2009년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2009. 7. 14 - 17

매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)의 광속도 변위 구동제어 성능분석

김원규*, 정태철*, 김윤현**
한밭대*, 한밭대-교신저자**

Drive controls regarding displacement of the velocity of light of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor and performance analysis

Won-Kyu Kim*, Tae-Cheol Jeong*, Youn-Hyun Kim**
HanBat University*, HanBat University-Corresponding Author(yhyunk@hanbat.ac.kr)**

Abstract - 본 논문은 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM)의 고속 출력 구동을 위한 제어 특성 해석을 시뮬레이션을 통해 나타낸다. IPMSM의 d축,q축 인덕턴스인 Ld, Lq 선형모델과 비선형 모델의 선형 제어와 비선형제어를 실험과 시뮬레이션에 의하여 비교 분석 하였다. 본 논문은 IPMSM에 최적화된 제어 시스템 구연에 있어서 기초 자료가 될 것이다.

1. 서 론

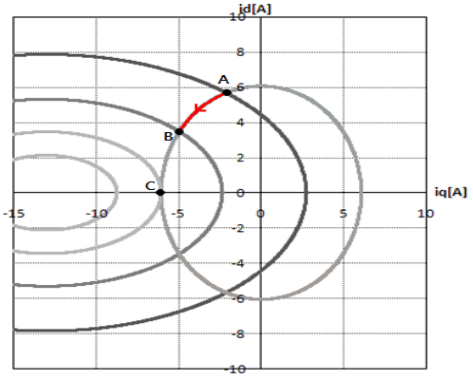
IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)은 회전자 내부에 영구자석을 매입 시켜 기계적으로 강력한 회전자 구조를 가지고 있다. 또 한, 영구자석의 매입으로 역돌극성을 가지게 된다. 돌극성으로 인해 마그네틱토크와 릴럭턴스 토크를 발생함으로 이를 이용해 고토크와 넓은 속도 범위를 만들 수 있다. 또한 고밀도, 고효율의 장점을 가지고 있어 일정토크와 일정속도를 요하는 Servo 시장과 하이브리드/전기자동차(HEV/EV) 시장 등 다양한 산업에 공급되고 있다.[1] IPMSM은 고속과 일시적 가동상태에서 d-q축 전류의 적절한 출력에 의존하며 기저속도 아래에서는 MTPA(Maximum Torque Per Ampere)제어를 하며 기저속도 위에서는 약계자 제어를 실행한다.[2] 본 논문에서는 전압과 전류 제한을 고려한 최대 출력 제어법으로 선형모델의 경우 $i_d=0$ 제어와 MTPA, 약계자 제어의 성능을 비교하고 선형모델의 약계자 제어와 비선형모델의 선형약계자제어, 비선형 약계자제어 각각의 제어 성능을 비교 분석하여 IPMSM제어에 있어 가장 최적화 된 제어 방법을 찾는데 유용한 자료가 될 것이다.

2. 본 론

2.1 전압, 전류제한을 고려한 최대 출력 제어법

IPMSM의 운전 영역은 정토크 영역과 정출력 영역으로 나눌 수 있다. 정토크 영역에서는 최대토크제어를 통해서 높은 기동토크를 얻고 정출력 영역에서는 전류 위상각 제어를 통해 넓은 운전 속도 범위를 만들 수 있다.

인버터로 구동되는 IPMSM은 전압과 전류의 최대값에 제약이 있다. 그림 2.1.1은 전압과 전류의 제약에 의한 전류제한원과 전압제한타원에 의한 전류 벡터의 궤적을 나타내었다.



