

Análisis de la operación del elemento de sobrecorriente residual: Estudio en equipo de baja tensión

Jaisiel Quintero Balandrán
Comisión Federal de Electricidad
SGRTNE, C.T. Carbón II
jaisiel.quintero@cfe.gob.mx

RESUMEN

Este documento se encuentra enfocado a la protección contra tierra en motores de baja tensión y la causas de la falla prematura debido a la falla en el aislamiento.

PALABRAS CLAVE

Falla a tierra, motor de inducción, protección de sobrecorriente, corriente de secuencia cero, huecos de tensión.

ABSTRACT

This paper is focused on the ground protection in motors of low voltage and the causes of the premature failure due to insulation failure.

KEYWORDS

Phase-to-ground fault, induction motor, overcurrent protection, zero-sequence current, sags.

INTRODUCCIÓN

En el presente documento se presenta una explicación teórica a la problemática presentada en equipos de baja tensión instalados principalmente en el área de carbón y cenizas de las centrales termoeléctricas de la Zona Norte de Coahuila en donde se observa la operación del elemento de sobrecorriente a tierra; se eligió la observación de los motores a un nivel de 480 V por ser estos los que tienen una mayor cantidad de arranques diarios, y por ende presentan la tasa de mortandad más grande así como las reparaciones subsecuentes.

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

Motores

Los motores observados en este estudio son de diversas capacidades, mismos que oscilan entre 60 y 300 HP, con distintas armazones y aplicaciones. Para fines de categorización y por conveniencia del estudio se engloban en función a su aplicación siendo catalogados de la siguiente manera:

- Bombas para manejo de lodos.
- Bombas para manejo de aguas turbias.



Artículo publicado en el XII Simposio Iberoamericano sobre Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia, 2015.

-Reductores acoplados a transportadores de bandas de diferentes longitudes (entre 30 m y 1500 m).

-Ventiladores, soplantes y compresores de diferentes capacidades.

Elementos de protecciones

Los relevadores de sobre corriente empleados son las unidades de disparo Digitrip, en sus diferentes versiones desde 520 hasta el 1150, dichas protecciones en su mayoría cuentan con los ajustes en base al cálculo de corto circuito elaborado para la puesta en servicio.

Transformadores de corriente

Los transformadores de corriente (TC's) se encuentran montados en la salida de potencia de los interruptores en el lado de la carga, con relación de transformación a 5A secundarios, mismos que se encuentran montados en los interruptores en las barras de salida de fuerza al motor, otra parte de los interruptores en cuestión se encuentran alojados en el interior del mismo interruptor y una pequeña parte se encuentra montado en los conductores de potencia, esta sección de TC's corresponde a los de secuencia negativa mismos que tienen una relación de 1000/1A.

Condiciones ambientales

El clima de la región es extremo, registrando temperaturas que oscilan entre los 0°C en temporada invernal y los 50 °C en temporada de verano, la altitud relativa oscila los 300 msnm, los equipos se encuentran totalmente expuestos a la intemperie o parcialmente encapsulados, cabe mencionar este dato en virtud de que esto representa considerables esfuerzos mecánicos en los equipos y tienen inferencia directa en el comportamiento tanto del desempeño como de la degradación de la vida útil, así como en las diferenciales de temperatura que se originaran en el arranque de los motores.¹

Tipo de sistema

El sistema se encuentra alimentado a través de transformadores reductores de 6900 V a 480 VCA, conectados en delta-estrella, la parte de baja se

encuentra sólidamente aterrizada (Ver figura 1), esto trae como ventaja el poder portar el neutro a través del mismo cableado, aunque cabe destacar el riesgo de la magnitud que originaría un arco por falla a tierra.

EL ELEMENTO DE SOBRECORRIENTE DE SECUENCIA CERO

Para el caso de estudio del presente documento, la detección de la falla a tierra, típicamente es lograda mediante el uso de un elemento de sobrecorriente que tiene su respuesta a la I_0 del sistema que monitorea. La corriente de secuencia cero tiene lugar en una falla que implica un desbalance de tensión, así como una referencia a tierra y aunque se genera en la operación normal del equipo cuando estos trabajan en sistemas desbalanceados, esto no implica una condición de falla,² pero se entiende el hecho de que las cargas desbalanceadas ocasionan flujos de corriente cero, adicionalmente, existe la recomendación de que los elementos de protección para falla a tierra sean ajustados en un nivel que permita la operación del equipo tomando en cuenta que este se encuentre por sobre el desbalance del sistema, lo cual, trae como consecuencia el segado de la sensibilidad del elemento de I_0 . El relevador de sobrecorriente

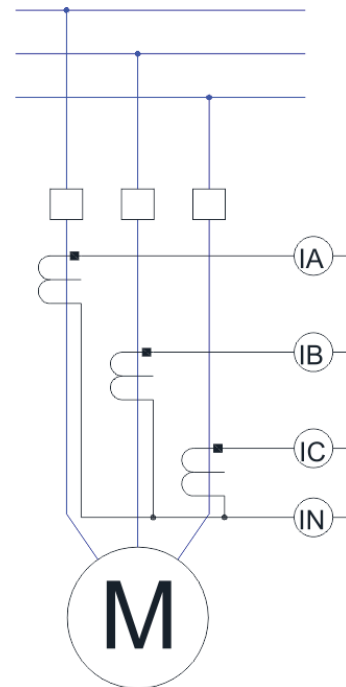


Fig. 1. Diagrama unifilar típico.

