

대전력 시험설비용 변류기 특성에 관한 연구

정흥수 · 나대열 · 김선구 · 노창일 · 김원만 · 이동준  
한국전기연구원

A Study of Current Transformer for High Power Testing Facility

Heung-Soo Jung, Dae-Ryeol La, Sun-Koo Kim, Chang-il Roh, Won-Man Kim, Dong-Jun Lee  
KERI

**Abstract** - A current transformer for measuring current in high power testing laboratory is exactly proportional to the current including D.C component due to electrical transient. But, current transformer isn't designed to consider D.C component, therefore when data acquisition system measure that current, the error is increased because of saturation of core. This paper describe the concept of transient factor and how to design the current transformer

1. 서 론

변류기는 전기회로의 대전류를 각종 측정기기 및 제어 기기에 적합한 소전류로 변성하는 기기로서, 측정기기의 절연, 측정범위의 확대, 측정기기의 표준화, 정밀측정, 각종 보호기기의 제어에 사용하며, 용도(계기용, 계전기용, 계량기용), 설치장소(옥내용, 옥외용), 절연방식(에폭시 절연형, 유입형, 가스 절연형)등에 따라 다양한 특성이 요구된다.

전기회로의 단락사고시 차단성능시험과 각종 전기기기의 열적 및 기계적인 내구성시험, 정상회로 상태에서 전기적인 개폐성능시험을 실시하기 위한 대전력 시험설비로 각종 시험을 실시하는 경우, 각 피시험품의 성능을 정확하게 평가하기 위해서는 정확한 시험 데이터를 측정하여야 한다. 대전력 시험시 전압 측정장치로 분압기(Voltage divider) 및 계기용 변압기(Potential transformer)를 사용하며, 전류 측정장치로 분류기(Shunt), 변류기(Current transformer) 및 로고스키 코일(Rogowski coil)을 사용한다. 여기에서는 전류 측정장치 중 널리 사용되는 변류기를 대전력 시험설비용으로 사용하기 위하여 갖추어야 할 특성 및 설계방법에 대하여 살펴보기로 한다.

2. 본 론

2.1 변류기의 원리

변류기는 철심에 통하는 자속을 매체로 하여 변류기의 1차측에 흐르는 전로의 대전류를 변류비에 비례한 소전류로 변환시키는 자속기로서 일반적인 구조는 변압기와 같다. 이러한 변류기의 등가회로는 그림 1과 같으며, 벡터도는 그림 2와 같다.

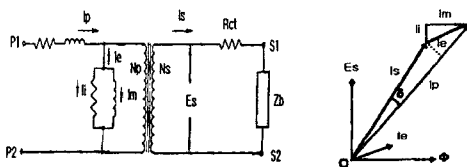


그림 1 등가회로도

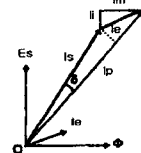


그림 2 벡터도

그림 1의 등가회로와 그림 2의 벡터도에서 알 수 있듯이 변류기의 1차 권선은 회로에 직렬 접속되기 때문에 회로전류가 1차 전류가 되며, 이 1차 전류는 2차측에 연결된 부품을 통하여 흐르는 2차 전류  $I_s$ 와 철심을 여자시키기 위한 여자전류  $I_m$ 로 나누어진다. 2차 단자에는 부담  $Z_b$ 가 연결되어 있으므로 2차 전류와 부담의 곱에 해당하는 2차 전압  $E_s$ 가 발생한다. 이 전압을 유지하기 위한 자속  $\Phi$ 가 철심을 통하여 2차 전압과 평형을 유지하는데, 부담이 증가하게 되면 2차 전압이 커지고, 철심의 자속이 증가하게 되므로 자속을 유지하기 위한 여자전류도 증가한다. 즉 철심을 여자시키기 위한 여자전류는 변류기의 1차 전류를 변류비에 비례한 2차 전류로 변성하는데 오차로서 작용을 한다. 이 여자전류는 2차 전압과 같은 성분인 철손전류  $I_w$ 와 자속과 같은 성분인 자화전류  $I_m$ 으로 나누어진다. 2차 전류  $I_s$ 와 여자전류  $I_e$ 의 벡터합인  $I_b$ 가 실제적인 1차 전류가 되며, 변류비를  $K_n$ 라고 한다면, 변류기의 비오차  $\epsilon$ 는

