

# EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LAS DEPRESIONES DE TENSIÓN ELÉCTRICA SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DE EQUIPO ELECTRÓNICO.

Jorge Luis Arizpe Islas  
Juan Rafael Cervantes Vega

## RESUMEN

Un problema de las fluctuaciones de tensión eléctrica es un problema de calidad de la energía, y se refiere a un conjunto de disturbios o condiciones que producen resultados indeseables para el equipo eléctrico instalado en la industria. El objetivo de este trabajo es analizar y evaluar el efecto de las depresiones de tensión eléctricas en terminales del equipo electrónico que por su sensibilidad a las fluctuaciones de voltaje se le llama equipo sensible.

## INTRODUCCIÓN

En este documento se hace referencia a la terminología comúnmente utilizada por los organismos internacionales de normalización [1], de una manera general, sin hacer mucho énfasis en las posibles causas de estas depresiones de voltaje. Esto con el fin de ser congruentes y evitar caer en posibles confusiones, debido a que en diversos artículos no se utiliza el término depresión de voltaje sino que se utiliza “ausencia de voltaje” para indicar que se trata de una disminución de la magnitud de este.

Así mismo se analiza el efecto de las depresiones de voltaje sobre aquel equipo que por su sensibilidad a las fluctuaciones de voltaje se le llama equipo sensible. En general este equipo se refiere a aquellas cargas con componentes electrónicos, tales como las computadoras, los variadores de velocidad y los controladores lógicos programables o PLC's. Sin embargo, los PLC's no son analizados debido a que básicamente son alimentados por un sistema muy similar al que se utiliza en las computadoras.

El efecto de las depresiones de voltaje sobre el funcionamiento de los variadores de velocidad, es analizado utilizando un modelo que permita encontrar algunas mejoras en la estructura de estos dispositivos. Así mismo, se hace un énfasis especial en la importancia del nodo de CD, en la reducción de la velocidad, asumiendo que no se dispara el variador por la intervención de los dispositivos de protección o la intervención de los sistemas de control.

## **JUSTIFICACIÓN**

El problema de las fluctuaciones de tensión en una red eléctrica industrial 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 eléctrica, por lo que en el resto del documento se utiliza el término voltaje a la señal de CD.

Las depresiones de voltaje presentes en redes industriales típicamente sobrepasan los límites establecidos por los fabricantes de equipo sensible, aquellos valores recomendados por la norma IEEE 1159-1995 [1] e incluso los establecidos por la especificación CFE L0000-45 [2].

**Tabla 1. Categorías y características típicas de fenómenos electromagnéticos.**

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%

Los dispositivos electrónicos generalmente soportan variaciones pequeñas en el voltaje suministrado, pero cuando se sobre pasa alguno de los límites mostrados en las diferentes curvas de aceptabilidad presentan pérdida de memoria o de datos, es decir un mal funcionamiento en general.

El concepto de curvas de aceptabilidad para cargas sensibles fue introducido en 1978 por Thomas Key. En la Figura 1, se muestran la curva de aceptabilidad típica producida por una asociación de fabricantes de equipo de cómputo CBEMA "Computer Business Equipment Manufacturers" [3] donde variaciones de voltaje por encima y por debajo del valor nominal, es decir, el sobre y bajo voltaje fuera de los límites mostrados puede causar mal funcionamiento del equipo. Esto es, si las depresiones de voltaje tienen una cierta magnitud y duración entonces pueden o no llevar al disparo del equipo.

Por lo anterior, esta grafica representa la respuesta típica de dispositivos electrónicos a las fluctuaciones de voltaje, y aún y cuando estas curvas bidimensionales presentan claras limitaciones, especialmente para equipos trifásicos, es una buena guía a seguir para aquellas compañías eléctricas que suministren energía a usuarios que tengan este tipo de cargas.

Esta curva tendrá que ser considerada para aplicaciones diferentes a las computadoras, ya que es imposible identificar todos los disturbios, así como tratar de generalizar su aplicación para todas las cargas.

Sin embargo, el propósito de estas curvas es dar una idea clara del impacto de las depresiones de voltaje sobre el comportamiento del equipo sensible y no ser una regla de diseño.

