

## 유한요소법에 의한 변압기의 돌입전류 계산

이준호 · 이기식

단국대학교 전기공학과  
서울특별시 용산구 한남동 산 8, 140-714

(1998년 10월 14일 받음, 1999년 2월 19일 최종수정본 받음)

본 논문에서는 썬지(Surge) 또는 사고에 의해 변압기에 충격전압이 인가되었을 때 권선에 유입되는 돌입전류를 계산하는 알고리즘을 제시하였다. 권선간의 정전용량을 3차원 유한요소법을 이용하여 계산하고 이것을 변압기의 회로에 포함시켰다. 그리고 변압기의 자기적인 특성과 변압기의 회로를 결합한 축대칭 3차원 유한요소법을 이용하여 변압기의 과도 특성을 해석하였다. 제시한 알고리즘을 이상 전압이 인가된 변압기에 적용하여 변압기 내부의 자장분포와 권선간의 전압 및 전류를 계산하였다. 예제를 통한 변압기의 해석 결과는 사고여부를 판단할 수 있는 자료가 될 수 있음을 알 수 있었다. 또한 자장분포의 시간에 따른 변화 즉 물리적 개념의 파악이 쉬워졌으며 각 권선, 권선간, 전 전류 및 부하전류 파형의 시간변화를 알 수 있었다.

### I. 서 론

산업 발전과 더불어 많은 전력의 수요가 요구되는 시점에서, 전력계통 기구들의 개발, 전력관리 기술의 발달은 전압의 고압화를 부추기고 있다. 국내에서도 이에 맞추어 초고압 변압기의 생산이 추진되고 있다. 초고압변압기는 단순히 전압이 높다는 사실만 다른 것이 아니라, 수요자에 대량의 전력을 공급한다는 차원에서 그 안전성 및 신뢰성이 월등히 높아야 한다. 더욱이 송전선에 낙뢰 등에 의하여 돌입전류가 발생할 경우 변압기에는 순간적으로 과도한 전류가 유입되고 이에 따라 권선의 구조를 변형하거나 절연물에 기계적 손상을 주기도 한다[1, 2].

변압기의 정상 운전시에는 60 Hz의 전류가 흐르는 경우이므로 권선간의 전압이 균등한 전압이 걸릴 것으로 판단된다. 그러나, 썬지 유입, 사고시의 이상전류 등의 흐름은 권선간의 전압이 균등하게 분배되지 않고 불균등하게 된다. 이러한 현상은 주로 권선간에 분포되고 있는 인덕턴스와 정전용량에 의해 지배된다.

이상 전압이 변압기에 인가되었을 때 이를 해석하는 기법으로는 권선간의 정전용량과 권선의 인덕턴스를 계산하여 등가회로를 구성하여 해석하는 방법이 있다 [3-5]. 그러나 이러한 해석방법들은 변압기 코어의 비선형성을 고려하기가 어렵고, 또한 등가회로를 다루기 때문에 변압기 내부의 자장 분포는 해석하지 못하는

단점이 있다.

본 연구에서는 권선간의 정전용량을 3차원 유한요소법을 이용하여 미리 계산하고 이것을 변압기의 회로에 포함시켰다. 그리고 자기 코어의 비선형성을 고려하여 변압기 내부의 자장 분포를 해석하기 위해 자장과 변압기의 회로가 결합된 축대칭 3차원 유한요소법을 이용하여 과도 특성을 해석하였다. 제시한 알고리즘을 이상 전압이 인가된 변압기에 적용하여 변압기 내부의 자장 분포와 권선과 캐패시터의 전압 및 전류를 계산하였다.

### II. 변압기의 정전용량 계산

변압기의 정전용량은 전기스칼라포텐셜을 이용하므로 정전장의 해석이 선행되어야 한다. 먼저 정전장을 해석하기 위한 3차원 유한요소법의 정식화 과정을 전개하고 다음으로 전기스칼라포텐셜을 이용한 정전용량의 계산과정을 설명한다.

