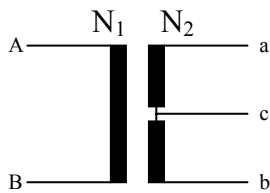
Omsättning

En transformator som är märkt t ex. 240/24V har spänningsoomsättningen 240/24 (10:1). På samma sätt gäller det för varvtal (N_1 och N_2) och ström (I_1 och I_2).

Man kan säga att omsättningstalet avgör förhållandet mellan primär- resp. sekundärsida. Observera att omsättningen inte har något med transformatorns effekt att göra.

Exempel

En ideal transformator har 300 trådvarv på primärlindningen och 120 trådvarv på sekundärlindningen. Sekundärlindningen består av 2 lindningar (a-c: 70 resp. c-b: 50 trådvarv).



Beräkna spänningen mellan a-b om man ansluter 230V på primärsidan (A-B).

Vad blir spänningen mellan a-c?

Vad blir spänningen mellan A-B om man istället ansluter 230V mellan c-b?

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$U_2 = \frac{U_1 \cdot N_2}{N_1} \Rightarrow U_2 = \frac{230 \cdot (70 + 50)}{300} \Rightarrow$$

$$U_2 = \underline{\underline{92V}}$$

$$U_2 = \frac{230 \cdot 70}{300} \Rightarrow U_2 = \underline{\underline{54V}}$$

eller

$$U_2 = \frac{70}{70+50} \cdot 92 \Rightarrow U_2 = \underline{\underline{54V}}$$

$$U_2 = \frac{230 \cdot 300}{50} \Rightarrow U_2 = \underline{\underline{1380V}}$$

Verklig transformator

Ovanstående formler gäller ej då transformatorn orsakar följande:

- **Läckflöden** Flödesläckage i hörnor etc. i järnkärnan.
- **Inre resistans** Resistanserna orsakar spänningsfall.
- **Tomgångsström** Primärsidan "drar" ström i tomgång.
- **Järnförluster** Består av virvelströms- och hysteresförluster.
- **Kopparförluster** Beror på resistansen och strömmen.

Dessa orsakar ett spänningsfall i transformatorn som ökar med belastningen samt att verkningsgraden inte är 100 % vilket den är för en ideal trafo.

