creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000266491

2018年 2月

碩士學位 論文

DC 전력망 과도 안정도 향상을 위한 아크유도형 DC 차단기에 관한 연구

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

朴 相 勇

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

DC 전력망 과도 안정도 향상을 위한 아크유도형 DC 차단기에 관한 연구

A Study on Arc-induction type DC Circuit Breaker for Transient Stability Improvement of DC Power Grid

2018年 2月 23日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

朴 相 勇

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

DC 전력망 과도 안정도 향상을 위한 아크유도형 DC 차단기에 관한 연구

指導敎授 崔 孝 祥

이 論文을 工學碩士學位 申請論文으로 提出함

2017年 10月

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

朴 相 勇

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

朴相勇의 碩士學位 論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 金 南 勳 (印)

委 員 SMART MEDIA 人才開發院 博士 朴 炯 昱 (印)

委 員 朝鮮大學校 教授 崔 孝 祥 (印)

2017年 11月

朝鮮大學校 大學院

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

Ⅰ. 서론 ····· 1

Ⅱ. DC 차단기 및 아크특성 ····· 3

A. DC 차단기 종류 ····· 3

1. 하이브리드 DC 차단기 ····· 3

2. 반도체 DC 차단기 ····· 4

3. 기계식 DC 차단기 ····· 4

B. 아크유도형 DC 차단기 ····· 6

1. 아크의 이론적 특성 ····· 6

2. 구조 및 동작원리 ····· 8

Ⅲ. 시뮬레이션 ····· 11

A. 아크유도 특성 분석 ····· 11

1. 유도침 형태 ····· 12

2. 유도침 개수 ····· 17

3. 유도침 위치 ····· 20

4. 유도침 방향 ····· 23

5. 유도간격 변화 ····· 25

B. 시뮬레이션 결과 분석 ····· 29

Ⅳ. 결론 ····· 32

참 고 문 헌 ····· 34

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

List of Tables

Table 3-1 The design condition for the simulation modelling ····· 12
Table 3-2 A well-established design condition for the simulation ····· 30

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

List of Figures

Fig. 2-1 The circuit of the hybrid-type DC circuit breaker ····· 3
Fig. 2-2 Component of the arc-extinguishing part of the mechanical circuit breaker ····· 5
Fig. 2-3 Basic components of the mechanical circuit breaker ····· 5
Fig. 2-4 Classification of the DC-Arc forms ····· 7
Fig. 2-5 Characteristic of the electric-arc ····· 7
Fig. 2-6 Basic components of the arc-induction-type DC circuit breaker ····· 8
Fig. 2-7 The operation principle of the arc-induction-type DC circuit breaker ····· 9
Fig. 2-8 The Equivalent circuit diagram of the arc-induction-type DC circuit breaker ····· 10
Fig. 3-1 The arc-induction-type DC circuit breaker modelling according to shape of the induction needle ····· 13
Fig. 3-2 The flowing a magnetic field graph according to shape of the induction needle ····· 14
Fig. 3-3 The distribution plot of the a magnetic field according to shape of the induction needle, when the gap between contact point was 0.2 mm ····· 15
Fig. 3-4 The distribution plot of the a magnetic field according to shape of the induction needle, when the gap between contact point was 1.2 mm ····· 16
Fig. 3-5 The arc-induction-type DC circuit breaker modelling according to number of the induction needle ····· 17
Fig. 3-6 The flowing a magnetic field graph according to number of the induction needle ····· 19
Fig. 3-7 The arc-induction-type DC circuit breaker modelling according to location of the induction needle ····· 20

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 3-8 The flowing a magnetic field graph according to location of the induction needle ····· 21
Fig. 3-9 The arc-induction-type DC circuit breaker modelling according to direction of the induction needle ····· 23
Fig. 3-10 The flowing a magnetic field graph according to direction of the induction needle ····· 24
Fig. 3-11 The arc-induction-type DC circuit breaker modelling according to the inducing gap ····· 25
Fig. 3-12 The flowing a magnetic field graph according to the inducing gap ····· 26
Fig. 3-13 The arc-induction-type DC circuit breaker modelling according to existence and nonexistence of the induction needle ····· 30
Fig. 3-14 The flowing a magnetic field graph according to existence and nonexistence of the induction needle ····· 31

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

A Study on Arc-induction type DC Circuit Breaker for Transient Stability Improvement of DC Power Grid

Sang Yong Park
Advisor : Prof. Hyo Sang Choi, Ph.D.
Department of Electrical Engineering
Graduate School of Chosun University

With the development of renewable energy and the expansion of the DC-based power grid, interest in DC transmission and distribution has been rapidly growing. To build a reliable transmission and distribution power grid, the role of DC circuit breakers is more important than anything else. Currently, DC circuit breakers in the commercialization stage include semiconductor, LC resonance, and hybrid type mechanical circuit breakers. The conventional DC circuit breakers interrupt the current by forcibly bearing an arc, and there are circuit breakers that use arc chutes and semiconductors. They have very fast interruption speed, but excessive heat occurs in the interruption operation, resulting in frequent failures and, in serious cases, large fires. Therefore, economical and stable DC circuit breakers are required to construct a reliable DC power grid, and the arc interruption technology of the arc extinguishing chamber, which is the most important part of a circuit breaker, is very important.

In this study, a new arc induction type DC circuit breaker was proposed. The arc induction type DC circuit breaker was a mechanical circuit breaker using an induction needle. It induced and absorbed the arc generated at the contact through the opening operation of the interrupting pole. The induced arc was extinguished through the ground wire. This method was different from the conventional method in which the arc chute of a mechanical circuit

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

breaker directly bore and extinguished an arc by absorbing it. The proposed method was faster and more stable through the arc induction and absorption of the induction needle.

In this paper, the magnetic flux according to the design conditions for the induction needle of the arc induction type DC circuit breaker was analyzed using HFSS, which is the electromagnetic field analysis software. Design conditions included the shape, quantity, position, and direction of the induction needle as well as the induction interval change. Simulation prototype model was designed by setting the simulation results as the design conditions of the established induction needle, and the magnetic field flowing according to the presence of the induction needle was compared. As a result, it was possible to reduce the magnetic field generated between the contacts by approximately 20% through the opening of the interrupting pole when the induction needle was used.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅰ. 서론

현재 급격한 산업발전으로 인해 환경문제에 대한 해결 대안으로 풍력 및 태양광 발전과 같은 신재생에너지원이 관심을 받고 있다. 매년 신재생에너지원 발전단지가 증가하는 추세이며, 발맞춰 직류 기반의 전기 철도, 전기자동차, 데이터센터에 대한 수요가 급증하고 있다.

현재 국내의 전력망은 AC(alternating current) 방식으로 정착되어 있으며, 인버터와 컨버터를 활용해 전기의 수급이 원활히 이루어지고 있다. 전체 부하 비율은 AC 약 90 %, DC(direct current) 약 10 %이지만, 2020년의 전체 부하 비율이 AC 약 50 %, DC 약 50 %를 기록할 것으로 예상하고 있다. 따라서 급증하는 DC 부하에 따라 전기 수급에 높은 신뢰성을 위한 DC 전력망이 매우 필요한 시점이다. 국내에서는 이미 정책 및 환경 변화를 통해 AC를 이용한 전형적인 전력공급 방식에서 DC를 이용한 전력공급 및 분산전원 DC 연계 사업을 진행하고 있다. 또한, 산학연을 중심으로 DC 배전망 구축에 필요한 전력변환기, 차단기 개발, DC 기반의 전력 시스템 운용 및 전력 보호 기술에 대한 연구가 진행되고 있다. 산업계에서는 전기 에너지 효율 향상 검증을 위해 IDC(internet data center) 빌딩 구내를 DC화 하였으며, 태양광을 통해 발전된 전기를 활용하여 주택 내 DC 설비에 필요한 에너지를 보충하며, 제로 에너지 하우스 실증을 완료한 바 있다. 연구기관에서는 AC 보다 DC 전원 공급의 타당성 연구를 통하여 에너지 효율 향상을 DC Home Test-bed를 구축하여 입증하였다. 한전은 2015년 DC 독립섬 그리드 구축을 거차도에서 하고 있으며, 2016년도부터는 실선로 최초 적용 사업을 추진하여 전남 및 광주지역 5곳 외 계림변전소 등에서 교류 13.2 kV의 특고압을 750 V의 저압 직류로 전환하는 사업을 진행할 예정으로 알려져 있다. 산학연을 중심으로 다양한 DC 실증사업을 진행하고 있지만, 앞으로 예상치 못한 선로 사고에 대비하여 신뢰도 높은 DC 전력계통을 위한 전력 보호 시스템을 구축해야만 한다. 이에 따라 전력망 구축에 필요한 DC 차단기 연구가 활발해지고 있다.

DC 차단기는 높은 전력 품질과 전력계통 안정도를 높이는 전력 보호 설비 중 하나로써 선로 사고로 인한 화재, 인명 피해를 줄이는데 반드시 필요한 보호 기

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

기이다. 미래에 직류 전력 수요량 증가는 불가피한 상황이며, 이에 따른 고장전류 또한 증가할 것으로 예상되기 때문에 이에 빠른 대응책이 필요한 시점이다[1-3].

AC는 시간에 따라 그 크기와 방향이 주기적으로 변화하므로 자연 영점이 형성된다. 그러므로 사고전류 차단에 유리하다. 하지만 DC는 자연영점이 없어서 높은 과전류 상태에서 차단이 이루어진다. 그러므로 아크가 발생하고 재점화 현상도 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 다양한 연구기관에서 DC 차단기에 대한 연구가 활발히 이어지고 있다. HVDC(high voltage direct current)에서는 대표적으로 ABB사에서 하이브리드식 HVDC 차단기를 자체 개발하였고, 상용화 단계이며, 매우 빠른 차단 동작을 보유하고 있다. 하지만, 다수의 IGBT(insulated gate bipolar mode transistor)활용으로 가격이 비싸다. MVDC(medium voltage direct current)에서는 LC 공진 및 역전류를 통한 강제영점을 만들어 차단하는 방식 그리고 전력용 IGBT 반도체를 이용하여 차단하는 방식 등이 연구 개발되고 있지만, 상용화 단계까지 이르기엔 시간이 필요하다. LVDC(low voltage direct current)에서는 보편적으로 기계식 직류차단기가 연구 및 상용화 되고 있다. 기계식 DC 차단기는 기계식 교류차단기와 구조가 비슷하고, 아크 슈트를 통해 아크를 강제적으로 소호하는 방식이다. 하지만, 부하 증가에 따른, 아크슈트의 과열 및 화재가 발생할 수 있다. 따라서, 신뢰도 높은 직류 전력망을 구축하기 위해서는 경제적이고 안정된 DC 차단기 연구가 필요하다. 아크의 특성을 잘 이해하고 효과적이며 안정적인 소호 방안을 모색하여야 한다[4].

