

眞空 遮断器의 大容量化

安寅煥 / 技術指導室

I. 序 言

眞空遮断器 (Vacuum circuit breaker) 가 실용화된 이래 그 우수한 諸性能이 인식되어 점차 使用度가 높아가고 있다.

그간 각국의 製作技術의 進歩와 더불어 信賴性의 向上, 小形輕量化 및 低 surge 化가 실현되고 또한 眞空遮断器의 大容量化가 추진되어 遮断容量이 대폭 증대되었다.

眞空遮断器의 遮断容量은 電極으로 입사하는 入射 energy를 어떤 方法으로 최소화 할 수 있는가에 달려있다. 이 入射 energy가 電極을 溶融시켜 金屬蒸氣를 電極空間外로 확산시킴으로써 電流遮断後 再發弧를 일으키는 원인이 되기 때문이다. 이러한 현상에 대한 대책으로서 arc의 停滯現狀을 방지하기 위한 電極構造의 개발과 arc를 電極全面에 분산시켜 arc energy를 최소화 시키는 方法으로 해결되었다.

첫째, arc의 進行方向과 直角方向의 磁界에 의해 arc를 회전시켜 電極全面을 遮断에 유효하게 사용하는 spiral 電極方式이며,

둘째, arc軸方向의 磁界(縱磁界)에 의해 arc를 電極空間內에 감금시켜 電極全面에 분산시키는 縱磁界 電極方式이다.

여기서 眞空 arc의 특성과 아울러 spiral 電

極 및 縱磁界 電極에 의한 遮断容量 증대에 대해 소개하고자 한다.

II. 眞空 arc의 特性

眞空中에서 通電狀態의 接點을 開離하면 arc가 발생하며, 이는 接點으로부터 증발한 金屬蒸氣가 電離하여 plasma 상태로 되기 때문이다.

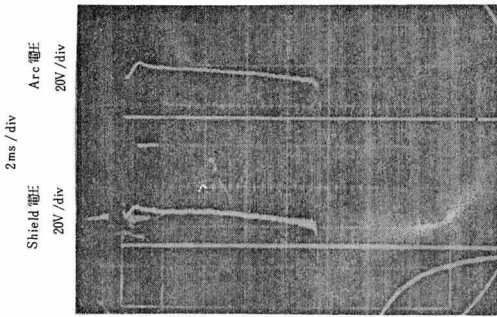
小電流 arc는 陰極點을 중심으로 円錐形을 이루며, 陰極點의 수는 銅電極의 경우 約 100A에서 1個이며, 電流가 증가함에 따라 2個 以上으로 분열한다. 陰極點으로부터 방출되는 ion, 中性金屬原子, 電子數의 比率은 約 1 : 10 : 100이며, ion의 速度는 10^4 m/sec, 電子의 速度는 10^6 m/sec 정도로 추정되고 있다.

數千 A의 小電流 眞空 arc에서의 arc形狀은 陰極點을 중심으로 arc가 분산하므로, energy密度가 陰極點 부근이 가장 높아, 電極消耗量이 陽極보다 陰極이 크며, 또한 arc電壓의 대부분은 陰極點에서 발생한다. 이때 arc電壓의 크기는 金屬의 종류에 의해 결정되며 銅電極의 경우 約 20V이다.

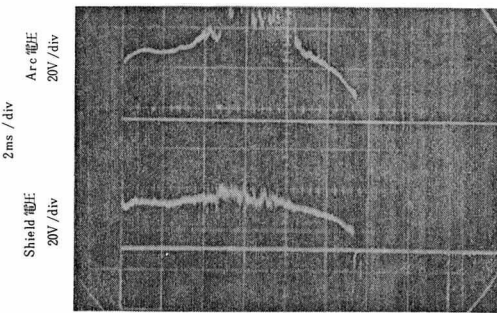
Arc電流가 數千 A 이상으로 증가하여 大電流로 되면, arc는 수축하는 동시에 陽極上에 밝은 spot가 발생하고, arc電壓이 급증한다.

眞空 valve 의 shield 는 절연되어 plasma 中에 floating 상태로 존재한다. Shield 에 多量의 ion 이 확산하여 입사하므로 shield 의 floating 상태의 電位는 plasma 에 대하여 2~3 V 낮고 shield 電流는 흐르지 않는다. 만약 shield 를 陰極에 접속하면 多量의 ion 이 유입하여 shield 電流가 흐르게 된다.

