

매입형 영구자석 동기전동기의 고성능 약계자 제어

이 중호*, 김 장목, 원 종수
서울대학교 공과대학 전기공학과

The High Performance Flux Weakening Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

Lee Jung-Ho, Kim Jang-Mok and Won Jong-Soo
Dept. of Elec. Eng., Seoul Nat'l. Univ.

Abstract

In this paper, the new flux weakening control algorithm for the drive system of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM) is proposed, which includes the feedback of torque and current. The torque error is used in order to control the current phase angle in the field weakening control. The proposed control method is compared with the stator flux oriented vector control method. Through the simulation the prominence of the proposed control method is verified.

1. 서론

매입형 영구자석 동기 전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)는 회전자 내부에 영구자석이 삽입되어 있다. 이 매입된 형상으로 인하여 $X_q > X_d$ 의 현상이 생기고, 2가지 성분 토크인 자석 일치 토크와 IPMSM의 특징인 릴럭턴스 토크가 존재한다. 이로 인해 작은 체적의 회전자로 큰 토크를 발생시킬 수 있으며, 또한 상당히 넓은 운전 속도 영역을 가진다.

이러한 IPMSM의 대표적인 토크 제어에는 피드 포워드(Feed forward) 제어법^[2]과 고정자 자속 기준 벡터제어법^[5]등이 있다. 피드 포워드 제어법은 전류 정보등 피드백 신호가 없는 시스템을 구성하므로 아주 간단하지만, 전동기 상수를 정확히 모르거나 상수 변동이 있을 경우 직접적인 오차를 수반한다^[6].

고정자 자속 기준 벡터제어법은 Bose씨에 의하여 제안된 것으로서 운전 영역뿐만 아니라 제어 모드가 정토크 영역과 정출력 영역으로 나뉜다. 이 방법은 정토크 영역에서는 비록 시스템이 복잡하지만 전동기 상수 변동을 고려한 자속 제어 모드가 있으므로 시스템을 안정되게 운전할 수 있다. 그러나, 정토크 운전에서 정출력 운전으로 변환 순간에 불연속에 가까운 과도 상태가 있다. 또한, 정상 상태에서는 비록 약간 큰 출력을 얻을 수 있으나, 전류와 토크에 큰 맥동을 포함하고 있다.

따라서, 본 논문에서는 정출력 운전을 위한 새로운 약계자 제어 방식을 제안하였다. 그리고, 기존의 고정자 자속 기준 벡터제어의 정토크와 정출력 특성과 비교하여, 새로 제안된 약계자 제어법이 간단하고 우수함을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

2. 본론

여기에서는 제안된 제어 알고리즘과 페루프로 동작되는 고정자 자속 기준 벡터 제어법을 서로 비교한다.

2.1 고정자 자속 기준 벡터제어

그림 1은 IPMSM의 고정자 자속 기준 벡터제어의 벡터도를 나타내고 있다.

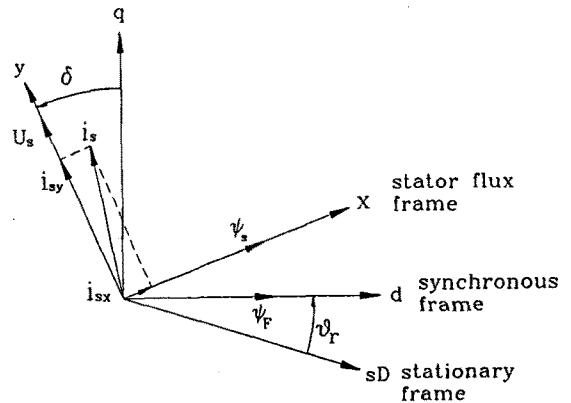


그림 1. 고정자 자속 기준 벡터제어의 페이스도

고정자 자속 기준 벡터 제어는 정토크 운전과 정출력 운정으로 나뉜다. 먼저 정토크 운전에서는 식 (1)과 같이 토크가 타여자 DC 전동기처럼 제어될 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} P |\Psi_s| i_{sy} \quad (1)$$

$$|\Psi_s| = \sqrt{(L_q i_{sq})^2 + (L_d i_{sd} + \Psi_f)^2} \quad (2)$$

$$i_{sy} = -i_{sd} \sin \delta + i_{sq} \cos \delta \quad (3)$$

여기서, P : 극 쌍수, $|\Psi_s|$: 고정자 쇄교자속

i_{sy} : 고정자 자속 기준 좌표상의 토크 성분 전류

L_d, L_q : d축, q축 인덕턴스

i_{sd}, i_{sq} : 동기 좌표상의 d축, q축 전류

Ψ_f : 자석의 상당 쇄교 자속, δ : 부하각

즉, y축 전류인 i_{sy} 를 조절함으로써 토크를 제어할 수 있고, x축 전류인 i_{sx} 로 고정자 자속을 제어할 수 있다. 수식 상으로는 마치 직류 전동기처럼 제어할 수 있는 것으로 보이지만 식 (2)와 식 (3)에서 알 수 있듯이 고정자 자속 기준 좌표의 y축 전류 i_{sy} 와 고정자 쇄교자속 Ψ_s 는 각각 동기 좌표의 q축과 d축 전류인 i_{sq} 와 i_{sd} 에 의해 결정되므로 성분 상호간에 간섭 현상(cross coupling)이 있어 완전한 벡터제어의 구현은 어렵다. 또한, 이 제

