

° 김 종겸, 이 은웅, 김 일중

한국수자원공사, 충남대학교, 주성전문대학

*The Extinguishing Principles and Surge voltage analysis of High-voltage switching V.C.B*

( Jong-Kyeom Kim , Eun-Woong Lee , Il-Jung Kim )

(KOWACO, Chung-Nam National University, Ju-Seong Technical College)

Abstract

The increasing application of Vacuum Circuit-Breakers (VCB) on utility and industrial systems has prompted and detailed investigation of vacuum switching surge mechanisms and protections. This paper arranges arc-extinguishing principles of magnetic field in vacuum in order to disperse rapidly arc generated from vacuum contacts on switching VCB and plans establishment of protection means to protect high-voltage motor against surge voltage magnitude and transient voltage rate of rise

1. 서론

진공차단기는 차단성능이 우수하고, 신뢰성이 높으며, 소형으로서 공간점유가 적고, 조작메카니즘이 간단할 뿐 아니라 유지보수가 쉬운 특징을 지니고 있기 때문에 산업현장에서 점차 그 사용범위가 확대되어가고 있다. 그런데 진공차단기를 고압전동기의 개폐기로 사용하는 경우 개폐시 소호력이 강하기 때문에 발생하는 서-지전압이 전동기의 절연열화를 일으키는 원인이 됨이 밝혀졌다. 본 연구에서는 서-지전압으로부터 고압전동기의 절연열화 저감방안을 모색하기 위해 국내에서 생산되는 진공차단기의 구조, 서-지발생현상과 소호원리등을 규명하여, 각각의 특징을 분석정리하고 아울러 기존 보호방법에 대해 검토하여 새로운 서-지전압저감을 위한 기초자료를 얻고자 한다.

2. 진공차단기의 구조

진공차단기는 그림과 같은 구조로 되어 있으며 각 부분의 기능과 재질특성은 다음과 같다.

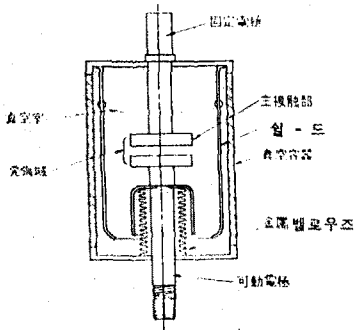


그림 1. 진공차단기의 구조

2.1 접촉자( CONTACT )

전원투입시 점접을 이루는 접촉자 매질은 진공차단기의 질을 결정하는 중요한 요소로서 다음과 같은 성질을 가진 재질이 요구된다.

- ① 차단시 회로조건에 의해 발생하는 과전압이 개폐기의 극간 내전압보다 높을 경우 발생하는 재발호의 반복원인이 되는 급속이온 발생이 잘 일어나지 않아야 한다.
- ② 차단기의 급구적인 사용목적은 전원으로 부터 기기를 빠른 시간내에 분리시키는 것으로서 동일형태라도 접촉자의 매질에 따라 다른 차단기에 비해 소형화 할 수 있고 가능한 한 차단능력이 우수하여야 한다.
- ③ 전원 분리시 접점부사이에서 발생하는 아크에 의해 표면의 용융으로 접촉부가 손상되어 개폐가 여러번 반복하더라도 차단성능이 저하하지 않아야 한다.
- ④ 전원을 차단한 후 절연회복의 속도가 늦어지지 않도록 차단기내부에 잔류가스성분이 존재하지 않아야 한다.

2.2 아크차폐(Arc Shield)

전원개폐로 전류재단시, 점접간에 발생한 급속증기를 압축 포착하는 기능을 갖고 있다.

2.3 Bellows

차단기의 개폐시 가동 접촉자의 이동을 가능하게 하며 가동접촉자의 이동에 따른 기계적 강도를 고려하고 전류의 효과와의 관계를 고려하여 구조와 크기등을 설계되어야 한다.

