

Fluctuaciones de Tensión Eléctrica en Redes Industriales debidas a la Operación de Cargas de Gran Tamaño

Arizpe Islas J. L.
UANL-FIME

Flores Moreno N. E.
UANL-FIME

Resumen. La operación de un sistema eléctrico debe cumplir con aspectos de economía, y de seguridad. Un aspecto importante, es la propensión que tienen los circuitos utilizados por las compañías eléctricas a las fluctuaciones en la tensión eléctrica cuando alimentan cargas de gran tamaño. Estas fluctuaciones momentáneas en la magnitud de la tensión suministrada son probablemente los problemas de calidad de la energía más importantes. Sin embargo, los usuarios industriales con servicio de suministro eléctrico exclusivo son más bien la excepción que la regla.

En consecuencia, los niveles crecientes de las fluctuaciones de tensión producidos por la operación de cargas cíclicas de tamaños considerables utilizadas por algunos usuarios, se proyectan como una fuente progresiva de deterioro de la calidad de la energía no solo en las instalaciones de los usuarios que las producen sino también en instalaciones vecinas alimentadas por la misma línea.

En este documento se propone una metodología para caracterizar los fenómenos electromagnéticos que se presentan en sistemas eléctricos industriales débiles, para establecer un criterio para diagnosticar incompatibilidades entre el sistema eléctrico de suministro y la carga.

Palabras clave: calidad de la energía, depresión de "voltaje".

I. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es analizar y caracterizar las fluctuaciones de tensión eléctrica así como la respuesta dinámica del sistema de distribución durante el arranque y la operación de motores de inducción de gran capacidad, siendo el objetivo central de este trabajo evaluar el ambiente eléctrico en una parte de la red del sistema eléctrico de potencia con las técnicas de modelado adecuadas y así mostrar aquellos escenarios de operación que las redes industriales deben evitar para que no se presenten las depresiones de tensión.

Así mismo, se pretende predecir el desempeño de los alimentadores y proponer técnicas para mitigar estas fluctuaciones de tensión. Asimismo, se investiga y se proponen algunas acciones correctivas necesarias para controlar el problema.

RVP-AI/2016 ♦ DIS-04 PONENCIA RECOMENDADA
POR EL **COMITE DE DISTRIBUCION DEL CAPITULO DE POTENCIA DEL IEEE SECCION MEXICO**
Y PRESENTADA EN LA **REUNION INTERNACIONAL DE VERANO, RVP-AI/2016,**
ACAPULCO GRO., DEL 17 AL 23 DE JULIO DEL 2016.

II. CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE PERTURBACIONES

El problema de las fluctuaciones de tensión en una red eléctrica industrial por la operación de cargas de gran tamaño no es nuevo ya que existen publicaciones al respecto, incluso se puede encontrar en las recomendaciones de la IEEE [1] la definición de una depresión de voltaje: es un decremento de entre 0.1 y 0.9 p.u., en el voltaje rms a la frecuencia del sistema y con una duración de 0.5 ciclos a 1 min. Por lo que esta norma tiene perfectamente definido, tipificado e incluso clasificado el problema tal como se muestra en la Tabla 1. Sin embargo, la IEEE menciona voltaje nominal y la NORMA Oficial Mexicana se refiere a tensión eléctrica¹, por lo que en el resto del documento se utiliza el término tensión eléctrica.

Tabla 1. Categorías y características típicas de fenómenos electromagnéticos²

| Variaciones de corta duración | Categoría | Duración típica | Magnitud típica de voltaje |
|-------------------------------|--------------|------------------|----------------------------|
| Depresiones de voltaje | Instantáneas | 0.5-3.0 ciclos | 0.1-0.9 p.u. |
| Depresiones de voltaje | Momentáneas | 30 ciclos-3 seg. | 0.1-0.9 p.u. |
| Depresiones de voltaje | Temporales | 3 seg.-1 min. | 0.1-0.9 p.u. |
| Fluctuaciones de voltaje | | Intermitente | 0.1-7% |

Generalmente, todos los equipos operan a tensión nominal, y cuando tienen una tensión de cero en terminales simplemente no operan, esto es, cuando no cuentan con una batería de emergencia. Sin embargo, entre estas dos condiciones extremas se encuentran las depresiones en la magnitud de la tensión eléctrica de corta o de larga duración, y el bajo nivel de tensión. Por lo que, es conveniente definir estos términos.

Usualmente, las depresiones en la tensión eléctrica son asociadas a fallas en el SEP, pero también pueden ser causadas por cambios repentinos de grandes bloques de carga o el arranque de motores de gran capacidad, etc.

