보호용 변류기의 과도성능에 대한 고찰

정흥수, 나대열, 김선구, 노창일, 김원만, 이동준
한국전기연구원

Study of requirements for protective current transformers for transient performance

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

Abstract - IEC 60044-6 (Requirements for protective current transformers for transient performance) was established to Korea Standard (KS C IEC 60044-6 ; Instrument transformers Part 6; Requirements for protective current transformers for transient performance) in December 11, 2003. In this paper, requirements, test items and test methods protective current transformers for transient performance.

1. 서 론

보호용 변류기는 전력계통에서 사고가 발생하였을 때 그 사고전류를 검출하여 차단기와 같은 보호기기를 동작시키는 전기기기이다. 이 보호용 변류기의 성능에 대해서는 IEC 60044, IEEE 57.13, JEC 1201등에 규정되어 있으며, KS(한국산업규격)으로는 규정되어 있지 않았으나 2003년 12월 11일 KS C IEC 60044-6(계기용 변성기 - 제6부 보호용 변류기의 과도성능에 대한 요건)으로 제정되었다. 지금까지 국내에서 제작되는 보호용 변류기는 IEC 규격보다는, JEC 및 IEEE 규격에 준하여 제작되고 있었으나, 한국산업규격이 IEC를 채택함으로써, 국내 보호용 변류기의 제작, 표기방법, 성능도 IEC의 규정대로 통일될 전망이다. 본 논문에서는 KSC IEC 60044-6를 중심으로 보호용 변류기의 구조, 갖추어야 할 성능, 그 성능을 평가하는 시험방법 등을 살펴본다.

2. 본 론

2.1 보호용 변류기 등급

보호용 변류기는 기능적인 성능에 따라 다음과 같이 분류된다.

P급 : 안정상태 대칭 1차 전류에서 종합오차($\hat{\varepsilon}_c$)에 의해 정의된 정확도. 잔류자속에 대한 제한은 없음.

TPS급 : 그 성능이 2차 여자 특성 및 권수비 오차 한도에 의해서 정의되는 저누설자속 변류기. 잔류자속에 대한 제한은 없음.

TPX급 : 규정된 과도 책무주기동안 파고 순시오차($\hat{\varepsilon}$)에 의해서 정의된 정확도. 잔류자속에 대한 제한은 없음.

TPY급 : 규정된 과도 책무주기동안 파고 순시오차($\hat{\varepsilon}$)에 의해서 정의된 정확도. 잔류자속은 포화자속의 10%를 초과하지 않을 것.

TPZ급 : 규정된 2차 루프 시정수에서 최대의 D.C 옵셋을 갖는 고장전류 통전시 파고 순시 교류분 오차($\hat{\varepsilon}_{ac}$)에 의해서 정의된 정확도. 직류분 오차한도에 대한 요건은 없음. 누설자속은 보통 무시됨.

2.2 변류기 등급에 따른 오차의 한도

각 변류기 등급에 따른 변류기의 허용오차의 한도는 표 1과 같다.

변류기 등급		정격 1차 전류에서			오차 한도 조건에서
		비오차 (%)	위상변이		최대 파고 순시 오차 (%)
			분 (Min)	센티 라디안	
P	5P	±1	±60	±1.8	5
	10P	±3	-	-	10
TPS		±0.25	-	-	10
TPX		±0.5	±30	±0.9	10
TPY		±1.0	±60	±1.8	10
TPZ		±1.0	180±18	5.3±0.6	10

표 1 변류기 등급에 따른 오차의 한도

2.3 변류기 등급에 따른 시험항목

각 변류기 등급에 따른 시험항목은 표 2와 같다.

시험항목	변류기 등급				
	P	TPS	TPX	TPY	TPZ
비오차	-	x	-	-	-
안정상태의 비오차 및 위상변이	x	-	x	x	x
2차권선저항(R_{ct})	x	x	x	x	x
여자특성	x	x	x	x	x
잔류자기계수(K_t)	x	-	-	x	-
2차루프시정수(T_s)	x	-	-	x	x
임계조건에서의 오차	x	-	x	x	x
설계요소(F_c)	-	-	x	x	x
저 누설자속 설계의 검증	x	x	-	-	-

표 2 보호용 변류기의 시험항목

2.3 시험항목별 시험방법

보호용 변류기의 과도성능과 시험항목에 관련된 시험방법에 대하여 살펴본다.

