

24MVA 몰드 변압기의 손실저감을 위한 Tie-Plate의 형상 최적설계 연구

(A Tie-plate Shape Optimization of 24MVA Cast Resin Transformer
for Reduction of Stray Loss)

김영배* · 신판석**

(Yong-Bae Kim · Pan-Seok Shin)

Abstract

This paper presents a method to reduce the stray loss of core Tie-Plate of distribution power transformer. The method combines a 3-dimensional FEM with PSO(Particle Swarm Optimization) algorithm to determine the shape of the Tie-Plate that minimizes eddy current and flux-leakage losses. To verify the method a 24MVA distribution(cast-resin) transformer was simulated using one objective function and two design variables with some constraints. The final optimized Tie-Plate has nine(3×3) slots of 10mm width, 15mm thickness and 25mm distance. After four iterations, the Tie-Plate loss was reduced to about 21 % of the original.

Key Words : Tie-Plate, Shape Optimization, Cast Resin Transformer, Core Loss, Stray Loss

1. 서 론

1.1 연구의 배경

진력용 변압기 표유부하손은 변압기 용량에 맞춘 철 구조물(프레임이나 tie-plate 등)의 설계가 전자기적인 특성분석과 평가를 통하여 적절하게 이루어지지 않으면 전체 부하손실의 20%를 넘는다. 또한 변압기의 용량이 늘어나면 철 구조물의 누설자속 입사량이 더 급격하게 증가하기 때문에 표유부하손 급증한다. 그러므로 대용량의 몰드 변압기를 고효율화 하는 데에 표유부하손에 대한 분석과 손실저감에 대한 연구가 필요하다. 몰드 변압기는 기본적으로 외함 없이 Tie-Plate, 2차 공통 부스바, 프레임에서 표유부하손이

* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 박사과정
** 교신저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수
* Main author : Ph.D student in Department of
Electrical Engineering of Hongik
University.
** Corresponding author : Professor in Department
of Electrical Engineering of Hongik
University.
Tel : 041-860-2593, Fax : 041-863-7605
E-mail : nhb0108@naver.com
접수일자 : 2014년 3월 13일
1차심사 : 2014년 3월 18일, 2차심사 : 2014년 5월 21일
심사완료 : 2014년 5월 22일

주로 발생한다. Tie-Plate는 그 위치가 다른 철 구조물에 비해 코일과 가깝기 때문에 누설자속이 높은 밀도로 Tie-Plate에 입사된다. 그렇기 때문에 Tie-Plate의 재료나 형태가 잘못 설계되면, 변압기의 국부적인 온도상승을 유발하고, hot spot 주변의 절연물은 열화될 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 Tie-Plate의 설계를 최적화하여 표유부하손을 줄이는 연구를 하였다[1].

Tie-Plate 손실에 관한 연구는 관련된 근사적 계산법과 일부 실험 데이터들이 보고되어 있지만 구체적인 설계방법이나 손실계산 및 실험에 대한 검증 연구 등이 아주 부족한 실정이다[2]. 그리고 이러한 분석적 해석과 수식에서는 와전류 효과가 무시되는 등 근사적 접근기법의 한계가 존재하므로 정확하다고 말할 수 없다. 이러한 수식적 한계나 실험데이터의 검증과 정확한 계산을 위하여 3차원 유한요소법(FEM)해석을 통해서 많은 부분 극복될 수 있다[3].

