to proporciona una indicación ya muy acertada de las características finales del transformador.

EJEMPLO

DIMENSIONES RESULTANTES

Largo transformador (mm)	1675
Ancho transformador (mm)	825
Alto transformador (mm)	1525
Masa aproximada aceite (kg)	510
Masa aproximada a desencubar (kg)	1055
Masa aproximada cuba (kg)	265
Masa total en servicio (kg)	1830

2.11 Accesorios

Además de las bornas en la tapa, los transformadores de distribución tienen otros accesorios como el que se muestra en la Fig. 84. Se trata de un dispositivo que combina, en un solo aparato:

- Un *termómetro* (aguja negra) con indicador (aguja roja) de la máxima temperatura alcanzada desde el último reinicio.
- Dos *interruptores termostáticos* ajustables, para activación de alarma (umbral inferior) y disparo de la protección del transformador (umbral superior).
- *Presostato* ajustable para disparar la protección en caso de sobrepresión interna (rango 0,1 - 0,5 bares).
- *Nivel de aceite* con contacto de alarma activo cuando cae por debajo de un umbral prefijado.
- Doble flotador para detección de gases (*relé Buchholz*) con contacto de alarma (primeras burbujas) y contacto de disparo de protecciones (exceso de gas acumulado en la parte superior).

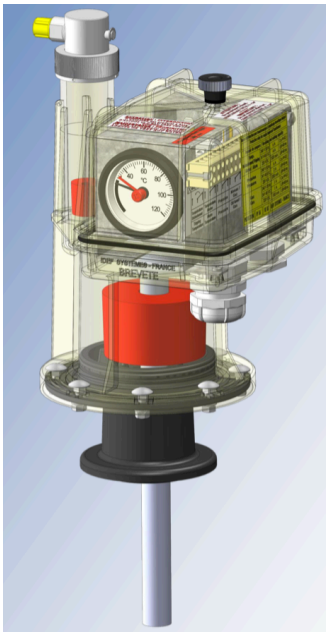


Fig. 84 Relé de Detección, Medición y Control (DMCR 3.0). [IDEF Systèmes]

3 LABORATORIO Y ENSAYOS

Las normas de fabricación de los transformadores obligan al fabricante a probar las máquinas y a certificar los resultados de los ensayos por escrito en un documento normalmente conocido como protocolo de pruebas del transformador.

Según la UNE-EN 60076-1 *Transformadores de potencia*, hay tres tipos de pruebas:

a) Las que se le hacen individualmente a todos y cada uno de los transformadores fabricados.

b) Las que se hacen solo a un transformador cualquiera, representativo de un

tipo de transformadores (para no repetirlas a todos los de ese tipo).

c) Las pruebas especiales, que pueden estar en la norma o pueden ser cualesquiera acordadas entre fabricante y comprador.

ENSAYOS INDIVIDUALES

a) Medición de la resistencia de los arrollamientos con corriente continua, registrando entre qué bornes se mide y a qué temperatura se hace (ver apartado 3.1 más adelante).

b) Medición de la relación de transformación y verificación de la polaridad de las bobinas (terminales correspondientes) y del desfase entre tensiones de bornes homólogos.

c) Medición de la impedancia de cortocircuito y de las pérdidas debidas a la carga (ver apartado 3.3, p. 62).

d) Medición de las pérdidas y de la corriente en vacío (ver apartado 3.2, p. 60).

e) Ensayos dieléctricos individuales (de tensión aplicada y de tensión inducida, según norma IEC 60076-3).

f) Ensayos en los cambiadores de tomas en carga, si son necesarios.

g) Ensayos de fugas con presión para los transformadores sumergidos en líquido (ensayo de estanquidad).

h) Ensayos de estanquidad y de presión para cubas de transformadores llenos de gas (norma IEC 60076-15).

i) Verificación de la relación de transformación y de la polaridad de los transformadores de intensidad instalados.

j) Verificación del aislamiento del núcleo magnético y de la estructura en transformadores sumergidos en líquido con aislamiento de núcleo o de estructura.

