

Modelado de Parques Eólicos

Estabilidad de Sistemas Eléctricos de Potencia
Curso 2018

FERNANDO BERRUTTI

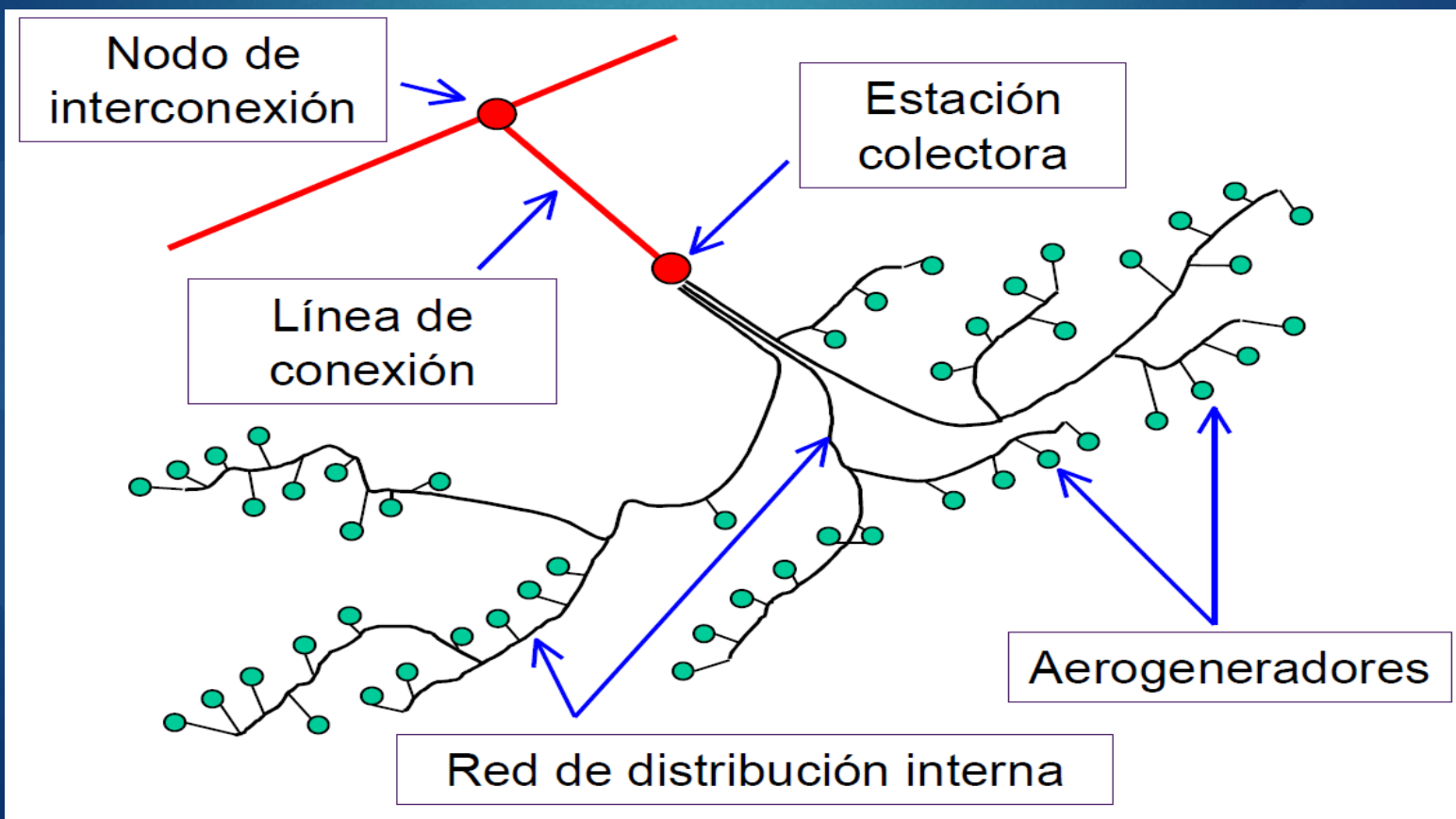
- ▶ **Introducción**
- ▶ Tecnologías de generación
- ▶ Curvas de potencia de turbinas eólicas
- ▶ Aerogeneradores de velocidad variable
- ▶ Modelos de parques eólicos

Centrales convencionales	Parques eólicos
Pocas unidades de generación (10MW–100MW)	Decenas o centenas de unidades (1.5MW – 5MW)
Despachable, controlabilidad de fuente primaria dentro de determinados límites	No despachable, controlabilidad muy limitada de la potencia inyectada
Es posible regular la potencia activa y la velocidad de giro	La potencia activa sigue las fluctuaciones del viento
Unidades equipadas con regulador de tensión individual	Control central de producción de potencia reactiva
Emplazamiento adecuado respecto a red de transmisión	Emplazamiento dependiente del recurso eólico
Generadores sincrónicos	Cuatro tecnologías de generación distintas

