

유전알고리즘을 이용한 로봇구동용 BLDC 형상최적화

정 춘 길, 이 동 업, 김 규 탁
창원대학교

The Optimum Design of BLDC Motor driving a robot by using Genetic Algorithm

Chun-gil Jung, Dong-yup Lee, Gyu-tak Kim
Changwon National University

Abstract - BLDC Motor is used in robots requiring a precise motion recently. This paper presents the optimal design reducing the rotor inertia in order to improve the driving characteristic of BLDC motor driving robots. The optimal design was performed by using a parallel Genetic Algorithm which is superior at searching objective functions for the complicated models having several optimal points. Therefore, objective function for optimization is rotor inertia and efficiency.

1. 서 론

요즘 산업의 정밀화, 소형 경량화, 다기능화에 따라 이런 BLDC 전동기는 여러분야에 많이 쓰이고 있다. 브러쉬와 정류자를 가지는 일반적인 DC 전동기와 달리 BLDC 전동기는 브러쉬와 정류자를 가지지 않으므로 브러쉬 전압강하나 마찰손이 없어 높은 효율을 가지며, 신뢰성이 높고 수명이 길다. 이러한 BLDC 전동기는 제어 성능이 우수하여 고속, 유연한 움직임을 필요로 하는 로봇 구동용 전동기로 많이 쓰인다. 로봇구동시 유연한 움직임을 위해서는 기동시, 정지시, 가감속시의 제어 및 운전특성이 좋아야 하며 이런 제어 및 운전 특성을 향상시키기 위해서는 전동기의 회전자 관성을 최소화 시킬 필요가 있다.

본 논문에서는 BLDC 전동기의 회전자 관성 최적화를 위해 관성에 크게 영향을 미치는 중요한 형상 설계변수를 결정하고 이 설계변수에 대한 최적화를 수행하였다. 또한 회전자 관성에 대한 최적화와 더불어 BLDC 전동기의 효율을 동시에 고려한 다중목적함수 최적화를 수행하였다.

최적화 수행을 위해 전기기기의 형상 최적화에 적합하며 탐색공간에서 여러 가지 다양한 해를 병렬적으로 찾을 수 있는 병렬 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)을 도입하였다. 초기모형을 기준으로 하여 목적함수와 설계변수를 지정하고, 이 지정된 변수들을 유전 알고리즘에 적용하였다. 유전 알고리즘 수행후, 추출된 설계변수의 최적치는 검증을 위해 다시 모델링하여 유효요소법으로 특성해석하였다.

2. 본 론

2.1 BLDC 전동기의 초기모형

그림 1은 BLDC 전동기의 최적화를 위한 초기모형의 단면도를 나타낸다. 그림 1에서와 같이 초기모형은 일반 BLDC 전동기와 같은 내전형 BLDC 전동기이며, 그림 1에서 보는 바와 같이 8극 12슬롯 구조를 가진다.

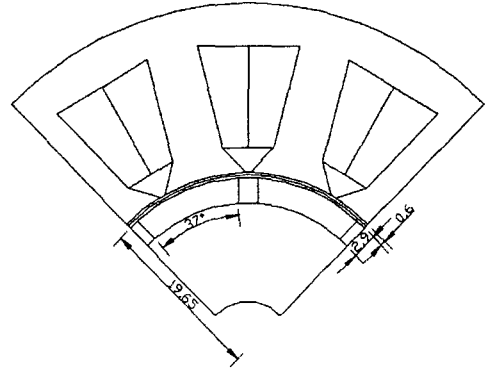


그림 1. 초기모형의 단면도 (1/4극분)

2.1.1 BLDC 전동기의 초기모형 제원

본 논문에서는 로봇구동용으로 현재 일반적으로 사용되는 BLDC 전동기를 기본모형으로 하였다. 그 초기모형의 사양과 회전자 관성 최적화를 위한 기본 형상치수는 다음과 같다.

표 1. 초기모형의 사양

전압[V]	63
상전류[A]	1.74
정격회전수[rpm]	3000
정격토크[kg.cm]	6.5
효율[%]	87.1(84.6)
공극[cm]	0.06
영구자석 두께[cm]	3.0
영구자석의 잔류자속밀도[T]	1.2
회전자직경[cm]	0.3
계자축방향 길이[cm]	1.76
회전자관성[kg.cm ²]	0.904

표 1에서 효율은 철손과 마찰손 등을 고려하지 않은 설계프로세서에 의해 계산된 효율이며 ()안의 값은 실험치를 나타낸다.

