150kW급 IPMSM의 영구자석 사용량 저감과 유기전압 만족를 위한 회전자 형상 최적설계

정태철*, 김원호*, 장익상*, 김미정*, 이기덕*, 이재준*, 이 주†
한양대학교*

Optimal Rotor Shape Design of 150kW-class IPMSM for Reduce Usage of Permanent Magnet and Satisfy Induced Voltage

Tae Chul Jeong*, Won Ho Kim*, Ik Sang Jang*, Mi Jung Kim*, Ki Deok Lee*, Jae June Lee*,
And Ju Lee†
Hanyang University*

Abstract - This study was designed to satisfy induced voltage limits considering drive's specifications and optimize design reducing usage of permanent magnet, by increasing salient poles ratio, when designing 150kW IPMSM. In order to achieve these objectives, design plans were determined, based on Ld and Lq parameters of a basic design model, according to changes in salient poles ratio and flux linkage using IPMSM's voltage equation and torque equation and then, required torque and induced voltage were analyzed using Sensitivity Analysis. Based on analysis data, the optimum design was performed and basic model's characteristics were compared to final model's through Gradient-Based Optimization Technique.

1. 서 론

최근 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)는 미래의 대체 이동수단으로 사용될 전기자동차의 구동 동력원으로써 많은 연구가 진행되고 있고, 전 세계 자동차 업체들도 시판을 하는 등 큰 변화의 흐름에 있다. 이러한 흐름에서 150kW급 IPMSM은 단일 전기자동차 구동용으로는 큰 용량에 속하며, 성공적으로 설계를 하기 위해서는 전기적인 특성 외에도, 제어기 사양, 기계적 강성구조, 냉각구조 등 설계시 여러 가지 고려해야 할 사항이 존재한다.[1]

3.5t트럭에 단일 구동용으로 탑재되는 순시정격 150kW급 매입형 영구자석 동기전동기의 기초설계를 수행하기 위하여 부하산정, 사이즈 제약조건, 냉각조건, 제어기사양, 등을 고려하여 다음 <표 1>과 같은 요구조건 및 사양으로 결정하였다.

<표 1> 요구조건 및 기초모델 설계사이즈

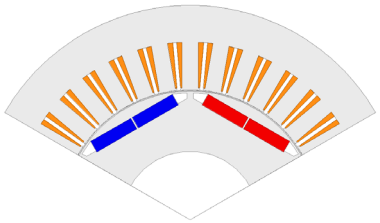
요구조건		사이즈 및 재질정보	
출 력	순시1분 150kW 연속정격 75kW	고정자외경	350mm
		회전자외경	210mm
속 도	정격 3500rpm 최대 10000rpm	적층길이	140mm
		코어재질	35PN230 (0.35T)
토 크	3500rpm 409Nm 10000rpm 143Nm	전류밀도	최대 15A/mm2 이하 (수냉식)
선간전압제한	537V (peak)	극수 슬롯수	6극 36슬롯
순시전류	270A (rms)	영구자석 Br	1.07T (150도기준)
동작온도	150도		

150kW급 IPMSM의 기초모델 형상은 <그림 1>과 같다. 기초모델 설계 결과 요구토크는 <표 2>에서와 같이 만족시켰으나 3500rpm 및 10000rpm에서 전압강하 성분을 고려한 선간유기전압 제한치가 <표 1>에서의 요구조건인 380Vrms를 만족시키는 설계가 되지 못하였다. IPMSM은 마그넷 토크 성분 이외에 돌극차를 이용한 릴럭턴스 토크도 이용하므로 IPMSM의 전압방정식 및 토크방정식으로부터 돌극비를 증가시키고 영구자석 사용량을 감소시켰을 때 최대토크 전류위상각의 증가로 인한 유기전압의 감소 및 요구토크 만족구간이 있을 것이라 예상하였다.

2. 기초모델 파라미터 분석

상세 파라메트릭 설계를 하는데 앞서 순시토크 및 선간전압제한을 만족시키는 설계를 하기 위해 앞장에서 예상한 요구토크 및 선간유기전압 제한치의 만족구간에 대해 살펴보기 위해서 기초설계모델의 Ld, Lq파라미터를 추출하고 IPMSM의 토크방정식과 전압방정식을 사용하여 분석하였다.

