

## 배전용 변압기의 권선 고장시 전자력 계산

하정우<sup>1</sup>, 김한들<sup>1</sup>, 신판석<sup>1</sup>, 이병성<sup>2</sup>, 한상옥<sup>3</sup><sup>1</sup>홍익대학교 전기공학과, <sup>2</sup>한국전력연구원, <sup>3</sup>충남대학교 전기공학과

### An Electromagnetic Force Caclulation for Winding Faults in Power Distribution Transformer

Jung-Woo Ha, Han-Deul Kim, Pan-Seok Shin, Byung-Sung Lee, Sang-Ok Han

Hongik University, KEPRI, Chungnam National University

**Abstract** – 변압기 권선내에서 발생되는 고장을 유한요소 전자계해석 프로그램(FLUX2D)을 이용하여 해석하였다. 50kVA, 13200/230(V) 단상 변압기의 권선간 고장시 전자계해석을 1차측 권선고장(turn-to-earth)과 2차측 권선고장(turn-to-turn)을 모의하여 해석하였다. 권선내부 고장 및 2차측 단락시 누설 자속분포, 권선간의 힘의 분포, 변압기 내부 권선의 정상시와 단락시의 전자계비교, 단락권선과 권선 상호간의 전자계 해석을 통하여 변압기 미치는 영향을 해석하였다. 변압기 권선간 단락시의 전자력 분석결과는 변압기의 절연설계 및 단락기계력에 대한 프레임 구조 설계를 위한 자료로 활용될 수 있다.

### 1. 개 요

배전용 변압기의 고장 발생시 수용가 측의 피해와 변압기 폭발시 인명 피해를 방지하기위해 변압기의 내부고장의 정확한 해석이 필요하다. 본 연구에서는 단상 변압기를 유한요소 전자계 해석 프로그램(Flux2D)을 이용하여 변압기 권선내에서의 권선 고장시 전자력특성을 해석하기 위하여 50kVA, 13200/230(V) 배전용 PAD변압기를 모의해석하여 1차측 권선고장(turn-to-earth)과 2차측 권선고장(turn-to-turn)시 1차 및 2차측 단락전류, 권선간의 힘의 분포 등을 해석하였다.

### 2. 50kVA 변압기 모의 해석

PAD 변압기의 권선의 고장을 모의하기 위한 model로 표1과 같이 50KVA, 13200/230(V) 외철형 변압기를 설정하였다. 변압기의 도면은 그림 1과 같이 표현하였으며, 코일은 297, 396, 396, 99, 87, 68, 47번으로 둑어서 구성되어 있고, 2차측은 12번씩 나누어 구성되었다. 1차측 코일의 직경은 1.5mm의 에너멜 코팅된 원형 도체를 사용하였다. 2차측 코일은 단면적이  $3.2 \times 7.5 \text{ mm}^2$ 인 각선으로 24번으로 구성되고, 각 도체에는 Nomex 절연지와 바니쉬 합침으로 절연된다.

표 1. 변압기 사양

분류	설명
정격	50KVA, 60Hz
코어형태	외철형 (shell 타입)
전압	13200/230 (V)
코아재질	$B_s=1.9\text{T}$ , 초기비투자율=14958
권선비	1400:24
깊이	140mm

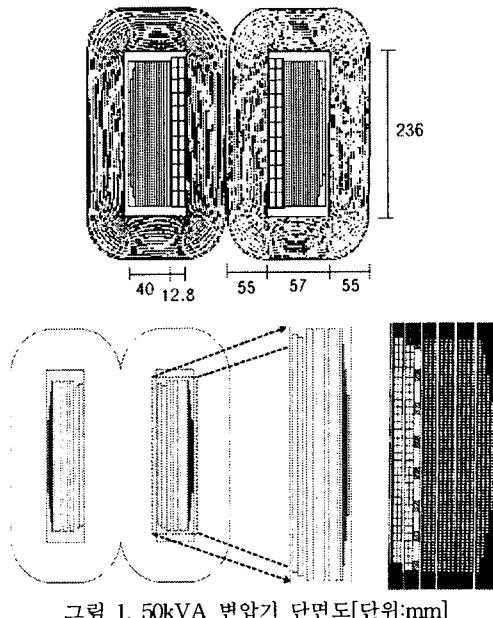


그림 1. 50kVA 변압기 단면도[단위:mm]

