

DC 차단기의 하이브리드 아크 소호 기법에 관한 연구

A Study on the Hybrid Arc Extinguishing Mechanism of the DC Circuit Breaker

주남규 · 김남호*

강원대학교 전기전자공학과

Nam-Kyu Joo · Nam-Ho Kim*

Department of Electrical and Electronic Engineering, Kangwon National University, Gangwon-do 200-701, Korea

[요 약]

손쉬운 제어성, 운용성 등 다양한 이유로 디지털 부하가 급증하고 있고 이와 함께 부하의 소비 패턴은 직류화 되고 있다. 그러나 공급되는 전력은 교류 전원이므로 실질적으로 필요로 하는 부하의 공급 전원이 직류 전원을 만족하기 위하여 교류 전원을 다시 직류로 변환하여 사용하고 있다. 태양광, 풍력, 연료전지 등 신재생 에너지원의 경우 직류 발전을 하는 발전원으로 교류로 변환을 통해 계통에 유입되고 다시 직류로 변환되어 부하에 공급하게 되는 다단 변환을 하게 되어 손실은 지속적으로 증가하게 된다. 에너지원의 효율적인 사용을 위한 직류 기반의 배전 시스템이 필요로 하나, 부하뿐만 아니라 보호 기능을 구현하기 위한 직류 배선용 차단기의 개발이 필요하다. 이에 본 연구에서는 영구 자석을 이용한 아크 소호 기술과 하이브리드 아크 소호 기술을 이용한 직류 아크 소호 기술에 대한 연구를 통하여 안정적인 직류 배전 시스템 운용을 위한 계통 및 기기 보호가 가능할 것으로 기대된다.

[Abstract]

Digital load is increasing suddenly for various reasons, such as easy control and management. Accordingly, a consumption pattern of load is becoming DC. However, the power supply is supplied by AC power. The load power supply substantially needs DC power. AC power has to be converted to DC power. Renewable energy sources like solar, wind and fuel cells are DC power generation, but the transfer needs to through by AC power, thus DC power has to be converted to AC power. Resultantly, a multi-stage conversion loss is constantly increasing. The power distribution system of DC-based is required for effective use of these energy sources. This requires a DC load, as well as is necessary to develop DC breaker. This study is expect for system and equipment for reliable DC power distribution through the study of the arc extinguish technology for direct current a hybrid arc extinguishing technology with permanent magnets technology.

Key word : Arc, Breaker, DC, Digital load, Distribution.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2015.19.3.250>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 9 June 2015; Revised 9 June 2015
Accepted (Publication) 23 June 2015 (30 June 2015)

*Corresponding Author ; Nam-Ho Kim

Tel: +82-31-329-5294

E-mail: nhk@kangwon.ac.kr

I. 서론

인류 문명의 발전과 함께 기술의 발전은 산업사회에서 컴퓨터를 대표로 하는 정보화 사회로 변화되고 있고, TV, 세탁기, 시스템 에어컨 등 다양한 전자 기기와 LED 조명 등과 같은 조명 시설이 삶의 편의성에 있어 매우 중요한 부분이 되어 사용되고 있다. 그러나 이러한 기기들은 직류 기반의 기기들이기 때문에 교류 기반의 전력 설비에서 공급을 받아 직류로 변환하여야 하므로 어쩔 수 없는 변환 손실이 발생한다. 또한 이러한 교류를 발생시키는 발전 에너지원으로 화석연료를 사용하고 있으나, 우리나라의 경우 100% 수입에 의존하고 있어, 2011년도 에너지 수입액이 1,695억불로 국내 주력 수출 품목인 반도체, 자동차, 선박의 총합 수출액인 1,495억불을 상회하고 있어 국가, 사회적으로 매우 큰 손실을 발생한다.

이러한 이유로 신재생 에너지의 발전 비율을 높일 필요성이 증대되고 있으나, 신재생에너지를 대표하는 태양광, 연료전지, 풍력 등은 직류 발전을 하기 때문에 직류를 교류로 교류를 다시 직류로 변환하는 다변환 시스템이고 그에 따른 변환 과정에서 발생하는 손실은 30%에 달한다.

손실을 저감하기 위해 인터넷데이터센터에서는 직류배전을 통해 교류 배전 시스템과 비교해본 결과 최소 13.2%에서 최대 25%까지 매우 높은 효율을 향상할 수 있었다 [1].

