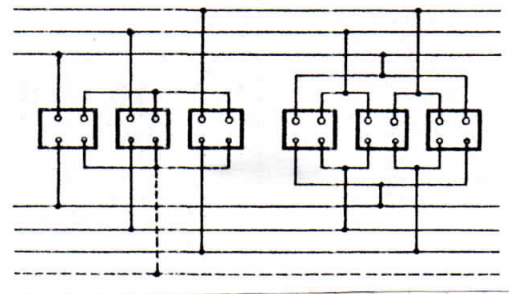
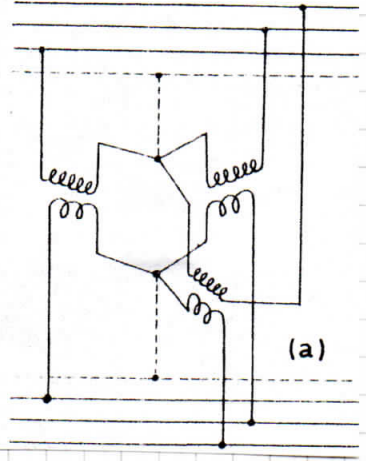
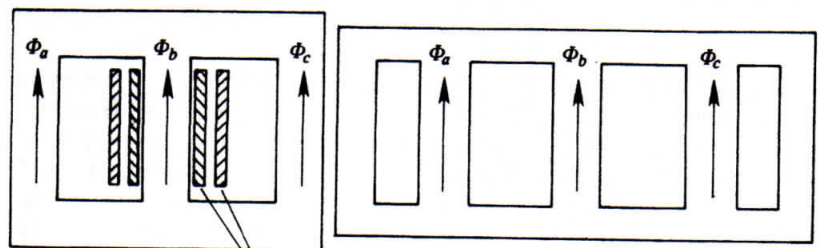


TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.

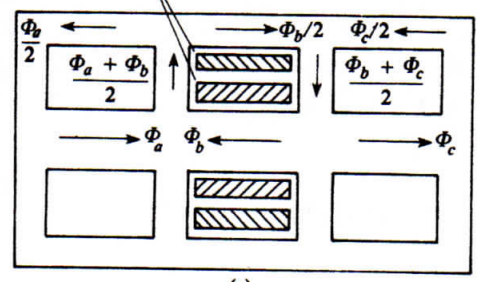
- Banco de 3 transf. monofásicos iguales.
  - Primarios y secundarios pueden estar conectados en  $\Delta$  o en  $\Delta$ .
  - Estudios por fase como transformadores monofásicos (C/P de los transf. constituyentes del banco) o en  $\Delta$  equivalente.
  - Razones para empleo de bancos de transf.: Transporte en caso de unidades de gran potencia (volumen, peso), o razones de seguridad en caso de necesitarse una reserva (Solo 1 fase de reserva en lugar de un transf. completo)



- Transformadores trifásicos. Unidad única que porta los 3 bobinado primarios y los 3 bobinado secundarios.
  - Construcción típica: Núcleo de 3 columnas, pero otras son también posibles: Núcleo de 5 columnas, Núcleo trifásico acorazado.
  - Observar que las disposiciones de 3 o 5 (o 4) columnas, todas en un mismo plano, implican asimetrías de construcción, que causan asimetrías de funcionamiento, evidenciadas especialmente en el funcionamiento en vacío de dichos transf.: los corrientes de vacío no son iguales en las 3 fases.



(a) Devanados de la fase b



Con mayor precisión, se debe hablar de transf. de flujos libres, o de flujos forzados (o ligados)

