

초고압 SF6 가스 차단기 투입 시 아크접촉자 내전압 특성 연구

Analysis of Withstand Voltage between Arc Contacts of High Voltage SF6 Gas Circuit Breaker in Making Operation

김인길[†] · 이주현* · 정형수** · 박재윤***

(In-gil Kim · Joo-hyun Lee · Hyung-su Jung · Jae-yoon Park)

Abstract - The non-controlled closing of High-voltage SF6 gas circuit breaker can cause transient current and overvoltage in the field. The controlled closing technology is an effective way to reduce transient current and voltage, prevent equipment failures, and improve power quality. For the development of controlled closing, it is obviously necessary to determine the withstand voltage between arc contacts of High-voltage SF6 gas circuit breaker in making operation. This paper focuses on decrease of pressure and density of SF6 gas that can affect withstand voltage between arc contacts in making operation. The dielectric strength between arc contacts could be improved by minimizing the decrement of pressure and density of SF6 gas obtained by simulation and test and moreover the rate of decrease of dielectric strength (RDDS) of arc contacts could be foreseen.

Key Words : Controlled closing, High-voltage SF6 gas circuit breaker, Withstand voltage between arc contacts, RDDS

1. 서 론

차단기의 제어되지 않은 투입에 의해 전력계통에 높은 전압과 과도 전류가 발생 될 수 있다. 이러한 과도현상은 변전소 및 공장 설비 등의 수명을 감소시킬 수 있으며, 보호계전기의 이상 동작과 같은 전력계통에 부정적인 영향을 일으킨다. 이러한 과도현상을 억제하기 위한 방안으로 투입저항이나 리액터, 피뢰기 등이 주로 사용되고 있으나 경제적인 측면이나 제품의 수명을 고려하면 최선의 방법은 아니다. 이를 위해 최근 투입제어 방식이 제안되었고 이 방식은 전력계통과 장비에 많은 이점을 준다. 투입제어 방식은 캐패시터 뱅크나 무부하 송전선로의 투입 시 과전압, 무부하 변압기의 투입 시 돌입 전류 등의 과도현상을 낮춰 줄 수 있다.[1][2] 이러한 투입제어 방식 개발의 중요한 요소들은 차단기의 투입동작 제어와 아크 접촉자 사이의 내전압 감소율(RDDS)의 예측이다. 초고압 SF6 가스 차단기가 투입동작을 진행 할 때의 속도는 차단기의 구조 및 소호방식에 따라 보통 27m/s의 속도를 가지게 되는데, SF6 가스 내부에서 빠른 속도로 움직이는 동적인 조건에서의 절연특성은 일반 정적인 조건에서의 절연특성과 다른 유형의 특성을 가지게 되며 동적인 조건에서의 절연특성을 분석하는 것은 쉽지 않다. 본 논문에서는 실제 사용되고 있는 초고압 SF6 가스 차단기를 이용하여 정적인 조건과 동적인 조건에 대한 내전압

시험을 수행하였으며, 투입 시 아크접촉자의 내전압 특성을 분석하고, 아크접촉자의 내전압 성능에 영향을 미치는 요인과 개선책에 대해 고찰하였다. 또한 이를 바탕으로 아크접촉자 내전압 감소율(RDDS)을 예측 할 수 있었다.

