

Roberto Cárdenas Dobson, Msc. Ph.D Profesor Titular, U. Chile

Departamento de Ingeniería Eléctrica Universidad de Chile



https://sites.google.com/site/robertocardenasdobson/home



Control Vectorial de Máquinas de Doble Excitación

Referencias. Werner Leonhard "Control of Electrical Drives" 3rd edition, Springer, 2001. , Apuntes del Curso.



Máquina de Doble Excitación

N N N



f _e	$\omega_e = 2\pi f_e$	P (polos)	ω_e rads ⁻¹	ω_e rpm
50	314	2	314	3000
50	314	4	157	1500
50	314	6	105	1000
50	314	8	78	750
50	314	10	63	600



- La máquina de doble excitación se puede encontrar en potencias que van desde los kWs a MWs (10-120MW)
- No se utiliza como máquina de inducción convencional debido a los problemas relacionados con los anillos deslizantes y al mayor costo de fabricación.
- La principal aplicación se encuentra en altas potencias 200kW-20MW operando a velocidad variable restringida
 - Generadores eólicos de 5MW y más, construidos con esta tecnología, existen en el mercado.

Principios Constructivos

UNIVERSIDAD DE CHILE



 El campo rotatorio del estator gira a la velocidad sincrónica ω_e

f _e	$\omega_e = 2\pi f_e$	P (polos)	ω_e rads ⁻¹	ω_e rpm
50	314	2	314	3000
50	314	4	157	1500
50	314	6	105	1000
50	314	<mark>8 8</mark>	78	750
50	314	1 0	63	600



- La máquina de doble excitación se puede encontrar en potencias que van desde los kWs a MWs (10-120MW)
- No se utiliza como máquina de inducción convencional debido a los problemas relacionados con los anillos deslizantes y al mayor costo de fabricación.
- La principal aplicación se encuentra en altas potencias 200kW-20MW operando a velocidad variable restringida
- Generadores eólicos de mas de 5MW, construidos con esta tecnología, existen en el mercado.



El Rotor tiene Anillos Deslizantes





Modelo en Estado Estacionario





Refiriendo el Modelo al Estator

UNIVERSIDAD DE CHILE



Al referir al estator se debe considerar la diferencia de frecuencias y la razón de vueltas. En este curso estamos considerando, por simplicidad, razón de vueltas unitaria. El modelo referido utiliza "s" para 7 considerar el cambio de frecuencias.



Modelo Referido al Estator



Zonas de Operación de la Máquina de Doble Excitación







Control de Velocidad de la Máquina de Doble Excitación



Algunos Métodos de Control de Velocidad

- Uso de resistencias conectadas en el rotor
- Topología de Kramer
- Topología de Scherbius





Resistencias Externas

Se agregan resistencias al rotor utilizando los anillos rozantes.

Se cambia la pendiente de la curva torquevelocidad.

Simple y funciona, pero es ineficiente.





Esquema de Control Kramer (importante desde el punto de vista histórico)









Control de Velocidad y Torque utilizando la Topología Kramer



- Se utilizan lazos anidados ,como ya sabemos, para controlar velocidad y torque.
- Torque proporcional a la corriente en el enlace dc.
- La corriente I_{dc} se regula controlando la tension V_2 , que depende de $cos(\alpha)$



Topología originalmente propuesta por Scherbius

UNIVERSIDAD DE CHILE

Scherbius fue un muy prolífico inventor. Entre sus inventos mas conocidos esta la famosa máquina Enigma, utilizada en criptografía, la cual fue la mejor de su época. Estudió en la Universidad Técnica de Munich (TUM 1903).



Controlando el deslizamiento y dado que P_R=sP_s (lo que se demuestra después) se puede utilizar electrónica de potencia diseñada para una fracción de la potencia nominal.