2.4 진공벨브

압력이 0.1 [Pa]이하로 일정하게 유지되면 파피전압이 일정하게 유지될 수 있다는 Paschen法則을 차단기의 특성으로 하기위해 진공벨브를 사용하여 왔다.

① 게터

진공내에서 잔류가스를 제거하여 진공도를 향상시키기 위해 사용하는 물질로 대개 지르코늄(Zr)을 사용한다.

3. 消弧原理와 電極構造

3.1 消弧原理

(1) 진공벨브의 소호원리

점접분리시 아크가 발생하며, 발생한 아크는 전극재료가 용융하여 발생한 급속증기가 플라즈마 상태로 된 급속아크 형태를 형성한다. 이 급속아크는 비교적 높은 증기압으로 되며, 주위가 진공이기 때문에 발생한 급속증기는 확산작용에 따라 압력이 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 급속히 확산된다. 아크전류가 증가할때 전극표면에서 급속증기의 발생도 증가하지만, 전류의 자연 영점근처에서는 아크전류의 감소에 따라 급속증기의 발생도 감소하게 되어 전극간에 급속증기의 잔류는 극히 작아진다. 전류의 자연영점에서 아크가 소멸하면, 전극간 잔류급속증기는 확산작용에 의해 진공벨브의 주위로 확산되어 극간절연이 빠르게 회복되므로서 이후 再發

弧電壓이 인가되더라도 소호하여 차단이 완료된다.

(2) 아크소호원리

금속증기 아크방전은 접촉자가 개방될 때 차단되어지는 차단전류에 의해 시작된다. 전류는 이 금속증기 플라즈마를 통하여 다음 전류 영점까지 흐른다. 아크는 전류영점 근처에서 소호되며, 도전성의 금속증기는 수  $\mu s$  내에 금속표면상에 응축되기 때문에 차단기내부의 절연강도는 대단히 빨리 회복된다. 즉, 아크소호장치의 기능은 전류 영점후 즉시 차단기내의 이온을 제거하는 것이다.

3.2 電極構造 와 遮斷機能

진공차단기내에서 아크 플라즈마의 빠른 확산은 높은 차단능력을 보증하지만, 양극의 과열에 의한 발생되는 양극점은 차단능력을 제한한다. 양극에서 금속증기나 열전자의 방출이 너무 많으면 전극사이의 절연회복을 악화 시켜 신속한 차단을 이룰수 없다. 그래서 양극점의 형성을 막기 위해 아크를 자체적으로 제어할 수 있는 몇가지의 방법이 研究되고 있다. 그 하나가 아크에 수직인 자계를 가하여 아크를 이동하는 방법과, 다른 하나는 아크전류에 의한 축자계를 형성시켜 수많은 소형의 아크를 일정하게 배분시키고, 전극표면의 에너지 밀도를 감소시켜 아크를 제한 하는 방법이다. 즉, 진공차단기에 자계를 도입하는 것은 차단능력을 향상시키기 위한 것으로서 자계에 의한 아크의 조절은 차단능력의 저하를 초래하는 양극점의 형성을 막기 위해서 채택되어진다. 이는 아크 위치의 변화를 통해 양극점의 형성을 막을 수 있기 때문이다.

(1) Spiral 電極

차단전류가 크고 전극의 직경이 크게되면, 아크는 전극의 표면에 일정하게 퍼지지않고, 일부분에 편중하게 된다. 특히 전극의 角부분에서는, 금속증기가 발생하기 쉬우며, 아크가 이 부분에 附着해서 현저하게 전극표면을 熔蝕시켜 再點弧의 원인이 되면 부하축기기에 나쁜 영향을 미치는 수가 있다. 그림 2는 아크에 직각방향의 자계를 가하여 아크전류의 진로를 移動시키므로 전극의 극부적인 가열을 막아주는 동작원리를 나타낸 그림이다.

