

LC 공진회로를 이용한 간이 합성시험설비

박종희⁰ 신영준 박경업 류형기 김명현
한국전기연구소 대전력연구실

Simple Synthetic Testing Facility Using LC Resonance Circuit

J.H.Park Y.J.Shin K.Y.Park H.G.Ryu M.H.Kim
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract

This paper shows the procedure to determine the physical variables of the simple synthetic testing facility using LC resonance circuit and presents the calculated results of those variables for the LC resonance circuit which can be used to test circuit breakers up to 36kV 40kA class. Attention has also been paid to the advantages of the LC resonance circuit compared with the method adopting short-circuit generator for the development of circuit breakers.

1. 서론

차단기의 단락전류 차단성능을 검증하는 방법에는 직접시험법과 합성시험법의 2가지로 크게 나눌 수 있다. 직접시험은 단락전류, 과도회복전압 및 회복전압을 하나의 전원인 단락발전기에서 직접 모두 공급하여 시험하는 방법이다. 그러나 단락발전기는 단락용량에 한계가 있으므로, 단락전류를 공급하는 전원으로는 단락발전기를 사용하고 과도회복전압 및 회복전압을 공급하여 주는 전원으로는 콘덴서 뱅크를 이용하는 합성시험법이 개발되어 현재 세계적으로 널리 사용되고 있으며 이와같은 합성시험법의 대표적인 것으로는 Weil 회로법[1]이 있다.

Weil 회로법을 비롯하여 단락발전기를 채택하고 있는 방법들은 운전 및 유지보수에 시간과 비용이 많이 소요되며, 특히 차단기의 개발시에는 많은 시험을 반복적으로 실시하여야 하므로 단락발전기의 운전에 대한 부담이 더욱 커지게 된다.

따라서 전류원으로 콘덴서와 리액터의 진동전류를 이용하면, 이런 경제적부담이 없어지므로 경제적이고 효율적인 시험을 실시할 수 있고 차단기의 연구개발에 보다 적극적으로 대처해 나갈 수 있다. 여기서는 이러한 간이 합성시험설비에 대한 개요를 소개하고, 이에 대한 개략적인 회로정수를 구하고 이 설비의 활용방안을 제시한다.

2. 설비의 개요

그림 1은 간이 합성시험설비의 회로도를 보여주고

있으며, 크게 전류원 회로와 전압원회로로 나눌 수 있다. 전류원회로의 콘덴서 C_1 과 리액터 L_1 에 의해 발생한 진동전류는 보조차단기 B_a 와 피시품차단기 B_c 에 단락전류 i 를 흐르게 한다. B_a 와 B_c 가 전류의 자연영점 T_0 에서 소호하기 직전 T_1 의 위치에서 주궤를 방전시키면, C_v 및 L_v 에 의한 진동방전전류 i_v 는 B_a 및 B_c 를 통해 흐른다. T_1 은 i 의 자연영점과 i_v 의 피크가 거의 일치하도록 정해진다. 그리고 진동전류 i_v 는 B_c 에 대해서 합의 방향으로 흐르기 때문에 B_a 는 B_c 보다 빨리 차단되고 (T_2 점) 그 이후는 B_c 를 통해서만 흐르는 i_v 의 영점 T_3 에서 B_c 는 차단되고, B_c 의 극간에는, 전압원회로의 C_v , L_v , R_f , C_f 및 충전전압 E_v 에 의해 결정되는 과도회복전압이 발생해서 직접시험과 같은 차단책무를 B_c 에 가하게 된다 (그림 2 참조).

위와 같은 시험회로는 단락발전기를 전류원전원으로 사용하는 시험회로와 비교해 볼 때 다음과 같은 장점들을 가지고 있다.

1) 소요에너지가 적다.

단락발전기를 전류원으로 사용하는 경우에는, 발전기를 구동하기 위한 운동에너지, 기계적 손실, 여자 손실 등이 있으나 LC회로를 전류원으로 사용하면 콘덴서의 충전에너지 $W = \frac{C_1 E_1^2}{2}$ 과 무시할 정도로 적은

회로저항손실뿐이다. 참고로 6.6kV, 20kA의 단락용량을 가진 단락발전기와 비교할 때 LC공진회로의 경우는 1회 단락시험을 위해 소요되는 에너지가 약 1/100 정도이다[2]. 특히 차단기개발 중간과정에서는 차단실패시 다른 모델로의 교체시간과 원인분석시간이 많이 걸릴 것이므로, 단락발전기의 경우는 계속 공회전시켜야 하지만 LC진동회로를 사용하면 지장이 없어 에너지 절감폭은 더욱 커질 수 있다.

