

개선된 (1+1) Evolution Strategy 를 이용한 유도전동기의 다중목적 최적 설계

*김민규, *이철균, *박정태, 정현교
 서울대학교 전기공학과 *현대중공업(주) 중앙연구소

**Multiobjective Optimal Design Technique for Induction Motor
 Using Improved (1+1) Evolution Strategy**

M.K. Kim, *C.G. Lee, *J.T. Park, H.K. Jung

Dept. of Electrical Engineering, Seoul National University, Seoul, KOREA
 *Hyundai Heavy Industries CO.,LTD.

Abstract

The multiobjective optimization is presented for the optimal design of induction motors. The aim of design is to find an optimized induction motor in terms of both the efficiency and the mass. The efficiency and the mass are linearly combined using the weighting factors. Optimization process is performed by using the improved (1+1) evolution strategy (ES). ES is the algorithm that can find the global minimum. To verify the validity of the proposed method, the method is applied to a sample design.

1. Introduction

다중목적함수의 최적화란 해석자가 최적화하려는 목적이 2개 이상인 경우의 최적화이다. 일반적으로 다중목적함수의 최적화는 의사결정 견해가 완전히 배제된 상황이라면 여러가지의 최적해군(set of feasible solution)이 발생한다. 따라서 의사결정의 단계에서 의지가 반영된 무관심 곡선(indifference curve)으로 최적해군 중에서 최적해를 찾아내게 된다[1]. 전기자동차의 경우 축전지에 의한 전기에너지가 한정되어 있기 때문에 모터의 효율과 함께 중량은 또 하나의 중요한 요소가 된다. 따라서, 전동기 설계자에게는 고효율 경량모터의 설계가 요구된다. 그러므로, 이러한 모터의 최적 설계는 다중목적 최적화 문제가 된다. 다중목적 최적화에 있어서 본 논문에서는 가중치법(weighting method)을 사용하여 가중치 요소에 의한 모터의 효율과 중량을 목적함수로 선택하였다[1]. 이 방법에서 주된 내용은 모든 개개의 목적함수에 가중치를 적용하여 하나의 목적함수로 표현하는 것이다. 본 논문에서 사용한 설계 과정은 synthesis, analysis, 최적화등 크게 세가지로 나누어진다. 첫째, synthesis는 설계를 유발하는 과정으로 독립변수들, 다른 설계정보와 모터 성격등으로 이루어진 집합에 기초를 한다. 다음으로 analysis는 정상상태에서의 회로정수를 도출하여 모터의 특성을 계산하는 과정이다. 마지막으로 최적화 과정에는 개선된 ES 알고리즘이 사용되었다. 개선된 ES 알고리즘은 절대최소점(global minimum)을 찾을 수 있고[2], 비결정론적 최적화 방법중 수렴 속도가 비교적 빠른 특성을 보인다.

2. DESIGN PROCEDURE

Synthesis는 설계를 하기 위한 과정으로 독립변수와 모터의 사양등 여러 가지 변수 및 상수로 이루어진 집합에 기초하여 구성된다. 우선 우리는 타당성 있는 모터를 설계하는 방법을 찾아야 하는데, synthesis는 최적화 변수의 선택과 타당성 있는 설계를 포함하고 있다. 만약 어떠한 최적화 기준에 관계없이 검색이 가능하다면 우리는 그 방법을 "synthesis"라고 부를 수 있다[3][4]. 독립변수의 선택은 요구되어지는 모터의 사양(또는 상수)에 따라 바뀐다. 여기서 설계의 제약 조건은 출력 Po와 정격 토크에 대한 기동 토크비 kst이다. 설계변수는 내종류의 자속밀도와 회전자 바 전류밀도, 그리고 세개의 형상 변수로 선택했다. 목적함수에 큰 영향을 주지 않는 변수들은 이차 변수로 선택하여 상수로 결정해준다. 본 논문에서는 여덟개의 독립변수로 부타 회전자를 설계한후 고정자를 설계한다.

2.1 Synthesis

본 논문에서는 설계변수를 고정자와 회전자의 치와 요크에 대한 내종류의 자속밀도와 회전자 바 전류밀도, 그리고 세개의 형상 변수로 선택했다. 세개의 형상변수는 고정자 슬롯 깊이와 회전자 슬롯의 밑부분 폭에 대한 회전자 치폭비율, 그리고 회전자 슬롯 내반경과 외반경의 비율이 된다. 이차변수들은 슬롯수, 고정자 슬롯의 점적율, 고정자 슬롯 opening, 고정자 권선, 회전자 동형바의 형태등이 된다. 극족수 p, 인가전압 Vi, 주파수 f 또한 상수로 취급한다.

