

ANSI/IEEE를 적용한 초고압 차단기의 차단시험

박승재*, 류형기*, 강영식*, 고희석**
*한국전기연구원, **경남대학교

Breaking test of UHV circuit breaker by ANSI/IEEE standard

Park Seung-Jae*, Rhyou Hyeong-Kee*, Kang Young-Sik*, Koh Heui-Seog**
*Korea Electrotechnology Research Institute, **Kyungnam University

Abstract - IEC(International Electrotechnical Commission) 62271-100 has been adopted for the design test of circuit breaker which is used as the main protecting device of power system. But, it is also necessary to separately receive the testing certificate in accordance with ANSI/IEEE standard for getting into the american market. Up to now, several domestic companies have completed the ANSI/IEEE testing in medium circuit breaker of distribution system, but they recently started the ANSI/IEEE testing in ultra high-voltage class of transmission and substation system. This paper introduces the testing techniques and its results for the making and breaking performance of 145kV, 40kA SF₆ gas circuit breaker which was firstly performed in KERI(Korea Electrotechnology Institute) by the ANSI/IEEE standard.

1. 서론
전력계통에서 선로 보호용으로 사용되는 차단기의 성능과 시험평가 방법은 주로 IEC 62271-100(2001)을 적용하고 있지만, 미주에서는 ANSI/IEEE C37.09를 사용하고 있다. 이러한 양 규격 사이에는 상당한 차이점을 보이고 있으며, 이로 인해 최근에는 통합하기 위한 활동도 활발하게 이루어지고 있다. 그러나 양 규격간에 여전히 많은 차이점이 존재하기 때문에 각각 별도로 성능 인증 시험을 실시해야 하며, 최근 국내의 초고압 차단기 제조 기업들도 미주 수출을 위하여 ANSI를 적용한 성능 인증 시험을 시작하고 있다.

이러한 미국의 차단기 규격은 성능 및 제반 요건을 IEEE C37.09(1999)에 대표로 규정하고 있으며, IEEE C 37.04(2000), IEEE C 37.06(1999), ANSI/IEEE C37.081(1981)에 부수적인 사항들을 규정하고 있다. 특히 ANSL/IEEE C37.081은 단락 합성시험에 대한 시험 방법을 규정하고 있으며, 이 합성 시험법은 전원 주파수의 고장 전류를 공급하는 발전기 그리고 과도회복전압과 회복전압을 발생시키기 위한 콘덴서로 구성되며, 초고압 차단기의 경우에는 전 세계적으로 모든 단락 시험소에서는 초고압 차단기의 경우에는 단락 발전기 설비 용량 한계로 인하여 이 합성시험법을 사용하고 있다.

본 논문에서는 2003년에 국내에서는 최초로 ANSI/IEEE의 합성시험법을 적용하여 성능 평가 인증시험을 완료한 145kV, 40kA 가스차단기의 시험 방법과 결과를 소개하고자 한다.

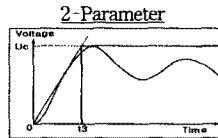
2. 본론

2.1 성능검증 항목

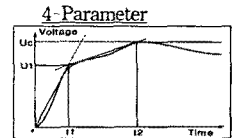
2.1.1 IEC와 ANSI 규격 비교

현재 차단기의 성능과 시험 방법에 대하여 사용되고

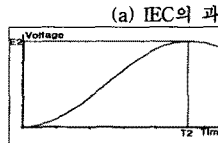
있는 IEC 62271-100와 IEEE C37.09 사이에는 표-1과 같은 차이점이 있는 관계로, 서로 별도로 규격 인증 시험을 실시하고 있다. 양 규격간에 가장 기본적인 면서 중요한 차이점은 차단 후 발생하는 과도회복전압(TRV ; Transient Recovery Voltage)로서, 그림-1에서와 같이 IEC의 U₁, U_c, t₃(t₂), rrrv는 각각 ANSI에서 E₁, E₂, T₂, R과 상호 대응되는 변수이다. 특히 100kV 이상의 초고압 초고압 차단기의 경우 ANSI에서는 exp-cos 파형을 가진 TRV를 규정하고 있다.



