

극초고압 변압기 주권선부 절연설계 개선 연구

이찬주*, 석복렬*, 김용한*, 김동해*, 허종성*
현대중공업(주) 기계전기연구소*

Study on the Insulation Design Improvement in the Main Winding of an Ultra-high Voltage Power Transformer

Chanjoo Lee*, Bok-Yeol Seok*, Yong-Han Kim*, Dong-Hae Kim*, Jong-Sung Hur*
Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries, Co., Ltd.*

Abstract - 본 연구에서는 변압기의 권선간 전계 및 절연안전을 예측 알고리즘을 개발하였으며, 이를 활용하여 극초고압 변압기의 절연구조 개선 연구를 수행하였다. 개발된 알고리즘을 사용하면 한 번의 기본 모델의 수치해석 결과만을 이용하여 다양한 권선간 거리 및 고체 절연물의 개수 변화에 따른 전계 및 절연안전율의 예측이 가능하다. 본 알고리즘을 극초고압 변압기 주권선부 개선에 적용시킨 결과, 권선간 고체 절연물 개수를 조절하면 절연신뢰성 저하없이 주권선부 거리를 단축시킬 수 있음을 확인하였다. 또한, 본 예측 알고리즘의 활용 가능성을 검증하고자 개선 모델의 절연안전율을 수치해석적 방법으로 계산하여 이를 예측 결과와 비교하였다. 그 결과, 본 예측 알고리즘으로 계산된 결과는 수치해석적 방법에 의한 결과에 비해 약 1~2% 정도의 작은 차이가 발생하는 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구를 통하여 개발된 전계분포 및 절연안전율 예측기법을 실제 설계에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

1. 서 론

극초고압 변압기의 사고는 그 하위단계의 변압기 사고에 비하여 매우 큰 경제적 및 사회적 피해를 야기하므로 극초고압 변압기의 절연 신뢰성은 매우 높아야 한다. 그러나 절연신뢰성 향상은 자칫 변압기 전체 크기를 증가시키는 요인이 될 수 있으므로, 절연신뢰성과 변압기 크기는 동시에 고려되어야 한다. 이에 따라 본 논문에서는 변압기 권선간 거리와 고체 절연물 배치와의 관계를 파악하여 극초고압 변압기 주권선부의 절연설계 개선방안을 찾고자 하였다.

일반적으로 변압기의 권선부 절연설계 시 용량 및 전압에 따라 권선과 철심의 사양을 결정한 후, 권선 사이의 절연성능 향상을 위하여 고체 절연물을 배치한다. 고체 절연물의 비유전율은 변압기유에 비하여 상당히 높으므로 고체 절연물이 권선 사이에 삽입될 경우, 권선간 전계 분포의 변형을 초래한다. 따라서 고체 절연물 배치 시 복잡한 전계해석 및 안전율의 산출이 병행되어야 한다. 그런데 극초고압 변압기의 경우에는 한 대의 변압기에 수십 개의 고체 절연물이 사용되므로 상당한 반복 업무 및 설계시간이 요구된다.

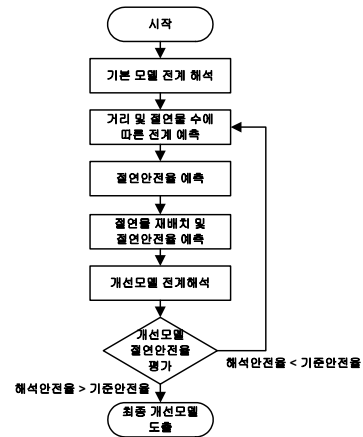
따라서 765kV 극초고압 변압기 절연설계기술 고도화를 위하여 권선간 고체 절연물 개수와 거리 변화를 고려한 전계 및 절연안전율 예측 알고리즘을 개발하였다. 그리고 연구를 통하여 개발된 알고리즘을 검증하기 위하여 임의로 선정된 765kV 극초고압 변압기의 주권선부 기본 모델을 이용하여 전계 및 고체 절연물 위치를 예측하고, 이를 실제 해석결과와 비교하였다.