본 연구는 새로운 아크 소호 방식인 아크유도형 DC 차단기를 제안하였다. 아크유도형 DC 차단기는 원뿔형으로 구성된 바늘 모양의 유도침을 활용해 기계식 접점 사이에서 발생하는 아크를 자연 유도 및 흡수하여 소호하는 방식의 기계식 DC 차단기이다. 아크 유도에 핵심인 유도침의 형태와 개수, 위치, 방향, 유도간격을 전자장 해석 프로그램인 HFSS(high frequency structure simulation)를 통해 시뮬레이션하고 그 특성을 분석하여, 단락 사고를 모의하고 차단극 개방에 따라 발생하는 자계의 변화를 검토하고자 하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅱ. DC 차단기 및 아크 특성

A. DC 차단기 종류

1. 하이브리드 DC 차단기

그림 2-1은 ABB사의 하이브리드형 DC 차단기 회로이다. 하이브리드 직류 차단기는 반도체 차단기와 기계식 차단기의 결합으로 각 차단기의 장단점을 보완한 방식의 직류 차단기이다. 구성요소는 기계식 차단기(Ultra fast disconnector), 부하 전환 스위치(load commutation switch), 주 차단기(main switch), 전류 제한 리액터(current limiting reactor), 잔류 전류 제한 차단기(residual current disconnecting circuit breaker)가 있다. 사고 발생 시, 부하 전환 스위치에서 사고 전류를 제한하고, 기계식 차단기의 개방동작에 의해 주 차단기로 보내지며 차단된다. 이와 동시에, 잔류 전류 제한 차단기가 개방되어 주 차단기가 과열되는 것을 보호한다. 주 차단기에는 IGBT가 사용되며, 20개씩 1 stack으로 4개의 HVDC breaker cell로 구성되어 있다. 또한, 사고전류 차단 시, 스너버 회로를 활용해 전압을 분배하게 되며, 추가 장비가 없다는 것이 특징이다[5].

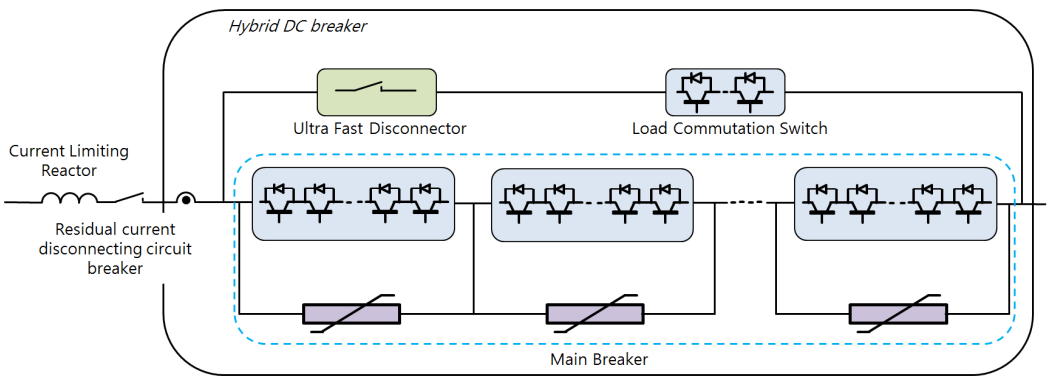


그림 2-1 하이브리드형 DC 차단기 회로

Fig. 2-1 The circuit of the hybrid-type DC circuit breaker

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 반도체 DC 차단기

반도체 DC 차단기는 순수 반도체로만 구성된 차단기로써, 구성은 반도체 스위치 소자와 기계식 스위치 그리고 병렬로 연결된 스너버 회로, 피뢰기로 구성되어 있다. 반도체 차단기는 반도체 스위치 소자의 동작 알고리즘으로 인해 차단이 이루어진다. 이때 반도체 소자가 직렬로 여러 개 달려있기 때문에 전압분배가 일어나 신속한 차단이 가능하다. 그러나 가격이 비싸고 차단시 반도체 스위치에 발생되는 열로 인한 파손 등이 문제가 된다. 또한 정상상태 시 반도체 소자로 인한 전력손실이 발생되게 된다.

3. 기계식 DC 차단기

기계식 차단기는 소호부, 차단부, 전류센서, 조작부 설계로 나누어 구성된다. 기존의 기계식 차단기는 그림 2-2와 같이 기계식 접점인 Anode와 Cathode, 사고전류에 의해 동작하는 솔레노이드, 발생된 아크를 강제 소호시키는 아크슈트 그리고 스위치로 구성된다. 이러한 기계식 차단기는 LVDC 35 kV_{dc} 이하에서 사용되며, 그림 2-3과 같은 요소들로 구성된다. 정상시에는 Anode와 Cathode가 도체 역할을 하여 주 선로에 정상전류가 흐른다. 사고 발생 시, 사고전류가 주선로에 흐르고 암페어 오른손 법칙에 의해 솔레노이드의 공이가 동작하여 스위치 off 동작을 일으킨다. 지렛대의 원리에 의해 Anode 접점이 Cathode 반대방향으로 움직여 개방되고, 높은 아크가 발생한다. 아크는 호를 그리면서 아크슈트 방향으로 움직이며 아크슈트에 의해 소호된다. 아크슈트는 아크에 의해 큰 부담을 받는다. 그러므로 아크슈트 제작에는 이와 같은 부담을 견딜 수 있게 설계해야 한다 [6-8].

소호부는 차단기 접점 개방으로 인해 발생하는 아크를 효과적으로 소호시키는 부분이다. 현재 빠르고 안전한 아크 소호를 위한 구조개선, 이온가스의 빠른 방출과 아크 급냉 방법 검토, 아크저항 증가 방법과 소호실 열용량의 증대방법에 대한 연구를 진행하고 있다[5].

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

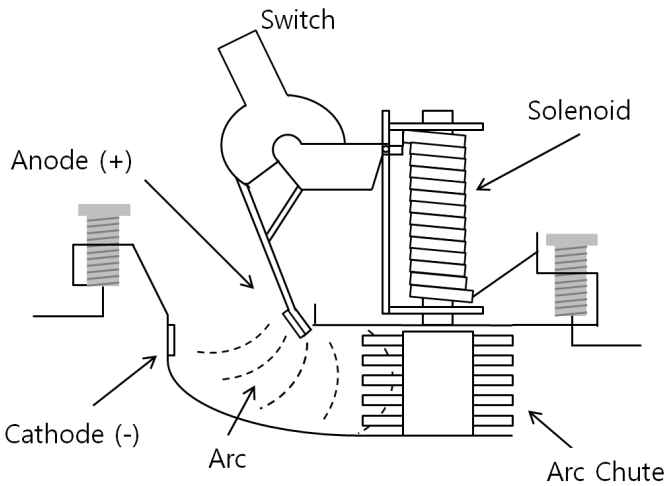


그림 2-2 기계식 차단기 소호부 구성 요소

Fig. 2-2 Components of the arc-extinguishing part in the mechanical circuit breaker

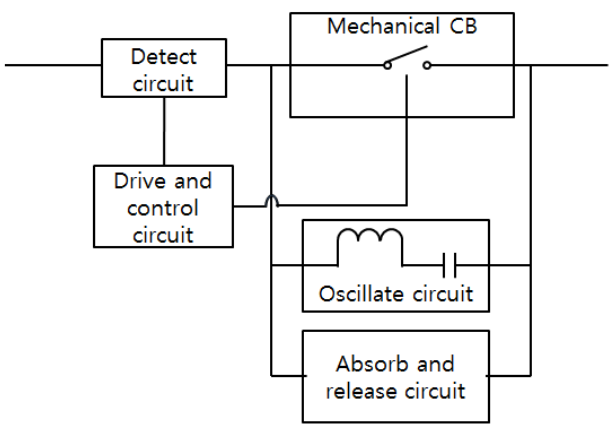


그림 2-3 기계식 DC 차단기 기본 구성요소

Fig. 2-3 Basic components of the mechanical circuit breaker

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

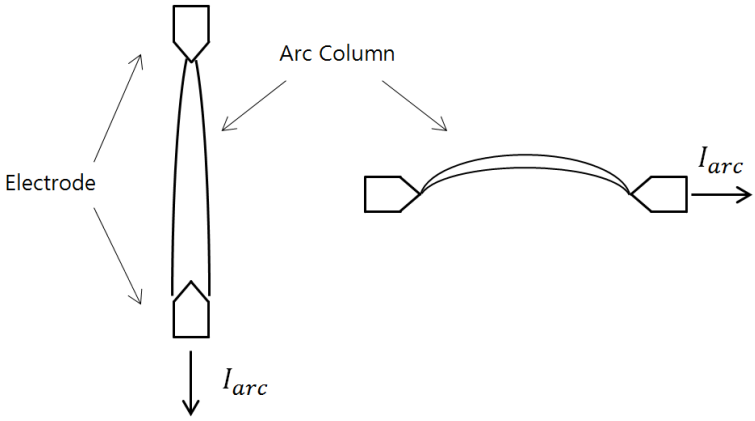
B. 아크유도형 DC 차단기

1. 아크의 이론적 특성

아크 유도 특성에 대해 분석하기 위해서는 DC 아크에 대한 분석이 선행되어야 한다. DC 아크는 회로 차단기 및 퓨즈와 같은 전력 시스템 보호 장치를 설계하는데 필요한 특성이기 때문에 매우 중요하다. 일반적으로 사용되는 아크 형태는 그림 2-4와 같이 나타낼 수 있다. 그림 2-4 (a)는 수직, 축대칭, 안정된 아크이고, 그림 2-4 (b)는 수평, 비축대칭, 자유분방한 아크이다. 축대칭 아크는 아크 형태가 일정하고 균일하게 연소된다. 비축대칭 아크는 동적인 평형상태 혹은 연속적인 운동 상태로 분석된다. 이와 같은 형태는 그림 2-5와 같이 3가지 상태 영역으로 나뉜다. 애노드 영역(Anode region), 플라즈마 기둥(Plasma column), 캐소드 영역(Cathode region)이다. 아크 전류(I_{arc})는 애노드에서 캐소드로 흐르며 그 구간에는 아크 전압(V_{arc})이 걸린다. 전극이 개방되기 전에는 맞붙어 있는 상태로 곡률반경이 크다. 따라서 전극 사이의 전하 밀도는 작으므로 정상전류가 큰 저항 없이 흐를 수 있게 된다. 하지만, 전극의 개방으로 곡률반경은 급격히 작아지며 전하밀도는 커진다. 도체 표면 및 내부의 전위는 등전위이다. 그러므로 도체는 모든 점에서의 전위가 동일하다. 그러므로 양극 사이의 어느 한 점에서 전계가 집중되고 전극 주위의 기체 이온화 현상이 일어난다. 이러한 현상으로 인해 플라즈마 상태 영역이 형성되고 그 속에서 전하의 이동이 발생한다. 이 플라즈마 상태 영역에서는 매우 복잡한 이온화 현상이 일어나고 이 양이온과 음이온들은 전기적 성질을 띤 전도성 기체로 볼 수 있다. 이러한 전하들은 양극의 전계에 의해 이동성이 가속화되어 플라즈마 상태 영역이 유지가 된다. 매우 복잡한 이온화 현상이 지속되고 양전하를 띠는 양성자에 비해 음전하를 띠는 전자들이 증가함에 따라 전류가 급격히 증가하는 현상이 발생한다. 이러한 아크의 형태는 매우 빠르게 이동하여 길이와 외형이 끊임없이 변화한다. 또한 플라즈마 상태 영역 안에서 국한되어 있지 않고 양극 사이로부터 벗어나기도 하며, 애노드 이탈(Anode drop)과 캐소드 이탈(Cathode drop)이 발생한다[9-16].

