차단기에서 차단 용량의 한계는 어디까지인가?

역/ 이 의 평
前 전기잡지 편집장

머 / 리 / 말

현재 가장 많이 사용되고 있는 교류 차단기는 72[kV] 이상에서는 SF_6 가스차단기이며, 36[kV] 이하에서는 진공차단기다. 그러나 현재에 이르기까지의 교류차단기의 역사를 보면 전력 계통용 기기 중에서도 그 형태, 성능 모두 놀라운 발전을 거듭해 온 기기다. 그 교류 차단기가 발달해 은 이유로는 크게

(1) 전력계통의 고전압화
(2) 전력계통의 대용량화

를 들 수 있다.

여기서는 위의 이유 중에서 (2)의 대용량화에 관계하여 교류차단기의 차단 능력에서 볼때 SF_6 가스차단기와 진공차단기가 왜 현재의 주류로 되어 있는가를, 또 차단 용량의 한계에 도전하기 위하여는 어떠한 일을 하고 있는가를 다음에 설명한다.

1. 전류 차단 현상

먼저 전류를 차단한다는 것은 어떠한 현상이며, 또 차단 능력을 효과적으로 높이는 방법에 대하여 설명한다.

(1) 차단 원리

교류 회로를 어떤 전극 간에서 닫고 열고 한 경우, 그 전극 간에는 아크가 발생한다. 단, 이 상태에서 아직 전류는 계속 흐르고 있으며 차단하였다고 할 수 없다. 교류의 경우, 반사이클 마다 전류 영점이 나타나고, 그 때 전류의 흐르는 방향이 반전하고 있으며, 아크는 전류 영점시 마다 소멸하고 있는 것이다. 그러나 그 순간을 생각하면 전극 간에 다수의 고온 가스나 이온이 남아 있으며 전류 영점에서 아크가 소멸하여도 전류 영점 직후에 나타나는 전압(전극 간에 가해지고 회로 조건에서 나타나는 전압으로서 과도 회복 전압이라고 한다)이 전극간 절연 회복의 값을 넘으면 재차 아크가 계속 발생한다.

교류차단기에서의 차단이란, 이 전류 영점의 기회를 최대한 이용한 것이며, 또 차단을 더욱 완전하게 하기 위하여 아크를 강제적으로 늘리는 방법이나 소호실을 설치하여서 신속히 아크를 냉각하는 방법으로써 아크 에너지를 효율적으로 소비할(이것을 소호(消弧)라고 함) 필요가 있다.

이상과 같이 전류 차단이 성공인가, 실패인

가의 판단은 그림 1처럼 나타내어 진다.

전류 영점 후의 시간 경과에 대하여 전극 간 절연 회복 특성이 곡선 A와 같은 경우, 과도 회복 전압은 일반적으로 전원측의 회로 조건에 의해서 결정되지만 차단이 성공인가, 실패인가를 설명하기 위하여 B, C곡선의 예로 설명하겠다. 곡선 B 처럼 A 이상의 값이 되면 재차 아크가 발생하여 차단이 실패(이 차단 실패는 재발호(再發弧)라고 한다)한다.

따라서 차단 성공과 실패의 차이는 전극 간에 나타나는 절연 회복 특성과 과도 회복 전압에 의해서 정해지는 것을 알 수 있다.

(2) 차단 방법

차단이 잘 되는가 안 되는가는 전극을 떼고 붙이고 하여 전류 영점을 통과하여서 일단 차단한 후, 다시 도통하지 않게 아크 에너지를 효율적으로 소호시키는가 하는 것이 결정적인 수단이 된다.

그 결정적인 수단이 되는 방법으로서는

(a) 아크를 강제적으로 늘려서 아크 전압을 높여 전류를 밀어 넣음으로써 소호한다.

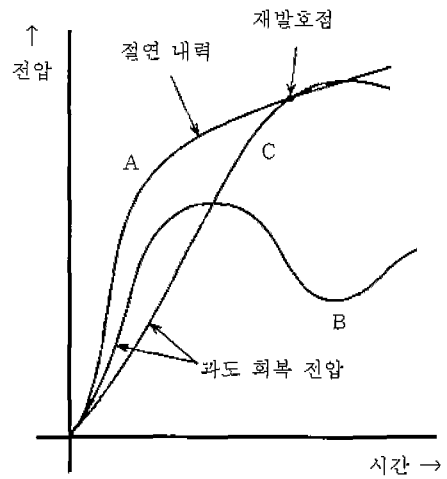


그림 1 절연 회복 특성과 과도 회복 전압

(b) 아크를 절연물 등의 냉각판 또는 냉각통 속에 유도시켜 냉각 효과로 소호한다.

