

# Direct Torque Control of IPMSMs for Fast Dynamic Response with Constant Switching Frequency

매입형 영구자석 동기 전동기에서 속응성이 향상된 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법

Eun-Kyeol Shin · Kyo-Beum Lee

신은결\* · 이교범†

## Abstract

This paper proposes the direct torque control (DTC) of interior permanent magnet synchronous motors (IPMSMs) for fast dynamic response with constant switching frequency. The conventional DTC is constructed based on the hysteresis flux and torque controllers with the flux and torque errors as input. The switching frequency of DTC is not constant. In the DTC with constant switching frequency, a torque regulator with a constant switching frequency is applied to overcome this problem, instead of the hysteresis torque controller for the conventional DTC. The DTC with constant switching frequency uses a torque regulator with a proportional-integral (PI) torque controller and a triangular carrier to realize a constant switching frequency. Compared to the conventional DTC, the DTC with constant switching frequency has the poor dynamic response because both voltage vectors increasing and decreasing torque are selected in the transient state. In this paper, the bandwidth of PI torque controller is varied to improve the dynamic response of the DTC with constant switching frequency. The effectiveness of the proposed method is verified through simulation results.

## Key Words

Constant switching frequency, Direct torque control (DTC), Dynamic response, Interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM)

## 1. 서론

최근, 자석의 가격 하락으로 인하여 매입형 영구자석 동기 전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)의 사용량이 증가하고 있다[1]. IPMSM은 높은 출력 밀도 및 토크 밀도로 인하여 로보틱스, 서보 드라이브 등 다양한 산업 분야에서 널리 사용되고 있다[2]-[7]. 특히, IPMSM의 경우, 회전자 내부에 삽입된 영구자석의 기계적 구조로 인하여 고속운전에 적합하다는 장점이 있다.

IPMSM의 토크 제어 기법의 경우, 크게 자속 기준 제어(Field-Oriented Control, FOC) 기법과 직접 토크 제어(Direct Torque Control, DTC) 기법으로 나눌 수 있다. FOC 기법은 비례-적분(Proportional-Integral, PI) 제어를 이용하여 동기 좌표계에서 고정자 전류를 통해 고정자 자속 및 토크를 제어하는 일반적인 기법이다[6]-[8]. FOC 기법은 동적 응답 특성이 좋지만, 좌표변환을 요구하기 때문에 연산량이 많다. DTC 기법은 히스테리시스 제어를 이

용하여 정지 좌표계에서 고정자 자속 및 토크를 직접 제어하는 기법이다[9]-[13]. DTC 기법은 파라미터 변화에 민감하지 않고, FOC 기법에 비해 제어 구조가 간단하며 더 좋은 동적 응답 특성을 갖는다. 하지만 토크 리플이 크고, 스위칭 주파수가 일정하지 않다.

일정 스위칭 주파수를 갖는 대안으로, 공간 벡터 변조를 이용하는 DTC 기법과 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법에 대한 연구가 진행되고 있다. 공간 벡터 변조를 이용하는 DTC 기법의 경우, PI 제어기와 지령 자속 벡터 연산기를 이용하여 고정자 지령 자속을 생성한다[12]-[15]. 고정자 지령 전압은 생성된 고정자 지령 자속으로 계산된다. 기존의 DTC 기법과 달리, 고정자 지령 전압이 제어 주기 이내에 계산되고, 공간 벡터 변조를 이용하여 스위칭 시퀀스를 결정한다. 공간 벡터 변조를 이용하여 스위칭 시퀀스를 결정하기 때문에 스위칭 주파수가 일정하다. 그러나 공간 벡터 변조를 이용하는 DTC 기법은 기존의 DTC 기법에 비해 제어 구조가 복잡하다. 일정 스

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Korea.

