

# 차단기의 투입성능 평가를 위한 최적 합성투입시험설비

論 文

54A-6-4

## Optimized Synthetic Making Test Facilities for Estimating the Making Performance of Circuit Breaker

朴勝哉<sup>†</sup> · 徐潤澤\* · 金孟顯\*\* · 宋元杓\*\*\* · 高羲石<sup>§</sup>

(Seung-Jae Park · Yoon-Taek Suh · Maeng-Hyun Kim · Won-Pyo Song · Hee-Seog Koh)

**Abstract** - Because all of the short-circuit testing laboratories have the limitation of test facilities, the synthetic making test methods have been used to estimate the short-circuit making performance of the ultra high-voltage circuit breaker as the alternative to direct test methods. So, KERI(Korea Eelctrotechnology Research institute) has completed the construction of the synthetic making test facilities using the low capacity step-up transformer method which fulfill the requirements specified in newly revised IEC 62271-100 Edition 1.1(2003) and have the testing capability up to 550kV, 63kA full-pole circuit breaker. The test facilities using the low capacity step-up transformer method presented in this paper are made up of the unit equipments such as HCS(High-speed Closing Switch), ITMC(Initial Transient Making Current) circuit and UP TR(low capacity step-up transformer) and have the operating range of 17.6°~145.1° for testing the circuit breaker rated on up to 50kA and 43.1°~119.6° for more than 50kA.

**Key Words** : 합성투입시험, L-C 공진회로법, 저용량 승압변압기법, High-speed Closing Switch(HCS), Initial Transient Making Current(ITMC)

### 1. 서 론

지락 또는 단락사고와 같은 전력계통의 고장을 신속히 차단하여 고장구간을 축소하고 계통의 신뢰도를 향상시킴으로써 고품질의 전력 에너지를 공급하기 위하여 사용하는 전력용 차단기의 성능평가 방법에 대해서는 오래 전부터 많은 연구가 수행되어 차단성능만을 평가하는 시험에 대한 설비설계 기술은 대부분 완성단계에 이르렀다. 그러나 차단기의 또 다른 역할인 투입성능 평가를 위한 기술은 수년 전까지만 해도 기술적인 진전을 이루지 못하였다[1]. 하지만 차단기의 성능을 완전하게 평가하기 위해서는 차단동작과 더불어 투입동작에 대한 정확한 평가방법이 필요하며, 직접적인 시험방법으로는 설비용량의 부족으로 인해 성능을 평가할 수 없다[2].

이러한 배경으로 해외에서는 1970년대에 작은 아크저항을 가진 차단기에 대한 투입성능을 평가할 수 있는 합성시험법이 제안되어 오늘날의 콘덴서와 리액터를 조합한 L-C 공진회로법이 개발되기에 이르렀다[3,4]. 이 방법은 합성차단시험용 전압원을 가지고 투입시험을 수행하며 자동 재폐로용 차단기에 대하여 0.3초의 휴지시간으로 연속적인 합성차단시험을 수행할 수 있는 가능성을 보였다[5]. 그렇지만 초고압·대용량 차단기의 경우 시험설비 구현에 있어서 비경제적이고

시험회로의 동작과 제어가 복잡하여 적용하기에는 많은 어려움이 있다[6]. 이 점을 보완하기 위하여 1980년대에 CESI(이태리)와 SIEMENS(독일)에서 저용량 승압변압기와 초기과도 투입전류(ITMC : Initial Transient Making Current) 발생용 회로를 사용하는 시험방법을 개발하기 시작하여 1990년대에 이르러 상업운전을 시작하였다[7-9]. 또한 차단기의 성능평가 기준으로서 폭넓게 적용되고 있는 국제전기위원회(International Electrotechnical Commission)의 규격도 개정이 완료되어 모든 차단기는 차단시험뿐만 아니라 투입시험도 정격 전압에서 정격 투입전류로 성능을 평가하도록 규정하고 있기 때문에 합성투입시험법을 채택하지 않을 수 없었다[10-12]. 그러나 국내에서는 최근까지 합성투입시험 설비에 관한 기술을 전혀 확보하지 못하고 있는 실정이었다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 한국전기연구원은 2000년부터 정부의 지원으로 설비의 설계기술과 시험기술을 확보하기 위한 개발연구를 시작하여 2003년에 설비의 구축을 완성하였다.

따라서 본 논문에서는 L-C 공진회로를 이용한 합성투입시험법에 관해서는 기본이론, 회로구성 및 동작원리에 대하여 간략하게 기술하였다. 그리고 저용량 승압변압기를 이용한 합성투입시험법에 대해서는 기본이론, 회로구성 및 동작원리와 함께 550kV, 63kA까지의 차단기에 대한 투입성능을 평가하기 위하여 구축한 설비의 동작한계 특성, 구성장치의 설계와 특성 실험, 시험 가능범위 및 적용시험 결과에 대하여 기술하였다.

† 교신저자, 正會員 : 韓國電氣研究院 試驗評價部 先任研究員  
E-mail : parksj@keri.re.kr

\* 正會員 : 韓國電氣研究院 試驗評價部 先任研究員

\*\* 正會員 : 韓國電氣研究院 試驗評價部 室長

\*\*\* 正會員 : (株)曉星 常務

§ 正會員 : 慶南大學校 電氣電子工學部 教授 · 工博  
接受日字 : 2005年 2月 22日  
最終完了 : 2005年 4月 4日

### 2. 본 론

#### 2.1 차단기의 투입과정

차단기가 투입될 때 소호부에 발생하는 스트레스는 회로의

조건(전압, 전류, 투입 위상각 등)과 차단기 고유특성에 의해 결정된다. 투입과정에서 우선 차단기는 인가전압으로 인하여 극간에 프리아크(pre-arc)가 발생하며, 접점이 기계적으로 접촉하면 이 아크는 소멸된다. 따라서 차단기는 개방상태에서 상대지간 전압을 유지하여야 하고 투입동작 과정에서는 프리아크에 대한 내구성을 구비하여야 한다. 마지막으로 투입과정이 완료되면 단락전류를 통전할 수 있어야 한다. 그림 1은 이러한 일련의 투입과정으로서 다음과 같이 3단계로 구분한다[10-12].

