

일정한 토크 평균치를 가지는 유도전동기 직접토크제어기법

Direct Torque Control Method of Induction Machine with Constant Average Torque

김정옥*, 조내수*, 최병태*, 김우현**, 임성운***, 권우현*

* 경북대학교 전자공학과(전화:(053)940-8526, 팩스:(053)950-5526, E-mail : ok7988@korea.com, nscho0104@hanmail.net, btchoi@palgong.knu.ac.kr, whkwon@ee.knu.ac.kr)

** 영남이공대학 전자정보계열(전화:(053)650-9249, 팩스:(053)950-5526, E-mail : whkim@ync.ac.kr)

*** 경일대학교 컴퓨터 제어·전기공학부(전화:(053)940-8526, 팩스:(053)950-5526, E-mail : swim@kiu.ac.kr)

Abstract : There are several types of switching table for selection voltage vector in direct torque control of induction motor. In general, two-quadrant and four-quadrant operation switching table are used mostly. Two-quadrant operation has an advantage that reduced the torque ripples in comparison with four-quadrant operation, but it has the defect that is not constant average torque. Because the torque increasing slope size by non-zero voltage vector is different from the torque decreasing slope size by zero voltage vector as speed region.

The main objective of this study is to maintain constant average torque using two-quadrant operation switching table. In proposed method, the torque increasing slope or decreasing slope are calculated before selected voltage vector is applied. Then, it is applied to zero voltage vector or non-zero voltage vector until the torque increasing slope and decreasing slope are equal in total magnitude. Therefore it becomes to maintain average torque at whole operation speed. The validity of the proposed method is proven by simulated and experimental results.

Keywords : direct torque control, induction motor, switching vector table

1. 서 론

직접토크제어방법은 Takahashi[1]와 Depenbrock[2]에 의해 제안되었으며, ABB에서 최신 교류전동기 제어 방식[3]이라고 소개한 이후로 많은 관심을 보이고 있다. 이는 공간전압벡터에 의해 직접 토크와 자속이 제어되기 때문에 빠른 토크 응답을 가지며 좌표변환이 필요 없으므로 제어구조가 간단하고 구현이 용이하다.

직접토크제어방법은 전압 및 전류를 측정하여 고정자 자속과 토크를 계산하고, 계산된 자속과 토크는 주어진 디스트리비시드 밴드 내에서 명령치를 추종하도록 하는 적절한 전압벡터를 선택하여 전동기에 인가하는 것으로 이루어진다. 그러므로 전압 및 전류의 측정으로부터 전압벡터의 인가까지가 한 주기를 이루며, 매 주기마다 적절한 전압벡터가 인가된다.

전압벡터 선정에는 여러 종류의 스위칭 테이블(optimum switching voltage look-up table)이 있는데 일반적으로 2상한 동작 스위칭 테이블(two-quadrant operation switching table)과 4상한 동작 스위칭 테이블(four-quadrant operation switching table)을 많이 사용한다. 2상한 동작 스위칭 테이블은 영전압벡터에 의한 토크하강을 사용하며 4상한 동작 스위칭 테이블에 비해 토크 리플이 작은 장점이 있다. 하지만 속도영역

에 따라 유효전압벡터에 의한 토크증가기울기 크기와 영전압벡터에 의한 토크하강기울기 크기가 다르기 때문에 토크 평균치가 일정하지 않는 단점이 있다. 이를 개선하기 위해 Chen은 가상벡터[4]를 이용한 방법을 Buja는 개선된 자속추정기를 가진 공간벡터변조[5]를 이용하는 방법을 제안하였다.

본 연구에서는 2상한 동작 스위칭 테이블 사용시 토크 평균치가 일정하지 않는 단점을 해결하는 방안을 제시한다. 제안한 방법에서는 선택된 전압벡터를 인가하기에 앞서 토크의 증가 또는 하강분을 계산하고 상승 및 하강의 전체적인 크기가 동일할 때까지 영전압 벡터나 유효전압벡터를 인가하여 전동기 속도에 관계 없이 토크 평균치를 일정하게 한다. 모의실험 및 실험을 통해 제안한 방법이 타당함을 확인한다.