Por ejemplo, si s_{max}=0.2 y la potencia nominal del estator es 10MW, entonces la electrónica de potencia del rotor se diseña para 2.0MW



Topología Scherbius

- Los conversores de corriente utilizados en las topologías originalmente propuestas por Kramer y Scherbius tienen varias desventajas. Por ejemplo el contenido armónico en las corrientes de rotor y en las entregadas a la red por el conversor del lado de la red.
- Cuando existen bajas tensiones en el rotor podrían existir problemas de conmutación para los tiristores del lado del rotor.
- En la actualidad el esquema Scherbius se utiliza con dispositivos de conmutación forzada (principalmente IGBTs) operando en el esquema Back to Back discutido y analizado anteriormente.





- Esquema bi-directional en el rotor; Puede operar como motor o generador en forma subsincrónica o super-sincrónica.
- Los conversores del lado de la red y del lado del rotor, sintetizan señales de magnitudes y frecuencia distintas.
- La aplicación mas común de esta topología es energía eólica. Una alta fracción de las turbinas eólicas (de velocidad variable) utilizadas en el mundo se basan en DFIGs (doubly-fed induction generators).
- La principal ventajas es la de utilizar conversores con potencias nominales de aproximadamente 1/3 de la potencia del sistema.
- Principal desventaja es tener el estator conectado directamente a la red lo que hace al sistema muy sensible a las perturbaciones de red (cortocircuitos, sobrevoltajes, etc.).



Mas información acerca de topologías y sistemas de control para DFIGs en:

R. Cardenas, R. Pena, S. Alepuz and G. Asher, "Overview of Control Systems for the Operation of DFIGs in Wind Energy Applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 7, pp. 2776-2798, July 2013, doi: 10.1109/TIE.2013.2243372





Control Vectorial de Máquinas de Doble Excitación



Ecuaciones α - β de la Máquina DFIM

V_r distinto de cero



• Nótese que la única diferencia hasta ahora, con respecto a la máquina jaula de ardilla, es la existencia de un voltaje de rotor.





Acrónimos Utilizados en Estas Diapositivas



- DFIM= Doubly-Fed Induction Machine
- DFIG=Doubly-Fed Induction Generator



Ecuaciones α - β de la Máquina

- Nuevamente se tienen dos ecuaciones (vectoriales) y cuatro variables. Por lo tanto se eligen dos vectores para reescribir las ecuaciones.
- Dado que el actuador está en el rotor (conversor back to back) se puede efectuar regulación directa de la corriente de rotor. Por lo tanto una de las variables vectoriales es <u>i</u>_r.
- Para simplificar el cálculo del torque se utiliza el flujo de estator ψ_s .
- Por lo tanto \underline{i}_s y ψ_r deben quedar en función de \underline{i}_r y ψ_s .
- Nótese que en la máquina "doubly-fed" se pueden medir la corriente de rotor y estator. A diferencia de la máquina jaula de ardilla, existen devanados físicos en el rotor.



Ecuaciones α - β de la Máquina

Eliminando la corriente de estator y el flujo de rotor se tiene:

$$L_{s}\underline{i}_{s} + L_{r}\underline{i}_{r}' = \underline{\psi}_{s} \rightarrow \underline{i}_{s} = \frac{\underline{\psi}_{s} - L_{0}\underline{i}_{r}'}{L_{s}}$$

Utilizando la definición de flujo de rotor se tiene:

$$\underline{\psi}_{r} = L_{0} \left(\underbrace{\frac{\psi_{s}' - L_{0} \underline{i}_{r}}{L_{s}}}_{i_{s}'} \right) + L_{r} \underline{i}_{r}$$



Ecuaciones α - β de la Máquina

En coordenadas de estator:

$$\underline{v}_{s} = R_{s}\underline{i}_{s} + \frac{d\underline{\psi}_{s}}{dt} = R_{s}\left[\frac{\underline{\psi}_{s} - L_{0}\underline{i}_{r}'}{L_{s}}\right] + \frac{d\underline{\psi}_{s}}{dt}$$

En coordenadas de rotor:

$$\underline{v}_r = R_r \underline{i}_r + \frac{d\underline{\psi}_r}{dt} = R_r \underline{i}_r + \frac{d}{dt} \left[L_0 \left(\frac{\underline{\psi}_s' - L_0 \underline{i}_r}{L_s} \right) + L_r \underline{i}_r \right]$$



