

Niching GA를 이용한 토크 모터의 최적 설계

김재광, 조동혁, 정현교
서울대학교 전기공학부

Optimal Design of Torque using Niching GA

Jae-kwang Kim, Dong-Hyeok Cho, Hyun-Kyo Jung
School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - 전기기기의 구조 및 형상 최적화에 있어서 다양한 제한 사항과 설계방법들을 이용하기 위하여 전역 최대점과 함께 국소 최대점까지 고려할 수 있는 최적화 기법이 요구되고 있다. 다양한 제한사항들을 모두 목적 함수에 포함시킬 경우에 발생하는 여러 가지 문제점들을 해결하고 설계자의 주관적 평가도 활용할 수 있는 새로운 기법을 필요로 한다. 이처럼 다양한 해의 생성과 보존을 필요로 하는 분야에 니체(niche) 개념이 이용될 수 있다. 본 논문에서는 니체 개념을 포함하는 유전 알고리즘을 이용하여 토크의 선형성을 보장하는 토크 모터의 최적 설계를 수행하였다. 최적 설계 결과를 전역 최대점만을 찾는 최적화 기법과 비교하여 그 타당성을 입증하였다.

1. 서 론

유압 서보 밸브용 토크 모터의 토크 선형성 최적화를 위한 설계에서 몇가지 다른 설계 결과들이 실제로 거의 같은 토크 선형성을 나타낼 수 있다. 이러한 전기기기의 설계에서 고려되어야 하는 다른 많은 측면들이 있기 때문에 토크의 선형성이 최대일때가 항상 가장 좋은 설계 결과라고 할 수는 없는 것이다. 예를 들어, 기본적인 토크 계수(입력 전류와 출력 토크의 선형관계를 나타내는 계수)의 크기와 출력 토크의 크기, 쉬운 제작 과정, 유지 및 보수 편의성, 사용상의 신뢰성등을 고려한다면 토크 선형성이 다소 작은 국소 최대점의 설계 결과가 오히려 최적 설계안으로 선택될 수 있는 것이다.

이러한 설계 고려 사항들을 모두 목적함수에 포함시켜서 최적 설계를 수행할 수도 있지만 이러한 다중 목적함수의 최적화 과정에서는 다음과 같은 몇가지 문제점들이 발생한다. 먼저, 서로 다른 설계 영역내의 다양한 목적함수들의 설계 민감도의 차이로부터 설계자의 의도와는 다른 결과가 발생하기도 한다. 또한, 아마추어 권선과 같은 기계 구조적 제한 사항이나 제작 과정상의 문제점들을 모두 최적화 목적함수에 포함시키는 자체가 어려운 일이다. 마지막으로, 아마추어나 풀피스의 열상승이나 모터의 시정수 등과 같은 요소들은 너무나 많은 시간을 필요로 하기 때문에 최적화 과정을 수행하는데 큰 시간 손실을 발생시킨다.

위와 같은 이유 때문에 가장 중요한 기준만을 최적 설계의 목적함수에 이용하고 나머지 제한 사항들을 고려하기 위하여 전역 최대점 뿐만 아니라 국소 최대점도 함께 찾아주는 니체 개념을 이용한다[1][2]. 선택된 기준을 고려하여 나온 최적 설계 결과중에서 후처리 과정을 통해 다양한 제한 사항에 부합되는 가장 적절한 해를 다시 찾도록 한다. 따라서, 많은 시간을 필요로 하면서 최적화 과정에서 적용되어야 하는 더 자세한 해석들은 후처리 과정의 기준으로 이용될 수 있다. 다시 말해서, 니체 개념을 이용해서 얻은 다양한 해중에서 위에서 언급된 여러 기준들과 설계자의 경험들을 이용해 가장 적절한 해를 선택하면 된다.

본 논문에서는 다양한 국소 최대점을 가장 효율적으로

찾기 위하여 RCS 유전 알고리즘을 이용하였고 그 결과를 제시하여 타당성을 보이고 있다[3].

