

## 고성능 SRM구동을 위한 설계변수 선정기법

김태형, 안진우  
경성대

### Design Technique for High performance SRM

Tae-Hyoung Kim, Jin-Woo Ahn  
Kyongsung Univ.

#### Abstract

In this paper, an optimal design method to have a good performance is researched. The parameters which are sensitive to the performance are examined and determined by using evolutionary computations and commercial CAD program to have good performance. Design method simulated is compared with conventional procedure.

따라서 본 연구에서는 상용으로 사용되고 있는 전용설계도구인 SRD를 이용하였으며, 각 설계 파라미터의 자동 입력을 위한 프로그램을 제작하였다. 여기에 진화알고리즘(Genetic Algorithm, 이하 GA)를 이용하여 파라미터를 선정, 요구조건에서 최적화된 SRM의 설계기법을 제안하였다. 또한 기존 설계 방식에 의해 설계된 6000[rpm] 3.5[KW]급 전동기와 동일한 조건하에서 제안된 설계 기법을 적용하여 효율성을 입증하고자 한다.

#### 1. 서 론

스위치 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM)은 최근 각광을 받고있는 브러쉬 레스 전동기의 한 종류로 그 성능이나 경제적인 면에서 우수한 장점을 가지고 있어 활발히 연구가 진행되고 있다. 그러나 기초가 되는 설계분야에서 경험 부족등으로 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다.

일반적인 SRM의 설계방법들은 크게 두 가지이다. 첫 번째 방법은 경험에 의한 반복 설계법으로 제약사항내에서 맞추어 주요 설계 파라미터의 대부분을 제약하고 특정부분을 변화시키는 것이다. 이 방법은 전용 설계도구를 이용한 반복설계를 통해 요구 성능을 만족시키게 되나, 해당조건에서 주어지는 설계조합의 경우가 방대하여 설계에 많은 시간과 노력이 요구되며, 얻어진 결과가 최적이라 보기 어렵다.

두 번째 방법은 간략화 된 모델에서 얻어진 출력 방정식을 이용하는 것으로 얻어진 출력방정식을 이용하여 각종 최적화 알고리즘 및 반복설계를 통하여 요구조건에 만족시키게 된다. 그러나 출력방정식을 얻은 모델의 실효성이 떨어지며 근사화로 인하여 모터제작시 설계치와 측정치의 오차가 발생할 수 있다는 단점을 가지게 된다.

#### 2. SRM의 적정설계범위

SRM의 설계에 GA를 적용하기 위해서는 부분별 설계 파라미터에 대한 분석이 필요하다. 각 설계 파라미터는 전동기로서의 기본적인 성능을 가지기 위한 범위가 존재하며, GA를 통한 지능설계에서 검색의 범위로 설정되어야 한다<sup>[1][2]</sup>.

##### 2.1 고정자 및 회전자의 반경과 적층길이의 범위

고정자 및 회전자의 반경을 결정하는 것은 SRM의 설계에서 가장 먼저 수행되어지는 과정이다. 이때 회전자의 반경은 요구성능 즉, 요구속도에서의 요구출력을 기준으로 식(1)을 통하여 결정되는 것이 일반적이다. 회전자 반경이 결정되면 고정자 반경은 회전자반경과 고정자 반경의 비로 결정될 수 있다. 일반적인 회전자 반경과 고정자반경과의 유효비는 0.5~0.55이다.