2.3.1 비오차 및 위상변이 측정

변류기에 대한 권수비 오차를 정확하게 측정할 수 있는 간단한 직접적인 방법은 없다. 실제 변류기의 오차는 아래 3가지 원인으로 인해 영향을 받는다.

1) 권수비와 정격 변성비간의 차이

2) 철심 여자전류(I_e)

3) 권선에 결합된 표유 정전용량에 흐르는 전류

그림 1은 변류기 저항분 및 리액턴스분에 대한 단순화된 기본 회로를 나타낸다.

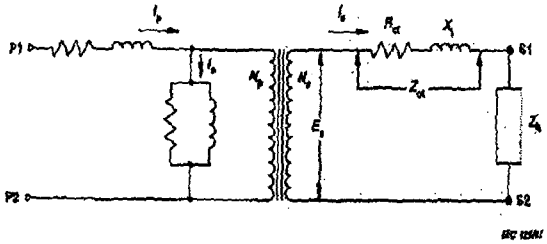

그림 1 변류기에 대한 단순화된 등가 회로

비오차가 작은 경우(예를 들면 1%), 주어진 2차 권선에 대한 유기 기전력(E_s)을 가정하는 것이 합리적이고, 표유 정전용량 및 철심 자화로 인한 오차 전류는 1차 전류(I_p)의 값에 상관없이 일정한 값을 유지한다. 이론적으로 만약 2차 루프 임피던스가 적당하게 조정될 수 있다면, E_s는 인가 전류의 범위에 대해 일정한 값에서 유지될 수 있다. 저누설자속형(예를 들면 TPS급)으로 설계된 변류기인 경우, 2차 누설 리액턴스는 무시될 수 있고, 2차 권선 저항만이 고려된다. 따라서 어떤 두 전류 I'_s와 I''_s에 대해서 다음과 같은 방정식이 성립된다.

$$I'_s(R_{ct}+R'_b) = E_s = I''_s(R_{ct}+R''_b)$$

측정된 비오차가 ξ'_c 및 ξ''_c라고 가정한다면, 권수비오차는 ξ_t로서 표시되고 결합된 자화 및 표유 전류는 I_x로 주어지고, 각각의 오차 전류는 식 1과 같다.

$$(\xi'_o-\xi_t)\frac{K_nI'_s}{100} = I_x = (\xi''_c-\xi_t)\cdot K_n\frac{I''_s}{100} \qquad \text{식 1}$$

그러므로

$$\xi_t = \frac{\xi'_cI'_s-\xi''_cI''_s}{(I'_s\cdot I''_s)}$$

2.3.2 2차 권선저항 측정

2차 권선저항을 측정하고, 측정값을 75℃ 또는 규정된 온도에 대한 값으로 보정한다. 그렇게 보정된 값이 2차 권선저항 R_{ct}에 대한 정격치이다.

2.3.3 여자특성 측정

여자특성곡선은 포화자속의 1.1배 이상까지 측정하며, TPX 및 TPY 변류기에 대한 시험시, 정격등가여자제한 2차전압(U_{al})에서 여자 전류의 파고치를 측정한다.

여자특성을 측정하는 방법은 다음과 같다.

2.3.3.1 여자특성 측정에 대한 일반사항

변류기가 완전하게 옵셋된 비대칭 단락전류(D.C성분이 포함된)가 인가되는 경우, 철심에 D.C성분으로 인한 단일방향성분의 자속 파형이 유기된다. 따라서 다음과 같은 여러 가지 여자특성을 측정하는 방법 중에서, 변류기 철심에 단일방향 자속이 인가되는 간접시험이 보다 정확하다.

