

케이블 변압기용 케이블의 반도체층 특성에 관한 연구

배병현, 우장수, 김현일, 박성조, 권영안
부산대학교

Characteristics Analysis of Semiconducting Layer in Cable Transformer

B. H. Bae, J. S. Woo, H. I. Kim, S. J. Park, and Y. A. Kwon
Pusan National University

Abstract - 케이블 변압기용 케이블에는 반도체층이 설치되며 권선의 각 턴에 대하여 외측 반도체층을 접지함으로써 권선에 과다 전계가 인가될 때 이로 인한 전압 스트레스를 막아주는 역할을 한다. 따라서 케이블 변압기에서는 변압기 용량에 따라 이 반도체층의 저항률과 두께 등을 적절히 선정하는 것이 매우 중요하다.

케이블 권선에서 반도체층의 높은 저항률은 두 개의 접지점 사이의 반도체층에서 높은 전계분포를 발생시키고, 낮은 저항률은 반도체층에서 높은 전력손실을 발생시킨다. 본 논문에서는 해석하고자 하는 모델에 FEM 해석을 적용하고, 반도체층 두께에 따른 특성해석을 수행한다.

1. 서 론

케이블 변압기는 기존의 변압기에 비하여 절연유 유출이나 화재 및 폭발의 위험이 없는 미래지향적 변압기로써 최근 연구가 진행되고 있는 변압기이다.[1-4]

케이블 변압기에 사용되는 케이블은 기존의 전력용 케이블에서 최외각 쉬스 및 금속 스크린을 제거한 형태로서 그림 1에서 보는바와 같이 도체, 내측 반도체층, 고체 절연층, 외측 반도체층으로 구성된다. 케이블 변압기의 절연은 XLPE 절연층이 담당하며, 이것은 기존 절연유 변압기의 절연매체인 광유의 절연특성과 비교되는 절연물질로 알려져 있다.

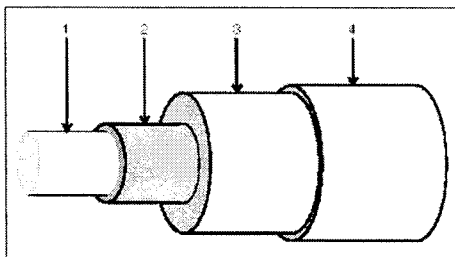


그림 1. 케이블 변압기용 케이블의 구조

- (1) conductor (2) inner semiconducting layer
(3) XLPE insulation (4) outer semiconducting layer

케이블 변압기의 주된 특성중 하나는 고전압 권선에서 각 턴에 대하여 외측 반도체층을 접지하는 것이다. 케이블 변압기의 절연특성을 결정짓는 요소중의 하나가 이 반도체층의 저항률인데, 전계의 과다 집중시 저항률이 매우 높은 경우 각 턴에 인가되는 전계에 의해 반도체층

절연과피의 우려가 있고, 저항률이 매우 낮은 경우 접지된 단자를 통해 쉽게 전류가 흘러 손실의 원인이 되어 전체적인 변압기의 효율을 떨어뜨리게 된다. 따라서 외측 반도체층의 저항률을 적절히 선택함으로써 전체 변압기의 절연특성과 효율을 최적화 할 필요가 있다.

본 논문에서는 이 반도체층 저항률의 변동에 따라 반도체층에 인가되는 전계와 그 손실을 분석한다.

2. 케이블 변압기

그림 2는 변압기 권선의 절연에서 절연유/절연지 대신에 고전압 XLPE 케이블을 사용한 케이블 변압기의 외관을 나타낸다.

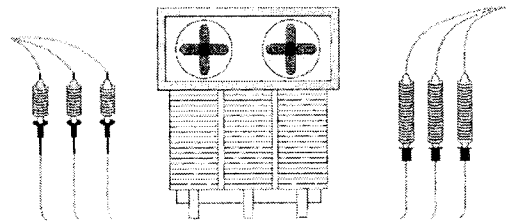


그림 2. 케이블 변압기 외관

케이블 변압기는 사용자나 환경에 상당한 이점을 가진다. 절연유를 사용하지 않는 점은 토양이나 지하수 오염을 제거하고, 폭발 위험을 최소화 한다. 그 결과 호수나 강, 지하, 인구 밀집 지역 어디든지 설치가능하게 된다.

