

일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기반 IPMSM의 슬라이딩 모드 제어를 이용한 속응성 향상

Improvement of Dynamic Response for IPMSM based on DTC-CFTC Using Sliding Mode Control

한 별*, 박 영 수*, 이 교 범*[★]

Byeol Han*, Yeongsu Bak*, Kyo-Beum Lee*[★]

Abstract

This paper proposes sliding mode control (SMC) method for improvement of dynamic response for IPMSM based on DTC with constant switching frequency. DTC with constant switching frequency method consists of PI torque controller and triangular comparator for constant torque error status. It has the poor dynamic response compared to conventional DTC. This paper proposes improvement method of dynamic response of DTC with constant switching frequency by using SMC. Simulation results confirm the effectiveness of the proposed method.

요 약

본 논문에서는 일정 스위칭 주파수를 가지는 직접 토크 제어(Direct Torque Control, DTC) 기반의 매입형 영구자석 동기 전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)에서 속응성 향상을 위한 슬라이딩 모드 제어(Sliding Mode Control, SMC) 기법을 제안한다. 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법은 비례-적분(Proportional-Integral, PI) 토크 제어기와 삼각파 비교기로 구성되어 토크 오차 상태를 일정하게 제어한다. 이는 일반적인 히스테리시스 기반의 DTC 기법에 비해 속응성이 좋지 않다. 본 논문에서는 SMC 기법을 이용하여 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법의 속응성을 향상시키는 방법을 제안한다. 제안하는 기법의 타당성을 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

Key words : Interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM), Direct torque control (DTC), Constant frequency torque control (CFTC), Sliding mode control (SMC), Dynamic response

* Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University

★ Corresponding author

E-mail : kyl@ajou.ac.kr, Tel : +82-31-219-2376

※ Acknowledgment

This research was supported by a grant(19RTRP-B146008-02) from Railroad Technology Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government and a grant (No.20172020108970) from the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) that was funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE).

Manuscript received Jun. 4, 2019; revised Jun. 24, 2019; accepted Jun. 27, 2019.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

영구자석 동기 전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)는 영구자석의 부착 형태에 따라 표면부착형 영구자석 동기 전동기(Surface mounted Permanent Magnet Synchronous Motor, SPMSM)와 매입형 영구자석 동기 전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)로 분류한다. IPMSM은 고속 운전에 유리하며, 출력밀도가 크고, 효율이 높아 고성능 제어가 요구되는 분야에 활발하게 적용되고 있다[1].

IPMSM의 순시 토크 제어 기법은 크게 자속 기준 제어(Field Oriented Control, FOC) 기법과 직접

토크 제어(Direct Torque Control, DTC) 기법으로 구분한다. DTC 기법은 1980년대 유도 전동기 기반에서 처음으로 제안되었으며, 이 후 PMSM 기반의 DTC 기법이 연구되었다[2]. DTC 기법은 자속과 토크를 직접 제어하므로, FOC 기법에 비해 속응성이 우수하고, 구조가 간단하며, 운전 중 전동기의 정수 변화에 영향을 받지 않는 장점이 있으나, 토크 리플이 크고, 스위칭 주파수가 일정하지 않은 단점이 있다[3].

일반적인 DTC 기법에서 토크 리플이 큰 단점을 개선하기 위해 공간 벡터 변조 기반의 DTC 기법[3], 토크 예측 제어 기법[4], 슬라이딩 모드 제어(Sliding Mode Control, SMC) 기반의 DTC 기법[5] 등 다양한 연구가 진행되었다. 그 중에서 비선형 제어 기법인 SMC를 이용한 DTC 기법은 히스테리시스 제어기를 기반으로 토크 리플을 감소시키고, 운전 중 정수 변동에도 강인한 제어 기법이다[6].

히스테리시스 제어기를 사용하는 일반적인 DTC 기법에서 스위칭 주파수가 일정하지 않은 단점을 보완하기 위해 최근에는 유도 전동기 및 PMSM 기반의 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법(Constant Frequency Torque Control, CFTC)이 연구되고 있다[7-10]. CFTC는 비례-적분(Proportional-Integral, PI) 토크 제어기와 일정 주파수의 삼각파 비교기로 결정한 토크 오차 상태를 스위칭 테이블에 인가하는 기법으로 일정 주파수의 삼각파 비교기에 의해 토크 오차 상태가 일정한 주파수를 가지게 하는 기법이다[11]. 하지만, CFTC는 PI 토크 제어기에 의해 일반적인 DTC 기법보다 속응성이 떨어지는 단점이 있다. 최근 로봇틱스, 압연 및 공작기계 등의 고성능 드라이브 분야에서는 IPMSM의 빠른 속응성이 요구되므로 이를 향상시키기 위한 방법이 필요하다.

