비용 효율이 높은 24kV급 고압배전반 개발을 위한 Bus Bar 사이즈에 따른 전·자기 손실 특성 분석

A Study on the Characteristics of the Electric Field and Electromagnetic Loss according to Bus Bar Size for a cost-effective 24kV High Voltage Switchgear

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

Abstract - The analysis on the bus bar effect is conducted to develop a cost effective 24kV/2,000A switchgear. The temperature enclosures and bus bars could rise due to several heat sources such as eddy current losses and copper losses. Therefore, a study on the characteristics of the electric field intensity and electromagnetic loss according to the bus bar size in a bus bar compartment is essential to design a electrically reliable high voltage switchgear. It is investigated that the electromagnetic influence to the temperature rising and the dielectric stability according to various bus bar sizes by using finite element method(FEM). The electric field intensity and electromagnetic loss according to various bus bar sizes are calculated to design a reliable and a high voltage switchgear. As results, it is found that the electromagnetic loss and the dielectric stability of bus bar could be determined by a bus bar size. It means that a cost effective 24kV/2,000A high voltage switchgear could be developed by selecting the proper size of a bus bar. Also, it is recognized that the electromagnetic characteristics according to various bus bar sizes in order to design an electrically stable high voltage switchgear when the enclosure size is determined as a fixed value. Furthermore, studies on the various nominal voltage class and bus bar sizes will be conducted to develop a cost effective high voltage switchgear.

Key Words : Bus bar, Copper losses, Electromagnetic loss, Finite element method, High voltage switchgear.

1. 서 론

전력계통의 고전압화 추세에 따라 절연관련 사고는 매년 증가하고 있으며, 이에 따라 전기적, 기계적 안전성 확보를 위하여 고전압 전력기기도 대형화되어가고 있다. 그러나 도심 내에 위치하는 변전소용 전력기기는 도심의 지가 상승으로 인하여 가능한 소형화되어야 하는 문제가 있다. 따라서 최소한의 공간에 고 신뢰성 전력기기가 설치되어야 한다. 해외 연구소와 대학, 중전기업체에서는 고전압전력기기의 전기적 안정성 향상과 부피 축소화에 관한 체계적이고 계획적인 연구를 진행중에 있다. 그러나 국내 업체에서 개발하고 있는 고전압전력기기는 주로 경험적인 방법과 해외 제품의 사이즈 벤치마킹에 의존하므로 해외 선진업체의 제품에 비하여 부피 경쟁력뿐만 아니라 가격 경쟁력 측면에서 선행연구가 필요한 실정이다. 따라서 국내 업체의 제품의 경쟁력 향상과 시장 확장을 위해서는 고전압전력기기의 절연설계기준 확립에 관한 연구가 반드시 선행되어야 할 것이다.

본 논문에서는 고전압 전력기기 중 하나인 고압배전반에 대한 전·자기손실 특성 분석을 수행하였다. 고압배전반이란

전력 공급처에서 공급되는 특고압의 전기를 실제 사용하는 각종 설비 및 장비의 정격에 맞는 낮은 전압 및 정격 용량으로 변환시켜 전기 시설물을 안전하게 사용할 수 있도록 조작 및 제어하는 역할을 하며 차단기, 단로기 등의 전력용 개폐장치, 계기용변성기, bus bar, 접속도체 등의 주회로 기기를 수납한 고전압기기이다. 고압배전반에는 차단기 등의 전기·전자 부품과 연결시켜주며 전력의 분기점을 만들어 주는 bus bar가 배치되어 있다. Bus bar는 전기적 에너지를 전달하기 위한 전도체 역할을 한다. 그러나 bus bar에 대전류가 흐르게 되면 도체에 흐르는 전류에 의한 주울손의 영향으로 발열 현상이 발생된다. 특히, 도체에 흐르는 전류가 시간적으로 변화한다면 발생한 자계에 의해 도체에 인접한 주위 금속에 와전류가 흐르고, 주울손이 추가로 발생하게 된다. 이와 같은 손실은 열의 형태로 기기내에 존재하게 되며 이에 따라 전력기기가 과열되어 통전 및 주변 절연물에 영향을 미치게 된다. 고압배전반 내의 전·자기 손실로 인하여 고전압 절연과 관련된 사고가 매년 증가하는 추세이다. 따라서 고 신뢰성 고압배전반 설계 시 bus bar compartment의 온도상승을 최소화하기 위한 절연설계법과 대전류 통전에 따른 주울손과 와류손에 의한 영향이 고려되어야 한다 [1][2].

