

Modelado de Parques Eólicos

Estabilidad de Sistemas Eléctricos de Potencia
Curso 2020

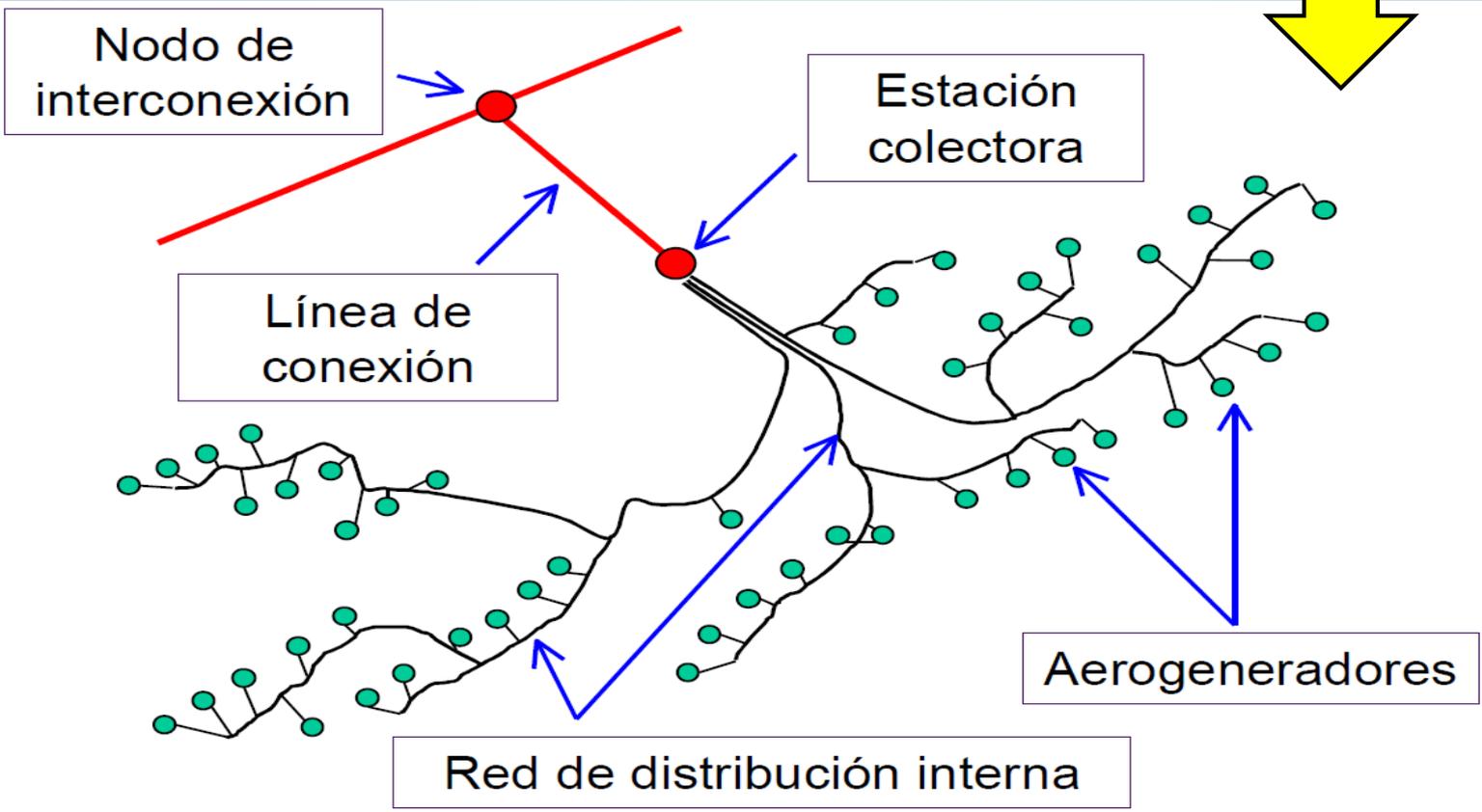
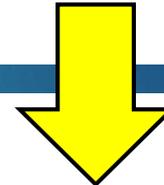
FERNANDO BERRUTTI

- ▶ **Introducción**
- ▶ Generadores de velocidad fija
- ▶ Generadores de velocidad variable (DFIG)
- ▶ Modelos agregados de parques

Introducción

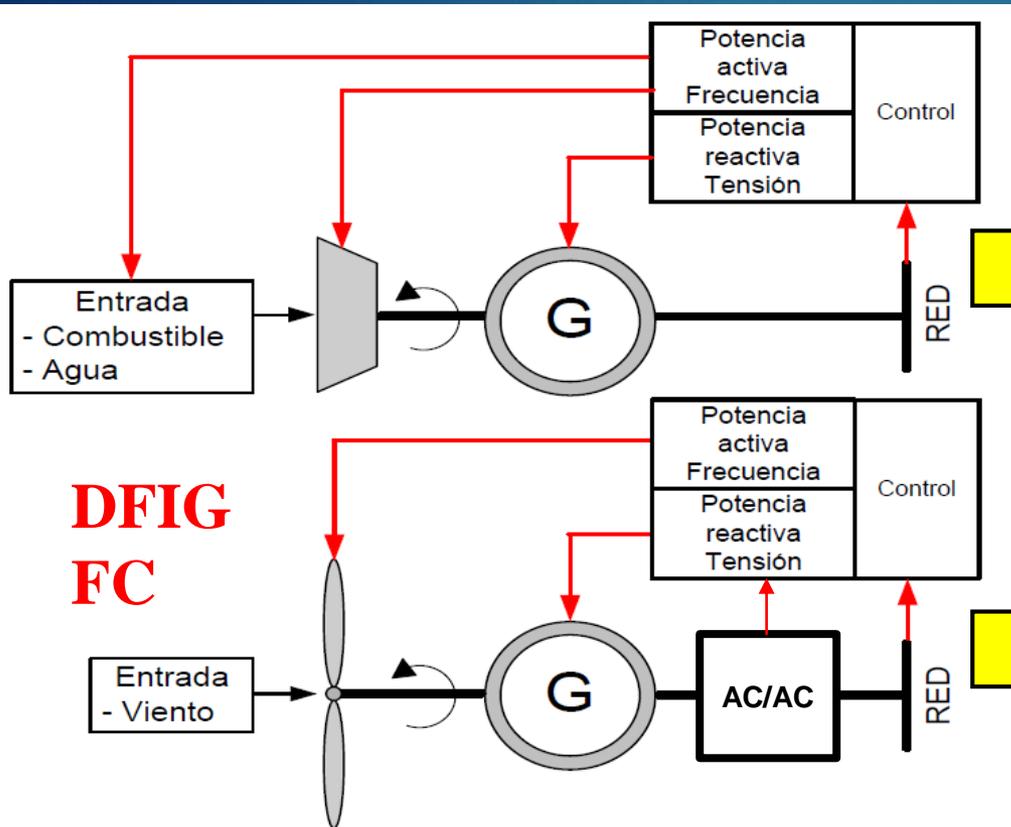
3

Pocas unidades de generación (10MW-100MW)	Decenas o centenas de unidades (1.5MW - 5MW)
Emplazamiento adecuado respecto a red de transmisión	Emplazamiento dependiente del recurso eólico