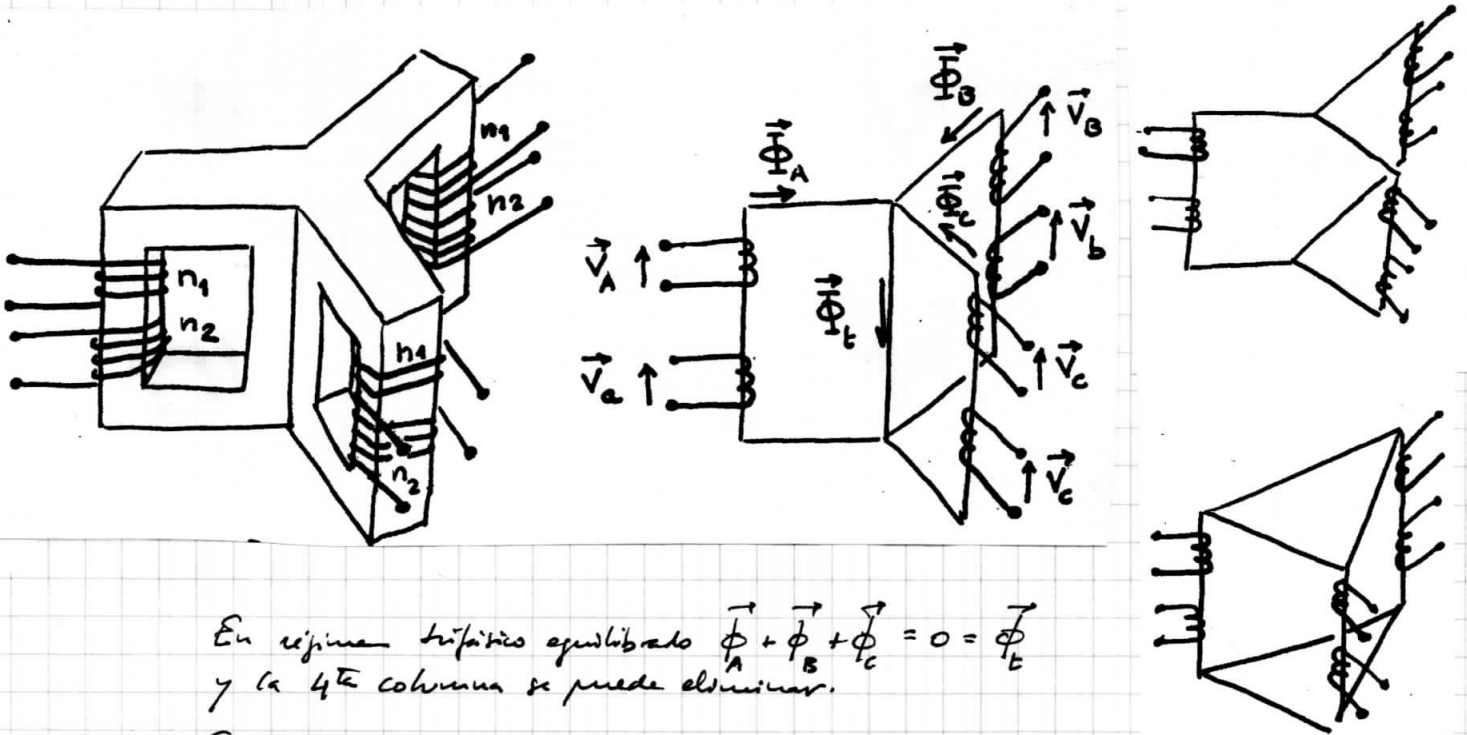
Despreciando las fugas, en el transformador de núcleos triplicados de 3 columnas, se tiene:

$$\textcircled{1} \quad \phi_A + \phi_B + \phi_C = 0 \quad \left( \text{En realidad } \phi_A + \phi_B + \phi_C = \phi_{\text{fugas}} \text{ de fuga total} \right)$$

$\Rightarrow$  flujos forzados

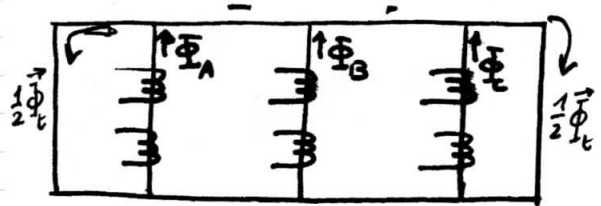
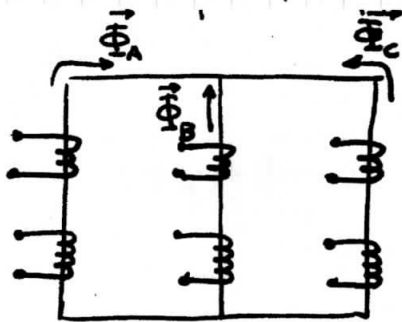
En los transformadores de banco de monofásicos, no hay restricción a la suma de los flujos en los núcleos, ya son circuitos magnéticos totalmente independientes.  $\Rightarrow$  Flujos libres. (o independientes)

