

**PARAMETER VARIATION EFFECTS ON FIELD ORIENTED CONTROL OF
AN INDUCTION MOTOR****EFFECTOS DE LA VARIACIÓN DE PARÁMETROS EN EL CONTROL
VECTORIAL POR CAMPO ORIENTADO DEL MOTOR DE INDUCCION****MSc. Jorge Luis Díaz Rodríguez., PhD. Aldo Pardo García****Universidad de Pamplona. Ciudadela Universitaria, Pamplona, Colombia**

Tel: 57-7-568 5303, Fax: 57-7-5685303 Ext. 156

e-mail: {jdiazcu, apardo13}@unipamplona.edu.co

Resumen: En este trabajo se analiza los efectos que la variación parámetros que se introducen en el desempeño del control por campo orientado indirecto del motor de inducción. El análisis es conducido por la formulación de las respuestas del par y flujo cuando se supone que no hay conocimiento real de estos parámetros. Se consideró el caso con regulación de velocidad, en lazo cerrado por ser de mayor interés que en lazo abierto. En ambos casos, el análisis es dividido en las situaciones de estado estable y de estado transitorio. En el trabajo también se presenta en análisis cualitativo del efecto de variación de parámetros sobre las pérdidas asociadas al motor.

Abstract: This paper studies the parameters variation effects that is introduce in the performance in the indirect field oriented vector control of an induction motor. The analysis is lead by the formulation of the electromagnetic flow and torque response when it assumes that there is no certain knowledge of these parameters. The case with speed regulation was considered, in close loop by being of greater interest than in open loop. In both cases, the analysis is divided in transient and steady state. This work also presents a qualitative analysis of the parameters variation effect on the losses associated with the motor.

Keywords: Induction Motor, Vector Control, Field Oriented Control, Parameters Estimation

1. INTRODUCCIÓN

El control por campo orientado indirecto es ventajoso frente al directo, por el hecho de que no necesita de la medición o estimación de la posición angular del flujo del rotor. Esto le asegura mayor simplicidad de implementación además, incluso menor costo.

La orientación del flujo del rotor se asegura por el cálculo de deslizamiento a partir de las componentes del par y flujo de la corriente del estator. Este cálculo involucra los parámetros de inductancia y resistencia del rotor que varían en función, principalmente, de la saturación del medio magnético y de la temperatura del rotor.

La dependencia de estos parámetros constituye la mayor deficiencia del control por el campo orientado indirecto. La búsqueda de soluciones para este problema es motivada por las ventajas que este método presenta sobre el directo, destacándose por lo antes dicho y por el hecho de que el método directo también es dependiente de ciertos parámetros del motor.

2. CONTROL POR CAMPO ORIENTADO EN SINTONÍA

El término sintonía será utilizado para denominar la situación en que el deslizamiento de control w_{sl}^c realmente produce la orientación del flujo del rotor. Esto equivale a decir que los parámetros y variables involucradas en el cálculo de w_{sl}^c son conocidos exactamente. El deslizamiento de control w_{sl}^c es obtenido substituyéndose los parámetros y variables del motor por los parámetros y variables de control equivalentes. De esto resulta:

$$w_{sl}^c = \frac{R_r^c L_m^c i_{qs}^c}{L_r^c \lambda_{dr}^c} = \frac{L_m^c i_{qs}^c}{\tau_r^c \lambda_{dr}^c} = \frac{1}{\tau_r^c} \frac{i_{qs}^c}{i_{dr}^c} \quad (1)$$

Considerando que el flujo del rotor λ_{dr}^c es constante, la ecuación 1 se reduce a:

$$w_{sl}^c = \frac{R_r^c i_{qs}^c}{L_r^c i_{ds}^c} = \frac{1}{\tau_r^c} \frac{i_{qs}^c}{i_{ds}^c} \quad (2)$$

Si el parámetro de control τ_r^c coincide con el valor real de la constante de tiempo rotórica τ_r , o sea:

$$\tau_r^c = \tau_r \quad (3)$$

Entonces el sistema opera en sintonía y el deslizamiento es dado por:

$$w_{sl}^* = w_{sl}^c = \frac{1}{\tau_r} \frac{i_{qs}}{i_{ds}} \quad (4)$$

En esta situación, el flujo y el par del motor son dados por:

$$\lambda_r^* = L_m i_{ds} \quad (5)$$

$$T_e^* = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m^2}{L_r} i_{ds} i_{qs} \quad (6)$$

Las ecuaciones 5 y 6 describen el comportamiento del flujo del rotor y del par electromagnético cuando el motor opera en sintonía y con flujo

constante, tanto en estado estable como en estado transitorio. Ellas serán utilizadas como parámetros de comparación para el análisis del control por campo orientado indirecto fuera de sintonía.

