

Calidad de la Energía en los Sistemas Eléctricos de Potencia. Efecto de las perturbaciones de corta duración sobre las máquinas asincrónicas

Marcos A. de Armas Teyra
Ave 32 entre 45 y 47 No. 4507
Cienfuegos 55100 Cuba
marmas53@yahoo.es

RESUMEN

Una de las manifestaciones más frecuentes de deterioro de la calidad de la energía en los sistemas eléctricos de potencia son los valles e interrupciones de voltaje de corta duración. Este trabajo analiza el comportamiento de los motores asincrónicos ante estos eventos tomando en consideración su duración, las prácticas de recierre, las constantes de tiempo que caracterizan los procesos transitorios en los diferentes estados operacionales en condiciones de campo y el tiempo necesario para la extinción del voltaje residual en máquinas compensadas y de diferente potencia. Muestra como las máquinas asincrónicas pueden ocasionar variaciones de voltaje aún más acentuadas en presencia de estas perturbaciones y se determina el tiempo mínimo de ajuste de las operaciones de recierre o transferencia de fuente en circuitos con máquinas asincrónicas. Como caso de estudio se analiza un motor de 900 kW, 2.3 kV con compensación de reactivo en sus terminales.

Palabras Claves— Calidad de la Energía, Valles e Interrupciones, Máquinas Asincrónicas.

I. INTRODUCCIÓN

Aunque son muchos los fenómenos electromagnéticos que alteran la calidad de la energía eléctrica de acuerdo con la norma IEEE 1159 1995, la vasta mayoría de los eventos registrados durante el año 2002 en la Provincia de Cienfuegos, Cuba corresponden a valles e

interrupciones de voltaje de corta duración. Otros estudios realizados arrojan que existe una cantidad considerable de circuitos con valores de desbalance de voltaje por encima de las normas internacionales y, aunque se han monitoreado diversas instalaciones explorando la contaminación armónica, la presencia de éstos es muy dependiente del tipo de carga y sólo se manifiestan en determinados circuitos de las industrias examinadas. En términos generales, los sistemas industriales registrados poseen una THD de voltaje en todos los casos inferiores al 5%. [1]

Las afectos que provocan los valles e interrupciones de corta duración sobre los equipos de la tecnología de la información han sido extensamente tratados en la bibliografía; por ejemplo, la curva ITIC, que caracteriza la tolerancia de estos medios a las perturbaciones transitorias y de estado estable, se utiliza para clasificar los eventos en equipos registradores de última generación [2]. Menos tratado ha sido la influencia sobre las máquinas asincrónicas. Por la cantidad y frecuencia con que suceden estos fenómenos y el uso generalizado de estas máquinas, este artículo enfatiza en el análisis de estos casos.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

En la actualidad existen registradores instalados en las líneas de transmisión y son escasos, no existen o se utilizan esporádicamente en subtransmisión y distribución. Como resultado, la mayor parte de los sucesos no se registran y no se tienen datos confiables para un conteo estadístico. Como muestra la Tabla I, los usuarios conectados al primer nivel están expuestos a muchos menos fenómenos que los conectados a la subtransmisión o distribución.

Calidad de la energía en los sistemas eléctricos de potencia. Efecto de las perturbaciones de corta duración sobre las máquinas asincrónicas.

Sensibilidad de los procesos

La industria y los servicios modernos utilizan una gran variedad de cargas susceptibles a las variaciones instantáneas y momentáneas de voltajes, entre ellas los accionamientos de velocidad variable, PLC, arrancadores, relevadores, computadoras, autómatas, etc. Todos esos equipos poseen diferentes niveles de susceptibilidad y como intervienen en todo el proceso, la sensibilidad queda determinada por el comportamiento del equipo más sensible. Aunque no es común mencionar a los motores como cargas particularmente sensibles, en realidad lo son y su presencia puede ocasionar operaciones inadecuadas o mal funcionamiento de los equipos más susceptibles.

Valles de Voltaje

Las valles de voltajes se deben generalmente a condiciones de falla en los sistemas de transmisión, subtransmisión o distribución como consecuencia de descargas atmosféricas, contactos entre líneas y árboles, animales, pájaros, tormentas, tornados, vientos, accidentes, fallas de aisladores o componentes del sistema. También suceden por el arranque de grandes motores o la operación de máquinas de soldar, hornos de arco, etc.

