

MODELADO DE LA MAQUINA SINCRONA PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD

Parte 3

Tratamiento de la saturación

Ecuación de "swing"

Límites operativos de la máquina síncrona

TRATAMIENTO DE LA SATURACION

Si L_{adu} es el valor no-saturado de L_{ad} , la saturación se considera a través de un factor de saturación de eje directo $K_{sd} \leq 1$ tal que:

$$L_{ad} = K_{sd} \cdot L_{adu}$$

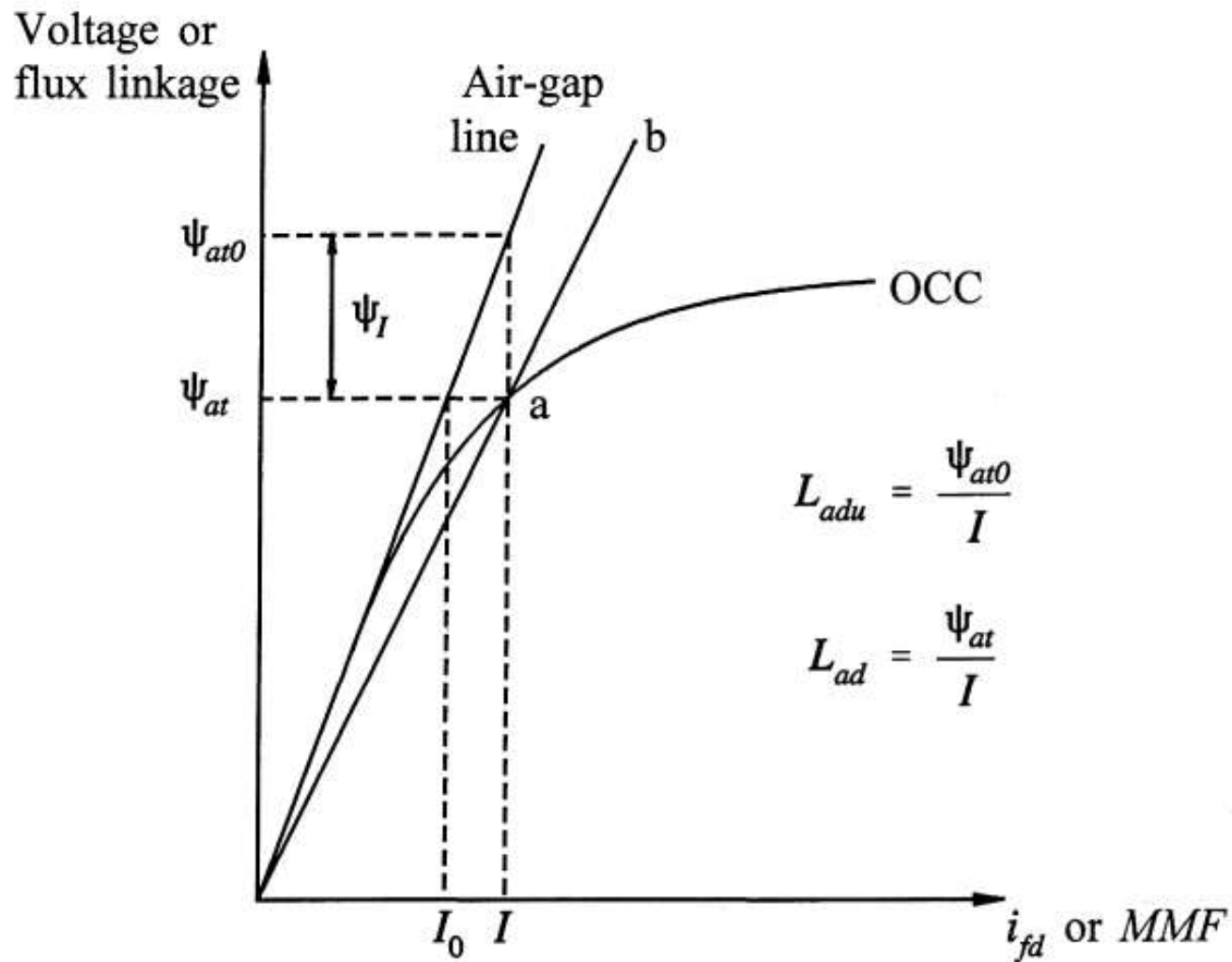
Análogamente:

$$L_{aq} = K_{sq} \cdot L_{aqu}$$

Se suele tomar :

