

# 매입형 영구자석 동기전동기의 준 식스 스텝 (Six-Step) 운전을 위한 약자속 제어에 관한 연구

최기영, 곽무신, 권태석, 설승기  
 서울대학교 전기컴퓨터 공학부

## Novel Flux-Weakening Control of an IPMSM for Quasi Six-Step operation

Gi-Young Choi, Mu-Shin Kwak, Tae-Suk Kwon, and Seung-Ki Sul  
 School of Electrical Engineering & Computer Science, Seoul National University

**Abstract** - 본 논문은 매입형 영구자석 동기 전동기의 준 식스 스텝 운전(Quasi six-step operation)을 위한 약자속 제어에 대한 새로운 방법을 제안한다. 제안된 방법은 전향 경로(feedforward path)와 궤환 경로(feedback path)로 구성되고 전향 경로는 1차원 참조표로 구성되며 궤환 경로는 전류제어기 출력과 과변조에 의해 제한된 전압의 차이를 이용한다. 제안된 방법을 통해 약자속 제어와 안티 와인드업(anti-windup) 제어가 동시에 이루어질 수 있다. 또한 제한된 직류단 전압 조건에서 식스 스텝(six-step) 운전에서 낼 수 있는 전동기의 최대 토크에 가까이 출력 토크를 발생시키면서 전류 제어를 계속할 수 있는 준 식스 스텝 운전이 가능하다. 제안된 방법의 유효성을 컴퓨터 시뮬레이션과 실험의 결과를 통해 입증하였다.

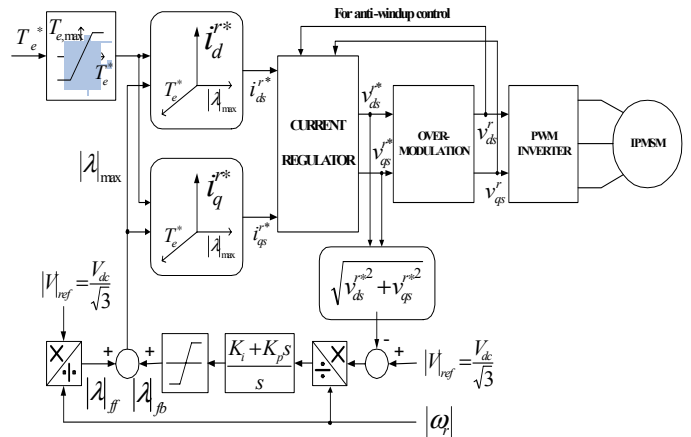
### 1. 서 론

매입형 영구자석 동기전동기는 고효율, 큰 단위 체적 당 토크, 기계적 강인함, 특히 넓은 약자속 영역의 장점으로 인해 하이브리드 자동차의 견인용 전동기로 널리 사용되면서 매입형 영구자석 동기전동기 관한 많은 연구가 진행되어왔다[1],[2].

[3]에서 S. Morimoto는 전동기의 속도와 토크에 의해 전류 지령을 계산하는 방법을 제안하였다. 그 전류 지령은 전동기의 속도에 따라 단위 전류 당 최대 토크 영역과 약자속 영역을 구분하여, 각 영역에서 전류제한원과 전압제한타원을 고려하여 계산된다. [4]에서는 전향보상을 이용한 약자속 운전 방법이 제안되었다. 전동기의 속도에 따라 정토크 영역과 약자속 영역을 구분하여 각각의 운전 영역에서 전류 지령을 계산하는 방법이다. 그러나 앞의 두 방법은 전동기의 제정수 변동에 민감하고 구형 방법이 복잡하다는 단점이 있다. 또한 전동기의 자기적 포화(magnetic saturation) 효과에 대한 연구가 미비하며, 전동기와 전력변환장치의 능력을 최대한 활용하는 문제 역시 깊이 있게 다루지지 않았다. [5]와 [6]에서는 전동기와 전력변환장치의 능력을 최대한 활용하기 위하여 약자속 제어와 식스 스텝 운전 간의 절환을 통해 전압변조지수(Modulation Index)를 높이는 방법이 제안되었다. 하지만 이 방법들에서 약자속 제어와 식스 스텝 운전 간의 매끈한 절환이 거의 불가능하며 더욱이 식스 스텝 운전 시에는 전류제어기가 동작하지 않으므로 토크의 리플이 증가하고 토크 제어의 동특성이 나쁘다. 그리고 자기회로의 포화 역시 고려되지 않았다.

