

Quasi-Newton Method에 의한 600W IPMSM의 철손 최소화 설계

The Design of Iron Loss Minimization of 600W IPMSM by Quasi-newton Method

백성민* · 조규원** · 김규탁†
(Sung-min Baek · Gyu-won Cho · Gyu-tak Kim)

Abstract - In this paper, the design of iron loss minimization of 600W was performed by using Quasi-Newton method. Stator shoe, the width of stator teeth and yoke, and the length of d-axis flux path were selected as design parameters, and the output characteristics according to each design variable were considered. The objective function was set to minimize iron loss. Using the Quasi-Newton method, the variables converged to the target value while changing simultaneously and multiple times. As the algorithm advanced optimization, the correlation with the behavior of each variable was compared and analyzed.

Key Words : Newton method, Cost function, Design optimization, Magnetic losses, Minimization methods

1. 서론

최근 에너지 및 환경관련 규제와 유가의 급등으로 인하여 전 기자동차 관련 전동기에 대한 수요가 급증하고 있다. 또한, 전자기 시스템은 고효율화, 고정밀화 되어감에 따라 설계과정에서의 성능향상을 위한 최적화요구는 날로 커지고 있고, 최적화를 위한 다양한 방법들이 강구되어지고 있다[1].

매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)는 영구자석을 회전자에 삽입하여 구조적으로 고속회전에 용이한 장점이 있다. 하지만 이로 인한 고속에서 높은 주파수 특성으로 인하여 철손이 많이 발생하여 회전자에 매입된 자석의 감자 위험이 높으며 효율 저감의 위험성도 가지게 된다. 고속에서 구동할 때에 발생하는 철손양이 열원에서 차지하는 비중은 저속 구동상황보다 상대적으로 크다. 전기기기에 있어 손실은 기기의 운전 조건이나 효율을 결정하는 중요한 요소이므로 이러한 손실을 정밀하게 예측하여 설계하는 것이 매우 중요하다[2].

본 논문에서는 최적화 기법 중 고전적인 수치해법에 기반을 둔 Quasi-Newton법을 사용하여 정의한 설계 변수에 따른 결과를 상관 계수와 p-value를 이용하여 두 변인간의 상관 관계를 수치로 정형화하여 변수의 영향도를 비교, 분석하였다.

2. 최적화 알고리즘 및 설계 변수

2.1 최적화 알고리즘

본 논문에서는 기존의 여러 최적화 기법들 중 하나인 Quasi-Newton법을 이용하여 철손을 최소화 하는 설계를 수행하였다. 이러한 최적화 설계에 앞서 Quasi-Newton법에 대해 알아 보았다

2.1.1 Quasi-Newton Method

Newton법은 (Newton's method)은 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson method)이라고도 불리는데, 방정식 $f(x) = 0$ 의 해를 근사적으로 찾을 때 유용하게 사용되는 방법이다.

뉴턴법(Newton's method)을 수식으로 표현하면 수식 (1)로 나타낼 수 있다. 아무 값이나 초기 값 x_0 에서 시작해서 다음 수식에 따라 수렴할 때까지 계속 x 를 이동시켜 나간다.

$$x^{t+1} = x^t - \frac{f(x^t)}{f'(x^t)} \quad (1)$$

종료 조건은 x 값의 변화가 거의 없을 때까지이다. 즉, $|x^{t+1} - x^t|$ 이 매우 작은 값이면 뉴턴법을 종료하고 $x = x^{t+1} - x^t$ 이 해, 즉 $f(x^{t+1}) = 0$ 라고 생각하는 것이다.

뉴턴법 (Newton Method's)은 Quasi-Newton 방법으로 불리는 반복적으로 근사된 Hessian 역행렬로 사용하는 방법으로 발전했다[3].

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Changwon National University, Korea.

E-mail: gtkim@cwnu.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Changwon National University, Korea.

** S&T Motiv Co. Ltd, Motor R&D center, Korea.

Received : January 11, 2017; Accepted : June 23, 2017

2.1.2 피어슨(pearson) 상관계수

두 변인간 상호 관련성을 알기 위해서는 분산도(scattergram)를 이용하는 것이 제일 처음 단계이다.

