

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL USO Y CONTROL DE MOTORES DE INDUCCIÓN OPERANDO COMO GENERADORES AUTÓNOMOS

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

ROLANDO PETTER ESTRADA MONTES

PROMOCIÓN

1995-2

LIMA-PERÚ

2012

**ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL USO Y
CONTROL DE MOTORES DE INDUCCIÓN
OPERANDO COMO GENERADORES AUTÓNOMOS**

Doy gracias a Dios por
haberme permitido pertenecer,
a la familia que quiso que formen,
Ana Montes y José Estrada.

A la que, ellos siendo de origen humilde,
le dieron su mayor riqueza,
su Vida.

A quienes no te equivocaste al confiarles,
9 de tus Hijos
que ante muchas carencias materiales protegieron y cuidaron
dándoles, amor, confianza, respeto, valores morales, etc.

Haciéndolos Gente de Bien
Espero llegar a hacer tanto con mi vida
Como Ellos.

SUMARIO

En los últimos años se han desarrollado sistemas de generación de energía no convencionales aislados de la red, aunque estos sistemas de generación renovables son de baja potencia, pueden llegar a lugares donde antes no había posibilidad de llevar energía eléctrica.

Estos sistemas son fuentes valiosas de energía para las industrias rurales y los planes de electrificación de los poblados. Es un método tradicional de procesamiento de granos en todo el mundo y ha desempeñado un papel importante en la modernización y el desarrollo de la industria rural. La Micro-hidroeléctrica ahora ofrece un potencial similar en la mayoría de los países en desarrollo, con aplicaciones en la iluminación de los poblados, la elaboración mecanizada de alimentos, y el suministro de energía a las actividades industriales a pequeña escala.

La experiencia nos dice que los generadores convencionales son difíciles de obtener o no son fiables en el servicio. Los Generadores de Inducción adquiridos a pedido especial son caros, pero los Motores Trifásicos de inducción por el contrario, siempre se pueden obtener a nivel local y son muy robustos en funcionamiento.

Este informe está destinado a ayudar a seleccionar un motor para cambiar su uso como generador en un sistema micro-hidroeléctrico. Además se propone soluciones de control para que la carga a servir deje de ser fija como solía ser con los primeros Generadores de Inducción, ampliando así el uso de esta valiosa fuente de auto-abastecimiento de energía, que se puede dar generalmente de manera hidroeléctrica a escala rural.

ÍNDICE

PRÓLOGO	1
CAPÍTULO I	
LA GENERACIÓN ELÉCTRICA Y LAS MÁQUINAS DE INDUCCIÓN	2
CAPÍTULO II	
VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS GENERADORES DE INDUCCIÓN	3
2.1 Ventajas	3
2.2 Desventajas	4
CAPÍTULO III	
CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UNA MÁQUINA INDUCCIÓN	5
3.1 Construcción	5
3.2 Operación	6
3.3 El funcionamiento de un Motor de Inducción	6
3.4 Operación de un Generador de Inducción conectado al Suministro	6
3.5 Operación de un Generador de inducción de forma autónoma	8
CAPÍTULO IV	
ASPECTOS DE SELECCIÓN DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN PARA USARLO COMO GENERADOR	12
4.1 Tipo de Rotor	12
4.2 Condiciones del sitio (Norma IEC 60529)	12
4.3 Tipo de Armadura	13
4.4 Aislamiento y aumento de la temperatura	13
4.5 Eficiencia	15
4.6 Potencia Nominal	15
4.7 Tensión Nominal	17
4.7.1 Pequeños Generadores	17
4.7.2 Grandes Generadores	18
4.8 Velocidad Nominal / disposición de accionamiento	19
CAPÍTULO V	
PARÁMETROS DE LOS CONDENSADOR DE EXCITACIÓN	20
5.1 Conexión de los Condensadores	20
5.2 Selección de los Condensadores	20

5.3	Cálculo de la Capacitancia de Excitación	21
5.3.1	Método de Prueba eléctrica sin carga	22
5.3.2	Método de Datos de performance del Motor de Inducción	23
CAPÍTULO VI		
TENSIÓN Y FRECUENCIA DE OPERACIÓN		26
6.1	Tensión de operación	26
6.1.1	Consideraciones de un generador	26
6.1.2	Consideraciones de la carga	27
6.2	Frecuencia de operación	27
6.2.1	Consideraciones de un generador	27
6.2.2	Consideraciones de la carga	27
6.3	Tensión y frecuencia ideales de operación	29
CAPÍTULO VII		
EFFECTO DE LA CARGA EN LOS TERMINALES DE SALIDA DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN		31
7.1	Carga Resistiva	31
7.2	Carga Inductiva	32
7.3	Carga Capacitiva	33
CAPÍTULO VIII		
OBTENCIÓN DE SALIDA MONOFÁSICA DESDE UNA MÁQUINA TRIFÁSICA CONEXIÓN C-2C		34
8.1	Prueba de potencia de salida	35
8.2	Prueba de corrientes de bobinado	36
8.3	Análisis de la Conexión C-2C	36
CAPÍTULO IX		
PROTECCIÓN DEL GENERADOR		40
9.1	Sobrecarga	40
9.2	Subcarga	40
9.3	Sobre velocidad	42
CAPÍTULO X		
SISTEMAS DE CARGA FIJA Y VARIABLE		43
10.1	Sistemas de Carga Fija	43
10.2	Sistemas de Carga Variable	44
10.3	Opciones de Controlador usando "Carga Balastro"	45
10.3.1	Control de ángulo de fase	45
10.3.2	Control de Carga Binaria ponderada	46
10.3.3	Control PWM –Pulse Width Modulation	47

CAPÍTULO XI	
ARRANQUE DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN COMO CARGA DE UN GENERADOR DE INDUCCIÓN	49
11.1 Técnicas para mejorar el arranque de un motor	49
CAPÍTULO XII	
SISTEMAS REGULADORES DE TENSIÓN PARA GIAEs CON CARGAS TIPO INDUSTRIAL	53
12.1 Sistema Regulador de Tensión basado en un Compensador Estático de Potencia Reactiva	53
12.2 Sistema Regulador de Tensión empleando un Compensador Estático de Potencia Reactiva (SVC) mejorado	53
12.3 Sistema de Control de Tensión basado en SVC (Static Var Compensator) y MERS (Magnetic Energy Recovery Switch):	54
12.4 Sistema de Control de Tensión basado en VSC (Voltage-Source Converter) usando STATCOM (STATIC COMPensator):	56
12.5 Sistema de Control de Tensión basado en un Transformador de Tensión constante (CVT- Constant Voltage Transformador)	56
12.5 Configuraciones de GIAE de Compensación-Serie	56
12.6 Configuraciones de Generadores de Inducción Auto Excitados con Compensación-Serie	57
12.7 Sistema Regulador de Tensión con compensación serie basado en dispositivos de conmutación (TCR-FC)	57
CAPÍTULO XIII	
PUESTA EN MARCHA DEL GENERADOR	59
13.1 Seguridad	59
13.2 Frecuencia y Potencia de salida	59
13.3 Rotación según las fases	59
13.4 Prueba Bajo carga	60
13.5 Ajuste para una máxima eficiencia	60
CONCLUSIONES	61
Anexo A: Eficiencia del un generador de inducción	62
Anexo B: Sistemas de un Transformador	68
Anexo C: Disparo por sobretensión (Apertura)	70
Anexo D: Corrección del factor de potencia para el arranque del motor	75
BIBLIOGRAFÍA	79

PRÓLOGO

El presente Informe está dividido en doce capítulos, los cuales se describen a continuación.

El Capítulo 1, nos da el entorno del problema de la generación de energía en sistemas aislados, también las experiencias e inconvenientes que se vienen dando y que dan como una buena opción el uso de Motores de Inducción al respecto.

El Capítulo 2, nos describe las ventajas y desventajas que tienen para evaluar el posible uso de una Máquina de Inducción.

El Capítulo 3, nos recuerda como esta construida una Máquina de Inducción y las diferencias de operación como Generador en un Sistema conectado y aislado.

El Capítulo 4, detalla las características que debe tener un Motor de Inducción para usarlo como generador.

El Capítulo 5, aquí se detalla la manera de hallar los condensadores necesarios para que la maquina pueda auto-excitarse para trabajar en forma autónoma.

El Capítulo 6, se describe los inconvenientes cuando el generador trabaje fuera de su tensión y frecuencia nominal, indicando la posibilidad que se opere por encima y por debajo de estos valores.

El Capítulo 7, describe como reacciona el generador frente a los diferentes tipos de carga, ya sea resistiva, inductiva o capacitiva.

El Capítulo 8, nos describe como de una máquina trifásica se puede generar energía monofásica, la llamada "Conexión C-2C", como una posibilidad de alcanzar potencias mayores.

El Capítulo 9, trata sobre las protecciones que debe tener este tipo de generadores.

El Capítulo 10, da pautas para solucionar el problema de que el generador pueda manejar carga variable.

El Capítulo 11, trata técnicas para arrancar un Motor de Inducción como carga de un Generador de Inducción.

El Capítulo 12, nos describe algunos Sistemas mejorados Reguladores de Tensión para Generadores de Inducción Auto Excitados

El Capítulo 13, nos describe las previsiones que se deben tener al momento de poner en marcha el generador.

CAPÍTULO I

LA GENERACIÓN ELÉCTRICA Y LAS MÁQUINAS DE INDUCCIÓN

Hasta hace poco, las instalaciones de Microcentrales Hidroeléctricas siempre habían utilizado Generadores Síncronos de CA para producir electricidad, cuando no había un acceso disponible a una red.

A menudo, por razones de disponibilidad y bajo costo, fueron usados máquinas diseñadas que funcionaban de pendiendo de combustibles como gasolina o diesel. Estas máquinas se diseñan generalmente para un uso intermitente.

En los últimos años, los Motores de Inducción se han instalado como generadores sobre los sistemas Micro-Hidroeléctricos. El Motor de Inducción es el tipo más común de propulsión eléctrica mayormente utilizado por la industria. A los Generadores de Inducción se les refiere a veces como IG (Induction Generator) Generador de Inducción o IMAGs (Induction Motor as Generator) - Motor de Inducción como Generador. Los Generadores de Inducción que se han instalado en los últimos años han demostrado ser mucho más fiables que los Generadores Síncronos disponibles. Además que no son fáciles de obtener y son caras.

Debido a la ausencia de un sistema de control adecuado, con el que se tendría que mantener una carga constante en todo momento. Esto se lograba generalmente, teniendo un solo interruptor o contactor unido al Generador y la conexión de forma permanente de todas las cargas a la red. En la actualidad se han desarrollado Controles de Generador de Inducción (IGC) de bajo costo, los IGCs se ajustan a todo uso, hasta para el más pequeño de los sistemas. Éstos permiten que varias cargas puedan conectarse y desconectarse cuando sea necesario.

Tabla 1.1: Clasificación de plantas hidroeléctricas pequeñas (Fuente: OLADE)

Tamaño de la planta de potencia	Potencia (kW)
MICRO	<50
MINI	50 a 500
PEQUEÑA	500 a 5000

CAPÍTULO II

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS GENERADORES DE INDUCCIÓN

Las principales ventajas y desventajas de la utilización de Máquinas de Inducción en vez de Generadores Síncronos en sistemas micro hidroeléctricos aislados son los siguientes.

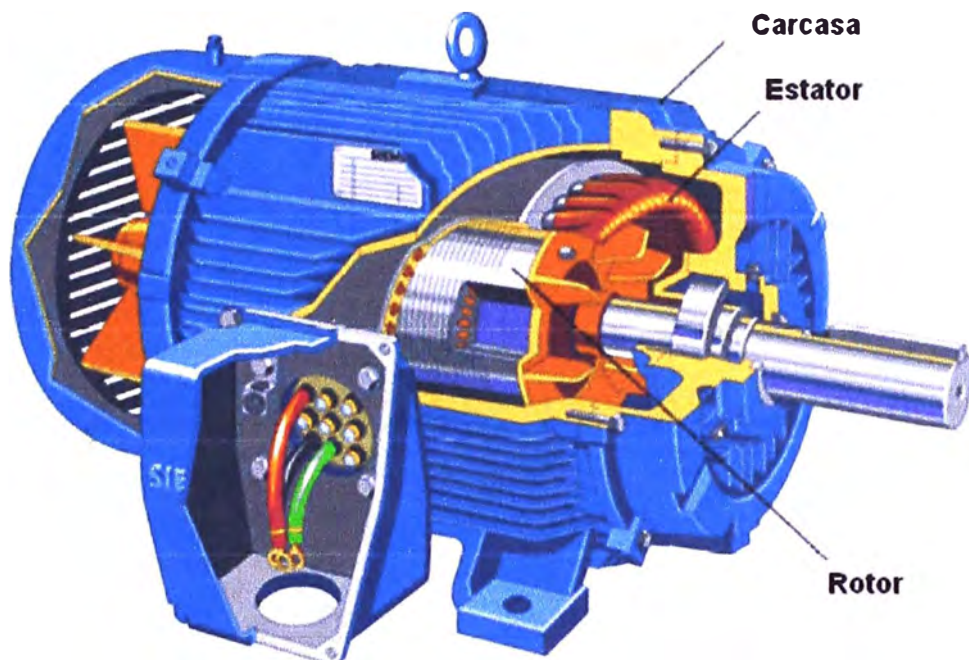


Fig. 2.1: Máquina de Inducción

2.1 Ventajas

Disponibilidad

Los Motores de Inducción son mucho más accesibles que los Generadores Síncronos. En algunos casos, las máquinas de segunda mano pueden ser reacondicionadas con el fin de reducir los costos.

Costo

Los Generadores de Inducción, incluyendo los condensadores de excitación, son generalmente más baratos que los Generadores Síncronos. Esto es especialmente cierto para las potencias bajas. Por ejemplo, un Generador de Inducción de 10 kW, suele tener la mitad del costo que un Generador Síncrono. Esta diferencia de precios varía entre los países, ya que depende de la producción local que se lleva a cabo y sobre las fuentes

importadoras de máquinas. En algunos países hay poca o ninguna ventaja económica en la utilización de Generadores de Inducción en sistemas de más de 25 kW, mientras que en otros hay un ahorro de costos considerable.

Robustez

Las Máquinas de Inducción son muy robustas y tienen una construcción simple, como se muestra en la Fig. 2.1. No tienen ningún devanado, diodos, ni anillos colectores en su rotor. Su rotor es sólido, generalmente consta de barras fundidas, en vez de un rotor bobinado lo que permite que el rotor soporte un exceso de velocidad considerable. Además, estas máquinas son totalmente cerradas, garantizando una buena protección contra el polvo y el agua. Están diseñados para un funcionamiento continuo con fajas de conexión en arduas condiciones industriales

2.2 Desventajas

Tensión nominal

Las Máquinas de Inducción no siempre están disponibles con capacidades de voltaje adecuado para su uso como generadores. Por lo que podría ser requerido una modificación en el conexionado de la maquina, o en casos extremos, un rebobinado.

Cálculo requerido

Mientras que los Generadores Síncronos se pueden comprar listos para su uso, una Máquina de Inducción no funcionará sin condensadores de un valor adecuado para su instalación.

Arranque de la máquina

El arranque de las máquinas es mas fácil para los Generadores Síncronos que para los Generadores de Inducción. Los Motores de Inducción, pueden desempeñarse como generadores usando un gran capacitor, que puede causar grandes caídas de tensión o incluso la pérdida de la excitación cuando es arrancado como Generador de Inducción.

Este informe explica cómo elegir y si es necesario modificar el devanado de una Máquina de Inducción con el fin de hacer que genere la tensión deseada, y cómo calcular la capacitancia necesaria. También da las pautas sobre la manera de mejorar el arranque de la máquina y los límites de la capacidad de arranque del motor. También se explica cómo utilizar un Motor Trifásico como Generador de Monofásico, y se describen los requisitos de protección y control.

CAPÍTULO III

CONSTRUCCIÓN Y OPERACION DE UNA MÁQUINA DE INDUCCIÓN

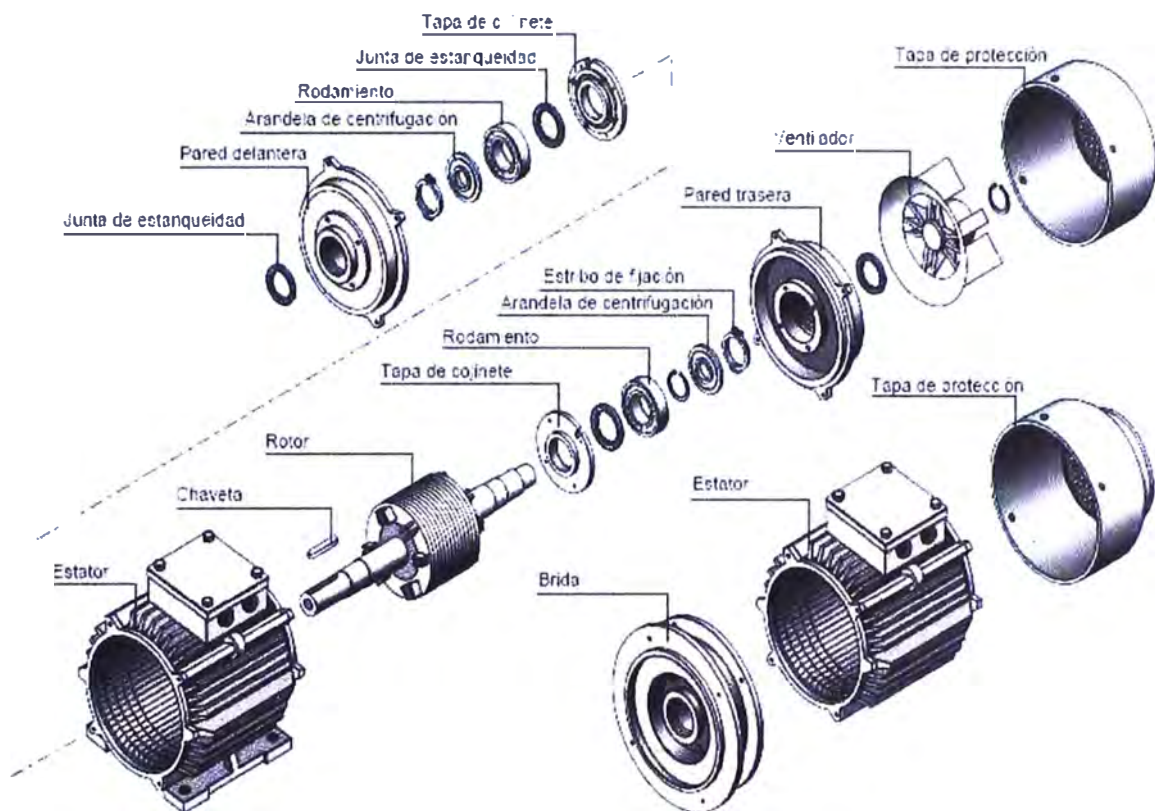


Fig. 3.1: Despiece de una Máquina de Inducción

3.1 Construcción

Las características mecánicas de un Motor de Inducción pueden verse en la Figura 3.1. Desde el punto de vista eléctrico, la Máquina de Inducción consiste en dos partes: una fija exterior, que es el estator devanado y el rotor que gira en el centro. El arrollamiento del estator consiste en bobinas de alambre de cobre aislado fijados en ranuras en el hierro, formando un sistema distribuido de arrollamientos similar al utilizado en un Generador Síncrono.

El rotor de la Máquina de Inducción es muy diferente a la de un Generador Síncrono. El núcleo estándar del rotor llamado de "Jaula de Ardilla" es cilíndrico y construido a partir de delgadas láminas de hierro en el cual tiene ranuras donde pasan los conductores. Los conductores generalmente, son barras de aluminio que están en corto circuito en cada extremo con anillos terminales de aluminio. Para las máquinas grandes, las barras de cobre o de aluminio están unidas o soldadas al final con los anillos terminales.

3.2 Operación

Con el fin de entender el funcionamiento de un sistema aislado, es decir, el Generador de Inducción no conectado a la red, empezaremos a entender la operación de un Motor de Inducción.

3.2 Funcionamiento del Motor de Inducción

Cuando una Máquina de Inducción está conectada a una fuente de corriente alterna, una corriente magnetizante fluye desde la fuente y crea un campo magnético giratorio en la máquina.

El campo giratorio corta las barras cortocircuitadas del rotor, induciendo corrientes en ellas que, debido a que están fluyendo en el campo magnético, reaccionan con el produciendo un torque. Este torque se transmite alrededor del campo del rotor, pero a una velocidad ligeramente inferior. La pequeña diferencia en la velocidad se debe a que sin ella no habría corrientes inducidas en el rotor y, por consiguiente, a su vez no se produciría un par. Cuando se aplica una carga al motor la diferencia de velocidad aumentará a medida que un mayor torque sea producido.

Sabiendo que el Deslizamiento (S) o sea la diferencia entre la velocidad del rotor y la velocidad del campo giratorio es:

$$S = (n_s - n_r)/n_s \quad (3.1)$$

Donde

n_s : es la velocidad de sincronismo (la velocidad del campo giratorio)

n_r : es la velocidad del rotor

Sin carga conectada, el deslizamiento del motor de inducción será muy pequeño, menor que 0.01 (esto es el 1%). Para una máquina de 1 kW el deslizamiento a plena carga será de aproximadamente 0.05 (o 5%). Las Máquinas más grandes tienen pequeños deslizamientos. Valores reales se puede ver en la Tabla 3.1, en la columna de la velocidad.

3.4 Operación de un Generador de Inducción conectado al Suministro

Si la misma Máquina de Inducción es impulsada por encima de la velocidad síncrona, de modo que el deslizamiento se vuelve negativo ($n_r > n_s$), con un torque aplicado a el rotor en vez de generado por el, la máquina actúa como generador, suministrando energía a la red.

in embargo, todavía necesita de la corriente de magnetización de la fuente con el fin de crear el campo giratorio, como si se tratara de un motor.

La salida de potencia a plena carga se alcanza con un deslizamiento de valor similar (pero negativo) que el deslizamiento de un motor a plena carga. El Ejemplo 3.1 ilustra la diferencia en el deslizamiento y la velocidad del eje en el funcionamiento como motor y como generador.

Tabla 3.1: Performance de un Motor [5]
(CPC = Corriente a Plena Carga)

kW	Polos	Velocidad Plena Carga (rpm)	CPC (A) a 415 V	Eficiencia			Factor de potencia		
				PC	3/4C	1/2C	PC	3/4C	1/2C
55	2	2810	1.32	74	76	76	0.79	0.68	0.51
	4	1400	1.5	73	72	69	0.7	0.61	0.47
	6	900	1.65	73	72	69	0.64	0.54	0.42
75	2	2850	1.75	78	78	74	0.77	0.73	0.61
	4	1400	1.95	77	77	74	0.7	0.6	0.48
	6	920	2.4	71	70	65	0.62	0.53	0.41
1.1	2	2850	2.5	79	78	73	0.8	0.74	0.64
	4	1410	3	79	78	71	0.65	0.55	0.43
	6	900	3.1	75	75	74	0.66	0.58	0.47
1.5	2	2850	3.2	76	78	70	0.86	0.82	0.73
	4	1420	3.6	82	83	80	0.71	0.61	0.47
	6	940	4.3	75	74	72	0.65	0.55	0.44
22	2	2850	4.4	81	81	80	0.86	0.82	0.73
	4	1420	4.9	80	81	80	0.78	0.71	0.58
	6	945	5.9	77	77	75	0.68	0.58	0.47
3	2	2860	5.8	83	83	81	0.88	0.83	0.7
	4	1420	6.5	81	82	80	0.8	0.74	0.61
	6	950	6.4	83	84	82	0.78	0.73	0.61
40	2	2840	7.2	85	86	85	0.9	0.88	0.81
	4	1420	8.4	83	84	83	0.8	0.72	0.61
	6	960	9.2	84	83	82	0.72	0.62	0.5
5.5	2	2900	10.6	85	85	83	0.85	0.83	0.76
	4	1445	11.3	85	86	85	0.8	0.74	0.61
	6	955	12.8	84	85	83	0.71	0.63	0.5
7.5	2	2900	14.1	86	86	85	0.87	0.84	0.77
	4	1450	14.6	86	86	85	0.83	0.76	0.64
	6	970	15.6	87	87	85	0.77	0.7	0.55
11	2	2930	20	87	87	85	0.87	0.83	0.74
	4	1460	20	88	88	87	0.86	0.81	0.7
	6	970	24	88	88	87	0.73	0.65	0.55
15	2	2940	27	88	88	87	0.89	0.88	0.85
	4	1470	27	90	90	89	0.87	0.8	0.68
	6	970	29	88	88	87	0.83	0.8	0.7
18.5	2	2950	32	90	90	87	0.89	0.87	0.75
	4	1460	33	89	89	88	0.89	0.88	0.83
	6	970	36	90	90	88	0.81	0.76	0.67
22	2	2920	38	88	88	86	0.92	0.91	0.88
	4	1460	38	90	91	90	0.89	0.86	0.81
	6	970	41	91	91	89	0.83	0.78	0.7
30	2	2945	53	89	88	86	0.89	0.87	0.79
	4	1470	54	91	91	89	0.86	0.83	0.76
	6	970	55	91	91	90	0.83	0.78	0.7
37	2	2950	64	90	89	86	0.89	0.85	0.8
	4	1465	66	91	91	89	0.86	0.8	0.72
	6	975	68	92	91	89	0.83	0.78	0.7
45	2	2950	77	90	89	87	0.91	0.9	0.84
	4	1465	79	91	91	89	0.87	0.81	0.74
	6	975	81	92	92	90	0.84	0.79	0.71
55	2	2955	93	90	89	87	0.91	0.9	0.84
	4	1470	98	91	91	89	0.83	0.78	0.68
	6	985	96	92	92	90	0.86	0.81	0.74

3.5 Operación de un Generador de Inducción de forma autónoma

La corriente de magnetización de una Máquina de Inducción se puede suministrar, en su totalidad o en parte, por condensadores. De hecho, los condensadores que generalmente se han instalado en grandes Motores de Inducción y Generadores de Inducción conectados a la red, para reducir el consumo de corriente reactiva de la red y corregir un factor de potencia inadecuado.

En el caso de un Generador de Inducción aislado, los condensadores son la única fuente externa de corriente magnetizante. Por lo tanto, con el fin de obtener la tensión de servicio requerido en la frecuencia deseada, la cantidad de capacitancia debe ser cuidadosamente elegida.

Ejemplo 3.1

Para una máquina de inducción de 4 Polos 7.5 kW de la Tabla 3.1:

- a) ¿Cuál es el deslizamiento a plena carga?
- b) ¿A qué velocidad el rotor de la máquina funciona como un generador funcionando a plena carga y 50 Hz?

a) La velocidad del eje del motor a plena carga es de 1450 rpm.

La velocidad de sincronismo se calcula a partir

$$n_s = (120 \times f)/p \quad (3.2)$$

Donde

f = frecuencia de suministro

p = número de polos

En este caso,

$$n_s = (120 \times 50)/4 = 1500 \text{ rpm}$$

Por lo tanto, utilizando la ecuación (3.1),

$$\text{El deslizamiento, } s = (1500 - 1450)/1500 = 0.033$$

b) A plena carga se genera un deslizamiento aproximadamente igual en magnitud al deslizamiento a plena carga como motor, pero negativo, $S = -0.033$.