[1]에서 그림 1과 같이 전향보상과 전압 궤환을 이용한 제어 방법이 제안되었다. 이 방법에서 미리 계산된 2차원 참조표에 의해 전동기의 자기적 포화가 고려되고 전동기 제정수의 오차는 전압 궤환 경로에 의해 보상될 수 있다. 또한 전동기와 전력변환장치의 능력을 최대한 활용하는 것 역시 전압 크기 지령  $|V_{ref}|$  을 큰 값으로 설정함으로써 가능하다. 그러나 약자속 제어와 안티 와인드업 제어 간의 상호작용에 의한 충돌을 고려하지 않았기 때문에 이 경우 전류 제어가 불안정해질 수 있다 [7].

본 논문에서는 매입형 영구자석 동기 전동기의 준 식스 스텝 운전(Quasi six-step operation)을 위한 약자속 제어에 대한 새로운 방법을 제안한다. 준 식스 스텝 운전이란, 식스 스텝 운전 시의 전압 변조 지수에 가까운 전압 변조 지수로 전동기를 운전하면서 동시에 전류를 제어하는 운전 방법이다. 본 논문에서 제안된 방법을 이용하면 약자속 제어와 안티 와인드업 제어가 함께 이루어질 수 있을 뿐만 아니라, 간단한 방법으로 전압 변조 지수를 제어함으로써 준 식스 스텝 운전을 수행할 수 있다. 제안된 방법의 유효성과 우수성을 컴퓨터 시뮬레이션과 실험 결과를 이용하여 [1]의 방법과 비교를 통해 검증하였다.

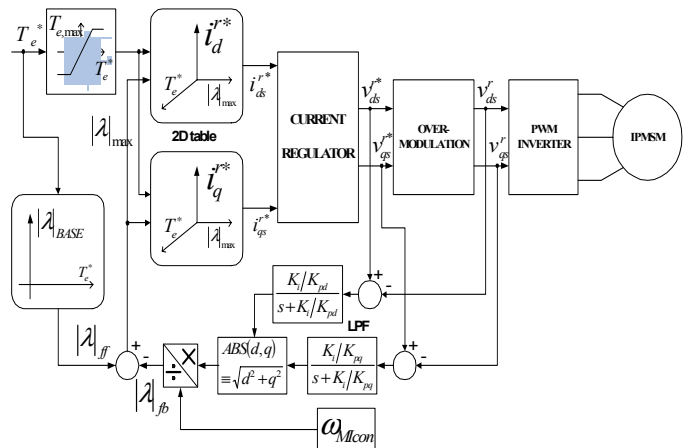


<그림 1> 기존의 IPMSM의 약자속 제어 방법

### 2. 본 론

#### 2.1 제안된 방법

그림 2는 제안된 방법의 블록도이다. 토크 지령  $T_e^*$  와 최대 자속  $|\lambda|_{max}$  를 입력으로 하는 2차원 참조표를 사용한다는 점에서 그림 1의 구조와 비슷하다. 그림 1의 방법과의 차이는 전향 경로와 궤환 경로에 있다. 그리고 역계산법(back-calculation method)에 의한 안티와인드업 제어도 포함되어있지 않다. 전향 경로는 토크 지령을 입력으로 하여 정토크 영역에서의 자속의 크기를 출력하는 1차원 참조표로 구성된다. 궤환 경로는  $|\lambda|_{fb}$  을 수정하기 위한 두 개의 저역통과 필터와 비선형적인 블록으로 구성된다. 궤환 경로에서 고정자 저항에 의한 전압강하를 무시하면  $|\lambda|_{fb}$  은 식 (1)과 같이 표현된다. 여기서  $\omega_{Mcon}$  은 단위가 rad/s로서 전압변조지수를 제어하기 위한 변수이다.



