

TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Profesor: César Chilet



OBJETIVO

- Definir el modelo del transformador para estudios de transmisión de potencia eléctrica en régimen permanente (en condiciones equilibradas).



26/05/2013

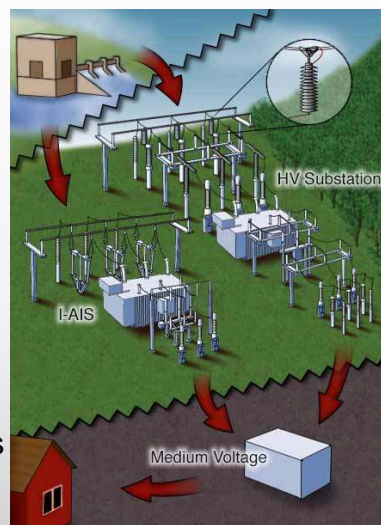
cchilet@tecsup.edu.pe

3

TRANSFORMADOR

Utilizados para viabilizar la transmisión de energía eléctrica en AT.

- Centrales: para elevar la tensión (69kV a 750 kV).
- Subestaciones (centros de consumo): para reducir las tensión (10 y 22,9 kV).
- Interconexiones: Para compatibilizar los diversos niveles de tensión de las LT's que aportan.



26/05/2013

cchilet@tecsup.edu.pe

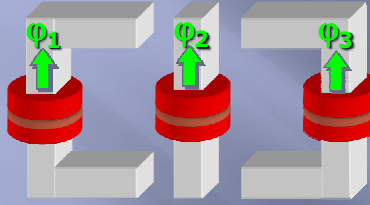
4

CARACTERÍSTICAS

1. Relación de transformación: fija o variable (estrecho margen).
2. El cambio de relación de transformación (en módulo y/o fase) \Rightarrow variación del flujo de Q y/o P en una LT.



Transformador trifásico

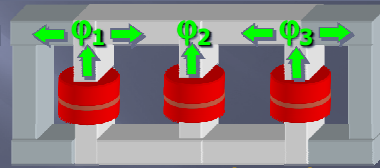


Transformador trifásico de 3 columnas

Las dos columnas laterales sirven como camino adicional al flujo. De este modo, es posible reducir la sección y, por tanto, la altura de la culata

En un transformador con tres columnas existe una pequeña asimetría del circuito magnético: el flujo de la columna central tiene un recorrido más corto y, por tanto, de menor reluctancia.

La corriente de magnetización de esa fase será ligeramente menor.

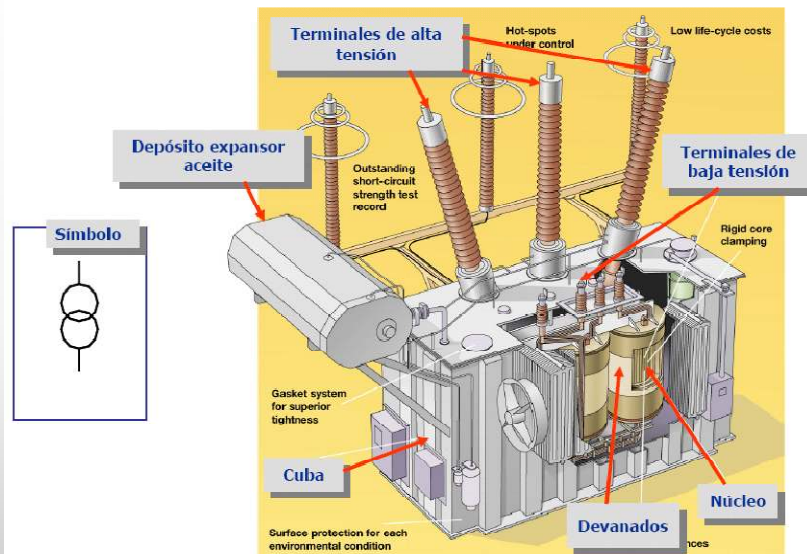


Transformador trifásico núcleo acorazado (5 columnas)

Si el sistema en el que trabaja el transformador es totalmente equilibrado su análisis se puede reducir al de una fase (las otras son = desfasadas 120° y 240°)

El circuito equivalente que se utiliza es el mismo, con la tensión de fase y la corriente de línea (equivalente a conexión estrella – estrella)

Aspectos constructivos



26/05/2013 ochtla@tecsup.edu.pe

ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

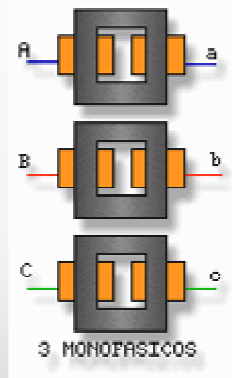


Components

- ① Three-limb core
- ② LV winding
- ③ HV winding
- ④ Tapped winding
- ⑤ Tap leads
- ⑥ LV bushings
- ⑦ HV bushings
- ⑧ Clamping frame
- ⑨ On-load tap changer
- ⑩ Motor drive
- ⑪ Tank
- ⑫ Conservator
- ⑬ Radiators