E-mail: kyl@ajou.ac.kr  
<https://orcid.org/0000-0002-2125-9500>

\* Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Korea.  
<https://orcid.org/0000-0001-7058-2067>

Received: Dec. 20, 2022 Revised: Feb. 16, 2023 Accepted: Feb. 23, 2023

Copyright © The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



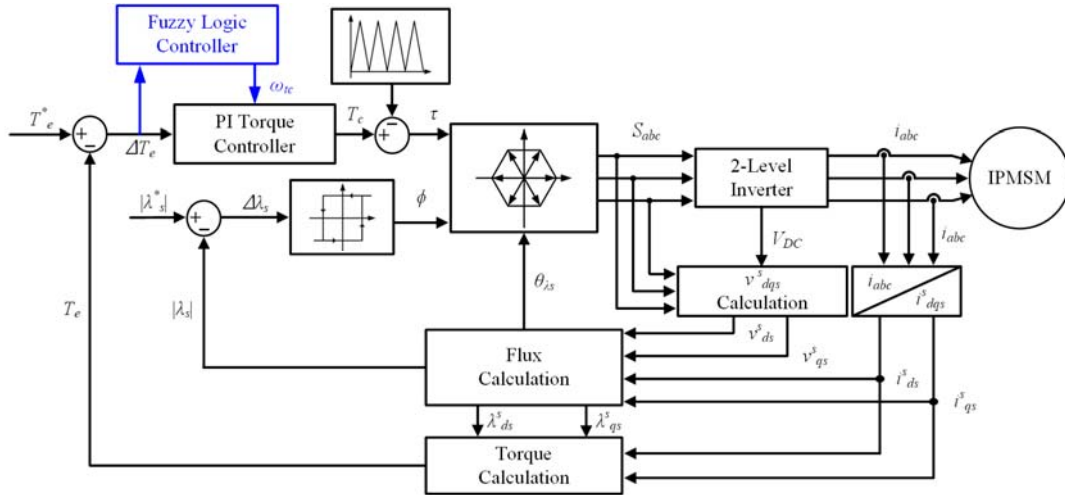


그림 3 제안하는 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법의 제어 블록도

Fig. 3 The block diagram of proposed DTC with constant switching frequency

반송파로 구성된 토크 레귤레이터의 동작은 그림 2와 같이 나타낼 수 있으며, 여기서  $T_p$ 는 삼각 반송파의 피크값을 의미하며, carrier wave는 삼각 반송파를 의미한다.

토크 레귤레이터의 동작에 따라 토크 오차 상태 ( $\tau$ )는 다음과 같이 결정된다.

$$\tau = \begin{cases} 1 & (T_c \geq \text{carrier wave}) \\ 0 & (T_c < \text{carrier wave}). \end{cases} \quad (6)$$

스위칭 시퀀스는 자속 및 토크 오차 상태와 자속각의 영역을 기준으로 스위칭 테이블에 따라 결정된다. 이때, 과도상태에서 토크를 증가 및 감소시키는 전압 벡터가 모두 선택되기 때문에 동적 응답 특성이 좋지 않다.

### 3. 속응성이 향상된 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법

#### 3.1 제안하는 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법

그림 3은 제안하는 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법의 제어 블록도를 나타낸다. 동적 응답 특성을 향상시키기 위해 토크 레귤레이터에 퍼지 로직 제어를 포함한다. 퍼지 로직 제어는 토크 오차에 따라 PI 토크 제어기의 대역폭 ( $\omega_c$ )을 결정한다. 그리고 대역폭에 따라 동적 응답 특성을 향상시키기 위한 적절한 비례 이득 및 적분 이득이 결정된다. 결과적으로, 제안하는 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법은 기존의 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법의 장점을 유지하면서 동적 응답 특성이 개선된다.

