

유한요소법을 이용한 배전용 PAD변압기 권선고장시의 전자계해석

하정우¹, 김철¹, 김한돌¹, 신판석¹, 이병성², 한상욱³

¹홍익대학교 전기공학과, ²한국전력연구원, ³충남대학교 전기공학과

Finite Element Analysis of Internal Winding Faults in PAD-Type Distribution Transformer

Jung-Woo Ha, Chul Kim, Han-Deul Kim, Pan-Seok Shin, Byung-Sung Lee, Sang-Ok Han
Hongik University, Kepri, Chungnam National University

Abstract - 배전용 변압기의 경우 고장 발생시 직접적인 수용가 측에 피해가 발생되며, 변압기 폭발시 인명 피해까지 우려되고 있다. 변압기 내부 고장으로 절연유가 분출될 경우가 가장 심각한 고장으로 이러한 피해를 방지하기 위해서는 내부 고장에 대한 정확한 해석이 필요하다. 본 연구에서 변압기 권선내에서 발생하는 고장을 유한요소 전자계해석 프로그램(FLUX2D)을 이용하여 해석하였다. 50kVA, 13200/230(V) 단상 변압기의 권선고장시 전자계해석, 1차측 권선고장(turn-to-earth)과 2차측 권선고장(turn-to-turn)을 모의하여 해석하였다. 또한, 권선 내부 고장 및 2차측 단락시 누설자속분포, 1차 및 2차측 고장전류, 권선간의 힘의분포 등을 해석하였다. 분석결과와 변압기의 절연설계 및 단락기계력에 대한 프레임 구조 설계를 위한 자료로 활용된다.

변압기의 해석은 Flux2D라는 유한요소 전자계 해석 프로그램을 이용하였다. 변압기의 도면은 그림1과 같이 표현하였으며, 1차측 코일 가장 바깥 측에 위치해있으며 저압 2차측은 1차측 안쪽에 위치하여 2개의 코일이 연결되어있다.

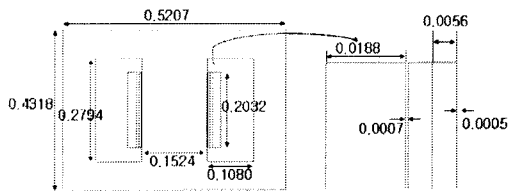


그림 1. 25kVA 변압기의 단면도[단위: mm]

1. 서 론

전력수요량이 지속적으로 증가하고 있으며, 이에 따라 배전용 변압기의 수요도 증가하고 있다. 배전용 변압기 품질개선을 위한 투자가 적어 좀처럼 고장율이 줄어들고 있지 않은 것이 현실이다. 배전용 변압기의 고장 발생시 수용가 측의 피해와 변압기 폭발시 인명 피해를 방지하기 위해 변압기의 내부고장의 정확한 해석을 필요하다. 본 연구에서는 단상 변압기를 유한요소 전자계 해석 프로그램(Flux2D)을 이용하여 변압기 권선내에서의 권선 고장시 특성을 해석하기 위하여 1단계에서 25kVA 단상 변압기를 모의해석 하고, 2단계에서 50kVA 배전용 PAD변압기를 모의해석 하여, 1차측 권선고장(turn-to-earth)과 2차측 권선고장(turn-to-turn)시 2차측 단락시 누설자속분포, 1차 및 2차측 고장전류, 권선간의 힘의분포 등을 해석하였다.

2.1.1 1차측 권선 고장(turn-to-earth) 해석

배전용 변압기의 내부 권선 단락고장을 해석하기 위하여 유한요소 프로그램을 이용하였다. 그림2는 1차측에서 총 780턴중 651~780턴이 권선단락으로 가정하여 모델링을 하였고, V는 1차측 전압원으로 7200V, B2와 B6은 1차측 코일, B1과 B5는 1차측에서의 단락된 코일을 나타내며, B4, B3, B7, B8은 2차측 코일을 표현한 것이다. 1차측 단락을 모의하기 위하여 스위치를 이용하여 단락회로를 구성하였다.

