

영구자석 내삽형 동기 발전기의 최적화 설계에 관한 연구

이 광 호, 권 혁 기, 홍 선 기
호서대학교 공과대학 정보제어공학과

A Study of Optimization Design for Buried type Permanent Magnet Synchronous Generator

Kwang-Ho Lee, Hyuk-Ki Kwon and Sun-Ki Hong
Department of Information & Control Engineering, Hoseo University

Abstract - 자여자석 동기 발전기에 비해, 영구자석 내삽형 동기 발전기는 순간적인 부하 단락 시에도 지속적으로 여자기에 여자 전원을 공급할 수 있어 큰 부하 변동에도 안정적으로 발전기를 운전할 수 있게 해 준다. 본 연구에서는 이러한 전동기의 해석 프로그램을 개발하고, 이로부터 유전알고리즘을 이용하여 설계프로그램을 개발하였다. 영구자석 동기 발전기의 목적함수를 효율로 두었으며, 발전기의 형상을 변화시켜 제약 조건을 만족하는 최대 효율을 갖는 1kW급 영구자석 내삽형 동기 발전기의 설계치를 제시하였다.

1. 서 론

동기 발전기는 최근 들어 중, 소규모의 열병합 발전기 등에 이르기까지 수요는 급격히 증가하고 있으며, 이에 대응하는 기술은 적절하지 못하고 있는 듯하다. 수요가 증가함에 따라 발전 시스템의 고효율화, 소형화는 당연한 요구사항이나, 현재 동기 발전기는 기존의 기술에 별 다른 진전이 없이 고전적인 방법에 의해 생산되고 있으며, 생산 규모도 크지 않다. 날로 증가하는 수요 및 해외 선진국과 경쟁하기 위해서 해석기술, 설계기술 및 생산 기술이 상호 보완되어 기술이 확보되지 않으면 안된다. 특히, 소형 발전기를 적용한 발전 시스템은 아파트 뿐만 아니라, 스포츠 센터, 수영장 등에 그 적용 부분이 넓다. 이에 따라 고효율 소형화 발전기 설계, 생산기술 개발이 요구된다. 본 논문에서 해석 프로그램의 결과와 유전 알고리즘을 적용시킨 설계프로그램을 개발하였다. 자석 폭, 회전자 외경, 고정자 티스 폭, 슬롯 깊이, 도체 턴수를 설계 변수로 하고, 효율을 목적함수로 두어 최적화된 내삽형 영구자석 동기발전기를 설계하였다.

2. 본 론

2.1 내삽형 영구자석 동기 발전기

영구자석 발전기는 영구자석에 의해 공급되는 자속을 사용하는 발전기이다. 특히 내삽형 영구자석 발전기 중, 그림 1과 같은 구조를 갖는 발전기는 자석에서의 자속이 회전자 치로 집중되어 공극으로 자속을 공급하므로, 공극 자속밀도를 높일 수 있을 뿐 아니라, 기구적으로도 견고하게 된다. 이러한 구조는 저렴한 페라이트 자석을 이용할 수 있어 가격 경쟁력도 갖을 수 있다.

본 논문에서는 표 1의 기본 사양을 가지고 그림 1의 형상을 한 영구자석 내삽형 동기 발전기를 실험 모델로 하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 8극기이며, 희토류 자석을 사용하는 경우에 비해 자석의 부피는 증가하지만 회전자 치로 자속이 집중하게 되어 높은 공극 자속밀도를 갖을 수 있다.

