

24kV급 배전반의 외함재질과 두께에 따른 Bus bar와 외함의 전자기 손실특성 분석

Analysis on Electromagnetic Loss Characteristics of Bus bar and Enclosure according to the Specifications of Enclosures for a 24kV Switchgear

허 정 일* 홍 중 기* · 강 형 구†
(Jeong Il Heo · Jonggi Hong · Hyoungku Kang)

Abstract - This paper deals with the electromagnetic loss characteristics of enclosures for a 24kV high voltage switchgear by using a finite element method (FEM). A study on the electromagnetic characteristics of enclosures for a high voltage switchgear should be conducted to minimize the size and the temperature rising of a switchgear. Generally, the enclosures made by stainless steel are used to minimize the eddy current loss caused by the transporting current in Bus bars due to its non-magnetic characteristics although the price of stainless steel is expensive compared with other metal for enclosures. Therefore, a switchgear made by stainless steel enclosures could be fabricated as a small size and are applied to a switchgear in urban substations. On the contrary, the switchgear enclosures made by steel could be fabricated with relatively cheap manufacturing price. However, the temperature easily rises due to the transporting current in Bus bars because steel is a ferromagnetic material. Therefore, the size of a switchgear made by steel enclosures is relatively massive and installed in rural substations. In this paper, the electromagnetic losses in the enclosures of a switchgear according to various enclosure thicknesses are calculated and compared with each other. Especially, we proposed a hybrid type enclosures for a switchgear made by stainless steel (top and bottom enclosure) and steel (left and right enclosure). It is concluded that the cost electromagnetic performance of applying the hybrid type enclosure is favorable to develop a high voltage switchgear.

Key Words : Bus bar, Eddy current, Electromagnetic loss, FEM, Switchgear

1. 서 론

현대사회가 고도화함에 따라 전기의 사용량은 지속적으로 증가하고 있으며, 이에 따라 전력기기들도 대용량화로 되어 가는 추세이다. 또한, 송전계통의 고압화가 가속화 되고 있는 실정이다. 송전계통과 배전계통을 통해 공급되는 전력은 배전반을 거쳐 여러 전력 수요부로 나누어 지고 있는데 이러한 전력의 분배역할을 하는 것이 Bus bar이다. 전력기기 중 특히 배전반에서는 대전류 통전시 와류에 의한 영향 및 온도상승을 고려하는 것이 필수적이다. 대전류가 Bus bar를 통해 통전되면 배전반 내부 및 외함에서는 대전류로 인하여 줄손이 발생하여 발열 현상이 일어난다. 특히 도체에 흐르는 전류가 시간적으로 변화한다면 발생한 자계에 의해 도체에 인접한 주위 금속에 와전류가 흐르고, 줄손이 추가로 발생하게 된다. 금속이 자성재료인 경우에는 자화에 의한 히스테리시스 현상이 일어나며 히스테리시스손이 발생한다. 이러한 손실이 전력기기에 발생하면 기기의 수명 및 효율이

심각하게 저하되게 된다[1]. 그러므로 배전반 설계시에는 전자기 손실을 고려한 설계가 이루어져야 하고 이와 동시에 경제성을 고려하여야 한다.

그러나 현재 이러한 연구가 많이 진행되지 않아 현장 경험을 토대로한 설계가 이루어지고 있는 실정이며, 이 경우에 손실과 경제성을 동시에 고려하지 않은 설계로 인하여 불필요한 이격거리, 두께가 산출되어 경제적 낭비가 발생하고 있다.

본 논문에서는 FEM(Finite Elements Method)을 이용하여 24[kV]/2000[A]급 MCSG(Metal Clad Switch Gear)의 모선부와 차단부 사이를 연결하는 Bus bar와 외함부분을 배전반의 상단에서 바라본 구조에 대하여 경제성과 전자기 손실을 고려한 효율적인 설계안을 제시하고자 한다. 4면이 SS(Stainless steel), St(Steel)인 재질의 외함과, Top·Bottom은 SS로 Left·Right는 St로 제작한 하이브리드형인 T/B SS, Top·Bottom은 St로 Left·Right는 SS로 제작한 하이브리드형인 T/B St 총 4가지 조건에 대하여 비교·분석하였다.