#### 2.1 1차측 권선 고장(turn-to-turn) 해석

변압기 1차측 권선의 Turn간 고장을 모의하기 위하여 그림 3은 1차측 단락 회로도로 코일은 그림 2의 권선을 나타낸 것이다. 1차측의 권선중 일부인 298번부터 693번인 B3, B4(396번)의 코일을 단락으로 모의하고, 인덕턴스 또한 단락코일 턴수에 비례하여 표2와 같이 나누어 코일과 함께 스위치(s/w)의 스위칭 시간을 조절하여 단락을 모의하였다.

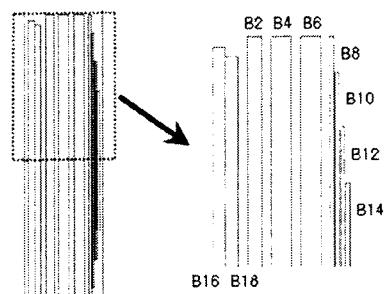


그림 2. 변압기 권선의 단면도

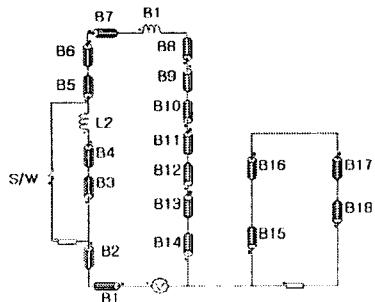


그림 3. 1차측 권선단락 모의를 위한 변압기 회로도

표 2. 50kVA 1차측 단락모의 회로도의 각 정수

표 시	기 호	내 용
Coil	B1, B2	297 Turns 1.060Ω
Coil	B3, B4 (단락)	396 Turns 1.414Ω
Coil	B5, B6	396 Turns 1.414Ω
Coil	B7, B8	99 Turns 0.353Ω
Coil	B9, B10	87 Turns 0.310Ω
Coil	B11, B12	68 Turns 0.727Ω
Coil	B13, B14	47 Turns 0.167Ω
Coil	B15, B16	12 Turns 0.75mΩ
Coil	B17, B18	12 Turns 0.75mΩ
R		저항 3.871Ω
L <sub>1</sub>		인덕턴스 2.469 mH
L <sub>2</sub>		인덕턴스 0.974 mH

그림 3에서 V는 1차측 전압으로 13200V, B1부터 B14는 1차측 코일, B3과 B4는 1차측에서의 단락된 코일을 나타낸다. 1차측 단락을 모의하기 위하여 스위치를 이용하여 단락회로를 구성하였다. 그림 5는 단락시 권선에 걸리는 자속밀도를 나타낸 것으로 자속밀도는 최대 1.468(Tesla)로 분포 되었고, 정상시  $6.15 \times 10^{-3}$ (Tesla)보다 훨씬 많은 자속밀도가 나타난다. 그림 7은 단락권선의 전류가 최대일 때 그림 6의 단락권선의 단면중 1부분에서 2부분까지의 단면에 걸리는 힘(법선방향)을 나타낸 것으로 힘의 밀도는 최고  $1.489 \times 10^3$ (N/mm<sup>3</sup>)로 정상시  $1.188 \times 10^2$ (N/mm<sup>3</sup>)보다 많은 힘이 법선 방향이 바깥 쪽으로 걸리는 것으로 확인 하였다. 그림 8과 같이 단락권선의 전류는 단락 전에 비해 644.2(A)로 증가 하였다. 단락권선의 전자력은 단락전 평균치는 34(N)와 최대치는 36(N)이었고, 단락후 평균치는 93(N)과 최대치는 106(N)으로 단락전에 비하여 단락 후에 걸리는 힘이 증가되고, 다른 권선에 영향을 주어 다른 권선에서도 전자력의 증가를 가져온다.

전자력은 Virtual works method와 라플라스 법칙을 이용하여 계산할 수 있으며, 본 프로그램에서는 계산의 정확도를 높이기 위하여 식(1)과 같이 Laplace법칙을 이용하였다.

$$\vec{F} = \iiint \vec{j} \times \vec{B} dv \quad (1)$$

여기서  $\vec{j}$ 는 전류밀도,  $\vec{B}$ 는 자속밀도를 나타낸다.

