

자기적 아크소호 기법을 이용한 직류 차단기 개발

이성민¹, 김효성[†]

Development of DC Circuit Breaker using Magnet Arc Extinguisher

Sung-Min Lee¹, and Hyo-Sung Kim[†]

Abstract - In recent years, DC distribution systems are becoming hot issue due to the increase in digital loads and DC generation systems according to the expansion of renewable energy technologies.^[1,2] However, removing the fault current in DC grids is comparably difficult since the current in DC grids has no zero-crossing point like in AC grids.^[3] Thus, developing dedicated DC circuit breakers for DC grids is necessary to get safety for people and electrical facilities.^[4] This paper proposes magnet arc extinguishing method to develop a 300[V_{DC}]/10[A] DC circuit breaker. The performance of the proposed DC circuit breaker was verified by an experimental circuit breaker test system built in this research.

Keywords : DC circuit breaker, Magnet arc extinguisher, AC distribution, DC distribution

1. 서 론

백여 년 전 에디슨과 테슬라사이에 직류와 교류의 전기시스템에 대한 논쟁이 있던 후, 현재에 이르기까지 교류시스템이 채택되어 사용되어 왔다.^[5] 사실 당시는 직류 전압을 높이기 위한 신뢰할 수 있는 방법이 없었고 전기에너지를 멀리까지 전송할 수 없었기 때문에 교류를 채용할 수밖에 없었다. 그 이후 교류 배전방식은 사용이 널리 보급되면서, 3상의 회전자계 발생이 교류전동기의 운전에 적합한 점과 교류방식의 일관된 운용으로 편리성과 합리성이 널리 확립되었다.

그러나 현대에 와서는 전력전자 변환기술의 발전으로 말미암아 직류 전압을 높이고 낮추는데 제약이 낮아졌고, 회전기의 효율도 교류전동기보다 오히려 BLDC모터와 같은 직류전동기의 경우가 더 우수한 경향이다. 더욱이 교류배전은 직류배전에 비하여 다음과 같은 문제점이 있는 것으로 나타난다.

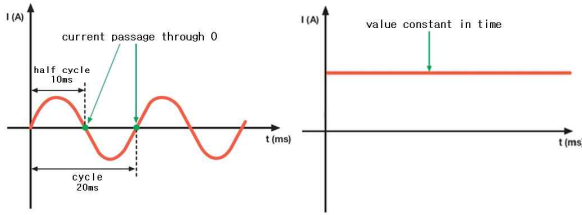
- 표면효과 및 코로나손실 발생
(손실, 실효저항 및 절연비용의 증가를 초래)

- 직류전송에 비해 계통의 안정도 저하
- 페란티 현상에 따른 배전선 말단 전압의 변동 발생
- 주파수가 다른 계통끼리는 연결 불가
- 통신선 유도장애 발생

이에 대하여 직류배전의 장점은 다음과 같다.

- 전력변환기 수의 최소화를 통한 전체 효율 증가
- 수전단 변압기의 불필요로 무부하시 손실 감소
- 수변전설비의 경량화 및 공간 감소
- 신재생에너지자원의 고효율 및 고신뢰성 연계
(직류발전 2~10% 효율 증가)
- 무정전부하의 대응 편이성
 - 기존의 UPS(AC/DC+Battery+DC/AC)로 대응
 - 직류의 경우 직접 접속(Battery 공용 사용)
 - 저렴한 고신뢰성 전원(Premium power) 확보가능
 - 전력변환 과정 생략으로 인한 신뢰성 확보 및 에너지 손실 감소^[6]
- 확장성: 무정전 증설 가능(Hot swap)
- 고효율 조명과 전자기기의 연계(LED 조명 등)
- Home Automation과의 시너지 효과 창출
 - 전력선을 통한 옥내 랜(LAN) 구성이 용이
- 인체 안전성
 - 동일전류일 경우 교류보다 직류가 인체에 미치는 영향이 적음 (반복적 근육수축이완 현상 없음)
 - 가정용의 경우, 낮은 수준의 직류 전압을 채택할 경우, 감전의 측면에서 매우 유리

Paper number : TKPE-2012-17-1-4
[†] Corresponding Author : hyoskim@kongju.ac.kr, Div. of Electrical, Electronic and Control Eng., Konju University
¹ Dept. of Electrical, Electronic and Control Eng., Konju University
 Manuscript received Sep. 9, 2011; accepted Dec. 21, 2011
 — 본 논문은 2011년 전력전자학술대회 우수추진논문임



