

Effect of model parameter errors in model predictive control applications

Diego Rojas, Marco Rivera, Javier Muñoz, Patrick Wheeler, Pericle Zanchetta, and Galina Mirzaeva

Abstract—When implementing predictive control strategies for power electronic converters a good model of the system is needed because this model determines the quality of the resulting controller. In this paper a study of the model parameter error effects in predictive control applications is presented. The results show that by considering a short sampling time, there can be a significant impact if there are variations in the resistance and inductance values.

Keywords—Model predictive control, Parameter error, RMS error, Total harmonic distortion (THD), Voltage source inverter.

I. INTRODUCCIÓN

EN los últimos años se ha demostrado que el control predictivo es una alternativa viable para el control adecuado de convertidores de potencia [1]. Esto se ha debido fundamentalmente a la simplicidad de la estrategia y la facilidad de poder incluir diferentes objetivos de control dentro de una sola función de costo, lo que ha permitido realizar implementaciones de esta técnica en diferentes tipos de convertidores tales como convertidores matriciales, convertidores multinivel, inversores, entre otras topologías para diferentes aplicaciones [1]–[5].

Pero es importante destacar que el modelo dinámico de un convertidor de potencia es muy importante para el uso de las técnicas de control predictivo. Esto ya que la ecuación de predicción es obtenida directamente de las ecuaciones diferenciales que representan el comportamiento del convertidor y la carga [6]. Por lo tanto, el valor de los parámetros tales como resistencia e inductancia, tienen una incertidumbre o error de precisión entre el valor real con el valor estimado en el modelo del convertidor, los que deben ser considerados a la hora de realizar una implementación de esta técnica de control. Un ejemplo es el valor de la inductancia que varía con respecto a la frecuencia de conmutación en una implementación experimental o el valor de una resistencia que varía con la temperatura.

D. Rojas estudiante del Doctorado en Sistemas de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de Talca, Curicó, Chile (e-mail: diego.rojass@utalca.cl).

M. Rivera, J. Muñoz pertenecen a la Facultad de Ingeniería, Universidad de Talca, Curicó, Chile (e-mail: marcoriv@utalca.cl, jamunoz@utalca.cl).

P. Wheeler, P. Zanchetta pertenecen al Power Electronics, Machines and Control Group, The University of Nottingham, Nottingham, UK (e-mail: Pat.Wheeler@nottingham.ac.uk, Pericle.Zanchetta@nottingham.ac.uk).

G. Mirzaeva pertenece a la School of Electrical Engineering and Computing, The University of Newcastle, Newcastle, Australia (e-mail: Galina.Mirzaeva@newcastle.edu.au).

Todo esto puede producir errores en el punto de resonancia o deteriorar la calidad de potencia de las corrientes en la red.

Por eso, la estrategia de control debe ser robusta ante incertidumbres o variaciones de los valores de los parámetros para obtener un comportamiento adecuado de las variables controladas del convertidor de potencia [7].

Algunos trabajos relacionados al análisis de la incertidumbre de los valores de parámetros son: la evaluación de la sensibilidad para aplicaciones de sistemas fotovoltaicos [8], evaluación del desempeño del controlador [7], análisis de sensibilidad paramétrica en una máquina de inducción [9] y en una máquina síncrona de imanes permanentes [10], [11], análisis de sensibilidad por variación del valor de inductancia [12], entre otros. En [13] se propone un método de identificación de parámetros adaptivo basado en la optimización de descenso de gradiente para un sistema de convertidor conectado a la red. En [14] se propone un observador generalizado con una técnica de control predictivo en corriente para un sistema de accionamiento basado en una máquina de imanes permanentes. La propuesta emplea un observador de estado extendido para estimar las perturbaciones, corrientes y aplica el modelo de sistema aumentado para el diseño del controlador. Una técnica dual de control predictivo basada en la corrección de error adaptivo es propuesta en [15] para inversores fuente de voltaje de cuatro piernas en aplicaciones de microredes, permitiendo mejor desempeño en estado estacionario y con una rápida respuesta antes transientes.

En este trabajo se presentan evaluaciones del efecto de la variabilidad de los valores de los parámetros para un control predictivo basado en modelo. Luego se presentan los resultados obtenidos de MATLAB/Simulink para un control predictivo de corriente en un inversor fuente voltaje ante varios valores del parámetro de inductancia y resistencia en el modelo de discretizado, cambios de referencia de la corriente en la carga y ante varios tiempos de muestreo considerando como medidas de desempeño el error cuadrático medio (RMS) y la distorsión armónica total (THD) de la corriente en la carga.

II. CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELO EN UN INVERSOR FUENTE VOLTAJE

Este tipo de control consiste en una estrategia que usa el modelo matemático del sistema en tiempo discreto para predecir el comportamiento de las variables que se desean regular. El inversor fuente voltaje (VSI) con carga RL se presenta en la Fig. 1 y la estrategia de control predictiva se presenta en la Fig. 2. La ecuación discreta usada para predecir el comportamiento de la corriente en la carga en un inversor fuente voltaje se expresa como

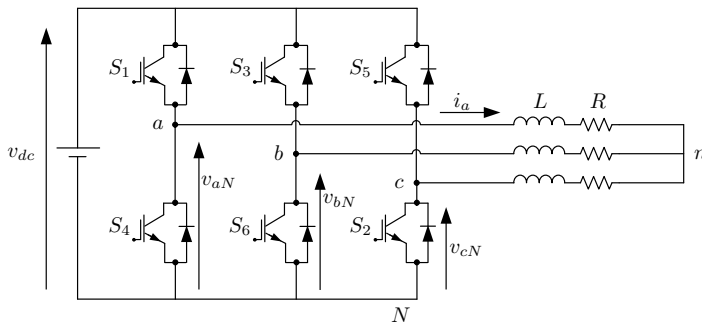


Fig. 1. Circuito de potencia del inversor fuente de voltaje.

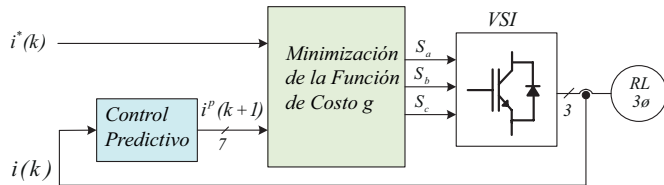


Fig. 2. Esquema de la estrategia de control predictiva.

$$\mathbf{i}(k+1) = \left(1 - \frac{RT}{L}\right) \mathbf{i}(k) + \frac{T}{L} \mathbf{v}(k). \quad (1)$$

La función de costo g en coordenadas $\alpha\beta$ es expresada como

$$g = |i_{\alpha}^* - i_{\alpha}^p| + |i_{\beta}^* - i_{\beta}^p|. \quad (2)$$

donde i_{α}^* y i_{β}^* son las componentes del vector de corriente de referencias \mathbf{i}^* , y en donde i_{α}^p e i_{β}^p son las componentes del vector de corriente en la carga predictiva $\mathbf{i}(k+1)$.

La predicción de la corriente indicada en la ecuación (1) se reescribe de la siguiente forma:

$$\mathbf{i}(k+1) = K_i \mathbf{i}(k) + K_v \mathbf{v}(k). \quad (3)$$

donde $K_i = (1 - RT/L)$ y $K_v = T/L$. R es el valor de la resistencia, L es el valor de la inductancia y T es el tiempo de muestreo. Con la ecuación (3) es posible verificar que una variación en el valor de la resistencia solo afecta al factor K_i ; en cambio, una variación en la inductancia afecta a ambos factores K_i y K_v [7].

III. ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE PARÁMETROS EN EL CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELOS

Una simulación de un control predictivo basado en modelos en un inversor fuente voltaje con carga RL es realizado. El valor nominal de la resistencia es 10Ω , el valor nominal de la inductancia es 10 mH , el tiempo de muestreo T de $70 \mu\text{s}$ y la corriente de referencia de la carga es de 10 A .

Se realizan cuatro variaciones del valor de la inductancia, cuya medida de evaluación del efecto será el error cuadrático medio y el THD de la corriente en la carga.

En primer lugar, se evalúa el efecto de la corriente en la carga con respecto a la variación del valor del parámetro de la inductancia.

Los valores del parámetro de la inductancia en el modelo predictivo son $5, 10, 15$ y 25 mH , manteniendo el valor

de la resistencia de 10Ω . En la Fig. 3 se visualiza la corriente en la carga para distintos valores de la inductancia. Aquí se aprecia que el valor de inductancia que se aleja del valor nominal tiene mayor THD y mayor error RMS. Esto también está resumido en la Tabla I. Es importante destacar que a pesar de estas variaciones, el efecto en el ripple de la corriente es insignificante. La Fig. 4 representa el error entre la corriente de referencia y la corriente en la carga de la fase a ($i_a^* - i_a$) para distintos valores de inductancia, donde los valores más alejados del valor nominal presentan un mayor error. En la Fig. 5 se presenta el voltaje v_{an} que presenta una conmutación del voltaje más distribuido con un menor valor de inductancia, sin embargo a mayor valor de inductancia la conmutación del voltaje es disperso. Es evidente que el controlador elige el mejor vector de voltaje a ser aplicado para mantener el seguimiento de la corriente de referencia a pesar de las diferencias entre el parámetro nominal establecido al controlador y el parámetro real de la inductancia.