En los transf. de 5 columnas (o 4, a veces se simplifica la construcción de su forma, no se impone la restricción  $\textcircled{1}$ ). Tampoco en los núcleos acorazados.  $\Rightarrow$  Flujos libres. En dichos circuitos puede haber otras restricciones sobre los flujos, pero no la  $\textcircled{1}$ .



En régimen tripéico equilibrado  $\vec{\phi}_A + \vec{\phi}_B + \vec{\phi}_C = 0 = \vec{\phi}_T$  y la 4ª columna se puede eliminar.

En régimen tripéico no equilibrado, la ausencia de 4ª columna impone la restricción  $\textcircled{1}$  (despreciando las fugas)



Circuitos equivalentes del transformador trifásico de conexiones directa, inversa y homopolar.

Hipo. Simetría de construcción. (No es cierta, pero la asimetría ~~está~~ en cuanto a los corrientes, no es de gran magnitud y solo es relevante en los corrientes de vacío.)

$Z_d, Z_i, Z_h$ :

De qué dependen?

- Conexión eléctrica del primario y del secundario
- Conexión, o no, de neutros a tierra. (primario y secundario)
- Tipo del circuito magnético: flujo libre o ligado.

### Influencia del circuito magnético

• Banco de 3 transf. monofásicos.

→ Elementos del circuito son iguales en  $Z_d$  y  $Z_i$

$$R_{0d} = R_{0i}, X_{0d} = X_{0i}, R_{sd} = R_{si}, L_{sd} = L_{si}$$

Solo cambia el índice cuando  $\bar{m}_i = \bar{m}_d^*$ . ( $1 \rightarrow 11$ , etc.)

Obs: los elementos  $X_0, X_s$  son los de 1 fase. (No hay neutros!)

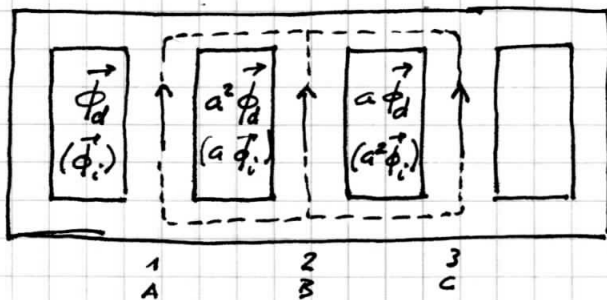
→ Rejimen homopolar  $R_{0h} = R_{0d}, X_{0h} = X_{0d}, R_{sh} = R_{sd}, X_{sh} = X_{sd}$ .

$$m_h = |\bar{m}_d|$$

• Circuito magnético de flujo libre (4 o 5 columnas)

Elementos de  $Z_d$  son iguales a los elementos de  $Z_i$ .

Directo (Inverso)



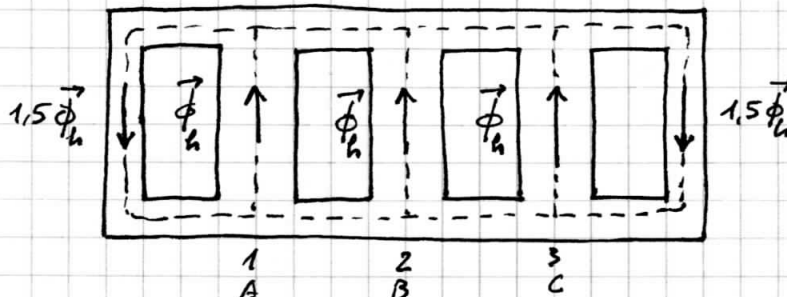
$$\text{Siempre: } \bar{m}_i = \bar{m}_d^*$$

