

## 수치해석을 이용한 배전용 변압기 권선 고장시의 전자력 계산방법 연구

(Electromagnetic Force Calculation of Internal Winding Fault in A Distribution Power Transformer by using A Numerical Program)

신판석\* · 하정우 · 정희준

(Pan-Seok Shin · Jung-Woo Ha · Hee-Jun Chung)

### 요 약

본 논문에서는 전력계통에서 발생하는 surge나 고장전류에 의해서 변압기의 고압측 권선에 선간단락이 발생할 경우 유도되는 전자력의 크기를 유한요소 전자계해석 프로그램을 이용하여 해석하는 방법을 제안하였다. 연구에서 사용된 배전용 변압기 model은 1[MVA], 22,900/220[V] 단상 외철형 Cable 권선형 변압기로서 권선간 단락을 모의하는 방법을 제안하고, FEM 프로그램(FLUX2D)을 이용하여 단락전류와 각방향의 전자력을 계산하고 분석하였다. 누설자속분포, 권선단락 시 전압 및 전류파형, 권선간에 작용하는 힘의 변화와 분포를 계산하였다. Simulation 방법의 타당성을 검증하기 위하여 이론치와 Pspice 프로그램을 이용하여 계산한 결과와 5[%] 이내의 오차율로 아주 잘 일치함을 확인하였다. 선간단락전류는 정격전류의 약 400배이며, 전자력도 20~200배 정도로 급증하였다. 본 연구의 결과는 배전용 변압기의 신뢰도 향상을 위하여 변압기 코일과 절연구조 설계에 유용한 정보를 제공하게 될 것이다.

### Abstract

In this paper, a simulation method of the internal winding fault is proposed to calculate winding current and electromagnetic force in a distribution power transformer by using FEM program. The model of the transformer is a single phase, 60[Hz], 1[MVA], 22.9[kV]/220[V], cable-type winding. The short-circuit current and electromagnetic force are calculated by FEM(Finite Element Method) program(Flux2D) and the results are verified with theoretical formula and PSPICE program. The simulation results are fairly good agreement with the other verified methods within 5[%] error rate. The turn-to-turn short-circuit current is 500 times of the rated current and the electromagnetic force is about 20~200times. The method presented in this study may serve as one of the useful tools in the electromagnetic force analysis of the transformer winding behavior under the short circuit condition for design of the structure.

Key Words : Electromagnetic Force, Internal Winding Fault, Power Transformer

\* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수

Tel : 041-860-2593, Fax : 041-863-7605, E-mail : pssshin@hongik.ac.kr  
접수일자 : 2007년 1월 6일, 1차심사 : 2007년 1월 15일, 심사완료 : 2007년 2월 8일

## 1. 서 론

배전용 변압기의 고장 발생시 수용가 측의 피해와 변압기 폭발시 인명 피해를 방지하기위해 변압기의 내부고장의 정확한 해석과 진단이 필요하다. 2004년 대에는 국내에서는 지중배전용 변압기의 신뢰도 향상을 위한 연구[1-2]가 진행되었다. 변압기의 권선 단락 연구는 1960년대에 M. Waters에 의하여 단상 또는 삼상 변압기의 권선의 tapping에 따른 축방향 전자력과 권선의 원통형 모양에 따른 radial방향 전자력계산 방법을 이용한 변압기 단락시 축방향과 Radial방향 전자력 계산 연구[3]로부터 A. B. Madin, B. Eng, J. Whitaker의 33.3[MVA]급 변압기의 고압측과 저압측의 권선의 높이 차이에 따른 다양한 권선 단락시 단락전류의 분석과 그로인한 축방향 힘의 발생과 분석에 관한 연구[4]가 진행되었다. 2002년에는 Mukund R. Patel에 의하여 변압기 내부권선이 적층형 권선일 때 단락시 발생하는 축방향 힘으로 인한 적층형 권선의 불안정상태와 변압기 특성 변화에 관한 연구가 진행되었다[5]. 수치해석적 방법으로는 H. Wang과 K. L. Butler에 의하여 변압기 내부권선 고압측 또는 저압측에서 다양한 부분의 권선단락을 모의하여 부하측의 전압과 전류의 정상시와 단락시의 모의해석을 하였다[6-7]. 이와 같은 변압기 내부 권선의 고장시 발생하는 단락전류와 전자력으로 인해 변압기의 구조와 절연에 심각한 문제를 발생시켜 변압기의 고장이 초래되고 계통 및 수용가에 원활한 전력을 공급할 수 없는 문제가 발생된다.