* 학생회원 : 한국교통대 첨단과학기술대 전기공학과 석사과정
† 교신저자, 정회원 : 한국교통대 첨단과학기술대 전기공학과 조교수

E-mail : kang@ut.ac.kr

접수일자 : 2012년 10월 31일

수정일자 : 2013년 6월 6일

최종완료 : 2013년 9월 10일

2. Bus bar와 외함 해석모델 선정 및 전계해석

2.1 외함재질과 상간이격거리 선정

그림 1과 같이 상간 이격거리, 상과 외함과의 이격거리는 국내 중전기 업체의 24[kV]/2,000[A]급 제품을 참고하여 모

표 1 외함의 사양

Table 1 Specification of enclosure

외함타입	구 분	너비[mm] × 두께[mm]	면적 [mm ²]
Top, Bottom		1002 × 1	1002
		1004 × 2	2008
		1006 × 3	3018
		1008 × 4	4032
외함타입	구 분	높이[mm] × 두께[mm]	면적 [mm ²]
Left, Right		514 × 1	514
		514 × 2	1028
		514 × 3	1542
		514 × 4	2056

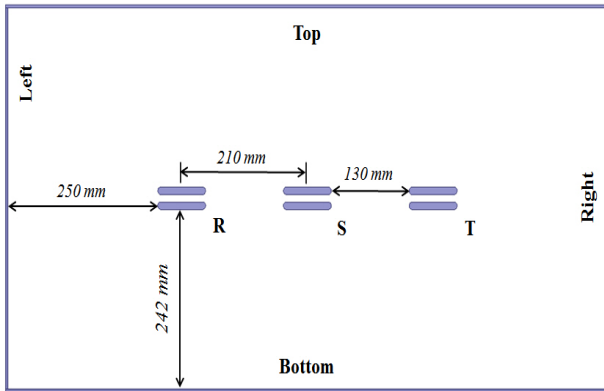


그림 1 외함과 버스바의 단면도

Fig. 1 Cross sectional view of enclosure and Bus bar model

델링 하였다. 해석을 수행하기 위해서 배전반 외함의 재료로 많이 쓰이고 있는 비자성체인 SS, 자성체 St, 하이브리드 타입으로 T/B SS, T/B St를 선정하였다. Bus bar의 재질로는 기존 배전반에서 많이 사용되는 copper로 선정하였다. 표 1은 외함의 두께별 치수와 면적을 나타내었다. 외함의 두께를 1[mm], 2[mm], 3[mm], 4[mm]로 선정한 이유는 외함의 두께가 증가할수록 손실특성과 제조원가에 대한 추이를 확인하기 위함이다. 외함의 재질과 두께에 따른 전자기 특성을 알아보기 위해서 Bus bar의 크기는 기존의 24 [kV]/2000[A]급 전류 통전용으로 많이 사용되는 너비와 두께가 80[mm]×10[mm]인 Bus bar를 선정하였다. 또한 Skin effect로 인하여 전류가 도체의 표면에 집중되어 흐르기 때문에 효율성을 고려하여 2병렬 구조를 택하였다.

2.2 전계해석조건 및 결과

선정된 모델에 대하여 손실해석에 앞서 Bus bar와 외함 간의 전기적 안정도를 확인하기 위해서 전계해석을 수행하였다. 고압배전반의 전계해석을 위하여 정격전압 24[kV]에 대한 IEC의 뇌임펄스 절연과피 시험규정을 준수하여 125 [kV]의 전압전원을 인가하였다. 실제로 고압배전반의 절연시

험에서 R상에 대한 시험은 S상과 T상 그리고 외함을 접지한다. S상에 대한 시험은 해석결과는 R상과 큰 차이를 보이지 않아 R상에 대한 시험을 준수하여 전계해석을 수행하였다.

일반적으로 기체절연매질의 절연내력특성은 전극시스템에서 최대전계(E_{MAX}) 크기에 의해서 결정된다고 알려져 있다[2]. 그 중 준 평등 조건에서의 기중 절연과피 기준전계는 3.5 [kV/mm] ~ 4.5[kV/mm]로 알려져 있다[3]. 기준전계가 의미하는 것은 공기를 절연매질로 하는 전력기기를 설계할 때 기기의 최대전계가 기준전계를 초과하면 절연적으로 불안정하여 절연과피가 일어날 확률이 높다는 것을 의미한다. 즉, 기준전계 이하로 설계되어야 절연적으로 안정하다고 할 수 있다.

그림 1과 표 1의 규격에 대해서 전계해석을 수행한 결과 모든 타입에서 최대전계가 4.5[kV/mm]를 초과하지 않는 것으로 나타났다. 즉, 절연적으로 안정적인 조건인 것으로 판단된다.