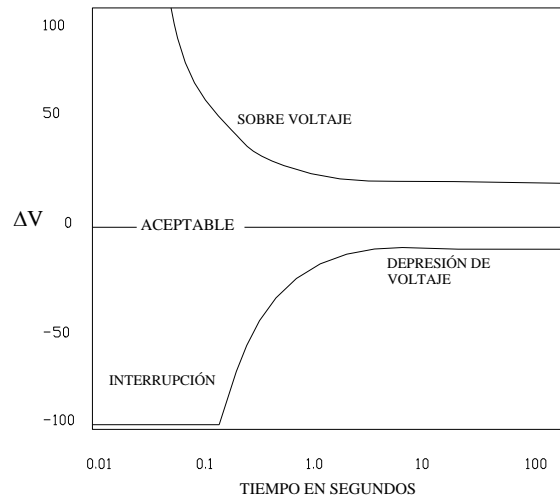


Figura 1. Curva CBEMA de aceptabilidad [3].

### Impacto de las depresiones de voltaje sobre los equipos electrónicos sensibles y otros equipos.

En [4] se mencionan algunas duraciones para las depresiones de voltaje así como su magnitud que ciertos equipos, tales como: los PLC's, variadores de velocidad, y computadoras entre otros, pueden soportar sin tener un mal funcionamiento. Sobre esta base se puede observar que la mayoría de estos equipos se comportan de una manera errática cuando la magnitud del voltaje cae por debajo de 60% con una duración igual o mayor a 30 ms (2 ciclos aproximadamente a una frecuencia de 60 Hertz). También, se muestra cómo los PLC's además de ser extremadamente sensibles a las fluctuaciones de baja frecuencia en el voltaje, también lo son a las depresiones de voltaje de muy corta duración, es decir a fenómenos transitorios.

Por lo anterior, resulta evidente que este equipo es el más afectado cuando el voltaje en terminales no se mantiene en su valor nominal. El problema es que este equipo forma un eslabón muy importante dentro de la cadena de producción de un sistema industrial automatizado, debido a que cuando uno o varios de estos equipos quedan fuera de servicio debido a una depresión de voltaje, inevitablemente una línea de producción puede quedar fuera de servicio.

De esta manera la severidad de la depresión de voltaje está determinada por el tipo de carga que se esté alimentando con este voltaje.

### Impacto de las depresiones de sobrevoltaje sobre las computadoras.

Las computadoras se han convertido en una herramienta valiosa del trabajo cotidiano. Sin embargo, en un sistema industrial automatizado estas son el corazón de la industria. Es por tanto primordial analizar el efecto de este fenómeno en el comportamiento de aquellas computadoras sobre las que se tiene una gran dependencia en un proceso determinado.

La alimentación de una computadora, en la mayoría de los casos consiste de un puente de diodos rectificadores con regulador electrónico de voltaje CD/CD, tal como se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 2.

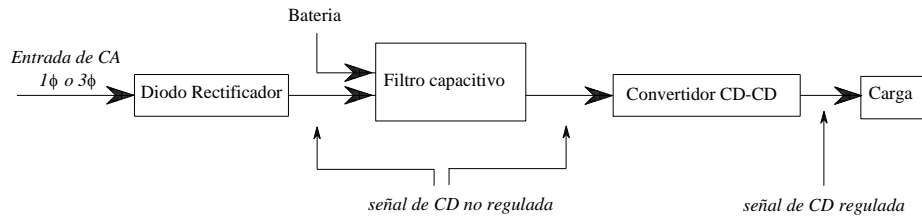


Figura 2. Diagrama de bloques típico de un sistema alimentador utilizado en computadoras.

### Voltaje en el nodo de CD.

El sistema de rectificación de onda completa consiste de un puente de cuatro diodos y un capacitor (sistema monofásico), cada diodo conduce solamente cuando se encuentra directamente polarizado, es decir cuando el voltaje de CA es mayor al de CD o el del capacitor. Es en este instante de tiempo, cuando el capacitor empieza a cargarse, por lo que el capacitor es cargado dos veces por ciclo a la tensión eléctrica de la fuente. Mientras que se encuentran en estado de no-conducción el capacitor es descargado a través del convertidor. De esta manera en estado estable, la cantidad de carga y descarga del capacitor es igual.

### METODOLOGÍA

Para estudiar el efecto de las depresiones de voltaje en el nodo de CD (no regulado), se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los dispositivos semiconductores (diodos) sólo conducen sin presentar caídas de voltaje cuando están directamente polarizados y dejan de conducir cuando la corriente que fluye a través de estos se vuelve cero, esto es, cuando están inversamente polarizados.
- La magnitud máxima de la tensión eléctrica de alimentación es de 1 p.u. y se supone que es perfectamente sinusoidal antes y durante el evento, además que tal voltaje no es afectado por la carga.

La energía requerida por el convertidor electrónico se considera constante e independiente del voltaje en el nodo de CD.