적층길이의 경우 일반적으로 보어직경, 즉 회전자 직경과의 비로 결정되고 그 값은 극수 조합에 따라 다르지만 전형적인 값을 1이다<sup>[3]</sup>.

$$T = KD_r^2 L_{stk} \tag{1}$$

##### 2.2 회전자 파라미터의 범위

회전자 극호각은 전동기의 기동문제를 고려하여 식 (2)와 같이 스트로크 각보다 크게 설계하여야

한다. 스트로크각은 전동기의 한 상을 여자시 회전자가 움직이게 되는 각을 의미하며 12/8의 경우 15°, 6/4의 경우 30°의 스트로크 각을 가지게 된다. 극호각이 스트로크 각보다 작을 경우 토크가 비연속적으로 발생하여 기동에 문제가 발생하므로 반드시 고려되어야 한다.

$$\text{Min}(\beta_s, \beta_r) \geq \varepsilon \quad (2)$$

$$\beta_r \geq \beta_s \quad (3)$$

회전자 요크는 회전자 극폭의 20~40[%]가 참조값으로 제공되어지고 있으며, 회전자극을 통한 자속의 흐름이 원활하게 이루어질 수 있도록 충분해야 한다.

회전자 극높이는 고정자와 회전자의 정렬과 비정렬시의 인덕턴스비를 크게 하기 위하여 너무 낮아서는 안되며, 또한 너무 높을 경우 프린징 현상이 발생할 수 있으므로 적절한 비율로 선정되어야 한다.

### 2.3 고정자 파라미터의 범위

고정자 요크 두께의 경우 자속의 흐름과 기계적인 강도 및 소음을 고려하여 충분히 두껍게 설계되어야 하나, 너무 두꺼워 질 경우 권선점유면적이 작아져 제작상에 어려움이 따르게 된다. 유효값으로는 회전자요크보다는 조금 두꺼운 40~60[%]의 값이 제시되어지고 있다.

## 3. GA와 상용프로그램의 연동

### 3.1 GA의 개요

1960년대부터 다양화 최적화 문제를 해결하기 위하여 자연 현상들을 모의한 알고리즘들이 개발되어 왔다. GA는 진화전략 (evolution strategies, ES), 진화 프로그래밍(Evolutionary Programming, EP) 과 함께 생물들은 계속적으로 변하는 환경에 효율적으로 적응해 간다는 사실에 착안하여 만들어진 알고리즘이 진화연산(Evolutionary Computation : EC)에 기초를 두고 있다. GA는 EC를 통해 주어진 최적화 문제에 대해 하나의 해가 아닌 해집단 (population)으로 탐색하게 된다. 해집단내에서 더 좋은 적합도(fitness)를 가지는 해들을 이용하여 그림과 같이 새로운 해집단을 재생하게 되며, 이때 교배(Crossover) 및 돌연변이(mutation), 엘리티즘(Elitism)으로서 다음세대의 해집단을 생성하게 된다<sup>[4][5]</sup>.

### 3.2 GA와 상용프로그램의 연계

본 논문에서는 GA를 통해 생성된 파라미터를 상용프로그램을 이용하여 연산하였다.

상용프로그램을 연산에 이용할 경우 성능연산의

신뢰성을 보장받을 수 있으며, 프로그램에서 제공되는 각종 환경적인 파라미터를 통해 실제에 가까운 연산이 가능하다. 또한 스위치 온-오프 시점과 같은 제어조건등의 선택도 가능하다.

GA에 의해 탐색된 파라미터는 상용프로그램에 전달되어야 하며 이를 상용프로그램에서 연산할 수 있도록 명령을 내려야 한다. 또한 연산된 결과 중 목적함수 연산에 필요한 정보를 다시 유전알고리즘 프로그램으로 넘겨주어야 하며, 이는 유전자 알고리즘의 각 세대별 샘플의 수만큼 행하여져야 한다. 그러므로 프로그램간의 정확한 정보교환없는 수행할 수가 없다. 이를 위하여 연동프로그램의 제작하였다.

### 3.3 GA의 적용

그림 1은 본 논문에서 적용한 실수형 유전알고리즘과 SRD 프로그램을 이용한 SRM 최적에 대한 전체 흐름도를 나타내었다<sup>[6][7]</sup>.