따라서, 본 논문에서는 CFTC 기반에서 IPMSM의 속응성 향상을 위한 SMC 기법을 제안한다. 일정 스위칭 주파수에서도 속응성을 향상시키기 위해서 SMC 기법으로 토크 오차를 설정하여 슬라이딩 평면에 설정하고, 출력을 PI 토크 제어기의 입력으로 설정한다. PI 토크 제어기의 출력은 삼각파 비교기에 의해 일정한 주기를 가지는 토크 오차 상태로 제어된다. 제안하는 기법의 타당성을 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

II. IPMSM의 DTC 기법

1. IPMSM 모델링

그림 1은 IPMSM의 회전자 단면도를 나타낸다. IPMSM의 d 축은 영구자석과 공극, 철심으로 구성되어 있으며, q 축은 영구자석이 없는 구조를 가진다. 그림 1과 같은 돌극형 구조에서는 q 축 인덕턴스가 d 축 인덕턴스보다 크다. IPMSM에서는 영구자석에 의한 토크와 인덕턴스 차이에 의한 릴럭턴스 토크가 추가적으로 발생한다[1].

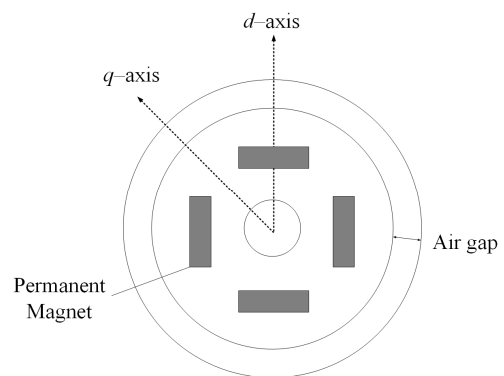


Fig. 1. Rotor section of IPMSM.

그림 1. IPMSM의 회전자 단면도

IPMSM의 회전자 쇄교 자속과 동기화한 $d-q$ 축 회전 좌표계에서의 고정자 쇄교 자속 λ_{dq} 는 식 (1), (2)와 같다.

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_f \tag{1}$$

$$\lambda_q = L_q i_q \tag{2}$$

여기서, λ_f 는 영구자석에 의한 쇄교 자속을 나타내고, L_d, L_q, i_d, i_q 는 각각 $d-q$ 축 인덕턴스와 고정자 전류를 나타낸다.

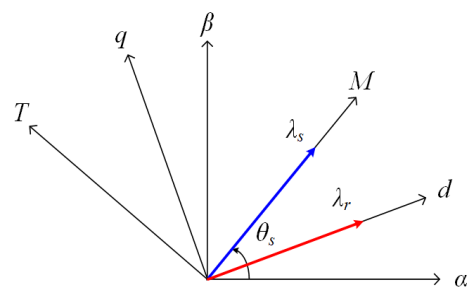


Fig. 2. Vector diagram of IPMSM.

그림 2. IPMSM의 벡터도

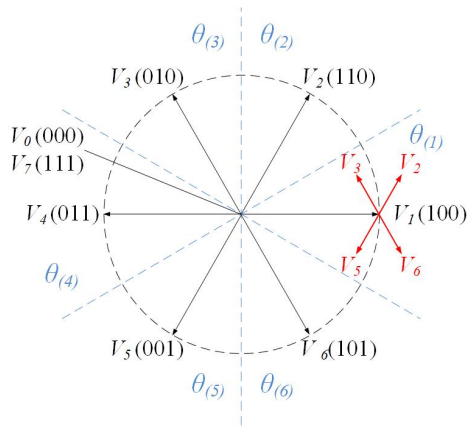


Fig. 3. Control amplitude of stator flux and sector of stator flux.

그림 3. 고정자 쇄교 자속의 크기 제어와 자속 영역

$d-q$ 축 회전 좌표계에서 돌극성을 갖는 IPMSM의 토크 (T_e)는 식 (3)과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_f i_q - (L_d - L_q) i_d i_q, \quad (3)$$

여기서, P 는 IPMSM의 극 수이다.