ENSAYOS DE TIPO:

a) Ensayos de calentamiento (norma IEC 60076-2).

b) Ensayos dieléctricos (frente a impulsos tipo rayo, norma IEC 60076-3).

c) Determinación del nivel de ruido (norma IEC 60076-10) para cada método de refrigeración para el que se especifica un nivel de ruido garantizado.

d) Medición de la potencia absorbida por los motores de los ventiladores y de las bombas de líquido.

e) Medición de las pérdidas y de la corriente en vacío al 90% y al 110% de la tensión nominal.

3.1 Resistencia de los devanados

Una vez fabricado el transformador las medidas de resistencia que pueden hacerse

son las marcadas como m_1, m_2 y m_3, y como n_1, n_2 y n_3 en la Fig. 85 sobre los bornes exteriores de las bobinas. Para deducir el valor de las resistencias R_a, R_b y R_c de cada arrollamiento es preciso considerar cómo están conectadas entre sí:

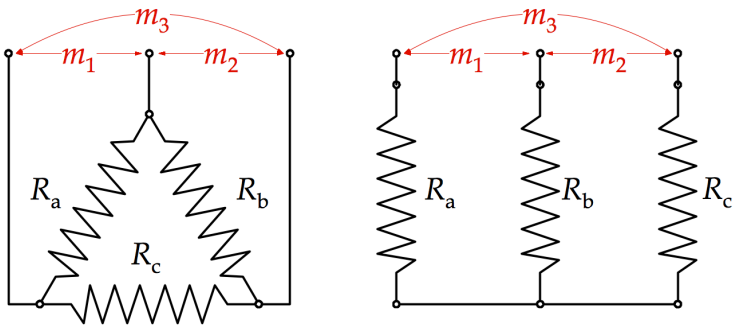


Fig. 85 Resistencia de devanados en triángulo y en estrella sin neutro accesible.

Devanados en triángulo

$$\begin{cases} \dfrac{1}{m_1} = \dfrac{1}{R_a} + \dfrac{1}{R_b + R_c} \\ \dfrac{1}{m_2} = \dfrac{1}{R_b} + \dfrac{1}{R_a + R_c} \\ \dfrac{1}{m_3} = \dfrac{1}{R_c} + \dfrac{1}{R_b + R_a} \end{cases}$$

Devanados en estrella sin neutro

$$\begin{cases} n_1 = R_a + R_b \\ n_2 = R_b + R_c \\ n_3 = R_a + R_c \end{cases}$$

Resolviendo ambos sistemas se obtienen enseguida los valores buscados de R_a, R_b y R_c en función de las correspondientes medidas para cada tipo de conexión:

RESISTENCIA TRES DEVANADOS EN TRIÁNGULO

$$\text{Simplify}\left[\text{Solve}\left[\left\{\frac{1}{m1} == \frac{1}{Ra} + \frac{1}{Rb + Rc}, \frac{1}{m2} == \frac{1}{Rb} + \frac{1}{Ra + Rc}, \frac{1}{m3} == \frac{1}{Rc} + \frac{1}{Rb + Ra}\right\}, \{Ra, Rb, Rc\}\right]\right]$$

$$\left\{\left\{Ra \to \frac{m1^2 + (m2 - m3)^2 - 2\,m1\,(m2 + m3)}{2\,(m1 - m2 - m3)}, Rb \to -\frac{m1^2 + (m2 - m3)^2 - 2\,m1\,(m2 + m3)}{2\,(m1 - m2 + m3)}, Rc \to -\frac{m1^2 + (m2 - m3)^2 - 2\,m1\,(m2 + m3)}{2\,(m1 + m2 - m3)}\right\}\right\}$$