El comportamiento del circuito magnético es el mismo en régimen directo e inverso, con iguales impedancias magnetizantes y de fuga.

$$R_{0d} = R_{0i}, X_{0d} = X_{0i}$$

$$R_{sd} = R_{si}, X_{sd} = X_{si}$$

Homopolar

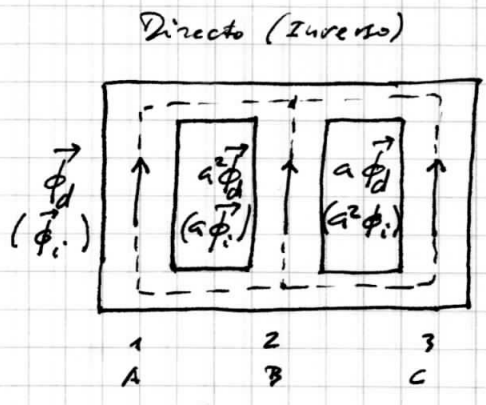


En régimen homopolar tiene un comportamiento diferente al directo e inverso. Camino más largo, reluctancia mayor, mayor pérdidas Fe

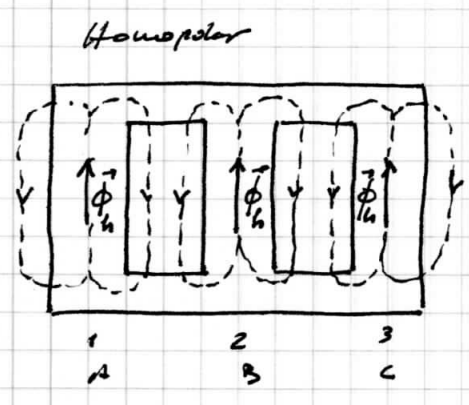
$$\left. \begin{array}{l} X_{0h} < X_{0d} \\ R_{0h} < R_{0d} \end{array} \right\} \text{pero } \approx$$

Circuito magnético de flujo ligado (3 columnas)

Elemento de  $Z_d =$  Elemento de  $Z_i$   
 $\vec{u}_i = \vec{u}_d^*$



$X_{od} = X_{oi}$



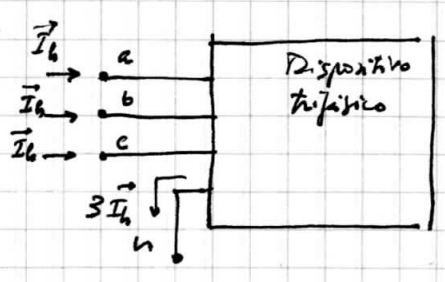
Los flujos homopolares  $\phi_h$  desean cerrarse por un camino de fugas (aire, carcasa, cuba de aceite)

$X_{oh} \ll X_{od} \quad (X_{oh} = \omega \mu_h = \frac{N^2}{R_h})$

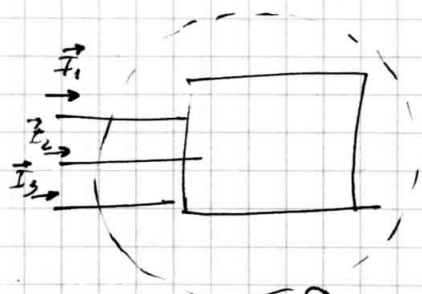
$X_{oh} \approx X_{sd}$

Influencia de la conexión de neutros a tierra

Circulación de corrientes homopolares por neutros:



La circulación externa de corrientes homopolares en cualquier dispositivo trifásico, independiente-mente de su conexión interna (Y, Δ), requiere que exista un neutro conectado a algo (tierra, otros neutros) que permita dicha circulación.



Sin neutros, o con neutros no conectados ("neutro aislado") no puede circular  $I_h$ .

$\Rightarrow Z_h = \infty$  (circuito abierto).

