

ELC-30514
Sistemas de Potencia I

CAPITULO 3
Sistema Por Unidad

Prof. Francisco M. González-Longatt

fglongatt@ieee.org

<http://www.giaelec.org/fglongatt/SP.htm>

1. Introducción al Sistema por Unidad

- Debido a los *valores significativos de energía* que manejan los SP.
- Obligan al uso de cantidades que poseen valores cuantitativos *elevados en potencias de diez* (MWatt, MVA, MVAr, kA, etc.),
- Sendas cantidades de potencias de diez son *poco prácticas en el calculo*.
- Con la idea de reducir el tamaño de las cifras que se crea el *sistema por unidad*.

1. Introducción al Sistema por Unidad

- El valor por unidad de una magnitud cualquiera se define como *la razón de su valor real a un valor particular denominado base*, quedando expresado el valor por unidad como un decimal.
- *El valor por ciento es igual a 100 veces el valor por unidad.*
- Los métodos de cálculo que utilizan las magnitudes en por unidad o por ciento, son *mucho más sencillos que usando los valores en magnitudes reales.*

2. Definición de SPU

- Sea una cierta **Variable**, su valor en por unidad (**Variable p.u** ó **Variable 0/1**) se defina como la relación entre el valor real de la **Variable** y un valor de referencia o base.

$$\text{Variable(por Unidad)} \equiv \frac{\text{Valor Real de la Variable}}{\text{Valor Base de la Variable}}$$

2. Definición de SPU

- Esta definición *sumamente sencilla es una poderosa herramienta de cálculo.*
- Brinda un gran número de bondades; especialmente en el *análisis de sistemas de potencia.*
- Los cálculos en SP son efectuados en la forma de por unidad
- Todas las cantidades son expresadas como una *fracción decimal de valores de base que son seleccionada apropiadamente.*

2. Definición de SPU

- Los *valores base son arbitrarios*.
- Pero *deben mantenerse y respetarse las relaciones básicas* que rigen las leyes de los circuitos eléctricos.

- Cuando se selecciona una base, normalmente se toman como valores bases, los valores nominales de los generadores y de los transformadores.
- Si los valores nominales de los generadores y de los transformadores son diferentes, se toma como base a los valores nominales de voltaje y potencia aparente más repetidos.

3. Ventajas del SPU

- Las impedancias de los generadores y transformadores *varían en un estrecho margen sin que dependan del tamaño de los mismos*, por lo cual permiten *detectar errores de cálculo*.
- *Evita tener que referir las cantidades de un lado a otro de los transformadores.*
- *Evita el reconocer el tipo de conexión Δ ó Y en los transformadores.*
- *Evita el trabajo con cantidades muy grandes en potencias de diez.*

3. Ventajas del SPU

- *Seleccionadas convenientemente las bases en sistemas con varios transformadores, se puede ahorrar trabajo.*
- *Reduce el empleo de $\sqrt{3}$ en cálculos trifásicos.*
- *Los fabricantes especifican sus equipos, en por unidad de los valores.*
- *El sistema por unidad se presta por lo sencillo para el cálculo mediante computadores.*

4. Variables Eléctricas Básicas

- Las redes eléctricas de los sistemas de potencia, usualmente requiere de seis (06) variables, que están estrechamente relacionadas con la solución de la red.

Tabla 1. Variables de un Sistema Eléctrico

<i>Cantidad</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Dimensión</i>
Corriente	\bar{I}	Amperes
Voltaje	\bar{V}	Voltios
Potencia	$\bar{S} = P + jQ$	Volt-Amperes
Impedancia	$Z=R+jQ$	Ohmios
Factor de Potencia	$F.P, \cos \phi$	Adimensional
Tiempo	t	Segundos

4. Variables Eléctricas Básicas

- El tiempo t , es una variable que se omite cuando se hace uso de la representación fasorial
- Se pasa del dominio temporal al de la frecuencia.
- Cuatro de las variables son función de dos básicas, de manera que al fijar estas dos variables las otras quedan determinadas
- *Por ejemplo : si se conoce el voltaje y la corriente, se puede conocer la potencia o la impedancia, y lo opuesto también es cierto).*

$$S = VI^* \longleftrightarrow V = ZI$$

4. Variables Eléctricas Básicas

- Los valores por unidad para las cuatro variables básicas V , I , Z y S :

$$\bar{V}[p.u] = \frac{\bar{V}[\text{Volt}]}{V_{base}}$$

$$\bar{I}[p.u] = \frac{\bar{I}[\text{Amp}]}{I_{base}}$$

$$\bar{Z}[p.u] = \frac{\bar{Z}[\Omega]}{Z_{base}}$$

$$\bar{S}[p.u] = \frac{\bar{S}[\text{Volt} - \text{Amp}]}{S_{base}}$$

4. Variables Eléctricas Básicas

- Para que el sistema por unidad pueda ser correctamente empleado en los sistemas eléctricos de potencia; *deben satisfacer las identidades y leyes de circuitos eléctricos*; a saber:
 - Ley de Ohm.
 - Identidades de Potencia.
 - Leyes de Kirchoff.
 - Identidades Trifásicas.

4. Ejemplo

- Suponga que se está trabajando en el sistema de 400 kV (este voltaje corresponde al nominal U_n) en EDELCA, y tómesese ese valor como base.
- Si una de las barras en la Subestación (S/E) Santa Teresa se tiene un voltaje de 390 kV en un instante dado.
- Determinar el valor de este voltaje en el sistema por unidad $V[p.u]$.

$$\bar{V}[p.u] = \frac{\bar{V}[Volt]}{V_{base}}$$


4. Ejemplo

- La base es un valor arbitrario, pero se toma el voltaje nominal del sistema de EDELCA (400 kV) como base para este problema.

$$V_{base} = 400 \text{ kV (línea-línea, rms)}$$

- Tomando en cuenta la definición de la variable voltaje en el sistema por unidad resulta:

$$\bar{V} [p.u.] = \frac{\bar{V} [Volt]}{V_{base}}$$


$$V_{base} = 400 \text{ kV}$$

4. Ejemplo

$$V[p.u.] = \frac{V[Volt]}{V_{base}}$$

$$V[p.u.] = \frac{390kV}{400kV} = 0.975 p.u$$

$$V[p.u.] = 0.975 p.u$$

- *El voltaje en la barra de alta de la Subestación Santa Teresa está 2.5% por debajo de su valor nominal.*
- Se recuerda que se admite un margen de tolerancia de más o menos 5%

4.1 Ley de Ohm en el SPU

- Hay algunas propiedades elementales de la impedancia en el sistema por unidad.
- Sea la impedancia por unidad $Z[p.u]$ definida por:

$$Z[p.u] = \frac{Z[\Omega]}{Z_{base}} \quad \longrightarrow \quad Z[\Omega] = R[\Omega] + jX[\Omega]$$

$$Z[p.u] = \frac{R[\Omega] + jX[\Omega]}{Z_{base}}$$


$$Z[p.u] = R[p.u] + jX[p.u] \quad \longleftarrow \quad Z[p.u] = \frac{R[\Omega]}{Z_{base}} + j \frac{X[\Omega]}{Z_{base}}$$


4.1 Ley de Ohm en el SPU

$$Z[p.u] = R[p.u] + jX[p.u]$$

- De lo antes expuesto, se concluye que la impedancia base es única, común tanto a la parte resistiva como a la reactiva.

$$Z[p.u] = \frac{R[\Omega]}{Z_{base}} + j \frac{X[\Omega]}{Z_{base}}$$


$$R[p.u] = \frac{R[\Omega]}{Z_{base}}$$


$$X[p.u] = \frac{X[\Omega]}{Z_{base}}$$

4.1 Ley de Ohm en el SPU

- La Ley de Ohm establece que la diferencia de potencial (V) a través de un conductor es proporcional a la corriente a través del;
- Siendo la constante de proporcionalidad, la resistencia eléctrica R ;
- Operacionalmente en unidades reales, la Ley de Ohm queda expresada por:

$$\bar{V} [Volt] = Z [\Omega] \bar{I} [Amp]$$

4.1 Ley de Ohm en el SPU

- Por definición el voltaje, la corriente y la impedancia en el sistema por unidad son:

$$\bar{V}[p.u.] = \frac{\bar{V}[Volt]}{V_{base}} \quad Z[p.u.] = \frac{Z[\Omega]}{Z_{base}} \quad \bar{I}[p.u.] = \frac{\bar{I}[Amp]}{I_{base}}$$

$$\bar{V}[p.u.]V_{base} = Z[p.u.]Z_{base}\bar{I}[p.u.]I_{base}$$

- las cantidades por unidad cumplen con la Ley de Ohm:

$$\bar{V}[p.u.] = Z[p.u.]\bar{I}[p.u.] \quad Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}}$$

4.1 Ley de Ohm en el SPU

- Las cantidades por unidad cumplen con la Ley de Ohm.

$$\bar{V}[p.u.] = Z[p.u.] \bar{I}[p.u.]$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}}$$

4.2 Identidades de Potencia

- Se conoce que la potencia aparente (S) eléctrica monofásica por definición es el producto del voltaje (V) por la corriente (I) conjugada.

$$\bar{S}[\text{Volt} - \text{Amp}] = \bar{V}[\text{Volt}] \bar{I}^*[\text{Amp}]$$

$$\bar{S}[\text{Volt} - \text{Amp}] = P[\text{Watt}] + jQ[\text{Var}]$$





$$\bar{S}[p.u.] = \frac{\bar{S}[\text{Volt} - \text{Amp}]}{S_{base}}$$

4.2 Identidades de Potencia

$$\bar{S}[p.u] = \frac{P[\text{Watt}] + jQ[\text{Var}]}{S_{base}}$$

$$\bar{S}[p.u] = \frac{P[\text{Watt}]}{S_{base}} + j \frac{Q[\text{Var}]}{S_{base}}$$


$$P[p.u] = \frac{P[\text{Watt}]}{S_{base}}$$


$$Q[p.u] = \frac{Q[\text{Var}]}{S_{base}}$$

$$\bar{S}[p.u] = P[p.u] + jQ[p.u]$$

4.2 Identidades de Potencia

- Con esta demostración tan sencilla se demuestra que la base (S_{base}) para potencia es única, y común para la potencia activa y reactiva.


$$\bar{S}[p.u] = P[p.u] + jQ[p.u]$$

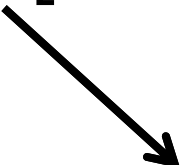
$$\left\{ \begin{array}{l} P[p.u] = \frac{P[Watt]}{S_{base}} \\ Q[p.u] = \frac{Q[Var]}{S_{base}} \end{array} \right.$$

4.2 Identidades de Potencia

- Se conoce que la potencia de un sistema eléctrico viene dado por el producto de la tensión y la corriente.
- Se cumple en variables reales que:

$$\bar{S}[\text{Volt} - \text{Amp}] = \bar{V}[\text{Volt}] \bar{I}^*[\text{Amp}]$$


$$\bar{V}[p.u.] = \frac{\bar{V}[\text{Volt}]}{V_{base}}$$


$$\bar{I}[p.u.] = \frac{\bar{I}[\text{Amp}]}{I_{base}}$$

4.2 Identidades de Potencia

$$\bar{S}[p.u.] = \frac{\bar{S}[Volt - Amp]}{S_{base}}$$

$$S[p.u.]S_{base} = V[p.u.]V_{base}I^*[p.u.]I_{base}^*$$

- esta relación es válida cuando los valores por unidad cumplen con la ley de potencia, si las siguientes relaciones son utilizadas:

$$\bar{S}[p.u.] = \bar{V}[p.u.]\bar{I}^*[p.u.]$$

$$S_{base} = V_{base}I_{base}^*$$

4.3. Leyes de Kirchoff SPU

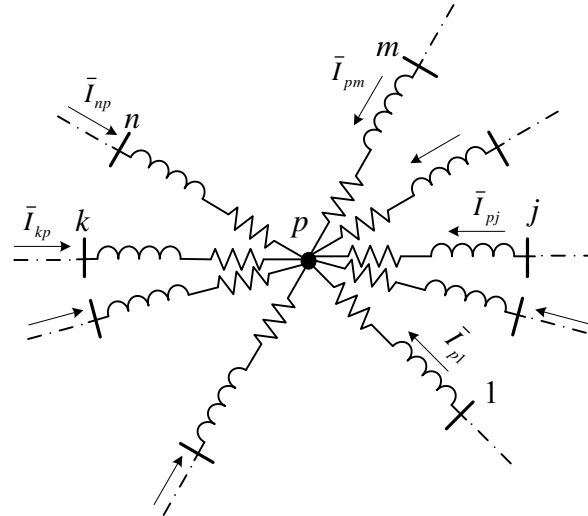
- Las leyes de *Robert Gustav Kirchoff* son las que *rigen el comportamiento de los circuitos eléctricos*,
- Son las relaciones que *permite el cálculo de las variables eléctricas*.
- Estas leyes son dos:
 - Ley de tensiones y
 - Ley de Corriente;
- Ambas se basan en el principio de *conservación de la energía y de la carga*.