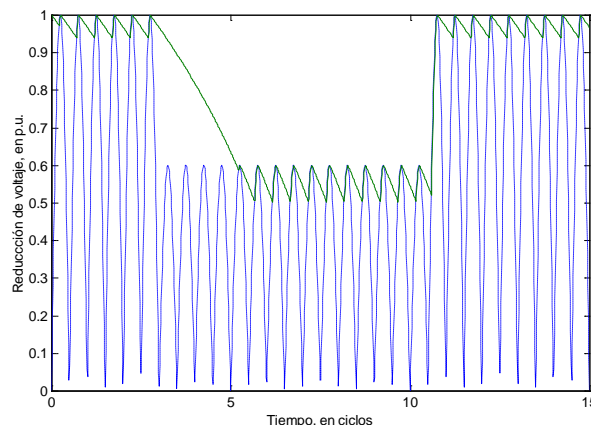


Fig. 3. Aumento en el rizado debido a una depresión de voltaje en el nodo de CD para un rectificador monofásico [5].

En la Figura 3, la señal de tensión eléctrica rectificadora antes del capacitor se indica con una línea punteada, mientras que el voltaje a la entrada al convertidor es indicado con una línea continua.

Debido a la caída de voltaje en los dispositivos semiconductores, el máximo voltaje alcanzado en el lado de directa es menor que el máximo valor de CA. Cabe mencionar que la descarga del capacitor depende solamente de la carga conectada y no así del voltaje de alimentación de CA. Sin embargo, el decaimiento en el voltaje a la entrada del convertidor está determinado por la magnitud de la depresión de tensión eléctrica.

Se debe observar que la energía a la salida del convertidor electrónico  $P$  depende del voltaje de CD, tal como se describe en [6], para cierto tipo de convertidores, donde se tiene que

$$P = Id \cdot Vd$$

$$Vd = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} Vs(1 - \cos\alpha) - \frac{2\omega}{\pi} Ls \cdot Id$$

donde

$Vd$  es el voltaje de CD a la salida del convertidor

$$Vd = (Vdo - Vd\alpha - \Delta VI)$$

$Id$  es la corriente de directa a la salida del convertidor

$Vdo$  es el voltaje de salida cuando el ángulo de disparo (alfa) es cero

$Vd\alpha$  es el voltaje de salida cuando el ángulo de disparo (alfa) es diferente de cero

$\Delta VI$  es la caída de voltaje debida a la impedancia interna de la fuente

$Vs$  es el voltaje de la fuente a la entrada del convertidor

$Ls$  es la inductancia interna de la fuente

$\alpha$  es el ángulo de disparo de los tiristores

Cuando se opera dentro de un cierto rango del voltaje a la entrada del convertidor, el voltaje regulado de salida puede mantenerse constante e independiente del voltaje de entrada, por lo que la potencia de salida del regulador de voltaje es independiente del voltaje a la entrada. Cuando se consideran las pérdidas del convertidor independientes del voltaje de CD, entonces éste es visto por el circuito rectificador como una carga constante.

De esta manera durante una depresión de tensión eléctrica, toda la energía suministrada a esta carga es suministrada por el capacitor, es decir, proviene de la energía almacenada en una capacitancia  $C$ .

$$Ec = \frac{1}{2} C \cdot V^2$$

donde

$Ec$  es la energía almacenada en el capacitor  $C$

$V$  es el voltaje en un tiempo  $t$

Por lo que la energía en el capacitor en un tiempo  $t$  al inicio de una depresión  $V_0$  es igual a la energía después de la depresión, más la energía consumida por la carga de acuerdo con [7] será:

$$\frac{1}{2}C \cdot V_0^2 = \frac{1}{2}C \cdot V_{dep}^2 + P \cdot t$$

donde

$V_0$  es el voltaje en el nodo de CD al inicio de la depresión de voltaje

$P$  es la potencia de la carga en el nodo de CD

Al resolver ésta expresión para el voltaje durante el período inicial de descarga se obtiene:

$$V_{dep} = V_0 \sqrt{1 - 2 \frac{P \cdot t}{C \cdot V_0^2}}$$

donde

$t$  es el lapso de tiempo a partir de la última carga del capacitor.

De esta forma se puede ver cómo el máximo voltaje ocurre cuando  $t = 0$ .

