

CAPITULO 7 . MÁQUINAS DE INDUCCIÓN POLIFÁSICAS

Ju, 4/vii

Máquinas de inducción polifásicas.

7.1 - Descripción y constitución de las máquinas.

$$\boxed{\frac{W_s}{P} = \frac{W_r}{P} + \eta_s}$$

Campo giratorio

Vel. campo giratorio/estator = $\frac{W_s}{P} = \eta_s$

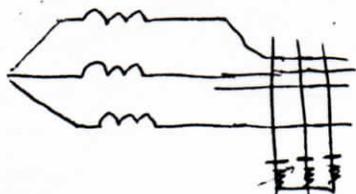
Ahora $\eta_s \neq \eta_{s1} \Rightarrow$ máq. asíncronas.

La condición de tener conversión es $\eta_s \neq \eta_{s1}$, aunque $\eta_s \cong \eta_{s1}$ y varía según la carga \rightarrow (lo opuesto a las M.S.)

estator trifásico

rotor $\begin{cases} \rightarrow$ trifásico \rightarrow rotor bobinado
 \rightarrow polifásico \rightarrow rotor de jaula de ardilla.

rotor bobinado



Cada barra tiene una R y una L propia, $\frac{1}{3} \times$ anillos ($\frac{1}{3}$ a todas las barras) \Rightarrow 

$\Rightarrow \cong$ sist. polifásico en λ ($\frac{1}{3}$ fase = 1 barra)

Los M.I. son el 98% de las máq. de uso, espec. máq. chicas.

$P < 15 \text{ MW}$ (grande, pero 10 veces $<$ q' en M.S.)

Consumen mucha I arranque \Rightarrow no se usan para P muy gds. (1 central x ej.). Pero les GS los mueve turbinas. Las MI arrancan solas, x0 esto da problemas a la red.

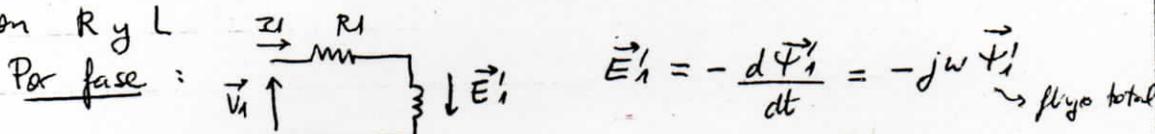
$1 \text{ MW } (0,746 \text{ kW}) < P_{\text{Hicas}} < 200 \sim 500 \text{ kW.}$

7.2 - Circuito equivalente.

Hip. Rotor bobinado trifásica, $\lambda - \lambda$

a) Rotor abierto y detenido. $\omega_2 = 0$

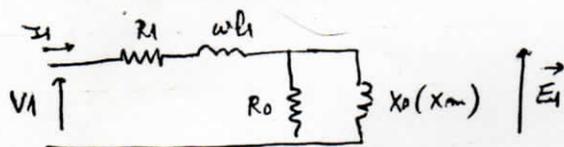
Alimento el estator; la fuente lo ve como 1 sistema con R y L



(uso convención de signo generador)
No todo el flujo pasará x el e.h., habrá fugas.

$\vec{V}_1 = R_1 \vec{I}_1 - \vec{E}'_1 = R_1 \vec{I}_1 + j\omega \vec{\Psi}'_1$

$\vec{V}_1 = R_1 \vec{I}_1 + j\omega L_1 \vec{I}_1 + j\omega \vec{\Psi}_f$ $\vec{\Psi}'_1 = \vec{\Psi}_1 + \vec{\Psi}_f$; $\vec{\Psi}_f = L_f \vec{I}_1$ (fugas)



$R_0 \Rightarrow$ pérdidas en el hierro.

Defin $\vec{E}_1 = j\omega \vec{\Psi}_1$

%observador en 1 punto fijo del e.h. ve 1 campo sinusoidal. \Rightarrow se genera un flujo sinusoidal en el rotor.

Rotor: \vec{E}_2 (tensión inducida x fase)

entre anillos \vec{U}_2 : $|\vec{U}_2| = \sqrt{3} |\vec{E}_2|$

Hay 1 efecto transformador: $|\vec{E}_2| = m |\vec{E}_1|$ y $\vec{E}_2 = m \vec{E}_1$

(trafo: $m = \frac{N_2}{N_1}$) máquina de inducción: $m = \frac{q_2 \cdot K_{b2} \cdot N_2}{q_1 \cdot K_{b1} \cdot N_1}$

relación de transformación

$H = \frac{3}{2}$ campos de 1 fase

$E = H \cdot e = \dots$
 $\frac{3}{2}$? (las tensiones inducidas tienen este coef.)

rotor abierto en fase. (= fase)
estos q m dependen el # fases.

La relac. de transf. se puede determinar experimentalmente.

Puede medir V_{10} , E_{20} , no el \vec{E}_1 , pero $E_1 \neq V_{10}$

$$m \cong \frac{E_{20}}{V_{10}}, \text{ pues } E_1 \cong V_{10}, \text{ aunque el error es } > \varphi' \text{ lo } \varphi' \text{ era en los trafos, pues tengo un e.h., cabezales de L, etc}$$

b) Rotor abierto y girando a $\omega \neq 0$.

Con $\omega = \omega_s$: ve l campo fijo. O sea: cuanto + se acerca a ω_s ve el campo girando + lento.

$$s = g = \text{deslizamiento} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$$

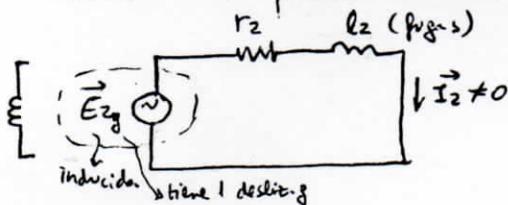
↑ slip ↑ glissement

V_{20} l campo f' gira a $(\omega_s - \omega) = g \omega_s$.

$$|\vec{E}_{2g}| = g |\vec{E}_1| = mg |\vec{E}_1| \text{ (la freq. de tension inducida en el rotor es } \neq \text{ freq. estator)}$$

c) Rotor en φ_c , girando a $\omega \neq 0$.

Ahora si puede circular i en todas las scpf del rotor.



→ este circuito funciona a freq. $g f$.

$$f = \frac{\omega_s}{2\pi}, \quad f_r = g f$$

$$\omega_r = g \cdot \omega_s$$

Estator y rotor son circuitos indep.

⇒ puedo tener freq. \neq en ambos.

$$\vec{E}_{2g} = (r_2 + j\omega_l z) \vec{I}_2$$

→ debido al ψ total de e.h. (no solo x el flujo del estator)

→ dada x el φ_c contribuyen al campo total de e.h.

\vec{E}_{2g} : corresponde a la superposicion de \vec{I}_1, \vec{I}_2 .

" $\vec{E}_{2g} = mg \vec{E}_1$ " (tienen = fase, visto desde el estator)

Los campos de estator y rotor giran a $\omega = \omega_s$, si no, no habria conversion. Pero al rotor se le agrega la vel mecanica.

