

## 전기자동차용 80[kW] IPMSM 구동 시스템 개발

# Development of an 80[kW] IPMSM Drive System for an Electric Vehicle

김 상 훈\*      박 내 춘\*\*  
Kim, Sang-Hoon      Park, Nae-Chun

### Abstract

This paper is about the development of 80[kW] IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) drive system for an electric vehicle. MTPA(Maximum Torque per Ampere) operation and flux-weakening operation for the optimal torque control of the IPMSM are presented. In this system, the torque control of the IPMSM is achieved by using the look-up table, which gives d- and q-axi's current references for the given torque command in the MTPA operation and flux-weakening operation regions. This look-up table is made by current injection tests, and from which the motor parameters are also estimated. The proposed system is verified by the experiment on the electric vehicle drive system, which consists of an 80[kW] IPMSM and an IGBT inverter.

키워드 : IPMSM, 약자속 제어, 전기자동차  
Keywords : IPMSM, Flux-weakening, Electric vehicle

### 1. 서론

최근 세계적으로 지구 온난화, 환경오염, 석유자원의 고갈 등에 대처하기 위해 이산화탄소 배출량 저감 기술과 대체에너지 기술을 응용한 친환경 전기자동차 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 이러한 전기자동차 구동 시스템에서 중요한 핵심 요소는 고신뢰성, 고효율, 고출력밀도, 고효율 등의 특성이다. 이들 특성을 만족하기 위해 전기자동차의 구동 전동기로서 매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)가 널리 사용되고 있다[2].

전기자동차 구동시스템은 빠른 응답특성과 넓은

운전 속도 범위를 요구하기 때문에 IPMSM의 순시 토크제어와 더불어 전운전영역에서 최대토크를 얻을 수 있는 제어 방법의 구현이 요구된다.

IPMSM의 순시 토크제어를 위해서는 통상 백터 제어 기법을 사용하며 최대 토크 운전을 하기 위해 정격속도이하의 범위에서는 MTPA(Maximum Torque per Ampere) 운전을 한다. 고속 영역에서 최대토크를 얻기 위해서는 약자속(Flux-weakening) 제어가 필요한데 이를 위한 방법으로는 전향 보상 방법, 전압 제한 방법, Look-up table을 이용한 방법 등이 있다[3]~[5]. 전향 보상 방법은 전동기의 제정수를 바탕으로 최적의 전류 지령을 도출하므로 정수들의 변동에 매우 민감하다. 고정자 저항과 영구자석의 자속은 운전 상황, 특히 기기의 온도에 민감하게 변동하므로 이러한 전향 보상 방식의 약자속 제어로는 정확한 고속 운전을 기대하기 힘들다. 전압 제한 방법은 전동기의 지령 전압의 크기가 전압 제한이하로 유지되도록

\* 강원대학교 전기전자공학과 교수, 공학박사, 교신저자

\*\* 강원대학교 전기전자공학과 박사과정

록 제어한다. 이 방법은 전동기의 제정수를 사용하지 않기 때문에 전동기 제정수 변동에 의한 오차 영향을 받지 않는다. 그러나 전압 오차를 제어하는 제어기의 이득을 결정하기가 쉽지 않고 전류 제어기와와의 간섭 때문에 전압 제어기의 대역폭을 넓게 할 수 없어 응답성이 느리다는 단점이 있다. Look-up table 방법은 전동기에 따라 참조표를 다시 만들어야 하는 단점이 있으나 제정수의 변동에 둔감하고 빠른 동특성을 얻을 수 있어 전기자동차 구동시스템에서 많이 사용되고 있다.

본 논문에서는 전기자동차 구동용 IPMSM의 MTPA 운전과 더불어 고속 영역 운전을 위한 약자속 제어 기법을 제안하였다. 전류 인가 실험을 통하여 전동기의 제정수를 추출하고, 측정된 데이터를 이용하여 자속데이터를 추출하고 이 자속데이터를 기반으로 MTPA 및 약자속 운전에 필요한 d-q축 전류맵을 작성한다. 제안된 방법을 실제 전기자동차용 80[kW] IPMSM에 적용하여 그 타당성을 검증하였다.

