

저압직류용 하이브리드 차단기

김효성[†]

Hybrid LVDC Circuit Breakers

Hyo-Sung Kim[†]

Abstract

This work investigates the commutation characteristics of the current flowing through an electrical-contact-type switch to the semiconductor switch branch during the breaking operation of hybrid DC switchgear. A simple, reliable, low-cost natural commutation method is proposed, and the current commutation characteristics are analyzed in accordance with the conduction voltage drop of the semiconductor switch branch through experiments. A prototype 400 V/10 A class natural commutation type hybrid DC switchgear is set up. Its performance is verified, and its characteristics are analyzed.

Key words: Hybrid LVDC circuit breaker, Electric contact type switch, Semiconductor switch, Commutation method, Conduction loss, Break arc.

1. 서 론

최근 수십 년 동안 전자 제품의 출현으로 우리가 사용하는 장치는 멀티미디어 및 모바일 장비, LED 조명, IT 장비, 선박, 전기 자동차 등 직류(DC)와 함께 작동하도록 변화되었다. 또한 최근에는 세탁기, 냉장고, 팬, 가열/냉각 시스템 등의 전기제품은 DC 전원으로 구동되는 전기 모터를 채택하여 속도 제어와 에너지 효율성이 향상되고 있다. 태양광 및 풍력 에너지를 사용하는 친환경 에너지에 의한 전원 시스템의 확산과 함께 전력생산의 형태도 DC로 이동되고 있다. 배터리 기술의 발달과 함께 직류는 또한 널리 인식되는 충전/방전 에너지의 기본적인 형태가 되었다. 이처럼 뛰어난 기술 발전과 더불어 DC 장치 비용의 대폭적인 절감은 직류배전 시장의 확대를 가져오고 있다^[1-5].

그러나, 직류배전 시장이 널리 보급되기 위해서는 인체 및 장비를 사고로부터 보호하는 안전기술이 요구된다. 교류시스템과 비교하여 직류시스템의 안전과 관련되는 차별적인 특징 중의 하나는 개폐기의 개방시 발생하

는 접점에서의 아크현상이다. 직류는 교류와 달리 전류가 스스로 영이 되는 점이 발생하지 않고 지속적으로 흐르므로, 기존의 전기접점형 회로차단기(Circuit breaker)나 스위치로 부하전류를 차단하는 경우 차단아크의 소호가 쉽지 않아서 전기화재의 위험성이 있다^[6-10]. 이에 비하여 반도체를 사용한 스위치는 회로차단시 아크를 수반하지 않는 장점이 있으나 도통시 손실이 크다는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 전기접점형 스위치와 반도체 스위치의 장점을 살린 복합형 회로차단기(Hybrid Circuit Breaker)의 개념이 제안되었다^[11].

복합형 직류회로차단기는 회로투입시 전기접점형 주스위치를 통하여 전압강하가 거의 없이 높은 효율로 부하전류를 공급하며, 회로차단시 주스위치에 흐르던 부하전류를 일시적으로 반도체 스위치(IGBT)로 전환(Commutation) 시켰다가 반도체 스위치에서 아크없이 차단한다. 따라서 회로차단시 주스위치에 흐르던 부하전류를 일시적으로 반도체 스위치로 전환시키기 위한 전용의 전류전환 회로가 필요하다. 기존의 전류전환 방식은 대별하여 Proactive 방식과 LC공진에 의한 역전류 주입방식이 있다^[12-14].

Proactive 방식은 접점형 주스위치 브랜치에 전환용 반도체 스위치를 직렬로 삽입하여 구성한다^[12,13]. 회로투입시 주스위치와 함께 직렬로 접속된 전류전환용 반도체 스위치도 완전히 ON 상태가 되어 최소한의 전압강하만 발생한다. 회로 차단시 주스위치와 직렬로 접속

Paper number: TKPE-2022-27-6-5

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: hyoskim@kongju.ac.kr, Dept. of EE & Control Eng., Kongju National University, Korea
Tel: +82-41-521-9167 Fax: +82-41-563-3689

Manuscript received Aug. 8, 2022; revised Sep. 4, 2022;
accepted Sep. 4, 2022

— 본 논문은 2022년 전력전자학술대회 우수추천 논문임

된 전류전환용 반도체 스위치를 능동운전영역(active operation area)에서 운전하므로써 주 스위치브랜치와 병렬로 접속되어 있는 반도체 스위치열(IGBT string) 양단의 전압을 상승시켜서 반도체 스위치열로 부하전류가 전환되도록 한다. 이 방식은 회로투입 상태에서 도통시 전류전환용 반도체 스위치(LCS) 양단에 발생하는 전압강하로 인하여 효율이 낮아지며, 전류전환용 반도체 스위치의 열발산을 위한 방열비용이 요구된다.

LC공진에 의한 역전류 주입방식은 LC공진회로를 주 스위치와 병렬로 연결하여 구성한다^[14]. 회로 투입시 주 스위치의 접점을 통해서만 부하전류가 흐르므로 효율이 높다. 회로 차단시 LC 공진전류를 발생시켜서 주스위치에 강제적으로 전류제로점을 만들어 줌으로써 주스위치를 아크없이 차단하고 부하전류를 반도체 스위치열(IGBT string)로 전환시킨다. 이 방식은 LC 공진회로에 전원전압 및 부하전류의 2배에 달하는 전압/전류 스트레스가 발생하여 LC 공진회로의 비용이 증가하며, 주스위치에도 부하전류의 2배에 해당되는 전류가 흐르므로 이에 맞는 주스위치의 접점용량 설계가 요구된다.