2. 전계 및 절연안전율 예측

극초고압 변압기의 효율적인 절연설계를 위해서는 정확한 전계분포의 예측과 더불어 고체 절연물인 배리어(barrier)와 앵글링(angle ring)의 개수 및 위치선정이 무엇보다 중요하다. 본 연구에서는 이를 위하여 권선간 거리 및 고체 절연물 개수 변경에 따른 전계 및 절연안전율을 예측하고 평가하는 알고리즘을 개발하였다.

전계 및 절연안전율 예측 알고리즘은 그림 1에 나타나있는 바와 같다. 우선 고체 절연물이 설치되지 않은 권선간 구조만을 이용한 기본 모델의 전계를 수치해석을 통하여 구한다. 그리고 거리 및 고체 절연물 개수를 임의로 결정하고 이에 대한 전계변화를 예측한다. 이 때 고체 절연물간 간격은 등(等)간격으로 하고, 최소 및 최대 절연안전율을 산출하여 적절한 권선 거리와 고체 절연물의 개수를 결정한다. 이후 고체 절연물의 위치를 바꿔가며 각 위치에 따라 절연안전율을 예측하고, 모든 부분에서의 절연안전율이 기준 절연안전율보다 높은가에 대한 분석을 수행한다. 이 조건이 만족되면 개선 모델에 대하여 수치해석법을 이용한 전계해석을 수행하고, 절연안전율을 최종 평가한다.

본 방법에서 중요한 두 가지 요인은 고체 절연물 개수에 따른 전계 변화와 권선간 거리에 따른 전계 변화이다.



〈그림 1〉 절연안전율을 예측 및 평가 흐름도

2.1 고체 절연물 개수에 따른 전계 변화 예측

고체 절연물이 없는 전극 내에 비유전율이 큰 고체 절연물이 삽입되면, 고체 절연물 내부의 전계는 기존 전계보다 낮아지지만, 고체 절연물 외부의 전계는 상승하게 된다[1]. 이러한 고체 절연물 삽입에 의하여 전계가 변하는 비율 즉, 고체 절연물에 의한 전계 변화율은 각 물질의 비유전율, 전극간 거리 그리고 고체 절연물의 총 두께에 의한 함수로 표현된다. 따라서 고체 절연물 두께와 개수가 결정되면 기본 모델 해석을 통하여 얻은 전계에 고체 절연물에 의한 전계 변화율을 적용시키면 복잡한 수치해석을 수행하지 않고서도 고체 절연물이 삽입된 모델의 전계를 예측할 수 있다.

2.2 거리 변화에 따른 전계 변화 예측

전극간 전압이 일정한 경우, 거리와 전계는 반비례의 관계를 갖는다. 특히, 변압기 권선은 실린더 전극과 흡사한 형태이므로 실린더 전극에서의 전계 분포[1]가 거리에 따라 변하는 것과 같은 추세를 따를 것으로 예측되었다. 따라서 본 연구에서는 실린더 전극에서의 거리에 따른 전계 변화율을 수식적으로 도출하여 이를 전계 분포의 변화를 예측하는데 사용하였다.

3. 전계 및 절연안전율을 예측 알고리즘 적용을 통한 절연설계

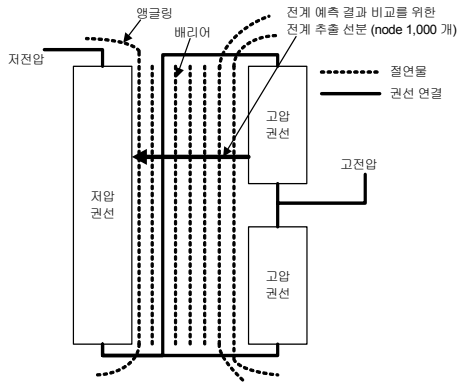
3.1 극초고압 변압기 주권선부 기본 구조

극초고압 변압기는 대부분 단권변압기로서 주권선부는 고압 권선부인 series 권선과 저압 권선부인 common 권선으로 구성된다. 고압 권선은 2병렬 구조로 되어 있으며, 중앙부에서 리드가 인출되는 중앙침입단의 구조를 갖는다. 그러므로 권선 중앙부에서의 전압이 가장 높기 때문에 중앙부에서의 절연구조가 주권선부 대부분의 절연구조를 결정하게 된다. 이러한 권선 중앙부에서의 절연시스템은 배리어라고 하는 실린더 형태의 고체 절연물이 배치된 액체/고체 복합절연의 형태로 구성된다.

