

# 능동댐핑을 이용한 차량용 PMSM의 회생제동기법에 관한 연구

추경민\*, 김우재\*, 정원상\*, 원충연\*  
 성균관대학교\*

## A Study on the Regenerative Braking Technique for Automotive PMSM using Active Damping

Kyoung-Min Choo\*, Woo-Jae Kim\*, Won-Sang Jung\*, Chung-Yuen Won\*  
 Sungkyunkwan University\*

### ABSTRACT

본 논문에서는 능동댐핑을 이용하여 영구자석 동기전동기(PMSM)의 회생 제동 시 기계적 마찰력을 이용한 브레이크와 같은 제동특성을 얻으면서도 최대한의 회생에너지를 얻을 수 있는 기법에 대하여 제안한다. 능동댐핑의 이득 값을 조정하여 가상으로 마찰력을 조정하였으며 최대회생이 가능한 이득 값의 기준을 정의하고, 시뮬레이션을 통해 가상 마찰력의 변화에 따른 감속 궤적 및 PMSM의 출력전력 변화를 확인하였다.

### 1. 서 론

전기자동차용 PMSM은 회전 방향과 반대 방향의 토크를 발생시키게 되면 회생제동을 통해 차량의 운동에너지를 전기에너지로 변환할 수 있는 장점이 있다. 그러나 기존의 제동방식은 역 토크의 크기가 사용자의 정지 입력에 비례하게 주어지므로 기존 기계적 마찰을 이용하는 제동 방법과 사뭇 다른 제동 토크를 발생시켜 운전이 위화감을 초래하였다. 이를 해결하기 위해 자동차의 관성모멘트와 물리적 마찰계수를 임의로 지정한 후 외란관측기를 이용하여 원하는 기계적 시정수를 얻을 수 있도록 제동 토크를 조정하는 기법이 소개되었다.<sup>[1]</sup> 그러나 능동댐핑을 이용하여 추가적인 가상 기계 마찰력을 모의하게 되면 구현이 더욱 간단할 뿐만 아니라 순수하게 마찰력만을 조절할 수 있기 때문에 실제 기계적 마찰을 이용한 방식과 매우 유사한 제동 특성을 얻을 수 있다. 또한 능동댐핑을 이용한 제동의 경우 최대 회생량을 얻기 위해 연구가 진행되었다.<sup>[2]</sup> 본 논문에서는 능동댐핑을 이용하여 기계적 마찰성분을 모의하는 제동기법과 회생에너지를 고려하여 마찰계수를 선정하는 기준을 제안하였다.

### 2. 능동댐핑을 이용한 기계적 마찰력 모의 기법

순시토크제어를 이용하여 회전력을 얻는 PMSM의 기계시스템은 그림 1의 표시된 부분과 같이 구성된다. 일반적으로 전류 제어루프의 응답성은 기계적 시정수에 비해 매우 크므로 전류 제어루프의 이득 값을 1로 놓으면 출력 속도에 이득 값  $B_{active}$ 를 곱하여 입력 토크 지령으로 궤환시켜 기계적 마찰력이  $B+B_{active}$ 만큼 증가한 것과 같은 역방향 토크 입력을 얻을 수 있다. 이 때 기계 시스템의 방정식은 식 (1)과 같이 변경된다.

$$T_e = J\omega_r' + (B + B_{active})\omega_r + T_L \quad (1)$$

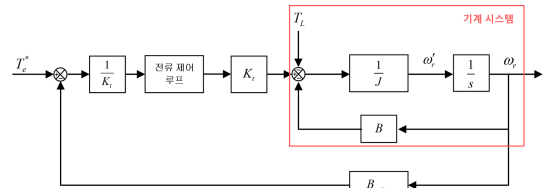


그림 1 능동댐핑을 적용한 PMSM의 기계시스템 구성  
 Fig. 1 Mechanical system configuration of PMSM with active damping

### 3. 기계적 마찰력의 크기와 회생에너지와의 관계

기존의 연구에서 능동댐핑을 이용해 PMSM의 최대 회생량을 얻을 수 있는 순시 토크를 발생시키는 제동기법이 제안되었다.<sup>[2]</sup> 식 (2)는 이 연구에서 PMSM의 속도에 따라 최대회생에너지를 가질 수 있는 토크의 크기이며 토크는 모터의 속도에 대한 함수이기 때문에 이 기법은 2장에서 소개한 능동토크를 제어하여 기계적 마찰력의 크기를 가상으로 조정한 기법과 매우 유사하다.