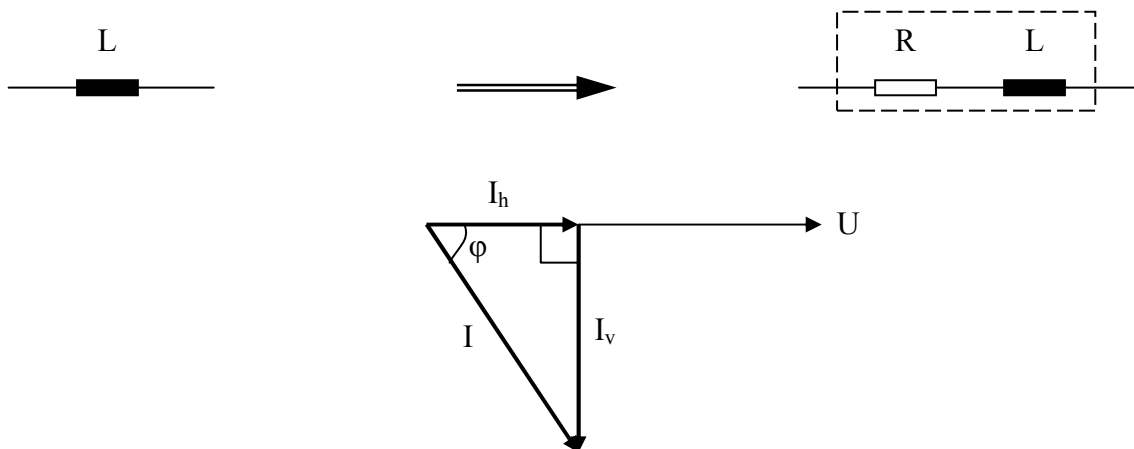
Ekvivalent schema

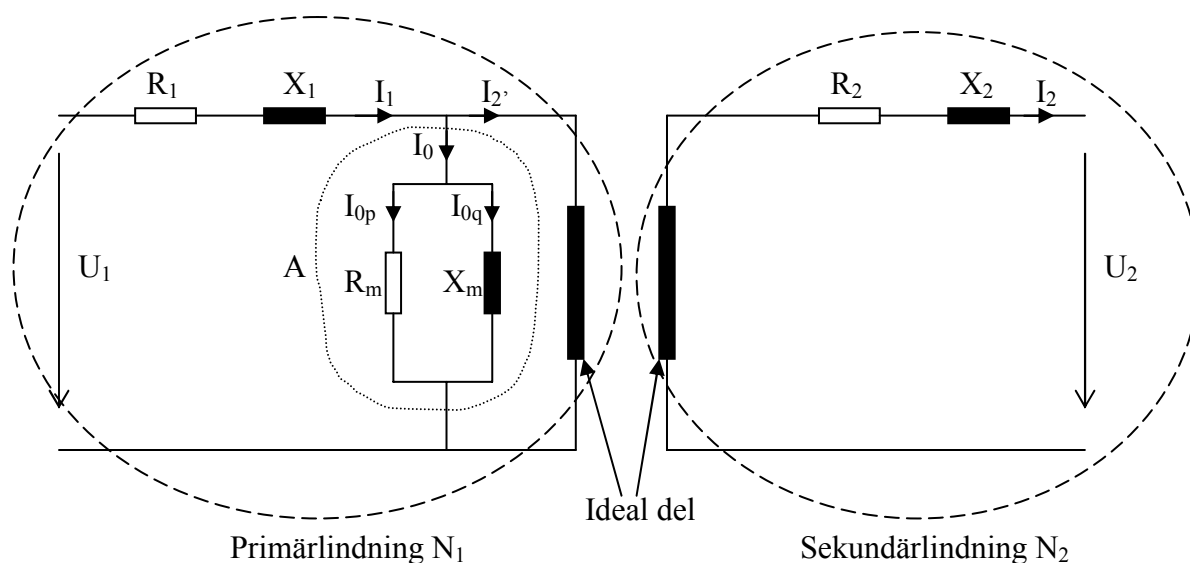
Eftersom de 2 lindningarna är elektriskt åtskilda (ej elektrisk kontakt med varandra) måste man "flytta" över ena sidan till den andra. Detta kallas att göra en ekvivalens. Oftast är det fråga om att flytta över sekundärsidan till primärsidan och därefter göra de beräkningar man önskar.

Enligt tidigare formel (ideal transformator) gäller: $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$ $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$

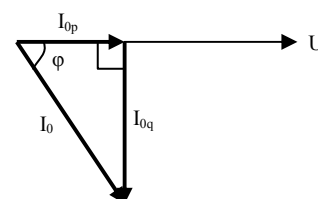
Man kan snabbt se om belastningen på sekundärsidan ökar kommer dess ström också att öka vilket gör att även strömmen på primärsidan ökar. $I_1 = \frac{I_2 \times U_2}{U_1}$ Det innebär att en förändring på sekundärsidan påverkar även primärsidan.

En lindning orsakar fasförskjutning mellan ström och spänning. Den resistiva delen kan ritas som en resistor och den induktiva som en spole.





I_2 har överreducerats till primärsidan, då kallas den för I_2' (i två prim). Den streckade inramningen (A) visar tomgångsdriften. Eftersom primärlindningen utgör en last på primärsidan när den ansluts till spänning kommer det att flyta en ström även om inte sekundärsidan är ansluten till någon last. Den ström som kommer att flyta då kallas för *tomgångsström* I_0 . Den kan delas upp i en horisontell I_{0p} och en vertikal del I_{0q}



I_0 för att det totala tomgångsströmmen (0)

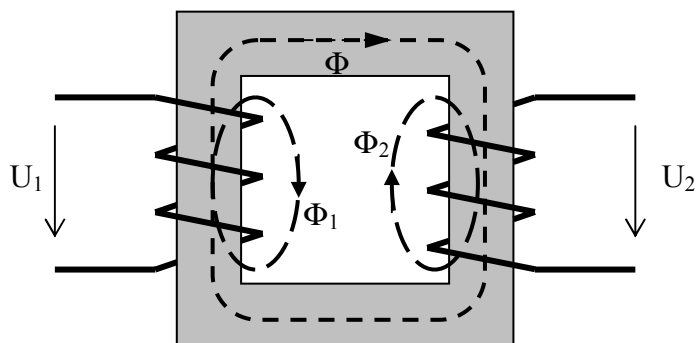
I_{0p} för att det är fråga om aktiv effekt (P) i tomgång (0) utvecklas i den resistiva delen

I_{0q} för att det är fråga om reaktiv effekt (Q) i tomgång (0) utvecklas i den induktiva delen

Dessa strömmar tillsammans orsakar *tomgångsförluster* P_0 .

I_{0p} ger upphov till aktiv effekt och utvecklas den i den resistiva delen av lindningen. Den kallas för *järnförluster*. Dessa förluster är oberoende av hur hårt transformatorn belastas (på sekundärsidan).

I_{0q} ger upphov till reaktiv effekt och utvecklas den i den induktiva delen av lindningen. Den orsakar *läckflöden*. Dessa förluster är beroende av hur hårt transformatorn belastas (på sekundärsidan). Vid ökad belastning på sekundärsidan (I_2 ökar) kommer också läckflödena att öka. Dessa läckflöden betecknas Φ_1 och Φ_2 .