3. 전자기 손실 해석

3.1 손실의 원인 및 영향

전력기기 설계 시 절연적으로 안정성을 고려해야 하는 것과 마찬가지로 전자기 손실 또한 고려해야 한다. 전자기 손실은 결과적으로 열손실로 이어져 배전반 내부의 온도를 높게 되고 기준온도 이상으로 상승하게 되면 기기의 소손이나 외함혼축 시 화상과 같은 인명피해를 유발할 가능성이 있다. 대전류 전력기기에서의 온도상승은 크게 전자기 손실로 인한 온도상승 및 주변온도 상승으로 인한 요인이 대부분이고 배전반의 경우 구성조건이나 작동조건이 광범위하기 때문에 과도한 온도상승의 원인은 다양한데 대표적으로 과도한 외부온도 상승, 적정설치용량 초과, 단락 또는 과부하, 부적절한 부품 및 배전반 내 위치배분 등이 있다[1]. 이와 같은 원인들 중 Bus bar에 흐르는 전류로 인한 자계에 의해서 발생한 와류에 의해 열이 발생하는데, 이 와류는 외함재질의 영향을 받는다. 따라서 비자성체인 SS과 자성체인 St의 특성에 따른 와류에 의한 손실과 원자재 가격을 고려한 조합을 통하여 손실특성 향상과 원자재 가격을 낮추기 위한 방안으로 2D FEM을 통하여 해석을 수행하였다. 경계조건은 Neumann에서 수행하였다.

3.2 자속밀도의 영향

도체에 전류가 통전되면 자기장이 형성되어 주변 도체에 전자기 손실이 발생되고 금속의 재질에 따라서 다르게 나타난다. SS는 비자성체로 자기장을 투과시켜 와류에 대한 영향이 적고, 히스테리시스손이 발생하지 않는 특성이 있다. 반면에 St는 강자성체로 자기장에 그대로 자화되는 특성을 보이고 와류손과 히스테리시스손이 발생한다. 본 연구에서는 SS, St, T/B SS, T/B St의 구조에 대해 손실과 제조원가 절감을 위해 자속밀도분포 분석을 하였다.

그림 2는 4면이 SS로 구성된 외함의 자속밀도분포를 나타내었다. 비자성체인 SS는 그림과 같이 자기장을 투과시키

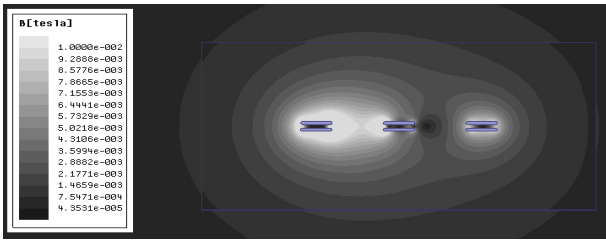


그림 2 SS의 자속밀도분포 (Phase : 0 deg)
 Fig. 2 Magnetic flux density distribution of SS (Phase : 0 deg)

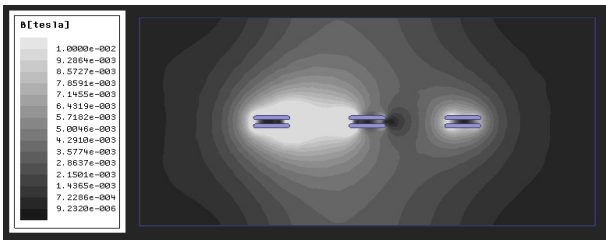


그림 3 St의 자속밀도분포 (Phase : 0 deg)
 Fig. 3 Magnetic flux density distribution of St (Phase : 0 deg)

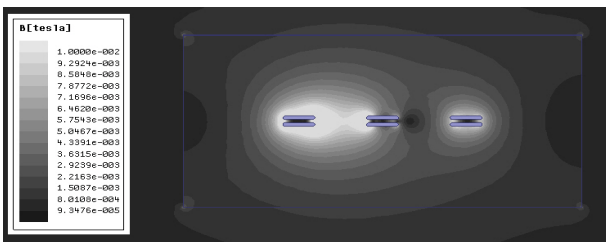


그림 4 T/B SS의 자속밀도분포 (Phase : 0 deg)
 Fig. 4 Magnetic flux density distribution of T/B SS (Phase : 0 deg)

