

특수차량용 Spoke Type IPMSG의 출력과 효율을 향상시키는 형상 최적설계

전호근, 김성안, 변상인, 조운현
동아대학교

Optimal Structure Design for Improvement of Output Power and Efficiency in a Spoke-Type IPMSG for a Special Vehicle

Hyo-Keun Jeon, Sung-An Kim, Sang-In Byun, Yun-Hyun Cho
Department of Electrical Engineering, Dong-A University

Abstract - This paper presents the structure design for optimizing output power density and efficiency to develop a spoke-type interior permanent magnet synchronous generator (IPMSG). To obtain the optimal structure, the combination of response surface method (RSM) and 2-D finite element analysis can solve the problem effectively for reducing the volume of permanent magnets (PMs) and maximizing the ratio between power density and efficiency. The effectiveness of this proposed structure design is verified by the simulation and experiment according to the comparison of the electromagnetic characteristics between the initial and modified structures.

1. 서 론

최근 특수 차량용 시스템에 대한 필요성이 증가하고 있다. 대부분의 시스템은 높은 전력밀도 및 높은 효율을 달성하기 위해 발전기에 희토류 자석을 사용하였다. 그러나 희토류자원 네오디뮴 PM의 가격인상으로 공급부족에 시달리고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 수많은 연구가 진행되고 있다. 특히 Spoke Type의 IPMSG는 자속의 집중형으로 높은 출력 밀도를 지니고 있다. 이 특성은 발전기에 요구된 PM의 부피를 줄일 수 있다. 그러나 이러한 현상은 BEMF, 높은 코강토크 및 토크리플의 왜곡을 증가 시킬수 있는 공극 자속밀도 분포를 지니게 된다. 따라서 본 논문에서는 Spoke Type IPMSG의 영구자석 부피를 줄이고 출력 및 효율을 향상시키는 최적의 구조 설계를 제안한다.

이러한 IPMSG는 자석배치에 있어 구조적 및 치수적으로 유동성이 크기 때문에 매우 다양한 구조가 제안되고 있다. 기존 SPMSM을 IPMSG로 치수를 변환시키고 표면의 자석을 내부로 매입하는 방향으로 연구개발이 주로 이루어져 왔다. IPMSG는 돌극비가 크기 때문에 비교적 넓은 정출력 운전 범위를 가져, 고속경부하시라도 효율저하를 줄일 수 있다. 따라서 돌극성에 의해 발생하는 릴럭턴스 토크가 지배적이며 영구자석에 의한 토크는 보조적으로 이용된다.

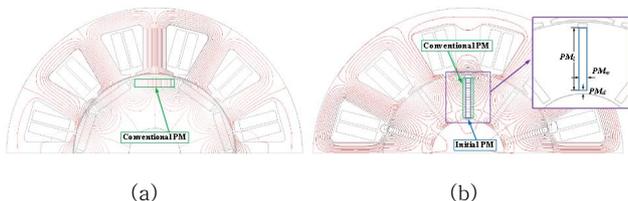
우선 기존의 IPMSG를 분석하고 이를 토대로 Spoke Type의 IPMSG를 모델링하여 유한요소해석을 진행하였다. 영구자석과 로터에 설계변수를 두어 RSM(반응표면법)을 이용하여 코강토크를 최소화하였다. 수치계산과 실험결과를 이용하여 특수차량용 Spoke Type IPMSG의 적용가능성을 예측하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델 및 사양

초기 Spoke Type IPMSG는 그림1과 같이 네오디뮴 PM을 사용하였다. (a)는 일반적인 IPMSG를 나타내고 있으며 (b)는 초기 제시한 Spoke Type IPMSG를 나타내고 있다.

그림(a)에 비하여 (b)는 두 개의 자속이 집중되어 높은 공극자속밀도를 가지므로 인하여 좋은 성능을 가지게 된다. 반면에 높은 자속밀도와 릴럭턴스 차이에 의하여 토크리플, 코강토크가 증가하게 되어 진동 및 소음이 커지게 된다.



〈그림 1〉 Flux line in the condition of full load.
(a) Conventional IPMSG. (b) Initial spoke-type IPMSG

이러한 결과로 인하여 영구자석의 부피를 줄여도 같은 성능을 낼 수 있으며 초기 일반적인 IPMSG와 이를 개선하여 Spoke Type으로 변경한 목표 사양을 표1에 나타내었다.