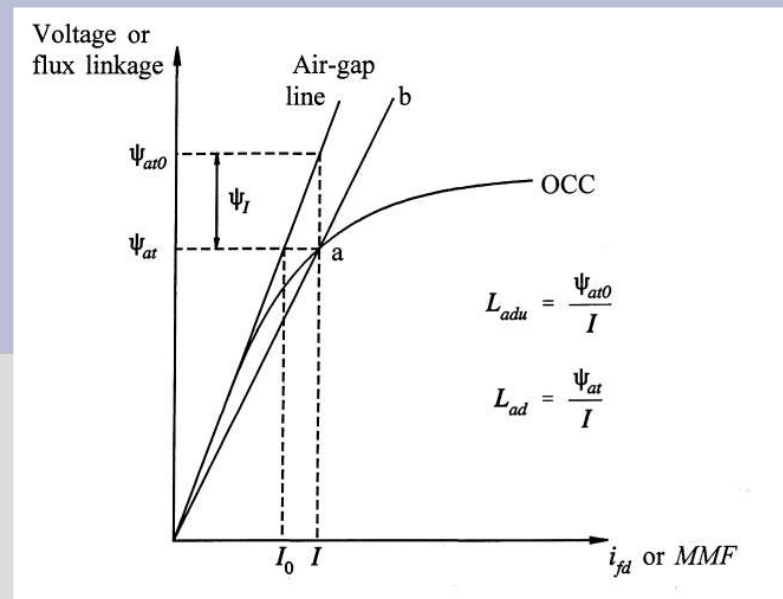
$K_{sq} = 1$ si la máquina es de polos salientes

$K_{sq} = K_{sd}$ si la máquina es de polos lisos.



Curva flujo-corriente de circuito abierto (OCC).

Se asume válida también en carga (ver apuntes)



En los programas de cálculo la curva $\psi_I = f(\psi_{at})$ se suele aproximar de una de las siguientes formas:

- Modelo exponencial entre 2 tramos rectilíneos
- Modelo cuadrático luego de un tramo rectilíneo

(Ver detalles en los manuales de los programas)

Valores típicos de los parámetros de la máquina síncrona

Parámetro	Hidráulica	Térmica
X_d	0,6 – 1,5	1,0 – 2,3
X_q	0,4 – 1,0	1,0 – 2,3
X'_d	0,2 – 0,5	0,15 – 0,4
X'_q	----	0,3 – 1,0
X''_d	0,15 – 0,35	0,12 – 0,25
X''_q	0,2 – 0,45	0,12 – 0,25
T'_{d0}	1,5 – 9,0	3,0 – 10
T'_{q0}	----	0,5 – 2,0
T''_{d0}	0,01 – 0,05	0,02 – 0,05
T''_{q0}	0,01 – 0,09	0,02 – 0,05
X_l	0,1 – 0,2	0,1 – 0,2
r_s	0,002 – 0,02	0,0015 – 0,005

**Reactancias y resistencias en p.u (base : valores nominales del estator),
tiempos en segundos**

Medición de parámetros de las máquinas : Ver Norma IEEE-115

ECUACION DE "SWING"

T_m : Torque mecánico (N-m)

T_e : Torque eléctrico (N-m)

$T_a = T_m - T_e$: Torque acelerante (N-m)

J : Momento de inercia (Kg-m²)

w_m : Velocidad angular mecánica (rad/s)

⇒

$J \cdot dw_m / dt = T_a$ (Ecuación de Newton)

pf : Número de pares de polos

$w = w_m \cdot pf$: Velocidad angular (pulsación) eléctrica (rad/s)

S_b :Potencia básica (MVA)

w_{0m} = velocidad angular mecánica nominal (rad/s)

$w_0 = w_{0m} \cdot pf =$ pulsación eléctrica nominal = $2\pi f_0$ (rad/s)

$T_b = S_b / w_{0m}$:Torque básico (N-m)

$H = 1/2 \cdot J \cdot w_{0m}^2 / S_b$:Constante de inercia (MW-s/MVA)