BANCO TRIFÁSICO

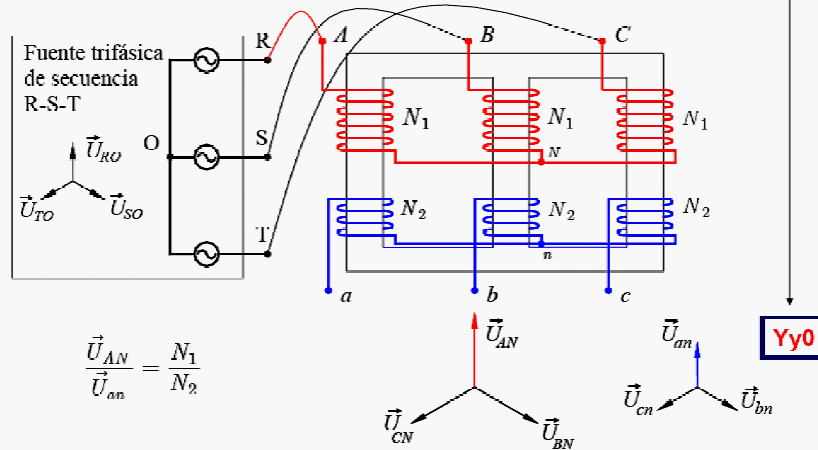
- También es posible la elaboración de un transformador trifásico a partir de tres transformadores monofásicos constituyendo lo que se conoce como **banco de tres transformadores monofásicos**. Con las tres bobinas primarias conectadas en estrella o delta, se forma el primario trifásico; y con las tres secundarias monofásicas, conectadas también en estrella o delta se forma el secundario trifásico.



26/05/2013 ochilae@lecsup.edu.pe

Conexión estrella-estrella

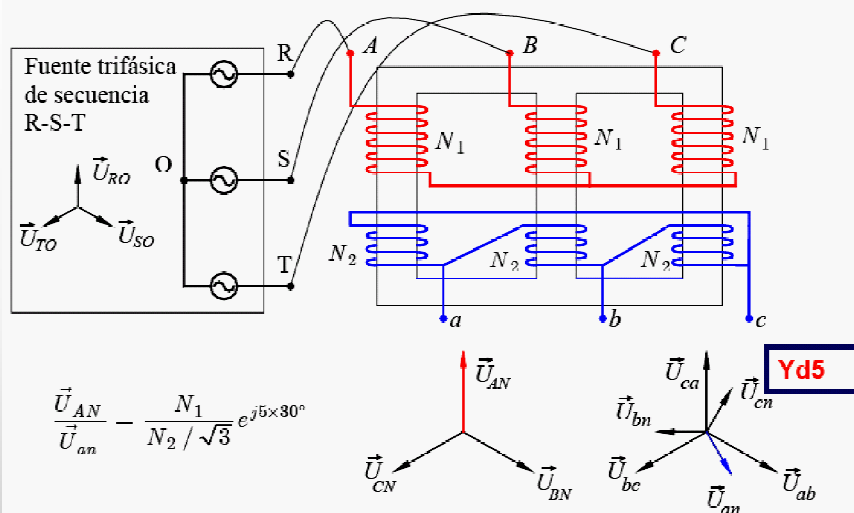
Denominación según EN 60076-1:1998



El desfase se expresa en múltiplos de 30°, lo que equivale a expresar la hora que marcarían el fasor de tensión de la fase A del primario (situado en las 12h) y el del secundario

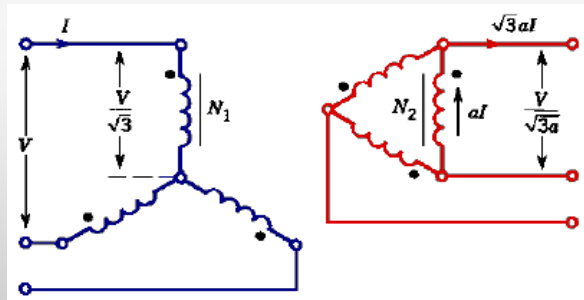
Conexión estrella-triángulo

EN 60076-1:1998



CONEXIONES DE TRANSFORMADORES

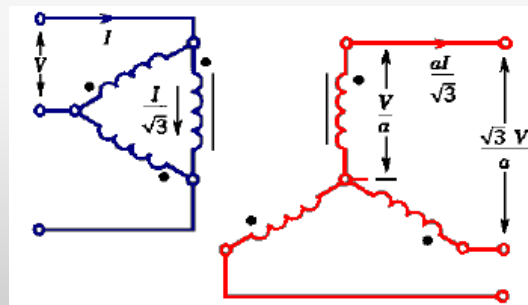
- Frecuentemente usado para reducir la tensión.



13

CONEXIONES DE TRANSFORMADORES

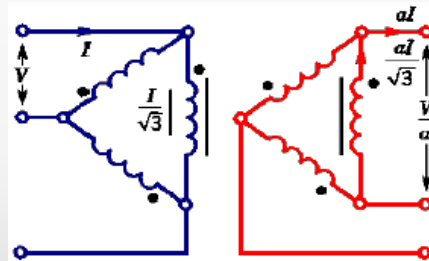
- Conexión de los transformadores elevadores en las centrales de generación



14

CONEXIONES DE TRANSFORMADORES

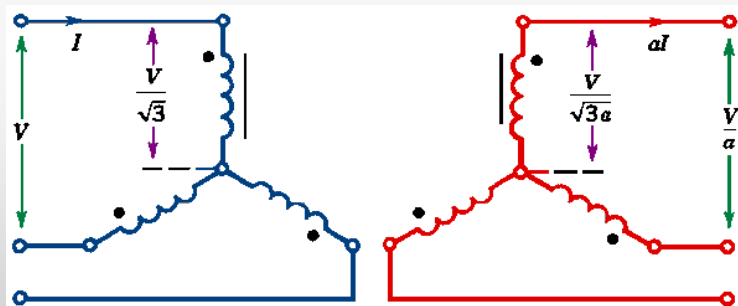
- Usados en media tensión, uno de los transformadores puede ser removido y operar en delta abierto.