En este trabajo la magnitud de una depresión en la tensión eléctrica se define como la magnitud de la tensión que se

¹ NORMA Oficial Mexicana NOM-002-SEDE-2010, Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución.
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5224693&fecha=15/12/2011

² IEEE Standard 1159-1995 - IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
<https://standards.ieee.org/findstds/standard/1159-1995.html>

mantiene durante el evento, esto es de acuerdo con la norma IEEE 1159 [1], y típicamente se representa por un porcentaje de la tensión nominal o en por unidad (p.u.). De esta manera una depresión de un 70% en un alimentador de 115kV significa que la magnitud de la tensión eléctrica a caído a 80.5kV y no a un valor de 34.5kV.

III. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS INDUSTRIALES

Un sistema entra en un estado de inestabilidad del voltaje cuando el incremento de carga ocasiona una progresiva e incontrolable degradación en el perfil del mismo. El principal factor causante de la inestabilidad es la incapacidad del SEP de satisfacer los requerimientos de potencia reactiva.

Empero, en un sistema industrial un incremento importante de carga es visto por el sistema como una reducción en la impedancia de carga por lo que la tensión eléctrica en terminales de la carga disminuye y prevalece sobre el incremento en la corriente de carga, teniendo como efecto neto un decremento en la potencia activa. Esto representa una condición de operación crítica que se manifiesta como una degradación progresiva del perfil de la magnitud de la tensión eléctrica y el sistema puede llegar a ser inestable; dependiendo fuertemente de las características de la carga.

En este trabajo se propone el estudio de las depresiones de tensión eléctrica en sistemas industriales, los cuales por naturaleza son radiales, sin generación local o algún tipo de compensación, de esta forma las redes industriales se encuentran dentro del escenario de operación más propenso a padecer de este problema.

A continuación, se describen las consideraciones tomadas en cuenta para este trabajo para el estudio de las depresiones de tensión eléctrica en redes industriales:

- El sistema de alimentación se encuentra trabajando bajo condiciones de operación balanceadas, y los parámetros del sistema se consideran concentrados, excepto para la línea de transmisión.
- Debido a que las grandes cargas industriales son comúnmente trifásicas, en la metodología empleada se considera que las cargas producen una depresión en la magnitud de la tensión eléctrica igual en las tres fases.
- Sólo se considera la reactancia del sistema industrial analizado, a 60 Hz.
- La magnitud de la tensión eléctrica en el nodo de alimentación se considera constante y de 1 p.u.
- El sistema analizado es radial y no se cuenta con dispositivos para la regulación de tensión eléctrica, así como tampoco con generación local durante el proceso de arranque.

Para cuantificar las depresiones en la magnitud de la tensión en las redes industriales con estas características, se utiliza un algoritmo propuesto por Bollen [2], tal como se muestra en la Fig. 1.

Este modelo es útil para describir algunas de las principales propiedades de las depresiones en la magnitud de la tensión. Se pueden observar algunas impedancias:

Zs' representa la impedancia del sistema alimentador entre la fuente y el nodo de acoplamiento común (PAC), la cual es calculada utilizando el nivel de falla en este nodo y la magnitud de la tensión de pre-evento,

Zs es la impedancia de la carga sensible a las depresiones en la magnitud de la tensión, mientras que

Zc es la impedancia de aquella carga que provoca estas depresiones, por lo que a esta se le llamará carga crítica.

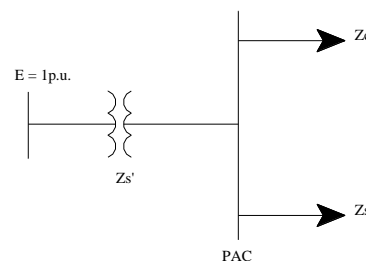


Fig. 1. Circuito equivalente para redes industriales radiales.

El punto de acoplamiento común (PAC), es el nodo donde se alimentan ambas cargas, la sensible y la crítica, simultáneamente. En este modelo la corriente demandada por la carga sensible puede ser despreciada, ya que se puede asumir que la de la carga crítica es mucho mayor a la primera. Sin embargo, esta suposición solamente es válida por un corto período de tiempo, esto es, durante el intervalo de tiempo en el cual la carga crítica permanezca conectada. De esta manera se tendrá que la magnitud de la tensión en el PAC será

$$V_{dep} = \frac{E \cdot ZcZs}{Zs'(Zc + Zs) + ZcZs} \tag{1}$$

donde Zk es la impedancia a la frecuencia fundamental ($=Rk + j Xk$)

Si se considera que la magnitud de la tensión en el alimentador E es de 1 p.u., entonces se obtiene la siguiente expresión

$$V_{dep} = \frac{ZcZs}{Zs'(Zc + Zs) + ZcZs} \tag{2}$$

Analizando la expresión anterior se observa que al tener un alimentador robusto (Zs' pequeña) la magnitud de la tensión en el PAC será de 1 p.u. aproximadamente independientemente de la carga conectada en el PAC. Esto es, las depresiones la magnitud de la tensión serán más severas en aquellos sistemas con bajo nivel de falla.