본 논문에서는 부피 축소를 통한 원가 절감으로 고 신뢰성 및 제품의 가격 경쟁력 향상에 도움이 되는 고압배전반의 개발을 위하여 기존의 bus bar 사이즈뿐만 아니라 9가지 사이즈의 새로운 bus bar 모델을 제안하였다. 각각의 bus bar 사이즈에 따른 bus bar와 enclosure의 전계 해석과

* 학생회원 : 한국교통대 첨단과학기술대 전기공학과 석사과정

† 교신저자, 정회원 : 한국교통대 첨단과학기술대 전기공학과 조교수

E-mail : Kang@ut.ac.kr

접수일자 : 2012년 10월 31일

최종완료 : 2012년 11월 21일

전·자기손실 해석을 FEM을 이용하여 수행하고 그 결과를 비교·분석하였다[3]. 고압배전반의 전·자기 손실효율은 bus bar, enclosure의 설계 시 온도 상승과 관련되므로 고 신뢰성 고압배전반 설계를 위해 선행되어야 한다.

2. Bus bar 사이즈에 따른 전·자기 손실효율

2.1 전·자기 손실효율 모델

기존의 24kV/2,000A급 고압배전반용 bus bar 사이즈는 주로 60×15×2ea, 70×10×2ea, 80×10×2ea 등이 사용되고 있다. 본 논문에서는 고 신뢰성 고압배전반의 개발을 위하여 기존의 모델과 더불어 9가지 사이즈의 새로운 bus bar 모델을 제안하고 그에 따른 전·자기손실 특성을 비교·분석하여 가격 경쟁력 측면을 고려한 bus bar 사이즈를 선정하였다. Bus bar의 재질은 copper, enclosure의 재질은 stainless steel로 선정하였다. 또한 24kV/2,000A 고압배전반 enclosure의 크기를 현대중공업 HMS-N24 모델의 규격을 참고하여 1,006mm×520mm로 선정하고 enclosure 두께를 3mm로 고정하였다. 24kV/2,000A급 고압배전반의 각 bus bar 간의 상간거리는 VCB(Vacuum Circuit Breaker) pole 간격에 맞추어 설계되므로 bus bar 간의 상간거리는 현대중공업의 24kV/2,000A급 VCB 제품 중에서 HVF 6144제품의 pole 간격을 기준으로 210mm로 고정하였다. 그림 1은 24kV/2,000A급 고압배전반을 상부에서 내려다보았을 때 bus bar compartment 내부 구조 단면도를 나타낸 그림으로 enclosure는 전·자기 손실효율을 위해 top, bottom, left, right로 구분하였다. Bus bar는 각 상마다 2병렬 연결한 구조이며, 2병렬로 연결한 이유는 bus bar에 대전류 통전 시 skin effect의 영향으로 효율을 높이기 위해서이다. 2개의 bus bar 중 모델에 따라 상부에 위치한 bus bar에는 아래첨자 '1'로 표시하고 하부에 위치한 bus bar에는 아래첨자 '2'로 표시하였다. 즉 R, S, T 3상에 대하여 각각 R₁, R₂, S₁, S₂, T₁, T₂로 표시하여 나타내었다.

그림 1 24kV/2,000A급 고압배전반 bus bar compartment의 단면도

Fig. 1 Cross sectional view of bus bar compartment in 24kV/2,000A high voltage switchgear

2.2 Bus bar 사이즈에 따른 전계 해석

고압배전반 설계 시 전계 해석은 절연과괴특성 분석과 절연안정성을 위하여 반드시 필요한 부분이다. 본 논문에서는 24kV/2,000A급 고압배전반용 bus bar compartment에 대한

전계 해석을 수행하고 그 결과를 비교·분석하였다. 정격전압 24kV의 고압배전반에 대한 IEC 시험 규정 중에서 뇌임펄스 절연과괴시험 규정은 1.2μs/50μs의 125kV이므로, 본 논문에서의 모든 전계 해석은 뇌임펄스 125kV를 인가하는 해석조건으로 수행하였다. 또한 실제 R상에 대한 절연시험에서는 S상과 T상 그리고 enclosure를 접지하며, S상에 대한 절연시험에서는 R상과 T상 그리고 enclosure를 접지하므로 본 논문에서 사용된 전계 해석 역시 같은 조건으로 전계 해석을 수행하였다. 그림 2는 enclosure의 크기를 고정하고 뇌임펄스전압 125kV를 R상에 인가하였을 때 bus bar 사이즈에 따른 최대전계 크기가 가장 작은 경우와 가장 큰 경우에 대한 그림이며 표 1은 bus bar 사이즈에 따른 뇌임펄스 125kV를 인가 하였을 때 R상과 S상의 최대전계값을 나타낸 표이다.

