

## 고압배전반의 전기적 안정성 향상을 위한 버스바의 배치기법에 따른 전자기 특성에 관한 연구

남석호<sup>1</sup>, 허정일<sup>1</sup>, 홍종기<sup>1</sup>, 강형구<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 한국교통대학교 전기공학과

### A Study on the Electromagnetic Characteristics of a High Voltage Switchgear According to the Arrangements of Bus Bars to Improve Electrical Stabilities

Seokho Nam<sup>1</sup>, Jeong Il Heo<sup>1</sup>, Jonggi Hong<sup>1</sup>, and Hyoungku Kang<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 380-702, Korea

(Received November 23, 2012; Revised January 15, 2013; Accepted February 13, 2013)

**Abstract:** The rated voltage has been rising in order to minimize the losses in power transmission. The high voltage electric machines should be minimized due to the constraints of space. Therefore, the temperature of high voltage electric apparatuses easily exceeds the temperature limits. In this paper, it is investigated that how to minimize the internal temperature rising of a high voltage switchgear by adjusting the arrangement of bus bars. High voltage switchgears consist of a circuit breaker, a CT, a PT, a earthing switches, bus bars, and so on. It is very difficult to estimate the electromagnetic properties of a high voltage switchgear due to these various environments and structures. In this paper, analyses are focused on the electromagnetic characteristics of bus bars according to the arrangement method and the enclosures to simplify the electromagnetic characteristics of a switchgear. It is found that the characteristics of electric field intensity and electromagnetic losses in bus bars are influenced by the arrangement method of bus bars. However, it is confirmed that the electromagnetic characteristics of enclosures are not affected by the arrangement of bus bars. In this paper, the arrangement methods of bus bars to minimize the electric field intensity and electromagnetic losses are suggested. It is expected that the research results are helpful to design and develop an electrically reliable high voltage switchgear.

**Keywords:** Bus bar, Electromagnetic loss, Electric field, High voltage switchgear

#### 1. 서 론

a. Corresponding author; kang@ut.ac.kr

Copyright ©2013 KIEEME. All rights reserved.  
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

현재 전 세계가 산업화되어 감에 따라 수용가의 전력수요량이 증가하고 있다. 수요량의 증가로 인해 전력계통은 전기저항으로 인하여 발생하는 손실을 최소화하기 위하여 고전압화 되어가고 있는 추세이며 이와 함께 전력기기의 정격전압 또한 상승하고 있다. 전력계통의 고전압화 추세에 따라 절연관련 사고는 매해 증가하고 있으며, 이에 따라 전기적, 기계적 안

정성 확보를 위하여 고전압 전력기기도 대형화되어 가고 있다 [1]. 하지만 도심지에 설치되는 고압배전반 등의 전력기기는 정격전압의 상승에도 불구하고 지가의 상승과 공간의 제약적 한계로 인하여 소형화가 요구되고 있다. 하지만 고전압화 및 소형화는 전력기기의 전기적 안정성을 저하시키는 원인이 되므로 이와 관련된 연구가 수행되어야 한다. 고전압 전력기기의 부피 축소는 부지비용의 절감과 더불어 외함과 버스바 등의 사용량 절감 효과를 볼 수 있기 때문에 제품의 가격 경쟁력 향상에 도움이 될 것이다.

미국, 일본, 유럽 등 주요 선진 국가에서 생산되고 있는 중전기기의 생산 점유율은 국내 업체에 비하여 높게 나타나고 있으며, 특히 세계 6대 주요 중전기기 기업이 세계시장의 30% 이상을 차지하고 있어 해외 제품이 국내 제품보다 시장에서의 입지가 더 높다고 할 수 있다. 이러한 이유로 국내 업체의 제품 경쟁력 향상과 시장 확장을 위해서 부피 축소 및 안정성 확보를 위한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 도심지에 설치되는 고전압 전력기기 중 24 kV/2,000 A급 고압배전반을 해석모델로 선정하고 부피축소를 위한 연구를 진행하였다. 배전반은 일반적으로 외함, 통전 버스바, 개폐기, 계기부 및 제어부분으로 구성된다. 이 중 배전반 내의 통전 버스바에 발생하는 발열이 고압배전반 발열의 상당 부분을 차지하고 있으며, 기존 국내 제품개발에서는 버스바의 체계적이고 논리적인 배치법에 대한 연구가 활발히 이루어지지 않았으며, 제조업체에 따라 서로 다른 배치형태를 이루고 있어, 이를 고려한 버스바의 배치법에 따른 버스바 및 외함의 전자기 손실을 분석하였다. 또한, 정격전압의 상승과 더불어 부피의 소형화는 절연 안정성을 저하시키는 원인이 되므로, 전계 해석도 진행하여 절연 특성도 고려하였으며, 결과값을 비교 분석한 후 효율적인 배치방법을 제안하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 배전반 전계 및 손실해석 모델링