Gustav Robert Kirchhoff
(12 de marzo de 1824 - 17 de octubre de 1887)

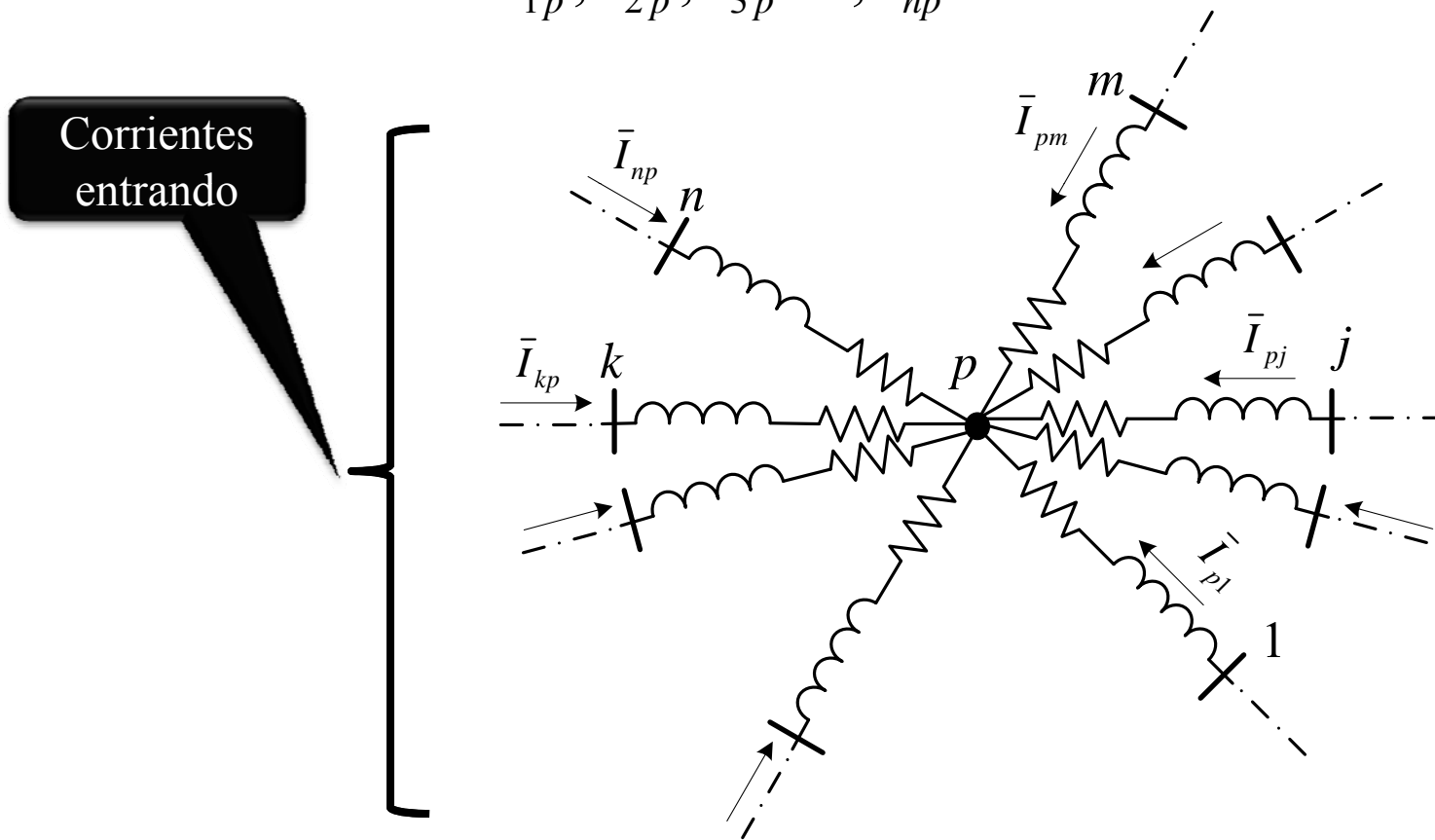
4.3. Leyes de Kirchoff SPU

- *Primera Ley de Kirchoff* también conocida como *Ley de las Corrientes*.
- Establece que la sumatoria algebraica de las intensidades de corriente en un nodo debe ser igual a cero, se debe verificar si las cantidades por unidad satisfacen esta ley.



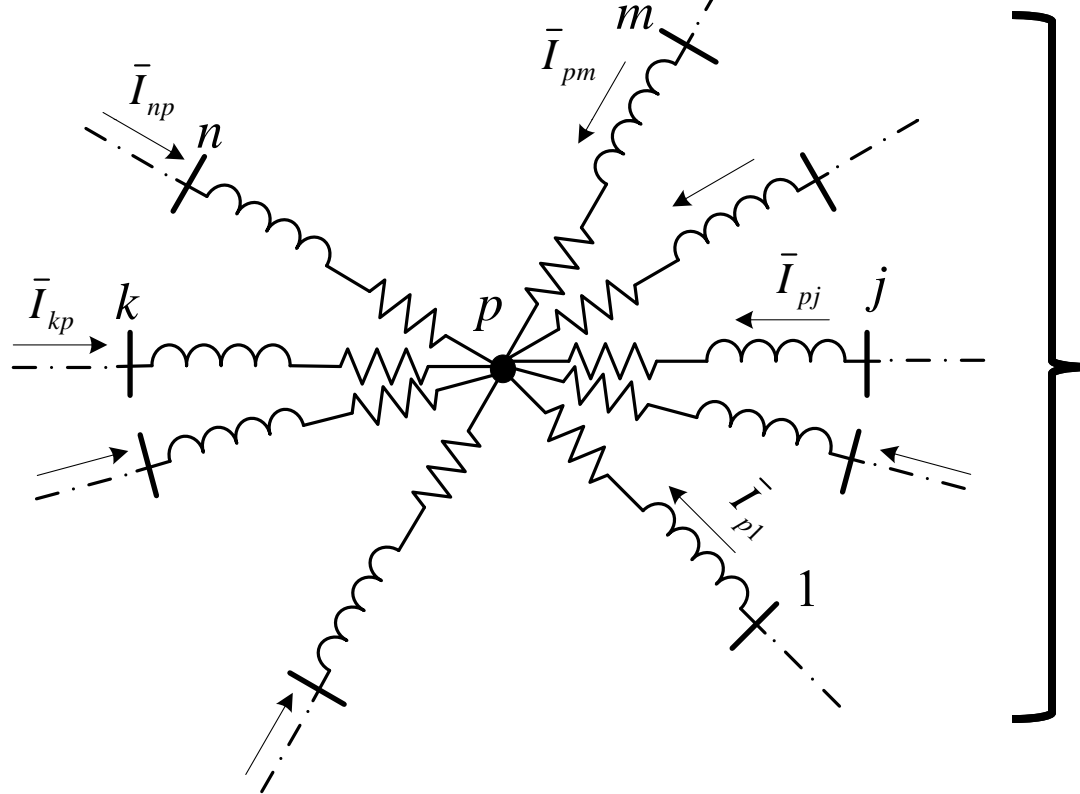
4.3. Leyes de Kirchoff SPU

- Suponga un nodo cualquiera p , donde entran n corrientes ($\bar{I}_{1p}, \bar{I}_{2p}, \bar{I}_{3p} \dots, \bar{I}_{np}$)



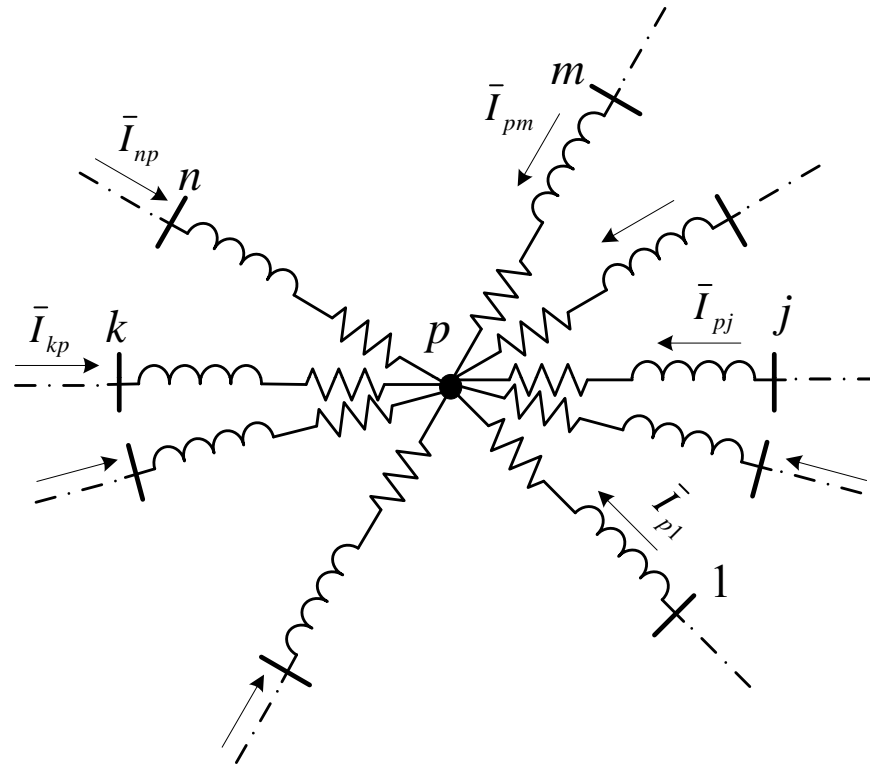
4.3. Leyes de Kirchoff SPU

- Suponga un nodo cualquiera p , donde salen m corrientes ($\bar{I}_{p1}, \bar{I}_{p2}, \bar{I}_{p3} \dots, \bar{I}_{pm}$)



Corrientes saliendo

4.3. Leyes de Kirchoff SPU



Nodo genérico con $n+m$ ramas

$$\sum_{i=1}^n \bar{I}_{ip} [Amp] = \sum_{j=1}^m \bar{I}_{pj} [Amp]$$

4.3. Leyes de Kirchoff SPU

$$\sum_{i=1}^n \bar{I}_{ip} [Amp] = \sum_{j=1}^m \bar{I}_{pj} [Amp]$$

- si se aplica la definición de sistema por unidad a ambos miembros se tiene:

$$\bar{I}_{ip} [p.u] = \frac{\bar{I}_{ip} [Amp]}{I_{basei}}$$

$$\bar{I}_{pj} [p.u] = \frac{\bar{I}_{pj} [Amp]}{I_{basej}}$$

- Sustituyendo las definiciones anteriores con los respectivos despejes:

$$\sum_{i=1}^n \bar{I}_{ip} [p.u] I_{basei} = \sum_{j=1}^m \bar{I}_{pj} [p.u] I_{basej}$$

4.3. Leyes de Kirchoff SPU

$$\sum_{i=1}^n \bar{I}_{ip} [p.u] I_{basei} = \sum_{j=1}^m \bar{I}_{pj} [p.u] I_{basej}$$

- para que se cumpla la ley de corrientes de Kirchoff en el sistema por unidad.

$$\sum_{i=1}^n \bar{I}_{ip} [p.u] = \sum_{j=1}^m \bar{I}_{pj} [p.u]$$

- se debe satisfacer:

$$I_{basei} = I_{basej}$$

4.3. Leyes de Kirchoff SPU

- Se concluye que los valores por unidad de la corriente cumplen con la primera ley de Kirchoff, *siempre y cuando las bases de las corrientes que entran y salgan sean iguales y únicas.*

$$I_{basei} = I_{basej}$$

$$\sum_{i=1}^n \bar{I}_{ip} [p.u] = \sum_{j=1}^m \bar{I}_{pj} [p.u]$$

4.3. Leyes de Kirchoff SPU

- Segunda Ley de Kirchoff o ley de tensiones
- Establece que la sumatoria de las caídas de tensión alrededor de un lazo cerrado debe ser igual a la sumatoria de las elevaciones de tensión.

$$\sum_{j=1}^n \bar{E} [Volt] = \sum_{j=1}^m \bar{V} [Volt]$$

- siendo E las caídas y V las elevaciones de voltaje

4.3. Leyes de Kirchoff SPU

$$\sum_{j=1}^n \bar{E}[\text{Volt}] = \sum_{j=1}^m \bar{V}[\text{Volt}]$$

- Si se aplica la definición de sistema por unidad a las elevaciones y a las caídas se tiene:

$$\bar{E}[\text{p.u.}] = \frac{\bar{E}[\text{Volt}]}{E_{base}}$$

$$\bar{V}[\text{p.u.}] = \frac{\bar{V}[\text{Volt}]}{V_{base}}$$

- Si se toman estas definiciones con los respectivos despejes y se insertan

$$\sum_{j=1}^n \bar{E}[\text{p.u.}] E_{base} = \sum_{j=1}^m \bar{V}[\text{p.u.}] V_{base}$$

4.3. Leyes de Kirchoff SPU

- Para que la ley de tensiones de Kirchoff cumpla con el sistema por unidad.

$$\sum_{j=1}^n \bar{E}[\text{p.u.}] = \sum_{j=1}^m \bar{V}[\text{p.u.}]$$

- Se debe verificar que:

$$E_{base} = V_{base}$$

- Los valores de voltaje en por unidad cumplen con la segunda Ley de Kirchoff, cuando *la base de tensión en un lazo cerrado es única.*

4.4. Identidades Trifásicas

- Los *sistemas trifásicos también pueden ser estudiados en cantidades por unidad.*
- En esta área es donde se emplea generalmente ya que *logra una gran cantidad de ventajas.*
- Todos los aspectos antes mencionados del sistema por unidad, son igualmente valederos en el caso en que se opere con sistemas trifásicos.
- Solo algunas salvedades aplican

4.4. Identidades Trifásicas

- Solo que realizando dos salvedades:
 - La *voltaje base es siempre un voltaje de línea a línea* (V_{L-L} , rms).
 - La *potencia aparente base debe tomarse siempre como potencia trifásica* ($S_{3\phi}$).

$$V_{base} = V_{linea-linea}$$

$$S_{base} = S_{3\phi}$$

4.4. Identidades Trifásicas

- Todas las relaciones circuitales válidas en circuitos trifásicos equilibrados se respetan.
- Por tanto, para una V_{base} expresada en kV y una S_{base} expresada en MVA se tiene:

$$\bar{S} [MVA] = \sqrt{3} \bar{V} [kV] \bar{I}^* [kA]$$

$$V_{base} = V_{linea-linea}$$

$$S_{base} = S_{3\phi}$$

4.4. Identidades Trifásicas

$$\bar{S}[MVA] = \sqrt{3}\bar{V}[kVolt]\bar{I}^*[kAmp]$$

- Si se despejan de las definiciones de las variables tensión, corriente y potencia en por unidad.

$$\bar{S}[p.u] = \frac{\bar{S}[Volt - Amp]}{S_{base}} \quad \bar{V}[p.u] = \frac{\bar{V}[Volt]}{V_{base}} \quad \bar{I}[p.u] = \frac{\bar{I}[Amp]}{I_{base}}$$
$$\bar{S}[p.u]S_{base} = \sqrt{3}\bar{V}[p.u]V_{base}\bar{I}^*[kAmp]I_{base}^*$$

- De modo que para que se mantenga el hecho de que la potencia en por unidad es el producto de la tensión y la corriente conjugada por unidad.

