

DC-link 전압변동을 고려한 PMSM 토크제어의 성능 향상 방법

(A Performance Improvement Method of PMSM Torque Control Considering DC-link Voltage Variation)

이정호* · 원충연**

(Jung-Hyo Lee · Chung-Yuen Won)

Abstract

This paper proposes a PMSM torque control method considering DC-link voltage variation and friction torque. In general EV/HEV application, two dimensions look-up table(2D-LUT) is used for reference current generation due to its stable and robust torque control performance. Conventionally, this 2D-LUT is established by flux-torque table to overcome the DC-link voltage variation. However, the flux table establishment is more complex than the speed table establishment. Moreover, one flux data reflects several speed conditions in variable DC-link voltage, friction torque cannot be considered by using the flux table. In this paper, speed-torque 2D-LUT is used for current reference generation. With this table, PMSM torque control is well achieved regardless of DC-link voltage variation by the proposed control method. Simulation and experimental results validate improvement of torque control error through friction torque compensation.

Key Words : PMSM Torque Control, DC-link Voltage Variation, 2D-LUT, Friction Torque Compensation

1. 서 론

최근에 영구자석 동기 전동기(Permanent Magnet

Synchronous Motor : PMSM) 구동 시스템은 효율성과 견인력이 우수하므로 전기자동차에 사용되고 있다. 일반적으로 전기자동차에 사용되는 견인 전동기의 경우, Look-up 테이블(LUT) 기반의 전류지령 제어를 통한 PMSM 구동 방법이 널리 사용된다.

LUT는 속도-토크 또는 자속-토크 LUT가 주로 사용되며 테이블의 데이터는 전동기 파라미터를 고려하기 위해 실험을 통해 얻는다. 그림 1은 기존의 속도-토크, 자속-토크 LUT기반의 토크 제어 방법을 나타낸다. 이 중, 그림 1 (a)의 속도-토크 2차원 Look-up 테이블(2D-LUT) 기반의 제어 방법은 간단한 제어 알고리즘과 비교적 쉽게 LUT를 만들 수 있다는 장점을

* 주저자 : LG이노텍 차량부품개발4팀 선임연구원
** 교신저자 : 성균관대학교 정보통신대학 교수
* Main author : Senior Research Engineer,
Automotive Components Development 4
Team, LG Innotek.
** Corresponding author : Professor, School of Inf.
and Comm., Sungkyunkwan Univ.
Tel : 031-290-7115, Fax : 031-290-7179
E-mail : daumin@naver.com
접수일자 : 2014년 10월 20일
1차심사 : 2014년 10월 22일
심사완료 : 2014년 11월 21일

가지고 있지만 DC-link 전압 변동에 대한 고려가 불가능하다[1-3]. DC-link 전압의 크기에 따라 전동기의 제어 가능 영역을 제한하며 안정적인 제어를 위해 최소 DC-link 전압으로 2D-LUT를 작성할 경우 실제 DC-link 전압에 대한 출력을 반영하지 못한다. 이러한 이유로 속도-토크 2D-LUT 제어 방법은 제어할 수 있는 출력이 최소한의 DC-link 전압이 발생할 수 있는 출력으로 감소한다. 이러한 문제를 극복하기 위해서, 그림 1 (b)의 자속-토크 2D-LUT 기반의 제어 방법이 전기자동차용 PMSM 구동에 널리 사용된다 [4-5]. 비록 이 방법은 자속 추정기와 더 복잡한 LUT 작성 방법을 필요로 하지만 DC-link 전압 변동을 자동적으로 반영하기 때문에 제어 가능한 출력을 확장시킬 수 있다.

자속-토크 2D-LUT 기반의 제어 방법은 토크 제어 시 DC-link 전압 변동을 고려하지 않아도 되는 장점을 가지고 있지만, 속도 정보가 직접적으로 토크발생에 영향을 주지 못하는 문제점이 있다. 기본적으로, 자속 데이터는 속도와 전압을 나눈 값이기 때문에, 이 두 데이터가 복합적으로 자속에 영향을 미친다. 전기적으로 토크 발생은 모터의 속도에 의해 영향을 받지 않으며 전류에 의한 영향을 받는다. 그렇기 때문에 자속-토크 2D-LUT 기반의 제어 방법은 전기적 토크에

의한 영향만 고려하며 기계적 토크 전달은 고려를 하지 못한다. 일례로서, 하나의 자속 데이터는 가변되는 DC-link 전압상태에서 여러 속도 데이터를 반영하기 때문에 가변 DC-link 전압이 토크 출력에 영향을 주는 문제점이 발생한다.

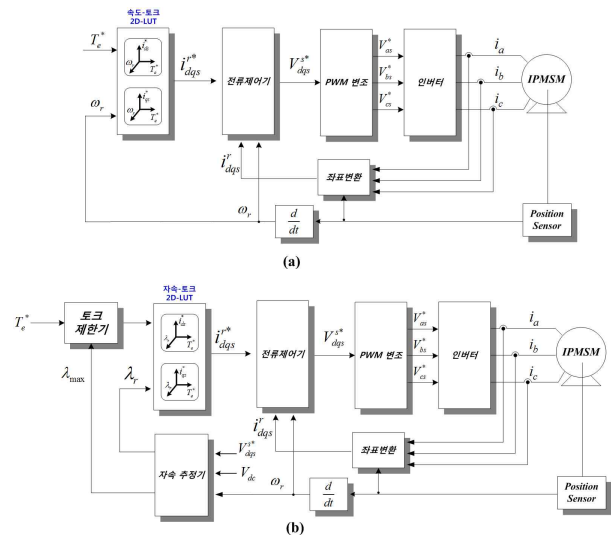


그림 1. 전기자동차 구동용 Look-up 테이블 기반의 제어기
 (a) 속도-토크 2D-LUT를 이용한 제어방법
 (b) 자속-토크 2D-LUT를 이용한 제어방법
 Fig. 1. The controller based look-up table for driving electric vehicle

