

# PMSM 구동의 효율적인 회생 토크 제어 방법

양세동, 김가인, 손현수, 신민호, 이정효  
 군산대학교

## Efficient Regenerative Torque Control Method of PMSM Drive

Se-dong Yang, Ga-In Kim, Hyeon-su Son, Min-Ho Shin, Jung-Hyo Lee  
 Gunsan National University

### ABSTRACT

This paper proposes efficient regenerative torque control method of PMSM(Permanent Magnet Synchronous Machine) drive. Generally, regenerative power from PMSM drive should have torque limitation for dissipated power during low speed operation. However, correct torque limitation trajectory cannot be easily obtained because of the varied PMSM parameters during the practical operation. To achieve efficient regenerative torque control of PMSM, this paper applies the resonant DC/DC converter between DC-link voltage and battery source. Besides, a novel adaptive tracking method for optimal regenerative torque limitation which does not need online motor parameters estimation is proposed. Proposed method is verified by the experiment.

### 1. 서론

최근 PMSM는 높은 전력밀도와 제어 가능한 속도 영역, 특히 트랙션 시스템 등으로 인해 하이브리드 전기차(HEV) 및 전기차(EV) 응용 분야에서 널리 사용되고 있다. PMSM 드라이브를 동작하는 일반적인 방법 그림1(a)는 DC/DC컨버터를 사용하지 않았기 때문에 단가는 낮고, 효율이 상승하는 장점이 있지만 DC-LINK전압이 배터리의 충전상태에 따라 가변되는 단점이 있다. 그림1(b)는 배터리와 인버터 사이에 DC/DC컨버터를 사용하는 방법으로서 배터리의 전압이 변동되더라도 DC-LINK전압이 일정하다. 이러한 방법은 단가는 상승하나 모터드라이브가 설계효율대로 동작할 수 있으며, 출력 또한 감소되지 않는다.<sup>[1]</sup>

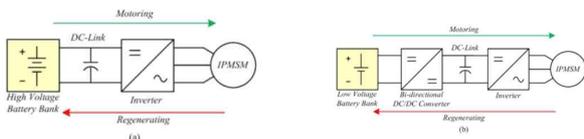


그림1 (a)인버터 EV/HEV 트랙션 시스템, (b)양방향컨버터 및 인버터

그림1(b)의 기존의 방법들에서 DC-LINK 전압을 가변시켜서 모터구동효율을 향상시키고자 했던 방법들이 연구되어왔다. 이러한 형태는 모터의 구동속도 및 역기전력에 따라서 입력전압을 가변 하여 인버터의 스위칭 손실을 저감시키고 PMSM저속 구동 효율을 상승시킬 수 있다. 그러나 이러한 방법은 하드

스위칭의 DC/DC 컨버터를 사용하기 때문에 모터 출력이 클 경우 손실이 커지는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문은 스위칭 양방향 DC/DC 컨버터를 적용시켜 효율을 향상 시켰다. 한편, 저속 회생 전력은 PMSM의 저항성분에 의해 손실된다. 이 동손을 고려할 경우, 회생토크 지령은 전동기 속도에 따라 제한되어야 한다.<sup>[2-4]</sup> 기존의 연구방법<sup>[2-3]</sup>에서는 유효한 회생전력 발생에 따른 회생토크제한만이 수행되었다. 따라서 이러한 방법들은 오프라인 테스트를 통해 회생토크가 발생되더라도 전력이 손실되는 임계속도를 얻고, 이러한 손실영역을 피하기 위해 이보다 낮은 속도에서는 회생토크지령을 차단한다. 대조적으로<sup>[4]</sup>에서는 PMSM의 파라미터에 따른 최대회생전력을 발생시킬 수 있는 지점에 대해 설명하였다. 그러나 이러한 방법도 의도치 않은 파라미터 변동이 발생할 경우 최대회생전력을 발생시키는 지점과 오차가 발생하며, 최악의 경우 회생토크는 손실로서 작용할 수 있다.

### 2. 소프트 스위칭 양방향 DC/DC 컨버터

그림2는 소프트 스위칭 양방향 DC/DC컨버터의 토폴로지를 보여줍니다. 그림에 표시된 것처럼 ZVZCS(Zero Voltage Zero Current Switching)용 공진회로는 주 전원선 외부에 위치하며, 내구성 이 뛰어난 공진 인덕터 및 커패시터를 고려하지 않고도 높은 출력을 달성 할 수 있다.