#### 2.1 3차원 유한요소법을 이용한 정전장의 해석

전기스칼라포텐셜을 이용한 정전장은 지배방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (-\epsilon \nabla V) = \rho \quad (1)$$

여기서,  $V$ 는 전기스칼라포텐셜[V],  $\epsilon$ 은 유전율[F/m] 그리고  $\rho$ 는 체적전하밀도[C/m<sup>3</sup>]이다. 식 (1)에 형상함

수  $N(x,y,z)$ 을 기중함수로 하는 갤러킨법을 적용하면 잔차  $R$ 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R = - \int_v \epsilon \left\{ \frac{\partial V}{\partial x} \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \frac{\partial N}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial z} \frac{\partial N}{\partial z} - \rho N \right\} dv \quad (2)$$

식 (2)를 이산화하기 위해 해석 영역을 유한개의 사면체 요소로 분할하고 요소내의 미지함수를 일차함수로 근사시킨다. 결과의 이산화된 계 방정식은 식 (3)과 같다.

$$\{R\} = \sum_{m=1}^{ne} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \int_{\Omega_m} \epsilon_m \left\{ \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right\} V_j dx dy dz - \sum_{m=1}^{ne} \int_{\Omega_m} \rho_m N_i dx dy dz \quad (3)$$

여기서,  $ne$ 는 해석영역에 존재하는 총 요소수이다. 식 (3)에서 잔차  $\{R\}$ 을  $\{0\}$ 으로 놓고 경계조건을 대입한 후 행렬식을 풀면 각 미지의 절점에서 전기스칼라포텐셜이 구해진다.

### 2.2 정전용량 계산

정전용량은 도체들 사이에 나타나는 량으로서 행렬의 형태로 표현된다.  $j$ 번째 도체에  $V_j[V]$ 를 주고 나머지 도체에는  $0[V]$ 를 주었을 때,  $j$ 번째 도체의 포텐셜에 의해  $k$ 번째 도체에 유기된 전하량은 식 (4)와 같다.

$$Q_{kj} = C_{jk} V_j \quad (4)$$

위 식에서  $Q_{kj}$ 를 알면 정전용량이 계산된다.

전하량  $Q_{kj}$ 는 3차원 유한요소법으로 구한 전기스칼라포텐셜을 이용하여 다음과 같이 구한다.

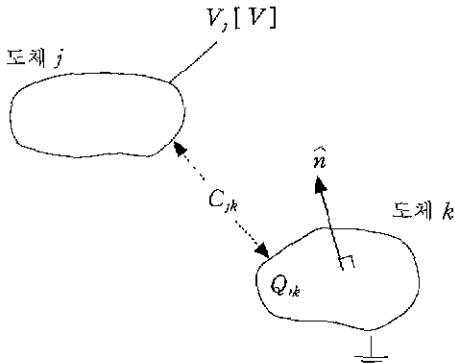


Fig. 1. Computation model of capacitance.

$$Q_{kj} = \oint_s \vec{D} \cdot d\vec{s} = \oint_s \epsilon \frac{\partial V}{\partial n} ds = \sum_{e=1}^{nbe} S_e \epsilon_e \sum_{i=1}^4 \frac{\partial N_i}{\partial n} V_i \quad (5)$$

여기서,  $nbe$ 는 적분 경로상의 요소수,  $S_e$ 는  $e$ 번째 요소에서 적분 경로상의 면적,  $\epsilon_e$ 는  $e$ 번째 요소의 유전율, 그리고  $n$ 은 도체의 단위 법선벡터이다.

## III. 변압기의 과도해석

변압기 권선간의 정전용량을 고려한 변압기의 등가 회로와 변압기의 전자기 특성방정식을 결합하는 유한요소정식화 과정을 전개한다.

### 3.1 변압기의 전자기 특성방정식

변위전류와 와전류를 무시한 맥스웰방정식으로부터 자기벡터포텐셜을 이용한 자기장의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} = -\vec{J} \quad (6)$$

여기서,  $\mu$ 는 자기투자율  $[H/m]$ ,  $\vec{A}$ 는 자기벡터포텐셜  $[Wb/m]$ 이고  $\vec{J}$ 는 전류밀도  $[A/m^2]$ 이다. 해석하고자하는 변압기를  $\theta$ 방향으로 계의 변화가 없다는 축대칭 3차원 문제로 가정하면  $\vec{A} = A_\theta \vec{J} = J_\theta \hat{a}_\theta$ 가 되어 자기벡터포텐셜과 전류밀도는  $\theta$  성분만 갖는다.

