

MI Doblemente Alimentada y Variadores de Frecuencia

Curso Máquinas Eléctricas

Bibliografía

- 1- Apuntes del curso de Máquinas Eléctricas (ediciones anteriores)

MI Doblemente Alimentada

- Tal como se ha visto en el curso hasta el momento, una máquina de inducción alimentada solamente desde el estator (con el rotor en cortocircuito) se puede comportar como motor o como generador.
- El único control posible con una MI alimentada desde una única fuente de tensión y frecuencia constante es por medio del eje mecánico: variando la carga se modifica el punto de funcionamiento. Eventualmente en las MI de rotor bobinado podría variarse la resistencia rotórica, modificando la curva $T_m(n)$ y por ende afectando el punto de operación.

MI Doblemente Alimentada

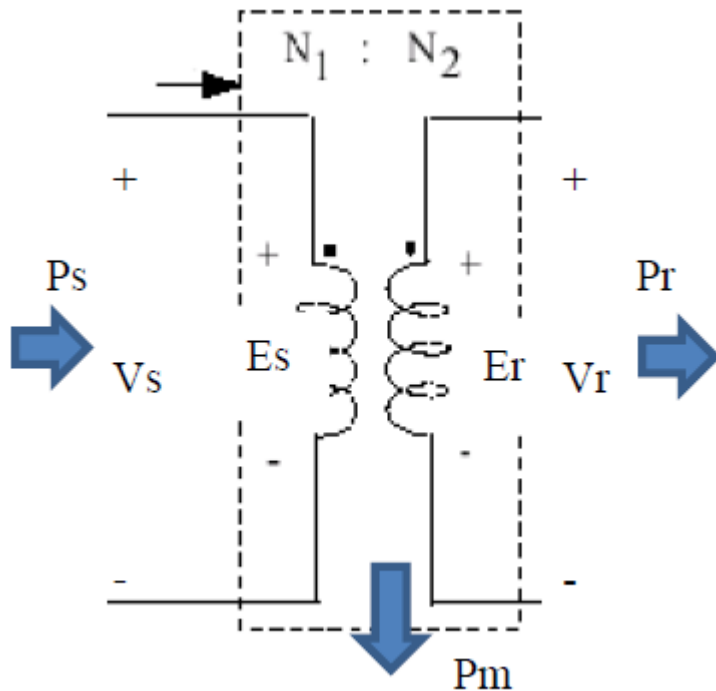
- Pero tanto en la MI de rotor bobinado o de jaula de ardilla, siempre se tendrá un consumo de potencia reactiva (Q) desde la red que alimenta el estator.
- La potencia activa (P) podrá ser consumida o entregada a la red, según la máquina opere a una velocidad de rotación menor o mayor a la velocidad de sincronismo n_s , respectivamente. Recordar que para una MI dada, n_s está impuesta por la frecuencia de la fuente que alimenta el estator.
- En comparación, una máquina sincrónica cuenta además de la regulación del eje mecánico, con el control de la excitación. Este doble control permite consumir o entregar a la red tanto P como Q.

MI Doblemente Alimentada

- Entonces surge la motivación de estudiar una MI que cuenta también con una segunda alimentación en el bobinado rotórico.
- A este conexionado se le denomina “MI Doblemente Alimentada” (más conocida por su sigla en inglés: *DFIG*, *Doubly-Fed Induction Generator*). Constructivamente no es más que una MI de rotor bobinado, el cual es alimentado desde otra fuente, en general un convertidor de frecuencia.
- Se analizarán a continuación las ecuaciones fundamentales que rigen el funcionamiento de la MI doblemente alimentada.

MI Doblemente Alimentada

- Balance de potencia:



Hipótesis:

- Se desprecian todas las pérdidas.
- Se desprecian los flujos de fuga.
- Permeabilidad del hierro infinita.