En caso de fallas las protecciones de la compañía electrificadora actúan y algunas realizan operaciones de recierre tratando de mantener la disponibilidad de la energía. Esta operación es vista como una interrupción momentánea o como un valle en dependencia del punto desde donde se "observa". En un circuito de distribución radial una parte de los usuarios experimentan un valle. Los conectados aguas abajo, una interrupción.

El tiempo de operación del recierre, debe ser superior al tiempo de extinción del arco más el tiempo de reposición de las protecciones. Por lo general el tiempo de ajuste mínimo del recierre en el sistema de transmisión es de 50 a 160 ms. En subtransmisión y distribución se emplean 0.5 s a 3 minutos [3]. El tiempo que se mantiene en posición desconectado el dispositivo puede ajustarse y variar dentro de los servicios de un territorio. En estos casos debe tenerse presente que el voltaje no colapsa a cero inmediatamente después de la apertura del interruptor debido a la presencia de flujo magnético en las máquinas eléctricas rotatorias.

Efecto de las valles e interrupciones cortas sobre las máquinas asincrónicas.

Cuando ocurre un valle de voltaje, el momento electromagnético, desarrollado por un motor asincrónico proporcional al voltaje al cuadrado, cae súbitamente desacelerando al motor. En estas condiciones el motor puede perder la estabilidad o debido al incremento de la corriente, producirse un disparo de las protecciones e interrumpir la producción.

La reducción de la velocidad depende tanto de la magnitud y duración del valle como de la masa inercial rodante y la característica de momento contra velocidad del mecanismo accionado. Si el momento desarrollado por el motor cae por debajo del momento resistivo, el motor se detiene. La magnitud y el tiempo límite máximo de duración del valle esta determinado no sólo por la estabilidad del motor sino, además, por el valor de la corriente que crece y sobrecalienta dañinamente el motor.

A partir de la ecuación del movimiento y de la expresión del momento desarrollado y del momento resistivo en función del deslizamiento; s , para una falla trifásica, se puede alcanzar una solución numérica aproximada. Estas ecuaciones son:

$$M_d = \frac{2M_{MAX}}{\frac{s}{s_{crit}} + \frac{s_{crit}}{s}} \times \left(\frac{V_1}{V_N} \right)^2 \quad (1)$$

$$M_{MEC}(s) - M_d = J \frac{ds}{at} \quad (2)$$

Donde:

M_d = momento desarrollado; (N-m.)

$M_{MEC}(s)$ = momento de la carga; (N-m.)

M_{MAX} = momento máximo; (N-m.)

V_N = voltaje nominal; (V)

V_1 = voltaje reducido por el fallo (V)

J = momento de inercial.

Un estudio realizado para fallas trifásicas y valores de la constante inercial H , en el orden de 3 s y superiores, plantea que es posible considerar desacoplados los transitorios eléctricos y mecánicos obteniéndose resultados satisfactorios. La falla trifásica tiene un efecto más severo y la monofásica más moderado. Ambas se propagan de forma diferente en el sistema. [4]

La solución de un caso particular ya sea determinar el tiempo máximo de duración de un valle, su

Calidad de la energía en los sistemas eléctricos de potencia. Efecto de las perturbaciones de corta duración sobre las máquinas asincrónicas.

magnitud para que no se pierda la estabilidad o el valor de las corrientes involucradas, puede obtenerse mediante el SIMULINK en MATLAB con un nivel superior de exactitud para cualquier estado de avería en el sistema.

Como efectos colaterales importantes asociados a estos fenómenos, se tienen el aumento en las pérdidas de energía, el envejecimiento del equipo por sobrecalentamiento, los esfuerzos electrodinámicos y los daños mecánicos a los engranes y otras partes del accionamiento. El impacto sobre la productividad depende del tipo de proceso y de la magnitud de la perturbación. En ocasiones este es el costo fundamental.

Debe tenerse presente que cuando existen varios motores en un circuito, ocurre el rearranque simultáneo. En estas condiciones, debido a las altas corrientes sostenidas que se establecen, se produce una caída de voltaje considerable que dificulta el proceso de arranque y puede sacar de servicio o afectar a otras cargas sensibles.

