

DEAS를 이용한 변압기 코아의 최적설계

論文
56-6-10

Optimal Design of a Transformer Core Using DEAS

金兌奎* · 金鍾旭†
(Taegyu Kim · Jong-Wook Kim)

Abstract – This paper introduces an optimal design technique for a 250-watt isolation transformer using an optimization method, dynamic encoding algorithm for searches (DEAS). Although the optimal design technique for transformers dates back to 1970s and various optimization methods have been developed so far, literature concerning global optimization for transformer core design is rarely found against its importance. In this paper, core configuration of the isolation transformer whose performance is computed by complex mathematical steps is optimized with DEAS. The optimization result confirms that DEAS can be successfully employed to transformer core design for various performance specifications only by adjusting weight factors in cost function.

Key Words : 변압기 코아, 최적 설계, 수치 최적화, DEAS

1. 서 론

전력 사용량의 지속적인 증가로 발전용과 배전용 변압기의 수요가 계속 증가하고 있으며, 각종 전기회로에서 사용되는 소형 변압기 또한 그 수요가 꾸준히 증가하고 있지만 변압기 코아의 최적설계에 관한 연구는 전세계적으로도 매우 드물다고 할 수 있다[1]. 특히 환경과 건강에 대한 관심이 날로 커져가고 있는 국내 상황에서 변압기의 고효율화와 저소음화는 이제 변압기 설계의 중요한 목표로 자리 잡아가고 있다. 하지만 변압기 고효율화를 위해서는 일반적으로 설계 자속밀도 값을 높여야 하고, 저소음화를 위해서는 설계 자속밀도 값을 낮춰야 하는 상반성이 있다[2]. 아울러 변압기의 원재료 가격 상승으로 제작비용을 최소화 하는 것도 중요하게 고려되어야 한다. 이는 변압기의 설계가 여러 요소들을 동시에 만족시켜야 하는 multi-objective optimization을 필요로 함을 의미하며, 이를 위해 설계자의 직관과 경험보다는 수치 최적화기법(computational optimization method)을 사용하는 것이 유리하다.

DEAS는 독자적으로 개발된 최적화기법으로서, 이전 스트링의 독특한 특성을 수치 최적화에 적용함으로써 순수한 컴퓨터 연산만으로도 부드럽지 않은 비용함수에 대해서 최적해를 효율적으로 찾을 수 있음을 보였다[3][4]. DEAS는 지역탐색(local search) 전략으로서 이전 행렬로 표현되는 동적인 이웃점들(neighborhood points) 가운데에서 최선의 것을 선택하는 방식으로 파라미터들을 점진적으로 최적화한다. 그리고 전역탐색(global search) 전략으로서 임의의 초기

값으로부터 지역탐색을 수행한 후 만족한 해를 찾지 못했다면 새로운 임의의 초기 값으로부터 재시작하게 하는 multistart 기법을 활용했다.

본 논문에서는 변압기 설계의 권위자인 McLyman[5]이 제안한 250W급의 절연변압기(isolation transformer)의 설계 원리를 소개하고, 책에서 도출한 최적 값과 DEAS를 이용한 최적 값을 비교하기 위해 코아 및 코일의 원재료는 교재의 것과 동일하게 설정했다. 설계 목표는 250W 절연변압기의 효율을 극대화하고, 전압변동률을 5%에 맞추며, 창 이용률(window utilization)을 0.4에 적중하게 하고, 상승온도를 30°C로 한정하는 것이다. 이를 위해 네 가지 성능지수(performance index)를 모두 포함하는 비용함수를 설계했으며, DEAS를 이용해서 효율개선을 주목적으로 하는 코아 설계가 가능함을 보인다.

국내에서 변압기 설계와 고장진단에 관련된 연구자의 수가 적음을 고려할 때, 본 논문에서 소개되는 변압기 설계 단계가 변압기 관련 연구에 작으나마 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 변압기 설계

용어 정리

α	전압변동률
A_c	코아 단면적, [cm ²]
A_p	면적 금(= $A_c W_a$), [cm ⁴]
A_t	변압기 표면면적, [cm ²]
$A_{wp(B)}$	1차 나권선 단면적, [cm ²]
$A_{ws(B)}$	2차 나권선 단면적, [cm ²]
B_{ac}	교류 자속밀도, [T]

* 學生會員 : 東亞大學 電子工學科 碩士課程

† 教練저자, 正會員 : 東亞大學 電子工學科 專任講師 · 工博

E-mail : kjwook@dau.ac.kr

接受日字 : 2007年 3月 20日

最終完了 : 2007年 4月 23日

표 1 절연변압기의 설계 사양 및 목표

Table 1 Transformer design specification and targets

설계 사양						설계 목표			
입력전압 (V_{in})	출력전압 (V_o)	출력전력 (P_o)	주파수 (f)	코아 재질	자속밀도 (B_{ac})	효율 (η)	전압변동률 (α)	창 이용률 (K_u)	상승온도 (T_r)
115V	115V	250W	47Hz	M6X	1.6T	95%	5%	0.4	30°C

η	효율
f	주파수, [Hz]
J	전류밀도, [amps per cm ²]
I_{in}	입력 전류, [amps]
I_o	출력 전류, [amps]
K_e	전기적 계수(electrical coefficient)
K_f	파형 계수(waveform coefficient)
K_g	코아 형상계수(core geometry coefficient), [cm ⁵]
K_s	전류밀도 관련 계수
K_u	창 이용률(window utilization factor)
K_{up}	1차권선 창 이용률
K_{us}	2차권선 창 이용률
MLT	평균 권선길이(mean length turn), [cm]
MPL	자기 경로길이(magnetic path length), [cm]
N_p	1차 권선수
N_s	2차 권선수
P_{in}	입력전력(= $V_{in}I_{in}$), [W]
P_o	출력전력(= V_oI_o), [W]
P_t	총 피상전력(= $P_{in} + P_o$), [W]
P_Σ	총손실(철손과 동손의 합), [W]
T_r	상승 온도, [°C]
V_{in}	입력 전압, [V]
V_o	출력 전압, [V]
W_a	코아 창면적, [cm ²]
W_{tfe}	코아 중량, [g]

표 1은 본 논문에서 최적화할 대상으로 선정한 250W 절연변압기의 설계 사양과 목표를 나타내며 비교를 위해 참고문헌 [5]의 값과 수식들을 동일하게 적용했다.