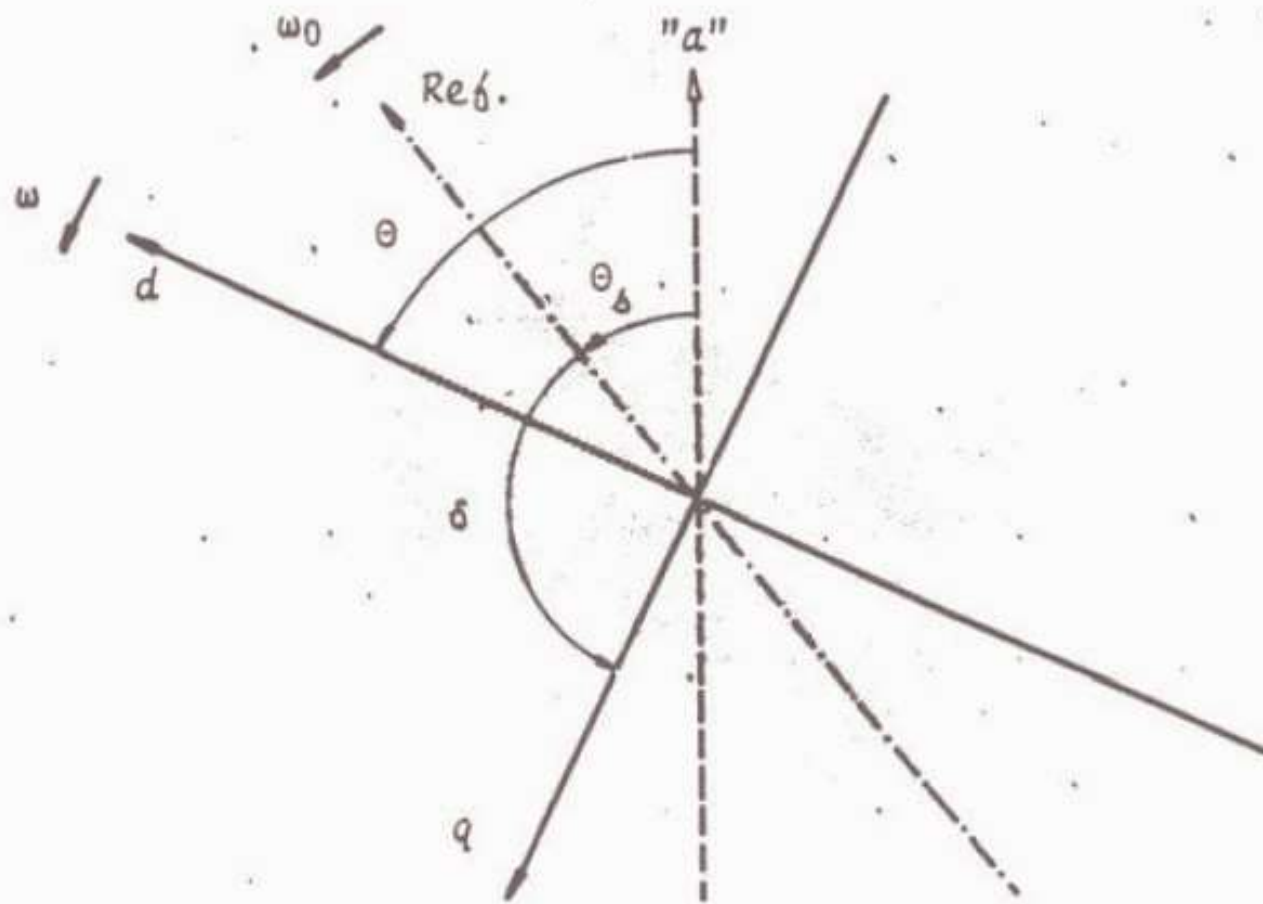
$\Rightarrow 2 \cdot H / w_0 \cdot (dw/dt) = T_a$ (pu)

Valores típicos de H:

Unidad térmica, 2 polos:2,5 a 6 seg.

Unidad térmica, 4 polos:4 a 10 seg.