〈표 1〉 Specifications of Conventional and Modified IPMSG

Item	unit	Values
Rated power	[W]	3500
Rated Speed	[rpm]	2600
Pole / solts	-	10/12
Conventional (Developed) PM volume	[mm ²]	76
Cogging torque	[mNm]	400
Efficiency	[%]	94.26
Rated power	[W]	3500
Rated Speed	[rpm]	2600
Pole / solts	-	10/12
Modified (Goal) PM volume	[mm ²]	<48
Cogging torque	[mNm]	<400
Efficiency	[%]	>95

표1에서 볼 수 있듯 일반적인 IPMSG에서의 영구자석의 부피를 줄이면서 효율과 코강토크는 비슷하게 가져갈 수 있게 설계 목적을 두었다.

2.2 영구자석 최적화

그림1의 (b)와 같이 PM_l, PM_w, PM_d 를 최적화 factor로 설정하였다. 초기 값은 19mm, 2.5mm 1mm로 두었다. 기본적인 설계 요구에 따라 세 가지 factor의 범위는 표2에 나타낸 값으로 주어진다. 영구자석의 부피를 최소화 하기 위해 Window-zoom-in method를 사용하여 설계 변수의 범위를 줄였다. 줄인 설계 변수 범위 내에서 최적점을 찾기 위하여 유한요소해석과 RSM을 이용한 결과를 표3에 나타내었다.

초기 모델과 비교하여 영구자석 최적화모델의 부피는 38% 감소한 것을 알 수 있다.

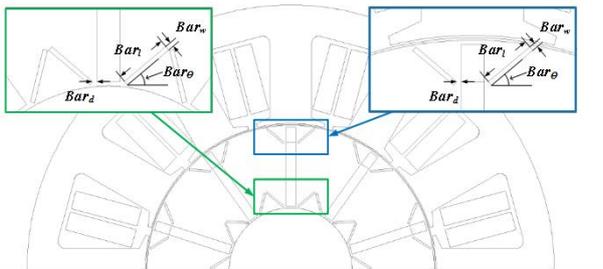
〈표 2〉 Ranges of Three Optimal Factors and Values for Minimizing PM

Factors	Ranges of factors (mm)		Optimal values (mm)
	first calculation	second calculation	
PM_l	17-19	17.5-18.5	17.5
PM_w	2.5-2.7	2.55-2.65	2.57
PM_d	0.5-1.0	0.5	0.5

<표 3> Analysis Results of RSM and FEA

Item	Unit	RSM	FEA
Output Power	[w]	3549.28	3547
Efficiency	[%]	96.16	96.16
Cogging Torque	[Nm]	330	329.31

2.2.1 회전자 최적화



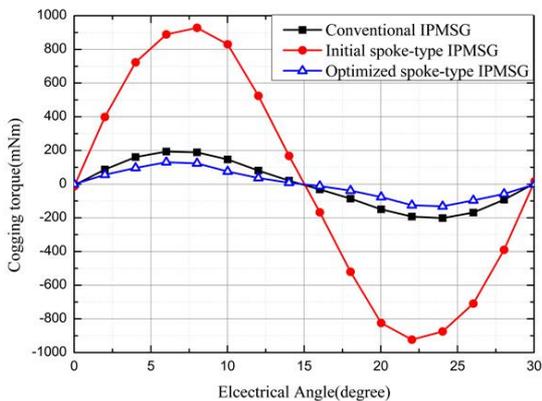
<그림 2> Modified rotor structure and optimal factors

<표 4> Ranges of Four Optimal Factors and Values for Reducing Cogging Torque

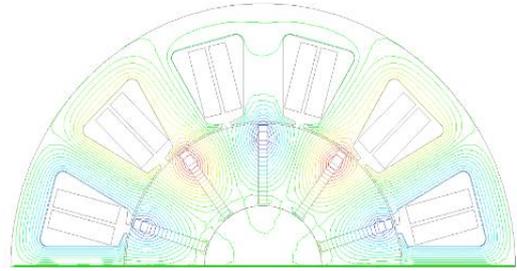
Factors	Ranges of factors (mm)		Optimal values (mm)
	first calculation	second calculation	
Bar_1	4.5-6	4.95-5.95	5.6
Bar_w	0.2-1	0.35-0.95	0.55
$Bar_α$	0.3-0.65	0.35-0.58	0.5
$Bar_θ$	25-45	28-44	40

