

직접 토크제어에 의한 유도전동기 토크맥동 저감 시스템

김남훈*, 김민호*, 김민회**, 김동희*, 황돈하***
*영남대학교, **영남이공대학, ***한국전기 연구원

A Torque Ripple Reduction System of Induction Motor with Direct Torque Control

Nam-Hun Kim, Min-Ho Kim, Min-Huei Kim, Dong-Hee Kim, Don-Ha Hwang
*Yeungnam University, **Yeungnam College of S & T, ***KERI

ABSTRACT

Direct torque control(DTC) is known to produce quick response in ac drives. Some drawbacks of the classical DTC are the relatively large torque ripple in a low speed range and notable current pulsation during steady state. They are reflected speed response and increased acoustical noise. In this paper, The DTC quick response are preserved at transient state, while better quality steady state performance is produced by Space Vector Modulation(SVM). It is able to reduce the acoustical noise, torque ripple and current pulsation during steady state. The system presented are closed loop stator flux and torque observer for wide speed range that inputs are currents and voltages sensing of motor terminal. Simulation results for the 2.2kw general purposed induction motor are presented and discussed.

Key Words : DTC, Torque Ripple Reduction, SVM, Stator Flux Observer

1. 서 론

최근 급속도로 발전되고 있는 산업분야에서 고도의 정밀도와 빠른 응답특성을 갖는 제어시스템이 필수적이다. 이를 위해 구조가 간단하고 견고하며 가격이 저렴한 유도전동기가 많이 사용되고 있으며, 최근에는 직접 토크 제어(Direct Torque Control)를 도입한 제어시스템이 많이 연구되고 있다.^{[1]-[13]} 직접 토크 제어는 히스테리시스 제어기를 사용하므로 제어구조가 디지털 형태로 아주 단순하고, 빠른 동적 응답특성이 요구되는 시스템에 큰 장점을 가지는 제어방식이다. 하지만 이 방식은 정상상태

에서 토크 리플과 전류 맥동이 많아서 정확한 속도제어에 있어서 문제가 발생할 수 있다. 최근 이러한 문제점을 해결하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있는 실정이다.^{[3][4]}

이에 따라 본 연구에서는 과도 상태에서는 DTC를 사용하여 DTC의 빠른 동적 응답특성을 유지하고, 정상상태에서는 Space Vector Modulation 방식을 사용하여 토크 리플과 전류 맥동을 감소시킬 수 있는 시스템을 제안하였다. 또한 범용 유도전동기를 저속에서 뿐만 아니라 고속에서도 적용하기 위하여 페루프 자속 관측기를 이용하였다.^{[9]-[11]} 제안된 시스템의 특성을 검증하기 위하여 Matlab Simulink를 이용하여 2.2Kw 농형 유도전동기의 속도제어 응답특성을 고찰하였다.

2. 직접 토크제어

2.1 직접 토크제어의 특성

유도전동기의 직접 토크 및 자속 제어는 인버터에 가해지는 최적 스위칭 모드 선택에 의하여 전동기에 공급되는 단자전압 제어에 의하여 이루어지므로 직접적으로 고정자의 자속과 발생하는 토크를 서로 독립적으로 제어할 수 있다. DTC의 장점은 제어구조가 디지털 형태로 아주 단순하고, 토크의 동적 특성이 전동기 회전자의 파라미터 변동에 영향이 적으며, 많은 제어기의 채용과 복잡한 알고리즘 계산에 요구되는 연산시간을 감소시킬 수 있는 특징을 가지고 있어 빠른 동적 응답특성이 요구되는 시스템에 큰 장점을 가지는 제어방식이다.^{[4][5]} 하지만 이 방식은 정상상태에서 토크 리플과 전류 맥동이 크다는 단점이 있다. 그러므로 이러한 문제점을 해결하기 위해서 과도상태에서는 DTC의 장점을 유지하면서 정상상태에서는 Space Vector Modulation 방식을 사용하여 정상상태시의 그러한 문제점을 해결하였으며, 그림 1은 전체 시스템의 구성을 보여주고 있다.