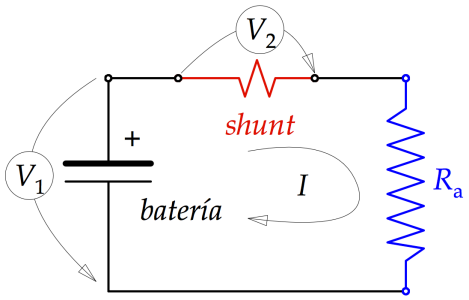
RESISTENCIA TRES DEVANADOS EN ESTRELLA SIN NEUTRO

$$\text{Solve}[\{n1 == Ra + Rb, n2 == Rb + Rc, n3 == Ra + Rc\}, \{Ra, Rb, Rc\}]$$

$$\left\{\left\{Ra \to \frac{1}{2}(n1 - n2 + n3), Rb \to \frac{1}{2}(n1 + n2 - n3), Rc \to \frac{1}{2}(-n1 + n2 + n3)\right\}\right\}$$

Fig. 86 Solución a los sistemas para el valor de las resistencias obtenida con Mathematica™.

Habitualmente las medidas de la resistencias m_i y n_i entre pares de bornas se hacen utilizando una batería de 12 ó 24 V, una resistencia ultrabaja finísimamente calibrada,llamada frecuentemente *shunt*, y dos voltímetros de buena precisión, como muestra la Fig. 87.



La resistencia *shunt* se emplea para conocer

la intensidad I. Su calibre viene marcado en mV/A, y así:

$$I(\mathrm{A}) = \frac{V_2(\mathrm{mV})}{calibre_{shunt}\left(\mathrm{mV}/\mathrm{A}\right)}; \qquad R_a(\Omega) = \frac{V_1(\mathrm{V})}{I(\mathrm{A})}$$

Fig. 87 Procedimiento para medir la resistencia Ra.

EJEMPLO

Calcular las resistencias de los devanados de un transformador en el que se han medido los valores de la derecha usando un *shunt* de 5 A/mV.

	V1 (V)	V2 (mV)
U - V (m_1)	21,718	8,083
V - W (m_2)	21,551	7,985
W - U (m_3)	21,726	8,053

Solución:

$m_1 =$ 13,434 Ω
$m_2 =$ 13,495 Ω
$m_3 =$ 13,489 Ω

Triángulo	
$R_a =$	**20,094 Ω**
$R_b =$	**20,275 Ω**
$R_c =$	**20,259 Ω**

Estrella	
$R_a =$	**6,715 Ω**
$R_b =$	**6,720 Ω**
$R_c =$	**6,775 Ω**

3.2 Ensayo en vacío

El ensayo de vacío pretende conocer los parámetros de la rama paralelo del modelo eléctrico de transformador referido al primario ya visto en el apartado 1.3, p. 14.

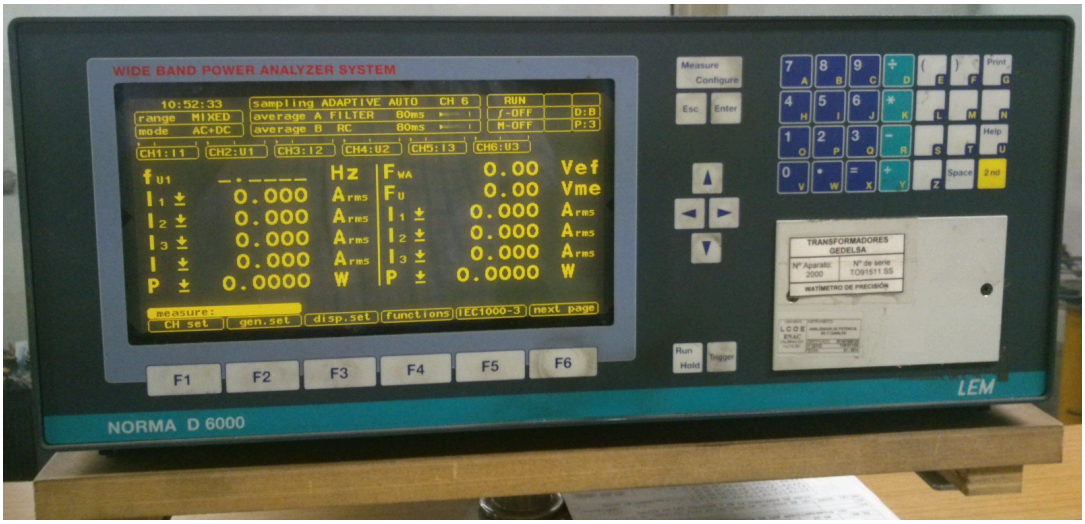


Fig. 88 Vatímetro de precisión calibrado, usado en el laboratorio de pruebas del fabricante. [GED]

