

## 쌍방향시동방식의 고속투입스위치의 개발

김맹현\*, 서운택\*, 박병락\*, 박승재\*, 홍정표\*\*, 고희석\*\*

\* : 한국전기연구소, \*\* : 창원대학교 전기공학과, \*\*\*: 경남대학교 전기전자공학부

### Development of the spark-gap switch with dual trigger system

M.H.Kim\*, Y.T.Suh\*, B.R.Park\*, S.J.Park\*, J.P.Hong\*\*, H.S.Kho\*\*

\*: High-power & high voltage division in KERI

\*\* : Dept. of Electrical Engineering, Changwon National University

\*\*\*: Dept. of Electrical & Electronics Eng. Kyung Nam Univ.

**Abstract** - This paper is introducing a newly developed spark gap switch with dual trigger system, into which the current from the voltage source is injected along with the test sequence during the synthetic testing of high voltage circuit-breaker.

#### I. 서론

합성시험방법에는 전압원회로를 대전류구간 내에 투입하여 대전류구간에서 고전압구간으로의 전이과정을 전압회로가 감당하게 하는 전류주입방법과 전압원회로를 고전압구간 내에 투입하여 대전류구간에서 고전압구간으로의 이동을 두 개의 전원이 동시에 감당하게 하는 전압주입방법이 있다. 이처럼 전압원회로를 차단기의 시험과정에 정확하게 맞추기 위해서는 고속으로 투입시키는 고속투입 스위치로는 제어가 용이하고 구조가 간단한 스파크 갭 스위치가 널리 사용된다[1~3].

하지만 현재 사용중인 스파크갭 스위치의 시동방식은 단 방향에서만 시동에너지를 주입하는 방식이므로 시동전극의 근방에 형성되는 스트리머 채널의 수가 많지 않아 스파크 갭 스위치의 동작의 범위가 매우 협소하였다. 따라서 합성시험방법으로 투입-차단 책무나 자동재폐로 책무를 실시하는 경우 피시험차단기가 개극되어 있는 상태이므로 스파크 갭 스위치의 양쪽 전극에는 전압원회로의 충전전압 뿐만 아니라 전류원회로의 시험전압이 중첩되어 인가되므로 스파크 갭 스위치의 동작이 매우 불안정하였다. 이로 인해 합성시험의 시험품질 및 시험효율이 크게 저하됨은 물론이고 빈번한 동작으로 인한 유지비가 과다하게 소요되었다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 근본적으로 해결하고 시험의 신뢰성 및 시험효율을 제고시키기 위해 기존의 시동장치와 반대의 전극에 또 다른 시동편을 설치하고 시동시간 및 펄스파의 상승시간이 동일한 장치를 부가함으로써 시동전극의 근방에 스트리머 채널의 이온화 밀도를 급속하게 증가시키므로써 시동편의 이온 방출과 빛의 조사를 극대화시켜 주 전극간에는 방전으로 인한 도전성이 좋은 프라즈마가 발생하여 비교적 큰 접거리(운전전압은 자가방전전압의 60%전압)에서 시간지연이나 기타의 오동작 없이 주 전극을 단락하는 고속투입 스위치를 설계, 제작하였다[7~10].

그리고 본 논문에서는 설계, 제작된 시제품의 동작특성과 실증시험의 결과를 기술하고, 아울러 압축공기를 동력원으로 하는 스파크갭 스위치의 전원장치에 관해서도 부가하여 기술하였다.

#### II. 스파크 갭 스위치의 일반

스파크 갭 스위치는 펄스파위 기술을 이용하여 짧은 시간에 전

기에너지를 부하로 방출하는 스위치로서 구조가 간단하고 제어가 용이한 트리거트론 스파크 갭 스위치(Trigatron Spark-Gap Switch)가 가장 널리 사용되고 있으며 한 쌍의 주 전극과 전극의 중앙에 시동전극이 삽입되어 있다.