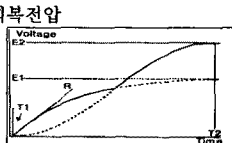
Uc : Peak voltage
t3 : Time to peak
rrrv : Rate of rise



U1 : 1st reference voltage
t1 : Time to reach u1
Uc : Peak voltage
t2 : Time to reach Uc
rrrv : Rate of rise(U1/t1)



E2 : Peak voltage
T2 : Time to peak



E2 : Peak voltage
T2 : Time to peak
T1 : Delay time
R : Rate of rise

(a) ANSI/IEEE의 과도회복전압

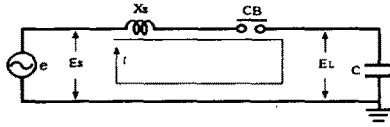
그림 1. 과도회복전압의 표기

표 1. IEC와 ANSI의 비교

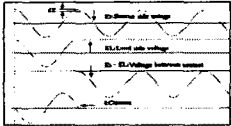
항목	시험항목	IEC	ANSI
진상 소전류	케이블, 선로	시험회수:48회 전압배수:1.0 ~ 1.4 재점호 발생:회수 제한	시험회수:24회 전압배수:1.0 ~ 1.2 재점호 발생:과전압 제한
	근거리 선로 고장	52kV, 12.5kA 이상 시험채무: L ₆₀ , L ₇₅ , L ₉₀ 정격 동작채무로 시험	적용:15.5kV 이상 시험채무: L ₇₅ , L ₉₀ O-3회로 시험
탈조		전압계수:2.0(절지계통) 2.5(비절지계통) TRV:4-Parameter	전압계수:2.0(절지계통) TRV:2-Parameter
	기본 단락 시험	T10	전압계수:1.3, 1.5 시험채무:정격 동작채무
T30			
T60			
T100s		전압계수:1.3, 1.5 시험채무:정격 동작채무	전압계수:1.3 시험채무:2회(대칭) 정격 동작채무
단상 단락	T100a	전압계수:1.3, 1.5 시험채무:3회(비대칭) 절지계통:상전압 정격차단전류	전압계수:1.3 시험채무:3회(비대칭) 상전압, 정격차단전류로서 대칭전류 차단
	대칭	비절지계통:선간전압 정격차단전류의 87%	상전압, 정격차단전류로서 대칭전류 차단
	비대칭	-	상전압, 정격차단전류로서 비대칭전류 차단

2.1.2 진상소전류 차단특성

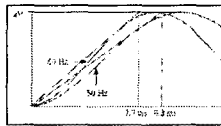
전력계통에서 발생하는 진상소전류의 종류로는 1) 무부하 가공선로에서 발생하는 선로충전전류, 2) 무부하 지중선로에서 발생하는 케이블충전전류, 3) 역률조정용으로 사용되는 콘덴사군에 의한 콘덴사군전류 등으로 구분할 수 있다. 이러한 진상소전류를 차단할 경우에는 그림-2에서처럼 상용주파수의 교류전압인 전원측전압(E_s)과 Capacitance에 충전되는 직류전압인 부하측 전압(E_L)에 의해 극간(E_t=E_s-E_L)에는 상용주파수 전압 침투치의 2배의 전압이 발생하며, 이 전압에 도달하는 시간은 50 Hz인 경우는 8.3 ms, 60Hz인 경우는 7.3ms이며, 이 지점에서의 절연파괴(재점호) 발생과 과전압에 대한 성능 검증이다.



(a) 등가회로



(b) 전압과 전류 파형



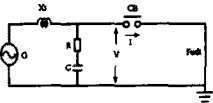
(c) 과도회복전압

그림 2 진상소전류 차단 현상

2.1.3 대전류 차단 특성

차단기가 구비하여야 할 가장 중요한 특성은 고장 전류 차단을 통한 계통 보호로서, 고장의 종류로는 지락, 선간단락, 3상 단락과 같이 실제 사고에 의한 고장과, 계통 연계시 동기의 상실로 인해서 발생하는 탈조상태 등이다. 이러한 고장전류는 선로의 유도임피던스에 의해서만 제한되기 때문에 전압과 전류의 위상차는 거의 90도에 가깝고 수십 kA 정도의 큰 지상전류이다.