Sup. quito las I de rotor y las llevo a una I equiv. en el estator:

$$\vec{I}'_1 = \vec{I}_{10} + \vec{I}_2$$

↓
la p'tenta en vuelo

→ la del rotor llevada al estator. (corriente de estator equivalente a la del rotor.)

$$\vec{I}_2 s: \begin{cases} E_r = \frac{3}{2} m' r \cos(\omega_s t - p\theta - \varphi_r + \varphi_0) \\ E_s = \frac{3}{2} m' s \cos(\omega_s t - p\theta - \varphi_s) \end{cases}$$

en coordenadas estator

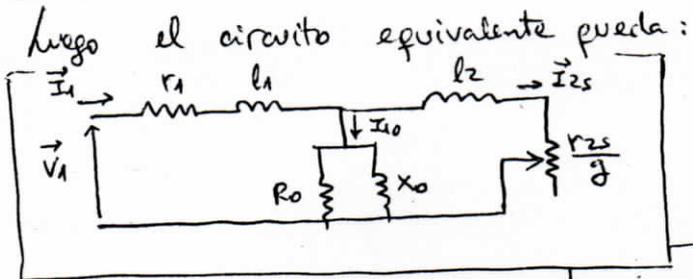
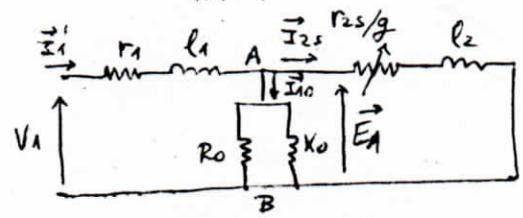
rotor y estator trifásicos

→ los bobinados reales estator \neq freq. (reso largo todo al estator)

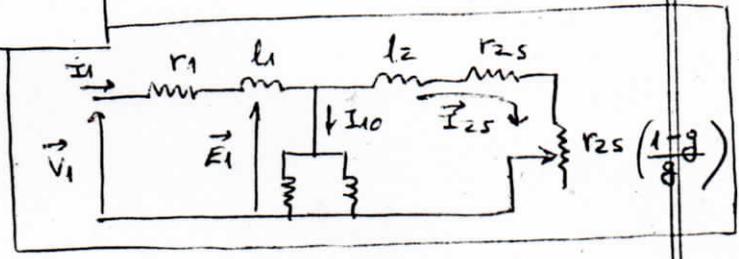
$m \cdot g \cdot \vec{E}_1 = (r_2 + j\omega_s l_2) \frac{\vec{I}_{2s}}{m}$ \rightarrow a frecuencia f (todo visto desde el estator) (desde l referencial del estator)

$\vec{E}_1 = \left[\frac{1}{m^2} \left(\frac{r_2}{g} \right) + j\omega_s \frac{l_2}{m^2} \right] \vec{I}_{2s}$; $r_{2s} = \frac{r_2}{m^2}$, $l_{2s} = \frac{l_2}{m^2}$

$\vec{E}_1 = \left(\frac{r_{2s}}{g} + j\omega_s l_{2s} \right) \vec{I}_{2s}$



$\frac{r_{2s}}{g} = r_{2s} + r_{2s} \frac{(1-g)}{g}$



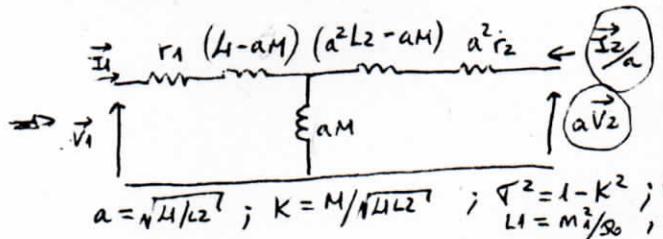
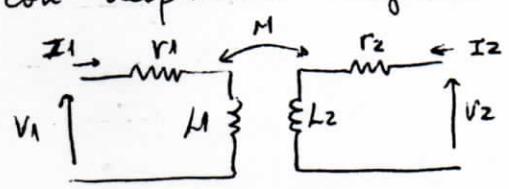
Pérdidas en el rotor:

rotor real: fase: $r_2 I_2^2$

rotor equiv.: fase: $r_{2s} I_{2s}^2 = \frac{r_2}{m^2} (m I_2)^2 \rightarrow$ efectivamente las pérdidas son iguales.

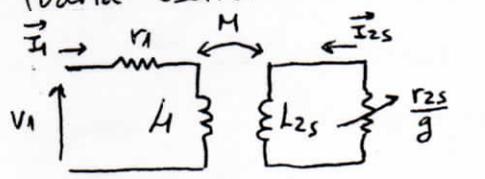
$\Rightarrow P_{rs} = P_r$ (pérd. rotor)

Es 1 forma de decir q' para y fase se trata de circuitos con acoplamiento magnético:



$a = \sqrt{L_1/L_2}$; $K = M/\sqrt{L_1 L_2}$; $\sigma^2 = 1 - K^2$; $l_1 = L_1 \sigma^2$; $l_2 = M^2/\sigma^2$

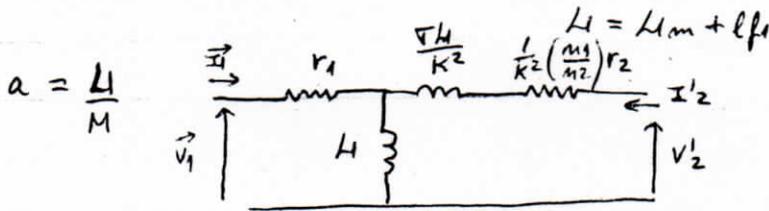
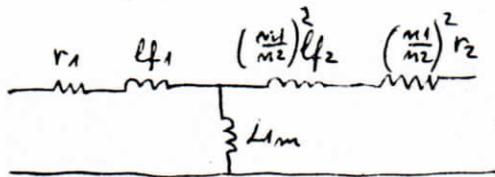
Podría escribir:



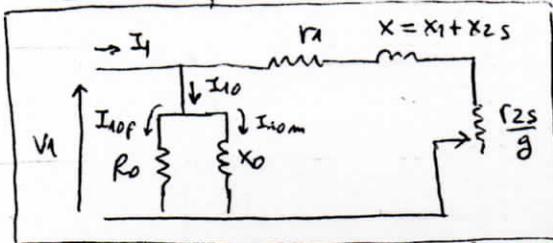
$\vec{V}_1 = r_1 \vec{I}_1 + j\omega L_1 \vec{I}_1 + j\omega M \vec{I}_{2s}$
 $0 = \frac{r_{2s}}{g} \vec{I}_{2s} + j\omega L_{2s} \vec{I}_{2s} + j\omega M \vec{I}_1$

Matemát. podría multiplicar la ecuv. x cualquier N° y sería correcto, pero solo esta me da las mismas pérdidas.

(*) H) $\text{Pot}_1 = \text{Pot}_2$
 (ver apuntes trafos., este ahí)



Circuito equivalente aproximado:

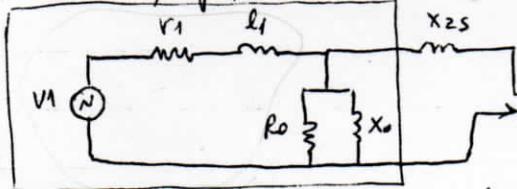


$X_1 = \omega_s L_1$; $X_{2s} = \omega_s L_{2s}$

Esto es análogo a lo q' se hacía en los trafos, pero la aprox. es de peor calidad, pues $(X_0)^f$ de

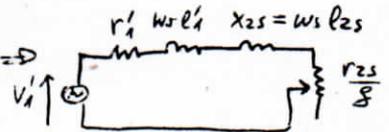
↑ el circuito p' problm. se usa en los problemas. // fogas es > .

$V_1 = \text{cte.}$; $f_s, \omega_s = \text{ctes.}$



(la lf1 es difícil de hallar, pues se hace solo 1 ensayo de % \Rightarrow vienen las l todas juntas).