2. 본 론

2.1 Niching 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 자연 도태와 적자 생존에 기초한 확률론적인 기법이다. 유전 알고리즘은 이러한 생명체의 자연 진화 법칙을 일반 최적화 문제에 적용한 방법으로 설계 영역에 다수의 설계점을 분포시켜 목적 함수 값과 제약 조건의 위반 정도에 따라 각 설계점에 적합성을 부여한다. 적합성이 클수록 다음 단계인 교배와 변종 과정에 참여할 확률을 크게 하여 적합성이 좋은 설계점에 비슷한 형질을 가진 설계점들이 다음 단계에 보다 많이 형성되어 계산이 진행될수록 전체 설계점들은 좋은 방향으로 탐색이 진행된다[2].

그러나 최적화 문제에 기본적의 표준 유전 알고리즘을 적용하면 다른 피크에 해당하는 설계점들 사이의 경쟁을 제한할 수 없으므로 하나의 전역 최대점에만 수렴하게 된다. 이러한 현상을 genetic drift라 한다. 따라서 설계자가 국소 최대점의 존재에도 관심이 있는 경우에는 기존의 표준 유전 알고리즘으로서는 원하는 결과를 얻기가 힘들다. 이 문제를 해결하기 위해서 제안된 Niching 기법은 생태계의 니체(Niche) 개념을 도입하여 탐색공간에서 여러 가지 다양한 해를 병렬적으로 찾을 수 있게 한다. 자연 생태계에서 비슷한 모습을 가진 개체들의 집합인 종들이 각각의 자기영역과 역할을 가지고 있는데 이것을 니체라고 한다. 이러한 생물학의 니체와 종의 개념을 최적화 문제 해결을 위해 유전 알고리즘에 도입하였다. 니체는 다양한 모드가 있는 탐색 공간내에서의 각 피크점들의 위치, 좋은 전체 개체집단중에서 서로 어떤 주어진 거리내에 있는 개체들에 해당된다고 할 수 있다. 그리고 이러한 니체들을 탐색하는 유전 알고리즘을 Niching 유전 알고리즘이라 한다.

2.2 Restricted Competition Selection

Niching 유전 알고리즘중에 니체의 적합도에 비례하여 개체들을 유지하는 Sharing과 Crowding 등이 있지만 본 논문에서는 니체내에서 가장 큰 적합도를 가지는 개체만을 이용하는 기법인 Restricted Competition Selection(RCS)를 이용한다[4][5]. 같은 니체 안에 있는 개체들은 형상, 구조, 전동기 특성 등이 아주 유사하기 때문이다. RCS에서는 개체의 다양성을 유지하기 위해 같은 니체 개체간의 경쟁은 허용하지만 서로 다른 니체 개체들간의 경쟁을 제한한다. 즉, 탐색영역에서 서로간의 거리가 Niche Radius 이내인 개체들의 적합도를 비교하여 승자의 적합도는 그대로 유지하고 패자의 적합도는 '0'으로 지정한다. 이렇게 함으로써 다른 니체내의 개체들과 비교해서는 비록 적합도가 작더라도 같은 니체내의 다른 개체들보다 적합도가 크다면 선택된다. RCS 기법은 다음과 같은 루틴으로 구성된다.

