

## 매입형 영구자석 동기모터(IPMSM)의 파라미터 연구

전용현\*, 박일한\*, 김영선\*, 김홍정\*\*  
 성균관대학교\*, 삼성전자\*\*

### Study of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Parameters

Yong-Hyun Jeon\*, Il-Han Park\*, Young-Sun Kim\*, Hong-Jung Kim\*\*  
 Sungkyungwan University\*, Samsung Electronics\*\*

**Abstract** - 본 논문은 매입형 영구자석 동기모터(IPMSM)의 제어 파라미터에 관한 것으로, 종래의 IPMSM의 제어는 120° 통전방식의 인버터로 구동되는 구형과 제어를 적용하여 왔으나, 최근 정음화, 저진동화 및 고속 운전영역의 확대 등의 시장의 요구, 제어 기술의 발전으로 정현과 제어 (또는 벡터 제어) 방식이 점차로 확대되는 추세이다. 본 논문에서는 정현과 제어방식에 요구되는 IPMSM의 모터 파라미터에 대해 FEM 해석 결과와 측정 장치에 의한 실측의 결과를 비교 분석하여, IPMSM의 제어 파라미터 도출의 기초 연구 자료로 활용하고자 한다.

#### 1. 서 론

IPMSM의 제어 방법으로 1990년대까지는 고효율화, 절약에너지화 관점에서 비교적 제어가 용이한 구형과 제어 방식이 주로 적용되어 왔다. 제어 기술의 발전과 더불어 각 에어컨 메이커에서는 제품의 고급화에 주력하여 종래의 고효율화, 절약에너지화에 추가하여 정음화, 저진동화를 구현하기 위해 많은 노력을 기울이고 있으며, 그 중 하나가 에어컨용 압축기에 탑재되는 IPMSM의 정현과 제어 방식의 적용이다. 압축기에 탑재되는 IPMSM을 구동시키기 위해서는 회전자 위치검출이 필요하고, 종래부터 사용되어지는 120° 통전방식의 구형과 제어에서는 60°의 무통전 구간에 대해 역기전력에 의한 회전자 위치를 검출하는 방식이라면 정현과 제어는 무통전 구간이 존재하지 않으므로 모터의 전류와 전압의 위상차를 최적으로 제어하는 것으로, 회전자 위치검출 없이 고효율의 정현과 제어가 가능하게 되었다. 기존의 구형과 제어가 비교적 단순한 제어 방식이라면 정현과 제어는 좀 더 복잡한 제어 방식으로, 구형과 제어 방식 대비 토크리플이 적고, 약자속 제어에 의한 고속 운전이 유리하다고 할 수 있다.

본 논문에서는 고정자가 집중권 방식인 IPMSM의 정현과 제어를 위한 파라미터의 계산을 FEM 해석을 통해 예측하고, 그 결과를 실측 데이터와 비교 분석하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 해석 모델

본 논문의 IPMSM의 제원은 표 1과 같다. 비교적 소형 에어컨에 탑재되는 압축기용 구동 모터이다. 그림 1은 IPMSM의 철심 형상과 시작기이다. 정현과 제어를 위해 역기전력 파형이 정현파가 되도록 철심의 형상을 설계하였다. 3상 전압방정식으로부터 d-q축 좌표계로 변환한 IPMSM의 전압방정식 및 토크는 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T = P_n \Psi_a i_q + P_n (L_d - L_q) i_d i_q \quad (2)$$



〈그림 1〉 IPMSM의 철심 형상 및 시작기

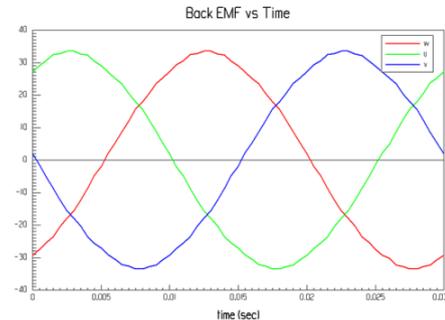
〈표 1〉 해석 IPMSM 제원

Parameter	Unit	Value
Rated Output	kW	0.8
Rated Torque	Nm	2.1
Rated Speed	rpm	3,480
Rated Current	A	3.5
No. of Pole/Slot	-	4 / 6
Stator Outer Diameter	mm	99
Rotor Outer Diameter	mm	51
Axial Length	mm	50
Permanent Magnet	-	42SH