4.4. Identidades Trifásicas

$$\bar{S}[p.u]S_{base} = \sqrt{3}\bar{V}[p.u]V_{base}\bar{I}^*[p.u]I_{base}^*$$

- De modo que para que se mantenga el hecho de que la potencia en por unidad es el producto de la tensión y la corriente conjugada por unidad.

$$\bar{S}[p.u.] = \bar{V}[p.u.]\bar{I}^*[p.u.]$$

- Las bases deben satisfacer.

$$S_{base} = \sqrt{3}V_{base}I_{base}$$

4.4. Identidades Trifásicas

$$\bar{S} [p.u.] = \bar{V} [p.u.] \bar{I}^* [p.u.] \qquad S_{base} = \sqrt{3} V_{base} I_{base}$$

- Resulta fácilmente demostrable con el uso de la ecuación dos ecuaciones de uso muy común.

$$Z_{base} [\Omega] = \frac{|V_{base}|^2 [kVolt]}{S_{base}^* [MVA]}$$

$$I_{base} [kAmp] = \frac{S_{base} [MVA]}{\sqrt{3} V_{base} [kVolt]}$$

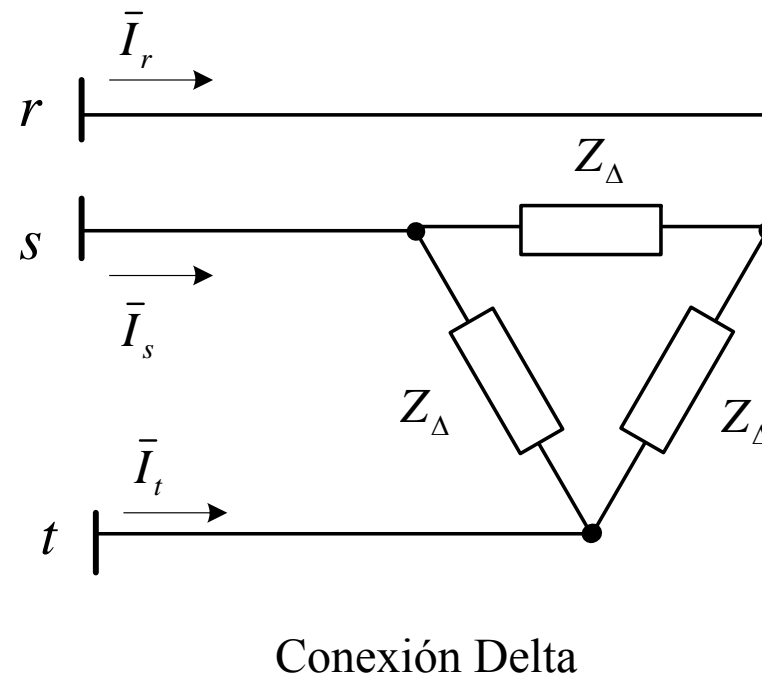
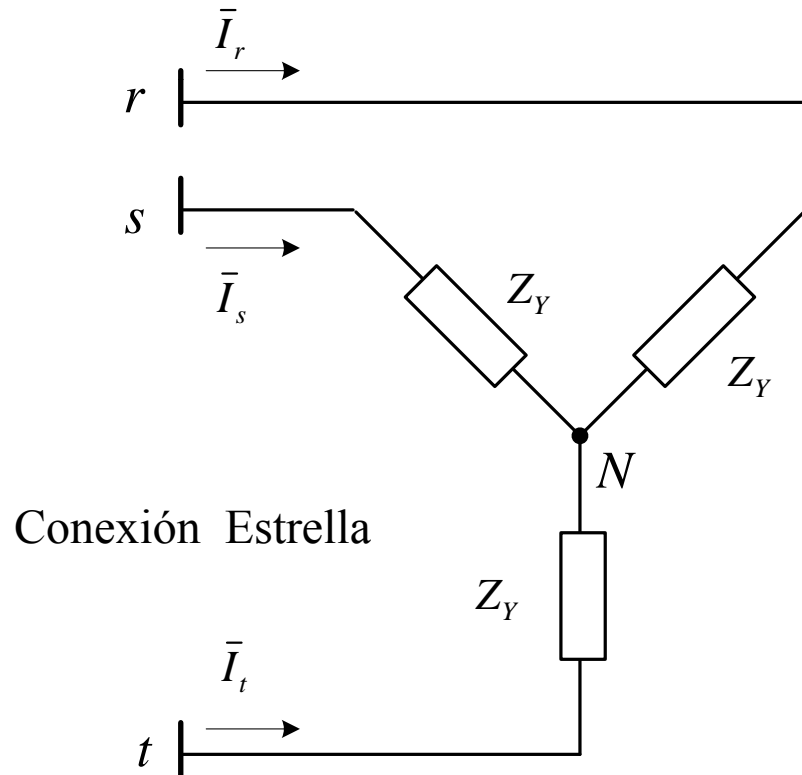
4.4. Identidades Trifásicas

- Es de uso muy común para determinar la impedancia base cuando se conocen las bases de tensión y potencia.

$$Z_{base} [\Omega] = \frac{|V_{base}|^2 [kVolt]}{S_{base}^* [MVA]}$$

4.4. Identidades Trifásicas

- Las cargas trifásicas simétricas dentro de los sistemas de potencia pueden estar conectadas en estrella (Y) o en delta (Δ).

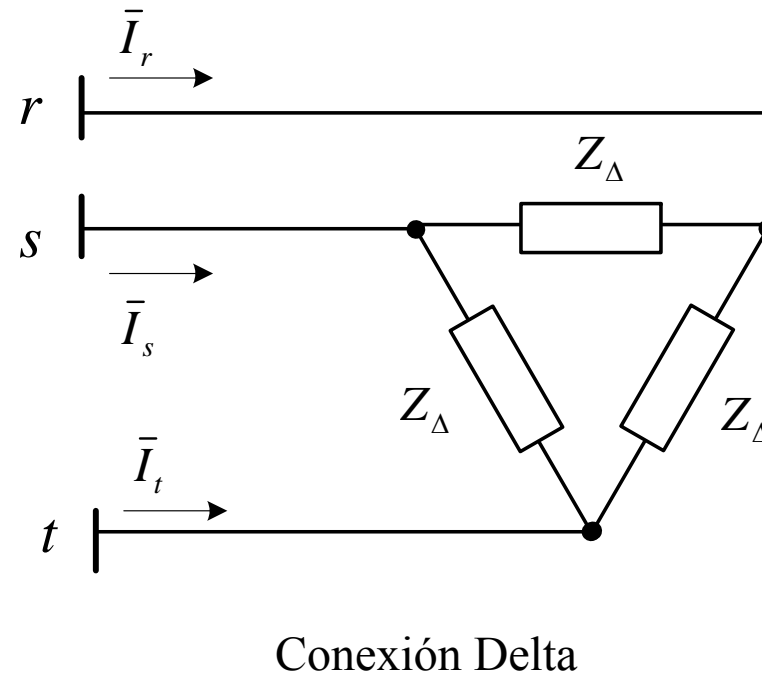
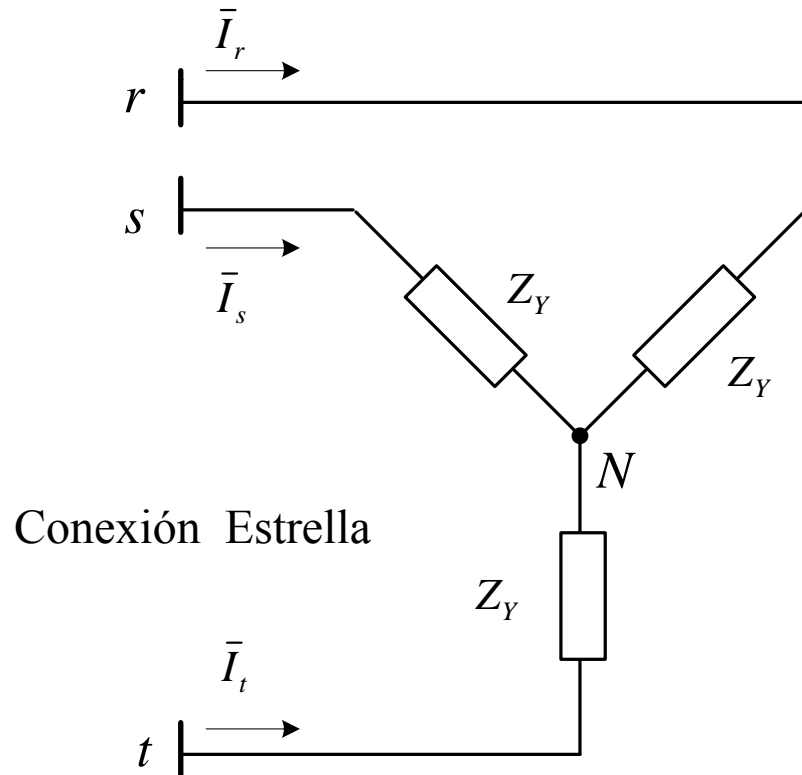


4.4. Identidades Trifásicas

- Considérese dos cargas trifásicas simétricas:

$$Z_Y = R_Y + jX_Y$$

$$Z_{\Delta} = R_{\Delta} + jX_{\Delta}$$



4.4. Identidades Trifásicas

- Si se aplica la definición de sistema por unidad a las impedancias de ambas cargas trifásicas simétricas.

$$Z[p.u.] = \frac{Z[\Omega]}{Z_{base}}$$

4.4. Identidades Trifásicas

Estrella

$$Z_Y [p.u.] = \frac{Z_Y [\Omega]}{Z_{baseY}}$$

$$Z_{baseY} = \frac{(V_{base} [línea - neutro])^2}{S_{base1\phi}} = \frac{\left(\frac{V_{base}}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{S_{base}}{3}}$$

$$Z_{baseY} = \frac{\frac{V_{base}^2}{3}}{\frac{S_{base}}{3}}$$

$$Z_{baseY} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}}$$

Delta

$$Z_{\Delta} [p.u.] = \frac{Z_{\Delta} [\Omega]}{Z_{base\Delta}}$$

$$Z_{base\Delta} = \frac{(V_{base} [línea - línea])^2}{S_{base1\phi}} = \frac{(V_{base})^2}{\frac{S_{base}}{3}}$$

$$Z_{base\Delta} = \frac{V_{base}^2}{\frac{S_{base}}{3}}$$

$$Z_{base\Delta} = \frac{3V_{base}^2}{S_{base}}$$

4.4. Identidades Trifásicas

$$Z_{baseY} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}}$$

$$Z_{base\Delta} = \frac{3V_{base}^2}{S_{base}}$$

- Si se compara las ecuaciones:

$$Z_{base\Delta} = 3Z_{baseY}$$

- Tomando en cuenta que para sistemas trifásicos equilibrados la impedancia en unidades reales de *la conexión delta es tres veces la impedancia en unidades reales de la impedancia en estrella.*

$$Z_{\Delta} [\Omega] = 3Z_Y [\Omega]$$

4.4. Identidades Trifásicas

$$Z_{\Delta}[\Omega] = 3Z_Y[\Omega] \qquad Z_{base\Delta} = 3Z_{baseY}$$

- En cada una de las definiciones de impedancias para cargas simétricas en por unidad.

$$Z_Y[p.u] = \frac{Z_Y[\Omega]}{Z_{baseY}} \qquad Z_{\Delta}[p.u] = \frac{Z_{\Delta}[\Omega]}{Z_{base\Delta}}$$

- Resulta:

$$Z_{\Delta}[p.u] = Z_Y[p.u]$$

4.4. Identidades Trifásicas

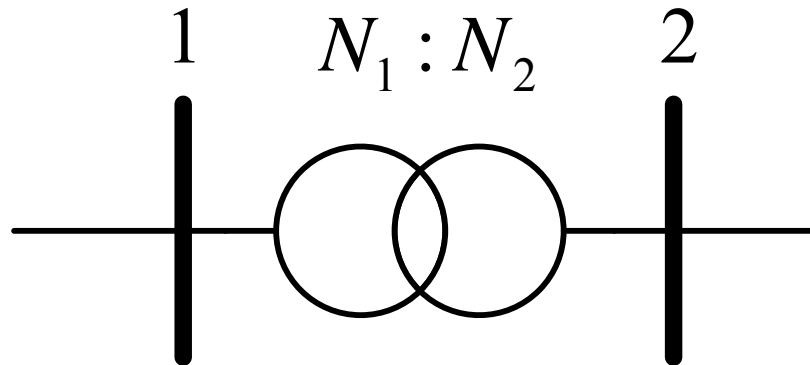
$$Z_{\Delta}[p.u] = Z_Y[p.u]$$

- Las cantidades por unidad se elimina la equivalencia que existe entre sistemas conectados en delta o en estrella; siempre que las bases cumplan con la equivalencia entre delta y estrella.

$$Z_{base\Delta} = 3Z_{baseY}$$

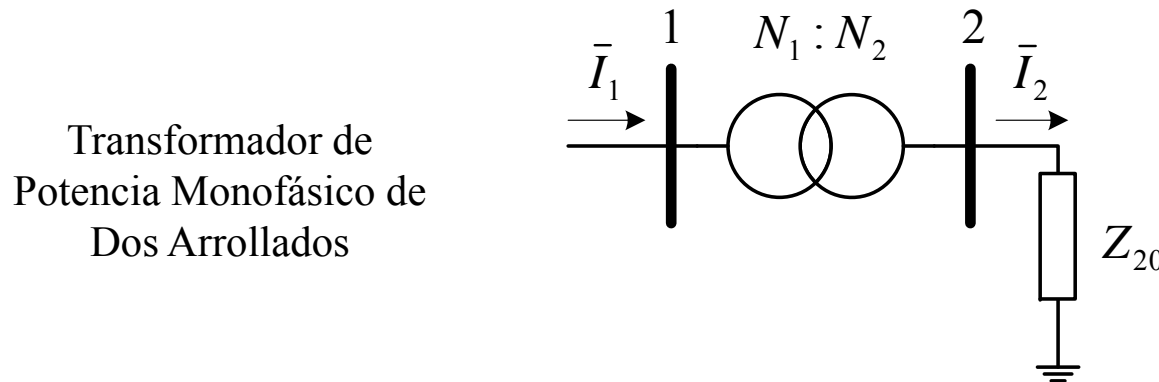
5. Transformadores Monofásicos

- Los transformadores son uno de los elementos dentro del sistema de potencia de mayor uso.
- Se le dedica especial interés en su trato dentro del sistema por unidad.



