

빠른 과도 응답을 가지는 영구자석 동기 전동기의 약자속기법

권용철, 김성민, 설승기
서울대학교 전기·컴퓨터 공학부

A Flux Weakening Scheme for Improved Transient Performance of Permanent Magnet Synchronous Machine Drives

Yong-Cheul Kwon, Sungmin Kim, and Seung-Ki Sul
School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University

Abstract

지금까지 영구자석 동기 전동기의 구동에 있어서 약자속에 대한 연구는 대부분 정상상태에서의 전류제어 성능에 초점이 맞춰져 왔다. 그러나 전류 지령이 급변하는 상황에서는 신속하게 정상상태에 이르는 것이 중요함에도 불구하고, 이에 대한 연구는 많지 않았다. 본 논문에서는 약자속(Flux Weakening) 운전시 전류제어의 과도상태를 개선하여 정상상태에 빠르게 도달하도록 하는 약자속기법을 제안하였다. 제안된 방법은 정상상태의 전류 지령을 결정하는 약자속제어기와, 과도상태에서 전압 여유분을 확보하여 빠르게 정상상태에 이르도록 하는 과도 지령 수정기로 구성된다. 컴퓨터를 이용한 모의 실험과 11kW 영구자석 전동기에 대한 실험을 통하여 제안된 약자속기법의 성능을 확인하였다.

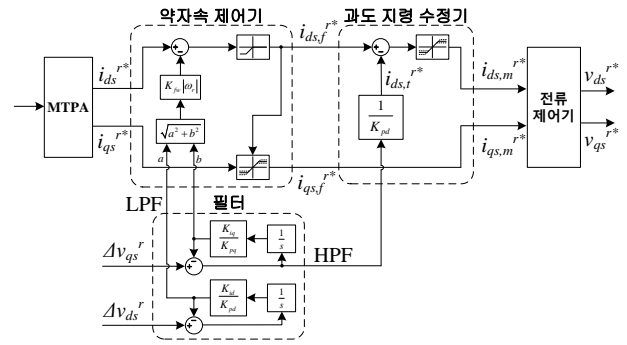


그림 1. 제안하는 약자속 제어기법

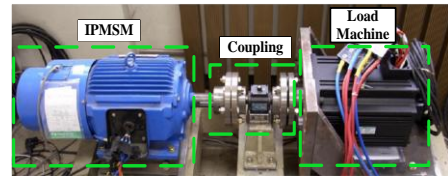


그림 2. 약자속 실험 세트

1. 서론

영구자석 동기 전동기는 높은 토크 밀도와 높은 운전 효율로 인하여 많은 관심과 연구가 집중되어왔다. 특히 영구자석 동기 전동기의 운전영역을 넓히기 위한 약자속(Flux Weakening) 제어에 대하여 많은 연구가 있었으며, 이는 크게 두 가지로 나누어진다.

첫째, 전동기의 정상상태 방정식으로부터 운전 점을 계산하여 전류 지령을 구하는 방식이다^[1]. 이 방식은 운전 점이 바로 계산되어 적용되므로 과도 특성이 좋지만 제정수 오차에 민감한 특성을 보인다.

둘째, 전압 제한을 이용하여 전류지령을 결정하는 방식이다^{[2]-[3]}. 이 방식은 제한 제어를 통하여 제정수의 오차에 강인한 특성을 보이지만, 동작 점을 결정하는 과정이 길어 과도 특성이 빠르지 않다.

본 논문에서는 기존의 전압 제한에 기반한 약자속 기법에 덧붙여서 과도상태를 개선하기 위한 과도지령수정기를 함께 사용하는 제어 기법을 제안한다. 이러한 제어 기법을 통해, 고속 운전 상황에서의 전압 부족 상황에 대한 이해를 기반으로 과도 상태를 개선하여, 정상상태와 과도상태 모두에서 좋은 제어특성을 얻을 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다.

2. 제안된 약자속 제어 기법

토크축-회전자 기준 동기 좌표계 q축-전류의 변화는 실제 토크축에 인가된 전압과 전동기 회전에 의해 발생하는 유효 역기전력의 차이에 의하여 결정된다. 이는 수식적으로 다음과 같이 표현된다.

$$v_{q,dyn}^r = v_{qs}^r - e_{qs}^r \approx L_q \frac{di_{qs}^r}{dt} \quad (1)$$

v_{qs}^r 과 e_{qs}^r 은 각각 토크축 입력 전압, 토크축 유효 역기전력을 나타내며, e_{qs}^r 은 다음과 같이 얻어진다.