본 연구에서는 배전용 변압기를 유한요소 전자계 해석 프로그램(FLUX2D)을 이용하여 변압기 권선의 내부권선 단락을 모의하여 선간 전자력을 계산하는 방법을 제안하였다. 배전용변압기의 해석모델은 1[MVA], 22,900/220[V] 단상 외철형 Cable 권선형 변압기를 선정하여 모의해석 하고, 고장전류 시 고장전류, 전압, 누설자속분포 및 권선간의 힘의 분포와 전자력을 계산하였다. 또한 계산방법의 검증을 위하여 이론치와 Pspice 프로그램을 이용한 분석결과와 비교하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 변압기 권선의 전자력

변압기의 권선단락(turn-to-turn)시 단락전류는 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$I_{sc} = \frac{1.8\sqrt{2}MVA \times 10^6}{E \times e_z} \quad (1)$$

여기서  $I_{sc}$ 은 단락전류시 처음 최대 전류값, [MVA]는 변압기 용량, E는 선간전압,  $e_z$ 는 [%]전압 임피던스를 각각 나타낸다. 또한 단락전류에 의한 변압기의 1차측과 2차측은 radial 방향으로 힘이 그림 1과 같이 나타나게 되고, Radial 방향 전자력(Pr)은 식 (2)와 같으며 그림 2의 hoop stress ( $\sigma_{mean}$ )를 적용하여 식 (4)와 같은 식으로 권선전체에 발생하는 radial 방향의 전자력(Prw)을 계산할 수 있게 된다[3].

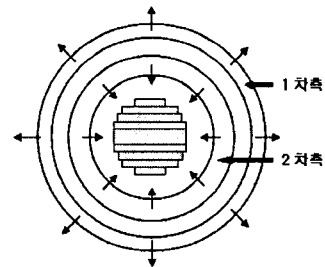


그림 1. Radial 방향 힘의 분포  
Fig. 1. Radial force distribution

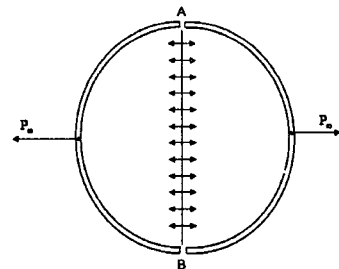


그림 2. 권선의 Hoop stress  
Fig. 2. Hoop stress of the winding

$$P_r = \frac{2\pi (ni)^2 \pi D_w}{100h} \text{ dynes} \quad (2)$$

$$= \frac{2\pi^2 (ni)^2 D_w}{h \times 10^{11}} \text{ tons}$$

$$\sigma_{mean} = \frac{(ni)^2 \pi D_w}{h n a_c \times 10^{11}} [\text{ton/in}^2] \quad (3)$$

$$= \frac{i^2}{h} \times \frac{n\pi D_w}{a_c} \times 10^{-11} [\text{ton/in}^2]$$

$$P_{rw} = 2\sigma_{mean} n_c a_c [\text{tons}] \quad (4)$$

변압기의 권선이 탭핑되었을 경우 변압기 코어의 자속밀도(Br)와 축방향의 전자력(PA) 계산은 권선과 코어와의 거리와 같은  $h_{eff}$ 의 가상변위 경계면(그림 4 참조)을 이용하여 잔여 암페어턴(residual ampere turn) 다이어그램(그림 3 참조)을 이용하여 다음과 같은 식 (6, 7)으로 계산할 수 있다[3].

$$B_r = \frac{4\pi}{10} \times \frac{a(\ni)}{2h_{eff}} [\text{gauss}] \quad (6)$$

$$P_A = \frac{2\pi a (ni)^2}{10^{11}} \times \frac{\pi D_m}{h_{eff}} [\text{tons}] \quad (7)$$

여기서  $h_{eff}$ 는 코어의 표면과 가상변위 경계면까지의 거리(inches),  $ni$ 는 권선의 기자력,  $D_m$ 는 변압기의 지름(inches)을 각각 나타낸다.

