

KERI 합성투입시험회로의 해석적 고찰

이용한  
한국전기연구원

Analytical Examination of KERI Synthetic Short-circuit Current Making Test Circuit

Lee, Yong-Han  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - In the present IEC 60427(2000), reduced applied voltage can be used for synthetic short-circuit making current tests if the maximum pre-arcing time of the test circuit breaker is less than  $1/\omega$ . But in the near future IEC, only the making tests with full test voltage shall be allowed. To meet this trend, KERI is preparing synthetic making test facilities using step-up transformer, ITMC and plasma making switch.

This paper presents analytical characteristics of KERI's synthetic short-circuit making test circuits. The results of this paper can be useful for effective and adequate tests.

1. 서 론

차단기의 동작성능을 평가하기 위해서는 개로상태에서의 인가전압과 폐로상태에서의 단락전류를 공급할 수 있는 시험설비가 요구되는데, 비교적 단락용량이 작은 배전급 차단기의 단락시험에서는 필요한 전압과 전류를 단일전원으로부터 공급하여 수행(직접시험)할 수 있으나, 단락용량이 매우 큰 송전급 차단기의 단락시험에서는 필요한 전압과 전류를 각각 분리·공급하여 수행(합성시험)하고 있다. 그런데 IEC 등의 국제규격에서 송전급 차단기의 합성시험에서, 과거에는 저감전압 투입이 인정되었으나, 현재에는 전전압 투입만을 인정하는 형태로 강화되고 있으며, KERI에서도 이에 부합되는 합성투입시험을 수행하기 위해 현재 550 kV 63kA 1-pole 급 차단기의 전전압 합성투입시험이 가능한 시험설비를 구축하고 있다.

본 논문에서는 현재 KERI에서 구축중인 합성투입시험설비의 안전하고 효율적이면서 적합한 운용을 위해 합성투입시험회로의 여러 구성 요소들에 대한 해석적 특성을 검토하였다.

2. 본 론

2.1 KERI 합성투입시험회로의 구성 및 동작

차단기의 단락투입동작은 고압구간(High-voltage interval), 프리아크구간(Pre-arcing interval) 및 잠금구간(Latching interval)의 3개 구간으로 구분할 수 있다. 일반적으로 합성투입시험회로는 그림 1과 같이 고압구간에서 요구되는 전압을 공급하는 전압원과 프리아크 및 잠금구간에서 요구되는 단락전류를 공급하는 전류원으로 구성된다. 전류원은 통상 단락발전기(또는 단락발전기+단락변압기)와 같이 비교적 낮은 전압의 저임피던스 대용량 전원을 사용하며, 전압원은 충전된 커패시터를 사용하거나 고압피던스의 승압변압기를 이용하는 방법 등이 있다.

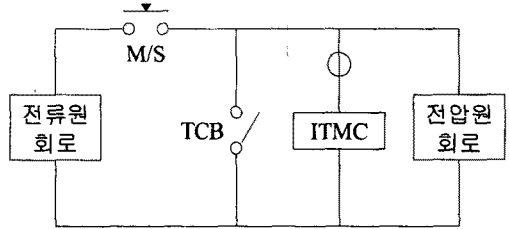


그림 1. 합성투입시험회로 개념도

2.1.1 KERI 합성투입시험회로의 구성

KERI에서 구축중인 합성투입시험회로는 그림 2와 같이 단락발전기와 단락변압기를 전류원으로 사용하고, 전류원 전압과 승압변압기를 이용하여 전압원을 구성하는 방법을 적용하고 있다.

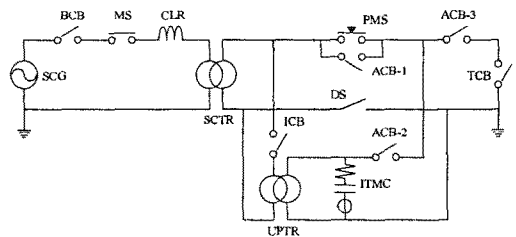


그림 2. KERI 합성투입시험회로도

그림 2에서 SCG, BCB, MS, CLR, SCTR, UPTR, ITMC, PMS 및 TCB는 각각 단락발전기, Backup CB, Making Switch, 한류리액터, 단락변압기, 승압변압기, 초기과도투입전류(Initial Transient Making Current)회로, Plasma Making Switch 및 피시품 차단기를 나타내며, ICB, ACB-1,2,3는 시험회로 구성을 변경하기 위한 보조차단기들이며, DS는 전류원 회로와 전압원 회로를 분리하기 위한 단로기를 표시하고 있다.