↳ podría hacer el Thévenin de esto \Rightarrow



Det. experimental del circuito equiv.:

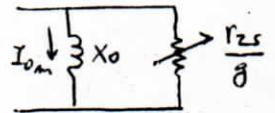
I_{10} $\begin{cases} \rightarrow I_{10} \text{ magnetizante, } \phi' \text{ predomina.} \\ \rightarrow I_{10} \text{ de pérdidas.} \end{cases}$

Funcionamiento normal : $g \approx 0$ ($0 < g < 1$) ($\Rightarrow r_{2s}/g$ muy grande)

$g \approx 1\% \rightarrow 5\%$; $g_{\text{típico}} \approx 2\% \text{ a } 3\%$

Se podría reducir a esto el circuito equiv:

(es útil hacer las ventan "en grueso" con este circuito, y luego refinar.)



a) Ensayo en vacío.

b) " en c.c. a rotor flopeado.

} solo se consume la pot. de pérdidas (ensayos a baja pot.) (Es difícil poder hacer ensayos a altas pot. (E))

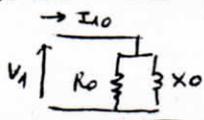
a) En vacío (\equiv sin carga mecánica)

$V_1 = V_{1m}$, rotor en c/c, $\left[R \neq R_{2s} \right]$, "no muy \neq ", $\left[g = 0 \right] \Rightarrow \frac{r_{2s}}{g} \approx \infty, \approx \text{vacío}$.

$\Rightarrow I_{2s} \approx 0$

Se mide la I_{10} , P_{10} (consumida).

Gralm. se hace además medida de r_1 en corriente continua \Rightarrow dato no ten- de? $\frac{1}{3}$? los efectos de?
 (aunque esta medida no considere el efecto pelicular de A.C.)

Si considero este equivalente: 

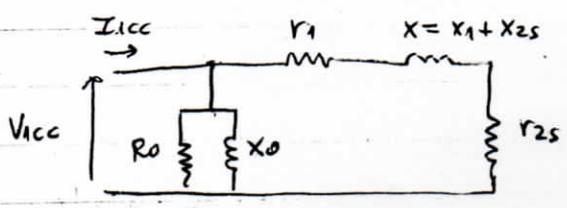
$$R_0 = \frac{V_1^2}{P_{10}} ; P_{10} = 3 \frac{V_1^2}{R_0} ; \boxed{R_0 = \frac{3V_1^2}{P_{10}} = \frac{U_1^2}{P_{10}}}$$

$U_1 = \sqrt{3} V_1$
 ↑ $\frac{1}{\sqrt{3}}$ por fase

$$X_{10} = \sqrt{\frac{(3V_1 I_{10})^2 - P_{10}^2}{I_{10}^2}} = \frac{3V_1^2}{X_0} \Rightarrow \boxed{X_0 = \frac{U_1^2}{\sqrt{3V_1^2 I_{10}^2 - P_{10}^2}}}$$

b) Ensayo en rotor bloqueado. Mido: $U_{icc}, I_{icc}, P_{icc}$.

$$s = 0 ; g = \frac{s_2 - 0}{s_2} = 1$$



Consumo mucha corriente (r_{2s} chico) \Rightarrow ensayo % . Entonces no puede hacerse a V_N , se hace a V reducido, tal $p' I \approx I_{nom}$.

$$\boxed{V_{icc} < V_{Nm}}$$

En los trafos la V_{icc} era muy chica: $30-40\% V_N$, pero ahora tengo $I_{10} \approx 40\% I_N$ (en vacío) y como la máq. tiene + fugas ϕ los trafos, la I se consume x la rama en % x o t_2 x la de vacío \Rightarrow puedo darle + tensión (en los trafos necesitaba V muy chica, pues I_{om} era muy chica)

$$V_{icc} \text{ tal que } |I_{icc}| = |I_{10}| \Rightarrow |V_{icc}| \approx 30\% V_N$$

Quiero los parámetros del circ. equiv. ϕ' me sirven xa determinar el func. de la máq. en condiciones normales.

Pero: en vacío el R_0 mide $(R_0 \parallel X_0)$ pérd. Joule estator ($40\% t_2 \approx 16\%$) y pérd. mecánicas (protam, etc) y en el Fe.

En rotor bloq: R_0 debe ser \neq : no tengo pérd. mecánicas, además está r_1 (ϕ' incluye pérd. Joule), y aparecen ahora pérdidas importantes en Fe rotor (en vacío, rotor gira a s_2 , ve 1 campo de \Rightarrow no hay pérdidas en Fe, B continuo) \Rightarrow

\Rightarrow debería poner una R_0' ϕ' no se como determinar:



$$P_{e.m.t} = C_{em} \cdot \omega_s$$

$$P_{e.m.t} = \frac{P_{Tn}}{g} \Rightarrow \boxed{P_{Tn} = g \cdot P_{e.m.t}} \rightarrow \text{toda la potencia "desviada al rotor" (q' deberá disiparse)}$$

Si el rotor g está % a través de una \rightarrow o no. (*)

Con $g \approx 0$, como $p_r = g f \Rightarrow p_r \approx 0 \Rightarrow P_{fer} \approx 0$ pues son proporcionales a la frec y $frec^2$ (sob hay pérdidas en AC.)

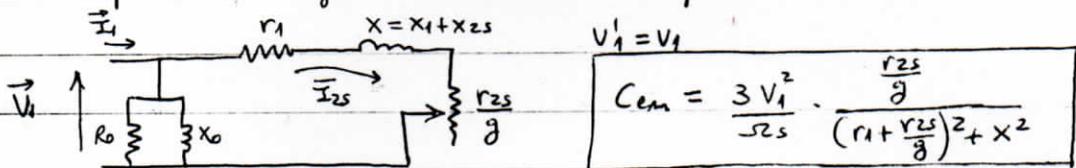
(*) Se puede conectar otras cosas al rotor, para aprovechar esa Pot; se desvía entonces al rotor (esa Pot.) pero se puede reinyectar a la red.

Cem.

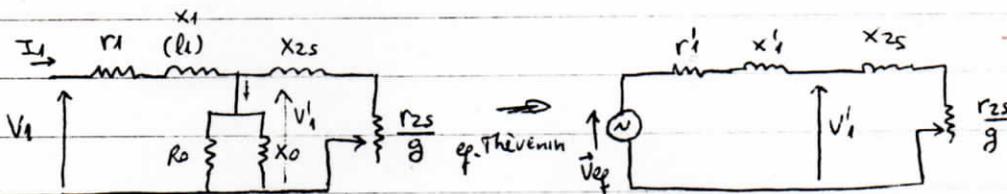
$$\text{Hip. adic. : } \boxed{P_{mec fric+vent} = 0}$$

$$C_{em} = \frac{P_{e.m.t}}{\omega_s} = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{r_{2s}}{g} I_{2s}^2 = \frac{3}{\omega_s} \left(\frac{r_{2s}}{g} \right) \frac{V_1^2}{\left(\frac{r_{2s}}{g} \right)^2 + X^2}$$

Se puede usar (prob. se usa) esta aprox =



← Se usa esto
frec
(y no el modelo oxidado)



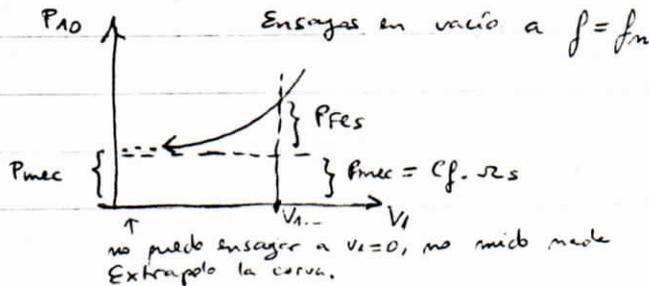
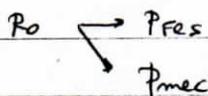
(es como decir q' la rama en || R_0 y X_0 no afecta mucho)

$$P_{util} = C_{em} \cdot \omega_s = \frac{C_{em} \cdot \omega_s (1-g)}{P_{e.m.t}} = 3 V_1^2 \cdot \frac{r_{2s} \left(\frac{1-g}{g} \right)}{\left(r_1 + \frac{r_{2s}}{g} \right)^2 + X^2}$$

R_0 determinado por ensayo en vacío incluye $P_{mec f+v}$.