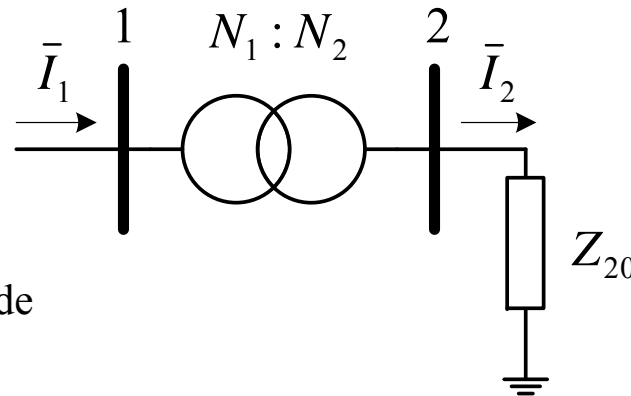
5. Transformadores Monofásicos

- Suponga un *transformador de potencia monofásico, ideal, de dos arrollados*.
- Se considera ideal, no posee asociado pérdidas o reactancia interna
- Resultando en forma explícita la relación de transformación es $N_1:N_2$,
- El cual es conectado a una carga de impedancia Z_{20} .



5. Transformadores Monofásicos

Transformador de
Potencia Monofásico de
Dos Arrollados



- Satisface que el cociente de los voltajes primario a secundario (V_1/V_2) es numéricamente igual al cociente del número de vueltas primario y secundario (N_1/N_2).

$$\frac{V_1[\text{Volt}]}{V_2[\text{Volt}]} = \frac{N_1[\text{Vueltas}]}{N_2[\text{Vueltas}]}$$

5. Transformadores Monofásicos

$$\frac{V_1[\text{Volt}]}{V_2[\text{Volt}]} = \frac{N_1[\text{Vueltas}]}{N_2[\text{Vueltas}]}$$

- Si se selecciona las bases de tensión de manera que cumplan con la relación de transformación.

$$\frac{V_{base1}}{V_{base2}} = \frac{N_1}{N_2}$$

- siendo:

V_{1base} : Voltaje base en la barra 1

V_{2base} : Voltaje base en la barra 2

5. Transformadores Monofásicos

$$\frac{V_1[Volt]}{V_2[Volt]} = \frac{N_1[Vueltas]}{N_2[Vueltas]} \qquad \frac{V_{base1}}{V_{base2}} = \frac{N_1}{N_2}$$

- Si se procede a igualar las ecuaciones:

$$\frac{V_1[Volt]}{V_2[Volt]} = \frac{V_{base1}}{V_{base2}} \quad \longrightarrow \quad \frac{\bar{V}_1[Volt]}{V_{base1}} = \frac{\bar{V}_2[Volt]}{V_{base2}}$$

- En atención a la definición de los valores por unidad, en cada una de las barras del transformador:

$$\bar{V}_1[p.u] = \frac{\bar{V}_1[Volt]}{V_{base1}} \qquad \bar{V}_2[p.u] = \frac{\bar{V}_2[Volt]}{V_{base2}}$$

5. Transformadores Monofásicos

$$\frac{\bar{V}_1[Volt]}{V_{base1}} = \frac{\bar{V}_2[Volt]}{V_{base2}}$$

$$\bar{V}_1[p.u.] = \frac{\bar{V}_1[Volt]}{V_{base1}} \qquad \bar{V}_2[p.u.] = \frac{\bar{V}_2[Volt]}{V_{base2}}$$

- resultando evidente que:

$$\bar{V}_1[p.u.] = \bar{V}_2[p.u.]$$

5. Transformadores Monofásicos

$$\bar{V}_1 [p.u.] = \bar{V}_2 [p.u.]$$

- Se concluye que cuando se expresan las tensiones de un transformador en el sistema por unidad *se elimina la relación de transformación*.
- Esto solo es cierto cuando las bases cumplen con la relación de transformación.

$$\frac{V_1 [Volt]}{V_2 [Volt]} = \frac{V_{base1}}{V_{base2}}$$

5. Transformadores Monofásicos

- Por otra parte, en un transformador monofásico, se cumple que las corrientes satisfacen a la relación de transformación:

$$\frac{I_2 [Amp]}{I_1 [Amp]} = \frac{N_1 [Vueltas]}{N_2 [Vueltas]}$$

- Si las bases de corriente son seleccionadas convenientemente para que satisfagan la relación de transformación:

$$\frac{I_{base2}}{I_{base1}} = \frac{N_1}{N_2}$$

5. Transformadores Monofásicos

- entonces igualando las expresiones:

$$\frac{\bar{I}_1[Amp]}{\bar{I}_2[Amp]} = \frac{I_{base1}}{I_{base2}} \quad \longrightarrow \quad \frac{\bar{I}_1[Amp]}{I_{base1}} = \frac{\bar{I}_2[Amp]}{I_{base2}}$$

- Si se toma en cuenta la definición de los valores por unidad para la corriente, en cada una de las barras del transformador:

$$\bar{I}_1[p.u] = \frac{\bar{I}_1[Amp]}{I_{base1}} \qquad \bar{I}_2[p.u] = \frac{\bar{I}_2[Amp]}{I_{base2}}$$

5. Transformadores Monofásicos

$$\frac{\bar{I}_1[Amp]}{I_{base1}} = \frac{\bar{I}_2[Amp]}{I_{base2}}$$
$$\bar{I}_1[p.u.] = \frac{\bar{I}_1[Amp]}{I_{base1}} \qquad \bar{I}_2[p.u.] = \frac{\bar{I}_2[Amp]}{I_{base2}}$$

- Resultando:

$$\bar{I}_1[p.u.] = \bar{I}_2[p.u.]$$

5. Transformadores Monofásicos

- Si se eligen las bases de corrientes en ambos lados del transformador para que cumplan con la relación de transformación, el valor de corriente en el sistema por unidad de un lado y otro del transformador son iguales.

$$\frac{\bar{I}_1 [Amp]}{I_{base1}} = \frac{\bar{I}_2 [Amp]}{I_{base2}} \qquad \bar{I}_1 [p.u.] = \bar{I}_2 [p.u.]$$

5. Transformadores Monofásicos

- Nótese que el hecho de que en los valores de tensión y corriente en el sistema por unidad, *se elimina el acoplamiento magnético*.

$$\frac{V_1[\text{Volt}]}{V_2[\text{Volt}]} = \frac{V_{base1}}{V_{base2}} \quad \bar{V}_1[p.u.] = \bar{V}_2[p.u.]$$

$$\frac{\bar{I}_1[\text{Amp}]}{I_{base1}} = \frac{\bar{I}_2[\text{Amp}]}{I_{base2}} \quad \bar{I}_1[p.u.] = \bar{I}_2[p.u.]$$

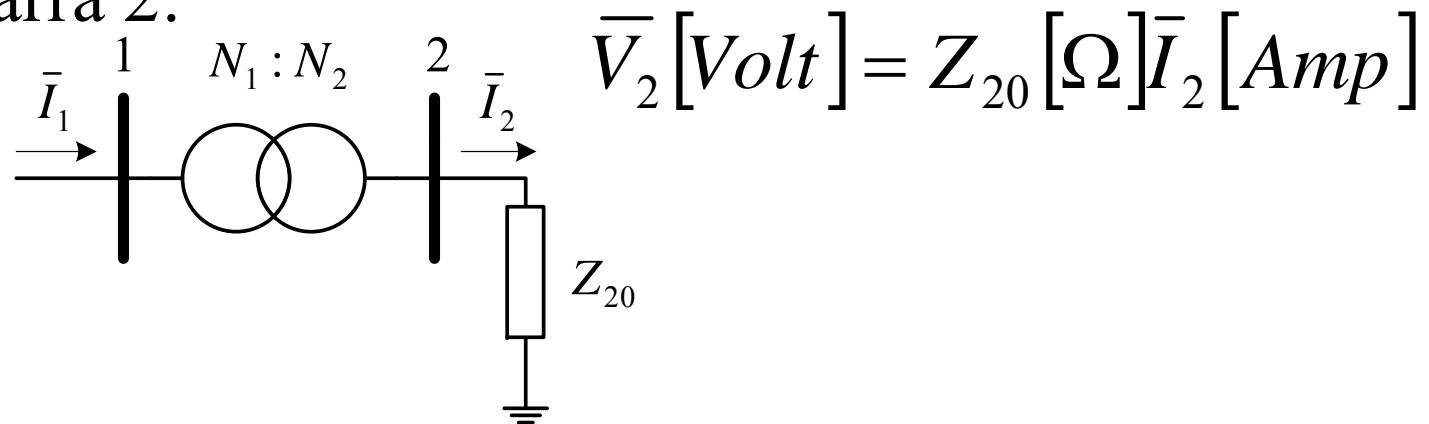
5. Transformadores Monofásicos

- En un transformador monofásico, se puede seleccionar como valores bases arbitrarias en cualquiera de las combinaciones de corriente y tensión; pero *los restantes son calculados mediante el empleo de la relación de transformación.*

$$\frac{V_{base1}}{V_{base2}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_{base2}}{I_{base1}}$$

5. Transformadores Monofásicos

- Considérese que el transformador de potencia de dos arrollados monofásico posee una carga Z_{20} conectada en la barra 2:



- Si se asume que la impedancia Z_{20} referida al primario es Z_{10} , entonces es valedera la aplicación de la ley de Ohm en unidades reales al primero.

5. Transformadores Monofásicos

- Si se asume que la impedancia Z_{20} referida al primario es Z_{10} , entonces es valedera la aplicación de la ley de Ohm en unidades reales al primero.

$$\bar{V}_1 [Volt] = Z_{10} [\Omega] \bar{I}_1 [Amp]$$

$$\frac{\bar{V}_1 [Volt]}{V_{base1}} = \frac{\bar{V}_2 [Volt]}{V_{base2}}$$

$$\frac{Z_{10} [\Omega] \bar{I}_1 [Amp]}{V_{base1}} = \frac{Z_{20} [\Omega] \bar{I}_2 [Amp]}{V_{base2}}$$

5. Transformadores Monofásicos

$$\bar{I}_1 [Amp] = \bar{I}_1 [p.u.] I_{base1}$$

$$\bar{I}_2 [Amp] = \bar{I}_2 [p.u.] I_{base2}$$

$$\frac{Z_{10} [\Omega] \bar{I}_1 [p.u.] I_{base1}}{V_{base1}} = \frac{Z_{20} [\Omega] \bar{I}_2 [p.u.] I_{base2}}{V_{base2}}$$

$$\bar{I}_1 [p.u.] = \bar{I}_2 [p.u.]$$

$$\frac{Z_{10} [\Omega] \bar{I}_1 [p.u.] I_{base1}}{V_{base1}} = \frac{Z_{20} [\Omega] \bar{I}_2 [p.u.] I_{base2}}{V_{base2}}$$

5. Transformadores Monofásicos

- Si:
$$\frac{\bar{I}_1 [Amp]}{I_{base1}} = \frac{\bar{I}_2 [Amp]}{I_{base2}}$$

- Finalmente:

$$\frac{Z_{10} [\Omega]}{\begin{pmatrix} V_{base1} \\ I_{base1} \end{pmatrix}} = \frac{Z_{20} [\Omega]}{\begin{pmatrix} V_{base2} \\ I_{base2} \end{pmatrix}} \quad \Rightarrow \quad \frac{Z_{10} [\Omega] \bar{I}_1 [p.u.]}{\begin{pmatrix} V_{base1} \\ I_{base1} \end{pmatrix}} = \frac{Z_{20} [\Omega] \bar{I}_2 [p.u.]}{\begin{pmatrix} V_{base2} \\ I_{base2} \end{pmatrix}}$$

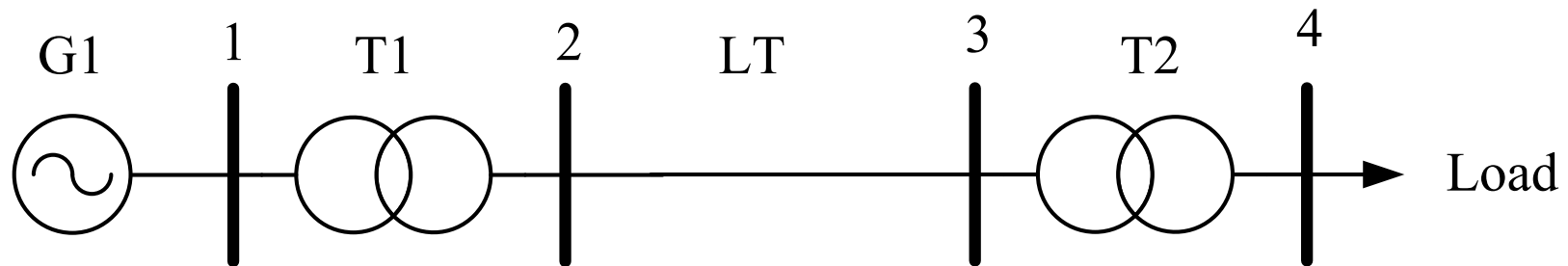
$$\frac{Z_{10} [\Omega]}{Z_{10base}} = \frac{Z_{20} [\Omega]}{Z_{20base}} \quad \Rightarrow \quad Z_{10} [p.u.] = Z_{20} [p.u.]$$

5. Transformadores Monofásicos

- Se deduce que la impedancia Z_{20} [Ω] referida al lado primario Z_{10} [Ω] son iguales en cantidades por unidad, demostrando que en el sistema por unidad las impedancias [p.u] son iguales no importa de que lado del transformador se expresen.