Unidad hidráulica: 2 a 4 seg.



$$d\delta/dt = w - w_0 \Rightarrow d^2\delta/dt^2 = dw/dt \Rightarrow$$

Ecuación de swing clásica:

$$2.H/w_0 \cdot (d^2\delta/dt^2) = T_a \text{ (pu)}$$

Incorporando un término de amortiguación:

$$2.H/w_0 \cdot (d^2\delta/dt^2) + K_D \cdot \Delta w = T_a \text{ (pu)}$$

$$\Delta w = w - w_0$$

$$P_a = T_a \cdot w_m = P_m - P_e : \text{Potencia acelerante (MW)}$$

Ecuación de swing aproximada:

$$T_a \cdot w_{0m} / S_b \cong T_a \cdot w_m / S_b = P_a / S_b = P_a \text{ (pu)} = P_m \text{ (pu)} - P_e \text{ (pu)} \Rightarrow$$

$$2.H/w_0 \cdot (d^2 \delta/dt^2) + K_D \cdot \Delta w = P_a \text{ (pu)}$$

DATOS DE GENERADORES		
ALSTHOM-JEUMONT VG40-125	UNIDADES	
Estación		TERRA
Nro. de unidades		2
Voltaje Nominal	KV	13.8
Velocidad nominal	rpm	125
Grupo		3, 4
Tipo		HIDRAULICA
S Nominal	MVA	40
P Nominal	MW	38
Q máxima (para P= mínima técnica)	MVAR	-36, +28
Ra (resistencia de armadura)	ohm	
Xd (reactancia síncrona directa)	pu	0.915
Xq (reactancia síncrona en cuadratura)	pu	0.567
X'd (reactancia transitoria directa)	pu	0.3
X'q (reactancia transitoria en cuadratura)	pu	
Xp (reactancia de Polier)	pu	
T'd (cte. de tiempo transitoria en el eje d)	seg.	1.48
T'q (cte. de tiempo transitoria en el eje q)	seg.	
T''d (cte. de tiempo subtransitoria en el eje d)	seg.	
T''q (cte. de tiempo subtransitoria en el eje q)	seg.	
T'do (cte. de tiempo transitoria en el eje d / circuito abierto)	seg.	4.5
T'qo (cte. de tiempo transitoria en el eje q / circuito abierto)	seg.	
X2 (reactancia de secuencia inversa)	pu	0.258
Xo (reactancia homopolar)	pu	0.108
X''d (reactancia subtransitoria directa)	pu	0.212
X''q (reactancia subtransitoria en cuadratura)	pu	0.313
T''qo (cte. de tiempo subtransitoria en el eje q / circuito abierto)	seg.	0.042
T''do (cte. de tiempo subtransitoria en el eje d / circuito abierto)	seg.	0.038
RCC (relación de corto-circuito)		1.3
Momento de inercia del ac generador	ton.m2	1510
Mínimo momento de inercia de la combinación turbina-ac generador	ton.m2	1567
H (cte. de inercia del ac generador)	KW.s/KVA	3.234
Constante de inercia de la combinación turbina-ac generador	KW.s/KVA	3.359
Zn(impedancia de puesta a tierra)	ohm	1150
Rl (resistencia del bobinado inductor)	ohm	0.333
Tipo de sistema de excitación		Estática
Arrollamineto amortiguador (si,no)		si
Potencia Mínima Técnica	MW	15
Potencia Máxima Técnica	MW	38
Fecha de información		9/95

Modelo típico de máquina síncrona DSAT

Synchronous Machine Model DG0S1

Model Descriptions

This model uses parameters in standard form and type 1 saturation model.