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Vertical, Axisymmetric, Wall Stabilized Arc

(b) Horizontal, Non-Axisymmetric, Free-Burning Arc

그림 2-4 DC 아크 형태 분류

Fig. 2-4 Classification of the DC-Arc forms

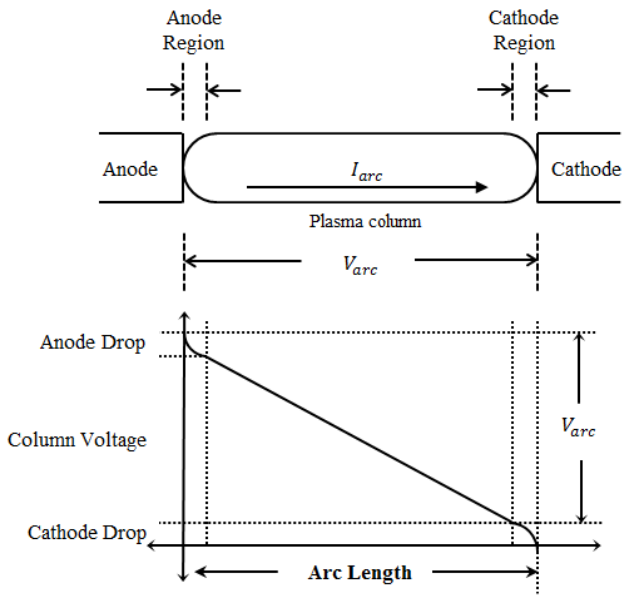


그림 2-5 아크 특성

Fig. 2-5 Characteristic of the electric-arc

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 구조 및 동작원리

아크유도형 DC 차단기는 그림 2-6과 같이 1차, 2차 선로로 구성되어 있다. 1차 선로에는 애노드와 캐소드가 구성되어 있고, 2차 선로에는 유도침과 접지선이 구성되어 있다. 1차와 2차 선로는 개회로로 구성되었으며, 애노드와 캐소드가 맞닿는 지점을 기준으로 유도침이 일정 간격 떨어져 수직방향으로 위치한다. 여기서 V_0는 인가전압이고 I_P는 1차 선로에 흐르는 전류이며 I_S는 2차 선로에 흐르는 전류이다.

유도침은 1차 선로에 흐르는 정상전류에게 큰 영향을 끼치지 않는다. 하지만 1차 선로에서 어떠한 고장이 발생했을 시에는 사고전류에 의해 DC 차단기의 기계식 접점이 개방된다. 애노드와 캐소드의 접점이 열리면서 강한 아크가 발생하게 된다. 아크는 불완전한 형태로 발생하게 되고 높은 열과 함께 솟구친다. 이때 애노드, 캐소드 접점과 일정간격 떨어져 위치해 있는 유도침에 의해 아크는 유도 및 흡수된다. 이로 인해 접점 사이에 발생한 아크는 사라지게 되고 접지선을 따라 땅으로 흘러 소호된다.

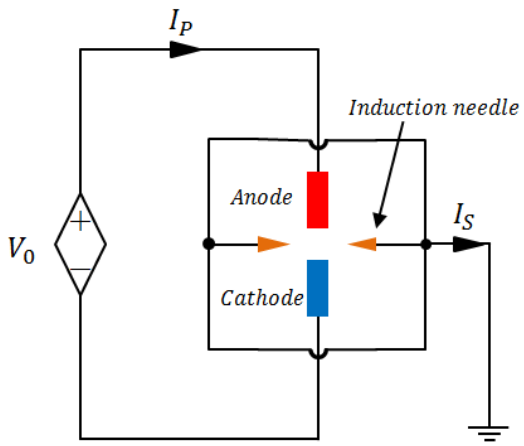


그림 2-6 아크유도형 DC 차단기의 기본 구성요소

Fig. 2-6 Basic components of the arc-induction-type DC circuit breaker

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 2-7은 아크유도형 DC 차단기의 동작원리이다. ①은 애노드이고, ②는 캐소드, ③은 유도침, ④는 접지선이다. ⑤는 애노드와 유도침간의 간격인 유도간격이고, ⑥은 애노드와 캐소드 간의 간격인 극간격이다. 그림 2-7 (a)는 정상상태이고, 그림 2-7 (b)는 과도상태로 기계식 접점이 개방되는 시점이다. 그림 2-7 (c)는 기계식 접점이 완전 개방된 상태이다.

그림 2-7 (a)는 애노드와 캐소드가 맞닿아 있는 상태이고, 유도침은 애노드와 캐소드 맞닿은 지점으로부터 유도간격이 떨어진 지점에 위치한다. 이때 정상전류는 애노드에서 캐소드 방향으로 큰 저항 없이 흐른다. 그림 2-7 (b)는 기계식 접점이 개방되기 시작한 직후의 상태이다. 애노드와 캐소드는 고정되어 있고, 캐소드는 애노드 반대 방향으로 이동한다. 두 접점이 개방이 되면서 아크가 발생된다. 그림 2-7 (c)는 기계식 접점이 완전 개방된 시점으로, 극간격이 유도간격보다 크다. 이때에는 애노드와 유도침 간의 전계의 세기가 애노드와 캐소드 간의 전계의 세기보다 강하기 때문에 아크는 애노드에서 유도침으로 흐르게 된다. 또한, 유도침의 모양은 피뢰침의 형태를 적용하여 아크 유도 효과를 높이는데 중요한 역할을 한다.

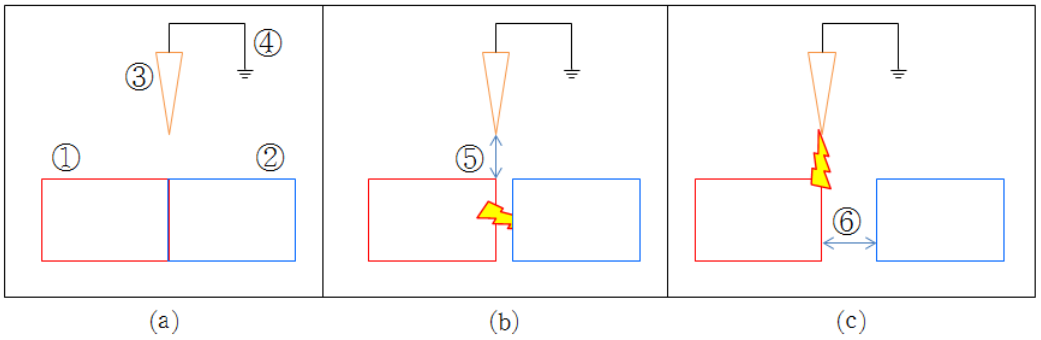


그림 2-7 아크유도형 DC 차단기의 동작원리

Fig. 2-7 The operation principle of the arc-induction-type DC circuit breaker

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 2-8은 아크유도형 DC 차단기의 등가회로도이다. DC 전원, 부하, 애노드, 캐소드 그리고 유도침으로 구성되어 있다. 애노드와 캐소드, 유도침의 각각 한 점을 임의로 설정하여 극간격의 변화에 따른 아크 현상을 분석할 수 있다. 이는 도체의 모든 지점은 전위가 동일하다는 점에서 가능하다. q_1은 애노드 접점이고, q_2는 캐소드 접점, q_3는 유도침 접점이다. r_1은 극간격이고, r_2는 유도간격이다. 이때, 극간격은 유도간격보다 작아 아크는 애노드와 캐소드 사이에서 발생한다. 식 (1)은 쿨롱의 법칙으로 전극의 거리와 세기의 관계를 나타낸다.

$$F = \frac{k \cdot Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \tag{1}$$

이 때, Q_1과 Q_2는 극의 세기를 나타내며, r은 극간의 거리를 나타낸다. F는 극과 극사이에 작용하는 힘이다. 식 (1)을 통해 극간의 거리가 증가할수록 두 극 사이에 발생하는 힘이 줄어든다. 이는 두 극 사이에 아크가 발생하였을 때, 극의 거리가 증가할수록 아크가 발생하는 힘이 줄어들며, 다른 극으로 쉽게 유도될 수 있다.

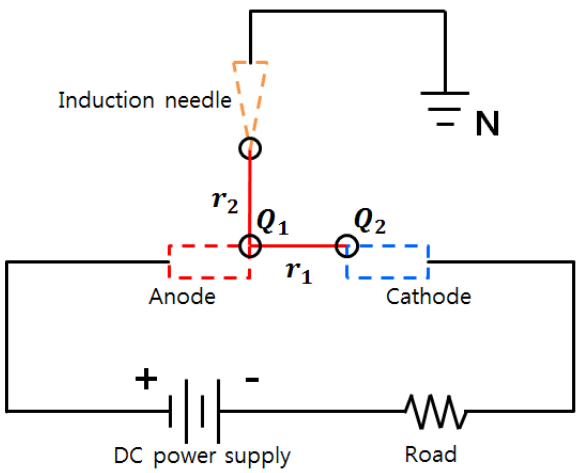


그림 2-8 아크유도형 DC 차단기의 등가회로도

Fig. 2-8 The Equivalent circuit diagram of the arc-induction-type DC circuit breaker

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅲ. 시뮬레이션

A. 아크유도 특성 분석

본 연구에서는 전계 및 자계해석 프로그램인 HFSS를 활용하여 아크의 특성을 분석하였다.

시뮬레이션을 통해 극간격의 변화에 따른 아크의 흐름을 분석하였다. 아크의 흐름은 각 도체에 흐르는 자속의 변화로 분석하였다. 식 (2)는 앙페르의 주회적분 법칙으로 전류 주위에 임의의 폐곡선을 구성하고 폐곡선 상의 각 점의 자계의 세기 H [AT/m]을 폐곡선 전체에 걸쳐 적분하는 것이 폐곡선을 통과하는 전류 I [A]이다. 이를 이용해 전류의 흐름을 확인할 수 있다.

$$I = \oint H \cdot dl \ [\mathrm{A}] \tag{2}$$

애노드에서 발생한 자속을 기준으로 캐소드에서 발생한 자속과 유도침에서 발생한 자속을 비교하기 위해 자계비를 산출하였다. 식 (3)은 자계비 산출 식으로써 접점의 개방에 따라 애노드와 캐소드, 애노드와 유도침 사이에 발생한 자속 변화량을 계산하여 아크의 흐름을 분석할 수 있다.

$$\text{Ratio of the magnetic flux} = \frac{Cathode}{Anode} \tag{3}$$

애노드와 캐소드의 개방동작으로 선로 단락 사고를 모의하여, 발생하는 아크를 통해 유도침의 설계 요인에 따른 아크 유도 특성을 비교 분석하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1. 유도침의 형태

유도침의 형태는 유도 특성에 직접적으로 영향을 주기 때문에 매우 중요하다. 접점 사이에 발생하는 아크를 효과적으로 빠르게 유도 및 흡수를 해야 하기 때문이다. 유도침은 접점 모양과 비슷한 원통형과 피뢰침 형상과 비슷한 원뿔형으로 설계하여 그 특성을 비교 분석하였다.

설계 조건은 표 3-1과 같다. 유도침의 형태에 따라 극간격을 0 mm에서 3 mm까지, 0.2 mm간격으로 시뮬레이션 하였다.

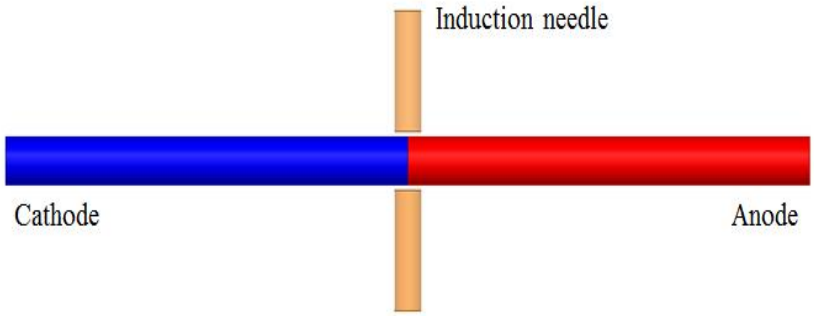
Table 3-1 The parameters of the simulation modelling

모 델	요 소	규격
애노드, 캐소드	재료	구리(Cu)
	지름	10 mm
	높이	150 mm
유도침 (원통형)	재료	구리(Cu)
	윗지름	10 mm
	밑지름	10 mm
	높이	25 mm
유도침 (원뿔형)	재료	구리(Cu)
	윗지름	0 mm
	밑지름	10 mm
	높이	25 mm

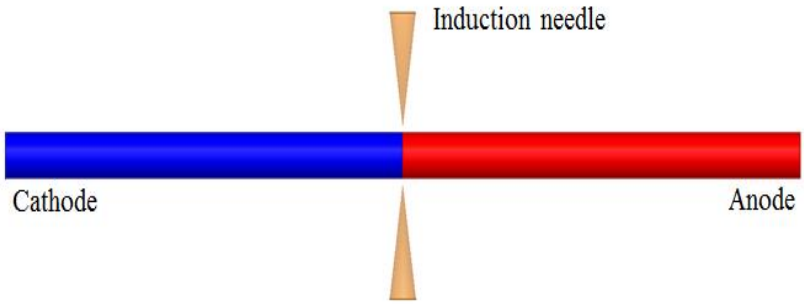
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 3-1 (a)와 (b)는 유도침 형태에 따른 원통형과 원뿔형으로 모델링한 시뮬레이션 그림이다. 유도침의 위치는 애노드와 캐소드의 중간지점이다. 유도간격은 1 mm이다. 극간격 변화에 따라 발생하는 자계 H 값을 측정하고, 식 (3)을 통해 산출한 값으로 비교 분석하였다[17-20].



