

# 전기설비 사고의 열적 특성 분석

## Analysis of Heat Characteristics for Fault Power Utility

김 기 화\*  
Kim, Ki-Hwa

### Abstract

In this study, EMTP(Electromagnetic Transients Program) which is one of the most well-known computer simulation methods is used to collect the data for a power plant fault. EMTP is the program for an interpretation of the phenomena of electric transients, and is designed to manifest the data of the electric current and voltage etc. at the time of a power plant fault. By EMTP, I analyze the properties of the heat energy which are transferred from the electrics when a power plant fault brings out. In terms of the results of this study, it is able to measure the heat energy at a power plant fault(power transformer) and to be acquired of the related data. And moreover, these data are expected to be used as a standard for the protection of the fire owing to a high voltage power transformer fault.

Key word : EMTP(Electromagnetic Transients Program), power plant fault.

### 국문요약

본 연구에서는 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 전력설비사고의 데이터를 수집하는 방법인 EMTP 프로그램을 이용하여 전기설비중 중요도가 가장 큰 전력용 변압기에서 발생하는 변압기 외부사고, 내부 지락 사고, 상간 단락사고, 층간 단락사고 등에 대한 시뮬레이션 하였다. 전기설비에 사고가 발생할 경우에는 주울 열에 의한 절연 열화등 사고시의 변화에 대하여 화재로 비화되기 때문에 열과의 관계가 가장 밀접한 전기적인 특징인 전류량을 추정하여 데이터로 분석하였다. 그 결과 변압기 사고시 발생하는 열 에너지에 대한 데이터화가 가능하였으며 이를 바탕으로 전력설비사고로 발생하는 열에 의한 화재발생 유무를 확인하는 척도로 이용될 수 있다.

### 1. 서 론

현재의 산업설비들은 전력 의존성이 대단히 크므로 전력설비에서 발생하는 사고인 정전이나

화재와 같은 문제점이 날로 확대되고 있다. 전력 설비의 안정성확보를 위해서는 평상시 점검과 측정이 필수적이거나 주로 전원차단 후 점검과 측정이 이루어지고 있어 이상 발열로 인한 열화 등에 대한 진단은 이루어지지 않고 있다. 그러므로

\* 가톨릭상지전문대학 전기과 교수, 중신회원

활선 상태에서는 과부하시에 변압기, 선로, 모선, 개폐기 등에서 이상시 과열이 발생하게 되나 전원차단 후의 측정으로는 데이터의 취득이 매우 어렵다.

전기설비중 가장 중요한 변압기는 절연유, 절연지 외에 동, 알루미늄 등의 도전재료와 철심 재료로서 규소 강판을 사용하며 이를 지지하는 철과 스텐인레스 등이 사용된다. 이 재료중 변압기 열화와 관련되는 것은 절연유, 절연지 권선피막 등의 절연재료이다. 변압기의 수명은 이들 재료가 뇌서어지, 개폐서어지, 전기적, 기계적 응력에 의한 단락, 단선 등에 의하여 파괴되는 시점에 의하여 결정되며, 기계적 열화요인도 사고의 원인이 될 수 있다. 변압기 사고는 내부사고와 외부사고의 두 가지로 나눌 수 있으며 내부사고는 권선(coil), Lead선의 과열 및 방전, 내부 절연물의 방전, 파괴 및 열화 등을 들 수 있고, 외부사고로는 Tank외함, 배관, 가스켓, 붓싱, 외부 연결 선로의 사고 등을 들 수 있다.

변압기에서 발생하는 사고는 일시에 많은 전류가 흐르고 이로 인한 절연유의 팽창과 심할 경우 폭발로 이어져 화재의 원인이 되기도 한다. 그러나 전력용 변압기 사고는 정해진 시간에 일어나는 것이 아니고 불시에 일어나는 사고가 대부분이다. 이러한 사고를 분석하고, 그에 대한 대책을 세우는 것은 어려운 일이다. 특히 초고압용 변압기의 경우 사고 상황을 알 수 있는 데이터를 얻기 위하여 실제 사고시의 데이터를 취득하거나, 실제 실험에 의하여 해야하나 실제실험은 위험성이 대단히 커서 곤란하다. 따라서 본 논문에서는 EMTP프로그램을 이용하여 초고압 전력용 변압기의 여러 가지 이상상태 중 외부사고, 내부 지락사고, 상간 단락사고, 층간 단락사고 등을 시뮬레이션 하여 이상상태시의 전압과 전류 등의 데이터를 추출하고 이를 바탕으로 열과의 관계를 분석하여 논하고자 한다.

