

전류위상각 제어를 이용한 IPMSM 약계자 운전

홍일표, 유지윤
고려대학교

Field Weakening Control of IPMSM by Current Phase Angle Control

Il-Pyo Hong and Ji-Yoon Yoo
Korea University

ABSTRACT

IPMSM(Interior Permanent Magnet Motor) 운전을 위한 기존의 약계자 제어기는 약계자 운전 시 필요한 고정자 전류에 대한 명확한 기준이 없어 실험을 통해 알아볼 수밖에 없다. 이를 개선하고자 본 논문에서는 전류위상각 제어를 이용하여 최적의 고정자 전류를 찾는 약계자 제어기를 제안하고 시뮬레이션을 시행하여 제안한 알고리즘의 효용성을 입증한다.

1. 서론

IPMSM은 회전자 철심에 영구자석을 매입하여 기계적으로 강인하면서 온도 상승에 의한 영구자석의 감자 가능성이 적어 열악한 환경에서도 운전이 가능하다. 또한 회전자의 영구자석에 의한 토크와 회전자의 돌극성에 의한 자기저항 토크를 같이 사용하여 작은 체적의 회전자로 큰 토크를 얻을 수 있으며 유효공극이 작아 전기자 반작용이 강하므로 일정출력영역에서 약계자 제어에 의한 고속운전이 용이하다.

IPMSM 구동용 인버터의 공급전압 및 전동기의 절연등급에 의한 제한 전압 등의 원인으로 인해 전동기의 고정자 권선에 인가되는 전압이 제한되는데 약계자 제어는 전동기에 역기전력으로 전기자 반작용을 발생시켜 자속의 크기를 제한함으로써 보다 넓은 속도범위에서 전동기를 사용하기 위해 이용된다. 전기자동차, 정밀공작기계 등과 같은 분야에서는 일정출력영역에서의 운전이 매우 중요하므로 이와 같은 분야에서는 약계자 제어기가 많이 이용되고 있다.

본 논문에서는 고정자 전류위상각을 이용하여 유도되는 약계자 제어기를 제안하며 시험결과와 응답특성을 다양하게 분석함으로써 본 논문의 타당성을 입증하고자 한다.

2. 일정 토크 영역에서의 제어

IPMSM의 토크방정식과 고정자 전류방정식은 각각 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \quad (1)$$

$$i_s^2 = i_q^2 + i_d^2 \quad (2)$$

식 (1)을 i_d 에 관하여 미분하고 식 (2)를 이용하여 i_d 에 관한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$2(L_q - L_d)i_d^2 - \lambda_f i_d - (L_q - L_d)i_s^2 = 0 \quad (3)$$

i_d 의 2차방정식인 식 (3)을 풀면 다음과 같은 i_d 의 최종 식을 얻을 수 있다.

$$i_d = \frac{\lambda_f - \sqrt{\lambda_f^2 + 8(L_q - L_d)^2 i_s^2}}{4(L_q - L_d)} \quad (4)$$

식 (2)를 i_q 의 식으로 다시 정리하면 다음과 같은 i_q 의 최종 식을 얻을 수 있다.

$$i_q = \text{sign}(i_s) \cdot \sqrt{i_s^2 - i_d^2} \quad (5)$$

이때 $i_s \geq 0$ 이면 $\text{sign}(i_s) = 1$ 이며 $i_s < 0$ 이면 $\text{sign}(i_s) = -1$ 이다.

3. 일정 출력 영역에서의 제어

동기 좌표축에서 d,q축 전류와 고정자 전류의 관계는 그림 1과 같고, 식 (1)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_f i_s \sin \theta + \frac{1}{2} (L_d - L_q) i_s^2 \sin 2\theta \quad (6)$$

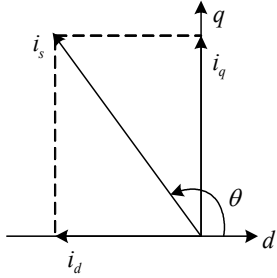


그림 1. 전류 페이저 다이어그램

식 (6)으로부터 IPMSM의 토크는 전류 위상각 θ 에 따라 변화함을 알 수 있다. 본 논문에서는 IPMSM이 일정출력영역으로 진입할 때 전류 위상각을 일정한 형태의 패턴으로 증가시킴으로써 약계자 제어에 의한 최대토크를 제어하는 새로운 알고리즘을 제안한다. 이때 시스템의 전체 구성도는 그림 2와 같다.