〈표 1〉 765kV 극초고압 변압기 주권선부 기본 모델 사양

	정격 전압	임펄스 시험 전압
고압 권선	765kV	2,050kV
저압 권선	345kV	1,050kV
권선간 거리	200mm	
기준 절연안전율	1.3	

* 절연안전율: 각 절연거리에서의 절연파괴 기준 전계와 실제 전계와의 비율



〈그림 2〉 주권선부 연결 및 절연구조

또한, 고압 권선 상부와 저압 권선 하부는 동(同)전위를 갖는 구조이므로 주권선부 상부에서는 영글링이라고 하는 고체 절연물을 사용하여 각 권선을 감싸는 절연구조를 형성하게 된다. 표 1은 본 연구에서 임의로 선정된 765kV 극초고압 변압기의 주권선부 사양을 나타내며, 그림 2는 극초고압 변압기 주권선부의 절연구조를 개략적으로 표현한 그림이다.

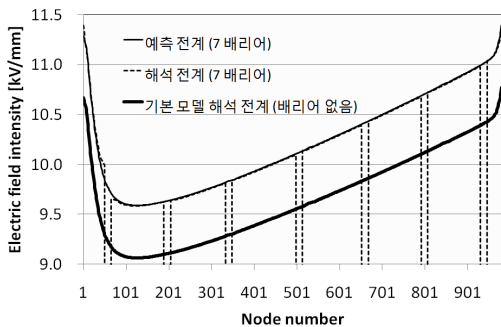
3.2 기본 모델에서의 고체 절연물 배치 및 안전을 평가

본 절에서는 표 1과 같이 임의로 선정된 765kV 극초고압 변압기 사양을 기본으로 주권선부 중앙부에서의 절연설계를 수행하였으며, 또한 이를 수치해석적 방법과 비교하여 본 연구를 통하여 개발한 전계 및 절연안전을 예측 알고리즘을 검증하였다. 그림 1의 절연안전을 예측 및 평가 흐름도에 따라 기본 모델에 대한 해석을 수행하고 고체 절연물 개수에 따른 절연안전을 예측한 결과, 고체 절연물을 동일한 간격으로 설치한 경우, 7개 이상 삽입된 후부터 각 부분의 절연안전율이 기준안전율보다 높게 나타났다. 그러나 고체 절연물 설치 위치는 변압기의 냉각과도 밀접한 관련이 있으므로 고체 절연물 간 거리는 고체 절연물 설치 위치에 따라 달라진다. 따라서 권선 냉각을 고려하여 7개의 고체 절연물의 절연거리를 재설정 한 후 절연안전율을 분석한 결과, 기준 절연안전율을 상회하는 것을 확인할 수 있었다.

본 고체 절연물 배치안은 수치해석을 통하여 검증하였으며, 그 결과, 그림 3과 표 2에서 볼 수 있듯이, 전계 및 절연안전율의 최대 차이는 약 2% 정도 수준으로 매우 양호한 것으로 판단되었다.

3.3 개선 모델에서의 고체 절연물 배치 및 안전을 평가

본 절에서는 권선간 거리 단축을 위하여 거리에 따른 고체 절연물 개수를 전계 및 절연안전을 예측 알고리즘을 이용하여 계산하였다.