Se debe notar que este modelo monofásico en realidad puede ser aplicado a sistemas trifásicos balanceados, debido a que sólo es necesario analizar una fase. Por lo anterior, esta metodología es válida en redes industriales, donde las cargas de gran tamaño son invariablemente trifásicas.

Si la carga sensible es despreciada, entonces se obtiene la siguiente expresión

$$V_{dep} = \frac{Z_c}{Z_s' + Z_c} \quad (3)$$

Un esquema un poco más general sería el que se presenta en la Fig. 2, donde se incluye cualquier impedancia presente entre el alimentador y el PAC, donde se aplica el mismo criterio, obteniendo así que la magnitud de la tensión en el PAC será

Si la magnitud de la tensión en el alimentador E es de 1 p.u.

$$V_{dep} = \frac{Z_s Z_c}{Z_s'(Z_c + Z_s) + Z(Z_c + Z_s) + Z_s Z_c} \quad (4)$$

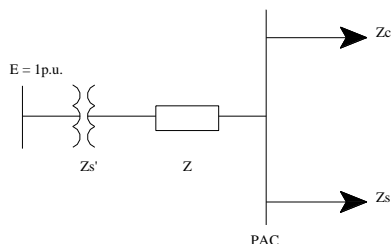


Fig. 2. Modelo utilizado para redes industriales radiales.

En la Fig. 3 se muestra la magnitud de la depresión en función de la longitud del alimentador calculada para sistemas con diferentes niveles de falla (750 MVA, 200 MVA y 75 MVA). Se supone que la impedancia de la fuente es puramente reactiva.

Como se puede observar y tal como era de esperarse la magnitud de la depresión en el PAC se incrementa al aumentar la distancia que existe entre el PAC y el alimentador; igualmente, esto sucede cuando se disminuye el nivel de corto circuito (alimentador más débil). Esto significa que cuando se acerca eléctricamente la carga al alimentador, la caída de tensión se aproxima a cero.

Influencia del transformador

La impedancia Z que existe entre el motor y el PAC mostrada en la Fig. 2 no solamente consiste en cables sino también de transformadores. Uno de los elementos que tienen una “mayor” impedancia es el transformador. La presencia de un transformador entre el PAC y la carga nos lleva a tener una depresión en la magnitud de la tensión menos severa en aquellas cargas alimentadas por el lado de alta del transformador.

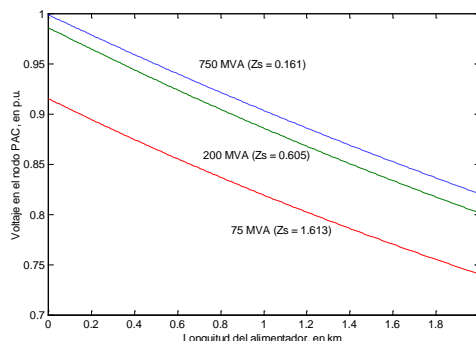


Fig. 3. Magnitud de la tensión en el PAC en función de la longitud del alimentador, utilizando un cable de 50mm².

Para mostrar la influencia de un transformador en la magnitud de una depresión en la magnitud de la tensión, se puede considerar la situación que se muestra en la Fig. 4.

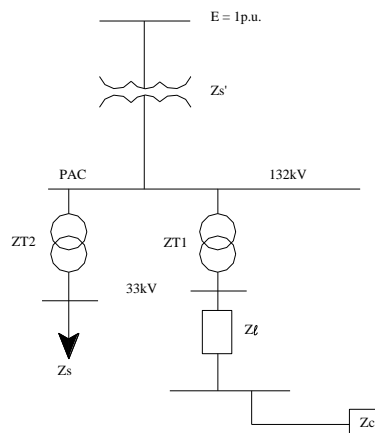


Fig. 4. Red industrial con cargas a diferentes niveles de tensión.

