

전력용 변압기의 차전류 특성분석

박재세(인천전문대학), 정동호(인천전문대학)

A study of differential current characteristic on power transformer

Jae-se Park, Dong-Hyo Jeong
Incheon City College

ABSTRACT

To comparative analysis of proposed techniques, the paper constructs power system model including power transformer, utilizing the EMTP, and collects data through simulation of various internal faults and magnetizing inrush.

1. 서 론

변압기의 사고 원인은 지속적인 과부하로 인한 내부 절연물과 절연유의 절연내력 저하 때문에 사고로 발전되는 경우와 낙뢰 등의 이상전압 발생으로 인한 경우, 그리고 외부단락 사고시 과전류로 인한 경우 등이 있다. 변압기의 사고 유형으로는, 변압기 권선의 선간단락과 층간단락, 권선과 철심간의 절연과파에 의한 지락사고, 고저압 권선의 혼축, 권선의 단선 등으로 분류된다.

변압기의 고장 유형별 고장율에 따르면, 가장 많이 발생하는 변압기 사고는 권선사고와 같은 변압기 내부의 사고이며, 탭 절환기, 붓싱 등에서 발생한 외부사고도 많이 발생된다. 이에 본 논문에서는 차전류의 순시치와 실효치 변동, 차전류의 고조파 분석을 통하여 변압기의 내부사고와 여자돌입등 외란 상태를 판별하여 보고자 한다.

변압기 보호방식에서, 여자돌입시에 보호계전기의 오동작을 방지하기 위하여 다음의 3가지 방법중에서 제2고조파 억제방식이 가장 많이 사용되고 있다.

- 감도 저하 방식 : 계전기의 동작코일에 병렬로 저항을 접속하여 검출감도를 낮게 하고 여자돌입전류가 감소 했을 시기를 추정하여 본래의 감도를 지니도록 하는 방법으로써 일정시간 트립 회로를 인터록(lock) 하는 방식이다. 단점은 내부사고가 발생하는 경우 사고의 정도에 따라서 보호가 늦어지는 경향이 있다.
- 비대칭과 저지 방식 : 여자돌입전류는 반파정류파형과 유사한 비대칭파가 되기 때문에 별도의 저지 계전기를 이용하여 동작코일과 직렬로 접속하여 여자돌입시 억제시킨다.
- 제2고조파 억제방식 : 1차측과 2차측 사이의 차전류가 발생할 경우, 내부고장시에는 기본파성분이 다량 함유되는 반면 여자돌입시에는 제2고조파 성분이 일정량 이상으로 함유되는 특성을 이용하여 기본파에 대한 제2고조파의 함유량을 이용하여 여자돌입을 판별하여 계전기 오동작을 방지한다.

2. 본 론

2.1 변압기의 여자돌입과 과여자 상태 모의

EMTP에서 변압기의 여자돌입과 과여자 상태를 모의하기 위해서는 포화 변압기 모델을 이용한다. 포화변압기 모델은 이상 변압기의 등가회로에 직렬저항과 인덕턴스 그리고 병렬 여자회로를 추가하여 모델링을 한다. 병렬로 삽입되는 여

자회로는 구간 선형형태로 입력되는 자속-전류($\lambda-i$)특성을 표현하는 비선형 인덕턴스로서, 이는 EMTP의 단상 변압기 모델에 내장되어 있다. 자속-전류 특성은 변압기 제작사에 의해 제공되는 V-I 곡선으로부터 EMTP내의 보조 프로그램인 CONVERT를 이용하여 구할 수 있다. 얻어진 히스테리시스 특

성 데이터를 EMTP의 입력데이터로 하여 변압기에 전원을 투입함으로써 여자돌입과 과여자 상태의 모의가 가능하다.