Järnkärnans uppgift är att "leda" flödet Φ . Eftersom lindningarna är upplindade utanpå järnkärnan kommer det att uppstå ett litet "läckage". Flödet i sekundärlindningen uppstår då sekundärsidan belastas och det flyter en ström i den.

Överreducering

Som vi tidigare talat om tillämpar man överreducering. Eftersom primär- och sekundärsida ”lever” varsitt liv utan elektrisk kontakt måste värden från den ena sidan ”lyftas” över till den andra, detta kallas för överreducering. Man får då istället en krets att räkna på istället för två olika kretsar.

Ett överreducerat värde

<i>Från</i>	<i>Till</i>	<i>Betecknas</i>	<i>Kallas / uttalas</i>
Sekundärsida	Primärsida	'	Prim
Primärsida	Sekundärsida	''	Bis

När värden överreduceras tar man hänsyn till transformatorns ”utväxlingsförhållande” eller omsättning.

Formler

Allmänt gäller för impedanser och spänningar:

R_1 till sekundärsida

$$R_1'' = R_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

X_1 till sekundärsida

$$X_1'' = X_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

Z_1 till sekundärsida

$$Z_1'' = Z_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

U_1 till sekundärsida

$$U_1'' = U_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)$$

När man ”lyfter” över dessa värden till sekundärsidan måste man även ta hänsyn till värdena på sekundärsidan (R_2 och X_2). Dessa värden adderas helt enkelt med ovanstående. Summan kallas nu för kortslutningsresistans resp. kortslutningsreaktans, då de är framtagna med ett sk. Kortslutningsprov vilket förklaras längre fram.

jämför med ovan

Kortslutningsresistans

$$R_k'' = R_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 + R_2$$

Kortslutningsreaktans

$$X_k'' = X_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 + X_2$$

Kortslutningsimpedans

$$Z_k'' = \sqrt{\left(R_k'' \right)^2 + \left(X_k'' \right)^2}$$

Vid ekvivalent överflyttning av impedansvärden på sekundärsidan till primärsidan gäller följande skalfaktor för impedanser:

$$\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$$

För ekvivalent överflyttning av sekundärspänning till primärsidan gäller:

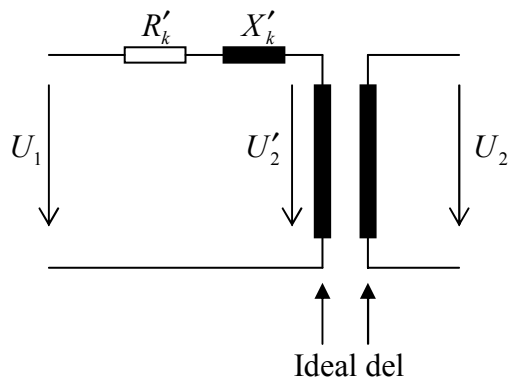
$$U_2' = U_2 \left(\frac{N_1}{N_2}\right)$$

Vanliga beräkningar

När man utför beräkningar på en transformator är det i regel på sekundärsidan man gör dessa. Detta beror på att det är just på sekundärsidan belastningen har olika karaktärer vilket påverkar transformatorns egenskaper. På primärsidan ansluts en spänning som i princip är konstant.

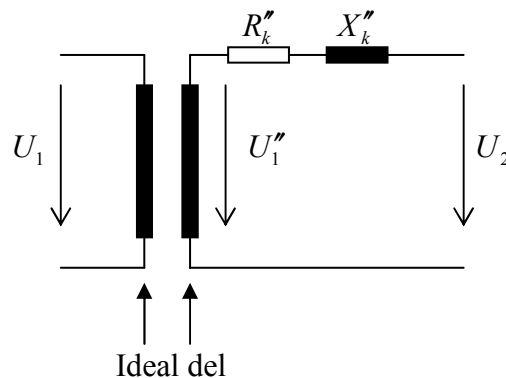
Ekvivalenta schema

Nedan visas kretsarna översatta till resp. sida.



Sett från primärsidan

Alla värden på sekundärsidan är över-reducerade till primärsidan.



Sett från sekundärsidan (vanligaste metoden)

Alla värden på primärsidan är över-reducerade till sekundärsidan.

Transformatorns märkeffekt S_n

En transformators effekt anges alltid i VA (voltampere) vilket avser dess skenbara effekt S_n . Detta beror på att den last som ansluts till sekundärsidan ger upphov till färförskjutning mellan ström och spänning om den är induktiv eller kapacitiv (kapacitiv -otrevlig art => ger ökad sekundärspänning). Vanliga enheter är VA och kVA och vid riktigt stora tillämpas MVA. Se gärna på t ex. laddningsaggregatet till en mobiltelefon.

Märkspänningar

En transformators märkspänningar anges vid olika tillstånd för olika typer. För

- Småtransformatorer anges de vid full last och för
- Krafttransformatorer anges de i tomgång.