$$\epsilon = \frac{K_n I_s - I_b}{I_b} \times 100 (\%) \quad (1)$$

가 되며, 위상각 오차는  $\delta$ (분)이 된다. 정격전류보다 전류가 작아질수록 1차 전류에 비해 여자전류가 상대적으로 커지므로 오차는 증가한다(표 1 참조). 이러한 여자전류는 주로 철심의 재질과 구조에 많이 좌우된다. 이렇듯이 변류기의 오차를 결정하는 요인은 주로 여자전류가 되고, 오차가 적은 정밀한 변류기를 제작하기 위해서는 여자전류를 감소시키는 것이 중요하다. 변류기의 여자전류를 감소시키기 위해서는 자속밀도를 적게 하여야 한다. 그러므로 철심의 단면적  $S_c$ 를 크게 하거나, 1차 및 2차 권선 횟수를 크게 해야 한다.

2.2 대전력 시험설비용 변류기의 특성

IEC 규격에서는 변류기를 계기용 변류기(Measuring current transformer)와 보호용 변류기(Protective current transformer)로 구분하여, 각각의 요구 특성을 규정하고 있다. 계기용 변류기는 정상상태에서의 전류를 정확하게 측정하기 위한 용도로 사용하며, 그 요구 특성에 따라 정밀용, 특수용 및 일반용으로 분류하는데, 정밀용은 정격 전류  $I$ 의 5%~120%까지의 전류에 대한 오차를, 특수용은 정격 전류의 1%~120%까지의 전류에 대한 오차를, 일반용은 정격 전류의 50%~120%까지의 전류에 대한 오차를 규정한다. 전류측정용으로 가장 널리 사용되는 정밀용 변류기에 대한 비오차 및 위상각 오차의 한도를 표 1에 나타내었다.

보호용 변류기는 단락 또는 지락사고 발생시 사고 전류를 검출하여 차단기와 같은 보호기기를 동작시키기 위하여 사용하며, 정격전류 및 사고전류(보통 정격전류의 수십배의 과전류)에서의 성능을 과도계수 및 오차계급으로 표시하는데 계기용보다 오차의 범위가 크며, 요구 특

성에 따라 5종류(P급, TPS급, TPX급, TPY급, TPZ급)로 구분한다.

오차 계급	비오차 (%)				위상각 오차 (분)			
	0.05 I	0.2 I	1.0 I	1.2 I	0.05 I	0.2 I	1.0 I	1.2 I
0.1	±0.4	±0.2	±0.1	±0.1	±15	±8	±5	±5
0.2	±0.75	±0.35	±0.2	±0.2	±30	±15	±10	±10
0.5	±1.5	±0.75	±0.5	±0.5	±90	±45	±30	±30
1.0	±3.0	±1.5	±1.0	±1.0	±180	±90	±60	±60

표 1 정밀용 변류기의 비오차 및 위상각 오차 특성

대전력 시험설비용으로 사용하는 변류기는 사고 전류를 모의한 시험 전류를 정상상태에서 정확히 측정을 하여야 하므로, 계기용 변류기의 정확도와 보호용 변류기의 과전류에 대한 특성을 모두 갖추어야 한다.

대전력시험시 측정하여야 하는 시험 전류  $i(t)$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$i(t) = \sqrt{2} I [ e^{-\frac{t}{T_b}} - \cos \omega t ] \quad (2)$$

$I$ : 시험전류의 실효치

$$T_b (= \frac{L_b}{R_b}) : \text{변류기를 포함한 1차 회로의 시정수}$$

식 (2)는 시험 전류가 과도현상에 의해 지수적으로 감소하는 직류분과 정현파인 교류분이 포함되어 있는 것을 나타낸다. 각 시험규격에 의하면 직류분을 포함한 과고전류의 최대값은 교류분 전류의 2.6배(60 Hz, IEC)로 규정하고 있다. 그러므로 변류기는 시험규격에서 규정한 직류분을 포함한 시험 전류를 측정할 때 변류기 오차의 변화를 고려하여야 한다. 이 오차의 변화를 고려하기 위하여 과도계수를 설정하여야 한다.