MI Doblemente Alimentada

- En las hipótesis anteriores la tensión en las terminales del estator (V_s) es igual a la tensión inducida en el estator E_s y la tensión en las terminales del rotor (V_r) es igual a la tensión inducida en el rotor (E_r).
- Con las hipótesis anteriores la MI se modela como un transformador cuyo primario es el estator (frecuencia f_s) y su secundario es el rotor (frecuencia f_s) pero que además el balance de P debe tener en cuenta la potencia mecánica P_m intercambiada en el eje de la máquina:

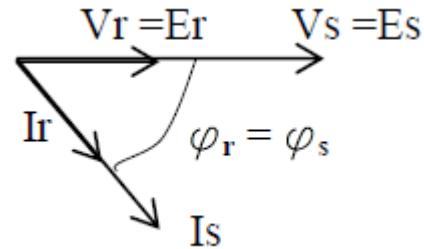
$$P_s = P_r + P_m$$

MI Doblemente Alimentada

- La relación entre las tensiones inducidas y corrientes en el estator y rotor es:

$$\overline{E}_r = g \cdot m \cdot \overline{E}_s$$

$$\overline{I}_r = \frac{\overline{I}_s}{m}$$



Donde g es deslizamiento y m es la relación de transformación medida en vacío y con el rotor detenido.

MI Doblemente Alimentada

- La potencia estatórica (consumida desde la fuente estatórica) es:

$$P_S = V_S \cdot I_S \cdot \cos(\varphi_S) = E_S \cdot I_S \cdot \cos(\varphi_S)$$

- La potencia rotórica (entregada hacia la fuente rotórica) resulta:

$$\begin{aligned} P_r &= V_r \cdot I_r \cdot \cos(\varphi_r) = E_r \cdot I_r \cdot \cos(\varphi_r) = g \cdot m \cdot E_S \cdot \frac{I_S}{m} \cdot \cos(\varphi_S) \\ &= g \cdot E_S \cdot I_S \cdot \cos(\varphi_S) \end{aligned}$$

$$\rightarrow \boxed{P_r = g \cdot P_S}$$

MI Doblemente Alimentada

- Observación:
 - Si $0 < g < 1$ el rotor entrega una fracción de la potencia que intercambia por el estator.
 - Si $g < 0$ la maquina absorbe potencia por el rotor.
 - Si se sustituye este resultado en el balance inicial se tiene:

$$P_m = (1 - g) \cdot P_s$$

- Se puede realizar el mismo razonamiento con la potencia reactiva, entonces:

$$Q_r = g \cdot Q_s$$

MI Doblemente Alimentada

- Se ha estudiado en el curso que para que la maquina produzca par se debe cumplir la condición de sincronismo:

$$\Omega_s = \Omega_r + \Omega$$

donde:

- $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_s}{p}$ (velocidad de rotación del campo giratorio del estator, respecto del estator)
- $\Omega_r = \frac{\omega_r}{p} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_r}{p}$ (velocidad de rotación del campo giratorio del rotor, respecto del rotor)
- Ω (velocidad de rotación del rotor, respecto del estator)

MI Doblemente Alimentada

- Entonces la velocidad de rotación de la máquina resulta:

$$\Omega = \frac{2\pi}{p} (f_s - f_r)$$

Si la frecuencia f_s es fija (por ejemplo impuesta por la red) se observa que controlando la frecuencia del circuito del rotor es posible fijar la velocidad de rotación de la máquina.

De las ecuaciones anteriores se deduce:

$$f_r = g \cdot f_s$$

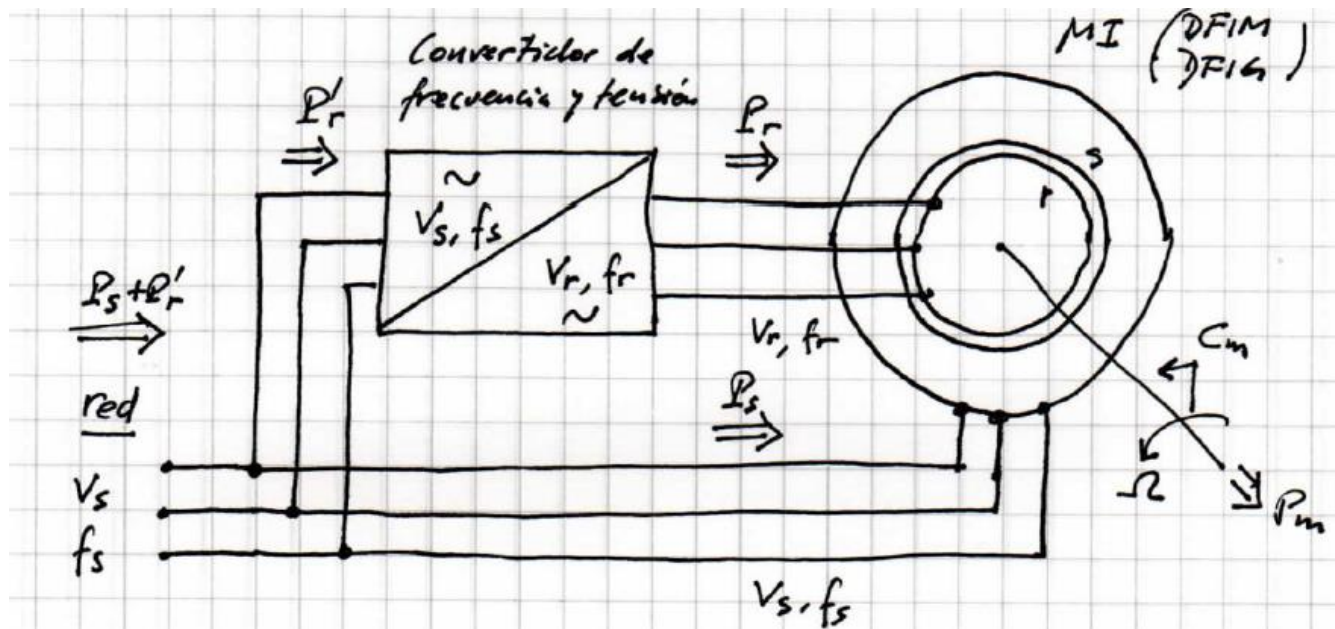
con $g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$ (deslizamiento)

MI Doblemente Alimentada

- Observaciones:
 - Si la velocidad de rotación del eje es menor que la velocidad de sincronismo el campo giratorio del rotor debe girar en el mismo sentido que el rotor complementando lo que falte para llegar a Ω_s .
 - Si la velocidad de rotación del eje es mayor que la velocidad de sincronismo el campo giratorio del rotor debe girar en sentido opuesto que el rotor para lo que se debe invertir la secuencia del sistema trifásico del rotor.

MI Doblemente Alimentada

- Como se indicó anteriormente, el estator de un DFIG se alimenta desde una fuente de tensión V_s y frecuencia f_s y el rotor desde una fuente de tensión V_r y frecuencia f_r . Normalmente ambas fuentes no son independientes, sino que están vinculadas entre sí por un convertidor de f y V de electrónica de potencia:



MI Doblemente Alimentada

- Modos de funcionamiento como **motor**:

La máquina funcionando como motor debe cumplir:

$$P_s > 0$$

$$P_m = (1 - g) \cdot P_s > 0$$

a) Deslizamiento positivo ($0 < g < 1$) entonces:

$$P_r = g \cdot P_s > 0$$

La máquina entrega potencia activa a la red por el rotor.

Además se verifica que $P_m > 0$.

Máquina funcionando como motor en forma “tradicional”.

MI Doblemente Alimentada

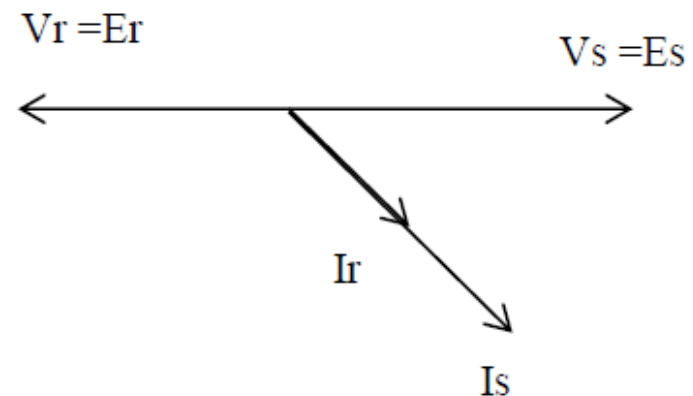
- Modos de funcionamiento como **motor**:

b) Deslizamiento negativo ($g < 0$) entonces:

$$P_r = g \cdot P_s < 0$$

La máquina consume potencia activa de la red por el rotor.