15

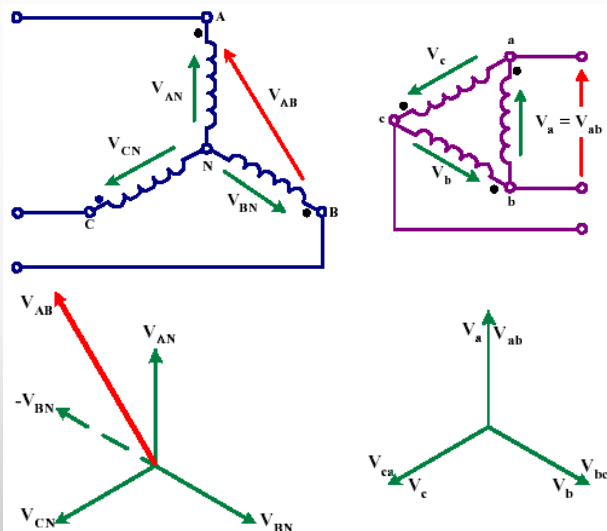
CONEXIONES DE TRANSFORMADORES

- Utilizado raramente, problemas con el desbalance y con los terceros armónicos.



16

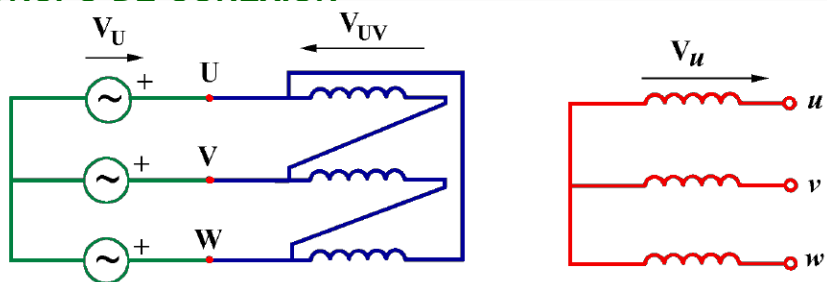
DESFAJAJE ENTRE DEVANADOS



- Las conexiones Dy o Yd crean desfase entre las tensiones de líneas del primario y secundario.
- Los desfases son múltiplo de 30° .

17

GRUPO DE CONEXIÓN



Transformador Delta-Estrella.

U, V, W : Devanados de alta tensión.
u, v, w : Devanados de baja tensión.

} Norma Alemana.

H1, H2, H3 : Devanados de alta tensión.
x1, x2, x3 : Devanados de baja tensión.

} Norma Americana.

GRUPO DE CONEXIÓN

Nº	GRUPO	SIMBOLO		CONEXIONADO	
		Primario	Secundario	Primario	Secundario
0	Dd0				
	Yy0				
	Dz0				

- En las tablas mostradas a continuación, se detallan los grupos de conexiones normalizados para transformadores de potencia trifásicos.

19

GRUPO DE CONEXIÓN

- debe tenerse en cuenta que el esquema de conexionado es valido solamente en el caso que los devanados tengan el mismo sentido de arrollamiento.

Nº	GRUPO	SIMBOLO		CONEXIONADO	
		Primario	Secundario	Primario	Secundario
5	Dy5				
	Yd5				
	Yz5				

20

GRUPO DE CONEXIÓN

Nº	GRUPO	SIMBOLO		CONEXIONADO	
		Primario	Secundario	Primario	Secundario
11	Dy11				
	Yd11				
	Yz11				

21

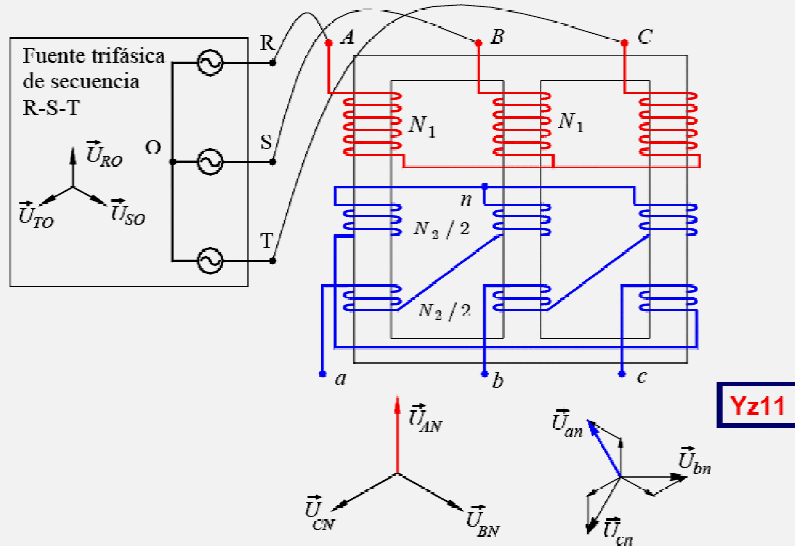
GRUPO DE CONEXIÓN

Nº	GRUPO	SIMBOLO		CONEXIONADO	
		Primario	Secundario	Primario	Secundario
6	Dd6				
	Yy6				
	Dz6				

