

# 變壓器 過渡勵磁電流計算에 미치는 等價回路定數의 影響

左 宗 根

## The Effect of Equivalent Circuit Parameters on the Transformer Magnetizing Inrush Current Calculation

*Jwa Chong-keun*

### Summary

T-type equivalent circuit, composed by test data, is used to calculate the transient magnetizing currents. Using this circuit, the method of determining circuit parameters considered the effect of the parameters variation as well as the method of computing inrush currents.

The results obtained are as follows:

- 1) To determine the circuit parameters, primary winding-resistance measurement, open circuit test, short circuit test and hysteresis characteristic measurements are required.
- 2) The value of  $r_1$ , measured by primary winding-resistance measurement, should be converted into the resistance at 25°C.
- 3) The core loss resistance( $r_m$ ) is necessary to compute the magnetizing inductance.

### 序 論

變壓器에 있어서 過渡勵磁電流는 保護裝置의 設計資料(Blume et al. 1944; AIEE Committee Report, 1951)로 필요할 뿐만아니라 通信回路(Holmgren et al. 1968)나 直流電力系統(Bowles, 1970, 1974; Povh and Schultz, 1978) 등에 影響을 주고 있다. 이에 따라 이 電流에 대해서 많은 實驗的 및 시뮬레이션方法이 19世紀末부터 發表되고 있다.

이 電流計算을 위해서 Specht(1951, 1969)와 Finzi와 Mutschler(1951)는 簡易等價回路를 사용하여 過渡狀態 각 cycle의 尖頭電流를 計算하였고 Macfadyen 등(1973)과 Yacamini와 Abu-Nasser(1981)도 簡易等價回路에 의한 過渡電流의 시뮬레이션方法을 Yamashita 등 (1975)은 T型等價回路에 의한 시뮬레이션 技法을 發表하였다.

그러나 이 方法들은 대부분 計算에 設計資料가 필요하든지 아니면 計算過程이 複雜하고 특히 回路定數가운데 鐵損分抵法을 無視하여 電流를 計算하고 있으며 等價回路定數에 대한 考慮가 되어있지 않다.

따라서 본 研究에서는 實測資料만에 의한 過渡勵磁電流 計算을 위한 T型等價回路定數의 影響을 考慮하여 回路定數를 決定하고 이 電流의 簡明한 計算方法을 提示하고자 한다.

## 等價回路 및 磁化曲線

### 1. 等價回路 및 定數決定

出力 1.5KVA, 電壓 120/240V, 加極性 變壓器에 대하여 1次捲線抵抗測定에서 1次捲線抵抗  $r_1$ 을 無負荷試驗에서 鐵損分抵抗  $r_m$ 과 磁化인덕턴스  $\ell_0$ 를 短路試驗에서 1次漏洩인덕턴스  $\ell_1$ 을 決定하여 Table 1에 보였고 等價回路는 Fig 1과 같다.

Table 1. Equivalent circuit parameters

$r_1$ (at 25°C)	0.25194 $\Omega$
$r_m$	642.86 $\Omega$
$\ell_1$	$1.485 \times 10^{-4}$ H
$\ell_0$ (at rated voltage)	1.88025 H

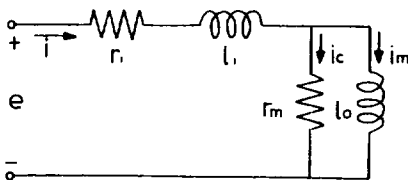


Fig. 1. Equivalent circuit at no load

이 等價回路定數중 임의의 電流에 대한  $\ell_0$ 는 鐵心の 飽和로 電流값에 따라 變化하는 非線型特性을 가지며 Fig. 2의 磁化曲線에서  $\ell_0 = \lambda_m / i_m$ 으로 구한다.

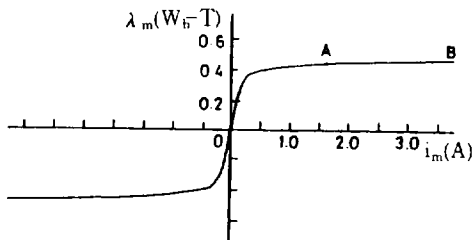


Fig. 2. Magnetization curve

### 2. 磁化曲線

試驗 變壓器에 대하여 電壓을 定格의 40%에서 150%까지 段階的으로 變化시키면서 Hysteresis loop를 測定하고 이 loop들의 頂點을 連結하여 Fig. 2의 磁化曲線을 얻는다.

