

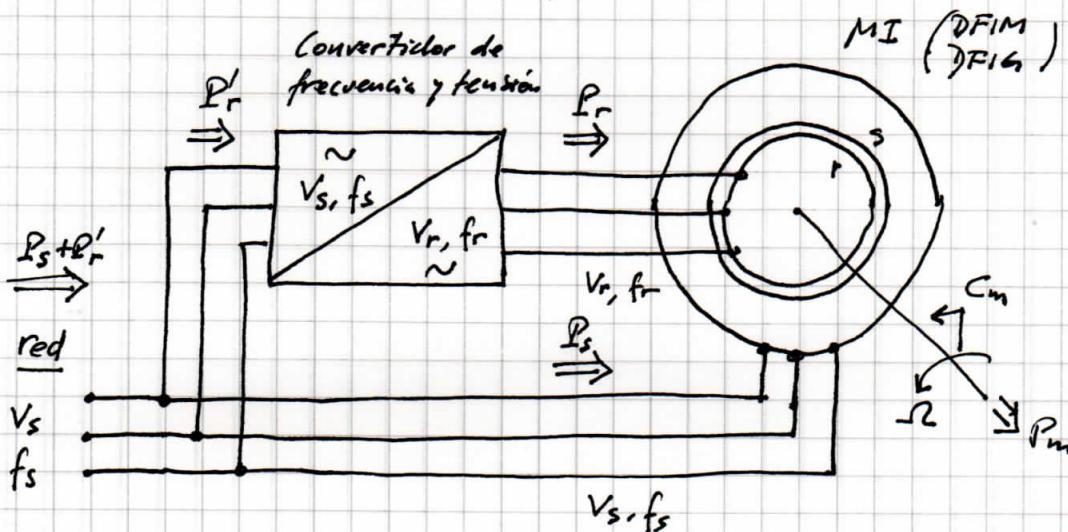
MÁQUINAS DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADAS

Modos de funcionamiento de las máquinas de inducción.

1) Doble Alimentación

La terminología Máquina de Inducción Doblemente Alimentada (en inglés DFIM - Doubly Fed Induction Machine, o DFIG (DFI Generador), por su aplicación más usual, especialmente en generación eólica), refiere a una conexión en que el rotor (trifásico, bobinado, accesible extensamente mediante contactos deslizantes sobre los anillos) no está cortocircuitado sobre sí mismo o sobre resistencias externas, sino conectado a otra fuente de alimentación.

Así el estator se alimenta por una fuente de tensión V_s y frecuencia f_s y el rotor por una fuente de tensión V_r y frecuencia f_r . Normalmente ambas fuentes no son independientes, sino que están vinculadas entre sí por una conversión de frecuencia y tensión de electrónica de Potencia, como en el esquema siguiente:



P_s : Potencia (activa) eléctrica tomada por el estator, de la red, (si $P_s > 0$)
 } entregada a la red, (si $P_s \leq 0$)

P_r : Potencia (activa) eléctrica tomada por el rotor de su fuente (si $P_r > 0$)
 } entregada " " a su fuente (si $P_r \leq 0$)

$P'_r \approx P_r$: sólo difieren en las pérdidas del convertidor de frecuencia y tensión

P_m : Potencia mecánica en el eje ($P_m > 0$, entregada a la carga, si
 C_m y S_2 son de igual signo)

Las condiciones de funcionamiento de la máquina de inducción imparten las siguientes relaciones:

① $\boxed{S_2s = S_2r + S_2}$, con $S_2s = \frac{\omega_s}{P} = \frac{2\pi f_s}{P}$: Vel. campo giratorio del estator respecto al estator.

$$S_2r = \frac{\omega_r}{P} = \frac{2\pi f_r}{P}$$
 : Vel. campo giratorio del rotor respecto del rotor

$$S_2 = \text{Vel. mecánica del rotor respecto al estator}$$

$$\textcircled{2} \quad \boxed{f_r = g f_s} \quad \text{con } g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} : \text{ desplazamiento.}$$

$$\textcircled{3} \quad \boxed{|V_r| \approx m g |V_s|}, \quad \text{con } m = \text{relación de transformación en vacío}$$

y a rotor abierto y detenido.