완전한 양적 상관관계일 때 r(상관관계 계수)값은 +1.00이며 완전한 음적 상관관계일 때 r값은 -1.00이 된다. 그리고 두 변인간에 전혀 상관관계가 없는 경우 r값은 0.00이 된다. 다시 언급하지만 상관관계는 두 변인간에 선형적 관계를 전제로 하는데 상관관계 계수 값은 분산도 상의 여러 점들이 일반적 유형의 기울기(slope)의 함수이며 점들을 에워싸고 있는 타원형의 너비(width of the ellipse)인 것이다. 만일 기울기가 음이면 r(상관관계 계수)의 부호는 마이너스 (-)가 될 것이다. 또한 타원형의 너비가 좁다면 관계의 정도는 클 것이며 따라서 상관관계 계수도 클 것이다.

이상의 것을 정리한다면 상관관계 계수 (r)란 두 변인간의 관계를 나타내는 지수(index)로서 그 값은 $-1 \leq r \leq 1$ 을 가지며 r값의 부호는 관계의 방향을 표시하며 r값의 절대값은 관계의 크기(혹은 선형적 강도)를 나타낸다[4].

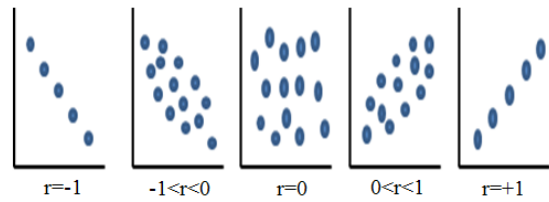


그림 2 r값에 따른 분산도
Fig. 2 Dispersion according to r value

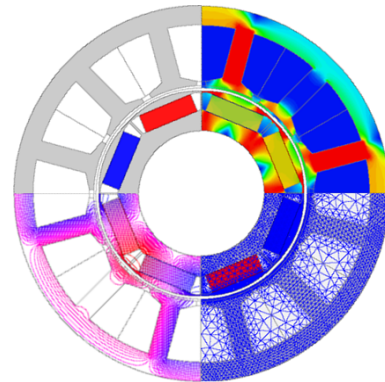


그림 3 기본 모델의 형상
Fig. 3 The shape of the basic model

2.2 기본모델

그림 1과 표 1에 본 연구에 적용된 전동기 기본 모델의 형상과 제원을 요약하여 나타내었다.

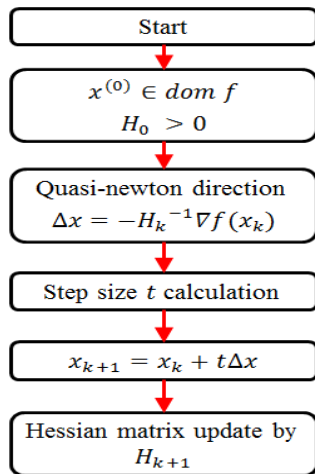


그림 1 Quasi-Newton 알고리즘 순서도
Fig. 1 Quasi-Newton algorithm flow chart

표 1 기본 모델의 제원

Table 1 The value of the basic model

Item	value
Pole / Slot	8 / 12
Rated torque [Nm]	1.86
Rated speed [rpm]	3,000
Rated current [Arms]	24
Stator diameter [mm]	83.6
Stack length [mm]	45

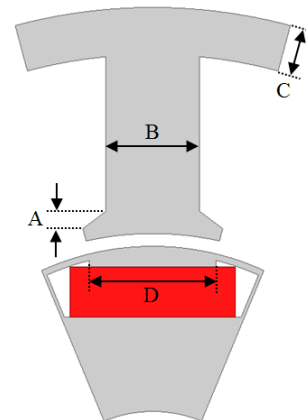


그림 4 설계 변수
Fig. 4 The design parameters

2.2 설계 변수 및 목적 함수

본 연구에서는 자기적인 설계 변수 4개를 선정하여 각 변수가 변해가는 거동을 분석하였으며, 최적화는 Quasi-Newton법을 이용하였다.

자기회로 최적화를 위한 설계 변수를 그림 4에 나타내었다. 변수 A는 고정자 Shoe, B는 고정자 치폭, C는 고정자 Yoke, D는 d축 자로 길이를 각각 나타낸다. 이에 최적화를 위한 각 설계 변수의 최소 및 최대 가변치를 표 2에 나타내었다.