과도계수  $K_t$ 는 직류분이 최대일 때, 다음 식과 같다.

$$K_t = \left( \frac{2\pi f T_b T_s}{T_b - T_s} \right) \times \left( e^{-\frac{t}{T_b}} - e^{-\frac{t}{T_s}} \right) + 1 \quad (3)$$

$t$ : 파고 전류에서의 오차 보증시간 (초)

$$T_s = \frac{L_s}{R_s} (= \frac{L_m}{R_{ct} + R_b}) \text{ (2차회로의 시정수)}$$

$$L_m = \frac{\Phi_s}{i_m} \text{ (H) } (\Phi_s : \text{철심의 포화 자속})$$

또한 초기 파고전류에 의하여 철심 및 권선에 가해지는 전자력에 견디며, 각종 시험시 발생하는 과도전압 및 개폐저지 전압에 대해 충분한 절연을 확보할 수 있는 구조이어야 하는데, 이러한 구조적인 특성을 갖춘 관통형 변류기로 제작하는 것이 좋다.

관통형 변류기는 1차 권선이 없고, 철심과 2차 권선만으로 구성된 구조이며, 1차 권선은 선로의 도체를 철심에 관통시켜 사용한다. 철심의 형태는 주로 원형이며, 철심에 2차 권선을 균일하게 분포시켜 권선한다면 누설 리액턴스는 무시할 수 있다. 따라서 변류기는 2차 권선에 대한 절연만이 요구되므로 구조가 간단하다. 그러나 관통형 변류기는 1차 권선의 횟수가 1회이므로, 1차 전류가 큰 경우에는 큰 암페어턴을 얻을 수 있으므로 오차 특성이 좋지만, 1차 전류가 적은 경우에는 큰 암페어턴을 얻을 수 없으므로 오차특성이 나빠지므로, 보통 1차 전류가 1000 A 이상인 변류기에 대해서 적용한다.

## 2.3 대전력 시험설비용 변류기의 설계방법

### 2.3.1 정격사양의 설정

관통형으로 변류기를 설계하기 위해서, 위의 특성 및 측정하고자 하는 전류를 고려한 정격을 설정하여야 한다. 정격으로는 최고회로전압, 정격 1차 전류, 정격 2차

전류, 오차계급, 정격 부담(VA), 사용 주파수, 과도계수 등이 있다.

### 2.3.2 암페어턴(Ampere Turn)

변류기의 설계시 가장 기본이 되는 항목으로서, 변류기의 오차 특성을 결정하는 가장 중요한 요소이다. 변류기의 오차 특성을 좋게 할수록, 부담을 크게 할수록, 정격전압을 높게 할수록 암페어턴(정격전류 × 권선 횟수)을 크게 설정하여야 한다. 암페어턴을 크게 할수록 오차의 특성은 좋아지나, 경제적, 구조적인 요구특성에 따라 암페어턴을 무조건 크게 할 수는 없으며, 보통 1,000~1,500 AT로 설정(다중비인 경우, 최소 정격 전류값을 기준)하며, 2차 권선 횟수  $N_s (= \frac{AT}{I_s})$ 를 계산한다.

### 2.3.3 철심

암페어턴(AT)을 선정하여 2차 권선 횟수를 결정하였으면, 철심의 단면적  $S_i$ 를 계산하여야 한다. 정격 부담  $Z_b$  및 과도 계수  $K_t$ 에서의 자속밀도  $B_m$ 은 철심의 포화점(철심의 재질에 따라 다르나 보통 1.8(T)) 이하이어야 한다. 즉, 철심 자속밀도의 최대값  $B_m$ 은 다음과 같다.

$$B_m = \frac{1.8}{\sqrt{2} \times K_t} \text{ [T]} \quad (4)$$

철심의 단면적  $S_i$ 는 다음과 같다.

$$S_i = \frac{E_s \times 10^4}{4.44 f N_s B_m} \text{ (cm}^2\text{)} \quad (5)$$

$$E_s = I_s \times (Z_b + R_{ct}) \text{ (V)}$$

$R_{ct}$ 의 값은 알 수 없으므로 0으로 가정한 후, 식(5)로 철심의 단면적을 구한다. 이 철심의 단면적을 점적률(보통 0.95)로 나누어, 실제 철심의 단면적을 구한다. 철심의 내경(= 변류기 내경 + 절연물 두께 + 권선 두께)  $D_i$ 를 정한 후, 철심의 폭과 높이의 비(보통 2.5)로 철심의 외경  $D_o$ 와 높이  $H$ 를 계산한 후, 평균 자로 장 ( $l_i = (2 \times D_i) + (\pi \times H)$ ) 및 철심의 중량 ( $W_i = S_i \times l_i \times \text{비중} \times 10^{-3}$ )을 계산한다.