#### 2.1.1 고압배전반의 구조 및 특성

고압배전반의 절연구조는 그림 1과 같이 일반적으로 차단기실(A), 저압실(B), 모선실(C), cable실(D)로 구분된다. 그림 1의 모선실에 있는 버스바에 대전류

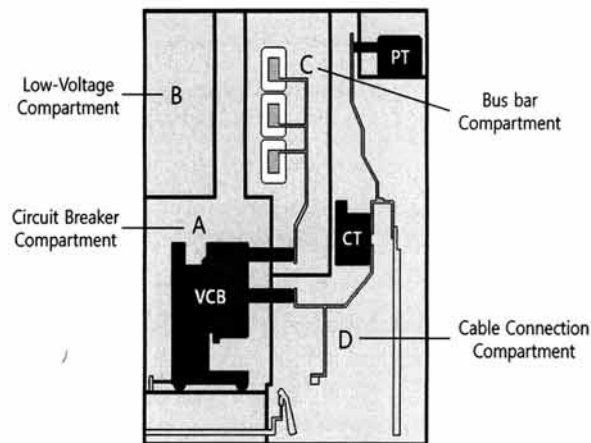


Fig. 1. Schematic diagram of a high voltage switchgear.

가 흐르게 되면 도체에 흐르는 전류에 의해 주울손이 발생하게 되고, 흐르는 전류가 시간적으로 변화한다면 발생한 자계에 의해 도체에 인접한 주위 금속에 와전류가 흐르게 된다. 이렇게 발생한 주울손과 와전류의 손실은 열의 형태로 배전반 내에 존재하게 되어 통전 및 주변 절연물에 영향을 줄 뿐만 아니라 인명 피해로까지 이어질 수 있다. 최근에 이르러 전력기기의 소형화 및 고차단 용량을 요구함에 따라 온도상승의 원인 및 현상 파악, 과도한 온도상승을 억제할 수 있는 방안 마련이 시급한 과제로 대두되고 있다 [2]. 실제 전력기기의 내부 손실에 의해 발생하는 열에너지는 대부분 대류 열 전달에 의해 방출된다. 따라서 대류현상은 배전반 열 해석에 있어서도 가장 중요한 열 전달 현상이다. 배전반의 대류현상에 의한 열 손실은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$Q = h \times A \times (T_{ext} - T) (W) \quad (1)$$

여기서  $Q$ 는 열손실,  $A$ 는 외함의 내부 및 버스바의 도체 표면적,  $h$ 는 대류계수,  $T_{ext}$ 는 배전반 외부온도,  $T$ 는 배전반 내부온도를 나타낸다. 이 식 (1)에서  $h$ 와  $A$ ,  $T_{ext}$ 는 주변 환경 등에 따라 결정되는 값으로, 손실  $Q$ 와 내부온도  $T$ 와의 연관성을 알 수 있다 [2,3]. 식 (1)을 통해 손실에 의하여 발생하는 열에너지는 고압배전반의 온도상승의 주요한 원인이 되는 것을 확인하였다. 따라서 고압배전반의 부피 축소를 위해서는 버스바의 전자기 특성을 분석하고 손실을 최소화하는 연구가 필수적이다.

