

단락시험 회로의 시정수 조절에 의한 투입전류 제한법

박승재*, 류형기*, 강영식*, 고희석**

*한국전기연구원 산업협력부, **경남대학교 전기전자공학부

Limiting method of short-circuit making current by controlling the time constant of dc component

Park, Seung-Jae*, Rhyou, Hyeong-Kee*, Kang, Young-Sik*, Koh, Heui-seong
*Korea Electrotechnology Research Institute, ** Kyungnam Univ.

Abstract - In order to newly define and specify the performance and the testing method of the high-voltage circuit breaker, IEC 62271-100 was published in May, 2001 and took place of IEC 60056 which had been used since 1987.

This new standard intensifies the requirement and the test method of the circuit breaker and also domestic manufacturer makes progress the new product development. And, KERI also goes on the build-up project of short-circuit testing facilities for fulfilling the testing method requirements in new IEC 62271-100.

This paper introduce the limiting method of short-circuit making current by controlling the time constant of dc component.

1. 서 론

차단기는 전력 계통에서 정상적인 부하 상태의 선로 개폐는 물론이고, 특히 지락 또는 단락과 같은 지역을의 큰 사고전류를 차단하여 계통의 안정성을 유지하기 위해 사용되는 개폐장치의 일종이다.

한편, 차단기의 제반 성능 및 시험 방법을 규정한 IEC(International Electrotechnical Commission)-60056 은 1987년에 제정되어 최근까지 국제적으로 사용되어 왔지만, 2001년에 IEC 62271-100으로 보완, 개정되었다.

그리고 차단기의 개폐 또는 투입/차단 성능시험 항목은 소전류 영역(진상소전류, 지상소전류)과 대전류 영역(단락전류, 근거리선로고장전류, 탈조 전류)으로 크게 구분되는데, 신규격 IEC 62271-100에서는 소전류 영역의 진상소전류 개폐시험과 대전류 영역의 단락전류 투입차단시험 항목에 대한 시험규정이 전면적으로 개정되었다.

이와 같은 국제적인 흐름에 맞추어 국내의 최대 사용기관인 한국전력공사 규격의 개정도 진행 중에 있으며, 또한 국내 제조회사들도 신규격의 요건을 충족시킬 수 있는 신제품 개발에 주력하고 있다.

한편, 차단기의 핵심 요건인 투입차단 성능의 검증은, 주로 한국전기연구원의 대용량 단락시험 설비를 이용하고 있으며, 현재 한국전기 연구원도 신규격의 성능검증을 효율적으로 수행할 수 있도록 다방면의 시험설비 및 시험기술 개발을 활발하게 진행하고 있다. 특히, 대전류 차단성능 시험항목 중 정격단락전류에 대한 차단기의 정격동작채무 수행 능력을 규정하고 있는 단락투입차단 시험 T100s를 위해서는 투입전류의 제한이 필수적인 요소이며, 본 논문에서는 정격전압 52kV 까지의 배전선로용 차단기의 T100s 시험시 시험설비의 직류분 감쇠 시정수 조절을 통하여 과도한 투입전류를 발생시키지 않고 효율적인 성능검증을 실시할 수 있는 방법과 결과를 소개한다.

2. 본 론

2.1 계통 시정수와 고장전류 발생

2.1.1 고장전류 발생 현상

전력계통의 고장은 간략하게 그림-1(a)의 등가회로와 같이 나타낼 수 있으며, 이 때의 고장전류는 주로 리액턴스에 의해 제한된다.

그림-1(a)에서 전원전압을 $v(t) = V_m \sin(\omega t + \theta)$ 라고 하면, 식-(1)로 표현되는 고장전류가 발생한다.

