

배전급 가스차단기의 연구개발 동향



한국전기연구소
책임 연구원 신영준

1. 서론

21세기를 향한 우리나라 사회는 정보화, 자동화, 쾌적한 환경 및 복지후생의 시대로 급변해 가고 있으며, 전기에너지의 수요가 폭발적으로 증가할 것으로 예측되고 있다. 발전설비 규모는 1993년부터 2006년까지 총 75기 35,965MW의 발전소가 새로 건설되어 총발전용량은 1993년보다 2배이상 많은 53,935MW에 이르게 되고, 변전설비 규모는 1992년에 61931MVA에서 2006년에 161,745MVA로 약 2.6배 확장될 것으로 추정되고 있으며, 2002년에는 최고송전전압을 765kV로 승압할 계획으로 되어 있다.

전력수요의 증가와 더불어 차단기를 비롯한 개폐장치의 국내시장도 2006년에 2.6배 이상 확장될 것으로 예측되고 있다. 또한 우리나라는 국토가 좁고 인구의 도시집중화 및 환경문제가 대두되고 있으므로, 수전설비용 부지확보는 물론 무공해성, 안전성, 고신뢰성, 무유지보수성, 미관등은 매우 심각한 문제로 되고 있다.

따라서 UR이후의 배전급 가스차단기의 국내시장 방어는 물론 국제경쟁력을 확보하고, 우리사회의 심각한 문제를 해결하기 위한 TOTAL 가스화를 이룩하기 위해서는 먼저 가스차단기의 자체 연구개발이 선행되어야 한다. 이렇게 시급하면서도 필수불가결한 배전급 가스차단기에 있어서 선진외국에서 개발된

각종 소호방식과 국내외 연구개발동향, 배전급 가스차단기의 중요한 설계변수에 대하여 설명하고자 한다.

2. 가스차단기의 소호방식

현재까지 전 세계적으로 연구되고 있거나 개발되어 상품화된 가스차단기의 소호방식을 분류해보면 다음 표1과 같이 정리할 수 있다.

표 1. 가스차단기의 소호방식 분류

주 소 호 방 식	세 부 소 호 방 식
電磁식 소호 (Rotary Arc)	㉠ 구동코일 電磁식 소호 ㉡ 영구자석 電磁식 소호 ㉢ 구동코일-영구자석 電磁식 소호
열팽창식 소호 (Thermal Expansion)	㉣ Orifice노즐 열팽창식 소호 ㉤ Laval노즐 열팽창식 소호
압축분사식 소호 (Puffer)	㉥ 순수 파퍼식 소호 ㉦ 역유동(Back-Flow) 파퍼식 소호
흡입식 소호 (Suction)	㉧ 일방 흡입식 소호 ㉨ 양방 흡입식 소호

이들 소호방식중 1980년대 이전 배전급 가스차단기에 주로 많이 이용되었던 소호방식은 순수파퍼식이었으나, 1980년대 이후 유증차단기 및 진공차단기의 문제점을 개선하고, 순수파퍼식의 단점을 보완하기 위하여 노력한 결과 현재는 로타리아크식과 열팽창식이 주된 소호방식을 이루고 있다.

그러나 하나의 소호방식만으로는 대전류영역 및 소전류영역 모두에서 차단성능을 얻는데 어려운 점이 있고, 대응량화 및 소형화에 문제점이 나타나 현재는 이런 소호방식중 2 또는 3가지의 소호방식을 결합시킨 복합소호방식이 주류를 이루고 있다. 복합소호방식은 주된 소호방식으로 열팽창식을 채택하고 로타리아크식 또는 파퍼식을 보조된 소호방식으로 채택한 것이 많은 부분을 차지하고 있다.

복합소호방식의 가스차단기는 배전급에서 종래의 유증차단기, 진공차단기, 파퍼형 가스차단기에 비해 많은 장점을 가지고 있으며[1], 그 중 몇가지를 설명하면 다음과 같다.

1) 동작에너지가 적게 소요된다 : 압력상승을 이용

하는 복합소호형 가스차단기에서 알맞은 차단성능을 내기 위해 필요한 가스압력을 발생시키는데 소요되는 에너지는 전류에 비례하여 증가하며, 100kA에서 약 7kJ정도이다. 단락차단전류 63kA에서 복합소호형 가스차단기가 필요로 하는 구동에너지는 파퍼형 차단기가 필요로 하는 구동에너지의 약 10%에 불과하며, 또한 이것은 실질적으로 차단기의 정격전압에 관계없이 적용된다.

2) 조작기구부가 간단하고 가볍다 : 어떤 복합소호형 가스차단기에서는 때때로 작은 보조파퍼가 소전류 차단을 위해 활용되는 경우가 있지만, 보조피스톤에 의해 이동될 가스량은 종래의 파퍼형에서의 가스량보다 현저히 적다. 따라서 구동에너지가 적게 들 뿐만아니라 조작기구부의 구조도 간단하게 할 수 있고 무게도 가볍게 줄일 수 있다.

3) 점점 개극속도가 비교적 느려도 좋다. 일반적으로 파퍼형 차단기는 구동초기 가스압축을 하기 위해 아주 빠른 점점의 개극속도가 요구되는 반면에, 복합소호형 가스차단기는 정격전압 즉 점점간격과 차단시간만에 의해 점점의 개극속도가 결정되므로 파퍼형에 비해 비교적 느리게 설계해도 좋다.

4) 차단부의 치수를 줄일 수 있다 : 복합소호형 가스차단기는 점점이 완전 개극위치에 도달한 이후에도 차단능력을 보유하고 있기 때문에 차단부의 치수를 줄일 수가 있다. 왜냐하면 단락전류에 DC분이 아주 많이 포함되어 전류영점이 지연된 경우에 아킹시간이 보다 길어지는 이유로 개극거리를 길게 만드는 등의 어떤 특별한 설계가 복합소호형 가스차단기에서는 필요없기 때문이다.

5) 지상소전류 차단시 위험한 과전압이 발생하지 않는다 : 아크에 의해 발생한 압력상승을 이용하는 복합소호형 가스차단기는 고장전류가 영전류로 진행해 감에 따라 압력상승도 더불어 감소하기 때문에 전류재단현상이 거의 없으므로 영전류 전에 전류파형이 왜형되는 것을 방지할 수 있다. 전동기와 무부하변압기의 개폐, 즉 지상소전류 차단시에 위험한 과전압을 발생시키지 않으므로 과전압 억제장치도 필요하지 않게 된다.

3. 배전급 가스차단기에 대한 기술개발 및 연구동향

가스차단기의 주된 소호방식에 의한 분류에 따라 국내외에서 연구개발되어 상품화되었거나 연구중에 있는 배전급 가스차단기의 동향을 살펴보면 다음과 같다.

3.1 파퍼형 차단기

피스톤의 압축작용 및 아크에 의한 가스열에 의해 열팽창실 및 노즐상류장의 유동이 가압되고, 이 가압된 가스를 아크에 강제로 분사시켜 소호하는 방식이다. 최근에는 열팽창가스를 역류시켜 파퍼작용을 강화함으로써 아크의 소호를 개선하는 방식이 주로 파퍼방식의 차단부에 적용되고 있으며, 아크에 의해 팽창시의 압력이 상승하면 아크접점이 노즐목을 빠져나가 봉쇄가 해제될 때까지 가압된 가스를 파퍼실린더에 역류시켜 가압실의 압력상승을 보다 높게 하여, 이 가압된 가스를 아크에 분사시켜 소호하는 방식이다.

