

단락시험에서의 과도회복전압발생회로에 관한 연구

° 김 맹 현*, 서 윤 택*, 윤 학 동*, 강 영 식*, 고 희 석**
 * : 한국전기연구소, ** : 경남대학교 전기전자공학부

A study on TRV generating circuit in short-circuit tests

° Maeng-Hyun, Kim*, Yoon-Teak, Suh*, Hack-Dong, Yoon*, Young-Sik, Kang*, Hee-Seog, Kho**
 * : Testing & Industrial Service Center of Korea Electrotechnology Research Institute
 ** : Department of Electrical & Electronics Engineering of Kyung Nam University

Abstract - This paper deals with the analysis on the TRV generating circuit and the TRV waveform occurred from the short-circuit tests using only the short-circuit generator. And the results of analysis on the proposed TRV generating circuit and TRV measured are described.

I 서론

과도회복전압(Transient Recovery Voltage)은 차단기의 차단 성능에 직접적으로 영향을 미치는 요소임으로 전력계통 고유의 TRV를 파악하는 일은 매우 중요한 것으로 인식되어 전력계통에서 발생하는 TRV에 관한 연구는 아주 오래 전부터 수행되어 현재에 이르고 있다. 전력계통이 가지는 고유한 TRV를 파악하기 위해 과거에는 전력계통을 해석하거나, 모의회로를 구성하여 측정하거나 전력계통을 직접 차단하여 계통에서 발생하는 TRV를 평가하였다. 그러나 현재에는 전자기술과 해석기술의 발달로 대부분 컴퓨터를 이용하여 전력계통을 해석하고 있다[1][2].

계통에서 발생하는 TRV는 일반적으로 복잡한 형태를 가지고 있지만 시험소에서는 단일주파수를 발생시키는 경우가 대부분이다. 하지만 시험소도 선로의 길이가 짧기는 하지만 계통과 동일한 구조를 가지고 있으므로 여러 개의 주파수가 중첩되어 다중주파수의 TRV가 발생된다. 따라서 시험소에서는 이러한 TRV를 규격에 부합되는 파형을 만드는 것이 매우 중요함으로 이를 위해 적절한 시험회로의 구성과 제어가 필요하게 된다[1][2].

한국전기연구소도 단락발기만을 사용하는 직접 단락시험시험을 실시함에 있어 다음과 두가지의 문제점을 안고 있다. 첫째 단락시험 동작책부-1, 2에서와 같이 전류는 작은 반면에 TRV의 상승률이 아주 큰 경우에는 상승율이 규격치 미달하게 되고, 둘째로 단락시험 동작책부-3, 4 & 5에서와 같이 전류는 큰 반면에 TRV의 상승시간이 클 경우에는 다중주파수가 중첩되는 4-파라미터의 TRV가 발생되는 문제점을 안고 있다[3][4].

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 현재 한국전기연구소에 설치되어있는 시험회로와 발생TRV를 분석하고, 문제점으로 대두되고 있는 여러 주파수의 합성으로 인한 왜형의 TRV를 규격에 부합하는 단일 주파수를 갖는 TRV발생회로를 제안한다. 그리고 이렇게 제안된 각 시험회로의 특성을 비교 분석하여 최적의 시험회로를 선정하고 이 시험회로에서 발생하는 예상 TRV를 기술하였다[5-9].

II 시험회로와 회로의 분석

현재 한국전기연구소에서 사용하는 시험회로도는 그림 1과 같이 기계적으로 축적된 회전에너지를 순간적으로 커다란 전기적 에너지로 변환시키는 단락발전기(Gen), 과도한 전기적인 사고로부터 이를 보호하는 단락발전기 보호용 차단기(Bb), 단락사고를 인위적으로 발생시키는 투입스위치(Ms), 시험전류를 조정하는 리액터

(Lclr) 및 TRV의 파형을 제어하는 파형 조정회로(Re, Ce)로 구성되어 있다.

