

등가자기회로를 이용한 IPM V-type 영구자석형 전동기 파라미터 분석

김도진\*, 김용훈\*, 정재우\*, 홍정표\*  
한양대학교

The analysis of IPM V-type PM machine parameter Using Equivalent Magnetic Circuit

Do-Jin Kim, Yong-Hoon Kim, Jae-Woo Jung, Jung-Pyo Hong  
Hanyang University

**Abstract** - 영구자석형 전동기는 높은 출력밀도를 가지므로 현재까지 많은 연구가 진행되어 왔다. 일반적으로 매입형 영구자석 동기전동기는 영구자석의 사용량이 많을수록 돌극비를 향상시킬 수 있으므로 발생토크 성분 중 킬러턴스 토크의 비중을 키울 수 있다. 이는 토크 발생 시 입력전류를 저감시켜 동손이 감소하고 효율을 증가시키는 효과를 기대할 수 있다. 본 논문에서는 매입형 영구자석 동기전동기의 등가자기회로법을 이용한 설계에 대해 다루고자 한다. 등가자기회로법은 계산시간이 빠르고 전동기 구성요소들의 영향을 신속하게 살펴 볼 수 있으므로 초기설계에 많이 사용된다. 본 논문에서는 등가자기회로법을 이용하여 공극자속밀도를 산정하고 후 슬롯을 고려한 relative permeance, 그리고 무부하 역기전력을 산정하고 최종적으로 유한요소법을 이용하여 검증한다.

1. 서 론

매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor : 이하 IPMSM)의 경우 고효율, 고회전력 그리고 넓은 속도의 운전 영역과 같은 많은 장점들 때문에 그 사용 비중이 점점 높아지고 있다. 특히 약계자 제어를 함으로써 정출력을 가지는 최대속도 영역을 더욱 넓힐 수 있다. 그러므로 IPMSM의 적용 분야는 소형 초고속 모터에서부터 자동차 구동모터와 같은 파워 시스템까지 그 영역이 매우 넓어지고 있는 추세이다. 본 논문에서는 이러한 IPMSM의 초기설계 시 유한요소해석이 아닌 등가자기회로법을 이용하여 산정하는 방법에 대한 내용을 다루었다.

최근 전동기의 성능을 향상시키기 위해서 IPMSM의 경우 영구자석의 형태를 I-type 형태에서 V-type 형태를 많이 사용하고 있다. 이는 영구자석 사용량을 증가시켜 상당 직렬 턴 수가 동일한 조건에서 역기전압을 향상시킬 수 있다. 그러므로 토크 발생 시 요구되는 전류를 감소시켜 동손을 저감하고 고효율 전동기의 설계를 가능케 한다. 본 논문에서는 이러한 V-type 형태의 IPMSM에 대한 해석을 등가자기회로법을 이용하여 공극자속밀도, relative permeance, 무부하 역기전력의 산정에 대하여 다루고자 한다. 등가자기회로법의 경우 초기설계 단계에서 설계 인자의 변화에 따른 모터의 특성변화 양상을 빠르게 살펴 볼 수 있으므로 많은 초기설계에 적합하다. 등가자기회로법으로부터 산성된 공극자속밀도, relative permeance, 무부하 역기전력은 유한요소해석 결과와 비교하여 신뢰성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 등가자기회로법

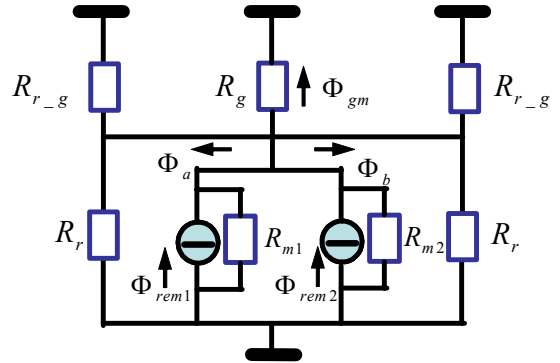
등가자기회로법 해석에 앞서 IPMSM의 전동기 형상을 그림 1과 같이 등가화 시킨다. 등가자기회로법을 해석하기 위해서 다음과 같은 가정을 둔다.

- 1) 단부 효과는 무시한다.
- 2) 회전자 rib 영역을 제외한 고정자와 회전자의 비투자율은 무한대이다.
- 3) 권선은 대칭성을 가진며, 와전류는 무시한다.

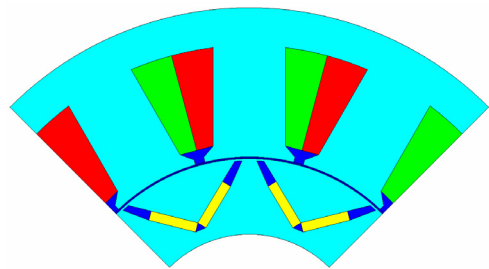
여기서,  $R_m$ ,  $R_r$ ,  $R_g$ ,  $R_{r-g}$ 은 각각 영구자석, rib, 공극, rib의 상단 부분의 자기저항을 나타낸다. 이때  $\Phi_{rem}$ 은 영구자석의 자속을 나타낸다.