IPMSM의 고정자 쇄교 자속 ($\lambda_\alpha, \lambda_\beta$), 쇄교 자속의 크기 ($|\lambda_s|$), 토크 (T_e)를 $\alpha-\beta$ 축 정지 좌표계로 표현하면 식 (4), (5)와 같다.

$$\lambda_\alpha = \int (v_\alpha - i_\alpha R_s) dt, \quad \lambda_\beta = \int (v_\beta - i_\beta R_s) dt, \quad (4)$$

$$|\lambda_s| = \sqrt{\lambda_\alpha^2 + \lambda_\beta^2}$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_\alpha i_\beta - \lambda_\beta i_\alpha) \quad (5)$$

여기서, $v_{\alpha\beta}$ 와 $i_{\alpha\beta}$ 는 각각 $\alpha-\beta$ 축에서의 전압과 전류를 나타낸다.

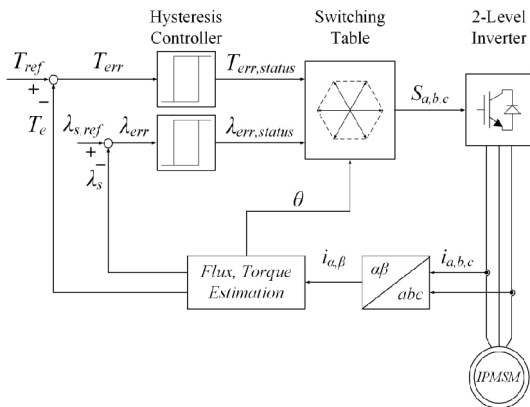


Fig. 4. Block diagram of conventional DTC method.
그림 4. 일반적인 DTC 기법의 블록도

그림 2는 IPMSM의 벡터도를 나타낸다. λ_s 와 λ_r 은 각각 IPMSM의 고정자와 회전자 쇄교 자속 벡터를 나타낸다. $\alpha-\beta$ 축은 정지 좌표계, $d-q$ 축은 회전자 쇄교 자속과 동기한 회전 좌표계, $M-T$ 축은 고정자 쇄교 자속과 동기한 회전 좌표계이며, θ_s, θ_r 은 각각 고정자, 회전자 쇄교 자속 벡터의 위상각이다.

2. IPMSM의 일반적인 DTC 기법

DTC 기법의 기본 원리는 전압 벡터의 적절한 선택으로 고정자 쇄교 자속을 직접 제어하여 토크를 제어하는 것이다. 전압 벡터는 스위칭 상태 변화를 최소화하는 방식으로 선택하여 구동 인버터에 인가한다.

식 (4)에서 고정자 쇄교 자속을 한 주기만 고려하면, 식 (4)는 식 (6)으로 표현할 수 있다.

$$\lambda_s = V_s t - R \int i_s dt + \lambda_{s|t=0}. \quad (6)$$

식 (6)에서 고정자 저항을 무시하면, 고정자 쇄교 자속 벡터 λ_s 는 그림 3과 같이 인가하는 전압 벡터의 방향으로 이동하는 것을 알 수 있다[2].

Table 1. Switching table of conventional DTC method.

표 1. 일반적인 DTC 기법의 스위칭 테이블

		$\theta_{(1)}$	$\theta_{(2)}$	$\theta_{(3)}$	$\theta_{(4)}$	$\theta_{(5)}$	$\theta_{(6)}$
$\psi = 1$	$T = 1$	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	$T = -1$	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
$\psi = -1$	$T = 1$	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
	$T = -1$	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

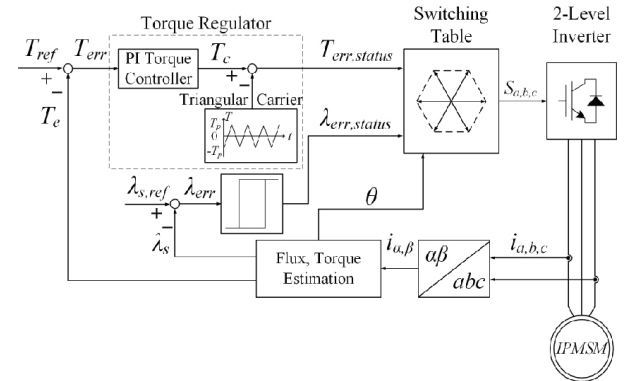


Fig. 5. Block diagram of CFTC method.

그림 5. 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법의 블록도

일반적인 DTC 기법은 토크 및 쇄교 자속 추정기, 히스테리시스 제어기, 스위칭 테이블로 구성한다. 인가하는 전압 벡터는 추정된 자속이 위치한 영역과 히스테리시스 제어기 출력에 따라 스위칭 테이블에서 결정된다.

그림 4는 일반적인 DTC 기법의 블록도를 나타낸다. 일반적인 DTC 기법의 스위칭 테이블은 표 1과 같다.

3. 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC(CFTC) 기법

그림 5는 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법(CFTC)을 나타낸다. 일반적인 CFTC 기법은 적절한 전압 벡터의 선택으로 고정자 쇄교 자속을 직접 제어하여 토크를 제어하는 일반적인 DTC 기법과 유사하다[11].

