

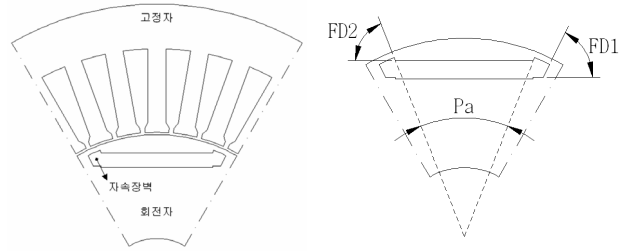
ISG용 매입형 영구자석 동기 전동기 무부하 선간 역기전력 고조파 저감설계

이진규, 정재우, 김성일, 홍정표
한양대학교 기계공학부

The Harmonic Reduction Design of IPMSM No-load line-line Back-EMF for ISG

Jin-Gyu Lee, Jae-Woo Jung, Sung-Il Kim, Jung-Pyo Hong
School of Mechanical Engineering, Hanyang University

Abstract - This paper presents a method for reducing the Total Harmonic Distortion(THD) of line-line back-EMF of the IPMSM with distributed winding under the no-load condition. Firstly, the specific harmonic components of line-line back EMF are reduced considering with winding factor. Secondly, THD of line-line back EMF is minimized according to change of pole angle using by Space harmonic Analysis. Finally, the optimal design for minimizing the THD is conducted using response surface methodology with finite element analysis. The validity of the design method dealt with in this paper is demonstrated by comparison between the THD of optimal model and initial model.



<그림 1> 해석모델(좌) 및 설계인자(우)

1. 서 론

최근 세계적으로 석유 소비가 급격히 증가하면서 기존 내연기관의 에너지원인 석유 가격이 급상승하였다. 또한 자동차의 배기가스로 대기오염 및 지구 온난화 문제가 심각하게 대두되고 있다. 이에 대한 대책으로 대체에너지 개발, 고효율 기기 설계에 많은 노력을 기울이고 있다. 특히 자동차 분야에서는 Hybrid electric vehicle(HEV), Fuel cell electric vehicle(FCEV), Electric vehicle(EV)의 개발에 활발한 연구가 진행되고 있다.[1]

에너지 저장장치의 저장 용량 한계로 기존의 내연기관과 EV의 중간 과정인 HEV에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 HEV 시스템의 운전에서 가장 큰 에너지를 필요로 하는 구동모터와 에어컨 컴프레서 구동용 모터의 효율 향상은 HEV에서 연비를 향상 시킬 수 있는 중요한 요소이다.

본 논문의 검토 모델인 Integrated Starter/Generator(ISG)용 모터는 starter와 generator로 동작할 뿐만 아니라, idle stop 시 에어컨 컴프레서 구동용으로 모터로써 운전된다. ISG용 모터가 에어컨 컴프레서 구동용으로 작동할 때 고속으로 운전이 되므로 철손에 의한 손실을 고려하여 설계해야 한다. 그러므로 철손저감을 위하여 무부하 역기전력의 total harmonic distortion(THD)을 저감 시켜야 한다.

본 논문에서는 대상 모델인 6극 36슬롯 분포권 모델의 pole angle과 slot pitch에 따른 무부하 선간 역기전력의 THD가 최소가 되는 초기 모델을 선정하고, 선정된 모델의 무부하 선간 역기전력의 THD를 최소화 하는 설계변수들을 최적설계기법중 하나인 response surface methodology(RSM)를 사용하여 최적화 한다. 최적설계된 모델의 선간 역기전력 THD는 초기모델의 것과 비교하여 설계 방법에 대한 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 목적함수와 제약조건

본 논문에서 목적함수와 제약조건은 다음과 같다. 제한된 전류내에서 출력력을 확보하기 위하여 역기전력은 초기모델과 동등수준 또는 이상이 되도록 결정하였다.

목적함수 : THD < 1.0 [%]

제약조건 : 무부하시 선간 역기전력의 기본파성분 ≥ 42 [Vrms]

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n F_{ph}^2}}{F_{p1}} \times 100 \quad (1)$$

여기서 F_{ph} 는 역기전력의 h 차수 고조파성분이다.

2.2 해석모델

해석대상 모델은 그림 1과 같이 6극 36슬롯 매입형 영구자석 동기기이다. 무부하 선간 역기전력의 THD를 저감시키기 위하여 slot pitch와 pole angle에 따른 THD를 산정하여 권선 방식 및 초기 형상을 정한다. 그림 2는 치 슬롯 구조에 의한 슬롯 고조파를 무시하고 전기자 권선의 slot pitch 변화에 따른 고조파별 권선계수를 나타낸 것이며 이는 식 (2)를 이용하여 산정하였다.