식 (6)에 형상함수  $N(r,z)$ 을 기중함수로 하는 갤러킨법을 적용하면 잔차  $R$ 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R = \int_v N \left[ \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rA) \right\} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} + J \right] dv = 0 \quad (7)$$

식 (7)을 이산화하기 위해 해석 영역을 유한개의 삼각형 요소로 분할하고 요소내의 미지함수를 일차함수로 근사시킨다. 결과의 이산화된 식 (8)과 같다

$$\sum_{m=1}^{ne} \sum_{l=1}^3 \sum_{j=1}^3 \int_{\Omega_m} \frac{2\pi}{\mu} \left[ \left( \frac{N_l}{r} + \frac{\partial N_l}{\partial r} \right) \left( \frac{N_i}{r} + \frac{\partial N_i}{\partial r} \right) + \frac{\partial N_l}{\partial z} \frac{\partial N_i}{\partial z} \right] r dr dz A_i = \sum_{m=1}^{nv} \sum_{l=1}^3 \sum_{j=1}^3 2\pi \int_{\Omega_m} N_l r dr dz J_m \quad (8)$$

여기서,  $ne$ 는 해석 영역에 존재하는 총 요소수,  $nv$ 는 변압기 내의 상수 그리고  $nve$ 는 각 상의 요소수이다.

권선을 통하여 입력되는 전류원의 경우 전자기 특성방정식에서 요구하는 것은 전류밀도이지만, 본 연구에서는 전압원 문제로 보아 전류치와 전류밀도 사이의 상관관계를 이용하여 전류를 미지수로 처리한다. 한 상의 면적이  $S$ , 턴수가  $N$  그리고 여기에 흐르는 전류를  $I$ 라 하면

$$J = \pm \frac{N}{S} I \tag{9}$$

와 같이 된다. 여기서  $\pm$ 는 권선의 방향으로서 축과 동일한 방향이면 “+”, 축과 반대 방향이면 “-”이다. 식 (9)를 식 (8)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^{m_c} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \int_{\Omega} \frac{2\pi}{\mu} \left[ \left( \frac{N_j}{r} + \frac{\partial N_j}{\partial r} \right) \left( \frac{N_i}{r} + \frac{\partial N_i}{\partial r} \right) \right. \\ & \left. + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right] r dr dz A_j \\ & = \sum_{m=1}^{m_c} \sum_{n=1}^{m_c} \sum_{i=1}^3 2\pi \int_{\Omega} N_i r dr dz \pm \frac{N}{S} I_m \end{aligned} \tag{10}$$

식 (10)을 행렬식으로 표현하면 식 (11)과 같다.

$$\{K P^T\} \begin{Bmatrix} A \\ I_p \end{Bmatrix} = \{0\} \tag{11}$$

여기서 각 기호의 의미는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_{ij} = & \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \int_{\Omega} \frac{2\pi}{\mu} \left[ \left( \frac{N_j}{r} + \frac{\partial N_j}{\partial r} \right) \left( \frac{N_i}{r} + \frac{\partial N_i}{\partial r} \right) \right. \\ & \left. + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right] r dr dz \end{aligned} \tag{12}$$

$$P_m = -\pm \int_{\Omega} \frac{N_m}{S_m} N_i dx dy, \quad m = 1, 2, \dots, n_v \tag{13}$$

$$I_p = \{I_1 I_2 \dots I_m\}^T, \quad m = 1, 2, \dots, v \tag{14}$$

### 3.2 변압기의 회로방정식

그림 2은 변압기의 1차 권선을 나타낸다. 변압기의 권수는 보통 수 백회 이상이나 여기서 설명의 편의를 위해 권수를 9회로 하였으며 권선의 감는 방향은 1, 2, 3, ..., 8, 9 순서로 하였다. 각각의 코일은 모두 독립적으로 저항과 인덕터를 가지는 것으로 하였다. 그리고

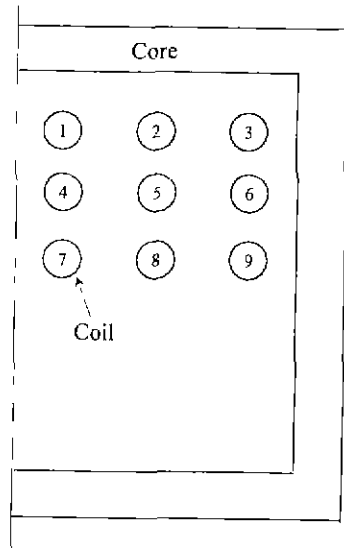


Fig. 2. Model of primary coil for transformer.