배전용 SF₆가스 파퍼형 차단기는 유럽, 일본을 비롯한 외국의 많은 제작사에 의해 1970년대에 개발되었다. 배전급의 전압이 송변전급에 비해 상대적으로 낮기 때문에 아크를 소호하는 가스의 온도가 더 높아도 좋으므로 결과적으로 피스톤체임버의 체적을 작게 할 수 있는 잇점이 있다.

일본에서는 공칭 게이지압력 5kg/cm²에서 조작하는 7.2kV 63kA 파퍼형 차단기를 개발하여 상품화하였으며, 이 차단기는 3상이 별도로 내장되어 있고 차단체임버는 에폭시 레진 붓싱과 함께 알루미늄 주형으로 구성되어 있다.

유럽에서는 공칭가스압력 1barg 이하를 사용해 12kV 31.5kA와 24kV 25kA 정격의 파퍼형 차단기를 생산하고 있다. 접점과 조작피스톤이 위치한 3개의 별도의 실린더를 서로 하나로 협조하는 레진 몰딩으로 설계되어 있다. 이런 식으로 3상이 동일한 유니트내에 내장되어 있지만, 내부 Flashover의 위험은 상당히 줄어 든다. 3상이 공히 하나의 체임버에 내장된 것도 생산되고 있으며, 이런 방법으로 상들을 공통

내장하는 것은 2차 배전급 차단기에서는 경제적으로 얻어질 수 있다. 가스누설도 결합개소를 세군데로(금속체임버와 절연된 몰딩사이, 기계적 구동샤프트, 가스충진구) 축소시켜 최소화하였다. 더구나 전압이 인가되는 도전부들은 환경적 영향을 줄이기 위해 완전히 내장한 형태이다.

우리나라에서는 1993년에 유럽의 제작업체와 기술 제휴로 대부분의 부품을 제공받아 조립생산하고 있지만, 연구개발에 대한 경험이나 기술축척 및 자체설계능력이 현재는 거의 없다고 볼 수 있다.

3.2 로타리아크형 차단기

로렌츠 힘을 이용하는 로타리아크 소호방식은, 고장전류가 발생하여 트립신호가 차단기에 주어지면, 차단기는 개극하기 시작하고 차단기의 두 접점 사이에 아크가 발생하기 시작한다. 일정한 시간 후, 이 아크는 구동코일로 전이되고, 고장전류는 대부분 이 구동코일을 통해서 흐르게 된다. 전류가 구동코일을 통해 흐르면, 자속이 발생하여 아크에 로렌츠 힘이 작용하고, 아크는 이 힘에 의해 회전하게 되면서 소호된다.

노즐유동을 보조적 소호수단으로 활용하지 않는 여러가지 로타리아크형 차단기가 대략적 전압범위 3.6~36kV 및 전류범위 50kA까지에 대해서 상업화되어 있다. 유럽 및 일본에서는 3.6kV/12.5~50kA, 7.2kV/12.5~40kA, 36kV/25kA의 범위에 걸친 나선형 아크 차단부를 활용하고 있다. 프랑스의 Merin-Gerin에서는 유사한 전압범위에 걸쳐서 아크를 회전시키기 위해 동심환 점점을 활용하고 있다.

나선형 아크차단부와 동심환 점점차단부는 유사한 성능을 보여 주고 있으며, 두가지 형태 모두 주접점 및 아킹점점을 활용하고 있다. 주접점은 차단기가 투입되었을 때 정격전류를 흘릴 뿐만 아니라 자체생성 코일을 단락시키는 역할도 한다.

자기회로를 알맞게 설계하면 주아크점점으로 아크의 전이가 얻어질 수 있다. 전이시간은 3ms정도이며, 1~5bar_g 범위의 가스압력, 1~10kA의 전류치 및 3~6mm 전이간격에 민감하게 변하지 않는다[2]. 코일을 통해 흐르는 전류때문에 초기에는 과도적인 자계가 생성되며, 어떤 조작조건하에서 아크전압은 전이간격사이에 재발호가 일어날 수 있을 정도까지 증가

할 수 있으며, 이 때문에 결과적으로 구동자계가 축소되고 코일에 가로 걸쳐 병렬 도전로가 형성되어 분류된다.

또다른 점점분리의 형태가 프랑스 Merlin-Gerin 10kA 7.2kV 접촉기에 사용되고 있다. 주전류 점점들은 환형 아킹접점들과 동심이지만, 자계생성코일을 여자시키기 위해 환형 점점에 앞서 분리된다. 이것에 의해 아크가 전이될 필요도 없이 빠른 가속의 아크 회전이 일어난다.

진공차단부의 문제점인 전류제한 및 과전압은 나선형 아크의 상대적으로 높은 저항때문에 모든 조작 범위에 걸쳐서 나타나지 않는다. 또한 전자구동력이 최소일 때 저전류를 차단하기 위해 필요한 것들과 보조적인 가스유동을 실제로 사용할 필요가 없다.

이런 차단부를 조작하는데 소요되는 에너지의 양은 작으며, 투입에너지는 등가의 유증차단기에 필요한 것의 대략 절반이다. 아크뿌리가 회전하므로 넓은 범위의 전류치에 걸쳐 아킹시간은 11kV에서 약 1사이클, 36kV에서 1.75사이클 정도로 낮아 점점손상을 줄일 수 있다. 차단에 성공하는 조작수는 전류치의 증가와 더불어 감소하지만, 로타리아크 차단부 성능은 현재의 요구조건들을 초과하므로 평생밀폐 무유지보수는 가능한 것으로 보여진다.

3상일괄 조작을 위해 가스가 충전된 공통외함내에 각 상의 차단부를 내장할 수 있으며, 간격들의 상대적 배열은 다른 상들로부터 추출된 고온가스에 의해 각 상의 전기적 회복을 간섭하지 않도록 해야 하며, 각 상으로부터 구동자기력이 상호작용하지 않도록 조심스런 고려를 할 필요가 있다. 각 상과 관련된 점점간격들의 형상은 제작사에 따라 다르며, 제한된 장소에서 사용하기 위해 최소체적이 요구되는 곳에 클로버 배열의 코일을 활용한다. 보다 높은 정격전류들(1.25 및 2kA)에 대해서는 가스용기의 체적은 보다 크게 하므로 자계코일을 직선상으로 배열하여 결과적으로 기계적 구동 형상을 더욱더 단순화시킬 수 있다. 로타리아크 차단기에 사용된 전형적 압력은 3bar이다.

우리나라에서는 1980년대 중반 로타리아크 소호원리를 이용한 가스부하개폐기를 외국과 기술 제휴로 개발한 이래, 현재는 많은 중전기기업체에서 100% 자체설계하여 생산하고 있다. 그러나 로타리아크 차단기는 아직 시작하지 못하고 있으며, 1992년 한국전

기연구소에서 국내최초로 연구 개발[3]에 착수한 이래 몇몇 기업에서도 연구를 시작하고 있는 단계이다.

3.3 열팽창식 자체소호 가스차단기

열팽창력을 직접 이용하는 열팽창 소호방식은, 두 아크접점 사이에 발생한 아크에 의해 팽창실의 가스가 가압되고, 점점이 노출목 또는 아크런너부의 목을 빠져나가 봉쇄가 해제될 때, 이 가압된 가스를 아크에 분사하여 소호하는 방식이다. 이 방식은 저전류의 차단에 어려움이 있어 다른 소호방식과의 복합으로 주로 이용되고 있다. 그러나 팽창실의 구조를 잘 설계하면 저전류영역에서 대전류영역까지 전혀 문제없이 차단할 수 있다고 보고되고 있다[4].

