

소용량 배전용 변압기 권선의 전자력 계산

하정우<sup>1</sup>, 신판석<sup>1</sup>, 이병성<sup>2</sup>, 송일근<sup>2</sup>, 한상옥<sup>3</sup>

<sup>1</sup>홍익대학교 전기공학과, <sup>2</sup>한국전력연구원, <sup>3</sup>충남대학교 전기공학과

An Electromagnetic Force Calculation of the Primary Winding in Power Distribution Transformer

Jung-Woo Ha<sup>1</sup>, Pan-Seok Shin<sup>1</sup>, Byung-Sung Lee<sup>2</sup>, Il-Keun Song<sup>2</sup>, Sang-Ok Han<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Hongik University, <sup>2</sup>KEPRI, <sup>3</sup>Chungnam National University

**Abstract** - 본 연구에서는 전력계통에서 발생하는 고장 전류에 의해서 변압기의 1차측 코일에 유도되는 전자력의 크기를 유한요소 전자계해석 프로그램(FLUX2D)을 이용하여 해석하였다. 50kVA, 13200/230(V) 단상 변압기의 권선간 전자력계산을 축대칭FEM을 이용하여 각방향의 전자력을 분석하였다. 누설자속분포, 전류유입시 권선 상호간에 작용하는 힘의 변화와 힘의 분포, 변압기 내부 권선의 정상시와 고장전류시의 전자계비교를 전자계 해석을 통하여 변압기에 미치는 영향을 해석하였다. 변압기에 대전류가 유입되는 경우의 전자력 분석결과를 변압기의 절연설계 및 단락기계력에 대한 프레임 구조 설계를 위한 자료로 활용된다.

표 1. 변압기 사양

분 류	실 명
정 격	50KVA, 60Hz
코어형태	외철형 (shell 타입)
전 압	13200/230 (V)
코어재질	$B_s=1.9T$ , 초기비투자율=14958
권 선 비	1400:24
깊 이	140mm

1. 개 요

배전용 변압기의 고장 발생시 수용가 측의 피해와 변압기 폭발시 인명 피해를 방지하기 위해 변압기의 내부고장의 정확한 해석이 필요하다. 본 연구에서는 단상 변압기를 유한요소 전자계 해석 프로그램(Flux2D)을 이용하여 변압기 권선의 고장전류 유입시의 권선간의 전자력특성을 해석하기 위하여 50kVA, 13200/230(V) 배전용 PAD변압기를 모의해석 하여 고장전류시 권선간의 힘의 분포와 전자력을 통해 변압기에 미치는 영향을 계산하였다.

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, 1차측 코일은 바깥쪽부터 47, 68, 87, 99, 396, 396, 297턴으로 묶어서 구성되어 있고, 2차측은 12턴씩 나누어 구성되었다. 1차측 코일간의 힘의 분포를 알아보기 위하여 그림 2와 같이 4개의 층으로 구성된 396턴을 좀더 세밀하게 나누어 안쪽부터 99턴과 197턴으로 나누고 나머지 100턴을 코일의 시작과 끝부분을 1턴씩 2개로 나누고 가운데를 1턴씩 6개로 나머지부분을 45턴으로 구성하였다. 1차측 코일의 직경은 1.5mm의 에너멜 코팅된 원형 도체를 사용하였다. 2차측 코일은 단면적이  $3.2 \times 7.5\text{mm}^2$ 인 각선으로 24턴으로 구성되고, 각 도체에는 Nomex 절연지와 바니쉬 합침으로 절연된다.

2.1 99턴 단락시 모의 해석

그림 3은 변압기 고장전류를 모의하기 위한 회로도이다. 권선간의 전자력계산과 힘의분포를 알아보기 위하여 1차측의 권선중 일부인 396턴을 총 14개로 표2와 같이 나누고 397턴부터 496턴을 단락을 스위치(s/w)의 스위칭시간을 조절하여 모의하였다.

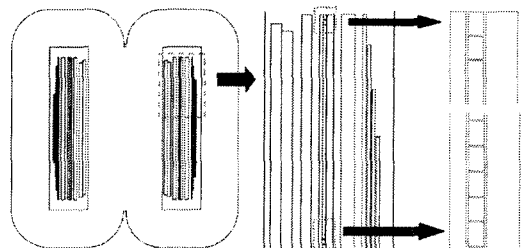


그림 1. 변압기 권선의 단면도

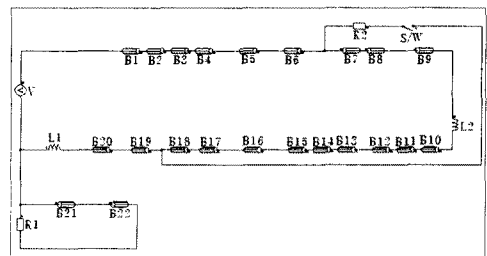


그림 3. 1차측 권선단락 모의 회로도(99턴 단락시)