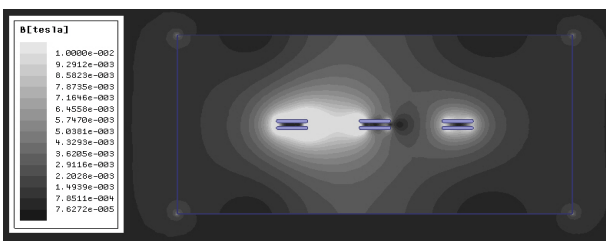


그림 5 T/B St의 자속밀도분포 (Phase : 0 deg)
 Fig. 5 Magnetic flux density distribution of T/B St (Phase : 0 deg)

는 것으로 보여진다. 그림 3은 4면이 St로 구성된 외함의 자속밀도분포에 대해서 나타내었다. 강자성체인 St는 그림과 같이 자기장을 통과시키지 않고 자화시키는 것으로 나타난다.

그림 4와 그림 5는 각각 손실과 원재료 절감을 고려한 T/B SS, T/B St 구조의 자속밀도분포를 나타내었다. 이 구조는 고가의 비자성체 SS과 저가의 강자성체인 St를 조합하여 효율적인 설계를 도출하기 위함이다. 이 구조의 자속

밀도분포는 비자성체인 SS부분은 자속을 통과시키고 강자성체인 St부분에서는 자속에 의해 자화되고 있는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 비자성체와 자성체의 특성 때문에 외함에 발생하는 손실값이 다르게 나타난다.

3.3 정자계 지배방정식

Bus bar에 교류전류가 흐를 때 준정상 맥스웰 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

식(3)으로부터 자속밀도 \vec{B} 는 자기 벡터 포텐셜 \vec{A} 를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} = \mu \vec{H} \quad (4)$$

식(1)으로부터 지배방정식을 다음과 같이 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) = \vec{J} = \vec{J}_s + \vec{J}_e \quad (5)$$

여기서, \vec{J}_s 는 전원전류이고, \vec{J}_e 는 와전류이다. 도체에 유기되는 와전류는 다음과 같고,

$$\vec{J} = \sigma_e \vec{E} = -\sigma_e \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (6)$$

이로부터 지배방정식은 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_s - \sigma_e \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (7)$$

3.4 전자기 손실 해석 및 분석과 제조원가 비교

본 논문에서는 표 1의 Bus bar와 외함의 사양을 토대로 전자기 손실을 해석하였다. 그림 6부터 그림 9까지 각각 타입별로 외함의 좌측 상단부분의 전자기 손실 분포를 나타냈다.

그림 10의 그래프와 같이 전자기 손실은 외함의 두께에 반비례하고, 강자성체인 St로 제작된 외함의 경우에는 SS에 비해 손실이 큰 것을 알 수 있다. 각 타입별 두께증가에 대한 손실의 차이를 분석해보면 외함의 두께가 1[mm]일 경우 SS의 경우가 가장 손실이 적었으며, 나머지 타입별 손실은 SS대비 St 293[%], T/B SS 129[%], T/B St 153[%]의 값을 나타냈다.

2[mm]일 경우 역시 SS의 경우가 가장 손실이 적었으며 나머지 타입별 손실은 SS대비 St 217[%], T/B SS 103[%],

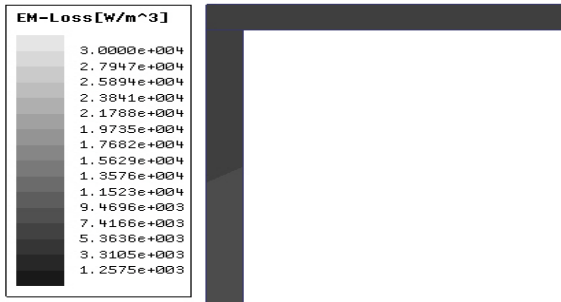


그림 6 SS의 전자기 손실 분포 (두께 : 4[mm])
 Fig. 6 Electromagnetic loss distribution of SS (Thickness : 4[mm])

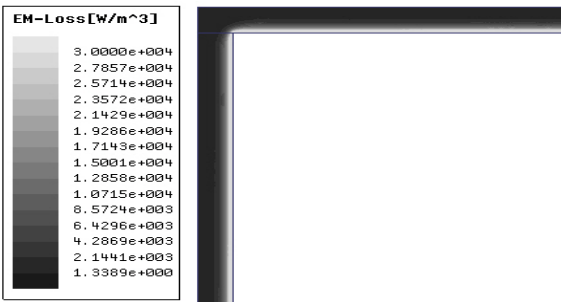


그림 7 St의 전자기 손실 분포 (두께 : 4[mm])
 Fig. 7 Electromagnetic loss distribution of St (Thickness : 4[mm])