1.2 연구의 방법

Tie-Plate의 손실 해석은 Bertotti 공식을 이용한 것이며 이것은 Steinmetz 공식을 약간 수정한 것이다. 표유부하손은 무부하손에 속하는 철손은 아니지만, 그 본질적인 원인은 같다고 할 수 있기 때문에 철손공식을 적용하여 계산할 수 있다. 시변자속이 존재하는 공간 안에 자성체가 있을 때 자화이력에 의한 히스테리시스 손실과 맴돌이 전류에 의한 와전류 손실, 그리고 포화자속에 의한 손실이 발생한다[4].

$$dW = \underbrace{k_h B_m^2 f}_{\text{Losses by hysteresis}} + \underbrace{\frac{\pi^2 \sigma d^2}{6} (B_m f)^2}_{\text{Losses by eddy current}} + \underbrace{k_e (B_m f)^{\frac{3}{2}}}_{\text{Losses in excess}} \times 8.67 \quad (1)$$

- k_h : 히스테리시스 손실 계수
- k_e : 포화 손실 계수 σ : 도전율
- d : 강판의 두께 f : 주파수
- B_m : 자속밀도의 피크 값

히스테리시스 손실은 최대자속밀도의 제곱에 비례하고 주파수에 비례한다. 와전류 손실은 최대자속밀도와 주파수에 제곱에 비례하고 포화 손실은 1.5를 지수로 비례한다. 이에 더불어 Bertotti 손실 계수 k_h 와 k_e 를 적용하여 손실밀도(Volume density of the average power)dW를 계산해 내고 적층을 적층과 체적적분을 통해서 손실을 계산한다.

이때 Bertotti 손실 계수 k_h 와 k_e 는 재료의 밀도, 도전율, 적층두께, 주파수, 적층율, 그리고 손실그래프 정보를 가지고 계산해 낸다. 즉 표유부하손이 일어나는 클램프나 Tie-Plate, 탱크 등의 구조물의 재료 데이터가 요구된다.

표 1. Bertotti 계수와 단위
Table 1. Bertotti coefficient and unit

계수	단위
k_h	히스테리시스 손실 계수 $WsT^{-2}m^{-3}$
σ	도전율(일반적인 와류손 계수) Sm^{-1}
k_e	포화손실 계수 $W(Ts^{-1})^{-3/2}m^{-3}$
d	규소강판 두께 m
k_f	코어적층율($0 < k_f \leq 1$) -
f	주파수 Hz

2. 최적화 이론

2.1 LHS(Latin Hypercube Sampling Strategy)

슬롯 폭은 Tie-Plate의 가로, 세로 길이가 정해져 있기 때문에 어느 정도 제한된 범위 안에 있게 되지만, 슬롯 폭과 두께 두 변수가 변화할 수 있는 모든 경우의 수를 전부 해석하는 것은 매우 긴 시간이 소요된다. 그러므로 이러한 Uniform Sampling Point 생성방법 대신에 의사최적점(pseudo-optimal point)을 이용한 LHS를 적용하여 샘플링 포인트를 형성하고 그에 대한 표유부하손값을 수치해석 시뮬레이션을 이용하여 계산한다[5].

LHS는 “공간을 채우는” 형식의 설계방법으로, 연속적으로 “zoomed-out”된 설계공간에 순응적으로 샘플링 포인트를 추가하면서, 샘플링 포인트 분포의 질(quality)을 향상시키며, 이를 통해 목적함수들의 기대값의 추정을 위한 입력변수(샘플링 포인트 데이터)를 생성하는데 사용할 수 있는 샘플링 포인트 생성 방법이다.

이 알고리즘은 4 단계로 이루어진다[6].

- 1) 전체 설계변수 영역에서 LHS를 이용하여 초기 샘플링 포인트를 생성한다.
- 2) 최적형상 파라미터(optimal shape parameter)로 반응평면(response surface)을 만들고, (1+1) 진화기법을 이용하여 의사최적점을 찾는다.
- 3) 찾아낸 의사최적점의 수렴 여부를 판별한다.
- 4) 설계범위를 축소하고, 그 범위 내에서 부가적으로 샘플링 포인트를 생성한 후, LHS를 이용하여 근접한 의사최적점을 찾는다. 찾아낸 의사최적점을 중심으로, 설계영역을 재설정하는 “zoomed-out”을 한다.