앞에 열거한 두 가지 전류방식은 전류장치에 추가적인 비용이 들어갈 뿐만 아니라 전류전환 동작을 제어하기 위한 장치가 추가적으로 필요하며, 이러한 제어장치는 전체시스템의 신뢰성을 저하시키는 원인이 되기도 한다. 본 논문은 간단하고 신뢰성이 높으며 비용이 적게 드는 자연전류방식을 채용한 복합형 직류개폐기의 구성을 제시하고, 차단동작시 전기접점형 스위치에 흐르는 부하전류를 반도체스위치 브랜치로 전환시키는 특성에 대하여 연구한다. 전원전압 400V/ 부하전류 10A급 자연전류방식 복합형 직류개폐기를 제작하여 성능을 검증하고 특성을 분석한다.

2. 제안하는 복합회로 개폐기의 자연전류 원리

그림 1에 접점형 스위치를 갖는 저전압 직류시스템의 전력회로 구조 및 차단아크 실험파형을 보인다. 접점형 스위치는 도통손실이 아주 낮아서 기존에 교류용 개폐기로서 많이 사용되어 왔다. 그러나 직류에서는 전류 영점이 없어서 그림1(b)에서 보이는 것처럼 차단시 상당히 긴 시간동안 아크가 발생되어 접점의 용융 또는 열로 인한 인명 및 설비의 손상을 초래할 개연성이 높다.

그림 1(b)에서 시간에 따라 상승하는 파형은 차단시 접점 사이에 발생하는 아크전압이고, 하강하는 파형은 차단시 접점 사이의 공기를 관통하는 아크전류이다. 접점이 개방되는 순간 부하전류는 접점 사이의 공기 매질에 전기방전 경로를 형성하여 흐르려고 한다. 전기방전은 방전전류의 크기에 따라 암방전, 글로우 방전, 아크 방전으로 분류되며 부하전류가 약 1A 이상인 경우 아크방전이 발생한다. 아크방전이 발생하기 위해서는 전자와 공기분자의 충돌에 의한 플라즈마의 생성을 야기하기

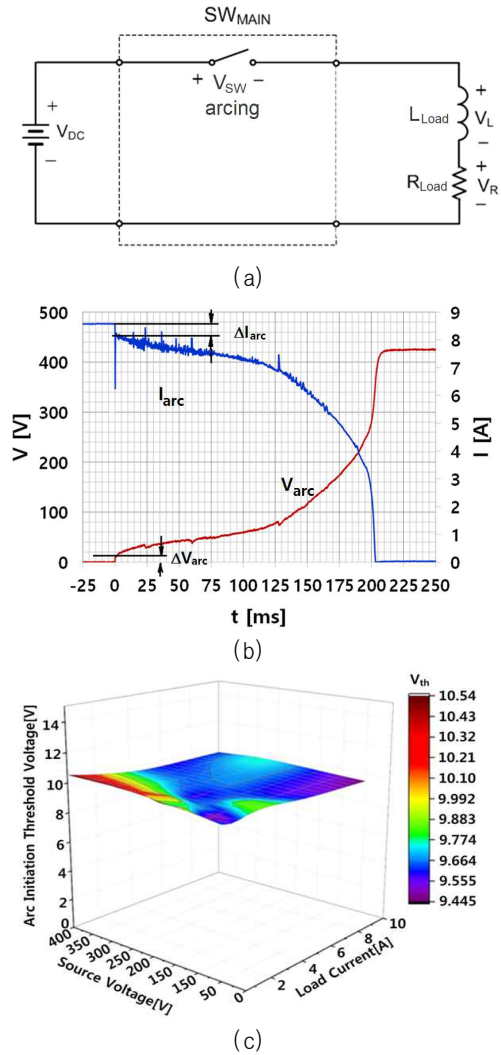


Fig. 1. Circuit structure and breaking arc of contact type switch. (a) Power circuit concept of contact type switch, (b) Breaking arc voltage/current waveform, (c) Arc initiation voltage characteristic graph according to power supply voltage and load current.

위한 전압이 필요하며 약 10V의 아크촉발 전압(ΔV_{arc}) 이 접점간에 급격히 형성된다^[15]. 반대로 부하전류는 아크가 발생하는 순간 접점간에 발생하는 아크촉발전압에 해당되는 만큼의 아크전류 강하(ΔI_{arc})가 나타나서 키르히호프의 전압법칙을 만족한다. 즉,

$$\Delta I_{arc} = \frac{\Delta V_{arc}}{V_{DC}} \times I_{Load} \approx \frac{10}{V_{DC}} \times I_{Load} \quad (1)$$

그림 1(c)는 전원전압과 부하전류에 따른 아크촉발전압 특성 그래프를 보인다. 아크와 관련된 실험은 이온과 전자충돌의 양자역학적 특성으로 인하여 카오틱하고 편차가 심하게 발생한다. 이 그래프는 이러한 편차 현상을 줄이기 위하여 10번 반복실험하여 평균값을 구한 결과이다. 전원전압 0 - 400V, 부하전류 0 - 10A의 전 영역에서 아크촉발전압이 약 10V 정도로 일정하다는 것을

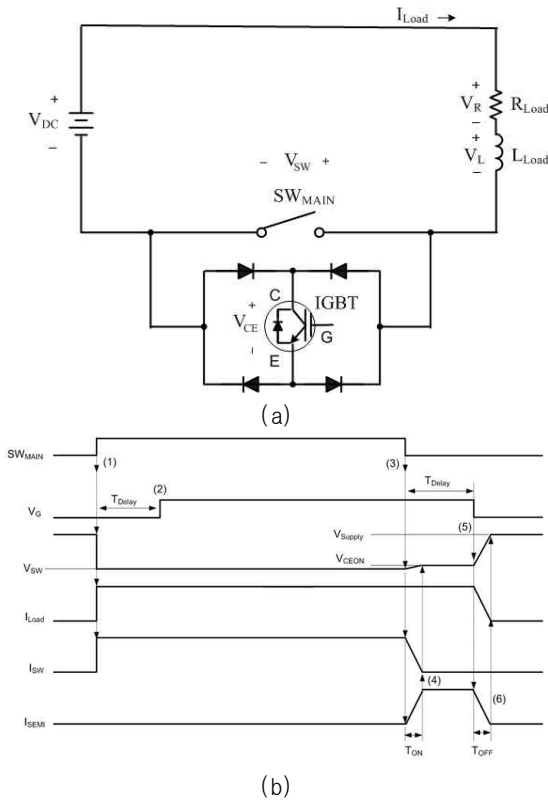


Fig. 2. The concept of a natural commutation type hybrid circuit breaker. (a) Power circuit concept, (b) Operation sequence

