

전기 트리를 가지는 사각 버스바의 절연 설계에 관한 유한요소해석

전준영¹, 노태우¹, 조성만¹, 김상민¹, 오종석², 최정완², 서재학²

¹ (주)다원시스, ² 국가핵융합연구소

Finite Element Analysis for Insulation Design of Rectangular Busbar with the Electrical Tree

Jun Young Jeon¹, Tae Woo Rho¹, Sung Man Jo¹, Sang Min Kim¹, Jong Seok Oh², Jungwan CHOI², Jae Hak Suh²

¹ Dawonsys Co., Ltd., Korea, ² National Fusion Research Institute (NFRDI), Korea

ABSTRACT

케이블 및 버스바는 전원을 공급하는 부대 장치로 산업 전반에 걸쳐 널리 사용되고 있다. 대부분의 경우 일정 주기로 점검 및 교체 등의 유지 보수를 진행하나 ITER IVC 버스바 및 지중케이블 등의 특수한 경우에는 점검 및 작업성의 이유로 유지 보수를 진행할 수 없다. 이러한 경우, 절연물 내부에 전기 트리가 발생했을 때에는 대책이 없다.

전기 트리는 부분적인 고전계에 의한 진성파괴, 전하의 주입 또는 추출에 의한 파괴 및 전기 기계적 응력(맥스웰 응력)에 의한 파괴, 미소 부분 방전에 의한 파괴의 가장 큰 고장요인이 되는 현상이며, 다양한 사고 사례가 알려져 있다.

본 연구에서는 유한요소해석법을 이용하여 전기 트리를 가지는 사각 버스바에 대한 전계해석을 진행하였고, 전기 트리를 방지할 수 있는 사각 버스바의 절연 설계에 대한 방안을 제시한다. 이 설계 방안은 향후 전기 트리를 고려한 사각 버스바의 절연 설계 기초 데이터로 활용될 것이다.

1. 서론

모든 재료는 완전할 수 없고 결함을 가지고 있다. 재료 과학적인 관점에서, 1차원 결함으로 공공(vacancy), 2차원 결함으로 전위(dislocation), 3차원 결함으로 기공(void)을 말할 수 있으며 전기 절연 재료의 경우, 3차원 결함인 기공이 큰 문제가 된다.^[1,2]

고체 절연 재료 중, 국부적으로 전계가 집중되는 곳이 있으면 그 곳으로부터 나뭇가지 형의 방전흔적(tree)이 형성된다. 이 방전흔적은 순차적으로 진전되다 결국 재료를 파손시킨다. 이러한 현상을 전기적 트리(electrical tree)라 한다.

전기 트리는 절연 재료가 기화하여 생긴 나뭇가지 형의 경로로 지름 수 μm 의 관형 공동 형태로 나타나며 국부적인 고전계에 의해 주로 발생된다. 전기 트리 발생 시, 폴리에틸렌과 폴리프로필렌은 수소가 검출되며 아크릴과 에폭시 계열은 원재료에 포함된 산소로 인해 물이 검출된다.

전기 트리의 연구는 발생과 진전으로 구분할 수 있으며 전기 트리의 발생, 진행, 형태는 인가되는 전압과 절연재료의 종류에 의해서 많은 차이가 있다. 전기 트리 발생 전압은 직류가 교류보다 크며 온도가 상승하면 전기 트리 발생 전압이 낮아진다.

전기 트리에 관한 연구, 특히 시뮬레이션 적용에 관한 연구는 국내보다는 해외에서 주로 수행되었다.^[1,2,3]

현재에도 많은 절연 설계가 경험적인 방법들에 의존하고 있어 불확실한 잠재적인 문제들을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 전기 트리를 가지는 사각 버스바의 절연 설계 방안을 소개한다. 연구 결과는 향후 다양한 조건을 가지는 절연 설계에 있어 기초 자료로 사용될 수 있리라 기대한다.

2. 본문

2.1 경계조건

사용된 시뮬레이션 프로그램은 MAXWELL이며, 그 중 electrostatic 모듈을 사용하였다. 나뭇가지 형태의 관형 공동을 그대로 모델링하는 것은 불가능하며 나뭇가지 형태의 진전 방향을 예측하여 구현하는 것 또한 불가능하다. 전자기 해석을 선행한 후, 미리 설정된 경로를 바탕으로 과도 구조해석으로 이어진 시뮬레이션을 수행하는 방안들이 있으나, 그러한 방법들은 결과의 신뢰성에 문제가 있고 더 많은 검증이 필요하므로 바람직한 방법이 아니라고 판단된다. 그러므로 방전흔적들을 단순화 시키는 방법의 사용이 타당하다. 방전흔적들을 단순화 시키는 방법은 “2012, Z. Wang, University of California”의 연구로부터, aspect ratio 2.5 를 가지는 타원형의 방전흔적으로 근사화 시키는 방법이 제시되었다.^[3] Brukes의 연구는 이러한 연구 결과를 심화시켜 타원 모델에 채널 모델을 적용하여 진행되었다.^[2] 그림 1은 단일 결함에 대한 타원모델 근사화 방법을 보여준다.

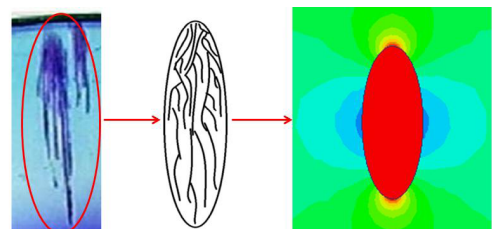


그림 1 타원형 모델로의 근사화

Fig. 1 Single electrical tree and ellipsoid representation

해석에 사용된 재료 물성치는 다음 표 1과 같으며 방전흔적은 단일 타원 모델로부터 채널 모델이 동시에 적용된 두 가지의 경우로 구성하였다. 도체는 구리이며 양단의 전위차는 10kV로 정의하였다.