Transformatorer delas in enligt

	1-fas	3-fas
Småtransformatorer	$0 < 1,0\text{kVA}$	-

Krafttransformatorer	$\geq 1,0\text{kVA}$	$\geq 5,0\text{kVA}$
----------------------	----------------------	----------------------

Exempel

En 1-fastransformator har omsättningen $400/230\text{V}$. $R_1=5,0\Omega$, $X_1=7,3\Omega$, $R_2=1,1\Omega$ och $X_2=2,5\Omega$

Beräkna kortslutningsresistansen och kortslutningsreaktansen överreducerat till sekundärsidan (R_k'' och X_k'').

Beräkna kortslutningsresistansen och kortslutningsreaktansen överreducerat till primärsidan (R_k' och X_k').

Beräkna U_1'' vid primärspänningen 400V samt vid 380V .

$$\begin{aligned}
 &400/230\text{V} \\
 &R_1 = 5,0\Omega \\
 &X_1 = 7,3\Omega \\
 &R_2 = 1,1\Omega \\
 &X_2 = 2,5\Omega
 \end{aligned}$$

$$R_k'' = R_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 + R_2 \quad \rightarrow \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1}$$

$$R_k'' = R_1 \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 + R_2 \Rightarrow R_k'' = 5,0 \left(\frac{230}{400} \right)^2 + 1,1 \Rightarrow \underline{\underline{R_k'' = 2,85\Omega}}$$

$$X_k'' = X_1 \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 + X_2 \Rightarrow X_k'' = 7,3 \left(\frac{230}{400} \right)^2 + 2,5 \Rightarrow \underline{\underline{X_k'' = 4,9\Omega}}$$

$$R_k' = R_2 \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 + R_1 \Rightarrow R_k' = 1,1 \left(\frac{400}{230} \right)^2 + 5,0 \Rightarrow \underline{\underline{R_k' = 8,35\Omega}}$$

$$X_k' = X_2 \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 + X_1 \Rightarrow X_k' = 2,5 \left(\frac{400}{230} \right)^2 + 7,3 \Rightarrow \underline{\underline{X_k' = 14,9\Omega}}$$

$$U_1'' = U_1 \left(\frac{U_2}{U_1} \right) \quad 400\text{V} \quad U_1'' = 400 \left(\frac{230}{400} \right) \Rightarrow \underline{\underline{U_1'' = 230\text{V}}}$$

$$380\text{V} \quad U_1'' = 380 \left(\frac{230}{400} \right) \Rightarrow \underline{\underline{U_1'' = 218,5\text{V}}}$$

Eftersom $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$ kan man ange

$\frac{U_1}{U_2}$ som representanter för $\frac{N_1}{N_2}$

Exempel

En 1-fastransformator på 5,0kVA är märkt 400/110V. Spänningsfallet är 4% vid märklast.

Beräkna sekundärspänningen i tomgång om primärspänningen håller 400V.

Beräkna sekundärspänningen i tomgång om primärspänningen håller 380V.

Beräkna sekundärspänningen vid märklast om primärspänningen håller 400V.

1-fas 5,0 kVA Detta är en krafttransformator
400/110V då anges märkspänningarna i
 $U_{fall} = 4\%$ tomgång.
 $S_n = 5,0 \text{ kVA}$

$U_1 = 400V \Rightarrow \underline{U_2 = 100V}$

$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} \Rightarrow \frac{U_1}{U_2} = \frac{400}{100} \Rightarrow \frac{U_1}{U_2} = 4$

Ökar/minskar U_1 kommer U_2 öka/minska
proportionellt lika mycket.

$U_2 = \frac{380}{400} \cdot 100 \Rightarrow \underline{U_2 = 95V}$

$U_2 = (1 - 0,04) \cdot 100 \Rightarrow \underline{U_2 = 96V}$

Räkna 27-31

Nu har vi gjort en del enklare beräkningar. Vi ska nu gå vidare med de mer praktiska beräkningarna, de som man har direkt praktisk nytta av i olika tillämpningsfall.

Transformatorns inre spänningsfall

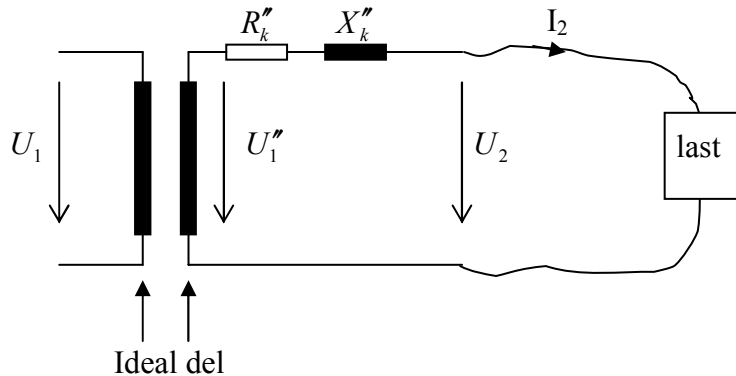
Så fort en transformator belastas (en last ansluts till sekundärsidan) kommer det att uppstå ett spänningsfall i transformatorn. Storleken på detta spänningsfall är beror på lastens karaktär, en induktiv last som har stor fasförskjutning (U och $I \Rightarrow$ låg effektfaktor $\Rightarrow$ lågt $\cos\phi$) ger upphov till ett större spänningsfall.

