

# Dithering기법에 의한 직접 토크 제어 방식의 토크리플 개선에 관한 연구

이흥희, 김정현

울산대학교 전기전자정보시스템공학부

## A study on the torque ripple reduction of PMSM in direct torque control by using dither signal

H.H. Lee and J.H. Kim

School of Electrical Engineering and informational System, University of Ulsan, Korea

### ABSTRACT

This paper focuses on a simple technique to reduced torque ripple in the direct torque control inverter for PMSM drive. It is actually impossible to raise the inverter switching frequency in the conventional system, although the hysteresis bandwidths for the stator flux and torque control are sufficiently diminished, because of the sampling interval and the delay in estimating the flux and the torque. In order to overcome the problem, the proposed method introduces a dithering technique into the conventional system by superposing triangular waves with high frequency and minute amplitude on the torque error. And the programable 3-stage lowpass filter is added instead of pure integrator. Simulation results prove the feasibility of proposed strategy compared with conventional method.

Key Words : DTC, Dithering, Programable 3-level lowpass filter, ripple reduction

### 1. 서론

최근 산업현장에서 사용되는 교류전동기의 속응성 및 정밀도를 높이기 위해 다양한 제어기법이 연구되어졌으며 그 중 대표적으로 벡터제어 기법이 사용되고 있다. 그러나 이런 벡터제어 기법은 속응성과 정확도 측면에서는 우수하나 알고리즘 구현이 복잡하고 계산량이 많아 고성능 프로세서를 사용하여야 하는 단점을 가지고 있다.

따라서 벡터 제어의 복잡한 구조의 단점을 극복하기 위한 제어기법으로 전동기의 토크와 고정자 자속을 독립적으로 제어할 수 있는 직접 토크제어(Direct Torque Control)에 대한 연구가 진행되고 있다. 하지만 직접토크

제어는 토크와 고정자 자속을 직접 제어하므로 빠른 속응성과 구현이 간단한 장점도 있지만, 자속과 토크 히스테리시스 제어기로 인해 토크 리플이 큰 단점을 가지고 있다.

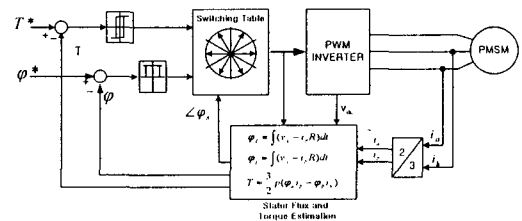


그림 1 기존 DTC 구성도

지금까지 국내외에서 토크리플을 개선에 관한 연구가 많이 진행되어 왔다. 그 중에서 가장 일반적인 기법은 공간전압벡터 방식(SVM)을 이용한 방식이다.<sup>[3]</sup> 이 기법은 토크의 리플을 현저히 감소시킬 수는 있으나 기존의 직접 토크제어기법에 비해 다소 복잡하고 계산량이 많은 단점을 가지고 있다.

직접 토크제어의 빠른 응답특성을 가지면서 토크리플을 개선할 수 있는 방법으로 본 논문에서는 dithering 기법을 적용하였다. 이 기법은 토크오차와 고정자 자속오차에 dither 신호를 더해줌으로서 스위칭 주파수를 증가시켜 토크와 고정자 자속의 리플을 줄이는 우수한 기법이다.<sup>[1]</sup>

그러나 [1]에서 제시한 dither 신호의 크기(히스테리시스 밴드폭)와 주파수(약 30kHz)는 샘플링 시간( $T_s$ )에 따라 리플 개선 비율이 다르게 나타나고 있다. 본 논문에서는  $T_s$ 에 따른 가장 좋은 성능을 낼 수 있는 dither 신호의 크기를 시뮬레이션을 이용해 찾아보고 그림 7에 나타내었다. 한편 고정자 자속의 리플은 토크 리플보다 상대적으로 작기때문에 dither 신호를 더해 주어도 성능 개선이 거의 나타나지 않았다. 이런 이유로 본 논문에서는 토크 에러만 dither 신호를 추가하였다.