Introducción

4



Despachable, controlabilidad de fuente primaria dentro de determinados límites

Es posible regular la potencia activa y la velocidad de giro

Unidades equipadas con regulador de tensión individual

No despachable, controlabilidad muy limitada de la potencia inyectada

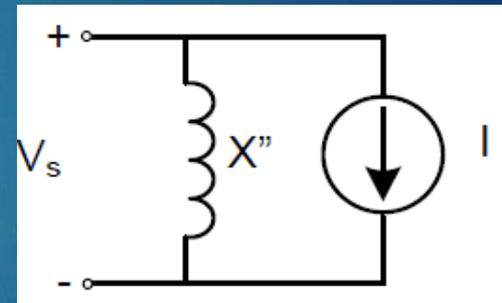
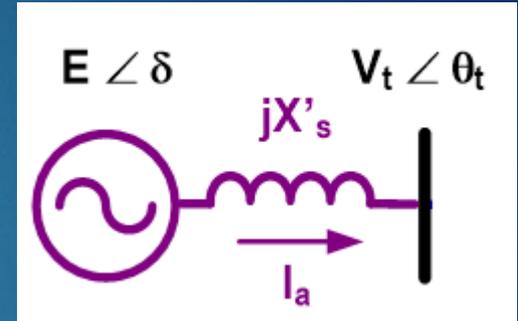
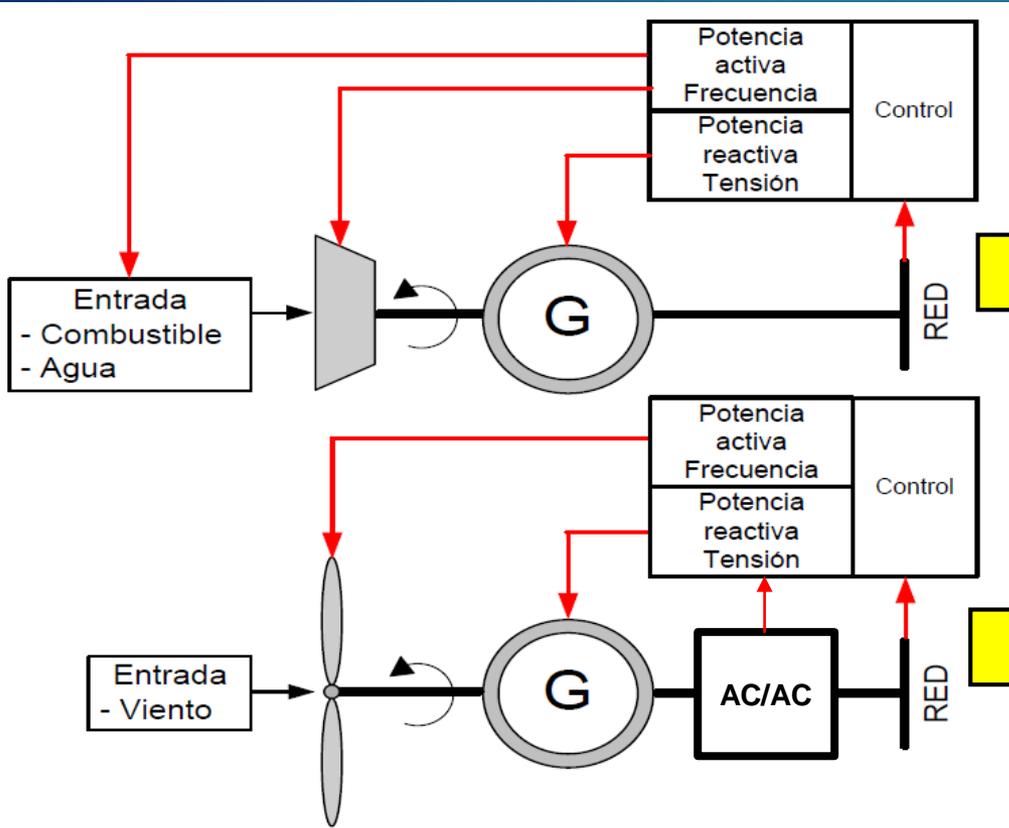
La potencia activa sigue las fluctuaciones del viento

Control central de producción de potencia reactiva

- ▶ La energía eólica no puede ser confinada, solamente se puede optimizar su extracción.
- ▶ Esta característica física impone diferencias operativas importantes respecto a los generadores síncronos.

Introducción

5



- Los generadores eólicos modernos se comportan como fuentes de corrientes controladas

¿Controladas por qué magnitudes?

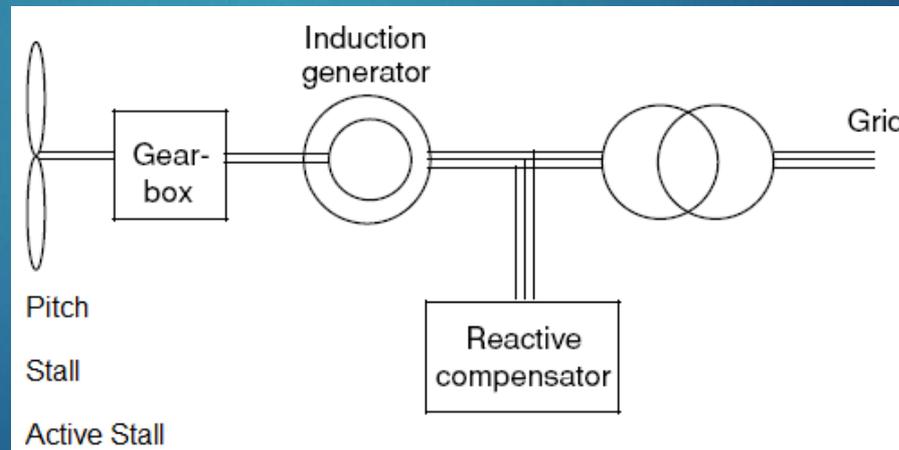
- ▶ Introducción
- ▶ **Generadores de velocidad fija**
- ▶ Generadores de velocidad variable (DFIG)
- ▶ Modelos agregados de parques

Tecnologías de generación obsoletas

7

► Ventajas

- 1) La frecuencia de operación del generador está impuesta por la red, sin importar la velocidad a la que gire la turbina.
- 2) Bajo costo.

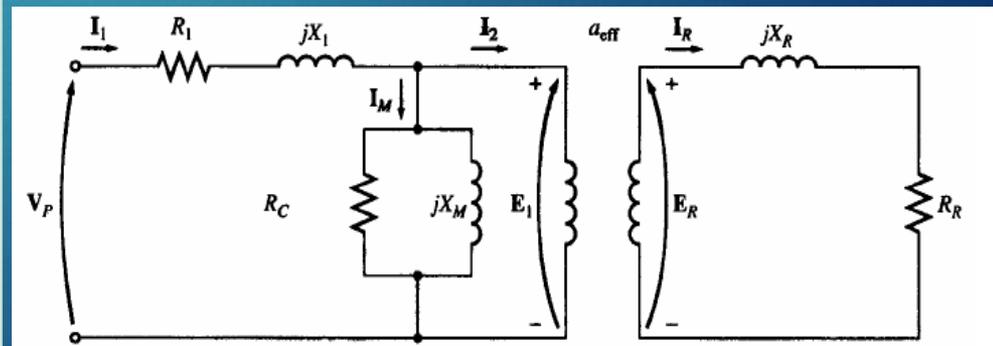
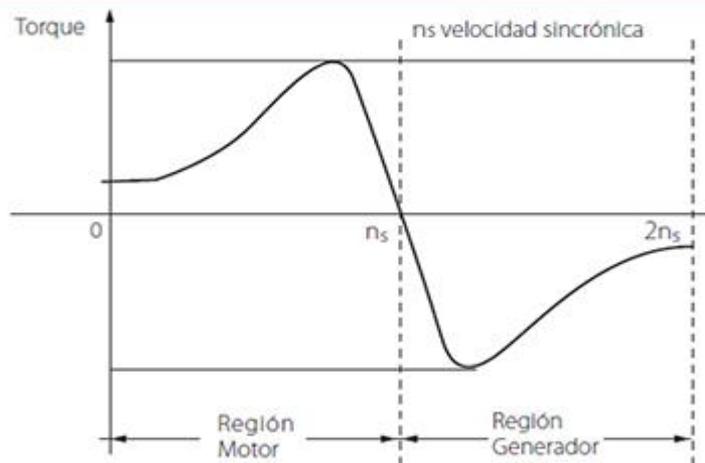