<그림 2.1.1> 최대출력제어시 속도증가에 따른 전류벡터의 궤적

그림 2.1.1에서 점 A는 정토크 운전 영역으로 전류 제한 조건 하에 높은 기동토크를 얻는 제어 방식으로 식 1로 나타낼 수 있다.

$$i_d=\frac{\Psi_a}{4(L_q-L_d)}-\sqrt{\frac{\Psi_a^2}{16(L_q-L_d)^2}+\frac{I_{am}^2}{2}},\quad i_q=\sqrt{I_{am}^2-i_d^2} \tag{1}$$

식 1의 I_{am}은 연속운전 시에 모터의 정격전류에 해당하는 전류 제한 값으로 모터의 공급 전류와 전류제한 값이 같아지는 경우 발생 토크는 최대가 되고 그림 2.1.1의 점 A가 운전 포인트가 된다.

모터의 속도가 기저속도를 넘게 되면 d-q축 전류는 전류제한 원과 전압제한 타원의 교차점을 따라 이동 한다. 이 영역에서의 제어를 약계자 제어라 하며 정출력 운전 영역이라 한다. 정출력 운전영역에서는 그림 2.1.1와 같이 전류 궤적은 점 A에서 점 B로 이동한다. 속도가 더욱 증가함에 따라 점 B의 위치에서 점 C($i_{d=}-I_{am}, i_q=0$) 로 도달하고 이 때의 출력은 0이 된다. 정출력 운전영역을 식 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$i_d=\frac{\Psi_a L_d-\sqrt{(\Psi_a L_d)^2+(L_q^2-L_d^2)(L_q I_{am})^2-(\frac{V_{om}}{w})^2}}{L_q^2-L_d^2} \tag{2}$$

식 2의 V_{om}은 유기전압의 상한 값 이다. 유기전압은 인버터로 출력 가능한 최대전압의 전압 제한이며 DC LINK에 의존한다.

또한 전압과 전류의 제약 조건을 고려한 경우의 출력범위 (속도-출력)와 효율 특성 등은 모터의 기기정수에 크게 의존한다.

표 1은 시뮬레이션을 위한 IPMSM 모델의 기기정수로서 본 논문의 시뮬레이션 모델에 사용 되었다.

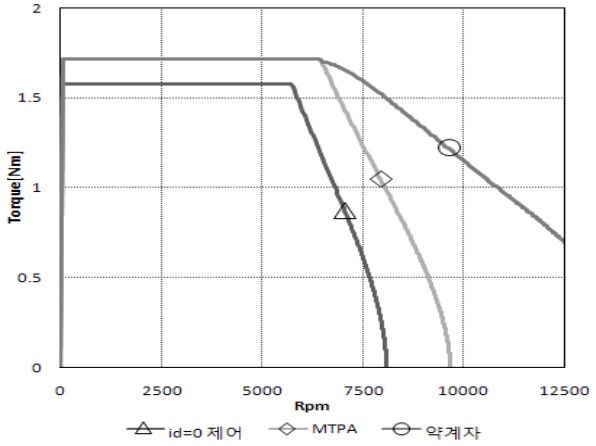
<표 1> 시뮬레이션을 위한 IPMSM의 기기정수

극쌍수	P_n	2
영구자석에 의한 쇄교자속	Ψ_a	0.13 Wb
d축 인덕턴스	L_d	10 mH
q축 인덕턴스	L_q	20 mH
전기자 저항	R_a	0.77548 Ω
등가철손 저항	R_c	300 Ω

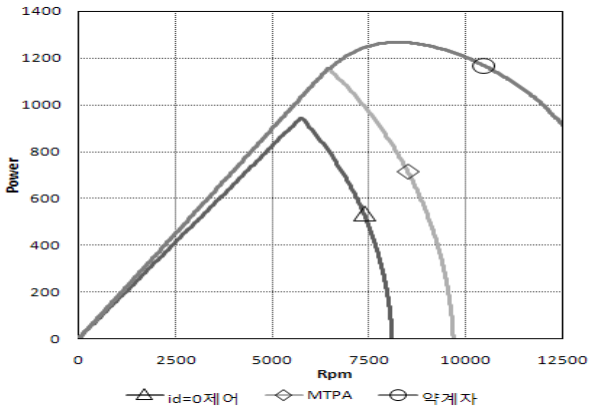
2.2 시뮬레이션에 의한 성능 분석

본 논문의 모든 시뮬레이션은 전류제한 $I_{am}=6.0621778$[A] 로 하였으며 전압제한 $V_{am}=110$[V] 를 기준으로 하였다. 기저속도 $w_{base}=6458$[rpm] 으로 하였다.