2. 본 론

2.1 투입제어 방식에서의 RDDS(Rate of Decrease of Dielectric Strength)의 중요성

차단기를 투입 제어용으로 적용 시에는 최적의 투입 시점 선정이 필요하게 되는데, 최적의 투입 시점은 일반적으로 과도전압을 억제하기 위한 전압 영점 투입과 과도전류를 억제하기 위한 전압 피크 투입으로 나눌 수 있다. 전압 피크 투입은 전압 영점 투입보다 가혹한 조건이 아니고, 전압 영점 투입을 안정적으로 수행할 수 있다면 전압 피크 투입 또한 가능하므로 이하에서는 전압 영점 투입에 대해서만 설명하고자 한다. 전압 영점 투입 시에는 차단기의 선행아크(Pre-strike)특성이 고려된 상태에서 전류통전(Current Making) 시점이 차단기 아크접촉자 사이에 인가되는 전압 영점에 가능한 한 가까운 영역에서 일어나도록 해야 한다. 즉, 차단기 투입 시 선행아크가 발생하는 순간의 전압인 투입전압(Vm)을 최소화하는 것이 투입제어의 목표라 할 수 있다. 따라서 이때 고려되어야 할 사항으로는 차단기가 투입하는 동안의 아크접촉자의 내전압 감소율(RDDS: Rate of Decrease of Dielectric Strength)과 투입시간의 변화특성(Δt)이 반드시 포함되어야 한다. 그림 1의 (a)와 같이 차단기의 RDDS가 인가전압의 영점에서의 기울기보다 작을 경우($K < 1$), 인가전압 파형과 한점 이상에서 접촉 가능성이 있어 큰 투입전압(Vm)이 발생할 가능성이 존재하게 된다. 그림 1

[†] 교신저자, 정회원 : (주)효성 임원
E-mail : kimik@hyosung.com

* 비 회원 : (주)효성 과장

** 정 회원 : (주)효성 연구원

*** 정 회원 : 경남대 전기공학과 교수

접수일자 : 2012년 2월 15일

최종완료 : 2012년 2월 29일

의 (b)와 같이 차단기의 RDDS가 인가전압의 영점에서의 기울기와 같거나 클 경우($K \geq 1$), 인가 전압파형과 한점에서만 교차하게 되므로 투입전압(V_m)이 나타나게 되는 위치가 전압 영점을 기준으로 대칭한 위치에 존재하게 되어 투입전압(V_m)을 최소화시킬 수 있다.[3][4] 따라서 차단기 투입 시 아크접촉자 사이의 내전압 성능 저하 현상 및 감소율을 예측할 수 있어야 최적의 투입 시점을 선정 할 수 있다. RDDS는 일반적으로 pre-arcing이 발생하는 전압, pre-arcing이 발생하는 순간과 차단부 아크 접점의 기계적 접촉 사이의 시간을 의미하는 pre-arcing 시간으로부터 계산된다.

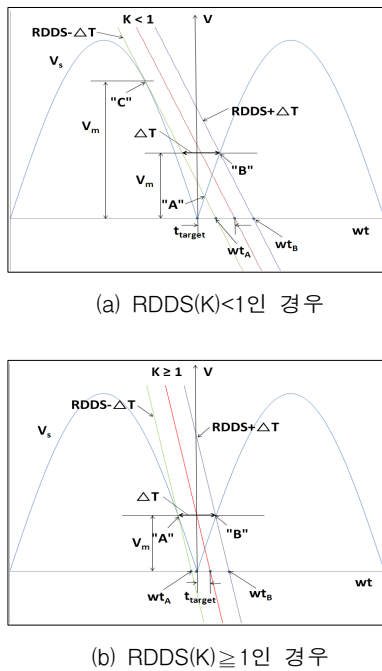


그림 1 차단기 RDDS(K)의 크기에 따른 투입 시점의 영향
Fig. 1 Influence of RDDS(K) for the making instant

2.2 차단기 투입 시 아크접촉자 내전압 성능 검토

초고압 SF6 가스 차단기의 투입 시 아크접촉자의 내전압 성능을 검토하기 위해서는 차단기가 투입 동작을 하는 동안 차단기 내부에서 시간에 따라 변화하는 여러 종류의 파라미터(아크접촉자의 전계강도, SF6 가스의 압력, 밀도, 온도, 속도 등)의 값을 정확하게 분석하는 것이 매우 중요하며, 특히 아크접촉자의 절연내력 변화와 차단부 내부 SF6 가스의 압력과 밀도의 변화 대한 분석은 필수적이다. 그러므로 무부하 조건에서 아크접촉자의 전계강도 변화와 SF6 가스의 압력과 밀도의 변화를 측정하여 해석에 의하여 계산된 해석결과와 실증 시험결과를 상호 비교함으로써 해석결과에 대한 타당성을 검증할 필요가 있다.