$$T_e = k_{te}\omega_r \quad (\text{where, } k_{te} = 3P^2\phi_f^2 / 16R_s) \quad (2)$$

이 기법을 사용할 경우 그림 2와 같이 일정한 토크를 이용하여 감속하는 기법보다 더 큰 회생에너지량을 얻을 수 있게 된다. 이제 능동댐핑의 이득 값, 즉 기계 시스템의 가상 마찰력의 크기가 바뀌었을 때의 회생전력에 대하여 고려해본다. 그림 3은 가상 마찰력의 크기를 바꾸어가며 그에 따른 속도의 궤적을 나타낸 것이다. 그림 3에서 보이는 것과 같이 가상 마찰력

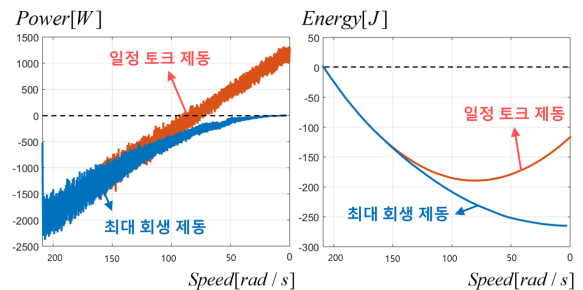


그림 2 일정토크제어와 최대회생에너지를 고려한 제동기법의 회생에너지 비교

Fig. 2 Comparison of regenerative energy with constant torque control and maximum regenerative energy

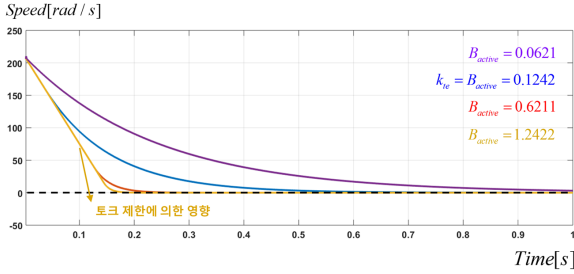


그림 3 능동댐핑으로 인한 가상 마찰력에 따른 감속 궤적  
Fig. 3 Decelerated trajectory with virtual friction due to active damping

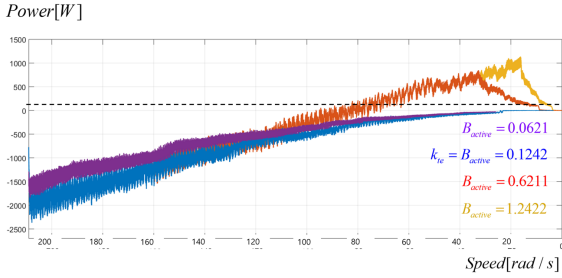


그림 4 능동댐핑으로 인한 가상 마찰력에 따른 회생에너지 비교  
Fig. 4 Comparison of regenerative energy according to virtual friction due to active damping

의 크기를 증가시킬수록 속도는 빠르게 제동하게 되지만 일정 크기에 도달한 이후에는 마찰력을 계속해서 증가시키더라도 제동 특성이 변화하지 않음을 알 수 있다. 이러한 현상은 PMSM의 토크 제한에 의한 것이며 때문에 만약 가상 마찰력을 매우 큰 값으로 선정할 경우 제한 토크를 일정하게 주어 제동하는 것과 같은 특성을 가지게 된다.

그림 4는 그림 3과 같은 가상 마찰력을 갖는 시스템에서 제동까지의 속도에 따른 회생 전력량을 나타낸 것이다. 그림과 같이  $B_{active}$ 의 값이 증가할수록 회생에너지는 점점 증가하다가  $k_{tc}$ 와 같아졌을 때 가장 큰 회생전력을 가지게 되며 그 이상으로 증가하게 되면 오히려 회생 전력이 감소함을 알 수 있다. 즉 총 회생전력을 고려한다면 능동댐핑을 이용한 가상 마찰력  $B_{active}$ 의 크기는  $k_{tc}$ 로 제한되어야 한다.