(a) 교류전원 (b) 직류전원
그림 1 전원의 종류

Fig. 1 The type of electric power sources

- 전자기파 영향의 감소
- 전기품질의 향상: 교류체계에서의 전압강하, 주파수 동요, 과도현상 등의 영향 감소
- 가정용에 1개의 고효율 대용량 전력변환기로 대체, 기존 다수의 저효율 어댑터 불필요

더욱이 디지털사회로 이행하고 있는 현대사회에서 대부분의 전자기기의 최종 전력소비는 직류형태이므로 반드시 교류로 전력을 공급할 필요성은 점점 더 적어지고 있다.

이와 같이 직류배전에 대한 관심이 고조되고 있는 가운데, 직류 배전망의 안전성에 관한 문제도 지속적으로 제기되고 있다. 안전성은 두 가지 측면에서 확보가 이루어져야 한다. 첫째로 인체 안전성이고, 둘째로 전력설비 및 기기의 안전성이다. 전력설비 및 기기의 안전성을 확보하고, 고장전류로부터 계통을 보호하기 위한 차단기술, 낙뢰, 절연고장 등으로부터 계통을 보호하기 위한 접지기술 등이 필요하다.

저압 배전망에서 기존에 사용되던 대표적인 보호 차단기술은 퓨즈(Fuse)와 회로차단기(Circuit breaker)이다. 퓨즈는 전류의 실효값(RMS)에 따른 열에너지에 의해 용융되어 동작 하므로 교류전류와 직류전류에서 특성에 큰 차이가 없다.

그러나 회로차단기는 접점양단에 발생하는 아크전압의 크기가 중요한 변수가 된다. 또한 부하전류가 매 반주기마다 스스로 제로가 되는 교류배전망과 달리 부하전류의 값이 일정한 크기로 흐르는 직류배전망에서 회로차단기의 동작상황은 확연히 달라진다.

그림 1에서 보이는 바와 같이 교류전류의 경우 매 반 사이클마다 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. 만약 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 저해하여왔던 중요한 요인 중의 하나이다.

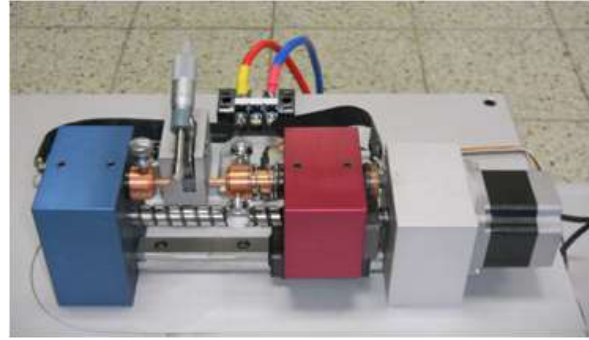


그림 2 직류 회로 차단기의 외관

Fig. 2 Photo of DC circuit breaker

본 논문에서는 전용 직류 회로 차단기로서 자기적 아크소호 기법을 이용한 차단기 구조를 제안한다. 제안한 차단기는 자석의 자기력을 이용한 차단기로서 기존의 차단기에 비하여 매우 빠른 차단시간 특성을 갖는다. 제안한 차단기의 성능을 검증하기 위하여 실험 장치를 구축하고, 네 가지로 구성된 차단극에 대하여 비교실험 및 분석을 한다.

2. 직류 차단실험 장치 구성

2.1 전원전압

직류 차단기 실험용 직류전원은 외부환경요인을 최소화 하고, 회로 차단 시 발생하는 서지전압과 서지 전류 등의 악조건에서도 안정된 전원전압을 유지하기 위하여 납산 배터리를 사용 하였다. 12[V_{DC}]의 공칭전압과 40[Ah]의 공칭용량을 갖는 납산 배터리 25대를 직렬로 연결하여 300[V_{DC}]/40[Ah]의 배터리뱅크를 구성 하였다.

2.2 배터리 충전시스템

배터리는 방전함에 따라 단자전압이 감소하게 되어 중국에는 방전불능상태에 이른다. 따라서 정기적으로 보충충전이 필요하다. 300[V_{DC}]의 공칭전압을 갖는 납산배터리의 운전전압 범위는 250[V_{DC}]~360[V_{DC}]정도가 된다. 이러한 범위에서 PWM컨버터로 구성되는 충전 장치를 동작시키기 위한 교류 선간전압은 약 180[V_{AC}] 정도가 요구된다.