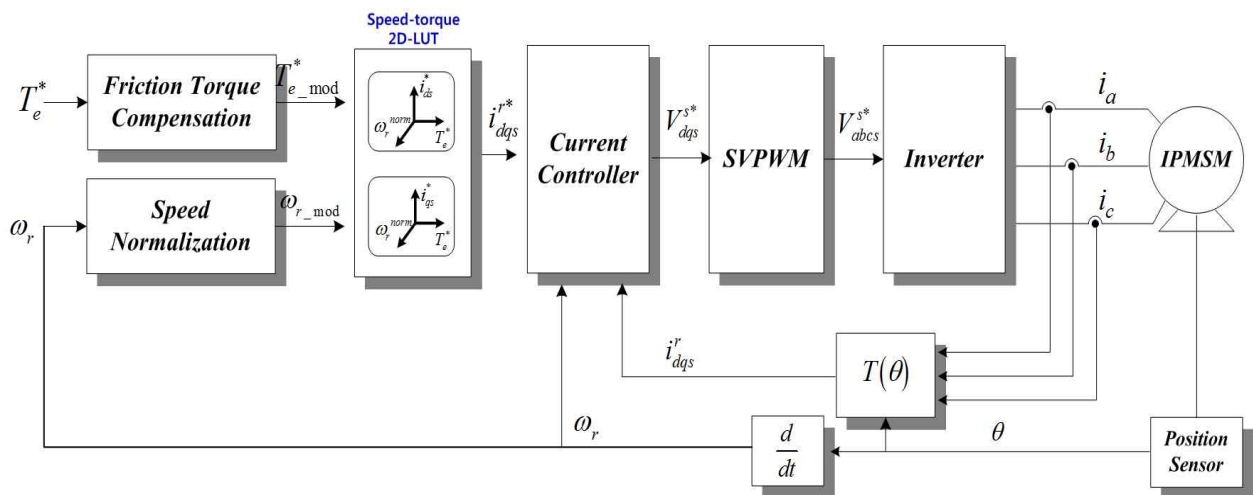


그림 2. 제안된 DC-link 전압변동을 고려한 제어 블록도
 Fig. 2. Control block considering the proposed DC-link voltage variation

그러나 기계적 관점에서 부하에 전달되는 토크는 속도에 따라 가변하며 DC-link 전압의 영향을 받지 않는다. 전동기와 부하 사이에는 부하에 토크를 전달하는 축이 존재하는데, 이 축에서 속도에 비례하는 기계적 에너지를 소실하게 된다. 전동기 속도는 토크 제어에 직접적으로 영향을 주지 않으므로 이러한 마찰 토크는 자속-토크 2D-LUT 기반의 제어 방법으로 보상이 불가능하다.

본 논문은 DC-link 전압 변동과 마찰토크를 고려한 PMSM의 토크 제어방법에 대해 제안한다. DC-link 전압 변동에 대한 마찰 토크를 보상하기 위해 속도-토크 테이블 기반의 토크 제어 기법을 사용한다. 앞에서 설명한 것처럼 이러한 방법은 DC-link 전압 변동 조건을 반영하지 못하는 문제가 있다. 따라서 제안된 알고리즘은 DC-link 전압 변동을 고려할 수 있는 방법에 대해 설명하고 DC-link 전압 변동을 고려한 마찰토크 보상 기법에 대하여 다루기로 한다.

2. DC-link 전압변동을 고려한 속도 정규화 방법

그림 2는 PMSM을 위한 제안된 토크 제어 방법으로 제어 블록은 기존의 속도-토크 2D-LUT 제어 기법에 마찰 토크 보상 블록 및 속도 정규화 블록이 추가 구성된다.

2.1 속도-토크 2차원 Look-up Table

DC-link 전압변동에 대한 속도 정규화 방법을 기술하기 전에, 속도-토크 2D-LUT에 대한 설정 방법에 대해 설명한다. PMSM의 전압 방정식과 토크 방정식의 d-q축 동기좌표계는 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^r \\ v_{qs}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega_r L_q \\ \omega_r L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \phi_f \end{bmatrix} \quad (p = \frac{d}{dt}) \quad (1)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P (\phi_f i_{qs}^r + (L_d - L_q) i_{ds}^r i_{qs}^r) \quad (2)$$

정상상태에서 저항에의 전압성분을 무시하면 전압 제한은 다음과 같이 표현된다. 한편, 전압 제한 값은 선형변조영역만을 할당한다면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_{\max} = \omega_r \sqrt{(L_d i_{ds}^r + \phi_f)^2 + (L_q i_{qs}^r)^2}$$

$$v_{\max} = V_{dc} / \sqrt{3} \quad (3)$$

속도-토크 2D-LUT는 최소 DC-link 전압을 기준으로 작성되어야 하며 최소 DC-link 전압을 V_{dc}^{norm} 이라 할 경우 위 수식은 다음과 같이 변환된다.

$$v_{\max}^{norm} = \omega_r \sqrt{(L_d i_{ds}^r + \phi_f)^2 + (L_q i_{qs}^r)^2}$$

$$v_{\max}^{norm} = V_{dc}^{norm} / \sqrt{3} \quad (4)$$

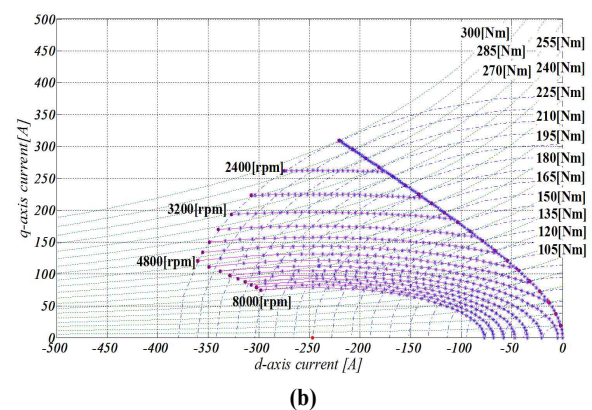
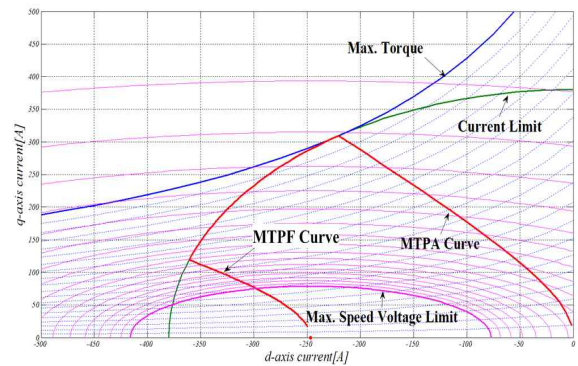


그림 3. 속도-토크 2D-LUT 설계 방법 (a) 구동 영역 (b) 속도-토크에 따른 전류맵

Fig. 3. Design method of the speed-torque 2D-LUT

일반적으로 PMSM의 토크제어는 그림 3 (a)와 같이 정토크 영역은 단위전류당 최대토크 제어 (MTPA제어)를 수행하며, 전류제한원과 단위자속당 최대토크 제어(MTPF제어) 안에서 약자속 제어를 수행한다.