#### 4. 시뮬레이션

그림 5는 제안된 능동댐핑을 이용한 차량용 PMSM의 회생 제동 기법을 구현하기 위한 제어블록선도이다. 기존 제어의 토크 레퍼런스와는 별도로 최대 회생을 위한 속도의 궤환루프가 구현되어있으며 회생량을 최대로 유지시키기 위하여  $k_{tc}$  이상의 가상 마찰력은 사용자의 입력을 0으로 제한하고 이를 궤환루프에 곱해주어 구현하였다.

그림 6은 사용자의 입력을 계단적으로 변화시켰을 때의 시간에 따른 속도 궤적을, 그림 7은 속도에 따른 회생전력을 나타낸 것이다. 그림과 같이 어느 속도에서 이득값을 변경 하더라도 각 가상 마찰력을 단독으로 사용했을 때의 회생전력 궤적을 따라감을 알 수 있으며  $k_{tc}$  이상의 가상 마찰력이 제한되어 있기 때문에 사용자의 입력이 1일 때 가장 급격한 제동특성을 가짐을 볼 수 있다.

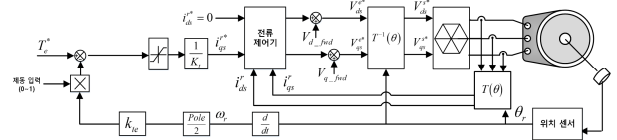


그림 5 능동댐핑을 이용한 회생제동기법의 전체 블록선도  
Fig. 5 Block diagram of regenerative braking technique using active damping

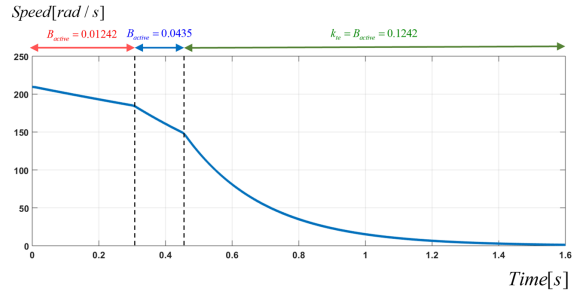


그림 6 능동댐핑으로 인한 가상 마찰력 변화에 따른 감속 궤적  
Fig. 6 Deceleration trajectory according to change of virtual friction due to active damping

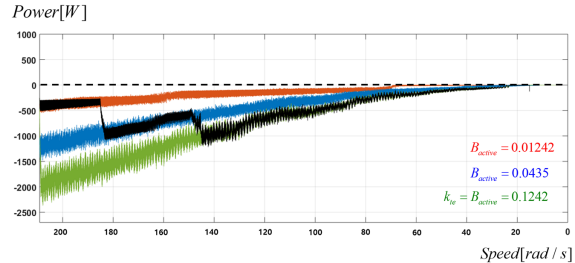


그림 7 능동댐핑으로 인한 가상 마찰력 변화에 따른 전동기의 회생전력  
Fig. 7 Regenerative power of motor according to change of virtual friction due to active damping

#### 5. 결론

본 논문에서는 능동댐핑을 이용하여 PMSM의 제동토크를 기계식 브레이크와 유사하게 모의하면서도 최대한의 회생 에너지를 얻을 수 있는 제어기법이 제안되었으며 이를 시뮬레이션을 통해 증명하였다. 그러나 실제 차량용 전동기에 지배적으로 사용되는 IPMSM의 비선형적인 궤환을 갖는 최대회생 제동특성에 대한 분석 및 최대 회생이 가능한 가상 마찰력 이상의 토크가 필요한 긴급상황을 판별하여 대처할 수 있는 알고리즘에 대한 연구가 향후에 필요하다.

#### 참고 문헌

- [1] 정성철, 이익선, 고종선, "높은 에너지 회수를 위한 전기자동차용 PMSM 전압제어", 2017년도 전력전자학술대회, pp. 152-155, 2017, July.
- [2] 김우재, 원일권, 추경민, 홍성우, 김준찬, 원충연, "순시 최대 회생에너지를 갖는 영구자석 동기전동기 제동기법에 대한 연구" 2017년도 전력전자학술대회, pp. 75-76, 2017, November.