

# (1+1) Evolution Strategy 를 이용한 유도전동기의 최적 설계

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

## High-Efficiency Light-Weight Motor Design Technique for Electric Vehicle Using Evolution Strategy

M.K. Kim, C.G. Lee, J.T. Park, H.B. Lee, H.K. Jung, S.Y. Hahn

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

### Abstract

In this paper, the squirrel cage induction motors required multi-objective function are designed. As the objective function of the optimization program, we select the linear combination of loss and mass of motors by using weighting factors. Optimization process is performed by using the evolution strategy (ES). ES is the algorithm that can find the global minimum. To verify the validity of the proposed method, a sample design is tried.

### 1. 서론

최근 전기 에너지의 고가로 인해 고효율 유도전동기의 수요가 증가하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 여러 설계자들이 다양한 최적화 기술을 제시했다. 유도전동기의 최적 설계 방식은 특성에 대한 이해로부터 전동기의 변수를 결정하기 위한 현대적인 접근 방식이다. 그리고 전기자동차의 경우 축전지에 의한 전기에너지가 한정되어 있기 때문에 모터의 중량은 또 하나의 중요한 요소가 된다. 따라서, 전동기 설계자에게는 고효율 경량모터의 설계가 요구된다. 그러므로, 이러한 모터의 최적 설계는 다목적 최적화 문제가 된다. 다목적 최적화에 있어서 일반적으로 사용하는 방법은 선형조합법(linear combination method)이다[1]. 이 방법에서 주된 내용은 모든 개개의 목적함수를 가중치가 적용된 하나의 목적함수로 조합하는 것이다. 본 논문에서는 가중치 요소에 의한 모터의 효율과 중량의 선형조합법을 사용했다.

본 논문에서 사용한 최적화 설계는 synthesis, analysis, 최적화 등 크게 세가지로 나누어진다. 첫째, synthesis는 설계를 유발하는 과정으로 독립변수들, 다른 설계정보와 모터 정격등으로 이루어진 집합에 기초를 한다. 다음으로 analysis는 정상상태에서의 회로 정수들을 도출하여 모터의 특성을 계산하는 과정이다. 마지막으로 최적화 과정에는 ES 알고

리즘이 사용되었다. 이 알고리즘은 절대최소점 ( global minimum ) 을 찾을 수 있고[2], 비결정론적 최적화 방법중 수렴 속도가 비교적 빠른 특성을 보인다.

### 2. SYNTHESIS

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  $P_o$  와 정격 토크에 대한 기동 토크비  $k_{st}$  이다. 우리는 설계변수를 고정자와 회전자 치와 요크에 대한 내충류의 자속밀도와 회전자 바 전류밀도, 그리고 두개의 형상 변수로 선택했다. 두개의 형상변수는 고정자 슬롯 길이와 회전자 슬롯의 밑부분 폭에 대한 회전자 치폭비율이 된다. 목적함수에 큰 영향을 주지 않는 이차 변수들은 상수로 결정해준다. 이차변수들은 슬롯수, 고정자 슬롯의 점적율, 고정자 슬롯 opening, 고정자 권선, 회전자 농형바의 형태등이 된다. 극쌍수  $p$ , 인가전압  $V_1$ , 주파수  $f$  또한 상수로 취급한다.

우선 우리는 일곱개의 독립변수로 부터 회전자를 설계한 후 고정자를 설계한다.

### 2.1 회전자 설계

회전자와 고정자의 슬롯은 치폭이 나란한 형태이다. 따라서 회전자 슬롯 모양에 중요한 비율은 다음과 같다[5]

$$r_{sw} = \frac{w_{sr}}{w_r} \quad (1)$$

$r_{sbr}$ 이 0일 경우 회전자 슬롯은 삼각형이 된다. 다음식에서 회전자 각부의 반경을 얻을 수 있다.

$$r_{obs} = \frac{R_{or}}{R_{sbr}} \quad (2)$$

$$R_{sbr} = \frac{R_{sh}}{1 - \frac{\pi B_{tr}}{B_{yr}(1+r_{sbr})q \cdot \sin \frac{P\pi}{2q}}} \quad (3)$$

여기서 슬롯과 치폭의 값을 얻을 수 있다.

$$w_{tr} = \frac{2\pi R_{sbr}}{q(1+r_{sbr})} \quad (4)$$

$$w_{sbr} = r_{sbr} \cdot w_{tr} \quad (5)$$

축방향 길이와 정적 슬립은 다음식에서 구할 수 있다.

$$L_s = \frac{P_o + 2q R_{er} I_{erk}^2}{I_{erk} q \left( \frac{\omega}{\sqrt{2}} w_{tr} B_{tr} - 4B_{bar} \sin^2 \frac{P\pi}{2q} I_{erk} \right)} \quad (6)$$

$$s_n = \frac{\sqrt{2}(2R_{er} + 4R_{bar} L_s \sin^2 \frac{P\pi}{2q}) I_{erk}}{\omega w_{tr} B_{tr} L_s} \quad (7)$$

## 2.2 고정자 설계

일반적으로 공극길이와 고정자 슬롯 opening은 기계적 고려에 의해서 구해진다. 우선 고려되어야 할 중요한 변수는 고정자 치자속밀도이다. 이는 회전자 치자속밀도의 함수로 나타내어 질 수 있다.

$$B_{tr} = k_w \cdot B_{tr} \quad (8)$$

$k_w$ 은 임의의 값 ( $0 \leq k_w \leq 1$ )이다. 고정자 요크의 높이와 고정자 치폭은 다음 공식에서  $B_{yr}$ 와  $B_{tr}$ 로 부터 구할 수 있다.

$$h_{yp} = \frac{\phi}{2B_{yr} L_s k_s} \quad (9)$$

$$w_{tr} = \frac{\phi}{B_{tr} L_s P m N_{app} k_s} \quad (10)$$

$\phi$ 는 극당 자속,  $\phi_s$ 는 총자속이다.