La corriente pico transitoria de arranque de un motor dada por la ecuación (3) considerando el desplazamiento debido a la componente de corriente directa puede superar de 9 a 11 veces su valor nominal:

$$i(t) = \frac{\sqrt{2}V_N}{\sqrt{r_1^2 + x'^2}} \left[\text{sen}(\omega t + \delta - \theta) - \text{sen}(\delta - \theta) \times e^{-\frac{t}{\tau_{DC}}} \right] \quad (3)$$

$$\tau_{DC} = \frac{x'}{\omega r_1};$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{x'}{r_1} \right)$$

r_1 ; Resistencia del estator en Ω

x' ; Reactancia subtransiente en Ω dada por la formula (9)

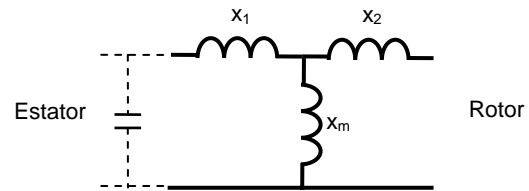
Interrupciones instantáneas y momentáneas

El principal problema de las interrupciones de corta duración consiste en que, durante el período de ausencia de potencia, el motor se desacopla eléctricamente de la red y sufre una desaceleración. Simultáneamente, en el estator se desarrolla un voltaje trifásico de frecuencia y amplitud decreciente inducido por el flujo residual atrapado en el rotor. La amplitud de este voltaje decrece exponencialmente con una constante de tiempo que depende de la potencia del motor y del estado de operación del estator. Cuando se reestablece el voltaje de la red, este puede

“aparecer” en oposición de fase al voltaje residual produciéndose un efecto similar a la sincronización fuera de fase de una máquina síncrona al sistema. En este caso surgen corrientes que superan hasta 20 veces la corriente nominal y con ella grandes esfuerzos electromecánicos.

Constantes de tiempo de la máquina

Durante los estados transitorios los motores se caracterizan, por constantes de tiempo que permiten evaluar su comportamiento. Entre ellas se tienen las constantes de tiempo de circuito abierto, cortocircuito y la constante de tiempo en presencia de compensación reactiva. Estas constantes se determinan a partir del circuito equivalente:



Constante de tiempo de circuito abierto:

$$\tau_{OC} = \frac{x_2 + x_m}{2\pi f r_2} \quad (4)$$

Constante de tiempo de cortocircuito:

$$\tau_{SC} = \frac{x_2 + \frac{x_m x_1}{x_m + x_1}}{2\pi f r_2} \quad (5)$$

Constante de tiempo compensado:

$$\tau_{CC} = \frac{x_2 + \frac{x_m(x_1 - x_C)}{x_m + (x_1 - x_C)}}{2\pi f r_2} \quad (6)$$

r_2 ; resistencia del rotor, x_1 ; reactancia del estator

x_2 ; reactancia del rotor, x_m ; reactancia de magnetización

x_C ; reactancia capacitiva todas en p.u. o en Ω .

Como puede observarse de (4), (5) y (6) la constante de tiempo de cortocircuito es inferior a la de circuito abierto mientras que en presencia de

Calidad de la energía en los sistemas eléctricos de potencia. Efecto de las perturbaciones de corta duración sobre las máquinas asíncronas.

capacitores el valor de esta constante puede ser considerablemente mayor.

Si en el caso de una interrupción, un motor con compensación de reactivo se acelera por efecto de la carga, el voltaje generado por el flujo residual puede superar el valor del voltaje de línea.

La Tabla I muestra, aproximadamente, el tiempo necesario para la extinción del flujo residual en función de la potencia en motores de diseño estándar. El ejemplo desarrollado muestra la variación de la constante de tiempo con el grado de compensación.

