

초고압 진공 인터럽터의 전자계 해석 및 설계

류재섭, 배재운, 박석원, 김영근
LS산전 전력연구소

Electromagnetic Field Analysis and Design of High Voltage Vacuum Interrupter

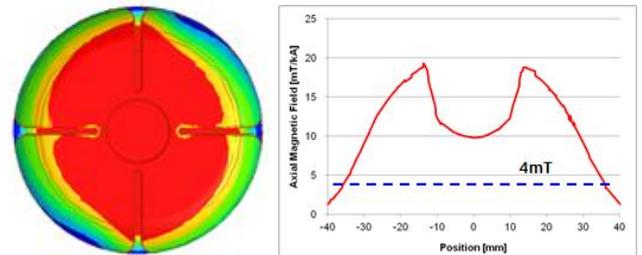
Jaeseop Ryu, ChaeYoon Bea, Seok Won Park, Young Geun Kim
Electrotechnology R&D Center, LSIS

Abstract - 본 논문에서는 송전급 전력계통 적용을 위한 축자계 방식의 진극 구조를 갖는 진공 인터럽터의 전자계 해석 및 설계에 대해서 기술하였다. 상대적으로 극간 거리가 먼 초고압 진공인터럽터의 진극 구조로 축자계 방식을 채택하였으며, 효과적인 아크 확산 면적을 확보하기 위하여 자계 해석을 통해 진극 사이지를 선정하였다. 또한, 접지된 금속 외함 내에서 진공 인터럽터의 절연을 확보하기 위하여 전계 해석을 통해 진극 및 쉴드 등의 형상 설계를 수행하였다. 본 논문에서는 72.5kV 40kA 정격의 진공 인터럽터의 설계를 위한 전자계 해석 결과를 실험 결과와 비교하여 설계 기준의 타당성을 검증하였고, 국제표준인 IEC 62271-100의 시험 규격에 의한 차단시험을 통하여 설계된 진공 인터럽터의 성능을 검증하였다.

축자계 방식의 진공 인터럽터는 사고 전류 차단 시에 발생하는 아크를 접점 사이에서 발생하는 축방향 자속밀도에 의하여 아크 접점 표면으로 확산시켜 전류를 차단하는 방식이다. 여기에서 축방향 자속밀도는 아크 확산이 효과적으로 이루어 질 수 있도록 충분한 크기를 가져야 하며, 본 설계에서는 4mT/kA를 기준으로 설계 하였다. 그림 1에는 초기 모델에 의한 축방향 자속밀도 분포와 크기를 보이고 있다. 해석 결과에서 초기 설계 모델은 기준값 이상의 충분한 축방향 자속밀도를 보이고 있으며, 접점 표면 전계 영역에 걸쳐 분산되어 있음을 확인하였다.

1. 서 론

전력기기의 절연매질로 많이 사용되고 있는 SF6 가스는 온난화 지수(GWP, Global Warming Potential)가 이산화탄소의 23,900배에 달하는 온실가스로 분류되어 관리를 받고 있다. SF6 가스의 사용 규제는 SF6 가스를 차단 매질로 사용하고 있는 초고압 가스차단기의 변화를 요구하게 되었다. 친환경 전력기기는 SF6 가스를 100% 대체하는 것과 복합구조, compact화 등에 의하여 사용량을 줄이는 방법으로 나눌 수 있다. 이 중에서 SF6 가스를 100% 대체하기 위해서는 두 가지 핵심 기술이 필요하다. 하나는 절연 매질을 SF6 가스에서 고체절연 또는 N2, Dry-air 등의 대체 가스로 바꾸는 것이고, 다른 하나는 차단부를 가스 차단기에서 진공 차단기로 바꾸는 것이다. 따라서 최근에는 많은 전력기기 업체에서 초고압 진공 인터럽터를 사용한 차단기 개발을 진행하고 있으며, 현재 최고 정격의 진공 인터럽터는 145kV 정격까지 상용화 되었다[1-5].



〈그림 1〉 축자계 진극의 자속 밀도 분포

진공 인터럽터의 진극 구조는 횡자계 방식과 축자계 방식으로 나뉜다. 횡자계 방식은 진극 사이에서 발생하는 자속의 방향이 진극의 중심에서 반경 방향으로 향하여 전류 차단 시에 발생하는 아크를 접점 외주를 따라서 빠르게 회전시켜 차단하는 방식이고, 축자계 방식은 진극 사이에서 발생하는 자속이 방향이 중심축 방향으로 형성되어 전류 차단 시 발생하는 아크를 아크 접점 표면으로 확산시켜 차단하는 방식이다. 현재까지는 극간 거리가 긴 초고압용 진공 인터럽터에는 축자계 방식을 사용하고 있다. 또한, 진공 인터럽터를 사용한 차단기의 구조는 진공 인터럽터 내부 절연에 매우 많은 영향을 미치게 된다. 특히, 접지된 금속 외함을 사용하는 차단기의 경우에는 진공 인터럽터 내부의 전계 분포를 집중하게 하는 효과가 있어, 진공 인터럽터의 설계 시에는 차단기의 구조를 우선 고려해야 한다.