Observar que $g < 0$ implica que la velocidad del eje es mayor que la de sincronismo por lo cual se tiene un “motor hipersincrónico”; en este caso es necesario que el convertidor conectado al rotor cambie la secuencia del sistema trifásico de rotor.



MI Doblemente Alimentada

- Modos de funcionamiento como **generador**:

La máquina funcionando como generador debe cumplir:

$$P_s < 0$$

$$P_m = (1 - g) \cdot P_s < 0$$

a) Deslizamiento positivo ($0 < g < 1$) entonces:

$$P_r = g \cdot P_s < 0$$

La máquina consume potencia activa de la red por el rotor.

Además se verifica que $P_m < 0$.

Observar que se trata de un generador que funciona a velocidad menor que la de sincronismo (“generador subsincrónico”).

MI Doblemente Alimentada

- Modos de funcionamiento como **generador**:

b) Deslizamiento negativo ($g < 0$) entonces:

$$P_r = g \cdot P_s > 0$$

La máquina entrega potencia activa a la red por el rotor.

Generador asíncrono “tradicional” girando a mayor velocidad que la velocidad de sincronismo ($g < 0$); entonces inversión de secuencia de fases del sistema rotórico.

Variadores de frecuencia

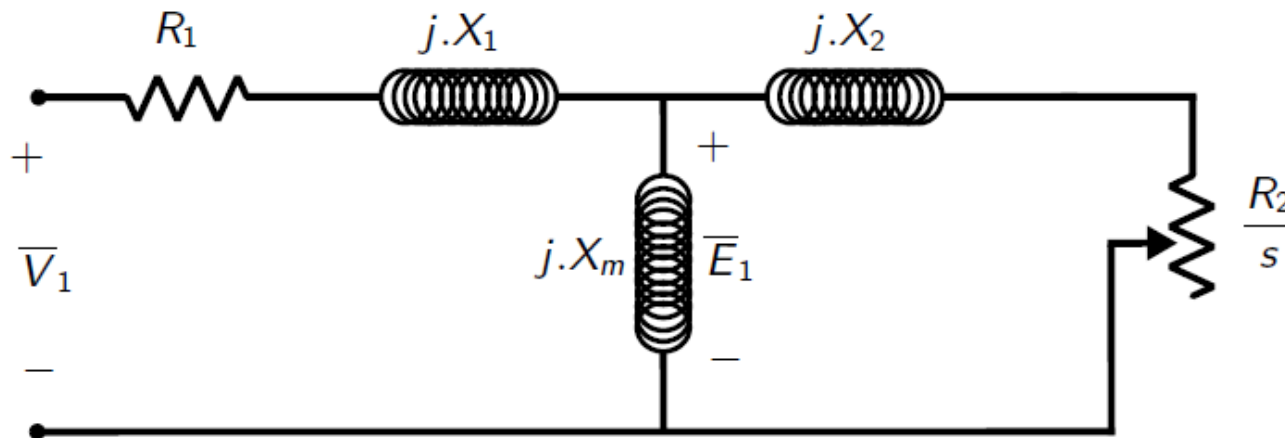
- La alimentación de los motores de inducción puede realizarse directamente desde la red, pero esto trae aparejado que la velocidad de operación tiene poco margen de variación.
- En el pasado se utilizaban motores de rotor bobinado con resistencia variable o motores DC en los casos donde se requerían variaciones de velocidad mayores.
- Los Variadores de Frecuencia son convertidores de electrónica de potencia que permiten generar AC a una frecuencia dada y por ende variar la velocidad de sincronismo, permitiendo operar a velocidad variable con motores tipo jaula de ardilla, más robustos y sencillos.

