

CONTROL DE MÁQUINAS ASINCRÓNICAS EMPLEANDO UN CONVERTIDOR DE FRECUENCIA

Rueda José Luis, Ing.
Tapia Calvopiña Luis, Ing.
Escuela Politécnica Nacional

RESUMEN

Los motores de inducción pueden ser puestos en marcha conectándolos simplemente a la red; a veces, sin embargo, hay buenas razones para no hacerlo así. Por ejemplo, la corriente de arranque requerida puede causar una caída en el voltaje del sistema de potencia tal que haga inaceptable el arranque a través de la línea. En el arranque y aceleración de un motor de inducción la intensidad de corriente se incrementa y generalmente está en el orden de 5 a 8 veces el valor nominal de la corriente. Con este antecedente, es necesario emplear métodos arrancar y controlar la velocidad del motor, entre los cuales se tiene el arranque estrella – triángulo, arranque con voltaje reducido, arranque con resistencias, que son los métodos convencionales. El método preferido hoy en día para el control en motores asincrónicos es mediante el uso de convertidores de frecuencia. Con el uso de los convertidores de frecuencia se puede mejorar las condiciones que se presentan en el arranque, se puede realizar un control de velocidad en la aceleración y frenado, y definir rangos de velocidad de acuerdo a los requerimientos que se deseen.

La velocidad del motor está determinada principalmente por la frecuencia aplicada. La velocidad del motor disminuye un poco conforme la carga y con ello deslizamiento aumenta. Si la carga es demasiada, el motor excederá el par máximo y perderá velocidad o se detendrá.

El problema de regulación de velocidad de los motores eléctricos en general, y en particular de los motores asincrónicos, tiene un gran significado en la explotación.

En toda una serie de ramas de la industria ante las características de regulación se plantean altas exigencias tanto en lo que se refiere a los límites y suavidad de regulación, como a su economía.

jose Luisrt@ieee.org

1. DESARROLLO EL PAR INDUCIDO EN UN MOTOR DE INDUCCIÓN

Al aplicar al estator un conjunto trifásico de voltajes, fluye un conjunto trifásico de corrientes estatóricas que producen un campo magnético B_s que rota en dirección contraria a las manecillas del reloj. La velocidad de rotación del campo magnético está dada por:

$$n_{sinc} = \frac{120 f_e}{P} \quad (1)$$

Donde f_e es la frecuencia del sistema y P es el número de polos de la máquina. Este campo magnético rotacional B_s pasa sobre las barras del rotor e induce voltaje en ellas.

2. CIRCUITO EQUIVALENTE PARA VOLTAJES NO SINUSOIDALES

Para la operación motriz en estado estable las no linealidades físicas del motor, tales como saturación magnética y la variación de la resistencia e inductancia con la corriente pueden ser despreciadas.

Si el motor puede ser analizado propiamente como un sistema lineal, las fuentes de voltaje no sinusoidales pueden ser resueltas en series de Fourier y cada componente armónico aplicado separadamente a un circuito equivalente apropiado. El efecto total se lo puede obtener aplicando el principio de superposición.

Si la máquina esta rotando a una velocidad angular el n ésimo armónico del deslizamiento es:

$$s_n = \frac{n \mp (1 - s)}{n} \quad (2)$$

El signo negativo significa la rotación del campo en sentido directo, el mismo que se obtiene con los armónicos de orden 1, 7, 13, etc., mientras que el signo positivo se refiere a la rotación del campo en sentido contrario

obtenido con los armónicos de orden 5, 11, 17, etc.

