

철도 차량용 EMB의 클램핑 포스 과도응답 향상을 위한 토크 예측 제어

Torque Predictive Control for Dynamic Performance Improvement of Clamping Force in EMB for Railroad Cars

장 윤 *, 박 영 수 *, 이 교 범*[★]

Yoon Jang*, Yeongsu Bak*, Kyo-Beum Lee*[★]

Abstract

This paper proposes a torque predictive control for dynamic performance improvement of clamping force in electro-mechanical brake (EMB) for railroad cars. In general, pneumatic braking system (PBS) is used for railroad cars. It is sensitive depending on environmental changes and it has increasing idle running time because of slow dynamic response. Additionally, the PBS has low braking efficiency in case braking torque more than standard value is applied to the brake system such as emergency braking. In order to overcome these disadvantages of the PBS, the EMB is used for the railroad cars. The EMB for railroad cars has advantages that increasing the fuel efficiency and design flexibility because it is able to decrease vehicle weight of railroad cars and secure space for design. In this paper, control method for dynamic performance improvement of clamping force in EMB for railroad car is proposed. The effectiveness of the proposed control method is verified by the simulation results.

요 약

본 논문은 철도 차량용 electro-mechanical brake (EMB)의 클램핑 포스 과도응답 향상을 위한 토크 예측 제어 방법을 제안한다. 일반적으로 철도 차량에는 공압식 제동 시스템이 사용된다. 공압식 제동 시스템은 외부환경 변화에 민감하며, 과도응답 속도가 느리기 때문에 공주시간이 증가한다. 또한, 긴급 제동과 같은 기준 이상의 제동 토크를 인가하는 경우에 제동 효율이 낮은 단점이 있다. 이러한 공압식 제동 시스템의 단점은 철도 차량용 EMB 시스템을 적용하여 극복할 수 있다. 철도 차량용 EMB 시스템은 차량의 축중을 감소시키고, 설계 공간을 확보하기 때문에 연비 증가 및 설계 유연성 확보 등의 장점을 갖는다. 본 논문에서는 철도 차량용 EMB의 클램핑 포스 과도응답 향상을 위한 제어 방법을 제안한다. 제안하는 제어 방법의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

Key words : Railroad, Electro-mechanical brake (EMB), Brake-by-wire (BBW), Permanent magnet synchronous motor (PMSM), Clamping force

* Dept. of Electrical Engineering, Ajou University

★ Corresponding author

e-mail: kyl@ajou.ac.kr, tel: 031-219-2376

※ Acknowledgment

This research was supported by a grant from R&D Program (PK1701B) of the Korea Railroad Research Institute, Republic of Korea

Manuscript received Sep. 06, 2017; revised Sep. 13, 2017 ; accepted Sep. 14, 2017

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.

I. 서론

최근 세계적으로 내연기관의 사용으로 인한 화석연료 고갈 및 환경오염 문제로 인해 전기 자동차에 대한 관심이 높아지고 있다. 이와 더불어, 자동차에서 사용되는 여러 복잡한 기계적인 구조를 대체하기 위한 새로운 구조 및 방법이 연구되고 있다. 특히, 자동차의 제동 시스템에 사용되는 유압 및 기계 구조를 대체할 차세대 제동 시스템인 Electro-Mechanical Brake (EMB) 시스템이 활발히 연구되고 있다. 하지만, 자동차에 적용되는 EMB는 안전 및 소음 기준이 높고, 설치 공간이 한정적이기 때문에 개발에 어려움이 있다[1]. 이와 달리, 철도 차량은 자동차에 비해 소음 기준이 낮고, 설치 공간 또한 자동차보다 제한적이지 않기 때문에 철도 차량용 EMB 시스템의 개발이 활발하게 진행되고 있다.

일반적으로 철도 차량의 제동 시스템은 공기의 압력을 이용하여 제동하는 방식인 공압식 제동 시스템이다. 공압식 제동 시스템은 외부환경 변화에 민감하고, 과도응답 속도가 느리기 때문에 공주시간이 증가한다. 또한, 비상 상황에 의한 급제동과 같이 제동을 위한 기준 이상의 힘이 요구되는 경우에는 제동 효율이 매우 낮으며, 지속적인 급유를 통해 공압 장치들의 녹 방지 및 유효성을 유지 보수해야 하는 단점이 있다. 이러한 공압식 제동 시스템의 단점은 철도 차량용 EMB 시스템을 적용하여 극복할 수 있다[2].

철도 차량의 공압식 제동 시스템을 EMB를 이용한 제동 시스템으로 대체하면 복잡한 구조의 공압 관련 장치들을 단순한 와이어로 대체할 수 있다. 이에 따라, 철도 차량의 축중을 감소시켜 연비를 크게 향상시킬 수 있고, 자체 하부의 공간 효율성을 높일 수 있다. 또한, 공압식 제동 시스템에 비해 EMB를 이용한 제동 시스템은 철도 차량 설계 시, 공간 확보에 대한 유연성, 디자인 및 경량화 측면에서 유리하다[3].

철도 차량용 EMB 시스템은 크게 전력 변환장치, 전동기, 기어 부, 제동 장치로 구성된다. 전력 변환장치는 전동기와 연결되며, 직류 전압을 교류 전압으로 변환하여 전동기의 출력 토크를 제어한다. 전동기의 출력 토크는 기어 부를 통해 증폭되

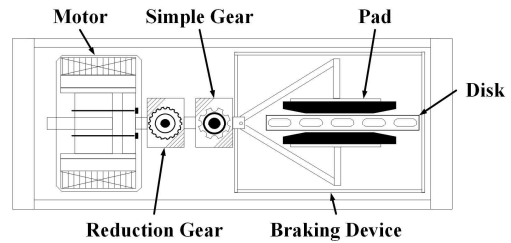


Fig. 1. Structure of EMB system for railroad cars.

