

합성투입시험설비의 설계 및 실증시험

김맹현¹⁾, 김대원¹⁾, 서운택¹⁾, 윤학동¹⁾, 고희석²⁾
한국전기연구원¹⁾, 경남대학교²⁾

Design of Test Circuits for Synthetic Making Testing Facilities

M. H. Kim¹⁾, D. W. Kim¹⁾, Y. T. Suh¹⁾, H. D. Yoon¹⁾, H. S. Koh²⁾
Korea Electrotechnology Research Institute¹⁾, Kyungnam University²⁾

Abstract - 차단기의 합성차단시험방법에 대한 연구는 오래 전부터 수행되어 시험방법 및 시험설비의 설계기술은 완성을 보았지만, 차단기의 또 다른 역할인 투입능력에 대해서는 현재까지 한국에서는 기술적인 진전이 전혀 없었다. 그러나 차단기의 성능을 완전하게 평가하기 위해서는 차단동작과 더불어 투입동작에 대한 정확한 평가방법이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 건설한 KERI 합성투입시험설비의 시험회로의 설계와 실증시험결과 등에 관해 기술하였다.

1. 서 론

차단기의 합성차단시험에 대해서는 오래 전부터 많은 연구가 수행되어 시험방법 및 시험설비의 설계기술에 대해 대부분 완성을 보았지만, 차단기의 또 다른 역할인 투입능력에 대해서는 수년 전까지만 하여도 기술적인 진전이 전혀 없었다. 그러나 차단기의 성능을 완전하게 평가하기 위해서는 차단동작과 더불어 투입동작에 대한 정확한 평가방법이 필요하다. 하지만 투입시험과 차단시험과 마찬가지로 직접 시험방법으로는 설비용량이 너무 부족하기 때문에 투입 성능을 평가할 때 중요하게 고려해야 할 pre-arching 현상에 대해 정확한 등가시험을 수행할 수 없었다.^[1~5] 그러나, 1970년대에 Ellis et alias가 낮은 차단저항을 갖춘 차단기에 대한 합성투입 및 차단시험을 수행하는데 적당한 합성시험회로를 제안하여 오늘날의 콘덴서와 리액터를 조합한 합성투입시험회로를 개발하였다. 이 시험방법은 차단시험에 이미 사용되는 것과 같은 전압원을 가지고 투입시험을 수행하고, 약 0.3s의 시간간격으로 연속적인 두 번의 합성 차단시험을 수행할 수 있는 가능성을 보여주었지만, 건설비용이 많이 들고 시험회로의 동작이 매우 복잡하여 시험소에서 사용하기에는 많은 어려움이 있었다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 CESI(이태리)와 SIMENSE(독일)에서 저용량 송암용 변압기와 초기과도전류(Initial Transient Making Current : ITMC) 발생용 회로를 사용한 시험방법을 1970년대에 개발하여 1980년 후반부터는 상업운전을 하고 있다^[6~8]. 그리고 차단기의 성능평가에 기준이 되는 IEC(international Electrotechnical Commission)60056은 1990년대 초반부터 개정작업을 시작하여 2001년 5월에 개정이 완료되어 IEC62271-100^[14~15]으로 변경되어 발효되었다. 개정된 규격에 따르면 모든 전력용 차단기는 차단시험 뿐만 아니라 투입시험도 정격전압과 정격전류에서 시험을 수행하도록 규정하고 있으므로 합성투입시험방법을 채택하지 않을 수 없다. 따라서 본 논문에서는 550kV 63kA 차단기를 Full-Pole로 투입과 차단성능을 평가할 수 있는 합성투입시험설비의 회로설계 및 실증시험 등에 관해 기술하였다.

2. 본 론

2.1 시험회로의 설계

2.1.1 시험회로의 구성

본 연구에서 사용한 시험회로는 2000년도에 개정된 IEC60427^[12]과 2001년도에 개정된 IEC62271-100^[13]의 규격을 기준으로 제어가 용의하며 건설비가 상대적으로 저렴한 저용량 송암용 변압기회로로서 시험회로도는 Fig. 1와 같고 시험회로의 구성은 그림에서 나타낸 것처럼 단락발전기를 포함한 전류원회로, 송암-용 변압기와 HCS 및 ITMC전류발생용 회로를 포함한 합성투입용 전압원회로와 콘덴서와 리액터를 포함한 합성차단용 전압원회로로 구성되어 있다.

