

## 역전류 주입방식 초고압 직류차단기의 차단 기술

이병운, 정진교, 박경엽, 신영준  
한국전기연구소

### Interruption Techniques of Inverse Current Injection Type of HVDC Circuit Breaker

B.Y. Lee, J.K. Chung, K.Y. Park, Y.J. Shin  
KERI

**Abstract** - This paper describes the interruption techniques of HVDC circuit breaker which adapts inverse current injection method. A representative circuit configuration of this type of HVDC circuit breaker is presented and its operational mechanism and timing diagrams are investigated.

공하는 것으로 알려진 역전류 주입방식 직류차단기에 대하여 그 회로 구성, 동작 메카니즘 및 차단과정 타이밍도를 기술한다.

## 2. 직류차단기의 차단기술

### 1. 직류차단기의 기술적 과제

직류송전기술의 발달과 더불어, 직류송전설비의 규모가 축소되고 비용이 절감되었으며 신뢰도가 향상되었다. 그 결과 직류송전방식은 꾸준히 증가하여 현재 전세계적으로 60여 지역에서 총용량 50GW가 넘는 설비가 운전 또는 건설중에 있다. 직류송전의 적용분야로는 30km 이상의 수중케이블을 이용한 송전, 두 교류계통의 비동기연계 그리고 가공송전선에 의한 장거리 대전력 수송을 들 수 있다. 직류송전 시스템의 구조는 크게 2단자 구조와 다단자 구조로 분류할 수 있는데 어느 경우든 계통의 신뢰도와 운전의 자유도를 확보하고 계통의 효율적인 운영을 위해서는 직류차단기가 필요하다.

전류를 차단하는데 있어서 가장 유효 적절한 시점은 전류가 영점에 도달하는 순간일 것이다. 이러한 관점에서 교류전류는 그 특성상 자연적으로 전류영점에 도달하기 때문에 교류차단기는 이 순간에 전류를 차단할 수 있는 기회를 갖게 된다. 반면에, 직류전류는 자연적으로 전류영점이 발생하지 않기 때문에 직류차단기는 직류전류에 강제적으로 전류영점을 발생시킬 수 있는 장치를 갖추지 않으면 안된다.

직류전류를 전류영점에 도달하도록 하기 위해서는 직류전류를 감소시킬 필요가 있는데 이것은 시스템에 저장된 에너지를 소비시킴으로써 가능하다. 이 에너지는 송전선과 직류평활 리액터의 리액턴스에 저장된 것으로 총인덕턴스를  $L$ 이라고 하고 차단할 고장전류의 크기를  $I$ 라 하면 그 양은  $LI^2/2$ 이 된다. 또한 직류전류의 차단후에 전류의 급격한 감소에 의해 유도성 회로에서 야기되는 과전압은 시스템과 전력기에 해를 미치지 않을 정도로 충분히 낮아야만 한다.

직류전류의 차단에 있어서의 주요 기술적 과제들을 요약하면 다음과 같다.

- ① 직류전류에 전류영점 발생
- ② 유도성 회로에 저장된 에너지의 소산
- ③ 전류차단에 의해 야기된 과전압의 억제

에너지의 소산과 과전압의 억제는 산화아연저항을 이용하여 실현하고 있다.

본 논문에서는 우선, 직류차단기의 차단방식을 결정하는 전류영점 발생방식에 대하여 조사하고 그 가운데 초고압에 적합하고 또한 최대의 직류전류 차단용량을 제

그림 1에 직류전류 차단방식을 전류영점의 발생 방법에 따라 분류해 두었다. 그리고 그림 2에는 직류전류 차단중에 직류차단기의 양단에 걸리는 전압과 전류의 전형적인 파형들을 도시하였다. 역전압 발생방식(inverse voltage generating method)에서는 아크전압을 전원전압보다도 높게 함으로써 전류를 영으로 감소시키고 있으며 수 kV의 저전압 직류차단기에 적용되어 왔다. 비록 이 방식은 전류의 감소와 에너지의 소비가 차단부내에서 완료된다는 점에서 매우 이상적인 방식이지만 실제의 직류송전시스템에는 아크전압과 에너지의 소산이 매우 크기 때문에 그 적용이 매우 곤란하다.

전류전환방식(current-commutating method)에서는 직류전류를 부분적으로 아크현상의 전류제한 효과에 의해 저장이나 커패시터로 전환함으로써 유도성회로에 저장된 에너지를 소산시키고 있다.