그림 1. 철도 차량용 EMB 시스템의 구성

며, 제동 장치로 전달된다. 제동 장치로 전달된 토크에 의해 패드가 동작하며, 패드와 디스크의 마찰을 통해 클램핑 포스가 생성된다. 즉, 패드와 디스크 사이의 클램핑 포스를 통해 철도 차량용 EMB는 제동 기능을 수행한다. 일반적으로 클램핑 포스를 발생시키기 위한 전동기의 토크는 비례-적분(Proportional-Integral, PI) 제어기를 통해 제어된다. 하지만, PI 제어기를 이용하는 경우, 토크 제어의 과도응답 속도가 느리며, 전동기의 파라미터에 따라 이득을 선정하는 과정이 필요하다.

본 논문은 철도 차량용 EMB의 클램핑 포스 과도응답 향상을 위한 토크 예측 제어(Torque Predictive Control, TPC) 방법을 제안한다. 추가적으로, TPC를 이용한 토크 제어 시에 발생하는 상전류 및 토크 리플을 저감하기 위해 개선된 TPC 방법을 이용한다. TPC를 이용한 제어 방법은 파라미터 변동에 강인한 특성을 가지며, 구현이 쉽다[4], [5]. 제안하는 방법을 통해 클램핑 포스의 과도응답을 향상시키고, PMSM의 상전류 및 토크 리플을 저감할 수 있다. 제안하는 제어 방법의 타당성은 MATLAB을 이용한 시뮬레이션을 통해 검증한다.

II. 철도 차량용 EMB 시스템

1. EMB 시스템의 구성

철도 차량용 EMB 시스템의 구성은 그림 1과 같으며, 전동기(Motor), 감속기(Reduction Gear), 평기어(Simple Gear), 제동 장치(Braking Device)로 구성된다. EMB 시스템의 전동기는 높은 효율을 가지며 부피가 작은 영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)를 사용한다[6], [7]. 본 논문에서는 표면 부착형 PMSM을 사용하여 EMB 시스템을 구성

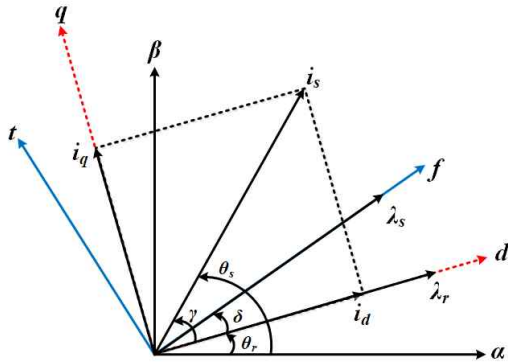


Fig. 2. Vector diagram of PMSM and coordinate axes.
그림 2. PMSM의 벡터도와 좌표계

하였다.

2. EMB 시스템의 동작원리

EMB 시스템의 PMSM에서 출력되는 토크는 감속기 및 평기어를 통해 증폭된다. 증폭된 토크는 제동 장치에 인가되어 디스크(Disk) 양 옆의 패드(Pad)를 동작시키며, 패드와 디스크 사이의 거리가 감소한다. 패드와 회전하는 디스크 사이의 마찰을 통해 클램핑 포스가 생성되며, 클램핑 포스를 통해 디스크의 속도를 감소시켜 철도 차량용 EMB 시스템의 제동 기능을 수행한다[8].

III EMB 시스템을 위한 PMSM 제어

1. 일반적인 PMSM 제어 방법

일반적인 PMSM 제어 방법은 크게 V/F 제어 방법, 벡터 제어(Field-Oriented Control, FOC) 방법 및 직접 토크 제어(Direct Torque Control, DTC) 방법으로 구분한다. V/F 제어 방법은 전압과 주파수를 제어하는 방법이며, 구현이 쉬운 장점이 있다[9]. FOC 방법은 전압, 주파수 및 전류를 제어하는 방법이며, PMSM의 빠른 토크 응답과 정확한 속도 제어가 가능하다[10]. 하지만, V/F 제어 방법은 제어 성능이 좋지 않으며, FOC 방법은 제어가 복잡하고 토크가 간접적으로 제어되는 특징이 있으므로 철도 차량용 EMB 시스템을 위한 PMSM 제어에는 적합하지 않다.

DTC 방법은 PMSM의 토크와 자속을 제어하는 방법이다. DTC 방법을 이용하는 경우에는 PMSM의 빠른 토크 응답과 정확한 속도 제어가 가능하며, 구현이 쉬운 장점이 있다[11], [12]. 하

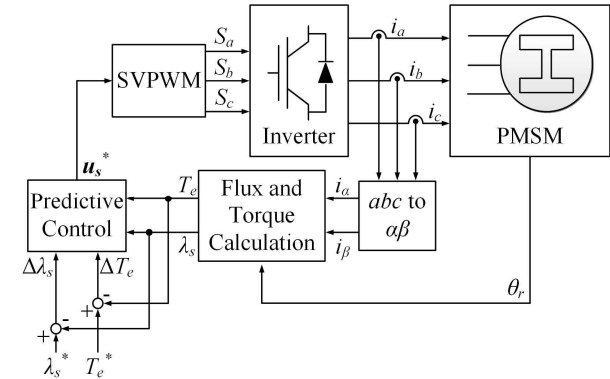


Fig. 3. Control block diagram of PMSM using TPC.
그림 3. TPC를 이용한 PMSM 제어 블록도

지만, PMSM의 출력 토크 리플이 크게 발생하며, DTC 방법을 EMB 시스템을 위한 PMSM 제어에 적용할 경우에는 감속기 및 패드에 토크 리플 성분이 그대로 전달된다. 따라서, 클램핑 포스에도 리플 성분이 포함되며, 이러한 리플로 인해 패드의 불균형한 마모가 발생하여 제동 장치의 수명을 단축시키고, EMB 시스템의 신뢰도를 저하시킨다[13]-[16]. 따라서, 본 논문은 EMB 시스템을 위한 PMSM의 토크 제어를 위해 빠른 토크 응답을 가지며 토크 리플을 저감시킬 수 있는 개선된 TPC 방법을 제안한다.