Re-utilizado la ecuación (3.1), $n_r = n_s (1 - S)$

$$n_r = 1500 [1 - (-0.033)] = 1550 \text{ rpm}$$

Por lo tanto, como motor la velocidad del rotor es 50 rpm por debajo de la velocidad de sincronismo y como generador la velocidad del rotor es de 50 rpm por encima de la velocidad de sincronismo.

Para que se produzca una acumulación de tensión, un magnetismo remanente suficiente debe estar presente en el rotor. El magnetismo remanente es el magnetismo inicial en el Hierro del rotor. Por lo general, es suficiente para producir un voltaje pequeño, de alrededor de un voltio, a la velocidad de sincronismo sin una capacitancia conectada. Este puede ser un insuficiente magnetismo, ya que fue usado la última vez, que la

maquina recibió un gran impacto o la generación termino con una carga resistiva conectada. El magnetismo remanente depende del tipo de Hierro utilizado. Pues también existen las Máquinas de Inducción de energía eficiente de baja pérdida en el Hierro, que tienden a tener los niveles más bajos de magnetismo remanente.

Si el magnetismo es suficiente para excitar al generador a la frecuencia nominal, entonces aumentaría la velocidad del generador, ya que a mayor frecuencia es necesario menor magnetismo para que se produzca la excitación. En casi todos los casos, esto será suficiente para excitar el generador. Sin embargo, si esto falla, el magnetismo remanente se puede aumentar mediante la conexión de una corriente continua suministrada durante unos segundos a través de dos de los terminales de la máquina, antes de hacer funcionar la máquina a su velocidad normal. Una batería de automóvil es más que suficiente para este propósito. También se pueden utilizar Pilas secas ordinarias, conectadas en serie. Las pilas secas de gran capacidad, tales como las utilizadas en grandes linternas, son una buena fuente donde obtener la gran corriente requerida.

Una manera simple, pero útil para entender el funcionamiento básico de un generador de inducción independiente es el representar a la máquina simplemente con su reactancia magnetizante. Se puede utilizar el circuito equivalente muy simplificado que se muestra en la Fig. 3.2 Esta es una representación bastante exacta con el fin de determinar los requisitos de condensador

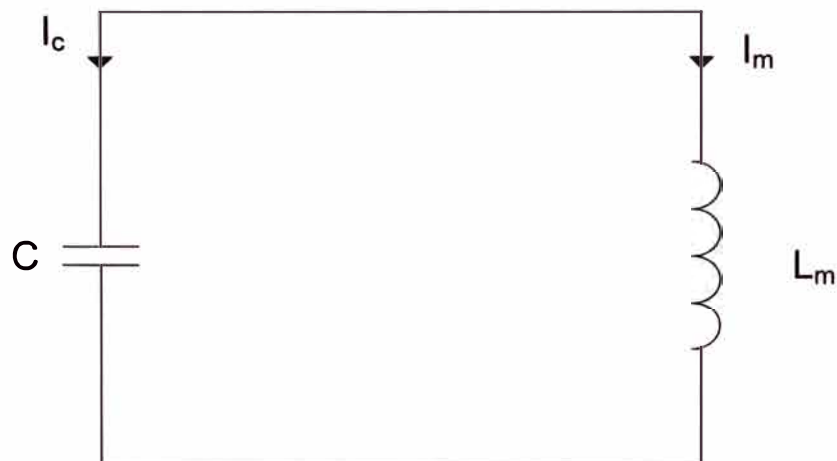


Fig. 3.2: Circuito equivalente simplificado de un Generador de Inducción

Con el rotor en movimiento, la corriente comienza a fluir debido al actual magnetismo remanente en el rotor. La corriente del condensador, I_c , será igual a la corriente de magnetización I_m actual, y la máquina y los condensadores actuarán como un circuito resonante en una frecuencia angular ω , fijado por la velocidad del rotor de la máquina. Si

hay la suficiente capacidad, la corriente aumentará rápidamente hasta que se alcance la operación estable cuando la impedancia de los condensadores sea igual a la impedancia de magnetización dada por la ecuación (3.3).

$$1/\omega C = \omega L_m \quad (3.3)$$

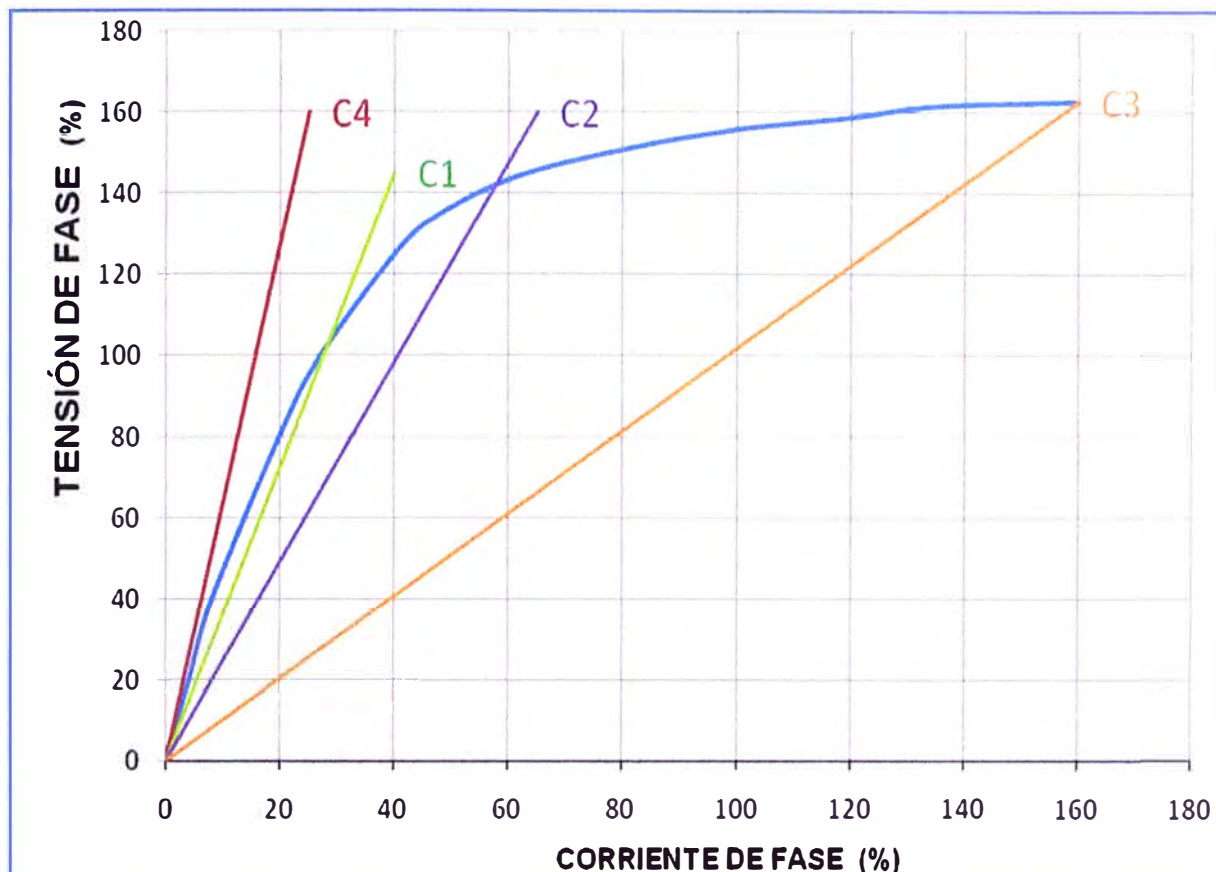


Fig. 3.3: Curva de excitación de un Generador de Inducción sin carga, velocidad constante y diferentes valores de capacitancia de excitación ($C3 > C2 > C1 > C4$)

La operación estable se debe a que la inductancia de magnetización es una función no lineal de la corriente, debido a la saturación magnética en el hierro del rotor y el estator. Cuando se conecte la suficiente capacitancia, la característica Tensión vs. Corriente para el condensador corresponderá a la tensión de la corriente característica para la magnetización de la inductancia, como se muestra en la Fig. 3.3.

Estando la maquina en vacio. La corriente magnetizante a tensión nominal, es aproximadamente el 27% de la corriente nominal y el capacitor a conectar para compensar el 100% de la Potencia Reactiva vale C1 (Capacidad limite); en este caso no hay sobretensión al abrir el interruptor.

Si conectamos un capacitor C2, tal que a plena carga el factor de potencia sea uno, al abrirse el contactor aparecerá una sobretensión de mas de 40% sobre la nominal.

Para valores mayores de capacidad, como C3 (que entrega la corriente nominal del motor), la sobretensión es aun mayor (64%).

Como contrapartida si se conecta un capacitor C_4 , menor que C_1 , no hay ningún peligro de sobretensión, pero esto no debe hacerse con el criterio de que la capacidad a conectar se lo mas próxima posible a la capacidad limite (C_1).

Este es el punto de operación del generador. El aumento de la capacidad aumentará la tensión de operación, pero, esto hace que más corriente fluya en la máquina, perdiéndose la energía adicional como calor en el bobinado del estator.

CAPÍTULO IV

ASPECTOS DE SELECCIÓN DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN PARA USARLO COMO GENERADOR

El número de opciones disponibles cuando se selecciona una máquina de inducción dependerá de la accesibilidad de los fabricantes, proveedores y el rango de máquinas disponibles. Las guías siguientes se refieren al más amplio rango de opciones que pueden estar abiertos al comprador, aunque algunas de las opciones no sean muy disponibles.

4.1 Tipo de Rotor

Los Motores de Inducción con rotor de jaula de ardilla son, el tipo más común de máquinas y siempre deben seleccionarse. Algunos fabricantes también producen máquinas de rotor bobinado, pero estos son más caros y menos robustos y, por tanto deben evitarse. Los Motores de rotor bobinado se pueden reconocer por el hecho de que tienen terminales adicionales que se conectan con el rotor por medio de anillos colectores.

4.2 Condiciones del sitio (Norma IEC 60529)

Los motores deben tener una clasificación de IP en su placa de identificación que indica su nivel de protección contra la penetración de sólidos y líquidos. El primer número se refiere a la penetración de sólidos y la segunda a la penetración de líquidos. Los niveles de protección, o los números de IP, más comúnmente disponibles son:

IP 21 Protección contra sólidos superiores a 12.5 mm y contra de goteo vertical de agua.

IP 22 Protección contra sólidos superiores a 12.5 mm y contra goteo de agua que cae en cualquier ángulo de hasta 15 ° de la vertical.

IP 23 Protección contra sólidos superiores a 12.5 mm y contra el agua que cae en forma de aerosol en cualquier ángulo de hasta 60° de la vertical.

IP 44 Protección contra sólidos superiores a 1 mm y salpicaduras de agua desde cualquier dirección.

IP 54 protegido contra el polvo y contra salpicaduras de agua desde cualquier dirección.

IP 55 protegido contra el polvo y contra chorros de agua desde cualquier dirección.

La mayoría de los motores se clasifican con Ventilación Totalmente Cerrados (TEFV) y están protegidos con IP54 o IP55. Estas máquinas son adecuadas para su uso en ambientes con mucho polvo, como por ejemplo los molinos. Para aplicaciones de accionamiento directo IP55 son los mejores debido a la protección adicional que ofrecen.

Los Motores de Inducción con una capacidad superior a 10 kW a veces están disponibles con su cubierta a prueba de goteo (IP21, IP22 o IP23). Son más baratas que las máquinas TEFV y, por tanto, vale la pena considerarlos, excepto en ambientes con mucho polvo.

4.3 Tipo de Armadura

Los fabricantes suelen ofrecer la opción de Motores tipo Horizontal o Vertical, llamados así por la posición que toma el eje del rotor en funcionamiento. Se seleccionara estos según el tipo de Turbina que se tenga pensado usar.

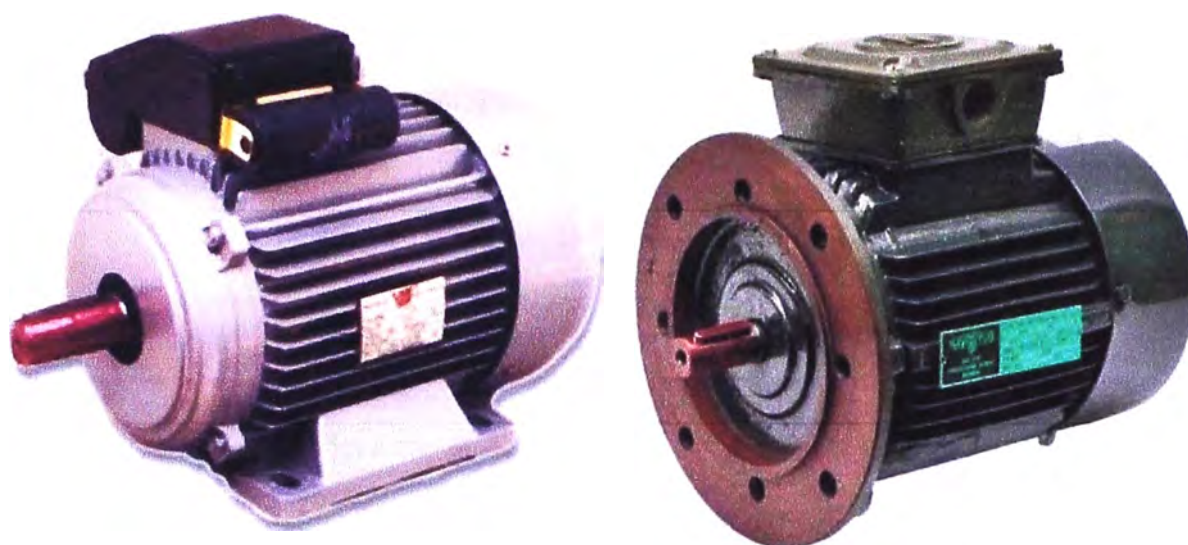


Fig. 4.1: Motores de Inducción Horizontal y Vertical

4.4 Aislamiento y aumento de la temperatura

La vida útil del bobinado de la máquina depende del número de horas que la máquina se utiliza por día, la calidad del aislamiento y la temperatura de funcionamiento. Una guía general para el efecto de la temperatura sobre la vida del aislamiento es que por cada reducción de 10°C en la temperatura de funcionamiento, la vida útil del aislamiento de las bobinas se duplicará. Las clasificaciones más comunes de aislamiento que se utilizan actualmente son:

La temperatura máxima incluye la temperatura del bobinado más la temperatura del ambiente. Si las bobinas se operan a la temperatura máxima según su clasificación, entonces, de acuerdo a las normas de aislamiento, la vida del aislamiento será de un mínimo de 20.000 horas.

En la práctica, la vida es mucho más larga, ya que es poco probable que la máquina funcione en su temperatura máxima y con la temperatura del ambiente máxima todo el tiempo.

Las mejoras en el aislamiento en los últimos años han significado que las máquinas puedan funcionar a mayores temperaturas, permitiendo utilizar conductores más delgados.

Tabla 4.1: Tipos de aislamiento [2]

CLASE	MATERIALES QUE LO CONSTITUYEN		TEMP MAX. (°C)
	MATERIAL AISLANTE	MEDIO AGLOMERANTE O IMPREGNANTE	
E	Esmaltes de acetato de polivinilo Aglomerado con celulosa	Melamina con formaldehido Fenol con formaldehido	120°C
B	Fibras de vidrio Productos de Mica Esmaltes politereftalatos Films de policarbonato	Goma laca Compuestos asfálticos o bituminosos Resinas alquídicas Resinas poliéster Melamina y formaldehido	130°C
F	Fibras de vidrio Productos de Mica Esmaltes de poliamidas aromáticas Films de poliéster-imida	Resinas epoxi Resinas de poliuretano Resinas de silicona	155°C
H	Fibras de vidrio Films de poliamidas aromáticas y de poliamidas. Politetrafluoroetileno Caucho silicona	Resinas de silicona	180°C
C	Porcelana, mica, cuarzo, vidrio u otro material cerámico Politetrafluoroetileno	Resinas de silicona cuando sea preciso	<180°C

Como resultado, se han convertido en máquinas más pequeñas y baratas. Sin embargo, los conductores más delgados reducen la eficiencia y en la actualidad es la comparación entre la eficiencia y el costo de la máquina, en lugar de la temperatura máxima de funcionamiento, la que tiende a determinar el tamaño del conductor. El costo de cable con aislamiento clase F no es mucho mayor que con clase B. Por lo tanto, muchas Máquinas de Inducción modernas están hechas con conductores de clase F, incluso si la temperatura de funcionamiento no requiere su uso. De hecho, algunos fabricantes utilizan el aislamiento clase F, pero afirman que sus motores están diseñados para operar dentro de límites de clase B. Estos motores tendrán aproximadamente cuatro veces el tiempo de vida que las mismas máquinas provistas de un aislamiento de clase B.

Como la mayoría de los Generadores de Inducción se utilizan de forma continua y el tiempo de vida del bobinado es un gran inconveniente, la vida de aislamiento es una consideración importante y se debe buscar motores con aislamiento de alta temperatura.

Difícilmente un generador se descarta debido a la operación a gran altitud. Los casos puntuales se dan a temperaturas no superiores a 40 ° C en altitudes de hasta 1000 metros sobre el nivel del mar. Los siguientes factores de corrección se deben utilizar en altitudes más altas.

Tabla 4.2: Reducción de potencia para el funcionamiento a gran altitud. [5]

Altitud	2000m	3000m	4000m
Cuando la temperatura ambiente es 40°C reducir la potencia nominal por:	92%	85%	75%
Temperatura ambiente a máxima Potencia nominal	32°C	24°C	16°C

4.5 Eficiencia

Las Máquinas de Inducción tienen un rendimiento ligeramente inferior si se utilizan como generadores que como motores, como se muestra en el Anexo A. A menudo la única opción para mejorar la eficiencia es cambiar el voltaje de operación y la frecuencia, como se discute en el Capítulo VI. Sin embargo, algunos fabricantes producen una gama de motores de alta eficiencia mediante el aumento de la cantidad de cobre que se utilizan en las bobinas y la cantidad y/o la calidad del hierro utilizado en los núcleos del estator y el rotor. Cuando estén disponibles, estas máquinas deben ser consideradas cuando se seleccione un generador adecuado. Por lo general son 50% más caros que un motor estándar, pero este costo es a menudo justificado por la mayor potencia de salida, como se muestra en el Ejemplo 4.1. Las Máquinas de energía eficiente tienen una mejor eficiencia de las máquinas estándar a carga parcial, así como a plena carga.

La baja pérdida en el hierro usado de las máquinas de energía eficiente da como resultado un magnetismo remanente más bajo. Para proporcionar el magnetismo suficiente para que se produzca la excitación puede ser necesaria una batería, como se explico en el capítulo anterior.

4.6 Potencia Nominal

Cuanto mayor sea la potencia absorbida por el generador, mayor es la temperatura de operación y por lo tanto, más corta será la vida de sus bobinados. Para asegurar la larga vida del bobinado, cuando se utiliza como generador, la máquina debe mantenerse por debajo de su temperatura de funcionamiento como motor a plena carga.

Las temperaturas del bobinado de la Máquina de Inducción operando como motor y como generador figuran en el Anexo A. Mediante una cuidadosa elección de las condiciones de funcionamiento en el modo de generador, es decir la tensión y frecuencia, la potencia nominal en el modo de generador es similar a la potencia nominal como motor pero se

puede tener un aumento de la temperatura. Sin embargo, esto supondría un funcionamiento equilibrado y cerca de las condiciones óptimas de funcionamiento.

Ya que mantener una carga igual en cada fase rara vez es posible en los pequeños sistemas de generación y la operación en las mejores condiciones no siempre es posible, los valores nominales de potencia de Máquinas de Inducción deben atenuarse cuando se utilizan como generadores. Se recomienda un factor de corrección de 0.8 y se aplica también a la generación monofásica desde una máquina trifásica, como se explica en el Capítulo VIII.

Un factor de corrección del 0.8 proporciona un buen margen de seguridad, ya que la transferencia de calor entre los bobinados del estator ayuda a corregir las diferencias de temperatura debido a las corrientes desiguales en los bobinados.

Ejemplo 4.1

Elección de un motor de 7.5 kW para su uso como un generador de 6 kW, eligiendo entre una Máquina estándar, con un 86% de eficiencia, de precio \$ 400 y una Máquina de energía eficiente, con un 90% de eficiencia, por \$ 600.

a) Si la Máquina estándar le dará una potencia eléctrica de 6 kW, cuando es impulsada por la turbina en un sistema micro hidroeléctrico, ¿Cuál será la salida que da la Máquina de energía eficiente?

b) ¿Cuál es el costo por kW de la energía adicional producida?

a) La potencia de salida de la turbina es:

$$P_{\text{turb}} = P_{\text{gen}} / \eta_{\text{gen}} \quad (4.1)$$

Donde: P_{gen} es la potencia del generador

η_{gen} es la eficiencia del generador

Usando la eficiencia de la Máquina de Inducción estándar

$$P_{\text{turb}} = 6 / 0.86 = 6.98 \text{ kW}$$

Para la Máquina de energía eficiente,

$$P_{\text{gen}} = P_{\text{turb}} \times \eta_{\text{gen}} = 6.98 \times 0.9 = 6.28 \text{ kW}$$

b) Un adicional de 280 Watts se ha producido a un costo adicional de \$ 200. Por lo tanto, el costo adicional por kilowatt es el siguiente:

$$\text{\$ } 200 / 0.28 \text{ kW} = 720 \text{ \$/kW}$$

La decisión sobre si se debe usar una Máquina de Inducción de energía eficiente dependerá del costo por kW de la potencia adicional que se produce, en comparación con el costo por kW del sistema de energía hidroeléctrica instalada, y la utilidad de la energía adicional producida.

Se debe evitar el uso de un generador más grande de lo necesario, especialmente Máquinas de Inducción de baja capacidad, pues estos tienen mala eficiencia de carga parcial, como se muestra en el Anexo A.

4.7 Tensión Nominal

Cuando se selecciona una Máquina de Inducción la tensión nominal es una consideración muy importante. En algunos casos será posible obtener una máquina que puede ser utilizada directamente como un generador. En otros casos, serán necesarias algunas modificaciones a sus bobinas.

4.7.1 Pequeños Generadores

Los Fabricantes a menudo fabrican Máquinas de Inducción con capacidad de hasta 3 kW con la posibilidad de elegir la operación a 240 V en triángulo o 415 V en estrella. En estas máquinas se leerán 240/415 V en la placa. La conexión de 240 V se utiliza con la máquina como generador monofásico, como se explica en el Capítulo VIII. La conexión de 415 V es ideal para la generación trifásica, con presencia de un punto neutro que puede ser conectado a tierra, esto permite conectar cargas monofásicas (240 V) entre cualquier línea y el neutro, y conectar cargas trifásicas a las tres líneas.

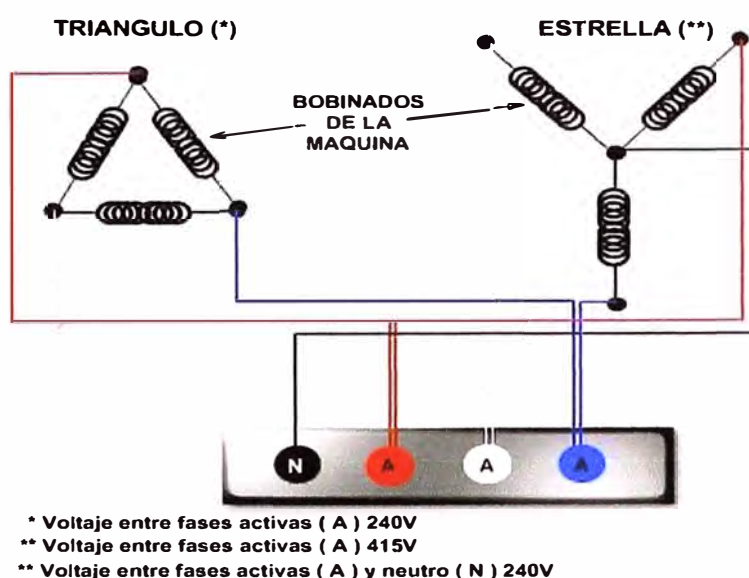


Fig. 4.2: Configuración de bobinados Triángulo y Estrella

Estos motores se pueden conectar ya sea para operar en 240 V o 415 V esto es posible pues en la caja de bornes se hallan los seis terminales de sus bobinas. Esto permite una fácil conexión en estrella o en triángulo, como se muestra en la Fig. 4.3. Algunos pequeños motores se suministran con los devanados en estrella, con la conexión en estrella hecha internamente de modo que sólo tres terminales se proporcionan en la caja de bornes. En estos casos, un simple trabajo en un taller de reparación de motores será necesario para proporcionar una conexión con el punto neutro en la caja de bornes. Si un terminal de bobina no tiene un buen punto de puesta a tierra en la cubierta de la máquina, dentro de la caja de terminales, se puede utilizar el punto de neutro de la estrella, conectándola a tierra. La reconfiguración en Triángulo requiere otra reconexión interna de los bobinados y las líneas de conexión Triángulo deben ser llevados a tres terminales en

la caja de bornes. Se deben evitar los motores bobinados de 415 V en conexión triángulo, como se explica en la siguiente sección.

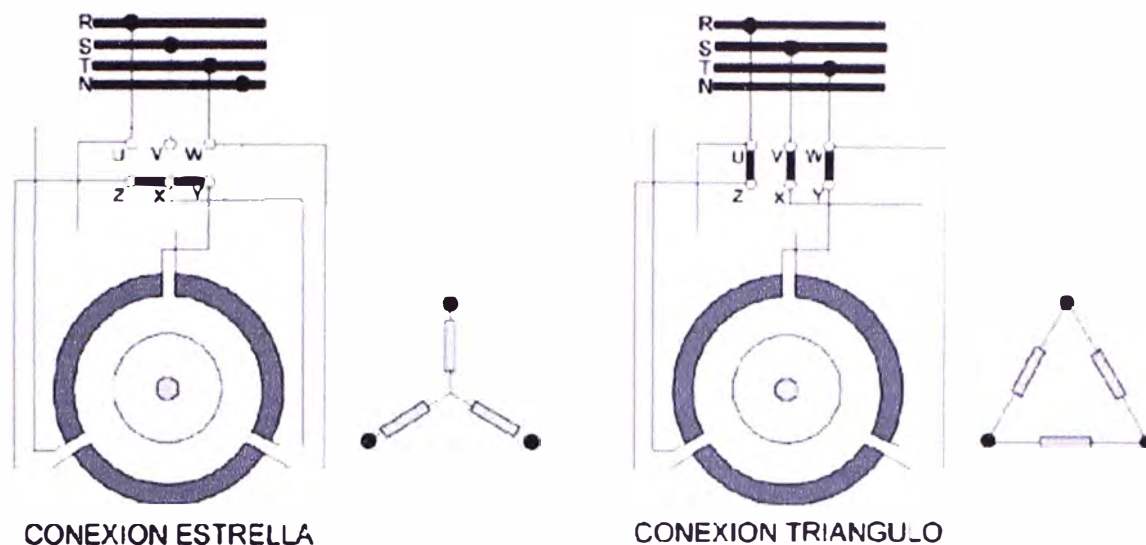


Fig. 4.3: Conexión de bobinados Estrella y Triángulo en la caja de bornes.