La siguiente evaluación consiste en el efecto de la variación del parámetro de la resistencia en el modelo predictivo manteniendo constante el valor de la inductancia. Los valores de resistencia evaluados son de $5, 10, 15$ y 25Ω . El valor nominal de la resistencia es de 10Ω .

La Fig. 6 presenta la forma de onda de la corriente en la carga para distintos valores del parámetro de la resistencia. Se puede apreciar que a un mayor valor de resistencia, el THD de corriente disminuye, pero el error RMS aumenta como es el caso de la Fig. 6c. En la Tabla II se presenta los distintos valores de las medidas de evaluación para distintos valores de resistencia. Al aumentar el valor de la resistencia, el THD va disminuyendo. En cambio, el error RMS aumenta cuando el valor de la resistencia está alejado del valor nominal. En la Fig. 7 se presenta el error entre la corriente de referencia i_a^* y la corriente en la carga i_a para distintos valores de resistencia, donde los valores más alejados del valor nominal presentan un mayor error. En la Fig. 8 se presenta el voltaje v_{an} que no presenta mayor efecto ante variaciones del valor del parámetro resistencia.

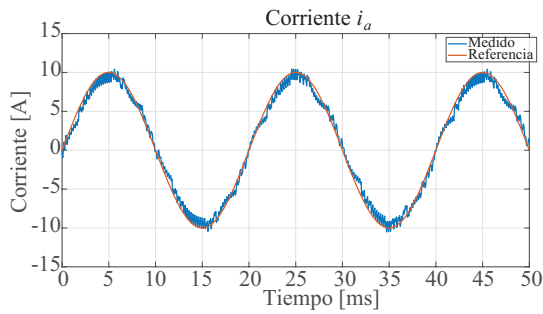
También se evalúa la respuesta dinámica del control predictivo ante variaciones del valor de los parámetros de resistencia e inductancia, realiza un cambio escalón de 10 a 15 A en la corriente en la carga.

TABLA I
ERROR RMS Y THD DE i_a PARA DISTINTOS VALORES DE L .

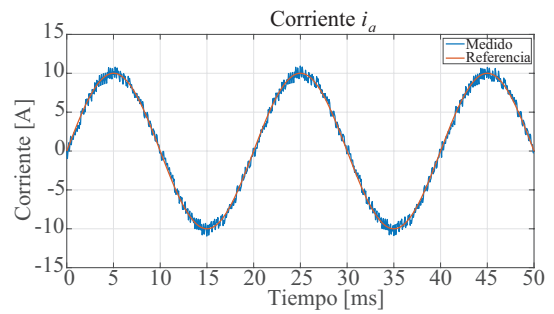
L (mH)	Error RMS	THD i_a
5	0.764	6.93 %
10	0.531	5.83 %
15	0.589	6.08 %
25	0.748	7.52 %

TABLA II
ERROR RMS Y THD DE i_a PARA DISTINTOS VALORES DE R .

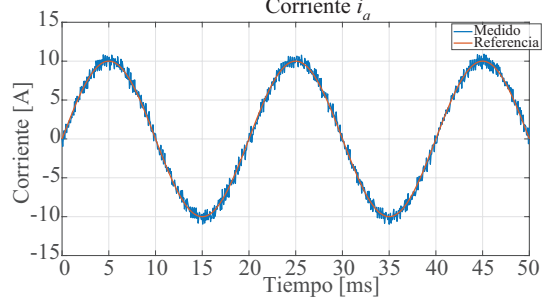
R (Ω)	Error RMS	THD i_a
5	0.617	6.24 %
10	0.531	5.83 %
15	0.564	5.57 %
25	0.965	4.98 %



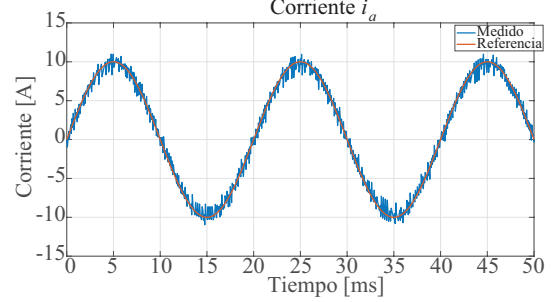
(a) $L = 5 \text{ mH}$.



(b) $L = 10 \text{ mH}$.