2. TPC를 이용한 PMSM 제어 방법

TPC를 이용한 PMSM 제어 방법은 PMSM의 토크 및 자속의 관계를 수학적으로 표현하고, 제어에 필요한 전압 벡터를 계산하여 PMSM의 출력 토크를 제어하는 방법이다. TPC를 이용하여 PMSM의 출력 토크를 제어할 경우에는 제어에 필요한 전압 벡터만 인가하므로 일반적인 PMSM 제어 방법에 비해 빠른 토크 응답 특성을 가지며, 오버슈트 없이 정확한 토크 제어가 가능하다.

그림 2는 PMSM의 벡터도와 좌표계를 나타낸다. α - β 축은 정지 좌표계를 나타내며, d - q 축은 PMSM의 회전자에 동기화된 회전 좌표계를 나타낸다. 또한, f - t 축은 고정자 자속에 동기화된 회전 좌표계를 나타낸다. θ_s 와 θ_r 은 고정자 및 회전자 자속 벡터의 위치를 나타내며, δ 는 고정자 및 회전자 쇄교 자속 사이의 각을 나타낸다. 추가적으로, γ 는 회전자 자속(λ_r)과 고정자 전류(i_s) 사이의 각을 나타낸다.

그림 3은 TPC를 이용한 PMSM 제어 블록도를

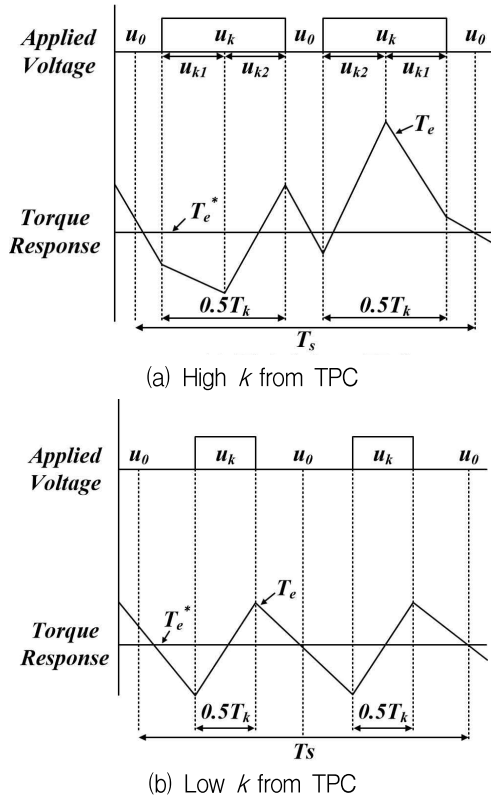


Fig. 4. Relation of magnitude of applied voltage vector and torque ripple.

그림 4. 인가된 전압 벡터의 크기와 토크 리플의 관계

나타낸다. PMSM의 자속(λ_s) 및 토크(T_e)는 정지 좌표계 출력 전류(i_{α} , i_{β})와 PMSM의 위상각 정보(θ_s)를 통해 계산된다. 계산된 자속 및 토크와 지령 자속(λ_s^*) 및 지령 토크(T_e^*)와의 오차를 이용하여 예측 제어(Predictive Control)를 수행하며, 이를 통해 지령 전압 벡터(u_s^*)를 얻는다. 마지막으로, 지령 전압 벡터와 공간 벡터 변조 방법(SVPWM)을 통해 전력 변환장치를 동작시키기 위한 스위칭 신호를 생성한다.

TPC를 이용하여 PMSM을 제어하기 위해서는 PMSM의 자속과 토크의 관계를 수학적으로 해석해야 한다. 우선, PMSM의 전압(u_s) 방정식, 고정자 쇄교 자속(λ_s) 방정식, 토크(T_e) 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u_s &= R_s i_s + \frac{d}{dt} \lambda_s \\ \lambda_s &= L_s i_s + \lambda_r \\ T_e &= \frac{3}{2} p_n (\lambda_s \times i_s) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, R_s 는 고정자 저항, λ_r 은 회전자 자속, p_n 은 PMSM의 쌍극을 나타내며, $u_s = [u_{\alpha} \ u_{\beta}]^T$,

$i_s = [i_{\alpha s} \ i_{\beta s}]^T$, $\lambda_s = [\lambda_{\alpha s} \ \lambda_{\beta s}]^T$ 를 나타낸다.

PMSM의 전압 방정식을 고정자 쇄교 자속의 미분항으로 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \lambda_s = u_s - R_s i_s \quad (2)$$

또한, 식 (1)의 고정자 쇄교 자속 방정식을 미분하여 고정자 전류(i_s)의 시간에 따른 변화율로 표현하면 다음과 같으며, 고정자 쇄교 자속의 미분항에 식 (2)를 대입하여 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_s &= \frac{1}{L_s} \left(\frac{d}{dt} \lambda_s - \frac{d}{dt} \lambda_r \right) \\ \frac{d}{dt} i_s &= \frac{1}{L_s} \left(u_s - R_s i_s - \frac{d}{dt} \lambda_r \right) \end{aligned} \quad (3)$$

PMSM의 토크 방정식을 미분하면 다음과 같으며, 토크(T_e)의 시간에 따른 변화율은 고정자 쇄교 자속 및 고정자 전류의 시간에 따른 변화율로 나타낸다.

$$\frac{d}{dt} T_e = \frac{3}{2} p_n \left(\frac{d}{dt} \lambda_s \times i_s + \lambda_s \times \frac{d}{dt} i_s \right) \quad (4)$$

식 (4)에 식 (2)와 식(3)을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} T_e &= \left(\frac{3}{2} \frac{p_n}{L_s} \lambda_s \times u_s + \frac{3}{2} p_n u_s \times i_s \right) \\ &\quad + \left(-\frac{R_s}{L_s} T_e - \frac{3}{2} \frac{p_n}{L_s} \lambda_s \times \frac{d}{dt} \lambda_r \right) \end{aligned} \quad (5)$$