Simplificando se llega a:



Refiriendo a un eje sincrónico d-q rotando a ω_e

- Recordemos que para referir una ecuación desde el estator al eje sincrónico se debe multiplicar por $e^{-j\theta_e}$
- Y que para referir una ecuación desde el rotor al eje sincrónico se debe multiplicar por $e^{-j\theta_{SL}}$. Donde:

$$\theta_e = \int \omega_e dt$$

$$\theta_{SL} = \int (\omega_e - \omega_r) dt$$





Ecuaciones d-q de la máquina DFIG

Estator

$$\underline{v}_{sdq} = R_s \frac{\underline{\psi}_{sdq}}{L_s} + \frac{d\underline{\psi}_{sdq}}{dt} + j\omega_e \underline{\psi}_{sdq} - R_s \frac{L_0}{L_s} \underline{i}_{rdq}$$
Rotor
$$\underline{v}_{rdq} = R_r \underline{i}_{rdq} + \sigma L_r \frac{d\underline{i}_{rdq}}{dt} + j\omega_{sL}\sigma L_r \underline{i}_{rdq} + \frac{L_0}{L_s} \frac{\underline{\psi}_{sdq}}{dt} + j \frac{L_0}{L_s} \omega_{sL} \underline{\psi}_{sdq}$$

Separando en los componentes d-q se tiene

$$v_{sd} = \frac{R_s}{L_s} \psi_{sd} - \frac{L_0}{L_s} R_s i_{rd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_e \psi_{sq}$$
Ecuaciones
$$v_{sq} = \frac{R_s}{L_s} \psi_{sq} - \frac{L_0}{L_s} R_s i_{rq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_e \psi_{sd}$$
$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_{SL} \sigma L_r i_{rq} + \frac{L_0}{L_s} \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \frac{L_0}{L_s} \omega_{SL} \psi_{sq}$$
$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_{SL} \sigma L_r i_{rd} + \frac{L_0}{L_s} \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \frac{L_0}{L_s} \omega_{SL} \psi_{sd}$$

Ecuaciones de estator

Ecuaciones de rotor





Orientando el sistema de ecuaciones

Para simplificar el cálculo del torque en este caso se utiliza orientación en el flujo del estator, aunque otras metodologías han sido propuestas en la literatura (orientación en la tensión de estator es una alternativa).

Orientando en el vector flujo de estator , se tiene que $\underline{\psi}_s = \psi_{sd} + j0$ y el flujo en cuadratura es $\psi_{sq} = 0$.

Calculando el flujo de estator



• El flujo de estator se calcula de la ecuación:

$$\underline{v}_{s} = R_{s}\underline{i}_{s} + \frac{d\underline{\psi}_{s}}{dt} \rightarrow \underline{\psi}_{s} = \int \left(\underline{v}_{s} - R_{s}\underline{i}_{s}\right)dt$$



Cálculo del Flujo de Estator

- El cálculo del flujo de estator involucra nuevamente el uso de un integrador modificado.
- Pero en este caso el estator se encuentra conectado directamente a la red. Por lo tanto está operando a una frecuencia fija (50Hz en Chile) y con un voltaje constante.
- La frecuencia de estator es alta y fija. En este caso no existe el problema de pérdida de orientación al operar a baja frecuencia.
- Tampoco tiene mayor importancia la variación de la resistencia de estator. El voltaje de estator es demasiado alto como para que cambios en la caída de tensión de la resistencia sean demasiado importantes (con la posible excepción de máquinas pequeñas).