Variadores de frecuencia

- Existen varias estrategias de control de los MI a partir de variadores de velocidad, con complejidad creciente respecto al nivel al que se quiere controlar el motor. Se presentará el más sencillo, llamado control escalar (o $V/f = \text{cte.}$) por no requerir conceptos de modelado dinámico de los MI, no vistos en el curso.
- El control escalar de velocidad surge de una característica propia de este tipo de máquinas: en la zona de operación normal presenta una elevada regulación de velocidad.
- Esto genera un método sencillo para controlar su velocidad de operación: variar n_s . Para tener una variación continua de la misma, se debe variar la frecuencia de la alimentación.

Variadores de frecuencia

- Recordando el modelo de régimen permanente (despreciando las pérdidas en el hierro):



El par motor se puede expresar en función de E_1 :

$$T_m = \frac{3 \cdot p \cdot R_{2e}}{g \cdot \omega_s} \cdot \frac{E_1^2}{\left(\frac{R_{2e}}{g}\right)^2 + X_{2e}^2}$$

Variadores de frecuencia

- Por otra parte E_1 es la tensión inducida (derivada del flujo de magnetización), por lo que para flujo sinusoidal:

$$E_1 = \frac{\omega_s \cdot \psi_{max}}{\sqrt{2}}$$

Donde E_1 es el valor eficaz de la tensión inducida y ψ_{max} es el valor de pico del flujo de magnetización.

Sustituyendo en la expresión del par:

$$T_m = \frac{3 \cdot p \cdot R_{2e} \cdot \omega_s}{2g} \cdot \frac{\psi_{max}^2}{\left(\frac{R_{2e}}{g}\right)^2 + X_{2e}^2} = \frac{3 \cdot p \cdot \frac{R_{2e}}{g} \cdot \pi \cdot f_s}{\left(\frac{R_{2e}}{g}\right)^2 + X_{2e}^2} \cdot \psi_{max}^2$$

Se obtuvo el par en función del flujo de magnetización y el deslizamiento.

Variadores de frecuencia

- Derivando respecto a g la expresión anterior e igualando a cero se obtiene el deslizamiento de par máximo:

$$g_{T_m \max} = \frac{R_{2e}}{X_{2e}}$$

Evaluando en ese punto $T_m(g)$ se obtiene el par máximo:

$$T_{m \max} = \frac{3 \cdot p}{2L_{2e}} \cdot \psi_{\max}^2$$

El par máximo depende del cuadrado del valor máximo del flujo, por lo que si se mantiene el flujo constante en todo momento siempre se podrá obtener el par máximo. Esta conclusión resulta fundamental para alimentar el motor a frecuencia variable.

Variadores de frecuencia

- Por otra parte en la zona de pequeños deslizamientos $\frac{R_{2e}}{g} \gg X_{2e}$ por lo que la expresión del par se simplifica:

$$T_m = \frac{3 \cdot p \cdot \frac{R_{2e}}{g} \cdot \pi \cdot f_s}{\left(\frac{R_{2e}}{g}\right)^2 + X_{2e}^2} \cdot \psi_{max}^2 \approx \frac{3 \cdot p \cdot \pi \cdot f_s}{\frac{R_{2e}}{g}} \cdot \psi_{max}^2$$
$$= \boxed{\frac{3 \cdot p \cdot \pi}{R_{2e}} \cdot \psi_{max}^2 \cdot g \cdot f_s}$$

En la zona de trabajo normal, a flujo constante el par es proporcional a la frecuencia de deslizamiento ($g \cdot f_s$).