이러한 대전류 차단에 있어서 중요한 요소로는 대전류에 의한 아크에너지, 차단 지점에서의 전류의 기울기 및 차단 후 발생하는 과도회복전압으로서, 표-1의 T100s와 T100a는 아크 에너지와 과도회복전압에 대한 성능 검증이고 근거리선로고장시험은 대전류 차단 후 발생하는 높은 기울기를 가진 과도회복전압에 대한 검증이다. 그림-3의 고장회로에서 발생하는 전류는 식-(1)의 교류분과 식-(2)의 직류분으로 구분되며 실제 차단기가 차단해야 할 전류는 식-(3)과 같이 두 전류의 합이다. 식-(4)는 직류분이 소멸된 후 전류영점에서의 기울기이며, 이 전류의 기울기는 주파수에 비례한다.



(a) 등가회로



(b) 전압, 전류 파형

그림 3 단락전류 차단 현상

$$i_s = \left[\frac{\sqrt{2}E}{Z} \right] \sin(\omega t + \theta + \phi) \tag{1}$$

$$i_i = \left[\sqrt{2}E \right] \left[\sin(\theta - \phi) e^{-\frac{R_1 t}{L}} \right] \tag{2}$$

$$i = i_s + i_i \tag{3}$$

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{\sqrt{2}\omega E}{Z} \tag{4}$$

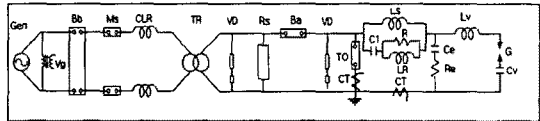
여기서, $\omega = 2\pi f$, $\phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R_1}$, $X_s = \omega L$, $Z = \sqrt{R_1^2 + X_s^2}$, $R_1 = X_s$ 의 선로 저항

2.2 성능 평가 결과

2.2.1 차단 성능평가의 개요

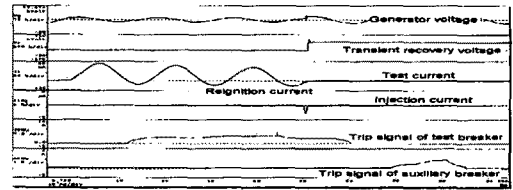
38kV까지의 배전급 차단기는 주로 진공 차단기를 사용하고 있으며, 국내에서도 ANSI를 적용한 시험을 다수 실시해오고 있다. 그러나 초고압에서는 SF₆ 가스를 사용한 가스 차단기를 주로 사용하고 있으며, 국내에서는 ANSI를 적용한 성능 평가 시험을 2003년에 처음으로 실시, 완료하였다. 이 성능 평가에 있어서 진상소전류 개폐시험은 배전급 차단기와 동일한 직접시험법을 사용하였으며, 대전류 차단시험(근거리선로고장, 탈조, 기본단락)은 그림-4의 전압원과 전류원을 분리하는 합성시험법을 사용하였다.

합성단락시험은 1) 상용주파수의 대전류를 공급하는 전류원은 단락발전기를 이용하여 20kV 정도의 전압에서 고장 전류를 공급하며, 2) 과도회복전압과 회복전압을 위한 전압원은 콘덴서에 저장된 에너지를 방전시켜 약 500Hz 정도의 고주파수 주입전류와 전압(과도회복전압과 회복전압)을 발생시킨다. 이 과정에서 전류원 전압이 차단기 정격에 비하여 매우 작기 때문에 인위적인 아크연장을 위하여 아크연장 장치(Rs)를 사용한다.



- Gen --- 단락발전기
- Bb --- 후비보호용 차단기
- Ms --- 루일스위치
- CLR --- 한류리액터
- S.C TR --- 단락변압기
- Rs --- 아크연장 장치
- Ba --- 보조차단기
- Bt --- 시험용 차단기
- Cv --- 충전콘덴서
- Lv --- 공진리액터
- Ce --- 전압조정 콘덴서
- Re --- 전압조정 저항
- Ls, LR, RC1 --- Artificial line(근거리선로고장시험용)
- Gs --- Main gap

(a) 합성단락시험 회로



(b) 시험전류 및 시험전압

그림 4. 합성단락 시험 결과 파형

2.2.2 과도회복전압

금번 성능 평가를 위한 145kV, 40kA 차단기에 대하여 인가해야 할 과도회복전압은 그림-5와 같다. 그림-5에서 처럼 T10과 T30에서는 2-Parameter TRV, 그리고 T60과 T100a 및 T100s에서는 exp-cos 파형의 4-parameter TRV를 발생시켜야 한다.