I_0 mide la suma de las tres corrientes de fase, esta comúnmente se refiere como corriente residual y su ecuación característica es:

$$I_r = 3I = I_A + I_B + I_C \quad (1)$$

La ventaja de los elementos de I_0 son la amplia cobertura a fallas resistivas, su simplicidad para el ajuste y que no son afectadas por la corriente de carga ya que el impacto sobre I_0 es pequeño,³ no obstante cabe mencionar que es susceptible a las variaciones en las fuentes de alimentación, además del desbalance normal del sistema.

Modelo de la falla a tierra

En el modelado de la falla a tierra es importante analizar los efectos de diferentes tipos de aterrizaje a fin de predecir los efectos de las fallas a tierra del sistema. El modelo más común es el que involucra a las componentes simétricas,¹ y particularmente el uso del circuito de corriente de secuencia cero. Históricamente el vector de corriente de secuencia cero I_0 y el V_0 han sido usados con los relevadores para la protección de falla a tierra. Parte del motivo por el cual se han usado por un largo tiempo se debe a que los valores de secuencia cero son directamente proporcionales a la suma de las tres fases y las tres corrientes como podemos apreciar en las ecuaciones.

$$I_0 = \frac{1}{3} I_a + \frac{1}{3} I_b + \frac{1}{3} I_c \quad (2)$$

$$V_0 = \frac{1}{3} V_a + \frac{1}{3} V_b + \frac{1}{3} V_c \quad (3)$$

Al observar las ecuaciones se puede entender el principio de funcionamiento de la sobrecorriente residual, por lo que es necesario analizar el contexto en el que se desarrolla la aplicación del motor eléctrico para poder entender la relación respecto a la operación de la protección eléctrica, no obstante debido a que el caso de estudio se encuentra enfocado en la operación de la protección residual, es pertinente que avancemos analizando las causas que pueden ocasionar que se generen las corrientes de secuencia cero.

EFFECTOS DE I_0 EN MOTORES

Habitualmente los efectos de las fallas eléctricas incipientes no son fácilmente perceptibles, por lo cual cuando se hace evidente un problema eléctrico,

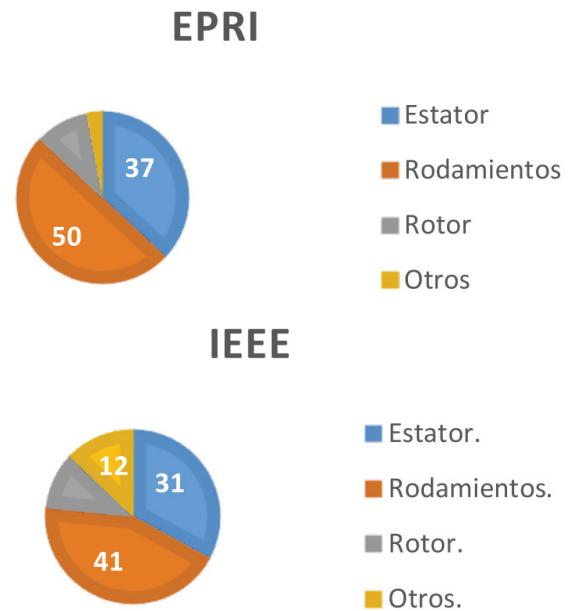


Fig. 2. Principales causas de falla: (a) EPRI; (b) IEEE.

se considera que el mecanismo de evolución del daño será muy agresivo,⁴ y se podrá sospechar de una falla inminente en el equipo en un intervalo de tiempo que normalmente será corto. Dentro de la categorización de fallas tanto EPRI como de IEEE, ya que en motores de inducción la segunda falla más común se encuentra en el estator, misma que se encuentra caracterizada por tener un mecanismo degenerativo originado en el corto circuito entre espiras de una misma fase, hasta que trasciende a una falla más severa que produce la falla final.⁵ Las principales causas de falla pueden ser observadas en las gráficas tanto de EPRI como de la IEEE.^{6,7}

A su vez, las fallas en las que se encuentra implicado el corto circuito en el devanado, regularmente se encuentra asociada con un cambio en la corriente de secuencia negativa, así como en la impedancia de secuencia inversa, los componentes de secuencia de un motor se encuentran dadas por⁸

$$R := \begin{bmatrix} V_p \\ V_n \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{pp} & Z_{pn} & Z_{po} \\ Z_{np} & Z_{nn} & Z_{no} \\ Z_{op} & Z_{on} & Z_{oo} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_p \\ I_n \\ I_o \end{bmatrix} \quad (4)$$

Los índices p, n y o, representan la secuencia positiva, negativa y cero respectivamente en tanto en fasores de corriente como de tensión, Z_{ij} representa la impedancia de secuencia i debido a la secuencia j.