IPMSM의 전압방정식 및 토크방정식은 식 (1), 식 (2)와 같다.[2]



<그림 1> 기초모델 형상

<표 2> 전류위상각에 따른 Ld,Lq

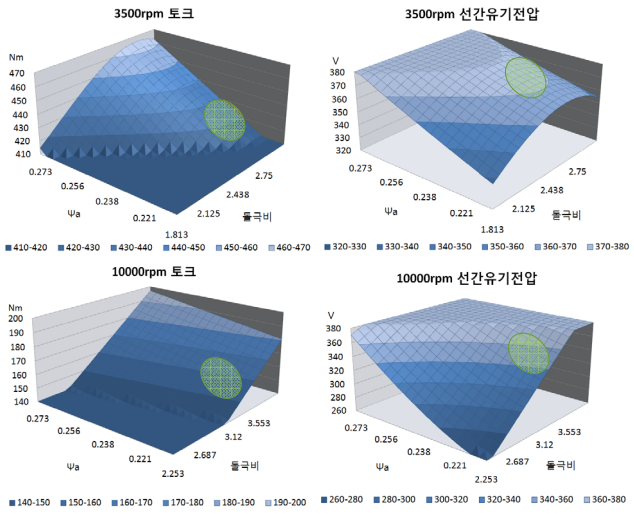
속 도	토크	전류	전류 위상각	Ld	Lq	돌극비	Ψ_o	Ψ_a	선간 유기전압
3500rpm	412Nm	270Arms	26deg	0.324mH	0.656mH	2.02	0.337	0.259	**380.3Vrms**
10000rpm	145Nm	270Arms	80deg	0.392mH	1.117mH	2.85	0.12	0.259	**384Vrms**

$$V_a = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \quad (1)$$
$$= \sqrt{(R_a i_d - \omega L_q i_q)^2 + (R_a i_q + \omega L_d i_d + \omega \Psi_a)^2}$$
$$T = P_n \{\Psi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q\} \quad (2)$$

전류위상각에 따른 Ld, Lq 및 쇄교자속은 <표 2>와 같다.

분석방법은 3500rpm, 전류270Arms, 에서의 돌극비 2에서 돌극비를 1.8에서 3까지 변화시키고, 10000rpm, 전류270Arms에서의 돌극비 2.85에서 돌극비를 2.6에서 3.9까지 변화시키며, 영구자석에 의한 무부하 쇄교자속 Ψ_a를 기초설계모델 값에서 +10% 에서 -20% 까지 변화시켜 선간유기전압 및 토크 특성을 파악하였다.

분석결과 <그림 2>와 같이 돌극비를 증가시키고 무부하 쇄교자속량을 감소시킬수록 선간유기전압이 낮아지며 요구토크는 만족하는 영역이 존재하는 것을 확인하였다. 따라서 회전자 형상변환을 통해 돌극비를 증가시키며 영구자석의 사용량을 줄이는 설계가 필요하다고 판단하였다.



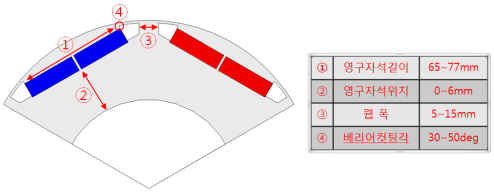
<그림 2> 돌극비 쇄교자속에 따른 토크 및 선간유기전압특성

3. 회전자 형상 최적설계

3.1 민감도 분석 (Sensitivity Analysis)