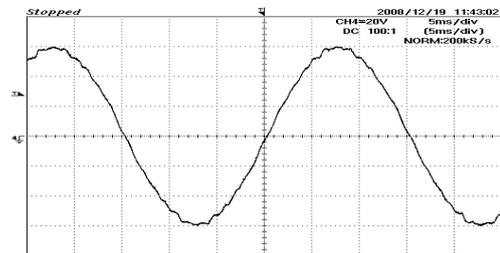
##### 2.2 파라미터 분석

###### 2.2.1 역기전력 분석

역기전력 파형을 정현파로 하기 위해 FEM을 통해 철심형상을 최적화하였고, 시작기를 제작하여 역기전력 파형을 실측하였다. 그 결과를 그림 2, 3에서 확인할 수 있다.



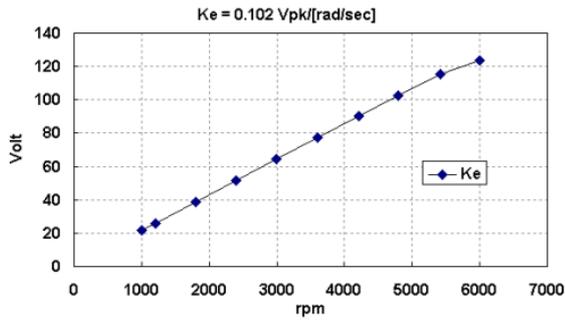
〈그림 2〉 FEM 해석을 통한 역기전력 파형



〈그림 3〉 역기전력 파형 측정치

FEM 해석 및 시작기 측정치로 역기전력 상수(Ke)를 계산할 수 있다. 역기전력 상수는 정현과 제어에 필요한 중요한 파라미터의 하나이며, 식 (3)과 같이 구할 수 있으며 그 결과를 그림 4에 나타내었다.

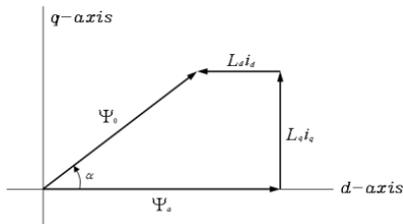
$$K_e = \frac{V_{peak}}{\omega_{rad/sec}}, \quad (\omega_{rad/sec} = 2\pi \times \frac{Pole \times \omega_{rpm}}{120}) \quad (3)$$



〈그림 4〉 역기전력 상수

### 2.2.2 인덕턴스 해석

IPMSM의 톨릭턴스 토크를 결정하는 d, q축 인덕턴스 또한 정현파 제어를 위한 중요한 파라미터이다. FEM에서의 인덕턴스의 산출은 그림 5의 자속 벡터도와 식 (4), (5)로부터 구할 수 있다.

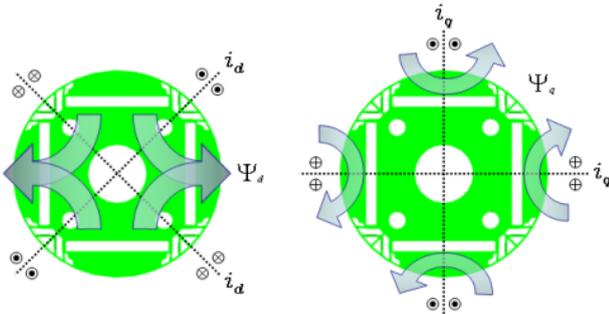


〈그림 5〉 IPMSM의 자속 벡터도

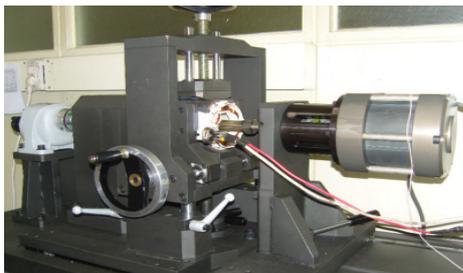
$$L_d = \frac{\Psi_0 \cos \alpha - \Psi_d}{i_d}, \quad L_q = \frac{\Psi_0 \sin \alpha}{i_q} \quad (4)$$