현재까지 열팽창식 자체소호 차단기의 가장 정교한 형태는 균일한 가스가열이 일어날 수 있도록 아크회전을 활용한다. 자체소호 SF₆차단기는 1977년 이래 실사용되어 오고 있다. 현재까지 다양한 형식의 자체소호 가스차단기가 수만대 이상 세계에 널리 실사용되고 있다. 실사용 경험상 이들 차단기들은 유지보수없이 30,000회 투입/개극 조작후에도 여전히 실사용할 수 있다고 보고되고 있다. Brown Boveri는 발전기용 차단기로 적용하기 위하여 또한 전압보상장치, 대전류 배전 및 대형 모터의 스위칭용으로 24kV 100kA 자체소호 차단기를 최근 설계하였다.

일본에서는 대전류영역에서 주된 소호방식으로 열팽창식을 채택하지만, 저전류영역에서 아크소호력을 공급하기 위하여 보조적으로 영구자석 또는 구동코일을 이용하는 가스차단기를 많이 개발하여 사용하고 있다[5, 6]. 그러나 아직 열팽창력에 의해 분사하는 유동량 및 유동구조를 최적화하여 저전류영역에서의 문제점을 해결하지 못하고 있는 것으로 판단되고 있다.

비록 자체소호원리의 사용도 다른 스위칭원리와 같은 물리적 한계에 지배되지만, 정격전압 및 차단용량에 대한 한계가 없는 것처럼 보인다. 비록 전압한계는 SF₆의 절연강도가 온도에 종속되므로 이에 의해 결정되지만, 원리는 72.5kV 및 그 이상의 전압에 잘 적용될 수 있다. 그러나 100kA를 초과한 전류의 차단은 저항성 또는 용량성 damping 소자가 채용되지 않는 한 제한된 RRRV성능으로 되는 것 같다.

우리나라에서는 열팽창식 가스차단기를 아직 생산

하지 못하고 있으며, 1994년부터 국내최초로 한국전 기연구에서 25.8kV급 열팽창분사식 차단부의 연구개발에 착수하였다.

3.4 가스차단기의 기술개발 및 연구분야

가스차단기에 관련된 기술을 대별하면 절연, 통전 및 차단기술과 구조설계기술 2가지로 나눌수 있다. 절연·통전·차단기술 및 구조설계기술에 관련된 중요한 연구분야는 다음표 2와 같이 정리될 수 있다.

표 2 가스차단기의 기술과 연구분야

관련 기술 분류	중요 연구 분야
절연·통전·차단기술	① SF ₆ 가스의 기본기술 ② 새로운 아크소호방식 ③ 특수 접점재료 ④ 특수 내아크재료 ⑤ 다점 접촉방식
구조설계기술	⑥ 3상 일괄 몰드 ⑦ 기밀 개소의 축소 ⑧ 조각기구부의 단순화 ⑨ 부품수의 축소 및 다기능화

자력소호차단기에 요구되는 성능을 개발 또는 개선하기 위해서는 위에 언급한 세분된 관련 연구분야에 대해 기본적으로 수행하여야 하며, 상호관련을 대응시키면 다음표 3과 같다[15].

표 3 차단기의 요구성능과 관련 연구분야

요구 성능	관련 연구분야
소전류 개폐용	①, ②, ③, ④
긴수명	②, ③, ④, ⑧
소형 경량	①, ②, ⑥, ⑧, ⑨
낮은 개폐써지 전압	①, ②, ④
양호한 기밀성능	⑥, ⑦
안정된 동작	⑧, ⑨
안정된 접촉	③, ⑤
큰 투입용량	③, ⑤
큰 통전용량	⑤
낮은 감전위험	①, ⑥
가스압력 상승과 하락에 대한 안전	②, ⑥
가스누출시 양호한 절연성능	①, ⑥
가스누출시 양호한 차단성능	①, ②, ③, ④
접점개소의 축소	①, ②, ⑥

4. 배전급 가스차단기의 중요한 설계변수

배전급 가스차단기의 설계를 위해서는 제일 먼저 설계하고자 하는 차단기에 대한 사양 및 차단부의 소호방식을 결정하여야 한다. 그리고 차단기를 구성하고 있는 모든 설계변수를 이론적으로 추론하고, 이 이론적 설계치를 전자계해석, 유동해석, 아크해석 등과 같은 특성해석용 전산프로그램을 이용해 검증용하여 일차 보안을 한 후 실제 설계에 착수한다. 설계에 따라 제작된 모델 차단기의 기본적으로 중요한 특성들은 실험적으로 검증되어야 하며, 실험결과를 분석하여 설계를 보완하는데 활용하여야 한다. 이렇게 배전급 가스차단기를 설계하는데 있어서 중요한 몇가지 설계변수에 대한 설명을 하고자 한다.

4.1 로렌츠 힘

아크를 구동하는 전자력, 즉 로렌츠힘은 기본적으로 다음과 같이 벡터적으로 정의될 수 있다.

$$\vec{F} = \vec{I} \times \vec{B} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 \vec{F} 는 아크의 단위길이당 힘, \vec{I} 는 구동코일에 흐르는 전류의 순시치, \vec{B} 는 구동코일에 전류가 흘러 생성된 자속밀도의 순시치이다.

보다 효과적인 로렌츠힘을 얻기 위해서는 자계가 고장전류에 대하여 위상차이가 있어야 한다. 전류와 자속밀도의 직각성분의 곱으로 표현되는 힘은 영전류 바로 직전에 큰 값을 가진다. 힘의 크기는 영전류에서 항상 영으로 감소하며, 피크전류 근처에서의 힘의 크기는 이 힘의 실효성을 알 수 있는 좋은 척도가 될 수 없으며, 그대신 영전류에서 dF/dt 가 실효성을 나타내는 좋은 척도로 사용될 수 있다. 이것은 단위 시간당 그리고 단위 아크길이당 힘의 변화율로 정의된다.

상대적 dF/dt 를 비교하기 위해서는 전류크기와 아크길이에 대한 일정한 상수를 설정할 필요성이 있으며, 다른 전류와 다른 아크길이에 대한 힘은 이 힘이 전류의 제곱에 비례하고 아크길이에 선형적이기 때문에 쉽게 계산될 수 있다.

진공차단부를 조사해 보면, 비록 힘의 피크크치는 40N/cm 정도로 크지만, 영전류에 가까운 곳의 dF/dt 는 단지 1~2N/cm·ms 정도로 매우 작다. 로타리아크 차단부와 같이 자계와 고장전류사이에 위상차가 있는 경우에는, 전류의 피크 근처에서는 비슷한 힘

의 크기를 보여주지만 영전류에서는 dF/dt 가 60-70N/cm·ms 정도로 매우 큰 값으로 변한다. 이것은 그림 1에 잘 나타나 있으며, 이 그림에서 dF/dt 를 비교하기 위한 전류크기와 아크길이에 대한 기준으로 사용되는 상수들은 각각 10kArms와 1cm이다[7].

