

합성 진상전류 개폐 시험설비의 회로설계에 관한 연구

김명현, 서윤택, 윤학동, 신영준, 강영식, 고희석

A study on circuit design of synthetic test facilities of capacitive current switching tests

M.H.KIM, Y.T.Suh, H.D.Yoon, Y.J.Shin, Y.S.Kang, H.S.Koh

Abstract - A study on the test method and the test facilities of synthetic capacitive current tests have been very slight and the direct test method with the short-circuit generator and power transformer only used up to now.

However, according to the development of analysis technique of power system and design and manufacture technique we are realized that direct testing method is not satisfactory to evaluate the performance of circuit-breaker because it is difficult to simulate precisely the conditions of power system. Therefore, in order to solve these problem this paper deals with the tests methods and the design technique of the tests facilities of the synthetic capacitive current based on the same theory with the synthetic short-circuit tests.

1. 서 론

지난 20년 동안 초고압·대용량 차단기의 단락능력을 평가하기 위한 합성시험방법에 대한 연구는 오래전부터 꾸준히 수행되어 현재에는 시험설비의 설계기술 및 시험방법에 대해서는 대체적으로 완성을 보았지만[1-3], 차단기가 무부하 전력계통을 개폐할 때 발생하는 과도전류 및 전압에 대한 개폐장치의 개폐능력을 평가하는 진상전류시험에 대한 합성시험설비 및 방법에 대한 연구는 별로 이루어지지 않아 현재에는 단락발전기와 변압기만을 사용하는 직접시험방법이 사용되고 있다. 하지만 전력계통의 해석기술과 차단기의 설계 및 제작기술의 발전으로 직접시험방법으로는 최소 아크시간에서의 전력계통의 상태를 정확하게 모의할 수 없으므로 차단기의 성능을 정확하게 평가할 수 없음이 확인되었다[4-8]. 따라서, 본 논문에서는 이러한 진상전류개폐시험에서 발생하는 문제점을 해결하기 위한 방법으로 단락시험과 동일한 이론에 기초한 진상전류개폐시험의 다양한 합성방법과 550kV 차단기의 진상전류개폐시험을 평가하기 위한 합성시험방법과 시험회로의 설계 및 계산결과에 대해 기술하였다.

2. 본 론

2.1 진상전류의 개폐에 관련된 현상

2.1.1 차단시험

초고압·대용량 차단기의 중요한 성능 중의 하나가 진상전류의 개폐성능이다. 그림 1은 무부하 선로와 케이블 그리고 콘덴서 백크와 같은 진상부하의 회로구성과 차단현상을 간략하게 나타낸 것으로 부하회로가 용량성 부하 ($\frac{1}{\omega C} \gg \omega L$)로만 구성되어 있어 전류가 전압보다 전기각으로 90도 앞서고 전류를 차단하기 전에는 전원측전압(Vs)과 부하측전압(VL)은 동일하고, 진상전류가 흐르는 동안은 페란티 효과로 인해 시험전압이 인가전압보다 U1만큼 상승하게 된다. 그러나 전류가 차단된 후에는 부하측에는 시험전압의 파괴치로 유지되고 전원측전압은 다시 제동전압으로 복구하게 되는데 이 과정에서

일시적으로 과도전압이 발생하게 된다. 이 과도전압의 크기와 주파수는 계통에 존재하는 회로파라미터에 의해 결정되는데 이 때 발생하는 전압의 파괴치는 식(1)과 같고, 일반적으로 계통의 k는 1보다 크기 때문에 차단기의 극간에 인가되는 전압(Vc)는 정격전압의 두배 이상이 된다.

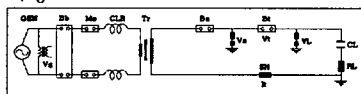
$$V_c = V_m \sqrt{\frac{2}{3}} (1+k) \quad (1)$$

여기서

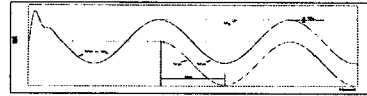
k : 차단전의 전압과 정격전압과의 비율

V1 : $V_m \sqrt{\frac{2}{3}} (k-1)$ (페란티 효과에 의한 전압 상승치)

VL : $V_m \sqrt{\frac{2}{3}} (k)$ 이다.