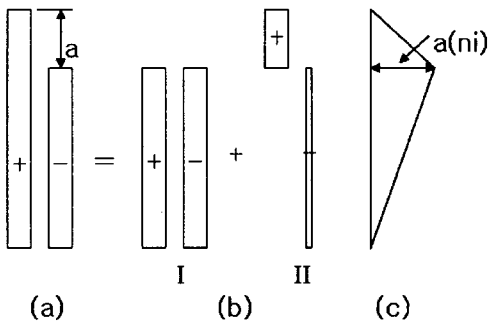


그림 3. 권선의 탭핑시 잔여 암페어턴 계산을 위한 다이어그램  
Fig. 3. Determination of residual ampere-turn diagram for winding tapped at one end

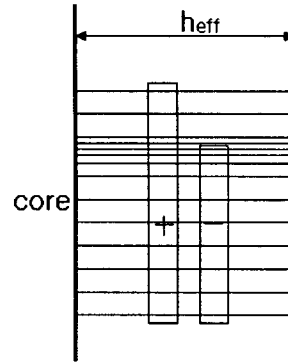


그림 4. 권선의 탭핑시 잔여 암페어턴 계산을 위한 가상변위 경계면  
Fig. 4. Virtual displacement boundary surface for calculating the residual ampere-turn

## 2.2 변압기 권선단락의 모의 해석

변압기 권선의 내부단락 고장을 모의하기 위하여 선정된 배전용변압기 Model의 사양을 표 1에 기술하였다. 주요사양은 단상, 60[Hz], 1[MVA], 22,900/220[V] 외철형 변압기이다. 변압기 해석모델의 단면은 그림 5와 같이 표현하였으며, 권선의 형태는 원통형으로 고압측은 Cable형 권선으로 저압측은 몰드 형태로 제작되어있다. 고압측 코일간의 힘의 분포를 알아보기 위하여 고압측의 권선중 221~330번째 권선의 단락을 모의하였다.

표 1. 해석 변압기 모델의 사양  
Table 1. Specification of the transformer model

| 분류    | 설명                   |
|-------|----------------------|
| 정격 용량 | 1[MVA], 60[Hz]       |
| 코어형태  | 외철형                  |
| 정격 전압 | 22900/220[V]         |
| 정격 전류 | 44/4545[A]           |
| 상수    | 단상                   |
| 코어재질  | $B_s=1.9T$ (PH-Core) |
| 권선비   | 104 : 1              |

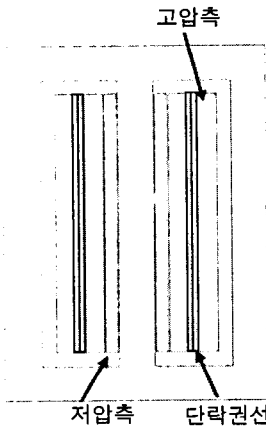


그림 5. 유한요소해석을 위한 1(MVA) 변압기 해석 모델  
Fig. 5. FE analyzing model of the 1(MVA) transformer

### 2.2.1 Pspice에 의한 모의 해석

1단계에서 변압기 권선단락시의 전류 및 전압파형을 계산하고 그 결과를 이론치와 유한요소 프로그램을 이용하여 계산한 결과를 비교 검토하기 위하여 Pspice 프로그램을 이용하여 동일한 model을 동일한 조건과 회로정수를 이용하여 simulation하였다. 그림 6은 1[MVA], 22,900/220[V]의 해석모델 변압기의 권선단락을 Pspice로 모의한 회로도이다. 스위치의 스위칭 시간을 이용하여 50[ms]에서 단락을 모의하여 계산한 결과를 그림 7과 8에서 보여주고 있다. 단락권선의 정상시와 단락시 전류를 파형으로 나타낸 것으로 50[ms]에서 단락시 권선의 전류가 54[A]에서 26.2[kA]로 급증한 것을 보여주고 있다. 이 계산결과는 이론값 및 FLUX시뮬레이션 결과와 유사한 값을 나타내고 있다.