알 수 있다. 만일 반도체 스위치의 도통전압이 10V 이하인 전력용 반도체가 전기접점형 주스위치 양단에 병렬로 연결되어 있다면, 전기접점이 개방되는 순간 발생하는 아크축발전압 ($\Delta V_{arc} \approx 10V$)에 의하여 전기접점을 통하여 흐르던 부하전류는 아크방전 없이 곧바로 반도체 스위치로 전환될 수 있다. 이러한 전류전환방식을 본 논문에서는 자연전류(natural commutation) 방식이라고 명명한다.

그림 2(a)는 이러한 원리를 이용하여 제안하는 저압직류용 복합회로차단기의 전력회로 개념을 보인다. 반도체 스위치 브랜치는 단일 또는 여러 개의 반도체 스위치를 직렬접속하여 구성할 수 있다. 또한 브리지 다이오드를 사용하므로써 양방향 도통이 가능하다. 그림 2(b)는 제안된 저압직류용 복합회로차단기의 기본적인 동작 순서를 보인다.

제안된 저압직류용 복합회로차단기의 동작 순서는 다음과 같다;

스위치 ON 동작 시퀀스:

- (1) 전기접점형 주스위치(SW_{Main})를 ON 시킨다.
- (2) 일정한 시간지연 후에 반도체 스위치의 Gate에 ON 명령을 주어 반도체 스위치를 ON 시킨다. 이때 전기접점형 주 스위치(SW_{Main})가 ON된 상황에서는 반도체 스위치의 Collector와 Emitter 단자 사이의

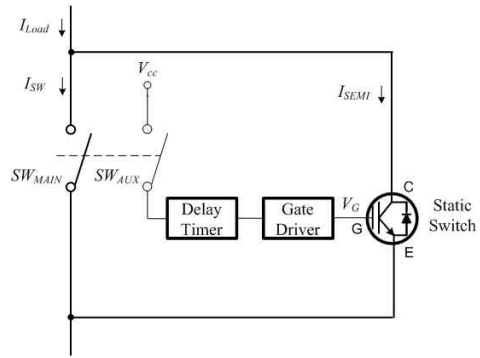


Fig. 3. Concept of a gate driving circuit for the proposed commutation type hybrid circuit breaker.

포화전압(V_{CEON})이 거의 영에 가까우므로, Gate에 ON 명령을 주어도 실상 반도체 스위치는 ON 되지 못하며 부하전류는 주 스위치(SW_{Main})를 통하여 흐르게 된다.

스위치 OFF 동작 시퀀스:

- (3) 반도체 스위치의 Gate에 ON 명령이 주어진 스텝바이 상태에서, 전기접점형 주스위치(SW_{Main})를 OFF 시킨다.
- (4) 아크발생 원리에 따라 전기접점형 주스위치(SW_{Main})가 OFF 되어 아크가 발생하기 직전에 점점 양단에 약 10V 정도의 아크축발전압이 형성되려고 한다.
- (5) 아크축발전압이 반도체 스위치를 턴온시키기에 충분하면 전기접점형 주스위치(SW_{Main})를 통하여 흐르던 전류는 아크방전 없이 이미 Gate에 ON 명령이 주어진 반도체 스위치를 통하여 즉시 전환된다.
- (6) 전기접점형 주스위치(SW_{Main})가 충분히 열려서 절연 거리를 확보한 후에 반도체 스위치의 Gate에 OFF 명령을 주어 차단아크 발생 없이 반도체 스위치를 OFF 시킨다.

이와 같이, 제안된 저압직류용 복합회로차단기는 ON 시 점점을 통하여 전류가 흐르므로 도통효율이 높고, OFF 동작시 점점 양단에 아크가 발생하지 않는다.

그림 3에 제안하는 복합형 회로차단기를 위한 반도체 스위치 게이트구동회로의 개념을 설명한다. 간단히 하기 위하여 단방향 전류차단에 대해서 설명한다. 전기접점형 스위치는 기계적으로 연동되는 주 스위치(SW_{Main})와 보조 스위치(SW_{Aux})의 두 개 스위치 쌍으로 되어있다. 주스위치(SW_{Main})와 병행하여 동작하는 보조 스위치(SW_{Aux})는 시간지연회로(Delay Timer)를 경유하여 반도체 스위치의 Gate에 가해지는 ON/OFF 명령을 지연시킨다. 시간지연회로는 마이크로프로세서나 타이머릴레이를 사용할 수도 있고, 아날로그 RC회로의 시정수에 의한 시간지연을 이용할 수도 있다. 이와 같이 간단한 지연회로만 사용하여 제어회로를 구성하므로 제품이 간단하여지고 고장의 발생요인이 거의 없다.

3. 자연전류 특성 실험

제안된 복합회로차단기의 자연전류 특성을 검증하기 위하여 기초실험을 수행하였다. 실험에서 사용한 전원 전압은 400Vdc 이고 부하전류는 10A로 하였다. 그림 4는 제안된 복합형 회로차단기의 실험회로를 보인다. 실험의 편의상 한 개의 반도체 스위치(MOSFET)에 다이오드를 직렬로 접속하여 반도체스위치 브랜치의 도통전압(V_{DSON})을 달리하면서 전류전환 특성을 분석하였다. 실험에 사용된 MOSFET는 IXYS사의 IXFH20N50P3로서 500V/20A의 정격이고, Diode는 Fairchild사의 FFH50US60S로서 600V/50A의 정격이다. [표 2]에 기초 실험에 사용된 직렬접속 다이오드수와 반도체스위치 브랜치의 등가 도통전압(V_{DSON})을 보인다.