한 주기 내에서 고정자 전압 벡터를 인가하는 경우, PMSM의 토크 변화량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta T_e &= \left(\left(\frac{3}{2} \frac{p_n}{L_s} \lambda_s \times u_s + \frac{3}{2} p_n u_s \times i_s \right) \right. \\ &\quad \left. + \left(-\frac{R_s}{L_s} T_e - \frac{3}{2} \frac{p_n}{L_s} \lambda_s \times \frac{d}{dt} \lambda_r \right) \right) T_s \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)은 PMSM의 고정자 자속(λ_s), 회전자 자속(λ_r), 고정자 전압(u_s)을 이용하여 PMSM의 토크 제어가 가능하다는 것을 나타낸다. 여기서, T_s 는 시스템의 제어 주기를 나타낸다. 또한, 식 (1)에서 PMSM의 회전자 자속(λ_r) 및 전압(u_s) 방정식을 이용하여 토크 변화량을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta T_e &= \left(\frac{3}{2} \frac{p_n}{L_s} (\lambda_s - L_s i_s) \times u_s \right) T_s \\ &\quad + \left(-\frac{R_s}{L_s} T_e - \frac{3}{2} \frac{p_n}{L_s} \lambda_s \times \frac{d}{dt} \lambda_r \right) T_s \end{aligned} \quad (7)$$

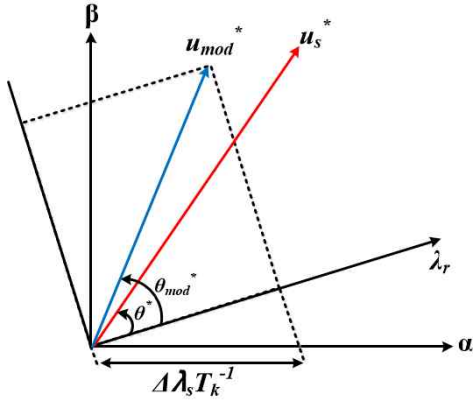


Fig. 5. Vector diagram of modified reference voltage.
그림 5. 수정된 지령 전압 벡터도

$$\Delta T_e = \frac{3}{2} \frac{p_n}{L_s} \lambda_r \times u_s T_s + \left(-\frac{R_s}{L_s} T_e - \frac{3}{2} \frac{p_n}{L_s} \lambda_s \times \frac{d}{dt} \lambda_r \right) T_s \quad (8)$$

식 (8)로부터 지령 토크와 PMSM 출력 토크의 오차를 최소화 하는 지령 전압 벡터 u_s^* 의 위상각 θ^* 를 구하면 다음과 같으며, PMSM의 출력 전류, 자속, 토크를 이용하여 계산된다.

$$\theta^* = \sin^{-1} \left(\frac{\Delta T_e + \left(\frac{R_s}{L_s} T_e + \frac{3}{2} \frac{p_n}{L_s} \lambda_s \times \Delta \lambda_r \right) T_s}{\frac{3}{2} \frac{p_n}{L_s} |\lambda_r| |u_s| T_s} \right) \quad (9)$$

또한, 지령 전압 벡터 u_s^* 의 크기(u_k)는 최대 유효 전압 벡터의 크기와 상수 k 의 곱($k|u_s|$)으로 결정된다. 여기서, k 를 0에서 1 사이의 값으로 고정하며, 고정된 k 에 의해 u_s^* 의 크기도 고정된다. 일반적으로 TPC를 이용한 PMSM 제어 시에는 토크의 과도응답 향상을 위해 k 를 1 또는 0.7로 고정한다. 그림 4는 인가된 전압 벡터의 크기와 토크 리플의 관계를 나타낸다. k 가 1 또는 0.7로 고정된 경우에는 그림4(a)와 같이 유효 전압 벡터가 인가되는 시간이 필요 이상으로 길어지는 상황이 발생한다. 이런 상황에서는 토크의 변화량이 증가하여 PMSM의 토크 과도응답 특성이 향상되지만, 출력 상전류 및 토크 리플이 증가한다[17], [18].

결과적으로, TPC를 이용한 PMSM 제어 방법은 PI 제어를 이용한 방법에 비해 철도 차량용 EMB 시스템을 위한 PMSM의 토크 과도응답을 향상시킬 수 있으며, 공주시간을 단축시키고 파라미터

변화에 따른 제어 불안정성을 개선할 수 있다. 하지만, PMSM의 출력 상전류 및 토크 리플이 수반되며, 이는 철도 차량용 EMB 시스템의 기어 및 제동 장치의 수명과 제동 신뢰도에 영향을 미친다. 따라서, 본 논문은 빠른 토크 응답을 가지며, PMSM의 출력 상전류 및 토크 리플을 저감시킨 개선된 TPC를 이용한 PMSM 제어 방법을 제안한다.

3. 개선된 TPC를 이용한 PMSM 제어 방법

TPC를 이용한 PMSM 제어 시, 고정된 지령 전압 벡터의 크기(u_k)에 의해 발생하는 토크 리플을 저감시키기 위해서는 적절한 k 의 선정이 필요하다. 제안하는 방법을 통해 적절한 k 를 선정하는 경우에는 자속 및 토크 제어를 위한 적절한 크기의 지령 전압 벡터가 계산된다. 즉, 그림 4(b)와 같이 짧은 시간에 유효 전압 벡터를 인가하여 자속 및 토크의 리플을 최소화한다. 추가적으로, 토크 지령이 급변하는 과도 상태에서는 k 를 큰 값으로 선정하여 토크의 과도응답을 향상시킬 수 있다.