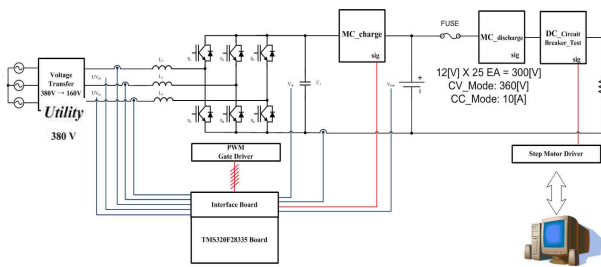
따라서 380[V_{AC}]:180[V_{AC}]의 강압용 절연변압기로 PWM컨버터의 교류 측 선간전압을 낮추어 공급한다. 또한 충전동작 중에는 차단실험을 할 수 없도록 인터로킹을 걸어 PWM컨버터를 보호하였다.

2.3 직류 회로 차단기

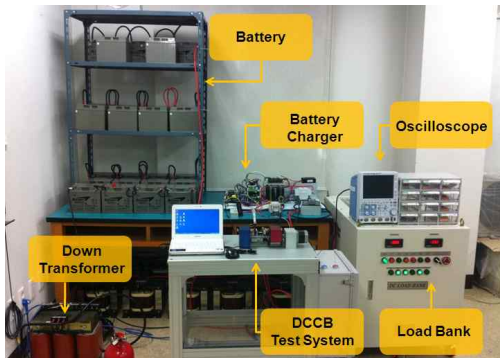
그림 2는 직류 회로 차단기의 외관이다. 본 연구의 대상은 인터넷 데이터센터(IDC)를 위한 300[V_{DC}] 배전계통에 적용할 수 있는 직류전용차단기이다. 전형적인 IDC의 부하는 서버로서 5[A]이하의 부하전류를 요구한다.

표 1 펄스 값 설정에 따른 차단극의 선속도
Table 1 Line speed of the circuit breaker by setting pulse ratio

pitch	펄스 값[rev/sec]	선속도[mm/sec]
10mm	2500	50
	3750	75
	5000	100
	6250	125
	7500	150



(a) 직류 차단실험 장치 구성도



(b) 직류 차단실험 장치 테스트 베드

그림 3 직류 차단실험 장치 구성도 및 테스트 베드
Fig. 3 DC circuit breaker schematic and Test bed

따라서 본 연구에서는 여유를 고려하여 $300[V_{DC}]/10[A]$ 의 정격부하전류에 대한 차단기의 설계를 한다. 먼저 순수한 차단극 구조에 대하여 다양한 차단극 이송속도에 대한 차단특성을 파악하고, 새로운 차단극 구조를 제안하여 차단특성을 개선하도록 한다.

차단극의 이송속도에 따른 차단 특성을 알아보기 위하여 5상 스텝모터를 사용하여 차단속도를 제어한다.

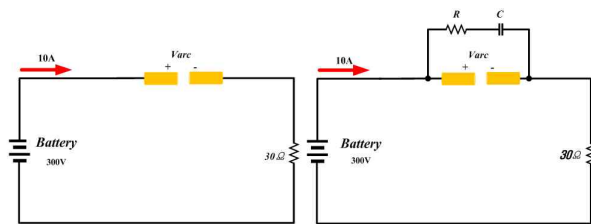
구동모터의 1회전 당 볼스크류의 진행거리는 $10[mm]$ 이고, 구동모터는 500펄스 일 때 1회전 한다. 따라서 펄스 값 설정에 따라 차단극의 선속도가 결정된다.

표 1과 같이 펄스 값을 차단극 제어용 프로그램에 입력하면 차단극의 이송속도를 다양하게 설정하여 실험을 진행 할 수 있다.

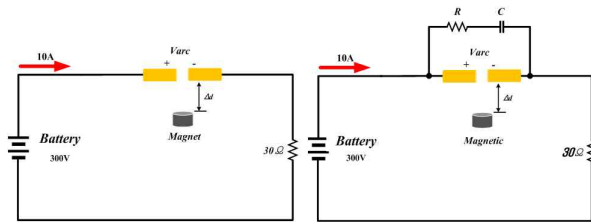
그림 3은 직류차단실험 장치 구성도 및 실험을 위하여 실제 구성한 테스트 베드를 보인다.