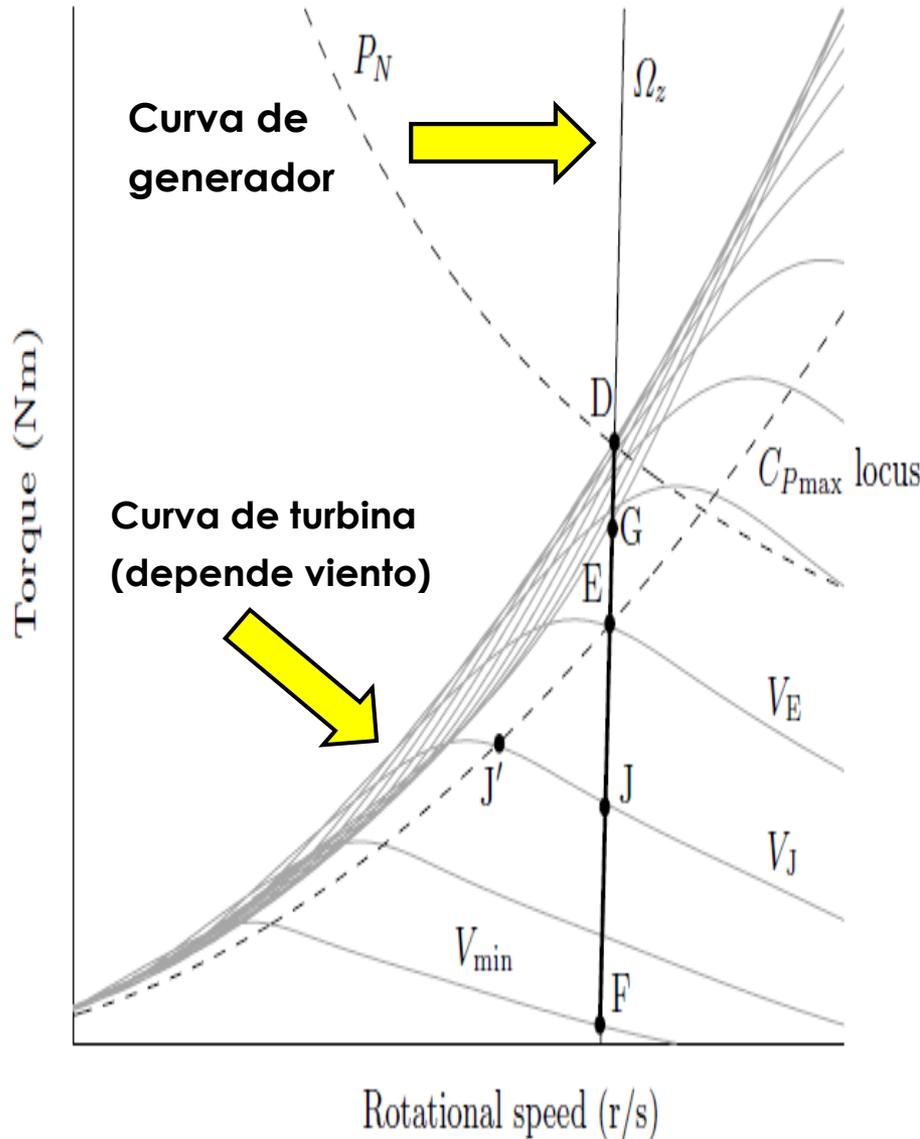
Tecnologías de generación obsoletas

8

► Desventajas

- 1) Solo es posible generar si la velocidad de rotación supera la velocidad de sincronismo (limitado).
- 2) **Consumo de potencia reactiva, dependiente de la producción de potencia activa fluctuante con el viento. Mala calidad de potencia y flicker.**
- 3) **Son ineficientes por no poder adaptarse a las curvas potencia-velocidad de los generadores.**





Curvas de par

- La curva de par de la turbina varía para cada velocidad de viento, y por cada curva existe un máximo relativo.
- La curva de par del generador es casi vertical, no pudiendo adaptarse al punto de máxima eficiencia.
- El generador tipo 2 es capaz de modificar levemente la pendiente y aumentar el rango de utilización y por ende, su eficiencia.

¿Qué se pretende de un generador eólico?

1. Que sea capaz de generar en un mayor rango de velocidades y adaptándose a la curva de par-velocidad de la turbina (esto implica modificar la curva par-velocidad del generador).
2. Dentro de sus limitaciones, que se comporte lo más parecido posible a un generador síncrono (control desacoplado de potencia activa y reactiva).

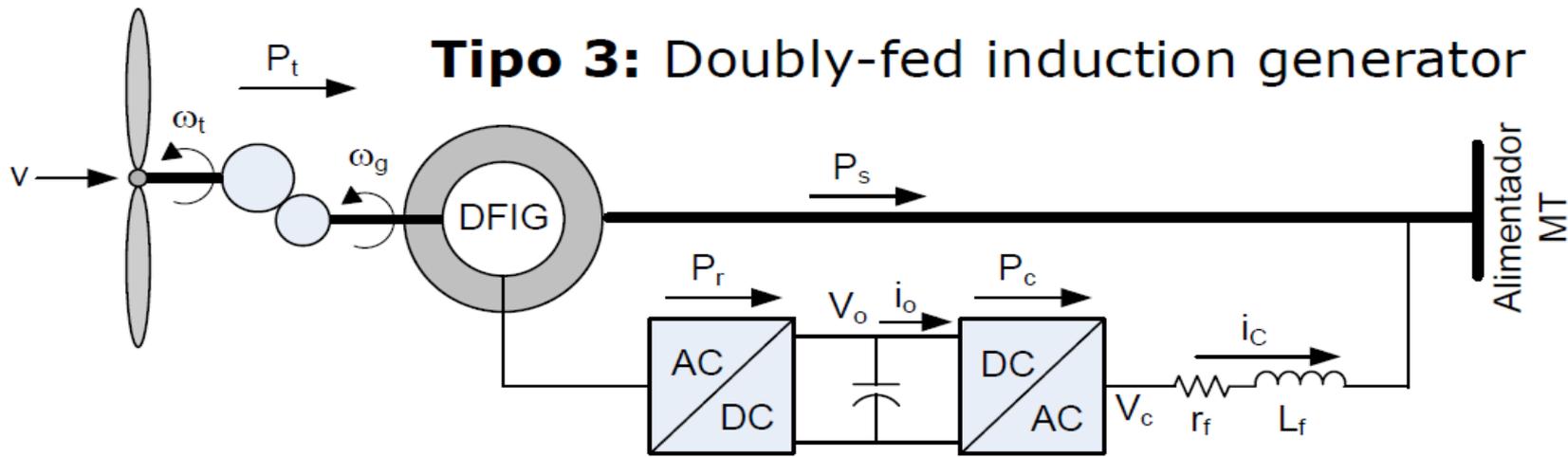
Contenido

11

- ▶ Introducción
- ▶ Generadores de velocidad fija
- ▶ **Generadores de velocidad variable (DFIG)**
- ▶ Modelos agregados de parques

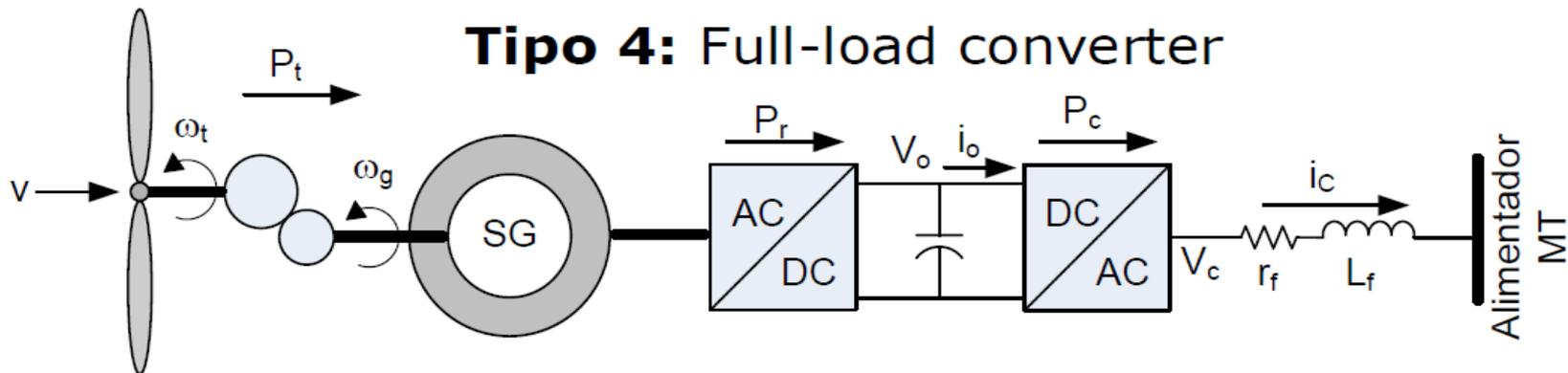
Tecnologías de generación Velocidad variable

12



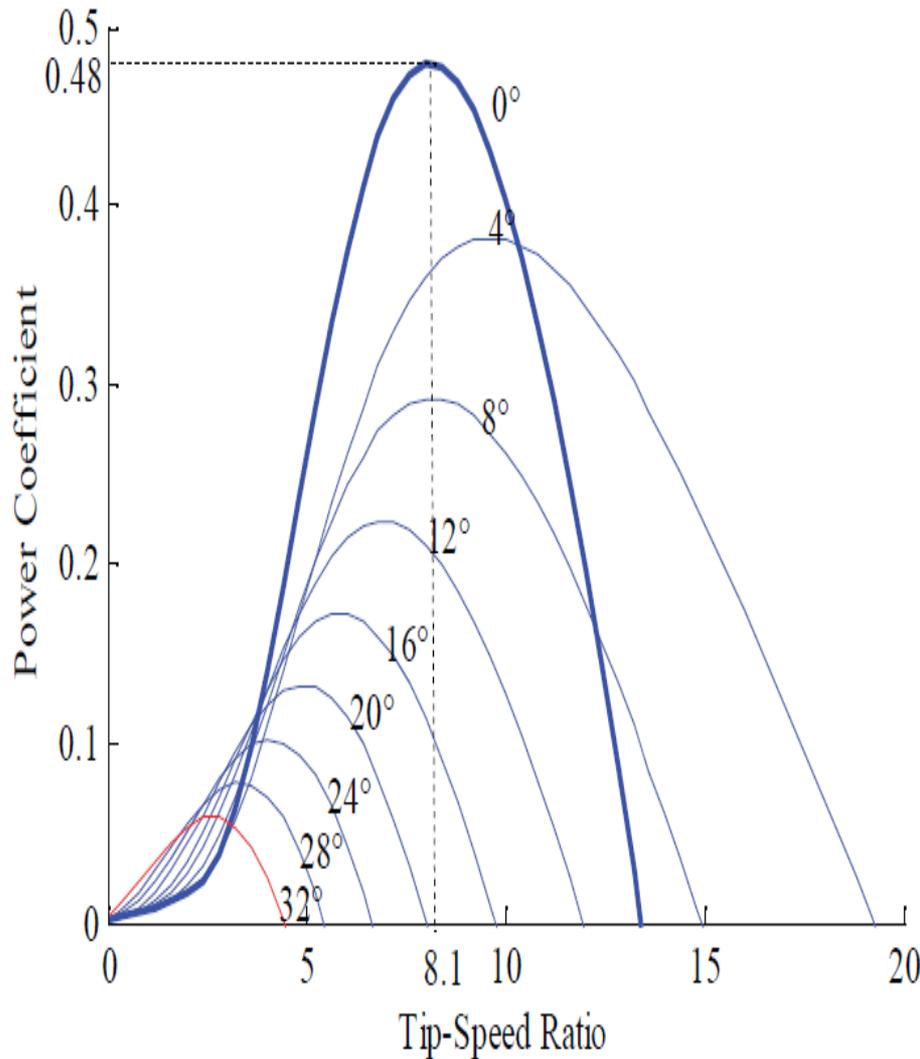
¿Cómo se llega a esto?