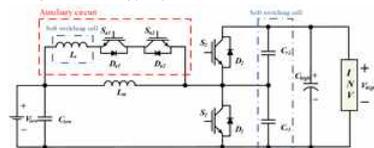


그림2 소프트 스위칭 양방향 DC/DC 컨버터 토폴로지

소프트 스위칭 양방향 컨버터의 buck, boost 동작 모드를 보여준다. 이러한 그림과 같이 회로의 7가지 동작 모드를 해결할 수 있다. 자세한 설명은<sup>[5]</sup>를 참고 한다.

### 3. 회생 토크제한 방법

PMSM 드라이브의 회생 전력을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$P_m = \frac{3}{2}(v_d^e i_d^e + v_q^e i_q^e) = \frac{3}{2}(R_s i_d^2 + R_s i_q^2 + (L_d - L_q)\omega_r i_d^e i_q^e + \omega_r \phi_f i_q^e) \quad (1)$$

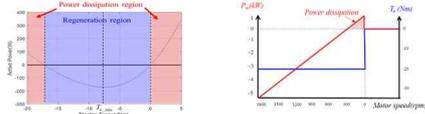


그림3 (좌측)모터 속도예 따른 발전/손실영역

그림4 (우측)저속 동작 시 회생토크에 의한 손실구간

그림 3은 특정 모터 속도에서의 회생 전력곡선을 보여 준다. 그림에 표시된 것과 같이 발전영역과 전력 손실영역은 유효전력 영점에 따라 분류된다. 음의 토크가 일정 크기를 초과하면 회생 동작이 더 이상 지속되지 않고, 전력손실이 발생 한다. 그 결과, 그림4와 같이 모터에 회생 토크가 가해지는데도 불구하고 전력손실영역이 발생한다. 만약 전류제어 동특성이 기계적 동특성보다 빠른 경우 모터 속도는 (1)에서 일정 할 수 있다. 그런 다음 최대 회생 전력에 대한 dq축 전류를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial P_m}{\partial i_d^*} = \frac{3}{2}(2R_s i_d^* - L_d i_d^* \omega_e + L_d \omega_e i_q^*) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial P_m}{\partial i_q^*} = \frac{3}{2}(2R_s i_q^* + L_d i_d^* \omega_e + \omega_e \phi_f - L_q i_q^* \omega_e) = 0 \quad (3)$$

$$i_d^*_{min}(\omega_e) = \frac{(L_d - L_q)\omega_e^2 \phi_f}{4R_s^2 - (L_d - L_q)^2 \omega_e^2} \quad (4)$$

$$i_q^*_{min}(\omega_e) = \frac{-2R_s \omega_e \phi_f}{4R_s^2 - (L_d - L_q)^2 \omega_e^2} \quad (5)$$

그 결과, 최대 회생력을 위한 최소 토크를 얻을 수 있다.

$$T_{e,min}(\omega_e) = \frac{3Pk_s \phi_f^2}{8R_s} \frac{\omega_e}{(\omega_e + k_b)^2 (\omega_e - k_b)^2} \quad (6)$$

where,  $k_b = \frac{2R_s}{L_d - L_q}$

### 3.2 입력전력 계산을 통한 최대 회생전력 추적

그림5는 최적회생토크 궤적을 나타낸다. 파란색의 영역에서는 MTPA제어에 따른 효율적인 토크발생이 가능한 영역이며, 흰색 영역은 비효율적인 회생전력이 발생하는 영역, 붉은 색은 손실전력이 발생하는 영역이다. 만약 효율적이면서 회생전력을 최대로 발생시키려면, 전동기 속도에 따라 노란색 토크궤적을 따르면 된다. 하지만 이러한 궤적은 모터 파라미터에 따라 변동된다. 이러한 변동에도 최적의 회생출력 궤적을 찾기 위해 흰색영역과 파란색영역의 특징은 식(7)과 같이 얻어질 수 있다.