(Aunque: Pérd. en R_0 son proporc. a V_1 , y las pérdidas mec en realidad dependen de la ω_s y ésta de la frec.; si trabajo con V_1 cercano a V_{nom} , esto no varía mucho.)

(con V_1 chico, estaría sub-estimando las Pérd. mec.)



$$\boxed{\eta = \frac{P_{ut}}{P_{abs}} = \frac{P_{ut}}{P_1} = \frac{P_{ent}(1-g)}{P_{ent} + P_{Js} + P_{res}} \leq (1-g)} \Rightarrow g \text{ debe ser chico}$$

(si no, $\eta \downarrow$ mucho)

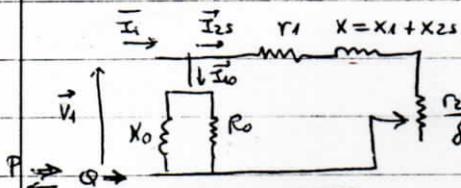
$$\eta = 1-g \text{ si } \boxed{P_{Js} + P_{res} = 0}$$

$$\boxed{C_{em} = \frac{1}{g} \frac{1}{\Omega_s} \cdot P_{Jr}} \rightarrow \text{con } g \neq 0 \text{ debe haber pérdidas en el rotor}$$

(P_{Jr}) para q' haya C_{em} . Si no hay P_{Jr} será una M.S. ($g=0$).

Debo entonces desviar parte de la pot. como P_{Jr} , para q' haya funcionamiento posible como M.I.

(Idem a transmisión con potens, si no hay fricción, no pueden transmitir (mecánica))

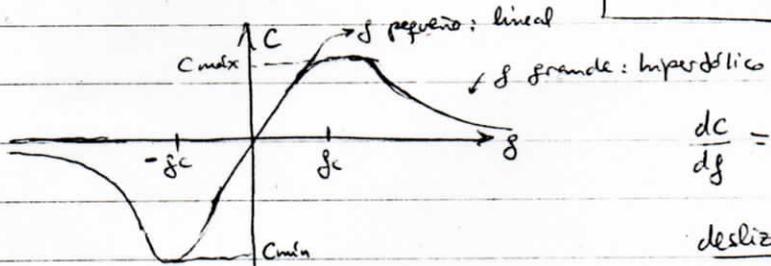


$$C = \frac{3V_1^2}{\Omega_s} \cdot \frac{\frac{r_{2s}}{g}}{(r_1 + \frac{r_{2s}}{g})^2 + X^2}$$

$\frac{r_{2s}}{g} \rightarrow$ pulsación eléctrica
 $\frac{r_{2s}}{g} \rightarrow r^2$ puros plos

$$\boxed{g \text{ muy grande}} : \frac{r_{2s}}{g} \text{ pequeño} \ll r_1 \rightarrow C = \frac{3V_1^2}{\Omega_s} \frac{1}{r_1^2 + X^2} \cdot \frac{r_{2s}}{g}$$

$$\boxed{g \text{ pequeño}} : \frac{r_{2s}}{g} \gg r_1 \Rightarrow C \approx \frac{3V_1^2}{\Omega_s} \frac{g}{r_{2s}}$$



$$\frac{dC}{dg} = 0 \Rightarrow g_c = \frac{r_{2s}}{\pm \sqrt{r_1^2 + X^2}}$$

deslizamiento crítico.

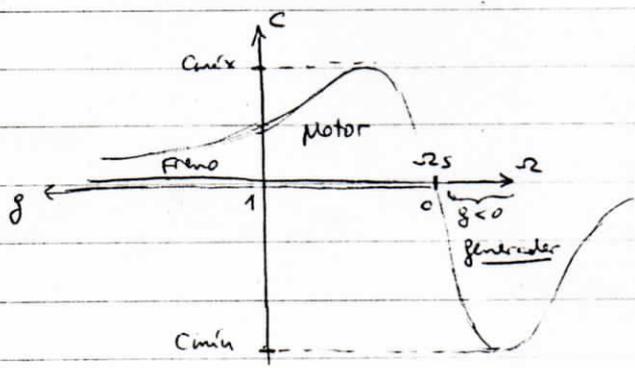
$$C_{m\acute{a}x}(g_c) = \frac{3V_1^2}{\Omega_s} \frac{1}{2} \frac{1}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + X^2}}$$

$$C_{m\acute{i}n}(-g_c) = -\frac{3V_1^2}{\Omega_s} \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{r_1^2 + X^2} - r_1}$$

$$; |C_{m\acute{i}n}| > |C_{m\acute{a}x}|$$

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

\Rightarrow 3 zonas de funcionamiento



1) $0 < g < 1$, $\Omega > 0$, $C > 0$
 $P_{ut}(\text{mec.}) > 0$; $0 < \Omega < \Omega_s$
 motor

2) $\boxed{g < 0}$, $\Omega > \Omega_s > 0$, $C < 0$
 $P_{ut} < 0$
 siempre > 0 generador (normal)

$P_{ent} = \frac{P_{Jr}}{g} < 0$ (el e.h. transporta energía desde el rotor hacia el estator)

$P_1 < 0$; $P_1 = P_{ent} + P_{Js} + P_{res}$; son pérdidas (no mecánicas, siempre) (-) (+) (normalmente)

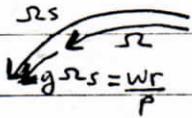
3) $g > 1 > 0$, $C > 0$, $s_2 < 0$, $P_{ut} < 0$

$P_{ent} > 0$, $P_1 > 0$ freno (a contracorriente)

Absorbe pot. x ambos lados \rightarrow la disipa x pérdidas Joule

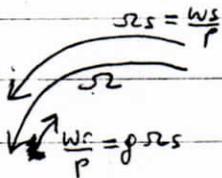
Un freno: toma pot. mecánica y la disipa.

1) $0 < g < 1$



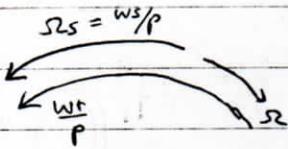
$$\omega_s = \frac{\omega_r}{P}$$

2) $g < 0$



$$\frac{\omega_s}{P} = \frac{\omega_r}{P} + \omega \quad (\text{condic. de frec.})$$

3) $g > 1$



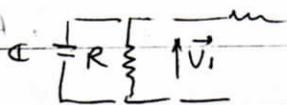
Prácticamente ω_r será el doble que ω_s
 \Rightarrow pérdidas muy grandes. El modelo ya no es bueno.

xa p' sirve: si desconecto y vuelvo a conectar cambiando 2 fases del estator: s_2 gira xa = lado, invertido es \Rightarrow la nueva condic. de frec. es esta. Invierto el campo giratorio. Necesito 1 motor para p' lo haga girar + rápido que s_2 . \Rightarrow se duplican pérdidas Joule estator.

Hay 1 límite térmico xa esas pérdidas; si duran poco, hay 1 transitorio térmico. Pero si fuera prolongado, puede no estar diseñado xa eso. Logra 1 frenado brusco (x ej. montacargas en la obra, en los guinchos.)

- En el motor la P puede ser \rightleftharpoons . Pero la Q debe ser siempre entrante, pues son self.