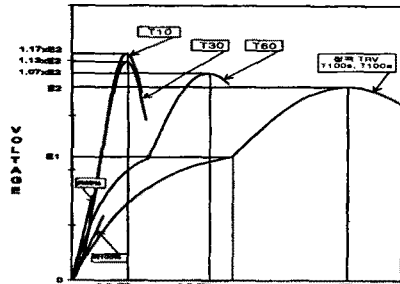


그림 5. 기본단락시험에 대한 과도회복전압

2.2.3 시험용 차단기

금번 성능 평가를 위해서는 표-2의 정격 및 사양을 가진 145kV, 40kA 가스차단기를 사용하였으며, 그림-6은 소호부의 개략도와 시험 장면을 보여주고 있다.

표 2. 시험용 차단기의 주요 정격 및 사양

정격전압 / 정격차단전류	145kV, 40kA
정격 차단시간	3 Cycle
조작방식	스프링 축제조작(정격 제어전압 125 Vd.c.)
정격 동작핵부	O-0.3초-CO-3분-CO
SF6 가스압력	정격 : 0.5 MPa · G, 최소 : 0.45 MPa · G

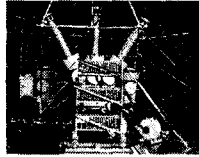
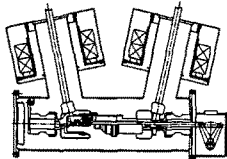


그림 6. 시험용 차단기의 내부 구조와 시험 평가 장면

2.2.4 진상소전류 시험

보통 절연특성은 차단기가 완전히 정지된 상태에서의 절연 성능 평가인 반면에 진상소전류시험은 차단기가 개로 행정 중인 과도 상태에서 2배의 전압에 대한 절연 성능 검증을 목적으로 한다. 표-3은 본 차단기에 실시된 케이블 충전과 선로 충전전류 개폐시험 결과이며, 재점호는 발생하지 않았고 양호한 특성으로 평가되었다.

표 3. 진상소전류 시험결과

항목	핵부	시험전류 (A)	시험전압 (kV)	TRV peak(kV)	극성 (회수)	아크시간 (ms)
케이블 충전	1A	27.3A	85.2	242-247	+(12)	0.1~8.7
선로 충전	3A	26.7A	103	293-297	+(12)	0.1~8.9
케이블 충전	1B	82.5A	84.5	242-250	-(12)	0.3~9.1
선로 충전	3B	83.2A	103	293-297	-(12)	0.3~9.1

2.2.4 대전류 시험

보통 차단기의 진상소전류 차단 특성은 표-3과 같이 아크시간과 차단전류가 매우 작기 때문에 접점 소모등은 거의 발생하지 않으며 주로 과전압에 대한 절연성능의 검증 즉 재점호 발생 유무가 주목적이다. 이에 비하여 대전류 차단은 표-4에서 알 수 있는 바와 같이 최소아크시간이 약 10ms 정도로 길고 차단 전류도 크기 때문에 상당한 점접 소모가 발생한다.

이러한 대전류 차단성능에 영향을 미치는 주요 요소는 다음과 같이 전압과 전류 2가지 측면에서 구분할 수 있다.

1) 차단전류

- 영점에서 전류 기울기
- 아크 최종 구간에서 전류 높이
- 아크 구간에서 최종 Loop의 지속 시간

2) 전압

- 차단 직후 TRV 기울기와 침투치
- 회복전압

특히, 근거리선로고장시험에서는 차단 후 선로의 유도성 임피던스에 의해 발생하는 고주파수의 삼각파 전압에 의한 차단성능이 핵심이며, 이 때 특성 임피던스는 삼각파 전압의 기울기(dV/dt)와 차단전류 영점에서 전류의 기울기(di/dt)의 비로 정의되며 450Ω이 표준이다.