2.1.1 해석 모델의 형상

본 논문에서 등가자기회로법을 이용하여 해석할 대상 전동기의 형상은 그림 2와 같다. 8극 12슬롯 구조의 집중권 전동기이며 V-type 형태로 적용된 영구자석의 잔류자속밀도는 1.2T 이다.



<그림 1> IPMSM의 등가자기회로



<그림 2> 해석모델의 형상

2.1.2 수식적 접근

앞서 언급한 IPMSM의 등가자기회로를 이용하여 공극자속량을 산정하기 위한 수식은 다음과 같다.

$$\Phi_{gm} = 2\Phi_{rem} \times \frac{R_l}{R_g + R_l} \tag{1}$$

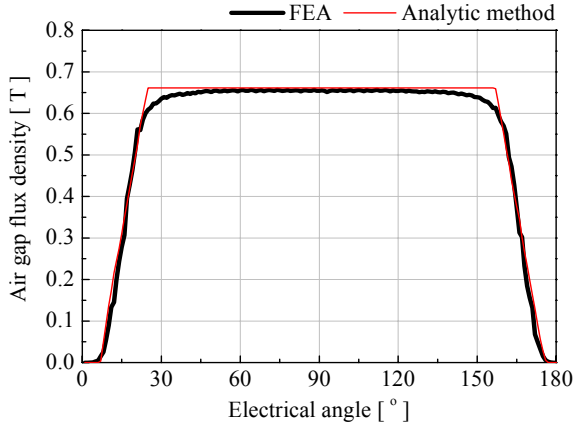
여기서,  $\Phi_{rem}$ 은 공극의 자속이고,  $R_g$ 는 공극의 자기저항이며,  $R_l$ 은 공극을 제외한 나머지 자기저항을 구한 것이다.

$$R_l = \frac{R_m}{2} // \frac{R_a}{2} \tag{2}$$

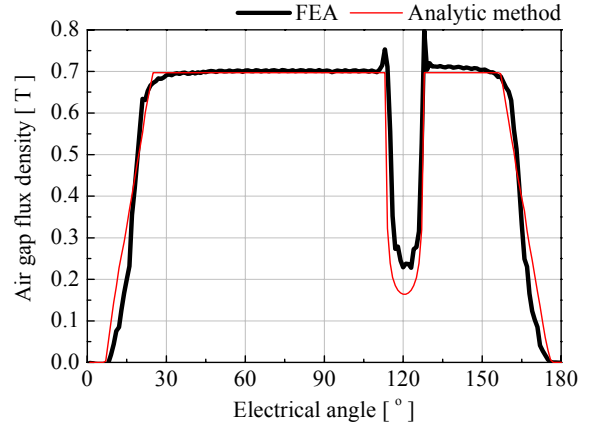
$$R_a = R_r // R_{r-g} \tag{3}$$

$$B_{gm} = \Phi_{gm} \times \frac{1}{\frac{\pi D}{2p} \left( \frac{2\alpha_m \times 2p}{360} \right) L_{stk}} \tag{4}$$

여기서,  $R_a$ 는 rib영역의 철심과 공극에서의 자기저항을 병렬로 연결한 저항 값이며,  $p$ 는 극쌍수이고,  $D$ 는 회전자 직경,  $L_{stk}$ 는 적층길이,  $\alpha_m$ 은 극호율을 의미한다.



〈그림 3〉 평활철심 고려 시 공극자속밀도



〈그림 4〉 슬롯을 고려한 공극자속밀도

## 2.2 전동기 파라미터

전동기의 특성을 정확히 파악하기 위해서는 공극자속밀도의 산정이 중요하다. 전동기에서 공극자속밀도를 산정하기 위해서 슬롯의 형태를 고려하기 힘들기 때문에 평활철심을 가정한 후 공극자속밀도를 산정한다. 그 후 슬롯을 고려하기 위한 relative permeance를 산정하여 앞서 계산된 공극자속밀도에 적용함으로써 슬롯을 고려한 공극자속밀도의 산정이 가능하다. IPMSM 전동기의 경우 relative permeance는 SPMSM과 대조적으로 회전자 표면에서의 철심의 경로가 존재하기 때문에 SPMSM에 비해서 값이 커지게 된다.

### 2.2.1 공극자속밀도

IPMSM의 전동기의 공극자속밀도를 산정하기 위해서 고정자 슬롯을 무시한 평활철심으로 설정하여 공극자속밀도를 산정한다. 이때 회전자 rib 부분의 투자율을 산정하기 위해서 rib 영역만 비선형해석을 수행하게 하여 그 결과를 등가자기회로법에 적용한다. 그림 3은 해석모델이 평활철심일 경우 공극자속밀도를 나타낸다.