또한 자속추정을 직류 성분이 계속 축적되는 문제점을 가진 순수적분 대신에 프로그램어블 3단계-저역필터를 사용하였다.<sup>[5]</sup>

본 논문에서는 직접 벡터제어의 특성을 만족시키면서 토크리플을 개선할 수 있는 방법을 제시하고, 시뮬레이션을 통하여 본 연구에서 제시한 직접 토크제어의 타당성을 확인한다.

## 2. PMSM의 직접 토크제어

일반적으로 고정좌표계( $\alpha-\beta$ )에서 PMSM을 표현하면

$$v_s = R_s i_s + \frac{d\phi_s}{dt} \quad (1)$$

식 (1)에서 고정자 자속식 (2), (3)을 구할 수 있고, 고정자자속의 크기와 각위치는 식 (4), (5)로 정의된다.

$$\phi_{as} = \int (v_a - R_s i_{as}) dt \quad (2)$$

$$\phi_{\beta s} = \int (v_\beta - R_s i_{\beta s}) dt \quad (3)$$

$$|\phi_s| = \sqrt{\phi_{as}^2 + \phi_{\beta s}^2} \quad (4)$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \left( \frac{\phi_{\beta s}}{\phi_{as}} \right) \quad (5)$$

PMSM의 토크는 식 (6)과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\phi_{as} i_{\beta s} - \phi_{\beta s} i_{as}) \quad (6)$$

여기서 P는 PMSM의 극수이다.

DTC의 기본구성은 그림 1과 같으며, 원리는 전동기의 3상 전압과 전류값으로 위 식을 이용해서 PMSM의 자속과 토크 그리고 고정자 각위치를 계산한다. 계산된 값은 피드백 루프를 통하여 재입력된다. 여기서 표 1과 같이 정의된 스위칭 테이블의 전압벡터가 히스테리시스 비교기의 출력값에 따라 선택되면서 원하는 자속과 토크를 제어할 수가 있다. 그림 2는 고정자 자속벡터가 선택된 전압벡터에 의해서 제어되는 원리를 나타내고 있다.

유도전동기에서는 영전압벡터가 인가 될 때는 고정자 자속은 원위치에 계속 있지만, PMSM에 경우에는 고정자 자속은 영전압벡터가 인가 되더라도 영구자석이 붙어 있는 회전자에 회전하기 때문에 변하게 된다. 그러므로 PMSM에서는 고정자 자속을 제어하는데 영전압벡터를 사용할수 없다. 따라서 자속의 크기를 줄일때 영전압이 없는 6개의 전압벡터를 사용하는 스위칭 테이블은 서로 방향이 다른 전압 벡터를 선택하여 자속을 제어한다.<sup>[2]</sup>

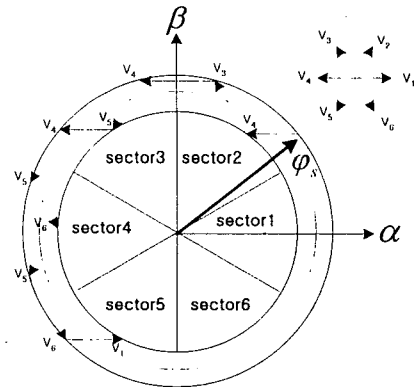


그림 2 전압벡터에 의한 고정자 자속과 토크제어

표 1 영전압벡터를 사용하지 않은 스위칭 테이블

sector		τ					
		1	2	3	4	5	6
φ=1 (↑φ)	τ=1 (↑T)	V <sub>2</sub> (110)	V <sub>3</sub> (010)	V <sub>4</sub> (011)	V <sub>5</sub> (001)	V <sub>6</sub> (101)	V <sub>1</sub> (100)
	τ=0 (↓T)	V <sub>6</sub> (101)	V <sub>1</sub> (100)	V <sub>2</sub> (110)	V <sub>3</sub> (010)	V <sub>4</sub> (011)	V <sub>5</sub> (001)
φ=0 (↓φ)	τ=1 (↑T)	V <sub>3</sub> (010)	V <sub>4</sub> (011)	V <sub>5</sub> (001)	V <sub>6</sub> (101)	V <sub>1</sub> (100)	V <sub>2</sub> (110)
	τ=0 (↓T)	V <sub>5</sub> (001)	V <sub>6</sub> (101)	V <sub>1</sub> (100)	V <sub>2</sub> (110)	V <sub>3</sub> (010)	V <sub>4</sub> (011)

