

# 해석 시간 저감을 위한 전기 권선의 FEM 등가 권선법

박의종\* · 김용재\*\*

A Study on FEM Equivalent Winding Method for Reducing Analysis Time

Eui-Jong Park\* · Yong-Jae Kim\*\*

## 요약

2D FEM은 3D FEM에 비하여 모델 및 조건을 간소화하여 해석할 수 있다. 하지만 코일의 조건에 대하여는 실제 코일의 인입과 반출을 순차적으로 구성하여 해석 조건에 입력하는 경우가 많다. 본 논문은 다수의 슬롯을 가지더라도 하나의 FEM Coil로 구성된 등가 권선법을 적용하여 코일 조건의 단순화 및 해석 시간의 단축을 나타내고 권선형 마그네틱 기어에 적용하여 결과의 일치성을 보인다.

## ABSTRACT

Compared to 3D FEM, 2D FEM can be analyzed by simplifying the model and conditions. However, with respect to coil conditions, in many cases, direction of coils(upward, downward, entrance, exit, etc.) are sequentially configured and set up the FEM analysis conditions. This paper shows simplification of coil conditions and reduction of analysis time by applying the equivalent winding method composed of one FEM coil even if it has multiple slots, and shows consistency of results by applying it to a winding type magnetic gear.

## 키워드

Analysis Time, Equivalent Winding, Finite Element Method, Magnetic Gear, Winding  
해석 시간, 등가 권선, 유한 요소법, 마그네틱 기어, 권선법

## 1. 서론

모터와 발전기를 아우르는 전기기기의 역사는 오래 되었음에도 매년 새로운 연구가 수행되고 있으며, 모터와 발전기의 복잡성도 증대되고 있다. 이에 따라 전자장 해석 시뮬레이션인 FEM(: Finite Element Method)의 모델링 또한 복잡해지고 있다. 일부 프로그램에서는 보편적인 설계에 대하여 최적화된 프로그램을 제공하고 있지만 기존의 틀에서 벗어난 모델의

경우 연구자가 하나하나 설정해야 하는 것은 변함없다. 특히 슬롯의 개수가 증가하고 코일의 권선법이 복잡할수록 해석 시간보다 모델의 구성 시간이 오래 소요되기도 한다. 본 연구자는 마그네틱 기어(Magnetic Gear)에 전자석을 접목하는 연구를 수행 중이다. 마그네틱 기어의 특징에 따라 전자석을 구성하는 슬롯과 코일은 수십에서 수백 개에 이르게 된다[1-4]. 또한, 모터와는 달리 조건에 따라 주기성이 존재하지 않는 구조도 있어 모든 슬롯과 코일을 구성하는 것은

\* 조선대학교 스마트이동체융합시스템공학부  
(parkej21@chosun.ac.kr)

\*\* 교신저자 : 조선대학교 전기공학부  
• 접수일 : 2023. 08. 19  
• 수정완료일 : 2023. 09. 15  
• 게재확정일 : 2023. 10. 17

• Received : Aug. 19, 2023, Revised : Sep. 15, 2023, Accepted : Oct. 17, 2023

• Corresponding Author : Yong-Jae Kim  
Dept. Electrical Engineering, Chosun University,  
Email : kimyj21@chosun.ac.kr

불가피하다.

이러한 다수의 슬롯을 가진 전기기기를 시작품으로 제작하는 경우, 코일은 정해진 순서에 따라 순차적으로 구성하는 것이 당연한 절차이다. FEM을 사용하는 다른 연구에서도 시작품의 제작에 맞추어 모델이 구성되는 것을 알 수 있다[5-9]. 하지만 FEM을 이용한 분석에서, 반드시 해당 절차를 따라야 하는 것은 아니며, 오히려 과정을 간소화하여 모델의 구성 시간 및 해석 시간을 단축할 수 있다.

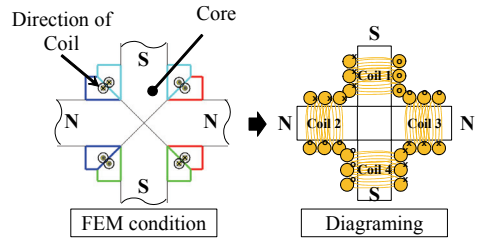
본 논문에서는 2D-FEM을 사용하여 다수의 슬롯 구조를 간소화하는 방법을 소개하고 이 방법이 해석 시간에 미치는 영향을 분석한다. 사용한 모델은 4극 집중 권이고 총 네 가지의 구성 조건을 비교한다. 이후 가장 우수한 간소화 방법을 전자석형 마그네틱 기어에 적용하여 주요 전자계 특성과 해석 시간을 비교한다. 본 분석에 사용된 프로그램은 JSOL의 JMAG-Designer이다.

