

변압기보호계전 알고리즘 개발을 위한 변압기의 고장해석

서 희석⁰
두원공업전문대학

신 명철
성균관대학교

The fault analysis of transformer to develop protective relaying algorithm for transformer

Hee-Seok Suh⁰
Doo Won Tech. College

Myong-Chul Shin
Sung Kyun Kwan Univ.

<Abstracts> This paper deals with a simulation method of faults in a power transformer. Using the [R],[L] matrix supplied by the auxiliary routine of EMTP called BCTRAN, the turn to ground fault and turn to turn fault are simulated and the inrush condition is simulated using saturable transformer model. Data from simulations can be used to identify the response of the digital protection algorithms for transformer.

EMTP내의 ①XFORMER, ②TRELEG, ③BCTRAN이라는 보조프로그램이 이용되는데 ①의 경우는 단상 2권선변압기를, ②는 내철형 3상변압기를 모의하는데 한정되고, ③은 단상 및 3상변압기에 모두 적용할 수 있다.[6] 다음의 식(1)은 EMTP의 보조프로그램을 이용하여 구한 임피던스행렬을 이용하여 2권선 변압기를 표현한 것이다.

1. 서론

전력수요의 증가에 따른 계통의 확장에 수반하여 관련기기는 초고압화, 대용량화 추세에 있다. 이러한 관련기기를 중에서도 특히 변압기는 사고시 그 파급효과가 지대하여 변압기사고에 대응하기 위한 각종 디지털보호계전 알고리즘이 연구되고 있다.[1,2] 이와같은 알고리즘 개발을 위해서는 변압기의 여자돌입(inrush) 및 고장 등과 같은 이상현상에 대한 각종 시험용 데이터가 필요한데 실제통에서 이와같은 데이터를 취득하기에는 어려움이 있다. 이에 대부분의 경우 소용량의 변압기를 이용 특정고장 등을 모의하여 데이터를 얻거나 고장파형에 근접한 신호를 수식적으로 표현하여 이용하고 있다. [3,4] 그리고 실제적으로 전력용변압기의 경우 고장발생 빈도가 가장 높은 것은 권선의 층간단락 및 권선의 지락고장으로, 보호계전 알고리즘을 개발하기 위해서는 이에 대한 고려가 무엇보다 중요하다. 이에 본 연구에서는 전력계통의 과도현상해석 프로그램인 EMTP(electro magnetic transient program)를 이용하여 임의의 변압기에 대한 여자돌입상황, 변압기내부의 권선에서 발생하는 지락고장 및 단락고장, 외부에서 발생한 고장 등을 모의하여 변압기보호 알고리즘의 성능을 시험할 수 있는 각종 시험용 데이터를 얻을 수 있도록 하였고, 여자돌입상황과 고장상태를 구별하는데 일반적으로 이용되는 제2고조파 성분의 함유율을 DFT 필터를 이용하여 해석하였다.

2. EMTP를 이용한 변압기의 고장모의

EMTP를 이용하여 변압기를 모의하기 위해서는 변압기를 π등가회로화하고 여기서 [C]를 제외한 상호결합된 임피던스행렬을 이용한다. 이와같은 임피던스행렬을 구하기 위해서는

$$\begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} \\ M_{21} & L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_1(t)}{dt} \\ \frac{di_2(t)}{dt} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 $V_1(t), V_2(t)$ 및 $i_1(t), i_2(t)$ 는 각각 1차, 2차측의 순시전압, 전류를 나타내고 R_1, R_2, L_1, L_2 는 각각 저항 및 자기인덕턴스를 M_{12}, M_{21} 는 상호인덕턴스를 나타낸다. 따라서 변압기 내부에서 고장이 발생한 경우에는 고장조건에 따라 식(1)의 저항 및 인덕턴스행렬을 변형하여 이를 EMTP의 입력데이터로 이용하므로써 고장모의가 가능하다. 예를들어 그림1과 같은 2권선 변압기의 경우 1차측 권선에서 지락고장이 발생한 경우에는 1차측 권선수가 각각 N_a, N_b 인 2부분으로 나뉘어지는 형태가 된다.