¿Por qué?



Curva de potencia

13



Curva de potencia de turbina eólica

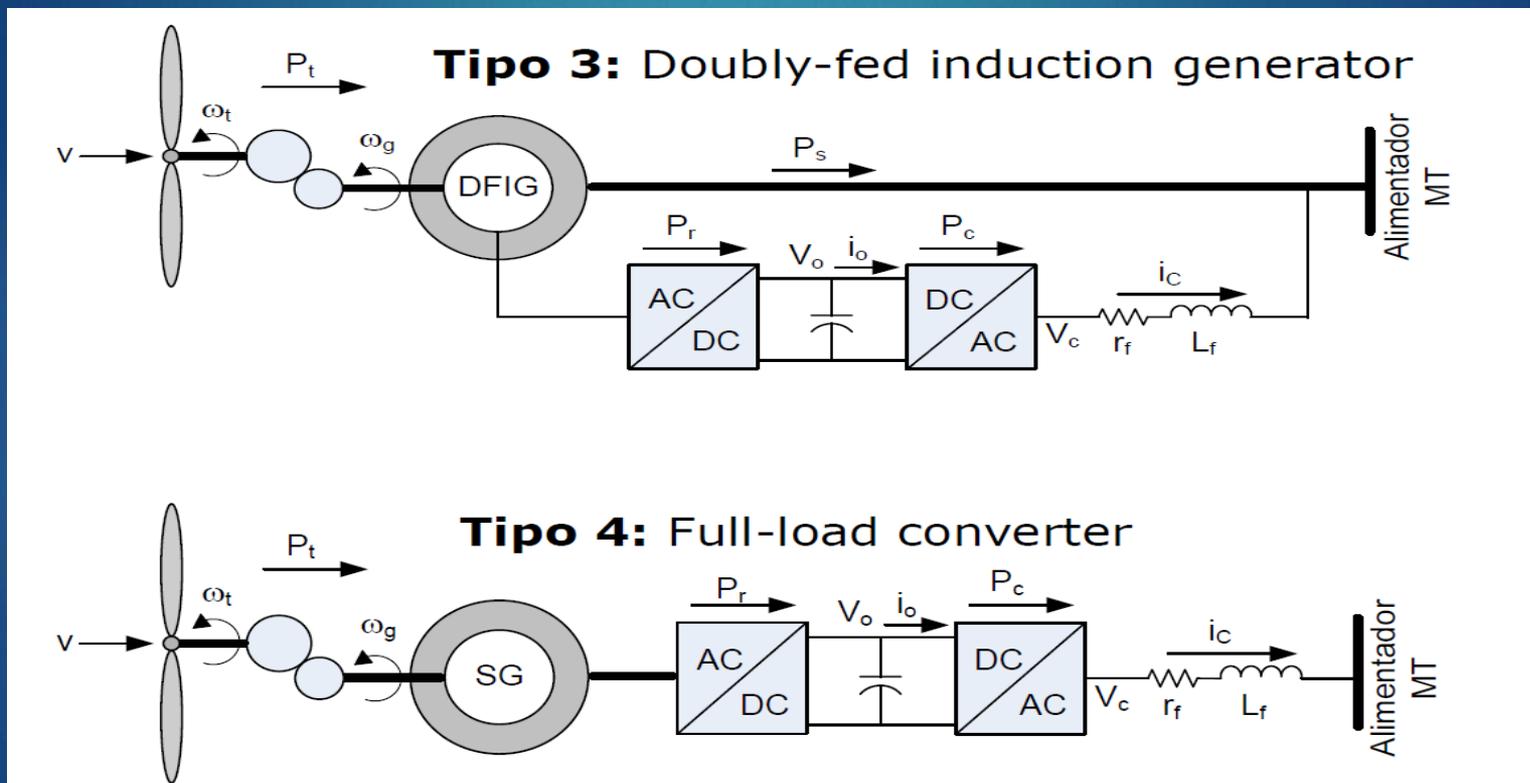
$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3$$

$$P_m = P_{\max} \Leftrightarrow \lambda = \lambda_{\text{opt}} = \frac{R\omega_t}{v}$$

El funcionamiento de velocidad fija no permite optimizar la extracción de potencia

Generadores de velocidad variable

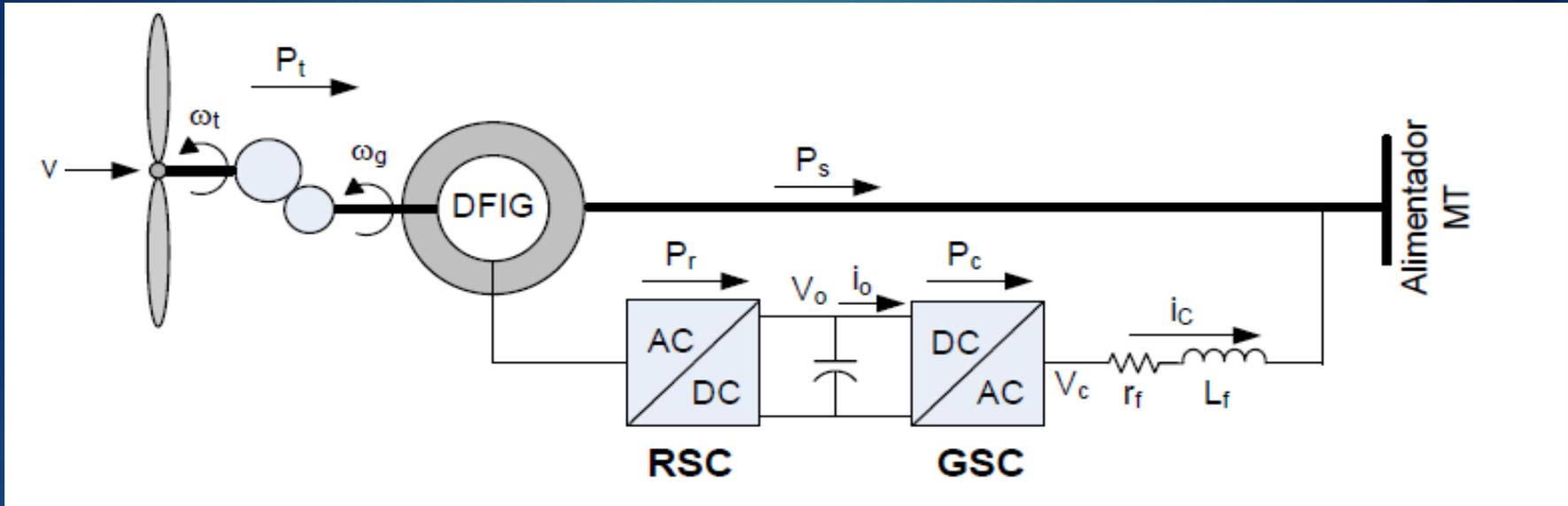
Problema fundamental: Variar la velocidad del generador implicaría cambiar la frecuencia de operación de la red, se necesita desacoplar la frecuencia de operación de la red y la del generador.



Con este tipo de configuraciones, además, se permite solucionar el problema de consumo de potencia reactiva...

