

영구자석 삽입형 Claw Pole Machine 의 회전자 최적 설계

임호경, 이상호, 김성일, 홍정표
한양대학교 자동차공학과

Optimum Design in the Rotor of Claw Pole Machine with Permanent Magnet Attached

Ho-Kyoung Lim, Sang-Ho Lee, Sung-Il Kim, Jung-Pyo Hong
Department of Automotive Engineering, Hanyang University

Abstract - When permanent magnet is embedded in the rotor of claw pole machine, the magnetic saturation of rotor core is largely reduced. As a result of the reduction of magnetic saturation, reluctance is reduced. Thus, larger Back-EMF is obtained due to the increase of flux linkage. In this paper, C-core which is the simplified motor is used to define the phenomena. The merit to attach permanent magnet in the rotor of claw pole machine is confirmed through 3D-FEA. Finally, permanent magnet size is optimized to obtain the maximum Back-EMF increase.

1. 서 론

최근 환경문제 및 화석연료 고갈 등의 이유로 자동차의 증가는 여러 가지 심각한 문제를 야기하고 있다. 이로 인해 자동차 시장에서의 많은 비율을 차지하고 있는 내연기관 자동차의 효율 개선이 필요하다. 이런 대안으로 하이브리드 자동차 및 전기 자동차의 개발이 국내뿐만 아니라 국외에서도 많이 이루어지고 있다. 본 논문에서 다루고자 하는 Intergrated Starter and Generator (ISG)는 하이브리드 자동차의 필수 부품 중 한가지로 전동기와 발전기 통합 모델이다 [1].

ISG는 계자의 여자 방식에 따라서 크게 영구 자석형과 권선형으로 구분된다. 영구자석형은 영구자석이 적층된 요크에 부착 또는 매입된 형태이고 권선형은 주물로 제작된 claw pole machine 내부에 계자 코일이 감겨 있는 형태이다. Claw pole machine는 주물로 제작되므로 제작이 용이할 뿐 아니라, 재료비와 제작비용 또한 저렴하여 대량 생산에 용이하다. 또한 회전자가 적층된 영구 자석형 ISG에 비해 구조가 강건하다는 장점이 있다. 하지만 claw pole machine는 회전자의 구조 특성상 적층이 불가능하기 때문에 철손에 의한 손실이 크다. 본 논문에서는 claw pole machine의 회전자 안에 영구자석을 부착함으로써 성능을 향상시키는 방법을 제안하고자 한다.

2. 본 론

2.1 회전자에 부착된 영구자석의 기능

회전자에 영구자석이 부착된 claw pole machine의 해석에 앞서 영구자석이 모터의 성능에 어떠한 영향을 미치는지 알아보도록 한다.

2.1.1 비교 모델

Claw pole machine을 C-core형상으로 대응시키면 Fig. 1과 같다. Claw pole machine의 회전자에 해당하는 부분은 A, C로 나타내었고 고정자에 해당하는 부분은 B로 나타내었다. B 부분의 면적이 다른 경우와 영구자석에 유무에 따른 경우의 자속밀도 분포와 쇄교 자속량을 비교해 보았다.

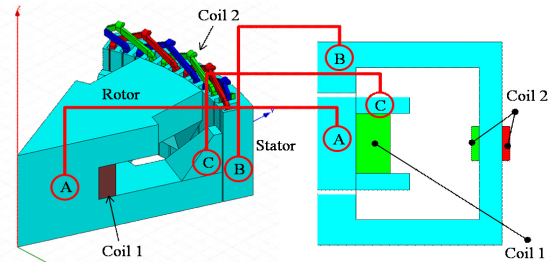
2.1.2 영구자석의 기능

Fig. 2은 각각 Coil 2에 의한 flux path와 영구자석에 의한 flux path를 보여준다. 영구자석이 삽입된 경우에는 flux path가 반대이므로 A부분에서의 자속이 서로 상쇄되어 자기저항이 줄어들게 되고 이로 인한 효과로 B부분으로 쇄교하는 자속이 증가하게 된다.

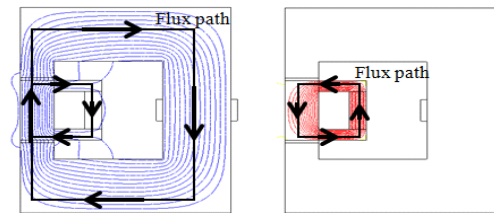
2.1.3 비교 모델의 해석

B부분이 작은 경우에 코일 1에서의 MMF 변화에 따른 코일 2에서의 쇄교자속량 및 C-core 내부 자속밀도를 Fig. 3(a)에 나타내었다. 영구자석을 삽입함으로써 A부분의 자기포화를 감소시켰지만 고정자에 해당하는 부분의 단면적이 작아 자속밀도가 1.9T에 이르러 자기포화가 심하게 발생하여 코일2에 쇄교하는 자속량이 증가하지 않았다.

