

Método experimental

Otra forma diferente de estimar los parámetros del modelo de circuito del motor de inducción, consiste en solucionar el problema de forma experimental, para lo cual se deben realizar una serie de ensayos que a continuación se explicarán.

Esta metodología difiere de las anteriores en cuanto a que, para resolver el problema se parte de datos diferentes a los datos de catálogo, como son los datos obtenidos de la realización de los diferentes ensayos y no es necesaria ninguna herramienta informática para la resolución del problema. Sin embargo, se incluirá ya que también resuelve el problema principal que se plantea, obtener una estimación de los parámetros del modelo de circuito de un motor de inducción.

A1.1 Metodología

El modelo de circuito utilizado es el mostrado en la Figura A1.1.1, en el que intervienen siete parámetros: los valores de tres resistencias, tres reactancias y el de las pérdidas mecánicas, no mostradas en el modelo de circuito.

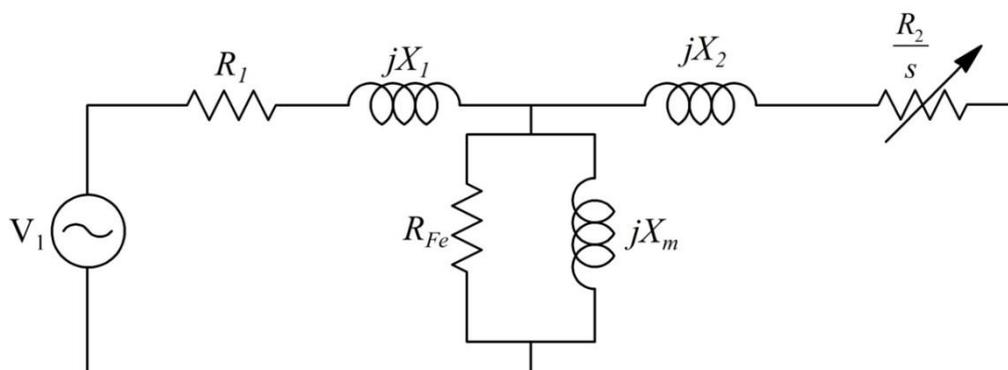


Figura A1.1.1: Modelo de circuito de jaula simple

Los parámetros del modelo de circuito se determinan experimentalmente a partir de un ensayo de funcionamiento en vacío y un ensayo de impedancia.

El ensayo en vacío se lleva a cabo haciendo funcionar el motor a la tensión y frecuencia nominales, sin carga alguna sobre su eje, y permite conocer la intensidad de vacío, I_{NL} , y la potencia activa de funcionamiento en vacío, P_{NL} .

A1.2 Ensayo de funcionamiento en vacío

Este ensayo se realiza haciendo funcionar el motor a tensión y frecuencia nominales, sin carga acoplada. Para hacer la separación de los tipos de pérdidas (pérdidas mecánicas y pérdidas en el hierro), se ensaya la máquina alimentando desde una tensión del 125% de la nominal reduciéndola hasta el punto en el que una reducción de la tensión incrementa la intensidad. Se toman las lecturas de tensión, intensidad, potencia consumida y temperatura.

La medida de la potencia consumida son las pérdidas totales del motor funcionando en vacío. Estas pérdidas incluyen las pérdidas estatísticas, I^2R , las pérdidas mecánicas (fricción y ventilación), P_{pmec} , y las pérdidas en el hierro, P_h , (las pérdidas por efecto Joule en el rotor pueden despreciarse durante el funcionamiento en vacío). Para realizar la separación de las pérdidas (hierro – mecánicas), previamente se debe medir la resistencia estatística de la máquina a temperatura ambiente.

Para determinar las pérdidas mecánicas se sustraen las pérdidas estatísticas, $3I^2R$, de las pérdidas totales (potencia consumida en el funcionamiento en vacío) para cada una de las tensiones del ensayo de funcionamiento en vacío, y se representa la curva de diferencia de potencia ($P_{NL} - 3I_{NL}^2R = P_h + P_{pmec}$) en función de la tensión, extrapolando la curva hasta tensión cero. Donde esta curva se intercepta con el eje de las tensiones, se obtienen las pérdidas mecánicas.

Las pérdidas en el hierro, P_h , a cada tensión de ensayo se obtiene de restar a las pérdidas totales (potencia consumida en el funcionamiento en vacío), las pérdidas mecánicas y las pérdidas por efecto Joule estatísticas calculadas anteriormente.