Velocidad variable

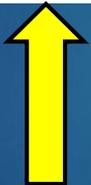
15



$$\frac{p}{2} \omega_g = \omega_s - \omega_r$$

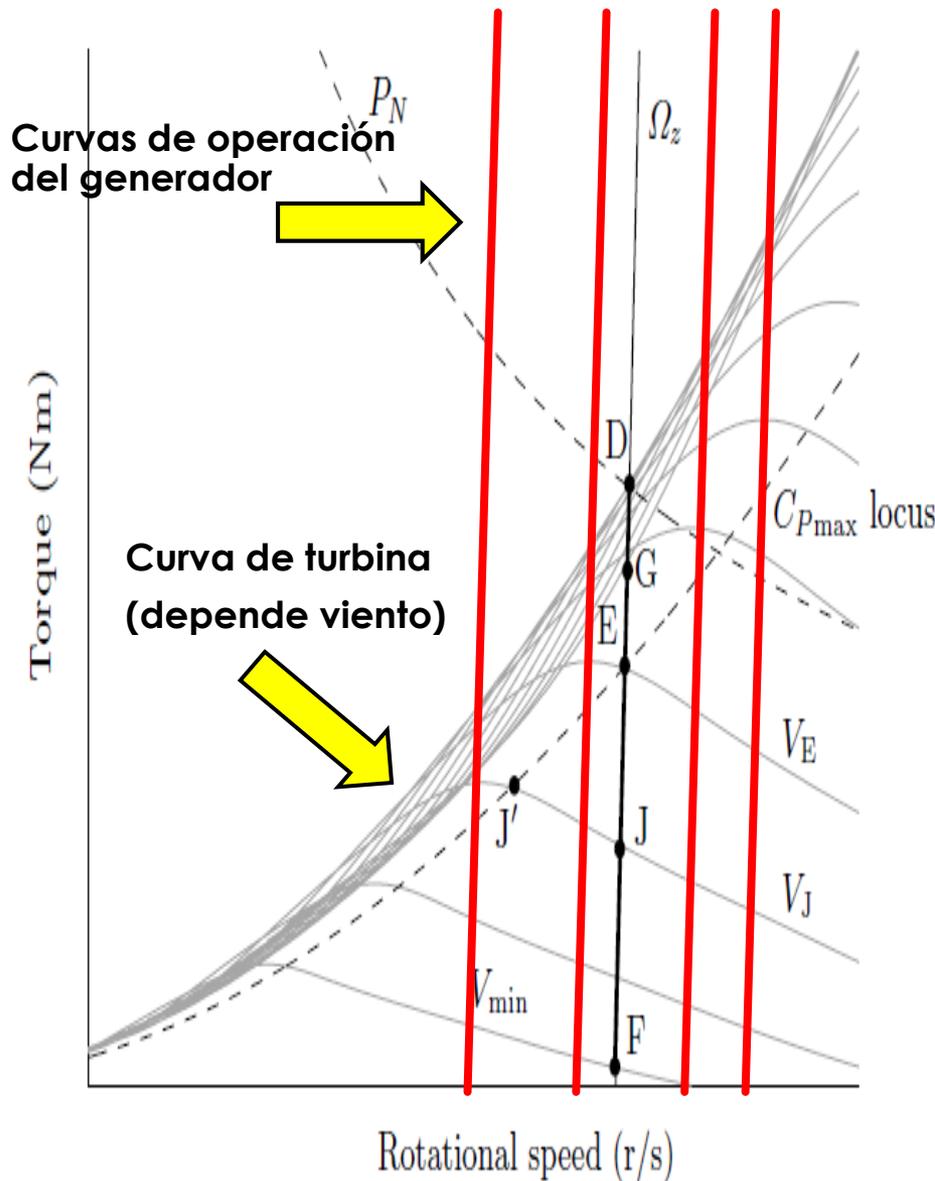


Impuesta por el convertidor RSC
(Rotor side converter)



Impuesta por
la red de potencia

¿Cómo controlar el RSC para que establezca la frecuencia variable correcta?

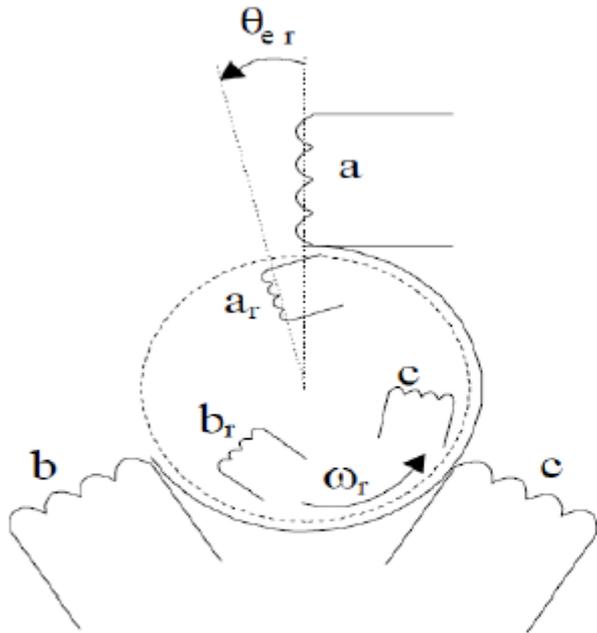


Curvas de par

- Con la configuración tipo DFIG, es posible variar la curva de operación del generador, adaptándose al óptimo, variando la velocidad del rotor.
- Es posible variar la velocidad de rotación de la máquina sin incidir en la frecuencia de operación de la red.

Máquina de inducción

17



$$[V] = [R][i] + \frac{d}{dt}[\Psi]$$
$$[V] = [V_a, V_b, V_c, V_{a_r}, V_{b_r}, V_{c_r}]^T$$
$$[i] = [i_a, i_b, i_c, i_{a_r}, i_{b_r}, i_{c_r}]^T$$
$$[R] = \text{Diag}[R_s, R_s, R_s, R_r, R_r, R_r]$$



1

$$[\Psi] = [L_{abca_r b_r c_r}(\theta_{er})][i]$$



2

$$\frac{J}{p_1} \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_{load}; \quad \frac{d\theta_{er}}{dt} = \omega_r \quad T_e = \frac{1}{2} p_1 [i]^T \frac{d[L]}{d\theta_{er}} [i]$$



3

Sistema de ecuaciones diferenciales de octavo orden con coeficientes variables en el tiempo.

Se debe aplicar la transformación de Park para eliminar la dependencia explícita de los coeficientes respecto al tiempo.

Máquina de inducción

18

$$\begin{aligned}V_{ds} &= -r_s i_{ds} - \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs} \\V_{qs} &= -r_s i_{qs} - \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \psi_{ds} \\V_{dr} &= -r_r i_{dr} - \frac{d\psi_{dr}}{dt} - s \cdot \omega_s \psi_{qr} \\V_{qr} &= -r_r i_{qr} - \frac{d\psi_{qr}}{dt} + s \cdot \omega_s \psi_{dr} \\ \omega_r &= s \cdot \omega_s\end{aligned}\quad \mathbf{1}$$

$$\begin{aligned}\psi_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \psi_{dr} &= L_m i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \psi_{qr} &= L_m i_{qs} + L_r i_{qr}\end{aligned}$$

2

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad \frac{J}{p} \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_{\text{turb}}$$

$$T_e = \frac{p}{2} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds})$$

3

Máquina de inducción

Transformación Park

19

$$V_{ds} = -\omega_s \Psi_{qs}$$

$$V_{qs} = +\omega_s \Psi_{ds}$$

$$V_{dr} = -s \cdot \omega_s \Psi_{qr}$$

$$V_{qr} = +s \cdot \omega_s \Psi_{dr}$$

$$\omega_r = s \cdot \omega_s \quad \mathbf{1}$$

$$\Psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr}$$

$$\Psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr}$$

$$\Psi_{dr} = L_m i_{ds} + L_r i_{dr}$$

$$\Psi_{qr} = L_m i_{qs} + L_r i_{qr}$$

2

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad \frac{J}{p} \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_{turb}$$

$$T_e = p(\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) \quad \mathbf{3}$$

Observaciones:

La tensión V_s está impuesta por la red \rightarrow

$$\left. \begin{array}{l} V_{ds} = V_s \\ V_{qs} = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \Psi_{ds} = 0$$

$$i_{dr} = -\frac{L_s i_{ds}}{L_m} \quad \Psi_{dr} = k_1 i_{dr} \quad \Psi_{ds} = k_2 i_{dr}$$

Máquina de inducción

Transformación Park

20

$$V_{ds} = -\omega_s \Psi_{qs}$$

$$V_{qs} = +\omega_s \Psi_{ds}$$

$$V_{dr} = -s \cdot \omega_s \Psi_{qr}$$

$$V_{qr} = +s \cdot \omega_s \Psi_{dr}$$

$$\omega_r = s \cdot \omega_s \quad \mathbf{1}$$

$$\Psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr}$$

$$\Psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr}$$

$$\Psi_{dr} = L_m i_{ds} + L_r i_{dr}$$

$$\Psi_{qr} = L_m i_{qs} + L_r i_{qr}$$

2

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad \frac{J}{p} \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_{\text{turb}}$$

$$T_e = p(\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) \quad \mathbf{3}$$

Observaciones:

V_s está impuesta por la red →

$$\left. \begin{array}{l} v_{ds} = V_s \\ v_{qs} = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \Psi_{ds} = 0 \\ \Psi_{qs} = -\frac{V_s}{\omega_s} \end{array} \right.$$

1er consecuencia →

$$T_e = -p \frac{V_s}{\omega_s} \frac{L_m i_{dr}}{L_s}$$

Máquina de inducción

Transformación Park

21

► 1er consecuencia

$$T_e = p(\psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds}) = -p \frac{V_s}{\omega_s} \frac{L_m i_{dr}}{L_s}$$

$$\frac{J}{p} \frac{d\omega_r}{dt} = -p \frac{V_s}{\omega_s} \frac{L_m i_{dr}}{L_s} - T_{turb}$$

El torque de la máquina se controla con la corriente i_{dr} .