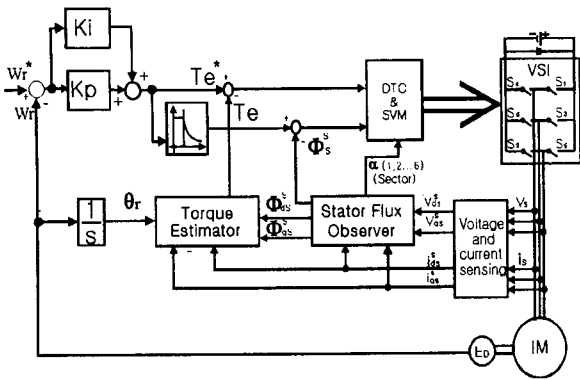


그림 1 전체 시스템 구성

유도전동기의 고정자와 회전자 의 쇄교자속은 식 (1)과 같은 상태방정식으로 표시되며, 토크는 식 (2)로 된다. 여기서 \overline{V}_s 는 고정자의 공간전압벡터를, \overline{I}_s 는 공간전류 벡터를 나타낸 것이다.

$$\overline{\Phi}_s = \int (\overline{V}_s - \overline{I}_s R_s) dt = \Phi_{ds} + j \Phi_{qs} \quad (1)$$

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\overline{\Phi}_s \times \overline{I}_s) \quad (2)$$

인버터에 의한 구동시스템에서 임의의 위치에서 선택 될 수 있는 6개의 섹터위치에 따른 자속 ($\Delta \overline{\Phi}_n$)과 인버 터가 출력 할 수 있는 8개의 전압벡터(\overline{V}_n)에 따라 히 스테리시스 밴드 안에서 스위칭 벡터의 선택에 따라 회 전하고 있는 자속의 궤적을 결정 할 수 있으며, 이와 같 이 고정자의 쇄교자속이 결정되면 식 (2)에 의하여 발생 토크를 계산 할 수 있다.^{[4][5]}

2.2 자속관측기

직접 토크제어(DTC)의 운전특성은 추정된 고정자 자 속의 정확도에 따라 대단히 큰 영향을 받으며, 자속 관 측기에는 여러 가지 형태의 자속 추정기가 있다. 일반적 으로 전압 모델을 적용한 고정자 자속 관측기는 고속영 역에서 우수한 특성이 얻어 지며, 저속영역에서는 전류 모델의 관측기가 우수한 특성이 얻어진다. 본 연구에서 는 저속 영역에서는 전류모델을 이용하고 고속영역에서 는 전압모델을 이용하는 전압전류 폐루프 자속관측기를 사용하여 넓은 속도 범위에서 정확한 자속을 추정할 수 있도록 하였다.^{[8]-[11]} 그림 1은 전압 모델과 전류모델이 결합된 폐루프 자속 관측기를 보여주고 있으며 각 부분 의 수식은 (3)-(8)에서 나타내었다.

$$\begin{bmatrix} I_{qs}^r \\ I_{ds}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs}^s \\ I_{ds}^s \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$P \begin{bmatrix} \Phi_{dr}^r \\ \Phi_{qr}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_r} \Phi_{qr}^r + \frac{L_m}{T_r} I_{qs}^r \\ -\frac{1}{T_r} \Phi_{dr}^r + \frac{L_m}{T_r} I_{ds}^r \end{bmatrix} \quad (4)$$