표 2 차단실험 조건
Table 2 Parameters of circuit breaker experiment system

Parameters	Value
배터리 전압	$300[V_{DC}]$
부하 저항	$30[\Omega]$
부하 전류	$10[A]$
차단극	구리(Cu)
차단극 이송속도	$50 \sim 150[mm/sec]$
스너버회로	$R=33[\Omega], C=22[\mu F]$



(a) 순수 차단극 (b) 스너버 부착 차단극



(c) 자기적 아크소호 차단극 (d) 하이브리드형 차단극

그림 4 차단극의 구조
Fig. 4 Circuit breaker structure

3. 직류 회로 차단실험

3.1 직류 차단실험 조건

직류 차단실험에서의 파라미터는 표 2에서 보이는 바와 같은 조건으로 실험을 하였다.

IT설비의 부하는 저항부하로 간주할 수 있기 때문에, 본 실험에서도 저항부하를 사용하여 실험을 진행 하였다.

그림 4의 차단극 구조에서 보이는 바와 같이 첫 번째로 순수한 차단극만 사용하여 실험을 진행 하였고, 두 번째로 스너버회로를 사용하여 그에 따른 특성을 알아보았다. 세 번째로, 본 논문에서 제안한 자기적 아크소호 기법을 이용한 차단 실험을 진행하여 제안한 차단극의 성능을 확인하였다.

3.2 자기적 아크소호 기법

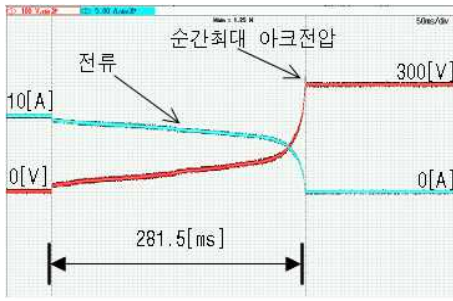
본 논문에서 제안한 자기적 아크소호 기법은 자석에서 형성되는 자력선을 아크전류 흐름방향과 직각으로

표 3 자석사양
Table 3 Magnet Specification

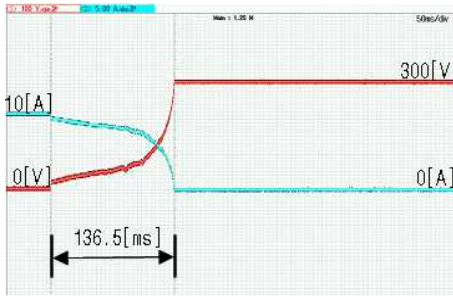
Parameters	Value
Type	네오디뮴(NdFeB)
Grade	N35
Size	지름: 8[mm] 두께: 10[mm]

표 4 순수 차단극 실험결과
Table 4 Experimental result of pure pole

이송속도 [mm/sec]	차단시간 [ms]	순간최대 아크전압[V]
50	281.5	329
75	169.5	308
100	144.5	321
125	141.0	363
150	136.5	335



(a) 차단극 이송속도 50[mm/sec]



(b) 차단극 이송속도 150[mm/sec]

그림 5 차단극 이송속도에 따른 실험 결과
Fig. 5 Experimental result according to pole movement speed

배치한다. 그러면 아크전류에는 플레밍의 왼손 법칙에 따른 자기력이 가해지게 되어 아크가 공간으로 분산됨으로써 아크 저항 값이 증가하게 된다. 따라서 아크 에너지가 빨리 소모되어 차단시간이 줄어드는 효과를 기대할 수 있다.

표 3은 실험에서 사용한 자석의 사양을 나타내었다.

4. 실험결과

4.1 순수 차단극

그림 5는 순수 차단극만 사용한 차단 실험 결과이다. 차단기가 차단을 시작하게 되면 부하전류는 10[A]에서 0[A]로 하강 하게 된다. 이때 시간을 측정하여 차단 시간을 기록하게 된다. 또한 차단이 이루어지는 시점에서 순간 최대 아크전압이 발생한다.

표 4는 순수 차단극만 사용하였을 경우 차단극 이송 속도에 따른 결과를 보여준다. 차단극의 이송속도가 빨라짐에 따라 차단시간이 빨라진다. 하지만 전체적인

표 5 스너버 차단극 실험결과
Table 5 Experimental result of snubber pole

이송속도 [mm/sec]	차단시간 [ms]	순간최대 아크전압[V]
50	278.5	312
75	160.5	308
100	141.5	311
125	143.5	310
150	136.5	312

결과를 보면 차단극의 이송속도가 100[mm/sec]이상일 경우에는 차단시간이 크게 개선되지 않는다.