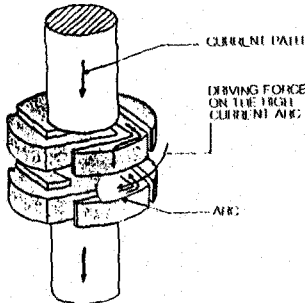


그림 2. 磁界移動方式의 電極構造圖 및 斷面圖

(2) 單極 軸磁界 電極 (uni-pole axial magnetic field type electrode)

접촉자인 전극구조는 디스크 형태의 주전극과 코일전극으로 구성되어 있다. 전류는 그림3과 같이 축 중심에서 나누어져서 축 주위로 흐르게 된다. 이때 나뉘어진 전류는 각각 코일전극의 원주부분을 통해 주 전극으로 흐르게 된다. 아크는 주 전극사이에서 점화되어지며, 코일전극의 원주 부분에서의 전류는 전체적으로 단극 축자계를 발생한다. 이 방식은 자계를 한 방향으로 형성하기 때문에 와류를 발생한다는 단점을 지니고 있다.

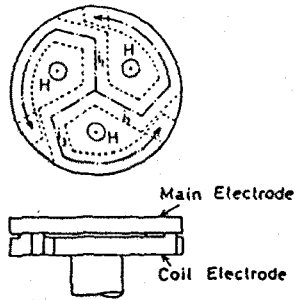
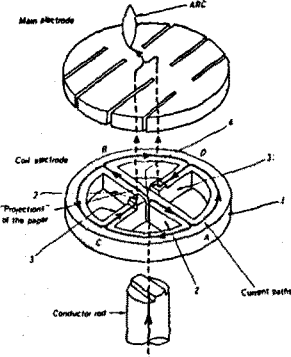


그림 3. 축자계인가 방식의 자계구성도

(3) 多極 軸磁界 電極 (multi-pole axial magnetic field type electrode)

축자계 자속은 자계가 전극을 수직으로 통과함에 따라 전극내에서 渦流가 발생한다. 와류에 의해 발생된 자계의 극성은 전극사이의 차단전류에 의해 발생하는 주 자계의 극성과는 반대다. 이 와류에 의한 자계의 相은 전체 자계의 크기를 감소시킬뿐아니라, 전류 영점의 순간에 약간의 잔류자계를 생겨나게 하여 주자계의 상보다 늦어진다. 그리고 잔류자계는 잔류 아크 플라즈마를 급속히 확산하지 못하게 하므로서 절연회복을 느리게 한다. 이와같은 현상을 제거하는 방법으로 와류를 감소시키기 위하여 전극에 몇개의 슬릿을 만든다. 그렇게 하더라도 도체 條 때문에 전극의 중심 근처에서는 별로 효과가 없지만, 다극 축자계 전계는 전류 최고값에서 축자계를 발생시키고, 전류 영점에서 매우 낮은 잔류자계를 가지며 축중심에서는 잔류자계를 가지지 않는 장점이 있다. 아래 그림 4는 다극 축자계에 대한 모습을 나타내는 것이고, 그림 5는 전류통로와 극성을 나타낸 것이다.



1. Ring section 2. First splite 3. Second splite 4. Fish section

그림 4. 다극 축자계 전극

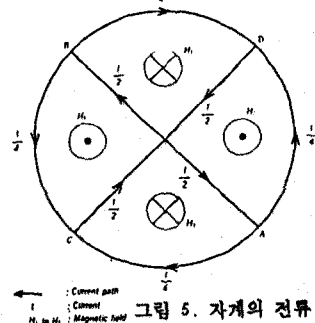


그림 5. 자계의 전류 통로, 전류 값과 극성

(4) 축자계와 직교자계와의 차이점

① 에너지가 확산되는 직교자계전극의 유효면적은 주변에서 고리형태 접촉자에만 한정되지만, 축자계전극의 에너지 확산 유효면적은 전체 전극표면이다.

⑤ 회로파괴의 아크전압은 전류 최대값동안 급격하게 상승하지만, 축자계 전극의 아크전압은 낮게 유지되며 일정하다. 이는 축자계전극의 전체 아크에너지가 직교자계의 아크 에너지보다 작기 때문이다.