(La condición de $=$ solo se verifica despreciando las caídas de tensión en la resistencia e inductancia de fases del rotor).

$$\textcircled{4} \quad \text{En la MI: } \boxed{P_r'' = g P_{emt}} \quad \text{con: } P_r'' = \text{"Potencia desarrollada al rotor"}$$

↓

$$\boxed{-P_r \approx g P_s}$$

(Si despreciamos las pérdidas de MI)

$P_{emt} = \text{"Potencia Electromagnética transmitida"}$

P_{emt} difiere de P_s en las pérdidas Joule propias del rotor, y en el signo

Obs: a) Dado g , las condiciones $\textcircled{2}$ y $\textcircled{3}$ son las que tiene que cumplir el convertidor de frecuencia y tensión.

b) Existen convertidores capaces de imponer al valor de P_r , signo indicado, en cuyo caso de $\textcircled{4}$ se ve que pueden imponer g .
(Siempre tienen que cumplir $\textcircled{2}$ y $\textcircled{3}$ para el g que impongan).

c) Según el tipo y diseño de los convertidores, estos también pueden tener la capacidad de forzar flujos de reactiva, en cuyo caso el montaje tiene la capacidad de forzar el $\cos \phi$ visto desde la red.

d) Despreciando todas las pérdidas; en la MI se tiene:

$$-P_r = P_{jr} = P_r'' = g P_{emt}$$

$$P_{emt} \approx P_s$$

$$P_m = C_{em} \cdot \omega_s = \underbrace{C_{em} \cdot \omega_s}_{P_{emt}} (1-g) = \underbrace{(1-g)}_{\approx P_s} P_{emt}$$

$$\Rightarrow -P_r = \frac{g}{1-g} P_m = P_{jr}$$

y se verifica el balance

$$P_s = \overbrace{P_{jr}}^{= -P_r} + P_m \quad \Rightarrow \quad \overbrace{P_m}^{\frac{g}{1-g} P_m} \approx \overbrace{\frac{g}{1-g} P_m + P_m}^{\approx P_s}$$

$$\boxed{P_m = P_s + P_r}$$

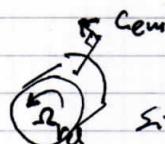
2) MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UNA MI.

Punto 1) P_{em} : Potencia electromagnética extraída o entregada por un bobinado al campo giratorio en el entorno de una maquinaria. Notación: (bobinado trifásico = "armadura")

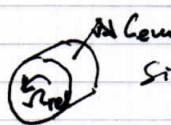
$$P_{em} = C_{em} \cdot S_{rel}$$

C_{em} : Par electromagnético transmitido por el campo giratorio y aplicado a la armadura considerada.

S_{rel} : Velocidad relativa de la armadura respecto del campo giratorio



Si C_{em} y S_{rel} son de igual signo, entonces la armadura entrega potencia al campo giratorio y $P_{em} > 0$



Si C_{em} y S_{rel} son de signo contrario, entonces la armadura extrae potencia del campo giratorio, frenando, y $P_{em} < 0$.

Punto 2) S_{rel} : Velocidad relativa de la armadura respecto del campo giratorio

Si en una armadura trifásica (polifásica) de p pares de polos circula un sistema de corriente trifásico (polifásico) equilibrado directo, de pulsación eléctrica $= \omega = 2\pi f$, entonces esa armadura crea un campo giratorio a la velocidad de sincronismo $S_S = \frac{\omega}{p}$.

⇒ El campo gira a $S_S = \frac{\omega}{p}$ respecto de la armadura.

Entonces la armadura tiene una velocidad relativa S_{rel} respecto del campo giratorio: $S_{rel} = -S_S = -\frac{\omega}{p}$.

