

면역알고리즘을 이용한 전기자동차용 유도전동기의 최적설계

이철균*. 최옥돈*. 김민규**. 천장성**. 정현교**

*현대중공업 기술개발본부 마복리연구소. **서울대학교

Optimal Design of Induction Motor for Electric Vehicle Using Immune Algorithm

C.G. Lee*, U.D. Choi*, M.K. Kim**, J.S. Chun**, H.K. Jung**

*Hyundai Heavy Industries Co. Ltd., **Seoul National University

Abstract - This paper describes a procedure for the optimal design of induction motor for electric vehicle. The immune algorithm is applied for the optimal solution search. To verify the validity of the proposed method, a example design for output 20[kw] is performed.

1. 서 론

전기자동차는 배기가스가 없고 소음이 적어 청정한 환경을 조성할 수 있고, 에너지 효율이 가솔린 자동차에 비해 우수하며 2차 에너지인 전기에너지를 이용함으로서 에너지 자원을 다양화 시킬 수 있는 등 여러 가지 장점으로 인하여 지구환경 보전과 에너지 절약 측면에서 이의 개발, 보급의 필요성이 증대되고 있다.

전기자동차 구동용 전동기로서 유도전동기는 기존의 직류전동기에 비해 보수성·신뢰성 뿐만 아니라 소형·경량화의 측면에서 우수한 성능을 지니고 있고, 영구자석형 AC 전동기에 비해 가격, 견고성, 생산성면에서 유리하기 때문에 주목을 받고 있다. 전기자동차용 유도전동기는 빗데리의 한정된 에너지를 이용하므로 고효율의 특성을 갖추어야 하고, 제한된 공간에 장착되므로 소형·경량화되어야 한다.

본 연구에서는 전기자동차용 유도전동기 설계시에 고효율, 고출력밀도 특성을 달성하기 위해 최적설계기법을 도입하였다. 최적해를 탐색하기 위해 사용한 면역알고리즘은 생체의 면역체계를 모사한 것으로, 면역체의 다양한 항체생성 능력을 설명하는 소매트설과 면역체의 자기조절 능력을 설명하는 네트워크설에 근거하고 있다.[1]

설계의 적용사례로 소형 전기자동차에 사용될 정격출력 20[kW], 순시출력 50[kW]인 유도전동기를 설계하였다.

2. 본 론

2.1 설계변수의 선정

설계변수(1차 독립변수)의 선정은 요구되는 전동기의 특성이나 제한조건에 많은 영향을 받는다. 설계변수는 목적함수에 주요한 영향을 주는 변수를 최소한으로 선정한다. 여기서는 자속밀도(고정자 계철, 고정자 치, 회전자 계철, 회전자 치), 회전자 도체의 전류밀도, 회전자 슬롯형상치수비(회전자슬롯 폭과 치폭의 비), 고정자 슬롯 깊이를 설계변수로 선정하였다. 또, 전동기 특성 및 목적함수에 대한 영향이 적은 변수들은 미리 주어진 값으로 고정했는데, 예를들면 고정자·회전자의 슬롯수 및 슬롯입구부 치수, 고정자 권선의 점적률 등이다.

2.2 전동기 합성(Synthesis)

전동기의 설계에 있어서 합성은 설계변수·전동기 사양 등으로 구성된 집합을 기초로 하여, 실현 가능한 모터를 설계하는 것을 말한다. 그러므로, 합성이라는 과정에는 설계변수선정과 실현성 있는 설계법이 포함되어 있어야 한다. 본 논문의 합성과정에서는 주어진 설계변수로부터 회전자를 먼저 설계하고 고정자를 나중에 설계한다.[2][3]

그림 1의 흐름도는 본 논문에서 사용한 유도전동기 합성의 흐름도이다. 설계변수가 선택이 되면 제한조건인 정격출력을 만족시키기 위해서 상당직렬도체수를, 정격에 대한 최대토크비를 만족시키기 위해서 r_{obs} (회전자슬롯 윗 반경/밑 반경)를 조절한다. 이러한 과정을 거쳐서 제한조건을 만족하는 회전자, 고정자의 각 부분의 치수를 도출한다. 유도전동기의 특성해석방법으로는 T등가회로법을 사용했다. 여기서 계산한 전동기의 효율과 무게는 최적화루틴의 목적함수로 전달된다.