Los niveles de corriente de falla son 3,000 MVA en el nodo de 132kV, y de 900 MVA en el nodo de 33kV. En términos de impedancia, la impedancia de la fuente es de 5.80 Ω, y la impedancia del transformador es de 13.55 Ω, ambas están referidas al nivel de alta tensión de 132kV.

Utilizando nuevamente la misma metodología y considerando que E es de 1 p.u. se obtiene la siguiente expresión para el PAC:

Si $ZT1 = ZT2$, se tiene

$$V_{dep} = \frac{(Z_c + ZT)(ZT + Z_s)}{Z_s'(Z_s + Z_c + 2ZT) + ZT(ZT + Z_s) + Zl(Z_s + Z_c + 2ZT) + Zc(ZT + Z_s)} \quad (5)$$

donde

$Z_s' = 5.81 \Omega$,

$Z_c = 0.04\Omega$,

Zl es la impedancia del alimentador por unidad de longitud, y

l es la distancia que existe entre el motor y el lado secundario del transformador.

La impedancia de las cargas sensible y crítica a 33kV son de 10.89Ω y de 0.72Ω respectivamente, las cuales deben de ser referidas al nivel de 132kV.

La ZT en esta expresión considera que la potencia de los transformadores es de 200 MVA a 33kV. El resultado es mostrado en la Fig. 5.

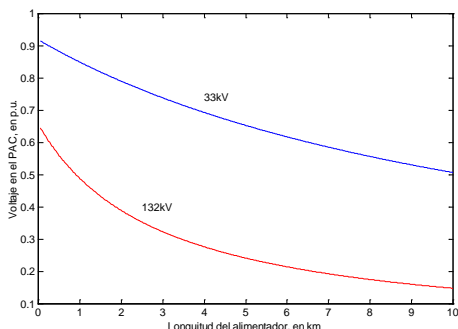


Fig 5. Magnitud de Tensión eléctrica en el PAC para diferentes niveles de tensión.

En la figura 5 se puede apreciar que las depresiones en el PAC debidas a la conexión de cargas en el lado de 33kV son menos severas. Esto es debido a que las impedancias de las cargas son vistas desde el lado de 132kV como $(132/33)^2$ veces más altas que aquellas vistas desde el nivel de 33kV.

La expresión utilizada para determinar el comportamiento de la magnitud de la tensión en el PAC cuando la carga crítica está alimentada directamente a 132kV es:

$$V_{dep} = \frac{Z_c(Z_s + ZT)}{Z_s'(Z_s + Z_c + ZT) + Z_c(Z_s + ZT) + ZL(Z_s + Z_c + ZT)} \quad (6)$$

No obstante, cuando se considera la longitud del alimentador como una cantidad constante de 10km y en su lugar se considera como variable la potencia de la carga crítica desde cero hasta 50 MVA, se obtiene la figura 6.

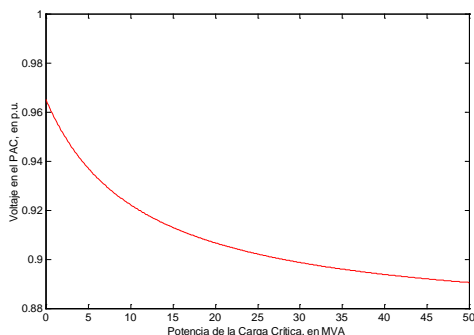


Fig. 6. Magnitud de la depresión en la magnitud de la tensión vs carga crítica.

IV. DEPRESIONES EN LA MAGNITUD DE LA TENSIÓN EN REDES INDUSTRIALES Y ARRANQUE DE MOTORES DE INDUCCIÓN

Una de las principales causas de las depresiones en la magnitud de la tensión en redes industriales es el arranque simultaneo de motores de inducción de gran capacidad o de un gran número de motores de inducción a tensión de línea. Este arranque es extraordinariamente sencillo, pero al mismo tiempo implica sobrecorrientes de arranque considerables, lo cual es un problema para los diseñadores de redes industriales, por lo que es conveniente analizar el comportamiento de este tipo de carga durante el arranque.

El análisis del comportamiento de un motor de inducción durante el arranque es necesario para predecir el comportamiento de la en la magnitud de la tensión en terminales y la corriente requerida durante el arranque de éste, así como para estimar el tiempo que tardará en acelerarse hasta alcanzar su velocidad nominal.

El modelo que se utilizó para emular el comportamiento transitorio de un motor de inducción durante el arranque es el propuesto por Krause en [3] y fue implementado utilizando MATLAB ®/ Simulink.