트리거트론 스파크 갭 스위치의 시동은 시동전극에 상승시간이 빠른 고전압 펄스를 주어 타운젠트 메커니즘(Townsend-mechanism)을 통해 주 전극에 방전을 유발시키는 것으로, 고전압 시동펄스를 시동전극에 인가하면 절연과피의 물리적 메커니즘에 따라 약간의 시간지연과 주 전극간의 전파가 경과한 후 시동전극의 근방에 스트리머가 형성된다. 이렇게 형성된 하나 또는 몇몇의 스트리머 채널들은 반대전극과 큰 저항(10k $\Omega$ )을 가지고 연결된다. 인가된 전압은 이들 스트리머 채널의 이온화밀도를 계속 증가시켜 주 전극간의 절연성을 현저히 감소시키면 주 전극간에는 불꽃방전이 발생하게 된다[4~6]. 이와 같이 불꽃방전을 유발시키는 방법으로 시동장치를 사용하지 않는 다른 메커니즘을 사용하기도 한다. 즉 열을 가한 다든지 아니면 외부의 충격파(stock wave)를 주입하여 타운젠트의  $\alpha$  계수(충돌전리계수)를 증가시켜 불꽃방전인 아크가 발생되어 주 전극간이 전기적으로 급속하게 투입시킬 수가 있다.

#### 2.1 스파크 갭 스위치의 동작특성

스파크 갭 스위치의 동작특성을 여러 가지 요인에 의해 달라지게 되는데 이 중에서 특히 대표적인 요소가 되는 것을 살펴보면 다음과 같다.

##### 1) 충전전압

스파크 갭 스위치의 지연시간(td)과 Jitter시간(tj)은 충전전압을 증가하게 되면 감소하게 되고, 감소하게 되면 증가하게 된다. 그리고 충전전압이 스파크 갭 스위치 유지전압의 70~80%이하가 되면 td와 tj가 급격히 증가하는 경향이 있으므로 스파크 갭 스위치의 운전전압은 일반적으로 유지전압의 80% 정도에서 운전한다. 하지만 이러한 한계도 시동장치의 시동전압이나 에너지 등을 증가시키면 스파크 갭 스위치의 50%유지전압이하에서도 운전이 가능하다는 보고가 있다.

##### 2) 시동용 펄스전원

지연시간(td)과 Jitter시간(tj)은 시동용 펄스전원의 전압과 에너지가 증가하게 되면 감소하게 되지만 그 영향력은 충전전압에 비해 약하다. 그리고 지연시간(td)과 Jitter시간(tj)은 시동용 펄스전원의 전압 및 에너지이외에도 펄스의 상승시간 및 지속시간 등에도 크게 영향을 받는 주요한 요소이다.

##### 3) 충전전압의 극성

전압극성에 관한 문제는 4가지 경우가 있으나 이들 중에서 시동용 펄스전원의 극성이 정(+)극성이고 충전전압을 부(-)극성일 때 지연

시간(td)과 Jitter 시간을 줄일 수 있다.

4) 전극구조

주 전극의 설계는 주 전극 축 근방의 전계가 균등하게 유지되도록 하고 축상에 전계가 집중되는 구조로 하며 주 전극의 지름은 전극의 운전거리보다 크게되도록 한다.

5) 가스종류

스파크 갭 스위치의 절연 매질은 보통 편리한 공기나 질소를 사용한다. 그러나 높은 전압에 있어서는 절연을 높이기 위하여 SF<sub>6</sub>를 사용하는 경우도 있다.

2.2 트리거트론 스파크 갭 스위치의 특징

1) 장점

트리거트론 스파크 갭 스위치는 td와 tj가 작고, 시동영역은 스파크 갭 스위치 유지전압의 25%까지 제어가 가능할 만큼 넓은 시동영역을 갖고, 구조가 간단하고, 제어가 대단히 용이하다.

2) 단점

시동회로가 주전극회로와 전기적으로 절연되어 있지 않아 시동전극의 전압이 주 전극의 충전전압까지 올라가므로 제어신호와 시스템과의 유기적 절연을 유지시키면서 제어신호가 결합되는 방법이 필요하게 되고, 고속으로 주 전극을 시동시키기 위해서는 주 전극이 투입하는 속도보다 훨씬 상승속도가 빠른 펄스전압이 필요하고, 주 전극간에 아크의 형성에 의해 스위치가 투입되므로 전극에 심한 마모가 발생하게 되고 이러한 전극의 마모는 스위치의 동작에 악영향을 끼친다.