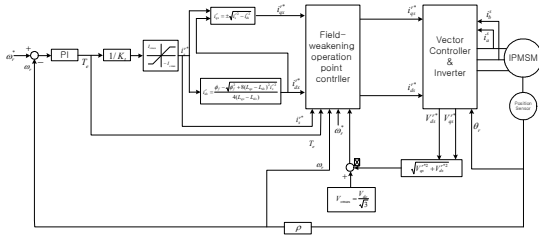


그림 2. IPMSM의 약계자 제어를 포함한 제어시스템 구성도

약계자 제어 시 d축 전류와 q축 전류의 지령은 각각 다음과 같이 생성된다.

$$i_d^*(t) = i_s^* \cos(\theta + k_2 \cdot \alpha(t)) \quad (7)$$

$$i_q^*(t) = i_s^* \sin(\theta + k_2 \cdot \alpha(t)) \quad (8)$$

이때 θ 항은 전류위상각 조절의 기준이 되는 전류위상각이며 $k_2 \cdot \alpha(t)$ 항은 θ 항을 기준으로 변화되는 전류위상각을 의미한다. k_2 항은 ± 1 의 값을 가지며 전류위상각의 변화 방향을 설정한다. 전류위상각 변화를 부드럽게 하기 위해 전류위상각 변화 패턴을 식 (9)와 같이 정현파 형태로 설정하였다. 이때 m 은 변화되는 전류위상각의 한주기를 전류위상각 조절 수행 주기로 나눈 값이다.

$$\alpha(t) = k_1 \sin\left(\pi \cdot \frac{i}{m}\right), \quad i = 0 \dots m \quad (9)$$

전동기가 일정토크영역을 지나 일정출력영역으로 진입하면 시스템이 요구하는 d,q축 전류에 도달하기 위해 전류위상각이 증가하게 된다. 하지만 전류위상각이 무한정 증가할 경우 토크가 감소할 뿐만 아니라 시스템이 발산할 우려가 있기 때문에 출력토크가 최대토크 이하로 떨어지지 않도록 일정출력영역 진입 후 전류위상각을 조절하여 시스템의 발산을 방지하도록 한다.

전류위상각이 변화하여 발생하는 입력 토크의 변화량은 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta T = \sum_{i=1}^m \left\{ T^*(t_i) - \left[\frac{(T^*(t_m) - T^*(t_0))}{m} \times i + T^*(t_0) \right] \right\} \quad (10)$$

만약 ΔT 의 값이 변동될 경우 이는 전류위상각의 증가로 인해 입력토크가 감소되었다는 것을 의미하기 때문에 전류위상각을 감소하는 방향으로 k_2 의 값을 조정한다.

그림 3은 본 논문에서 제안한 약계자제어의 순서도이다. 알고리즘의 구성이 단순하기 때문에 저가의 마이크로프로세서를 사용해도 쉽게 구현할 수 있다.

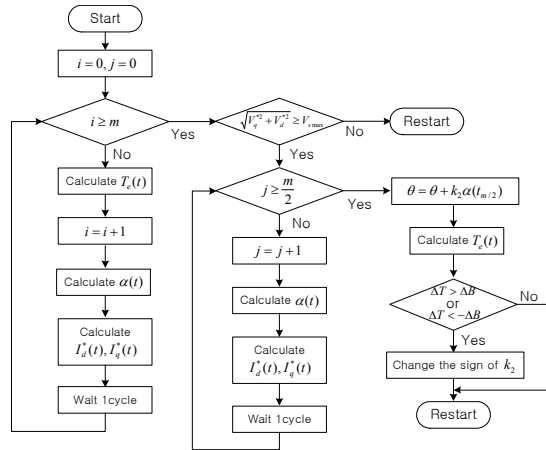


그림 3. 약계자 제어기의 알고리즘 순서도

4. 시뮬레이션

제안한 약계자 제어기를 구현하기 위한 알고리즘의 유용성을 입증하기 위해 PSIM을 사용하여 시뮬레이션을 시행하였다. 그림 4는 논문에서 제시한 방법을 이용하여 0.1N·m의 부하를 인가한 상태에서 약계자 제어 알고리즘을 적용하였을 때의 결과이다. 그림 5는 0.1N·m의 부하를 인가하였을 때 최대토크영역에서 약계자영역으로 진입했을 때의 결과이며, 그림 6은 0.1N·m의 부하를 인가하였을 때 약계자영역에서 최대토크영역으로