2.2 회전자관성최적화를위한설계이론

본 논문에서는 최적화 설계기법으로 유전알고리즘을 사용하였으며, 최적화를 위해 유전알고리즘에 초기 설계조건에서 일반적으로 많이 쓰이는 장하분배법을 기본 프로세서로 하여 등가회로법과 퍼미언스법을 적용하였다. 설계이론의 기본 식들은 다음과 같다.

$$\tau + \tau_0 = \frac{p^2 \Phi_g^2}{\sqrt{2M}} [Nm] = \frac{p^2 \Phi_g^2}{9.8 \sqrt{2M}} [kgm] \quad (1)$$

$$\tau + \tau_0 = K_r I = \left(\frac{m}{2}\right) \cdot \sqrt{2} p k_w u \Phi_g I \quad (2)$$

$$\Phi_g = \frac{3.72}{p} \sqrt{M(\tau + \tau_0)} \quad (3)$$

여기서 M :장하비, p :극수, Φ_g :1극당 유효자속, k_w :권선 계수, w :직렬권수, I :전류, K_r :토크상수, τ_0 :무부하 손실, 토크, τ : 정적 토크

식(1)과 같이 장하 분배법에 의하여 1극 자속을 계산한 후, 설계수순에 따라서 BLDC 전동기의 각 부분의 주요 치수를 구한다. 또한 각 부분의 치수를 퍼미언스법과 등가 회로법에 적용하여 BLDC 전동기의 토크 및 효율 등의 특성을 계산한다.

$$a_m = \frac{1}{2} \psi L_m (D - l_m) = \frac{\alpha_i \pi}{2p} L_m (D - l_m) [cm^2] \quad (4)$$

$$p_u = \frac{l_m}{a_m} \frac{a_g}{k_c l_g} \quad a_g = \frac{1}{2} \psi k_i L_u (D + l_g) \quad k_i = 0.97 \quad (5)$$

여기서 a_m : 자석단면적, ψ : 계자극각도, L_m : 계자축방향 길이, D : 계자직경, l_m : 자석두께, $\alpha_i = p\psi/\pi$: 극호율, p_u : 유효퍼미언스계수, k_c : 카터계수, l_g : 공극길이, k_i : 철심점적율

본 논문에서는 위의 식들을 기본 설계프로세서로 하며 BLDC 전동기의 회전자 관성의 저감을 위해 회전자관성에 관한 식을 동시에 적용하였다. 최적화 프로세서의 중요한 목적함수인 전동기의 회전자 관성에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\text{회전자 관성(Rotor Inertia)} = \frac{1}{4} GD^2 \quad (6)$$

(G : 회전자 질량, D : 회전자 직경=계자직경)

$$\begin{aligned} \text{회전자 질량} = & \text{계자자석 질량} + \text{회전자요크 질량} \\ & + \text{shaft} + \dots \quad (7) \end{aligned}$$

전동기의 회전자는 크게 계자자석, 회전자 요크 그리고 shaft 등으로 구분된다. 회전자의 질량계산을 위해 각각의 재질밀도를 고려하여 계산하며, 회전자요크와 자석재질의 밀도 및 체적을 계산하여 회전자 각 부분의 질량을 계산하였다. 이 식(6)의 회전자의 질량과 회전자 직경은 회전자 관성의 중요한 변수로 작용하므로 회전자 각부분의 질량과 회전자 관성에 관한 식은 최적화 설계 프로세서에 적용된다.

2.2.1 최적화 설계 프로세서

그림 2는 BLDC 회전자 관성 최적화를 위한 설계프로세서를 나타내며, 유전알고리즘의 적용을 위한 목적함수 및 설계변수는 초기모델의 사양과 특성을 고려하여 선정하였다.