(a) R상에 125kV 전압을 인가하였을 때 55×20×2ea 모델의 전계 해석 결과

(b) R상에 125kV 전압을 인가하였을 때 60×10×2ea 모델의 전계 해석 결과

그림 2 Bus bar 사이즈에 따른 전계 해석 결과

Fig. 2 Electric field results according to bus bar size

표 1 Bus bar 사이즈에 따른 최대전계값

Table 1 Maximum electric field according to Bus bar size

Bus bar 사이즈	R상 최대전계(kV/mm)	S상 최대전계(kV/mm)
55×15×2ea	3.25	3.26
55×20×2ea	2.86	2.90
60×10×2ea	3.83	3.87
60×15×2ea	3.26	3.25
65×10×2ea	3.83	3.86
65×15×2ea	3.23	3.27
70×10×2ea	3.82	3.85
70×15×2ea	3.32	3.25
75×10×2ea	3.66	3.61
75×15×2ea	3.23	3.26
80×10×2ea	3.54	3.55
80×15×2ea	3.26	3.29

2.3 Bus bar 사이즈에 따른 전·자기 손실 해석

고압배전반의 전·자기 손실해석은 bus bar에 대전류 통전 시 와전류에 의한 영향 및 온도상승을 예측할 수 있는 방법을 개발하기 위해서 필요한 부분이다. 와전류는 자속에 의하여 금속에 발생하는 전류이므로 본 논문에서는 전·자기손실 분포뿐만 아니라 자기장 분포도 살펴보았다. 그림 3은 bus bar 사이즈가 60×15×2ea일 때 3상 위상각 0°에 대한 자기장 분포 해석과 전·자기 손실 분포해석을 나타낸 그림이다. 또한 전·자기손실은 물질의 종류와 배치 등에 의하여 결정되므로 각각의 bus bar 사이즈에 따른 bus bar에서의 전·자기 손실해석과 enclosure에서의 전·자기 손실해석을 수행하고 표 2과 표 3을 통해 비교하여 나타내었다.

(a) 60×15×2ea 모델의 자기장 분포 (Phase : 0 deg)

(b) 60×15×2ea 모델의 전·자기손실 분포

그림 3 2,000A 통전 시 자기장 및 전·자기 손실 분포

Fig. 3 Magnetic field and electromagnetic loss when applying 2,000A

표 2 Bus bar 사이즈에 따른 bus bar의 전·자기손실 비교
Table 2 Electromagnetic loss of bus bar according to bus bar size

Bus bar 사이즈	R상 (kW/m ²)	S상 (kW/m ²)	T상 (kW/m ²)	합계 (kW/m ²)
55×15×2ea	83.927	88.649	83.240	255.817
55×20×2ea	49.946	53.320	49.459	152.725
60×10×2ea	154.516	162.095	153.425	470.036
60×15×2ea	72.847	77.588	72.169	222.604
65×10×2ea	133.259	140.956	132.295	406.511
65×15×2ea	63.911	68.649	63.321	195.881
70×10×2ea	116.574	124.405	115.617	356.595
70×15×2ea	56.679	61.450	56.097	174.226
75×10×2ea	101.876	106.454	100.720	309.050
75×15×2ea	50.698	55.513	50.125	156.336
80×10×2ea	92.171	100.291	91.105	283.568
80×15×2ea	45.696	50.563	45.130	141.388

표 3 Bus bar 사이즈에 따른 enclosure의 전·자기손실 비교

Table 3 Electromagnetic loss of enclosure according to bus bar size

Bus bar 사이즈	Top + Bottom (kW/m ²)	Left + Right (kW/m ²)	합계 (kW/m ²)
55×15×2ea	11.893	20.278	32.171
55×20×2ea	11.746	20.050	31.796
60×10×2ea	11.960	20.393	32.353
60×15×2ea	11.785	20.129	31.914
65×10×2ea	10.991	18.096	29.087
65×15×2ea	10.817	17.849	28.666
70×10×2ea	10.889	17.962	28.851
70×15×2ea	10.702	17.696	28.398
75×10×2ea	15.429	30.380	45.809
75×15×2ea	10.583	17.544	28.127
80×10×2ea	11.505	19.761	31.266
80×15×2ea	10.454	17.375	27.829