Variadores de frecuencia

- También es válida en la zona de pequeños deslizamientos la siguiente relación entre par y corriente rotórica:

$$T_m = \frac{3 \cdot p \cdot \pi}{R_{2e}} \cdot \psi_{max}^2 \cdot g \cdot f_s = \frac{3 \cdot p \cdot \pi}{R_{2e}} \cdot \psi_{max} \cdot g \cdot f_s \cdot \underbrace{\frac{E_1 \cdot \sqrt{2}}{\omega_s}}_{\psi_{max}}$$
$$= \frac{3 \cdot p}{\sqrt{2} \cdot R_{2e}} \cdot \psi_{max} \cdot g \cdot \underbrace{I_{2e} \cdot \frac{R_{2e}}{g}}_{E_1} = \boxed{\frac{3 \cdot p}{\sqrt{2}} \cdot \psi_{max} \cdot I_{2e}}$$

En la zona de trabajo normal, el par es proporcional al producto del flujo y la corriente de rotor. Cuanto mayor sea el flujo, sin entrar en saturación, se necesitará menor corriente de rotor para dar un cierto par, disminuyendo las pérdidas Joule.

Variadores de frecuencia

- En base a lo visto anteriormente, se obtiene como conclusión que el nivel de flujo de magnetización tiene un papel preponderante en la operación de la máquina.
- Asumiendo despreciable el efecto de R_1 y X_1 , la tensión de alimentación estática iguala la tensión inducida:

$$V_1 \approx E_1$$

- Para mantener un nivel de flujo constante en la máquina:

$$\frac{V_1}{f_s} = \frac{V_{1 \text{ nom}}}{f_{s \text{ nom}}} = \text{cte.}$$

Variadores de frecuencia

- Con la máquina alimentada de esta forma y bajo condiciones ideales el valor del par máximo se mantiene constante. Para todas las velocidades menores a la velocidad de sincronismo nominal se dice que se trabaja en la zona de par constante.
- Por encima de la velocidad de sincronismo nominal, no se puede mantener la relación $\frac{V_1}{f_s} = cte$. Se fija la tensión en su valor nominal, disminuyendo entonces el flujo al aumentar la frecuencia, trabajando en lo que se conoce como zona de campo debilitado.

Variadores de frecuencia

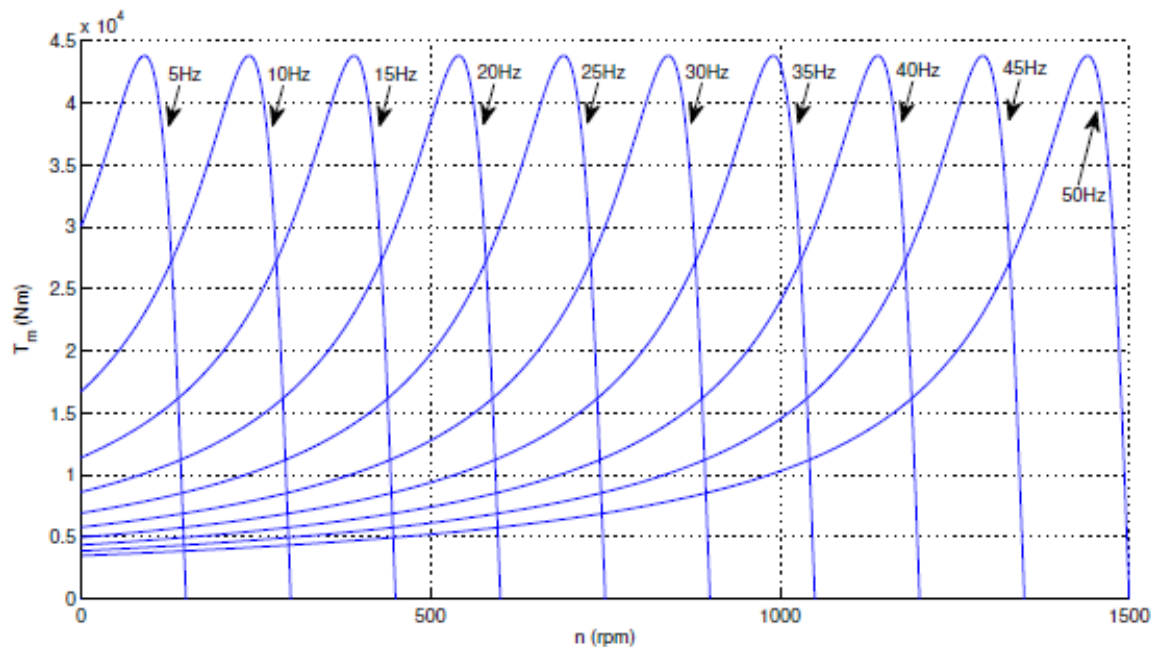
- En función de lo que se calculó previamente, el par en la zona de pequeños deslizamientos es proporcional (a flujo constante) a la corriente rotórica:

$$T_m = \frac{3 \cdot p}{\sqrt{2}} \cdot \psi_{max} \cdot I_{2e}$$

- Esto lleva a una conclusión importante: alimentando la máquina con relación $\frac{V_1}{f_s} = cte$ ante un par de carga constante, las pérdidas Joule son constantes en todo el rango de velocidades.

Variadores de frecuencia

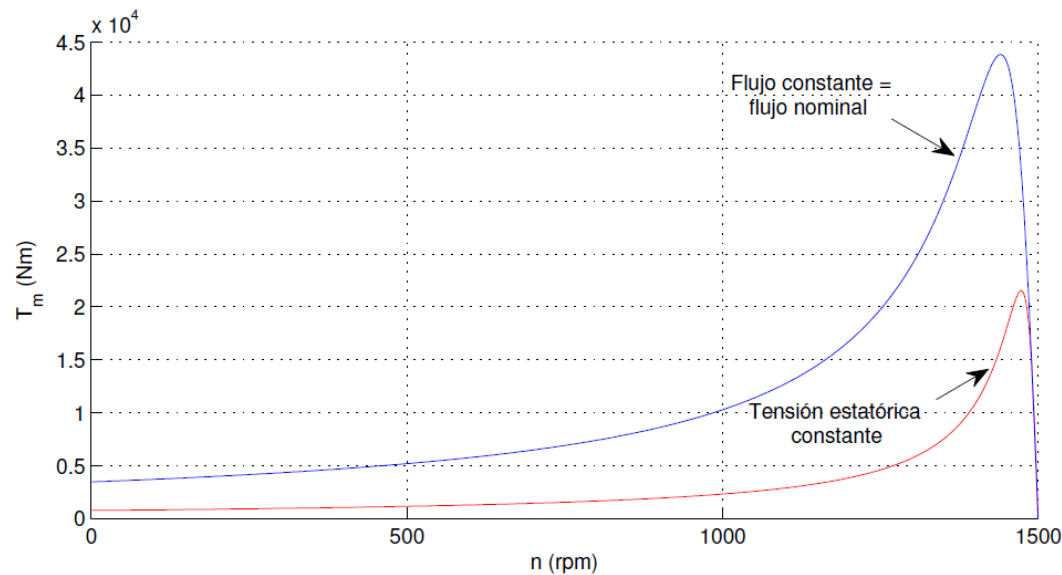
- Asumiendo que el flujo se mantiene constante para todo deslizamiento, las curvas $T_m(n)$ al alimentar con frecuencias menores resultan en una traslación en la velocidad:



Conclusión: Se puede utilizar la frecuencia de alimentación como referencia de velocidad.

Variadores de frecuencia

- En realidad si se alimenta la máquina en tensión, el flujo no se mantiene constante para todo deslizamiento, debido a la caída de tensión en la resistencia y reactancia de dispersión del estator.



Si se alimentara el motor en corriente se podría imponer el valor del flujo manteniendo la corriente de magnetización constante.