2.2. 변압기의 내부고장 모의

변압기의 내부고장 시뮬레이션은 고장발생 권선을 나누어 모델링을 하는 기법을 이용한다. 이 방법은 EMTP내의 보조 프로그램인 BCTRAN에 의해 얻어지는 변압기의 임피던스 행렬을 이용한다. BCTRAN은 변압기를 상호 결합된 요소로서 취급하여 EMTP에서 바로 처리할 수 있는 [R]과 [L] 행렬 데이터를 출력한다. 따라서 변압기의 권선에서 고장이 발생한 경우 [R], [L] 행렬을 고장조건에 부합되게 수정한 후 EMTP의 입력 데이터로 재활용함으로써 변압기의 고장 모의가 가능하다. 그림 1은 2권선 3상변압기를 임피던스 행렬을 이용하여 표현하기 위해 나타낸 것이다.

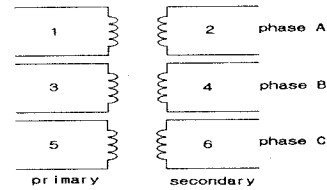


그림 1. 2권선 3상변압기

그림 1에서 변압기의 1차측 및 2차측의 전압은 저항과 인덕턴스를 이용하여 식(1)으로 표현된다.

$$\begin{aligned} v_1 &= R_{j1}i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt} + M_{14} \frac{di_4}{dt} + M_{15} \frac{di_5}{dt} + M_{16} \frac{di_6}{dt} \\ v_2 &= R_{j2}i_2 + M_{21} \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt} + M_{24} \frac{di_4}{dt} + M_{25} \frac{di_5}{dt} + M_{26} \frac{di_6}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

$$v_6 = R_{j6}i_6 + M_{61} \frac{di_1}{dt} + M_{62} \frac{di_2}{dt} + M_{63} \frac{di_3}{dt} + M_{64} \frac{di_4}{dt} + M_{65} \frac{di_5}{dt} + L_6 \frac{di_6}{dt}$$

여기서 V_1 및 i_1 는 각각 1차, 2차측의 순시전압, 전류를 나타내고 R_j , L_j 는 각각 저항 및 자기인덕턴스를 M_{ij} 는 상호인덕턴스를 나타낸다. 그리고 식(1)을 행렬식을 이용하여 표현하면

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_6 \end{bmatrix} = [R_{ij}] \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_6 \end{bmatrix} + [L_{ij}] \begin{bmatrix} \frac{di_1}{dt} \\ \vdots \\ \frac{di_6}{dt} \end{bmatrix} \quad (2)$$

이 되고, 행렬 $[R_{ij}]$, $[L_{ij}]$ 는 각각 식(3), (4)와 같다.

$$[R_{ij}] = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[L_{ij}] = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} \\ M_{21} & L_2 & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ M_{31} & M_{32} & L_3 & M_{34} & M_{35} & M_{36} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & L_4 & M_{45} & M_{46} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & L_5 & M_{56} \\ M_{61} & M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & L_6 \end{bmatrix} \quad (4)$$

따라서 그림 2 와 같이 변압기의 1차측 B상 권선이 a 와 b 로 나뉘어져 권선의 비가 $n_a : n_b$ 인 부분에서 지락고장이 발생한 경우

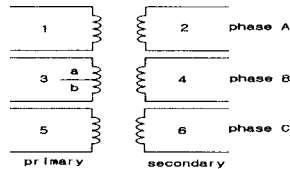


그림 2 1차측 B상 권선지락 고장

식(3), (4)로 표현되는 행렬은 각각 식(5), (6)과 같이 $[7 \times 7]$ 행렬로 변형된다.

$$[R'_{ij}] = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[L'_{ij}] = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} \\ M_{21} & L_2 & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ M_{31} & M_{32} & L_a & M_{34} & M_{35} & M_{36} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & L_b & M_{45} & M_{46} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & L_5 & M_{56} \\ M_{61} & M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & L_6 \end{bmatrix} \quad (6)$$

이와 같이 변압기 내부 권선의 임의의 지점에서 지락고장이 발생한 경우는 BCTRAN에서 얻어진 저항 및 인덕턴스 행렬을 $[7 \times 7]$ 행렬로 각각 수정한 후 다시 EMTP의 변압기 입력데이터로 이용함으로써 시뮬레이션이 가능해진다.

