

CARACTERÍSTICAS EXTERNAS y REGULACIÓN de TRANSFORMADORES

Norberto A. Lemozy

1 CARACTERÍSTICAS EXTERNAS

Se denomina variable *entre* a una magnitud que está determinada entre dos puntos, tal como una diferencia de potencial o una velocidad, mientras que una variable *a través* es aquella magnitud que se manifiesta a través de un conductor o un eje, como ser la corriente, una cupla o una fuerza.

La *característica externa* de una máquina es la curva que relaciona dos magnitudes de salida, cuyo producto da una potencia. En general se representa una variable *entre* en función de una variable *a través* como se muestra en la figura 1.

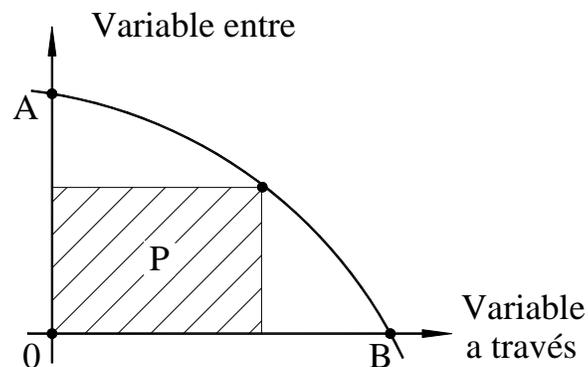


Fig. 1. Característica externa genérica.

El punto *A* corresponde a la máquina funcionando en vacío y el punto *B* a la máquina en cortocircuito o bloqueada para que no se mueva. En ambos la potencia es nula. Ambos puntos existen en todas las características externas, pero podrían ser inalcanzables por superar la capacidad térmica o mecánica de la máquina.

En las máquinas que suministran energía eléctrica, como los transformadores y los generadores, la característica externa es la tensión en función de la corriente a la salida de la misma, figura 2a.

En las máquinas que suministran energía mecánica, motores, la característica externa es la velocidad de rotación en función de la cupla y si es de translación, la velocidad lineal en función de la fuerza, figuras 2b y 2c respectivamente.

Algunos autores muestran las características externas con los ejes permutados.

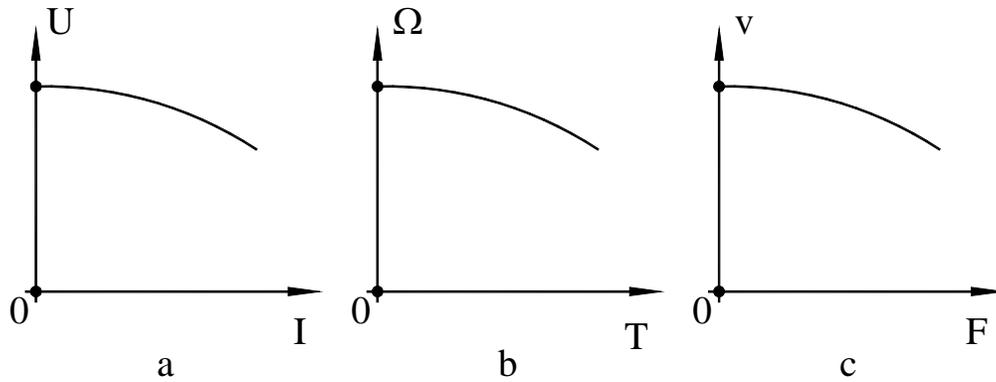


Fig. 2. Características externas.

2 REGULACIÓN

En general interesa conocer la capacidad de la máquina de mantener constante la variable *entre*, a medida que cambia la variable *a través* (carga), para cuantificar esa variación se define la *regulación* como la diferencia de los valores de la variable *entre* en vacío y para un dado estado de carga, generalmente el nominal, referida al valor nominal de esa variable. La regulación suele indicarse con la letra griega delta mayúscula Δ y es una magnitud en por unidad (pu).

$$\Delta = \frac{\text{Variable } entre \text{ en vacío} - \text{Variable } entre \text{ en carga}}{\text{Variable } entre \text{ nominal}} \quad (1)$$

Para el caso de un motor, resulta:

$$\Delta = \frac{\Omega_0 - \Omega}{\Omega_n} \quad (2)$$

Aunque las variables sean magnitudes fasoriales, para el cálculo de la regulación se toman los respectivos módulos. Por ejemplo en el caso de un transformador, resulta:

$$\Delta = \frac{|\dot{U}_{20}| - |\dot{U}_2|}{U_{2n}} \quad (3)$$

La regulación puede dar un número positivo, negativo o cero. Por ejemplo en el caso de un generador o de un transformador, una regulación positiva significa que al aumentar la carga baja la tensión, este comportamiento es característico en esas máquinas cuando tienen cargas resistivo-inductivas; el caso contrario es característico con cargas capacitivas. Una regulación igual a cero indica que no hay variación de la tensión entre vacío y carga, cosa muy poco frecuente.

