2002년도 대한전기학회 EMECS학회 추계학술대회 논문집 (2002.11.14-16)

유전 알고리즘을 이용한 BLDC 전동기의 최적 설계

김홍식, 이주현, 전문호, 김창업
호서 대학교 전기공학과

The Optimum Design of Brushless DC Motor using Genetic Algorithm

Hong-Sik Kim, Ju-Hyun Lee, Mun-Ho Jeon, Chang-Eob Kim
Dept. of Electrical Engineering Hoseo University

Abstract - This paper proposes the optimum design of a Brushless DC(BLDC) motor using Genetic algorithm and SUMT. The efficiency is chosen as the object function.

1. 서 론

BLDC(Brushless Direct Current) 전동기는 산업의 정밀화, 소형 경량화, 다기능화 되어감에 따라 유도전동기나 일반 직류전동기보다 운전 특성이 좋고 효율이 높다. 브러시의 잡음이 적고, 신뢰성이 높으며 수명이 길어서 VCR, FDD, CDP 등의 제품에 소형경량화를 위해 많이 사용되고 있다.

BLDC 전동기의 사용목적에 따라서 설계를 진행하는데, 설계시 변수를 일반 비선형의 일종인 순차 비제약 최소화 기법(Sequential Unconstrained Minimization Techniques : SUMT)을 도입하고 유전 알고리즘을 이용하여 설계변수의 최적화를 하였다. 목적함수는 BLDC의 효율로 잡았으며 초기설계와 최적화된 특성차를 비교 검토하였다.

2. BLDC 전동기의 최적설계

2.1 BLDC 전동기의 특성

BLDC 전동기의 특성은 다음과 같다[1]. 그림 1은 등가 회로를 나타낸 것이다.

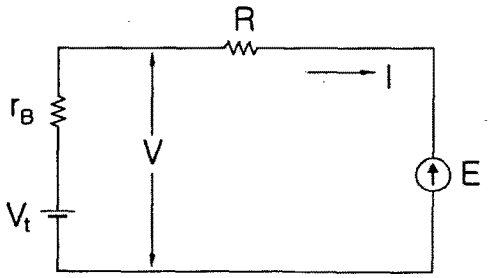


그림 1. BLDC 전동기의 등가회로
Fig. 1. Equivalent circuit BLDC motor

공급전압을 V, 전기자회로 전저항을 R, 전기자 전류를 I라고 하면, 전기자 회로에서의 회로방정식은 다음과 같이

$$V = E + IR \tag{1}$$

$$V = V_t - Ir_B \tag{2}$$

$$V = E + I(R + r_B) \tag{3}$$

공급 전압은 전기자 유도기전력 또는 역기전력에 회로의 저항 전압강하 분을 더한 것과 같다. 공급전압이 일정하면, 전동기의 정상동작시 위의 식은 항상 성립한다.

역기전력 E는 전류의 변화를 방해하는 방향으로 발생하는 전압으로

$$E = \frac{P \cdot Z \cdot \phi}{60a \times 10^8} \cdot N = K_E \cdot N \tag{4}$$

으로 나타낼 수 있다.

V - 공급전압[V]
V_t - 기전력[V]
R - 전저항[Ω]
r_B - 내부저항[Ω]
I - 전기자 전류[A]
N - 정격속도[rpm]
τ - 정격 토오크[kgcm]
K_E - 역기전력 정수
m - 상수

전동기의 입력 W, 출력 P는 다음과 같이

$$W = mV_t I\cos\phi \ [W] \tag{5}$$

$$P = 1.027\tau N \times 10^{-2} \ [W] \tag{6}$$

이며, 효율 η는

$$\eta = \frac{P}{W} \tag{7}$$

이다.

2.2 최적 설계 방법

2.2.1 최적화 이론

최적화 문제에 적용하기 위한 방법으로 비선형 최적화 프로그래밍은 식(8)로 표현된다.

$g_j(X) \le 0$(j=1,2,3,…,m)의 조건에서
$f(X)$를 최소화시키는 X를 찾는다. (8)

여기서 $X = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$는 독립 설계 매개변수, n은 매개변수의 개수, j는 제약 조건의 개수이다.

본 논문은 SUMT를 사용하였으며[2], 이러한 최적화 문제를 다른 형식으로 변환시켜 다음 식(9)으로 해를 구한다.

Φ_k(적합도)의 최대화값 X는

$$\Phi_k = \Phi(X, r_k) = f(X) - r_k \sum_{j=1}^{n} G_j[g_j(X)] \quad (9)$$

여기서 $r_k(k=1,2,\cdots)$는 Penalty 매개 변수이다.
목적 함수로는 전동기의 효율을 선택하였다.

