

반응표면법을 이용한 ISG용 WFSM의 계자 유기 전압 및 토크 리플 저감 최적 설계

박진철, 홍년한, 황성우, 채승희, 홍정표
한양대학교

Optimum Design for Reducing Field Induced Voltage and Torque ripple of WFSM for ISG using Response Surface Methodology

Jin-Cheol Park, Nyeon-Han Hong, Sung-Woo Hwang, Seung-Hee Chai, Jung-Pyo Hong
Hanyang University

Abstract - Integrated Starter-Generator(ISG)는 스타터(Starter)와 발전기(Generator)를 하나의 장치로 통합한 형태의 자동차 부품 시스템이다. ISG는 높은 토크로 엔진을 돌려주어 차량의 원활한 Idle Stop & Go 가능하게 하고 차량 제동 시에는 발전기 역할을 하여 배터리를 충전한다. 본 논문에서는 ISG용 WFSM (Wound Field Synchronous Motor)의 초기모델에 반응표면법을 적용하여 계자 유기 전압 및 토크 리플 저감을 목표로 최적화 설계를 진행하였다.

1. 서 론

회도류는 전동기의 성능 향상을 위해 필수적인 재료이나 공급이 불안정하고 가격 변동을 예측하기 어려우며 환경파괴가 심한 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하고자 최근 회도류를 사용하지 않는 전동기 개발 연구가 진행 되고 있고 그 중 WFSM(Wound Field Synchronous Motor)이 대표적이다.

WFSM은 계자자속을 직접 제어할 수 있기 때문에 저속영역에서는 계자자속을 증가시켜 높은 토크를 얻을 수 있고, 고속영역에서는 계자자속 자체를 줄여 제어의 용이성 뿐만 아니라 전기자 축의 동손을 저감할 수 있는 장점을 가지고 있다.

따라서 저속에서 고속 영역까지 운전해야 하는 ISG(Integrated Starter -Generator) 전동기로는 자동차용 WFSM이 적합하다. 그러나 고속운전 시 발생하는 높은 계자 유기 전압은 제어기에 부담을 주고, 토크 리플은 진동 및 소음을 유발할 수 있으므로 계자 유기 전압과 토크 리플을 줄이려는 노력이 필요하다.

본 논문에서는 ISG용 8극 72슬롯 WFSM을 검토 모델로 선정하고 목적 변수인 계자 유기 전압과 토크 리플은 최소화하고 평균 토크는 요구 조건을 만족하도록 최적화 목표를 정했다. 설계 변수로 회전자의 편심과 Pole Arc를 이용하여 반응표면법을 통해 최적 형상을 결정하고 유한요소해석법으로 성능을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 반응표면법

반응표면법은 하나 또는 그 이상의 설계 변수가 반응 변수에 영향을 줄 때 실험이나 시뮬레이션 데이터를 이용하여 설계 변수와 반응 변수의 관계를 찾는 통계적 방법이다. 본 논문에서는 반응표면법에서 곡면 2차 반응 모델 구축을 위해 통상적으로 이용되는 반응표면추정법인 중심합성법(Central Composite Design: CCD)을 적용하였다. 설계 변수와 반응 변수의 관계인 반응표면식을 Taylor Series 근사를 통해 표현하면 식 (1)과 같다.

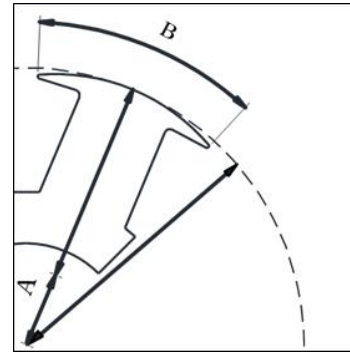
$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j \quad (i < j) \quad (1)$$

반응표면식의 파라미터들은 다음과 같다.