A1.3 Ensayo de impedancia

Para el ensayo de impedancia, el *IEEE Std. 112-2004* [6] define cuatro métodos:

- a) Método 1: Ensayo de rotor bloqueado alimentado con tensiones de amplitud reducida que haga circular la intensidad nominal y de una frecuencia del 25% de la frecuencia nominal como máximo.
- b) Método 2: Ensayo de rotor bloqueado a tres frecuencias: frecuencia nominal, 50% de la frecuencia nominal y otra como máximo al 25% de la frecuencia nominal, todas a intensidad nominal. De estos tres puntos se determinan las curvas a utilizar para la determinación los valores de las impedancias a frecuencia reducida.

- c) Método 3: El motor se prueba desacoplado de la carga y la tensión de alimentación se reduce para alcanzar aproximadamente el punto de deslizamiento nominal.
- d) Método 4: Cuando ninguno de los anteriores métodos se puede llevar a cabo, se utiliza el siguiente: ensayo de rotor bloqueado a voltaje reducido, frecuencia nominal e intensidad nominal más una prueba bajo carga.

A1.3.1 Método 1

Para la prueba de rotor bloqueado se toman simultáneamente los valores de tensión e intensidad de todas las fases y de la potencia consumida a varios niveles de tensión, a una frecuencia del 25% de la nominal como máximo, con especial cuidado en las proximidades de la intensidad nominal.

Se dibujan las curvas de tensión en abscisas e intensidad y potencia en ordenadas. La curva de intensidad frente a tensión es normalmente una línea recta. Se deriva el valor de tensión y potencia de entrada para determinar la reactancia total y resistencia rotórica al nivel requerido de intensidad a partir de esas curvas. Se determina la resistencia rotórica, R_2 , y la reactancia total X_1+X_2 a partir de esa información utilizando (A1.1) y (A1.11). Los cálculos comienzan asumiendo una relación entre X_1 y X_2 . Cuando se dispone de información de diseño, se utiliza el valor de X_1/X_2 o, si no se dispone de él, para los motores con diseños A, B, C y D definidos en NEMA MG-1-2003 [30], se usan las siguientes relaciones:

$$\left(\frac{X_1}{X_2}\right) = 1.0 \text{ para motores tipo A, D y motores de rotor bobinado}$$

$$\left(\frac{X_1}{X_2}\right) = 0.67 \text{ para motores tipo B}$$

$$\left(\frac{X_1}{X_2}\right) = 0.43 \text{ para motores tipo C}$$

Calcular la potencia reactiva en vacío, Q_0 , y en las condiciones del ensayo Q_L :

$$Q_0 = \sqrt{(mV_{10}I_{10})^2 - P_0^2} \quad (\text{A1.1})$$

$$Q_L = \sqrt{(mV_{1L}I_{1L})^2 - P_L^2} \quad (\text{A1.2})$$

La tensión de fase usada, V_1 , es:

$$V_1 = \frac{\text{Tensión de línea}}{\sqrt{3}}$$

Las ecuaciones (A1.3), (A1.4) y (A1.5) se resuelven de forma iterativa de la siguiente forma:

- 1) Hallar X_m mediante la ecuación (A1.3) suponiendo los valores de X_l/X_m y X_l
- 2) Hallar X_{lL} mediante (A1.4) usando el mismo valor anterior de X_l/X_m
- 3) Hallar X_l mediante (A1.5)
- 4) Hallar X_m mediante (A1.3) usando los valores de X_l y X_l/X_m obtenidos en los dos puntos anteriores
- 5) Volver al punto 2) y continuar el proceso iterativo hasta alcanzar valores estables de X_l y X_l/X_m en un 0.1%

$$X_m = \frac{mV_0^2}{Q_0 - (mI_{10}^2 X_l)} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{X_l}{X_m}\right)^2} \quad (\text{A1.3})$$

$$X_{lL} = \frac{Q_L}{mI_{lL}^2 \times \left[1 + \left(\frac{X_l}{X_2}\right) + \frac{X_l}{X_m}\right]} \times \left[\left(\frac{X_l}{X_2}\right) + \frac{X_l}{X_m} \right] \quad (\text{A1.4})$$

$$X_1 = \frac{f}{f_L} \times X_{lL} \quad (\text{A1.5})$$

$$B_m = \frac{1}{X_m} \quad (\text{A1.6})$$

$$X_{2L} = \frac{X_{lL}}{\left(\frac{X_l}{X_2}\right)} \quad (\text{A1.7})$$

$$X_2 = \frac{f}{f_L} \times X_{2L} \quad (\text{A1.8})$$

$$G_{Fe} = \frac{P_h}{mV_{10}^2} \times \left(1 + \frac{X_l}{X_m}\right)^2 \quad (\text{A1.9})$$

donde:

P_h son las pérdidas en el hierro, en W, determinadas tras el ensayo de funcionamiento en vacío.

$$R_{Fe} = \frac{1}{G_{Fe}} \quad (\text{A1.10})$$

$$R_{2L} = \left(\frac{P_L}{mI_{lL}^2} - R_{lL} \right) \times \left(1 + \frac{X_2}{X_m}\right)^2 - \left(\frac{X_2}{X_l}\right)^2 \times X_{lL}^2 G_{Fe} \quad (\text{A1.11})$$

donde R_{1L} es igual a la mitad de la resistencia estática, en ohmios, a la temperatura de la prueba.