Comúnmente los motores son alimentados como se aprecia en la figura 4, sin neutro, por tal motivo la corriente de secuencia cero es nula y la ecuación puede ser reducida a:

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{pp} & Z_{pn} \\ Z_{np} & Z_{nn} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} V_p \\ V_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

Cabe destacar que I_n es sensible a las variaciones de la fuente, las asimetrías del motor y de la carga. Al existir una falla, la impedancia de la matriz se verá afectada debido a la asimetría que experimenta el motor, de modo que la falla se puede detectar mediante la comparación de I_n de motor y fuente sin falla, y la I_n con falla; la desviación entre estas dos variables será un indicador de falla, así mismo para el cálculo de la impedancia de secuencia inversa se puede emplear la siguiente fórmula:⁹

$$Z_2 = \frac{V_n}{I_n} \quad (6)$$

El arranque de un motor eléctrico supone un esfuerzo electromagnético de una magnitud tal que consume una corriente lo suficientemente grande como para iniciar la rotación de un eje, en el que pudiera llegar a darse el caso de que por condiciones propias del proceso en el que se encuentra inmersa la máquina en cuestión, se pudiera encontrar cargado o sobrecargado, y dado que el arranque del motor representa un subtransitorio de hasta 10 veces la corriente a plena carga seguido de un transitorio de entre 6 y 7 veces la corriente nominal, lo que origina la demanda de una gran cantidad de corriente que se verá traducido en un hueco de tensión con una duración determinada por el tiempo de arranque del motor. Cabe considerar que la puesta en marcha de un motor produce un incremento en la potencia activa del circuito en el cual se encuentra alojada la máquina que está arrancando, el motor de inducción presenta grandes efectos sobre los huecos de tensión con la peculiaridad de una perturbación subsecuente derivada de la aceleración de la máquina (ver figura 5).

En el instante en que un transformador es energizado se tiene la aparición de transitorios de flujo magnético derivado de la demanda de corriente implicada en la magnetización, a su vez esta corriente consumida por el transformador puede tener su origen en tres causas principales que a continuación son enunciadas:

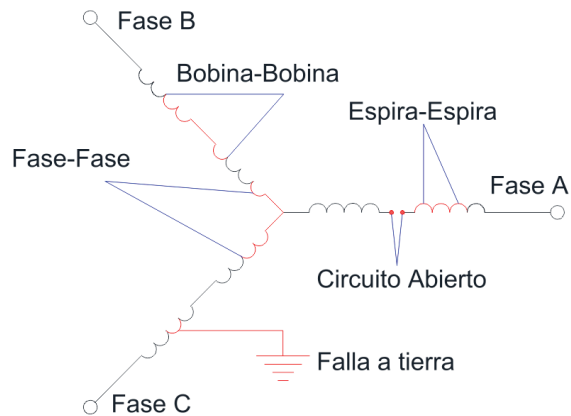


Fig. 3. Fallas en las que se encuentra implicado el corto circuito en el devanado.

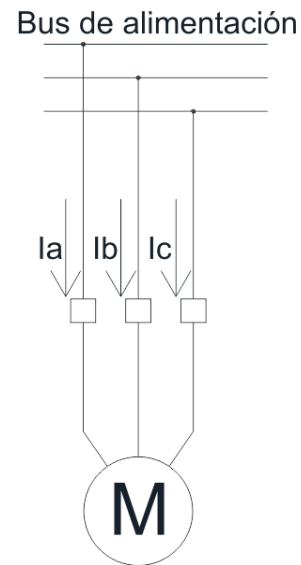


Fig. 4. Conexión típica de un motor.

a) La energización que tiene lugar cuando un transformador previamente desenergizado vuelve a ser alimentado.

b) La recuperación originada por la recuperación del nivel de tensión normal posterior a un abatimiento de tensión originado por un transitorio en el sistema.

c) Empatía (*sympathetic inrush*) originada por la operación paralela de dos transformadores, con la peculiaridad de que este tipo de consumo de corriente se encuentra asociada a un periodo de recuperación más lento que las anteriores debido a sus características inusuales y la generación de armónicos de voltaje¹¹ (ver figura 6).

Cabe mencionar que la corriente de energización del transformador presenta gran asimetría resultante de la saturación del núcleo del transformador ocasionada por el crecimiento excesivo del flujo magnético en una sola dirección.¹²

Una característica de los huecos de tensión cuando son originados por el *inrush* de transformadores, es el desbalance que presenta entre el voltaje de fase y los armónicos inyectados por el transformador, y esto constituye la diferencia comparativa con relación a los huecos ocasionados por los motores, ya que la recuperación del hueco tiende a seguir la curva de aceleración por lo que presenta una característica tipo exponencial con la diferencia de no inyectar armónicos a la red, caso que tiene lugar con los transformadores.¹⁰

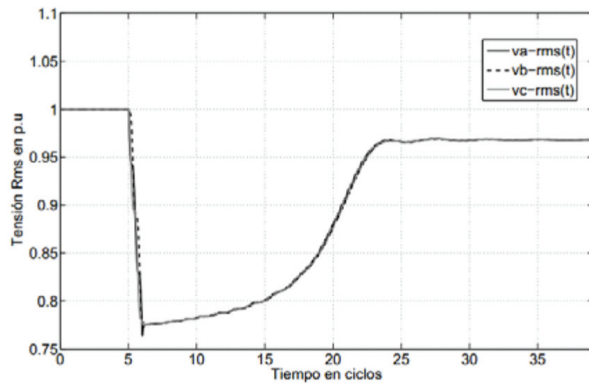


Fig. 5. Hueco de tensión originado por la puesta en servicio de un motor eléctrico.¹⁰

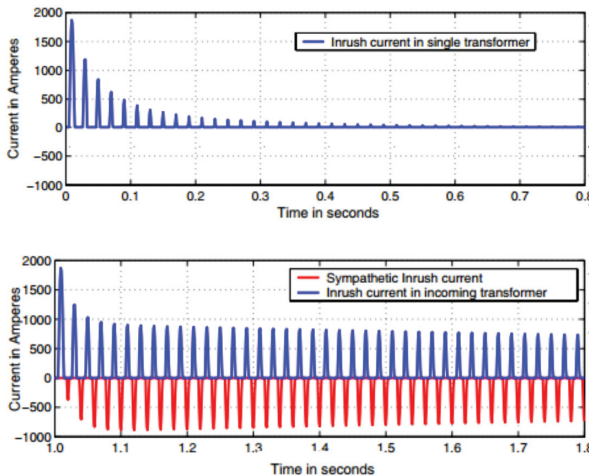


Fig. 6. Formas de onda típicas de las corrientes (a) de *inrush* y (b) de *inrush* de empatía.

