

영구자석 동기전동기의 제동 알고리즘

趙官烈*, 梁淳培, 洪贊熙

A Braking Algorithm of a PM synchronous Motor

Kwan-Yuhl Cho, Soon-Bae Yang, and Chan-Hee Hong

요 약

영구자석 동기전동기의 제동 알고리즘을 제안한다. 전동기의 고정자 저항을 제동저항으로 사용함으로써 전동기의 운동에너지를 부가적인 제어회로 없이 고정자 권선에서 소모한다. 제안된 제동 알고리즘은 고정자권선에서 전력소모를 최대화하고 DC 링크 콘덴서전압 제한 및 인버터 전류제한 조건하에서 최대의 제동토크를 발생하여 제동시간을 최소화 할 수 있다.

ABSTRACT

A braking algorithm for a PM synchronous motor is presented. The resistance of the stator windings operates as a braking resistors and dissipates the regenerated power from the rotor without any braking components including the electronic power components and control circuits. The proposed braking algorithm maximizes the power dissipation in the stator windings and also generates the maximum braking torque under the limit conditions of DC link capacitor voltage and inverter currents so that it can minimize the braking time.

Key Words : Braking, PM synchronous motor, Flux weakening control, Inverter

1. 서 론

산업용에 주로 적용되어 왔던 인버터 시스템은 최근 가정용 전기제품에도 적용이 증가되고 있다. 인버터를 사용한 가변속 제어용 전동기로는 유도전동기, 영구자석 동기전동기(permanent magnet synchronous motor), 스위치드 릴럭턴스 모터(switched reluctance motor), 동기 릴럭턴스 모터(synchronous reluctance motor)등이 있다. 그 중에서도 영구자석 동기전동기는

고효율 및 제어의 용이성으로 인해 수십 W~수 kW의 소용량에서 활발히 적용되고 있다.

전동기를 사용한 제어시스템의 경우 응용분야에 따라 급격한 가감속 또는 돌발상황 발생시 전동기를 빠른 시간내 정지시켜야 하는 급제동이 요구되어진다. 이러한 급제동은 기계적인 마찰 브레이크를 사용하거나 전기적인 제동토크를 이용함으로써 구현할 수 있다. 기계적인 제동은 신뢰성 및 급속한 제동시간에는 유리하나 기계적인 제동장치에 의한 재료비증가, 시스템 부피증대 등의 문제가 있다. 전기적인 제동에는 양방향 스위치를 사용하여 회전자의 운동에너지를 전원에 되돌려주는 회생제동(regenerated braking) 방식과 제동저항 등을 사용하여 에너지를 소모하는 다이내믹 제동(dynamic braking) 방식으로 구분할 수 있다^{[1][3]}. 회생제동 방식은 에너지를 전원에 회생시킴으로써 에

*LG전자 디지털 어플라이언스 연구소 책임연구원

E-mail : kycho@lge.com

접수일자 : 2002. 3.11

1차심사 요청일 : 2002. 3.22 2차심사 요청일 : 2002. 5.21

심사완료일 : 2002. 6.12

너지 손실을 줄일 수 있으나 양방향 스위치를 사용함으로써 재료비가 증가한다. AC 전원을 다이오드(diode)를 통하여 DC 전원으로 정류하는 단방향 전력 변환 회로를 사용하는 경우 정류부(rectification part)는 전동기에서 회생되는 에너지를 AC 전원부에 되돌려줄 수 없으므로 이러한 회생에너지는 DC link 콘덴서의 전압을 상승시키게 된다. DC 링크(link) 콘덴서에 축적되는 에너지를 소모시킬 수 있는 가장 일반적인 방법은 DC 링크 콘덴서에 병렬로 제동저항(braking resistor)을 추가하는 방법이다. 제동저항을 사용하는 방법은 제동저항에서 많은 양의 에너지를 소모할 수 있으므로 제동시간을 줄일 수 있으나, 제동저항 및 부가적인 제어회로가 필요함으로써 제동시스템의 부피증대 및 재료비 상승에 의해 사용상의 제한을 받는다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 유도전동기에 대하여 전동기의 고정자 권선을 제동저항으로 사용하여 회전자의 에너지를 소모하는 방법이 제안되었다^[4]. 고정자 권선에서 에너지를 최대한 소모하기 위하여 손실 제어기(loss controller)에서 q축 전류로 제동토크(braking torque)를 제어하고 d축 전류의 평균치과 실효치로 각각 계자(loaded) 및 시스템 손실(system loss)을 제어한다. 이러한 제동방법은 기계적인 제동 및 제동저항 삽입 방법에 비해 제동시간은 길지만 기계적인 제동장치 또는 제동저항 등의 보조장치가 필요 없이 전동기의 적절한 전력제어로 구현이 가능하므로 재료비 저감 및 소형화(compact)에 유리하다. 영구자석 동기전동기에 대해서는 약계자 영역(flux weakening region)에서 제동을 위해 d축 전류를 이용하는 방법이 제안되었다^{[5],[6]}.

본 논문에서는 표면부착형 영구자석 동기전동기(surface mounted PM synchronous motor)를 사용하는 인버터 시스템에서 DC 링크 콘덴서 전압제한 및 인버터 전류제한 조건하에서 전동기의 고정자 권선에서 회전자의 에너지를 빠른 시간내 소모하기 위한 전동기의 속도, 전압 및 전류조건에 따른 최적전류를 해석적으로 구하였다. 또한 전동기의 제동시간을 최소화하기 위한 제동 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제안된 알고리즘의 특성을 평가하였다.

2. 최대 제동토크 운전을 위한 전류계적

고정자 권선에서 전동기의 회생에너지를 소모하는 제동방법의 경우 제동토크를 최대로 하기 위한 조건은 다음의 3가지로 요약할 수 있다.