En el caso particular de los transformadores, como su impedancia interna es muy reducida, la variación de la tensión es muy pequeña y la regulación es próxima a cero. En los *generadores sincrónicos*, o *alternadores*, ocurre todo lo contrario y la regulación es un número grande, que puede superar el 100 %.

Como en los sistemas de distribución de energía eléctrica, un indicador de calidad del producto es la constancia de la tensión, conviene que los elementos de dicho sistema tengan una regulación lo más pequeña posible, cosa que los transformadores cumplen muy bien; pero como se verá oportunamente, en los alternadores, se deben colocar sistemas de control realimentados

que ajustan la corriente de excitación, a fin de mantener constante la tensión de salida y compensar su mala regulación intrínseca.

3 REGULACIÓN EN TRANSFORMADORES

3.1 Medición directa

La regulación de una máquina se puede determinar en forma directa, por medio de un ensayo en carga, como se analizó en el capítulo de rendimiento de transformadores, pero como en el caso del transformador la variación de la tensión de salida es muy pequeña, el error que resulta al hacer la diferencia de las tensiones en vacío y en carga, puede ser excesivo e invalidar la medición, con el agregado de los inconvenientes propios de aplicar la carga nominal a una máquina de gran potencia. Por lo tanto se prefieren las determinaciones indirectas.

3.2 Determinación a partir del circuito equivalente

Como ya se dijo, el circuito equivalente del transformador es un modelo muy exacto y fácil de determinar, por lo tanto en todos los casos se prefiere calcular la regulación a partir de ese modelo. Como en este caso interesa la caída de tensión que se origina en la impedancia serie de dicho circuito y, además, en condiciones de carga próxima a la nominal, la influencia de la corriente de vacío del transformador es despreciable, se puede trabajar con un circuito equivalente aproximado, sin rama en paralelo, como se muestra en la figura 3 que simplifica notablemente el cálculo y brinda resultados muy ajustados a la realidad.

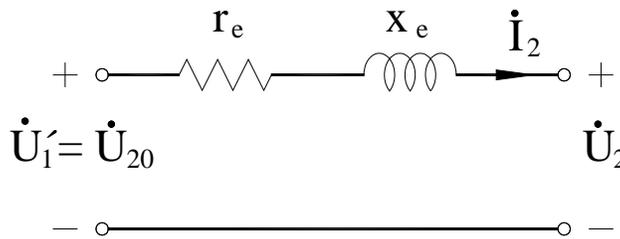


Fig. 3. Circuito equivalente aproximado.

Por comodidad conviene trabajar con las magnitudes referidas al secundario, aplicando la segunda ley de Kirchhoff al circuito de la figura 3, resulta:

$$\dot{U}_{20} = \frac{\dot{U}_1}{a} = \dot{U}'_1 = \dot{U}_2 + (r_e + jx_e)\dot{I}_2 \quad (4)$$

El diagrama fasorial que le corresponde a esta ecuación, considerando una carga resistivo-inductiva, es el mostrado en la figura 4, donde, para mayor claridad, las caídas de tensión se han representado muy ampliadas.

Para el cálculo de la regulación interesan los módulos de las tensiones, por lo tanto la ecuación (4) se puede reescribir haciendo las proyecciones y aplicando el teorema de Pitágoras al triángulo OAB:

$$U_{20} = \sqrt{(r_e I_2 + U_2 \cos \varphi_2)^2 + (x_e I_2 + U_2 \sin \varphi_2)^2} \quad (5)$$

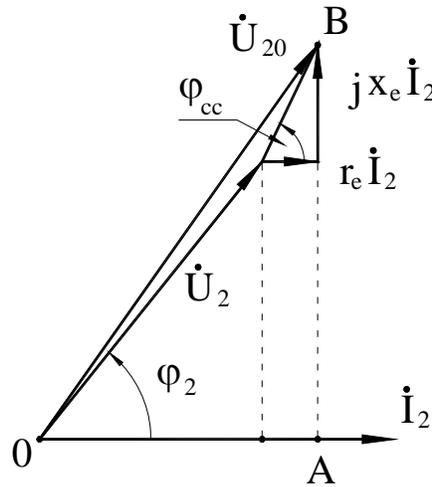


Fig. 4. Diagrama fasorial para carga inductiva.

Como normalmente la alimentación de los transformadores está ajustada para que suministren su tensión nominal a la salida, se puede suponer:

$$U_2 = U_{2n} \quad (6)$$

Considerando tensión nominal a la salida, la regulación definida por la expresión (3), resulta:

$$\Delta = \frac{U_{20}}{U_{2n}} - 1 \quad (7)$$

Entonces la regulación queda:

$$\Delta = \sqrt{\left(\frac{r_e I_2}{U_{2n}} + \cos \varphi_2\right)^2 + \left(\frac{x_e I_2}{U_{2n}} + \sin \varphi_2\right)^2} - 1 \quad (8)$$

Es importante tener en cuenta el signo del ángulo de fase φ_2 : se debe considerar *positivo* para cargas *inductivas* y *negativo* para cargas *capacitivas* y consecuentemente, en este último caso, el signo del seno de φ_2 , también será negativo.

