케이블 변압기용 케이블의 반도전층 최적화에 관한 연구

배병현*, 우장수, 김현일, 한정호, 권무삼, 권영안
부산대학교

Optimization of Semiconducting Layer in Cable Transformer

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

Abstract - 케이블 변압기용 케이블에는 반도전층이 설치되며 권선의 각 턴에 대하여 외측 반도전층을 접지함으로써 권선에 과다 전계가 인가되는 것을 억제하는 역할을 한다. 케이블 변압기는 케이블의 반도전층의 저항률에 따라 전계분포 및 전력손실이 다른 특성을 나타낸다. 반도전층의 저항률이 매우 높을 경우 각 턴에 인가되는 전계에 의해 각 턴의 접지 사이에 높은 전계가 인가되고, 저항률이 매우 낮을 경우 반도전층에서 높은 전력 손실을 야기하여 변압기의 전체 효율을 감소시키게 된다. 따라서 반도전층의 저항률을 적절히 선정함으로써 전체 변압기의 절연특성과 효율을 최적화 할 필요가 있다. 본 연구에서는 유한요소법과 진화전략을 적용하여 케이블 변압기용 케이블의 반도전층 최적화를 수행한다.

1. 서 론

케이블 변압기는 기존의 변압기에 비하여 절연유 유출이나 화재 및 폭발의 위험이 없는 미래지향적 변압기로서 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 반도전층, 고체절연층, 외측 반도전층으로 구성된다. 케이블 변압기의 절연은 XLPE 절연층이 담당하며, 이것은 기존 절연유 변압기의 절연매체인 광유의 절연특성과 비교되는 절연물질로 알려져 있다.

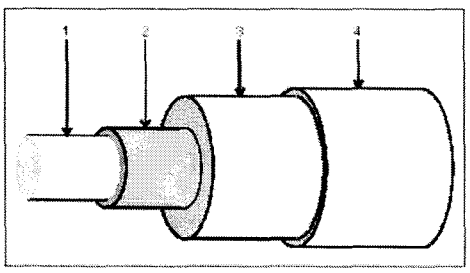

그림 1. 케이블 변압기용 케이블의 구조
(1) 도체 (2) 내부 반도전층
(3) XLPE 절연층 (4) 외부 반도전층

케이블 변압기의 주된 특성중 하나는 고전압 권선에서 각 턴에 대하여 외측 반도전층을 접지하는 것이다. 케이블 변압기의 절연특성을 결정짓는 요소 중의 하나가 이 반도전층의 저항률인데, 저항률이 매우 높을 경우 각 턴에 인가되는 전계에 의해 절연파괴의 우려가 있고, 저항률이 매우 낮을 경우 반도전층에서 와전류에 의한 높은 전력 손실이 발생하고 변압기의 전체 효율을 감소시키게 된다. 따라서 반도전층의 저항률을 적절히 선정함으로써 전체 변압기의 절연특성과 효율을 최적화 할 필요가 있다. 본 논문에서는 유한요소법과 진화전략을[5,6] 적용하여 케이블 변압기용 케이블의 반도전층 최적화를 수행한다.