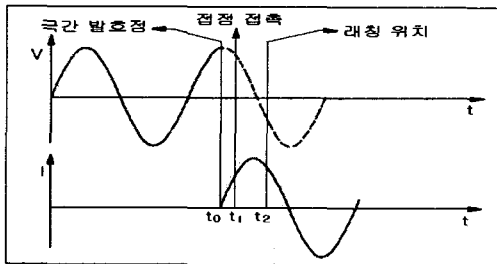


그림 1 차단기의 투입과정  
Fig. 1 Making process of circuit breaker

- ① 고전압 구간(0 ~  $t_0$  : high-voltage interval)  
개방상태에 있는 차단기가 투입동작을 진행하는 과정에서 극간 절연파괴로 인하여 프리아크가 발생하기 시작하는 극간 발효점( $t_0$ )까지를 고전압 구간이라고 한다.
- ② 프리아크 구간( $t_0 \sim t_1$  : pre-arc interval)  
투입과정에서 극간 발효점( $t_0$ )부터 접점이 기계적으로 접촉하여 프리아크가 소멸되는 지점( $t_1$ )까지를 프리아크 구간이라고 한다. 투입시험은 주로 프리아크 구간에 대한 성능을 평가하는 것으로서 대칭전류와 비대칭전류의 2가지 경우를 고려해야 한다.
- ③ 래칭 구간( $t_1 \sim t_2$  : latching interval)  
접점이 기계적으로 접촉하여 프리아크 구간이 완료되는 지점( $t_1$ )부터 투입행정이 완료되어 정지상태인 래칭 위치에 도달하는 지점( $t_2$ )까지의 구간이다.

## 2.2 합성투입시험의 개요

차단기가 개방되어 있는 상태에서는 전압만 인가되고 전류는 없는 상태이며, 투입과정에서는 단락전류와 같은 대전류가 통전되지만 극간에 나타나는 전압강하는 아주 작다는 기본개념에서 합성투입시험에 관한 연구가 시작되었다. 이 방법은 전류는 작지만 정격 전압을 발생시키는 전압원과 낮은 전압에서 정격 투입전류를 발생시키는 전류원으로 구성되어 투입과정에서 고전압 회로로부터 대전류 회로로 중단 없이 이동시킴으로서 결과적으로 한 개의 전원으로 고전압과 대전류를 공급하는 직접시험법과 동일한 결과를 얻을 수 있는 방법이다[6].

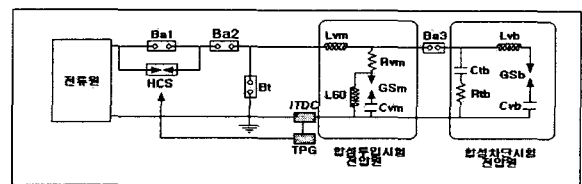
프리아크 구간동안 차단기에 발생하는 아크 에너지는 전압과 전류의 함수로서 매우 큰 스트레스를 발생시킨다. 투입과정에서 전류는 계통조건에 따라 결정되고 아크저항은 차단기의 고유특성이기 때문에 아크에너지로 인해 차단기에 가해지는 스트레스는 프리아크 시간에 따라 결정된다. 즉, 전압 위

상의 침투치에서 절연파괴가 발생하여 프리아크 시간이 가장 길어지는 경우에 아크에너지가 최대로 된다. 그리고 이 경우에는 대칭전류가 발생하며, 합성투입시험은 이러한 대칭전류에 대한 차단기의 성능을 평가하기 위한 것으로서 시험의 등가성을 확보하기 위해서는 프리아크 시간, 파형 및 아크전압을 직접시험법과 동일하게 발생시켜야 한다.

## 2.3 L-C 공진회로법

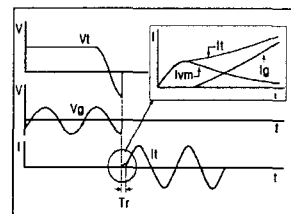
### 2.3.1 시험회로의 구성과 동작원리

L-C 공진회로를 이용한 합성투입시험법은 그림 2(a)와 같이 시험전압을 발생시키기 위한 전압원을 콘덴서로 구성하는 방법으로서 동작은 다음과 같다.



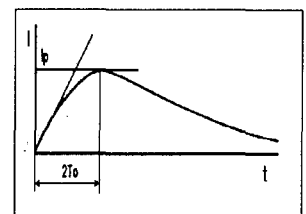
(a) 시험회로

(a) Test circuit



(b) 시험전압과 전류

(b) Test voltage and current



(c) 초기과도투입전류( $I_{vm}$ )

(c) ITMC current ( $I_{vm}$ )

$L_{vm}, L_{60}, C_{vm}, R_{vm}$  : 합성투입시험회로,  
 $C_{vb}, C_{tb}, L_{vb}, R_{tb}$  : 합성차단시험회로,  
 $Bt$  : 피시험 차단기,  $Ba1, Ba2, Ba3$  : 보조 차단기,  
 $HCS$  : 고속 투입스위치,  $GSm, GSb$  : 갭 스위치  
 $Vg$  : 전류원 전압,  $Vt$  : 시험전압,  $Ig$  : 전류원 전류,  
 $I_{vm}$  : ITMC 전류,  $I_t$  : 시험전류

그림 2 L-C 공진회로법을 이용한 합성투입시험  
Fig. 2 Synthetic making test using the L-C resonance circuit method

- ① 콘덴서  $C_{vm}$ 에 직접시험법과 동일한 전압( $V_{C_{vm}}$ )으로 충전시켜 프리아크의 등가성과 전류의 연속성이 유지되도록 한다.
- ②  $Ba2$ 는 투입상태,  $Ba1$ 과  $Ba3$ 은 개방상태로 유지시키고 차단기( $Bt$ )에 인가되는 전압을 전류원 전압과 동일한 위상으로 유지시키기 위하여 발전기에서 공급되는 전류원 전압의 파고점을 검출하여 갭 스위치  $GSm$ 을 기동시킨다.  $GSm$ 이 전기적으로 투입되면  $C_{vm}$ 의 충전에너지가  $L_{60}$ 으로 방전되면서 그림 2(b)에서 나타낸 바와 같이 상용주파수의 교류전압이 발생한다.
- ③ 차단기의 투입과정에서 전압원 회로의 상용주파수전압인

시험전압(Vt)에 의한 절연파괴로 차단기가 전기적으로 투입되면 Cvm의 에너지는 Rvm, Lvm을 통해 방전하면서 그림 2(c)에서 Ivm으로 나타낸 초기과도투입전류(ITMC : Initial Transient Making Current)가 차단기의 접점을 통해 흐르게 된다.