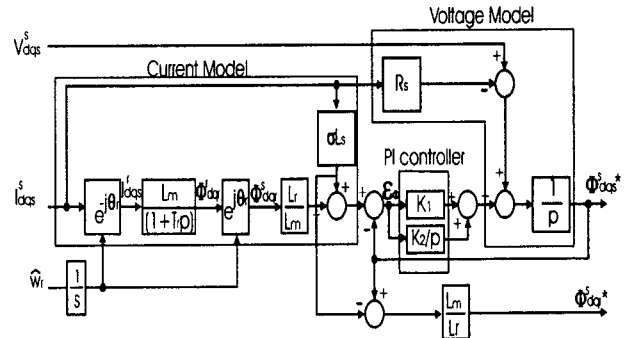


그림 2 폐루프 자속 관측기

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ar}^s \\ \Phi_{dr}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{ar}^r \\ \Phi_{dr}^r \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{qs}^s \\ \Phi_{ds}^s \end{bmatrix} = \frac{L_m}{L_r} \begin{bmatrix} \Phi_{ar}^s \\ \Phi_{dr}^s \end{bmatrix} + \sigma L_s \begin{bmatrix} I_{qs}^s \\ I_{ds}^s \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$K_1 = \frac{L_m}{L_r} (\sigma_1 + \sigma_2), K_2 = \frac{L_m}{L_r} \sigma_1 \sigma_2 \quad (7)$$

$$\Phi_{qds}^s = \int [(V_{qds}^s - R_s I_{qds}^s) + \epsilon_\theta (K_1 + \frac{K_2}{P})] dt \quad (8)$$

여기서, I_{qds}^r 은 회전자에서 본 고정자의 전류, I_{qds}^s 은 고정자에서 본 고정자의 전류, Φ_{qds}^s 는 고정자에서 본 고정자의 자속, Φ_{qdr}^r 는 회전자에서 본 회전자의 자속, Φ_{qdr}^s 는 고정자에서 본 회전자의 자속, T_r 은 회전자 시 정수, ϵ_θ 는 폐루프 자속관측기의 고정자 자속과 전류모 델 관측기의 고정자 자속의 차, σ 는 누설계수, σ_1 과 σ_2 는 전류모델과 전압모델의 주파수 밴드폭을 나타낸 것이 다.

2.3 DTC 와 SVM

그림 3에서 DTC와 SVM제어기의 구성을 보여주고 있다. 제어기는 PI제어기와 히스테리시스 제어기로 구성 이 되어있고, PI제어기는 자속 PI제어기와 토크 PI제어 기로 구성되어 있으며, 각각 식 (9)와 식 (10)과 같다. 히스테리시스 제어기는 각각 2레벨과 3레벨 히스테리시스 제어기로 구성되어 있다.

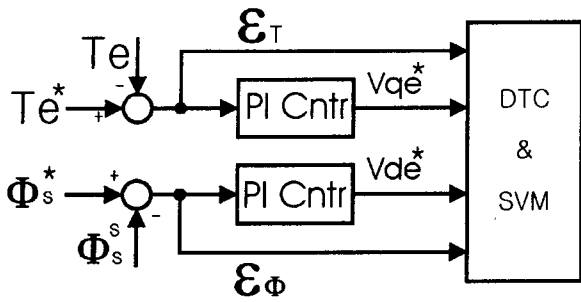


그림 3 DTC-SVM 제어기

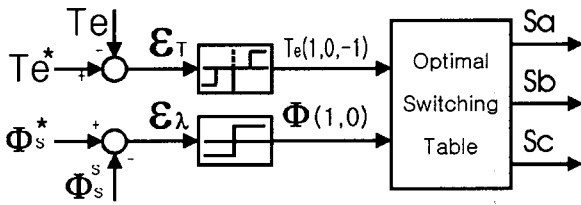


그림 4 전형적인 DTC 제어기

여기서 과도 상태와 정상상태는 실제 속도가 기준속도의 90%로 설정하고 있다. 즉, 실제 속도가 정상속도의 90% 이하인 경우는 DTC를 사용하고, 90% 이상인 경우는 SVM 방식을 사용하여 제어하고 있다. 그림 4는 전형적인 히스테리시스 제어기의 구성을 보여주고 있다.

$$V_{sd}^* = (K_{P\phi} + K_{I\phi}/s)(\phi_s^* - \phi_s) \quad (9)$$

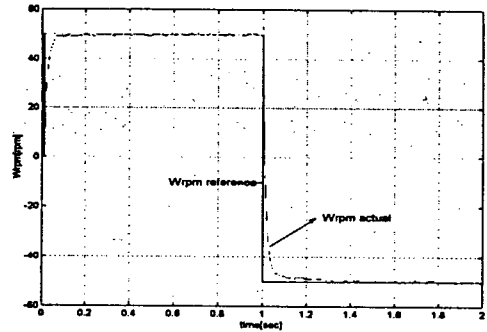
$$V_{sq}^* = (K_{PTe} + K_{ITe}/s)(Te^* - Te) \quad (10)$$