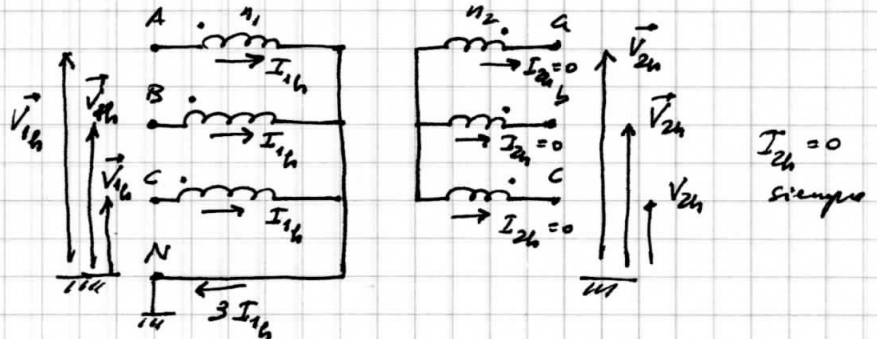
↳ Ley de nodos Kirchoff  $\Rightarrow \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 = 0$   
 $\Rightarrow \vec{I}_h = 0$

## Influencia del conexionado eléctrico. (Y, Δ, Z)

Ejemplo (lista de casos no exhaustiva). Se analiza sólo el circuito quiv. de régimen homopolar (secuencia 0)

Por la observación anterior acerca de los neutros aislados se analiza solamente los casos donde al menos hay un neutro conectado a tierra, en el primario o en el secundario.

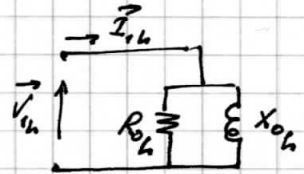
1)  $YNy$



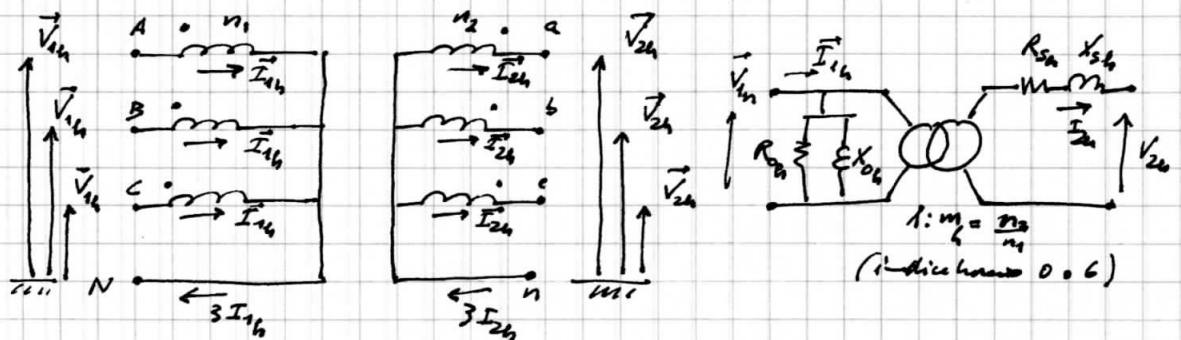
Para la secuencia homopolar, el transf.  $YNy$  está siempre en vacío en el secundario. Las corrientes homopolar pueden circular en el primario, dependiendo de la conexión de N a tierra o a otro neutro. Con  $I_{1h} \neq 0$ , bajo riesgo de deformación de onda de tensión en el secundario, debido a la saturación del hierro.

Si el régimen homopolar es impuesto desde fuera ( $V_{1h} \neq 0$ ) se tendrá  $V_{2h} = m_h V_{1h} \neq 0$ , con  $m_h = \frac{n_2}{n_1}$ .

