

# 최소자승법을 이용한 Y-Δ 변압기 누설 인덕턴스 추정 방법

論 文
56-4-2

## Leakage Inductance Estimation of Y-Δ Transformer Using the Least Square Method

姜龍澈<sup>†</sup> · 黃泰根\* · 李炳銀\*\* · 張成一\*\*\* · 金容均<sup>§</sup>

(Yong-Cheol Kang · Tae-Keun Hwang · Byung-Eun Lee · Sung-Il Jang · Yong-Gyun Kim)

**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 cycle.

**Key Words** : Leakage inductance estimation, Least square method, Parameters

### 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 변압기 특성에 영향을 받을 뿐만 아니라, 차전류에 고조파가 많지 않는 경우에는 오동작의 가능성이 존재하며, 내부 사고시 계전기 동작시간이 오래 걸리는 단점이 있다.

이러한 단점을 개선하고자, 자속의 증분을 억제신호로 사용하는 방식이 제안되었다[4]. 또한, 변압기 모델에 기초한 변압기 보호 방식들이 제안되었다[5-7]. 이 방식들은 전류차동방식에 비해 동작시간이 빠르고 성능이 우수하지만, 변압기의 파라미터 즉 1차, 2차 각각의 권선 저항과 1차, 2차 각각의 누설 인덕턴스가 필요하다.

변압기의 파라미터는 개방시험 및 단락시험에 의해 추정할 수 있다. 그런데, 단락시험에 의해서 얻는 단락 임피던스는 1차와 2차가 합해진 형태로 얻기 때문에, 별도의 1차, 2차 누설 인덕턴스는 구할 수 없다.

최소 자승법을 이용하여 1차, 2차 각각의 파라미터를 추정하는 방식이 제안되었다[8]. 이 방식은 실시간 데이터를 이용하여 각각의 1차, 2차 파라미터를 추정할 수 있다. 하지

만, 이 방식은 권선전류를 이용하기 때문에 델타 권선을 포함한 변압기에는 적용될 수 없다.

1차, 2차의 권선 저항의 경우에는 1차와 2차에 별도의 직류 전원을 인가하여 추정 가능하다. 본 논문에서는 변압기 1차, 2차 각각의 누설 인덕턴스를 추정하는 방식을 제안한다. 제안한 방식은 1차, 2차에서 유도된 미분방정식을 권선비를 고려하여 하나로 결합한다. 변압기 1차, 2차 전압, 전류로부터 최소자승법을 이용하여, 1차, 2차 누설 인덕턴스를 추정한다. EMTP를 이용하여 3상 Y-Δ 변압기를 모델링 한 후, 제안한 방식을 저역 통과필터의 차단 주파수, 부하, 누설 인덕턴스의 크기를 각각 다르게 한 경우에 대하여 검증하였다. 제안한 방식은 단상 및 3상 Y-Y 변압기에도 적용할 수 있으나, 본 논문에서는 3상 Y-Δ의 경우에 대해 적용해 보았다.

### 2. 최소자승법을 이용한 Y-Δ 변압기 누설 인덕턴스 추정 방식

#### 2.1 단상 변압기

그림 1에 단상변압기를 나타내었다. 변압기 내부사고가 발생하지 않았다면, 각 권선의 단자전압은 다음과 같다.

$$v_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + e_1 \quad (1)$$

$$v_2 = -R_2 i_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} + e_2 \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$e_1 = v_1 - R_1 i_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} \quad (3)$$