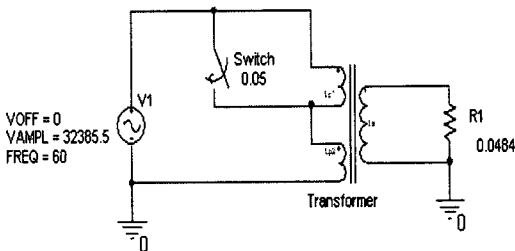


그림 6. 1(MVA) 변압기의 Pspice 회로도  
Fig. 6. Pspice circuit of the 1(MVA) transformer model

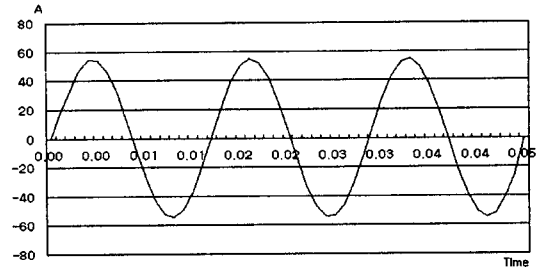


그림 7. 1차측권선의 전류(정상시)  
Fig. 7. Primary winding current(Steady-state)

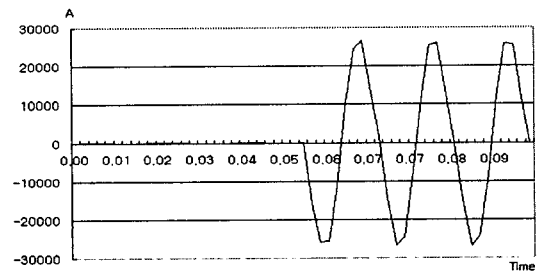


그림 8. 단락권선에 흐르는 전류(단락시)  
Fig. 8. Short-circuit current of winding fault (Transient)

### 2.2.2 FEM 모의 해석 model

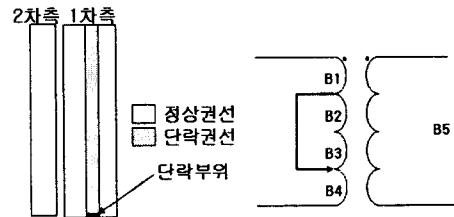


그림 9. 권선단락 회로도  
Fig. 9. Short-circuit of winding fault

변압기의 권선단락(turn-to-turn)을 모의하기 위하여 그림 9와 같이 권선의 층간단락부위를 선정하여 그림 10과 같이 회로도를 구성하였다. 단락의 위치는 임의로 선정할 수 있으며, 여기서는 가장 높은 전압이 발생하는 경우를 선정하여 분석하였다. 권선간의 전자력계산과 힘의 분포를 계산하기 위하여 고압측의 권선의 990턴(55턴×18층으로 구성됨)중 일부인 221~330번째 권선 단락을 스위치(s1)의 스위칭 시간을 조절하여 모의 하였음 221(5번째층)~330

번째(6번째층) 권선의 단락시 radial방향 전자기력이 가장 크게 나타나게 된다. B1-B5는 변압기의 권선을 나타내며 R1-R2는 저항을 나타낸다.

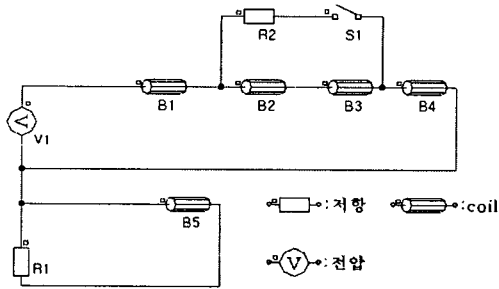


그림 10. 권선단락 모의 회로도(110턴 단락시)  
Fig. 10. Short-circuit simulation of winding fault

권선간의 전자기력은 Maxwell stress를 이용한 Laplace's law을 이용하여 계산할 수 있으며, 축대칭을 이용하여 축방향의 힘[N]과 Radial 방향의 stress(Newton/degrees)를 구할 수 있다. 본 프로그램에서는 계산의 정확도를 높이기 위하여 Maxwell stress를 이용한 계산방법을 택하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\vec{F} = \iiint_v \vec{J} \times \vec{B} dv \quad (7)$$

