

## IPM 동기모터의 불가역감자 특성 비교 연구

정석원\*, 권혁성\*, 정현교\*  
서울대학교\*

### A Comparison Study on Demagnetization Characteristics of IPM Synchronous Motor

Seok-Won Jung\*, Hyuk-Sung Kwon\*, Hyun-Kyo Jung\*  
Department of Electrical & Computer Engineering, Seoul National University\*

**Abstract** - IPM(Interior Permanent Magnet) 모터는 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크를 이용하는 모터이다. 이런 IPM 모터에 쓰이는 영구자석 중 희토류 자석은 온도에 취약한 특성이 있어 낮은 온도에 비해 높은 온도에서 더 쉽게 불가역감자가 발생할 수 있다. 또한 페라이트 자석에 비해 상대적으로 가격이 비싸 희토류 저감 IPM 모터 개발이 지속적으로 진행되고 있다. 따라서 본 논문에서는 희토류 저감 IPM 동기모터의 영구자석 위치를 변화한 3가지 U자형 2층 IPM 모터 모델을 선정하여 회전자 전류의 크기 및 위상 그리고 약자속 제어를 고려한 불가역감자 특성을 비교 및 분석하였다. 이렇게 분석한 결과를 바탕으로 IPM 설계 시 불가역감자에 강한 설계 방법에 대하여 고찰하였다.

#### 1. 서 론

IPM모터는 영구자석에 의한 마그네틱 토크와 자속장벽에 의한 릴럭턴스 토크를 모두 이용하는 형태의 모터이다. 따라서 높은 출력 밀도와 효율을 바탕으로 산업계 전반에서 폭넓게 쓰이고 있다.

IPM모터에서 사용되는 자석으로는 크게 페라이트 자석과 희토류 자석 등이 있다. 페라이트 자석의 경우 희토류 자석에 비해 성능특성이 낮지만 가격이 상대적으로 저렴하다. 이에 반해 희토류 자석은 큰 보자력 및 잔류자속을 갖는 특성이 있어 자석의 두께 및 적층두께를 작게 설계할 수 있다. 하지만 페라이트 자석에 비해 상대적으로 가격이 비싸 산업계에서는 탈 희토류 및 희토류 저감 IPM 모터 개발이 지속적으로 진행되고 있다. 또한 온도 특성에 취약하여 높은 온도에서는 낮은 온도 비해 불가역감자가 더 쉽게 발생할 수 있다.

이에 본 논문에서는 희토류 저감 IPM 동기모터의 영구자석 위치를 변화한 3가지 U자형 2층 IPM 모터 모델을 선정하여, 회전자의 전류 크기 및 위상 그리고 약자속 제어를 고려한 불가역감자 특성을 비교 및 분석하였다. 일련의 해석 과정은 2D FEM(Finite Element Method)을 통하여 수행하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 불가역감자 특성 비교 모델

IPM 모터의 불가역감자 특성 비교를 위하여 3가지 회전자 형태를 선정하였다. 표 1은 IPM 모터의 기본 사양이며, 3개의 회전자 비교 모델 및 고정자 모델은 그림 1과 같다. 회전자 형태는 U자형 2층 IPM 구조로 선정하였고, 자석 위치의 영향만을 고려하기 위하여 일정한 영구자석 체적량, 극호비(pole arc to pole pitch ratio), bridge의 길이와 두께를 동일하게 유지하였다. 각 모델의 주기성을 고려하여 1/4 모델링 해석을 수행하였고, 전기자의 권선 방식은 분포권을 사용하였다.

회전자 모델 1, 2는 U자형 bridge의 마디별로 약50%의 영구자석을 채운 형태로, 모델 1의 경우 영구자석을 bridge 양끝 마디 위쪽 끝에 위치시켰고, 모델 2의 경우는 bridge 양끝 마디 아래쪽 끝에 위치시켰다. 모델 3의 경우 모든 영구자석 체적을 중간 마디에 위치시킨 형태이다.