코일의 좌우간의 거리는 상하간의 거리보다 큰 것으로 보면 코일의 좌우간의 정전용량은 상하간의 정전용량에 비해 무시할 수 있으므로 코일의 상하간에만 정전용량을 삽입하였다 그림 3은 변압기의 1차 권선의 등가회로를 나타내고 있다

그림 2의 등가회로에서 임의의 루프에서 KVL을 적용하면 식 (15)와 같이 표현할 수 있다.

$$V(t) = R I(t) + \frac{d\phi(t)}{dt} + V_c(t) \tag{15}$$

식 (15)에서 좌측 항은 1차 축의 전원 전압으로서 해당 루프에 전원 전압이 없으면 ‘0’이 된다. 우측의 첫 항은 도체의 저항에 의한 전압 강하이고, 두 번째 항은 도체에 나타나는 역기전력 항이다. 그리고 세 번째 항은 캐패시터 양단의 전압으로서 전류에 대하여 표현하면 식 (16)과 같다.

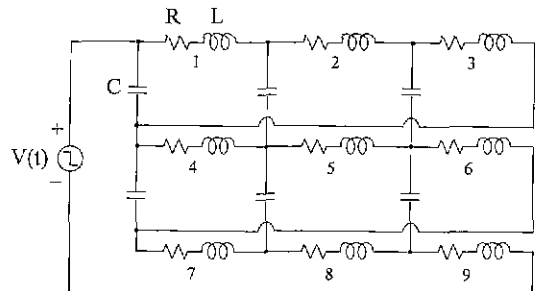


Fig. 3. Equivalent circuit of primary coil for transformer.

$$I(t) = C \frac{dV_c(t)}{dt} \quad (16)$$

식 (15)에 있는 역기전력 항은 유한요소영역과 회로방정식을 연결하는 양으로서 자기벡터포텐셜을 이용하여 표현하면 식 (17)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d\phi(t)}{dt} &= N \frac{d}{dt} \oint_c \vec{V} \cdot d\vec{l} \\ &= \sum_{m=1}^{mv} \pm N \frac{l}{S_{sm}} \sum_{n=1}^{mve} \sum_{i=1}^{mp} \int_{\Omega} N_i dx dy \frac{dA_i}{dt} \end{aligned} \quad (17)$$

식 (16)과 식 (17)에 있는 시간 미분 항을 처리하기 위하여 후퇴차분법을 적용하여 이산화하면 다음과 같은 수식을 각각 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} RI_s^{t+\Delta t} + V_c^{t+\Delta t} + \sum_{m=1}^{mv} \pm N \frac{l}{S_{sm}} \sum_{n=1}^{mve} \sum_{i=1}^{mp} \int_{\Omega} N_i dx dy \frac{1}{\Delta t} A_i^{t+\Delta t} \\ = V_c^{t-\Delta t} + \sum_{m=1}^{mv} \pm N \frac{l}{S_{sm}} \sum_{n=1}^{mve} \sum_{i=1}^{mp} \int_{\Omega} N_i dx dy \frac{1}{\Delta t} A_i^t \end{aligned} \quad (18)$$

$$I_s^{t+\Delta t} = \frac{C}{\Delta t} V_c^{t+\Delta t} - \frac{C}{\Delta t} V_c^t \quad (19)$$

식 (18)과 식 (19)를 변압기의 모든 루프에 적용하고 이를 식 (11)과 결합하면 변압기의 과도특성을 해석할 수 있게 된다.

변압기의 자장을 해석하는 경우 투자율은 일정한 값을 가지지 않고 자장의 크기에 따라 그 값이 결정되는 비선형 특성을 가진다. 이러한 비선형문제의 해석은 단 한번의 계산만으로는 정확한 자장의 분포를 구할 수 없다. 본 연구에서는 수렴속도가 빠르고 해의 안정도가 뛰어난 뉴턴-랩슨법을 적용하여 비선형 해석을 하였다.

