

Diseño de un motor sincrónico y su sistema de protección

Ángel del Río Mora

Candidato a graduación en ingeniería eléctrica, UPRR

Sinopsis

El diseño de un motor sincrónico no es una tarea común en la práctica de la ingeniería eléctrica debido a que este tipo de máquina está disponible en el mercado para toda posible aplicación, ya sea de carácter mecánico o para compensar potencia eléctrica. Esta situación crea la interrogante de cuál es una técnica para diseñar un motor sincrónico.

Este trabajo muestra el uso de una técnica de diseño por tanteo, en la cual se parte de unos parámetros descriptivos iniciales para una máquina, obtenidos matemáticamente, y con el programa "Electromagnetic Transients Program" (EMTP) se define el motor deseado por medio de sus parámetros descriptivos.

Abstract

Design of a synchronous motor and its protection system

The design of a synchronous motor is not a common task in the practice of electrical engineering because this type of machine is widely available for mechanical applications and as synchronous capacitors. This situation makes us ponder on a technique to design a synchronous motor.

This paper presents a technique of design by trial and error where the researcher starts with the descriptive initial parameters for a machine, obtained mathematically, and then, with the Electromagnetic Transient Program (EMTP), the desired motor is defined.

Introducción

En este artículo se presenta el desarrollo del método de diseño por tanteo para determinar los parámetros que mejor describen un motor sincrónico. En primer lugar se obtienen unos parámetros descriptivos para un motor sincrónico mediante cálculos matemáticos y luego se usa el programa de simulación de redes de potencia eléctrica conocido como "Electromagnetic Transients Program" (EMTP) o "Alternative Transients Program" (ATP) para obtener los parámetros finales que describen el motor sincrónico deseado. Luego de obtener los parámetros se simula en el programa una falla trifásica en los terminales del motor para observar el comportamiento de esta máquina bajo condiciones anormales o de falla eléctrica. Como próximo paso se une el motor a la subestación eléctrica y se simula el caso (motor, transformador, carga), tanto con una falla trifásica en los terminales del motor como una de fase, y se monitorean los cambios producidos por estas condiciones anormales en el motor sincrónico deseado. Finalmente se establece una protección eléctrica para el sistema completo (motor, transformador, carga).

Cálculo de los parámetros iniciales

Los parámetros que describen una máquina sincrónica son:

- Ra Resistencia del inducido en dominio de α , β , γ por fase
- Rf Resistencia (mutua) de campo (rotor) o lado excitación DC
- Rkd Resistencia que representa la capacidad de liberar energía de los embobinados de amortiguamiento en el campo ("damper winding") en el dominio d
- Rkq Resistencia que representa la capacidad de liberar energía de los embobinados de amortiguamiento en el campo ("damper winding") en el dominio de q
- La Inductancia mutua dominante del inducido ("leakage

inductance”)

Lmd	Inductancia de magnetización en el dominio de d
Lmq	Inductancia de magnetización en el dominio de q
Lfm	Inductancia mutua del campo (rotor)
Lkd	Inductancia propia del “damper winding” (en el rotor) en el dominio d
Lkq	Inductancia propia del “eddy - current winding” en el rotor en dominio q
Lakd	Inductancia mutua entre el embobinado del rotor y el estator en el dominio d
Lakq	Inductancia mutua entre el embobinado del rotor y el estator en el dominio q
J	Inercia efectiva del rotor (“mechanical damping”)
β	Posición angular del rotor (o δ en radianes)

Estos parámetros están orientados al dominio o, d y q. La figura 1 muestra cómo se relaciona este dominio con la máquina sincrónica. Esta figura presenta un corte transversal de un motor sincrónico de dos polos. El propósito de identificar las características del motor sincrónico es identificar el eje directo (d), que se centraliza magnéticamente en el plano horizontal, y el eje de cuadratura (q), que está 90 grados eléctricamente adelantado al eje d.