Se corrigen R_{1L} y R_{2L} a la temperatura especificada usando

$$R_b = \frac{R_a(t_b - k_1)}{t_a + k_1} \quad (\text{A1.12})$$

donde: R_a es la resistencia conocida a la temperatura t_a

t_a es la temperatura en °C a la que se ha medido R_a

t_b es la temperatura en °C a la que debe corregirse la resistencia

R_b es la resistencia, en ohmios, una vez corregida a la temperatura t_b

k_1 es una constante que depende del material y vale 234.5 para el cobre y 225 para el aluminio.

Una vez corregidas R_{1L} y R_{2L} con la temperatura, se identifican como R_1 y R_2 .

A1.3.2 Método 2

Se realiza el mismo proceso que para el método 1 para determinar la resistencia rotórica, R_{2L} , y la reactancia total $X_{1L}+X_{2L}$, a cada una de las tres frecuencias del ensayo, (25%, 50% y 100% de la frecuencia nominal). Se trazan las curvas de los valores de resistencia rotórica y reactancia total frente a frecuencia mediante las que se determinan los valores requeridos a las frecuencias de operación reducidas. Los resultados de resistencias e inductancias, después de la conversión a la frecuencia de operación, se usan en el modelo de circuito para determinar las características de la máquina.

A1.3.3 Método 3

La resistencia rotórica, R_2 , y la reactancia rotórica, X_2 , a frecuencia reducida debe obtenerse de las lecturas (tensiones, potencias, intensidades, velocidad y resistencia del estator) a un deslizamiento que aproxime la frecuencia rotórica requerida. En este método, la máquina se hace funcionar descargada o con una carga ligera y a una tensión reducida (frecuencia nominal) que proporcione el deslizamiento deseado.

Con los datos del ensayo de vacío, se calcula la reactancia total por fase para cada punto de la prueba y se dibuja una curva de reactancia total por fase frente a tensión por fase, Figura A1.1.

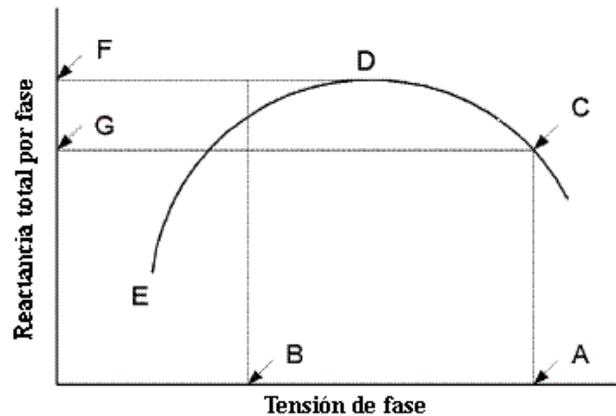


Figura A1.1: Reactancia total del ensayo de vacío

En la Figura A1.1:

A es la tensión nominal

B indica un valor de tensión reducido en el ensayo de vacío

CDE es la curva de reactancia total a partir de la prueba de vacío

F es la reactancia correspondiente al punto más alto, D, de la curva CDC. Este valor es usado como reactancia total $X_l + X_m$ en los cálculos de los ensayos a tensión reducida.

G es la reactancia total $X_l + X_m$, usada para determinar X_m

A partir de los datos del ensayo a tensión reducida, se calcula la impedancia total por fase, Z , y el factor de potencia FP . El ángulo de fase, θ_1 , de la intensidad estática, la resistencia total aparente por fase, R , y la reactancia total aparente por fase, X , se determinan como:

$$\theta_1 = -\arccos(FP) \quad (A1.13)$$

$$R = Z \times \cos(-\theta_1) \quad (A1.14)$$

$$X = Z \times \sin(-\theta_1) \quad (A1.15)$$

El valor de X determinado en la ecuación (A1.15) se usa como primera aproximación de la suma ($X_1 + X_2$) para el siguiente proceso iterativo. El cociente de reactancias, X_1/X_2 , se obtiene de los datos de diseño o, si no se conocen, de las relaciones dadas en el método 1. Basado en esta suma y cociente de reactancias iniciales, X_1 se calcula como:

$$X_1 = X \frac{\left(\frac{X_1}{X_2}\right)}{1 + \left(\frac{X_1}{X_2}\right)} \quad (A1.16)$$