2) 시험의 효율성이 높다.

단락발전기를 사용하는 경우에는 기동 및 정지시간이 1시간 이상 소요되지만 콘덴서의 충전시간은 보통 1분 내외이다. 따라서 정해진 시간내에서 보다 많은 회수의 시험이 가능하다.

3) 시험전류의 주파수변경이 쉽다.

LC진동회로를 사용하는 경우는 L과 C의 값을 변화시키면 주파수를 쉽게 바꿀 수 있다.

4) 유지보수 및 취급이 간단하다.

단락발전기를 사용하는 경우에는 발전기를 비롯하여 여자장치, 유험유 순환설비 등의 유지보수 및 취급

급이 어렵지만 콘덴서를 사용하면 유지보수 및 취급이 용이하다.

5) 설비비용이 동일용량의 단락발전기에 비해 훨씬 적게 소요된다.

6) 소음발생이 적다.

한편 LC공진회로의 단점으로는 단락전류의 감쇠가 단락발전기에 비해 빨라서, 단시간 전류시험이나 봉전 사이클이 긴 단락전류 시험인 경우에는 원하는 전류치를 얻기가 어려울 수가 있다.

3. 회로정수 계산

3.1 전류원회로

합성시험에서 단락전류를 공급하는 전류원회로는 차단중의 아크공간에 필요한 물리적인 조건을 부여하는 것으로, 필요한 아크에너지 즉 아크전압을 공급하기에 충분한 전압이어야 한다. 실제의 LC공진회로에는 선로의 저항분 또는 아크저항이 있기때문에 그림 3과 같은 C-L-R회로로 된다. 콘덴서 C_i 에 전하 q 를 충전시킨 상태에서 스위치 M_s 를 닫아서 리액터 L_i 와 저항 R_i 를 통해서 방전시키면 단락전류는 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$L_i \frac{di}{dt} + R_i i + \frac{1}{C_i} \int i dt = L_i \frac{d^2 q}{dt^2} + R_i \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C_i} q = 0 \quad (1)$$

이 미분방정식의 해는, $R_i < 2\sqrt{L_i/C_i}$ 의 경우, 초기조건으로서 $t=0$ 에서 $q=Q=C_i E_i$ 및 $i=0$ 를 주면

$$v_i(t) = \frac{Q}{C_i \sqrt{1 - \frac{R_i^2 C_i}{4L_i}}} e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \theta) \quad (2)$$

$$i(t) = -\frac{2Q}{\sqrt{4L_i C_i - R_i^2 C_i^2}} e^{-\alpha t} \sin \beta t \quad (3)$$

여기서 E_i 는 콘덴서 C_i 의 초기 충전전압, $\alpha = \frac{R_i}{2L_i}$,

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{L_i C_i} - \left(\frac{R_i}{2L_i}\right)^2}, \quad \cot \theta = \frac{\alpha}{\beta} \text{이다. 식 (2) 및 (3)은}$$

그림 4와 같은 감쇠 진동파형을 나타낸다. 이 C-R-L 회로를 전류원으로 하는 경우에는 가능하면 전류의 감쇠를 작게할 필요가 있다. 전류의 감쇠율은 R_i 가 작으면 근사적으로 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = \log_e \frac{I_n}{I_{n+1}} = \alpha \frac{\pi}{\beta} \approx \frac{\pi}{2} \frac{R_i}{Z_i} \quad (4)$$

여기서 $n=1, 2, 3, \dots$ 은 $t=0$ 로부터 헤아린 전류피크의 숫자이며 Z_i 는 써지임피던스($Z_i = \sqrt{L_i/C_i}$)이다. 따라서 전류의 감쇠율은 R_i/Z_i 즉 회로의 써지임피던스와 저항분의 비에 의해서 결정되며 R_i/Z_i 의 값에 따른 전류감쇠의 시간적 변화를 그림 5에 나타낸다. 한편 식 (3)에서 만약 R_i 가 무시가능한 값이면 $\beta = 1/\sqrt{L_i C_i}$ 이므로 $i = \frac{E_i}{Z_i} \sin(\beta t)$ 로 된다. 여기서 공진주파수를 상용

주파수로 하면 $i = \frac{E_i}{\omega L_i} \sin(\beta t)$ 로 되고 이 충전전압 E_i

와 인덕턴스 L_i 의 값은, 발전기를 사용한 회로의 전압 및 인덕턴스와 같게 된다. 따라서 L_i 및 C_i 는 단락전류의 실효치 I_s 를 알면 다음과 같이 구해진다.

$$L_i = \frac{E_i}{\sqrt{2} I_s \omega}, \quad C_i = \frac{1}{\beta^2 L_i} \quad (5)$$

표 1에 R_i 가 0인 경우의 전류원회로의 회로정수 계산 결과를 나타낸다.