영구자석의 최적화는 기존의 IPMSG보다 영구자석의 부피는 줄었지만 큰 코깅토크를 가지기 때문에 코깅토크를 감소시키고 영구자석의 자속집중을 최대화시키기 위해 로터의 구조변경을 통한 최적화를 제안하였다. 로터의 구조를 최적화 하기 위해 내부에 배리어를 삽입하였다. 이 배리어의 길이와 각도등을 설계변수 요인으로 선택하였다. 초기 값은 각각 6mm, 0.5mm, 0.5mm, 40° 로 설정하였다. 4가지 요소의 범위는 표4에 나타난 값으로 주어진다. 이러한 4가지 factor를 이용해 반응표면법을 이용하였을 때, 조합에 따라 형태가 달라지며 25가지의 조합을 유한요소해석을 이용해 결과를 도출해 내었다. 결과로 설계 변수의 최적화를 하였을 때 각각 5.6mm 0.55mm 0.5mm 40° 가 최적임을 확인할 수 있다. 이를 이용해 Cogging Torque를 그림3에 비교하였다. 기존의 IPMSG에서 초기 Spoke Type으로 변경하였을 때에 비해 로터와 영구자석의 최적화했을 때 기존 IPMSG의 코깅토크보다 더욱 작은 것을 확인할 수 있다. 로터의 최적화를 한 결과는 표5에 나타냈으며 RSM결과와 유한요소해석 결과가 거의 동일함을 확인할 수 있으며 유한요소 해석결과는 초기 목표했던 출력, 효율, 코깅토크를 만족 시키고 있다.

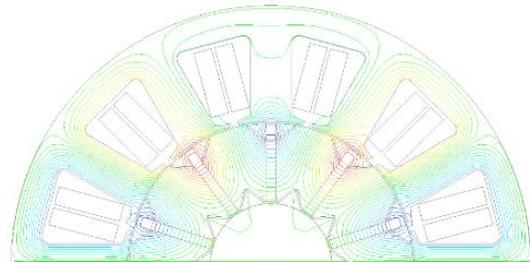
그림4는 부하시 초기 Spoke Model과 최적화 된 Spoke Model의 자속선도를 비교하고 있다.



<그림 3> Comparison of the cogging torque



(a)



(b)

<그림 4> Flux line in the condition of full load. (a) Initial spoke type IPMSG. (b) Optimized spoke-type IPMSG.

<표 5> Analysis Results of RSM and FEA

Item	Unit	RSM	FEA
Output Power	[w]	3569.486	3563.716
Efficiency	[%]	96.402	96.398
Cogging Torque	[mNm]	268.94	263.277

3. 결 론

본 논문은 특수차량용의 Spoke Type IPMSG에서 출력 및 효율 코깅토크 개선을 위한 구조 최적화 설계에 대해서 제안하였다. 영구자석의 부피를 줄여 가격적인 면에서 유리한 점을 얻고 코깅토크를 줄이기 위하여 배리어의 길이 및 각도에 변수를 두어 최적화 한 뒤 이에 따른 출력 및 코깅토크 분석을 유한요소해석과 반응표면법을 이용하여 결과를 도출 하였다. 이 제안된 모델은 초기 모델보다 영구자석의 부피를 38% 줄일 수 있으며 출력은 일반적인 IPMSG와 동일하게 가져가며 Spoke Type의 가장 큰 문제점인 코깅토크를 줄일 수 있다.

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(No.20134030200320)입니다.
이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임 (No. 2014R1A2A2A01003368)

[참 고 문 헌]

[1] H. W. Kim, K. T. Kim, and Y. S. Jo, "Optimization Methods of Torque Density for Developing the Neodymium Free SPOKE-Type BLDC Motor," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 49, no. 5, pp. 2173-2176, May. 2013.
[2] K. Y. Hwang, J. H. Jo, and B. I. Kwon, "A Study on Optimal Pole Design of Spoke-Type IPMSM with Concentrated Winding for Reducing the Torque Ripple by Experiment Design Method," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 10, pp. 4712-4715, Oct. 2009.