Utilizando el valor de la reactancia total sin carga, $(X_l + X_m)$, desde el punto D de la Figura A1.1, el valor de la reactancia de magnetización, X_m , puede aproximarse por:

$$X_m = (X_l + X_m) - X_l \quad (\text{A1.17})$$

A partir de los datos del ensayo a tensión reducida se calcula:

$$V_2 = \sqrt{[V_1 - I_l R_l \cos \theta_l - X_l \text{sen} \theta_l]^2 + [I_l R_l \text{sen} \theta_l + X_l \cos \theta_l]^2} \quad (\text{A1.18})$$

La resistencia, R_l , debe corregirse con la temperatura del ensayo antes de usar la ecuación (A1.17) y también en las ecuaciones siguientes.

$$\theta_2 = \arctan \left(\frac{-I_l R_l \text{sen} \theta_l - X_l \cos \theta_l}{V_1 - I_l R_l \cos \theta_l - X_l \text{sen} \theta_l} \right) \quad (\text{A1.19})$$

$$I_e = \frac{V_2}{X_m} \quad (\text{A1.20})$$

$$R_{Fe} = \frac{V_2^2}{\left(\frac{P_h}{m} \right)} \quad (\text{A1.21})$$

$$G_{Fe} = \frac{1}{R_{Fe}} \quad (\text{A1.22})$$

$$I_{Fe} = \frac{V_2}{R_{Fe}} \quad (\text{A1.23})$$

$$I_2 = \sqrt{I_l \cos \theta_l - I_e \text{sen} \theta_2 - I_{Fe} \cos \theta_2}^2 + [-I_l \text{sen} \theta_l + I_e \cos \theta_2 + I_{Fe} \text{sen} \theta_2]^2 \quad (\text{A1.24})$$

$$X_2 = \frac{-V_l I_l \text{sen} \theta_l - I_l^2 X_l - I_e^2 X_m}{I_2^2} \quad (\text{A1.25})$$

$$X = X_l + X_2 \quad (\text{A1.26})$$

Repetir la ecuación (A1.16) usando (A1.26) con X_l/X_2 con el mismo valor inicial usado en (A1.16) y el nuevo valor de X de (A1.26) y continuar hasta conseguir valores estables de X_l y X_2 que varíen menos de un 0.1%.

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2} \quad (\text{A1.27})$$

$$R_2 = s \sqrt{Z_2^2 - X_2^2} \quad (\text{A1.28})$$

Usando el valor de la reactancia total, (X_1+X_m) , del ensayo de vacío a tensión nominal, punto C en Figura A1.1, calcular:

$$X_m = X_1 + X_m - X_1 \quad (A1.29)$$

$$B_m = \frac{1}{X_m} \quad (A1.30)$$

$$V_2 = \sqrt{[V_1 - I_1 R_1 \cos \theta_1 - X_1 \sin \theta_1]^2 + [I_1 R_1 \sin \theta_1 + X_1 \cos \theta_1]^2} \quad (A1.31)$$

$$G_{Fe} = \frac{P_h}{mV_2^2} \quad (A1.32)$$

Los valores obtenidos en (A1.13), (A1.25), (A1.30) y (A1.32) se usan en los cálculos del modelo de circuito.

A1.3.4 Método 4

Son necesarios los siguientes ensayos a frecuencia nominal:

- Ensayo de vacío
- Ensayo de rotor bloqueado a tensión reducida
- Operación de la máquina descargada (o con carga reducida) a tensión reducida y deslizamiento de par nominal.

Para cada ensayo, se miden las tensiones, potencias, intensidades, deslizamiento y resistencia estatórica.

Los valores de X_1 , X_2 , X_m y R_{Fe} se determinan con el ensayo de vacío y de rotor bloqueado a frecuencia nominal siguiendo el método 1. El valor de R_2 a frecuencia reducida se obtiene del ensayo con carga nominal. El deslizamiento de par máximo se determina usando datos de diseño o datos de la placa de características.

Tras haberse determinado X_1 por el método 1, el valor de X_2 se obtiene del ensayo a deslizamiento nominal como sigue:

- Calcular V_2 mediante (A1.18).
- Calcular θ_2 mediante (A1.19).
- Calcular I_{Fe} e I_e mediante (A1.23) y (A1.20).
- Calcular I_2 mediante (A1.24).
- Calcular la impedancia rotórica, Z_2 , usando (A1.27).
- Calcular R_2 usando (A1.28).