

RG-MADS를 적용한 매입형 영구자석 동기전동기의 최적설계

논 문
61-2-5

Optimal Design of Interior PM Synchronous Machines Using Randomly-Guided Mesh Adaptive Direct Search Algorithms

김 광 덕* · 이 동 수* · 정 상 용** · 김 종 욱*** · 이 철 균†
(Kwangduck Kim · Dongsu Lee · Sang-Yong Jung · Jong-Wook Kim · Cheol-Gyun Lee)

Abstract - Newly proposed RG-MADS (Randomly Guided Mesh Adaptive Direct Search) has been applied to the optimal design of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM) which has the distinctive features of magnetic saturation. RG-MADS, advanced from classical MADS algorithm, has the superiority in computational time and reliable convergence accuracy to the optimal solution, thus it is appropriate to the optimal design of IPMSM coupled with time-consuming Finite Element Analysis (FEA), necessary to the nonlinear magnetic application for better accuracy. Effectiveness of RG-MADS has been verified through the well-known benchmark-functions beforehand. In addition, the proposed RG-MADS has been applied to the optimal design of IPMSM aiming at maximizing the Maximum Torque Per Ampere (MTPA), which is regarded as representative design goal of IPMSM.

Key Words : Randomly Guided Mesh Adaptive Direct Search Algorithm (RG-MADS), Interior Permanent Magnet Synchronous Machine (IPMSM), Maximum Torque Per Ampere (MTPA), Finite Element Analysis (FEA)

1. 서 론

매입형 영구자석 동기전동기 (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)는 자석을 회전자에 매입하여 구조적 안전성을 지니며, 자석에 의한 자석토크뿐만 아니라 자기저항 토크를 함께 이용할 수 있어 타전동기에 비해 토크밀도 및 출력밀도가 높고, 유효공극이 작아 전기자 반작용이 현저하여 약계자제어 특성이 우수해 넓은 운전 속도 영역에서 구동이 가능하여 EV 구동 시스템을 비롯한 견인용 전동기로서 여러 시스템에서 적용되고 있다[1-2]. 이러한 IPMSM은 동작시 자계 포화도가 높아 형상변화에 따른 성능 민감도가 높으며, 비선형적인 특성을 지니므로 고 정밀 해석을 위해서는 고급화된 비선형 수치해석기법이 수반되어야 한다. 또한 설계 단계에서부터 IPMSM이 적용 시스템의 요구 성능에 최적화 될 수 있도록 수치해석기법과 결합된 최적 설계 프로세스 개발이 요구된다[3].

최적 설계 프로세스는 먼저 최적화 이론을 기본으로 한다. 최적화 이론이란 주어진 조건을 바탕으로 최적의 해를 구하는 과정을 다루는 이론이다. 최근 들어 다양한 분야에서 방대한 계산시간과 계산의 복잡성에 대한 문제를 해결하고자 최적화 이론의 적용이 증가하고 있다. 특히 전동기 설

계 관점에서 비선형성이 반영된 전기기기 설계에서 최적화 기법을 적용한 최적설계를 다룬 연구가 있었으며 이에 대한 결과들이 다수 발표되었다[4-6].

일반적으로 최적 설계 프로세스는 목적함수를 계산하기 위한 수치해석 부분과 최적해를 도출하는 최적화 알고리즘 부분으로 구분된다. 먼저 수치해석 부분은 전동기의 특성을 해석하는 것으로 호출함수를 불러와서 목적함수의 결과를 도출한다. 하지만 수치해석에서는 전동기의 특성해석 계산에서 많은 시간을 차지하므로 호출함수의 호출횟수를 줄여 시간을 단축시킬 필요가 있다. 호출함수의 호출횟수는 최적화 알고리즘이 결정하며, 알고리즘의 특성에 따라 최적해를 탐색하는 탐색방법에서의 차이가 존재한다[7].

본 논문에서는 최적화 알고리즘으로 MADS (Mesh Adaptive Direct Search Algorithms)에서 개선한 RG-MADS(Randomly Guided Mesh Adaptive Direct Search Algorithms)를 적용하였다. 먼저 MADS는 현재해에 대한 이웃해의 생성 후, 각각의 해들에 대한 목적함수 값의 비교평가를 통해 해를 개선시키는 방식이다[8]. 그러나 탐색 전략에 기인하는 Poll Size 파라미터와 Mesh Size 파라미터에 전략적 차이를 두므로써 변수영역에서의 지역탐색방향이 제한적이지 않게 되는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 MADS의 취약점인 Random 탐색에 의한 연산시간 증가를 해결하기 위해 PSO (Particle Swarm Optimization)[9]의 주계념인 방향성을 도입한 RG-MADS를 새로이 제시한다.

