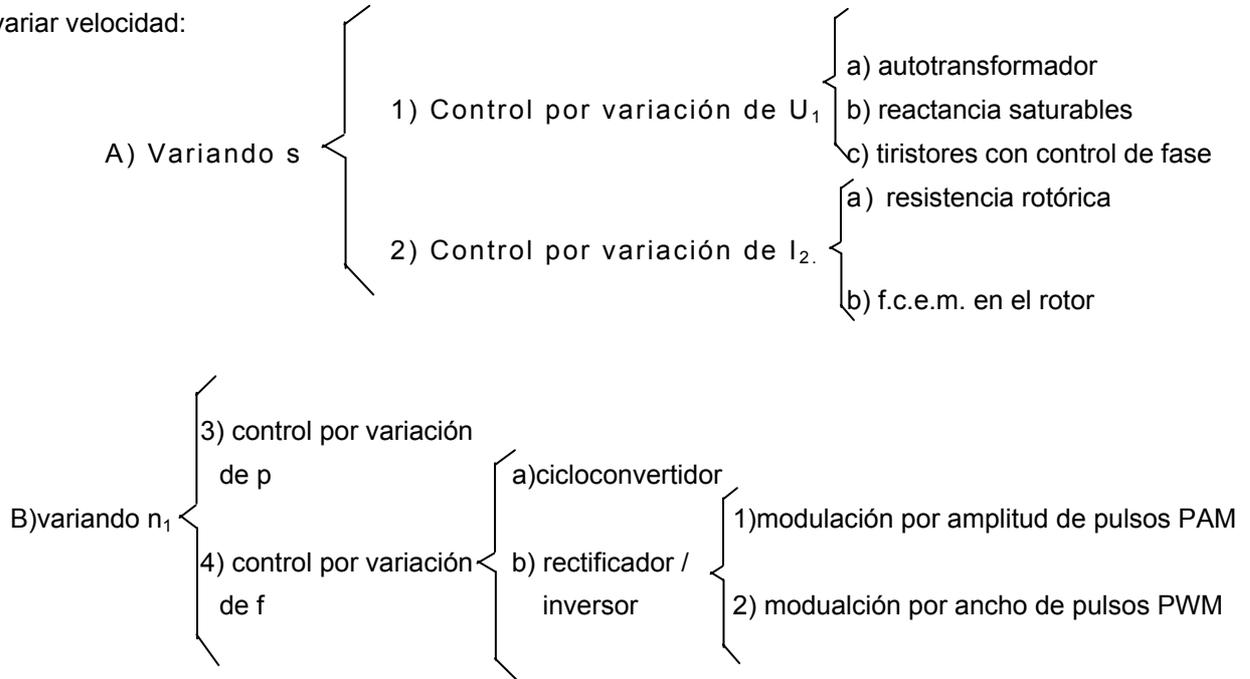


**VARIACIÓN DE VELOCIDAD DE MOTOR ASÍNCRONO**

De la expresión de  $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$  despejamos  $n_2$ :  $n_2 = n_1 (1 - s)$  se deducen dos formas básicas para variar velocidad:



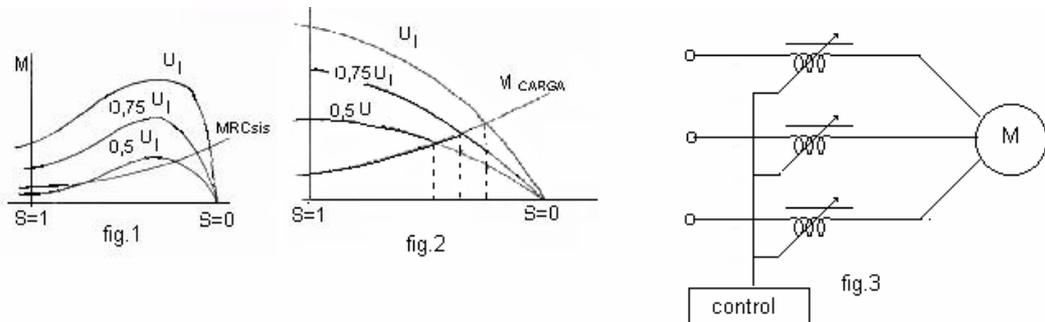
**A-1) Control por variación de U<sub>1</sub>**

Al cargar un motor asíncono la velocidad se estabiliza a un cierto valor, en el que el par motor y el resistente son iguales.

