



Estimación de componentes de secuencia mediante el filtro de Vold-Kalman para la detección de averías en el estátor de la MI

Mazzoletti M. A. ^{a *}, Gentile F. R. ^b, Puertaz M. P. ^a, Donolo P. D. ^c, Bossio G. R. ^c

^a *Lab. de Inv. y Desarrollo en Energía Eléctrica, LIDEE–Facultad de Ingeniería, UNaM*

^b *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais*

^c *Grupo de Electrónica Aplicada, GEA-IITEMA-CONICET, Facultad de Ingeniería, UNRC*

e-mails: mazzoletti@fio.unam.edu.ar, francisco.gentile@engenharia.ufjf.br

Resumen

En este trabajo se propone una estrategia para la detección de cortocircuitos entre espiras (CEE) en los bobinados de estátor de la Máquina de Inducción (MI) trifásica. La propuesta se basa en el estudio y análisis de un modelo dinámico en qd que incluye una avería en cualquiera de los bobinados de fase y considerando el h -ésimo armónico en la tensión de alimentación. Para la detección de un CEE se propone un algoritmo de seguimiento de órdenes basado en el filtro de Vold-Kalman con el objetivo monitorear la componente armónica de orden cinco en la tensión y la corriente aplicada que de acuerdo con estudios previos es un buen indicador de la avería. Se presentan resultados de simulación para la MI en condiciones normales de funcionamiento y con averías para diferentes condiciones de velocidad y niveles de carga.

Palabras Claves – *Máquina de inducción, Detección de averías, Cortocircuito entre espiras, Distorsión armónica.*

1 Introducción

En la mayoría de los procesos industriales la Máquina de Inducción (MI) trifásica es utilizada como principal eslabón en la cadena de producción. En la Argentina, el 39 % de la energía eléctrica consumida es destinada al sector industrial [1] y se estima que cerca del 70 % se utiliza para el funcionamiento de las máquinas eléctricas [2]. En diversas aplicaciones, la MI es accionada por arrancadores suaves o convertidores de frecuencia para el control de tensión o de velocidad. En dichas aplicaciones, los armónicos de tensión y de corriente se generan de manera natural durante el funcionamiento. En un sistema eléctrico trifásico equilibrado, cada una de las componentes armónicas puede clasificarse como de secuencia positiva, negativa u homopolar [3]. Sin embargo, diferentes condiciones de operación provocan el desequilibrio de las tensiones o las corrientes originando componentes en diferentes secuencias para el mismo armónico. En la MI con una falla interna las impedancias simétricas se vuelven asimétricas y como consecuencia de este desequilibrio, las componentes armónicas pueden utilizarse para la detección del problema [4, 5].

En esta línea temática, el grupo de investigación ha propuesto diferentes estrategias basada en el análisis de las componentes armónicas para la detección de un cortocircuito entre espiras (CEE) en los bobinados de estátor de la MI [6–10].

*mazzoletti@fio.unam.edu.ar.

Para analizar y caracterizar las averías frente a las variaciones en las condiciones de operación existen los métodos basados en modelo de procesos [3, 11]. En este contexto, los primeros modelos incluyendo un CEE en los bobinados de estátor de la MI fueron propuestos en [12, 13]. Debido a que los CEE producen ligeros desequilibrios en la corriente, usualmente, las protecciones de uso convencional no cuentan con la capacidad necesaria para su detección. No obstante, la corriente de falla que circula entre las espiras defectuosas puede alcanzar magnitudes varias veces mayores a la corriente nominal. Basado en la propuesta de Tallam *et.al.* [12], en [13] se propuso un modelo para la MI trifásica que incluye los efectos de cortocircuito entre espiras en cualquiera de los bobinados de fase. Un método propuesto y aún vigente se basa en el análisis de la matriz de impedancias de secuencia obtenida a partir del modelo analítico con falla [14, 15]. En estos casos, la detección se realiza mediante el seguimiento de los términos fuera de la diagonal de la matriz de impedancia. Es importante mencionar que los métodos basados en modelo han sido propuestos considerando los efectos de las averías en la componente de frecuencia fundamental de secuencia positiva, sin incluir los armónicos separados en componentes de secuencia.

En este trabajo se presenta una estrategia para la detección de un CEE en los bobinados de la MI con rotor jaula de ardilla utilizando las componentes de secuencias de la corriente de estátor. La propuesta se basa en un modelo dinámico con avería de la MI considerando el h -ésimo armónico en la tensión de alimentación [16]. La detección de un CEE se realiza mediante la evaluación y el monitoreo de la armónica de orden cinco en la corriente de estátor. A diferencia de anteriores propuestas [8–10] que utilizan un filtro clásico para separar las componentes armónicas, en esta estrategia se propone para la detección de un CEE la implementación de un algoritmo de seguimiento de órdenes basado en el filtro de Vold-Kalman [17]. Se presentan resultados de simulación para la MI en condiciones normales de funcionamiento y con averías para diferentes condiciones de velocidad y niveles de carga.

2 Modelo de la MI en Componentes de Secuencia con un CEE en Bobinados

El modelo dinámico que considera armónicos en la tensión de alimentación fue presentado en [10, 16, 18]. En la Fig. 1 se muestra un esquema de una MI trifásica que indica los efectos que produce un CEE en los bobinados del estátor. Puede apreciarse que una avería en la fase a provoca la circulación de una corriente dentro del bobinado, ocasionando la elevación de temperatura y el deterioro en la aislación. Para analizar los efectos de esta avería, a continuación, se presenta el modelo de la MI con avería para el estado estacionario.