표 1에서 입출력 전압, 주파수, 설계 자속밀도는 설계 사양으로서 미리 주어진 상수 값이며, 효율과 전압변동률, 창 이용률, 상승온도는 목표 사양으로서 수식 전개 과정에서 반복을 통해 계산할 수 있는 값들이다. 변압기 코아 재질은 설계 능력 비교의 공정성을 위해 McLyman이 사용한 M6X의 특성을 동일하게 적용했다. M6X는 방향성 전기강판 중 중금(POSCO의 CGO금)이며 JIS 규격으로 35G155에 해당된다.

표 1에서 변압기 효율은 식 (1)과 같이 정의되며, 설계에 있어서 대단히 중요한 성능지수라고 할 수 있다.

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_\Sigma} = \frac{P_o}{P_{in}} \quad (1)$$

식에서 P_o 는 출력전력, P_Σ 는 코아와 권선에서 발생하는 순열의 합인 총손실, 그리고 P_{in} 은 입력전력을 의미한다. 만약 P_Σ 가 0이 되면 변압기의 효율은 100%가 된다. 표 1에서 전압변동률은 변압기 부하를 무부하에서 전부하로 변화시키면 2차 전압(또는 출력 전압)이 하강하는데 이 전압변동의 경계 2차 전압에 대한 비율을 백분율로 나타낸 것을 의미하며 수식으로는 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha = \frac{V_o(\text{무부하}) - V_o(\text{전부하})}{V_o(\text{전부하})} \quad (2)$$

참고로 누설 리액턴스도 전압변동률이나 효율에 영향을 미치지만 본 논문에서는 그 영향을 고려하지 않기로 한다.

변압기 설계에서 가장 우선되어야 할 것이 적절한 코아재질의 선택이다. 이를 위해서 McLyman은 코아 형상계수인 K_g 를 고안하고, 계산된 K_g 값과 가장 근사한 값을 갖는 재질을 테이블에서 찾는 방식을 사용했다.

다음은 참고문헌 [5]에서 제안된 변압기 설계단계를 설명하며, 각 단계에서 계산된 값들은 이해의 편의를 돋기 위해 참고문헌 [5]에서 최적값으로 소개된 값을 이용해서 계산했다.

Step 1. 변압기 피상전력(P_t) 계산

$$P_t = P_{in} + P_o = P_o \left(\frac{1}{\eta} + 1 \right) \quad (3)$$

P_t 는 1차 권선과 2차 권선의 전류밀도가 동일한 경우 면적곱 A_p 와 정비례하며[5], 면적곱은 코아 창면적과 코아 단면적의 곱으로 정의되므로 P_t 는 변압기의 형상과 관련이 있다.

Step 2. 전기적 계수(K_e) 계산

$$K_e = 0.145(K_f)^2 f^2 (B_m)^2 10^{-4} = 1.62, \quad (4)$$

$$K_f = 4.44 (\text{sine wave})$$

McLyman은 다음 Step의 코아 형상계수를 계산하기 위해 식 (4)와 같은 전기적 계수를 고안했다.

Step 3. 코아 형상계수(K_g) 계산

$$K_g = \left(\frac{P_t}{2K_e \alpha} \right) = 31.7 [\text{cm}^5] \quad (5)$$

McLyman은 코아 형상계수를 코아 재질 및 형상을 대표하는 값으로 정의했다.

Step 4. 코아 형상 선택

McLyman은 식 (5)에서 구한 31.7에 가장 가까운 코아로서 EI-150 적층코아를 선택했다. 표 2는 EI-150 적층코아의 각 파라미터를 나타내며 K_g 가 37.579로서 근사한 값임을 알

표 2 EI-150 적층코아 데이터

Table 2 Dimension data for an EI-150 lamination core

코아 규격 데이터				설계 데이터							
D [cm]	E [cm]	F [cm]	G [cm]	MLT [cm]	MPL [cm]	A _c [cm ²]	W _a [cm ²]	A _p [cm ⁴]	W _{tfe} [g]	A _t [cm ²]	K _g [cm ⁵]
3.810	3.810	1.905	5.715	22.0	22.9	13.79	10.887	150.136	2334.0	479.0	37.579

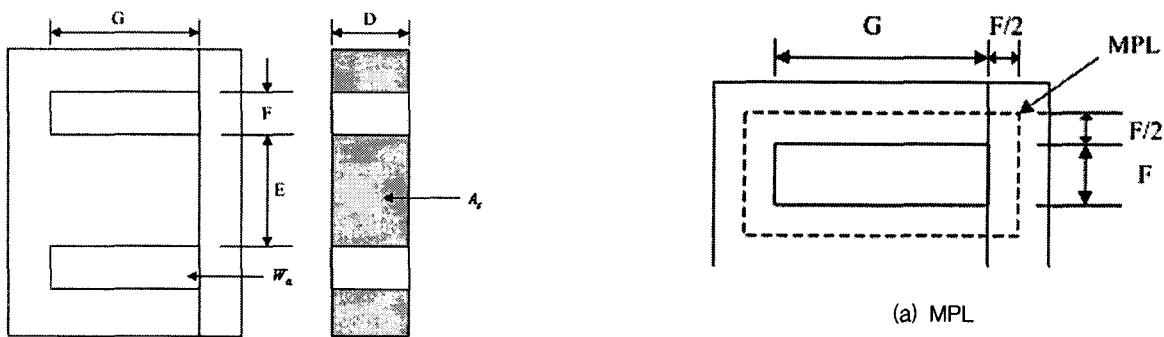


그림 1 EI 코아 규격도

Fig. 1 Dimensional diagram of EI core

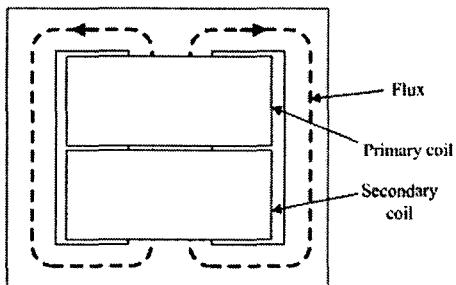


그림 2 EI 코아 형상

Fig. 2 EI lamination outline

수 있다.