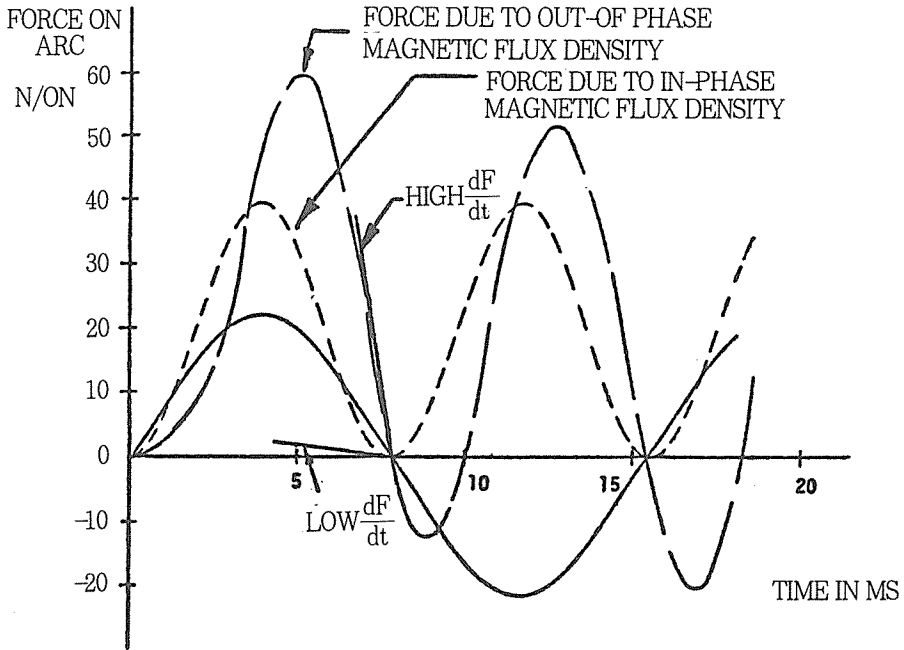


그림 1. 전류 및 자속과 로렌츠 힘의 관계

4.2 자속밀도

로렌츠 힘의 실효성은 영전류에서의 자속밀도의 크기와 밀접한 관계가 있으므로, 채택한 로렌츠 힘의 실효성을 사용하여 전류를 차단하는데 필요한 자속밀도의 크기를 구할 수 있다. I와 B의 상호 직각성분에 대해 영전류에서의 dF/dt 의 크기는 다음식과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{dF}{dt} \cdot 1I=0 = B \frac{dI}{dt} = B_{\omega} I_p \dots\dots\dots (2)$$

여기서, ω 는 전류의 각주파수, I_p 는 전류 피크크치를 나타낸다. 이 식에서 전류와 자속밀도 사이에 위상차가 존재하는 경우, 영전류에서 자속밀도가 영이

아니므로, 영전류에서의 자속밀도를 증가시키면 차단 성능이 개선될 수 있음을 알 수 있다.

4.3 구동코일

구동코일의 형상은 그림 2와 같은 2가지 단면적 형상이 주를 이루고 있다. 아크를 구동하는 로렌츠 힘은 자속의 크기에 영향을 받으므로 코일구조를 효율적으로 하여 충분한 자속을 공급할 수 있도록 하여야 한다.

코일의 구조를 설계할 때에 고려해야 할 것은 다음식으로 주어지며, 실제로 θ (또는 N_{θ})는 코일중단에서 자계가 불균일하기 때문에 주어진 코일의 한 계내에서 변한다.

$$N_N = \frac{B_o}{I_b} \leq - \frac{N \cos \theta}{0.786(L + 0.44D)} \dots\dots\dots (3)$$

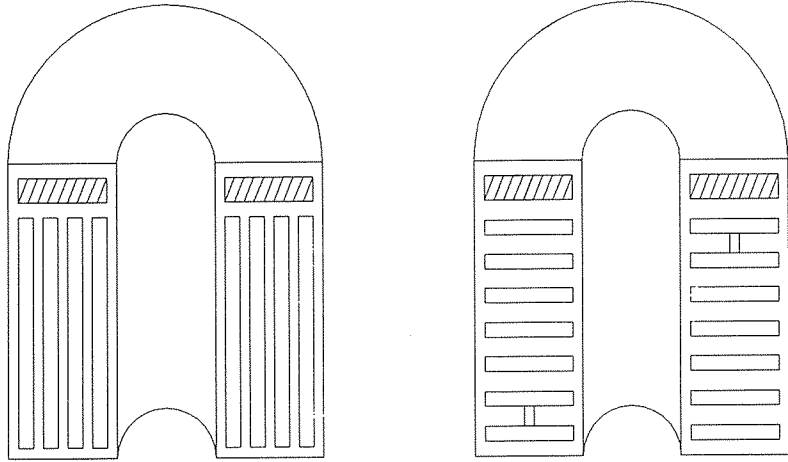


그림 2 구동코일의 개략적 단면 형상

여기서 B_o 는 자속밀도, I_b 는 차단전류, N 는 코일권선수, L 은 코일길이, D 는 코일직경을 나타낸다. 로타리아크 차단부에서는 일반적으로 θ 의 값으로 40도에서 53도 사이의 값으로 조정하며, 코일구조의 효율성을 나타내는 N_N 의 값으로는 0.7에서 1.2 사이의 값을

가지도록 설계한다. 일반적으로 L 이 줄어들수록 차단성능이 조금 개선될 수 있다고 보고된 것도 있으나, 다음 그림 3과 같은 세가지 형상에 대해 차단시험을 실시한 결과 구동코일의 형상에는 거의 관계가 없는 것으로 보고된 것도 있다[8].

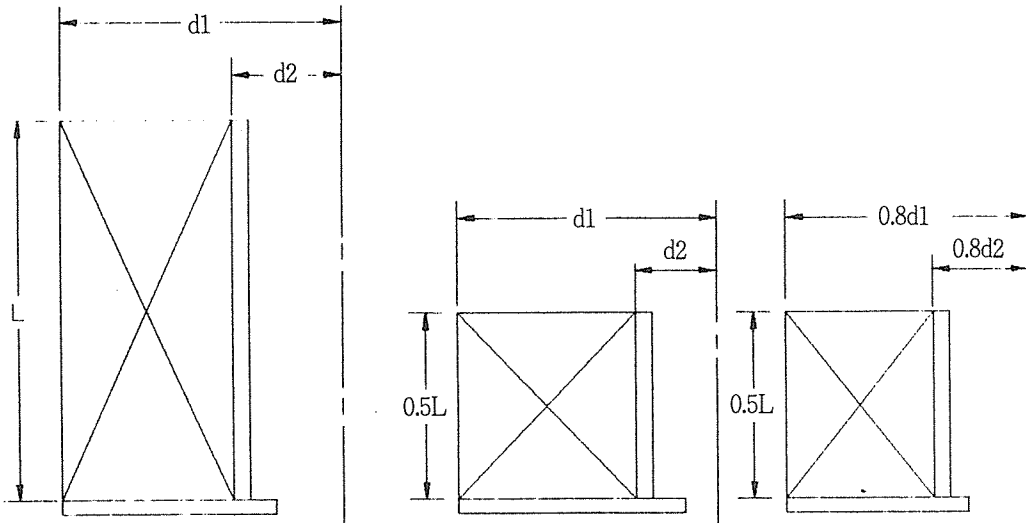


그림 3 구동코일의 치수 변화

고장전류와 자속사이의 위상지연각도 θ 는 다음 식으로 주어지며, 로타리아크 차단부의 경우 θ 가 대략 45도 근처에서 최적성능을 나타내는 것으로 알려지고 있으므로 접점재질 및 접점두께와 구동코일을 알맞게 선택하면 최적성능을 얻을 수가 있다[2].

$$\tan\theta = \frac{\omega L_c L \Delta}{P_c \pi D} \dots\dots\dots (4)$$

여기서 ω 는 전류파형의 각주파수, L_c 는 원통형 접점의 자기인덕턴스, P_c 는 원통형 접점재질의 저항율, L 는 원통형 접점의 길이, Δ 는 원통형 접점의 두께, D 는 원통형 접점의 직경을 나타낸다.