제안하는 방법을 통해 선정된 적절한 k 는 모터의 출력 토크 T_e 및 고정자 자속의 변화량 $\Delta \lambda_s$ 를 이용하여 선정한다. 즉, 고정자 자속 λ_s 를 제어할 지령 전압 벡터의 크기를 그림 5와 같이 고정자 자속 오차 $\Delta \lambda_s$ 를 이용하여 계산한다. 식 (2)에서 고정자 저항 R_s 에 의한 전압 강하를 무시하면, 고정자 자속의 변화량은 다음과 같다.

$$\Delta \lambda_s = u_s T_s \quad (10)$$

식 (10)을 이용하여 d축 고정자 전압의 크기를 나타내면 다음과 같다.

$$u_{ds} = \Delta \lambda_s T_s^{-1} \quad (11)$$

적절한 k 는 다음과 같이 최대 지령 전압 벡터와 수정된 지령 전압 벡터(u_{mod}^*)의 비로 나타내며, 식 (11)과 삼각함수 공식을 통해 계산할 수 있다.

$$k = \frac{|u_{mod}^*|}{|u_s^*|} = \frac{\sqrt{u_{ds}^2 + u_{qs}^2}}{u_s^*} = \frac{\sqrt{(\Delta \lambda_s T_s^{-1})^2 + (u_s^* \sin \theta^*)^2}}{|u_s^*|} \quad (12)$$

또한, 식 (9)와 계산된 k 를 통해 수정된 지령 전

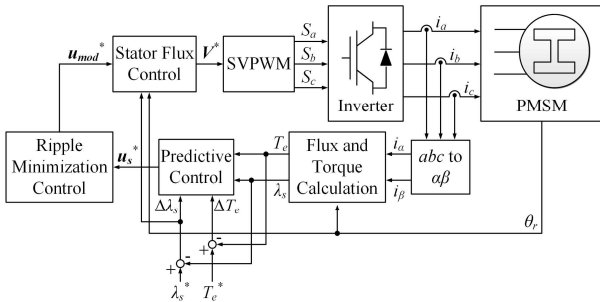


Fig. 6. Control block diagram of PMSM using proposed TPC.

그림 6. 제안하는 TPC를 이용한 PMSM 제어 블록도

Table 1. PMSM and simulation parameters.

표 1. PMSM 및 시뮬레이션 파라미터

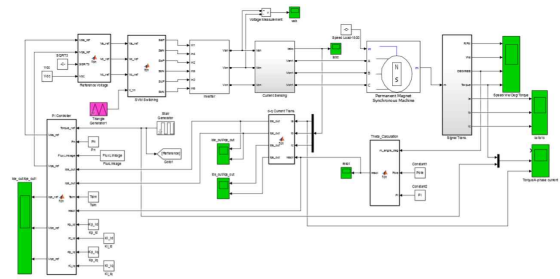
Parameters	Value
Rated speed	3000 rpm
Rated power	600 W
Stator resistance	0.11 Ω
d-axis inductance	0.74 mH
q-axis inductance	0.74 mH
Flux linkage	0.0291 Wb
Pole	8
Moment of inertia	0.000055 kgm ²
DC-link voltage	100 V

압 벡터 u_{mod}^* 의 위상각을 계산하면 다음과 같다.

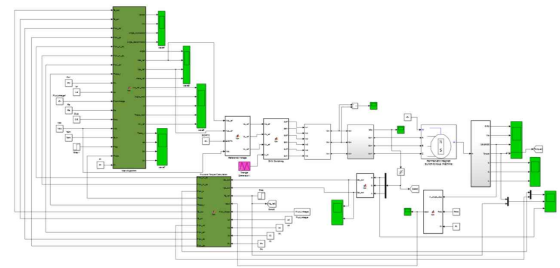
$$\theta_{mod}^* = \arcsin\left(\frac{1}{k} \sin\theta^*\right) = \arcsin\left(\frac{|u_s^*|}{|u_{mod}^*|} \sin\theta^*\right) \quad (13)$$

θ_{mod}^* 는 지령 토크와 PMSM 출력 토크의 오차를 최소화하는 u_{mod}^* 의 위상각을 결정하며, 결과적으로 수정된 지령 전압 벡터 u_{mod}^* 를 통해 PMSM의 토크 리플을 저감시킬 수 있다.

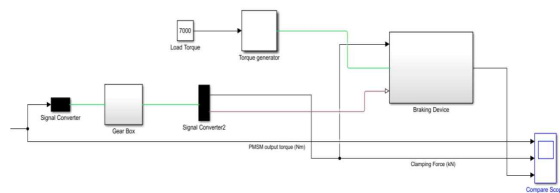
그림 6은 제안하는 TPC를 이용한 PMSM 제어 블록도를 나타낸다. 전력 변환장치의 출력 전류 i_{abc} 및 PMSM의 회전자 위상각 θ_r 을 통해 자속 λ_s 및 토크 T_e 를 계산한다. 계산된 값과 지령 자속 λ_s^* 및 지령 토크 T_e^* 를 통해 오차를 계산하며, 오차 정보($\Delta\lambda_s$ 및 ΔT_e)를 이용하여 지령 전압 벡터 u_s^* 를 계산한다. 여기서, 제안하는 방법을 통해 적절한 k 를 선정하여 수정된 지령 전압 벡터 u_{mod}^* 를 계산한다. 마지막으로, 수정된 지령 전압 벡터 u_{mod}^* , 자속 오차 $\Delta\lambda_s$ 및 PMSM의 회전자 위상각 θ_r 을 이용하여 전력 변환장치에 인가하는 지령 전



(a) PI torque control of PMSM



(b) Torque predictive control of PMSM



(c) Braking device

Fig. 7. Simulation block diagram of PMSM torque control in EMB for railroad cars.

그림 7. 철도 차량용 EMB를 위한 PMSM 토크 제어 시뮬레이션 블록도

압 v^* 를 생성한다.

IV. 시뮬레이션 결과

철도 차량용 EMB의 클램핑 포스 과도응답 향상을 위한 개선된 TPC의 타당성과 유효성을 검증하기 위해 MATLAB 툴을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. PMSM 및 시뮬레이션 파라미터는 표 1과 같다.