변압기의 권선에서 단락고장이 발생한 경우는 R, L 행렬을 각각 $[8 \times 8]$ 행렬로 변형하여 시뮬레이션이 가능하다. 그림 2.5는 변압기의 1차측 B 상의 권선에서 단락고장이 발생한 경우를 나타낸 것이다.

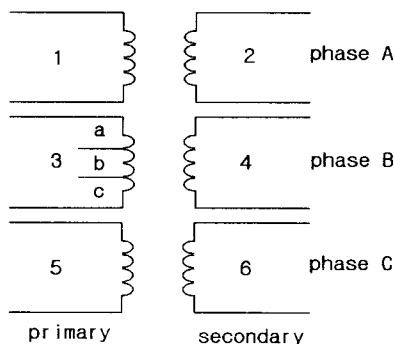


그림 3. 1차측 B상 권선간 단락 고장

그림 2.5는 3번째 권선이 a, b, c 로 분리되어 권선수가 각각 n_a, n_b, n_c 로 분리된 경우이다. 따라서 저항 행렬은 식(7)과 같이 $[8 \times 8]$ 행렬로 변형되며,

$$[R'_{ij}] = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 \end{bmatrix} \quad (7)$$

인덕턴스 행렬은 다음의 식(8)과 같이 변형된다.

$$[L'_{ij}] = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} \\ M_{21} & L_2 & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ M_{31} & M_{32} & L_a & M_{34} & M_{35} & M_{36} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & L_b & M_{45} & M_{46} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & L_c & M_{56} \\ M_{61} & M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & L_6 \end{bmatrix} \quad (8)$$

변압기의 내부 권선에서 단락고장이 발생한 경우에도 권선지락 고장이 발생한 경우와 같이 임피던스 행렬을 고장부분의 권선비와 누설계수를 이용하여 $[8 \times 8]$ 행렬로 수정하고, 수정된 임피던스 행렬을 EMTP의 변압기 입력데이터로 이용함으로써 시뮬레이션이 가능해진다.

2. 3 모의 분석

그림 4 는 제안된 기법을 도출하는 과정과 성능 평가를 위하여 사용한 모의계통이다. 송전선은 현재 사용중인 ACSR의 데이터를 이용하였고, 3상 2권선으로, 45/60MVA, 154kV/22.9kV, Δ -Y 결선인 변압기를 모의대상으로 삼았다. 전력용 변압기 시스템은 변압기의 과도해석을 거친 후, 이를 EMTP의 EEUG 버전 WatATP 99 소프트웨어를 이용하여 여자돌입, 내부고장을 모의하였다. 샘플링 주파수는 60[Hz] 시스템에서 720[Hz]인 주기당 12 샘플링과 8640[Hz]인 주기당 144 샘플링을 하였다. 여자돌입과 고장발생위치, 고장종류들을 가변 시켜 여러 가지 다양한 상황을 모의하였다.

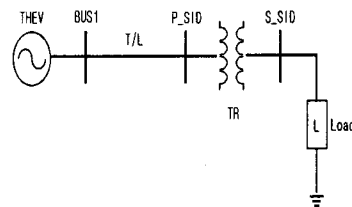


그림 4. 모의 계통

모의 계통에 대한 변압기의 여자돌입과 여러 가지 내부고장상태 등 약 20여 가지를 WatATP 99로 시뮬레이션을 수행하였다. 전류의 신호는 Wpcplot 를 이용하여 그래프로 나타내었으며, 그 과도상태를 해석·고찰하였다.

정상상태에서 변압기의 양단 전압·전류신호는 정현파로서 크기는 변압비에 따라 일정하며 120° 위상차를 갖는 3상평형이 된다.