(a) Cylinder-type



(b) Cone-type

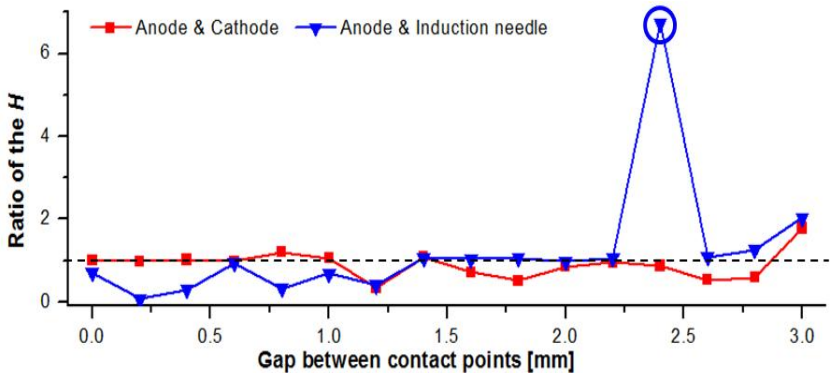
그림 3-1 유도침 모양에 따른 아크유도형 DC 차단기 모델링

Fig. 3-1 The arc-induction-type DC circuit breaker modelling according to shape of the induction needle

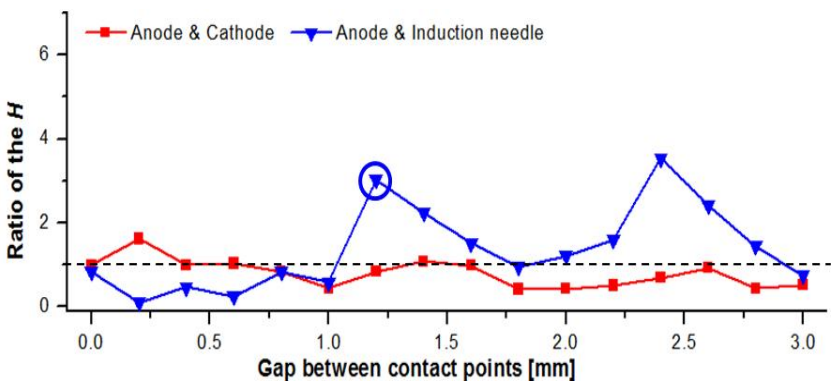
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 3-2 유도침의 원통형과 원뿔형으로 변화하는 극간격을 통해 발생하는 자계의 흐름을 나타낸 그래프이다. 그림 3-2 (a)는 원통형의 유도침 형태이며, 극간격 2.4 mm일 때 약 6.7의 가장 높은 자계비가 나타났다. 그림 3-2 (b)는 원뿔형의 유도침 형태이며, 극간격 1.2 mm일 때 약 3.1의 가장 높은 자계비가 나타났다. 따라서 유도침이 원뿔형일 때가 원통형일 때 보다 약 1.2 mm 빠르게 아크가 유도되는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Cylinder-type



(b) Cone-type

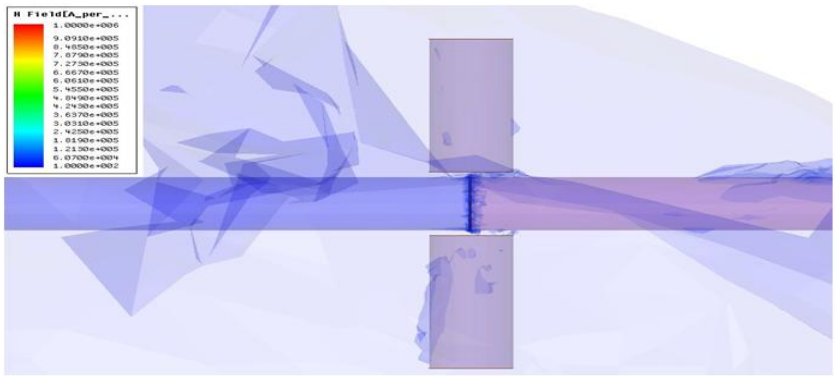
그림 3-2 유도침 모양에 따른 자계 흐름 그래프

Fig. 3-2 The flowing of a magnetic field according to shape of the induction needle

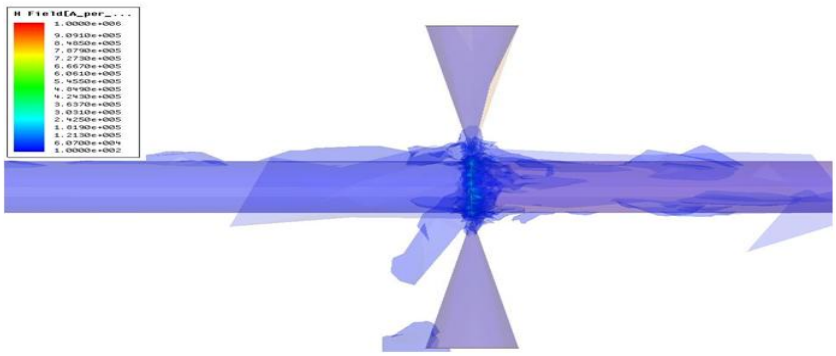
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 3-3은 유도간격이 1 mm이고, 극간격이 0.2 mm일 때의 자계 분포도를 나타낸 그림이다. 그림 3-3 (b)의 원뿔형이 그림 3-3 (a)의 원통형 보다 높은 자계 분포도를 확인할 수 있다.



(a) Cylinder-type



(b) Cone-type

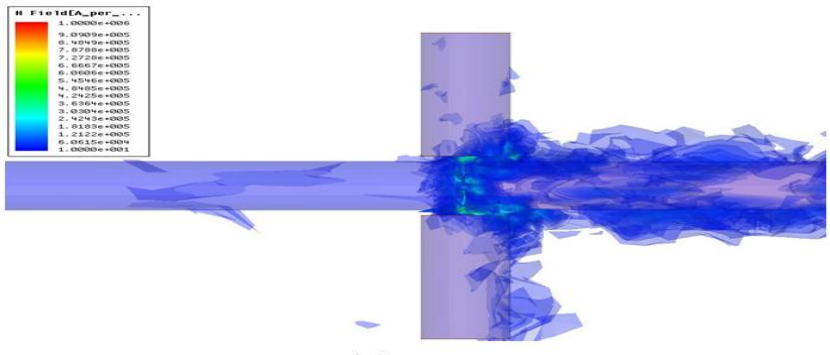
그림 3-3 극간격이 0.2 mm 일 때, 유도침 모양에 따른 자계 분포도

Fig. 3-3 The distribution plot of the a magnetic field according to shape of the induction needle, when the gap between contact points was 0.2 mm

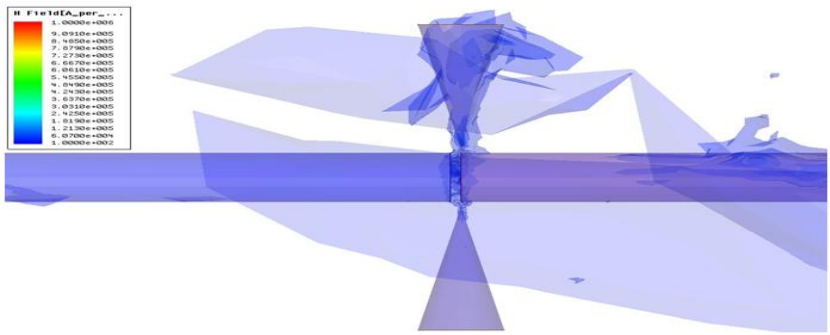
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 3-4는 극간격이 1.2 mm일 때의 자계분포도를 나타낸 그림이다. 그림 3-3과는 반대로 그림 3-4 (a)의 원통형이 그림 3-4 (b)의 원뿔형보다 높은 자계 분포도를 확인하였다. 이 시뮬레이션 결과로 극간격의 변화를 순차적으로 비교 분석하였을 때, 원뿔형의 유도침이 원통형의 유도침보다 아크를 더 빠르게 유도 및 흡수를 하였다. 따라서 유도침은 피뢰침의 형태인 원뿔형이 이온화된 전자들을 유도 및 흡수하는데 적합하다고 판단된다.



(a) Cylinder-type



(b) Cone-type

그림 3-4 극간격이 1.2 mm 일 때, 유도침 모양에 따른 자계 분포도

Fig. 3-4 The distribution plot of the a magnetic field according to shape of the induction needle, when the gap between contact points was 1.2 mm

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 유도침 개수

유도침의 개수에 따른 아크유도 특성을 분석하기 위해 그림 3-5와 같은 시뮬레이션 모델을 설계하였다. 그림 3-5 (a)는 1개의 유도침이 설계된 아크유도형 DC 차단기 모델이다. 그림 3-5 (b)는 2개의 유도침이 설계된 아크유도형 DC 차단기 모델이다. 유도침이 서로 180도 간격으로 설계되어 있다. 그림 3-5 (c)는 유도침 4개로 구성되었으며, 각각 90도 간격으로 설계되어 있다. 모델링의 설계 조건은 표 3-1의 원뿔형과 같다[20-22].