## 2. EMTP

EMTP(Electromagnetic TRansients Pro-

gram)는 전력계통의 과도현상을 분석하기 위한 수리계산용 프로그램으로 미국의 BPA(Bonneville Power Administration)에 의하여 개발되었다. EMTP의 원래 목적은 전력계통의 써어지(surge)현상만을 분석하기 위한 것이었으나 발전을 계속하여 동기발전기, 싸이리스터(thyristor), 제어계, 회전 기기의 모델이 추가되고, 발전기, 교류-직류변환기 해석, 고조파 해석까지 할 수 있는 프로그램이 되었다. EMTP를 이용한 과도현상 해석이란 물리적 실체를 통한 과도현상에의 직접적인 체험이 아니고, 수학적 형식과, 모델을 통한 간접적인 추정이며 이 추정은 시뮬레이션의 정밀함과 충분한 신뢰도를 가지고 있다. EMTP 프로그램의 방법론은 계통요소들을 수학적으로 표현하는 모델링 방법과 이들 수학적 표현으로부터 원하는 과도 전압, 전류의 발생 및 전파상태를 계산하는 수치해석이다.

EMTP를 이용한 과도현상 분석은 충분한 신뢰도로 인하여 실제 실험에 의한 결과와 유사할 뿐만 아니라 반복적인 실험이 가능하고 초고압에서도 행할 수 있으며 위상의 변화를 정확히 실험할 수 있는 장점이 있다.

## 3. EMTP의 수치해석

EMTP 계산 방식에 있어서 Well-posed initial-value problem을 고려하여 식 1로 나타내면

$$\begin{aligned} y &= f(t, y) \\ a &\leq t \leq b \\ y(a) &= \alpha \end{aligned} \quad (1)$$

EMTP의 수치해석중 하나인 Trapezoidal Rule을 설명하기 위해 식 1의 양변을  $t$ 에서  $t + \Delta t$ 까지 적용하면 식 2와 같다.

$$y(t+h) - y(t) = \int_t^{t+h} f(t, y(t)) dt \quad (2)$$

식 2의 우변을 수치 해석적으로 표현하면 식 3과 같으며 이 식에서 우변의 적분항은 그림 1과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

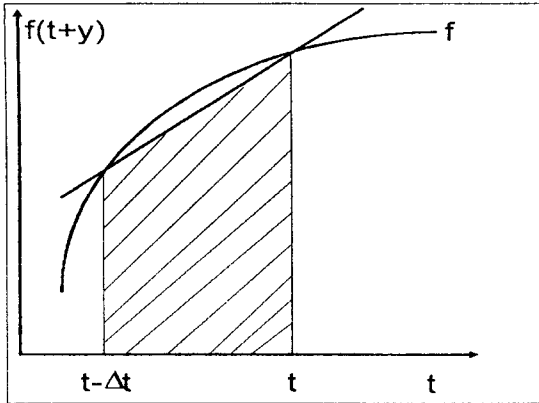


그림 1. Trapezoidal rule.

$$\int_{t-\Delta t}^t f(t, y(t)) dt \approx \frac{h}{2} [f(t, y(t)) + f(t-\Delta t, y(t-\Delta t))] \quad (3)$$

따라서

$$y(t) = y(t-\Delta t) + \frac{h}{2} [f(t, y(t)) + f(t-\Delta t, y(t-\Delta t))] \quad (4)$$

이다. 식(4)에서  $h = -\Delta t$ 이면

$$y(t) = \frac{\Delta t}{2} [f(t, y(t)) + f(t-\Delta t, y(t-\Delta t))] + y(t-\Delta t) \quad (5)$$

그러므로 식 5는 식 1의 해를 얻기 위한 적분식이 된다.