III. 쌍방향 시동방식의 스파크 갭 스위치의 개발

3.1 현재 사용중인 스파크 갭 스위치의 문제점

스파크 갭 스위치의 동작은 그림 3-1(a)에서 나타난 것처럼 상부전극 중앙에 설치된 시동용 전극에 전류영점예측기에서 발생된 시동신호를 광변환기 및 광수신기를 거쳐 고전압 발생장치에서 만들어진 고전압 펄스전원을 주 전극의 시동편에 인가하여 불꽃방전을 발생시키므로써 주 전극간을 전기적으로 투입시키는 방식이다. 따라서 시동전극에 인가되는 시동용 전원의 전압 및 에너지는 스파크 갭 스위치의 운전범위를 정하는 중요한 요소이다. 그러나 현재 사용중인 스파크 갭 스위치의 운전범위는 그림 3-1(b)와 같이 자가방전전압의 80%전압이 시간지연 없이 운전할 수 있는 최대 범위이다. 합성단락시험에서 필요한 스파크 갭 스위치의 운전범위는 차단의 동작책무에 따라 다소 다르긴 하지만 현재의 운전범위로는 상당히 부족한 실정이므로 신뢰성 있는 투입스위치로 사용하는 것은 다소의 운전상의 문제를 가지고 있었다.

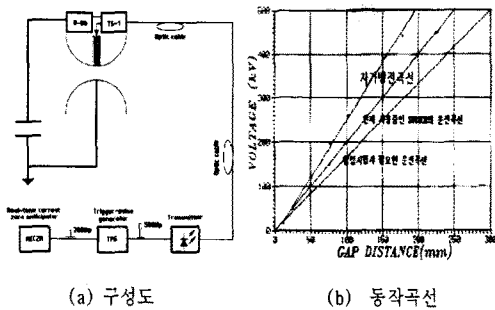


그림 3-1 스파크갭 스위치의 구성도 및 동작곡선

3.2 개발된 스파크갭 스위치의 사양

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 근본적으로 해결하고 시험의 신뢰성 및 시험효율을 제고시키기 위해 기존의 시동장치와 반대의 전극에 또 다른 시동편을 설치하고 시동시간 및 펄스폭의 상승시간이 동일한 장치를 부가함으로써 시동전극의 근방에 스트리머 채널의 이온화 밀도를 급속하게 증가시키므로써 시동편의 이온의 방출과 빛의 조사를 극대화시켜 주 전극간에는 방전으로 인한 도전성이 좋은 프라즈마가 발생하여 비교적 큰 갭거리(운전전압은 자가방전전압의 60%전압)에서 시간지연이나 기타의 오동작 없이 주 전극을 단락하는 고속투입 스위치를 설계, 제작하였고, 표 1에 개발된 시제품의 사양을 현재의 장치와 비교하여 나타내었고, 그림 3-2에는 개발된 시제품의 블록도와 동작특성곡선을 함께 나타내었다.

표 1 스파크 갭 스위치의 동작특성

항목	스파크 갭 스위치의 동작특성		비고
	현재의 장치	개발된 시제품	
직류유지전압	0 ~ 500 kVdc	0 ~ 500 kVdc	동일
운전전압범위	25 ~ 450 kVdc	25 ~ 450 kVdc	동일
통전최대전류	12 kAp	12 kAp	동일
운전전압 영역	80%	60%	20%증가
지연시간	5.0 μs	5.0 μs	동일
Jitter 시간	0.5 μs	0.5 μs	동일

3.3 시동장치의 구성

시동장치의 전체 구성도는 그림 3-3과 같으며 동작은 다음과 같다. 먼저 시험전류의 전류영점을 실시간으로 정확하게 예측하여 스파크 갭 스위치의 시동시점을 결정한 후 시동신호를 Trigger Pulse Generator (TPG)로 전송한다. TPG에서는 동기된 전기신호를 광신호로 변환하여 Trigger Pulse Distributor(TPD)로 전송한다. TPD로 전송된 광신호는 전기신호로 변환 분리한 후 이를 다시 광신호로 변환하여 Trigger Pulse Receiver (TPR)로 전송한다. 전송된 광신호는 TPR에서 다시 전기신호로 변환, 증폭하여 100kV로 만든 다음 High Voltage Pulse Generator System(HVGS)로 전송된다. 이렇게 전송된 시동신호는 마침내 High Voltage Controller System를 시동시켜 주 전극을 전기적으로 단락상태로 만든다.