이 방법은 그림 2의 제어 블록 다이어그램에서 알 수 있듯이 시스템이 매우 복잡하다.

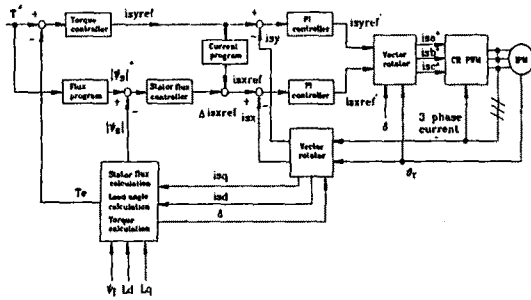


그림 2. 고정자 자속 기준 벡터제어의 제어 블록도

둘째로, 전동기 속도가 증가하면 전동기의 역기전력이 비례하여 점점 커진다. 이 역기전력이 인버터의 직류단(dc link) 전압에 가까워지면 더 이상 인버터는 구동 전압을 내지 못하고, 전류 제어기는 포화가 되어 결국 전류제어를 못하게 된다. 따라서 토크는 현저하게 떨어지게 되고 시스템은 자연스럽게 토크와 전류를 제어할 수 없는 6 스텝 (six-step) 전압 운전으로 들어간다. 이의 해결을 위해 고정자 자속 기준 벡터제어의 정출력 운전은 인버터의 포화를 인버터 게이팅 신호의 스위칭 변화수가 현저히 감소하는 것으로써 감지한다. 인버터가 포화되면 정토크 운전시의 토크를 정출력에서도 발생하기 위해 전압 위상각 δ 를 기율여 강제로 6 스텝 전압을 인가한다. 비록 이 방법은 약간 큰 출력을 낼 수 있지만, 인가된 6 스텝 전압에 의하여 전류와 토크에 많은 맥동을 포함하고 있다. 또한, 고정자 자속 기준 벡터제어는 정토크 운전 시스템과 정출력 운전 시스템이 다를 뿐만 아니라 시스템이 복잡하며, 운전 영역 변경시에는 불연속 구간이 생긴다.

2.2 제안된 방법

여기서 제안된 IPMSM의 운전 방식에 대한 제어 블록 다이어그램이 그림 3에 나타나 있다.

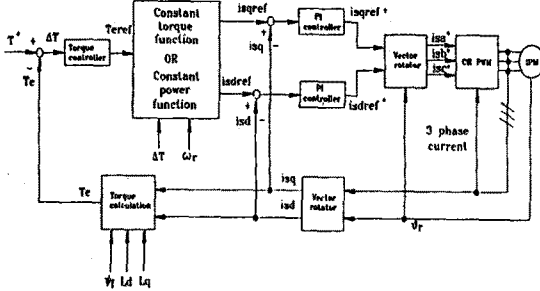


그림 3. 제안된 제어 블록도

정토크 운전시에는 기존의 피드 포워드 방식에 토크와 전류 피드백을 삽입시켜 토크 및 전류 페루트 제어를 하였다. 이 방법은 정토크 운전에서 고정자 자속 기준 벡터제어의 시스템 보다 훨씬 간단할 뿐만 아니라 토크 응답도 좋아진다.

한편, 정출력 영역의 운전은 그림 4에 있는 해석상 간단함을 위하여 저항분을 무시한 전압 제한 타원과 토크 곡선으로 설명 된다^[23]. 이 전압 제한 타원은 식 (4)에 의하여 그럴 수 있다.

$$V_{om} = \sqrt{(\omega_e L_q i_{sq})^2 + (\omega_e \Psi_f + \omega_e L_d i_{sd})^2} \quad (4)$$

