

Figura 6. Test 1 estacionario para DTC clásico (columna de la izquierda) y DTC basado en VVs (columna de la derecha). De arriba abajo: a) velocidad mecánica, b) par electromagnético, c) módulo del flujo $\alpha\text{-}\beta$ del estator, d) corrientes x-y, e) corrientes de fase a_1 y a_2 , f) corrientes $\alpha\text{-}\beta$ y g) espectro de frecuencia de la corriente de la fase a_1 .

Tabla 3. Vectores de tensión para control de par.

H_s	H_{Te}	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}
+1	+1	V_{54}	V_{22}	V_{18}	V_{26}	V_{27}	V_{11}	V_9	V_{41}	V_{45}	V_{37}	V_{36}	V_{52}
+1	-1	V_{45}	V_{37}	V_{36}	V_{52}	V_{54}	V_{22}	V_{18}	V_{26}	V_{27}	V_{11}	V_9	V_{41}
+1	0	V_0	V_{13}	V_0	V_{13}	V_0	V_{13}	V_0	V_{13}	V_0	V_{13}	V_0	V_{13}
-1	+1	V_{18}	V_{26}	V_{27}	V_{11}	V_9	V_{41}	V_{45}	V_{37}	V_{36}	V_{52}	V_{54}	V_{22}
-1	-1	V_9	V_{41}	V_{45}	V_{37}	V_{36}	V_{52}	V_{54}	V_{22}	V_{18}	V_{26}	V_{27}	V_{11}
-1	0	V_{13}	V_0	V_{13}	V_0	V_{13}	V_0	V_{13}	V_0	V_{13}	V_0	V_{13}	V_0

Una vez validado el funcionamiento en régimen estacionario del control directo de par basado en vectores virtuales, se pasa a validar el funcionamiento dinámico del mismo. En el test 2 la velocidad de referencia sigue el perfil de una rampa, cambiando el valor de referencia de la misma de 350 rpm en $t=10s$ a 500 rpm en $t=11s$ (ver Figura 7a). El cambio en la velocidad de referencia implica un cambio en el par de referencia. En Figura 7b se puede observar cómo el seguimiento del par de referencia es adecuado. El flujo magnético de referencia permanece constante y su regulación también es realizada satisfactoriamente como se muestra en la Figura 7c. Por último, se representan en la Figura 7d las corrientes x-y, las cuales son prácticamente nulas también en este ensayo dinámico gracias a la utilización de los VVs.

Tabla 4. THD de las corrientes de fase para diferentes DTC.

Estrategia de control	THD (%)
DTC clásico	64,29
DTC basado en VVs	17,29

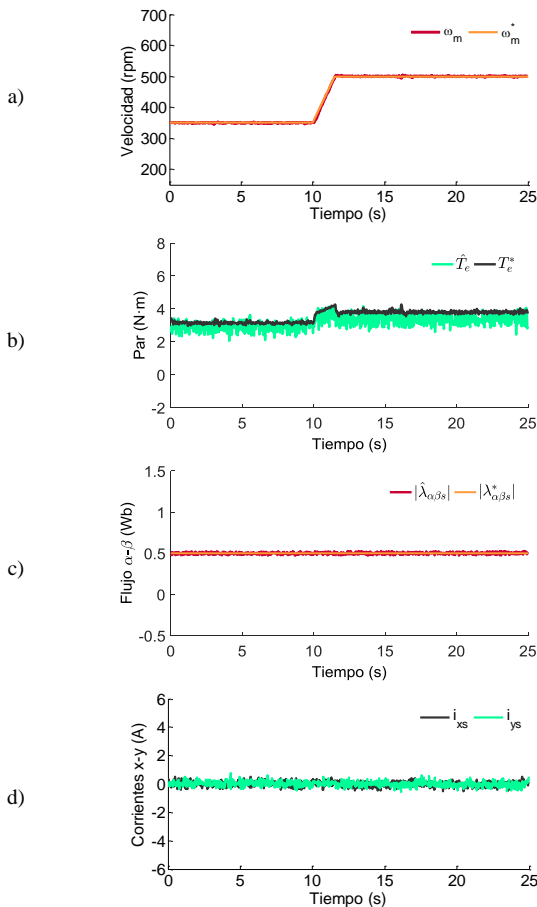


Figura 7: Test 2 ensayo dinámico de velocidad con DTC basado en VVs. De arriba a abajo: a) velocidad mecánica, b) par electromagnético, c) módulo del flujo α - β del estator y d) corrientes x-y.