1) Trigger Pulse Generator System

개발된 스파크 갭 스위치의 TPG System은 전류영점 예측기로부터 동기된 스파크 갭 스위치의 시동신호를 수신 증폭, 정형하는 펄스 발생회로, 이를 광신호로 변환하는 광펄스 구동회로, 출력신호를 Monitoring할 수 있는 출력펄스 Monitor 회로로 구성되어 있다.

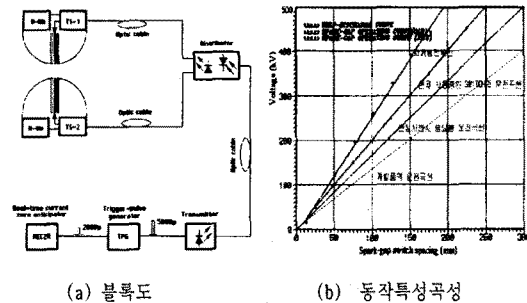


그림 3-2 개발된 스파크 갭 스위치의 블록도 및 동작특성곡선

2) Trigger Pulse Distributer System

TPD system은 TPG System으로부터 송신된 광신호를 전기신호로 변

환하는 고속Trigger Pulse 입력회로, 이를 다시 시동신호로 변환하는 펄스발생회로, 시동신호를 2개로 분리한 후 다시 광신호로 변환하는 광펄스 구동회로와 출력펄스 Monitor회로로 구성되어 있다.

### 3) Trigger Pulse Receiver System

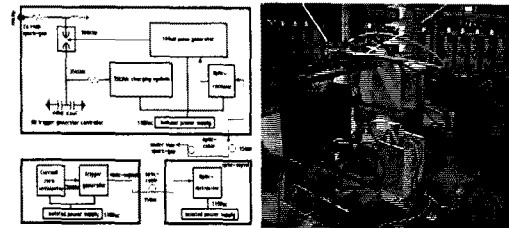
TPD System으로부터 송신된 광신호를 전기적인 시동신호로 변환하는 Fiber Optic입력회로와 이를 다시 HPG의 구동신호로 변환 재생하는 500V 펄스발생회로로 구성되어 있다.

### 4) High Voltage Pulse Generator System

본 System의 구성은 TPD System으로부터 송신된 시동신호를 수신, 증폭 재생하는 Pulse Board와 이를 구동하는 10kV 직류전원 장치와 증폭된 10kV의 시동신호를 HVP System을 구동하기 충분한 전압(100kV)으로 승압시키는 HV Pulse Transformer로 구성되어 있다.

### 5) HV Trigger Controller System

본 System의 구성은 Main Spark Gap Switch를 직접적으로 시동시키기 위해 에너지를 저장 공급하는 35kV 직류충전장치와 충전된 시동에너지를 제어 조정하여 70kV의 Pulse를 발생시키는 과형정형회로로 구성되어 있다.



(a) 구성도 (b) 외형  
그림 3-3 시동장치의 구성도 및 외형

## 3.4 압축공기 발전장치

저압장치로서 대지와는 500kV에서 1500kV까지의 절연을 유지하면서 스파크 갭 스위치에 시동전원을 공급해야 하므로 특별한 방법의 전원 공급장치가 필요하다.

### 1) 제품의 구성

개발된 제품은 Air Motor, 윤활장치, 3상 교류발전기, 제어장치 및 축전기로 구성되어 있고, 장치의 동작은 압축공기가 Air Pressure switch(Air PR S/W)에 입력되면 Inverter를 turn on하고 Inverter의 출력이 solenoid valve를 열게되면 Air Motor에 압축공기를 공급하게 되어 회전력을 얻게된다. 그러면 Air Motor와 축으로 연결된 발전기를 회전시켜 마침내 전기에너지를 발생하게 되는 것이다.

### 2) 압축공기발전장치의 입력과 출력

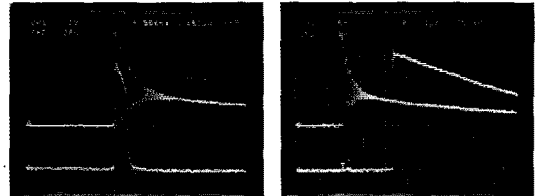
Air Motor의 입력공기의 압력을 4kg/cm<sup>2</sup>(약 60PSIG)로 할 경우 Air Motor의 회전수는 400rpm으로 회전하게 되며 발전기의 회전수는 1200rpm이 된다. 이 때의 공기소모량은 400 l / min가 되며, 이때의 출력전압 및 출력전류는 12Vdc, 7.5A가 되어 출력이 약 90W가 된다.