Por ejemplo





El integrador modificado, en estado estacionario, es casi perfecto en esta zona



Orientando en el flujo de estator





Algunas Consideraciones

- Despreciando R_s el flujo de estator es aproximadamente igual a la integral del voltaje de red. Es decir tiene una magnitud aproximadamente constante. Por este motivo en algunos casos se desprecian los términos proporcionales a $\frac{d\psi_{sd}}{dt}$ en las ecuaciones de rotor y estator.
- Sin embargo, al existir perturbaciones en la red, como cortocircuitos, apertura de líneas etc., no es posible considerar la magnitud del flujo como constante. Existe un transiente cuya dinámica depende de la constante de tiempo del estator.
- Otro problema se produce al conectar el estator a una red desbalanceada y/o con distorsión armónica, ya que la secuencia negativa y los armónicos se reflejarán en el flujo de estator. Esto puede afectar a las corrientes de rotor y además producir torques pulsatorios.
- Nótese que cuando se utiliza la máquina de doble excitación con el estator conectado a la red, no se puede debilitar el flujo a menos que se utilice un conversor adicional conectado al estator (lo cual se ha propuesto pero, al menos en mi conocimiento, no es algo muy utilizado).

Ecuaciones aproximadas considerando flujo constante

$$v_{sd} = \frac{R_s}{L_s} \psi_{sd} - \frac{L_0}{L_s} R_s i_{rd}$$

$$v_{sq} = -\frac{L_0}{L_s} R_s i_{rq} + \omega_e \psi_{sd}$$

Término dominante en la tensión de estator

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_{SL} \sigma L_r i_{rq}$$

Ecuaciones de estator
Ecuaciones de rotor

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_{SL} \sigma L_r i_{rd} + \frac{L_0}{L_s} \omega_{SL} \psi_{sd}$$

Ecuaciones de rotor

UNIVERSIDAD DE CHIL

Razón entre la potencia de estator y rotor

 Utilizando la teoría de la potencia instantánea, la potencia es proporcional al producto punto entre el vector de voltaje y el vector de corriente. Es decir:

$$P_{s} = k(\underline{v}_{s} \circ \underline{i}_{s}) \qquad P_{r} = k(\underline{v}_{r} \circ \underline{i}_{r})$$

• En el caso ideal, despreciando las resistencias y las inductancias de fuga (que normalmente son bajas), se tiene:

$$P_s \approx k \omega_e \psi_{sd} i_{sq}$$
 $P_r \approx k \frac{L_0}{L_s} \omega_{SL} \psi_{sd} i_{rq}$




Razón entre la potencia de estator y rotor

• Calculando la razón de potencia se tiene:

$$\frac{P_r}{P_s} = \frac{k \frac{L_0}{L_s} \omega_{SL} \psi_{sd} i_{rq}}{k \omega_e \psi_{sd} i_{sq}} = \frac{L_0}{L_s} \frac{\omega_{SL} i_{rq}}{\omega_e i_{sq}}$$

Si el sistema de control vectoria<mark>l está or</mark>ientado en el flujo de estator se cumple que:

$$\psi_{sq} = 0 \rightarrow L_s i_{sq} + L_0 i_{rq} = 0$$

Por lo tanto la corriente en cuadratura de rotor se calcula como:

$$i_{sq} = -\frac{L_0}{L_s}i_{rq}$$

Razón entre la potencia de estator y rotor

• Reemplazando la ecuación anterior en el calculo de la razón de potencia se llega a: $\frac{P_r}{r} = -\frac{\omega_{SL}}{r} = -s$

En la actualidad esto no necesariamente se cumple ya que los reglamentos eléctricos obligan a los generadores eólicos a permanecer conectados (por un tiempo limitado) en presencia de un cortocircuito. Para lograr ese objetivo puede ser necesario sobredimensionar los conversores.





Cálculo del Torque en la Máquina de Doble Excitación

• El torque en esta máquina se puede calcular como:

$$T_e = k \frac{P}{2} I_m \left(\underline{i}_r \underline{\psi}_{rs}^c \right)$$

- Donde k depende de la transformada $\alpha\beta$ utilizada, P es el número de polos e I_m es el operador imaginario. El superíndice "c" indica complejo conjugado y el termino ψ_{rs} indica "flujo de rotor debido al estator".
- El flujo de rotor es: $\underline{\psi}_r = L_r \underline{i}_r + L_0 \underline{i}_s$. Por lo tanto $\underline{\psi}_{rs} = L_0 \underline{i}_s$. Reemplazando se obtiene:

$$T_e = k \frac{P}{2} L_0 I_m \left(\underline{i}_r i_s^c\right) = k \frac{P}{2} L_0 I_m \left((i_{rd} + j i_{rq})(i_{sd} - j i_{sq})\right)$$

