

Control de Generador Asíncrono con Adaptación de la Resistencia del Rotor Basado en un Modelo de Referencia

Pedro Luis Roncero Sánchez-Elipse*, Aurelio García-Cerrada**, Vicente Feliu Batlle*

*Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática, E.T.S. de Ingenieros Industriales. U.C.L.M.

Campus Universitario s/n 13071 Ciudad Real, España

Tel. 926 29 53 00 Fax 926 29 53 61 e-mail: proncero@ind-cr.uclm.es vfeliu@ind-cr.uclm.es

**E.T.S. de Ingeniería (ICAI), Universidad Pontificia Comillas, Alberto Aguilera 23, 28015 Madrid, España

Tel. 91 542 28 00 Fax 91 559 65 69 e-mail: aurelio@iit.upco.es

Resumen

En este artículo se presenta un método de adaptación de la resistencia del rotor de un generador asíncrono basándose en el modelo de referencia de potencia reactiva. A diferencia de otros trabajos en la literatura, se establece una ley de adaptación independiente del modo de funcionamiento de la máquina y de la velocidad de ésta. La ley de adaptación es válida para cualquier potencia de la máquina y se demuestra la estabilidad de dicha ley mediante el teorema de Lyapunov. Todos los resultados se han validado mediante simulación.

1. Nomenclatura

$\hat{\omega}_S$:	Estimación de la velocidad del flujo del rotor.
ω_e :	Velocidad del sistema de referencia para el modelo del motor.
θ_e :	Posición del sistema de referencia.
L_S, L_R :	Autoinducciones del estator y del rotor.
R_S, R_R :	Resistencias del estator y del rotor.
$\hat{R}_R$:	Estimación de la resistencia del rotor.
L_M :	Inductancia mutua.
σ :	Factor de dispersión $(1 - L_M^2/L_S L_R)$.
$(\cdot)^*$:	Valor de referencia.
$(\cdot)_d$:	Componente en eje d.
$(\cdot)_q$:	Componente en eje q.
$(\cdot)_S$:	Magnitud del estator.
$(\cdot)_R$:	Magnitud del rotor.
P :	Pares de polos.
J :	Inercia de la máquina.

2. Introducción

En los últimos años el control vectorial del motor de inducción ha adquirido una especial importancia en los accionamientos de velocidad variable, lo que ha permitido que el motor de inducción haya aumentado progresivamente su presencia en los accionamientos regulados.

En el control vectorial se ha de conocer la posición o la velocidad del vector espacial del flujo del rotor, lo cual se puede hacer midiendo o estimando el flujo (control directo) o calculando la velocidad del flujo a partir de la

velocidad del rotor y de las corrientes de estator (control indirecto). En este último caso, el cálculo de la velocidad del flujo depende de la resistencia del rotor, que cambia según las condiciones térmicas del motor.

Se han propuesto muchos métodos para estimar la resistencia del rotor. Algunos de éstos basados en un modelo de referencia [1]. Incluso dentro de esta clase de algoritmos, se destacan varias posibilidades:

- a) Modelo de referencia de par. Utiliza una expresión del par para estimar la resistencia del rotor [2]. La adaptación se puede usar durante transitorios de par. Depende de la resistencia del estator y del término L_M^2/L_R . En [2] se analiza su implementación, pero no su convergencia.
- b) Modelo de referencia de potencia reactiva. Utiliza una expresión de la potencia reactiva para estimar la resistencia del rotor [3]. No depende de la resistencia del estator, aunque sí depende de los parámetros L_S y σ .
- c) Modelos de referencia de tensión de eje "d" y de tensión de eje "q" [1]. Utilizan la expresión de la tensión de estator de eje "d" y la expresión de la tensión de estator de eje "q", respectivamente, para estimar la resistencia del rotor. Los dos métodos dependen de la resistencia del estator y de los parámetros L_S y σ . En [1] se analizan los errores que se producen en régimen permanente entre la variable estimada de la máquina y su valor real obtenido del modelo de referencia. Este error es responsable del proceso de adaptación. Se demuestra que el par de carga y la frecuencia de alimentación influyen en la convergencia de los algoritmos.