La frecuencia del rotor en términos de las componentes armónicas del primario es:

$$f_{2n} = [n \mp (1 - s)] * f \quad (3)$$

Donde: n es el orden del armónico. Entonces, el circuito general equivalente para operación al enésimo armónico de frecuencia es el mostrado en la figura 1:

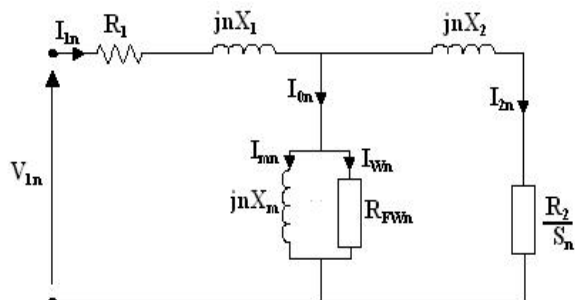


Figura 1: Circuito equivalente para el enésimo armónico de frecuencia.

3. ARRANQUES CONVENCIONALES

Puede llevarse a cabo por los medios siguientes:

- a) Resistencia en serie.
- b) Reactancia en serie.
- c) Autotransformador.
- d) Conexión estrella – delta.
- e) Arranque con una sección del arrollamiento.

El par de un motor de inducción varía con el cuadrado de su tensión final. Una reducción de la tensión final del motor, para reducir la corriente de arranque se usa en los métodos indicados de a) a d).

Cuando se utiliza una resistencia o una reactancia en serie, la corriente de arranque que en este caso es igual a la corriente de línea, se reduce directamente con su tensión final mientras que el par motor de arranque se reduce con el cuadrado de la tensión final. Por ejemplo, con una resistencia o reactancia en serie que produce una caída de tensión de 30 %, la corriente de línea será el 70 % de su valor a tensión plena y el par del motor de arranque será el 49 % de su valor original.

El autotransformador reduce la corriente de línea con el cuadrado de la tensión final del

motor mientras que la resistencia o reactancia reducen la corriente de línea, al mismo par de arranque, directamente con la tensión final. Para el mismo par de arranque el autotransformador produce una mayor reducción de la corriente de línea que la resistencia o reactancia pero es más costoso.

La aplicación de la conexión estrella – delta: En el arranque, se conecta el arrollamiento en estrella, la corriente de línea es 1/3 de la corriente de línea con el estator conectado en delta: esto se debe a que la tensión de fase en la conexión estrella es 1/√3 veces la tensión de fase en la conexión en delta y la corriente de línea en la conexión estrella es también 1/√3 veces la corriente de línea en conexión delta. Se disminuye el par de arranque en 1/3 de su valor con el estator conectado en delta, ya que el cambio de delta a estrella disminuye la tensión de fase a 1/√3 de su valor original y el par es proporcional al cuadrado de la tensión de fase. La transformación delta – estrella se usa principalmente para arrancar motores pequeños.

En el método de arranque con una sección del arrollamiento, el arrollamiento del estator debe consistir, para funcionamiento normal, de dos o más circuitos paralelos en cada fase. Para el arranque, se usa primero uno de los circuitos paralelos y después se conectan separadamente los otros circuitos sobre la línea. Usando uno de los circuitos paralelos se incrementa la impedancia del arrollamiento del estator y se reduce la corriente y par de arranque.

En motores de rotor devanado, la resistencia del circuito del rotor no es fija como en el caso del motor jaula de ardilla; ésta puede variarse entre un valor infinitamente grande (anillos rozantes abiertos) y la resistencia del arrollamiento del rotor (anillos rozantes en cortocircuito). De lo expuesto, en el circuito del rotor de un motor de inducción se puede introducir una resistencia externa que se puede utilizar para arrancar un motor de rotor devanado.

4. CONVERTIDOR DE FRECUENCIA

Los controladores electrónicos de velocidad para motores de CA, por lo general, convierten primero el suministro de CA en CC mediante el uso de un rectificador y, posteriormente, lo convierten una vez más

utilizando un puente inversor, en una fuente de frecuencia y tensión de CA variables. La conexión entre el rectificador y el inversor se denomina circuito intermedio. A continuación se muestra un diagrama de bloques de un controlador de velocidad, a menudo denominado Convertidor de Frecuencia.

La fuente, que puede ser monofásica (usualmente a baja potencia) o trifásica, es aplicada a un rectificador de onda completa que alimenta a los capacitores del circuito intermedio.