- 가) DC 링크 콘덴서 전압을 일정값 이하로 유지한다.
- 나) 인버터의 전류제한과 전압제한의 조건하에서 전동기의 회생에너지를 고정자 권선에서 빠른 시간내 소모하기 위하여 고정자 권선에 흐르는 전류를 최대한으로 한다.
- 다) 제동시간을 줄이기 위하여 제동토크가 최대가 되도록 d축 및 q축 전류를 제어한다.

표면부착형 영구자석 동기전동기에 대하여 위의 3가지 조건을 만족하는 전류계적에 대하여 고찰한다. DC 링크 콘덴서 전압은 회전자에서 고정자로 넘어오는 회생에너지(regenerated energy)와 고정자 권선에서 소모되는 에너지의 차에 의해 결정된다. 즉 회생에너지가 고정자 권선에서 소모되는 에너지보다 큰 경우 DC 링크 콘덴서 전압은 상승하고 반대로 회생에너지가 고정자 권선에서 소모되는 에너지보다 작은 경우 콘덴서 전압은 감소한다. 그러므로 회생에너지와 고정자 권선에서 소모되는 에너지가 동일하도록 제어함으로써 조건 가)를 만족시킬 수 있다. 표면부착형 영구자석 동기전동기(SPM synchronous motor)에서 전동기의 회전자로부터 고정자 권선에 넘어오는 회생전력은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_g = T_e \omega_m = \frac{3}{2} \phi_f i_{qs} \omega_r \quad (1)$$

식 (1)에서 ϕ_f 는 영구자석의 쇄교자속(flux linkage), i_{qs} 는 회전자 기준축에서의 q축 전류, ω_r 과 ω_m 은 각각 회전자의 전기 각속도 및 기계 각속도를 나타낸다. 일반적으로 제동모드에서 고정자 권선에 흐르는 제동전류는 제동시간을 저감하기 위하여 인버터에서 허용할 수 있는 최대전류가 흐르도록 제어한다. 이러한 조건하에서 영구자석 동기전동기의 고정자철손(core loss)은 고정자 동손(copper loss)에 비해 상대적으로 무시할 만큼 작다. 고정자 권선에서 소모되는 동손은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_r = \frac{3}{2} r_s (i_{qs}^2 + i_{ds}^2) \quad (2)$$

식 (2)에서 r_s 는 고정자의 상저항, i_{ds} 는 회전자 기준축에서의 d축 전류를 나타낸다. 제동토크를 최대로 하기 위한 3가지 조건중에서 가)의 조건은 위에서 언급한 바와 같이 회전자에서 고정자로 넘어오는 회생전력(regenerated power)보다 고정자 권선에서 소모되는 전력을 크게 함으로써 만족될 수 있다. 이러한 조건을

만족하는 q축 및 d축 전류의 궤적은 식 (1)과 (2)로부터 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(i_{qs} + \frac{\phi_f \omega_r}{2 r_s} \right)^2 + i_{ds}^2 \geq \left(\frac{\phi_f \omega_r}{2 r_s} \right)^2 \quad (3)$$

고정자 저항에서 회생에너지를 소모하는 제동방법에서 조건 나)를 만족시키기 위해서는 고정자 권선에 흐르는 전류가 최대가 되도록 제어하고 조건 다)의 제동토크를 최대로 하기 위해서는 식 (1)에 나타난 바와 같이 q축 전류가 최대가 되도록 제어해야 한다. 그러나 고정자 권선에 흐를 수 있는 전류는 인버터의 최대 허용전류와 고정자에 인가할 수 있는 최대전압에 의해 제한받게 된다. 따라서 먼저 인버터 최대전류 및 최대전압에 의해 제한되는 q축 전류 및 d축 전류의 궤적을 살펴보고 제한된 궤적내에서 제동토크를 최대로 하기 위한 전류궤적을 고찰한다. 전동기가 고속 또는 제동 모드에서 q축 및 d축 전류의 동특성(dynamics)을 무시하면 q축 및 d축 인덕턴스의 전압강하를 무시할 수 있으므로 표면부착형 영구자석 동기전동기의 전압방정식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \omega_r L_d i_{ds} + \phi_f \omega_r \quad (4)$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} - \omega_r L_q i_{qs}$$

식 (4)에서 V_{qs} 및 V_{ds} 는 각각 q축 및 d축 전압을, L_q 및 L_d 는 각각 q축 및 d축 인덕턴스를 나타낸다. q축 및 d축 전압은 인버터의 최대 출력전압에 의해 제한되므로 식 (5)를 만족하여야 한다.

$$V_{qs}^2 + V_{ds}^2 \leq V_{\max}^2 \quad (5)$$

식 (5)에서 전동기에 인가할 수 있는 최대전압 V_{\max} 는 DC 링크 전압 및 PWM 스위칭 특성에 의해 결정된다. 고정자 전류가 최대 인가전압에 의해 제한되는 영역은 전동기의 속도가 고속일 때이다, 이러한 영역에서는 고정자 저항 임피던스(impedance)의 제곱(r_s^2)은 인덕턴스의 임피던스의 제곱($\omega_r^2 L^2$)에 비해 매우 작으므로 전압제한 조건에서의 q축 및 d축 전류의 궤적은 식 (4)와 (5)로부터 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{ds}^2 + \left(i_{qs} + \frac{\phi_f}{L_d} \right)^2 \leq \left(\frac{V_{\max}}{\omega_r L_q} \right)^2 \quad (6)$$

마지막으로 인버터에서 전동기에 인가할 수 있는 최대전류는 인버터 회로 및 전동기보호를 위해 제한된다. 인버터의 최대 허용전류는 인버터 스위치의 전력용량(power capacity) 및 영구자석의 감자방지를 위한 최대 허용전류등에 의해 결정된다. 이러한 인버터 전류제한 조건에 의해 허용 가능한 q축 및 d축 전류는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{qs}^2 + i_{ds}^2 \leq I_{\max}^2 \quad (7)$$

고정자 권선에서 전동기의 회생에너지를 소모하는 제동 알고리즘을 구현하기 위한 나)의 조건은 최대전압 제한조건인 식 (6)과 인버터 최대전류 제한조건인 식 (7)을 만족하는 q축 및 d축 전류중에서 전류벡터의 크기(amplitude)가 가장 큰 q축 및 d축 전류를 선택함으로써 고정자 권선에 흐르는 전류를 최대로 할 수 있다. 또한 다)의 조건은 식 (6)과 식 (7)을 만족하는 q축 및 d축 전류중에서 q축 전류가 최대가 되는 q축 및 d축 전류를 선택함으로써 식 (1)에 나타난 바와 같이 제동토크를 최대로 할 수 있다.