그림 5는 그림 1과 같은 순수한 점점형 주 스위치 (SW_{Main})만 사용하여 부하전류를 차단한 경우의 실험 파형을 보인다. 차단초기에 점점형 주 스위치 양단의 전압이 아크축발전압으로 급상승한 후 아크가 발생하기 시작하며, 점점의 개리거리가 증가하면서 스위치 점점 양단의 전압은 지속적으로 증가하며 소호단계로 진행된다. 이 실험에서 부하전류 차단시 아크발생 시간은 약 195ms로 측정되었다. 한편, 스위치 점점을 통하여 흐르던 부하전류는 점점 양단의 전압이 증가함에 따라 지속적으로 감소하며 소호 단계로 진행된다.

그림 5(b)는 차단아크 발생 초기의 실험파형을 확대한 것이다. 점점형 스위치가 분리되어 아크가 발생하기 전 약 10.31V의 아크축발전압이 형성된다. 이때 초기 차단 전류는 식 (1)에 따라 약 0.24A 정도 감소하여 약 9A 정도가 된다.

$$\Delta I_{arc} = \frac{\Delta V_{arc}}{V_{DC}} \times I_{Load} = \frac{10.31}{400} \times 9.24 \approx 0.24[A] \quad (2)$$

만일 그림 4와 같이 그림 1의 순수한 점점형 스위치와 병렬로 반도체스위치를 추가한다면, Case 1의 경우는 아크축발전압(10.31V)이 반도체스위치의 도통전압($V_{DSON} = 4.36V$) 보다 크므로 주 스위치 점점에서의 아크발생 없이 반도체 스위치로 전류전환이 일어난다. Case 2의 경우는 점점형 주 스위치 양단의 전압이 반도체스위치의 도통전압($V_{DSON} = 12.83V$)에 이르러서 전류 전환이 일어나기 전까지 약 1.28ms 동안 점점양단에 아크가 발생할 것으로 보인다. 또한 Case 3의 경우는 점점형 주 스위치 양단의 전압이 반도체스위치의 도통전압($V_{DSON} = 23.3V$)에 이르러서 전류전환이 일어나기 전까지 약 6.88ms 동안 점점양단에 아크가 발생할 것으로 보인다.

그림 6은 제안하는 자연전류방식 복합형 직류회로차단기를 통하여 부하전류가 흐르던 상황에서 주 스위치 (SW_{Main})만 OFF 시킨 시점에서 반도체스위치로의

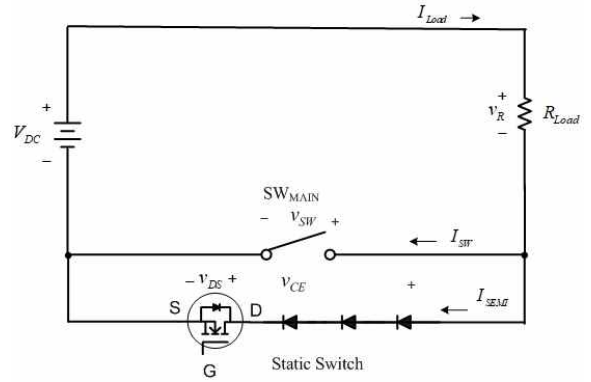


Fig. 4. Basic experimental circuit of proposed natural commutation type hybrid circuit breaker.

TABLE I
BASIC EXPERIMENT CONDITION

Supply Voltage [V]	400
Load Resister [Ω]	40
Load Current [A]	10
MOSFET	IXFH20N50P3
Diode	FFH5 - US60S

TABLE II
NUMBER OF DIODES CONNECTED IN SERIES AND EQUIVALENT CONDUCTION VOLTAGE OF SEMICONDUCTOR SWITCH (V_{DSON})

Case	No. of series diodes	Equivalent V_{DSON} [V]
1	0	4.36
2	10	12.83
3	20	23.3

자연 전류전환 특성을 실제로 확인하기 위한 실험파형을 보인다. 그림 6(a)는 Case 1 조건으로 단일 반도체 스위치만을 사용하여 반도체스위치의 도통전압이 약 4.36V인 경우이다.

주 스위치가 열리면서 스위치 점점 양단에 아크가 형성되기 위하여 약 10V 정도의 아크축발 전압이 상승하려고 하지만, 반도체스위치의 도통전압인 약 4.36V 정도에 이르르면 반도체 스위치가 ON 되면서 스위치점점 양단의 전압을 반도체 스위치의 도통전압(V_{DSON})으로 고정하여 잡아주므로 아크가 전혀 형성되지 못하고 부하전류가 반도체 스위치로 전환되는 것을 볼 수 있다. 이 경우 약 24us 정도의 시간지연을 갖고 주 스위치에 흐르던 부하전류가 이미 게이트신호가 인가되어 있던 반도체 스위치 브랜치로 빠르게 전환된다.