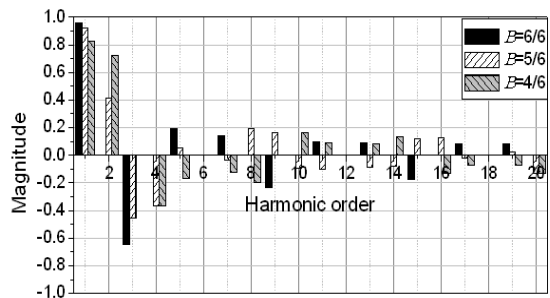
$$k_w = k_d \times k_p$$

$$k_d = \frac{\sin(\nu\pi/2m)}{\sin(\nu\pi/2mq)}, \quad k_p = \sin \frac{\nu\beta\pi}{2} \quad (2)$$

여기서 k_w 는 Winding factor, k_d 는 Distributed factor, k_p 는 Short pitch factor, ν 는 Harmonic order, q 는 Slot number/Phase number/Pole number, m 은 Phase number, β 는 Coil pitch/Pole pitch 이다.

Y결선의 선간 역기전력에서는 3, 9, 15...와 같은 3^n 고조파성분은 회로내부에서 상쇄되므로 외부 단자에 나타나지 않으므로 5, 7고조파 성분이 고조파의 주요성분으로 남게 된다. 우선 Slot pitch가 6, 5, 4인 경우에 대하여 권선계수의 5, 7고조파를 비교했다. slot pitch가 5일 때 권선계수의 고조파 성분이 가장 작으므로 슬롯 피치를 5로 결정하였다.

공간고조파법을 이용하여 slot pitch가 5일 때 pole angle에 따름 무부하 선간 역기전력의 THD를 산정한 결과는 그림 3과 같다. Pole angle이 44.1°에서 무부하 선간 역기전력의 THD가 최소화 된다. 따라서 초기모델의 권선방법은 slot pitch가 5인 단절편이며 pole angle은 44.1°인 모델로 결정하였다.



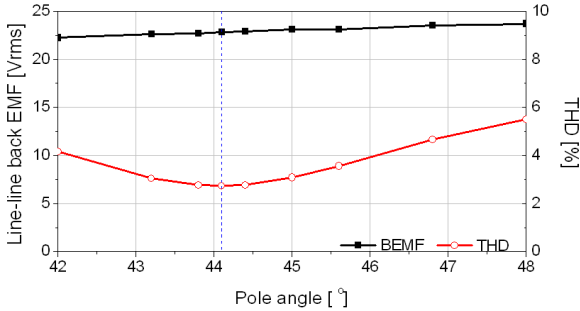
<그림 2> slot pitch에 따른 권선계수의 고조파성분 분포

〈표 1〉 slot pitch에 따른 권선계수

Harmonic order	6/6	5/6	4/6	6/6 : 5/6 : 4/6
1	0.966	0.933	0.828	1 : 0.97 : 0.86
5	0.197	0.051	-0.170	1 : 0.26 : 0.86
7	0.145	-0.032	-0.126	1 : 0.22 : 0.87
11	0.102	-0.098	0.088	1 : 0.96 : 0.86

〔참 고 문 헌〕

[1] 정재우, 권순오, 홍정표, “극 수와 슬롯 수 조합에 따른 HEV용 IPMSM의 특성 비교 및 분석,” 대한전기학회 하계학술대회 논문집, B, 1017-1018, 2007.
 [2] 김영균, 김성일, 홍정표, “집중권 매입형 영구자석 전동기의 역기전압 THD 저감설계,” 대한전기학회 하계학술대회 논문집, B, 1270-1272, 2006.
 [3] 반지형, 권순오, 하승형, 홍정표, “매입형 영구자석 동기전동기의 극 수 슬롯 수 조합에 따른 특성에 관한 연구,” 대한전기학회 하계학술대회 논문집, B, 771-772, 2006.
 [4] Shigeo Morimoto, Yoji Takeda, “Machine Parameters and Performance of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with Different Permanent Magnet,” Electrical Engineering in Japan, Vol. 131, No 4, 2000.
 [5] S. I. KIM, J. Y. Lee, Y. K. Kim, and J. P. Hong, “Optimization for reduction of torque ripple in interior Permanent Magnet motor by using Taught method,” *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 41, 1796-1799, May 2005.
 [6] Douglas C, Montgomery, Design and analysis of experiments, John Wiley & sons, 2001.