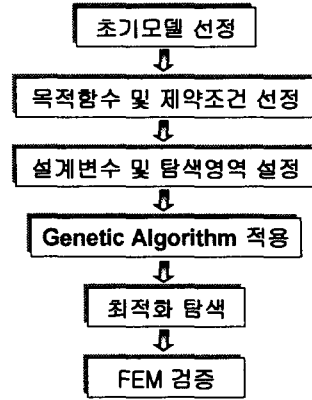


그림 2. 최적화 프로세서

2.2.2 목적함수

일반적으로 전동기의 설계시 그 용도에 따라 설계기준이 달라진다. 본 논문에서는 로부거동을 위한 BLDC 전동기의 회전자 관성의 저감이 목적이므로 목적함수를 전동기의 회전자 관성으로 하였다. 그러나 회전자 관성만을 목적함수로 할 경우 전동기의 효율, 출력과 같은 특성이 줄어들 수 있으므로 BLDC 전동기의 효율까지 목적함수로 선정하였다. 최적화 적용시에는 회전자 관성, 효율 각각에 대해서 최적화 했을때와 두 목적함수를 동시에 고려하였을 때의 결과모델들을 서로 비교하였다. 선정된 목적함수들은 좀 더 빠르고 정확한 수렴을 위한 각각의 제약조건이 필요한. 본 논문에서는 목적함수들에 대한 제약조건으로서 초기모델의 제원을 그대로 적용하였다. 즉, 회전자 관성은 $0.917 [kg \cdot cm^2]$ 이하, 효율은 $87.1[\%]$ 이상으로 설정하였다.

2.2.3 설계변수

BLDC 전동기의 특성에 영향을 주는 설계변수들은 많이 존재한다. 이 변수들 중에는 전동기의 크기와 극수, 슬롯수와 같은 구조적인 변수들과 철심재질, 자석재질과 같은 재질변수 그리고 그밖의 여러 경험적인 변수들이 있다. 본 논문에서는 재질변수 및 경험적인 변수들은 고정된 값으로 하고 목적함수인 회전자 관성과 효율에 크게 영향을 미치는 회전자 직경, 자석두께, 계자축방향 길이, 및 전기자 권선수를 설계변수로 선정하였다.

유전 알고리즘에 의한 최적화 탐색범위는 설계변수에 따라 기본 모델의 $5 \sim 15[\%]$ 로 하였으며 표 2와 같이 선정하였다.

표 2. 설계변수의 탐색범위

설계변수	탐색범위
회전자 직경(X1)	$3.5 \leq X1 \leq 4.5$
자석 두께(X2)	$0.25 \leq X2 \leq 0.35$
계자축방향 길이(X3)	$1.55 \leq X3 \leq 1.95$
전자자 권선수(X4)	$300 \leq X4 \leq 360$

2.2.4 유전알고리즘

유전 알고리즘은 확률적인 방법과 개체간의 체계적인 정보교환을 통해 탐색공간을 조사해 나감으로써 주위환경에 알맞은 가장 적절한 해를 얻고자 하는 방법이다. 유전 알고리즘은 여러 점을 동시에 탐색하는 전역적 탐

색을 하기 때문에 다극점 문제에 있어서 국부수렴 할 가능성이 적고, 확률적인 방법에 의한 의사결정으로 최적점 탐색을 위한 어떠한 가능성도 배제하지 않는 점이 장점 중의 하나이다.

2.2.5 유전알고리즘의 적용

본 논문에서는 앞서 선정된 목적함수와 설계변수들 사이의 관계를 수식을 통해 먼저 확립한 후, 유전 알고리즘에 적용하였다. 그림 3은 적용된 유전 알고리즘의 흐름도를 나타낸다.

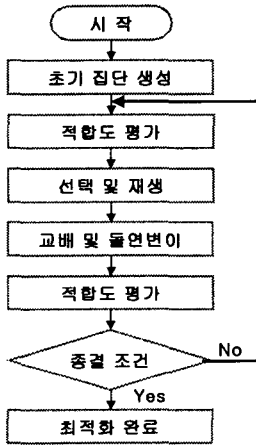


그림 3. 유전알고리즘의 흐름도

회전자 관성과 효율에 대해서 앞서 제시한 제약조건을 두고, 설계변수의 탐색범위를 표 2와 같이 반영하여 유전 알고리즘에 적용하였다. 그림 4는 적용한 유전알고리즘의 수렴특성을 나타냈다.