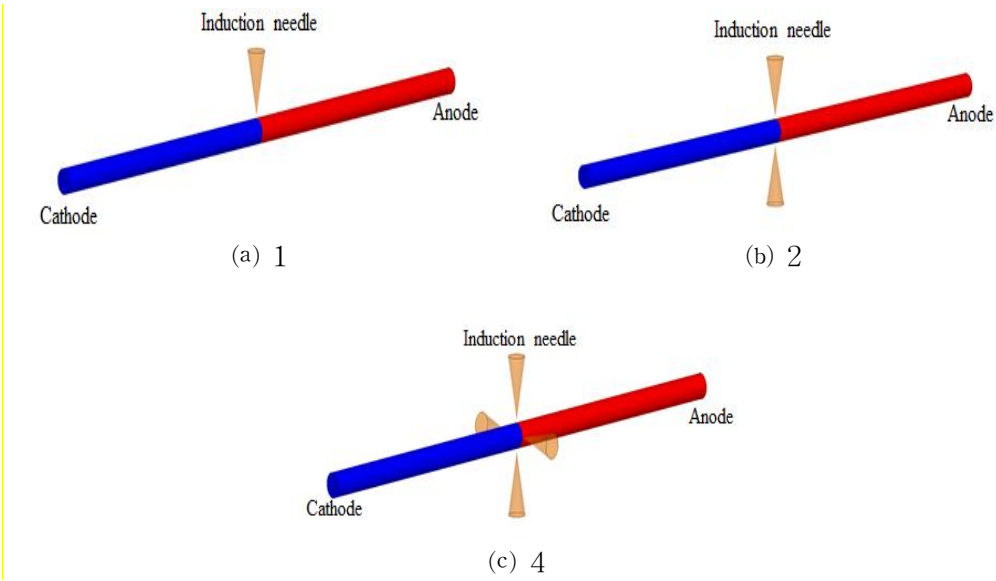


그림 3-5 유도침 개수에 따른 아크유도형 DC 차단기 모델링

Fig. 3-5 The arc-induction-type DC circuit breaker modelling according to number of the induction needle

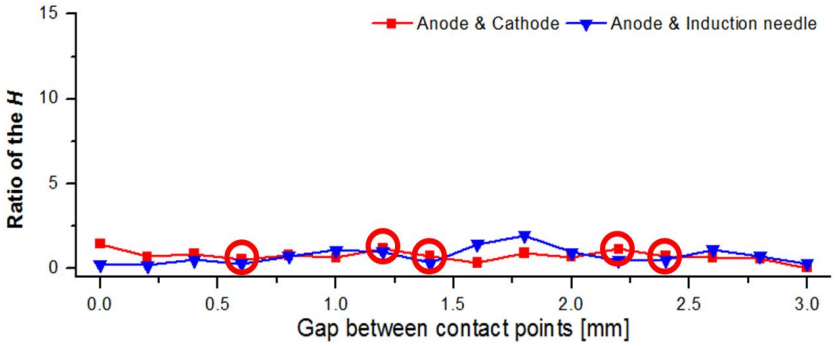
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

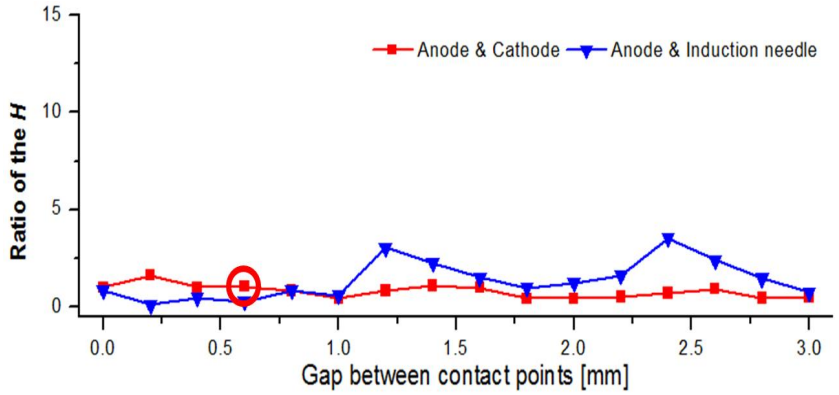
그림 3-6은 유도침 개수에 따른 자계 흐름을 극간격의 변화에 따라 나타낸 그래프이다. 그림 3-6 (a)는 유도침이 1개일 때의 자계 변화 그래프이다. 극간격 1.0 mm에서 애노드와 캐소드간의 자계비는 약 0.36, 애노드와 유도침간의 자계비는 약 1.09으로 나타났다. 하지만, 극간격 1.2 mm에서 애노드와 캐소드간의 자계비와 애노드와 유도침간의 자계비는 각각 약 1.17과 약 1.01로 나타났다. 이후, 극간격 1.6 mm에서 애노드와 캐소드간의 자계비는 약 0.34, 애노드와 유도침간의 자계비는 약 1.43으로 나타나는 등, 유도침의 아크 유도 흐름이 불안정한 것을 확인할 수 있었다. 그림 3-6 (b)는 극간격의 변화에 따른 유도침이 2개일 때 발생하는 자계의 변화 그래프이다. 극간격 0.2 mm에서는 애노드와 캐소드간의 자계비가 약 1.62로 나타났다. 이후, 극간격 1.2 mm에서는 약 0.45, 극간격 2.4 mm에서는 0.69인 것을 확인할 수 있었다. 반대로 애노드와 유도침 간의 극간격 0.2, 1.2, 2.4 mm에서 자계비가 각각 0.09, 3.03, 3.54로 나타났다. 일정한 비율로 자계가 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 그림 3-6 (c)는 유도침이 4개로 구성된 아크 유도형 DC 차단기 모델로 극간격에 따라 변하는 자속의 변화량을 그래프로 나타내었다. 애노드와 유도침간의 자계비는 극간격 0.6 mm에서 애노드와 캐소드간의 자계비보다 높은 약 2.1이 나왔지만, 그 이후 극간격 0.8, 1.4 mm에서는 애노드와 캐소드간의 자계비보다 낮은 약 0.76, 0.45가 나왔다. 시뮬레이션 결과, 유도침의 개수가 2개일 때 가장 안정적인 아크 유도 및 흡수 흐름을 확인할 수 있었다.

Collection @ chosun

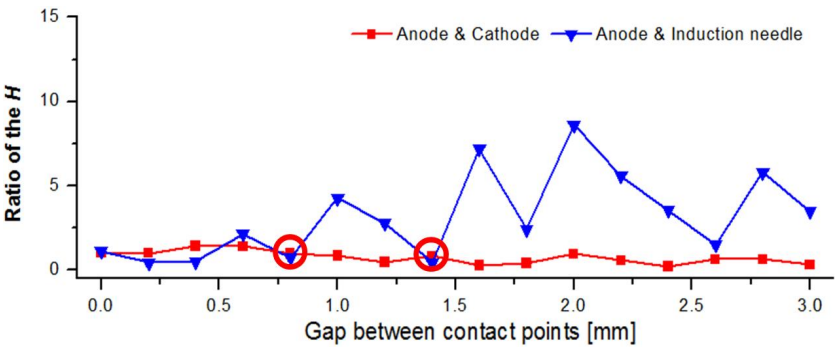
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) 1 (Induction needle)



(b) 2 (Induction needle)



(c) 4 (Induction needle)

그림 3-6 유도침 개수에 따른 자계 흐름 그래프

Fig. 3-6 The flowing of a magnetic field according to number of the induction needle

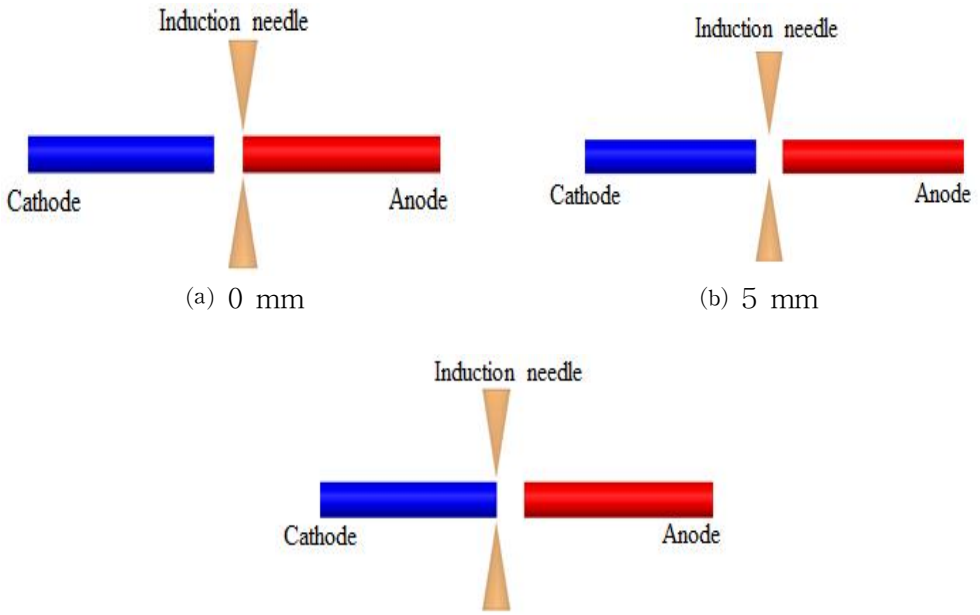
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 유도침 위치

유도침의 위치는 접점 개방 시 발생하는 아크를 효과적으로 유도 혹은 흡수할 수 있는 지점이어야 한다. 선행 시뮬레이션에서는 유도침을 도체의 이론적인 성질을 바탕으로 애노드와 최대한 가까운 거리에 위치시켰다. 하지만, 아크는 접점 사이로 호를 그리면서 발생한다. 유도침의 거리에 따라 아크의 유도 또한 달라질 수 있다. 그렇기 때문에 유도침과 극 사이의 거리에 대한 분석이 반드시 필요하다[23].

그림 3-7은 유도침 위치에 따른 아크유도형 DC 차단기의 시뮬레이션 모델이다. 유도침 위치는 애노드를 기준으로 0 mm, 5 mm, 10 mm로 나누어 위치한다. 이때, 유도간격은 1 mm이다.



(a) 0 mm (b) 5 mm

(c) 10 mm

그림 3-7 유도침 위치에 따른 아크유도형 DC 차단기 모델링

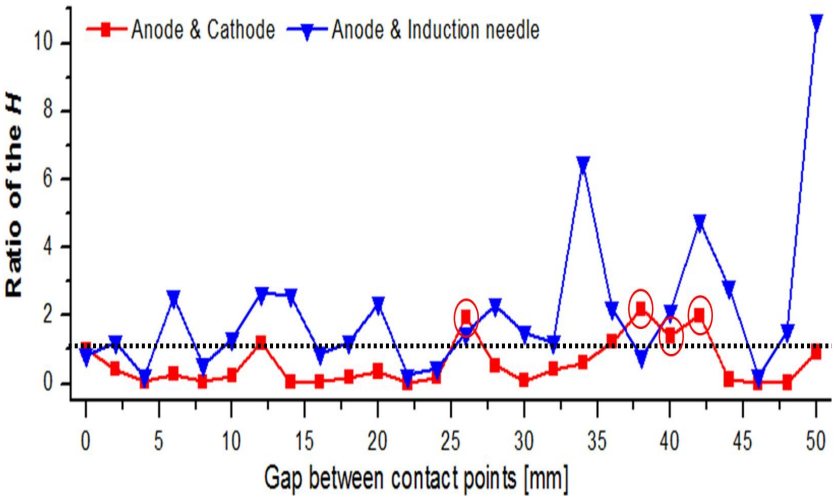
Fig. 3-7 The arc-induction-type DC circuit breaker modelling according to location of the induction needle

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 3-8 (a)는 유도침이 애노드로부터 0 mm 떨어진 지점에 위치하며, 극간격의 변화에 따라 나타나는 자계의 흐름을 그래프로 나타내었다. 그 결과, 극간격 26 mm에서 정상자계에 비해 약 2배 가까운 자속이 애노드와 캐소드 사이에서 발생하였다. 또한, 최대 발생된 자속비는 약 2.1배로 극간격 38 mm에서 발생하였다. 그림 3-8 (b)는 유도침이 애노드로부터 5 mm 떨어져 있을 때, 극간격 변화에 따라 나타나는 자계의 흐름 그래프이다. 다음 그래프와 같이 극간격 8 mm 지점에서 약 1.8배의 자계비가 나타났으며, 0~50 mm간 최대 자속비는 극간격 40 mm에서 약 4배 높게 나타났다. 그림 3-8 (c)는 유도침이 애노드로부터 10 mm 떨어진 상태이며, 극간격의 변화를 통해 나타나는 자계의 흐름을 나타낸 그래프이다. 극간격 6 mm에서 약 3배 높은 자속비가 나타났으며, 극간격 16 mm, 34 mm, 38 mm에서도 나타났다.

시뮬레이션 결과, 유도침이 애노드를 기준으로 0 mm 간격에 있을 때, 자속비가 가장 빠르게 안정적인 유도 및 흡수가 일어났다.



