

# 개선된 자기소호회로와 아크전압 억제회로를 사용한 유도성 부하의 직류차단 특성 실험

이성민<sup>1</sup>, 김효성<sup>†</sup>

## Experiment on DC Circuit Breaker for Inductive Load by Improved Magnetic Arc-extinguisher and Arc-Attenuation Circuit

Sung-Min Lee<sup>1</sup>, and Hyo-Sung Kim<sup>†</sup>

**Abstract** - Recently, DC distribution systems become hot issues since DC type loads increase rapidly according to the expansion of IT equipment such as computers, servers, and digital devices; DC type loads will cover 50% for all electricity loads in 2020 which was mere 10% in 2000<sup>[1,2]</sup>. DC distribution systems are also accelerated by the expansion of renewable power systems since they are easy to be interfaced with DC grids rather than AC grids. However, removing the fault current in DC grids is comparably difficult since the current in DC grids has non zero-crossing point like in AC grids.<sup>[3]</sup> Thus, developing dedicated DC circuit breakers for DC grids is necessary to get safety for human and electrical facilities<sup>[4]</sup>. Magnet arc extinguishing method is proper to small size DC circuit breakers<sup>[5,6]</sup>. However, simple Magnet arc extinguishing method is not enough to break inductive fault currents. This paper proposed a novel DC circuit breaker against inductive fault current defined by IEEE C37.14-2004 Standard for Low-Voltage DC Power Circuit Breakers Used in Enclosures. The performance of the proposed DC circuit breaker was verified by an experimental circuit breaker test system built in this research.

**Keywords:** AC distribution, DC distribution, DC circuit breaker, arc-extinguisher, arc-attenuation

### 1. 서 론

최근 들어 디지털 제품의 급증으로 인해 직류를 사용하는 부하가 증가하고 있고, 또한 신재생 에너지 발전 등 직류형태의 분산발전기술이 확산됨에 따라 직류 배전망에 대한 관심이 높아지고 있다<sup>[1,2]</sup>. 하지만 직류는 교류와 달리 전류가 일정하게 흐르므로 부하측에서 단락 사고가 발생하는 경우 지속적으로 발생하는 아크전류를 차단하기가 어렵다. 따라서 인체의 안전과 전력설비 및 기기의 안전성을 확보하기 위해서는 고장전류로부터 계통을 보호하기 위한 적절한 차단기술의 개발이 필요하다<sup>[3,4]</sup>.

회로차단기는 점점양단에 발생하는 아크전압의 크기

가 중요한 변수가 된다. 또한 부하전류가 매 반주기마다 스스로 제로가 되는 교류배전망과, 그렇지 않고 부하전류의 값이 일정한 크기로 흐르는 직류배전망에서 회로차단기의 동작상황은 확연히 달라진다. 그림 1에서 보이는 바와 같이, 교류전류의 경우 매 반사이클마다 전류가 스스로 제로가 되는 점이 발생하므로 사고전류 차단이 비교적 용이하다고 볼 수 있다. 그러나 직류전류의 경우 사고전류가 스스로 제로가 되지 않으므로 차단기는 높은 아크전압 발생을 통하여 전류의 흐름을 억제하여야 하므로 상대적으로 차단이 어렵다. 직류배전망에서 회로차단기가 충분한 아크전압을 확보하지 못하고 사고전류의 지속적 흐름을 허용하게 되면 대형 화재사고로 이어질 수 있는 가능성이 있다. 이는 많은 장점을 갖고 있음에도 불구하고 직류배전망의 보급을 저해하였던 중요한 요인 중의 하나이다.

소규모 직류 회로 차단기의 차단특성을 개선하기 위한 아크소호 기법으로서 자기적 회로에 의한 아크소호 기술이 있다<sup>[5,6]</sup>. 자기적 아크소호기술은 전류와 자력선의 역학관계를 이용한 기술로서, 전류 차단시 발생하는

Paper number: TKPE-2012-17-6-4 ISSN: 1229-2214

<sup>†</sup> Corresponding author: hyosung@kongju.ac.kr, Div. of Electrical, Electronic and Control Eng., Kongju Nat'l University  
Tel: +82-41-521-9167 Fax: +82-41-563-3689

<sup>1</sup> Dept. of Electrical, Electronic and Control Eng., Kongju National University