(a) 등가 회로도



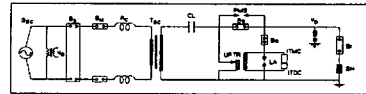
b) 시험전압

그림 1 진상전류의 시험회로도 및 시험전압

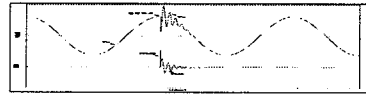
여기서 t_m : 파괴전압에 도달하는 시간
Vs : 전원측 시험전압이다.

2.1.2 투입시험

투입동작은 차단기의 전원측 단자에는 전원측 전압이 인가되고 부하측 단자의 전압이 없다. 즉 진상부하에는 전하가 없다. 그러므로 차단기가 투입동작을 시작하여 극간의 절연이 파괴되면 그림 2(b)와 같은 돌입 전류가 흐르기 시작하게 된다. 그러면 차단기의 접점에는 아크가 발생하게 되고 이 아크는 차단기의 접점이 기계적으로 접촉 할 때까지 지속되며 이때 발생한 전류를 돌입전류라 하고 돌입전류에는 다음과 같은 세가지의 요소를 포함하고 있다. 1) 전원측회로의 Rs와 Cs에 의해 결정되는 초기 과도투입전류, 2) 전원측 회로 Ls와 부하측 회로 CL에 의해 결정되는 과도투입전류, 3) 상용주파 진상전류가 그것이다. 그리고 1), 2)항의 크기는 절연파괴가 발생하는 순간의 전압에 의해 결정된다. 선로 혹은 케이블 전류의 개폐전류는 부하의 서어지 임피던스가 크기 때문에 과도전류의 크기가 제한되지만 Back-to-Back 콘덴서 군과 같이 서어지 임피던스가 작은 경우에는 과도전류가 매우 크기 때문에 전류의 상승률이 매우 높아 접점의 부식을 발생시키는 원인이 될 수 있고, 차단부 내에서 접점이 용접되거나 압력의 급격한 상승으로 폭발 등이 발생할 수도 있다.



(a) 시험회로도



(b) 시험전류 및 전압

그림 2 합성진상전류 투입시험회로도 및 시험전압, 전류

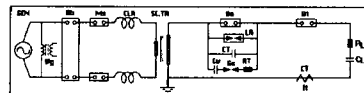
2.2 합성진상전류개폐시험

2.2.1 합성시험 조건

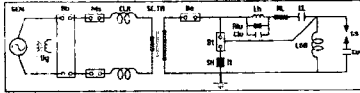
합성시험회로는 차단기에 인가되는 전압 및 전류의 스트레스가 계통의 상태와 동일한 상태임이 입증되어야 하므로 시험회로의 구성 및 조건들이 규정치를 만족되어야 한다. 차단기 성능평가의 기준이 되는 IEC62271-100 [9-11]에 따르면 합성시험방법으로 진상전류 개폐시험을 수행하기 위해서는 1)재발화가 발생하면 전원회로와 부하회로 사이에 상호작용으로 인해 발생하는 현상을 합성회로는 재생할 수 없고, 2)투입시험에서 프리아크를 차단하면 돌입전류가 차단기의 수명에 미치는 영향과 차단기의 극간 및 대지간의 전계분포를 정확하게 재생할 수 없으므로 합성시험방법을 사용할 수 없고, 3)차단기에 인가되는 시험전압과 전류의 모양과 크기가 규격치와 같아야하고, 4)초기 과도전압의 크기, 주파수 및 회복전압의 감소가 없어야만 합성방법으로 시험을 수행하여도 등가성을 유지할 수 있다고 보고되고있다[11].

2.2.2 합성시험회로

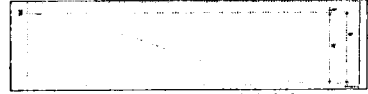
합성시험회로는 그림 3과 4에서 나타낸 것처럼 시험전류를 공급하는 전류원회로와 시험전압을 공급하는 전압원회로라는 두개의 전원과 정확한 초기과도전압을 발생하기 위한 보조회로로 구성되어 있다. 두개의 전원은 단락발전기와 변압기를 사용하거나 아니면 콘덴서 백크를 사용하거나 혹은 두가지의 복합형태를 사용 할 수도 있고, 전원의 연결 방식에 따라 그림 3과 4 같은 전류주입방식 및 전압주입방식의 시험회로 등이 사용되고 있다.