- ④ ITDC(Initial Transient Detecting Circuit)는 ITMC 전류를 검출하여 TPG(Trigger Pulse Generator)에 송신하고 TPG는 고속 투입스위치(HCS : High-speed Closing Switch)를 기동시킨다.
- ⑤ ITMC 회로의 전류는 HCS의 동작 지연시간(t<sub>d</sub>)동안 아크를 유지시키고, 이후 HCS가 전기적으로 투입되면 그림 2(b)와 같은 상용주파수의 시험전류(I<sub>t</sub>)가 차단기에 흐르게 되어 직접시험법과 동일한 프리아크를 발생시킨다.
- ⑥ 위의 과정으로 합성투입시험은 완료되지만 전류원 전류로 인한 HCS의 과도한 손상을 방지하기 위하여 Ba1을 투입시켜 분로시킨다.

**2.3.2 시험회로의 해석**

합성차단시험 전압원 회로의 구성요소(Cvb, Ctb, Lvb, Rtb)는 차단시험을 위한 투입전류와 과도회복전압(TRV : Transient Recovery Voltage)의 조건에 따라 결정된다. 그리고 합성투입시험을 위한 정전용량 Cvm은 투입시 차단기 극간에 프리아크만 유지시키면 되기 때문에 Cvb의 10% 정도로 작게 조정한다. 합성투입시험 전압원 회로의 ITMC 전류는 시험전류의 불연속을 방지하기 위해 식(1)부터 식(4)까지와 같이 임계제동이 되도록 한다.

$$I_{vm} = \frac{V_{Cvm}}{L_{vm}} \cdot t \cdot e^{-t/2T_0} \tag{1}$$

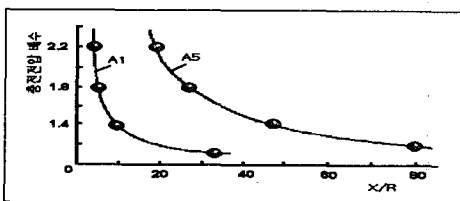
$$I_p = \frac{V_{Cvm}}{L_{vm}} \cdot 2 \cdot T_0 \cdot e^{-1} \tag{2}$$

$$\left[ \frac{dI_{vm}}{dt} \right]_{t=0} = \frac{V_{Cvm}}{L_{vm}} \tag{3}$$

$$Tp = 2 \cdot T_0 \tag{4}$$

여기서,  $T_0 = \frac{L_{vm}}{R_{vm}} = \frac{\sqrt{L_{vm} C_{vm}}}{2}$ ,  $R_{vm} = 2\sqrt{\frac{L_{vm}}{C_{vm}}}$

상용주파수 시험전압을 발생시키기 위한 공진리액터(L<sub>60</sub>)는 일정한 크기의 상용주파수전압을 공급하기 위해 높은 X/R비를 가져야 한다. 하지만 리액터의 X/R비를 30이상 되게 하는 것 보다 충전전압을 증가시키는 것이 훨씬 효율적이다. 예를 들어, X/R비가 30이고 1사이클 후에 투입할 경우 그림 3에서 알 수 있는 것처럼 콘덴서 Cvm의 충전전압을 10% 정도만 과충전하면 규정된 전압을 얻을 수 있다.



A1 : 전압 인가시간이 1Cycle A5 : 전압 인가시간이 5Cycle  
그림 3 L<sub>60</sub>의 X/R비와 충전전압과의 관계

Fig. 3 Relation between X/R ratio of L<sub>60</sub> and charging voltage

**2.3.3 시험법의 장단점**

L-C 공진회로법은 합성차단시험용 전압원 콘덴서(Cvb)를 이용하여 합성투입시험용 전압원 콘덴서(Cvm)로 사용하기 때문에 전압이 낮은 저용량 차단기의 경우에는 합성투입시험용 전압원 콘덴서를 별도로 구축할 필요가 없으므로 경제적인 면이 있다. 그렇지만 초고압·대용량 차단기의 자동 재폐로 성능평가를 위해서는 투입시험용과 차단시험용 전압원 콘덴서의 구성에 있어서 과도한 비용이 소요되어 비경제적이다. 또한 전압원 회로의 상용주파수전압 발생용 공진리액터(L<sub>60</sub>)가 Cvb와 Cvm에 따라 가변되어야 하고 전류원 회로와의 동기(주파수, 위상) 특성을 제어하기가 어렵다.

**2.4 저용량 승압변압기법**

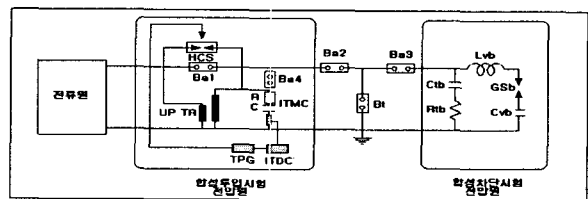
**2.4.1 시험회로의 구성과 동작원리**

L-C 공진회로법의 단점을 보완하기 위하여 개발된 저용량 승압변압기법의 시험회로는 그림 4(a)이다. 이 방법에 있어서 발전기를 이용하는 전류원과 합성차단시험회로(Cvb, Ctb, Lvb, Rtb)는 L-C 공진회로법과 동일하다. 반면에 합성투입시험용 전압원을 저용량 승압변압기(UP TR : low capacity step-up transformer)와 ITMC 회로로 구성하는 방법으로서 동작은 다음과 같다.

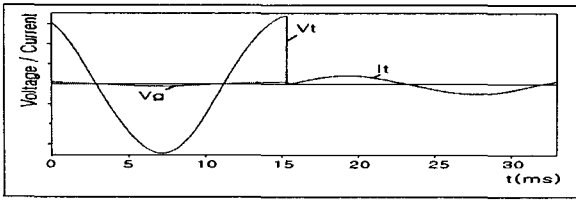
- ① Ba2는 투입상태, Ba1과 Ba3은 개방상태로 유지시키고 전류원을 인가하면 그림 4(b)에서와 같이 승압변압기를 통해 시험전압이 차단기에 인가된다.
- ② 전압이 인가된 상태에서 차단기를 투입하면 극간의 절연파괴와 함께 프리아크가 시작된다.
- ③ 프리아크의 시작과 함께 UP TR에서 발생하는 상용주파수의 교류전류와 ITMC 회로에서 발생하는 고주파수의 전류가 중첩되어 차단기의 극간을 흐르게 된다. 그리고 ITDC가 ITMC 전류를 검출하여 TPG에 송신하고 TPG는 HCS를 기동시킴으로서 전류원 전류와 연결되도록 하면 상용주파수의 시험전류가 흐르게 되어 직접시험법과 동일한 프리아크 상태가 된다.
- ④ 마지막으로 Ba1을 투입시켜 전류원 전류로 인한 HCS의 과도한 손상을 방지시킨다.