Recordar que  $M = f(U^2)$  por consiguiente se produce una fuerte caída de M –

Si la carga mantiene un M elevado a velocidades bajas se entra en la zona inestable y el motor se detiene. Fig.-1

Este inconveniente puede reducirse con los motores de anillos rozantes, ya que al incluir resistencias en el rotor, se deforma la curva, ampliando la zona estable fig. 2



Es de bajo rendimiento porque aumenta las pérdidas rotóricas.

De las expresiones  $M = \frac{30 P_{12}}{\pi n_1}$  y  $P_{cu2} = P_{12} \cdot S$  se deduce  $P_{cu2} = K M n_1 \cdot S$

Nos dicen que para la obtención simultánea de momento y resbalamiento elevado, existen pérdidas elevadas en el rotor, por consiguiente corrientes estáticas y

rotóricas elevadas. Esto obliga a subutilizar en potencia los motores controlados por este procedimiento.  
 Formas de proceder:

**A1a) Auto transformador con tensión secundaria variable. –**

Se utiliza en motores pequeños (fraccionales).-Pequeños ventiladores.

**A1b) Reactancias saturables:**

El devanado de excitación de la reactancia r tensión aplicada.- Se utiliza para potencias n

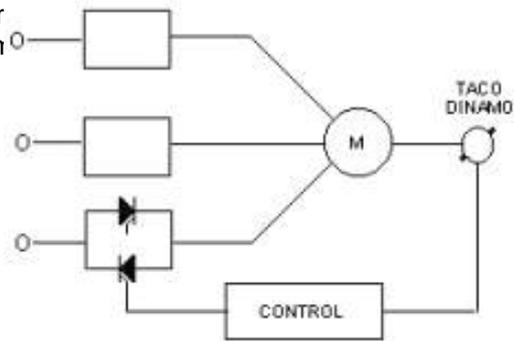


fig. 4

A1c) Tiristores con control de fase

Se regula el disparo de los tiristores un cierto ángulo, lo que determina una reducción de la tensión.-

Inconvenientes: gran contenido de armónicos;

Subutilización del motor.

Los equipos de control de velocidad por variación de la tensión estatórica son, en general, sistemas de bucle cerrado. Una taco dínamo acoplada al eje del motor genera una tensión proporcional a la velocidad del motor, que es comparada en el circuito de control con una tensión de referencia preestablecida. Si la velocidad del motor es menor (mayor) que la deseada, la tensión del taco dínamo será más baja (alta) que la de referencia y un amplificador de error disminuirá (aumentará) el ángulo de retardo de los tiristores. La tensión aplicada al motor aumentará (disminuirá) y lo mismo sucederá con el par y la velocidad. - f i g . 4 .

Aplicaciones: Ventiladores: como tienen una curva M-n exponencial se pueden usar motores jaula de ardilla normal. Para ventiladores con .margen de velocidad que incluya pocas rpm., rotores con altas resistencia  $P_2 = R_2 I_2^2$

Para grúas y elevadores con curvas de M = cte se adaptan mejor los motores con anillos, hasta 100 HP.

**A2a) Control por variación de I<sub>2</sub> con resistencia rotórica.**

Una forma de regular el deslizamiento es la variación de la resistencia del circuito rotórico. Esto se consigue en los motores con anillos conectando reóstatos a los mismos. En los casos de dispositivos de arranque con intensidad reducida, se anula la resistencia una vez que se alcanza la velocidad de régimen. En otras ocasiones se puede usar para reducir la velocidad por debajo de la nominal, no más allá de un 75% u 80%.- fig.5.

Tiene el inconveniente de la disipación de energía y por ende rendimiento bajo.