영구자석 동기전동기의 제동시간을 최소화 하기 위해 위에서 주어진 가)~다)의 3가지 조건을 만족하는 고정자 전류는 가)의 조건을 만족하기 위해 식 (3)의 조건을 만족하여야 하고, 나) 및 다)를 만족하기 위해 식 (6)과 식 (7)의 조건을 만족하고 전류의 크기(magnitude, $i_{qs}^2 + i_{ds}^2$)가 최대인 전류중에서 q축 전류가 최대가 되도록 q축 전류 및 d축 전류를 선택하면 된다.

그림 1은 DC 링크 콘덴서의 전압을 일정값 이하로 유지하기 위한 전력 제한조건, 전동기에 인가되는 최대전압 조건을 나타내는 전압 제한조건 및 인버터 전류 제한조건을 만족하는 제동모드에서의 q축 및 d축 전류의 궤적을 나타낸다. 고속영역에서의 허용 가능한 전류는 전압제한 및 전력제한에 의해 좌우되고 저속영역에서의 허용 가능한 전류는 전력제한 및 인버터 전류제한에 의해 좌우된다. q축 및 d축 전류가 최대전압 또는 최대전류에 의해 제한되는 영역은 전동기의 속도에 따라 결정되므로 q축 및 d축 전류가 최대전압 및 최대전류에 의해 제한되는 경계속도에 대해 고찰한다. q축 및 d축 전류가 전압제한 조건 및 전력제한 조건에 의해 제한되는 영역에서는 전동기의 속도가 고속이므로 식 (6)을 구할 때와 같이 고정자 저항 임피던스(impedance)의 제곱(r_s^2)은 인덕턴스의 임피던스의 제곱($\omega_r^2 L^2$)에 비해 매우 작으므로 무시한다. 또한 관성

부하(inertia load)의 비중이 높은 응용분야의 경우 고속영역에서는 약계자 제어(flux weakening control)에 의해 정출력 운전(constant power operation)을 하므로 q축 전류의 제곱은 d축 전류의 제곱에 비해 상대적으로 무시할 만큼 작다. 이러한 조건하에서 전력 제한조건을 만족하며 전압제한에 의한 최대 허용전류와 인버터 전류제한에 의한 최대 허용전류가 만나는 경계속도는 식 (3), 식 (6) 및 식 (7)로부터 식 (8)과 같이 근사화할 수 있다. 식 (8)에 나타난 근사값은 실제값에 비해 1~2%의 오차를 가지고 있으나 제동 알고리즘의 DC 링크 콘덴서 전압 제어부에서 q축 전류에 의해 보상되므로 제동특성에 미치는 영향은 무시할 수 있다.

$$\omega_{pv} = \frac{V_{max}}{L_d I_{max} - \phi_f} \quad (8)$$

전동기의 속도가 식 (8)에 주어진 ω_{pv} 보다 큰 영역에서 전력제한 및 전압제한 조건을 만족하는 q축 및 d축 전류는 그림 1(b)에 나타난 빗금친 영역의 전류들이다. 이러한 전류들 중에서 최대 제동토크를 발생하기 위해서는 q축 전류의 크기를 최대로 해야 하므로 그림 1(b)에서 전력제한 조건궤적과 전압제한 조건궤적이 만나는 점(●)의 q축 및 d축 전류를 선택해야 한다. 반면에 전동기의 속도가 ω_{pv} 보다 작은 영역에서의 q축 및 d축 전류는 전력제한 및 인버터 전류제한 조건에 의해 좌우되므로 최대 제동토크를 발생하는 q축 및 d축 전류는 그림 1(c)에 나타난 바와 같이 전력제한 조건궤적과 전류제한 조건궤적이 만나는 점(●)의 q축 및 d축 전류를 선택해야 한다. 최대 제동토크를 발생하는 q축 및 d축 전류는 전동기의 속도가 낮아짐에 따라 인버터 전류제한 궤적을 따라 q축 전류의 절대치는 증가하고 d축 전류의 절대치는 감소하는 방향으로 이동하게 된다.

전동기의 속도가 d축 전류는 영(zero)이 되고 q축 전류는 인버터 최대전류인 I_{max} 가 되는 경계속도 ω_{pc} 가 되면 회전자에서 고정자로 넘어오는 회생전력은 고정자권선에서 소모되는 전력과 동일하게 된다. 전동기의 속도가 ω_{pc} 보다 작은 영역에서는 회생전력이 고정자 권선에서 소모되는 전력보다 작게 되므로 d축 전류는 영(zero)으로 제어하고 q축 전류는 $-I_{max}$ 로 제어함으로써 최대 제동토크 조건으로 운전할 수 있다. 경계속도 ω_{pc} 는 식 (3)에 주어진 전력제한 조건 및 식 (7)에 주어진 인버터 전류제한 조건의 q축 및 d축 전류의 경계값으로부터 식 (9)와 같이 주어진다.