3. CONTROL POR CAMPO ORIENTADO FUERA DE SINTONÍA

Cuando el valor real de la constante de tiempo rotórica no es exactamente conocido, el deslizamiento obtenido por la ecuación 2 no corresponde al que produce la orientación del flujo del rotor. Como consecuencia, la orientación del campo no es obtenida y se dice que el motor opera fuera de sintonía.

En este caso, τ_r^c puede ser escrito como:

$$\tau_r^c = \frac{\tau_r}{x} \quad (7)$$

Donde x representa la relación entre el valor real y el valor conocido de la constante de tiempo rotórica. Como x está relacionando con la constante de tiempo rotórica, en este se considera el error introducido en el valor real tanto de la resistencia como de la inductancia del rotor.

De la ecuación 2 se obtiene directamente la relación entre el deslizamiento impuesto por el control w_{sl}^c y aquel que producirá la orientación del flujo del rotor w_{sl}^* .

$$w_{sl}^c = \frac{x}{\tau_r} \frac{i_{qs}}{i_{ds}} = x w_{sl}^* \quad (8)$$

Con esta formulación, x representa el error de deslizamiento introducido por el hecho de que el valor conocido de la constante de tiempo del rotor no corresponde con su valor real. Es importante recordar que es supuesta la imposición ideal de corrientes, siendo válida, por tanto, la igualdad $w_{sl} = w_{sl}^c$.

Esta formulación permite analizar comparativamente el desempeño del control por campo orientado con sintonía y fuera de sintonía, a través de la obtención de las expresiones para las variables de interés en función del error de deslizamiento x . La situación de sintonía queda representada por $x = 1$.

3.1 Análisis en lazo cerrado

El término lazo cerrado será utilizado para denominar el control por campo orientado indirecto del motor de inducción en el cual se introduce un lazo de control de velocidad. La figura 1 ilustra en diagrama de bloques este control.

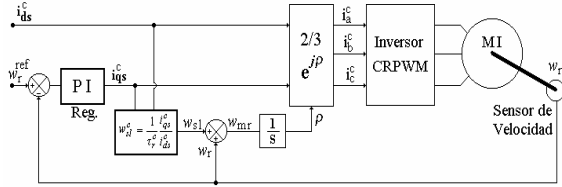


Fig. 1. Control por campo orientado indirecto en lazo cerrado con regulación de velocidad

Como regulador de velocidad será considerado un regulador PI (Proporcional Integral) convencional.

3.1.1 Análisis en estado estable

La presencia de la acción integral en el regulador de velocidad garantiza un error nulo en estado estable en la respuesta a referencias de velocidad constantes. Así mismo, la corriente i_{qs} asume un valor tal que el par producido por el rotor es suficiente para mantener la velocidad del rotor en el valor establecido por la referencia. Este par está dado por:

$$T_e = T_c + \frac{2}{P} B w_r^{ref} \quad (9)$$

En función de variables eléctricas, este mismo par puede ser obtenido. Así mismo,

$$T_e = k_t i_{qs} i_{ds} \frac{x \left[1 + \left(i_{qs} / i_{ds} \right)^2 \right]}{1 + \left(x i_{qs} / i_{ds} \right)} \quad (10)$$

$$\text{Donde } k_t = \frac{3 P L_m^2}{2 L_r}$$

Resolviendo 10 para i_{qs} , se obtiene

$$i_{qs}^3 - \frac{T_e x}{k_t i_{ds}} i_{qs}^2 + i_{ds}^2 i_{qs} - \frac{T_e i_{ds}}{x k_t} = 0 \quad (11)$$

La solución real de esta ecuación corresponde al valor de la componente i_{qs} necesario para producir, en estado estable, el par T_e (ecuación 9) para un valor dado de i_{ds} y un error dado de deslizamiento x . Si el motor estuviese en sintonía, este mismo valor de i_{qs} produciría el par

$$T_e^* = k_t i_{ds} i_{qs} \quad (12)$$

Dividiendo ambos lados de la ecuación 12 por T_e y resolviendo para i_{qs} , se obtiene

$$i_{qs} = \frac{i_{ds}}{a} \frac{T_e^*}{T_e} \quad (13)$$

Donde

$$a = \frac{i_{ds}^2 k_t}{T_e} \quad (14)$$

Sustituyendo la ecuación 13 en 11, se obtiene

$$\left(\frac{T_e^*}{T_e} \right)^3 - x \left(\frac{T_e^*}{T_e} \right)^2 + a^2 \left(\frac{T_e^*}{T_e} \right) - \frac{a^2}{x} = 0 \quad (15)$$

