

최소 자승법을 이용한 변압기 파라미터 추정방식

강용철, 김은숙, 원성호, 김건군*, 양한국
전북대학교, 차세대전력기술연구소

Parameter Estimation of a Power Transformer Using the Least Square Method

Y.C. Kang, E.S. Jin, S.H. Won, G.G. Kim*, H.K. Yang
Chonbuk National University, NPT Center

Abstract - This paper proposes a parameter estimation technique of a power transformer. Based on the combined equation, it estimates separately the primary and secondary leakage inductances using the least square method from the instantaneous voltages and currents in the steady state. The performance of the proposed technique was investigated by varying the cut-off frequency of the filter and the number of samples per cycle. The estimated values are obtained based on the average value for 41 cycles.

1. 서 론

현재 변압기 보호는 변압기 양단의 차전류의 크기로부터 사고를 판정하는 전류차동 계전방식을 주로 사용하고 있으나, 여자돌입이나 과여자시에 오동작의 가능성이 존재한다. 따라서, 이러한 경우의 오동작을 방지하기 위하여, 고조파 성분을 이용하여 억제하거나 방지하는 방식을 사용하여 왔다[1-3]. 하지만, 이러한 방식은 계통 및 변압기의 특성에 영향을 받을 뿐만 아니라, 차전류에 고조파가 많지 않는 경우에는 오동작의 가능성이 존재하며, 동작시간이 오래 걸리는 단점이 있다.

이의 단점을 개선하고자, 자속의 중분을 역제신호로 사용하는 방식이 제안되었다[4]. 또한, 변압기 모델에 기초한 디지털 변압기 보호용 방식들이 제안되었다[5-7]. 이 방식들은 기존의 전류차동방식에 비해 동작시간이 빠르고 성능이 우수하지만, 변압기의 파라미터 즉, 1차, 2차 각각의 권선 저항과 1차, 2차 각각의 누설 인덕턴스가 필요하다.

현재, 변압기의 파라미터는 개방시험 및 단락시험에 의해 추정할 수 있다. 그런데, 단락시험에 의해서 얻는 단락 임피던스는 1차와 2차가 합해진 형태로 얻기 때문에, 참고문헌 [4-7]의 방식에 적용할 수 없다.

한편, 권선 저항 같은 경우에는 1차와 2차에 별도의 적류 전원을 인가하여 추정 가능하나, 누설 인덕턴스를 별도로 추정하는 방식은 현재까지 제시되고 있지 못했다.

본 논문에서는 변압기 1차, 2차 누설 인덕턴스를 추정하는 방식을 제안한다. 제시한 방식은 1차, 2차에서 유도된 미분방정식을 권선비를 고려하여 하나로 결합한다. 부하를 연결한 상태에서의 변압기 1차, 2차 전압, 전류로부터 최소자승법을 이용하여, 단상 변압기의 1차, 2차 누설 인덕턴스를 추정한다. EMTP를 이용하여 단상 변압기를 모델링 한 후, 제시한 방식을 저역 통과필터의 차단 주파수를 다르게 한 경우, 부하를 다르게 한 경우, 파라미터를 다르게 한 경우에 대하여 검증하였다.

2. 최소자승법을 이용한 변압기 파라미터 추정방식

그림 1에 단상 변압기를 나타내었다. 변압기 내부사고가 발생하지 않았다면, 매 순간의 1차, 2차 단자전압은 다음과 같이 표현된다.

$$v_1 = R_1 i_1 + L_{\Delta} \frac{di_1}{dt} + e_1 \tag{1}$$

$$v_2 = -R_2 i_2 - L_{\Delta} \frac{di_2}{dt} + e_2 \tag{2}$$

여기서, R_1, R_2 : 1차, 2차 권선저항

L_{Δ}, L_{Δ} : 1차, 2차 누설 인덕턴스

e_1, e_2 : 1차, 2차 유기전압

식 (1)과 식 (2)를 e_1, e_2 에 대해 다시 전개하면 식 (3)과 식 (4)와 같다.

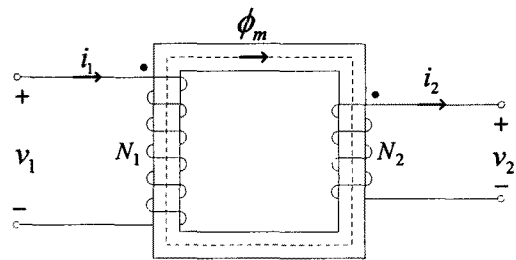
$$e_1 = v_1 - R_1 i_1 - L_{\Delta} \frac{di_1}{dt} \tag{3}$$

$$e_2 = v_2 + R_2 i_2 + L_{\Delta} \frac{di_2}{dt} \tag{4}$$

따라서, 유기전압 e_1, e_2 는 1차, 2차 단자전압과 전류, 권선저항과 누설 인덕턴스로부터 계산 가능하다.

만약 내부사고가 발생하지 않았다면, 매 순간의 유기전압비는 권선비(N_1/N_2)가 된다. 즉, 식 (5)와 같게 된다.

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \tag{5}$$



i_1, i_2 : 1차, 2차 전류

v_1, v_2 : 1차, 2차 전압

N_1, N_2 : 1차, 2차 권선수

ϕ_m : 상호 자속

그림 1 단상 2권선 변압기

식 (3)과 식 (4)를 식 (5)에 대입하여, 정리하면 아래의 식 (6)과 같다.

$$v_1 - R_1 i_1 - L_n \frac{di_1}{dt} = \frac{N_1}{N_2} (v_2 + R_2 i_2 + L_e \frac{di_2}{dt}) \quad (6)$$

L_n, L_e 를 추정하고자 식 (6)을 다시 정리하면,

$$\frac{di_1}{dt} \cdot L_n + N \left(\frac{di_2}{dt} \right) \cdot L_e = v_1 - N \cdot v_2 - R_1 i_1 - N \cdot R_2 i_2 \quad (7)$$

여기서, $N = N_1/N_2$ 라 하였다.

식 (7)을 간단히 표현하면, 식 (8)이 된다.

$$S_{n1} \cdot L_n + S_{n2} \cdot L_e = Y_n \quad (8)$$

이 때, $S_{n1} = \frac{di_1}{dt}$, $S_{n2} = N \frac{di_2}{dt}$

$$Y_n = v_1 - N \cdot v_2 - R_1 i_1 - N \cdot R_2 i_2$$

식 (8)의 양변에 적분을 취하면 다음과 같다.

$$S_{n1} \cdot L_n + S_{n2} \cdot L_e = Y_n \quad (9)$$

행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \\ \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_n \\ L_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

식 (10)을 다시 정리하면,

$$[S][L] = [Y] \quad (11)$$

이 때, $[S], [L]$ 과 $[Y]$ 는 $n \times 2, 2 \times 1$ 과 $n \times 1$ 행렬이다. $[L]$ 을 추정하기 위해 최소자승법을 적용하면 다음과 같다,

$$[L] = \{[S]^T [S]\}^{-1} [S]^T [Y] \quad (12)$$

식 (12)로부터 구하고자 하는 1, 2차 누설 인덕턴스를 추정할 수 있다.

3. 사례 연구

본 논문에서 제시한 방식을 사용하기 위하여 그림 2의 계통을 사용하였으며, 단상 2권선 154KV/12.7KV, 18.33[MVA] 변압기를 사용하였고, 전원용량은 6[GVA], 부하용량은 18.33[MVA], 역률은 0.9이다. EMTP를 이용하여, 데이터룰 생성하였으며, 변압기 철심의 히스테리시스 특성은 96소자를 이용하였으며, 포화점은 40A, 334Vs로 하였다.

제한한 파라미터 추정법을 차단 주파수 f_c 와 주기 당 샘플 수 N_s 를 다르게 조사하였으며, 전원을 다르게 한 경우, 다른 변압기를 사용한 경우에 대하여 조사하였다. 제안한 방식으로 추정한 값과 참값과의 오차를 비교하였다.

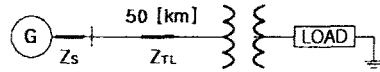


그림 2 모델 계통

3.1 필터의 차단 주파수를 다르게 할 경우

변압기에 전부하를 연결한 상태에서, 주기당 샘플링과 차단 주파수, f_c 를 다르게 한 경우, 추정한 값과 참값 ($L_n = 0.07640$ H, $L_e = 0.001559$ H)을 비교한 오차를 표 1에 나타내었다. 표 1의 a는 $N_s = 128$ 일 때의 결과이고, b는 $N_s = 192$ 일 때의 결과이다.

표 1에서 보는 것처럼 주기 당 샘플 수를 128과 192 샘플의 경우에는, f_c 가 960 [Hz]이상이면 오차가 1%미만을 나타냄을 알 수 있다. 즉, 제시한 알고리즘은 샘플링이 높고, 컷오프가 높을수록 정확하게 인덕턴스를 추정할 수 있다.

f_c (Hz)	추정한 L_n (H)	L_n 의 오차(%)	추정한 L_e (H)	L_e 의 오차(%)	총 오차(%)
3840	0.07578	0.81	0.001573	-0.86	0.83
1920	0.07591	0.65	0.001570	-0.69	0.67
960	0.07582	0.76	0.001572	-0.81	0.78
480	0.07496	1.89	0.001590	-1.96	1.93
240	0.07427	2.80	0.001604	-2.89	2.84
120	0.07419	2.90	0.001606	-2.99	2.95

(a) $N_s = 128$ 일 경우

f_c (Hz)	추정한 L_n (H)	L_n 의 오차(%)	추정한 L_e (H)	L_e 의 오차(%)	총 오차(%)
3840	0.07603	0.48	0.001568	-0.55	0.52
1920	0.07609	0.41	0.001567	-0.47	0.44
960	0.07596	0.58	0.001569	-0.64	0.61
480	0.07503	1.80	0.001589	-1.89	1.85
240	0.07428	2.77	0.001604	-2.89	2.83
120	0.07420	2.88	0.001606	-3.00	2.94

(b) $N_s = 192$ 일 경우

표 1 필터의 차단 주파수를 다르게 할 경우

3.2 부하를 다르게 할 경우

표 2는 부하가 전부하의 50%일 경우의 결과를 나타내었다. 컷오프가 1920[Hz]와 3840[Hz]인 경우의 결과만을 나타내었다. 부하를 다르게 하였을 경우에, $N_s = 128, 192$ 이고, $f_c = 1920, 3840$ Hz인 경우에 대해 비교하였다.

표 2에서 보는 것처럼 전부하의 반의 부하를 연결한 경우의 전압, 전류 데이터를 사용하여 추정하여도 제한한 추정법의 오차는 매우 작음을 알 수 있다.

f_c (Hz)	N_s	추정한 L_n (H)	L_n 의 오차(%)	추정한 L_e (H)	L_e 의 오차(%)	총 오차(%)
3840	128	0.075937	0.61	0.0015689	-0.62	0.61
	192	0.07610	0.40	0.001566	-0.42	0.41
1920	128	0.07597	0.56	0.001568	-0.57	0.57
	192	0.07609	0.40	0.001566	-0.43	0.42

표 2 전부하의 반의 부하를 연결한 경우

3.3 전원의 크기를 다르게 할 경우

표 3은 전원의 크기를 정격전압의 50%로 연결한 경우의 결과를 나타낸다. 샘플링 주파수와 컷오프 주파수는 이전의 경우와 같은 값을 사용하였다.

표 3에서 보는 것처럼 시험을 위한 전원의 크기가 달라져도 제안한 파라미터 추정법의 오차는 매우 적음을 알 수 있다.

fc (Hz)	N_s	추정한 L_n (H)	L_n 의 오차(%)	추정한 L_e (H)	L_e 의 오차(%)	총 오차(%)
3840	128	0.07573	0.88	0.001574	-0.93	0.90
	192	0.07606	0.45	0.001567	-0.51	0.48
1920	128	0.07596	0.57	0.001569	-0.62	0.60
	192	0.07617	0.30	0.001565	-0.37	0.34

표 3 전원의 크기를 다르게 했을 경우

3.4 참 값의 크기를 다르게 할 경우

표 4는 누설인덕턴스의 크기가 다른 변압기의 경우의 결과를 표 a는 2배일 때, b는 1/2배일 때 추정된 값과 참값의 비교를 나타낸다. 샘플링 주파수와 컷오프 주파수는 이전의 경우와 같은 값을 사용하였다.

표 4에서 보는 것처럼 누설인덕턴스의 참 값의 크기가 변하여도 제안한 파라미터 추정법의 오차는 매우 작음을 알 수 있다.

$$L_n = 0.15281 \text{ H}, L_e = 0.00311838 \text{ H}$$

추정한 L_n (H)	L_n 의 오차(%)	추정한 L_e (H)	L_e 의 오차(%)	총 오차(%)
0.15247	0.22	0.003127	-0.27	0.25

(a) 2배일 경우

$$L_n = 0.0382025 \text{ H}, L_e = 0.00077957 \text{ H}$$

추정한 L_n (H)	L_n 의 오차(%)	추정한 L_e (H)	L_e 의 오차(%)	총 오차(%)
0.03785	0.93	0.000787	-0.99	0.96

(b) 1/2배일 경우

표 4 누설 인덕턴스가 다른 변압기의 경우

4. 결 론

본 논문에서는 최소자승법을 이용한 단상 변압기 1, 2차 누설인덕턴스를 추정 방식을 제안하였다. 제안한 방식은 변압기 1차, 2차의 두 식을 권선비를 고려하여 결합한 식을 유도한 후에, 부하를 연결한 상태에서 변압기 양단의 전압, 전류로부터 최소자승법을 이용하여 1, 2차 누설인덕턴스를 추정하였다.

제안한 파라미터 추정법의 성능을 검증하기 위하여 샘플링 주파수와 컷오프 주파수를 다르게 해서 검토한 결과, 샘플링 주파수와 컷오프 주파수가 높을수록 제시한 방식의 오차가 적음을 알 수 있었다.

또한, 전부하를 사용하지 않거나, 정격전압을 사용하지 않은 경우의 데이터를 가지고서도 누설 인덕턴스를 정확하게 추정하였다. 그리고, 누설 인덕턴스가 다른 변압기의 경우에 대해서도 정확하게 누설인덕턴스를 추정함을 알 수 있었다.

제시한 방식을 사용하여 변압기의 누설 인덕턴스를 정

확하게 추정하게 되면, 보다 성능이 우수한 변압기 보호 계전방식의 개발에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 ERC 프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] C. D. Hayward, "Harmonic-Current-Restrained Relays for Transformer Differential Protection," *AIEE Trans.* vol. 60, pp. 377-382, 1941
- [2] R. L. Sharp, W. E. Glassburn, "A Transformer Differential Relay with Second-Harmonic Restraint," *AIEE Trans. Part III*, vol. 77, pp. 913-918, 1958
- [3] C. H. Einvall, J. R. Linders, "A Three-phase Differential Relay for Transformer Protection," *IEEE Trans. on PAS*, vol. 94, no. 6, pp. 1971-1980, November/December 1975
- [4] A. G. Phadke, J. S. Thorp, "A New Computer-Based Flux-Restrained Current-Differential Relay for Power Transformer Protection," *IEEE Trans. on PAS*, vol. 102, no. 11, pp. 3624-3629, November 1983
- [5] K. Inagaki, M. Higaki, Y. Matsui, K. Kurita, M. Suzuki, K. Yoshida, T. Maeda, "Digital Protection Method for Power Transformers Based on an Equivalent Circuit Composed of Inverse Inductance," *IEEE Trans. on PWRD*, vol. 3, no. 4, pp. 1501-1510, October 1988
- [6] M. S. Sachdev, T. S. Sidhu, H.C. Wood, "A Digital Relaying Algorithm for Detecting Transformer Winding Faults," *IEEE Trans. on PWRD*, vol. 4, no. 3, pp. 1638-1648, July 1989
- [7] Y. C. Kang, B. E. Lee, S. H. Kang, S. S. Kim, J.K. Lee, "A Transformer Protective Relaying Algorithm Using the Ratio of Induced Voltages," *IEEE PES 2001 SM*, July 15 ~ 19, 2001, Vancouver, BC, Canada