#### 3.2 퍼지 로직 제어의 설계

퍼지 로직 제어는 아날로그 값을 분석하는 수학적 시스템 기

반의 제어 방법이다[20]-[21]. 퍼지 로직 제어는 세 가지의 변환 과정으로 분류된다: Fuzzification, Rule evaluation, Defuzzification. 세 변환 과정을 통해, 퍼지 로직 제어기는 입력 변수로부터 출

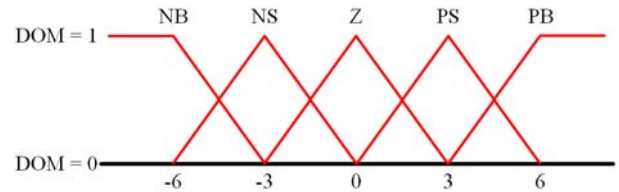


그림 4 멤버십 함수

Fig. 4 The membership function

표 1 멤버십 함수의 정의

Table 1 The definition of the membership function

| Membership Function | Meaning              | Value |
|---------------------|----------------------|-------|
| NB                  | Negative big value   | -6    |
| NS                  | Negative small value | -3    |
| Z                   | Zero                 | 0     |
| PS                  | Positive small value | 3     |
| PB                  | Positive big value   | 6     |

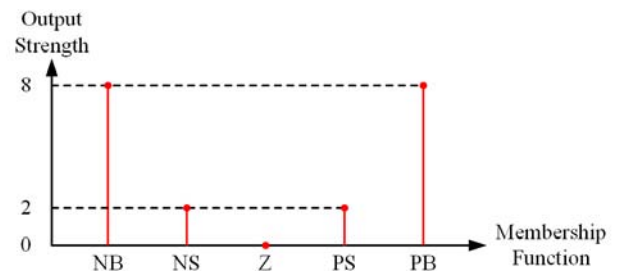


그림 5 멤버십 함수의 가중치

Fig. 5 The output strength of the membership function

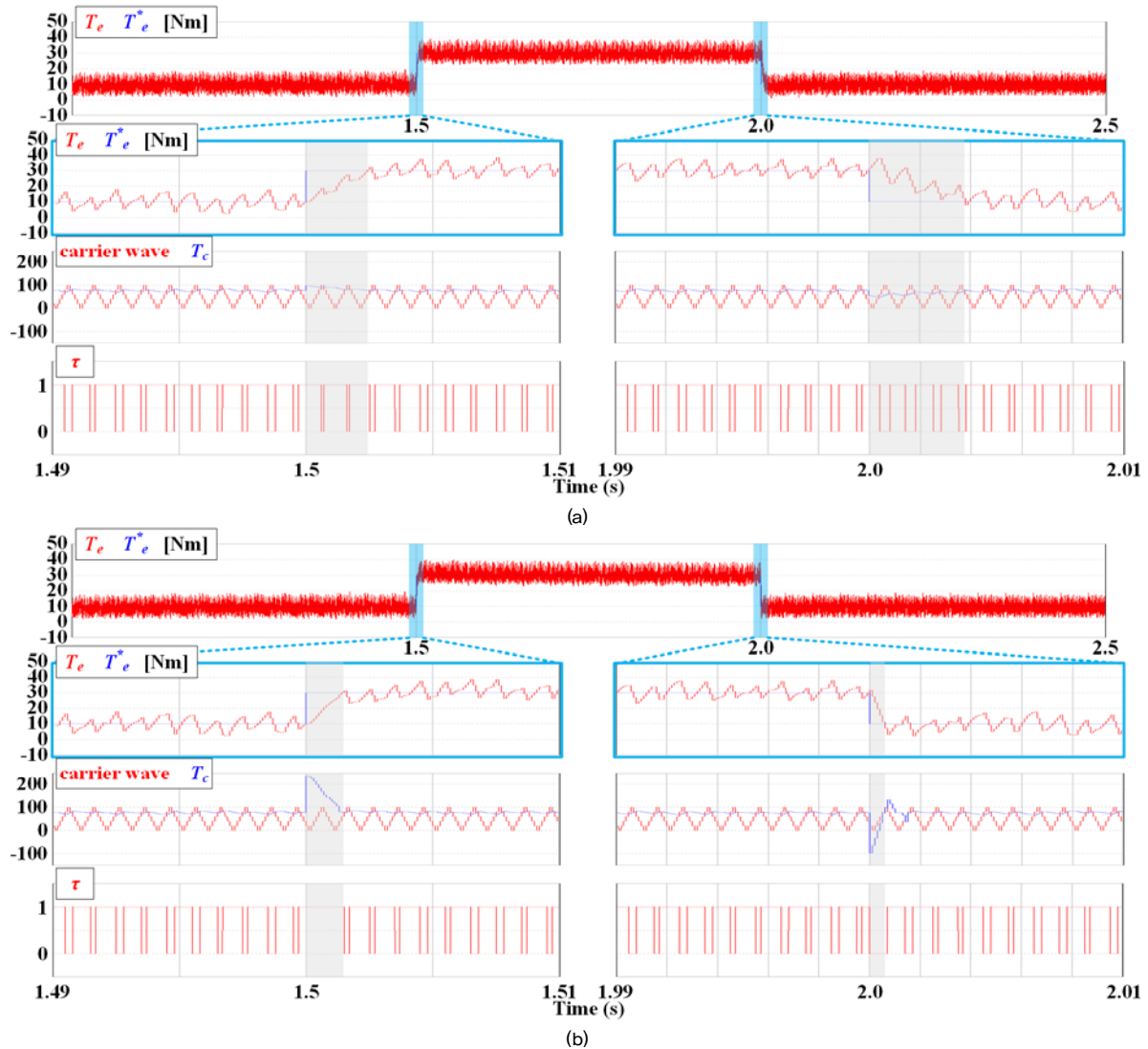


그림 6 시뮬레이션 결과: (a) 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법 (b) 제한하는 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법  