그림 1과 그림 2에서 EI type 코아의 규격도와 코아 형상을 나타냈다. 그림 3은 그림 1로부터 MLT와 MPL을 구하는 과정을 보인 것으로 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$MLT = 2(D+2H+E+2H) = 2(D+E+4H) \quad (6)$$

$$MPL = 2(G+2 \cdot \frac{F}{2} + F + 2 \cdot \frac{F}{2}) = 2(G+3F) \quad (7)$$

식(6)에서 H는 절연을 위한 코일 중심부와 코아간 거리를 의미하며 일정한 값으로 설정한다. H는 설계자에 따라 다르고, 정밀하게 계산하기가 어려우므로 표 2와 식 (6)을 이용하면 다음과 같이 계산된다.

$$H = \frac{MLT - D - E}{8} = 0.845[\text{cm}] \quad (8)$$

표 2에서 A_c와 W_a는 그림 1을 참조하면 코아 규격 데이터와는 다음과 같은 관계가 있음을 알 수 있다.

$$A_c = SF \cdot D \cdot E \quad (9)$$

$$W_a = F \cdot G \quad (10)$$

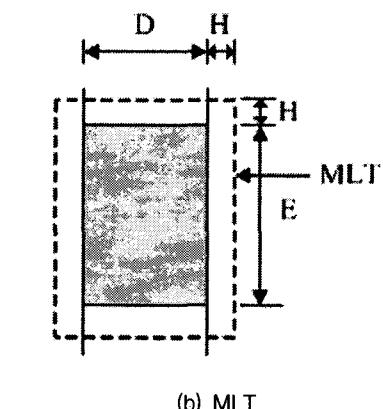


그림 3 코아 규격 데이터와 설계 데이터와의 관계

Fig. 3 Relation between dimension data and design data

식 (9)에서 SF는 점적률(stacking factor)을 의미하며 본 논문에서는 참고문헌 [5]에서 설정한 대로 0.95로 잡았다. 점적률은 적층한 철심의 실증량과 이론 중량과의 비율이며 1.0에 가까울수록 좋다.

표 2에서 W_{tfe}와 A_t는 철손과 상승온도를 구하는데 중요하므로, 두 값을 구하는 과정을 알아보도록 하자. 코아 중량 W_{tfe}는 코아의 부피에 밀도를 곱하면 구할 수 있으며, 코아의 부피는 자기경로 길이에 코아 단면적을 곱하면 구할 수 있다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$W_{tfe} = d \cdot MPL \cdot A_c \quad (11)$$

식 (11)에서 d는 전기강판의 밀도를 나타내며 통상적으로 7.65 g/cm³로 알려져 있다[7]. 그러나 본 논문에서 채택한 전기강판인 M6X의 밀도는 식 (11)과 표 2의 측정값들을 이용해서 역으로 계산하면 7.391 g/cm³이며, Step 20에 이 값을 적용해서 코아중량을 계산한다.

두 번째로 표면 면적은 면적 곱에 대해 다음과 같은 관계가 성립된다[5].

$$A_t = K_s (A_p)^{0.5} \quad (12)$$

식에서 K_s 는 전류밀도 관련 계수로서 마찬가지로 표 2의 측정값들로부터 계산하면 $K_s = 39.09$ 이고 Step 22에 이 값을 적용한다.

식 (6)-(12)를 보면 변압기 코아의 설계 데이터를 결정하는 값은 표 2의 코아 규격 데이터(D, E, F, G)와 식 (11)의 전기강판 밀도, 식 (12)의 전류밀도 관련 계수이다. 이 중에서 전기강판 밀도와 전류밀도 관련 계수는 동일한 종류와 두께의 전기강판에 대해서는 일정하므로 본 논문에서는 DEAS를 이용해서 D, E, F, G 의 최적값을 탐색하기로 한다.

Step 5. 1차 권선수(N_p) 계산

$$N_p = \frac{V_{in}(10^4)}{K_f K_u B_{ac} f A_c} = 250 \text{ [Turns]} \quad (13)$$

식(13)은 Faraday의 법칙을 이용해서 구할 수 있으며, MKS 단위를 CGS 단위로 변환하기 위해 분자에 10^4 을 곱했다.

Step 6. 전류밀도(J) 계산

$$J = \frac{P_t(10^4)}{K_f K_u B_{ac} f A_p} = 256 \text{ [A/cm}^2\text{]} \quad (14)$$

식(14)는 P_t 와 A_p 의 정의와 식(13), Step 24의 식(33)을 이용해서 유도할 수 있다. 그리고 전류밀도는 1차와 2차 권선에 대해 동일하다고 가정한다.

Step 7. 입력전류 I_{in} 계산

$$I_{in} = \frac{P_o}{V_{in}\eta} = 2.28 \text{ [A]} \quad (15)$$

Step 8. 1차 나권선(bare wire) 면적 $A_{wp(B)}$ 계산

$$A_{wp(B)} = \frac{I_{in}}{J} = 0.0089 \text{ [cm}^2\text{]} \quad (16)$$

나권선 면적이란 권선에서 전류가 통과하는 도선만의 면적을 의미한다.

Step 9. 권선표로부터 1차 권선 종류 선택

$$\text{AWG} = \#18,$$

$$A_{wp(B)}' = 0.00822 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\left(\frac{\mu\Omega}{cm}\right) = 209.5 \text{ [micro-ohm/cm]}$$

McLyman은 Step 8에서 계산된 권선 단면적과 가장 근사한 단면적을 가지는 AWG #18을 표 3에서 선택했다.

표 3 권선 특성표

Table 3 Wire table

AWG	Bare Area $\text{cm}^2(10^{-3})$	Resistance $(\mu\Omega/\text{cm}, 20^\circ\text{C})$	Area $\text{cm}^2(10^{-3})$
#14	20.820	82.8	22.95
#15	16.510	104.3	18.37
#16	13.070	131.8	14.73
#17	10.390	165.8	11.68
#18	8.228	209.5	9.326
#19	6.531	263.9	7.539
#20	5.188	332.3	6.065
#21	4.116	418.9	4.837
#22	3.243	531.4	3.857

Step 10. 1차 권선 저항 계산

$$R_p = MLT \cdot N_p \cdot \left(\frac{\mu\Omega}{cm}\right) (10^{-6}) = 1.15 \text{ [ohms]} \quad (17)$$

Step 11. 1차 동손(P_p) 계산

$$I_p = A_{wp(B)}' J \quad (18)$$

$$P_p = I_p^2 R_p = 6.56 \text{ [W]} \quad (19)$$

식 (18)은 Step 9에서 선택된 권선의 단면에 대해 1차 권선에 흐르는 전류를 다시 계산한 식이다.

Step 12. 2차 권선수 계산

$$N_s = \frac{N_p V_o}{V_{in}} \left(1 + \frac{\alpha}{100}\right) = 262.5 \rightarrow 263 \text{ [Turns]} \quad (20)$$

식 (20)에서 권선 수는 정수여야 하므로 반올림해서 263 turns이 된다.

