

## 고정자 극수-회전자 배리어의 조합에 의한 매입형 영구자석 동기전동기의 특성 해석

손병관\*, 전경원\*, 서명기\*, 김용재\*\*, 문재원\*\*\*, 정상용\*  
 성균관대\*, 조선대\*\*, 한국기계전기전자시험연구원\*\*\*

### Characteristic Analysis of IPMSM through Combination of Stator Slot Number and Magnet Barrier

Byungkwan Son\*, Kyoungwon Jeon\*, Myung-ki Seo\*, Yong-jae Kim\*\*, Jae-Won Moon\*\*\*, Sang-yong Jung\*  
 Sungkyunkwan University\*, Chosun University\*\*, Korea Testing Cetification\*\*\*

**Abstract** - 본 논문에서는 극-슬롯 조합, 회전자 배리어의 형상에 따른 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)의 공극자속밀도, 역기전력 특성을 분석하였다. 먼저 유한요소해석(FEM)을 수행하여 공극자속밀도와 역기전력을 추출하였으며, 추출된 데이터를 고속푸리에변환(FFT)을 이용해 고조파 분석을 수행하였다. 이를 통해 극-슬롯 조합과 회전자 배리어 형상 간의 조합이 공간고조파의 크기에 중요한 영향을 미치는 것을 확인하였다.

인이 된다. 자석의 경우 착자 방향과 자석의 극 간격을 조절함으로써 공극자속밀도의 고조파를 최소화 할 수 있지만, 여기에는 한계가 존재한다. 따라서 자석의 배치를 결정한 후 자석 배리어, 회전자 표면의 형상의 변화와 같은 방법을 통해 고조파를 최소화하는 방법을 사용한다. 회전자 표면의 형상의 변화를 두는 것은 주로 출력이 손실을 가져오므로, 본 논문에서는 자석 배리어를 중심으로 공간고조파를 저감하는 방법을 선택하였다. 자석 배리어는 자속의 누설을 막아서 쇄교자속량을 늘려주는 효과를 가지며 자석 배리어의 형상 변화를 통해 공극자속밀도 분포를 바꾸어 공간고조파를 감소시킬 수 있다.[3]

### 1. 서 론

영구자석 동기전동기(PMSM)는 높은 출력밀도와 효율, 속응성 등의 장점으로 인하여 산업계 전반에 널리 쓰이고 있다. 이러한 PMSM에 있어서, 일정한 출력토크가 발생하도록 설계하는 것은 소음 및 진동을 저감하고 전동기의 정밀한 제어를 하기 위해 중요한 설계목표 중 하나이다. 이상적인 조건에서, PMSM은 정현적인 역기전력을 형성하고, 정현적인 전류를 여자하여 일정한 토크를 출력한다. 하지만 실제의 경우, 슬롯 리플로 인한 공간고조파와 인버터 스위칭으로부터 비롯된 시간고조파 등 각종 고조파의 영향으로 일정한 토크를 출력하지 못하고 토크리플을 형성하게 된다. 위에서 언급했듯이, 이러한 토크리플은 소음 및 진동을 유발하고, 제어 성능에 악영향을 미치므로 이를 최소화하는 설계가 필요하다. 토크리플을 저감하기 위한 방법은 크게 두 가지 범주로 나눌 수 있다. 첫 번째 방법은 모터 설계 단계에서 분수슬롯, 스류와 같은 방법들을 통해 공간고조파를 최소화하고 자계분포와 역기전력을 이상적인 경우와 가깝게 만드는 방법이다. 그리고 두 번째 방법은 모터제어 단계에서 여러 전류 제어 알고리즘을 통해 시간고조파를 최소화하고 여자전류를 제어하여 공간고조파 성분을 상쇄시키는 것이다.[1]

본 논문에서는 모터 설계 단계에서 PMSM 중 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)의 토크리플 저감을 위해 공간고조파를 최소화하는 설계를 진행하였다. 자석의 배치를 일정하게 유지하면서, 고정자의 극-슬롯 조합, 회전자의 자석 배리어 변화를 통해 나타나는 공극자속밀도, 무부하 역기전력의 변화를 살펴보고, 고조파 분석을 통해 주요 고조파의 영향을 살펴보았다. 유한요소해석(FEM)을 사용하여 공극자속밀도, 역기전력의 데이터를 추출하였고, 고속푸리에변환(FFT)을 이용하여 추출된 데이터의 고조파를 분석하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 고정자 슬롯 리플로 인한 공간고조파