39



Cálculo del Torque en la Máquina de Doble Excitación

• Calculando el componente imaginario se tiene:

$$T_e = k \frac{P}{2} L_0 \left(i_{rq} i_{sd} - i_{rd} i_{sq} \right)$$

• Pero, como se discutió anteriormente:

$$i_{sq} = -\frac{L_0}{L_s}i_{rq}$$

• Reemplazando se llega a:

$$T_e = k \frac{P}{2} L_0 \left(i_{rq} i_{sd} + \frac{L_0}{L_s} i_{rd} i_{rq} \right) \rightarrow T_e = k \frac{P}{2} \frac{L_0^2}{L_s} i_{rq} \left(i_{rd} + \frac{L_s}{L_0} i_{sd} \right)$$



Corriente Magnetizante Ficticia en esta Máquina

• El flujo del estator se calcula como:

$$\psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_0 i_{rd}$$

Esto puede escribirse como:

$$\psi_{sd} = L_0 \left(i_{rd} + \frac{L_s}{L_0} i_{sd} \right) = L_0 i_m$$

Esto significa que se ha definido una corriente magnetizante ficticia que es función de la corriente directa del rotor y del estator.

Nótese que esto es muy distinto a la máquina jaula de ardilla, donde los reactivos pueden ser suministrados solo desde el estator.



Ecuación de torque

• Finalmente el torque de esta máquina se puede definir como:

$$T_{e} = k \frac{P}{2} \frac{L_{0}^{2}}{L_{s}} i_{rq} \left(i_{rd} + \frac{L_{s}}{L_{0}} i_{sd} \right) = k \frac{P}{2} \frac{L_{0}^{2}}{L_{s}} i_{rq} i_{m}$$

Otra alternativa es definirlo en función del flujo de estator como:

$$T_e = k \frac{P L_0}{2 L_s} \psi_{sd} i_{rq}$$



¿Cómo se Establece el Flujo?

• Como se demostró anteriormente, el flujo de estator se calcula como:

$$\psi_{sd} = L_0 \left(i_{rd} + \frac{L_s}{L_0} i_{sd} \right) = L_0 i_m$$

 Depreciando la caída de tensión en la resistencia de estator se tiene que el flujo de estator se puede calcular como:

$$v_{sq} = -\frac{L_0}{L_s} R_s i_{rq} + \omega_e \psi_{sd} \to \psi_{sd} \approx \frac{|\underline{v}_s|}{\omega_e}$$

• La corriente magnetizante de estator se puede calcular como:

$$i_{sd} = \frac{\left|\underline{v}_{s}\right|}{\omega_{e}L_{s}} - \frac{L_{0}}{L_{s}}i_{rd}$$



¿Cómo se Establece el Flujo?

• Existen varias alternativas para establecer el flujo. La primera alternativa es minimizar el tamaño del conversor del lado del rotor, utilizando éste exclusivamente para suministrar corriente de torque. Es decir $i_{rd} = 0$. Por lo tanto se cumple que:

- La desventaja es que en este caso la máquina de doble excitación opera con un factor de potencia en atraso, desde el punto de vista de la red.
- Se puede operar con factor de potencia unitario. En este caso se tiene que $i_{sd} = 0$. La corriente i_{rd} se calcula como:

$$i_{rd} = \frac{|\underline{v}_s|}{\omega_e L_0}$$



¿Cómo se Establece el Flujo?

 No son las únicas posibilidades. Manipulando la corriente i_{rd} se puede lograr que el estator suministre o absorba reactivos.

$$i_{sd} = \frac{|\underline{v}_s|}{\omega_e L_s} - \frac{L_0}{L_s} i_{rd}$$

- Por ejemplo sobre-excitando la máquina (es decir $i_{rd} > \frac{|\underline{v}_s|}{\omega_e L_0}$) se logra suministrar reactivos al forzar que la corriente directa de estator sea negativa. Esto es similar al "condensador sincrónico" que se utiliza en sistemas de potencia.
- Existen algunos mercados donde se pueden vender reactivos al sistema. Por lo tanto un sistema eólico basado en DFIGs (u otras máquinas) puede vender reactivos, especialmente cuando la velocidad del viento es baja (poca captura de energía) y los conversores tienen capacidad de corriente disponible (no están entregando mucha potencia al sistema).