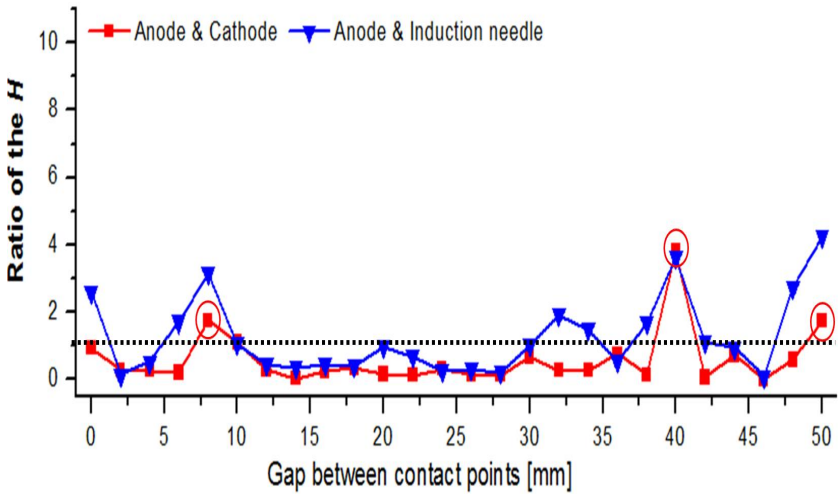
(a) 0 mm (Induction needle)

그림 3-8 (계속)

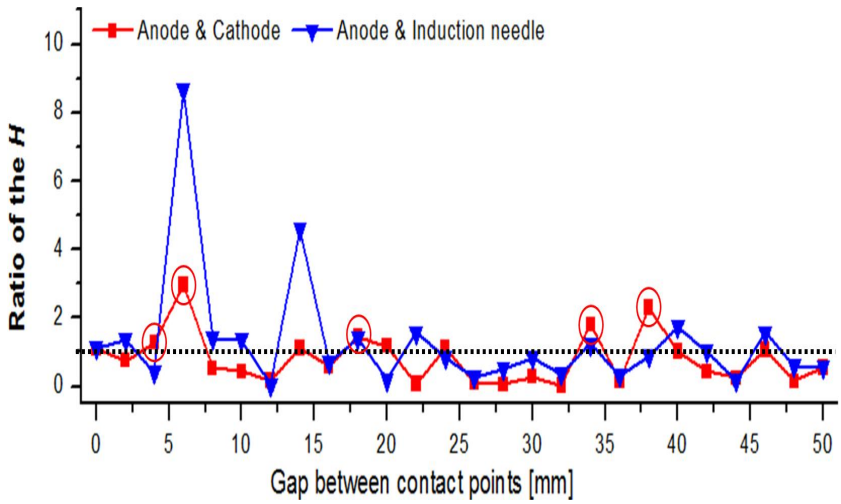
Fig. 3-8 (continued from the previous page)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(b) 5 mm (Induction needle)



(c) 10 mm (Induction needle)

그림 3-8 유도침 위치에 따른 자계 흐름 그래프

Fig. 3-8 The flowing of a magnetic field according to location of the induction needle

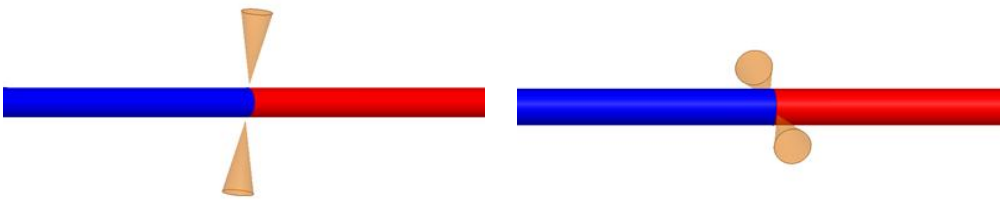
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. 유도침 방향

아크는 불규칙적인 호를 그리면서 발생하므로 유도침을 종방향과 횡방향에 따라 아크 유도에 영향을 끼칠 수 있다. 그러므로 유도침 방향에 따른 아크 유도에 대한 분석이 반드시 필요하다[24].

그림 3-9 (a)는 유도침이 종방향으로 위치해 있는 아크유도형 DC 차단기의 시뮬레이션 모델이다. 애노드와 캐소드 위치에 두 개의 유도침을 종방향의 180도 간격으로 위치해 있다. 그림 3-9 (b)는 유도침이 횡방향인 시뮬레이션 모델이다. 위의 모델링으로 극간격의 변화에 따르는 자계의 흐름을 그림 3-10과 같이 분석하였다. 그림 3-10 (a)는 유도침이 종방향으로 위치해 있을 때, 극간격의 변화에 따른 자속의 변화 그래프이다. 애노드와 캐소드간의 자계비는 일정하게 발생하였다. 하지만, 애노드와 유도침간의 자계비는 극간격의 변화에 따라 구간별로 단계적으로 증가하는 흐름을 보였다. 극간격 0~14 mm구간에서는 약 5.6의 평균 자계비를 보였고, 16~36 mm구간에서는 약 12.1의 평균 자계비를 보였다. 극간격 50 mm일 때, 약 41.3의 자계비가 나타났다. 그림 3-10 (b)는 유도침이 횡방향으로 위치해 있을 때, 극간격에 따른 자계 흐름 그래프이다. 애노드와 캐소드 간의 자계 흐름에는 큰 변화 없었다. 애노드와 유도침 간의 자계 흐름을 구간별로 나누어 분석해 본 결과, 극간격 0~14 mm 구간에서는 약 5.6의 평균 자계비를 보였다.



(a) Longitudinal axis　　(b) Horizontal axis

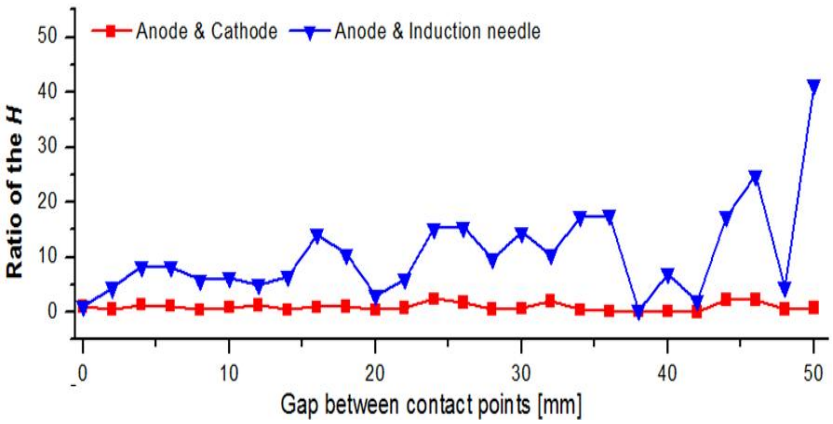
그림 3-9 유도침 방향에 따른 아크유도형 DC 차단기 모델링

Fig. 3-9 The arc-induction-type DC circuit breaker modelling according to direction of the induction needle

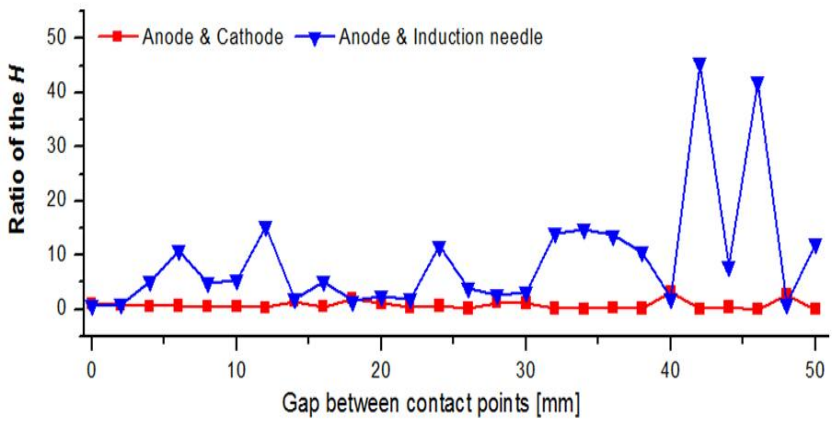
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

극간격 16~36 mm 구간에서는 약 6.8의 평균 자계비를 보였다. 특히, 극간격 42 mm에서 가장 높은 약 45.3의 자계비를 나타내었고, 극간격 46 mm 에서도 약 41.9의 높은 자계비를 보였다. 유도침이 횡방향으로 위치해 있을 때, 애노드와 유도침 사이에 발생하는 자속이 극간격 42 mm에서 높은 자계비가 나타나면서 종방향의 유도침보다 극간격에서 8 mm 빠르게 나타났다.



(a) Longitudinal axis



(b) Horizontal axis

그림 3-10 유도침 방향에 따른 자계 흐름 그래프

Fig. 3-10 The flowing of a magnetic field according to direction of the induction needle

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5. 유도간격 변화

애노드와 유도침 사이의 거리인 유도간격에 따라 주 선로에 흐르는 정상전류에 영향을 끼칠 수 있고, 아크유도 효율이 떨어질 수도 있다. 유도간격 변화에 따른 아크 유도를 분석하고 최적화된 위치를 찾고자 한다. 그림 3-11은 유도간격을 각각 1, 5, 10, 15, 20 mm로 나누어 시뮬레이션 설계한 모델이다.