케이블 변압기에서는 전계는 XLPE 케이블 안에 대부분 집중되고, 케이블 표면은 접지된다. 모든 형태의 전기적 스트레스에 대처하기 위한 복잡한 절연 시스템의 설계에 대한 요구는 완전히 제거되고, 간단하고도 신뢰성 있는 설계를 할 수 있다.

제조 관점에서, 케이블 변압기는 케이블 공장에서 만들어진 절연 시스템의 장점을 그대로 가진다. 이것은 절연 시스템의 테스트가 변압기 조립 공정 전에 이미 끝났음을 의미한다.

현재의 케이블 변압기는 기존 절연유 변압기보다 설계상으로 크다. 그러나 일반적으로 바닥 면적은 비슷하며, 제작 시간은 더 적다. 설계와 조립에 있어서의

유연성은 케이블변압기가 이전에는 자유롭지 못했던 사용자의 요구에 맞는 크기나 차지하는 면적으로 설계될 수 있다는 것이다. 또한 설치 공간에서 직접 조립 가능하므로 운송이 간편하다.

star-neutral 결선된 변압기가 직접 또는 간접적으로 접지되어 있다면, 중성점 끝의 절연 계급은 단자 끝 보다도 낮을 것이다. 따라서 권선의 끝부분에서 절연 두께가 얇아짐이 가능하고, 그 후에 변압기 정격에 따라 절연 두께를 증가하면 된다. 이것은 충분히 큰 크기의 케이블을 사용했을 때 효과적이며 변압기 철심과 권선의 부피 최적화를 더욱 가능하게 한다. 기존의 변압기에서 턴이나 레이어 사이의 전계 스트레스는 턴당 전압의 근사와 관련이 있고 따라서 권선의 총 길이에 제한이 있었다. 케이블변압기의 큰 장점 중의 하나는 고유의 낮은 단락회로 임피던스이다. 이 임피던스는 필요하다면 쉽게 증가시킬 수도 있다. 단락회로 임피던스 증가 용량은 접지된 케이블 바깥 표면에 기인한다. 따라서 저전압/고전압측 권선은 매우 근접하게 배치될 수 있다. 저전압측 권선은 고전압 권선층 사이나 또는 저전압/고전압 권선 사이에 같이 섞일 수 있다.

현재의 케이블변압기는 기존 변압기보다 무부하 손실이 높으나 총 손실은(무부하+부하) 적다. 향후 케이블변압기의 생산기술 향상으로 손실은 더욱 감소될 것이다. 자속밀도와 전류밀도는 기존 변압기의 수치 범위 내에 있으며 케이블 바깥 표면이 접지 되었으므로 권선 내부를 비자성 철로 둘 수 있게 하고, 단락 발생시 일어날 수 있는 축방향 인장력에 대하여 기계적으로 지탱할 수 있게 한다.

3. FEM을 이용한 케이블의 특성해석

22.9kV CN/CV-W XLPE 케이블의 제원은 표 1과 같고 그 단면도를 그림 3에 나타내었다.

표 1. 케이블의 제원

	Thickness[mm]	ϵ_r	$\rho[\Omega m]$
Conductor	3.65		
Semiconducting layer	0.7	2.4	0.8
			5.3
Insulation	6.6	2.3	1000

3.1 해석 이론

복소 벡터포텐셜 \vec{V} 를 계변수로 하는 지배 방정식은 맥스웰 방정식으로부터 식 (1)과 같이 유도된다.

$$\nabla \cdot (\sigma \vec{E} + j\omega \vec{E}) = 0 \quad (1)$$

여기서, σ 는 도전율, $\epsilon (= \epsilon_r \epsilon_0)$ 는 유전율이다.