22

Conexión estrella-zig zag

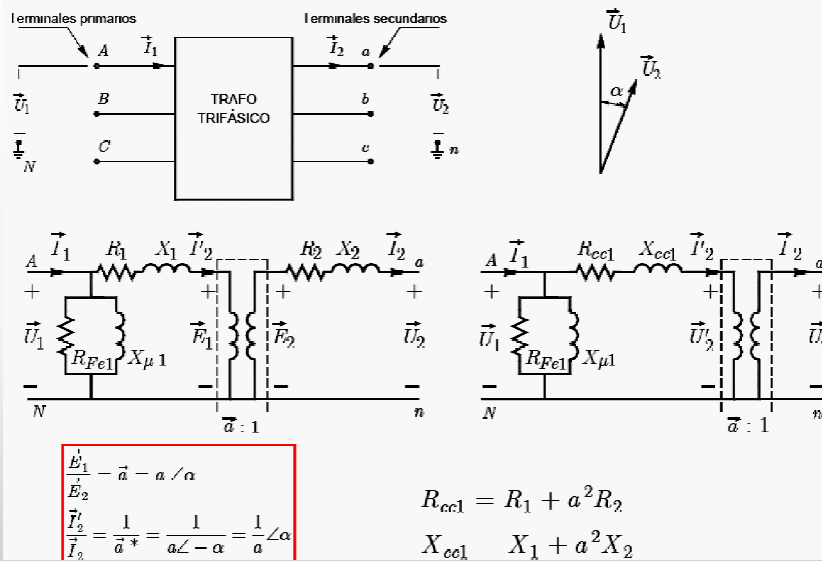
TE05/06-Trafo /



26/05/2013 cchiliet@lecsup.edu.pe

Circuito equivalente fase-neutro

TE05/06-Trafo



26/05/2013 cchiliet@lecsup.edu.pe

Sistema de cálculos por unidad

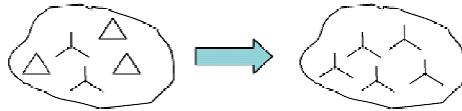
TE05/06-

$$\text{Magnitud por unidad} = \frac{\text{Magnitud real}}{\text{Valor base}}$$

$$\frac{\vec{U}}{U_B} = \frac{\vec{Z}}{Z_B} \frac{\vec{I}}{I_B} ; \quad \vec{S} = \frac{\vec{U}}{U_B} \frac{\vec{I}^*}{I_B}$$

$$\vec{U}_{pu} = \frac{\vec{Z}_{pu}}{Z_B} \vec{I}_{pu} ; \quad \vec{S}_{pu} = \frac{\vec{U}_{pu}}{U_B} \vec{I}_{pu}^*$$

Transformación Y-Δ



equivalente fase-neutro
→ análisis por fase

$$\left. \begin{matrix} U_B^{F-N} \\ S_B^{1\phi} \end{matrix} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} I_B = \frac{S_B^{1\phi}}{U_B^{F-N}} \\ Z_B = \frac{U_B^{F-N}}{I_B} = \frac{(U_B^{F-N})^2}{S_B^{1\phi}} \end{matrix} \right.$$

$$\left. \begin{matrix} I_B = \frac{S_B^{3\phi}/3}{U_B^{L-L}/\sqrt{3}} = \frac{S_B^{3\phi}}{\sqrt{3} U_B^{L-L}} \\ Z_B = \frac{(U_B^{L-L}/\sqrt{3})^2}{S_B^{3\phi}/3} = \frac{(U_B^{L-L})^2}{S_B^{3\phi}} \end{matrix} \right.$$

$$\vec{S}_{pu}^{3\phi} = \frac{\vec{S}^{3\phi}}{S_B^{3\phi}} = \frac{3\vec{S}^{1\phi}}{3S_B^{1\phi}} = \vec{S}_{pu}^{1\phi}$$

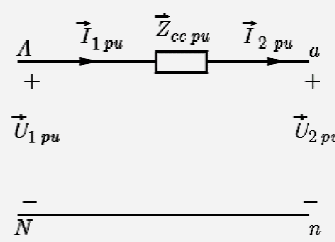
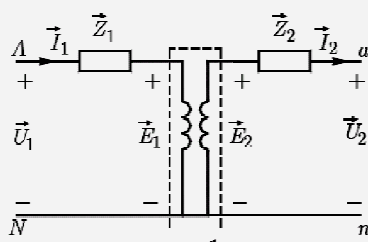
$$U_{pu}^{L-L} = \frac{U_B^{L-L}}{U_B^{L-L}} = \frac{\sqrt{3} U_B^{F-N}}{\sqrt{3} U_B^{F-N}} = U_{pu}^{F-N}$$