Introducción

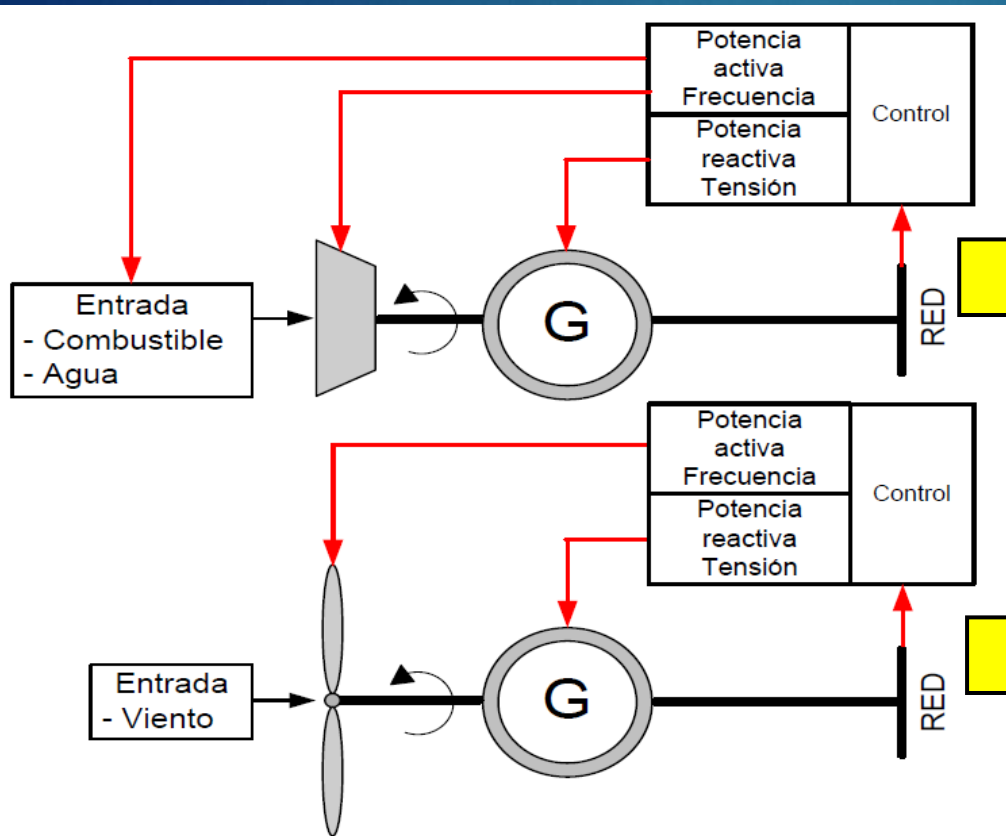
4

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

5



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

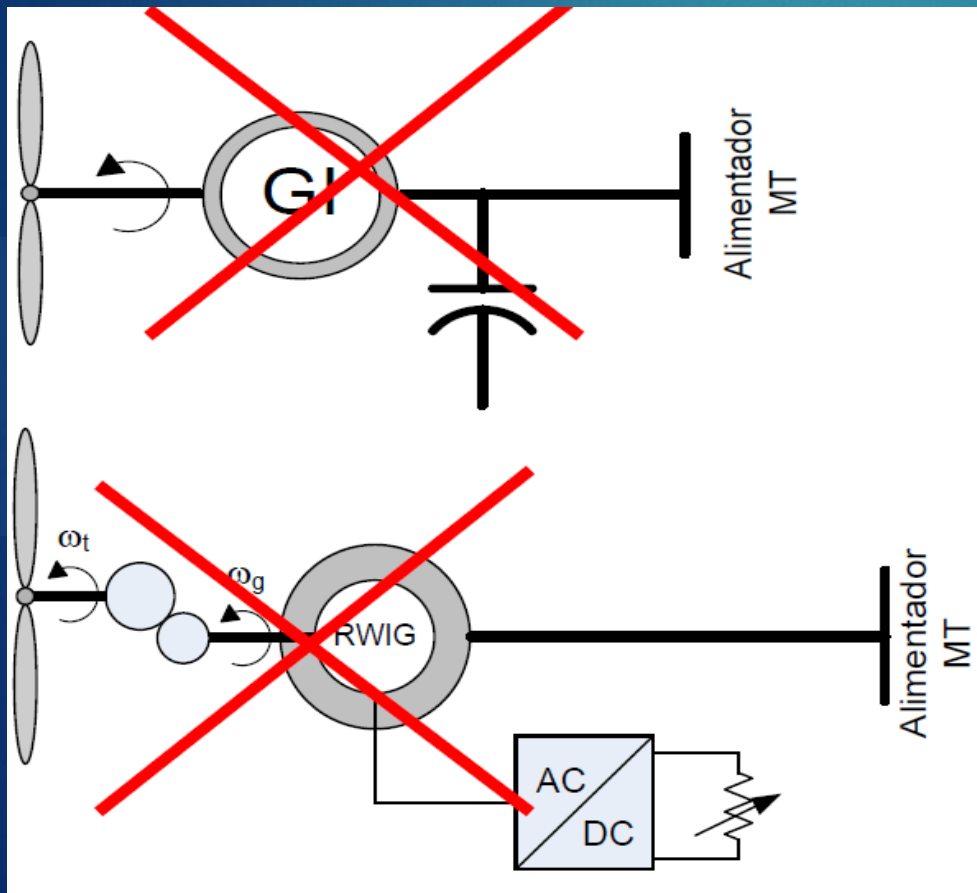
- ▶ La energía eólica no puede ser confinada, solamente se puede optimizar su extracción.
- ▶ Esta característica física impone diferencias operativas importantes respecto a los generadores síncronos.

- ▶ Introducción
- ▶ **Tecnologías de generación**
- ▶ Curvas de potencia de turbinas eólicas
- ▶ Aerogeneradores de velocidad variable
- ▶ Modelos de parques eólicos

Tecnologías de generación obsoletas. Velocidad fija

7

- ▶ La tipificación de generadores responden a la evolución histórica del aprovechamiento del recurso.



- ▶ **Tipo 1:**
Generador de inducción del tipo jaula

- ▶ **Tipo 2:**
Generador de inducción de rotor bobinado y resistencia rotórica variable

Tecnologías de generación obsoletas

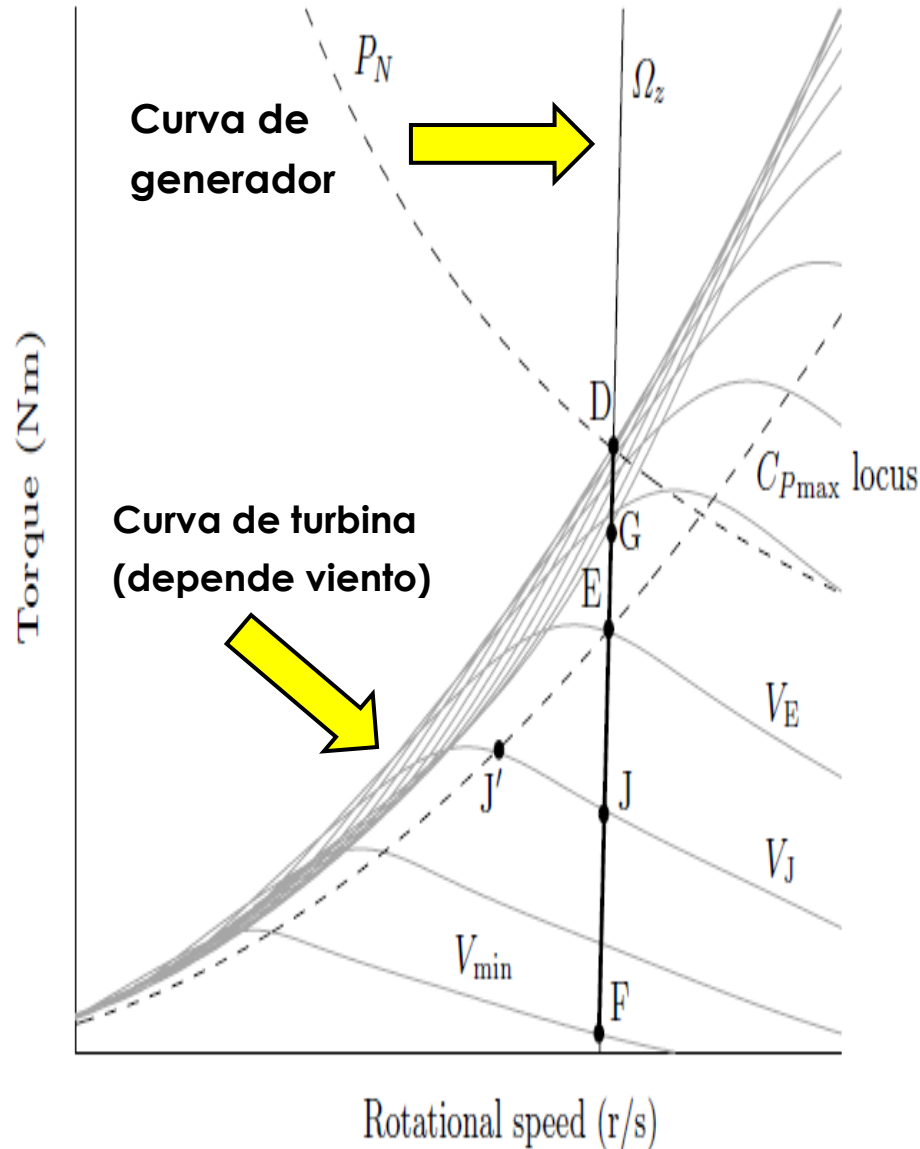
8

► 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.