여기서 부가적인 샘플링 포인트를 추가하는 것이 LHS를 의미하는 것과 같다. 그리고 나면, 반응평면은 다시 설정되고, 실제 전역 최적점(global optimal point)이 찾아질 때 까지 이 과정을 반복하게 된다.

2.2 RSM(Response Surface Method)

이 데이터를 RSM(Response Surface Method)을 통해 반응표면을 구성하고, 반복 수행을 통해 최적 값을 찾는다. 다중 방사성 기저함수(RBF: Radial Basis Function)를 사용한 RSM은 많이 이용되는 보간법 중의 하나로 설계변수에 따른 RSM은 다음 식과 같이 구성된다[7].

$$S(x) = \sum_{i=0}^n c_i g(x - x_i)$$

$$g(x) = \sqrt{|x|^2 + h^2} \quad (2)$$

여기서 x 는 디자인 파라미터 벡터이고, c_i 는 샘플링 포인트 x_i 에 대응하는 상수이고, $g(x)$ 는 다차원 곡면

의 방사성 기저 함수(REF)이고, h 는 형상 파라미터(Shape parameter)라고 불리며 기능은 중심점 옆에 있는 단일의 기저 함수의 굴곡을 컨트롤 한다.

2.3 PSO(Particle Swarm Optimization Method)

RSM으로 PSO는 새, 벌 등의 군집생활을 하는 생물체들의 이동 모습과 그 원리를 알고리즘화 한 것이다. 그 집단들의 여러 개의 입자(Particle)들의 위치가 각각의 해가 된다. PSO 알고리즘은 일부 정지조건이 충족될 때까지 다음 세단계의 반복으로 이루어져 있다[8].

1. 각 입자의 적합성 평가
 2. 각 입자들의 위치변화 중 가장 적합도가 높은 위치를 갱신
 3. 각 입자의 속도와 위치를 갱신
- 속도와 위치를 갱신하는 단계는 PSO 알고리즘의 최적화 단계의 핵심으로 식 (3)으로 구성된다.

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1r_1[\hat{x}_i(t) - x_i(t)] + c_2r_2[g(t) - x_i(t)] \quad (3)$$

각 입자는 i 로 표시되고 $v_i(t)$ 는 시간 t 에서의 입자 i 의 속도이며 $x_i(t)$ 는 시간 t 에서의 입자 i 의 위치이다. 매개변수 w, c_1, c_2 ($0 \leq w \leq 1.2$), ($0 \leq c_1 \leq 2$), ($0 \leq c_2 \leq 2$)는 사용자 계수이다. r_1, r_2 ($0 \leq r_1 \leq 1, 0 \leq r_2 \leq 1$)는 각각의 속도 갱신으로 생성되는 무작위 값이다. $\hat{x}_i(t)$ 는 시간 t 에서의 각 입자 i 의 최고 위치이고 $g(t)$ 는 시간 t 에서 군집이 가장 적합도가 높았던 위치이다. 각 입자의 속도가 계산되면 각 입자의 위치는 입자의 이전 위치로 새로운 속도를 사용하여 갱신되고 그 식은 식 (4)와 같다.

$$x_i(t+1) \leftarrow x_i(t) + v_i(t+1) \quad (4)$$

일부 정지 조건이 충족될 때 까지 이 과정은 반복되며 일부 정지조건은 알고리즘이 정해놓은 횟수에 도달했을 때, 최고의 적합 위치를 찾아냈을 때, 미리 정의된 적합도 값에 도달했을 때이다.

종합적으로 최적화 이론들을 적용한 최적화 기법은 다음과 같은 최적설계 알고리즘의 순서를 따른다. 먼저 초기모델의 손실 목적함수와 설계변수(슬롯폭, 두께)를 정한 다음 LHS를 이용하여 RSM과 PSO를 적용하기 위한 초기 데이터를 생성한다. 이 후 RSM을 통해 반응표면을 구성한 후 PSO를 이용하여 수렴구간을 찾고 수렴이 될 때까지 반복 수행한다. 최종 수렴한 후 최종모델을 적용하며 전체 프로그램의 흐름도는 그림 1과 같다.