Fig. 6 The simulation results of the (a) DTC with constant switching frequency and (b) proposed DTC with constant switching frequency

력 변수를 도출한다. 본 논문에서는 토크 오차에 따라 동적 응답 특성을 개선하기 위해 퍼지 로직 제어기의 입력 변수를 토크 오차로 설정하였으며, 출력 변수를 PI토크 제어기의 대역폭으로 설정하였다.

Fuzzification 과정은 입력 변수를 하나 이상의 멤버십 함수에 할당시키고, 멤버십 함수에 속하는 정도(Degree of Membership, DOM)를 결정하는 과정이다. 멤버십 함수는 삼각형, 다각형, 가우시안 등 다양한 형태로 구성될 수 있다. 하지만 삼각 멤버십 함수의 경우, 다른 형태의 멤버십 함수보다 구현 측면에서 용이하다. 또한 삼각 멤버십 함수를 이용하는 퍼지 로직 제어의 경우, 다른 형태의 멤버십 함수를 이용하는 퍼지 로직 제어보다 오버슈트가 없고 동적 응답 특성이 좋다. 따라서 본 논문에서는 삼각 멤버십 함수를 이용하며, 삼각 멤버십 함수의 개수 및 값은 퍼지 로직 제어의 우수한 성능을 달성하도록 설정되었다.

DOM을 포함한 삼각 멤버십 함수를 그림 4에 나타내었다. 퍼

지 로직 제어에 사용된 삼각 멤버십 함수는 5개의 삼각 멤버십 함수로 구성했으며, DOM은 0부터 1로 설정하였다. 표 1은 삼각 멤버십 함수의 정의를 나타낸다. 6 [Nm]의 토크 오차는 큰 오차값으로, 3 [Nm]의 토크 오차는 작은 오차값으로 선정하였다. 따라서, NB는 음의 큰 값을, PB는 양의 큰 값을 의미하여 각각 -6과 6으로 설정되었다. NS는 음의 작은 값을, PS는 양의 작은 값을 의미하여 각각 -3과 3으로 설정되었으며, Z는 Zero를 의미하여, 0으로 설정되었다.

Rule evaluation 과정은 가중치를 결정하는 과정이다. 그림 5는 삼각 멤버십 함수의 가중치를 보여준다. 본 논문에서 가중치의 값은 안정한 범위 내에서 동적 응답 특성이 좋은 값으로 설정하였다.