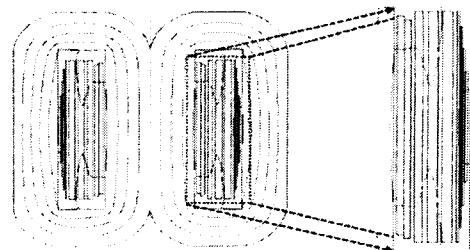


그림 4. 단락시 차속선도



그림 5. 단락시 자속밀도

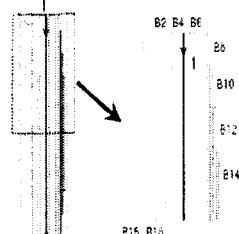


그림 6. 단락권선 단면도

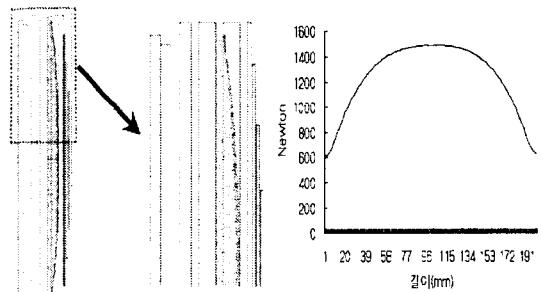


그림 7. 단락권선 단면에 걸리는 힘

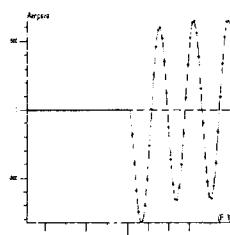


그림 8. 단락권선 전류

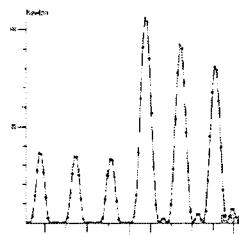


그림 9. 단락권선에 유도되는 전자력

## 2.2 2차측 권선 고장시(turn-to-earth) 해석

2차측 단락해석은 1차측 단락과 같은 모델로 2차측의 24년 중 12년에서 단락이 발생한 것을 모의하였다.

그림 10은 변압기 2차측 권선(B17, B18)의 단락 모의하기 위한 회로도로서 B17과 B18을 스위칭 시간을 이용하여 simulation 하였다.

표 3. 50kVA 2차측 단락모의 회로도의 각 정수

Coil B15, B16	12 Turns	0.75mΩ
Coil B17, B18 (단락)	12 Turns	0.75mΩ
R	저항	3.871Ω
L	인덕턴스	3.443 mH

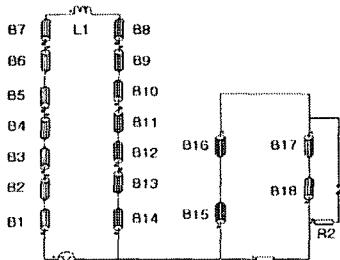


그림 10. 2차측 권선단락 변압기 회로도

그림 11은 단락시 권선에 걸리는 자속밀도를 나타낸 것으로 자속밀도는 최대 0.885(Tesla)로 분포 되었고, 정상시  $6.15 \times 10^{-3}$ (Tesla)보다 많은 자속밀도가 나타난다. 그림 13은 단락 권선의 전류가 최대일때 그림 12의 단락권선의 단면중 1부분에서 2부분까지의 단면에 걸리는 힘은 최고  $8.45 \times 10^4$ (N/mm<sup>3</sup>)로 정상시  $5.41 \times 10^3$ (N/mm<sup>3</sup>)보다 많은 힘의 법선 방향이 안쪽으로 걸리는 것으로 확인 하였다. 그림 15는 2차측 단락시 단락부분의 권선에 유도되는 전자력을 나타낸 그래프이다. 단락전 전자력의 평균치와 최대치는 1(N)미만이었고, 단락후 평균치는 400(N)과 최대치는 485(N)로 단락전에 비하여 단락후에 걸리는 전자력이 급격히 증가되고, 다른 권선에 영향을 주어 다른 권선에서도 전자력의 증가를 가져옴을 알 수 있다. 또한 단락권선에 걸리는 전류도 24.92(KA)로 증가됨을 알 수 있다.