### Impacto de las depresiones de voltaje en la operación de las computadoras.

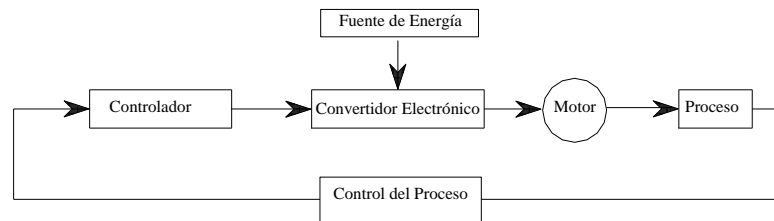
El disparo de la mayoría de las computadoras durante una depresión de voltaje es atribuido al bajo voltaje en nodo de CD, es decir, a un voltaje insuficiente como para que el convertidor funcione correctamente. Por lo que el voltaje al cual las computadoras no presentan problemas será  $V_0$  (voltaje antes del evento) y éstas dejarán de funcionar cuando  $V_0 < V_{min}$ , por lo que el tiempo máximo que toma el pasar de  $V_0$  a  $V_{min}$  puede ser fácilmente encontrado como:

$$t = \frac{1}{2} \frac{(V_0^2 - V_{min}^2)C}{P}$$

Esta expresión puede ser utilizada para determinar el tiempo en el cual ocurrirá el disparo de un equipo en general, cuando se conoce el voltaje mínimo al cual éste puede funcionar correctamente. Es decir, por medio de la ecuación anterior es posible determinar el máximo tiempo que el equipo puede soportar sin quedar fuera de servicio, comúnmente debido a la intervención de las protecciones o al mal funcionamiento del convertidor electrónico; cuando se presenta una depresión de voltaje. Generalmente el voltaje en el nodo de CD depende del diseño del convertidor electrónico; el cual varía entre un 50% y 90% del voltaje de CD.

### Impacto de las depresiones de voltaje los variadores de CA.

Los variadores de velocidad son probablemente el equipo más sensible a las depresiones de voltaje, y la sensibilidad de estos dispositivos es analizada en varios artículos técnicos como [5], en las cuales se concluye que la mayoría de estas depresiones de voltaje pueden ser toleradas al agregar una capacitancia en nodo de CD. En la Figura 4, se muestra el diagrama básico para un variador de velocidad.



**Figura 4. Diagrama de bloques general para un variador utilizado en el control de motores.**

El disparo de los variadores de velocidad puede ser debido a diferentes causas, tales como:

- Protecciones en el convertidor, para detectar cambios repentinos en las condiciones de operación.
- El bajo voltaje en el nodo de CD, debido a una depresión de voltaje, puede producir el disparo de la unidad o del inversor PWM.
- El incremento en la corriente durante una depresión de voltaje, puede activar las protecciones contra sobrecorriente.
- Generalmente los procesos no permiten variaciones en la velocidad o en el par de los motores provocadas por depresiones de voltaje.

Algunos variadores se reinician inmediatamente después de que el voltaje se ha recuperado. Sin embargo, otros pueden ser reencendidos manualmente. De cualquier forma la principal causa de los problemas en los variadores de velocidad de CA es el bajo voltaje en el nodo de CD debido a las depresiones de voltaje.

### Operación de los variadores de CA.

Los variadores de velocidad generalmente están provistos con protecciones contra bajo voltaje y sobre corriente [6], de tal forma que los variadores de velocidad no necesariamente funcionan incorrectamente en presencia de una depresión de voltaje sino que simplemente dejan de funcionar debido a la intervención de estos dispositivos cuando detectan un bajo voltaje en el nodo de CD, es decir, justo a la entrada del convertidor electrónico mostrado en la Figura 4.

Debido a que en este trabajo se analizan cargas industriales las cuales son invariablemente trifásicas, se considera que los variadores son alimentados a través de un circuito trifásico de rectificación. En el control de velocidad de motores de inducción se utilizan dispositivos semiconductores no controlados (diodos) mientras que en los motores de CD se utilizan rectificadores con control del ángulo de disparo.

El voltaje en el nodo de CD depende del voltaje obtenido a través de estos dispositivos de rectificación, y generalmente contiene una componente de rizado que es atenuada por medio de un capacitor C, de tal manera que cuando el voltaje cae por debajo de un valor límite el rectificador deja de conducir (inversamente polarizado) y el inversor PWM es alimentado momentáneamente, unos pocos ciclos, con la energía almacenada en el capacitor C conectado en el nodo de CD. De esta manera es necesario analizar el voltaje en este nodo de CD, tal como se hizo previamente.