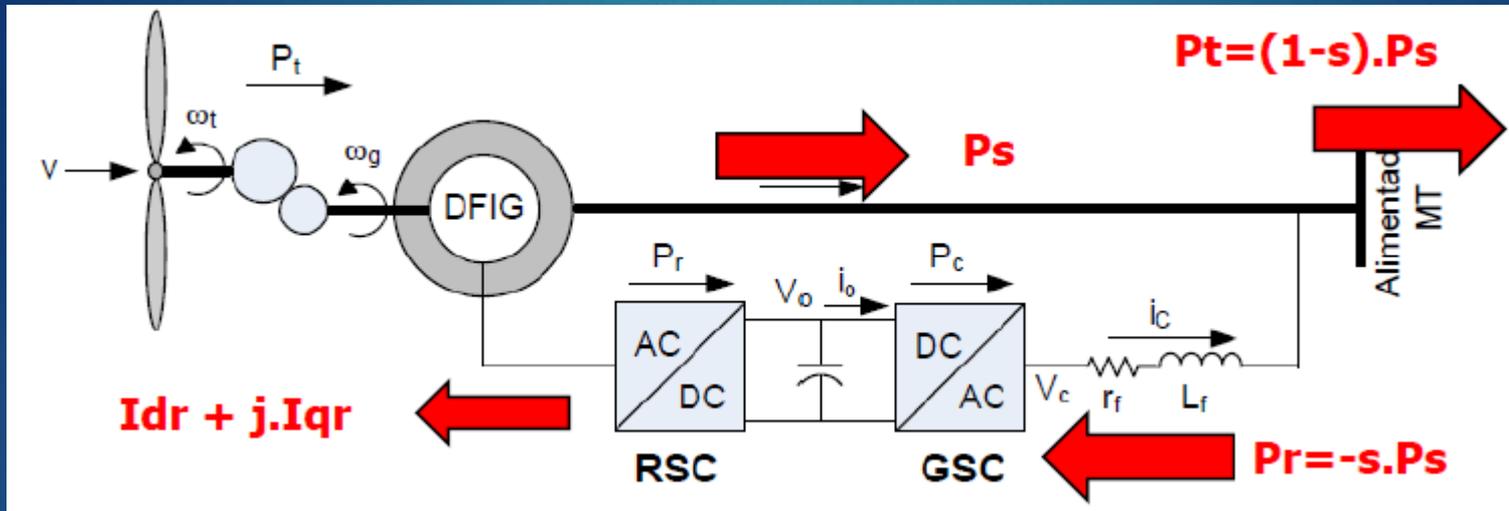
► 2da consecuencia

$$Q_s = v_{ds}i_{qs} - v_{qs}i_{ds} = -\frac{V_s^2}{L_s \omega_s} - \frac{L_m}{L_s} V_s i_{qr}$$

La potencia reactiva que intercambia la máquina con el estator depende de la corriente i_{qr}

Máquina de inducción

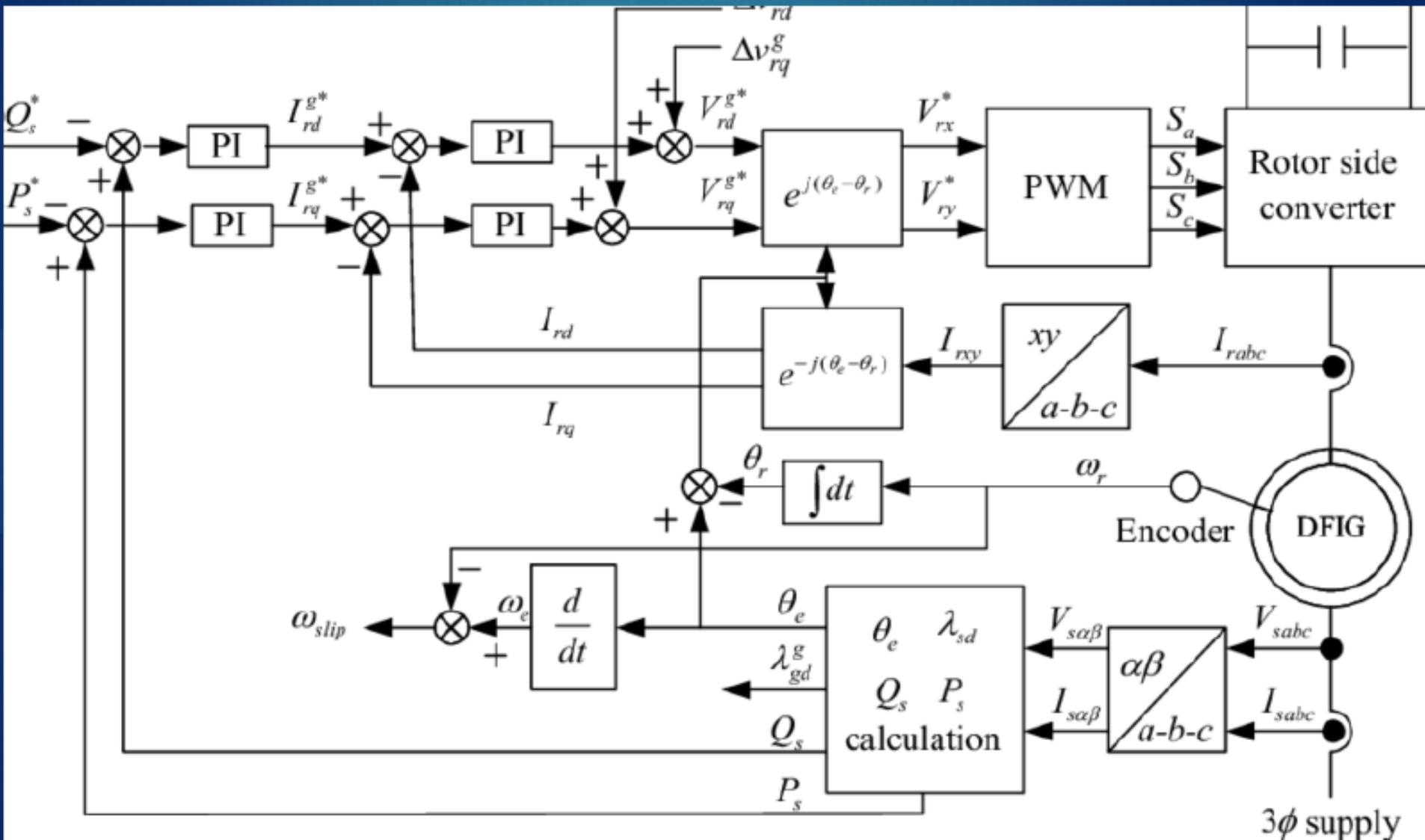
22



- ▶ La imposición de la corriente sobre el rotor implica mantener el bus de continua a una tensión constante.
- ▶ Un costo energético: $P_r = -s.P_s$

Máquina de inducción

23

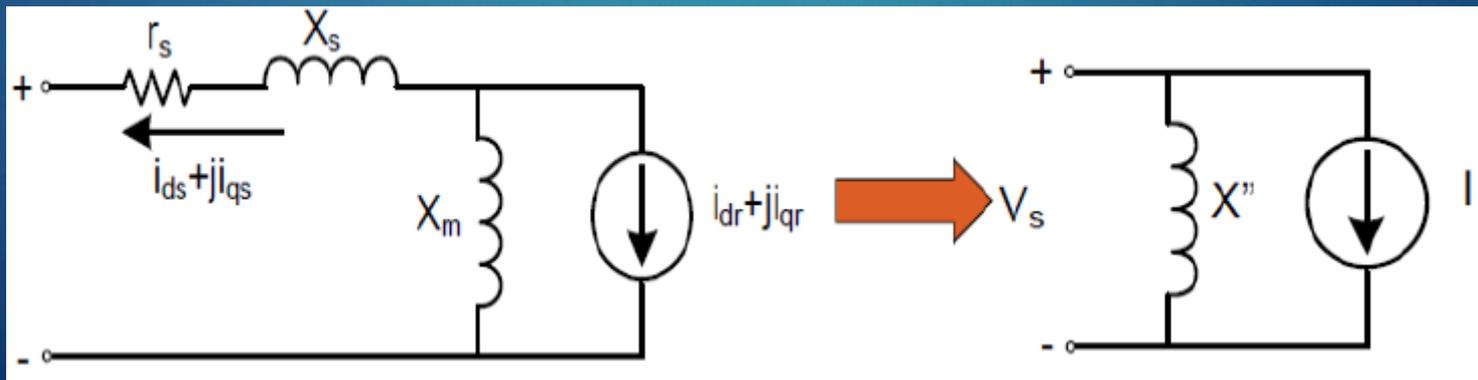


- ▶ Introducción
- ▶ Generadores de velocidad fija
- ▶ Generadores de velocidad variable (DFIG)
- ▶ **Modelos agregados de parques**