## 3. 제안한 PMSM의 직접 토크제어

DTC에서 토크 리플이 생기는 원인은 여러 가지가 있다. 그 원인들중 가장 대표적인 것이 그림 4의 시스템의 샘플링 시간(Ts)과 그림 5와 같이 고정자 자속과 토크 추정에서 발생하는 시간지연(time delay)을 들수 있다. 이상적인 DTC기법에서는 토크밴드에 크기에 따라 토크리플 크기와 스위칭 주파수가 변하지만, 실제로는 그림 5, 6와 같이, 위에서 언급한 두가지 원인으로 인해 토크리플의 크기는 히스테리시스 밴드폭보다 더 커지고, 스위칭 주파수는 전체적으로 낮아지면서 불규칙적으로 된다.

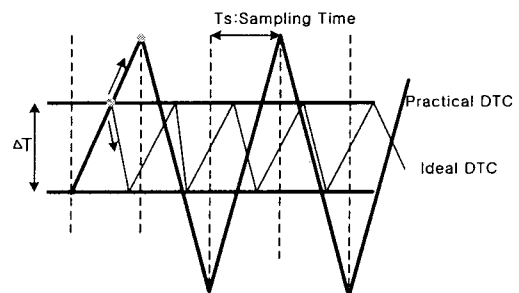


그림 3 샘플링 시간에 따른 토크 리플

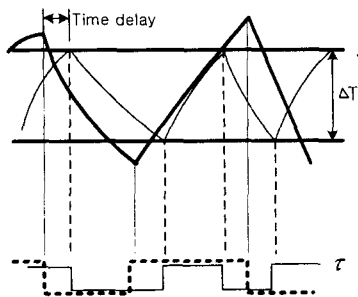


그림 4 시간지연에 따른 토크 리플

이와 같은 이유로 실제 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션이 나 모터 구동시에 토크 리플은 정의된 히스테리시스 밴드폭보다 몇배에서 수십배까지 차이가 난다.

본 논문에서는 샘플링 시간이나 시스템의 시간지연에 관계 없이 스위칭 주파수를 올릴수 있는 dithering 기법과 자속 추정시 사용하는 순수 적분기를 대신해 프로그램어블 3-단계 저역필터를 함께 사용하여 토크와 고정자 자속 리플의 감소시키는 제안된 DTC기법을 제시한다.

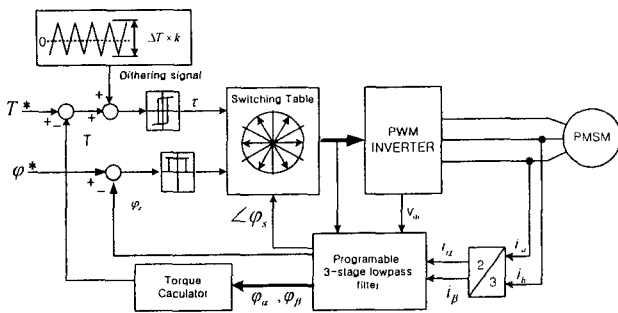


그림 5 제안한 DTC 구성도

### 3.1 Dithering 기법

dithering 기법은 토크 오차와 자속 오차에 고주파수인 삼각파를 겹치는 기술을 말한다. 고정자 자속과 토크 제어하는 히스테리시스 보상기는 본래 비선형적인 요소로 간주된다. 반면에 dithering은 히스테리시스의 비선형요소를 선형적으로 바꾸는 효과를 가지고 있다. [1]에서 A/D 변환기의 분해능은 입력 아날로그 신호에 높은 주파수의 랜덤 노이즈를 겹침으로써 향상시킬수 있다고 설명하고 있다. 이를 응용하면 dither 신호의 최대 크기는 A/D 변환기의 1 LSB와 같고 DTC 제어기의 히스테리시스 비교기는 A/D 변환기의 1bit로 간주될 수 있다. 이런 이유로 토크 오차의 정밀도가 개선되면서 전체적인 토크리플이 감소한다. 그림 6는 dither 신호를 추가함으로써 리플이 감소되고 스위칭 주파수가 증가하는 것을 보여준다.