► 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.**

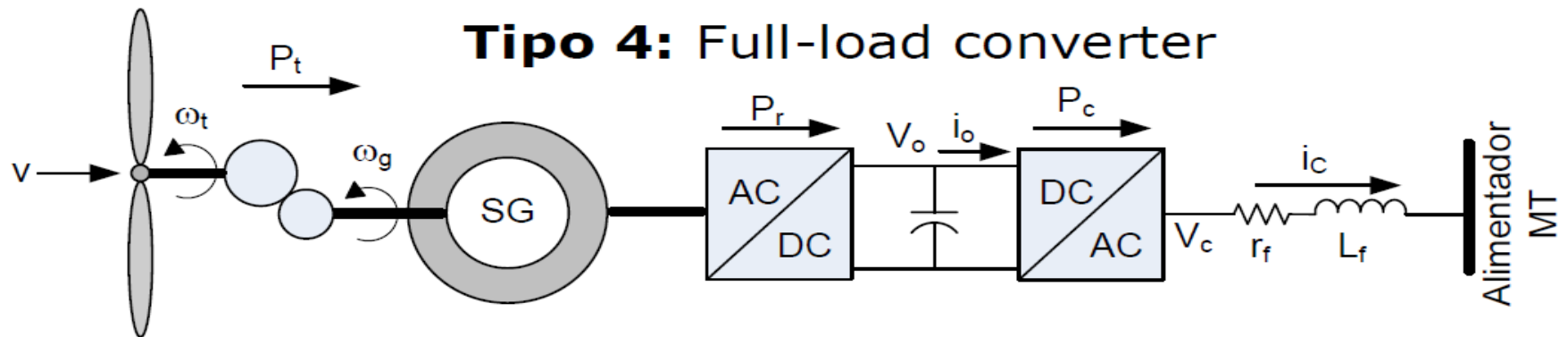
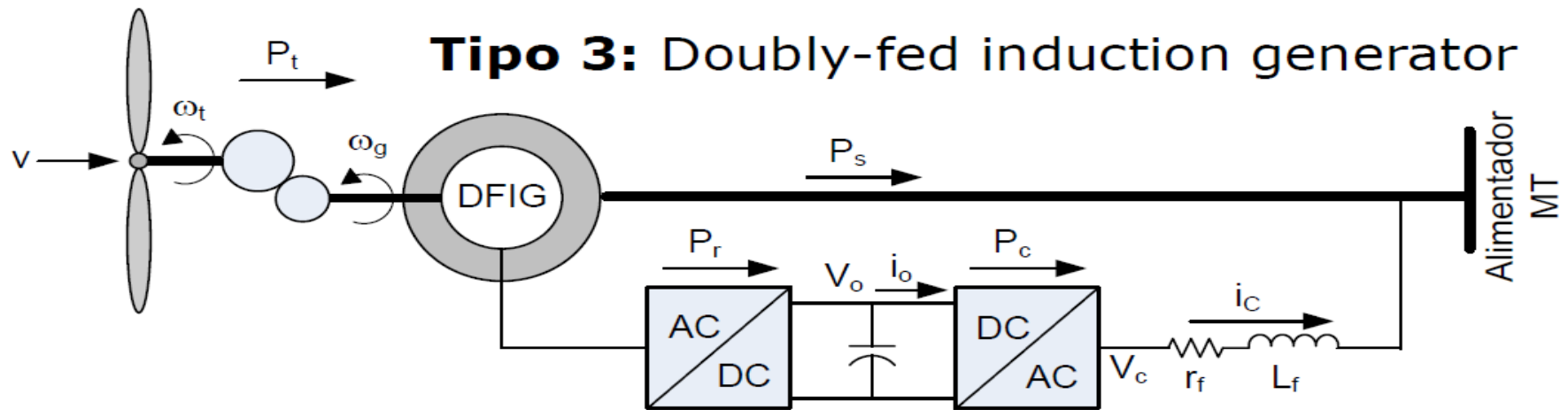


Curvas de par

- 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. Independientemente que el rotor no pueda mantener una velocidad de sincronismo, debe acoplarse a la red de potencia.
2. Control independiente de potencia activa y reactiva.
3. Que genere potencia activa con una eficiencia razonable en un mayor rango de velocidades, adaptándose a la curva de par-velocidad de la turbina.

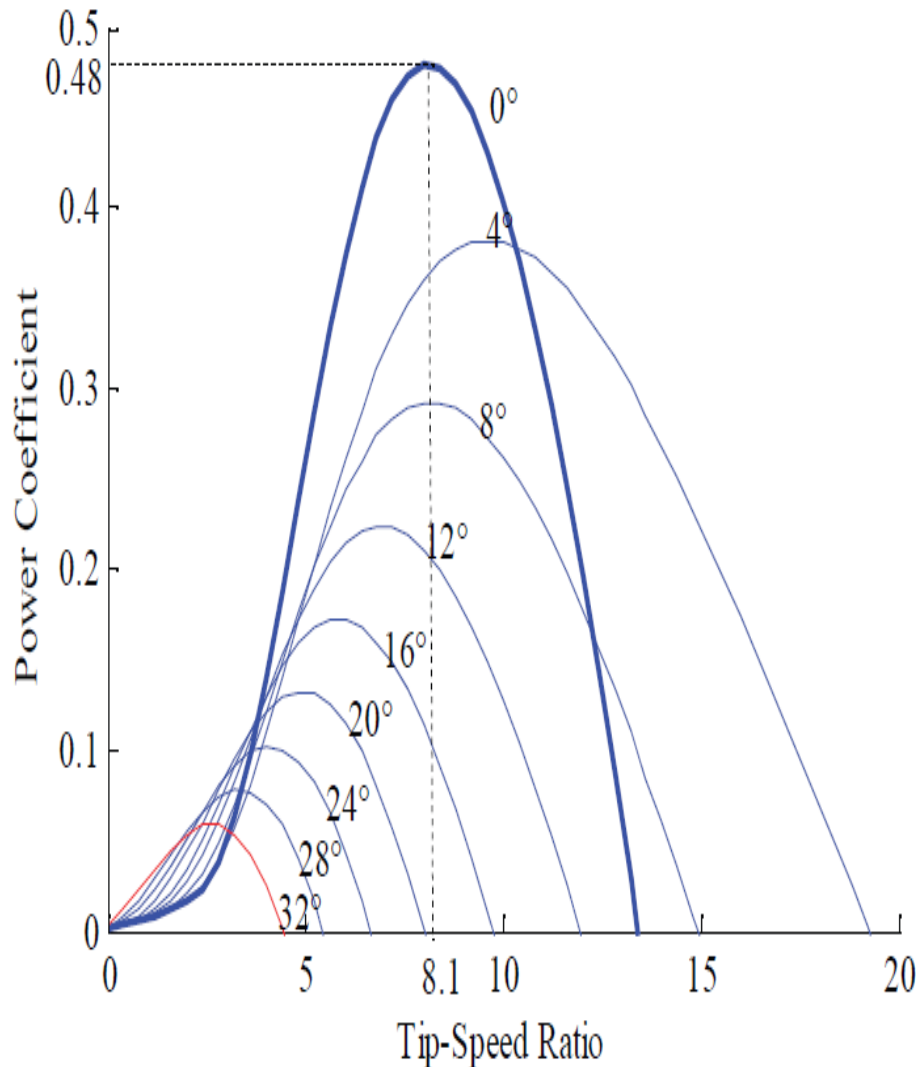


- Integración a la red de potencia.
- Desacople de producción de potencia activa y reactiva.
- ? Eficiencia.