(c) 고압 가스를 아크에 내뿜어 아크를 냉각하여 소호한다.

(d) 진공 중에서의 확산 효과로 아크를 소호한다.

등이 있으며 각각의 차단 방법에 따라서 각종의 차단기를 분류할 수 있다.

(a)의 방법에 의한 차단기 : 초기의 유입차단기

(a)와 (b)의 조합에 의한 차단기 : 유입차단기, 자기차단기

(c)의 방법에 의한 차단기 : 공기차단기, SF_6 가스차단기

(d)의 방법에 의한 차단기 : 진공차단기

2. 교류차단기의 변천

현재에 이르기까지 교류차단기의 역사는 오랜 것으로는 기중 개폐에 의한 개폐기와 퓨즈를 조합한 것으로 시작하여 차단 이론, 소호 매체 등의 상위(相違)에서 대표적인 차단기로서 유입차단기, 공기차단기 및 자기차단기 등으로 분류할 수 있고 대략 기술한 순서로 변천하여 발달해 왔다. 이들 차단기류가 현재 주류로 되어 있는 SF_6 가스차단기 및 진공차단기로 변천해 온 과정을 차단 원리면에서 설명한다.

계통 전압이 수 천[V]가 되면 초기의 개폐기와 퓨즈의 조합으로는 차단이 곤란해지며 단순한 접촉자를 절연유 속에서 개폐하는 차단기가 제작되었다. 이것은 기름이 가지는 절연 능력에 따라서 고전압에 견딜 수 있는 개폐기를 만들 생각이었지만 전류 차단 능력도 향상하기 시작하여 차단기라는 것의 등장으로 이어졌다. 이 차단기는 플레인 브레이크(Plain Break)형 유입차단기라고 하며, 그 차단 원리는 차단 시에 접촉자 사이에 생기는 아크 에너지에 의해 기름이 분해하고 그 고압 분해 가스에 의한 냉각 및 가스 압력, 가스와 기름의 난류(亂流)에 의한 냉각 효과와 절연 특성을 이용하여서 아크가 소호되는 것이다.

그러나 이것만으로는 역시 차단 용량에 한계가 있으며 해가 지나면서 증대해 가는 전력 계통의 대용량화에 수반하여 지락 전류를 차단하기 위하여는 단지 다량의 절연유로 차단 능력을 향상시키는 것만으로는 불충분하였다.

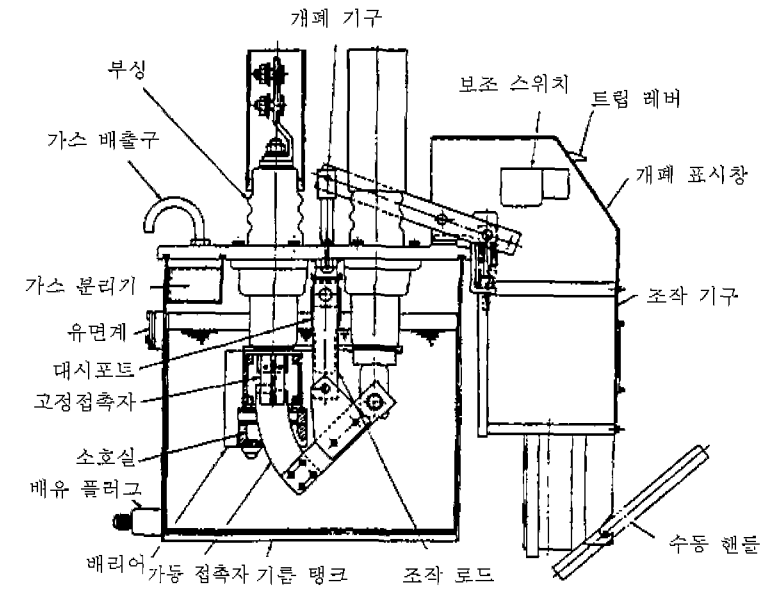
그 원인은 분해 가스가 탱크벽에 닿아서 벽과 접촉자 간에서 플래시 오버하거나 가스 압력에 의해서 탱크가 파괴되어 차단 불능이 되는 것이다.

이와같이 단락 용량 증대에 대하여 차단을 가능하게 하기 위하여 소호실을 설치한 유입차단기가 개발되었다.