고정자를 구성하는 슬롯과 치로 인해 IPMSM의 원주방향 릴럭턴스는 균일하지 않고 슬롯오픈 주위에서 상대적으로 증가하게 된다. 이러한 릴럭턴스 변화는 공극자속밀도 분포에 고조파 성분을 형성하여 역기전력에도 악영향을 미친다. 회전자의 회전 시 매극매상슬롯수가  $q$ , 상수가  $m$ 이라고 하면 회전자가 전기각 한 주기를 회전하는 동안  $2mq$ 번의 치를 만나므로 여기서 발생하는 고조파 차수는 식(1)과 같다.[2]

$$f_l = 2mqf \quad (1)$$

이 리플은 식(2)과 같은 치 리플의 역기전력 고조파를 형성한다.

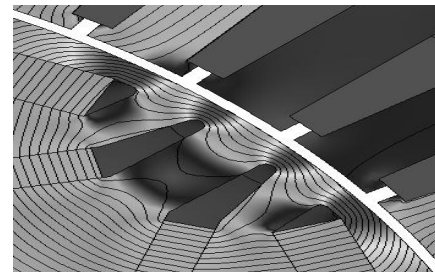
$$f_{l1} = f_l + f = f(2mq+1), f_{l2} = f_l - f = f(2mq-1) \quad (2)$$

3상 권선방식에서는 고조파가 식(3)와 같이 형성된다.

$$n = 6q \pm 1 \quad (3)$$

#### 2.2 회전자 자석 배치와 배리어로 인한 공간고조파

회전자에서는 자석의 배치와 배리어의 형상이 공간고조파의 주요 요

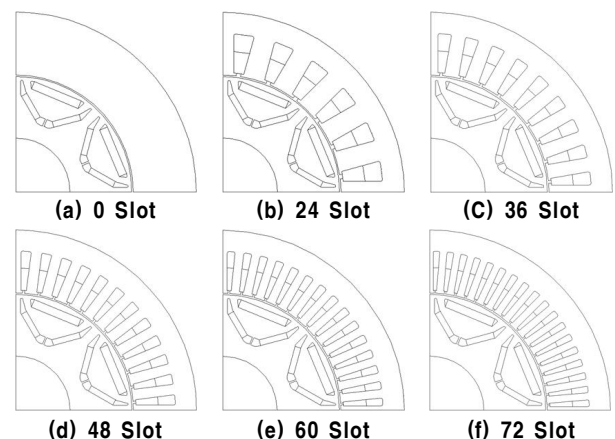


〈그림 1〉 자석 배리어의 효과

#### 2.3 고조파 요소별 특성해석

##### 2.3.1 고정자 슬롯 수에 따른 특성 분석

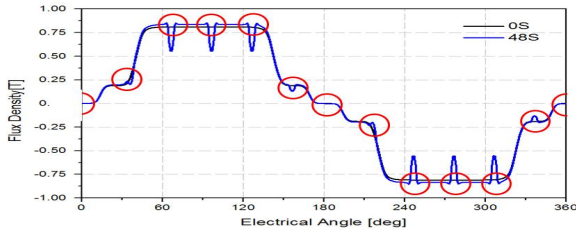
회전자 형상을 동일하게 두고, 권선을 전절권에 비해 코일간격을 1씩 줄인 분포단절권으로 하여 고정자 슬롯 수에 따른 특성해석을 수행하였다. 그림2과 같이, 고정자 슬롯 수가 24, 36, 48, 60, 72개인 5개 모델의 슬롯오픈닝과 치폭의 길이를 슬롯 수에 반비례하게 설계하였다. 회전자로부터 오는 극당 자속량이 일정하므로 요크폭은 일정하게 유지하였고, 병렬회로를 이용해 각 상당 총 턴수를 동일하게 설정하였다. 슬롯에 따른 공극자속분포의 차이를 확인하기 위해 슬롯이 없는 고정자 모델을 기준 모델로 하였다.