2.2.1 투입 시 아크접촉자 사이의 SF6가스 밀도 저하 현상

초고압 SF6 가스 차단기의 내부 구조는 그림 2와 같다. 초고압 SF6 가스 차단기는 트립동작을 수행하는 동안에 파

퍼실린더와 피스톤의 상호작용에 의하여 SF6 가스를 압축하게 되고 이 압축된 SF6 가스를 절연노즐을 통하여 아크접촉자 사이에서 발생한 아크에 분사하여 아크를 소호하는 구조를 가진다. 투입동작을 수행하는 동안에는 트립동작과 반대로 파퍼실린더와 피스톤의 상호작용에 의하여 SF6 가스가 절연노즐을 통하여 파퍼실린더 사이로 흡입하는 구조를 가진다. 이 때 절연노즐 안쪽에 위치하고 있는 아크접촉자 부근의 SF6 가스 압력 및 밀도가 급격하게 저하하는 현상이 발생하게 된다. SF6 가스의 압력 및 밀도 저하로 인하여 아크접촉자의 절연내력도 저하하게 되고 이것은 투입 시 아크접촉자의 내전압 성능 저하를 발생시키는 직접적인 원인이 된다. 투입 시 아크접촉자 내전압 성능을 향상시키기 위해서는 SF6 가스의 유로를 개선하여 아크접촉자 부근에서의 가스밀도 저하현상을 최소화하여 전계의 세기를 완화시켜 짧은 극간 거리에서 절연내력특성을 개선하여야 한다.

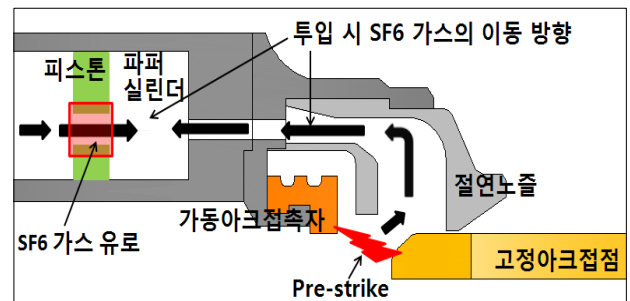


그림 2 초고압 SF6 가스 차단기의 내부 형상
Fig. 2 Inner shape of High-voltage SF6 gas circuit breaker

2.2.2 투입 시 아크접촉자의 내전압 성능 계산

차단기를 투입제어 방식으로 사용할 때에는 차단기에 전류가 거의 공급되지 않는 무부하 조건, 즉 SF6 가스의 온도가 높지 않은 상태가 되므로, 차단기 투입 시 아크접촉자의 내전압 특성 계산식은 기본적으로 냉가스 유동 시의 절연과 전압 예측식[5]과 같다. 그러므로 우리는 아래의 계산식(1)을 통해 아크접촉자의 내전압 성능을 예측하였다. 여기서 V_{bd} 는 내전압, A는 실험상수, ρ 는 SF6 가스의 밀도, |E|는 100V 인가 시 전계강도이다. 이하에서는 실험상수 A값의 특징과 밀도 예측방법 및 전계해석에 의한 전계강도 계산방식에 대해 논의한다.

$$V_{bd} = A \times \frac{\rho^{0.7}}{|E|} \quad (1)$$

2.2.3 밀도 예측

많은 연구를 통해 차단부 아크접촉자 간의 내전압이 가장 낮은 부위는 고정아크접촉자 표면이라는 사실이 알려졌다. 고정아크접촉자 표면의 경우 매우 작고 매끄러운 곡선 형태의 가공이 되어 있기 때문에 압력센서를 설치하기 위한 Hole 가공 등을 할 경우 센서 설치로 인한 측정값의 왜곡이

일어날 가능성이 매우 크다. 우리는 센서를 고정아크접촉자에 설치하여 압력을 측정된 결과와 센서가 설치된 형상을 고려한 해석결과의 Validation을 실시하고 동일한 해석 절차를 이용하여 센서가 설치되지 않은 모델링에 대한 유동해석을 실시하여 차단부 고정아크접촉자 표면에 대한 SF6 가스 밀도를 그림 3과 같이 예측하였다. 유동해석에 사용한 툴은 Ansys CFX Ver. 12.1로 정확도 향상을 위해 3D quarter 모델을 사용하였다.