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

### 2.3 FEM 모의 해석 결과

FEM해석은 과도자계해석으로 이루어지며, 해석의 정확도를 높이기 위하여 sampling time을 1/20[Hz]로 하였고, 25,700개의 요소로서 1시간 20여 분이 소요된다. 유한요소프로그램으로 모의해석 한 결과 단락시의 누설자속분포, 전류 및 전압파형, 권선의 전자기력을 계산하였다. 그림 11은 자속밀도분포로 자속밀도가 높은 부분일수록 밝게 나타난다. 단락시 변압기단면의 자속밀도분포는 권선부분에 많은 누설자속이 발생했음을 알 수 있다. 그림 12 (a)는 단락시 자속분포계산을 위한 경로(path)를 표시

하며, 그림 12 (b)는 자속밀도의 분포를 정상시와 비교한 것이다. 단락시 변압기 전체에서 자속밀도가 증가하였고, 권선에서 자속밀도가 크게 증가하여 권선에서의 누설이 많이 발생함을 알 수 있다. 자속밀도와 전류밀도로 인하여 축방향과 radial방향으로 힘이 크게 발생하게 된다.

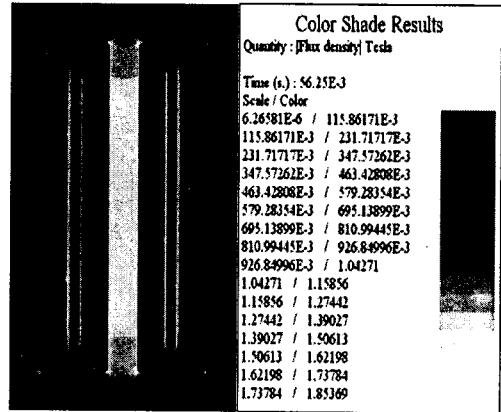


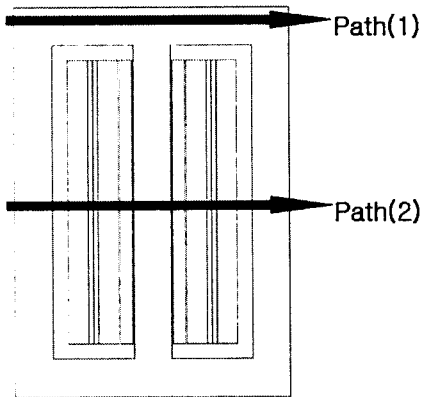
그림 11. 단락시 자속밀도  
Fig. 11. Flux density of winding fault

그림 13은 변압기권선단락이 221번째 권선과 330번째 권선사이에서 발생한 것을 모의하여 계산한 전류파형이다. 정상상태의 전류 54[A]에서 단락 후 25.6[kA]로 증가하였고 단락전류의 이론치는 식 (1)에 의한 계산 결과 26.46[kA]과 일치함을 알 수 있다. 또한 1차측 선로전류는 정격전류 54[A]에서 6.5[kA]로 증가하였고, 2차측 전류는 5.9[kA]에서 8.9[kA]로 증가하였다.

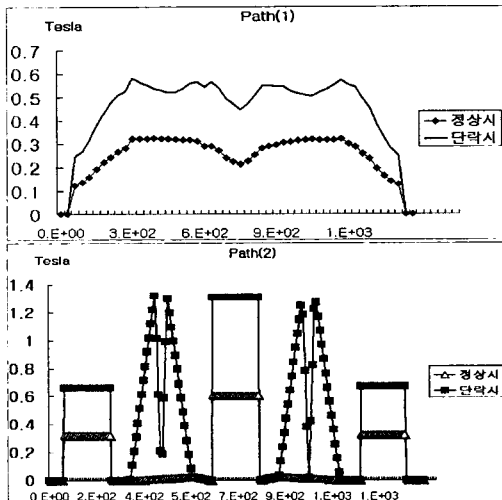
표 2는 각권선의 계산된 전류값을 보여주고 있으며 단락 시 단락권선의 전류는 이론치, Pspice 및 FEM의 계산결과가 아주 잘 일치함을 보여주고 있으며, 이는 FEM 모의해석방법이 타당함을 보여준 것이다.