이 磁化曲線에서 曲線 OA는 몇개의 區間으로 나누어 指數函數로 AB는 1차函數로 다음과 같이 表現 (左, 1984) 한다.

$$\text{曲線OA } \lambda_m = a(1 - e^{-bi_m}) \quad (1)$$

$$\text{曲線AB } \lambda_m = c i_m + d \quad (2)$$

각 電流範圍에 대한 係數 a, b, c 및 d의 값은 Table. 2와 같다.

Table 2. Coefficients of equation (1) and (2)

Current range	a	b
$0 \leq i_m < 0.1$	-0.09458	-12.50014
$0.1 \leq i_m < 0.2$	0.39613	9.02887
$0.2 \leq i_m < 0.4$	0.40597	8.44795
$0.4 \leq i_m < 0.8$	0.42528	6.38001
$0.8 \leq i_m < 1.6$	0.43313	4.65793
Current range	c	d
$i_m \geq 1.6$	0.00545	0.42416

## 回路定數의 影響

### 1. 過渡勵磁電流의 計算

Fig. 1의 等價回路에서 電壓平衡式을 쓰면

$$e = r_1 i + \ell_1 \frac{di}{dt} + \ell_2 20 \frac{di_m}{dt} \quad (3)$$

$$r_m i_c = \ell_0 \frac{di_m}{dt} \quad (4)$$

이고 (3), (4)式에서  $i_c$ 와  $i_m$ 을 구하여

$$i = i_c + i_m \quad (5)$$

으로 全電流를 구할 수 있고 이의 計算過程을 Fig. 3의 順序圖에 보였다.

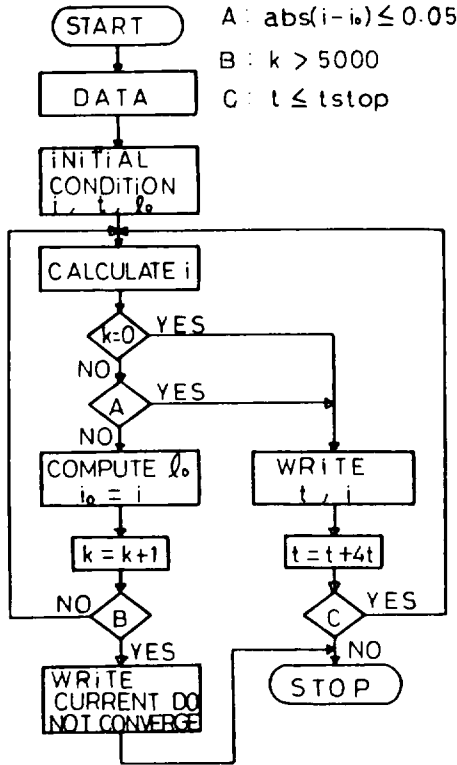


Fig. 3. Flow chart for the solution procedure

2. r<sub>1</sub>의 影響

周圍溫度 23℃일때 測定値는 0.25Ω이고 이를 25℃ 및 75℃로 換算한 값은 각각 0.25194Ω 및 1.20194Ω이며 短絡試驗 結果의 값은 0.192Ω이다. 다른 定數들은 θ<sub>1</sub>를 제외하고 固定시켰을 때 印加電壓 位相이 θ<sub>1</sub>=3.5138rad 및 θ<sub>2</sub>=-1.2581rad 일때의 計算電流를 Fig. 4, 5에 보였고 測定電壓과 電流를 Fig. 6, 7에 보였다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 r<sub>1</sub>=0.25194Ω일때 즉 25℃로 換算한 抵抗値에서 測定値와 잘 一致함을 알 수 있다.

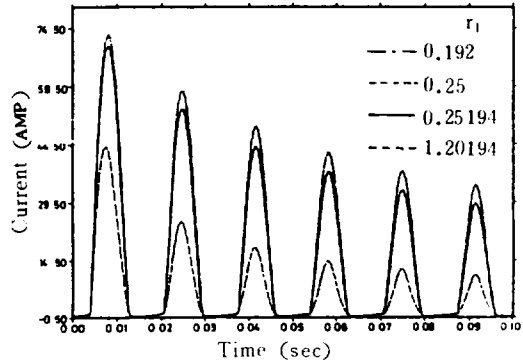


Fig. 4. Computed waveform at θ<sub>1</sub>(r<sub>1</sub> variation)