토크 및 쇄교 자속 추정기를 통해 IPMSM의 토크와 자속을 계산하며, 자속 히스테리시스 제어기로 자속 오차 상태를 결정하고, 스위칭 테이블을 이용하여 전압 벡터를 선택한다. 일반적인 DTC 기법에서는 히스테리시스 제어기를 통해 토크 오차 상태를 결정한다. 이와 달리, CFTC 기법에서는 PI 토크 제어기의 출력을 삼각파와 비교하는 토크 레귤레이터로 토크 오차 상태를 결정한다. 하지만, CFTC 기법은 일반적인 DTC 기법에 비해서 속응성이 좋지 않다[10].

그림 6은 토크 레귤레이터에 의한 토크 오차 상태를 나타내며, 토크 오차 상태는 식 (7)과 같이 PI 토크 제어기의 출력(T_c)과 삼각파(Carrier)를 비교

하여 결정한다.

$$T_{err,status} = \begin{cases} 1, & T_c \geq Carrier \\ -1, & T_c < Carrier \end{cases}, \tag{7}$$

여기서, T_c 는 PI 토크 제어기의 출력이다.

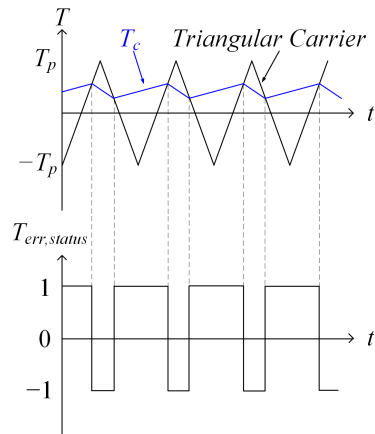


Fig. 6. Torque error status using torque regulator. 그림 6. 토크 레귤레이터에 의한 토크 오차 상태

III. 제안하는 SMC를 이용한 CFTC 기법

그림 7은 제안하는 SMC를 이용한 CFTC 기법의 제어 블록도를 나타낸다. 2-레벨 인버터로 전동기를 구동하며, 제어 블록도는 SMC와 CFTC 부분으로 구성한다. SMC 부분은 선형 구조와 가변 구조의 병행 입력을 가진다. CFTC 부분은 일반적인 CFTC 기법과 동일한 구조를 가진다.

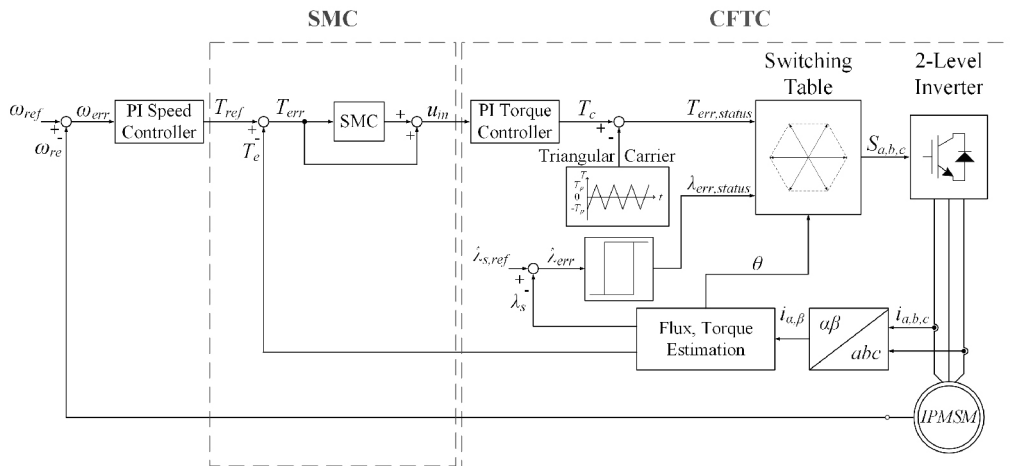


Fig. 7. Control block diagram of IPMSM based on CFTC using SMC. 그림 7. SMC를 이용한 CFTC 기반의 IPMSM 제어 블록도

1. 슬라이딩 모드 제어

그림 8은 그림 7의 SMC 블록도를 나타낸다. SMC 출력은 부호 함수화한 슬라이딩 평면과 SMC 이득 K_{smc} 의 곱을 입력과 합하여 계산한다.