약자속 제어의 경우 d-q축 전류는 전압제한원과 토크방정식의 교점을 통해 얻어진다. 두 수식을 대입하여 q축 전류에 대해 전개할 경우, 다음의 방정식을 얻을 수 있다. 이 방정식의 근을 구하여 해당 토크/속도에 대한 q축 전류를 구하고, 이를 다시 전압방정식에 대입하면 해당 토크/속도에 대한 d축 전류도 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & (L_d - L_q)^2 L_q^2 i_{qs}^{r^4} \\
 & + \left\{ L_d^2 \phi_f^2 - 2\phi_f^2 L_d (L_d - L_q) + (L_d - L_q)^2 \phi_f^2 - (L_d - L_q)^2 \left(\frac{v_{\max}^{norm}}{\omega_r} \right)^2 \right\} i_{qs}^{r^2} \\
 & + \left\{ 2\phi_f (L_d - L_q) \frac{L_d T_c}{P_n} - \frac{2L_d^2 T_c \phi_f}{P_n} \right\} i_{qs}^e + \left(\frac{L_d T_c}{P_n} \right)^2 = 0
 \end{aligned} \tag{5}$$

그림 3 (b)는 위 수식을 통해 얻어진 각 속도-토크에 대한 d-q축 전류맵을 도시하였다. 수식 (5)에서 약계자 영역에 대한 d-q축 전류는 DC-link 전압에 따라 가변됨을 알 수 있다.

2.2 DC-link 전압변동을 고려한 속도-토크 정규화 기법

정토크 영역에서는 약계자 영역과 다르게 DC-link 전압에 대한 영향을 고려할 필요가 없다. 따라서 이러한 제어 영역에서는 MTPA 제어를 수행하기 위한 d-q축 전류로 구성된다.

반면 약계자 영역은 DC-link 전압 변동에 따라 d-q축 전류가 변화되어야 한다. 그림 4는 가변 DC-link 전압에 따른 d-q축 전류의 변화를 도시하였다. DC-link 전압 변동에 따라 d-q축 전류를 변동하기 위해, 특정 속도 ω_{r1}^{norm} 에 대한 d-q축 전류 데이터를 정의한다. 만약 DC-link 전압이 V_{dc}^{norm} 일 경우 전압제한원의 수식은 다음과 같이 표현된다.

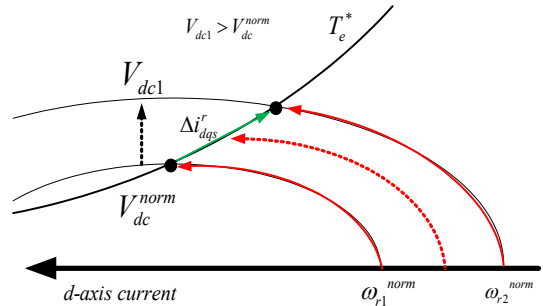


그림 4. 가변 DC-link 전압에서 d-q축 전류의 변화
Fig. 4. The d-q axis current change in the variable DC-link voltage

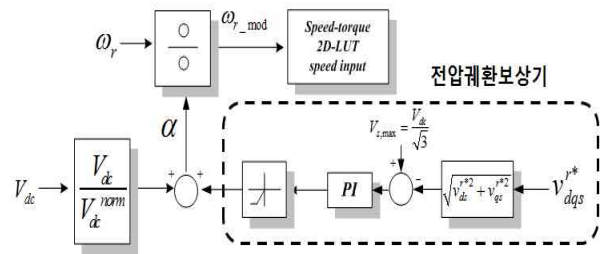


그림 5. 속도 정규화 제어 블록도
Fig. 5. The control block diagram for speed normalization

$$\omega_{r1}^{norm} = \frac{v_{\max}^{norm}}{\sqrt{(L_d i_{ds}^r + \phi_f)^2 + (L_q i_{qs}^r)^2}} \tag{6}$$

만약 DC-link 전압이 V_{dc}^{norm} 에서 V_{dc1} 으로 증가할 경우 d-q축 전류는 Δi_{dqs}^r 로 변화되어야 한다. 그러나 이러한 전류 변화는 (5)를 통해 q축 전류 근에 대해 얻어야 하므로 계산이 복잡하며 PMSM 파라미터에 따른 영향이 크므로 추출이 어렵다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 본 논문은 DC-link 전압 변동에 대한 d-q축 전류는 모두 속도에 대한 LUT에 저장되어 있음에 착안하였다. 먼저 DC-link 전압변동비를 α 로 정의하면 전압제한값은 DC-link 전압에 따라 수식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

수식 (7)을보면 전압제한값은 DC-link 전압변동에 비례함을 알 수 있다. 이를 다시 속도에 대한 방정식으로 정리하면 수식 (8)을 얻을 수 있다.

$$\alpha = \frac{V_{dc}}{V_{dc}^{norm}}$$

$$v_{max} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} = \frac{\alpha V_{dc}^{norm}}{\sqrt{3}} = \alpha v_{max}^{norm} \quad (7)$$

$$\omega_r = \frac{v_{max}}{\sqrt{(L_d i_{ds}^r + \phi_f)^2 + (L_q i_{qs}^r)^2}}$$

$$= \frac{\alpha v_{max}^{norm}}{\sqrt{(L_d i_{ds}^r + \phi_f)^2 + (L_q i_{qs}^r)^2}} = \alpha \omega_r^{norm} \quad (8)$$

수식 (8)에 나타난 바와 같이 현재 속도와 정규화된 속도는 전압변동비에 따라 결정됨을 알 수 있다. 이러한 수식을 통해 제어 블록도를 구성하면 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 전압 제한 보상기는 온도나 습도에 따라 PMSM 파라미터가 변동되어도 전압 제한원내에 안정적으로 제어를 수행할 수 있도록 한다[6].