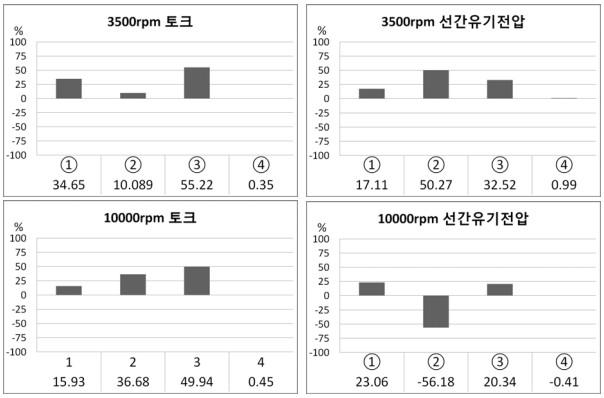
민감도 분석(Sensitivity Analysis)은 각 변수의 순간 변화율 즉 기울기에 해당되는 값을 구하는 것이다. 설계 민감도의 크기는 결국 다수개의 입력변수들 중에서 출력변수에 미치는 영향도를 크기로 나타낸 것이다. 따라서, 회전자 형상변수에 따른 토크 및 선간유기전압에 대한 설계 민감도를 유한차분법을 이용하여 계산하였다.[3]

회전자 형상변수는 <그림 3>에서 보는 것과 같이 영구자석 길이와 위치, 베리어의 넓이와 각도로 결정하였고 각 형상변수의 범위는 앞장에서 살펴본 돌극비 및 쇄교자속량에 따른 형상 변수 범위로 정하였다.



<그림 3> 회전자 형상변수

민감도 분석 결과 <그림 4>와 같이 3500rpm에서 토크 민감도는 영구자석길이와 웹폭에 가장 영향이 큰 것으로 나타났으며 이는 마그넷 토크 및 릴럭턴스 토크와 밀접한 관련이 있다고 판단된다. 하지만 최대속도 10000rpm에서는 d축 감자전류로 인하여 영구자석길이의 영향이 작아졌다고 판단되고, 영구자석의 위치에 의한 영향이 크게 나타났다. 선간유기전압의 민감도는 영구자석에 위치 및 웹폭에 따라 변화량이 큰 것으로 나타났다. 전체적으로 영구자석의 길이보다는 회전자의 형상에 따라 토크 및 유기전압이 크게 변동됨을 알 수 있다.



<그림 4> 민감도 분석결과

3.2 Gradient-Baced Optimization

Gradient-Baced Optimization기법은 첫 번째 과정으로 목적함수 및 구속 조건들에 대한 민감도 분석 데이터를 바탕으로 방향 탐색 과정을 거치고 두 번째 과정으로 지정된 범위 내에서 최대한 높게 이동하는 거리를 찾는 선 탐색 과정을 하는 것으로써 이러한 과정들이 최적조건을 만족할 때까지 반복하여 최적 설계점을 구할 수 있는 방법이다.[3]

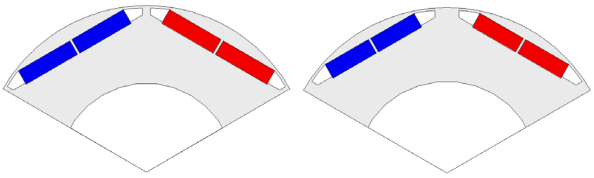
3500rpm에서의 요구토크 409Nm 및 최대속도 10000rpm에서의 요구토크 143Nm를 만족하며 선간유기전압 제한치 380Vrms를 만족하는 최적설계를 하기 앞서 초기 조건으로 민감도 분석한 결과를 바탕으로 영구자석길이가 작고, 웹폭이 크고, 영구자석의 위치가 작은 값을 초기조건으로 설정하고 최적설계를 수행하였다.

<표 3> 최적설계결과

	영구자석 길이	영구자석 위치	웹폭	베리어 컷팅각	3500rpm 토크	10000rpm 토크	3500rpm 선간유기 전압	3500rpm 선간유기 전압
기존모델	77mm	0mm	5mm	-	412Nm	138.9Nm	380.3Vrms	384Vrms
최적설계 모델	65.11mm	0.24mm	15mm	30.95 deg	417.5Nm (예상)	149.9Nm (예상)	374.8Vrms (예상)	369.9Vrms (예상)

3.3 최적설계 결과

최적설계 수행결과 <표 3>과 같은 최적 회전자 사이즈 및 토크, 선간유기전압을 도출하였다. 최적설계한 사이즈 정보를 바탕으로 제작공차를 고려하여 소숫점 이하 사이즈를 제거하고 전자장 FEM을 수행하여 기초설계모델과 최적설계모델과의 특성을 비교 하였다.