SMC는 비선형 제어 기법으로 슬라이딩 평면에 오차 궤적을 설정하여 정수 변동 및 외란에 강인한 특징이 있다[5-6]. 본 논문에서는 IPMSM 토크의 속응성을 향상시키기 위하여 SMC를 적용한다. 식 (8)과 같이 IPMSM 토크와 지령 토크의 차이인 토크 오차(T_{err})와 토크 오차의 적분을 합하여 슬라이딩 평면을 설정한다.

$$Surface = T_{err} + k \int T_{err} dt, \quad (8)$$

여기서, 토크 오차 $T_{err} = T_{ref} - T_e$ 로 T_{ref} 는 지령 토크이며, k 는 슬라이딩 평면 계수(Sliding Surface Coefficient)이다.

SMC에서 토크 오차 값이 슬라이딩 평면에 수렴하기 위해서는 식(8)이 식(9)의 조건을 만족해야 한다.

$$Surface = T_{err} + k \int T_{err} dt = 0. \quad (9)$$

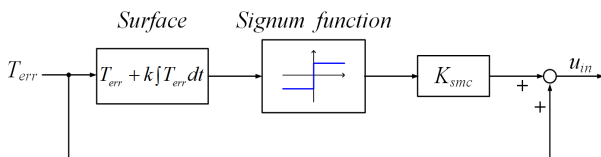


Fig. 8. Block diagram of SMC.

그림 8. SMC 블록도

식 (9)의 조건에 따라 식 (8)을 식 (10)으로 표현할 수 있다.

$$T_{err} = -k \int T_{err} dt. \quad (10)$$

SMC 적용을 위해 식 (11)과 같이 선형 구조의 PI 토크 제어기와 가변 구조의 슬라이딩 평면으로 제어 입력을 설정한다.

$$U_{in} = T_{err} + K_{smc} \cdot \text{sgn}(Surface), \quad (11)$$

여기서, K_{smc} 는 슬라이딩 모드 제어 이득이며, $\text{sgn}(Surface)$ 는 부호 함수이다.

제어기의 입력을 식 (11)과 같이 설정하면 강인하고 속응성이 우수한 특성을 갖지만, 정상 상태에

서는 토크 오차가 0으로 수렴하기 때문에 가변 구조의 SMC는 노이즈에 취약하여 제어기 출력에 채터링(Chattering) 현상이 발생한다[5]. 이를 완화하기 위해 식 (12)와 같이 슬라이딩 평면을 부호 함수화한다.

$$\text{sgn}(Surface) = \begin{cases} 1, & (Surface > 0) \\ 0, & (Surface = 0) \\ -1, & (Surface < 0). \end{cases} \quad (12)$$

Table 2. Simulation parameters.

표 2. 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Value
DC-Link Voltage [V]	400
Sampling Time [μ s]	25
Rated Power [kW]	11
Rated Speed [rpm]	1800
Rated Torque [N · m]	58.35
PMSM Stator Resistance [Ω]	0.349
PMSM d -axis Inductance [mH]	13.17
PMSM q -axis Inductance [mH]	15.5
Pole	6

슬라이딩 평면이 정상 상태의 오차 0보다 큰 경우, 부호 함수는 1이 되고 PI 토크 제어기의 입력은 $U_{in} = T_{err} + K_{smc}$ 이 되어 기존 토크 오차 T_{err} 보다 큰 값을 가지게 된다. PI 토크 제어기의 출력은 슬라이딩 모드 이득 K_{smc} 에 따라 토크 오차 T_{err} 보다 더 큰 값을 가지게 된다. 따라서, 지령 토크에 대한 IPMSM 토크의 속응성은 슬라이딩 모드 이득 K_{smc} 의 값에 따라 결정된다.

IV. 시뮬레이션 결과

제안하는 기법의 타당성을 검증하기 위해 PSIM tool을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 파라미터는 표 2와 같다.

그림 9와 그림 10은 일반적인 CFTC 기법과 제안하는 SMC를 이용한 CFTC에서 IPMSM 토크 제어 시뮬레이션 결과를 나타낸다. IPMSM의 속도는 300 rpm으로 설정하였으며, 지령 쇠교 자속은 0.9 Wb, 지령 토크는 20 Nm, 40 Nm로 가변하였다. 토크 레귤레이터의 삼각파 주기는 150 μ s이며, T_p 는 60 Nm로 설정하였으며, PI 토크 제어기의 비례, 적분 이득 K_{pt} , K_{it} 는 각각 3과 30으로 설정하였