우선 회전자와 고정자의 슬롯은 치폭이 나란한 형태로 가정한다. 다음식에서 회전자 각부의 반경을 얻을수 있다.,

$$I_{obs} = \frac{R_{or}}{R_{sbr}}$$

$$R_{br} = \frac{R_{sh}}{\pi B_{tr} \left(1 - \frac{P_{\pi}}{B_{tr} (1 + I_{bst}) q \cdot \sin \frac{P_{\pi}}{2q}} \right)}$$

그리고, 다음식에서 회전자 슬롯폭과 치폭의 값을 얻을 수 있다.

$$W_{tr} = \frac{2\pi R_{sbr}}{q(1 + f_{sbr})}$$

$$W_{sbr} = f_{sbr} \cdot W_{tr}$$

축방향 길이와 정격 슬립은 다음식에서 구할 수 있다.

$$L_s = \frac{P_o + 2q R_{er} l_{erk}^2}{l_{erk} q \left(\frac{\omega}{\sqrt{2}} W_{tr} B_{tr} - 4R_{dar} \sin^2 \frac{p\pi}{2q} \right) l_{erk}}$$

$$S_n = \frac{\sqrt{2} (2 R_{er} + 4R_{dar} L_s \sin^2 \frac{p\pi}{2q}) l_{erk}}{\omega W_{tr} B_{tr} L_s}$$

고정자 설계는 회전자 자료와 설계변수로 부터 도출한다[5]. 설계변수에서 고정자 요크폭과 치폭을 결정한다. 그림 1.에 설계 흐름도를 제시하였다.

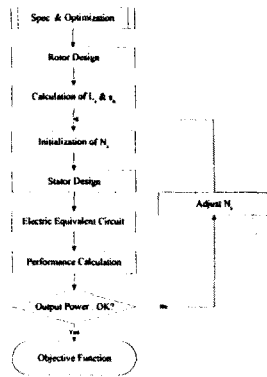


Fig. 1. 설계 흐름도

설계된 건동기의 특성 계산을 위해 T-등가회로를 사용하였다 [6][7].

2.2 Improved (1+1) Evolution Strategy Algorithm

ES는 생명체의 적응진화 과정을 모사한 생물학적 알고리즘인 Genetic Algorithm과 금속의 제련과정중 풀림과정을 통해 금속이 최대한 안정된 상태가 되는 과정을 본뜬 Simulated Annealing에서 환경에 따라 변이의 폭을 조정하여 적응하는 과정을 모사하여 합성된 방법으로 비결정론적 방법중 빠른 수렴특성을 갖고 있다. 그러나, 변수의 개수가 증가하면 수렴속도가 기하급수적으로 감소하고, 변수의 수가 보다 증가하면 절대 극값을 못찾는 경우도 발생한다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 절대극값을 찾을 수 있는 가능성을 보다 많이 부여해 주면서 수렴속도를 증가시켜야 할 필요가 발생하였다. 개선된 (1+1) ES는 다음의 차례로 구현된다.

step1. (초기값 선택): 전체 Evolution Window에서 임의의 개체들을 발생시킨후 개체에 대한 목적함수를 계산하여 가장 우수한 개체를 초기목적함수로 선택

step2. (재생산): 자식세대의 발생

$$X_{ci} = X_{pi} + a_i \cdot R_i$$

a_i : X_{pi} 를 중심으로한 변이가능폭

R_i : 평균이 0이고 (-1,1)에서 균등분포를 갖는

확률밀도함수

step3. (선택): 적자생존원리에 의해서 우수한 개체가 선택된다. X_p 와 X_c 에 해당하는 목적함수를 F_p 와 F_c 라 하면

$$X_p = X_c \quad \text{if} \quad F_c < F_p$$

$$X_p \quad \text{if} \quad F_c > F_p$$

step4. (annealing): 변이가능폭을 다음의 규칙에 의해서 변화시킨다.

$$a = a \cdot 0.85 \quad \text{if} \quad 10 \text{세대동안의 변이 회수} > 10 \cdot N/5$$

$$a/0.85 \quad \text{if} \quad 10 \text{세대동안의 변이 회수} \leq 10 \cdot N/5$$

N : 설계변수의 수

step 5 (shaking): 전체 Evolution Window 영역에서 임의의 개체에 대한 목적함수 계산

shaking의 빈도는 수렴정도에 따라서 변화한다.

step5. (종료): 요구하는 해에 대하여 조건을 만족하면 이 과정을 종료한다. 아니면 step2로 되돌아 간다.

제시한 ES 알고리즘과 일반적인 ES의 비교를 위하여 목적함수로 sinc function을 이용하였다. 그림 2.는 변수의 개수가 10개일 경우에 대하여 개선된 ES와 일반적인 ES의 수렴특성을 나타낸다.