Del Río/Diseño motor sincrónico

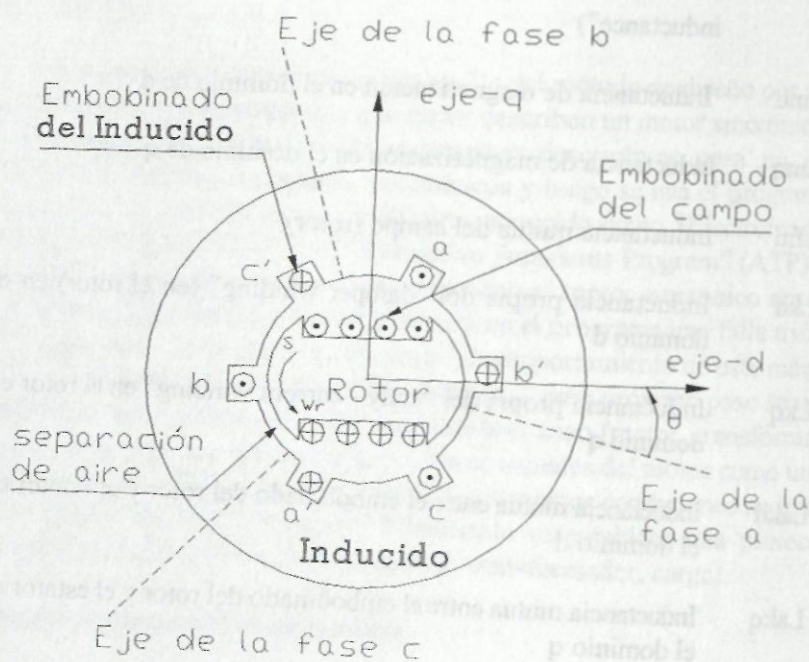


Figura 1. Corte transversal de un motor sincrónico de dos polos

La selección de que el eje q adelanta al eje d es puramente arbitraria¹. La posición del rotor relativa al inducido se mide por el ángulo θ entre el eje d y el eje magnético de la fase a . Se usan los parámetros en el dominio d y q para eliminar la dependencia de estos valores de la posición relativa del rotor (θ). Para obtener estos parámetros iniciales, en primer lugar se determinan una serie de valores de los parámetros típicos para este tipo de máquina, enmarcados entre un valor mínimo y un valor máximo. La tabla 1 muestra los valores determinados.

¹Kundur, P., 1994, *Power System Stability and Control*, Power System Engineering Series, Primera Edición, McGraw - Hill Inc., p. 45 -196.

Tabla 1. Valores típicos de los parámetros del motor sincrónico para una unidad termal ²

Reactancia sincrónica	Xd	1.0 - 2.3
	Xq	1.0 - 2.3
Reactancia transitoria	X' d	0.15 - 0.4
	X' q	0.3 - 1.0
Reactancia subtransitoria	X" d	0.12 - 0.25
	X" q	0.12 - 0.25
Constante de tiempo Oc transitoria	T' do	3.0 - 10.0
	T' qo	0.5 - 2.0
Constante de tiempo Oc subtransitoria	T" do	0.02 - 0.05
	T" qo	0.02 - 0.05
Inductancia mutua del estator	Xl	0.1 - 0.2
Resistencia del estator	R a	0.0015 - 0.005

nota:

- a - Los valores de las reactancias están en por unidad con valores bases del estator igual a la máquina correspondiente de los valores medios.
- b - Las constantes de tiempo son en segundos.

Una vez se obtienen estos valores típicos se el valor medio de cada grupo de valores para tener mayor libertad al momento de comenzar a variar los parámetros teóricos obtenidos con las siguientes ecuaciones que relacionan estos valores con los que presenta la tabla 1:

$$L_{ad} = L_d - L_l \quad (1)$$

$$L_{aq} = L_q - L_l \quad (2)$$

² Kundur, P., 1994, *Power System Stability and Control*, Power System Engineering Series, Primera Edición, McGraw-Hill Inc., Págs.. 45 - 196.

Del Río/Diseño motor sincrónico

$$L_d' = L_l + \frac{L_{ad} L_{fd}}{L_{ad} + L_{fd}} \quad (3)$$

$$L_{kq} = L_l + L_q \quad (4)$$

$$L_{kd} = L_l + L_d \quad (5)$$

$$T'_{do} = \frac{L_{ad} + L_{fd}}{R_{fd}} \quad (6)$$

$$T''_{do} = \frac{1}{R_d} \left(L_d + \frac{L_{ad} L_{fd}}{L_{ad} + L_{fd}} \right) \quad (7)$$

$$T''_{qo} = \frac{1}{R_q} \left(L_q + \frac{L_{aq} L_{fd}}{L_{aq} + L_{fd}} \right) \quad (8)$$

Para calcular el ángulo interno del rotor se usa la relación fasorial que presenta la figura 2.