y: Tune function, x: Design Parameter, α: regression coefficient

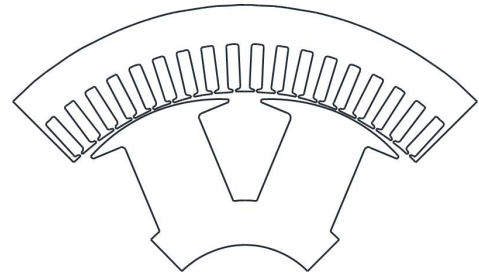
2.2 계자 유기 전압과 토크 리플 저감 방안

공극자속밀도는 모터 형상에 따라 불균형한 분포를 가지게 된다. 불균형한 공극자속밀도분포는 계자 유기 전압과 토크 리플에 영향을 주게 된다. 불균형한 분포를 가진 공극자속밀도를 개선하기 위한 방법은 여러 가지가 있는데 그 중에서 <그림 1>에 도시된 것처럼 회전자 형상에 편심과 Pole Arc를 조절 방법이 있다. 편심을 적용하게 되면 회전자 외경이 일정하지 않아 회전자 위치에 따라 공극의 길이가 변화하여 공극자속밀도의 파형을 바꿀 수 있다. 그리고 Pole Arc를 조절하여 공극자속밀도의 분포를 개선 할 수가 있다.



<그림 1> A: 편심 B: Pole Arc

2.3 초기모델

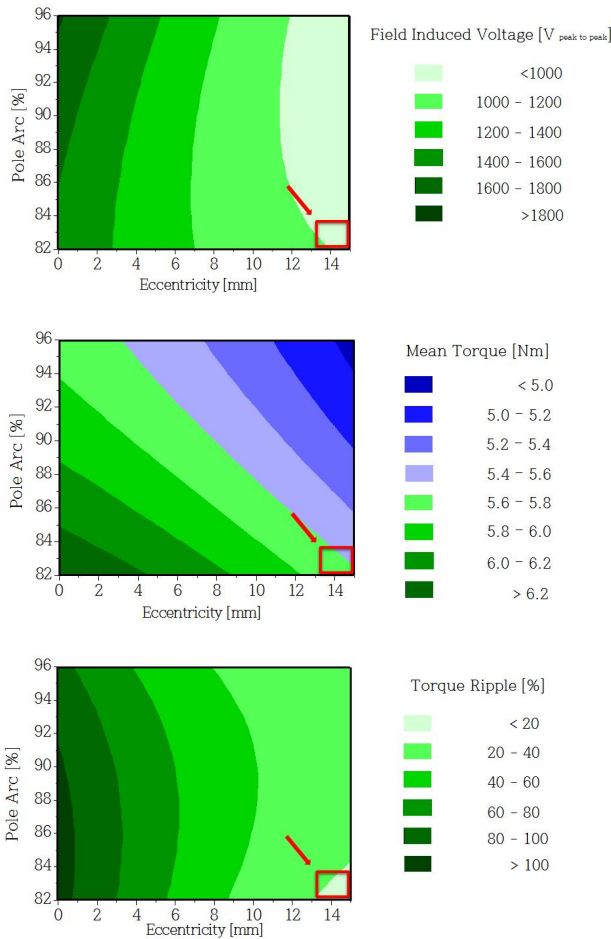


<그림 2> ISG용 WFSM 초기 모델

<그림 2>는 <표 1>에 제시된 ISG용 WFSM 설계 사양을 토대로 제작된 초기 모델이다. 또한 WFSM을 구동하기 위한 기저속도 1,700 rpm, 최대 속도 15,000rpm일 때에 필요한 전류, 전류위상각을 특성해석을 통해 부하 조건으로 정했다.

<표 1> ISG용 WFSM 설계 사양

항목	수치	
극/슬롯	8 / 72	
고정자 외경 [mm]	148	
회전자 외경 [mm]	108	
적층길이 [mm]	40	
최대토크 [Nm]	52@1,700rpm	
최대속도 [rpm] / 기저속도 [rpm]	15,000 / 1,700	
계자 턴 수 [turn]	43	
전기자 상당 직렬 턴 수 [turn]	24	
DC Link Voltage [V]	48	
최대 전류	고정자 [A _{rms}]	250
	회전자 [A]	40



〈그림 3〉 최대 속도에서의 편심과 Pole Arc에 대한 반응표면

2.4 최적 설계

계자 유기 전압과 토크 리플을 목적 변수로, 회전자 편심과 Pole Arc를 설계 변수로 선정하여 목적 변수를 최소화 하는 방향으로 최적화를 진행하였다.

최적화 수행을 위한 반응표면을 얻기 위해 중심점과 축점을 더한 중심합성계획법을 사용하였다. 초기 모델과 동일한 부하조건에서 편심과 Pole Arc의 조합이 서로 다른 9개의 모델을 해석하여 계자 유기 전압, 평균 토크, 토크 리플에 대한 반응표면 등고선을 <그림 3>과 같이 도시하였다.