Formeln för en transformators spänningsfall ser ut som följer:

$$U_2 = U_1'' - \left(R_k'' \frac{P_2}{U_{2n}} + X_k'' \frac{Q_2}{U_{2n}} \right)$$

Vi ska reda ut begreppen nu.

Vi börjar med den förra kretsen, den då vi överreducerar alla värden från primärsidan till sekundärsidan.



När man ansluter en last till sekundärsidan kommer det att flyta en ström I_2 där (förutsatt att primärsidan är ansluten till ett elnät).

$$U_2 = U_1'' - \left(R_k'' \frac{P_2}{U_{2n}} + X_k'' \frac{Q_2}{U_{2n}} \right) \quad \text{Som vi tidigare vet bestäms strömmen av } \frac{P}{U}$$

Att vi i formeln använder U_{2n} beror på att vi inte vet den aktuella U_2 spänningen, det är ju den vi skall beräkna (annars får vi ett slags "moment 22").

Multipliserar vi strömmen I_2 med motståndet får vi en spänning (Ohm's lag $U = I \times R$)

$$U_2 = U_1'' - \left(R_k'' \frac{P_2}{U_{2n}} + X_k'' \frac{Q_2}{U_{2n}} \right)$$

Om vi adderar dessa 2 spänningsfall får transformatorns inre spänningsfall.

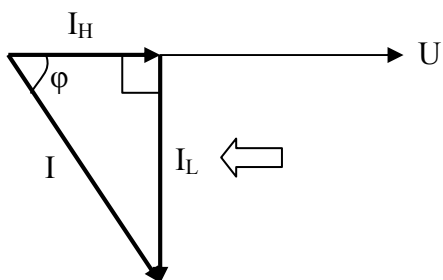
För att slutligen få fram aktuell sekundärspänning U_2 subtraherar vi det inre spänningsfallet från den överreducerade primärspänningen U_1''

$$U_2 = U_1'' - (U_R + U_L)$$

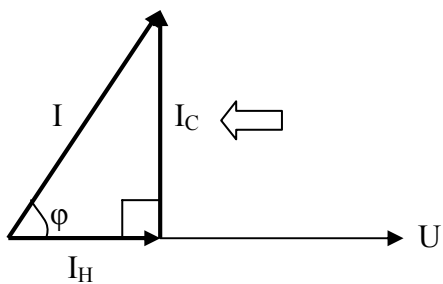
Värt att notera

Formlen utgår från att lasten (om den är fasförskjuten) är mer eller mindre induktiv. Skulle lasten vara kapacitiv erhåller man istället ett minustecken mellan de 2 delspänningarna U_R och U_L . Detta kan i stora kapacitiva laster få otäcka följder i form av för hög sekundärspänning.

Att vi sätter ett minustecken istället beror på följande:



En induktiv last ser delströmmarna ut så här.



Och för en kapacitiv last så här. Den kapacitiva strömmen är exakt 180° motriktad en induktiv ström, därför ska det i sådana vara minustecken.

Exempel

En 1-faformator på 4,0kVA är märkt 230/90V. $R_1=0,65\Omega$, $R_2=0,06\Omega$, $X_1=0,84\Omega$ och $X_2=0,09\Omega$

Beräkna R_k'' och X_k''

Beräkna U_2 om primärspänningen är 230V. Sekundärsidan belastas med 2,5kVA $\cos\phi 0,8$

Beräkna U_2 då primärspänningen sjunker till 200V vid samma last som ovan.

Hur stor last med $\cos\phi 0,8$ kan anslutas utan att sekundärspänningen sjunker under 85V.

Primärspänningen håller i detta fall 230V?