### 2.3.4 권선

2차 권선의 전류밀도는 사용 동선, 절연물의 종류 및 단시간전류(단시간전류 정격이 있는 경우)를 고려하여 선정한다(보통  $2.5 \frac{A}{mm^2}$ ). 이 전류밀도를 기준으로 2차 권선 단면적  $S_s$  및 권선 굵기  $C_s$ 를 계산한다.

철심의 횟수 및 2차 권선의 수(횟수, 권선 층 및 절연물의 두께)에서 권선 평균길이를 구하여, 전체 권선의 길이 ( $l_s = \text{권선 평균길이} \times \text{권선 횟수}$ ) 및 중량 ( $W_s = S_s \times l_s \times \text{비중} \times 10^{-3}$ )을 계산한다. 권선의 길이에 따른 2차 권선의 저항(20°C에서의 값)  $R_{ct}$ 는 다음과 같다.

$$R_{ct} = 1.724 \times 10^{-2} \times \frac{l_s \text{ (m)}}{S_s \text{ (mm}^2\text{)}} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (6)$$

코일의 저항값  $R_{ct}$ 를 고려하여, 식(5)를 다시 계산한 후, 철심 및 권선을 결정한다. 또한 2차 회로의 합성 저항  $R (= R_b + R_{ct})$ , 합성임피던스  $Z (= \sqrt{R^2 + X^2})$

및 역률  $\cos \phi_2 (= \frac{R}{Z})$ 를 구한다.

### 2.3.5 여자회로의 값

철손  $W$ 는 다음과 같다.

$$W = \left( B^2 \left[ \sigma_H \left( \frac{f}{100} \right) + \sigma_E d^2 \left( \frac{f}{100} \right)^2 \right] \right) \times W_i \quad (W) \quad (7)$$

$\sigma_H$  = 히스테리시스 손 계수 (0.39 ~ 0.45)

$\sigma_E$  = 와전류 손 계수 (11.3 ~ 13.1)

$d$  = 철심의 두께 (mm)

여자전류  $I_0$ 는, 철심의 B-H곡선으로부터 여자전류 ( $\frac{A_0}{\text{cm}}$ )를 구한 후, 여자 암페어턴  $AT_0 (= \frac{A_0}{\text{cm}} \times l_i)$ ,

여자전류  $I_0 (= \frac{AT_0}{\sqrt{2} N_s})$ , 철손전류  $I_i (= \frac{W}{E_s})$  및

자화전류  $I_m (= \sqrt{I_0^2 - I_i^2})$ 을 구한다.

### 2.3.6 오차의 계산

변류기의 비오차  $\epsilon$ 은

$$\epsilon = -\frac{100}{I_1} (I_m \sin \phi_2 + I_i \cos \phi_2) + \beta \quad (\%) \quad (8)$$

위상각 오차  $\delta$ 는

$$\delta = \frac{3.438}{I_1} (I_m \cos \phi_2 - I_i \sin \phi_2) \quad (\text{분}) \quad (9)$$

으로 주어진다.

비오차가 규정된 오차 범위를 벗어나거나, 오차를 개선하기 위하여 보상권선(2차 권선 횟수에 1~2회의 권선 횟수를 조정하는 것)을 실시하여 오차를 보상한다. 보상권선에 의해서 위상각 오차는 조정되지 않지만, 비오차보상은 다음과 같이  $\beta$ 만큼 조정된다.

$$\beta = \frac{\text{보상권선 횟수}}{2\text{차권선 횟수} - \text{보상권선 횟수}} \times 100 \quad (\%) \quad (10)$$

또한, 철심의 일부에 구멍을 만들어 여기에 2차 권선의 일부를 2차 권선과 반대방향으로 권선을 하면, 저전류에서의 비오차 및 위상각 오차의 조정이 가능하다. 또한 2차 회로에 정격 부당 이외의 병렬 및 직렬 임피던스(콘덴서 등)를 접속하여, 여자전류를 보상하여 오차특성을 개선할 수 있다.