이러한 RG-MADS의 효용성을 증명하기 위해 대표적인 테스트 함수인 Branin 함수와 Schwefel 함수에 적용하여 기존의 최적화 알고리즘인 MADS와 비교하여 탐색성과 수렴 결과 등을 나타내었으며, RG-MADS기반의 IPMSM 최적설계를 구현하여 최적 설계결과를 비교검토 하였다.

* 준 회원 : 성균관대학교 정보통신공학부 석사과정

** 정 회원 : 성균관대학교 정보통신공학부 조교수

*** 정 회원 : 동아대학교 전자공학과 조교수

† 교신저자, 정회원 : 동의대학교 전기공학과 교수

E-mail : cglee@deu.ac.kr

접수일자 : 2011년 12월 19일

최종완료 : 2012년 1월 10일

2. 매입형 영구자석 전동기

2.1 매입형 영구자석 전동기의 구조 및 특징

d-q좌표계를 바탕으로 자석의 착자 방향을 고려하여 반경 방향의 자석 중심축을 d축으로 하며, d축으로부터 전기각으로 90°만큼 떨어져 있는 자석 사이의 중심을 q축으로 정의한다. d축과 q축은 자속이 흐르는 자로의 차이를 바탕으로 구분한다. d축의 자로는 철심, 자석, 공극을 가지며, q축의 자로는 공극과 철심만으로 이루어져 있다. 일반적으로 자석의 투자율은 공극의 투자율과 동일하므로 자석을 통과하지 않는 q축 자로에 비해 d축 자로의 자기저항이 더 크게 되고, q축의 인덕턴스가 d축 보다 커서 돌극성이 발생한다 [10-11]. 이러한 돌극성으로 인해 IPMSM은 영구자석에 의한 토크 성분(alignment torque)뿐만 아니라 d, q축 자기저항 차이에 의한 토크성분(reluctance torque)을 가지므로 단위체적당 큰 토크를 얻을 수 있는 장점을 지닌다. 또한, 돌극비(saliency ratio, Lq/Ld)에 비례하여 약계자 제어 특성이 향상되어 광범위한 가변속 운전 특성을 지니게 된다[12-13]. 이에 IPMSM 설계시 회전자 내부의 영구자석을 다층 매입 구조로 하여 돌극성을 증가시키는 설계가 이루어지고 있다.

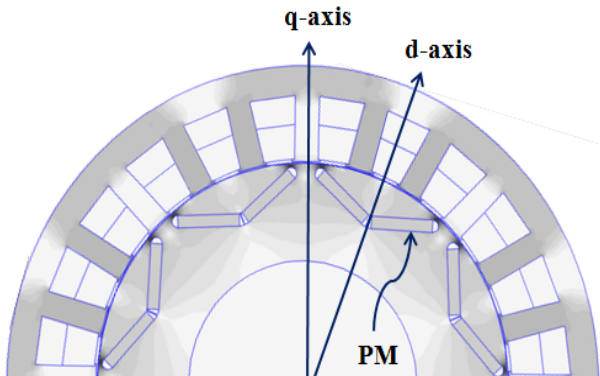


그림 1 IPMSM의 d-q 축 모델
Fig. 1 d-q axis model of IPMSM

2.2 매입형 영구자석 동기전동기의 특성 방정식

전동기의 출력은 일반적으로 토크와 속도로 발생되는데 그중에서 전동기의 최대속도와 최대토크는 인버터에서 공급하는 최대전류 I_{max} 및 최대출력전압 V_{max} 가 결정하며, 그 제한식은 다음 식 (1)-(2)와 같다.

$$V_{ds}^2 + V_{qs}^2 \leq V_{max}^2 \quad (1)$$

$$i_{ds}^2 + i_{qs}^2 \leq I_{max}^2 \quad (2)$$

여기서 i_{ds} , i_{qs} 는 d, q축 전류이고, V_{ds} , V_{qs} 는 d, q축 단자 전압을 뜻한다.

한편, IPMSM의 전기적 입력은 다음 식 (3)-(4)와 같다.

$$P_{in} = \frac{3}{2}(V_{ds}i_{ds} + V_{qs}i_{qs}) \quad (3)$$

$$P_{in} = \frac{3}{2} \left\{ R_s(i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + \frac{d(\lambda_{ds}i_{ds} + \lambda_{qs}i_{qs})}{dt} + \omega_r(\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds}) \right\} \quad (4)$$

여기서, ω_r 은 동기 전기각 속도, λ_{ds} , λ_{qs} 는 각각 d, q축 고정자 쇄교자속이다. 또한 첫 번째 항은 동손이며, 두 번째 항은 자기에너지에서의 시간변화율, 그리고 마지막 항은 기계적 출력이다.

식 (4)에서 기계적 출력을 다시 나타내면 아래의 식(5)와 같다.

$$P_m = \frac{3}{2}\omega_r(\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds}) \quad (5)$$

식 (5)에서 알 수 있는 바와 같이 동일한 전압과 전류의 입력조건을 주었을 때 전동기의 형상 및 자석의 형상의 미세한 변화에 따라 자기저항 및 쇄교자속의 변화로 전동기의 토크는 변화하게 된다.