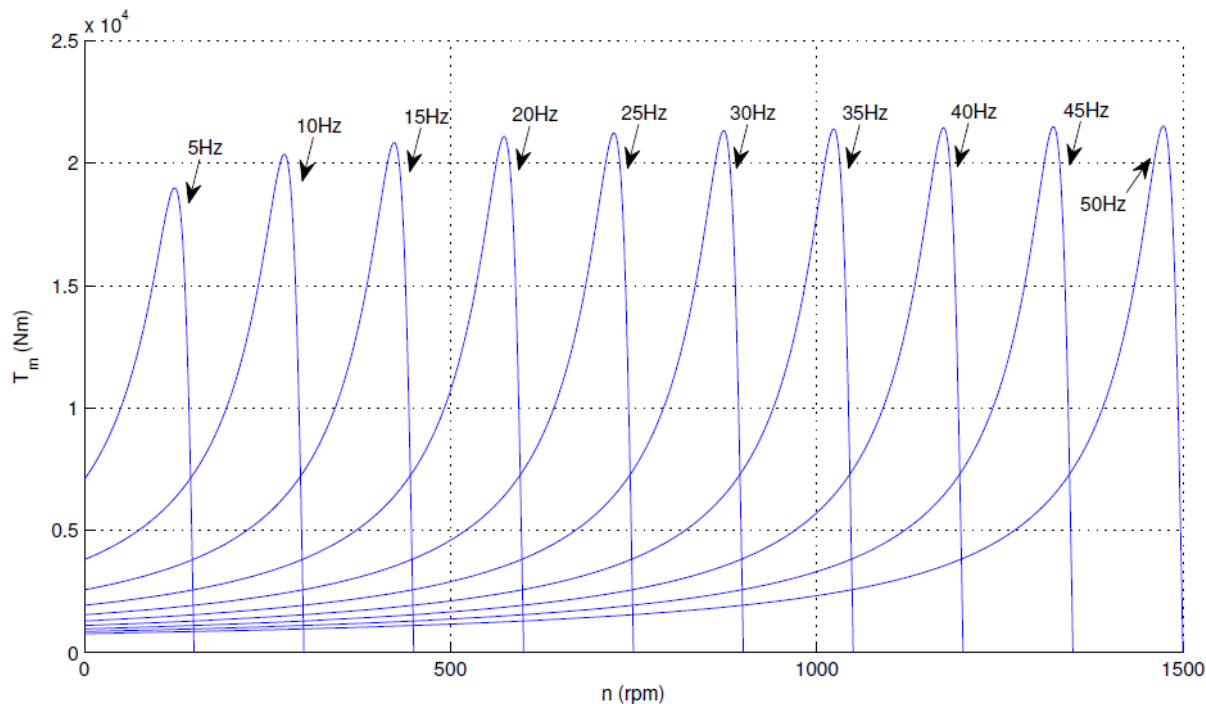
Variadores de frecuencia

- Compensación de V/f a bajas frecuencias:
 - A frecuencias cercanas a la nominal, la caída de tensión estática es esencialmente en X_1 . Conforme baja la frecuencia, también disminuye el valor de X_1 , con lo que la caída de tensión estática disminuye y mantener $\frac{V_1}{f_s} = cte$ es equivalente aproximadamente a mantener $\frac{E_1}{f_s} = cte$ y por tanto el flujo se conserva constante.
 - A frecuencias de alimentación bajas, R_1 deja de ser despreciable frente a X_1 y entonces si se mantiene la alimentación $\frac{V_1}{f_s} = cte$ habrá una pérdida de flujo debido a la caída de tensión en R_1 .

Variadores de frecuencia

Dado que el par es dependiente de ψ_{max}^2 , con f_s y g dados, esta caída de flujo se traducirá en una caída en el par.

En la figura siguiente se muestran las curvas $T_m(n)$, para un motor alimentado con $\frac{V_1}{f_s} = cte$. Notar la disminución de par en las bajas frecuencias:



La solución es compensar aplicando una tensión mayor que la que indica la relación $\frac{V_1}{f_s} = cte$ a bajas frecuencias.

Variadores de frecuencia

- Resumen:
 - El control $\frac{V_1}{f_s} = cte$ permite controlar con relativa facilidad la velocidad de un MI, utilizando la frecuencia como referencia de velocidad.
 - La implementación resulta simple, mediante un inversor comandado por PWM por ejemplo.
 - Como desventaja se observa que no hay un control dinámico, sino que se establece el valor de velocidad en régimen permanente. Existen otros métodos más complejos como el control vectorial, para aplicaciones más específicas que requieren un control del par en forma dinámica.