## II. FEM의 네 가지 권선법과 공극 자속밀도

### 2.1 순차적 권선법

그림 1 ~ 그림 4는 4극 집중권 모델과 FEM상의 권선법을 나타낸다. 각 그림의 좌측은 FEM 프로그램의 설정화면이고 그림의 우측은 표현 방법을 개선하여 다시 도식화한 것으로 좌우는 서로 같은 구조이다. 또한, 그림의 하단은 회로도를 나타낸다. 회로도에서 전류는 Current 기호로 나타내며 각 모델은 동일한 전류를 사용한다. 코일은 FEM-Coil로 나타내며 각 FEM-Coil의 감은 수(턴 수)는 동일하게 설정한다. 또한, 코일의 들어가는 면은 'X', 코일의 나오는 면은 'O'으로 나타낸다.

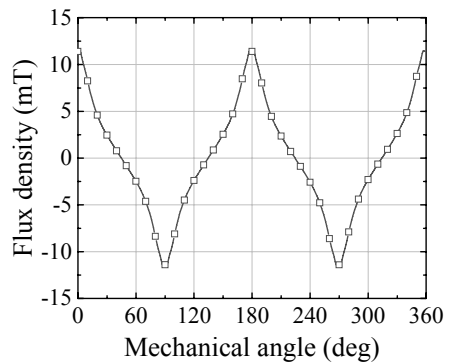
먼저, 그림 1(a)는 시작품 제작방식과 동일한 방법으로 코일을 설정한 경우이다. 각 코어에 코일을 집중 권으로 감아 4극을 만드는 가장 기본적인 형태로, 코일이 들어가는 면(X)과 나오는 면(O)을 설정하여 N극과 S극을 구성한다. 이러한 설정을 각 FEM-Coil에 입력하고 네 개의 FEM-Coil로 구성하는 것이 그림 1의 방법이다. 하지만 이와 같은 방법은 가장 기본적이거나 슬롯 수가 많아질수록 조건의 설정 수, FEM-Coil의 수, 그리고 이에 따른 해석 자원이 증가하게 되어 해석을 위한 준비시간과 해석 시간 모두 상승하게 된다.



Current FEM-Coil\_1 FEM-Coil\_2 FEM-Coil\_3 FEM-Coil\_4

Circuit diagram

(a) 권선법과 회로도  
(a) Winding and circuit



(b) 공극 자속밀도  
(b) Air gap flux density

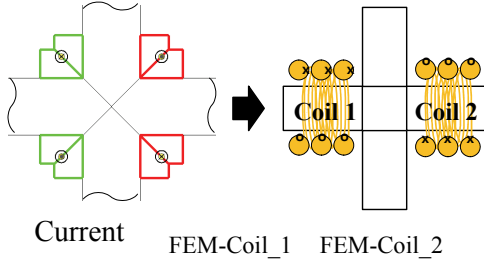
그림 1. 순차적 권선법  
Fig. 1 Parallel winding

### 2.2 Winding #1

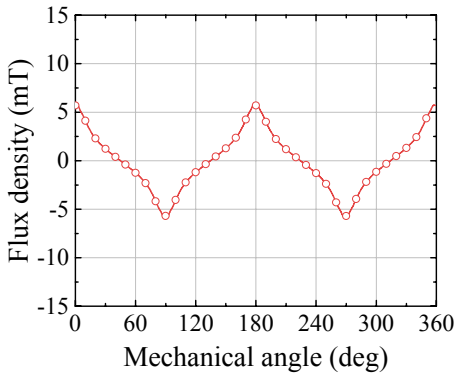
편의상 그림 1(a)의 도식화된 그림을 직각좌표의 사분면에 대응한다. 이때, 1사분면은 코일의 나오는 면만 존재하고, 2사분면은 들어가는 면만, 나머지 3, 4 사분면도 동일한 면만 존재함을 알 수 있다. 이러한 특징을 FEM에 그대로 반영한 방법을 그림 2에 나타낸다. 동일한 면만 있으므로 해당 면을 두 코일로 분리하지 않고 하나의 코일에 배치하면 FEM-Coil을 두 개로 줄일 수 있다. 그 결과 그림 2는 좌우가 N극으로만 구성된 모델로 보이지만 실제 코일이 감긴 형태는 그림 1과 동일하며 그 특징도 같다. 그림 1(b)와 그림 2(b)는 4극 모델의 공극 자속밀도를 나타내며 그 형태가 같음을 알 수 있다. 크기 값이 다른 것은 FEM-Coil 하나당 같은 턴수로 설정했고 두 경우의 총 FEM-Coil의 개수가 다르기 때문이다. 즉, 그림

2(b)의 크기 값은 그림 1(b) 대비 1/2배 차이를 나타낸다.