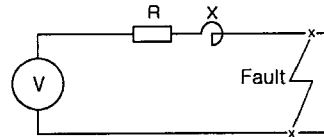
$$i(t) = i_{ac} + I_{dc} \tag{1}$$

$$= I_m \sin(\omega t + \theta - \phi) - I_m e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\theta - \phi)$$

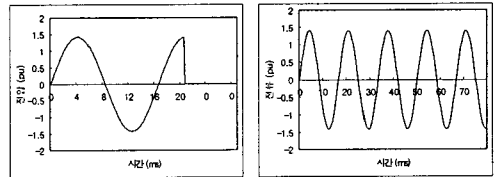
여기서, $I_m = \frac{Vm}{Z}$, $\tau = \frac{L}{R}$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} = \frac{\pi}{2}, \quad Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

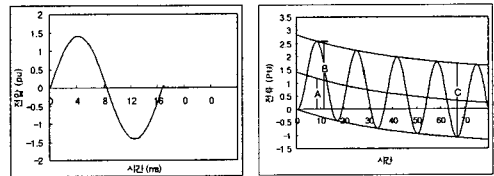
식-(1)에서 리액터의 Inductance와 저항의 비를 직류분 감쇠 시정수라고 하며, IEC 62271-100에서 45ms를 표준으로 채택하고 있다.



(a) 고장계통의 등가회로



(b) 대칭고장전류(전압 peak점, $\theta = \phi$)



(c) 비대칭고장전류(전압 peak점, $\theta = \pi/2 + \phi$)

그림-1 : 전압 위상각에 따른 고장전류

그림-1(a)의 회로상태에서 발생하는 전류는 전압의 위상에 따라 초기의 직류분 전류(I_{dc})의 크기에 따라 고장전류 Peak가 달라진다.

그림-1(b)와 같이 $\theta = \varphi$ 인 전압 Peak에서 고장이 일어나면, 식-(1)의 I_{dc} 가 영이 되어 순수한 교류분 전류(I_{ac})만의 대칭 전류(Symmetrical current)가 발생한다. 이와는 반대로, 그림-1(c)처럼 $\theta = \pi/2 + \varphi$ 인 전압 영점에서 고장이 일어나면 최대의 직류분 전류와 이에 따른 최대 Peak 전류를 가진 비대칭 전류(Asymmetrical current)가 발생한다. 식-(2)와 식-(3)은 그림-1(c)의 비대칭 전류에 대한 백분율 직류분(%dc)과 Peak 전류의 관계를 나타낸 식이다. 여기서 직류분 감소 특성과 이에 따른 투입전류의 크기는 시정수(τ)에 의해서 결정되기 때문에 이를 직류분 감소 시정수라고 한다. 즉, τ 가 클수록 직류분 감소가 작아지고 투입전류 Peak치가 커진다.

$$\%dc = \frac{A}{C/2} \times 100 = \frac{I_{dc}}{\sqrt{2}I_{ac}} \times 100 (\%) \quad (2)$$

$$I_p = B = A + C/2 = \sqrt{2}I_{ac} + I_{dc} = K \times I_{ac} \quad (3)$$

2.1.2 IEC 62271-100의 규정

정격전압에서 발생할 수 있는 고장전류를 차단기가 이상 없이 차단할 수 있는 최대치를 차단기의 정격 단락 차단전류라고 한다. 그리고 2.1.1에서 설명한 바와 같이 전압 영점에서 투입할 때 발생하는 초기 Peak 전류에 대하여 이상 없이 제재로 동작을 수행할 수 있는 전류의 한도를 정격 단락투입전류라고 한다.

이 투입전류는 순시치로서 차단전류의 배수로 나타내며, IEC 62271-100에서는 표준 시정수($\tau = 45ms$)에서 2.6배(계통 주파수가 60Hz 경우)와 2.5배(계통 주파수가 50Hz인 경우)로, 표준 시정수를 초과하는 별도의 시정수의 경우는 2.7배로 규정하고 있다. 그림-2는 4가지 시정수 상태에서 시간에 대한 직류분 감소특성이며, 표-1은 초기 비대칭 전류의 Peak와 실효치의 비(P/r 비)를 계산한 결과이다. 여기서 알 수 있는 바와 같이, 시정수(τ)가 클수록 직류분이 늦게 감소하고, 따라서 투입전류 배수(P/r 비)도 커진다.