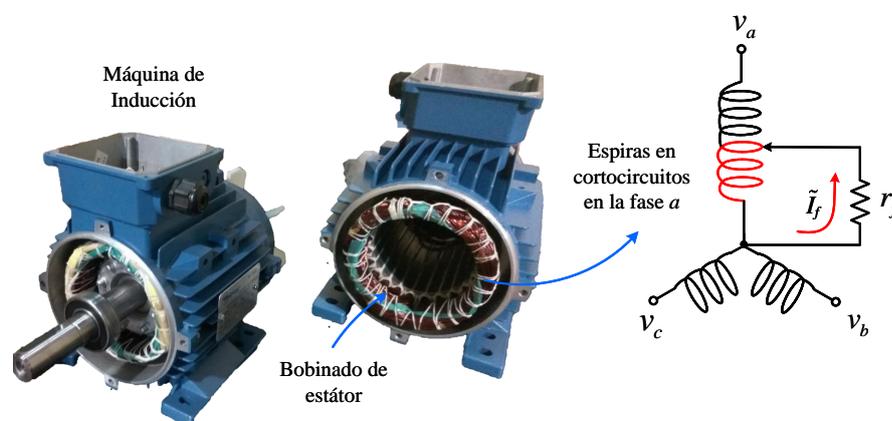


Figura 1: Esquema de una máquina de inducción trifásica con un CEE en bobinados del estátor.

2.1 Obtención del Modelo de la MI para el Estado Estacionario

El modelo de la MI con avería para el estado estacionario se obtiene aplicando tensiones de alimentación de amplitud y frecuencia arbitraria. De esta manera, el modelo en componentes de secuencia considerando el armónico de orden h en la tensión puede expresarse de la siguiente manera [11],

$$v_{qdh} = \tilde{V}_{sph} e^{jh\omega_e t} + \tilde{V}_{snh} e^{-jh\omega_e t} \quad (1)$$

Conociendo que la velocidad angular eléctrica, ω_e es invariante para el régimen estacionario, las soluciones analíticas de las corrientes pueden definirse según,

$$i_{qdh} = \tilde{I}_{sph} e^{jh\omega_e t} + \tilde{I}_{snh} e^{-jh\omega_e t} \quad (2)$$

donde \tilde{V} e \tilde{I} representan los fasores de tensión y corriente de amplitud variable y los subíndices p y n refieren a las componentes de secuencia positiva y negativa, respectivamente. $h = 1, 2, 3, \dots$, según con el orden del armónico.

De (1), (2) y considerando el deslizamiento $S = (\omega_e - \omega_r)/\omega_e$, el modelo para el estado estacionario puede expresarse de la siguiente manera:

$$\tilde{V}_{sph} = (r_s + jh\omega_e L_s) \left(\tilde{I}_{sph} - \frac{1}{3} \mathbf{\mu}_{qd} \tilde{I}_f \right) + jh\omega_e L_m \tilde{I}_{rph} \quad (3)$$

$$\tilde{V}_{snh} = (r_s + jh\omega_e L_s) \left(\tilde{I}_{snh} - \frac{1}{3} \mathbf{\mu}_{qd}^* \tilde{I}_f \right) + jh\omega_e L_m \tilde{I}_{rnh} \quad (4)$$

$$0 = (r_r A + jh\omega_e L_r) \tilde{I}_{rph} + jh\omega_e L_m \left(\tilde{I}_{sph} - \frac{1}{3} \mathbf{\mu}_{qd} \tilde{I}_f \right) \quad (5)$$

$$0 = (r_r B + jh\omega_e L_r) \tilde{I}_{rnh} + jh\omega_e L_m \left(\tilde{I}_{snh} - \frac{1}{3} \mathbf{\mu}_{qd}^* \tilde{I}_f \right) \quad (6)$$

donde,

$$A = \frac{h}{h-1+S} \quad B = \frac{h}{h+1-S} \quad (7)$$

Finalmente, el modelo para el circuito de falla viene dado por,

$$\mathbf{\mu}_{qd}^* \tilde{V}_{sph} + \mathbf{\mu}_{qd} \tilde{V}_{snh} = K (r_s + jh\omega_e L_{ls}) \tilde{I}_f + r_f \tilde{I}_f \quad (8)$$

donde \tilde{I}_f representa el fasor de la corriente de falla para el armónico h y $K = (1 - \frac{2}{3} \|\mathbf{\mu}_{qd}\|) \|\mathbf{\mu}_{qd}\|$.

2.2 El Modelo de la MI Resultante para el Quinto Armónico

El modelo de la MI propuesto permite evaluar los efectos de un CEE incluyendo las componentes armónicas de cualquier orden. Si bien el grado de distorsión armónica suele ser poco importante en las redes de alimentación convencionales, los armónicos de diferentes órdenes y amplitudes se generan de manera natural cuando la MI es accionada por los SS o VSI, y en particular el quinto armónico [6, 19]. En tales casos, si las tensiones son equilibradas, el armónico de orden cinco presenta solo la componente de secuencia negativa, es decir, contrario al sentido de giro de la componente fundamental.