### Voltaje en el nodo de CD.

El comportamiento del voltaje en el nodo de CD en las tres fases es igual al que se describió anteriormente cuando, se analizaba el impacto de las depresiones de sobre voltaje sobre las computadoras. Ahora se considera un variador con una carga P (convertidor), un voltaje nominal  $V_o$  en el nodo de CD, y una capacitancia C conectada al nodo de CD, tal que:

$$V_{\min} = V_o \sqrt{1 - 2 \frac{P \cdot t}{C \cdot V_o^2}}$$

donde

$V_{\min}$  representa el voltaje mínimo en el nodo de CD debajo del cual ocurre el disparo de los variadores de CA.

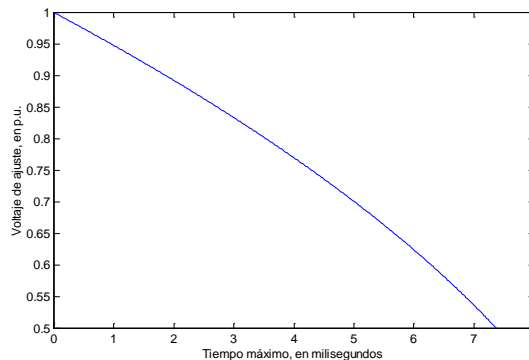
Es claro que no es posible considerar una carga constante P, debido a que la energía que entrega el inversor depende del voltaje de CD a la entrada de este. Sin embargo, suponiendo que las pérdidas en el inversor permanecen constantes a pesar del incremento en la corriente, se puede adoptar un modelo ideal para el inversor, es decir, sin caída de voltaje en terminales del motor, y sin incremento de pérdidas durante la depresión.

### Tolerancia a las depresiones de voltaje.

El disparo de los variadores de CA ocurre cuando el voltaje en el nodo de CD cae por debajo de un valor mínimo Vmin, ya sea por la intervención de las protecciones o por la mala operación del convertidor [7]. El tiempo que transcurre para alcanzar este valor, como se ha expresado anteriormente será:

$$t = \frac{1}{2} \frac{(V_o^2 - V_{\min}^2)C}{P}$$

Para ilustrar esto, se considera un variador de velocidad de CA con un voltaje nominal Vo de 620 volts, con una capacitancia de 4,400µF alimentando a un motor de inducción de 115HP. El variador se dispara cuando el voltaje en el nodo de CD cae por debajo de 560 volts (Vdep > 9.6%), por lo que el tiempo en forma general se calcula para un rango de voltajes que van desde 50% hasta un 100%, obteniendo así la Figura 5.



**Figura 5. Tolerancia de voltaje para un variador de velocidad con diferentes límites operativos.**

De esta manera si fuera posible ajustar las protecciones de bajo voltaje por arriba del voltaje mínimo en el nodo de CD, se reduciría enormemente el número de disparos, debido a que la posibilidad de ocurrencia de una depresión mayor a 9.6% es menor.

Es obvio que para ajustes como el descrito en las protecciones, los cuales son muy pequeños, el variador quedará fuera de servicio en unos pocos ciclos. Por lo que el tiempo para un ajuste de un 50% será mayor al que se obtiene para un voltaje mínimo de 9.6%. Incluso para una depresión de un 100% (Vmin de 0 volts) se puede observar que la capacitancia estará descargada completamente en 9.833ms, por lo que para una interrupción de energía con una duración de más de 10ms inevitablemente el variador se disparará, esto si la carga permanece constante.

### Tamaño del capacitor del nodo de CD.

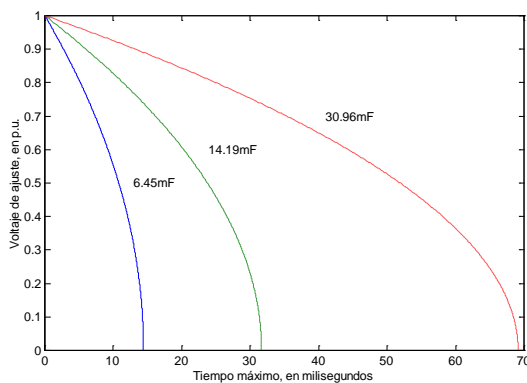
Se observa que en el ejemplo anterior la capacitancia en el nodo de CD no es lo suficientemente grande como para proveer inmunidad al variador contra las depresiones de voltaje. Sin embargo, es posible aumentar la capacitancia para soportar un voltaje dado.