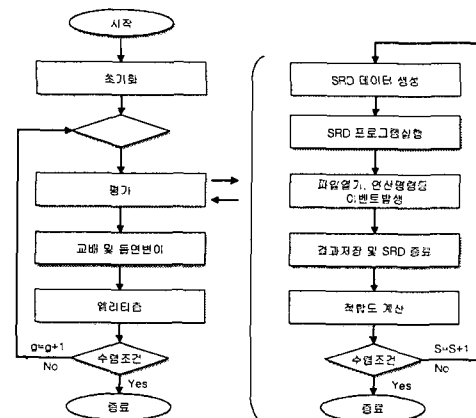


그림 1. GA 알고리즘을 이용한 최적 설계 흐름도  
Fig 1. Flowchart of optimal design using GA

### 3.3.1 해집단 구성

그림 2은 같이 GA를 통한 설계에 이용된 변수와 해집단의 구성을 나타낸 것이다.

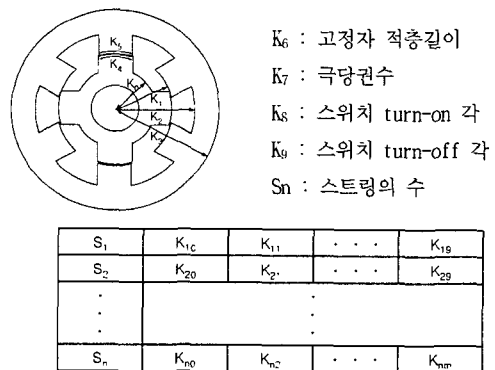


그림 2. 설계파라미터와 해집단의 구성  
Fig. 2 Design parameter and population

### 3.3.2 평가 및 복제

생성된 각 스트링을 평가하기 위한 해석 과정 그림 1에 나타내었다. 상용프로그램이 종료되면 식(4)의 적합도 함수를 이용하여 적합도를 산출한다. 여기서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 출력과 효율의 고려도를 결정할 수 있는 상수이다.

$$Fitness = \frac{1}{(\alpha \times Power + \beta \times Eff.)} \quad (4)$$

복제법은 적합도에 비례하여 복제하는 룰렛휠 방법을 사용하였다.

### 3.3.3 교배 및 돌연변이 방법과 엘리트즘

본 논문에서는 실행시간이 단축되고 수학적 기법이 첨가될 수 있는 실수형 유전알고리즘을 이용하였으며, 교배 및 돌연변이 방법으로 단순교배 (simple crossover)와 균일 돌연변이(uniform mutation)를 사용하였다. 단순교배 방법은 부모해집단에서 두 개의 스트링을 임의로 선택하여 그림 3와 같이 자손해집단을 생성하는 방식이다. 그림 3에서 보는 것처럼 t 세대에서 두 개의 스트링과 틀 임의로 선택하였을 때, k 번째 변수의 위치에서 교배가 발생했다면 t+1 세대의 자손은 그림 3와 같다.

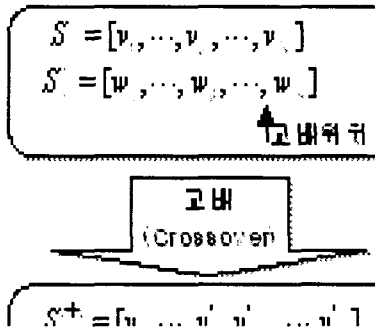


그림 3. 단순교배 방법  
Fig 3. Simple crossover

여기서,  $v'_j = \alpha_1 \times v_j + \alpha_2 \times w_j$ ,

$$w'_j = \alpha_1 \times w_j + \alpha_2 \times v_j$$

$\alpha_1, \alpha_2$  : 0과 1사이의 임의의 수

$v_1, v_2$  : 각 변수의 상한치와 하한치사이의 값

$N$  : 각 스트링을 구성하는 변수의 개수

균일 돌연변이 방법은 t 세대의 해집단 중에서 하나의 스트링  $S'_k = [v_1, \dots, v_k, \dots, v_N]$ 의 k 번째 변수가 돌연변이를 수행한다면, t+1 세대의 자손은 그림 4와 같다.