3. 시뮬레이션 결과

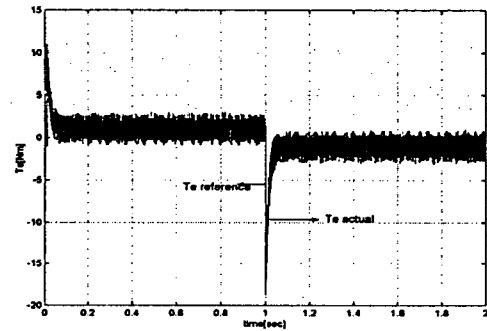
시뮬레이션은 Matlab simulink를 사용하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 전동기의 파라미터를 나타내고 있다. 그림 5는 과도 상태에서는 DTC, 정상상태에서는 SVM을 사용하였을 경우의 응답특성을 보여주고 있으며, 기준 속도를 50[rpm]에서 -50[rpm]의 지령을 주었을 경우 2초동안 제시된 제어시스템의 응답특성을 나타내고 있고, (a)는 속도 응답특성, (b)는 토크 응답특성, (c)는 고정자 기준 좌표계에서의 dq축 전류 파형을 나타내고 있다. 그림 6은 전형적인 DTC를 사용하였을 경우의 응답특성을 보여주고 있으며, 기준속도를 50[rpm]에서 -50[rpm]의 지령을 주었을 경우 2초 동안 제시된 제어시스템의 응답특성을 나타내고 있고, (a)는 속도 응답특성, (b)는 토크 응답특성, (c)는 고정자 좌표계에서의 dq축 전류 파형을 나타내고 있다.

표 1 적용된 전동기의 파라미터

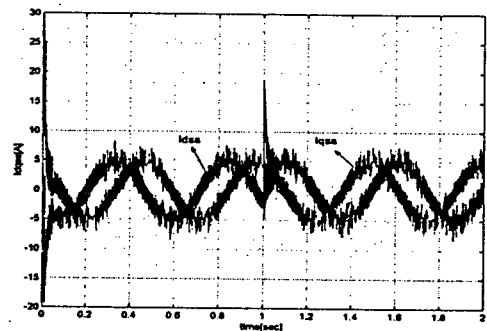
정격극수	4극	Ls	79.156[mH]
정격출력	2.2[Kw]	Lr	79.156[mH]
정격전압	220[V]	Lm	75.01[mH]
정격전류	8.2[A]	Rs	0.713[Ω]
회전자시상수	0.102	Rr	0.773[Ω]