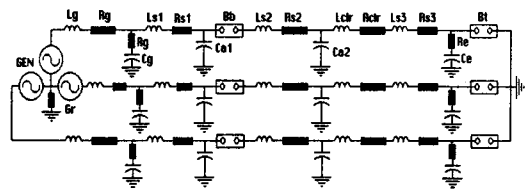


그림 1 단락시험회로도

2.1 시험전류의 계산

그림 1의 시험회로를 간략화하여 집중정수회로로 나타내면 그림 2(a)와 같이 된다. 그림 2(a)에서 피시험차단기(Bt)가 투입상태일 때 투입스위치(Ms)를 투입하면 단락전류는 단락발전기와 보호차단기를 통해 식(1)과 같은 시험전류가 피시험차단기(Bt)를 통해 흐르게 된다.

$$I(t) = V_m/Z[\sin(\omega t + \theta - \varphi) - \sin(\theta - \varphi)e^{-\alpha t}] \quad (1)$$

여기서 $\alpha = R/L$

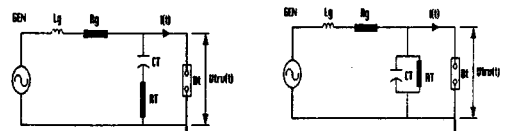
$$\varphi = \tan^{-1}(\omega L/R) = \tan^{-1}(\omega/\alpha)$$

$$\theta = \cos^{-1}(R/Z) = \cos^{-1}[R/\sqrt{R^2 + X^2}]$$

$$V_m \sin(\omega t) = \text{발전기 전압}$$

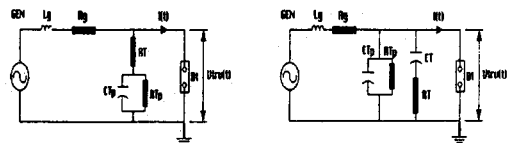
2.2 시험전압의 계산

그림1의 시험회로도에서 TRV를 발생시키는 회로는 그림2와 같이 여러 가지가 있지만 현재 국내외 시험소에서 사용되는 회로는 그림 2(a)와 2(b)가 대부분이고 특히 많이 사용되는 시험회로는 그림 2(a)와 같은 직렬 제동방식회로이다. 그리고 그림 2(a)에서 발생하는 TRV는 단락전류와 임피던스의 곱으로 나타낼 수 있으므로 식(2)과 같이 계산할 수 있다.



(a) 직렬 제동방식

(b) 병렬 제동방식



(c) 직.병렬 제동방식

(d) 직.병렬 제동방식

그림 2 대표적인 TRV 발생회로

$$V_{TRV}(t) = Vm[\sqrt{A^2 + B^2} \cos(\omega t - \theta_1)] - Vm[\sqrt{A^2 + \frac{\alpha^2(2D+A)^2}{\beta^2 - \alpha^2}} \cos(\omega t - \theta_2)] \quad (2)$$

여기서 $\alpha = \frac{R}{2L}$, $B^2 = \frac{1}{LC}$, $r^2 = B^2 - \alpha^2$

$$A = \frac{4\alpha^2\omega^2 + \beta^2(\beta^2 - \omega^2)^2}{4\alpha^2\omega^2 + (\beta^2 - \omega^2)^2}$$

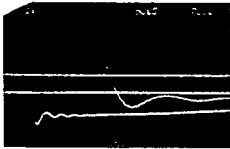
$$B = \frac{2\alpha\omega\beta}{4\alpha^2\omega^2 + (\beta^2 - \omega^2)^2}$$

$$D = \frac{-\beta^2\omega^2}{4\alpha^2\omega^2 + (\beta^2 - \omega^2)^2}$$

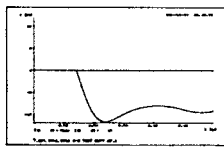
$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{B}{A}$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{\alpha(A+2D)}{Ar}$$