3. 최적화 알고리즘

3.1 MADS (Mesh Adaptive Direct Search Algorithm)

MADS는 반복 알고리즘(iterative algorithms)의 형태로, 수렴과정에 있어서 미분정보를 요구하지 않기 때문에 응답속도 및 연산시간이 빠르며, 수렴성이 수학적으로 증명된 알고리즘이다[8]. MADS는 최적해를 개선해 나가는 방식을 사용하고 있는데 기본적으로 탐색영역에서 기본해를 구하고 그 기본해를 이웃하고 있는 해를 발생시켜, 각각 해에 대한 목적함수 결과를 비교 평가하는 방식이다. 이와 비슷한 방식의 대표적인 알고리즘으로는 GPS(Generalized Pattern Search)가 있는데 MADS와의 차이는 탐색방식의 차이가 있다[14].

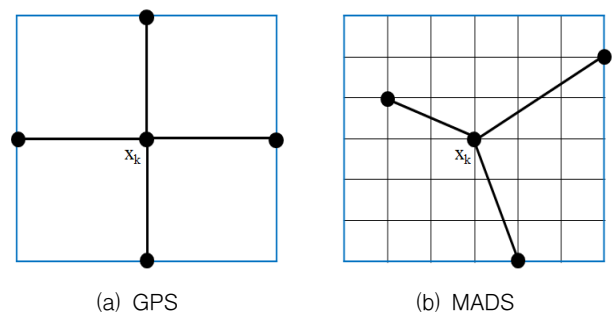


그림 2 GPS와 MADS의 탐색 특성
Fig. 2 Search characteristic of GPS and MADS

그림 2는 GPS 및 MADS의 특징을 비교해 놓은 것이다. 그림 2에서 보는 바와 같이 GPS의 경우는 이웃해 선정에 관련된 파라미터와 mesh를 생성시키는 파라미터가 동일하여 탐색 범위가 제한적인 반면 MADS는 이웃해 선정 파라미터와 mesh 생성 파라미터 사이에 차이가 있으므로 GPS 보다 다양한 범위를 찾을 수 있다[7]. 현재해를 중심으로 선

정된 이웃해에서 개선된 결과가 도출되면 그 이웃해는 프레임 센터가 되며, 개선된 해를 중심으로 프레임을 구축 후, mesh를 재생성 시켜 다음 반복차수에 대한 새로운 이웃해를 선정한다. 그리고 동일한 과정으로 목적함수 평가를 수행한다. 이때 mesh 크기 파라미터는 동일하게 유지되거나, 증가하게 된다. 그러나 개선된 해가 도출되지 않을 시, 현재 해를 프레임 센터로 설정하여, 보다 조밀한 mesh를 생성시킨다. 즉 mesh 크기 파라미터가 감소하게 되며, 프레임 센터를 기준으로 조밀해진 mesh상의 이웃해를 선정하여 목적함수 평가를 수행한다.

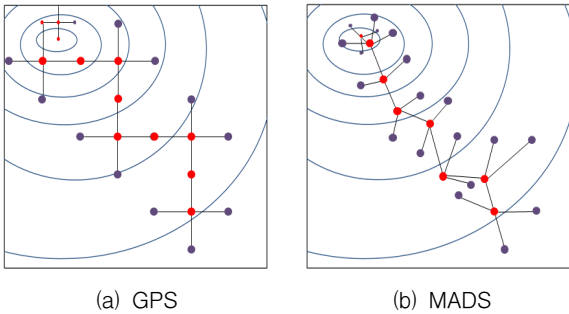


그림 3 GPS와 MADS의 탐색방법
Fig. 3 Search method of GPS and MADS

MADS의 특징을 살펴보면 반복 횟수 k에 대해, MADS의 mesh에 대한 집합은 다음과 같이 식 (6)에 정의된다.

$$M_k = \bigcup_{x \in S_k} \{x + \Delta_k^m D_z : z \in N^{mD}\} \quad (6)$$

여기서, S_k : 목적함수 평가에 적용된 해집합, Δ_k^m : mesh 크기 파라미터, D_z : mesh 전개를 위한 Spanning 집합

MADS에서 mesh 크기 파라미터는 일반적으로 $\Delta_k^m \leq \Delta_k^p$ 와 같은 관계를 가지며 다음의 식 (7)에 나타난다.

$$\Delta_{k+1}^m = \tau^{\omega_k} \Delta_k^m \quad (7)$$

$$\omega_k = \begin{cases} \{0, 1, \dots, \omega^+\} & \rightarrow \text{개선된 해를 발견하였을 때} \\ \{\omega^-, \omega^- + 1, \dots, -1\} & \rightarrow \text{해가 개선되지 않았을 때} \end{cases}$$