Entonces: si coloco una R en bornes, no circula I:



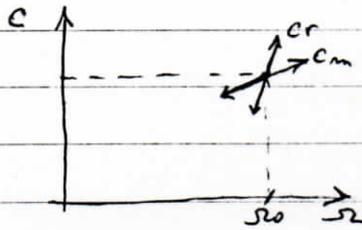
pues $\&$ necesito alguien p' me suministre la Q. Debería poner Cond. Pero es un

sist. aislado, la frec. no está determinada. Debo hacer 1 balance de P y Q. (debo estudiarlo con cuidado). (semejante al estado ^{mis-shunt} pero ^{pero considero q' hay saturación} _{ya no es lineal})

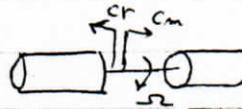
Otro caso \neq : MI conectado a la red, (q' tiene sus generadores), si lo nuevo $s_2 > s_2$ con motores auxiliares y entro en zona generador: la red me suministra Q con f=cte

Debido entonces tener α de la red, se usa en aplicaciones chicas (decenas de kw) (generadores asincrónicos). Se los mueve con 1 turbina hidráulica o eólica a $\omega > \omega_s$; se lo arranca como motor.

Estabilidad Motor-Carga.



$$\omega_0 = \omega_r = \omega_m$$



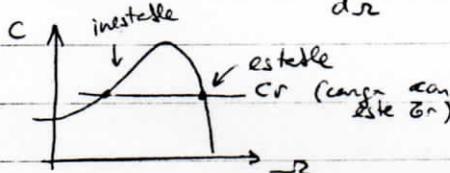
Estable si $\left. \frac{dC_r}{ds} \right|_{s_0} > \left. \frac{dC_m}{ds} \right|_{s_0}$

$\omega' > \omega_0 \Rightarrow C_r > C_m \Rightarrow \frac{d\omega}{dt} < 0$, se frena
 $\omega' < \omega_0 \Rightarrow C_m > C_r \Rightarrow \frac{d\omega}{dt} > 0$, func. estable, vuelve a su pto. de origen.

si $\left. \frac{dC_r}{ds} \right|_{s_0} < \left. \frac{dC_m}{ds} \right|_{s_0} \Rightarrow$ func. inestable

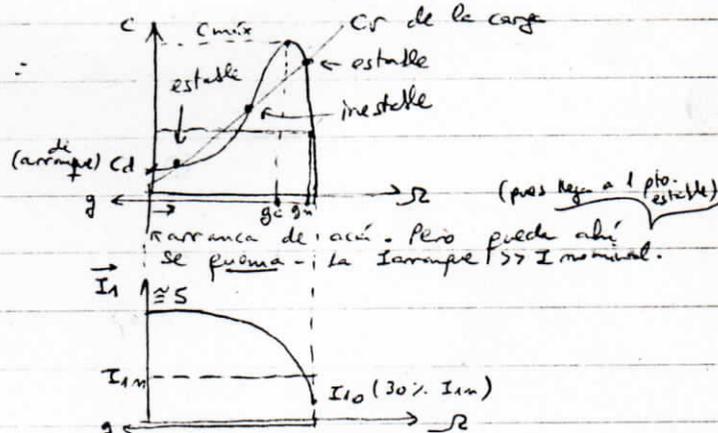
Normalmente: $\frac{dC_r}{ds} > 0$, en casi todo el rango útil.

Gráb. se dice: $\frac{dC_m}{ds} < 0 \Rightarrow$ estable (se cumple con creces la condición)



← es cierto con 1 carga así.

Pero, exagerando 1 poco: tengo otro punto estable



indep. de la red. $|I_{10}| \approx 0.3 |I_{1m}|$

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_{10} + \vec{I}_{2s}$$

$$\vec{I}_{2s} = \frac{\vec{V}_1}{(r_1 + \frac{r_{2s}}{s}) + jX}$$

$$g_m \approx 2\% \quad \frac{r_{2s}}{s} \gg$$

$$|\vec{I}_{2sm}| \approx \frac{|\vec{V}_1|}{\left(\frac{r_{2s}}{s_m}\right) grande}$$

$$g \approx 1 \quad \frac{r_{2s}}{s} \ll \frac{r_{2s}}{s_m}$$

$$I_{2s}|_{g=1} \approx 4 a 5 I_{2s} (g = g_m)$$

$$g_m \approx 1 a 5\% \quad ; \quad f_c \approx 6 a 10\%$$

Puedo variar g_c y g_m . Quiero $\downarrow g_m$ para mejorar el η .
 La η varía con la carga: en realidad no quiero f' varíe mucho, si no $\eta \downarrow$ (a medida $f' \downarrow$ la r_2).

Necesito tener P_{gr} y $e \neq r_2$, pero quiero g_m chico.

Puedo $\downarrow g_{m\max}$, pero $\downarrow \eta$! Se puede hacer, aunque requiere algún refinamiento.

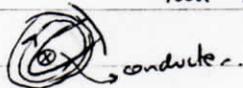
$g_{m\max}$ no es función de r_2 (sí el g_c)

Ver diapositiva, fig 11, rotores de jaula. Tengo \neq formas de ranuras.



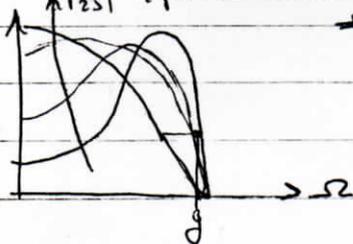
La $x = x_1 + x_2$ es de fugas (la magnetizante es la otra).

\odot \rightarrow privilegio al flujo de fugas, le doy un camino magnético a este.

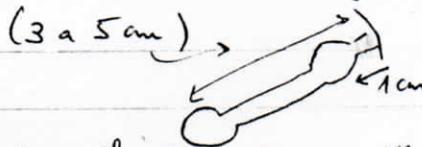


Juego entonces con r_2 y x_2 variando la forma de la ranura:

$\uparrow r_2$ pero se inclinan las curvas, quiero mantener g chico \rightarrow debo actuar $td.$ sobre x_2 .



Hay 1 efecto peculiar a las 50 Hz tal f' al arrancar es vista \downarrow chuce la react. (ranura angosta y larga)



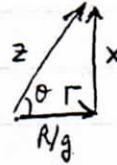
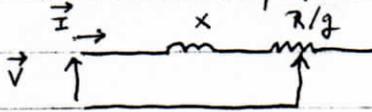
\Rightarrow se tiene una r variable en el arranque, va \downarrow frec. rotor, cuando se llegara a r_2 (si llegara) no habría efecto peculiar (i dc)

Un mismo estator da entonces desempeños muy \neq según el tipo de rotor f' se ponga. Hay 4 o 5 categorías, A, B, C, D, E, ...

$$X = \omega L = \frac{\omega N^2}{R}$$

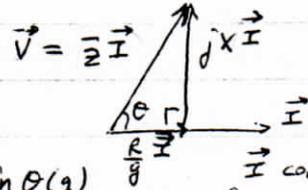
Diagrama circular

(versión simplificada)



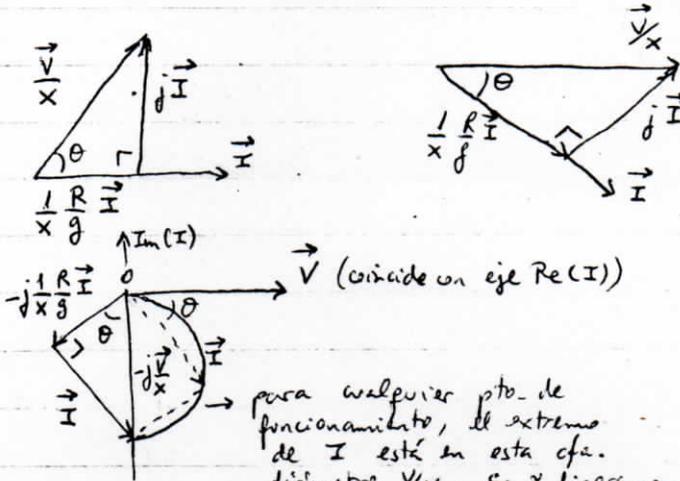
$V = ct_e, x = ct_e, f = ct_e$

$\vec{I} = \vec{I}(g) = \frac{\vec{V}}{\vec{Z}(g)}$



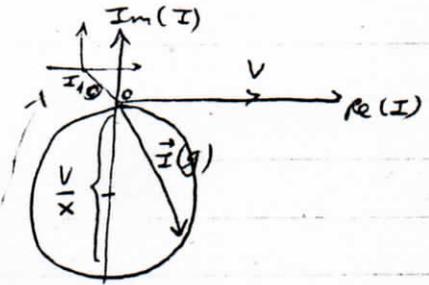
\vec{I} como origen de fases (no es lo usual, formal es V)