### 2.2.2 슬롯을 고려한 공극자속밀도

Relative permeance는 conformal mapping을 통해서 산정한다. 이때, 앞서 산정한 평활철심일 경우의 공극자속밀도에 relative permeance를 적용하여 슬롯을 고려한 공극자속밀도를 산정할 수 있다. 수식 5는 relative permeance를 산정한 수식을 나타내고 그림 4는 해석모델의 relative permeance와 슬롯을 고려한 공극자속밀도를 나타낸 그래프이다.

$$a = \sqrt{1 + \left(\frac{2g_0}{\beta}\right)^2} \quad (5)$$

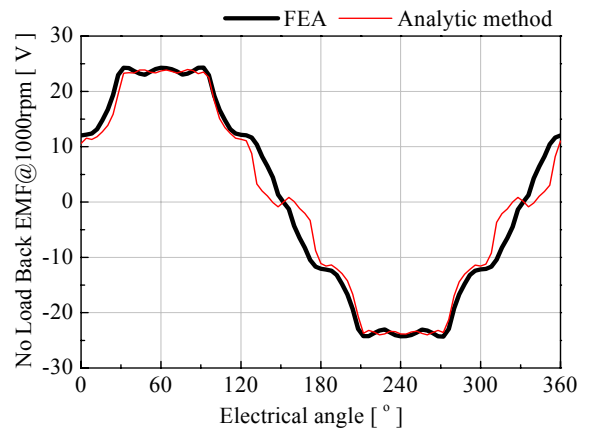
$$\lambda_{slot\_open} = \left(\frac{2\mu_0}{\beta\sqrt{a^2 - w^2}}\right) / (\mu_0/g_0) \quad (6)$$

여기서,  $g_0$ 는 공극길이,  $\beta$ 는 슬롯 오픈 길이,  $w$ 는 고정자 철심에 따른 길이이다.

### 2.2.3 무부하 역기전력

전동기의 극수, 슬롯수가 정해짐에 따라서 권선의 배치는 무부하 역기전력을 최대 가질 수 있는 권선배치로 이루어져야 한다. 따라서 극수, 슬롯 수, 코일 피치가 결정되면 권선배치가 이루어지며, 산정된 공극자속밀도와 권선배치를 이용하여 권선의 쇄교자속양을 산정할 수 있다. 산정된 쇄교자속을 이용하여 속도에 따른 무부하 역기전력을 산정할 수 있다. 그림 5는 등가자기회로법을 통해 계산된 무부하 역기전력과 유한요소해석 결과를 나타낸다. 본 논문에서 제시한 방법을 이용하여 IPMSM의 공극자속밀도, relative permeance, 무부하 역기전력을 계산한 결과는 유한요소해석을 통해 산정된 결과와 비교하여 오차는 발생한다. 하지만 초기 설계 시 설계 인자의 변화에 따른 전동기의 특성분석에 효과적으로 활용이 가능 할 것으로 판단된다.

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (7)$$



〈그림 5〉 무부하 역기전력

## 3. 결 론

본 논문에서 제시하는 등가자기회로법은 유한요소해석과 비교할 경우 오차를 5% 이내로써 결과에 신뢰성을 가진다. 이를 이용하여 IPMSM의 초기 설계 시 설계 인자의 변화에 따른 전동기의 특성을 빠른 시간 내에 분석이 가능할 것으로 판단된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 방량, 김도진, 홍정표, “매입형 영구자석 전동기에서 무부하시 공극자속밀도 분포에 대한 Slot-Opening Effect를 고려한 보조 모델”, 대한전기학회논문지, vol.60, no4, pp.759-765, 2011
- [2] Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, “Analysis of Cogging Torque in Interior Permanent Magnet Motor by Analytical Method”, 대한전기학회 영문논문지, vol.11B, pp.1-8, 2001
- [3] 임기채, 홍정표, 김규탁, “공간고조파법을 이용한 영구자석 선형 동기전동기의 슬롯을 고려한 정특성 해석”, 대한전기학회논문지, vol.48, pp.145-151, 1999
- [4] Zhu, Z.Q., Howe, D., Chan, C.C., “Improved analytical model for predicting the magnetic field distribution in brushless permanent-magnet machines”, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, no. 1, pp. 229-238, Jan 2002.
- [5] Ishak, D., Zhu, Z.Q., Howe, D., “Permanent-magnet brushless machines with unequal tooth width and similar slot and pole numbers”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 2, pp. 584-590, 2005.
- [6] Zhu, Z.Q., Howe, D., “Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet DC motors. III. effect of stator slotting”, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 29, no. 1, pp. 143-151, 1993.

“본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 10033324)”