Modelado de parques

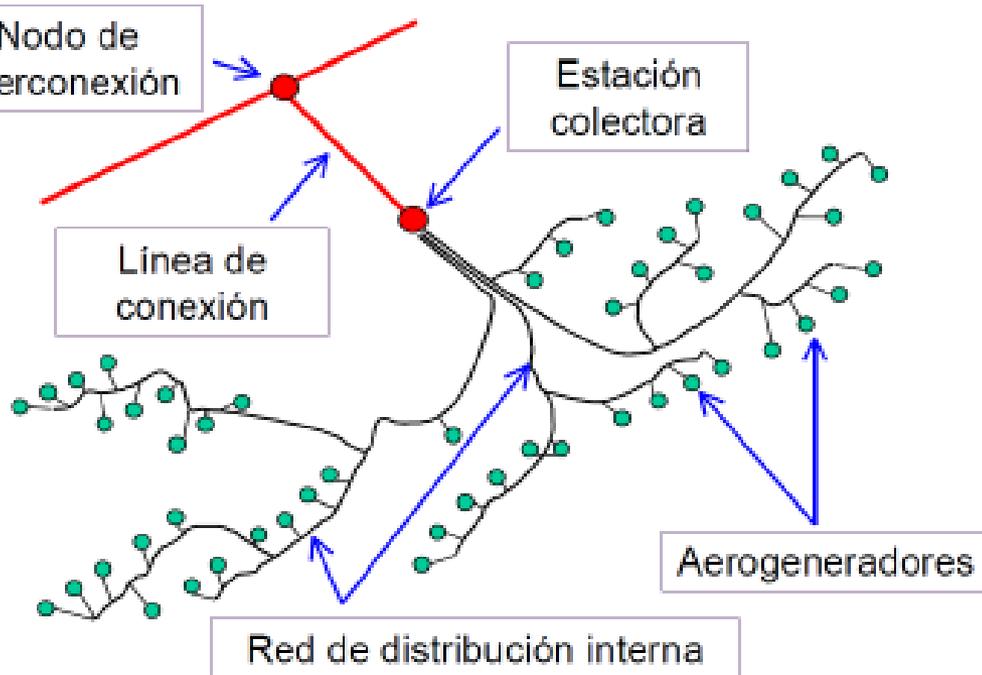
25

- ▶ La estrategia de control planteada implica que para controlar la potencia activa o torque, se debe controlar la corriente i_{dr} , y si se quiere controlar la potencia reactiva, se debe controlar la corriente i_{qr} .
- ▶ i_{dr} se determina en forma local, en función de la velocidad del viento que mide el anemómetro del aero.
- ▶ i_{qr} se determina de forma centralizada por el centro de control del parque eólico, sea con el objeto de controlar tensión o para mantener un determinado FP.