4.2 스너버 부착 차단극

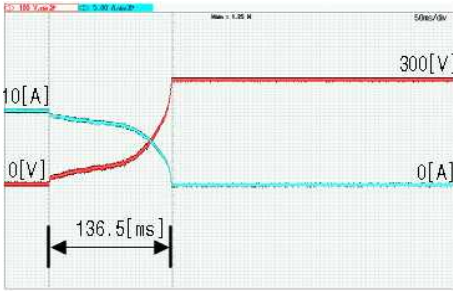
표 5는 스너버회로를 적용하였을 때의 실험 결과이다. 순수 차단극 실험결과와 비교 하여 보면 차단극 이송 속도에 따른 차단시간은 순수 차단극 실험과 같거나 비슷하다. 따라서 차단시간 개선에 스너버 사용은 효과가 없음을 알 수 있다.

다만 순간적인 최대 아크전압은 순수 차단극만 사용하였을 경우의 평균 331.2[V] 보다 약간 개선된 310.6[V]인 것을 확인 할 수 있었다. 이 실험에서도 차단극 이송속도를 증가함에 따라 차단시간이 선형적으로 줄어들었지만, 100[mm/sec]이상에서는 차단시간이 줄어들지 않고 오히려 더 늘어나는 것을 확인 할 수 있었다.

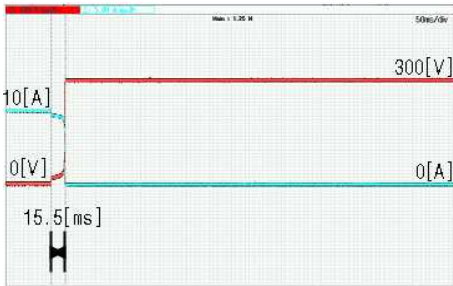
4.3 자기적 아크소호 차단극

본 실험에서 차단극 접점과 자석과의 이격거리에 따른 특성을 알아보기 위하여, 차단극 접점과의 이격거리를 25[mm]~10[mm]의 범위에서 5[mm]씩 변경하며 실험을 진행하였다.

실험 결과 차단 시간은 평균 20.4[ms]이고, 아크전압은 평균 322[V]이다. 순수 차단극 차단 실험에 비하여 차단 시간이 약 150[ms]이상 개선된 것을 확인 하였고, 자기적 아크소호 기법 차단실험의 우수성을 실험적으로 입증하였다.



(a) 스너버 부착 차단극 결과



(b) 자기적 아크소호 차단극 결과(자석이격거리: 10[mm])

그림 6 차단극 종류에 따른 실험 결과
(이송속도: 150[mm/sec])

Fig. 6 Experimental result on pole type
(line speed: 150[mm/sec])

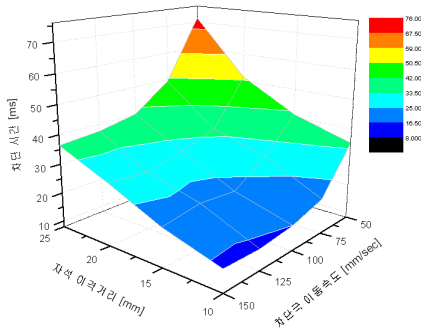


그림 7 자기적 아크소호 차단극 차단특성
Fig. 7 Characteristics of magnet arc extinguish pole

그림 7은 자석과 차단극 접점과 이격거리에 따른 차단특성을 보여준다. 그림 7에서 보이는 바와 같이 자석이 차단극 접점에 가까워질수록 차단시간이 줄어드는 것을 확인 하였다. 하지만 10[mm]이내의 간격에는 자석이 아크전압에 의해 손상 되는 경우가 발생하므로 10[mm]이하로 접근시키는 것은 바람직하지 않다.