(a) 전압주입시험회로



(b) 전류주입시험회로
그림 3 합성전상전류 시험회로



(b) 차단기 극간의 회복전압
그림 6 전상전류차단시험에서의 회복전압

2.3 본 논문에서 설계한 시험회로

전상전류 개폐시험은 규격이 요구하는 조건을 충족시키는 다양한 회로가 이론적으로 많은 연구가 수행되어 다양한 시험회로가 사용되고 있지만 본 논문에서는 제어와 등가성의 확보가 용이한 복합방식의 합성시험회로를 사용하여 550kV급 차단기의 전상전류개폐성능을 평가할 수 있는 합성시험회로를 설계하였다.

2.3.1 전류주입방식

그림 4에서 나타낸 것처럼 시험용 차단기(Bt)를 중심으로 전류원(Ics)과 전압원(Ivs)이 병렬로 연결되어 그림 5(a)에서 나타낸 것처럼 전압원전류(Ivs)를 전류원전류(Ics)에 중첩시켜 규격에서 규정한 시험전류 및 전압을 차단기에 인가하는 시험방법으로 시험회로의 동작은 다음과 같다. 1) 투입스위치(Ms)를 투입하면 단락발전기(Gen)와 단락변압기(Tr)에서 발생된 시험전류가 보조차단기(Ba)를 통해 시험용 차단기(Bt)에 인가된다. 2) 전압원전류를 전류원전류의 영점 전 수백μs시점에서 전압원회로의 투입스위치인 스파크 갭 스위치(SG)를 트리거하면 회로파라미터 CL, RL, Li에 의해 결정되는 Ivs를 중첩시키면 그림 5(b)와 같은 전류가 Ba와 Bt를 통해 흐르게 되고 Ba가 Ics를 차단하게 되면 Bt에는 Ivs만 흐르게 되고, 3) Ivs를 Bt가 차단하게 되면 Ci, Ri 및 Li에 의해 결정되는 초기과도회복전압(ITRV)과 Ch와 Lpf에 의해 결정되는 상용주파회복전압(Vr)이 Bt에 인가되어 합성전상전류의 차단시험을 완성한다.

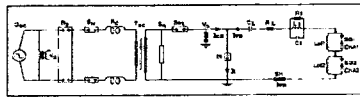
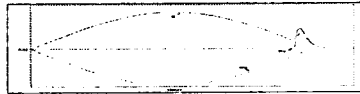


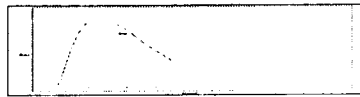
그림 4 전류주입방식의 합성시험회로도

(1) 주입전류

전상전류의 주입전류는 ITRV회로에 포함되어 있는 저항 Ri 때문에 단락시험에서의 주입전류와 다르게 정형파가 아닌 그림 5(b)에서 나타낸 것 같은 비정형파가 발생된다. Ivs의 크기와 주파수는 식(2)와 식(3)과 같이 간략하게 계산할 수 있다.



(a) 전류원전류(Ics) 및 전압원전류(Ivs)



(b) 전압원전류(Ivs)

그림 5 전류주입방식에서의 시험전류

$$E_v = V_n \frac{Ch + CA}{Ch} \quad (2)$$

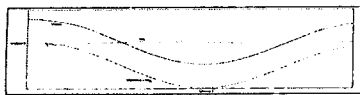
$$I_{vs} = \frac{E_v}{L_A} e^{-\alpha t} \sin(\alpha t_p) \quad (3)$$

$$\text{여기서 } \alpha = \sqrt{\frac{1}{L_A} \left(\frac{Ch \times CA}{Ch + CA} \right) - \left(\frac{R_l}{2L_A} \right)}$$

t_p : Ivs의 파고치에 도달하는 시간이다.