II. 직접토크제어

1. 직접토크제어 기본원리

2상 d-q 정지좌표계로 표현되는 3상 유도전동기의 고정자 전압방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$v_s = r_s i_s + p \lambda_s \tag{1}$$

$$v_s = [v_{ds} \ v_{qs}]^T, \quad i_s = [i_{ds} \ i_{qs}]^T, \quad \lambda_s = [\lambda_{ds} \ \lambda_{qs}]^T$$

고정자 저항에 의한 전압 강하를 무시한다면

$$\Delta \lambda_r = v_r dt \quad (2)$$

와 같이 표현할 수 있는데, 식 (2)는 고정자 전압벡터를 인가하면 인가된 전압벡터의 방향으로 고정자 자속 벡터의 변화가 생기며, 변화분의 크기는 인가된 전압 벡터와 인가시간의 곱과 같다는 것을 의미한다.

유도전동기의 토크방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{\sigma L_r} \text{Im}[\lambda_r \cdot \lambda_r^*] = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{\sigma L_r} |\lambda_r| \lambda_r \sin \delta \quad (3)$$

$$\lambda_r = [\lambda_{dr} \lambda_{qr}]^T, \sigma = 1 - L_m^2 / L_r L_s, * : \text{켈레복소수}$$

식 (3)에서 고정자 자속 및 회전자 자속의 크기가 일정하다면 그 사이의 자속각으로 토크를 변화시킬 수 있음을 알 수 있다. 일반적으로 회전자보다 고정자 측의 시정수가 충분히 작으므로 순간적인 고정자 자속 벡터의 변화는 고정자 및 회전자 자속 사이의 자속각을 변화시키고 이는 토크의 변화를 발생시킨다. 따라서 전체 시스템에서 인버터를 통한 전압벡터의 인가는 전압벡터의 방향으로 고정자 자속의 변화분을 발생시키고, 고정자 자속의 변화는 회전자 자속과의 자속각을 변화시켜 토크를 발생시킴을 알 수 있다.

그림1은 고정자 자속 변화에 따른 자속 위치와 공간 전압벡터를 나타내고 있다. 고정자 자속이 섹터 1에 있다면 자속을 증가시키기 위해서는 전압벡터 v_1, v_2, v_6 를 자속을 감소시키기 위해서는 전압벡터 v_3, v_4, v_5 를 인가하면 된다. 이중 토크를 증가시키는 전압벡터는 v_2, v_3 이 된다. 따라서 토크에 대한 요구와 자속에 대한 요구를 동시에 만족시키는 전압벡터를 선정하여 출력한다.

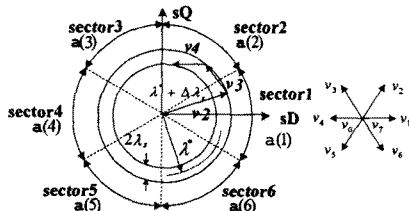
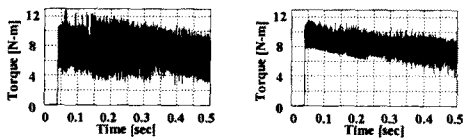


그림1. 고정자 자속 변화에 따른 자속 위치와 전압벡터 계산된 자속 및 토크와 명령치의 비교에는 일반적으로 3-레벨 토크, 2-레벨 자속 히스테리시스 비교기가 사용된다. 비교기의 출력으로부터 전압벡터를 선정하기 위한 스위칭 테이블을 표1에 나타내었다.



(a) 4상한동작스위칭테이블 (b) 2상한동작스위칭테이블

그림 2. 토크 실험파형

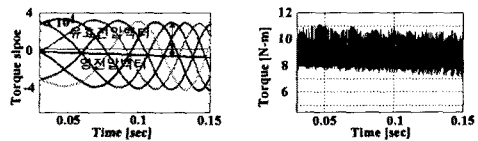
표 1. 4상한 동작 스위칭 테이블(Tb4)과 본 논문에서 사용하는 2상한 동작 스위칭 테이블(Tb2)

ϕ, r, S_n	S1	S2	S3	S4	S5	S6
스위칭테이블	Tb4	Tb2	Tb4	Tb2	Tb4	Tb2
$\phi=1$	$r=1$	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6
	$r=0$	v_7	v_8	v_9	v_{10}	v_{11}
	$r=-1$	v_6	v_7	v_8	v_9	v_{10}
$\phi=0$	$r=1$	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
	$r=0$	v_0	v_6	v_7	v_8	v_9
	$r=-1$	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9