4.7.2 Grandes Generadores

Los Motores de Inducción con una capacidad superior a 3 kW generalmente usan el modo de arranque estrella-triángulo. Estas máquinas están diseñadas para funcionar con una conexión triángulo de 415 V como se explica en el Capítulo XI.

Desde el punto de vista de la generación, una conexión triángulo de 415 V tiene la desventaja de que no hay punto de estrella para servir como una conexión entre neutro y tierra. Por lo tanto, no se puede conectar una carga monofásica (240 V) y existen importantes desventajas en términos de puesta a tierra. Este arreglo de bobinado se puede utilizar con ventaja en situaciones donde existe una línea de transmisión larga, como se explica en el Anexo B. En todo caso, los sistemas triángulo de 415 V son poco usuales y esos deben ser de conexión estrella. Hay tres posibilidades para la obtención de una máquina de 415 V conectado en estrella. Estas, con el fin de la facilidad y el costo, son los siguientes:

- a) Tratar directamente de adquirir de una maquina que opere con un bobinado de 240/415 V. La mayoría de los fabricantes suministran este tipo de máquinas sin un costo extra, aunque el plazo de entrega puede ser mayor.
- b) Reducir la tensión de servicio reconectando los grupos de bobinas por ranuras a una configuración en paralelo. Esto se puede lograr, porque las máquinas son generalmente bobinadas con un número par de grupos de bobinas por fase, conectados en serie. La reconexión en paralelo para producir 207.5 V, es una operación relativamente sencilla, ya que sólo se deben reconectar los extremos de las ranuras de bobina y no será necesario un rebobinado. Para hacer funcionar la máquina a 240 V, será necesario un

aumento de la frecuencia de operación de aproximadamente el 10%, para compensar el aumento de saturación, como se explica en el Capítulo VI.

c) Para tener una conexión triángulo de 415 V a partir de una máquina rebobinada para 415 V estrella, es muy caro, ya que cuesta aproximadamente la mitad del precio de una nueva máquina. Esto es una buena opción si reacondicionamos una máquina de segunda mano que debe ser rebobinado de todos modos. En este caso debe hacerlo un rebobinador que se sepa escalar las vueltas y calibres de los cables correctamente ya que muchos suelen copiar simplemente el bobinado existente.

Si las opciones primera o tercera se toman entonces vale la pena considerar el rebobinado de la máquina para una tensión superior a fin de mejorar la eficiencia, como se explica en el Capítulo VI.

4.8 Velocidad Nominal / disposición de accionamiento

Lo ideal sería que el generador debe ser accionado directamente por la turbina. Esto tiene ventajas de una mayor eficiencia, menores costos de sistemas de transmisión, menor mantenimiento y una instalación más sencilla. Desafortunadamente, la velocidad de la turbina es a menudo mucho más lenta que la velocidad de un generador estándar y por lo tanto, este caso no siempre es posible. Puede ser adecuada en instalaciones de turbinas de alta velocidad específica, tales como bombas. Las Máquinas de Inducción tienen la ventaja sobre los Generadores Síncronos que están disponibles de 6 polos y, a veces de 8 polos. Sin embargo, para una potencia dada, el costo relativo de una máquina de 4 polos es por lo general 1.5 veces el valor de una máquina de 6 polos y 2 veces el valor de una máquina de 8 polos. En general, hay una pequeña diferencia económica entre las máquinas de dos y cuatro polos. En la mayoría de las instalaciones de máquinas de 4 polos la transmisión es por medio de una correa hacia la turbina. Para las turbinas de velocidad muy lenta, donde una sola correa de transmisión no es suficiente, vale la pena considerar máquinas de inducción con engranajes, cuando sea posible. Una caja de cambio para trabajo arduo debe ser seleccionada con el fin de garantizar una buena fiabilidad. Aunque las Máquinas de Inducción estándar están diseñados para una correa de transmisión, se debe tener cuidado de limitar la carga radial con el fin de garantizar una buena vida de los rodamientos. Siempre que sea posible, debe ser contactado el proveedor del motor para obtener información sobre los límites de dimensión de las poleas y se debe consultar las características de tensión del catálogo del fabricante de correas de transmisión.

CAPÍTULO V

PARÁMETROS DE LOS CONDENSADORES DE EXCITACIÓN

5.1 Conexión de los condensadores

Para un sistema de generación de tres fases, los condensadores pueden estar conectados en estrella o en triángulo, como se muestra en la Figura 5.1. En el caso de un sistema conectado en estrella, el punto estrella de los condensadores no debe estar conectado al generador, pues en el sistema neutral se va a producir una distorsión de la forma de onda y un aumento de las pérdidas.

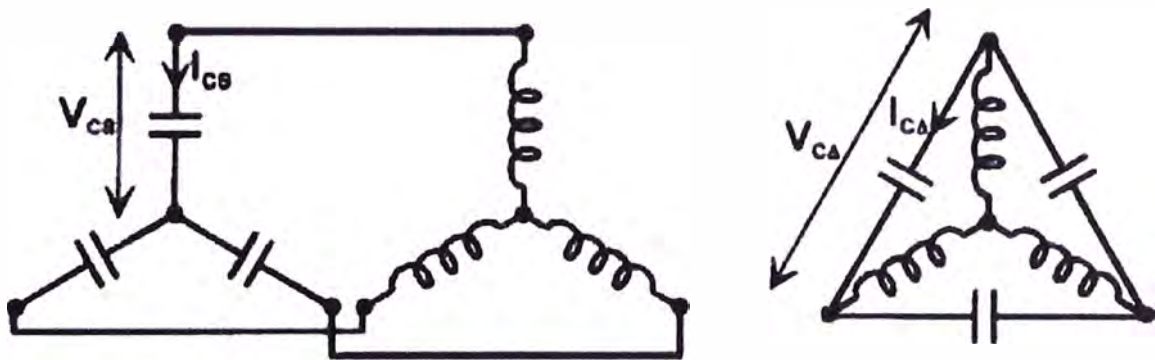


Fig. 5.1: Capacitancia de excitación en Conexiones Estrella y Triángulo

La conexión en estrella y conexión en triángulo se relacionan de la siguiente manera:

$$V_{C\Delta} = \sqrt{3} \cdot V_{CY} \quad (5.1)$$

$$y \quad I_{C\Delta} = I_{CY} / \sqrt{3} \quad (5.2)$$

$$X_{C\Delta} = V_{C\Delta} / I_{C\Delta} = (\sqrt{3} \cdot V_{CY}) / (I_{CY} / \sqrt{3}) = 3 \cdot V_{CY} / I_{CY} = 3 \cdot X_{CY}$$

Donde $C = 1/\omega \cdot X_C,$

$$C_{\Delta} = C_Y / 3 \quad (5.3)$$

Si los condensadores están conectados en estrella, requieren tres veces más capacidad que la requerida para la conexión delta, aunque de menor voltaje y por lo tanto pueden ser utilizados condensadores más baratos

5.2 Selección de los Condensadores

En general, el tipo más adecuado de los condensadores a utilizar es el tipo Condensador Permanente (Motor run), que se utiliza con algunos motores de inducción monofásico. Estos están ampliamente disponibles en capacidades de hasta por encima de 40 micro-Faradios (μF). Su voltaje es usualmente de 380 a 415 V, aunque también a veces están disponibles los valores de 220-240 V. El precio de un condensador es aproximadamente

proporcional a su tensión nominal. Por lo tanto, a una mayor tensión de los condensadores su costo será mayor, ya que la capacidad de es volt-amperios incrementa como en el cuadrado de la tensión.

Los condensadores tipo "Motor run" en general son muy baratos, e incluso para una conexión en estrella, llega a ser inferior al 30% del costo del generador. En cambio se deben evitar los Condensadores de Arranque (Motor start), ya que no están diseñados para uso continuo. Normalmente los Condensadores de Arranque (Motor start) son electrolíticos y puede también ser reconocidos por su muy bajo costo y su gran capacitancia para su tamaño. Los Condensadores diseñados para la corrección de factor de potencia de las lámparas fluorescentes se pueden utilizar para Generadores de Inducción. Sin embargo, rara vez están disponibles en tamaños de más de 10 μF .

El tiempo de vida de los Capacitores se rige por la calidad de fabricación, la tensión de operación, frecuencia y temperatura. El tiempo de vida es muy dependiente del voltaje. Por ejemplo, un condensador que tiene una duración de un año a su tensión nominal puede durar por treinta años a la mitad de la tensión nominal. Por lo tanto, se recomienda que los condensadores de 415 V se utilicen aun para un arreglo en estrella, y evitar su uso a 415 V a menos que los condensadores estén clasificados para más de 415 V.

El tiempo de vida de los condensadores también depende de la frecuencia. Un aumento en la frecuencia aumentará la corriente del capacitor, aumentan pérdidas y así también la temperatura del aislamiento.

El tiempo de vida de los condensadores es también altamente dependiente de la temperatura ambiente. Los condensadores deben ser colocados en una caja que tenga orificios de ventilación o ranuras para ayudar a enfriar los condensadores, y esta se debe colocar en un lugar fresco y lejos de la luz solar directa.

Los Condensadores solo están disponibles en tamaños estándar y generalmente se especifican con una tolerancia de +/- 10%. Por lo tanto, sin medir los condensadores individuales, es difícil obtener con precisión la capacidad necesaria. La siguiente sección muestra que una gran precisión no es necesaria, aunque se deben hacer esfuerzos para estar dentro del 10% del valor calculado.

5.3 Cálculo de la Capacitancia de Excitación

Un cálculo preciso de la capacidad necesaria para generar un voltaje determinado en condiciones específicas de carga sólo es posible con un conocimiento exacto de los parámetros eléctricos de la Máquina de Inducción, incluyendo la variación de los parámetros de voltaje. Estos parámetros pueden ser obtenidos por medio de una serie de pruebas estándar, pero se requiere un equipo caro. En la práctica, es suficiente para calcular un valor aproximado de capacidad de excitación y ajustar la velocidad de la turbina hasta que se obtenga la tensión requerida del sistema. Esto significa que la

frecuencia de funcionamiento puede diferir de la frecuencia nominal de la Máquina de Inducción, lo cual es aceptable siempre que la frecuencia se mantenga dentro de límites razonables. Estos límites se explican en el Capítulo VI.

Se recomiendan dos métodos para el cálculo aproximado de la Capacitancia de Excitación necesaria:

Método de la Prueba eléctrica sin carga.

Método de Datos de performance del Motor de Inducción.

5.3.1 Método de Prueba eléctrica sin carga

Este método implica una "prueba sin carga", ya sea como motor o como generador. La "Prueba sin carga" se puede utilizar para calcular la Capacitancia de Excitación debido a que la potencia aparente dada por la Máquina de Inducción sin carga es aproximadamente igual a la energía reactiva requerida cuando se ejecuta como generador en funcionando cerca a plena carga.

La prueba de movimiento es más simple, pero requiere de un suministro trifásico con capacidad suficiente para arrancar la máquina (la corriente de arranque será de aproximadamente seis veces la corriente nominal a plena carga). Son necesarios un voltímetro y amperímetro de pinza para medir el voltaje de línea y corriente, con el fin de determinar la potencia aparente y por lo tanto la potencia reactiva que deberían suministrar los Condensadores de Excitación. Un ejemplo de cálculo se da en el Ejemplo 5.1.

Ejemplo 5.1

Un Motor de Inducción trifásico de 2,2 kW, 4 polos, 50 Hz, 415 V, consume una corriente de 3,5 A cuando se suministra a la tensión y la frecuencia nominal y se ejecuta como un motor sin carga mecánica. Calcular la capacidad de excitación que debe estar conectado en estrella para recuperar la máquina de generar aproximadamente a la tensión nominal cuando se maneja ligeramente por encima de su velocidad nominal.

La potencia aparente total sin carga,

$$\Sigma S_{\text{sin carga}} = \sqrt{3} \times V_{\text{línea}} \times A_{\text{línea}} = \sqrt{3} \times 415 \times 3,5 = 2516 \text{ VA}$$

Utilizando la relación que la potencia aparente sin carga es igual a la potencia reactiva a ser proporcionada por los Condensadores de Excitación (como se indica en la sección de Prueba eléctrica sin carga), la potencia reactiva total,

$$\Sigma Q = \Sigma S_{\text{sin carga}} = 2516 \text{ VAR}$$

Por lo tanto, la potencia reactiva por fase,

$$Q_{\text{fase}} = Q / 3 = 2516 / 3 = 837 \text{ VAR}$$

Para los condensadores conectados en estrella,

$$V_{\text{fase}} = V_{\text{línea}} / \sqrt{3} = 415 / \sqrt{3} = 240 \text{ V}$$

$$I_{\text{fase}} = Q_{\text{fase}} / V_{\text{fase}} = 837/240 = 3.5 \text{ A (*)}$$

Donde: $X_e = V / I = 1 / 2\pi fC,$
 $C = I / 2\pi fV$ (5.4)

Por lo tanto, $C = 3.5 / 2\pi \times 50 \times 240 = 46 \mu F$

* Tener en cuenta que para la conexión en estrella la corriente del capacitor es la misma que la corriente en línea sin carga.

Si no hay un suministro trifásico con la capacidad suficiente para arrancar la Máquina de Inducción, la "Prueba eléctrica sin carga" se puede realizar con la máquina funcionando como generador. Solo un pequeño motor monofásico o trifásico se utilizando un correa de transmisión para la prueba de la maquina. Para la prueba la máquina debe ser llevada muy cerca de la velocidad de sincronismo con los condensadores conectados excitando a la máquina a la tensión nominal. Siempre que la máquina a prueba este muy cerca de la velocidad de sincronismo, la prueba es más precisa que con el motor en movimiento a pesar de que lleva mucho más tiempo para hacerla. Por lo general, sólo vale la pena para las máquinas usadas, sin datos de performance.

El método de la Prueba eléctrica sin carga puede subestimar la capacidad requerida.

Sin embargo, es bastante exacta para máquinas por debajo de 5 kW.

5.3.2 Método de Datos de performance del Motor de Inducción

El segundo método usado es el de "Datos del fabricante", que estima la potencia reactiva necesaria de los condensadores, por medio de la corriente a plena carga y factor de potencia.

La reactancia capacitiva para la corrección de factor de potencia total se puede obtener de esta información y la tensión nominal. Si los datos del fabricante no están disponibles el valor requerido se puede obtener utilizando los datos dados en la Tabla 3.1. Esto es bastante exacto de las máquinas de diseño moderno. Un ejemplo de cálculo se da en el **Ejemplo 5.2**

Por lo general, si se utiliza cualquiera de estos dos métodos de cálculo de capacitancia, el generador produce un voltaje muy bajo cuando se opera a la frecuencia nominal. La razón de esto es que cuando la máquina funciona como un generador bajo carga, ellos no compensan plenamente en un aumento de saturación.

Sin embargo, no es recomendable el uso de una capacitancia adicional para permitir el aumento de saturación. Hay dos razones para esto:

1) Un alto nivel de saturación reduce la eficiencia del generador y el máximo rendimiento, como se muestra en el Ejemplo 5.3. Hay dos alternativas mucho más preferibles: funcionamiento a tensión reducida y el funcionamiento a mayor frecuencia, como se explica en el Capítulo VI.

2) El método "Datos de los fabricantes" no siempre es fiable. Si es conectada demasiada capacitancia entonces puede ocurrir una operación a baja frecuencia, que es ineficaz

para el generador y puede dañar las cargas. En general, tener poca capacitancia es mejor que tener demasiada.

Ejemplo 5.2

Un motor de inducción de 15 kW, 4 polos, 50 Hz, 415/240 V es conectado en estrella para la operación como generador. Utilizando los datos de rendimiento en la Tabla 3.1, calcular la cantidad de capacidad de excitación que debe estar conectada en triángulo para que la máquina genere aproximadamente a la tensión nominal, cuando funciona ligeramente por encima de su velocidad nominal.

En la Tabla 3.1, la corriente de plena carga por línea es de 27 A y el factor de potencia es de 0,87. La potencia aparente total a plena carga,

$$\Sigma S = \sqrt{3} \times V_{\text{línea}} \times I_{\text{línea}} = \sqrt{3} \times 415 \times 27 = 19.408 \text{ VA}$$

Por lo tanto, la potencia real,

$$\Sigma P = \Sigma S \cos\phi = 19,408 \times 0,87 = 16885 \text{ W}$$

La potencia reactiva se puede obtener desde el triángulo de potencias

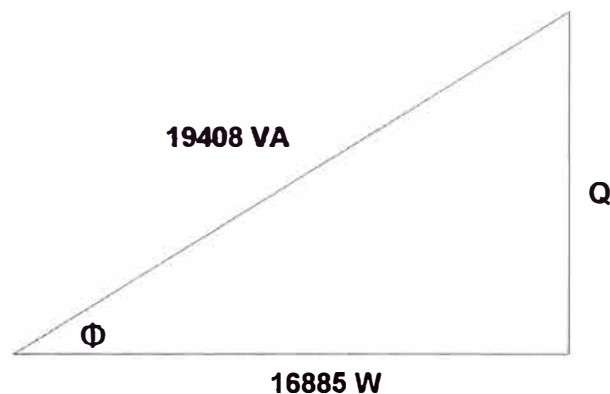


Fig. 5.2: Triangulo de potencias

$$\Sigma Q = (19408^2 - 16885^2)^{1/2} = 9569 \text{ VAR}$$

Por lo tanto, la potencia reactiva por fase,

$$Q_{\text{fase}} = \Sigma Q / 3 = 9569 / 3 = 3,189 \text{ VAR}$$

Para condensadores conectados en Triangulo,

$$V_{\text{fase}} = V_{\text{línea}}$$

$$I_{\text{fase}} = Q_{\text{fase}} / V_{\text{fase}} = 3190 / 415 = 7.69 \text{ A}$$

De la ecuación (5.2), $C = I / 2\pi fV = 7.69 / 2\pi \times 50 \times 415 = 59 \mu\text{F}$

Ejemplo 5.3

Cuando la máquina de 2.2 kW del Ejemplo 5.1 es instalada en un lugar donde para producir la tensión nominal a la frecuencia nominal, la capacidad requerida debe ser incrementada en un 30% en comparación con el cálculo inicial, determinar:

- La potencia reactiva suministrada por los condensadores.
- La máxima potencia de salida del generador si la corriente de línea a plena carga del motor, es 4,9 amperios, no debe excederse.

(a) La estimación inicial de la potencia reactiva total, ΣQ , era 2516 VAR. Un aumento del 30% dará 3271 VAR.

(b) La máxima potencia aparente de la Máquina de Inducción es fijada por la corriente de línea nominal. Por lo tanto,

$$\Sigma S = \sqrt{3} \times V_{\text{línea}} \times A_{\text{línea}} = \sqrt{3} \times 415 \times 4.9 = 3522 \text{ VA}$$

La Potencia Real máxima se puede obtener desde el triángulo de potencias:

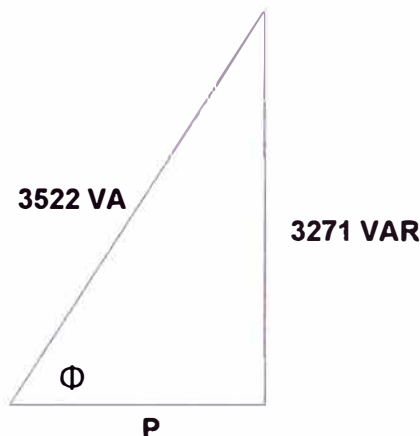


Fig. 5.3: Triangulo de potencias

La potencia máxima de salida es,

$$\Sigma P = (\Sigma S^2 - \Sigma Q^2)^{1/2} = (3522^2 - 3271^2)^{1/2} = 1306 \text{ W}$$

Esto es sólo el 60% de la potencia nominal del motor y, dado que la corriente nominal de salida está fluyendo reducida, la eficiencia será muy por debajo que de un motor eficiente. En la práctica, la potencia puede reducirse aún más, ya que el cálculo se basa en un generador con carga equilibrada.

Es recomendable seleccionar una combinación de capacitores que permitan hacer algunos ajustes en el sitio. Esto puede ser usado para asegurar que la frecuencia de operación sea aceptable y para maximizar la potencia de salida, como se explica en el Capítulo XII.

CAPÍTULO VI

TENSIÓN Y FRECUENCIA DE OPERACIÓN

La tensión y la frecuencia de operación de un generador dependerán de la potencia de la turbina, la capacitancia de excitación y de la carga conectada, incluyendo su factor de potencia. Hay una cierta flexibilidad en cuanto a la elección de la tensión de servicio y la frecuencia que puede ser aprovechada para mejorar la eficiencia del sistema.

6.1 Tensión de operación

6.1.1 Consideraciones de un generador

Como se explica en el Capítulo III, un Generador de Inducción puede ser operado en un rango de tensiones. La Fig. 3.3 muestra cómo, para el funcionamiento a velocidad constante, la tensión está determinada por la cantidad de capacitancia conectada.

Para el funcionamiento a velocidad síncrona, la tensión más alta que se puede lograr es típicamente 125% el valor nominal del motor y la tensión más baja de aproximadamente el 65% del valor nominal del motor.

El límite superior es fijado por la tensión a la que la corriente de excitación es igual a la corriente nominal de la máquina y el límite inferior es la tensión a la que la máquina está lo suficientemente saturada para operar de manera estable.

No es recomendable la operación cerca al límite superior de tensión, ya que, debido a las consideraciones de temperatura del devanado, la gran corriente que fluye en el generador desde los condensadores de excitación reduce la carga máxima que se puede conectar y reduciendo la eficiencia del generador.

Esto fue demostrado en el Ejemplo 5.3.

La operación cerca del límite inferior de tensión no es recomendable por dos razones:

- a) Un reducido condensador de excitación hace al generador muy sensible a las cargas reactivas, lo que podría causar significativas variaciones en la frecuencia y la posible pérdida de excitación, como se explica en el Capítulo VII.
- b) La eficiencia estará por debajo de la máxima eficiencia, particularmente cuando el generador está muy cargado. Esto es así porque, a fin de lograr la misma potencia de salida a tensión reducida, la corriente de carga debe ser aumentada. Por ejemplo, una reducción del 33% en el voltaje se requerirá un aumento del 50% en la corriente de carga a fin de mantener la potencia de salida. Esto aumenta el calentamiento del estator y el rotor, reduciendo la eficiencia.

Como se muestra en el Anexo A, para lograr una eficiencia óptima de la Máquina de Inducción debe ser operado como un generador en un 90-95% del valor nominal del motor. Además de mejorar la eficiencia, esto recorta los costos del condensador y mejora la vida útil del aislamiento.

Al seleccionar el voltaje de operación para el generador, también se debe considerar la caída de tensión de la línea de transmisión.

6.1.2 Consideraciones de la carga

Deben evitarse Tensiones superiores a las calificaciones de los fabricantes, ya que se reduce la vida útil de los aparatos que conforman la carga. Por ejemplo los datos de los fabricantes indican que para una lámpara incandescente estándar una sobretensión continua de sólo el 5% reducirá la vida útil de la lámpara en un 50%. Por lo tanto, está claro que la operación de los aparatos por encima de la tensión nominal debe evitarse.

El efecto de una baja tensión con una lámpara incandescente o calentador es aumentar la vida útil y la disminución de su producción (Luz o Temperatura). En el caso de lámparas fluorescentes, una tensión baja puede evitar su encendido y puede causar que falle el arrancador debido a la operación repetitiva.

Con los motores, el torque de arranque se reducirá y un recalentamiento puede ocurrir si el motor está a plena carga.

Los equipos eléctricos están normalmente diseñados para trabajar para una variación de tensión de alimentación de +/- 6%, y los límites inferiores de tensión se puede ampliar a un 15% para sistemas en los son usadas cargas resistivas y lámparas fluorescentes. Por debajo de este voltaje de las lámparas incandescentes funcionan de manera muy ineficiente y se producirá problemas de arranque con lámparas fluorescentes.

6.2 Frecuencia de operación

6.2.1 Consideraciones de un generador

El aumento de la frecuencia de operación reducirá la corriente de excitación requerida para lograr la tensión nominal, como se muestra en la Fig. 6.1. Esto se traduce en mejoras en la eficiencia y la máxima potencia de salida, como muestra el Anexo A.

6.2.2 Consideraciones de la carga

El funcionamiento de algunos aparatos domésticos eléctricos, como televisores, reproductores de discos y relojes, fue hace algún tiempo, dependiente de su sincronización con la frecuencia de alimentación, y por lo tanto requerían de una fuente de bien regulada. Este no es el caso con los equipos más modernos desde que se usa una frecuencia de referencia generada internamente. Hoy en día, los límites de variación de frecuencia aceptables son principalmente establecidos por los requerimientos de transformadores y motores.

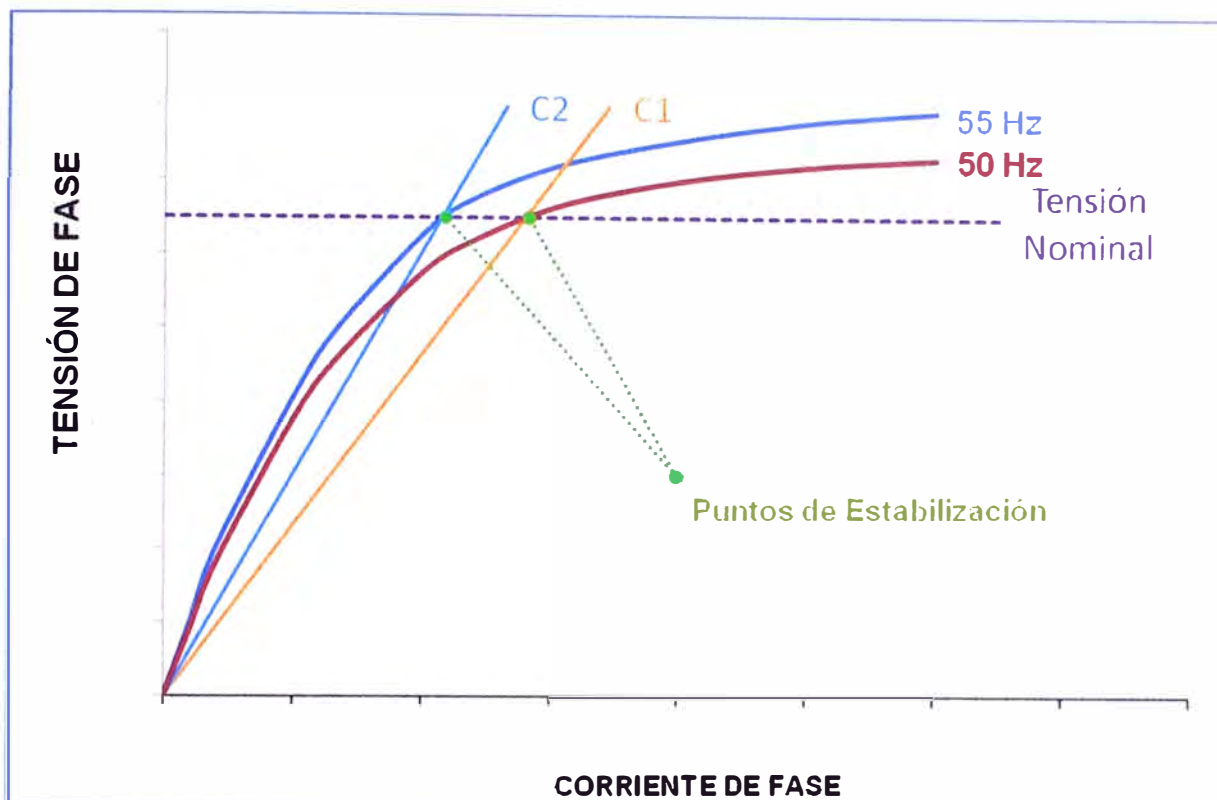


Fig. 6.1: Características de excitación para una máquina de inducción sin carga que opera en dos frecuencias diferentes

Los efectos de la frecuencia de alimentación en el rendimiento de un motor dependen del tipo de motor utilizado. Sólo dos tipos de motor se utilizan comúnmente como carga en estos suministros de corriente alterna, los Motores Universales y Motores de Inducción. El Motor Universal se llama así porque da un rendimiento parecido tanto en CA y CC. Por el contrario, el rendimiento del Motor de Inducción se ve muy afectado por la frecuencia de alimentación y, esta es el parámetro principal para limitar el uso de estas máquinas.