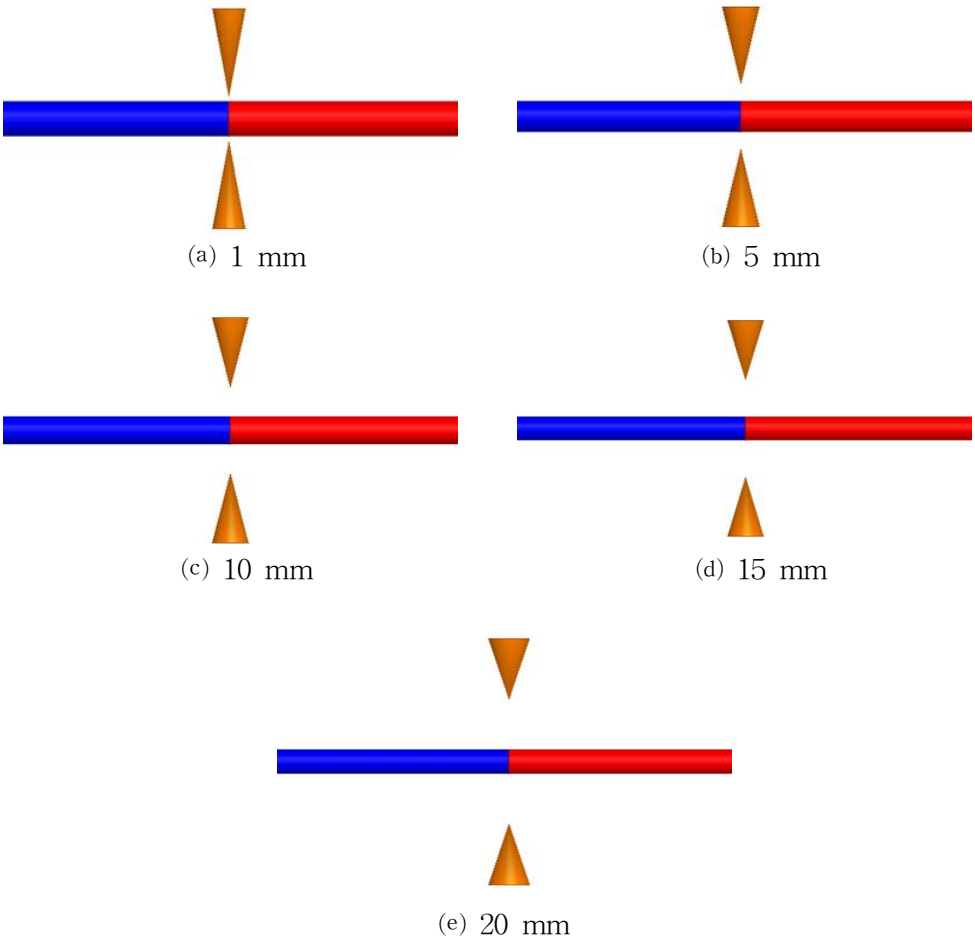


그림 3-11 유도간격에 따른 아크유도형 DC 차단기 모델링

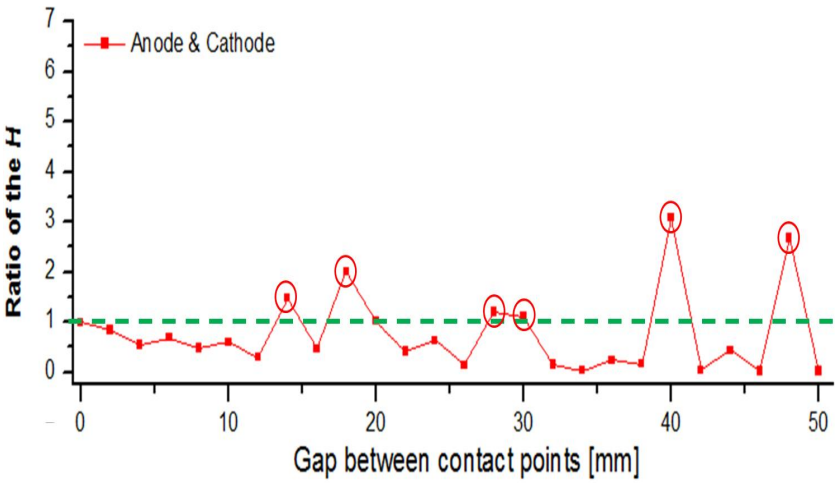
Fig. 3-11 The arc-induction-type DC circuit breaker modelling according to the inducing gap

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 3-12는 유도침의 유도간격에 따라 극간격이 변화할 때의 자속 흐름 그래프이다. 극간격이 0 mm일 때, 애노드와 캐소드 사이에 발생하는 자속비는 1이다. 이때, 이를 기준으로 그 이상 발생하는 과도 지점을 비교 분석하였다.

그림 3-12 (a)는 유도간격이 1 mm일 때이다. 0~50 mm 구간에서 과도 자속비는 총 6번 발생하였다. 극간격 14 mm에서 높은 자속비가 처음 발생하였으며, 약 1.4배였다. 그 이후 극간격 40 mm에서 가장 높은 약 3배의 자속비가 발생했다.



(a) 1 mm

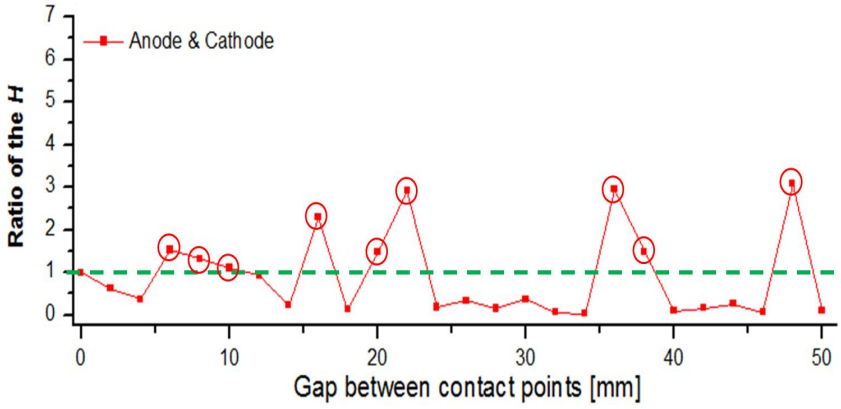
그림 3-12 유도간격에 따른 자계 흐름 그래프

Fig. 3-12 The flowing of a magnetic field according to the inducing gap

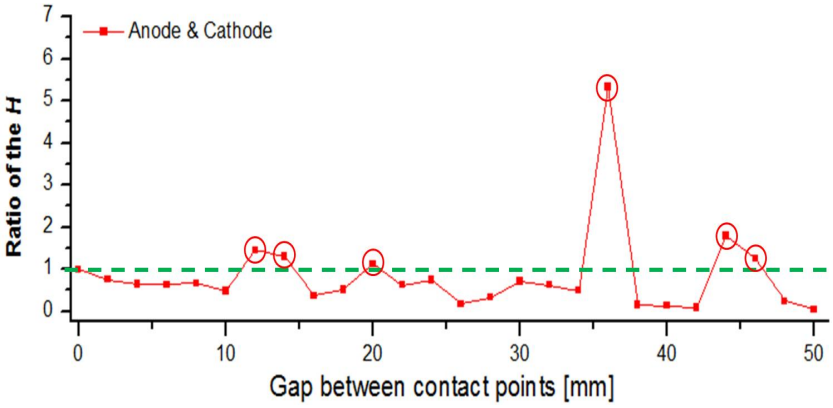
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 3-12 (b)는 유도간격이 5 mm일 때이다. 0~50 mm 구간에서 과도 자속비는 9번 일어났으며, 최초 발생 극간격은 6 mm이고, 약 1.5배의 자속비가 나타났다. 극간격 22, 36, 48 mm에서 약 3배 높은 자속비가 나타났다. 그림 3-12 (c)는 유도간격이 10 mm일 때이다. 최초 과도 자속비가 발생한 지점은 극간격 12 mm이고, 약 1.4배로 나타났다. 가장 높은 약 5.3의 자속비는 극간격 36 mm에서 발생하였으며, 총 과도 자속비 발생 횟수는 6번이었다.



(b) 5 mm



(c) 10 mm

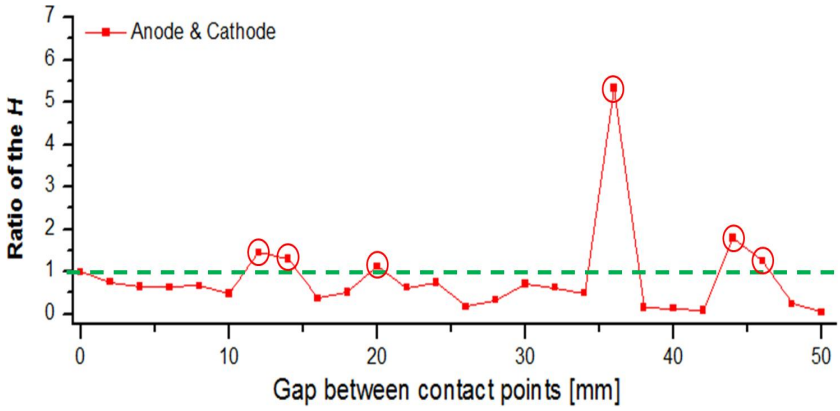
그림 3-12 (계속)

Fig. 3-12 (continued from previous page)

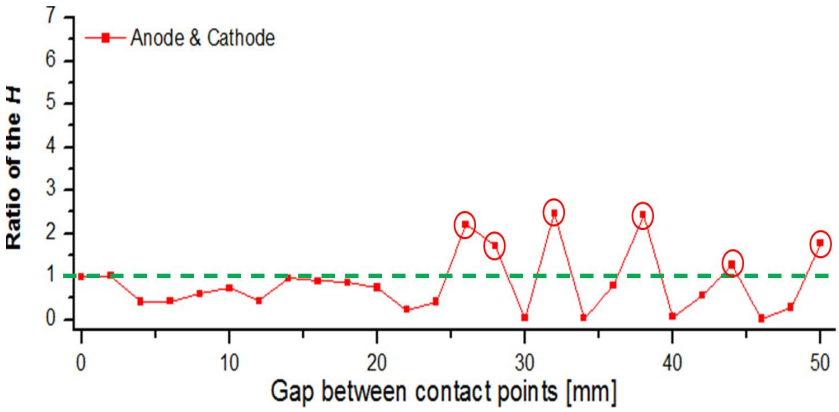
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 3-12 (d)는 유도간격이 15 mm일 때이다. 0~50mm 구간에서 과도 자속비는 총 6번 발생하였다. 최초 발생 시점은 극간격 26 mm로 약 2.2로 나타났다. 최대 자속비 값은 2.4로 극간격 32, 38 mm이었다. 그림 3-12 (e)는 유도간격이 20 mm일 때이다. 최초 과도 자속비가 발생한 시점은 극간격 8 mm이며, 총 횟수는 9번이다. 최대 높은 과도 자속비는 극간격 36 mm에서 약 14로 나타났다.



(d) 15 mm



(e) 20 mm

그림 3-12 (계속)

Fig. 3-12 (continued from previous page)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

B. 시뮬레이션 결과 분석

본 논문에서 적용되는 유도침의 아크유도 및 흡수에 대한 설계 조건은 시뮬레이션을 통해 비교 및 분석하였고, 그 결과는 다음과 같다.

- 유도침 형태는 원뿔형으로 접점을 향하는 방향의 등전위면을 좁게 하여 전계의 세기를 높게 해야 한다.
- 유도침 개수는 2 개일 때가 가장 안정적이며, 아크를 효과적으로 유도 및 흡수를 할 수 있었다.
- 유도침 위치는 애노드를 기준으로 0 mm일 때 가장 빠른 아크 유도 동작을 얻을 수 있었다.
- 유도침 방향은 횡방향이 애노드와 유도침 사이에서 발생한 자계비가 더 빠르고 높은 아크 유도 효율을 보였다.
- 유도간격은 15 mm일 때, 접점 개방 직후에도 상대적으로 안정적인 흐름을 보였다.

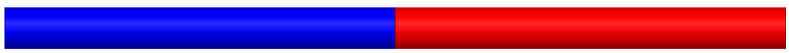
유도침 시뮬레이션 결과로부터 최적 유도침 설계 조건을 도출할 수 있었다.

유도침의 유무에 따라 접점 개방 동작으로 애노드와 캐소드 사이 발생하는 아크의 흐름에 변화를 가져 올 수 있을지를 확인하기 위해 기계식 접점과 기계식 접점에 유도침을 결합한 모델을 활용하여 비교 시뮬레이션을 수행하였다. 유도침을 결합한 모델의 시뮬레이션을 수행하여 제시된 유도침에 대한 검증을 진행하였다.