3. DC-link 전압변동을 고려한 마찰 토크 보상 기법

기계적 부하가 연결된 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r + T_L \quad (9)$$

속도 변동이 없다고 할 경우, 위 수식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$T_L = T_e - B\omega_r = T_e - F \cdot T(T_e, \omega_r) \quad (10)$$

이러한 마찰토크 성분 때문에 토크 변동 성분은 그림 6 (a)를 통해 알 수 있다. 운동방정식을 살펴보면 속도 성분은 토크 성분의 1차 지연 성분이기 때문에 토크의 변동이 속도에는 영향을 주지만 속도의 변동이 토크에 영향을 주지 않는다. 따라서 토크 제어에 있어 마찰토크는 부하토크에 포함시켜 발생토크를 제어하면 되기 때문에 이에 대한 고려를 해줄 필요가 없다. 그러나 자속-토크 테이블을 이용한 제어에서 DC-link 전압이 가변되면 현재 전동기의 속도 정보를

반영할 수 없다. 따라서 발생토크와 부하토크 사이의 마찰토크 출력 성분을 알 수 없으며 이에 따라 오차가 발생한다. 그림 6 (b)는 이러한 마찰토크에 의해 출력토크가 가변되는 현상을 나타낸 그래프이다.

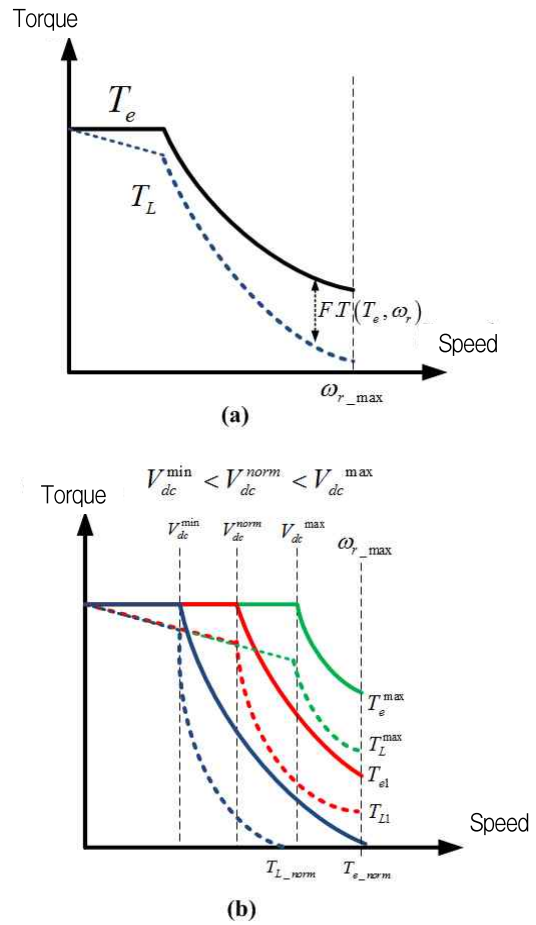


그림 6. 마찰토크에 의한 속도-토크 그래프 (a) DC-link 전압이 고정일 때 (b) DC-link 전압이 가변할 때
Fig. 6. The speed-torque graph considering friction torque

그림 7 (a)는 가변 DC-link 전압 상황에서 실제 마찰토크에 의해 나타나는 현상이고, 그림 7 (b)는 마찰토크를 고려하여 자속-토크 2D-LUT를 작성하였을 때 가변 DC-link 전압상태에서 토크 출력을 나타내었다. 그림을 살펴보면 DC-link 전압이 증가하더라도 속도의 증가에 따라 마찰토크 역시 증가함으로 출력토크는 감소한다.

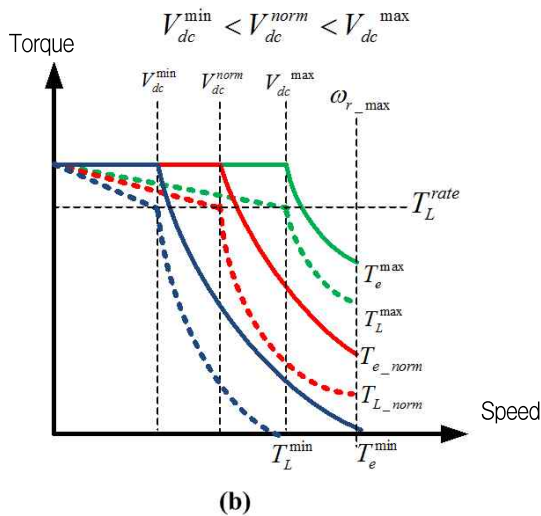
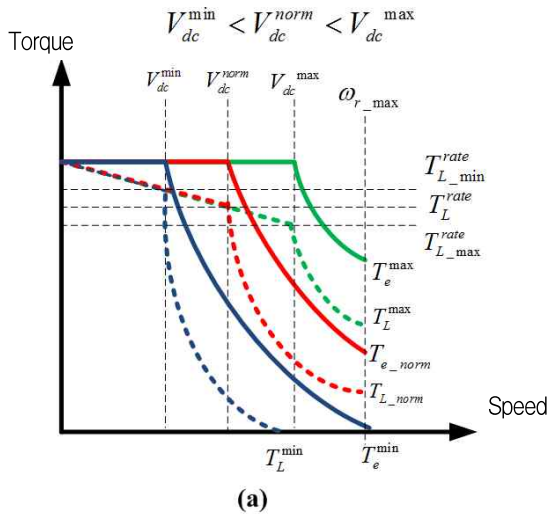


그림 7. 자속-토크 2D-LUT 사용 시 토크 출력 오차
(a) 실제 토크출력 (b) 자속-토크 2D-LUT 토크 출력

Fig. 7. The output torque error using flux-torque 2D-LUT

이 때, 자속-토크 2D-LUT에서 DC-link 전압변동비에 따라 출력된 토크를 일정 비율로 증가시켜 반영하기 때문에 마찰토크를 고려하지 않는다. 그러나 실제로는 마찰토크에 대한 성분이 존재하여 DC-link 전압의 증가에 대한 제어 가능 속도가 증가함에 따라 마찰토크에 대한 영향이 출력 토크에 나타난다. 따라서 자속-토크 2D-LUT를 사용하여 제어할 경우 실제 토크 출력과 발생된 토크 출력 사이에 이러한 마찰토크

만큼의 오차를 갖는다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문은 먼저 속도에 대한 마찰 토크를 다음과 같이 측정하였다. 이 방식은 다음의 가정을 필요로 한다.