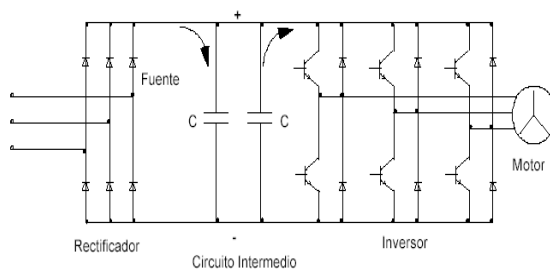


Figura 2: Diagrama de Bloques del Convertidor de Frecuencia

Los capacitores reducen los rizados de voltaje (especialmente en el caso de fuentes monofásicas) y suministran energía en lapsos cortos cuando existe una interrupción de la energía de entrada. La tensión en los capacitores no es controlada y depende de la tensión máxima del suministro de CA. La tensión de CC es convertida nuevamente a CA a través de la Modulación por Ancho de Pulso (PWM).

La forma de onda deseada es creada conmutando los transistores de salida IGBTs (de las siglas en inglés Insulated Gate Bipolar Transistors) entre encendido y apagado a una frecuencia fija (la frecuencia de conmutación). Se puede generar la corriente deseada al variar el tiempo de encendido y apagado de los transistores IGBT, pero la tensión de salida todavía es una serie de pulsos de onda cuadrada.

5. MEDICIONES Y ANALISIS DE RESULTADOS

Se realizan mediciones con el objetivo de poder analizar el comportamiento del motor asincrónico durante los transitorios presentados al operar el convertidor de frecuencia, compararlos con los valores nominales estables y también con los valores que se obtienen al utilizar algunos de los métodos tradicionales para arrancar el motor

asincrónico y realizar inversión de giro. Adicionalmente se hace un análisis del comportamiento de la corriente a la entrada del convertidor y a la entrada del motor, cuando el motor está con carga. Hay un registro de lecturas a partir de formas de onda en tiempo real de:

- Corriente de línea en el arranque.
- Corriente de línea al invertir el sentido de giro.
- Corriente de línea a la entrada y a la salida del convertidor para diferentes frecuencias considerando que el motor está con carga.

Las mediciones de corriente de arranque y de inversión de giro se efectuaron en el motor trifásico de inducción de 2CV, 220/380V ubicado en la mesa número 11 del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela Politécnica Nacional.

5.1 ANÁLISIS Y COMPARACION DE LOS VALORES MEDIDOS

5.1.1 CORRIENTES DE ARRANQUE

En la tabla 1 se muestran los valores máximos de corriente medidos con el osciloscopio en el arranque (IARR) y en estado estable (IE).

Tabla 1: Valores de corriente medidos

ARRANQUE	V (V)	IARR Máx (A)	IE Máx (A)	IARR rms (A)	IE rms (A)
Directo	220	50.00	4.33	35,36	3,06
Y - Delta	220	13.80	1.63	9,76	1,15
Voltaje reducido	110	20.00	2.67	14,14	1,89
	165	30.30	2.67	21,43	1,89
Resistencia en el rotor	220	34.00	4.17	24,04	2,95
	220	15.50	4.17	10,96	2,95
Convertidor	220	8.53	4.93	6,03	3,49

La corriente nominal del motor con el estator conectado en delta es 7 A de acuerdo al dato de placa. Los valores rms de corriente mostrados en la tabla 2 se pueden comparar con el valor nominal de corriente en forma de porcentaje, y se muestran en la tabla 2

Tabla2: Valores de corriente medidos como porcentaje de la corriente nominal

ARRANQUE	V (V)	IARR rms (A)	IE rms (A)	IARR/IN (%)	IE/IN (%)
Directo	220	35.36	3,06	505,08	43,74
Y - Delta	220	9.76	1,15	139,40	16,47
Voltaje reducido	110	14.14	1,89	202,03	26,97
	165	21.43	1,89	306,08	26,97
Resistencia en el rotor	220	24.04	2,95	343,45	42,12
	220	10.96	2,95	156,57	42,12