여자돌입상황은 WatATP 99에서 0.04448초 시점에서 변압기를 계통에 투입한 경우로 모의된 것이다. 가압 직후의 3상전압은 초기에 불평형이고 시간이 지남에 따라 평형이 된다. 변압기에 인가된 전압의 초기위상은 A상을 기준으로 하는데, 전류 크기는 전압 위상이 0° 에서 인가될 때가 가장 크며 90° 에서 인가될 때가 가장 작게 나타난다. 또한 시정수에 따라 여자돌입상태의 지속시간이 달라진다. 여자돌입시에는 가압측에만 매우 큰 전류가 흐르고, 2차측에는 이론적으로 전류가 거의 흐르지 않

으나, 실제로는 1차측에 비하여 작은 비율로 나타나는 것을 알 수 있다. 이때 차전류가 크게 나타나게 된다.

2.3.1 3상 차전류의 순시치 분석

종래의 고조파억제 방식 디지털 비유차동계전기법에서는, 변압기의 1,2차측 전류의 차를 이용한 차전류를 사용하고 있다. 본 절에서는 차전류의 순시치와 실효치를 분석하였다. 보호계전기에서 계기용 변성기로부터 입력되는 데이터는 순시치이다. 이들은 사고발생시점과 고장위치, 그리고 변압기 투입위상각에 따라 그 양상이 달라지게 되며, 이에 따라 차전류도 다르게 나타난다.

그림 5는 내부 지락시의 3상 차전류의 순시치를 나타낸다. 그림과 같이 정상상태에서의 차전류는 발생하지 않거나 약간의 전류가 나타나다가, 내부 지락사고가 발생되면 과도상태의 고장전류로 인하여 고장과 관련된 상의 순시치 전류들은 급격하게 상승함으로 인하여 차전류의 순시치는 급격하게 커지게 된다.

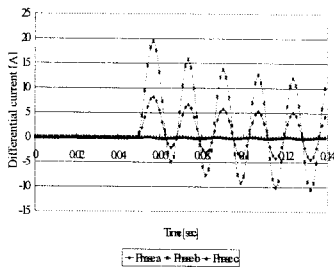


그림 5. 지락사고시

그림 6은 내부 단락사고의 경우, 3상 차전류의 순시치를 나타낸다. 그림과 같이 정상상태에서 차전류는 발생하지 않거나 약간의 전류가 나타나다가, 내부 단락사고가 발생되면 과도상태의 고장전류로 인하여 고장과 관련된 상의 순시치 전류들은 급격하게 상승함으로 인하여 차전류의 순시치는 급격하게 커지게 된다.

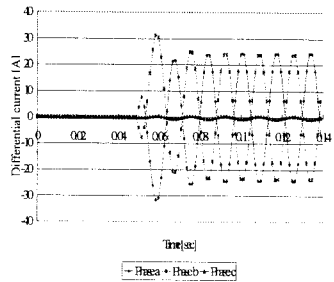


그림 6. 단락사고시

그림 7은 여자돌입의 경우, 3상 차전류의 순시치를 나타낸다. 변압기를 1차측 가압에 따른 여자돌입상태에서는, 투입 직후 1차측의 전류만이 급격하게 상승하기 때문에 3상 모두에 차전류가 발생하게 된다. 이때 가압하는 전압의 위상각에 따라 여자돌입전류의 크기가 좌우되는데, 투입위상각이 0°인 경우가 가장 크게 나타난다. 한편 주목할 것은 전압의 투입위상각과 관계없이 3상 차전류 모두 동일한 시간대에, 약 1/6주기(2.77[ms]) 인 동안 모두 0에 근접한 값을 나타내는 특징을 갖는다. 즉, 이러한 현상으로부터 여자돌입시에는 3상 모두에서 차전류가 발생하며, 약 1/6기동안에 모두 0에 근접하게 되고, 내부사고의 경우에는, 사고상과 관련된 상에서 차전류가 발생하는 것을 알 수 있다.