가정 : DC-link 전압은 마찰토크에 영향을 주지 않는다.

위 가정을 바탕으로 마찰토크 추정 순서는 다음과 같다.

- 1) 인버터 허용 DC-link 최대 전압에서의 전류맵을 작성한다.
- 2) d-q축 전류와 전동기 파라미터를 이용하여 전동기 출력 토크를 계산한다.
- 3) 토크 센서에서 출력되는 토크와 전동기 출력토크의 오차를 이용하여 마찰토크를 계산한다.
- 4) 속도와 토크에 대한 마찰토크 테이블을 작성한다.

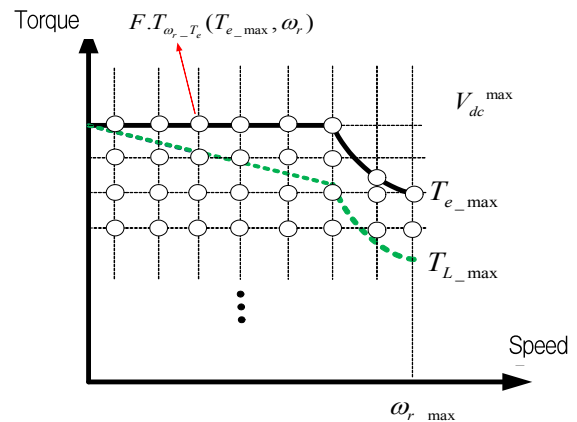


그림 8. 속도-토크에 의한 마찰 토크 측정 값
Fig. 8. The friction torque value considering speed-torque

그림 8은 속도, 토크 별로 마찰토크를 측정하는 방법을 나타낸 그림이며, 마찰 토크를 측정하는 식은 다음과 같다.

$$F.T_{\omega_r, T_e}(T_{e_max}, \omega_r) = T_{e_max} - T_{L_max} \quad (11)$$

여기서, T_{e_max} 는 d-q축 전류를 통해 계산된 토크,

T_{L_max} 는 측정된 토크이다.

측정된 마찰토크를 이용하여 제어기를 구성하면 그림 9와 같이 표현된다. 제어기를 살펴보면 먼저 전동기의 파라미터를 기반으로 발생토크를 추정한다. 전동기의 현재 속도와 추정된 발생 토크를 이용하여 현재 상태의 마찰 토크를 추정하며 이를 지령토크에 보상한다. 한편 출력 토크는 마찰토크가 보상된 지령토크와 비교하여 PI제어기를 거쳐 토크 오차 성분을 보정한다.

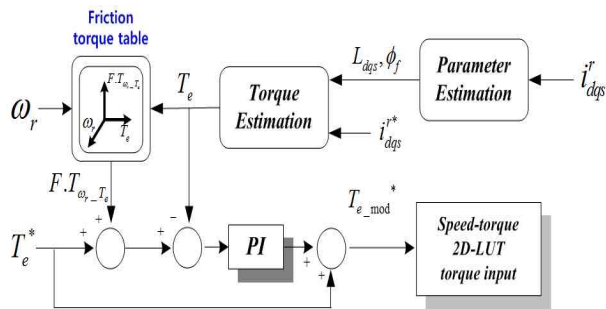


그림 9. 마찰 토크 보상 제어 블록도
Fig. 9. The control block diagram for friction torque compensation

이러한 마찰토크 오차 블록도는 속도와 토크에 대한 정보만을 고려하며 따라서 DC-link 전압과 상관없이 동작한다. 그렇기 때문에 DC-link 전압과 상관없이 속도가 변동하면 그에 따른 마찰토크를 보상하는 방향으로 토크를 발생시킨다. 따라서 마찰토크 오차 블록도를 적용하면 자속-토크 2D-LUT를 사용할 때는 다르게 그림 10과 같이 토크제어 오차가 개선된 토크 출력을 얻는다. 그림 10에서 각종 파라미터를 설명하면 다음과 같다.

- $T_{L_min}^{rate}$: 최소 DC-link 전압에서의 정격
- T_L^{rate} : 정격 DC-link 전압에서의 정격토크
- T_L^{min} : 최소 DC-link 전압에서 부하에 전달되는 토크
- $F.T(T_e, \omega_r)$: 마찰토크
- $T_{L_prop}^{min}$: 마찰토크오차가 보상되었을 경우 부하에 전달되는 토크

$T_{L_conv}^{min}$: 자속-토크 2D-LUT를 적용하였을 경우의 출력토크

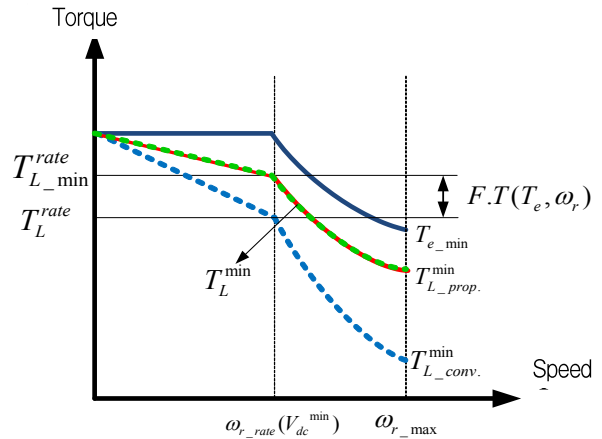


그림 10. 마찰 토크 보상에 의한 토크 출력
Fig. 10. The output torque considering the friction torque compensation

만약 자속-토크 2D-LUT 테이블이 정격 DC-link 전압상황에서 마찰토크를 고려하여 측정되었다면 최소 DC-link 전압에서의 출력토크는 파란색 점선과 같이 감소한다. 그러나 제안된 기법을 적용하면 마찰 토크 성분이 보상되므로 초록색 점선과 같이 출력 토크가 증가된다.