마지막으로, Defuzzification 과정은 각 삼각 멤버십 함수의 DOM과 가중치를 통해 퍼지 로직 제어의 출력 변수를 계산하는 과정이다. 퍼지 로직 제어의 출력 변수는 입력 변수에 대한 각 삼각 멤버십 함수의 DOM과 가중치의 곱들의 합으로 표현

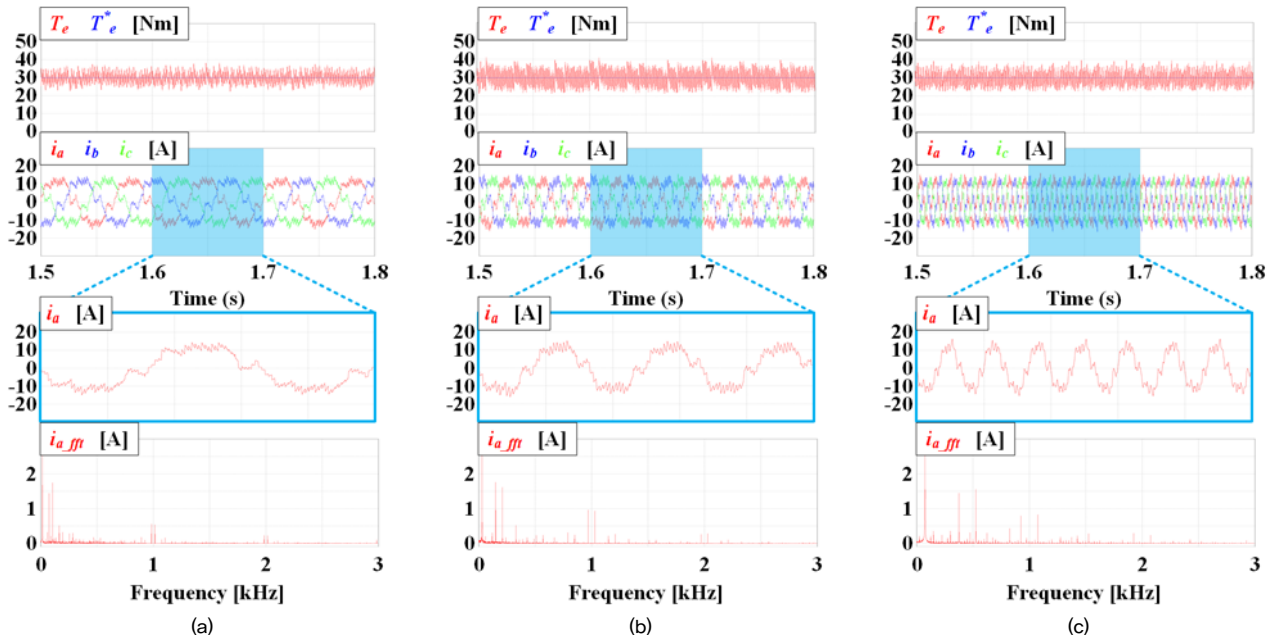


그림 7 제안하는 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법의 FFT 분석 결과: (a) 300 [rpm] (b) 600 [rpm] (c) 1500 [rpm]

Fig. 7 The FFT analysis results of the proposed DTC with constant switching frequency at (a) 300 [rpm], (b) 600 [rpm] and (c) 1500 [rpm]

할 수 있으며, 식 (7)과 같다.