Step 13. 2차 나권선(bare wire) 면적 $A_{ws(B)}$ 계산

$$A_{ws(B)} = \frac{I_o}{J} = 0.00804 \text{ [cm}^2\text{]} \quad (21)$$

Step 14. 권선표로부터 2차 권선 종류 선택

$$\text{AWG} = \#18,$$

$$A_{ws(B)}' = 0.00822 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\left(\frac{\mu\Omega}{cm}\right) = 209 \text{ [micro-ohm/cm]}$$

Step 9와 동일한 방법으로 표 3에서 가장 근사한 면적을 갖는 권선을 선택한다.

Step 15. 2차 권선 저항 계산

$$R_s = MLT \cdot N_s \cdot \left(\frac{\mu\Omega}{cm}\right) (10^{-6}) = 1.21 \text{ [ohms]} \quad (22)$$

Step 16. 2차 동손(P_s) 계산

$$I_s = A_{ws(B)}' J \quad (23)$$

$$P_s = I_s^2 R_s = 5.70 \text{ [W]} \quad (24)$$

Step 17. 1차와 2차 동손의 합 계산

$$P_{ca} = P_p + P_s = 11.68 \text{ [W]} \quad (25)$$

Step 18. 전압변동률 α 계산

$$\alpha = \frac{P_{ca}}{P_o} (100) = 4.67 \text{ [%]} \quad (26)$$

Step 19. 전기강판 손실 계산

$$W/K = 0.000557(f)^{1.68} (B_{ac})^{1.86} = 0.860 \text{ [W/Kg]} \quad (27)$$

식에서 세가지 계수들(0.000557, 1.68, 1.86)은 M6X 전기강판의 계수들로서 일반적으로 전기강판 제조사들이 제공하는 데이터를 이용한다.

Step 20. 코아 손실 계산

$$P_{fe} = (W/K)(W_{tf}) (10^{-3}) = 2.00 \text{ [W]} \quad (28)$$

식에서 코아 중량 W_{tf} 는 식 (11)에서 구한 값을 대입하면 되며, 10^{-3} 을 곱한 것은 g으로 표시된 코아 중량을 Kg으로 변환하기 위함이다.

Step 21. 총손실 계산

$$P_{\Sigma} = P_{ca} + P_{fe} = 13.68 \text{ [W]} \quad (29)$$

Step 22. 단위면적당 총손실 계산

$$\psi = \frac{P_{\Sigma}}{A_t} = 0.0286 \text{ [W/cm}^2\text{]} \quad (30)$$

식에서 A_t 는 식 (12)에서 계산된 값을 사용한다.

Step 23. 상승온도 계산

$$T_r = 450\psi^{0.826} = 23.9 \text{ [}^{\circ}\text{C}] \quad (31)$$

식 (31)에서 두 계수 450과 0.826은 측정 데이터에 의해 구해진 값들이다.

Step 24. 창 이용률(window utilization) K_u 계산

$$K_u = K_{up} + K_{us} = 0.388 \quad (32)$$

$$K_{up} = \frac{N_p A_{wp(B)}'}{W_a}, \quad K_{us} = \frac{N_s A_{ws(B)}'}{W_a} \quad (33)$$

창 이용률이란 변압기 코아의 창 면적에서 권선이 차지하는 총면적을 의미한다. 창 이용률이 0.388이라는 것은 코아의 창에서 38.8%를 권선이 차지하며, 나머지 부분은 보빈, 투브, 공기, wrapper나 layer의 절연물 등이 차지함을 의미한다.

위의 설계단계가 끝나면 설계 성능지수인 효율, 상승온도, 전압변동률, 창 이용률을 계산할 수 있다. 효율은 식 (1)과 (29)를 이용해서, 상승온도는 식 (31), 전압변동률은 식 (26), 창 이용률은 식 (32)를 이용하면 계산할 수 있다. 그런데, 창 이용률을 제외한 세 값들은 순환적으로 계산되며, 각 값에 상호 영향을 미치는 형태를 갖고 있다.

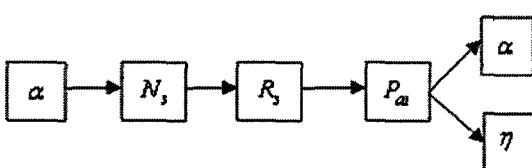
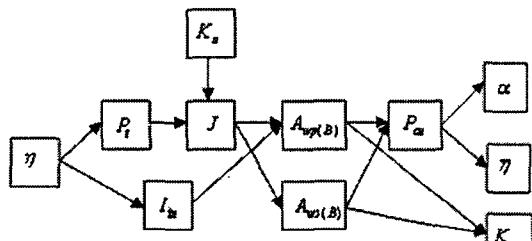


그림 4 변압기 성능지표의 관계도

Fig. 4 Relational diagram of transformer performance indices

그림 4(a)는 Step 1에서 Step 24까지의 계산시 효율과 창 이용률이 세 개의 출력값(α , η , K_u)에 어떤 영향을 미치는지 화살표를 통해 보여주고 있다. 효율과 창 이용률은 자신을 포함해서 세 값 전체에 영향을 미치며 순환적인 관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 그림 4(b)는 전압변동률이 계산 단계에서 자신과 효율에 영향을 미치며 마찬가지로 순환적인 관계에 있음을 보인다. 그러므로 정확한 성능지표를 계산하기 위해서는 표 1에서 얻어진 목표 성능지표를 초기값으로 해서 수렴할 때까지 Step 1, 5~22를 반복해야 한다. Step 2, 3, 4는 McLyman이 코아 type을 선택하기 위해 고안한 것이며, 본 논문에서는 선택된 EI-150 적층코아를 그대로 사용해서 설계하므로 계산에서 제외된다.

McLyman은 Step 8, 9를 이용해서 권선을 선택했지만, 설계단계 반복 시 한 값(AWG #18)으로 고정해야 한다. 왜냐하면 각 Step의 반복계산 중 Step 9와 14에서 $A_{wp(B)}$ '와 $A_{ws(B)}$ '이 증가하면 식 (32)에서 K_u 가 증가하고, 다음 반복에서 식(14)의 J 가 감소하게 된다. 이는 식 (16)과 (21)에서 $A_{wp(B)}$ 와 $A_{ws(B)}$ 를 증가시켜 결과적으로 표 3으로부터 다시 증가된 $A_{wp(B)}$ '와 $A_{ws(B)}$ '를 선택하게 하므로 반복이 진행됨에 따라 발산하게 된다. 그러므로 본 논문에서는 권선을 AWG #18로 고정해서 정확한 성능지표를 계산하기로 한다. 즉, 주어진 코아 형태와 권선에 대해 DEAS로 코아 설계를 정교화 함으로써 향상된 성능을 갖는 변압기 코아 설계를 수행한다. 그럼 5는 반복 계산시 AWG #18 권선에 대해 전체 성능지표가 표 1에서 설정된 초기값으로부터 일정값으로 수렴함을 보인다.