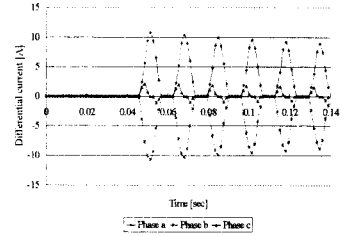


그림 7. 여자돌입시

2.3.2. 3상 차전류의 실효치 분석

그림 8은 내부 지락사고시의 3상 차전류의 실효치를 나타낸다. 그림과 같이 정상상태에서의 차전류는 거의 발생하지 않는데, 내부 지락사고가 발생되면 고장과 관련된 상의 실효치 전류들은 급격하게 상승하기 때문에 이로 인하여 차전류의 실효치도 급격하게 커지게 된다.

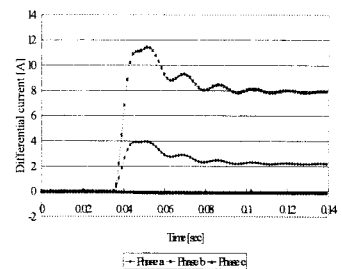


그림 8. 지락사고시

그림 9는 내부 단락사고의 경우, 3상 차전류의 실효치를 나타낸다. 그림과 같이 정상상태에서 차전류는 발생하지 않지만, 내부 단락사고가 발생되면 사고상을 중심으로 순시치 전류들은 급격하게 상승하기 때문에 차전류의 실효치도 급격하게 커지게 된다.

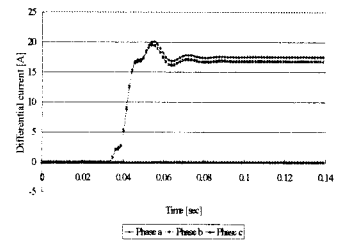


그림 9. 단락사고시

그림 10은 여자돌입의 경우, 3상 차전류의 실효치를 나타낸다. 가압한 변압기 1차측의 전류만이 투입위상각에 따라 3상 모두에 차전류가 급격하게 상승하게 된다. 차전류의 실효치는 차전류의 순시치와는 다르게 그 값이 0인 주기는 없게되나, 여자돌입전류의 감쇄 특성으로 인하여 실효치의 값이 작아지게 된다.

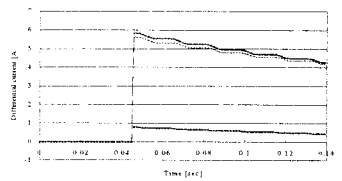


그림 10. 여자돌입시

2.3.3 차전류의 고조파 분석

앞에서 살펴본 것과 같이, 각 외란에 대해서 차전류가 발생하게 되고 이에 따라 차전류의 고조파 성분의 함유정도도 달라지게 된다. 디지털계전기에서는 일반적으로 DFT를 이용하여 고조파를 분석하고, 원하는 주파수 성분을 추출하게 된다. 본 절

에서는, 여자돌입과 내부사고의 경우, 차전류(a상 기준)의 고조파성분을 분석하고자 한다.

그림 11은 내부 지락사의 차전류의 고조파 분석을 나타낸다. 그림과 같이 내부 지락사고가 발생되면, 고장과 관련된 상에는 기본파의 크기는 상승하게 되며, 제2고조파 및 제5고조파 성분은 일시적으로 커졌다가 감소하게 된다. 이때 기본파 성분은 약 2.5주기동안 과도상태에 있게되며, 제2고조파 및 제5고조파 성분은 약 1주기동안의 과도상태가 지속된다.