El inverso de la solución real de la ecuación 15 proporciona la relación T_e / T_e^* para una situación dada de la operación del motor (i_{ds} , T_c , B y x) (Krishnan R. and Doran F. C. Jul/Aug. 1987). Esta relación representa la razón entre los pares producidos por el motor cuando está fuera de sintonía y cuando está en sintonía, para un mismo conjunto de valores de i_{qs} e i_{ds} .

Transformando 13, se obtiene

$$\frac{\lambda_r}{\lambda_r^*} = \frac{\sqrt{1 + \left(T_e^* / T_e a \right)^2}}{\sqrt{1 + \left(x T_e^* / T_e a \right)^2}} \quad (16)$$

Esta ecuación establece la relación entre el flujo del rotor real y el que sería producido con los mismos valores de corriente si el motor opera en sintonía. La figura 2 muestra el comportamiento de la relación λ_r / λ_r^* en función de x para varias condiciones de carga, representadas por diferentes valores de T_e y para i_{ds} ajustado para producir flujo nominal cuando está en sintonía.

Se puede notar de la figura 2 que el flujo es reducido considerablemente para errores de deslizamiento mayores que uno. Esta reducción en el flujo es poco pronunciada para valores pequeños de carga, pues, en esta condición de operación, la magnitud de i_{qs} es pequeña frente a la magnitud de i_{ds} .

El aumento pronunciado del flujo, para valores de x menores que uno, no ocurre efectivamente, pues la saturación magnética limita el aumento del flujo a un valor un poco sobre el flujo nominal.

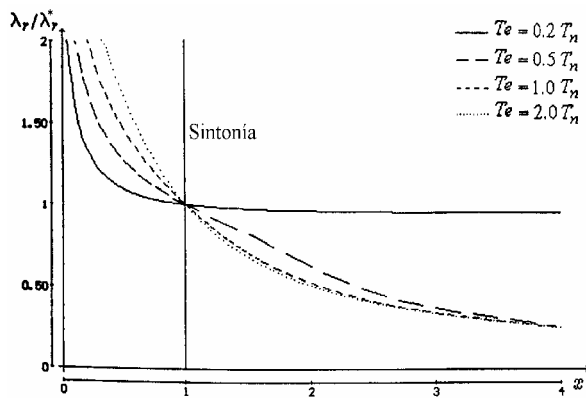


Fig. 2. Característica del flujo en operación fuera de sintonía en lazo cerrado.

La figura 3 muestra el comportamiento de la relación T_e/T_e^* en función de x para un valor específico de i_{ds} y para valores de carga T_e .

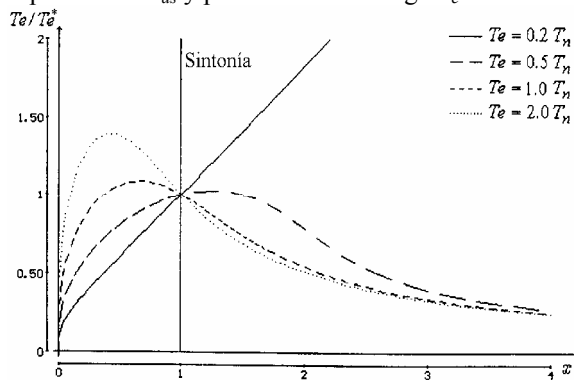


Fig. 3. Característica del par en la operación fuera de sintonía en lazo cerrado

Del gráfico se puede notar que, para cargas próximas o mayores que la carga nominal y para valores de $x > 1$, el par producido es menor que el que sería producido en sintonía. Lo mismo ocurre para valores de $x < 1$ y para cargas menores que la carga nominal. El aumento pronunciado de la relación T_e/T_e^* , para $x < 1$ y cargas mayores que la nominal, no ocurre efectivamente debido a la limitación de flujo introducida por la saturación magnética.

Para valores de x mayores que uno y para cargas pequeñas, el par producido en sintonía es inferior al producido fuera de sintonía, considerando un mismo valor de corriente.