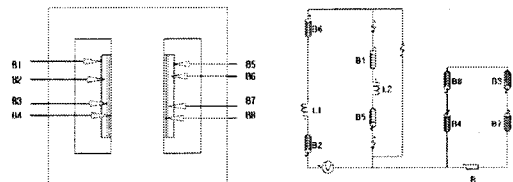


그림 2. 1차측 권선단락 변압기 도면과 회로도

2. 본 론

2.1 25kVA 변압기 모의 해석

PAD 변압기의 권선의 고장을 모의하기 위한 model로 표1과 같이 구성하였다.

표 1. 변압기 사양

| 분 류 | 설 명 |
|------|------------------------|
| 정 격 | 25kVA, 60Hz |
| 코어형태 | 외철형 (shell 타입) |
| 전압 | 7200/240 (V) |
| 임피던스 | 1.75% |
| 리액턴스 | 1.62% |
| 권선비 | 780:26, 2차측에 13턴씩 직렬연결 |
| 코어재질 | 1차측: 구리, 2차측: 알루미늄 |

표 2. 1차측 단락모의 회로도의 각 정수

| 표시 기호 | 내 용 | |
|------------------|-----------|------------|
| Coil B2, B6 | 650 Turns | 2.779 Ω |
| Coil B1, B5 | 130 Turns | 0.555 Ω |
| Coil B4,B3,B7,B8 | 13 Turns | 0.002 Ω |
| R | 저항 | 2.304 Ω |
| L ₁ | 인덕턴스 | 0.07425 mH |
| L ₂ | 인덕턴스 | 0.01485 mH |

인덕턴스의 계산은 표 1에 나와 있는 %임피던스와 %리액턴스를 이용하여 계산하였다.

정격사양을 이용하여 전류(I=3.47A)와 기준 임피던스(Z=2073.6Ω)를 구하여, 저항과 리액턴스를 구한다.

$$Z = R_{eq} + jX_{eq} = 36.28 + 33.59 (\Omega) \quad (1)$$

와 같이 되어 인덕턴스는 식(2)에 의하여

$$L_{eq} = X_{eq} / 2\pi f \quad (2)$$

L_{eq} =89.1(mH)로 L_1 : 74.25(mH), L_2 : 14.85(mH)를 입력하였다. 2차코일 저항 Z_L =2.304Ω을 입력하였다. 또한 1차측 권선의 고장을 Pspice로 분석하기 위하여 회로도를 그림 3과같이 구성하였다. 모든 조건은 Flux2D와 같고 스위치 시간을 20ms 일때 U1 스위치는 개방되고, U2 스위치는 닫히게 되어 변압기의 1차측이 단락되는 것을 회로도로 표현했다.

$$L_p / L_s = (N_p / N_s)^2 \quad (3)$$

2차측 인덕턴스는 식(3)를 이용하여 계산하여 L_{p1} : 74.25(mH), L_{p2} : 14.85(mH), L_s : 0.099(mH)로 설정하였다.

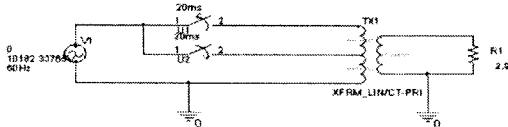


그림 3. 1차측 단락 Pspice 회로도

자속선도는 단락시 단락부분을 제외한 나머지 부분에서 만 형성되고 그림5의 그래프에서도 보이듯이 턴수가 780:26턴에서 650:26턴으로 30:1의 비율에서 25:1의 비율로 전류가 정상상태시보다 단락이후 증가됨을 알 수 있다. 단락권선의 전자력은 그림6과 같이 단락전 힘의 평균치와 실효값은 672(N), 423(N)과 최대치는 900(N)이었고, 단락후 평균치와 실효값은 814(N), 512(N)과 최대치는 1102(N)으로 단락전에 비하여 단락후에 걸리는 힘이 증가됨을 알 수 있다. Pspice 해석결과 1차측 단락시 전압, 전류가 증가함을 알수있다.

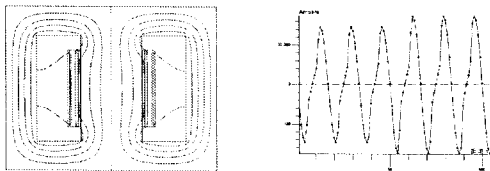


그림 4. 단락시 자속선도 그림 5. R의 전류 파형

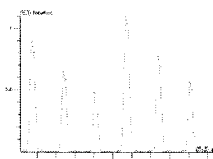


그림 6. 단락권선에 유도되는 전자력

2.1.2 2차측 권선 고장시(turn-to-earth) 해석

2차측 단락해석은 그림1의 2차측의 26턴중 13턴에서 단락이 발생한 것을 모의하여 2차측 코일중 13턴에 1차측 단락과 같이 스위치를 사용하였다. 인덕턴스 L_{s1} : 0.0495(mH), L_{s2} : 0.0495(mH)로 설정하였다.