$$e_2 = v_2 + R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (4)$$

내부사고가 발생하지 않았다면, 매 순간의 유효 전압비는 권선비( $N_1/N_2$ )가 된다. 즉,

† 교신저자, 正會員 : 全北大 電子情報工學部 副教授  
E-mail : yckang@chonbuk.ac.kr

\* 學生會員 : 全北大 電氣工學科 碩士課程

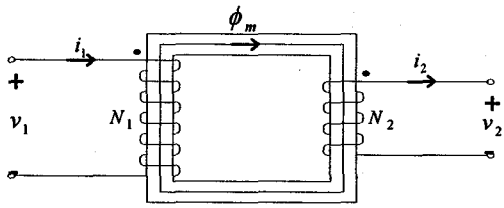
\*\* 正會員 : 全北大 電氣工學科 博士課程

\*\*\* 正會員 : 全北大 電子情報工學部 研究教授

§ 正會員 : 韓國IED Eng. 代表理事

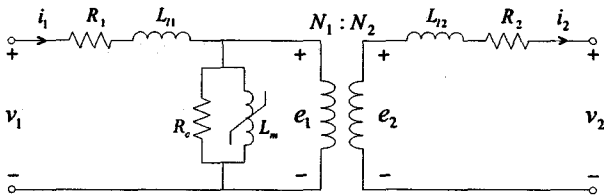
接受日字 : 2006年 12月 15日

最終完了 : 2007年 2月 5日



$v_1, v_2$ : 1차, 2차 단자전압  $i_1, i_2$ : 1차, 2차 전류  
 $N_1, N_2$ : 1차, 2차 권선수  $\phi_m$ : 상호 자속

(a) 단상변압기



$e_1, e_2$ : 1차, 2차 유기 전압  
 $R_1, R_2$ : 1차, 2차 권선저항  
 $L_{11}, L_{22}$ : 1차, 2차 누설 인덕턴스  
 $R_c$ : 철손저항,  $L_m$ : 자화 인덕턴스

(b) 단상변압기 등가회로

그림 1 단상변압기

Fig. 1 Single-phase transformer

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (5)$$

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

$$v_1 - R_1 i_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} = \frac{N_1}{N_2} (v_2 + R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt}) \quad (6)$$

$L_{11}, L_{22}$ 를 추정하고자 식 (6)을 다시 정리하면,

$$\left(\frac{di_1}{dt}\right)L_1 + \left(N\frac{di_2}{dt}\right)L_2 = v_1 - Nv_2 - R_1 i_1 - NR_2 i_2 \quad (7)$$

여기서  $N=N_1/N_2$ 로 정의하였다.

식 (7)을 간단히 표현하면, 식 (8)이 된다.

$$S'_{n1} \cdot L_1 + S'_{n2} \cdot L_2 = Y'_n \quad (8)$$

이 때,  $S'_{n1} = \frac{di_1}{dt}, S'_{n2} = N\frac{di_2}{dt}$

$$Y'_n = v_1 - Nv_2 - R_1 i_1 - NR_2 i_2$$

식 (8)의 양변에 적분을 취하면 다음과 같다.

$$S_{n1} \cdot L_1 + S_{n2} \cdot L_2 = Y_n \quad (9)$$

행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \\ \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

식 (10)을 다시 정리하면,

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

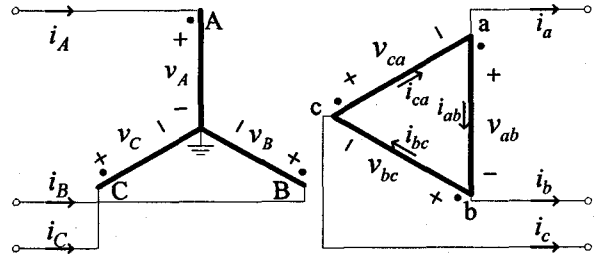
여기서  $[S], [L]$ 과  $[Y]$ 는  $n \times 2, 2 \times 1$ 과  $n \times 1$ 행렬이다.  $[L]$ 를 추정하기 위해 최소자승법을 적용하면 다음과 같다.

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

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

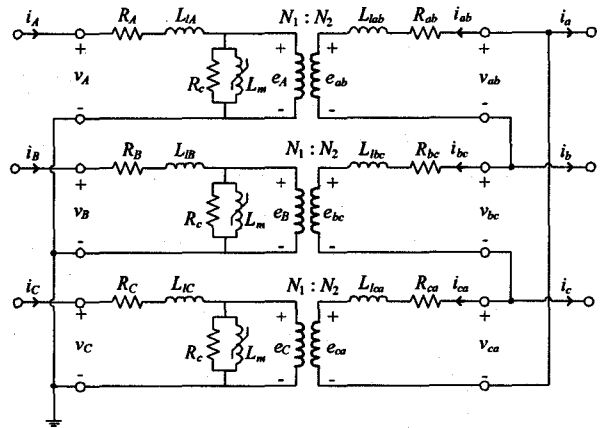
### 2.2 3상 Y-Δ변압기

그림 2에 3상 Y-Δ변압기를 나타내었다.