TABLA I
CONSTANTES DE TIEMPO Y REACTANCIA SUBTRANSITORIA

Potencia (Kw)	10	100	200	400	800
τ_{SC} (s)	0.02	0.03	0.04	0.06	0.01
τ_{OC} (s)	0.3	0.4	0.6	1.1	1.5
x' (p.u.)	0.117	0.156	0.16	0.17	0.17

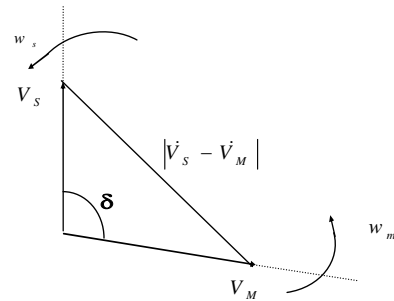
Si no se realiza un ajuste adecuado del tiempo de recierre, la rápida reconexión del motor a la fuente puede crear sobre corrientes y esfuerzos elevados que no todas las máquinas y sistemas pueden soportar. El valor de la corriente puede superar tres o cuatro veces la corriente de arranque de un motor surgiendo caídas de voltajes considerables, grandes esfuerzos electrodinámicos y disparos indeseables de interruptores que operan bajo condiciones de cortocircuito.

Entre las medidas para evitar este problema se encuentran: efectuar el recierre con un tiempo superior a tres constantes de tiempo en circuito abierto, evitar o reducir el grado de compensación directamente en los terminales del motor o emplear comparadores de fase cuando se va a efectuar el recierre o transferir la carga a otra fuente en circuitos con voltaje residual debido a la presencia de máquinas rotatorias. [5]

Cálculo de la corriente pico de arranque cuando se reestablece la energía.

Un motor puede soportar una reconexión en oposición de voltaje si, fasorialmente, la diferencia entre el voltaje del sistema; V_S , y el voltaje residual; V_{RM} , en sus terminales no excede el 25% del voltaje nominal del motor. Esta condición se expresa como:

$$|\dot{V}_S - \dot{V}_{RM}| \leq 1.25 V_N$$



La diferencia de voltaje ΔV está dada por:

$$\Delta V = \dot{V}_S - \dot{V}_{RM} = V_S \text{sen} w_S t - V_{RM} \text{sen}(w_M t - \delta)$$

Si se asume $V_S = V_{RM}$ y $w_S = w_M$ los cálculos se simplifican y en las condiciones más críticas:

$$\Delta V = 2V_S \text{sen} \frac{\delta}{2}$$

El valor pico máximo del componente de corriente alterna, para $\delta = \pi$ esta dado por:

$$I_{PICO_{MAX}} = \frac{2\sqrt{2}V_S}{x'}$$

Si se considera el nivel de corriente directa en la fase más crítica mediante un factor k que depende de la relación $\frac{r_1}{x}$. Cuyo orden está en el rango 1.25 – 1.6 y tomando V_S como base se tiene:

$$I_{PICO_{MAX}} = \frac{2k\sqrt{2}}{x'} \text{ p.u.} \tag{8}$$

$$x' = x_1 + \frac{x_m x_2}{x_m + x_2} = x_1 + x_m - \frac{x_m^2}{x_m + x_2} \tag{9}$$

Calidad de la energía en los sistemas eléctricos de potencia. Efecto de las perturbaciones de corta duración sobre las máquinas asíncronas.

La reactancia subtransiente en máquinas de diseño estándar se encuentra entre 0.12 y 0.20 en p.u. Cuando no se conocen los parámetros, se determina, aproximadamente, como el inverso de la corriente de arranque a voltaje nominal.

$$x' = \frac{1}{I_{ROTOR\ BLOQUEADO} (p.u.)}$$

Ejemplo:

Un motor de 900 kW., 2,4 kV, trifásico conectado en delta, 60 Hz posee una corriente nominal de 155 A. La corriente en vacío es de 30 A. Determine las constantes de tiempo de circuito abierto, cortocircuito y compensada si se utilizan capacitores con una corriente por fase igual al 90% de la corriente en vacío del motor. Los parámetros del circuito equivalente en p.u. son:

$$x_m = 5.167, x_1 = 0.136, x_2 = 0.1098, r_2 = 0.0097$$

$$\text{La impedancia base; } Z_b = \frac{V_b}{I_b} = \frac{2400}{155} = 15.48 \ \Omega$$

$$\tau_{OC} = \frac{x_2 + x_m}{2\pi f r_2} = \frac{5.167 + 0.1098}{2 \times 3.1416 \times 60 \times 0.0097} = 1.44 \ s$$