Por último, un test con variación de par y velocidad constante es realizado en la Figura 8. En $t=9,6s$ se impone un escalón en el par de carga, que implica unos valores del par de referencia de 2,75 y 1,75 Nm antes y después del mismo (ver Figura 8b). A pesar de la repentina variación del par de carga, el control de la velocidad sólo se ve afectado ligeramente durante una breve fracción de tiempo, tal y como se muestra en la Figura 8a. La regulación del flujo magnético no se ve afectada por la variación del par de carga, validando de esta manera la regulación independiente de estas dos variables de control, tal y como reflejan las Figuras 8b y 8c. Por otro lado, cuando se reduce el par de carga, también lo hace la amplitud de las corrientes α - β encargadas de su producción (ver Figura 8f) y, por lo tanto, también lo hacen las corrientes de fase (ver Figura 8e). Mientras, las corrientes x-y permanecen constantes con un valor prácticamente nulo gracias a la aplicación de los VVs implementados en el esquema de control directo de par.

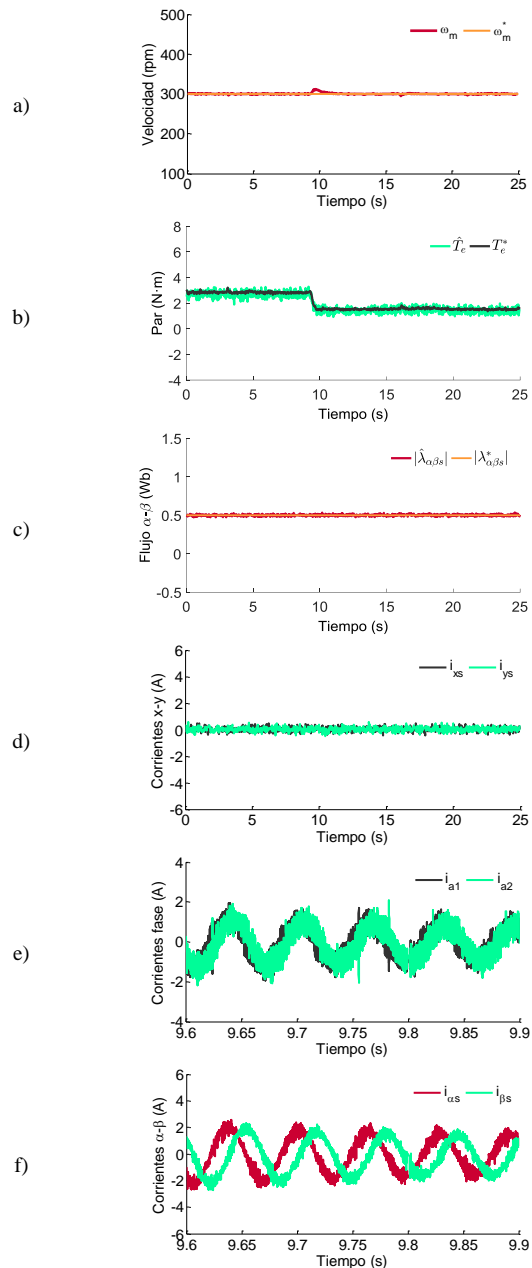


Figura 8: Test 3 ensayo dinámico de par con velocidad constante para DTC basado en VVs. De arriba a abajo: a) velocidad mecánica, b) par electromagnético, c) módulo del flujo α - β del estator, d) corrientes x-y, e) corrientes de las fases a_1 y a_2 y f) corrientes α - β .

En resumen, el control directo de par basado en vectores virtuales combina las ventajas del control directo de par (simplicidad, robustez y buena respuesta dinámica) y las de los sistemas multifásicos. La bondad del método ha quedado validada en esta sección con la obtención de resultados experimentales de tres test experimentales estándares, en los cuales el esquema de control propuesto ha presentado un comportamiento satisfactorio.