La corriente de magnetización de un Motor de Inducción aumenta si la frecuencia de alimentación cae, en la misma forma que para un Generador de Inducción. Esto aumenta la disipación de potencia en los bobinados del estator y puede causar que se sobrecalienten. Este mismo efecto se produce con los transformadores. Los Transformadores pequeños, que a menudo se utilizan en aparatos eléctricos, son muy susceptibles a los daños a causa de su operación en estas frecuencias. Por estas razones, **se debe evitar el funcionamiento a una frecuencia por debajo de su clasificación.**

El aumento de la frecuencia de operación tiene el efecto contrario. Reduce la corriente de magnetización y por lo tanto, los Motores de Inducción y Transformadores se calientan. Sin embargo, hay desventajas. La principal limitación se produce cuando las cargas del motor, tales como bombas y ventiladores, con una demanda de potencia que aumenta significativamente con la velocidad se utilizan en la carga. El efecto de esta carga puede

significativamente con la velocidad se utilizan en la carga. El efecto de esta carga puede ser apreciable, ya que, para Motores de Inducción, la velocidad del eje aumenta de forma lineal con la frecuencia y la demanda de potencia de los ventiladores se incrementa a casi el cubo de la velocidad. Un aumento del 10% en la frecuencia es en general aceptable, incluso con cargas tan altamente dependiente de la velocidad. Las razones de esto son los siguientes:

- a) A causa de sobredimensionamiento, la mayoría de los motores funcionan a sólo 60 - 80% de su potencia nominal cuando se opera a la frecuencia nominal. Por lo tanto, hay una cierta capacidad de reserva.
- b) Como se explicó anteriormente, la operación a más alta frecuencia reduce la corriente de magnetización, compensando así parte del aumento en la carga actual.
- c) El aumento de la velocidad del eje aumenta el enfriamiento de la máquina.

Si no hay motores que dependen grandemente de la velocidad, entonces el límite superior de frecuencia se puede incrementar hasta un 20% por encima de la frecuencia nominal. Si sólo se utilizan cargas resistivas, entonces no hay límite de frecuencia impuestas por la carga. El límite máximo será determinado por el límite de funcionamiento estable del generador, es decir, la frecuencia con la que la máquina no se satura para la salida de voltaje requerido.

6.3 Tensión y frecuencia ideales de operación

Si una Máquina de Inducción funciona como un generador en el mismo voltaje y la frecuencia que ha sido diseñado para motor, funciona a una menor eficiencia y una temperatura más alta que para un motor a una potencia equivalente. Esto se debe al aumento de saturación y por lo tanto una mayor corriente de magnetización. La selección cuidadosa de la tensión nominal de la Máquina de Inducción, la tensión y la frecuencia de operación puede reducir el nivel de saturación y teniendo como resultado las siguientes ventajas:

- Mejora de la eficiencia del generador.
- Aumento de la potencia máxima de salida del generador (dentro de los límites térmicos).
- Mayor vida útil del bobinado.
- Reducción de costos de los condensadores.

La tensión de operación está determinada por la tensión nominal, los requerimientos de tensión de la carga y la caída de tensión en la línea de transmisión. Lo ideal sería que la Máquina de Inducción debería ser operada como un generador en un 6% por debajo de la tensión del motor, para tener las ventajas enumeradas anteriormente. Por ejemplo, para operar como generador a 240 V debe ser utilizado un Motor de Inducción de 255 V.

El Capítulo IV presenta una serie de opciones para la obtención de una máquina con el voltaje correcto. Si la Tensión nominal del motor deseado no se puede obtener, luego de considerar operar las cargas, ligeramente por encima de su frecuencia nominal, ya que también proporcionará las ventajas enumeradas anteriormente.

Aunque menos eficiente, es bastante aceptable operar una maquina como generador a la misma tensión y frecuencia al que ha sido diseñado para motor. Se requerirá mayor Capacitancia, en comparación con los valores calculados utilizando los métodos indicados en el Capítulo V, y se debe tener cuidado de asegurarse de que las corrientes de bobinados no sean demasiado altas.

CAPÍTULO VII

EFECTO DE LA CARGA EN LOS TERMINALES DE SALIDA DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN

7.1 Carga Resistiva

La Fig. 7.1 muestra la variación de la tensión con carga resistiva de un Generador de Inducción que opera a una velocidad constante y con una Capacitancia de excitación fija. La corriente a plena carga es la que la corriente del generador iguala a la corriente nominal como motor. Una carga excesiva causará el colapso de la excitación.

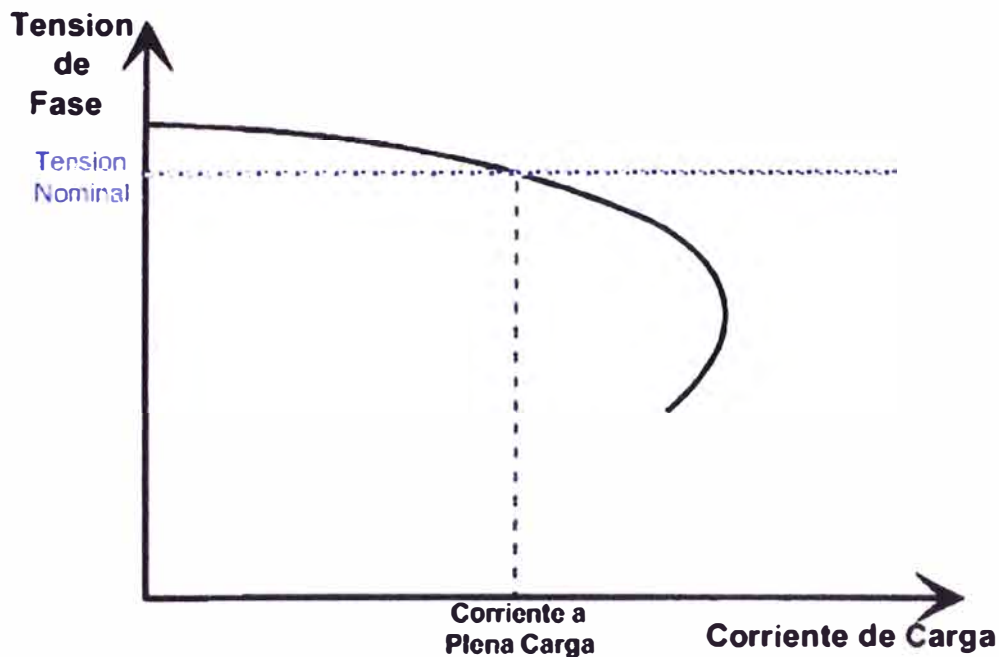


Fig. 7.1: Curva Tensión vs. Corriente de Carga para Generador de Inducción con Capacitancia de excitación fija operando a velocidad constante

La Fig. 7.1 no proporciona una representación completa de lo que ocurre cuando el generador se utiliza en un sistema micro-hidroeléctrico, ya que no tiene en cuenta la variación de frecuencia debido a la característica de potencia-velocidad de la turbina. La característica de una curva Potencia- Velocidad típica de una turbina se muestra en la Fig 7.2. Cuando la carga del generador se incrementa la tensión caerá inmediatamente en una cantidad determinada por las características de la Fig. 7.1. El aumento de la carga de la turbina hará que la velocidad de la turbina baje, resultando en una reducción correspondiente en la frecuencia de operación. Esta disminución en la frecuencia provoca una caída de tensión adicional, debido a la reducción de la excitación, como se muestra

en la Fig. 6.1. La velocidad de la turbina y la tensión generada caerá hasta una velocidad que se alcanza, cuando la potencia de salida de la turbina es igual a la carga de la turbina.

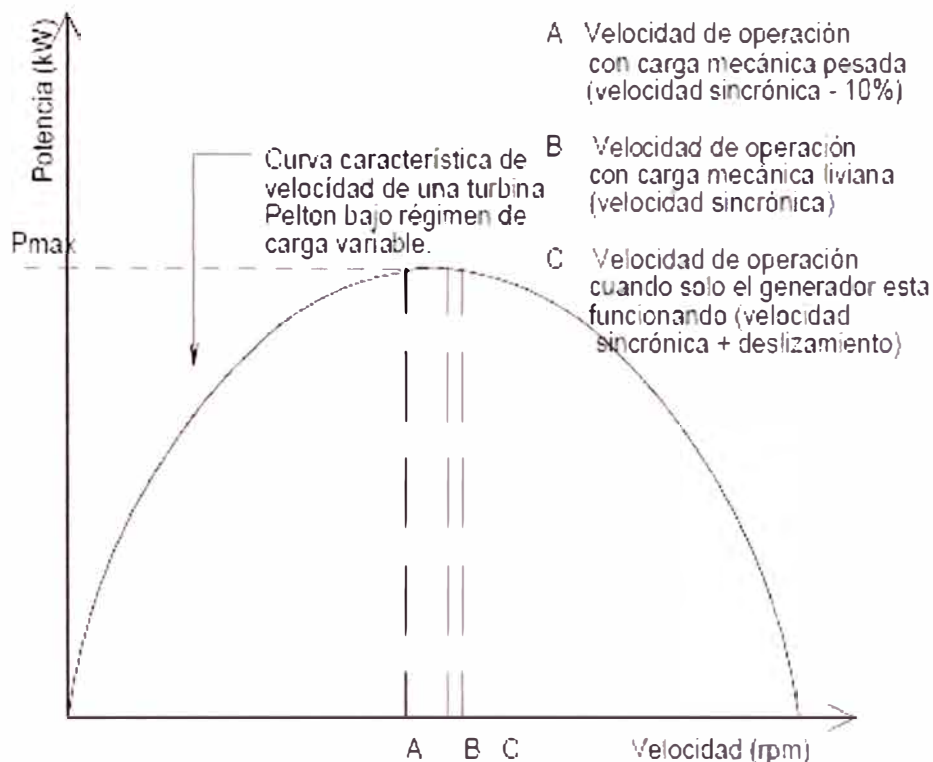


Fig. 7.2: Potencia vs. Velocidad - Característica de una Turbina con flujo constante y bajo diferentes condiciones de carga

Por el contrario, si la carga resistiva en el generador se reduce, la tensión generada se elevará y la velocidad de la turbina se incrementará. Si toda la carga en el generador se desconecta, la tensión y la velocidad de la turbina se incrementarán hasta que las pérdidas en el generador igualen a la potencia de salida de la turbina.

Es evidente de lo antes descrito que la carga resistiva debe ser controlada con el fin de regular el voltaje y la frecuencia. Las formas de control de carga se presentan en el Capítulo X.

7.2 Carga Inductiva

Si un Inductor es conectado a la salida del generador, la corriente en el Inductor será suministrada por los condensadores conectados al generador. Esto reducirá la cantidad de la Capacitancia de excitación disponible, y como resultado la tensión caerá temporalmente. La caída de tensión reducirá la potencia disipada en las otras cargas y por lo tanto la velocidad de la turbina se incrementará. La tensión aumentará a medida que aumenta la velocidad hasta alcanzar el equilibrio a una velocidad donde la potencia

de la turbina es igual a la carga en la turbina. Por lo tanto, las cargas inductivas darán como resultado un aumento en la frecuencia de operación.

En un sistema no controlado, la tensión de operación, dependerá en gran medida de la característica de la curva de Potencia vs. Velocidad de la turbina. Si la salida de potencia de la turbina no varía significativamente entre las velocidades inicial y final no habrá ningún cambio significativo en el voltaje.

Si se conecta una carga inductiva demasiado grande, la excitación del generador colapsará. Esto puede ocurrir cuando se conectan como carga Motores de Inducción, como se discute en el Capítulo XI.

7.3 Carga Capacitiva

De la misma manera que con una carga inductiva se incrementa la frecuencia de operación, una carga capacitiva se reducirá. Esto podría ser perjudicial para el generador y otras cargas, como se explica en el Capítulo VI. Afortunadamente, cargas con factor de potencia capacitivo son muy raras. Esto puede ocurrir si se conecta una capacitancia de corrección de factor de potencia demasiado grande teniendo una carga inductiva.

CAPÍTULO VIII
OBTENCIÓN DE SALIDA MONOFÁSICA DESDE UNA MÁQUINA TRIFÁSICA
CONEXIÓN C-2C

Los motores monofásicos de inducción se puede utilizar como generadores, pero los problemas pueden ser experimentados en el logro de la excitación y en la determinación del tamaño y disposición de los condensadores necesarios. Además, los Motores de Inducción monofásicos son más caros que los Motores de Inducción Trifásicos y están disponibles solo para potencias pequeñas.

Tabla 8.1 Potencias disponibles para Motores de Inducción [S/N]

POTENCIA kW	0.75	1.1	1.5	2.2	3	4	5.5	7.5	11	15	22	30	37	45
HP	1	1.5	2	3	4	5.5	7.5	10	15	20	30	40	50	60
Monofásico 1Φ	X	X	X	X	X									
Trifásico 3Φ	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Ante esto, es posible utilizar un Motor de Inducción de Trifásico como un Generador Monofásico y de esta manera aprovecharlo para proporcionar un suministro monofásico. El método para la obtención de una salida monofásica de una máquina trifásica es la siguiente:

- a) Utilizar una Máquina de Inducción trifásica adecuada para la operación 240/415 V y conectar la maquina en Triangulo.
- b) Calcular la Capacitancia por fase, "C", necesaria para la normal operación Triangulo de 240 V Trifásico.
- c) En lugar de conectar "C" a cada fase de conectar una capacitancia de valor "2C" a una sola etapa, otra de valor "C" a una segunda fase y ninguna capacitancia en la tercera fase. Esto se conoce como conexión "C - 2C". La carga debe estar conectada en la fase correspondiente a la capacitancia "C", como se muestra en la Fig. 8.1.

Este arreglo desequilibrado de capacitancias ayuda a compensar la carga desequilibrada en el generador, y como resultado el generador se puede utilizar con una producción de

hasta un 80% de la potencia del motor. Este es el mismo factor de reducción de potencia que se aplica a las máquinas trifásicas para compensar el desequilibrio de la carga.

En el uso de la conexión "C-2C" es esencial para asegurarse que la dirección de rotación del rotor de la máquina es correcta, en relación con las fases en que las capacitancias de valores "C" y "2C" estén conectadas.

Si el arreglo de condensadores es el correcto la "fase C" se produce su pico de tensión antes que la fase "2C". Si ocurre lo contrario, el generador funcionara ineficientemente y se sobrecalentara.

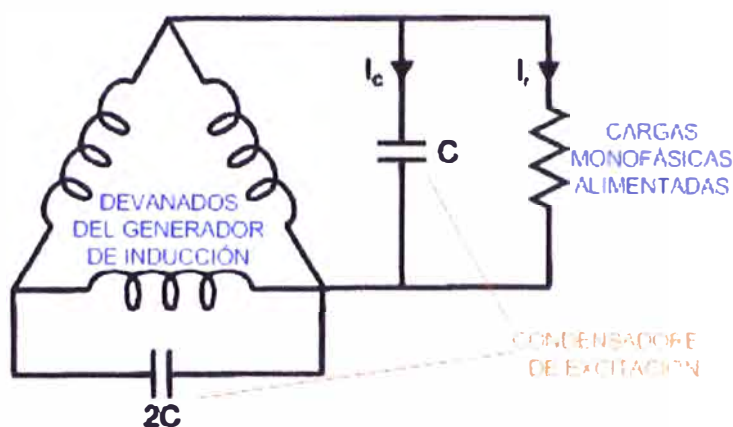


Fig. 8.1: Generación monofásica desde una máquina trifásica utilizando la conexión "C-2C "

Es posible determinar la rotación correcta del etiquetado de los bobinados. Sin embargo, es muy fácil cometer errores o puede ser que las bobinas estén mal etiquetadas. La rotación correcta se debe comprobar mediante la ejecución de la máquina con ambas secuencias de fase. Esta es una tarea relativamente sencilla. La rotación correcta se puede determinar midiendo la potencia de salida o de las corrientes en bobinados.

8.1 Prueba de potencia de salida

Para esta prueba es necesaria una potencia de entrada constante. Esto se consigue normalmente mediante la ejecución de la turbina a potencia máxima. La salida de la turbina se incrementara gradualmente y la carga aplicada a la "fase C" para mantener la tensión a su valor nominal.

Cuando la energía de la turbina alcanza el máximo, se mide la corriente de carga. Repita la prueba con la Capacitancia "2C" conectada a la fase y previamente sin capacidad conectada.

Una lectura de corriente a mayor carga se obtendrá para un arreglo correcto de Capacitancias para que el generador funcione más eficientemente.

Usualmente puede ser un aumento del 10% de la potencia de salida. La mejora de la eficiencia significa que mucha menos energía será disipada por el generador y como resultado funcionara apreciablemente a menor temperatura.

Esta prueba es muy fácil de realizar si se utiliza un controlador de Generador de Inducción debido a que el controlador mantiene una tensión constante y el medidor del balastro indica que conexión produce la máxima potencia de salida.

8.2 Prueba de corrientes de bobinado

Por un análisis detallado, se puede demostrar para una carga puramente resistiva, si la condición dada en la ecuación 8.1 se cumple, el generador conectado de la forma "C-2C" se comporta como una maquina trifásica equilibrada. Por lo tanto, si las corrientes de bobinados se miden en esta condición de carga, las corrientes serán iguales, siempre que la secuencia de fases sea la correcta

$$P_{\text{carga}} = \Sigma Q / \sqrt{3} \quad (8.1)$$

Donde P_{carga} es la potencia disipada en la carga

ΣQ es la potencia reactiva total de los condensadores

Una representación alternativa, utilizando el esquema de la Fig. 8.1 es,

$$I_r = \sqrt{3} I_c \quad (8.2)$$

Para cargas encima y debajo de la condición de carga dada por la ecuación 8.1, la máquina no es balanceada, y como resultado la máquina se calienta más y es menos eficiente que una máquina trifásica balanceada, como se muestra en el Anexo A.

Cerca de la condición balanceada este efecto es muy pequeño y reduce la potencia al 80% de la potencia de salida del motor es más que suficiente compensación por el desbalance

La condición de equilibrio dada por la ecuación 8.1 es para una carga resistiva, con un sistema monofásico "C-2C", se debe tener gran cuidado de corregir el factor de potencia de la carga inductiva, con el fin de mantener el funcionamiento del generador lo más cercano a su estado más equilibrado posible.

Ejemplo 8.1

Para la máquina de 2.2 kW del Ejemplo 5.1, calcular la potencia de salida del generador requerido para ofrecer un funcionamiento equilibrado con una conexión tipo "C-2C"

Del Ejemplo 5.1

$$\Sigma Q = 2516\text{VAR}$$

Para un funcionamiento equilibrado, la ecuación 8.1 se debe cumplir,

$$P_{\text{carga}} = \Sigma Q / \sqrt{3} = 2516 / \sqrt{3} = 1453\text{W}$$

8.3 Análisis de la Conexión C-2C

Con el fin de analizar el circuito de la Fig. 8.2, se supone que la carga conectada, que es la carga de los consumidores más la "Carga Balastro", es una constante y es resistiva. Esto es cierto, en pequeños sistemas hidroeléctricos que normalmente se utilizan para proporcionar energía para la iluminación y tal vez para el planchado de la ropa. De la Fig. 8.2:

$$i_a = i_{\text{carga}} + i_{\text{cap1}} \quad (8.3)$$

$$i_b = -(i_a + i_c) \quad (8.4)$$

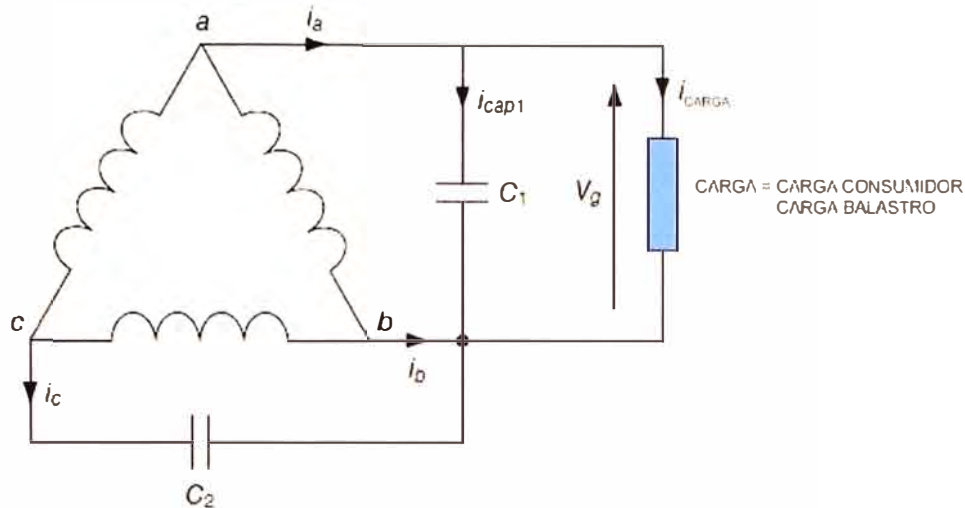


Fig. 8.2: Generación monofásica de conexión "C-2C"

Uso de las ecuaciones. (8.3) y (8.4), y suponiendo que la máquina está funcionando como una máquina trifásica equilibrada, el diagrama vectorial se puede construir como se muestra en la Fig. 8.3. Como el condensador C_2 está conectado a través de las fases b y c, i_c es perpendicular al vector de tensión V_{bc} . Con el fin de obtener un funcionamiento equilibrado las siguientes dos condiciones deben ser cumplirse:

$$\theta = 60^\circ \quad \text{y} \quad |i_c| = |i_a|$$

Una vez que las dos condiciones se cumplen, es decir, $i_a = I \angle 0^\circ$ y $i_c = I \angle -240^\circ$, a continuación, a partir de la Ecuación (8.4), $i_b = I \angle -120^\circ$ (donde I es el valor RMS de las corrientes trifásicas equilibradas).

Las condiciones para el funcionamiento equilibrado pueden ser expresadas en términos de las corrientes como en las ecuaciones. (8.5) y (8.6).

Desde el triángulo OAB de la Figura 8.3, utilizando las condiciones dadas en la ecuación. (8.5), la siguiente puede verse que:

$$\tan \theta = |i_{\text{carga}}| / |i_{\text{cap1}}| = 3$$

$$\cos \theta = |i_{\text{cap1}}| / |i_a| = 1/2$$

$$\cos \theta = |i_{\text{cap1}}| / |i_c| = 1/2$$

$$|i_c| = 2 |i_{\text{cap1}}| \quad (8.5)$$

$$|i_{\text{carga}}| = \sqrt{3} |i_{\text{cap1}}| \quad (8.6)$$

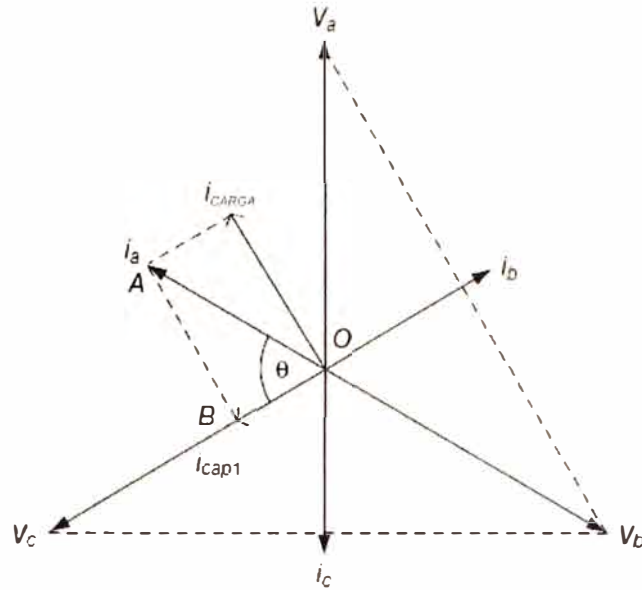


Fig. 8.3: Diagrama vectorial de la "Conexión C-2C"

Es decir, con el fin de obtener un funcionamiento equilibrado del motor trifásico, el condensador C_1 se debe seleccionar de tal manera que se cumpla la ecuación (8.6) y también de la ecuación (8.5) entonces el condensador C_2 debe ser igual a $2C_1$.

Cuando un generador de inducción se utiliza de esta manera, se debe tomar especial atención sobre la conexión del condensador C_2 . Si el condensador C_2 está conectado entre las fases a y c en lugar de c y b como se muestra en la Fig. 8.4, entonces el diagrama fasorial resultante se muestra en la Fig. 8.5.