③ 직교자계 전극의 아크전류 조절은 40(KA) 보다 높을 경우 상당히 어렵다.

④ 직교자계의 전극은 구조가 간단하여 가공이 쉽고 가격이 싸다.

(5) 차단능력의 비교

차단기의 차단능력은 전극의 간격과 전극의 형태에 따라 다르다. 차단능력의 한계를 아크가 발효하는 전극표면의 아크 에너지 밀도의 관계에서 보면 축자계 형태 전극의 차단능력은 전극 직경의 단면적에 비례하고, 직교자계형태 전극의 차단능력은 전극직경 그 자체에 비례하며, 이를 비교한 것이 그림 6이다. 여기서 직경이 60[mm]까지는 직교자계와 축자계의 차단능력에는 차이가 거의 없지만, 이후부터는 다소 차이가 있음을 알 수 있다.

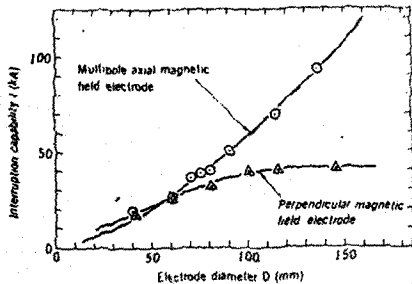


그림 6. 차단능력과 전극직경과의 관계

4. 開閉時-지의 種類와 現象 2.2)

서-지전압은 전류제단, 다중재발효, 전압상승, 삼상동시전류제단(Virtual current chopping), 先點呼(Prestriking) 등에 의해 주로 발생하게 된다.

4.1 전류제단 현상

전류를 차단할 때, 전류의 자연영점에 도달하기전에 강제적으로 차단해 버리는 제단현상이 발생하게 된다. 이때의 제단전류와 회로의 서-지 임피던스의 곱에 해당하는 서-지 전압이 발생하게 된다. 전류제단 현상은 전극을 구성하는 재질의 용융점, 증기압, 밀합수, 이온화 에너지등의 많은 실제적인 요소들에 의해 좌우된다. 특히, 전류제단은 소용량 전동기의 지연전류의 차단시에 발생하기 쉬운 현상이다.

전류제단 현상은 음극점으로 부터 금속증기나 하전입자의 공급이 아크중에 진공으로 확산하는 하전입자나 금속증기를 따를수 없기 때문에 생기는 것으로 분석된다. 따라서 음극점으로 부터 금속증기의 공급능력을 적게하므로써 전류제단 레벨을 감소시킬 수 있다.

4.2 재발효에 의한 과도전압

차단시의 개극과정에서 극간절연이 회복전압(재기전압)에 견디지 못하면 재발효(reignition) 현상이 생기게 되는데, 다중 재발효에 의해 상승되는 서-지전압은 고주파 전류차단능력, 전극동작속도, 전극내 전압, 케이בל길이, 케이בל의 인덕턴스와 캐패시턴스, 부하 인덕턴스와 캐패시턴스 등에 영향을 받게 된다. 이 再發효현상이 여러번 반복되면, 회로의 정전용량에 충전되는것이累積되어 높은 서-지전압이 되는 경우가 생겨나게 된다.

다중 재발효 전압상승과정은 두가지 방법으로 끝나게 된다. 그 첫째는 개극시간의 경과와 접촉자의 극간거리가 증가함에 따라 전압이 상승하는 과정에서 고주파전류의 차단이 일어나고 접촉자 구간에서는 정상 주파수의 회복과도전압이 지속하는 것과, 둘째는 부가적으로 발생하는 고주파수나 전원주파수 전류에 첨가된 고주파 전류가 영점으로 감쇄될 때 까지 수많은 주기동안 지속하는 것이다.