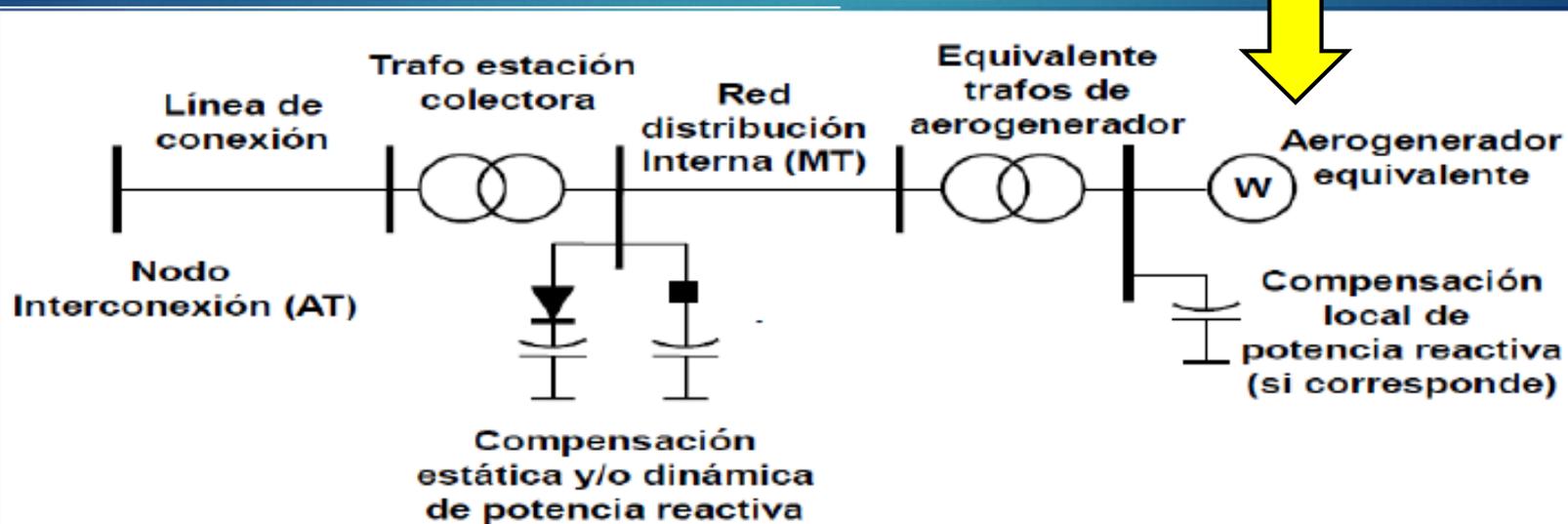


Modelado agregado

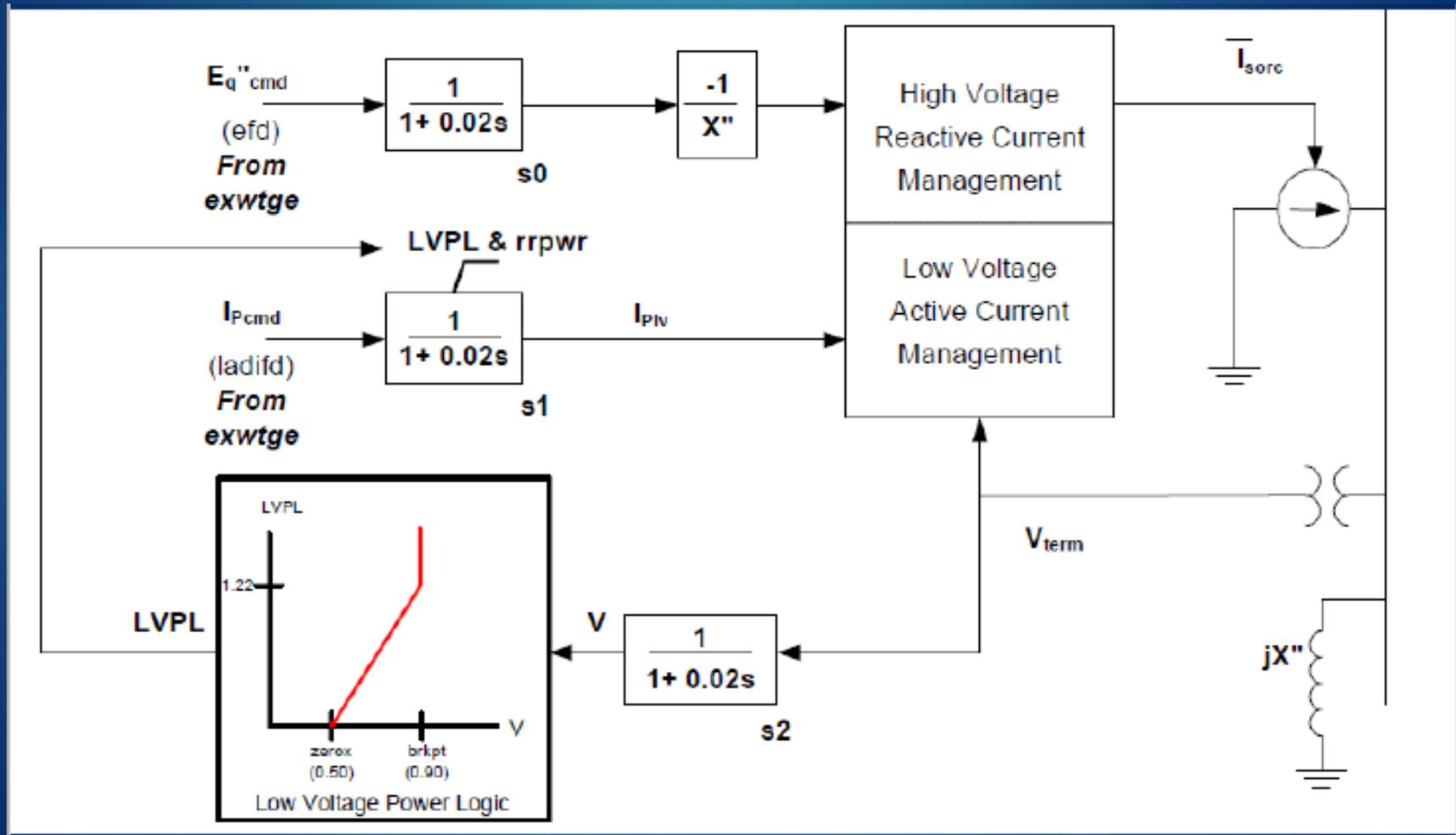
26



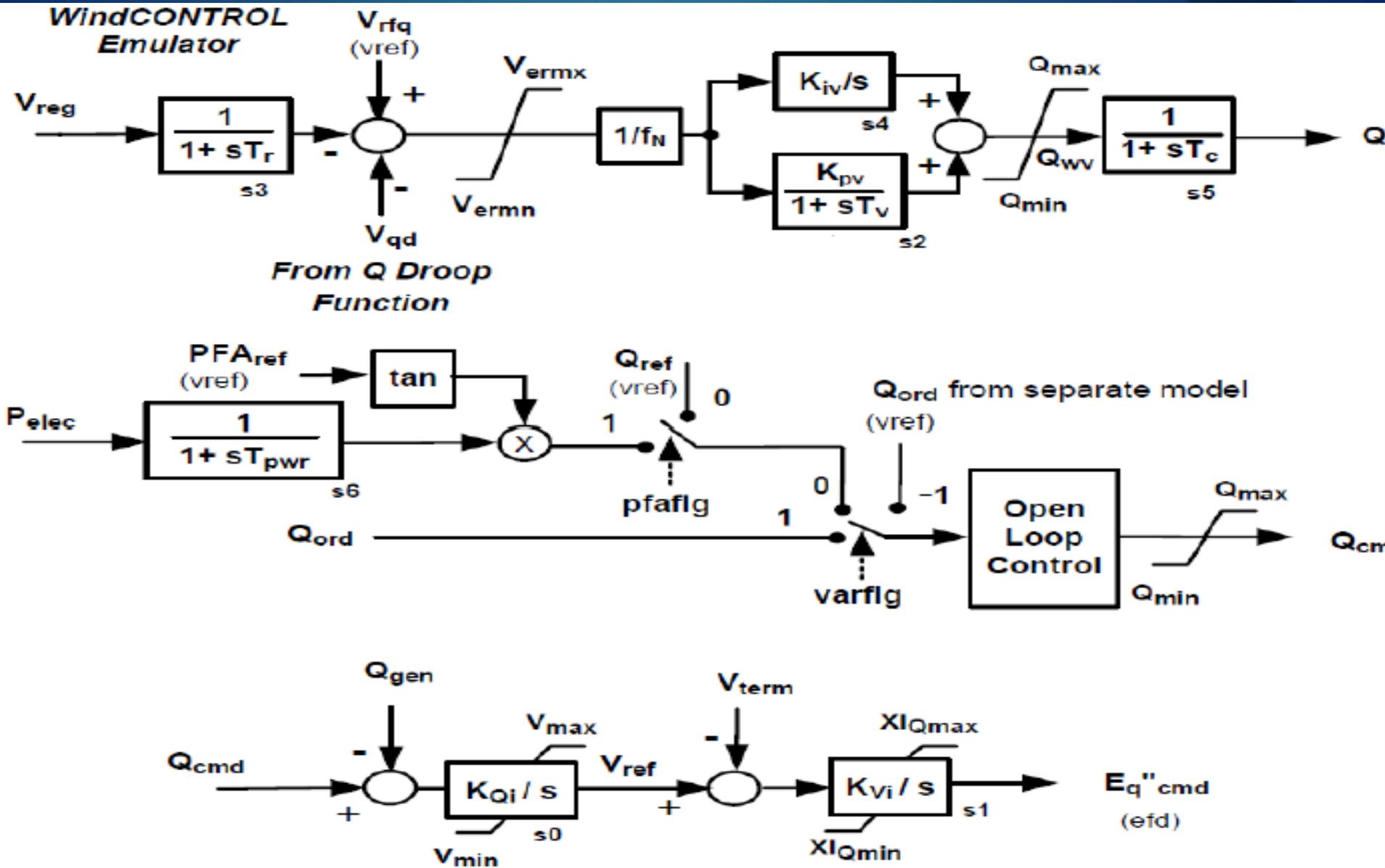
- ▶ Este modelo se enfoca en el impacto del parque eólico sobre la red, despreciando los detalles de modelado.

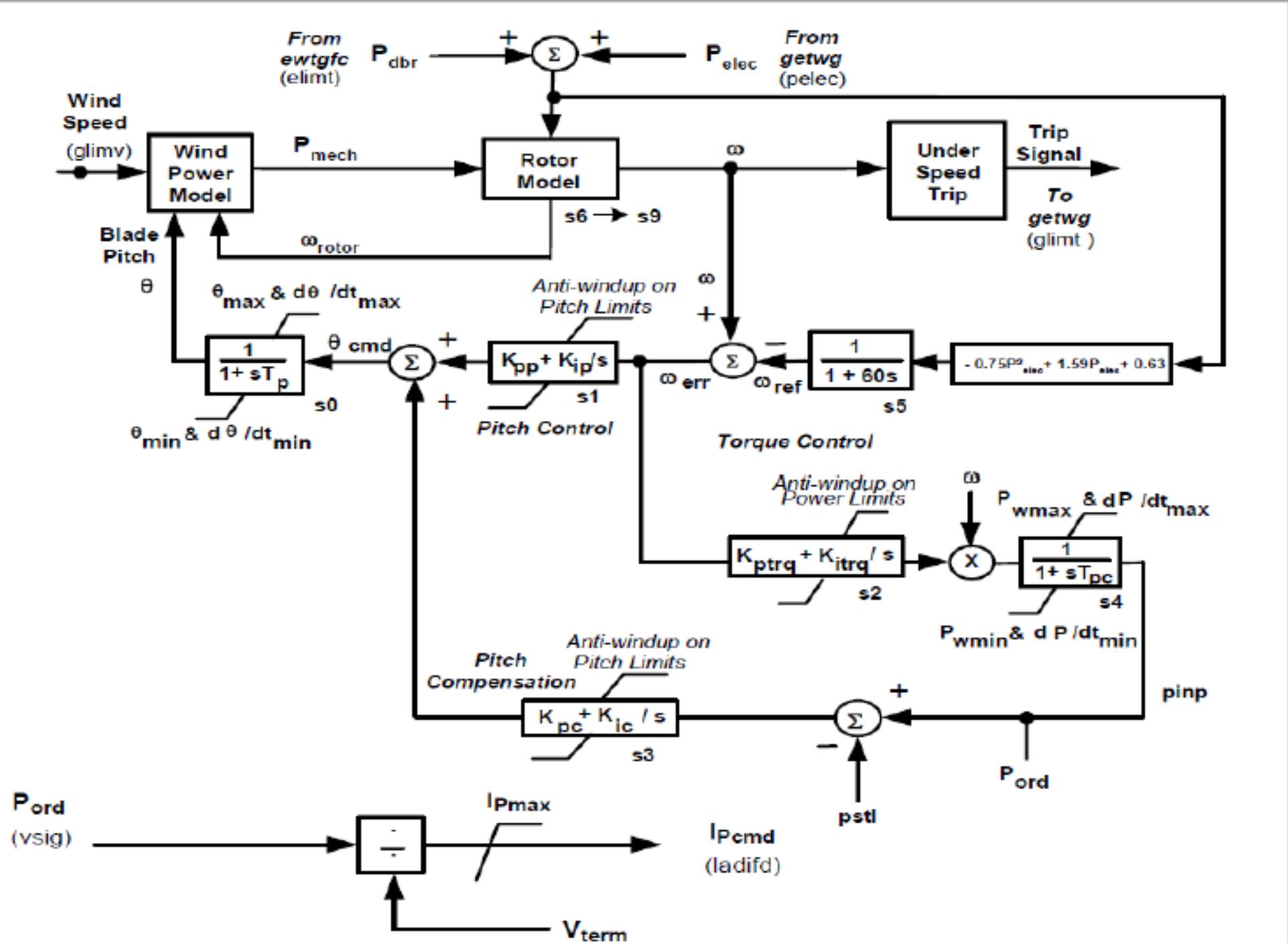


Modelling of GE wind-turbine generators for grid studies



Modelado agregado





Modelado agregado

30

Full converter WTD under 3-ph dip , Generic model $T_s = 5$ ms