V. DESCRIPCIÓN DE CASOS DE ESTUDIO DE LAS DEPRESIONES EN LA MAGNITUD DE LA TENSIÓN

El primer esquema de distribución industrial a estudiar es el que se muestra en la Fig. 7, donde la caída de tensión depende fuertemente de los parámetros del sistema. En esta figura, Z_s' es la impedancia de acoplamiento entre el PAC y el nodo de suministro, Z_m la impedancia del motor durante el arranque y Z_s la de la carga adicional.

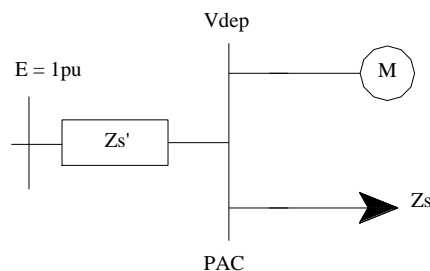


Fig. 7. Circuito equivalente.

Al igual que en los casos anteriores se considera que la en la magnitud de la tensión en el nodo de suministro es de 1 p.u. por lo que la magnitud de la tensión en el PAC será encontrado mediante la siguiente expresión;

$$V_{dep} = \frac{Z_m Z_s}{Z_s'(Z_s + Z_m) + Z_m Z_s} \quad (7)$$

Resulta evidente que esta ecuación puede ser expresada en función de la potencia de la máquina Sm así como en función de la potencia del alimentador Ss' y de la carga adicional Ss , debido a que es posible escribir la impedancia de la fuente como:

$$Zs' = \frac{Vn^2}{Ss'} \quad (8)$$

y la impedancia del motor durante el arranque es:

$$Zm = \frac{Vn^2}{\beta Sm} \quad (9)$$

donde:

β es la relación entre la corriente de arranque y la corriente nominal.

De tal forma que la expresión para la depresión en la magnitud de la tensión puede ser presentada de la siguiente forma:

$$Vdep = \frac{Ss'}{Ss' + Ss + \beta Sm} \quad (10)$$

Es claro que el comportamiento de la magnitud de la tensión es diferente para cada una de las fases. Sin embargo, basta con analizar una sola fase (fase A) para visualizar el efecto de la depresión.

Normalmente, el nivel de cortocircuito en VA, del nodo de suministro es considerablemente mayor que la carga total alimentada por el sistema. Por ejemplo, en [4] el nivel de cortocircuito en VA, del alimentador es 15 veces mayor a la carga total en el sistema. Sin embargo, en la realidad pueden presentarse escenarios no tan favorables.

Por otra parte, cuando se hace uso de un transformador para disminuir las depresiones debidas al arranque de motores de inducción, se tendrá una configuración como la que se presenta en la Fig.8.

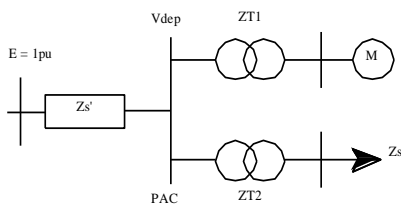


Fig. 8. Circuito equivalente para representar una depresión debida al arranque de un motor de inducción con dos transformador dedicados.

Si ambos transformadores son de la misma capacidad en VA, así como de impedancias eléctricas iguales, se tiene que la magnitud de la tensión en el PAC puede representarse como:

$$Vdep = \frac{(ZT + Zm)(Zs + ZT)}{Zs'(Zs + 2ZT + Zm) + ZT(Zs + ZT) + Zm(Zs + ZT)} \quad (11)$$

Aún y cuando estas expresiones describen el comportamiento de la magnitud de la tensión en el PAC, la corriente demandada durante el proceso de arranque de la máquina de inducción dependerá exclusivamente de los parámetros de ésta, siendo el parámetro más importante la constante inercia H y la condición inicial de la máquina.

En la Fig. 9 se muestra la depresión de la magnitud de la tensión producida por el arranque de una máquina en vacío cuya constante de inercia H es de 0.6760 s y una producida por una segunda máquina con una constante de inercia de 1.0 s. El sistema utilizado es el mostrado en la Fig. 7 donde se supone una fuente con una potencia de cortocircuito de 30MVA y se tiene una carga sensible de 1MVA.

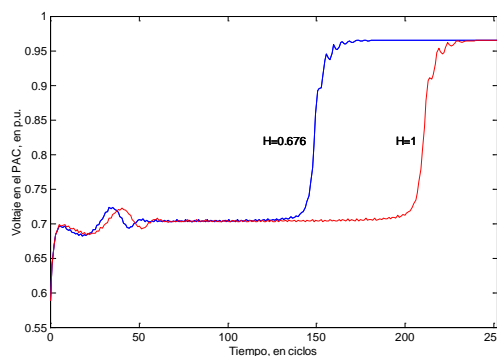


Fig. 9. Comportamiento de en la magnitud de la tensión en el PAC durante el arranque de un motor de inducción.