에너지의 최적화 사용을 위해서 공항과 같은 다중이용시설의 경우 조명을 LED등으로 변환을 통하여 조명에서도 효율이 향상된다.

그러나 효율성을 위한 직류 배전을 위해서는 부하설비의 직류화, 직류에 대한 보호기기들이 안정적으로 조합이 이루어져야 편리하고, 효율적이며, 안전하게 사용할 수 있다 [2].

하지만 직류는 교류와 달리 전류가 일정하게 흐르기 때문에 고장전류가 발생하게 되면 안정적으로 차단을 하기가 어려워 기존의 AC용 보호기기를 사용하여 DC를 차단 및 보호하는 방식은 보호 기기 수명을 보장할 수 없고, 대용량 기기를 사용하여 하기 때문에 비용적, 공간적 손실이 많이 발생하게 된다. 이를 해결하기 위하여 DC 아크 소호에 적합한 소호 기술에 대한 기술 개발이 필요하여 영구자석 등을 통한 아크 소호 기술을 개발하고 있다 [3],[4].

II. 아크 소호 기술

2-1 단락 용량 증대 기술

전원용량의 증대 등으로 단락 용량은 계속 증가하는 추세이고, 이에 따라 차단기에 부과되는 동작 책무는 더욱더 가혹해지고 있다 [5]. 이러한 성능을 만족하기 위한 차단기로써의 기능요건을 크게 3가지로 분류 하면 (1) 투입 상태에서 양호한 도체이어야 한다. 따라서 정상 상태 또는 단락 상태와 같은 이상 조건

하에서 열적/구조적으로 견디어야 한다. (2) 개방 상태에서 양호한 절연체이어야 한다. 따라서 상간, 또는 상, 대지간의 절연을 유지하여야 한다. (3) 차단기 개방 시에는 접촉자 손상 없이 신속하고 안전하게 회로를 분리 하여야 한다. 이를 위한 차단기의 주요 구성품으로 전로의 개폐가 이루어지는 가동 접점과 고정 접점이 있으며, 핸들과 같은 조작부, 접촉부를 개방시키면 통전 중인 전류가 어느 한도 이하가 아니면 아크를 발생하며, 특히 전로의 사용 전압이 높아지거나 전류가 커지면 아크는 더욱 크게 발생하게 되며 차단 시 발생하는 아크를 소멸시키지 못하면 차단에 실패하게 되며 재 접촉되어 큰 사고로 발전하게 된다. 이를 해결하기 위한 중요한 방법으로 소호실을 설계하여 구성시키고 있으며, 소호실의 세부 구성으로 여러장이 금속판을 일정한 간격으로 적층시킨 Arc chute와 Arc chute를 지지하는 절연판으로 구성되어 진다. Arc chute는 가동 접점 및 고정 접점간에 발생하는 아크를 신장, 구동 시키고, Arc chute에서의 분단(分斷), 냉각에 의해 아크 전압을 상승시켜서 전류를 차단하게 한다.

2-2 AC그리드를 이용한 DC 아크 소호 기술

정격전류 및 과전류, 단락전류 등 다양한 차단기의 투입 전류에 대한 차단 시 아크를 수반하나 직류 계통에 있어 교류 계통과 달리 회로적으로 에너지가 0로 되는 지점을 지나가지 않기 때문에 발생하는 아크에 대한 소호의 어려움으로 이를 해결하기 위한 방법에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다.

계통의 등가회로는 그림 1과 같으며 이를 수직으로 정리하면 식 1과 같이 되고, 아크를 소호하기 위해서는 식 2와 같이 전개되며, 차단기가 아크 소호에 대하여 안정성을 확보하기 위해서는 식 3과 같이 되므로 계통의 저항과 계통 전압은 차단기에서 제어 가능한 함수가 아니므로 아크 전압(U_a)의 증대가 아크 소호에 있어 매우 중요하다.

$$U - Ri - L \frac{di}{dt} - U_a = 0 \quad (1)$$

$$L \frac{di}{dt} = U - Ri - U_a \quad (2)$$

$$\frac{di}{dt} < 0 \quad (3)$$

또한 그림 2와 같이 아크를 소호하기 위하여 t₀에서 t_s까지 걸리는 개리 시간에 대한 단축 또한 매우 중요하며 이는 예상되는 고장전류를 최소화하기 위한 방법으로 기존의 차단기에서는 전자 반발식, 로터리 방식 등 다양한 방식을 사용하여 최소의 시간에 동작하도록 연구가 진행 중이다.