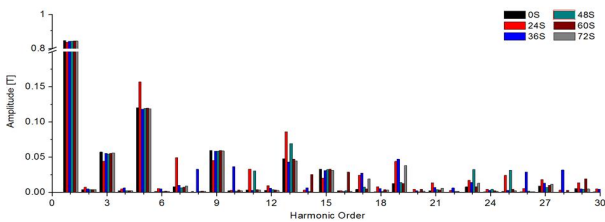
〈그림 2〉 고정자 슬롯 수별 해석 모델

FEM 해석수행결과, 그림3과 같이 릴럭턴스 차이에 의해 슬롯오픈닝 근처의 공극자속밀도가 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이로

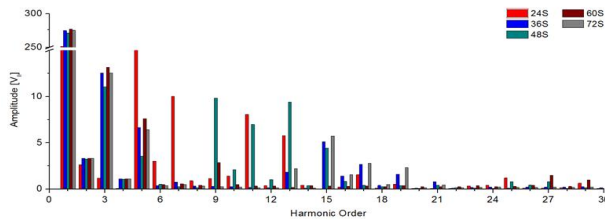
인해 전기각 한주기 단 치의 개수만큼 자속이 급격하게 변화하여 그림 4.(a)와 같이 공극자속밀도에  $6q \pm 1$  차 고조파를 형성하였다. 또한, 슬롯수가 증가함에 따라 공극자속밀도의 고조파 크기가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 한편, 역기전력은 그림 4.(b)와 같이 매극대상슬롯수가 분수인 모델의 고조파가 특히 감소하는 것을 확인할 수 있는데 이는 공극자속밀도의 주요 고조파가 짝수이므로 권선에 쇄교할 때 상쇄되기 때문이다. 따라서 분수슬롯 역기전력의 주요 고조파는 36슬롯은 17,19차, 60슬롯은 29,30차가 되어 상대적으로 크기가 작아진다. 슬롯리플을 중심으로  $6q \pm 3$  차 고조파 역시 크게 형성되는데 분포단절권으로 인한 고정자 권선에 3차 고조파가 크게 나타나기 때문에 형성된다고 볼 수 있다.



<그림 3> 48슬롯 모델의 공극자속밀도



<a> 공극자속밀도 고조파 분석



<b> 역기전력 고조파 분석

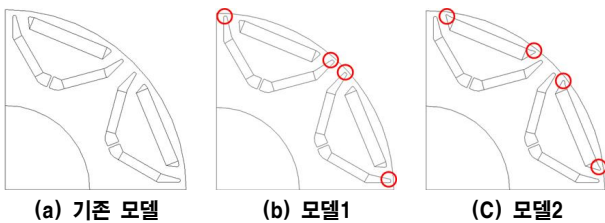
<그림 4> 고정자 슬롯 수별 해석 결과의 고조파 분석

<표 1> 고정자 슬롯 수별 주요 고조파 차수와 역기전력 THD

슬롯수	24S	36S	48S	60S	72S
매극대상슬롯수	1	1.5	2	2.5	3
공극자속밀도 주요고조파차수	5,7th	8,10th	11,13th	14,16th	17,19th
역기전력 주요고조파차수	5,7th	17,19th	11,13th	29,31th	17,19th
역기전력 THD	14.52%	4.70%	6.48%	4.18%	4.74%

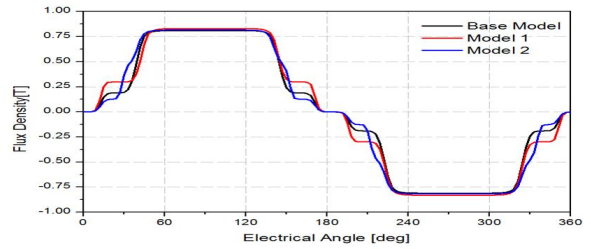
### 2.3.2 회전자 배리어 형상에 따른 특성 분석

조합에 따른 특성 분석을 위하여, 상대적으로 고조파가 큰 24슬롯, 48슬롯 모델에 대하여 회전자 형상을 변화시켜 가며 특성해석을 수행하였다. 모델1의 경우 두 번째 층 자석의 배리어의 길이를 늘리고, 모델2의 경우 첫 번째 층 자석 배리어의 길이를 늘려 그림 5와 같이 설계하였다.

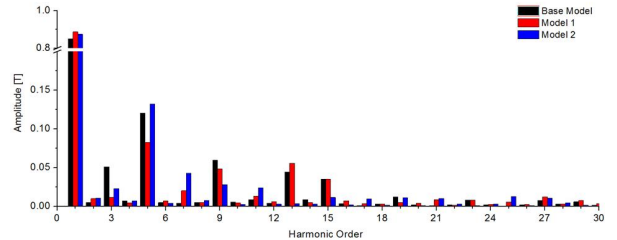


<그림 5> 회전자 형상별 해석모델

FEM 해석 수행 결과, 그림 6와 같이 자석 배리어의 효과로 인해 공극자속밀도 파형이 변화하였다. 모델1의 경우 두 번째 층 자석의 누설 자속을 줄여 배리어 간 자속을 향상시켰고, 모델2의 경우 첫 번째 층의 누설 자속을 줄여 첫 번째 자석간 자속이 향상되어 고조파 양상이 달라 나타났다. 이로 인해 기존 모델 대비 모델1의 공극자속밀도는 5차 고조파가 감소하고 13차 고조파가 증가했으며, 모델2의 자속밀도는 9,13차 고조파가 감소하고 5,7차 고조파가 증가하였다. 고정자 슬롯 리플이 5,7차인 24슬롯 모델에서는 회전자 모델2와 조합 시 고조파가 증첩되어 THD가 증가하였으나 회전자 모델1과의 조합에서는 THD가 크게 감소하였다. 또한 고정자 슬롯 리플이 11,13차인 48슬롯 모델에서는 회전자 모델1과 결합 시 고조파가 증첩되어 역기전력 파형이 개선되지 못하였으나 회전자 모델2와 결합에서는 THD가 크게 감소하였다.



<그림 6> 회전자 모델별 공극자속밀도 고조파 분석



<그림 7> 회전자 모델별 공극자속밀도 고조파 분석

<표 2> 회전자 모델 조합별 주요 고조파 차수와 역기전력 THD

슬롯수	24S			48S		
	기존	모델1	모델2	기존	모델1	모델2
THD	14.52%	10.45%	15.66%	6.48%	6.14%	2.55%

## 3. 결 론

본 논문에서는 매입형 영구자석 동기전동기의 공간고조파 저감을 통해 역기전력 개선 설계를 진행하였다. 주요 공간고조파 요인인 고정자 슬롯 리플, 자석 배리어 배치를 변화시켜가며 공극자속밀도, 역기전력을 분석하였다. 고정자 슬롯 리플로 인해 공극자속밀도에  $6q \pm 1$  차 고조파가 생성되었으며, 역기전력은 권선 배치에 의해  $6q \pm 1$ ,  $6q \pm 3$  차 고조파가 주로 영향을 미쳤다. 특히, 분수슬롯의 경우 공극자속밀도의 주요 고조파가 짝수 차수가 되면서 코일의 쇄교 자속에서 비롯되는 역기전력에서는 서로 상쇄되어 역기전력 THD가 낮은 현상을 보였다. 회전자 자석 배리어의 변화는 자속의 출입을 변화시켜 자속분포에 영향을 미치는 것을 확인했는데, 이를 이용해 공극자속밀도를 변화시키면 고정자 슬롯과의 조합을 통해 고조파를 저감시킬 수 있다. 반면, 고정자 슬롯 리플에 의한 고조파 차수와 회전자 자석에 의한 고조파 차수가 증첩되면 역기전력 파형에 크게 악영향을 미치는 것을 확인하였다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Thomas M.Jahns, "Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives-A Review", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol43, pp321-330, 1996
- [2] Essam S.Hamadi, "Design of Small Electrical Machines" pp128-133, 1994
- [3] 장익상, 김승주, 진창성, 김기찬, 이주, "배리어 길이에 따른 매입형 영구자석 동기전동기의 Ld, Lq 파라미터 특성에 관한 연구, 대한전기학회 전기학회논문지, 58호, pp496-501, 2009