2.1.2 KERI 합성투입시험회로의 동작

KERI에서 구축중인 합성투입시험회로는 피시품 차단기의 Od-CsOs(직접차단-합성투입:합성차단) 동작을 모의할 수 있도록 준비되고 있으나, 본 논문에서는 피시품의 Cs(합성투입) 동작에 따른 합성투입시험회로 설비의 동작만을 검토하였으며, 그림 3에 피시품, 보조차단기 및 PMS 등의 동작 시퀀스를 나타내었다. 그림 3에서 HVG 및 LVG는 각각 PMS를 동작시키기 위해 시험자가 임의로 제어하는 제어시스템 내부 구동신호로서, PMS는 이들 2개 신호와 ITMC 신호가 동시에 입력될 때 동작된다.

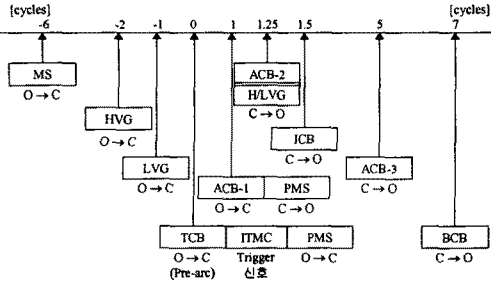


그림 3. KERI 합성투입시험회로의 동작 시퀀스

그림 4와 5에는 KERI 합성투입시험설비 구성도 및 신호흐름도를 각각 나타내었다.

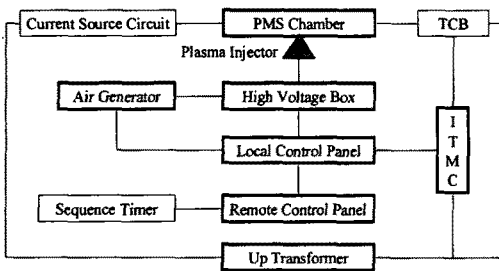


그림 4. KERI 합성투입시험설비 구성도

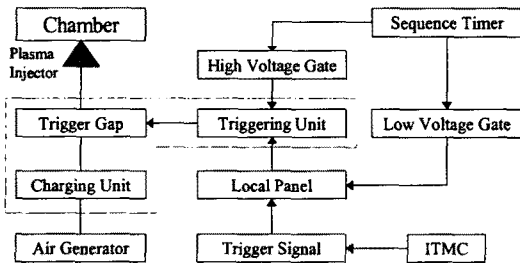


그림 5. KERI 합성투입시험설비 신호흐름도

## 2.2 KERI 합성투입시험회로 해석

합성투입시험을 시행하기 위해서는 먼저 설비상태를 확인한 후, 시험요구조건에 적절한 시험회로 구성 및 파라미터를 선정해야 하는데, 여기에서는 전압 조정 및 Pre-arc 특성 확인을 위한 사전시험을 포함한 전체 시험과정에 대한 회로특성을 해석하였다.

### 2.2.1 승압변압기 탭 선정

KERI 합성투입시험회로는 그림 2에 도시한 것과 같이 피시험체에 투입전압을 인가하기 위해 승압변압기를 사용하게 되는데, 승압변압기의 1차측에는 13.5 kV 및 24 kV 2개의 탭이 있으며, 2차측에는 최소 55 kV에서 355 kV 까지 15 kV 단위로 총 21개의 탭이 있다.

그런데 승압변압기 2차측에는 ITMC를 공급하기 위한 R-C 회로가 부가되어 용량부하로 작용하게 되므로 페란티 효과에 의한 전압상승 효과가 나타난다. 즉, 승압변압기의 2차 탭 전압은 무부하 전압값이므로, ITMC 회로에 의한 전압상승을 고려하여 다음과 같이 2차 탭 위치를 선정해야 한다.

그림 6에 전압원 등가회로를 도시하였는데,  $V_s$ ,  $R_s$ ,  $X_s$ 와  $R_c$ ,  $C_c$  및  $V_1$ 은 단락전류 및 투입전압 범위에 의해 단순 결정되며,  $V_2$ 를 가변시킴으로써 투입전압을 조정할 수 있다.