직류 계통에서는 그림 3과 같이 접점의 개극 개시부터 아크가 발생하여 최대 아크 전압을 발생 후 전류를 차단하게 되나 일반적인 아크 구동력은 로렌츠의 값(F)에 의해서 전류가 크게 되면 될수록 구동력도 크게 된다.

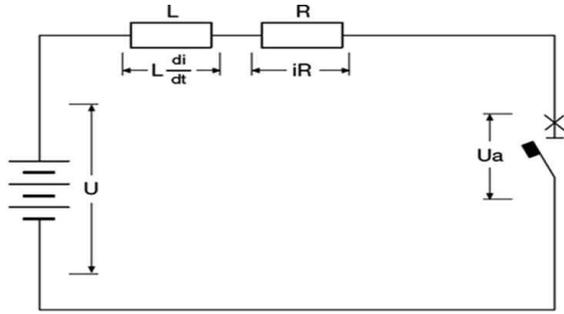


그림 1. 등가회로
Fig. 1. Equivalent circuit.

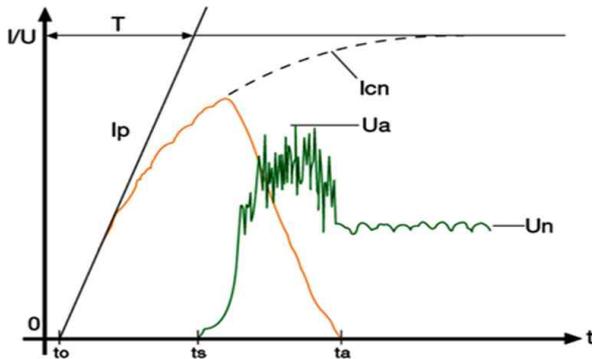


그림 2. 차단기의 동작 시 전류 및 전압 파형
Fig. 2. The current and voltage waveforms in the operation of breakers.

여기서, I_p : 단락 전류의 기울기, I_{c_n} : 단락 전류, U_a = 최대 아크 전압, U_n =계통 전압, t_0 = 단락 전류 시작점, t_s = 회로 개방 시점, t_a = 고장 전류 차단 시간.

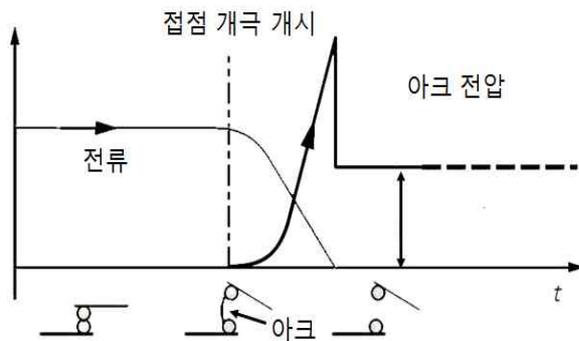


그림 3. 직류 회로의 전류 차단 파형
Fig. 3. Current blocking waveform of direct current circuit.

아크주의 전류 밀도와 자속의 밀도와의 관계에서 발생되나, 직류 계통에서는 자속밀도를 높게 가져가지 못하기 때문에 아크 구동력이 약하기 때문에 이를 해결하기 위한 방법으로 그리드를 이용하는 방법과 영구자석을 이용하는 방법, 전자석을 이

용하는 방법, 컴프레서를 이용하여 아크를 강제로 그리드로 불어내는 방법을 사용하여 아크를 소호하고 있다[4].

그림 4는 가동접촉자의 움직임에 따른 아크 전압의 발생을 보여주는 것으로 직류 계통에서는 아크 구동력이 교류 계통에 비하여 작아지므로 국내의 경우 아크 슈트를 사용하여 직류 차단을 위한 방법으로 각극의 최대 직류 전압을 250 V를 분담되므로 이를 직렬로 연결하게 되면 아크 차단이 각극에 DC 250 V를 분담됨으로 사용하는 직류 전압의 범위에 따라 2극, 3극, 4극을 직렬로 연결하여 식 4와 같이 각 접점에서 아크 전압을 발생시켜 접점의 아크 전압 분배로 총합 아크 전압을 높이는 방법을 채택하고 있다.

$$U_{a (total)} = U_r + U_s + U_t + U_n \tag{4}$$

EGI 혹은 철판에 니켈 금을 사용한 그리드를 이용하는 방법으로 기존의 교류 계통 차단기를 직류 계통의 차단기로 사용하기 위하여 아크 전압을 높이기 위한 방법으로 접점을 다수 사용함으로써 아크 전압을 분배하여 높이는 방법을 사용하고 있으나, 이는 전기적 개폐 수명에 대한 보증을 하기가 어려워 빈번한 차단이 발생될 수 있는 장소에는 사용하기에 부적합하다.