Entonces se tendrá  $I_{1h} \neq 0$ , determinado por:



2)  $YNyn$

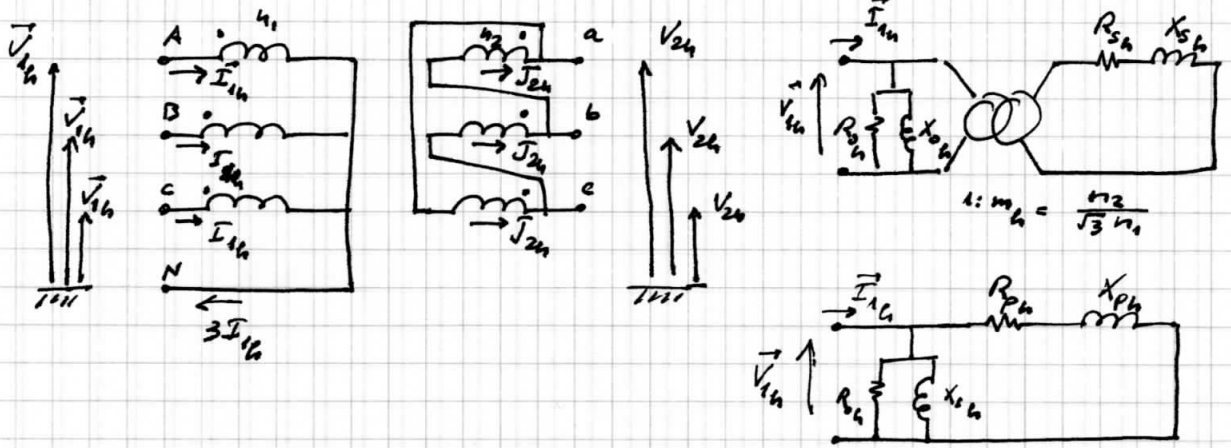


Con ambos N y n conectados a tierra, pueden circular las corrientes homopolar,  $I_{1h} \neq 0$ ,  $I_{2h} \neq 0$ .

En la secuencia homopolar el transf. actúa como transf. monofásico, pero con los valores de  $Z_h$  que resultan de su tipo de circuito magnético.

Las tensiones  $V_{1h}$  y  $V_{2h}$  se transforman según  $m_h = \frac{n_2}{n_1}$ , y las corrientes  $I_{2h}$  dependen de las cargas homopolar. Las corrientes  $I_{1h}$  dependen de  $I_{2h}$  y de la impedancia magnetizante, especialmente  $X_{0h}$  según el circuito magnético (flujos libres o ligados)

(3) **YNd**



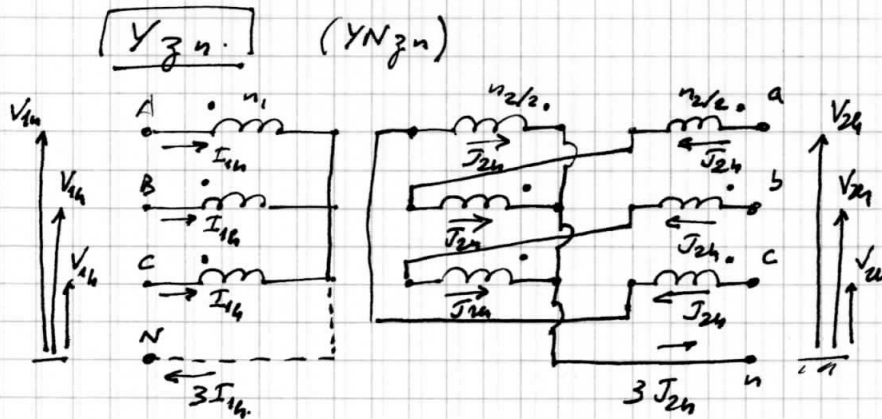
Por estar en  $\Delta$ ,  $V_{ab} + V_{bc} + V_{ca} = 0$ , pero las 3 tensiones son =, por lo que  $V_{ab} = V_{bc} = V_{ca} = 0$

$$V_{ab} = V_a - V_b, \text{ etc } \Rightarrow V_a = V_b = V_c = 0 \Rightarrow V_{2h} = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) = 0.$$

El secundario en  $\Delta$  está siempre en cortocircuito para el régimen homopolar.  $J_{2h} \neq 0$ , sólo limitada por  $R_{2h}$  y  $X_{2h}$ .

Como  $J_{2h} \neq 0$ , bajo riesgo de deformación de tensiones  $V_2$  por armónicos 3 los regímenes homopolares del lado del primario no se trasladan al secundario.