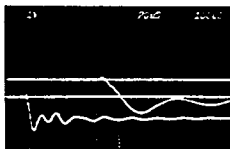
하지만 계산결과를 측정 한 값에 근접하는 결과를 얻기 위해서는 식(1)과 같은 간단한 계산방법은 사용할 수 없고 그림1과 같이 시험회로를 분포정수를 갖는 등가회로를 구성하고 이 등가회로를 과도전압 해석용 프로그램을 사용하여 계산하여야 한다. 그림3과 표1은 그림1의 분포 등가시험회로를 계산한 결과와 7.2kV, 20kA 차단기의 시험시에 발생하는 실측치를 비교한 것이다. 표 1에서 알 수 있는 것처럼 계산치와 실측치의 오차가 5%이내에 있는 신뢰할 수 있을 정도의 결과를 얻어 본 연구에서는 이들 정수를 회로계산의 기본 정수로 활용하여 여러 가지의 TRV 제어 회로들의 계산을 수행하였다.



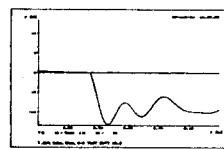
(a) 실측치(동작책무-1)



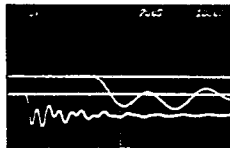
(b) 계산치(동작책무-1)



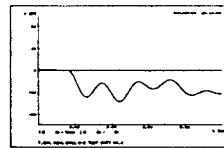
(c) 실측치(동작책무-2)



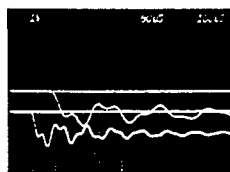
(d) 계산치(동작책무-2)



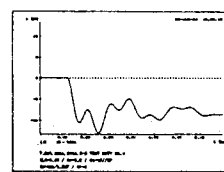
(e) 실측치(동작책무-3)



(f) 계산치(동작책무-3)



(g) 실측치(동작책무-4,5)



(h) 계산치(동작책무-4,5)

그림 3 등가회로의 계산결과와 시험결과 파형

표1 등가회로의 계산결과와 시험결과

시험동작책무	과고치(kV)		과고시간(μs)		오차 (%)
	실측치	계산치	실측치	계산치	
책무-1	13.2	13.5	34.5	32.5	2.2/5.8
책무-2	13.2	13.5	29.0	26.8	2.2/7.6
책무-3	13.6	14.1	25.2	23.5	3.6/6.3
책무-4	12.3	13.0	39.5	36.5	5.7/7.6

III TRV 회로 개선

본 연구에서는 제2절에서 검토한 시험회로를 기본으로 시험회로를 분석하고 최적의 시험회로를 만들기 위해 아래와 같은 3가지 방법의 TRV개선 방법을 제안하였다. 그리고 본 연구에서 사용한 시험회로는 7.2kV 20kA 차단기의 시험회로를 모델로하여 각 TRV 발생회로의 장단점을 분석하여 최적의 TRV 발생회로의 구성을 시도했다.

3.1 고주파 발생회로를 추가하는 방법(방법1)

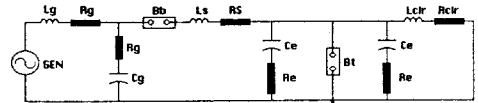
그림 4(a)에서 나타난 것처럼 전류 제어용 리액터의 일부를 피시험차단기의 부하측에 설치함으로써 부하측에서 발생하는 TRV가 전원측의 TRV와 합쳐져서 상승시간이 아주 짧은 경우에도 조정이 가능하도록 한다. 그림5(b)는 예상 TRV출력 파형이다.

장점 : 1) 극간 TRV와 회복전압은 IEC규격을 만족시킬 수 있다
단점 : 1) 하지만 극-대지간 회복전압은 IEC규격을 만족시키지 못한다.

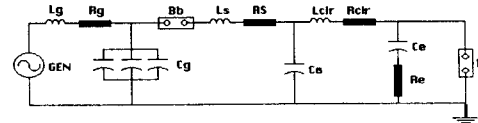
2) 구성 회로가 복잡하고 결선이 상당히 어렵다.