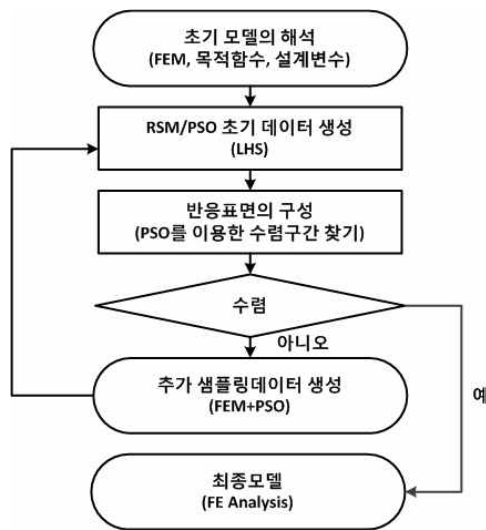


그림 1. 최적화 알고리즘을 이용한 프로그램의 흐름도
Fig. 1. Flow chart of optimization algorithm using FEM program

3. 해석 결과

3.1 해석 모델

24MVA 몰드변압기 컴팩트화를 위해 Tie-Plate의 최적설계와 절연몰드코일을 개선하는 설계를 하고, 3차원 해석을 진행하였다. 3차원 모델링은 그림 2와 같이 코어는 8개의 적층으로 이루어져 있고 저압, 고압 권선이 상, 하부 2개의 섹션으로 나뉘어져 있다. 각 제원은 실제 설계치 표 1과 같다. Tie-Plate의 최적설계를 하기 전에 초기모델의 설계치를 검증하기 위해 철손을 계산하였다. 해석 결과는 표 2와 같이 와류손

4.26kW를 포함하여 전체 손실은 22.66kW이다.

식 2는 각 코일의 정격전류를 계산하는 식으로 각각의 전압과 용량을 이용하여 변압기 각 코일에 흐르는 상전류로 계산하였다. 역률 $\cos\theta$ 는 업체에서 제공된 일반적인 값으로 0.8로 정하였다.

$$I_1 = \frac{24M}{3 \times 22.9k \times \cos\theta} = 436.68 [A]$$

$$I_2 = \frac{24M}{3 \times 6.6k \times \cos\theta} = 1515.15 [A] \quad (5)$$

식 2에 계산된 1차측 정격전류와 2차측 정격전류를 각 코일의 입력전류로 하여 Flux2D 프로그램의 정상 교류자계 3차원(Steady state AC Magnetic 3D) 해석을 하였다. 해석 결과 총 손실은 22.6kW로서 실제 설계치의 무부하손(철손)인 23.1kW과 비교하여 2%의 오차를 보이므로 아주 근사한 계산결과를 보여주고 있다. 이 때 최대 자속밀도는 3.197T이다.

해석 모델의 검증이 끝나고 Tie-Plate를 적용한 해석모델은 그림 3과 같다. Tie-Plate의 형상은 실제 제작을 용이하게 하기 위하여 슬롯을 3×3으로 모델링하였다. 3×1의 경우 강도가 약해지기 때문에 철심을 지탱하기 어렵다.

