

# FEM 시뮬레이션을 이용한 2MVA 몰드변압기 권선간 써지전압 분배 해석 기법 연구

(A Surge Voltage Distribution Analysis of 2MVA Cast Resin Transformer Winding  
with FEM Simulation)

장형택\* · 신판석\*\*

(Hyeong-Taek Jang · Pan-Seok Shin)

## Abstract

This paper presents an analyzing method of the capacitance of the power transformer for initial voltage distribution and insulation design. When a high incoming surge voltage is accidentally occurred in windings of transformer, it does not distribute equally in the windings. This phenomenon makes electric field concentration and the insulating material could be break. Initial voltage distribute mostly depends on capacitances between winding to winding or winding to core in the transformer. If the C network can be structuralized into the equivalent circuit model and be calculated each capacitance element value by circuit analysis and FEM(Finite Element Method) simulation program, the transformer designer could know the place where the structure is to be modified or the insulation to be reinforced. This method quickly provides the data of the voltage distribution in each winding to the designer.

Key Words : Initial Voltage Distribution, Transformer Design, FEM

## 1. 서 론

### 1.1 연구 배경

근래에 장거리 대용량 송전이 더욱 요구되면서 전

력계통의 안정도를 향상시키고, 전력에너지의 손실을 저감시키고자 하는 노력들이 이루어지고 있다[1]. 이에 하나로서 초고압 전력용 변압기의 절연설계를 통한 안전성 향상과 콤팩트화를 들 수 있다. 절연설계는 변압기의 성능과 안전성을 위해 필수적인 사항이므로 [2] 많은 부하를 담당하고 있는 변압기는 사고 발생 시에 직접적으로 발생하는 손실과 함께 그 과급효과 및 기업의 생산중단과 같은 휴지에 의해 2차 손실액 수가 천문학적으로 불어날 수 있기 때문에 변압기 제조사는 제품 출하 전 아래와 같은 시험 및 검사를 마쳐야 한다.

\* 주저자 : 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정

\*\* 교신저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수

Tel : 010-2415-5116, Fax : 041-863-7605

E-mail : lcjtt17@naver.com

접수일자 : 2010년 8월 9일

1차심사 : 2010년 8월 10일

심사완료 : 2011년 2월 24일

- 구조 및 외관검사
- 권선저항 측정
- 변압비 측정
- 극성 및 각변위 측정
- 임피던스 전압 및 부하손실 측정
- 무부하손실 및 여자전류 측정
- 온도상승 시험
- 상용주파 내전압 시험
- 유도 내전압 시험
- 뇌임펄스 내전압 시험
- 절연저항 측정

뇌임펄스 내전압 시험은 변압기가 고장이나 낙뢰 등에 의해 발생하는 써지(surge) 전압 유입 시에도 충분한 절연 강도를 가지도록 제작되었는지 검증해 준다[3].

최근에는 전력부하 밀도의 증가로 인하여 콤팩트하면서도 고효율인 변압기를 요구하는 세계시장에서 변압기 설계자들은 설계 여유도(margin)를 점점 더 적게 확보할 수밖에 없다[4]. 그러므로 안전성과 규격을 보장하는 설계를 위해, 더 정확한 설계 데이터를 확보해야 한다. 이를 위해 직접 변압기를 제작하는 방법은 그 비용과 시간의 소요가 매우 크기 때문에 설계단계에서 시뮬레이션을 통해 전자계 데이터를 빠르게 획득하는 기법이 요구된다.

## 1.2 연구 목적 및 방법

사고 시 순간적으로 써지 전압이 변압기에 인가되면 변압기 내부에 권선들에서 일어나게 되는 각각의 전압강하는 균등하게 분담되어지기 어렵다. 초기 써지 전압 분배는 각각의 권선에 균등하게 분배되어야 특정한 권선에 큰 전계집중이 일어나는 것을 막을 수 있다.

초기 써지 전압 분배는 권선과 권선 사이나, 권선과 철심, 혹은 권선과 외함 사이의 정전용량 값들에 의해서 결정된다. 그러므로 변압기 내부의 캐패시턴스들로 이루어진 등가회로를 모델링하고 각각의 캐패시턴스 값들을 알 수 있다면, 설계단계에서 초기전압분배를 예측하고 전계집중을 피할 수 있는 적절한 내부구

조 설계와 절연강도를 계산할 수 있게 된다.