적합도가 가장 높은 개체를 유전알고리즘의 해집단에 각각 하나씩 복제하는 엘리트즘을 사용하였다.

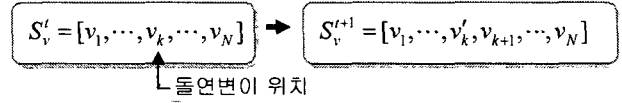


그림 4. 균일 돌연변이 방법  
Fig 4. Uniform Mutation

## 4. 기존설계법과의 비교

### 4.1 시뮬레이션 조건 및 범위

본 논문에서는 GA에 의해 탐색된 전동기의 성능을 입증하기 위하여 기존의 개발된 전동기와 동일한 제약조건을 가지는 범위에서 시뮬레이션을 수행 하였다. 시뮬레이션 대상은 경험적으로 제작된 6/4 SRM이며 성능은 표 1과 같다. 비교전동기는 저속 전기자동차용 SRM으로 이용목적에 의해 축 직경과 고정자반경이 제한된 상태에서 기존의 반복설계법에 의해 설계된 것이다. 그러므로 GA를 이용한 시뮬레이션에서도 동일한 조건을 취했다. 또한 출력과 토크의 반영비율을 1:1로 설정하여, 모두 우수한 형상에 중점을 두어 수행되었다.

표 1. 기존전동기의 성능 및 주요 파라미터

Voltage	72 [V]	Ds	138 [mm]
Speed	6000 [rpm]	Dr	76 [mm]
Power	3.513 [KW]	Airgap	0.25 [mm]
Torque	5.592 [Nm]	Bs/Br	34[deg] / 36[deg]
Eff.	88.81 [%]	ys, yr	11[mm] / 16[mm]

### 4.2 형상 및 성능의 변화

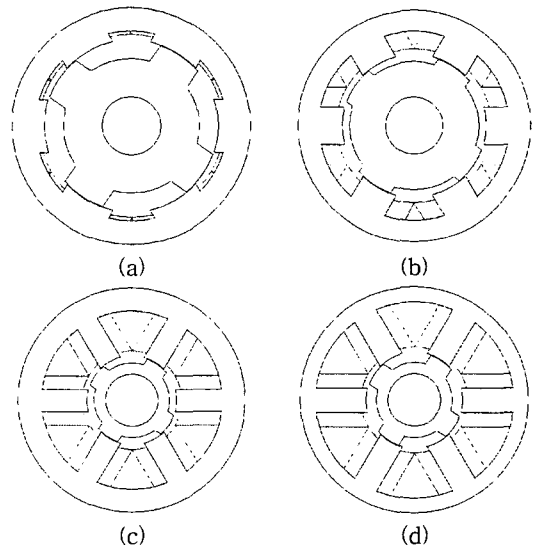


그림 5. 세대에 따른 형상 진화  
Fig. 5 Evolutionary process

그림5는 세대별로 높은 적합도를 나타내는 형상을 나타낸 것이며 그림6은 FEM 결과이다. 세대가 진화되면 전동기는 안정적인 형상으로 변화하였다. 또한 스위칭 시점도 각 형상에서 최적의 성능을 낼 수 있는 온각과 오프각이 선정되었다. 그림7은 각 세대에 따른 적합도를 나타낸 것이며 그림8은 그에 따른 성능을 나타낸 것이다.