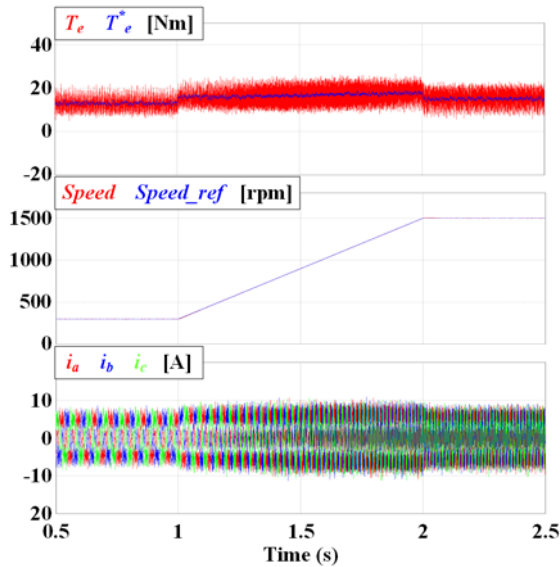


그림 8 제안하는 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법을 이용한 속도 제어 시뮬레이션 결과

Fig. 8 The simulation results of the speed control with the proposed DTC with constant switching frequency

$$\begin{aligned} \omega_{tc} = & DOM(NB) \cdot 8 + DOM(NS) \cdot 2 \\ & + DOM(Z) \cdot 0 + DOM(PS) \cdot 2 \\ & + DOM(PB) \cdot 8. \end{aligned} \quad (7)$$

#### 4. 시뮬레이션 결과

제안하는 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법의 성능을 검증하기 위해 PSIM 시뮬레이션 툴을 이용하여 시뮬레이션을

진행하였다. IPMSM의 파라미터는 표 2에 나타내었다. 시뮬레이션 조건은 다음과 같다:  $V_{DC}$ 는 600 [V]이고 제어 주기는 100 [ $\mu$ s]이며, 삼각 반송파의 주파수는 1 [kHz] 이다.

표 2 IPMSM의 파라미터

Table 2 IPMSM parameters

| Parameter             | Value   | Unit                         |
|-----------------------|---------|------------------------------|
| Rated power           | 11      | kW                           |
| Rated speed           | 1750    | rpm                          |
| Rated torque          | 60      | Nm                           |
| Stator resistance     | 0.349   | $\Omega$                     |
| d-axis inductance     | 0.01317 | H                            |
| q-axis inductance     | 0.0156  | H                            |
| Number of poles       | 6       |                              |
| Permanent magnet flux | 0.554   | Wb                           |
| Moment of inertia     | 0.2     | $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ |

그림 6은 IPMSM의 회전속도가 1500 [rpm]일 때의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 6 (a)와 그림 6 (b)는 각각 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법과 제안하는 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법의 동적 응답 특성을 보여준다. 지령 토크의 값이 10 [Nm]에서 30 [Nm]로 변화하는 것과 30 [Nm]에서 10 [Nm]로 변화하는 것을 구현하였다. 기존의 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법의 경우, 과도상태에서 토크를 증가 및 감소시키는 전압 벡터가 모두 선택되었다. 하지만 제안하는 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법의 경우, 과도상태에서 토크가 증가되거나 감소되는 전압 벡터만 선택됨을 확인할 수 있다. 지령 토크의 값이 10 [Nm]에서 30 [Nm]로 변화하는 경

우, 2.4 [ms]에서 1.4 [ms]로 단축되었으며, 지령 토크의 값이 30 [Nm]에서 10 [Nm]로 변화하는 경우, 3.8 [ms]에서 0.6 [ms]로 단축되었다.

그림 7은 제안하는 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법의 Fast Fourier Transformation (FFT) 분석 결과를 나타낸다. 그림 7 (a), 그림 7 (b), 및 그림 7 (c)는 IPMSM에서 정상상태 기동 시, 각각 300 [rpm], 600 [rpm], 1500 [rpm]의 회전속도에서 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 7은 토크( $T_e$ ), 지령 토크( $T_e^*$ ), 3상 고정자 전류( $i_{abc}$ )를 나타낸다. 추가로, 스위칭 주파수 대역을 분석하기 위해 a상 전류의 FFT 분석 결과를 나타내며, 삼각 반송파의 주파수 대역에서 지배적인 고조파를 보인다. 따라서, 제안하는 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법의 스위칭 주파수가 거의 일정함을 확인하였다. 또한, 스위칭 주파수가 일정해짐으로써 손실을 예측할 수 있으므로, 신뢰성이 높다는 장점이 있다.