Perturbaciones de tensión

De acuerdo a ¹³ las perturbaciones se encuentran catalogadas en tres grupos generales:

- a) Variaciones en el valor RMS de voltaje o corriente.
- b) Perturbaciones transitorias, a su vez contiene la siguiente subdivisión
 - a. Transitorios
 - b. Variaciones de corta duración
 - c. Variaciones de larga duración
 - d. Desbalances de voltaje o corriente
 - e. Distorsión en la forma de onda
 - f. Fluctuaciones de tensión
 - g. Variaciones de frecuencia
- c) Deformaciones de la forma de onda.

En el caso concreto de los huecos de tensión, estos se encuentran categorizados en perturbaciones de corta duración no repetitivas o transitorias caracterizadas por un voltaje residual referido al voltaje inicial que se denomina profundidad, y una duración temporal.

Un hueco de tensión es una disminución de potencial que se encuentra entre el 90% y el 10% de la nominal entre fases, que se encuentra acompañada de una subsecuente recuperación posterior a un breve intervalo que típicamente se encuentra entre los 0.5 ciclos y 1 minuto, dicho fenómeno puede tener su origen en: descargas atmosféricas que afectan a un sistema concreto, maniobras en alta tensión que inestabilicen los flujos de potencia, variaciones de carga por energización de equipo eléctrico y fallas de corto circuito.¹³

Efectos de los huecos de tensión en motores de inducción y su relación con la operación de la falla a tierra

Las perturbaciones de tensión tienen un efecto sobre los motores de inducción, entre las perturbaciones más importantes que podemos encontrar los armónicos, los huecos de tensión y desequilibrios de tensión.

El efecto que tienen los armónicos en los motores de inducción es el de afectar variables como: corriente, par-velocidad, factor de potencia, eficiencia y potencia, con las consecuentes reducción

a su vida útil.¹⁴ Dicho fenómeno no es estudiado tan extensamente en el presente documento, en virtud de que la topología de la red en cuestión tiene mayoritariamente cargas inductivas, además de que la utilización de agentes generadores de armónicos es relativamente baja, contrastado con el hecho de que la fuente de energía se encuentra “aguas arriba” con sólo un nivel de tensión de transformación.

Hablando del término concreto de los huecos de tensión, encontramos sus definiciones como:

*Disminución brusca de alimentación a un valor situado entre el 90% y el 1% de la tensión declarada U_{cm} seguida del restablecimiento de la tensión después de un corto lapso de tiempo. Por convenio, un hueco de tensión dura de 10ms a 1min. La profundidad de un hueco de tensión es definida como la diferencia entre la tensión eficaz mínima durante el hueco de tensión y la tensión declarada. Las variaciones de tensión, que no reducen la tensión de alimentación a un valor inferior al 90% de la tensión declarada U_c no son consideradas como huecos de tensión.¹⁵

*Disminución de tensión o la intensidad, en un valor eficaz, entre 0.1 y 0.9 PU a la frecuencia de la red, para duraciones comprendidas entre 0.5 ciclos y 1 minuto.¹³

Los huecos de tensión ocasionan sobrecorrientes transitorias, súbitos incrementos del par y también pueden ocasionar pérdida de velocidad,¹⁶ así mismo si los huecos son simétricos estos tienen una dependencia directa con la profundidad y la duración del hueco, en tanto que los huecos asimétricos tienen relación con el punto en que inicia el evento, tal es el caso del arranque de un motor que presenta asimetría la impedancia, para efectos prácticos mediante simulaciones se pueden apreciar la recuperación del nivel normal de tensión una vez que el motor alcanza su velocidad nominal.¹⁷

Los sistemas de tensión con desequilibrio es un caso muy común tanto en instalaciones industriales como en el seno de la misma central generadora, y esta condición tiene efecto directo sobre el rendimiento de la máquina, en tanto que el motor propiamente aporta reactivos¹⁸ que se traduce en el equilibrio de tensión de la red además se documenta el hecho de que el aumento de niveles de carga en los motores de inducción modifica el factor de desequilibrio de

secuencia negativa de tensión (VUF) en el punto de conexión, en comparación con los motores de inducción de carga ligera.¹⁹ Otra conclusión importante es que las variaciones en el deslizamiento del motor tienen efecto sobre el voltaje o corriente de secuencia positiva en el punto de evaluación mientras que el valor de secuencia negativa permanece casi constante, entre los efectos nocivos que se pueden tener derivados de esta condición podemos mencionar el corto entre espiras.²⁰⁻²²