El esquema propuesto en este trabajo estima la resistencia del rotor a partir de un modelo de referencia basado en [4] que corresponde con el uso de la potencia reactiva para el modelo de referencia. A diferencia de referencias anteriores, aquí se estudia la convergencia

del algoritmo de forma rigurosa. En la Sección 3 se introduce el modelo de potencia reactiva como modelo de referencia para estimar la velocidad del vector espacial del flujo; en la Sección 4 se propone una ley de adaptación de la resistencia del rotor, basada en el modelo de potencia reactiva, tanto en modo motor como en modo generador. Esta ley es independiente de la velocidad del sistema de referencia, del valor inicial de la resistencia estimada y del tamaño de la máquina. En la Sección 5 se analiza la estabilidad del método de estimación de la resistencia del rotor mientras que en la Sección 6 se contrastan los resultados obtenidos mediante simulación de una máquina funcionando en modo generador.

3. Modelo de potencia reactiva

El modelo del motor en un sistema de referencia que gire a una velocidad cualquiera se puede expresar como [5]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \omega_e & B & C\omega_R \\ -\omega_e & A & -C\omega_R & B \\ D & 0 & E & \omega_e - \omega_R \\ 0 & D & -(\omega_e - \omega_R) & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F & 0 \\ 0 & F \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P}{J} (T_e - T_l) \quad (2)$$

Donde:

$$\begin{aligned} A &= -\frac{R_S}{L_S \sigma} - \frac{R_R(1-\sigma)}{L_R \sigma} & B &= \frac{L_M R_R}{\sigma L_S L_R^2} \\ C &= \frac{L_M}{\sigma L_S L_R} & D &= \frac{L_M R_R}{L_R} \\ E &= -\frac{R_R}{L_R} & F &= \frac{1}{L_S} \\ T_e &= G(\psi_{rd} i_{sq} - \psi_{rq} i_{sd}) & G &= \frac{P L_M}{L_R} \end{aligned} \quad (3)$$

El modelo del motor de inducción se puede expresar usando un sistema de referencia que gire a la velocidad del flujo del rotor. Si las corrientes de estator están controladas, se trabaja a flujo constante y el eje "d" del sistema de referencia coincide con el vector espacial del flujo, en régimen permanente se cumple que $i_{sd} = i_{sd}^*$, $i_{sq} = i_{sq}^*$ y $|\vec{\psi}_R| = L_M i_{sd}^*$. Si se trabaja con corrientes de referencia constantes, se obtienen las siguientes ecuaciones del estator:

$$L_S \sigma \frac{di_{sd}^*}{dt} = -R_S i_{sd}^* + L_S \sigma \hat{\omega}_S i_{sq}^* + v_{sd} = 0 \quad (4)$$

$$L_S \sigma \frac{di_{sq}^*}{dt} = -L_S \hat{\omega}_S i_{sd}^* - R_S i_{sq}^* + v_{sq} = 0 \quad (5)$$

Despejando $\hat{\omega}_S$ de (4) y (5) se obtiene:

$$\hat{\omega}_S = \frac{R_S i_{sd}^* - v_{sd}}{L_S \sigma i_{sq}^*} \quad (6)$$

$$\hat{\omega}_S = \frac{-R_S i_{sq}^* + v_{sq}}{L_S i_{sd}^*} \quad (7)$$

Eliminando R_S entre (6) y (7):

$$\hat{\omega}_S = \frac{v_{sq} i_{sd}^* - v_{sd} i_{sq}^*}{L_S (i_{sd}^{*2} + \sigma i_{sq}^{*2})} = \frac{Q}{L_S (i_{sd}^{*2} + \sigma i_{sq}^{*2})} \quad (8)$$

Donde Q es la potencia reactiva instantánea absorbida por la máquina. La ventaja de la expresión (8) es que sólo depende de parámetros del motor que no experimentan grandes cambios (L_S y σ).