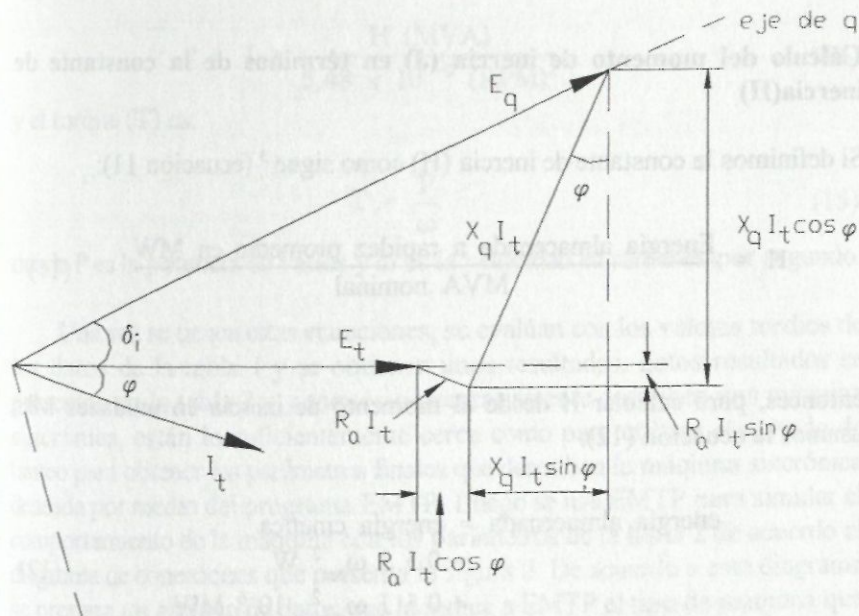


Figura 2. Relación fasorial para calcular el ángulo interno del rotor

De la relación fasorial se obtiene que:

$$\delta_i = \tan^{-1} \left[\frac{X_q I_t \cos \varphi - R_a I_t \sin \varphi}{E_t + R_a I_t \cos \varphi + X_q I_t \sin \varphi} \right] \quad (9)$$

Si el parámetro $\cos \varphi$ tiene un valor de 1, entonces:

$$\delta_i = \tan^{-1} \left[\frac{X_q \times I_t}{E_t + R_a I_t} \right] \quad (10)$$

Cálculo del momento de inercia (J) en términos de la constante de inercia(H)

Si definimos la constante de inercia (H) como sigue³ (ecuación 11):

$$H = \frac{\text{Energía almacenada a rapidez promedio en MW}}{\text{MVA nominal}} \quad (11)$$

entonces, para calcular H desde el momento de inercia en unidades Mks usamos la ecuación (12):

$$\begin{aligned} \text{energía almacenada} &= \text{energía cinética} \\ &= 0.5 J \omega_{om}^2 W \\ &= 0.5 J \omega_{om}^2 10^{-6} MW \end{aligned} \quad (12)$$

donde J es el momento de inercia en kg/m² y ω_{om} es el valor medio de la rapidez en rad/s mecánicos [$2 \pi (\text{RPM} / 60)$]. Por lo tanto,

$$H = 5.48 \times 10^{-9} \frac{J (\text{RPM})^2}{\text{MVA}_{\text{nominal}}} \quad (13)$$

y despejando por el momento de inercia (J)

³ Kundur, P., 1994, *Power System Stability and Control*, Power System Engineering Series, Primera Edición, McGraw - Hill Inc., p. 45-196.

$$J = \frac{H \text{ (MVA)}}{5.48 \times 10^{-9} \text{ (RPM)}^2} \quad (14)$$

y el torque (T) es:

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (15)$$

donde P es la potencia en vatios y ω es la velocidad en radianes por segundo.