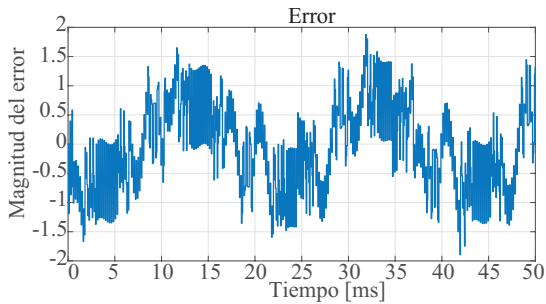


(c) $L = 15 \text{ mH}$.

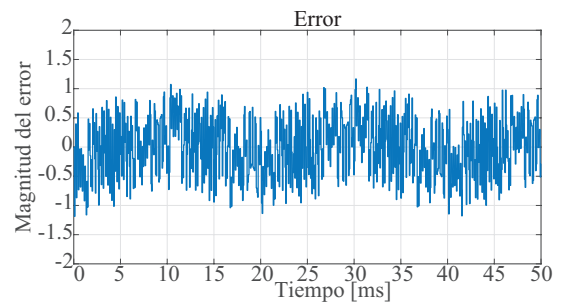


(d) $L = 25 \text{ mH}$.

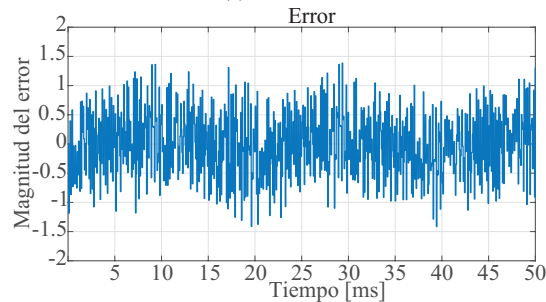
Fig. 3. Corriente i_a para distintos valores del parámetro inductancia L .



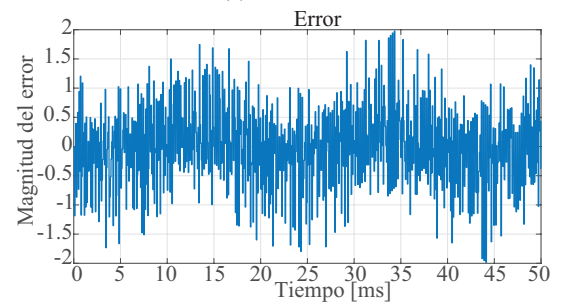
(a) $L = 5 \text{ mH}$.



(b) $L = 10 \text{ mH}$.



(c) $L = 15 \text{ mH}$.



(d) $L = 25 \text{ mH}$.

Fig. 4. Error ($i_a^* - i_a$) para distintos valores del parámetro inductancia L .

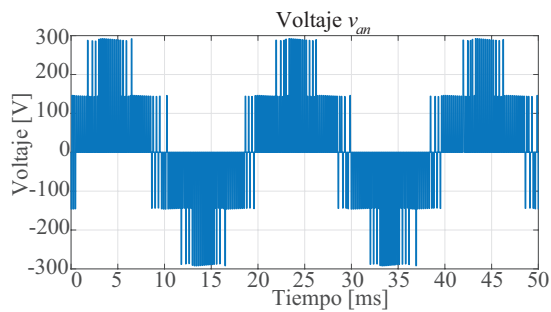
En las Figuras 9 y 10 se presenta la respuesta dinámica de la corriente en la carga. Se observa una rápida respuesta ante cambios de referencia sin mayores cambios ante variaciones del parámetro inductancia y resistencia. Cabe destacar que sólo se produce un cambio en el valor del parámetro resistencia de 25Ω , ya que la corriente no sigue adecuadamente la referencia, debido a que el error RMS es de 0.965.

Finalmente se evalúa el desempeño ante dos tiempos de muestreo diferentes. Los tiempos de muestreo a evaluar son

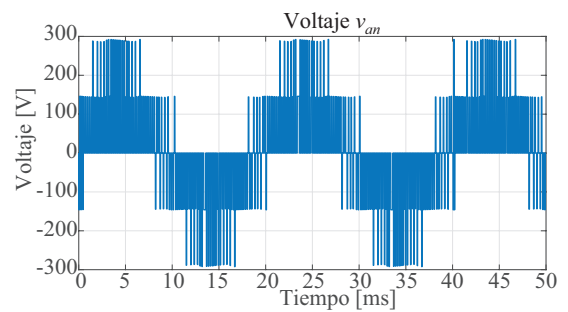
de $200 \mu\text{s}$ y $10 \mu\text{s}$. Las Tablas III y IV presentan los valores de THD y error RMS para los mismos valores de los parámetros de inductancia y resistencia usados anteriormente.