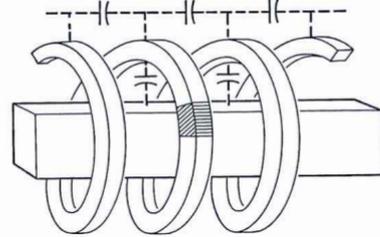


그림 1. 변압기 내부 캐패시턴스 개념도  
Fig. 1. Key map of capacitance in the transformers

본 논문에서는 이를 위하여 FEM(Finite Element Method)시뮬레이션 프로그램과 회로해석 프로그램을 사용하였다. 이는 변압기 설계자에게 어느 권선에서 초기 써지 전압 분담이 크게 이루어지는지 빠르게 데이터화해 줄 수 있다. 이를 통해 어떤 권선에서 직렬 캐패시턴스와 접지 캐패시턴스의 비율이 문제가 있는지 판단할 수 있고, 각각의 권선에 절연이 부족한지 혹은 과잉인지 판단할 수 있는 절연설계의 데이터가 될 수 있다.

본 논문은 FEM 수치해석으로 변압기 내부 정전에너지(Electrostatic stored energy)를 산출함으로써 캐패시턴스값을 얻는다. 그리고 등가화된 변압기 내부 회로를 모델링하는 단계를 거쳐 회로해석을 수행함으로써 초기 써지 전압 분배를 예측하는 기법을 제안하고 수식적 이론과 비교함으로써 그 타당성을 검증하려 한다.

계산기법의 검증을 위하여 용량 2[MVA] 1차 정격 전압 22.9[kV] 2차 정격전압 380/220[V], 중량 4,100 [kg], 임피던스 6.5[%], 주파수 60[Hz], 외형치수 1,960[mm]×1,050[mm]×1,950[mm]의 몰드변압기를 모델로 하여 분석하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 수식적 고찰

#### 2.1.1 캐패시턴스 수식

변압기 권선의 써지전압분배를 계산하기 위해서는

변압기내의 철심, 권선 및 절연물간의 정전용량을 계산하고 직병렬회로를 분석하여 전압을 계산하게 된다. 권선간에 캐패시턴스는 수식적으로 식 (1)과 같이 구해질 수 있다[4].

$$C_{gw} = \frac{\epsilon_0 \pi D_m H}{(t_{oil} / \epsilon_{oil}) + (t_{solid} / \epsilon_{solid})} \quad (1)$$

- $D_m$  : 두 권선의 평균 지름
- $t_{oil}, t_{solid}$  : 두 권선 사이의 절연유나 전연물의 두께
- $H$  : 권선의 높이(만약 두 권선의 높이가 같지 않으면, 평균 높이를 취할 수 있다.)

식 (1)과 같은 수식으로는 일반적이고 대칭적인 형상에서 캐패시턴스 값을 쉽고 빠르게 구할 수 있다. 그러나 비대칭성이 큰 형상일수록 이러한 수식으로 정확한 캐패시턴스 값을 계산해 내기 어려워진다. 변압기 내부는 비대칭성이 큰 형상일 뿐만 아니라 아주 복잡한 캐패시턴스들의 망으로 증가화 되기 때문에 설계자가 모든 절연물의 유전율( $\epsilon$ )과 코일과 코어, 외함과 같은 도체의 형상을 모두 알고 있다 하더라도, 이러한 수식적 방법을 적용하기 어렵다.