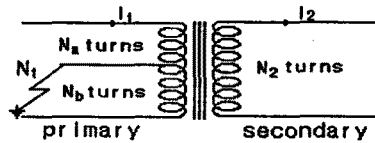


그림1. 2권선 변압기

따라서 식(1)은 식(2)로 변형된다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{a2} \\ M_{ab} & L_b & M_{b2} \\ M_{a2} & M_{b2} & L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_a(t)}{dt} \\ \frac{di_b(t)}{dt} \\ \frac{di_2(t)}{dt} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 R_1 은 권선수에 비례하여 R_a, R_b 로 나뉘어져 각각 식(3), (4)와 같이 되고

$$R_a = \frac{n_a}{n_1} R_1 \quad (3)$$

$$R_b = \frac{n_b}{n_1} R_1 \quad (4)$$

자기인덕턴스 L_a, L_b 는 누설율(leakage factor) σ_{ab} 를 이용하여 식(5),(6)으로 수정된다. [5]

$$L_b = \frac{L_1}{k^2 + 2k\sqrt{1 - \sigma_{ab} + 1}} \quad (5)$$

$$L_a = k^2 \cdot L_b \quad (6)$$

여기서 $k = N_a/N_b$ 로 고장점에 따른 권선의 비를 나타내며, 누설율 σ_{ab} 는 변압기의 고장형태 및 고장점에 따라 권선에 저장된 에너지를 이용하여 계산된다.[5] 그리고 변형된 상호인덕턴스 M_{ab}, M_{a2}, M_{R2} 는 식(7),(8),(9)를 이용하여 구할 수 있다.

$$M_{ab} = \frac{L_1 \sqrt{1 - \sigma_{ab}}}{(k + \frac{1}{k}) + 2\sqrt{1 - \sigma_{ab}}} \quad (7)$$

$$M_{a2} = M_{12} \sqrt{\epsilon} \cdot \sqrt{\frac{L_a}{L_1}} \cdot \sqrt{1 + \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} \cdot \frac{L_1 L_2}{M_{12}^2}} \quad (8)$$

$$M_{R2} = M_{12} - M_{a2} \quad (9)$$

여기서 ϵ 는

$$\epsilon = \frac{\sigma_{a2}}{\sigma_{12}} = \frac{L_a L_2 - M_{a2}^2}{L_1 L_2 - M_{12}^2} \cdot \frac{L_1}{L_a} \quad (10)$$

과 같이 정의된다. 따라서 식(2)과 같이 변형된 [R], [L]행렬을 EMTP 입력용 변압기 데이터로 하고 스위치소자를 이용하여 변압기의 내부권선에서 발생한 권선지락고장의 모의가 가능하다. 이와같은 원리는 3상 변압기에도 그대로 적용이 가능하다. 즉 3상 변압기는 정상상태인 경우 식(1)과 같이 π 등가회로를 이용하여 표시하면 [R],[L]행렬은 각각 [6x6]으로 나타난다. 그리고 임의의 상에서 임의의 권선고장이 발생한 경우에는 고장 발생상에 해당하는 행렬의 행과 열이 변형된다. 예를들어 변압기의 1차측 A상에서 권선지락고장이 발생한 경우 2권선의 경우와 같이 1번째 권선 N_A 가 N_a, N_b 로 2분되면서 1행1열이 각각 권선 N_a, N_b 와의 상호관계식으로 표현되어 [R],[L]행렬은 각각 [7x7]행렬로 변형된다. 그리고 변압기의 내부에서 권선간 단락고장이 발생한 경우에는 [R],[L]행렬은 각각 [8x8]행렬로 변형된다. 즉 권선간 단락고장이 발생한 경우에는 권선이 3부분으로 나뉘어지는 형태가 된다. 물론 3상변압기의 경우에는 단상에 비해 복잡한 단계가 요구된다. 즉 누설율을 구하거나 변형된 인덕턴스 등을 구하는데 비선형방정식의 해를 이용하는 경우도 발생한다. 그러나 기본적인 원리는 단상의 경우와 같다.

3. 적용사례

본 연구에서는 그림3과 같은 모델전력계통을 이용하여 변압기의 여자돌입상황은 EMTP내의 파포호변압기모델로, 변압기 내부에서 발생하는 권선고장등은 BCTRAN을 이용하여 출력된 [R],[L]행렬을 이용하여 모의하였다.