4.3 삼상동시전류제단(Virtual current chopping)

비접지계통에 있어서 지상 小電流를 차단하는 경우, 삼상 동시차단(virtual chopping)이라는 현상이 생기는 수가 있다. 삼상동시차단에 의해 미관상 제단되는 전류값은 보통의 경우에 비해 대단히 큰 값이 되고, 이 결과 발생하는 전압도 대단히 큰값이 될 가능성이 있다. 이는 차단시에 다른 상에 강제적으로 차단영향을 미치는 것으로서 한상(즉 A상)에서 再發弧와 전압상승을 수반하여 나머지 다른 두상(B, C상)과 결합하여 고주파 전류가 흐르게 되면 발생하게 된다. 이는 케이블과 접지선 임피던스에서 상호인덕턴스에 영향을 받는것이 지배적이다. 그러나 발생시 일어나는 회로정수의 범위가 정해져 있고, 충분히 큰 고주파전류가 흐르기 때문에 부하측 대지정전용량의 값이 크게 되면, 과도회복전압 주파수가 작게되어 재발효 발생이 어렵게 된다는 것이다.

4.4 先點呼(Prestriking)

차단기의 투입점점간사이의 전계세기가 이들 점점자가 접촉하기도 전에 일정 이상이 되어 점점접의 絶緣이 破壞되어 일어나는 현상을 말한다. 차단기의 선로속과 전원속 전압은 매우 빠른 속도로 중간치 이하로 떨어지며, 이 변화는 수십[ns]의 짧은 時間以内에서 일어나게 된다. 차단기의 선로속에서 일어나는 매우빠른 전압변화는 매우 가파른 전압파형이 되어 선로에 연결되어 있는 회로영역에 투입 및 반사 되는 것과 같은 결과를 낳게된다. 이 파형의 크기는 시스템 선간 중성점 전압이 정점값 만큼이나 높다. 이 과도전압에 의해 아크가 발생하여 투입점점점을 통과하여 흐르는 전류는 회로의 성질이나, 차단기의 형식에 따라 차단될 때 투입점점점 사이의 유전체의 세기가 점점을 통과한 전압의 세기보다 클때까지 회복된 상태를 유지하는 것이고, 유지 못하게 되면 두번째 선점호가 일어나게 된다. 이 과정은 점점이 최종적으로 닫게 되기까지 여러번 반복될 수 있다. 선점호현상은 그 수가 매우 작고, 접촉자 겹이 시간에 대해 매우 빠른 속도로 감소하기 때문에 부하를 차단할 때 보다 가혹하지 않다고 볼 수 있다.

5. 保護技法

진공차단기의 단점은 차단시 발생하는 고조파전류를 차단해야 하는 것으로서 이 전류는 전원 주파수 전류에 비교적 높은 값으로 겹쳐져서 높은 서-지전압을 일으키게하여 곧바로 부하측 단자에 좋지 못한 결과를 나타내게 한다. 그래서 각 나라별로 이에 대한 대책을 마련하여 부하기기를 차단기로 개폐할 때 나타나는 가혹한 서-지에 대한 대책을 마련하고 있다.

5.1 保護裝備의 設置 2.2)

과전압은 대지절연에 영향을 미치고, 급준한 파형의 전압은 권선절연의 열화를 일으키기 때문에 이에 대한 대책을 확실하게 마련하는 것이 무엇보다도 중요하다. 따라서 이에 대한 대책으로 마련된 서-지보호장치로는 서-지전압크기에 대한 보호방법과, 과도전압 상승율을 변경시키는 방법을 이용한 것으로 다음과 같은 대책이 마련되어져 왔다.

(1) 전동기 단자와 대지간에 서-지캐패시터를 설치하여 過電壓의 程度를 低減시키는 방법

서-지캐패시터는 부하회로의 고유주파수를 저감시키고, 부하에 따라 결정되는 전압상승비율을 감소시키며, 부하회로의 유효 서-지임피던스를 감소시키는 기능을 한다. 즉, 전동기 단자에 캐패시턴스의 설치는 차단후 접촉자사이에서 나타나는 전압의 상승비율을 감소시키기 때문에 發弧서-지의 程度低減에 효과가 있다. 그러나 再發弧 전류는 진동적으로 지속되고, 연속적인 다중 재발효는 여전히 지속되므로 별도의 추가 보호장치의 필요성은 해결되지 않는다.