Manuscript received Jul. 31, 2012; accepted Sep. 19, 2012

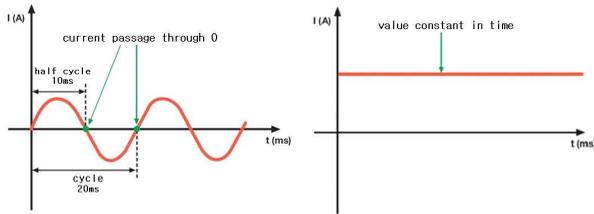
아크전류의 흐름과 직각방향으로 자력선을 형성시켜서 아크전류가 휘어지도록 하여 아크전류의 궤적이 길어지도록 유도함으로써 아크전류를 신속히 소호시킨다. 그러나 단순한 자기적 아크소호기술은 일반적인 유도성 부하 전류에 대하여는 충분한 아크소호력을 확보하지 못한다.

본 논문에서는 일반적인 유도성 부하에서의 효과적인 직류차단을 위하여 자력선집중회로를 개발하여 자기적 아크소호력을 개선하는 방식을 제시한다. 또한 유도성 부하에 의해서 발생하는 지속적인 아크전압의 발생을 억제하기 위하여 다이오드와 저항의 직렬회로에 의하여 아크에너지를 발산시키는 전기적 아크소호기술을 제안한다. 제안된 이론에 대하여 IEEE C37.14-2004 밀폐형 저압직류 회로차단기 표준에 따른 유도성 부하 직류차단특성 실험 장치를 구축하고 실험을 통하여 그 성능을 검증 한다.

## 2. 직류차단 동작원리

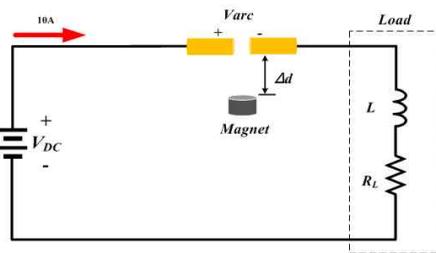
### 2.1 자기회로에 의한 아크소호 기술

제안한 자기적 아크소호 기법은 자석에서 형성되는 자력선을 전기 접점에서 발생하는 아크전류의 흐름과



(a) AC source (b) DC source

Fig. 1 The type of electric power sources



(a) Structure of magnetic arc-extinguisher



(b) Fleming's left hand rule

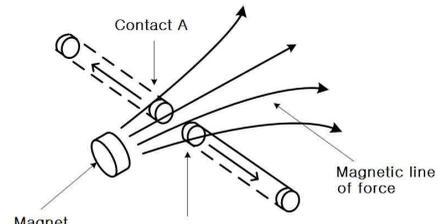
Fig. 2 Principles of arc-extinguisher

직각으로 배치한다. 그러면 아크전류에는 그림 2b와 같이 플레밍의 왼손 법칙에 따른 자기력이 가해지게 되어 아크가 공간으로 분산됨으로써 아크저항 값이 증가하게 된다. 따라서 아크에너지가 빨리 소모되어 차단시간이 줄어드는 효과를 기대할 수 있다.

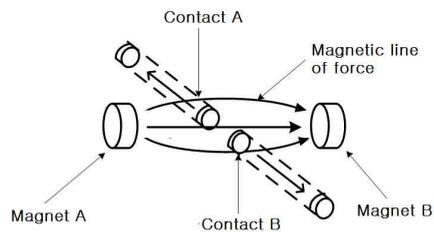
자기적 아크소호를 일으키는 자기력의 세기는 자석밀도의 크기에 비례한다. 그림 3a에서 단일자석을 사용하는 경우, 자속은 방사상으로 퍼져나가므로 접점과의 이격거리가 증가함에 따라 전기접점에서의 유효한 자속밀도는 거리의 제곱에 반비례하여 감소한다. 다시 말해, 자기적 아크소호력을 증가시키기 위해서는 자석과 전기접점간의 이격거리를 짧게 하여야한다. 그러나 자석이 접점과 너무 가깝게 설치되면 부하전류 차단시 발생되는 아크전류에 의하여 자석이 고온에 노출되어 자성을 잃어버리는 사고가 자주 발생한다. 따라서 그림 3b와 같이 전기접점을 사이에 두고 아크소호용 자석을 탠덤구조로 이중배치 함으로써 전기접점에서의 유효자속밀도는 높게 유지하면서, 접점과 자석간의 이격거리는 여유 있게 유지할 수 있는 방법을 제안한다.