## 3. (1+1)Evolution Strategy

ES는 생명체의 적응진화 과정을 모사한 생물학적 알고리즘인 Genetic Algorithm과 금속의 재련과정중 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. ES는 다음의 세 과정으로 나누어 설명할 수 있다.

재생산 : 일정한 유전적 범위내에서 다음 세대를 복제

변이 : 외부요인에 따른 돌연변이

Annealing : 주어진 환경에서 적응해 가는 과정

이러한 과정을 수치적으로 모사하여 최적화 알고리즘에 도입하면, 적당히 선정된 n개의 모델변수 집합들이 부모 세대를 구성하고, 재생산 과정에 의해 m개의 모델변수 집합들이 형성되면 이들이 자식세대를 형성한다. 그리고 n개의 부모세대와 m개의 자식세대로 부터 적자 생존의 원리에 입각하여 우수한 목적함수를 갖는 n개의 모델변수 집합들을 선택하여 새로운 부모세대를 구성한다. 이러한 방법을 (n+m) ES라 한다. 본 논문에서는 부모세대와 자식세대의 집합이 각각 1개씩인 (1+1) ES를 사용하였다. 실제 (1+1) ES는 다음의 차례로 구현된다.

step1. (초기화): 초기설계변수에 대한 초기목적함수 계산

step2. (재생산): 자식세대의 발생

$$X_{ci} = X_{pi} + a_i R_i \quad (11)$$

$a_i$ :  $X_{pi}$ 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

$$X_p = \begin{cases} X_c & \text{if } F_c < F_p \\ X_p & \text{if } F_c > F_p \end{cases}$$

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

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

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

N: 설계변수의 수

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

그림 1.은 ES에 의한 최적화 과정을 나타낸다.

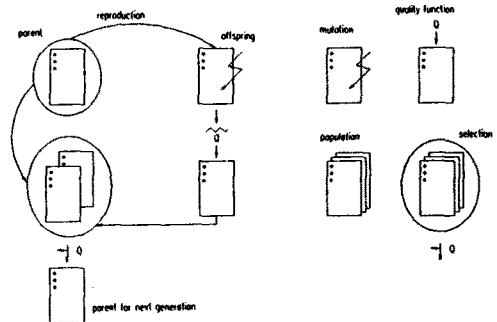


그림 1. (1+1)ES의 과정

## 4. Objective Function

최적화에 대한 기준은 요구되는 사항에 따라 변화하게 된

다. 소비자의 입장에서는 초기가격과 유지비가 최소인 것을 원하고 제작자는 재료비와 생산비용을 줄이기 위해 노력할 것이다. 항공기용 모터의 경우는 중량이 최소화되어야 할 것이다. 본 논문에서 다루는 EV 용 모터에서는 효율은 최대화되고 중량은 최소화되어야 한다. 효율의 최대화는 손실의 최소화이므로 손실과 중량을 최소화하는 방향으로 최적화한다. 목적함수는 다음과 같이 손실과 중량으로 구성된다.

$$F = W_{\text{loss}} \cdot w_l + M_{\text{motor}} \cdot w_m \quad (12)$$

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

### 5. Numerical Example

각각의 목적함수(손실과 중량)에 대한 가중치를 결정하는 것은 어려운 일중에 하나이다. 그 이유는 구동 시스템의 형태나 모터의 출력등에 따라 변화되어지기 때문이다. 따라서 가중치의 변화에 의한 설계 결과를 그림 2.에 제시한다. 그에 따른 조건들은 다음과 같이 주어진다.

i) 전동기 사양

$P_o$ : 15[kw],  $kst$ : 1.5,  $f$ : 100Hz,  $m$ : 3,  $P$ : 4,  $V_1$ : 170[V]

ii) 독립변수

$r_{abr}, \delta_{bar}, h_{ahs}, k_{sr}, B_{lr}, B_{yr}, B_{ys}$

iii) 고정값

$R_{sh}$ : 2.5,  $q$ : 40,  $N_{ep}$ : 4,  $W_{sor}$ : 1.5,  $h_{sor}$ : 1.5,

$W_{sos}$ : 4,  $h_{sos}$ : 1.5

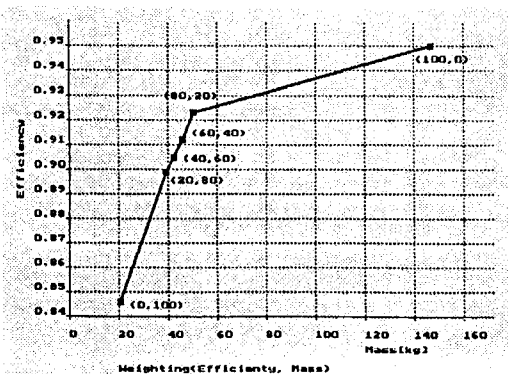


그림 2. 가중치 비율의 변화에 따른 효율과 중량의 변화

### 6. Conclusion

본 논문에서는 synthesis 와 analysis, 최적화를 통하여 유도 전동기를 설계하였다. 최적화에 사용된 (1+1)Evolution strategy 알고리즘은 비교적 간단하고, 최적의 해를 비교적 적은 시간안에 얻을수 있었다.

EV 용 고효율 경량모터 설계를 위하여 효율과 중량을 가중치를 이용하여 선형조합하였다. 그리고 여러가지 경우의 가중치를 이용하여 설계결과를 검사하였다.

### REFERENCE

- [1] Jared L. Cohon, Multiobjective 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