## 2.2 전계 및 손실해석 모델링

본 연구에서는 국내 중전기 업체 중 하나를 선정하였다. 선택된 회사에서 개발 중인 24 kV/2,000 A급 제품의 규격을 참고하여 모델링을 하였으며, 통전 버스바에 대한 전자기해석을 2차원으로 진행하였다. 유한요소해석들은 Infolytica사의 ElecNet과 MagNet을 각각 전계해석과 손실해석에 사용하였으며, 해석모델에 대한 자세한 사양을 표 1에 나타내었다. 고압배전반 버스바의 전자기 해석을 위한 모델링은 그림 1의 모선실(C)을 수직방향에서 바라본 모습의 2차원 모델로, 그림 2와 같이 표현하였다. 버스바의 배치방법은 기울기의 변화에 따라 3가지 타입으로 구분하였으며, 타입별 배치방법을 그림 3에 나타내었다. N타입은 버스바의 끝단 부분이 수직을 이루며 배치되는 형태이며, H타입은 수평방향으로 동일한 위치에 배치시킨 형태, V타입은 수직방향으로 위치를 통일시킨 형태이다. 버스바의 기울기  $\theta$ 는 타입에 따라  $0^\circ$ 에서  $90^\circ$ 까지  $15^\circ$ 씩 기울기의 변화를 주었다. 버스바와 버스바 사이의 이격 거리는 R, S, T 각 상의 중심을 기준으로 270 mm 간격을 주었고, 외함 내부와 버스바 중심은 가로 290 mm, 세로 247 mm의 이격거리를 두었다. 여기서 버스바의 기울기가 달라질수록 외함과 버스바 끝단 사이의 이격거리가 변화하지만, 제조업체에서는 외함의 크기를 고정하여 제품개발을 하는 것이 우선적이므로 외함의 크기를 고정하여 연구를 진행하였다.

Table 1. Specifications of the simulation modeling.

	Material	Copper
Bus bar	Size (mm)	80×10 (W×H)
	Radius (mm)	5
	Degree (°)	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90
Enclosure	Material	Stainless steel
	Size (mm)	1,000×514×2.3 (W×H×T)
Insulating gas		Air

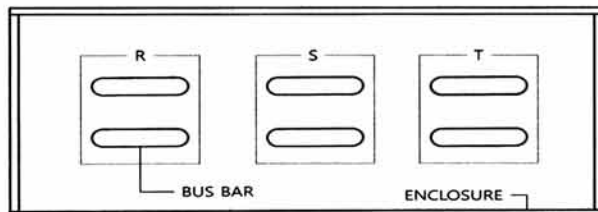


Fig. 2. Sectional view of high voltage switchgear for the electromagnetic simulations of two dimensions at top view.

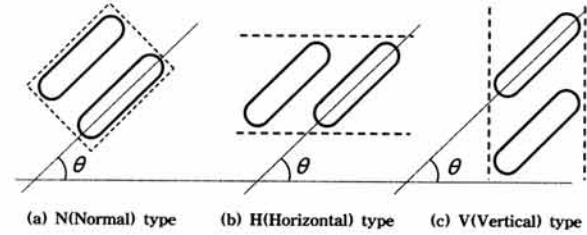


Fig. 3. Arrangement methods of bus bars according to type.

## 2.3 전계 및 손실해석 조건

버스바의 기울기가  $0^\circ$ 와  $90^\circ$ 일 때의 배치형태는 세 가지 타입이 모두 동일한 형태를 가지므로 이를 제외한 총 17가지 모델을 시험모델로 선정하였다.

고압배전반의 전계해석을 위하여 정격전압 24 kV에 대한 IEC의 뇌임펄스 절연과피 시험규정을 준수하여 125 kV의 전압전원을 사용하였다. 실제로 고압배전반의 절연시험에서 R상에 대한 시험에서는 S상과 T상, 그리고 외함을 접지한다. S상에 대한 시험은 해석결과 R상과 큰 차이를 보이지 않아 R상에 대한 시험을 준수하여 전계해석을 진행하였다.

전자기 손실해석을 위한 시험전류의 선정은 R, S, T 각 상에  $120^\circ$ 의 위상차를 가지는 2,000 A급 배전반의 실효전류를 사용하여 시뮬레이션 해석을 진행하였다. 손실해석은 선정된 고압배전반의 자기해석을 실시한 후 해석틀을 이용하여 손실을 계산하는 방법으로 진행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 배전반의 전계 및 손실 계산

#### 3.1.1 전계해석 결과 및 고찰

일반적으로 기체 절연매질의 절연내력특성은 전극 시스템에서의 최대 전계( $E_{MAX}$ ) 크기에 의해서 결정된다고 알려져 있다 [4]. 본 연구에서 선정한 고압배전반은 기체절연물인 공기를 절연체로 사용하므로 해석모델의 최대 전계에 대한 결과값을 정리하였다. 위의 표 1에서 제시한 사양을 가지는 버스바의 배치타입별 기울기에 따른 모델에 대하여 R상의 절연시험에 대한 전계해석을 하였으며, 결과값을 그림 4에 정리하

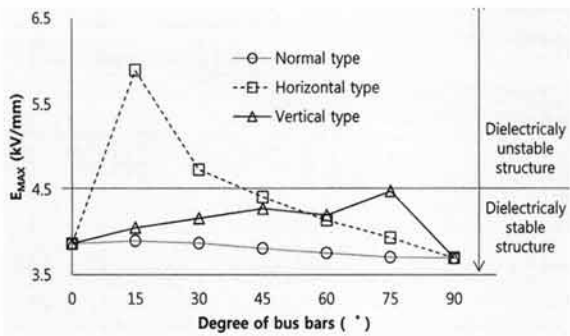


Fig. 4. E<sub>MAX</sub> according to the arrangement types and  $\theta$  difference of bus bars at dielectric tests of R phase.