電極空間의 plasma 는 비교적 균일한 密度로 電流가 감소함에 따라 저하한다. 電流零點에서 陽ion 은 約 10^4 m/sec 의 速度로 陰極點으로 부터 방사하므로, 電極距離가 1 cm 일 경우 約 $1\mu s$ 전후에 ion 은 電極空間外로 확산하든가 혹은 電極에 부착된다. 또한 random 하게 운동하는 金屬 plasma 로 구성된 殘留 plasma 도 급속히 감소한다.



(a) Arc 電流 2.3kA Peak



(b) Arc 電流 13kA Peak

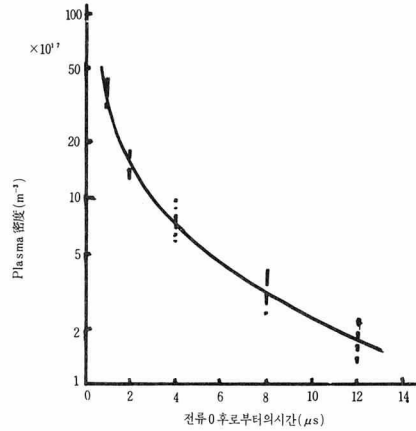
〈그림 1〉 Arc 電壓과 Shield 電壓

〈그림 1〉은 2.3 kA 및 13kA peak 電流時의 arc 電壓과 shield 電壓을 각각 측정 비교한 것이다.

그림에서와 같이 小電流時의 arc 電壓 및 shield 電壓은 모두 안정되어 있다. 그러나 電流가 증가함에 따라 (b)에서와 같이 arc 電壓의 peak 値는 급증한다. 이 경우 shield 電壓은 거의 일정하며, arc 電壓의 급증은 위에서 설명한 大電流 arc 時의 陽極現象이다.

Ⅲ. 眞空 arc 의 遮斷現狀

數千 A 이하의 電流에서는 arc 가 분산하므로



〈그림 2〉 Plasma 密度의 減衰

〈그림 2〉는 200 A 의 短形波 arc 電流零後의 殘留 plasma 密度를 殘流電流의 測定値로 부터 逆算한 것이다.

Arc 가 분산하는한 plasma 密度를 이론적으로 概略計算이 가능하므로, 어떤 電極徑에 대해 遮斷電流가 어느 정도인지 추정하는 것은 가능하나, arc 電流가 증가함에 따라 實測定値와 일치하지 않는다. 이것은 앞에서 설명한 바와같이, arc 가 수축하여 plasma 가 균일하게 분산하지 않을뿐 아니라, 陽極 spot 가 발생하여 電極의 溶融이 격심해지기 때문이다.

遮斷이라는 관점에서 보면, 이러한 現象은 매우 불리한 현상이다. 電流零點에 도달해도 溶融 擴散된 金屬粒子가 電極間에 존재하고, 陽極表面이 高温으로 되기 때문에 電流零點後 인가되는 再起電壓에 의한 再發弧로 遮斷不能이 되기 때문이다.

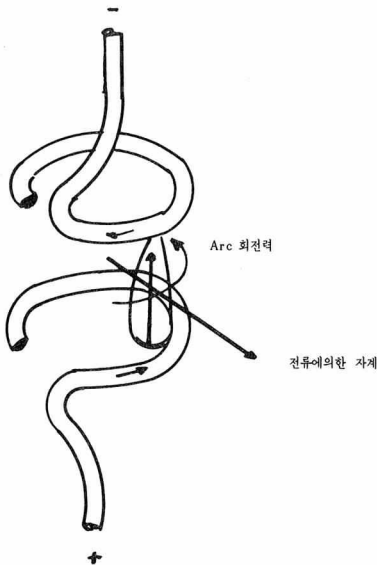
이상과 같이, 眞空遮斷器의 遮斷電流를 증가하기 위해서는 陽極 spot 의 발생을 억제하여 陽

極에서의 入射 energy를 최소화하지 않으면 안 된다.

IV. Spiral 電極

眞空遮断器의 遮断容量은 電極徑을 크게 하면 증대되나, 어느정도 이상으로 크게 해도 arc는 電極面의 一部에 집중해서 停滯되어 있으므로 遮断容量의 증가에는 한계가 있다.

