

병렬 컴퓨팅을 이용한 영구자석 직류전동기의 최적설계

조명수*, 이철균*, 김재광**, 정현교***
 동의대학교*, 현대기아자동차연구소**, 서울대학교***

Optimal Design of Permanent Magnet DC Motor Using Parallel Computing Method

Myung-Soo Cho*, Cheol-Gyun Lee*, Jae-Kwang Kim**, Hyun-Kyo Jung***
 Dong-Eui University*, Hyundai-Motor Company**, Seoul National University***

Abstract - In this paper, finite element analysis (FEA)-based optimization using Internet distributed computing is proposed for the real world and complex optimization such as optimal design of permanent magnet dc motor (PMDCM).

1. 서 론

자동차에 사용되는 영구자석 직류전동기(Permanent Magnet DC Motor: PMDCM)는 설치공간과 무게 제약으로 인해 높은 파워밀도 [W/kg]와 작은 체적을 요구한다. 이러한 전동기의 회전자는 대부분 축방향으로의 통풍덕트를 가지며, 이는 열적인 부분과 무게의 관점에서 이점을 지닌다. 하지만 복잡한 회전자 형상으로 인하여 유한요소 해석(finite element analysis, FEA)과 열 해석이 요구되어진다. 그러나 유한 요소 해석과 열 해석은 많은 계산시간을 필요로 하며, 특히 최적화 기법을 적용할 경우 최적해로 수렴하는 동안 과도한 실행 시간으로 큰 제약을 받는다.

이러한 문제 해결을 위하여 병렬 또는 분산 컴퓨팅 기법이 요구되며, 본 논문에서는 기존의 전통적 하드웨어 방법(MPP, vector computer)을 사용하는 대신에 인터넷 웹 서비스(Internet Web Service)를 활용한 인터넷 분산 컴퓨팅(Internet Distributed computing)을 제안한다. 인터넷 분산 컴퓨팅은 해결하고자 하는 문제의 해석 과정을 인터넷으로 링크된 여러 대의 컴퓨터들로 병렬 처리함으로써 전체 계산시간을 줄일 수 있다. 또한 인터넷으로 링크된 컴퓨터들에 접근 용이하며, 신뢰성이 높고, 네트워크 방화벽(network firewall)에 접근이 용이하다는 장점이 있다. 따라서 본 논문에서는 전기기기의 최적설계 시에 인터넷 분산 컴퓨팅 기법을 적용하여 전체 계산시간을 줄일 수 있는 병렬 컴퓨팅 기법을 제안하고자 한다.

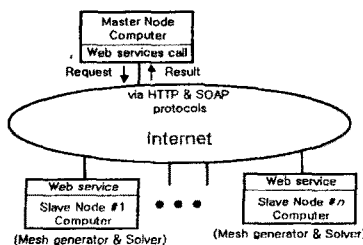
2. 인터넷 분산 컴퓨팅

2.1 인터넷 웹 서비스

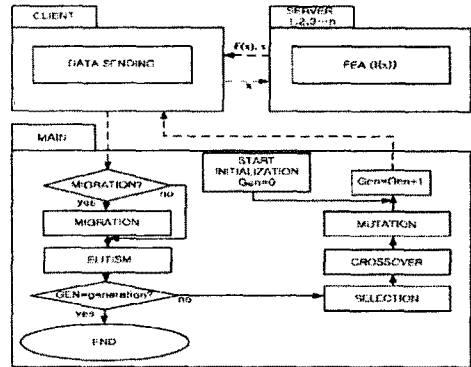
그림 1은 인터넷 분산 컴퓨팅의 체계를 보여준다. Master Node는 해결해야 할 일들을 생성하는 역할을 수행하고, Slave Node는 생성된 일들을 받아서 처리하는 역할을 수행한다. Master Node와 Slave Node 사이의 통신은 인터넷 웹 서비스의 HTTP(Hypertext Transfer Protocol)와 SOAP(Simple Object Access Protocol) 프로토콜에 의해 이루어진다. 특히, SOAP는 웹 서비스의 핵심이며, 이는 메시지 생성에 대한 표준을 제공하고, Master node와 Slave node 간의 RPC(Remote Procedure Call) 통신을 용이하게 해준다.