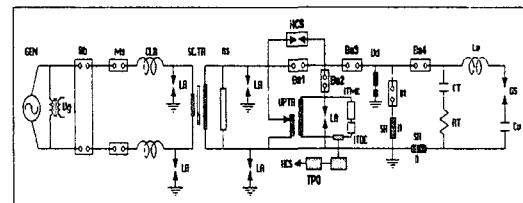


Fig. 1 Circuit for synthetic making tests using a low power transformer

여기서,

UPTR : 전압조정 및 송암 변압기

Ba1, Ba2, Ba3, Ba4 : 보조 차단기

Cv, Lv : 차단시험을 위한 전압원회로

CT, RT : TRV 제어용회로

GS : 스파크 캡 스위치

ITMC : Rc-Cc에서 발생하는 초기과도전류

2.1.2 시험회로의 설계

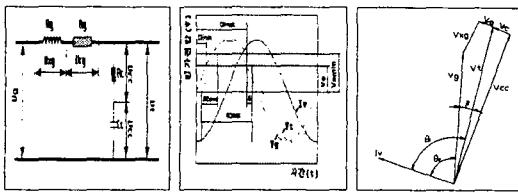
본 시험설비는 550kV 63kA 1pole 차단기의 투입 및 차단성을 평가하기 위한 시험설비이므로 시험회로의 정격은 다음과 같다.

- ① 최대 시험전압 : $320\text{kV} (= 550\text{kV}/\sqrt{3})$
- ② 최대 투입전류 및 파고치 : $63\text{kA}/164\text{kAp} (= 63\text{kA} \times 2.6)$
- ③ 제어 및 보조차단기의 응답속도 : 60ms(IICS 전류통전능력)
- ④ 전류원회로의 최대전압 : 13.5kV
- ⑤ 플라즈마 고속투입스위치의 운전영역 : $90^\circ \pm 40^\circ$

(1) 플라즈마 고속 투입스위치(HCS)

합성투입시험설비에서 HCS는 시험의 유효성을 결정하는 핵심적인 시험설비로서 전류원회로의 시험전압과 제어장치의 응답속도를 고려하여 다음과 같은 정격의 설비를 도입하여 사용하였다.

- ① 정격 전압 : 355kV
- ② 정격 투입전류 및 파고치 : $63\text{kA}/164\text{kAp}$
- ③ 동작 지연시간 : $300\mu\text{s}$ 이하
- ④ 최소동작전압 : 15kVp 이하



(a) 등가회로도 (b) 동작범위 (c) Vector 도
Fig. 2 Equivalent circuit, Vector diagram and test
current and voltage for synthetic making tests

(2) ITMC회로

본 연구에서 사용한 전압원회로는 저용량 승압용 변압기이므로 퍼시험용 차단기의 극간에 절연파괴가 발생하여 변압기의 2차 권선이 단락되어도 IICS가 투입되기 전까지는 매우 작은 전류만 차단기의 극간에 흐르게 된다. 그러므로 ITMC회로의 설계는 IICS의 동작시간까지 아크전류를 유지시키는데 필요한 최소전류(차단기의 소호매질에 따라 다르긴 하지만 최대 소호전류로 계산)를 일정시간 동안 유지시킬 수 있도록 설계하였다.

① 설계조건

- $I_{min} : 5A$ (SF₆ 가스차단기를 기준)
- $V_n : 400kV$ ($550kV$ 의 차단기를 기준)
- $V_{min} : 70kV$ ($p=123kV * \sqrt{(2/3) * \sin(90^\circ - 40^\circ)}$)
- $T_r : 300\mu s$ (본 시험회로에서 사용되는 IICS의 최대 동작 지연시간이 $200\mu s$ 이므로 시험설비 동작의 신뢰성을 고려)

② 시험설비의 설계

$$R_c = \frac{V_{min}}{I_{min}} e^{-1} = \frac{70kV}{5A} \times 0.368 = 5152\Omega (\approx 6000\Omega)$$

$$E_{Rc} = I_{min}^2 \times R_c \times T_r \times \frac{3}{2} = 67.4J$$

$$Cc = \frac{T_r}{R_c} = \frac{300\mu s}{5150\Omega} = 58nF (\approx 55nF)$$

③ UPTR

승압용 변압기(UPTR)은 시험전압과 전류사이의 적절한 위상관계를 갖도록 하기 위해서 가능한 위상변위를 작게 되도록 설계·제작하여야 한다. 그러므로 UPTR의 용량은 최대 시험전압과 ITMC회로의 합수로서 다음과 같이 계산할 수 있다.