- step 0 : (초기화)
 - 랜덤하게 초기개체집단(개체수 N_p)구성.
 - 적합도 순서로 M개를 선택.
 - 세대수(g)를 1로 지정.
- step 1 : (유전조작)
 - 개체집단에서 복원 없이 2개의 부모세대 개체를 선택하여 교배와 변이의 유전작용 시행.
 - $N_p/2$ 번 반복하여 새로운 개체집단 구성.
- step 2 : (엘리트 집합)
 - 새 개체집단에 엘리트 집합을 합쳐 N_p+M 개의 개체수를 가진 경쟁 개체집단을 구성.
- step 3 : (RCS)
 - d_{ij} (개체간 거리)(L(niche radius) 일 때 적합도 비교.
- step 4 : (새로운 개체집단 구성)
 - 경쟁 개체집단에서 새로운 적합도 순서로 N_p 개 선택하여 새로운 부모세대 개체집단 구성.
 - 그중에서 적합도 순서로 상위 M개 선택하여 엘리트 개체집단 구성.
- step 5 : (종료)
 - 세대수가 $g=G_n$ (미리 지정한 반복 세대수)이면 종료, 아니면 g를 1 증가한 후 step1.

흐름도로 나타내면 다음과 같다.

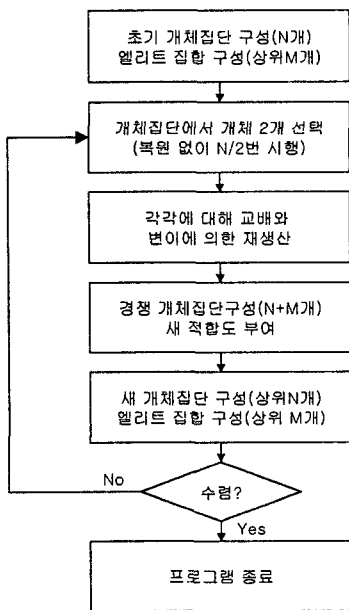


그림 1. Niching 유전 알고리즘의 흐름도
Fig. 1. Flowchart of niching genetic algorithm

2.3 토크 모터의 최적 설계

2.3.1 해석 모델

유압 서보 밸브의 구성품 중에서 전기적인 입력 신호를 미소 변위로 전환하는 부분으로서 각변위형을 토크 모터라고 한다. 여기서는 전류를 입력으로 받아 서보 밸브의 유압을 증폭하는 스톨부에 토크를 발생시키는 전기기계적 변환부를 일컫는다.

토크 모터는 기본적인 자속 흐름을 형성하는 영구 자석(Magnet), 자속의 흐름을 도와주는 폴피스(Plot pieces)와 코일을 감은 전기자(Armature)가 주요 구성품이다. 코일에 전류가 흐르지는 경우에는 양쪽 공극을 흐르는 자속에 차이가 나지 않으므로 동일한 흡인력이

발생하고 따라서 전체적으로 토크가 발생하지 않는다. 코일에 전류가 흐르게 되면 전기자가 자성을 띄게 되고 기자력을 발생시키며 이 기자력에 비례하는 양의 자속의 차가 양쪽 공극에 발생하게 된다. 여기서 발생한 자속의 차이만큼 양쪽 공극의 흡인력에 차이가 생겨나고 그에 따라 토크가 생성된다. 생성된 토크는 아래쪽 스톨부에 연결된 스프링 기구에 대응하여 힘의 균형을 이룰 때까지 전기자를 움직이게 한다.

이 과정에서 토크 모터의 입력으로 주어지는 전류에 대한 토크의 선형성이 제어를 위해서는 가장 중요한 인자가 된다. 따라서 여러 가지 변수(전류, 각변위, 모터 구조에 관련된 치수 등)들의 변화에 대해서 토크의 크기를 측정하고 이 중에서 입력 전류에 대한 토크의 크기가 어떠한 형태로 나타나는지를 해석하고 앞서 말한 전류대 토크 선형성에 대한 최적 설계를 수행하도록 한다. 그림 2에서 본 논문의 해석 모델인 토크모터의 단면도를 나타내었다.