아크소호 그리드의 최적 사용을 위해서는 아크주의 전류 밀도, 자속 밀도가 높거나, 전계가 강해야 효과적으로 아크 슈트의 기능을 구현할 수 있다.

실제 차단 시험 결과 대 전류 영역은 차단되나, 100 A 이하의 소전류 영역에 있어서 아크가 소호실의 그리드에 구동되지 않고 차단이 불안정한 부분이 있기 때문에 소전류 영역에 있어 안전한 차단 용량을 얻기 위해 개선이 필요하다[6].

$$F = J \times B \tag{5}$$

여기서 J: 아크주의 전류 밀도, B: 자속 밀도.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \tag{6}$$

여기서 J: 전류 밀도, σ : 전도율(electrical conductivity), E: 전계 (electrical field).

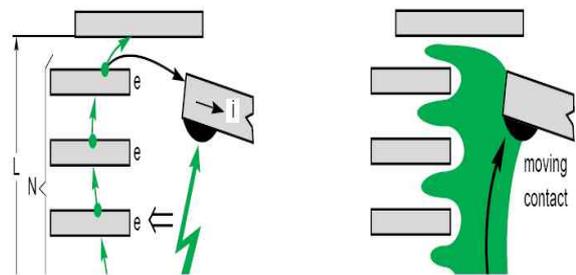


그림 4. 아크 슈트의 플레이트에 의한 아크 소호
Fig 4. The arc plates placed in the arc chutes help to extinguish the arc.

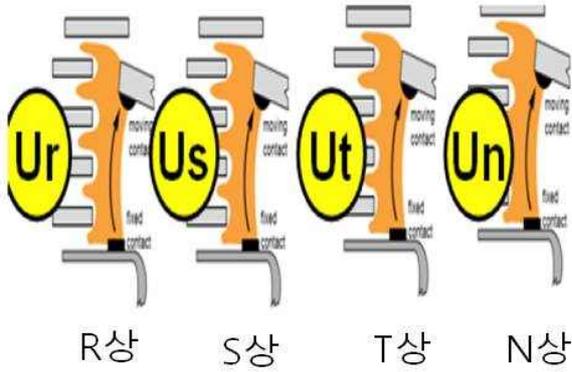


그림 5. 직류 차단 원리
Fig. 5. DC blocking principle.

2-3 DC 아크 소호 기술

아크를 소호하기 위하여 직류의 경우 open core magnetic blow-out, secondary coil magnetic blow-out devices 방법 등을 사용하며 그에 대한 원리는 아래와 같다.

- Open core magnetic blow-out : 주 전류 주위에 철 코일 또는 오픈 코어를 형성하여 주 전류의 흐름을 연결한다. 이러한 배열은 주 전류가 흐르는 동안 올바른 방향에 존재하는 자기장을 갖는 장점이 있으나, 아주 낮은 전류에서는 자력을 발생하지 못할 수 있고, 높은 정격의 전류에서는 정상상태에서 차단기를 차단할 수 있는 위험이 있다. 이러한 방법은 철도와 같은 제품에 대한 크기에 대하여 보다 자유로울 수 있는 장소에 설치되는 차단기에 사용하는 경우가 많다.

- Secondary coil magnetic blow-out devices : 아크를 효과적으로 소호하기 위하여 높은 아크 구동력과 빠른 아크 구동 속도가 필요하며 이를 해결하기 위해 식 7의 식으로부터 영구자석을 사용함으로써 낮은 아크 전류에 의해 발생하는 자속 밀도를 외부 에너지를 이용한 영구자석을 사용하여 전체적인 자속 밀도를 높여 아크 구동력을 얻을 수 있다.