Cabe destacar que existen estudios en los que se relaciona la tercer armónica de la componente fundamental con la magnitud de la corriente y el voltaje de alimentación para inferir el porcentaje de falla del aislamiento en diferentes condiciones de carga, esto derivado de desbalances de voltaje,²¹ dicho desequilibrio puede tener efecto sobre el par y la corriente generando alto rizado en el par de torsión, dicho efecto se puede traducir a la interrupción de la operación de los equipos²³ y derivado del desbalance de corriente se tendrán salidas de equipo derivados de la operación del respectivo esquema de protección, cabe destacar que también se tienen efectos en la potencia aprovechada por el proceso, con el consecuente impacto económico debido que desequilibrios de un 5% pueden ser traducidos en una disminución de la eficiencia de entre 1 y 3%.²⁴ Adicionalmente la operación de un motor en condiciones de desbalance de corriente trae como consecuencia una creciente diferencial de temperatura que implica otra fuga de potencia.²⁵

Al respecto, los huecos de tensión pueden ser caracterizados por medio de dos métodos, uno llamado Clasificación ABC y otro que se conoce como clasificación de componentes simétricas, por cuestiones de simplicidad y utilización en la literatura especializada, se enuncia el que corresponde a la clasificación ABC. A continuación observamos las siete tipologías generales en las que se engloban los huecos de tensión:

Se encuentra sustentado que en un motor, la contribución de potencia reactiva debido al enlace de flujo magnético atrapado en el motor, evita un colapso en el voltaje y da como resultado un hueco de tensión no rectangular, por su parte el torque negativo inducido durante el intervalo de falla ocasiona la pérdida de velocidad en conjunto con el esfuerzo

mecánico que representa en si la carga impulsada por el motor, lo cual prolonga el tiempo de reaceleración y aumenta el tiempo de retardo en la recuperación de voltaje.¹⁸ Cabe mencionar que en los motores trifásicos de inducción el par electromagnético se encuentra en función del cuadrado de la tensión del estator,²⁶ lo cual confirma la sensibilidad ante los huecos ya que se ve comprometida la estabilidad en la velocidad frente a una variación de tensión de la red de alimentación.

Fallas en devanados

Cuando un motor presenta espiras en corto circuito, se ve modificada la impedancia efectiva de secuencia inversa,²⁷ dicho parámetro tiene una gran utilidad como indicador de falla en las bobinas, y en conjunto con la teoría de componentes simétricas, represente una herramienta de diagnóstico de fallas.²⁸

En términos prácticos, los niveles de tensión que pueden ser observados en campo, hacen manifiesto el hecho de que se operan en condiciones de desequilibrio tanto de voltaje como de ángulos de fase. El análisis de un motor de inducción que se encuentra en un sistema desequilibrado puede ser modelado en base a su circuito equivalente de secuencia directa e inversa. En la figura 8 observamos un circuito equivalente donde las variables R_s y R_r representan las reactancias de estator y rotor respectivamente. Las reactancias de dispersión de estator y rotor y la reactancia de magnetización corresponden a X_s , X_r y X_m respectivamente.

La componente variable de la resistencia del rotor R_{rl} , es la que hace posible el cálculo de la potencia mecánica del motor como una función del deslizamiento del rotor (S).

$$Rl = \frac{Rr(1-s)}{s} \quad (7)$$

Dicho parámetro se encuentra afectado por los cambios de deslizamiento, tal como se observa en la función derivada.

$$\frac{d(Rl)}{dS} = -\frac{Rr}{S^2} \quad (8)$$

Por el hecho de que el campo de secuencia inversa se encuentra contrapuesto con el campo directo, el equivalente del circuito se obtiene al sustituir, S , en el circuito de secuencia directa por $(2-S)$, y el circuito

resultante puede ser observado en la figura, donde la impedancia es expresada como:

$$Rl2 = -\frac{Rr(1-S)}{2-S} \quad (9)$$

En donde podemos observar que ya no es tan afectada por los cambios de deslizamiento dicho evento es apreciable en la siguiente ecuación:

$$\frac{d(Rl2)}{dS} = -\frac{Rr}{(2-S)^2} \quad (10)$$

Y debido que la mayoría de los motores de inducción tienen poco deslizamiento (del orden del 3%), cabe destacar que la impedancia de secuencia negativa es mucho menor que la impedancia positiva, por lo que para un nivel bajo de tensión de secuencia inversa, circula un nivel relativamente

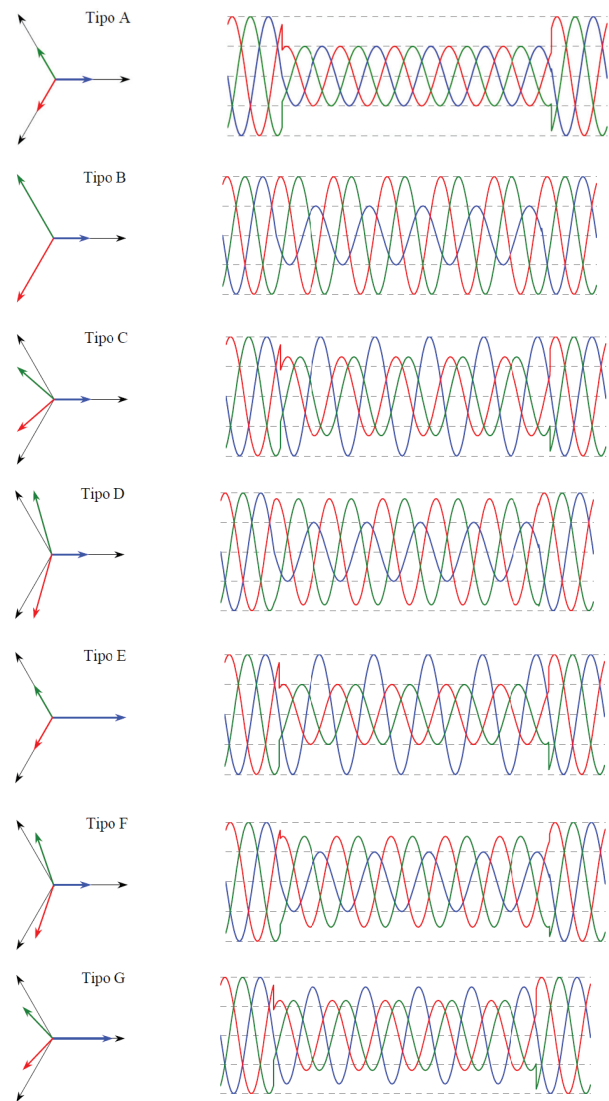


Fig. 7. Siete tipologías generales en las que se engloban los huecos de tensión.