Se destaca en primer lugar, que el THD y el error RMS aumenta considerablemente en comparación a un tiempo de muestreo de $70 \mu\text{s}$.

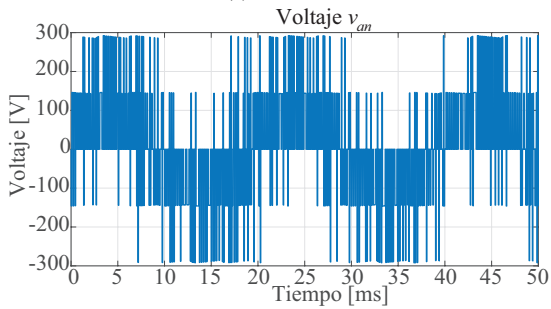
Además cabe destacar que si el valor de la inductancia se aleja del valor nominal, el THD de la corriente aumenta y también el error RMS aumenta en comparación a los valores



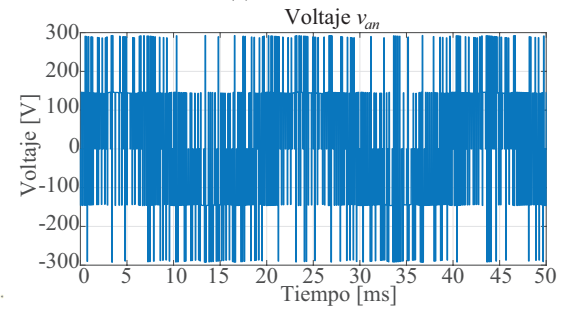
(a) $L = 5 \text{ mH}$.



(b) $L = 10 \text{ mH}$.

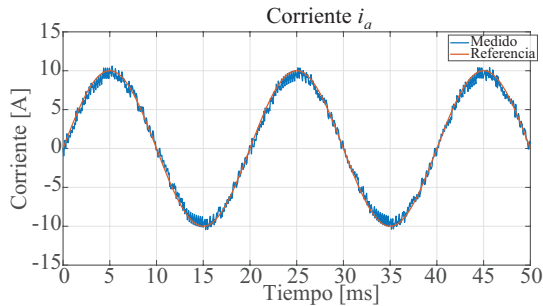


(c) $L = 15 \text{ mH}$.

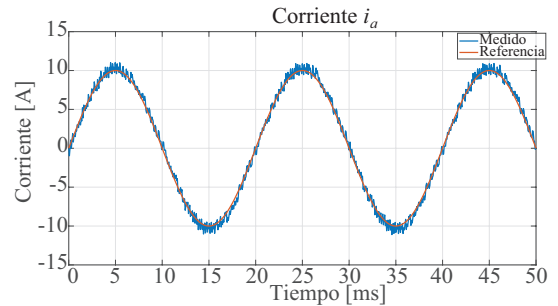


(d) $L = 25 \text{ mH}$.

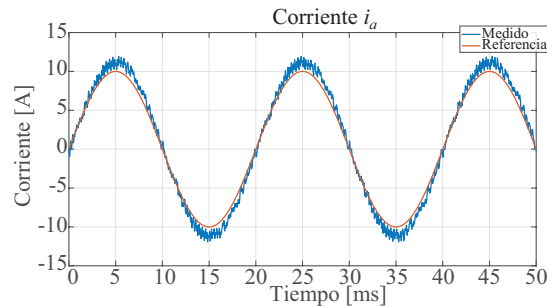
Fig. 5. Voltaje v_{an} para distintos valores del parámetro inductancia L .



(a) $R = 5 \Omega$.



(b) $R = 15 \Omega$.



(c) $R = 25 \Omega$.

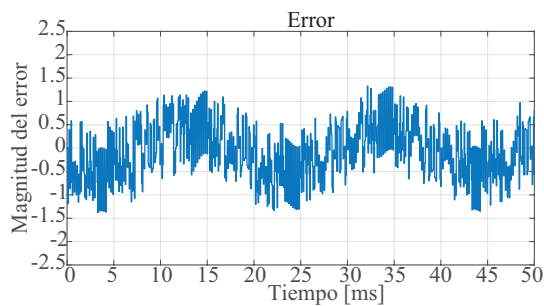
Fig. 6. Corriente i_a para distintos valores del parámetro resistencia R .

TABLA III
ERROR RMS Y THD DE i_a PARA DISTINTOS VALORES DE L CON TIEMPO DE MUESTREO $200 \mu\text{s}$.