Convertidor	220	6.03	3,49	86,17	49,80
-------------	-----	------	------	-------	-------

Se observa que en el arranque directo en relación entre la corriente de arranque a la nominal es el 505.08 %, es decir es cinco veces el valor de la corriente nominal, lo cual cumple con lo establecido en la teoría (entre 5 y 8 veces la corriente nominal). Analizando de manera similar, se tiene que en el arranque estrella – triángulo la corriente es 1.39 veces la corriente nominal. En el arranque por voltaje reducido se tienen 2 y 3 veces la corriente nominal para cada caso. En el arranque con resistencias en el circuito del rotor se tienen 3.43 y 1.56 veces la corriente nominal en cada caso. Finalmente, cuando se arranca el motor usando el convertidor de frecuencia de tiene una corriente inferior a la nominal, esto debido a que en el momento del arranque, el convertidor alimenta al motor con un voltaje que aumenta linealmente desde valores muy bajos.

Los valores de corrientes en estado estable, medidos en los tipos de arranque son menores a al valor de corriente nominal, y están dentro del rango establecido en la teoría sobre el motor de inducción. En la tabla 3 se muestra la duración del transitorio de corriente presentado en el arranque en cada método utilizado.

Tabla 3: Tiempos de duración de los transitorios en el arranque

ARRANQUE	V (V)	DURACION (segundos)
Directo	220	1.15
Y - Delta	220	4.13
Voltaje reducido	110	4.00
	165	2.17
Resistencias en el rotor	220	1.25
	220	1.53
Convertidor	220	0.84

Los transitorios presentados en los tipos de arranques estrella - triángulo y voltaje reducido son los de mayor duración. En el primer caso, se alimenta al motor con 220 V, el estator está conectado en estrella, la corriente en esta conexión es menor que en la conexión delta, por lo tanto, se necesita más tiempo para que el motor venza la propia inercia rotacional, y por ello se produce, una corriente elevada en el arranque, y un transitorio de corriente de duración mayor en relación a los transitorios presentados en los otros métodos.

De manera similar, en el arranque con voltaje reducido, se necesita una corriente mayor en

el arranque para romper la inercia, y por eso un valor elevado de corriente; debido a que voltaje es reducido, la corriente no puede incrementarse más y por eso el tiempo de duración del transitorio de corriente es mayor en relación a los otros. Se nota que arrancar con un voltaje equivalente al 50 % (110 V) o el 75 % (165 V) del valor nominal influye en la magnitud de la corriente en el arranque y consecuentemente en el tiempo de duración del transitorio de corriente.

En el arranque con resistencias en el circuito del rotor, el tiempo de duración de los transitorios es menor, esto debido a que el efecto de las resistencias adicionales en el circuito del rotor, que además se traduce en una limitación de la corriente en el arranque y el alcance rápido del estado estable. Se nota también que cuando a un mayor valor de resistencias adicionales en el rotor, la corriente en el arranque disminuye, pero el transitorio de corriente tiene una mayor duración.

El arranque usando el convertidor de frecuencia se presenta el una corriente de arranque menor en comparación al resto de tipos de arranque ensayados, y el tiempo de duración de transitorio, debido a que el arranque se realiza con voltajes muy reducidos y también que en el convertidor se configuró que el tiempo establecido para llevar al motor desde cero hasta 60 Hz sea de 10 segundos. En conclusión, el arranque con el uso de un convertidor de frecuencia, el presenta un mejor comportamiento en relación a los otros tipos de arranque.

5.1.2 INVERSION DE GIRO

En la tabla 4 se muestran los valores máximos de corriente medidos con el osciloscopio en el transitorio (I_{inv}) que se presento en la inversión por cambio de fases y usando el convertidor. Estos valores se llevan a valores rms dividiéndolos para el factor $\sqrt{2}$.