**2.4.2 시험법의 장단점**

그림 4(a)에서 알 수 있는 바와 같이 투입시험용 전압원을 차단시험용 콘덴서와는 상호 독립적으로 구성하기 때문에 초고압·대용량 차단기의 자동재폐로 성능평가를 위한 설비구성에 있어서 L-C 공진회로법보다 훨씬 경제적이다. 또한 전압원 회로와 전류원 회로의 동기(주파수, 위상)가 자동으로 이루어지기 때문에 시험회로 제어가 용이하다.



(a) 시험회로  
(a) Test circuit



(b) 시험전압과 전류

(b) Test voltage and current

그림 4 저용량 승압변압기법을 이용한 합성투입시험

Fig. 4 Synthetic making test using the low capacity step-up transformer method

2.4.3 시험법의 한계특성

저용량 승압변압기와 ITMC 전류 발생회로를 사용하여 합성투입시험을 실시하는 저용량 승압변압기법은 HCS, ITMC 회로, UP TR 및 전류원 회로의 특성이 시험의 한계범위와 유효성을 결정하며, 그림 5는 한계특성 곡선이다.

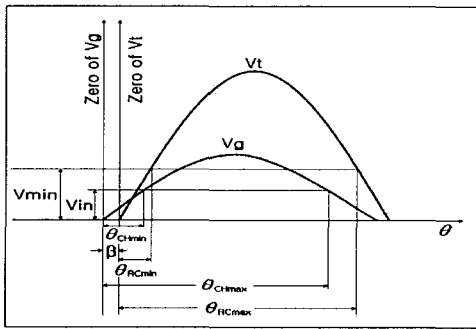


그림 5 저용량 승압변압기법의 한계특성

Fig. 5 Limiting characteristics of the low capacity step-up transformer method

2.4.3.1 ITMC 회로에 따른 한계

그림 4(a)에서와 같이 저항(R)과 콘덴서(C)가 직렬로 구성되어 있는 ITMC 회로는 차단기가 전기적으로 투입된 후 HCS의 동작 지연시간( $t_r$ )동안 프리아크를 유지시킬 수 있어야 한다. 따라서 그림 5에 나타낸 바와 같이 차단기에 인가되는 ITMC 회로 전압의 순시치( $V_p$ )는 프리아크를 유지할 수 있는 최소전류( $I_{min}$ ) 이상을 발생시켜야 하기 때문에 식 (5)와 식(6)의 조건을 만족해야 한다. 따라서 ITMC 회로에 따른 한계는 식(7)과 식(8)로 나타낸  $[\theta_{RCmin}, \theta_{RCmax}]$ 의 범위가 된다.

$$V_p \geq V_{min} \tag{5}$$

$$I_{min} = \frac{V_{min}}{R} e^{-T_r/RC} \tag{6}$$

$$\theta_{RCmin} = \sin^{-1} \frac{V_{min}}{\sqrt{2} V_g} \tag{7}$$

$$\theta_{RCmax} = 180^\circ - \sin^{-1} \frac{V_{min}}{\sqrt{2} V_g} \tag{8}$$

여기서,  $I_{min}$  : 프리아크를 유지할 수 있는 최소 전류,  
 $V_{min}$  :  $I_{min}$ 을 유지할 수 있는 최소 전압

R, C :  $I_{min}$ 을 제어하는 ITMC 회로,  
 $V_p$  : ITMC 회로 전압의 순시치,  
 $V_t$  : 시험전압

2.4.3.2 HCS에 따른 한계

HCS는 기본적으로 차단기의 정격에 따라 결정되는 수 백 kV 정도의 시험전압에 대하여 절연을 유지하여야 한다. 그리고 차단기가 전기적으로 투입되면 수 십 kV 정도의 전류원 전압에서 트리거 장치에 의해 빠른 시간에 동작되어 대전류를 투입할 수 있어야 한다. 따라서 전류원 회로의 전압 순시치( $V_{in}$ )는 HCS의 최소 동작전압( $U_{TOV(min)}$  : Minimum Triggered Operating Voltage) 이상이어야 하며, 이에 따른 한계는 식(9)와 식(10)으로 나타낸  $[\theta_{CHmin}, \theta_{CHmax}]$ 의 범위가 된다.

$$\theta_{CHmin} = \sin^{-1} \frac{U_{tov(min)}}{\sqrt{2} V_g} \tag{9}$$

$$\theta_{CHmax} = 180^\circ - \sin^{-1} \frac{U_{tov(min)}}{\sqrt{2} V_g} \tag{10}$$

여기서,  $U_{tov(min)}$  : HCS의 최소 동작전압,  
 $V_g$  : 전류원 전압

2.4.3.3 시험회로의 한계

식(9)와 식(10)으로 구해지는 HCS에 의한 한계범위  $[\theta_{CHmin}, \theta_{CHmax}]$ 에 UP TR과 ITMC 회로에 의해 발생하는 전류원 전압과 시험전압 사이의 위상차( $\beta$ )와 HCS의 동작 지연시간( $t_r$ )에 의해 발생하는 위상차( $\gamma = \omega t_r = 2\pi f t_r$ )를 고려하면 식(11)과 식(12)에 나타낸 바와 같이  $[\theta'_{CHmin}, \theta'_{CHmax}]$ 의 한계범위가 얻어진다.

$$\theta'_{CHmin} = \sin^{-1} \frac{U_{tov(min)}}{\sqrt{2} V_g} - \beta - \gamma \tag{11}$$

$$\theta'_{CHmax} = 180^\circ - \left[ \sin^{-1} \frac{U_{tov(min)}}{\sqrt{2} V_g} + \beta + \gamma \right] \tag{12}$$

따라서 시험회로의 한계범위  $[\theta'_{min}, \theta'_{max}]$ 는 식(13) 및 식(14)와 같이 ITMC 회로에 의한 한계범위인  $[\theta_{RCmin}, \theta_{RCmax}]$ 와 전류원 회로, HCS 및 UP TR에 의한 한계범위인  $[\theta'_{CHmin}, \theta'_{CHmax}]$ 에서 작은 범위가 된다.

$$\theta'_{min} = \text{MAX}[\theta_{RCmin}, \theta'_{CHmin}] \tag{13}$$

$$\theta'_{max} = \text{MIN}[\theta_{RCmax}, \theta'_{CHmax}] \tag{14}$$

위의 관계에 따른 저용량 승압변압기법의 한계특성은 위상차가 커지면 HCS의 동작범위를 현격하게 축소시켜 시험설비의 동작이 매우 불안정하게 된다. 이러한 제한을 줄이기 위해서는 UP TR의 용량은 가능한 크게 하고 ITMC 회로의 C 값은 가능한 작게 하는 것이 매우 효과적이지만 이 또한 프리아크를 유지시킬 정도 이상의 전류는 가져야 한다.