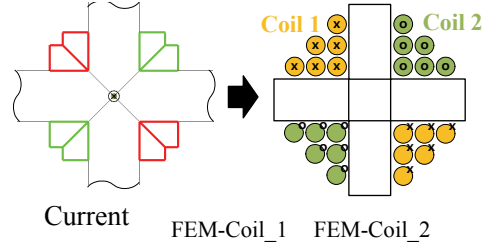
일의 한쪽 면만을 사용했기 때문이며 크기 값은 앞선 경우와 마찬가지로 1/2배 차이를 보인다.



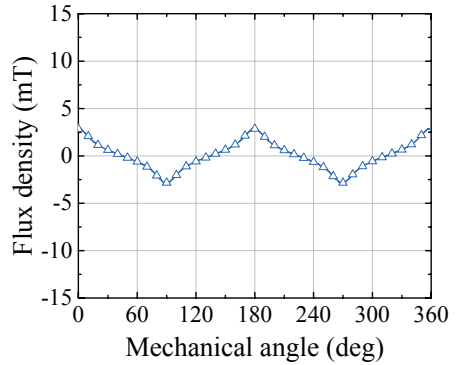
(a) 권선법과 회로도  
(a) Winding and circuit



(b) 공극 자속밀도  
(b) Air gap flux density  
그림 2. 권선법 #1  
Fig. 2 Winding #1



(a) 권선법과 회로도  
(a) Winding and circuit



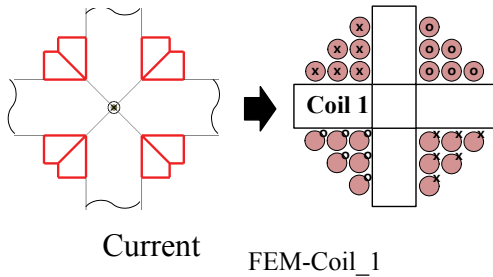
(b) 공극 자속밀도  
(b) Air gap flux density  
그림 3. 권선법 #2  
Fig. 3 Winding #2

### 2.3 Winding #2

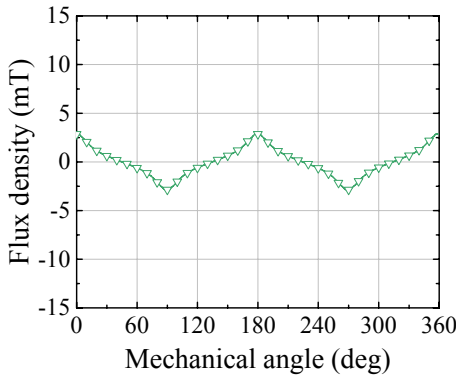
앞선 그림 1, 2는 FEM-Coil 하나에 코일의 들어가는 면과 나오는 면을 함께 설정한 경우이다. 그림 3에서는 FEM의 특징을 이용하여 FEM-Coil 하나에 들어가는 면과 나오는 면을 각각 하나씩만 설정한 경우를 나타낸다. 그림 3(a)에서 같은 FEM-Coil은 같은 색상으로 표시하였다. FEM-Coil\_1에는 코일의 들어가는 면만, FEM-Coil\_2에는 코일의 나오는 면만을 설정하여 총 FEM-Coil의 수는 그림 2(a)에서의 개수와 같다. 이때 공극 자속밀도는 그림 3(b)에 나타내며 코일의 한쪽 면만 설정했음에도 그림 1(b), 그림 2(b)와 형태는 같음을 알 수 있다. 크기가 다른 이유는 코

### 2.4 Winding #3

그림 3의 방법을 통해 하나의 FEM-Coil에 하나의 코일 면만 입력하는 것이 가능함을 확인했다. 따라서 앞선 방법들을 모두 결합하면 FEM-Coil 하나에 모든 코일의 정보를 입력할 수 있게 된다. 슬롯에 감기는 모든 코일 중 들어가는 면을 하나로 묶고, 마찬가지로 나오는 면을 묶어 하나의 코일의 들어가는 면과 나오는 면에 설정한다. 이러한 개념을 도식화하여 그림 4(a)에 나타내고 공극 자속밀도는 그림 4(b)에 나타낸다. FEM-Coil이 하나만 존재함에도 공극 자속밀도의 형태는 같고 그 크기 값은 그림 3의 경우와 같다.