Tabla 4: Tiempos de duración de los transitorios en el arranque

TIPO	I_{inv} Máx (A)	I_{inv} rms (A)
Cambio de fases	20.00	14.14
Convertidor	8.00	5.66

En la tabla 5 los valores rms de corriente mostrados en la tabla 6.5 se comparan con el valor nominal de corriente en forma de porcentaje. También se indica el tiempo de duración de los transitorios de corriente

presentados en el momento de la inversión de giro.

Tabla 5: Valores de corriente como porcentaje de la corriente nominal y tiempos de duración de los transitorios en el arranque

TIPO	IInv rms (A)	IInv/IN (%)	DURACION (segundos)
Cambio de fases	14.14	202.03	1.29
Convertidor	5.66	80.81	0.227

De los valores mostrados en la tabla anterior, se nota que al valor de corriente en el momento que se produce la conmutación para invertir el sentido de giro es similar al que se tiene en el arranque con un voltaje reducido del 50 % del valor nominal, debido a que se espera 4.73 segundos (valor determinado en 6.4.1) luego de quitar la alimentación, tiempo en el cual el motor se frena por la propia inercia, luego se hace la conmutación con el voltaje de alimentación equivalente al 50 % del valor nominal, y por ello, se produce un fenómeno parecido al que ocurre en el arranque con voltaje reducido en cuanto a la magnitud de corriente. En cambio, tiempo de duración del transitorio es menor respecto al que se presentó en el arranque con voltaje reducido, esto debido a que mientras el motor todavía estaba disminuyendo la velocidad en un sentido de giro por inercia propia, se hizo el cambio de conmutación.

5.1.3 MEDICIONES A LA ENTRADA DEL CONVERTIDOR

En la tabla 6 se muestran los valores de THD (distorsión armónica) de voltaje y de corriente obtenidos cuando en la salida del convertidor se tienen diferentes valores de frecuencias.

Tabla 6: Distorsión armónica de voltaje y de corriente en la entrada del convertidor

F(Hz)	THD CORRIENTE (%)	THD VOLTAJE (%)
30	315	2.59
60	244	2.76
70	229	2.77

Se nota que la onda de voltaje prácticamente no presenta distorsión, debido a que el voltaje es el de la fuente. En cambio, la forma onda de corriente presenta una distorsión considerable porque se producen picos de corriente en la misma, debido a la acción de los diodos del puente rectificador.

Cuando la frecuencia de salida del convertidor es 30 Hz, la distorsión armónica es mayor debido a que el ancho de los picos de corriente presentados es menor. A medida que se aumenta la frecuencia de salida en el convertidor la acción del puente rectificador provoca que el ancho del pico de corriente sea mayor, con lo cual la forma de onda trata de aproximarse a una senoidal, y como consecuencia la distorsión de la onda de corriente disminuye.

5.1.4 MEDICIONES A LA ENTRADA DEL MOTOR

En la tabla 7 se muestran los valores de THD (distorsión armónica) de voltaje y de corriente obtenidos en los diferentes valores de frecuencia.

Tabla 7: Distorsión armónica de voltaje y de

F (Hz)	THD CORRIENTE (%)	THD VOLTAJE (%)
30	1.77	9.33
60	1.43	10.90
70	2.23	4.54

corriente en la entrada del convertidor

La distorsión armónica de la forma de onda de voltaje es tiene valores superiores a los presentados en la forma de onda de corriente, debido a que la onda esta compuesta por una serie de pulsos de onda cuadrada que en conjunto tratan de asemejarse a una onda senoidal. La distorsión en el voltaje para la frecuencia de 30 Hz difiere de la distorsión en el voltaje para 60 Hz y 70 Hz por el hecho de que en estas ondas existe sobremodulación para obtener voltajes de salida necesarios para aumentar la velocidad del motor, el ancho de los pulsos es mayor, y la onda de voltaje se asemeja más a una onda senoidal.