5. Conclusiones

Los sistemas multifásicos se presentan como una alternativa atractiva en aquellas aplicaciones industriales que requieren unas prestaciones que no pueden ser proporcionadas por los sistemas trifásicos convencionales. Por ello, el desarrollo de esquemas de control para este tipo de sistemas es un tema de investigación recurrente en los últimos años. La implementación de uno de los métodos estándares trifásicos como es el control directo de par para sistemas multifásicos de seis fases basado en vectores virtuales ha sido analizada y validada de manera satisfactoria en este trabajo. Las prestaciones del método han sido probadas con una serie de test experimentales. La implementación de los vectores virtuales se ha presentado como una solución real al problema de la minimización de las componentes x - y en el control directo de par en uno de los sistemas multifásicos con mejores visos de implantación industrial.

Referencias

- Abdel-Khalik, A.S., Masoud, M.I. y Williams, B.W. 2012. Improved flux pattern with third harmonic injection for multiphase induction machines. *IEEE Transactions on Power Electronics* 27, No. 3, 1563-1578.
- Abdel-Khalik, A.S., Masoud, M.I. y Williams, B.W. 2012. Vector controlled multiphase induction machine: harmonic injection using optimized constant gains. *Electric Power Systems Research* 89, 116-128.
- Alcharea, R., Kianinezhad, R., Nahid-Mobarakeh, B., Betin, F. y Capolino, G.A. 2008. Direct torque control for six-phase symmetrical induction machines. 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics.
- Arahal, M.R. y Durán, M.J. 2009. PI tuning of five-phase drives with third harmonic injection. *Control Engineering Practice* 17, 787-797.
- Arnanz, R., García, F.J. y Miguel, L.J. 2016. Métodos de control de motores de inducción: síntesis de la situación actual. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 13, 381-392.
- Barrero, F. y Durán, M.J. 2016. Recent advances in the design modeling, and control of multiphase machines – Part I. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 63, No. 1, 449-458.
- Benatmane, M. y McCoy, T. 1998. Development of a 19 MW PWM converter for U.S. Navy surface ships. *Proc. Int. Conf. ELECSHIP, Istanbul, Turkey*, 109-113.
- Bermúdez, M., González-Prieto, I., Barrero, F., Guzmán, H., Durán, M.J. y Kestelyn, X. 2017. Open-phase fault-tolerant direct torque control technique for five-phase induction motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 64, No. 2, 902-911.
- Bojoi, R., Levi, E., Farina, F., Tenconi, A. y Proumo, F. 2006. Dual three-phase induction motor drive with digital current control in the stationary reference frame. *IEEE Proceedings Electric Power Applications* 153, No. 1, 29-139.
- Che, H.S., Levi, E., Jones, M., Hew, W.P. y Rahim, N.A. 2014a. Current control methods for an asymmetrical six-phase induction motor drive. *IEEE Transactions on Power Electronics* 29, No. 1, 407-417.
- Che, H.S., Levi, E., Jones, M., Durán, M.J., Hew, W.P. y Rahim, N.A. 2014b. Operation of a six-phase induction machine using series-connected machine-side converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 61, No. 1, 164-176.
- Che, H.S., Durán, M.J., Levi, E., Jones, M., Hew, W.P. y Rahim, N.A. 2013. Post-fault operation of an asymmetrical six-phase induction machine with single and two isolated neutral points. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 1131-1138.
- Cortés, P., Kazmierkowski, M.P., Kennel, R.M., Quevedo, D.E. y Rodríguez, J. 2008. Predictive control in power electronics and drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 55, No. 12, 4312-4324.
- Durán, M.J., Riveros, J.A., Barrero, F., Guzmán, H. y Prieto, J. 2012. Reduction of common-mode voltage in five-phase induction motor drives using predictive control techniques. *IEEE Transactions on Industrial Applications* 48, No. 6, 2059-2067.
- Durán, M.J. y Barrero, F. 2016. Recent Advances in the design modeling, and control of multiphase machines – Part II. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 63, No. 1, 459-468.