그러나 본 논문에서 제안하는 dithering 기법을 이용한 DTC 구성도는 그림 5와 같다. 그림 5에서 k는 5~20 값을 가지는 상수이다. 제안한 dithering 기법은 dither

신호의 크기가 히스테리시스 밴드의 크기에 5~20배 정도의 크기를 가져야 토크 리플의 성능이 개선된다. 그림 7은 샘플링 주파수에 따른 dither 신호의 크기를 나타내었다.

그리고 자속 리플은 토크 리플에 비해 상대적으로 작기 때문 자속 히스테리시스 부분에는 dither 신호를 추가하지 않고 시뮬레이션 하였다.

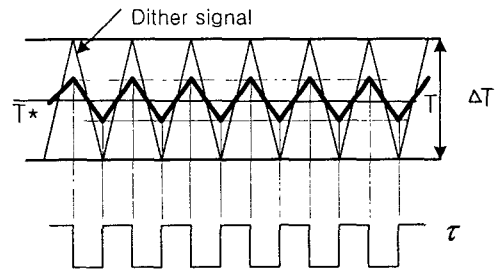


그림 6 Dithering 기법 사용시 스위칭 동작

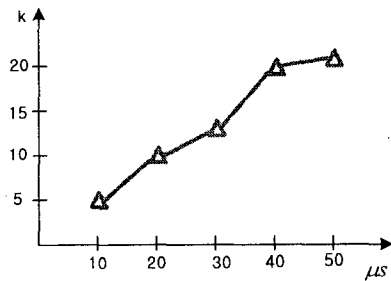


그림 7 Ts에 따른 토크 리플이 최소화 되는 k값

### 3.2 프로그램어블 3-단계 저역필터

식 (2), (3)에서 고정자 자속을 계산하는 가장 일반적인 방법으로 순수 적분기를 사용한다. 그러나 순수 적분기를 사용할 경우 고정자 전압과 전류에 포함된 직류오차 값이 계속 축적된다. 이런 문제점을 해결하기 위해 순수 적분기 대신에 3개의 저역필터를 직렬로 연결하여, 전동기의 동기각속도에 따라 저역필터의 차단 주파수를 조정함으로써, 인버터의 어떤 주파수에도 거의 완벽한 적분 기능을 수행할 수 있는 프로그램어블 3-단계 저역필터 사용하였다. 이 프로그램어블 3-단계 저역필터의 문제점은 전동기가 기동하는 과도상태에서 3개의 저역필터의 시간지연 때문에 고정자 자속이 갑자기 급격히 감소되며, 따라서 토크 역시 급격히 감소되는 것이다. 이런 저역필터로 인한 시간지연이 생기는 문제점도 dithering 기법을 함께 사용함으로써 어느 정도 보완 할 수 있다.

다음식은 하드웨어 저역필터의 이득  $G_b$ 와 위상  $\phi_b$ 이다.

$$\phi_h = \tan^{-1}(\tau_h \omega_e) \quad (7)$$

$$G_h = 1/\sqrt{1+(\tau_h \omega_e)^2} \quad (8)$$

여기서  $\tau_h$ 는 하드웨어 저역필터의 시정수이다.

3개의 프로그래머블 저역필터의 전체이득과 위상은

$$3\phi_p = 3 \tan^{-1}(\tau_p \omega_e) \quad (9)$$

$$3G_p = 1/\sqrt{[1+(\tau_p \omega_e)^2]^3} \quad (10)$$

여기서  $\tau_p$ 는 프로그래머블 저역필터의 시정수이다.