#### IV. 적용 사례

전장에서 전개한 이론 및 알고리즘을 이용하여 작성된 프로그램을 임의의 변압기 모델에 응용·적용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

##### 4.1 모델

그림 4와 같은 축대칭 3차원 모델을 선정하였고, 이것을 해석하기 위한 회로의 개념도는 그림 5와 같다. 그림 5의 연필모양으로 표시된 것이 저항을 가진 코일 요소이다. 강압 변압기로서 1차 축의 코일 상단부 및

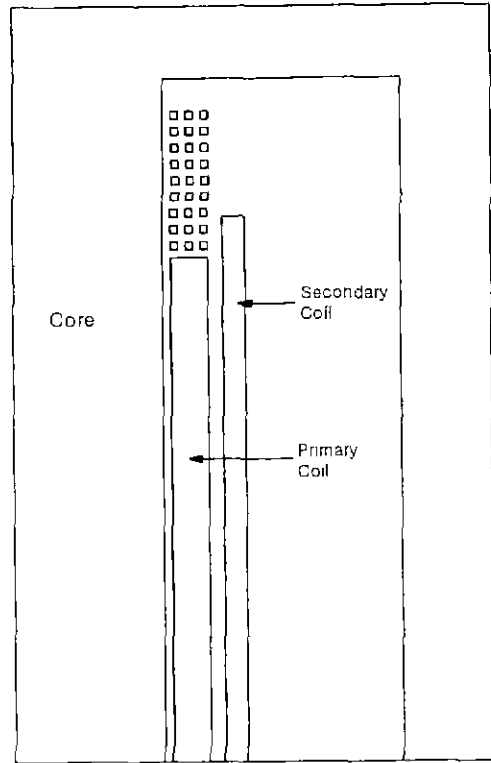


Fig. 4. Analysis model (Axisymmetric 3-dimensional).

중단부로 나누어 상단부는 개개의 코일을 단독으로 독립시켰으며 상하의 코일사이에 정전용량이 삽입된 모델로 택했다. 중앙부의 1차 코일은 정전용량이 없는(물론 고려해야 하지만 너무나 많은 컴퓨터 기억용량이 필요하므로 간단히 하기 위해서 생략했음) 집중권선(175 turns)으로 취급하였다. 2차 권선의 권회수는 100 Turns로서 1000 Ω의 외부 부하저항을 가지고 있다. 또한 1차와 2차의 전위의 기준을 정하기 위해 공통접지선도 함께 주어졌다. 그림 5에서 각 소자의 인접된 곳

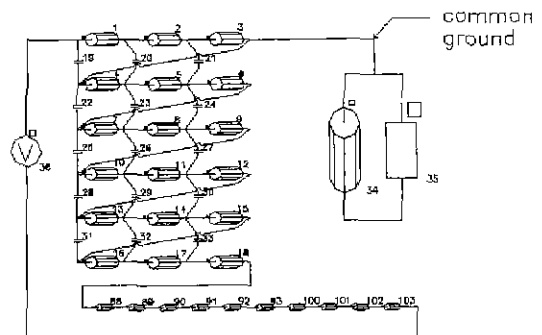


Fig. 5. diagram of general concept.

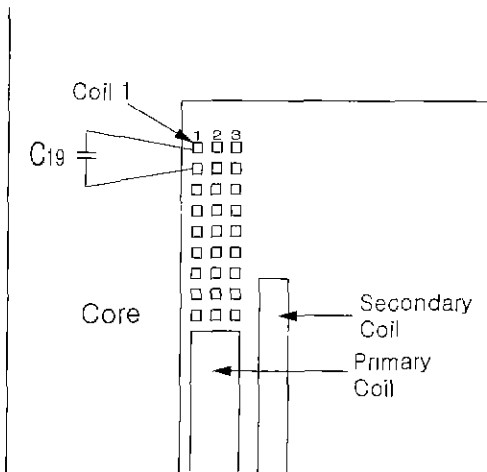


Fig. 6. Enlarged model.

에 조그마한 사각형은 회로에서의 극성을 표시하기 위한 것이다. 그림 6은 해석결과와의 설명을 위해 코일과 캐패시터에 번호를 붙인 확대도이다.

4.2 정전용량 계산 결과

권선간의 정전 용량을 계산하기 모델은 그림 4 또는 그림 6에서 1차 측의 코일 상단부분만을 고려한 경우와 같이 코어 주위에 여러 개의 코일이 독립적으로 감겨져 있는 것이다. 이 때 어느 두 도체에는 각각에 1[V]와 0[V]를 인가하고 다른 모든 도체에는 등전위 조건을 주고 유한요소해석을 한 다음 식 (5)를 이용하면 두 도체간의 정전용량이 계산된다. 각 권선 사이의 정전용량을 계산한 결과 권선이 인접된 것과 그렇지 못한 것과의 차이는 매우 크게 나타났으므로 인접된 정전용량만

해석에 도입하였으며, 각 인접 권선사이의 정전용량은 대체로 같은 값인 0.001[nF]으로 입력하였다.