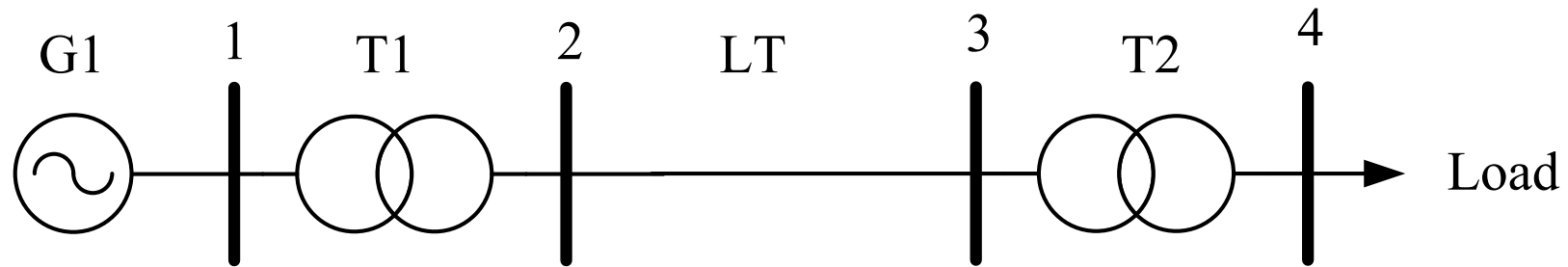
6. Sistemas Monofásico con Varios Transformadores

- El sistema de por unidad es particularmente útil cuando se trabaja con *sistemas con varias estaciones de transformación*.
- Suponga que se tiene un sistema monofásico como el de la figura, con *dos transformadores ideales y una línea de transmisión*.



Sistema de Potencia con dos transformadores

6. Sistemas Monofásico con Varios Transformadores

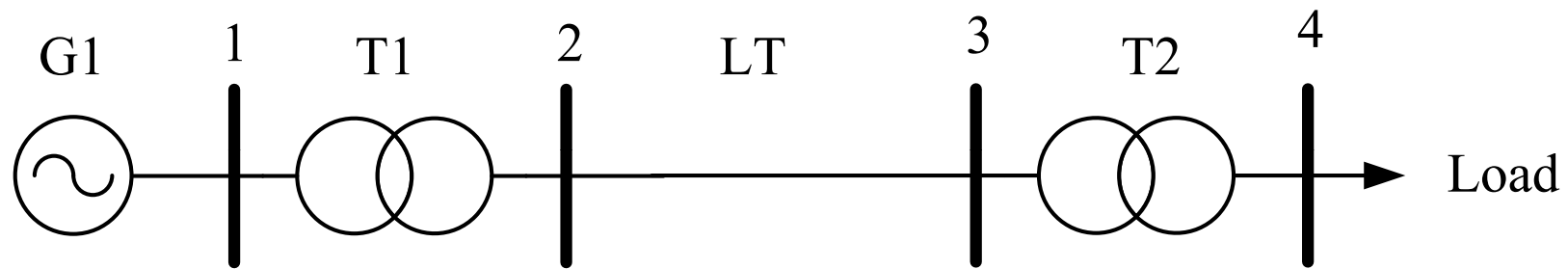


Sistema de Potencia con dos transformadores

- Se disponen de los datos nominales de los transformadores, de la línea de transmisión y de la carga. Se conocen de cada elemento:
 - T1 : S_{1n} ; V_{1n} / V_{2n}
 - T2 : S_{2n} ; V_{3n} / V_{4n}
 - L.T : Z_{23} [Ω]
 - Load : Z_L [Ω]

6. Sistemas Monofásico con Varios Transformadores

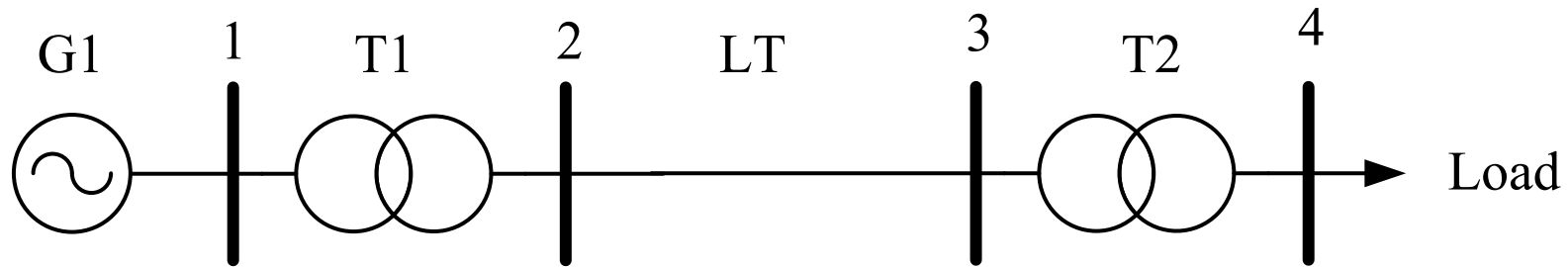
- Se desea calcular el valor del voltaje y la impedancia en la barra 1 (V_1, Z_{10}) en por unidad.



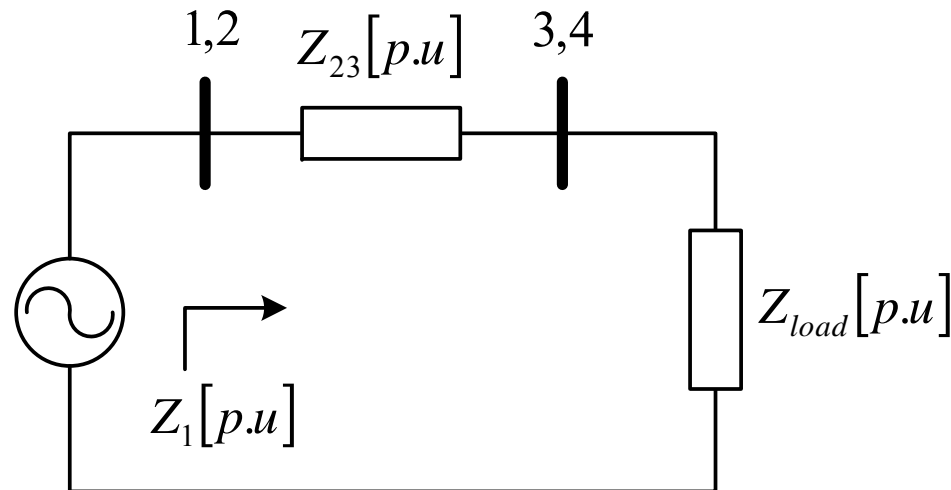
6. Sistemas Monofásico con Varios Transformadores

- Para trabajar el sistema de potencia de la figura en por unidad se procede de la siguiente forma:
- Se seleccionan dos valores base arbitrarios; y se calculan el resto.
 - *Por ejemplo:* se toma la tensión V_{Ibase} y una potencia S_{base} , esta capacidad puede ser la de alguno de los transformadores o bien un valor arbitrario el cual va a ser común para todo el sistema.
- Se delimitan las diferentes zonas para las cuales los valores bases son comunes y dependen del número de transformadores.
- Se determinan los valores bases desconocidos.

6. Sistemas Monofásico con Varios Transformadores



Sistema de Potencia con dos transformadores

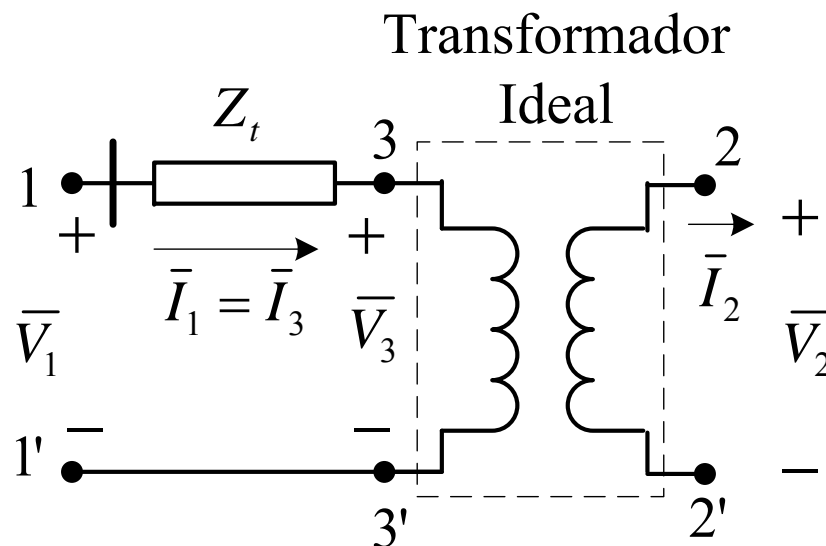


Modelo equivalente de impedancia

$$Z_1 [p.u] = Z_{23} [p.u] + Z_4 [p.u]$$

7. Transformadores Reales

- En el transformador de potencia real hay que tomar en cuenta para el análisis en sistema por unidad los siguientes aspectos:
 - La corriente de excitación.
 - La impedancia equivalente.

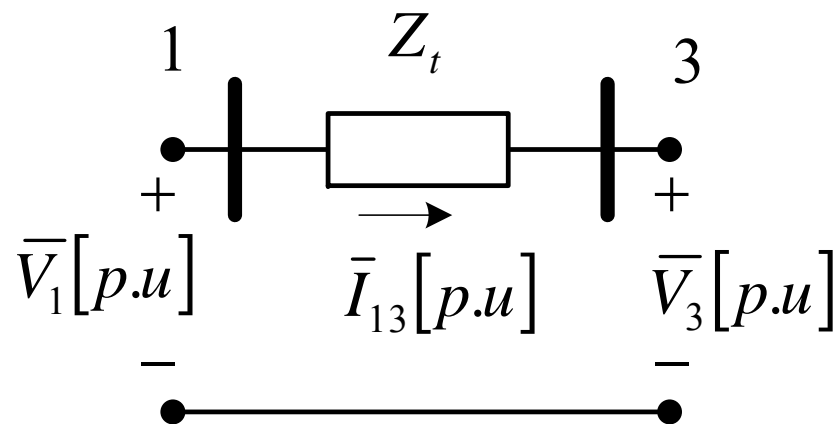


7. Transformadores Reales

- Si se seleccionan dos valores bases V_{base1} y I_{base1} , empleando el sistema por unidad se tiene que:

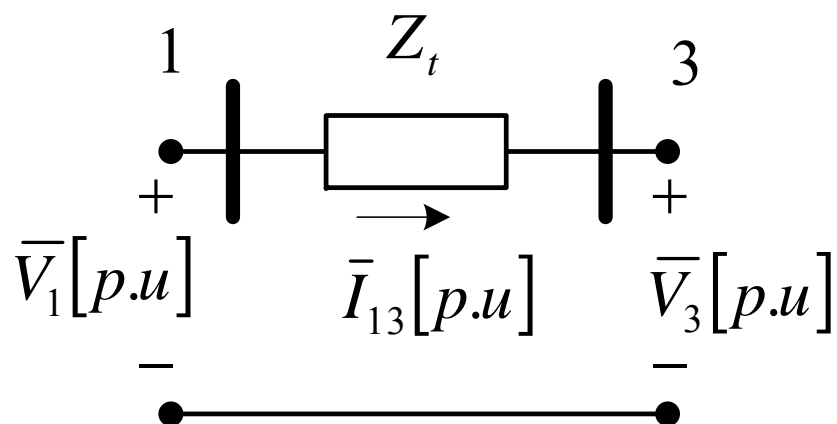
$$V_3 [p.u.] = V_2 [p.u.]$$

- Entonces el circuito equivalente para el transformador 1ϕ real se puede representar por:



Modelo equivalente para un transformador real en el sistema por unidad

7. Transformadores Reales



Modelo equivalente para un transformador real en el sistema por unidad

- Se cumple:

$$V_1 [p.u.] = V_3 [p.u.] + I_1 [p.u.] Z_T [p.u.]$$

- En los transformadores el valor de la impedancia del transformador se puede obtener de las características nominales del mismo.

7. Transformadores Reales

- La placa de especificaciones del transformador, traen el valor de Z_T .
- Normalmente el fabricante específico este valor en % dando R , X en potencia.

$$R_{eq} [\%] = \frac{R_{eq} [\Omega] I_{nominal}}{V_{nominal}} \times 100\%$$
$$X_{eq} [\%] = \frac{X_{eq} [\Omega] I_{nominal}}{V_{nominal}} \times 100\%$$

- El porcentaje representa la caída de tensión que se produce al circular por R_{eq} ó X_{eq} la corriente nominal del transformador expresada en porcentaje de la tensión nominal, de acuerdo al lado considerado.

7. Transformadores Reales

- Si por ejemplo se toma como base la corriente y el voltaje nominal como bases resulta:

$$R_{eq} [\%] = \frac{R_{eq} [\Omega] I_{nominal}}{V_{nominal}} \times 100\%$$

$$X_{eq} [\%] = \frac{X_{eq} [\Omega] I_{nominal}}{V_{nominal}} \times 100\%$$

$$X_{eq} [\%] = X_{eq} [\Omega] \times \frac{100\%}{Z_{base}}$$

Ejemplo 1

- Sea un transformador de potencia monofásico de 50MVA, 11/132 kV y reactancia igual $X=10\%$. ¿Qué significado tiene la esta reactancia?
- *Resolución*
- El significado físico de este 10% es que la caída de tensión en X_{eq} cuando el transformador está trabajando a plena es el 10% de la tensión nominal (13.2 kV), referida al secundario.

Ejemplo 2

- Dado un transformador monofásico con los siguientes datos de placa: 50 MVA, 11/132 kV, $X_1 = 0.242 \Omega$ y $X_2 = 34.848 \Omega$ (visto del lado de alta). Determinar el valor de la reactancia porcentual vista de ambos lados.