Una vez se tienen estas ecuaciones, se evalúan con los valores medios de los datos de la tabla 1 y se obtienen unos resultados. Estos resultados se presentan en la tabla 2 y, aunque no necesariamente describen una máquina sincrónica, están lo suficientemente cerca como para utilizar el método de tanteo para obtener los parámetros finales que describen la máquina sincrónica deseada por medio del programa EMTP. Luego se usa EMTP para simular el comportamiento de la máquina con los parámetros de la tabla 2 de acuerdo al diagrama de conexiones que presenta la figura 2. De acuerdo a este diagrama se prepara un archivo de datos que le indica a EMTP el tipo de máquina que se simula, el sistema eléctrico que la alimenta en el caso del motor y cómo se presentan las diferentes partes de la máquina en el archivo de datos según las condiciones o eventos deseados por el usuario.

Tabla 2. Datos finales teóricos que describen un motor sincrónico:

Variable	Valor en pu	Valor real
Ld	1.65	5.04mH
Lq	1.65	5.04mH
Ll	0.15	0.46mH
Ra	3.25m	3.75m Ω
Lad	1.5	4.59mH
Laq	1.5	4.59mH
Lfd	0.1364	0.42mH
Lkq	1.8	5.51mH
Lkd	1.8	5.51mH
Rfd	0.6678m	0.7704m Ω
Rd	0.1345	0.1552 Ω
Rq	0.1345	0.1552 Ω

Del Río/Diseño motor sincrónico

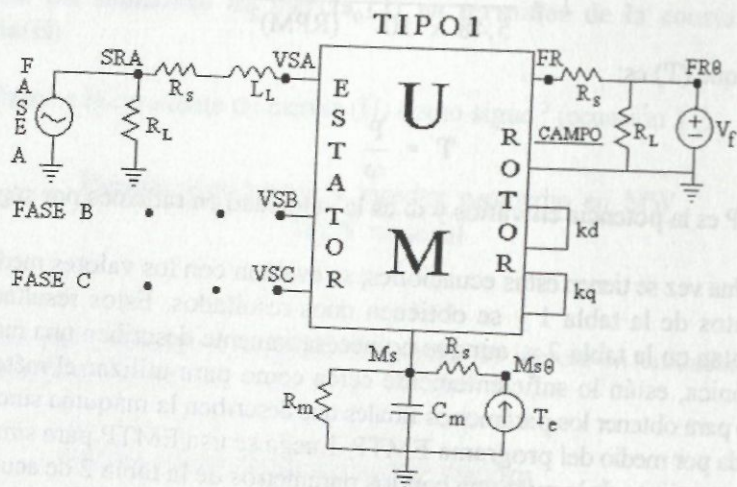


Figura 2. Diagrama de conexiones de un motor sincrónico para uso del programa EMTP

Las variables en el diagrama de conexiones del motor sincrónico representan lo siguiente:

SRA, SRB, SRC Voltajes trifásicos balanceados ⁴

R_L Resistencia grande, con un valor que fluctúe entre 10^5 y 10^8 , para conexión con EMTP (de la fuente a tierra)

R_s Resistencia pequeña, con un valor que fluctúe entre 10^{-3} y 10^{-6} , para aislación y medida de corriente

⁴Leuven EMTP Center (ED.), 1990, *Alternative Transients Program - Rule Book*, Can / Am EMTP User Group.

- L_L Inductancia de línea (mH)
 C_m Capacitor análogo a la inercia

$$C_m = J \cdot 10^6 \mu\text{F} \quad (16)$$

donde J se da en $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

- Te Fuente de corriente DC que representan la estabilidad de la carga mecánica (negativo para motor)
 R_m Resistencia para modelar el amortiguamiento mecánico lineal

$$R_m = \frac{1}{\beta \Omega} \quad (17)$$

- MS Nodo que representa la velocidad mecánica (rad/s)
 V_A, V_B, V_C Voltajes pico en las fases A, B y C, respectivamente.

$$V_A = \sqrt{2/3} V_{\text{rms línea-línea}} \sin(377t + 0) \quad (18)$$

$$V_B = \sqrt{2/3} V_{\text{rms línea-línea}} \sin(377t - 120) \quad (19)$$

Del Río/Diseño motor sincrónico

$$V_C = \sqrt{2/3} V_{\text{rms línea-línea}} \sin (377t + 120) \quad (20)$$

FR Nodo que representa la aportación de la excitación DC

Luego de construir el archivo de datos que describe el caso a simular y de simular el caso se obtienen los siguientes resultados:

Problema El motor sincrónico descrito por los valores teóricos no se estabiliza al graficar el torque electromagnético (T_e) versus el tiempo

Solución Variar las magnitudes de las inductancias de magnetización en los dominios D y Q (L_{md} y L_{mq}) para disminuir las pérdidas a través de la resistencia del cobre del inducido. Esta resistencia disipa una cantidad de energía directamente proporcional a la magnitud de la excitación DC.