Por lo tanto, de (3)–(8) el modelo de la MI con avería para el estado estacionario con $h = 5$ puede expresarse como:

$$\tilde{V}_{sn5} = (r_s + j5\omega_e L_s) \left(\tilde{I}_{sn5} - \frac{1}{3} \mathbf{\mu}_{qd}^* \tilde{I}_f \right) + j5\omega_e L_m \tilde{I}_{rn5} \quad (9)$$

$$0 = \left(r_r \frac{5}{6-s} + j5\omega_e L_r \right) \tilde{I}_{rn5} + j5\omega_e L_m \left(\tilde{I}_{sn5} - \frac{1}{3} \mu_{qd}^* \tilde{I}_f \right) \quad (10)$$

$$\mu_{qd} \tilde{V}_{sn5} = K (r_s + j5\omega_e L_{ls}) \tilde{I}_f + r_f \tilde{I}_f \quad (11)$$

La representación del modelo analítico de secuencia negativa para el quinto armónico se muestra en la Fig. 2(a). En la Fig. 2(b) se muestra el circuito equivalente para al lazo de falla.

A partir del desarrollo analítico las siguientes particularidades pueden derivarse del modelo con avería:

- En una red de alimentación con tensiones equilibradas, el armónico de orden cinco contiene solo la componente de secuencia negativa, en la Fig. 2(a) con $\mu_{qd} \tilde{I}_f = 0$. Bajo estas condiciones, las componentes de secuencia positiva del armónico de orden cinco son nulas,

$$\tilde{V}_{sp5} = 0 \rightarrow \tilde{I}_{sp5} = 0 \quad (12)$$

- A partir de las condiciones del punto anterior, una avería en los bobinados de la MI ocasiona componentes de secuencias tanto negativa como positiva. Entonces, desde (3), puede observarse que la corriente de estátor de secuencia positiva es una señal proporcional a la severidad de la falla y cuya magnitud se define de la siguiente manera,

$$\tilde{I}_{sp5} = \frac{1}{3} \mu_{qd} \tilde{I}_f \quad (13)$$

- De (5) y (6), los términos de la resistencia del rotor, $r_r A$ y $r_r B$, respectivamente, presentan en función del deslizamiento ($0 \leq S < 1$) las siguientes características,

$$r_r A = \frac{5}{4+S} r_r \rightarrow \begin{cases} r_r, & \text{si } S = 1 \\ \frac{5}{4} r_r, & \text{si } S \rightarrow 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$r_r B = \frac{5}{6-S} r_r \rightarrow \begin{cases} r_r, & \text{si } S = 1 \\ \frac{5}{6} r_r, & \text{si } S \rightarrow 0 \end{cases} \quad (15)$$

A partir de estas últimas condiciones puede apreciarse que las variaciones de la resistencia equivalente del rotor son acotadas y prácticamente constantes para cualquier estado de carga, entre el estado de rotor bloqueado ($S = 1$) y de rotor libre ($S \rightarrow 0$).

- En un CEE catastrófico definido para $r_f = 0$, ver en la Fig. 2(b), la corriente \tilde{I}_f es limitada solo por los parámetros característicos de la máquina, r_s y L_{ls} , y por la severidad de la avería μ_{qd} . Notar que la tensión de secuencia negativa también es proporcional a la severidad de la falla.

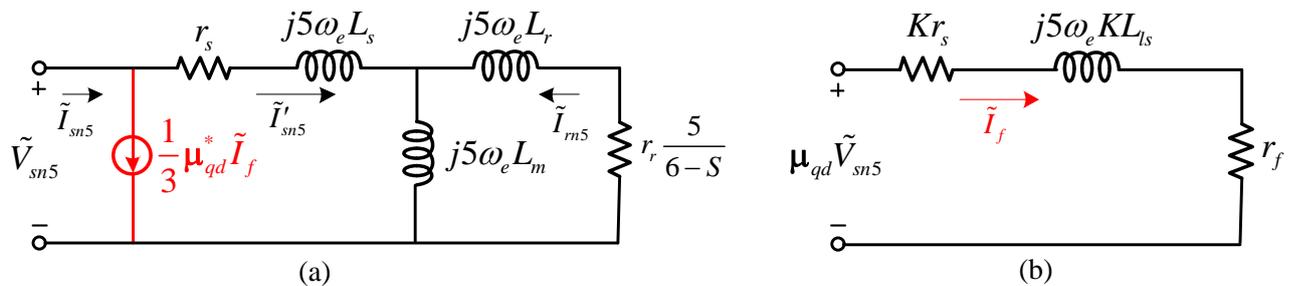


Figura 2: Circuitos equivalentes para el armónico de orden cinco. (a) Componente de secuencia negativa. (b) Circuito de falla.

3 Implementación de filtro de Vold-Kalman para el seguimiento de componentes

El filtro de Vold-Kalman es probablemente el filtro Bayesiano más conocido, presenta la característica de ser un estimador óptimo aún en presencia de ruido en la señal. Funciona en dos etapas: la *primera etapa* es la de *estimación* o *predicción*, en la cual se realiza el cálculo del siguiente valor de la variable estocástica que se está utilizando, y la *segunda etapa* es la de *corrección*, donde se incorpora la información obtenida de la medición real. Para la etapa de predicción es necesario un modelo matemático que describa la evolución de la variable en cuestión. En este trabajo se realiza el seguimiento de las componentes de secuencia fundamental y de quinto armónico de las tensiones y corrientes, lo cual se logra realizando el seguimiento de las señales de cada fase y luego realizando la descomposición en redes de secuencias.