<그림 2> 제안된 IPMSM의 약자속 제어 방법

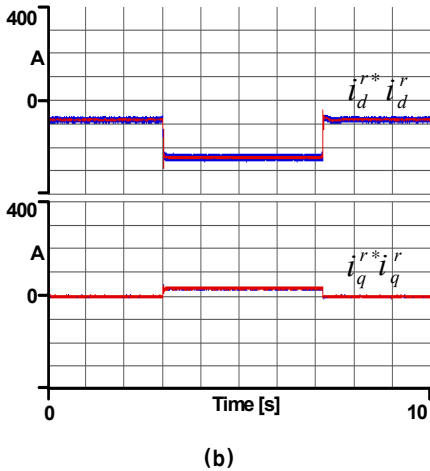
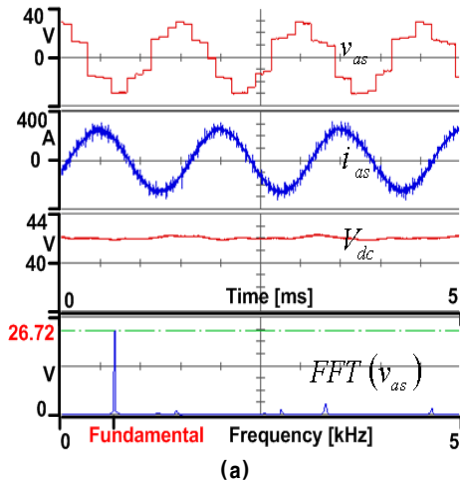


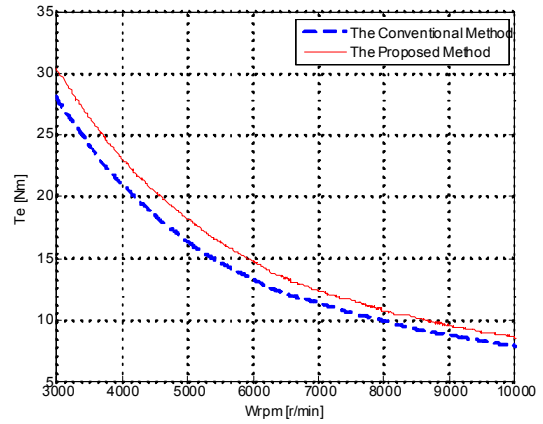
그림 3> (a)제안된 방법의 준 식스 스텝 운전 (b)제안된 방법의 동특성(Dynamic performance)

$$|\lambda|_{fb} = \frac{\sqrt{\left(\frac{K_i}{s}(i_{ds}^{r*} - i_{ds}^r)\right)^2 + \left(\frac{K_i}{s}(i_{qs}^{r*} - i_{qs}^r)\right)^2}}{\omega_{MIcon}} = \frac{\sqrt{V_{ds,integ}^2 + V_{qs,integ}^2}}{\omega_{MIcon}} = \frac{|V_{dq,integ}|}{\omega_{MIcon}} \quad (1)$$

식 (1)의 분자는 전류제어기의 d, q축 전류제어기 적분기 출력의 크기로서 약자속 영역에서 전압이 부족한 정도를 나타내는 정보를 담고 있는 변수이다. 즉 정토크 영역에서 그 값은 영이며, 약자속 영역에서는 전압이 부족하면 할수록 더 큰 값이 될 것이다. 그리고  $|\lambda|_{max}$ 와 전류 지령이 식 (1)에 의해 적분기 출력으로부터 얻은  $|\lambda|_{fb}$ 와 2차원 참조표에 의해 수정되므로 약자속 제어와 안티와인드업 제어를 동시에 수행할 수 있다. 또한  $\omega_{MIcon}$ 을 조절함으로써 준 식스 스텝 운전도 수행할 수 있다. 제한된 직류단 전압을 효율적으로 사용하기 위해서 그 값을 약자속 영역에서의 속도로 정하는 것이 바람직하다.