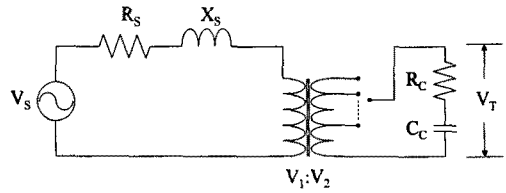


그림 6. 전압원 등가회로

그런데, 승압변압기 2차측 탭을 변경하면, 임피던스도 함께 변하기 때문에 시험전압  $V_T$ 는 2차 전압  $V_2$ 의 선형 함수가 아닌 다음 식으로 표현된다.

$$V_T = \sqrt{\frac{R_C^2 + X_C^2}{(R_{TH} + R_C)^2 + (X_{TH} - X_C)^2}} \frac{V_2}{V_1} V_s \quad (1)$$

단,  $X_C = 1/\omega C_c$

$R_{TH}$ ,  $X_{TH}$  : 승압변압기 2차 측에서 본 Thevenin 등가임피던스로서,  $V_2$ 의 함수로 나타남.

따라서 요구되는 시험전압에 가장 적합한 승압변압기의 2차 탭 위치는 상기 식으로 표현된 비선형방정식의 해를 구해서 결정하게 한다.

### 2.2.2 피시험체의 Pre-arc 특성 확인

피시험체의 pre-arc는 극간전압의 파고에서 아크가 개시되어 접점이 기계적으로 접촉될 때까지 지속될 때 최대가 되는데, 이 때에는 직류성분이 거의 포함되어 있지 않은 대칭 교류전류가 흐르게 된다.

IEC 60427(2000)에서는 전전압에 대한 최대 pre-arcing 시간이  $1/\omega$  이하인 차단기에 대해서는 저감 전압투입을 예외적으로 허용하고 있으나, 이러한 예외 조항을 삭제하여 전전압투입만을 인정하는 방향으로 개정되고 있다.

차단기의 pre-arc는 이동극의 이동개시시점과 이동속도에 따라 달라지는데, 이동개시시점은 극간 내전압변화 직선이 인가전압 파고와 만날 때 최대 pre-arcing 시간이 발생되며, 이동속도가 빠를수록 짧아지게 된다. 그림 7에 여러 가지 극간내전압변화직선과 인가전압과의 관계를 도시하였으며, 최대 pre-arcing 시간  $1/\omega$ 은 이론적인 최소 pre-arcing 시간이 0이 되는 최소이동속도를 나타낸다.

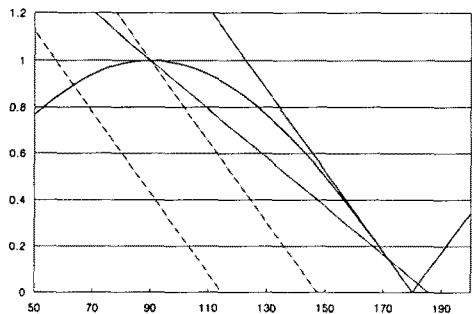


그림 7. 극간내전압과 인가전압

한편, 저감전압투입의 저감률을  $f_R$ 이라 할 때, 전전압 투입시험에서 최대 pre-arcing 시간이  $t_{m}$ 인 차단기의 저감전압투입시험 시 최대 pre-arcing 시간  $t_{mr}$ 은 다음과 같다.

$$f_R = \frac{V_R}{V_F} \quad (2)$$

$$t_{mr} = f_R \cdot t_m$$

단,  $V_F, V_R$  : 전전압 및 저감전압

일정 아크전압 및 대칭 투입전류를 가정할 경우, 전전압 투입시점 시의 pre-arc 에너지  $E_F$ 와 저감전압투입시점에 의한 pre-arc 에너지  $E_R$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$E_F = K \cdot \int_0^{t_m} |\sin(\omega t)| dt \quad (3)$$

$$E_R = K \cdot \int_0^{R \cdot t_m} |\sin(\omega t)| dt$$

따라서  $E_F$ 와  $E_R$ 의 비율은 저감율과 저전압투입시점 시의 최대 pre-arcing 시간에 따라 그림 8과 같이 나타내어지며, 저감전압투입에 의한 pre-arc 에너지는 전전압투입에 비해 매우 낮아짐을 알 수 있다.

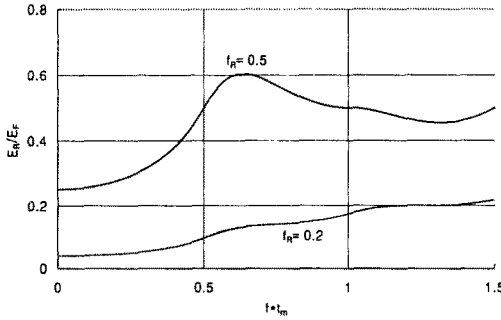


그림 8. 저감전압투입에 의한 pre-arc 에너지 감소

### 2.2.3 ITMC 회로 및 PMS의 방전특성

ITMC 회로는 R-C 직렬로 구성되며, 피시품 차단기에 pre-arc가 발생되어 전기적으로 단락될 때, C 요소에 충전된 전하를 방전하여 초기 투입전류를 공급하며, 한편으로 전류원 전류를 통전시키기 위한 트리거 신호를 발행하는 회로이다.