유전손실각을 가지는 영역에서 전력손실은 다음과 같다.

$$P = \iiint_V \epsilon_0 \epsilon_r E^2 \tan \delta \, dv \quad (2)$$

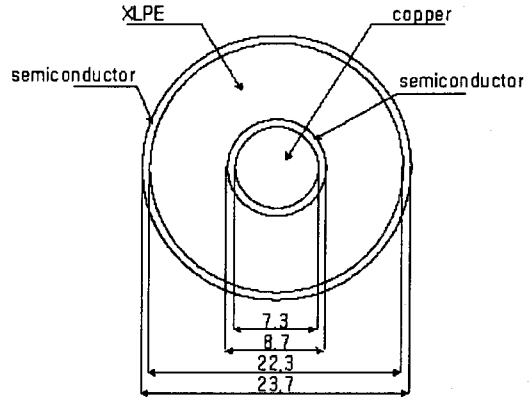


그림 3. 케이블의 단면도

3.2 해석 결과

상용 유한요소 해석 프로그램인 FLUX2D를 이용하여 해석모델에 대하여 턴당 근사전압 30V를 도체에 인가하고, 반도체층의 저항율은 ABB社의 Dryformer의 저항율인 40 Ω cm으로 하여 전계해석을 하고 반도체층의 손실을 계산하였다. 그림 4는 표1과 같은 케이블에서 요소분할도를 나타낸다.

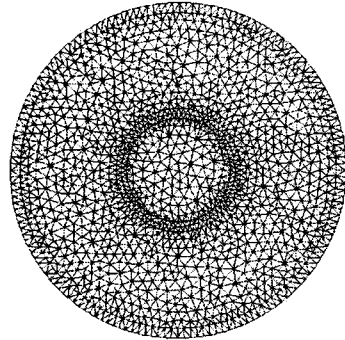


그림 4. 해석모델의 요소분할도

그림 5는 케이블의 방사방향 각 점에서 전계분포를 나타내고 그림 6은 케이블의 방사방향 각 점에서 전력밀도분포를 나타낸다.

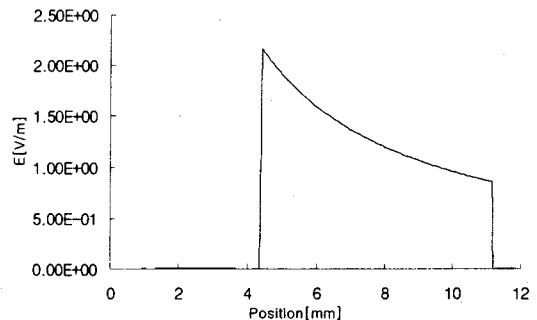


그림 5. 해석모델의 전계분포

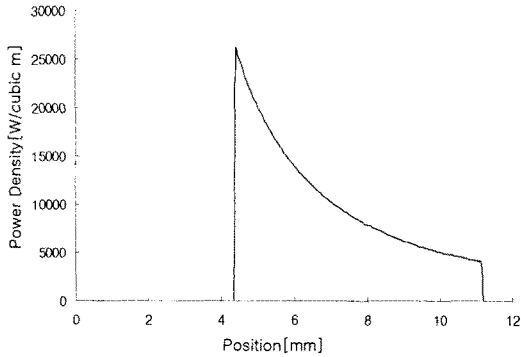


그림 6. 해석모델의 전력밀도분포

3.3 반도체층 저항율의 변동에 따른 특성

반도체층의 저항율의 변동에 따른 전계집중과 손실과의 관계를 알아보기 위해 각 저항율에 대한 비교를 수행하였다. 그림 7은 외측 반도체층의 저항율 변동에 따른 전계분포를 나타내고 그림 8은 외측 반도체층의 저항율 변동에 따른 전력밀도분포를 나타낸다.