알고리즘을 통한 최적화를 시행하기 전에 설계의 제약 함수로 기본 모델과 동일 출력을 만족하도록 설정하였고 동손은 슬롯 면적에 따라 종속적으로 변화하고 기계손은 속도에 의존하므로 고정되어 철손을 최소화하면 결국 손실이 최소화되어 효율을 최대화시킬 수 있다고 가정하였다. 목적 함수는 철손을 최소화하는 방향으로 선정하였으며 이를 표 3에 나타내었다.

표 2 설계 변수 및 가변 범위

Table 2 Design Variables and Variable Range

Item	A	B	C	D
Minimum value [mm]	0.5	4.3	3.5	10
Maximum value [mm]	1.21	7.4	4.3	13
Nominal value [mm]	1.21	4.3	4.3	0

표 3 목적함수 및 제약함수

Table 3 The objective function and constraints

Item	Object	Target
제약 함수	출력	기본모델과 동일 출력
목적 함수	철손	최소화

3. 최적화 결과

3.1 최적화 수행 결과

최적화 알고리즘을 통한 설계 결과는 그림 5와 같다. 본 연구에서 설정된 cost는 0.001이하에서 수렴하게 설정하였으며 최종 수렴은 0.0003에서 총 77회 최적화 진행 후에 수렴하였다.

그림 6에 최적화가 진행됨에 따른 변수들의 거동을 나타내었다. 각 변수들은 설계 초기값에서 목적 함수의 달성을 위해 감소 혹은 증가하는 방향성을 설정하여야 하며, 이는 알고리즘의 오차 함수의 기울기가 0이 되는 시점까지 반복한다. 이를 위해 변수들은 최종 모델까지 끊임없이 변화하고 있으며, 그 중 변수 A와 C는 초기치에서 큰 폭 없이 수렴하였고, B와 D는 일정한 수렴성을 지니고 있음을 알 수 있다.

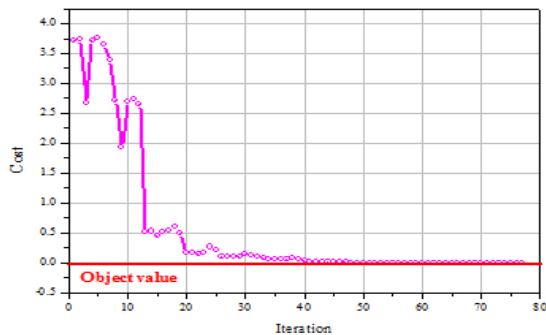


그림 5 최적화 알고리즘의 cost 수렴 결과
Fig. 5 Cost convergence result of optimization algorithm

그림 7에 최적화가 진행됨에 따른 손실 및 효율의 거동을 나타내었다. 이와 같이 최적화 알고리즘에 의해 설계는 뚜렷한 목표를 가지고 진행되었으며, 각 변수들은 알고리즘의 판단 하에 목적 달성을 위해 의미를 부여 받았음이 명확하다. 단, 손실의 변화와 설계 변수의 상호간의 관계는 아직 불명확하므로 상기 서술한 기초 통계학을 적용하여 이를 분석한다.