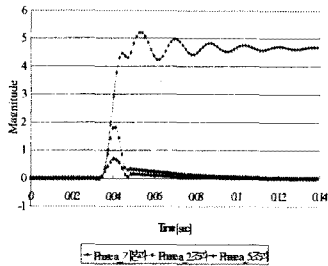


그림 11. 내부 지락사고시(고조파)

그림 12는 기본파에 대한 제2고조파와 제5고조파의 비를 나타낸다. 그림으로부터 알 수 있듯이, 기본에 대한 제2고조파와 제5고조파의 비는 약 1주기의 과도상태 기간을 제외하고 그 크기는 10%이하로 작음을 알 수 있다.

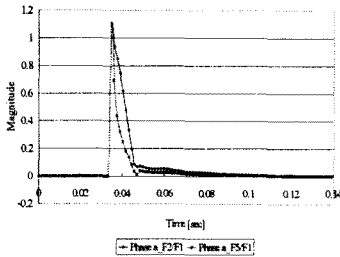


그림 12. 지락사고시(고조파 비율)

그림 13은 내부 단락사고시의 차전류의 고조파 분석을 나타낸다. 그림과 같이 내부 단락사고가 발생되면, 고장과 관련된 상에서, 기본파의 크기는 상승하게 되며, 제2고조파 및 제5고조파 성분은 일시적으로 커졌다가 감소하게 된다. 이때 기본파 성분은 약 2주기동안 과도상태에 있게되며, 2고조파 및 5고조파 성분은 내부 단락사고의 경우보다 과도상태의 지속시간이 길게 나타난다. 그림 14는 기본파에 대한 제2고조파와 제5고조파의 비를 나타낸다. 그림으로부터 알 수 있듯이, 기본파에 대한 제2고조파 비는 내부 지락사고에 비하여 동요가 작으나, 기본파에 대한 제5고조파의 비는 내부 단락사고의 경우보다 그 과도상태 동요기간이 길게 나타난다. 과도상태의 기간을 제외하고 그 크기는 10%이하로 작음을 알 수 있다. 즉, 내부사고인 경우에는, 제2고조파와 제5고조파가 기본파에 비하여 매우 작게 함유되는 것을 알 수 있다.

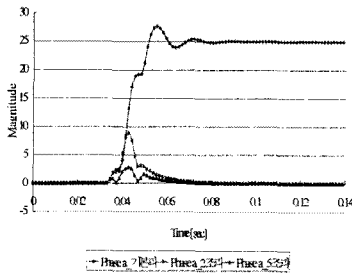


그림 13. 단락사고시(고조파)

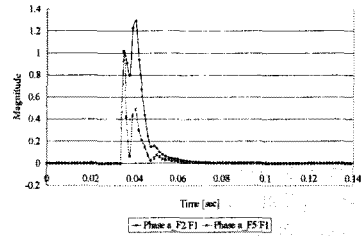


그림 14. 단락사고시(고조파 비율)

그림 15는 여자돌입의 경우, 차전류의 고조파 분석을 나타낸다. 그림과 같이 가압이 발생되면, 각상별로 기본파성분의 크기는 다소 감소하나, 제2고조파 및 제5고조파 성분은, 내부사고의 경우와 다르게, 완전히 사라지지 않고 일정한 정도를 계속 함유하는 것을 알 수 있다. 그림 16은 기본파에 대한 제2고조파와 제5고조파의 비를 나타낸다. 그림으로부터 알 수 있듯이, 내부 사고시에는 고장발생 후 약 2주기정도가 지난 다음에는 완전히 0으로 감소하였으나, 여자돌입시에는, 이 비율이 다소 상승하는 것을 알 수 있으며, 기본파에 대한 제5고조파의 비도 내부사고의 경우와 다르게 일정한 비율로 유지되는 것을 알 수 있다. 즉, 내부사고인 경우에는, 제2고조파와 제5고조파가 기본파에 비하여 매우 작게 함유되나, 여자돌입시에는, 일정하게 함유되는 것을 알 수 있다.