2.2 유전알고리즘과 분산 컴퓨팅의 결합

본 논문에서는 최적화 알고리즘으로 확률론적 최적화의 기법으로 널리 알려진 유전알고리즘(Genetic Algorithm: GA)을 사용 하였으며, 그림 2에 이러한 최적화 알고리즘과 인터넷 분산 컴퓨팅을 결합한 구성을 나타내었다. 최적화 알고리즘은 Master Node 컴퓨터(Main)에서 실행되고, 목적함수의 평가는 Slave Node 컴퓨터들(Servers)에서 처리된다. 그러므로 최적화를 위한 전체 수행시간은 인터넷에 링크된 컴퓨터의 수에 따라서 감소한다.



<그림 2> 인터넷 웹 서비스



<그림 3> 인터넷 분산 컴퓨팅을 이용한 유한요소해석의 최적화 체계

그림 2에서 MAIN은 최적화 알고리즘을 수행하고, 기기의 설계변수를 생성하는 역할을 수행한다. CLIENT는 MAIN에서 생성된 설계변수들을 각 SERVER로 분배하는 역할을 수행하고, 각 SERVER들은 분배된 설계변수를 입력받아 유한 요소 해석을 적용하여 특성 해석을 수행한다. SERVER의 계산결과는 CLIENT를 통하여 MAIN으로 반환하고, MAIN에서는 최적화 알고리즘을 통하여 최적화 후보해를 판별한다. 이러한 과정을 반복 수행하여 기기의 최적설계를 수행한다.

2.3 시험 함수 적용

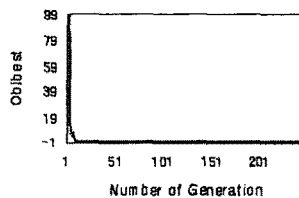
병렬 컴퓨팅의 성능은 Speed-Up factor S(n)과, 병렬 컴퓨팅의 효율 E(n) 등에 의해 평가된다. 여기서, n은 병렬 컴퓨팅에 사용되는 처리기(processor)의 수를 의미한다. S(n)은 n개의 처리기에 의해 운용된 실행시간 T_n에 반한 개의 처리기에 의해 운용된 실행시간 T₁을 나눈 값으로 계산된다. 또한, 효율 E(n)은 병렬 컴퓨팅에 분배된 n개 처리기의 평균 활용으로 정의된다. 그러므로 E(n)=S(n)/n 이다.

인터넷 분산 컴퓨팅의 성능을 검토하기 위하여, Rosenbrock 함수 문제를 사용되어졌으며, 4차원의 Rosenbrock 함수는 다음과 같이 정의 한다.

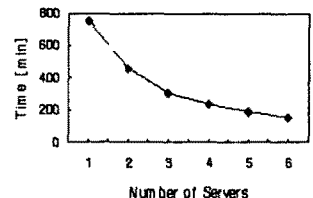
$$F_4(x) = 100(x_2^2 - x_1^2) + (1 - x_1)^2 + 90(x_4 - x_3^2) + (1 - x_3)^2 + 10.1\{(x_2 - 1)^2 + (x_4 - 1)^2\} + 19.8(x_2 - 1)(x_4 - 1)$$

, where $-10 \leq x_1, x_2, x_3, x_4 \leq 10$ (1)

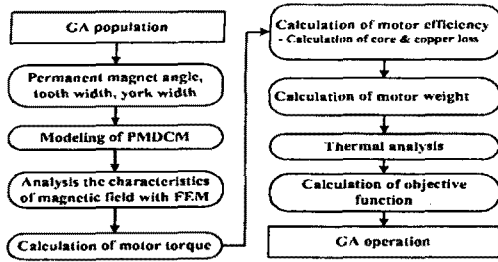
위 시험함수 계산시간을 실제 전기기기 최적화 문제 계산시간과 같은 조건으로 평가하기 위해, 시험함수 계산에 3초의 지연시간을 주었다. 유전 알고리즘의 모 집단의 개체 수는 60이고, 세대수는 최대 250세대이다. 그림 3은 SERVER 컴퓨터 3대를 사용하였을 때, 수렴 특성을 보여준다. 이러한 결과는 제안된 최적화 방법이 잘 수행되었다는 것을 나타낸다. 그림 4는 SERVER 컴퓨터 수에 따른 최적화 수행 시간을 나타낸다. 분산처리의 계산효율은 해당 문제의 계산시간과 컴퓨터간의 통신 시간의 비에 의해 좌우된다. 이 예에서, S(3)은 2.4이고, E(3)은 0.81이다. 만약 해당 문제의 목적함수의 평가 시간이 3초 보다 길면, S(n)과 E(n)는 더 개선될 수 있다.