25

26/05/2013 cchiller@lecsup.edu.pe

Cálculos p.u. con trafos de dos devanados

TE05/06-Trafo 10



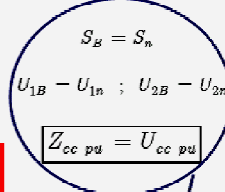
$$\frac{U_{1B}}{U_{2B}} = a$$

$$\frac{\vec{U}_{1R}}{U_{1B}} = \frac{\vec{Z}_1}{Z_{1B}} \frac{\vec{I}_{1R}}{I_{1B}} + \frac{\vec{E}_1}{U_{1B}}$$

$$\frac{\vec{E}_2}{U_{2B}} = \frac{\vec{Z}_2}{Z_{2B}} \frac{\vec{I}_{2R}}{I_{2B}} + \frac{\vec{U}_2}{U_{2B}}$$

$$\vec{U}_{1pu} = \vec{Z}_{1pu} \vec{I}_{1pu} + \vec{Z}_{2pu} \vec{I}_{2pu} + \vec{U}_{2pu}$$

$$\vec{U}_{1pu} = \vec{Z}_{ccpu} \vec{I}_{1pu} + \vec{U}_{2pu}$$

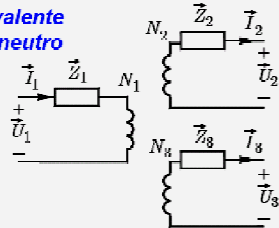


	Reactancia inductiva (pu)	Relación R/X
Hasta 1.000 kVA (trafos distribución MT)	0,04 ÷ 0,08	0,2 ÷ 0,6
Más de 1.000 kVA (trafos transporte)	0,06 ÷ 0,16	0,02 ÷ 0,08

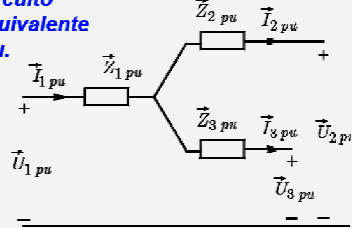
Cálculos p.u. con trafos de tres devanados

$$S_R \text{ común y } U_{1R} = U_{1n} ; U_{2R} = U_{2n} \text{ y } U_{3R} = U_{3n}$$

Circuito equivalente fase-neutro



Circuito equivalente p.u.



Tres ensayos de cortocircuito

$$U_{cc12 pu} = Z_{cc12 pu}$$

$$U_{cc13 pu} = Z_{cc13 pu}$$

$$U_{cc23 pu} = Z_{cc23 pu}$$

$$\begin{aligned} \vec{Z}_{cc12 pu} &= \vec{Z}_{1 pu} + \vec{Z}_{2 pu} & \vec{Z}_{1 pu} \\ \vec{Z}_{cc13 pu} &= \vec{Z}_{1 pu} + \vec{Z}_{3 pu} & \vec{Z}_{2 pu} \\ \vec{Z}_{cc23 pu} &= \vec{Z}_{2 pu} + \vec{Z}_{3 pu} & \vec{Z}_{3 pu} \end{aligned}$$

Normalmente las potencias nominales de cada devanado son distintas

Ejemplo: transformador Yy0d11, 130/110/66 kV, 45/30/20 MVA

$X_{cc12} = 10\%$ (referido a 30 MVA), $X_{cc13} = 6\%$ (referido a 20 MVA),

$X_{cc23} = 10,5\%$ (referido a 30 MVA)

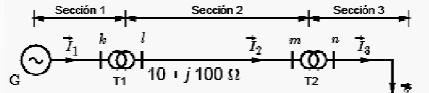
TRANSFORMADORES DE 3 DEVANADOS

$$X_P = \frac{X_{PS} + X_{PT} - X_{ST}}{2}$$

$$X_S = \frac{X_{PS} + X_{ST} - X_{PT}}{2}$$

$$X_T = \frac{X_{PT} + X_{ST} - X_{PS}}{2}$$

Cálculos p.u. en sistemas de potencia



T1: 5 MVA; 13,2/132 kV; $X_{se1} = 10\%$. $300 + j0 \Omega$
 T2: 10 MVA; 138/69 kV; $X_{se2} = 8\%$.

$$S_B^{3\phi} = 10 \text{ MVA}$$

$$U_{1B}^{l-l} = 138 \text{ kV} \quad U_{1B}^{l-l} = 138 \cdot (13,2/132) = 10 \text{ kV}$$

$$U_{3B}^{l-l} = 69 \text{ kV} \quad U_{3B}^{l-l} = 138 \cdot (69/138) = 69 \text{ kV}$$

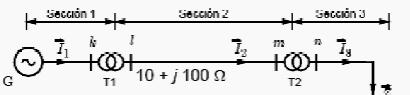
$$Z_{1B} = \frac{(U_{1B}^{l-l})^2}{S_B^{3\phi}} = \frac{(13,8 \cdot 10^3)^2}{10 \cdot 10^6} = 19,04 \Omega$$

$$Z_{2B} = \frac{(U_{2B}^{l-l})^2}{S_B^{3\phi}} = \frac{(138 \cdot 10^3)^2}{10 \cdot 10^6} = 1.904 \Omega$$

$$Z_{3B} = \frac{(U_{3B}^{l-l})^2}{S_B^{3\phi}} = \frac{(69 \cdot 10^3)^2}{10 \cdot 10^6} = 476 \Omega$$

1. Secciones según trafos.
2. Potencia base S_B común.
3. U_B en una de las secciones
 U_B en otras secciones según r.t. nominal de trafos.
4. Z_B en cada una de las secciones $Z_B = U_B^2 / S_B$.
5. OPCIONAL: $\text{Ángulo base } \alpha_B$
 α_B en otras secciones según I.H. de los trafos.