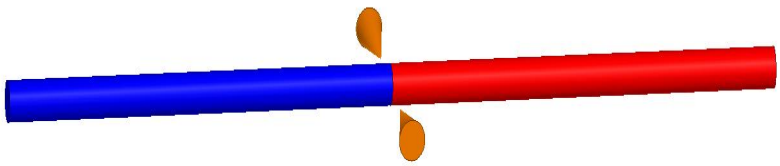
그림 3-13은 유도침의 유무에 따른 아크유도형 DC 차단기의 모델을 나타낸 그림이다. 그림 3-13 (a)는 유도침이 없는 기계식 DC 차단기 모델이고, 그림 3-13 (b)는 유도침이 결합된 아크유도형 DC 차단기의 모델이다. 설계조건은 표 3-2와 같다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) nonexistence



(b) existence

그림 3-13 유도침 유무에 따른 아크유도형 DC 차단기 모델링

Fig. 3-13 The arc-induction-type DC circuit breaker modelling according to existence and nonexistence of the induction needle

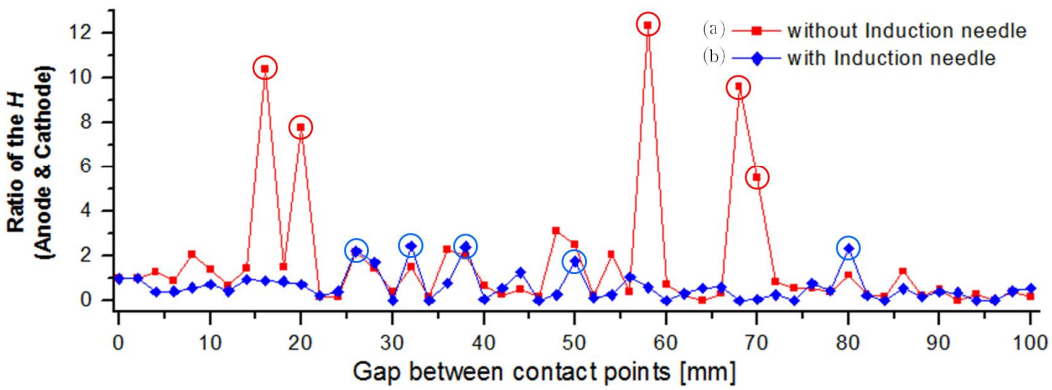
Table 3-2 A well-established design condition for the simulation

모 델	요 소	규격
유도침	재료	구리(Cu)
	윗지름	0 mm
	밑지름	10 mm
	높이	25 mm
설계 조건	유도침 형태	원뿔형
	유도침 개수	2 개
	유도침 위치	애노드 기준 0 mm
	유도침 방향	횡방향
	유도 간격	15 mm

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 3-14는 유도침 유무에 따른 애노드와 캐소드 간의 자속 변화 그래프를 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림 3-14 (a)는 유도침이 없을 때 자계 흐름 그래프이다. 단락사고를 모의하여 접점 개방시 자속 변화를 확인하였다. 그 결과, 극간격 16, 20, 30, 68, 70 mm에서 각각 약 10.4, 7.7, 12.3, 9.6, 5.5의 높은 자계비가 나타났다. 가장 높은 자계비는 약 12.3이며, 극간격 30 mm일 때 나타났다. 자계비가 높게 나타난 것은 전자의 흐름이 높은 상태이며, 전류의 흐름이 높게 나타난 것으로 사료된다. 그림 3-14 (b)는 유도침이 있을 때 자계 그래프이다. 그림 3-14 (a)와 동일한 방식으로 모의하여 접점의 변화를 주었다. 그 결과, 극간격 26, 32, 38, 80 mm에서 각각 2.2, 2.4, 2.4, 2.3의 높은 자계비가 나타났다. 가장 높은 자계비는 2.4이며, 극간격 32, 38 mm에서 나타났다. 유도침이 있을 때가 유도침이 없을 때 보다 약 5.1 배로 자계비를 줄였다.



(a) Mechanical DC circuit breaker, (b) Arc-induction-type DC circuit breaker

그림 3-14 유도침 유무에 따른 자계 흐름 그래프

Fig. 3-14 The flowing of a magnetic field according to existence and nonexistence of the induction needle

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅳ. 결 론

본 논문에서 제안한 아크유도형 DC 차단기는 기계식 차단기에 유도침을 결합한 구조이다.

아크유도형 DC 차단기는 기계식 차단기에 아크슈터 대신 유도침에 대하여 결합함으로써 차단기 개방 동작 시, 발생하는 아크를 유도 및 흡수하여 소호하는 방식이다. 본 논문에서는 아크유도형 DC 차단기의 핵심 요소인 유도침을 HFSS를 활용하여 설계하고 최적의 파라미터를 도출하였다. 또한, 단락 사고를 모의하여 유도침의 유무에 따른 사고 차단 특성을 분석하였다.

유도침은 아크를 신속하게 유도 및 흡수해야 하기 때문에 그 형태의 중요도는 매우 크다. 따라서, 유도침의 형태를 원뿔형과 원통형으로 나누어 자계 흐름을 비교 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 원뿔형이 극간격 약 1.2 mm 빠르게 아크가 유도됨으로써 원뿔형이 유도침의 형태로 적합한 것을 확인할 수 있었다. 또한, 유도침 개수에 따른 아크 유도 및 흡수에 대한 영향을 분석하기 위해 유도침의 개수로 1개, 2개, 4개로 나누어 자계 흐름을 비교 분석하였다. 유도침이 1개와 4개일 때 애노드와 캐소드 간의 자계비와 애노드와 유도침간의 자계비가 일정하지 못하고 불안정한 동작을 보였다. 하지만 유도침이 2개일 때, 애노드와 캐소드 간의 간격이 0.2, 1.2, 2.4 mm로 증가함에 따라 자계비가 각각 1.62, 0.45, 0.69이었으며, 동일한 거리에서 애노드와 유도침간의 자계비는 각각 0.09, 3.03, 3.54인 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 유도침 개수를 2개로 할때가 상대적으로 안정된 유도 흐름을 보였기 때문에 본 연구에서는 유도침 2개를 선정하였다.

아크는 사고에 의해 발생되는 Free-burning 상태의 아크로써 호를 그리며 발생한다. 이 형태를 고려하여 유도침 위치를 선정할 필요가 있다. 따라서, 유도침의 위치를 애노드를 기점으로 0 mm, 5 mm, 10 mm로 선정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 유도침의 위치가 애노드를 기준으로 0 mm일 때, 다른 설정 값들에 비해 극간격 약 16 mm에서 자계비 1.0을 초과하는 흐름을 확인할 수 있었다.

아크의 Free-burning 상태는 유도침의 방향에도 영향을 끼칠 수 있다. 따라서, 유도침의 방향을 종방향과 횡방향으로 나누어 자계 흐름을 비교 분석하였다. 유도침의 방향이 횡방향일 때, 종방향보다 8 mm 빠른 극간격 42 mm에서 높은 자

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

계비를 나타내는 것을 시뮬레이션 결과를 통해 확인할 수 있었다. 그러므로 유도침의 방향은 횡방향이 아크유도에 적합하다.

마지막으로 정상전류의 흐름을 방해하지 않고, 아크의 유도 효율을 높이기 위해 유도침 규격에 맞는 유도간격을 선정하는 것이 필요하다. 유도간격은 1, 5, 10, 15, 20 mm로 변화를 주어 시뮬레이션을 수행하였다. 유도간격이 15 mm일 때, 극간격 0 mm에서 24 mm까지 자계비 1.0을 넘지 않았으며, 극간격 32 mm에서 약 2.4의 최고 자계비를 나타내었다. 이는 유도간격 1, 5, 10, 20 mm보다 가장 낮은 값임을 확인하였다.

각 유도침 설계 조건의 시뮬레이션 결과들을 기반으로 설계한 유도침의 유무에 따른 차단 특성을 분석하였다. 극간격 14~18 mm에서 유도침 없을 때가 유도침 있을 때보다 자계비 약 10배로 높게 발생되었고, 극간격 58~70 mm구간에서는 약 12 배 높게 발생되었다. 따라서, 유도침이 없을 때보다 있을 때, 자계비가 약 5.1배 줄어드는 효과를 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해 유도침의 형태, 개수, 위치, 방향, 유도간격의 최적화 단계 시뮬레이션을 수행하였고, 최적의 유도링을 설계하여 기계식 DC 차단기에 적용하였다. 그 결과, 유도침의 적용은 차단극 접점 사이에 발생하는 자계를 약 5배 줄이는 결과를 나타냈다.

본 연구를 기반으로 아크유도형 DC 차단기를 실제로 설계하고, 그 특성을 분석 및 개선하는 연구가 지속적으로 이루어진다면, 경제성 및 빠른 차단능력을 가질 뿐만 아니라 다양한 차단기와 연계하여 더 나은 차단 능력을 선보일 유연성까지 갖추게 될 것이며, DC 그리드망에 즉각적으로 적용 가능한 DC 차단기가 될 수 있을 것으로 판단된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참 고 문 헌

[1] 송성근, 김용구, “직류(DC) 배전 시스템의 기술동향,” 전기의 세계, vol. 65(8), pp. 13-20, 2016.

[2] 지식경제부, “제3차 신재생에너지 기술개발 및 이용보급 기본계획(2009~2030),” 2008.

[3] 에너지관리공단 신재생에너지센터, “2008년 신재생에너지 보급통계,” 2009.

[4] J. C. Das, “Arc flash hazard calculation in L-V & M-V DC systems-part I-short-circuit calculations,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, pp. 1687-1697. May/June 2014.

[5] M. Callavik, A. Blomberg, J. Hafner, B. Jacobson, “The hybrid HVDC breaker an innovation breakthrough enabling reliable ahvdc grids,” ABB Grid systems Technical Paper, Nov. 2012.

[6] A. P. Strom, “Long 60-Cycle Arcs in Air,” AIEE 65, pp. 113-118, 1946.

[7] D. Sweeting, “Electrocutions and arcs,” in Energy NSW 2008 The [R]Evolution in Networks, Australia, New South Wales:NSW Chapter of Elect. Energy Soc. Australia, Oct. 2008..

[8] A. D. Stokes and W. T. Oppenlander, “Electric arcs in open air,” Journal of Physics D:Applied Physics, pp. 26-35, 1991.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[9] Z. Ganhao, “Study on DC circuit breaker,” Proc. 5th Int. Conf. Intell. Syst. Design Eng. Appl, pp. 942-945, 2014.

[10] 차민영, 한병문, “시뮬레이션에 의한 계통연계형 태양광발전의 동작 특성 분석,” 대한전기학회 학술대회 논문집, 1106-1107, 7, 2009.

[11] 허태복, 김학련, 창상훈, “전기철도 변전소의 직류고속도차단기 동작 감소방안에 관한 연구,” 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp. 1-6, 2004.

[12] C37.16, “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,” IEEE stabdards, 2009.

[13] Ravel F. Ammerman, Tammy Gammon, Pankaj K. Sen, John P. Nelson, “DC-Arc Models and Incident-Energy Calculations,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 46, no. 5, pp. 1810-1819, 2010.

[14] Fabian M. Uriarte, Angelo L. Gattozzi, John D. Herbst, Hunter B. Estes, Thomas J. Hotz, Alexis Kwasinski, Robert E. Hebner, “A DC Arc Model for series faults in Low voltage microgrids,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 3, no. 4, pp. 2063-2070, 2012.

[15] IEC 60947-2, “Low-voltage switchgear and controlgear part 2: Circuit breakers, IEC, 7 June, 2016.

[16] 이상익, 김동우, 김재현, 임용배, 강대철, “직류회로보호를 위한 저압용 직류차단기 설계,” 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 192-193, 2013.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[17] BEAMA, “Guide to Low voltage circuit-breakers standards,” June, 2015.

[18] 조연규, “고전압 모의시험을 통한 피뢰침의 성능 평가에 관한 연구,” 창원대학교 대학원 석사학위 논문, 2005.

[19] 이성민, “직류배전에 적용하기 위한 회로차단기에 관한 연구,” 공주대학교 대학원 석사학위 논문, 2012.

[20] 박상용, 정인성, 최혜원, 이유경, 김준범, 박노아, 황선호, 최효상, 정병익, “시뮬레이션을 이용한 아크유도형 직류 차단기의 유도 특성 분석,” 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 1559-1560, 2016.

[21] 김준범, 정인성, 최혜원, 박상용, 박노아, 황선호, 최효상, “유도침 재질에 따른 아크유도형 직류 차단기의 유도 특성,” 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 288-289, 2016.

[22] 박상용, 정인성, 최혜원, 김준범, 박노아, 황선호, 최효상, “유도링 개수에 따른 아크유도형 직류 차단기 특성 분석,” 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 242-242, 2017.

[23] 박상용, 정인성, 최혜원, 김준범, 박노아, 황선호, 최효상, “유도침 위치에 따른 아크유도형 직류 차단기의 차단 특성,” 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 1649-1649, 2017.

[24] 박상용, 정인성, 최혜원, 김준범, 박노아, 황선호, 최효상, “유도침 방향에 따른 아크유도형 직류 차단기의 차단 특성,” 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 105-105, 2016.

Collection @ chosun