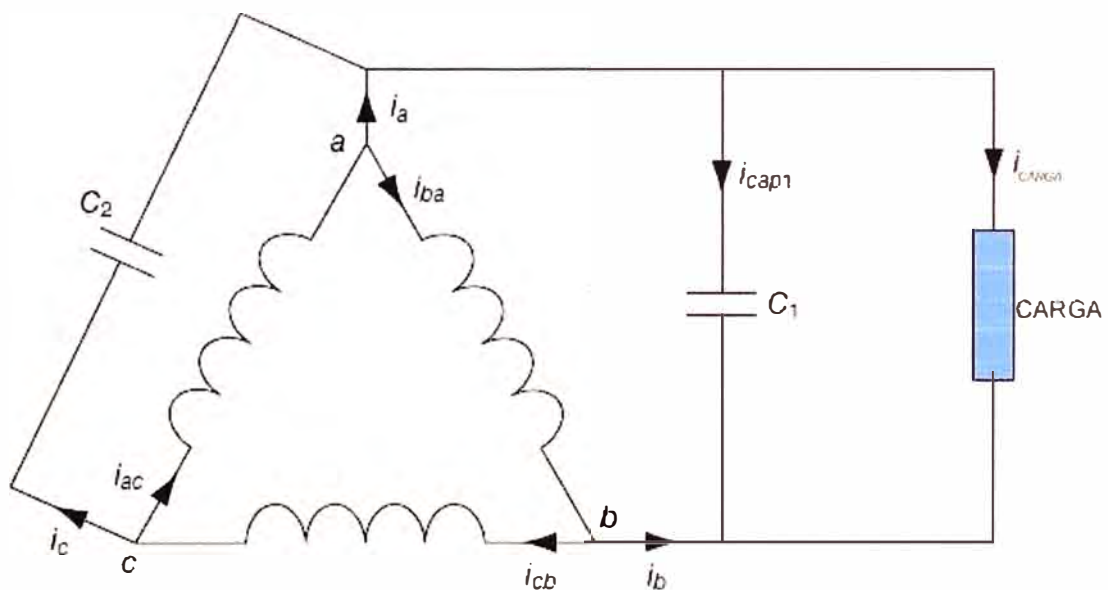


Fig. 8.4: "Conexión C-2C" errónea

En este caso, el generador se ejecuta como un sistema desequilibrado. Se puede observar que la corriente a través de uno de los devanados del generador de inducción se convierte en doble de la corriente en los otros dos devanados. Bajo esta condición, este devanado del generador se sobrecalienta. Por lo tanto, es importante una la correcta conexión del condensador C_2 .

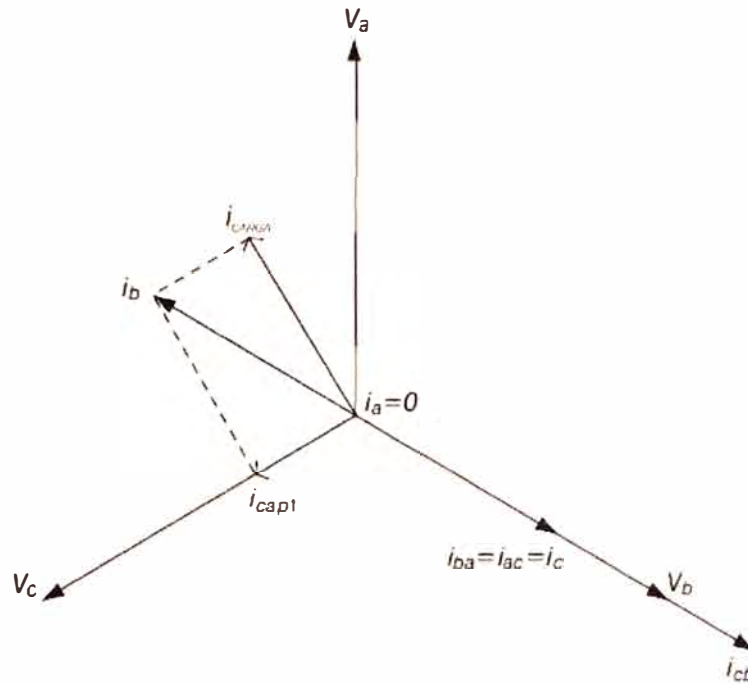


Fig. 8.5: Diagrama fasorial de "Conexión C-2C" errónea

CAPÍTULO IX

PROTECCIÓN DEL GENERADOR

9.1 Sobrecarga

Siempre que la energía eléctrica del generador sea mayor o igual a la máxima energía eléctrica de la turbina del generador, se produce una sobrecarga en los devanados del generador, debido a la excesiva carga en las fases, lo que no debería darse. Por la sobrecarga se da un colapso parcial de la excitación, por que se llega al límite de corriente permitido en el devanado. Sin embargo, con un sistema trifásico una sobrecarga severa en una fase podría causar que la fase se quemara. Ante esto se debe utilizar un **MCB (Miniature Circuit Breaker)** para evitar esto. Se puede utilizar un MCB de un valor de 1.5 veces la potencia nominal a plena carga del generador, ya que el rendimiento de la máquina ha sido reducido para permitir un cierto desequilibrio de la carga. Si se tienen como cargas motores trifásicos entonces se debe utilizar un MCB tripolar para prevenir una falla operativa en una fase del motor.

Si la calificación de generador es inferior a la máxima potencia de energía eléctrica de la turbina-generador, la salida del generador debe estar equipada con MCBs para evitar daños por sobrecarga. Tenga en cuenta que, independientemente de si se utiliza un sistema de una red trifásica o monofásica "C-2C " la Potencia máxima del generador es de 80% de la potencia del motor.

9.2 Subcarga

Un Generador de Inducción está en mayor riesgo debido a pérdida de carga que de sobrecarga. La razón de esto es que, con poca carga o sin carga, el generador se acelera y por lo tanto, la frecuencia y la tensión irán en aumento. Ambos factores aumentan el flujo de corriente en los condensadores del generador y por lo tanto la corriente de devanados se incrementará, por lo general a un nivel que excede a su valor nominal. Para proteger contra los daños a los condensadores y los bobinados, se deben instalar MCBs en serie con los condensadores con el fin de abrirse en un exceso de velocidad del generador. Tal disposición se muestra en la Fig. 9.1. El valor de apertura del MCB debe estar ligeramente por encima de la corriente máxima del capacitor en condiciones normales de operación. Es preferible desconectar todos los condensadores a la vez. Por lo tanto, debe ser utilizado un MCB tripolar con un sistema trifásico y un MCB bipolar con un sistema "C-2C" monofásico. El MCB bipolar debe ser evaluado según

corriente máxima a través del arreglo "2C" de condensadores. Se puede utilizar MCBs unipolares si no están disponibles los bipolares y tripolares.

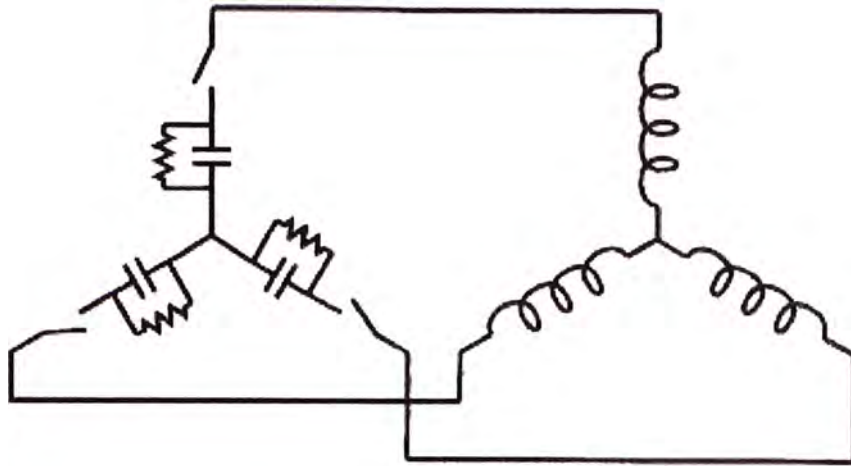


Fig. 9.2 Protección de subcarga por medio de MCBs.

Los MCBs magnéticos son preferibles a los MCBs térmicos, ya que son más precisos y no son afectadas por las variaciones de temperatura. El valor del MCB se debe ser entre 1.2 y 1.5 veces la corriente del Capacitor en condiciones normales. Si el valor de apertura del MCB es mucho más grande que la corriente nominal, entonces hay un peligro de que no se dispare cuando se desconecta la carga. La clasificación usual de corrientes de los MCBs son 2, 4, 6, 10, 16, 20, 25, 32, 40 y 50 amperios. Actualmente algunos MCB pueden ser ajustados manualmente. Si no se puede obtener un MCB con una corriente nominal adecuada entonces debe ser utilizado una combinación. Por ejemplo, si un sistema generador trifásico tiene un condensador de corriente a la frecuencia y la tensión nominal de 10 amperios por fase, el MCB se debe clasificar entre 12 y 15 amperios. Puesto que no hay MCB adecuada dentro de este rango, los condensadores de cada fase se deben dividir en dos grupos iguales y estar protegidos por interruptores automáticos de 6 Amp.

El correcto funcionamiento de los MCBs debe ser revisado mediante la realización de una prueba a una velocidad sin carga una vez instalado el generador. Esto se puede hacer mediante la desconexión de la carga del consumidor y cualquier tipo de "carga balastro", y la apertura de la válvula de la turbina en su totalidad. La potencia de salida de la turbina se disipa en el generador que girara. Si el MCB no actúa dentro de los diez minutos y estos deben ser reemplazados con MCB de una corriente más baja o una mayor sensibilidad. Para sobrecorrientes pequeñas los MCBs pueden tardar varios minutos en accionar.

Los pequeños sistemas de generación tienden a tener la "tensión sin carga" muy baja, porque, como se muestra en la Tabla 3.1, la Máquina de Inducción es menos eficaz y por

lo tanto se disipa la potencia de la turbina a una tensión más baja. La “tensión sin carga” es generalmente dos veces la tensión nominal, aunque para pequeños generadores pueden ser tan bajos como 360 V y para los grandes generadores de hasta 600 V.

Si el funcionamiento de la turbina a una “velocidad sin carga” no hace a la corriente de excitación superior a la corriente nominal del generador entonces los MCB no son necesarios, siempre que el voltaje del condensador no sea superado. Esto sólo es posible para las turbinas con una eficiencia que disminuye rápidamente con el exceso de velocidad.

La pequeña capacitancia que usa el Controlador de Generador de Inducción puede que esta sea suficiente para provocar la excitación, incluso una vez que los condensadores principales han sido desconectados por el MCB. Esto puede darse, ya que la corriente de excitación en estas condiciones es muy por debajo de la corriente nominal del generador. Normalmente, cuando la turbina esta inoperativa, los condensadores se descargan en los devanados del generador. Sin embargo, si los condensadores se desconectan por el MCB se mantendrán cargadas y si se tocan podría causar una descarga eléctrica. Las resistencias se muestran en la Fig. 9.2 se incorporan a la seguridad eléctrica, ya que se asegurará de que los condensadores se descargan cuando la turbina está inoperativa. En aras de una alta fiabilidad, asegúrese de que en condiciones normales la potencia disipada en las resistencias de descarga es inferior al 25% que su potencia nominal disipada.

9.3 Sobre velocidad

Las Máquinas de Inducción estándar pueden soportar exceso de velocidad considerable, debido a sus rotores sólidos. Es normalmente bastante aceptable el doble de la velocidad nominal, aunque en máquinas de dos polos y máquinas de gran tamaño se debe obtener el asesoramiento del fabricante. La mayoría de los sistemas micro-hidroelectricos usan generadores de cuatro polos, con las turbinas con una “velocidad sin carga” inferior al doble de la velocidad nominal, y por lo tanto, el Generador de Inducción no necesita de protección de sobrevelocidad.

CAPÍTULO X

SISTEMAS DE CARGA FIJA Y VARIABLE

10.1 Sistemas de Carga Fija

Los sistemas más simples de Generador de Inducción tienen una turbina de potencia salida constante y una carga constante. No hay forma de controlar la carga si se requiere y por lo tanto, el costo y la complejidad del sistema se mantiene al mínimo.

El sistema es operado para que si hubiese una sobrevelocidad en la turbina se debe desconectar la carga eléctrica. Si la potencia de salida de la turbina se incrementa hasta incrementarse hasta un voltaje específico. Un interruptor de sobretensión se debe utilizar para evitar que la carga se dañe en caso que parte de la carga eléctrica se desconecte. El diseño de un interruptor adecuado se menciona en el Anexo D.

Un Sistema de Carga Fija tiene una serie de desventajas. Estas son las siguientes:

- a) A menudo es difícil asegurar una carga eléctrica constante. Por ejemplo, en un sistema Micro Hidroeléctrico de un pueblo se podría suponer que una carga que consta solo de las bombillas de luz, sin interruptores individuales, representa una carga fija ideal. La experiencia demuestra que esto no es siempre el caso, ya que los habitantes pueden apagar las bombillas si se deciden ir a la cama temprano.
- b) Las interrupciones del sistema debido a las sobretensiones puede ser muy incómodo, especialmente si el generador está lejos del centro de carga. Como una opción se puede establecer la tensión normal de funcionamiento en un nivel bajo para reducir los riesgos de interrupciones. Esto se traduce en un funcionamiento ineficiente de algunos electrodomésticos, especialmente en bombillas de luz.
- c) Pueden resultar interrupciones frecuentes en el Sistema cuando el interruptor de sobretensión es desconectado por los usuarios.
- d) Se deben evitar cargas conmutables o variables. Si esto ocurriera sólo tendría que ser en una pequeña proporción de la carga total. Por ejemplo, un refrigerador por lo general se puede utilizar en un sistema donde hay una gran carga fija.
- e) En general, el uso menos productivo de la potencia disponible

Para maximizar el uso de los sistemas de carga fija, se puede instalar conmutadores que permiten elegir entre dos o más aparatos de aproximadamente la misma potencia. Sin

embargo, un sistema con un interruptor de sobretensión y conmutadores es menos versátil que un sistema con un controlador de carga y puede ser igual de caro.

10.2 Sistemas de Carga Variable

Por un pequeño aumento en los costos del sistema en general, se puede utilizar un controlador electrónico con el sistema de generación para permitir pueda haber grandes cambios en la carga de los consumidores. Esto supera las desventajas de los Sistemas de Carga Fija que se enumeran en la sección anterior

El voltaje generado y la frecuencia son controladas por el mantenimiento de una carga casi constante en la turbina, como se muestra en la Fig. 10.1. El controlador compensa las variaciones de la carga principal de forma automática, con la variación de la cantidad de potencia disipada en una carga resistiva, generalmente conocido como la "Carga Balastro", con el fin de mantener la carga total constante.

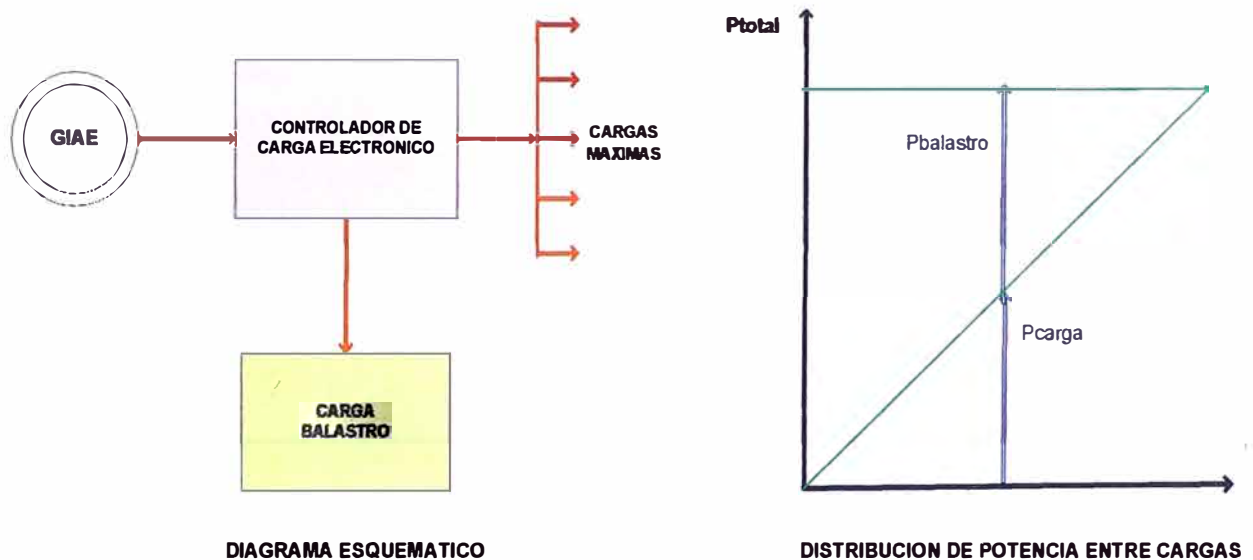


Fig. 10.1 Principios básicos del control electrónico de carga

Los primeros Controladores Electrónicos de Carga fueron diseñados para su uso con Generadores Síncronos, censan y regular la frecuencia generada. No necesitan controladores de tensión porque los Generadores Síncronos tienen incorporados reguladores de voltaje. Sin un controlador de frecuencia electrónico, la frecuencia puede variar según los cambios de carga y sin carga será mucho más alta que la frecuencia nominal

Los requisitos de control del Generador de Inducción son diferentes a las de un Generador Síncrono, ya que, sin ningún tipo de control electrónico, tanto el voltaje como la frecuencia varían cuando se cambia la carga. Por esta razón, los sistemas de control contienen un controlador de voltaje y un controlador de frecuencia. El Controlador de Tensión controla la excitación, variando la cantidad de capacitancia conectada y el controlador de frecuencia varía la carga resistiva, al igual que los controladores de

Generadores Síncronos. Estos sistemas son caros y complejos, y por lo tanto, no se han utilizado ampliamente.

Un tipo de **Controlador de Generador de Inducción (IGC)** desarrollado, prescinde de la necesidad de un controlador de voltaje por separado mediante el uso ventajosamente de las características del generador y la turbina. Este controlador es muy similar a los controladores electrónicos que se utilizan con Generadores Síncronos, excepto que la tensión es detectada y controlada directamente en lugar de la frecuencia. Las características del generador son tales que este controlador también produce una buena regulación de frecuencia.

Cuando una carga resistiva está conectada al generador la tensión cae. El IGC censa la caída de tensión y compensa por la disminución de la potencia disipada con la "Carga Balastro". Un pequeño cambio transitorio en la frecuencia se producirá antes del regreso de la frecuencia y la tensión a sus valores originales. La carga total en el generador será la misma que antes del cambio de carga.

Si una carga inductiva es conectada a la Sistema la tensión caerá, y por lo tanto, el controlador reducirá la potencia disipada en la Carga Balastro. Esta reducción en la carga resistiva causa la aceleración de la turbina y el aumento de la frecuencia generada. El aumento de la frecuencia reduce la corriente magnetizante requerida por el generador e incrementa la corriente del condensador. Como resultado, la tensión aumentará y volverá a su valor inicial. Así la frecuencia se ha incrementado tanto como para compensar la carga inductiva. Como resulta con las modernas Máquinas de Inducción del alto nivel de saturación, la frecuencia incrementada es pequeña con cargas inductivas, por lo general menos del 10% para un factor de potencia de la carga global de 0.9. Teniendo en cuenta que la Carga Balastro es resistiva, no es difícil mantener un factor de carga total de energía superior a 0.9. La regulación de la frecuencia mejora y se puede obtener una corrección de factor de potencia significativa de las cargas inductivas. Una importante carga inductiva puede ser por ejemplo un gran número de lámparas fluorescentes en el sistema.

10.3 Opciones de Controlador usando "Carga Balastro"

Hay una serie de opciones para variar la "Carga de Balastro": el Control de ángulo de Fase, Carga Binaria Ponderada y PWM (Pulse Width Modulation).

10.3.1 Control de ángulo de Fase

Puede ser producido al retrasar el disparo de un triac o tiristor en una carga resistiva variable, como se muestra en la Fig. 10.2. Cada medio ciclo, el encendido de la "Carga de Balastro" se retrasa en " α " grados el ángulo de fase que puede tener un valor de entre 0° y 180°

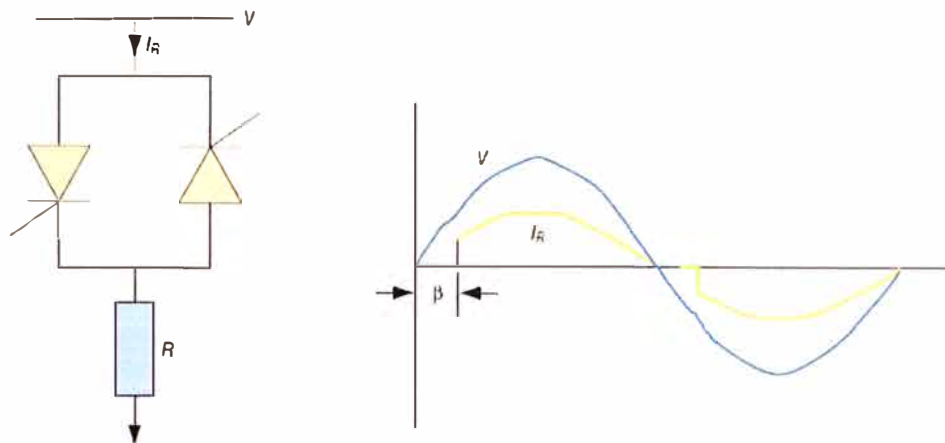


Fig. 10.2 Forma de onda de Controlador de ángulo de fase de una Carga Balastro

Este enfoque de control se utiliza a menudo con Generadores Síncronos, pero es menos apropiado para los Generadores de Inducción por el factor de potencia variable de retraso producido por la corriente del Balastro atrasado de la tensión. El efecto de esto con un Generador de Inducción es aumentar la frecuencia por la variación producida, como se explica en el Capítulo VII. Otra desventaja es la distorsión de forma de onda que produce un calentamiento mayor en los devanados del generador. Para compensar la distorsión de la forma de onda, el generador debe ser de gran tamaño

10.3.2 Control de Carga Binaria Ponderada

En este caso la carga resistiva variable es producida por el cambio en una combinación de resistencias fijas. Los valores de estas resistencias fijas son binarios ponderados a fin de lograr el máximo número de fases de carga con el mínimo número de resistencias y switches. En una sola fase, un arreglo de tres resistencias se muestra en la Fig. 10.3, junto con los siete valores de la carga de Balastro que se puede lograr.

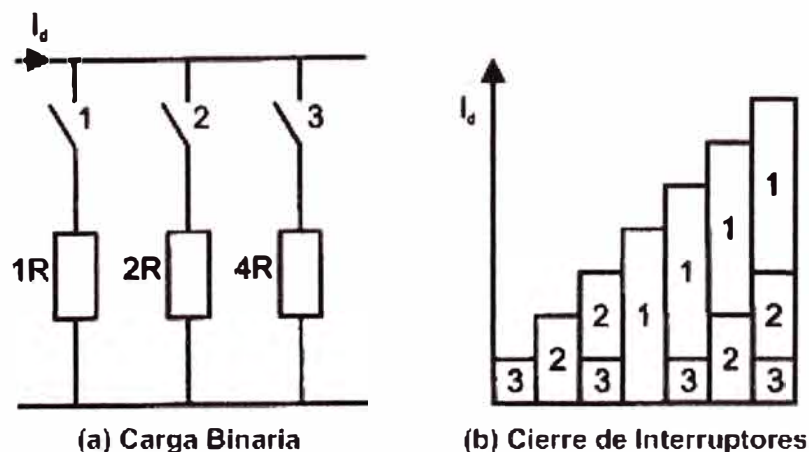


Fig. 10.3. Controlador de cargas binarias y la gama actual de Balastro

Las principales ventajas de este enfoque es que la distorsión de forma de onda no se produce y la Carga de Balastro es resistiva. Sin embargo, tiene una serie de desventajas. La principal desventaja es la complejidad resultante de requerir un número de Cargas de Balastro, cada una, con sus conexiones, cables y dispositivos de conmutación.

Los Balastos deben ser de valor de la resistencia exacta, que puede resultar difícil, con elementos de calefacción disponibles, especialmente para potencias pequeñas. Además, debido a que la Carga de Balastro sólo varía en niveles fijos, la tensión sólo es controlada en un rango.

Para un funcionamiento estabilizado en condiciones de flujo parcial debe ser utilizado de un gran rango, lo que da una pobre la regulación de voltaje.

10.3.3 Control PWM - Pulse Width Modulation

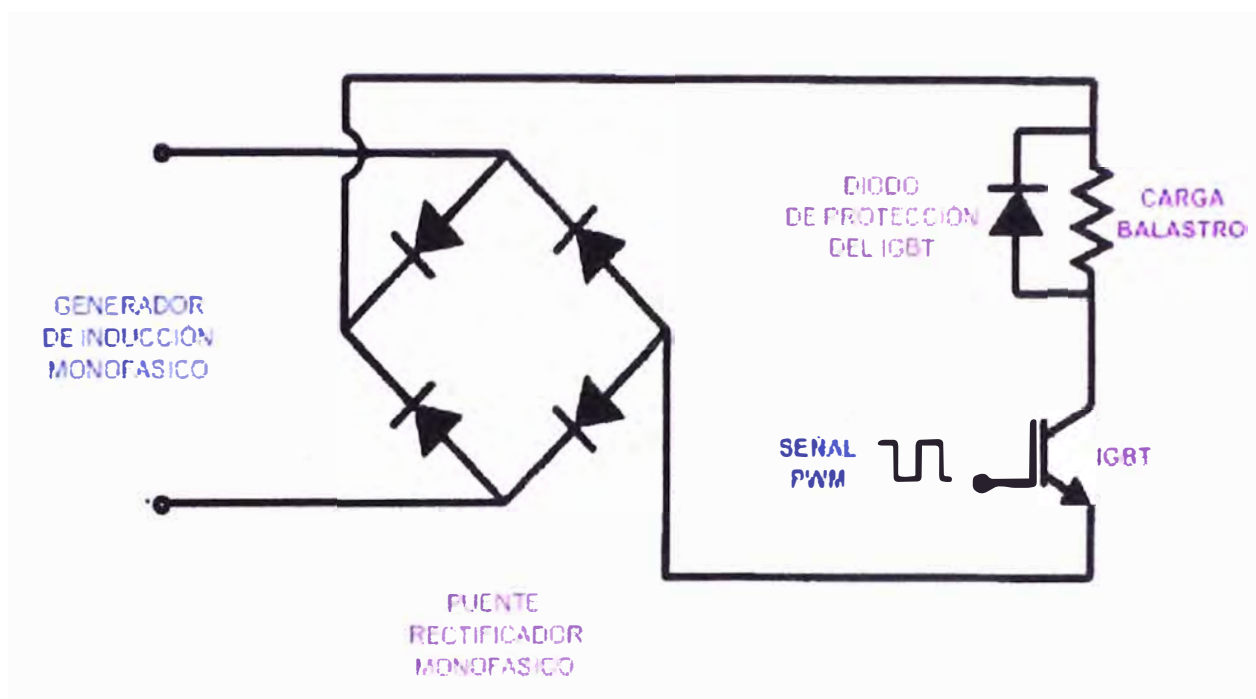


Fig.10.4 Circuito básico de conexión de un Controlador monofásico PWM usando un IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

El controlador PWM, en su forma más simple, sólo requiere una Carga de Balastro única, como se muestra en la Fig. 10.4. La Carga Balastro está conectada a través de la salida rectificadora del generador y se activa y desactiva por medio de un IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).

El controlador varía en pulso (Pulse) y ancho (Width), conocida como la relación PWM, controla la disipación de potencia en la Carga de Balastro. El pulso puede variar en todo el rango de 0% a 100%. La Fig. 10.5 muestra las formas de onda de tensión con un 60% respecto al tiempo.

Las ventajas de este tipo de controlador son una buena regulación de voltaje, una simple conexión de la Carga Balastro y una Carga Balastro eficaz resistiva.