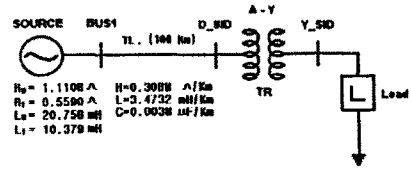


그림 3. 모델전력계통도

여기서 변압기는 효성중공업(주)의 3 ϕ 45/60(MVA) 154/23 (KV), Δ -Y 결선을 이용하였다. [6]

또한 최근에 주로 이용되는 변압기의 디지털보호방식에서는 여자돌입전류에 포함된 제2고조파성분의 함유율을 이용하여 여자돌입상황과 고장상태를 구분한다. 즉 여자돌입상황을 극대화하기 위하여 제2고조파 역제폭성을 갖는 비유차동계전방식등이 이용되므로[1-5] 고조파분석은 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는 DFT필터를 이용하여 여자돌입전류 및 고장발생시 변압기의 차전류에 포함된 제2고조파의 함유율을 분석하였다. 그림4는 변압기의 여자돌입시 1차측전류와 차전류에 포함된 기본파에 대한 제2고조파의 비율을 나타낸 것이다. 여기서 1차측전류를 나타낸 것은 일반적으로 변압기에 이상현상이 발생하면 1차측전류에 큰 변화가 발생하기 때문이다.

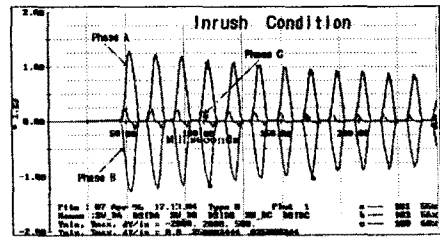


그림 4-a. 여자돌입시 변압기 1차전류

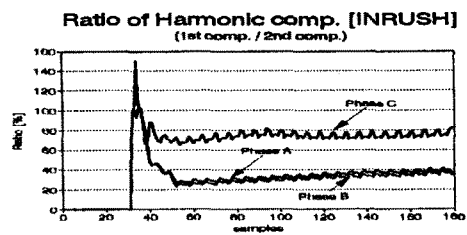


그림 4-b. 여자돌입시 기본파에 대한 제2고조파의 비율

여기서 여자돌입상황은 EMTP에서 0.044초후에 변압기를 계통에 투입한 경우로 그림(4-a)의 3상전류는 EMTP의 보조프로그램인 TPLOT을 이용하여 나타낸 것이다. 그리고 그림(4-b)는 주기당 32샘플한 차전류를 DFT필터를 이용하여 필터링한 경우 기본파에 대한 제2고조파의 비율을 나타낸 것이다. 그림(4-b)에서와 같이 변압기의 여자돌입시에는 차전류에 제2고조파성분이 많이 포함되어 있음을 알 수 있다. 그림5는 변압기의 1차측 외부단자 A상에서 지락고장이 발생한 경우를 나타낸 것이다.

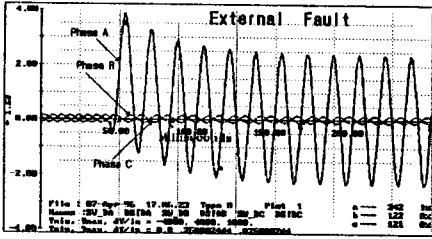


그림 5-a. 외부고장 발생시 변압기의 1차전류

Ratio of Harmonic comp. [EXT. FAULT]
(1st comp. / 2nd comp.)

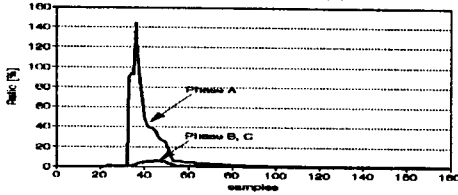


그림 5-b. 외부고장 발생시 기본파와 제2고조파의 비율

그림(5-a)와 같이 외부단자에서 고장이 발생한 경우에는 전력계통에서 발생한 일반적인 지락고장과 유사하게 A상의 전류가 현저히 커지고 그 외의 전류는 크게 변함이 없다. 그리고 그림(5-b)와 같이 여자돌입시와는 다르게 차전류에는 제2고조파성분이 적게 포함되어 있음을 알 수 있다. 다음의 그림6은 변압기의 내부권선에서 지락고장이 발생한 경우를 나타낸 것이다.

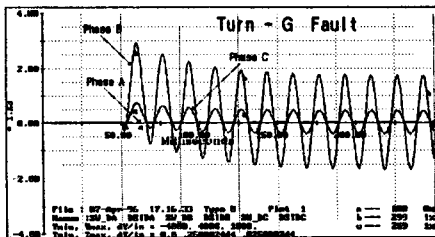


그림 6-a. 권선지락고장이 발생한 경우의 1차전류

Ratio of Harmonic comp. [TURN-G FAULT]
(1st comp. / 2nd comp.)

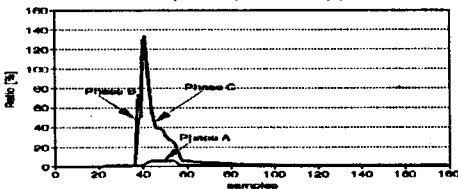


그림 6-b. 권선지락고장 발생시 기본파와 제2고조파의 비율

그림(6-a)는 0.050초 후에 변압기의 1차측 B상 내부권선, 즉 권선비가 20:80인 지점에서 지락고장이 발생한 경우를 나타낸 것으로 B, C상의 전류는 위상이 같고 그 크기만 다르게 나타나는 반면 A상전류는 그 크기가 미소하다. 그리고 그림(6-b)와 같이 차전류에는 제2고조파성분이 적게 포함되어 있다. 그림7은 변압기내부의 권선에서 단락고장이 발생한 경우이다.

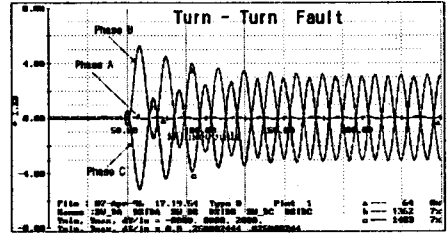


그림 7-a. 내부권선에서 단락고장이 발생한 경우의 1차전류

Ratio of Har.comp. [TURN-TURN FAULT]
(1st comp. / 2nd comp.)

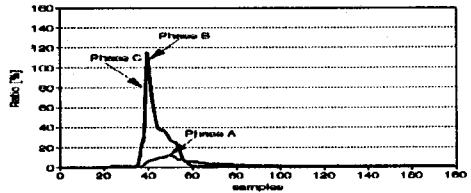


그림 7-b. 권선단락고장 발생시 기본파와 제2고조파의 비율

즉 변압기의 1차측 B상권선에서 권선의 5:80:15인 부분에서 0.048초후에 단락고장을 발생시킨 경우로 B,C상의 전류는 서로 위상이 반대임을 알 수 있고, 그림(7-b)와 같이 권선단락고장이 발생한 경우에도 차전류에는 제2고조파가 적게 포함되어 있다.

4. 결론

본 연구에서는 EMTP를 이용하여 변압기의 내부고장을 모의하는 방법을 제시하였고, 여자돌입상황 및 변압기의 내부고장에 따른 전류파형을 예시하였다. 이러한 데이터들은 변압기보호 알고리즘을 개발하는데 시험용데이터로 이용이 가능하고 특히 오프라인(off line)으로 이용되는 경우 EMTP에서 출력 데이터의 주기당 샘플수를 조정할 수 있어 디지털신호처리가 용이하다. 아울러 향후 차세대 보호계전방식으로 주목되고 있는 변압기 보호계전기의 인공지능화 연구에도 많은 도움이 될 수 있을 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

- Habib, M. Marin, M.A. "A comparative analysis of digital relaying algorithms for the differential protection of three phase transformers." IEEE.PS, pp. 1378-1384, 1988.
- Degen, A.J. "Microprocessor-implemented digital filters for inrush current detection." EPES, pp.196-205, 1982.
- Murty, Y.V.V.S. Smolinski, W.J. Sivakumar, "Design of a digital protection scheme for power transformers using optimal state optimal state observers." IEE Proc.C 135, pp. 224-230, 1988.
- H.W. Dommel, V.Brabdwajn, "Matrix representation of three phase N-winding transformer", IEEE Trans. on PAS, pp 1369-1378, Jun., 1982.
- P. BASTARD, P. BERTRAND, M. MEUNIER "A Transformer Model for Winding Fault Studies", IEEE PWRD, vol.9, No.2, 1994, pp. 690-699.
- "취급설명서", HIC-140-410, 효성중공업(주)