3.2 전압원회로

3.2.1 주입전류의 크기 및 주파수

주입전류의 크기 및 주파수는 $R_i=0$ 인 경우의 전류원회로와 같으므로 식 (3)을 이용하면 쉽게 구할 수 있다. 따라서 그 결과만 소개하면 주입전류의 실효치 I_v 와 각주파수 ω_v 는

$$I_v = \frac{E_v}{\sqrt{2} C_v / L_v} \quad (6)$$

$$\omega_v = \sqrt{\frac{1}{L_v C_v}} \quad (7)$$

여기서 E_v 는 전압원콘덴서 C_v 의 충전전압이다.

3.2.2 과도회복전압

전압원으로는 2-parameter법에 의한 Weil 합성 시험회로를 선택하였으며 과도회복전압은 R_r 및 C_r 와 병렬로 연결된 피시폼차단기 B_i 에 인가된다. B_i 양단에 인가되는 과도회복전압을 구하는 과정은 참고문헌 [3-6] 등에 상세하게 설명되어 있으므로 여기서는 그 결과만 제시한다. 즉

$$v_v(t) = E_v \frac{C_v}{C_v + C_r} (1 - e^{-pt} \cos qt) + E_v \frac{p}{q} \left(2 - \frac{C_v}{C_v + C_r}\right) e^{-pt} \sin qt \quad (8)$$

여기서

$$p = \frac{R_r}{2L_v}, \quad q = \sqrt{\frac{1}{L_v C_r} - p^2} \quad (9)$$

이며 상기식에서 C_r 는 전압원회로의 전체 커패시턴스이고 $C_r = \frac{C_v C_f}{C_v + C_f}$ 로 표시된다. 그리고 과도회복전압이 피크일 때의 시각 T_M 은

$$T_M = \frac{1}{p} \left(\cot \left(-\frac{p}{q} \right) - \theta + \pi \right) \quad (10)$$

로 표시되고 여기서

$$\theta = \cot \left(\frac{p}{q} \left(1 - \frac{2C_f}{C_v}\right) \right) \quad (11)$$

이다.

C_v 는 전압원회로의 주입전류의 각주파수 ω_v 가 정해지면 다음식에서 쉽게 구해진다.

3.2.3 회로정수

$$C_v = \frac{1}{L_v \omega_v^2} \quad (16)$$

직접시험과 합성시험의 등가조건에서 L_v 와 L_i 는 같아야 하며 전류영점에서의 전류의 기울기도 같아야 한다. 즉

$$L_v = L_i \quad (12)$$

그리고 C_f 는 과도회복전압의 주파수로부터 다음과 같이 구해지며

$$C_f = \frac{1}{L_v (2\pi f_{TRV})^2} \quad (17)$$

그리고

$$I_{s\omega_i} = I_{v\omega_v} = \left. \frac{di}{dt} \right|_{i=0} \quad (13)$$

여기서 $f_{TRV} = \frac{1}{2T_M} \approx \frac{1}{2.5t_3}$ 이다 (t_3 는 IEC 56 [7]에 규정된 과도회복전압의 파고시간). 또 R_f 는

여기서 ω_i 는 전류원회로의 각주파수($= \beta$)이다. 한편

$$\sqrt{2}I_{s\omega_i} = \frac{V_1}{L_i}, \quad \sqrt{2}I_{v\omega_v} = \frac{E_v}{L_v} \quad (14)$$

$$R_f = (0.5 \sim 0.8) \sqrt{\frac{L_v}{C_f}} \quad (18)$$

이므로

$$E_v = V_1 \quad (15)$$

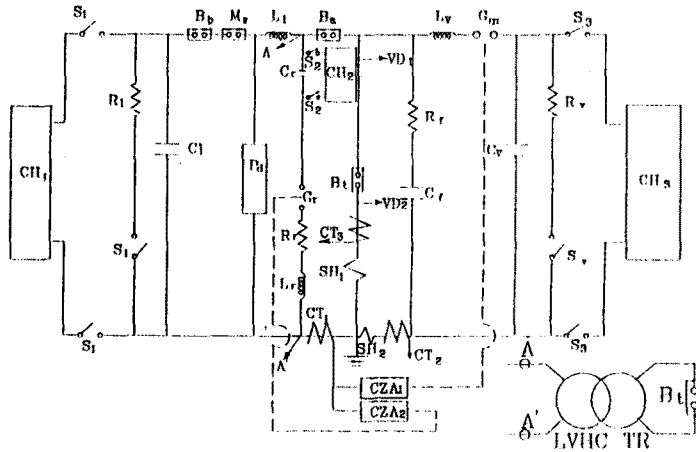
에서 근사적으로 정해진다. 마지막으로 회복전압 R_v 는

$$R_v = \frac{C_v}{C_v + C_f} \quad (19)$$

이 성립한다. 여기서 V_1 은 상용주파회복전압의 피크치이며 $V_1 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} F_p V_L$ 로 표시된다 (F_p 는 first pole to clear factor이고 V_L 은 정격전압임).