하드웨어 저역필터와 3개의 프로그래머블 저역필터에 의한 전체 위상  $\phi_T$ 는 순수 적분기와 같은 역할을 하기 위해서는 전체 위상  $\phi_T$ 는  $\pi/2$ 이 되어야 하므로

$$\tau_p = \frac{1}{\omega_e} \tan\left[\frac{1}{3}\left(\frac{\pi}{2} - \phi_h\right)\right] = f(\omega_e) \quad (11)$$

와 같으며, 이 식 (11)의  $\tau_p$ 는 동기각속도  $\omega_e$ 에 관한 함수가 된다.

또한 하드웨어 저역필터를 포함한 전체 필터의 이득  $G_T$ 는 다음 식과 같다.

$$G_T = 1/\sqrt{[1+(\tau_1 \omega_e)^2][1+(\tau_p \omega_e)^2]^3} \quad (12)$$

여기서, 순수 적분기의 이득이  $1/\omega_e$ 이므로  $G_T \cdot G_S = 1/\omega_e$  되기 위한 보상이득  $G_S$ 는

$$G_S = \frac{1}{\omega_e} \sqrt{[1+(\tau_1 \omega_e)^2][1+(\tau_p \omega_e)^2]^3} = g(\omega_e) \quad (13)$$

으로 표현되고,  $G_S$ 는  $\tau_p$ 와 같이  $\omega_e$ 의 함수이다.

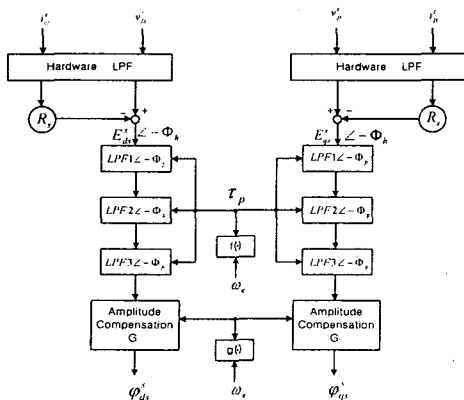


그림 8 프로그래머블 3-단계 저역필터

#### 4. 시뮬레이션

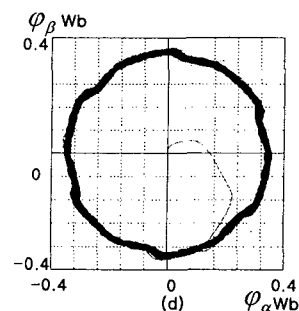
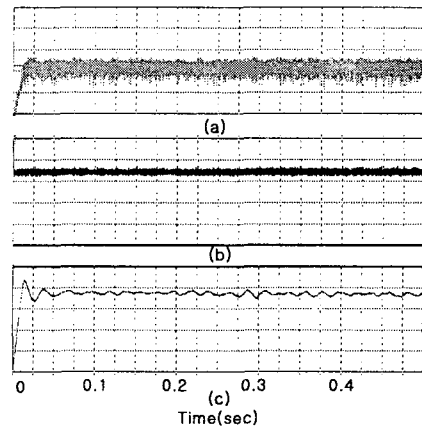
제안한 DTC의 전체 구성도는 그림 5와 같다. 기존 DTC에서 토크오차에 dither 신호(100kHz, k=5)를 추가하고 고정자 자속 추정시에 순수적분기 대신 동기각속도에 따라 차단주파수가 변하는 프로그래머블 3-단계 저역필터로 제안한 DTC를 구성하였다. 토크 및 고정자 자속의 히스테리시스 밴드는 기준치의 1%로 하였으며, 샘플링 시간  $10 \mu s$ 로 하여 기존 DTC와 제안한 DTC를 서로 비교하였다.

시뮬레이션 결과는 그림 9, 10에 나타내었다. 그림 9, 10의 (a)는 토크, (b)는 고정자 자속 (c)는 PMSM의 속도, (d)는 고정자 자속 궤적이고, (e)는  $\alpha-\beta$  자속 파형이다. 두 그림에서 전체적인 리플이 그림 10에 비해 그림 9에서 상대적으로 많이 떨림을 확인할 수 있다.