- ▶ Introducción
- ▶ Tecnologías de generación
- ▶ **Curvas de potencia de turbinas eólicas**
- ▶ Aerogeneradores de velocidad variable
- ▶ Modelos de parques eólicos

Curva de potencia

13



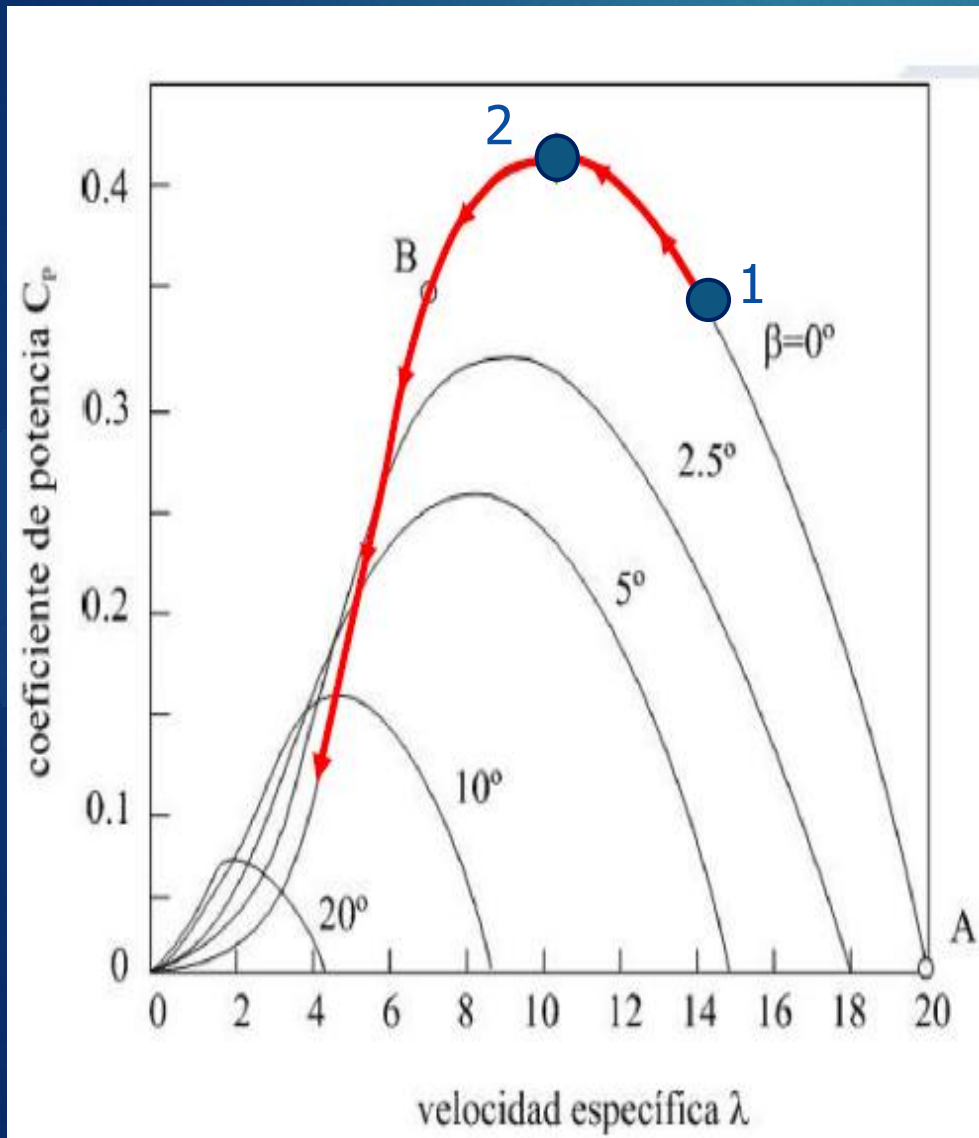
Curva de potencia de turbina eólica

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

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

Curva de potencia

14



Generador de velocidad fija.

- Suponer inicialmente que el generador opera en 1.
- Aumenta la velocidad del viento hasta llegar a 2.
- Si sigue aumentando la velocidad del viento, ahora el generador produce menos potencia...

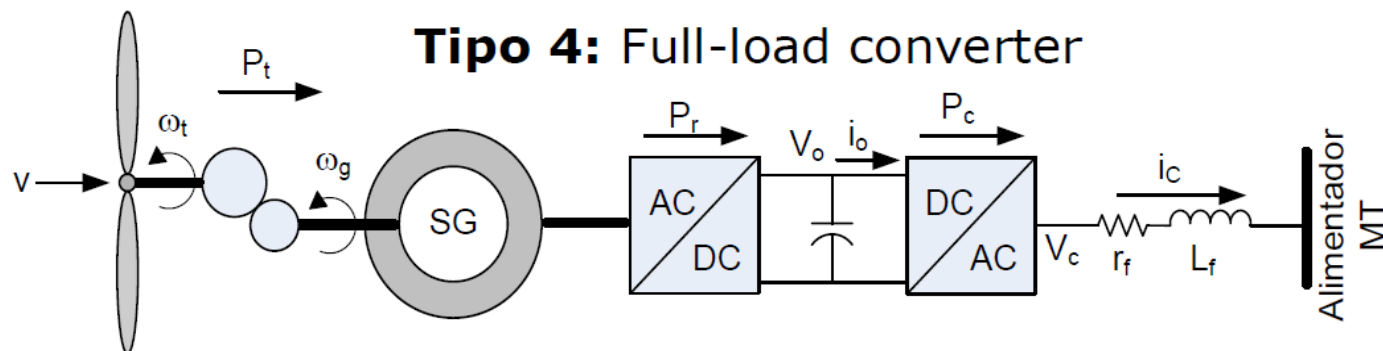
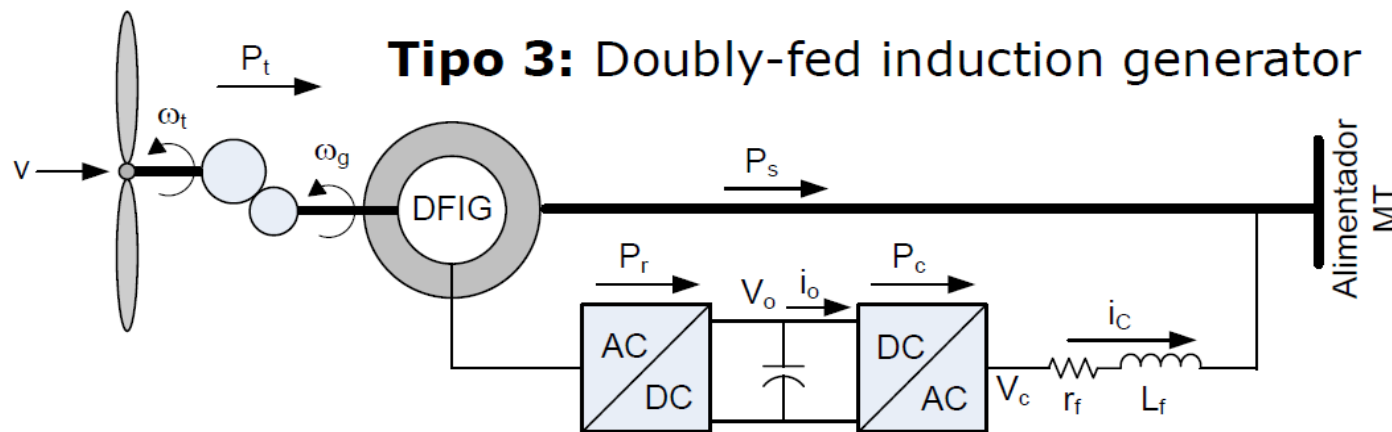
¿Qué sería deseable? Variar la velocidad angular de la turbina para que opere en el punto óptimo.

