

Elektriska drivsystem

Föreläsning 2 - Transformatorer

Mattias Krysander

Institutionen för systemteknik
Linköpings universitet
matkr@isy.liu.se

2010-09-23

Dagens föreläsning

Använda kunskapen om magnetiska kretsar till att analysera transformatorer.

1. Introduktion av transformatorer
2. Modellering av ideal transformator
3. Modellering av transformatorförluster
4. Bestämning av transformatorns parametrar
5. Prestandamått
6. Olika typer av transformatorer

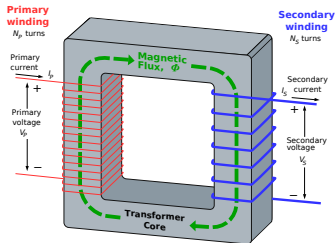
— Introduktion av transformatorer —

Exempel på transformatorer användningsområden

- ▶ Viktig AC-komponent, transformerar spänningen i kraftnät för att optimera generering, överföring, distribution.
 - ▶ högspänningsledningar: 400 kVA
 - ▶ regionnät: 20-130 kV
 - ▶ hushållsel: 230 V
- ▶ lågspänningselektronik
- ▶ bryta likström, men överföra växelström

Transformatorns uppbyggnad och konstruktion

Transformator med 2 lindningar på en magnetisk krets.

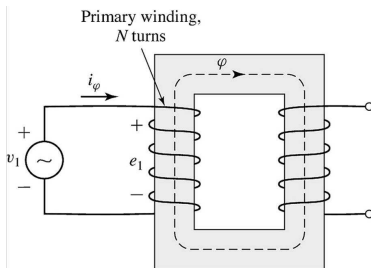


- ▶ magnetisk krets konstruerad för att minimera förlusterna
- ▶ laminerad kärna med goda magnetiska egenskaper och tätt packade lindningar
- ▶ primär , sekundärlindning, hög/lågspänningssidan, upp/nedsidan

Nedsänkt i transformatorolja, leder ut värme och elektriskt isolerande.

Transformatorn - utan last

Betrakta först fallet utan last.



Hur ser förhållandet ut mellan e_1 , φ och i_φ ut?

Inducerad spänning

Vi börjar med att beräkna den inducerade spänningen e_1 givet ett magnetiskt flöde φ .

Antag att $\varphi = \phi_{\text{peak}} \sin \omega t$.

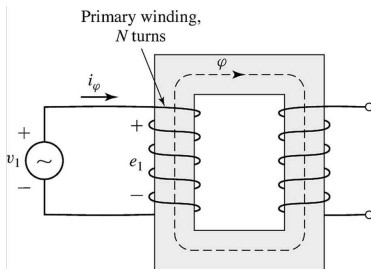
Faradays lag:

$$e_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt} = N_1 \omega \phi_{\text{peak}} \cos \omega t$$

Beskrivet i rms:

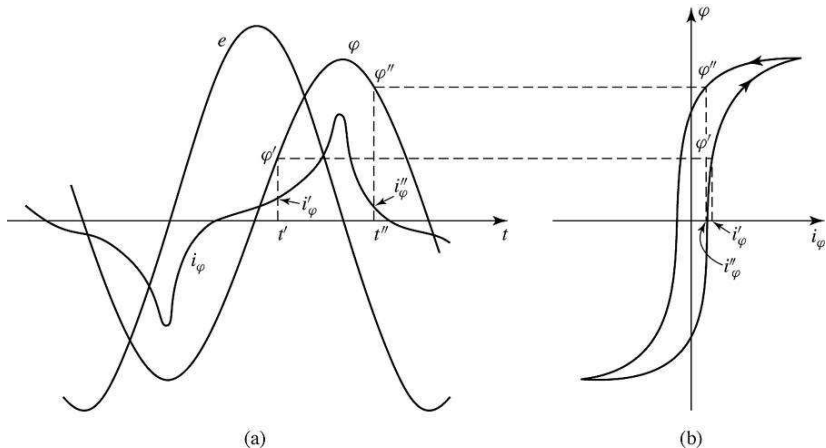
$$E_1 = \sqrt{2} \pi f N_1 \phi_{\text{peak}} \quad \Leftrightarrow \quad \phi_{\text{peak}} = \frac{E_1}{\sqrt{2} \pi f N_1}$$

Magnetfältets styrka beror bara på spänningen e_1 och frekvensen. Vilken ström i_φ kommer transformatorn att dra?



Exciterande ström

Strömmen i_φ kommer ej vara sinusformad pga hysteres.