진입했을 때의 결과이다. 그림 4~6의 (a)와 (b)를 비교했을 때 실제속도가 지령 속도를 잘 추종하고 있음을 알 수 있으며 이를 통해 제안된 약계자 제어 알고리즘이 시스템의 발산 없이 제대로 제어됨을 확인할 수 있다.

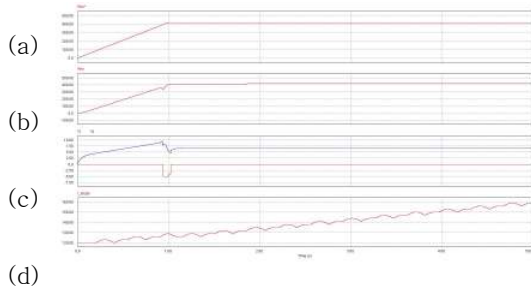


그림 4. 부하 인가 상태에서의 약계자 제어
 (a) 지령속도 (b) 실제 속도
 (c) q축 전류(상)와 d축 전류(하)
 (d) 전류위상각

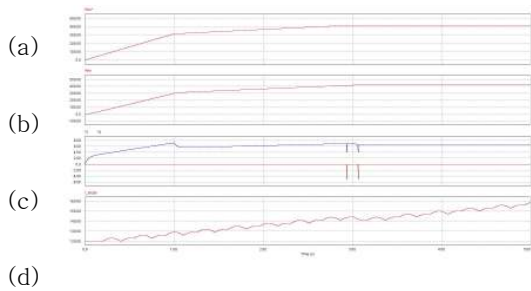


그림 5. 부하 인가 상태에서 최대토크영역에서 약계자영역으로 진입
 (a) 지령속도 (b) 실제 속도
 (c) q축 전류(상)와 d축 전류(하)
 (d) 전류위상각

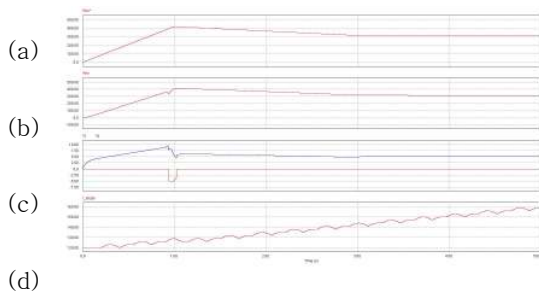


그림 6. 부하 인가 상태에서 약계자영역에서 최대토크영역으로 진입
 (a) 지령속도 (b) 실제속도
 (c) q축 전류(상)와 d축 전류(하)
 (d) 전류위상각

5. 결론

본 논문에서는 전류위상각 제어를 이용하여 약계자 제어를 할 수 있는 제어 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 Slow Dynamic 시스템에 적합하며, 알고리즘의 구성이 단순하기 때문에 기존의 전동기 구동 시스템에 손쉽게 적용할 수 있다.

참고 문헌

- [1] W. L. Soong et al., "Field-Weakening Performance of Brushless Synchronous AC Motor Drives", IEE Proceedings - Electric Power Applications, Vol. 141, No. 6, pp. 311-340, November 1994.
- [2] Jang-Mok Kim et al., "Speed Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive for the Flux Weakening Operation", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 1, pp. 43-48, Jan./Feb. 1997.
- [3] Jae-Sub Ko et al., "Maximum Torque Control of IPMSM Drive with LM-FNN Controller", SICE-ICASE International Joint Conference, 18-21, pp. 684-689, October 2006.
- [4] 이광운, "영구자석 동기전동기의 최대 효율 점 추적 제어", 전력전자학회 전력전자학술대회 논문집, pp.331-333, 2007년 7월.