La velocidad $\hat{\omega}_S$ así estimada sólo refleja la velocidad del vector espacial del flujo del rotor cuando el sistema de referencia usado para modelar el motor tiene el eje "d" sobre el vector espacial del flujo del rotor ($\psi_{Rq} = 0$ siempre) y se ha alcanzado el régimen permanente.

En un accionamiento con control vectorial indirecto se impone que la velocidad del vector espacial de la corriente de estator sea:

$$\omega_e = \omega_R + \frac{\hat{R}_R i_{sq}^*}{L_R i_{sd}^*} \quad (9)$$

Evidentemente, ésta también será la velocidad del vector espacial del flujo del rotor en régimen permanente. Por otro lado, la posición del vector espacial del flujo del rotor se calcula como:

$$\theta_e = \int \omega_e dt \quad (10)$$

Además se fuerza a que las corrientes del estator en un sistema situado en θ_e sean iguales a los valores de referencia. Esto sólo garantiza la correcta orientación en régimen permanente del sistema de referencia si $\hat{R}_R = R_R$ [6]. Por lo tanto, la expresión (8) puede usarse como modelo de referencia.

4. Ley de adaptación de la resistencia del rotor

En las Figuras 1 y 2 se describe el sistema de control de la máquina, junto con la ley de adaptación:

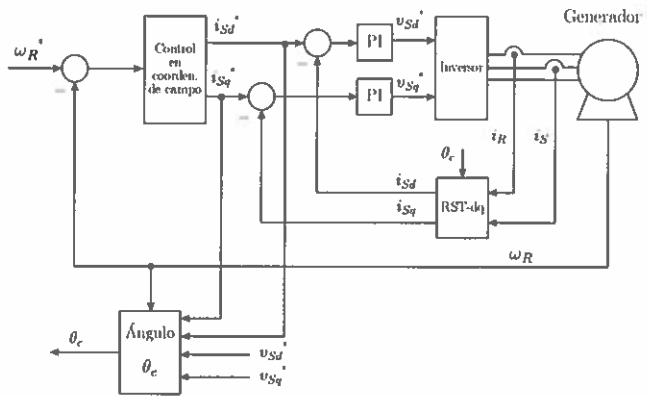


Fig. 1. Esquema de control vectorial indirecto

El error entre $\hat{\omega}_S$ y ω_e en régimen permanente es:

$$e = \hat{\omega}_S - \omega_e \quad (11)$$

Si se calculan v_{sd} y v_{sq} de (1) y se sustituyen en (8) se obtiene la siguiente expresión de $\hat{\omega}_S$:

$$\hat{\omega}_S = \omega_e \frac{R_R^2 i_{sd}^{*2} + \sigma \hat{R}_R^2 i_{sq}^{*2}}{R_R^2 i_{sd}^{*2} + \hat{R}_R^2 i_{sq}^{*2}} \frac{i_{sd}^{*2} + i_{sq}^{*2}}{i_{sd}^{*2} + \sigma i_{sq}^{*2}} \quad (12)$$

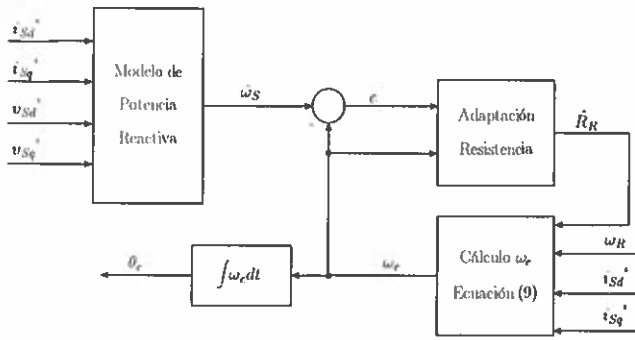


Fig. 2. Cálculo de θ_e y adaptación de $\hat{R}_R$

Sustituyendo (12) en (11) el error resultante es:

$$e = \alpha \frac{\omega_e (R_R^2 - \hat{R}_R^2)}{R_R^2 i_{sd}^{*2} + \hat{R}_R^2 i_{sq}^{*2}}; \quad \alpha = \frac{(1 - \sigma) i_{sd}^{*2} i_{sq}^{*2}}{i_{sd}^{*2} + \sigma i_{sq}^{*2}} \quad (13)$$