4,0 kVA
230/90V
 $R_1 = 0,65\Omega$
 $R_2 = 0,06\Omega$
 $X_1 = 0,84\Omega$
 $X_2 = 0,09\Omega$

$$R_k'' = R_1 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 + R_2 \Rightarrow R_k'' = 0,65 \left(\frac{90}{230}\right)^2 + 0,06 \Rightarrow R_k'' = 0,16\Omega$$
$$X_k'' = X_1 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 + X_2 \Rightarrow X_k'' = 0,84 \left(\frac{90}{230}\right)^2 + 0,09 \Rightarrow X_k'' = 0,22\Omega$$

Last: 2,5 kVA $\cos\phi 0,8$ $S = 2,5 \text{ kVA}$
 $P = S \cdot \cos\phi \Rightarrow P = 2,5 \cdot 10^3 \cdot 0,8 \Rightarrow P = 2,0 \text{ kW}$
 $Q = S \cdot \sin\phi \Rightarrow Q = 2,5 \cdot 10^3 \cdot 0,6 \Rightarrow Q = 1,5 \text{ kVAR}$

$$U_1'' = U_1 \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \Rightarrow U_1'' = 230 \left(\frac{90}{230}\right) \Rightarrow U_1'' = 90V$$
$$U_2 = U_1'' - \left(R_k'' \frac{P_2}{U_{2n}} + X_k'' \frac{Q_2}{U_{2n}}\right) \Rightarrow U_2 = 90 - \left(0,16 \frac{2,0 \cdot 10^3}{90} + 0,22 \frac{1,5 \cdot 10^3}{90}\right) = 83V$$
$$U_1'' = 200 \left(\frac{90}{230}\right) \Rightarrow U_1'' = 78V$$
$$U_2 = 78 - \left(0,16 \frac{2,0 \cdot 10^3}{90} + 0,22 \frac{1,5 \cdot 10^3}{90}\right) \Rightarrow U_2 = 71V$$
$$U_2 = U_1'' - \left(R_k'' \frac{P_2}{U_{2n}} + X_k'' \frac{Q_2}{U_{2n}}\right) \quad \begin{cases} P = S \cdot \cos\phi \\ Q = S \cdot \sin\phi \end{cases}$$
$$U_2 = U_1'' - \left(R_k'' \frac{S_2 \cdot \cos\phi_2}{U_{2n}} + X_k'' \frac{S_2 \cdot \sin\phi_2}{U_{2n}}\right)$$
$$85 = 90 - \left(0,16 \frac{S_2 \cdot 0,8}{90} + 0,22 \frac{S_2 \cdot 0,6}{90}\right) \Rightarrow$$
$$85 = 90 - \left(1,42 \cdot 10^{-3} S_2 + 1,47 \cdot 10^{-3} S_2\right) \Rightarrow$$
$$85 = 90 - \left(2,89 \cdot 10^{-3} S_2\right)$$
$$S_2 = \frac{90 - 85}{2,89 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow$$
$$S_2 = \underline{\underline{1732 \text{ kVA} \cos\phi 0,8}}$$

Förluster

De förluster som uppstår i transformatorn är

- P_{Fe} (järnförluster)
- P_{cu} (kopparförluster)

P_{Fe} (järnförluster)

Är **oberoende** av hur hårt transformatorn belastas.

P_{cu} (kopparförluster)

Är **beroende** av hur hårt transformatorn belastas. De ökar kvadratisk. ($P = R \times I^2$)

I tillämpningssammanhang används begreppen

P_0 (tomgångsförluster). Är **oberoende** av hur hårt transformatorn belastas.

P_b (belastningsförluster). Är **beroende** av hur hårt transformatorn belastas.

P_0 (tomgångsförluster) representerar i princip P_{Fe} (järnförluster).

P_b (belastningsförluster) representerar följaktligen P_{cu} (kopparförluster).

För att ta reda på dessa utför man ett sk. **tomgångsprov** och **kortslutningsprov**.

Tomgångsprov

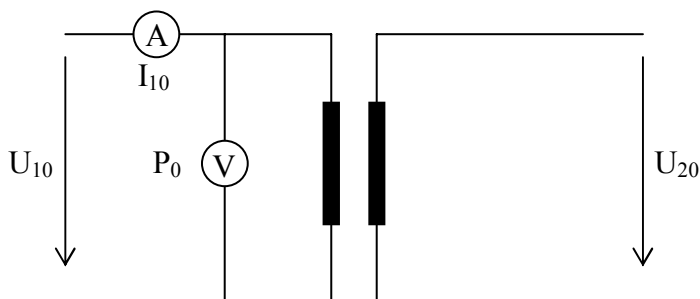
I provet tar man fram tomgångsförlusterna P_0 samt omsättningen.

Provet utförs med öppen sekundärkrets (obelastad transformator).

I ett tomgångsprov tar man reda på transformatorns tomgångsförluster P_0 . Man kan också få fram transformatorns omsättning. Transformatorns primärsida ansluts till märkspänning. Man mäter:

U_{10} , U_{20} , P_0 och I_0 (U_{10} läses "u ett noll"). Med U_{10} och U_{20} kan man få fram omsättningen

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{10}}{U_{20}}$$



Med tomgångsprov erhålls

U_{10} (Tomgångsspänning Primärsida)

U_{20} (Tomgångsspänning Sekundärsida)

P_0 (Tomgångsförluster)

I_0 (Tomgångsström Primärsida)

Kortslutningsprov

I detta prov tar man fram belastningsförluster P_b , R_k'' och X_k''

Provet utförs så att transformatorn belastas till 100%.