〈그림 3〉 Pole angle에 따른 무부하 선간 역기전력의 THD

2.3 RSM을 이용한 최적설계

2.3.1 설계변수

결정된 초기모델의 형상에서 RSM을 위한 회전자 설계변수는 무부하 선간 역기전력 파형을 정현적으로 만들기 위해 회전자 자속 장벽의 형상에 영향을 주는 FD1과 FD2로 결정하였으며 그림 1에 나타난 바와 같다. 이때 FD1과 FD2는 최적설계 과정에서 가공성을 고려하기 위해 식 (3)에서 나타난 범위 안에서 제한하였으며 고정자의 형상은 일정하다.

$$\begin{aligned} 47^\circ \leq FD1 \leq 97^\circ \\ 0^\circ \leq FD2 \leq 117^\circ \end{aligned} \quad (3)$$

2.3.2 최적모델

설계변수의 수가 적고, 변수의 범위가 RSM을 수행하기에 충분하므로 목적함수에 대한 설계변수의 영향도를 평가하는 완전요인설계는 생략하고 최적화를 수행하였다. RSM수행 결과로부터 근사등가다항식을 구성한 결과 식 (4), (5)와 같으며 이를 이용하여 반응표면을 구성44한 결과 그림 4와 같다.

$$Y_{EMF} = 42.22 - 0.71FD1 + 0.38FD2 - 0.24FD1FD1 - 0.08FD2FD2 + 0.05FD1FD2 \quad (4)$$

$$Y_{THD} = 3.22 + 0.17FD1 - 0.47FD2 - 0.43FD1FD1 - 0.10FD2FD2 + 0.09FD1FD2 \quad (5)$$

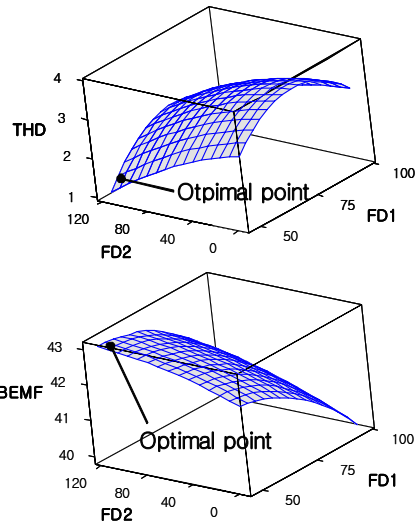
결과에서 보듯이 FD1값이 작을수록, FD2값은 클수록 선간 역기전력이 증가하고 THD는 감소하는 경향을 보인다. 최적모델의 FD1과 FD2 값은 각각 50°, 115°이고, 이때 무부하 선간 역기전압은 43.0Vrms, THD는 1.08%로 예측 되었다. 최적모델을 유한요소법을 이용하여 무부하 선간 역기전력과 THD는 그림 5과 같이 산정되었다.

초기모델과 최적모델의 무부하 선간 역기전압과 THD를 각각 비교하였을 때 무부하 선간 역기전력은 42.5Vrms에서 43.1Vrms로 THD는 3.1%에서 0.8%로 향상되었다.

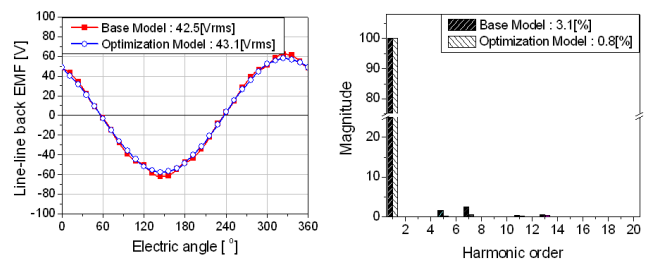
3. 결 론

본 논문은 고속 회전형 분포권 매입형 영구자석 동기기기의 무부하 선간 역기전력의 THD를 최소화 하기위해 slot pitch와 pole angle 선정과 회전자의 자속장벽 형상을 최적화 기법을 이용하여 최적값을 결정하였다. 매입형 영구자석 동기기기의 무부하 선간 역기전력 파형을 정현적으로 만드는 방법에는 여러 가지가 있지만, 본 논문에서는 무부하 선간 역기전력의 THD를 최소화하는 분포권 초기모델 선정방법과 초기모델을 이용한 최소한의 변수로 무부하 선간 역기전력의 THD를 최소화 할 수 있는 방법을 제시하였다.

이상의 결과와 더불어 HEV시스템에서 운전하기위해 극 수와 슬롯 수 조합에 따른 진동 및 소음을 저감할 수 있는 설계가 함께 이루어질 경우 매입형 영구자석 동기기기 설계에 도움이 될 것으로 사료된다.



〈그림 4〉 선간 역기전력(상)과 THD(하)에 대한 Response Surface



〈그림 5〉 최적화전, 후 역기전압(좌) 및 THD(우)

〈표 2〉 초기모델과 최적모델 설계변수 값 비교

	초기모델	최적모델
FD1 [°]	60.0	50.0
FD2 [°]	68.0	115.0

〈표 3〉 초기모델과 최적모델 선간 무부하역기전력 및 THD

	초기모델	최적모델	초기모델 : 최적모델
선간 무부하 역기전력 [Vrms]	42.5	43.1	1 : 1.01
THD [%]	3.1	0.8	1 : 0.26