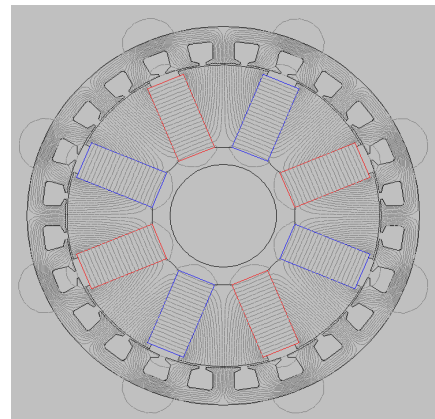
2.2 유전 알고리즘

유전 알고리즘이란 임의로 발생된 초기 집단에서 자연의 유전 원리를 모방한 유전 진화 작용을 통하여 점차적으로 좀 더 최적에 가까운 해로 접근시켜 나가는 것이다. 즉 기본적인 개념은 주어진 문제에 대한 해들의 후보들을 어떤 구조화된 형태로 표현한 후 이 후보들을 유전 작용을 통하여 점차로 진화 시켜 나가는 것이다.

만일 유전 정보 전달 과정에서 최적의 배열 상태에서 특정 정보가 빠지거나 다른 것으로 바뀐다면 전혀 다른 의미가 되거나 의미 없는 유전 정보가 된다. 만일 잘못된 유전 정보가 전달되어 세분열을 통해 후손이 탄생된다면 대부분 주위 환경에 의해 도태된다. 이 이론이 바로 주위 환경에 잘 적응하는 생명체만 생존한다는 진화론으로 이어진다. 부모로부터 자손에게 임의로 유전자를 할당하는 교배 연산을 통해 자손이 발생한다. 이때 돌연변이가 매우 낮은 확률로 자손 개체에 적용되며, 하나의 개체를 돌연변이 시킬 때 전형적으로 단일 형질이 무작위로 변경되고, 우수한 유전 물질이 세대를 거쳐 물려진다. 평가와 생식(선택과 유전연산) 과정은 만족할 만한 해가 나타나거나 유전알고리즘이 제한된

〈표 1〉 샘플 모델의 기본적인 사양

항 목	값	단 위
정격 출력	1,000	W
정격속도	1800	rpm
극수	8	
슬롯수	24	
상수	3	
잔류자속밀도	0.395	T



〈그림 1〉 발전기의 등포텐셜도

세대 수에 도달할 때까지 계속 계산 한 후 우수한 개체를 내 놓는다.

2.3 해석프로그램 시뮬레이션

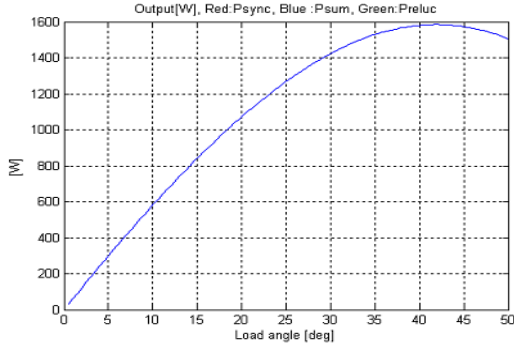
샘플 영구자석 내삽형 동기 발전기를 무부하 및 부하에 따른 각각의 출력, 전류, 단자 발전 전압 등을 실험을 통하여 측정하였다. 측정한 데이터 값을 이용하여 개발하고자 하는 해석 프로그램의 파라미터들을 결정하고 개선시켰다. 또한 샘플 동기 발전기의 실험치의 출력과 해석 프로그램의 계산치의 출력을 비교하여 해석프로그램의 타당성을 확인하였다[그림 4]. 그림 2는 부하각에 따른 출력[W]의 계산치이다. 그림 2를 통해 부하각이 15 ~ 20 사이인 17쯤에서 샘플 영구자석 내삽형 동기 발전기의 정격 출력인 1Kw가 나오는 것을 확인 할 수 있다. 그림 3은 부하각 변화에 따른 효율의 변화량의 계산치이다. 그림 3으로부터 부하 각 17일때의 효율이 계산치는 92.1% 라는 것을 알 수 있다.

그림 4은 선간전압에 따른 출력들이다. 그림 4의 왼쪽의 그래프는 선간 전압에 따른 선전류의 실험치와 계산치를 비교한 것이다. 오른쪽의 그래프는 선간전압에 따른 부하 상저항을 실험치와 계산치를 비교한 것이다. 그림 4에서 빨간 원들은 샘플 동기 발전기의 실험치이다. 실험치와 계산치가 거의 일치하고 같은 경향을 보이는 것을 알 수가 있다. 또한 해석프로그램으로 샘플 동기 발전기의 정격 출력 1Kw가 되는 시점으로 구한 효율은 92.6%로 근사치인 것을 확인 하였다.