$U_A, U_B, U_C, U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$ : 1차, 2차 각 상의 단자전압  
 $i_A, i_B, i_C, i_{ab}, i_{bc}, i_{ca}$ : 1차, 2차 각 상의 권선전류  
 $i_a, i_b, i_c$ : 2차 각 상의 선전류

(a) 3상 Y-Δ변압기



$e_A, e_B, e_C, e_{ab}, e_{bc}, e_{ca}$ : 1차, 2차 각 상의 유기 전압  
 $R_A, R_B, R_C, R_{ab}, R_{bc}, R_{ca}$ : 1차, 2차 각 상의 권선저항  
 $L_{1A}, L_{1B}, L_{1C}, L_{1ab}, L_{1bc}, L_{1ca}$ : 1차, 2차 각 상의 누설 인덕턴스

$R_c$ : 각 상의 철손저항,  $L_m$ : 각 상의 자화 인덕턴스

$N_1, N_2$ : 1차, 2차 권선수

(b) 3상 Y-Δ변압기 등가회로

그림 2 3상 Y-Δ변압기

Fig. 2 Three phase Y-Δ transformer

각 권선의 전압 식은 아래와 같다.

$$v_A = R_A i_A + L_{1A} \frac{di_A}{dt} + e_A \quad (13)$$

$$v_B = R_B i_B + L_{1B} \frac{di_B}{dt} + e_B \quad (14)$$

$$v_C = R_C i_C + L_{1C} \frac{di_C}{dt} + e_C \quad (15)$$

$$v_{ab} = R_{ab} i_{ab} + L_{1ab} \frac{di_{ab}}{dt} + e_{ab} \quad (16)$$

$$v_{bc} = R_{bc}i_{bc} + L_{lbc} \frac{di_{bc}}{dt} + e_{bc} \quad (17)$$

$$v_{ca} = R_{ca}i_{ca} + L_{lca} \frac{di_{ca}}{dt} + e_{ca} \quad (18)$$

여기서  $R_A, R_B, R_C, R_{ab}, R_{bc}, R_{ca}$  : 권선저항

$L_{lA}, L_{lB}, L_{lC}, L_{lab}, L_{lbc}, L_{lca}$  : 누설 인덕턴스

$e_A, e_B, e_C, e_{ab}, e_{bc}, e_{ca}$  : 유기 전압

내부사고가 발생하지 않았다면, 매 순간의 유기전압비는 권선비( $N_1/N_2$ )가 된다. 즉 식 (7)과 같게 된다.

$$\frac{e_A}{e_{ab}} = \frac{N_1}{N_2}, \quad \frac{e_B}{e_{bc}} = \frac{N_1}{N_2}, \quad \frac{e_C}{e_{ca}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (19)$$

식 (19)는 각 상의 유기 전압비와 권선비를 나타낸다.  $\Delta$  권선에 해당하는  $i_{ab}, i_{bc}, i_{ca}$ 는 측정할 수 없는 값이므로, 식 (16)~(18)으로는 파라미터 추정을 할 수 없다.

상전류 대신 선전류를 사용하기 위해서, 아래의 식 (20)을 사용한다. 식 (19)과 (20)은 필요충분조건이다.

$$\frac{e_C - e_A}{e_{ca} - e_{ab}} = \frac{N_1}{N_2}, \quad \frac{e_A - e_B}{e_{ab} - e_{bc}} = \frac{N_1}{N_2}, \quad \frac{e_B - e_C}{e_{bc} - e_{ca}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (20)$$

식 (20)은 Y- $\Delta$ 변압기의 경우 유기 전압비와 권선비간의 관계식을 나타낸다.