(a) 속도 응답특성

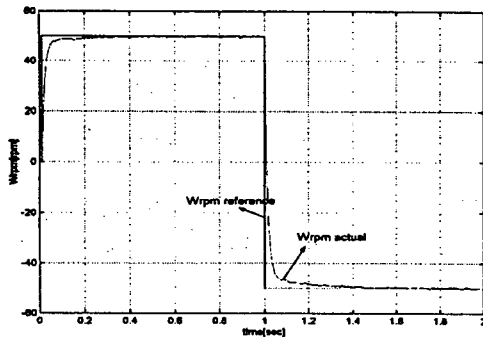


(b) 토크 응답특성

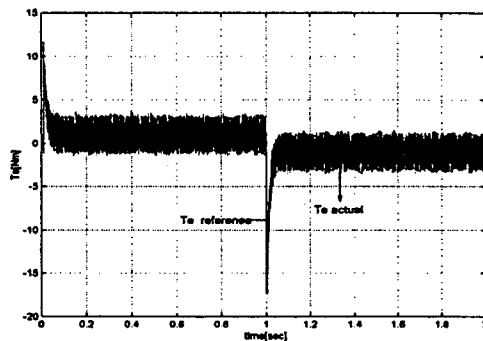


(c) 고정자 전류파형

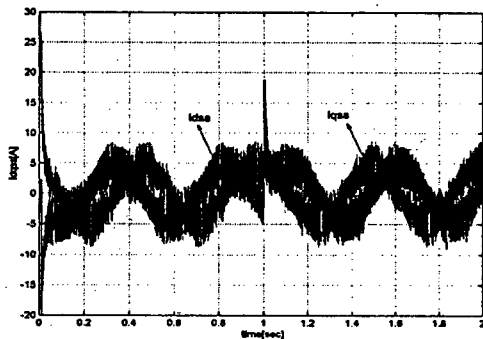
그림 5 DTC 와 SVM방식



(a) 속도 응답특성



(b) 토크 응답특성



(c) 고정자 전류파형

그림 6 전형적인 DTC방식

4. 결 론

본 논문에서는 직접토크제어 시스템의 성능에 매우 큰 영향을 주는 자속을 고속에서 뿐 아니라 저속에서도 적용할 수 있는 페루프 자속관측기를 사용하였으며, 직접 토크 제어의 가장 큰 단점인 토크 리플과 전류 맥동을 줄이기 위해서 과도 상태에서는 DTC, 정상상태에서는 SVM 방식을 사용하였고 이를 전형적인 DTC방식과 비

교해 본 결과 정상상태에서의 전류리플과 토크리플이 매우 감소하였다는 것을 확인 할 수 있었다. 이 방식을 사용하면 지금까지 전형적인 DTC에서 토크 리플이나 전류맥동으로 인해 초저속 영역에서 생겼던 속도 제어의 문제점들을 해결할 수 있을 것이며 센서리스제어에서도 더 안정된 특성을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 김민희, 김남훈, "DSP를 이용한 유도전동기 디지털 제어 시스템", 한국산업응용학회 논문집, Vol. 3, No. 1, pp. 9~15, 2000.
- [2] 김민희, 김남훈, 김민호, "직접 토크 및 자속 제어에 의한 유도전동기의 위치제어 시스템" 대한 전기학회 논문지, 제 49P권 제2호 pp. 22~28, Oct 2000.
- [3] Cristial Lascu, Ion Boldea, Fred Blaabjerg, "A modified Direct Torque Control for Induction Motor Sensorless Drive", IEEE Trans. IA. Vol. 36, NO. 1, pp. 122~130, Jan 2000.
- [4] Ion Boldea "Electric Drives", CRC Press, 1999.
- [5] Peter Vas, "Sensorless Vector and Direct Torque Control", Oxford Press, 1998.
- [6] Perer Vas "Artificial-Intelligence-Based Electrical Machines and Drives", Oxford Press. 1999.
- [7] Jun-Koo Kang, Seung-Ki Sul "New direct torque control of induction motor for minimum torque ripple and constant switching frequency" IEEE Trans. IA., Vol. 35, No. 5, pp. 1076~1082, Sep./Oct., 1999.
- [8] Bimal K. Bose, "Power Electronics and Variable Frequency Drivers, IEEE Press, 1997
- [9] P. L. Jansen, R. D. Lorenz, D. W. Novotny "Observer-Based Direct Field Orientation : Analysis and Comparison of Alternative Methods", IAS-Annual meeting, pp. 536~543, 1993
- [10] P. L. Jansen, R. D. Lorenz, "A physically insightful approach to the design and accuracy assessment of flux observers for the field oriented IM drives." IEEE Trans. IA., Vol. 30, pp. 101~110, Jan/Feb. 1994.
- [11] P.L. Jansen, R. D. Lorenz, and Donald W. Novotny, "Observer-Based direct field orientation: Analysis and Comparison of Alternative methods" IEEE Trans. IA., vol. 30, No. 4, July/August 1994.
- [12] I. Takahashi, T. Noguchi, "A new quick response and high efficiency strategy of an induction motor" in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting 1985, pp 495~502
- [13] M. Depenbrock, "Direct self control for high dynamics performance of inverter feed AC machines," ETZArch., Vol. 7, No. 7, pp. 211~218, 1985.