

순시 최대 회생에너지를 갖는 영구자석 동기전동기 제동기법에 대한 연구

김우재* · 원일권* · 추경민* · 홍성우* · 김준찬* · 원충연*
성균관대*

Study on The Regenerative Braking Method of Permanent Magnet Synchronous Motor for Maximum Regenerative Power.

Woo Jae Kim*, Il Kuen Won*, Kyoung Min Choo*, Sung Woo Hong*, Jun Chan Kim*,
Chung Yuen Won*
Sungkyunkwan University*

ABSTRACT

본 논문에서는 속도에 따른 순시 최대 회생에너지를 갖는 제동기법이 제안되었다. 제안하는 기법을 기존 전동기 구동시스템에 적용시키기 위해 주변기기를 추가하지 않고 특정속도에서 최대 회생에너지를 갖는 토크를 발생시켜 전동기를 제동하였다. 또한 제안하는 기법의 회생 에너지가 기존의 기법보다 증가함을 시뮬레이션을 이용하여 검증하였다.

1. 서론

배터리를 이용하는 전동기의 구동시스템은 제동 시 사용한 에너지를 회생 가능하기 때문에 에너지의 효율이 상당히 좋아 전기자동차, 철도 등의 다양한 산업 분야에서 사용되고 있다. 회생에너지를 향상시키기 위해 울트라커패시터 사용과 같은 하드웨어의 새로운 제안기법을 이용하여 최대 회생에너지를 갖는 연구^[1]등 많은 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 그러나 이와 같은 기법을 적용하기 위해서는 주변기기의 추가가 필요하게 되어 비용과 부피가 증가하는 등 문제가 발생한다. 따라서 본 논문에서는 주변기기의 추가 없이 회생량을 증가시키는 기법을 제안하였으며 시뮬레이션을 통해 제안한 기법을 검증하였다.

2. 순시 최대 회생에너지를 갖는 최대 회생 토크

전동기의 회생제동 시 에너지의 소비를 최소화하면서 최대 회생량이 증가하게 되면 그만큼의 에너지 효율이 좋아지게 된다. 특정속도에서 순시 최대 회생에너지를 갖는 토크를 구하기 위해 본 논문은 표면부착형 영구자석 동기전동기(SPMSM)의 정상상태에서 최대 회생 토크를 수식적으로 해석하였다. 식(1)인 영구자석 동기 전동기의 q축 전압방정식이며, d축 전류는 0 이므로 q축 전류는 식(2)와 같이 표현할 수 있고, SPMSM의 전력식은 식(3)과 같다.

$$v_q = R_s i_q + \lambda \omega_e \quad (1)$$

$$i_q = \frac{v_q - \lambda \omega_e}{R_s} \quad (2)$$

$$P = \frac{3}{2} v_q i_q = \frac{3}{2} (R_s i_q^2 + \lambda \omega_e i_q) \quad (3)$$

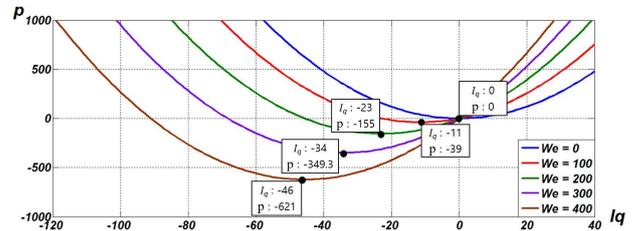


그림 1 ω_e 에 따른 q축 전류와 전력 특성 곡선

Fig. 1 q axis current and power characteristic curve according to ω_e

그림 1은 식(3)의 전력과 q축 전류의 관계를 그래프로 나타낸 것이며, 속도 ω_e 의 값에 따라 그래프의 최솟값이 달라지는 것을 확인할 수 있는데, 이것은 속도 ω_e 에 따른 최대 회생 토크가 달라지는 것을 의미한다. 특정 속도 ω_e 에 아래로 볼록한 2차방정식의 형태, 식(3)의 에너지 소비를 최소로 하기 위해서 미분한 값을 0으로 하여 전력의 최솟값을 나타내는 q축 전류를 구하면 식(4)와 같다.

$$\frac{dP}{di_q} = \frac{3}{2} (2R_s i_q + \lambda \omega_e) = 0$$

$$\Rightarrow i_q = -\frac{\lambda \omega_e}{2R_s} \quad (4)$$

영구자석 동기 전동기의 토크는 전동기의 기계적 출력으로부터 구할 수가 있으며 정상상태에서 전체적인 입력 전력은 식(5)처럼 크게 고정자 동손, 기계적 출력으로 나뉘게 된다. 에너지 소비가 최솟값이 되는 q축 전류를 이용하여 기계적 출력의 최솟값은 식(6)과 같다. 이를 전동기의 속도 ω_r 로 나누어서 식(7)처럼 특정 속도에서의 순시 최대 회생에너지를 갖는 영구자석 동기 전동기의 최대 회생 토크를 구할 수 있다.