발산전류 진동방식(divergent current oscillation method)에서는 고주파 진동전류의 크기를 L-C회로와 아크자체로 구성된 전환 loop내에서 확대시킴으로써 전류영점을 발생시키고 있다. 이 진동은 주로 전류가 증가함에 따라서 아크전압이 감소하는 소위 아크의 부(negative)특성에 기인하고 있다. 소호매체로는 기름, 공기,  $SF_6$  또는 진공이 사용될 수 있으며 교류차단기술이 이 방식에 적용 가능하나 소호부는 병렬 커패시턴스를 최소화시키도록 수정될 필요가 있을 수 있다. 이 방식 역시 전류전환방식으로 분류되고 있다.

역전류 주입방식(inverse-current-injecting method)에서는 사전에 충전된 커패시터를 인덕터를 통하여 방전시킴으로써 발생하는 고주파 역전류를 직류전류에 중첩시킴으로써 전류영점을 발생시키고 있다. 소호부가 저장된 에너지를 소산시킬 필요성은 거의 없으며 종래의 교류차단기가 이 방식에 선택적으로 이용될 수 있다. 이 방식은 커패시터를 사전에 충전시키기 위한 보조 전원이 필요하고 다른 방식에 비하여 회로구성이 매우 복잡하게 되는 경향이 있다.

### 3. 역전류 주입방식 직류차단기

표 1에 역전류주입방식을 이용한 전형적인 직류차단기의 개발 사례를 정리하였다. 이 방식은 사용 역사가 가장 길고 개발된 많은 직류차단기 가운데 최대의 직류전류 차단용량을 제공하고 있다. 이 방식에서 회로구성에 몇 가지 변화가 있지만 전류영점을 발생시키기 위해 사전에 충전된 커패시터로부터 방전전류를 주입함으로써 직류전류를 차단한다는 원리에 있어서는 동일하다.

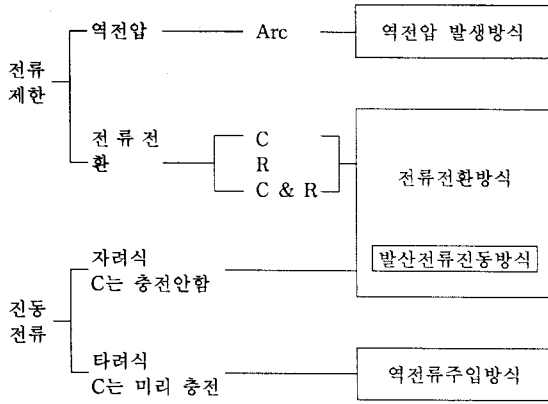


그림 1. 직류전류 차단방식

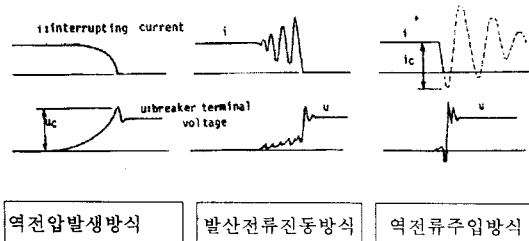


그림 2. 직류차단시의 전형적인 전압·전류 파형

표 1. 역전류주입방식을 이용한 전형적인 직류차단기의 개발 사례

번호	회로구성	차단동작
(1)		<ol style="list-style-type: none"> <li>진공차단기 CB가 열리고 갭 TG<sub>1</sub> 점호</li> <li>전류영점을 만들기 위해 커패시터 C가 방전</li> <li>전류영점에서 CB의 전류차단</li> <li>비선저항 NR에서 에너지를 소멸하기 위해 갭 TG<sub>2</sub> 점호</li> <li>NR의 전류를 차단하기 위해 갭 TG<sub>3</sub> 점호</li> </ol>
(2)		<ol style="list-style-type: none"> <li>진공과 SF<sub>6</sub>의 직렬로 이뤄진 혼합차단기 CB가 열림</li> <li>갭 TG를 점호하여 커패시터 C<sub>1</sub>과 펄스변압기 PTr을 통해 커패시터 C가 방전, 고주파전류를 CB로 투입</li> <li>전류영점에서 CB의 전류차단</li> <li>스위치 S<sub>1</sub>을 닫고 비선형저항 (ZnO<sub>1</sub>, ZnO<sub>2</sub>)에 의해 에너지소멸</li> </ol>
(3)		<ol style="list-style-type: none"> <li>커패시터 C가 저항 R<sub>1</sub>과 R<sub>2</sub>를 통해 정상적으로 충전</li> <li>차단기 GCB를 열고 스위치 CS를 닫으므로써 C가 리액터 L을 통해 방전, DC전류위에 고주파 전류가 중첩</li> <li>전류영점에서 GCB 전류를 차단</li> <li>R<sub>2</sub>로만 C를 급속충전하기 위해 CS를 열고 BS를 닫는다.</li> </ol>

표 1의 (1)과 같은 구조에서는 진공차단기와 세 개의 갭을 사용하고 있는데, 이 갭들은 역전류와 비선형저항을 삽입함으로써 차례로 점호된다. 이 차단기는 1982년에 100kVp 10kA의 전류를 차단하였다.