여기서, ω_e : 회전자와 전기 각속도

V_{om} : 인버터 최대 상전압

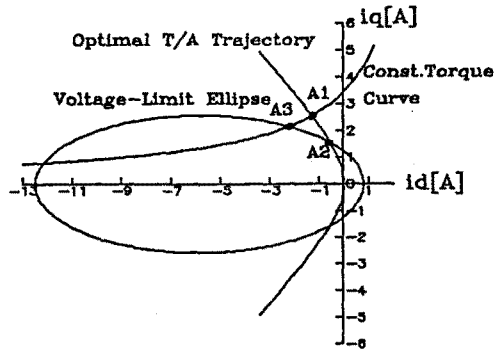


그림 4. IPMSM의 전압 제한 타원과 토크 곡선 및 최적 전류 곡선

또한, 정토크 영역의 운전에서는 그림 4의 단위 전류당 최대 토크를 발생하기 위한 전류 제척(Optimal T/A max. trajectory)에 따라 운전된다. 이 그림에서 정적 토크와 정적 속도 (점 A1) 이내에서 전류 제어 PWM에 문제가 없다. 그러나, 속도가 증가하면 전압 제한 타원이 속도에 반비례하여 작아지게 된다. 따라서, 원하는 운전점은 A1인데 이 점은 전압 제한 곡선 밖에 있기 때문에 이 점에서는 전류를 내지 못하고, 운전점은 A2점으로 이동하게 되어 발생 토크가 감소하고 토크 맥동이 심하게 된다^[24]. 여기서 원하는 토크만큼 내려면 전압 제한 타원과 토크 곡선이 만나는 A3점을 따라서 id, iq 전류를 가하여야 한다. 즉, d축 전류를 증가시켜 전기자 반작용 효과를 이용함으로써 공극 자속을 줄이면 역기전력을 줄일 수 있다. 이렇게 하면 인버터가 포화되지 않고 정출력 운전 영역에서도 연속적인 전류 제어 PWM 운전을 할 수 있다. 이를 구현하기 위해서는 전압 제한 타원과 토크 곡선이 만나는 점을 각 시각마다 계산하여야 이에 상응하는 d축 전류와 q축 전류를 구하여야 한다. 그러나, 이들 점들을 구하기 위해서는 전류에 대한 4차 방정식을 풀어야 한다. 이 방법은 어려운 뿐만 아니라 많은 계산량을 필요하기 때문에 구현의 어려움이 많다. 그래서 본 논문에서는 계산량을 줄임과 동시에 빠른 응답을 위해서 다음과 같은 방법을 사용하여 약제자 제어를 구현하였다.

즉, IPMSM이 고속이 되어 전류 제어가 포화되었을 때 발생 토크는 명령 토크를 추종하지 못하며, 속도가 증가하면 할수록 그 차는 더 커진다. 여기서 이 명령 토크와 발생 토크의 차이에 비례하여 d축 전류값을 증가시켜 주면 간단하고 빠른 응답성을 갖는 약제자 제어를 구현할 수 있다. 이와 같은 운전을 위해서 d축 명령 전류인 i_{sdref} 을 식 (5)와 같이 결정하고, q축 명령 전류인 i_{sqref} 는 식 (6)에서와 같이 결정한다.

$$i_{sdref} = i_{sd0} + K \left(\frac{T_{eref}}{T_{erefo}} - 1 \right) \quad (5)$$

$$i_{sqref} = \frac{1}{L_q} \sqrt{\left(\frac{V_{om}}{\omega_e} \right)^2 - (\Psi_f + L_d i_{sdref})^2} \quad (6)$$

여기서, i_{sdref} , i_{sqref} : 동기 좌표상의 d, q축 명령 전류

i_{sd0} : 정출력 운전 초기의 d축 전류

T_{eref} : 토크 제어기의 명령 토크

T_{erefo} : 정출력 운전 초기의 토크 제어기의

명령 토크, K : 비례 상수 ($K < 0$)

이렇게 결정된 d축 전류인 i_{sdref} 와 q축 전류인 i_{sqref} 를 전동기에 인가하면, 연속적인 전류 제어 PWM 운전을 할 수 있어 토크와 전류에서 맥동이 없는 좋은 성능을 얻게 할 수 있다.

표. 1 전동기 상수

정격 출력	600[W]
정격 토크	2.25[Nm]
정격 회전수	2500[rpm]
정격 전류	1.9[A]
정격 전압	230[V]
극 수	4
d축 인덕턴스	37[mH]
q축 인덕턴스	95[mH]
전기자 저항	8.85[Ω]

3. 시뮬레이션 및 검토

표 1은 시뮬레이션에 사용된 전동기의 상수이다. 그림 5는 고정자 자속 기준 벡터제어 운전시에 정토크 운전에서 정출력 운전으로 들어갈 때의 d, q 전류와 토크를 보이고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 변화 초기에 불연속에 가까운 큰 맥동이 전류와 토크 성분에 포함되어 있다. 뿐만 아니라 약 20ms 동안 과도 상태를 수반하며, 정상 상태에서도 역시 전류와 토크에 많은 맥동이 있다.