Exciterande ström

Fourierserieutveckling:

$$i_{\varphi} = I_c \cos \omega t + I_m \sin \omega t + \sum_{n=1}^{\infty} (I_{2n+1} \sin(2n+1)\omega + I_{2n+1} \cos(2n+1)\omega)$$

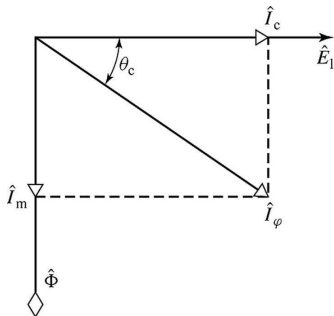
Tredje övertonen ca 40% av den exciterande strömmen som är ca 1-2% av märkströmen \Rightarrow försummar övertoner.

Den exciterande strömmen i_{φ} delas upp i:

- ▶ $I_c \cos \omega t$ - ström i fas med den inducerade spänningen som motsvarar järnförlusterna.
- ▶ $I_m \sin \omega t$ - den magnetiserande strömmen i fas med flödet.

Exciterande ström

Eftersom både ström i_φ , spänning e_1 och magnetiskt flöde φ är sinusformiga kan komplexa tal beskriva fas och amplitud och visas i sk visardiagram:



Komplexa tal är tak-markerade.

Växelströmseffekter

Momentaneffekt

$$p(t) = u(t)i(t)$$

Medeleffekter

- ▶ Aktiv effekt:

$$P = E_1 I_c = E_1 I_\varphi \cos \theta_c \text{ [W]}$$

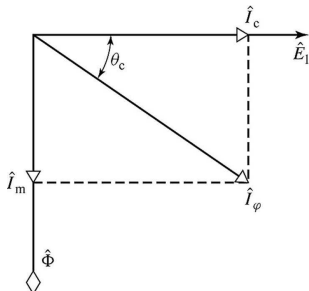
- ▶ Reaktiv effekt:

$$Q = E_1 I_m = E_1 I_\varphi \sin \theta_c \text{ [VA]}$$

- ▶ Skenbar effekt:

$$S = E_1 I_\varphi \text{ [VA]}$$

Effektfaktor: $\cos \theta_c = \frac{P}{S}$, strömmen efter spänningen, lag.



Växelströmseffekter

- ▶ Aktiv effekt:

$$P = E_1 I_c = E_1 I_\varphi \cos \theta_c \text{ [W]}$$

effekt motsvarande järnförluster

- ▶ Reaktiv effekt:

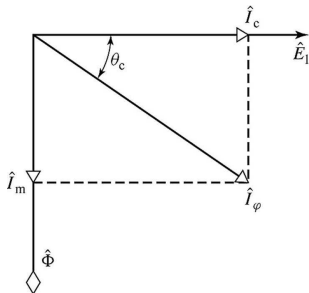
$$Q = E_1 I_m = E_1 I_\varphi \sin \theta_c \text{ [VA]}$$

svarar mot magnetiseringen

- ▶ Skenbar effekt:

$$S = E_1 I_\varphi \text{ [VA]}$$

dimensionerande för
transformatorer, ledare etc



Modellering av transformatorn

Vi kommer bygga en modell av en transformator genom att

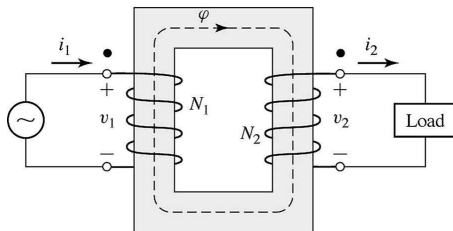
1. modellera en ideal förlustfri transformator
2. modellera förlusterna med kretselement kopplade till den ideala transformatorn

— Modelling av ideal transformator —

Ideal transformator - antaganden

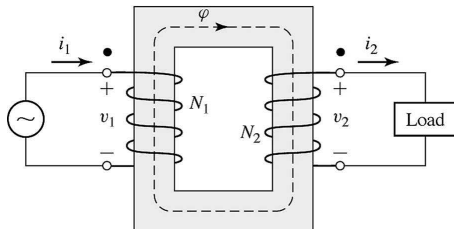
Förlustfri dvs

- ▶ inga järnförluster
- ▶ oändlig permeabilitet
- ▶ inga läckflöden
- ▶ lindningarna förlustfria (resistansfria).



Punkterna markerar terminaler av motsvarande polaritet, dvs matas lindningarna med ström in i punkterna samverkar de resulterande mmk:erna.

Ideal transformator



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

är omsättningstalet.