Cuando la máquina de inducción funciona en modo motor, la velocidad del rotor ω_R y la componente de eje "q" de la corriente de estator i_{sq}^* tienen el mismo signo, con lo que el error valdrá cero sólo cuando $\hat{R}_R = R_R$. Sin embargo, cuando la máquina de inducción funciona en modo generador, la velocidad del rotor y la componente de eje q de la corriente de estator tienen signos diferentes, con lo que el error valdrá cero cuando $\hat{R}_R = R_R$ o cuando $\omega_e = 0$ (ver (9)).

Se puede elegir la siguiente ley de control para actualizar la resistencia del rotor (ver [4]):

$$\frac{d\hat{R}_R}{dt} = \gamma i_{sq}^* e \quad (14)$$

Donde γ es una constante positiva que afecta a la velocidad de convergencia. Sustituyendo (13) en (14), se obtiene:

$$\frac{d\hat{R}_R}{dt} = \gamma \alpha \frac{\omega_e i_{sq}^* (R_R^2 - \hat{R}_R^2)}{R_R^2 i_{sd}^{*2} + \hat{R}_R^2 i_{sq}^{*2}} \quad (15)$$

En modo motor, la ley de actualización de la resistencia converge siempre al valor real de la resistencia del rotor porque $\omega_e i_{sq}^* > 0$; pero si se funciona en modo generador y se cumple que $\omega_e i_{sq}^* < 0$, $\hat{R}_R$ aumentará cuando $\hat{R}_R > R_R$ y disminuirá cuando $\hat{R}_R < R_R$, con lo que no se alcanzará nunca el valor real de la resistencia del rotor R_R . Además la velocidad de convergencia de la resistencia del rotor depende de la velocidad del sistema de referencia ω_e .

La ley de actualización de la resistencia del rotor que se propone aquí resuelve el problema de los dos modos de funcionamiento de la máquina de inducción, es independiente de la velocidad del sistema de referencia y del valor inicial de la resistencia estimada ($\hat{R}_{R0}$) y no tiene limitación en cuanto a la potencia de la máquina:

$$\frac{d\hat{R}_R}{dt} = \frac{\gamma}{\omega_e} e \quad (16)$$

Sustituyendo (13) en (16), se obtiene:

$$\frac{d\hat{R}_R}{dt} = \gamma \alpha \frac{(R_R^2 - \hat{R}_R^2)}{R_R^2 i_{sd}^{*2} + \hat{R}_R^2 i_{sq}^{*2}} \quad (17)$$

En la Sección 5 se demuestra rigurosamente que dicha ley estima la resistencia del rotor correctamente para cualquier modo de funcionamiento. Sin embargo no funciona para velocidad nula del sistema de referencia en régimen permanente ($\omega_e = 0$), aunque dicho régimen de funcionamiento no se da en la máquina de inducción.

5. Estabilidad de la ley de adaptación

La ecuación diferencial (17) es claramente no lineal; para demostrar su estabilidad se usará el teorema de Lyapunov sobre estabilidad asintótica y global (ver [7]).

Se define la variable h como:

$$h = R_R^2 - \hat{R}_R^2 \quad (18)$$

Si R_R es constante durante el proceso de adaptación y teniendo en cuenta (17) se cumple que:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{-2\gamma\alpha\hat{R}_R}{R_R^2 i_{sd}^{*2} + \hat{R}_R^2 i_{sq}^{*2}} h \quad (19)$$

Se puede definir la siguiente candidata a función de Lyapunov: $V = h^2$, con $V > 0$ salvo en el origen. Además:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dh} \cdot \frac{dh}{dt} = \frac{-4\gamma\alpha\hat{R}_R}{R_R^2 i_{sd}^{*2} + \hat{R}_R^2 i_{sq}^{*2}} h^2 \quad (20)$$

Luego:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{-4\gamma\alpha\hat{R}_R}{R_R^2 i_{sd}^{*2} + \hat{R}_R^2 i_{sq}^{*2}} V < 0 \quad \forall V(h) \neq 0 \quad (21)$$

Por lo tanto el punto $h = 0$ ($\hat{R}_R = R_R$) es un punto de equilibrio asintótica y globalmente estable.