2. 케이블 변압기

케이블 변압기는 사용자나 환경에 상당한 이점을 가진다. 절연유를 사용하지 않는 점은 토양이나 지하수 오염을 제거하고, 폭발 위험을 최소화 한다. 따라서 호수나 강, 지하, 인구 밀집 지역 어디든지 설치가 가능하게 된다. 절연유 방식 변압기에서 절연지/절연판/절연유 방식의 절연 시스템은 차단기 스위칭 등에 의한 고전압에 노출된다. 따라서 턴과 턴, 권선과 권선의 절연은 이러한 동작에 의한 영향이 고려되어야 하며 권선 배치의 정확도와 권선 내부의 청결도는 매우 중요하다. 그러나 케이블 변압기에서 전계는 XLPE 케이블 안에 대부분 집중되고, 케이블 표면은 접지된다. 모든 형태의 전기적 스트레스에 대처하기 위한 복잡한 절연 시스템의 설계에 대한 요구는 제거되고, 간단하고도 신뢰성 있는 설계를 할 수 있다. 제조의 관점에서, 케이블 변압기는 케이블 공장에서 만들어진 절연 시스템의 장점을 그대로 가진다. 현재 케이블변압기는 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 면적으로 설계를 가능하게 한다. 또한 설치 공간에서 직접 조립 가능하므로 운송이 간편하다. 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 표면적에 기인한다. 따라서 저전압/고전압측 권선은 매우 근접하게 배치될 수 있다. 저전압측 권선은 고전압 권선층 사이나 또는 저전압/고전압 권선 사이에 같이 섞일 수 있다. 현재 케이블변압기는 기존 변압기보다 무부하 손실이 높으나 총 부하손실은 적다. 향후 케이블변압기의 생산기술 향상으로 손실은 더욱 감소될 것이다. 자속밀도와 전류밀도는 기존 변압기의 수치 범위 내에 있으며 케이블 바깥 표면이 접지 되었으므로 권선 지지부를 비자성 철로 둘

수 있게 하고, 단락 발생시 일어날 수 있는 축방향 인장력에 대하여 기계적으로 지탱할 수 있게 한다.

3. 케이블 전계 해석을 위한 모델

본 연구에서 제시한 최적설계의 설계사례로서 사용하는 케이블의 단면도는 그림 2와 같다.

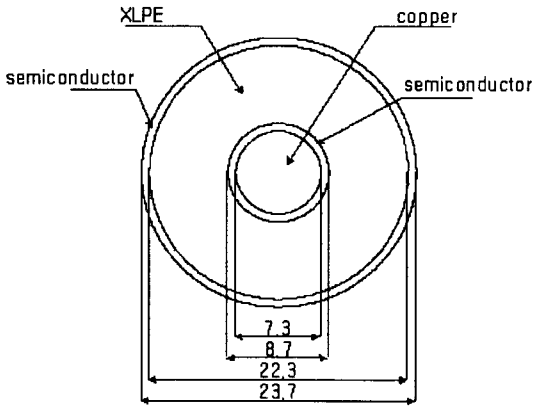

그림 2. 케이블의 단면도

최적화를 위한 케이블 초기 해석모델의 제원은 표 1과 같다.

표 1. 케이블 초기 해석모델의 제원

	Thickness [㎜]	ε_r	ρ[Ωm]
Conductor	3.65		
Semiconducting layer	0.7	2.4	3,000
			2,500
Insulation	6.6	2.3	10^{18}

유한요소법 해석은 전체모델에 대하여 이루어졌으며 삼각요소법을 적용하여 요소를 나누었다. 해석을 위한 요소 분할도는 그림 3과 같으며 6,164개의 요소와 12,409개의 절점으로 구성되어 있다. 전계 해석시 절연파괴시험 기준을 적용하여 도체 표면에 150kV의 전압을 인가하였고, 손실 해석시에는 턴당 전압 30kV를 인가하였다. 이에 의해 케이블의 초기 모델에서 FEM에 의해 구한 전계분포는 그림 4와 같다.

4. 케이블 반도전층의 최적 설계

케이블 변압기용 케이블의 반도전층의 저항률이 매우 높을 경우 각 턴에 인가되는 전계에 의해 각 턴의 접지 사이에 높은 전계가 인가되고, 저항률이 매우 낮을 경우 반도전층에서 높은 전력 손실을 야기하여 변압기의 전체 효율을 감소시키게 된다. 본 연구에서는 기존 모델을 이용하여 성능을 유지하면서 반도전층의 저항율을 변화시켜 전력손실을 최소로 하는 최적설계를 수행한다.
그림 2의 케이블에서 외부 반도전층의 전력손실은 반도전층에서 일어나는 와전류로 인한 손실이며 식(1)과 같이