지금까지의 식을 정리하고

$$R_{T-i} = \frac{\Delta t}{2}$$

$$H_{T-i} = \frac{\Delta t}{2} [f(t, y(t)) + f(t-\Delta t, y(t-\Delta t))] + y(t-\Delta t)$$

이라고 정의하면 식 6이 되어 최종값이 된다.

$$y(t) = R_{T-i} f(t) + H_{T-i} \quad (6)$$

유사한 방법으로 미분식을 정의하면 식 7과 같이 구할 수 있다.

$$f(t) = R_{T-d} y(t) + H_{T-d} \quad (7)$$

#### 4. EMTP의 적용

EMTP에서는 미분·적분식을 이용하여, R, L, C에 관한 복합적인 연산이 가능하므로 EMTP에서 얻을 수 있는 출력은 전압과 전류, 그리고 위상각을 얻을 수 있다. 따라서 EMTP 프로그램에서는 3상회로의 a, b, c상을 모두 표현할 수 있다.

기존 EMTP를 이용한 데이터의 수집은 전력용 변압기의 경우 변압기 외부에서 일어나는 사고 즉 변압기 1차측 단락사고 및 지락 사고에 대한 전압, 전류에 대한 데이터의 수집과 변압기 2차측 단락사고 및 지락사고가 발생할 경우의 데이터만을 수집할 수 있었다. 그러나 본 연구에서는 변압기의 내부사고인 내부 지락사고, 상간 단락사고, 2차측 층간 단락사고를 시뮬레이션 하여 데이터를 수집하였다.

#### 5. 실험연구 및 고찰

변압기에서 발생할 수 있는 사고 전압, 전류를 얻기 위해서 시뮬레이션은 그림 2와 같이 154/22.9 kV, 40 MVA급 초고압 변전소용 변압기를 대상으로 하였다. 변압기의 부하는 40 MVA로 하였으며, 테브낭의 등가전원으로 각각의 선로는 50 km, 30 km 떨어진 전원 소스로 하였다. EMTP에서는 BUS단위로 전압 및 전류를 측정하는 형태이므로 BUS 3은 대상 변압기의 1차측

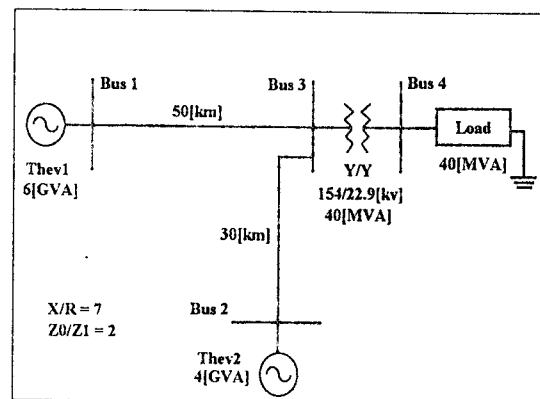


그림 2 변압기 사고 시뮬레이션 모델 계통도.

측정부분이며, BUS 4는 변압기의 2차측 측정 장소이다. EMTP 시뮬레이션 시간은 사고 전 2주기(1주기 = 1/60 sec), 사고후 5주기이고, 주기당 16번 샘플링을 하였다. 외부사고는 부하역률 1.0인 경우에 변압기 2차측 A상과 B상의 위상차가 0°, 90°인 때의 단락현상을 시뮬레이션 하였다. 또한 내부사고에서 각 상 지락사고는 부하역률 1.0에서 변압기 1차측의 Va의 위상이 0°인 경우와 90°인 경우 A상 지락을 시뮬레이션 하였다. 상간 단락사고는 같은 부하역률에서 Va의 위상이 0°인 경우와 90°인 경우 A상과 B상의 단락현상에 대하여 시뮬레이션 하였다.