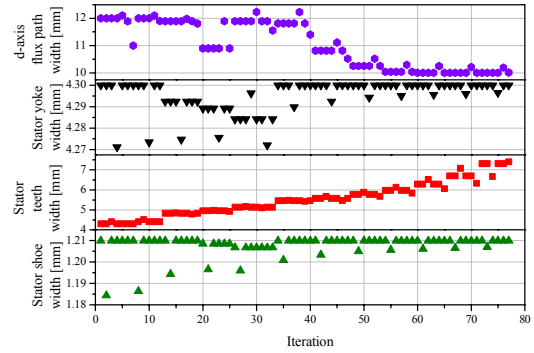


그림 6 iteration과 설계 변수 변화
Fig. 6 Design variables according to Iteration

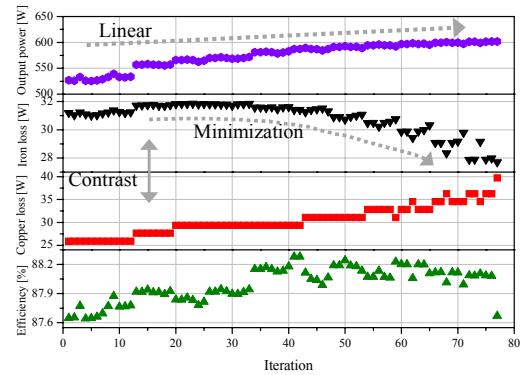


그림 7 iteration과 손실 및 효율 변화
Fig. 7 Loss and efficiency according to Iteration

표 4 각 변수와 손실 및 효율의 상관 관계

Table 4 Correlation between loss and efficiency for each variable

	A	B	C	D	동손	철손
B	0.254 0.026	-	-	-	-	-
C	0.062 0.595	0.394 0.000	-	-	-	-
D	-0.247 0.030	-0.830 0.000	-0.427 0.000	-	-	-
동손	0.244 0.032	0.979 0.000	0.332 0.003	-0.845 0.000	-	-
철손	-0.180 0.118	-0.851 0.000	-0.417 0.000	0.720 0.000	-0.825 0.000	-
효율	0.236 0.039	0.639 0.000	0.390 0.000	-0.573 0.000	0.538 0.000	-0.262 0.021

3.2 최적화 결과 분석

설계 변수와 설계 결과간의 상호관계 분석을 위해 표 4에 각 변수와 검토 결과와의 관계를 나타내었으며, 상관 계수와 P-값을 계산하여 표 4에 나타내었다. 각 셀(Cell)내의 상단 수치는 상관 계수로 서로 얼마나 상관관계를 가지는지를 나타내는 척도이며 하단의 수치는 P-값을 각각 나타낸다. 표 4의 결과를 종합해 보면 다음과 같은 몇 가지 대안제를 유추할 수 있다.

- 가. 철손과 동손은 상관 계수가 -0.825로 매우 높은 관계가 있으며, 이는 오차의 확률이 거의 없다.
- 나. 변수 B는 동손과 0.979, 철손과 -0.851로 효율 변화에 가장 큰 영향을 미치는 변수이며, 이 또한 오차 확률이 거의 없다.
- 다. 변수 D는 동손과 -0.845, 철손과 0.720으로 효율 변화에 두 번째로 큰 영향을 미치는 변수이며, 이 또한 오차 확률이 거의 없다.
- 라. 설계 변수 B와 D는 -0.830으로 서로 간에 음의 방향으로 매우 높은 관계가 있으며 이 또한 오차 확률이 거의 없다.

상기 4가지 결과는 통계학적으로 나타난 도출된 분석이며, 이를 세부적으로 검토하여 상기 통계가 가지는 의미를 확정한다. 그림 8는 (가)에서 도출된 결과를 고찰하기 위해 동손과 철손

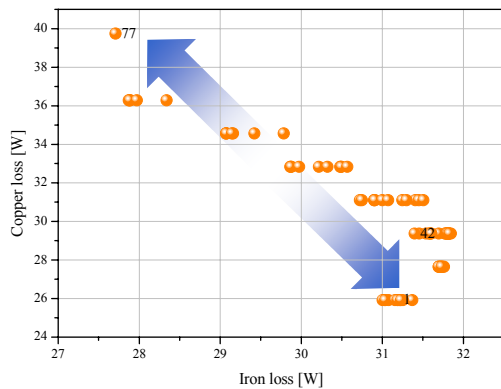


그림 8 철손과 동손의 상관관계
Fig. 8 Correlation between iron loss and copper loss

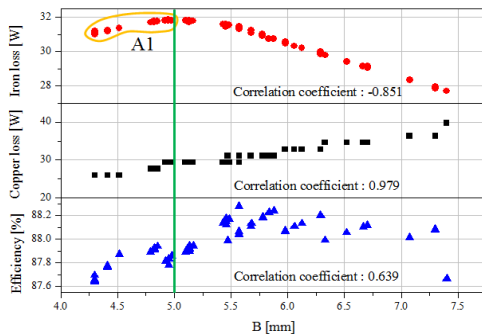


그림 9 변수 B와 손실 및 효율의 상관관계
Fig. 9 Correlation between variable B and loss & efficiency

의 변화 양상을 나타낸 것이다. 목적 함수가 철손의 감소이므로, 1번 모델과 같이 철손이 매우 큰 상태에서부터 최대 효율점인 42번 모델을 지나, 철손이 가장 작지만 동손이 가장 큰 77번 모델까지 그 상호 관계를 뚜렷하게 목격할 수 있다. 이로써, (가)의 통계 결과는 유의미한 결론임을 알 수 있다.