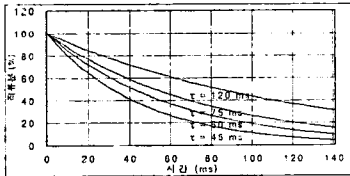


그림-2 : 시정수(τ)에 따른 직류분 감소율

표-1: 계통 주파수와 시정수에 따른 투입전류 배수

		주파수	
		50Hz	60Hz
시정수	45ms	2.55	2.59
	60ms	2.61	2.66
	75ms	2.65	2.68
	120ms	2.72	2.73

그림-2 : 시정수(τ)에 따른 직류분 감소율

2.2 단락투입차단시험 책무와 투입전류 제한

2.2.1 단락시험 설비의 전류 특성

계통의 발전기 특성과 마찬가지로 대용량 단락발전기를 전원으로 사용하는 단락시험설비의 전류는 발전기의 과도특성(과도 임피던스, 차과도 임피던스), 여자 시스템의 여자 특성, 그리고 시험정격(시험 전압, 시험 전류)을 조정하기 위하여 사용하는 한류 리액터(CLR)에 따라 그림-3과 같이 감소하는데, 이러한 감소 특성을 개선하기 위하여 발전기 계자 코일의 Super excitation 기능을 사용하기도 한다. 식-(4)는 한국전기연구원 단락시험 설비의 시험전류 특성을 나타내는 식으로서, Super excitation 여자 시스템을 사용하지

않을 경우이다.

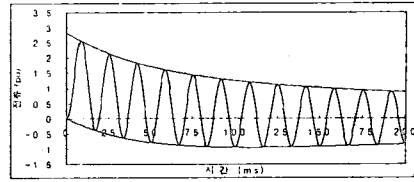


그림-3 : 단락시험 설비의 전류감쇠특성

$$i(t) = \left(\frac{1}{X'} - \frac{1}{X}\right)e^{-t/T'} + \left(\frac{1}{X} - \frac{1}{X'}\right)e^{-t/T''} + \frac{1}{X} \quad (4)$$

여기서,

$$X'' = X' + X_e, \quad X' = X' + X_e,$$

$$X = X + X_e, \quad T'' = \frac{X''}{X'} \times \frac{X}{X''} \times T''$$

$$T' = \frac{X'}{X} \times \frac{X}{X'} \times T'$$

$$X'' = 2.7\% (180MVA \text{ base}), \quad X' = 5.9\% (180MVA \text{ base})$$

$$X_e = 34\% (180MVA \text{ base}),$$

$$T'' = 0.05 \text{ sec}, \quad T' = 1.1 \text{ sec}$$

$$i(t) : \text{단락전류}, \quad X_e : \text{외부 임피던스}$$

2.2.2 신규격의 단락투입차단 시험 규정

표-2는 IEC 62271-100에 규정된 단락 투입/차단 시험의 5가지 시험항목에 대한 조건을 간략하게 보여 주고 있다. 이 표에서 T100s와 T100a는 정격 차단전류를 차단하는 시험으로서, 특히 T100s는 정격 동작 책무로 정격 투입전류를 투입하며 직류분이 20% 이하인 대칭전류를 차단하여야 하는 항목이다.

표-2 : 차단기의 단락투입, 차단 시험항목

시험 항목	시험 전압	시험 전류		직류분	동작 시이월스	
		투입	차단			
T10	Vn	-	0.1xIsc	≤20%	Rated operating sequence	
T30	Vn	-	0.3xIsc	≤20%		
T60	Vn	-	0.6xIsc	≤20%		
T100s	Vn	2.6xIsc	Isc	≤20%		
T100a	Vn	-	Isc	주(1)	O. O. O	
단상 고정	1선지락	0.58xVn	-	Isc	≤20%	O
	2선지락	Vn	-	0.58xIsc	≤20%	O

* Vn : 정격전압, Isc : 정격단락전류

주 (1), 차단기의 개극 시간과 계통 시정수에 따라 그림-2 적용

2.2.3 시정수 조정을 이용한 T100s 시험

표-2의 T100s 시험을 위해서는 단락전류를 투입한 후에, 직류분이 20% 이하로 낮아져서 대칭전류 상태가 될 때까지 전류를 지속시킨 후에 차단시켜야 하는데, 이 최소 지속시간(T_{min})은 시험설비 시정수의 함수로서 일반적으로 식-(5)으로 표시될 수 있다.