그림 14는 단락 시 단락권선의 전자기력 방향을 표시하고 있으며 단락권선의 radial 방향 전자기력이 axial 방향 전자기력보다 크게 나타남을 알 수 있으며 1차측 단락권선이 중간에 위치하고 있다. 그림 15는 변압기 권선의 221번째부터 276번째 권선의 축방향 전자기력으로 권선의 단락전 최대치는 0.18[N]에서 단락 후 최대 4[N]로 단락권선 양쪽 끝에서 권선의 안

쪽으로 전자력이 발생되었음을 알 수 있다. 그림 16은 radial 방향 전자력으로 단락전 4[N]에서 단락 후 930[N]으로 강한 전자력이 권선 안쪽에서 바깥쪽으로 발생되었다. 이는 277번째(6번째층)부터 330번째 권선의 전자력과 같은 값을 가진 것이다. 단락권선에 발생하는 강한 축방향과 radial 방향의 힘에 의해서 다른 권선에 영향을 주어 다른 권선에서도 전자력 증가를 가져오게 될 것이다.



(a) 누설자속계산을 위한 경로  
(a) Path for calculation of leakage flux



(b) 누설자속 분포  
(b) Distribution of the leakage flux

그림 12. Path면의 정상시와 단락시 자속밀도  
Fig. 12. Steady-state and fault flux density of path

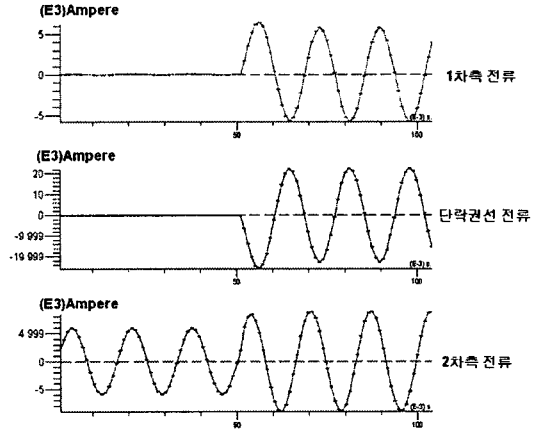


그림 13. 정상시와 단락시 권선의 전류  
Fig. 13. Circuit current of normal and fault

표 2. 각 권선의 전류 계산결과 비교(단위 : A)  
Table 2. Results of the calculated winding current(unit : A)

|              | 정 상<br>(peak) | 과 도<br>(peak) | 비교<br>([%]) |
|--------------|---------------|---------------|-------------|
| 고압측(FEM)     | 54            | 6300          |             |
| 저압측(FEM)     | 5900          | 8900          |             |
| 단락권선(FEM)    | 54            | 25,600        | 96          |
| 단락권선(Pspice) | 58            | 26,200        | 99          |
| 단락권선(이론)     | 62            | 26,460        | 100         |

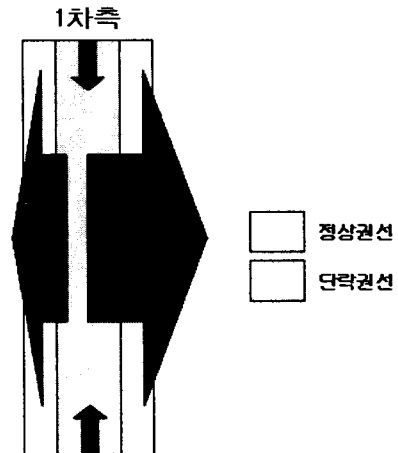


그림 14. 단락시 단락권선의 전자력 방향  
Fig. 14. Electromagnetic force direction of the winding fault