였다. 해석결과 그림 4와 같이 H타입과 V타입에 비하여 N타입의 최대 전계가 상대적으로 낮은 특성을 보였으며, 버스바의 기울기 변화에 따른 최대 전계의 변화가 가장 작은 것을 확인할 수 있었다. 최대 전계 값이 작을수록 절연적으로 안정하다는 것을 의미하며, 반대로 전계값이 클수록 절연적으로 불안정하다는 것을 의미하므로, N타입이 다른 H타입과 V타입에 비해 절연적으로 안정한 결과를 보였다.

선행연구를 통하여 전계이용률을 이용한다면 기중에서의 기준전계를 구할 수 있음을 알았다. 전계이용률이란, 전계의 평응도를 나타내는 척도로 절연과피 특성은 전계이용률에 따라 다르게 나타난다. 기중절연을 사용하는 전극시스템의 절연과피 특성은 전계이용률에 따른 최대 전계가 4.5 kV/mm에서 포화된다는 사실을 확인할 수 있었으며, 포화된 전계값은 기중에서의 기준전계로 사용할 수 있었다 [1]. 선행연구 결과는 전극시스템에서의 최대 전계가 4.5 kV/mm 이상의 값을 가질 때 절연과피 현상이 일어날 수 있다는 것을 의미하며, 반대로 기준전계 이하의 최대 전계값을 가질 때 절연적으로 안정한 구조라 할 수 있다. 본 연구에서 버스바의 배치기법에 따른 전계해석 결과는 선행연구를 통해 구한 기준전계를 이용하여 분석하였으며 그림 4에 표시하였다. 그림 4에서처럼 H타입의 기울기가 15°와 30°일 때 기준전계 이상의 값을 보여 절연적으로 불안정한 특성을 보였으며, 이는 배전반의 절연설계에 있어서 고려되어야 할 배치 형태로 사료된다. 두 모델을 제외한 15개의 모델에 대해서는 기준전계 이하의 값을 가져 절연설계에 있어 적용이 가능할 것으로 판단되며, 버스바의 기울기가 90°일 때 3.72 kV/mm로 가장 낮은 최대 전

계값을 보이므로 가장 적절한 절연설계 구조로 판단된다.

### 3.2 전자기 손실해석 결과 및 고찰

고압배전반의 버스바와 외함을 구분하여 손실계산을 하였으며, 결과값을 그림 5에 나타내었다.

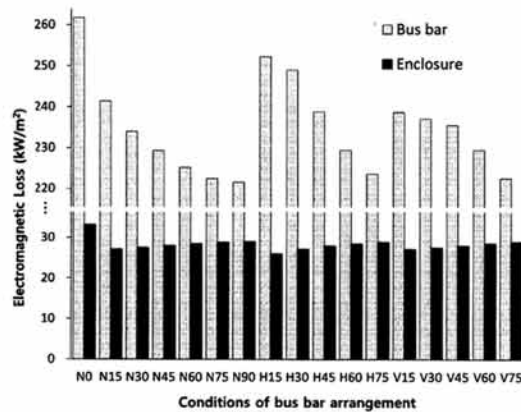


Fig. 5. Comparisons on the electromagnetic losses of bus bars and enclosure according to arrangement type.