Antag att växelspanningen v_1 läggs på. Faradays lag:

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt} \quad \Rightarrow \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

KCL:

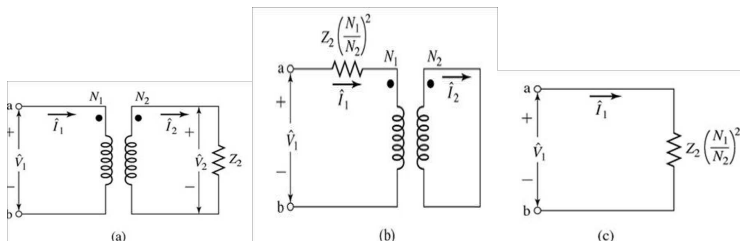
$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

Effektsamband:

$$p_1 = v_1 i_1 = v_2 i_2 = p_2$$

All energilagring förmåga har försumrats.

Lastens inverkan på primärsidan



Enligt tidigare:

$$\hat{V}_1 = \frac{N_1}{N_2} \hat{V}_2 \quad \hat{I}_1 = \frac{N_2}{N_1} \hat{I}_2 \quad \hat{V}_2 = \hat{I}_2 Z_2$$

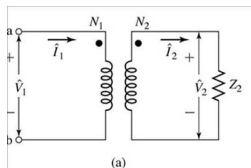
Inverkan av lasten på primärsidan:

$$Z'_2 = \frac{\hat{V}_1}{\hat{I}_1} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \frac{\hat{V}_2}{\hat{I}_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 Z_2$$

Detta innebär att kretsarna ovan är ekvivalenta sett från primärsidan.

Ideal transformator - exempel

Uppgift: Teckna \hat{I}_1 och \hat{I}_2 givet \hat{V}_1 , $w = N_1/N_2$ och Z_2 .



Beräkna ekvivalent impedans

$$Z_2' = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 Z_2 = w^2 Z_2$$

Strömmen \hat{I}_1 blir

$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{V}_1}{w^2 Z_2}$$

Överför strömmen till sekundärsidan:

$$\hat{I}_2 = \frac{N_1}{N_2} \hat{I}_1 = w \hat{I}_1 = \frac{\hat{V}_1}{w Z_2}$$

— Modellering av transformatorförluster —

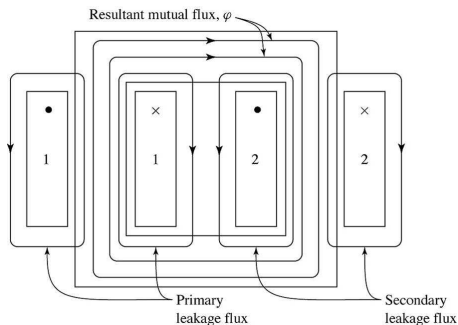
Typer av transformatorförluster

Nu ska vi till den ideala transformatorn lägga till följande förluster:

- ▶ resistiva förluster i spolarna
- ▶ järnförluster
- ▶ läckflöden

Resultatet kommer bli en modell med 8 parametrar som beskriver en transformator.

Läckflöden

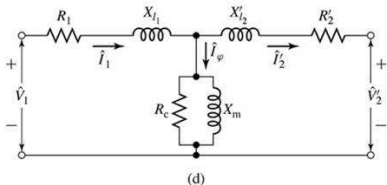
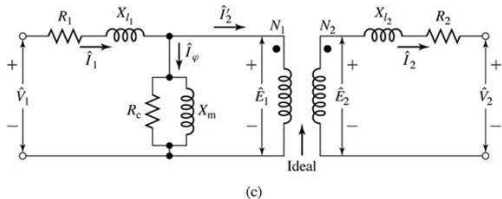
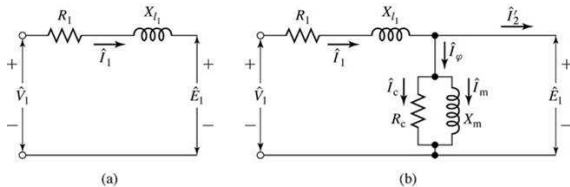


Flödena kan delas in i

- ▶ ömsesidigt flöde, huvudflöde
- ▶ läckflöden som bara genomlöper en av spolarna. Läckflöden går genom luft och kan därför modelleras som en induktans och motsvarande reaktans:

$$X_{l_1} = 2\pi fL_{l_1}$$

Utvecklingen av en transformatormodell steg för steg



Primär/sekundärsidan:

\hat{V}_i - spänning

\hat{I}_i - ström

N_i - varv

R_i - lindningsresistans

X_{li} - läckreaktans

\hat{E}_i - inducerad spänning

Primärsidan:

\hat{I}_φ - tomgångsström

\hat{I}_c - ström till järn-förluster

R_c - magnetiseringsresistansen

\hat{I}_m - magnetiserande ström

X_m - magnetiseringsreaktansen

\hat{I}_2 - ström som driver last.