## 2. IPMSM 약자속 운전[6]

### 2.1 IPMSM 모델링

IPMSM의 동기좌표계 전압 방정식은 식 (1), (2)와 같다.

$$v_{ds}^r = R_s \dot{i}_{ds}^r + \frac{d}{dt}(L_{ds} \dot{i}_{ds}^r + \phi_f) - \omega_r L_{qs} \dot{i}_{qs}^r \quad (1)$$

$$v_{qs}^r = R_s \dot{i}_{qs}^r + \frac{d}{dt}(L_{qs} \dot{i}_{qs}^r) + \omega_r (L_{ds} \dot{i}_{ds}^r + \phi_f) \quad (2)$$

역기전력이 큰 고속영역에서 고정자 저항의 전압 강하 성분은 무시할 만큼 작다고 하면 정상상태에서 전압 방정식은 식 (3), (4)와 같다.

$$v_{ds}^r \approx -\omega_r L_{qs} \dot{i}_{qs}^r \quad (3)$$

$$v_{qs}^r \approx \omega_r L_{ds} \dot{i}_{ds}^r + \omega_r \phi_f \quad (4)$$

### 2.2 전압제한과 전류제한

전동기의 속도가 증가하여 약자속 운전영역에 들어 갈 경우 전동기의 운전영역은 식 (5)의 전압 제한과 식 (6)의 전류 제한 조건에 의해 결정된다.

$$v_{ds}^r{}^2 + v_{qs}^r{}^2 \leq V_{smax}^2 \quad (5)$$

$$i_{ds}^r{}^2 + i_{qs}^r{}^2 \leq I_{smax}^2 \quad (6)$$

전압 제한 영역은 속도가 증가함에 따라 점점 작아지게 되고 이에 따라 최대 토크를 얻기 위한 최적의 운전점은 그림 1에서 보이는 것과 같이 전

압과 전류 제한의 교점을 따라 운전하게 된다

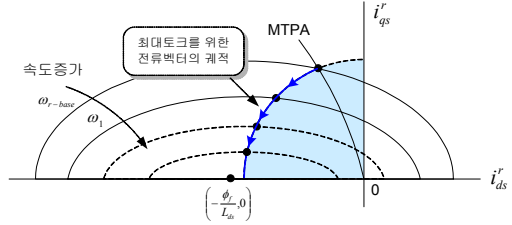


그림 1. 전압과 전류 제한

## 3. 전류인가 시험

최대 토크 제어를 위한 전류 지령 테이블 작성과 전동기 제정수를 추정하기 위하여 매입형 영구자석 동기전동기에 전류 인가 시험을 하였다. 시험 조건은 다이내모 회전 속도 2750[rpm], 직류 전압 280[V]이다. 측정 변수는 토크값, d축 전압, q축 전압이다. 전류 인가 시험은 그림 2와 같이 전류 평면의 2사분면에서 전류크기는 11단계, 위상은 5° 단위 19단계로 총 209회에 걸쳐 시험을 실시한다.

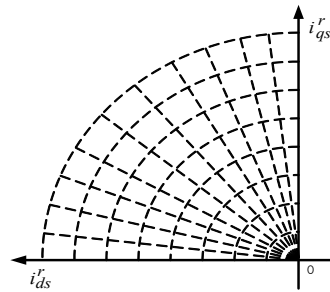


그림 2. 전류 인가 시험 영역

그림 3은 전류 인가 실험을 통해 측정된  $\beta$ 각에 따른 토크를 나타내고 있다.

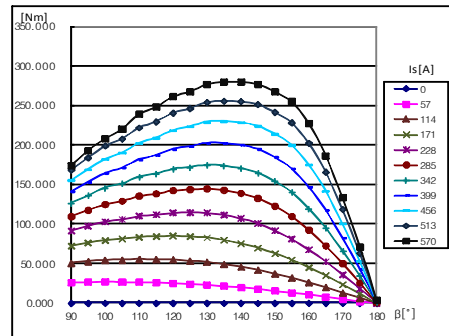
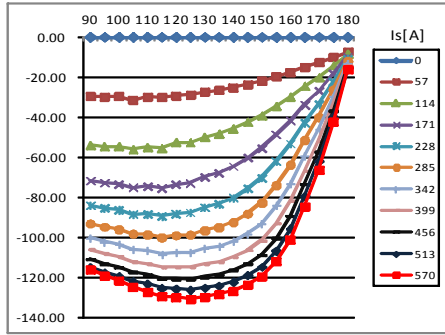
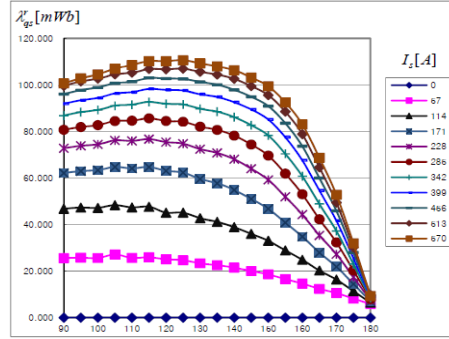


그림 3 발생토크

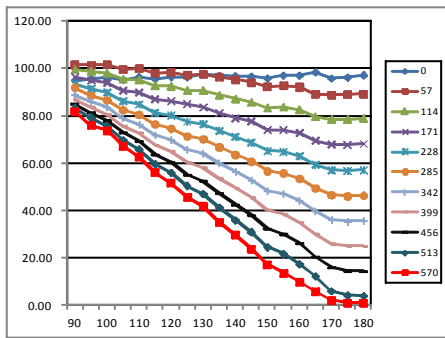
그림 4는 측정된 d-q축 전압을 나타내고 있다.