### 2.2 저항-다이오드에 의한 아크전압 억제회로

인덕터를 포함하는 유도성 부하의 경우, 부하전류를



(a) single magnet



(b) tandem type dual magnets

Fig. 3 Principle of tandem magnets to increase magnet flux density at contacting points

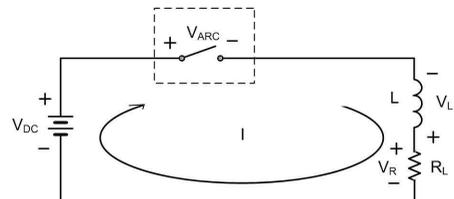


Fig. 4 Increase of arc voltage from inductive loads

차단하는 순간 인덕터에서는 매우 높은 자기유도 전압(역기전력)이 발생된다. 그림 4의 아크소호모델에 키르히호프의 전압법칙을 적용하면 차단기에 걸리는 아크전압은 식(1)과 같이 간단히 계산할 수 있다.

$$V_{ARC} = V_{DC} + V_L - IR_L \quad (1)$$

단,  $V_{DC}$  : 정격전원전압

$L$  : 부하회로의 등가인덕턴스

$R_L$  : 부하회로의 등가저항

$V_{ARC}$  : 아크전압

$V_L = L \frac{di}{dt}$  : 회로차단시 부하 인덕터에서 발생하는 자기유도 전압

식(1)에서 인덕터에서 발생하는 역기전력은 수천볼트에 이를 수도 있다. 이러한 역기전력은 차단기 접점의 아크전압을 증가시키기기 때문에 차단기에 심각한 손상을 초래하기도 하고 심지어 유도성 부하의 시정수에 따라서는 차단불능상태에 이르게 할 수도 있다. 이는 전기 화재로 이어질 가능성이 있으므로 매우 위험하다.

부하 인덕터에 의한 역기전력이 차단기 접점의 아크전압에 영향을 미치는 것을 막기 위하여 그림 5와 같이 다이오드와 저항을 사용한 아크전압제한회로를 제안한다. 아크전압제한회로는 부하 인덕터에서 부하전류의 변동에 따른 역기전력이 발생하려고 할 때 부하전류를 다이오드-저항 회로로 바이패스시킴으로써 역기전력의 크기를 제한시킨다. 이 때 차단기 전기접점에 발생하는 아크전압은 식 (2)와 같이 계산된다.

$$V_{ARC} = V_{DC} + IR_D \quad (2)$$

식 (2)에서 알 수 있는 바와 같이 부하 인덕터에 의한 역기전력이 제거됨으로 차단기 전기접점에 가해지는 아크전압은 현격히 감소한다. 다만  $R_D$ 에서의 전압강하성분  $IR_D$ 이 조금 추가된다. 식 (2)에서  $R_D$ 는 다이오드에 직렬로 연결된 저항으로서 차단직전 부하 전류 값과의 곱에

의한 전압강하  $IR_D$ 가 발생되어 아크전압을 증가시키는 요인이 된다. 반대로  $R_D$  저항은 부하전류가 빨리 영이 되도록 부하 인덕터에 저장되어 있는 에너지를 방출해주는 기능이 있다. 따라서  $R_D$ 의 값을 적당히 조정함으로써 부하전류의 감소기울기를 조정하고, 차단기 접점에서 발생하는 아크전압을 허용범위 내로 제한시킬 수 있다.

### 2.3 제안된 직류차단기

그림 6에 최종적으로 제안된 직류차단기의 개념을 보인다. 자석과 자극편으로 구성되는 두 세트의 자석에 의하여 전기접점과 직각방향으로 자기소호회로를 만들어 준다. 직류차단기의 출력단자에는 그림에서와 같이 병렬로 다이오드-저항회로를 접속하여 부하전류의 감소기울기를 조정하고, 차단기 접점에서 발생하는 아크전압을 허용범위 내로 제한시켜준다.