### 2.1.2 전압분배상수 $\alpha$

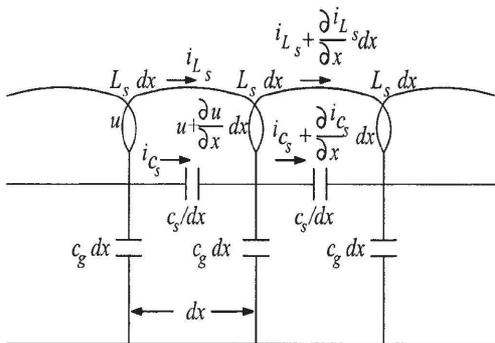


그림 2. 초기 전압 분배 수식 개념도  
Fig. 2. Key map of initial surge voltage distribution with formula

$$u_0 = u(x, 0) \quad (2)$$

$u_0$ 는 초기 전압 분배이다.

$$u_0 = A_1 e^{kx} + A_2 e^{-kx} \quad (3)$$

$$k = \sqrt{\frac{c_g}{c_s}} \quad (4)$$

식 (3)에서  $A_1$ 과  $A_2$ 는 경계조건에 의해서 얻어진다. 중성점 접지의 경우,  $A_1 + A_2 = 0$ 이므로  $A_1 = -A_2$ 을 식 (3)에 대입할 수 있다. 전개과정을 통해 식 (5)와 같은 전압분배 수식을 얻는다[4].

$$\begin{aligned} \therefore \left[ \frac{du_0}{dx} \right]_{\max} &= \frac{1}{L} kL = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{c_g}{c_s}} L \\ &= \frac{1}{L} \sqrt{\frac{C_G}{C_S}} = \frac{1}{L} \alpha \end{aligned} \quad (5)$$

$\alpha = \sqrt{\frac{C_G}{C_S}}$  CG는 전체 접지캐패시턴스(total ground capacitance), CS는 직렬 캐패시턴스(series capacitance), CG/CS는 전압분배율이 된다. 즉 초기 썬지 전압 분배는 변압기 내부의 직렬 캐패시턴스와 접지 캐패시턴스의 비율인  $\alpha$  값에 의존한다[4].

그림 3은  $\alpha$  값이 0일 때 초기전압분배가 각 권선에서 균등하게 이루어짐을 알 수 있다.

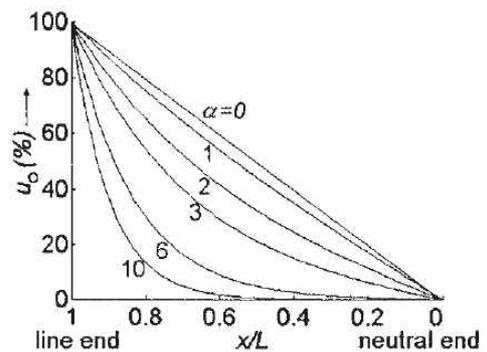


그림 3.  $\alpha$  값에 따른 초기 전압 분배  
Fig. 3. Initial surge voltage distribution by  $\alpha$

## 2.2 FEM을 이용한 캐패시턴스 계산

순간적으로 전압썬지가 변압기권선에 유입되었을 때 권선간에 전위차로 절연물에 에너지가 축적된다.

그 에너지를 FEM 수치해석으로 얻어 캐패시턴스 값을 구한다.

$$W_{stored} = \frac{1}{2} CV^2 \quad (6)$$

그림 4와 같이 변압기 내부의 기하학적 형상에 구획(Region)을 나누고 FEM 수치해석을 통해 변압기 내부에 저장된 정전에너지를 산출한다. 각각의 구획은 유전율을 가지는 절연물 혹은, 공기이거나, 전위를 가지는 도체이다. 그러므로 전위를 가진 도체 사이에 유전율( $\epsilon$ )을 가진 절연물이 가진 정전 에너지  $W_{stored}$  [J]로 캐패시턴스  $C$  [F] 값을 얻을 수 있다.