2.2 전계 해석 및 절연 설계

전극의 형상이 결정되면 기본적인 내부 구조를 설계하고, 전계 해석에 의한 절연 성능을 예측하여 최종 형상 설계를 완성한다. 이 때, 진공 인터럽터가 금속 외함 내에 설치된 경우는 외함이 없는 경우와 비교하여 전기력선이 한 쪽 방향으로 치우치는 분포를 보이고 있으며, 이로 인하여 진공 인터럽터 내부의 전계 강도가 상승하는 결과를 가져온다. 본 연구에서는 진공 인터럽터를 접지된 금속 외함 내에 설치하는 구조의 차단기를 고려하여 진공 인터럽터를 설계 하였다.

진공 인터럽터의 설계에서 절연 내력의 확보 유무를 확인하기 위해서는 전계의 최대치가 기준 전계값보다 높은지 비교하게 된다. 진공의 절연 설계 기준(V_{bd})은 최소 20kV/mm에서 최대 30kV/m까지 사용된다. 이 설계 기준은 각 업체별로 경험치와 여유율을 포함한 것이기 때문에 설계자의 고유한 기준으로 간주된다[6]. 그림 2에는 금속 외함의 유무에 따른 진공 인터럽터 내부의 전계 분포를 비교하고 있다.

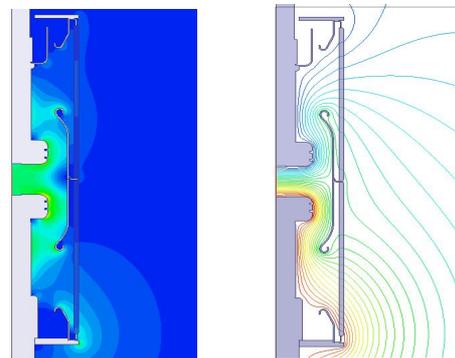
본 논문에서는 축자계 방식의 진극 구조를 갖는 72.5kV 40kA 정격의 진공 인터럽터 설계를 위한 전계 해석 및 자계 해석 결과를 보이고, 성능 시험을 통하여 설계 결과의 타당성을 검증하였다.

2. 진공 인터럽터의 전자계 해석

표 1에는 본 연구에서 개발한 진공 인터럽터의 사양을 정리하였다. 진공 인터럽터의 설계는 자계 해석으로부터 아크 접점의 사이즈 및 형상을 선정하고, 이를 바탕으로 전계 해석을 통해 최종 형상을 설계한다.

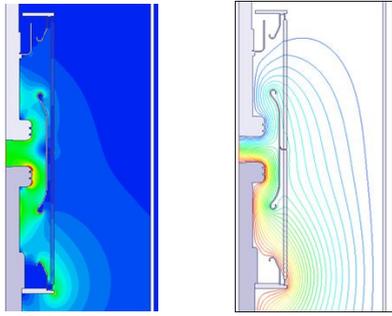
〈표 1〉 72.5kV 40kA VI 개발 사양

항 목	정 격	항 목	정 격
정격 전압	72.5kV	상용주파 내전압	140kVrms
정격 전류	2000A	뇌임펄스 내전압	325kVpeak
정격 차단 전류	40kA	정격 가스 압력	0.3 MPa·G
단시간 정격	40kA / 3sec	절연 가스	SF6/Dry-air



(a) 금속 외함이 없는 경우의 전계 해석 결과

2.1 자계 해석 및 진극 설계



(b) 금속 외함이 있는 경우의 전계 해석 결과

〈그림 2〉 진공 인터럽터의 전계 해석 결과

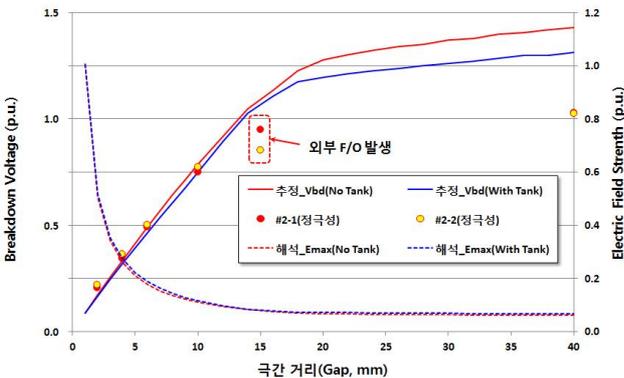
3. 실험 및 성능 평가 결과

3.1 절연 시험 결과

설계 결과를 바탕으로 Prototype 진공 인터럽터 및 차단부를 제작하여 절연 성능 시험을 진행하였다. 차단부 내부의 절연 가스는 진공 인터럽터 외부에서 발생하는 절연과피를 방지하고, 진공 인터럽터 내부의 절연성능을 확인하기 위하여 SF6 가스를 사용하였다. 그림 3에는 진공 인터럽터 차단부의 절연 시험 결과를 보이고 있다. 전계 해석을 통한 절연 설계 과정에서 얻어진 진공 인터럽터 내부의 전계값(점선)으로부터 극간 거리에 따른 절연 성능을 추정(실선)하였으며, 거리별 절연 시험을 통하여 결과를 비교하였다. 예측된 극간 거리별 절연 성능은 실험결과와 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 최대 극간 거리에서는 한계 성능을 확인하지 못해 예측값과 비교할 수 없었다.