### 2.3.7 과도오차의 계산

과도 계수에서의 과도오차  $\epsilon_t$ 는 다음과 같다.

$$\epsilon_t = \left[ \frac{T_p}{T_p - T_s} \left( e^{-\frac{t}{T_s}} - e^{-\frac{t}{T_p}} \right) + \frac{1}{2\pi f T_s} \right] \times 100 \quad (\%) \quad (11)$$

### 2.3.8 설계의 예

정격사항 : 24kV 1000/5 A 40 VA 60 Hz 0.5급  
 $K_t = 10$

$AT$	1000 AT	$H$	6.5 cm
$N_s$	200 회	$l_i$	49.8 cm
$T_p$	0.05 초	$W_i$	6.0 kg
$T_s$	5 초	$C_s$	1.6 mm
$t$	0.033 초	$S_s$	2.0 mm <sup>2</sup>
$B_m$	0.12 T	$l_s$	41.7 m
$S_i$	15.7 cm <sup>2</sup>	$W_s$	0.74 kg
$Z_b$	1.6 $\Omega$	$R_{ct}$	0.36 $\Omega$
$D_i$	15.0 cm	$Z$	1.9 $\Omega$
$D_o$	20.0 cm	$W$	0.052 W

$AT_0$	1.892 AT	$\epsilon$	-0.13 %
$I_0$	0.0067 A	$\delta$	0.56 분
$I_i$	0.0053 A	$\beta$	-
$I_m$	0.0041 A	$\epsilon_t$	0.53 %
$\cos \phi_2$	0.86	$K_t$	10

### 2.3. 기타 고려사항

변류기의 1차 회로에 직류가 통전되거나, 과전류가 통전되는 상태에서 전류가 차단되는 경우에 철심의 히스테리시스 현상으로 인한 잔류자속이 남아있게 된다. 그 상태에서 다시 변류기에 전류가 통전되는 경우, 오차가 증가한다. 정격전류에서 큰 오차의 변화는 없지만, 정격전류의 10% 이하의 저전류를 측정하는 경우, 잔류자속의 영향을 고려해야 한다. 잔류자속의 영향을 고려하는 구체적인 방법은 아직까지 제시되지 않고 있다. 다만 잔류자속이 포화자속의 10% 이하가 되는 것이 바람직하다.

## 3. 결 론

IEC 규격에서 과도계수는 보호용 변류기의 정확한 특성을 표시하기 위한 개념으로만 사용하고 있으며, 계기용 변류기에는 적용하지 않는다. 그러나 위에서 살펴본 바와 같이, 대전력 시험설비용으로 사용하기 위하여 과도계수를 갖는 계기용 변류기를 제작하고 과도오차특성(그림 3 참조) 및 오차특성(표 2 참조)을 측정하였다.

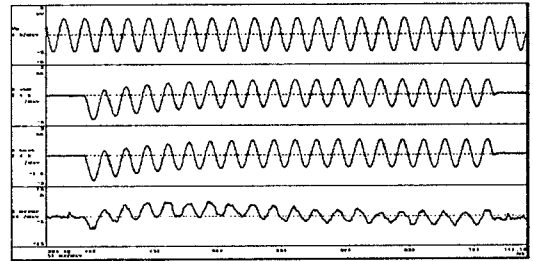


그림 3 과도오차특성 오실로그래프

비오차 ( $\epsilon$ )	-0.18 % (1.0 I)
위상각 오차 ( $\delta$ )	1.2 분 (1.0 I)
과도 오차 ( $\epsilon_t$ )	0.48 % ( $I_p = 2.6 I$ )

표 2 오차특성

따라서 대전력 시험설비용 변류기는 정격전류에서의 오차 및 직류분을 포함한 과과전류에서의 과도오차를 고려해야만 정확한 전류를 측정할 수 있다는 것을 알 수 있다.

### (참 고 문 헌)

- [1] IEC 60044-1, "Current Transformers", IEC TC-38, 1996-12.
- [2] IEC 60044-6, "Requirements for protective current transformers for transient performance", IEC TC-38, 1992-03.
- [3] JEC 1201, "Current Transformers", 일본전기학회, 1985.
- [4] 원종수, "전기설계학", 1994.