Las ondas de corriente prácticamente no presentan distorsión armónica, esto debido a que los bobinados del motor actúan como filtros eliminándose las componentes de la corriente que se presentan alrededor de la frecuencia de la onda portadora; para las frecuencias de 60 Hz y 70 Hz además de este efecto se tiene sobremodulación. Con esto, se comprueba que el control de velocidad de un motor de inducción con convertidores de frecuencia es adecuado.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. En el arranque directo del motor, la corriente es cinco veces el valor de la corriente nominal. Por lo cual, para reducir este valor de corriente es conveniente emplear un método adecuado para el arranque de acuerdo a los requerimientos del motor.

2. En el arranque estrella – triángulo, en la conexión en estrella el voltaje en cada bobina del estator es el valor del voltaje de línea sobre $\sqrt{3}$, con lo cual la corriente de arranque disminuye en relación a lo que se tendría en la conexión delta en el arranque directo; en cambio, el transitorio tiene una mayor duración en relación al resto de métodos ensayados. Luego, se produce un transitorio brusco en el cambio de estrella a triángulo que tiene una duración 0.04 segundos y un valor máximo de 15.5 A que llevado a rms es 11 A equivalente a 1.57 veces la corriente nominal, siendo un valor mayor en relación al que se tiene en el momento del arranque en estrella. La el valor de la corriente en este transitorio y su duración dependen de la rapidez con la que se realiza el cambio, si el cambio es lento, el pico de corriente será menor debido a que durante el tiempo en que el motor estuvo conectado en estrella se vence la mayor parte de la inercia rotacional propia, y solo se requiere una corriente extra para llegar al estado estable, y el tiempo de duración del transitorio es mayor. Si el cambio es rápido, la corriente aumenta para vencer la inercia y el tiempo de duración del transitorio es menor. La principal ventaja de este método sería la reducción de la corriente en el arranque.

3. En el arranque con voltaje reducido, en el primer caso, la corriente de de arranque se redujo de 35.36 A en el arranque directo a 14.14 A, es decir, cerca de la mitad. En el segundo caso la reducción de la corriente en el arranque es menor (21.43 A); en tanto que ocurre lo contrario con el tiempo de duración del transitorio, es decir, que el voltaje de alimentación con el cual se arranca el motor se refleja en la magnitud de la corriente y el tiempo de duración del transitorio en el arranque. La principal ventaja de este método es la reducción de la corriente, pero a la vez presenta la desventaja de un aumento en la duración del transitorio.

4. En el arranque con resistencias en el circuito del rotor, la disminución de la corriente en el arranque depende del valor de las resistencias, así, en el primer caso, la corriente disminuye de 5 veces el valor de la corriente nominal a 3.43 veces la, en tanto que en el segundo caso disminuye a 1.56. En cambio, el tiempo de duración del transitorio disminuye, pero no de una forma tan notable como en el arranque con voltaje reducido, aunque en este caso la duración del transitorio es relativamente menor al presentado en los arranques estrella - triángulo y voltaje reducido. En resumen, la principal ventaja de este método es la reducción considerable de la corriente en el arranque con un transitorio de corta duración.

5. El arranque con el uso del convertidor de frecuencia es el que presenta mayores ventajas en relación a los métodos convencionales utilizados el arranque, esto se refleja en que la magnitud de la corriente en el arranque es menor que la nominal y el tiempo de duración del transitorio de corriente es el mínimo, siendo estas sus ventajas principales.

6. La inversión de giro con el cambio de fases, se produjo un transitorio en el cual se presentó una corriente de magnitud similar a la presentada en el arranque con voltaje reducido, pero la duración de este transitorio es menor a la del transitorio presentado en este tipo de arranque, debido al efecto del voltaje de alimentación (50 % del valor nominal) y la inercia en el momento de la conmutación para el cambio de fases.