$$\lambda = \lambda_{\text{opt}} = \frac{R\omega_t}{v}$$

Generadores de velocidad variable

16

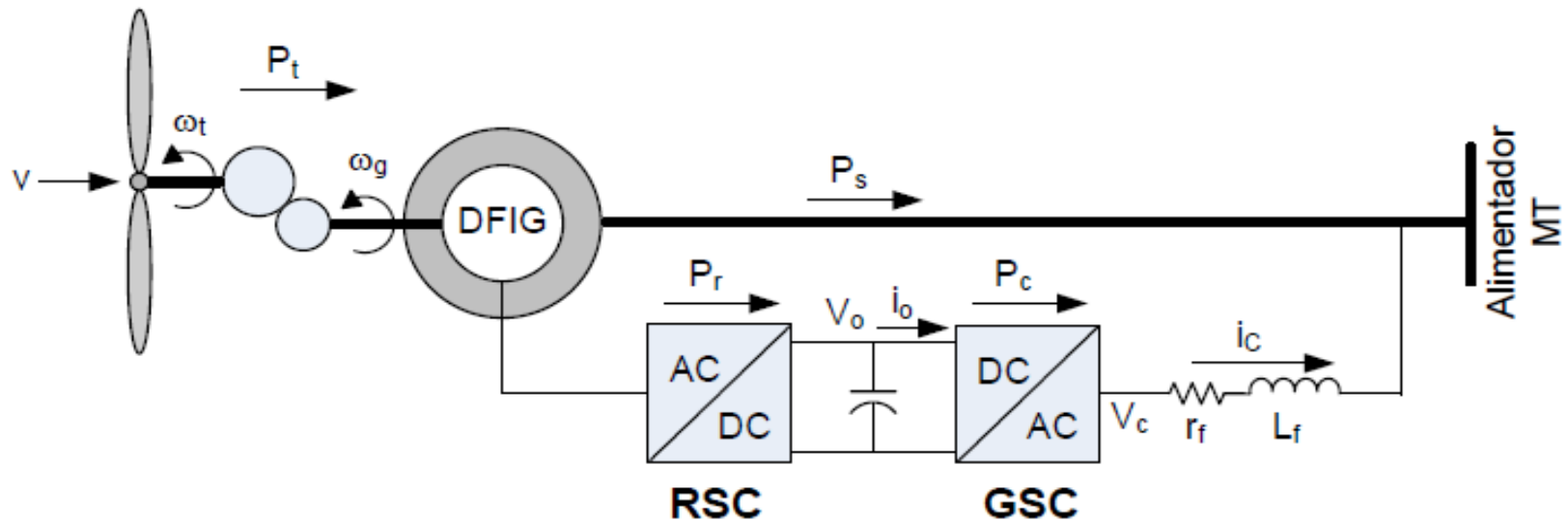
Se puede variar la velocidad del generador sin incidir en la frecuencia de operación de la red eléctrica.



- ▶ Introducción
- ▶ Tecnologías de generación
- ▶ Curvas de potencia de turbinas eólicas
- ▶ **Aerogeneradores de velocidad variable**
- ▶ Modelos de parques eólicos

Velocidad variable

18



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

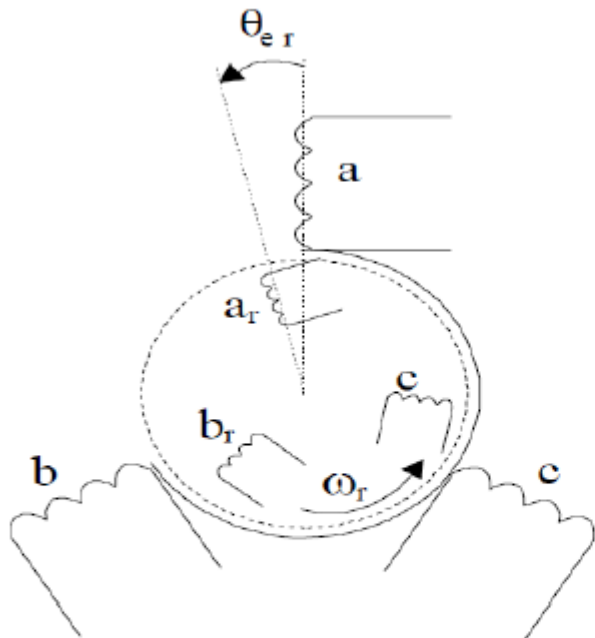
Impuesta por el convertidor RSC
(Rotor side converter)

Impuesta por
la red de potencia

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

Máquina de inducción

19



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

1

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

2

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

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

20

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

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

$$\begin{aligned}\frac{d\theta_r}{dt} &= \omega_r & \frac{J}{p} \frac{d\omega_r}{dt} &= T_e - T_{\text{turb}} \\ T_e &= \frac{p}{2} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds})\end{aligned}$$

3

Máquina de inducción

Transformación Park

21

$$\begin{aligned}V_{ds} &= -\omega_s \Psi_{qs} \\V_{qs} &= +\omega_s \Psi_{ds} \\V_{dr} &= -s \cdot \omega_s \Psi_{qr} \\V_{qr} &= +s \cdot \omega_s \Psi_{dr} \\\omega_r &= s \cdot \omega_s\end{aligned}\quad \mathbf{1}$$

$$\begin{aligned}\Psi_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\\Psi_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\\Psi_{dr} &= L_m i_{ds} + L_r i_{dr} \\\Psi_{qr} &= L_m i_{qs} + L_r i_{qr}\end{aligned}\quad \mathbf{2}$$

$$\begin{aligned}\frac{d\theta_r}{dt} &= \omega_r & \frac{J}{p} \frac{d\omega_r}{dt} &= T_e - T_{\text{turb}} \\T_e &= p(\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds})\end{aligned}\quad \mathbf{3}$$

Simplificaciones para el análisis (solo con propósitos didácticos)...