이러한 arc의 停滯現象을 해결하기 위해 사용된 것이 spiral 電極으로 그의 原理는 <그림 3>과 같다. Spiral 上에 흐르는 電流에 의해 arc 方向과 直角方向의 磁界가 형성되며, 이때 발생한 磁界는 arc에 강력한 驅動力을 주어 회전시킴으로써 arc가 一點에 停滯하지 않도록 하는 것이다.



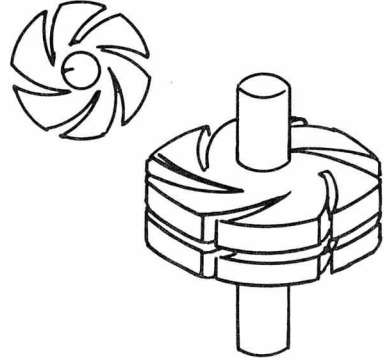
<그림 3> Spiral 電極의 Arc 回転力

Spiral 電極의 形狀은 여러가지 形態가 사용되고 있으며, 一例로서 소개하면 <그림 4>와 같다.

Spiral 電極은 arc 驅動에 의해 電極 全面을 遮断에 有効하게 사용하므로 遮断電流가 증가한다. 그러나, 이 電極에 있어서도 본질적으로 plasma 결핍에 대한 대책이 없기 때문에, 電流가 증가하면 arc 電壓이 증가하고 또한 陽極

의 溶融이 발생한다.

Spiral 電極에서의 遮断電流는 約 40~50kA 정도가 限界値이며, 이 이상의 電流遮断은 電極徑을 크게해도 곤란하다.

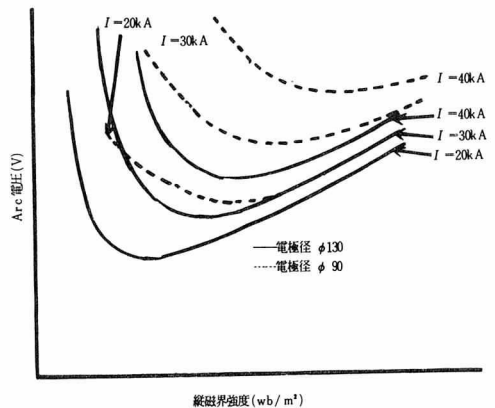


<그림 4> Spiral 電極의 形狀

V. 縱磁界中の 眞空 arc 및 遮断現象

Arc의 進行方向과 直角方向의 磁界는 arc에 驅動力을 주어 회전시키며, 軸方向의 磁界는 arc를 安定화시켜 電極空間內에 감금시키는 역할을 한다.

縱磁界中の arc電壓은 接点의 材質, 電極距離, 電極徑, 遮断電流의 크기 및 磁界強度에 의해 결정된다. <그림 5>는 각 電流值 및 電極徑에 대한 arc電壓과 磁界強度와의 關係를 측정 한 것이다.



<그림 5> 縱磁界 Arc 特性(電極距離 : 30mm)

그림에서의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) Arc 電壓은 遮斷電流가 증가함에 따라 증대한다.
- (2) Arc 電壓은 電極徑이 커짐에 따라 감소한다.
- (3) Arc 電壓은 磁界強度가 증가함에 따라 감소→최소→증가 한다. 즉, arc 電壓이 最小로 되는 適正磁界가 존재함을 의미한다.
- (4) 電流密度가 증가함에 따라 最小 arc 電壓을 얻기 위한 磁界強度는 증가한다.

〈그림 5〉에서 遮斷電流 30kA, 電極徑 ϕ 130인 경우, 最小 arc 電壓을 얻기 위한 磁界強度는 약 0.122 wb/m^2 이며, 이때의 arc의 形狀은 다음과 같다.

최초로 電極端部에서 發弧한 arc는 高速度로 電極全面에 확산한 후, 電極表面에 다수의 陰極點이 발생함과 동시에 arc柱는 磁力線을 따라 電極空間內에 감금된다.

이것은 遮斷이라는 관점에서 볼때 매우 바람직한 현상이다.