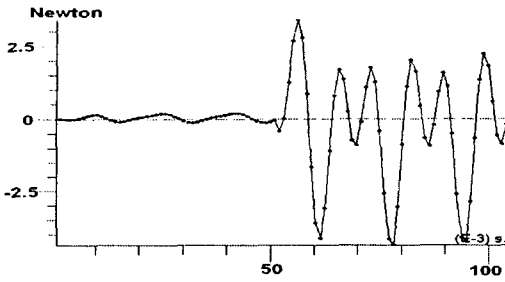


그림 15. 단락권선의 축방향 전자력  
Fig. 15. Axial force of the winding fault

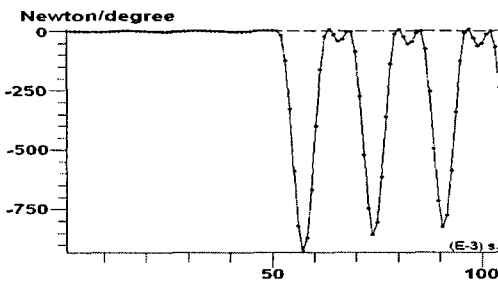


그림 16. 단락권선 radial방향 전자력  
Fig. 16. Radial force of the winding fault

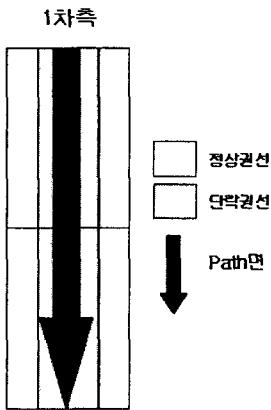


그림 17. 단락권선의 Path면  
Fig. 17. Path of the winding fault

그림 17은 단락권선의 전자력밀도를 계산하기 위하여 그림과 같이 path면을 설정하여 계산경로를 잡은 것이다. 그림 18은 단락권선의 계산경로에 따른 축방향의 전자력밀도로서 권선의 양단에서 단락 전 최대치는 위쪽이 단위체적당 전자력 밀도가  $9.2 \times 10^2$  (N/mm)으로 아래쪽은  $8.8 \times 10^2$  (N/mm)이었고, 단락 후 최대치는 위쪽이  $4.15 \times 10^4$  (N/mm)으로 아래

쪽은  $3.32 \times 10^4$  (N/mm)으로 단락 전에 비하여 단락 후에 단락권선의 양단에서 강한 전자력이 발생되고 있음을 알 수 있다. 그림 19는 Radial방향 전자력밀도로서 권선의 중앙에서 전자력이 많이 발생함을 보여주고 있다. 단락전 최대치는 단위체적당 전자력 밀도가  $1.310^2$  (N/mm)이고, 단락 후 최대치는  $5.810^4$  (N/mm)으로 단락 전에 비하여 단락 후에 단락권선의 양단에서 강한 전자력이 발생되었다.

FEM 프로그램으로 계산한 결과 권선의 전류는 최대 474배 전자력은 축방향 힘은 22배, radial force는 232배로 계산되었고, 결과 검증을 위하여 이론치와 Pspice와의 계산 결과를 비교한 결과 전류는 99[%]이고, 전자력은 축방향 힘은 98[%], radial force는 83[%] 범위 안에서 일치하였다(표 3 참조).

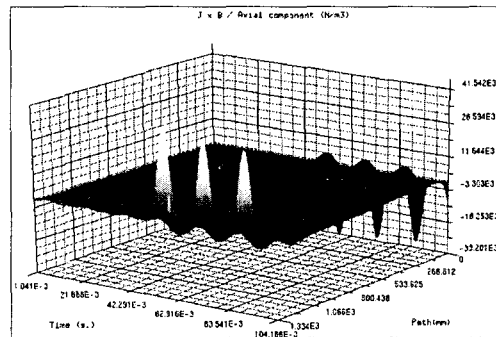


그림 18. Axial방향 전자력밀도  
Fig. 18. Axial force density of the winding fault

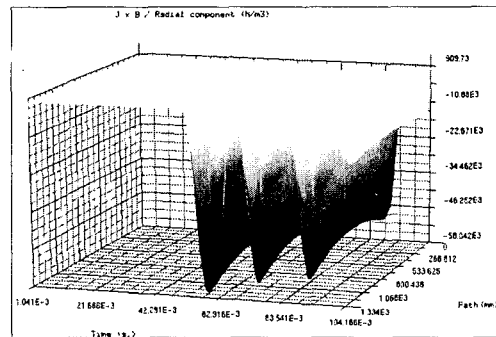


그림 19. Radial방향 전자력밀도  
Fig. 19. Radial force density of the winding fault

표 3. FEM 시뮬레이션 결과와 이론값 비교  
Table 3. Comparison of the FEM simulation and calculation results

| 내 용          | 시뮬레이션 결과 | 이론값       |
|--------------|----------|-----------|
| 단락권선의 전류     | 25.6[kA] | 26.46[kA] |
| Axial force  | 4[N]     | 3.95[N]   |
| Radial force | 930[N]   | 777.62[N] |

#### 4. 결 론

본 논문에서는 배전용 변압기의 신뢰도 향상을 위하여 변압기고장의 주요 원인인 권선단락에 대한 모의해석 및 전자력을 계산하여 변압기절연 및 구조강도설계 시 활용할 수 있는 자료를 제공하는 것이다.