로 주어진다.

표 2는 36kV 40kA 차단기까지를 고려해서 상기 식들에 의해 구한 전압원에 대한 회로정수 계산결과를 보여주고 있다.



- Ba : Auxiliary breaker
- Bb : Back-up breaker
- Bt : Test breaker
- CH1 : Charger for current source capacitor
- CH2 : Charger for reignition capacitor
- CH3 : Charger for voltage source capacitor
- Ci : Capacitor for current source
- CT1 : Current transformer for CZA's
- CT2 : Current transformer for injection current
- CT3 : Current transformer for test current
- CZA1, CZA2 : Current zero anticipators
- M/S : High speed making switch
- Pd : Protecting devices

- R1, Rv : Resistors for dump
- S1, Sv : Disconnecting switches
- Cv : Capacitor for voltage source
- Gm : Main triggering gap
- Gr : Reignition triggering gap
- Lv : Reactor for voltage source
- Rf : Resistor for TRV
- Cf : Capacitor for TRV
- SH1, SH2 : Shunts
- VD1, VD2 : Voltage dividers
- Li : Reactor for current source
- Cr, Lr, Rr : Capacitor, reactor and resistor for reignition system

그림 1 간이 합성시험설비 회로도

5. 결론

LC공진회로를 이용한 간이 합성시험설비의 장단점과 회로정수의 계산 방법을 제시하고, 36kV 40kA 차단기, 600V 85kA 공기차단기, 220V 배선용차단기에 대한 단락시험을 실시할 수 있는 시험회로에 적용하여 각각의 회로정수를 계산하였다 (표 1 및 표 2 참조). 이 시험설비는 단락발전에 비해, 아주 저렴한 가격으로 설치할 수 있고 에너지가 적게 소요되며 효율적으로 운용할 수 있으므로 각종 차단기 및 개폐기의 연구개발을 위해 필수적이다.

참고문헌

[1] G. St-Jean and V. Zajic, "A two-frequency circuit for producing a two-parameter transient recovery voltage", C 74 463-6, presented at IEEE PES Summer Meeting, July 1974.

[2] 金方直弘의 2인, "대용량 C-L회로에 의한 단락차단시험에 대하여", SPD-88-1, 일본 전기학회연구자료, 개폐보호연구회, 1988.

[3] J.G.P. Anderson et al., "Synthetic testing of a.c. circuit breakers", IEE Proc., Vol. 113, No. 4, April 1966.

[4] M. Murano et al., "Synthetic testing of high power circuit breaker", IEEE Summer Meeting, July 1973.

[5] F.O. Mason, "Synthetic testing of high power circuit breaker", Electrical Review, 1963, pp. 817-820.

[6] 遮斷器常置專門委員會, "전력계통의 재기전압에 관한 조사보고 (I)", 일본 전기학회기술보고, 2부 제 23호, 1973.

[7] IEC Publications 56-2, 56-4

표 1 회로정수 계산결과 (전류원)

정격		회로정수 계산결과				시험 구분	비고
정격전압	정격전류	주파수	Ei	Ci	Li		
kV	kA	Hz	kV	μF	mH		
7.2 (차단기)	50	60	8.8	21,300	0.33(0.1244 Ω)	합성	
		50	8.8	25,590	0.40(0.1256 Ω)		
36 (차단기)	40	60	11	13,640	0.52(0.196 Ω)	합성	
		50	11	16,380	0.62(0.195 Ω)		
0.6 (ACB)	85	60	8.8	823.6	8.54(3.22 Ω)	합성	LVHC TR: 단상 3대 11 kV / 250 V * 4 15 kA * 4, 15 MVA *Z = 3
		50	8.8	988.8	10.26(3.22 Ω)		
0.22 (MCCB)	125	60	8.8	1210.7	5.81(2.119 Ω)	직접	
		50	8.8	1453.6	6.98(2.2 Ω)		