### 5.1 변압기 외부사고

그림 3은 변압기를 중심으로 외부 부하측에서 일어나는 사고 발생을 시뮬레이션한 것으로서 사고시의 전압을 EMTP 프로그램을 이용하여 출력한 데이터로 EMTP내부에서 지원하는 도구인 PCPLOT을 이용하여 출력한 결과이다. 이때 BUS 4에서 출력 데이터를 얻은 것으로 b,c상 전압의 크기를 나타낸다. 그림 4는 그림 3과 동일한 시간의 전류값을 BUS 3의 CT를 이용하여 a, b, c 각 상의 전류 값을 나타내었다. 사고 전 2주기동안은 작은 부하전류가 흐르지만 사고직후 부터는 큰 전류값이 출력됨을 볼 수 있다.

그림 5는 변압기 외부 부하측 사고시 전류의 크기에 따라 발생되는 열을 시간별로 나타낸 것

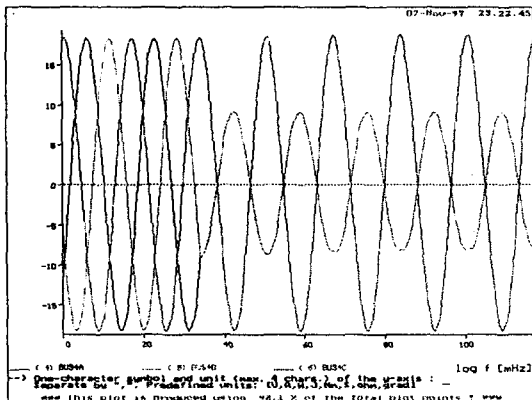


그림 3 변압기 외부사고(BUS4의 a,b,c상 전압).

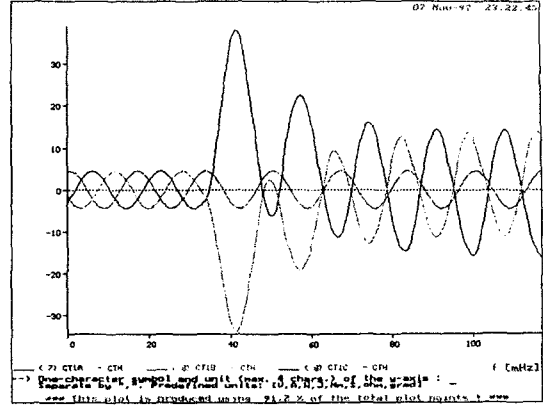


그림 4. 변압기 외부사고(변압기 1차측 CT의 a,b,c상 전류).

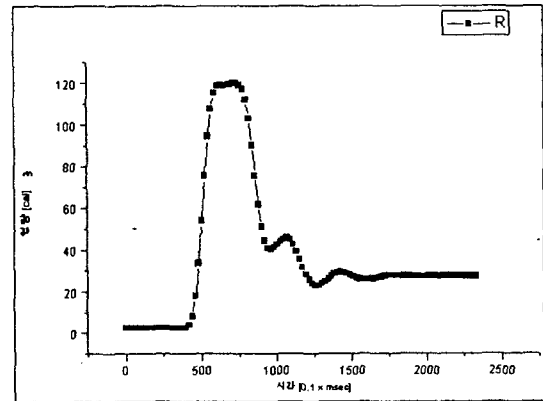


그림 5. 변압기 부하측 외부사고의 1차측 a상 발생열.

으로 EMTP 시뮬레이션 결과로 얻은 데이터를 전류와 열과의 관계를 이용하여 분석하였다. 변압기의 크기와 무게 등이 변압기의 종류에 따라 다르며 변압기의 설치상태 역시 다르므로 본 연구에서는 1Ω으로 가정한 주울 열의 형태로 분석하였다. 그림에서 알 수 있드시 외부 사고시에는 사고 발생시에만 큰 전류가 흘러 많은 열이 발생하고 다음 주기부터는 전류가 점차 감소하여 발생열도 감소함을 알 수 있다.