$|\vec{I}(g)| = I(g) = \frac{V}{Z(g)} = \frac{V \cdot x}{x \cdot Z(g)} = \frac{V}{x} \sin \theta(g)$

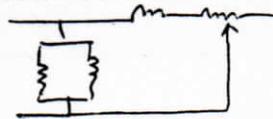


(→ diagrama de corrientes)

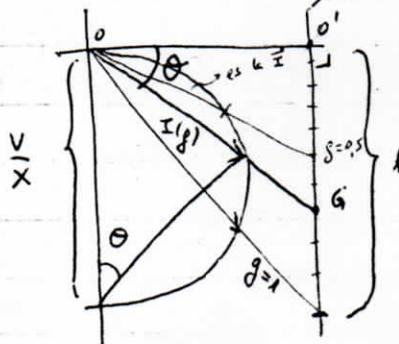
para cualquier pto. de funcionamiento, el extremo de I está en esta cfa. diámetro V/x . Es ≠ diagrama de admitancias



Si agrego:



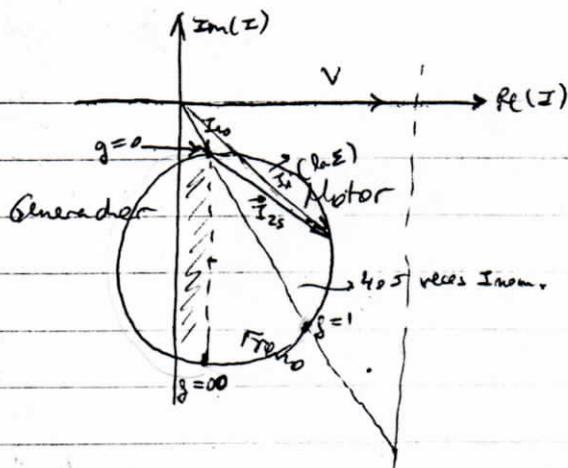
simplemente tomo otro sistema de ejes, corrido (se suma la \vec{I}_{10})



$\frac{O'G}{OO'} = \tan \theta = \frac{x}{R/g} = \left(\frac{x}{R}\right) \cdot g$

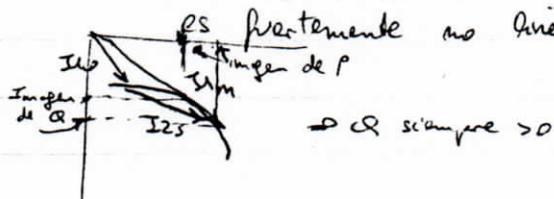
→ tomo el func. para $g=1$ (ensayo rotor stop.) y si quiero ver la I para $g = 0,5 \times g_1$, voy y la mido.

Antes se usaba mucho x a estos cálculos.



Se ve claram. f' al τf
 $\Rightarrow \tau I$.

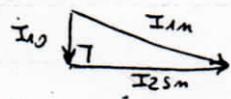
Quiero $f' \vec{I}$ sea τf .
 la cfa \Rightarrow tengo el mejor $\cos \varphi$ posible para esa I_{nom} .
 Allí g muy chico; la cfa
 es fuertemente no lineal en g .



La \vec{I}_0 no es despreciable

Conectado a la red, $\tau f'$ funciona como generador debe ser $g < 0$
 Pero aún así hay 1 zona donde $P > 0$ (se consume en R_0 y x_0)
 Para g más negativos, se tendrá $P < 0$.

Se suele hacer la aproximación:

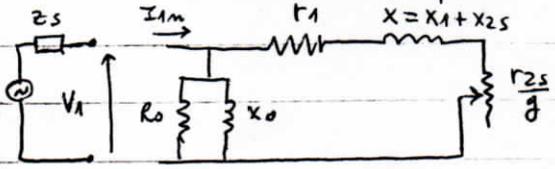


aunque en este diagrama se ve f' no es así

Ju, 11/VII

Métodos de arranque de motores polifásicos de inducción.

Problema de arranque:



$g = 1$ (arranque)

$g_m \approx 0,02 \Rightarrow \frac{R_25}{g}$ se convierte en 50 veces + chica en el arranque

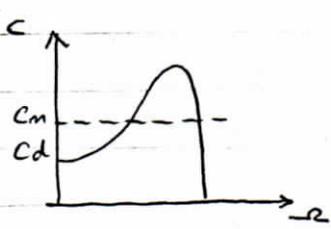
$I_m \leftrightarrow I_{Id} (g=1)$

$I_{Id} \approx 5 \sim 7 I_m$ (en el arranque)

El dimensionado térmico es para I_m , pues el arranque dura pocos segundos \Rightarrow si es exitoso, no hay problemas térmicos.

Pero la instalación f' alimenta \Rightarrow gran caída de tensión en la fuente \rightarrow se entretiene el arranque ($C_m \propto V_1^2$, es proporc.)

Además es perjudicial xa otros usuarios de la red.



r_{25} pequeña
 g_m chico ($\approx 1\%$)

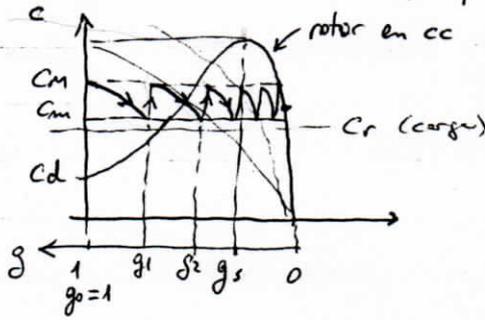
A veces, mediante un embrogue, puede no ponerse toda la carga en el arranque.

Quiero arrancar con el mayor par posible.

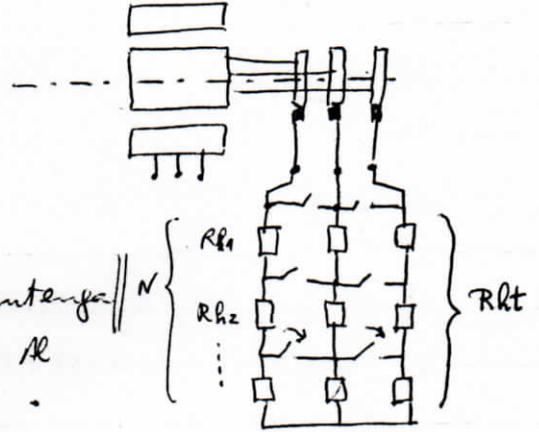
Hay \neq tipos de arranque, según el tipo de máq. y lo q' se pretende.

a) rotor trifásico dotado

Está accesible el rotor; puedo insertar R durante el arranque.



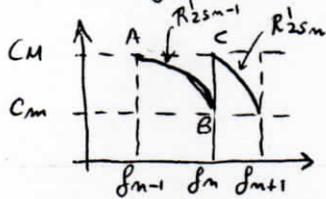
(reóstato rotórico)



Elijo R tal q' el C se mantenga en 1 franja, entre C_m y C_m . Al llegar a C_m cambiamos la R, etc.

General. $C_m \leq C_{nom}$. y $C_m \approx 1,2$ a $1,5 C_{nom}$.