(a) d축 전압



(b) q축 쇠교 자속량



(b) q축 전압

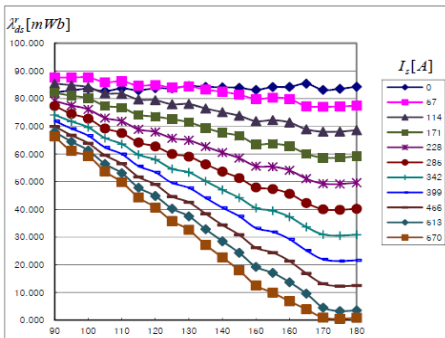
그림 4. 측정된 d-q축 전압

그림 5. d-q축 쇠교 자속량

전압 방정식으로부터 d-q축 쇠교자속량은 전류 인가 실험을 통해 측정된 데이터 이용하여 식 (7), (8)과 같이 구할 수 있다. 계산된 d-q축 쇠교자속량은 그림 5와 같다.

$$\lambda_{ds}^r = \frac{v_{qs}^r - R_s i_{qs}^r}{\omega_r} \quad (7)$$

$$\lambda_{qs}^r = \frac{R_s i_{ds}^r - v_{ds}^r}{\omega_r} \quad (8)$$



(a) d축 쇠교 자속량

### 3.1 전동기 제정수 추정

전류 인가 시험을 통해 추출한 전압과 쇠교 자속 데이터를 이용하여 전동기의 제정수를 추정한다. 정상상태에서 d와 q축 고정자 전압 방정식은 식 (9), (10)과 같다.

$$v_{ds}^r = R_s i_{ds}^r - \omega_r L_{qs} i_{qs}^r \quad (9)$$

$$v_{qs}^r = R_s i_{qs}^r + \omega_r L_{ds} i_{ds}^r + \omega_r \phi_f \quad (10)$$

d-q축 전류가 0[A]인 경우 정상상태 전압방정식은 식 (11), (12)와 같이 d축 전압은 0[V]가 되고, q축 전압은 전동기의 역기전력의 크기와 동일하게 된다.

$$v_{ds}^r = 0 \quad (11)$$

$$v_{qs}^r = \omega_r \phi_f \quad (12)$$

그러므로 식 (13)과 같이 d-q축 전류를 0[A]로 제한한 경우 q축 전압 데이터를 이용하여 역기전력 상수를 추정할 수 있다. 전류 인가 시험을 통해 측정된 데이터로부터 추정된 역기전력 상수는 0.083[Wb]이다.

$$\phi_f = \frac{v_{qs}^r}{\omega_r} = \frac{97.40}{1151} = 0.083 \quad (13)$$

정상상태 전압방정식에서 d축 전류와 q축 전류를 각각 0[A]로 제어하는 경우 전압방정식은 식 (14), (15)와 같이 상호간섭성분만이 남게 된다.

$$v_{ds}^r = -\omega_r \lambda_{qs}^r \quad (@i_{ds}^r = 0, i_{qs}^r \neq 0) \quad (14)$$

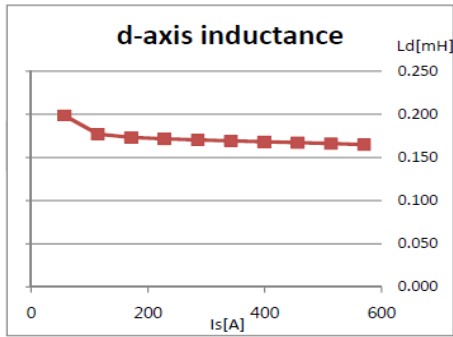
$$v_{qs}^r = \omega_r \lambda_{ds}^r \quad (@i_{ds}^r \neq 0, i_{qs}^r = 0) \quad (15)$$

위 식에서  $\lambda_{ds}^r = L_{qs} i_{qs}^r$  이고,  $\lambda_{qs}^r = L_{ds} i_{ds}^r + \phi_f$  이므로 d와 q축 인덕턴스는 식 (16), (17)과 같이 구할 수 있다.