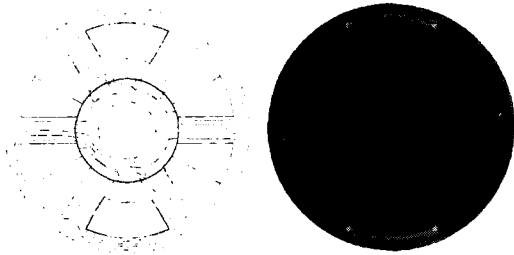


그림 6. FEM을 이용한 시뮬레이션결과  
Fig. 6 Simulated Result using FEM

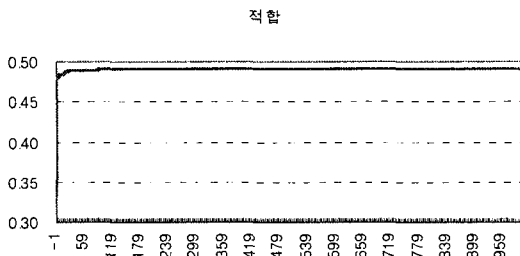


그림 7. 세대별 적합도  
Fig. 7 Fitness according to generations

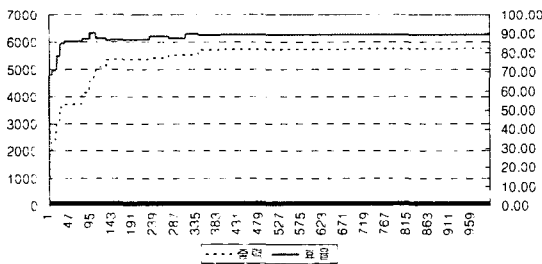


그림 8. 세대별 성능변화  
Fig. 8 Performance according to generations

표 2. 생성전동기 성능 및 주요 파라미터  
Table 2 Performance and parameters from simulated results

Ds	138[mm]	Bs / Br	30 / 31 [mm]
Dr	58.3[mm]	ys / yr	8.5 / 4.4 [mm]
Power	5.774[KW]	Airgap	0.25 [mm]
Torque	9.19[Nm]	turn-on	30.2[deg]
Eff.	89.5[%]	turn-off	79.3[deg]

표2는 시뮬레이션결과에 의해 설계된 전동기의 성능과 사양을 나타내었고 표3은 두 전동기의 성능을 비교하였다. 전체적으로는 형상에서는 기계적, 전기적

안정성을 유지하며, 기존에 비해 좋은 성능을 보이고 있다.

표 3. 기존전동기와 생성전동기 성능비교  
Table. 3 Compare reference motor with generated motor

	기존전동기	생성전동기	성능변화
Power[Kw]	3.513	5.774	2.261 - 상승
Eff.[%]	88.81	89.5	0.69 - 상승
Torque[Nm]	5.592	9.19	3.598 - 상승

## 5. 결 론

본 논문에서는 SRM의 설계에 GA를 적용하여 기존 방식보다 높은 성능과 신뢰성을 가지는 설계 방식을 제안하였다. 이를 위하여 상용프로그램을 이용함으로써 설계 시 성능 연산의 신뢰성을 확보 하였으며, 기존 방식에 의한 전동기와의 성능 비교를 통하여 효율성을 입증하였다.

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.(KRF-2004-D090300-D00146)

## 참 고 문 헌

- [1] 안진우, "스위치드 릴럭턴스 전동기", 오성미디어, 2004
- [2] B. K. Bose, T.J.E Miller, P.M. Szezesny and W.H. Bocknell, "Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor", *IEEE Trans. on Industrial Application*, vol.22, no. 4, PP. 708~715, 1986.
- [3] C. Wu and C. Pollock, "Analysis and Reduction of Vibration and Acoustic Noise in the Switched Reluctance Drive", *IEEE Trans. on Industrial Application*, vol. 31, no. 1, PP. 91~98, 1995.
- [4] R. Krishnan, R. Arumugan, J. F. Lindsay, "Design Procedure for Switched Reluctance Motors", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 24, PP. 456~461, 1988
- [5] J.W Ahn, "Model and simulation of the Switched Reluctance Motor Drive System", *KIEE International Trans. on EMECS*, vol. 2-8, PP. 201~206, 2002
- [6] D. E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, *Addison-Wesley publishing Company, INC.*, 1989
- [7] D. B. Fogel, "An Introduction to Simulated Evolutionary Optimization", *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 5, No. 1, Jan. 1994