Problema La velocidad del eje no se mantiene constante en los 377 radianes por segundo o 3600 RPM

Solución Para estabilizar la velocidad del eje solo hay que estabilizar la magnitud del torque electromagnético, pues al éste oscilar también oscila la magnitud de los flujos electromagnéticos que son los responsables de hacer girar el eje

Problema El tiempo que tarda el motor en vencer la inercia efectiva del eje (arranque) es muy alto (se presentan altas fluctuaciones de corriente durante este proceso)

Solución Disminuir la magnitud de la inercia efectiva del eje (J) que va a mover la carga mecánica del motor.

- | | |
|----------|--|
| Problema | Las pérdidas debido al paso de la corriente del inducido (I_a) son muy altas. |
| Solución | Disminuir la magnitud de la impedancia del inducido ($Z_a = R_a + j X_a$) para disminuir las pérdidas y aumentar la eficiencia del motor. |
| Problema | Determinar si el motor va a funcionar en excitación normal o en sobreexcitación. |
| Solución | Determinar qué beneficio se obtiene con la sobreexcitación que aumenta el factor de potencia en la barra de distribución de 38 kV y genera ahorros en la factura de servicio mensual a pagar |
| Problema | Si se escoge el funcionar en sobreexcitación, esto indica que el motor funcionará como una carga capacitiva ¿Cómo lograrlo? |
| Solución | Aumentar la magnitud de la corriente de campo (I_f) hasta conseguir un valor que sobreexcite la máquina, pero que no comprometa la eficiencia del motor. |

El procedimiento para corregir los problemas encontrados es el estabilizar el motor variando la magnitud de las inductancias de magnetización en los dominios de d (L_{md}) y q (I_{mq}) para disminuir las pérdidas a través de la resistencia del cobre del inducido. Estas inductancias almacenan una cantidad de energía directamente proporcional al valor de la excitación DC. Luego se varía la magnitud del amortiguamiento mecánico, J , para cambiar la magnitud de la inercia efectiva del rotor hasta conseguir una combinación que refleje estabilidad en la gráfica del voltaje en los terminales del motor y del torque electromagnético en un tiempo razonable. Cuando se tiene la combinación más apropiada se varía la magnitud de la resistencia del inducido (R_a) para disminuir las pérdidas debido al paso de la corriente (I_a) por el inducido y, por consiguiente, aumentar la eficiencia del motor sincrónico. Finalmente se lleva el motor a su funcionamiento en estado estable variando los parámetros correspondientes a la excitación DC y se obtienen los parámetros finales que

Del Río/Diseño motor sincrónico

describen el motor deseado. La tabla 3 presenta los datos finales que describen el motor sincrónico que tiene las siguientes características:

- Tres fases
- Dos polos
- 6705 caballos de fuerza de salida (5000 kW)
- Velocidad nominal de 3600 RPM (377 radianes por segundo)
- Frecuencia de 60 ciclos
- Corriente nominal de 694 amperios
- Ciclo de trabajo continuo
- Corriente de campo (excitación DC) de 6946 amperios
- Voltaje nominal de 4160 voltios
- Voltaje de campo (excitación DC) de 62.9 voltios
- Factor de potencia de 97% (adelantado)