표 1의 (2)의 경우는 진공차단기와 가스분사차단기가 직렬로 연결되어 사용되었다. 이와 같은 구조의 특징으로는 펄스변압기 PTr이 사용되었다는 점과 기충전된 커패시터가 펄스변압기의 저압단에 설치되어 있다는 것이다. 이 방식의 차단기는 1982년에 380kVp, 8kA의 전류를 차단하였고 정격 250kV, 1.4kA의 고전압직류 가스절연 개폐장치(HVDC GIS)용 차단기로서 사용되어 왔다. 이것이 SF<sub>6</sub> 가스절연이 HVDC에 사용된 첫 번째 사례이었다.

표 1의 (3)의 구조에서는 가스분사차단기와 시스템 자체에 의해서 사전에 충전되는 커패시터가 이용되고 있다. 이 방식의 차단기에 의해서 1985년에 250kV, 8.8kA의 전류가 차단되었으며 GIS용으로는 표 1의 (2)에서와 같이 SF<sub>6</sub> 가스절연이 채택되었다. 그림 3에는 이와 같은 구조의 역전류 주입방식 직류차단기에 대한 동작 메커니즘을 동작 순서에 따라 도시한 것이다. 동작원리를 보다 자세히 설명하면 다음과 같다. BS(Bypass Switch)가 열린 채로 소호 커패시터가 충전시스템의 전압으로부터 충전된 상태에서 차단기 GCB가 닫히면 직류전류 I가 차단부를 통하여 흐르게 된다. 차단부에 흐르는 직류전류 I를 차단하기 위해 차단기 GCB를 개방함과 동시에 CS(Closing Switch)를 닫는다. 이 때 소호 커패시터와 소호 리액터로 구성되는 공진회로를 통해 소호 커패시터에 충전되었던 전하가 방전하면서 고주파 진동전류가 발생하게 되고 이것이 차단부에 흐르는 직류아크전류에 중첩되어 전류영점이 발생되게 된다. 차단부에서의 직류아크전류는 전류영점에서 소호되고 직류전류는 소호 커패시터로 전이된다. 소호 커패시터는 전이된 직류전류로부터 충전되면서 급격히 전압이 상승하게 된다. 소호 커패시터의 전압이 에너지 흡수저항 ZnO-Rs의 제한전압에 이르게 되면 직류전류는 소호 커패시터에서 에너지 흡수저항 ZnO-Rs로 전이되고, 이 저항들은 유도성 회로에 저장된 에너지를 소산시킴으로써 직류전류를 영으로 만들어 차단을 완료하게 된다. 직류전류 차단후 CS가 개방되고 직류송전선으로부터 소호 커패시터가 분리된다. 이후 차단기의 고속재폐로에 대비하여 소호 커패시터를 고속으로 충전시키기 위해 BS를 단락시켜 충전저항을 R<sub>1</sub>+R<sub>2</sub>에서 R<sub>2</sub>로 전환시킨다. 소호 커패시터를 시스템 전압으로 충전시킨 후 BS를 개방하여 충전저항을 R<sub>1</sub>+R<sub>2</sub>로 전환한다. 이것으로써 차단의 전과정이 종료된다. 그림 4에는 차단과정에서의 타이밍도를 도시하였다.