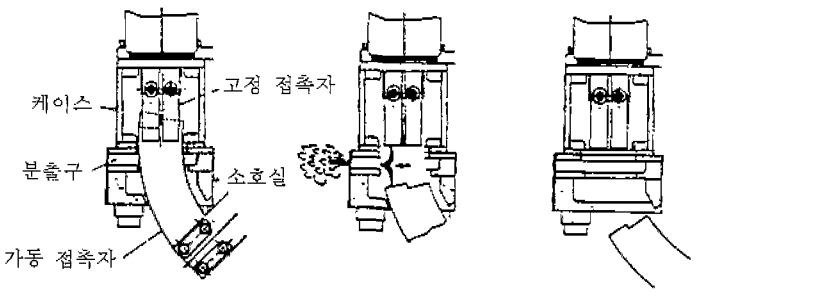
소호실이란 접촉자를 절연물로 싸서 아크를 그 속에 유도시킴으로써 가스 고압화, 가스 팽창을 방지하는 급냉각 효과, 가스에 의한 아크 취소(吹消) 작용, 소호에 적합한 가스 난류를 발생시킬 수 있어 차단 능력을 각별히 향상시키고 있다.

소호실을 채택한 탱크형 유입차단기의 예를 들어 그 구조도와 소호 작용을 그림 2에서 설명한다.

주접촉부는 1상 1점 차단방식으로 각상에 소호실을 설치하고 접촉부는 케이스 내에 넣은 핑거형



(a) 탱크형 유입차단기 구조 설명도



(ⅰ) 투입 상태 (ⅱ) 차단 상태 (ⅲ) 차단 완료(개로 상태)

(b) 소호 작용 설명도

그림 2 탱크형 유입차단기의 구조도

고정 접촉자와 가동 접촉자가 스프링에 의해 충분한 접촉 압력을 가진 구조로 되어 있다. 차단 원리는 개극(開極) 시의 아크에 의해 발생한 가스 압력이 케이스 하부에 설치된 소호 장치의 분출구에 아크를 밀어붙여 제트 유류(油流)에 의해 그 아크를 잡아 늘리고 동시에 냉각에 의한 소호 작용으로 아크를 소멸시킨다.

탱크형 유입차단기 외에 애자형 유입차단기가 있으며 소호실을 애관 속에 수납하여 지지 애자 또는 지지 애관으로 대지와의 절연을 유지하게 한 것으로 절연유도 현저히 절감되고 특별 고압, 대용량에 적용되고 있다.

유입차단기가 발달하는 과정에서 공기차단기가 제작되었다. 차단 원리는 10 ~ 30기압의 압축 공기를 노즐상(狀) 접점의 축 위에 발생한 아크에 내뿜어서 소호시키는 방식이다.

본 차단기는 유입차단기에 비해 불연성이며 접점의 손모가 적고 경량으로 취급이 용이하다는 등의 특징이 있으며 1950년대부터 1980년대까지 66[kV] 이상인 회로의 주요 차단기로 되어 있다.

3.3~22[kV]인 회로에서는 탱크형 유입차단기에 이어서 자기차단기가 널리 채택되었다.

차단 원리는 취소(吹消) 코일에 전류를 흘려 이 코일에 발생하는 자계에서 아크를 유도하여 절연물의 소호판(아크 슈트)에 밀어넣어 냉각 소호하는 것이다.

이러한 변천을 거쳐 현재 72[kV] 이상에서는 SF_6 가스차단기, 36[kV] 이하에서는 진공차단기가 주류를 이르고 있다.

3. SF_6 가스차단기

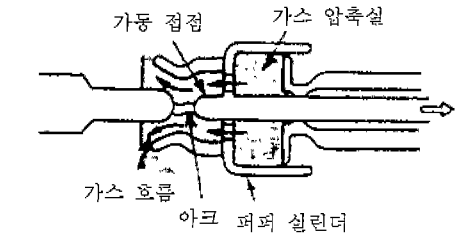
SF_6 가스차단기는 SF_6 가스를 가지고 있는 우수한 절연 성능 및 냉각 성능을 최대한으로 이용한 차단기며, 특히 근년의 콤팩트화, 불연화의 요청 때문에 72[kV] 이상의 유입차단기나 공기차단기에 대신하여 주류로 되어 있다.

당초는 복압식 가스차단기에서 소호실과 단로부가 접지된 금속 케이스 내에 수납되어 대지 절연에는 압력이 낮은 가스 압력으로, 소호 및 극간 절연에는 높은 가스 압력이 사용되어 압력차에 의해 가스를 내뿜는 것을 이용하여 아크를 소호하는 것이었다.