(a) 권선법과 회로도  
(a) Winding and circuit



(b) 공극 자속밀도  
(b) Air gap flux density

그림 4. 권선법 #3  
Fig. 4 Winding #3

### III. 전자석형 마그네틱 기어에 적용

앞에서 분석한 내용을 토대로 해석 시간 저감용 등가 권선법을 애플리케이션인 전자석형 마그네틱 기어에 적용하였다. 적용된 마그네틱 기어는 그림 5와 같이 내측 회전자 4극의 영구자석으로 구성되고 외측 회전자는 16극의 전자석으로 구성되며 폴피스는 10개를 갖는 4:1의 기어이다. 외측 회전자의 16극 전자석을 구성하기 위해 일반적인 권선법을 사용할 경우 총 16개의 FEM-Coil을 설정해야 하며 각각 들어가는 면과 나오는 면을 설정해야 한다. 하지만 앞 절의 등가 권선법을 이용할 경우 단 하나의 FEM-Coil로 설정할 수 있다. 하지만 단순히 FEM-Coil의 수만 변경하는 것이 아닌 코일의 권선수가 영향을 미침을 앞선 분석에서 확인했다. 따라서 일반 권선법에서 코일 하나의

턴 수는  $T_n$ ,  $S$ 는 슬롯 수로 나타내면 등가 회로에서의 권선수  $T_e$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

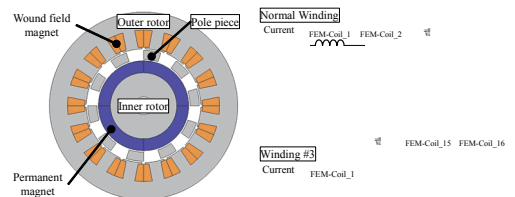
$$T_e = T_n \times S \quad \dots (1)$$

또한, FEM-Coil의 개수가 줄어든 만큼 코일 저항의 변화도 고려해야 한다.  $R_n$ 을 일반 권선법에서 코일 하나의 저항값으로 나타내면 등가 권선법에서의 저항값  $R_e$ 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

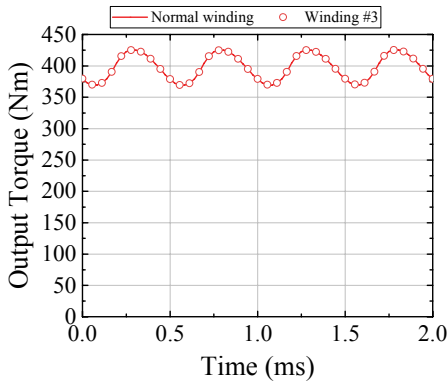
$$R_e = R_n \times S \quad \dots (2)$$

이러한 수식을 전자석형 마그네틱 기어에 적용하여 최종 분석한 결과 그림 5(b)와 같이 동일한 출력 토크를 얻을 수 있었다. 이외에 결과 값은 표 1에 나타난다. 출력 토크의 경우 동일하고 철손까지 같게 나타남을 알 수 있다. 하지만 동손의 경우 코일 개수 변화에 맞추어 보정 하였음에도 불구하고 0.58%의 차이를 나타내었다. 전류값 및 전체 저항값은 동일했으나 이러한 차이는 프로그램 자체적인 보정으로 판단된다.

본 결과에서 가장 유의미한 내용은 해석 시간이며 일반 권선법 대비 등가 권선법이 20%의 해석 시간 감소를 나타내었다. 분석된 모델에 한하여는 40초 정도의 차이만 나타냈으나 대형 기기 및 상세 해석에서는 유의미한 시간 감소를 예상할 수 있다.



(a) 전자석형 마그네틱 기어 및 회로도  
(a) Electromagnet type magnetic gear and circuit



(b) 출력 토크

(b) Output torque

그림 5. 전자석형 마그네틱 기어

Fig. 5 Electromagnet type magnetic gear

표 1. 전자석형 마그네틱 기어의 해석 결과

Table 1. The analysis result

	Normal Winding	'Winding #3	Ratio
Average O. Torque	0.398 Nm	0.398 Nm	-
Resistance of FEM-Coil	0.49 Ohm	7.84 Ohm	16
FEM-Coil Turns	34 turns	544 turns	(=Number of Slots)
Copper Loss	12.18 W	12.25 W	+0.58%
Iron Loss	38 W	38 W	-
Analysis Times	3m 36 s	2m 54 s	-20%