Cálculos p.u. en sistemas de potencia



T1: 5 MVA; 13,2/132 kV; $X_{se1} = 10\%$. $300 + j0 \Omega$
 T2: 10 MVA; 138/69 kV; $X_{se2} = 8\%$.

$$\bar{Z}_{pu} = \frac{\bar{Z}}{Z_B} = \frac{(300 + j0) \Omega}{476 \Omega} = 0,63 + j0$$

$$\bar{Z}_{L,pu} = \frac{\bar{Z}_L}{Z_B} = \frac{(10 + j100) \Omega}{1.904 \Omega} = 0,0052 + j0,0525$$

$$X_{se1,pu}^{(2)} = X_{se1,pu}^{(1)} \left(\frac{U_B^{(1)}}{U_B^{(2)}} \right)^2 \left(\frac{S_B^{(2)}}{S_B^{(1)}} \right) = 0,1 \left(\frac{13,2}{138} \right)^2 \left(\frac{10}{5} \right) = 0,133$$

$$X_{se2} = 0,08$$

$$U_{G,pu} = \frac{U_G^{l-l}}{U_{1B}^{l-l}} = \frac{13,2}{13,8} = 0,96$$

6. Valores p.u. de las impedancias $Z_{pu} = Z_{real} / Z_B$.

Si es necesario, *cambio de base*

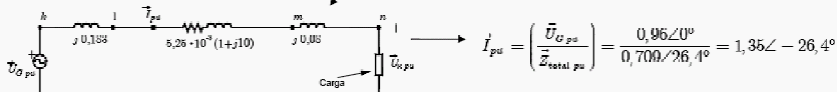
$$Z_{pu}^{(2)} = Z_{pu}^{(1)} \frac{Z_B^{(1)}}{Z_B^{(2)}} = Z_{pu}^{(1)} \left(\frac{U_B^{(1)}}{U_B^{(2)}} \right)^2 \frac{S_B^{(2)}}{S_B^{(1)}}$$

7. Valores p.u. de tensiones que sean datos.

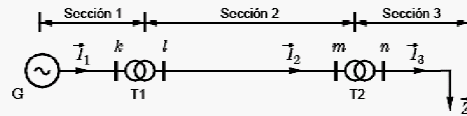
8. Esquema de impedancias fase-neutro.

9. Resolución en p.u.

Valores p.u. >>>> valores reales.



Cálculos p.u. en sistemas de potencia TF05/06-Trafo 14



$$I_{1B} = \frac{S_B^{3\phi}}{\sqrt{3} U_{1B}^{l-l}} = \frac{10 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 13,8 \cdot 10^3} = 418,4 \text{ A} \quad I_{2B} = \frac{13,2}{132} 418,4 = 41,84 \text{ A} \quad I_{3B} = \frac{138}{69} 41,84 = 83,67 \text{ A}$$

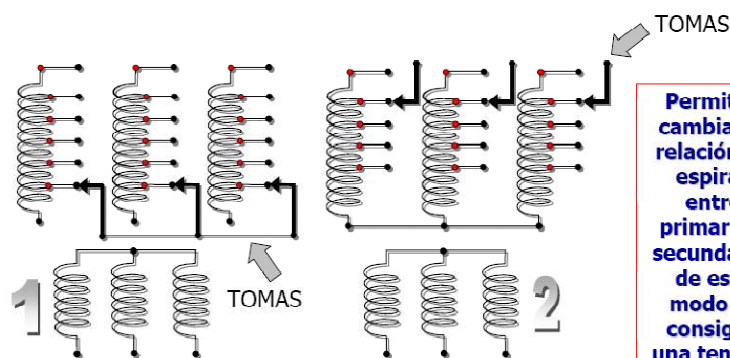
Valores p.u. >>>> valores reales.

- Corriente del generador $I_1 = 1,35 \cdot 418,4 = 584,8 \text{ A}$.
- Corriente en la línea de transmisión $I_2 = 1,35 \cdot 41,84 = 56,48 \text{ A}$.
- Corriente en la carga $I_3 = 1,35 \cdot 83,67 = 112,95 \text{ A}$.
- Tensión en la carga $U_3^{l-l} = 0,8505 \cdot 69 = 58,68 \text{ kV}$.
- Potencia entregada a la carga.

$$S^{4\phi} = S_{pu} S_B^{3\phi} = 1,148 \cdot 10 = 11,48 \text{ MVA}$$

31

Transformadores con tomas



El caso 1 es preferible ya que las tomas están a menor tensión respecto de la cuba

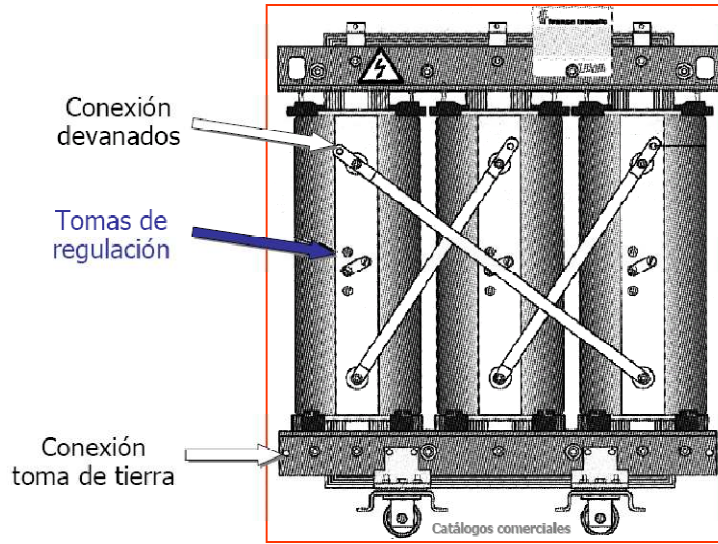
Permiten cambiar la relación de espiras entre primario y secundario, de este modo se consigue una tensión variable