I fig. (d) är alla storheter relaterade till primärsidan.

Modellerings exempel

Uppgift: En 50kVA 2400:240V 60Hz transformator har läckageimpedans $0.72 + j0.92\Omega$ på högspänningssidan och $0.007 + j0.009\Omega$ på lågspänningssidan. Vid märkspänning och frekvens, är impedansen i shuntgrenen $Z_\varphi = 6.32 + j43.7\Omega$ refererad till lågspänningssidan. Modellera transformator med ekvivalenta kretsar både refererade till hög- resp. låg-spänningssidan.

Modellerings exempel

Lösning:

$$2400:240V \Rightarrow w = N_1/N_2 = 10.$$

$$\text{Använd } \frac{Z^H}{Z^L} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = w^2.$$

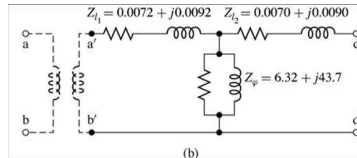
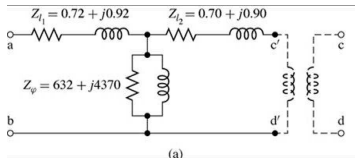
hög

$$Z_{l_1}^H = 0.72 + j0.92\Omega$$

låg

$$Z_{l_2}^L = 0.007 + j0.009\Omega$$

$$Z_{\varphi}^L = 6.32 + j43.7\Omega$$



Ingenjörsmässiga förenklingar och parameterisering

Bestämning av transformatorns parametrar

Modellen innehåller följande 8 parametrar:

- ▶ N_1, N_2 - lindningsvarvtalen
- ▶ R_1, R_2 - lindningsresistanserna
- ▶ X_{l_1}, X_{l_2} - läckreaktanserna
- ▶ X_m - magnetiseringsreaktansen
- ▶ R_c - magnetiseringsresistansen

Utan omsättningstalet så är de 6 sistnämnda parametrarna inte identifierbara. För varje omsättningstal finns dock en uppsättning parametrar som överensstämmer med mätdata.

Antag att vi känner N_1 och N_2 .

Bestämning av transformatorns parametrar

Det återstår 6 parametrar:

- ▶ R_1, R_2 - lindningsresistanserna
- ▶ X_{l_1}, X_{l_2} - läckreaktanserna
- ▶ X_m - magnetiseringsreaktansen
- ▶ R_c - magnetiseringsresistansen

Det finns två alternativ:

- ▶ Anta att $R_1 = R_2$ och $X_{l_1} = X_{l_2}$ då alla impedanser är relaterade till samma sida.
- ▶ Resistanserna R_1 och R_2 kan skattas utifrån spänning och ström från likströmsprov.

Här kommer jag utveckla det första alternativet.

Med två test ett kortslutningsprov och ett tomgångsprov där man mäter ström, spänning och effekt kan parametrarna identifieras.

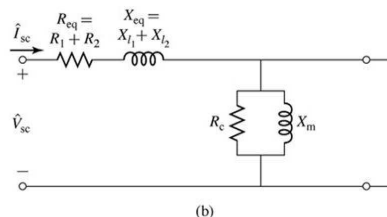
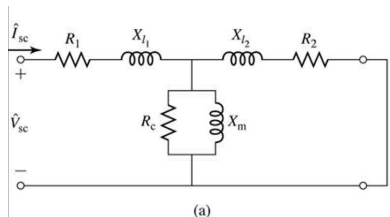
Kortslutningsprov

Märkström på primärsidan (ofta uppsidan), kortsluten sekundärsida.

Mät signaler: kortslutningsspänning V_{sc} , ström I_{sc} , aktiv effekt P_{sc} i primärkretsen.

Belastningsförlusterna består mest av resistiva förluster i lindningar samt magnetisk läckning.

Kortslutnings-resistansen R_{sc} och -reaktansen X_{sc} bestäms med detta prov.