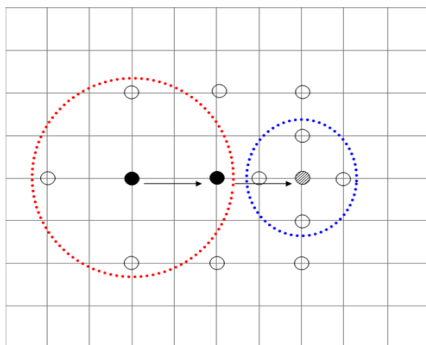


그림 4 이웃해를 찾지 못했을 때 Mesh 크기의 설정
Fig. 4 Change of mesh size for an unsuccessful search

해의 개선을 위해 MADS에서의 mesh 크기 파라미터는 poll size 파라미터에 비해 빠르게 수렴하며, 탐색하고자 하는 해 영역에서의 mesh가 보다 조밀해짐에 따라 GPS와 달리 해 선정에 대한 제한적 탐색범위를 개선할 수 있게 된다. 또한 프레임센터에서부터 난수 발생적으로 이웃해 생성이 가능해지므로, 다양한 탐색전략의 가미가 가능하게 되며, 아울러 결정론적 최적화 기법의 문제점인 국소최적화 문제를 일정부분 개선할 수 있게 된다.

3.2 RG-MADS (Randomly-Guided Mesh Adaptive Direct Search Algorithm)

본 논문에서는 현재의 해 x_k 를 중심으로 발생한 이웃해들의 목적함수 값을 사용하여, 다음 탐색방향을 찾기 위한 새로운 개념을 제안한다. 즉, 현재 탐색한 지점 주변의 이웃해들 중, 해가 개선된 값들의 가중치를 계산하여, 다음 단계에서 탐색하게 될 방향에 대해 개선 확률을 높인 것이다.

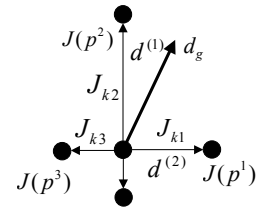


그림 5 RG-MADS 기법의 이웃해 탐색 방법
Fig. 5 Concept of the search method of RG-MADS

그림 5는 초기해를 중심으로 각 방향에 대한 이웃해 발생을 나타내며, 이에 대한 목적함수로 각 값에 가중치를 계산하여 계산한 방향벡터를 나타내고 있다. 이러한 이웃해들에 대한 가중치를 계산한 방향벡터를 다음과 같이 식 (8)에 나타냈다.

$$d_g = \frac{d_1 J_1 + d_2 J_2 + \dots + d_{2n-1} J_{2n-1}}{\sqrt{J_1^2 + J_2^2 + \dots + J_{2n-1}^2}} \quad (8)$$

$$\text{여기서 } J_i = \left| \left(0, \min \left[\frac{J(p_i) - J(x_k)}{|p_i - x_k|} \right] \right) \right|, \quad i = 1, \dots, 2n-1$$

이러한 d_g 는 개선된 모든 이웃해들에 대한 평균적인 방향벡터를 나타낸다. 여기서 RG-MADS는 확률적인 속성을 마련하기 위해 가장 많이 개선한 두 개의 해를 임의의 계수와 함께 추가하였으며, 다음 식 (9)에 나타난다.

$$d_e = d_g + \alpha_1 r_1 d^{(1)} + \alpha_2 r_2 d^{(2)} \quad (9)$$

여기서, α_1 과 α_2 는 가중치에 대한 계수이며, r_1 과 r_2 는 랜덤함수, d_1 과 d_2 는 이웃해들 중 가장 많이 개선된 해의 방향과 두 번째로 많이 개선된 방향을 나타낸다. 이러한 방향을 계산하여 초기해에 대해 나타내면 다음의 식 (10)과 같다.

$$x'_k = x_k + \Delta_k^m d_e \quad (10)$$

3.3 테스트 함수 적용

본 논문에서는 RG-MADS의 수렴의 수학적 신뢰성을 확보하기 위해 대표적인 테스트 함수인 Branin 함수와 Schwefel 함수에 RG-MADS를 적용하였고, RG-MADS의 개선된 성능을 확인하기 위해서 MADS를 테스트 함수에 적용시켜 비교하였다.

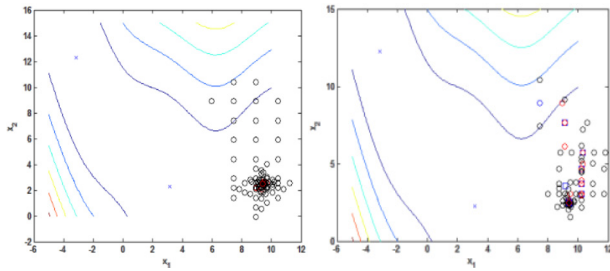
3.3.1 Branin 함수

Branin 함수에 대한 식은 다음의 식 (11)과 같다.

$$f_{BR}(x) = \left(x_2 - \frac{5.1}{4\pi^2}x_1^2 + \frac{5}{\pi}x_1 - 6\right)^2 + 10\left(1 - \frac{1}{8\pi}\right)\cos x_1 + 10 \quad (11)$$

$$-5 \leq x_1 \leq 10, \quad 0 \leq x_2 \leq 15$$

Branin 함수의 최소값은 0.397887이며, 전역 최적해는 $x=(-3.142, 12.275)$, $(3.142, 2.275)$, $(9.425, 2.425)$ 로서 3개의 전역 최적해를 가진다.