자속선도는 단락시 단락부분을 제외한 나머지 부분에서

만 형성되는 것을 알 수 있고, 전류는 단락이후 감소됨을 알 수 있다. Pspice 해석결과 1차측 단락시 전압, 전류가 감소됨을 알 수 있다.

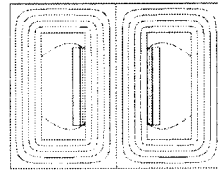


그림 7. 단락시 자속선도

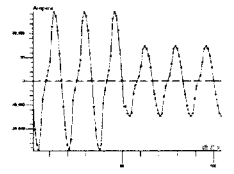


그림 8. R의 전류 파형

2.2 50kVA 변압기 모의 해석

PAD 변압기의 권선의 고장을 모의하기 위한 model로는 표3과같이 설정하였다. 변압기의 도면은 그림9와 같이 표현하였으며, 297, 396, 396, 99, 87, 68, 47턴으로 구성되어있고, 2차측은 12턴씩 나누어 구성되었다.

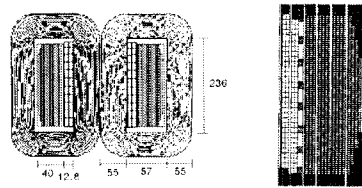


그림 9. 50kVA 변압기 단면도[단위:mm]

표 3. 변압기 사양

| 분류 | 설명 |
|------|---|
| 정격 | 50KVA, 60Hz |
| 코어형태 | 외철형 (shell 타입) |
| 전압 | 13200/230 (V) |
| 코어재질 | 포화자속밀도=1.9T, 초기비투자율=14958(G) |
| 권선비 | 1400:24 |
| 권선 | 1차측: 직경 1.5mm 에너멜 코팅된 원형 도체 2차측: 단면적 3.2×7.5mm ² 각 도체에 절연지가 감겨져있음 |
| 길이 | 140mm |

2.2.1 1차측 권선 고장(turn-to-turn) 해석

배전용 변압기의 1차측의 권선중 일부인 298턴부터 693턴까지의 단락을 해석하였다. 그림10은 1차측 단락 회로도이다. 그림11은 유한요소 해석을 하기 위하여 삼각요소로 분할된 요소분할도로서 10,898개 요소와 21,829개의 node로 분할되었다.



그림 10. 1차측 권선단락 변압기 회로도

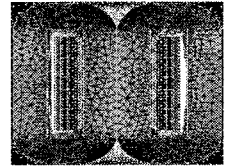


그림 11. 요소분할도

그림10의 V는 1차측 전압원으로 13200V, B1부터 B14는 1차측 코일, B3과 B4는 1차측에서의 단락된 코일을 나타낸다. 1차측 단락을 모의하기 위하여 스위치를 이용하여 단락회로를 구성하였다.

표 4. 50kVA 1차측 단락모의 회로도의 각 정수

| 표시 기호 | 내용 | |
|----------------------|-----------|----------|
| Coil B1, B2 | 297 Turns | 1.060 Ω |
| Coil B2,B4,B5,B6 | 396 Turns | 1.414 Ω |
| Coil B7, B8 | 99 Turns | 0.353 Ω |
| Coil B9, B10 | 87 Turns | 0.310 Ω |
| Coil B11, B12 | 68 Turns | 0.727 Ω |
| Coil B13, B14 | 47 Turns | 0.167 Ω |
| Coil B15,B16,B17,B18 | 12 Turns | 0.75mΩ |
| R | 저항 | 3.871 Ω |
| L ₁ | 인덕턴스 | 2.469 mH |
| L ₂ | 인덕턴스 | 0.974 mH |