표 2. 50kVA 1차측 단락모의 회로도의 각 정수

표시 기호	내 용
Coil B1	47 Turns 0.335 Ω
Coil B2	68 Turns 0.485 Ω

Coil B3	87 Turns	0.621 Ω
Coil B4	99 Turns	0.707 Ω
Coil B5	396 Turns	2.828 Ω
Coil B6	197 Turns	1.414 Ω
Coil B7~8, B10~15, B17~18	1 Turns	0.714m Ω
Coil B9, B16	45 Turns	0.321 Ω
Coil B19	99 Turns	0.707 Ω
Coil B20	297 Turns	2.121 Ω
Coil B21~22	12 Turns	1.5 mΩ
L <sub>1</sub>	인덕턴스	3.199 mH
L <sub>2</sub>	인덕턴스	0.243 mH
R	저항	3.871 Ω

그림 4와 5는 자속방향의 변화시를 나타낸 것으로 자속 방향의 변화시 단락후 자속방향 변화때 단락권선에 의하여 자속방향의 변화시 많은 영향을 준다. 그림 8과 같이 단락권선의 전류는 단락 전에 비해 1.94(KA)로 증가 하였다. 그림 6은 단락시 단락권선의 전자력 방향을 나타낸 것으로 단락후 전자력의 방향은 상하로 형성되고, 그림 7은 단락권선의 전자력으로 권선의 양단에서 단락전 최대치는 위쪽이  $2.8 \times 10^7 (N/mm^3)$ 으로 아래쪽은  $2.7 \times 10^7 (N/mm^3)$ 이었고, 단락후 최대치는 위쪽이  $3.37 \times 10^8 (N/mm^3)$ 으로 아래쪽은  $3.34 \times 10^8 (N/mm^3)$ 으로 단락전에 비하여 단락 후에 단락권선의 양단에서 강한 전자력이 발생되어 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.

$$\vec{F} = \iiint \vec{J} \times \vec{B} dv \quad (N/mm^3) \quad (1)$$

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

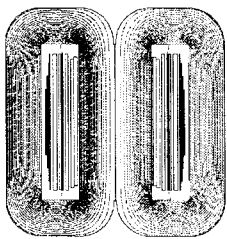


그림 4. 정상시 자속선도

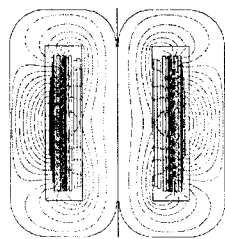


그림 5. 단락시 자속선도

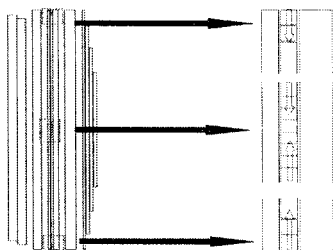


그림 6. 단락시 단락권선의 전자력 방향

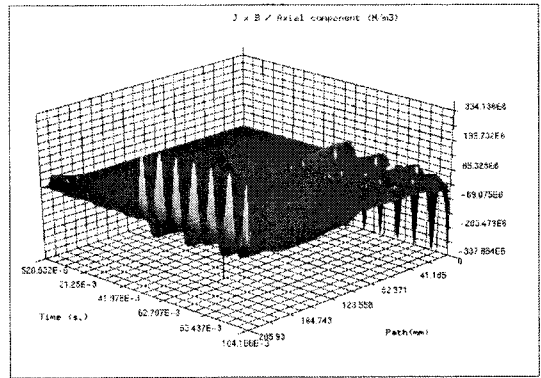


그림 7. 단락권선 단면에 걸리는 힘

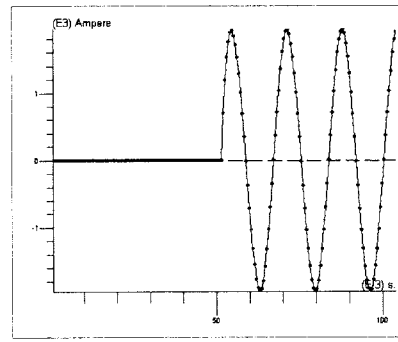


그림 8. 단락권선 전류

## 2.2 45턴 단락시 모의 해석

99턴 단락시와 같은 조건하에 397턴부터 446턴의 단락을 그림 9의 회로로 단락을 모의 하였다.