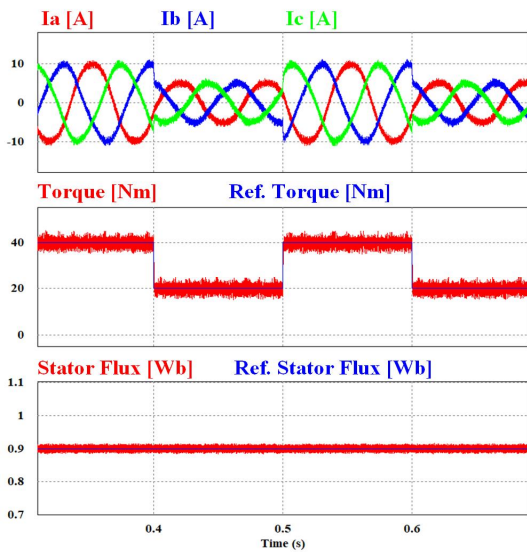


Fig. 9. Simulation result about IPMSM torque control using conventional CFTC.
 그림 9. 일반적인 CFTC에서의 IPMSM 토크 제어 시뮬레이션 결과

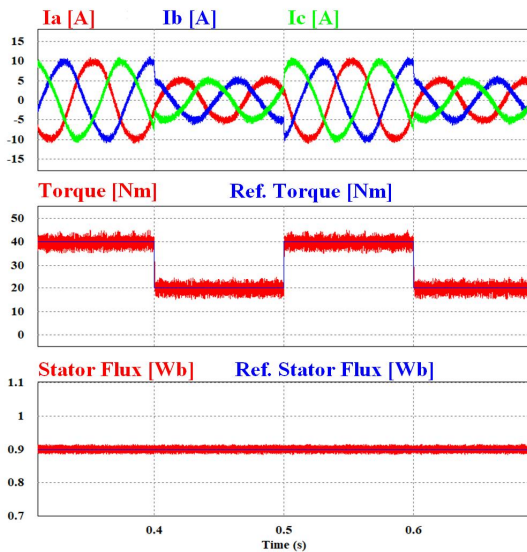


Fig. 10. Simulation result about IPMSM torque control using proposed method with SMC CFTC.
 그림 10. 제안하는 SMC를 이용한 CFTC에서의 IPMSM 토크 제어 시뮬레이션 결과

다. 슬라이딩 평면 계수 k 는 1로 설정하였고, 정상 상태에서 출력 토크에 불필요한 채터링 현상이 발생하지 않도록 SMC 이득 K_{smc} 를 4로 설정하였다. 그림 11과 그림 12는 일반적인 CFTC 기법과 제안하는 SMC를 이용한 CFTC 기법에서 지령 토크 가변 시의 속응성에 관한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. IPMSM의 속도는 300 rpm으로 설정하였으며, 지령 쇄교 자속은 0.9 Wb, 지령 토크는 0.5 s에

20 Nm에서 40Nm으로 설정하였다. 그림 11에 나타낸 일반적인 CFTC 기법에서 토크 제어 응답 시간은 0.89 ms이며, 그림 12에 나타낸 제안하는 SMC를 이용한 CFTC 기법에서 토크 제어 응답 시간은 0.45 ms이다.

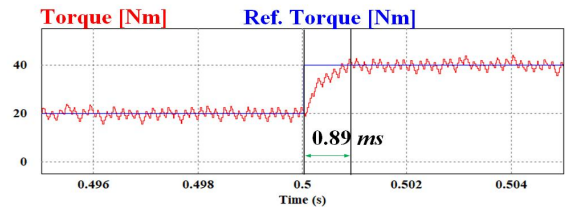


Fig. 11. Simulation result about dynamic response of torque control using conventional CFTC.
 그림 11. 지령 토크 가변에 따른 일반적인 CFTC에서의 속응성 시뮬레이션 결과

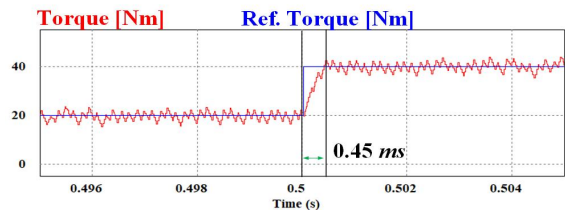


Fig. 12. Simulation result about dynamic response of torque control using proposed method with SMC CFTC.
 그림 12. 지령 토크 가변에 따른 제안하는 SMC를 이용한 CFTC에서의 속응성 시뮬레이션 결과

그림 13과 그림 14는 각각 일반적인 CFTC 기법과 제안하는 SMC를 이용한 CFTC 기법에서의 IPMSM 속도 제어 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 부하 토크는 15 Nm로 설정하였으며, 지령 쇄교 자속은 0.9 Wb로 설정하였다. 지령 속도는 300 rpm에서 900 rpm으로 설정하였다. 토크 레귤레이터의 삼각파 주기는 150 μ s이며, T_p 는 60 Nm로 설정하였다. 슬라이딩 평면 계수 k 는 1로 설정하였고, SMC 이득 K_{smc} 는 4로 설정하였다.