식 (20)을 사용하기 위해서, 2차 권선의 선전류와 상전류간의 관계식 (21)을 이용하였다.

$$i_{ca} - i_{ab} = i_a, \quad i_{ab} - i_{bc} = i_b, \quad i_{bc} - i_{ca} = i_c \quad (21)$$

또한, 사고가 발생하지 않으면,  $\Delta$ 권선에 해당하는 각 상의 권선저항과 누설인덕턴스가 서로 같다.

$$R_{ab} \approx R_{bc} \approx R_{ca} = R_2, \quad L_{lab} \approx L_{lbc} \approx L_{lca} = L_2 \quad (22)$$

식 (16)~(18)을 정리하면 다음과 같다.

$$e_{ca} - e_{ab} = v_{ca} - v_{ab} - R_2 i_a - L_2 \frac{di_a}{dt} \quad (23)$$

$$e_{ab} - e_{bc} = v_{ab} - v_{bc} - R_2 i_b - L_2 \frac{di_b}{dt} \quad (24)$$

$$e_{bc} - e_{ca} = v_{bc} - v_{ca} - R_2 i_c - L_2 \frac{di_c}{dt} \quad (25)$$

식 (23)~(25)과 대응되는 1차 권선의 식은 식 (13)~(15)로부터 다음과 같이 유도된다.

$$e_C - e_A = v_C - v_A - (R_C i_C - R_A i_A) - (L_{lC} \frac{di_C}{dt} - L_{lA} \frac{di_A}{dt}) \quad (26)$$

$$e_A - e_B = v_A - v_B - (R_A i_A - R_B i_B) - (L_{lA} \frac{di_A}{dt} - L_{lB} \frac{di_B}{dt}) \quad (27)$$

$$e_B - e_C = v_B - v_C - (R_B i_B - R_C i_C) - (L_{lB} \frac{di_B}{dt} - L_{lC} \frac{di_C}{dt}) \quad (28)$$

식 (23)~(28)은 파라미터 추정을 하기 위해 식 (20)에 일치하는 식이다.

식 (26)에서 정상상태의 경우,  $R_C = R_A = R_1, L_{lC} = L_{lA} = L_1$ 라고 가정하면, 식 (26)을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$e_C - e_A = v_C - v_A - R_1(i_C - i_A) - L_1 \left( \frac{di_C}{dt} - \frac{di_A}{dt} \right) \quad (29)$$

식 (29)과 (23)을 하나의 식으로 합치면 다음과 같다.

$$v_C - v_A - R_1(i_C - i_A) - L_1 \left( \frac{di_C}{dt} - \frac{di_A}{dt} \right) = N(v_{ca} - v_{ab} - R_2 i_a - L_2 \frac{di_a}{dt}) \quad (30)$$

식 (30)을 다시 정리하면,

$$\left( \frac{di_C}{dt} - \frac{di_A}{dt} \right) L_{l1} + \left( -N \frac{di_a}{dt} \right) L_{l2} \quad (31)$$

$$= -(i_C - i_A) R_1 + (N i_a) R_2 + (v_C - v_A) - N(v_{ca} - v_{ab})$$

식 (31)을 간단히 표현하면,

$$S'_{n1} \cdot L_{l1} + S'_{n2} \cdot L_{l2} = Y'_n \quad (32)$$

여기서,  $S'_{n1} = \frac{di_C}{dt} - \frac{di_A}{dt}, S'_{n2} = -N \frac{di_a}{dt}$

$$Y'_n = -(i_C - i_A) \cdot R_1 + (N i_a) \cdot R_2 + v_C - v_A - N \cdot (v_{ca} - v_{ab})$$

양변에 적분을 취하면,

$$S_{n1} \cdot L_{l1} + S_{n2} \cdot L_{l2} = Y_n \quad (33)$$

행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \\ \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{l1} \\ L_{l2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad (34)$$

식 (34)를 다시 정리하면,

$$[S][L] = [Y] \quad (35)$$

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

$$[L] = \{ [S]^T [S] \}^{-1} [S]^T [Y] \quad (36)$$

식 (36)으로부터 구하고자 하는 1, 2차 누설 인덕턴스를 추정할 수 있다.

### 3. 사례연구

본 논문에서는 그림 3와 같은 모델 계통을 사용하였다. 변압기는 3상 2권선 Y- $\Delta$ 변압기(154kV/12.7kV, 55[MVA])를 사용하였고, 전원용량은 6[GVA], 부하용량은 55[MVA], 역률은 0.9이다.

EMTP를 이용하여 데이터를 생성하였고, 변압기 철심의 히스테리시스 특성은 type-96소자를 이용하였으며, 포화점은 (40A, 333.754Vs)를 선택하였다.