UNIVERSIDAD DE CHILE Sistemas de Control de Ambos Conversores



Sistema de Control de la Máquina (rotor-side)





Términos de desacoplamiento





Términos de desacoplamiento







Diseño de los controladores de corriente de rotor



Control del Conversor de lado de la red (ya discutido)







Generación de Energía Eólica Utilizando el DFIG





Principios básicos de Energía Eólica







Energía en un cilindro





• La energía cinética de las partículas de viento se puede calcular como:

$$E_k = \frac{1}{2}Mv^2 = \frac{1}{2}\rho l\pi r^2 v^2$$

• Donde p es la densidad del aire, típicamente de un valor aproximadamente igual a 1.25kg/m³, l es el largo y r es el radio del cilindro. Utilizando dl =*vdt* se tiene:

$$E_{k} = \frac{1}{2}Mv^{2} = \frac{1}{2}\rho\pi r^{2}v^{3}t$$



• La potencia se puede calcular como:

$$P = \frac{\partial E_k}{\partial t} = \frac{1}{2}\rho\pi r^2 v^3$$

Esta es la potencia máxima, la que no es posible de capturar ya que significaría que a la entrada del cilindro tenemos velocidad de viento y a la salida se ha eliminado completamente.

De acuerdo al principio enunciado por el físico alemán Albert Betz (en 1919), las turbinas eólicas no pueden capturar mas de 59.3% (16/27)de la energía cinética que se encuentra en el viento. El valor 16/27 se conoce como constante de Betz-



 Cuando se utiliza una turbina eólica, la expresión de potencia capturada en el cilindro se reemplaza por la potencia capturada por las aspas:

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

• Con ρ como la densidad del aire, r el radio de las aspas, v es la velocidad del viento y $C_p(\lambda, \beta)$ es el coeficiente de potencia. De acuerdo a Albert Betz el máximo coeficiente de potencia posible es 16/27 \approx 0.592. Es decir se puede capturar, como máximo el 59.292% de la potencia eólica disponible en el radio r barrido por las aspas.



- El coeficiente de potencia $C_p(\lambda, \beta)$ no es un valor fijo, depende de λ (razón de velocidad de punta de aspa o tip-speed ratio) y de β el ángulo de pitch (ángulo de ataque).
- La razón entre una curva de coeficiente de potencia y λ se muestra en la siguiente figura:



curva algo antigua. En la actualidad las aspas son más eficientes.

Esta curva depende de aspectos constructivos y del perfil del aspa.



• El "tip-speed ratio" se puede calcular como:

• Donde ω_t es la velocidad rotacional de las aspas (no necesariamente igual a la del generador) y v es la velocidad del viento.

 $r\omega_t$





- La potencia de la turbina es proporcional al radio al cuadrado.
- El factor de planta entrega información de la potencia promedio entregada durante el año.
- Un factor de planta tipico podria ser de 30% (cambia dependiendo de la ubicación del sistema eolico, altura, etc.)
- Por lo tanto una turbina de 5MW entregaría : 5 x 10⁶ x 8760 x 0.3 = 13140MWh (F.P.=0.3)





Recuerde

- La energía eólica no es despachable (non-dispatchable power source). Es decir no se le puede entregar un comando de potencia al generador y esperar que se cumpla incluso si es que no existe viento.
- Para hacerla despachable típicamente se utiliza en conjunto con sistemas de almacenamiento.
- Los generadores eólicos de velocidad variable reducen la inercia de un sistema de potencia. Por los tanto es menos robusto.
- Estos problemas se encuentra en otros sistemas basados en energías renovables. Por ejemplo sistemas basados en paneles solares.