(a) MADS의 탐색결과 (b) RG-MADS의 탐색결과

그림 6 Branin 함수에서의 MADS와 RG-MADS의 탐색결과 비교

Fig. 6 Search result of MADS and RG-MADS for Branin function

표 1 Bran 함수에서의 MADS와 RG-MADS의 탐색횟수
Table 1 Number of search of MADS and RG-MADS for Branin function

MADS	RG-MADS	
	$a_1=a_2=0.5$	$a_1=a_2=1$
150.6	132.6 (12.0%)	127.2 (15.5%)

그림 6은 MADS와 RG-MADS를 Branin 함수에 적용하였을 때 해의 탐색결과를 나타낸 것이다. RG-MADS의 결과가 MADS의 결과보다 적은 탐색횟수로 수렴함을 알 수 있다. 또한 표 1에서 탐색횟수가 각각 12%와 15.5%의 개선됨에 따라 RG-MADS가 MADS보다 수렴속도에서 향상되었다는 것을 알 수 있다. 아래의 그림 7은 MADS와 RG-MADS가 Branin 함수의 최소값인 0.397887에 수렴하는

과정을 보여주고 있다.

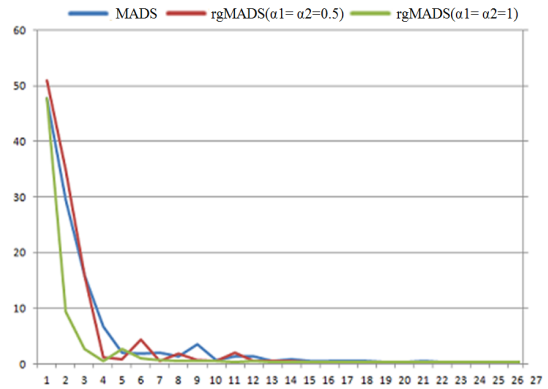


그림 7 MADS와 RG-MADS의 수렴과정

Fig. 7 The convergence process of MADS and RG-MADS

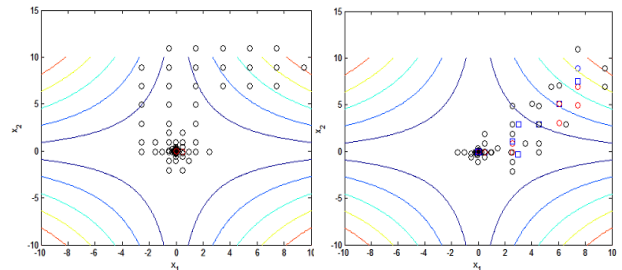
3.3.2 Schwefel 함수

Schwefel 함수의 식은 다음의 식 (12)와 같다.

$$f_{sh}(x) = \sum_{i=1}^2 |x_i| + \prod_{i=1}^2 |x_i| \quad (12)$$

$$-10 \leq x_1, x_2 \leq 10$$

Schwefel 함수의 최소값은 0이며, 전역 최적해는 $x=(0,0)$ 으로 단 한 개의 전역 최적해를 가진다.



(a) MADS의 탐색결과 (b) RG-MADS의 탐색결과

그림 8 Schwefel 함수에서의 MADS와 RG-MADS의 탐색결과 비교

Fig. 8 Search result of MADS and RG-MADS for Schwefel function

표 2 Schwefel 함수에서의 MADS와 RG-MADS의 수렴결과
Table 2 Number of search of MADS and RG-MADS for Schwefel function

MADS	RG-MADS	
	$a_1=a_2=0.5$	$a_1=a_2=1$
259.8	208.9 (19.6%)	203.2 (21.8%)

그림 8은 MADS와 RG-MADS를 Schwefel 함수에 적용하였을 때 탐색결과를 비교해 놓은 것이다. Branin 함수의 경우와 마찬가지로 RG-MADS가 적은 탐색횟수로 해를 탐색하는 모습을 볼 수 있으며 표 2에서 그 결과를 보여주고 있다. MADS와 비교하여 RG-MADS가 19.6%와 21.8%로 탐색횟수가 개선됨을 보여주고 있다. 아래의 그림 9는 MADS와 RG-MADS가 Schwefel 함수의 최소값인 0에 수렴하는 과정을 보여주고 있다.