기초설계모델 최적설계모델

<그림 5> 기초설계모델 최적설계모델

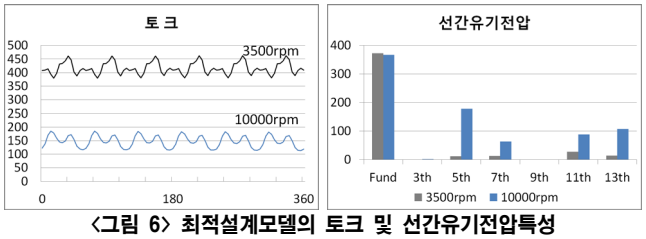
4. 기초모델과 최적설계모델 특성비교

최적설계모델 및 기초설계모델의 회전자 형상은 <그림 5>와 같다. 기초설계모델과 최적설계모델과의 특성을 비교하기 위하여 요구조건 및 Ld, Lq특성 이외에도 영구자석 사용량 및 릴럭턴스 토크비율을 추가하여 살펴 보았다.

첫번째로 Gradient-Baced Optimization기법을 이용한 회전자 형상 결과와 실제 전자장FEM 해석을 비교한 결과 토크는 약 0.87%, 선간유기전압은 약0.76%의 오차로 제안한 최적설계 기법이 신뢰성이 높다고 판단된다. 두번째로 <표 4>의 돌극비 및 무부하 쇄교자속Ψ_a를 보면 기초모델의 파라미터 분석을 하였던 <그림 2>의 영역 내에 위치한 설계가 된 것을 확인하였다. 세번째로 <표 4>및 <그림 6>과 같이 돌극비가 커짐으로써 마그넷토크 대비 릴럭턴스 토크의 비율을 증가시켜 요구토크 만족 및 영구자석 사용량을 15.9% 줄인 설계결과를 얻을 수 있었다. 마지막으로 <표 4>와 <그림 6>과 같이 돌극비 증가로 인한 최대토크 전류위상각의 증가 및 영구자석 사용량의 감소로 선간유기전압 제한치를 만족시키는 최적설계 결과를 얻었다.

<표 4> 기초모델과 최석설계 특성비교

	속 도	평 균 토 크	릴럭턴스 토크비율	선간유기 전압	Ld	Lq	Ψ_a	돌극 비	영구자석 사용량
기존 모델	3500rpm	412Nm	20.8%	380.3Vrms	0.324mH	0.656mH	0.259	2.02	100%
	10000rpm	138.9Nm	56.3%	384Vrms	0.392mH	1.117mH	0.12	2.85	
최적 설계 모델	3500rpm	415.9Nm	40.8%	372.6Vrms	0.311mH	0.837mH	0.229	2.68	84.1%
	10000rpm	147.9Nm	62.4%	366.5Vrms	0.370mH	1.194mH	0.229	3.23	



<그림 6> 최적설계모델의 토크 및 선간유기전압특성

5. 결 론

IPMSM의 기초설계모델에서 Ld, Lq파라미터를 산출하여 돌극비 및 쇄교자속량에 따른 요구토크 및 유기전압제한치의 최적설계 포인트를 예상하였고 요구토크 및 유기전압을 만족시키는 회전자 형상 최적설계를 수행하였다. 이와 같은 방법은 IPMSM 전동기의 돌극비 증가 설계 및 제작시 가격적 부담으로 인한 영구자석량의 최소설계에 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 향후 실제제작을 위해 회전자의 기계적 강성해석 및 토크리플저감, 유기전압, 고조파저감 등 최적설계를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로
한국산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구
과제입니다.(No. 10033217)

[참 고 문 헌]

[1] 김원호, “NE-Map을 통한 전기 자동차용 매입형 영구자석 동기전동기 설계기법에 관한 연구”, 학위논문(박사), 한양대학교 대학원, 서울, 2011.

[2] 한양대학교에너지변환연구실, “매입자석 동기모터의 설계 및 제어”, 서울 : 인터비전, 2007.

[3] Arkadan, A.A, Subramaniam-Sivanesan, S, Demerdash, N.A.O, “Shape optimization of PM devices using constrained gradient based inverse problem methodology”, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 32, pp. 1222-1224, 1996.