2.4.4 구성장치의 설계와 특성실험

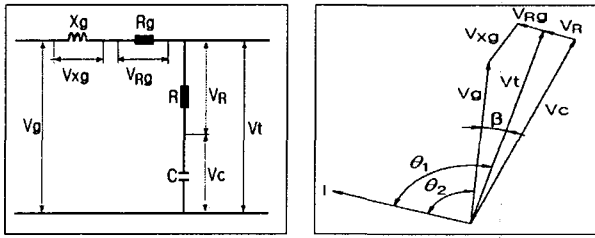
550kV, 63kA까지의 차단기에 대한 투입성능을 평가하기

위하여 구축된 저용량 승압변압기법의 구성장치인 HCS, ITMC 회로 및 UP TR의 특성에 따른 등가회로와 벡터도는 그림 6이고, 식(15)에서 식(17)까지는 이들 사이의 관계이다. 그리고 각 구성장치의 설계와 특성실험 결과는 다음과 같다.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{1}{wCR} \quad (15)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{\frac{1}{wC} - Xg}{Rg + R} \quad (16)$$

$$\beta = \theta_1 - \theta_2 \quad (17)$$



(a) 등가회로도 (b) 벡터도  
(a) Equivalent circuit (b) Vector diagram

$Xg$  : UP TR의 등가 리액턴스,  
 $Rg$  : UP TR의 등가 저항,  
 $R$  : ITMC 회로의 저항,  
 $C$  : ITMC 회로의 capacitance  
 $Vg$  : 전류원 전압,  $Vt$  : 시험전압

그림 6 저용량 변압기법의 등가회로와 벡터도

Fig. 6 Equivalent circuit and vector diagram of the low capacity step-up transformer method

### 2.4.4.1 고속 투입스위치(HCS : High-speed Closing Switch)

합성투입시험에서 HCS는 시험의 유효성을 결정하는 핵심 장치로서 전압원 회로의 고전압에 대하여 절연을 유지할 수 있는 운전전압( $U_{ov}$  : Operating Voltage), 트리거 장치에 의해 전기적으로 투입이 가능한 최소 동작전압과 동작 지연시간 그리고 상용주파수의 전류원 전류에 대한 통전능력이 핵심요소이다. 본 연구에서는 HCS에 대한 이러한요건을 충족시키기 위하여 다음의 조건으로 설계하였다.

- ① 최대 운전전압 :  $350kV(=(550/\sqrt{3}) \times \alpha, 550kV$  full-pole 차단기를 고려)
- ② 최대 투입전류 및 파고치 :  $63kA/164kAp(=63kA \times 2.6)$
- ③ 통전능력 :  $63kA/60ms$
- ④ 전류원 회로의 전압 :  $13.5kV$
- ⑤ 동작 지연시간( $t_r$ ) :  $300\mu s$  이하
- ⑥ 최소 동작전압( $U_{TOV(min)}$ ) :  $15kVp$  이하

그림 7은 HCS를 보여주고 있으며, 소형화와 신뢰성 확보를 위하여 고압의 압축공기를 이용하였다. 그리고 그림 7(a),(b)에 나타난 바와 같은 챔버를 4개 직렬로 구성하여 다양한 시험정격에 따라 사용 개수를 선택할 수 있도록 하였다. 그림 8은 HCS의 운전전압을 결정하기 위한 실험결과로서 HCS 내부의 공기압력과 절연유지 전압 사이의 관계를 보여주고 있다. 그림 8에서 절연유지 전압은 승강법(up and

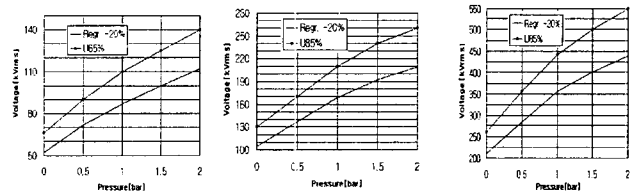
down method)을 적용하여 결정하였다. 즉, 동일전압에서 4회 ( $m=4$ )를 인가하여 파괴방전이 발생하지 않는 조건에 대한 상용주파수 교류내전압 실험결과로서  $m$ 에 따른 확률전압( $U_p$ )은 식(18)이다. 여기서  $m=4$ 이므로 확률이 85%인  $U_{85\%}$ 가 결정된다. 그리고 실제 운전전압은  $U_{85\%}$ 보다 20% 여유를 갖도록 선정하였으며, 최대 운전전압( $U_{ov(max)}$  : Maximum Operating Voltage)에 여유를 두기 위하여  $400kV$ 까지의 운전전압을 확보할 수 있는  $1.5bar$ 를 표준 공기압력으로 선정하였다.

$$U_p = 0.5^{1/m} \quad (18)$$



(a) HCS의 구조 (b) HCS의 내부 (c) HCS의 외형  
(a) Geometry of HCS (b) Inside view of HCS (c) Outside view of HCS  
그림 7 고속 투입스위치

Fig. 7 High-speed closing switch

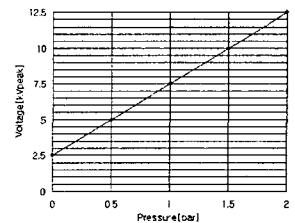
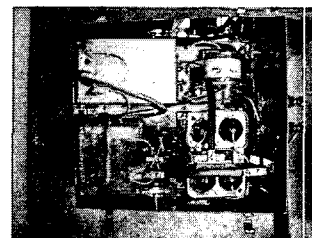


(a) 1-챔버의 운전전압 (b) 2-챔버의 운전전압 (c) 4-챔버의 운전전압  
(a) Operating voltage of 1-chamber (b) Operating voltage of 2-chamber (c) Operating voltage of 4-chamber

그림 8 HCS의 운전전압( $U_{ov}$ )

Fig. 8 Operating voltage( $U_{ov}$ ) of HCS

HCS에 있어서 또 다른 요건은 프리아크 구간의 시작점에서 트리거 장치의 동작에 의해 전기적으로 투입되어 전압원 과 전류원을 연결시킬 수 있는 최소 동작전압( $U_{TOV(min)}$ )이다. 그림 9는 트리거 장치와 HCS의 최소 동작전압 특성으로서 HCS의 표준 공기압력인  $1.5bar$ 의 상태에서 최소 동작전압  $U_{TOV(min)}=10kVp$ , 동작 지연시간  $t_r=100\mu s$ 의 특성을 보였다.



