

# Theorie Stroomtransformatoren

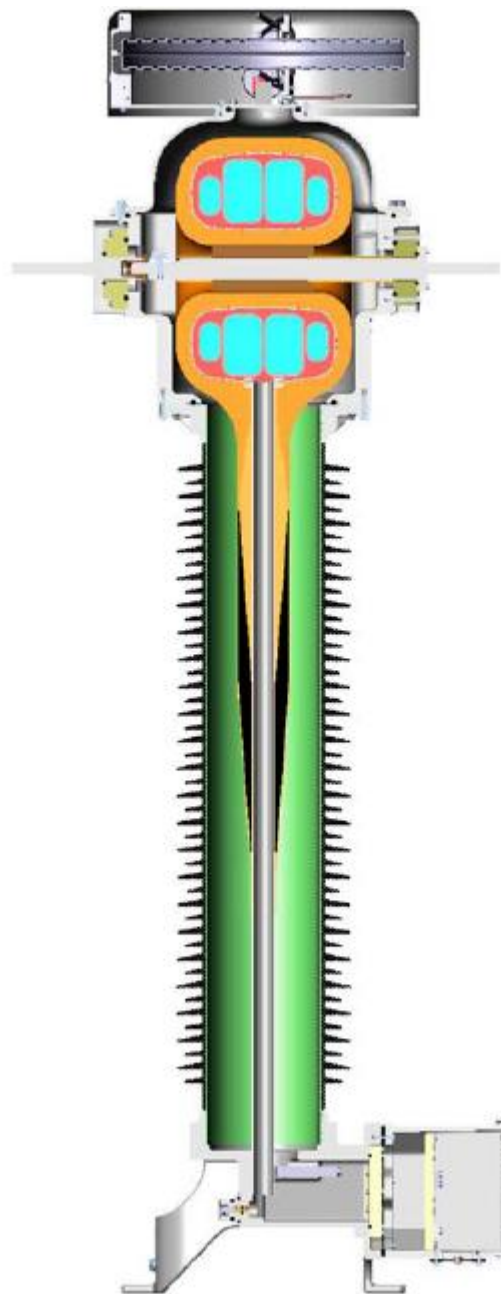
**Tjepco Vrieswijk**

Hamermolen Ugchelen, 22 november 2011

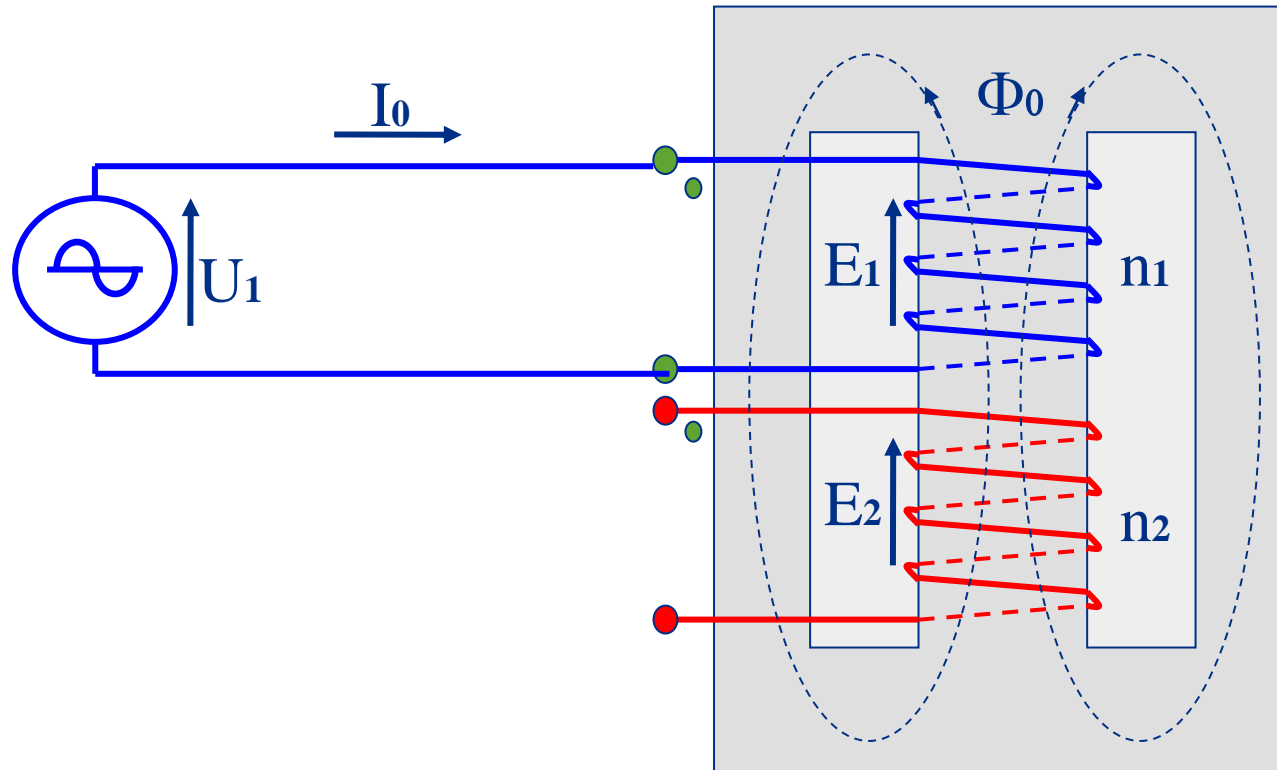


# Onderwerpen:

- Theorie stroomtransformatoren
- Vervangingschema CT
- Magnetische verzadiging
- Tijdconstante
- Kenmerken CT
- Specificeren CT
- Type kernen
- Reken voorbeeld
- Type plaatjes



# Transformator onbelast



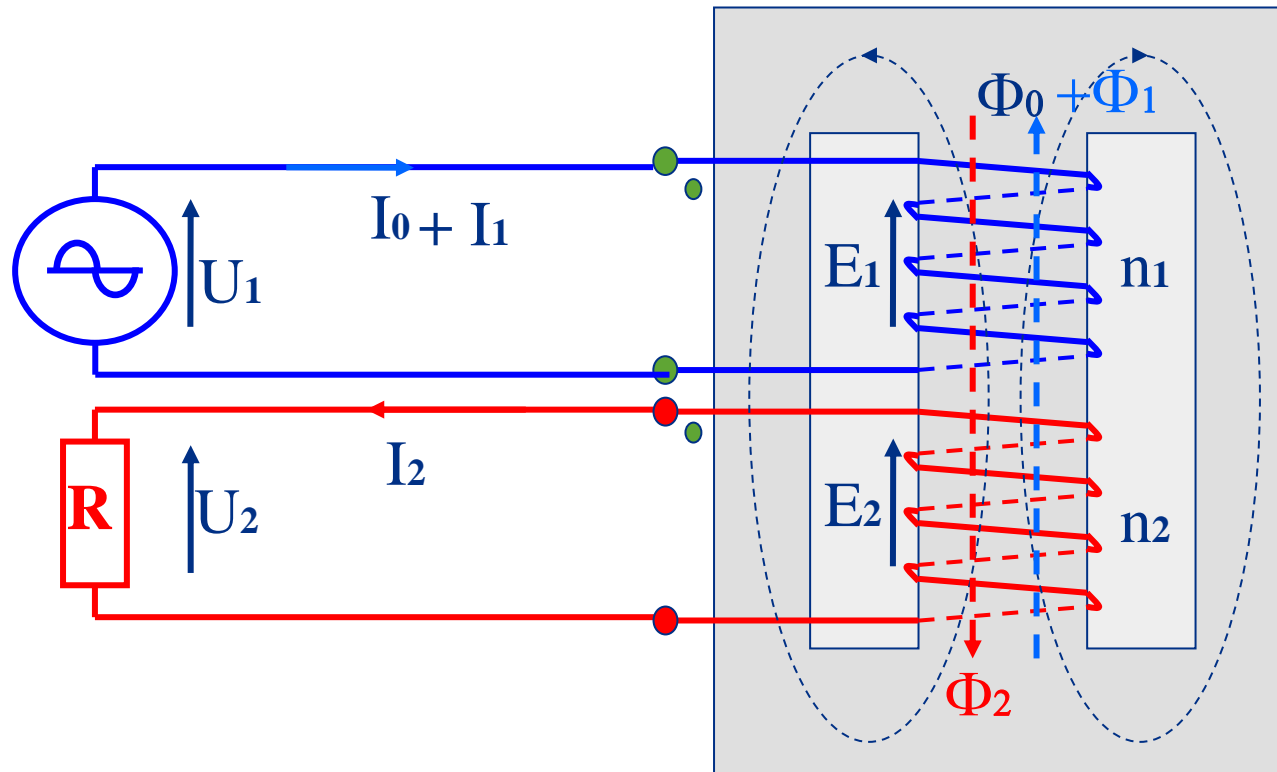
Spanningsbron veroorzaakt wisselstroom door spoel 1 en flux in kern.