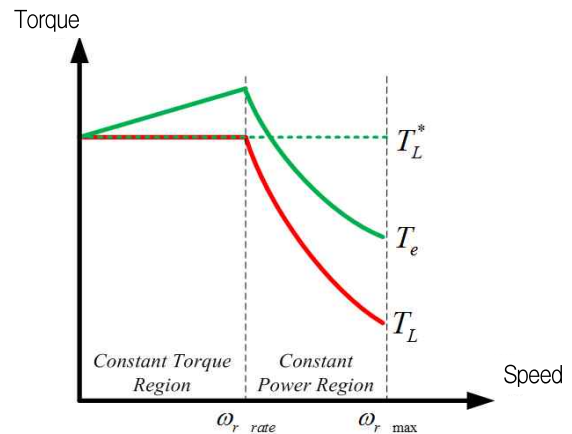


그림 11. 마찰 토크 보상에 의한 발생 토크 및 부하에 전달되는 토크
Fig. 11. Developed torque and load torque by friction torque compensation

그림 11은 마찰 토크 보상이 적용되었을 때 발생하는 토크 및 부하에 전달되는 토크를 나타내었다. 그림을 살펴보면 마찰토크에 의한 오차 성분에 의해 출력 토크는 속도에 따라 증가한다. 이를 통해 부하에 전달되는 토크는 정토크 영역에서 지령토크를 일정하게 유지하며 정출력 영역에서는 최대출력에 의해 제한됨을 알 수 있다.

4. 실험

4.1 DC-link 전압변동에 따른 최대출력 변동 실험

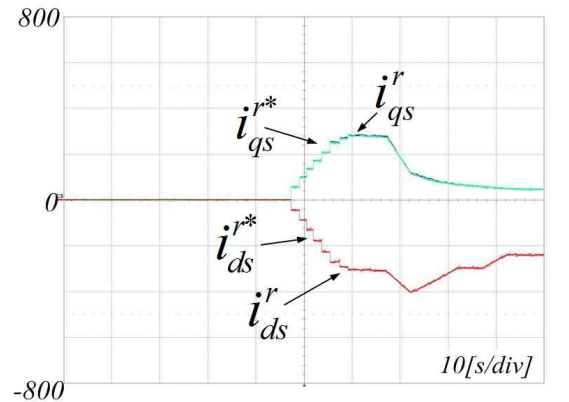
표 1. 모터 및 부하 파라미터
Table 1. Motor and load parameters

극 수	10
상저항 [mΩ]	30
Ld [mH]	0.260
Lq [mH]	0.560
상역기전력 [Vrms/krpm]	41.14
정격 DC-link 전압 [Vdc]	320
최소 DC-link 전압 [Vdc]	260
토크 [Nm]	350
정격속도 [rpm]	2400
최대속도 [rpm]	8000
상전류최대치 [Apk]	380
마찰계수	0.0594

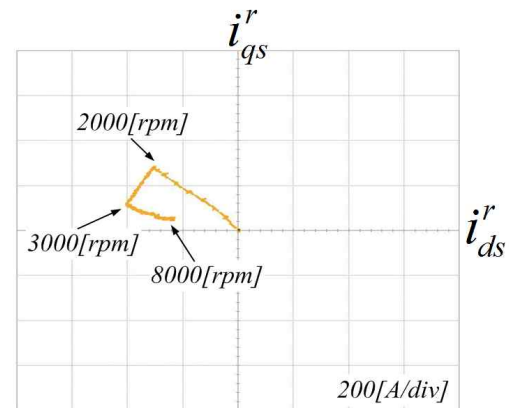
본 논문의 실험에 사용된 모터 및 부하의 파라미터는 표 1과 같다.

그림 12는 정격 DC-link 전압에서 전동기 속도변동에 따른 최대출력제어를 하였을 때 d-q축 전류 변동을 실험한 파형이다. 전류맵은 정격 DC-link 전압을 기준으로 8000rpm까지 작성되어 있음을 알 수 있다.

d-q축 전류 제어는 전동기 속도 변동에 따라 각각 정토크 영역과 정출력 영역에 대한 MTPA 제어와 약자속 제어를 수행하였고, 특정속도 이상에서는 MTPF 제어를 수행하여 고속 제어도 가능함을 보여주었다.



(a)



(b)

그림 12. 전동기 속도 변동에 따른 최대 출력 제어
(a) 시간영역에 대한 전류파형, (b) d-q축 전류영역에 대한 전류파형

Fig. 12. Maximum output control corresponding to the motor speed variation

그림 13은 각각 320V, 260V, 380V으로 DC-link 전압을 가변하였을 때 최대출력 제어 실험 결과이다. 1000rpm에서 최대 토크 지령인 350Nm을 인가한 후, 5000rpm까지 부하 전동기를 회전시켜 그 때 출력되는 d-q축 전류를 도시하였다. 다만 380V일 경우에는 약자속 영역에서 인버터 출력이 90kW 이상으로 확장되어 실험세트 고장의 위험이 있다. 이 때문에 토크 지령을 200Nm로 인가한 후 속도를 상승시켜 이에 대한 전류맵을 보여준다. d-q 축 전류맵을 살펴보면 DC-link 전압이 상승할수록 DC-link 전압비에 따라 수정된 속도의 d-q축 전류가 출력되는 것을 확인할 수 있다.

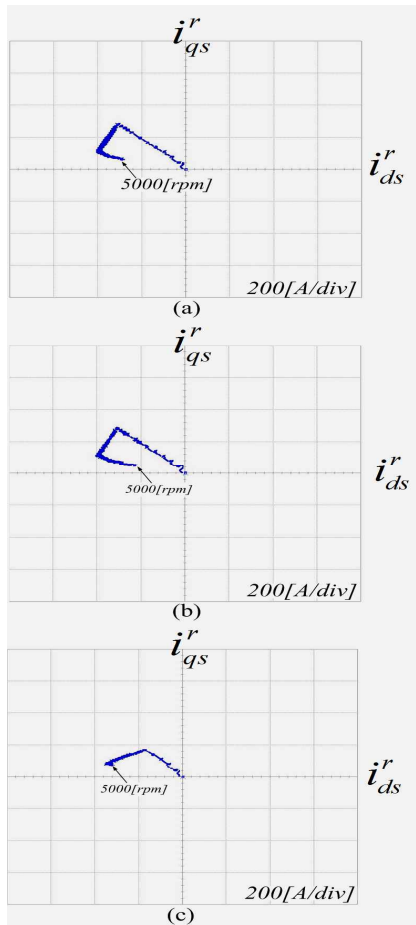


그림 13. DC-link 전압에 따른 최대 출력 (a) DC-link 전압 : 320V, (b) DC-link 전압 : 260V, (c) DC-link 전압 : 380V