Conociendo el ajuste y la duración de partir de la expresión anterior se obtiene la capacitancia C:

$$C = 2 \frac{P \cdot t_{\max}}{V_o^2 - V_{\min}^2}$$

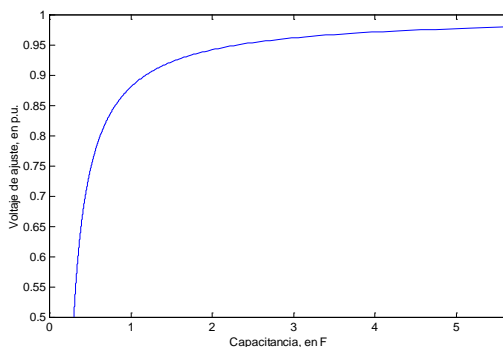


En la Figura 6, se muestra el comportamiento de un variador de velocidad con diferentes valores en la capacitancia.



**Figura 6. Comportamiento de un variador de velocidad con diferentes valores en la capacitancia.**

Mediante la ecuación anterior se pueden obtener los valores para la capacitancia  $C$  mostrados en la Figura 7, para soportar un voltaje mínimo en el nodo de CD para un tiempo de 30 ciclos.



**Figura 7. Capacitancia necesaria en el nodo de CD de un variador de velocidad.**

Con esto, se puede apreciar que la capacitancia para estas tolerancias y duraciones no son factibles, por ejemplo, si el mínimo valor de ajuste corresponde a 607 volts (98% de  $V_0$ ) sería necesario un capacitor de 5.6 faradios. Por esta razón se debe de buscar otra fuente de energía alterna. Se debe observar que la capacitancia es calculada suponiendo que la carga  $P$  permanece constante.

Por lo anterior la tolerancia de un variador de velocidad de CA, para depresiones de voltaje, puede ser determinada por:

- El ajuste en las protecciones contra bajo voltaje, el cual determina el voltaje mínimo al cual el variador puede funcionar correctamente.
- Mediante el uso de la curva apropiada, para un tamaño del capacitor determinado, es posible encontrar la máxima duración para una depresión de voltaje que puede soportar un variador.

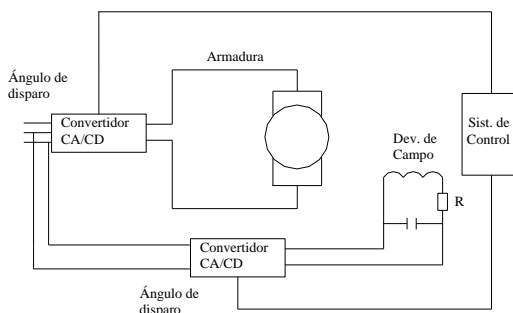
### Impacto de las depresiones de voltaje sobre los variadores de CD.

Los variadores de CD generalmente proporcionan un mejor control sobre la velocidad de un motor de CD. En el caso de los motores de CD su velocidad básicamente depende de la magnitud de voltaje en terminales, el cual es mucho más fácil de controlar que la frecuencia. En esta parte del trabajo se discuten algunos aspectos importantes de la configuración de estos, así como algunas estrategias de protección y control. Sin embargo, en [6] es posible encontrar un análisis detallado de estos dispositivos.

### Configuración típica de un variador de CD.

Debido a que el uso de motores de CD con imanes permanentes está limitado a unos pocos caballos de potencia, además de tener una velocidad máxima limitada, sólo se analizan aquellos motores de CD con electroimanes. En la Figura 8, se muestra la configuración típica de un variador de CD con un motor cuyo devanado de campo es excitado por separado.

En la práctica, se utiliza una fuente controlable de voltaje para alimentar el devanado de armadura y así establecer la corriente de armadura  $I_a$ . Este voltaje es controlado por medio del ángulo de disparo de los tiristores.



**Figura 8. Configuración típica de un variador de CD para un motor de CD con devanado de campo excitado por separado.**

En un motor de CD el par electromagnético es producido por la interacción del flujo en el devanado campo  $\phi f$  y la corriente de armadura  $I_a$ .

$$T_{em} = Kt \phi f I_a$$

donde

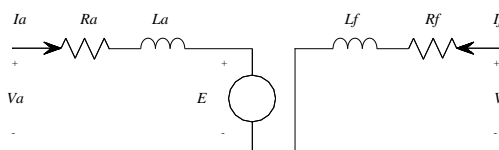
$Kt$  es una constante de par del motor

El flujo de campo  $\phi f$  puede ser controlado ajustando la corriente de campo  $I_f$ , mientras que el par electromagnético  $T_{em}$  puede ser controlado independientemente del flujo, ajustando la corriente de armadura  $I_a$ . Se puede observar que la potencia necesaria para energizar el devanado de campo no es significativa, en comparación con la requerida por la armadura, por esa razón el control del par dependerá principalmente del cambio de la corriente de armadura.