Entre otras aplicaciones se utilizan en las redes de transporte y distribución para mantener la tensión cte. con independencia de la carga

32

Transformadores con tomas

IE05/U6-1 rarc

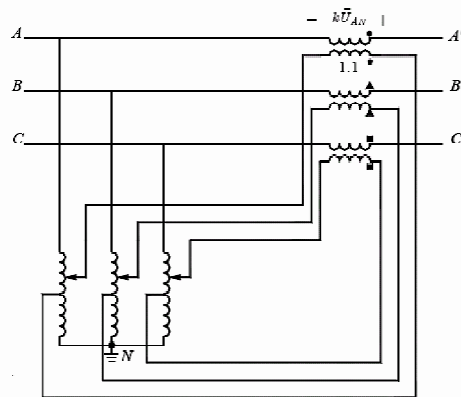


26/05/2013 cchillet@iecsup.edu.pe

3

Trafos de regulación I (trafos reguladores del módulo de la tensión)

IE0



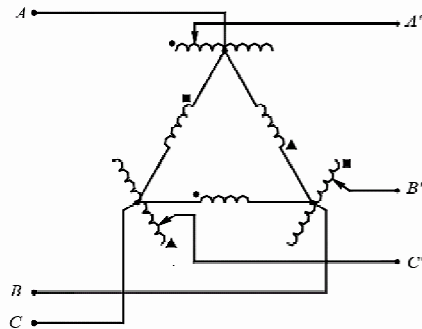
$$\vec{U}_{A'N'} = \vec{U}_{AN} + k\vec{U}_{AN} = (1 + k)\vec{U}_{AN}$$

26/05/2013 cchillet@iecsup.edu.pe

34

Trafos de regulación II (trafos reguladores del desfase de la tensión)

1-FRM/10-FRATO 1



$$\vec{U}_{AA'} = \rho \vec{U}_{BC}$$

$$\vec{U}_{CC'} = \rho \vec{U}_{AB}$$

$$\vec{U}_{BB'} = \rho \vec{U}_{CA}$$

$$\vec{U}_{A'B'} = \vec{U}_{A'A} + \vec{U}_{AB} + \vec{U}_{BB'} = \vec{U}_{AB} + \rho(\vec{U}_{CA} - \vec{U}_{BC})$$

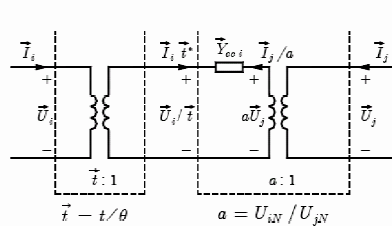
$$\vec{U}_{A'B'} = \vec{U}_{AB} + \rho(e^{j2\pi/3} - e^{-j2\pi/3})\vec{U}_{AB} = \vec{U}_{AB}(1 + j\rho\sqrt{3})$$

26/05/2013 cchiliet@lecsup.edu.pe

35

Modelo general del transformador

1-FRM/10-FRATO 1



$$\begin{pmatrix} \vec{I}_i / \vec{t} \\ \vec{I}_j / a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{Y}_{cc} & \vec{Y}_{cc} \\ -\vec{Y}_{cc} & \vec{Y}_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{U}_i / \vec{t} \\ \vec{U}_j / a \end{pmatrix}$$

Análisis p.u. con

$$S_B \text{ y } U_{iB}/U_{jB} = U_{iN}/U_{jN} = a$$

General

$$\begin{pmatrix} \vec{I}_i \\ \vec{I}_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{Y}_{cc} / t^2 & -\vec{Y}_{cc} / \vec{t} \\ -\vec{Y}_{cc} / \vec{t} & \vec{Y}_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{U}_i \\ \vec{U}_j \end{pmatrix}$$

TRM

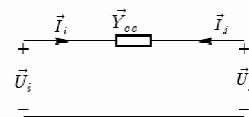
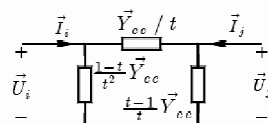
$$\vec{t} = t \angle 0^\circ$$

$$\begin{pmatrix} \vec{I}_i \\ \vec{I}_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{Y}_{cc} / t^2 & -\vec{Y}_{cc} / t \\ -\vec{Y}_{cc} / t & \vec{Y}_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{U}_i \\ \vec{U}_j \end{pmatrix}$$

Trafo fijo

$$\vec{t} = 1 \angle 0^\circ$$

$$\begin{pmatrix} \vec{I}_i \\ \vec{I}_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{Y}_{cc} & -\vec{Y}_{cc} \\ \vec{Y}_{cc} & \vec{Y}_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{U}_i \\ \vec{U}_j \end{pmatrix}$$