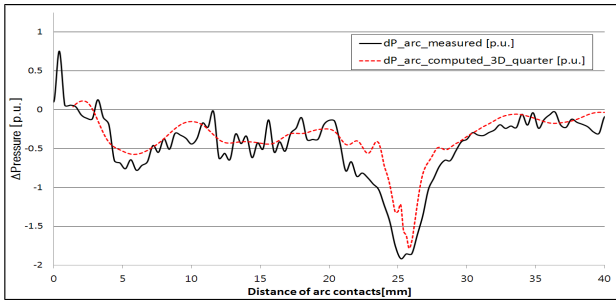


그림 3 고정아크접점에서의 압력 실측 및 해석 결과 비교
 Fig. 3 Comparison of pressure testing and calculating at a fixed arc contact

2.2.4 실험상수 A의 예측

차단기의 아크접촉자 거리에 따른 파괴 전압을 측정하기 위해 그림 4와 같이 장치를 구성하여 시험을 수행하였고, 이 시험을 통하여 내전압 계산식의 주요 실험상수 A를 예측하였다. 차단부의 아크접촉자 거리를 2~20mm까지 2mm간격으로 변경해가며 AC전압을 인가하여 파괴 전압을 측정하였다. 그림 5는 각각 다른 Class에서 사용되고 있는 2종류의 초고압 SF6 가스 차단기의 극간 거리별 절연파괴 전압을 측정된 결과이며, 종축은 절연파괴 전압(1 p.u. : 차단기 정격 전압), 횡축은 아크 접촉자의 거리를 나타낸다. 차단기 (가)와 (나)의 차이점은 표 1과 같다. 그림 6은 아크접촉자 거리에 따른 절연파괴 전압을 이용하여 실제 투입특성에 맞게 시간도메인으로 변환하여 그린 RDDS 그래프이다. RDDS는 차단기 아크 접점 거리에 따른 절연파괴 전압과 차단기 투입시 속도에 의해 계산되었으며, 투입시 SF6 가스의 압력 및 밀도 변화는 없는 것으로 가정하였다. 이 시험을 통해 차단기 (가)의 RDDS(K)는 1.25, 차단기 (나)의 RDDS(K)는 1.24임을 알 수 있다.

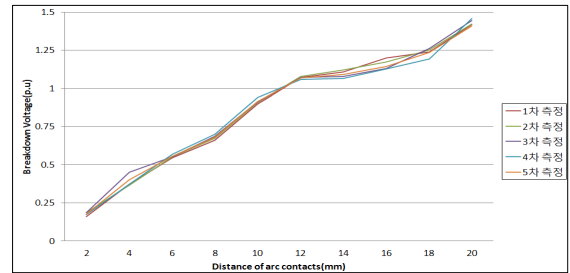


그림 4 아크접촉자 거리에 따른 내전압 시험
 Fig. 4 Withstand voltage test at different distance between arc contacts

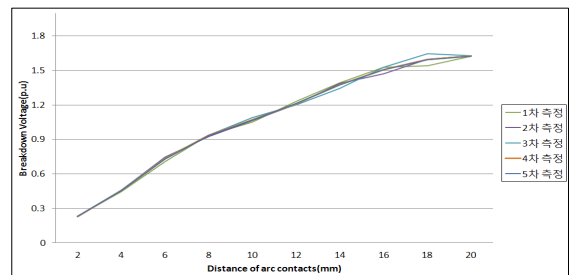
표 1 차단기 (가), (나) 비교

Table 1 Comparing with circuit breaker (가) and (나)

구분	차단기 (가)	차단기 (나)
투입 속도	1 p.u.	1.5 p.u.
투입 시 SF6 가스 유로 단면적	1 p.u.	0.5 p.u.
고정아크접점 외경	1 p.u.	1.2 p.u.
가동아크접점 내경	1 p.u.	1.3 p.u.