- Se desprecian las resistencias del rotor y el estator.
- Se desprecian los transitorios electromagnéticos de flujo, tanto en el rotor como en el estator.

Máquina de inducción

22

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2

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

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

V_s está impuesta por la red $\Rightarrow$

$$\left. \begin{matrix} V_{ds} = V_s \\ V_{qs} = 0 \end{matrix} \right\} \Rightarrow \begin{cases} \psi_{ds} = 0 \\ \psi_{qs} = -\frac{V_s}{\omega_s} \end{cases}$$

Máquina de inducción

23

► 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}

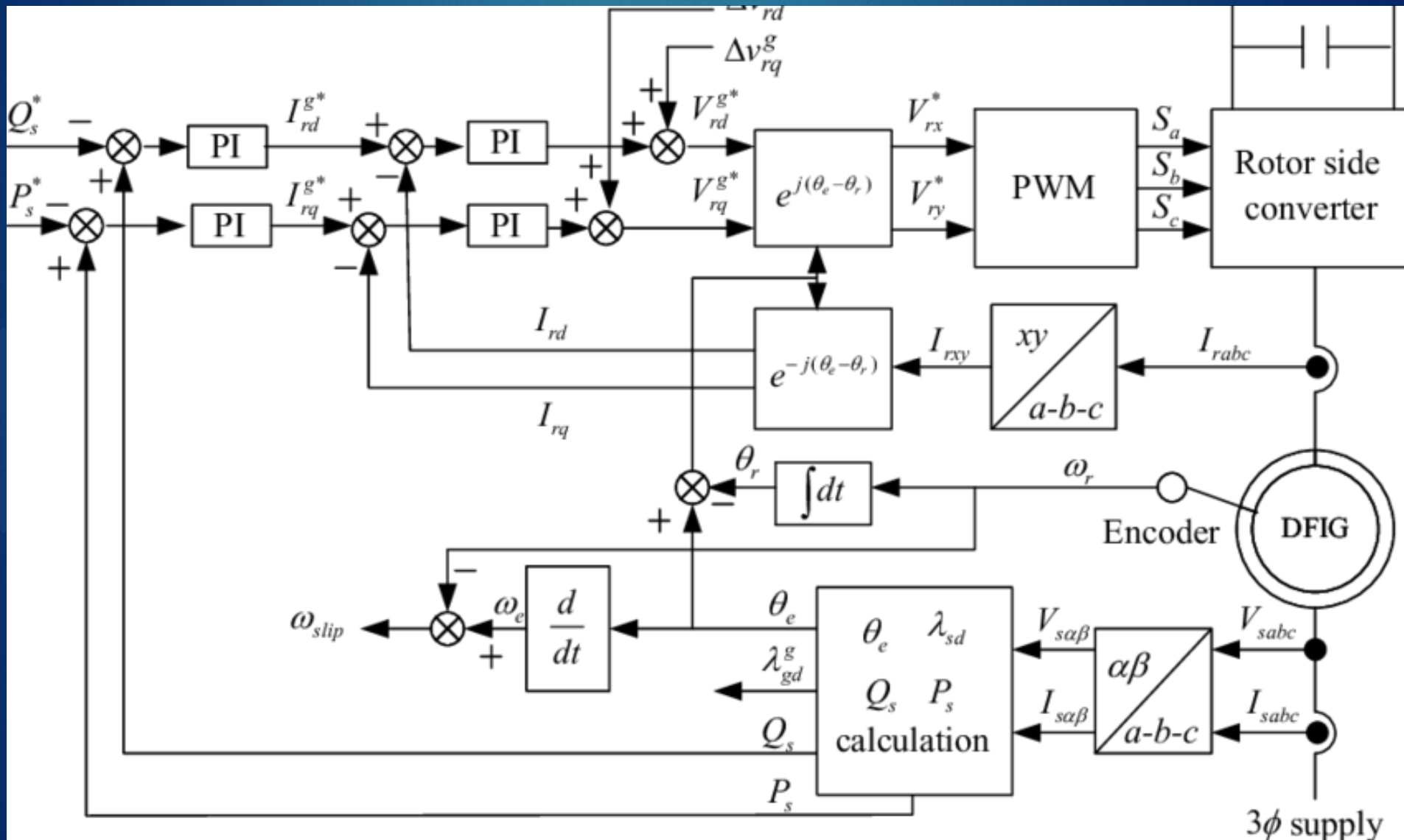


- Mantener el bus de continua a tensión constante.
- Un costo energético: $P_r = -s.P_s \rightarrow P_{total} = (1-s).P_s$

No entraremos en el detalle de la operación del convertidor del lado de la red

Sistema de control DFIG

25

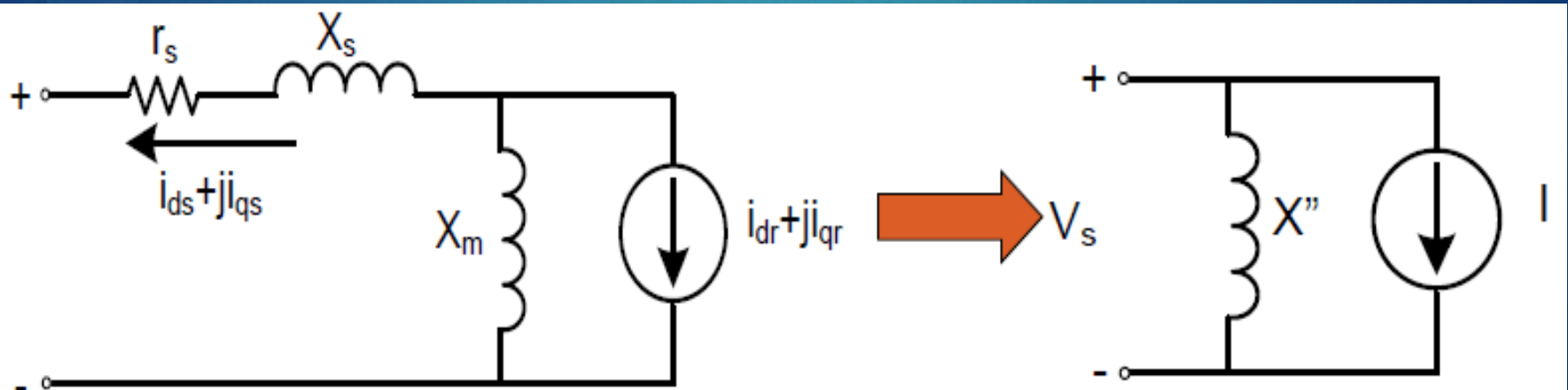


- ▶ Introducción
- ▶ Tecnologías de generación
- ▶ Curvas de potencia de turbinas eólicas
- ▶ Aerogeneradores de velocidad variable
- ▶ **Modelos de parques eólicos**