Fig. 13. Maximum output considering the DC-link voltage

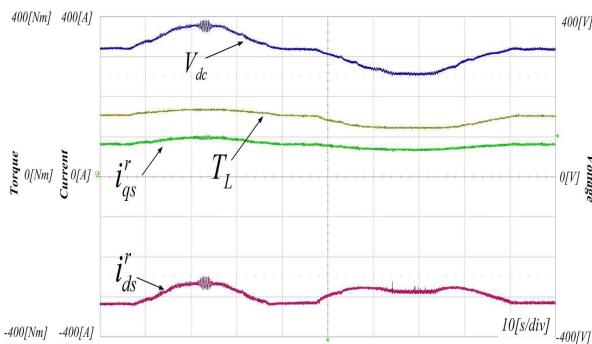


그림 14. DC-link 전압 변동에 대한 최대 출력 제어 (속도 : 4000rpm)

Fig. 14. Maximum output control considering the DC-link voltage variation

그림 14는 DC-link 전압 변동에 따른 최대출력제어를 수행한 토크제어 실험 결과이다. 속도는 4000rpm에서 토크제어를 수행하였다. 최대 출력 제어에서 토크 지령은 DC-link 전압에 따라 가변한다. 이는 DC-link 전압의 변동에 따라 최대 출력할 수 있는 토크도 변동하기 때문이다. DC-link 전압이 증가하였을 경우 더 큰 토크 출력을 발생하며, DC-link 전압이 감소할 경우 출력 토크가 작아지는 것을 확인할 수 있다.

4.2 DC-link 전압변동에 따른 마찰토크 보상 실험

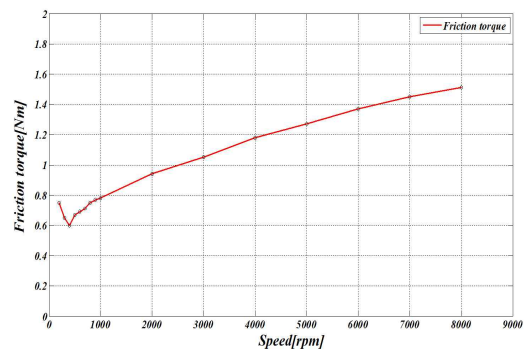


그림 15. 속도 변동에 따른 마찰 토크

Fig. 15. Friction torque corresponding to the speed variation

그림 15는 속도 변동에 대한 측정된 마찰토크 값이다. 저속에서 정지마찰과 쿨롱마찰에 의한 토크 성분을 확인할 수 있으며 고속으로 올라갈수록 점성마찰에 의한 토크 성분이 증가함을 볼 수 있다. 마찰 토크의 측정은 부하 유도기와 PMSM 사이에서 측정하였기 때문에 베어링에 의한 마찰토크가 나타난다. 베어링에 의한 마찰토크의 경우 토크 크기에 따른 마찰토크 변동이 나타나지 않아 그래프와 같이 속도에 대한 마찰토크 변동만을 고려하였다.

그림 16은 DC-link 전압변동에 따른 토크 변동을 측정한 실험결과이다. 토크 제어는 4000rpm 약자속 영역에서 실험하였으며 80Nm 지령을 인가한 상태에서 전동기의 DC-link 전압을 260V에서 380V까지 가변하였다. 그림을 살펴보면 제안된 알고리즘을 사용

하였을 때 DC-link 전압변동에도 일정한 부하토크 출력이 발생되는 것을 알 수 있다.

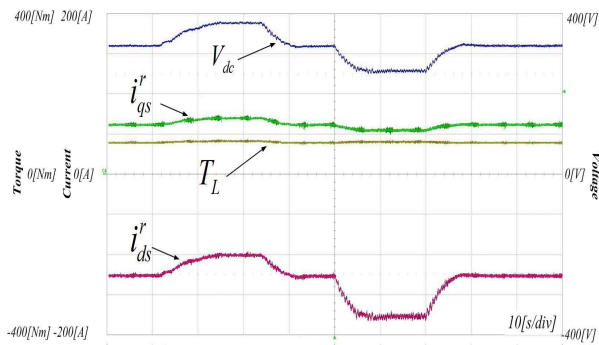


그림 16. DC-link 전압 변동에 대한 일정 토크 제어 (속도 : 4000rpm, 토크지령 : 80Nm)

Fig. 16. Constant torque control considering the DC-link voltage variation

표 2. 마찰 토크 오차 비교

Table 2. Comparing of friction torque error

DC-link 전압	마찰 토크 오차 보상 전	마찰 토크 오차 보상 후
260V	3.8%	2.9%
380V	4.1%	3.2%

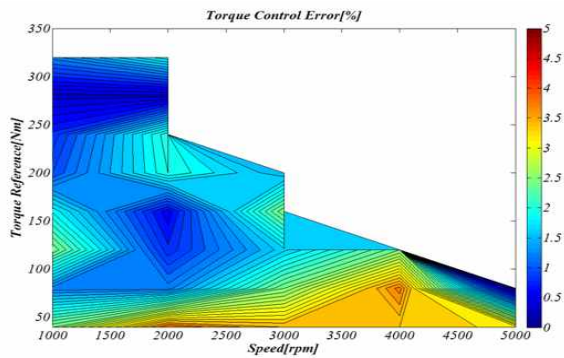


그림 17. 토크 제어 오차(DC-link ; 320V)

Fig. 17. Torque control error (DC-link : 320V)

그림 17은 정격 DC-link 전압에서의 전 영역의 토크제어 오차를 도시한 그림이다. 그림 18, 19는 각각 260V, 380V에서 전 영역의 토크제어 오차에 대해 마찰토크 보상을 했을 때와 하지 않았을 때를 비교한 그림이다. 마찰토크오차를 보상하였을 때 토크 오차가 감소폭은 표 2로 나타내었다.