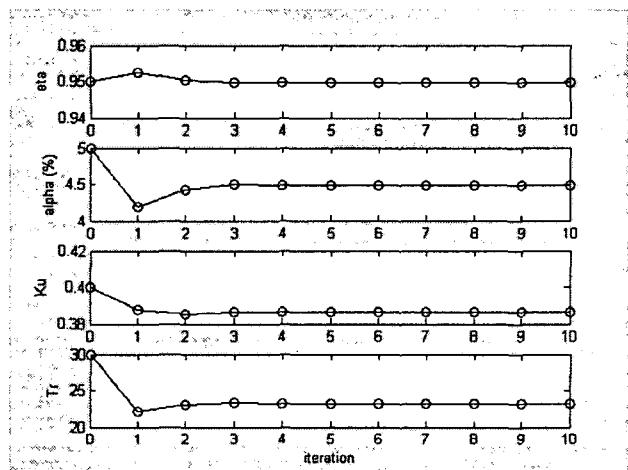


그림 5 성능지표의 수렴

Fig. 5 Convergence of performance indices

이러한 반복계산을 통해 얻어진 McLyman 코아의 정확한 성능지수는 다음과 같다.

$$\eta = 0.9498, \quad \alpha = 4.4822, \quad Ku = 0.3862, \quad Tr = 23.1814$$

DEAS로 변압기 코아 설계시 설계 인자는 그림 1의 EI 코아 규격 데이터이다. 이 값들로부터 표 2의 모든 설계 데이터들이 계산되어지며, 그림 6에서 보는 것처럼 모든 성능지수에 직,간접적으로 복잡하게 영향을 미친다. 그리고 설계 인자들은 코아 형상과 관련된 물리적 값들이므로 각각의 상한값과 하한값을 설정하기가 용이하다.

비용함수는 효율의 극대화, 상승온도와 전압 변동률, window utilization의 목표값 적중을 위해 다음과 같이 설계했다.

$$J = \beta_1(1 - \eta) + \beta_2 \frac{|\alpha - 5|}{5} + \beta_3 \frac{|K_u - 0.4|}{0.4} + \beta_4 \frac{|Tr - 30|}{30} \quad (34)$$

식 (34)에서 $\beta_i, i=1,2,3,4$ 는 가중치로서 설계자가 중시하는 성능지수 항이 목적함수에 미치는 영향을 최대화하기 위해 조정되어서 곱해지는 값들이다. 예를 들어, 효율이 가장

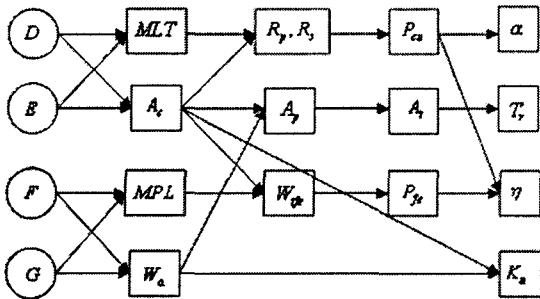


그림 6 변압기 설계인자와 성능지표간 영향도

Fig. 6 Relational diagram of design factors and performance indices

중요하다면 β_1 을, 전압 변동률을 정확하게 5%로 맞추고 싶다면 β_2 를 다른 가중치보다 크게 정하면 된다. 본 논문에서는 효율을 높이는데 중점을 두었기 때문에 $\beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 1$ 로 두고 β_1 을 10에서 50까지 상대적으로 크게 설정하여 최적값을 찾았다. 설계자의 필요에 따라 식 (34)에 새로운 항을 임의대로 추가하거나 변형시킬 수 있는데 그 이유는 DEAS가 여타 gradient법과는 달리 목적함수의 편미분 정보를 사용하지 않기 때문이다. 이는 직접 최적화법의 큰 장점이기도 하다[6].

3. DEAS

DEAS는 크게 지역최적화(local search)와 전역최적화(global search) 과정으로 나눌 수 있으며, 지역최적화는 탐색점 주변을 좀 더 면밀히 탐색하는 bisectional search(BSS)와 BSS에서 얻은 정보를 기반으로 이웃 영역을 확장 탐색하는 unidirectional search(UDS)로 나눌 수 있다. 그리고 전역최적화를 위해서는 가장 용이하면서도 간단하게 구현할 수 있는 multistart 기법을 채용했다. multistart 기법은 임의의 시작점에서 지역최적화를 통해 지역해를 발견후 다시 임의의 시작점으로부터 지역최적화를 반복하는 방법으로 전역해를 찾는 전역최적화법이다. 이 방법에서 전역해는 탐색된 모든 지역해 중에서 최소 혹은 최대(최대화 문제의 경우)인 것으로 선택된다. 전역 최적화에 대한 설명은 참고문헌 [3]에 잘 소개되어 있으므로 본 논문에서는 생략한다.

이진 스트링은 유전 알고리듬[8]에서 한 개체의 염색체(chromosome)로 사용되며, 길이가 고정된 채 교배(crossover)와 돌연변이(mutation) 연산에 의해 계속적으로 비트들을 변화시키며 진화한다. 유전 알고리듬에서는 전 파라미터의 염색체 스트링을 하나로 이어 붙이기 때문에 파라미터의 길이가 길어질 경우 문제가 발생한다. 즉, 아무리 염색체 스트링이 길어져도 일정 혹은 이점 교배를 행하기 때문에 전 파라미터에 대해 충분한 교배 조합이 만들어지지 못하므로, 결국 돌연변이의 영향이 커지게 된다. 이는 유전 알고리듬의 탐색 효율이 저하됨을 의미한다.

이러한 유전 알고리듬의 단점에 비해, DEAS는 전 파라미터의 이진 스트링을 한 줄로 붙이는 것이 아니라 차례로

쌓음으로써 이진 행렬(binary matrix)을 구성한다. 그리고 지역탐색을 수행함에 따라 이진 행렬의 가장 오른쪽 열에 0 또는 1로 구성된 최적의 이진 열(binary column)을 계속해서 붙여 나간다. 최적의 이진 열을 찾기 위해서는 현재의 최적점 근처에서 가능한 모든 탐색 방향으로의 이웃점을 찾아내어서 비용함수를 계산 및 비교하는 과정(BSS)이 필요하다. 이 과정에서 얻어진 최적 방향으로의 확장탐색을 통하여 넣은 해를 찾는 과정(UDS)이 필요하다.