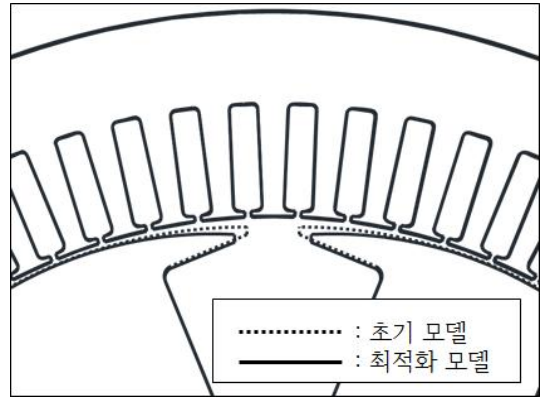
<그림 3>으로부터 설계 변수와 목적 변수의 관계를 알 수가 있다. 편심은 계자 유기 전압, 평균 토크, 토크 리플에 모두 영향을 미치고 Pole Arc는 계자 유기 전압과 토크 리플에는 상관 관계가 없지만 평균 토크에 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있다.

반응표면 등고선으로부터 결정된 회전자의 편심은 15mm, Pole Arc는 82%이다.

2.5 최적화 모델 결과 분석

<그림 4>는 초기 모델과 최적화 모델의 형상을 비교한 것이다. 초기 모델과 동일한 부하조건에서 최적화 모델로부터 계자 유기 전압, 평균 토크, 토크 리플을 구했다.

<표 2>는 초기 모델과 최적화 모델의 기저속도와 최대속도에서 계자 유기 전압, 평균 토크, 토크 리플을 정리 한 것이다. 결과적으로 기저속도 1,700rpm에서 최적화 모델의 평균 토크는 <표 1>에 제시된 최대 토크 요구조건을 만족한다. 동시에 기저속도와 최대 속도에서 초기모델보다 계자 유기 전압은 각각 72.8%, 25.6%로 감소하였고 토크 리플은 각각 27.2%, 68.9%로 저감된 것을 확인하였다.



〈그림 4〉 초기 모델과 최적화 모델의 형상 비교

〈표 2〉 초기 모델과 최적화 모델 시뮬레이션 해석 결과

기저 속도 1,700 [rpm]	Field Induced Voltage [V _{peak to peak}]	Mean Torque [Nm]	Torque Ripple [%]
초기 모델	199.79	52.87	7.30
최적화 모델	58.40	52.45	5.31
변화율	-72.8%	-4.6%	-27.2%

최대 속도 15,000 [rpm]	Field Induced Voltage [V _{peak to peak}]	Mean Torque [Nm]	Torque Ripple [%]
초기 모델	1181.83	5.74	65.93
최적화 모델	879.80	5.84	20.48
변화율	-25.6%	+1.7%	-68.9%

3. 결 론

본 논문에서는 ISG용 WFSM의 계자 유기 전압을 줄이면서 동시에 토크 리플을 저감하는 최적 설계를 수행 하였다. 회전자의 편심과 Pole Arc를 설계 변수로 정하고 반응표면법을 이용하여 최적화를 수행하였다. 그 결과 WFSM이 기저 속도에서의 평균 토크는 기준에 만족하면서 계자 유기 전압과 토크리플의 성능이 개선되는 결과를 얻었다.

[참 고 문 헌]

[1] Sung-In Park and Ki-Chan Kim, "Torque Ripple Reduction Method with Asymmetric Pole for Wound-Field Synchronous Motor", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 50, No. 3, 2015
 [2] 도상화, 이병화, 채승희, 홍정표, "계자권선형 동기 전동기의 토크 리플 저감 설계", 한국자동차공학회, pp. 1654-1658, 2012
 [3] 박종민, 김성일, 홍정표, 이종호, "반응표면법을 이용한 집중권선 동기 릴럭턴스 전동기의 토크 리플 저감에 관한 회전자 설계", 대한전기학회, pp. 669-670, 2006
 [4] 황성우, 김동민, 채승희, 홍정표, "회전자 편심과 극호비를 이용한 EPS용 전동기의 코깅토크 저감 최적설계", 대한전기학회, pp. 1340-1344, 2014