La resistencia que se muestra en la Figura 8 es para limitar la corriente de campo, por lo que las variaciones en el voltaje de alimentación, debidas a las depresiones de voltaje, repercuten directamente sobre el voltaje a la salida del convertidor electrónico, la corriente de campo y la de armadura, y de esta forma sobre el par y la velocidad de salida lo cual puede producir un paro de línea, además de aumentar las pérdidas en el motor debido a la deformación presente en la corriente de armadura.

### Control de velocidad en un motor de CD.

En los motores de CD el flujo magnético  $\phi f$  es establecido por el estator, ya sea mediante imanes permanentes, donde  $\phi f$  permanece constante o mediante un devanado de campo donde la corriente de campo  $I_f (=V_f/R_f)$  controla el flujo  $\phi f$ . En la Figura 9, se muestra el circuito equivalente de estado estable (e. e.) para un motor de CD con excitación separada.



**Figura 9. Circuito equivalente de un motor de CD.**

Si se desprecia la saturación magnética en la trayectoria del flujo se tiene que

$$\phi f = K_f I_f$$

donde  $K_f$  es una constante de proporcionalidad del campo

En el devanado de armadura, la fuerza contra electromotriz  $E$  es producida por la rotación de los conductores a una velocidad  $\omega_m$  (radianes/mecánicos) en presencia del campo magnético (Ley de Faraday).

$$E = K_e \phi f \omega_m$$

donde

$K_e$  es una constante del voltaje del motor

Esta fuerza magnetomotriz también puede ser expresada en función de la corriente de campo

$$E = K I_f \omega_m$$

En un motor de CD, el par electromagnético  $T_{em}$  es producido por la interacción del flujo  $\phi f$  y la corriente de armadura  $I_a$ , es decir, debido a la interacción de los campos.

$$T_{em} = K_t \phi f I_a$$

o bien

$$T_{em} = K I_f I_a$$

En la práctica se utiliza una fuente regulable de voltaje para alimentar el devanado de armadura, y de esta manera establecer  $I_a$ , tal como se muestra en la Figura 10.

Por lo tanto, la corriente  $I_a$  en el devanado de armadura está determinada por  $V_a$ , la fuerza contra electromotriz inducida  $E$ , la resistencia y la inductancia en el devanado de armadura  $R_a$  y  $L_a$  (Véase Figura 10).

$$V_a = E + R_a I_a + L_a p I_a$$

La interacción entre el par electromagnético  $T_{em}$  y la carga, determina el incremento en la velocidad del motor, tal que:

$$T_{em} = J p \omega_m + B \omega_m + T \omega_c$$

donde

$J, B$  representan la inercia total y el amortiguamiento de la carga

$T \omega_c$  es el par equivalente de la carga

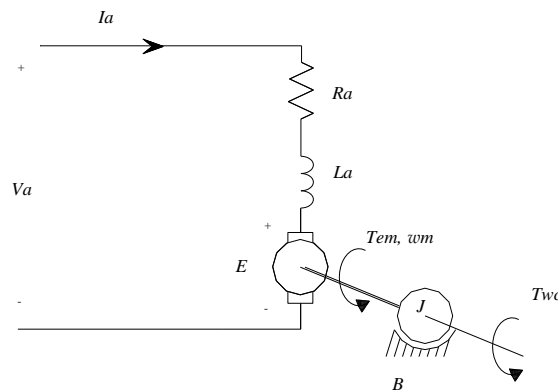


Figura 10. Operación de una máquina de CD.

La velocidad en estado estable será

$$\omega_m = \frac{1}{K_e \phi f} \left( V_a - \frac{R_a}{K_t \phi f} T_{em} \right)$$

La velocidad del motor, y por lo tanto el par, pueden ser controlados mediante el voltaje alimentado a la armadura  $V_a$  y el flujo  $\phi_f$ , dentro de dos regiones llamadas de par constante (donde  $\phi_f$  es nominal) y de potencia constante (donde  $\phi_f$  es menor al nominal).

Sin embargo, en un motor de CD la resistencia de armadura es pequeña mientras que la del devanado de campo es relativamente grande.

Por lo que la velocidad en estado estable puede ser definida como

Si  $V_a \approx E$  en estado estable

$$\omega m = \frac{R_f V_a}{K V_f}$$

Efecto de las depresiones de voltaje sobre los variadores de CD.

Debido a que sólo se consideran depresiones de voltaje trifásicas, en presencia de estas es posible alcanzar una nueva condición de operación en estado estable de estos variadores.