DEAS는 BSS와 UDS라는 기본 탐색원리를 유지하고 계산량의 차이를 둔 eDEAS(exhaustive DEAS)와 uDEAS(univariate DEAS)가 개발되었다. eDEAS는 DEAS의 가장 초기 버전이며, 전체 변수에 변화를 줌으로써 생성되는 이웃 점이 2^n 개가 되므로 계산량의 부담이 큰 단점이 있다. 이에 각 변수 별로 BSS와 UDS를 생성하는 알고리듬인 uDEAS가 개발되었으며 10차 이상의 다차원 문제에 대해 탁월한 최적화 성능을 보였다[9]. 본 논문에서는 탐색 차원이 4차이므로 편중의 우려가 없는 eDEAS를 선택했으며 다음에 소개되는 DEAS의 내용은 eDEAS에 관한 것이다.

3.1 BSS

BSS는 이진 행렬로 표현되는 현재의 최적점으로부터 이웃점을 생성하는 과정과 이를 위해 생성된 이진 행렬들을 복호화하고 비용함수를 계산하는 과정, 그리고 그 중에서 최소의 비용함수를 갖는 행렬을 선택하고 최적 탐색 방향을 도출하는 과정으로 구성된다. 여기에서 도출된 최적 탐색 방향은 곧이어 진행되는 UDS의 기본 탐색방향이 된다.

2개의 변수를 최적화하는 문제를 예로 들어 상기한 BSS의 각 단계를 설명하도록 한다. 예를 들어 직전 session(BBS)와 UDS의 조합)에서 최적값이라고 판별된 행렬이 다음과 같다고 하자.

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

이 행렬 A_1 주변의 이웃점 행렬들은 다음과 같이 0과 1의 조합으로 생성된 2^2 가지의 열을 A_1 행렬의 최우측에 붙인 이진 행렬로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} A_1^{(1)} &= \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \\ A_1^{(2)} &= \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \\ A_1^{(3)} &= \begin{bmatrix} A_1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \\ A_1^{(4)} &= \begin{bmatrix} A_1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

그 다음 단계로서 각 이웃점 행렬들을 복호화(decoding)하고 그 값으로부터 비용함수를 계산하는 과정이 수행된다. 복호화를 위해서는 유전 알고리듬에서 많이 사용되는 복호화 함수를 사용하며, 길이가 m 인 이진 스트링에 대해 $[r_l \ r_u]$ 의 범위를 갖는 경우 다음의 복호화 함수를 사용한다.

$$f([b_{m-1} b_{m-2} \dots b_1 b_0]) = \frac{r_u - r_l}{2^m - 1} \sum_{j=0}^{m-1} b_j 2^j \quad (35)$$

식 (35)는 하나의 스트링에 대해 복호화를 행한 것이며 위의 이웃점 행렬들을 복호화 하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\theta^{(1)} = \begin{bmatrix} f([1010]) \\ f([0110]) \end{bmatrix}, \quad \theta^{(2)} = \begin{bmatrix} f([1010]) \\ f([0111]) \end{bmatrix},$$

$$\theta^{(3)} = \begin{bmatrix} f([1011]) \\ f([0110]) \end{bmatrix}, \quad \theta^{(4)} = \begin{bmatrix} f([1011]) \\ f([0111]) \end{bmatrix}.$$

BSS의 마지막 단계로서 다음과 같이 네 개의 이웃점 행렬에 대해 주어진 문제의 비용함수를 구한 후 비용함수 값이 최소인 행렬을 구한다.

$$\theta^* = \min\{\mathcal{J}(\theta^{(1)}), \mathcal{J}(\theta^{(2)}), \mathcal{J}(\theta^{(3)}), \mathcal{J}(\theta^{(4)})\} \quad (36)$$

식 (36)에서 가장 작은 비용함수를 갖는 파라미터 벡터 θ^* 의 최우측 열을 조사하면 A_1 행렬로부터의 최적 탐색방향을 알 수 있으며, 이 최적 탐색방향은 UDS에 넘겨진다. 예를 들어 $A_1^{(2)}$ 가 네 개의 행렬 중 가장 비용함수가 작다면 최적 탐색방향은 $[0 1]^T$ 이 된다. 어떤 이진 스트링의 LSB에 0을 붙이고(즉 $[b_{m-1} b_{m-2} \dots b_1 b_0]$) 복호화를 하면 $[b_{m-1} b_{m-2} \dots b_1 b_0]$ 의 실수 값보다 감소하고, 1을 붙이고(즉 $[b_{m-1} b_{m-2} \dots b_1 b_0]$) 복호화를 하면 $[b_{m-1} b_{m-2} \dots b_1 b_0]$ 의 실수 값보다 증가하는 성질이 있으므로[3], BSS의 최적 탐색방향 $[0 1]^T$ 은 x_1 의 방향으로는 음의 방향, x_2 의 방향으로는 양의 방향으로 좀 더 탐색을 확장시키면 보다 놓은 해를 찾을 확률이 높다고 할 수 있다. 여기에서 한 가지 주의할 것은 BSS에서는 현재 비용함수 값보다 감소하는 이웃점 행렬이 없는 경우에도 상대적으로 최소값을 갖는 이웃점 행렬을 선택함으로써 강제적으로 열수를 1 증가시킨다는 점이다. 이는 탐색공간의 분해도를 높이기 위해 고안되었지만, 원리적인 면에서 보면 비용함수를 증가시킴에도 불구하고 확률적으로 선택할 수 있게 한 simulated annealing[10]과 유사한 면이 있다고 할 수 있다.

3.2 UDS

BSS가 심화 탐색(exploitation) 특성을 갖는다면, UDS는 광역 탐색(exploration)의 특성을 갖는다. 구배법(gradiant method)에서는 지역해에 접근할수록 비용함수의 기울기 값이 감소하며, 이는 step length λ_i 가 일정할 경우 다음 식에서 알 수 있듯이 생긴된 최적점 x_{i+1} 의 변화가 점차 감소함을 의미한다.

$$x_{i+1} = x_i - \lambda_i \nabla \mathcal{J}(x_i) \quad (37)$$

BSS만 있을 경우 식 (37)에서 $-\lambda_i \nabla \mathcal{J}(x_i)$ 의 값이 지수적으로 감소하게 되어 초기 탐색점이 최적해 근처에 있을 경우에는 초기에 수렴함을 알 수 있다. 하지만 초기 탐색점이 지역해에서 멀리 있을 경우에는 step length를 일정하게 유지한 상태에서 넓게 탐색해야 한다. 이를 위해 UDS는 스트링 길이를 변화시키지 않고 직전의 BSS에서 찾은 최적의 방향을 기반으로 increment addition(INC)이나 decrement subtraction(DEC)을 수행한다.