### 5.2 변압기 내부 지락사고

그림 6은 변압기 내부에서 a상이 발생하는 지락사고를 시뮬레이션한 것으로 변압기 1차측인 BUS 3에서의 전류를 측정된 것이다. 지락된 a

상 전류만이 큰 값으로 변화하고 다른 상인 b,c는 전류의 변화가 거의 없다. 그림 7은 그림 6과 같은 때의 변압기 2차측인 BUS 4에서 측정된 전류값이다. 이 경우에는 변압기에서 내부 지락사고가 발생하였으므로 사고가 발생한 a상은 외부로 전류가 흐르지 않고 정상상태인 b,c상에 많은 전류가 지속적으로 흐르고 있음을 알 수 있다.

변압기 내부 1상에서 지락사고가 발생한 경우에 대해 시뮬레이션한 결과 그림 8과 같이 많은 양의 열이 사고시부터 지속적으로 발생함을 볼 수 있다. 내부 지락사고 발생시 많은 열의 지속적인 발생으로 인하여 화재의 위험이 변압기 외부사고에 비하여 대단히 높음을 알 수 있다.

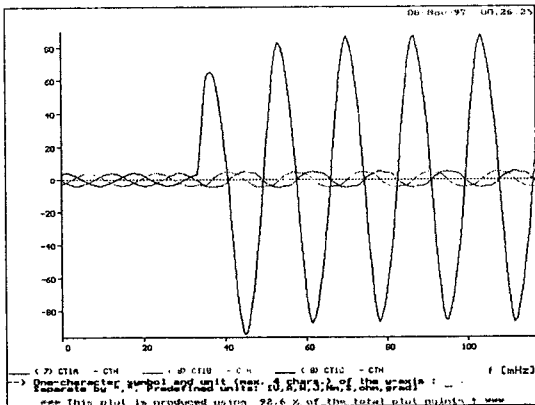


그림 6. 변압기 내부 지락사고(변압기 1차측 CT의 a,b,c 상 전류).

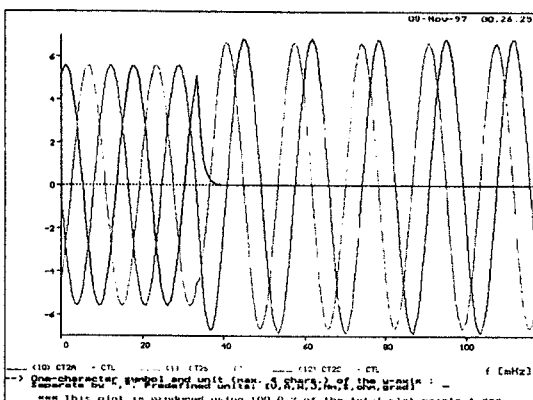


그림 7. 변압기 내부 지락사고(변압기 2차측 CT의 a,b,c 상 전류).

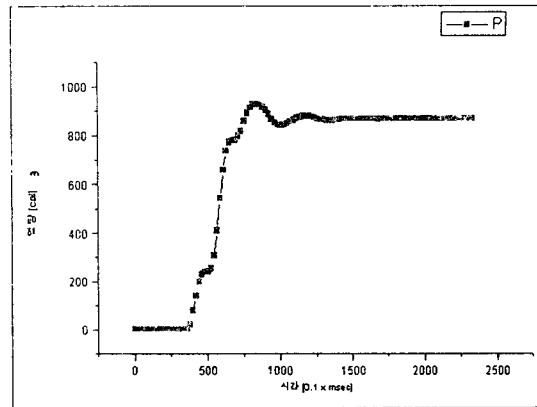


그림 8. 변압기 내부지락사고의 1차측 a상 발생열.

### 5.3 변압기 내부 상간 단락사고

그림 9는 변압기 내부 상간 단락사고를 시뮬레이션한 것으로 변압기 1차측에서 측정된 것이다. 변압기 내부 상간 단락사고 역시 5.2절의 지락사고시와 같이 큰 사고전류가 발생하였다. 그림 10은 변압기 2차측에서 사고발생시의 전류값을 나타낸 것이다. 1차측 사고 상간에는 큰 사고전류가 맥동하며 나타나고 있는것은 사고순간 DC-Offset에 의한 것이다. 또한 2차측에서 측정된 전류는 단락되었기 때문에 두 상은 전류가 합하여진다.