(a) 트리거 장치 (b) 최소 동작전압( $U_{TOV(min)}$ )  
(a) Triggering system (b) Minimum Triggered Operating Voltage( $U_{TOV(min)}$ )

그림 9 트리거 장치와 최소 동작전압( $U_{TOV(min)}$ )

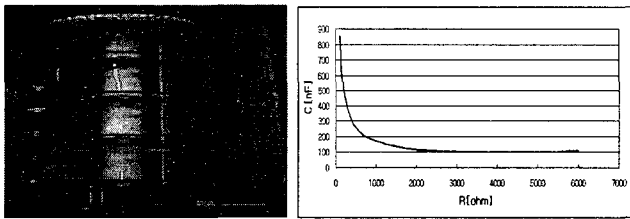
Fig. 9 Triggering system and minimum triggered operating voltage( $U_{TOV(min)}$ )

2.4.4.2 ITMC 회로

저용량 승압변압기법에서는 차단기의 극간에 절연파괴가 발생하여 변압기의 2차 권선이 단락되어도 HCS가 투입되기 전까지는 매우 작은 전류만 흐르게 된다. 따라서 ITMC 회로는 HCS의 동작 지연시간까지 프리아크를 유지시키는데 필요한 최소전류(I<sub>min</sub>) 이상을 일정시간동안 유지시킬 수 있어야 하며, 이를 위하여 다음과 같은 조건으로 설계하였다.

- I<sub>min</sub> : 5A<sub>p</sub>(SF<sub>6</sub> 가스차단기를 기준)
- 시험전압(V<sub>t</sub>)의 범위 : 50kV ~ 350kV<sub>rms</sub>
- 한계 범위 :  $\theta_{RCmin}=50^\circ$ ,  $\theta_{RCmax}=130^\circ$
- V<sub>min</sub> : 54.2kV<sub>p</sub>(= 50kV $\times\sqrt{2}\times\sin 50^\circ$ )
- 최대 지연시간 : 400 $\mu$ s(HCS의 동작 지연시간이 최대 300 $\mu$ s까지 되는 경우를 고려)

그림 10(a)는 ITMC 회로의 외형이고 위의 설계조건을 식(6)에 적용하면 그림 10(b)과 같은 저항(R)과 콘덴서(C)의 관계가 얻어진다. 그리고 합성투입설비에서는 ITMC 회로의 시정수를 동일하게 유지하여야 하기 때문에 정격 전압이 170kV 이하의 차단기에 대한 성능평가를 위해서는 R=3000 $\Omega$ , C=110nF를 1조로 구성하고, 170kV를 초과하는 차단기의 경우에는 2조를 직렬로 구성하여 R=6000 $\Omega$ , C=55nF가 되도록 하였다.



(a) ITMC 회로 (b) R과 C의 관계  
 (a) ITMC circuit (b) Relation between R and C  
 그림 10 ITMC 회로 및 저항(R)과 콘덴서(C)의 관계  
 Fig. 10 ITMC circuit and relation between R and C

2.4.4.3 저용량 승압변압기(UP TR)

합성투입시험에서 시험전압을 발생시키기 위한 저용량 승압변압기의 외형은 그림 11이며, 시험전압과 전류사이에 위상차를 90°로 유지시키기 위하여 전류원 전압과의 위상변위가 작아야 한다. 그리고 UP TR의 용량은 최대 운전전압과 ITMC 회로의 함수로서 식(19)와 같으며, 다음과 같은 조건으로 설계하였다.

- 정격용량 : P<sub>n</sub>=2.54MVA
- 1차 전압 : 13.5kV, 24kV
- 2차 전압 : 50kV ~ 350kV
- 특성 임피던스 : %Z=12.2%, X<sub>g</sub>=5.88k $\Omega$ , R<sub>g</sub>=0.89k $\Omega$
- 역률 : cos $\theta$ =0.15

$$P_n = w \cdot C \cdot U_{OV(max)}^2 \quad (19)$$

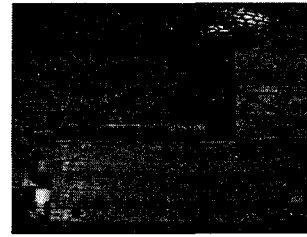


그림 11 저용량 승압변압기  
 Fig. 11 Low capacity step-up transformer

2.4.5 시험 가능범위

저용량 승압변압기법에 있어서 시험 가능범위는 전류원 전압과 전압원 회로 구성장치(HCS, ITMC 회로, UP TR)의 설계조건에 따라 결정된다. 표 1과 표 2는 한국전기연구원 단락시험설비의 전류원 전압조건(13.5kV, 24kV)에 대한 시험 가능범위를 보여주는 동작특성이다. 이 표들의 결과를 보면 시험 가능범위가 주로 HCS의 특성에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다.

2.4.5.1 ITMC 회로에 의한 가능범위

2.4.4.2항의 ITMC 회로 설계조건(V<sub>t</sub>=350kV, V<sub>min</sub>=54.2kV<sub>p</sub>)을 식(7)과 식(8)에 대입하면 [ $\theta_{RCmin}=8.7^\circ$ ,  $\theta_{RCmax}=171.3^\circ$ ]의 시험 가능범위가 구해지며, ITMC 회로에 의한 가능범위는 전류원 전압조건과는 무관하다.

2.4.5.2 HCS에 의한 가능범위

2.4.4.1항의 HCS 설계조건(U<sub>TOV(min)</sub>=15kV<sub>p</sub>)과 전류원 전압 조건을 식(9)와 식(10)에 대입하여 가능범위를 구하면 다음과 같은 결과가 구해진다.