Como en esta expresión la regulación aparece como una diferencia entre dos cantidades muy próximas entre sí, es necesario realizar los cálculos con no menos de *seis cifras significativas* a fin de que el resultado resulte suficientemente exacto. Siempre que no se desprecien cifras en cálculos intermedios, todas las calculadoras actuales brindan con creces esa exactitud.

Si para una corriente de carga dada, por ejemplo la nominal, se representa la regulación en función del ángulo de fase φ_2 de la carga, resulta la curva de la figura 5.

En la figura 5 se puede observar que para un dado ángulo de fase de una carga capacitiva, la regulación se vuelve negativa, lo que significa que la tensión aumenta con la carga. Este fenómeno se suele producir en las redes de distribución eléctrica, en horarios nocturnos, donde se reduce la carga activa de los transformadores y aumentan su influencia las capacidades de los cables.

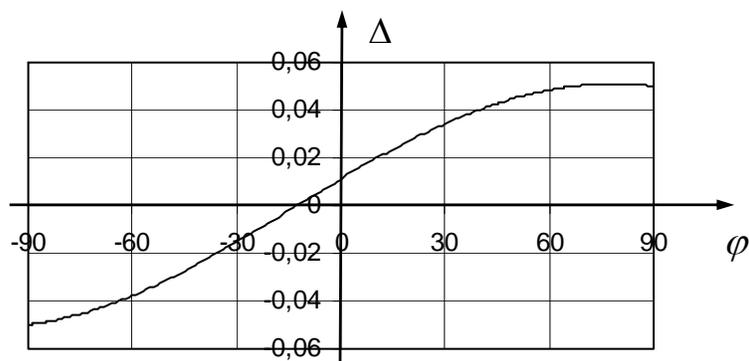


Fig. 5. Regulación en función del ángulo de fase de la carga.

4 CARACTERÍSTICAS EXTERNAS DE LOS TRANSFORMADORES

Estas curvas características se pueden obtener mediante ensayos en carga, pero, como ya se dijo, no es lo usual en el caso de transformadores; en cambio resulta mucho más conveniente calcularlas a partir del circuito equivalente de la figura 3 y empleando la ecuación (5). En efecto, si de esta última expresión se despeja la tensión de salida U_2 resulta la siguiente ecuación cuadrática:

$$U_2^2 + 2(r_e \cos \varphi_2 + x_e \sin \varphi_2) I_2 \cdot U_2 + [(r_e^2 + x_e^2) I_2^2 - U_{20}^2] = 0 \quad (9)$$

En la figura 6 se muestran características externas de un transformador normal con cargas de factor de potencia igual a 1; 0,7 inductivo y 0,7 capacitivo obtenidas con la ecuación (9). En las mismas se puede apreciar la escasa variación de la tensión.

De acuerdo a la ecuación (9) las características externas constituyen a una familia de elipses que pasan por los puntos de funcionamiento en vacío y en cortocircuito.

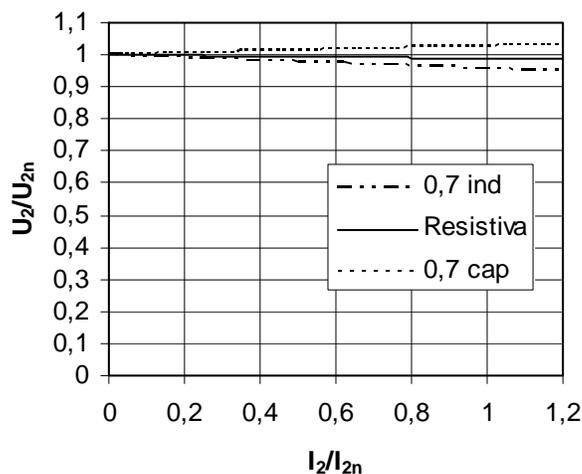


Fig. 6. Características externas.

Si se continuasen las curvas de la figura 6 hasta el cortocircuito del transformador, todas concurrirían al punto:

$$U_2 = 0$$
$$I_{2cc} = \frac{U_{20}}{\sqrt{r_e^2 + x_e^2}} \quad (10)$$

Esa corriente de cortocircuito, con tensión nominal aplicada en el primario, es muy elevada y los transformadores pueden admitirla solamente unos pocos segundos.

5 BIBLIOGRAFÍA

EE Staff del MIT: “*Circuitos Magnéticos y Transformadores*” Editorial Reverté, 1943.

Alberto Ricardo Gray: “*Máquinas Eléctricas*” Tomo I, EUDEBA, 1965.

Corrales Martín J.: “*Teoría, Cálculo y construcción de Transformadores*” Editorial Labor, 1945.

Moeller F. y Werr Th.: “*Electrotecnia General y Aplicada*” Tomo II, primera parte, Editorial Labor, 1972.

Ing. Norberto A. Lemozy
2009