$$\tau_{SC} = \frac{x_2 + \frac{x_m x_1}{x_m + x_1}}{2\pi f r_2} = 0.066 \ s$$

La corriente de los capacitores;

$$I_{CAP} = \frac{0.9 \times 30}{\sqrt{3}} = 15.6 \ A$$

La reactancia capacitiva;

$$x_C = \frac{2400}{15.6} = 153.8 = 9.93 \ p.u.$$

La constante de tiempo con capacitores:

$$\tau_{CC} = \frac{x_2 + \frac{x_m (x_1 - x_C)}{x_m + (x_1 - x_C)}}{2\pi f r_2} = 3.02 \ s$$

El tiempo mínimo necesario en este caso para que se extinga el voltaje en el estator debido al flujo residual debe ser superior a tres constantes de tiempo, es decir a nueve segundos. Si el estator estuviese abierto sólo se necesitarían aproximadamente cuatro segundos. Este debe ser el tiempo mínimo de ajuste del recierre o de interrupción si debe eliminarse toda posibilidad de aparición de sobrecorriente en el sistema.

El valor pico máximo de la corriente de reanque es:

$$x' = x_1 + \frac{x_m x_2}{x_m + x_2} = 0.136 + \frac{5.167 \times 0.1098}{5.167 + 0.1098} = 0.243$$

$$I_{PICO\ MAX} = \frac{2k\sqrt{2}}{x'} = \frac{2 \times 1.5\sqrt{2}}{0.243} = 17.45 \ p.u. = 2617.5 \ A$$

Esta corriente puede provocar valles de voltaje, disparos de interruptores o el mal funcionamiento de los equipos de control, automática, adquisición de datos, etc, que operen alimentados desde la misma subestación o en las vecindades en dependencia del grado de rigidez del sistema.

Situaciones similares se presentan durante el arranque de motores con compensadores estrella delta donde ocurre una transición a circuito abierto del estator. Las grandes corrientes transitorias son la causa de muchas de las averías de estos equipos y del "pestaño" de las luces que no son más que manifestaciones de valles en sistemas débiles.

III. CONCLUSIONES

1.- Los valles e interrupciones de corta duración; momentáneas e instantáneas son un problema dominante de la calidad de la energía en la Provincia de Cienfuegos. Originados desde el sistema o por causas propias de la carga, se manifiestan frecuentemente en los sistemas eléctricos industriales y de servicios.

2.- Las máquinas asíncronas y sus cargas son afectadas por estos fenómenos y en determinadas condiciones pueden provocar interrupciones en los procesos productivos y el mal funcionamiento de los dispositivos de control, de electrónica de potencia y de la tecnología de la información.

3.- En los circuitos con transferencia de fuentes y recierre automático, es necesario considerar las constantes de tiempo para la extinción del flujo residual de las máquinas asíncronas

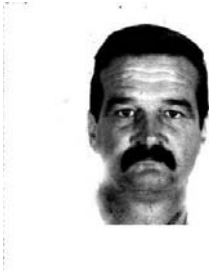
REFERENCIAS

- [1] de Armas Teyra Marcos A, Cayón José : "Consideraciones sobre la calidad de la energía eléctrica en la Provincia de Cienfuegos" Memorias de Convención FIE 2002, Universidad de Oriente, Cuba
- [2] Power Recorder RPM System Guide Power Quality Inc Yuma Arizona 2003.
- [3] R. Gonzáles, Departamento de Protecciones Provincial. Comunicación personal mayo 2003.

Calidad de la energía en los sistemas eléctricos de potencia. Efecto de las perturbaciones de corta duración sobre las máquinas asíncronas.

- [4] F Corrales and J Pedra, "Algorithm for the study of voltage sags on induction machines. IEEE Transaction on energy Conversion, vol 14, No 4 Dec 1995
- [5] de Armas Teyra Marcos A. "Curso de Calidad de la Energía", UABC IING Mexicali, Febrero 2004.

AUTOR



Marcos A. de Armas Teyra
Ave 32 entre 45 y 47 No. 4507
Cienfuegos 55100 Cuba
marmas53@yahoo.es