그림 15, 그림 16은 일반적인 CFTC 기법과 제안하는 SMC를 이용한 CFTC 기법에서 지령 속도 가변 시의 토크 속응성에 관한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 부하 토크는 15 Nm로 설정하였으며, 지령 속도는 0.5 s에 300 rpm에서 900 rpm으로 설정하였다. 그림 15에 나타낸 일반적인 CFTC 기법에서 토크 제어 응답 시간은 1.61 ms이며, 그림 16에 나타낸 제안하는 SMC를 이용한 CFTC 기법에서 토크 제어 응답 시간은 1.18 ms이다. 결과적으로, 제

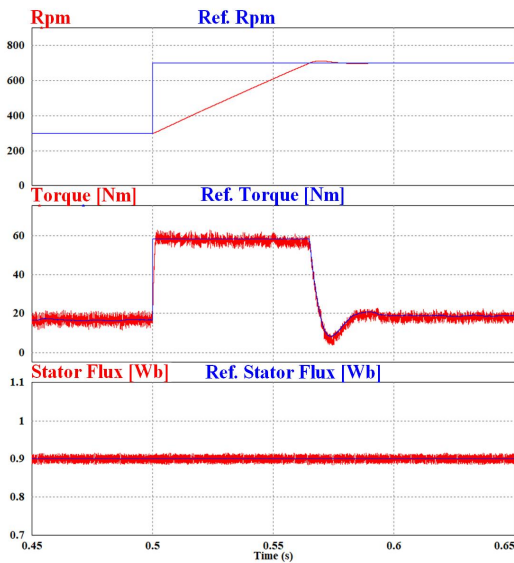


Fig. 13. Simulation result about IPMSM speed control using conventional CFTC.

그림 13. 일반적인 CFTC에서의 IPMSM 속도 제어 시뮬레이션 결과

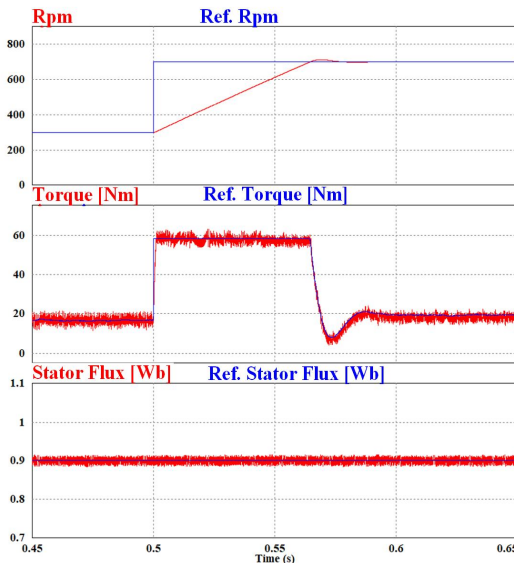


Fig. 14. Simulation result about IPMSM speed control using proposed method with SMC CFTC.

그림 14. 제안하는 SMC를 이용한 CFTC에서의 IPMSM 속도 제어 시뮬레이션 결과

안하는 SMC를 이용한 CFTC 기법으로 IPMSM의 토크 제어 속응성이 향상되었다.

V. 결론

본 논문에서는 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기반 IPMSM의 SMC를 이용한 속응성 향상

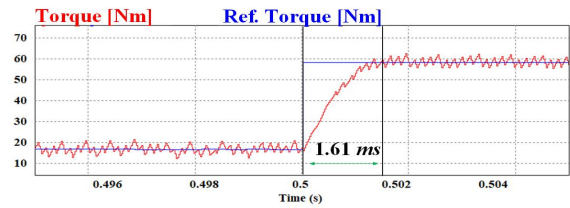


Fig. 15. Simulation result about dynamic response of speed control using conventional CFTC.

그림 15. 제안하는 SMC를 이용한 CFTC에서의 IPMSM 속도 제어 시뮬레이션 결과

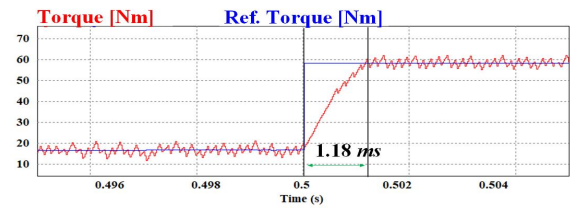


Fig. 16. Simulation result about dynamic response of speed control using proposed method with SMC CFTC.