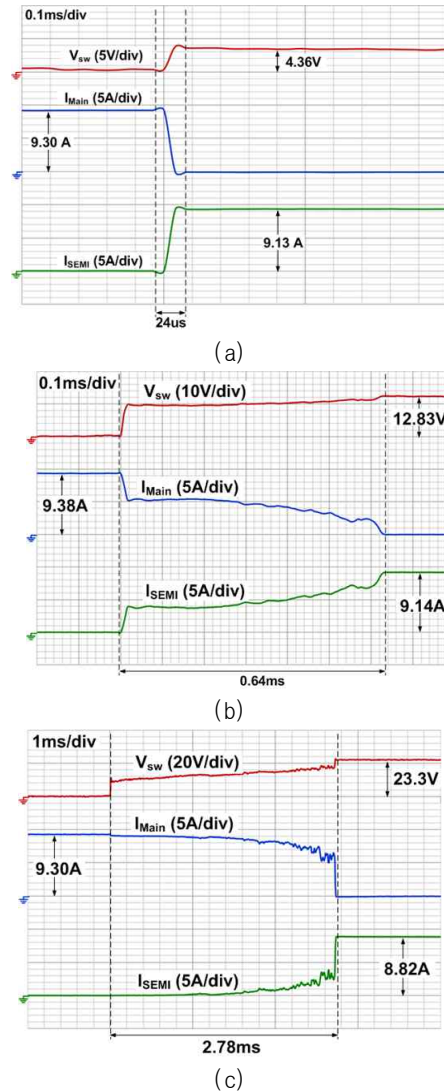
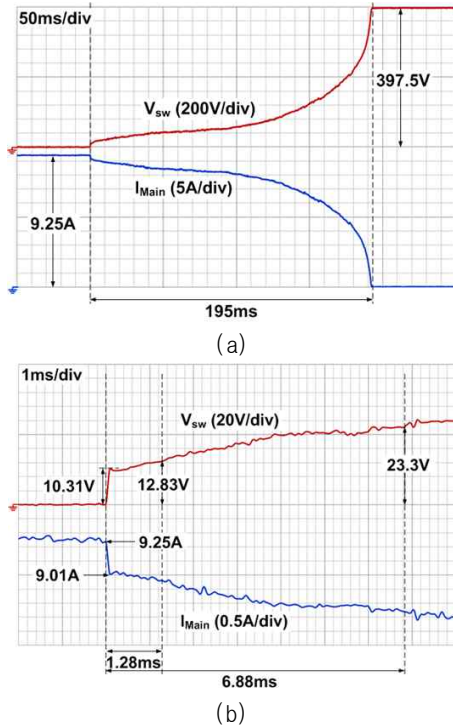


Fig. 5. Experimental waveform of load current cut-off by pure contact type switch. (a) Waveform for the entire period, (b) Waveform for initial expansion of the breaking arc.

그림 6(b)는 Case 2 조건으로 다이오드 10개를 직렬 연결하여 반도체스위치 브랜치의 도통전압(V_{DSON})을 약 12.83V로 조정한 경우의 부하전류 차단 실험파형이다. 주 스위치가 열리면서 주 스위치 접점 양단에 아크가 형성되기 위하여 약 10V 정도로 아크축발전압이 상승하면서 반도체스위치 브랜치 양단에 가해 지지만, 반도체 스위치를 도통시키기 위해 충분한 전압에 이르지 못하므로 반도체스위치는 완전히 ON 되지 못하고 과도적으로 능동영역에서 동작하며 약 4A 정도의 부하전류만 전환된다. 따라서 나머지 약 5A 정도의 부하전류는 주 스위치를 통하여 아크 상태로 흐르게 되므로 차단아크가 발생하는 것을 볼 수 있다.

이때, 주스위치 양단에서 발생하는 아크는 초기 차단 전류가 마치 5A인 아크 현상이 나타난다. 점접형 주 스위치의 개리거리가 증가함에 따라 주스위치 접점 양단의 아크전압이 증가하고 이 아크전압은 반도체 스위치 브랜치의 양단에도 가해지기 때문에 반도체스위치 브랜치로 바이패스되는 부하전류가 증가하면서 아크소호시간을 줄여준다.

계속하여 아크전압이 반도체스위치 브랜치의 도통전압(V_{DSON})인 약 12.83V를 넘어서면 모든 전류는 반도체스위치로 전환되며 점접형 스위치는 완전히 소호된다. 이때 아크가 지속되는 시간은 약 0.64ms 이다. 이는 그림 5(b)에서 예상했던 전류전환이 일어나기까지의 시간 약 1.28ms 보다 짧다.

Fig. 6. Current commutation experimental waveform of the proposed hybrid circuit breaker. (a) Case 1; $V_{DSON} = 4.36V$, (b) Case 2; $V_{DSON} = 9.16V$, (c) Case 3; $V_{DSON} = 23.3V$

그 이유는 아크가 발생하는 동안 병렬연결된 반도체스위치가 능동영역에서 동작하면서 아크전류를 어느정도 바이패스 시키므로 접점에서의 아크에너지가 상대적으로 줄어들기 때문이다.

그림 6(c)는 Case 3 조건으로 다이오드 20개를 직렬 연결하여 반도체스위치 브랜치의 도통전압(V_{DSON})이 약 23.3V 정도가 되도록 조정한 경우의 부하전류 차단 실험파형이다. 제한된 복합형 직류회로차단기의 주 스위치가 열리면서 스위치 접점 양단에 아크가 형성되기 위하여 약 10V 정도로 전압이 상승하지만, 반도체 스위치 브랜치의 도통전압에 전혀 미치지 못하여서 차단초기에 반도체 스위치는 거의 도통되지 못하고 아크발생에 의한 0.24A 정도의 차단전류 감소 현상만 나타난다.

점접형 주 스위치 접점의 개리거리가 증가함에 따라 차단아크의 발생과 함께 점접형 주 스위치 양단의 아크전압이 증가한다.

TABLE III
EQUIVALENT CONDUCTION VOLTAGE OF SEMICONDUCTOR SWITCH (V_{DSON}) AND ARCING CHARACTERISTICS

Case	No. of diodes	Equival. V_{DSON} [V]	$T_{contact}$ [ms]	T_{Hybrid} [ms]
1	0	4.36	0	0
2	10	12.83	1.28	0.64
3	20	23.3	6.88	2.78

이 아크전압은 반도체 스위치 브랜치의 양단에도 가해지기 때문에 반도체스위치는 과도적으로 능동영역에서 동작되면서 반도체스위치 브랜치로 바이패스 되는 부하전류가 증가하면서 주 스위치에 흐르는 전류를 감소시키므로 순수한 접점형 스위치에 비하여는 아크소호 시간이 감소한다.

또한 아크전압이 더욱 증가하여 반도체스위치 브랜치의 도통전압(V_{DSON})인 23.3V에 이르면 부하전류는 모두 반도체 스위치로 전환되어 주 스위치는 완전히 소호된다. 이 경우 아크가 지속되는 시간은 약 2.78ms 이다.