2.2.2 유전 알고리즘

유전알고리즘은 확률적인 방법과 개체간의 체계적인 정보교환을 통해 탐색공간을 조사해나감으로써 주위환경에 알맞은 가장 적절한 해를 얻고자 하는 방법이다. 유전알고리즘은 여러 점을 동시에 탐색하는 전역적 탐색을 하기 때문에 다극점(multimodal) 문제에 있어서 국부수렴(local convergence) 할 가능성이 적고, 확률적인 방법에 의한 의사결정으로 최적점 탐색을 위한 어떠한 가능성도 배제하지 않는 점이 장점중의 하나다.

가) 유전적 탐색을 위한 기본 설정

인공적인 염색체인 스트링상에 이진수의 유전자형(genotype)으로 코딩(coding)된 유전정보는 개체의 표현형(phenotype), 즉 실변수값을 얻기 위한 과정이 필요하다.
한 변수에 대한 스트링의 길이를 l_i로 할당하면 스트링이 나타내는 이진수 b_i의 범위는 $[0, 2^{l_i}-1]$이 되고 이 값은 다음 식(10)에 의해 실변수의 범위 $[x_i^{\min}, x_i^{\max}]$로 선형적으로 mapping된다.

$$x_i = x_i^{\min} + \frac{b_i}{2^{l_i}-1}(x_i^{\max} - x_i^{\min}) \quad (10)$$

나) 스트링 길이

각 변수의 스트링 길이 결정은 최적점 탐색의 분해능(resolution)과 관계되는 문제이다. 만일, 최적점 탐색에 있어 한 변수값에 요구되는 정밀도가 $p(x_i)$라면 그 변수에 할당되어야 할 스트링상의 비트수 l_i(정수)는 다음을 만족하여야 한다.

$$l_i \geq \log_2\left(\frac{x_i^{\max} - x_i^{\min}}{p(x_i)} + 1\right) \quad (11)$$

스트링의 전체길이 l은 각 변수에 할당된 비트수의 합으로 결정된다.

$$l = \sum_{i=1}^{m} l_i \quad (12)$$

다) 적합도 평가

스트링의 전체길이 l이 결정되면, 유전알고리즘을 이용한 최적화문제는 2^l개의 점이 존재하는 이산적인 탐색공간에서 적합도를 최대화하는 점을 찾는 문제로 단순화된다. 그러므로, 목적함수 최소화문제를 적합도 최대화 문제로 변환하는 과정이 필요하며, 이는 목적함수의 역으로 쉽게 얻을 수 있다.

$$Fitness(A) = 1/P(X) \quad (13)$$

여기서, X는 스트링 A의 2진정보를 식에 의해 mapping 하여 얻어지는 $m\times1$의 변수벡터이다. 각 세대마다 모든 개체는 적합도에 대한 평가(evaluation)를 시행하고 적합도값의 결과는 우열관계, 교차, 교배에 중요한 정보가 된다.

라) 기본 유전 연산자

재생산 - 개체의 적합도 값에 따라 적응성이 높은 개체만이 적자생존 방식으로 선택되어 자손을 번식시킬 수 있다. Roulette wheel을 이용하여, 적합도에 비례한 개가 확률적으로 주어진다.

교배 - 분열 과정 중 2개의 염색분체가 일부 유전자를 서로 교환하는 현상으로, 유성생식모델에서는 먼저 어버이의 스트링을 2개씩 만들어 이중 하나씩 2개의 스트링이 서로의 유전자를 교환한다.

돌연변이 - 돌연변이는 일정확률로 유전자의 값을 바꾸는 방법이 일반적이며, 염색체의 일정구간을 확률적으로 선정, 상위비트와 하위비트의 값을 서로 교환하는 방법이다[3].

표1은 전동기의 설계변수와 제약조건, 그림 2는 각 설계변수들의 형상을 나타낸다.

표 1 설계 변수와 제약 조건
Table 1 Design parameter and constraints

설계 변수	제약 조건
X_1: ANG(자극각)	$g1$: 전기자외경 $D0 \leq 125[mm]$
X_2: TR(자석두께)	$g2$: 1극당 자속 $\Phi \geq 100000[Mx]$
X_3: TY(요크두께)	$g3$: 자석평균단면적 $AM \leq 40[mm^2]$
X_4: TW(치폭)	$g4$: $60 \leq ANG \leq 90[^\circ]$
	$g5$: $10.0 \leq TR \leq 25.0[mm]$
	$g6$: $5.0 \leq TY \leq 10.0[mm]$
	$g7$: $2.0 \leq TW \leq 6.0[mm]$

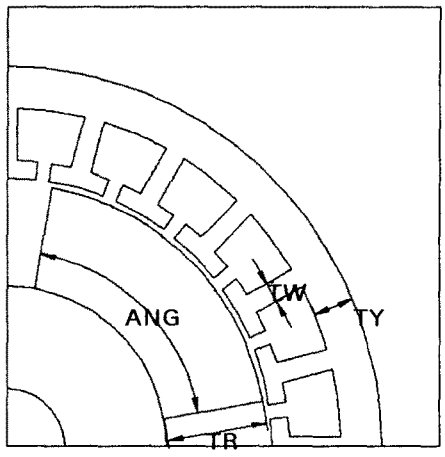


그림 2. 설계 변수
Fig. 2. Design parameters

2.3 해석 및 결과 검토

그림 3은 초기 모델과 최적화된 설계변수를 실선과 파선으로 나타내었다.