3. 전·자기 손실 해석 결과 및 분석

고압배전반의 bus bar compartment는 내부공기와 고체로 구성된 bus bar, enclosure로 구성되어 있다. Bus bar compartment내에서 bus bar를 통해 전류가 흐르게 됨에 따라 에너지 손실이 일어나고 이 에너지 손실로 인해 온도가 상승하게 된다. 또한 열이 외함에 전달되게 되고 결국은 맞닿아있는 주변 공기로 열 방사가 일어나게 된다. 선행 연구에 따르면 뇌임펄스전압에 대한 공기 중의 1기압 하에서 절연과피전계는 최소 3.5kV/mm ~ 최대 4.5kV/mm 라고 알려진 바 있다[4]. 그러므로 본 논문에서는 고압배전반의 안전율을 확보하기 위해서 3.5kV/mm의 절연과피전계값을 기준으로 전·자기 손실해석을 수행하였다. Bus bar 사이즈에 따른 전계 해석 결과에서 전계값이 3.5kV/mm를 상회한다는 것은 절연적으로 불안정하여 절연과피현상이 발생할 수 있다는 것을 의미하며, 반대로 전계값이 작을수록 절연적으로는 안정하다는 것을 의미한다. 그림 4는 bus bar 사이즈에 따른 절연 안정성을 나타낸 그래프이다. 전기 절연적인 관점에서 살펴보았을 때 bus bar의 두께가 15mm 이상이어야 절연적으로 안정적임을 확인할 수 있었다. 또한 bus bar 사이즈가 55×20×2ea일 때 최대전계값이 가장 낮아 절연적으로 가장 안정적 모델임을 확인할 수 있었다. 그림 5는 bus bar 사이즈에 따른 bus bar에서의 전·자기손실과 enclosure에서의 전·자기손실을 비교하여 나타낸 그래프이다. 그래프를 통해 살펴보면 bus bar 사이즈에 따른 bus bar 총 전·자기손실 중에 bus bar의 두께가 10mm일 때 보다 15mm일 때 전·자기손실이 낮음을 확인할 수 있었고 bus bar의 두께가 일정할 때 bus bar의 너비가 넓을수록 전·자기손실값이 낮아짐을 확인할 수 있었다. 또한 bus bar 사이즈에 따른 enclosure에서의 전·자기손실 변화값은 크지 않았으며 bus bar의 면적이 커질수록 전·자기손실값은 작아짐을 확인할 수 있었다. 그림 4를 분석한 결과 기존의 24kV/2,000A급 고압배전반 bus bar 사이즈 중에서 70×10×2ea, 80×10×2ea는 뇌임펄스전압에 대한 공기 중의 1기압 하에서 최소 절연과피전계값인 3.5kV/mm를 상회하여 전기 절연적인 관점에서

그림 4 Bus bar 사이즈와 최대전계값에 따른 절연 안정성 비교

Fig. 4 Comparison of insulation stability according to bus bar size and maximum electric field

(a) Bus bar 사이즈에 따른 bus bar의 총 전·자기손실값

(b) Bus bar 사이즈에 따른 enclosure의 총 전·자기손실값 비교

그림 5 Bus bar 사이즈에 따른 bus bar 와 enclosure의 총 전·자기손실값

Fig. 5 Total electromagnetic loss of bus bar and enclosure according to bus bar size

그림 6 Bus bar 사이즈에 따른 총 전·자기손실과 가격에 관한 비교

Fig. 6 Comparison of total electromagnetic loss and cost according to bus bar size