#### IV. 결 론

본 논문은 2D-FEM을 이용하여 일반적인 권선법을 간소화 하는 등가 권선법을 소개하였으며 FEM-Coil의 개수를 단 하나로 감소시켜 모델 구성 시간을 단축함은 물론 해석 시간까지 20% 개선하는 효과를 나타내었다. 등가 권선법을 구성하기 위해 슬롯 수가 코일의 턴 수 및 코일의 저항에 영향을 주는 것을 확인했으며 이를 수식에 반영하여 해석 모델에 적용하도록 했다. 슬롯 수가 적은 모델에서는 본 논문에서 제시한 등가 권선법의 효과가 적지만 슬롯이 많

을수록, 특히 전자석형 마그네틱 기어와 같이 수백 개의 슬롯이 요구된다면 모델링 간소화와 해석 시간 절감 효과를 증대시킬 수 있다.

이러한 방법이 가능한 이유는 코일이 배치되는 영역은 변경하지 않고 단순히 기자력의 관점에서 접근했기에 가능하다. 그림 3과 그림 4 모델의 기자력 (Ampere \* Turn)을 1이라고 했을 때, 그림 2 모델은 2의 값을 갖고 그림 1 모델은 4의 값을 갖게 된다. 또한, FEM 시뮬레이션의 특징을 적용했기 때문에 실제로는 구축할 수 없는 구조이지만 일반적인 권선법과 동일한 출력 특성을 얻을 수 있다.

애플리케이션으로 전자석형 마그네틱 기어를 나타냈으나 브러시를 사용하는 직류기를 제외한 다양한 전기기기 분야에서 널리 사용될 수 있으며 최적 설계 분야에서 분석 수를 무한대로 수행할 때 본 논문에서 제시한 방법이 해석 시간 감소에 유용하게 활용될 수 있다.

#### 감사의 글

이 논문은 2021년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

#### References

- [1] L. Xu, G. Liu, W. Zhao, J. Ji, H. Zhou, and T. Jiang, "Design and Analysis of a New Linear Wound-Field Flux Reversal Machine Based on Magnetic Gear Effect," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 11, 2015, pp. 8205004.
- [2] C. Gim, E. Park, and Y. Kim, "A Study on the Structure of Hybrid Magnetic Gear with Armature Type Rotor," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 13, no. 6, 2018, pp. 1235-1242.
- [3] B. Kim, J. Kim, "An Optimal Design Method of a Linear Generator for Conversion of Wave Energy," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 6, 2021, pp. 1195-1204.
- [4] M. Joo, M. Choi, S. Yang, "Design of Axial Flux

Permanent Magnetic Motor Using Soft Magnetic Composite Core," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 17, no. 4, 2022, pp. 607-616.

- [5] J. Lim, G. Jeong, S.Kim, D. Kim, and C. Park, "Analysis of the Electromagnetic Characteristics according to the Winding Method of 45kW-Class Dual-rotor-structured Synchronous Motor," *Conference of the Korean Society for Railway*, Online, Korea, 2020, pp. 149-151.
- [6] H. Kim, D. Kang, S. Lee, S. Jung, and C. Lee, "Comparative Study of Integer-slot PMSM with Lap Winding and Concentric Winding," *The Transactions of Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 70, no. 2, 2021, pp. 324-328.
- [7] J. Park and J. Byun, "A study on torque characteristics of IPMSM applied to various winding methods," *The Conference of Korean Institute of Electrical Engineers*, Busan, Korea, 2019, pp. 126-128.
- [8] M. Lyeo, S. Lee, and B. Kwon, "Characteristic comparison of Consequent Pole Vernier Machine under winding method," *The Conference of Korean Institute of Electrical Engineers*, Suwon, Korea, 2019, pp. 201-203.
- [9] D. Chang, "Analysis on Performance Characteristic of Wound Rotor Synchronous Generator by Finite Element Analysis," *Journal of the Korean Magnetcs Society*, vol. 29, no. 3, 2019, pp. 79-90.



**김용재(Yong-Jae Kim)**

1996년 조선대학교 전기공학과 졸업(공학사)  
2003년 일본 무사시 공업대학 대학원공학연구과 전기공학 졸업(공학석사)

2006년 일본 무사시 공업대학 대학원공학연구과 전기공학 졸업(공학박사)

2007년~현재 조선대학교 전기공학과 교수  
※ 관심분야 : 전기기기 설계 및 해석

저자 소개



**박의종(Eui-Jong Park)**

2013년 조선대학교 전기공학과 졸업  
2015년 조선대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)  
2020년 조선대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)

2021년~현재 조선대학교 스마트이동체융합시스템 공학부 조교수

※ 관심분야 : 전기기기, 모터 설계 및 해석