- Ferreira, C.L. y Bucknall, R.W.G. 2004. Modelling and real-time simulation of an advanced marine full-electrical propulsion system. *Proc. IEEE PEMD Conference, Edinburgh, U.K.*, 2, No. 498, 574-579.
- Gamesa Technological Corporation S.A., 2016. Gamesa 5.0 MW. Recuperado de: <http://www.gamesacorp.com/recursos/doc/productos-servicios/aerogeneradores/catalogo-g10x-45mw.pdf>
- Gao, L., Fletcher, J.E. y Zheng, L. 2011. Low-speed control improvements for a two-level five-phase inverter-fed induction machine using classic direct torque control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 58, No. 7, 2744-2754.
- González, O., Rodas, J., Ayala, M., Gregor, R., Rivera, M., Durán, M. y González-Prieto, I. 2016. Predictive current control with kalman filter observer for a five-phase induction machine operating at fixed switching frequency.
- González-Prieto, I., Durán, M.J., Barrero, F., Bermúdez, M. y Guzmán, H. 2017. Impact of postfault flux adaptation on six-phase induction motor drives with parallel converters. *IEEE Transactions on Power Electronics* 32, No. 1, 515-528.
- González-Prieto, I., Durán, M.J., Che, H.S., Levi, E., Bermúdez, M. y Barrero, F. 2016. Fault-tolerant operation of six-phase energy conversion systems with parallel machine-side converters. *IEEE Transactions on Power Electronics* 31, No. 4, 3068-3079.
- González-Prieto, I., Durán, M.J. y Barrero, F. 2016. Fault-tolerant control of six-phase induction motor drives with variable current injection. *IEEE Transactions on Power Electronics*.
- Gregor, R., Rodas, J., Gregor, D. y Barrero, F. 2015. Reduced-order observer analysis in MBPC techniques applied to the six-phase induction motor drives. *INTECH Open Science*.
- Guzmán, H., Durán, M.J. y Barrero, F. 2012. A comprehensive fault analysis of a five-phase induction motor drive with an open phase. 15th International Power Electronics and Motion Control Conference, LS5b.3-1 – LS5b.3-6.
- Guzmán, H., Durán, M.J., Barrero, F., Bogado, B. y Toral, S. 2014. Speed control of five-phase induction motors with integrated open-phase fault operation using model-based predictive current control techniques. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 61, No. 9, 4474-4484.
- Guzmán, H., Durán, M.J., Barrero, F., Zarri, L., Bogado, B., González-Prieto, I. y Arahal, M.R. 2016. Comparative study of predictive and resonant controllers in fault-tolerant five-phase induction motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 63, No. 1, 606-617.
- Hodge, C., Williamson, S. y Smith, A.C. 2002. Direct drive marine propulsion motors. *Proc. Int. Conf. Electrical Machines (ICEM), Bruges, Belgium, CD-ROM, Paper 807*.
- Jones, M., Slobodan, N., Vukosavic, S., Dujic, D. y Levi, E. 2009. A synchronous current control scheme for multiphase induction motor drives. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 24, No. 4, 860-868.
- Jung, E., Yoo, H., Sul, S., Choi, H. y Choi, Y. 2012. A nine-phase permanent-magnet motor drive system for an ultrahigh-speed elevator. *IEEE Transactions on Industrial Applications* 48, No. 3, 987-995.
- Khan, M.R., Iqbal, A. y Ahmad, M. 2008. MRAS-based sensorless control of a vector controlled five-phase induction motor drive. *Electric Power Systems Research* 78, 1311-1321.
- Kianinezhad, R., Nahid, B., Betin, F. y Capolino, G.A. 2006. A novel direct torque control (DTC) method for dual three phase induction motors. *IEEE International Conference on Industrial Technology*.
- Kianinezhad, R., Alcharea, R., Nahid, B., Betin, F. y Capolino, G.A. 2008. A novel direct torque control (DTC) for six-phase induction motors with common neutrals. *IEEE International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*.
- Kouro, S., Cortés, P., Vargas, R., Ammann, U. y Rodríguez, J. 2009. Model predictive control – a simple and powerful method to control power converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 56, No. 6, 1826-1838.
- Levi, E. 2016. Advances in converter control and innovative exploitation of additional degrees of freedom for multiphase machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 63, No. 1, 433-448.
- Libo, Z., Fletcher, J.E., Williams, B.W. y Xiangning, H. 2008. Dual-plane vector control of a five-phase induction machine for an improved flux