3) 또 다른 구성회로를 제작해야 함으로 비경제적이다.

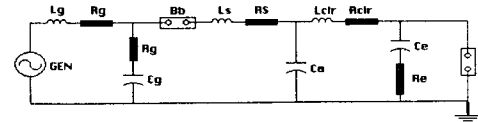
4) 동작책무-3,4는 시험설비의 임피던스에 의해 TRV가 결정되므로 여러개의 주파수가 중첩되는 문제는 그대로 남는다.



(a) 고주파 발생회로를 추가하는 방법



(b) 시험설비 고유TRV의 주파수를 줄이는 방법



(c) 시험설비 고유TRV회로에 제동저항을 사용하는 방법
그림 4 제안된 TRV 발생회로도

3.2 시험설비 고유TRV의 주파수를 줄이는 방법(방법2)

그림 4(b)에서 나타난 것처럼 단락발전기 보호용 차단기의 TRV 조정용 콘덴서의 값을 아주 많이 설치(시험설비 고유 TRV 주파수의 1/10배 이하)하여 단락발전기의 회로가 시험회로에 영향을 받지 않게 함으로써 TRV의 조정이 용이하도록 한다. 그림5(c)는 예상 TRV출력 파형이다.

장점 : 1) 극간 및 극대지간 TRV 및 RV를 IEC 규격에 만족시킬 수 있다.

단점 : 1) 피시험 차단기의 측면에서 보아서 훨씬 작은 주파수를 만들기 위해서는 많은 콘덴서를 발전기 출력단자에 투입해야 함으

로 많은 설치공간이 필요하게 된다.

2) 발전기단에 많은 콘덴서가 설치되어있으므로 과도 진동이 상당히 오래 지속된다.

3) 콘덴서를 통해 많은 전류가 흐르므로 시험회로의 역울 조정이 불가능하게 된다.

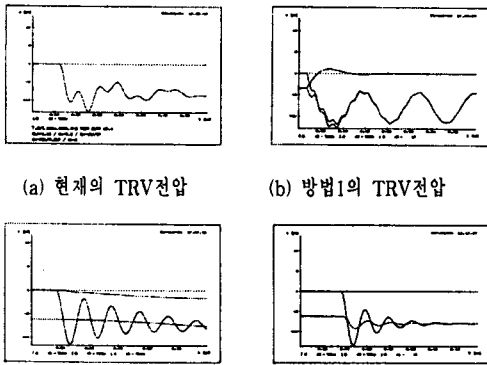
3.3 시험설비 고유TRV회로에 제동저항을 사용하는 방법(방법3)

그림 4(c)에서 나타난 것처럼 단락발전기 보호용 차단기의 용이한 차단을 위한 TRV 조정용 콘덴서와 직렬로 제동용 저항을 삽입하여 피시험 차단기에 발생하는 TRV에 영향을 미치지 않게 함으로써 TRV의 조정이 가능하게 한다. 그림5(d)는 예상 TRV출력 파형이다.

장점 : 1) 극간, 극대시간 TRV 및 RV를 IEC규격에 만족시킬 수 있다. 2) 설치가 용이하다.

3) 발전기 단의 과도 진동이 짧은 시간 내에 정상상태로 안정된다.

단점 : 1) 발전기단의 과도진동을 임계제동이나 과 제동회로를 사용하여 보호용 차단기에 다소 가혹한 TRV가 인가된다.



(a) 현재의 TRV전압 (b) 방법1의 TRV전압
(c) 방법2의 TRV전압 (d) 방법3의 TRV전압

그림 5 등가회로의 계산결과와 시험결과 파형

3.4 제동저항의 계산

보호용 차단기에서 본 전원측회로의 특성 임피던스는 식(3)과 같다.

$$Z_c = \sqrt{(Lg/Cg)} = 7.4 \quad (3)$$

따라서 제동저항 R_c 는 $2 \cdot Z_c$ 보다 다소 작은 값을 선택하는 것이 적당하지만 7.2kV 차단기의 동작책무-3,4에서 같이 파고치가 부족한 것은 보완하기 위해서 이 값보다 다소 큰 값인 20Ω, 200Ω 저항을 선정했다.