철도 차량용 EMB를 위한 PMSM의 토크 제어 시, PI 제어기를 이용한 시뮬레이션 회로도는 그림 7(a)와 같으며, 개선된 TPC를 이용한 시뮬레이션 회로도는 그림 7(b)와 같다. 또한, EMB의 제동 장치의 시뮬레이션 회로도는 그림 7(c)와 같다. PMSM의 출력 토크는 감속 기어 및 평 기어를 통해 증폭되고, 증폭된 토크를 제동 장치로 인가한다. 인가된 토크에 의해 패드와 디스크가 접촉하면서 제동 기능이 수행되고, 클램핑 포스가

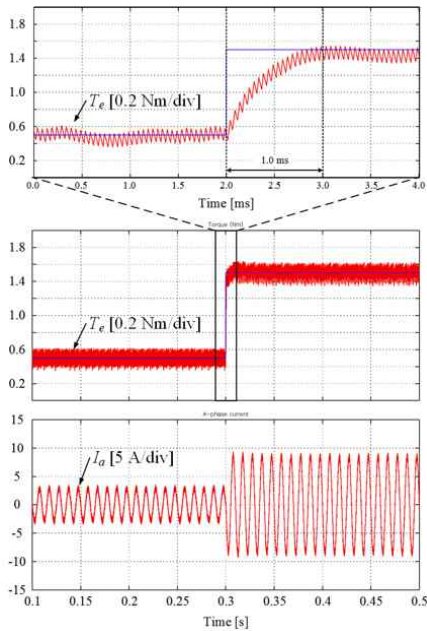


Fig. 8. Simulation result of PMSM torque control in EMB for railroad cars using PI control.

그림 8. PI 제어를 이용한 철도 차량용 EMB의 PMSM 토크 제어 시뮬레이션 결과

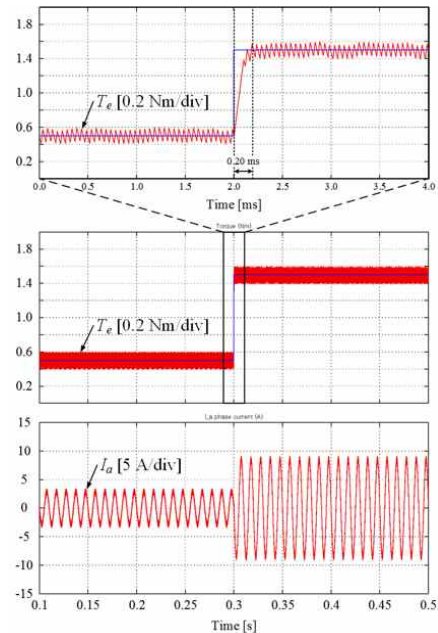


Fig. 10. Simulation result of PMSM torque control in EMB for railroad cars using proposed TPC.

그림 10. 제안하는 TPC를 이용한 철도 차량용 EMB의 PMSM 토크 제어 시뮬레이션 결과

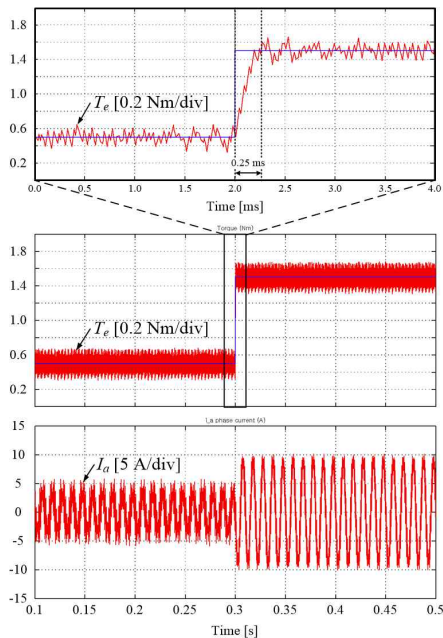


Fig. 9. Simulation result of PMSM torque control in EMB for railroad cars using TPC.

그림 9. TPC를 이용한 철도 차량용 EMB의 PMSM 토크 제어 시뮬레이션 결과

발생한다. 시뮬레이션에서는 운행 중인 철도 차량의 디스크에서 발생하는 토크(부하 토크)는 70 N으로 설정하였으며, 이는 철도 차량의 추진력에 비례한다. 또한, 감속 기어의 기어 비는 1:100으로

설정하여 PMSM의 출력 토크가 100 배로 증폭되도록 설정하였다.

그림 8은 PI 제어를 이용한 철도 차량용 EMB의 PMSM 토크 제어 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 지령 토크는 0.3 s에 0.5 Nm에서 1.5 Nm로 증가하였으며, PMSM의 출력 토크는 지령에 따라 제어되지만 토크 제어의 과도응답 시간은 약 1.0 ms로 나타난다.

그림 9는 일반적인 TPC를 이용한 PMSM 토크 제어 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 지령 토크는 PI 제어를 이용한 경우와 동일하게 0.5 Nm에서 1.5 Nm로 증가하였으며, PMSM의 출력 토크는 지령에 따라 제어된다. 토크 제어의 과도응답 시간은 약 0.25 ms로 PI 제어를 이용한 경우에 비해 과도응답이 향상되었지만, PMSM의 출력 상전류 및 토크 리플이 증가하였다.

PMSM의 출력 상전류 및 토크 리플을 저감하기 위해 제안하는 TPC를 이용한 PMSM 토크 제어 시뮬레이션 결과는 그림 10과 같다. 지령 토크는 0.5 Nm에서 1.5 Nm로 증가하였으며, PMSM의 토크 역시 지령에 따라 제어된다. 토크 제어의 과도응답 시간은 약 0.20 ms로 나타나며, PI 제어를 이용한 경우에 비해 약 5 배 빠른 토크 과도응답

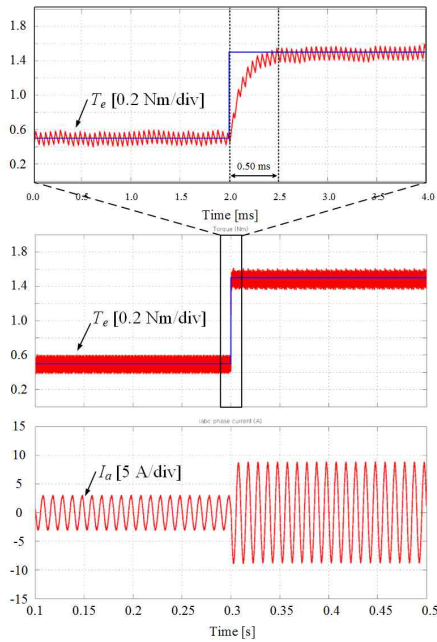


Fig. 11. Simulation result of PMSM torque control using proposed TPC ($L_d = L_q = 0.4 \text{ mH}$).