이는 그림 5(b)에서 예상했던 전류전환이 일어나기까지의 시간 약 6.88ms 보다 짧다. 그 이유는 아크가 발생하는 동안 병렬연결된 반도체 스위치가 능동영역에서 동작하면서 아크전류를 어느 정도 바이패스 시켰으므로 접점에서의 아크에너지가 상대적으로 줄어들기 때문이다. 표 3은 순수한 접점형 스위치와 제안한 복합형 개폐기에서 접점 양단의 전압이 반도체스위치 브랜치의 도통전압(V_{DSON})에 도달하는데 걸리는 시간특성을 정리하였다.

이와같이 반도체스위치 브랜치의 도통전압(V_{DSON})이 접점형 주 스위치의 아크촉발전압($\Delta V_{arc} \approx 10[V]$) 보다 큰 경우도 접점형 스위치에서 발생하는 아크전압이 증가함에 따라 반도체 스위치가 과도적으로 능동영역으로 동작하여 아크전류를 일부 바이패스 시킴으로써 아크소호시간을 줄여주는 효과는 있다. 이러한 경우, 시간이 지남에 따라 주 스위치에 흐르던 아크전류는 반도체스위치로 모두 전환되지만, 주 스위치 양단 접점에서 발생하는 아크를 피할 수는 없다.

더욱이, 전원전압이 증가하거나 부하전류가 커져서 차단 아크전력이 크게 증가하는 경우는, 전류전환이 일어나기 전에 아크에너지에 의하여 접점이 융착되어 차단이 실패하는 등의 사고가 발생할 수도 있다. 결론적으로 제안된 복합형 직류차단기가 아크발생 없이 정상적으로 작동되기 위하여는 반도체 스위치 브랜치의 도통전압이 아크촉발 전압인 10V 미만이어야 한다. 즉,

$$V_{DSON} < \Delta V_{arc} \tag{3}$$

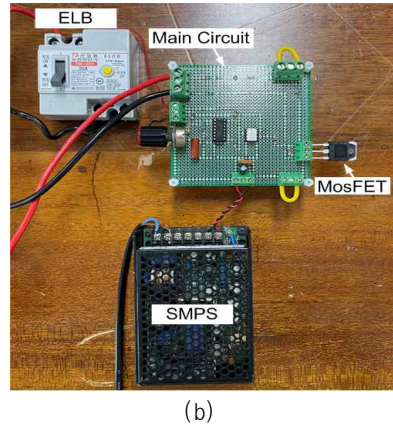
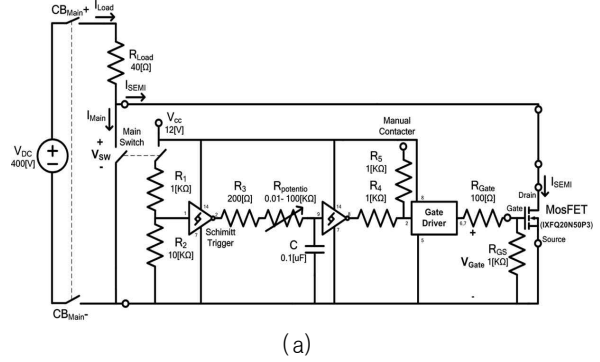


Fig. 7. Propotype hybrid circuit breaker for natural commutation method. (a) Schematic circuit diagram, (b) Photo produced.

4. 복합형 개폐기의 제작 및 특성 실험

그림 7은 제안된 복합형 회로차단기의 구현 회로를 보인다. 전기접점형 스위치는 기계적으로 연동되는 주 스위치(SW_{Main})와 보조 스위치(SW_{Aux})의 두 개 스위치 쌍으로 되어있다. 주 스위치(SW_{Main})와 병행하여 동작하는 보조 스위치(SW_{Aux})는 시간지연회로(Delay Timer)를 작동하여 반도체 스위치(MOSFET)의 Gate에 가해지는 ON/OFF 명령을 지연시킨다. 전원전압이 400V로서 비교적 낮으므로 한 개의 MOSFET 스위치로 전원차단 기능이 가능하다. 이는 기초실험 조건인 표 3의 Case 1에 해당된다. 시간지연회로는 두 개의 슈미트 트리거 특성을 갖는 Not 게이트 사이에 RC-시간지연 회로를 두어서 시간지연을 발생하도록 하였다. 회로요소가 아날로그 방식이며 단순하여 외부 잡음에 의한 오동작의 가능성이 낮고 신뢰성이 높다.

그림 7(b)는 제작된 400V/40A급 복합형회로차단기의 외형 사진이다. 복합형회로차단기에서 사용하는 반도체 스위치부는 전용 반도체차단기와 달리 도통시 발생하는 열을 외부로 발산시키기 위한 히트싱크를 필요로 하지 않으므로 제품의 사이즈가 크게 줄어들며, 도통시 발생하는 열에 의한 제품의 열화가 발생하지 않는 특징이 있다.