En [17] se pueden encontrar detalles de un modelo matemático para utilizar en el filtro. Dado que el modelo matemático para el filtro de Vold-Kalman depende de la frecuencia de la señal a ser sincronizada, en esta implementación la frecuencia de red se considera constante y de valor para el armónico fundamental $\omega_1 = 2\pi f_1$, siendo $f_1 = 50Hz$.

El modelo en espacio de estados discreto, que representa a una señal considerando la componente fundamental y el armónico de orden cinco, se presenta a continuación:

$$\begin{bmatrix} x_{10^\circ} \\ x_{190^\circ} \\ x_{50^\circ} \\ x_{590^\circ} \end{bmatrix}_{k+1} = \mathbf{A}_d \begin{bmatrix} x_{10^\circ} \\ x_{190^\circ} \\ x_{50^\circ} \\ x_{590^\circ} \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_4 \end{bmatrix}_k \quad (16)$$

$$y_k = \mathbf{C}_d \begin{bmatrix} x_{10^\circ} \\ x_{190^\circ} \\ x_{50^\circ} \\ x_{590^\circ} \end{bmatrix}_k + \nu_k \quad (17)$$

donde, k es el tiempo discreto, x_{10° , x_{50° y x_{190° , x_{590° , corresponden a los estados en fase y en cuadratura para la componente fundamental y para el quinto armónico, respectivamente. Los valores de la matriz γ corresponden al vector de perturbaciones de ruido blanco gaussiano, lo que permite modelar los cambios de amplitud y fase de la señal. Por último, y_k es la salida del modelo, ν_k es ruido blanco gaussiano y representa el ruido de medición. Finalmente \mathbf{A}_d y \mathbf{C}_d se definen según:

$$\mathbf{A}_d = \begin{bmatrix} \cos(\omega_1 T_s) & \sen(\omega_1 T_s) & 0 & 0 \\ -\sen(\omega_1 T_s) & \cos(\omega_1 T_s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\omega_5 T_s) & \sen(\omega_5 T_s) \\ 0 & 0 & -\sen(\omega_5 T_s) & \cos(\omega_5 T_s) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{C}_d = [1 \ 0 \ 1 \ 0] \quad (19)$$

donde $\omega_5 = 2\pi f_5$ con $f_5 = 250Hz$

La aplicación del algoritmo del filtro se reduce a los siguientes tres etapas aplicadas por cada muestra de la señal medida:

1. Cálculo de la Ganancia K_k mediante:

$$K_k = \mathbf{A}_d \mathbf{P}_k \mathbf{C}_d^T (\mathbf{C}_d \mathbf{P}_k \mathbf{C}_d^T + R)^{-1} \quad (20)$$

donde \mathbf{P}_k es una matriz de covarianzas asociada al proceso de predicción y R en este caso es un escalar que corresponde a la covarianza de la medición.

2. Cálculo de los estados estimados \hat{x}_{k+1} dado x_k :

$$\hat{x}_{k+1} = \mathbf{A}_d \hat{x}_k + K_k (S_k - \mathbf{C}_d \hat{x}_k) \quad (21)$$

donde S_k es la señal medida en el instante k .

3. Cálculo de la matriz de covarianzas para la siguiente iteración:

$$\mathbf{P}_{k+1} = \mathbf{A}_d \mathbf{P}_k \mathbf{A}_d^T - K_k \mathbf{C}_d \mathbf{P}_k \mathbf{A}_d^T + \mathbf{Q}; \quad (22)$$

donde \mathbf{Q} es una matriz que tiene la misma dimensión que \mathbf{A}_d y representa las covarianzas del proceso de estimación.

En este punto, los valores de los estados estimados a partir de la ecuación (21) corresponden a las funciones trigonométricas senos y cosenos del armónico fundamental y del quinto, en sincronismo con la señal medida y sin ruido blanco gaussiano. Lo mismo acontece con la señal de salida y_k del filtro, esta señal se encuentra en sincronía y sin el ruido correspondiente a la medición o el ruido de alta frecuencia debido a la conmutación de los dispositivos de electrónica de potencia.

En la Fig. 3a se muestra el resultado de la estimación del filtro de Vold-Kalman (línea de trazos negra) y en la 3b se puede ver en detalle el área correspondiente al rectángulo rojo. Puede observarse la eliminación del ruido en la señal original una vez aplicado el filtro.