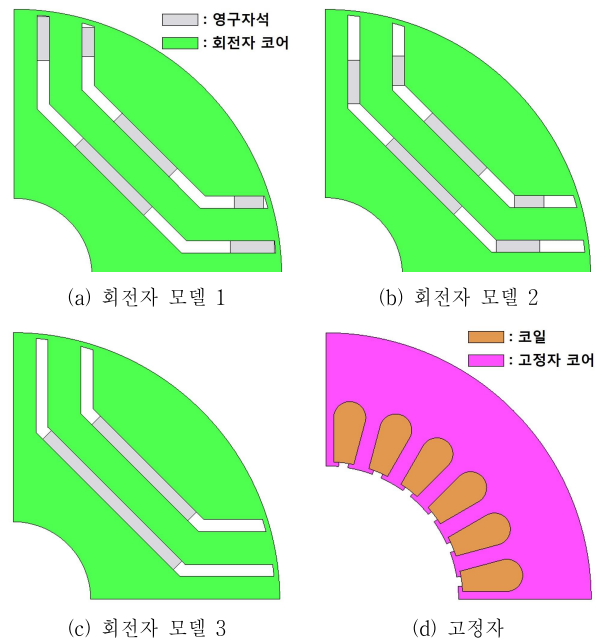
영구자석은 희토류 자석인 NdFeB를 사용하였다. 희토류 자석의 경우 높은 온도에서 취약한 특성이 있으므로 본 연구에서는 140°C에서의 영구자석 특성을 적용하기로 하였다.

##### 2.2 해석 방법

IPM 모터의 불가역감자 특성은 각 모델에 대한 부하 상황에서의 FEM 해석을 통해 수행되었다. 부하 해석을 위해 모델별 고정자 코일에 연속정격전류 10A 및 순시정격전류 13A를 각각 인가하고 전류 위상각은 최대 토크가 발생할 수 있도록 설정하여 불가역감자 특성을 비교 및 분석하였다. 추가적으로 고정자 전류를 연속정격전류로 일정하게 유지한 상태로 위상각을 변화해 가며 불가역감자 특성이 어떻게 되는지 확인해 보았고, 마지막으로 약자속 제어 상황을 고려한 해석을 실시하였다.

〈표 1〉 비교 대상 IPM 모터 기본 사양

구 분	제 원
상수 / 극수 / 슬롯수	3상 / 4극 / 24슬롯
샤프트 외경	16mm
회전자 외경	55mm
고정자 외경	112mm
적층 두께	65mm
공극 길이	0.5mm
영구자석 / 잔류자속밀도	NdFeB / 1.15T @140°C



〈그림 1〉 영구자석 배열에 따른 회전자 비교 모델 및 고정자 모델

##### 2.3 불가역감자 특성 이론

영구자석의 불가역감자는 크게 외부 자계 및 온도변화에 의해 발생한다.

일반적으로 영구자석에 외부 자계가 인가되면 증자 또는 감자가 발생할 수 있으며, 불가역감자의 경우 외부 자계에 따른 영구자석 동작점이 감자 영역의 Knee-point를 넘어갈 때 발생하게 된다. 따라서 외부 자계에 대한 불가역감자가 발생하지 않게 하기 위해서는 영구자석에 작용하는 외부 기자력의 세기가 Knee-point 이상을 유지하도록 해야 한다.

불가역감자는 온도변화에 의해서도 발생할 수 있는데, 영구자석의 온도가 변화하면 잔류 자속 밀도, 보자력 값이 변하게 되고 그에 따라 knee-point 값이 또한 변화하게 된다. 본 연구에서 사용된 희토류 자석의 경우 온도가 높을수록 잔류 자속 밀도 및 보자력 값이 낮아지기 때문에 불가역감자에 불리하게 작용한다. 따라서 같은 외부 자계가 인가되더라도 높은 온도에서는 더 쉽게 불가역감자가 발생할 수 있다.