(2) 회복전압

회복전압은 Lpf와 Ch에 의해 결정되는 1-cos 함수의 파형으로 합성시험회로에서는 Ivs가 차단된 후에 회복전압이 나타나게 되므로 규정된 전압상승률을 만족시키기 위해서는 Lpf와 Ch의 공진주파수를 동작 주파수 보다 다소 작게 계산하여야 하고 그림 6은 전류주입방식의 합성시험에서 발생하는 시험회로를 나타낸 것이다.



(a) 시험회로의 전압

(3) ITRV의 조정

차단기가 전상전류를 차단한 직후에 발생하는 과도회복전압의 모양은 그림 7과 같으며 크기와 주파수는 Li와 Rc/Ri 및 CL/Ci와 다양한 회로요소의 함수로써 ITRV가 대략 0.05Uc 이상이 되면 쉽게 조정이 된다. 그러나 본 논문에서는 제어와 용이한 계산을 위하여 ITRV의 값을 가능하면 작게 설정하였다.



그림 7 ITRV의 전압

2.3.2 L-C공진방식

전류주입회로가 시험회로의 구성이나 제어와 단락시험과 동일하고, 시험설비용량이 작기 때문에 여러 가지로 유리하지만 시험전류가 200A 이하가 되면 전압원회로의 전류가 너무 작게 되어 Ba와 Bt의 아크전압에 의한 전류의 감소가 매우 크게 되어 등가성을 유지할 수 없게 된다. 그러므로 본 논문에서는 동작책무-1과 같이 시험전류가 작은 경우에는 L-C공진회로를 사용하였다. L-C공진회로는 그림 8에서 전압원회로만으로 시험전류와 전압을 차단기에 동시에 인가하는 시험방법으로 시험회로의 동작은 다음과 같다. 1) Ba1는 개로, Ba2, Ba3 및 Bt는 투입한 상태에서 전압원회로의 투입스위치인 스파크 갭 스위치(SG)를 트리거하면 회로파라미터 CA, Li를 통해 상용주파 전류가 Bt와 Ba2를 통해 발생하게 된다. 2) 시험전류 It를 Bt가 차단하게 되면 Ci, Ri 및 Li에 의해 결정되는 초기과도회복전압(ITRV)과 Ch와 Lpf에 의해 결정되는 상용주파회복전압(Vr)이 Bt에 인가되어 합성전상전류의 차단시험을 완성한다.

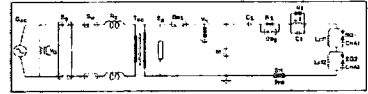
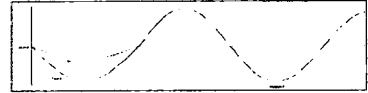


그림 8 L-C공진회로방식의 합성시험회로도

(1) 주입전류, 회복전압 및 ITRV

주입전류는 충전용 콘덴서(Ch) 및 부하용 콘덴서(CL)과 상용주파 회복전압 발생용 리액터(Lpf)에 의해 결정되는 그림 8(b)에서 나타낸 것 같은 상용주파 정형파전류가 발생된다. 그리고 시험전류(It)의 크기와 주파수는 식(4)와 식(5) 같이 계산할 수 있다. 그리고 회복전압과 ITRV는 전류주입회로와 동일한 계산 방법과 결과를 나타낸다.



(a) 차단기에 인가되는 전류와 Lpf에 발생하는 전류



(b) 차단기에 인가되는 전류
그림 9 L-C공진회로의 시험전류

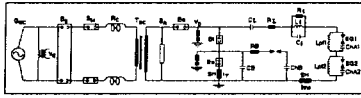
$$I_p = \omega C_L E_v \quad (4)$$

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_p (Ch + C_L)}} \quad (5)$$

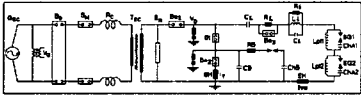
2.3.3 복합방식

복합시험회로는 그림 10에서 나타낸 것처럼 시험용 차단기(Bt)의 전압원과 부하측에 시험전압과 전류를 동시에 인가하여 그림 5와 그림 11에서 나타낸 규정된 시험전류 및 전압을 차단기에 인가하는 시험방법으로 시험회로의 동작은 다음과 같다. 1) 투입스위치(Ms)를 투입하면 단락발전기(Gen)와 단락변압기(Tr)에서 발생된 시험전류가 보조차단기(Ba)를 통해 시험용 차단기(Bt)에 인가된다. 2) 전압원전류를 전류원전류의 영점 전 수백μs시점에서 전압원회로의 투입스위치인 스파크 갭 스위치(SG1,2)를 트리거하면 회로파라미터 CL, RL, Li에 의해 결정되는 Ivs를 중첩시키면 그림 5(a)와 같은 전류가 Ba와 Bt를 통해 흐르게 되고 Ba가 Ics를 차단하게 되면 Bt에는 Ivs만