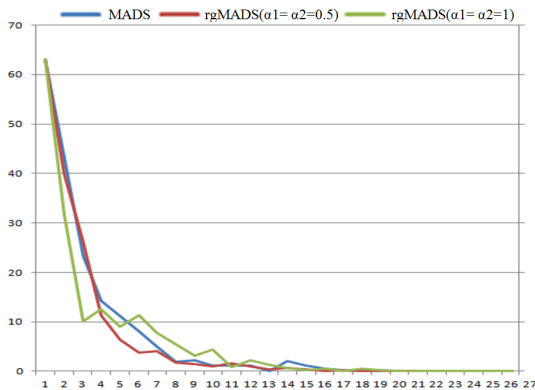


그림 9 Schwefel 함수에서의 MADS와 RG-MADS의 수렴특성
 Fig. 9 Convergence process of MADS and RG-MADS for Schwefel function

4. IPMSM의 최적 설계

4.1 목적함수 : 전류당 최대토크 (MTPA)

IPMSM은 자석에 의한 토크(Alignment Torque)뿐만 아니라 자기저항 차이로 인한 토크(Reluctance Torque) 또한 존재하기 때문에 여타 전동기보다 토크밀도가 높다. 아울러, 인버터 벡터제어를 통해 전동기 입력전류 크기 및 전류 위상각 제어를 하여, 최대 토크를 발생하고 높은 효율을 얻을 수 있도록 하고 있다. 따라서 정토크 영역에서는 전류제한에 따라 높은 기동토크를 얻는 것이 중요하기 때문에 다양한 전류와 전류 위상각 조합 중에서 동일한 전류로 최대의 토크를 얻을 수 있는 조합을 찾아야한다. 이 제어 방식을 단위 전류당 최대토크(Maximum Torque Per Ampere, MTPA)라 하며, 이를 식 (13)에 나타내었다[15]. 그러므로 본 논문에서는 MTPA를 최적설계의 목적함수로 선정하였다. MTPA의 정확한 계산을 위해 전동기의 d-q축 쇄교자속을 FEM을 통하여 구하였다.

$$MTPA = MAX \left[\frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) / I_{max} \right] \quad (13)$$

4.2 설계 변수 및 상수

표 3은 본 논문에서 사용하는 매입형 영구자석 전동기 모델의 사양을 나타내었다.

표 3 초기모델의 설계사양

Table 3 Specification of analysis model

구분	사양
상수	3
극수	10
슬롯수	45
고정자 외경	360
회전자 외경	208
공극	0.8
병렬회로수	5

자석의 형상에 따라 MTPA가 달라지므로 설계변수로서 자석의 각도 및 길이를 선정하였으며 그림 10과 같이 5개의 변수를 설정하였다. 특히 자석 간의 간섭이 일어나지 않도록 설계변수에 적절한 범위를 결정해주었다. 또한 과도한 자석사용을 방지하기 위해서 설계변수에 제한을 두었으며, 동일한 조건에서 결과를 비교하기 위해 입력 전압과 전류의 최대치를 일정하게 유지하였다. 아래는 설계변수의 제한을 나타내었다.

- 자석의 너비(X_1, X_2) : 4.2mm ~ 6.2mm
- 자석의 두께(X_3, X_4) : 3mm ~ 5mm
- 자석 각도(X_5) : 110° ~ 140°
- 자석의 사용량 (1극 기준) : 80mm²

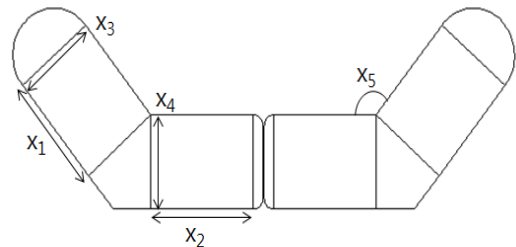


그림 10 자석의 설계변수설정

Fig. 10 Selection of design variables for Magnet

5. 최적설계 결과

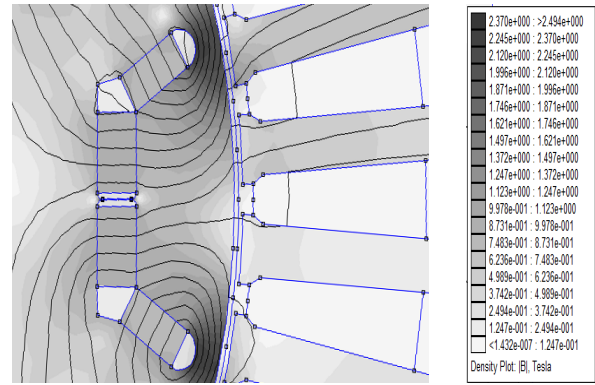
그림 11과 표 4는 초기모델, MADS가 적용된 모델, RG-MADS가 적용된 최적설계모델의 결과를 나타낸 것이다. 표 4에서는 각 모델에 대하여 설계변수의 변화, MTPA 값, 연산시간 등을 각각 나타내었다. MTPA의 값은 초기모델의 결과 값에 비해 MADS가 적용된 모델과 RG-MADS가 적용된 모델 모두 약 12%상승하였다. 두 방법에 의한 MTPA값은 거의 차이가 없지만 RG-MADS 기반의 최적설계는 MADS 기반의 최적설계보다 연산시간에서 17%정도 절감되었다. 따라서 RG-MADS는 목적함수를 계산하는데 시간이 많이 걸리는 IPMSM과 같은 전기기기의 최적설계에 적합한 알고리즘이라는 것을 알 수 있다. 또한 표 4의 설계변수의 결과로부터 그림 11을 확인하게 되면 초기모델로부터 MADS와 RG-MADS를 적용한 최적설계 모델들의 형상