$$\begin{cases} \frac{dP_m}{dT_e} > 0 & (T_{e,min} \leq T_e \leq 0) \\ \frac{dP_m}{dT_e} < 0 & (T_e > T_{e,min}) \end{cases} \quad (7)$$

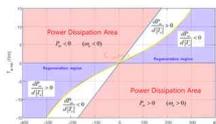


그림5 최적의 회생 토크궤적에 대한 감지방범 제한(노란색 선)

그림 6은 제안된 회생토크제한 방법을 나타낸 그림이다. 그림을 살펴보면 DC/DC컨버터로부터 얻어진 발전전력에 대해 토크 변동에 따른 미분성분을 추출하고, 이 성분을 영으로 제어하여 저장된 토크제한궤적을 수정한다.

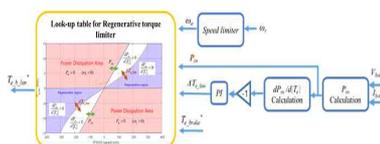


그림6 제안된 회생 토크제한 컨트롤 블록 다이어그램

## 4. 실험 결과

실험은 10KW PMSM에 의해 진행 했다. 그림7은 제안된 방법과 저속 회생토크 인가 방법을 비교한 파형이다. 그림7(a)에서와 같이 제안된 방법은 파란색 선으로 전력이 발생되도록 하였으며, 기존의 방법은 검은색의 궤적으로 동작하도록 회생토크를 인가하였다. 그림7(b)에서 나타난 바와 같이 기존의 방법에 비해 회생전력이 증가하였고, 손실전력이 나타나지 않음을 알 수 있다.

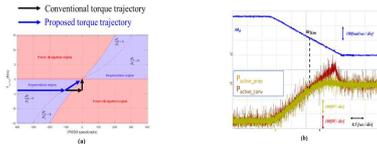


그림7 제안된 방법과 기존토크 인가 방법 비교실험 결과  
(a)제안된 방법과 기존 방법의 토크궤적, (b)비교실험결과

## 5. 결론

본 논문은 효율적인 PMSM의 회생토크제어 방법을 설명한 다. 이를 위해 부가회로를 적용한 소프트스위칭 양방향 DC-DC컨버터를 배터리와 DC-link 사이에 위치시켜 스위칭손실을 저감하였다. 또한 PMSM 파라미터 변동을 위한 새로운 적응형 회생토크제한방법을 적용시켰다. 이러한 회로구성 및 제어방법을 통하여 저속 회생발전효율을 크게 증가시킬 뿐만 아니라, 파라미터 편차에 따른 회생전력을 극대화시킬 수 있다.

## ACKNOWLEDGMENT

This work is supported the Human Resources Development Program (Grant No. 20174010201350) by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grants. The Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Education (NRF-2016R1A6A1A03013567).

## 참고 문헌

- [1] T. T. Vo., X. Chen., W. Shen., A. Kapoor, "New charging strategy for lithium-ion batteries based on the integration of Taguchi method and state of charge estimation," Journal of Power Sources, vol. 273, pp.413-422, 2015.
- [2] P. Fajri, S. Lee, V. A. K. Prabhala and M. Ferdowsi, "Modeling and Integration of Electric Vehicle Regenerative and Friction Braking for Motor/Dynamometer Test Bench Emulation," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, no. 6, pp. 4264-4273, June 2016.
- [3] S. Heydari, P. Fajri, M. Rasheduzzaman and R. Sabzehgar, "Maximizing Regenerative Braking Energy Recovery of Electric Vehicles through Dynamic Low-Speed Cutoff Point Detection," in IEEE Transactions on Transportation Electrification. vol. 5, no 1, pp. 262-270, Jan. 2019.
- [4] K.M. Choo, C.Y. Won, "Design and Analysis of Electrical Braking Torque Limit Trajectory for Regenerative Braking in Electric Vehicles With PMSM Drive Systems",IEEE Transactions on Power Electronics , vol. 35, no. 12, Dec., 2020.
- [5] J.H. Lee, D.H. Yu, J.G. Kim, Y.H. Kim, S.C.Shin, D.Y. Jung, Y.C. Jung, C.Y. Won, "Auxiliary Switch Control of a Bidirectional Soft-Switching DC/DC Converter", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no 12, pp. 5446 - 5457, May. 2013.