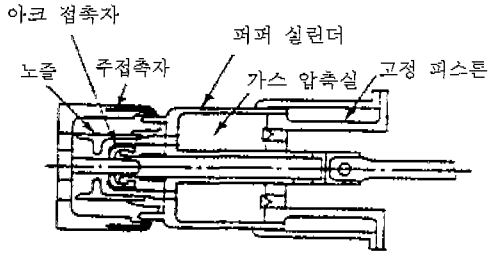
다음에 차단 동작시 퍼퍼 실린더(풀무)를 구동함으로써 내뿜는 압력을 얻어 아크를 끄는 것을 특징으로 하는 단압식 가스차단기가 개발되었다.

이것은 복압식에 비해 액화 방지용 히터, 가스 서큘레이터 등이 필요없는 외에 구조가 간단하기 때문에 가스차단기는 전면적으로 단압식(單壓式)을 이행하여 현재에 이르고 있다.

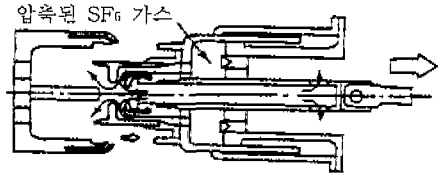
단압식(퍼퍼형) SF_6 가스차단기의 차단 동작중에 있어서의 소호 원리를 그림 3에 나타낸다.



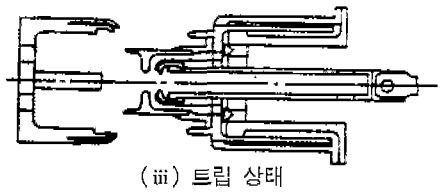
(a) 원리도



(i) 투입 상태



(ii) 트립 동작중



(iii) 트립 상태

(b) 차단 동작

그림 3 퍼퍼형 가스 차단기

조작 기수에 접속된 퍼퍼 실린더와 일체화한 가동 전극을 구동함으로써 개극이 된다.

전극의 개극과 동시에 발생하는 아크에 퍼퍼 실린더와 피스톤으로 된 압축실에서 만들어진 고압 SF_6 가스가 절연 노즐을 통하여 내뿜어져 소호하는 것이다. 그리고 대전류 차단시는 전극간에 발생하는 아크 기둥이 노즐에 충만하여 가스 흐름을 저지하는 현상을 일으켜(이것을 폐새 현상이라고 함), 실린더 내 압력을 상승시켜 전류 영점에서 가스의 내뿜는 힘을 증대시켜 소호 능력을 향상시키고 있다. 또 소전류 차단시에는 비교적 약하게 내뿜는 힘이 되어 전류 절단 현상(진공차단기의 항에서 설명)을 저감시키게 되고 차단 전류의 값에 따라서 소호력을 자동적으로 조정할 수 있는 특징을 가지고 있다.

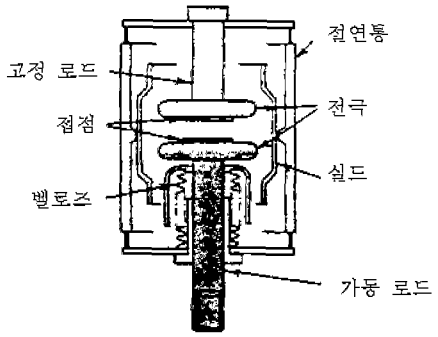


그림 4 진공차단기의 구조

4. 진공차단기

진공차단기는 그림 4에서 처럼 10[Torr] 이하인 고진공도를 유지한 용기(진공 밸브) 내에 접촉자를 맞댄 구조로서 가동 전극은 벨로즈를 통하여 외부의 조작 기구에 접속되어 있다.

고진공 중에서는 짧은 갭에서도 절연 내력은 대단히 높고 아크에서 발생한 금속 증기의 확산이 빨라서 대단히 우수한 차단 성능을 가지고 있다.

이 원리는 1890년대에 이미 알려져 있었지만 진공기술, 야금기술이 발단되지 못하였고 실용화된 것은 1950년대였다.

진공차단기가 실용화되면서 완전 밀봉의 진공 밸브와 조작기구의 단순화에 따라 유입차단기나 자기차단기의 가연성 기름이나 접촉자의 점검의 불편성이 싫어서 급속히 치환되었다.