Se puede observar cómo el tiempo necesario para el arranque aumenta conforme se incrementa la inercia de la máquina, aún y cuando está opera en vacío, entonces cuando se tiene una carga desde el arranque, el motor de inducción podría tomar demasiado tiempo en acelerarse y llegar a su velocidad nominal o inclusive podría no alcanzar esta condición, por lo que el par de carga deberá ser pequeño en el arranque, de lo contrario el motor permanecerá inmóvil.

La depresión en el PAC dependerá de los parámetros del sistema. En este caso la capacidad de la fuente tiene gran influencia sobre la magnitud de estas depresiones, al igual que en el caso de la conexión de una carga constante de gran tamaño. Esto se puede apreciar en una forma más evidente en la Fig. 10, donde se presenta el comportamiento de en la magnitud de la tensión en el PAC, cuando se arranca un motor de inducción de 2,250HP a 2,300 volts.

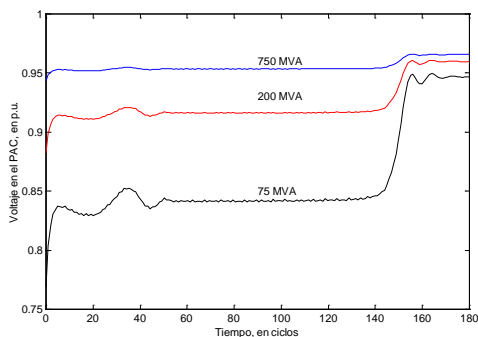


Fig. 10. Comportamiento de la magnitud de la tensión en el PAC durante el arranque de un motor de inducción.

Se debe observar que la magnitud de la depresión no es constante sino que varía con la condición de operación de la máquina y de su ciclo de trabajo, por lo que su duración puede ser considerablemente más larga.

Así mismo, se debe resaltar que el arranque de un motor de inducción de gran capacidad puede afectar el comportamiento de otros motores conectados al mismo nodo ya que puede reducir la magnitud de la tensión nominal en las terminales que los alimenta. De esta manera, una condición de bajo “voltaje” en terminales de la máquina, durante el arranque, puede llegar a provocar que esta no logre alcanzar su velocidad nominal, o podría tomar un tiempo excesivamente grande haciendo que actúen los sistemas de protección contra bajo “voltaje”. Así mismo la ocurrencia de una depresión en terminales de la máquina cuando está operando a su velocidad nominal puede reducir su par electromagnético y aumentar la demanda de corriente al aumentar el deslizamiento de esta.

VI. PARÁMETROS DEL RED ELÉCTRICA QUE PUEDEN MITIGAR EL PROBLEMA

Considerando la información obtenida en este documento es posible identificar los parámetros más relevantes de la carga así como de la red eléctrica industrial, que tiene una influencia importante sobre las depresiones en la magnitud de la tensión y de esta manera es posible modificar algunos de estos parámetros para evitar que se presenten condiciones operativas críticas en redes industriales propensas a las depresiones. Sin embargo, la modificación de algunos de estos puede no ser factible debido a la dificultad asociada con la implementación física y sobre todo debido a su alto costo.

Relación potencia del nodo de suministro y de carga

Es evidente que al tener una relación potencia del nodo de suministro y de carga grande la depresión en la magnitud de la tensión sería menor, esto es, si se cuenta con un nodo de suministro robusto la respuesta del sistema ante una carga de gran tamaño sería muy buena.

Para aumentar esta relación se puede cambiar el nodo de suministro por otro con mayor nivel de corto circuito, lo cual puede ser una solución pero con un costo asociado elevado. Si bien es cierto que el tener una relación potencia del nodo de suministro y de carga mayor a 20 puede no eliminar totalmente el problema, si es un factor muy importante para la recuperación en la magnitud de la tensión en el sistema, ya que cuando no se tiene esta condición se opera el sistema bajo un régimen de carga bastante severo y puede provocar una condición de colapso de voltaje dependiendo de las características de la carga. Empero, en el caso de usuarios industriales que comparten un nodo de suministro, posiblemente sigue siendo la solución más viable.

También, se puede reducir la carga de tal forma que la conexión de ésta no produzca este problema, sin embargo en la realidad es necesario conectar toda una serie de cargas (o bloque) simultáneamente para realizar un proceso.