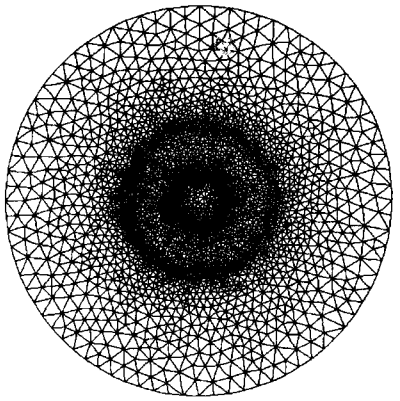

그림 3. 해석모델의 삼각요소분할도

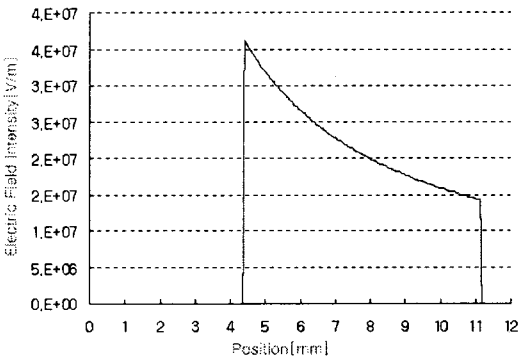

그림 4. 케이블 초기모델의 전계분포

나타낼 수 있다.

$$P = \int\int_v \rho\, J_e^2 dV \tag{1}$$

여기서 J_e는 와전류의 전류밀도이다.

식(1)의 전력손실을 최소화하는 제약조건으로서 저항율과 전계강도의 제한치를 설정하였다.

본 연구에서는 진화전략에 의해 최적화를 수행하며, 진화전략의 구조로서 (1+1)ES를 이용한다. (1+1)ES는 1개의 부모 개체를 이용하여 부모 개체의 각 변수값에 난수를 발생하여 돌연변이시킨 자손 개체를 만들고 이 중 더 나은 개체가 생존하여 다음 세대의 부모 개체가 되는 방식으로서 알고리즘은 그림 5와 같다. 여기서 돌연변이 연산은 평균적으로 돌연변이가 1/5의 성공률을 보일 경우, 목적함수가 최적의 수렴률을 보이는 1/5 success rule을 수식화 하였다.

$$x' = x + \sigma(t)N(0,1) \qquad \forall i \in \{1,2,\cdots,n\} \tag{2}$$

$$\sigma(t) = \begin{cases} \sigma(t-n)/c & \text{if } P_m > 1/5 \\ \sigma(t-n)c & \text{if } P_m < 1/5 \\ \sigma(t-n) & \text{if } P_m = 1/5 \end{cases} \tag{3}$$

본 연구에서 최적화를 위한 목적함수와 제약조건은 다음과 같다.

$$\text{Minimize} \quad P = \int \int_v \rho J^2 dV \ [W]$$

$$\text{Subject to} \quad E_{(x=11.85)} < 3,000 \ [kV/m]$$

$$\rho < 100,000 \ [\Omega m]$$

여기서, P 와 E, ρ 는 각각 케이블 외부 반도전층의 손실, 외부 반도전층 표면의 전계의 세기, 외부 반도전층의 저항율이다.