또한 식 8에 의하여 빠른 아크 구동 속도를 얻을 수 있어 이를 통해 저 정격의 차단기에서도 안정적인 아크 소호력을 얻을 수 있다

그러나 양방향의 전류 흐름이 발생할 경우 자장의 방향이 변화하기 때문에 아크의 이동이 아크슈트 방향으로 이동하지 못하고 개폐 기구부로 이동하여 차단에 어려움이 있을 수 있어 ESS (energy storage system)와 같이 방향성이 바뀔 수 있는 제품에 대한 설치에는 부적합하다.

$$F = \int_{V_a} \vec{J}_a \times (\vec{B}_a + \vec{B}_p) dV_a \tag{7}$$

여기서, V_a : 아크 영역의 체적, J_a : 아크 전류 밀도, B_a : 아크 전류에 의하여 발생하여 아크 전류와 쇄교하는 자속 밀도, B_p : 영구자석에 의하여 발생하는 자속 밀도가 아크 전류와 쇄교하

는 자속 밀도.

$$U_{arc} = \sqrt{\frac{2BI}{C_D \rho_{air} d_{arc}}} \tag{8}$$

여기서, C_D : 항력계수, ρ_{air} = 공기밀도, d_{arc} = 아크의 직경.
설치 공간의 제약이 따르는 장소에 설치되는 저압 차단기의 경우 영구 자석을 사용하는 것이 효과적이며, 저 정격 및 낮은 아크 전압에서는 효과적이다.

2-4 AC 그리드를 사용한 DC 아크 소호 성능 실험

기존의 교류 계통을 위한 차단기의 소호 그리드, 가동자, 가동접점, 고정 접점의 구조와 접점 간 아크의 관계는 그림 7로 일반 아크 구동력은 로렌츠의 값에 의해서 전류가 클수록 아크 구동력도 크게 된다.

소 전류 영역에서는 아크 구동력이 부족하여 소호 그리드에 아크가 유도되지 않기 때문에 아크 전압이 올라가지 않는 것이 차단이 불안정한 이유이다. 그림 8,9와 같이 AC 전원에서 사용하는 EGI 그리드를 사용하여 DC 전압에서 사용 시 200 V까지는 낮은 아크 소호 성능이 필요하므로 안정적으로 아크를 소호하여 AC, DC 혼용으로 사용이 가능하나 300 V 이상 시 아크 소호가 어려우므로 정상적인 정격 전류에서 개폐가 불가능하다.

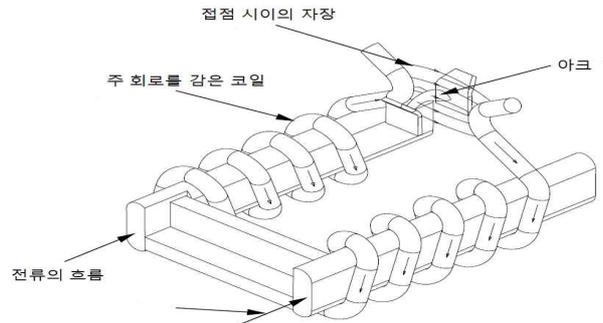


그림 6. 전자력에 의한 아크 소호
Fig. 6. Arc extinguishing by electromagnetic.

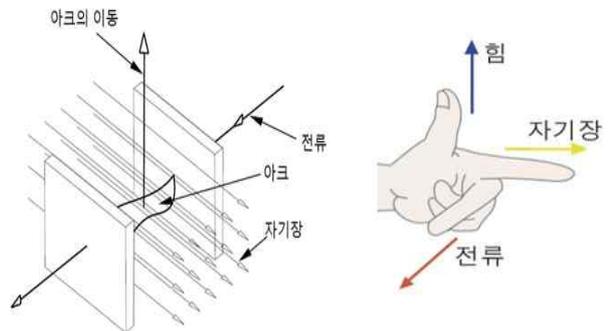


그림 7. 영구자석에 의한 아크 소호
Fig. 7. Arc extinguishing by permanent magnet.

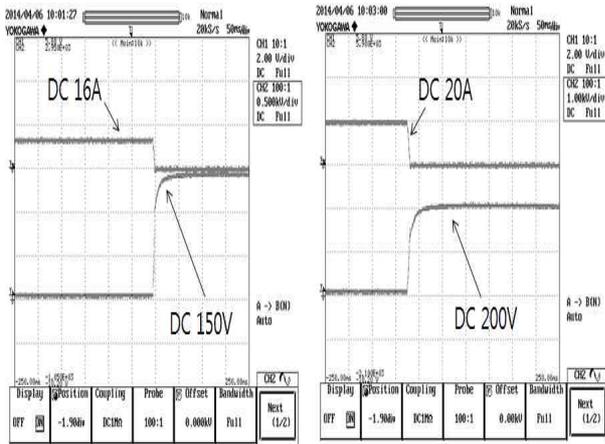


그림 8. AC 그리드 사용 시 아크 소호 (성공)
 Fig. 8. When using the AC grid arc extinguishing (success).