흐르게 되고, 3)Ivs를 Bt가 차단하게 되면 Ci, Ri 및 Li에 의해 결정되는 초기과도회복전압(ITRV)과 Ch와 Lpf에 의해 결정되는 상용주파회복전압(Vr)이 Bt의 전원측에 인가하고, 그리고 약 100μs정도 후에 SC3을 트리거하여 차단기의 부하측에 지수함수의 회복전압을 증첩하여 인가하여 차단시험을 완성한다.



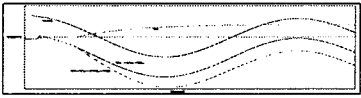
(a) 전류주입 시험회로



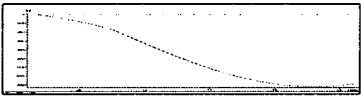
(b) L-C공진 시험회로
그림 10 합성진상전류 시험회로(복합방식)

(1) 주입전류, 회복전압 및 ITRV

회복전압은 Lpf와 Ch에 의해 결정되는 1-cos 함수의 회복전압과 지수함수의 회복전압을 증첩시켜 그림 10과 같은 시험전압을 시험용 차단기에 인가된다. 그리고 주입전류와 ITRV는 전류주입회로와 동일한 계산 방법과 결과를 나타낸다.



(a) 시험회로의 전압



(b) 차단기 극간의 회복전압
그림 11 진상전류차단시험에서의 회복전압

2.4 결과 검토

다음의 표1에서 표4는 여러가지 합성진상전류시험회로의 회로파라미터와 예상시험전류 및 전압을 나타낸 것으로 시험전류가 200A 이하인 경우에는 L-C공진회로를 사용하면 회로가 간단하고 제어가 용이하여 다소 유리하지만 상대적으로 시험설비의 에너지가 많이 소요되고, 콘덴서 충전장치를 효율적으로 사용하기 위해서는 부하용 콘덴서를 전원용 콘덴서와 동일하게 충전하여야만 하는 어려움이 있다. 그러므로 420kV 및 550kV급 차단기인 경우에는 표1과 표3에서 나타난 것처럼 전류주입방식이나 복합방식의 시험회로를 사용하는 것이 유리한 것을 알 수 있다.

표1 550kV 차단기의 합성시험회로의 파라미터(동작책무-1)

구분	ChA	Lpf	L _i	R _i	C _i	R _L	C _L		RB	CB	ChB		
	(μF)	(kV)	(H)	(mH)	(Ω)	(μF)	(Ω)	(μF)	(kV)	(kΩ)	(μF)	(μF)	(kV)
복합방식	4.3	510	2.0	210	-	0.01	3200	0.27	-	20	0.2	4.0	220
L-C공진	2.83	581	2.0	210	-	-	2250	1.47	420	-	-	-	-

표2 550kV 차단기의 시험전류 및 전압 파라미터(동작책무-1)

구분	It(A)		TRV				주파수		주입시점	
	전류원	전압원	U ₁ (kV)	t ₁ (μs)	U _c (kV)	t ₂ (ms)	전류원(Hz)	전압원(Hz)	전류원(μs)	전압원(ms)
복합방식	150	160	26.6	123	1062	7.1	60.0	54.0	540	1.91
L-C공진	-	160	-	-	1072	7.2	-	60.0	-	-

표3 550kV 차단기의 합성시험회로의 파라미터(동작책무-2)

구분	ChA	Lpf	L _i	R _i	C _i	R _L	C _L	RB	CB	ChB		
	(μF)	(kV)	(H)	(mH)	(Ω)	(μF)	(Ω)	(μF)	(kΩ)	(μF)	(kV)	
복합방식	4.3	510	2.0	210	-	0.01	1800	0.27	20	0.2	4.0	220
전류주입	4.3	581	2.0	210	-	-	2250	0.15	-	-	-	-