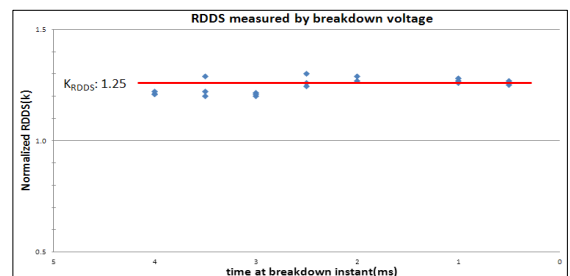
(a) 극간거리별 내전압 측정결과 : 차단기 (가)



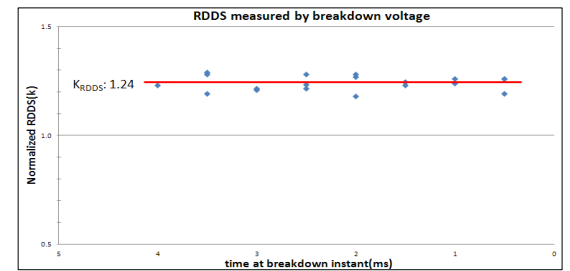
(b) 극간거리별 내전압 측정결과 : 차단기 (나)

그림 5 차단기 (가), (나)의 극간거리별 내전압 측정결과

Fig. 5 Withstand voltage measurement at different distances between arc contacts of circuit breaker (가), (나)



(a) 차단기 (가)의 RDDS 그래프



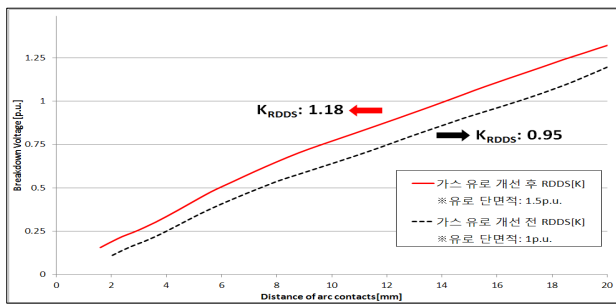
(b) 차단기 (나)의 RDDS 그래프

그림 6 차단기 (가), (나)의 아크접촉자 내전압 감소율(RDDS)

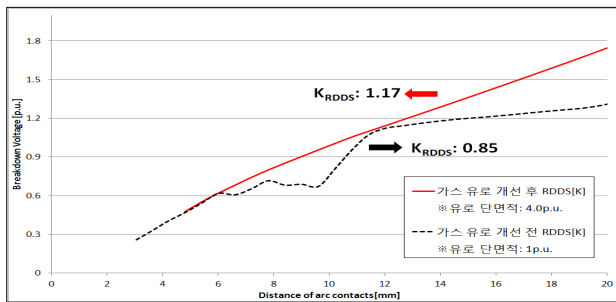
Fig. 6 RDDS between arc contacts of circuit breaker (가), (나)

2.3 투입 시 아크접촉자 내전압 감소율(RDDS) 계산

그림 7은 2.2절에서 고찰하였던 파라미터(유동해석을 통해 예측된 밀도 값과 2.2.4절의 시험에서 특정된 실험상수 A값 그리고 전계해석을 통한 전계강도)를 이용하여 계산된 차단기 (가), (나)의 투입 시 아크접촉자 내전압 성능 감소율(RDDS)이다. 흑색 점선은 SF6 가스 유로를 개선하기 전의 내전압 성능 감소율이며, 투입 시 압력 및 밀도 저하로 인하여 국지적인 내전압 성능 저하 현상이 있음을 보여주고 있다. 적색 실선은 그림 2에서 표현한 SF6 가스 유로의 단면적을 늘려 투입 시 아크접촉자 부근의 SF6 가스 압력 및 밀도가 저하하는 현상을 개선한 내전압 성능 감소율이며, 차단기 (가)의 RDDS(K)는 1.18, 차단기 (나)의 RDDS(K)는 1.17이다.