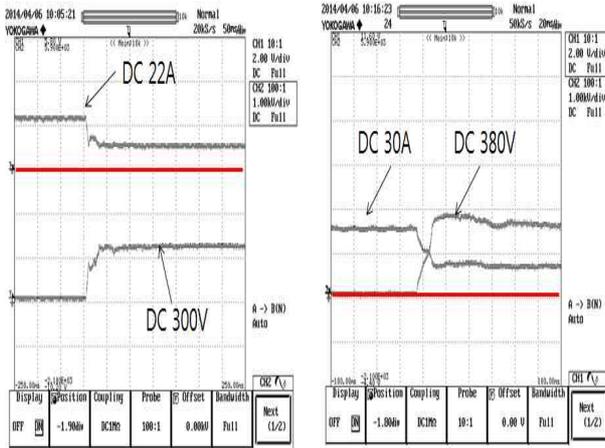


그림 9. AC 그리드 사용 시 아크 소호 (실패)
 Fig. 9. When using the AC grid arc extinguishing (failure).

2-5 하이브리드 아크 소호 장치의 아크 차단 성능 실험

본 연구에서는 순수 영구자석에 의한 아크 소호 방식을 이용한 아크 슈트를 그림 10과 같이 구현하였으며 DC에서의 초기 아크 구동력의 증대 및 최적화를 위하여 pole당 양방향으로 영구자석을 삽입시켜 아크의 이동을 효과적 구현하였다. DC 차단 시 전기적 개폐에 대한 안정성을 확보하기 위해서는 최소 100 ms 이내에 아크 소호가 이루어져야 아크 용착에 의한 접점과 차단 메카니즘의 탄성 변화가 없다.

시험 결과 그림 11과 같이 1 pole에 흐르는 전압과 전류의 안정적으로 스위칭이 이루어 졌으며, 특히 pole 당 1개의 영구자석 설계 시 아크 소호 능력 시험과 2개 영구자석을 사용하여 설계한 경우에 대하여 동일한 시험을 수행한 결과 동일 성능을 유지하였다.

그러나 태양광 발전과 같은 신재생 에너지의 경우 open

voltage가 600 V급 이상을 사용하는 경우가 많으므로 태양광과 같은 비교적 높은 DC 전압을 사용하는 장소에서 전기적 개폐 성능을 검증을 위하여 개발한 영구자석을 이용한 아크 슈트를 실험한 결과 200 ms 이상 불안정한 영역이 발생하여 전기적 개폐 성능 유지에 어려움이 있었다.

이를 해결하기 위한 방안으로 높은 아크 전압을 발생시킬 수 있도록 EGI 철판을 이용한 철편을 그리드에 삽입 시키고, 고온 안정성은 비교적 약하지만 자력이 강하고 기계적 강도가 높으며, 최대 에너지 (BH)가 큰 네오뮴 자석을 혼용한 하이브리드 형태의 아크 슈트를 개발하여 실험하였으며, 실험 결과 높은 아크 에너지가 발생하는 DC 600 V, 30 A의 전기적 개폐 성능 실험 시에는 네오뮴 자석과 그리드를 혼용한 하이브리드 형태의 아크 소호 방법을 사용한 아크 슈트의 안정도 확보 시간은 50 ms 이내로 효과적이었다.