De wisselde flux ( $\Phi_0$ ) induceert spanningen ( $E_1$  en  $E_2$ ) in beide spoelen

$E_1$  en  $E_2$  verhouden zich als het aantal wikkelingen  $n_1$  en  $n_2$ .

De nullast stroom ( $I_0$ ) is zeer klein zolang  $E_1$  en  $U_1$  elkaar bijna opheffen.

# Transformator belast

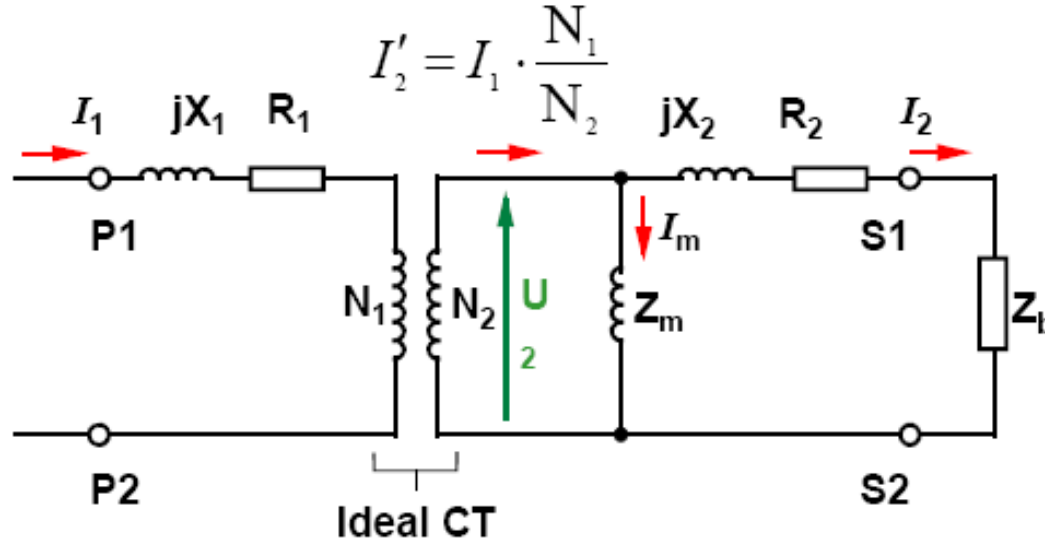


Weerstand  $R$  veroorzaakt stroom  $I_2$  door spoel 2 en stroom  $I_1$  door spoel 1.

Hierbij is  $I_1 \times n_1 = I_2 \times n_2$  zodat geïnduceerde flux 1 en 2 elkaar opheffen.

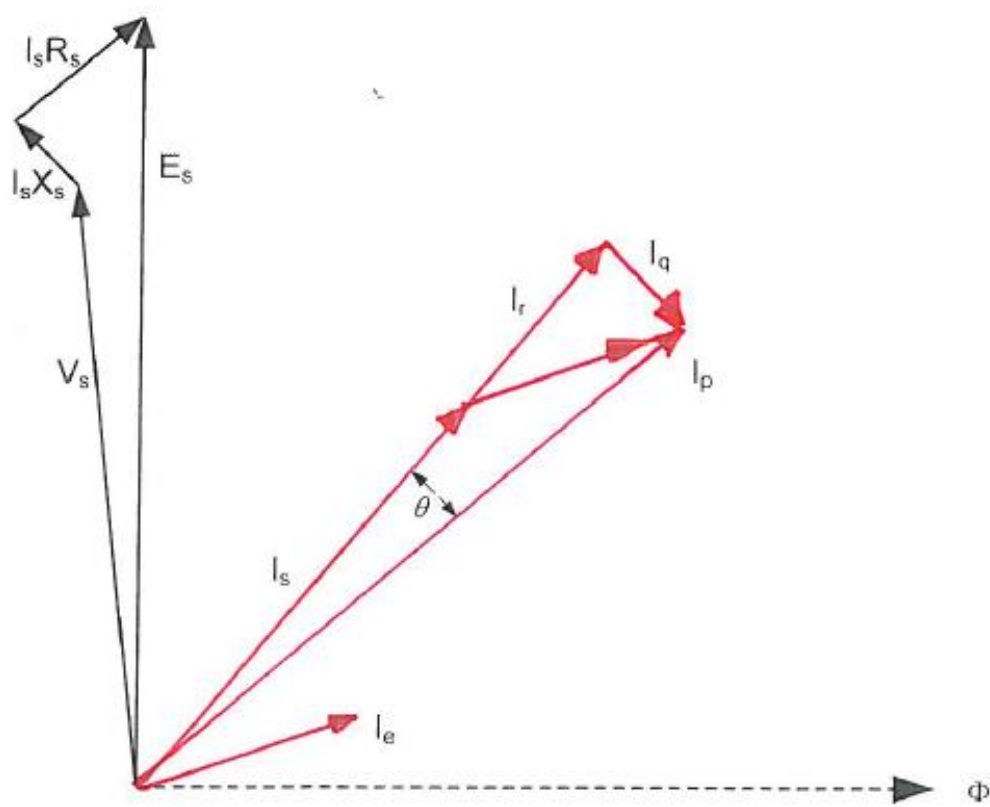
$I_1$  en  $I_2$  zijn zich omgekeerd evenredig met aantal wikkelingen  $n_1$  en  $n_2$ .

# Vervangingschema CT



- $X_1$  = Primary leakage reactance
- $R_1$  = Primary winding resistance
- $X_2$  = Secondary leakage reactance
- $Z_0$  = Magnetizing impedance
- $R_2$  = Secondary winding resistance
- $Z_b$  = Secondary load

Note: Normally the leakage fluxes  $X_1$  and  $X_2$  can be neglected



- $E_s$  = Secondary induced e.m.f.
- $V_s$  = Secondary output voltage
- $I_p$  = Primary current
- $I_s$  = Secondary current
- $\theta$  = Phase angle error
- $\Phi$  = Flux
- $I_s R_s$  = Secondary resistance voltage drop
- $I_s X_s$  = Secondary reactance voltage drop
- $I_e$  = Exciting current
- $I_r$  = Component of  $I_e$  in phase with  $I_s$
- $I_q$  = Component of  $I_e$  in quadrature with  $I_s$

# Magnetische veldsterkte en inductie

Magnetische veldsterkte  $H$  (A/m) in spoel afhankelijk van:

- $I$  = de stroomsterkte (A) door de spoel
- $n$  = het aantal windingen van de spoel
- $L$  = de lengte (m) van de spoel

$$H = \frac{I \times n}{L}$$

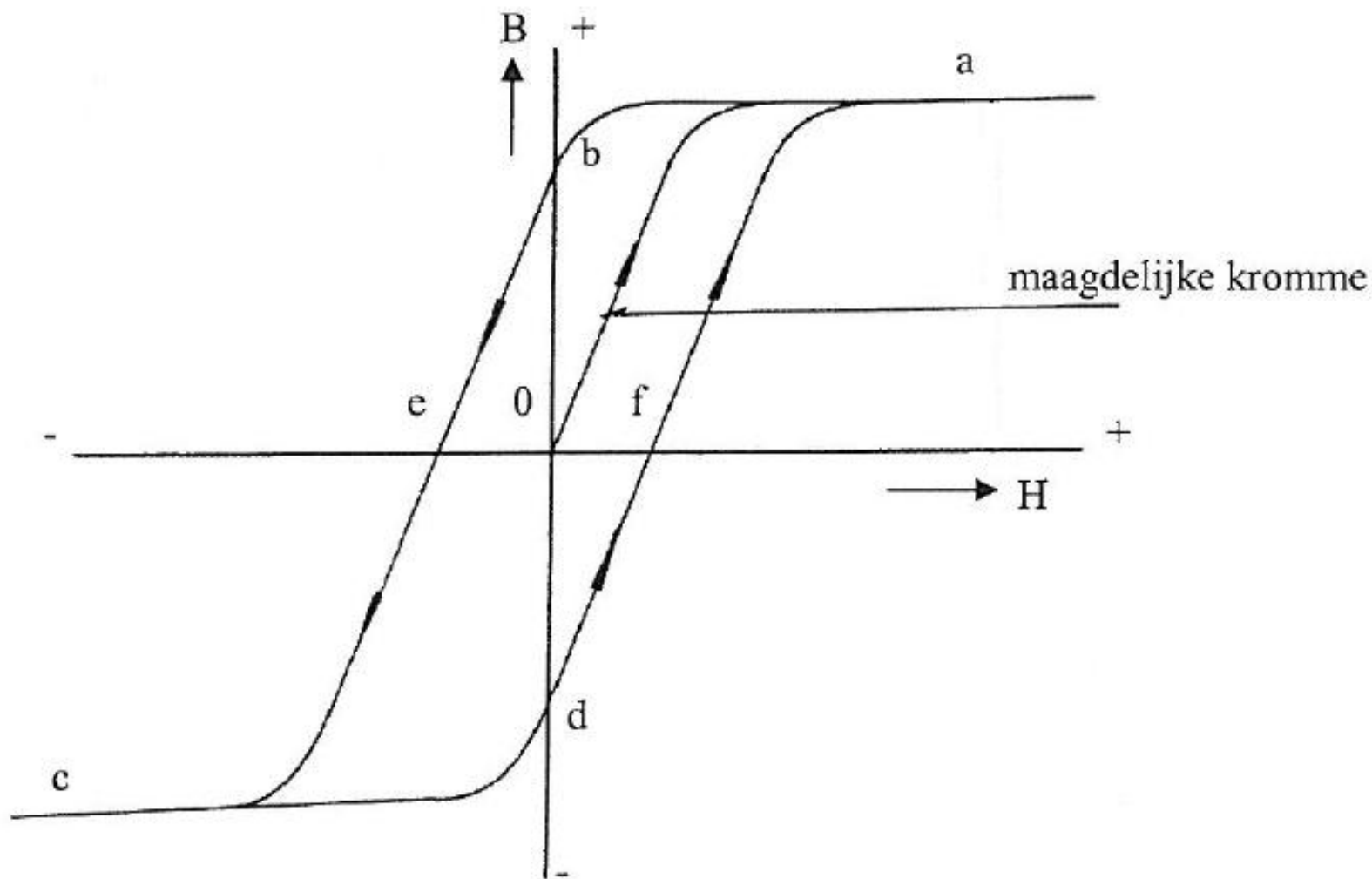
Magnetische inductie of fluxdichtheid  $B$  (Wb/m<sup>2</sup> of Tesla) is afhankelijk van:

- $\mu$  = de magnetische permeabiliteit (Wb/A.m) van het medium (b.v. lucht of ijzer) in de spoel
- $H$  = de magnetische veldsterkte.

$$B = \mu \times H$$

# Verzadiging

Grafiek geeft het verband tussen wisselende magnetische veldsterkte (H) en daardoor veroorzaakte wisselende fluxdichtheid/magnetische inductie (B):



# Geïnduceerde spanning

Geïnduceerde effectieve spanning in spoel:

$$E = 4,44 \times f \times \Phi \times n$$

Magnetische flux  $\Phi$  (Wb) in de kern van de spoel is de fluxdichtheid vermenigvuldigd met het oppervlak  $A$  (m<sup>2</sup>) van de doorsnede van de kern.

$$\Phi = B \times A$$

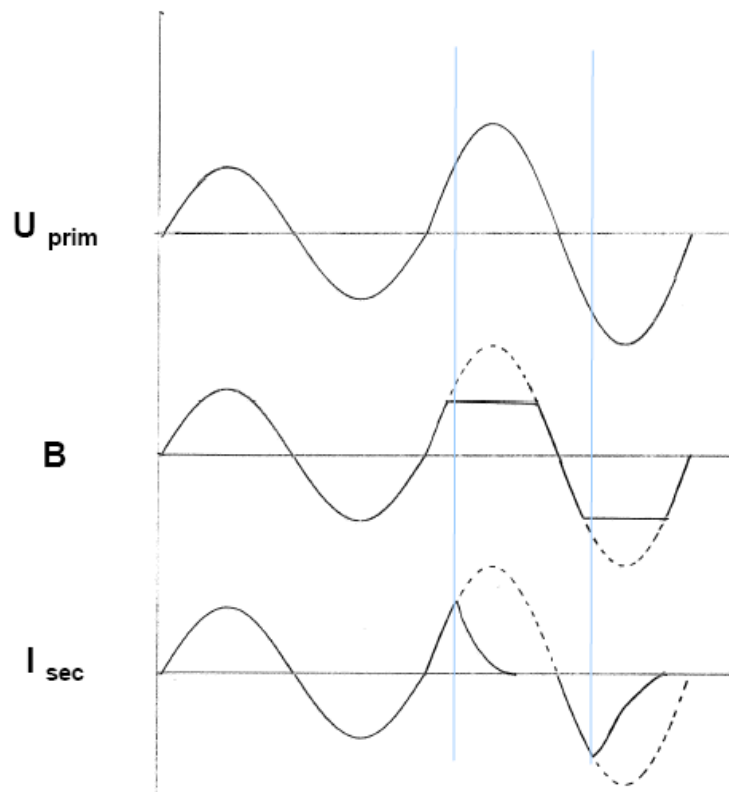
$B_{\max} \approx 0,6 - 0,8$  T voor  $\mu$  metaal.  $B_{\max} \approx 2$  T voor koudgewalst ijzer.

Voorbeeld: Stel  $B_{\max} = 1,8$  T en kernoppervlak van  $10 \times 10$  cm =  $0,01$  m<sup>2</sup>

Maximaal geïnduceerde effectieve spanning per winding ( $n = 1$ ) van spoel:

$$4,44 \times 50 \times 1,8 \times 0,01 = 4 \text{ V}$$

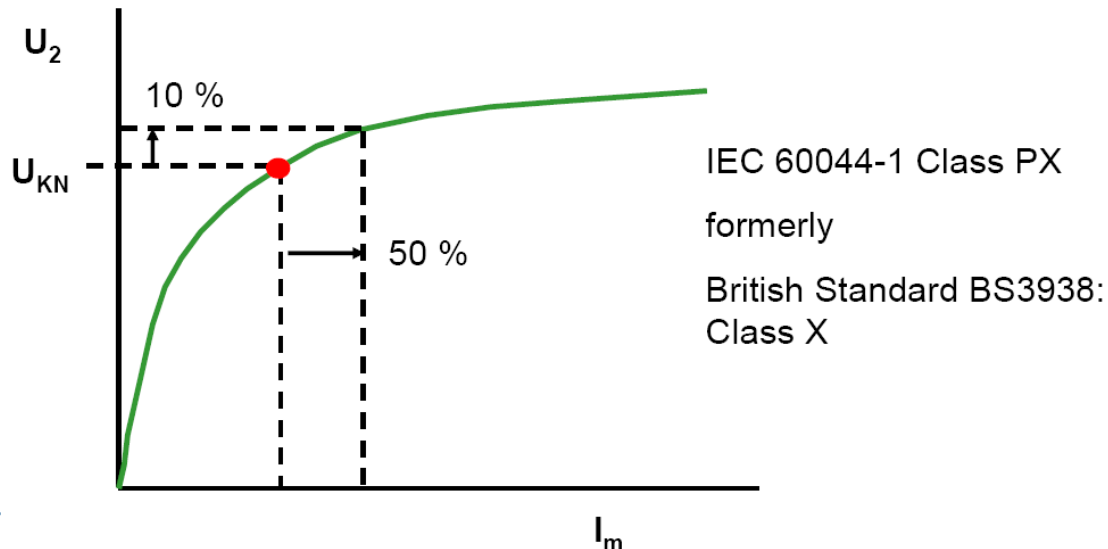
# Te hoge spanning op transformator



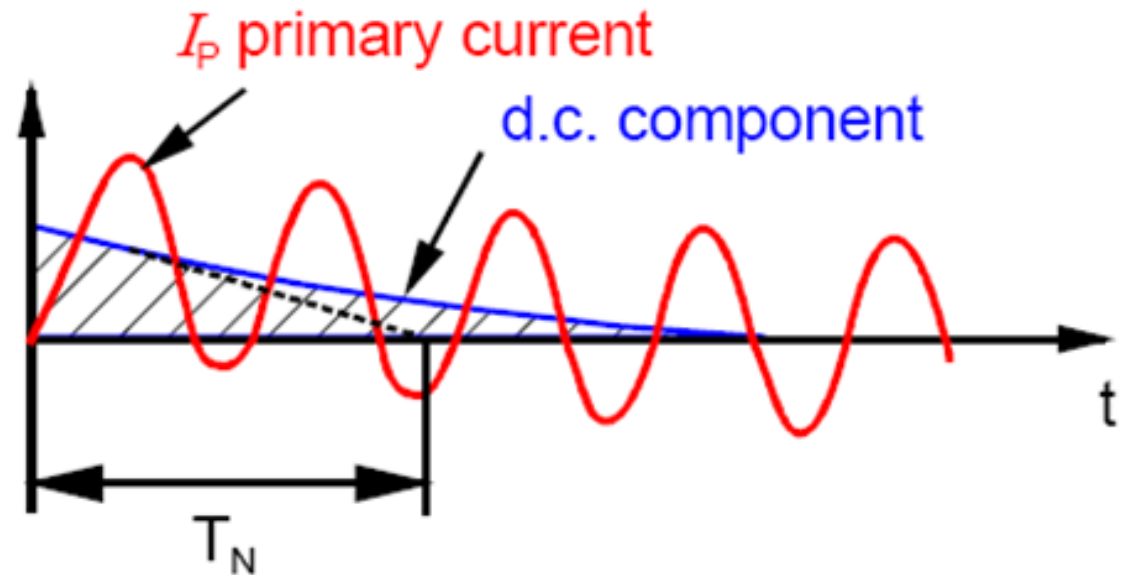
Het beeld hierboven laat een grote primaire stroom zien. Het magnetisch veld in de primaire en secundaire spoel wordt gedurende een deel van de periode constant. Een constant magnetisch veld induceert geen secundaire spanning en dus valt op dat moment de secundaire stroom weg.

Wanneer een CT in verzadiging gaat en wat dus de werkelijke overstroomfactor is, is van een aantal factoren afhankelijk.

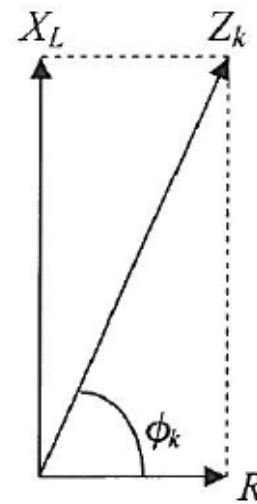
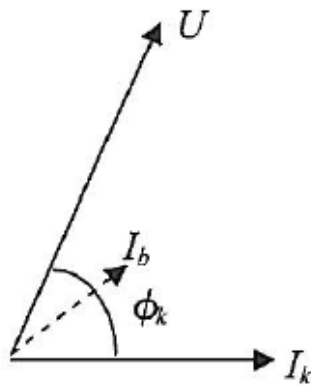
1. De overstroomfactor van de CT
2. Het vermogen van de CT
3. De inwendige weerstand van de CT
4. Het aangesloten vermogen, denk hierbij aan vermogen van bedrading en beveiligingsrelais.
5. De tijdconstante van het net. Dit geeft een DC component die verzadiging versneld.



# tijdconstante



- Als in een spoel met weerstand een magneetveld is opgebouwd waarna deze spoel wordt kortgesloten zal de in de spoel opgeslagen energie ontladen worden via een stroom door de spoel en de weerstand.
- De snelheid en dus de tijd waarin dit plaats vindt is afhankelijk van de verhouding tussen de zelfinductie van de spoel en de weerstand. Dit is een tijdconstante
- De tijdconstanten in een net kunnen worden bepaald uit de kortsluithoeken



Aangezien  $X_L = \omega L$  kan hieruit de tijdconstante  $\tau$  als volgt bepaald worden.

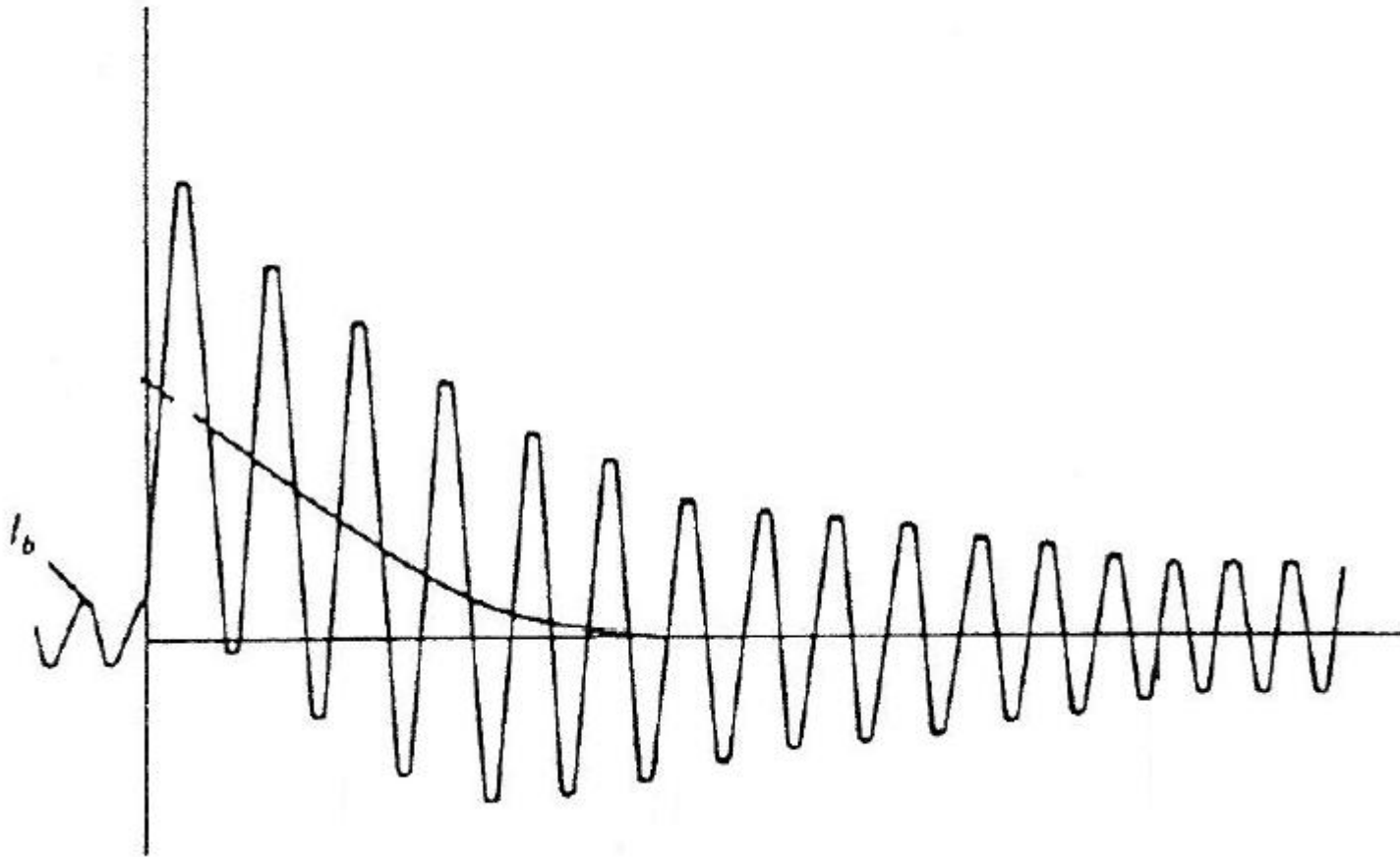
$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{\omega L}{R} \quad \text{Daaruit volgt} \quad \tau = \frac{L}{R} = \frac{\operatorname{tg} \varphi_k}{\omega} \quad [\text{s}] \quad \text{De hoeksnelheid} \quad \omega = 2\pi f \quad [\text{rad/s}]$$

Voor het net met  $f = 50 \text{ Hz}$  wordt de tijdconstante  $\tau = \frac{\operatorname{tg} \varphi_k}{2\pi f} = \frac{\operatorname{tg} \varphi_k}{2\pi 50} \quad [\text{s}]$

Gebruikelijk is het om  $\tau$  uit te drukken in milliseconden dan wordt  $\tau = \frac{\operatorname{tg} \varphi_k}{2\pi 50} 10^3 \quad [\text{ms}]$

Net	$\varphi_k$	$\tau$
10 kV	$30^\circ$	1,84 ms
110 kV	$75^\circ$	11,9 ms
220 kV	$82^\circ$	22,6 ms

In de praktijk gaat men er van uit dat na een tijd van  $t/\tau = 5$  de stroom nul is.



voor een 220 kV lijn blijkt de  $I_{ksym}$  na:  $5 * 22,6 = 113$  msec bereikt te zijn.