이 식에서 알 수 있듯이 L 가 D 를 변화시킬 때, 다른 변수가 일정하다고 가정하면 같은 비율로 변화시

켜야 일정한 위상차를 얻을 수가 있다.

4.4 아크런너

아크런너의 두께가 줄어들면 자속밀도는 증가하는 경향이 있다. 아크런너의 두께에 대한 자속밀도의 변화는 그림 4와 같이 나타나 있으며, 이 그림에서 컷전류피이크를 측정하여 P. U. 단위로 사용한 경우, 코일전류 피이크의 P. U.에 대한 자속밀도 크기와 코일전류에 대한 시간관계는 자속밀도에 주는 아크런너의 두께의 영향을 비교하기 위한 기준으로 사용하였다. 이 그래프를 이용하여 가장 큰 자속밀도를 주도록 설계를 선택하면 최선의 차단성능을 얻을 수 있다고 본다.

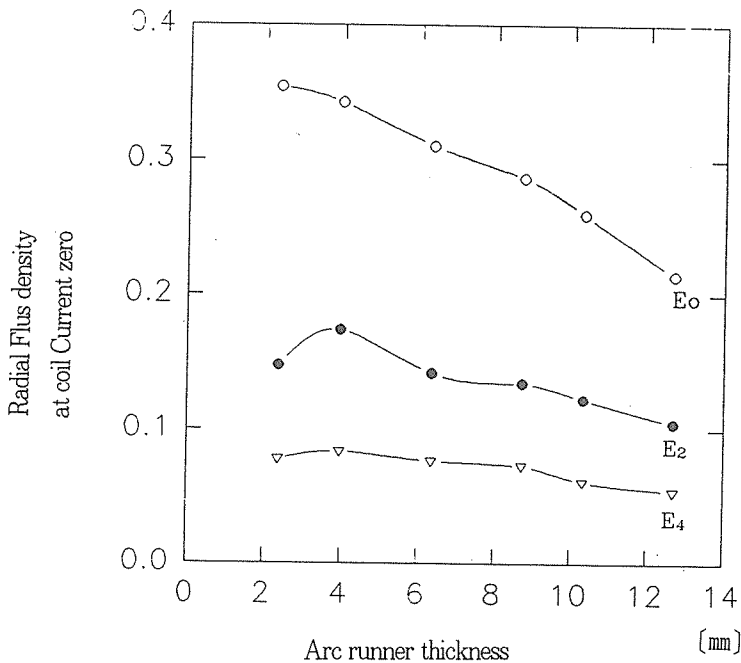


그림 4. 아크런너의 두께에 대한 자속밀도의 변화

자속밀도를 또한 아크런너로부터 (아크가 일어나는 영역쪽으로) 거리의 함수로 측정해 보면, 영전류점에 있어서 전류원으로부터의 거리가 증가해 가면 자속밀도는 감소해 가는 경향이 있으며, 아크런너의 두께가 작아질수

록 감소율이 조금 더 커지는 경향을 나타낸다.

아크런너의 재질로는 C_{1b} , $C_{1c}-C_{1d}$, $C_{1e}-W$ 등이 주로 사용되고 있으나, 아크에 의한 용삭율, 열적회복특성 등이 우수하고 가격이 비교

저렴한 Cu-W를 보통 채택하고 있으며, 아크회전반경을 고려하여 전체 아크런너 면적중 일부를 Cu-W로

하고 있다. 단락환의 모양은 그림 5와 같이 다양한 형상이 채택되고 있다.

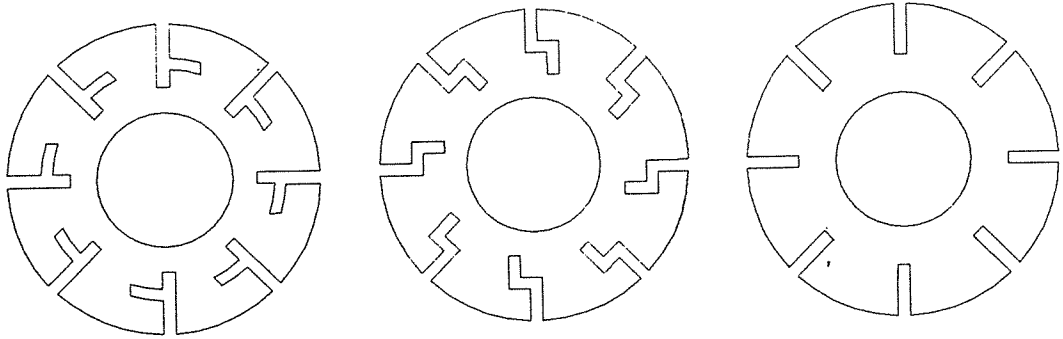


그림 5. 단락환의 형상

4.5 코일구조내에서 반발력

코일과 아크런너사이의 반발력은 수천 파운드 정도로 엄청나게 크다. 이 힘은 보다 얇은 아크런너를 사용하면, 보다 작은 전류가 유기되므로 줄어들 수 있지만 코일을 조립하는데 필요한 기계적 강도도 줄어들기 때문에 이 점을 고려하여야 한다. 반발력 F는 다음 식으로 계산된다.

$$F = \frac{1}{2} icir \frac{dM}{dx} \dots\dots\dots (5)$$

여기서 *i*c는 코일전류, *i*r은 아크런너의 전류, dM/dx는 분리거리에 대한 상호인덕턴스의 변화를 나타낸다.

아크런너에 유기된 전류 *i*은 미분 회로방정식을 풀어 구한 해로서 다음과 같이 쓰여진다.

$$i_r(t) = -\frac{\omega MI_m}{A} \left[\cos\left(\omega t + \tan^{-1}\left(\frac{-\omega L}{R}\right)\right) - \frac{R}{A} \exp\left(-\frac{Rt}{L}\right) \right] \dots\dots\dots (6)$$

여기서 $\omega = 2\pi f = 377$ (60Hz에서), M은 코일에서 런너까지 상호인덕턴스, I_m 은 코일에서 파이크전류, R은 런너저항, L은 런너인덕턴스, $A = [R^2 + (\omega L)^2]^{1/2}$ 이다. 이 식은 만약 매개변수 L, R, M이 결정될 수 있으면 고장전류 영역에서 유기된 전류의 크기를 알기 위해

사용될 수 있다.

이론적으로 계산을 하여 자계의 구조를 분석할 수 있지만, 이런 계산은 복잡한 구조때문에 쉽지는 않다. 어떤 특정지점에 유기된 전류가 각 도전통로에 흐르게 되어, 총 자속밀도 또는 순 자속밀도에 영향을 주는 자속밀도를 생성시키며, 이 유기된 전류는 대부분 상호인덕턴스에 의해 결정된다.