- ① V<sub>g</sub>=13.5kV인 경우 : [ $\theta_{CHmin}=51.8^\circ$ ,  $\theta_{CHmax}=128.2^\circ$ ]
- ② V<sub>g</sub>=24kV인 경우 : [ $\theta_{CHmin}=26.2^\circ$ ,  $\theta_{CHmax}=153.8^\circ$ ]

2.4.5.3 시험설비의 가능범위

2.4.4.2항의 ITMC 회로 설계조건(R=6000 $\Omega$ , C=55nF)과 2.4.4.3항의 UP TR의 설계조건(X<sub>g</sub>=5.88k $\Omega$ , R<sub>g</sub>=0.89k $\Omega$ , cos $\theta$ =0.15)을 식(15)부터 식(17)까지에 대입하면 전류원 전압과 시험전압 사이의 위상차  $\beta=2.2^\circ$ 가 되고, HCS의 최대 지연시간을 300 $\mu$ s로 산정한 경우 HCS의 동작 지연시간에 의한 위상차  $\gamma=6.5^\circ$ 가 된다. 그리고 식(11)과 식(12)를 적용하여 가능범위를 구하면 다음과 같은 결과가 구해진다.

- ① V<sub>g</sub>=13.5kV인 경우 : [ $\theta'_{CHmin}=43.1^\circ$ ,  $\theta'_{CHmax}=119.6^\circ$ ]
  - ② V<sub>g</sub>=24kV인 경우 : [ $\theta'_{CHmin}=17.6^\circ$ ,  $\theta'_{CHmax}=145.1^\circ$ ]
- 따라서 식(13)과 식(14)를 이용하여 시험설비의 가능범위를 구하면 전류원 전압이 13.5kV에서는 [ $\theta'_{min}=43.1^\circ$ ,  $\theta'_{max}=119.6^\circ$ ]가 되고, 전류원 전압이 24kV에서는 [ $\theta'_{min}=17.6^\circ$ ,  $\theta'_{max}=145.1^\circ$ ]가 된다.

2.5 저용량 변압기법의 적용시험

현재 한국전기연구원 단락시험설비의 전류원 전압조건은 13.5kV, 63kA와 24kV, 50kA의 2가지이다. 따라서 차단기의 정격 단락전류가 50kA 이하인 경우에는 24kV의 전류원 전압 조건, 그리고 50kA를 초과하는 경우에는 13.5kV의 전류원 전압 조건에서 시험을 실시하였다. 그림 12는 시험장면, 그림 13은 시험전압과 전류를 나타내는 결과파형이며, 표 3은 170kV, 362kV, 550kV 차단기에 대한 적용시험 결과를 나타내고 있다. 이 표에서 알 수 있는 것처럼 지연시간( $t_r$ )이 110  $\mu$ s 정도로서 HCS의 동작 지연시간과 거의 동일하였다.

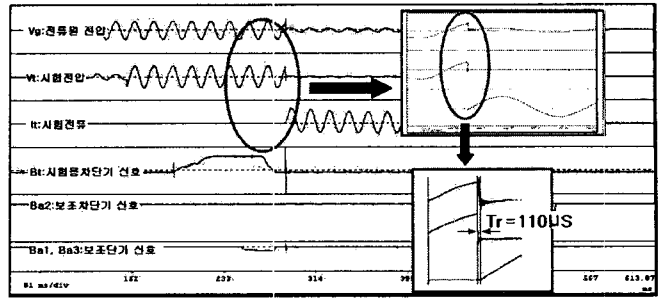


그림 13 저용량 승압변압기법의 시험결과  
Fig. 13 Test results of the low capacity step-up transformer method

표 1 시험설비의 동작특성(Vg = 13.5kV)  
Table 1 Operating range of test facility(Vg=13.5kV)

항목	$\gamma$	$\beta$	$\theta_{RCmin}$	$\theta_{RCmax}$	$\theta_{CHmin}$	$\theta_{CHmax}$	$\theta'_{CHmin}$	$\theta'_{CHmax}$	$\theta'_{min}$	$\theta'_{max}$
동작특성	6.5°	2.2°	8.7°	171.3°	51.8°	128.2°	43.1°	119.6°	43.1°	119.6°
비고	시험전류 : 63kA, 시험전압 : 350kVrms									

표 2 시험설비의 동작특성(Vg = 24kV)  
Table 2 Operating range of test facility(Vg = 24kV)

항목	$\gamma$	$\beta$	$\theta_{RCmin}$	$\theta_{RCmax}$	$\theta_{CHmin}$	$\theta_{CHmax}$	$\theta'_{CHmin}$	$\theta'_{CHmax}$	$\theta'_{min}$	$\theta'_{max}$
동작특성	6.5°	2.2°	8.7°	171.3°	26.2°	153.8°	17.6°	145.1°	17.6°	145.1°
비고	시험전류 : 50kA, 시험전압 : 350kVrms									

표 3 합성투입시험에의 적용시험 결과  
Table 3 Application test results into synthetic making test

차단기 정격		전류원 전압 (kVrms)	시험 전압 (kVrms)	시험 전류 (kArms)	ITMC 회로		HCS 구성	발호점 전류원 전압 (Vin, kVp)	지연 시간 (tr, $\mu$ s)	프리아크	
전압 (kVrms)	투입전류 (kArms)				R ( $\Omega$ )	C (nF)				발호 전압 (kVp)	시간 (ms)
170	50	22.3	100-105	50.8	3000	110	2-챔버	25.5-30.2	106-112	115-135	3.12-4.58
	63	12.5	100-105	64.5	3000	110	2-챔버	13.4-17.1	108-117	112-142	3.23-4.37
362	50	22.3	212-216	51.3	6000	55	4-챔버	25.1-29.8	104-110	292-302	3.78-5.03
	63	12.5	212-216	64.8	6000	55	4-챔버	13.1-16.8	108-114	295-300	3.68-5.12
550	50	22.3	322	51.3	6000	55	4-챔버	29.3	106	454	9.87



(a) 시험실 (b) 시험용 차단기 (c) 제어 보드  
(a) Test cell (b) Test circuit breaker (c) Control board  
그림 12 저용량 승압변압기법을 이용한 합성투입시험 장면  
Fig. 12 View of synthetic making test using the low capacity step-up transformer method

3. 결 론

초고압·대용량 차단기의 성능평가 방법에 관한 연구는 비교적 오랫동안 진행되어 합성차단시험을 위한 시험방법과 시험설비에 대해서는 많은 진전을 이루었지만 합성투입시험에 대해서는 기술적 진전이 미흡한 실정이었다. 그리고 합성투입시험법에는 L-C 공진회로와 저용량 승압변압기를 이용하는 방법이 연구되어 전 세계적으로 사용되고 있다는 것은 주지의 사실이다. 따라서 본 논문에서는 2가지 시험방법에 대한 회로구성과 동작원리에 대한 검토와 IEC 60427(2000)과