4.3 입력전원 및 계산 방법

충격 전압은 아주 짧은 시간동안에 변압기에 가해지므로 입력전원으로는 120[V] DC를 주었으며 0.1[μs]의 시간간격으로 8[μs]까지 80단계로 나누어 해석하였다. 이러한 시간정도에서는 웬만한 모든 전원은 DC로 간주될 수 있고, 또한 권선간의 인덕턴스와 정전용량에 의한 과도상태를 관측할 수 있게 된다. 물론 변압기 전체로서는 훨씬 더 긴 시간이 지나야 정상상태에 진입하게 된다. 이는 권선간의 시정수와 변압기 전체의 시정수는 엄청나게 차이를 의미한다.

4.4 결과 검토

그림 7(a)부터 그림 7(c)는 각 시간별로 해석된 자력선의 분포를 보이고 있다. 전원이 인가된 직후 그림 7(a) (0.1 μs)에서는 모든 자력선의 발생이 1차 권선 중 집중권선에 의해 이루어지고 캐패시터가 있는 코일 부분에서는 캐패시터 전류로서 자장의 형성이 이루어지지 않는다. 또한, 급증되는 자장은 2차에 전압 및 전류를 유기시켜 2차 전류에 의한 반발이 생기므로 2차 코일을 침투하지 못하고 1차와 2차 사이를 통해 자력선은 자나가게 된다. 그림 7(b) (1 μs)에서는 상단의 캐패시터부의 전류보다 코일의 전류에 의한 자력선의 회전이 시간 변화를 하고 있고, 또한 더 많은 침투전압이 걸림을 알 수 있다. 따라서, 균등공간 분포의 권선인 경우는 상단부터 제1과 제2권선 사이에 높은 전장이

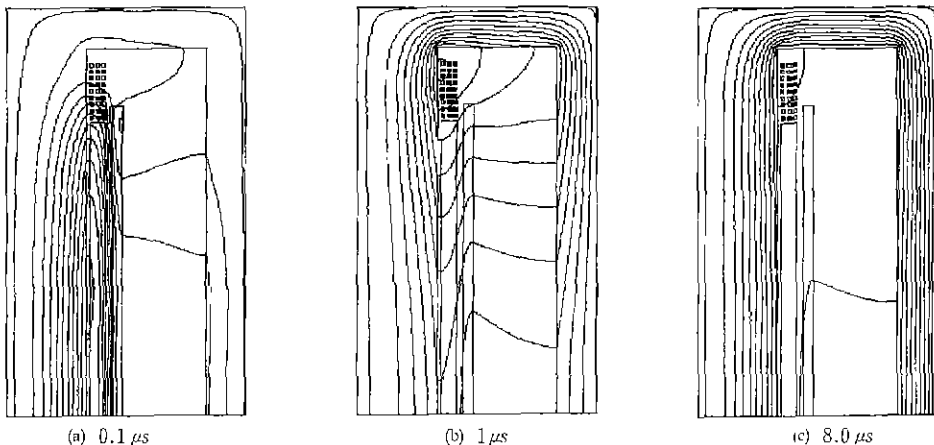


Fig. 7. Flux distribution.

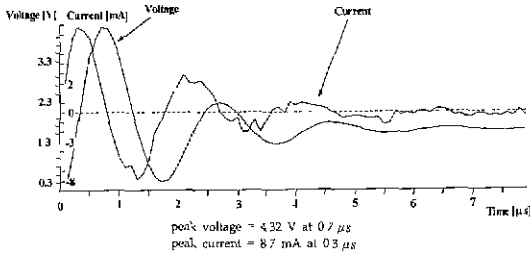


Fig. 8. Voltage and current of capacitor #19.

발생됨을 알 수 있는 것이다. 마찬가지로 급격한 캐패시터의 전류변화는 그 전류가 인접된 코일을 통해 흐를 것이므로 그림 9에서 보듯이 전류 및 전압의 변화율에 차이가 있음을 나타낸다. 그림 7(c) (8  $\mu$ s)에서는 캐패시터 전류에 의한 과도 현상은 거의 지나고 변압기 전체의 정상적인 자력선 분포모양을 갖추고 있다. 즉 모든 자력선은 1, 2차 코일 모두를 둘러싸고 코어를 통해 지나가고 있음을 보여준다. 그러나 여기서 조심할 것은 아직도 자력선의 수(즉 자속밀도)는 점점 증가하고 있는 추세에 유의해야 한다. 그러나 이 시간 이후의 해석은 진행하지 않았다. 왜냐하면 권선간의 최대전압은 이 기간에 나타난 최대전압보다 그리 많지 않기 때문이다.