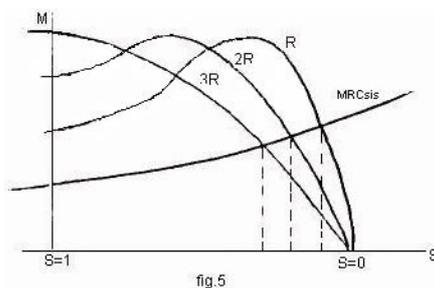


fig.5

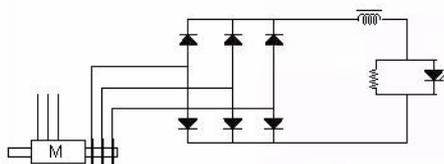


fig.6

En aplicaciones con cambio frecuente de velocidad se pueden eliminar los reóstatos y sus inconvenientes sustituyéndolos por un equipo estático que utiliza un rectificador e interponer una resistencia equivalente variable, mediante una resistencia y un tiristor en paralelo. La razón del intervalo de conducción a la de bloqueo determina la resistencia equivalente. fig.6.

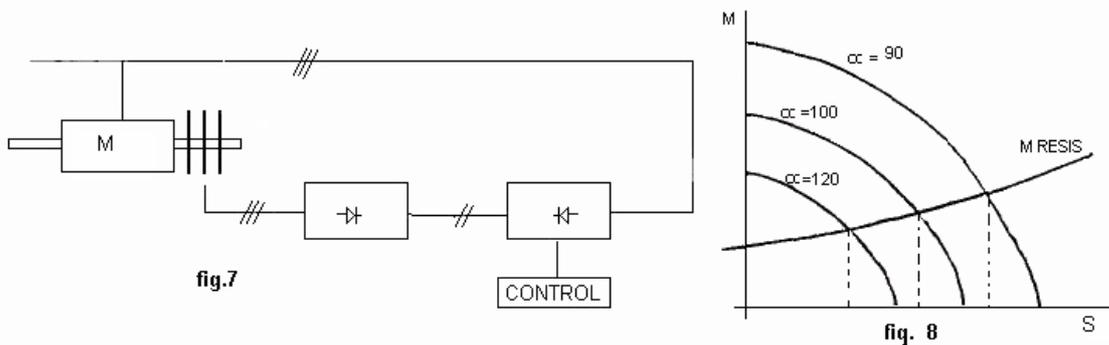
**A2b) control por fcm en el rotor**

Es posible realizar un control de la  $I_2$  oponiendo una fcm. a la tensión generada  $U_2$  en los anillos, ya que, variando la tensión secundaria se vería la velocidad; recordar  $E_{2s} = E_2 \cdot s$

Hace algunos años se utilizaba lo que se llamaba un "grupo Scherbius", que era un acoplamiento mecánico y eléctrico entre cuatro máquinas rotativas, lo que determinaba un sistema muy caro. Esto mismo se puede hacer ahora por control estático de la  $I_2$ .- Se rectifica la tensión que entregan los anillos obteniéndose  $E_2 \cdot s$ .-

Se conecta éste a la salida de un inversor autónomo, constituido por tiristores, conectados a la red, los que nos entregan  $E_2 \cdot \cos \alpha$ , siendo  $\alpha$  el ángulo de disparo de los tiristores.fig.7

Entonces:  $E_2 \cdot S = E_2 \cdot \cos \alpha \Rightarrow S = \cos \alpha$  o sea, regulando el disparo de los tiristores se regula el deslizamiento o velocidad. Las curvas correspondientes serán fig. 8



**B) Variación de la velocidad síncrona**

De la fórmula.  $N = 60.f/p$  se deduce que se puede variar n controlando frecuencia o cambiando el N° de polos.

**B3) Control por variación de p**

Es posible obtener dos velocidades en la proporción 1:2 utilizando un solo arrollamiento. Esto se obtiene conmutando las conexiones de las bobinas lo que permite cambiar el n°- de polos. Ej. en fig.1 para una fase con cuatro bobinas.