(a) 차단기 (가)의 아크접촉자 내전압 감소율(RDDS) 그래프



(b) 차단기 (나)의 아크접촉자 내전압 감소율(RDDS) 그래프

그림 7 투입 시 아크접촉자 내전압 감소율(RDDS) 계산 그래프
Fig. 7 RDDS between arc contacts in making operation by calculation

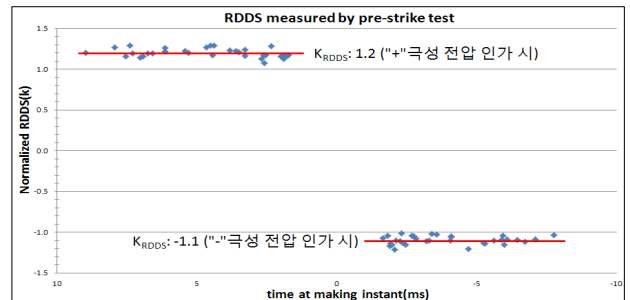
2.4 투입 시 아크접촉자 내전압 감소율(RDDS) 실증 시험

상기 차단기의 아크접촉자 내전압 감소율(RDDS) 예측을 위한 해석의 정합성을 위해 규격 IEC 62271-302와 CIGRE working group 13.07(Controlled switching of HVAC circuit breakers)에 준하여 그림 8과 같이 한국전기연구원 에서 검증 시험을 수행하였다. 차단기 극간에 초고압이 인가된 상태에서 아크 접점이 기계적으로 접촉되는 때를 순간적으로 측정하는 것은 어렵다. 그래서 동작특성 커브와 아크 접점이 기계적으로 접촉되는 시간은 전압이 인가되지 않은 상태에서 측정하였고, pre-arcing 시간은 전압이 인가된 상

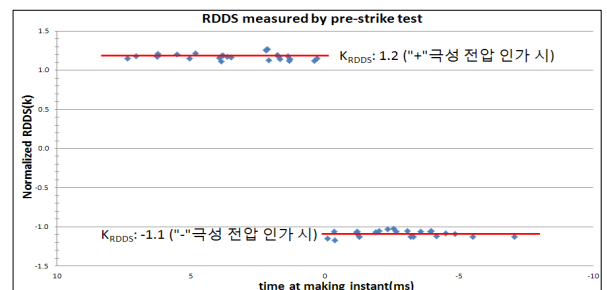
태에서 pre-strike 시간을 측정한 후 전압이 인가되지 않은 상태에서 측정된 파라미터를 이용하여 계산하였다.[6][7] 그림 9는 차단기 (가), (나)의 측정 결과를 보여준다. 그림 9의 일직선은 시험 결과를 근사치한 것이며, 각 차단기의 RDDS를 나타낸다. 차단기 (가), (나) 모두 (+)극성 전압을 인가하여 시험한 RDDS가 (-)극성 전압을 인가하여 시험한 RDDS보다 큰 것을 알 수 있다. 이것은 고기압의 SF6 가스 중에서는 (-)극성의 파괴전압이 (+)극성의 파괴전압보다 낮게 되기 때문이다.[8] 아크접촉자 거리에 따른 파괴 전압을 이용하여 계산된 RDDS와 비교하면 차단기 (가)의 경우 약 4%의 오차가 있었으며, 차단기 (나)의 경우 약 3%의 오차가 있었다. 이것은 2.2.1절에 논의 되었듯이 차단기 투입 시 발생하는 SF6가스의 밀도 저하로 인한 아크접촉자의 내전압 감소에 따른 오차이다. 유동해석을 통해 예측된 밀도 값과 특정된 실험상수 A값 그리고 전계해석을 통한 전계강도를 이용하여 계산된 RDDS와 비교하면 차단기 (가), (나) 모두 약 1%의 오차가 있었다.