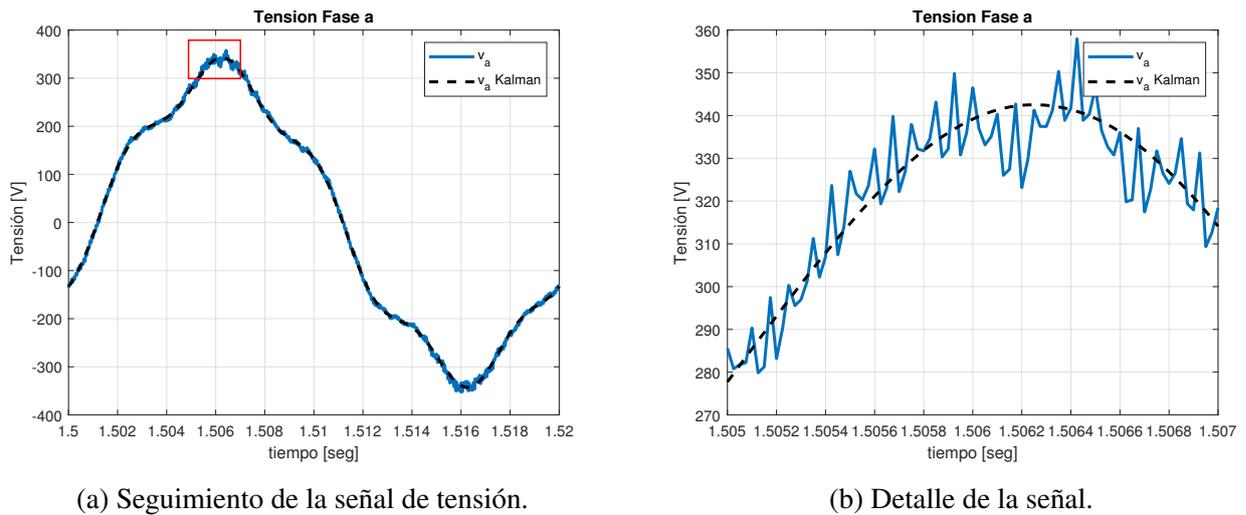


Figura 3: Filtro de Kalman aplicado a la tensión de alimentación de la fase a .

4 Desempeño del filtro de Vold-Kalman y análisis de resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos utilizando el modelo dinámico de la MI con falla presentado en la Sección 2 y el filtro de Vold-Kalman propuesto para el seguimiento de componentes.

En la Fig. 4 se muestran las tensiones y las corrientes instantáneas de la MI luego de ser procesadas con el filtro de Kalman. En la Fig. 4(a) se presentan las tensiones de alimentación con distorsión producto de la inclusión del armónico de orden cinco. Una vez que se aplica el filtro se obtienen las componentes fundamental y de orden cinco de forma separada y para cada fase. De forma similar, en la Fig. 4(b) se presentan las corrientes para la MI en condición de vacío.

A partir de la descomposición de las señales temporales, en la Fig. 5 se muestra la descomposición en secuencia de cada componente. Tanto para la componente fundamental como para el quinto

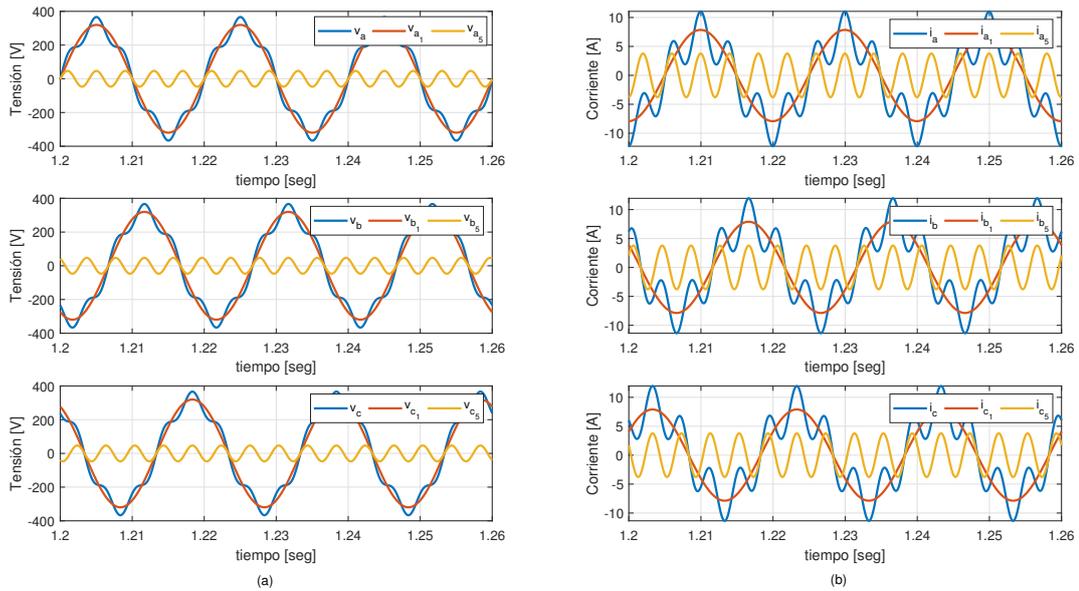


Figura 4: Descomposición en secuencia usando el Filtro de Kalman (a) Tensiones de alimentación. (b) Corrientes de fase

armónico se obtiene las componentes de secuencia positiva y negativa. En la Fig. 5(a) se presentan las componentes de la tensiones de alimentación. Dado que el sistema de alimentación es equilibrado, se observa la componente fundamental de secuencia positiva y la componente de secuencia negativa del armónico cinco. En esta condición, tanto la componente fundamental de secuencia negativa como la componente de secuencia positiva del armónico cinco son nulas. De la misma forma se procesan las corrientes con el filtro para obtener los resultados de corriente que se muestran en la Fig. 5(b). En el caso de las corrientes se observa un comportamiento similar al descrito para las tensiones.