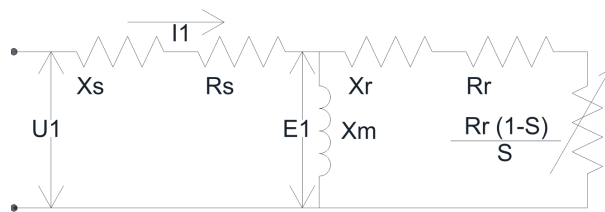


Fig. 8. Circuito equivalente de secuencia positiva del motor de inducción.

alto de secuencia inversa, lo que ocasiona que al monitorear la corriente en línea, está sea afectada por pequeños desequilibrios de tensión y por tal motivo oculte una falla incipiente, también se puede observar que la impedancia de secuencia inversa es poco sensible a los cambios de deslizamiento, por lo que la impedancia de secuencia inversa es constante a las variaciones de carga y al flujo de corriente de secuencia inversa.

Dicha impedancia se calcula al obtener el cociente entre la componente de secuencia inversa de voltajes y la componente de secuencia inversa de corrientes, como se ve en la ecuación.

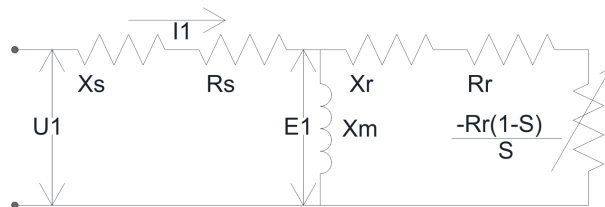


Fig. 9. Circuito equivalente de secuencia negativa del motor de inducción.

$$Z_{2ef} = \frac{V_{r2}}{I_{r2}} \quad (11)$$

Donde:

V_{r2} e I_{r2} son las componentes de secuencia inversa de voltajes y las corrientes respectivamente, calculados con la teoría de componentes simétricas como se ve en las ecuaciones.

$$V_{r2} = \frac{1}{3} V_r + \frac{1}{3} a^2 V_s + \frac{1}{3} a V_t \quad (12)$$

$$I_{r2} = \frac{1}{3} I_r + \frac{1}{3} a^2 I_s + \frac{1}{3} a I_t \quad (13)$$

Cuando el aislamiento comienza a tener daños, se tiene una pérdida de la simetría en las impedancias, por lo que se presenta un afluente de componentes de distinta secuencia, ocasionando caídas de voltaje atribuibles a la circulación de componentes de cualquier secuencia. Por tal motivo la Z_{2ef} se puede

ver alterada frente a fallas incipientes, y en base a experimentación han concluido que la impedancia de secuencia negativa presenta una tendencia de evolución determinado por el daño del aislamiento del estator, con lo que se asevera que el módulo cambia de valor frente a un corto, aun cuando este solo tenga efecto sobre un par de espiras.

Fallas en estator y su detección mediante corrientes de secuencia negativa

Dentro de las fallas ocurridas en el estator de un motor de inducción, ocupa un papel preponderante la falla por cortocircuito entre espiras, ya que el aislamiento entre dos espiras de una misma bobina suele ser el más frágil, y bajo ciertas condiciones de operación, puede estar sometido a grandes esfuerzos electromagnéticos y/o térmicos; esto lo convierte en el elemento más débil del sistema de aislamiento de un motor, adicionalmente pueden existir factores externos como la abrasión que puede estar determinada por el tipo de contaminación en el que se encuentra el equipo.

Las consecuencias de un cortocircuito entre espiras pueden ser catastróficas, porque aparece una corriente circulante localizada de un valor significativamente alto (varias veces la corriente nominal), que no se refleja en los terminales del motor y que produce un efecto de aumento local de la temperatura. El incremento de temperatura hace que el aislamiento exterior se deteriore progresivamente, lo que lleva en poco tiempo a un cortocircuito de mayor magnitud, como el que ocurre entre fase y tierra o entre bobinas de diferentes fases dentro de la misma ranura.²⁹ El signo exterior de la falla es operación de la protección de falla a tierra, pero el factor determinante de la falla incipiente es la degradación degenerativa del aislamiento entre espiras.

En condiciones en que existiera una buena simetría, se esperaría que el voltaje y la corriente de secuencia negativa fueran nulos, no obstante, en el sistema puede ser inducida una corriente de secuencia negativa que puede tener su origen en la asimetría natural del devanado del motor producto del modo de embobinado, además que es un proceso fuera de medición puesto que implicaría el control de la cantidad de cobre en cada fase del estator.