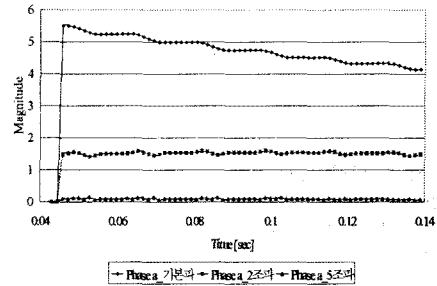


그림 15. 여자돌입시(고조파)

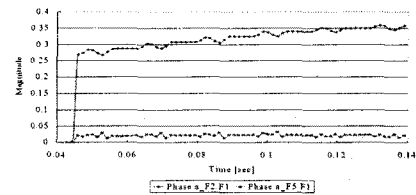


그림 16 여자돌입시(고조파 비율)

3. 결 론

모의로 시뮬레이션을 하여 분석을 해본 결론은 다음과 같다.

1) 차전류의 순시치 분석결과, 여자돌입시에는 3상 모두에서 차전류가 발생하며, 약 1/6주기동안에 모두 0에 근접하게되고, 내부사고의 경우에는, 사고상과 관련된 상에서 차전류가 발생하는 것을 알 수 있다.

2) 차전류의 실효치 분석결과, 내부 지락사고와 단락사고가 발생되면 고장과 관련된 상의 실효치 전류들은 급격하게 상승하기 때문에 이로 인하여 차전류의 실효치도 급격하게 커지게 되나, 여자돌입의 경우, 가압한 변압기 1차측의 전류만이 투입위상각에 따라 3상 모두에 차전류가 급격하게 상승하게 된다.

3) 고조파분석결과, 내부 사고시에는 고장발생 후 약 2주기정도가 지난 다음에는 완전히 0으로 감소하였으나, 여자돌입시에는, 이 비율이 다소 상승하는 것을 알 수 있었으며, 기본파에 대한 제5고조파의 비도 내부사고의 경우와 다르게 일정한 비율로 유지되는 것을 알 수 있었다. 즉, 내부사고인 경우에는, 제2고조파와 제5고조파가 기본파에 비하여 매우 작게 함유되나, 여자돌입시에는, 일정하게 함유되는 것을 알 수 있었다.

- 위의 결과를 활용하여 전력용변압기의 보호계전 알고리즘에 적용한다면, 여자돌입과 내부고장을 판별하는 방법으로 유용하게 활용할 수 있을 것으로 본다.

[참 고 문 헌]

- [1]한국전력공사, "보호제어 유니트의 소프트웨어 , 변전소종합보호제어 시스템설계 및 제작기술 개발 최종보고서 부록, pp. 1 ~ 87, 1997.2.
- [2]박철원, 서희석, 신명철, "신경회로망을 이용한 변압기의 고장판별 시스템에 관한 연구 , 대한전기학회 논문지, 46권 6호, pp. 833 ~ 839, June, 1997.
- [3]박철원, 권명현, 신명철, "도비시 웨이브렛변환을 이용한 변압기의 여자돌입과 내부고장판별논리기법 , 대한전기학회 논문지, 50A권 5호, pp. 211 ~ 217, May, 2001.
- [4]C.W. Park, M.C. Shin, "Digital Relaying Algorithm for Power Transformer Protection using Fuzzy Logic Approach", KIEE International Transactions on Power Engineering, Vol.2-A, No.4, pp. 153 ~ 159, Dec. 2002.
- [5]명지대 차세대전력기술센터(NPTC), "Next-Generation Protection Technology , pp. 1 ~ 214 Feb. 2002.
- [6]박철원, "전력용 변압기 보호용 IED를 위한 적응형 알고리즘 기술 개발 , 산자부지원, EESRI 전력산업연구개발 사업계획서 (R-2003-B-069-02) pp. 1 ~ 42, May 2003.
- [7]박재세, 박철원, 신명철, "변압기 보호용 IED를 위한 개선된 알고리즘의 비교", 대한전기학회 2003년도 전력기술부분회 추계학술대회 논문집 pp. 210 ~ 212, 2003.11.