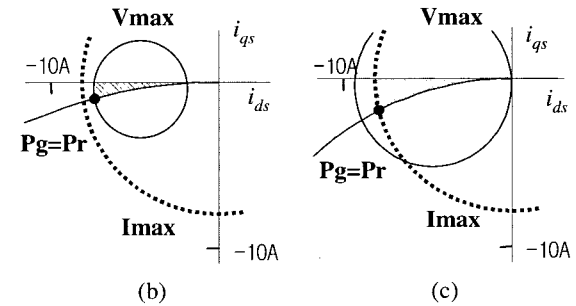
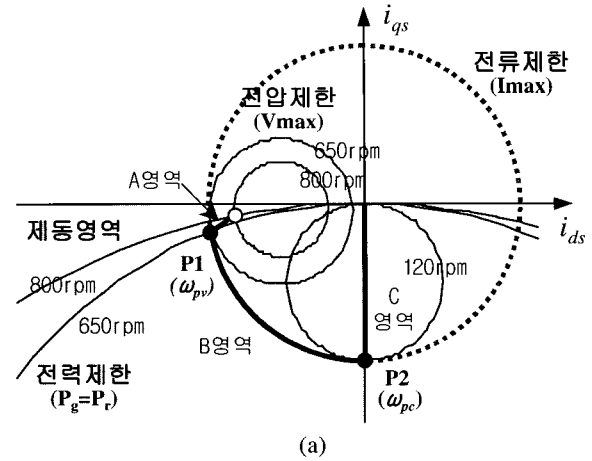


그림 1 전압, 전류 및 전력제한조건에서 d축, q축 전류궤적
(a) 저류궤적, (b) 750rpm일 때 전류궤적
(c) 450rpm일 때 전류궤적
Fig. 1 Trajectories of d-axis and q-axis currents
(a) current trajectories
(b) $\omega_r=750\text{rpm}$, (c) $\omega_r=450\text{rpm}$

$$\omega_{pc} = \frac{r_s}{\phi_f} I_{max} \quad (9)$$

그림 2는 식 (8), (9)과 같이 주어진 DC 링크 콘덴서 전압 및 인버터 최대 전류값에 따른 ω_{pv} 와 ω_{pc} 의 변화를 나타낸다. 고속에서 V_{max} 가 증가함에 따라 전동기에 인가할 수 있는 전류범위가 증가하므로 ω_{pv} 는 V_{max} 에 비례하여 증가한다. 또한 동일한 V_{max} 에 대해 인버터 최대허용 전류값이 감소함에 따라 전력제한과 전압제한 및 전류제한이 교차되는 ω_{pv} 는 증가하게 된다. 저속에서 전력제한과 전류제한이 교차되는 ω_{pc} 는 I_{max} 가 증가함에 따라 다소 증가한다. 반면에 저속영역에서의 전류는 V_{max} 에 의해 제한받지 않으므로 ω_{pc} 는 V_{max} 에 영향을 받지 않는다.

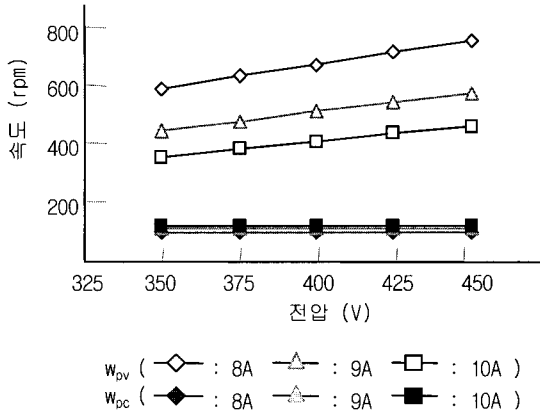


그림 2 DC link 콘덴서전압 및 최대전류에 따른 w_{pv} , w_{pc}
Fig. 2 w_{pv} , w_{pc} for the DC link capacitor voltages and maximum currents

그림 1(b)에 나타난 바와 같이 $\omega_r > \omega_{pv}$ 인 A영역에서 회생전력을 고정자 권선에서 소모되는 전력과 같게 만드는 q축 및 d축 전류(nominal current, i_{qn} , i_{dn})는 식 (4)와 (6)으로부터 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{qn} &= -\frac{r_s}{\psi_f \omega_r} \left(\frac{\psi_f}{L_d} + \frac{V_{\max}}{\omega_r L_q} \right)^2 \\ &= -\frac{r_s}{\psi_f \omega_r} i_{dn}^2 \end{aligned} \quad (10)$$

$$i_{dn} = -\left(\frac{\psi_f}{L_d} + \frac{V_{\max}}{\omega_r L_q} \right)$$

또한 $\omega_{pc} < \omega_r < \omega_{pv}$ 인 B영역에서의 q축 및 d축 전류(nominal current)는 식 (4)와 (7)로부터 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{qn} &= -\frac{r_s}{\psi_f \omega_r} I_{\max}^2 \\ i_{dn} &= -I_{\max} \sqrt{1 - \left(\frac{r_s}{\psi_f \omega_r} \right)^2} \\ &= -\sqrt{I_{\max}^2 - i_{qn}^2} \end{aligned} \quad (11)$$

마지막으로 $\omega_r < \omega_{pc}$ 인 C영역에서의 q축 및 d축 전류(nominal current)는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{qn} &= -I_{\max} \\ i_{dn} &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

3. 제동 알고리즘

그림 3은 표면부착형 영구자석 동기전동기의 제안된 제동 알고리즘을 나타낸다. 영구자석 동기전동기의 유기전압은 3상 정현파(sinusoidal waveform) 형태이고 3상 인버터 회로를 통하여 전동기에 전압이 인가된다. 모터링 모드(motoring mode)로 운전시 속도는 비례-적분 제어기(PI controller)에 의해 제어되고 고속 운전시는 약계자 제어(flux weakening control)에 의해 d축 전류를 제어한다. q축 및 d축 전류는 비례-적분제어(PI control)에 의해 제어되고 dq축 전류간 결합(coupling)되어 있는 전류는 정제환(feedforward)으로 보상한다. q축 및 d축 전압제어는 공간벡터 PWM 방식으로 스위칭 주파수는 15kHz로 설정하였다. 또한 인버터 스위치의 단락을 보호하기 위해 데드타임(dead time) 보상을 추가하였다.