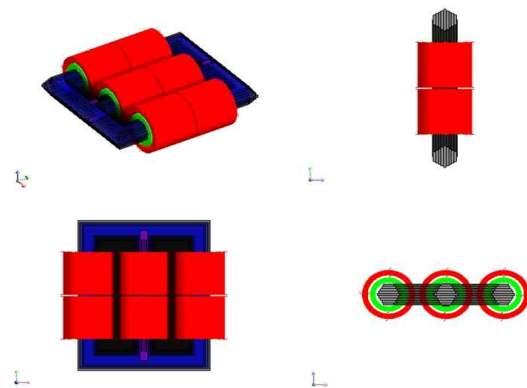


그림 2. 24MVA의 3D FEM 모델
Fig. 2. 24MVA mold transformer of 3D model

3D 모델을 바탕으로 해석한 자속밀도 분포는 그림 3과 같다. 최대 자속밀도는 코일부분이 감싸져 있는

코어 leg에서 나타나며 자속밀도는 3.196T이다. 최소 자속밀도는 코어의 위, 아래 부분의 자속밀도로 0.94T이다. FEM 프로그램의 3D 모델링에서의 장점인 상세 모델링에서 코어의 적층은 구현되었지만, 5단적층과 T형 접합부분으로 코어가 잘라져 적층되는 부분은 구현이 불가능하므로 그림 4처럼 코어의 접합부분의 자속밀도가 상세히 표현되지 못하였다.

표 2. 24MVA 몰드 변압기 설계 사양
Table 2. Design specifications of 24MVA mold transformer

구분	24MVA	
1차 전압	22.9KV	
2차 전압	6.6KV	
결선	DD	
절연종별	H/H	
권선온도상승	125K/125K	
부하손 at 120°	저하손	102,400W
	STRAY손	52,000W
	총부하손	154,400W
무부하손	23,100W	
총손실	177,500W	

표 3. 기본 모델의 철손 해석 결과
Table 3. The basic model of iron loss analysis

1차측 정격 전류	2차측 정격 전류	철손(W)				최대 자속 밀도 B(T)
		히스테리 시스손	와류손	초과	총손실	
437A	1515A	17884	4264	510	22658	3.197



그림 3. Tie-plate를 추가한 3D FEM 모델
Fig. 3. 3D FEM model for tie-plate

그림 5에서 나타나는 Tie-Plate의 단면 자속밀도 분포는 코어부분에서 자속밀도가 약 3.0T 이상이 분포하여 높은 것을 알 수 있다. 상대적으로 코어보다 Tie-Plate는 재질 특성은 자기포화가 1.2T, 투자율이 5000으로 낮으며 자로의 구성이 제대로 되지 않으므로 자속밀도가 1.7T로 작아 Tie-Plate에서 손실이 많게 된다.

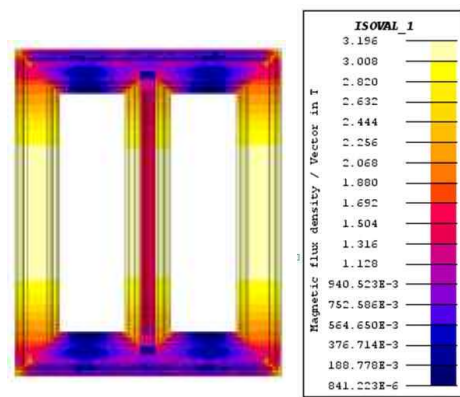


그림 4. 24MVA 3D 모델의 자속밀도 분포
Fig. 4. 24MVA 3D model of the magnetic flux density

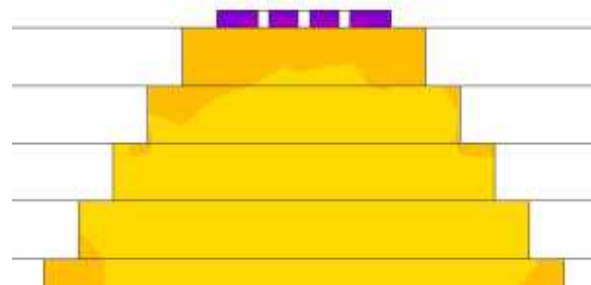


그림 5. 24MVA 코어와 Tie-plate 단면 자속밀도 분포
Fig. 5. Tie-plate section 24MVA core and the magnetic flux density distribution

3.2 결과

3D의 철손(무부하손)은 실제 해석 모델에서 설명한 것과 같이 제원표의 23.1kW보다 2% 작은 22.6kW로 해석의 오차를 줄였다.