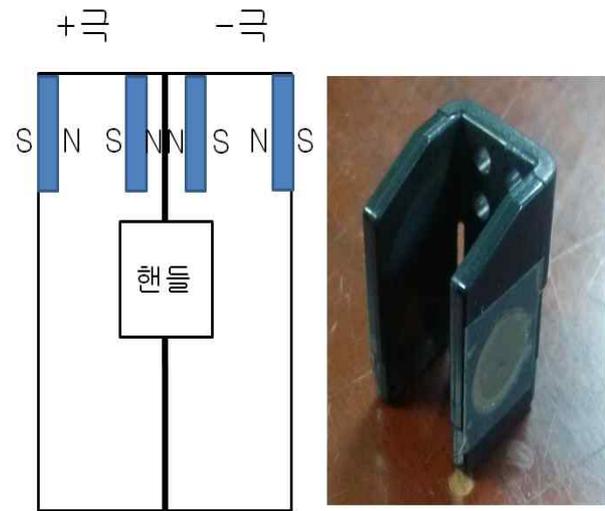
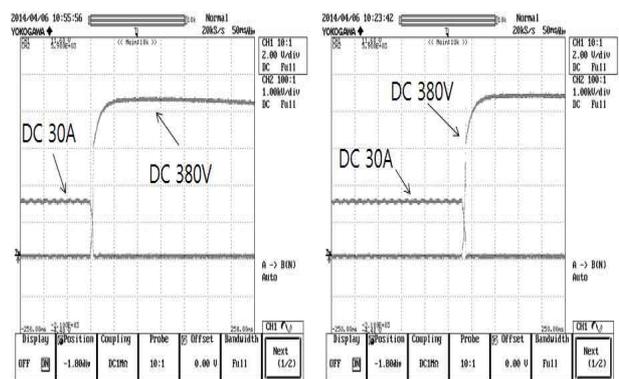
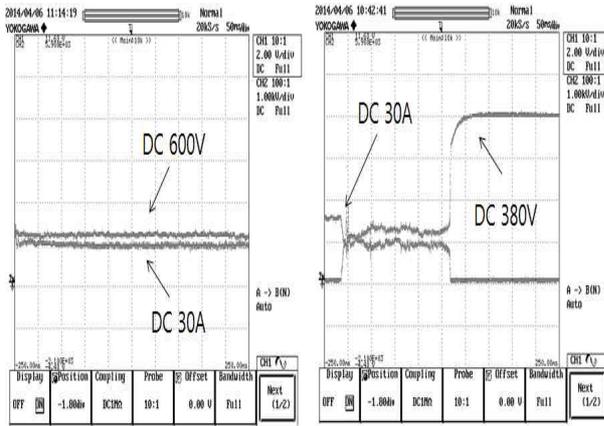


그림 10. 영구자석의 부착 방향
 Fig. 10. Attaching direction of the permanent magnet.



(a) 극당 영구자석 1개 사용 시 (b) 극당 영구자석 2개 사용 시
 그림 11. 아크 소호 그래프 (영구자석 사용-DC 380V)
 Fig. 11. Arc extinguishing graph (Using permanent magnets-DC 380 V).



(a) DC 600 V 아크 소호 (실패) (b) 영구자석 극성 변환 시 아크 소호

그림 12. 아크 소호 그래프 (영구자석 사용-DC 600 V, 극성변환)

Fig. 12. Arc extinguishing graph (Using permanent magnets - DC 600 V).

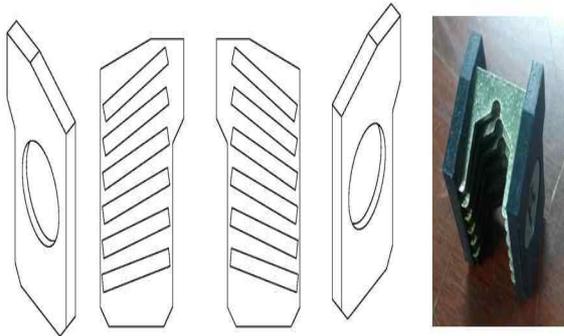
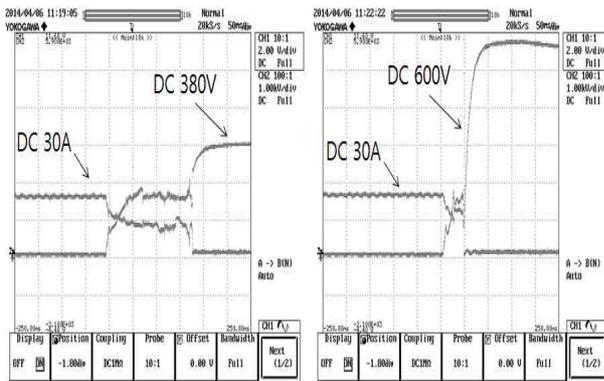


그림 13. 개발 된 아크 슈트
Fig. 13. Developed arc chute.



(a) DC 380V 아크 소호 (b) DC 600V 아크 소호

그림 14. 아크 소호 (그리드와 영구자석 사용)
Fig. 14. Arc extinguishing graph (Using permanent magnets and grid).

III. 결 론

본 연구에서는 교류 계통의 시스템에서 직류 계통의 시스템으로 변환 과정에서 개발되어지는 시스템의 안정적인 사용을 위한 직류 설비 및 계통 보호용 차단기에 대하여 설계하고 이를 검증하였다.