진공 중의 아크는 가스차단기처럼 아크를 유지할 수 있는 매체가 없기 때문에 전극 재료에 의한 금속 증기 아크 방전이 주체로 되었으며 이 때문에 딴 차단기와는 다른 차단원리가 된다.

그림 5(a)는 진공 전극 간의 아크 방전의 상태를 그림에 나타낸 것이며 음극 표면의 음극점에서 방출된 금속 증기나 플라스마는 양광주(陽光柱)가 되어 양극에 도달한다.

이 음극점에 있어서의 방전 전류는 전극 재료에 따라 달라지며 그 최대 전류가 거의 정해져 있다. 즉 전류가 증가하면 음극점의 수도 증가하게 된다.

또, 반대로 전류가 감소하면 음극점의 수도 감

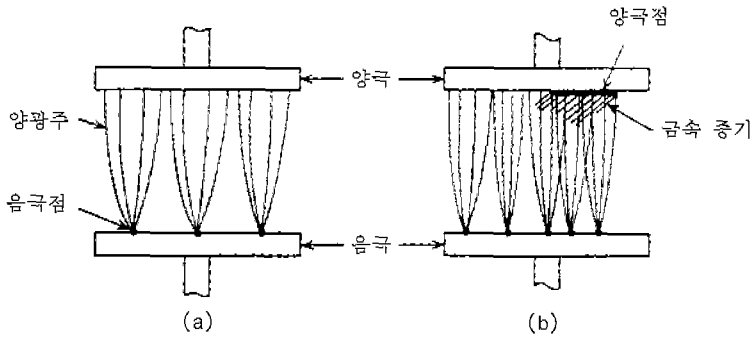


그림 5 진공 아크의 상태

소하고 전류 영점까지 감소하기 시작하면 음극점이 불안정해지며 드디어는 전류 영점 전에서 전류 차단하는 현상이 일어난다.

이 현상을 전류 차단이라고 하고 딴 차단기에도 볼 수 있는 현상이지만 특히 진공차단기의 경우, 소전류 차단 시에 그 양호한 차단 성능 때문에 개폐 서지의 문제를 일으키는 일이 있다.

그리고 대전류를 차단하는 경우, 그림 5(b)처럼 약 10[kA]를 넘으면 음극점이 증가하고 양극 재료를 현저히 용융시켜 금속 증기를 발생시키는 양극점이 나타난다.

이 상태에서 전류 영점에 와도 금속 증기는 다량으로 남고 양극점도 급속히는 냉각되지 않으며 아직 금속 증기를 발생하고 있기 때문에 전극 간의 절연 회복이 늦고 과도 회복 전압에 의해서 다시 아크를 발생하여 재발호 현상이 된다.

진공차단기의 차단 성공, 실패를 좌우하는 요인은 양극점을 여하히 발생시키지 않는가, 또 발생시켜도 전극의 용융을 여하히 작게 하는가 하는 것이 중요하다.

여하히 양극점을 발생시키지 않는가 하는 구체적인 예를 다음에 설명한다.

전술한 것처럼 진공 아크가 약 10[kA]를 초과하면 양극점이 발생한다.

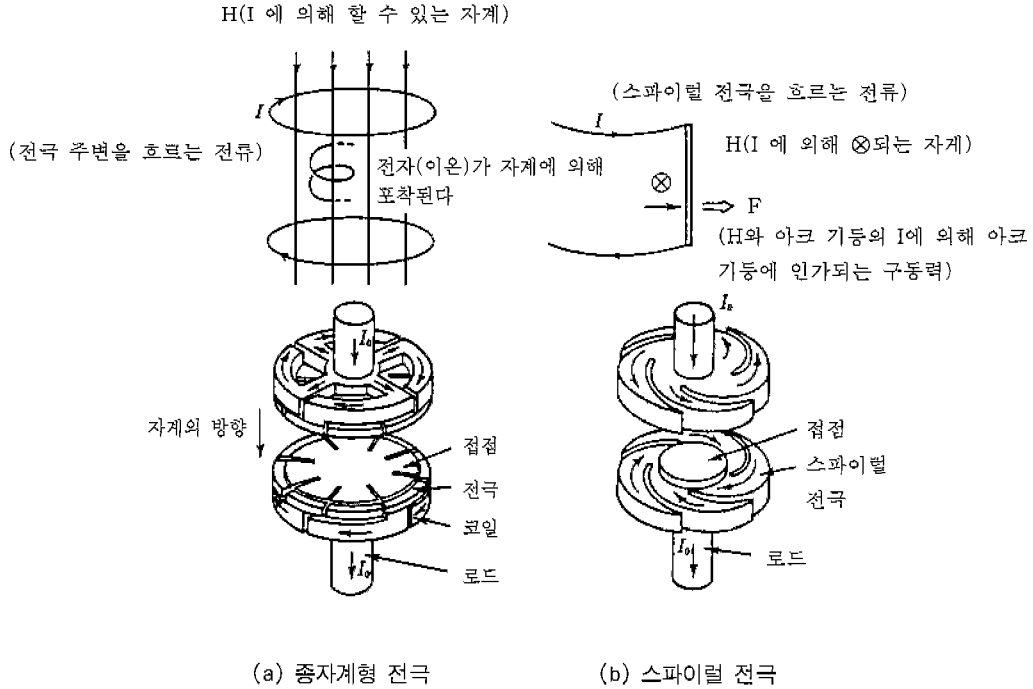
이 원인에 음극점의 집중화가 있으며 전류 증가에 수반하여 현저해진다.