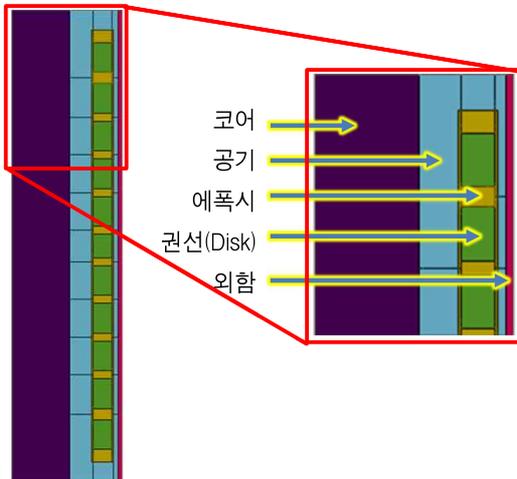


그림 4. FEM 수치해석을 위한 단면도  
Fig. 4. Cross-section diagram for FEM analysis

### 2.3 등가 회로 모델링

FEM 수치해석을 위해 나뉜 구획에서의 정전용량을 대입시킬 등가 회로를 모델링해야 한다. 그림 4에서 알 수 있듯이 권선과 권선 사이에 자계가 형성되어 있고 그 공간에 유전율( $\epsilon$ )을 갖는 절연물이 있으므로 비슷하다고 생각되어질 수 있으나, 실제 변압기의 코일을 고려해 보면 권선은 사실상 평판 콘덴서의 극판과 유전체와는 다른 형태의 구조임을 쉽게 알 수 있다. 이를 유의하여 등가 회로의 모델링이 이루어져야 한

다. 또한 본 논문에서 제안한 기법과 이론적 수식과의 대조의 편의를 위해 권선들의 묶음인 디스크(Disk)를 한 도체로 간주하여 단순화한 형상으로 FEM 수치해석을 수행하였고, 절연물 또한 에폭시( $\epsilon=4.2$ )로 일정한 값을 적용하였으나, 실제 변압기에 적용에 있어서는 디스크를 이루는 권선법이 고려되어야 하고, 변압기내의 유전율( $\epsilon$ )이 서로 다른 절연물들이 기계적 강도 등의 이유로 구조물을 이루고 있다면 이 또한 고려되어야 한다[5].

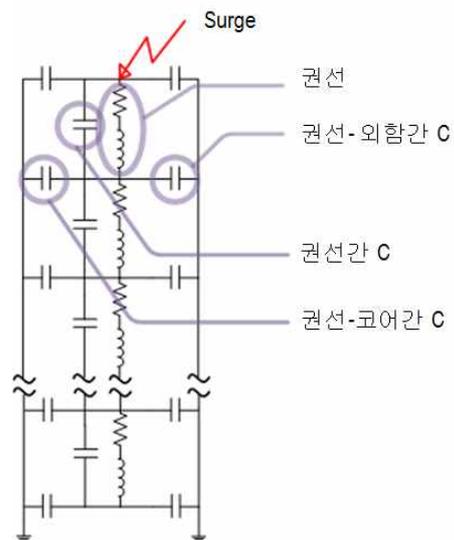


그림 5. 등가 회로 모델링  
Fig. 5. Equivalent circuit modeling

그림 5는 RLC 네트워크로 변압기 내부회로를 등가 모델링한 것이다. 각 권선을 저항과 인덕터로 등가화 하며, 저항은 구리의 저항율로 쉽게 얻어지고, 인덕턴스는 FEM 수치해석을 통해서 산출할 수도 있고 식 (7)과 같이 수식적으로 얻을 수도 있다.

$$L = \frac{0.8r^2 N^2}{6r + 9l + 10d} \quad (7)$$

- L = 인덕턴스  $\mu\text{H}$
- r = 코일의 평균 반지름
- l = 감은 코일의 총 길이
- N = 코일을 감은 회수

d = 코일의 두께(i.e., 외부반경에서 내부반경을 뺀 것)

그림 5와 같이 모델링한 회로에 FEM 수치해석으로 얻은 정전용량 값을 대입하여 회로해석 툴로 풀면 쉽게 각각의 권선간 전압강하를 얻을 수 있다.

이를 수행하기 위해 모델링한 회로에 써지 파형을 모의하여 인가해 주어야 한다. 본 논문에서는 2.4절에서 설명하는 표준 임펄스 파형을 인가했다.

### 2.4 표준 임펄스 파형

변압기 운전중 계통에서 뇌(surge)로 인해 발생할 수 있는 과도적인 이상전압에 대해 변압기가 충분한 절연강도를 유지하고 있는가를 검증하기 위해 뇌 임펄스 내전압 시험을 한다. 이때 가하는 시험 전압 파형으로 표준 임펄스를 사용한다. 표준 임펄스 파형은 식 (8)과 같이 두 지수함수 팀의 차로써 표현된다.

$$V(t) = V_1(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \tag{8}$$

임펄스 파형을 대개  $t_f \times t_r$ 로 표현한다. 여기서  $t_f$ 와  $t_r$ 는 파두시간과 파미시간을 뜻한다. 피크전압의 30[%]와 90[%]점을 직선으로 연결한 점과 시간축이 만나는 점을 규약원점으로 한다. 파두시간은 피크치 30~90[%]까지의 시간의 1.6배이고, 파미시간은 파형의 피크치의 50[%]가 되는 지점까지의 시간이다[6].