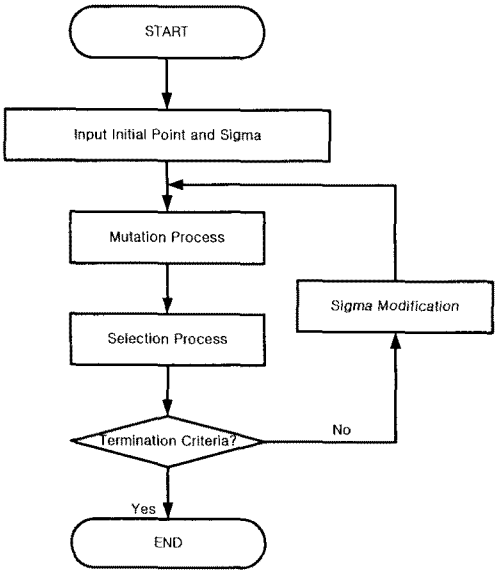

그림 5. (1+1)-ES 알고리즘

5. 설계결과 및 검토

본 연구에서 (1+1)_진화 전략을 이용하여 100세대까지 설계 변수를 변화시켜 그에 따른 응답을 FEM 해석에 의해 전계 및 전력손실을 계산한 후 설계 변수의 변화에 따른 목적함수와 제약조건을 비교하여 가능해를 구하였다. 그림6은 본 연구에서 진화전략에 의한 최적화를 수행하여 얻어진 저항율에 대한 100세대까지의 수렴 추이를 나타낸다.

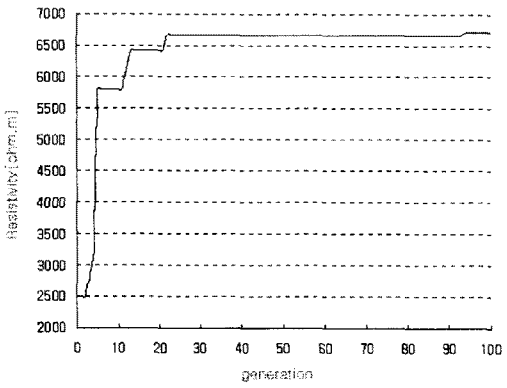

그림 6. 진화 전략을 이용한 저항율의 수렴 추이

최적저항율은 6,717.7 Ωm로 구해졌으며 최적화 모델에서 전계 분포를 계산한 결과, 외부 반도전층 표면의 전계는 초기 모델에 비하여 상승하였으나 제약조건은 만족하고 있다.

그림 7은 초기 해석모델과 최적화 모델의 전력손실 비교를 나타낸다. 외부 반도전층의 손실이 초기 모델에(저항율 2,500 Ωm) 비해 62.7%가 감소하였다.

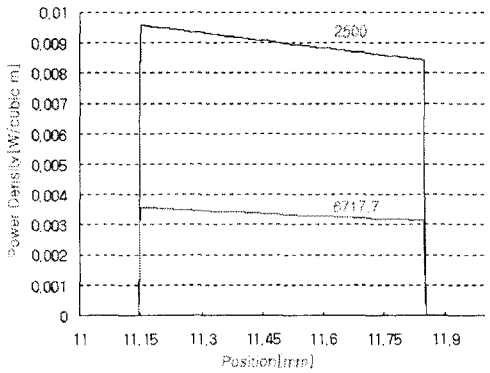

그림 7. 케이블 외부 반도전층의 전력 손실 비교

6. 결 론

케이블 변압기용 케이블에는 반도전층이 설치되며 권선의 각 턴에 대하여 외측 반도전층을 접지함으로써 권선에 과다 전계가 인가되는 것을 억제한다. 따라서 케이블 변압기에서는 이 반도전층의 저항율을 적절히 선정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 케이블 변압기용 케이블의 반도전층 저항율에 따른 전계분포 및 전력손실을 FEM 해석을 통해 구하고 목적함수와 제약조건을 비교하여 가능해를 구하였으며 진화전략에 의해 저항율의 최적화를 수행하였다. 적용사례에서 최적화 수렴이 양호하게 이루어졌으며 초기 모델에 비하여 전력손실이 크게 감소되는 최적모델이 제시되었다.

[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.l 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. Lejion, "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 Material, pp.849-855, 2000.

[5] M Gen and R Cheng, *Genetic Algorithms and Engineering Design*, Wiley, 1997.

[6] K Preis, C Magele, and O Biro, "FEM and Evolution Strategies in the Optimal Design of Electromagnetic Devices," IEEE Trans on Magnetics, vol.26, no.5, pp.2181-2183, 1990.