Resolución

- La corriente nominal en ambos lados del transformador es:

$$I_{1n} = \frac{50MVA}{11kV} = 4545.45Amp$$

$$I_{2n} = \frac{50MVA}{132kV} = 378.78Amp$$

Ejemplo 2

- Se determinan los valores de reactancia en porcentaje para ambos lados del transformador:

$$X_{alta} [\%] = X_2 [\Omega] \frac{I_{1n}}{V_{1n}} 100\%$$

$$X_{alta} [\%] = 34.848\Omega \frac{378.78 \text{ Amp}}{132 \text{ kV}} 100\%$$

$$X_{alta} = 10\%$$

$$X_{baja} [\%] = X_1 [\Omega] \frac{I_{2n}}{V_{2n}} 100\%$$

$$X_{baja} [\%] = 0.242\Omega \frac{4545.45 \text{ Amp}}{11 \text{ kV}} 100\%$$

$$X_{baja} = 10\%$$

Ejemplo 2

- La reactancia del lado de alta y baja es igual, un resultado que era de esperarse por teoría.

$$X_{alta} = 10\%$$

$$X_{baja} = 10\%$$

8. Cambios de Base

- Con frecuencia ciertos parámetros de un sistema son expresados en valor por unidad pero con valores de base diferentes a los seleccionados en el sistema
- Se hace necesario efectuar un cambio de base.
- Dado que las impedancias de cualquier parte del sistema tienen que ser expresadas respecto a la misma impedancia base, al hacer los cálculos, es preciso tener un medio para pasar las impedancias de una base a otra.

8. Cambios de Base

- Se conoce que la impedancia por unidad de un elemento de circuitos es:

$$Z[p.u] = Z[\Omega] \frac{S_{base}}{V_{base}^2}$$

- Las unidades típicas en el análisis de sistemas de potencia:

$$Z[p.u] = Z[\Omega] \frac{MVA_{base}}{kV_{base}^2}$$

8. Cambios de Base

- Sean :
 - $Z_1[p.u]$: Impedancia en p.u considerando los valores de base 1
 - $Z_2[p.u]$: Impedancia en p.u considerando los valores de base 2
 - S_{base1}, V_{base1} Valores base para $Z_1[p.u]$
 - S_{base2}, V_{base2} Valores base para $Z_2[p.u]$
- Se tiene :

$$Z_2[p.u] = Z_1[p.u] \frac{S_{base2}}{S_{base1}} \left(\frac{V_{base1}}{V_{base2}} \right)^2$$

8. Cambios de Base

$$Z_2 [p.u] = Z_1 [p.u] \frac{S_{base2}}{S_{base1}} \left(\frac{V_{base1}}{V_{base2}} \right)^2$$

- Esta ecuación no tiene ninguna relación con la transferencia del valor de impedancia de un lado a otro de un transformador.

Ejemplo 1

- La reactancia X de un generador es 0.20 por unidad basada en los datos de placa del generador: 13.2 kV, 30 MVA.
- La base para los cálculos es 13.8 kV, 50 MVA.
- Determinar el valor de X para las nuevas bases.

Resolución

- Considerando la ecuación de cambio de bases:

$$X_{new} [p.u] = X_{old} [p.u] \frac{S_{new}}{S_{old}} \left(\frac{V_{old}}{V_{new}} \right)^2$$

Ejemplo 1

- Considerando la ecuación de cambio de

- bases:
$$X_{new} [p.u] = X_{old} [p.u] \frac{S_{new}}{S_{old}} \left(\frac{V_{old}}{V_{new}} \right)^2$$

- En este caso los valores *old* son aquellos en los que estaba definido originalmente la reactancia y los *new* son aquellos a los que se quiere referir el valores por unidad de la reactancia.

$$X_{old} = 0.20 p.u \quad V_{old} = 13.2kV \quad S_{old} = 30MVA$$

$$X_{new} = ? \quad V_{new} = 13.8kV \quad S_{new} = 50MVA$$

Ejemplo 1

$$X_{old} = 0.20 p.u \quad V_{old} = 13.2kV \quad S_{old} = 30MVA$$

$$X_{new} = ? \quad V_{new} = 13.8kV \quad S_{new} = 50MVA$$

- Sustituyendo los respectivos valores se obtiene:

$$X_{new} [p.u] = 0.20 p.u \frac{50MVA}{30MVA} \left(\frac{13.2kV}{13.8kV} \right)^2$$

$$X_{new} = 0.306 p.u$$

- Este valor esta referido en las bases de 13.8 kV y 50 MVA.

Ejemplo 2

- Supóngase que se tiene un transformador de 186.6 MVA, 69/220 kV, y reactancia de 8%. Determinar el valor de la reactancia expresada en las bases de 230 kV, 100 MVA.

Resolución

- Se conoce que el fabricante entrega el valor de la reactancia de este transformador en porcentaje (cien veces el valor por unidad), de los datos de placa.

$$X_{old} = 0.08 p.u \quad V_{old} = 220kV \quad S_{old} = 186.6MVA$$

Ejemplo 2

- Un transformador ha de tener tantas bases de voltaje corriente, e impedancia como devanados tenga el mismo.
- En este caso, la base de voltaje se refiere al lado de alta.

$$X_{new} [p.u] = X_{old} [p.u] \frac{S_{new}}{S_{old}} \left(\frac{V_{old}}{V_{new}} \right)^2$$

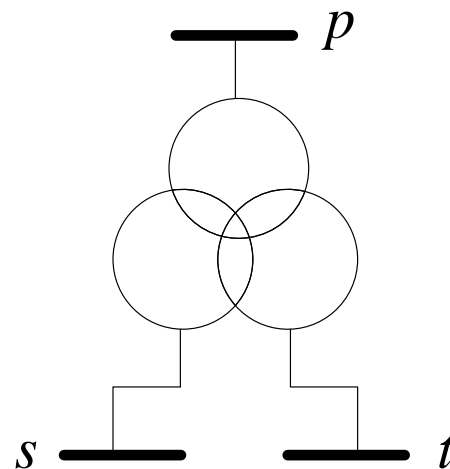
- Sustituyendo los respectivos valores:

$$X_{new} [p.u] = 0.08 p.u \frac{100 MVA}{186.6 MVA} \left(\frac{220 kV}{230 kV} \right)^2$$

$$X_{new} = 0.03922 p.u$$

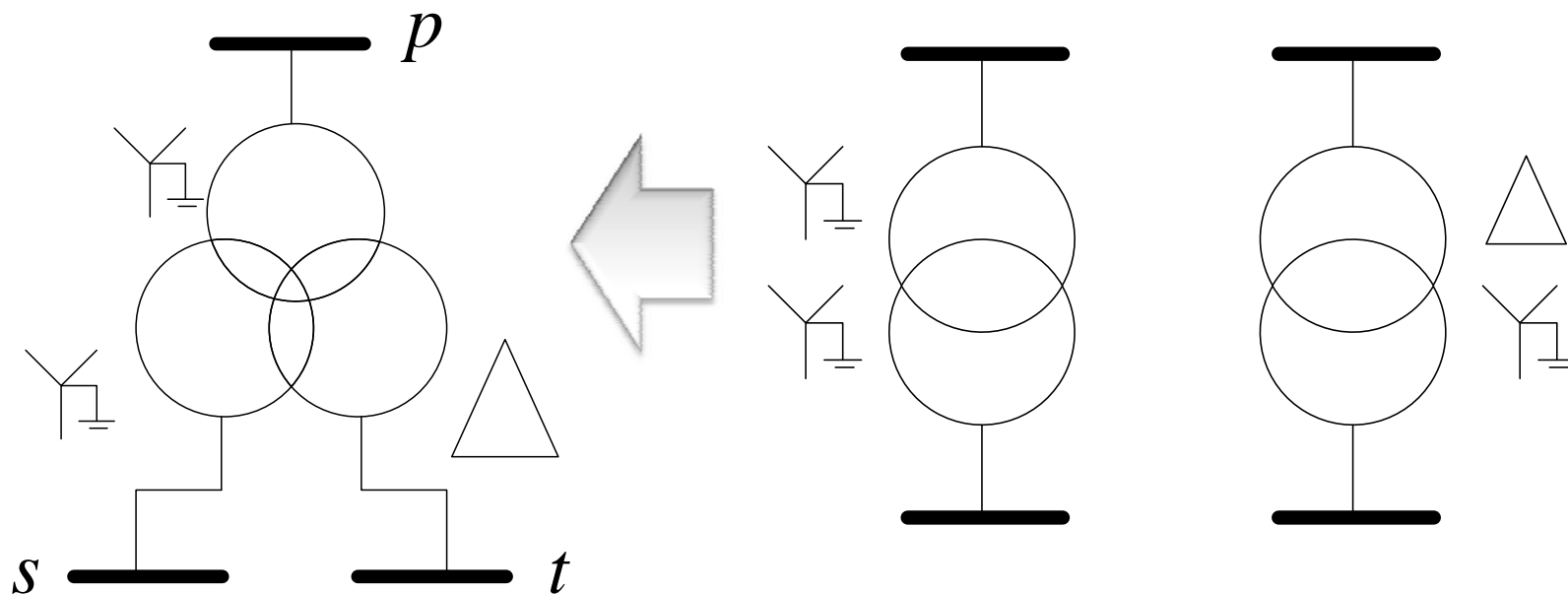
9. Transformador de 3 Devanados

- El transformador de tres devanados es aquel en el que se incluye un tercer devanado por cada fase, se llaman también transformadores de circuitos o devanados múltiples.
- El tercer arrollado que se incluye por cada fase suele ser denominado *terciario*.



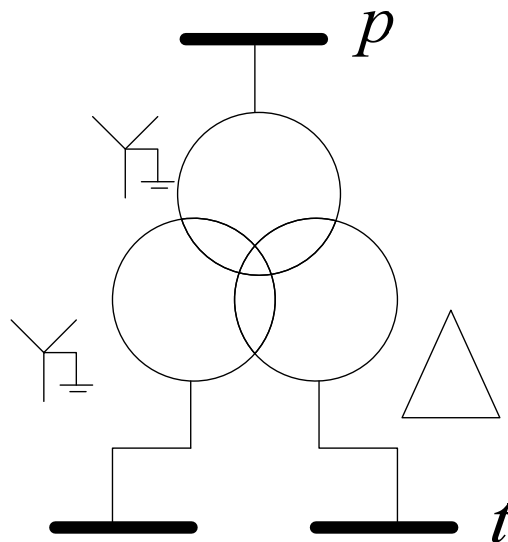
9. Transformador de 3 Devanados

- Utilizar las ventajas de la conexión Y-Y (estrella-estrella) de los transformadores de dos devanados al tiempo que el terciario se conecta en delta, con el fin de reducir los efectos indeseables de la conexión Y-Y de sus otros dos devanados.



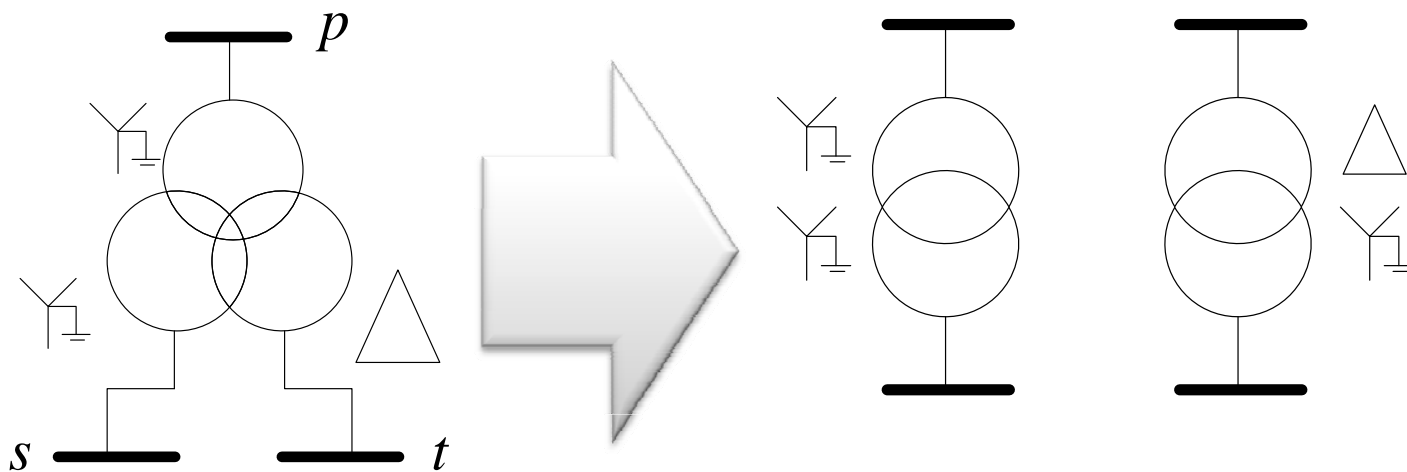
9. Transformador de 3 Devanados

- En conexión Y-Y de los devanados de alta y baja, y se conecta el terciario en corto o delta, lo cual tiene la finalidad de *reducir en forma apreciable los terceros armónicos de tensión* que de otra forma estaría presentes en el devanado de baja de donde se alimenta la carga.



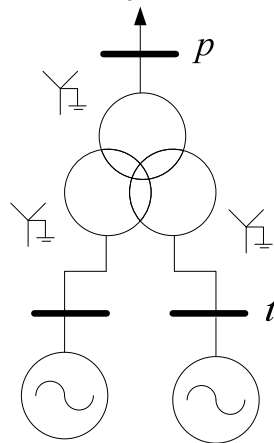
9. Transformador de 3 Devanados

- Se requiere *interconectar tres circuitos de diferentes niveles de voltaje*.
- Es la opción más económica y práctica utilizar un transformador de tres devanados y no dos transformadores de dos arrollados con diferente relación de transformación.



9. Transformador de 3 Devanados

- Para alimentar cargas que requieran una alta confiabilidad en el servicio, para lo cual se alimentarían de dos fuentes diferentes.
- En la planta de generación Macagua II, propiedad de la empresa EDELCA, en Venezuela, donde dos generadores son conectados a los devanados secundarios y terciario, y la carga en el primario.