그림 8은 제안하는 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법을 이용한 속도 제어 시뮬레이션 결과이며, 토크( $T_e$ ), 지령 토크( $T_e^*$ ), IPMSM의 회전속도 (Speed) 및 지령 속도 (Speed\_ref), 그리고 3상 고정자 전류( $i_{abc}$ )를 나타낸다. 이때의 부하 토크는 정격 토크의 20%로 적용하였으며, 제안하는 기법을 적용하였을 때 속도 제어가 원활하게 수행됨을 확인하였다.

## 5. 결론

본 논문에서는 IPMSM에서 속응성이 향상된 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법을 제안하였다. 기존의 DTC 기법의 경우, 히스테리시스 자속 및 토크 제어를 이용함으로써 스위칭 주파수가 일정하지 않다. 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법에서, 히스테리시스 토크 제어기 대신 일정 스위칭 주파수를 가지는 토크 레귤레이터를 이용함으로써 이러한 문제를 극복하였다. 기존의 DTC 기법에 비해, 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법은 과도상태에서 토크를 증가 및 감소시키는 전압 벡터가 모두 선택됨으로써 동적 응답 특성이 좋지 않다. 따라서, 토크 오차에 따라 PI 토크 제어기의 대역폭을 가변시킴으로써 일정 스위칭 주파수를 가지는 DTC 기법의 동적 응답 특성을 개선하였다. 제안하는 기법의 유효성 및 성능을 시뮬레이션 결과를 통해 검증하였다.

### Acknowledgements

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20225500000110)

## References

- [1] K.-B. Lee, Advanced Power Electronics, munundang, 2019, ISBN 979-11-5692-402-9.
- [2] H.-W. Lee, D.-H. Cho., and K.-B. Lee, "Rotor Position Estimation Over Entire Speed Range of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors," J. Power Electron., vol. 21, no. 4, pp. 693-702, Apr. 2021.
- [3] D.-H. Cho., Y. Bak., and K.-B. Lee, "Method of Estimating Initial Rotor Position for IPMSMs Using Subdivided Voltage Vectors Based on Inductance Variation," J. Power Electron., vol. 20, no. 5, pp. 1195-1205, Sep. 2020.
- [4] Z. Zhang, A. Shen, P. Li, X. Luo, and Q. Tang, "MTPA-Based High-Frequency Square Wave Voltage Signal Injection Strategy for IPMSM Control," J. Power Electron., vol. 21, no. 10, pp. 1461-1472, Oct. 2021.
- [5] W. Zhang, F. Xiao, J. Liu, Z. Mai, and C. Li, "Maximum Torque per Ampere Control for IPMSM Traction System Based on Current Angle Signal Injection Method," J. Electr. Eng. Technol., vol. 15, no. 4, pp. 1681-1691, Jul. 2020.
- [6] B. Han, J.-S. Lee, Y. Bak, and K.-B. Lee, "Six-Step Operation Strategy for Direct Self-Control Method of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Based on Torque Angle," J. Power Electron., vol. 21, no. 9, pp. 1352-1364, Sep. 2021.
- [7] Y.-G. Oh, B. Han, and K.-B. Lee, "Direct Self-Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with a Constant Switching Frequency," J. Electr. Eng. Technol., vol. 17, no. 2, pp. 1121-1130, Mar. 2022.
- [8] H.-M. Yun, Y. Kim, and H.-H. Choi, "Differential Evolution Approach for Performance Enhancement of Field-Oriented PMSMs," J. Electr. Eng. Technol., vol. 13, no. 6, pp. 2301-2309, Nov. 2018.
- [9] Y. Inoue, S. Morimoto, and M. Sanada, "Examination and Linearization of Torque Control System for Direct Torque Controlled IPMSM," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 46, no. 1, pp. 159-166, Jan./Feb. 2010.
- [10] X. Wang, Z. Wang, Z. Xu, and Y. Hu, "Optimization of Torque Tracking Performance for Direct-Torque-Controlled PMSM Drives with Composite Torque Regulator," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 67, no. 12, pp. 10095-10108, Dec. 2020.
- [11] B. Han, J.-S. Lee, Y. Bak, and K.-B. Lee, "Performance Analysis of Direct Torque Control Method for Traction System Based on IPMSM," J. Korean Soc. Railw., vol. 23, no. 1, pp. 21-34, Feb. 2020.
- [12] I. M. Alsofyani and K.-B. Lee, "Improved Transient-Based Overmodulation Method for Increased Torque Capability of Direct Torque Control with Constant Torque-Switching Regulator of Induction Machines," IEEE Trans. Power Electron., vol. 35, no. 4, pp. 3928-3938, Apr. 2020.
- [13] I. M. Alsofyani, Y. Bak, and K.-B. Lee, "Fast Torque