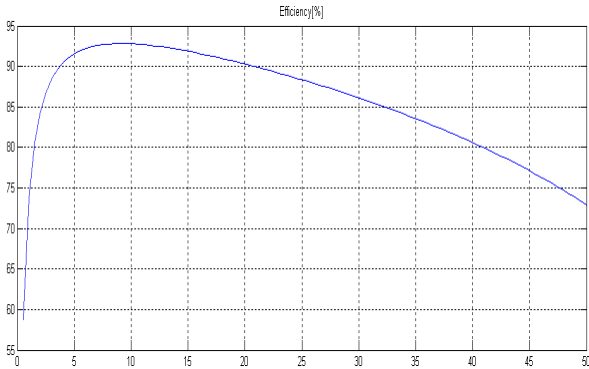
2.4 최적화 프로그램 시뮬레이션

해석프로그램을 본론 2.2절에서 언급한 유전알고리즘에 적용시켰다. 설계치수의 목적 변수는 자석 폭, 회전자 외경, 고정자 티스 폭, 고정자 슬롯 깊이, 도체의 턴수이다. 또한 확실한 설계 치수를 얻기 위하여 목적변수의 설계치수 출력시 다음과 같은 제한 조건을 줬다. 최대 출력은

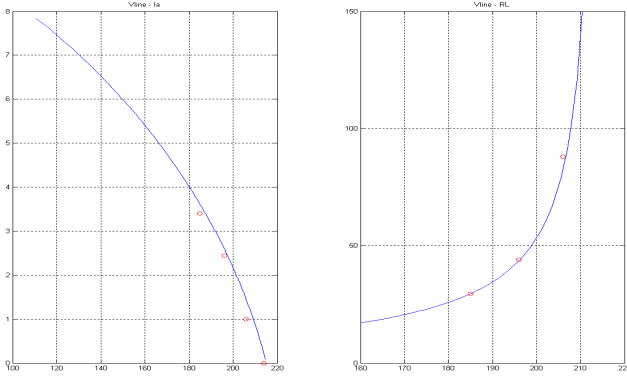
1.4Kw 미만, 고정자 요크 자속 밀도는 1.7T 이상, 출력은 1Kw 미만, 고정자 슬롯 면적에 0.4배한 값이 도체 면적 보다 크게 한다는 것이다. 만약 제한 조건에 맞지 않다면 설계 프로그램의 효율은 0%로 출력 될 것이다. 하지만 모든 제한 조건에 맞게 해석을 하였다면 다음 표 2의 결과 값이 나올 것이다. 표 2에서 최대 출력과 효율이 샘플 동기 발전기 보다 상승된 출력이 나오는 것을 확인 할 수 있다. 표 2의 출력에 관한 최적 설계치수는 자석 폭, 회전자 외경, 티스 폭, 도체 턴수는 샘플 동기 발전기 보다 크게 나왔고, 슬롯 깊이는 샘플 동기 발전기 보다 작게 나왔다.



〈그림 2〉 부하각에 따른 출력[W]



〈그림 3〉 부하각에 따른 효율[W]



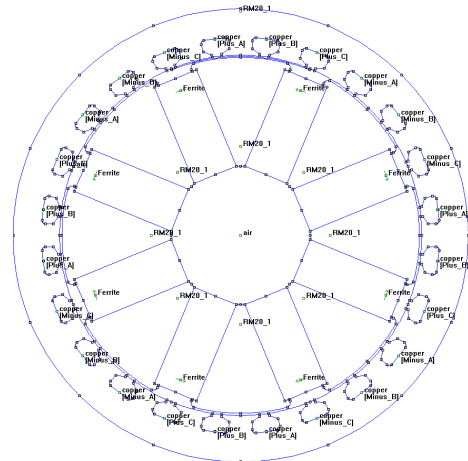
〈그림 4〉 선간전압에 따른 출력

〈표 2〉 해석 프로그램과 최적화 프로그램의 출력값 비교

	해석 프로그램	최적화 프로그램
고정자 요크 자속밀도	1.69[T]	1.67[T]
최대 출력	1.58[Kw]	1.73[Kw]
1Kw일때 부하각	0.33	0.30
효율	92.6[%]	94.1[%]