제안한 파라미터 추정법을 다양한 차단 주파수  $f_c$ 와 주기당 샘플 수  $N_s$ 에 대하여 조사하였으며, 전원, 부하, 누설 인덕턴스의 크기를 다르게 사용한 경우에 대해서도 조사하였다. 제안한 방식으로 구한 누설 인덕턴스 값과 참 값과의 오차를 비교하였다.

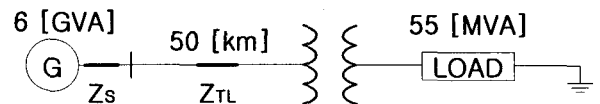


그림 3 모델 시스템  
Fig. 3 Model system

#### 3.1 필터의 차단 주파수를 다르게 할 경우

변압기에 전부하를 연결한 상태에서, 주기당 샘플 수  $N_s$ 과 차단 주파수  $f_c$ 를 다르게 한 경우, 추정된 값과 참값 ( $L_{l1} = 76.40\text{mH}, L_{l2} = 1.559\text{mH}$ )을 비교한 오차를 표 1에 나타내었다. (a)는  $N_s = 128$ 일 때의 결과이고, (b)는  $N_s = 192$ 일 때의 결과이다.

표 1에서 보는 것처럼 주기당 샘플 수가 128과 192샘플의 경우에는 차단 주파수  $f_c$ 가 960[Hz]이상이면 오차가 1%미만을 나타냄을 알 수 있다. 즉, 제한한 알고리즘은 샘플링이 높고, 컷오프가 높을수록 정확하게 인덕턴스를 추정함을 알 수 있다.

표 1 저역 통과 필터의 차단 주파수를 다르게 할 경우  
Table 1 Cut-off frequency of a lowpass filter

(a)  $N_s = 128$ 의 경우

$f_c$ (Hz)	추정한 $L_{11}$ (mH)	$L_{11}$ 의 오차 (%)	추정한 $L_{12}$ (mH)	$L_{12}$ 의 오차 (%)	총 오차 (%)
3840	75.78	0.81	1.573	-0.86	0.83
1920	75.91	0.65	1.570	-0.69	0.67
960	75.82	0.76	1.572	-0.81	0.78
480	74.96	1.89	1.590	-1.96	1.93

(b)  $N_s = 192$ 의 경우

$f_c$ (Hz)	추정한 $L_{11}$ (mH)	$L_{11}$ 의 오차 (%)	추정한 $L_{12}$ (mH)	$L_{12}$ 의 오차 (%)	총 오차 (%)
3840	76.03	0.48	1.568	-0.55	0.52
1920	76.09	0.41	1.567	-0.47	0.44
960	75.96	0.58	1.569	-0.64	0.61
480	75.03	1.80	1.589	-1.89	1.85

3.2 부하를 다르게 할 경우

표 2는 부하가 전 부하의 50%인 경우의 결과를 나타내었다. (a)는  $N_s = 128$ 일 때의 결과이고, (b)는  $N_s = 192$ 일 때의 결과이다.

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

표 2 전 부하의 반의 부하를 연결한 경우  
Table 2 Half the load

(a)  $N_s = 128$ 의 경우

$f_c$ (Hz)	추정한 $L_{11}$ (mH)	$L_{11}$ 의 오차 (%)	추정한 $L_{12}$ (mH)	$L_{12}$ 의 오차 (%)	총 오차 (%)
3840	75.94	0.61	1.569	-0.62	0.61
1920	75.97	0.56	1.568	-0.57	0.57
960	75.74	0.87	1.573	-0.87	0.87
480	73.81	3.39	1.613	-3.43	3.41

(b)  $N_s = 192$ 의 경우

$f_c$ (Hz)	추정한 $L_{11}$ (mH)	$L_{11}$ 의 오차 (%)	추정한 $L_{12}$ (mH)	$L_{12}$ 의 오차 (%)	총 오차 (%)
3840	76.10	0.40	1.566	-0.42	0.41
1920	76.09	0.40	1.566	-0.43	0.42
960	75.84	0.74	1.571	-0.77	0.75
480	73.87	3.32	1.612	-3.37	3.35

3.3 전원의 크기를 다르게 할 경우

표 3은 전원의 크기를 정격전압의 50%, 표 4는 전원의 정격전압의 10%로 연결한 경우의 결과를 나타낸다. (a)는  $N_s = 128$ 일 때의 결과이고, (b)는  $N_s = 192$ 일 때의 결과이다.