그림 9는 (나)의 통계 결과를 고찰하기 위해, 변수 B와 손실 및 효율과의 그래프를 나타낸 것이다. 변수 B가 증가하면 슬롯 면적이 감소하게 되어 선경 또한 감소하게 되고 저항은 선경에 반비례하므로 증가하여 동손이 증가하는 양의 상관관계를 보인다. 또한, 변수 B가 증가함에 따라 자로가 넓어지면서 자기 포화가 해소되어 철손이 점점 감소하는 음의 상관관계를 가지게 된다. 즉 변수 B가 5 [mm] 이상일 때 알고리즘에 의한 손실 및 효율의 거동은 직선형에 가까워 큰 상관관계를 가지는 것을 알 수 있다.

반면, 변수 B가 5 [mm]보다 작은 A1 구간에서는 철손과의 상관관계가 뚜렷하게 나타나지 않는다. 그 이유로 알고리즘이 그림 10에서 변수 B가 5 [mm] 이전에는 철심 포화에 영향을 미치는 다른 변수들을 가변하는 구간으로 판단된다. 그리고 5 [mm]를 넘어서는 순간부터 각 변수들이 안정화됨에 따라서 선형적인 손실 변화가 발생하게 되고 변수 B와 손실의 상관관계가 뚜렷해지는 것을 확인할 수 있다. 이로써 (나)의 통계 결과 또한 유의미한 결과임을 알 수 있다.

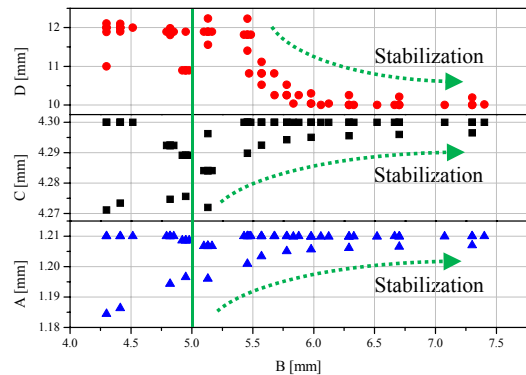


그림 10 변수 B와 각 변수들과의 상관관계
Fig. 10 Correlation between variable B and each variable

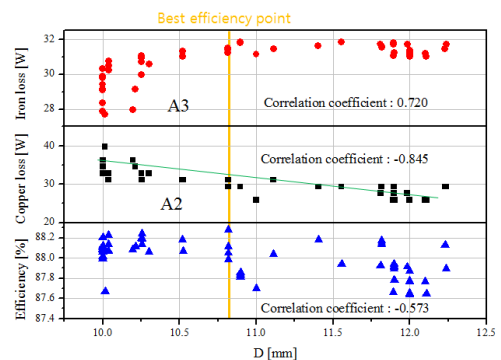


그림 11 변수 D와 손실 및 효율의 상관관계
Fig. 11 Correlation between variable D and Loss & efficiency

(다)의 통계 결과를 분석하기 위해, 변수 D와 손실 및 효율의 그래프를 그림 11에 나타내었다. 변수 D가 커짐에 따라 동손은 감소하는 음의 상관관계를 가지게 되는 것을 확인할 수 있으며 이러한 변화양상이 그림 12에 나타난 변수 B의 거동과 일치하는 것을 알 수 있다.