6. Validación y resultados

Se ha simulado una máquina de 250W (ver [4]), que utiliza un control de velocidad del rotor. La resistencia de rotor de la máquina se ha aumentado un 50% sobre el valor nominal. El par de carga es constante de valor $T_L = -1,5\text{Nm}$. Se consideran varios escalones en la referencia de la velocidad del rotor. El régimen de funcionamiento es en modo generador. La ley de adaptación no empieza a funcionar hasta pasados 4 segundos.

La Figura 3 muestra una simulación para velocidades alrededor de 300 rad/s (1432 r.p.m.). Se observa cómo la resistencia estimada converge al valor real R_R , la corriente i_{sq}^* es negativa al funcionar en modo generador. La Figura 4 muestra otra simulación para bajas velocidades de rotor, en concreto alrededor de 20 rad/s. (95,5 r.p.m.). Se observa que la ley de adaptación, de nuevo, funciona correctamente y que la velocidad de convergencia de la adaptación no depende de ω_R .

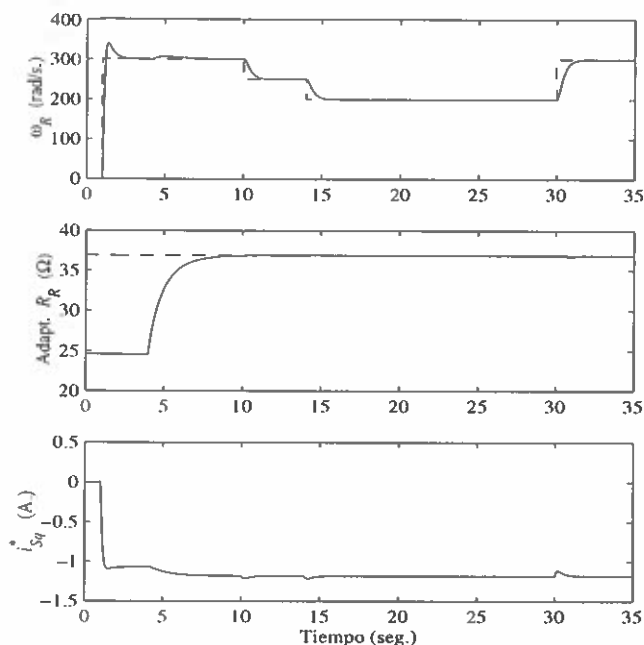


Fig. 3. Proceso de adaptación de la resistencia con escalones en la referencia de la velocidad del rotor y referencia de la corriente de par i_{Sq}^* . ω_R (-), ω_R^* (- -), $\hat{R}_R$ (-) y R_R (- -)

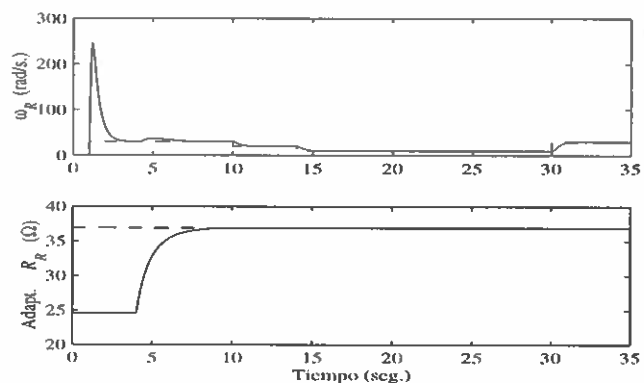


Fig. 4. Proceso de adaptación de la resistencia para bajas velocidades del rotor. ω_R (-), ω_R^* (- -), $\hat{R}_R$ (-) y R_R (- -)

6.1. Sensibilidad del método propuesto

Uno de los inconvenientes del modelo de referencia de potencia reactiva es su sensibilidad a la desintonía en los valores de las inductancias, en concreto L_S y L_R .