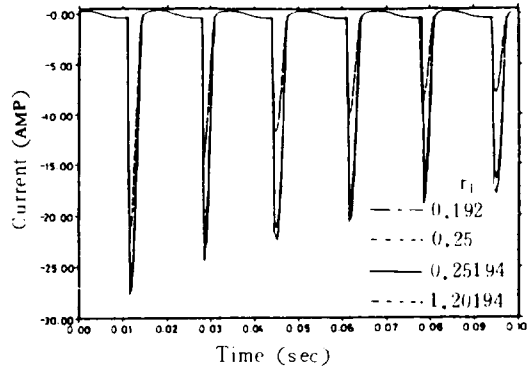


Fig. 5. Computed waveform at θ<sub>2</sub> (r<sub>1</sub> variation)



Fig. 6. Measured waveform at θ<sub>1</sub>  
Voltage 10V/div; Current 20A/div  
; Time base 10ms/div.

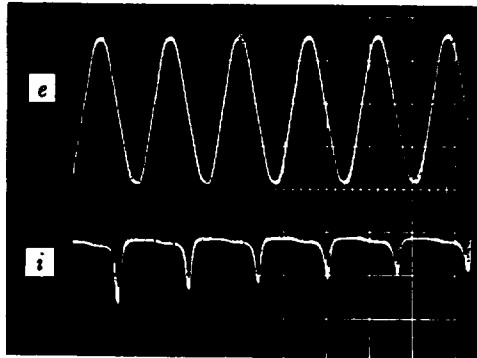


Fig. 7. Measured waveform at  $\theta_2$   
Voltage 10V/div; Current 20A/div  
; Time base 10ms/div.

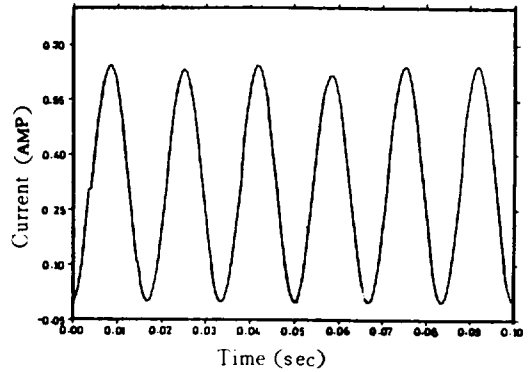


Fig. 8. Computed waveform at  $\theta_1$  ( $r_m$  neglected)

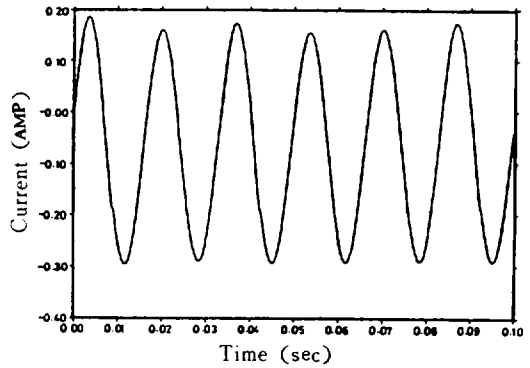


Fig. 9. Computed waveform at  $\theta_2$  ( $r_m$  neglected)

## 2. $r_m$ 의 影響

$r_m$ 을 無視했을 때  $i_m$ 의 값이 달라지므로 이에 따라 磁化曲線의 座標軸의 값도 修正되어야 한다. 修正된 磁化曲線에서 式 (1), (2)의 係數를 구하면 Table 3와 같고 이 경우 計算電流는 Fig. 8, 9와 같이 거의 正弦波와 같이 변화하고 測定值(Fig. 6, 7)와 一致하지 않음을 알 수 있다.

Table 3. Coefficient of equation (1) and (2) ( $r_m$  neglected)

Current range	a	b
$0 \leq i_m < 0.1$	-0.09437	-11.34222
$0.1 \leq i_m < 0.2$	-1.30567	-1.41857
$0.2 \leq i_m < 0.4$	0.56941	6.97636
$0.4 \leq i_m < 0.8$	0.62024	4.94580
$0.8 \leq i_m < 1.6$	0.63406	4.00803
Current range	c	d
$i_m \geq 1.6$	0.01078	0.61578

## 4. 印加電壓位相에 따른 變化

Fig. 4, 5에 實線으로  $r_1$ 과  $r_m$ 이 Table. 1의 값을 가질 때의 計算電流를 보였고 Fig. 10은 電壓位相을  $0^\circ$ 에서  $150^\circ$ 까지 Fig. 11은  $180^\circ$ 에서  $330^\circ$ 까지  $30^\circ$  간격으로 段階적으로 變化시켰을 때의 計算電流를 나타낸다. 이들 結果 測定值와 잘 一致하고 있으므로 本 方法이 妥當함을 알 수 있다.