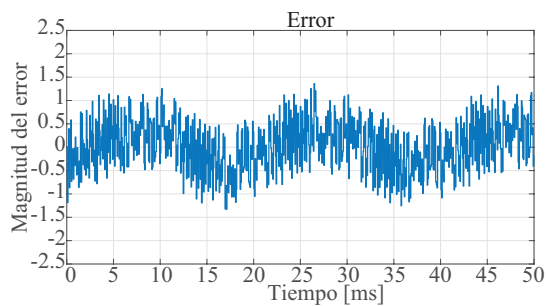
L (mH)	Error RMS	THD i_a
5	2.225	20.62 %
10	1.507	16.22 %
15	1.278	13.99 %
25	1.664	15.91 %

TABLA IV
VALOR DEL ERROR RMS Y THD DE i_a PARA DISTINTOS VALORES DE R CON TIEMPO DE MUESTREO $200 \mu\text{s}$.

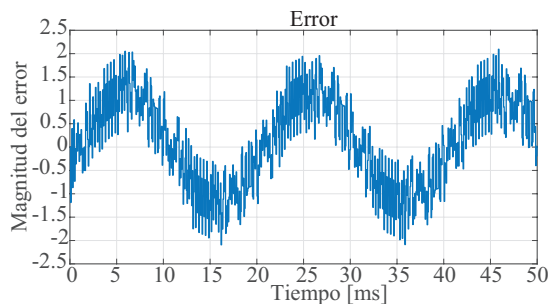
R (Ω)	Error RMS	THD i_a
5	1.664	15.91 %
10	1.507	16.22 %
15	1.541	13.95 %
25	3.239	11.14 %



(a) $R = 5 \Omega$.

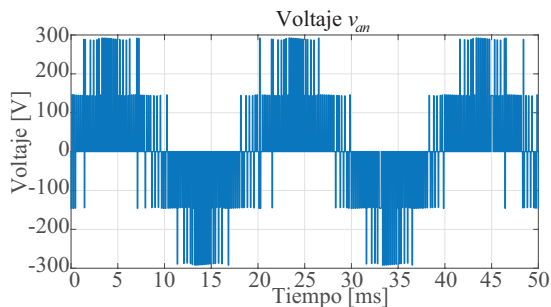


(b) $R = 15 \Omega$.

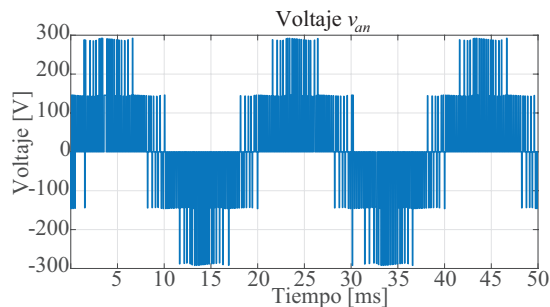


(c) $R = 25 \Omega$.

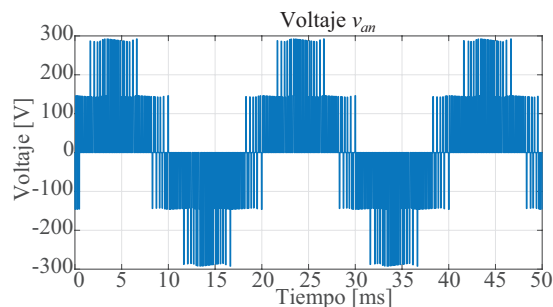
Fig. 7. Error ($i_a^* - i_a$) para distintos valores del parámetro resistencia R .



(a) $R = 5 \Omega$.



(b) $R = 15 \Omega$.



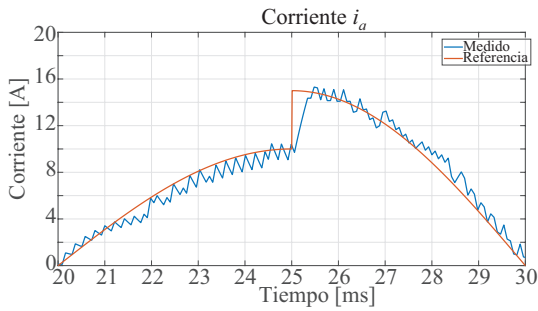
(c) $R = 25 \Omega$.

Fig. 8. Voltaje v_{an} para distintos valores del parámetro resistencia R .