Si la fuente de alimentación no presenta balance en los voltajes, se genera una componente de secuencia negativa que induce una corriente desbalanceada y que genera una componente de corriente negativa circulante por el devanado. La corriente total de secuencia negativa puede ser calculada por:

$$I_n = I_{sf} + I_{0n} + I_{VUF} \quad (14)$$

Donde:

I_{sf} : componente de la corriente generada por la condición de falla.

I_{0n} : corriente de secuencia negativa debida a imperfecciones, defectos de fabricación o bobinado inherentes al motor, es decir, no relacionada con la situación de falla o de alimentación asimétrica.

I_{VUF} : corriente de secuencia negativa asociada al desequilibrio de tensiones de alimentación expresado a través del coeficiente VUF como indicador de dicho desbalance.¹³

$$\%VUF = \frac{U_n}{U_p} \% \quad (15)$$

Las componentes de resistencia y reactancia del rotor se refieren al estator usando el deslizamiento, las pérdidas en el núcleo son despreciables al sustituir una rama de magnetización por una reactancia.³⁰

La componente variable de la resistencia del rotor reflejada representa la potencia mecánica del motor en la secuencia positiva y negativa respectivamente (R_p y R_n). La resistencia R_r es la resistencia de rotor bloqueado obtenido en la prueba del mismo nombre según aparece en.³¹

La relación entre resistencia de secuencia positiva y negativa es alta, es decir, aún que se tenga un voltaje de secuencia negativa bajo, se genera corriente de secuencia negativa alta en donde existe bajo deslizamiento. No obstante, si observamos en el circuito de secuencia negativa, la reactancia del devanado del rotor, esta es proporcional al doble de la frecuencia de alimentación, con lo que se limita la corriente de secuencia negativa por el rotor, y con ello su consecuente valor reflejado al estator, de modo que un incremento en el factor de desbalance de voltaje se refleja como un incremento proporcional en la corriente de secuencia negativa. La constante de proporcionalidad se encuentra en función a los parámetros de diseño y construcción del motor.³²

CONCLUSIONES

Con base a la presente investigación y a los fenómenos observados en campo se argumenta que la corriente de secuencia negativa es un indicador de las fallas en el devanado del estator por cortocircuito entre espiras, por lo que puede ocasionar la operación de la protección de sobrecorriente a tierra de manera asertiva pero debe descartarse la circulación de dicha corriente, ocasionada por otros problemas como el desbalance de tensiones en la alimentación del motor.

El desbalance de tensiones, aun en pequeña escala, impulsa corrientes de secuencia negativa de magnitud considerable, comparable a la corriente de falla ocasionada por un cortocircuito entre espiras.

Haciendo un uso del principio de transitividad de la implicación, y observando el fenómeno que tiene lugar en un motor eléctrico cuando este es sometido a un hueco de tensión, las variables que se ven afectadas son el torque y velocidad, por lo que, cuando por causas atribuibles al sistema al cual se encuentra acoplado el motor, se realizan modificaciones a las características normales de operación, se esperaría que se tuviera un respuesta en el lado de la alimentación, que pudiera encontrarse relacionada con la sobrecarga del circuito derivado en el cual se encuentra alimentado el equipo, ocasionando la operación de la protección de sobrecorriente a tierra, sin que esta tuviera un indicativo concreto de la falla incipiente en un motor, esto con términos no limitativos, puesto que un fenómeno de esta naturaleza con un patrón repetitivo, influye directamente en que se generen las fallas a largo periodo.

La operación de la protección de falla a tierra, se encuentra acompañada de una posible indicación de falla final del aislamiento que en algunos casos, si es debidamente detectable, puede ser reparable para incrementar la vida del equipo, estos casos son:

- Cuando opera la falla a tierra y que se encuentra acompañado de un desbalance muy grande de corriente, que puede ser indicativo de un empalme flojo, o terminales del motor mal ponchadas, o bien mala conexión del motor.
- Cuando la falla a tierra se encuentra acompañada de una lectura de aislamiento que gira en

torno a los megaohms, que pudiera ser indicativo de un aislamiento recalentado, donde se puede rescatar el equipo a través de un mantenimiento bien aplicado.

- Cuando la falla a tierra se encuentra franca y se tiene una lectura de kilo ohms y hasta cientos de ohms, y cuando el equipo en cuestión se encuentra inmerso en un ambiente con un alto grado de humedad, en este caso el equipo detectado a tiempo, le pueden ser restituidas las condiciones de operación mediante la aplicación de calor al devanado.