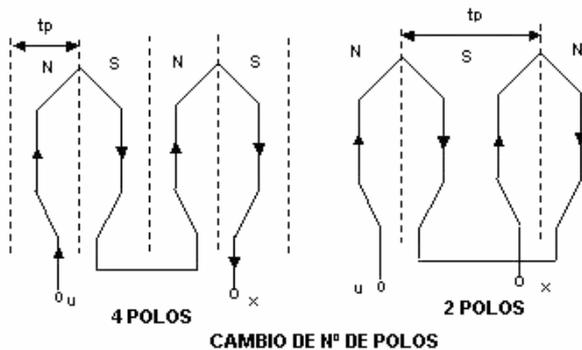


fig. 9

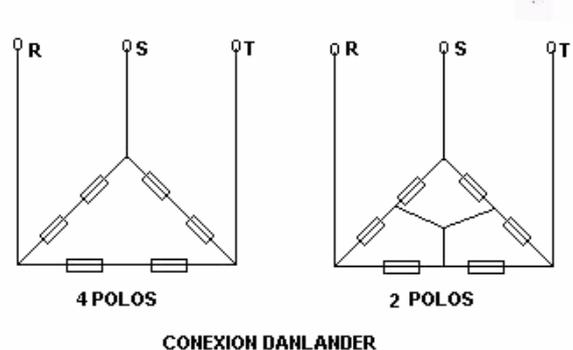


fig. 10

Existe la conexión denominada "Dahlander", según esquema Fig. .10 que permite dos velocidades en conexión  $\Delta/Y$

Si se desea obtener otras proporciones distintas a 1:2, se hace necesario un arrollamiento para cada velocidad. Para tres velocidades se utiliza una conexión Dahlander (2 velocidades) y un arrollamiento independiente para la 3ª- velocidad.-  
Inconvenientes: 1) se obtienen velocidades por saltos. Ej. 3000 / 1500 v/min. 2) para las distintas velocidades no se puede mantener la potencia constante (por las distintas potencias admisibles por el circuito magnético para cada velocidad)

Ej. 1500 rpm - -> 3,3 kW; 3000 rpm -- →4,04 KW. 3) el tablero para tres velocidades posee 9 bornes.

#### **B4) Control por variación de f**

Esto se efectúa mediante controladores de velocidad electrónicos.

**Definición:** son dispositivos que nos permiten variar la velocidad y el momento de los motores, convirtiendo las magnitudes constantes: frecuencia y tensión de red, en magnitudes variables.

Con estos dispositivos hay que tener en cuenta que la potencia decae en forma lineal con la disminución de la frecuencia, ya que siendo:  $P = M \cdot \omega_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}$  y además:

$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$  vemos que al disminuir U, por el variador, disminuye P, entonces hay que reducir la potencia del motor, para que al aumentar I, no sobrecaliente el motor.-

Por consiguiente, a bajas velocidades, no puede funcionar a potencia constante. Una fábrica de estos equipos sugiere reducciones de potencia para frecuencias muy bajas en motores chicos ( $\leq 200$  W) de hasta 20% y para motores grandes ( $\cong 75$  kW) de hasta 50%.-

Para frecuencias superiores a la normal decrece el par y la potencia resulta constante  $P = F \cdot v$  ; aumenta la velocidad, decrece la fuerza y por lo tanto el par.

#### **Aplicaciones**

- 1) en sistemas de bombeo y ventilación, adaptando la velocidad a la demanda se economiza energía y reducen ruidos.-
- 2) aumentando la velocidad de un proceso se eleva la producción.-
- 3) ajustando la velocidad en los tornillos de dosificación se obtiene economía de materiales
- 4) en instalaciones de suministro de agua se pueden eliminar las sobre presiones del sistema de bombeo
- 5) en procesos de fabricación se adaptan las velocidades a las variaciones de las piezas trabajadas y al ingreso de materias primas.-
- 6) en cadenas de embotellado se reducen ruidos variando la velocidad de acuerdo a la producción.

**En resumen:** estos dispositivos pueden controlar:

- a) velocidad, aceleración y frenado.
- b) momento
- c) arranque suave con rotor en movimiento.
- d) protección contra sobre intensidades y temperatura.
- e) variables de procesos (caudal, presión, temperatura, viscosidad, etc.)