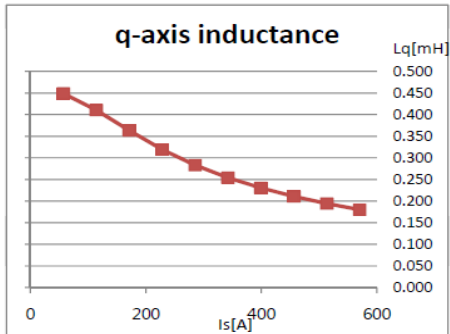
$$L_{ds} = \frac{v_{ds}^r - \phi_f}{i_{ds}^r \omega_r} \quad (16)$$

$$L_{qs} = \frac{v_{qs}^r}{i_{qs}^r \omega_r} \quad (17)$$

식 (16), (17)에  $\beta$ 각 90°도와 180°에서의 자속테이터와 전류를 대입하여 d-q축 인덕턴스를 추정한다. 추정된 인덕턴스는 그림 6과 같다.



(a) d축 인덕턴스



(b) q축 인덕턴스

그림 6. 추정된 d-q축 인덕턴스

### 3.2 전류 지령 테이블 생성

측정한 d-q축 쇠교자속, 토크 테이터를 이용하여 전류 지령 테이블을 작성하였다. 고속 영역에서 운전점은 토크곡선과 전압 제한 타원의 교점이 됨으로, 토크 지령과 전압타원의 반지름인 자속값을 기준으로 전류지령을 구하게 된다.

그림 7은 생성된 d-q축 전류 지령 테이블을 나타내고 있다. 테이블의 x축은 속도이며, y축은 전동기의 토크이다.

rpm	0.0	2750.0	3475.0	4200.0	4925.0	5650.0	6375.0	7100.0	7825.0	8550.0	9275.0	10000.0
0.0	0.0	0.0	-0.0	-0.0	-78.0	-156.0	-180.9	-216.0	-247.9	-277.4	-299.0	-311.2
28.0	-10.2	-10.2	-8.5	-10.5	-90.0	-144.2	-188.6	-224.2	-253.3	-278.0	-298.0	-312.0
56.0	-42.9	-42.9	-35.5	-47.1	-172.0	-280.8	-350.7	-413.7	-465.5	-506.1	-536.1	-554.0
84.0	-86.9	-86.9	-67.8	-90.0	-149.0	-243.1	-318.5	-384.0	-434.8	-473.5	-501.7	-519.4
112.0	-126.5	-126.5	-94.0	-127.9	-178.0	-271.9	-339.6	-396.6	-439.6	-471.2	-492.8	-506.6
140.0	-177.7	-177.7	-127.8	-160.2	-211.9	-299.7	-364.1	-419.9	-457.1	-483.3	-498.0	-506.9
168.0	-216.9	-216.9	-169.9	-204.9	-246.7	-317.8	-367.8	-414.5	-445.5	-461.6	-468.6	-471.8
196.0	-253.1	-253.1	-197.9	-243.9	-283.7	-353.7	-403.4	-447.3	-476.4	-491.4	-493.8	-493.3
224.0	-274.5	-274.5	-219.8	-268.0	-319.0	-394.5	-450.3	-488.2	-507.2	-514.1	-515.4	-512.6
252.0	-287.1	-287.1	-230.6	-281.6	-337.5	-417.1	-486.4	-524.3	-539.8	-543.7	-544.4	-544.4
280.0	-298.6	-298.6	-237.5	-291.6	-349.0	-430.1	-507.6	-544.0	-556.4	-557.1	-557.1	-557.1

그림 7. 전류 지령 테이블

기저 속도 미만에서 280[Nm] 입력을 인가하면 d축 전류 -436[A], q축 전류 366[A]를 출력하고, 최대 속도인 10000[rpm]에서는 d축 전류 -494[A], q축 전류 59[A]를 출력한다.

## 4. 실험

### 4.1 실험 조건

제한한 기법을 검증하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 전동기의 사양은 표 1과 같다.

표 1. 전동기 사양

정격 Power[kW]	80
정격 전류 [ $I_{rms}$ ]	380
정격 토크[Nm]	280
극 수	8
직류 전압 [V]	280
$R_s$ [ $\Omega$ ]	0.0098
$L_d$ [mH]	0.1456
$L_q$ [mH]	0.2651
$\phi_f$ [wb]	0.0857

제어기는 TI(Texas Instruments)사의 32bit급 DSC(Digital Signal Controller)인 TMS320F28335를 사용하였고, 인버터의 스위칭 주파수는 8[kHz]이다. 그림 8은 실험 장치의 구성을 나타내고 있다.