Longitud del alimentador

Otro punto importante es determinar las características de los cables conductores que alimentan dichas cargas incluso determinar si existe la necesidad de algún cambio de sección transversal en el conductor ya que como se vio anteriormente este hecho puede contribuir al abatimiento en la magnitud de la tensión en el PAC.

El evitar que se opere en el límite de capacidad de los cables es una medida muy efectiva para reducir las caídas de tensión en estos y es relativamente fácil de realizar a un bajo costo. El no poner atención a este tipo de detalles seleccionando el calibre del conductor para la máxima carga de estado estable puede tener consecuencias indeseables, como lo son fallas en el sistema debido a la degradación prematura, calentamiento, etc., por lo que se deberá tomar en cuenta la corriente pico demandada por la carga aún y cuando ésta sea transitoria para determinar el calibre de estos conductores.

Transformadores con alta impedancia

Los transformadores también constituyen una parte importante en el análisis de las depresiones, ya que la impedancia del transformador puede ser suficientemente grande para ser despreciada, por lo que se debe considerar el efecto que tiene este elemento del sistema.

Como se vio anteriormente la magnitud de la tensión en el PAC además de estar fuertemente determinado por la robustez del nodo de suministro también depende de la capacidad, en VA, del transformador. Aún y cuando este elemento representa una caída de tensión adicional, este elemento también ayuda a mejorar el perfil de la magnitud de la tensión en el nodo de baja tensión. Además el transformador funciona como un amortiguador impidiendo que la depresión provocada en el lado de baja se propague a un nivel de tensión más alto, lo cual es muy conveniente para otras cargas sensibles conectadas a través del mismo alimentador.

Al tener dos transformadores para adecuar el nivel de tensión eléctrica de alimentación a la carga, se obtiene un mejor comportamiento en el perfil de la magnitud de la tensión en el nodo donde se encuentra esta carga. Asimismo cuando la carga total equivalente es pequeña con respecto a la capacidad de un transformador que la alimenta, el perfil de la magnitud de la tensión se mejora ya que esto equivale a tener un nodo de suministro sobredimensionado para una carga dada.

El cambiar o colocar un transformador de mayor capacidad, y por lo tanto de menor impedancia, puede ser una opción factible debido a que es relativamente fácil de lograr y su costo es razonable.

Parámetros de los motores de inducción

En este trabajo solamente se consideran aquellos escenarios de operación extremos donde el motor(es) se arranca(n) sin ningún medio arranque suave, es decir, casos en que la magnitud del par de arranque sea esencial, y sean alimentados con una tensión nominal. Esto es debido a que cuando se utilizan reactores, transformadores o tensión reducida (estrella-delta), el par de arranque disminuye, siendo varias veces menor que el par correspondiente a la conexión directa, por lo que estos métodos de arranque solo se pueden utilizar en casos en que el par de frenado, debido a la carga, sea pequeño en el arranque. De esta manera se analiza el caso más crítico y la solución de cualquier otra condición más indulgente será más factible.

Se debe observar que es sumamente importante obtener la inercia de aquellas motores de inducción que sean de tamaño considerable, es decir, de aquellas que ocasionen depresiones de tensión en el nodo de suministro durante el proceso de arranque, ó en su defecto obtener un equivalente de aquellas motores conectados a un nodo de suministro, para así poder estimar el comportamiento de la magnitud de la tensión en el nodo de suministro.

Este tipo de motores pueden hacer que la magnitud de la tensión en el nodo de alimentación se deprima momentáneamente, sin embargo, esta depresión puede algunas veces tomar demasiado tiempo de tal manera que las cargas sensibles se empiecen a quedar fuera de servicio. Así

mismo estas depresiones pueden afectar a los mismos motores haciendo que el proceso de arranque se prolongue, lo que conlleva a tener altas corrientes durante este proceso.

También, se puede ver claramente como el efecto de X/R del motor juega un papel muy importante durante el proceso de arranque del mismo, debido a que cuando ésta relación aumenta las oscilaciones en el par del motor durante el arranque están menos amortiguadas lo cual corresponde al caso del mmotors de gran caballaje, mientras que las que tienen unos cuantos caballos de fuerza no presentan este fenómeno.

Cabe mencionar, que la resistencia del rotor ayuda no solo a amortiguar las oscilaciones en el par, sino que también se incrementa con el fin de hacer que el par de arranque aumente durante el proceso de arranque. Empero, la gran mayoría de los motores de inducción utilizados en una red eléctrica industrial son tipo jaula de ardilla por lo que la resistencia del rotor no puede ser variada.