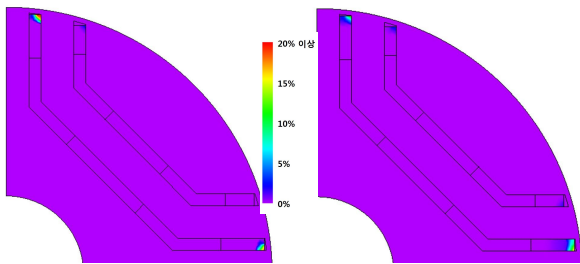
## 2.4 해석 결과

### 2.4.1 고정자 전류 크기 변화에 따른 불가역감자 해석

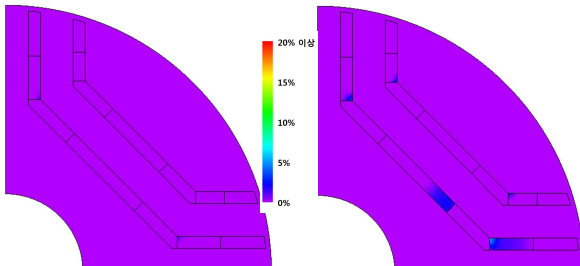
그림 2는 1800rpm의 회전자 회전 속도와 최대 토크를 위한 45°의 전류 위상을 갖는 상황에서 회전자 모델별 전류 크기 변화(연속정격전류 10A, 순시정격전류 13A)에 따른 불가역감자 해석 결과를 보여준다.

결과에 따르면 고정자 전류 크기가 클수록 같은 모델 간에 불가역감자의 크기 및 범위가 확대되었다. 또한 회전자 모델에 따라 불가역감자 크기 및 영역이 상이하었는데, 대체로 모델 1의 경우 bridge 양끝 마디 위쪽 부위, 모델 2의 경우 bride 양끝 마디 하단 및 중간마디 우측, 모델 3의 경우 중간마디 우측 하단에 국부적 불가역 감자가 발생하였다.

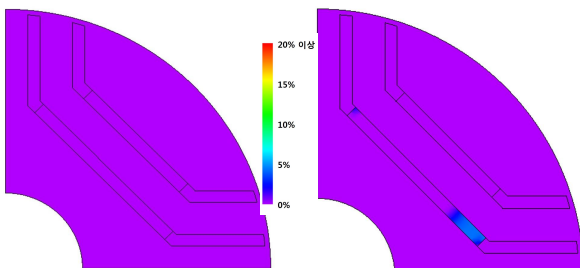
전반적으로 모델 3이 불가역감자에 있어 강인함을 나타내지만, 순시정격전류 상황에서는 연속정격전류에서와는 달리 모델 3에서도 불가역감자가 발생하였다.



(a) 모델 1(좌: 10A, 우: 13A)



(b) 모델 2(좌: 10A, 우: 13A)



(c) 모델 3(좌: 10A, 우: 13A)

〈그림 2〉 고정자 전류 크기 변화에 따른 불가역감자 해석

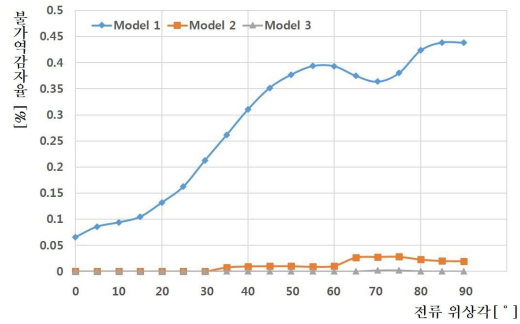
### 2.4.2 고정자 전류 위상 변화에 따른 불가역감자 해석

그림 3은 1800rpm의 회전자 회전 속도와 10A의 고정자 연속정격전류 크기를 갖는 상황에서 모델별로 고정자 전류 위상을 0도부터 90도까지 변화해가면서 불가역감자율을 해석한 결과이다. 불가역감자율 산정은 FEM에 의한 영구자석 내 요소별 불가역감자율을 평균한 값으로 나타내었다.