그림 8에서 그림 12는 각부의 전압과 전류를 시간영역에서 그린 것이다. 그림 8은 상단부와 중단부의 캐패시터를 흐르는 전류 및 양단의 전압이다. 캐패시터 양단간의 전압은 바로 코일 한 층간의 전압이므로 절연 파괴와 밀접한 관계가 있다. 1차 권선의 전압은 물론 DC로 일정하고 전류가 처음 몇 스텝에서 급증함을 알 수 있으며 약간의 진동을 거쳐 거의 정상상태에 도달되었음을 볼 수 있다. 그림 9는 상단부에 있는 코일의 전압과 전류를 나타내는 여기서 전압은 단순히 코일 하나에 걸리는 저항 전압과 인덕턴스 전압을 의미하며 코일간의 전압이 아님에 유의 바란다. 그림 10은 캐패

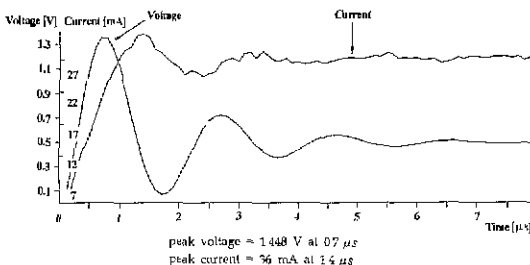


Fig. 9. Voltage and current of coil #1.

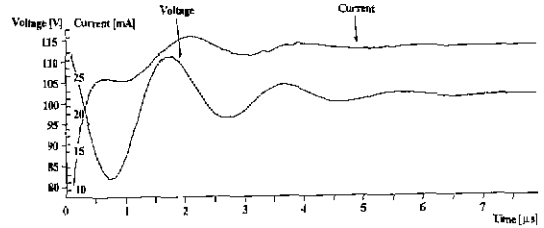


Fig. 10. Voltage and current of center coil (no capacitance).

시터가 없는 집중 권선부의 전압과 전류이며 초기의 전압은 전부 여기에 걸리다가 점점 전압이 캐패시터로 나누어 걸리면서 여기의 전압이 감소됨을 알 수 있다. 물론 공진회로를 구성하여 진동되는 전압과 전류 파형을 볼 수 있다. 지금까지의 그림으로써 대략 40 또는 50 스텝에서부터 캐패시터 및 인덕터에 의한 과도 현상은 지난 것으로 볼 수 있다. 그림 11과 그림 12는 1차 및 2차 코일 전류와 전압을 그린 것이다. 이 정도의 시간에서 이미 2차 권선전류에 의한 반발도 많이 줄었음을 알 수 있다. 그리고 그림 12에서 보듯이 그 후의 단자전압이 거의 일정(약간씩 줄기는 하지만)한 것을 관측할 수 있을 것이다. 이것은 DC전압에 의한 R-L 직렬회로의 전류가 증가하고 있는 과도상태에 있음을 의미하고 아직도 자장이 증가하고 있으므로 2차 권선에 전압이 유기되고 있음을 보여주고 있는 것이다. 따라서 권선간의 캐패시터가 의미가 있는 시간대와 그것에 의한 과도기가 지난 변압기권선만에 의한 과도기로 나

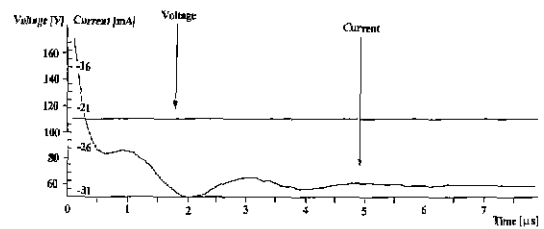


Fig. 11. Source voltage and current.