$$i_d = -I_a \sin \beta, \quad i_q = I_a \cos \beta \quad (5)$$

FEM 결과와 비교하기 위해 인덕턴스 측정 장치에서 시작기를 실측하였다. 그림 6과 같이 d, q축으로 자속이 흐르도록 하여 그림 7의 측정 장치에서 인덕턴스를 측정하였다.



〈그림 6〉 IPMSM의 d, q축 자속의 흐름



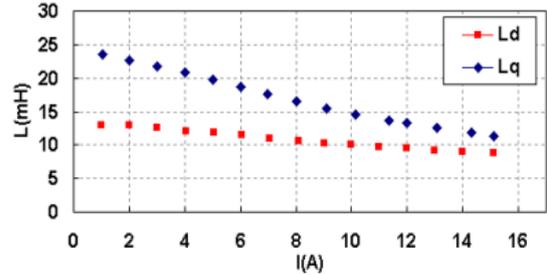
〈그림 7〉 IPMSM의 인덕턴스 측정 장치

IPMSM의 회전자와 고정자를 각각 d, q축 방향으로 정렬하고, 전원

장치를 통해 모터에 전원을 인가한 후 전류를 측정한다. d축의 인덕턴스는 a상에서 (b+c)상으로 전원을 연결하여 측정하고, q축의 인덕턴스는 a상에서 b상으로 전원을 연결하여 측정한다. 인덕턴스는 식 (6)으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{V}{I} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \quad L = \frac{\sqrt{\left(\frac{V}{I}\right)^2 - R^2}}{2\pi f} \quad (6)$$

그림 8에 d, q축 인덕턴스 측정결과를 도시하였다.



〈그림 8〉 시작기의 인덕턴스 측정 결과

전류가 커질수록  $L_d$ 에 비해  $L_q$ 의 변화가 크고, 돌극비가 줄어들음을 알 수 있다. IPMSM의 최대 출력을 산정하여 전류가 10A 일 경우의 인덕턴스를 FEM 계산치와 실측치를 비교해보면 약 3% 정도의 오차가 발생함을 알 수 있다. 표 2에 그 값을 나타내었다.

〈표 2〉 IPMSM의 인덕턴스 비교 (10A)

구분	$L_d$	$L_q$	돌극비
FEM	10.45	14.99	1.43
실측치	9.97	14.65	1.47

### 3. 결 론

본 논문에서는 IPMSM의 정현파 제어를 위한 파라미터 산출을 수행하였다. 파라미터는 FEM을 통한 예측과 시작기를 통한 실측으로 분석하였으며, 중요한 파라미터인 역기전력 상수와 인덕턴스에 대해 FEM을 통한 예측이 일정 수준의 정확도를 보임을 확인하였다. 새로운 제품을 개발하기 위해서는 수개월의 개발 기간과 연구비와 투자비를 필요로 한다. 본 논문에서 해석을 통한 예측이 연구개발에 필요한 시간과 비용을 줄여줄 수 있음을 확인할 수 있었고, 또한 본 논문이 IPMSM의 파라미터 산출에 있어 기초 연구 자료가 될 수 있을 것으로 사료된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 武田洋次, 松井信行, 森本茂雄, 本田幸夫 共著, “埋め込み磁石同期モータの設計と制御”, OHM社, 2001
- [2] 龜山浩幸, 松下元士, 池防泰裕, “モータ制御:エアコン用壓縮機の高性能化”, シャープ技報, 第94号, pp.41-45, 2006
- [3] William H. Hayt, Jr. & John A. Buck, “Engineering Electromagnetics 7th Edition”, McGraw Hill, 2006