## 3. 직류차단 특성 실험

### 3.1 직류차단 실험장치 구성 및 실험조건

직류차단 특성 실험용 직류전원은 외부환경요인을 최소화하고, 안정된 전원전압을 유지하기 위하여 12V<sub>DC</sub>의 공칭전압과 40Ah의 공칭용량을 갖는 납산 배터리 25대를 직렬로 연결하여 300V<sub>DC</sub>의 배터리 뱅크를 구성하였다.

실험용 유도성 부하는 저항과 인덕터로 구성되어 있기 때문에 부하 저항은 회로에 10A의 전류를 흘려주기 위한 30Ω으로 선정하였고, 부하 인덕턴스는 IEEE Standards C37.14에서 규정한 차단기의 내구성 시험조건의 시정수 0.02s~0.06s를 만족하기 위하여 600mH의 인덕턴스를 적용하였다. 이때의 시정수는 식 (3)과 같이 계산된다.

$$time\ constant = \frac{L}{R} \quad (3)$$

표 1은 직류차단 특성 실험을 위한 조건을 보인다.

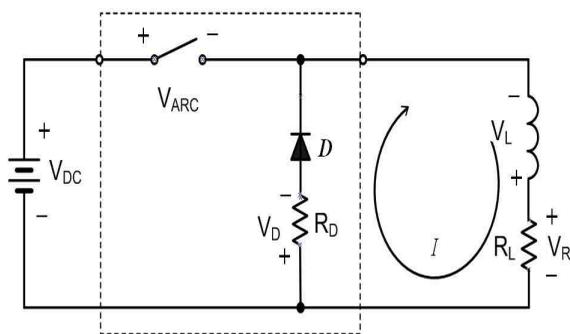


Fig. 5 Arc voltage attenuation by diode-resistor circuit

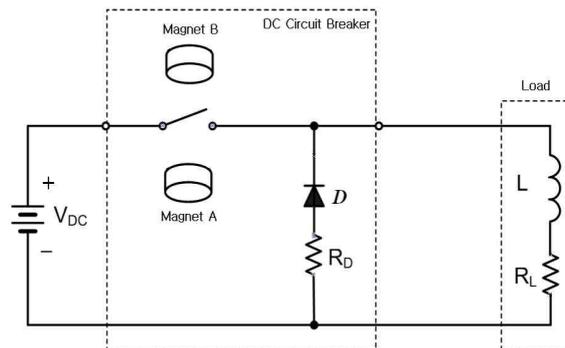


Fig. 6 Proposed DC circuit breaker

Table 1 Parameters of circuit breaker experiment system

Parameters	Value
V <sub>in</sub>	300[V <sub>DC</sub> ]
R <sub>Load</sub>	30[Ω]
L <sub>Load</sub>	600[mH]
Load Current	10[A]
Contact type	Cu
Contact moving speed	50~150[mm/sec]
Magnet type	NdFeB

그림 7은 직류차단 특성 실험을 위하여 실제로 구성된 Test Bed를 보인다.

3.2 실험결과

그림 8은 본 연구자 그룹에 의하여 연구된 바 있는 그림 2a)와 같은 기존의 자기적 아크소호 기법<sup>[6]</sup>을 이용한 직류회로차단기에 의한 유도성 부하에서의 차단 실험 결과이다. 예상한 바와 같이 차단이 이루어지는 시점에 약 1300V의 아주 높은 자기유도 전압이 발생되고, 차단 시간 또한 70ms로 지연되는 것을 볼 수 있다. 이러한 높은 아크전압과 긴 차단시간은 화재사고로 발전하여 인명과 재산상의 피해를 촉발할 수 있다.

높은 자기유도 전압 발생을 막고 차단시간을 줄이기 위하여 본 논문에서는 그림 6으로 제안된 직류 차단기 구조를 적용하여 실험을 진행하였다. 그림 9는 그에 따른 실험 결과 파형을 보인다. 제안된 직류 차단기 구조에 의해 아크전압은 311V, 차단시간은 22ms로 현격히 줄어드는 것을 확인하였다.