이를 위한 요소기술로 전기적 개폐 수명 확보를 위한 직류 아크소호 방법과 접점에 대한 내아크성 시험을 통하여 최적화된 직류 차단기를 설계하고, 다양한 실험을 통하여 성능실험을 하였다.

또한 AC 계통에서 사용되는 차단기와 DC 계통에서 사용되는 차단기의 성능에 있어 매우 중요한 전기적 개폐 성능 만족을 위하여 AC 차단기에서 사용하는 그리드를 사용한 차단기의 경우 DC 200 V에서는 안정적으로 차단되었으나, DC 300 V에서 아크 소호를 못하여 차단이 불가능하므로 DC 배전에서 사용하고자 하는 DC 380 V급 차단기로 사용이 불가능함을 알 수 있었고, 이를 바탕으로 네오뎀 자석 방식의 아크 소호부를 설계, 실험한 결과 DC 380 V에서는 100 ms 이내의 안정도 시간을 확보함으로써 아크소호 성능 확보를 통한 전기적 개폐 수명이 만족되었다.

그러나 DC 600 V에서의 성능 실험을 한 결과 200 ms 이상 아크소호 시간을 발생됨에 따라 차단을 실패하게 되어 사용이 불가능하게 되었다. 이를 해결하기 위하여 초기 아크 구동력 강화를 위한 네오뎀 자석의 설계와 구동된 아크를 높은 아크 전압으로 유도시킬 수 있는 EGI 그리드를 혼용한 하이브리드 형태의 아크 소호부를 설계하였고, DC 380 V 및 DC 600 V에서 실험을 하였으며, 그 결과 DC 380 V에서는 150 ms의 차단 시간이 필요하여 불안정 영역이 발생되었고, DC 600 V에서는 50 ms의 불안정 영역이 발생함을 알 수 있었으며 이를 통하여 아크 구동력이 높을 경우 그리드의 사용을 통하여 아크 전압을 높이는 것이 효과적이나, 낮은 영역에서는 순수 영구자석을 통하여 아크를 소호하는 것이 효과적임을 알 수 있었다.

네오뎀 자석과 EGI 그리드의 혼용을 통한 하이브리드 아크 소호부를 통하여 아크구동력 강화를 통한 아크 소호 능력을 향상시킬 수 있었으며, 그 결과 50 ms 이내에 아크를 소호함으로써 전기적 개폐 수명에 대한 안정화가 확보되는 성과를 이룰 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 강원대학교 학술연구조성비의 지원으로 연구가 진행되었습니다. 관계부처에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] S. G. Son, H. S. Mok, G. S. Park and J. Hong “A comparative study on the electric power efficiency of IDCs with AC and DC

distribution systems,” *The Korean Institute of Illuminations and Korea Electrical Installation Engineers*. Vol.22, No. 8, pp. 38~44, 2008.

- [2] W. G. Lee, B. H. Han, H. M. Jeong and H. S. Kim “Development of residual current detector for DC distribution system,” in *The Korean Institute of Power Electronics Conference*, Gyeongju: Korea, pp. 53~54, July, 2013.
- [3] G. Byeon, “A Research on the characteristic of fault current of DC distribution system and AC distribution system,” in *IEEE 8th International Conference*, Jeju: Korea 2011.

- [4] IEC TR 60755, “Residual current protective device dependent or independent in line voltage,” 2008.
- [5] J. S. Kim, “A Study on the optimal shape of arc chute for molded case circuit breakers”, *The Korean Institute of Electrical Installation Engineers Conference*. Jeju: Korea pp. 926~928, July. 2002.
- [6] T. Weimina. et al, “Effect of contact breakaway muzzle velocity on contact breakaway in direct circuit”, *Journal of Harbin Institute Technology*, Vol. 33, No. 3, pp. 414~418, June, 2001.



주 남 규 (Nam-Kyu Joo)

2002년 2월: 강릉대학교 제어측공학과 (공학사)
2004년 2월: 강원대학교 전기공학과 (공학석사)
2014년 8월: 강원대학교 전기전자공학부 (공학박사)
2007년 9월 ~ 현재: (주)대륙 수석연구원
※ 관심분야 : DC 보호, 차단기, 보호기기



김 남 호 (Nam-Ho Kim)

1974년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1977년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
1993년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학박사)
1981년 2월 ~ 현재 : 강원대학교 전기전자공학부 교수
※ 관심분야 : 회전기기 효율화