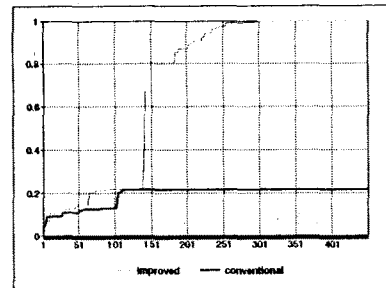


그림 2. 개선된 ES와 일반적인 ES의 수렴특성 비교

2.3 Objective Function

최적화에 대한 기준은 요구되는 사항에 따라 변화하게 된다. 전기자동차 구동용 모터에서는 효율은 최대화되고 중량은 최소화 되어야한다. 효율의 최대화는 손실의 최소화이므로 손실과 중량을 최소화하는 방향으로 최적화한다. 따라서 목적함수는 다음과 같이 손실과 중량으로 구성된다.

$$F = W_{\text{loss}} \cdot w_l + M_{\text{motor}} \cdot w_m$$

여기서 W_{loss} : 손실, M_{motor} : 모터의 중량
 w_l, w_m : 손실과 중량에 대한 가중치

3. Numerical Example

다음의 조건을 만족시키는 전동기를 설계한다. 그림 3에 가중치의 변화에 의한 설계 결과물, 그림 4에 각 변수들의 최적화 과정을, 그리고 그림 5에 목적 함수의 수렴 과정을 나타내었다.

i) 전동기 사양

3 상, 4 극, P_o : 15[kw], kst : 1.5, f : 100Hz, V_1 : 170[V]

ii) 고정값

R_{sh} : 25, q : 40, N_{pp} : 4, W_{sor} : 1.5, h_{sor} : 1.5,
 W_{sos} : 4, h_{sos} : 1.5

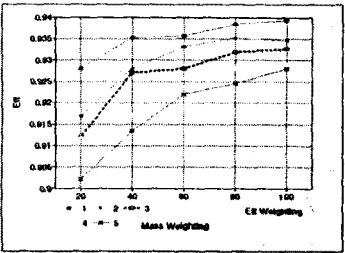
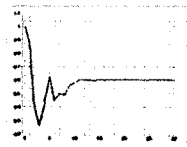
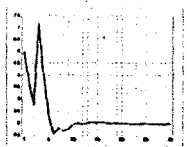


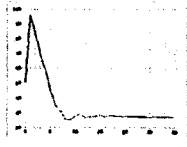
그림 3. 가중치에 대한 효율의 변화



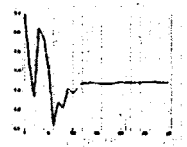
(a) Design variable 1.



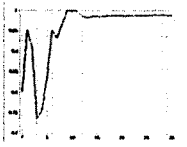
(b) Design variable 2.



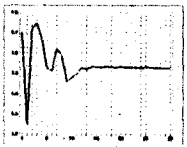
(c) Design variable 3.



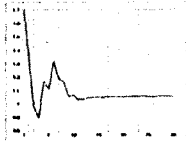
(d) Design variable 4.



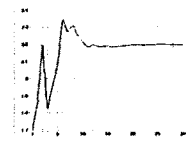
(e) Design variable 5.



(f) Design variable 6.



(g) Design variable 7.



(h) Design variable 8.

그림 4. 설계변수들의 최적화 과정

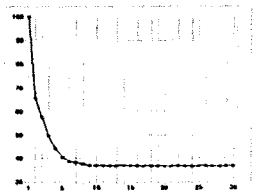


그림 5. 목적함수의 수렴 과정

최종 결과는 효율 89.99%, 중량 41kg.로 목적에 적절한 값을 얻었음을 알 수 있다.

4. Conclusion

본 논문에서는 개선된 (1+1) Evolution strategy 알고리즘을 다중 목적함수의 최적화 문제에 적용시켰다. 제안한 (1+1) Evolution strategy 알고리즘은 일반적인 Evolution Strategy 알고리즘에 비해 많은 변수에서 우수한 수렴특성을 보였다.

전기자동차 구동용 유도전동기 설계를 위하여 손실과 중량을 가중치를 선택조합하여 목적함수를 구성하였고, 가중치범을 이용하여 noninferior set 에서 가장 합당한 해를 구하였다. 결과물 통하여 제안된 방법이 다중목적 최적화에 적절함을 보였다.

REFERENCE

- [1] Jared L. Cohon, *Multiojective Programming and Planning*, ACADEMIC PRESS, 1978, Chapt.3-4.
- [2] Hans-Paul Schwefel, *Numerische Optimierung von Computer Modellen mittels der Evolutionsstrategie*, John Wiley & Sons,LTD., Chap.4-6.
- [3] M. Nurdin, M. Poloujadoff and Faure, "Synthesis of Squirrel Cage Motors : A Key to Optimization", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.EC-6, No. 2, pp. 327-335, 1991
- [4] M.Poloujadoff and Z. Amine Es-Sbai, "A State Variables Method for the Optimization of an Inertia", *Journal DePhysiqueIII*, pp531-541, 1994
- [5] M.K. Kim, C.G. Lee, J.T. Park, H.K. Jung, S.Y. Hahn, "Optimization of Three Phase Induction Motor Using Univariant Search Method", *ICEE*, pp. 544-547, 1995
- [6] Kuhlmann, *Design of Electrical Apparatus*, John Wiley & Sons, New York, U.S.A, 1950, Chap. 17-18, pp. 296-326
- [7] Cyril G. Veinott, *Theory and Design of Small Induction Motor*, McGraw Hill Book Company, New York, U.S.A, 1959, Chap. 18, pp. 335-340