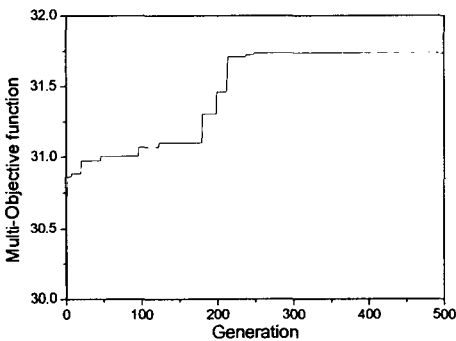


그림 4. 유전알고리즘의 수렴특성

표 3은 유전알고리즘을 이용한 최적화 수행결과 추출된 결과이며, 각각은 회전자 관성, 효율에 대해서 최적화했을 때와 두 목적함수를 모두 고려했을 때, 즉 다중목적일 때의 최적화 결과를 나타낸다. 효율과 관성에 대해서 최적화 수행시, 초기모델을 기준으로 하여 최소값으로 설정하였으며, 효율과 관성 두가지를 동시에 최적화하는 다중목적 최적화의 경우에는 효율은 2%내외, 회전자 관성은 30%내외의 변화를 나타내므로 유전알고리즘 적용시 이에 변화 변화범위를 적용하였다.

표 3. 유전알고리즘에 의한 최적화 수행결과

설계변수 및 목적함수	초기 모델	회전자 관성	효율	다중 목적
회전자 직경(X1)[cm]	3.93	3.54	3.7	3.54
자석 두께(X2)[cm]	0.3	0.33	0.27	0.27
계자축방향 길이(X3)[cm]	1.76	1.58	1.94	1.94
전기자 권선수(X4)[Turns]	328	360	360	360
회전자 관성[kg·cm ²]	0.917	0.602	0.801	0.69
효율[%]	87.1	87.2	88.6	88.3

그 결과, 효율에 대한 최적화 모델의 경우 효율이 1.7[%] 증가하였으며, 회전자 관성에 대한 최적화 모델의 경우 회전자 관성이 34.3[%] 감소를 보였다. 이 두가지를 고려한 다중목적 최적화 모델의 경우, 효율이 1.4[%] 증가하였으며, 회전자 관성은 24.8[%] 감소를 보였다.

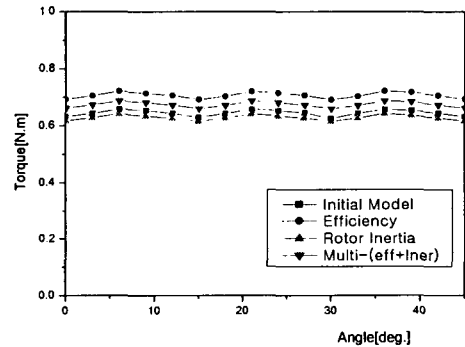


그림 5. 초기모델과 최적화 모델들의 토크특성

그림 5는 유전알고리즘에 의한 최적화 수행결과 추출된 설계변수들을 다시 모델링하여 FEM으로 토크특성을 비교한 것이다. 그림에서 최적화 모델들은 1/2슬롯 skew가 적용되었다.

3. 결 론

본 논문에서는 로부트동용 저관성 BLDC 전동기의 최적 설계를 위해 다중목적 최적화를 위한 병렬 유전알고리즘을 적용하였다. 효율 및 회전자 관성에 대한 최적화 수행 결과, 초기모델과 비교하여 효율증가는 작지만, 회전자 관성면에서 24.8[%] 감소하는 결과를 얻었다. 또한 최적화 결과 추출된 설계변수를 FEM으로 특성해석하였다. 추후 연구과제로는 초기모델과 회전자 관성 최적화 모델의 기동 및 정지시 운전특성을 고려하고자 한다.

[참 고 문 헌]

- 1) 大川 光吉, “永久磁石磁器回路 設計.特性計算法”, TDK CORPORATION, 1987
- 2) 진강규, 유전알고리즘과 그 응용, 교유사, 2002
- 3) J.R.Hendershot Jr and T.J.E. Miller, “Design of brushless permanent magnet motors”, Oxford Magna Physics, 1994
- 4) 이철관, “Niching 유전 알고리즘을 이용한 전기자동차용 유도전동기의 최적설계”, 서울대학교 공학박사 학위 논문, 1998