Se han realizado varias simulaciones para analizar dicha sensibilidad. El par de carga es $T_L = -1,5\text{Nm}$ y la velocidad del rotor es $\omega_R = 300\text{rad/s}$; las inductancias se han variado un $\pm 4\%$ respecto al valor nominal. Los resultados obtenidos se reflejan en la Tabla 1.

Los casos más desfavorables ocurren para incrementos del $\pm 4\%$ en la inductancia del estator: hay un gran error en la adaptación de la resistencia, lo que se traduce en errores considerables en las corrientes de estator (sobre todo en la corriente de flujo i_{Sd}), por lo que haría falta un mecanismo de adaptación de la inductancia de estator. Para variaciones de la inductancia del rotor, el método

de adaptación produce errores menores en la estimación de la resistencia, pero errores considerables en el par.

$\Delta\%$	$\epsilon_{R_R}\%$	$\epsilon_{i_{Sd}}\%$	$\epsilon_{i_{Sq}}\%$	$\epsilon_{T_e}\%$
$\Delta L_R = +4\%$	6,12	8,20	1,93	10,38
$\Delta L_R = -4\%$	2,89	4,85	2,06	6,78
$\Delta L_S = +4\%$	17,10	13,65	2,95	10,30
$\Delta L_S = -4\%$	11,11	8,00	3,50	4,78

Tabla 1. Errores por desintonía en las inductancias. El error de la variable x es $\epsilon_x = |(x_{real} - x_{medida}) \setminus x_{real}|$

7. Conclusiones

En este trabajo se ha deducido una ley de adaptación de la resistencia del rotor para una máquina de inducción basada en un modelo de referencia. Dicha ley de adaptación es independiente del modo de funcionamiento de la máquina, siendo válida para funcionamiento como motor o como generador. En otros trabajos, los controles propuestos sólo funcionan correctamente cuando la máquina funciona como motor. Se ha demostrado de forma rigurosa la estabilidad de la ley de adaptación mediante el teorema de Lyapunov, concluyéndose que la ley de adaptación propuesta es asintótica y globalmente estable.

Se han validado los resultados principales mediante simulación. El mecanismo de adaptación produce errores elevados cuando hay desintonía en la inductancia de estator.

Referencias

- [1] Timothy M. Rowan, Russel J. Kerkman and David Leggate. A simple on-line adaptation for indirect field orientation of an induction machine. *IEEE Transaction on Industry Applications*, 27(4):720-727.
- [2] Robert D. Lorenz and Donald B. Lawson. A simplified approach to continuous on-line tuning of field-oriented induction machines drives. *IEEE Transaction on Industry Applications*, 26(3):420-424.
- [3] Luis J. Garcés (1980). Parameters adaption for the speed-controlled static ac drive with a squirrel-cage induction motor. *IEEE Transaction on Industry Applications*, 1A-16(2):173-178.
- [4] A. García-Cerrada and A. Robertson. Reactive power model used for adaptive and indirect field-orientated induction motor control. In *Actas del Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación SAAEI99*, pages 359-362. Universidad Pontificia Comillas de Madrid, Sept. 1999.
- [5] Aurelio García-Cerrada. *Observer-Based Field-Oriented Controller for an Inverter-fed Traction Induction Motor Drive*. Ph.d. thesis, School of Electronic & Electrical Engineering, University of Birmingham, Birmingham, December 1990.
- [6] H. Sugimoto. A new transfer function of an induction motor driven by a variable frequency source. In *IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC'83*, 1983.
- [7] J. J. E. Slotine, W. Li. *Applied Nonlinear Control*. Prentice-Hall, New Jersey, 1991.