TPS 및 TPX급 변류기는 큰 잔류자기 계수 때문에 여자특성을 측정하기 전에 철심을 감자할 필요가 있다. TPY급 변류기에 대해서는 잔류자기 계수가 매우 낮으므로 철심을 감자할 필요가 없다. 철심 자화 특성 측정은 철심 2차 결합 자속과 자화 전류간의 관계를 입증하는 것을 의미한다. 2차 권선 저항의 전압강하의 영향을 고려하는데, 만약 그 값이 2%를 초과한다면, 측정된 전압치에서 전압강하를 빼야 한다.

2.3.3.2 A.C. 방법

정현파인 교류 전압을 2차 단자에 인가하고, 그에 상응하는 자화전류의 값을 측정한다. 권선 및 2차 단자의 파도한 전압 스트레스를 피하기 위하여 낮은 주파수에서 실시할 수도 있다. 더 낮은 주파수에서는 철심에서 심한 와전류 손실과 권선층간의 용량성 전류의 영향이 감소된다. 여자전류는 파고치 지시 계기로 결과가 파고 자속치와 일치하게 되도록 측정한다.

2차 결합자속치 Φ와 주파수 f에서 인가된 전압 U의 관계는 식 2와 같다.

$$\Phi = \frac{\sqrt{2}}{2\pi f}\cdot U \quad \text{(Wb)} \qquad \text{식 2}$$

그리고 정격 주파수 f에서 실효등가전압 U는 식 3과 같다.

$$U = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}}\cdot\Phi \quad \text{(V, r.m.s.)} \qquad \text{식 3}$$

측정결과는 정격 주파수에서 그것의 등가 실효전압 U를 통한 자화전류 i_m의 파고치와 자속 Φ의 파고치간의 규정된 관계를 나타내는 곡선으로서 표시한다.

자화 인덕턴스는 포화 자속 Φ_s의 20%와 90% 사이 범위에서 산정된 위 곡선의 평균 기울기로 주어진다.

$$L_m = \frac{\Phi_s}{i_m} \approx \frac{\sqrt{2}\,U}{2\pi f i_m} \quad \text{(H)} \qquad \text{식 4}$$

2차측의 누설 인덕턴스가 무시될 수 있는 경우, 저항성 전부담 ($R_{ct}+R_b$)에 대한 2차 회로 시정수 T_s는 다음과 같이 식 5로 계산된다.

$$T_s = \frac{L_s}{R_s} = \frac{L_m}{R_{ct}+R_b} \quad \text{(s)} \qquad \text{식 5}$$

여자전류가 포화자속 Φ_s에 도달되면, 전류의 영점 교차점에서 자속치는 잔류자속 Φ_r을 표시한다. 그러면, 잔류자기 계수 K_r은 비 $\Phi_r/\Phi_s = \Psi_r/\Psi_s$로서 계산된다.

2.3.3.3 D.C 방법

D.C 포화방법은 같은 값의 자속이 도달되는 지속시간의 D.C 전압을 인가한다. 자속크기는 인가된 권선의 단자간에서 전압과 R_{ct} i_m에 상당하는 부가전압을 더한 총합으로부터 계산한다.

요구되는 여자전류의 제한치가 적당한 시간안에 도달되도록, 최대 인가 전류치 (I_m)는 요구되는 값보다 더 커야 한다. 예를 들어, I_m은 TPS급을 제외한 모든 등급에 대하여 과도 오차전류 제한치의 2배 정도가 좋다. TPS급은, I_m이 E_{al}에서 여자전류의 5배도 좋다. I_m의 더욱 더 높은 값은 잔류자기 계수(K_r)을 결정하는데 철심 포화에 도달하기 위하여 필요할 수도 있다.

시험회로에서 방전 저항 R_d을 접속하여야 한다. 그렇지 않다면 스위치 S가 개방되고 유도성 전류가 차단될 때 철심 인덕턴스는 매우 높은 과전압을 유기할 수도 있다. R_d의 저항치가 R_d+R_{sh}의 합이 R_d와 같도록 선택된다면, 방전회로 루프 시정수는 대략 정격 2차 회로 시정수 (T_s)와 같게 되고, 2차 회로 방전특성은 S의 개방시 측정된다. 그렇지만, 이 값은 실제로는 너무 높은 전류를 가할 수도 있으므로, R_d는 높은 저항치로 선택한다.