즉, 변수 D와 동손의 상관관계는 변수 B의 변화양상에 절대적으로 의존한다고 판단된다. 이를 통해 (다)의 통계 결과가 참임을 알 수 있다. (라)의 통계 결과는 상기 (가)와 (다)에서 검토된 결과들로 재정리 할 수 있으며, 이를 다시 표현하면 그림 13과 같다. 그림 13을 통해서 변수 D와 변수 B가 명확한 음의 상관관계를 가지는 것을 확신할 수 있다. 상관 관계 분석을 통해 4가지 통계적인 결과가 실제 전동기의 최적 설계에 부합함을 상기 검토를 통해 증명하였다. 하지만 이와 같은 특성은 본 연구에서 진행된 설계에서만 국한되므로 모든 경우에 일반화되지 않는다. 최종적으로 설계가 진행된 과정을 종합하면 그림 14와 같다.

그림 14에서 알고리즘이 최적화 설계를 진행함에 따라 목표로 하는 출력에 도달하기 위해 계속해서 출력을 증대시키고 있는 것을 확인할 수 있다. 알고리즘이 출력을 증대시키는 방법으로 큰 의미를 가진다고 판단했던 두 변수인 변수 B(고정자 치 폭)를 넓히고 반대로 변수 D(d축 자로 길이)를 좁히는 방법을 선택했다. 그 중 알고리즘은 출력을 상승시키는 방법으로 변수 B를 증가시키는 것이 가장 효과적이라고 판단했다. 그림 14에서 화살표로

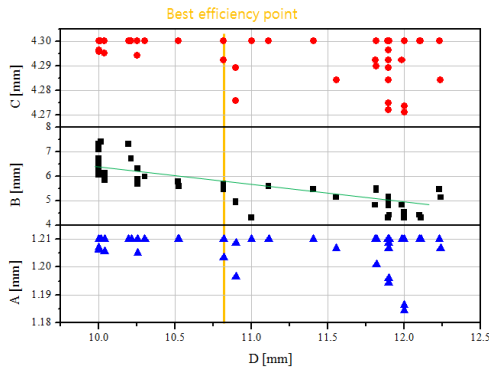


그림 12 변수 D와 각 변수들과의 상관관계
Fig. 12 Correlation between variable D and each variable