(4) Conexión Zig-Zag ("Doble estrella interconectada")



En el secundario en  $Y$  las medias bobinas iguales están conectadas en oposición, por lo que, aunque exista un flujo homopolar en el núcleo, las tensiones inducidas por los  $V_{2h} = 0$  siempre,

aunque  $J_{2h} \neq 0$

Aunque el flujo tenga armónicos 3 (homopolares), éstos no deforman las tensiones secundarias.

(5)  $\boxed{Yy}$  sin neutros (conectados)

$\Rightarrow$  Deformación de tensiones y Bobinado Terciario de compensación

En la conexión  $Yy$ ,  $I_{1H} = 0$ ,  $I_{2H} = 0$ .

El caso es crítico por la deformación del flujo en el núcleo debido al impedimento de circulación de corrientes armónicas 3<sup>o</sup> (homopolares).  $\Rightarrow V_1$  perfectamente sinusoidal  $\Rightarrow V_2$  con fuerte contenido armónico 3<sup>o</sup>.

Solución (a): Bobinado Terciario en  $\Delta$ , de compensación.

①  $\sum n_i = R\Phi$  (Forma alternativa de la ley de Ampère)

②  $n_1 i_1 + n_2 i_2 + n_3 i_3 = R\Phi$

$\uparrow$              $\uparrow$              $\uparrow$   
 primario    secundario    terciario en  $\Delta$   
 en Y        en Y

La eq. ① se descompone por Fourier en el fundamental y armónicos. No hay armónicos pares, y supondremos despreciable los armónicos de rango  $> 3$ .

Fundamental: ②  $n_1 i_1^{(1)} + n_2 i_2^{(1)} + n_3 i_3^{(1)} = R^{(1)} \Phi^{(1)}$

Si terciario en  $\Delta$  sin conexiones externas,  $i_3 = j_3$  en el interior del  $\Delta$ .  $j_3$  son las corrientes inducidas por el flujo de 3er armónico, por lo que  $i_3^{(1)} = 0$

3er armónico: ③  $n_1 i_1^{(3)} + n_2 i_2^{(3)} + n_3 j_3^{(3)} = R^{(3)} \Phi^{(3)}$

$\underbrace{\quad\quad\quad}_0 \quad \underbrace{\quad\quad\quad}_0$   
 corrientes homopolares  
 que no pueden circular  
 en Y.

②'  $n_1 i_1^{(1)} + n_2 i_2^{(1)} = R^{(1)} \Phi^{(1)}$

③'  $n_3 j_3^{(3)} = R^{(3)} \Phi^{(3)}$

④  $v_3^{(3)}(t) = 3 j_3^{(3)} + \frac{d\Phi^{(3)}}{dt}$

$\underbrace{\quad\quad\quad}_0 \quad \underbrace{\quad\quad\quad}_{n_3 \frac{d\Phi^{(3)}}{dt}}$   
 porque está en  $\Delta$

Para el terciario se elige un bobinado de pocas espiras (a veces  $n_3 = 1$ ) y baja resistencia.

El flujo de tercer armónico queda asociado a las corrientes de 3er armónico del bob. de compensación

$\Rightarrow$  No hay deformación de  $V_2$

Solución (b): Se fuerza al flujo  $\varphi^{(3)}$  a ser reducido.

→ Núcleo magnético de 3 columnas: flujo forzado.

El flujo de 3<sup>er</sup> armónico  $\varphi^{(3)}$  es homopolar: debe cerrarse por el camino de fuga.

$$\Rightarrow \varphi^{(3)} \approx \Phi_{\text{fuga}}$$

$$v_2 = r_2 i_2 + \frac{d\varphi_2}{dt} = r_2 i_2 + n_2 \frac{d\varphi_2}{dt}$$

Si es y  
sin núcleo,  
 $i_2$  no tiene 3<sup>er</sup> armónico

tiene contenido de  
3<sup>er</sup> armónico  $\approx$  flujo de fuga

⇒  $v_2$  tendrá contenido armónico,  
pero de orden reducido.