Este ensayo suele hacerse alimentando el transformador por el devanado BT dejando al aire el lado AT (Fig. 89), pero los resultados han de corresponder al modelo eléctrico del transformador cuyos parámetros están referidos al primario, por lo que hay que ajustar primero los resultados de la medida para obtener los valores que se habrían conseguido de hacer el ensayo por ese primario (lado AT).

EJEMPLO

Los datos de la tabla son las medidas obtenidas en el ensayo de vacío sobre un transformador de 400 kVA, 20/0,42 kV que se muestran en la Fig. 90.

Sn (kVA)	400		
U1 (V)	20000		
U2 (V)	420		
m	47,62		
I1 (A)	11,55		
I2 (A)	550		
f (Hz)	50,000	U (V)	419,87
P1 (kW)	0,18098	I1 (A)	1,321
P2 (kW)	0,08050	I2 (A)	1,222
P3 (kW)	0,12498	I3 (A)	0,931
P (W)	384,30	I (A)	1,158

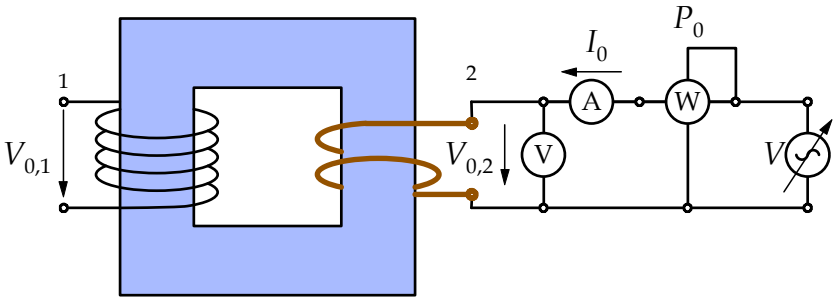


Fig. 89 Ensayo de vacío hecho por el lado del secundario para no tener que trabajar con tensiones elevadas.

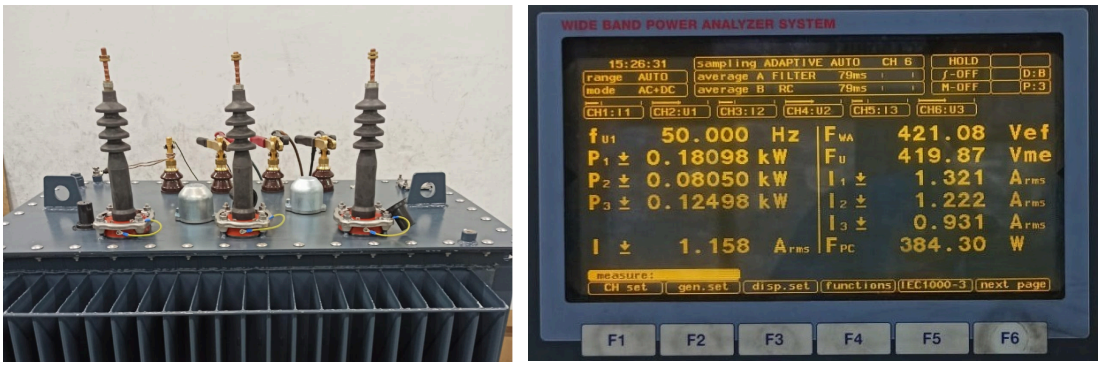


Fig. 90 Transformador 400 kVA durante un ensayo de vacío (hecho por el secundario) y medidas del vatímetro. [GED]

La tensión a la que se hace el ensayo es $V_{0,2}$ = 419,87 V, muy bien hecho porque prácticamente es la tensión nominal de la máquina por ese lado (420 V). Corresponde a una tensión de ensayo en el primario, aplicando la relación de transformación m, de

$$V_{0,1} = V_{0,2}\, m = \frac{U_{0,2}}{\sqrt{3}}\, m = \frac{419,87}{\sqrt{3}} \frac{20}{0,42} = 11543,4 \text{ V}$$

La potencia absorbida por el transformador en esas condiciones P_0 es la suma de las tres medidas por el vatímetro en cada fase $P_0 = P_1 + P_2 + P_3$ = 386,46 W. Se comprueba que respeta las pérdidas máximas reglamentarias (387 W).