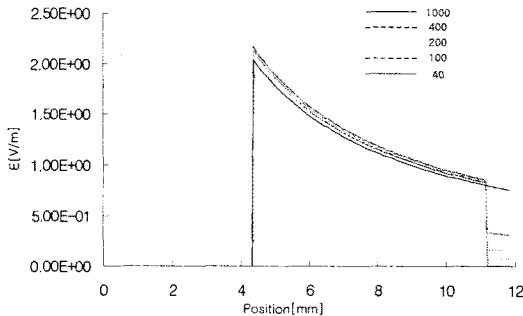


그림 7. 외측 반도체층의 저항율에 따른 전계분포

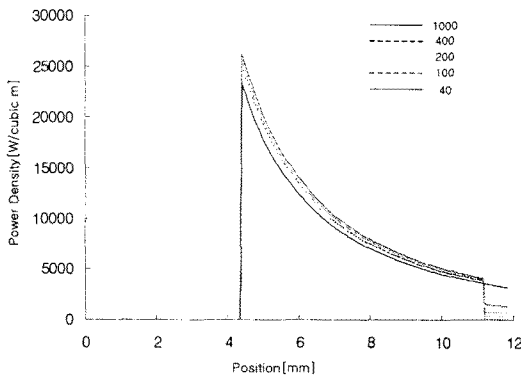


그림 8. 외측 반도체층의 저항율에 따른 전력밀도분포

표 2는 외측 반도체층의 저항율 변동에 따라 계산된 손실 비교표이다.

표 2. 외측 반도체층의 저항율에 따른 손실 비교

ρ [Ω m]	내부 반도체층 [w/m]	XLPE [w/m]	외부 반도체층 [w/m]	전체 손실 [w/m]
5.3	0.000448	3.00092	0.001029	3.0024
10	0.000447	2.9991	0.001941	3.00148
100	0.000442	2.9645	0.019181	2.98412
200	0.000437	2.92676	0.037873	2.96507
400	0.000425	2.85341	0.073846	2.92768
1000	0.000395	2.64918	0.171395	2.82097

그림 7의 결과에서 보면 외측 반도체층에 인가되는 전계의 세기는 저항율에 따라 크게 차이가 나며 저항율이 낮으면 전계의 세기가 감소한다. 그리고 전력손실은 그림 8 및 표 2의 결과에서 나타난 바와 같이 저항율이 낮으면 손실이 증가한다. 따라서 케이블 변압기에서는 변압기 용량에 따라 이 반도체층의 저항률과 두께 등을 적절히 선정하여야 한다.

4. 결 론

케이블 변압기용 케이블에는 반도체층이 설치되며 권선의 각 턴에 대하여 외측 반도체층을 접지함으로써 권선에 과다 전계가 인가될 때 이로 인한 전압 스트레스를 막아주는 역할을 한다. 따라서 케이블 변압기에서는 변압기 용량에 따라 이 반도체층의 저항률과 두께 등을 적절히 선정하는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서는 케이블 변압기용 케이블의 반도체층 저항율이 반도체층의 절연내력 및 손실에 미치는 영향에 대하여 FEM 해석을 이용하여 연구하였다. 반도체층에 인가되는 전계의 세기는 저항율의 크기에 비례함을 확인하였고, 반도체층에서 소모되는 전력손실은 각각의 저항율에 대하여 약간의 차이를 나타내었다.

[참 고 문 헌]

- [1] M. Leijon and T. Andersson, "High and dry", IEE Review, Vol.9, No.4, pp.9-14, 2000.
- [2] M.J. Dahlgren, L. Walfridsson, L. Ming, and A. Jaksts, "A recent development in the electrical insulation systems of generators and transformers", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.17, No.3, pp.10-15, 2001.
- [3] A. Jaksts, S. Forsmark and M. Leijon, "Power transformers for 21st century," IEEE Electric Power Engineering, Power Technology Conf., p 52, 1999.
- [4] L. Ming, A. Jaksts, R. Liu and M. Leijon, "Recent trends within insulation system for transmission and distribution apparatus," Int. Conf. on Properties and applications of dielectric materials, pp.849-855, 2000.