변압기 내부 상간 단락사고를 시뮬레이션한 결과 그림 11과 같이 많은 양의 열이 사고시 부터 맥동하면서 지속적으로 발생함을 보인다. 내

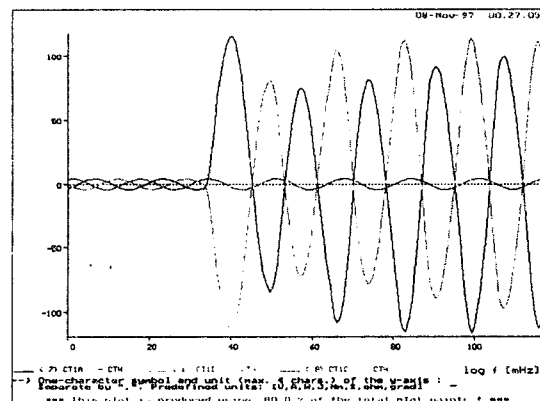


그림 9. 변압기 내부 상간단락사고(변압기 1차측 CT의 b,c상 전류).

부 상간 단락사고 발생시 많은 열의 지속적인 발생으로 인하여 시간 증가에따라 화재 위험이 변압기 내부 지락사고와 같이 대단히 높음을 알 수 있다.

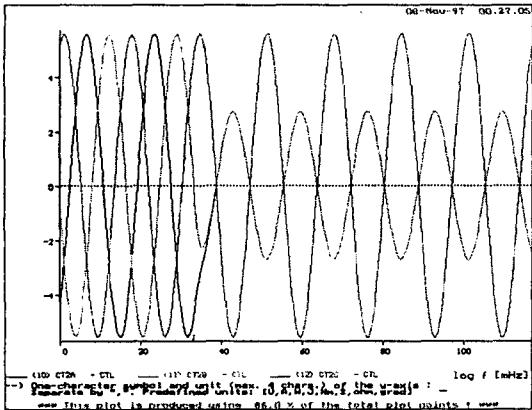


그림 10. 변압기 내부 상간단락사고(변압기 2차측 CT의 a,b,c상 전류).

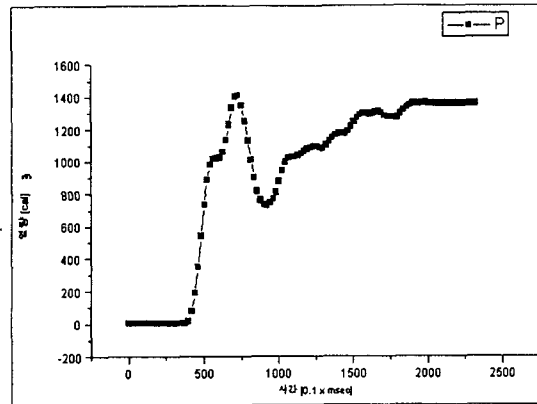


그림 11. 변압기 층간단락사고의 1차측 a상 발생열.

#### 5.4 시뮬레이션 전류량

전기설비 사고중 본 연구에서는 주로 초고압 변압기(154/22.9kV)에서 발생빈도가 많은 부하측 사고 현상과, 변압기 내부의 지락사고, 상간 단락사고, 그리고 층간 단락사고에 대하여

표 1. 변압기 사고 전·후의 전류량.