## IV. 동작특성시험 및 결과검토

본 연구에서 개발된 시제품의 동작특성평가시험은 시동신호 발생장치, 고전압 펄스발생장치 및 실부하 상태에서의 동작특성시험의 순서로 실시하였다.

### 4.1 시동신호 발생장치의 동작시험

시동신호 발생장치의 동작시험은 그림 3-2(a)에서 나타난 구성도를 기본으로 각 Module의 입력파형과 출력파형을 측정하여 그 Module의 동작성능을 평가하였으며, 그 특성시험 평가결과는 다음과 같다. 그림 4-1(a)는 RECZA(real time current zero anticipator)의 출력파형과 TPG의 출력파형을 나타낸 것으로 시간 지연은 거의 없다. 4-1(b)는 TPG의 출력파형과 TPR의 출력파형을 나타낸 것으로 그림에서 알 수 있는 것처럼 시간지연은 2.0 $\mu$ s 정도 발생하였다



(a) RECZA의 출력 및 TPG 출력 (b) TPG 및 TPR의 출력파형  
그림 4-1 시동신호 발생장치 출력파형

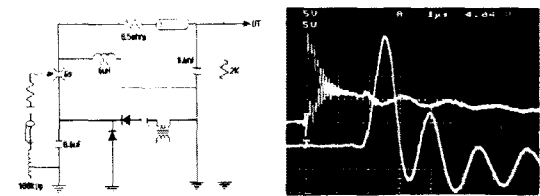
### 4.2 고전압 펄스발생장치의 동작시험

회로의 구성은 다음과 같다. 그림 4-2(a)는 개발된 스파크 갭 스위치의 하부고압 펄스발생장치의 회로도로서 운전효율과 장치의 개발인가를 절감하기 위해 충전 콘덴서를 1-Stage로 구성하고, 회로의 정수는 스파크 갭 스위치의 동작효율을 극대화하기 위해 상부 고압펄스 발생장치의 상승시간과 일치하도록 조정하였다.

그림 4-2(b)는 TPG의 출력과 시동권의 동작상태를 나타낸 것이고, 그림 4-3는 스파크 갭 스위치가 동작할 때의 불꽃방전의 상태를 고속카메라를 이용하여 촬영한 그림이다.

### 4.3 실부하 상태에서의 동작 특성시험

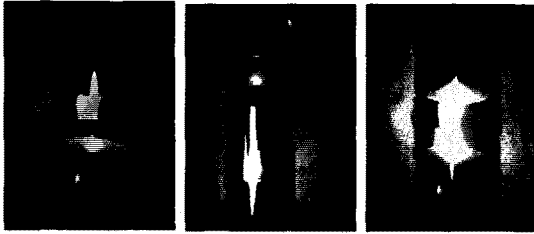
그림 4-4(a)는 실부하 시험의 회로도로서 피시험 차단기(Bt)의 왼쪽은 단락발전기로 구성된 전류원 회로이고, 오른쪽은 콘덴서뱅크로 구성된 전압원회로이다. 스파크 갭 스위치의 동작 시험은 피시험 차단기(Bt)와 보조차단기(Ba)를 개로한 상태에서 전류영점 예측기(RECZA)에서 시동신호를 출력하면 이 시동신호는 여러 단계의 신호변화를 거쳐 스파크 갭 스위치를 동작시키게 된다. 콘덴서뱅크(Cr)에 충전된 전하는 주회로 리액터(Lv)와 과도회복전압(TRV)의 조정회로인 CT와 RT를 통해 방전하게 된다. 본 시험에서의 동작시간 즉, 지연시간 및 Jitter time의 측정은 이러한 동작 스펙스를 각각의 충전전압의 여러 단계에서 수행하여 그 결과를 표 4-1에 나타내었다. 따라서 표 4-1의 시험결과에서 알 수 있는 것처럼 각각의 시험전압에서 실시한 동작시험에서의 스파크 갭 스위치의 평균