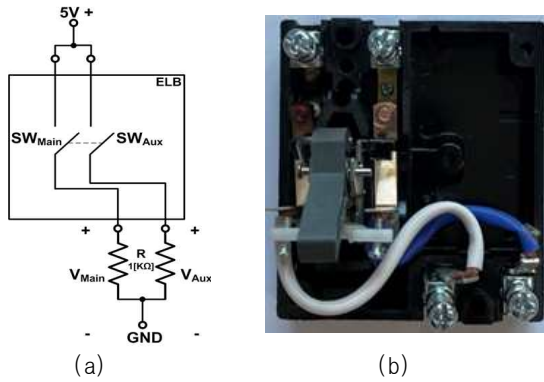


Fig. 8. The structure and appearance of the contact type switch used. (a) Circuit diagram, (b) Photo

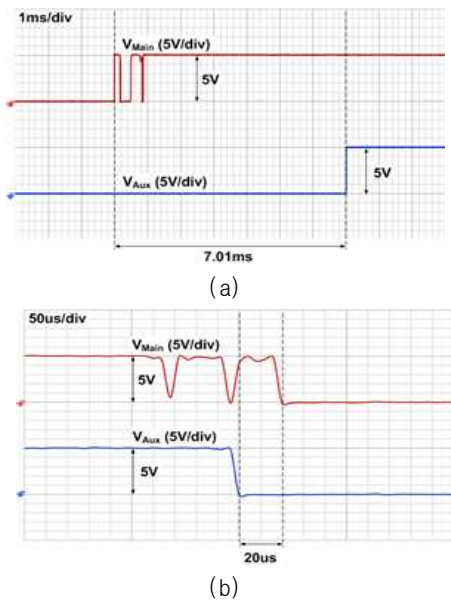


Fig. 9. ON/OFF characteristics of the contact type switch used. (a) ON characteristic, (b) OFF characteristic

그림 8은 제작에 사용된 접점형 스위치의 구조와 외관을 보인다. 접점형 스위치는 주택 분전함에서 사용되는 Electric Leakage Breaker(ELB) 스위치를 분해하여 접점 부분만 사용하였다. 그림 9는 사용된 ELB 접점의 ON/OFF 동작 특성을 보인다. 그림 9a)는 제작에 사용된 ELB 접점의 ON 동작 시 특성을 보인다. 두 접점의 동작이 동시에 ON 되지 못하고 시간차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 주 접점으로 사용하는 접점은 ON 동작 시 채터링 현상이 있으며, 보조접점으로 사용하는 스위치는 약 7ms의 시간차가 발생한다. 이러한 시간차는 복합회로차단기의 동작에 요구되므로 문제가 되지 않는다. 즉 스위치 ON시 주 스위치가 먼저 켜지고 다음으로 보조 스위치가 켜져야 하므로 이러한 동작특성은 제품의 정상적인 작동에 도움이 된다. 다만 두 접점의 이러한 시간차 동작이 반복적으로 재현되지 않는다면 문제가 될 수 있다.

그림 9(b)는 제작에 사용된 ELB 접점의 OFF 동작 시

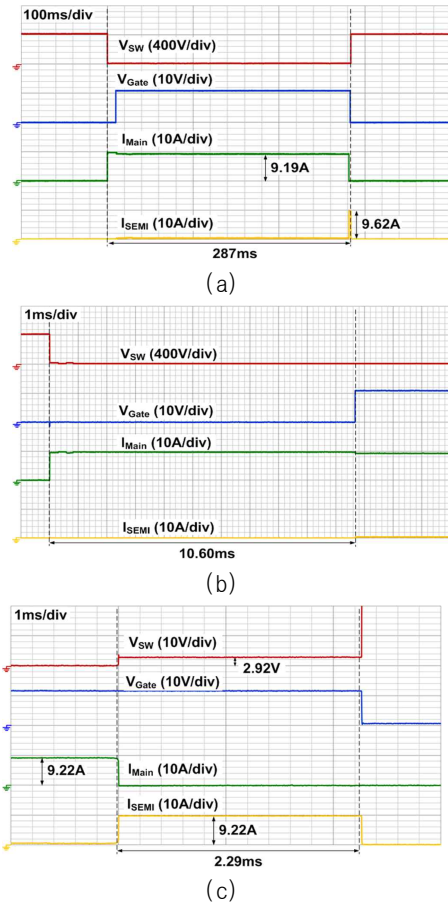
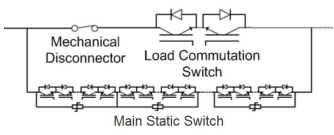
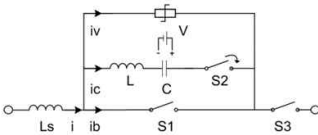
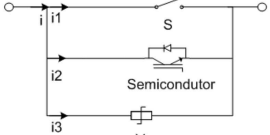


Fig. 10. Experimental waveform of load current cut-off by the prototype LVDC hybrid circuit breaker. (a) whole period waveform, (b) ON performance, (c) OFF performance

특성을 보인다. ON 동작 시와 마찬가지로 두 접점의 동작이 동시에 OFF 되지 못하고 시간차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 주 스위치에서 짧은 시간을 갖는 채터링 현상이 있지만 큰 문제가 되지는 않는다. 그러나 그림1(b)에 설명한 것처럼 주 스위치가 OFF 된 후에 보조 스위치가 OFF 되어야 함에도 불구하고 제작에 사용된 ELB 접점은 보조 스위치가 먼저 OFF 되는 문제가 있다. 이러한 문제를 해소하기 위하여 RC 지연회로를 사용한 보조 스위치의 출력신호를 적절히 지연할 필요가 있다. 그림 10은 제작된 LVDC 복합형 개폐기에 의한 부하전류 차단 실험 파형을 보인다. 그림 10(a)는 전체기간 중의 주요부의 전압 및 전류 파형을 보인다. 맨 위의 파형은 주 스위치 양단의 전압을 보인다. 위에서 둘째 레벨의 파형은 반도체 스위치에 인가하는 게이트 신호의 파형이다. 반도체 스위치에 인가하는 게이트 신호는 보조 스위치의 신호를 RC 시간지연회로로 시간지연을 하여 보낸다. RC 시간지연회로는 슈미트 트리거 IC 특성을 사용하여 ON 및 OFF 시 모두 약 3ms의 시간지연을 유발한다. 위에서 셋째 레벨의 파형은 주 스위치를 통해서 흐르는 부하전류의 파형을 보인다. 마지막으로 맨 아래의 파형은 소호용 반도체 스위치에 흐르는 전류

TABLE IV
COMPARISON OF THE PROPOSED LVDC HYBRID CIRCUIT BREAKER

Type	Proactive commutation	LC resonant commutation	Proposed Natural commutation
Scheme			
Measures	Line commutate switch (LCS)	- Resonant inductor - Resonant capacitor	Arc initiation voltage
Break arc	No	Exist (1~5ms)	No
Conduction loss	High	Low	Low
Applications	HVDC	HVDC	LVDC
Trouble issues	LCS heating	- Capacitor aging - Contactor aging by arc	Not particular
Timing control	Complex	Complex	Simple

의 특성을 보인다.