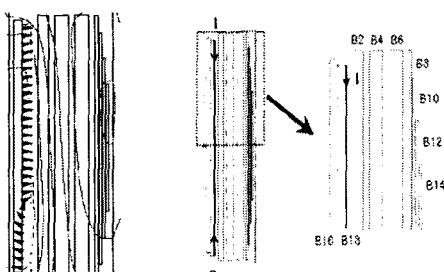


그림 11. 단락시 자속밀도

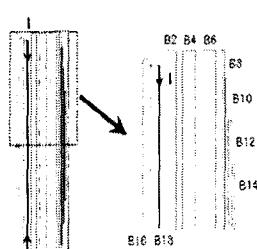


그림 12. 단락권선 단면도

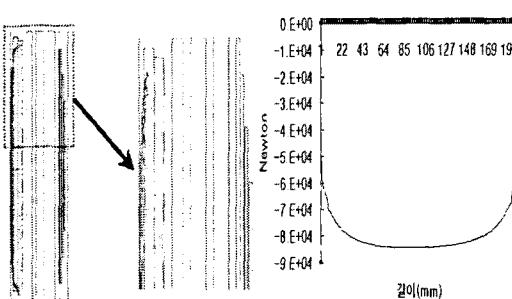


그림 13. 단락권선 단면에 걸리는 힘

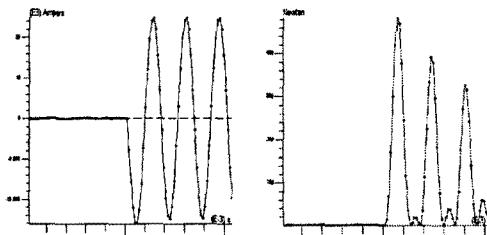


그림 14. 단락권선 전류

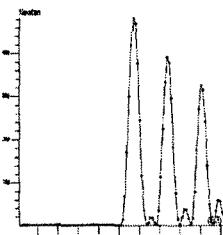


그림 15. 단락권선 유도되는 전자력

### 3. 결 론

본 논문에서는 배전용 PAD변압기의 권선 고장시 단락권선의 전자력과 전류의 특성을 해석하기 위하여 50kVA급 단상 변압기를 FEM 프로그램을 이용하여 1차측 권선고장(turn-to-earth)과 2차측 권선고장(turn-to-turn) 시 단락권선의 전자력과 전류의 변화를 확인하였다.

1차측 단락시 단락권선의 전자력은 최대100(N), 평균 92(N)로 전류는 644.2(A)로 증가하고, 2차측 단락시 단락권선의 전자력은 최대485(N), 평균400(N)의 큰힘이 걸림이 확인 되었고, 전류 또한 24.92(KA)로 1차측에 비해 많은 힘과 전류가 발생됨을 확인하였다. 1차측, 2차측 고장시 전자력의 증가는 다른 권선의 전자력 증가를 일으키며, 권선 상호간에 영향을 주어 변압기 특성의 변화를 가져온다. 단락시 증가하는 단락권선의 전자력과 전류의 증가로 인한 변압기 특성 변화는 변압기 고장과 수용가 측의 피해에 영향을 주게 되므로 기계적인 단락 강도 설계에 반영해야 할 것이다.

본 연구는 2005년도 전력산업 기술개발사업으로 이루어졌음

### [참 고 문 헌]

- [1] 산업자원부, “지중배전용 변압기 신뢰도 향상에 관한 연구”, 중간보고서, 2004년 3월
- [2] H. Wang, K. L. Butler, “Finite Element Analysis of Internal Winding Faults in Distribution Transformer”, power delivery, IEEE Transactions, VOL. 16, NO. 3, JULY 2001
- [3] H. Wang, “Models for Short Circuit and Incipient Internal Faluts in Single-Phase Distribution Transformers”, Ph.D Thesis Texas A&M University, May 2001
- [4] 하정우, 김철, 김한들, 신관석, 이병성, 한상우, “Finite Element Analysis of Internal Winding Faults in PAD-Type Distribution Transformer”, 2005년 5월 대한전기학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 108-110