7. Al realizar la inversión de giro con el uso del convertidor de frecuencia, se produjo una corriente de magnitud similar a la que se produce en el arranque con este método, pero con un transitorio de menor duración, por el efecto de la inercia. La magnitud de la corriente en el momento de la inversión y la duración del transitorio son notablemente menores en relación a los presentados en el método convencional de cambio de fases, presentándose otra ventaja en el uso del convertidor de frecuencia.

8. Otras ventajas presentadas en el uso del convertidor de frecuencia son regulación de voltaje, corriente y frecuencia en la alimentación al motor con respuestas prácticamente instantáneas, el tamaño compacto, menor número de conexiones y protección del motor contra sobrecargas y

sobrevoltajes. Por lo que se recomienda el uso de convertidores de frecuencia como el método más adecuado para el arranque de máquinas asincrónicas.

9. Una desventaja considerable en el uso del convertidor de frecuencia para el control de velocidad de máquinas asincrónicas en relación a los métodos que usualmente se usan es debido a que el convertidor de frecuencia transforma el suministro de CA en CC a través de un puente con diodos rectificadores sin control. La tensión en el circuito intermedio es cercana a la tensión máxima del suministro de CA por lo que los diodos solamente conducen durante un breve período en el pico de la forma de onda de CA. Por lo tanto, la forma de onda de la corriente posee un valor RMS relativamente elevado mientras que la corriente fluye desde la fuente durante un breve lapso (como se pudo observar en las formas de onda tomadas en la entrada del convertidor). Lo anterior significa que la forma de onda de la corriente está compuesta por una serie de armónicos de baja frecuencia y esto a su vez, ocasiona una distorsión armónica en la forma de onda de corriente en la fuente de alimentación.

10. Se recomienda tomar en cuenta la necesidad de evaluar los armónicos producidos en el uso del convertidor de frecuencia para garantizar que no se excedan niveles que ocasionen, por ejemplo, grandes pérdidas en transformadores o interferencia con otros equipos.

REFERENCIAS

1. MICHAEL LIWSCHITZ – GARIK, CLYDE C. WHIPPLE. Máquinas de corriente alterna. Primera edición. Editorial Continenta, S. A. México. 1971.
2. CHAPMAN, STEPHEN. Máquinas eléctricas. Tercera edición. McGraw – Hill Interamericana, S.A. Bogotá. 2001.
3. KOSOW, IRVING. Máquinas eléctricas. Segunda Edición. Prentice – Hall Hispanoamericana, S.A. México. 1993.
4. ESPINOZA TORRES VOLKER KAREL. Inversor trifásico con IGBT's aplicando técnica PWM. Tesis. Quito. Marzo del 2000.
5. RIVERA ARGOTI PABLO. Control de máquinas eléctricas. Escuela Politécnica Nacional. Quito. 2000.
6. A. E. FITZGERALD, KINGSLEY CHARLES, D. UMANS STEPHEN.

Máquinas Eléctricas. McGraw – Hill. México. 1992.

7. J. THALER GEORGE, L. WILCOX MILTON. Máquinas Eléctricas, estado dinámico y permanente. Editorial Limusa. México. 1974.
8. GRAY ALBERTO. Máquinas eléctricas. Tomo I. Editorial Universitaria. Buenos Aires. 1965.
9. IVANOV. A. V., SMOLENSKI. Máquinas eléctricas. Editorial Mir. Moscú. 1984.
10. <http://www.siemens.com/S7-200>
11. http://www.ad.siemens.de/meta/html_76/product3.htm

BIOGRAFÍAS

José L. Rueda: Ingeniero eléctrico, Escuela Politécnica Nacional 2004. Actualmente estudiante de doctorado en ingeniería eléctrica en el Instituto de Energía Eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan, República Argentina. Áreas de Interés: Análisis de sistemas eléctricos de potencia, mercados eléctricos.

Luis Tapia Calvopiña: Ingeniero Eléctrico, Escuela politécnica Nacional. Master en Ciencias de la Información y Codificación, Pontificia Universidad Politécnica de Madrid. Profesor principal en el Departamento de Energía Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional.