

분수슬롯 영구자석 동기전동기의 권선법 연구

황수진\*, 성기용\*, 김민규\*, 류동석\*, 황점평\*, 김기찬\*  
한밭대학교\*

A study on the Winding Method of Permanent Magnet Motor with Frictional-Slot

Su-Jin Hwang\*, Ki-Young Sung\*, Min-Gyu Kim\*, Dong-Seok Ryu\*, Zhan-hong Huang\*, Ki-Chan Kim\*  
Hanbat National University\*

**Abstract** - 본 논문에서는 10극 12슬롯의 분수슬롯을 가지는 영구자석 동기전동기의 권선방법을 알아보고자 한다. 권선방법은 수학적 수식을 통해 계산되었고 권선법에 따른 결과는 2차원 유한요소법으로 검증하였다. 무부하 역기전력과 토크 파형을 비교하여 분수슬롯 권선법의 최적화된 설계방법을 찾고자 하였다.

1. 서 론

영구자석 동기전동기는 자기적 에너지밀도가 높아 효율이 좋고 속도 제어가 유리하여 정밀을 요구하는 전기구동분야에 많이 사용되어진다. 영구자석 동기전동기는 스위칭 인버터 기술의 발전과 고 에너지 영구자석의 개발로 인해 고효율을 위한 설계방법이 연구되고 있으며, 전기자 권선방법에 따른 소형, 경량화로 고성능화에 많이 연구되어진다. 최근 전기자동차의 wheel-in 구동모터를 사용함에 따라서 저속구동을 위한 다극구조의 모터를 필요로 한다. 출력밀도를 높이고 소형화를 실현하기 위해 극수를 높여주는 것이 유리하지만 정수슬롯의 경우 다극 구조로 설계되어지면 슬롯이 많아지게 되어 소형화를 시킬 수 없고 차량용으로 조립이나 제작이 어려워진다. 그래서 분수슬롯 구조의 설계가 필요하다. 분수슬롯은 정수슬롯과 달리 극의 주기성이 없기 때문에 코깁토크가 작아진다.[1] 또한 높은 토크밀도와 낮은 토크리플을 가지는 특성이 있고 효율성이 높기 때문에 많은 분야에서 사용되어지고 있다. 분수슬롯의 권선법은 복잡성과 다양성 때문에 권선을 하는 유효한 방법들이 많다. 본 논문에서는 유효한 극과 슬롯의 조합에 의한 분수슬롯 모델을 권선배치 하여보고 이를 2차원 유한요소법으로 해석하였다. 토크파형과 역기전력파형을 비교하여 권선방법에 따른 특성을 알아보고 검증해보고자 한다.

2. 분수슬롯 권선법

2.1 분수슬롯의 적용

영구자석 전동기의 극과 슬롯의 조합 및 권선 배치에 대한 가능성은 무한하다.[2][3] 이에 유효극과 슬롯의 조합을 찾기 위한 가정이 필요하다. 본 논문에서 고려된 가정은 다음과 같다.  
첫째, 모터는 3상을 가진다.  
둘째, 모든 슬롯은 채워진다. 그러므로 슬롯의 개수는 항상 3의 배수이다.  
셋째, 각 슬롯은 이중권으로도 설계될 수 있다.  
넷째, 모든 코일은 같은 턴수를 가지고 모든 span은 같은 슬롯 수를 가진다.  
분수슬롯 모터의 권선설계에 위와 같은 가정을 만족시켜야지 3상이 평형한 권선설계를 할 수 있다.

2.2 권선법의 과정

권선법의 설계 순서는 다음과 같다. 우선 코일 span을 정해야 하는데, 코일 span 또는 코일 pitch는 코일의 원주 폭이다. 예를 들면 만일 코일이 슬롯 a로부터 슬롯 a+2까지 가면 코일 span은 2슬롯이다. 코일 span은 자극 당 슬롯의 개수를 정의하는 것을 통해 알 수 있다. 다음 식 (1)에서 함수 max(x, y)는 둘 중 최대를 선택하고, 함수 fix(x)는 정수부분을 선택한다.

$$S^* = \max\left(\text{fix}\left(\frac{N_s}{N_m}\right), 1\right) \quad (1)$$

A상의 시작 코일의 위치를 임의로 정하게 되면 다음 B상과 C상의 상간의 거리는 3상 이므로 다른 두상과 전기적으로 120° 이동되어 지도록 설계되어야 한다. 식 (2), (3), (4)와 같이 k값을 구하게 되는데 이때 k 다음 상까지의 슬롯간격을 의미한다. 함수 rem(x, y) = z는 x를 y로 나누었을 때 나머지를 z로 나타낸다. 식(4)의 q값은 다음 식을 만족하면서 최소가 되는 정수 값을 가져야한다.

$$\theta_{sl}(k) = \text{rem}\left(k \cdot 180 \frac{N_m}{N_s}, 360\right) = 120 \quad (2)$$

$$\text{rem}\left(\frac{3N_m}{N_s}k, 3\right) = 1 \quad (3)$$

$$k = \frac{2N_s}{3N_m}(1+3q) \quad (4)$$

다음으로 모든 슬롯을 전기각으로 나타내줘야 하는데 식 (5)와 같이 대입하면 한 슬롯 당 전기각을 알 수 있다.

$$\theta_s = \frac{N_m}{N_s} \cdot 180^\circ E \quad (5)$$

식 (5)와 같이 나타낸 전기각도 정확하지만 이를 권선할 때 전기각 180°를 초과하기 때문에 명확하게 알기가 어렵다. 때문에 전기각 -180°E ~ 180°E 일 때 이를 직관적으로 이해하기 쉬우므로 식 (5)와 같이 나타낸 전기각을 식(6)을 통해 -180°E ~ 180°E 사이의 전기각으로 바꿔 준다.

$$\theta = \text{rem}(\theta + 180^\circ, 360^\circ) - 180^\circ \quad (6)$$

$$\theta = \text{rem}(\theta + 90^\circ, 180^\circ) - 90^\circ \quad (7)$$

상기와 같은 이유로 이를 다시 식(7)과 같이 전기각 -90°E ~ 90°E 사이의 값으로 변환한다. 이때 변환된 값은 전기적으로 극성이 바뀌므로 변경된 전기각에는 코일의 권선 방향을 변경하여 준다.

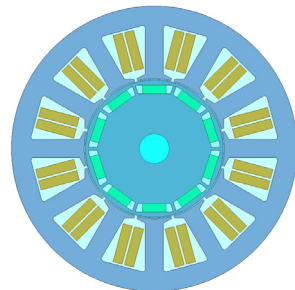
$$N_{eph} = \frac{N_s}{N_{ph}} = \frac{N_s}{3} \quad (8)$$

권선을 할 때 위상 당 코일의 개수를 선정해야 하는데 2.1절에서 가정한 바와 같이 3상 모터의 권선 설계이므로 N<sub>ph</sub>는 항상 3을 갖는다. 식 (8)번과 같이 과정을 마치고 이들 중 각도가 작은 값을 N<sub>eph</sub>개 선택하여 권선하면 된다.

3. 권선법의 유한요소법 해석

3.1 해석모델

분수슬롯 모터의 권선 설계시 다양한 권선법이 발생하여 비교가 가능하도록 2층권을 가지는 10극 12슬롯의 3상 IPM Motor를 해석모델로 하였다. 그림 1은 해석모델 10극 12슬롯 형상의 단면도를 나타내었다.



<그림 1> 10극 12슬롯의 IPM Motor

3.2 분수슬롯의 계산

10극 12슬롯의 경우 최대 코일 span은 S\* = max(fix(12/10), 1) = 1이 된다. A상과 B상의 거리는 식(2),(3),(4)에 의해 구하면 q가 3일 때 정수를 가지므로 간격 k=8을 가진다. A상의 권선 시작 슬롯을 a이라고 하면 B상의 권선 시작 슬롯은 a+8이 된다. 식 (5)에서 한 슬롯 당 전기각을 구하면 θ<sub>s</sub> = 150°E가 되고 다음을 표 1과 같이 나타낼 수 있다.

〈표 1〉 10극 12슬롯의 한 슬롯 당 전기각

slot	1	2	3	4	5	6
Angle	0	150	300	450	600	750
In	1	2	3	4	5	6
Out	2	3	4	5	6	7
Slot	7	8	9	10	11	12
Angle	900	1050	1200	1350	1500	1650
In	7	8	9	10	11	12
Out	8	9	10	11	12	1

식 (6)에 의해 3번 슬롯부터 전기각  $-180^\circ E \sim 180^\circ E$ 로 변환하면  $\theta_3 = \text{rem}(300+180^\circ, 360^\circ) - 180^\circ = -60^\circ$ 의 값을 가진다. 이와 동일하게 나머지 슬롯에 대해서도 변환하여 나타내면 표 2와 같은 값을 가진다.

〈표 2〉 표 1을  $-180^\circ E \sim 180^\circ E$  로 변환한 전기각

Slot	1	2	3	4	5	6
Angle	0	150	-60	90	-120	30
In	1	2	3	4	5	6
Out	2	3	4	5	6	7
Slot	7	8	9	10	11	12
Angle	-180	-30	120	-90	60	-150
In	7	8	9	10	11	12
Out	8	9	10	11	12	1

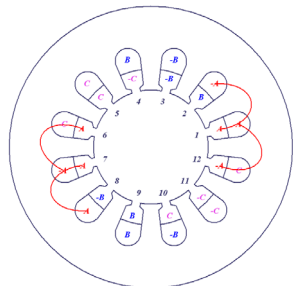
이를 다시 식 (7)에 의해 전기각  $-90^\circ E \sim 90^\circ E$  사이의 값을 가지도록 변환하면  $\theta_2 = \text{rem}(150+90^\circ, 180^\circ) - 90^\circ = -30^\circ$ 의 값을 가지고 전기각  $-90^\circ E \sim 90^\circ E$ 로 변경하였을 경우 극성이 바뀌므로 In, Out의 값을 변경하여 코일의 방향을 바꿔준다. Slot 2, 5, 7, 9, 12번을 변경하면 표 3과 같은 값을 가진다.

〈표 3〉 표 2를  $-90^\circ E \sim 90^\circ E$  로 변환한 전기각

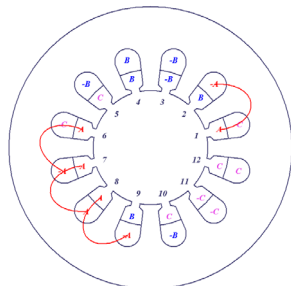
slot	1	2	3	4	5	6
Angle	0	-30	-60	90	60	30
In	1	3	3	4	6	6
Out	2	2	4	5	5	7
Slot	7	8	9	10	11	12
Angle	0	-30	-60	-90	60	30
In	8	8	10	10	11	1
Out	7	9	9	11	12	12

권선을 할 때 위상 당 코일의 개수를 선정하기 위해 식 (8)에 값을 대입하면 3상 모터의 권선 설계이므로  $N_{cph} = 12/3 = 4$ 개를 가진다. 표 3에서 4개 선택하여 권선하면 된다. 전기각이 최소가 되는 1번 슬롯과 7번 슬롯을 선택하고 나머지 두 개는 같은 값을 갖는 코일을 선택한다.

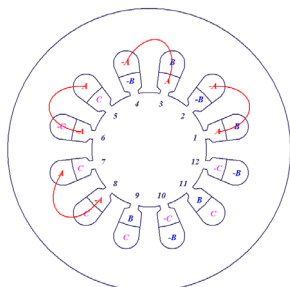
그림 2는 슬롯 1, 6, 7, 12번, 그림 3은 슬롯 1, 6, 7, 8번, 그림 4는 슬롯 1, 3, 5, 7번을 선택해 와인딩 한 것이다.



〈그림 2〉 10극 12슬롯 권선법1



〈그림 3〉 10극 12슬롯 권선법2



〈그림 4〉 10극 12슬롯 권선법3

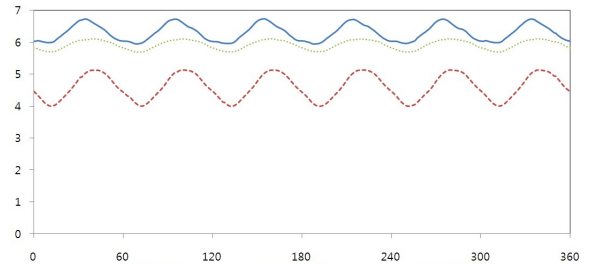
와인딩을 감는 방법은 표 4와 같이 나타낼 수 있다. 위와 같은 표로 나타내보면 전기각  $0^\circ$  두개와 전기각  $30^\circ$  두개를 선택한 것은 전기각  $-30^\circ$  두개를 선택한 것과 같은 권선법임을 알 수 있다.

〈표 4〉 10극 12슬롯의 권선법 1

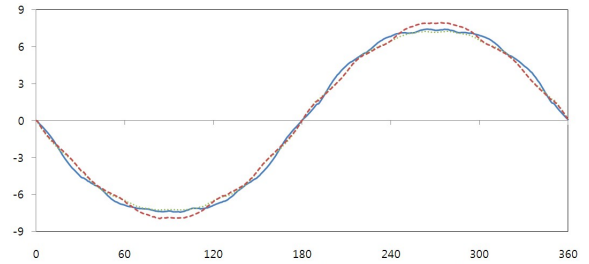
Slot	Phase A	Phase B	Phase C
1	In & In		
2	Out	In	
3		Out & Out	
4		In	Out
5			In & In
6	In		Out
7	Out & Out		
8	In	Out	
9		In & In	
10		Out	In
11			Out & Out
12	Out		In

### 3.3 FEM 해석 결과

그림 5와 6에서 볼 수 있듯이 권선법에 따른 FEM 해석 결과 토크의 크기와 리플의 폭이 변화하고 무부하시의 역기전력 값도 변화가 됨을 볼 수 있다. 10극 12슬롯에서 슬롯 4개를 선택할 때 표 3의 전기각 값을 절대값으로 두고 절대값이 다른 두 슬롯을 선택 시 와인딩이 3층권으로 되는 특성이 있으므로 같은 절대값을 선택하는 것이 중요하다. 절대값의 총 합이 작은 값을 선택하여 와인딩 할수록 그 특성 값이 좋아짐을 알 수 있다.



〈그림 5〉 권선법에 따른 토크파형



〈그림 6〉 권선법에 따른 무부하시 backEMF

## 4. 결 론

본 논문에서는 분수 슬롯 유효한 권선설계 방법에 따른 코깅토크 및 역기전력에 미치는 영향을 고찰하였다. 대상모델로써는 IPM Motor로 하여 10극 12슬롯 모델이다. 다양한 권선방법에 따른 역기전력과 토크의 파형을 FEM 해석을 통해 비교 분석하여, 토크가 최대가 되는 권선방법을 제시하였다.

유한요소법에 의한 해석결과로 볼 때, 분수 슬롯의 일반적으로 코일에 연결된 자속을 극대화 하고 코일의 유도 역기전력을 최대로 하기 위해서는 코일 span은  $180^\circ E$ 에 가까워야 한다. 선택된 슬롯에 전기각의 절대값 크기의 합이 작을수록 좋은 특성을 기대할 수 있다.

### [감사의 글]

"이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.20110013272)."

### [참 고 문 헌]

- [1] Nicola Bianchi, Silverio Bolognani, Michele Dai Prè, and Giorgio Grezzani, "Design Considerations for Frictional-Slot Winding Configurations of Synchronous Machines", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 42, No. 4, pp.997-1006, 2006
- [2] Hanselman Duane C., "Brushless Permanent Magnet Motor Design", pp. 6.1-6.8, 1994
- [3] Hendershot J.R., Jr. and Miller T.J.E "Design of Brushless Permanent-Magnet Motor", pp. 4.1-4.33, 2004