앞의 예제에서 BSS의 결과 $[0 1]^T$ 가 최적 방향이었다면 x_1 의 스트링에 대해서는 DEC, x_2 의 스트링에 대해서는 INC를 수행하는 것이 UDS이다. UDS에서는 확장 벡터(extension vector)를 이용하는데 BSS 방향으로의 확장탐색을 수행하면 1, 그렇지 않으면 0으로 표현된다. 확장 벡터는 BSS와 유사한 원리에 의해 n 차원의 문제에 대해 $2^n - 1$ 개가 발생되는데 $[0 0]^T$ 는 아무런 extension도 일어나지 않은

것이므로 제외되기 때문이다. UDS는 BSS와 달리 비용함수가 감소할 때까지 반복적으로 수행되므로 직전의 UDS 이웃 점 중의 한 점의 비용함수를 다시 계산하는(revisit) 문제가 발생된다. 그럼 7은 2차원 문제에 대해 BSS와 UDS가 실행되는 예를 도시한 것인데, 굵은 선으로 표시된 것은 최적 탐색방향을 나타내며 두 번째 UDS에서 생성된 이웃점 중에 A가 직전 UDS에서 탐색된 점임을 알 수 있다. DEAS에서는 이진비트의 특성을 활용한 masking 기법을 사용함으로써 이러한 재탐색을 용이하게 방지한다[3].

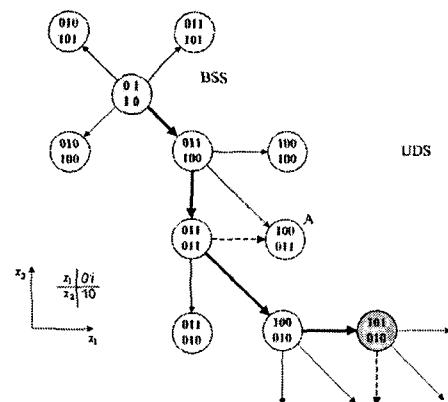


그림 7 2차원에서의 DEAS 지역최적화 예시
Fig. 7 Local search of DEAS in two dimension

BSS의 예제에서 $A_1^{(2)}$ 에 대해 $[0 1]^T$ 의 탐색방향으로 UDS를 수행하면 세 개의 확장벡터 $[0 1]^T$, $[1 0]^T$, $[1 1]^T$ 가 생성되고, 각 벡터에 대해 다음 세 개의 이웃점 행렬이 생성된다.

$$B^{(1)} = \begin{bmatrix} 1010 \\ 1000 \end{bmatrix}, \quad B^{(2)} = \begin{bmatrix} 1001 \\ 0111 \end{bmatrix}, \quad B^{(3)} = \begin{bmatrix} 1001 \\ 1000 \end{bmatrix}.$$

그 후에는 BSS와 동일한 방법으로 각 행렬들을 복호화하고 비용함수를 계산하는 과정, 그리고 그 중에서 최소의 비용함수를 갖는 행렬을 선택한다.

4. 변압기 코아 최적 설계

DEAS로 최적화할 설계값은 그림 1의 D, E, F, G이다. McLyman이 설계한 규격 데이터 값을 기준으로 향상된 설계를 위해 각 설계값의 탐색 범위는 다음과 같이 설정했다.

$$D \in [2 6], \quad E \in [2 6], \quad F \in [1 3], \quad G \in [3 9]$$

DEAS 알고리듬과 관련된 파라미터들은 다음과 같이 설정했다.

- DEAS type : eDEAS
- 탐색 단계 : 예비탐색(preliminary search)
- numMaxTrial=5
- initRowLen=1, maxInitRowLen=5
- maxFinRowLen=10

탐색단계에서 예비탐색이라는 것은 multistart시 임의로 설정되는 초기 스트링의 길이가 initRowLen에서부터 maxInitRowLen까지 변화되는 탐색방법을 의미한다. 이렇게 초기 스트링의 길이를 변화시키는 이유는 비용함수의 형상(landscape)에 대한 정보가 없기 때문에 비용함수가 단봉(unimodal)으로부터 다봉(multimodal)의 특성일 때까지 골고루 탐색시켜 보는 것이다. 만약 예비탐색을 통해 초기 스트링의 길이가 1일 때에 지역해를 바로 찾을 수 있다면 아래로 볼록한 형태의 단봉 비용함수일 것이고, 초기 스트링의 길이가 3이상이 되어야만 지역해를 찾을 수 있다면 한 개 이상의 지역해를 갖는 다봉함수일 것이다. 이에 비해 본탐색(main search)은 예비탐색으로부터 얻은 비용함수 형상정보를 활용해서 초기 스트링 길이를 최적값으로 정하고 multistart를 수행하는 탐색기법이다. 활선(on-line) 시스템식별처럼 계산시간이 대단히 중요한 문제가 아닌 경우는 예비탐색 만으로도 좋은 결과를 얻을 수 있으므로 본 논문에서는 DEAS 예비탐색을 수행했다.

DEAS 파라미터 중 numMaxTrial=5라는 것은 시작 스트링 길이가 1($=\text{initRowLen}$)에서 5($=\text{maxInitRowLen}$)까지 변화될 때 주어진 길이의 시작 스트링에 대해 5번을 반복하라는 것을 의미한다. 그러므로 지역탐색은 총 25번이 수행되었다. 그리고 maxFinRowLen=10은 스트링 길이가 10이 되면 지역탐색을 멈추라는 것을 의미한다. DEAS는 이진 스트링을 이용하기 때문에, 스트링 길이로부터 탐색영역에 대한 현재 해상도를 직접적으로 계산할 수 있다. 스트링 길이가 10라는 것은 $2^{10} \approx 0.001$ 의 해상도이므로 충분히 높다고 할 수 있다.

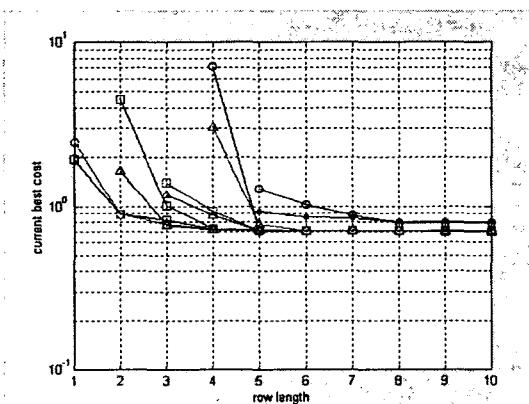


그림 8 DEAS를 이용한 전역해 탐색 과정

Fig. 8 Aspects of global search with DEAS

그림 8은 $\beta_1 = 10$, $\beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 1$ 일 때 비용함수(34)를 DEAS로 최적화하는 과정을 보인다. 본 논문에서는 변압기 효율을 최대화하는 것에 주안점을 두었으므로 β_1 의 값을 다른 값보다 상대적으로 크게 설정했다. 25번의 지역최적화 후 얻어진 전역해는 다음과 같다.