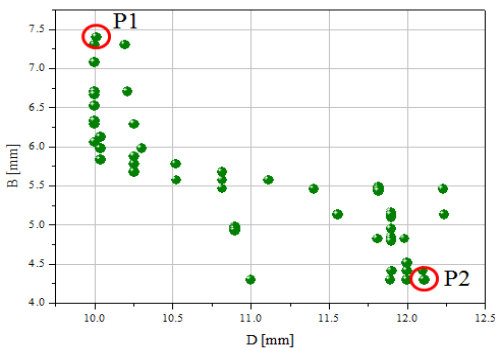


그림 13 변수 B와 변수D의 상관관계
Fig. 13 Correlation between variable B and variable D

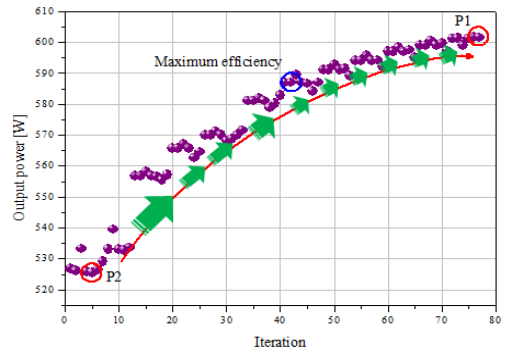


그림 14 최적화에 따른 출력 변화
Fig. 14 Output changes according to optimization

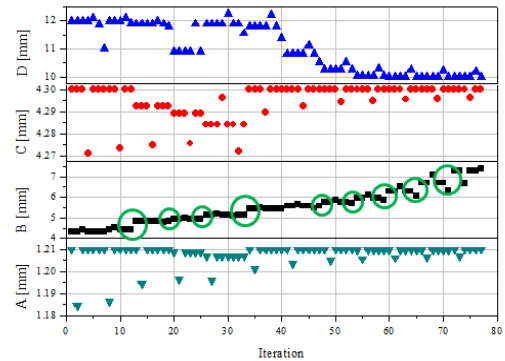


그림 15 iteration과 설계 변수 변화
Fig. 15 Iteration and design variable alteration

표 5 기본모델과 최대효율모델 비교

Table 5 Comparison of characteristics between basic model and proposed model

	기본 모델	최대효율 모델
권선직경/연선 수/턴 수	0.8/6/7	0.8/7/6
권선저항 [ohm]	0.0235	0.017
역기전력 [V]	9.01	8.6
코깁토크 [mNm]	482.39	128.6
인가전류 [A]	23.5	24
구동토크 [Nm]	1.858	1.868
토크리플 [%]	23.83	6.3
동손 [W]	38.93	29.38
철손 [W]	31.43	31.40
기계손 [W]	17.15	
총 손실 [W]	87.51	77.93
출력 [W]	583.71	586.98
효율 [%]	86.96	88.28

표시한 부분의 출력 변화 양상이 그림 15의 변수 B의 거동에 표시한 부분과 일치하는 것을 알 수 있고 약 50번 모델부터 출력이 포화되면서 변수 B를 급격히 높이는 것으로 보아 이를 확인

할 수 있다. 상기 결과를 통해 도출된 최대 효율 모델과 기본 모델을 비교하여 아래와 같이 나타내었다.

4. 결 론

본 논문에서는 최적화 알고리즘으로 전동기의 철손 최소화를 수행하였으며, 설계가 진행됨에 따른 설계 변수의 거동을 고찰하였다. 최적화 알고리즘은 설정된 목적 달성을 위해 수렴과정에서 변수들의 변화에 따른 영향도를 판단하였다. 변수 B인 고정자 치폭과 변수 D인 d축 자로의 길이를 영향력이 있는 변수들로 선정하였음을 알 수 있었다.

최적화 알고리즘이 제어하는 설계 변수와 고찰 대상인 손실간의 관계는 시각적 혹은 직관적으로 판단하기 어렵다. 이유는 일반적으로 수행하는 실험계획법처럼 변화하는 특정 변수를 위해 기타 변수들이 고정되어 있는 피동적인 분석 방법이 아니기 때문이다. 이와 같이, 알고리즘에 의한 설계 변수의 평가는 상관 계수로 정형화 할 수 있음을 본 연구에서 나타내었다. 결과적으로, 8극 12슬롯을 가지는 600[W]급 전동기의 철손 저감을 위한 자로의 최적설계에서는 고정자 철심이 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 최종적인 효율로 비교하면, 고정자 철심의 너비는 전동기 효율에 0.639의 효과를, D축 자로의 너비는 0.573, 고정자 요크는 0.390, 치 끝단 슈의 직각 길이는 0.236의 효과를 각각 미치고 있음을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문(저서)는 2017학년도 창원대학교 연구교수 연구비와 2015년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2015H1C1A1035824).

References

[1] M. S. Berkani; S. Giurgea; C. Espanet; C. Kieffer, "Study on Optimal Design Based on Direct Coupling Between a FEM Simulation Model and L-BFGS-B Algorithm", IEEE Trans on Magnetics, vol. 49, no. 5, pp. 2149-2152, 2013

[2] Seo Jang Ho, Lim Jae Won, Kwon Chung, Min Suk Kim, "Harmonic Iron Analysis of Traction Motor in the High Speed Train with the Distributed Tractions", Proceedings of the Korean Society of Railway Engineers Conference, 2008.11, 162-168 (7 pages)

[3] Eun Jung Lee, "A study on a Neural Network model using Quasi-Newton method", Hanyang University, 2010.

[4] Choi Changhyeon, "Policy Analysis Level 1 Level Metering Analysis 2005 Edition", Chapter 9, 2005.

저 자 소 개



백 성 민 (Sung-min Baek)

1992년 6월 16일 생. 2016년 창원대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 055-213-3640

Fax : 055-263-9956

E-mail : ant7357@changwon.ac.kr



조 규 원 (Gyu-won Cho)

1984년 3월 2일 생. 2009년 창원대 전기공학과 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2014년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).

Tel : 055-213-3640

Fax : 055-263-9956

E-mail : gyuwon.cho@sntmotiv.com



김 규 탁 (Gyu-tak Kim)

1961년 11월 12일생. 1982년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 창원대학교 공대 전기공학과 교수.

Tel : 055-213-3635

Fax : 055-263-9956

E-mail : gtkim@changwon.ac.kr