스위치 S가 닫혀진 후 짐시동안, 철심자속이 일정하게 유지될 때 여자전류 i_m이 그것의 최대치(I_m)에 도달되었다고 간주한다. 자화 인덕턴스 (L_m)은 자속치가 등가 실효전압 $U(t)$에 의하여 주어진 경우, $\Phi(t)$를 대응하는

$i_m(t)$로 나누거나 자화 곡선상의 적당한 지점에서 추론될 수도 있다.
스위치 S의 개방시, 감소하는 자화전류는 2차 권선과 방전저항 R_d를 통하여 흐른다. 상응하는 자속치가 감소하지만, 전류 영점에서 0으로 떨어지지 않을 수도 있다. 적당한 여자전류 I_m이 포화자속 Φ_s를 얻기 위하여 선택되었을 때, 전류 영점에서 잔류자속치는 잔류자속 Φ_r로 간주되어야 한다. 그전에 철심이 강제적으로 감자되어지는 TPS 및 TPX 변류기와 감자할 수도 있는 TPY 변류기에 대하여, 잔류자기 계수(K_r)은 비 Φ_r/Φ_s로부터 결정된다.
이외에도 여자특성을 측정하는 방법으로, 대체 DC방법, 커패시터 방전방법등이 있다.

2.3.4 잔류자기계수의 결정
잔류자기 계수(K_r)은 해당되는 등급의 규정에 따르는 지를 확인하며, 여자특성 측정의 결과로 산출한다.

2.3.5 2차루프시정수의 계산
자화 및 누설 인덕턴스(L_s)와 2차 루프저항(R_s)의 합으로부터 얻어진 변류기의 2차 루프 시정수의 값(T_s)은
$T_s = L_s / R_s$ 로 표시된 값으로 TPY급 변류기에 대해서는 ±30%, TPZ급 변류기에 대해서는 ±10% 이상 다르지 않아야 한다. 여자특성 측정시 식 5로 계산한다.

2.3.6 파고순시오차전류의 측정
TPS급 및 TPX급 변류기는 큰 잔류자기 계수 때문에 직접시험 전에 감자한다. 잔류자기 계수를 무시할 수 없다면, TPY급 변류기도 감자시킨다.
정격 주파수 및 정격 2차 부담에서 두 번의 직접 시험을 실시한다.
1) 정격 주파수에서 정격 1차 단락전류가 옵셋(D.C성분)이 없이 인가된다. 순시오차전류의 교류분이 측정되고 2차 시정수($1/\omega T_s$)에 상응하는 이론적인 값과 일치하여야 한다.
2) 정격 주파수에서 정격 1차 단락전류가 최대 옵셋(최대 D.C성분)을 갖고 인가된다. 80ms까지 1차 시정수의 규정된 값에 대하여, 시험은 규정된 정확도 제한 조건(규정된 책무주기)에서 실시된다. 1차 시정수는 규정된 값으로부터 10% 이상 벗어나서는 안된다. 80ms이상 1차 시정수의 규정된 값에 대하여, 사용자와 제조자간의 동의를 조건으로, 시험은 등가 정확도 제한 조건에서 실시될 수 있다.

첫 파고 순시 1차 전류는 규정된 조건에 상응하는 값보다 커야 한다. 인가 시간 및/또는 2차 부담은 시험하는 동안에 측정된 2차 전압 총합이 정확도 제한 자속(Φ_{al})에 도달하도록 조정된다.
상응하는 파고 순시 오차 전류의 기록된 값이 측정되고 관련된 정확도 계급(표 1)에 대하여 오차 전류 제한치를 초과해서는 안된다. TPX급 및 TPY급 변류기인 경우, 전체 오차전류가 측정된다. TPZ급 변류기인 경우, 오차전류의 교류분이 파고대파고치의 1/2로 측정된다. 제한조건(E_{al} 및 E_{alc})에서 추론되어질 수 있는 등가 1차 기전력의 기록으로부터 2차 단자간 전압의 정수배 이외에 1차, 2차 및 오차전류의 순시값을 사용하여야 한다.