## 2.2 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험 결과

그림 3은 전동기의 최고 속도 10000r/min에서 최대 토크 40Nm를 인가했을 때의 실험 결과 파형이다. 그림 3의 (a)에서 제안적인 상전압 파형을 통해 식스 스텝처럼 운전되고 있다는 것을 알 수 있고, 매끄러운 정현적 모습을 보이는 상전류 파형을 통해 전류제어가 잘 수행되고 있음을 알 수 있다. 직류단 전압 파형과 상전압의 FFT(Fast Fourier Transform) 결과를 통해 전압변조지수를 계산하면 0.9993으로 식스 스텝의 경우(전압변조지수=1)에 매우 가깝다. 그리고 그림 3의 (b)에서 50p.u./s의 기율기로 토크를 인가함으로써 전류 제어의 동특성을 관찰한 결과 실제 전류가 과변조에 무관하게 지연 없이 지령을 추종함을 알



<그림 4> 약자속 영역에서의 능력곡선 비교

수 있다. 이러한 실험 결과는 준 식스 스텝 운전과 안티 와인드업 제어가 잘 이루어지고 있음을 입증한다.

그림 4는 약자속 영역에서 제안된 방법과 [1]의 방법을 비교하기 위한 능력 곡선이다. 본 논문에서 제안된 방법의 결과가 [1]의 방법의 결과보다 전체적으로 더 큰 출력토크를 내는 것을 알 수 있으며, 최고 속도에서 출력 토크는 약 9% 증가한다. 이러한 출력토크의 증가는 제안된 약자속 제어 방법이 전동기와 전력변환장치의 능력을 효율적으로 활용하고 있음을 보여준다.

## 3. 결 론

본 논문에서 매입형 영구자석 동기 전동기의 새로운 약자속 제어 방법을 제안하였다. 전류제어기로부터 얻은 지령전압과 과변조에 의해 제한된 출력전압의 차이를 이용해 준 식스 스텝 운전을 위한 약자속 제어와 안티와인드업 제어를 동시에 수행할 수 있다. 그 결과 식스 스텝 운전의 경우에 가까운 전압변조지수로, 전동기가 가진 토크를 빠른 동특성으로 최대한 활용하여, 최고속도에서 기존의 방법보다 9%의 출력토크 증가를 보였다. 제안된 방법의 이와 같은 유효성과 우수성은 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 실험 결과에 의해 증명되었다.

## [참 고 문 헌]

- [1] B. H .Bae and S. K. Sul, "New Field Weakening Technique for High Saliency Interior Permanent Magnet Motor" in Conf. Rec. IEEE-IAS, Oct.2003, pp. 898-905.
- [2] J.M.Kim and S. K. Sul, "Speed Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive for the Flux Weakening Operation" in IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol.33, 1997, pp.43-48.
- [3] S. Morimoto, Y. Takeda, T. Hirasaka, and K. Taniguchi, "Expansion of operating limits for permanent magnet motor by current vector control considering inverter capacity" in IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol.26, 1990, pp.866-871.
- [4] S. Morimoto, M. Sanada, and Y. Takeda, "Wide speed operation of interior permanent magnet synchronous motors with high performance current regulator" in IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol.30, 1994, pp.920-926.
- [5] J. Holtz, W. Lotzkat, and M. Khambadkone, "Continuous control of PWM inverter in the over modulation range including the six-step mode" in IEEE Trans. Power Electron., Vol.8, 1993, pp.546-553.
- [6] B. K. Bose, "A high-performance inverter-fed drive system of an interior permanent magnet synchronous machine" in IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol.24, 1988, pp.987-1087.
- [7] T. S. Kwon and S. K. Sul, "Novel anti-windup of a current regulator of a surface mounted permanent magnet motor for flux weakening control" in IEEE-IAS Annu. Meeting, Vol.3, 2005, pp.1813-1819.