그림 16. 제안하는 SMC를 이용한 CFTC에서의 IPMSM 속도 제어 시뮬레이션 결과

기법을 제안하였다. 토크 오차를 슬라이딩 평면에 위치하여 새로운 토크 오차를 설정하였으며, 토크 레귤레이터의 입력으로 설정하였다. 토크 레귤레이터를 통해 일정한 토크 오차 상태를 얻고, PI 토크 제어기의 이득을 적절히 선정하여 IPMSM의 토크를 제어하였다. 이러한 기법을 통해 IPMSM 토크의 속응성을 향상시켰다. SMC를 이용한 제안하는 기법의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

References

- [1] K.-B. Lee, *Advanced Power Electronics Engineering*, Munundang, 2019.
- [2] L. Zhong, M. F. Rahman, W. Y. Hu, K. W. Lim, and M. A. Rahman, "A Direct Torque Controller for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol.14, no.3, pp.637-642, 1999. DOI: 10.1109/60.790928
- [3] L. Tang, L. Zhong, M. F. Rahman, and Y. Hu, "A Novel Direct Torque Control for Interior Permanent-Magnet Synchronous Machine Drive With Low Ripple in Torque and Flux-A Speed-Sensorless Approach," *IEEE Trans. Ind. Appl.*,

vol.39, no.6, pp.1748–1756, 2003.

DOI: 10.1109/IAS.2002.1044074

[4] Y. Cho, Y. Bak, and K.-B. Lee, “Torque-Ripple Reduction and Fast Torque Response Strategy for Predictive Torque Control of Induction Motors,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol.33, no.3, pp.2458–2470, 2018. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2699187

[5] Y. Zhang, X. Jian, L. Cai, and L. Ni, “Sliding Mode Control Design in Traction Motor Direct Torque Control,” in *Proc. VPPC*, pp.1–6, 2016.

DOI: 10.1109/VPPC.2016.7791777

[6] L. Meng and X. Yang, “Comparative Analysis of Direct Torque Control and DTC based on Sliding Mode Control for PMSM Drive,” in *Proc. CCDC*, pp.736–741, 2017.

DOI: 10.1109/CCDC.2017.7978529

[7] I. M. Alsofyani, J.-H. Lee, B.-M. Han, and K.-B. Lee, “Improved Performance of CFTC-based Direct Torque Control of Induction Machines by Increasing Torque Loop Bandwidth,” in *Proc. IPEC*, pp.466–470, 2018.

DOI: 10.23919/ipe.2018.8507989

[8] I. M. Alsofyani and K.-B. Lee, “Modified Frequency Carriers for Improving DTC with Constant Frequency Torque Controller of Induction Machines,” in *Proc. CENCON*, pp.128–132, 2017. DOI: 10.1109/CENCON.2017.8262471

[9] D. Mohan, X. Zhang, and G. H. Foo, “Three-Level Inverter-Fed Direct Torque Control of IPMSM With Constant Switching Frequency and Torque Ripple Reduction,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.63, no.12, pp.7908–7918, 2016.

DOI: 10.1109/TIE.2016.2547907

[10] I. M. Alsofyani and K.-B. Lee, “Improved Overmodulation Strategy in DTC with Constant Frequency Torque Controller of PMSM for Quick Torque Control at Different Dynamic Condition,” in *Proc. ECCE*, pp.3394–3399, 2018.

DOI: 10.1109/ECCE.2018.8557694

[11] X. Zhang and G. Foo, “A Constant Switching Frequency-Based Direct Torque Control Method for Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives,” *IEEE Trans. Mechatron.*, vol.21,

no.3, pp.1445–1456, 2016.

DOI: 10.1109/TMECH.2015.2480782

BIOGRAPHY

Byeol Han (Member)



2015 : BS degree in Electronic System Engineering, Hanyang University ERICA.

2019~present : MS student in Electrical and Computer Engineering, Ajou University.

Yeongsu Bak (Member)



2014 : BS degree in Electrical and Computer Engineering, Ajou University.

2016 : MS degree in Electrical and Computer Engineering, Ajou University.

2016~present : PhD student in Electrical and Computer Engineering, Ajou University.

Kyo-Beum Lee (Member)



1997 : BS degree in Electrical and Electronic Engineering, Ajou University.

1999 : MS degree in Electrical and Electronic Engineering, Ajou University.

2003 : PhD degree in Electrical Engineering, Korea University.

2003~2006 : Research Associate, Institute of Energy Technology, Aalborg University.

2006~2007 : Assistant Professor, Chonbuk National University.

2007~present : Professor, Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University.