그림 11. 제안하는 TPC를 이용한 PMSM 토크 제어 시뮬레이션 결과 ($L_d = L_q = 0.4 \text{ mH}$)

시간을 얻을 수 있다. 또한, 일반적인 TPC를 이용한 경우에 비해 전류 및 토크의 리플이 저감되었다.

추가적으로, 제안하는 제어 방법이 전동기 파라미터 변동에 강인한 특성을 갖는 것을 확인하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 11은 철도 구동용 EMB를 위한 PMSM의 d-q축 인덕턴스 (L_d, L_q)가 0.4 mH로 변동된 경우, TPC를 이용한 PMSM 토크 제어 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 전동기의 파라미터 중 d-q축 인덕턴스가 감소된 경우에 토크 제어의 과도응답 시간이 0.5 ms로 증가하지만, PI 제어기를 이용한 경우에 비해서는 과도응답이 향상되었다. 또한, PMSM의 토크는 제안하는 TPC를 통해 지령 토크로 제어된다.

PMSM의 d-q축 인덕턴스(L_d, L_q)가 1.3 mH로 변동된 경우, TPC를 이용한 PMSM 토크 제어 시뮬레이션 결과는 그림 12와 같다. d-q축 인덕턴스가 증가된 경우에는 토크 제어의 오버슈트가 발생하지만, 지령에 따라 적절히 제어된다. 또한, PI 제어기를 이용한 경우에 비해서는 과도응답이 향상되었다. 그림 11과 그림 12에 나타난 시뮬레이션 결과를 바탕으로 제안하는 TPC 방법은 전동기 파라미터 변동에 강인한 특성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

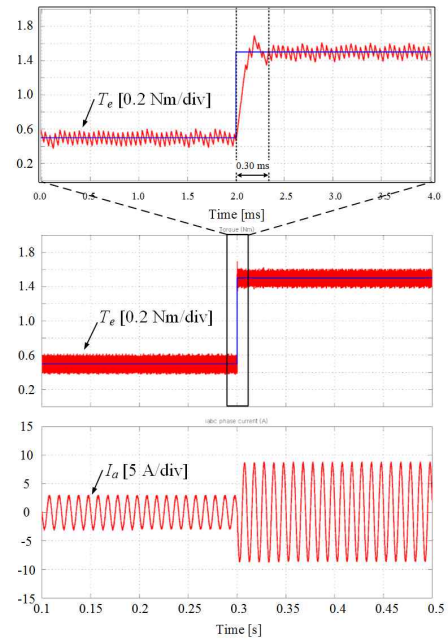


Fig. 12. Simulation result of PMSM torque control using proposed TPC ($L_d = L_q = 1.3 \text{ mH}$).

그림 12. 제안하는 TPC를 이용한 PMSM 토크 제어 시뮬레이션 결과 ($L_d = L_q = 1.3 \text{ mH}$)

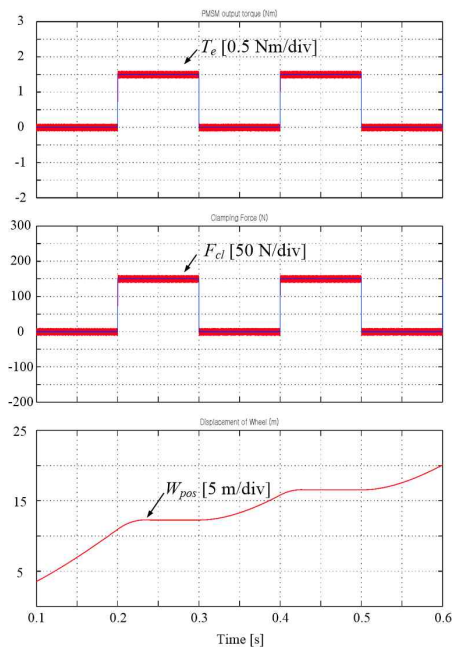


Fig. 13. Simulation result of braking performance of EMB for railroad cars using proposed TPC.

그림 13. 제안하는 TPC를 이용한 철도 차량용 EMB의 제동 성능 시뮬레이션 결과

그림 13은 제안하는 TPC를 통해 철도 차량용 EMB의 PMSM 출력 토크를 제어한 경우, 제동 장치에 발생하는 클램핑 포스(F_c) 및 휠의 회전거리

(w_{pos})를 나타낸다. PMSM의 토크는 지령 토크에 따라 0.1 s 간격으로 0 Nm에서 1.5 Nm로 제어된다. 이에 따라, 제동 장치는 0.1 s 간격으로 제동 토크 인가 및 해제를 반복하며, 클램핑 포스는 0 N 및 150 N으로 발생된다. 클램핑 포스가 발생하지 않는 제동 토크 해제 시에는 휠의 회전거리가 증가하며, 이와 반대로 제동 토크 인가 시에는 회전거리가 감소한다.

V 결론

본 논문은 철도 차량용 EMB의 클램핑 포스 과도응답 향상을 위한 TPC 방법을 제안한다. PI 제어기를 이용한 PMSM의 토크 제어 시, 토크 과도응답 속도가 느리기 때문에 과도응답 특성을 향상시키기 위해 TPC 방법을 이용한다. 하지만, TPC 방법에서는 고정된 k 를 이용하여 지령 전압 벡터의 크기를 설정하므로, PMSM의 출력 상전류 및 토크 리플이 발생한다. 따라서, 과도응답 특성을 향상시킬 뿐만 아니라 적절한 k 를 선정하여 토크 리플을 저감하는 TPC 방법을 제안하였다. 제안하는 방법은 PI 제어기와 달리 전동기의 파라미터에 따라 이득을 선정하는 과정이 필요하지 않으며, 전동기의 파라미터 변동에 강인한 특성을 갖기 때문에 철도 차량용 EMB를 위한 PMSM 토크 제어에 적합하다. 제안하는 방법의 타당성을 검증하기 위해 MATLAB 시뮬레이션을 수행하였으며, PI 제어기 및 일반적인 TPC 방법을 이용한 시뮬레이션 결과와 토크 제어 과도응답 속도 및 토크 리플의 크기를 비교하였다. 또한, 철도 차량의 부하를 고려하여 철도 차량용 EMB의 클램핑 포스를 통한 제동 성능을 확인하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 제안하는 TPC를 통해 급격한 제동 토크가 인가되는 경우에도 클램핑 포스가 정확하게 발생되며, 휠의 제동이 이루어지는 것을 확인하였다.