- 설계 규격: $D=2.4536$, $E=5.4878$, $F=1.2659$, $G=8.9531$
- 성능 지수: $\eta=0.9449$, $\alpha=4.9989$, $K_u=0.4000$, $T_r=25.5038$
- 목적함수 값: 0.7009

이 값은 McLyman의 코아 성능지수와 비교해 볼 때 효

율은 $\eta=0.9498$ 보다 다소 감소했지만 α 와 K_u 값들은 각각 4.4822, 0.3862로서 모두 목표값에 적중했으며 $T_r(=23.1814)$ 값도 목표값(=30)에 보다 근접했음을 알 수 있다. 그리고 McLyman의 코아에 대한 목적함수 값은 주어진 β_i 값에 대해 0.8673이어서 DEAS가 찾은 코아 규격이 보다 개선된 결과임을 알 수 있다. 그러나 효율의 감소에 주안점을 두어 코아를 설계해야 하므로 β_1 을 20에서 50까지 점차 증가시키며 최적화를 수행했으며 그 결과를 표 4에 정리했다. 표에서 β_1 이 증가할 수록 효율 값이 0.9449에서 0.9634까지 증가하지만 α 와 T_r 에 대한 적중률은 다소 떨어짐을 알 수 있다. 이는 4개의 성능 지수를 동시에 조절하는 데서 오는 한계점이라 할 수 있지만, 해당 성능지수와 관련된 가중치를 증가시킴으로써 DEAS가 적절한 해를 찾아낼 수 있음을 보였다. 결론적으로 $\beta_1 = 50$ 일 때 DEAS는 McLyman보다 효율이 1.36% 개선되고 전압변동률과 상승온도, 창 이용률도 목표값에 근사한 코아 규격을 얻을 수 있었다.

제안된 설계법의 장점은 비용함수에서 가중치와 성능지수들을 미분가능성과 관련없이 자유롭게 변형 및 조절함으로써 설계 자유도를 높일 수 있고, DEAS의 고속최적화 성능으로 인해 짧은 시간 내에 원하는 설계값을 얻을 수 있다는 점이다.

5. 결 론

변압기의 최적설계 기법은 변압기의 오랜 역사와 전력기반에 미치는 심대한 중요성에도 불구하고, 지금까지 국내외적으로 활발히 연구되지 못하였다. 본 논문에서는 250W급의 절연변압기에 대해 변압기 설계의 권위자인 McLyman[5]의 설계방법에 대해 저자가 개발한 최적화법인 DEAS를 적용해서 최적설계를 수행했으며, 그 결과 개선된 효율을 가지면서도 다른 설계목표를 적절히 만족시키는 변압기 코아 형상을 얻을 수 있었다. DEAS는 비용함수의 미분정보를 이용하지 않으므로 비용함수를 설계자의 의도대로 자유롭게 정의할 수 있으며, 원하는 성능지수들이 여러 개일 경우 해당 가중치를 높임으로써 선택적으로 최적화를 할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서 제안된 방법은 변압기 이외의 다양한 전기기기에 대한 최적설계와 전력망 최적화에도 적용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] W. G. Hurley, W. H. Wolfe, and J. G. Breslin, "Optimized transformer design: inclusive of high-frequency effects," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 13, no. 4, July 1998.
- [2] 권동진, 저소음 변압기 개발을 위한 기초 조사 연구, '04 전력연-단426, 전력연구원, 2004
- [3] J. -W. Kim and S. W. Kim, "A numerical method for global optimization: dynamic encoding algorithm for searches," *IEE Proc.-Control Theory and Appl.*, vol. 151, no. 5, pp. 661-668. Sept. 2004.
- [4] J. -W. Kim and S. W. Kim, "Parameter identification of induction motors using dynamic encoding

표 4 효율 최대화를 위한 코아 설계 비교

Table 4 Comparison of core design performances

β_1	최적 데이터				성능 데이터				비용함수	
	D	E	F	G	η	α	K_u	T_r	J	J_m
-	3.8100	3.8100	1.9050	5.7150	0.9498	4.4822	0.3862	23.1814	-	-
10	2.4536	5.4878	1.2659	8.9531	0.9449	4.9989	0.4000	25.5038	0.7009	0.8673
20	2.9098	4.3373	2.0118	6.0118	0.9458	5.0003	0.4000	25.1632	1.2462	1.3693
30	3.0098	4.1761	2.0528	5.9119	0.9458	4.9949	0.4000	25.1443	1.7882	1.8713
40	4.6667	3.5238	1.9206	4.8095	0.9523	4.1699	0.3999	22.5496	2.3229	2.3733
50	5.7419	5.8710	1.1935	3.7742	0.9634	2.6052	0.4000	17.9615	2.7122	2.8753

algorithm for searches (DEAS)," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 20, no. 1, pp. 16-24, March 2005.

- [5] C. W. T. McLyman, *Transformer and Inductor Design Handbook*, Marcel Dekker, Inc. 2004.
- [6] S. S. Rao, *Engineering Optimization*, John Wiley & Sons Inc., 1996.
- [7] 전기강판 카탈로그, 포스코, 2006.
- [8] K. A. DeJong, *An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems*, Ph.D. thesis, University of Michigan, Ann Arbor, MI. Dissertation, 1975.
- [9] J. -W. Kim, N. G. Kim, and S. W. Kim, "On-load parameter identification of an induction motor using univariate dynamic encoding algorithm for searches", *International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 852-856, Bangkok, Thailand, August 2004.
- [10] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing", *Science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671 - 680, 1983.

저 자 소 개



김태규 (金兌奎)

1981년 4월 7일생. 2007년 동아대 전자공학과 졸업. 2007년~현재 동 대학원 전자공학과 석사과정

Tel : 051-200-5579

E-mail : taegyuya@hotmail.com



김종욱 (金鍾旭)

1970년 10월 24일생. 1998년 포항공대 전자전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전자전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전자전기공학과 졸업(박사). 2004년~2006년 포스코 기술연구소 전기강판연구그룹 연구원2, 2006년~현재 동아대학교 전자공학과 전임강사

Tel : 051-200-7714

Fax : 051-200-7712

E-mail : kjwook@dau.ac.kr