Contenido

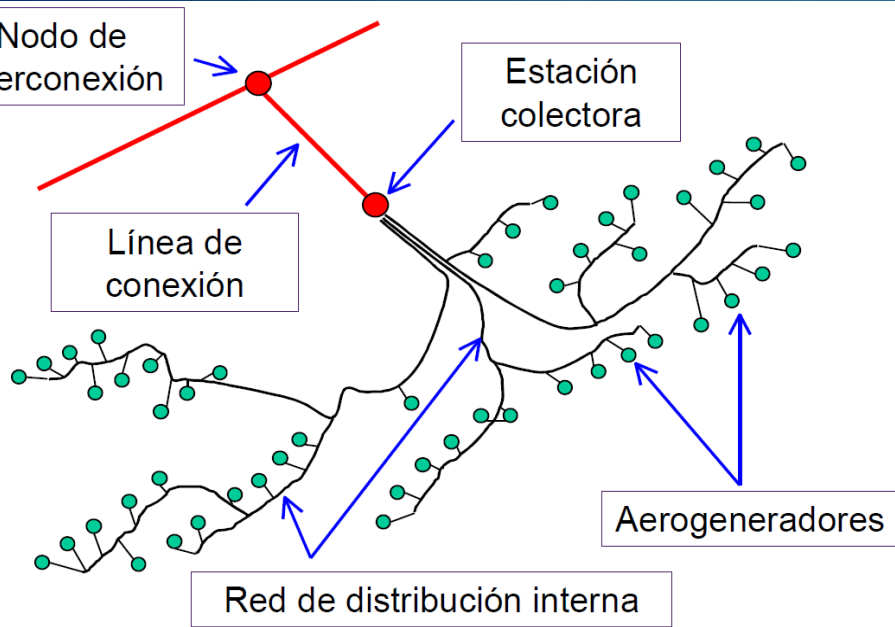
27

- ▶ La estrategia de controlar la velocidad y la inclusión de los convertidores implican que un aerogenerador sea visto por la red como una **fuentes de corriente controlada**.
- ▶ **I_{dr}** : determinada localmente por la turbina en función de la velocidad de viento.
- ▶ **I_{qr}** : determinada por el centro de control del parque eólico para cumplir consignas de tensión en el nodo de conexión del parque.
- ▶ **Importante:** No existe ecuación cardinal asociada a este tipo de generadores...

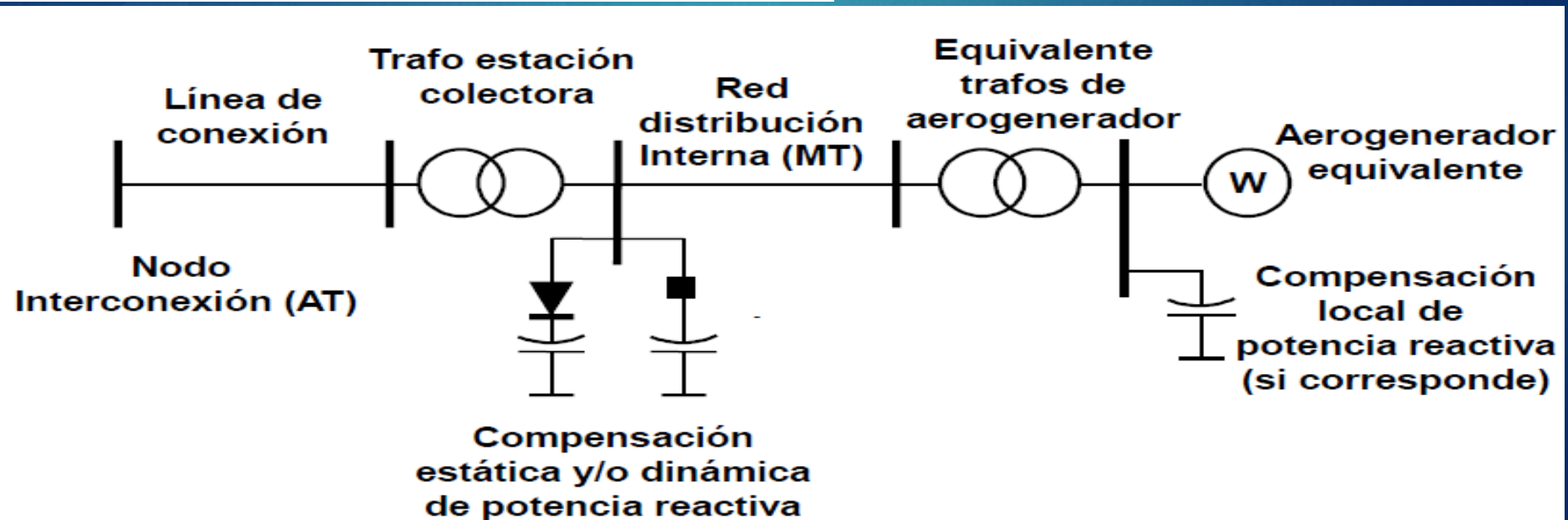


Modelo agregado parque

28



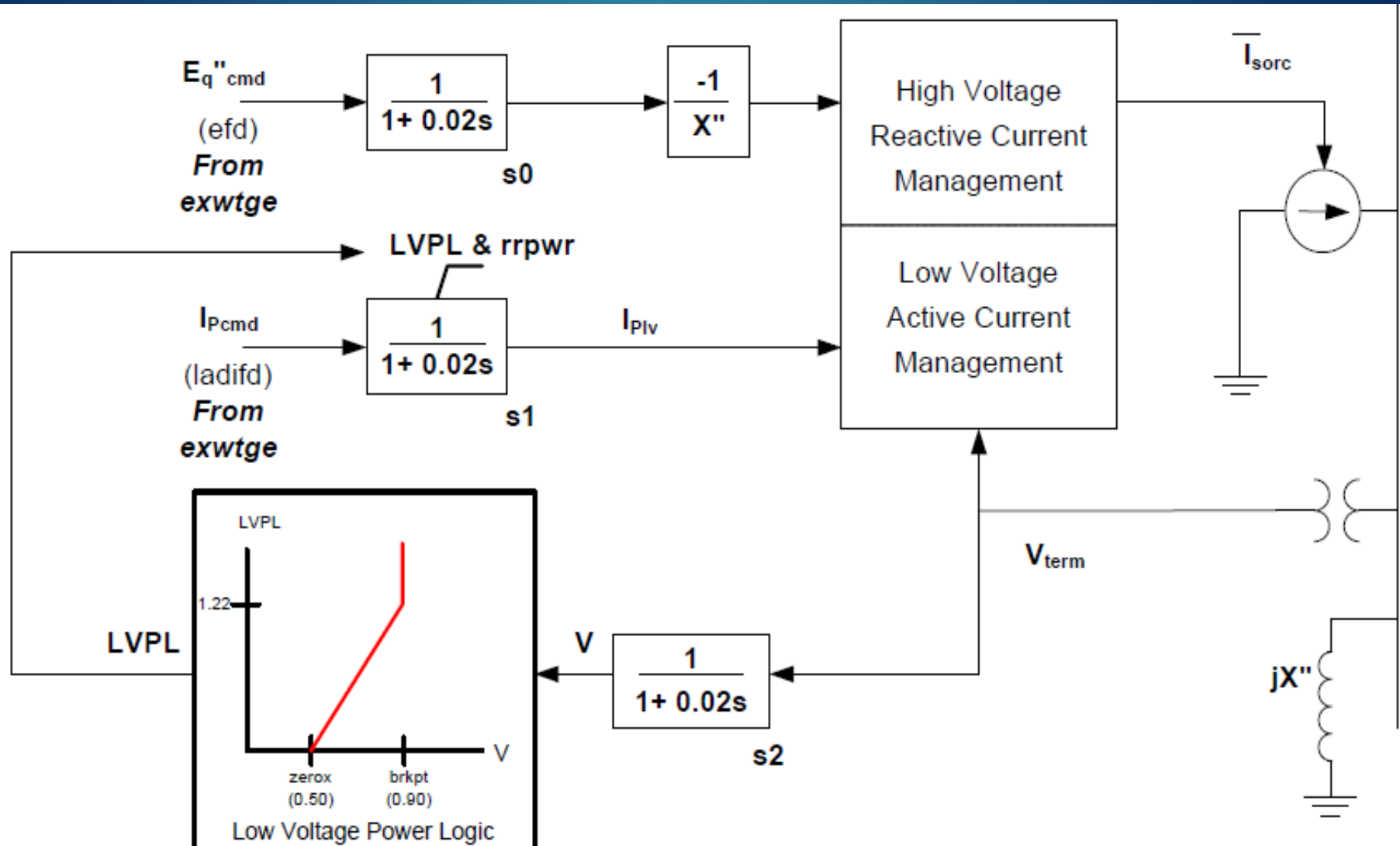
El modelo agregado es útil para estudios en los que la red de potencia es el centro de atención.