표4 550kV 차단기의 시험전류 및 전압 파라미터(동작책무-2)

구분	It(A)		TRV				주파수		주입시점	
	전류원	전압원	U ₁ (kV)	t ₁ (μs)	U _c (kV)	t ₂ (ms)	전류원(Hz)	전압원(Hz)	전류원(μs)	전압원(ms)
복합방식	500	500	29.5	99	1072	7.1	60.0	54.0	540	1.91
전류주입	500	500	28.5	114	1078	7.2	60.0	54.0	540	-

3. 결론

전력계통의 송전전압과 단락용량이 증가되면서 계통의 진상전류개폐상태를 정확하게 모의하기 위한 연구가 활발하게 수행되어 국제규격인 IEC62271-100(2001)에서는 차단기의 진상전류개폐시험도 단락시험과 동일한 개념으로 성능평가를 수행하도록 규정하고있다. 그러나 진상전류시험은 단락회로와 다르게 부하를 통해 시험전류와 전압을 차단기에 인가해야하는 어려움이 있다. 그래서 본 논문에서는 지금까지 개발된 여러 시험회로를 비교분석하고, 등가성 및 시험설비의 건설에 따르는 투자비와 시험의 효율 등을 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 투입시험은 Back-to-Back 콘덴서군에서만 적용되는 시험이고, 국내의 계통에서는 고려할 필요가 없는 시험으로 사료되어 본 논문에서는 제외하였다. 그러나 시험설비는 2004년에 건설될 것이다. 차단시험은 시험회로의 계산과 결과검토에서 나타난 것처럼 전원회로의 조건을 계통과 동일하게 모의하기 위해서는 반드시 합성시험회로를 사용해야 하고, 그리고 시험전류에 따라 시험방법을 다르게 적용하면 시험설비의 건설에 따르는 투자비의 절감과 시험의 효율을 제고시킬 수 있을 것이다.

(참고 문헌)

- [1] E. Emolumento, E. Figini, S. Rovelli, "Balanced synthetic for short circuit and capacitive current switching test of high voltage and extra high voltage circuit breaker", CESI 88-17, SWICON-88, 1988
- [2] S. Manganaro, A. Romiti, S. Rovelli, "Resent experience synthetic circuits for capacitive current switching tests on HV circuit-breaker", IEEE/PES 83 WM 125-2 JAN. 30 - FEB. 4, 1983
- [3] G. Aldrovandi, G. Furioli, A. Romiti, "Multi-frequency HV capacitive load direct switching tests in laboratories having a single frequency power supply", IEEE/PES 83 WM 126-0 JAN. 30 - FEB. 4, 1983
- [4] A.D. Strokes - S. Rovelli, "Discussion on : Balanced Synthetic Circuit: new circuit for high-power testing with low frequency transient recovery voltage" Proceedings IEEE 1975, n. 4, vol. 122, pp. 427-429
- [5] S. Manganaro, "New developments in synthetic testing technique" International Workshop on HV- Switchgear Bangalore (India) 18-19 February 1985
- [6] G. Aldrovandi I. Bonfanti, G. Kuhnhardt, H. Pliet, "Development and application of new synthetic circuits in CESI and IPH" CIGRE 1992, Report 13-201
- [7] L. Vander Sluis, G.C. Damster, H.W. Kempen, W.A. Vander Linden, "Synthetic test methods : Experience and future developments", (Cigre report 30 August-5September, 1992)
- [8] S. Managanaro - G. Mazza - S. Rovelli, "Some problems encountered in the evaluation of the stresses on high voltage circuit breakers during making operations on a short circuit" Report presented at the Colloquim of CIGRE SC N. 13, Poland, September 1977
- [9] IEC, "IEC-High voltage alternating current circuit breaker", IEC60056/FDIS, 2001
- [10] IEC, "IEC-Synthetic testing high voltage alternating current circuit breaker", Publication 60427, 2000
- [11] IEC, "IEC-High voltage alternating current circuit breaker", IEC62271-100, 2001