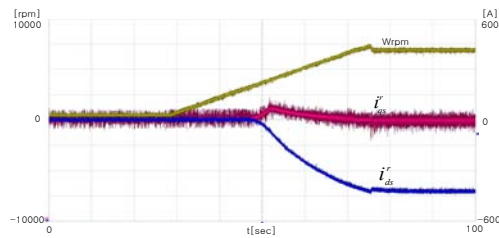
(a) 전체 실험 장비 구성



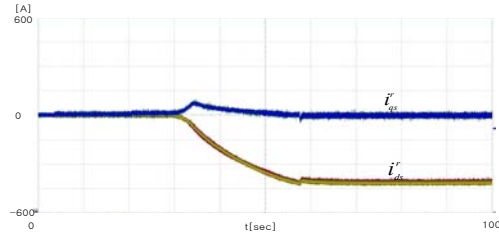
(b) 구동 및 부하 전동기 (c) 제어기 및 인버터  
그림 8. 실험 장비 구성

#### 4.2 실험 결과

그림 9는 0[rpm]에서 7500[rpm]으로 가속 시 속도와 d-q축 전류를 나타내고 있다. 기저 속도 이상의 속도에서 d축 전류는 자속을 줄이기 위해 감소하게 되고, 실제 전류는 지령 전류를 잘 추정한다. 전동기는 약자속 운전 영역인 7500[rpm]까지 원활하게 운전됨을 알 수 있다.



(a) 속도 및 d-q축 전류



(b) d-q축 전류 지령과 실제 전류  
그림 9. 가속 실험 결과

그림 10은 2000[rpm]으로 정속 운전 중 전부하(280[Nm])를 인가한 경우 d-q축 전류 응답을 나타내고 있다. 실제 전류는 전류 지령을 잘 추종하는 것을 알 수 있다.

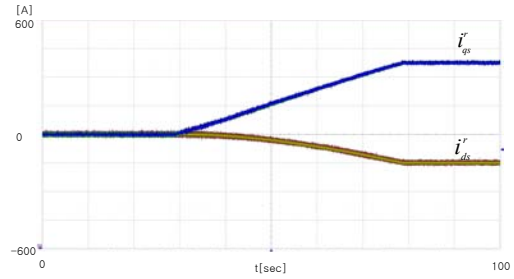


그림 10. 전부하 인가 실험

그림 11은 2000[rpm]에서 전부하(280[Nm]) 지령 인가 시 전동기의 상전류 파형을 나타내고 있다.

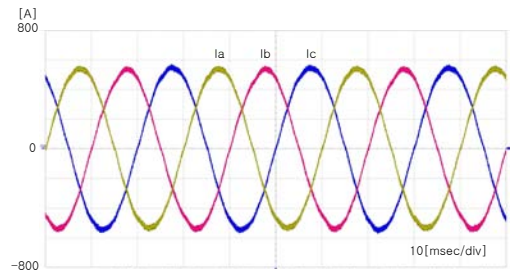


그림 11. 전부하시 상전류

#### 5. 결론

본 논문에서는 전기자동차 구동을 위한 IPMSM의 구동시스템의 설계에 대해 설명하였다. 전류 인가시험을 통하여 MTPA 운전영역과 약자속 운전영역에서의 최대토크 발생을 위한 전류 지령 테이블을 생성하였고, IPMSM의 제정수들도 추정하였다. 얻어진 전류 지령 테이블을 80[kW] IPMSM 구동시스템에 적용하여 주어진 토크 지령에 대해 올바른 토크가 출력됨을 검증하였다.

#### 참고 문헌

- [1] “그린카 전기동력 시스템”, 전력전자학회 기술보고서, 2010.
- [2] 홍정표, 허진, “차세대 자동차용 전동구동 시스템 개발 동향,” *대한전기학회지: 전기의 세계*, 2010.
- [3] 김상훈, “약계자 영역에서 유도 전동기의 최대 토크 운전”, 서울대학교 공학박사 학위논문, 1994. 8.
- [4] 권태석, “영구자석동기기의 출력토크 향상을 위한 새로운 약자속 제어기”, 서울대학교 공학박사 학위논문, 2007. 8.
- [5] Sun Kai1, Shu Qifang, “Field Weakening

산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제33권 A호, 2013.  
김 상 훈, 박 내 춘

Operation Control Strategies of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicles," *Proceedings of the 30th Chinese Control Conference*, July 22-24, pp.3640-3644, 2011, China.

[6] 김상훈, *DC, AC, BLDC 모터 제어*, 북두출판사, 2판, 8장, 2012.