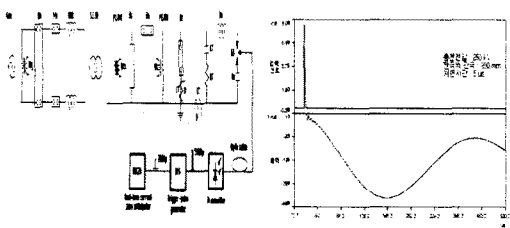
(a)고압펄스발생장치의 회로도 (b)TPG의 출력과 시동권의 동작상태  
그림 4-2 고압Pulse 발생장치의 회로도 및 출력파형

지연시간은 5.0 $\mu$ s이다. 이 지연시간은 시동신호를 발생하여 스파크 갭 스위치까지 전달하는데 소요되는 고유의 시간이 그림 4-1과 4-2

에서 나타난 것처럼 4.5 $\mu$ s이므로 스파크 갭 스위치의 순수한 동작 지연시간은 0.5~1.0 $\mu$ s이고, 지연시간의 편차인 Jitter time는 0.5  $\mu$ s이하가 된다.



(a) 상부갭 시동시 (b) 하부갭 시동시 (c) 쌍방향 시동시  
그림 4-3 개발된 시제품의 동작시 불꽃방전 그림



(a) 시험 회로도 (b) 시험 결과

그림 4-4 스파크 갭 스위치의 실부하 시험 회로도 및 시험결과

표 4-1 스파크 갭 스위치의 동작특성

시동 방식	쌍방향 시동방식		단방향 시동방식		전극의 간극 (mm)
	760 / 760 (J)	760 / 380 (J)	760 (J)	380 (J)	
충전전압					
50 kV	5.0 (us)	-	5.0 (us)	5.0 (us)	24
	4.5 (us)	-	-	-	35
	5.0 (us)	-	-	-	40
	6.0 (us)	-	-	-	50
100 kV	-	-	5.0 (us)	5.0 (us)	50
	4.5 (us)	5.0 (us)	-	-	100
150 kV	-	-	5.0 (us)	5.0 (us)	75
	5.5 (us)	5.0 (us)	-	-	150
200 kV	-	-	4.5 (us)	4.0 (us)	100
	5.0 (us)	5.0 (us)	-	-	200
250 kV	-	-	5.0 (us)	5.0 (us)	125
	5.0 (us)	5.0 (us)	-	-	250

## V. 결 론

본 연구에서는 시동에너지를 스파크 갭 스위치의 양쪽 전극에서 동시에 주입하는 쌍방향 시동방식을 채택함으로써 스파크 갭 스위치의 운전전압을 유지전압의 80%에서 60%까지 확장된 장치를 개발 완료함으로써 합성시험시 투입-차단 책무 및 자동개폐로책무에서 스파크 갭 스위치의 양쪽 전극에는 전류원회로의 시험전압이 증첩되어 인가되므로 발생하던 스파크 갭 스위치의 불안정한 동작을 해

결할 수 있었다.

이로서 합성단락시험의 신뢰성 및 시험효율을 제고시킬 수 있었고, 펄스파워의 발생장치 및 고전압제어 장치 등의 국산화도 함께 완성하여 시험설비의 운전비용도 크게 절감할 수 있을 것으로 기대 된다.

향후 본 연구의 기본기술을 바탕으로 초고압 대용량 차단기의 투입시험설비의 개발 및 연구에 적극 활용할 계획으로 있으며, 고압 제어 장치의 부품의 개발사업도 병행하여 추진할 계획이다.

## 참 고 문 헌

- [1] " IEC-High voltage alternating current circuit breaker " Publication 60056, 1987
- [2] " IEC-Synthetic testing high voltage alternating current circuit breaker " Publication 60427, 1989
- [3] A. Greenwood, "Electrical Transients in power Systems", Wiley-Interscients Pub., John Wiley & Sons, Inc. 1991
- [4] W. James Sarjeant, R. e. Dolling, "High-power electronics", TAB Books inc., 1989.
- [5] 林泉, "고전압 플라즈마공학", 동일출판사, 1997
- [6] 천춘생, "방전고전압공학", 동명사, 1980
- [7] 오길한 편역, "기계방전공학", 경북대학교출판부, 1996
- [8] 전기학회 대전류응용기술조사전문위원회편, "대전류공학 핸드북", 코로나사, 1992
- [9] Gerhard schaefer, M. kristansen, a. Guenther, "Gas Discharge Closing Switches", Plenum Press, 1990
- [10] J. M. Meek, J. D. Craggs, "Electrical Breakdown of Gases", John Wiley & Sons, Inc. 1978