<그림 3> 시험 함수의 수렴 특성



<그림 4> SERVER 수에 따른 계산 시간



〈그림 5〉 FEA를 이용한 PMDCM 최적화 흐름도

3. 영구자석 직류전동기의 최적설계

본 논문은 자동차에 사용되는 영구자석 직류전동기의 최적설계를 인터넷 분산 컴퓨팅을 활용하여 수행하였다. 최적화에 적용한 영구자석 직류전동기의 출력은 180W이고, 4극을 갖는다.

3.1 유한 요소 해석(FEA)

자동차에 사용되는 영구자석 직류전동기는 복잡한 회전자와 영구자석의 기하학적 구조로 인하여 전동기의 특성해석 수행 시 유한 요소 해석과 열 해석이 요구되어진다.

그림 5는 유한 요소 해석을 통한 영구자석 직류전동기의 특성해석 흐름도를 보여준다. 유전 알고리즘을 통해 전동기의 설계 변수를 발생시키고, 설계 변수를 통하여 영구자석 직류전동기의 모델링과 전자기 해석을 수행한다. 전자기 해석을 통해 전동기의 토크와 자속밀도 및 손실을 계산하고, 이를 통하여 효율을 계산한다.

본 논문에서는 전자기 해석과 열 해석의 통합 수행을 위하여 전자기장의 Possion 방정식과 열 해석의 Fourier 열전달 방정식의 유사성을 활용하여 두 방법이 결합된 해석방법을 사용하였다. 하지만, 두 해석의 경계조건이 다른 관계로 전기장에서는 고정경계조건을, 열 해석에서는 혼합경계조건을 각각 적용하였다. 그러므로 전자기 해석시 사용한 유한 요소 해석의 요소 관련 데이터를 재사용하여 열해석을 수행하게 되며, 이는 전체 계산시간을 줄여준다.[2] 그림 6은 열 해석 수행을 통해 고정자 최외각에서 회전자 중심부까지의 온도분포를 나타내었다.

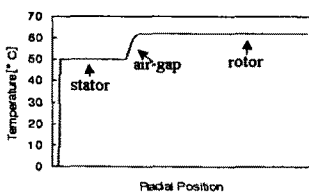
3.2 설계변수와 목적함수

설계 변수로는 고정자에 부착된 영구자석의 자극 각도(x1)와 회전자 형상에 관련된 2가지 변수 전기자 치폭(x2), 전기자 요크 깊이(x3)를 선택하였다. 전동기의 설치공간의 제약을 고려하여 전동기의 고정자 외경 및 축방향 길이를 고정하였다. 극수 및 공극의 길이도 고정하였다. 그림 7에 영구자석 직류전동기의 최적 설계 시의 설계 변수를 나타내었다.

영구자석 직류전동기의 최적화에서 목적함수는 전동기의 고성능과 효율 측면에서 출력토크와 효율 최대화 및 온도 상승 최소화 등을 들 수 있고, 또한 제작비용의 절감을 위해 전동기 전체 무게 최소화 등을 들 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 여러 목적함수를 적용하기 위해 퍼지 최적화 이론을 접목하여 다중 목적함수 최적화를 수행하였다.[3] 목적함수로는 전동기의 토크, 효율, 무게, 온도상승을 선택하였다.