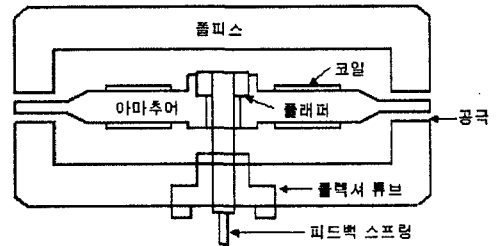


그림 2. 해석 모델
Fig. 2. Analysis model

2.3.2 설계변수 및 목적함수

토크모터의 특성상 입력전류와 출력토크의 선형성이 기기의 성능을 좌우하는 가장 중요한 요소이다. 유압부와와의 연계성으로 인해 토크의 선형성이 보장되어야만 최종출력의 정밀한 선형적 제어가 가능해지기 때문이다. 따라서 본 논문에서도 토크 모터의 토크 선형성을 목적함수로 설정하였다. 설계 변수값들의 개체집단이 선택된 후에 실제 사용되는 범위의 다양한 입력전류(1~10mA)에 대한 출력토크의 값들에 대한 상관계수를 구하여 이 값을 토크모터의 선형성을 판별하는 기준으로 삼는다. 입력전류에 대한 출력토크의 상관관계를 구하기 위한 그래프의 예가 아래 그림 3에 있다. 물론 상관계수이기 때문에 1이 최대값이 되고 1에 가장 가까운 상관계수를 발생시키는 개체집단을 찾으려 한다. 유압부를 제어하기 위해서 필요한 토크 상수(입력전류와 출력토크의 비율을 나타내는 계수) 및 출력토크의 최소값과 모터의 무게, 크기 그리고 공극의 최소값등은 최적화의 제한조건으로 선택되었다.

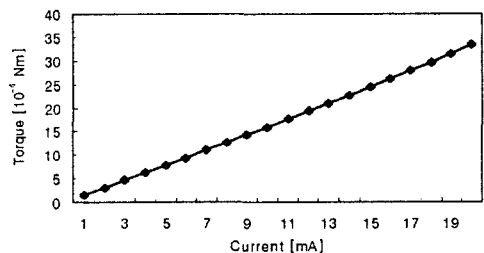


그림 3. 입력전류에 대한 출력토크
Fig. 3. Input current vs output torque

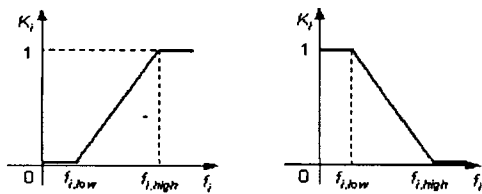
목적함수인 토크 선형성에 가장 큰 영향을 미치는 영구자석의 전류자속밀도, 공극과 접하는 부분의 폴피스의

두께 및 너비, 공극의 길이, 아마추어에 감겨져 있는 코일의 권선수 등을 독립적인 설계변수로 설정하였다. 공극의 길이는 기계적인 정밀성 때문에 매우 작게 설정할 수 없고 코일의 권선수는 주어진 면적을 최대한 활용하기 때문에 실제로 거의 상수에 가깝게 설계에 활용되고 있다. 또한 본 논문에서의 영구자석의 잔류자석밀도는 재료의 특성으로 몇가지 특정한 값들만을 취할 수 있고 그 값도 매우 제한되기 때문에 커다란 영향을 미치지 않을 것이다. 이러한 이유로 niching 유전 알고리즘이 활용될 수 있는 국소 최대점은 풀피스의 형상에 의하여 발생 할 것이다.

2.3.3 평가기준

설계의 결과로 나온 최적해 후보들 중에서 토크모터에 가장 적합한 것을 선정해야 하는데, 이를 위해서는 여러 설계점들을 비교 및 평가할 수 있는 평가기준이 필요하다. 평가기준은 토크모터가 적용되는 시스템의 요구 특성에 따라 결정되는데, 토크의 선형성, 최대입력에서의 출력토크의 크기, 토크모터의 시정수 등을 이용한다. 토크의 선형성은 제어의 정밀성을 위한 요소이고 출력토크의 크기는 전체 시스템의 제어 범위에 관계되며 시정수는 시스템의 응답특성과 관련이 있다.