전동기가 모터링(motoring) 모드에서 제동모드로 변경되면 dq 전류명령 발생기는 전동기의 속도에 따라 dq축 전류명령 (i_{qn} , i_{dn}) 을 발생한다. 전동기의 속도가 ω_{pv} 보다 큰 경우 dq 전류명령은 식 (10)과 같이 전동기속도의 함수로 발생되고 ω_{pv} 보다 작고 ω_{pc} 보다 큰 영역에서는 식 (11)에 주어진 dq 전류명령을 발생한다. 또한 전동기의 속도가 ω_{pc} 보다 작은 영역에서는 식 (12)로 주어진 dq축 전류명령을 발생한다.

전동기의 회전자로부터 고정자 권선으로 넘어오는 회생전력(regenerated power)은 식 (1)에 나타난 바와 같이 전동기의 속도 및 q축 전류에 비례한다. 즉 주어진 속도에서의 DC 링크 콘덴서의 전압은 q축 전류에 의해 좌우되므로 DC 링크 콘덴서의 전압을 일정 기준값 이하로 제어하기 위해서는 q축 전류를 제어해야 한다. DC 링크 콘덴서의 전압을 일정값 이하로 제어하기 위한 전압제어기는 DC 링크 전압을 검출하여 비례-적분 제어기에 의해 q축 전류명령을 보상함으로써 DC 링크 전압을 기준 전압값 V_{dcmax} 이하로 제어한다. 회생전력이 고정자 권선, 코어(core) 및 인버터에서 소모되는 전력보다 크게 되면 회생전력은 DC 링크 콘덴서의 전압상승을 제한하기 위하여 감소되어야 한다. 즉 $\Delta V_{dc} (= V_{dc} - V_{dcmax}) > 0$ 이면 q축 보상전류는 양(positive)이 되어 모터링 토크(motoring torque)가 발생함으로써 제동토크를 작게 한다. 따라서 DC 링크

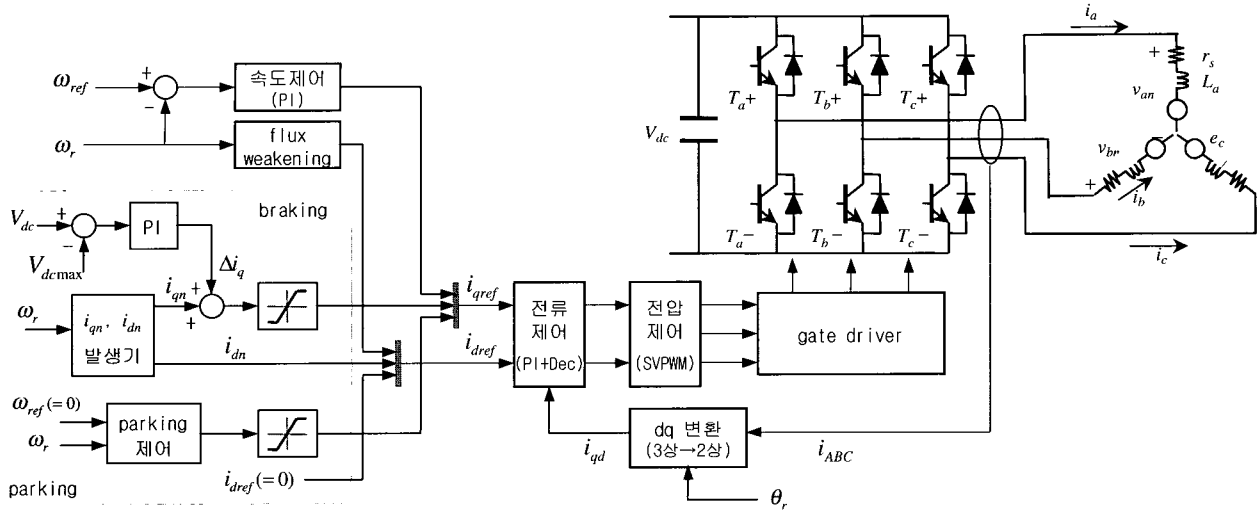


그림 3 제동 알고리즘의 블록도
Fig. 3 Block diagram of braking algorithm

콘덴서에 축적되는 에너지가 감소하게 되어 DC 링크 콘덴서 전압은 V_{dcmax} 이하로 떨어지게 된다. 이와 유사하게 $\Delta V_{dc} < 0$ 인 경우에는 q축 보상전류는 음(negative)이 되어 제동토크(braking torque)를 증가하게 함으로써 DC 링크 콘덴서에 축적되는 에너지를 증가시킨다. 고정자 철손 및 인버터 회로손실은 제동에너지를 흡수하기 때문에 제동전력을 증가시키는 효과를 나타낸다. 이러한 부가적인 제동전력은 DC link 콘덴서 전압을 V_{dcmax} 이하로 제어하는 전압제어기에서 q축 전류명령 발생시 보상된다.

제동모드는 전동기의 속도가 아주 낮은 영역에서 정지모드(parking mode)로 전환되고 이 영역에서 전동기의 속도를 영(zero)으로 하기 위한 구속 토크(holding torque)를 발생하도록 q축 전류 및 d축 전류를 제어함으로써 전동기가 일정한 위치에 고정되도록 한다.