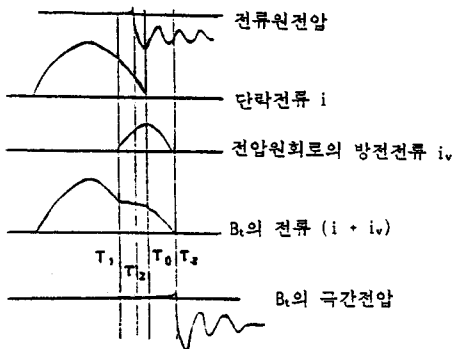


그림 2 합성회로 각부의 전압전류

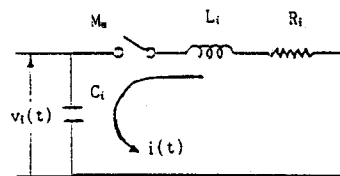


그림 3 C-L-R 회로

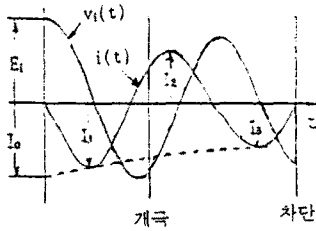


그림 4 전류원회로의 전압전류의 시간적 변화

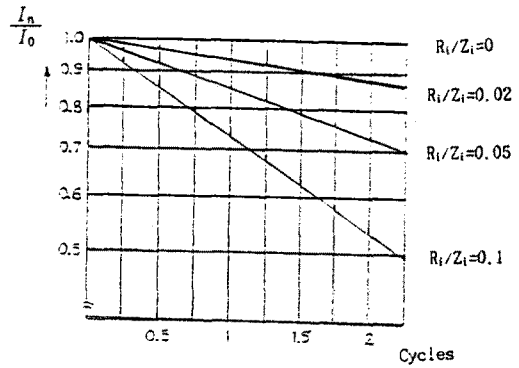


그림 5 전류감쇠의 시간적 변화

표 2 회로정수 계산결과 (전압원)

정격	TRV				회로정수 계산결과										
	전압	차단전류	비교치	비교시간	상승률	차단전류		충진전압	회복전압	Cv	Iv	RF	CF	FI	II
kV	kA	kV	μS	kV/μs	μs	kA	kV	kV	kV	μF	mH	Ω	μF	Hz	kA
7.2	40	13	11	1.2	10	4	8.81	8.81	17.0	4.13	413.3	0.007	600.2	0.40	
		13	11	1.2	30	12	8.81	8.81	51.1	1.33	137.8	0.02	611.4	1.22	
		13	22	0.6	60	24	8.84	8.83	102.1	0.69	34.4	0.17	600.8	2.41	
		12	52	0.24	100	40	8.32	8.26	245.0	0.38	8.7	1.6	522.2	4.73	
	50	13	11	1.2	10	5	8.81	8.81	21.3	3.3	330.7	0.009	600.2	0.5	
		13	11	1.2	30	15	8.86	8.86	63.8	1.1	114.9	0.026	600.2	1.51	
		13	22	0.6	60	30	8.89	8.88	127.6	0.55	28.7	0.22	600.8	3.0	
		12	52	0.24	100	50	8.43	8.35	212.7	0.32	7.3	2.1	614.2	4.9	
25.8	25	47.3	19	2.49	10	2.5	31.7	31.7	2.97	23.6	1430.7	0.003	600.6	0.25	
		47.3	19	2.49	30	7.5	32.1	32.0	8.9	7.9	476.9	0.011	600.6	0.76	
		47.3	38	1.24	60	15	32.5	32.4	17.8	3.9	119.2	0.092	602.5	1.55	
		44	88	0.5	100	25	31.3	30.4	29.7	2.27	30.9	0.87	613.2	2.53	
	31.5	47.3	19	2.49	10	3.15	32.3	32.3	3.74	18.8	1135.5	0.005	600.6	0.32	
		47.3	19	2.49	30	9.45	32.3	32.3	11.2	6.3	378.5	0.014	600.6	0.97	
		47.3	38	1.24	60	18.9	32.5	32.4	22.4	3.1	94.6	0.116	602.5	1.95	
		44	88	0.5	100	31.5	31.3	30.4	37.4	1.8	24.5	1.10	613.2	3.19	
36	40	66	23	2.88	10	4	44.0	44.0	4.9	20.6	988.4	0.005	500.5	0.48	
		66	23	2.88	30	12	43.0	43.0	14.7	6.38	329.5	0.01	519.8	1.46	
		66	46	1.44	60	24	43.7	43.5	29.4	3.42	76.5	0.118	502.1	2.87	
		62	108	0.57	100	40	41.6	40.6	49.0	1.98	18.0	1.227	511.5	4.63	