Låt $Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq}$ vara enligt fig och anta att $Z_{eq} \approx Z_{sc}$.

$$R_{eq} = P_{sc}/I_{sc}^2, \quad |Z_{eq}| = V_{sc}/I_{sc} \quad X_{eq} = \sqrt{|Z_{eq}|^2 - R_{eq}^2}$$

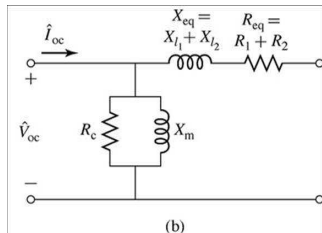
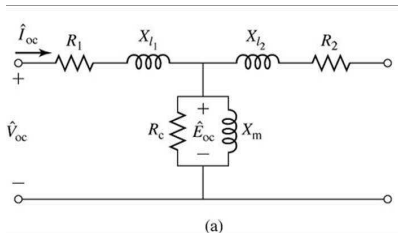
Tomgångsprov

Märkspänning på primärsidan (ofta nedsidan), öppen sekundärsida.

Mät signaler: tomgångsspänning V_{oc} , ström I_{oc} , aktiv effekt P_{oc} i primärkretsen.

Tomgångsförlusterna består mest av järnförluster.

Magnetiserings-reaktansen X_m och -resistansen R_c bestäms med detta prov.



Låt Z_φ vara magnetiseringsimpedansen och anta $Z_\varphi \approx Z_{oc}$.

$$R_c = \frac{V_{oc}^2}{P_{oc}}, \quad |Z_\varphi| = \frac{V_{oc}}{I_{oc}} \quad X_m = (|Z_\varphi|^{-2} - R_c^{-2})^{-\frac{1}{2}}$$

— Prestandamått —

Prestandamått

Verkningsgraden:

$$\eta = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}}$$

Verkningsgraden ökar i regel med storlek, från ca 50% i elektronik till 99% i MVA-krafttransformatorer.

Förlusterna kan delas upp i lindningsförluster P_{winding} och magnetiseringsförluster P_{core} enligt:

$$P_{\text{input}} = P_{\text{output}} + P_{\text{loss}}$$

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{winding}} + P_{\text{core}}$$

där

$$P_{\text{winding}} = R_{\text{eq},H} I_H^2$$

$$P_{\text{core}} = \frac{V_H^2}{R_{C,H}}$$

Index H betyder att alla värdena är refererade till högspänningssidan.

Verkningsgradsbestämning

Givet: 50 kVA 2400:240V transformator med effektfaktor 0.8.

Test 1: $P_{sc} = 617W$, $V_{sc}^H = 48V$, $I_{sc}^H = 20.8A$.

Test 2: $P_{oc} = 186W$, $V_{oc}^L = 240V$, $I_{oc}^L = 5.41A$.

Uppgift: Beräkna verkningsgraden ν .

Lösning: Observera att test 1 gjorts med märkströmen och test 2 med märkspänningen.

$$\nu = \frac{P_{output}}{P_{input}} = \frac{P_{output}}{P_{output} + P_{loss}}$$

$$P_{output} = (VI)_H \cos \theta = 50 \cdot 0.8 = 40kW$$

$$P_{loss} = P_{winding} + P_{core} = P_{sc} + P_{oc} = 803W$$

Detta ger att

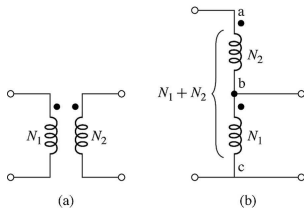
$$\nu = \frac{40}{40.803} = 98.0\%$$

— Olika typer av transformatorer —

Transformator typer

▶ Autotransformator

- ▶ Endast en lindning med extra uttag i mitten.
- ▶ Mindre läckflöden, mindre förluster, lägre excitationström, billigare än två-lindningstransformatorn då omsättningstalet är nära 1.
- ▶ Ej elektriskt separerad, kräver extra isolering i ab.



▶ Trefastransformator

- ▶ Tre sammankopplade en-fastransformatorer. Y eller Δ -kopplade.
- ▶ Mättransformatorer: Ström/spännings-transformatorer
 - ▶ I mätapplikationer transformera ström resp spänning till lämpliga nivåer. Exakt mätning utan att störa.

Att ta med sig från föreläsningen

- ▶ Modellerat transformatorn som en ideal förlustfri transformator kopplade till impedanser som modellerar transformatorns förlusterna.
- ▶ Förlusterna modelleras som läckflöde, lindningsresistans och järnförlust.
- ▶ Tester för att parameterisering av modellerna.
- ▶ Verkningsgrad

Analogi mellan transformatorer och maskiner

- ▶ Magnetiskt kopplade lindningar.
- ▶ Ömsesidiga flödet genom luftgap.
- ▶ Den mekaniska rörelsen leder till tidsvariationer i ömsesidiga flöden som inducerade spänningar. Detta är grunden för elektromekanisk energiomvandling.
- ▶ Friktionsförluster, i övrigt likartade förluster.
- ▶ Liknande tester för att bestämma maskinförluster.