표-4는 대전류 시험의 결과로서, 본 성능 평가에 적용된 합성시험법을 규정한 ANSI/IEEE C37.081에서는 차단 전류에 대한 전체 조건으로서 차단전류의 최종 Loop에서 진폭은 95% 이상, 시간은 90% 이상 유지되도록 규정하고 있다. 이러한 규정은 합성 시험시 낮은 전류원 회로의 전압으로 인해 그림-4의 보조차단기(Ba)와 시험용 차단

기(TO)에서 발생하는 아크 저항으로 인해 전류가 감소하여 아크 에너지가 작아지는 것을 제한하기 위한 것으로서, 전류원 회로의 용량에 대한 규정이다.

표 4. 대전류 시험 결과

항목	시험 핵부	시험전류			TRV			아크 시간 (ms)	
		기울기 (A/μs)	침투치 (kAμs)	시간 (ms)	E2 (kV)	T2 (μs)	R (kV/μs)		
근거리 선로	L75	16.2	40.9	8.38	194	208	1.94	12.2-18.2	
	L90	19.7	53.2	8.63	202	208	2.02	13.5-19.9	
합조	1	1.52	3.87	8.38	304	580	-	11.5-17.9	
	2	5.38	14.7	8.79	304	484	-	12.1-18.6	
기본 단락	T10	2.23	5.62	8.52	267	65	-	10.4-17.3	
	T30	6.25	18.3	8.95	248	64	-	11.8-18.8	
	T60	13.8	32.8	8.29	235	152	4.03	11.8-18.5	
	T100s T100a	1st	21.8	70.5	9.86	219	306	2.05	12.3-15.4
		2nd	19.3	-	-	115	132	-	16.5-20.3
		3rd	12.8	-	-	169	137	-	16.5-20.3
	단상 대칭, 비대칭	21.7	71.8	9.53	171	305	2.03	21.4	

3. 결 론

최근까지 초고압 차단기의 성능 평가시험을 위해 적용되던 IEC 60056(1987)과 IEC 60427(1989)은 신규 개정되어 완료되어 IEC62271-100(2001)과 IEC 60427(2000)로 재편되었으며, ANSI 규격도 IEC와의 상호 통합을 위하여 많은 부분이 수정되고 있는 추세이다. 그러나 아직도 미주로의 진출을 위해서는 별도로 성능평가 시험을 실시해야 하며, 본 연구에서 실시된 ANSI에 따른 성능평가는 향후 증가될 것으로 예상되는 초고압 차단기의 성능 평가의 기초가 될 것으로 사려된다.

금번에 실시된 대전류 시험에서 TRV는 2-Parameter의 경우는 ANSI 규격에 규정된 바를 충실하게 만족시킬 수 있었지만 4-Parameter의 경우에는 규격에서 요구하는 exp-cos 파형의 50-80% 지점의 전압에서 가혹한 상태를 유지하였다. 이는 초기 exp 파형의 구형에 있어서 전압원 회로의 구성상 한계가 있기 때문으로서 향후 추가로 시험설비를 보완해야 할 필요가 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEEE C37.04, "IEEE standard rating structure for AC high-voltage circuit breakers", 1999
- [2] ANSI C37.06, "AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis-Preferred ratings and related required capabilities", 2000
- [3] IEEE C37.09, IEEE standard test procedure for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis", 1999
- [4] ANSI/IEEE C37.081, "Guide for synthetic fault testing of AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis", 1981
- [5] IEC 60056, "High-voltage alternating-current circuit breakers", 1987
- [6] IEC 60427, "Synthetic testing of high-voltage alternating current circuit-breakers", 1989
- [7] IEC 62271-100; "High-voltage alternating current circuit breakers", 2001
- [8] IEC 60427, "Synthetic testing of high-voltage alternating current circuit-breakers", 2000
- [9] C. H. Flursheim, "Power circuit breaker theory and design, second edition" Peter Peregrinus Ltd., 1982
- [10] Klaus Ragaller, "Current interruption in high voltage networks", PLENUM PRESS, NEW YORK and LONDON, 1978