4. 시뮬레이션 및 실험결과

표 1은 시뮬레이션 및 실험에 사용된 영구자석 동기전동기의 사양을 나타낸다. 저속에서 고토크를 발생하기 위하여 48극의 극수를 갖고 있으며 영구자석 표면 부착형으로 d축 및 q축 인덕턴스는 동일하다. 부하는 관성모멘트(moment of inertia)가 0.98Nmsec^2 로 정격출력 350W 에 비해 매우 큰 관성부하를 갖고 있다. 정격속도 400rpm 이상의 고속운전은 약계자 제어(flux weakening control)에 의해 d축 전류를 인가하여 정출력모드(constant power mode)로 운전하며 700rpm 에

서의 부하 토크는 10kgfcm이다. 제동시 부하는 관성부하가 주로 작용하고 마찰 토크(friction torque)는 관성부하에 비해 무시할 만큼 작다. 제동 알고리즘은 TMS320C2402로 구현하였다.

표 1 영구자석 동기전동기 사양
Table 1 Specs. of PM synchronous motor

정격출력	350 W	정격속도	400 rpm
극수	48	ψ_f	0.154 Vsec
R_s	5.0 Ω	관성모멘트	0.98 Nmsec ²
L_d	30 mH	L_q	30 mH

그림 4 및 그림 5는 자연제동시의 시뮬레이션 및 실험결과를 나타낸다. 제동초기 전동기의 회전속도는 700rpm이다. 자연제동은 인버터의 상단스위치 또는 하단스위치만을 도통시켜 전동기에 영전압 벡터(zero voltage vector)를 인가한다. 따라서 전동기의 상전류는 유기전압(back emf)을 전압원으로 하여 상저항, 상인덕턴스의 RL 부하로 프리휠링(freewheeling) 하게 된다. 전동기의 권선에 프리휠링 전류가 흐름에 따라 전동기의 속도는 점차 감소하게 되며 이에 비례하여 유기전압의 크기도 감소하게 된다. 자연제동의 경우 강제제동에 비해 모터에 흐르는 상전류의 크기가 작으므로 고정자 권선에서 소모되는 전력(power)이 작게 되어 전동기가 정지할 때까지의 제동시간이 23초로 강제제동에 비해 길게 된다. 자연제동시 전동기에는 영

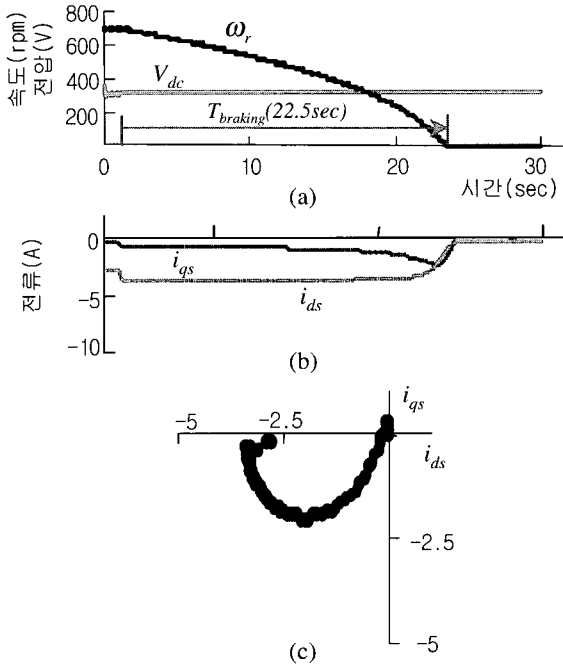


그림 4 일반제동: 시뮬레이션
 (a) 속도 및 dc link 전압
 (b) q축 및 d축 전류 (c) 전류궤적
 Fig. 4 Braking for free run: simulation
 (a) speed and dc link capacitor voltage
 (b) q-axis and d-axis currents
 (c) current trajectory

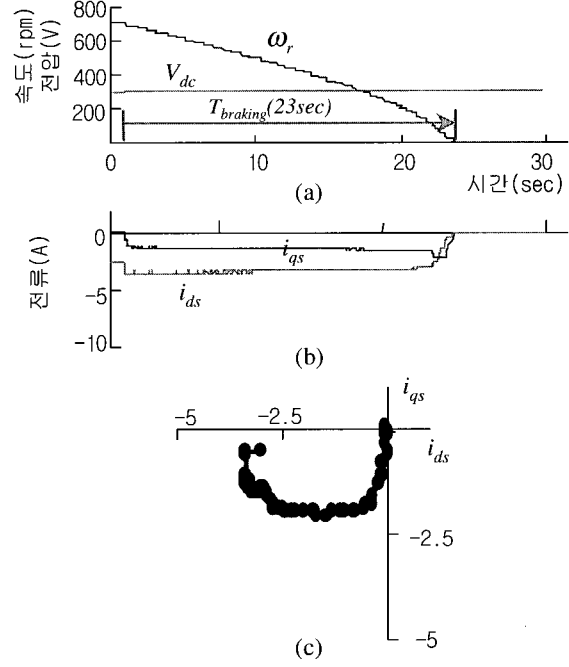


그림 5 일반제동: 실험결과
 (a) 속도 및 dc link 전압
 (b) q축 및 d축 전류 (c) 전류궤적
 Fig. 5 Braking for free run: experiment
 (a) speed and dc link capacitor voltage
 (b) q-axis and d-axis currents
 (c) current trajectory

전압이 인가되므로 DC 링크 콘덴서는 전동기와 분리되어 전동기로부터 DC 링크 콘덴서에 유입되는 전류가 없으므로 DC 링크 전압은 정류 다이오드로 정류된 전압을 그대로 유지하게 된다.