① 설계조건

- $V_{max} = 350kV$; 최대 시험전압
- ② 승압용 변압기의 정격
- 정격 용량 : $u \times C_c \times V_{max}^2 = 377 \times 55nF \times 350kV^2 = 2540kVA$

2.1.3 시험회로의 동작특성

(1) ITMC회로에 의한 시험회로의 동작범위

본 ITMC회로의 동작특성은 아래의 두식의 설계조건을 대입하여 계산하면 다음과 같이 결과를 얻을 수 있다.

$$\theta_{RCmin} = \sin^{-1}\left(\frac{70kV}{\sqrt{2} \times 350kV}\right) = 8.13^\circ$$

$$\theta_{RCmax} = 180^\circ - \sin^{-1}\left(\frac{70kV}{\sqrt{2} \times 350kV}\right) = 171.87^\circ$$

(2) IICS 동작전압에 의한 시험회로의 동작범위

IICS 동작특성은 동작전압에 의해 결정되고, 동작특성의 계산은 동작전압과 전류원회로의 공급전압을 아래의 두식에 대입하여 계산하면 다음과 같은 결과를 얻을

수 있다.

$$\theta_{CImin} = \sin^{-1}\left(\frac{15kV}{\sqrt{2} \times 13.5kV}\right) = 51.8^\circ$$

$$\theta_{CImax} = 180^\circ - \left(\sin^{-1}\left(\frac{15kV}{\sqrt{2} \times 13.5kV}\right)\right) = 128.2^\circ$$

(3) 시험회로의 동작범위

본 시험회로의 동작특성은 ITMC회로의 동작특성과 HCS의 동작특성이 의해 결정되고 동작범위는 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다.

$$\theta_{CHmin} = \left(\sin^{-1}\left(\frac{15kV}{\sqrt{2} \times 13.5kV}\right)\right) - 2.2^\circ - 6.5^\circ = 43.1^\circ$$

$$\theta_{CHmax} = 180^\circ - \left(\left(\sin^{-1}\left(\frac{15kV}{\sqrt{2} \times 13.5kV}\right)\right) + 2.2^\circ + 6.5^\circ\right) = 119.6^\circ$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\frac{1}{wC_c R_c} = 82.9^\circ$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}\frac{\frac{1}{wC_c} - X_g}{R_g + R_c} = 80.7^\circ$$

$$\beta = \theta_1 - \theta_2 = 82.9^\circ - 80.7^\circ = 2.2^\circ$$

$$\gamma = wT_r = 360^\circ \times 60 \times 300 \times 10^{-6}s = 6.5^\circ$$

2.2 실증시험 및 결과 검토

건설된 시험설비의 실증시험은 개별시스템의 동작특성 시험과 설비종합 및 국제규격에 따른 시험을 수행하여 성능을 평가하였고 그 결과는 다음과 같다.

(1) 고속투입스위치(HCS)

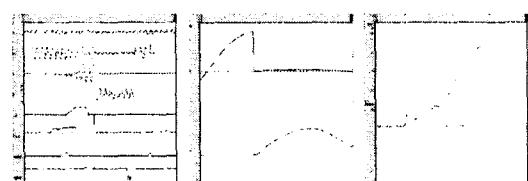
설계최대정격인 전압원 전압 550kV, 전류원 전압 13.5kV, 시험전류 63kA를 사용하여 합성투입시험과 합성투입 및 차단시험을 수행한 시험결과는 최소동작전압은 11.5kV이고, 최대지연시간은 그림 3(a)에서 나타낸 것처럼 120μs이다.

(2) 시험전압공급용 승압용 변압기

시험전압을 자동으로 제어하기 위해 2차측 단자는 Tap 절환장치를 설치하고 용량은 ITMC회로의 삽입에 따른 전압 및 전류의 위상의 차이를 최소화하기 위해 설계치인 2500kVA 보다 다소 용량을 증가시켜 3000kVA로 제작하였으며 내부 임피던스는 12.5%로 단락전류를 감소시키기 위해 다소 크게 제작하였다.

(3) ITMC회로

ITMC회로는 IICS의 지연시간(200μs)을 감안하여 시정수를 300μs로 제작하기 위해 콘덴서는 110nF, 저항은 6kΩ를 직렬로 연결하였으며, 차단기에 pre-arc에 의해 통전되는 전류는 HCS의 최소동작전압과 차단기의 소호특성을 고려하여 7Ap 이상이 되게 제작하였다. 본 연구에서 건설한 합성투입시험설비의 최대시험용량은 550kV 63kA이고, 실동작특성은 Table 1에서 나타낸 것처럼 시험전압을 기준으로 43°에서 120°이다. 그리고 시험전류가 50kA일 경우에는 전류원전압이 24kV로 증가됨으로 시험범위가 18°에서 145°까지 확대된다.