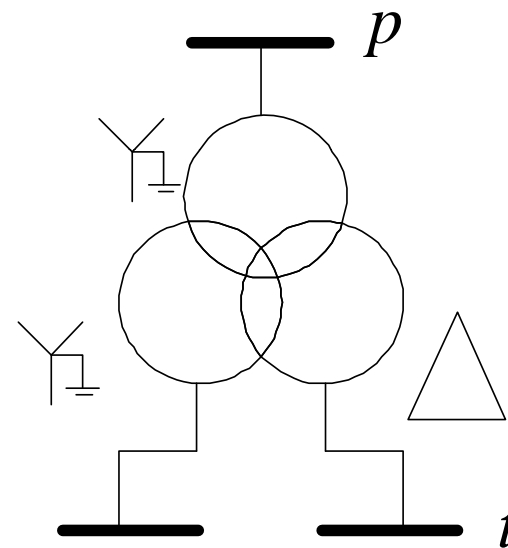
9. Transformador de 3 Devanados

- Solo que van a existir tres relaciones, productos de las interacciones magnéticas de los tres arrollados.

$$\frac{V_{\text{primario}}}{V_{\text{secundario}}} = \frac{N_{\text{primario}}}{N_{\text{secundario}}}$$

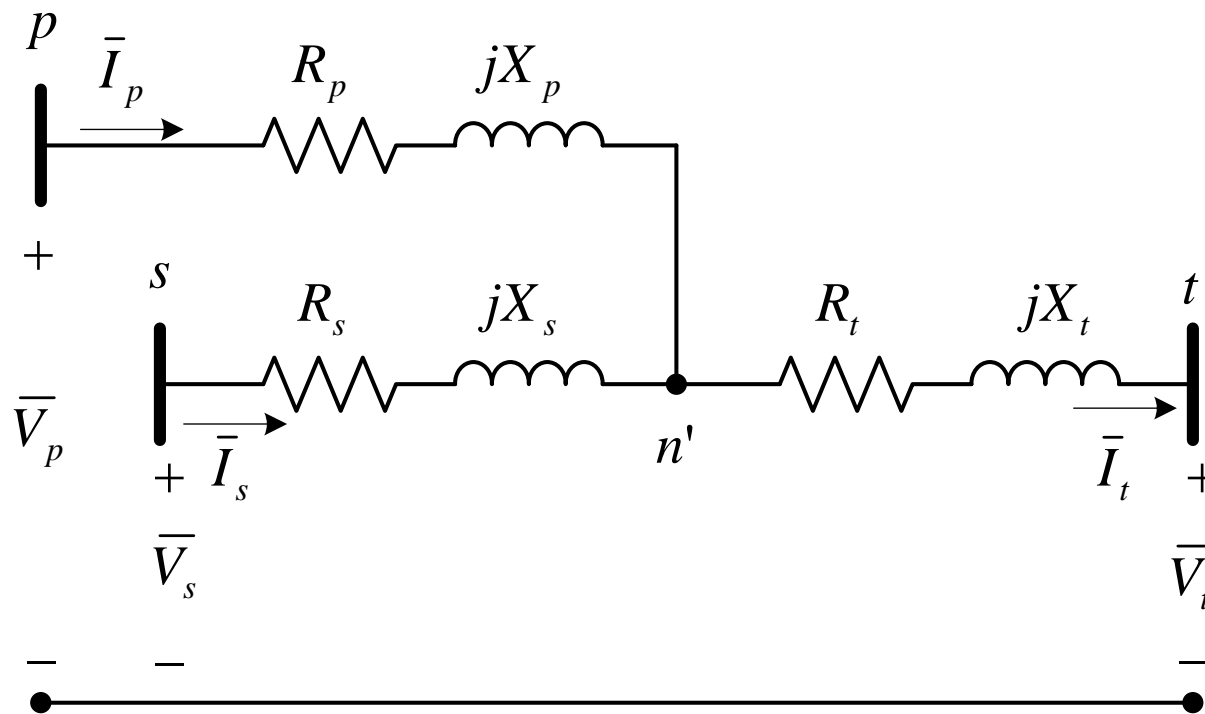
$$\frac{V_{\text{primario}}}{V_{\text{terciario}}} = \frac{N_{\text{primario}}}{N_{\text{terciario}}}$$

$$\frac{V_{\text{secundario}}}{V_{\text{terciario}}} = \frac{N_{\text{secundario}}}{N_{\text{terciario}}}$$

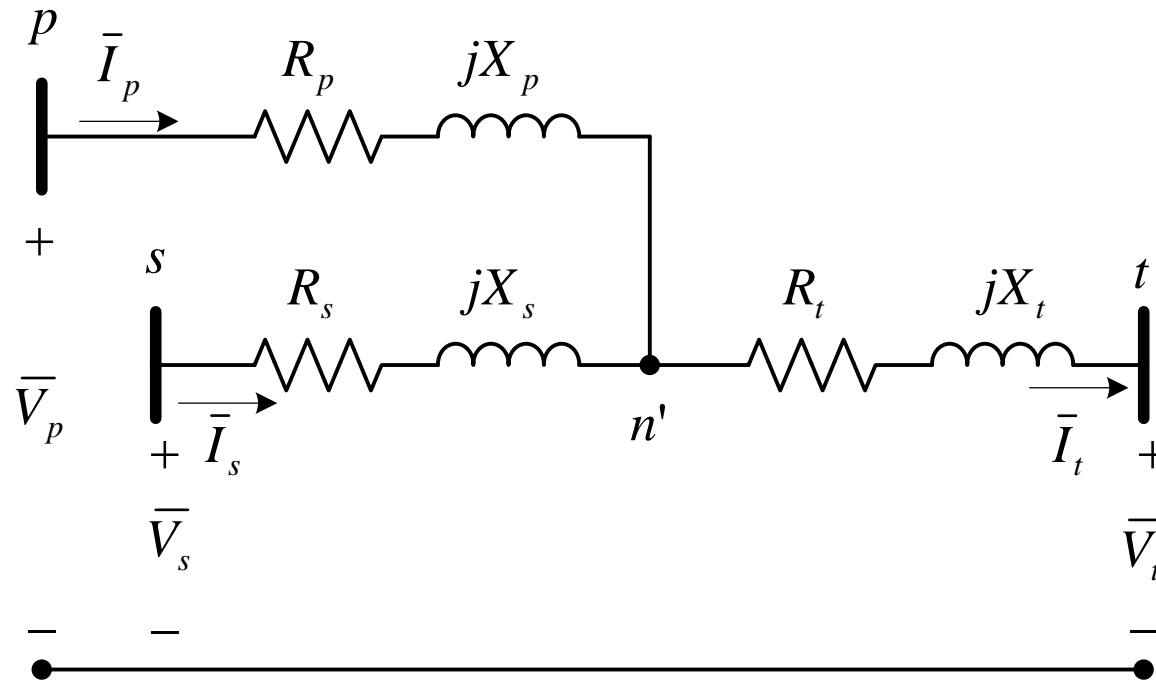


9. Transformador de 3 Devanados

- El modelo equivalente de un transformador de tres devanados ideal, consta de tres impedancias Z_p , Z_s , y Z_t en conexión estrella.



9. Transformador de 3 Devanados



- Z_p : Impedancia del arrollado primario . $Z_p = R_p + jX_p$
- Z_s : Impedancia del arrollado secundario . $Z_s = R_s + jX_s$
- Z_t : Impedancia del arrollado terciario . $Z_t = R_t + jX_t$

9. Transformador de 3 Devanados

$$Z_p = R_p + jX_p$$

$$Z_s = R_s + jX_s$$

$$Z_t = R_t + jX_t$$

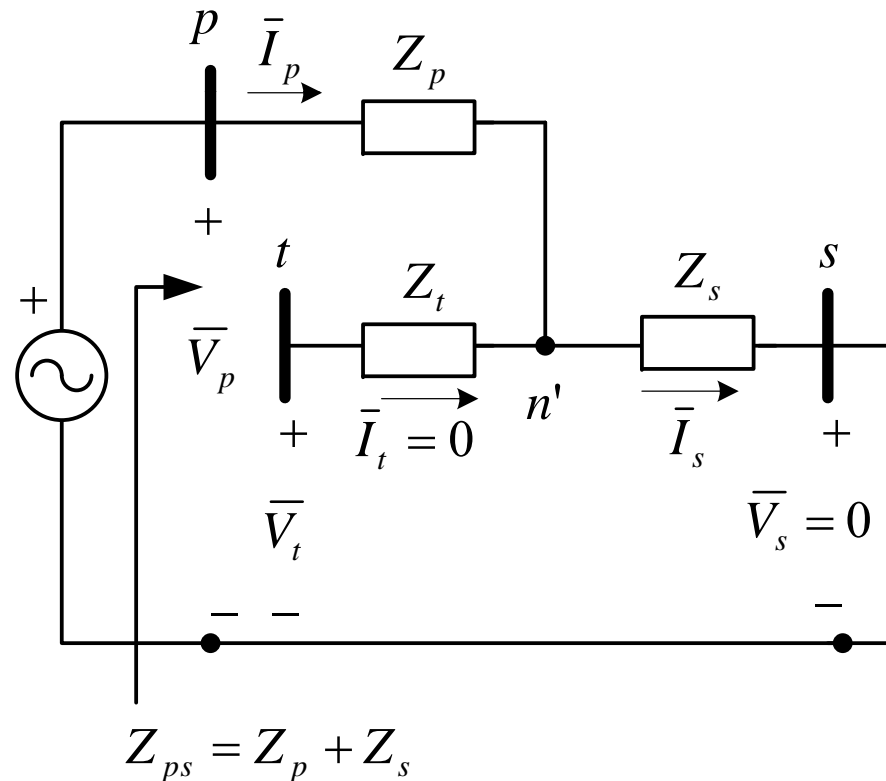
- Estas impedancias al igual que el transformador de dos arrollados se obtienen a partir de los ensayos de cortocircuito realizados a la máquina;
- La única diferencia que en el caso de la máquina de tres arrollados a de aplicarse igual número de veces el ensayo.

9. Transformador de 3 Devanados

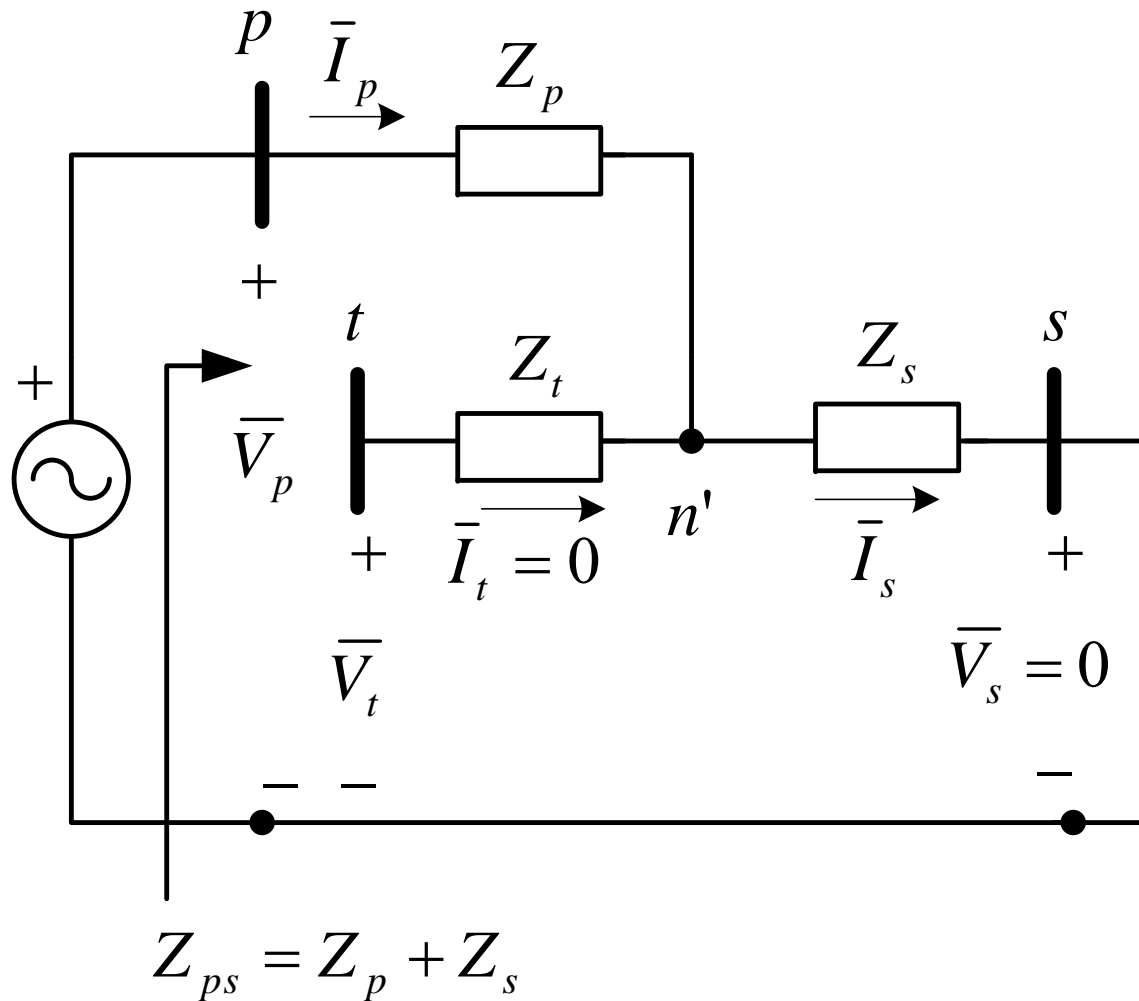
- En el ensayo de cortocircuito de un transformador de tres arrollados se debe realizar en tres etapas (por simplicidad en la representación solo se ha considerado la parte reactiva de la impedancia):

9. Transformador de 3 Devanados

- Alimentar por el primario, se cortocircuita el secundario, se mide es X_{ps} : Reactancia primario secundario.