불안정한 조건임을 확인할 수 있었다. 또한 본 논문에서는 비교적 전기 절연적으로 안정한 bus bar 사이즈 두께가 15mm 이상인 조건에 대해서 전·자기손실값과 bus bar의 동량을 고려한 bus bar의 원자재 단가를 비교·분석하였다[5]. Bus bar의 단면적은 국내 업체의 가격 경쟁력 측면에서 중요한 요소가 된다. 그림 6은 bus bar에서의 총 전·자기손실값과 각각의 bus bar 사이즈에 높이를 100mm로 가정한 크기에 대한 원자재 단가를 비교한 그래프이다. 그래프를 통해 분석한 결과, bus bar의 가격은 최소값 6,600원에서 최대값 9,800원까지 차이를 보였으며 전·자기손실값과 경제적인 측면을 고려하였을 때 점선으로 그려진 부분에서 65x15x2ea의 bus bar 사이즈가 가장 양호한 특성을 나타내는 사실을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 고 신뢰성 24kV급 고압배전반 개발을 위해서 9가지 사이즈를 가지는 bus bar 모델을 제시하고 전·자기손실 특성과 경제적인 측면에 대한 분석을 수행하였다. Enclosure의 크기를 고정된 조건에서 전계 해석을 한 결과, 전기 절연적 측면에서는 bus bar의 두께가 15mm 이상이어야 전기 절연적으로 안정한 조건임을 확인하였다. 또한 전·자기 손실해석 결과, Enclosure에서의 총 전·자기손실값은 큰 차이를 나타내지 않았고 bus bar에서의 총 전·자기손실값은 bus bar의 두께가 15mm 이상이 되는 조건 하에서 단면적이 클수록 적어짐을 확인할 수 있었다. 그리고 bus bar의 전·자기손실 특성과 동량을 고려하여 bus bar 사이즈가 커짐에 따른 원자재 단가를 비교한 그래프를 통해 분석한 결과, 본 논문에서 제시한 9가지 bus bar 모델 중에서 65x15x2ea 크기의 bus bar 모델이 손실특성을 고려한 가격 경쟁력 측면에서 양호한 특성을 나타내었다.

본 논문에서는 고 신뢰성 고압배전반 설계를 위해서 bus

bar의 두께가 15mm 이상인 조건 중에서 bus bar의 동량을 고려하고 전·자기손실 특성 비교를 통해 가장 경제적이면서 손실특성이 좋은 bus bar 크기를 선정하고 고압배전반을 설계하는 배치기법에 관하여 논의하였다. 이와 같은 연구 결과는 국내 고압배전반 제품의 절연, 기계적, 그리고 열적 향상에 기여하고 축소형 고압배전반의 절연설계법을 위한 지표로 참고될 수 있을 것으로 판단된다. 추후 고 신뢰성 고압배전반 개발을 위해서 bus bar의 수직배치와 수평배치에 관한 연구와 bus bar compartment의 전·자기 손실해석뿐만 아니라 온도 해석을 통한 연구를 진행할 계획이다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] 이방욱, 강종성, 손중만, 최원준, 서정민, “대전류 통전 시 배전반내의 열적 현상에 관한 연구”, 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp.1051-1053., 1999.
- [2] 배준한, 김해준, “전력기기용 Al/Cu 복합 부스바의 통전용량 설계 및 특성 평가”, 대한전기학회 논문지, pp.682-632, 2006., Vol.55, No.12
- [3] Yasuo nishikore, Soji Kojima, and Teruya Kouno, “A Study of the Field Utilization Factor and the Maximum Electric Field at Sparkover of the standard Sphere Gaps”, Electrical Engineering in Japan, Vol.139, No.4, pp. 399-404, 2002.
- [4] 남석호, 강형구 “친환경 고압배전반 개발을 위한 dry air의 압력별 절연내력 특성 분석에 관한 연구”, 대한전기학회 논문지, pp.1560-1565, 2011., Vol.60, No.8
- [5] “한국물가정보”, 2012.10

저 자 소 개

홍 종 기 (洪 鐘 基)

1987년 10월 13일생. 2012년 충주대 첨단과학대학 전기공학과 졸업. 2012년~현재 한국교통대학교 전기공학과 대학원 석사과정.

Tel : 010-7158-6889

E-mail : hjg@ut.ac.kr

허 정 일 (許 禎 日)

1987년 09월 23일생. 2012년 충주대 첨단과학대학 전기공학과 졸업. 2012년~현재 한국교통대학교 전기공학과 대학원 석사과정.

Tel : 010-8574-0256

E-mail : jiheo@ut.ac.kr

남 석 호 (南 碩 昊)

1986년 05월 08일생. 2011년 충주대 첨단과학대학 전기공학과 졸업. 2011년~현재 한국교통대학교 전기공학과 대학원 석사과정.

Tel : 010-3109-2191

E-mail : sanranki@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 조교수.

Tel : 043-841-5145

Fax : 043-841-5140

E-mail : kang@ut.ac.kr