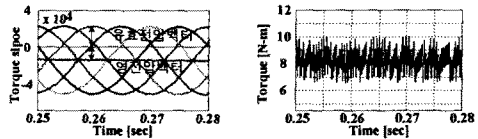
2. 2상한 스위칭 테이블의 문제점

4상한 동작 스위칭 테이블은 표 1에서와 같이 유효 전압벡터에 의한 토크상승과 토크하강을 가지고 2상한 동작 스위칭 테이블은 유효전압벡터에 의한 토크상승과 영전압벡터에 의한 토크하강을 가진다. 두 테이블을 사용하여 전압벡터를 인가했을 때 토크파형을 그림 2에 나타내었다. 4상한 동작 스위칭 테이블은 저속에서는 일정한 토크 평균치를 가지지만 리플이 큰 단점을 가진다. 그러나 2상한 동작 스위칭 테이블은 리플은 작지만 속도영역에 따라 토크 평균치가 일정하지 않다. 왜냐하면 그림3에서 보듯이 속도영역에 따라 유효전압벡터에 의한 토크증가기울기와 영전압벡터에 의한 토크하강기울기 크기가 서로 다르기 때문이다.

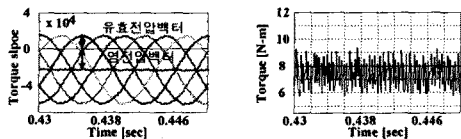
따라서 2상한 동작 스위칭 테이블을 사용시 중속에서는 유효전압벡터에 의한 토크상승기울기 크기와 영전압벡터에 의한 토크하강기울기 크기가 비슷하여 토크 평균치가 일정하지만 저속과 고속에서는 전압벡터에 의한 토크기울기 크기가 달라서 토크 평균치가 일정하지 않다.



(a) 유효전압벡터 > 영전압벡터



(b) 유효전압벡터 ≈ 영전압벡터



(c) 유효전압벡터 < 영전압벡터

그림 3. 전압벡터에 의한 토크기울기

III. 제한한 일정한 토크 평균치 알고리즘

본 논문에서는 2상한 동작 스위칭 테이블 사용시 속도 영역에 따라 토크 평균치가 일정하지 않은 문제점을 해결하기 위한 방안을 제시한다.

유도전동기의 자속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_s}{\sigma L_s} & \frac{r_r M}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{r_r M}{\sigma L_s L_r} & j\omega_r - \frac{r_r}{\sigma L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} v_s \quad (4)$$

토크방정식 식(3)을 $(k+1)$ 번째 샘플링 순간의 수식은

$$T_{e(k+1)} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{M}{\sigma L_s L_r} \text{Im}[\lambda_{s(k+1)} \cdot \lambda_{r(k+1)}^*] \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다.

식 (4)의 고정자 및 회전자 자속방정식을 이산방정식으로 나타낼 때, 샘플링 간격 t_{sp} 가 작다면, $(k+1)$ 번째 샘플링 순간에서는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \lambda_{s(k+1)} &= \lambda_{s(k)} + \left[-\frac{r_s}{\sigma L_s} \lambda_{s(k)} + \frac{r_r M}{\sigma L_s L_r} \lambda_{r(k)} + v_s \right] t_{sp} \\ \lambda_{r(k+1)} &= \lambda_{r(k)} + \left[\frac{r_r M}{\sigma L_s L_r} \lambda_{s(k)} + (j\omega_r - \frac{r_r}{\sigma L_r}) \lambda_{r(k)} \right] t_{sp} \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)를 토크방정식에 대입하여 풀고, 샘플링 간격 t_{sp} 의 제곱항은 아주 작으므로 무시한다면, $(k+1)$ 번째 샘플링 순간에서 t_{sp} 동안의 토크 변화량, 즉 토크기울기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_T = \frac{\Delta T_{ek+1}}{t_{sp}} = \frac{-T_e}{\sigma L_s} + \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{M}{\sigma L_s L_r} [-V_{sx} \lambda_{ry} + V_{sy} \lambda_{rx} - \omega_r (\lambda_{sx} \lambda_{rx} + \lambda_{sy} \lambda_{ry})] \quad (7)$$

$$\sigma L_s = \left(\frac{r_s}{\sigma L_s} + \frac{r_r}{\sigma L_r} \right)^{-1}$$

2상한 동작 스위칭 테이블은 속도 영역에 따라 토크 평균치가 일정하지 않기 때문에 토크 평균치가 일정하다면 토크기울기 중간값과 명령치와의 오차는 0에 가까운 값이 된다. 토크기울기의 중간값과 토크기울기의 중간값 오차는 계산된 토크값과 식 (7)을 이용해서 구한다.

$$T_{e-mid} = T_e + \frac{1}{2} S_T \cdot t_{sp} \quad (8)$$

$$\Delta T_{e-mid} = T_e^* - T_{e-mid} \quad (9)$$

계산된 토크값이 명령치에 이르게 되면 유효전압벡터나 영전압벡터가 인가되어 평균치가 일정하지 않게 된다. 이를 위해 계산된 토크값이 명령치 근처에 있는가의 판단이 필요하며 토크오차와 토크기울기 중간값 오차의 부호로 결정이 되며 식(10)에 나타나있다.