Esto ocurre porque, en esta condición de operación el flujo se mantiene prácticamente constante y el aumento de par es debido al aumento del deslizamiento, como resultado del aumento del error del deslizamiento x .

3.1.2 Análisis en estado transitorio

Durante los estados transitorios de velocidad, la corriente i_{qs} es limitada a un valor dado máximo debido a limitaciones, en general, del inversor y del propio motor de inducción. Como resultado, durante la mayor parte de un estado transitorio de velocidad, la componente i_{qs} es en su valor máximo y el motor evoluciona como si estuviese en lazo abierto con i_{qs} y i_{ds} constantes.

En la región lineal de operación del regulador de velocidad, sin embargo, la componente i_{qs} es variable en función del error de velocidad. Así mismo, el comportamiento tanto del flujo como del par será alguno de esos y el análisis por medio de la función de transferencia sobre la linealización del sistema en torno a un punto de operación, no permite la obtención de resultados simples.

La figura 4 ilustra el comportamiento del flujo del rotor para un escalón aplicado en la referencia de velocidad en 3 situaciones distintas de error del deslizamiento. En la figura 5 se exponen los resultados obtenidos para el par electromagnético en las mismas condiciones.

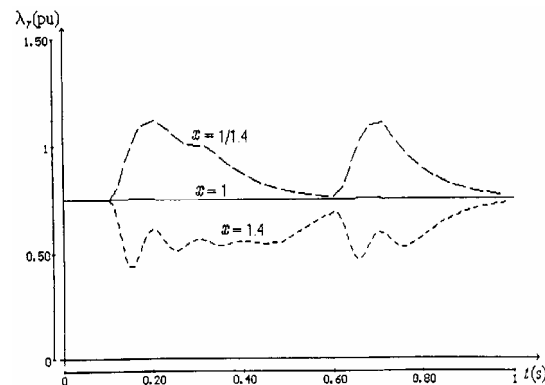


Fig. 4. Comportamiento del flujo rotórico λ_r durante los estados transitorios de velocidad en situaciones distintas de error de deslizamiento. El flujo en sintonía es el flujo nominal

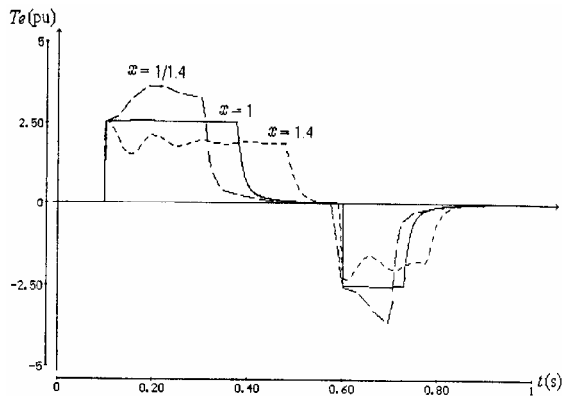


Fig. 5. Comportamiento del par electromagnético durante los estados transitorios de velocidad en situaciones distintas del error del deslizamiento. El flujo en sintonía es el flujo nominal

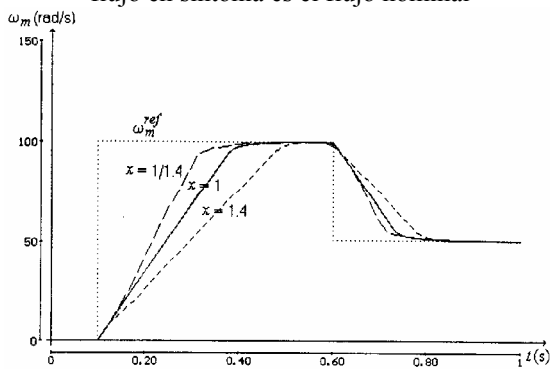


Figura 6: Referencia y respuesta de velocidad del motor de inducción en 3 situaciones distintas de error del deslizamiento

La referencia de velocidad aplicada en estas simulaciones esta representada en la figura 6, al igual que la respuesta de velocidad obtenida en cada situación del error del deslizamiento.

Se puede verificar que el comportamiento del par y del flujo durante el intervalo en que i_{qs} está limitada a su valor máximo. Como el motor está operando sin carga, el par producido en estado estable es aproximadamente nulo. Así mismo, el flujo del rotor tiende a su valor de sintonía independientemente del valor del error del deslizamiento, pues i_{qs} es aproximadamente cero. Fuera de sintonía, la respuesta de velocidad se degrada, aun así, en menor proporción que la respuesta del par.