표 3과 표 4에서 보는 것처럼 시험을 위한 전원의 크기가 달라져도 제안한 파라미터 추정법의 오차는 매우 작음을 알 수 있다.

표 3 전원의 크기를 정격전압의 50%로 연결한 경우  
Table 3 Half the rating voltage

(a)  $N_s = 128$ 의 경우

$f_c$ (Hz)	추정한 $L_{11}$ (mH)	$L_{11}$ 의 오차 (%)	추정한 $L_{12}$ (mH)	$L_{12}$ 의 오차 (%)	총 오차 (%)
3840	75.73	0.88	15.74	-0.93	0.90
1920	75.96	0.57	15.69	-0.62	0.60
960	75.96	0.58	15.69	-0.63	0.61
480	74.91	1.95	15.91	-2.02	1.99

(b)  $N_s = 192$ 의 경우

$f_c$ (Hz)	추정한 $L_{11}$ (mH)	$L_{11}$ 의 오차 (%)	추정한 $L_{12}$ (mH)	$L_{12}$ 의 오차 (%)	총 오차 (%)
3840	76.06	0.45	1.567	-0.51	0.48
1920	76.17	0.30	1.565	-0.37	0.34
960	76.12	0.37	1.566	-0.44	0.41
480	75.07	1.75	1.588	-1.84	1.79

표 4 전원의 크기를 정격전압의 10%로 연결한 경우  
Table 4 Ten percent of the rating voltage

(a)  $N_s = 128$ 의 경우

$f_c$ (Hz)	추정한 $L_{11}$ (mH)	$L_{11}$ 의 오차 (%)	추정한 $L_{12}$ (mH)	$L_{12}$ 의 오차 (%)	총 오차 (%)
3840	75.30	1.44	1.584	-1.58	1.51
1920	75.46	1.24	1.581	-1.36	1.30
960	75.31	1.43	1.584	-1.57	1.50
480	75.11	1.70	1.588	-1.85	1.78

(b)  $N_s = 192$ 의 경우

$f_c$ (Hz)	추정한 $L_{11}$ (mH)	$L_{11}$ 의 오차 (%)	추정한 $L_{12}$ (mH)	$L_{12}$ 의 오차 (%)	총 오차 (%)
3840	75.58	1.08	1.578	-1.21	1.15
1920	75.88	1.08	1.578	-1.22	1.15
960	75.36	1.37	1.583	-1.52	1.45
480	75.12	1.68	1.588	-1.86	1.77

3.4 누설 인덕턴스의 크기를 다르게 할 경우

표 5는 누설 인덕턴스의 크기가 원래의 2배인 경우, 표 6은 누설 인덕턴스의 크기가 원래의 1/2배인 경우의 결과를 나타낸다. (a)는  $N_s = 128$ 일 때의 결과이고, (b)는  $N_s = 192$

일 때의 결과이다.

표 5과 표 6에서 보는 것처럼 누설 인덕턴스의 크기가 변하여도 제안한 파라미터 추정법의 오차는 매우 작음을 알 수 있다.

표 5 누설 인덕턴스의 크기가 2배의 경우

Table 5 Double leakage inductance

$$(L_{11} = 152.81\text{mH}, L_{12} = 3.11838\text{mH})$$

(a)  $N_s = 128$ 의 경우

$f_c$ (Hz)	추정한 $L_{11}$ (mH)	$L_{11}$ 의 오차 (%)	추정한 $L_{12}$ (mH)	$L_{12}$ 의 오차 (%)	총 오차 (%)
3840	152.51	0.20	3.126	-0.25	0.22
1920	152.34	0.31	3.130	-0.36	0.34
960	151.89	0.60	3.139	-0.65	0.63
480	149.01	2.49	3.199	-2.58	2.54