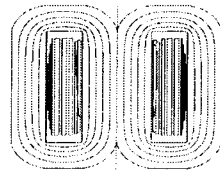


그림 16. 단락시 자속선도

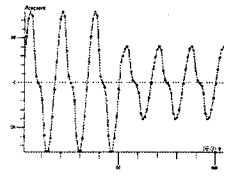


그림 17. R의 전류파형

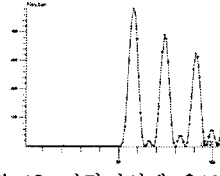


그림 18. 단락권선에 유도되는 전자력

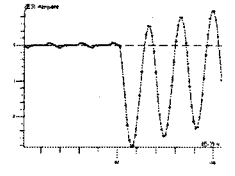


그림 19. 단락권선 전류

자속선도는 단락시 단락부분을 제외한 나머지 부분에서만 형성되는 것을 알 수 있다. 그림12는 정상 시부터 0.05초에 단락이 일어났을 때의 R에서의 전류 그래프이다. 그래프에서도 보이듯이 턴수가 1400:24턴에서 1004:24턴으로 58:1의 비율에서 41:1의 비율로 전류가 증가됨을 알 수 있다. 단락권선의 전자력은 단락전 평균치는 34(N)과 최대치는 36(N)이었고, 단락후 평균치는 93(N)과 최대치는 106(N)으로 단락전에 비하여 단락후에 걸리는 힘이 증가됨을 알 수 있다. 또한 단락권선에 걸리는 전류는 한주기마다 점점 증가한다.

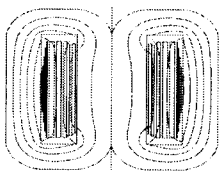


그림 12. 단락시 자속선도

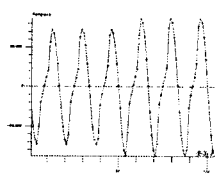


그림 13. R의 전류파형

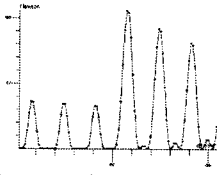


그림 14. 단락권선에 유도되는 전자력

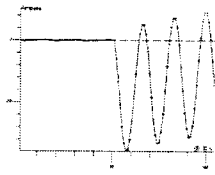


그림 15. 단락권선 전류

3. 결 론

본 논문에서는 배전용 PAD변압기의 권선내에서 권선 고장시 특성을 해석하기 위하여 25kVA급과 50kVA급 단상 변압기를 FEM 프로그램과 Pspice를 이용하여 모 N(turn-to-earth)과 2차측 권선고장(turn-to-turn)시 자속선도와 전류파형을 변화를 확인하였다. 또한 단락시 단락권선에 유도되는 전자력과 전류의 양이 증가하는 특성을 확인하였다. 특히 2차측 고장시 전자력은 최대 485(N), 평균400(N)의 큰 힘이 걸림이 확인 되었고, 전류도 시간이 지남에 따라 점점 증가하는 현상을 나타내었다. 이와같이 단락시 증가하는 단락권선의 전자력과 전류의 증가는 수용가 측의 피해와 변압기 고장에 영향을 주게 되므로 기계적인 단락강도 설계에 반영해야 할 것이다.

[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 in Texas A&M University, May 2001

2.2.2 2차측 권선 고장시(turn-to-earth) 해석

2차측 단락해석은 1차측 단락과 같은 모델로 2차측의 24턴중 12턴에서 단락이 발생한 것을 모의하였다. 회로도는 1차측 단락시와 같이 스위치를 이용한 2차측에 단락회로를 모의한 하였다.

변압기의 단락시 자계는 그림16과 같이 단락부분을 제외한 나머지 2차측에만 형성되는것을 알 수 있다. 그림 17은 그래프에서도 보이듯이 턴 수가 1400:24턴에서 1400:12턴으로 58:1의 비율에서 116:1의 비율로 전류가 정상상태 시보다 단락이후 감소됨을 알 수 있다. 그림18은 2차측 단락시 단락부분의 권선에 유도되는 전자력을 나타낸 그래프이다. 단락전 힘의 평균치와 최대치는 1(N)미만이었고, 단락후 평균치는 400(N)과 최대치는 485(N)로 단락전에 비하여 단락후에 걸리는 힘이 증가됨을 알 수 있다. 또한 단락권선에 걸리는 전류는 처음에는 약하나 단락후 점점 증가한다(최대치 60A에서 단락후 988A까지 꾸준히 증가).