4. INFLUENCIA DE SATURACIÓN

Cualitativamente, la saturación puede ser vista como una reducción en el valor de la reactancia equivalente de magnetización, el que implica un aumento de la corriente de magnetización. Una vez que este aumento tiende a reducir la relación i_{qs}/i_{ds} , la saturación siempre tiende a disminuir la sensibilidad al error del deslizamiento (Lorenz R. D and Novotny D. W.. Mar/Apr. 1990).

Una forma de modelar la saturación del medio magnético es considerar el flujo limitado en un valor λ_r^{sat} . Este modelo de saturación puede ser introducido y aparece como una línea recta limitando el flujo para errores de deslizamiento menores que 1, como está ilustrado en la figura. Esto permite concluir que valores grandes de i_{qs}/i_{ds} lleva rápidamente el motor a la condición de saturación, para errores de deslizamiento negativos ($x < 1$).

El problema asociado a la saturación magnética es el aumento de las pérdidas en el hierro que provocan sobrecalentamiento del motor. Como consecuencia, la eficiencia de la máquina es reducida y su vida útil perjudicada.

5. PÉRDIDAS

Como fue concluido el análisis anterior, un error de deslizamiento negativo ($x < 1$) lleva el motor para la condición de saturación magnética. Tal hecho provoca un aumento de las pérdidas en el hierro y en consecuencia sobrecalentamiento del motor. Las pérdidas en el hierro pueden ser divididas en pérdidas por histéresis y pérdidas por corrientes parásitas. Estas pérdidas también dependen de la frecuencia de operación del motor, siendo mayores para frecuencias mayores.

Por otro lado, un error de deslizamiento positivo ($x > 1$) lleva el motor a la condición de subexcitación. Como consecuencia de la disminución del flujo hay una correspondiente disminución del par. Esto es cierto para los valores de i_{qs}/i_{ds} en los cuales la disminución de flujo supera el efecto del aumento de par, provocado por el aumento del deslizamiento.

Como el motor es forzado a trabajar con un deslizamiento mayor que el necesario, la corriente del rotor aumenta. Así mismo hay un aumento de las pérdidas en el cobre y un consecuente sobrecalentamiento del motor.

El balance entre pérdidas en el cobre y pérdidas en el hierro puede ser optimizado realizando la minimización de pérdidas. Tal optimización es obtenida adecuando el nivel de flujo para cada situación de operación del motor, o sea, operando el motor con flujo variable en vez de flujo constante (Krishnan R. and Doran F. C. Jul/Aug. 1987). La variación del flujo, sin embargo, debe ser suficientemente lenta para no degradar la respuesta de par.

La operación a flujo constante, no minimiza las pérdidas en todo el diapasón de operación del motor, ofrece la máxima sensibilidad del par en relación con la corriente. La escala del nivel de flujo puede ser obtenida teniendo en cuenta la máxima eficiencia del motor, considerando el régimen de trabajo del motor, la saturación magnética y otras limitaciones relacionadas con la implementación del control (Khater F. M. H, Lorenz R. D., Novotny D. W. and K. Tang. Mar/Apr. 1987, Lorenz R. D and Novotny D. W.. Mar/Apr. 1990).

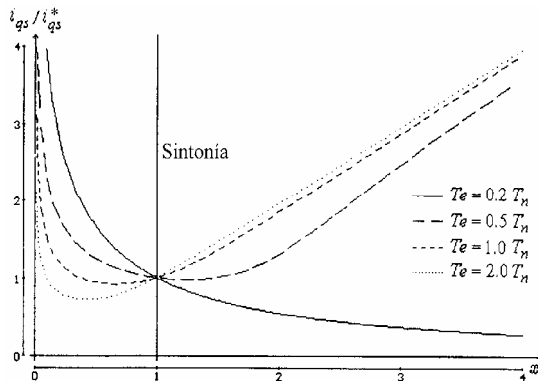


Fig. 7. Características de las componentes del par de la corriente del estator, fuera de sintonía en lazo cerrado