Control and Minimized Sector-Flux Droop for Constant Frequency Torque Controller Based DTC of Induction Machines,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 34, no. 12, pp. 12141–12153, Dec. 2019.

- [14] D. Mohan, X. Zhang, and G. H. B. 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, Dec. 2016.
- [15] I. M. Alsofyani and K.-B. Lee, “Modified Frequency Carriers for Improving DTC with Constant Frequency Torque Controller of Induction Machines,” in Proc. CENCON Conf., pp. 128–132, Oct. 2017.
- [16] X. Zhang and G. H. B. Foo, “A Constant Switching Frequency-Based Direct Torque Control Method for Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives,” IEEE ASME Trans. Mechatron., vol. 21, no. 3, pp. 1445–1456, Jun. 2016.
- [17] B. Han, Y. Bak, and K.-B. Lee, “Improvement of Dynamic Response for IPMSM Based on DTC-CFTC Using Sliding Mode Control,” J. Inst. Korean Electr. Electron. Eng., vol. 23, no. 2, pp. 628–635, Jun. 2019.
- [18] 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 Conditions,” in Proc. ECCE Conf., pp. 1681–1691, Sep. 2020.
- [19] I. M. Alsofyani and K.-B. Lee, “Enhanced Performance of Constant Frequency Torque Controller-Based Direct Torque Control of Induction Machines with Increased Torque-Loop Bandwidth,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 67, no. 12, pp. 10168–10179, Dec. 2020.
- [20] D.-H. Cho, Y. Bak, and K.-B. Lee, “Performance Improvement of a Hydraulic Turbine Generation System Using Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control,” KIEE., vol. 68, no. 10, pp. 1195–1203, Oct. 2019.
- [21] Y. J. Lee, Y. Bak, and K.-B. Lee, “Control Method for Phase-Shift Full-Bridge Center-Tapped Converters Using a Hybrid Fuzzy Sliding Mode Controller,” Electronics, vol. 8, no. 705, pp. 1–17, Jun. 2019.



**이교범 (Kyo-Beum Lee)**

He received the B.S. and M.S. degrees in electrical and electronic engineering from the Ajou University, Suwon, Korea, in 1997 and 1999, respectively. He received the Ph.D. degree in electrical engineering from the Korea University, Seoul, Korea, in 2003. From 2003 to 2006, he was with the Institute of Energy Technology, Aalborg University, Aalborg, Denmark. From 2006 to 2007, he was with the Division of Electronics and Information Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, Korea.

In 2007, he joined the Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Suwon, Korea. He is an Editor-in-Chief of the Journal of Power Electronics. He is an associated editor of the IEEE Transactions on Power Electronics. His research interests include electric machine drives, renewable power generations, and electric vehicle applications.

#### 저자소개



**신은결 (Eun-Kyeol Shin)**

She received her B.S. degree in Telecommunication and Robot Engineering from Korea National University of Transportation, Chungju, South Korea in 2021. She is currently working toward her M.S. degree in Electrical and Computer Engineering from the Ajou University, Suwon, South Korea. Her research interests include electric machine drives and multilevel inverters.