Punto 3) Paros aplicados por el campo giratorio

Si el par aplicado sobre el rotor por el campo giratorio es C_{emr} , entonces por el principio de acción y reacción, el par aplicado por el mismo campo giratorio sobre el estator de la máquina es

$$C_{emg} = -C_{emr}.$$

Relaciones Sistemas en la Máquina de Inducción

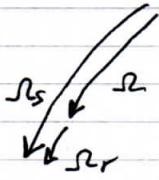
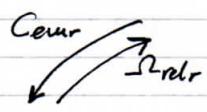
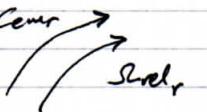
$$\textcircled{1} \quad \frac{\omega_s}{P} = \frac{\omega_r}{P} + \underline{\underline{r_2}}$$

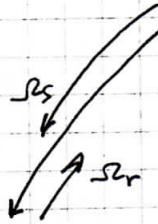
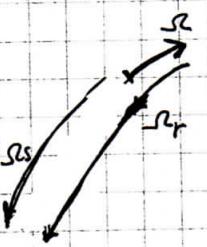
$$\left. \begin{array}{l} r_{2s} = \frac{\omega_s}{P} \\ r_{2r} = \frac{\omega_r}{P} \end{array} \right\} \quad \boxed{\underline{\underline{r_2}} = r_{2r} + r_{2s}}$$

$$\text{De } \textcircled{2} \Rightarrow \boxed{\underline{\underline{r_2r}} = g - \underline{\underline{r_2s}}}$$

Convenación de signos: Se admite que el sistema de alimentación es trifásico, equilibrado y directo, y que $\underline{\underline{r_2s}} > 0$ ($r_{2s} > 0$ = giro en sentido trigonométrico > 0 , es decir antihorario).

Signo del par $C > 0$ si está aplicado en el mismo sentido que una velocidad > 0 .

g	Velocidad	Rotor	Stator	EP mecánico	Máquina de Inducción
1) $0 < g < 1$		a) <u>Extrae Pem del campo giratorio</u> $Pem_r = Cem_r, r_{2relr} < 0$ $r_{2relr} = -r_{2r} < 0$ $\Rightarrow Cem_r > 0$  $r_{2r} > 0$ $r_{2r} > 0$ $r_2 > 0$ $r_{2r} < r_{2s}$ $r_2 < r_{2s}$ $\boxed{Pr < 0}$	$Cem_s = -Cem_r < 0$ $r_{2rels} = -r_{2s} < 0$ $Pem_s = Cem_s (-r_s)$ $Cem_s > 0$ $Pem_s > 0$ <u>Estator extrae</u> <u>Pem al c. giratio</u>	$Cm = Cem_r > 0$ $r_2 > 0$  $Pm = Cm r_2 > 0$ <u>Par motor</u> <u>Entrega</u> <u>Pot. mecánica</u> $\boxed{Pm > 0}$	Motor de Inducción (Subsidiaria)
		b) <u>Entrega Pem al campo giratorio</u> $Pem = Cem_r, r_{2relr} > 0$ $r_{2relr} = -r_{2r} < 0$ $\Rightarrow Cem_r < 0$  $\boxed{Pr > 0}$	$Cem_s = -Cem_r > 0$ $r_{2rels} = -r_{2s} < 0$ $Pem_s = Cem_s (-r_s)$ $Cem_s < 0$ $Pem_s < 0$ <u>Estator extrae</u> <u>Potencia del c. g., que alimenta las pérdidas y el resto se entrega alred</u> $\boxed{Pm < 0}$	$Cm = Cem_r < 0$ $r_2 > 0$  <u>Par resistente</u> <u>extrae</u> <u>Pm de su eje.</u> $\boxed{Pm < 0}$	Generatriz subsidiaria Rotación de la fuerza externa $\boxed{Pr > 0}$ $\boxed{Ps < 0}$ $\boxed{Pm < 0}$