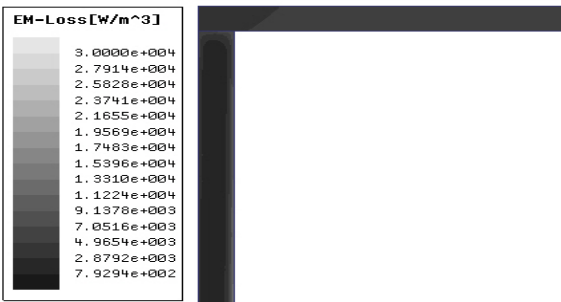


그림 8 T/B SS의 전자기 손실 분포 (두께 : 4[mm])
 Fig. 8 Electromagnetic loss distribution of T/B SS (Thickness : 4[mm])

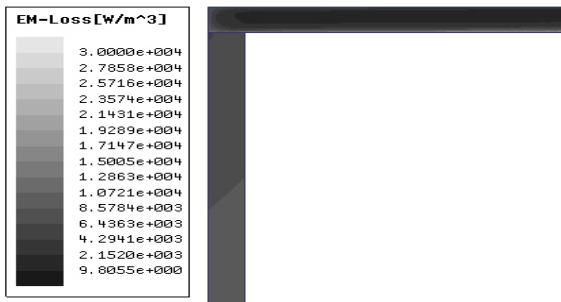


그림 9 T/B St의 전자기 손실 분포 (두께 : 4[mm])
 Fig. 9 Electromagnetic loss distribution of T/B St (Thickness : 4[mm])

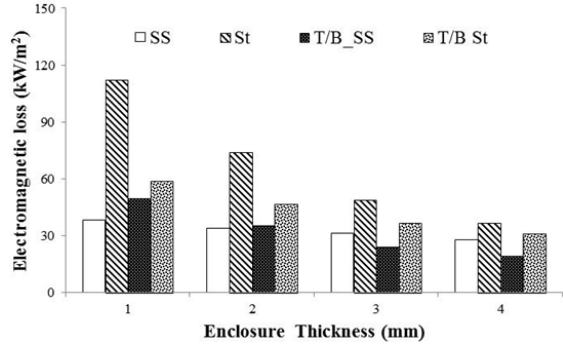


그림 10 외함재질과 두께에 따른 외함의 전자기 손실
 Fig. 10 Enclosure electromagnetic loss according to enclosure materials and thickness

표 2 외함의 제조원가
 Table 2 manufacturing cost of enclosure

단위 : 원

구분 \ 두께	1[mm]	2[mm]	3[mm]	4[mm]
SS	9,738	19,501	29,290	39,105
St	2,823	5,654	8,492	11,337
T/B SS	7,393	14,812	22,257	29,727
T/B St	5,167	10,342	15,525	20,715

T/B St 136[%]의 값을 나타냈다. 3[mm]일 경우에는 T/B SS가 가장 손실이 적었으며, SS대비 나머지 타입별 손실은 St 157[%], T/B SS 77[%], T/B St 116[%]로 나타났다. 4 [mm]일 경우에도 T/B SS가 가장 손실이 적었으며, SS대비 나머지 타입별 손실은 St 130[%], T/B SS 68[%], T/B St 111[%]로 나타났다. 결과적으로 두께가 1[mm]에서 4[mm]까지 증가할 때 손실은 각각 SS는 27[%], St는 68[%], T/B SS 62[%], T/B St 46[%]가 감소하였다.

표 2는 경제적인 외함제작을 위하여 제조단가를 가정하여 계산해 보았다. 표 1에 나타난 규격에서 높이를 100[mm]로 가정하여 한국물가정보에서 공시한 2012년 10월 물가를 반영하여 계산하였다[4]. 두께 4[mm]의 경우에 가장가격이 비싼 SS 대비 St 29[%], T/B SS 76[%], T/B St 53[%]의 수준이었다.