References

[1] J. S. Cheon, "Brake by wire system configuration and functions using front EWB (Electric Wedge Brake) and rear EMB (Electro-Mechanical Brake) actuators," *SAE Technical Papers*, Oct. 2010.

DOI : <https://doi.org/10.4271/2010-01-1708>.

[2] M. Kim, S. Oh, and S. Kwon, "Characteristic test of the electro mechanical brake actuator for urban railway vehicles," *Korean Society Of Precision Engineering*, vol. 33, no. 7, pp. 535-540, Jul. 2016.

DOI : 10.7736/KSPE.2016.33.7.535

[3] I. Hwang, P. Yoon, and K. Huh, "Development of a vehicle stability control system using brake-by-wire actuators," *Journal of Dynamic System, Measurement, and Control*, vol. 130, no. 1, pp. 011008, Jan. 2008.

DOI : 10.1115/1.2807190

[4] Y. Li, C. Wang, and H. Hu, "Predictive control of torque and flux of induction motor drives," in *Proc. PEDS*, pp. 67-71, Nov. 2005.

DOI : 10.1109/PEDS.2005.1619662

[5] M.-H. Shin, D.-S. Hyun, S.-B. Cho, and S.-Y. Choe, "An improved stator flux estimation for speed sensorless stator flux orientation control of induction motors," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 15, no. 2, pp. 312-318, Mar. 2000.

DOI : 10.1109/63.838104

[6] D. Y. Han, Y. S. Cho, and K.-B. Lee, "Simple sensorless control of interior permanent magnet synchronous motor using PLL based on extended EMF," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 12, no. 2, pp.711-717, Mar. 2017.

DOI : <https://doi.org/10.5370/JEET.2017.12.1.1921>

[7] J.-S. Yoon, K.-G. Lee, J.-S. Lee, and K.-B. Lee, "Off-line parameter identification of permanent magnet synchronous motor using a goertzel algorithm," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 10, no. 6, pp. 2262-2270. Nov. 2015.

DOI : <https://doi.org/10.5370/JEET.2015.10.6.2262>

[8] C. Jo, S. Hwang, and H. Kim, "Clamping-force control for electro mechanical brake." *IEEE Trans. Vehi. Tech.*,

vol. 59, no. 7, pp. 3205-3212, Sep. 2010.

DOI : 10.1109/TVT.2010.2043696

[9] B. J. chalmers, L. Musaba, and D. F. Gosden, "Variable-frequency synchronous motor drives for electric vehicles," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 32, no. 4, pp. 896-903, Aug. 1996.

DOI : 10.1109/28.511647

[10] D. Casadei, F. Profumo, G. Serra, and A. Tani, "FOC and DTC: Two viable schemes for induction motors torque control," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 17, no. 5, pp. 779-787, Sep. 2002.

DOI : 10.1109/TPEL.2002.802183

[11] K.-B. Lee, J.-H. Song, I. Choy, and J.-Y. Yoo, "Improvement of low-speed operation performances of DTC for 3-level inverter-fed induction motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 48, no. 5, pp. 1006-1014, Oct. 2001.

DOI : 10.1109/41.954565

[12] Md. Habibullah, D. dah-Chuan, D. Xiao, J. E. Fletcher, and M. F. Rahman, "Low complexity predictive torque control strategies for a three-level inverter driven induction motor," *IET Elect. Power Appl.*, vol. 11, no. 5, pp. 776-783, 2017.

DOI : 10.1049/iet-epa.2016.0572

[13] H. Zhu, X. Xiao, and Y. Li, "Torque ripple reduction of the torque predictive control scheme for permanent-magnet synchronous motors," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 59, no. 2, pp. 871-877, Feb. 2012.

DOI : 10.1109/TIE.2011.2157278

[14] Y. Cho, K.-B. Lee, M. Li, J.-H. Song, and Y. I. Lee, "Novel torque predictive control for a permanent-magnet synchronous motor with minimum torque ripple and fast dynamics," *in Proc. APEC*, pp. 2253-2258, Mar. 2013.

DOI : 10.1109/APEC.2013.6520609

[15] H.-S. Ro, H.-G. Jeong, K.-G. Lee, J.-S. Lee, and K.-B. Lee, "Torque ripple minimization scheme using torque sharing

function based fuzzy logic control for a switched reluctance motor," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 118-127, Jan. 2015.

DOI : <https://doi.org/10.5370/JEET.2015.10.1.118>

[16] K.-B. Lee, J.-H. Song, I. Choy, and J.-Y. Yoo, "Torque ripple reduction in DTC of induction motor driven by 3-level inverter with low switching frequency," *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 17, no. 2, pp. 255-264, Mar. 2002.

DOI : 10.1109/PESC.2000.878900

[17] Y. Cho, K.-B. Lee, J.-H. Song, and Y. I. Lee, "Torque-ripple minimization and fast dynamic scheme for torque predictive control of permanent-magnet synchronous motors," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 4, pp. 2182-2190, Apr. 2015.

DOI : 10.1109/TPEL.2014.2326192

[18] M. Siami, D. A. Khaburi, and J. Rodriguez, "Torque ripple reduction of predictive torque control for PMSM drives with parameter mismatch," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 9, pp. 7160-7168, Sep. 2017.

DOI : 10.1109/TPEL.2016.2630274

BIOGRAPHY

Yoon Jang (Member)



2017 : BS degree in Electrical Engineering, Soonchunhyang University.

2017-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.