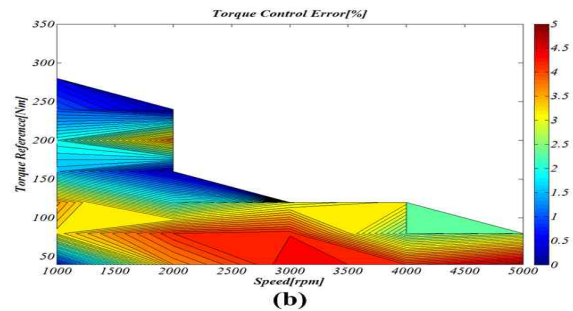
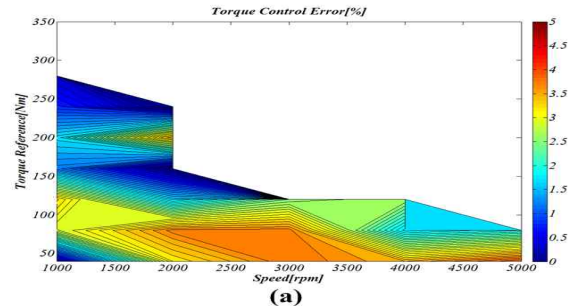


그림 18. DC-link 전압이 가변되었을 때 토크 제어 오차 (DC-link : 260V) (a) 마찰토크를 보상한 경우 (b) 마찰토크를 보상하지 않은 경우

Fig. 18. Torque control error at DC-link voltage variation (DC-link : 260V)

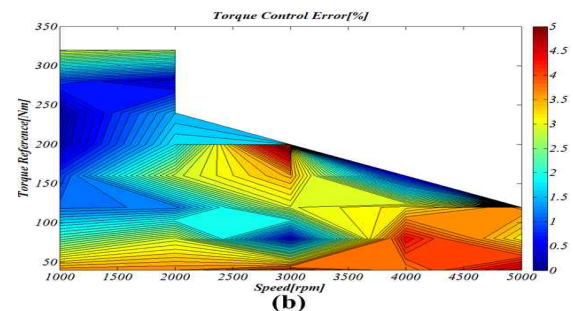
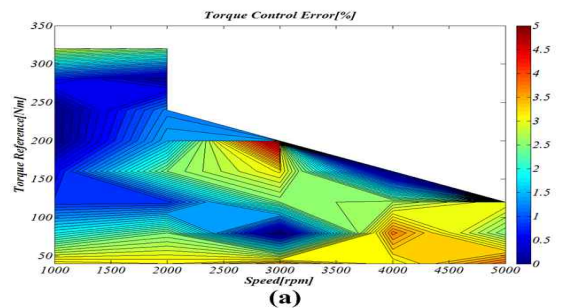


그림 19. DC-link 전압이 가변되었을 때 토크 제어 오차 (DC-link : 380V) (a) 마찰토크를 보상한 경우 (b) 마찰토크를 보상하지 않은 경우

Fig. 19. Torque control error at DC-link voltage variation (DC-link : 380V)

비록 전동기의 베어링에 대한 마찰 토크이기 때문에 그 크기가 크지 않아 수치적인 개선점이 적지만, 마찰 토크가 큰 실제 차량의 경우 토크 개선 효과가 더 크게 나타날 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 논문은 DC-link 전압 변동 및 마찰 토크를 고려한 PMSM 토크 제어 방법을 기술하였다. DC-link 전압이 변동되는 경우, 마찰 토크에 의한 영향으로 자속 토크 2D-LUT를 이용할 경우 토크 제어 오차가 발생한다. 그러나 제안된 토크 제어 방법을 이용하면 DC-link 전압이 변동되더라도 이에 대한 오차를 보상할 수 있다. 제안된 방법은 비교 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다. (No. 2014R1A2A2A05006744)

References

[1] Y. Kusaka, E. Yamada, and Y. Kawabata, "Method and Apparatus for Driving and Controlling Synchronous Motor using Permanent Magnets as its Field System," US Patent 55169995, Oct, 1996.

[2] Jaehyuk Lee, JungHyoo Lee, JinHo Park, ChungYuen Won, "Field-weakening strategy in condition of DC-link voltage variation using on electric vehicle of IPMSM" IEEE-Conf. Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 1-6, Aug. 2011.

[3] Yang Nanfang, Luo Guangzhao, Liu Weiguo, Wang Kang, "Interior permanent magnet synchronous motor control for electric vehicle using look-up table" IEEE-Conf., Electrical Machines and Systems(ICEMS), pp.1015-1019, Jun. 2012.

[4] Tae-Suk Kwon, Gi-Young Choi, Mu-Shin Kwak and Seung-Ki Sul "Novel Flux-Weakening Control of an IPMSM for Quasi-Six-Step Operation," IEEE-Trans. Ind. Appl., vol 44, no. 6 pp. 1722-1731, Nov. 2008.

[5] Bing Cheng, Tesch, T.R., "Torque Feedforward Control Technique for Permanent-Magnet Synchronous Motors," IEEE-Trans. Ind. Elect., vol 57, no. 3, pp. 969-974, Mar. 2010.

[6] J. M. Kim and S. K. Sul, "Speed control of interior permanent magnet synchronous motor drive for the flux weakening operation," IEEETrans.Ind.Appl.,vol.33,no.1,pp.43 - 48,Jan./Feb.1997.

◇ 저자소개 ◇



이정효(李禎孝)

1982년 9월 20일생. 2006년 건국대 전기공학과 졸업. 2008년 성균관대 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 2008~2013년 성균관대 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(박사). 2013년~현재 LG이노텍 선임연구원.



원충연(元忠淵)

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시주립대학 전기공학과 방문 교수. 1998~2000년 한국철도기술연구원 심사위원.

2006~2009년 한국전력공사 PQ심사위원. 2006~2009년 차세대 첨단도시철도시스템(한국건설교통기술평가원) 기술개발사업운영위원. 2006년~현재 (주)로템 기술자문위원. 2010~2012년 도시철도 공사 기술검증위원. 2007~현재 삼성전기 에너지파워 연구 센터장. 2011~2012년 한국토지주택공사 기술심사 평가위원. 현재 성균관대 전자전기공학부 교수.