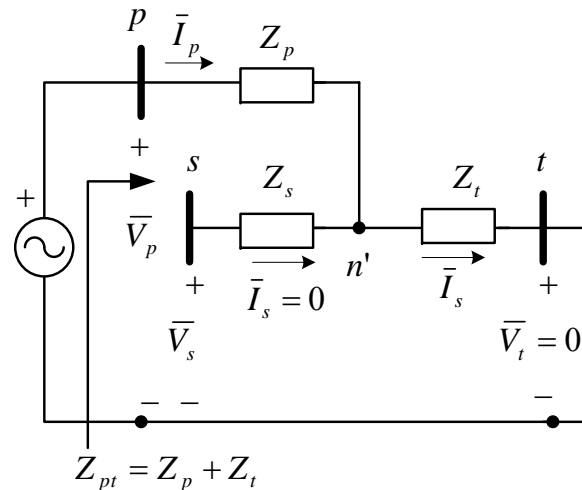


9. Transformador de 3 Devanados

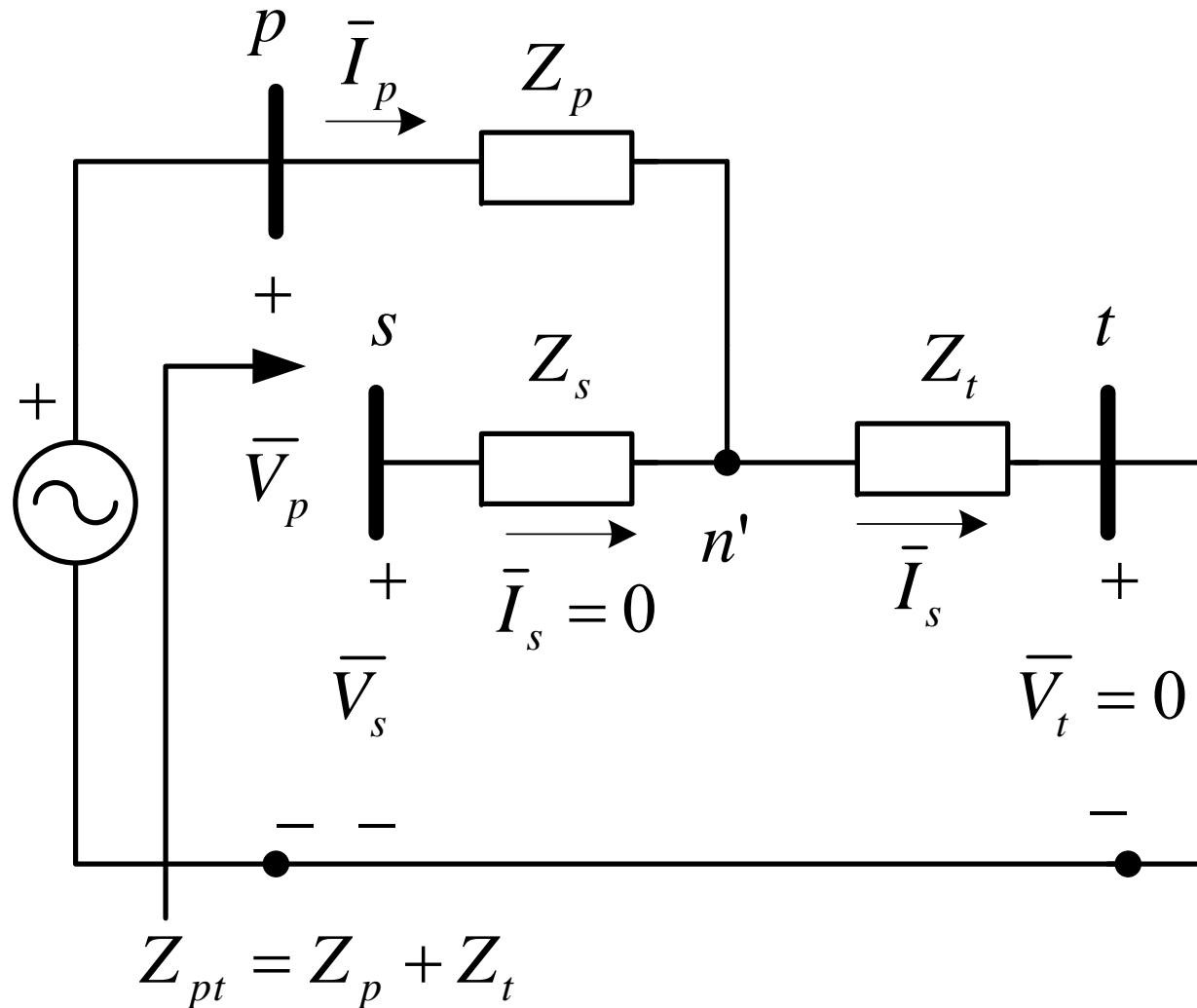


9. Transformador de 3 Devanados

- *Se alimenta por el devanado primario mientras se cortocircuita el terciario, de igual forma no se debe superar la menor de las potencias de los devanados en ensayo, en este caso por lo general el del terciario.*
- *La impedancia que se obtiene del ensayo es X_{pt} : Reactancia primario terciario.*

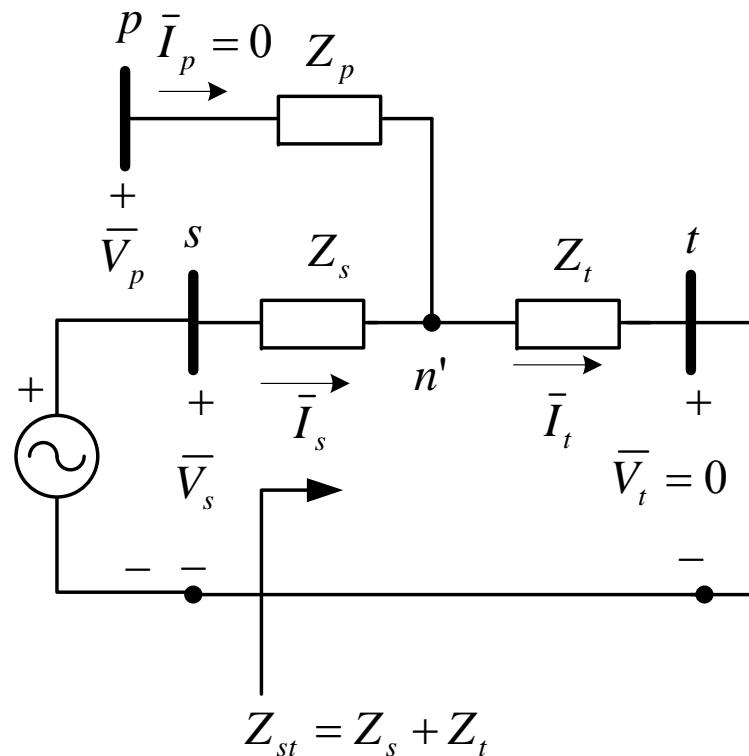


9. Transformador de 3 Devanados

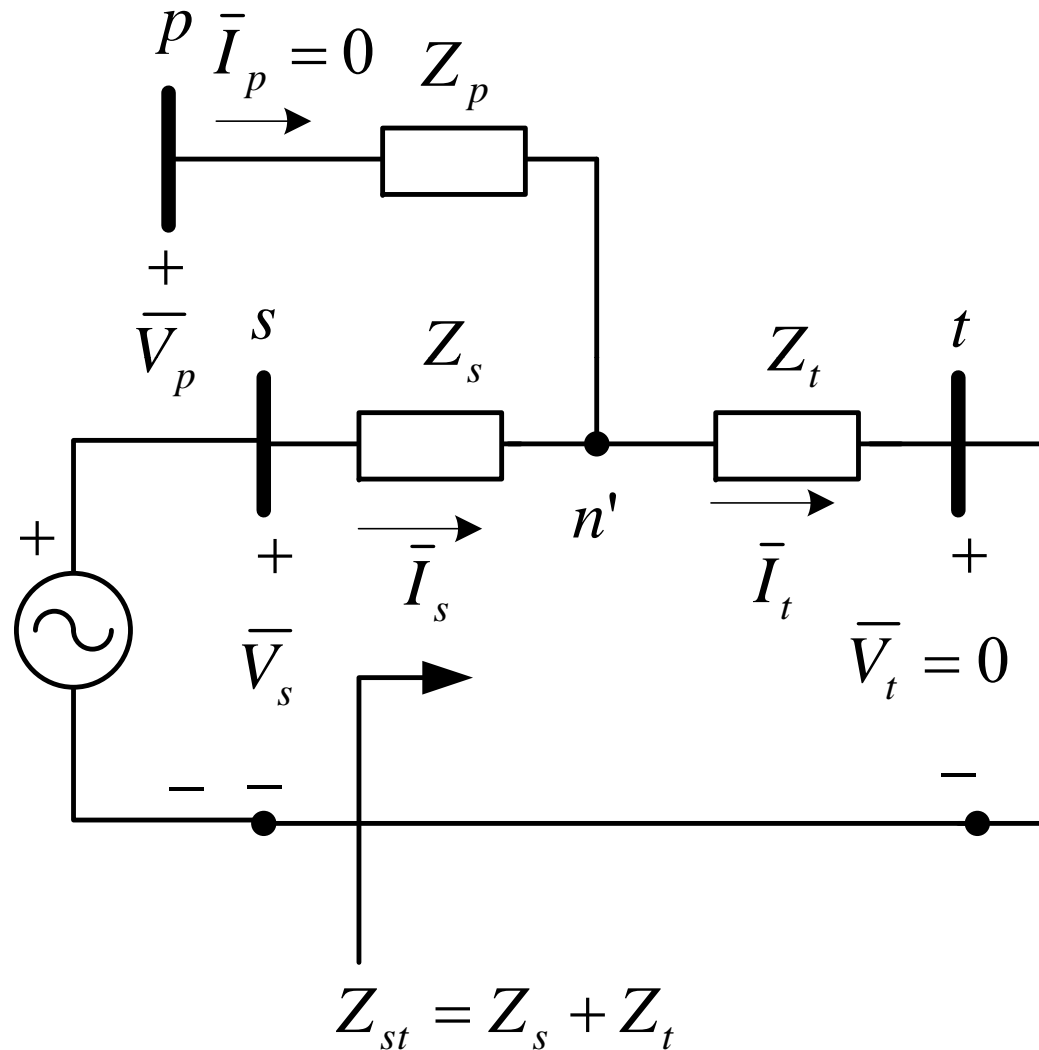


9. Transformador de 3 Devanados

- *Se alimenta por el secundario al tiempo que se cortocircuita el terciario.*
- *Se obtiene X_{st} : Reactancia secundario terciario.*



9. Transformador de 3 Devanados



9. Transformador de 3 Devanados

- De los tres ensayos de cortocircuito se obtiene un conjunto de tres ecuaciones lineales con tres incógnitas (X_p , X_s , X_t):

$$\begin{cases} X_{pt} = X_p + X_t \\ X_{st} = X_s + X_t \\ X_{ps} = X_p + X_s \end{cases}$$

9. Transformador de 3 Devanados

$$\begin{cases} X_{pt} = X_p + X_t \\ X_{st} = X_s + X_t \\ X_{ps} = X_p + X_s \end{cases}$$

- Si se resuelven las tres ecuaciones se tiene:

$$X_p = \frac{1}{2} (X_{ps} + X_{pt} - X_{st})$$

$$X_s = \frac{1}{2} (X_{ps} + X_{st} - X_{pt})$$

$$X_t = \frac{1}{2} (X_{pt} + X_{st} - X_{ps})$$

9. Transformador de 3 Devanados

- En los transformadores de tres devanados los fabricantes proporcionan en la placa.
- Los valores en porcentaje (%) de las reactancias obtenidas en los ensayos de cortocircuito.

$$Z_{ps} [\%] = 100\% \times Z_{ps} [p.u]$$

$$Z_{pt} [\%] = 100\% \times Z_{pt} [p.u]$$

$$Z_{ps} [\%] = 100\% \times Z_{ps} [p.u]$$

9. Transformador de 3 Devanados

$$Z_{ps} [\%] = 100\% \times Z_{ps} [p.u]$$

$$Z_{pt} [\%] = 100\% \times Z_{pt} [p.u]$$

$$Z_{ps} [\%] = 100\% \times Z_{ps} [p.u]$$

- El valor en porcentaje representa cien veces el valor por unidad de la impedancia de cortocircuito, este valor expresado en las bases del ensayo.

Ejemplo 1

- Supóngase un transformador monofásico de tres devanados 100/100/10 MVA, $765/\sqrt{3}:400/\sqrt{3}:13.8/\sqrt{3}$ kV,

$$X_{ps} = 10\%, X_{st} = 8\%, X_{pt} = 5\%.$$

- Estos valores en porcentaje representan:

$$X_{ps} = 0.1 \text{ p.u}$$

$$X_{st} = 0.08 \text{ p.u}$$

$$X_{pt} = 0.05 \text{ p.u}$$

-
-
- Ahora bien las bases de este valor por unidad se obtienen de los ensayos.
 1. X_{ps} , se hace alimentando por el primario y cortocircuitando el secundario, es decir que la base de tensión de X_{ps} es $765/\sqrt{3}$ kV, y la potencia base la menor de las de los arrollados involucrados 100 MVA.
 2. X_{st} se alimenta por el secundario, por lo que la base de tensión es $400/\sqrt{3}$ kV, y la de potencia es la del arrollado de menor potencia en ensayo, 10 MVA, la del terciario.

-
-
3. X_{pt} , se alimenta por el primario y se cortocircuita el terciario, por lo que las bases son $765/\sqrt{3}$ kV, y 10 MVA.

Reactancia	Bases (kV ; MVA)
$X_{ps} = 0.1$ p.u	$765/\sqrt{3}$; 100
$X_{st} = 0.08$ p.u	$400\sqrt{3}$; 10
$X_{pt} = 0.05$ p.u	$765/\sqrt{3}$; 10