그림 10(b)는 제작된 LVDC 복합형 개폐기의 ON동작 시 주요부의 파형을 보인다. 파형의 순서는 그림 10(a)의 경우와 같다. 주 스위치가 ON된 이후에 약 10.6ms가 지난 후 소호용 반도체 스위치를 ON시키는 게이트 신호가 출력된다. 그러나 반도체 스위치의 게이트 신호와 관련 없이 부하전류는 주 스위치를 통해서만 흐른다. 이는 반도체 스위치의 ON 저항 또는 ON voltage drop이 주 스위치 양단의 값에 비하여 크기 때문이다. 따라서 소호용 반도체 스위치는 켜져있지만 부하전류는 주 스위치로만 흐른다.

그림 10(c)는 제작된 LVDC 복합형 개폐기의 OFF 동작 시 주요부의 실험 파형을 보인다. 각 레벨에서 파형의 순서는 그림 10(a)의 경우와 같다. 주 스위치가 OFF되면 주 스위치에 흐르던 전류는 즉시 소호용 반도체 스위치로 전환된다. 이때 소호용 반도체 스위치가 ON되기 위하여 필요한 전압만큼 주 스위치 양단의 전압이 약 2.9V 정도 상승하는 것을 볼 수 있다. 소호용 반도체 스위치는 RC 시간지연회로에 의해서 설정된 적당한 시간이 지난 후에 게이트 신호가 영으로 떨어지면서 아크 없이 소호된다.

5. 결 론

본 논문에서는 저압직류에서 도통시 손실을 낮추고 차단시 아크가 발생하지 않는 복합형 개폐기의 원리를 분석하고 자연전류방식의 게이트 구동 제어기를 제안하였다. 자연전류특성 실험결과 반도체 스위치 브랜치의 도통전압(V_{DSON})이 주 스위치 접점의 아크축발전압(ΔV_{arc})보다 낮으면 아크없이 전류전환이 이루어지는 것을 증명하였다. 또한 400V/10A급 LVDC 복합형 개폐기를 제작하여 성능을 검증하고 특성을 분석하였다. 반도체

스위치와 도통 시간은 3ms 미만으로서 짧은 시간 동작하므로 스위치의 과부하내량을 크게 할 수 있다. 최적 설계에 의하여 OFF 동작시 반도체 스위치의 도통 시간을 더욱 줄인다면 반도체 스위치의 정격전류는 크게 낮추어 사용해도 될 것이다.

제안된 자연전류 방식 복합형 직류 개폐기는 주택용 배전반 스위치 및 벽부 스위치 등에 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 제안하는 LVDC 복합차단기의 장단점을 정리하면 표4와 같다.

이 논문은 2016년도 정부(교육과학기술부)의 재원을 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2016R1D1A3B01008279).

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2022-00144404, 친환경선박 핵심기술 국제표준화).

실험과 자료정리에 도움을 준 대학원생 석사과정 신윤성군에게 감사합니다.

References

[1] Pratt, A.; Kumar, P.; Aldridge, T.V., "Evaluation of 400V DC distribution in telco and data centers to improve energy efficiency," *INTELEC 2007*, pp. 32 - 39, 2007.
 [2] T. Babasaki, "Developing of higher voltage direct-current power-feeding prototype system," *INTELEC 2009*, pp. 1-5, 2009.
 [3] E. Rodriguez-Diaz J. C. Vasquez J. M. Guerrero "Intelligent DC homes in future sustainable energy systems:

when efficiency and intelligence work together," *IEEE Consum. Electron. Mag.* Vol. 5 No. 1 pp. 74-80 Jan. 2016.

[4] T. Dragicevic J. C. Vasquez J. M. Guerrero D. Skrllec "Advanced LVDC electrical power architectures and microgrids: a step toward a new generation of power distribution networks," *IEEE Electr. Mag.* Vol. 2 No. 1 pp. 54-65 Mar. 2014.

[5] M. Ghaffarpour Jahromi G. Mirzaeva S. D. Mitchell D. Gay "Powering mobile mining machines: DC versus AC power," *IEEE Ind. Appl. Mag.* Vol. 22 No. 5 pp. 63-72, Sep. 2016.

[6] 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.

[7] Seungseok BAEK, "Development of plug and socket -outlet for 400 volts direct current distribution system," *Conference record on ICPE-2011*, pp. 218-222, 2011.

[8] 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.

[9] ABB SACE S.p.A. "ABB circuit-breakers for direct current applications," , 2007.

[10] Christian Strobl et al, "Safety concepts and circuit protection for LVDC grids in datacenters and in telecommunications," *INTELEC 2018*, CD ROM, 2018.

[11] Z. A. Shukla and G. D. Demetriades, "A survey on hybrid circuit-breaker topologies," *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 30, No. 2, pp. 627 - 641, July 2014

[12] M. Callavik and A. Blomberg, "The hybrid HVDC breaker," ABB Grid Systems, 2012.

[13] Z. Chen et al., "Analysis and experiments for IGBT, IEGT, and IGCT in hybrid DC circuit breaker," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 65, No. 4, pp. 2883 - 2892, Apr. 2018.

[14] X. Zhang, et. al, "A state-of-the-art 500-kV hybrid circuit breaker for a dc Grid," *IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS MAGAZINE*, pp.15~27, June 2020.

[15] W. H. Kim, Y. J. Kim, and H. S. Kim, "Arc voltage and current characteristics in low-voltage direct current," *Energies*, Vol. 11, No. 10, 2018.



김호성(金孝城)

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