# Kenmerken stroomtrafo's

- Meestal 1 primaire winding (= kabel of ander geleider door ringkern).
- Zet hoge primaire stromen om naar standaard waarde, meestal 1 A of 5 A.
- Aantal secundaire wikkelingen is bij 1 A gelijk  $I_{np}$ . Bij 5A is dat  $1/5 \times I_{np}$ .
- Maximum spanning per winding is afhankelijk van kerndoorsnede en -materiaal.
- Secundair bijna kortgesloten bedreven ver vanaf max. spanning / verzadiging.
- Bij  $R_{u'} < R_u$  is nauwkeurigheidsgrensfactorcijfer ( $N'$ ) hoger dan nominaal ( $N$ ).  
Inwendige weerstand ( $R_i$ ) is dan belangrijk:  $N' = N \times (R_i + R_u) / (R_i + R_{u'})$
- Berekent op continu 120 %  $I_{ns}$ . In kortsluitsituatie  $I_{np}$  max gedurende 1 of 3 s.
- Bij open wikkeling wordt kern door magnetische verzadiging zeer warm en ontstaat gevaarlijke spanning (2500 / 1A; 5P650; 5 VA levert  $\approx 10$  kV).  
Isolatie van wikkeling is maar op 2 kV topspanning berekend!

# Specificeren nominaal vermogen

Gebruikelijke waarden: 1 – 1,5 – 2 – 2,5 – 5 – 10 – 15 – 30 – 60 VA.

- Nominaal vermogen kern moet ruimschoots het werkelijk aangesloten vermogen (verlies in leidingen en aangesloten verbruikers) zijn.
- Bij 1 A circuits is 2 VA vaak ruim voldoende.

Weerstand van de leidingen berekenen met formule:  **$(0,0175 \times l) / A$**

- **0,0175** is soortelijke weerstand ( $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ ) van koperdraad bij 20° C.
- **l** = totale lengte in m van alle leidingen tussen stroomtrafo klemmen en verbruikers. (lengte van kabels vanwege heen en terugcircuit 2x nemen)
- **A** = oppervlak van geleiderdoorsnede in  $\text{mm}^2$ .

Bij 1 A circuit is leidingverlies ( $I^2 \times R$ ) in VA gelijk aan de weerstand.

Bij 5 A circuit is leidingverlies ( $I^2 \times R$ ) in VA gelijk aan 25 x de weerstand.

# Nauwkeurigheidsgrensfactor N

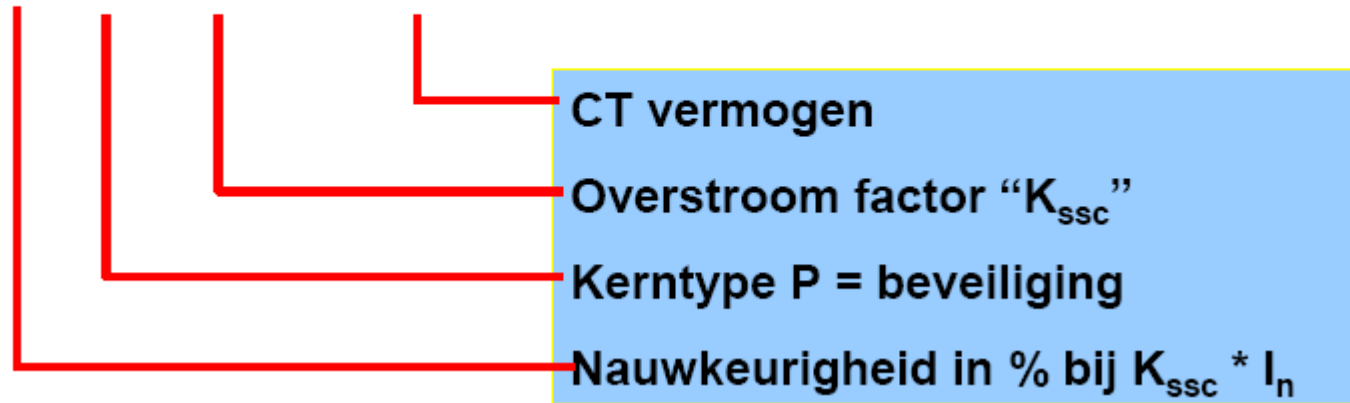
Gebruikelijke waarden: P5 - P10 – P15 – P20 - P30

Factor (getal achter de P) geeft aan hoeveel maal de kern de nominale stroom bij nominale belasting en 5% (5P) of 10% (10P) nauwkeurigheidsgrens kan overzetten.

Grensfactor (N) berekenen door volgende factoren te vermenigvuldigen:

- Symmetrische factor  $K_{sc} = I_{kmax} / I_{pn}$ .  
Hogere gekozen primaire nominaal stroom ( $I_{pn}$ ) beperkt dus  $K_{sc}$ .
- Asymmetrie factor  $K_{td}$  is afhankelijk van nettijd constante.  
Snelle beveiligingen, type kern en slimme digitale relais beperken  $K_{td}$ .

5 P 10, 15VA



$$K'_{SSC} = K_{SSC} \frac{R_{ct} + R_b}{R_{ct} + R'_b}$$

$$K'_{SSC} > K_{td} \frac{I_{SSC \text{ max ext fault}}}{I_{pn}}$$

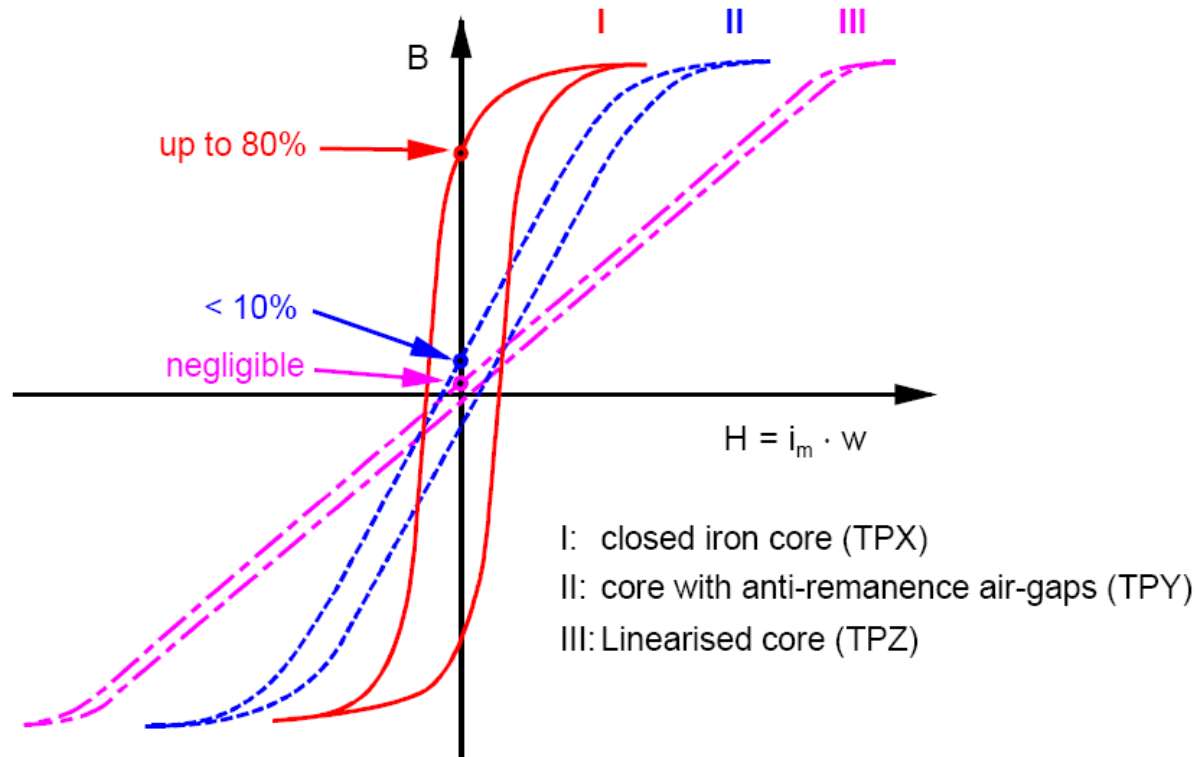
$$n' = n \frac{Z_i + Z_{u_{nom}}}{Z_i + Z_{u_{werk.}}}$$