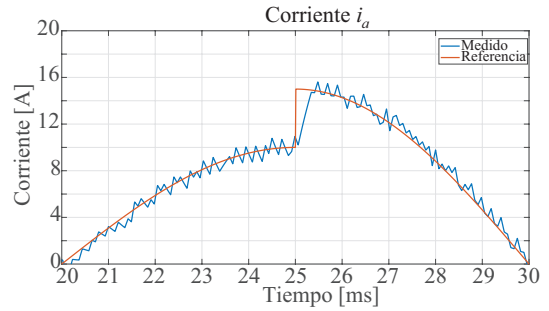
nominales de las medidas de evaluación (situación similar al caso del tiempo de muestreo de $70 \mu s$). El THD de la corriente y el error RMS ante variaciones de resistencia e inductancia no tienen mayor variabilidad para un tiempo de muestreo de $10 \mu s$, en comparación a los otros tiempos de muestreo evaluados. Los valores de las medidas de evaluación son presentados en la Tabla V y en la Tabla VI. Además, cabe mencionar que no hay una mayor variabilidad de los resultados de medición ante variaciones de los parámetros de resistencia e inductancia.

TABLA V
VALOR DEL ERROR RMS Y THD DE i_a PARA DISTINTOS VALORES DE L CON TIEMPO DE MUESTREO $10 \mu s$.

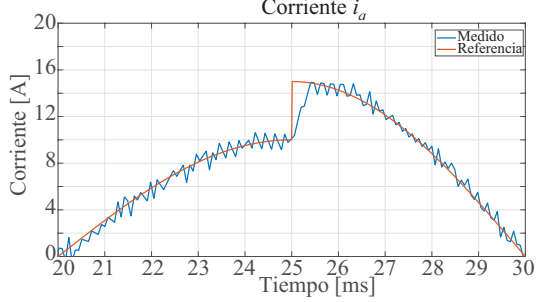
L (mH)	Error RMS	THD i_a
5	0.102	0.98 %
10	0.076	0.87 %
15	0.079	0.86 %
25	0.099	1.05 %



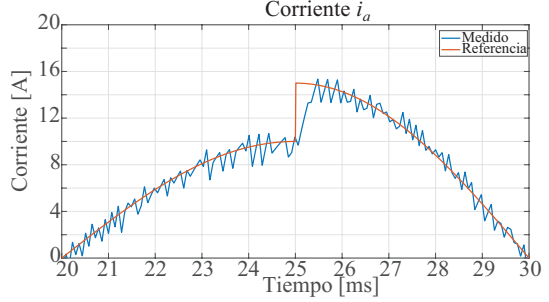
(a) $L = 5 \text{ mH}$.



(b) $L = 10 \text{ mH}$.

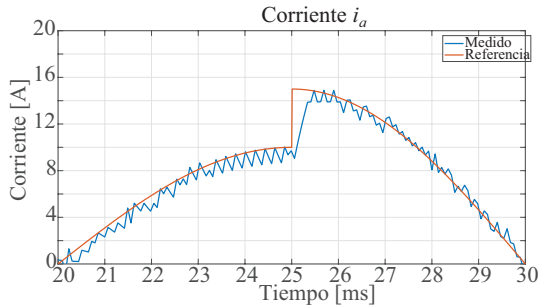


(c) $L = 15 \text{ mH}$.

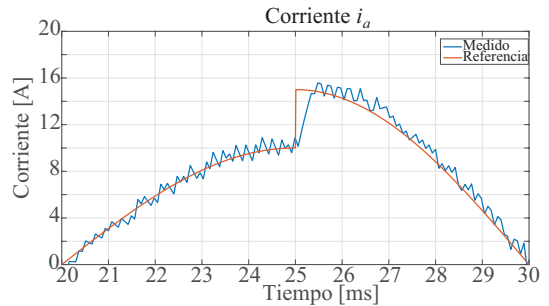


(d) $L = 25 \text{ mH}$.

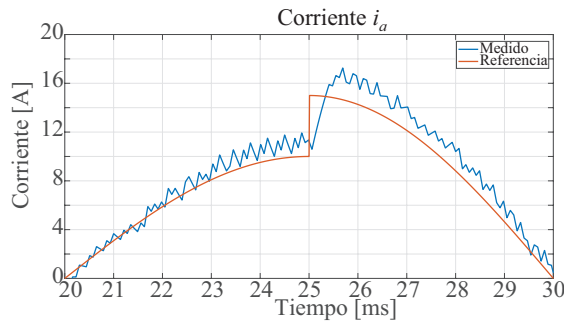
Fig. 9. Corriente i_a ante un cambio de referencia para distintos valores del parámetro inductancia L .



(a) $R = 5 \Omega$.



(b) $R = 15 \Omega$.



(c) $R = 25 \Omega$.

Fig. 10. Corriente i_a ante un cambio de referencia para distintos valores del parámetro resistencia R .

CONCLUSIONES

En este paper se presentó un análisis de sensibilidad ante variaciones o errores de los parámetros de un modelo de un convertidor para un control predictivo. Los parámetros que se evaluaron fueron el valor de la resistencia y el valor de la inductancia usando como medidas de evaluación el error RMS y el THD de la corriente en la carga. Los resultados de simulación aplicando una estrategia de control predictiva de

corriente fueron obtenidos a través de MATLAB/Simulink.