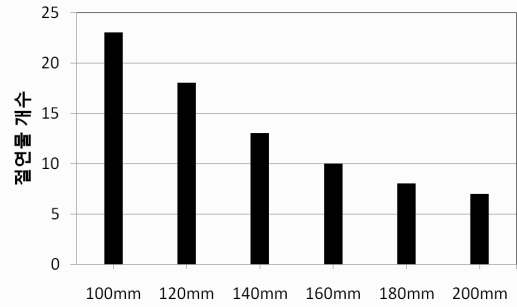


〈그림 3〉 기본 모델에서의 전계 비교

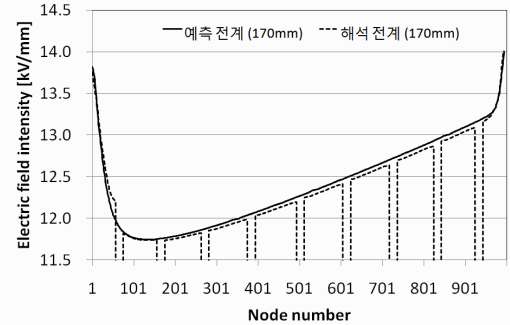
〈표 2〉 기본 모델의 예측 절연안전율과 해석 절연안전율의 비교

고체 절연물간 간격 번호	1	2	3	4	5	6	7	8
예측 절연안전율	1.943	1.486	1.447	1.338	1.334	1.353	1.316	1.787
해석 절연안전율	1.901	1.484	1.445	1.337	1.332	1.350	1.313	1.775

* '1'은 고전압 권선과 고체 절연물사이 간격, '8'은 저전압 권선과 고체 절연물사이 간격임.



〈그림 4〉 권선간 거리에 따른 고체 절연물 개수 (기준 절연안전율 1.3)



〈그림 5〉 개선 모델에서의 전계 비교

〈표 3〉 개선 모델의 예측 절연안전율과 해석 절연안전율의 비교

고체 절연물간 간격 번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
예측 절연안전율	1.593	1.503	1.459	1.405	1.355	1.357	1.332	1.341	1.352	1.585
해석 절연안전율	1.576	1.503	1.462	1.410	1.357	1.363	1.339	1.347	1.358	1.576

* '1'은 고전압 권선과 고체 절연물사이 간격, '10'은 저전압 권선과 고체 절연물사이 간격임.

권선간 거리를 변화시키면서 모든 절연물 사이에서의 절연안전율이 기준 절연안전율을 상회하는 고체 절연물의 개수를 구한 결과, 그림 4에서 보이는 바와 같이 고체 절연물의 개수는 권선간 거리를 단축할수록 급격히 증가하는 것을 알 수 있었다. 그러므로 권선간 거리 및 고체 절연물의 개수를 결정하기 위해서는 이러한 상호 관계를 잘 고려하여야 한다. 본 연구에서는 임의로 선정된 권선간 기본 거리인 200mm 대비 약 85% 정도 단축시킨 170mm 거리에 9개의 고체 절연물을 배치하고, 그에 따른 절연안전율 예측을 수행하였다. 그리고 이를 수치해석적으로 검증한 결과, 그림 5와 표 3으로부터 알 수 있듯이, 예측 전계는 해석 전계와 비교하여 약 2%의 차이가 발생하였으며, 예측 절연안전율은 해석 절연안전율과 비교하여 최대 약 1%의 차이가 발생하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 극초고압 변압기의 절연 신뢰성 향상과 소형화를 위하여 전계 및 절연안전을 예측 알고리즘을 개발하였으며, 이를 임의로 선정된 극초고압 변압기 기본 모델에 적용시켜 검증하였다. 그 결과, 오차 수준은 약 1~2%로서 비교적 정확하였다. 따라서 본 방법을 활용하면 변압기의 절연구조 개선 시 시행착오를 줄일 수 있어 시간 단축은 물론, 상당히 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구의 결과물은 향후 본격적으로 진행될 절연구조 개선을 통한 극초고압 변압기의 절연신뢰성 향상 연구에 활용될 계획이다.

[참 고 문 헌]

[1] D. Cheng, "Fundamentals of Engineering Electromagnetics", 1994.