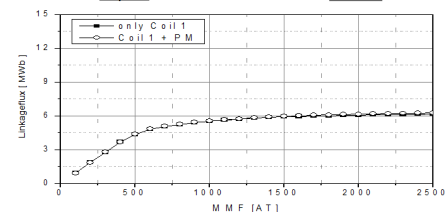
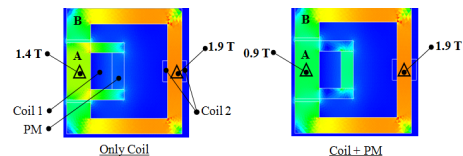
반면에 Fig. 3(b)에서 보듯이 B부분이 큰 경우에 영구자석 삽입에 의한 효과로 회전자의 A영역에서의 자기포화 감소시켰을 뿐만 아니라



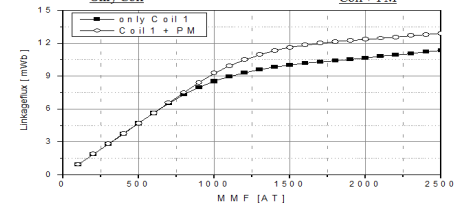
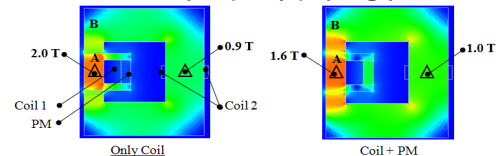
<그림 1> Claw pole machine 과 C-core 의 대응



(a) Coil 1에 의한 자속 경로 (b) PM에 의한 자속 경로
<그림 2> 자속 경로

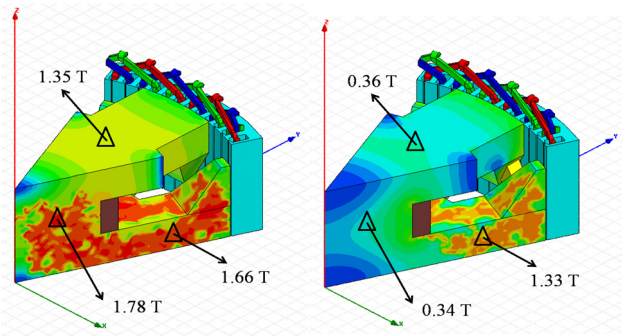


(a) B부분의 면적이 작은 경우

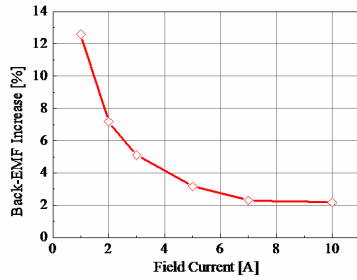


(b) B부분의 면적이 큰 경우

<그림 3> MMF 변화에 따른 쇄교자속



(a) 영구자석이 없는 경우 (b) 영구자석이 있는 경우
〈그림 4〉 회전자 자속밀도 분포



〈그림 5〉 계자 전류 변화에 따른 Back-EMF 증가율

고정자의 단면적이 충분히 넓기 때문에 B부분에 자속밀도가 1.0T에 이르러 자기포화가 이루어지지 않아 코일 2에 채교하는 자속량이 증가하는 것을 볼 수 있다.

2.1.4 비교 모델의 결론

C-core 형상에서 고정자 부분에 해당하는 단면적에 따른 두 결과들을 비교해보면 B부분에서의 자기포화가 이루어지지 않는 한에서 영구자석이 제 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

앞서 확인한 결과대로 실제 claw pole machine의 회전자에 영구자석을 삽입함으로써 회전자 철심의 자기포화를 감소시켜 고정자 코일에 채교하는 자속량의 증가량을 확인해 보았다.

2.2 Claw pole machine 의 해석

2.2.1 영구자석의 유무에 따른 비교

Fig. 4 에서는 동일 계자전류에서 영구자석의 유무에 따른 회전자에서의 자속밀도를 나타내었다. C-core 에서 검토한 것과 마찬가지로 회전자에서의 자속밀도가 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 하지만 고정자가 자기포화 상태에 이르게 된다면 고정자 코일에 채교하는 자속량에는 영향을 끼치지 않는다. 그러므로 계자 전류의 세기 변화에 따른 Back-EMF 증가 비율을 확인해 보았다.