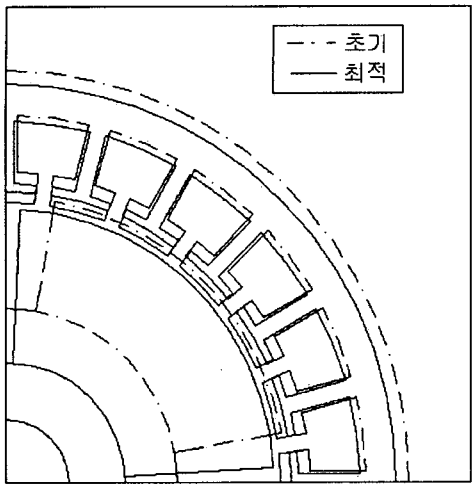


그림 3. 초기 모델과 최적 모델 비교
Fig. 3. Initial and optimum design

표 2는 BLDC 전동기의 초기 모델과 최적 설계 변수들에 대한 수치이다.

초기 모델에 비하여 철심외경은 2.5%가 줄어들고, 효율은 6%가 향상되었으며, 손실이 31.2%가 감소하여 고효율화가 가능하게 되었다.

표 2 설계 변수
Table 2 Design parameter

설계 변수		초기모델	Genetic
자석계자외경	[mm]	90	86.4
자극각도	[deg]	70	84
자석두께	[mm]	17.5	24.2
전기자철심내경	[mm]	92	88.4
슬롯높이	[mm]	12	12.8
슬롯개구폭	[mm]	2.5	2.5
철심치폭	[mm]	3.5	2.6
요크두께	[mm]	5.5	5.9
철심외경	[mm]	129	125.8
철심중량	[kg]	3.99	2.62
효율	[%]	86	92
손실	[W]	41.7	13.0

그림 4는 토오크에 대한 속도 곡선으로 설계시 요구사항(무부하속도)을 벗어나지 않았다.

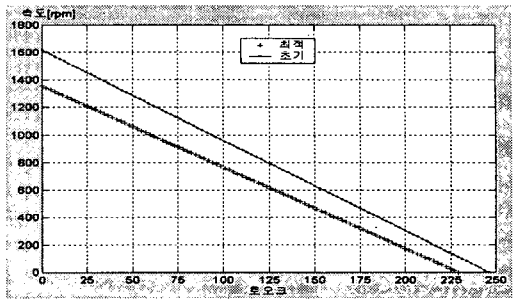


그림 4. 토오크-속도 특성
Fig 4. Torque-Speed characteristics

그림 5는 토오크에 대한 전류 곡선으로 설계시 요구사항을 벗어나지 않았다

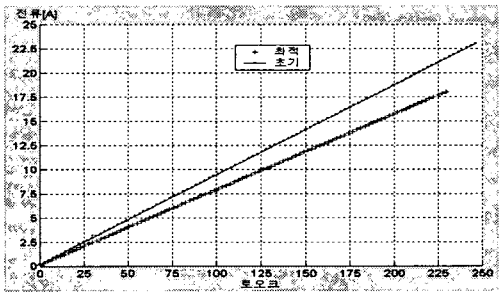
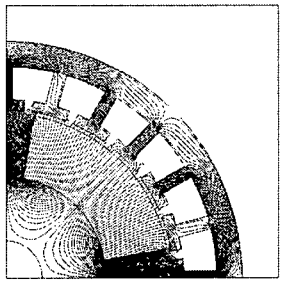
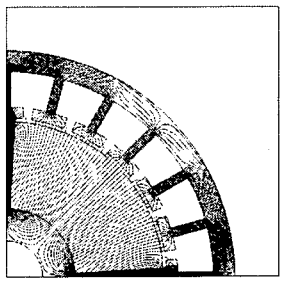


그림 5. 전류-토오크 특성
Fig 5. Current-Torque characteristics



(a) 초기 모델의 자속 분포



(b) 최적화 모델의 자속 분포

그림 6. 자속분포
Fig. 6. Flux distributions

그림 7부터 그림 12까지는 유전 알고리즘을 이용하여 구한 설계변수들을 나타낸 것이다.