REFERENCIAS

1. IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Buff Book), IEEE Std 242-2001 (Revision of IEEE Std 242-1986) [IEEE Buff Book], pp. 1--710, Dic. 2001.
2. J. Roberts, E. O. Schweitzer, III, R. Aroray et al., Limits to the sensitivity of ground directional and distance protection, 50th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conf., Mayo 1996.
3. E. O. Schweitzer, III y J. J. Kumm, Statistical comparison and evaluation of pilot protection schemes, 23rd Annual Western Protective Relay Conference, Oct. 1996.
4. M. Bouzid y G. Champenois, Accurate stator fault detection insensitive to the unbalanced voltage in induction motor, XXth International Conf. on Electrical Machines (ICEM), 2012, pp. 1545--1551, Sep. 2012.
5. J. Ilonen, J.-K. Kamarainen, T. Lindh et al., Diagnosis tool for motor condition monitoring, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 4, pp. 963--971, Jul. 2005.
6. IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Gold Book), ANSI/IEEE Std 493-1980, pp. 1--216, Ene. 2013.
7. P. F. Albrecht, J. C. Appiarius, R. M. McCoy et al., Assessment of the reliability of motors in utility applications - Updated, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. EC-1, no. 1, pp. 39--46, Mar. 1986.
8. J. L. Kohler, J. Sottiley y F. C. Trutt, Alternatives for assessing the electrical integrity of induction motors, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 28, no. 5, pp. 1109--1117, Sep. 1992.
9. J. Sottile, Jr y J. L. Kohler, An on-line method to detect incipient failure of turn insulation in random-wound motors, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 8, no. 4, pp. 762--768, Dic. 1993.
10. J. Blanco, J. F. Petit, G. Ordoñez et al., Caracterización, identificación y localización de huecos de tensión: revisión del estado del arte, Ingeniería y Ciencia, vol. 8, no. 15, pp. 191-220, 2012.
11. G. B. Kumbhar y S. V. Kulkarni, Analysis of sympathetic inrush phenomena in transformers using coupled field-circuit approach, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007, pp. 1--6, Jun. 2007.
12. A. Dobrogowski y P. Lisowski, The dependence of the inrush current of a transformer upon switching off/on phases, XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology, pp. 739--742, Sep. 2009.
13. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE Std 1159-1995, 1995.
14. M. R. Subbamma, V. M. Sudhan, K. S. R. Anjaneyuluy et al., Design aspects and analysis for higher order harmonic mitigation of power converter feeding a vector controlled Induction motor drives, 2012 International Conf. on Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM), pp. 282--287, Mar. 2012.
15. Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución, Norma Española UNE-EN 50160:2011, Mar. 2011.
16. M. H. J. Bollen, M. Hilgery y C. Roxenius, Effect of induction motors and other loads on voltage dips: theory and measurements, 2003 IEEE Bologna Power Tech Conf. Proc., vol. 3, pp. 6, Jun. 2003.
17. C. Y. Kang, H. J. Z. Hushairi, N. Ikhmary et al., Simulating voltage sag using PSCAD software, International Journal of Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering, vol. 7, no. 10, pp. 811--815, 2013.
18. P. Aree, Effects of large induction motors on

- voltage sag, 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conf. (APPEEC), pp.1--4, Mar. 2012.
- 19.U. Jayatunga, S. Pereray y P. Ciufu, Impact of mains connected three-phase induction motor loading levels on network voltage unbalance attenuation, 2012 IEEE International Conf. on Power System Technology (POWERCON), pp. 1--6, Oct.--Nov. 2012.
- 20.S. H. Kishan y S. P. Gupta, Effect of voltaje unbalance and stator inter turn short circuit on the characteristics of an induction motor, 2012 IEEE 5th India International Conf. on Power Electronics (IICPE), pp. 1--6, Dic. 2012.
- 21.S. S. Refaat, H. Abu-Rub, M. S. Saad, et al., Detection, diagnoses and discrimination of stator turn to turn fault and unbalanced supply voltage fault for three phase induction motors, 2012 IEEE International Conf. on Power and Energy (PECon), pp. 910--915, Dic. 2012.
- 22.C. Manop, V. Kinnareesy y S. Chunwiphat, SVM-based stator fault diagnosis for induction motors using dq0 voltage components, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, vol. 6, no. 10, pp. 4539--4553, Oct. 2010.
- 23.L. Guasch-Pesquer, L. Youb, F. Gonzalez-Molinay et al., Effects of voltage unbalance on torque and current of the induction motors, 2012 13th International Conf. on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), pp. 647--652, Mayo 2012.
- 24.E. B. Agamloh, S. Peeley y J. Grappe, A comparative analysis of voltage magnitude deviation and unbalance on standard and premium efficient induction motors, in Conf. Record of 2012 Annual IEEE Pulp and Paper Industry Technical Conf. (PPIC), pp. 1--8, Jun. 2012.
- 25.D. Springer, E. Stolzy y E. Wiedenbrug, Experimental analysis of industry standards on derating of a three-phase induction motor due to thermal stress caused by voltage unbalance, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009, pp. 1304--1308, Sep. 2009.
- 26.P. Vas, Electrical Machines and Drives: A Space-Vector Theory Approach, Oxford: Clarendon Press, 1992.
- 27.X. Boqiang, L. Hemingy y S. Liling, Negative sequence admittance average based detection of stator winding inter-turn short circuit fault in induction motors, 6th International Conf. on Electrical Machines and Systems, 2003. ICEMS 2003, vol. 2, pp. 867--870 Nov. 2003.
- 28.F. Villada, D. Parray y G. Ocampo, Estudio del comportamiento de motores de inducción ante fallas estatóricas, Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, no. 40. pp. 76--94, Jun. 2007.
- 29.M. Bouzid y G. Champenois, Accurate stator fault detection insensitive to the unbalanced voltage in induction motor, XXth International Conf. on Electrical Machines (ICEM), 2012, pp. 1545--1551, Sep. 2012.
- 30.A. Paz, J. L. Oslingery y J. A. Palacios, Diagnóstico de fallas estatóricas en motores de inducción de jaula de ardilla por medio de la corriente de secuencia negativa, Ingeniería y Universidad, vol. 18, no. 1, pp. 141--150, 2014.
- 31.IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, IEEE Std 112-2004 (Revision of IEEE Std 112-1996), pp. 1--79, 2004.
- 32.S. Bakhri, N. Ertugrul, W.L. Soongy et al., Investigation of negative sequence components for stator shorted turn detection in induction motors, 2010 20th Australasian Universities Power Engineering Conf. (AUPEC), pp. 1--6, Dic. 2010.