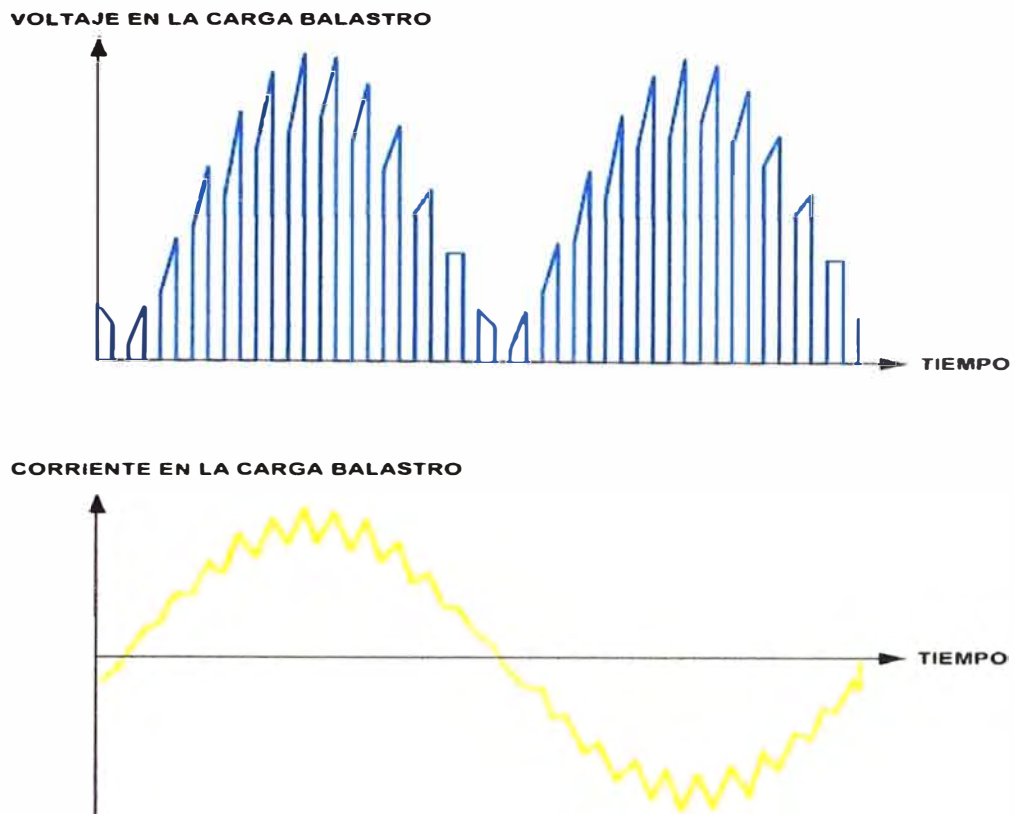


Fig. 10.5: Ondas típicas PWM monofásico con el 50% de ciclo de trabajo (Duty Cycle)
 La versión de trifásica utiliza un rectificador puente trifásico, como se muestra en la Fig. 10.6. Su desventaja es que no hay equilibrio en las fases y hay un aumento de la distorsión de forma de onda. Las ventajas son que es tan simple el diseño como el monofásico y utiliza la casi la misma placa de circuito.

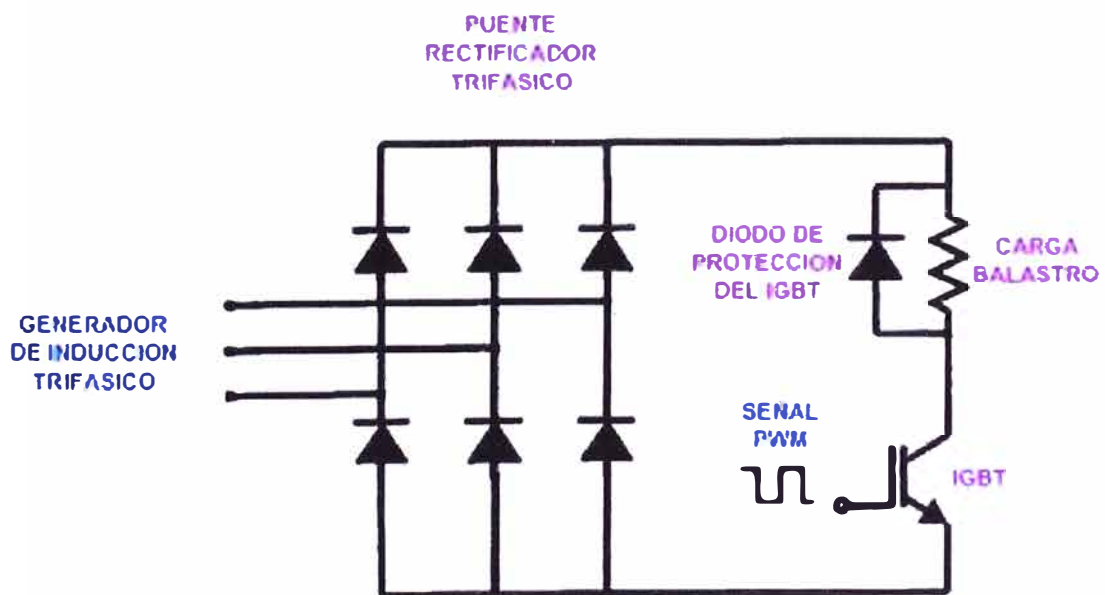


Fig. 10.6: Control PWM trifásico

Muchos de estos IGC se pueden fabricar sin ningún problema en países en desarrollo.

CAPÍTULO XI

ARRANQUE DE UN MOTOR DE INDUCCION COMO CARGA DE UN GENERADOR DE INDUCCIÓN

El arranque de un Motor puede ser un problema considerable para los Generadores de Inducción. Las razones para esto son que la corriente de arranque de un Motor de Inducción es generalmente de 6 veces la corriente nominal y el factor de potencia en el arranque es menor que cuando el motor está en funcionamiento. Para un arranque directo los límites para el motor, son en proporción de la capacidad del nominal del generador, normalmente puede ser de un 15% para un motor monofásico y un 10% para un motor trifásico. Los motores monofásicos son más fáciles de arrancar, porque su corriente de arranque no es tan alta y su factor de potencia es mejor. Si es demasiado grande el motor a encender, habrá capacitancia insuficiente para corregir el factor de potencia del motor y para excitar al generador.

Estos valores son sólo directrices, ya que mucho depende de la carga que el motor este manejando. Las cargas que requieran un alto par de arranque, tales como compresores, son mucho más difíciles para arrancar que las cargas de bajo torque de arranque, tales como ventiladores. Por ejemplo, un ventilador de 1.1 kW monofásico puede ser arrancado por una Máquina de Inducción 4 kW de "Conexion C-2C" y generando 2 kW. Tambien con una Máquina de Inducción de 1.1kW de "Conexion C-2C" y generando 800 W se puede arrancar un compresor de refrigerador de 180 W.

11.1 Técnicas para mejorar el arranque de un motor

Una opción para mejorar el arranque de un motor es tener un generador de gran tamaño, ya que esto proporciona capacidad adicional que le ayudará a corregir el factor de potencia del motor en el arranque. Las desventajas de este enfoque son el aumento de costos y reducción de la eficiencia, especialmente con carga parcial. Mejores opciones son la corrección del factor de potencia en el arranque o para las máquinas trifásicas, el arranque estrella-triángulo.

Corrección del factor de potencia en el arranque consiste en conectar temporalmente condensadores para compensar la corriente inductiva. La corriente de arranque por lo general se puede obtener de las hojas de datos de los fabricantes. Generalmente se le denomina "corriente de rotor bloqueado", y se refiere a la condición de partida cuando el rotor está inicialmente parado. El factor de potencia en el arranque es bajo, por lo general

0.4. Por esto, en el arranque la corriente inductiva es sólo ligeramente menor que la corriente de rotor bloqueado.

Ejemplo 11.1

Los datos del fabricante para un Motor de Inducción Trifásico de 380 V, de 5.5 kW son los siguientes:

Corriente a Plena Carga,	$I_n = 12A$
Corriente de Rotor Bloqueado,	$I_r = 70A$
Factor de Potencia a plena carga,	$pf = 0.89$

Calcular la capacidad necesaria para corregir el factor de potencia totalmente de un motor cuando se opera a plena carga.

La potencia aparente total a plena carga,

$$\Sigma S = \sqrt{3} \times V_{\text{linea}} \times I_n = \sqrt{3} \times 380 \times 12 = 7898 \text{ VA}$$

Por lo tanto, el potencia real,

$$\Sigma P = \Sigma S \cos \varphi = 7898 \times 0.89 = 7029W$$

La potencia reactiva se puede obtener desde el triángulo de potencias:

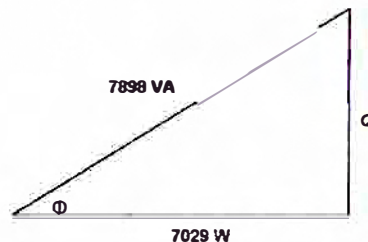


Fig. 11.1: Triangulo de Potencias

$$\Sigma Q = (7898^2 - 7029^2)^{1/2} = 3602 \text{ VAR}$$

$$Q_{\text{fase}} = \Sigma Q / 3 = 3602 / 3 = 1201 \text{ VAR}$$

Normalmente será elegirá un arreglo en triángulo de condensadores, ya que es más barato,

$$V_{\text{fase}} = V_{\text{linea}}$$

$$I_{\text{fase}} = Q_{\text{fase}} / V_{\text{fase}} = 1201 / 380 = 3.16A$$

De la ecuación (5.2), $C = I / 2\pi fV = 3.16 / 2\pi \times 50 \times 380 = 26 \mu F$

Ejemplo 11.2

Para el motor de 5.5 kW que se describe en el Ejemplo 11.1 el factor de potencia del rotor bloqueado es de 0.4. calcular:

(a) La potencia consumida de la red para un arranque directo en línea.

(b) La capacidad adicional necesaria para la corrección de factor de potencia total en el arranque, suponiendo que el motor está compensado en marcha a plena carga.

(a) $\Sigma S = \sqrt{3} \times V_{\text{linea}} \times I_r = \sqrt{3} \times 380 \times 70 = 46.07 \text{ kVA}$

$$\Sigma P = \Sigma S \cos \varphi = 46.07 \times 0.4 = 18.4 \text{ kW}$$

$$(b) \quad \Sigma Q = (\Sigma S^2 - \Sigma P^2) ^{1/2} = (46.07^2 - 18.43^2) ^{1/2} = 42.2 \text{ kVAR}$$

$$Q_{\text{fase}} = \Sigma Q / 3 = 42.2 / 3 = 14.1 \text{ kVAR}$$

$$V_{\text{fase}} = V_{\text{linea}}$$

$$I_{\text{fase}} = Q_{\text{fase}} / V_{\text{fase}} = 14,100 / 380 = 37 \text{ A}$$

De la ecuación (5.2), $C = I / 2\pi f V = 37 / 2\pi \times 50 \times 380 = 310 \mu\text{F}$

Restando el 27 μF conectado para corrección del factor de potencia a plena carga, la capacidad adicional requerida será

$$C = 310 - 27 = 283 \mu\text{F}$$

La capacidad adicional requerida en el arranque es más de diez veces la capacidad necesaria en movimiento,

La capacidad necesaria para corregir el factor de potencia en el arranque es mucho mayor que el requerido en movimiento, como se muestra en los Ejemplos 11.1 y 11.2. Si se utilizan condensadores estándar, entonces el costo de la corrección del factor de potencia será muy alto. Sin embargo, como los condensadores sólo necesitan ser conectados por unos segundos, mientras que el motor aumenta su velocidad, se puede utilizar condensadores de valor nominal de funcionamiento intermitente. Los Condensadores de Arranque "Motor Start" son la mejor opción ya que están diseñados para funcionar durante el corto tiempo necesario para el arranque del motor. Su costo por micro-Faradio es normalmente entre el 10% y el 20% del costo de los Condensadores Permanentes "Motor Run"

Para la conmutación de los condensadores es mejor utilizar relés de estado sólido (SSR-Solid State Relay) del tipo con función desconexión a corriente cero para reducir oscilaciones de tensión. Los Contactores no son recomendables debido al arco que se produce en la desconexión rápida. Un circuito de control para un sistema monofásico se da en el Anexo D. Con los sistemas trifásicos el arranque estrella-triángulo es la opción más barata y más simple, siempre y cuando el motor sea de 415 V en conexión triángulo y la carga sea tal que el par de arranque motor, 1/3 del par directo de salida en línea

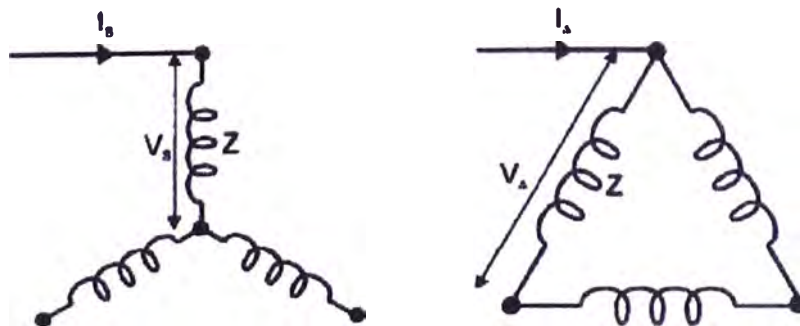


Fig. 11.1 Condiciones de arranque estrella y triángulo

Como se sabe el arranque estrella-triángulo del motor se conecta inicialmente en estrella y una vez alcanzada la velocidad requerida se reconecta en triángulo. Esto se hace de

forma manual o automática, dependiendo del tipo de arranque usado. Las dos configuraciones de bobinado se muestran en la Fig. 11.1.

En el arranque, la impedancia por fase, Z , es la misma si el motor está conectado en estrella o triángulo. Por lo tanto,

$$V_S = I_S \cdot Z, \quad V_{\Delta} = \sqrt{3} V_S$$

$$I_{\Delta} = \sqrt{3} (V_{\Delta} / Z) = \sqrt{3} (\sqrt{3} V_S) / Z$$

Donde,

$$I_{\Delta} = \sqrt{3} (\sqrt{3} \cdot I_S \cdot Z) / Z = 3 \cdot I_S \quad (11.1)$$

Desde la formación actual se reduce en un factor de tres para una conexión en estrella, la potencia activa y la potencia reactiva se reducirán en un factor de tres en el arranque.

El Ejemplo 11.3 muestra que mediante el uso de un arrancador estrella-triángulo la capacidad inicial puede ser reducida por un factor de más de tres. Como resultado de ello, por lo general es posible arrancar motores con un valor de un tercio de la capacidad del generador. Por ejemplo, en un sistema con un Motor de Inducción de 18,5 kW funcionando como un generador, y una potencia de 10 kW, se puede arrancar un motor aserradero de 7,5 kW. Para lograr esto se puede utilizar un arranque estrella-triángulo y el factor de potencia del motor será corregido en la condición estable.

Ejemplo 11.3

Repitiendo el Ejemplo 11.2 (b) para arranque estrella-triángulo.

La potencia reactiva se reduce en un factor de tres. Por lo tanto,

$$I_{fase} = Q_{fase} / V_{fase} = (14070 / 3) / 380 = 12.3 \text{ A}$$

De la Ecuación (5.2), $C = I / 2\pi fV$

$$C = 12.3 / 2\pi \times 50 \times 380 = 103 \mu\text{F}$$

Restando el 27 μF conectados para la corrección de factor de potencia a plena carga, la capacidad adicional necesaria es,

$$C = 103 - 27 = 76 \mu\text{F}$$

Esto es sólo el 27% de la capacidad adicional necesaria para el caso directo a la línea.

CAPÍTULO XII

SISTEMAS REGULADORES DE TENSIÓN PARA GENERADORES DE INDUCCIÓN AUTOEXITADOS CON CARGA TIPO INDUSTRIAL

Los sistemas de Regulación de Tensión presentados a continuación nos muestra que con el uso de los nuevos dispositivos electrónicos la utilización del Generador de Inducción Auto Excitado puede abarcar mucho mas de lo ya descrito.

Esto quiere decir que se puede superar las limitaciones que normalmente se tenía cuando se trataba de alimentar carga no lineal.

12.1 Sistema Regulador de Tensión basado en un compensador estático de Potencia Reactiva

(SVC - Static Var Compensator, TCR Thyristor-based phase-Controlled Reactor y FC Fixed Capacitor):

Es un Sistema con la reactancia Shunt (paralelo) variable, esto resulta debido a un Control de Angulo de Fase por Dispositivos de Conmutación (Switching) que es mostrada en la Fig.12.1. La corriente en la derivación shunt es controlada para obtener la tensión nominal a diferentes cargas.

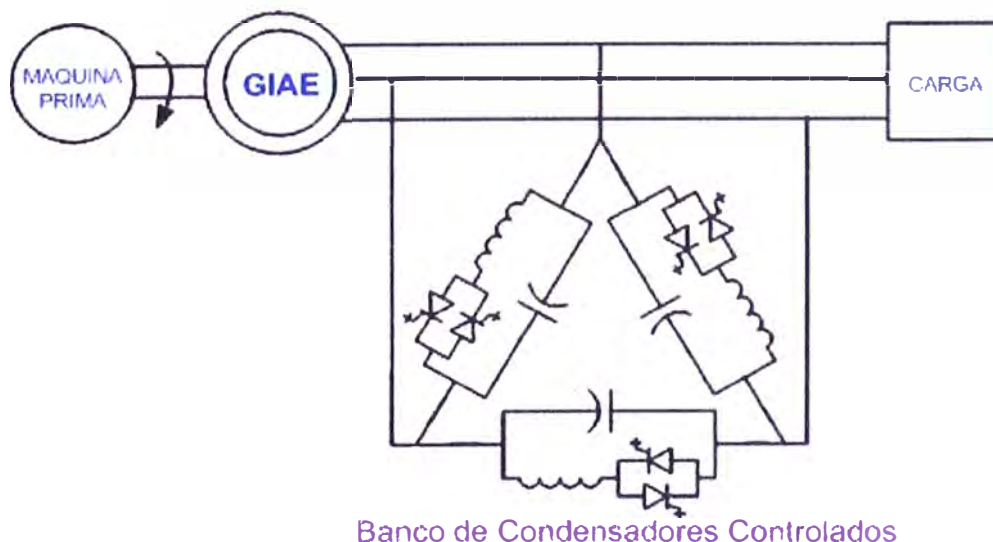


Fig. 12.1: Regulador de Tensión basados en TCR-FC

12.2 Sistema Regulador de Tensión empleando un Compensador estático de Potencia Reactiva (SVC) Mejorado:

El Compensador estático de Potencia Reactiva SVC se compone de un banco de condensadores fijo (FC) conectado en paralelo con un banco inductancias activadas por

tiristores basado en control por ángulo de fase (TCR - Thyristor-based phase-Controlled Reactor) y otro banco de condensadores basado en la conmutación por tiristores (TSC - Thyristor-based Switched Capacitor). El ángulo de disparo es controlado del TCR, y el TSC conmutándose adecuadamente mediante un control de realimentación de lazo cerrado. El error entre el voltaje censado (V_a) y el voltaje de referencia (V_{ref}) se procesa en un Controlador Proporcional-Integral (PI), y la salida del controlador de voltaje se usa para generar las señales de control para controlar el TCR y el TSC.

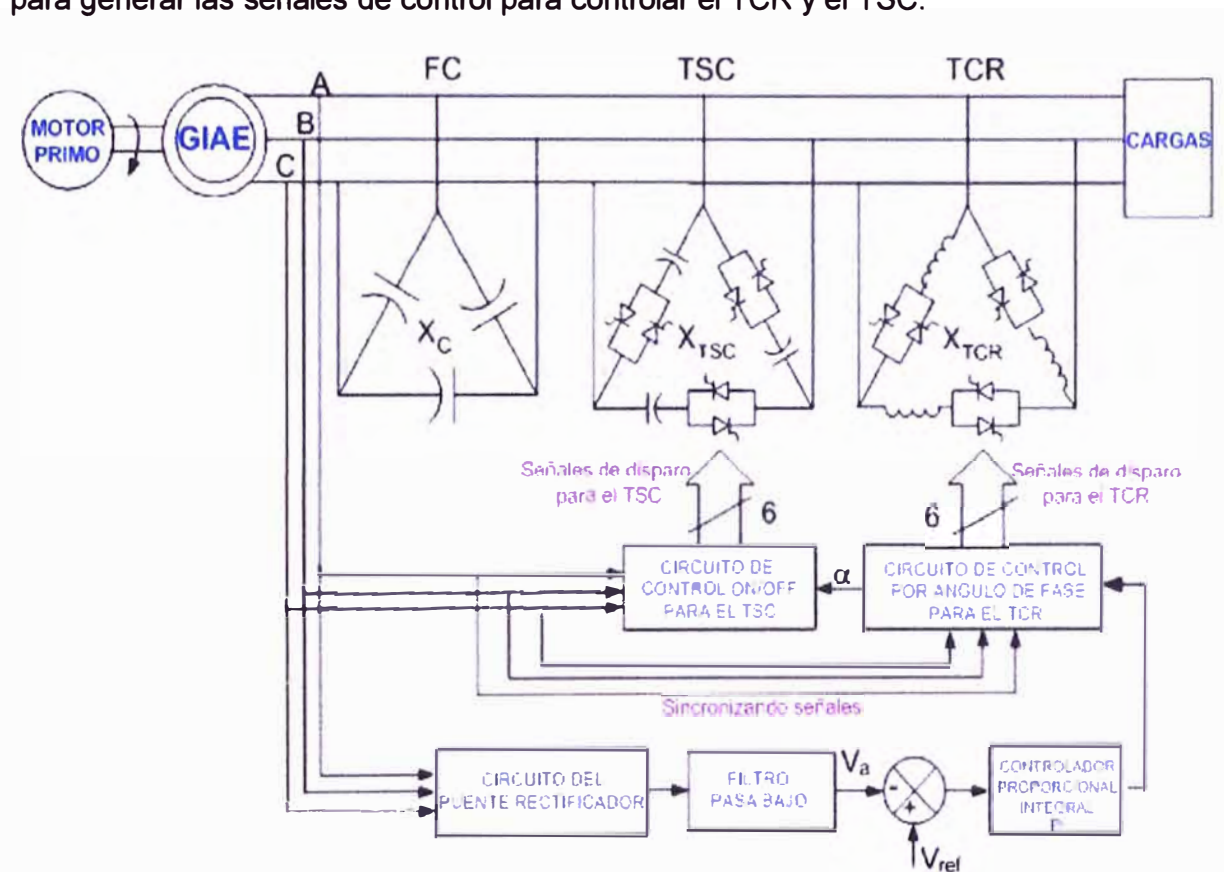


Fig. 12.2: Regulador de Tensión basados en TCR-FC

12.3 Sistema de Control de Tensión basado en SVC (Static Var Compensator) y MERS (Magnetic Energy Recovery Switch):

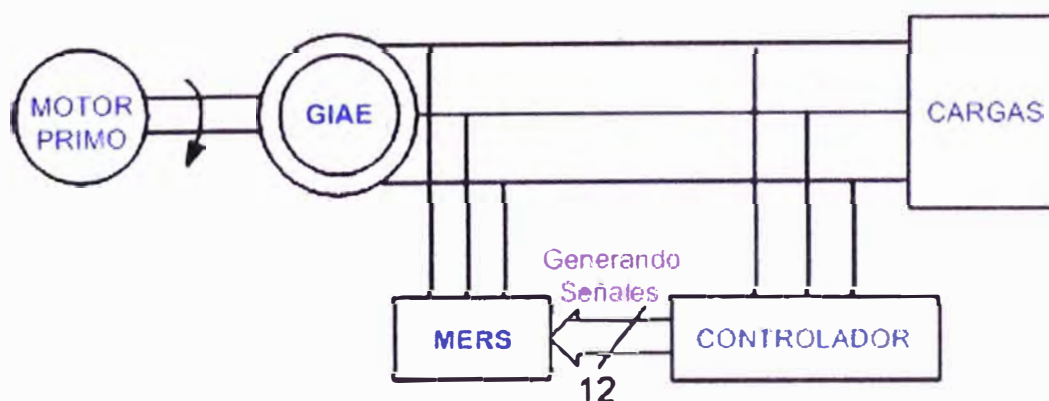


Fig. 12.3: Regulador de Tensión basado en SVC-MERS

El Sistema de Control de Tensión basado en compensación estática de VARs y en la recuperación de energía magnética: se basa en un interruptor de recuperación de energía magnética para el Generador de Inducción Auto-Excitado (SEIG) se muestra en la Fig.12.3. Los Sistema MERS-SVC pueden controlar la tensión en bornes del Generador con la ventaja de la baja frecuencia de conmutación, bajas pérdidas de conmutación, y control de alta velocidad.

Los Sistemas SVC-MERS consisten de conmutadores bidireccionales hechos con IGBT, un condensador DC y un inductor, de este modo funciona como un compensador de potencia reactiva variable.

Los estados de operación del SVC-MERS durante la carga, descarga, camino paralelo y su circuito equivalente, se muestran en la Fig.12.4, respectivamente.

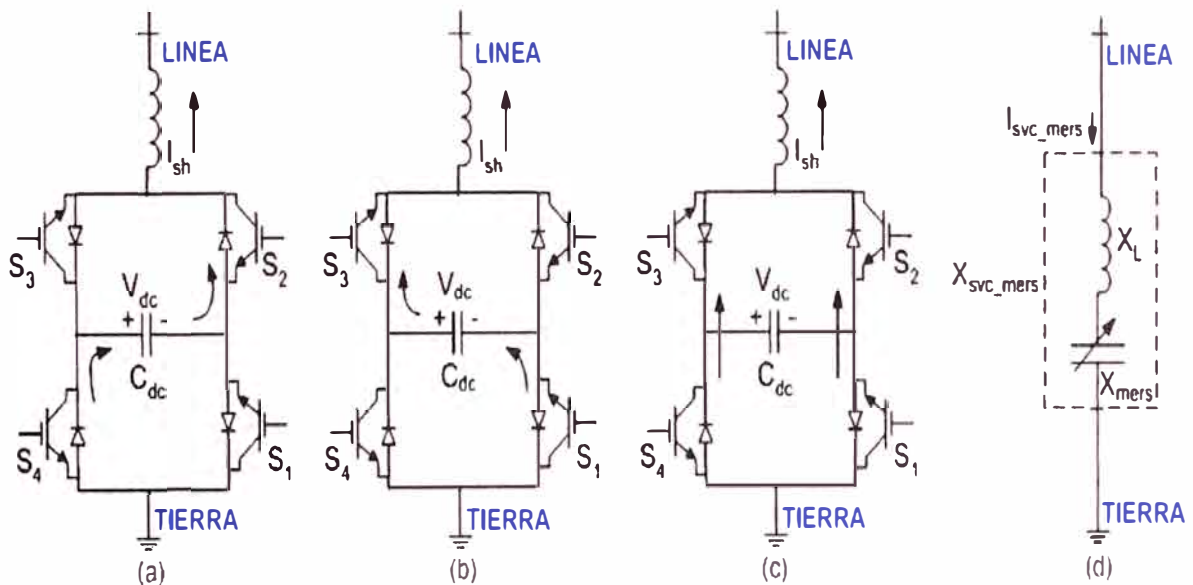


Fig. 12.4: Estados operativos del SVC-MERS

(a) Carga, (b) Descarga, (c) Paralelo, (d) Circuito Equivalente

En la semionda positiva, los IGBTs (S2 y/o S4) están conduciendo, y en la otra semionda, los IGBTs (S1 y/o S3) también conducen. Cada par de IGBTs conmutado, activándose y desactivándose una vez por ciclo. En la semionda negativa, cuando la corriente I_{sh} se incrementa, la carga del condensador está en la dirección de la flecha. Durante la activación de S1 y S3, el condensador se descarga con la misma dirección de la corriente.