Tabla 3. Datos finales que describen el motor sincrónico

Variable (teórico)	Variable (EMTP)	Valores (teórico inicial)	Valores (EMTP final)	Unidades (reales)
Ra	Ra	3.73 E - 3	0.42 E - 2	Ω
Rfd	Rfmut.	0.7704 E - 3	9.07 E - 3	Ω
Rd	Rkd	0.1552	9.28 E - 4	Ω
Rq	Rkq	0.1552	1.32 E - 2	Ω
Ll	La	0.46 E - 3	0.75 E - 4	H
Lfd	Lfmut.	0.42 E - 3	3.65 E - 6	H
Ld	Lmd	5.04 E - 3	1.752 E - 3	H
Lq	Lmq	5.04 E - 3	1.752 E - 3	H
Lad	Lakd	4.59 E - 3	7.67 E - 5	H
Laq	Lakq	4.59 E - 3	7.67 E - 5	H
J	J	299.21	200.0	H
δi	B	0.50	11.42	kg * m ² radianes

Una vez se obtienen los parámetros finales que describen el motor deseado se simulan una falla trifásica eléctrica a tierra en los terminales del motor y una falla de fase a tierra. Esto plantea las siguientes interrogantes:

¿Qué ocurre en el motor sincrónico durante una falla trifásica a tierra en sus terminales y luego de ella?

- La magnitud del voltaje en las tres fases se interrumpe por completo durante la falla, luego aumenta drásticamente en el instante en que desaparece la falla y luego decae a un valor muy por debajo del requerido cercano a cero (esto de forma oscilante)
- La magnitud de la corriente que alimenta el motor incrementa rápidamente en las tres fases en el momento en que se presenta la falla y luego comienza a disminuir.
- La magnitud del torque (T_e) aumenta rápidamente en el momento de la falla para luego decaer por el tiempo que dura la falla para luego continuar oscilando de forma constante.
- La magnitud de la velocidad del eje (rotor) disminuye drásticamente en el momento en que se presenta la falla trifásica para luego disminuir hasta un valor cercano a cero.
- La magnitud de la corriente de campo (excitación DC) aumenta drásticamente en el momento de la falla para luego disminuir de forma oscilante hasta un valor muy bajo. Cuando desaparece la falla, la corriente continúa oscilando alrededor de su valor original.
- La magnitud del ángulo del rotor (eje) comienza a incrementarse sin control alguno en el instante en que ocurre la falla y continúa con este comportamiento una vez desaparece la misma.
- La magnitud del flujo electromagnético mutuo (entre el rotor y el estator) en el dominio D cae drásticamente por el tiempo en que se presenta la falla para luego aumentar levemente y comenzar a oscilar sin control.
- La magnitud del flujo electromagnético mutuo (entre el rotor y el estator) en el dominio Q aumenta drásticamente en el momento en que se presenta la falla para luego disminuir mientras está presente la falla y luego aumenta de forma oscilante sin control alguno.

Del Río/Diseño motor sincrónico

¿Que ocurre en el motor sincrónico durante y luego de una falla a tierra en la fase A de sus terminales ?

- La magnitud del voltaje en sus terminales se desbalancea, debido a que la magnitud del voltaje en la fase A es cero, por el tiempo en que se presenta la avería. Cuando la falla desaparece, la magnitud del voltaje de la fase A aumenta drásticamente a un valor entre 5 y 6 veces el normal.
- La magnitud de la corriente en las tres fase aumenta, pero es la corriente de la fase A la que más alto valor alcanza. Luego se igualan las tres magnitudes (fases A, B, C) y continúan oscilando.
- En el momento en que ocurre la falla a tierra, en la fase A del motor se observa una alta fluctuación en corriente a través del neutral del transformador que está conectado a los terminales del motor.
- La magnitud del ángulo del rotor (eje) decae en forma oscilante sin control desde el momento en que ocurre la falla hasta alcanzar un valor cerca de cero.
- La magnitud del flujo electromagnético mutuo (entre el rotor y el estator) en el dominio D se distorsiona levemente durante la falla para luego estabilizarse y aumentar su magnitud levemente luego de desaparecer el disturbio.
- La magnitud del flujo electromagnético mutuo (entre el rotor y el estator) en el dominio Q se distorsiona drásticamente en forma decadente por el período en que se presenta la falla para luego oscilar y posteriormente estabilizarse en un valor cercano al original.
- La magnitud de la velocidad del eje (rotor) permanece prácticamente sin variar durante el disturbio ni luego de él.
- La magnitud del torque (T_e) aumenta drásticamente al momento de

ocurrir la falla para luego disminuir en forma oscilante mientras la falla está presente. Finalmente oscila hasta que se estabiliza.