Para la intensidad absorbida en vacío se toma la media de las tres intensidades de fase y se convierte a intensidad de primario también mediante la relación de transformación:

$$I_{0,1} = \frac{I_{0,2}}{m} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3\,m} = \frac{1{,}321 + 1{,}222 + 0{,}931}{3 \times \frac{20}{0{,}42}} = 0{,}027741 \text{ A}$$

A continuación se obtiene el factor de potencia del transformador considerado como una carga trifásica equilibrada. La potencia absorbida total en vacío es la suma de la que absorbe por cada una de sus fases

$$P_0 = 3\left(V_{0,1}\, I_{0,1} \cos\varphi_0\right),$$

de donde $\cos\varphi_0 = \dfrac{P_0}{3\, V_{0,1}\, I_{0,1}} = \dfrac{386{,}46}{3 \times 11543{,}4 \times 0{,}027741} = 0{,}459$ inductivo

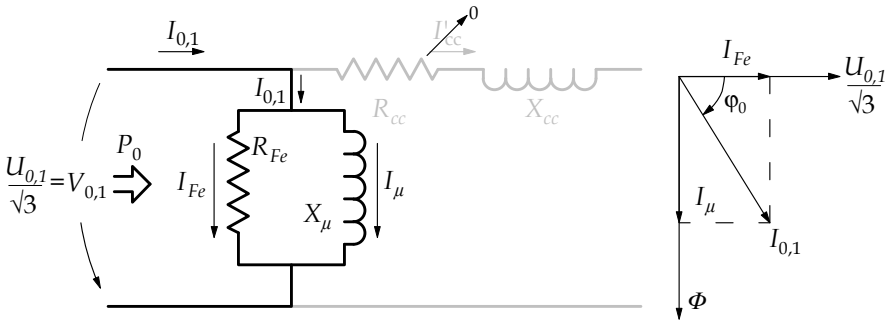


Fig. 91 Intensidades absorbidas durante el ensayo de vacío.

Resolviendo el diagrama fasorial de la Fig. 91 se obtienen ya los parámetros R_{Fe} y X_μ e incluso la impedancia total $Z_{0,1}$ del modelo del transformador:

$$\left.\begin{aligned} I_{Fe} &= I_{0,1}\cos\varphi_0 = 11{,}160 \text{ mA}; \quad R_{Fe} = \frac{V_{0,1}}{I_{Fe}} = 1034 \text{ k}\Omega \\ I_\mu &= I_{0,1}\,\text{sen}\varphi_0 = 21{,}606 \text{ mA}; \quad X_\mu = \frac{V_{0,1}}{I_\mu} = 534 \text{ k}\Omega \end{aligned}\right\} \quad Z_{0,1} = \frac{V_{0,1}}{I_{0,1}} = \frac{11543{,}4}{0{,}027741} = 475 \text{ k}\Omega$$

3.3 Ensayo en cortocircuito

El ensayo de cortocircuito pretende conocer los parámetros de la rama serie del modelo eléctrico de transformador referido al primario estudiado en el apartado 1.3, p. 14.

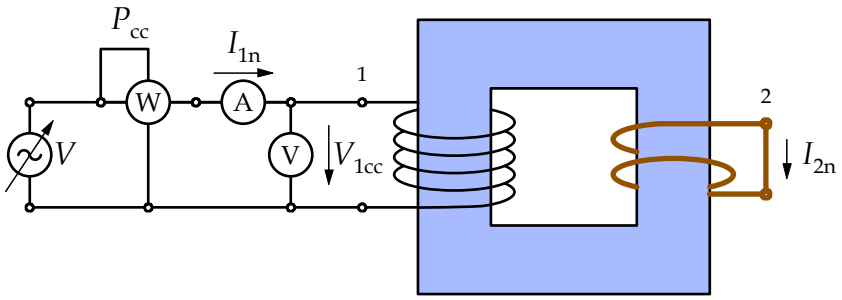


Fig. 92 Ensayo de cortocircuito hecho por el primario para no tener que trabajar con intensidades elevadas.

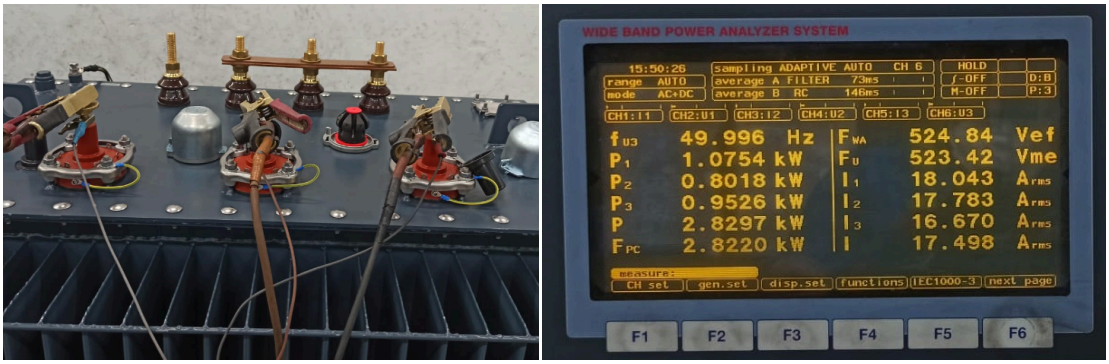


Fig. 93 Transformador 400 kVA durante un ensayo de cortocircuito y medidas del vatímetro. [GED]

EJEMPLO

Los datos de la tabla son las medidas obtenidas en el ensayo de cortocircuito sobre un transformador de 400 kVA, 13,2/0,4 kV que se muestran en la Fig. 93:

Sn (kVA)	400		
U1 (V)	13200		
U2 (V)	400		
m	33,00		
I1 (A)	17,50		
I2 (A)	577		
f (Hz)	49,996	U (V)	523,42
P1 (kW)	1,07540	I1 (A)	18,043
P2 (kW)	0,80180	I2 (A)	17,783
P3 (kW)	0,95260	I3 (A)	16,670
P (W)	2,82970	I (A)	17,498

Se considera que la intensidad a la que se hace el ensayo es la media de las tres intensidades de fase

$$I_{1cc} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} = \frac{18{,}043 + 17{,}783 + 16{,}670}{3} = 17{,}498 \text{ A}$$

y se verifica que el ensayo está muy bien hecho pues coincide con la intensidad nominal de ese devanado primario.

La potencia absorbida por el transformador en esas condiciones de cortocircuito P_{cc} es la suma de las tres medidas por el vatímetro en cada fase, es decir $P_{cc} = P_1 + P_2 + P_3$ = 2,8298 kW.

Este ensayo se hace tras encubar el transformador, por lo que los devanados pueden estar aún calientes. Para calcular las pérdidas debidas a la carga a la temperatura de referencia, que es de 75ºC según la UNE 60076-1, se extrapola linealmente siguiendo su Anexo E así:

> El cambio de la resistencia de los devanados de cobre y aluminio con la temperatura (por ejemplo, de 40ºC a 75ºC) es de esta forma

$$\text{(aluminio)}\quad R_{75^o} = R_{40^o}\frac{225+75}{225+40}; \qquad \text{(cobre)}\quad R_{75^o} = R_{40^o}\frac{235+75}{235+40}$$