$$ALF' = ALF \times \frac{P_i + P_{NB}}{P_i + P_{BB}}$$

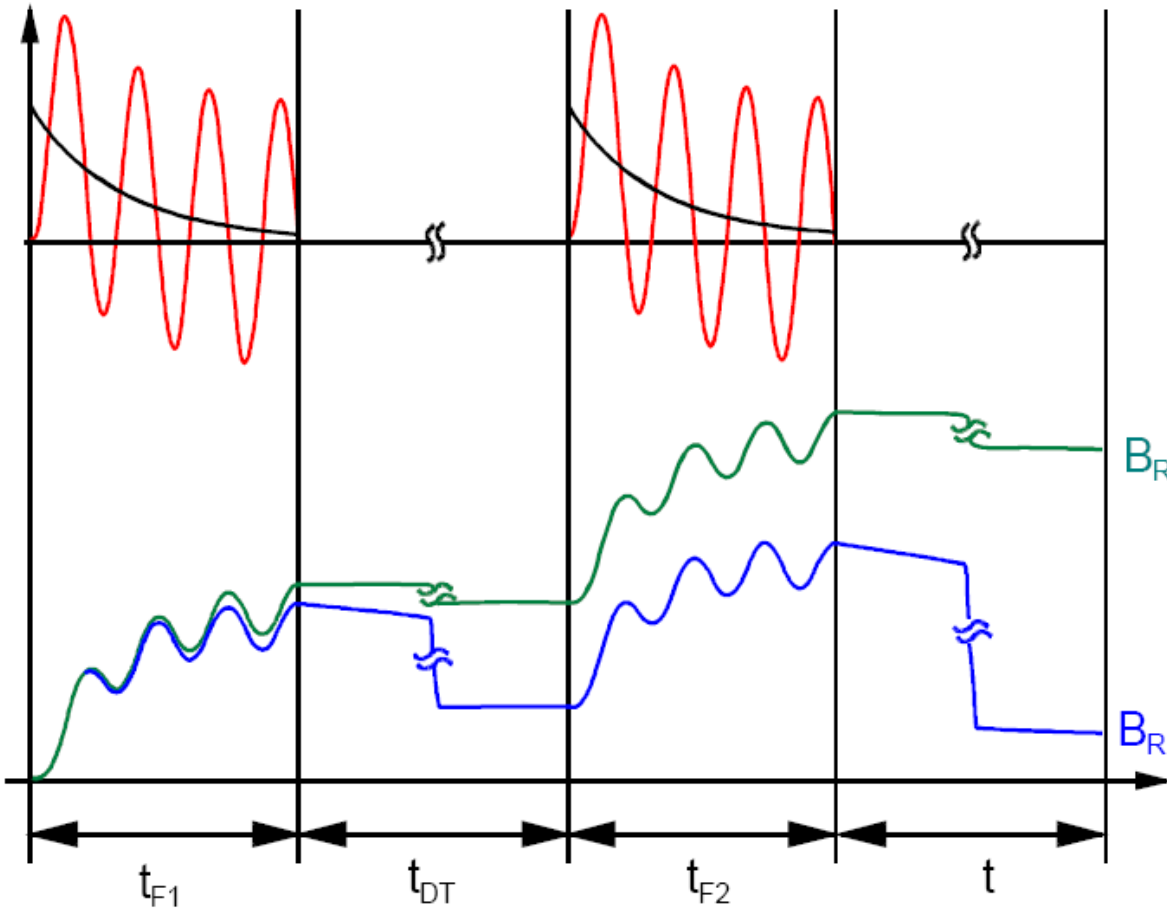
$$ALF' \geq \frac{I_{SC-max}}{I_n} \times K_{TF}$$

# Indeling CT voor beveiligingen

- Type P,PX,TPX,TPS      Gesloten kern, ook wel high remanence
- Type TPY,PR              Ant-remanentiekern, ook wel low remanence
- Type TPZ                  Lineaire kern, ook wel non remanence



# Wederinschakeling

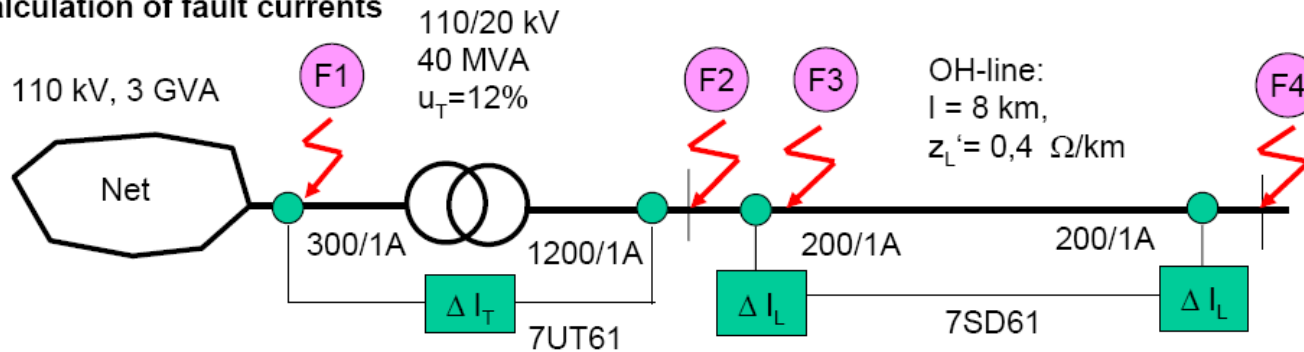


closed iron core (TPX)

core with anti-remanence air-gaps (TPY)

# CT dimensioning for Example differential protection (1)

## 1. Calculation of fault currents



Impedances related to 110 kV:

$$\text{Net : } Z_N = \frac{U_N^2 [\text{kV}^2]}{S_{SC}'' [\text{MVA}]} = \frac{110^2}{3000} = 4.03 \text{ } \Omega$$

$$\text{Transf. : } Z_T = \frac{U_N^2 [\text{kV}^2]}{P_{N-T} [\text{MVA}]} \cdot \frac{u_T [\%]}{100} = \frac{110^2}{40} \cdot \frac{12\%}{100} = 36.3 \text{ } \Omega$$

Impedances related to 20 kV:

$$\text{Net : } Z_N = \frac{U_N^2 [\text{kV}^2]}{S_{SC}'' [\text{MVA}]} = \frac{20^2}{3000} = 0.13 \text{ } \Omega$$

$$\text{Transf. : } Z_T = \frac{U_N^2 [\text{kV}^2]}{P_{N-T} [\text{MVA}]} \cdot \frac{u_T [\%]}{100} = \frac{20^2}{40} \cdot \frac{12\%}{100} = 1.2 \text{ } \Omega$$

$$\text{Line : } Z_L = l [\text{km}] \cdot z_L' [\Omega/\text{km}] = 8 \cdot 0,4 = 3,2 \text{ } \Omega$$