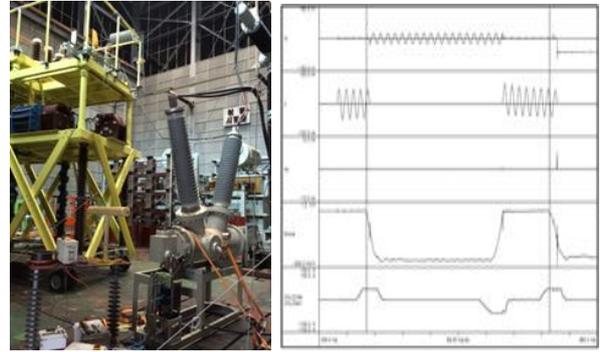
〈그림 3〉 진공 인터럽터 차단부 및 절연 시험 결과



〈그림 3〉 진공 인터럽터 차단부 및 절연 시험 결과

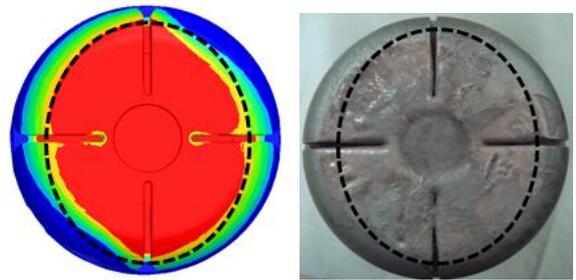
3.2 차단 시험 결과

72.5kV 40kA 진공 인터럽터의 차단 성능 시험은 국제시험 규격인 IEC 62271-100을 기준으로 진행되었다. 시험 항목은 기본 단락 시험(T100s(b), T100a)으로 정격 차단 성능을 검증하였으며, 근거리 선로 고장(SLF L90) 시험과 탈조(OP2) 및 충진전류 차단시험(LC1, CC2)으로 사고 종류에 따른 차단 성능을 검증하였다. 그림 4에는 차단 시험 장면과 시험 파형을 보이고 있다.



〈그림 4〉 사고전류 차단 시험 및 시험 파형

차단 시험 후, 진공 인터럽터의 접점 표면에 분포하는 아크의 흔적과 자계 해석을 통해 유추한 아크 확산 면적을 그림 5에 비교하였다. 그림에서 점선은 축방향 자속밀도의 유효면적을 표시한 것으로, 해석과 실제 차단 시험 후 확인된 접점 표면의 아크 확산 영역이 유사함을 알 수 있다.



〈그림 5〉 아크 확산 영역의 비교

4. 결 론

본 논문에서는 초고압 진공 인터럽터의 설계 및 전자계 해석에 대하여 기술하였다. 72.5kV 40kA 정격의 진공 인터럽터 개발을 위해 축자계 방식의 전극 구조 설계 및 접지 금속 외함을 고려한 절연 설계를 진행하였다. 샘플 진공 인터럽터의 차단 성능을 IEC 62271-100의 시험 기준에 의하여 평가하였으며, 요구하는 성능을 확인함으로써 적용된 설계 기준 및 방법의 타당성을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 류계섭, 탁성준, 김영근, 박석원 "송전급 진공 차단기의 개발 및 적용 동향", 2010년 대한전기학회 하계학술대회 논문집. ETP01, 2010
- [2] Y. Matsui, K. Nagatake, M. Takeshita, et al., "Development and Technology of High Voltage VCBs: Brief History and State of Art," *Proc. of ISDEIV2006*, vol. 1, pp. 253-256, Sept. 2006.
- [3] Z. Liu, J. Wang, S.Xiu, Z. Wang, "Development of High-Voltage Vacuum Circuit Breakers in China," *IEEE Trans. on Plasma Science*, vol. 35, no. 4, pp. 856-865, Aug. 2007.
- [4] X. Godechot, M. Schlaug, U. Ernst, M. Hairour, J. Jenkins, "Vacuum Interrupters in High Voltage Applications," *Proc. of ISDEIV2008*, vol. 1, pp. 103-106, Sept. 2008.
- [5] Jaeseop Ryu, Jongung Choi, Seokweon Park, "Development of Vacuum Interrupter with AMF Contacts for High Voltage Circuit Breaker", *Proceedings of ICEPE 2013*, 2-p2-Q-1, 2013
- [6] 류계섭, 배재훈, 박석원, 김영근 "초고압 진공 인터럽터의 진공 절연 특성 연구", *스마트 대전력 및 고전압 연구회 춘계학술대회 논문집*, pp.42-44, 2015