표2 단락발전기 보호용 차단기(Bb)의 정격

동작책무	회복전압 (kV)	차단전류 (kA)	TRV상승율 (kV/μs)	비고
동작책무-4	18	60	0.45	100%
동작책무-3	18	37.6	1.125	60%
동작책무-2	18	18.9	2.25	30%
동작책무-1	18	6.3	2.25	10%

IV 결과 검토

제안한 3가지의 TRV발생회로를 제3절에서 검토한 결과 그림 4(c)의 시험설비 고유TRV를 과제동시키는 방법이 시험설비의 효율적인 사용과 규격의 적합성에서 가장 우수한 것으로 사료된다. 그림6은 그림4(c)의 방법을 사용할 경우의 출력전압을 나타낸 것이

다. 하지만 문제점에서 이미 언급한 바와 같이 피시험차단기와 보조차단기가 동시에 시험전류를 차단하지 못할 경우 Bb에는 그림7에서 나타난 것처럼 TRV의 상승률이 2.0kV/μs 정도(7.2kV 20kA 시험에서의 전압이 발생하게 될 것이다. 이는 표2에서 나타난 단락발전기 보호용 차단기의 정격TRV상승율을 초과하지 않으므로 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

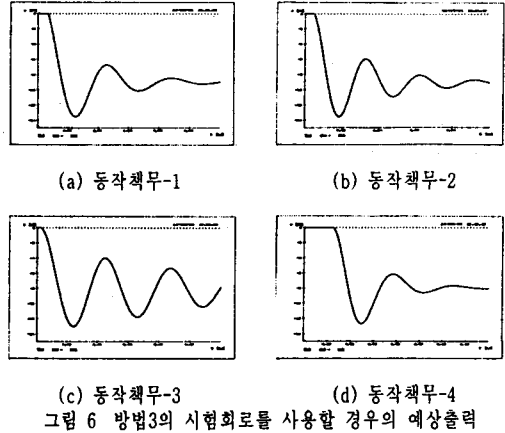


그림 6 방법3의 시험회로를 사용할 경우의 예상출력

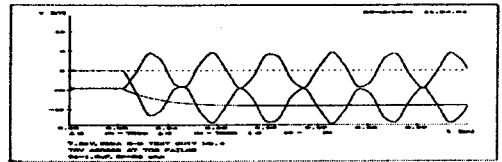


그림 7 방법3의 시험회로를 사용할 경우 Bb에 인가되는 TRV

참고 문헌

- [1] "電力系統の 再歸電壓に 關する 調査報告(1)", 電氣學會技術報告 第23號, 1973, P1-40
- [2] "電力系統の 再歸電壓に 關する 調査報告(2)", 電氣學會技術報告 第24號, 1973, P2-24
- [3] "IEC-High voltage alternating current circuit breaker " Publication 60056, 1987
- [4] " IEC-Synthetic testing high voltage alternating current circuit breaker " Publication 60427, 1989
- [5] R.Rallada, E. Brasca, S. Rovelli, V.Villa.; "Contribution to testing technique of high voltage circuit-breaker the development of synthetic methods ", IEEE conference record of international symposium on high power testing volume I, July 1971, P111-119
- [6] Anderson, J.G.P et al Proc.: " Synthetic testing of Ac circuit-breaker-Part I. methods of testing and relative severity", IEEE, vol. 113, No.4, 1966, P611-621
- [7] R.F. Wang, "Analysis of 2-parameter TRV and calculation of components in high power testing circuit ", high voltage apparatus, No.3, 1983, P10-20
- [8] St. Jean G.; "A complete analysis of the Weil circuit " . IEEE conference development in design and performance of EHV switching equipment, Publication No.182, 1979, P103-106
- [9] Mutukomi T., W. M., Woodson, H. H. ; "A new synthetic test installation for testing vacuum interrupters ". IEEE paper F76, 1976, P170-171