Cuando el voltaje del condensador es cero, la corriente fluye en un camino paralelo creado por la conducción de los IGBTs. En la siguiente semionda, la polaridad de carga del condensador sigue siendo la misma, sin embargo, la dirección de I_{sh} corriente se invierte. La corriente de variación de la compensación se obtiene mediante el control de la corriente que fluye en el condensador DC.

12.4 Sistema de Control de Tensión basado en VSC (Voltage-Source Converter) usando STATCOM (STATIC COMPENSATOR):

El Sistema de regulación de tensión se basa en el empleo del compensador síncrono estático STATCOM, es decir, en un convertidor Fuente de Tensión (VSC) controlado corriente (Current Controlled) (CC-VSC), como se muestra en la Fig.12.5. El VSC comprende los IGBT (I1-I6) con diodos anti paralelos (D1-D6). En este sistema una corriente reactiva en adelanto o atraso 90 grados respecto de la tensión inyectada por el VSC para el control de la tensión del generador de inducción.

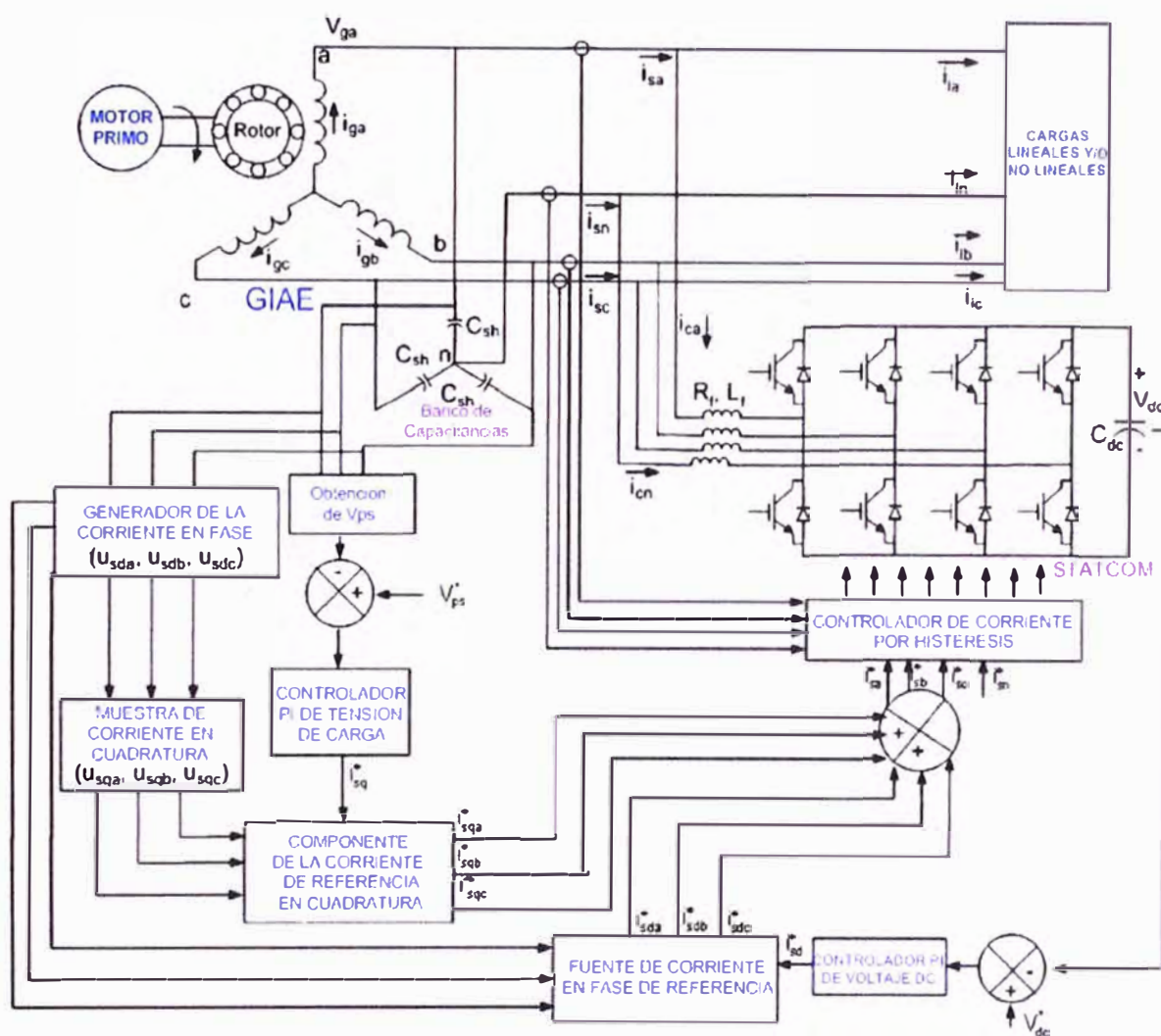


Fig. 12.5: Regulador de Tensión basado en STATCOM

Este circuito muestra ser el apropiado cuando la carga alimentada por el generador de inducción es de tipo no lineal. Las principales ventajas del VSC basado en STATCOM son su respuesta rápida y capacidad de operar a frecuencia de conmutación alta. El esquema de control presenta dos lazos de control para generar la corriente de referencia para el VSC. Un regulador de tipo PI es empleado para mantener constante la tensión del condensador conectado en los terminales DC del VSC. Este regulador recibe la diferencia o el error entre el valor de consigna $V_{dc,ref}$ que debe mantenerse constante y el valor real

o medido V_{dc} en el condensador. La señal de salida de este regulador corresponde a la componente activa de la corriente del VSC responsable por la carga o descarga del condensador conectado en los terminales DC del VSC. El otro regulador PI se encarga de reducir el error entre el valor de referencia de tensión del generador de inducción y el valor medido, generando a la salida de este regulador, una señal proporcional a la componente reactiva de la corriente del VSC responsable por el control de la tensión del generador de inducción. Estas dos componentes son empleadas para generar la corriente total de referencia del VSC como muestra la figura.

12.5 Sistema de Control de Tensión basado en un Transformador de Tensión constante (CVT- Constant Voltage Transformador):

En este sistema, el CVT se conecta entre el GIAE y la carga. La capacitancia Shunt se selecciona para proporcionar la tensión nominal a carga completa. A la luz de carga, el exceso de reactancia (VARs) es absorbido por el CVT mientras se opera en la región de profunda saturación. Este sistema de Regulación de Tensión tiene como resultado una regulación de voltaje razonable, pero causa pérdidas adicionales.

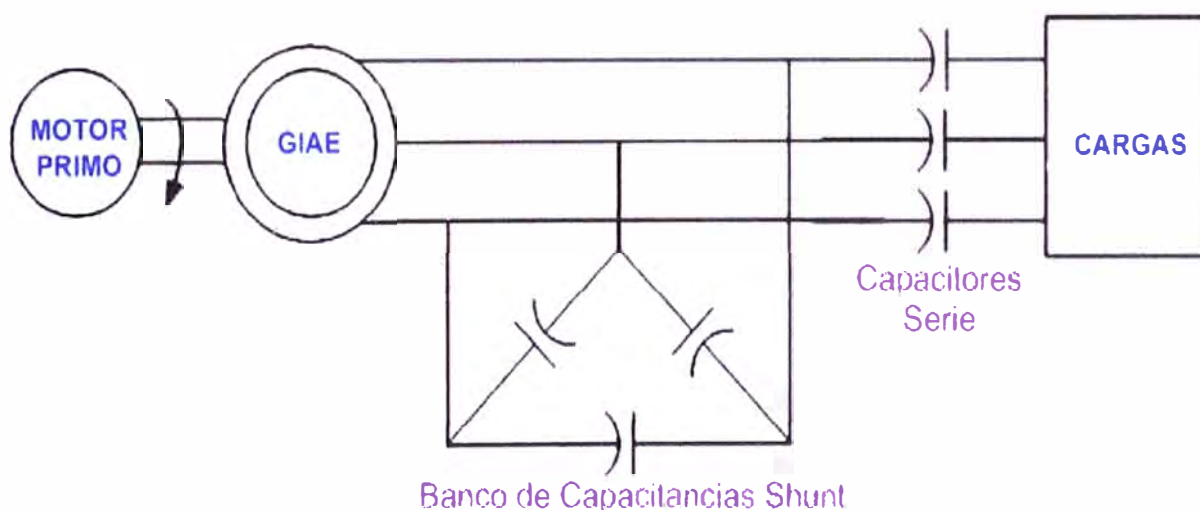
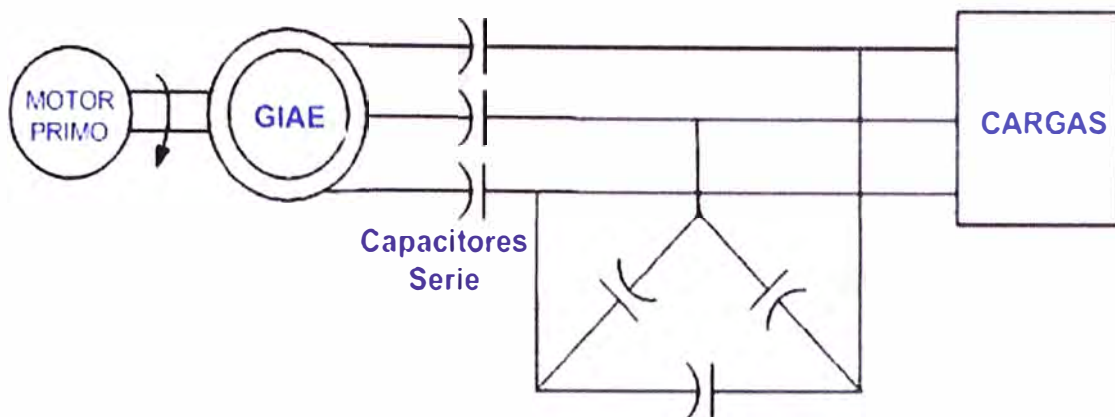


Fig. 12.6: Regulador de Tensión Shunt Corto

12.6 Configuraciones de Generadores de Inducción Auto Excitados con Compensación-Serie:

Se conocen dos configuraciones de GIAEs en Compensación-Serie, GIAE de Shunt corto y un GIAE de Shunt largo, como se muestran en las Figs. 12.6 y 12.7, respectivamente. Con capacitancias en serie y Shunt apropiadas, es posible obtener el perfil de tensión de carga casi plana en ambas configuraciones. Sin embargo, valores más altos de capacitancias Shunt y serie son requeridos para GIAEs de Shunt largo. Estas configuraciones de Sistemas de Regulación de Tensión de GIAEs son simples y rentables, pero causan un comportamiento inestable, con cargas dinámicas (motores de inducción).

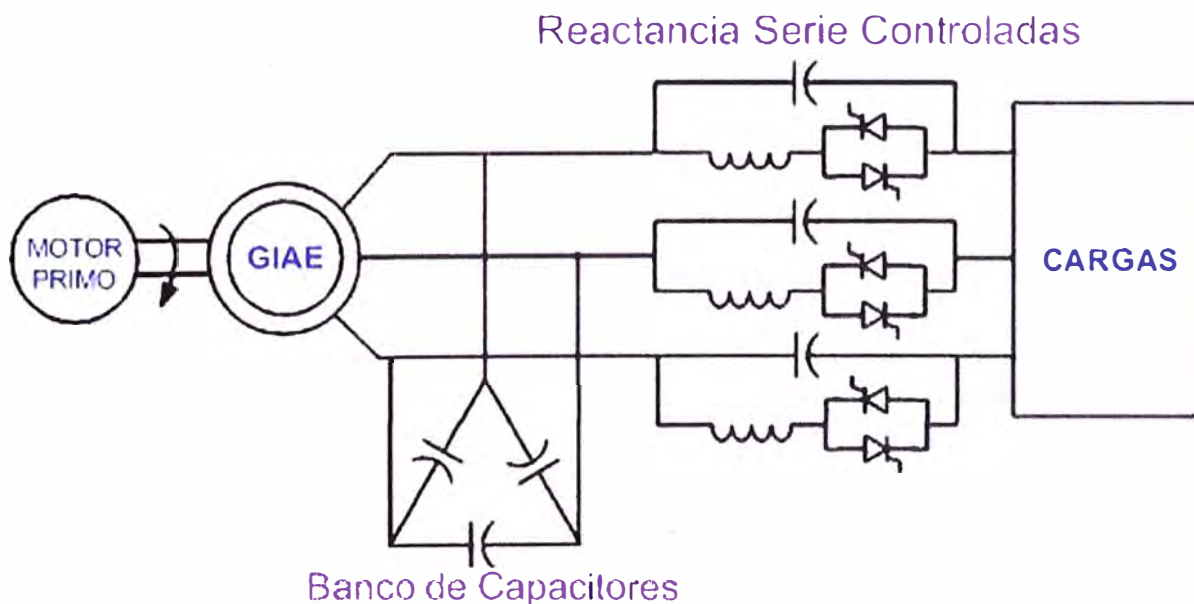


Banco de Capacitores Shunt

Fig. 12.7: Regulador de Tensión Shunt Largo

12.7 Sistema Regulador de Tensión con compensación serie basado en dispositivos de conmutación (TCR-FC):

Este sistema, como se muestra en la Fig. 12.8, introduce una impedancia reactiva variable en serie con la línea. La reactancia serie se compone de un FC (Capacitores Fijos) en paralelo con unas Inductancias controladas por tiristores por Angulo de fase (TCR - Thyristor-based phase-Controlled Reactor). Bajo variación de cargas, la reactancia serie es variada para obtener la tensión final de carga nominal.



Reactancia Serie Controladas

Banco de Capacitores

Fig. 12.8: Regulador de Tensión Shunt Largo

CAPÍTULO XIII

PUESTA EN MARCHA DEL GENERADOR

13.1 Seguridad

El cableado y la puesta a tierra deben llevarse a cabo en las normas vigentes y probarse muy bien. Con la seguridad mecánica, incluyendo la provisión de protecciones adecuadas, se debe comprobar la turbina antes del arranque.

13.2 Frecuencia y Potencia de salida

Cuando el generador se pone en servicio, se regula la potencia de la turbina con el fin de obtener la tensión nominal.

Entonces, mientras se mantiene una tensión constante, se varía la carga entre el vacío y la máxima salida del generador y se mide el valor de la frecuencia generada. Comprobando que el rango de frecuencia sea aceptable (véase el Capítulo VI para más detalle) y si no varía el valor de la Capacitancia de Excitación conectada. Las cargas inductivas que se van a utilizar deben estar conectados con el fin de determinar si el aumento de la frecuencia generada es aceptable.

Compruebe las corrientes del bobinado a carga máxima, para garantizar que el valor nominal de la Máquina de Inducción no sea superada.

Debido a un desequilibrio con relación al arreglo "C-2C" es aceptable que una de las bobinas este sobrecargada, a condición de que los otros dos están con carga baja. Las siguientes condiciones se deben cumplir.

$$I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 \leq 3 \times I_{\text{nominal}}^2 \quad (13.1)$$

I_1, I_2, I_3 son las tres medidas de corrientes de las bobinas.

I_{nominal} es la corriente nominal del bobinado.

Si el valor nominal del generador es inferior a la potencia mínima de la energía eléctrica generada de la turbina, se debe cambiar a un generador más grande, o asegurarse de tener una adecuada protección de sobrecarga, como se explica en el Capítulo IX.

13.3 Rotación según las fases

Si un sistema trifásico se instala deben ser revisados la secuencia de fases para asegurar que correcta rotación de los motores trifásicos conectados como carga.

Si se utiliza un sistema monofásico "Conexión C-2C", es esencial que se utilice la secuencia correcta de fases para evitar que el generador se sobrecaliente como se explica en el Capítulo VIII.

13.4 Prueba Bajo carga

Las pruebas de protección de baja carga deben llevarse a cabo, como se explica en el Capítulo IX.

13.5 Ajuste para una máxima eficiencia

La eficiencia del sistema a veces se puede mejorar mediante el ajuste de la cantidad de capacitancia conectada. El cambio resultante en la velocidad provocará un cambio tanto en la turbina, la eficiencia del generador y en caso de una turbina de reacción, las pérdidas de la tubería de descarga. La frecuencia debe mantenerse dentro de los límites aceptables tomando en cuenta el Capítulo VI

CONCLUSIONES

1. En los últimos años se vienen desarrollando novedosas técnicas que hacen más viables el uso de Máquinas de Inducción en sistemas aislados.
2. Con el uso de los Relay de estado sólido (SSR) los controles de carga hacen más eficientes Sistemas de Generación
3. Como la mayoría de requerimientos "Micro" proyectos de electrificación se requiere generar electricidad monofásica, la "Conexión C-2C" puede ser considerada.
4. A pesar que solo se genera el 80% de potencia nominal de la Máquina, con la "Conexión C-2C" se puede llegar a tener Sistemas monofásicos de potencias considerables.
5. El Sistemas de Control de carga son muy estables pero tienen la desventaja de que el conjunto Turbina-Generador entrega en todo momento la máxima potencia lo que podría implicar un mayor gasto de agua.
6. Los componentes de los Controles de Carga pueden ser obtenidos en el mercado local por lo que vale la pena invertir en estas técnicas, sabiendo que sin Sistemas de Generación Aislados no se puede electrificar el país en un 100%.

ANEXO A
Eficiencia Generador de inducción

Las siguientes tablas y gráficos presentan la eficiencia y la temperatura de bobinados en una red de 230 V, 50 Hz, trifásico, 4 polos, 2.2 kW de un Motor de Inducción, funcionando como motor y como generador. Para el funcionamiento como generador la capacidad de excitación variada y la carga se ha variado a fin de mantener una tensión constante a una frecuencia fija

Tabla A.1: Rendimiento de un motor (50 Hz y 230/400 V conectado en estrella) [5]

Carga % motor nominal	Temperatura (°C)	Eficiencia %
25	60	71.8
50	65	81.6
75	73	84.1
100	82	83.4
125	91	81.6

Las tablas y gráficos muestran claramente que las Máquinas de Inducción son más eficientes si se utilizan como motores que como generadores. Las mejoras en el rendimiento del modo generador se pueden obtener operando a menos de la tensión nominal y mayor frecuencia nominal. Para un motor en operación como generador, la máxima eficiencia se consigue generalmente en torno al 80% de la capacidad del motor. Por lo tanto, se debe restringir el modo de máxima potencia de salida del generador al 80% de la potencia del motor, así como la protección contra el exceso de temperatura de los devanados, tiende a mejorar la eficiencia.

Tabla A.2 Rendimiento de un Generador conectado en estrella en un cierto rango de voltaje y frecuencia [5]

Tensión de Fase	Frecuencia (Hz)	Carga (% motor nominal)	Capacitancia (μ F)	Temperatura (°C)	Eficiencia %
230	50	25	44	59	67.3
230	50	50	48	69	75.4
230	50	75	55	81	78.1
230	50	100	63	91	78.0
215	50	25	37	46	71.1
215	50	50	40	54	78.0
215	50	75	47	68	82.3
215	50	100	55	82	79.8
200	50	25	33	47	70.6
200	50	50	37	56	77.6
200	50	75	43	68	80.5
200	50	100	50	80	78.8
230	55	25	28	52	72.8
230	55	50	31	60	80.1
230	55	75	35	68	81.5
230	55	100	40	76	81.1
230	55	125	46	86	80.4

La eficiencia con una conexión "C-2C" es siempre inferior a un sistema conectado en triangulo equilibrado, excepto en el punto de equilibrio. Sin embargo, la diferencia en la

eficiencia de cerca al punto de equilibrio es muy pequeña. La operación en triángulo es menos eficiente que la operación estrella debido al aumento de las corrientes armónicas.

Tabla A.3: rendimiento de un generador equilibrado (50 Hz y 230 V) [5]

Conexión	Carga (% motor rating)	Capacitancia (μF)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Eficiencia %
Triángulo Balanceado	25	47	64	65.6
	50	52	76	74.2
	75	58	82	75.8
	100	66	92	75.9
Conexión C-2C	25	43	66	64.3
	50	50	75	73.9
	75	58	86	75.8
	100	67	95	75.6

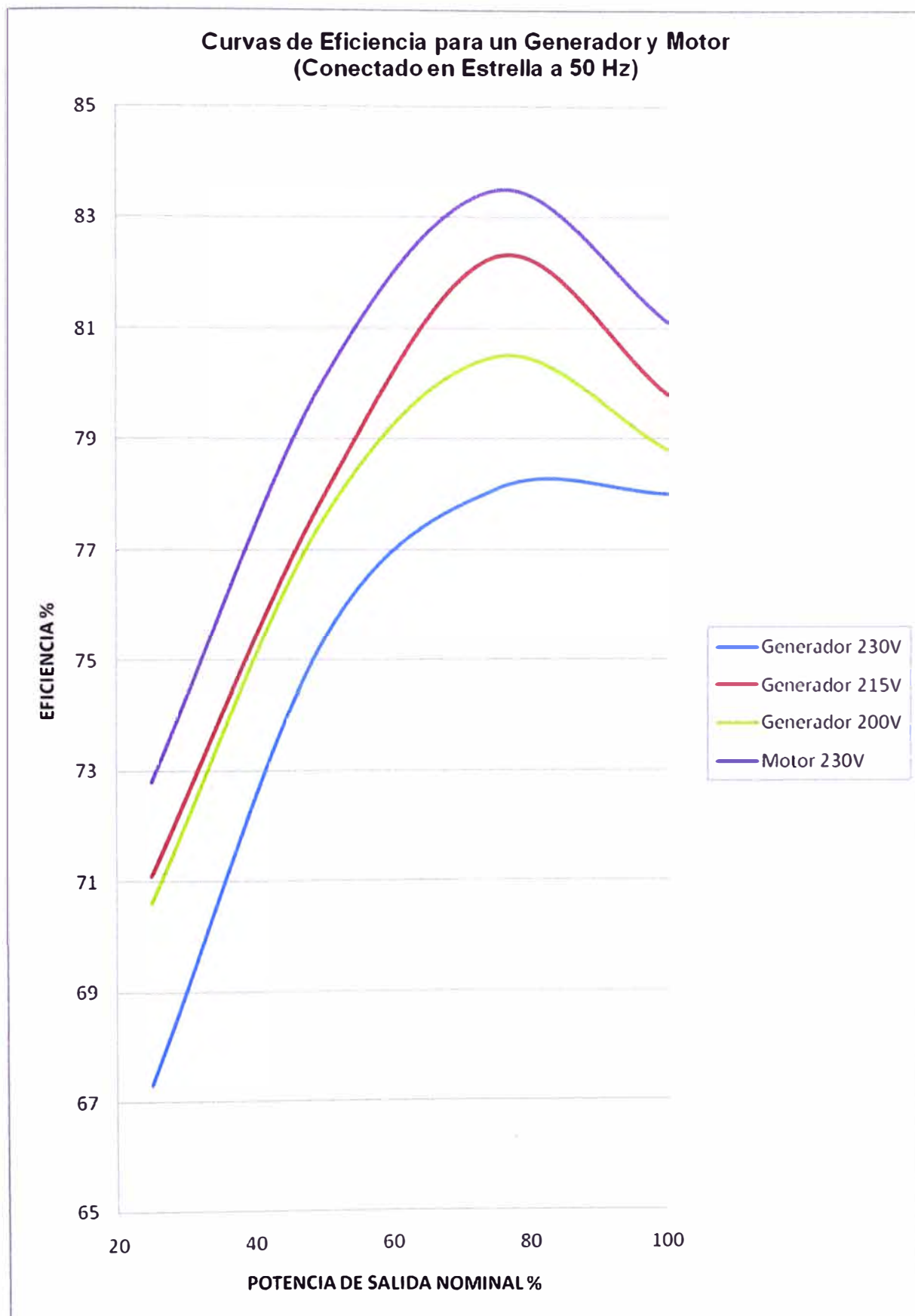


Figura A.1: Curvas de eficiencia para el funcionamiento como generador y como motor (conectado en estrella y 50 Hz)

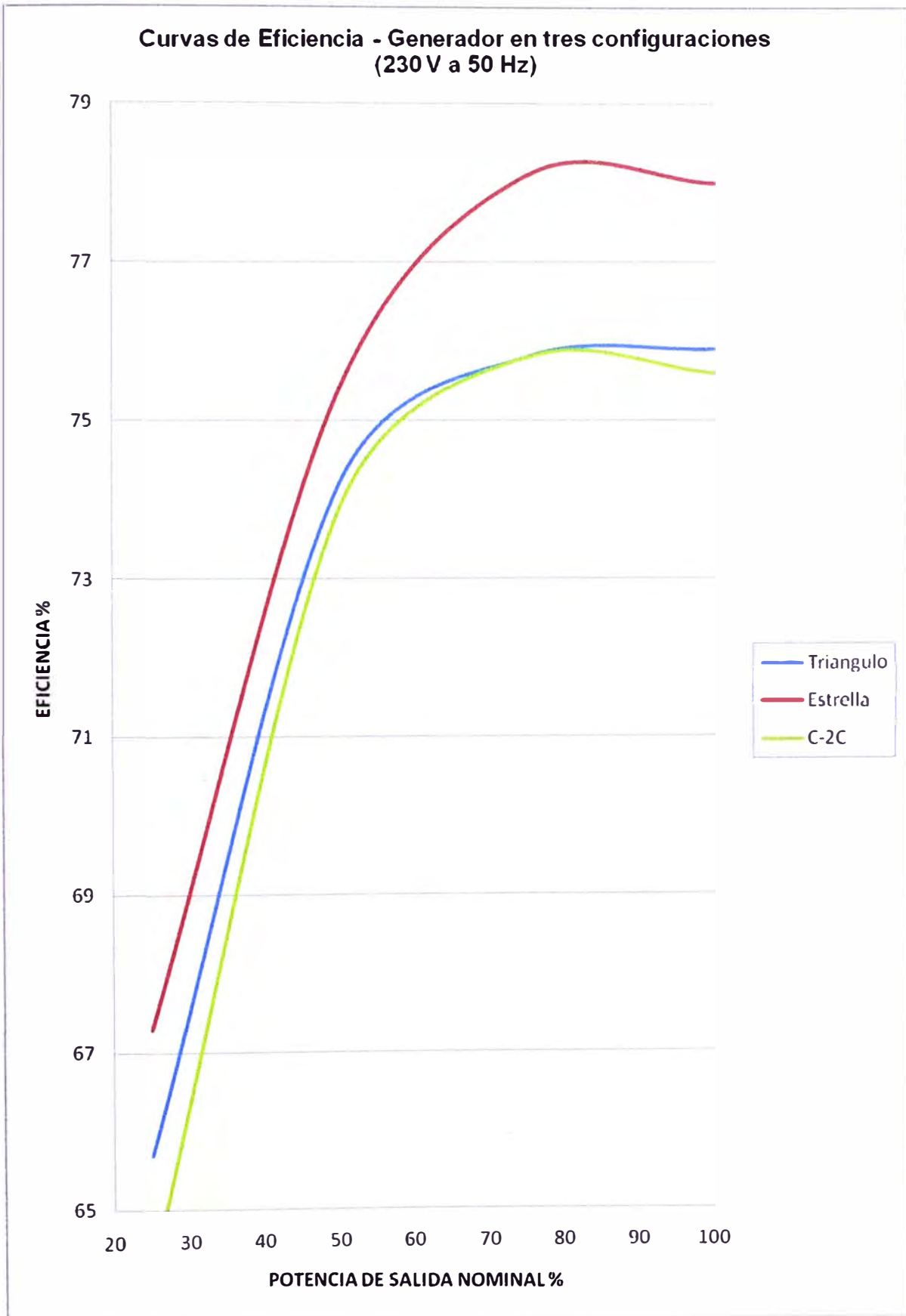


Figura A.2: Curvas de eficiencia para el funcionamiento de un generador con diferente conexionado (230 V y 50 Hz)