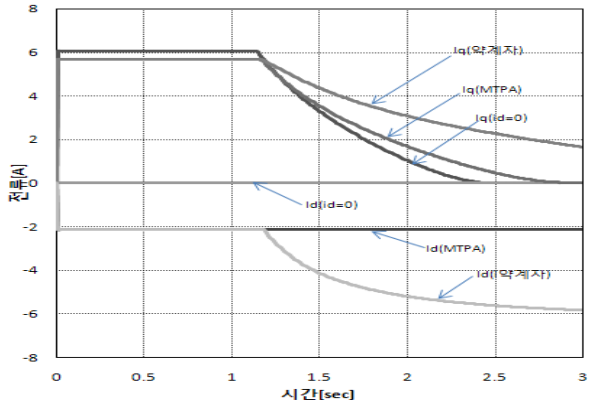
그림 2.2.1에서 그림 2.2.3 까지는 선형모델의 Id=0제어와 MTPA, 약계자 제어의 성능을 비교 분석해서 나타내었다. 그림 2.2.1에서 약계자 제어는 id=0제어와 MTPA 제어에 비해 넓은 속도변위 폭을 가지고 있음을 알 수 있다. 속도-Power, 전류 특성에서도 알 수 있듯이 선형모델의 약계자 제어가 가장 최적화된 제어임을 알 수 있다.