Principios Básicos de Sistemas Eólicos





Típica Turbina Eólica



Generalidades

- La velocidad del viento mínima con que opera una turbina es aproximadamente 3-4ms⁻¹ (cut-in speed). Más abajo de ese valor la captura de potencia puede ser muy baja como para justificar la operación y desagaste de la turbina.
- C_{pmax} está entre 0.4 y \approx 0.5. es decir un 67,5% 84% del límite de Betz.
- Dependiendo del perfil de aspa el valor máximo del coeficiente de potencia se produce cuando el "tip-speed ratio" λ es 6 o 7. A este valor se le denomina $\lambda_{opt.}$
- Asumiendo que la turbina se encuentra operando en el punto óptimo. Se tiene entonces:



$$\omega_t = \frac{\nu \lambda_{opt}}{r} \alpha \frac{1}{r}$$



Ejemplo de Diseño

- La potencia capturada por una turbina eólica es proporcional al cuadrado del radio *r*.
- Para turbinas de baja potencia el radio *r* es pequeño y la velocidad rotacional de las aspas es alta.
- Para turbinas de alta potencia el radio *r* es alto y la velocidad rotacional es baja.
- Ejemplo básico de diseño. Determinar la razón de la caja amplificadora cuando:

 $C_{pmax} = 0.4, \lambda_{opt} = 6, v = 10ms^{-1}, Polos = 10, P = 3MW$



Ejemplo de Diseño

$$P = \frac{1}{2}\rho\pi r^2 C_p(\lambda,\beta)v^3 \Rightarrow 3MW = \frac{1}{2}(1.25)\pi r^2(0.4)(10^3)$$

Resolviendo se llega a *r*=61.8mt. Utilizando el valor óptimo de la razón de velocidad de punta de aspa ($\lambda_{opt} = 6$) se tiene:

$$6 = \frac{r\omega_t}{v} = \frac{61.8\omega_t}{10} \rightarrow \omega_t = 9.27rpm$$

Para un generador de 10 polos la velocidad nominal es de 600rpm (a 50Hz). Por lo tanto la caja de amplificadora tiene una razón de ≈65.



Torque Aerodinámico en la Turbina

• El torque que produce el movimiento rotatorio de las aspas en una turbine eólica puede explicarse utilizando la ecuación de Bernoulli. Se cumple que se conserva la siguiente cantidad en un fluido:

$$\frac{v^2}{2} + gh + \frac{P}{\rho} = cte$$

• Donde v es la velocidad del viento, g es la aceleración de gravedad, h es la altura, P es presión y ρ es la densidad del aire.

Ecuación de Bernoulli





Ecuación de Torque

• El torque en la turbina eólica es igual a $\frac{P}{\omega_t}$ y puede escribirse como:

$$T_m = \frac{1}{2} \pi \rho r^3 C_t(\lambda, \beta) v^2$$

Donde $C_t(\lambda,\beta)$ es el coeficiente de torque de la turbina y se puede obtener como:

$$C_t(\lambda,\beta) = \frac{C_p(\lambda,\beta)}{\lambda}$$



Sistemas de Control



Pitch Control





- El control del ángulo de ataque de las aspas se utiliza para reducir la captura de potencia en la presencia de velocidades de viento mayor que la nominal.
- El efecto del "pitch control" es disminuir el valor del coeficiente de potencia $C_p(\lambda,\beta)$.
- Utilizando "pitch control" se protege al generador y además se evitan sobre-velocidades en las aspas.

Operación a Velocidad Fija y Velocidad Variable

• Utilizando la ecuación de potencia:

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

• Y la curva $C_p(\lambda, \beta)$ del aspa. Por ejemplo:





Se llega a las siguientes curvas de operación, Potencia Vs. Velocidad:



UNIVERSIDAD DE CHILE


Operación a velocidad fija y velocidad Variable

 La operación a velocidad fija es mas simple, ya que no es necesario utilizar conversores de potencia. Ejemplo de estas tecnologías es el "Danish concept" basado en máquinas jaula de ardillas.