Tal y como se vio en el inciso anterior la velocidad del motor es proporcional a la relación que existe entre el voltaje en terminales y el voltaje de campo. Por lo que una depresión de este tipo no tiene efecto sobre la velocidad despreciando el transitorio debido a las inductancias y a la inercia de la carga, además suponiendo que las protecciones del convertidor no actúan.

Sin embargo, durante una depresión de voltaje el voltaje de armadura cae y por lo tanto también lo hace la corriente de armadura sin llegar a tener un valor negativo debido a que se utilizan semiconductores unidireccionales.

$$\rho I_a = (V_a - E) / L_a$$

Asimismo, si la corriente de armadura tiene un decaimiento en su valor, también la corriente en el devanado de campo presenta algo similar, lo que provoca una disminución en el par y una caída en la velocidad. Estas caídas provocan que la fuerza contraelectromotriz  $E$  disminuya y en algún punto llegará a ser menor que  $V_a$ , por lo que nuevamente la corriente de armadura se empieza a incrementar.

De esta manera el par electromagnético llegará a ser mayor al de la carga y es aquí cuando la máquina acelerará nuevamente. Es necesario por lo tanto aumentar la corriente de armadura, conforme disminuye la corriente de campo, para obtener un par constante.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

El sistema de control de un variador de CD puede operar sobre los siguientes parámetros: voltaje y corriente de armadura, par o velocidad. El sistema de control puede mantener el voltaje de armadura y de campo constantes de tal forma que el variador no perciba ninguna depresión de voltaje. Sin embargo, éste puede tomar al menos unos cuantos ciclos en establecer el control. Por lo que el transitorio que se presenta cuando el voltaje se recupera puede llegar a ser más severo, debido a que el voltaje de armadura se incrementa mucho más rápido que  $E$  ocasionando que la corriente de armadura se eleve demasiado, así como el par y la velocidad.

Por otra parte, cuando disminuye la velocidad debido a una depresión de voltaje en terminales del motor, se puede recurrir al convertidor electrónico para mantener una velocidad constante mediante el ángulo de disparo, esto es, disminuyendo el ángulo de disparo. Es claro que cuando se reduce a cero el ángulo de disparo no es posible controlar la velocidad. Además este sistema de control no puede mitigar los transitorios en el par y la corriente.

Típicamente los variadores de velocidad de CD son disparados por las protecciones contra bajo voltaje, para evitar someter al variador a sobrecorrientes, o a sobrevoltajes debido a los cambios repentinos de velocidad o par, esto se lleva a cabo simplemente desconectando el nodo de CD cuando se presenta una depresión de voltaje.

Además de esto, los motores de CD generalmente son utilizados en procesos donde el control de la velocidad, par, y posición es muy preciso, tal como en los robots. Por lo que aún las pequeñas variaciones no son toleradas.

## **CONCLUSIONES.**

Las computadoras, los variadores de velocidad y los controladores lógicos programables, son algunos de los equipos más sensibles a las depresiones de voltaje, por lo que es importante reducir la probabilidad de disparo o de mal funcionamiento de estos equipos como consecuencia de una depresión de voltaje.

Al incrementar o agregar una capacitancia en el nodo de CD se aumenta significativamente la capacidad de este tipo de cargas de soportar una depresión en el voltaje.

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

## **BIBLIOGRAFÍA.**

- [1] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric power Quality, IEEE std. 1159-1995, nov. 1995.
- [2] Reporte de Medición de Depresiones de Voltaje en Acometida de Talleres y Aceros, 115kV, S. E. Talleres y Aceros, Orizaba, Veracruz, septiembre de 1997.
- [3] M. H. J. Bollen, "understanding of Power Quality Problems", IEEE Press Series, 2000.
- [4] G. T. Hey, W. T. Jewell, "Pitfalls of Power Quality Indices," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, no. 2, pp. 570-578, April 1998.
- [5] IEEE Recommended practice for Evaluating Electric Power Systems Compatibility with Electronics Process Equipment, IEEE Std. 1346-1998.
- [6] M. H. J. Bollen, L. D. Zhang, "Analysis of Voltage Tolerance of AC Adjustable-Speed drives for Three-Phase Balanced and unbalanced voltage Sags," IEEE Transactions on industry Applications, vol. 36, no. 3, pp. 904-910, may/June 2000.
- [7] N. MOHAN, T.M. UNDELAND, W.P. ROBBINS, Power Electronics - Converters, Applications and Design, John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-471-22693-2, 2003 3rd Edition.