<그림 2.2.1>선형모델 속도-토크 특성

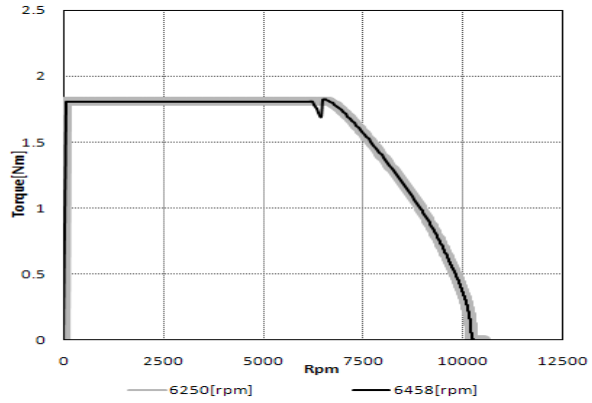


<그림 2.2.2>선형모델 속도-Power 특성

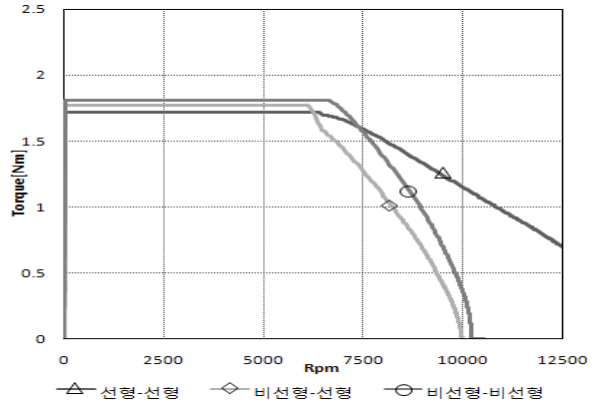


<그림 2.2.3>선형모델 시간-전류 특성

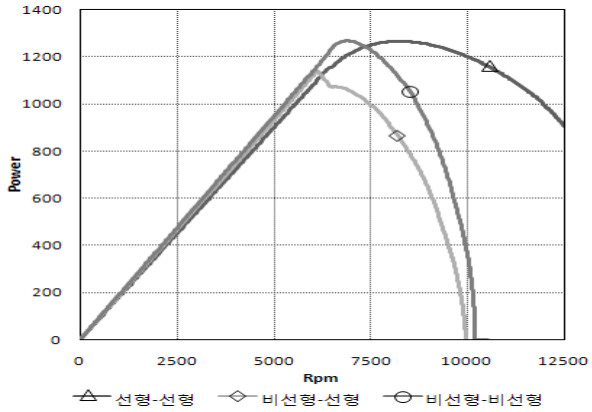
그림 2.2.4는 비선형모델 비선형 제어의 기저속도를 선형모델과 같은 6458[rpm] 으로 했을 때와 적정 기저속도인 6250[rpm]으로 했을때의 속도-전류 특성을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 정토크 운전영역에서 정출력 운전영역으로 넘어가는 부분이 맞지 않다는 것을 알 수 있다.



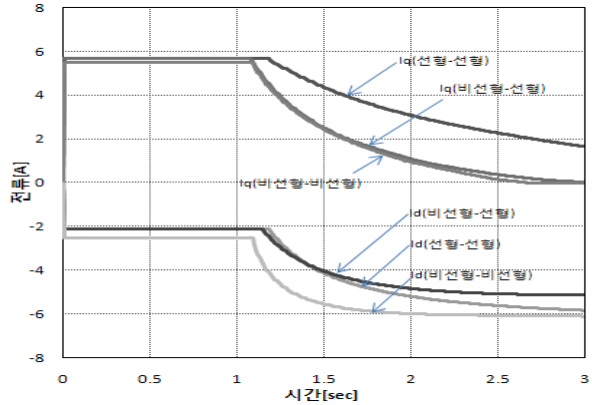
<그림 2.2.4> 기저속도 6458[rpm]에서의 비선형모델 속도-전류 특성



<그림 2.2.5>선형·비선형 모델 선형·비선형 제어 속도-토크 특성



<그림 2.2.6>선형·비선형 모델 선형·비선형 제어 속도-Power 특성



<그림 2.2.7>선형·비선형 모델 선형·비선형 제어 속도-전류 특성

그림 2.2.5에서 그림 2.2.7 까지는 선형모델 약계자 제어와 비선형 모델의 선형제어 비선형제어 각각을 비교 분석하여 나타내었다. 그림 2.2.4를 토대로 비선형모델 비선형약계자 제어의 기저속도는, $w_{base} = 6250[\mathrm{rpm}]$ 으로 하였다. 그림 2.2.4에서 알 수 있듯이 비선형 모델의 선형, 비선형 제어는 선형 모델의 약계자 제어에 비해 그 속도변위 범위가 작지만 정토크 운전영역 에서의 토크는 선형모델이 1.7164[Nm] 이고 비선형모델 선형제어는 1.7742[Nm], 비선형모델 비선형제어는 1.8082[Nm]로 선형모델에 비해서 더 높게 나왔다. 그러나 그림에서 알 수 있듯이 속도 변위폭이 현저한 차이가 난다. 속도-Power와 전류 특성에서도 비선형모델이 선형모델의 제어 특성에 미치지 못 함을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 IPMSM의 넓은 속도 범위 구현을 위해 선형모델과 비선형 모델을 나누어 각기 선형제어와 비선형 제어를 통하여 성능을 비교 분석하였다. 본 논문에서 사용된 비선형 모델의 L_d, L_q 값은 1kW 4극 IPMSM을 전자장 해석 프로그램에 의해서 구하였다. 이를 이용해 선형모델과 실제 모델인 비선형 모델을 제어시뮬레이션을 통해서 성능 차이를 나타내었다.

[참 고 문 헌]

[1]Zhiqiao Wu and Gui-Jia Su, "High-Perfomance Permanent Magnet Machine Drive for Eletric Vehicle Applications Using a Current Source Inverter", IEEE , 2008 IEEE,, 1page, Aug. 7 2008 in USA

[2]Jae-Suk Ko and Jung-Sik Choi and Dong-Hwa Cjung, "Maximum Torque Control of IPMSM", IEEE , SICE-ICASE International joint conference 2006, 1page, Oct.18-21 2006 in Bexco. Busan Korea