(b)  $N_s = 192$ 의 경우

$f_c$ (Hz)	추정한 $L_{11}$ (mH)	$L_{11}$ 의 오차 (%)	추정한 $L_{12}$ (mH)	$L_{12}$ 의 오차 (%)	총 오차 (%)
3840	152.89	-0.05	3.119	-0.01	0.04
1920	152.64	0.11	3.124	-0.18	0.15
960	152.13	0.44	3.134	-0.52	0.48
480	149.14	2.40	3.197	-2.52	2.46

표 6 누설 인덕턴스의 크기가 1/2배의 경우

Table 6 Half the leakage inductance

$$(L_{11} = 38.2025\text{mH}, L_{12} = 0.77957\text{mH})$$

(a)  $N_s = 128$ 의 경우

$f_c$ (Hz)	추정한 $L_{11}$ (mH)	$L_{11}$ 의 오차 (%)	추정한 $L_{12}$ (mH)	$L_{12}$ 의 오차 (%)	총 오차 (%)
3840	37.85	0.92	0.787	-0.98	0.95
1920	37.96	0.63	0.785	-0.69	0.66
960	37.95	0.67	0.785	-0.72	0.69
480	37.64	1.46	0.792	-1.54	1.50

(b)  $N_s = 192$ 의 경우

$f_c$ (Hz)	추정한 $L_{11}$ (mH)	$L_{11}$ 의 오차 (%)	추정한 $L_{12}$ (mH)	$L_{12}$ 의 오차 (%)	총 오차 (%)
3840	38.02	0.49	0.784	-0.56	0.53
1920	38.07	0.36	0.783	-0.43	0.39
960	38.03	0.46	0.784	-0.54	0.50
480	37.68	1.36	0.791	-1.46	1.41

### 3. 결 론

본 논문에서는 최소자승법을 이용한 3상 Y- $\Delta$  변압기 1차, 2차 누설 인덕턴스를 추정 방식을 제안하였다. 제안한 방식은 변압기 1차, 2차의 전압을 권선비를 고려하여 결합한 식을 유도한 후, 변압기 양단의 전압, 전류로부터 최소자승

법을 이용하여 1차, 2차 누설 인덕턴스를 추정하였다.

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

또한, 전부하를 사용하지 않거나, 정격전압을 사용하지 않은 경우의 데이터를 가지고서도 누설 인덕턴스를 정확하게 추정할 뿐만 아니라 누설 인덕턴스가 다른 변압기의 경우에 대해서도 정확하게 누설 인덕턴스를 추정함을 알 수 있었다.

제안한 방식을 사용하면 성능이 우수한 변압기 보호계전 방식의 개발에 활용될 수 있을 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 2005년도 산업자원부 전력산업연구개발 사업 전력선행기술에 의하여 이루어진 연구로서, 관계 부처에 감사드립니다.

### 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, and 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, and 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.
- [8] A. Keyhani, S.M. Miri, and S. Hao, "Parameter Estimation for Power Transformer Models from Time-Domain Data," IEEE Trans. PWRD, vol. 1, no. 3, pp. 140-146, Jul. 1986.

저 자 소 개



**강 용 철 (姜 龍 澈)**

1964년 8월 2일생. 1991년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재, 전북대 공대 전자정보 공학부 부교수.

Tel : 063-270-2391

Fax : 063-270-2394

E-mail : yckang@chonbuk.ac.kr



**장 성 일 (張 成 一)**

1971년 8월 30일생. 1996년 강원대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전북대 공대 전자정보 공학부 BK21 연구교수

Tel : 063-270-2391

Fax : 063-270-2394

E-mail : sijang@chonbuk.ac.kr



**황 태 근 (黃 泰 根)**

1981년 12월 5일생. 2005년 전북대 공대 전자정보공학부 졸업. 2006년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 063-270-2391

Fax : 063-270-2394

E-mail : taekeuny@chonbuk.ac.kr



**김 용 균 (金 容 均)**

1973년 7월 4일생. 1993년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2005년~현재 한국IED Eng. 대표이사

Tel : 02-529-2113

Fax : 02-571-9207

E-mail : codacoda@naver.com



**이 병 은 (李 炳 銀)**

1975년 11월 7일생. 1999년 전북대 공대 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 063-270-2391

Fax : 063-270-2394

E-mail : mpeclab@chonbuk.ac.kr