26/05/2013 cchiliet@lecsup.edu.pe

36

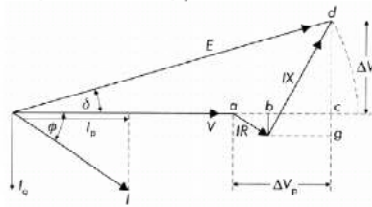
CAÍDA DE TENSIÓN EN UNA LT

26/

$$\begin{aligned}
 E^2 &= (V + \Delta V)^2 + \delta V^2 \\
 &= (V + IR \cos \phi + IX \sin \phi)^2 + (IX \cos \phi - IR \sin \phi)^2 \\
 &= \left(V + \underbrace{\frac{RP}{V} + \frac{XQ}{V}}_{\Delta V = \Delta V_p} \right)^2 + \left(\underbrace{\frac{XP}{V} - \frac{RQ}{V}}_{\delta V = \Delta V_q} \right)^2
 \end{aligned}$$

If $\delta V \ll V + \Delta V$, $E \approx V + \Delta V$

i.e. Voltage drop, $E - V \approx \Delta V = \frac{RP + XQ}{V}$



37

COORDINACIÓN PARA EL CAMBIO DE TAP'S

- Considere la operación de un sistema de transmisión con 2 transformadores con TAP's bajo carga.
- ts y tr son fracciones de las relaciones de transformación.
- El producto $ts \cdot tr$ debe ser la unidad para asegurar que el nivel de tensión total permanece en el mismo orden y que se emplee el mínimo rango de los TAP's en ambos transformadores.

26/05/2013 ochilae@iecsup.edu.pe

38

COORDINACIÓN PARA EL CAMBIO DE TAP'S

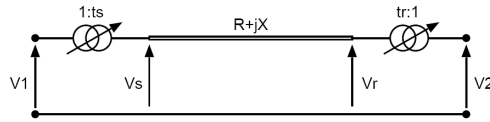
$$V_s = t_s V_1$$

$$V_r = t_r V_2$$

$$\Delta V = V_s - V_r = \frac{RP + XQ}{V_r}$$

$$t_s V_1 - t_r V_2 = \frac{RP + XQ}{t_r V_2}$$

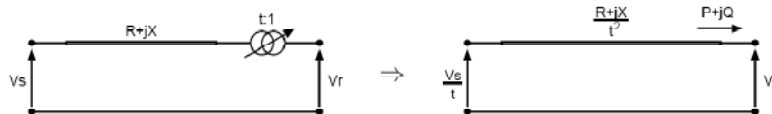
$$\Rightarrow t_s^2 \left[1 - \frac{RP + XQ}{V_1 V_2} \right] = \frac{V_2}{V_1} \quad \text{as } t_s t_r = 1$$



39

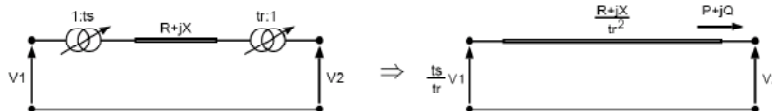
CIRCUITOS EQUIVALENTES

1. Single transformer



$$\text{i.e. } \frac{V_s}{t} - V_r = \frac{RP + XQ}{t^2 V_r}$$

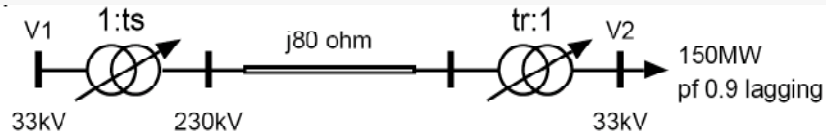
2. Two transformer



$$\text{i.e. } \frac{t_s V_1}{t_r} - V_2 = \frac{RP + XQ}{t_r^2 V_2}$$

EJEMPLO

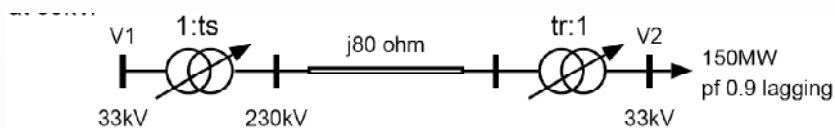
- Con $t_s \cdot tr = 1$, encontrar el TAP requerido para mantener la tensión de la barra de carga en 33 kV.



26/05/2013

cchilet@tecsup.edu.pe

41



$$t_s^2 \left[1 - \frac{X_{pu} Q_{pu}}{V_{1pu} V_{2pu}} \right] = \frac{V_{1pu}}{V_{2pu}} \quad \text{where} \quad X_{pu} = X \frac{S_b}{230^2}, \quad V_{1pu} = V_1 \frac{1}{33}$$

$$Q_{pu} = Q \frac{1}{S_b}, \quad V_{2pu} = V_2 \frac{1}{33}$$

$$\Rightarrow t_s^2 \left[1 - \frac{(X \frac{S_b}{230^2})(Q \frac{1}{S_b})}{(V_1 \frac{1}{33})(V_2 \frac{1}{33})} \right] = \frac{V_1 \frac{1}{33}}{V_2 \frac{1}{33}}$$

$$\Rightarrow t_s^2 \left[1 - \left(\frac{80}{230^2} \right) (72.65) \right] = 1$$

$$\Rightarrow t_s = 1.06 \text{ pu}$$

42