Cómo elegir las R?



$$R'_{2sm} = r_{2s} + R_{hs}^{(m)} \quad (\text{las estoy pasando del rotor al estator (subínd. s)})$$

$$R_{hs}^{(m)} = R_{hts} - \sum_{k=1}^m R_{hks} \quad ; \quad R_{hts} = \sum_{k=1}^N R_{hks}$$

Método aprox.

g es pequeño (aunque es cierto solo al final del proceso)

$$C(g) \approx \frac{3V_i^2}{2s} \cdot \frac{g}{r_{2s}} \quad (\text{vista en } \%)$$

$$\textcircled{A} \text{ y } \textcircled{C} : C_m = \frac{3V_i^2}{2s} \cdot \frac{g_{m-1}}{R'_{2sm-1}} = \frac{3V_i^2}{2s} \cdot \frac{g_m}{R'_{2sm}}$$

$$\textcircled{1} \quad \frac{g_m}{g_{m-1}} = \frac{R'_{2sm}}{R'_{2sm-1}}$$

$$0 < \frac{C_m}{C_m} = K < 1 \quad (\text{yo los elijo, los conozco}).$$

$$\frac{\left(\frac{g_m}{R'_{2sm-1}}\right)}{\left(\frac{g_m}{R'_{2sm}}\right)} = \frac{C_m}{C_m} \Rightarrow \frac{R'_{2sm}}{R'_{2sm-1}} = \frac{C_m}{C_m} = K$$

Logro una relación: $g_m = K g_{m-1}$ como yo quería.

Conozco $g_0 = 1 \rightarrow R'_{2s0} = r_{2s} + R_{hts} \Rightarrow$ Calculo R_{hts} para que $C(g_0=1) = C_m$

$g_m = k^m$

Conozco g_{nom} . Busco un N φ' mas de el punto + próximo : $g_{nom} \leq k^N \Rightarrow N$

Se puede hacer manual, o con contactores (temporizados, o φ' midan la $\vec{v}el.$)

Esto permite el arranque de la máquina en carga (pues $C_{motor} > C_{resistente}$ (carga)). En cambio con $C_d < C_r$ no podrá. Al agregar un reóstato estoy \downarrow la corriente además.



Este método requiere φ' el rotor sea sofocado.

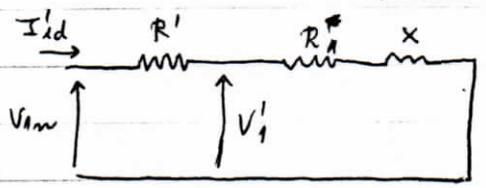
b) Reóstato estático.

Lo pongo en serie entre la fuente de aliment. y el estator.



sin R' : $I_{id} \rightarrow$ r_1 X $r'_{2s}/1$ (desprecie $t\delta$. I de vacío, aprox. $\frac{1}{2} I_{nom}$ cuando $I_{arr.} \approx 5 I_{nom} \Rightarrow I_{vacío} \ll$)

En módulos : $I_{id} = \frac{V_{1m}}{\sqrt{R_1^2 + X^2}}$; $R_1 = r_1 + r'_{2s}$



$I'_{id} = \frac{V_{1m}}{\sqrt{(R_1 + R')^2 + X^2}} < I_{id}$
 \Rightarrow obtengo $\frac{R'}{R_1}$

Luego : $V_1' = \sqrt{(R_1^2 + X^2)} \cdot I'_{id} = \frac{\sqrt{R_1^2 + X^2}}{\sqrt{(R_1 + R')^2 + X^2}} \cdot V_{1m} < V_{1m}$

Tendré $C'_d = C_{dm} \cdot \frac{V_1'^2}{V_{1m}^2} = C_d \cdot \frac{R_1^2 + X^2}{(R_1 + R')^2 + X^2} \rightarrow$

$\frac{I'_{id}}{I_{id}} = \frac{V_{1m}}{\sqrt{(R_1 + R')^2 + X^2}} \cdot \frac{\sqrt{R_1^2 + X^2}}{V_{1m}} = \frac{\sqrt{R_1^2 + X^2}}{\sqrt{(R_1 + R')^2 + X^2}}$

Los motores con bajo φ' de arranque (para buena eficiencia) \Rightarrow este método les \downarrow C_d (aunque \downarrow $I_{arr.}$) \Rightarrow tal vez ya no pueda arrancar con la carga φ' necesita, o en vacío puede demorar + (pues la inercia está) \Rightarrow demora + \Rightarrow probl. térmicos, etc.

Tenía como objetivo: $I'_{id} = a I_{id}$ $a < 1$

pero: $C'd = a^2 C_{dm}$

Este método se puede aplicar a cualquier motor.

c) Arranque $\lambda - \Delta$.

Se puede aplicar a cualquier motor, tal q' tenga los bornes accesibles

Condiciones:

→ Estator: 6 bornes accesibles

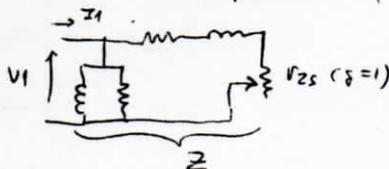
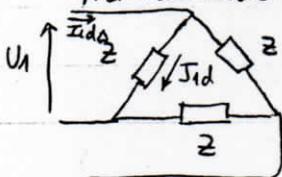
→ El motor debe poder trabajar normalmente en Δ

$U_{fuente} = U_{m \text{ motor}}$ (tensión de aislamiento por fase)

ej trifásica 380V ^{fuentes.} por fase ⇒ no puede aplicar el método

a un motor q' sea 220V/fase

Normalmente el motor está previsto para trabajar en Δ :

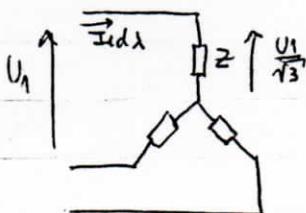


$\delta=1$

$$I_{id} = \frac{U_1}{Z} ; I'_{id\Delta} = \sqrt{3} I_{id} = \sqrt{3} \frac{U_1}{Z}$$

↑ Esto es el arranque normal.

Lo arranco en λ :



Ahora la tensión entre las fases es $U_1/\sqrt{3}$

$$I_{id\lambda} = \frac{U_1/\sqrt{3}}{Z}$$

Tengo entonces: $\frac{I_{id\lambda}}{I_{id\Delta}} = \frac{1}{3}$

Si tenía aprox: $I_{idm} \cong 6 I_{lm}$. Ahora: $I_{id\lambda} \cong 2 I_{lm}$.

Método muy usado xa motores chicos y medianos.

Se debe tener td. un contactor capaz de trabajar en esta forma, tienen 1 límite en V y Pot. Son muy caros si fueren q' aguanten mucho. Los usuales se hacen para 220, 380, 660 V. No los hay para 6kV (+ caro q' el motor!)

Par de arranque:

$$C_{d\Delta} = K \cdot U_1^2$$

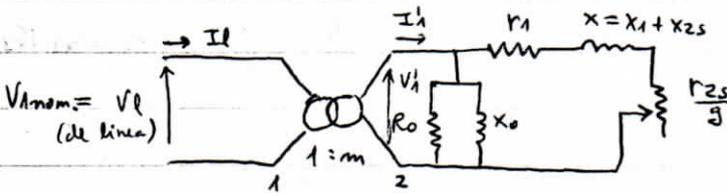
$$C_{d\lambda} = K \cdot \left(\frac{U_1}{\sqrt{3}}\right)^2$$

⇒ $\frac{C_{d\lambda}}{C_{d\Delta}} = \frac{1}{3}$

Este método es mejor pues C se reduce menos φ' con el método anterior ($1/3$ vs. $1/9$)

d) Arranque por transformador.