4.6 SF₆가스 팽창실의 용적 및 압력상승

실린더내의 가스를 가열하는데에 사용되는 아크에너지의 비율을 계산하기 위해서는 총 아크에너지를 다음식과 같이 여러가지 구성성분으로 나누어 생각할 수 있다.

$$VI = W_{rad} + W_w + W_g + W_a = W_{tot} \dots\dots\dots (7)$$

여기서, W_{rad} 는 방사손실, W_w 는 내벽에 빼앗긴 에너지, W_g 는 대부분 대류에 의해 가스에 전이된 에너지, W_a 은 전극에 전이된 에너지를 나타내고, 아크의 내부에너지는 무시할 수 있다. 아크에서의 에너지의 분배는 다음식과 같다.

$$VI = W_{el} + W_{dnn} \dots\dots\dots (8)$$

여기서, W_{dnn} 은 아크주로 들어가는 에너지입력을 나타내는데, 이것은 다음식과 같이 표현될 수 있다.

$$W_{dmm}=lEI \dots\dots\dots (9)$$

여기서, E는 평균전계강도, l은 아크길이를 나타낸다. W_{dmm} 은 SF₆ 가스속에서 5kA에서 9kA까지의 전류 범위에서 자유롭게 생성된 아크의 경우 W_{dmm} 의 약 30%에 이른다고 보고되고 있으며, 약 20%에 이른다는 연구결과도 있으므로 대략 25%정도로 추정하여도 큰 에러는 발생하지 않는다. 10kA 이하의 분사된 아크의 경우 W_{dmm} 는 다음식과 같이 표현될 수 있다고 보고된 것이 있다.

$$W_{rad} = \alpha l E \left(\frac{p_{\infty}}{p_0} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (10)$$

여기서, α 는 전극재질에 관계된 상수, p_0 는 정체영역의 압력, p_{∞} 는 유동내의 압력을 나타내며, 대략 W_{rad} 의 30% 정도인 것을 계산해 보면 알 수 있다. Cu-W로 된 전극의 경우 α 는 대략 0.5의 값을 가진다. 열팽창분사식 소호방식을 채택한 차단부에서는 대류의 역할은 매우 적고, 방사손실이 차지하는 비율을 단위 아크길이당 총 에너지입력 EI의 50% 이상이 된다. 또한 15,000°K에서 20,000° K의 온도범위에서 대기압의 공기속에서는 W_{rad} 가 EI의 70%에 이른다고 보고되고 있고, 일반적으로 SF₆ 가스속에서는 공기속 아크의 방사에너지보다 작으므로 대략 50% 정도로 추정하는 것이 타당하다.

대류에 의해 가스에 전이된 에너지 W_g 는 총 에너지입력의 대략 10% 정도이며, W_w 는 가스를 가열시키는데 소모되는 에너지가 될 수 없고, W_{rad} 중 가스를 가열시키는데 기여하는 비율은 가동점점의 직경(ϕ)에 대한 노즐길이(L)의 비, 즉 L/ϕ 에 깊은 관계가 있다[9]. 따라서 팽창실로 전이된 전체에너지는 다음식과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$W_c = W_g + (0.25 \sim 0.11)W_{rad} = (0.225 \sim 0.155)W_{in} \dots\dots (11)$$

Δt 의 시간동안 팽창실의 가스온도가 ΔT 만큼 상승한다고 한다면, 온도증가분은 다음식과 같이 주어진다.

$$\Delta T = \frac{W_c}{C_g M_g} \Delta t \dots\dots\dots (12)$$

여기서, M_g 는 팽창실의 가스질량, C_g 는 정적비열을

나타낸다. 여기서는 로타리아크 차단부 및 열팽창과퍼 차단부의 압력상승과 팽창실의 용적을 대략적으로 계산하고 설계하는 것이므로, 사용하고 있는 SF₆ 가스를 완전가스로 취급하여도 근사적 계산에는 큰 에러가 발생하지 않는다.

$$\frac{\Delta p}{p_0} = \frac{\Delta T}{T_0} \dots\dots\dots (13)$$

여기서, T_0 는 정체영역의 온도를 나타내므로 대략 300°K로 볼 수 있으며, p_0 는 정체영역의 압력을 나타내고, 상업화된 배전급 가스차단기의 대부분의 정체영역의 압력이 3kg/cm²이다.

상기 3개의 식을 조합하면 다음식과 같이 가스가 열에 의해서만 일어나는 팽창실에서의 압력상승을 계산할 수 있는 식이 유도되지만, 이 식을 로타리아크 차단부에 적용할 시는 아크턴너부의 개구면적이 가동아크점점에 의해 완전히 봉쇄되지 못하므로 이 점을 계산에 고려하여야 한다.

$$\Delta p = (0.225 \sim 0.155) V I \frac{p_0}{C_g M_g T_0} \Delta t \dots\dots\dots (14)$$

이 식에서 사용된 V와 I는 Δt 시간에 걸쳐 평균한 전압과 전류의 값을 나타낸다. 이 식을 사용하여 팽창실의 압력상승을 대략적으로 계산할 수 있고, 온도상승도 대략적으로 계산할 수 있으며, 또한 역으로 소호부의 설계에 요구되는 팽창실의 압력상승치 또는 온도상승치를 규정한 후 필요한 팽창실의 용적을 계산할 수 있다.

4.7 노즐의 형상

가스분사의 탈이온화 작용이 일어나는 노즐중간의 원통형 부분과 하류장의 길이는 차단부의 전압정격과 밀접한 관련이 있다. 노즐하류장의 일정목경의 길이와 발산각도는 가동점점이 하류장의 유동단면적의 변화에 크게 영향을 끼치므로 과도회복전압치에 매우 큰 영향을 주며, 이 영향은 노즐의 발산각도가 작을수록 더 오랫동안 지속되고 더 강할 것이다[10].

노즐상류장의 유동인입각도는 상류장 유동의 가속도의 정도를 결정하기 때문에 차단부의 열적회복특성에 상당한 영향을 미친다. 여러가지 실험적 연구보고에 의하면, 90도의 유동인입각도가 수 μs 이내의

열적회복특성이 가장 좋은 것으로 알려지고 있다 [11]. 다음 그림 6은 노즐내에서 유동해석을 한 일례

를 나타내고 있다.

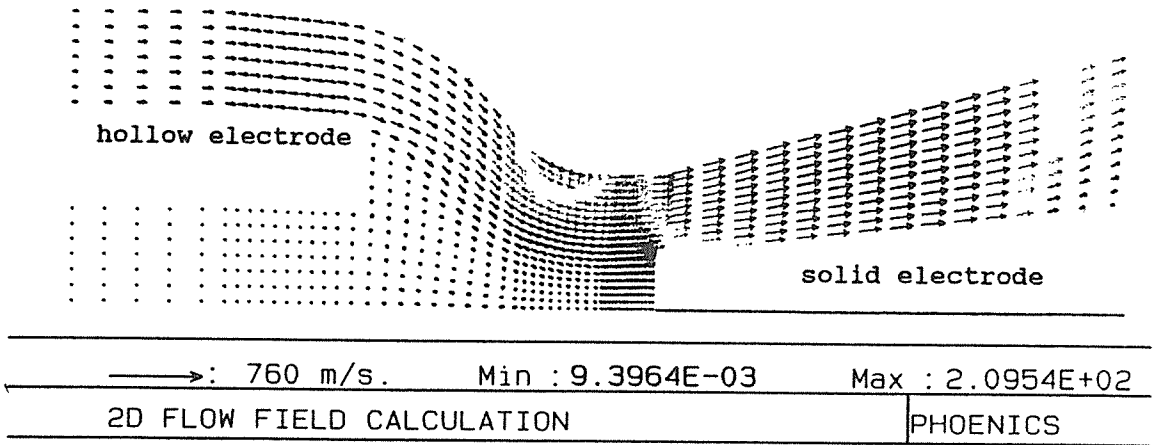


그림 6. 노즐내 유동해석 예

아크전류, 시간, 과도회복전압을 측정해 보면 회로의 가속도와 차단부의 개념상의 차이를 알 수 있으며, 이 측정변수들은 노즐형상과 하류장 유동이 바뀌면 변한다. 주어진 설계에 있어서, 이 변수들은 상류장 압력의 함수로 변하므로 아킹시간의 함수로 된다. 이러한 변수들을 측정하기 어려운 경우, 선택된 설계를 비교하기 위해서는 회로를 구성하고 최소 아킹시간을 결정하는 것이 실제적인 방법이다. 아킹시간이 가장 짧은 차단부가 가장 실효적이며, 단일유동형 차단부에서 최소 아킹시간에 영향을 주는 설계변수들을 나타내 보면 그림 7과 같다[12].