그림 6은 제안된 제동 알고리즘의 동특성 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 전동기의 제동 초기속도는 700rpm이고 DC 링크 콘덴서 제한값은 400V, 인버터 최대허용 전류값은 8A로 설정하였다. 이러한 조건하에서 ω_{pv} 및 ω_{pc} 는 각각 650rpm, 116rpm이다. 약계자 제어에 의해 고속으로 운전중인 전동기가 제동모드(braking mode)로 변경되면 DC 링크 콘덴서의 전압은 DC 링크 최대 허용전압보다 낮으므로 전압 제어기에서 ΔV_{dc} 에 해당하는 제동토크를 더 발생하게 된다. 이러한 제동토크는 DC 링크 콘덴서로 회생되는 에너지를 증가시켜 DC 링크 전압을 최대 허용값까지 짧은 시간에 상승시킨다. 전동기의 속도가 ω_{pv} 보다 큰 영역에서는 q축 및 d축 전류가 최대전압 조건 및 전력제한조건에 의해 제한되므로 인버터의 최대 전류값보

다는 작게 된다. $\omega_{pc} < \omega_r < \omega_{pv}$ 인 영역 B에서의 q축 전류 및 d축 전류는 전류제한 조건과 전력제한 조건에 의해 제한 받는다. 따라서 전류의 크기(amplitude)는 인버터 최대허용 전류값과 같게 되고 전력제한 조건에 의해 q축 및 d축 전류의 값이 변하게 된다. 속도가 감소함에 따라 q축 전류가 증가하므로 제동토크는 증가하게 된다.

그림 7은 제안된 제동 알고리즘의 실험결과를 나타낸다. 고속에서 전류 및 전압의 궤적이 시뮬레이션과 다소 차이가 나는 원인은 전압제어시 PWM 주파수가 15kHz의 높은 스위칭 주파수로 온/오프(on/off)할 때 시뮬레이션에서 스위치의 상승시간(turn on time) 및 하강시간(turn off time)등을 반영하지 못했기 때문이며 이로 인해 전동기에 인가할 수 있는 최대전압의 오차가 발생하였기 때문이다. 또한 인버터 회로부의 손실, 전동기 고정자의 철손(core loss), 제동시 마찰손(friction loss) 및 부하변동에 대한 영향을 시뮬레이션에 반영하지 못했기 때문에 시뮬레이션과 실험의 전류

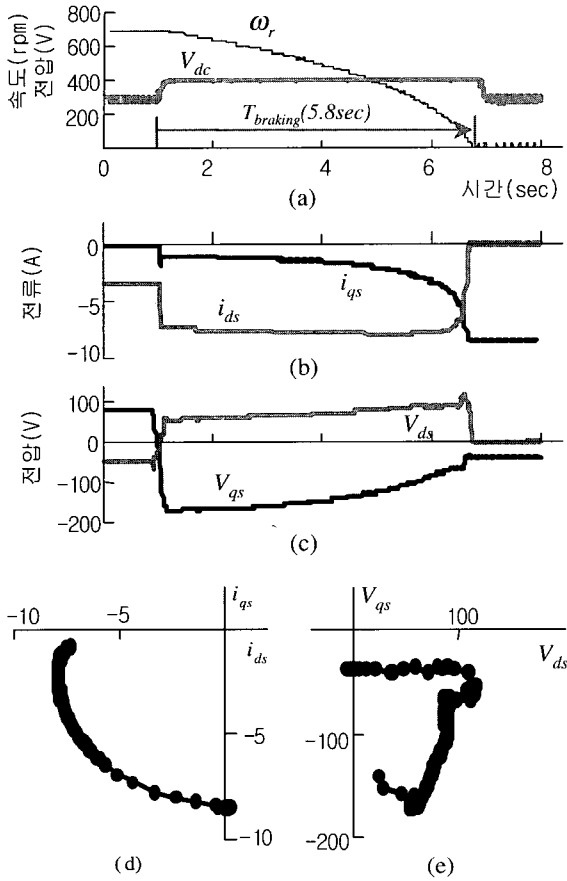


그림 6 제안된 알고리즘의 제동특성: 시뮬레이션
 (a) 속도 및 dc link 전압 (b) q축 및 d축 전류
 (c) q축 및 d축 전압 (d) 전류궤적
 (e) 전압궤적

Fig. 6 Braking for proposed algorithm: simulation
 (a) speed and dc link capacitor voltage
 (b) q-axis and d-axis currents
 (c) q-axis and d-axis voltages
 (d) current trajectory
 (e) voltage trajectory

및 전압의 동특성(dynamic characteristics)이 실험과형과 다소의 오차를 발생하였다.

그림 8은 최대전압 및 인버터 최대허용 전류값에 따른 제동시간을 나타낸다. 그림 8에 나타난 바와 같이 제동시간은 전류의 최대크기 및 전압의 최대크기가 증가함에 따라 감소한다. 전류의 최대치가 커질수록 진동기의 고정자 권선에서 소모할 수 있는 에너지의 양이 증가하기 때문에 제동시간은 감소하게 된다. 전압의 최대크기가 증가할수록 고속에서 진동기 권선에 인가할 수 있는 전류의 크기를 증가시켜 제동토크를 크