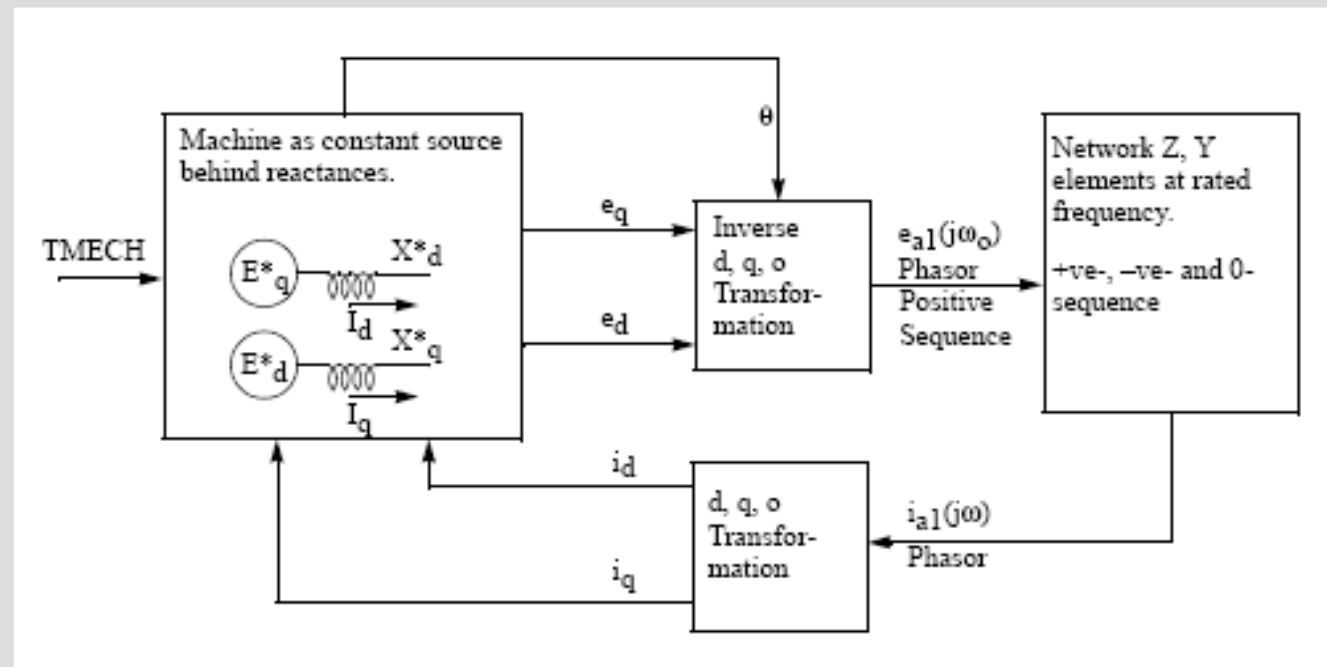
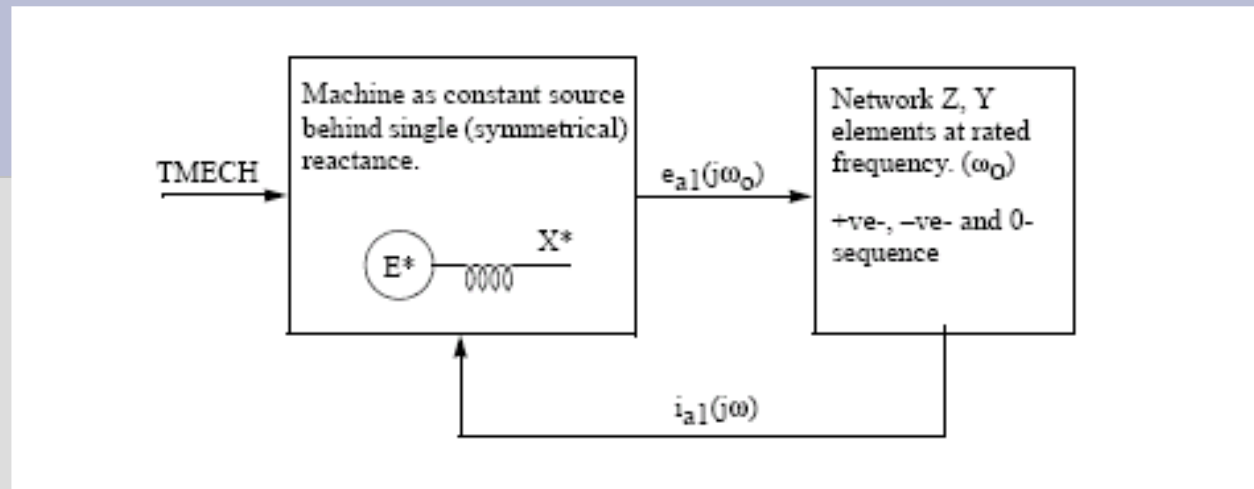
Data Format