(a) 시험전류 및 전압 (b) 투입전압 및 전류 (c) ITMC 및 대전류
Fig. 3 합성투입단락시험의 시험전압 및 전류 파형

3. 결 론

초고압·대용량 차단기의 합성투입시험에 대한 연구는 비교적 오래 동안 연구가 진행되었지만 합성시험의 필요성이 크게 대두되지 않았다. 그러나 차단기의 설계기술과 계통해석기술의 발전으로 차단기의 투입성능도 차단 성능과 동일하게 중요하다는 것이 인식되어 새로이 개정된 차단기의 규격인 IEC62271-100에서는 모든 차단기는 반드시 정격전압과 전류로 차단기의 투입성능을 평가하도록 규정하고 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 목적을 달성하기 위해 저용량 승압변압기를 사용하여 합성투입시험설비를 완성하였으며, 합성투입시험의 목적인 차동재폐차단기의 성능을 가장 등가성 있게 평가할 수 있는 시험설비를 완성하여 설비의 규모 및 성능은 세계 일류의 시험설비를 보유하게 되었다. 하지만 시험설비의 세어장치의 설계와 제작상의 어려움으로 3상 합성투입시험설비는 본 논문에서 검토하지 못했지만 가까운 장래에는 단상 및 3상 시험의 차이점과 3상 시험설비에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

Table 1 시험회로의 동작특성(전압 = 13.5kV)

항목	V	β	θ_{RCmin}	θ_{RCmax}	θ_{CLmin}	θ_{CLmax}	θ_{CHmin}	θ_{CHmax}
동작 특성	6.5	2.2	8.7	171.3	51.8	128.2	43.1	119.6
비고	시험전류	63kA, 시험전압	350kV					

Table 2 시험회로의 동작특성(전압 = 24kV)

항목	V	β	θ_{RCmin}	θ_{RCmax}	θ_{CHmin}	θ_{CHmax}	θ_{CLmin}	θ_{CLmax}
동작 특성	6.5	2.2	8.7	171.3	26.2	153.8	17.6	145.1
비고	시험전류	50kA, 시험전압	350kV					

[참 고 문 헌]

- [1] A. Balossi - M. Malaguti - P. Ostano, "Laboratory full-scale tests for the determination of the secondary arc extinction time in high speed reclosing" IEEE Conference Paper n. CP-66-382 presented at the Summer Power Meeting, New Orleans, 1996
- [2] A.D. Strokes - S. Rovelli, "Discussion on : Balanced Synthetic Circuit: new circuit for high-power testing with low frequency transient recovery voltage " Proceedings IEE 1975, n. 4, vol. 122, pp. 427-429
- [3] S. Manganaro - S./ Rovelli, "A new circuit for synthetic autoreclosing test duties under short-circuit conditions on high-power circuit-breakers" IEEE PES F77 132-4 presented at the Winter Meeting, New York, January 1977
- [4] R. Ballada, " A new fast and high current making switch for synthetic testing " Alta Frequenza n. 2, February 1975, pp. 107~111
- [5] R. Ballada, " A fast high current making-switch for synthetic testing of circuit breakers " Reprinted from Energy Storage, Compression and Switching(1976), Ed. W.H. Bostick, B. Nardi, O.S.F. Zucker
- [6] S. Managanaro - H. H. Schramm, "Application of synthetic auto-reclosing circuit for testing high-voltage circuit-breakers" IEEE T. PAS, November- December 1980, vol. 99, n. 6, pp. 2223~2231
- [7] S. Manganaro, "New developments in synthetic testing technique" International Workshop on HV-Switchgear Bangalore (India) 18~19 February 1985
- [8] G. Aldrovandi I. Bonfanti, G. Kuhnhardt, H. Pliet,

"Development and application of new synthetic circuits in CESI and IPIH" CIGRE 1992, Report 13-201

[9] 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)

[10] 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

[11] IEC, "IEC-High voltage alternating current circuit breaker", IEC60056/FDIS, 2001

[12] IEC, "IEC-Synthetic testing high voltage alternating current circuit breaker", Publication 60427, 2000

[13] IEC, "IEC-High voltage alternating current circuit breaker", IEC62271-100, 2001