기본모델 해석 코어의 설계는 이미 최적화되어있는

부분이고 Tie-Plate의 슬롯의 형상 변화 최적 설계로 표유부하손을 줄였다. Tie-Plate의 최적설계시 중요한 변수는 슬롯폭과 슬롯의 두께이다. 슬롯의 두께(T)를 구하는 식은 코어를 지탱해주는 Tie-Plate의 특성상 기계적 강도를 고려한 식 (6)과 같다.

$$T = \frac{\text{실제 tie plate 부피}}{\text{모델링 tie plate 부피} - (3 * \text{슬롯높이} * \text{슬롯폭})} \quad (6)$$

슬롯폭의 값은 슬롯두께(T)에 영향을 미친다. 슬롯 두께(T)는 저압코일의 내경범위 내에 있어야 하기 때문에 슬롯폭의 값은 28mm보다 커서는 안된다. 또한 강도에 영향을 미치는 단면적을 고려하여 슬롯폭의 값은 25mm보다 작아야 한다. 본 연구에서 슬롯폭의 최소값은 3D 해석에 미치는 매쉬의 면적을 고려하여 5mm로 지정하였고 최대값은 15mm로 정하였다. 각 슬롯폭의 변화에 따른 해석결과는 표 3과 같다.

해석 결과 Tie-Plate의 슬롯이 없는 모델은 1049W이고 슬롯이 3개 있는 모델은 870W 이하로 해석결과가 나왔다. 슬롯폭은 기계적 강도로 인하여 Tie-Plate의 두께에 영향을 미치므로 코어의 폭이 470mm이고 코일에 넘어서지 않기 위해 최대 15mm로 슬롯폭을 정하고 최대치인 15mm로 해석하였을 때 최소 손실값은 846W가 나온다. 그러나 실제로 설계할 시에는 폭과 두께의 수치를 간단히 할 필요가 있다.

표 4. Tie-Plate 크기와 손실 특성
Table 4. Tie-Plate size and loss characteristics

슬롯폭	두께 (mm)	By Hysteresis (W)	eddy current loss (W)	in excess (W)	total (W)
슬롯없음	12	870.78	75.35	102.71	1048.84
5 (실제설계치)	14.23	703.87	73.09	90.96	867.92
6	14.48	702.69	72.96	90.84	866.49
7	14.74	700.83	72.77	90.63	864.23
8	15.01	699.35	72.62	90.46	862.42
9	15.28	697.18	72.39	90.22	859.79
10	15.57	695.46	72.21	90.02	857.69

그림 6은 Tie-Plate의 최적 설계 모델이다. 실제 설계를 반영한 수치인 슬롯폭이 10mm 두께가 15mm로 할 때의 손실값은 826W으로 최소 손실보다도 20W가량 감소한다. 또한 슬롯이 없는 모델과 비교하여 233W의 손실이 감소하였다. 실제로 제작된 슬롯폭은 5mm로 해석결과와 비교하였을 때 868W로 최적설계치와 42W의 감소효과를 볼 수 있다. 슬롯폭이 5mm의 경우 전체손실감소는 543W로서 효율상승에 약 0.3%의 효과를 가져오므로 전체효율이 약 99.30%로 개선된다. 또한 Tie-Plate에 슬롯이 생기면서 코어를 받쳐주는 힘이 작아져 두께를 늘렸으므로 최적모델의 부피가 약 1.18배로 증가한다.