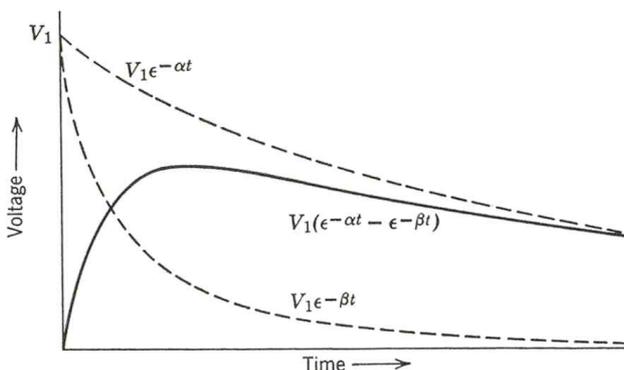


그림 6. 표준임펄스 파형의 수식표현  
Fig. 6. Formula of typical impulse waveform

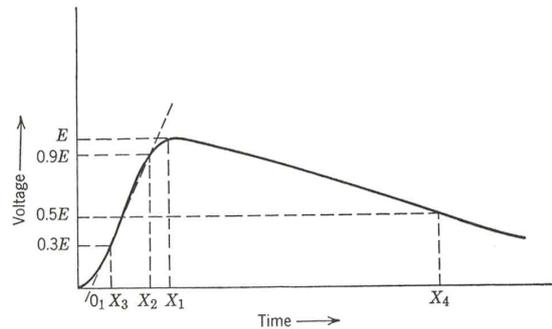


그림 7. 표준 임펄스 파형의 파두시간과 파미시간  
Fig. 7. The front of the wave and back of the wave of typical impulse waveform

파두시간 1.2[μs]동안 100[kV]까지 상승하고 다시 파형의 피크치 50[%]까지 떨어지는 파미시간을 50[μs]로 해서 1.2×50[μs]임펄스 파형을 구현하여 인가했다.

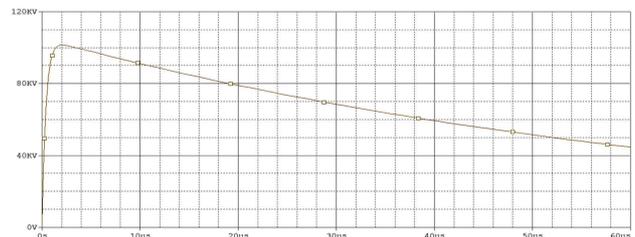


그림 8. 등가회로에 인가한 표준 임펄스 파형(1.2×50[μs])  
Fig. 8. Typical impulse waveform(1.2×50[μs]) applied to the equivalent circuit

### 2.5 초기 써지전압 분배 분석 및 적용

이론적으로 써지 임펄스가 유입되면, 짧은 파두 시간에 급격한 전압상승이 일어나고 내부 캐패시턴스에 의해서 그림 9-a의 곡선 a와 같이 불균등한 권선간 전압 분배가 이루어진다. 결국 이 현상은 파미시간에 다다르면서 권선간 저항성분에 의해서 그림 9-a의 직선 b와 같이 균등한 권선간 전압분포가 이루어지게 된다. 초기에 불균등한 전압분포(곡선 a)에서 균등한 전압분포가(직선 b)가 되기까지 자계와 전계가 서로 에너지를 주고 받으면서 그림 b와 같은 복잡한 오실레이션을 하게되고 이는 초기에 첫 번째 권선(Line end)에서 혹독한 전압 분담이 일어난 것처럼 다른 부분의 권선들에서도 많은 전압분담이 일어날 수 있음

을 보여준다[7].