따라서 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 제안한 DTC기법은 기존의 DTC기법에 비해 토크리플 및 자속의 리플이 훨씬 감소되는 것을 확인할 수 있다.

표 2 PMSM 상수

$R_s$	2.6 [ $\Omega$ ]	B	0.000463 [ $Kg m^2$ ]
$L_s$	10.98 [mH]	J	0.0002 [ $Kg m^2/s$ ]
$\phi_f$	217 [mH]	Pole	4



## 5. 결론 및 향후과제

본 논문은 DTC에서 샘플링 시간이나 고정자 자속과 토크 추정시 발생하는 시간지연으로 인해 증가하는 토크 리플을 감소 시키기 위해 제안한 기법을 제시하였다. 이 제시된 기법의 성능을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 실시 하였으며, 시뮬레이션 결과 기존의 DTC의 성능에 비해 토크 리플이 상당히 감소됨을 확인하였다.

앞으로 이 시뮬레이션 결과를 바탕으로 실제 PMSM을 구동해 보고 실험적으로 제안한 기법을 타당성을 검증하고자 한다.

## 참고 문헌

- [1] Toshihiko Noguchi and Masakazu Yamamoto, "Enlarging Switching Frequency in Direct Torque-controlled inverter by Means of Dithering." IEEE.
- [2] L. Zhong, M.F. Rahaman, "Analysis of Direct Torque Control in Permanent Magnet Synchronous Motor Drives" IEEE, 1997, pp. 528-536.
- [3] Isao Takahashi, Toshihiko Noguchi.. "Take a Look Back upon Past Decade of Direct Torque Control", IEEE.
- [4] Peter Vas "Sensorless vector and Direct Torque Control", Oxford University Press, 1998.
- [5] B.K. Bose, and N.R. Patel, "A Programmable Cascaded Low-pass Filter Based Flux Synthesis for A Stator Flux Oriented Vector Controlled Induction Motor Drive", IEEE Trans. on Ind. Electron, pp. 140-143, 1997.

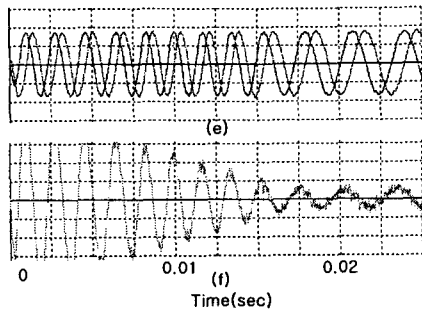


그림 9  $T_s=10\mu s$ 에서 기존 DTC의 시뮬레이션 결과

- (a) 토크 ( 기준토크:0.3 [N·m] )
- (b) 고정자 자속 크기 (기준 자속:0.34 Wb)
- (c) 속도 (눈금간격 200rpm )
- (d) 고정자 자속 궤적
- (e)  $\alpha-\beta$ 축의 고정자 자속
- (f) a상 전류파형

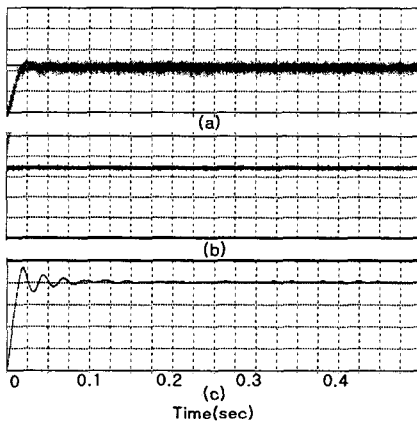


그림 10  $T_s = 10\mu s$ 에서 제안한 DTC의 시뮬레이션 결과

- (a) 토크 ( 기준토크:0.3 [N·m] )
- (b) 고정자 자속 크기 (기준 자속:0.34 Wb)
- (c) 속도 (눈금간격 200rpm )
- (d) 고정자 자속 궤적
- (e)  $\alpha-\beta$ 축의 고정자 자속
- (f) a상 전류파형