(2) 전동기 단자와 대지사이에 서지 어레스터를 설치하여 과전압을 제한하는 방법

보통의 어레스터보다 한층 방전개시전압을 낮게 설계한 써-지어레스터는 다중 재발호서-지가 진전해 나가는 중간에서도 서지전압의 크기가 방전개시전압에 到達하면, 그 에너지를 대지에 방전시키는 것에 의해 다중 재발호의 지속성을 없게하는 방법이다. 파형 준도를 저하시킬 수는 없지만, 서-지 파고치를 방전에 의해 낮게 억제하는 것으로서  $(AV/S)$  도 필연적으로 낮게 되어, 전동기 권선에 걸리는 전기적 스트레스를 작게할 수 있는 특징이다.

(3) (1) 과(2) 를 병용하는 방안

콘덴서로 준도를 저감시키고, 어레스터에 의해 파고치를 제한하는 방법이지만 고가이고, 설치장소가 넓게 차지하는 短點을 지니고 있다.

(4) 전동기 단자와 대지사이의 R - C 서지역제기(suppressor)를 설치하는 방법

콘덴서와 抵抗을 직렬연결하여 콘덴서에 의해 부하측의 서-지 임피던스를 낮추어 재단서-지를 낮게하고, 抵抗은 再發弧때의 에너지를 吸收하게 하는 방식이다. 서-지전압의 初期 상승율을 낮게 하므로서 多重-再發弧의 제어에 效果를 지니고 있다. 이는 서-지전압의 분포가 電動機等 부하 코일 線圈(Lin-end coil)에 거의 集中되기 때문에 초기 상승률이 높을수록 집중현상은 가중되는데 콘덴서에 의해 초기 상승률을 낮출 수 있어 絶緣破壞를 減少시킬 수 있다. 이는 우리나라 및 일본에서 'surge absorber'란 이름으로 널리 사용되고 있으나, 재발호 현상 발생시에 吸收된 서-지에너지가 진공 튜브쪽으로 逆放電(discharge)시켜 진공차단기 튜브의 손상을 초래하거나, 대지 용량의 증가등에 의한 안전성의 문제점을 지니고 있다.

(5) 비직선저항체를 設置하는 방법

비직선성을 가진 저항체(Zinc-oxide)를 접지사이에서 접속하는 방법으로서 다중 재발호서-지가 진전해 나가는 사이에도 저항체의 특성에 따라 전류를 대지간에 흘려 전압 상승을 억제하는 동시에 서-지에너지를 소비시키게 하는방법이다.

(6) 차단기와 직렬로 과파와 리액타를 設置하는 방법

발호서-지전류를 억제하는 기능과 함께 서-지준도를 저감시키는 것으로서 이에 의해 전동기 권선의 중간에 걸리는 전압 스트레스를 저감시키는 효과를 얻을 수 있다.

(7) ZORC 억제기 : R - C 회로와 병렬로 MO-varistor에 의해 병렬로 된 resistor를 부하하는 방법으로 케이블의 길이가 짧을때(15m이하)는 차단기에, 그렇지 않을 경우에는 전동기 단자에 붙이는 방법등에 사용하는 것으로서, 주파수와 전압의 종속관계를 지니고 있다. 고압전동기의 보호를 위한 ZORC 억제기는 첫번째가 전동기 단자함에 설치할 의도로 컴팩터화 한 것이고, 두번째가 스위치 판넬내에 내장을 위해 다른 것과의 결합할 수 있는 두종류가 있다. 이들이 갖는 특징은 다음과 같다.