이러한 이론적 배경과 비교하여, 등가 회로에 표준 임펄스 전압을 인가해 얻은 권선간에 써지 전압 분배 (그림 9-c)를 분석하였다. 써지 전압의 파두시간인

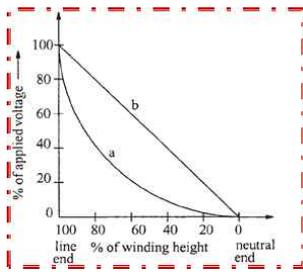


그림 9-a. 초기전압분배(선 a)  
Fig. 9-a. Initial surge voltage distribution

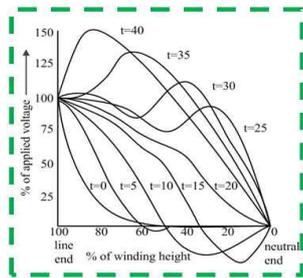


그림 9-b. 과도 오실레이션  
Fig. 9-b. Transition oscillation

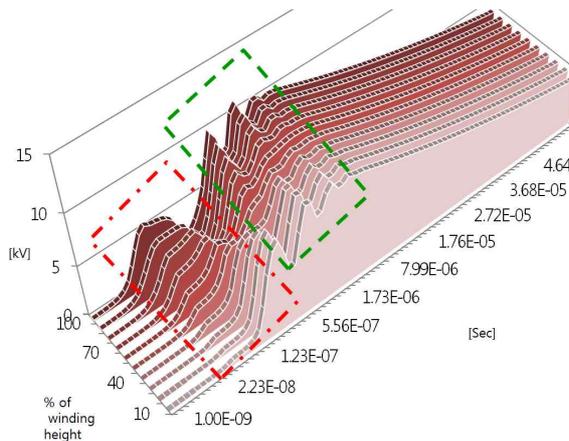


그림 9-c. 써지 임펄스 유입시 권선별 전압강하  
Fig. 9-c. Voltage drop in each turn at the inrush surge impulse

그림 9. 산출된 권선별 전압강하 분석  
Fig. 9. Analysis of calculated voltage drop in each turn

1.2[ $\mu$ s]에서 그림 9-a의 곡선 a와 같이 첫 번째 권선에 전압강하가 집중되는 현상과 균등한 전압분배가 이루어지기 전 오실레이션하는 모습을 확인할 수 있다. 써지 임펄스가 파미시간으로 접어들면서 균등한 전압분배가 되는 것까지 확인되어 이론과 일치하는 결과를 얻었다.

써지 임펄스의 파두시간이 끝나면서 써지 피크치가 나오는 1.2[ $\mu$ s]~2[ $\mu$ s]에서 한 권선간 담당하는 전압분담이 10[kV]를 넘으면서 최대 전계를 형성하게 됨을 예상할 수 있다. 본 논문에서 고려한 형상에서 권선과 권선 사이의 에폭시 두께는 10[mm]였고, 에폭시의 전계강도(35~40[kV/mm])를 고려해볼 때 이 모델은 과잉 절연 설계되어졌다고 판단되며 기계적 강도와 열적인 문제, 제작공정 등 다른 설계 요인들이 만족되면, 이 모델은 더 콤팩트하게 설계될 수 있다는 것을 데이터를 통해 알 수 있다.

이와는 다르게 직렬 캐패시턴스 CS와 전체 접지 캐패시턴스 CG의 비가 잘못 설계되어  $\alpha$  값이 커진 경우를 살펴본다. 전체적으로  $\alpha$  값이 큰 경우는 그림 10에서 볼 수 있듯이 인가된 써지 임펄스 전압의 거의 대부분을 첫 번째 권선이 분담한다. 매우 큰  $\alpha$  값으로 초기분배가 첫 번째 권선에 극심한 상황을 보여준다.