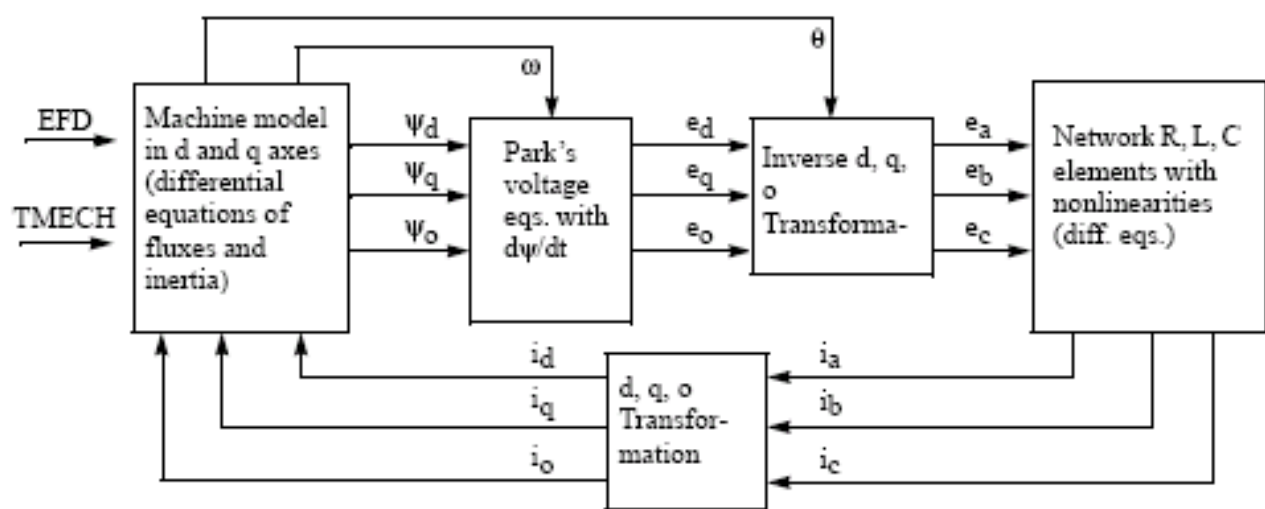
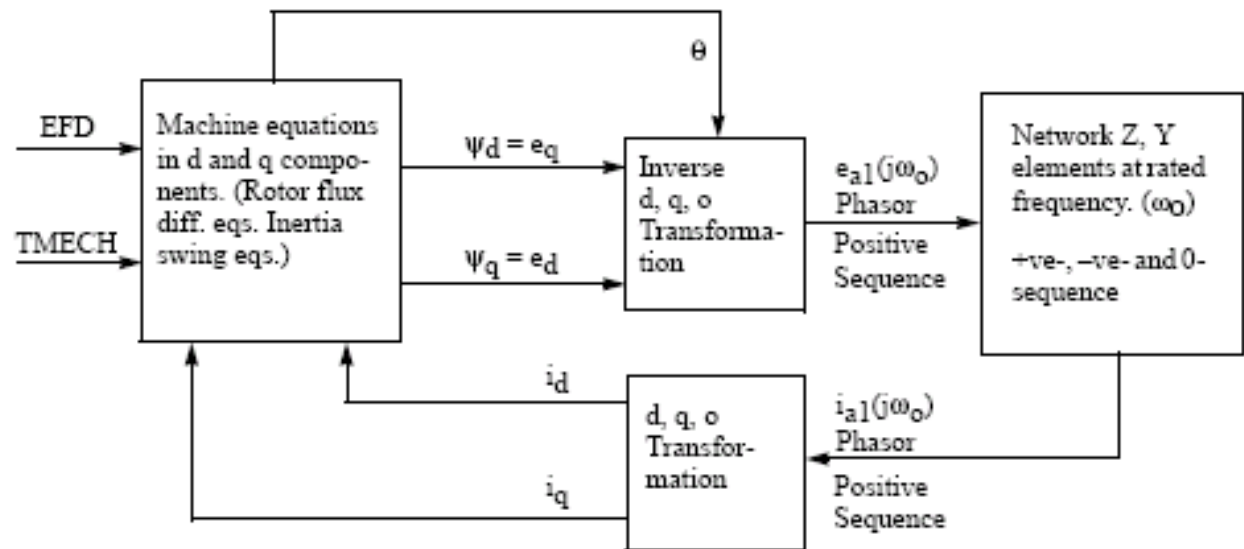
IBUS, 'DG0S1', I, MVA, R_s , X_d , X_q , X_l , X'_d , X'_q , X''_d , X''_q , T'_{d0} , T'_{q0} , T''_{d0} , T''_{q0} , H, K_D , α , A_{sat} , B_{sat} , ψ_L , ψ_M , RS /