## CT dimensioning for Example differential protection (2)

$$\text{F1 } I_{F1} = \frac{1.1 \cdot U_N / \sqrt{3}}{Z_N} = \frac{1.1 \cdot 110 \text{ kV} / \sqrt{3}}{4.03 \Omega} = 17.3 \text{ kA}$$

$$\text{F3 } I_{F3} = \frac{1.1 \cdot U_N / \sqrt{3}}{Z_N + Z_T} = \frac{1.1 \cdot 20 \text{ kV} / \sqrt{3}}{0.13 \Omega + 1.2 \Omega} = 9.55 \text{ kA}$$

$$\text{F2 } I_{F2} = \frac{1.1 \cdot U_N / \sqrt{3}}{Z_N + Z_T} = \frac{1.1 \cdot 110 \text{ kV} / \sqrt{3}}{4.03 \Omega + 36.3 \Omega} = 1.73 \text{ kA}$$

$$\text{F4 } I_{F4} = \frac{1.1 \cdot U_N / \sqrt{3}}{Z_N + Z_T + Z_L} = \frac{1.1 \cdot 20 \text{ kV} / \sqrt{3}}{0.13 \Omega + 1.2 \Omega + 3.2 \Omega} = 2.8 \text{ kA}$$

**Dimensioning of the 110 kV CTs for the transformer differential protection:**

**Manufacturer recommends for relay 7UT61:**

- 1) Saturation free time  $\geq 4 \text{ ms}$  for internal faults
- 2) Over-dimensioning factor  $K_{TF} \geq 1,2$  for through flowing currents (external faults)

The saturation free time of 3 ms corresponds to  $K_{TF} \geq 0,75$

**Criterion 1) therefore reads:**

$$ALF' \geq K_{TF} \cdot \frac{I_{F1}}{I_N} = 0,75 \cdot \frac{17300}{300} = 43$$

**For criterion 2) we get:**

$$ALF' \geq K_{TF} \cdot \frac{I_{F2}}{I_N} = 1,2 \cdot \frac{1730}{300} = 7$$

The 110 kV CTs must be dimensioned according to criterion 1).

## CT dimensioning for Example differential protection (3)

We try to use a CT type: 300/1, 10 VA, 5P?, internal burden 2 VA.

$$ALF \geq \frac{P_i + P_{operation}}{P_i + P_{rated}} \cdot ALF' = \frac{2 + 2.5}{2 + 10} \cdot 43 = 16.1 \quad (\text{Connected burden estimated to about 2.5 VA})$$

Chosen, with a security margin : 300 /1 A, 5P20, 10 VA,  $R_2 \leq 2 \text{ Ohm}$  ( $P_i \leq 2\text{VA}$ )

**Specification of the CTs at the 20 kV side of the transformer:**

It is good relaying practice to choose the same dimensioning as for the CTs on the 110 kV side:

1200/1, 10 VA, 5P20,  $R_2 \leq 2 \text{ Ohm}$  ( $P_i \leq 2\text{VA}$ )

**Dimensioning of the 20 kV CTs for line protection:**

**For relay 7SD61, it is required:**

- 1') Saturation free time  $\geq 3\text{ms}$  for internal faults
- 2') Over-dimensioning factor  $K_{TF} \geq 1.2$   
for through flowing currents (external faults)

The saturation free time of 3 ms corresponds  
to  $K_{TF} \geq 0.5$

**Criterion 1') therefore reads:**

$$ALF' \geq K_{TF} \cdot \frac{I_{F3}}{I_N} = 0.5 \cdot \frac{9550}{200} = 24$$

**For criterion 2') we get:**

$$ALF' \geq K_{TF} \cdot \frac{I_{F4}}{I_N} = 1.2 \cdot \frac{2800}{200} = 16.8$$

The 20 kV line CTs  
must be dimensioned  
according to criterion 1').

## CT dimensioning for Example differential protection (4)

For the 20 kV line we have considered the CT type: 200/5 A, 5 VA, 5P?, internal burden ca. 1 VA

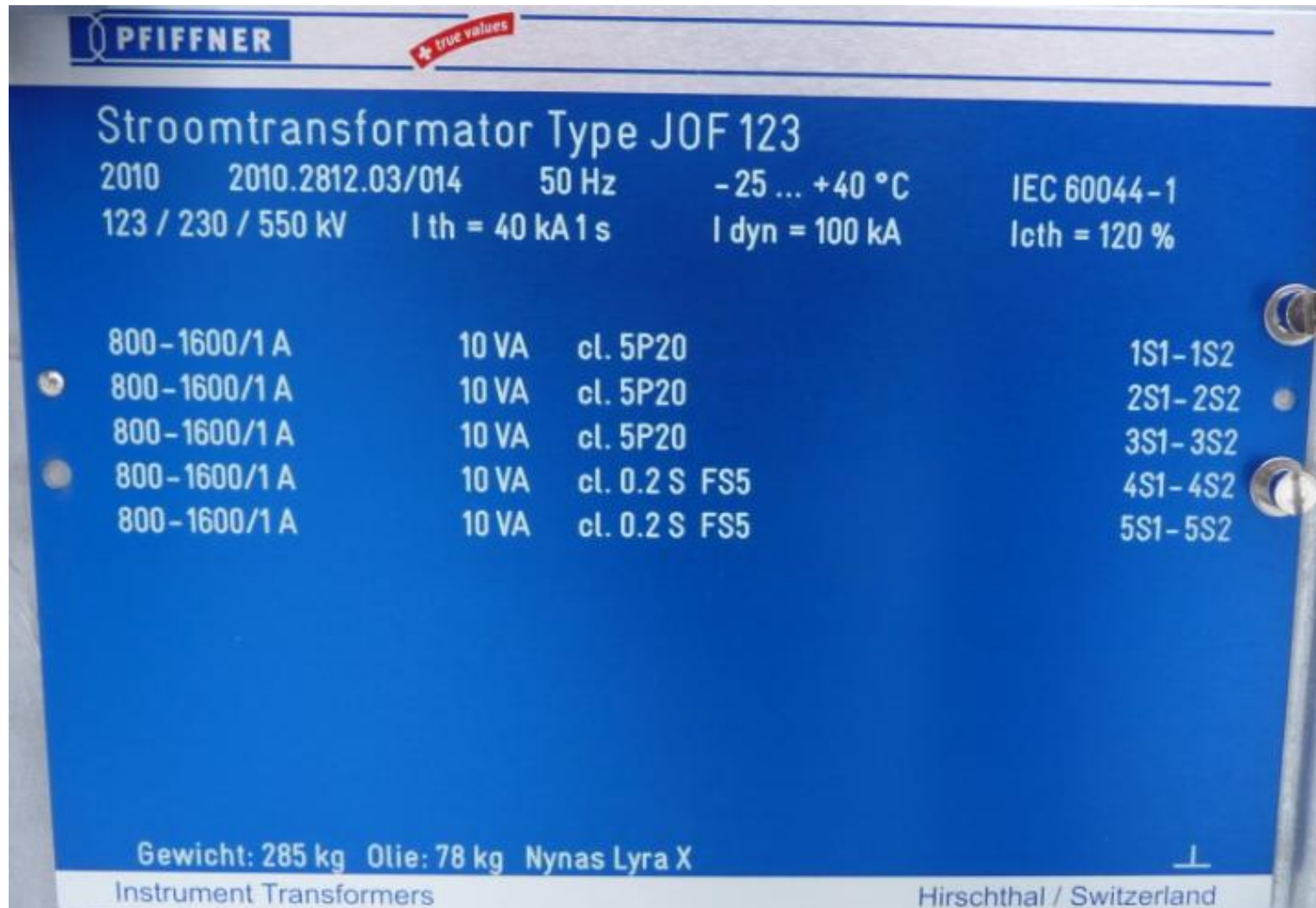
$$ALF \geq \frac{P_i + P_{operation}}{P_i + P_{rated}} \cdot ALF' = \frac{1+1}{1+5} \cdot 24 = 8 \quad (\text{Connected burden about 1 VA})$$

### Specification of line CTs:

We choose the next higher standard accuracy limit factor ALF=10 :

Herewith, we can specify: CT Type TPX, 200/5 A, 5 VA, 5P10,  $R_2 \leq 0.04 \text{ Ohm}$  ( $P_i \leq 1 \text{ VA}$ )

# Type plaatjes



<b>Measuring of protection cores acc. IEC</b>			<b>PAE 10</b>
Process owner: MB	released: <u>MB</u>	Edition: 08.12.04	page 1 of 3