그림 8 RDDS 실증 시험(한국전기연구원)
Fig. 8 RDDS verification test(KERI)



(a) 차단기 (가)의 RDDS 그래프



(b) 차단기 (나)의 RDDS 그래프

그림 9 차단기 (가), (나)의 아크접촉자 내전압 감소율(RDDS)
Fig. 9 RDDS measurement between arc contacts at circuit breaker (가), (나)

3. 결 론

본 논문에서는 각각 다른 Class에서 사용되고 있는 2종류의 초고압 SF6 가스 차단기에 대하여 투입 시 아크접촉자 부근의 SF6 가스 압력 및 밀도 저하로 인한 아크접촉자 사이의 내전압 성능 저하 현상 및 개선책에 대해 고찰하였다. 또한 유동해석을 통해 예측된 SF6 가스 밀도 값과 특정된 실험상수 A값 그리고 전계해석을 통한 전계강도를 이용하여 아크접촉자 내전압 감소율(RDDS)을 예측하였고, 실증 시험한 결과로부터 약 1%의 차이를 보이는 것을 알 수 있었다. 향후 개발할 투입제어 차단기에도 동일한 방식을 적용한다면 설계에 많은 도움이 될 것이다. 차단기는 72.5kV~800kV까지 다양한 전압 Class를 가지며, 소호방식도 단순과퍼방식, 복합소호방식 등 다양한 방식을 가지므로 각각의 전압 Class, 소호방식에 따라 투입 시 아크접촉자의 내전압 성능을 예측하는 연구가 향후 진행되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] CIGRE TF13.00, "Controlled Switching, A State-of-the-Art Survey Part 1", ELECTRA, No.162, pp.65-96, 1995.
- [2] CIGRE TF13.00, "Controlled Switching, A State-of-the-Art Survey Part 2", ELECTRA, No.164, pp.39-61, 1996.
- [3] CIGRE WG 13.07, "Controlled Switching of HVAC Circuit-Breakers, Guide for Application Part 1", ELECTRA, No 183, pp 43-73, April 1999.
- [4] CIGRE WG 13.07, "Controlled Switching of HVAC Circuit-Breakers, Guide for Application Part 2", ELECTRA, No.185, pp.37-57, August 1999.
- [5] 김홍규외 4인, "SF6 가스차단기의 소전류 차단성능 해석", 대한전기학회 논문지, Vol. 55B, No. 10, pp. 528-533, 2006.
- [6] H. Hamada외 7인, "RDDS(rate of decrease of dielectric strength) measurement for gas circuit breaker", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002, Vol. 3, pp. 1755-1759, Oct 2002.
- [7] H. Kohyama외 6인, "Development of 550kV and 362kV synchronous switching gas circuit breaker", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition 2001, Vol. 1, pp. 597-602, 2001.
- [8] 김익수, "초고압 전력기기의 최적설계를 위한 가스중 절연특성 연구", 한국전기연구원, pp. 64-66, 1995.

저 자 소 개



김 인 길 (金麟吉)

1986년 인하대 전기공학과 졸업, 2004년 아주대 경영대학원 MBA(석사), 현재 (주)효성 임원
 관심분야 고전압/대전력 응용
 E-mail : kimik@hyosung.com



이 주 현 (李周紘)

2002년 한양대 전자공학과 졸업, 현재 (주)효성 차단기개발팀 근무
 관심분야 고전압/대전력 응용
 E-mail : joo486@hyosung.com



정 형 수 (鄭亨洙)

2008년 고려대 기계공학과 졸업, 현재 (주)효성 차단기연구팀 근무
 관심분야 고전압/대전력 응용
 E-mail : mirageno01@hyosung.com



박 재 윤 (朴在潤)

1986년 경남대 전기공학과 졸업, 1991년 인하대 전기공학과 대학원(박사), 1996년 McMaster University 응용물리학과 post-doc, 2007년 Princeton University 화학과 교환교수, 현재 경남대 전기공학과 교수, 입학처장
 관심분야 고전압 응용, 신재생에너지
 E-mail : Jypark@kyungnam.ac.kr