- pattern. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 55, No. 5, 1996-2005.
- Lu, S. y Corzine, K. 2005. Multilevel multi-phase propulsion drives. *Proc. IEEE ESTS*, Philadelphia, PA, 363-370.
- Martín, C., Arahal, M.R., Barrero, F. y Durán, M.J. 2016. Five-phase induction motor rotor current observer for finite control set model predictive control of stator current. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 63, No. 7, 4527-4538.
- McCoy, T. y Benatmane, M. 1998. The all-electric warship: An overview of the U.S. Navy's integrated power system development programme. *Proc. Int. Conf. ELECSHIP*, Istanbul, Turkey, 1-4.
- Mengoni, M., Zarri, L., Tani, A., Parsa, L., Serra, G. y Casadei, D. 2015. High-torque density control of multiphase induction motor drives operating over a wide speed range. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 62, No. 2, 814-825.
- Munim, W.N.W.A., Durán, M.J., Che, H.S., Bermúdez, M. y González-Prieto, I. 2016. A unified analysis of the fault tolerance capability in six-phase induction motor drive. *IEEE Transactions on Power Electronics*, PP.
- Pandit, J.K., Aware, M.V., Nemade, R.V. y Levi, E. 2017. Direct torque control scheme for a six-phase induction motor with reduced torque ripple. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 32, No. 9, 7118-7129.
- Ren, Y. y Zhu, Z.Q. 2015a. Enhancement of steady-state performance in direct-torque-controlled dual three-phase permanent-magnet synchronous machine drives with modified switching table. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 62, No. 6, 3338-3350.
- Ren, Y. y Zhu, Z.Q. 2015b. Reduction of both harmonic current and torque ripple for dual three-phase permanent-magnet synchronous machine using modified switching-table-based direct torque control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 62, No. 11, 6671-6683.
- Ríos-García, N., Durán, M.J., González-Prieto, I., Martín, C. y Barrero, F. 2017. An open-phase fault detection method for six-phase induction motor drives. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*.
- Riveros, A., Yepes, A.G., Barrero, F., Doval-Gandoy, J., Bogado, B., López, O., Jones, M. y Levi, E. parameter identification of multiphase induction machines with distributed windings—Part 2: time-domain techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 27, No. 4, 1067-1077, 2012.
- Simoes, M.G. y Vieira, P. 2002. A high-torque low-speed multiphase brushless machine – A perspective application for electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 49, No. 5, 1154-1164.
- Singh, G.K., Nam, K. y Lim, S.K. 2005. A simple indirect field-oriented control scheme for multiphase induction machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 52, No. 4, 1177-1184.
- Smith, S. 2002. Developments in power electronics, machines and drives. *IEEE Power Engineering Journal* 16, No. 1, 13-17.
- Sudhoff, S.D., Alt, J.T., Hegner, N.J. y Robey, H.N. Jr. 1997. Control of a 15-phase induction motor drive system. *Proc. Naval Symp. Electr. Mach.*, Newport, RI, 69-75.
- Taheri, A. 2016. Harmonic reduction of direct torque control of six-phase induction motor. *ISA Transactions* 63, 299-314.
- Tani, A., Mengoni, M., Zarri, L., Serra, G. y Casadei, D. 2012. Control of multiphase induction motors with an odd number of phases under open-circuit phase faults. *IEEE Transactions on Power Electronics* 27, No. 2, 565-577.
- Terrien, F., Siala, S. y Noy, P. 2004. Multiphase induction motor sensorless control for electric ship propulsion. *Proc. IEEE PEMD Conference*, Edinburgh, U.K., 2, No. 498, 556-561.
- Vukosavic, S., Jones, M., Levi, E. y Varga, J. 2005. Rotor flux oriented control of a symmetrical six-phase induction machine. *Electric Power Systes Research* 75, No. 2/3, 142-152.
- Yaramasu, V., Dekka, A., Durán, M.J., Kouro, S. y Wu, B. 2017. PMSG-based wind energy conversion systems: survey on power converters and control. *IET Electric Power Applications*.
- Yepes, A.G., Malvar, J., Vidal, A., López, O. y Doval-Gandoy, J. 2015. Current harmonic compensation based on multiresonant control in synchronous frame for symmetrical n-phase machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 62, No. 5, 2708-2720.
- Zhao, Y. y Lipo, T.A. 1995. Space vector PWM control of dual three-phase induction machine using vector space decomposition. *IEEE Transactions on Industry Applications* 31, No. 5, 1100-1109.
- Zheng, L., Fletcher, J.E., Williams, B.W. y He, X. 2011. A novel direct torque control scheme for a sensorless five-phase induction motor drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 58, No. 2, 503-513.