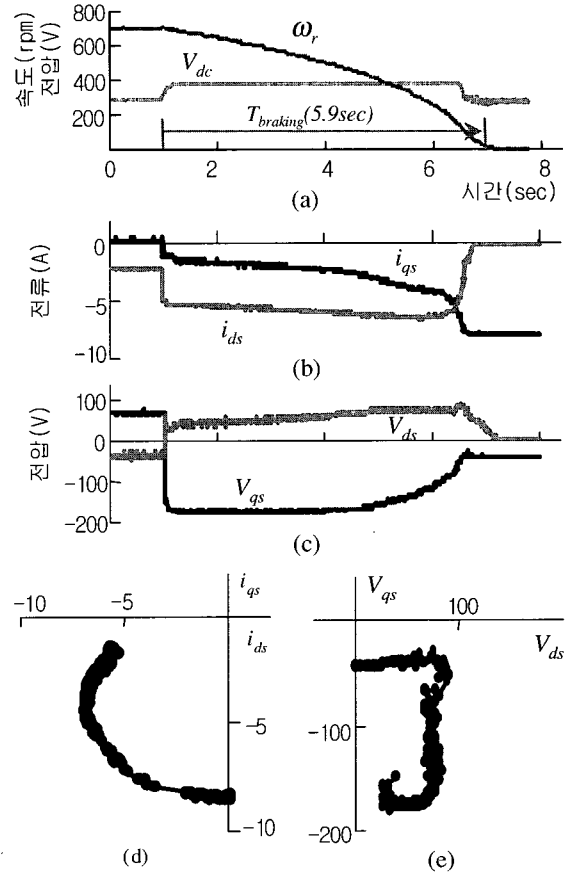


그림 7 제안된 알고리즘의 제동특성: 실험결과
 (a) 속도 및 dc link 전압 (b) q축 및 d축 전류
 (c) q축 및 d축 전압 (d) 전류궤적
 (e) 전압궤적

Fig. 7 Braking for proposed algorithm: experiment
 (a) speed and dc link capacitor voltage
 (b) q-axis and d-axis currents
 (c) q-axis and d-axis voltages
 (d) current trajectory
 (e) voltage trajectory

게 할 수 있고 또한 인버터의 스위칭손실이 증가되어 제동전력을 크게 함으로 제동시간은 줄어들게 된다. 인버터의 최대전류가 10A인 경우는 8A인 경우에 비해 전압제한 및 전력제한에 의해 q축 및 d축 전류가 제어되는 영역이 증가하게 된다. 이러한 운전영역에서의 q축 및 d축 전류의 크기는 DC 링크 콘덴서 전압에 영향을 많이 받게 되므로 제동시간도 DC 링크 콘덴서 전압에 따라 차이가 많이 된다. 반면에 인버터의 최대전류가 작을수록 전압제한에 의해 운전되는 영역이 작아지고 전류제한에 의해 운전되는 영역이 증가하므로

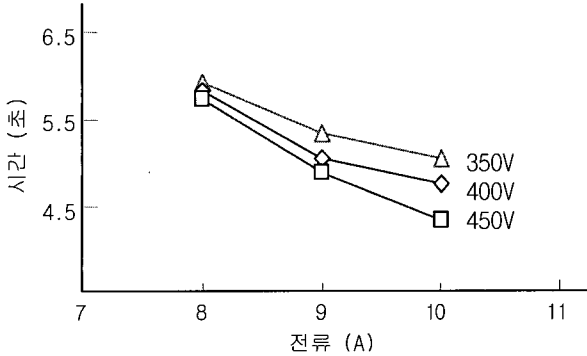


그림 8 최대전류 및 DC link 콘덴서전압에 따른 제동시간
Fig. 8 Braking time for maximum currents and DC link capacitor voltages

DC 링크 콘덴서 전압의 크기가 제동시간에 미치는 영향은 줄어들게 된다.

5. 결 론

본 논문에서는 표면부착형 영구자석 동기전동기의 제동시 제동저항을 사용하지 않고 전동기 권선에서 회전자의 에너지를 소모하는 제동 알고리즘을 제안하였다. DC 링크 콘덴서의 전압상승을 일정한 값 이하로 제어하기 위하여 전압제한, 전류제한 및 전력제한 조건하에서 전동기의 속도별로 전동기 권선에서 최대한으로 에너지를 소모할 수 있는 조건을 해석적으로 구하였으며 해석결과를 토대로 제동시간을 줄일 수 있는 제동 알고리즘을 제안하였다. 전동기에 인가할 수 있는 최대전압 및 인버터 최대전류에 따른 제안된 제동 알고리즘의 제동특성을 시뮬레이션과 실험을 통하여 고찰하였다

참 고 문 헌

[1] G. Celentano, M. Covino, and E. Pagano, "Regenerative and plug-braking operations of inverter-fed asynchronous motors", IEE Proc. Electric Power Appl., vol. 144, no. 6, pp. 453~455, 1997.
[2] V. Blasko, "Power conditions and control of a regenerative brake", 33rd Industry Applications(IAS) Annual Meeting, no. 2, pp. 1504~1510, 1998.
[3] 김경원, 서영민, 홍순찬, "회생전력 제어용 인버터 시스템의 구현에 관한 연구", 전력전자학회 논문집, 7권, 2호,

pp. 205~213, 2002. 2.

[4] J. Jiang and J. Holz, "An efficient braking method for controlled AC drives with a diode rectifier front end", IEEE Trans. on Industry Appl., vol. 37, no. 5, pp. 1299~1307, 2001.
[5] E. Robeischl and M. Schroedl, "Direct axis current utilization for intelligent sensorless permanent magnet synchronous drives", 36th Industry Applications Society(IAS) Annual Meeting, no. 1, pp. 475~481, 2001.
[6] J.M. KIM, K. Park, S.J. Kang, S.K. Sul, and J.L. Kwon, "Improved dynamic performance of interior permanent magnet synchronous motor drive in flux weakening operation", 27th Power Electronics Specialists Conference(PESC), no. 2, pp. 1562~1567, 1996.

저 자 소 개



조관열(趙官烈)

1963년 2월 20일생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 졸업(공학). 1993년~현재 LG전자(주) 디지털 어플라이언스 연구소 책임연구원. 당 학회 편집위원.



양순배(梁淳培)

1966년 8월 8일생. 1989년 서울대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 졸업(석사). 1991년~현재 LG전자(주) 디지털 어플라이언스 연구소 책임연구원.



홍찬희(洪贊熙)

1968년 3월 24일생. 1991년 한양대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 졸업(석사). 1994년~1998년 LG산전(주) 중앙연구소 선임연구원. 1999년~현재 LG전자(주) 디지털 어플라이언스 연구소 선임연구원.