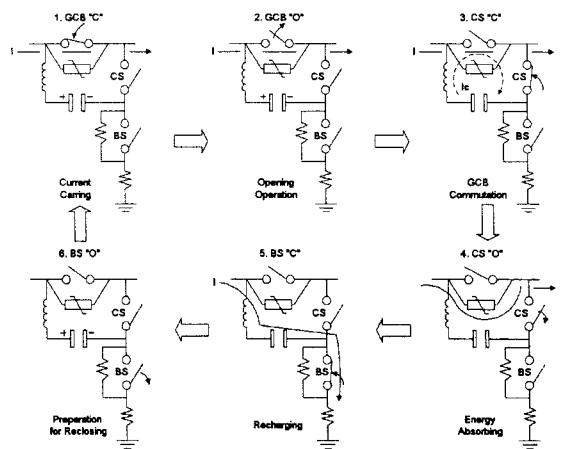


그림 3 역전류 주입방식 직류차단기 동작 메커니즘

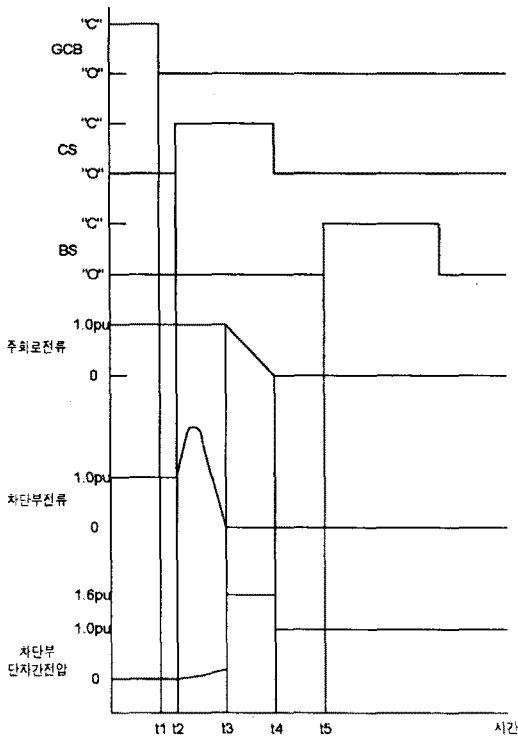


그림 4. 역전류 주입방식 직류차단기 타이밍도

#### 4. 결 론

본 논문에서는 직류차단기 개발에 요구되는 기술적 과제에 대하여 조사하고 직류전류 차단기술을 검토하였다. 이 가운데 최대의 직류전류 차단용량을 제공하는 것으로 알려진 역전류 주입방식 직류차단기에 대하여 그 대표적인 구조, 동작원리 및 차단과정에서의 타이밍도를 살펴 보았다. 향후 남북한 및 동북아의 직류송전 연계 등의 구상과 증가하는 직류송전시스템의 운전상의 자유도, 신뢰도 및 효율성의 향상을 위해서 본선용 초고압 직류차단기의 개발에 관한 연구가 우리나라에서도 본격적으로 진행될 것으로 기대한다.

본 연구는 과학기술부 지원 기관고유 과제인 "초고압 직류 전력기기 기본 기술 개발"로 수행한 연구 결과입니다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] Keiji Arimatsu, Shunji Tokuyama, Koji Suzuki and Fumikuro Endo, "Development of 250kv, 8kv HVDC Breakers" 日立評論 VOL. 67 No. 6(1985-6) p433-438
- [2] Tokuyama, K. Arimatsu, Y. Yoshioka, Y. Kato and K. Hirata, "DEVELOPMENT AND INTERRUPTING TESTS ON 250KV 8KV HVDC CIRCUIT BREAKER" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No 9, p2453-2459 September 1985
- [3] A. Lee, P. G. Slade, K. H. Yoon, J. Porter and J. Vithayathil, "THE DEVELOPMENT OF A HVDC SF<sub>6</sub> BREAKER" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, NO. 10, p2721-2729 October 1985
- [4] M. Sakai, Y. Kato, S. Tokuyama, H. Sugawara and K. Arimatsu, "DEVELOPMENT AND FIELD APPLICA-

TION OF METALLIC RETURN PROMECTING BREAKER FOR HVDC TRANSMISSION" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, VOL. PAS-100, No. 12, p4860-4868, December 1981

[5] L. Courts, J. J. Vithayathil, N. G. Hingorani, J. W. Porter, J. G. Gorman and, C. W. Kimblin, "A NEW DC BREAKER USED AS METALLIC RETURN TRANSFER BREAKER" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No 10, p4112-4120, October 1982

[6] B. Bachmann, G. Mauthe, E. Ruoss, H. P. Lips, J. Porter and J. Vithayathil, "DEVELOPMENT OF A 500KV AIRBLAST CIRCUIT BREAKER" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No 9, p2460-2466, September 1985

[7] B.Pauli, G. Mauthe, E. Ruoss, G. Ecklin, J. Porter and J. Vithayathil "DEVELOPMENT OF A HIGH CURRENT HVDC BREAKER WITH FAST FAULT CLEARING CAPABILITY" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.3, No 4, p2072-2080, October 1988

[8] A. N. Greenwood, P. Barkan and W. C. Kracht "HVDC VACUUM CURRENT BREAKERS" p1575-1588

[9] 이병운 외 3인, " 직류차단기의 차단기술 개발 동향 ", 제 3 회 전력기기 심포지움