Parameter Descriptions

IBUS	- Bus number, name, or generator equipment name of the machine.
I	- ID of the machine (may or may not be enclosed in single quotes).
MVA	- MVA base of the machine. If not specified (i.e., no value or zero is entered), the MVA base of the matched generator in powerflow data will be used.
R_a	- Armature resistance in per unit on machine MVA base.
X_d	- Unsaturated direct axis synchronous reactance in per unit on machine MVA base.
X_q	- Unsaturated quadrature axis synchronous reactance in per unit on machine MVA base.
X_l	- Leakage reactance in per unit on machine MVA base.
X'_d	- Unsaturated direct axis transient reactance in per unit on machine MVA base.
X'_q	- Unsaturated quadrature axis transient reactance in per unit on machine MVA base.
X''_d	- Unsaturated direct axis subtransient reactance in per unit on machine MVA base.
X''_q	- Unsaturated quadrature axis subtransient reactance in per unit on machine MVA base.
T'_{d0}	- Direct axis transient open circuit time constant in seconds.
T'_{q0}	- Quadrature axis transient open circuit time constant in seconds.
T''_{d0}	- Direct axis subtransient open circuit time constant in seconds.
H	- Inertia time constant of the machine in MW-second/MVA.
K_D	- Damping coefficient in (p.u. torque)/(p.u. speed deviation).
α	- This parameter is used only for synchronous motor, as the exponential in the load characteristic of the motor: $T_m = K\omega^\alpha$ (K is determined by TSAT based on the initial condition). It is ignored for generator model.
A_{sat}	- Coefficient in saturation characteristic.
B_{sat}	- Coefficient in saturation characteristic.
ψ_L	- Flux linkage on the saturation curve where the Region II characteristic starts.
ψ_M	- Flux linkage on the saturation curve where the Region III characteristic starts.
RS	- Ratio of the slopes of air-gap line and the Region III characteristic.