L_H : 노즐의 최소 단면적에 방해되지 않도록 설계
 상류장 원통형 점점내경: 가능한 크게 설계
 상류장 원통형 점점길이: 대응하는 하류장 점점의 길이보다 길게

- ϕ_N : 대략 $0.8 * I_{ca}(kA)(mm)$
- β_N : $0.3 \text{ } ^\circ\phi_N$
- α : 15° (주로 산업용 차단기)
- d_c : 차단전 하류장 유동의 생성을 위해 가능한 한 크게 설계
- L_c : 차단전 하류장 유동의 생성을 위해 가능한 짧게 설계
- d_H : d_H 개구의 총 단면적이 대략 $3/4\pi\phi_N^2$ 정도되게 설계
- L_N : 대략 $2\phi_N$
- γ_N : 대략 $2\phi_N$

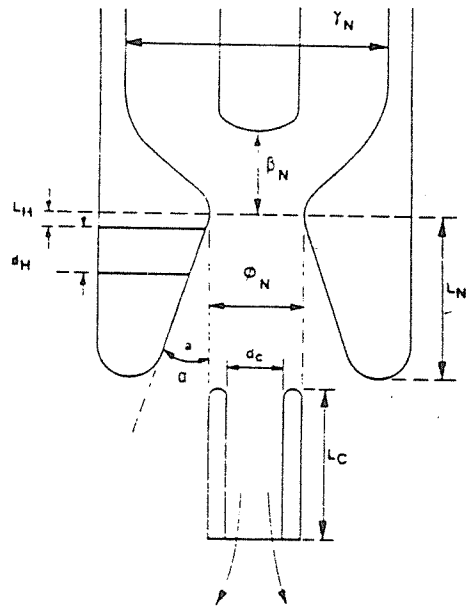


그림 7. 단일유동 차단부의 전형적 노즐

그리고 절연설계에 있어서 중요한 것은 접점양단에 전압이 인가되었을 때 지나친 전계가 임의의 지점에 집중되지 않도록 한다[13]. 그림 8에 로타리아크 소호부의 전계계산의 일례를 나타내고 있다.

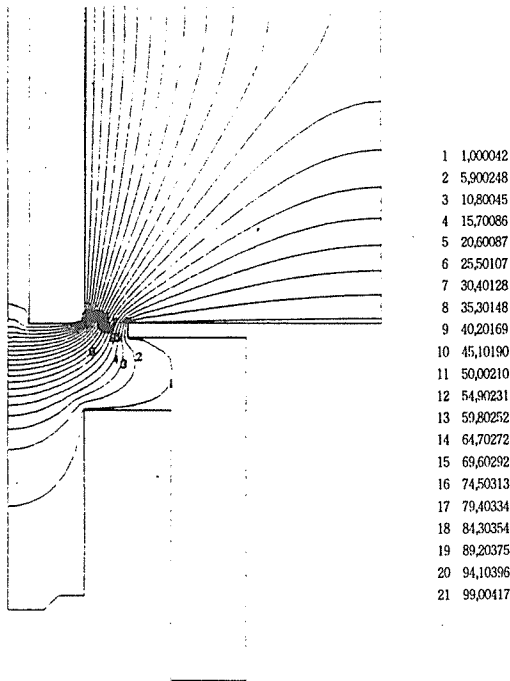


그림 8. 소호부의 전계분포 계산의 예

이런 설계상의 요소들의 관계를 어떻게 선택하는냐에 따라 차단부의 실효성이 결정된다. 차단부의 실효성은 일반적으로 열적인 재점화가 일어나는 최소 아킹시간 근처, 즉 비교적 낮은 TRV 값에서 판단되지만, TRV 피이크에서의 한계도 결정되어야 한다. 일반적으로 절연적 재점화의 위험이 더 높은 것은 최대 아킹시간이며, 스트로크 길이, 접점의 속도, 이온화된 가스의 제어는 최대 내전압의 한계를 결정하는데 필요하다.

5. 배전급 가스차단기의 차단특성

차단기의 중요한 역할중의 하나는 전력계통에서 발생한 단락전류를 차단하는 것이다. 전력계통에서

발생한 단락전류는 1사이클동안 2번 전류영점을 통과하는데, 차단기는 이 전류영점에서 전류를 차단한다. 차단기의 두 접점이 접촉상태에 있다가 개극하기 시작하면 두 접점사이에 아크방전이 일어나기 시작하며, 이 아크를 통해서 전류는 계속하여 흐르게 된다. 가스차단기의 경우 아크가 발생하면 일반적으로 차단기 내부에서는 가스온도와 전자온도가 동일한 열평형상태, 즉 열플라즈마로 된다. 단락전류가 전류영점에 도달하는 순간, 아크에너지의 입력은 영이 되기 때문에 에너지손실이 충분히 큰 경우에는 도전성이 유지되지 못하고 서서히 절연체로 변하여 극간에 걸리는 계통전압을 견디게 되어, 결국 단락전류를 차단하게 된다.

전류차단후 전류영점 근방의 과정을 좀더 자세히 살펴보면, 전류영점에서 아크의 도전성이 충분히 낮아지면 이 시점에서 아크는 소호된다. 아크가 소호되면 상승율이 매우 큰 과도회복전압의 초기부분이 차단기의 극간에 인가되기 시작하는데, 이 상태가 짧은 수 μs 에서 길게는 수십 μs 정도 지속되고, 이 시점이 경과하면 극간에는 보다 큰 값의 과도회복전압이 인가되어 온다. 전류영점후 차단기의 극간에 잔류하는 아크의 도전성이 충분히 저하하여 극간에 회복된 절연내력치가 과도회복전압치보다 크면 차단기는 전류차단에 성공하게 된다. 반대로 극간에 잔류하는 아크의 도전성이 여전히 높아 극간에 회복된 절연내력치가 충분하지 못하면, 아크는 극간에 재점화하고 차단기는 이 전류영점에서 전류차단에 실패하게 된다.

이와 같은 전류차단과정을 시간적으로 크게 2가지 영역으로 나누어 고려해 볼 수 있는데, 하나는 열적 파괴영역(Thermal Recovery Failure Regime)이고 다른 하나는 유전파괴영역(Dielectric Recovery Failure Regime)이다. 또한 유전파괴영역은 고온유전파괴영역(Hot or Early Dielectric Recovery Failure Regime)과 저온유전파괴영역(Cold or Late Dielectric Recovery Failure Regime)의 2가지 영역으로 구분할 수 있다. 그림 9는 열적파괴의 전형적인 예를 그림 10은 유전파괴의 전형적인 예를 나타내고 있다.

상기 2가지 영역을 나누는 경계시점을 정확히 구분할 수는 없지만, 일반적으로 전류영점 바로 직후의 수 μs 부터 수십 μs 까지의 기간을 열적파괴영역으로 볼 수 있으며 이 영역에 연이어 수백 μs 까지의 기간

을 유전과피영역으로 구분한다. 따라서 차단기가 전류차단에 성공하였다는 의미는 차단기의 극간에서 열적과피 및 유전과피가 일어나지 않고 열적회복 및 절연회복이 충분하여 아크가 재점화하지 않았다는 것을 말한다.