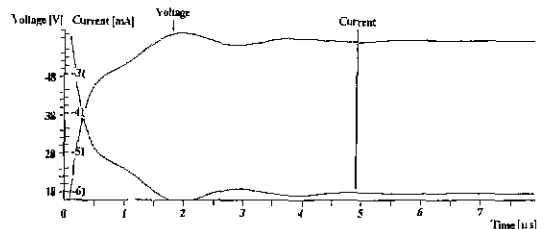


Fig. 12. terminal voltage and current of secondary coil (Load 1 k $\Omega$ ).

누어서 해석하여야 할 것이다. 그러나 변압기의 절연 파괴에 관심이 있는 경우는 물론 초기의 콘덴서에 의한 과도기간에 관심을 두어야 할 것이다.

위에서 살펴본 변압기의 해석 결과는 써지전압의 인가시 3 [ $\mu$ s] 이내에 사고여부를 판단할 수 있는 자료가 될 수 있음을 알 수 있었다. 또한 자장분포의 시간에 따른 변화 즉 물리적 개념의 파악이 쉬워졌으며 각 권선, 권선간, 전 전류 및 부하전류 파형의 시간변화를 알 수 있었다.

### V. 결 론

본 연구에서는 변압기에 외부로부터의 이상 써지전압이 인가되었을 때 권선에 유입되는 돌입전류를 계산하는 알고리즘을 제시하였다. 돌입전류는 주로 권선간에 분포되고 있는 정전용량과 인덕턴스에 의해 지배되는데 이것을 해석하는 기법으로 전장과 자장을 분리하여 모두 유한요소법을 이용하였다.

권선간의 정전용량 계산은 3차원 정전장 계산을 시행하여 용량계수 또는 전위계수를 계산하였다. 이때 계산된 계수 중 비교적 큰 값의 계수만 택함으로써 컴퓨터의 소요용량 및 계산시간을 단축시킬 수 있다. 자장 해석은 계산된 정전용량을 권선간의 절점을 택하여 삽입하고 자기회로를 해석하였다. 이때의 인가전압은 직류로 취급하여도 무방하다. 이것은 권선의 인덕터 및 용량에 의한 시정수가 전체회로 시정수에 비해 상

당히 짧기 때문이다. 그리고 권선사이의 전계의 세기는 삽입된 캐패시터의 양단전압을 권선간 거리로 나눈 값으로 취급하여 검토하였다.

예제를 통한 변압기의 해석 결과는 써지전압의 인가시 본 모델의 경우 3 [ $\mu$ s] 이내에 사고여부를 판단할 수 있는 자료가 될 수 있음을 알 수 있었다. 또한 자장 분포의 시간에 따른 변화 즉 물리적 개념의 파악이 쉬워졌으며 각 권선, 권선간, 전 전류 및 부하전류 파형의 시간변화를 알 수 있었다.

본 논문에서 제시한 기법은 실제의 제작모델의 설계시 권선모양에 따른 돌입전류 및 전반적인 절연파괴에 대한 안전도를 판단 할 수 있을 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 단국대학교 연구비에 의한 연구결과임.

### 참 고 문 헌

- [1] J. Duncan Glover, Mulukutla Sarma, PWS Publishing Company (1994) pp. 79-136.
- [2] 전기기술 편찬부, 변압기 공학, 성안당 (1995).
- [3] Z. Azzouz, A. Foggia, L. Pierrat and G. Meunier, IEEE Trans. on Mag., **29**(2), 1407(1993).
- [4] S. Tabaga, L. Pierrat and A. Foggia, ICEM, (2), 753(1994).
- [5] S. A. Holland and L. Haydock, ICEM, (2), 757(1994).
- [6] D. Shen, G. Meunier, J. L. Coulomb, J. C. Sabonnadiere, IEEE Trans. on Mag., **21**(6), 2288(1985).

## Calculation of Inrush Current of a Transformer using FEM

Joon-Ho Lee and Ki-Sik Lee

Dept. of Electrical Engineering, Dankook University, Seoul 140-714, Korea

(Received 14 October 1998, in final form 19 February 1999)

The inrush current of transformer can flow when the overvoltage caused by surge or external faults is applied. In this paper, an algorithm for the calculation of this inrush current is proposed. The capacitances of windings are precalculated by using 3 dimensional FEM and are appended to circuit of the transformer. And transient characteristics of the transformer are analyzed by axisymmetric FEM which is coupled magnetic field of transformer and circuit of transformer. When a transformer encounters abnormal voltage, using the proposed method, internal magnetic field of transformer, voltages and currents of windings are calculated.