Si suponemos que los devanados de aluminio estaban a 40ºC al medir, llamamos $P_{40^o} = R_{40^o}\, I_{cc}^2$ a las pérdidas medidas a esa temperatura, y *para la misma intensidad* las pérdidas a 75ºC serían $P_{75^o} = R_{75^o}\, I_{cc}^2$, luego

$$\left.\begin{aligned} R_{75^o} &= R_{40^o}\frac{225+75}{225+40} \\ P_{40^o} &= R_{40^o}\, I_{cc}^2 \\ P_{75^o} &= R_{75^o}\, I_{cc}^2 \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} P_{75^o} &= P_{40^o}\frac{R_{75^o}}{R_{40^o}} = P_{40^o}\frac{225+75}{225+40} = \\ &= 2829{,}8\times 1{,}132 = 3203{,}5\ \text{W} \end{aligned}$$

Como este valor es inferior a los 3250 W permitidos por el Reglamento de ecodiseño de transformadores para un aparato de 400 kVA, el transformador cumple con el requisito de eficiencia exigible y podrá ponerse en funcionamiento.

La tensión a la que se ha conseguido ajustar así el ensayo representa, frente a la tensión nominal de ese devanado, el porcentaje que se conoce como *tensión de cortocircuito* o *impedancia de cortocircuito* del transformador, ya vistas al final de la sección 2.4:

$$v_{cc}\% = z_{cc}\% = \frac{V_{1cc}}{V_{1N}}\times 100 = \frac{U_{1cc}/\sqrt{3}}{U_{1N}/\sqrt{3}}\times 100 = \frac{523{,}42}{13200}\times 100 = 3{,}97\%$$

que se comprueba satisface el requisito de 4%(±10%, es decir, entre 3,6% y 4,4%) para este tipo de máquinas.

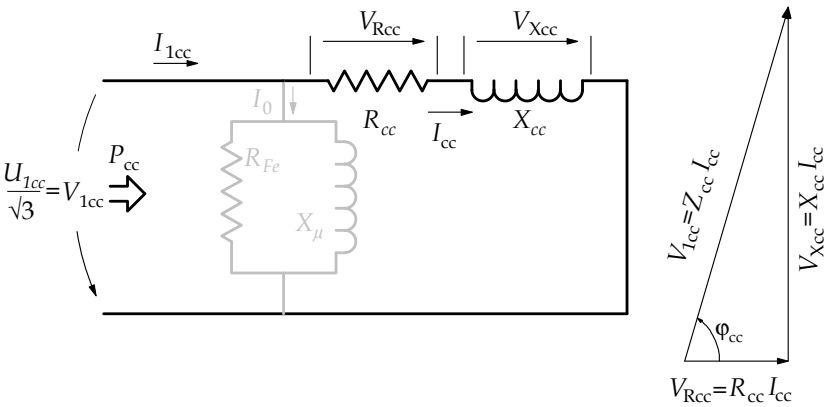


Fig. 94 Tensiones del ensayo de cortocircuito.

A continuación se obtiene el factor de potencia del transformador considerado como una carga trifásica equilibrada. La potencia absorbida total en cortocircuito es la suma de la que absorbe por cada una de sus fases

$$P_{cc} = 3\left(V_{1cc}\, I_{1cc} \cos\varphi_{cc}\right),$$

de donde $\cos\varphi_{cc} = \dfrac{P_{cc}}{3\, V_{1cc}\, I_{1cc}} = \dfrac{2829,8}{3 \times 302,2 \times 17,498} = 0,178$ inductivo

Resolviendo el diagrama fasorial de la Fig. 94 se obtienen los parámetros R_{cc}, X_{cc} y la impedancia total del transformador Z_{cc}:

$$\left.\begin{array}{l} V_{Rcc} = V_{1cc} \cos\varphi_{cc} = 53,907 \text{ V}; \quad R_{cc} = \dfrac{V_{Rcc}}{I_{cc}} = 3,081\ \Omega \\ V_{Xcc} = V_{1cc}\, \mathrm{sen}\varphi_{cc} = 297,350 \text{ V}; \quad X_{cc} = \dfrac{V_{1cc}}{I_{cc}} = 16,993\ \Omega \end{array}\right\} \quad \begin{array}{l} Z_{cc} = \dfrac{V_{1cc}}{I_{cc}} = \\ = \dfrac{302,20}{17,498} = 17,270\ \Omega \end{array}$$