Síntesis de los modelos de máquina y su interconexión con la red

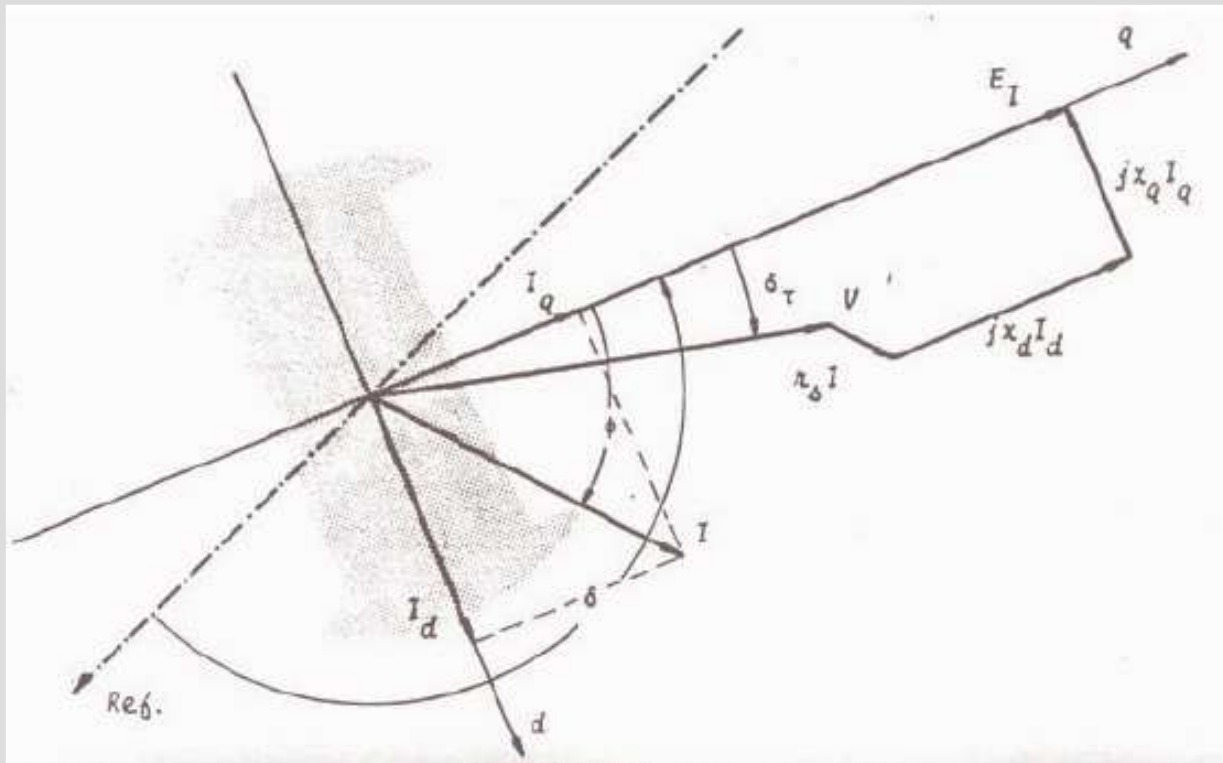




LIMITES OPERATIVOS DE LOS GENERADORES SINCRONOS

Cálculo de la potencia activa y reactiva en régimen balanceado

Tomamos la tensión terminal V como fasor de referencia, δ positivo antihorario. Se asume $r_s=0$.



$$V \cdot \cos \delta \tau = E_1 - x_d \cdot I_d$$

$$V \cdot \sin \delta \tau = x_q \cdot I_q$$

$$I = I_d \cdot \sin \delta \tau + I_q \cdot \cos \delta \tau + j \cdot (-I_d \cdot \cos \delta \tau + I_q \cdot \sin \delta \tau)$$

$$P + j \cdot Q = V \cdot I^*$$

$$P = V \cdot E_1 \cdot \sin \delta \tau / x_d + V^2 \cdot \sin \delta \tau \cdot \cos \delta \tau (1/x_q - 1/x_d)$$

(Rotor cilíndrico: $P = V \cdot E_1 \cdot \sin \delta \tau / x_d$)

$$Q = V \cdot E_1 \cdot \cos \delta \tau / x_d + V^2 \cdot \cos^2 \delta \tau \cdot (1/x_q - 1/x_d) - V^2 / x_q$$

(Rotor cilíndrico: $Q = V \cdot E_1 \cdot \cos \delta \tau / x_d - V^2 / x_d$)

Límites operativos

Límite de corriente de estator

$$P^2 + Q^2 \leq (V \cdot I_{\max})^2 \text{ (para } V = V \text{ nominal, } I_{\max} = I \text{ nominal es } V \cdot I_{\max} = S \text{ nominal)}$$

Límite de corriente de rotor

Para $E_1 = E_1$ máximo = $K \cdot I_{fd}$ máxima, obtenemos $P = f(Q)$, eliminando $\delta\tau$.
(Caracol de Pascal. Si es de rotor cilíndrico, degenera en una circunferencia)
Habitualmente se toma: E_1 máximo = condiciones nominales

Límite de estabilidad

Para cada E_1 obtenemos el $\delta\tau$ máximo, asociado a una potencia P máxima, y a su correspondiente Q (siempre a $V = \text{constante}$).
(Para rotor cilíndrico: $\delta\tau$ máximo = 90° , de lo contrario es $< 90^\circ$)
Haciendo variar E_1 obtenemos la curva límite P máxima = $f(Q)$
(En la práctica, se suele tomar un factor de seguridad, p.ej: P máxima - $0,1 \cdot P$ nominal)

Existen también limitaciones en esa zona vinculadas a calentamientos localizados si se trabaja con corrientes de campo bajas.

Comentario sobre el límite de estabilidad

Este límite de estabilidad “local” (máquina conectada a una red infinita) se complementa caso a caso con los límites de estabilidad que surjan del análisis del sistema real multimáquina.

Límites adicionales de potencia activa

- Potencia máxima de diseño
- Potencia mínima por consideraciones económicas (mínimo técnico)