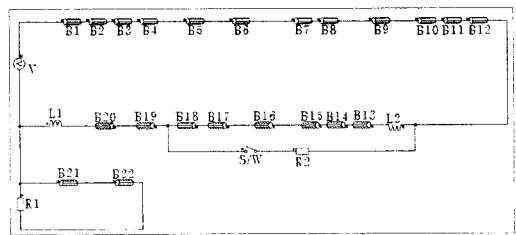


그림 9. 1차측 권선단락 모의 회로도(49턴 단락시)

그림 10과 11은 자속방향의 변화시를 나타낸 것으로 단락후 자속방향 변화때 단락권선과 정상권선에 의하여 자속이 많은 영향을 준다. 그림 14와 같이 단락권선의 전류는 단락 전에 비해 1.83(kA)로 증가 하였다. 그림 12는 단락시 단락권선의 전자력 방향을 나타낸 것으로 단락후 전자력의 방향은 상하로 형성되고, 단락시 전자력은 99턴 단락시보다 49턴의 단락시 단락권선과 정상권선과의 단락이 시작되는 곳에서  $7.78 \times 10^8 (N/mm^3)$ 으로 위쪽은  $3.91 \times 10^8 (N/mm^3)$ 으로 전자력이 강하게 나타난다. 그림 7은 단락권선의 전자력으로 권선의 양단에서 단락전 최대치는 위쪽이  $2.8 \times 10^7 (N/mm^3)$ 으로 아래쪽은  $2.7 \times 10^7 (N/mm^3)$ 이었고, 단락후 최대치는 위쪽이  $7.78 \times 10^8$

( $N/mm^3$ )으로 아래쪽은  $3.91 \times 10^8 (N/mm^3)$ 으로 단락전에 비하여 단락 후에 단락권선의 양단에서 강한 전자력이 발생되어 다른 권선에 영향을 주어 다른 권선에서도 전자력의 증가를 가져온다.

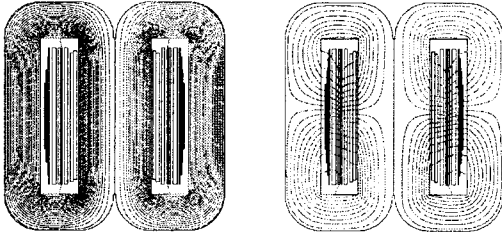


그림 10. 정상시 자속선도    그림 11. 단락시 자속선도

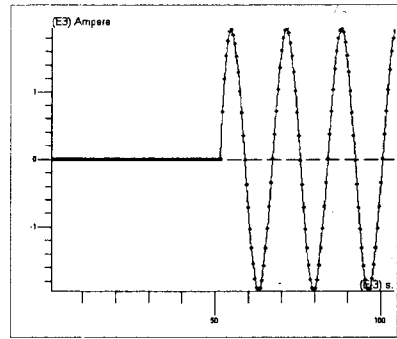


그림 14. 단락권선 전류

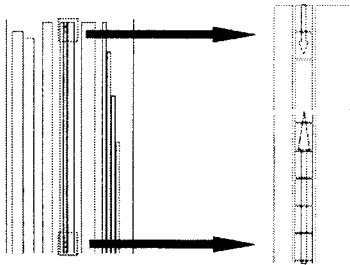


그림 12. 단락시 단락권선의 전자력 방향

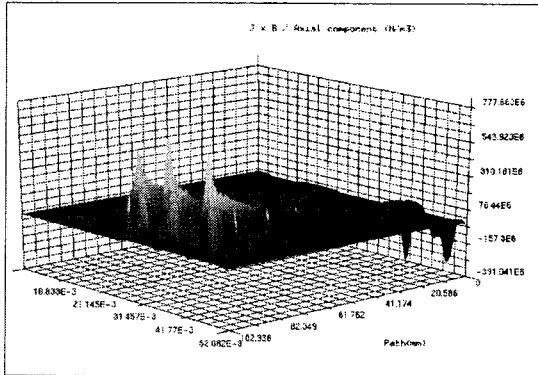


그림 13. 단락권선 단면에 걸리는 힘

### 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)시 단락권선의 전자력과 전류의 변화를 확인 하였다.

1차측 99턴 단락시 단락권선의 전자력은 최대  $3.37 \times 10^8 (N/mm^3)$ , 1차측 49턴 단락시 단락권선의 전자력은 최대  $7.78 \times 10^8 (N/mm^3)$ 으로 권선층 중간에서 단락시 정상권선과의 작용으로 인하여 99턴 단락시에 비하여 전자력이 많이 발생하였다. 1차측 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 단락강도 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 ThesinTexas A&M University, May 2001
- [4] 하정우, 김철, 김한들, 신판석, 이병성, 한상욱, “Finite Element Analysis of Internal Winding Faults in PAD-Type Distribution Transformer”, 2005년 5월 대한전기학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 108-110