$$\Delta T_e \times \Delta T_{e-mid} < 0 \quad (10)$$

표 4. 토크기울기 중간값 오차와 기울기 비

속도영역	토크기울기 중간값 오차	기울기 비
저속	$ \Delta T_{e-mid} > 0$	$S_{T2}/S_{T1} < 1$
중속	$\Delta T_{e-mid} \approx 0$	$S_{T2}/S_{T1} \approx 1$
고속	$ \Delta T_{e-mid} > 0$	$S_{T2}/S_{T1} > 1$

표4는 2상한 동작 스위칭 테이블의 속도영역에서 나

타는 토크기울기 중간값 오차와 기울기 비를 나타내었다. 중속에서는 토크기울기 중간값 오차는 거의 발생하지 않고 토크증가기울기와 토크하강기울기가 일정하기 때문에 기울기 비는 1에 가깝게 된다. 그러나 저속과 고속에서는 토크기울기 중간값 오차가 발생하며 기울기 크기가 다르기 때문에 기울기 비가 일정하지 않는다.

따라서 제한한 방법에서는 토크의 증가 또는 하강분을 계산하고 계산된 토크값이 명령치 근처에 있는지를 판단하게 된다. 식(10)을 만족하게 되면 상승 및 하강의 전체적인 크기가 동일할 때까지 영전압벡터나 유효전압벡터를 인가하기 위해서 다음과 같은 조건을 얻을 수 있다.

$$|\Delta T_{e-mid}| > \frac{|S_{T2}|}{|S_{T1}|} \cdot S_{T1} \cdot S_{T2} \cdot \text{토크증가, 하강기울기} \quad (11)$$

토크 평균치가 큰 저속일 경우에는 유효전압벡터를 인가하기에 앞서 상승 및 하강의 전체적인 크기가 동일할 때까지 영전압벡터를 인가하여 토크 평균치를 일정하게 한다. 그리고 고속일 경우에는 영전압벡터를 인가하기에 앞서 상승 및 하강의 전체적인 크기가 동일할 때까지 유효전압벡터를 인가하여 토크 평균치를 일정하게 한다. 따라서 제한한 방법으로 2상한 동작 스위칭 테이블 사용하여 전동기 속도에 관계없이 토크 평균치를 일정하게 할 수 있다.

IV. 모의실험 및 실험

모의실험 및 실험구성은 그림4와 같으며, 모터사양은 표3에 나타나있다.

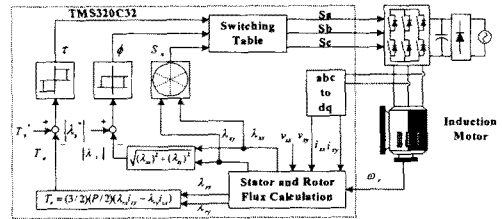


그림 4. 모의실험 및 실험에 사용된 시스템 블럭도

표 3. 모터사양

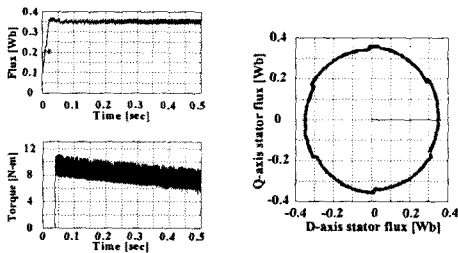
정격출력	1.5[kW]	고정자저항	0.86[Ω]
정격전압	180[V]	회전자저항	0.84[Ω]
정격전류	6.6[A]	고정자누설 인덕턴스	2.7[mH]
정격주파수	60.3[Hz]	회전자누설 인덕턴스	2.7[mH]
정격회전수	1750[rpm]	상호인덕턴스	98.5[mH]
극수	4	접성마찰계수	0.0045
관성계수	0.0085[kg · m ²]		[N · m · s/rad]

실험에는 Texas Instruments사의 저가 DSP 프로세서인 TMS320C32를 사용하였으며, 그림4의 점선 블록 부분을 수행한다. 모의실험에는 MATLAB simulink를 사용하여 구성하였다. 모의실험과 실험에 사용된 제어

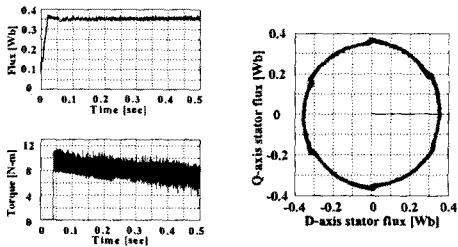
주기는 100[μsec]이며 고정자 자속과 토크의 명령치는 정격값인 0.35[Wb]과 8[N·m]로 주었고 히스테리시스 밴드의 크기는 영으로 설정하였다. 초기 고정자 자속의 확립을 위해 자속의 증가는 v_1 벡터, 감소는 v_0 벡터를 인가해 주는데 이때 고정자 전류의 최대치는 15A로 제한하였으며 이로 인해 자속확립에 약 0.025초가 소요된다. 토크 명령은 0.04초에 인가하였다.