g	Velocidades	rotor	stator	eje mecánico	Mdg Inducción
$g < 0$	 $R_s > 0$ $R > 0 (> R_s)$ $R_{rel} < 0$	a) extrae Pwm del C.G. $Pwm_r = Cem_r R_{rel,r}$ < 0 $Cem_r = Cem_r (-R_r)$ $\Rightarrow Cem_r < 0$ Cem_r $R_{rel,r} = -R_r < 0$ $\boxed{P_r < 0}$	$Cem_s = -Cem_r > 0$ $R_{rel,s} = -R_s < 0$ $Pwm_s = Cem_s R_{rel,s}$ $\Rightarrow Pwm_s < 0$ Cem_s $R_{rel,s} = -R_s > 0$ $\text{extrae Pwm del C.G.}$ $\text{ex pot. & extrae de la red. } P_s < 0$	$Cm = Cem_r > 0$ $R_m = R > 0$ $Pm = Cm R_m$ < 0 $\text{Par resistencia conforme Pwm lineal.}$	Generación hiper síncrono Con el rotor alimentado o conectado a una carga pasiva. $P_s < 0$ $P_r < 0$ $P_m < 0$
		b) entra Pwm al C.G. $Pwm_r = Cem_r R_{rel,r}$ > 0 $Pwm_r = Cem_r (-R_r)$ $\Rightarrow Cem_r > 0$ Cem_r $R_{rel,r} = -R_r > 0$ $\text{ex pot. & extrae de la alim. rotaria}$	$Cem_s = -Cem_r < 0$ $R_{rel,s} = -R_s < 0$ $Pwm_s = Cem_s (-R_s)$ $\Rightarrow Pwm_s > 0$ Cem_s $R_{rel,s} = -R_s > 0$ $\text{extrae Pwm al C.G.}$ $\text{ex pot. & extrae de la red.}$	$Cm = Cem_r > 0$ $R_m = R > 0$ $Pm = Cm R_m$ > 0 $\text{Par motor. Entrada Pwm.}$ $\boxed{P_m > 0}$	Motor hiper síncrono Con el rotor alimentado desde una fuente externa. Estator dim.
$g > 1$ $(g > 0)$	 $R = R_s(1-g)$ $R < 0$ $R_s > 0$ $R_{rel} = g R_s > 0$	a) extrae Pwm del C.G. $Pwm_r = Cem_r R_{rel,r}$ < 0 $Pwm_r = Cem_r (-R_r)$ $\Rightarrow Cem_r > 0$ Cem_r $R_{rel,r} = -R_r > 0$ $\boxed{P_r < 0}$	$Cem_s = -Cem_r < 0$ $R_{rel,s} = -R_s < 0$ $Pwm_s = Cem_s (-R_s)$ $\Rightarrow Pwm_s > 0$ Cem_s $R_{rel,s} = -R_s > 0$ $\text{extrae pot. al C.G. & extrae de la red. estatica comunida.}$	$Cm = Cem_r > 0$ $R_m = R < 0$ $Pm = Cm R < 0$ Par mantenimiento $\boxed{P_m < 0}$	Co rotina corotacionista actua como freno Estator dim. desde una fuente externa $P_r < 0$ $P_s > 0$ $P_m < 0$
		b) entra Pwm al C.G. $Pwm_r = Cem_r R_{rel,r}$ > 0 $Pwm_r = Cem_r (-R_r)$ $\Rightarrow Cem_r < 0$ Cem_r $R_{rel,r} = -R_r > 0$ $\boxed{P_r > 0}$ $\text{La Pwm la obtiene de la alimentacion rotaria.}$	$Cem_s = -Cem_r > 0$ $R_{rel,s} = -R_s < 0$ $Pwm_s = Cem_s (-R_s)$ $\Rightarrow Pwm_s < 0$ Cem_s $R_{rel,s} = -R_s > 0$ $\text{Extrae o recibe potencia del C.G. dinamico sus polos y la aplica en forma del estator}$	$Cm = Cem_r < 0$ $R_m = R < 0$ $Pm = Cm R > 0$ Par motor $\boxed{P_m > 0}$	Motor "inversido" (alimentado por el rotor) con el estator corotacionista o cerrado sobre una carga pasiva. $P_r > 0$ $P_s < 0$ $P_m > 0$