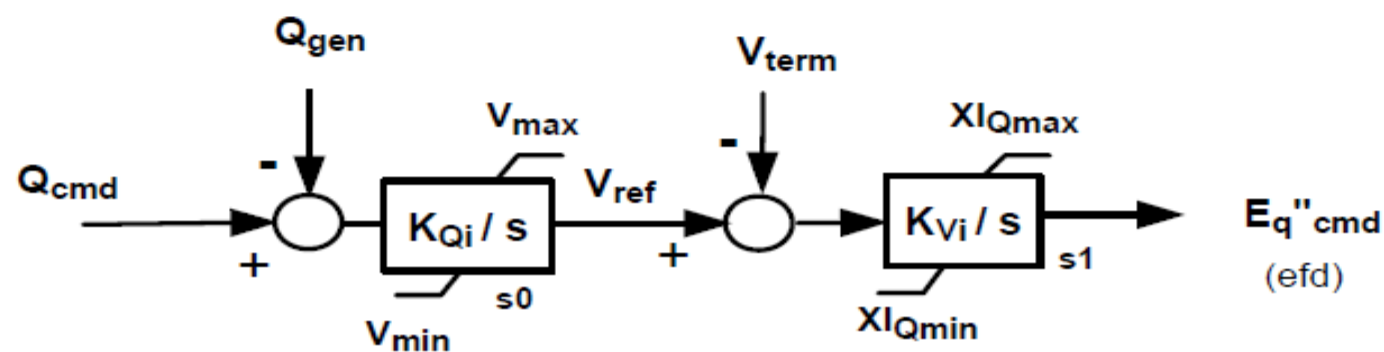


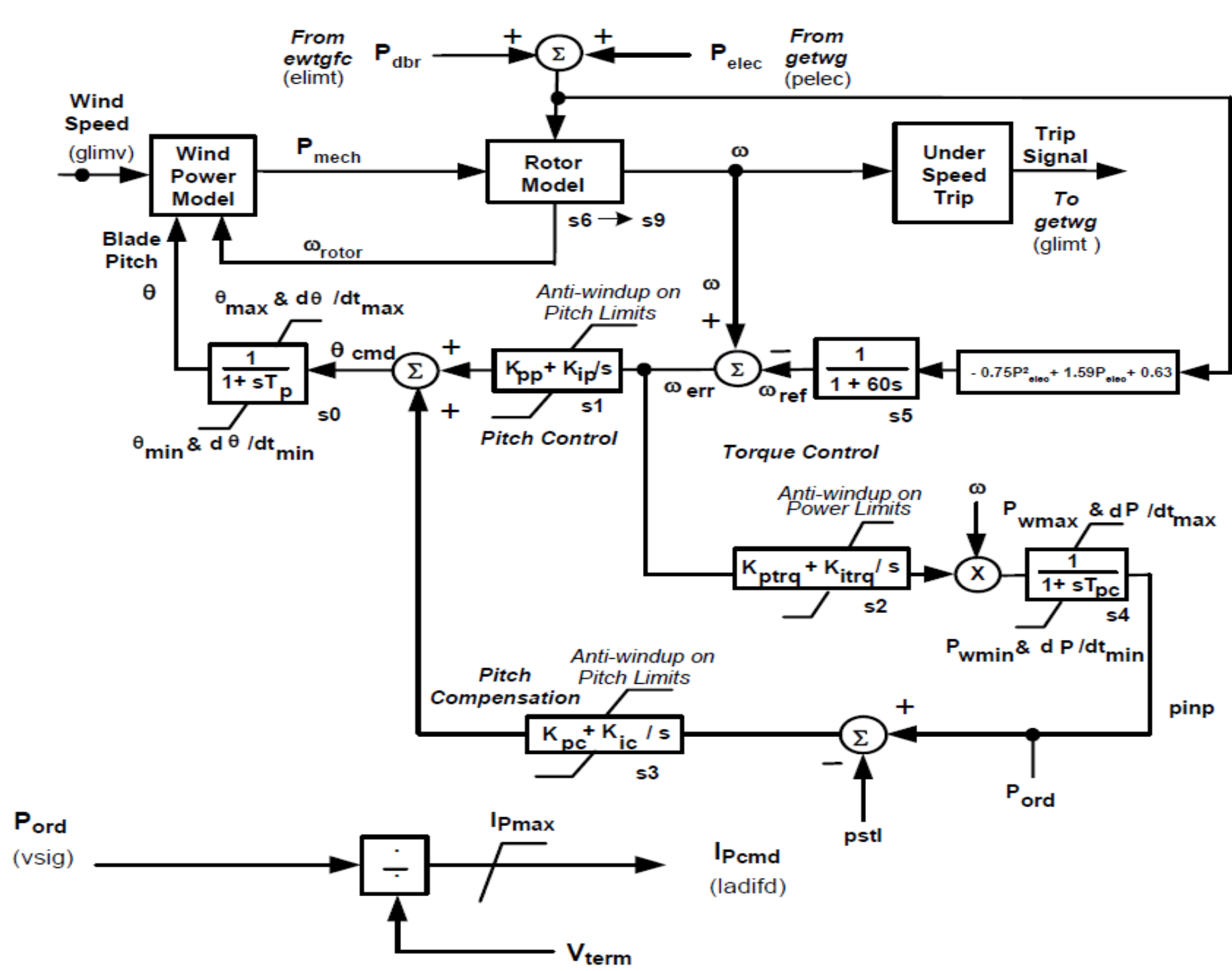
Modelo agregado parque

29

“Modeling of GE wind turbine-generators for grid studies”







Validación de modelos

32

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