**Consideraciones teóricas.**

La tensión es:  $U_1 = K \cdot f \cdot \Phi$  (1)

El momento depende del flujo:  $M = K \cdot S \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_{2s} = K' \cdot \Phi$  (2)

De (1) y (2) se puede escribir:  $M = K'' \cdot \frac{U}{f}$

Si se mantiene la relación  $\left( \frac{\text{tensión}}{\text{frecuencia}} \right)$  constante, el flujo, que depende de esta relación, se mantiene constante y el momento mantendrá la misma ley de variación con la velocidad que a la frecuencia nominal. De la fórmula del momento máximo:

$$M_{MAX} = \frac{30}{\pi} \frac{m_1}{n_1} \frac{U_1^2}{2(R_1 + X_1 + X_{21})}$$

Despreciando  $R_1$  se obtiene:  $M_{max} = K \cdot \frac{U_1^2}{f_1^2} \frac{1}{L_1 + L_{21}}$

al ser la relación tensión / frecuencia cte, se garantiza que el máximo momento también sea cte. La Fig. 11 muestra las modificaciones obtenidas en la curva de momento alimentando al motor a frecuencias menores que la nominal y manteniendo la relación  $U/f = cte$ . Además puede conseguirse elevar al par de arranque muy por encima del nominal haciendo trabajar el motor transitoriamente con un flujo superior al normal y adecuada frecuencia de arranque.

Se puede elevar la velocidad del motor por encima de la nominal sin más que aumentar la frecuencia de alimentación. Para mantener la relación  $U/f = cte$  en esta gama de velocidad también sería necesario aumentar la tensión del convertidor estático proporcionalmente a la frecuencia, pero existe un límite impuesto por la característica de tensión de los semiconductores y la saturación del hierro del motor, de tal forma que es habitual hacer coincidir la tensión a frecuencia nominal y mantener dicha tensión máxima para frecuencias superiores, El aumento progresivo de la frecuencia hace disminuir la relación  $U/f$  con el consiguiente debilitamiento del momento, como se ve en la fig. 12.- Sin embargo, la potencia que puede suministrar el motor no disminuye, en primera aproximación, porque es igual al producto  $M \cdot n$

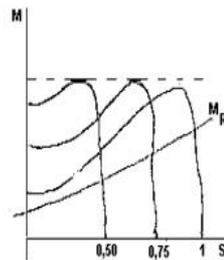


fig.11

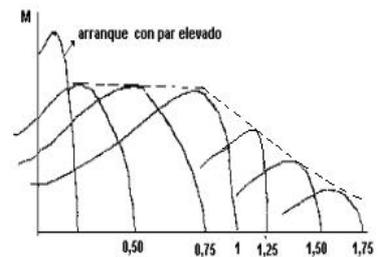


fig. 12

**B4a) Ciclo convertidor**

Son equipos que transforman directamente una onda de tensión alterna (trifásica o monofásica) a otra de menor frecuencia.

Se emplean para control de velocidad de motores de inducción de elevada potencia con frecuencias bajas, desde 0 a 16 Hz.-No son adecuados para producir frecuencias superiores a 1/3 de la de entrada. El dispositivo consiste en tres bloques iguales de dos rectificadores trifásicos controlados cada uno. El valor medio de la tensión de salida varía con el coseno el ángulo de disparo, modificándose para obtener una variación senoidal. Las otras dos fases son iguales pero desfasadas  $120^\circ$  entre sí.- fig. 13 y 14.

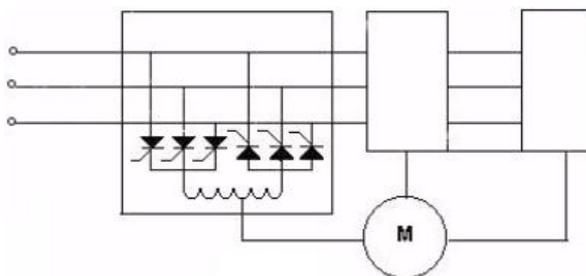


fig. 13

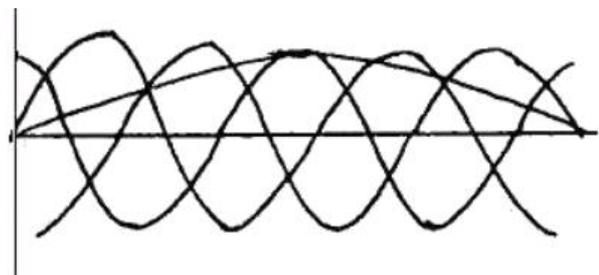


fig.14

### **B5b) Rectificador inversor.**

El control de tensión para obtener una relación  $U/f = \text{cte.}$  y además  $M = \text{cte.}$  se puede lograr de dos formas:

- 1) variando la tensión continua de entrada al inversor, modulación por amplitud de pulsos (PAM)
- 2) variando la relación entre tensión de continua a la entrada del inversor y la tensión de alterna a la salida del mismo, modulación por ancho de pulso (PWM)

Todos los convertidores usan el mismo principio básico, la red está conectada con un rectificador que transforma la corriente alterna en continua, a cual sin embargo no es completamente lineal. Por lo tanto se requiere un circuito intermedio para filtrarla. Y por última, en el inversor se transforma en una nueva corriente alterna a frecuencia variable. El circuito de control y regulación controla los componentes de tal manera que la relación  $U / f$  de salida estén adaptadas entre sí. El esquema de bloques representa en fig. -15.

Para el primer caso (PAM) se obtiene una onda de la forma de fig. 16 para -el segundo como (PWM) como en fig. 17

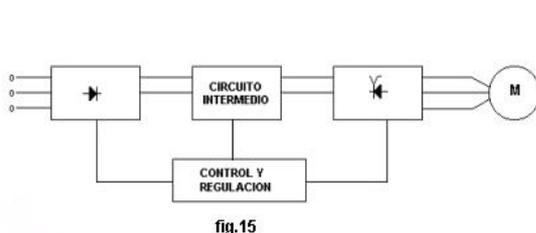


fig.15

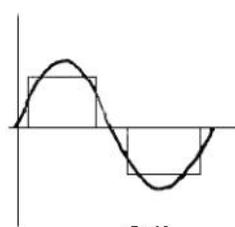


fig.16

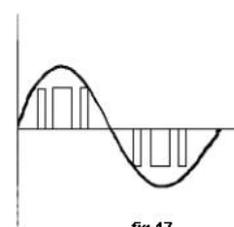


fig.17

### **C**

Es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos cuando se controla un motor con estos dispositivos:

#### **1) Armónicos**

Las corrientes armónicas originan ruidos y calentamiento del motor.

Los pares pulsatorios tienen su origen en ellas. La modulación de tensión (PAM/PWM) permite eliminar ciertos armónicos de bajo nivel, obteniendo una corriente más parecida a una senoide, un par más regular a baja velocidad y por ende, una disminución en el calentamiento.

Las corrientes armónicas dependen de: la saturación del motor, la frecuencia y tensión de funcionamiento

#### **2) Forma de la corriente.**

Las tensiones y corrientes proporcionadas al motor son alternas pero no senoidales,. Por consiguiente el motor alimentado por un variador electrónico calienta más que uno alimentado de la red; por lo que no puede utilizarse a la potencia de placa. Se debe efectuar la desclasificación recomendada por el variador.

#### **3) Ventilación.**

Los motores autoventilados se refrigeran bien a su velocidad nominal.

Cuando funcionan a baja velocidad la refrigeración no es conveniente.

Estos motores no pueden proporcionar de modo continuo su par nominal a baja velocidad, so pena de deteriorarlos. Hay que sobredimensionarlos.

Se puede solucionar con ventilación forzada.

#### **4) Resistencia de frenado**

La resistencia permite usar los variadores en frenado de parada o en marcha frenada disipando al mismo tiempo la energía de frenado.-

Aplicaciones: en máquinas de fuerte inercia, cargas arrastrantes o máquinas de ciclos rápidos.-

El par de frenado puede ser:

- 30% de  $M_n$  sin resistencia de frenado o
- 150 % de  $M_n$  con resistencia de frenado

#### **5) Inductancias de línea**

Permiten limitar las perturbaciones reinyectadas hacia la red, y resultan especialmente recomendadas en caso de instalación de varios arrancadores en una misma línea .- Garantizan una mejor protección

contra las sobre tensiones de la red y una reducción del índice de armónicas de corriente que genera el variador, además permiten limitar la corriente de línea. Son recomendadas en los siguientes casos:

- redes con muchas perturbaciones generadas por otros receptores (parásitas, sobretensiones).
- redes con desequilibrio de tensiones entre fases (mayor de 1,5 de  $U_n$ )
- variadores con una línea de alimentación de pequeña impedancia (situados cerca de transformadores de potencia 10 veces superior al calibre del variador)
- instalaciones con varios convertidores de frecuencia en la misma línea (reducción de la corriente de línea)
- reducción de la sobrecarga de los condensadores de corrección del  $\cos\phi$  en instalaciones con baterías de compensación del factor de potencia.

Producen caídas de tensión del orden del 3% al 5% de  $U_n$ .

Vienen especificadas por:

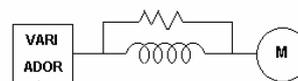
- su valor de autoinducción en mH
- su corriente nominal en A
- sus pérdidas en W

### **6) Filtro de Salida**

Este filtro se compone de tres inductancias de alta frecuencia en paralelo con tres resistencias (ver esquema)

Se instala entre el variador y el motor y permite:

- limitar al valor de  $dU/dt$  en los bornes del motor
- filtrar las perturbaciones que se originan al abrir un Contacto entre el filtro y el motor.
- reducir la corriente de fuga a tierra del motor.



Vienen especificados por

- longitud del cable entre el variador y el motor ya que si no se respeta puede ocasionar calentamiento excesivo de los filtros.
- pérdidas en W
- corriente nominal en A

### **Ejemplo:**

Motor de 4 KW (5 HP), 380 V, 750 v/min,  $\eta = 84 \%$

1º) Variador: se elige uno de 13/10, 1 A; pérdidas = 210 W

2º) Inductancia: autoinducción = 4 mH; pérdidas = 65 W; caída de tensión = 3% a 5%

I de línea sin inductancia = 10,1 A

I de línea con inductancia = 6,4 A

3º) Resistencia de frenado:  $100\Omega$ ; potencia a disipar a  $115^\circ\text{C} = 40 \text{ W}$

4º) Filtro de salida: para 10 A, pérdidas 150 W

5º) Suma de pérdidas: motor (640 W), variador (210), resistencia. (40W) autoinducción. (65W), filtro (150W), total: 1.105 W.

Rendimiento de la instalación:  $4\text{KW} / 5,105 \text{ KW} = 78 \%$

### **Aplicaciones**

Se los encuentra en rangos de potencias de 0,7 a 27 MW y se los utiliza en:

1º) compensadores síncronos para arranque, sincronización, frenado y regulación de velocidad.

2º) turbinas a gas y vapor en arranque, sincronización y frenado.

3º) estaciones de bombeo

4º) compensadores síncronos para arranque y sincronización.

5º) bombas alimentadoras de calderas en mando a velocidad variable

### Control vectorial de flujo

Para obtener cuplas importantes a muy bajas vueltas y con muy buenas características dinámicas, es necesario utilizar este sistema.

Consiste en modelizar el motor y transformar sus ecuaciones de forma tal de desacoplar las variables de flujo y cupla y controlarlas separadamente.- La transformación de las ecuaciones utiliza la transformación de Park, que permite el pasaje de un motor trifásico a un bifásico equivalente.-

Considerando el diagrama vectorial de la corriente primaria y sus componentes ortogonales reactiva  $I_d$  y activa  $I_q$  (fig. 18) se observa que  $I_q$  es virtualmente responsable de la potencia activa y por ende el par del motor e  $I_d$  responsable del flujo.-

De lo dicho se puede inferir un paralelismo entre  $I_q$  y la corriente de inducido e  $I_d$  y la corriente de excitación de un motor de c.c.- (fig. 19) .- Implementando un controlador vectorial donde las variables sean  $I_q$  e  $I_d$  podemos obtener una respuesta dinámica idéntica o superior al de un motor equivalente de c.c., e implementar controladores de posición de gran precisión con las ventajas propias del sistema convertidor – motor de inducción.