시스템의 평가기준을 수치적으로 나타내기 위해 후보해들의 만족도를 평가함수로 나타내었다. 그림 4에 나타나 있는 두 가지 형태의 평가함수를 사용한다. 평가기준에 대해서 전동기의 특성치가 증가함에 따라서 설계자의 만족도가 증가하면(예를 들어, 토크의 선형성과 출력토크의 크기) 평가함수 A를 사용하고 반대의 경우에는(예를 들어, 시정수) 평가함수 B를 사용한다. 평가함수 A에서 $f_{i,high}$ 는 평가기준에 대한 최적해 후보들의 특성치 중 최대값으로 하고 $f_{i,low}$ 는 사양 및 규격에 의해 주어지거나 허용할 수 있는 특성치의 하한으로 결정된다. 평가함수 B에서는 $f_{i,low}$ 는 평가기준에 대한 최적해 후보들의 특성치 중 최소값으로 하고 $f_{i,high}$ 는 사양 및 규격에 의해 주어지거나 허용할 수 있는 특성치의 상한이 된다.



(1) 평가함수 A (2) 평가함수 B
그림 4. 평가기준에 대한 평가함수

Fig. 4. Rating functions on evaluation criteria

2.3.3 최적 설계 결과

표 1은 최적설계의 결과로 나온 3가지 후보해에 대한 평가기준의 값들을 나타내고 있다. 각 평가기준별로 가장 적합한 값들을 이탤릭체로 나타내었다. 만일 토크 선형성만을 기준으로 최적해를 구한다면 첫 번째 경우가 최적해로 선정되었지만 이외의 평가기준을 평가함수를 이용하여 함께 적용한다면 두 번째 경우가 더 나은 최적해로 선정된다.

표 1. 최적 설계 결과
Table 1. Result of optimal design

설계변수	#1	#2	#3
토크선형성	0.994	0.989	0.992
출력토크(Nm)	0.00327	0.0338	0.0329
시정수(ms)	0.017	0.015	0.017

Niching 유전 알고리즘을 통하여 다른 피크의 최적해 후보를 함께 찾음으로써 더 나은 설계 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 출력 토크의 크기나 시정수값들을 함께 목적함수에 포함시킬 수도 있지만 그런 경우에 목적함수 자체가 복잡해지며 특히 시정수의 경우에는 동특성까지 고려해야 하는 어려움이 따른다. 가장 중요한 평가기준을 목적함수에 포함시키고 나머지 평가기준들을 차후에 평가함수를 이용하여 적용시키는 방법이 효율적임을 설계 결과에서 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 niche 개념을 유전 알고리즘과 결합시킨 niching 유전 알고리즘을 이용하여 전기기기를 해석하는 방법을 보여주고 있다. 토크모터에 niching 유전 알고리즘을 적용하여 최적 설계를 수행하였고 그 결과로부터 제안된 방법의 효용성을 입증하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] B. Sareni, L. Krahenbuhl and A. Nicolas, "Niching Genetic Algorithms for Optimization in Electromagnetics", The 11th COMPUMAG'97, pp.563-564, Rio de Janeiro, 1997.
- [2] S. W. Mahfoud, *Niching Methods for Genetic Algorithms*, Doctoral Dissertation / IlliGAL Report 95001, University of Illinois at Urbana Champaign, Illinois Genetic Algorithm Laboratory, 1995.
- [3] C. G. Lee, D. H. Cho and H. K. Jung, "Niching Genetic Algorithm with Restricted Competition Selection for Multimodal Function Optimization" CEFC'98, Tucson, Arizona USA, June, 1998.
- [4] D. E. Goldberg and J. Richardson, "Genetic Algorithms with Sharing for Multimodal Function Optimization", Proc. 2nd ICGA, pp.41-49, 1987.
- [5] K. A. De Jong, *An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems*, Doctoral dissertation, Univ. of Michigan, 1975.