3.3 최적설계 결과

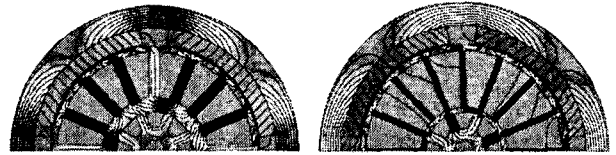
영구자석 직류전동기의 최적화 수행은 단일 목적함수의 평가를 통하여 각 함수의 적용 범위를 결정 후 다중 목적함수를 이용한 최적화를 수행하였다. 단일 목적함수의 최적화 문제는 기존 목적함수를 선정 후 나머지 목적함수들을 제한조건으로 사용하였다. 그림 8과 표 1은 단일 목적함수의 최적화 결과를 보여준다. 토크 최대화의 경우, 전기자 치 폭이 증가하고, 전기자 슬롯 면적이 감소하는 경향을 가지며, 이를 통해 전류밀도가 상승하게 된다. 또한, 효율 최대화의 경우, 토크 최대화의 경우와 반대의 결과를 갖는다. 다중 목적함수 최적화를 위한 멤버십 목적함수의 특성 값은 표 2에 나타낸다. 멤버십 함수의 특성 값은 기존 전동기의 특성과 설계자의 판단에 의해 선택되어진다. 그림 9는 최적화 세대에 따른 목적함수의 수렴결과를 나타낸다. 이러한 결과는 제안한 방법을 통해 실제 전동



〈그림 6〉 열 해석 결과

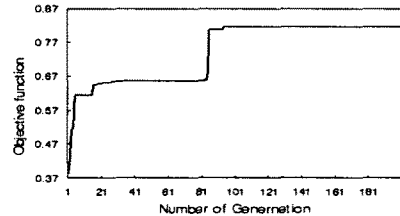


〈그림 7〉 PMDCM의 설계 변수



(a) 토크 최대화 (b) 효율 최대화

〈그림 8〉 단일 목적함수의 최적화 결과



〈그림 9〉 PMDCM의 수렴 특성

〈표 1〉 단일 목적함수 최적화의 비교

	설계변수			토크 [kgcm]	효율 [%]	무게 [kg]	온도 (°C)
	x1[°]	x2[mm]	x3[mm]				
기준모델	82.00	3.60	19.00	8.44	71.4	0.730	70.0
토크 최대화	75.81	4.04	18.16	9.25	70.1	0.730	78.1
효율 최대화	75.84	2.14	21.99	8.40	76.8	0.703	60.4

〈표 2〉 퍼지 멤버십 함수의 특성 값

	f_i low	f_i high
토크 [kgcm]	8.44	9.20
효율 [%]	70.0	75.0
무게 [kg]	0.70	0.73
온도 [°C]	70.0	90.0

〈표 3〉 최적화 모델과 기준모델의 비교

	토크 (kgcm)	효율 (%)	무게 (kg)	온도 (°C)	목적 함수
기준모델	8.44	71.4	0.730	70.0	0.004
최적화 모델	9.07	74.2	0.710	69.4	0.817

〈표 4〉 병렬 컴퓨팅의 성능평가

	전체계산시간 [min]		Speed-Up S(10)	효율 E(10)
	1 server	10 server		
전자기장 해석	1200	142	8.45	0.845
전자기장 & 열 해석	1600	186	8.60	0.860

기의 최적설계가 잘 수행되었다는 것을 나타내고 있다. 또한, 표 3를 통하여 최적화 모델의 전체 특성이 기존의 기기에 비해 우수하다는 것을 알 수 있다. 그러므로 퍼지 멤버십 함수를 적용한 다중 목적함수 최적화 기법은 매우 효과적임을 알 수 있다. 표 4에 제안된 병렬 컴퓨팅의 계산시간 및 성능지표를 나타내었는데, 해당 문제의 목적함수 계산시간이 증가함에 따라 병렬 컴퓨팅의 Speed-Up factor와 효율이 증가함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 최적설계 알고리즘과 인터넷 분산 컴퓨팅을 결합하여 유한요소해석을 필요로 하는 전기기기의 최적설계의 가장 큰 문제점인 전체 계산시간을 줄였다. 또한, 퍼지 멤버십 함수를 통해 다중 목적함수 최적설계를 구현하였다.

〈참 고 문 헌〉

[1] H.S. Choi et al., "A Distributed Computing Technique for Analysis of Electric Machines Using Internet Web Services," Digest of CEFC 2004, p.124, June 6-9, 2004.
 [2] S.M. Cho, J.K. Kim, H.K. Jung, and C.G. Lee, "Stress and Thermal Analysis Coupled With Field Analysis of Multilayer Buried Magnet Synchronous Machine With a Wide Speed Range", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 41, NO. 5, pp.1632-1635, May 2005.
 [3] J.T. Park, C.G. Lee, M.K. Kim and H.K. Jung, "Application of Fuzzy Decision to Optimization of Induction Motor Design", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol.33, No.2, pp.1939-1942, 1997.