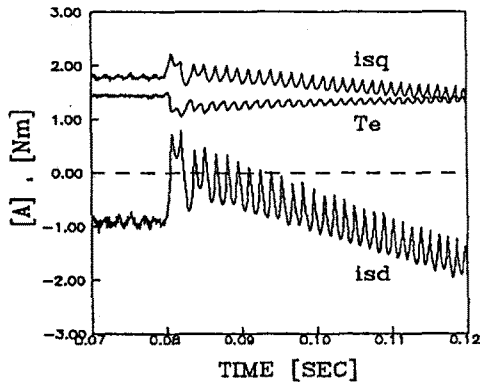


그림 5. 고정자 자속 기준 벡터제어의 토크와 d, q 전류

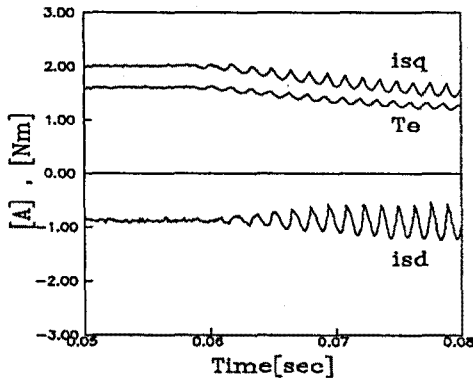


그림 6. 제안된 제어법에서 약제자 제어를 하지 않은 경우의 토크와 d, q 전류

그림 6은 제안된 제어법에서 약제자 제어를 하지 않은 경우의 토크와 d, q축 전류를 보이고 있다. 속도가 점점 증가하면 발생 토크는 더 현저하게 감소할 뿐만 아니라 많은 토크 및 전류 맥동을 포함하고 있다.

그림 7은 정출력 영역에서 제안된 약제자 제어 방식에 의한 d, q 전류와 토크를 보이고 있다. d축 전류가 음으로 증가함에 따라 q축 전류는 감소하지만 발생 토크의 감소는 그렇게 현저

하지 않으며, 전류와 토크의 맥동 성분도 훨씬 감소 되었음을 알 수 있다. 따라서, 제안된 방법이 고정자 자속 기준 벡터제어 보다 성능이 우수함을 알 수 있다.

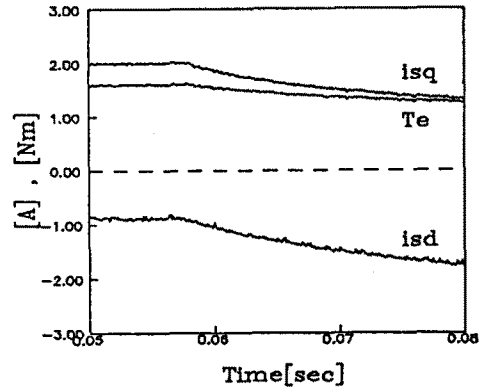


그림 7. 제안된 제어법에 의한 약제자 제어시의 토크와 d, q 전류

4. 결론

본 논문에서는 IPMSM 운전시 고성능을 얻을 수 있는 새로운 약제자 제어 방법을 제안하였고 고정자 자속 기준 벡터제어에 의한 약제자 제어법과 비교하였다. 고정자 자속 기준 벡터제어는 제어 알고리즘과 전체 시스템이 매우 복잡하며, 운전 영역 변화 시 불연속에 가까운 과도상태를 수반한다. 또한, 고속의 약제자 운전에서는 전류와 토크에 맥동이 매우 심하다.

그러나, 여기서 제안된 방법은 알고리즘과 시스템이 고정자 자속 기준 벡터제어보다 매우 간단하며, 정출력의 고속 약제자 제어시에는 IPMSM을 연속적인 전류제어 PWM으로 운전할 수 있다. 따라서 고정자 자속 기준 벡터제어 비해서 전류와 토크에 맥동이 거의 없음을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] P. Vas , Vector control of AC machines, Clarendon Press , 1990
- [2] T.M.Jahns , G.B.Kliman & T.W.Neumann , "Interior Permanent Magnet Synchronous Motors for Adjustable Speed Drives", IEEE Trans. IA , Vol.22 , No.4 , 1986 , pp.738-747
- [3] T.M.Jahns , "Flux Weakening Regime Operation of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive", IEEE Trans. IA , Vol.23 , No.4 , 1987 , pp.681-689
- [4] S.R.MacMinn & T.M.Jahns , "Control Techniques for Improved High-Speed Performance of Interior PM Synchronous Motor", 1988 IEEE IAS Conf. , pp.272-280
- [5] B.K.Bose, "A High Performance Inverter-fed Drive System of an Interior Permanent Magnet Synchronous Machine", Rec. of 1987 IEEE IAS Conf. , pp.269-276
- [6] 김 장목, 심 동준, 원 종수, "매립형 영구 자석 동기 전동기의 비선형성을 고려한 최적제어" 93년 춘계 전력전자 학술 대회 논문집. pp.129-133.