$$P_{in} = \frac{3}{2} (P_c + P_{out}) = \frac{3}{2} (R_s i_q^2 + \lambda \omega_e i_q) \quad (5)$$

$$P_{out} = \frac{3}{2} \lambda \omega_e i_q = -\frac{3\lambda^2 \omega_e^2}{4R_s} \left(\frac{Pole}{2} \right)^2 \quad (6)$$

$$T_e = \frac{P_{out}}{\omega_r} = -\frac{3\lambda^2\omega_r}{4R_s} \left(\frac{Pole}{2}\right)^2 \quad (7)$$

$$T_e = -\frac{3\lambda^2\omega_r}{4R_s} \left(\frac{Pole}{2}\right)^2 = J\dot{\omega}_r + B\omega_r$$

$$\Rightarrow \dot{\omega}_r = -\frac{1}{J} \left(B + \frac{3\lambda^2(Pole)^2}{16R_s} \right) \omega_r \quad (8)$$

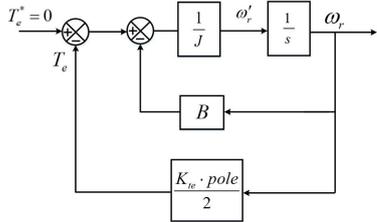


그림 2 최대 회생 토크를 이용한 기계시스템의 블록선도
Fig. 2 Block diagram of mechanical system using maximum regenerative torque

부하 토크를 무시한 상태에서 기계적 출력으로 인해 구한 토크식과 기계 시스템의 운동방정식을 이용하여 $\dot{\omega}_r$ 출력으로 정리를 하면 식(8)과 같이 표현되며, 이는 그림 2와 같이 기계 시스템의 블록선도가 되는 것을 확인할 수 있다. 토크지령 값이 0이므로 속도는 초깃값을 가진 상태에서 점점 0으로 감소하면서 전동기는 회생제동 모드로서 작동을 하게 된다.

3. 제안하는 순시 최대 회생에너지 제동 기법

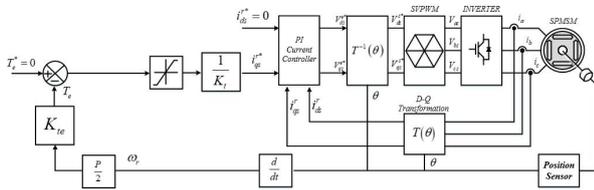


그림 3 제안한 회생 제동 기법을 적용한 전체 블록선도
Fig. 3 Block diagram using proposed regenerative braking method

그림 3은 제안한 회생 제동기법을 적용한 전체적인 블록선도를 나타낸다. 기존 기법은 실제 출력된 속도를 피드백 받아 통상 PI제어기를 사용하는 속도제어기를 통해 속도지령 값인 0으로 제어하지만, 제안한 회생제동기법은 상수 K_{re} 를 통한 출력 토크를 피드백 받아서 토크지령 값 0으로 제어하여 속도를 0으로 감소시킨다.

4. 시뮬레이션

제안한 기법으로 순시 최대 회생에너지의 향상을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 시스템의 변수들의 파라미터 종류 및 값을 나타내며, 그림 4는 속도에 따른 전력의 파형을 보여주고, 그림 5는 속도에 따른 q축 전류와 전압 파형을 보여주는데 기존의 기법과 제안하는 기법의 비교를 나타낸다. 기존의 기법에서는 전력의 양의 값, 즉 전력을 소모하는 영역이 존재하지만, 제안한 기법에서는 전력을 소모하는 영역이 없는 것을 확인하였다.

표 1 시스템 변수들의 상수 값
Table 1 Values of the System Parameters

Parameter	Vale	Parameter	Vale
R_s	0.2Ω	J	0.0297
L_{ds}	$303\mu H$	B	0
L_{qs}	$907\mu H$	Switching frequency	10kHz
Pole	8	V_{dc}	300V

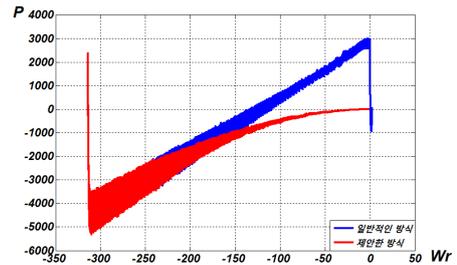
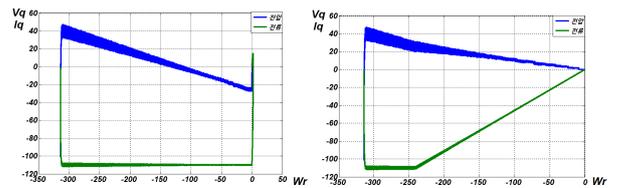


그림 4 속도에 따른 전력 파형 비교
Fig. 4 Power waveform comparison according to speed



(a) 기존의 기법 (b) 제안한 기법

그림 5 속도에 따른 q축 전류와 전압 파형 비교
Fig. 5 q axis current and voltage waveform comparison according to speed

5. 결론

본 논문에서는 전동기가 순시 최대 회생에너지를 갖는 회생 기법을 연구하였고, 특정 속도에서 최대 회생에너지를 갖는 최대 회생토크를 수식적으로 계산하였다. 그리고 해당 토크를 회생기법에 적용시킨 후 기존의 기법과 비교를 하였다. 기존의 기법에서는 전력을 소모하는 영역이 존재하였지만, 제안한 기법에서는 전력소모 없이 회생하여 최대 회생에너지를 갖는 것을 시뮬레이션으로 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20164030200980)

참고 문헌

[1] N. L. Hinov, D. N. Penev and G. I. Vacheva, "Ultra capacitors charging by regenerative braking in electric vehicles," 2016 XXV International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, 2016, pp. 1 4.