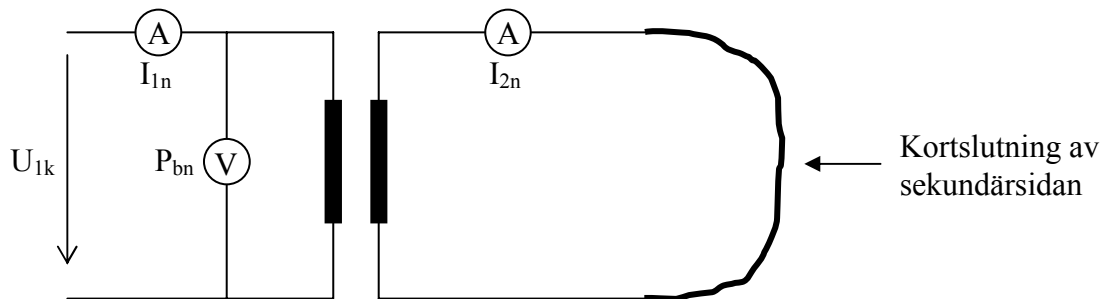
Med detta prov tar man reda på P_b (belastningsförluster) vid märklast. Provet går till på följande sätt:

Sekundärsidan kortsluts med en ledningsbit.

Primärsidan ansluts till en reglerbar växelspanning (helst finjusterbar).

Primärspänningen ökas försiktigt från 0V tills det att amperemetrarna för I_{1n} och I_{2n} visar märkström (primärspänningen är ca. 5-10% av märkspänningen).

På det här viset (genom att kortsluta sekundärsidan) kan man "simulera" att transformatorn arbetar med full last vid en låg primärspänning. Märkströmmarna anger ju att transformatorn är fullt belastad (100%). Tomgångsförlusterna P_0 kan försummas då primärspänningen är låg relativt märkspänningen.



Det man mäter är P_b vid märklast som vi kallar P_{bn} . Dessutom mäter man U_{1k} , I_{1n} och I_{2n} . Med hjälp av dessa mätvärden kan man beräkna följande:

$$Z_k'' = \frac{U_{1k}}{I_{2n}} \quad R_k'' = \frac{P_{bn}}{I_{2n}^2} \quad X_k'' = \sqrt{(Z_k'')^2 - (R_k'')^2}$$

U_{1k} måste överreduceras till sekundärsidan enligt formel $U_{1k}'' = U_{1k} \left(\frac{N_2}{N_1} \right)$

På så här vis tar man reda på R_k'' och X_k'' utan att veta vare sig R_1 , R_2 , X_1 eller X_2 . Det är ju R_k'' och X_k'' som vi använder i praktiska beräkningar på transformatorn.

Sammanfattning tomgångs- och kortslutningsprov

När dessa prov är genomförda kan man räkna på transformatorns sekundärspänning vid olika laster samt transformatorns verkningsgrad. Värden man erhållit samt med viss beräkning är:

P_0	(erhålls direkt)
P_{bn}	(erhålls direkt)
R_k''	(beräknas med P_{bn} och I_{2n})
X_k''	(beräknas med Z_k'' och R_k'')

Verkningsgrad

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Transformatorns verkningsgrad bestäms med den allmänna formeln

P_2 representeras av belastningen $S_2 \times \cos \varphi_2$ (uttagen effekt).

P_1 representeras av belastningen $S_2 \times \cos \varphi_2$ samt förlusterna P_0 och P_b . Dessa förluster är P_0 (tomgångsförluster) och P_b (belastningsförluster). P_b (belastningsförluster) är beroende av hur hårt transformatorn belastas, alltså kan man skriva den som $P_b = P_{bn} \times X^2$.

X^2 är belastningsgraden och kan tas fram genom $\frac{I_1}{I_{1n}} = \frac{I_2}{I_{2n}} = \frac{S}{S_n}$
 X^2 kan alltså aldrig bli större än 1.

Den slutliga formeln för verkningsgraden blir

$$\eta = \frac{S_2 \times \cos \varphi_2}{(S_2 \times \cos \varphi)_2 + (P_0) + (P_{bn} \times X^2)}$$

Exempel

En 1-fasformator med märkeffekten 10kVA har P_{bn} 190W och P_0 110W

Beräkna transformatorns förluster då man belastar transformatorn med 75%

Beräkna verkningsgraden för transformatorn om lasten har effektfaktorn 0,8 ($\cos\phi$).