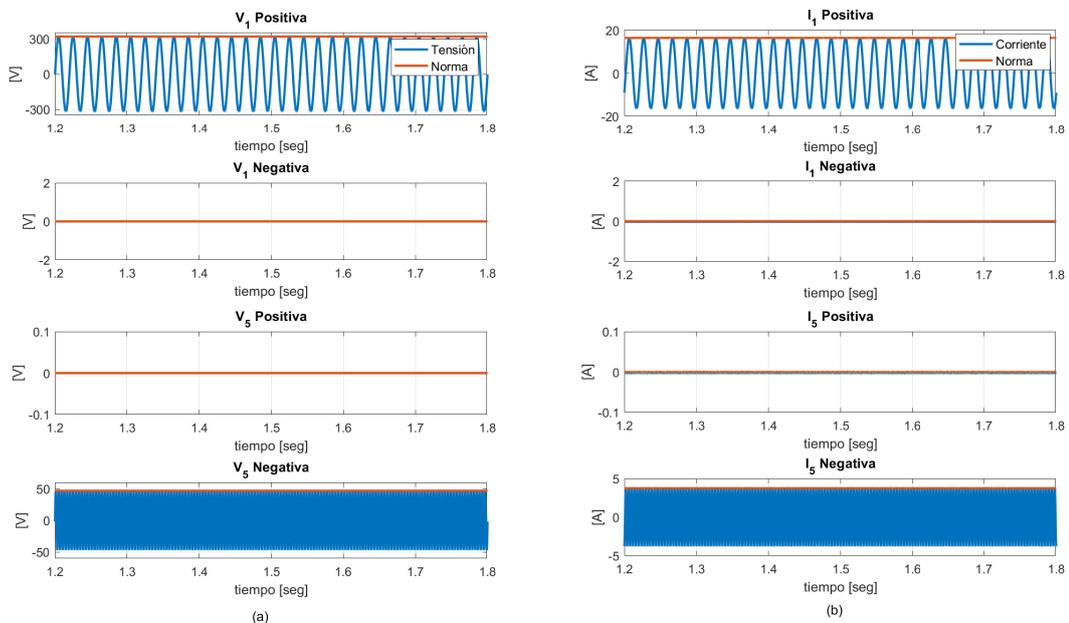


Figura 5: Componentes de secuencias para la MI sin falla. (a) Tensiones. (b) Corrientes

El efecto de un CEE sobre las señales eléctricas se muestra en la Fig. 6. Las tensiones de alimentación se mantienen sin cambio alguno en la Fig. 6(a). Sin embargo, en la Fig. 6(b) las corrientes de

fase se desequilibran debido a la falla que se genera a los 1,3 s. Notar que en todo instante el filtro de Vold-Kalman realiza de manera correcta la separación de cada componente contenida en las señales.

En la Fig. 7 se muestra la descomposición en secuencia de cada componente. Similar a los resultados presentados en la Fig. 5(a), en la Fig. 7(a) las componentes de las tensiones de alimentación se mantienen sin cambio alguno.