2.2.2 계자 전류 세기에 따른 비교

계자 전류의 세기를 증가시키면서 영구자석을 삽입하였을 경우와 영구자석이 없는 상태의 경우의 Back-EMF 을 비교해본다. 계자 전류의 세기는 1, 2, 3, 5, 7, 10A 의 경우에서 3차원 유한요소해석을 하였다. 계자 전류의 세기의 변화에 따라 영구자석이 있을 때와 없을 때의 Back-EMF의 증가 비율 [%] 은 식 (1)과 같다.

$$\text{Back-EMF increase}[\%] = \frac{\text{Back-EMF with PM} - \text{Back-EMF without PM}}{\text{Back-EMF without PM}} \times 100 \quad (1)$$

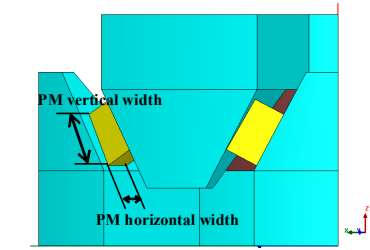
계자 전류의 크기에 따른 결과는 Fig. 5 에 나타내었다. 계자 전류가 증가할수록 영구자석 삽입하였을 때 증가하는 Back-EMF 비율이 줄어들게 된다. 이는 고정자에서의 자기포화로 인한 결과이다.

2.3 영구자석 크기의 최적화

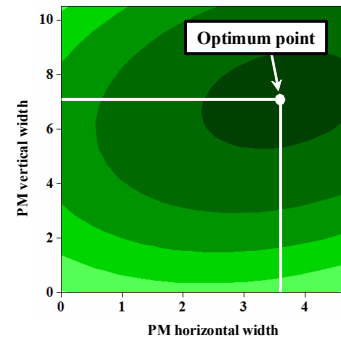
경제성을 고려하여 영구자석의 최소 크기에서 효과적으로 Back-EMF 를 증가시킬 수 있는 최적점을 반응표면법을 이용하여 찾았다.

2.3.1 설계 변수 및 목적 함수

영구자석 크기의 최적화 설계 변수는 Fig. 6 에 제시한 바와 같이 PM vertical width 와 PM horizontal width로 하였다. 목적함수는



〈그림 6〉 최적화에 이용한 설계 변수



〈그림 7〉 반응 표면법에 따른 Optimum Point

〈표 1〉 최적점에서의 Back-EMF 증가량

PM horizontal width	PM vertical width	Back-EMF increase per area [$\times 10^{-3}$]
3.6 cm	7.0 cm	8.82 V/cm ²

Back-EMF의 면적당 증가비율이며 식 (2)와 같다.

$$\text{Back-EMF increase per Area}[\%] = \frac{\text{Back-EMF with PM} - \text{Back-EMF without PM}}{\text{PM Area}} \times 100 \quad (2)$$

2.4.2 설계 변수의 범위

영구자석의 단면이 두 변수 PM vertical width, PM horizontal width 에 의해 변한다는 것을 고려하면 영구자석의 최대 PM vertical width 는 10.5cm 이고 최대 PM horizontal width는 4.6cm가 된다.

2.4.3 반응표면법을 이용한 최적화

다양한 실험계획법 중 본 논문에서는 적은 횟수의 실험으로 설계변수와 출력 사이의 비선형성을 고려할 수 있는 중심합성계획을 사용하였다 [2]. 계자전류의 크기가 5A인 경우에 대하여 반응표면법을 실행하였다. 영구자석의 크기에 따른 Back-EMF의 면적당 증가비율은 Fig. 7 에 나타내었고 최적설계의 결과는 표 1 과 같다.

3. 결 론

본 논문에서는 claw pole machine 의 회전자에 영구자석을 삽입하여 영구자석이 없는 기존의 claw pole machine보다 동일한 계자 전류 조건에서 Back-EMF 를 크게 확보 할 수 있는 방법을 제안하였다. 더불어 Back-EMF의 면적당 증가율이 최대가 되는 영구자석 크기를 최적화 하였다.

본 논문에서 제시한 claw pole machine에 영구자석을 삽입하는 방법은 제작비용이 적게 들어 대량생산에 용이하며 제작방식까지도 용이한 장점에 더불어 기동 토크 및 출력 향상을 얻을 수 있어 자동차 산업의 전반으로 기술적 파급 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] XiaoJiang Chen, Thornton. R, Edington. M, Lewis. R, Fang. Y, Peng. Q, 2007, "Accurate Torque Control of IPM machines for ISG Hybrid Vehicle Application", Society of Automotive Engineers,
- [2] 정재우, 권순오, 이상호, 홍정표, "등가 자기회로법을 이용한 Claw-pole type generator의 특성해석", 대한 전기학회 춘계학술대회 논문집, 2005, 04