Operación a Velocidad fija

- La captura de potencia es menor cuando se opera a velocidad fija.
- No se puede controlar fácilmente el factor de potencia y/o la potencia reactiva inyectada a la red.
- No se pueden controlar las perturbaciones en la red. Cortocircuitos por ejemplo. No cumplen las regulaciones mas exigentes.
- La calidad de la potencia es baja ya que todas la variaciones de velocidad de viento son transmitidas al sistema eléctrico.
- Los esfuerzos mecánicos son mayores.
- Menor costo.



Operación a Velocidad Variable

UNIVERSIDAD DE CHILE







Velocidad Variable

- Requiere conversores de potencia para conectarse a la red.
- Permite operar utilizando MPPT "Maximum power point tracking". Esto significa que la captura de potencia es mejor (depende de la inercia).
- La calidad de la potencia entregada a la red es mejor. La inercia de la turbina actúa como filtro pasabajo eliminando las componentes de alta frecuencia en la potencia capturada.
- Menores esfuerzo mecánicos





Algunos datos de Costos (2011-2013)

UNIVERSIDAD DE CHILE

	Weight	Stator Radius	Total Cost Estimation	Power Losses	Ride Through Performance	Noise reduction
3S Geared	100%	100%	100%	100%	Bad	No
DFIG			(including gearbox)			
D.D SG	≈850%	≈600%	120%	95%	Good	Yes
D.D. PMSG	≈450%	≈600%	105%	≈65%	Good	Yes

TABLE I THREE GENERATORS USED IN LARGE WIND TURBINES

Ver:

M. Liserre, **R. Cardenas**, M. Molinas *et al.*, "Overview of Multi-MW Wind Turbines and Wind Parks," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1081-1095, 2011.

Cardenas, R.; Pena, R.; Alepuz, S.; Asher, G., "Overview of Control Systems for the Operation of DFIGs in Wind Energy Applications," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.60, no.7, pp.2776,2798, July 2013.

Operación a Velocidad Variable Utilizando DFIG



Al utilizar el DFIG la velocidad variable es usualmente restringida a un 60% de la velocidad sincrónica. 30% hacia arriba y 30% hacia abajo. Algunas aplicaciones utilizan ±25%.

Dado que la potencia es cuadrática con la velocidad rotacional (o la velocidad del viento), al reducir la velocidad rotacional en un 40% la captura de energía se reduce a un 6%.



Sistema de Control Típico





79

Sistemas de control del DFIG para Aplicaciones de No siempre es necesario Energía Eólica



Universidad de Chile

Control Vectorial (visto en el curso)

Control Directo de Torque o control directo de potencia (no es parte del curso)



Problemas del DFIG



- La caída del voltaje de estator produce un cambio rápido en el flujo de estator, lo cual a su vez causa un alto voltaje inducido en el rotor.
- Si la tensión inducida de rotor es muy alta, mas alta que el dc link del conversor back to back, se pierde control de las corrientes de rotor.

Paper de Abad y Lopez

$$V_{r_{max}}\Big|_{+0} = \frac{N_r}{N_s} \{ |s| V_{s2} + (1-s) (V_{s1} - V_{s2}) \}$$

Gonzalo Abad; Jesús López; Miguel Rodríguez; Luis Marroyo; Grzegorz Iwanski, "Analysis of the DFIM Under Voltage Dips," in *Doubly Fed Induction Machine:* Modeling and Control for Wind Energy Generation Applications, JEEE, 2011, pp.265-302



Problemas del DFI

- Los voltajes inducidos en el rotor pueden ser muy altos
- Estos pueden producir corrientes muy altas en el rotor.
- Las protecciones se disparan y esto produce la desconexión del sistema de generación de la red.
- Esto, en algunos países, no está permitido por los actuales reglamentos de red.



Ejemplo Crow-Bar



- Sistemas de protección adicionales son utilizados. Por ejemplo crow-bars.
- Cuando la falla se produce, un IGBT u otro interruptor se activa, entregando un camino adicional para la corriente de rotor.
- El crow-bar podría estar en el dc-link.
- Funciona pero añade complejidad y conversores de potencia adicionales.



ijEstudien!!