배전용변압기의 모의해석 모델로서 단상 60[Hz], 1[MVA], 22,900/220[V] 변압기를 선정하여 1차측 권선단락(turn-to-turn)의 모의 해석하는 방법을 제안하고 유한요소프로그램으로 해석한 후 누설자속의 분포, 단락전류와 전압파형, 전자력의 분포 등을 계산하고 결과를 분석하였다. 모의방법을 검증하기 위하여 이론적으로 계산하는 방법과 전기공학에서 널리 사용되고 있는 Pspice를 이용하여 동일한 모델과 동일한 조건으로 해석하여 결과를 비교한 결과 95 [%] 이내에서 아주 잘 일치함을 확인하였다.

배전용 변압기의 권선단락시의 단락전류 및 단락 권선의 전자력을 계산한 결과 단락권선의 전류는 최대 400배, 전자력은 축방향 힘은 20배, radial force는 230배로 급증하여 설계 시 주요 고려대상임을 확인하였다. 본 연구의 결과는 변압기의 절연설계와 기계적인 구조설계 시에 반영하면 신뢰도가 향상된 변압기를 설계할 수 있게 될 것이다.

본 논문은 2006학년도 홍익대학교 학술연구 진흥비에 의하여 지원되었음.

#### References

(1) 산업자원부, “지중배전용 변압기 신뢰도 향상에 관한 연구”, 중간보고서, 2004년 3월.  
(2) 산업자원부, “지중배전용 변압기 신뢰도 향상에 관한 연

구”, 2차년도 중간보고서, 2005년 3월.  
(3) M. Waters, “The Short-Circuit Strength of Power Transformers”, Macdonald & Co., 1966.  
(4) MADIN, A. B., B.Eng., and WHITAKER, J.D. The Dynamic Behaviour of a Transformer Winding under Axial Short-circuit Forces. Proc. I.E.E., Vol. 110, pp. 535-550. March 1963.  
(5) Mukund R. Patel, “Instability of the Continuously Transposed Cable Under Axial Short-Circuit Forces in Transformers”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 17, NO. 1, JANUARY 2002.  
(6) 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.  
(7) H. Wang, “Models for Short Circuit and Incipient Internal Faults in Single-Phase Distribution Transformers”, Ph.D Thesis in Texas A&M University, May 2001.  
(8) Watts, G.B. “A Mathematical Treatment of the Dynamic Behaviour of a Power-Transformer Winding under Axial Short-circuit Forces”. Proc. I.E.E., Vol. 110, pp. 550-560. March 1963.  
(9) Mr. B. SOLLERGRÉN, “CALCULATION OF SHORT-CIRCUIT FORCES IN TRANSFORMER”, Final Report prepared by Working Group 12-04 of Study Committee No. 12.  
(10) TOURNIER, Y. and RICHARD, M., MADIN, A. B., and WHITTAKER, J.D. A Study of the Dynamic Behaviour of Transformer Windings under Short-circuit Conditions. C.I.R.E. Reports 143 and 143a-1962.

#### ◆ 저자소개 ◆

##### 신판석 (申判錫)

1953년 1월 28일생. 1977년 서울대학교 공과대학 졸업. 1986년 미국 R.P.I. 전기공학 졸업(석사). 1989년 R.P.I. 전기공학 졸업(박사). 1980~1993년 한국전기연구원 선임 연구원. 1993년~현재 홍익대학교 전기공학과 교수.

##### 하정우 (河政佑)

1978년 1월 9일생. 2004년 홍익대학 전기공학과 졸업. 2006년 현재 홍익대학교 전기공학과 대학원 전기공학과 석사 과정.

##### 정희준 (鄭熙準)

1972년 1월 9일생. 2000년 동국대학교 기계공학과 졸업. 2006년 현재 홍익대학교 전기공학과 대학원 전기공학과 석사 과정.