Handwritten calculations on grid paper:

10kVA
 P_{bn} 190W
 P_0 110W

75% last
 $0,75 \cdot 10 \cdot 10^3 = 7,5 \text{ kVA}$

$P_b = P_{bn} \cdot X^2 \Rightarrow P_b = 190 \cdot 0,75^2 \Rightarrow P_b = 107 \text{ W}$

Förluster vid 75% last:
 $P_0 + P_b \Rightarrow 110 + 107 = \underline{\underline{217 \text{ W}}}$

$\eta = \frac{S_2 \cdot \cos\phi_2}{(S_2 \cdot \cos\phi_2) + P_0 + (P_{bn} \cdot X^2)} \Rightarrow \eta = \frac{7,5 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{7,5 \cdot 10^3 \cdot 0,8 + 110 + 190 \cdot 0,75^2} \Rightarrow \eta = \underline{\underline{0,97}}$

Exempel

Man utför tomgångsprov och kortslutningsprov på 1-fasformator med märkeffekten 4kVA och märkspänningen 350/100V.

Tomgångsprov: 350V, 100V, 120W och 1,8A

Kortslutningsprov: 9,8V och 65W

Beräkna $\cos\varphi_0$ (effektfaktor i tomgång), R_k'' och X_k''

Beräkna transformatorns verkningsgrad vid full last och effektfaktorn 0,8 ($\cos\varphi$)

Beräkna sekundärspänningen vid lasten 2,2kVA och effektfaktorn 0,8. Primärspänningen är i detta fall 350V.

Beräkna sekundärspänningen vid lasten 3,5kVA och effektfaktorn 0,8. Primärspänningen är i detta fall 375V.

Beräkna sekundärspänningen då man ansluter en kapacitiv last på 4,0kVA och effektfaktorn 0,6. Primärspänningen är i detta fall 350V.

4 kVA 350/100V
Tomgångsprov: 350V, 100V, 120W och 1,8A
 $U_{10} = 350V$
 $U_{20} = 100V$
 $P_0 = 120W$
 $I_{10} = 1,8A$
Kortslutningsprov: 9,8V och 65W
 $U_{1k} = 9,8V$
 $P_{bn} = 65W$

$S_0 = U_{10} \cdot I_{10} \Rightarrow S_0 = 350 \cdot 1,8 \Rightarrow S_0 = 630VA$
 $\cos\varphi_0 = P_0 / S_0 \Rightarrow \cos\varphi_0 = 120 / 630 \Rightarrow \cos\varphi_0 = \underline{0,19}$

$U_{1k}'' = U_{1k} \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \Rightarrow U_{1k}'' = 9,8 \left(\frac{100}{350} \right) \Rightarrow U_{1k}'' = 2,8V$

$I = \frac{S}{U} \Rightarrow I_{2n} = \frac{S_n}{U_{2n}} \Rightarrow I_{2n} = \frac{4 \cdot 10^3}{100} \Rightarrow I_{2n} = 40A$

$Z_k'' = \frac{U_{1k}''}{I_{2n}} \Rightarrow Z_k'' = \frac{2,8}{40} \Rightarrow Z_k'' = 0,07 \Omega$

$R_k'' = \frac{P_{bn}}{I_{2n}^2} \Rightarrow R_k'' = \frac{65}{40^2} \Rightarrow R_k'' = \underline{0,04 \Omega}$

$X_k'' = \sqrt{(Z_k'')^2 - (R_k'')^2} \Rightarrow X_k'' = \sqrt{0,07^2 - 0,04^2} \Rightarrow X_k'' = \underline{0,06 \Omega}$

$\eta = \frac{S_2 \cdot \cos\varphi_2}{(S_2 \cdot \cos\varphi_2) + P_0 + (P_{bn} \cdot X^2)} \Rightarrow \eta = \frac{4 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{(4 \cdot 10^3 \cdot 0,8) + 120 + (65 \cdot 1,0^2)} \Rightarrow \eta = \underline{0,95}$

$U_1'' = U_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \Rightarrow U_1'' = 350 \left(\frac{100}{350} \right) \Rightarrow U_1'' = 100V$

$U_2 = U_1'' - \left(R_k'' \frac{P_2}{U_{2n}} + X_k'' \frac{Q_2}{U_{2n}} \right)$

$U_2 = 100 - \left(0,04 \frac{2,2 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{100} + 0,06 \frac{2,2 \cdot 10^3 \cdot 0,6}{100} \right) \Rightarrow U_2 = \underline{98,5V}$

$U_1'' = 375 \left(\frac{100}{350} \right) \Rightarrow U_1'' = 107V$

$U_2 = 107 - \left(0,04 \frac{3,5 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{100} + 0,06 \frac{3,5 \cdot 10^3 \cdot 0,6}{100} \right) \Rightarrow U_2 = \underline{104,6V}$

$U_2 = 100 - \left(0,04 \frac{4,0 \cdot 10^3 \cdot 0,6}{100} + 0,06 \frac{4,0 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{100} \right) \Rightarrow$

$U_2 = 100 - (0,96 - 1,92) \Rightarrow U_2 = 100,96 \approx \underline{101V}$

Räkna 37-38