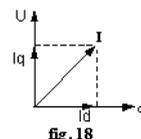


fig. 18

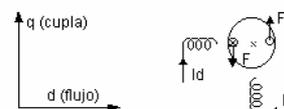


fig. 19

### FRENADO DE MOTORES ASÍNCRONOS

Un motor eléctrico se puede frenar mecánica o eléctricamente. No consideramos el frenado mecánico porque por el mismo el motor no queda sometido a sollicitación alguna. En el frenado eléctrico consideramos los siguientes casos

- 1) por contracorriente
- 2) por corriente continua
- 3) supersíncrono

#### 1º) Frenado por contracorriente

Se consigue conmutando dos fases de la alimentación., al alcanzar la velocidad cero, es preciso desconectar la alimentación, de ser posible de forma automática. La sollicitación térmica del motor equivale al doble o triple de la correspondiente al arranque. Por este motivo, cuando los tiempos de frenado sean superiores a 3 seg., habrá que estudiar si es posible realizar el frenado de esta forma, considerando el calentamiento del motor.

En motores con anillos, la resistencia exterior modifica la curva de par y por tanto el tiempo de frenado. Con una resistencia exterior., conectada al circuito del rotor de  $R_{ex.} = 1,5 \cdot Z_2$ , el momento de frenado es aproximadamente igual al nominal. La resistencia exterior debe absorber un calor de pérdidas proporcional a la relación existente entre su resistencia y la total. Tener cuidado en mecanismos de gran inercia.

#### 2º) Frenado por corriente continua, frenado dinámico

El procedimiento consiste en desconectar el estator de la red y excitarlo con corriente continua a tensión reducida. fig 1. Al aplicar la c.c. a los devanados estáticos se genera una polaridad fija en el espacio, el rotor al girar corta este

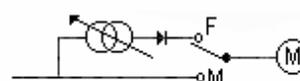


fig.1

campo fijo por consiguiente se comporta como un generador síncrono, de inducido rotante, en cortocircuito.- La energía cinética se transforma en eléctrica y se disipa en calor hasta que la primera se agota.- Algunas de las ventajas de este sistema son:

- a) no requiere elementos mecánicos acoplados al sistema
- b) el motor no puede girar en sentido contrario como con el de contracorriente.
- c) el rotor puede quedar libre o no
- d) la duración de frenado se puede regular en función de la c.c. inyectada.
- e) el frenado es suave.
- f) la energía disipada es solo 1/3 de la que se pierde por contracorriente, o sea igual a la de arranque.-
- g) este método suele venir incluido en los equipos de comando electrónico.

Durante el período de frenado, es decir, desde la velocidad nominal hasta su detención completa, el par de frenado es muy variable.- Según la magnitud de la  $I_{cc}$ , el par de frenado puede variar desde 0,5 Mn hasta 4 ó 5 Mn. estos últimos para una velocidad de 0,1 a 0,2 de la nominal, fig. 2, para anularse en la detención. Esto es debido a que, en el momento de la conexión de la  $I_{cc}$ , el flujo por reacción de inducido (carga L preponderante) es grande y desmagnetizante, por consiguiente el  $\phi$  resultante es

chico, y lo es el momento.- Los flujos pequeños a grandes velocidad desmagnetizante de la fmm del rotor.- A medida que la velocidad del rotor baja, por acción del frenado, baja la corriente rotórica, baja la fmm.,  $\theta = N \cdot I$ , desmagnetizante y por lo tanto crece el flujo,  $\phi = \Lambda NI$  y el momento.-

En la curva observamos que se tienen condiciones de frenado muy satisfactorias para velocidades comprendidas entre 0,1 y 0,5 de la nominal, lo que nos indica que, en motores con control de velocidad por frecuencia, si se baja ésta antes de frenar, se reduce la velocidad y aumenta el par de frenado.-

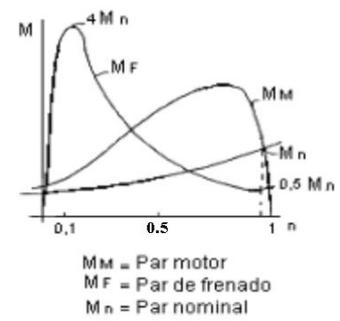


fig. 2

ción