모델 1의 경우 전반적으로는 위상이 커짐에 따라 불가역감자율이 증가되는 것을 확인할 수 있으며, 모델 2, 3은 상대적으로 불가역감자율이 낮게 측정되었고, 위상에 따른 불가역감자 변화 또한 미미하였다. 결과적으로 모델 1이 모델 2, 3에 비해 위상변화에 따른 불가역감자 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

### 2.4.3 약자속 제어를 고려한 불가역감자 해석

약자속 제어는 고속 회전에서 문제시 되는 전기자 전압을 제한하기 위해 전류 위상을 조절한다. 전류 위상의 변화는 전기자 자속을 변화시키고, 그 결과 영구자석에 미치는 자계가 변화되어 불가역감자가 발생할 수 있는 가능성이 생긴다.



〈그림 3〉 고정자 전류 위상 변화에 따른 불가역감자 해석

표 2는 약자속 제어 상황을 고려한 불가역감자 해석 결과를 보여준다. 연속정격전류 10A 및 순시정격전류 13A에서의 약자속 제어 해석 결과 상대적으로 모델 1이 평균 불가역감자율에 있어 가장 취약할 수 있었다. 하지만, 순시정격전류에서는 전 모델에서 10%이상의 불가역감자율을 보이므로, 약자속 제어시 불가역감자를 고려할 필요가 있다.

〈표 2〉 약자속 제어를 고려한 불가역감자 해석

해석 변수	모델	평균 불가역감자율	평균 토크
1800rpm (전류위상:45° 크기:10A)	모델 1	0.33%	5.39Nm
	모델 2	0.01%	5.38Nm
	모델 3	0.00%	5.39Nm
3600rpm (전류위상:76.5° 크기:10A)	모델 1	0.23%	2.41Nm
	모델 2	0.02%	2.40Nm
	모델 3	0.00%	2.40Nm
5400rpm (전류위상:80° 크기:10A)	모델 1	0.50%	1.81Nm
	모델 2	0.03%	1.80Nm
	모델 3	0.00%	1.80Nm
1800rpm (전류위상:45° 크기:13A)	모델 1	1.92%	7.25Nm
	모델 2	0.35%	7.27Nm
	모델 3	0.48%	7.28Nm
3600rpm (전류위상:71° 크기:13A)	모델 1	13.2%	4.70Nm
	모델 2	10.8%	4.69Nm
	모델 3	10.8%	4.69Nm
5400rpm (전류위상:80° 크기:13A)	모델 1	13.8%	2.55Nm
	모델 2	11.1%	2.55Nm
	모델 3	10.0%	2.56Nm

## 3. 결 론

본 논문에서 수행한 불가역감자 해석에서 알 수 있듯이, 고정자 전류 크기 및 위상의 변화는 영구자석의 국부적인 불가역감자를 발생시킬 수 있으며, 앞서 제시한 3가지 모델 중 불가역감자에 대한 강인성은 모델 3이 가장 좋은 결과를 나타냈다. 즉 회토티류 저감 IPM 동기모터 제작 시에는 모델 3과 같이 영구자석의 모든 체적을 중간마디에 위치시키는 것이 불가역감자 발생을 줄일 수 있다. 또한 약자속 제어 상황에서 순시정격전류의 영향은 불가역감자 가능성을 높일 수 있으므로 약자속 제어 운전을 요하는 모터의 경우 순시정격전류에서의 불가역감자를 고려한 IPM 모터 제작이 요구되어 진다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Rahman, M.A., "Recent Advances of IPM Motor Drives in Power Electronics World", IEEE PEDS 2005. International Conference, vol. 1, pp.24-30, 2005
- [2] M. Rosu, J. Saitz, and A. Arkkio, "Hysteresis model for finite-element analysis of permanent-magnet demagnetization in a large synchronous motor under a fault condition", IEEE Trans. Magn., vol. 41, no. 6, pp.2118-2123, Jun. 2005
- [3] Shigeo Morimoto, Yoji Takeda, " Machine parameters and performance of interior permanent magnet synchronous motors with different permanent magnet volume, " Electrical Engineering in Japan, Vol. 131, No. 4, 2000
- [4] Soong, W.L., Miller, T.J.E., "Field-weakening performance of brushless synchronous AC motor drives", Electric Power Applications, IEE Proceedings, Vol. 141, pp331-340, 1994