Otro aspecto importante, es aplicar la carga mecánica al motor en el instante de tiempo adecuado para disminuir las depresiones. Aún y cuando en muchos procesos la carga mecánica puede ser dependiente de la velocidad del motor [5], generalmente esta es aplicada desde el arranque de ésta y no es posible ajustar la carga mecánica a un instante de tiempo dado debido a las constantes de tiempo asociadas con el proceso, por lo que resulta nada trivial eliminar este problema modificando ya sea los parámetros de la máquina o ciclo de trabajo; en todo caso se puede buscar una relación que mantenga el compromiso entre eficiencia y costo de operación.

VII. CONCLUSIONES

El identificar el origen de las fluctuaciones en la magnitud de la tensión eléctrica en redes eléctricas industriales es muy importante para el análisis y caracterización de éstas. El estudio de dos de las principales fuentes como lo son las grandes cargas y el arranque de motores de inducción de gran capacidad y de los posibles efectos sobre el comportamiento del equipo sensible, permite precisar las acciones correctivas necesarias.

La técnica utilizada para evaluar las depresiones producidas por la conexión de cargas de gran tamaño en diferentes topologías de redes eléctricas industriales, permite describir algunas de las características más importantes de este fenómeno, así como el observar el comportamiento del sistema ante estas situaciones.

En este trabajo, se utilizó tanto la modelación dinámica (para el arranque de motores de inducción), como la estática para la carga cíclicas y así poder observar la respuesta del sistema de distribución cuando se arrancan

motores de inducción de gran capacidad y cuando se conectan cargas estáticas de gran tamaño. De esta forma, en el diseño de una red eléctrica industrial debe considerarse el comportamiento de estado estable y transitorio de las grandes cargas.

La severidad de las fluctuaciones de tensión, analizadas en este trabajo, no es una función simple de las características de la carga, también depende de la topología del sistema, condición de operación, localización de la carga y tipo de equipo que se utilice para mitigar este fenómeno.

Desde el punto de vista instalación eléctrica, todos los elementos del sistema, capacidad de cortocircuito del nodo de alimentación, longitud y ampacidad del conductor utilizado, juegan un papel importante en la forma de mitigar el problema de las fluctuaciones de la magnitud de la tensión.

El método utilizado para la evaluación de las depresiones debido al arranque de motores de inducción de gran capacidad requiere las características dinámicas de los motores durante el arranque. El modelo utilizado en este trabajo para representar el comportamiento transitorio del motor fue corroborado al comparar los resultados con los que se obtuvieron al utilizar el modelo presentado en el toolbox de MATLAB ®/ Simulink y el modelo equivalente propuesto por Krause [3].

Los resultados derivados de las simulaciones presentadas en el presente trabajo proporcionan información clave que permite comprender mejor el impacto de las cargas de gran tamaño y precisar las acciones correctivas necesarias. Aunque los cambios en el sistema y la condición operativa modifican substancialmente los resultados obtenidos.

El efecto de estas depresiones en la magnitud de la tensión nominal sobre las cargas sensibles más importantes dentro de una red eléctrica industrial es igualmente importante, por lo que el problema de las depresiones requiere ser analizado desde el punto de vista de esta carga sensible, las cuales deberán ser consideradas.

REFERENCIAS

- [1] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, *IEEE Std 1159-1995*, Nov. 1995.
- [2] M. H. J. Bollen, "Understanding of Power Quality Problems", IEEE Press Series 2000.
- [3] P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sodhoff, "Analysis of Electric Machinery" Mc. Grill-Hill, Inc., New York 1987.
- [4] G. Yalcinkaya, M. H. J. Bollen, P. A. Crossley, "Characterization of Voltage Sags in Industrial Distribution Systems", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 4, pp. 682-688, July/August 1998.
- [5] J. Arillaga, C. P. Arnold, B. J. Harker, "Computer Modeling of Electrical Power Systems" John Wiley & Sons. 1983.

BIOGRAFÍAS

Ing. Jorge L. Arizpe Islas, nació en Monterrey, N. L., México en 1977. Realizó sus estudios de Licenciatura en Ingeniería Eléctrica y Mecánica en la UANL obteniendo el grado en 1998; Maestría en Sistemas Eléctricos de Potencia en el Programa Doctoral de la Universidad Autónoma de Nuevo León en 2001.
jorge.arizpei@uanl.mx

Dra. Norma Esthela Flores Moreno
Profesor de Tiempo Completo de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica y Coordinador de Ciencias Básicas de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL Maestro en Ciencias de la UANL,
norma.floresm@uanl.mx