$$e_{qs}^r = \omega_r (\lambda_f + L_d i_{ds}^r) \quad (2)$$

고속 영역에서는, e_{qs}^r 의 크기가 커지므로 토크축 전류를 증가시키기 위한 전압이 제한된 인버터의 DC-link 전압으로 인하여 인버터가 합성할 수 없게 되어 전류 제어 성능이 급격히 떨어진다. 제안된 알고리즘은 빠른 과도 특성을 얻기 위하여 과도상태에서 i_{ds}^r 을 순간적으로 음의 방향으로 인가하여 토크축 전압 여유분을 확보하는 방법이다. 그림 1은 제안된 약자속 제어기법을 나타낸다. 약자속 알고리즘은 기존의 저주파 통과 필터를 이용한 방식^[3]을 사용하였다. Δv_{ds}^r 과 Δv_{qs}^r 은 지령 전압과 인버터에서 합성되는 전압의 차이로, 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta v_{ds}^r = v_{ds}^{r*} - v_{ds}^r \quad (3)$$

$$\Delta v_{qs}^r = v_{qs}^{r*} - v_{qs}^r$$

이러한 (3)에서 계산된 전압 차이는 저역 통과(Low Pass) 필터를 통하여 약자속 지령 전류를 생성하는 데에 사용된다^[3]. 본 논문에서 제안하는 과도 지령 수정기는 과도 상태에서만 동작하도록 해야 하므로 (3)의 전압 차이가 고역 통과(High Pass) 필터를 통해 자속축(Flux Axis)-회전자 기준 동기 좌표계 d축-전류의 지령을 수정하게 된다. Δv_{qs}^r 의 고주파 성분이 과도상태(Transient State)에서 토크축 전압 부족의 정도를 나타내므로 자속축 전류 지령은 이에 비례하게 수정된다.

$$i_{ds,m}^{r*} = i_{ds,f}^{r*} - \frac{s}{sK_{pq} + K_{iq}} \Delta v_{qs}^r \quad (4)$$

위의 식 (4)에서 두 번째 성분이 과도상태에서 자속축 전류 지령을 음의 방향으로 인가하여 토크축 전압 여유분을 확보하는 역할을 한다. 수식상에서 확인할 수 있듯

표 1. 영구자석 동기 전동기의 제정수와 정격

정격 출력	11kW
정격 전압	190V _{rms}
정격 전류	38A _{rms}
극수	6
고정자 상저항(R_s)	0.15 Ω
영구자석 쇄고 자속(λ_f)	0.254V _{peak} /(rad/sec)
자속축 인덕턴스(L_d)	3.6mH
토크축 인덕턴스(L_q)	4.3mH

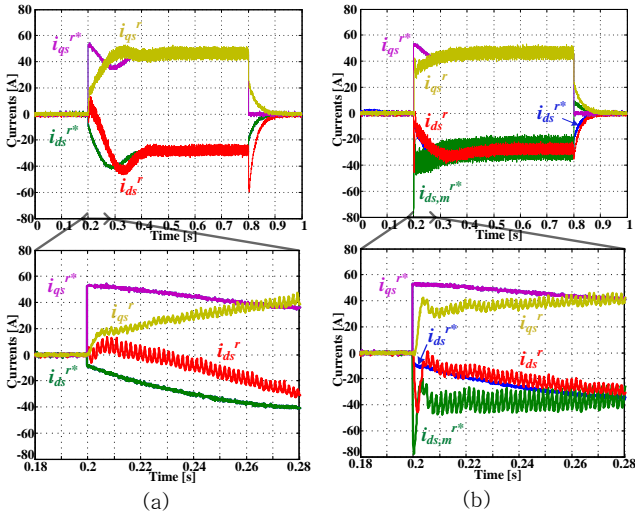


그림 3. 실험 결과 파형 (a) 기존의 약자속 방법 (b) 제안된 약자속 방법

이, 정상상태에서는 Δv_{qs}^r 의 직류 성분이 소거되므로 전류는 약자속 제어기의 지령을 추종하게 된다.

3. 모의 실험 및 실험 결과

그림 2는 11kW 영구자석 동기 전동기의 실험 세트를 나타내며 전동기의 제정수와 정격은 표 1에 나타내었다. 실험조건은 부하기로 1800r/min의 속도를 유지하면서 0.2초에서 0.8초까지 최대 토크 지령을 인가하였으며, 전류 파형을 측정하여 전류의 지령 추종성을 비교하였다. 그림 3은 실험 결과 파형을 나타낸다. 파형을 보면 알 수 있듯이 기존의 약자속 방법을 사용하면 과도상태에서 전류가 지령을 추종하는 데에 0.2s 이상의 시간이 소요된다. 제안된 방법을 사용할 경우, 급격히 인가된 지령에 대하여 신속하게 d축 지령을 수정하여 과도상태가 0.1s 이내로 매우 짧아지는 것을 확인할 수 있다.