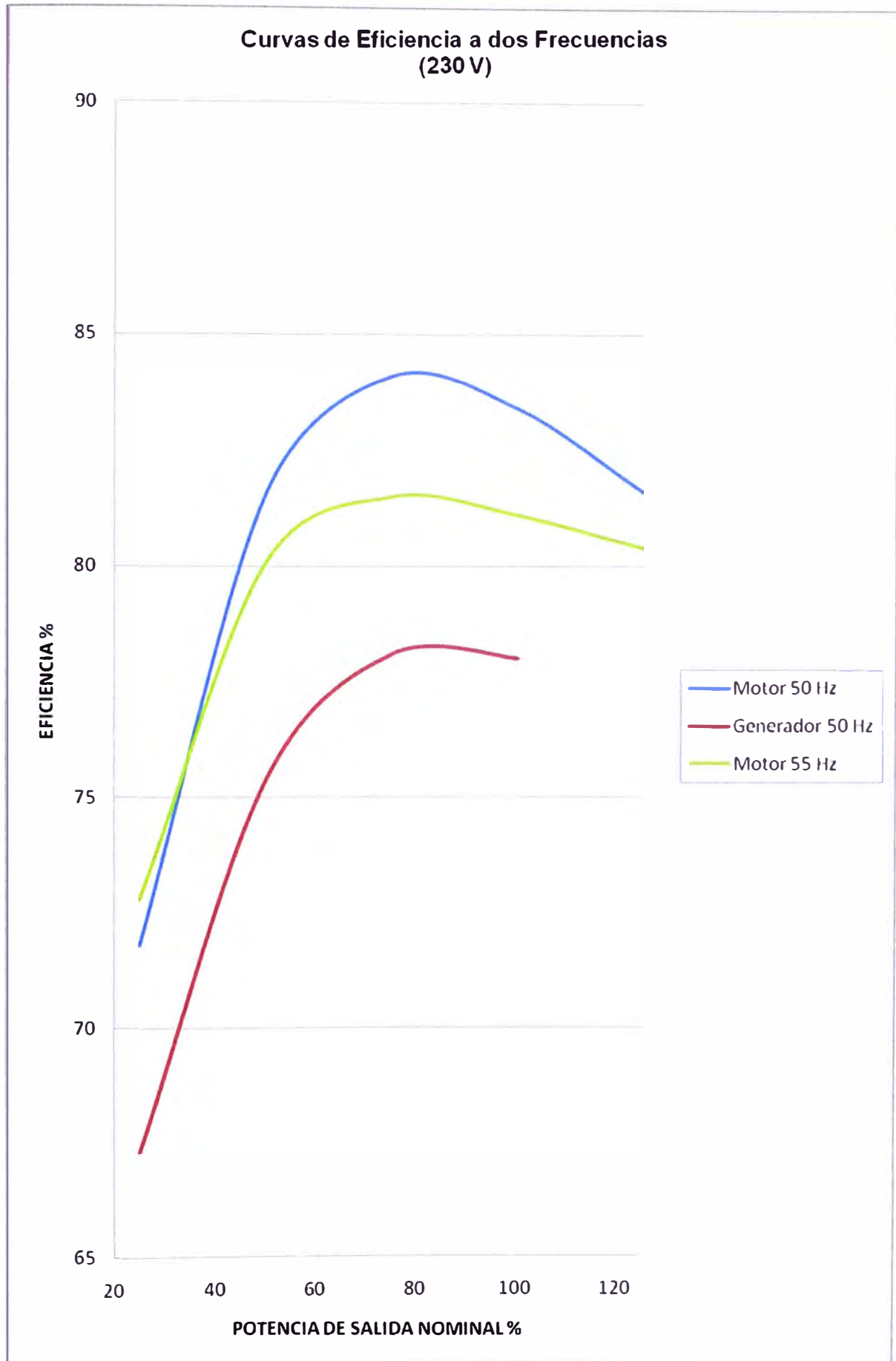


Figura A.3: Curvas de rendimiento a 230 V y dos frecuencias diferentes

ANEXO B
Sistemas con transformador

Si se requiere una línea de transmisión muy larga, vale la pena pensar en variar la tensión por medio de transformadores con el fin de reducir los costos de cable. Sin embargo, el ahorro en términos de costo por cable debe ser comparado con los gastos y las pérdidas adicionales producidos por los transformadores.

Una opción intermedia es la de generar una tensión alta para solo usar un transformador reductor. Esto es especialmente útil para sistemas monofásicos, ya que todos los Motores de Inducción estándar se pueden conectar a una línea de 415 V a la línea y si se aplica la "Conexión C-2C", los transformadores reductores de 415 a 240 V son **relativamente fáciles** de obtener. Una transmisión a 415 V en lugar de 240 V significa que el cable de la sección transversal se puede reducir por un factor de tres para la pérdida de la misma potencia. El transformador representa una carga inductiva importante y por lo tanto debe corregir el factor de potencia.

ANEXO C

Disparo por sobretensión (Apertura)

Un circuito para proteger las cargas eléctricas en el caso de una sobretensión se muestra en la Fig. C.1. Esto se debe utilizar con todos los sistemas de carga fija, como se explica en el Capítulo XI. Cuando se produce una sobretensión, los contactos del relé se abre y la bobina del contactor se des-excita haciendo que sus contactos se abran y desconecte las cargas del generador.

El único componente que depende de la características del generador es el contactor, todo el resto son estándar. La corriente nominal del contactor debe ser suficiente para alimentar la carga máxima en el generador. Dos valores de corriente se dan generalmente por un contactor: una categoría AC1 y una categoría AC3. La categoría AC1 es para cargas resistivas grandes y la categoría AC3 para cargas de motores. Aunque, para un sistema de carga fija, la carga sea como para la categoría AC1, la categoría AC3 se debe utilizar con el fin de asegurar una larga vida al sistema.

Los contactores por lo general tienen tres contactos principales (o polos como se les suele llamar) y un contacto auxiliar con una valor más bajo de corriente. Para un generador monofásico los polos del contactor principal se pueden conectar en paralelo para que compartan la corriente. Un factor de multiplicación se puede aplicar a la corriente nominal trifásica. Para dos polos en paralelo el factor es de 1.6 y por tres polos en paralelo 2.2. Esto permite una distribución desbalanceada de corriente entre los polos. Se debe tener cuidado en asegurar que el voltaje generado y la frecuencia, en condiciones normales, sean los adecuados para la bobina del contactor. Si la tensión es mayor y/o la frecuencia menor que los valores nominales de la bobina, entonces su tiempo de vida se reducirá. La operación a tensión reducida y/o alta frecuencia normalmente es bastante aceptable, siempre que el efecto combinado es inferior al 25%. Por ejemplo, si la tensión es de 10% por debajo de la tensión nominal, la frecuencia de la bobina no debe ser mayor de 15% por encima de la frecuencia nominal de bobina.

Si los contactos del relay y la bobina del contactor, que se muestra conectado entre el lado de la carga de los contactos auxiliares y neutro, se conecta directamente entre la línea y el neutro del generador, podría producir un **Chasqueo (abrir y cerrar varias veces)** en los contactos en el caso de un corto-circuito o sobrecarga severa. Esto debido a que la tensión caerá y cuando es insuficiente para energizar la bobina del contactor, los contactos se abrirán y aislaran la carga. Sin carga conectada la tensión se acumula, hasta que la bobina del contactor reactive la energía, y los contactos se cerrarán en sobrecarga severa y provocar que el proceso se repita. La apertura y cierre repetidos de los contactos causara daños rápidamente. El circuito de la Fig. C.1 impide la apertura repetida y cierre de los contactos, una vez que el interruptor de arranque está en la posición de marcha (funcionamiento), ya que si la tensión cae lo suficiente para

desenergizar la bobina de los contactos auxiliares, estos se abrirán y prevendrá la re-energización de la bobina del contactor.

El interruptor S1, se fija inicialmente en la posición inicial con el fin de aplicar tensión a la bobina del contactor. Siempre que una sobretensión no ocurra, los contactos del Relay DC se cerrarán y la bobina del contactor se energizará. Los contactos principales y auxiliares y se cerrarán cuando el interruptor está en la posición de marcha, la bobina del contactor permanecerá energizada. Un Chasqueo del contacto puede ocurrir cuando el interruptor está en la posición de inicio. Esto se puede prevenir mediante el aislamiento de las cargas en el arranque con los interruptores entre el contactor y las cargas. Sin embargo, la carga debe ser ingresada en los pasos como la aplicación de plena carga, es probable que colapse la tensión y cause que los contactos se abran.

Para los sistemas trifásicos, siempre que no haya cargas en trifásicas conectadas, cada fase se puede operar por separado, la tensión debe volver a la tensión nominal entre las operaciones de conmutación mediante el aumento de la potencia de salida de la turbina.

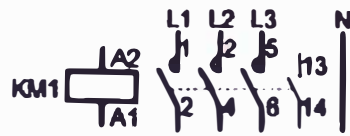
Para un sistema monofásico, a menos que el sistema de transmisión pueda ser convenientemente dividido de modo que haya más de una línea, de ser necesario se conmutará directo a plena carga con el contactor. En este caso, la turbina se debe iniciar rápidamente para minimizar el desgaste del contactor y este debe ser sobredimensionado por un factor de dos (02) al menos.

El relay de corriente continua y el interruptor de arranque deben estar dimensionados para una corriente de al menos 10 amperios, ya que la corriente de entrada en el contactor es muy grande y muy altamente inductiva

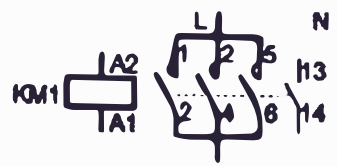
El circuito de detección de tensión es el mismo para un sistema monofásico y trifásico. La detección de la tensión entre una sola línea y el neutro es el adecuado para un sistema trifásico, porque incluso con considerable desequilibrio de fase, las variaciones entre las tensiones de fase son bastante pequeñas. El circuito de detección tiene que ser capaz de resistir la sobretensión total que se produce cuando la carga se desconecta y el exceso de velocidad del generador por la turbina. Esto puede durar sólo un tiempo corto ya que los condensadores de excitación se conmutarán por los **MCB(s) (Miniature Circuit Breakers)**, como se explica en el Capítulo IX. Sin embargo, en caso de que el MCB (s) no funcione, el circuito ha sido diseñado para soportar una tensión permanente AC de hasta 600 V, que es mayor que el voltaje máximo pico del sistema, pero para el caso de generadores de gran tamaño se explica en el Capítulo IX.

Las dos resistencias de potencia se seleccionan para establecer el rango de Tensión de operación en caso ocurra una sobretensión. Una resistencia de 22 kΩ se utilizara para todos accionamientos. La resistencia de 2W se puede seleccionar con un valor de hasta

Circuito de potencia



(a) Trifásico



(b) Monofásico

Circuito de Control

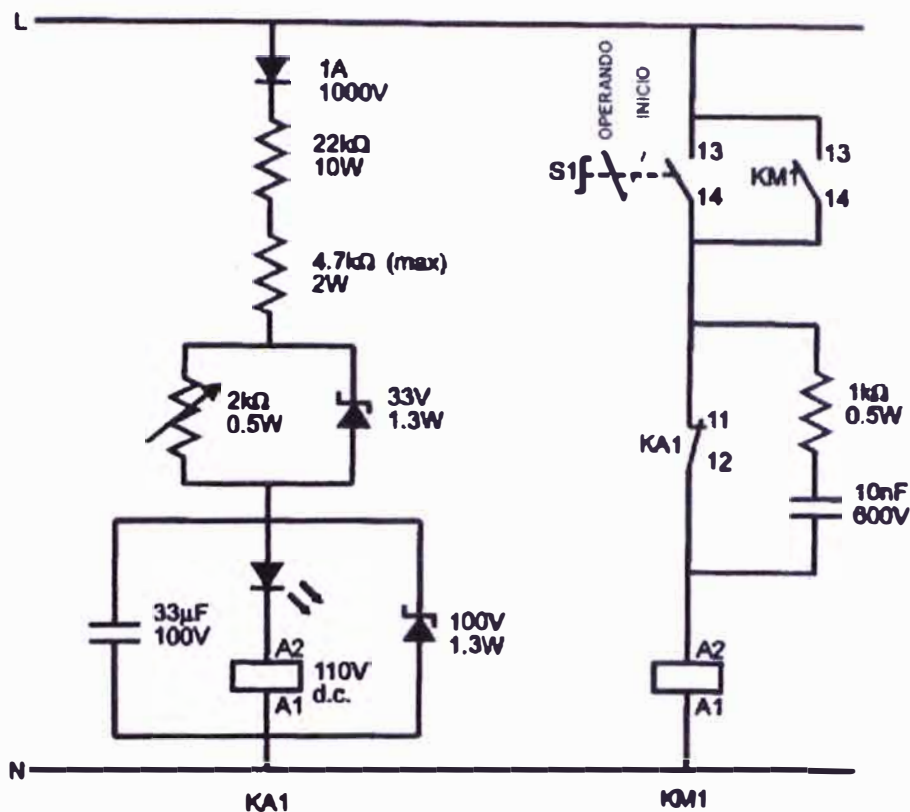


Figura C.1: Diagrama del circuito para disparo por sobretensión.

4.7 k Ω , cuanto mayor sea el valor, mayor es la tensión necesaria para que ocurra un accionamiento.

En serie con las dos resistencias de potencia se encuentra una resistencia variable que permite un cierto ajuste en el sitio de operación. Si no es necesario ningún ajuste en el sitio entonces se puede cortocircuitar este componente. El valor de la resistencia variable se ha limitado a 2 k Ω por dos razones:

- Se evita la tensión de accionamiento sea demasiado alta, lo que podría ser perjudicial para las cargas.
- Se evita el sobrecalentamiento de la resistencia variable, ya que los dispositivos con una potencia superior a 0.5 W son raros y costosos.

Debido a las tolerancias de las resistencias y el voltaje de operación del relé el rango de

tensión de la apertura debe ser determinada por una medición. Como una guía, solo la resistencia de potencia de 22 k Ω en el circuito, el rango de la tensión de accionamiento será aproximadamente entre 230V a 250V, dependiendo del ajuste del potenciómetro. Para tensiones más elevadas se puede lograr mediante la adición de una resistencia de 2 W de valor adecuado.

Los diodos Zener se utilizan para proteger a la resistencia variable, condensador y relay de ser quemados debido a una sobretensión. La resistencia y el condensador a través de los contactos del Relay son para reducir el arco que se forma en cuando sus contactos accionan.

Un relay con una bobina AC parece ser la opción obvia para este circuito. Sin embargo, estos muestran chequeos apreciables en los contactos cuando la tensión apenas alcanza el voltaje de operación de la bobina y por lo tanto no son adecuados. Un Relay DC se ha utilizado en su lugar. Un Relay 110 VDC en con una resistencia de la bobina de 19,000 Ω ha sido elegida, ya que los relés de baja tensión requieren una mayor corriente de operación y por lo tanto producen una mayor disipación de potencia en la resistencia de potencia y el potenciómetro. Desafortunadamente relés con una gran tensión de bobina y resistencia son difíciles de obtener.

ANEXO D:
Corrección del factor de potencia para el arranque de motores

La unidad descrita es para motores monofásicos. El circuito se podría modificar para arrancar motores trifásicos, aunque por lo general arranque estrella-triángulo es más apropiado, como se explica en el Capítulo XI.

El circuito de la Fig. D.1 conecta al condensador de corrección del factor de potencia por sólo 0.5 a 1.5 segundos, dependiendo del ajuste del potenciómetro. Para la mayoría de las aplicaciones, este es el tiempo suficiente para arrancar un motor. Si es necesario los valores del circuito se pueden cambiar para aumentar el tiempo en el condensador. Sin embargo, si el condensador está conectado por mucho tiempo el factor de potencia del motor será sobre corregido y se podría producir una sobretensión.

El condensador debería ser dimensionado para corregir totalmente el factor de potencia del motor en el arranque. Un valor elevado de Capacitancia es necesario. Sin embargo, debido a su uso intermitente, puede ser utilizado un condensador del tipo arranque (Motor Start). El circuito se conecta después el interruptor de suministro, como se muestra en la Fig. D.2.

El elemento de conmutación que se conecta y desconecta el condensador de arranque es un **Relay de estado sólido (SSR-Solid State Relay)** de corriente continua. Estos dispositivos tienen un rango mayor de corriente para operación intermitente que para operación continua, esto se especifica en los datos de las hojas de fabricante.

Cuando la alimentación se conecta el condensador de 33 μF , C1, rápidamente se carga a través del puente de diodos y presentando una fuente de corriente continúa al circuito de RC a la derecha del mismo. La parte de resistiva de este circuito RC es proporcionada por la resistencia fija R3, la resistencia variable VR1 y la resistencia en el circuito de entrada del Relay (SSR), como se muestra en la figura D.3.

El Relay de estado sólido (SSR) se trata como un dispositivo de controlado por corriente DC. Cuando se suministra energía al circuito, por el encendido del motor, la corriente fluirá a través del lado de la entrada del Relay (SSR) cargando C2 y causara que el Relay (SSR) conmute en el condensador corrector del factor de potencia. Como C2 se esta cargando, la corriente de carga gradualmente se cae y el Relay (SSR) se abrirá, desconectando el condensador de excitación.

Con valores de componentes que se muestran, esto tarda aproximadamente 0.5 segundos para una VR1 en 0Ω y 1.5 segundos para una VR1 en 47Ω . Sin embargo, mucho dependerá de la tensión mínima de funcionamiento del Relay (SSR). Algunas indicaciones del tiempo de conmutación se pueden obtener mediante la conexión de un amperímetro analógico en serie con el condensador de corrección del factor de potencia. Si un osciloscopio de almacenamiento está disponible, entonces el tiempo de retardo se puede medir con precisión.

La unidad descrita es para motores monofásicos. El circuito se podría modificar para arrancar motores trifásicos, aunque por lo general arranque estrella-triángulo es más apropiado, como se explica en el Capítulo XI.

El circuito de la Fig. D.1 conecta al condensador de corrección del factor de potencia por sólo 0.5 a 1.5 segundos, dependiendo del ajuste del potenciómetro. Para la mayoría de las aplicaciones, este es el tiempo suficiente para arrancar un motor. Si es necesario los valores del circuito se pueden cambiar para aumentar el tiempo en el condensador. Sin embargo, si el condensador está conectado por mucho tiempo el factor de potencia del motor será sobre corregido y se podría producir una sobretensión.

El condensador debería ser dimensionado para corregir totalmente el factor de potencia del motor en el arranque. Un valor elevado de Capacitancia es necesario. Sin embargo, debido a su uso intermitente, puede ser utilizado un condensador del tipo arranque (Motor Start). El circuito se conecta después el interruptor de suministro, como se muestra en la Fig. D.2.

El elemento de conmutación que se conecta y desconecta el condensador de arranque es un **Relay de estado sólido (SSR-Solid State Relay)** de corriente continua. Estos dispositivos tienen un rango mayor de corriente para operación intermitente que para operación continua, esto se especifica en los datos de las hojas de fabricante.

Cuando la alimentación se conecta el condensador de 33 μF , C1, rápidamente se carga a través del puente de diodos y presentando una fuente de corriente continúa al circuito de RC a la derecha del mismo. La parte de resistiva de este circuito RC es proporcionada por la resistencia fija R3, la resistencia variable VR1 y la resistencia en el circuito de entrada del Relay (SSR), como se muestra en la figura D.3.

El Relay de estado sólido (SSR) se trata como un dispositivo de controlado por corriente DC. Cuando se suministra energía al circuito, por el encendido del motor, la corriente fluirá a través del lado de la entrada del Relay (SSR) cargando C2 y causara que el Relay (SSR) conmute en el condensador corrector del factor de potencia. Como C2 se esta cargando, la corriente de carga gradualmente se cae y el Relay (SSR) se abrirá, desconectando el condensador de excitación.

Con valores de componentes que se muestran, esto tarda aproximadamente 0.5 segundos para una VR1 en 0Ω y 1.5 segundos para una VR1 en 47Ω . Sin embargo, mucho dependerá de la tensión mínima de funcionamiento del Relay (SSR). Algunas indicaciones del tiempo de conmutación se pueden obtener mediante la conexión de un amperímetro analógico en serie con el condensador de corrección del factor de potencia. Si un osciloscopio de almacenamiento está disponible, entonces el tiempo de retardo se puede medir con precisión.

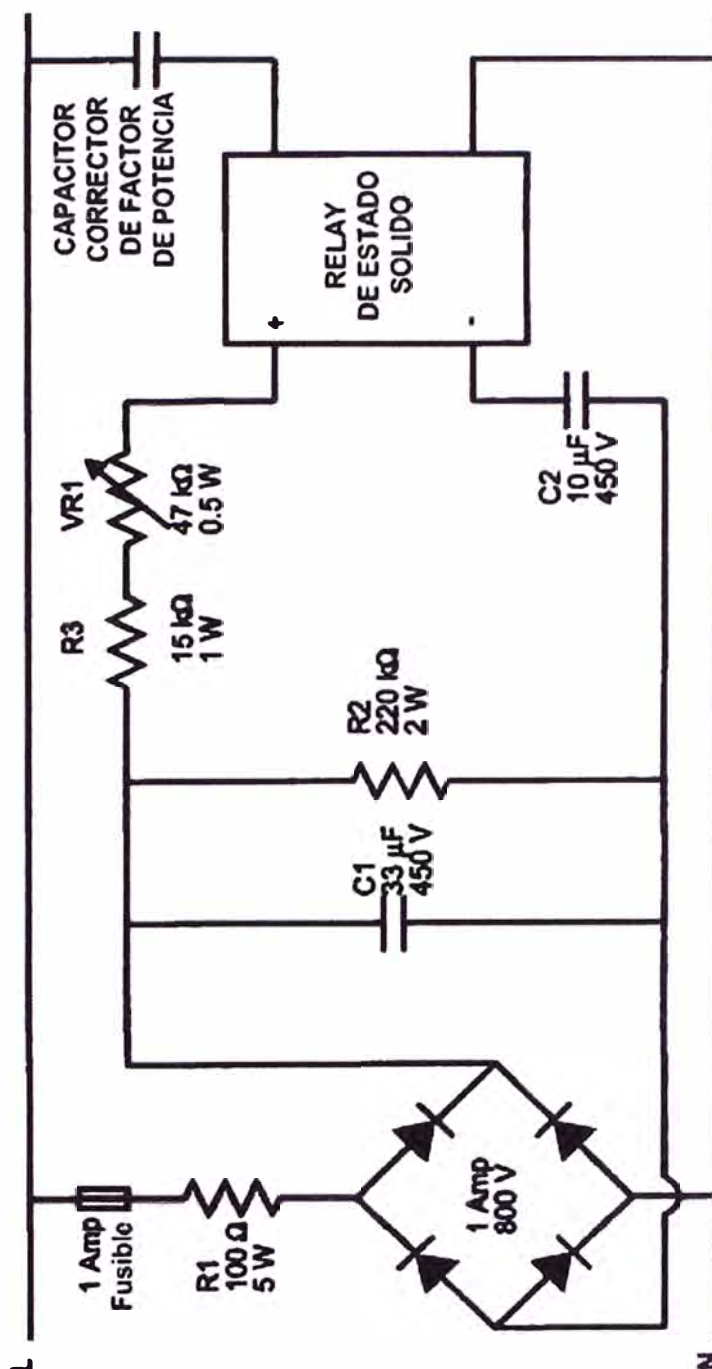


Figura A4.1: Corrección de Factor de Potencia Temporal para el arranque de un motor.



Figura A4.2: Conexión de la unidad de corrección del factor de potencia

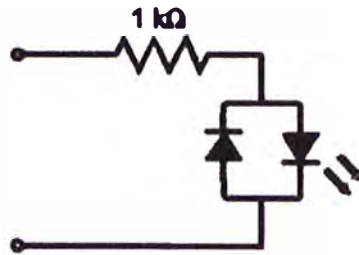


Figura D.3: Circuito de entrada para un Relay (SSR) de corriente continua

El Relay (SSR) se debe clasificar por el doble de la tensión pico, ya que cuando inicialmente el condensador está conectado se mantendrá cargado y puede provocar un pico de tensión del doble del aplicado a la salida de SSR. Además, el voltaje de entrada pico para SSR debe ser inferior a su capacidad máxima. El pico de tensión de entrada máxima está dada por

$$V_{PK} = \sqrt{2} \times V_{rms} \times R_{SSR} / (R_3 + R_{SSR}) \quad (D.1)$$

Donde:

V_{rms} es el r.m.s. la tensión de alimentación.

R_{SSR} es la resistencia de entrada de la SSR.

Tenga en cuenta que cuando se utiliza este circuito con refrigeradores, congeladores y cualesquiera otra carga que contengan un termostato el circuito debe estar conectado después de este elemento de conmutación con el fin de que funcione cada vez que encienda el motor.

BIBLIOGRAFÍA

1. Yogesh K.Chauhan, Sanjay K. Jain, "A Prospective on Voltage Regulation of Self-Excited Induction Generators for Industry Applications, 2010.
2. Bill Haveland, "Induction Motor for a Small Scale Hidro", Home Power #71 July 1999.
3. J.B. Ekanayake, "Induction generators for a small hydro schemes"- Power Engeneering Journal – April 2002.
4. T.S. Weerakoo, R.P.S.Chandrasena, A. Arulampalam, "Novel C2R-R Configuration for Micro-Hydro Plants Used in Islanded Systems", 2009.
5. Nigel Smith, "Motor as Generators for Micro-Hidropower", 2001.