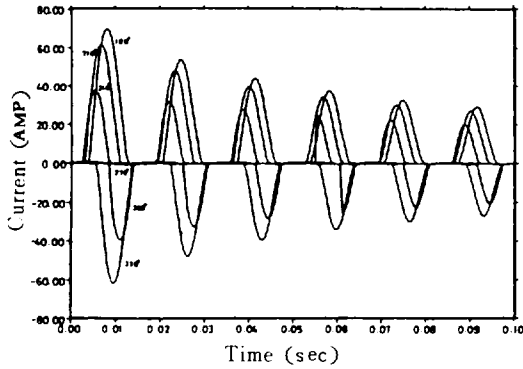


Fig. 10. Computed waveform ( $\theta$  variation)

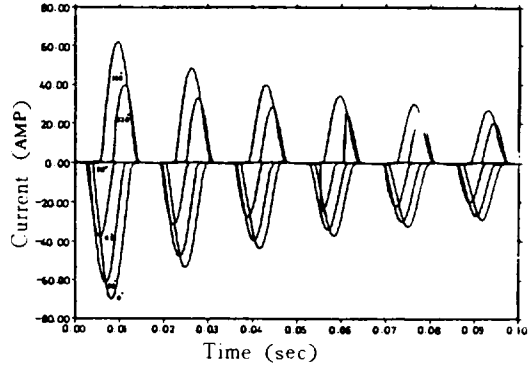


Fig. 11. Computed waveform ( $\theta$  variation)

### 摘 要

實測資料만에 의하여 變壓器 過渡勵磁電流 計算을 위한 T型等價回路를 構成하고 回路定數 變化에 대한 影響을 檢討하여 回路定數의 決定方法은 물론 電流計算方法도 提是하였다.

### 檢討한 結果

1. 回路定數를 決定기 위한 試驗은 1次捲線抵抗測定, 無負荷試驗, 短絡試驗 및 Hysteresis 特性測定이 필요하며
2.  $r_1$ 의 값은 1次抵抗測定 結果值를 25°C로 換算하고
3.  $r_m$ 을 考慮하여 計算하여야 함을 알았다.

### 參 考 文 獻

AIEE Comitee Report. 1951. Report on transformer magnetizing current and its effect on relaying and air switch operation. *AIEE Trans.*, 70: 1733-1740.

Blume, L. F., G. Camilli, S. B. Farnham, and H. A., Peterson 1944. Transformer magnetizing inrush currents and influence on system operation. *AIEE Trans.*, 63: 366-375.

Bowles, J. P., 1970. AC system and transformer representation for HVDC transmission studies. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, 89(7): 1603-1609.

Bowles, J. P., 1974. Overvoltages in HVDC transmission systems caused by transformer magnetizing inrush currents. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, 93(2): 487-495.

Finzi, L. A. and W. H. Mutschler, 1951. The inrush of magnetizing current in single-phase transformers. *AIEE Trans.*, 70: 1436-1438.

Holmgren, B., R. S. Jenkins, 1968. Transformer inrush current. *CIGRE*, vol. 1, pt. 12.03, 1-13.

左宗根, 1984. 過渡勵磁電流 計算을 위한 變壓器 磁化曲線의 表現. 濟州大學校 論文集, 19: 125-128.

Macfadyen, W. K. R. R. S., Simpson, R. D. Slater and W. S., Wood 1973. Method of predicting transient current patterns in transformers. *Proc. IEE*, 120(11): 1393-1396.

Povh, D. and W., Schultz, 1978. Analysis of overvoltages caused by transformer magnetizing

- inrush current. *IEEE Trans. power Apparatus and Systems*, 97(4): 1355–1365.
- Specht, T. R., 1951. Transformer magnetizing inrush current. *AIEE Trans.*, 70: 323–328.
- Specht, T. R., 1969. Transformer inrush and rectifier transient currents. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, 88(4): 269–276.
- Yacamini, R. and A. Abu-Nasser, 1981. Numerical calculation of inrush current in single phase transformers. *IEE Proc.*, 28(B6): 327–334.
- Yamashita, H., E. Nakamae, M. S. A. Hamman, and K. Wakisho. 1975. A program to analyze transient phenomena of circuits including precisely represented transformers. *IEEE/PES Summer Meeting*, vol. A75, Paper 403-6.