이 변화하였음을 알 수 있다. 이는 초기 모델에 비해 MADS와 RG-MADS를 적용한 모델들이 각각 목적함수인 MTPA를 향상시키기 위해서 변화한 것을 나타낸다. 하지만 최적설계모델들의 형상을 살펴보면 설계변수인 자석의 형상이 다르게 나타나 있다. 이러한 이유는 비선형 자기포화특성을 가진 IPMSM이 미세한 자계의 변화에도 토크가 변하기 때문에 수많은 변수들이 존재하고, 전역해 역시 존재하기 때문이다.

표 4 초기모델 및 최적설계모델의 비교

Table 4 Comparison results of optimal design for IPMSM

분류	초기모델	MADS 적용모델	RG-MADS 적용모델
설계 변수	X ₁ [mm]	5	5.820
	X ₂ [mm]	5	6.187
	X ₃ [mm]	4	3.345
	X ₄ [mm]	4	3.291
	X ₅ [mm]	130	133.74
MTPA[Nm/I _{max}]	0.7265	0.8172	0.8173
수렴 시간 [시간]		26.7	22.1



(c) RG-MADS를 적용한 모델의 형상 및 자속밀도 분포

그림 11 IPMSM의 설계 결과 비교

Fig. 11 Comparison of designed IPMSM

6. 결 론

본 논문에서는 전기기기 최적설계의 문제점인 막대한 수행시간을 단축하기 위해서 지역탐색기법인 MADS의 탐색전략을 수정한 RG-MADS를 제안하였다. 이 알고리즘의 효용성을 증명하기 위해서 기존의 MADS와 새로 제시한 RG-MADS를 포함한 2개의 테스트 함수에 적용하여 수렴까지의 탐색횟수를 비교하였고, 그 결과 RG-MADS의 탐색횟수가 감소함을 확인하였다.

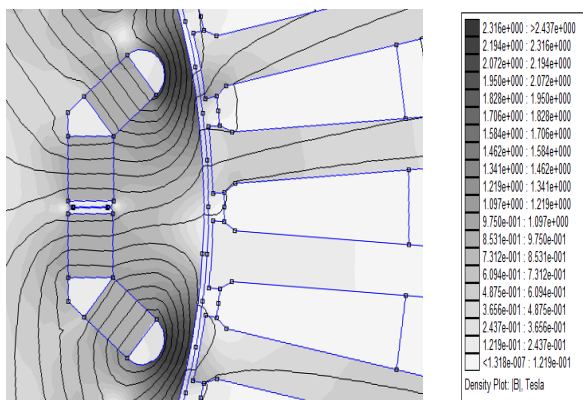
또한 IPMSM에 RG-MADS 알고리즘을 적용하여 MTPA를 향상시키는 목적으로 최적설계를 구현하였다. 기존의 MTPA 값과 비교하였을 때 최적설계로 구현한 MTPA 값이 향상되었으며, MADS와 RG-MADS와의 수렴시간을 비교하였을 때 RG-MADS가 더 짧은 시간에 최적설계의 결과값을 도출함을 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제시된 최적화 알고리즘인 RG-MADS는 목적함수의 계산에서 시간이 많이 걸리는 전기기기 최적설계에 적합한 알고리즘임을 알 수 있다.

감사의 글

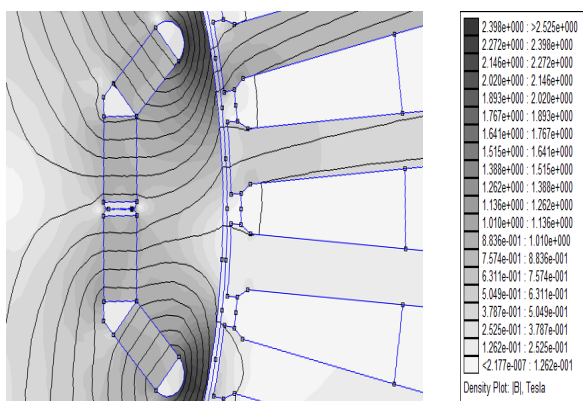
본 논문은 2010학년도 동의대학교 연구년 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] 장익상, 김원호, 진창성, 이주, “매입형 영구자석 동기전동기의 회전자 극수에 따른 운전영역 및 특성 파라미터 분석”, 한국철도학회 춘계학술대회논문집 pp. 1402-1408, 2010.
- [2] 이규상, 임희성, 신수철, 박종민, 이택기, 원충연, “IPMSM을 이용한 FCEV 구동 시스템”, 전력전자학회 추계학술대회 논문집, pp. 257-258, 2010.
- [3] Ohnishi, T.; Takahashi, N.; “Optimal design of efficient IPM motor using finite element method,” IEEETrans. Magnetics, Vol.36, no.5, pp. 3537-3539,