2.3 면역 알고리즘

면역 알고리즘은 생체의 면역 체계를 모사한 최적화 알고리즘이다. 면역 알고리즘은 다른 일반적인 최적화 알고리즘과 비교하여 다음과 같은 특징을 가진다. 첫째, 면역 알고리즘은 하나의 가능해를

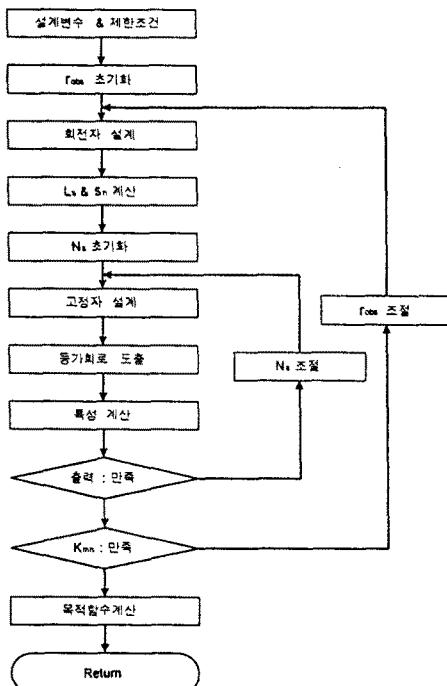


그림 1 전동기 합성의 흐름도

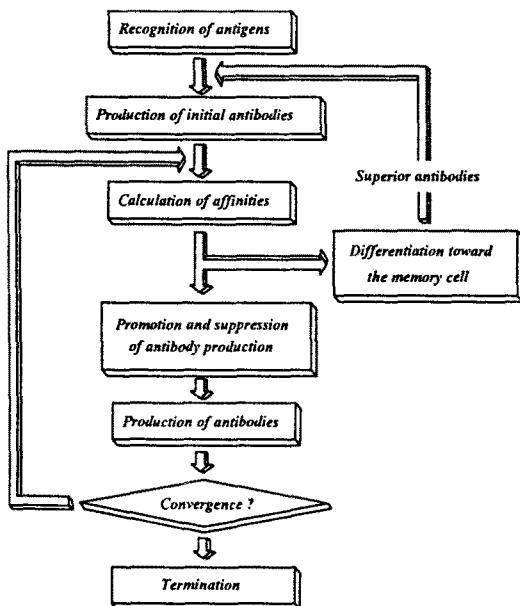


그림 2 면역 알고리즘의 흐름도

가지고 최적화 과정을 수행하는 것이 아니라, 동시에 여러 개의 가능해로써 최적화를 진행해 나간다. 둘째, 면역 알고리즘은 해의 값 자체를 그대로 사용하는 것이 아니라, 코드화된 수의 배열을 사용한다. 셋째, 다른 알고리즘은 목적함수의 미분값과 다른 정보들을 이용하기도 하는데, 최적화의 목적함수를 그대로 사용한다. 마지막으로, 면역 알고리즘은

비결정론적 알고리즘이다. 이러한 면역 알고리즘은 다른 비결정론적 알고리즘과 마찬가지로 단지 국소적 최적점만을 탐색하는 결정론적 알고리즘의 단점을 보완하는 특징을 가지고 있다.[1] 면역 알고리즘은, 그럼 2에 나타낸 6개의 순서에 의해 실현된다. 여기서 이 알고리즘을 최적화문제의 해탐색 알고리즘과 대응시켜 보면, 항원이 최적화문제의 제약 조건과 목적 함수, 항체가 최적화 문제의 해, 항원과 항체의 친화도가 해의 평가치에 대응한다.

2.4 적용 사례

소형 전기자동차에 사용될 유도전동기를 설계의 예제로 했는데 전동기의 사양은 다음과 같다.

표 1. 전동기의 사양

정격 출력(연속/순시)	20 / 50 [kW]
정격 속도(기저/최대)	3600/10000 [rpm]
정격 전압(기저/최대)	176/200 [V]
효율(@20kW,3600rpm)	93% 이상
중량(고정자,회전자)	33kg 이하

2.4.1 목적함수 및 제약조건

목적함수로 설정해야 되는 것은 전동기의 효율과 무게이다. 효율은 전기자동차의 일충전 주행거리에 가장 큰 영향을 주는 요소이며, 출력밀도[kW/kg]는 가속성능과 일충전 주행거리에 영향을 주게 된다. 이러한 경우 다목적함수가 되어 이를 조합하기 위해서는 효율과 무게가 각각 전기자동차 시스템에 미치는 영향을 평가해 가중치를 결정해 목적함수를 선형조합하는 방법이 필요하게 된다. 이를 위해서는 자동차 주행시스템, 배터리와 전동기의 파라미터 모두가 필요하게 된다. 이에 대한 연구가 본 연구실에서 진행중에 있으나, 아직 미흡한 편이므로 본 논문에서는 효율을 목적함수로 하고 무게를 제한조건으로 처리한 경우와 그 반대의 경우에 대해서 살펴보았다. 효율을 계산하는 동작점은 기저속도에서 연속정격이 출력될 때이다. 여기서, 전동기의 무게는 축과 프레임의 무게를 제외한 무게이다. 제약조건으로는 전기자동차의 가속성능을 결정하는 정격토크에 대한 최대토크의 비, 전동기의 설치공간에 대한 제약으로 인한 고정자 외경과 적층길이이다. 목적함수와 제한조건을 정리하면 다음과 같다.