[Directory](#)

**1. P-Class**

**a. Accuracy class designation**

*“For protective current transformers, the accuracy class is designed by the highest permissible percentage composite error at the rated accuracy limit primary current prescribed for the accuracy class concerned, followed by the letter “P” (meaning protection)” (acc. IEC 60044-1, page 77)*

**b. Determination of the secondary limiting e.m.f.**

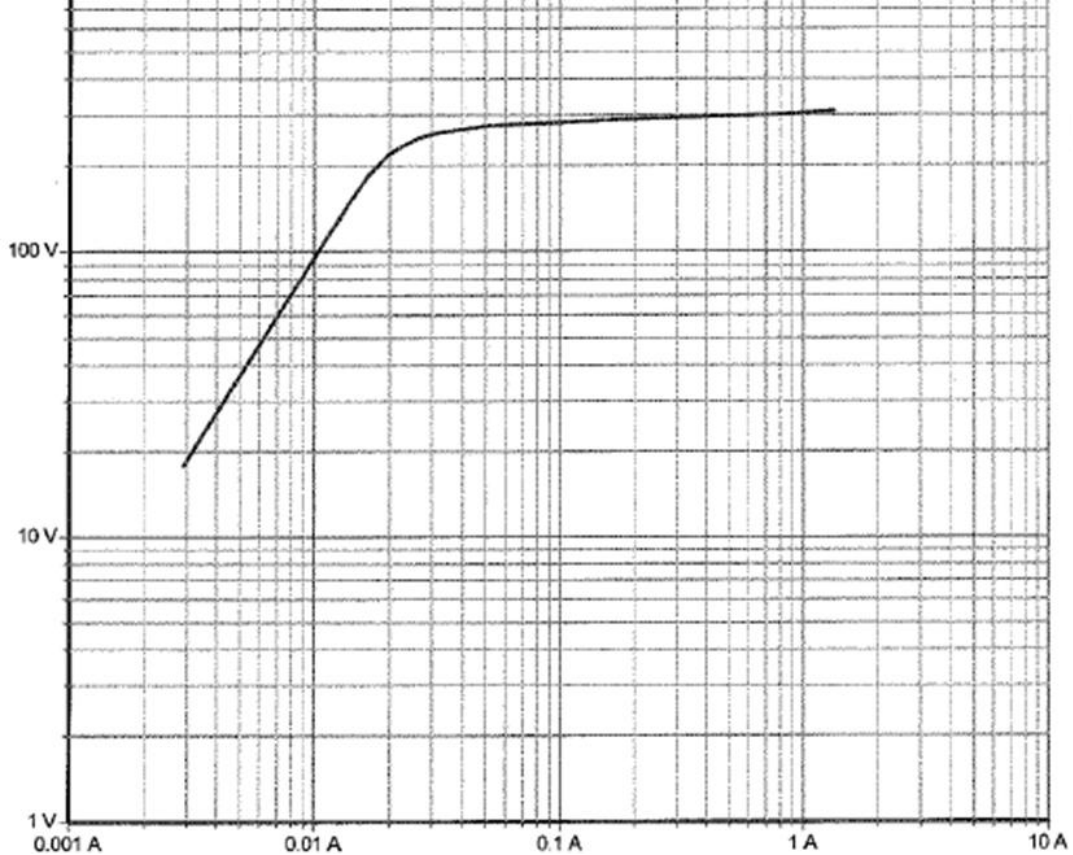
$$U = F \cdot I_{sec} \cdot \sqrt{\left(\frac{S}{I_{sec}^2} \cdot 0.8 + R_{ct 75^\circ C}\right)^2 + \left(\frac{S}{I_{sec}^2} \cdot 0.6\right)^2}$$

$$I_m \leq \frac{CE \cdot F \cdot I_{sec}}{100\%}$$

- U: Secondary limiting e.m.f.
- F: accuracy limit factor
- I<sub>sec</sub>: rated secondary current
- S: burden
- I<sub>m</sub>: exciting current
- CE: Composit-error [%]

A sinusoidal e.m.f. of rated frequency equal to the secondary limiting e.m.f. shall be applied to the secondary winding and the exciting current measured.

The core fulfils the class if the exciting current is lower than the calculated value.



Serie-Nr. Serie-Nr.	Kern Kern-nr	I <sub>PR</sub> /I <sub>SR</sub> [A]/[A]	Klasse	R <sub>ct</sub> (75 °C) [Ω]	gefordert verlangt	gemessen Gemeten	gefordert verlangt	gemessen Gemeten			
1	1	800/1 400/1	5P20 10VA	4.66	I <sub>m</sub> @280V	<1.0A	0.0837A	ε <sub>C</sub>	<5%	0.4 %	<input checked="" type="checkbox"/>

$$U_{vereist} = F * I_{sec} * \sqrt{\left(\frac{S}{I^2_{sec}} * 0,8 + R_{ct}\right)^2 + \left(\frac{S}{I^2} * 0,6\right)^2} \Rightarrow 20 * 1 \sqrt{\left(\frac{10}{1^2} * 0,8 + 4,66\right)^2 + \left(\frac{10}{1^2} * 0,6\right)^2} = 280V$$

$$I_m \leq \frac{CE * F * I_{sec}}{100\%} = \frac{5 * 20 * 1}{100} = 1A$$



KOTEF 220

79/768 639

245 / 460 / 1050 kV

E 1F 50 Hz

I<sub>th</sub> 2x50 / 1 kA

I<sub>dyn</sub> 125 kA

1650 kg

1,9UN 4h

A 2 x 625 (1,2)

VA 1 / 1 / 1 / 1 / 1 / 1

KI 20 / 10 / 10 / 10 / 10(20) / 20(40)

20 / 20 / 20 / 20 / <10 (<5)

1 / 2 / 3 / 4 / 5 / 6

V 220 000 /  $\sqrt{3}$

110 /  $\sqrt{3}$  / 110 / 3

VA 100(200) / 60

KI 0,2 (0,5) / 3P

S1 - S2 / S3 - S4

2000 / 25A

Haupt -  
stempel

Transformatorolie  
afgesloten van de buitenlucht

Gewicht van de olie :  
485 kg

# STROOMTRANSFORMATOR

Trench Germany GmbH

Type: SAS 420/6G

08/078 671

420/630/1425 kV

1050 kV Schakelspanning

P1-P2	4000 A	1 A	10 VA	Kl 0,2 S	FS 5						1S1-1S2
	4000 A	1 A	15 VA	Kl 0,2 S	FS 5						2S1-2S2
	4000 A	1 A	TPZ	Fi±1%	T <sub>D</sub> =120ms	K <sub>SSC</sub> =12,5	K <sub>Id</sub> =21,8	δi=35'±3'	R <sub>b</sub> =10Ω	R <sub>cl</sub> =16,00	3S1-3S2
	4000 A	1 A	TPZ	Fi±1%	T <sub>D</sub> =120ms	K <sub>SSC</sub> =12,5	K <sub>Id</sub> =21,8	δi=35'±3'	R <sub>b</sub> =10Ω	R <sub>cl</sub> =16,00	4S1-4S2
	4000 A	1 A	TPZ	Fi±1%	T <sub>D</sub> =120ms	K <sub>SSC</sub> =12,5	K <sub>Id</sub> =21,8	δi=35'±3'	R <sub>b</sub> =10Ω	R <sub>cl</sub> =16,00	5S1-5S2
	4000 A	1 A	TPZ	Fi±1%	T <sub>D</sub> =120ms	K <sub>SSC</sub> =12,5	K <sub>Id</sub> =21,8	δi=35'±3'	R <sub>b</sub> =10Ω	R <sub>cl</sub> =16,10	6S1-6S2

I<sub>d</sub> = 4800 A

I<sub>m</sub> 63 kA/1s | I<sub>dyn</sub> 160 kA | Class of insulation: E | 50 Hz | Outdoor use vertical only: IF

IEC 60044-1

Vuldruk: 3,9 bar rel./20°C | Toelaatbare bedrijfs overdruk: 4,9 bar rel. | SF<sub>6</sub>-Gewicht: 50,7 kg

Alarmdruk: 3,5 bar rel./20°C | Transport: Horizontaal | Tot.-Gewicht: 1520 kg

Klemmenkast niet openen onder spanning!

Made in Germany

Vragen ???