그림 10은 그림 2a)의 기존의 아크소호 차단극 구조와 그림 6의 본 논문에서 제안한 차단극 구조에 대한 차단극 이송속도에 따른 차단 특성 실험 결과를 각각의 그래프로 비교하여 나타내었다. 차단극의 이송속도가 빨라짐에 따라 차단시간이 선형적으로 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 하지만 150mm/sec이상의 차단극 이송속도에서는 차단시간이 크게 줄어들지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

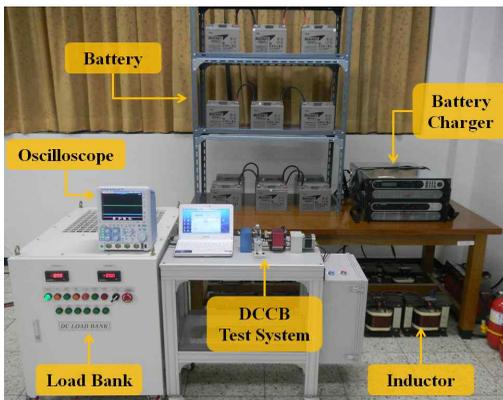


Fig. 7 DC Circuit Breaker Test bed for inductive loads

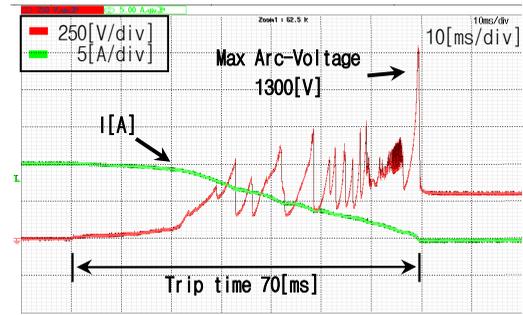


Fig. 8 Experiment for Inductive load by conventional magnet arc extinguishing circuit (magnet distance: 20[mm], break velocity: 150[mm/sec])

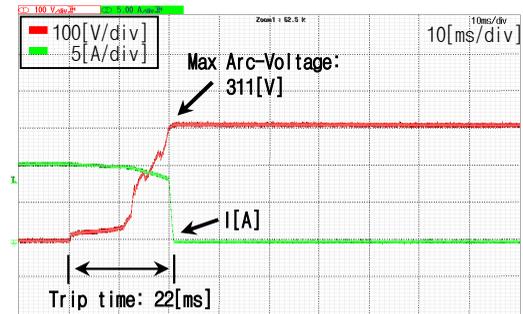
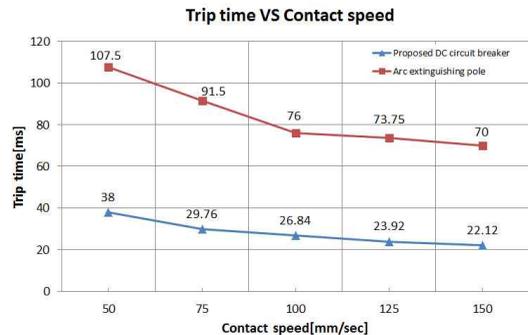
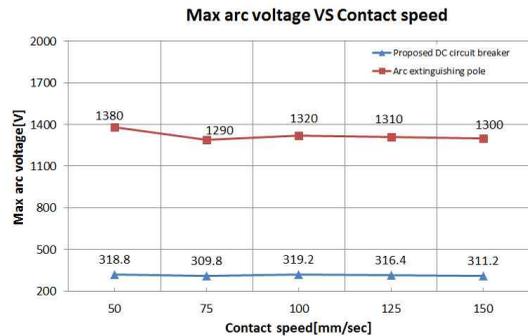


Fig. 9 Experiment for Inductive load by proposed arc extinguishing circuit (magnet distance: 20[mm], break velocity: 150[mm/sec])



(a) Trip time[ms]



(b) Max Arc-Voltage[V]

Fig. 10 Experiment for Inductive load according to each arc extinguishing circuit (magnet distance: 20[mm], break velocity: 150[mm/sec])