표 1 해석에 사용 된 재료의 물성치

Table 1 Material properties using in the analysis

	Aluminum	Copper	Steel Stainless	FR4 Epoxy	Mica	Water Distilled
Relative Permittivity	1	1	1	4.4	5.7	81

그림 2는 해석에 사용된 모델, 재료 그리고 방전흔적 모델의 적용을 나타낸다. 방전흔적모델은 단일 타원형 결함모델과 이에 채널이 적용된 결함 모델이며 Mica 절연 층에 적용되었다.

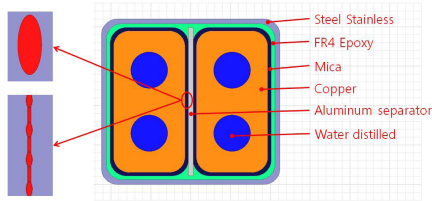


그림 2 해석모델과 근사모델, 재료의 적용
Fig. 2 Rectangular busbar model and applied materials

2.2 전계강도해석

경계조건 적용을 바탕으로 전계강도 해석을 진행하였으며, 무결함 모델의 결과로부터 전계 집중 구간에 방전흔적모델을 생성하였다. 무결함 모델의 해석 결과가 그림 3에 나타나 있다.

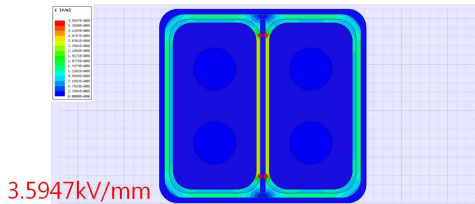


그림 3 무결함 모델의 해석결과-전계강도
Fig. 3 Result of analysis in the case of ideal model-Electrical field strength

Aluminum 분리판 주변으로 전계강도 값이 가장 높게 나타났으며 나머지 절연 층에 2.4 kV/mm 이하의 값이 관찰되었다. 다음 그림 4는 단일 타원형 결함모델을 적용한 결과를 보여준다. 결함에 전계가 집중됨을 확인할 수 있다.

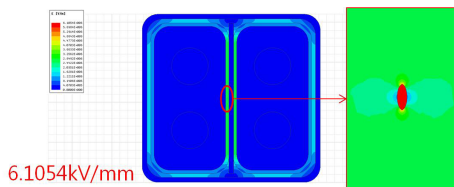


그림 4 단일 타원형 결함 모델의 해석결과-전계강도
Fig. 4 Result of analysis in the case of single ellipsoid defect model-electrical field strength

또한 채널로 연결된 방전흔적모델의 경우를 계속해서 진행했다. 그림 5는 채널로 연결된 수트리 결함을 가진 해석모델의

전계강도 값 결과를 나타내며, 표 2에 무결함 모델, 단순기공과 채널모델을 사용한 경우의 결과 값들이 정리되어 있다.

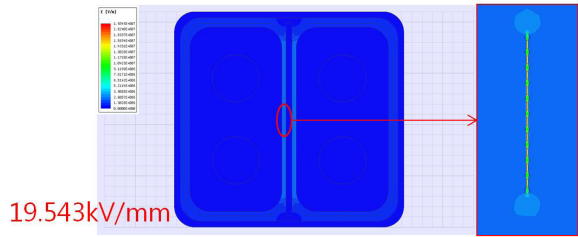


그림 5 채널로 연결 된 수트리모델의 결과-전계강도
Fig. 5 Result of analysis in the case of water void with channel model-electrical field strength

표 2 해석 결과

Table 2 Results of analysis

Composition of voids	Peak value of electrical field (kV/mm)
no void	3.6
Water void	6.5
Air filled void	6.1
Water void with channel	19.5
Air filled void with channel	14.5

3. 결론

전기 트리를 가지는 사각 버스바의 절연 설계 방안을 시뮬레이션을 통해 관찰하였다. 방전흔적모델을 이용하여 결함에 예상되는 경우의 전계강도 값을 산출하였으며 무결함모델에 비해 약 5.4배 증가 된 값을 최대 전계강도 값으로 설정해야 한다는 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구를 통해, 시뮬레이션을 이용한 사각 버스바의 절연 설계 방안을 제시하였다. 이와 같은 설계 과정은 다른 다양한 경우에서 결함을 가지는 절연 설계에 응용할 수 있다.

이 논문은 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 국책연구사업(No. 2007 2006995)의 연구결과임

참고 문헌

- [1] A.D. Teja, K. Rajagopala "Electric Field Effect in the Formation of Water Treeing in MV Power Cables", International Journal of Research in Engineering and Technology, pp710 714, Vol.3, Issue 4, Apr. 2014
- [2] K. Burkes, E. Makram, R. Hadidi, "Modeling the Effect of a Water Tree inside Tape Shield and Concentric Neutral Cables", Excerpt from the Proceeding of the 2014 COMSOL Conference in Boston
- [3] Z. Wang, P. Marcolongo, J. A. Lemberg, B. Panganiiban, J. W. Evans, P. K. Wright, "Mechanical fatigue as a mechanism of water tree propagation in TR XLPE", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 19, No. 1, pp.321 330, February 2012