- ① 고주파 재발호 서-지전류를 加減시키므로써 연속적인 재발호를 제거한다.
- ② 재발호서-지의 급준파 성분을  $2(\mu s)$  이하까지 제한할 수 있다.
- ③ 개별요소의 값들은 전압에 의해 결정하는 저항요소는 선 전호나 재발호의 경우에 수  $(\mu s)$  동안만 작동되는 것을 보장할 수 있도록 선택되어졌다.
- ④ 고주파 서-지가 발생할 수 있는 조건이 내제되어 있을때는 서지캐패시터와 직렬로 등가저항이 연결된 문제발생의 상에서만 단지 감소된다. 그래서 스위치 판넬내에 설치되더라도 相사이 고주파 결합을 증가시키지는 않는다. 따라서 기동시 차단시간내 삼상이 동시에 차단되지 않는다.

5.2 關聯機器의 絶緣強化

(1) 진공차단기의 재단전류의 減少方案

제작회사마다 점차 재발호 전류가 작은 접속자의 材料開發을 통해 기술향상을 圖謀하고 있다.

(2) 전동기의 絶緣階級을 높인다.

서지 진행이 권선속으로 들어감에 따라 漏電流와 권선의 서-지임피던스의 불연속으로 인한 반사등으로 입구보다는 덜 가파르기 때문에 이의 특성을 잘 파악하여 재단전류에 의한 서지전압이나 다중 재발호에 의한 과전압으로부터 기기를 보호하는 한 방법으로서 권선의 절연을 저급 보다 더욱 높은 등급의 재질을 선택하는 방법도 있지만 경제성을 고려하여 이에 대한 비교 대책이 마련되어야 한다.

6. 結論

전원으로부터 부하기기를 안전하게 개폐하는 진공차단기의 기능을 높이기 위해서 진공차단기의 개폐성능을 優秀하게 하고, 신뢰성을 높이는 方案으로는 급속이온의 발생과 접촉부의 損傷이 적으며 반복되는 개폐작용으로 차단성능이 低下되지 않는 진극재질의 개발이 時急하고, 개폐시 통전속을 통해 흐르는 전류의 방향을 이용하여 직교자계나 축자계를 발생시키므로써 접촉전극 표면에 발생하는 아크 즉, 급속이온을 분산시켜서 소호작용을 빠르게하는 진극구조를 찾아내는 것이다.

그리고 진공차단기를 사용하여 수  $(\mu s)$  짧은 시간내에 전원에서부터 부하를 차단시킬때 회로에 발생하는 높은 서-지전압이 부하기기의 절연내력을 열화시키는 것으로 부터 보다 완전하게 보호하기 위해서는 급준파의 준도와 과전압의 파고치를 저감시키는 장치를 부하기에 부착하는 것이다.

이러한 장치로써 서-지전압의 초기상승률과 파고치를 저감시키는데 효율적인 캐패시터와 재발호시 에너지를 흡수하는 저항요소의 이용으로 귀결된다. 따라서 향후 진공차단기 개폐시 발생하는 서-지전압으로부터 절연을 안전하게 보호하려면 차단기의 개별특성과 전동기 보호회로의 전기적 정수, 그리고 전동기의 절연강도등을 해석요소로 고려한 보호 대책이 연구되어야 한다.

參考文獻

- 1) Y. Kurosawa et al., "Behavior of Vacuum Arcs in Transverse Magnetic Field and Axial Magnetic Field", IEEE 10 th International Symposium on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum., pp 261-267, 1982
- 2) 일본전기학회기술보고서, "대용량차단기의 특수조건해설", Vol.10, pp.8-12, 1991
- 3) K.J.Cornick, T.R.Thompson, "Steep-fronted Switching Voltage Transients and Their Distribution in Motor Windings Part1 : System Measurements of Steep-fronted Switching Voltage transients" IEE Proc., Vol.129, Pt. B, No.2, pp. 45-55, 1982.
- 4) Working Group 13.02 of Study Committee NO.13, "Interruption of small inductive currents", Ch 3, Part A. B, 1981.
- 5) "Vacuum Circuit Breaker Application And Surge Protection" IEEE STD, pp. 1 - 28, 1988