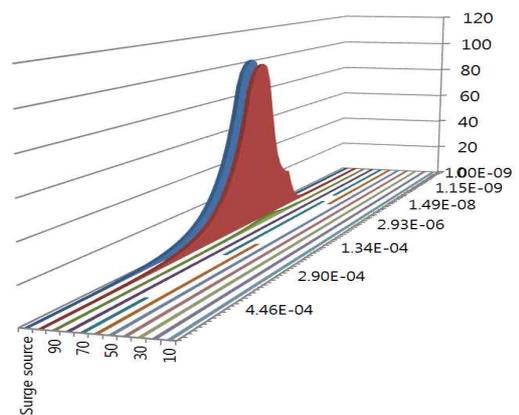


그림 10. 권선 전체적으로  $\alpha$  값이 큰 경우  
Fig. 10. The case of  $\alpha$  is too huge on the whole

그림 11은 마지막 권선에서  $\alpha$  값이 큰 경우를 모의한 결과이다. 보통의 전압 분배 곡선과 마지막 권선에 서 차이를 보이는 것을 쉽게 알 수 있다. 마지막 권선

에서 CG/CS를 낮추는 설계를 고려해야 한다.

이 두 경우의 적용에서처럼 설계자가 초기 써지 전압 분배에 불리한 설계를 했을 시 제작 전에 문제점을 알 수 있을 것이다.

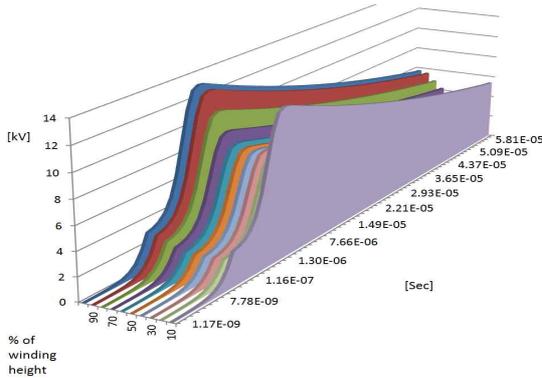


그림 11. 마지막권선에서  $\alpha$  값이 큰 경우  
Fig. 11. The case of  $\alpha$  is too huge on the last turn

### 3. 결 론

FEM 수치해석을 통해 2[MVA] 몰드변압기 내부 캐패시턴스들을 산출하고 모델링한 등가회로에 대입하여 계산하는 절차를 거쳐, 써지 임펄스가 권선에 유입되었을 때 초기 전압 분배 데이터를 획득할 수 있었다. 코어와 에폭시로 몰딩된 권선과 외함에 있는 구조에서 정전용량을 계산하고 권선의 전압분배계산을 알고리즘에 따라 검증하였다. 획득한 데이터를 이론값과 비교해본 결과와 적용을 통해 기법의 타당성을 검증할 수 있었다. 실제 변압기 시험을 병행해서 등가회로 모델링 기법과 오차를 보정할 파라미터들을 찾아간다면 실용성 있는 기법으로 쓰일 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2008-32)주관으로 수행된 과제임.

### References

- [1] 고인석 외 227인, “한국전력40년사”, 한국전력공사, (2001).
- [2] 지식경제부, “30MVA급 배전용 몰드 변압기의 컴팩트화 및 고효율화를 위한 기반기술 연구”, 2차년도 보고서 2009.
- [3] (주)효성자료실, “몰드변압기 일반, 변압기 시험 종류 및 방법”.
- [4] S.V.Kulkarni, S.A.Kharpade, “Transformer Engineering”, MARCEL DEKKER, INC, p.169-170, p.277-325, (2004).
- [5] Robert M. DelVecchio, Bertrand Poulin, Pierre T. Feghali, Dilipkumar M.Shah, and Rajendra Ahuja, “Transformer design principles”, CRC PRESS, p237-284,(2002).
- [6] Allan Greenwood, “Electrical Transients in Power Systems”, Wiley Interscience, p509-514.
- [7] J & P Transformer Book (Twelfth Edition)”, NEWNES, p487-491,(1998).

### ◆ 저자소개 ◆



#### 장형택(張亨宅)

1982년 3월 16일생. 2009년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2009년 동대학원 전기공학과 석사과정.



#### 신판석(申判錫)

1953년생. 1977년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1986년 미국 R.P.I. 전기공학과 졸업(석사). 1989년 R.P.I. 전기공학과 졸업(박사). 1980~1993년 한국전기연구원 선임연구원. 1993년~현재 홍익대학교 전기공학과 교수.