따라서 일층 양극에서의 금속 증기가 발생하기 쉬워진다. 이것을 방지하기 위하여는 음극점을 분산화하면 되고 그 방법으로는

다음 두 가지의 전극 구조가 개발되어 있다.

(1) 종(從)자계형 전극 : 그림 6(a)에서 처럼 아크와 병행인 축방향(종) 자계를 발생시킴으로써 집중화하려는 아크를 포착하여 전극 전면에 분산하여 국소적 용융를 방지하는 것이다.

(2) 스파이럴 전극 : 그림 6(b)에서 처럼 스파이



(a) 종자계형 전극 (b) 스파이럴 전극

그림 6 진공차단기의 전극 구조

럴 전극에서 발생하는 가로 방향의 자계에 의해서 아크를 전극면상에서 회전 운전시켜 아크를 일정 개소에 정체시키지 않고 전극의 용융을 방지하는 것이다.

5. 차단 용량 한계에의 도전

(1) SF_6 가스차단기

SF_6 가스차단기의 차단 용량 한계는 이론적으로는 100[kA]를 넘을 정도로 생각되고 있지만 그 차단 현상의 해명이나 해석은 대단히 어렵고 아직도 실험에 의한 개발이 큰 비중을 차지하고 있다.

그러나 차단부의 구조 및 동작원리가 간단하기 때문에 차단 용량을 증대시키는 방법으로는 아래 사항을 실시하면 상당한 효과가 기대된다고 알려져 있다.

〈차단 용량을 증대시키는 방법〉

(i) 차단부의 다중화 및 대형화
(ii) 노즐의 가스 분출 압력을 높인다.
(iii) 노즐 형상의 최적화

이러한 방법을 채택함으로써 차단 전류 80~100[kA]인 것이 개발되어 하나의 차단부에서 300[kV]-50[kA], 다점(多点) 차단부에서 550[kV]-50[kA] 2차단부(遮斷部), 800[kV]-50[kA] 4차단부의 차단기가 상품화되고 있다.

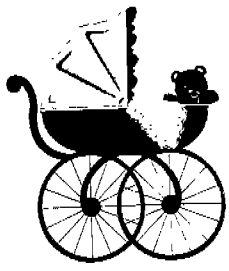
(2) 진공차단기

진공차단기에서 차단 용량의 한계는 전술한 것처럼 진공 중의 확산 효과를 이용한 진공 밸브에서 하는 차단 현상 때문에 그 전극 재료와 접촉 면적에서 스스로 차단 전류가 정해지고 있었다.

따라서 전극 재료와 접촉 면적을 아무리 바꾸어도 한계가 존재한다고 생각되고 있었다.

그러나 전극 형상을 스파이럴 전극이나 종(從)자계 전극으로 함으로써 그 생각은 재검토되고 있다.

특히, 종자계형 전극의 차단 능력은 대단히 우수하며 현재 차단 전류 200[kA] 이상의 것이 확인되고 있으며 13.8[kV]-100[kA]인 진공차단기가 상품화되고 있다.

맺 / 음 / 말

한마디로 차단 현상이라 하여도 차단시의 수 만 K에 도달하는 아크 방전 현상에서 소호의 수단으로서 고압 가스 내뿜기, 진공 주의 확산 효과 및 전극의 전리 현상 등, 그 해명에는 전기, 자기, 물리 및 유체 등의 광범위한 분야의 종합 지식이 필요하다.