		외 부 사 고						내 부 지 락 사 고					
		1 차 측			2 차 측			1 차 측			2 차 측		
	주기	a상	b상	c상	a상	b상	c상	a상	b상	c상	a상	b상	c상
사고 전	1	1.6	1.62	1.64	1.86	1.87	1.89	1.52	1.57	1.57	1.76	1.83	1.82
	2	1.6	1.62	1.64	1.86	1.87	1.89	1.52	1.57	1.57	1.76	1.82	1.82
사고 후	3	3.77	3.76	1.64	4.35	4.2	1.89	6.67	1.78	1.81	0.39	1.87	1.89
	4	3.18	2.88	1.69	4.06	3.63	1.95	6.91	1.85	1.83	0.04	1.95	1.94
	5	2.95	2.69	1.6	3.97	3.6	1.85	7.11	1.8	1.87	0.04	1.88	1.94
	6	3	2.66	1.64	3.96	3.55	1.89	7.12	1.81	1.86	0.04	1.89	1.95
	7	2.95	2.61	1.61	3.87	3.48	1.85	7.29	1.79	1.9	0.04	1.84	1.98
		상 간 단 락 사 고						층 간 단 락 사 고					
		1 차 측			2 차 측			1 차 측			2 차 측		
	주기	a상	b상	c상	a상	b상	c상	a상	b상	c상	a상	b상	c상
사고 전	1	1.57	1.57	1.52	1.82	1.82	1.76	1.61	1.56	1.55	1.77	1.81	1.79
	2	1.57	1.57	1.52	1.82	1.82	1.76	1.6	1.56	1.55	1.77	1.81	1.79
사고 후	3	7.3	7.26	1.53	1.26	1.14	1.77	1.95	1.56	1.57	1.77	1.81	1.81
	4	7.26	7.15	1.58	1.26	1.26	1.83	1.88	1.54	1.61	1.05	1.82	1.86
	5	7.22	7.24	1.49	1.18	1.18	1.72	1.85	1.56	1.55	1.15	1.78	1.78
	6	7.79	7.65	1.52	1.22	1.22	1.76	1.88	1.56	1.57	1.11	1.8	1.81
	7	7.76	7.67	1.49	1.19	1.19	1.72	1.85	1.56	1.54	1.13	1.81	1.77

분석하였다.

변압기에서 열의 주 발생요인인 전류에 대해 그 크기를 측정하여 사고 전 2주기의 전류값과 사고후 5주기동안의 모든 데이터를 표 1에 나타내었다. 변압기 내부의 층간 단락사고에 대한 시뮬레이션에서는 인접한 층간의 사고를 고려하였을 때 권선층간의 단락현상에의해 전류의 변화량이 큰 차이가 없었다. 따라서 변압기 사고 전후의 전류변화가 큰 것을 알 수 있다.

## 6. 결 론

전력설비중 초고압 변압기 사고시의 발생 열량을 EMTP를 이용한 전류를 수치적으로 구하여 이 전류에 의한 열량을 추정하는 것으로 부하측 외부사고, 내부 지락사고, 상간 단락사고, 2차측 층간 단락사고에 대한 시뮬레이션을 하였다.

시뮬레이션한 결과 변압기 자체 사고뿐만 아니라 외부사고에 대해서도 변압기에 많은 전류가 흐르고, 그 전류에 의하여 많은 열이 발생함을 추정할 수 있었다. 또한 변압기관련 전기사고시의 발생하는 전류를 수치화하여 이용함으로써

전기설비의 설계, 점검, 보수시에 전류에 의하여 발생하는 열에 의한 화재를 방지할 수 있는 적절한 데이터로 유용함을 알 수 있었다. 향후 EMTP를 이용하여 전선로, 모터, 발전기, 전기로등에 대해 다양한 과도상태를 시뮬레이션하여 열적 분석을 행한다면 전기사고로 인한 전기설비의 화재를 최소화할 수 있으며 설계 및 관리에 크게 기여할 수 있으리라 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. Walter A. Elmore, "Protective Relaying Theory and Applications", ABB Power T&D company Inc. 1994
2. 이진영, 윤명오, 이영재, "건축소방", 동일출판사, 1992
3. 백동현, "소방전기 시설론", 동일출판사, 1996
4. 편찬위원회, "22.9kV 수배전 설비" 대한전기기사협회, 1996
5. 이승재, 강상희, 김상태, 김기화, "Fuzzy Decision-Making을 이용한 지능형 변압기 보호계전 알고리즘", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 C, p891-p893, 1997.
6. 적외선 열화상 장비에 의한 열은도 분포시험연구, 한국전기안전공사 연구보고서, 1994.