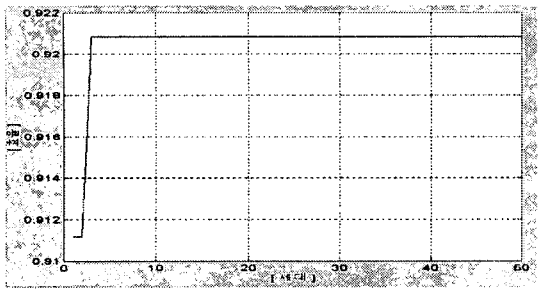


그림 7. 목적 함수(효율)
Fig. 7. Object function(Efficiency)

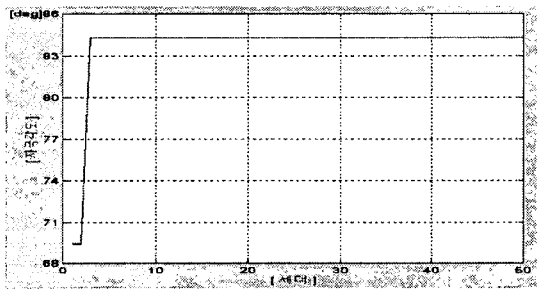


그림 8. 자극 각도
Fig. 8. Magnet Angle

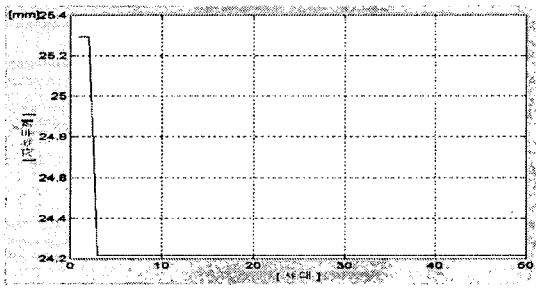


그림 9. 자석두께
Fig. 9. Magnet thickness

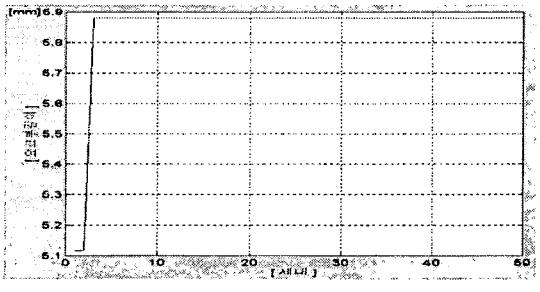


그림 10. 요크 두께
Fig. 10. York thickness

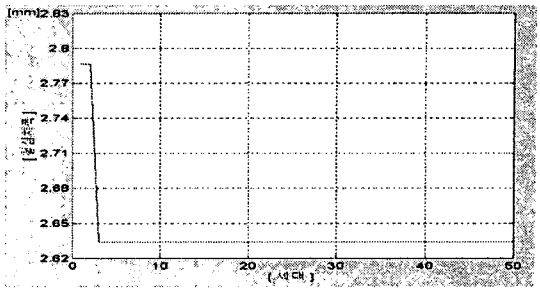


그림 11. 치폭
Fig. 11. Teeth Width

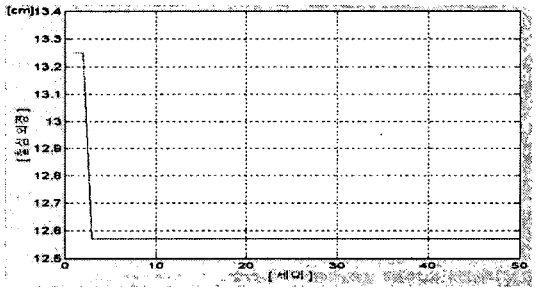


그림 12. 외경
Fig. 12. External Diameter

3. 결 론

본 논문에서는 BLDC 전동기의 설계치수의 최적화방법으로 국소해의 수렴을 피하고, 전체 최적점을 발견할 가능성이 높은 유전 알고리즘을 사용하였다.

유전 알고리즘을 전동기의 효율을 최대로 하는 것을 설계의 목적으로 하는 BLDC 전동기의 설계에 적용하여 설계목적을 만족하는 전동기의 치수를 도출하였다.

초기 모델보다 6% 높은 효율을 얻을 수 있는 전동기의 설계변수를 얻었다.

[참 고 문 헌]

[1] 大川光吉, 永久磁石磁氣回路の設計特性計算法, 綜合電子リサーチ, 1987.

[2] 임달호, 이철직, 박승찬, "등가회로법과 SUMT를 이용한 편측식 선형유도 전동기의 설계변수 최적화", 대한 전기학회 논문지, vol. 42, no. 5, pp. 340-343, 1993.

[3] David E. Goldberg, Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-wesley, 1989.

[4] Duane C. Hanselman, Brushless Permanent-Magnet Motor Design, McGraw-Hill, Inc, 1994.