그림5, 6은 2상한 동작 스위칭 테이블 사용한 경우의 토크제어 특성과 자속제어 특성을 모의실험 및 실험한 파형을 나타낸다. 유효전압벡터에 의한 토크증가 기율기와 영전압벡터에 의한 토크하강기율기가 다르기 때문에 토크 평균치가 일정하지 않음을 알 수 있다.

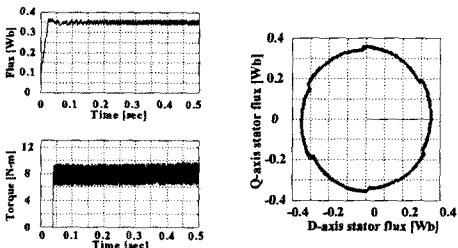
그림7, 8은 본 논문에서 제안한 방법을 이용하여 나타낸 토크제어 특성과 자속제어 특성을 모의실험 및 실험한 파형을 나타낸다. 자속이나 전류에는 변화없으며 전동기 속도영역에 관계없이 토크 평균치가 일정함을 알 수 있다.



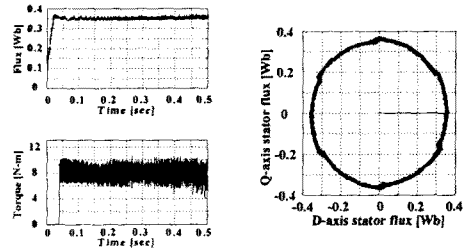
(a) 고정자 자속 크기와 토크 (b) 고정자 자속 궤적
그림5. 2상한동작스위칭테이블 사용시 모의실험 파형



(a) 고정자 자속 크기와 토크 (b) 고정자 자속 궤적
그림6. 2상한동작스위칭테이블 사용시 실험 파형



(a) 고정자 자속 크기와 토크 (b) 고정자 자속 궤적
그림7. 제안한 방법에 의한 모의실험 파형



(a) 고정자 자속 크기와 토크 (b) 고정자 자속 궤적
그림8. 제안한 방법에 의한 실험 파형

V. 결론

본 논문에서는 2상한 동작 스위칭 테이블 사용시 토크 평균치를 일정하기 위한 방법을 연구하였다. 제안한 방법에서는 선택된 전압벡터를 인가하기에 앞서 토크의 증가 또는 하강분을 계산하고 상승 및 하강의 전체적인 크기가 동일할 때까지 영전압벡터나 유효전압벡터를 인가하는 방식이다.

따라서 제안한 방법으로 전동기의 속도영역에 관계없이 항상 일정한 토크 평균치를 얻게 되어 성능을 향상시켰다. 또한 자속에는 변화를 주지 않고 토크에만 영향을 주며 대체로 토크 리플에도 큰 변화를 가지지 않는 장점을 가진다. 모의실험 및 실험을 통해 제안한 방법이 타당함을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] I. Takahashi and T. Noguchi, "A New Quick Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor," *IEEE Trans. on Industrial Applications*, Vol. IA-22, No. 5, pp. 820-827, 1986.
- [2] M. Depenbrock, "Direct Self-Control(DSC) of Inverter-Fed Induction Machine," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 3, No. 4, pp. 420-429, 1988.
- [3] P. Tiitinen, "The Next Motor Control Method, DTC direct torque control," *Int'l Conf. on Power Electronics, drives & energy system for Industrial growth, India*, pp.37-43, 1996.
- [4] Jie Chen and Yongdong LI, "Virtual Vectors Based Predictive Control of Torque and Flux of Induction Motor and Speed Sensorless Drives," *Industry Applications Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conf. Rec. of the 1999 IEEE*, Vol. 4, pp. 2606-2613, 3-7 Oct. 1999.
- [5] G. Buja, D. Casadei, G. Serra, "DTC-Based Strategies for Induction Motor Drives," in *Conf. Rec. IEEE-IECON*, pp.1506-1516, 1997.