배치법에 따른 표현방법은 앞에 배치타입을, 뒤에는 기울기를 나타내어 표현하였다. 예를 들어 N 타입의 기울기가 0°인 경우 N0와 같이 나타내었다. 해석 결과 버스바의 손실은 버스바의 기울기가 0°에서 가장 높은 손실값을 보였으며, 이때의 버스바 손실은 261.74 kW/m<sup>2</sup>, 외함의 손실은 33.14 kW/m<sup>2</sup>를 가졌으며, 버스바의 손실이 가장 적은 모델은 N90으로 221.55 kW/m<sup>2</sup>의 손실값을 가졌다. 버스바의 손실은 버스바의 상간 자속수가 0°의 기울기를 가질 때 쇄교자면적이 가장 크게 작용하여 쇄교하는 자속의 수가 다른 모델에 비하여 상대적으로 높게 작용을 하고 반대로, 기울기가 90°일 때의 자속은 버스바의 가장 작은 면적으로 쇄교하기 때문에 N90 모델에서 버스바의 손실이 가장 적게 나타나는 것으로 판단된다. 외함의 손실에서는 버스바와는 다르게 H15에서 25.98 kW/m<sup>2</sup>의 가장 적은 손실을 보였다. 하지만 H15모델의 전계해석 결과 선행 연구에서 구한 기준전계 이상의 최대 전계를 가져 절연적으로 불안정한 특성을 보였다. 이러한 결과는 절연과피 현상이 발생할 수 있다는 것을 의미하며, 고압배전반의 절연설계 시에 제외

하거나 외함의 크기 및 버스바 상간 이격거리를 증가시키는 방안을 검토해야 할 것으로 판단된다.

버스바와 외함 손실의 총합을 비교해 본 결과 N90 모델이 가장 작은값을 가져 배전반의 손실 설계에 적절할 것으로 판단된다. 하지만, 일반적인 배전반 설계에 있어 열대류 및 기타 온도상승의 원인으로 인한 외함의 온도상승을 우선적으로 고려하여 개발을 진행하기 때문에 위의 결과를 참고하여 버스바와 외함의 손실량에 따른 적절한 설계 모델의 선정이 필요할 것으로 보인다.

#### 4. 결론

고압배전반 내에서의 열화현상은 여러 가지의 열원과 복잡한 열 전달 현상, 다양한 내부구조 등으로 인하여 고려해야할 요소가 많고 정량적으로 해석하기에 어려운 문제를 가지고 있다. 이러한 원인으로 본 논문에서는 고압배전반 버스바만을 고려하여 배치기법에 따른 전계 및 손실계산을 하였으며, 결과값을 비교·분석하고 효율적인 배치방법을 제안하였다.

본 연구는 버스바 배치기법에 따른 총 17가지 모델을 선정하고 이에 대한 전계해석과 손실 계산을 하였다. 연구 결과 절연측면에서 V15와 V30 모델은 기준 전계 이상의 최대 전계값을 가지는 불안정한 절연구조로, 배전반 설계에 있어서 고려되어야 하는 모델로 사료된다. 타입별 가장 우수한 절연 특성은 N타입으로 특히 기울기가 90°일 때 가장 우수한 절연 특성을 보였다. 17가지 모델의 손실해석 결과 기울기의 증가에 따라 총 손실량이 감소하는 경향을 보였으며, 기울기가 0°일 때 가장 많은 손실량을 가지는 단점을 가졌다. 버스바의 기울기가 90°인 모델은 손실 측면에서도 가장 우수한 특성을 보여 절연 측면과 손실 측면 모두 가장 우수한 모델로 판단된다.

향후 실험 결과의 신뢰성을 보다 향상시키고 고압 배전반 설계에 좀 더 정확한 접근을 위하여 연구 결과와 배전반을 이용한 온도상승 시험을 통해 얻은 결과를 이용하여 온도해석을 수행할 계획이다. 이러한 연구 결과는 고효율 및 부피 축소를 위한 고압배전반의 설계법 개발에 도움이 될 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2010년 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임. (2010-0003558)

#### REFERENCES

- [1] S. H. Nam and H. K. Kang, *Trans. KIEE*, 60, 1005 (2011).
- [2] B. W. Lee, J. S. Kang, J. M. Sohn, W. J. Choi, J. M. Seo, *Trans KIEE*, 20, 1051 (1999).
- [3] T. F. Irvine and J. P. Hartnett, eds., *Advances in Heat Transfer*, 16, 199 (1975).
- [4] Y. Nishikori, S. Kojima, and T. Kouno, *Electrical Engineering in Japan*, 139, 26 (2002).
- [5] S. H. Nam and H. K. Kang, *Trans. KIEE*, 60, 1560 (2011).
- [6] K. M. Shong, W. K. Han, and C. S. Choi, *Trans. KIEE*, 55, 110 (2006).
- [7] C. C. Hwang, P. H. Tang, and Y. H. Jiang, *IEEE Trans.*, 152, 832 (2005).
- [8] Y. H. Oh, K. D. Song, and J. H. Sun, *Trans KIEE*, 52B, 434 (2003).