결과적으로 SS는 두께증가에 따른 손실감소는 효과가 적은 것으로 판단된다. 즉 배전반 설계시에 SS는 옥내와 같이 공간적인 제약이 많은 곳에는 적합할 것으로 예상되며, 두께에 대한 영향이 적으므로 두께를 증가시켜 설계하는 것은 제조원가 상승대비 비효율적인 것으로 판단된다. St는 손실 특성은 나쁘지만 가격적인 측면에서 활용도가 높아 옥외 설치 배전반에서 외함의 부피를 증가시키면 손실특성이 나아질 것으로 판단된다. 특히 T/B SS는 외함의 두께가 3[mm] 이상 부터는 SS보다 손실이 더 적게 나타났다. 즉 FEM해석만을 놓고 보았을 때 손실특성이 좋지만 고가인 SS와 손실 특성은 나쁘지만 저가인 St의 혼합한 하이브리드 형식의 외함의 제작이 가장 효율적인 것으로 보이며, 이와 같은 결과는 앞으로 실증실험을 통해 검증이 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 배전반 외함의 재질과 두께에 따른 외함의 손실에 대해서 FEM을 통해 분석하였다. 고가인 비자성체 SS과 저가인 자성체 St를 이용하여 손실과 외함 제조단가 측면에서 고려하였다. 기존의 배전반의 외함재질로 사용되어 온 SS, St과 본 논문에서 제시한 T/B SS, T/B St과 같은 하이브리드형 타입을 선정하였고 손실과 제조원가에 대하여 비교·분석 하였다.

SS는 두께가 증가함에 따라 손실이 27[%] 감소하였고, 두께 증가에 따른 영향은 크게 나타나지 않는 것으로 보여진다. 즉, SS는 좋은 손실특성을 이용해 작은 부피와 높은 손실특성이 요구되는 옥내 배전반 제작에 적합하고, St는 손실이 두께에 따라서 68[%] 감소되는 특성을 보이고 제조원가가 상대적으로 저렴하기 때문에 옥외에 설치되는 배전반 제작에 적합할 것으로 판단된다.

T/B SS과 T/B St은 손실과 가격을 고려하여 효율적인 설계를 도출하기 위해 연구를 수행하였다. 그 결과 일정 두께 이상에서 T/B SS인 경우의 손실이 SS보다 손실이 더 적은 것을 확인하였고 제조단가 또한 더 저가인 것으로 나타났다.

향후 해석결과와 신뢰성을 향상시키기 위해서 온도상승 실험을 수행하고, 실험을 통해 얻은 결과를 이용한 온도해석을 수행할 계획이다. 이와 같은 연구결과는 경제성을 고려한 고압배전반 설계법 개발에 도움이 될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 이방욱, 강종성, 손종만, 최원준, 서정민, “대전류 통전 시 배전반내의 열적 현상에 관한 연구”, 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 1051-1053, 1999.
- [2] Y. Nishikori, S. Kojima, and T. Kouno, Electrical Engineering in Japan, vol. 139, no. 26, 2002.
- [3] 남석호, 강형구, “고전압 전력기기 개발을 위한 기중 절연과피특성 분석에 관한 연구”, KIEE Tran., vol. 60, no.5, pp.1005-1010, 2011.
- [4] “한국물가정보”, 2012. 10.
- [5] 김중경, 한성진, “해석적 기법을 이용한 초고압 GIS용 삼상모선의 온도분포 해석”, KIEE Trans., vol. 55B, no. 4, pp. 196-201, 2006.

저 자 소 개



허 정 일 (許 禎 日)

1987년 09월 23일생. 2012년 충주대 첨단 과학대학 전기공학과 졸업. 2012년~현재 한국교통대학교 전기공학과 대학원 석사 과정.

Tel : 010-8574-0256

E-mail : jiheo@ut.ac.kr



홍 종 기 (洪 鐘 基)

1987년 10월 13일생. 2012년 충주대 첨단 과학대학 전기공학과 졸업. 2012년~현재 한국교통대학교 전기공학과 대학원 석사 과정.

Tel : 010-7158-6889

E-mail : hjg@ut.ac.kr



강 형 구 (姜 亨 求)

1973년 08월 04일생. 1997년 성균관대 공과대 전기공학과 졸업. 1999년 도 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사). 2005년 연세대 대학원 전기·전자공학과 졸업 (공학박사). 2005~2009년 현대중공업 선임연구원, 2009~현재 한국교통대학교 전기공학과 부교수.

Tel : 043-841-5145

Fax : 043-841-5140

E-mail : kang@ut.ac.kr