피시품의 pre-arc 개시시점에서의 전압원 전압의 전기각을  $\theta_m$ 이라 할 때, pre-arc 개시시점에서 ITMC 회로의  $C_c$ 에 충전된 전압  $v_C$ 는 다음과 같이 나타내어진다. (기준 페이지 : 전류원 전압)

$$v_C = \sqrt{2} V_T \frac{X_C}{\sqrt{R_C^2 + X_C^2}} \sin(\theta_m - \beta - \phi) \quad (4)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{R_C}{X_C}$$

위 식에서  $\beta$ 는 전류원 전압과 전압원 전압  $V_T$  간의 위상차로서 다음 식으로 구해진다.

$$\beta = \tan^{-1} \frac{R_C(X_{TH} - X_C) + X_C(R_{TH} + R_C)}{R_C(R_{TH} + R_C) - X_C(X_{TH} - X_C)} \quad (5)$$

피시품의 pre-arc 개시시점에서 아크전압을 무시하면 ITMC 회로에서 피시품에 공급하는 전류  $i_C$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$i_C = \frac{v_C}{R_C} e^{-\frac{t}{R_C \cdot C_c}} \quad (6)$$

ITMC 회로의 방전전류는 PMS 투입에 의해 전류원 전류가 공급될 때까지 피시품의 아크를 유지시킬 수 있어야 하므로, 이를 위한 pre-arc 개시 전기각  $\theta_m$ 의 유효범위가 존재한다. 또한 PMS가 ITMC로부터 트리거 신호를 받아 전류원 전류를 공급하기 위해서는 트리거 시점의 PMS 극간전압 즉 전류원 전압이 PMS의 최소 방전개시전압 이상이 되어야 하므로, 이에 의해서도  $\theta_m$ 의 유효범위가 존재한다. PMS의 동작지연시간을  $\tau$ , 최소동작개시전압을  $v_{PMS,min}$ 이라 두고, 아크 유지 최소전류를  $i_{a,min}$ 이라 할 때, 상기 2가지 조건을 모두 만족하는  $\theta_m$ 의 유효범위(반주기 구간에서는) 다음 식들로부터 구할 수 있다.

$$v_{C,min} = i_{a,min} \cdot R_C \cdot e^{-\frac{\tau}{R_C \cdot C_c}}$$

$$\psi = \sin^{-1} \left( \frac{v_{C,min} \sqrt{R_C^2 + X_C^2}}{\sqrt{2} V_T X_C} \right)$$

$$\beta_I = \tan^{-1} \frac{R_{UP}(R_{UP} + R_S) + X_{UP}(X_{UP} + X_S)}{X_{UP}(R_{UP} + R_S) - R_{UP}(X_{UP} + X_S)}$$

$$V_I = \sqrt{\frac{R_{UP}^2 + X_{UP}^2}{(R_{UP} + R_S)^2 + (X_{UP} + X_S)^2}} V_S \quad (7)$$

$$\theta_{min1} = \psi + (\beta - \beta_I) + \phi$$

$$\theta_{max1} = \pi - \theta_{min1}$$

$$\theta_{min2} = \sin^{-1} \frac{v_{PMS,min}}{\sqrt{2} V_I} - \omega \tau$$

$$\theta_{max2} = \pi - \theta_{min2} - 2\omega \tau$$

$$\theta_{m,min} = \text{MAX}(\theta_{min1}, \theta_{min2})$$

$$\theta_{m,max} = \text{MIN}(\theta_{max1}, \theta_{max2})$$

단,  $R_{UP}, X_{UP}$  : 승압변압기의 1차 환산 임피던스

## 3. 결 론

본 논문에서는 현재 구축중인 KERI 합성투입시험설비의 각 부분 및 단계별 회로특성을 해석적으로 검토하였는데, 이러한 검토는 향후 구축되는 실제 설비의 적절하고 안전한 운용 및 규격에 부합되는 시험조건 형성을 위한 기본적인 자료로 활용될 것이다.

그러나, 의도하지 않은 사고 등에 대한 설비 안정성을 확보하기 위해서는 다양한 시험환경 및 비정상적인 고장 조건 등을 고려한 종합적인 검토가 후속되어야 할 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] IEC 62271-100, "High-voltage alternating-current circuit breakers", 2001. 5.
- [2] IEC 60427, "Synthetic testing of high-voltage alternating-current circuit breakers", 2000. 4.