2.5 샘플 동기 발전기의 유한 요소 해석

유한 요소법은 수치해석 기법에 의해 전자계 시스템 문제를 해석하는 방법이다. 유한 요소 해석법은 형상이 복잡하거나 비선형 물질 특성을 가지는 경우 해석 적해를 구하기 매우 어려운 경우에 매우 유용한 수치



해석 기법이다.

표 1의 사양을 가진 영구자석 내삽형 동기 발전기의 상당 역기전력은

$$E_t = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

N 은 도체의 턴수 이다. Φ 는 극당 자속이다. 여기서 Φ 를 계산치로 구하지 않고 설계프로그램의 신빙성과 정확한 극당 자속을 위해 유한 요소 해석을 통해 구하였다. 극당자속을 구하기 위하여 유한 요소 틀을 이용하여 샘플 동기 발전기의 모델링을 하였다. 모델링의 치수는 최적화 프로그램으로 도출된 설계치를 입력으로 모델링 할 수 있게 하였다. 그림 5는 최적화 알고리즘으로 도출된 치수로 모델링한 형상이다.

3. 결 론

본 논문에서 내삽형 영구자석 동기발전기의 목적함수를 효율로 두는 해석 프로그램과 유전 알고리즘을 이용한 설계프로그램을 개발 하였다. 이를 이용하여 PMG Excitor 여자기용 영구자석 내삽형 동기 발전기를 해석, 설계할 수 있게 되었다. 정확한 해석을 위해 FEM 틀을 이용한 형상 모델링을 통하여 형상을 확인 하고 극당 자속을 시뮬레이션을 통하여 구하였다. 최대 효율을 갖는 1kw급 영구자석 내삽형 동기 발전기의 설계치를 제시하였다. 그리고 개발 프로그램은 사용자가 좀 더 쉽게 접근하여 설계할 수 있도록 하였다. 이러한 기술은 페라이트를 이용한 영구자석 내삽형 동기발전기의 국내 기반 기술의 향상에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글
본 연구는 중소기업 기술혁신 기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 大川光吉, “페라이트 磁石回轉機의 設計”, pp.183~268, 1984
- [2] 황희수, “퍼지 진화컴퓨팅 프로그래밍”, pp.77 ~ 126, 2006
- [3] N Bianchi, S Bolognari, “Perfomance Analysis of An IPM Motor with Segmented Rotor for Flux-Weakening Application”, IEE. no. 468, pp. 49 - 53, 1999.
- [4] Byoung-yull Yang, Hyun-kag Park, Byung-il Kwon, “Design of Flux Barrier for Reducing Torque Ripple and Cogging Torque in IPM type BLDC motor”, Electromagnetic Field Computation, 2006 12th Biennial IEEE Conference on 2006, pp.241 - 241, May 2006
- [5] S.A.Nasar,I Boldea and L.E. Unnewehr, Permanent magnet, Reluctance, and Self-synchronous Motors,CRC Press, 1993.
- [6] Byoung-yull Yang, Hyun-kag Park, Byung-il Kwon, Design of Flux Barrier of Reducing Torque Ripple and Cogging Torque in IPM type BLDC motor, Electromagnetic Field Computation, 2006 12th Biennial IEEE Conference on 2006, pp 241-241, May 2006
- [7] 이광호, 장중학, 권혁기, 홍선기, “내삽형 자석 동기 발전기 특성 해석에 관한 연구“, 대한전기학회 제37회 하계학술대회 논문집, B권 873p ~ 874p, 2006년 7월