Por un procedimiento semejante se puede obtener la relación entre las corrientes i_{qs} y i_{ds} necesarias para producir un determinado par, fuera de sintonía y en sintonía respectivamente. En lazo cerrado, esta relación esta dada por

$$\left(\frac{i_{qs}}{i_{qs}^*}\right)^3 - x\left(\frac{i_{qs}}{i_{qs}^*}\right)^2 + a^2\left(\frac{i_{qs}}{i_{qs}^*}\right) - \frac{a^2}{x} = 0 \quad (17)$$

Donde a esta dada por la ecuación 14. Esta ecuación es idéntica a la ecuación 15 sustituyendo la relación del par por la relación de las corrientes. La figura 7 ilustra el comportamiento de la relación i_{qs}/i_{ds}^* en función de x para varios valores de par de carga. Se puede verificar que para la mayoría de las condiciones de operación la corriente necesaria para producir un determinado par, es significativamente menor en sintonía que fuera de sintonía. Esto solamente no ocurre para el funcionamiento con cargas pequeñas y con $x > 1$. En esta situación el flujo permanece prácticamente constante y el par aumenta con el error del deslizamiento, en función del aumento del deslizamiento. Esto apenas significa que la operación en esta región sería más eficiente con un nivel menor de flujo (Khater F. M. H, Lorenz R. D., Novotny D. W. and K. Tang. Mar/Apr. 1987). Para $x < 1$ se mantiene la saturación magnética que no fue considerada. Así mismo, la aparente relación i_{qs}/i_{ds}^* menor que 1 para cargas elevadas, realmente no se obtiene.

6. CONCLUSIONES

1. En este trabajo fue analizado el desempeño del control por campo orientado indirecto cuando son considerados errores en el cálculo de deslizamiento. Los efectos introducidos por este error en el comportamiento del flujo del rotor y del par electromagnético fueron analizados en las condiciones de estado estable y estado transitorio, tanto en lazo abierto como en lazo cerrado. Las pérdidas en hierro y en el cobre también fueron consideradas y relacionadas con la operación fuera de sintonía.
2. Los resultados de este análisis muestran que el desempeño del control por campo orientado se degrada por la operación fuera de la condición de sintonía. Los principales efectos que se introducen son:
 - Transientes con oscilaciones amortiguadas en las respuestas de par y flujo del rotor i_{qs} .
 - Disminución de la capacidad de producir par en función de la reducción de flujo, para determinados valores de error del deslizamiento.

- Operación del motor en las regiones de saturación o subexcitación, con un consecuente aumento de las pérdidas en el hierro y en el cobre.
 - Degradación de la respuesta de velocidad en función de la pérdida del control directo del par por medio de i_{qs} .
 - Disminución de la eficiencia de la máquina.
3. La sensibilidad a errores del deslizamiento es mayor en máquinas de mayor potencia, de mayor eficiencia y cuando operan en la región de debilitamiento del campo.
4. Estos resultados permiten decir que con máquinas de baja potencia y baja eficiencia, tales efectos podrían ser tolerados o algún mecanismo simple de adaptación sería suficiente para garantizar un desempeño aceptable para muchas aplicaciones (Nordin K. B., Novotny D. W and Zinger D. S. July/Aug. 1985). Sin embargo, en máquinas de mayor eficiencias, caso más común de servomecanismos, tales efectos son más pronunciados y algún mecanismo de adaptación se torna necesario para garantizar un desempeño adecuado del control por campo orientado. Por lo que se necesitan de técnicas de adaptación de parámetros para reducir tales efectos.

Lorenz R. D and Novotny D. W.. Mar/Apr. 1990. "Saturation Effects in Field-Oriented Induction Machines". *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 26:283-289.

Nordin K. B., Novotny D. W and Zinger D. S. July/Aug. 1985. "The Influence of Motor Parameter Deviations in Feedforward Field Orientation Drive Systems". *IEEE Transaction on Industry Applications*, 21:1009-1015.

REFERENCIAS

- Khater F. M. H, Lorenz R. D., Novotny D. W. and K. Tang. Mar/Apr. 1987 "Selection of Flux Level in Field-Oriented Induction Machine Controllers with Consideration of Magnetic Saturation Effect". *IEEE Transactions Industrial Applications*, 23: 276-282,.
- Krishnan R. and A.S. Bharadwaj. Feb. 1991. "A review of parameter sensitivity and adaptation in indirect vector controlled induction motor drive". *IEEE Transaction on power Electronics*, 6:695-703.
- Krishnan R. and Doran F.C.. Jul/Aug. 1987. "Study of Parameter Sensivity in High - Performance Inverter-Fed Induction Motor Drive". *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 23: 623-635.