급준한 초기회복전압을 나타내는 대표적인 예는 SLF(Short Line Fault : 근거리 선로 고장) 차단시에 나타난다. 열적과피영역에 있어서는 차단되고 있는 전류는 흐르고 있지 않지만, 아직 잔류아크의 온도가 수천도를 유지하고 있기 때문에 일반적으로 열평형 기체로 취급하여도 무리가 없다. 잔류아크를 Conductance가 G(S/cm)인 2단자소자로 볼 수 있으므로, 여기서 발생하는 전력 P는 아크전류 I(A)와 전계강도 E(V/cm)의 곱으로 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$P = EI = \frac{I^2}{G} \text{ (W/cm)} \dots\dots\dots (15)$$

손실을 N(W/cm)이라 하면, 잔류아크에 축적되는 에너지 Q는 P와 N의 차가 되며, 이 Q가 아크의 평균 온도 T(K)를 결정하게 된다. 역으로 온도 T가 손실

N과 Conductance G에 영향을 주기도 한다.

6. 결 론

세계 각국의 배전급 가스차단기에 대한 기술개발 및 연구동향을 분석한 결과, 우리나라에서 향후 추진해야 할 이 분야에 대한 연구방향을 다음과 같이 정리하여 볼 수 있다[14].

- 1) 소호실 개발연구 : 선진외국에서 상품화된 기존의 각종 소호방식에 대한 소호원리 규명과 소호실 설계 및 제작, 그리고 차단성능시험 등을 실시하여 소호실에 관련된 제반기술을 국내기술로 소화하여야 한다.
- 2) 새로운 소호방식에 대한 연구 : 새로운 소호방식에 대한 소호원리 규명, 소호실의 설계 및 제작, 동작기구부와의 연관성 규명과, 단락전류차단시험, 소전류개폐시험, 특성시험 등 개발시험뿐만 아니라 수명시험도 실시하여 새로운 소호방식을 채택한 차단기에 관련된 제반기술을 완전히 습득하여야 한다.

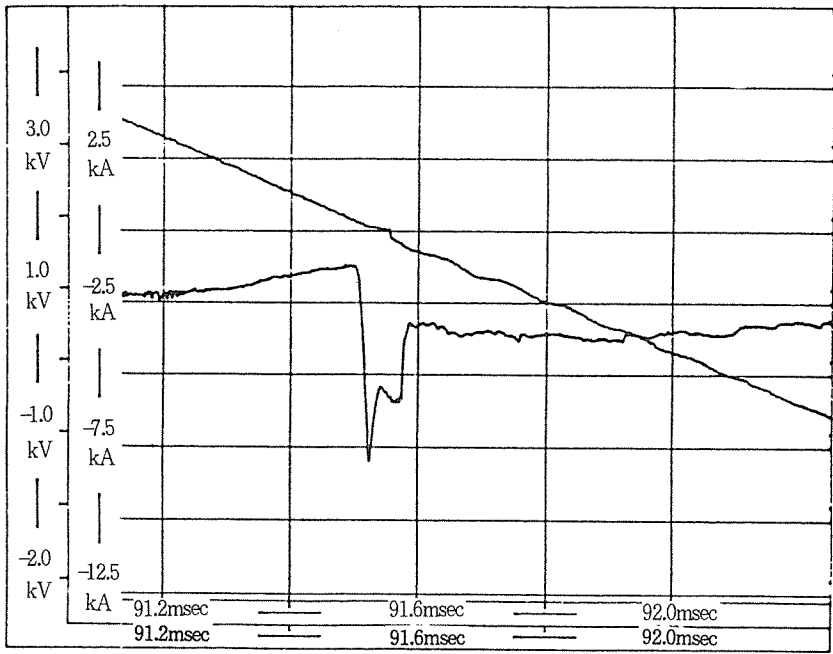


그림 9. 열적과피의 전형적 예

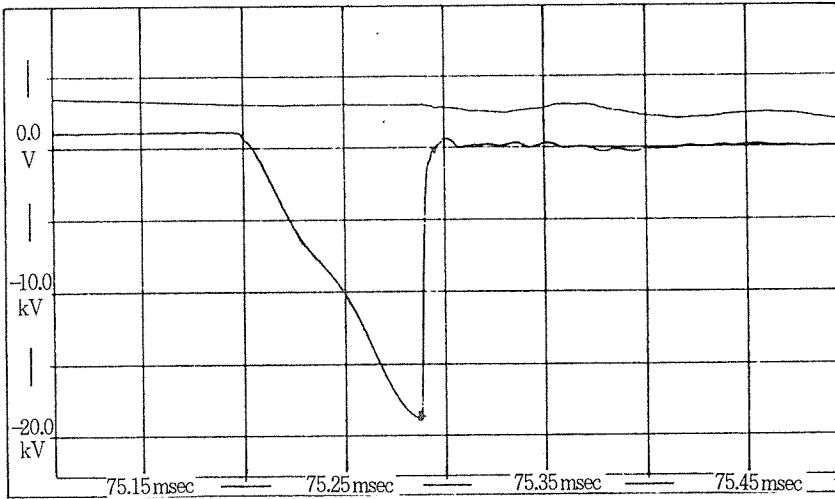


그림 10. 유전파괴의 전형적 예

3) 소전류차단시 전류재단현상에 의한 과전압 발생에 대한 연구: 각종 소호방식을 채택한 가스차단기로 지상소전류 및 진상소전류 차단시험을 실시하고 이때 전류재단현상에 의해 발생하는 과전압을 최소화시키는 연구와 그러한 소호방식을 개발하는 연구를 함으로써 사용목적에 알맞는 다양한 기종의 가스차단기를 개발하여야 한다.

4) 광학적 관찰 및 측정연구: 각종 소호방식을 채택한 가스차단기의 소호실을 광학적으로 관찰 및 측정할 수 있는 구조로 만들어 소호원리, 유동특성, 아크특성, 차단과정, 차단에 영향을 미치는 각종 변수 등에 대한 규명 및 분석을 함으로써 배전급 가스차단기에 대한 기본기술을 확보하여야 한다.

5) 특수재료 개발연구: 배전급 가스차단기가 소전류계폐용으로 긴 수명, 낮은 개폐찌지전압, 안정된 접촉, 큰 투입용량, 가스누출시에도 양호한 차단성능 등을 하기 위해서는 특수접점 및 특수 내아크재료에

대한 개발연구가 필수적으로 수행되어야 한다.

6) 3상일괄방식 연구: 배전급 가스차단기는 주로 수변전반에 설치되는 것이 많으므로 소형경량이 특히 요구되고 있다. 따라서 3상을 일괄하여 하나의 탱크에 내장하기 위해 절연설계를 최적화해야 하며, 3상일괄 절연탱크를 몰딩하는 설계기술을 개발하여야 한다.

현재 세계적으로 기술의 진보와 사회정세의 변화에 동반하여 설비의 자동운전, 무부수화가 진행되고 있으며 차단기에 대하여도 한층 고신뢰성, 무유지보수, 고안정성, 설치공간의 축소를 위한 소형경량화가 요망되고 있다. 배전급 가스차단기는 이런 요망에 부응하는 최적의 첨단 차단기로서 또한 우리나라가 추진하고 있는 중전기기의 진흥에 알맞는 전문 품목이므로 이에 대한 과감한 연구투자를 하여 가스차단기의 관련 연구를 보다 활성화시켜야 한다.

맘도 함께 꿈도 함께 보람도 함께