IEC 62271-100 Edition 1.1(2003)에서 규정한 시험방법, 시험설비의 조건 및 등가성 유지방법에 대한 기술적인 검토를 수행하였다. 그리고 550kV, 63kA까지의 차단기에 대한 투입성능을 평가할 수 있는 저용량 승압변압기를 이용한 합성투입 시험설비를 구축하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

**(1) 고속투입스위치(HCS)**

550kV, 63kA 차단기의 투입시험을 실시할 경우 HCS는 상전압(318kV) 이상의 운전전압을 유지하여야 하고 차단기에 프리아크가 발생하여 HCS가 동작하는 지점에는 13.5kVrms 만 인가되게 된다. 그러므로 HCS의 최소 동작전압은 15kVp 로 설계·제작하였으며, ITMC 회로 및 합성투입시험의 등가성을 고려하여 HCS의 최대 지연시간은 300 $\mu$ s 이하로 설계·제작하였다.

**(2) 저용량 승압변압기(UP TR)**

시험전압을 자동으로 제어하기 위하여 2차측 단자는 Tap 절환장치를 설치하였고, 용량은 ITMC 회로의 삽입에 따른 전압과 전류의 위상차를 최소화하기 위해 다소 용량을 증가시켜 2.54MVA로 설계하였다. 그리고 내부 임피던스는 단락 전류를 감소시키기 위해 다소 크게 설계하여 12.2%로 하였다.

**(3) ITMC 회로**

ITMC 회로는 HCS의 최대 지연시간(300 $\mu$ s)을 고려하여 시정수를 330 $\mu$ s로 설계하였으며, 차단기의 프리아크에 의해 통전되는 전류는 HCS의 최소 동작전압과 차단기의 소호특성을 고려하여 5Ap 이상으로 설계·제작하였다.

**(4) 시험가능 범위**

본 연구에서 구축한 합성투입시험설비의 최대시험용량은 550kV, 63kA이다. 그리고 시험 가능범위는 표 1과 표 2에 나타낸 것처럼 50kA를 초과하는 차단기에 대해서는 전류원 전압이 13.5kV이므로 43.1°~119.6°이며, 50kA 이하의 차단기에 대해서는 전류원 전압을 24kV까지 증가시킬 수 있으므로 17.6°~145.1°로 확대할 수 있다.

본 논문에서는 단상 합성투입시험을 위한 설비를 개발하였지만, 3상 합성투입시험법과 시험설비에 대해서는 관련 적용규격이 정립되지 않은 관계로 검토하지 못하였다. 그러나 현재 국제규격의 개정 추세를 고려하면 가까운 장래에 3상 합성투입시험에 관한 방법과 요건이 정립될 예정이므로 단상과 3상 시험의 차이점 및 3상 시험설비에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

**감사의 글**

이 논문은 과학기술부에서 시행한 중전기기기연구개발사업으로 수행된 논문입니다.

**참 고 문 헌**

[1] A. Balossi, M. Malaguti, and P. Ostano, "Laboratory full-scale tests for the determination of the secondary arc extinction time in high speed reclosing," IEEE Conference Summer Power Meeting, New Orleans,

No. CP-66-382, 1996

[2] A.D. Strokes and S. Rovelli, "Balanced synthetic circuit: new circuit for high-power testing with low frequency transient recovery voltage," IEEE Proceedings. No. 3, pp. 184-190, 1975

[3] R. Ballada, "A new fast and high current making switch for synthetic testing," Alta Frequenza, No. 2, pp. 107-111, February 1975

[4] R. Ballada, "A fast high current making-switch for synthetic testing of circuit breakers," Reprinted from Energy Storage, Compression and Switching, 1976

[5] S. Managanaro, and H. H. Schramm, "Application of synthetic auto-reclosing circuit for testing high-voltage circuit-breakers," IEEE Transactions, Vol. PAS-99, No. 6, pp. 2223-2231, 1980

[6] S. Manganaro, "New developments in synthetic testing technique," International Workshop on HV-Switchgear, Bangalore, India, pp. 18-19, 1985

[7] G. Aldrovandi, I. Bonfanti, G. Kuhnhardt, and H. Pliet, "Development and application of new synthetic circuits in CESI and IPH," CIGRE Report 13-201, 1992

[8] L. Vander Sluis, G.C. Damster, H.W. Kempen, and W.A. Vander Linden, "Synthetic test methods : Experience and future developments," CIGRE Report 30, 1992

[9] S. Managanaro, G. Mazza, and S. Rovelli, "Some problems encountered in the evaluation of the stresses on high voltage circuit breakers during making operations on a short circuit," CIGRE Report SC No. 13, 1977

[10] IEC60056/FDIS, 2001 : IEC-High voltage alternating current circuit breaker

[11] IEC 60427, 2000 : IEC-Synthetic testing high voltage alternating current circuit breaker

[12] IEC 62271-100 Edition 1.1, 2003 : IEC-High voltage alternating current circuit breaker

**저 자 소 개**



**박 승 재 (朴 勝 哉)**

1966년 10월 18일생. 1989년 광운대 전기공학과 졸업. 2000년 경남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년~현재 한국전기연구원 선임연구원  
Tel : (055) 280-1525  
Fax : (055) 280-1596  
E-mail : parksj@keri.re.kr





**서 윤 택 (徐潤澤)**

1965년 4월 17일생. 1991년 영남대 전기공학과 졸업. 1999년 창원대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년~현재 한국전기연구원 선임연구원

Tel : (055) 280-1592  
Fax : (055) 280-1596  
E-mail : ytsuh@keri.re.kr



**송 원 표 (宋元杓)**

1958년 9월 23일생. 1981년 서울대 원자핵공학과 졸업. 1991년 경남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 (주)효성 차단기/전장품 담당 상무이사

Tel : (055) 268-9007  
Fax : (055) 268-9488  
E-mail : wpsong@hyosung.com



**김 맹 현 (金孟顯)**

1961년 6월 14일생. 1989년 경남대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 박사 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 실장

Tel : (055) 280-1525  
Fax : (055) 280-1596  
E-mail : parksj@keri.re.kr



**고 희 석 (高義石)**

1942년 3월 21일생. 1966년 부산대 전기공학과 졸업. 1979년 동아대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 중앙대 대학원 전기공학과(박사). 현재 경남대 전기전자 공학부 교수

Tel : (055) 249-2628  
E-mail : powersys@kyungnam.ac.kr