2.3.7 설계요소의 결정
U_{alc}/E_{alc}의 비율에서 얻은 설계요소는 정격 조건 및 과도특성계수(K_{td})의 최고 이론치에서 변류기 성능에 대하여 유효하다. 이것은, 만약 C-O 및 C-O-C-O 책무주기 양쪽 다 규정된다면, K_{td}는 더 높은 값을 따르는 어느쪽의 책무주기로부터 결정될 것이다.
엄밀히, 설계요소는 규정된 조건하에서만 변류기 성능에 대한 2차 여자 특성과 관련이 있다.

2.3.8 저누설자속설계의 검증
변류기가 저누설자속설계의 기본 요건을 만족할 것인지를 검증하기 위한 직접시험은 이론적인 등가 2차 기전력과 측정된 값 사이에 편차가 10%를 초과하지 않는다는 것을 충분하게 입증할 수 있는 만큼 인가 전류, 책무주기 및 부담에서 충분히 많은 회수로 실시한다.

3. 결론 - 보호용 변류기의 선정

대부분의 경우, TPS, TPX 또는 TPZ급간의 선정은 일반적으로 사용상태에서 변류기가 사용될 전력계통의 계전기 설비를 고려하여 구매자가 각 등급의 중요한 특성을 고려하여 결정한다.
저누설자속형의 특성에 더하여, TPS급 변류기는 권수비를 정밀하게 제어하는 것이 요구된다. 두 요건은 단순한 순환전류 원리 및 고임피던스 계전기를 사용함에 근거한 단락사고뿐만 아니라 지락사고 보호 설계에 가장 중요하다. 잔류자속이 규정된 한도를 갖지 않으므로, 보통 측정용 보호 계전기에 대한 사용상 제한은 시험 및 현장 경험으로부터 추론된 경험적인 방법에 근거한다. 변류기가 심하게 포화되었을 때 1차 고장전류의 차단은 자속이 포화된 상태로부터 잔류 레벨로 떨어지는 것과 같이 2차 회로에서 전류가 빨리 감쇠된다. 보통 보호 계전기에 대한 재설정 시간은 TPS급 변류기의 감쇠 특성에 의해 중요하게 영향을 받지 않는다.
TPX급 변류기에 대한 기본적인 특성은 일반적으로 다른 오차 한도 규정과 1.1 이상의 구조 계수가 필요할 수도 있으며 유도 영향을 제외하면 TPS급 변류기의 특성과 비슷하다.
TPY급 변류기는 포화 자속의 0.1 P.U 미만으로 잔류자속을 제어한다. 포화상태로부터 잔류자속 조건으로 천이하는 동안, 2차 회로에서 전류는 비슷한 특징 및 비슷한 2차 접속 부담을 갖는 TPS 또는 TPX급 변류기에 대한 경우보다 훨씬 크며 더 길게 유지될 것이다. C-O-C-O 책무주기인 경우, TPY급 변류기에 대하여 필요한 과도특성계수는 2차 회로 시정수(T_s) 및 무전류시간(t_{fr})간의 관계에 의해 결정적으로 영향을 받을 것이다.
따라서 직류성분의 과도전류를 포함하는 1차계통사고 전류에 대한 과도성능을 갖는 변류기의 선택은 각 등급에 따른 특성을 반드시 확인한 후 선택하여야 하며, 그 성능의 확인은 각 등급에 따른 적절한 시험방법이 규정된 KS C IEC 60044-6을 따라야 한다.

[참 고 문 헌]

[1] IEC 60044-1, "Instrument transformers - Part 1: Current transformers", IEC TC-38, 1996-12.
[2] IEC 60044-6, "Instrument transformers - Part 6: Requirements for protective current transformers for transient performance", IEC TC-38, 1992-03.
[3] 원종수, "전기설계학", 1994.