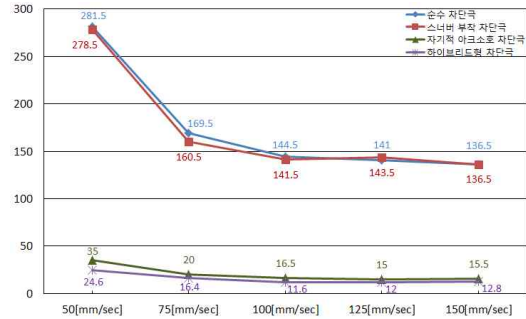
4.4 하이브리드형 차단극

앞 절의 실험을 통하여 각각 차단 방법에 따른 차단특성과의 관계를 확인 하였다. 실험 결과를 토대로 스너버회로와 자기적 아크소호 기법을 결합시키면서 차단시간 개선과 아크전압 개선의 효과가 있을 것으로 예상된다.

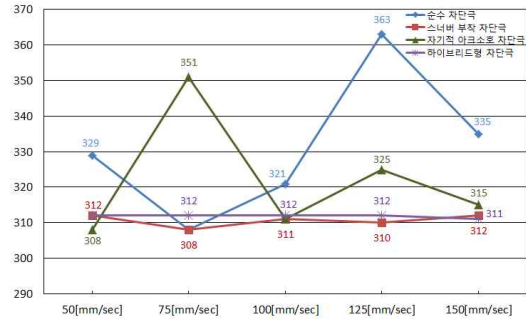
표 6 하이브리드 차단극 실험 결과(이격거리: 10[mm])

Table 6 Experimental result of hybrid pole

이송속도 [mm/sec]	차단시간 [ms]	순간 최대 아크전압[V]
50	24.6	312
75	16.4	312
100	11.6	312
125	12	312
150	12.8	311



(a) 차단시간 특성(자석이격거리 10[mm])



(b) 아크전압 특성(자석이격거리 10[mm])

그림 8 차단극 종류에 따른 차단특성

Fig. 8 DC circuit breaker characteristics on pole type

하이브리드형 차단극을 사용한 실험 결과, 표 6에 보이는 바와 같이 차단 시간은 평균 15.48[ms]로 자기적 아크소호기법 차단극보다 차단시간이 개선되는 효과를 보았고 아크전압도 평균 312[V]로 일정하게 측정되는 것을 확인하였다. 따라서 하이브리드형으로 직류차단기를 구성하였을 때, 차단시간과 최대 아크전압이 개선되는 것을 실험적으로 검증하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 네 가지 구조의 직류 차단기에 대한 차단극 이송속도의 차단 특성과 자석의 이격거리에 따른 차단 특성을 파악 하였다. 그에 따른 특성은 그림 8에서 보이는 바와 같다.

스너버회로를 사용한 직류 차단 실험에서는 순수 차단 실험에 비해 차단 시간을 개선하지 못하였지만, 최대 아크전압을 일정한 값을 가지도록 개선하는 효과가 있었다.

약 150[ms] 이상의 더 빠른 차단 시간을 갖는 것을 확인함으로써, 제안한 차단기 구조의 성능을 실험적으로 입증하였다. 또한 스너버 차단기와 자기적 아크소호 차단기를 결합한 하이브리드형 차단기 구조에 대한 실험을 진행하여 차단시간과 아크전압을 동시에 개선하였다.

본 논문에서 제안한 자기적 아크소호 차단기의 우수성을 실험적으로 검증 하였다.



이성민(李誠民)

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



김호성(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 오카야마대학 방문교수. 1987년~현재 공주대 전기전자제어공학부 교수.

주대 전기전자제어공학부 교수.

본 논문은 2011년 교육과학기술로부터 지원받아 수행된 연구임(지역거점연구단육성사업/에너지자립형 그린빌리지핵심기술사업단)

본 논문은 차세대 IDC 테스트 베드 연구 No. 1003524 지원에 의하여 수행되었음

참 고 문 헌

- [1] 김호성, "직류(DC)배전과 회로 차단기술", *전력전자학회 학회지*, 제15권, 제5호, pp. 40-46, 2010. 10.
- [2] T. Babasaki, "Developing of Higher Voltage Direct-Current Power-feeding Prototype System", *Intelec'09*, 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] Seungseok BAEK, "Development of plug and socket-outlet for 400 volts direct current distribution system", *Conference record on ICPE-2011*, pp. 218-222, 2011, June.
- [5] 이경호, "직류(DC)배전 동향 및 안전대책", *전력전자학회 학회지*, 제14권, 제2호, pp. 21-26, 2009. 4.
- [6] 박영훈, 백은미, "광양제철소 DC 배전시스템 적용 사례," *전력전자기술대회*, pp. 216, 2009. 7.
- [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.
- [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.