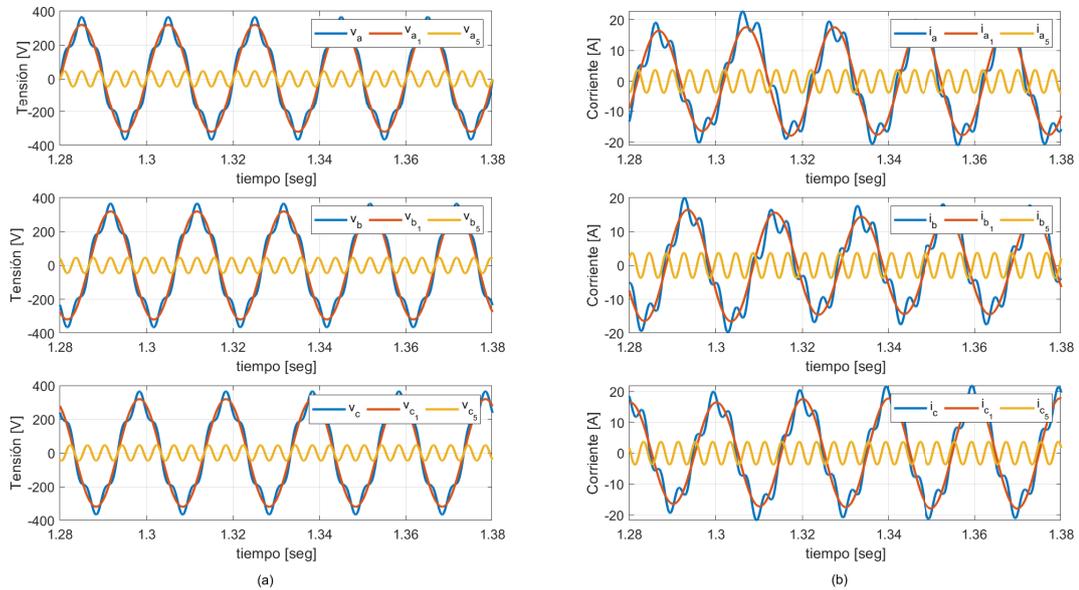


Figura 6: MI con un CEE (a) Tensiones de alimentación. (b) Corrientes de fase

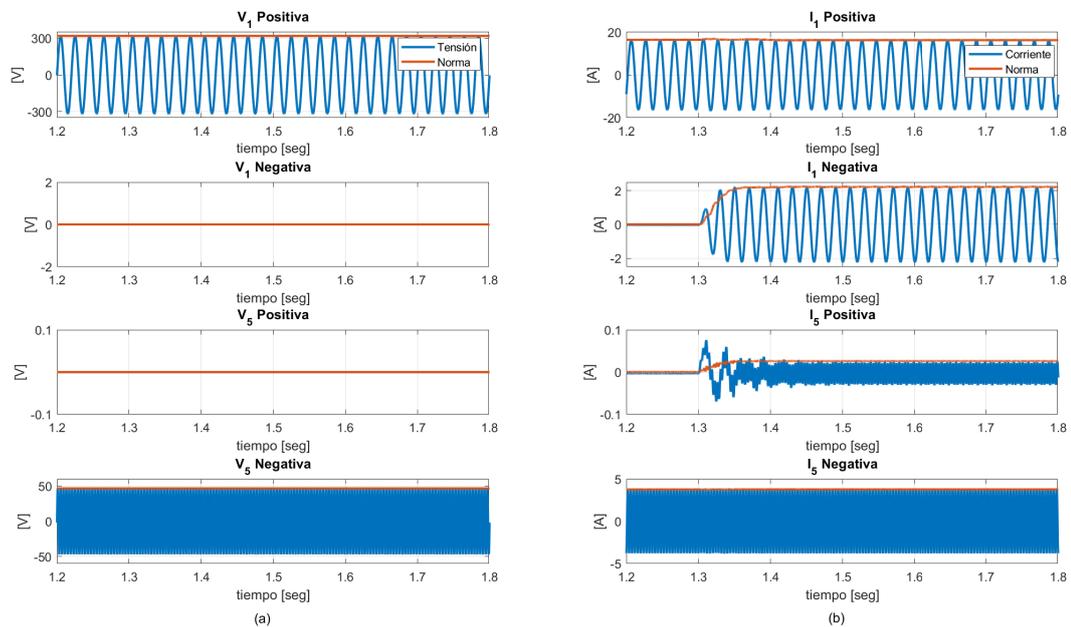


Figura 7: Componentes de secuencias con un CEE. (a) Tensiones. (b) Corrientes

Sin embargo, en la Fig. 7(b) puede notarse que las componentes de corriente sufren variaciones importantes a partir del disparo de la falla a los 1,3 s. Como se mencionó en la Sección 2.2 una avería en los bobinados de la MI ocasiona una componente de secuencia positiva proporcional a la severidad de la falla, ver la ecuación (13). En este caso, la magnitud de la componente indica la presencia de una falla en los bobinados de la MI.

Finalmente, en la Fig. 8 se muestra la MI con falla para dos estados de funcionamiento con el fin de evaluar la robustez del filtro ante transitorios de carga. Desde 1,2 s hasta 1,6 s la MI se encuentra en condición de vacío ($S \rightarrow 0$). A partir de los 1,6 s la máquina se encuentra funcionando a plena carga. En este ensayo el CEE es generado a los 1,3 s. Analizando el comportamiento de la componentes puede notarse el cambio de magnitud sobre la secuencia positiva del quinto armónico a partir del disparo de la falla. Si bien existe un transitorio de carga en 1,6 s, la magnitud de la componente de secuencia positiva no modifica su magnitud. Con respecto a la componente de secuencia negativa se observa que la falla no produce efectos significativos sobre la magnitud del quinto armónico.

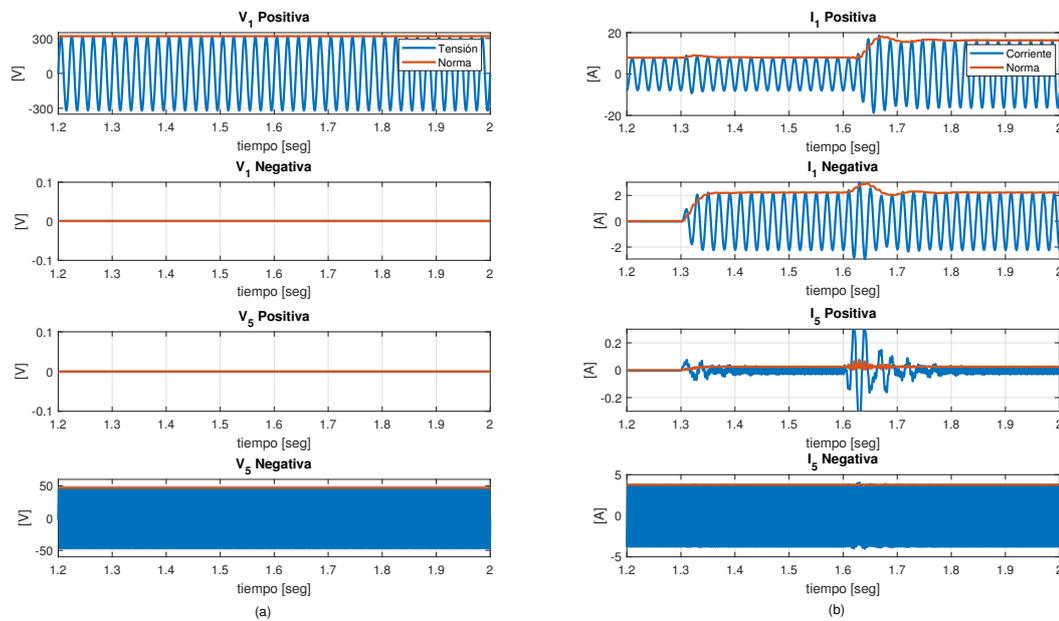


Figura 8: Componentes de secuencias para la MI con un CEE. (a) Tensiones. (b) Corrientes