$$T_{min} = -\tau \ln 0.2 \quad (s) \quad (5)$$

즉, 시정수가 크면 직류분 감소시간이 길어져서 전류 지속시간을 길게 유지해야 하고, 따라서 2.2.1에서 설명한 바와 같이 교류분 감소율이 커진다. 그리고 교류분 차단 신규는 차단기가 개극하는 지점에서 측정해야 하므로, 실효치 전류가 상당히 줄어든 상태이므로 2.1.2에서 설명한 초기 전류의 P/r비도 커지므로 상당히 높은 투입전류가 발생한다. 한국전기연구원의 단락 시험 설비의 고유 시정수는 약 65ms 정도이고, 여러 가지 과도 특성으로 인해 지속시간(T_{min})이 약 130ms 후에 대칭전류 상태가 되지만, 시정수를 규격치인 45ms로 조정할 경우에는 약 70ms 정도만에 대칭전류 상태가 된다.

이러한 점을 이용하기 위하여 투입시 회로의 시정수를 규격의 표준치인 45ms로 조정할 목적으로 직렬저항(R_s)을 삽입한 시험회로는 그림-4(a)이며, 그림-4(b) 7.2kV, 25 kA의 T100s O-CO동작 책무의 시험결과이다.

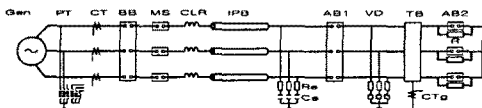
그림-4(a)의 시험 시퀀스는

(1) 보조차단기(AB1, AB2)와 시험용 차단기(TB)가 투입된 상태에서 투입스위치(MS)를 투입시켜 고장전류를 발생시킨다. 그 후 TB가 개로되어 전류를 차단하고, 이 후 약 4-5Cycle 뒤에 AB2가 개로된다. 이 구간에서는 전류는 직렬저항(Rs)를 통하지 않는다(그림-4(b), T1 구간).

(2) 이 후 다시 TB는 재폐로되어 직렬저항(Rs)을 통하여 전류를 투입하고, 2-3 Cycle이 지나면 보조 차단기(AB2)가 투입되어 전류를 by-pass 시킨다(그림-4(b), T2 구간).

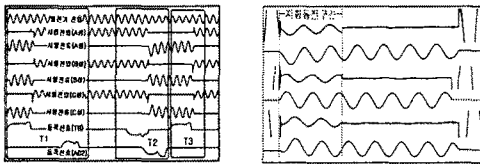
이 구간에서는 전류가 Rs를 통하여 흐르며, 투입시점에서는 규격의 표준치인 회로 시정수 상태이므로 P/R비가 작아지고 교류분이 20% 이하인 대칭전류 상태에 도달하는 시간도 짧아진다.

(3) 이 후 대칭 전류 상태가 되면 피시험 차단기(TB)가 개로되어 전류를 차단하여 O-CO 동작책무를 완료한다(그림-4(b), T3 구간).



- Gen : 단락발전기
- MS : 투입스위치
- IPB : Isolated Phase Bus
- AB : 보조차단기
- VD : 분압기
- BB : 후비보호용 차단기
- CLR : 한류 리액터
- TB : 시험용 차단기
- CT : 변류기
- Re, Ce : 과도회복전압 조정회로

(a) 단락시험 회로(T100s)



(b) 3상 시험 결과

그림-4 : 3상 단락시험 결과(T100s)

2.2.4 시험 결과 검토

현재 한국전기연구원의 단락시험 설비 고유 시정수인 약 65ms 상태에서 T100s 시험을 실시할 경우 투입전류는 시험 정격에 따라 최대 3.5까지 발생한다.