- 효율 > 93 [%]
- 전동기 무게 < 33 [kg]
- 최대토크비 > 330 [%]
- 고정자 외경 < 230 [mm]
- 적층 길이 < 140 [mm]

2.4.2 설계 결과

(1) 효율최대

그림 3은 목적함수를 효율로 하고 무게를 제한조

건으로 한 경우의 목적함수의 수렴하기 까지의 세대수에 따른 변화를 나타내고 있다. 최적화 과정은 총 1917세대만에 수렴했다. 표 2에 초기설계와 최종수렴시의 효율을 비교이며, 표 3는 설계변수들의 비교이다. 효율은 주어진 제한조건내에서는 93.3%가 최대치 임을 알 수 있다. 설계변수의 변화를 살펴보면 전류밀도가 작아지고 자속밀도는 증가하는데, 즉 철손보다 동손을 줄이는 방향으로 설계변수가 수렴했다. 이것은 저손실 규소강판을 사용하기 때문에 자속밀도가 높아도 철손의 영향이 그리 크지 않기 때문이다. 그러나 너무 높으면 역률의 악화로 동손이 증가하므로 효율이 감소될 것이다.

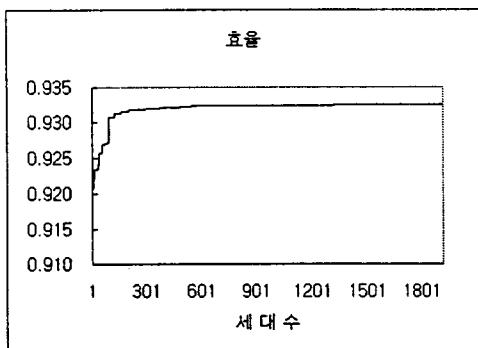


표 2. 목적함수(효율) 비교

항 목	초기설계	최종설계
효율	91.9	93.3
무게	32.88	33.0

표 3. 설계 변수 비교

	초기 설계	최종 설계
δ_{bar}	5.29	3.93
B_{tr}	1.65	1.84
B_{ts}	1.54	1.77

(2) 무게최소

그림 4는 목적함수를 무게로 하고 효율을 제한조건으로 한 경우의 목적함수의 수렴하기 까지의 세대수에 따른 변화를 나타내고 있다. 최적화 과정은 총 1639세대만에 수렴했다. 표 4에 초기설계와 최종수렴시의 무게를 비교이다. 표 5는 설계변수의 비교인데, 초기치에 비해 설계변수들의 변화 방향은 무게 최소를 위해 자속밀도는 증가, 효율 제한 조건에 의해 전류밀도는 감소하는 방향이다.

효율을 목적함수로 한 경우와 무게를 목적함수로 한 경우의 최종수렴된 설계변수를 살펴보면 무게 최소인 경우가 자속밀도와 전류밀도가 더 큰데, 이는 무게를 줄이기 위해서는 당연한 결과이라고 본다.

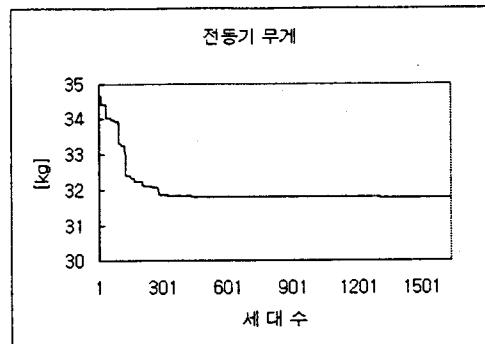


그림 4. 무게 목적함수의 변화

표 4. 목적함수(무게) 비교

항 목	초기설계	최종설계
무게	34.68	31.80
효율	93.1	93.0

표 5. 설계 변수 비교

	초기 설계	최종 설계
δ_{bar}	5.46	4.70
B_{tr}	1.84	1.89
B_{ts}	1.82	1.79

3. 결 론

본 연구에서는 전기자동차용 유도전동기 설계시에 고효율, 고출력밀도의 특성을 달성하기 위해 우수한 수렴특성을 갖는 면역알고리즘을 적용한 최적설계기법을 도입하였다. 전기자동차용 유도전동기의 설계시 목적함수를 효율로 한 경우와 무게로 한 경우에 대해서 살펴보았다. 소형전기자동차 구동에 사용될 유도전동기를 설계하였는데, 결과에 따르면 고효율과 경량화를 위해 전류밀도는 작아지고 자속밀도는 증가하는 것을 알 수 있다.

(참 고 문 현)

- [1] K. Mori, M. Tsukiyama and T. Fukuda, "Immune Algorithm with searching Diversity and its Application to Resource Allocation Problem", Trans. JIEE, vol.113-C, No.10, pp.872-878, 1993.
- [2] 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
- [3] 김민규, 이철균, 박정태, 정현교, 한송엽, "Univariant Search Method를 이용한 3상유도전동기의 최적설계", 전기학회논문지, Vol.46, No.5, pp.669-675, 1997.