5 Conclusiones

En este trabajo se presentó una estrategia para la detección de cortocircuitos entre espiras (CEE) en los bobinados de estátor de la Máquina de Inducción (MI) trifásica. En base a un modelo en componentes de secuencia con falla y considerando el h orden armónico en la tensión de alimentación se analizaron los efectos en la corriente de fase. En esta propuesta se implementó un filtro de Vold-Kalman para la estimación de las componentes de secuencia para la componente fundamental y el armónico de orden cinco. El uso de este filtro permite extraer de manera precisa la amplitud y las fase de las componentes analizadas en cada instante de tiempo utilizando los registros de señales, inclusive con altos niveles de ruido. La estrategia de detección propuesta demostró que un CEE puede detectarse mediante el cambio de magnitud del quinto armónico de secuencia positiva en la corriente de estátor.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en el marco del Proyecto de Investigación 16/I1144-IDP acreditado por la Secretaria General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Misiones (UNaM), en conjunto con el Grupo de Electrónica Aplicada (GEA) del IITEMA-CONICET de la Universidad Nacional de Rio Cuarto (UNRC) y gracias al financiamiento otorgado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y la Agencia Nacional de Promoción Investigaciones Científicas y Tecnológicas (ANPCyT).

Referencias

- [1] Secretaría de Energía de la Nación, “Balance Energético Nacional,” Nov. 2019.
- [2] Ministerio de Energía y Minería de la Nación, “Hacia una Visión Compartida de la Transición Energética Argentina al 2050.” Jul. 2019. ISSN 978-987-1560-81-3.
- [3] R. Isermann, *Fault-Diagnosis Applications*, 1st ed. Springer, Verlag, 2011.
- [4] S. Nandi, H. Toliyat, and X. Li, “Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 719–729, Dec 2005.
- [5] C. J. Verucchi and G. G. Acosta, “Fault detection and diagnosis techniques in induction electrical machines,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 5, no. 1, pp. 41–49, March 2007.
- [6] M. A. Mazzoletti, L. N. Pagano, and G. R. Bossio, “Detección de asimetrías en el estátor de los motores de inducción accionados por arrancadores suaves,” in *XV Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control (RPICXV)*, S.C. de Bariloche, Argentina, 2013, pp. 917–922.
- [7] G. D. Yuchechen, M. A. Mazzoletti, and G. R. Bossio, “Effects of stator winding interturn short-circuit faults of the IM by using instantaneous power theory,” in *2018 Argentine Conference on Automatic Control (AADECA)*, Nov 2018, pp. 1–6.
- [8] G. D. Yuchechen and M. A. Mazzoletti, “Efectos de un cortocircuitos entre espiras en bobinados de la máquina de inducción utilizando la teoría de la potencia instantánea,” in *VIII JIDeTEV, Jornadas de Investigación, Desarrollo Tecnológico, Extensión y Vinculación*, Ago. 2018, pp. 1–11.
- [9] —, “Análisis del cortocircuito en bobinados de la máquina de inducción utilizando la teoría de potencia instantánea,” *+Ingenio - Revista de Ciencia Tecnología e Innovación*, vol. 2, no. 1, pp. 54–65, Ago. 2020.
- [10] M. A. Mazzoletti, P. D. Donolo, M. C. Pezzani, M. O. Oliveira, G. R. Bossio, and C. De Angelo, “Stator faults detection on induction motors using harmonic sequence current components analysis,” *IEEE Latin America Transaction*, vol. 19, no. 5, pp. 726–734, 2021.
- [11] P. Krause, O. Wasynczuk, s. Sudhoff, and S. Pekarek, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, 3rd ed. New Jersey, USA: IEEE Press, 2013.
- [12] R. M. Tallam, T. G. Habetler, and R. G. Harley, “Transient model for induction machines with stator winding turn faults,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 3, pp. 632–637, 2002.
- [13] C. H. De Angelo, G. R. Bossio, S. J. Giaccone, M. I. Valla, J. A. Solsona, and G. O. Garcia, “Online model-based stator-fault detection and identification in induction motors,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 11, pp. 4671–4680, 2009.
- [14] S.-B. Lee, R. Tallam, and T. Habetler, “A robust, on-line turn-fault detection technique for induction machines based on monitoring the sequence component impedance matrix,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, no. 3, pp. 865–872, May 2003.
- [15] A. Berzoy, H. H. Eldeeb, and O. A. Mohammed, “On-line detection of stator faults in DTC-driven IM using SC impedance matrix off-diagonal term,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 6, pp. 5906–5915, Nov 2019.
- [16] M. A. Mazzoletti, L. A. Barruffaldi, J. A. Potschka, M. O. Oliveira, and G. R. Bossio, “Steady-state induction machine model with turn faults and voltage harmonics,” in *2018 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, June 2018, pp. 1–6.
- [17] R. Cardoso, R. F. de Camargo, H. Pinheiro, and H. A. Gründling, “Kalman filter based synchronization methods,” in *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2006, pp. 1–7.

- [18] M. A. Mazzoletti, G. D. Yuchechen, M. O. Oliveira, P. D. Donolo, M. C. Pezzani, and G. R. Bossio, “Validación experimental de un modelo de la MI con falla en los bobinados de estátor incluyendo los armónicos de la red,” in *XVIII Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control (RPICXV)*, no. 136, Sep. 2019, pp. 633–638.
- [19] F. Briz, M. W. Degner, J. M. Guerrero, and P. Garcia, “Stator windings fault diagnostics of induction machines operated from inverters and soft-starters using high-frequency negative-sequence currents,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, no. 5, pp. 1637–1646, 2009.