올바른 성능 평가를 위하여 전류의 지령 추종성을 나타내는 성능 지표를 다음과 같이 정의하였다. 성능 지표의 물리적 의미는 일정시간 동안의 전류 오차 실효치의 평균값이다.

$$I_{rms_error} = \sqrt{\frac{\int_{t_0}^{t_f} \left\{ (i_{ds,f}^{r*} - i_{ds}^r)^2 + (i_{qs,f}^{r*} - i_{qs}^r)^2 \right\} dt}{t_f - t_0}} \quad (5)$$

계단(Step)입력 토크 지령의 크기와 운전 속도 조건을 변화시켜 모의 실험을 반복 수행하여 얻은 전류 파형을 (5)의 성능 지표로 계산하여 그림 4에 나타내었다. 속도가 높아질수록, 그리고 계단 형태 토크 지령의 크기가 커질수록 전류 추종 성능이 떨어지는 경향이 있지만, 즉 실효 전류 오차의 평균치가 늘어나지만, 제안된 제어기

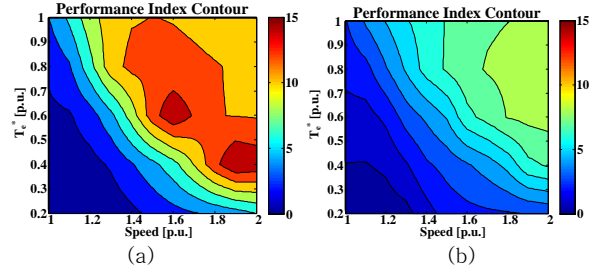


그림 4. 성능 지표를 나타낸 등위선 (a) 기존의 약자속 방법 (b) 제안된 약자속 방법

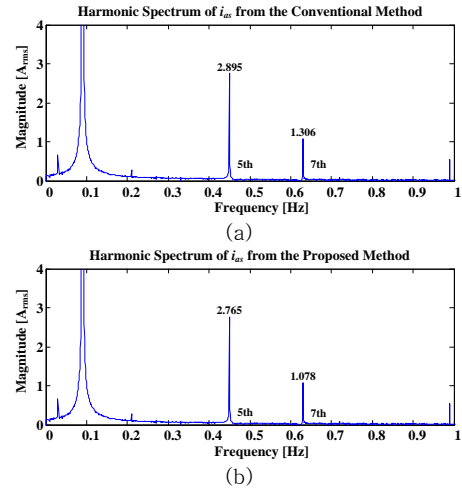


그림 5. 고조파 분포도 (a) 기존의 약자속 방법 (b) 제안된 약자속 방법

를 사용할 경우 성능이 사용하지 않은 경우에 비해 오차의 평균치가 현격히 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

정상상태에서의 특성 분석을 위하여, 1800r/min의 속도에서 최대 토크 지령을 인가한 상태에서 기존의 약자속 제어와 제안된 약자속 방법에서의 전동기 상전류의 고조파 분포를 그림 5에 비교 도시하였다. 그림 5의 (a)와 (b)를 비교하면 제 5고조파와 제 7고조파의 크기가 크게 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서 제안된 약자속 기법은 정상상태의 특성은 유지하면서 과도상태만을 개선하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 기존의 약자속 제어기에 과도 지령 수렴기를 추가하여 정상상태의 제어 성능을 유지하면서 과도 특성을 개선하는 제어기 형태를 제안하였다. 과도상태의 토크축 전압 부족상황을 고려하여 자속축 전류 지령을 적절히 수정해 줌으로써 전류의 지령 추종 특성이 개선되며, 이를 실험을 통하여 확인하였다.

참고문헌

- [1] S. Morimoto, Y. Takeda, T. Hirasa, and K. Taniguchi, "Expansion of operating limits for permanent magnet motor by current vector control considering inverter capacity," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 26, no. 5, pp.866-871, Sept./Oct. 1990.
- [2] J. M. Kim, and S. K. Sul, "Speed control of interior permanent magnet Synchronous motor drive for the flux weakening operation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 33, no. 1, pp. 43-48, Jan.-Feb. 1997.
- [3] T. S. Kwon, and S. K. Sul, "Novel antiwindup of a current regulator of a surface-mounted permanent-magnet motor for flux-weakening control," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 5, pp. 1293-1300, Sept./Oct. 2006.