(a) 초기 모델의 형상 및 자속밀도분포



(b) MADS를 적용한 모델의 형상 및 자속밀도분포

2000.

[4] Dong-Hyeok Cho, Jae-Kwang Kim, Hyun-Kyo Jung, Cheol-Gyun Lee "Optimal design of permanent-magnet motor using autotuning niching genetic algorithm," IEEE Trans. Magnetics, vol.39, no.3, pp.1265, May. 2003.

[5] Sung-Il Kim, Ji-Young Lee, Young-Kyoun Kim, Jung-Pyo Hong, Hur, Y., Yeon-Hwan Jung, "Optimization for reduction of torque ripple in interior permanent magnet motor by using the Taguchi method," IEEE Trans. Magnetics, Vol.41, no.5, pp. 1796-1799, 2005.

[6] 박지성, 정호창, 이철균, 김종욱, 정상용, "전기기기 최적설계용 미미틱 알고리즘에 관한 연구" 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 12-14, 2008.

[7] 김봉주, 유용민, 권병일, "영구자석의 부분감자를 고려한 매입형 영구자석형 동기전동기 최적설계", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 285-287, 2010.

[8] C. Audet, J. E. Dennis JR, "Mesh Adaptive DirectSearch Algorithms for Constrained Optimization," SIAMJ. Optim., vol. 17, no. 1, pp. 188-217, 2006.

[9] H.Yoshida, K.Kawata, F.Yoshikazu, "A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control Considering Voltage Security Assessment", IEEE Trans. on Power System, vol.15, no.4, pp:1232-1239, 2000.

[10] 우동균, 광상엽, 서장호, 정현교, "다층 매입형 영구자석 전동기의 리플현상을 고려한 d, q축 왜교자속 계산", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.776-777, 2008.

[11] 김민석, 박지성, 김대광, 김정철, 정상용, "차세대 전동차용 직접 구동용 매입형 영구자석 동기전동기의 특성 고찰", 한국철도학회 논문집 제 11권 제 4호, pp. 398-403, 2008.

[12] 긴강환, 이두희, 김성제, 장진영, 김윤호, "IPMSM이 적용된 차세대 고속전철 시스템의 약계자 제어", 전기학회논문지 P, 제 59P권 제4호 2010.12, pp.351-357.

[13] 강규홍, 이주민, 홍정표, 김규탁, 박정우, 김종무, "매입형 영구자석 동기전동기의 돌극성을 고려한 인덕턴스 산정 및 토크특성 해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 pp. 167-169, 1997.

[14] Virginia Torczon, "On the convergence of pattern search algorithms" SIAM J. OPTIM, vol. 7, No. 1, pp. 1-25, 1997

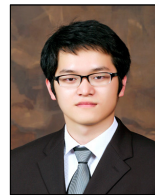
[15] S. - Y. Jung, "Numerical identification of D and Q axis parameters for multi-layer buried PM synchronous motor considering cross-magnetization," in Proc. ICEMS. no. 147, pp. 729-735, 2007.

저 자 소 개



김 광 덕 (金光德)

2011년 동아대학교 전기공학과 졸업
공학사, 2011년~현재 성균관대학교 대학
원 정보통신공학부 석사과정



이 동 수 (李東洙)

2010년 동아대학교 전기공학과 졸업
공학사, 2011년~현재 성균관대학교 대학
원 정보통신공학부 석사과정



정 상 용 (鄭相龍)

2003년 서울대학교 대학원 전기공학과
졸업, 공학박사, 2003~2006년 현대자동차
연구개발본부 선임연구원, 2006년~2011년
동아대학교 전기공학과 조교수, 2011~현
재 성균관대학교 정보통신공학부 조교수



김 종 욱 (金鍾旭)

2004년 포항공대 대학원 전자전기공학과
졸업, 공학박사, 2004~2006년 포스코 기
술연구소 전기강판연구그룹 연구원, 2006~
현재 동아대학교 전자공학과 조교수



이 철 균 (李哲均)

1998년 서울대학교 대학원 전기공학과
졸업, 공학박사, 1993~1999년 현대중공업
중앙연구소 선임연구원, 1999~현재 동의
대학교 전기공학과 교수