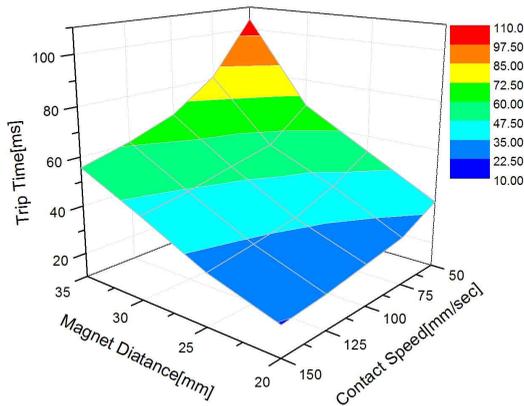


Fig. 11 DC breaking characteristics at inductive load

그림 11은 차단극의 이송속도 및 자석과 차단극 접점 간의 이격거리에 따른 실험결과를 나타내었다. 차단극의 접점과 자석과의 이격거리가 가까워짐에 따라 차단시간이 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 자석과 차단극의 이격거리가 20mm이내의 경우 유도성 부하 실험 조건에서 차단시 발생하는 높은 아크전류에 의해서 자석이 손상되는 일이 발생하기 때문에 20mm이하로 접근시키는 것은 바람직하지 않다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 유도성 부하에서 직류회로차단기의 차단 시간과 아크전압을 줄이기 위한 목적으로 개발된 집중형 자기소호회로와 아크전압 억제회로를 사용한 차단기 구조를 제안하였고 그에 따른 특성 실험을 하였다.

실험 결과 집중형 자기소호회로와 아크전압 억제회로는 기존의 단순한 아크소호 차단극에 비하여 차단 시간이 약 70ms에서 약 22ms로 3배 이상 빨라졌으며, 아크전압은 약 1300V에서 약 311V로 1/4배 이하로 감소되었다.

집중형 자기소호 회로는 자석 두 개를 사용하여 나란히 배치함으로써 차단접점에서 자기력을 극대화하여 차단시간 개선 효과를 보였다. 또한 다이오드와 저항을 이용한 아크전압 억제회로를 사용하여 유도성 부하에서의 아크전압을 획기적으로 개선하는 효과를 실험적으로 검증하여, 제안한 차단극의 우수성을 확인하였다.

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2012R1A1A2039747). 본 논문은 차세대 IDC 테스트 베드 연구 No. 1003524 지원에 의하여 수행되었음

#### 참 고 문 헌

- [1] Hyo-sung Kim, "DC distribution systems and circuit breaking technology," *The Journal of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 15, No. 5, pp. 40-46, 2010. 10.
- [2] T.Babasaki, T.Tanaka, Y.Nozaki, T.Aoki, F.Kurokawa, "Developing of Higher Voltage Direct -Current Power-feeding Prototype System," *INTELEC 2009. 31st International*, pp. 1-5, 2009.
- [3] Giovanna Postiglione, DC Distribution System for Home and Office, Master thesis on Department of Electric Power Engineering, Chalmers, Glothenburg, Sweden, 2001.
- [4] Kyung-ho Lee, "Prospect of DC distribution systems and safety issues," *The Journal of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 14, No. 2, pp. 21-26, 2009. 4.
- [5] S.Baek, T.Yuba, K.Kiryu, A.Nakamura, H.Miyazawa, M.Noritake, K.Hirose, "Development of plug and socket-outlet for 400 volts direct current distribution system," *Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), 2011 IEEE 8th International Conference on*, pp. 218-222, June. 2011.
- [6] Sung-min Lee, Hyo-sung Kim, "Development of DC Circuit Breaker using Magnet Arc Extinguisher," *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 17, No. 1, pp. 21-26, 2012. 2.
- [7] C37.14-2002, IEEE Standard for Low-Voltage DC Power Circuit Breakers Used in Enclosures, 2002.
- [8] IEC 60947-2 Ed.40, Low-voltage switchgear and controlgear - Part 2: Circuit-breakers.
- [9] IEC 60898-1, Electrical Accessories-Circuit-Breakers for Overcurrent Protection for Household and similar Installations-Part 1: Circuit-Breakers for A.C. Operation, Vol. 28, pp. 105-112, 1992, January/February.
- [10] C37.16-2000-IEEE standard for preferred ratings, related requirements, and application recommendations for low-voltage AC (635 V and below) and DC (3200 V and below) power circuit breakers.



#### 이성민(李誠民)

1983년 3월 26일생. 2011년 공주대 전기전자 제어공학부 졸업. 2011년~현재 동 대학원 전기전자제어공학과 석사과정.



#### 김효성(金孝城)

1958년 10월 20일생. 1981년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 충북대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~1997년 일본 오까야마 대학 방문교수. 1999년~2000년 덴마크 연구부교수. 1987년~현재 공주대 전기전자제어공학부 교수.