Estos demostraron que para valores de inductancia alejados del valor nominal, el THD y el error RMS aumentan. En cambio, al aumentar la resistencia disminuye el THD de la corriente, pero aumenta considerablemente el error RMS. Además, se demostró que la incertidumbre o variabilidad de los parámetros influyen más en la corriente de carga al aumentar el tiempo de muestreo, influyendo con mayor

TABLA VI
VALOR DEL ERROR RMS Y THD DE i_a PARA DISTINTOS VALORES DE R
CON TIEMPO DE MUESTREO 10 μs .

R (Ω)	Error RMS	THD i_a
5	0.086	0.88 %
10	0.076	0.87 %
15	0.084	0.87 %
25	0.127	0.84 %

impacto al THD de la corriente y al error RMS. Además, se concluye que la inductancia es más sensible en comparación con la resistencia en función del THD de la corriente i_a .

Sin embargo, no tiene un efecto significativo en la respuesta dinámica, manteniendo la rápida respuesta que destaca el control predictivo basado en modelos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Gobierno de Chile bajo los proyectos ANID/FONDECYT/1191028, ANID/MEC80190074, ANID/MEC80180097, Beca ANID de Doctorado Nacional 21201878 y SERC Chile (ANID/FONDAP/15110019).

REFERENCIAS

- [1] S. Vazquez, J. Rodriguez, M. Rivera, L. G. Franquelo, and M. Norambuena, "Model predictive control for power converters and drives: Advances and trends," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 2, pp. 935–947, 2017.
- [2] H. Dan, P. Zeng, W. Xiong, M. Wen, M. Su, and M. Rivera, "Model predictive control-based direct torque control for matrix converter-fed induction motor with reduced torque ripple," *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 90–99, 2021.
- [3] X. Wang, G. Liu, Q. Chen, A. Farahat, and X. Song, "Multi-vectors model predictive control with voltage error tracking for five-phase pmsm short-circuit fault-tolerant operation," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, pp. 1–1, 2021.
- [4] Q. Xiao, Y. Jin, H. Jia, Y. Mu, Y. Ji, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "Modulated model predictive control for multilevel cascaded h-bridge converter based statcom," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 1–1, 2021.
- [5] Y. Xu, Y. He, H. Li, and X. Haifeng, "Model predictive control using joint voltage vector for quasi z-source inverter with ability of suppressing current ripple," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, pp. 1–1, 2021.
- [6] *Model Predictive Control*. John Wiley & Sons, Ltd, 2012, ch. 3, pp. 31–39. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119941446.ch3>
- [7] *Effect of Model Parameter Errors*. John Wiley & Sons, Ltd, 2012, ch. 13, pp. 191–202. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119941446.ch13>
- [8] M. Metry, M. B. Shadmand, R. S. Balog, and H. A. Rub, "Sensitivity analysis to model parameter errors of mppt by model predictive control for photovoltaic applications," in *2015 First Workshop on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE)*, 2015, pp. 1–6.
- [9] J. V. Painen-Paillalef and N. H. Aros-Oñate, "Parametric sensitivity analysis of an induction machine with predictive control," in *2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, Nov 2019, pp. 1–7.
- [10] S. Wang, Y. Hu, J. Zhao, and Y. Zhang, "Parameter robustness improvement of predictive current control for permanent-magnet synchronous motors," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, pp. 1–1, 2021.
- [11] X. Li, Q. Yang, W. Tian, P. Karamanakos, and R. Kennel, "A dual reference frame multistep direct model predictive current control with a disturbance observer for spmsm drives," *IEEE Transactions on Power Electronics*, pp. 1–1, 2021.
- [12] Zhixian Deng and Wensheng Song, "Inductance sensitivity analysis of model predictive direct current control strategies for single-phase pwm converters," in *2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEC)*, 2015, pp. 1–6.
- [13] B. Long, Z. Zhu, W. Yang, K. T. Chong, J. Rodriguez, and J. M. Guerrero, "Gradient descent optimization based parameter identification for fcs-mpc control of lcl-type grid connected converter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 1–1, 2021.
- [14] X. Li, W. Tian, X. Gao, Q. Yang, and R. Kennel, "A generalized observer-based robust predictive current control strategy for pmsm drive system," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 1–1, 2021.
- [15] D. Ma, X. Cao, C. Sun, R. Wang, Q. Sun, X. Xie, and P. Wang, "Dual-predictive control with adaptive error correction strategy for ac microgrids," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1–1, 2021.