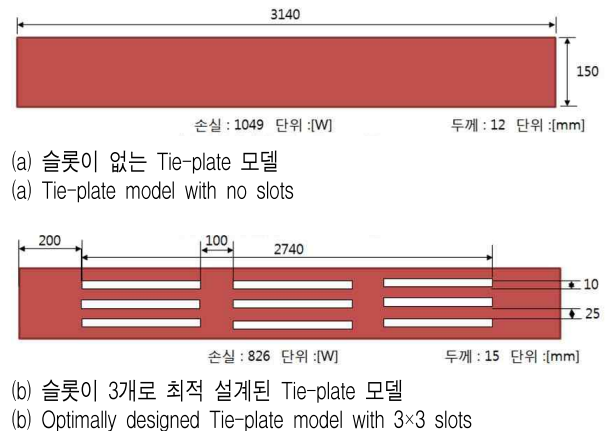


그림 6. Tie-plate 최적 설계 모델 (결과)
Fig. 6. Optimally designed Tie-plate model(results)

4. 결 론

몰드변압기 Tie-Plate의 최적설계는 3차원 FEM 해석의 최대 장점인 상세 설계로 컴팩트화된 모델을 쉽게 접근할 수 있다. 3D 모델링은 정확성이 중요하므로 최대한 실제형상과 동일한 모델을 입력하여 계산할 수 있도록 컴퓨터가 허용하는 최대의 요소수를 갖도록 모형이나 치수에 최대 중점을 두었으며, 해석결과도 실제 설계제원표와 크게 다르지 않았다. FEM 해석과 최적화 기법을 이용한 알고리즘을 연구하여 24MVA 배전용 몰드변압기의 Tie-Plate의 손실을 최소화하였고, 그 결과 슬롯이 3×3개로 설계된 최적설계

모델이 제시되었다. 최적 모델과 비교하여 슬롯이 없는 모델과는 표유부하손이 223W 손실이 감소하고, 이는 Tie-plate의 전체 손실의 약 21%의 효과를 가져온다.

본 해석기법으로 최적화 이론의 도입으로 손실 최적 모델의 제시와 3D FEM 해석을 통해 전자력 해석의 정확도를 높일 수 있으므로 향후 대용량 전력용변압기의 설계와 해석에 큰 도움이 될 것이다.

이 논문은 2013년도 정부 (교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2012R1A1A4A01010937).

References

- [1] Hyeong-Taek Jang, "A Study on Improvements of Electromagnetic Characteristics for Distribution Cast Resin Transformer by FEM Simulation", Hongik University Master Thesis, 2010.
- [2] Xuejun Ma, Yu Jiang, "Study on Eddy Current Loss of Core Tie-plate in Power Transformers", Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Asia-Pacific, 2010.
- [3] S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde, "Transformer Engineering", MARCEL DEKKER, INC, p.169-230, 2004.
- [4] D. C. Jiles, "Modelling the Effects of Eddy Current Losses on Frequency Dependent Hysteresis in Electrically Conducting Media", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 30. NO. 6, November 1994.
- [5] P.S. Shin, and et.al., "Shape Optimization of a Large-Scale BLDC Motor Using an Adaptive RSM Utilizing Design Sensitivity Analysis", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 43, no. 4, pp.1653-1656, April 2007.
- [6] S. Rippa, "An algorithm for selecting a good value for the parameter c in radial basis function interpolation", Advances in Computational Mathematics, vol. 11, pp.193-210, 1999.
- [7] Natelie Packham and Wolfgang M. Schmidt, "Latin hypercube sampling with dependence", Numerical Methods on Finance, École des ponts, paris, 2009.
- [8] James Kennedy and Russell Eberhart. "Particle swarm optimization." In Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, volume IV, pages 1942 - 1948, Piscataway, NJ, 1995. IEEE.

◇ 저자소개 ◇



김영배 (金英培)

1982년 9월 19일생. 2009년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2011년 홍익대학교 전기공학과 졸업(석사). 현재 홍익대학교 전기공학과 박사과정.



신판석 (申判錫)

1953년 1월 28일생. 1977년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1986년 미국 R.P.I. 전기공학과 졸업(석사). 1989년 미국 R.P.I. 전기공학과 졸업(박사). 1980~1993년 한국전기연구원 선임연구원. 1993년~현재 홍익대학교 전기공학과 교수.