표-3은 한국전기연구원의 단락시험 설비를 이용하여 7.2kV, 25.8kV, 36kV급 배전급 차단기의 3상 단락 시험 T100s에 대하여 시정수 조정에 의한 투입전류 개선 결과를 보여주고 있다. 이 표에서 동일 정격전압의 경우 시험전류, 즉 피시험 차단기의 단락 용량이 커질수록 투입전류를 IEC 62271-100의 허용범위인 10% 이내로 제한하는 데 한계가 있다는 것을 알 수 있다. 이는 식-(4)로 표현되는 시험전류 제한 요소가 외부 임피던스(Xe)보다는 발전기의 고유 특성(과도 임피던스, 차과도 임피던스)에 의해 대부분 의존하므로, 시험전류의 교류분 감소율이 커지기 것에 기인한다. 이러한 대용량 차단기의 투입전류를 제한하기 위해서는, 그림-4(a)의 단락시험회로에서 저항 대신에 리액터를 사용하여 투입전류의 교류분 실효치 자체를 억제하는 것이 더 효과적이다. 즉, 투입시에는 회로 임피던스의 10 - 20% 정도의 리액터를 통하여 전류가 흐르도록 하여 교류분 실효치 자체를 작게 하고, 이 후 2-3Cycle 후에 AB2를 투입하여 전류를 분도시킴으로서 다시 실효전류를 증가시킨 후에 TB를 차단시킨다. 그러나 이 방법은 리액터 제작 비용과 설치공간이 많이

소요되므로 비경제적이다. 그리고 소용량의 차단기를 시험할 경우에는 많은 리액터가 요구되므로, 저항법과 리액터법을 적절하게 사용하는 것이 필요하며, 필요시 양자의 방법을 혼용하는 것도 필요하다.

표-3 : 투입전류 제한 효과(T100s)

전압 (kV)	전류		시험 결과			
	차단 (kA)	투입 (kAp)	시정수 조정전	시정수 조정후	제한 결과 (%)	
					전후 비교	정격 기준
7.2	8	20.8	24.0	21.5	-10.5	+3.4
	12.5	32.5	37.5	34.0	-9.3	+4.6
	20	52	61.5	56.0	-8.9	+7.7
	25	65	81.5	70.5	-13.4	+8.5
	31.5	81.9	105	90.5	-13.8	+10.5
25.8 (24)	40	104	138	120	-13.0	+15.4
	12.5	32.5	37.0	34.0	-12.1	+4.6
	20	52	60.0	55.0	-15.4	+5.8
36	25	65	76.5	70.0	-17.7	+7.7
	25	65	73.5	69.0	-13.1	+6.2
	31.5	81.9	95.5	85.5	-10.5	+9.3

3. 결론

현재 차단기, 단로기, 접지 개폐기 등 개폐장치에 대한 국제규격인 IEC의 개정작업이 활발하게 진행되고 있다. 개정된 내용들은 대부분 제반 성능 요건 및 시험방법이 강화되고 있는 추세이며, 이를 대비하기 위해서 국내의 제작사들도 신제품의 연구개발을 활발하게 추진하고 있다. 이러한 환경에 효율적으로 대응하기 위해서 한국전기 연구원도 신규격의 제반 규정을 충족시킬 수 있는 시험설비 보강과 시험방법 개발을 수행하고 있으며, 본 논문에서 제안한 시정수 제어를 통한 투입전류 제한법을 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 주로 배전급 차단기에 대하여 단락투입차단시험 T100s을 IEC 62271-100의 개정내용에 적합하게 실시할 수 있는 범위를 향상시켰다.
- 과도한 투입전류를 억제하여, 신제품의 최적 설계에 기여할 수 있다.
- 리액터법과 상호 보완설비를 구성함으로써 보다 효율적이고 경제적인 시험이 가능할 것으로 사려된다.

(참고 문헌)

- [1] IEC 6271-100, "High-voltage alternating-current circuit Breakers," Fifth Edition, 2001.
- [2] IEEE C37.09, "IEEE Standard Test Procedure for AC High-voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis," 1979.
- [3] Allan Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems", second edition.
- [4] Klaus Ragaller "Current interruption in high-voltage networks" PLENUM PRESS, NEW YORK and LONDON, 1978.
- [5] Thomas E. and Browne, JR. "Circuit interruption Theory and Techniques" MARCEL DEKKER, INC.
- [6] C. H. Flursheim "Power circuit breaker theory and design, second edition" Peter Peregrinus Ltd. 1982.