Conecto el motor a través de 1 trafo:



$V_L, I_L \rightarrow$ de línea
 $I_1', V_1' \rightarrow$ del motor

$$m = \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_1'}{V_L} = \frac{V_1'}{V_{1nom.}}$$

Considero 1 trafo ideal $\Rightarrow \boxed{\frac{V_1'}{V_L} = m}$, $\boxed{\frac{I_1'}{I_L} = \frac{1}{m}}$ $m < 1$
 $g=1.$

Cuando $V_1' = V_{1nom.} \Rightarrow I_1'd = I_{1d nom} \approx 5 I_{1m}$
 x no hago esto

Hago: $V_1' = m V_{1nom.} \Rightarrow I_1'd = m I_{1d nom.}$ (es 1 imped. de.)

$$\boxed{I_{1d} = m I_1'd = \frac{m^2 I_{1d nom.}}{\uparrow}}$$

arranque de la tensión nominal

$$\text{Tengo } \boxed{C'd = K V_1'^2 = K (m V_{1nom.})^2 = m^2 C_{d nom.}}$$

El mismo factor en φ' se reduce la I , + el C , idem a $\lambda - \Delta$. Pero el coef es $1/3$ en el otro método, acá lo elijo.

Ahí requiero algún contactor para conectar y desc. el trafo.

Se usan en motores + gdes. φ' λ / Δ .

- Motores muy gdes:

$\Delta SE \rightarrow$ rotor bobinado

auxiliares de centrales \rightarrow arrancan directo

- Como el trafo es caro: se pone 1 autotrafo, ni siquiera trifásico. Se hace el sigte. montaje:



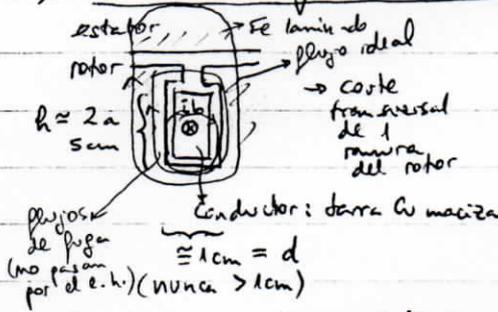
A: arranque
 M: marcha

Con 2 autotrafos. monofásicos, ↓ 2 tensiones :
 Como es equilibrado, ↓ las 2 corrientes y
 ↓ la otra

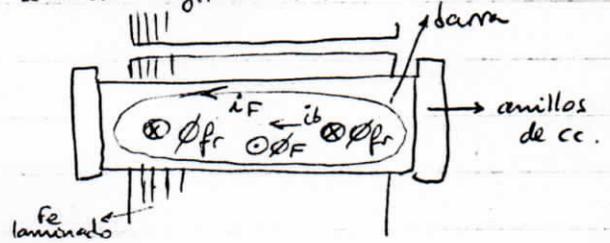


Arranca el trazo energizado, la 3^{ra} fase está conectada
 directam. a la red, las otras 2 a tensión reducida.
 luego en marcha se desenergizan los trazos

e) Motores de jaula de efecto pelicular



sección longitudinal:



En cada rama hay 1 flujo de fugas de rama (hay otros flujos de fuga, de cabeza de bobina, etc.) Sup. f' atraviesa la rama en forma aprox. transversal.



ϕ_{fr} : flujo de fugas de rama

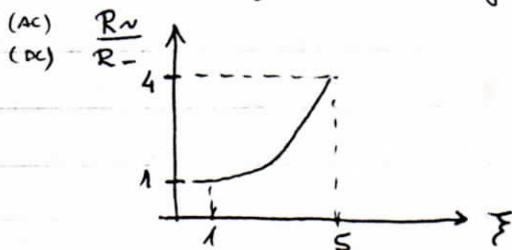
i_b es A.C. de baja freq (al arrancar no, tendrá = freq. f' estator)
 $\Rightarrow \phi_f$ variable en $t \Rightarrow$ origina i inducidas \rightarrow se oponen a la causa f' las origina (el ϕ_{fugas}): i inducida f' creará un flujo saliente ϕ_f f' se opone a ϕ_{fr} .

Efecto: la i tiende a concentrarse en la parte superior de la barra. \rightarrow

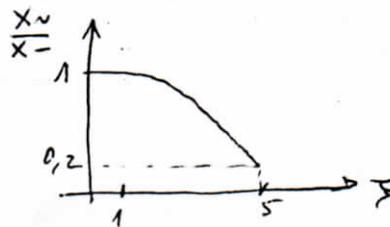
Al arrancar: i son $\sim 1/3$ en rotor (luego se atenúa) $\Rightarrow \phi_f$ e iF importantes

Es 1 efecto pelicular \Rightarrow no conviene hacer ranuras de t de 1 cm (habría H. un efecto pelicular lateral)

Luego el efecto pelicular es 4 veces - sensible, y la corriente se distribuye a lo largo de la barra. (después del arranque)

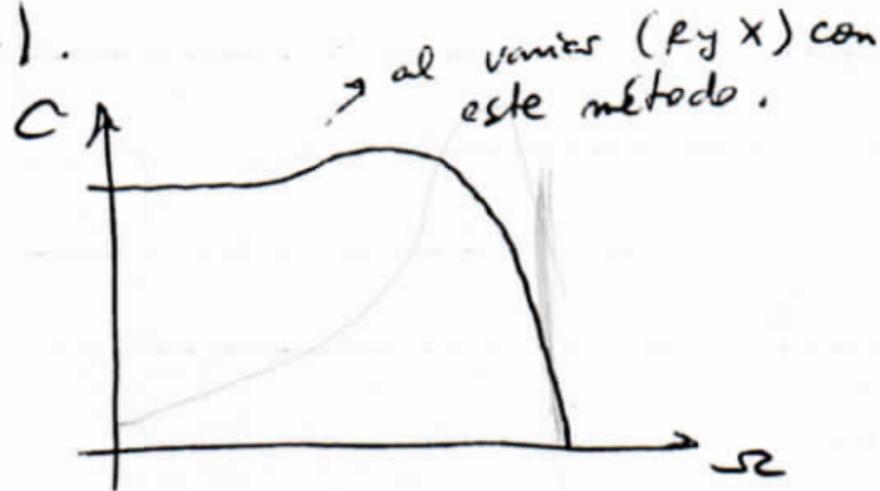
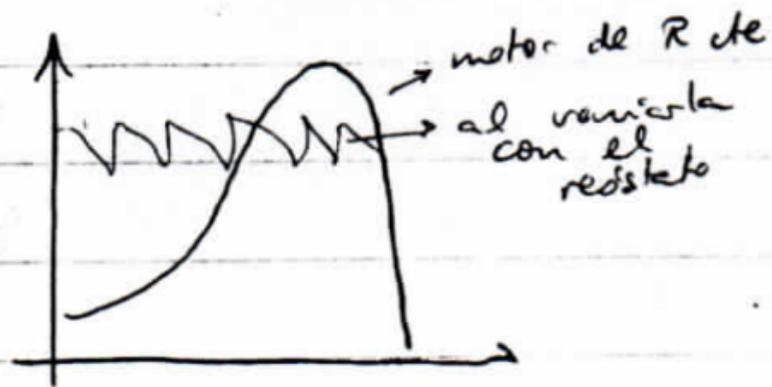


$\xi = \frac{h}{d}$; $d \approx \delta$: "espesor de piel" a 50 Hz.



Todo para $f=1$, a los efectos del diseño.

El efecto juega en el arranque con $f=1$. Luego se parecen
+ a los valores R- y X- (AC).



Logro \downarrow la I y \uparrow C

Este efecto peculiar se encuentra en motores grandes.

H. se hace en los motores de doble jaula (hay 1 jaula interior y otra exterior)