Luego de realizar el estudio se establece un sistema de protección eléctrica para el motor y el transformador. La figura 3 muestra el detalle de este sistema de protección.

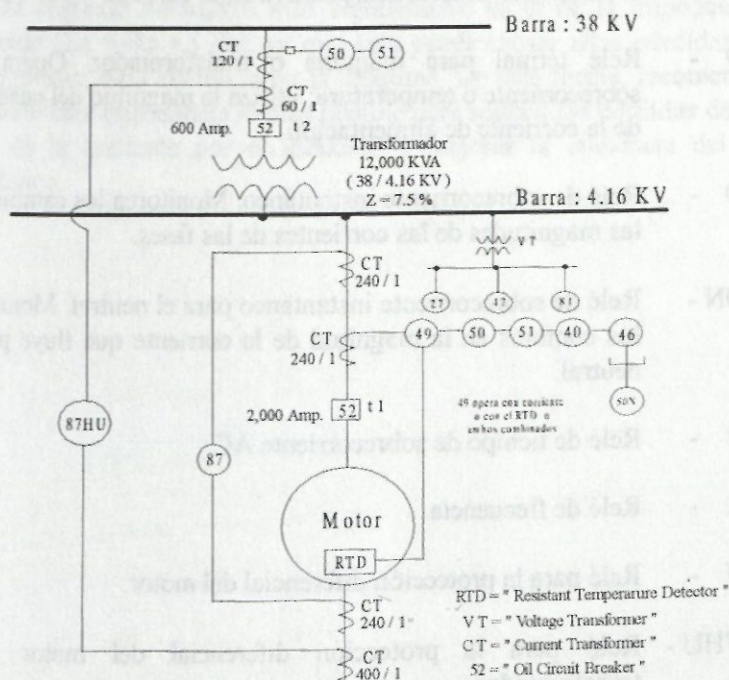


Figura 3. Sistema de protección para el motor y el transformador

Los números dentro de los círculos en la figura 3 indican la función de los relés, la cual se describe a continuación:

27 - Relé para bajo voltaje. Verifica el nivel de servicio en la barra

Del Río/Diseño motor sincrónico

- de 4,160 voltios.
- 40 - Relé de campo. Verifica que la excitación DC este presente.
 - 46 - Relé para verificar balance de fase o de fase invertida.
 - 47 - Relé para monitorear secuencia de fase del voltaje. Verifica que el motor este en secuencia positiva en la barra de 4,160 voltios.
 - 49 - Relé termal para máquina o transformador. Opera por sobrecorriente o temperatura; utiliza la magnitud del cuadrado de la corriente de alimentación.
 - 50 - Relé de sobrecorriente instantáneo. Monitorea los cambios en las magnitudes de las corrientes de las fases.
 - 50N - Relé de sobrecorriente instantáneo para el neutral. Monitorea los cambios en la magnitud de la corriente que fluye por el neutral.
 - 51 - Relé de tiempo de sobrecorriente AC.
 - 81 - Relé de frecuencia.
 - 87 - Relé para la protección diferencial del motor.
 - 87HU - Relé para la protección diferencial del motor y el transformador.

Conclusiones

Una vez completado el desarrollo del diseño del motor sincrónico se obtiene que el parámetro más significativo en la máquina es el de la inductancia de magnetización en los dominios d y q (L_{md} y L_{mq}) debido a su relación directa con la resistencia del cobre del inducido. Por lo tanto,

recomendamos disminuir esta inductancia de primera instancia en magnitudes de 10 y observar la magnitud del torque electromagnético (T_e) para verificar el tiempo de estabilización del mismo. Este tiempo debe ser entre 1 y 2.5 segundos para un buen arranque de la máquina. No obstante, hay que tener mucho cuidado con este tiempo porque en este período ocurren altas fluctuaciones en las corrientes a través de los embobinados del inducido.

El segundo parámetro más significativo es el de la impedancia del inducido ($Z_a = R_a + j X_a$), ya que ésta puede causar altas pérdidas y, por consiguiente, baja eficiencia en la máquina. De esta forma, recomendamos disminuir esta impedancia lo más posible para reducir las pérdidas debido al paso de la corriente por el inducido y mejorar la eficiencia del motor sincrónico.

BIBLIOTECA UPRN