즉, 適正磁界 印加時, arc를 電極空間 內에 효과적으로 감금하여 電極全面에 고루 분산시키므로써 電極에 입사하는 入射 energy를 최소화하며 또한 arc 電壓도 최소로 된다. 이 결과, 陽極의 溶融이 발생하기 어렵게 되며 電極의 소모도 극히 감소하므로 遮斷電流가 대폭 증가함과 아울러 遮斷器의 壽命이 매우 길어지게 되었다.

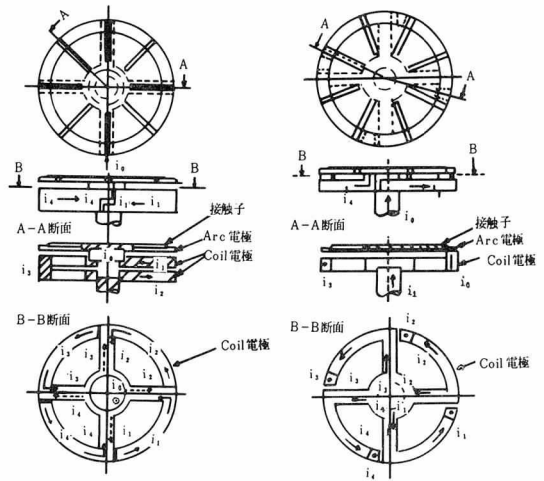
VI. 縱磁界電極의 構造

縱磁界를 인가하는 방법은 여러가지가 사용되고 있다. 一例를 들면, 眞空 valve의 外部에 coil을 부착하고, 이 coil을 主導電部와 直結시켜 主導電通路로 사용함으로써 縱磁界를 발생토록 하는 방법이다. 그러나 이 방법은 電極과 coil의 간격이 매우 크므로, 適正磁界強度를 발생토록 하기 위해서는 많은 卷數가 요구되며, 이 결과로, coil의 熱的強度와 絶緣의 면에서 어려움이 따른다.

이러한 결점을 제거하여 電極自体에서 縱磁界를 발생하도록 한 것이 〈그림 6〉과 〈그림 7〉이며, 接觸子 및 arc電極의 下部에 coil電極을 접속시켜 通電電流에 비례하는 磁界를 발생하

도록한 것이다.

〈그림 6〉에서와 같이, 通電軸으로부터 유입된 電流 i_0 는 coil電極에서 i_1, i_2, i_3, i_4 로 분류되어 coil電極의 円周部를 통과한 후, 다시 電極의 중심으로 되돌아 와서 arc電極, 接觸子에 도달한다. 이 電流는 反對電極의 接觸子, arc電極, coil電極의 經路를 통해 通電軸으로 流出하는 구조이다. 여기서 直径方向의 電流(예를 들면, i_1 과 i_2)에 의한 磁界는 서로 상쇄되며, 電極空間의 縱磁界는 coil電極의 円周部를 통과하는 電流에 의해 발생된다. 〈그림 7〉도 이와 같은 原理로써 좀 더 간단한 구조이다.



〈그림 6〉

〈그림 7〉

VII. 電極徑과 遮斷容量

〈그림 8〉은 각 電極構造에 대해 電極徑과 遮斷電流와의 관계를 측정된 결과이며, 適正磁界 印加時, 縱磁界電極에서의 遮斷電流는 電極徑의 약 1.4乘에 비례한다고 알려져 있다. 이에 대한 理論的 解釋方法으로 아래의 2가지가 소개되어 있다.

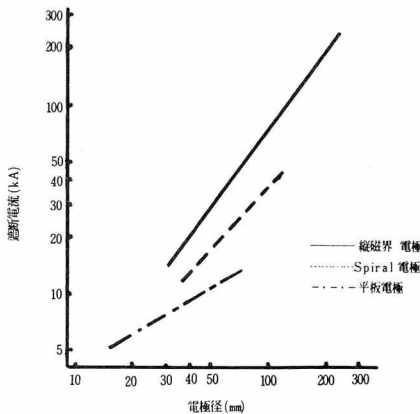
첫째, 電流遮斷時에 발생하는 金屬粒子의 密度에 의해 絶緣破壞가 일어난다는 것이며, 遮斷後의 殘留 plasma 密度 減衰와 回復電壓에 의해 결정된다. 간단히 말하자면, 電流零點에서

의 金屬粒子密度가 어느 限界值 이상일 경우 遮断不能이 됨을 의미한다. 또한 眞空遮断器의 遮断電流는

$$I(rms) = \frac{kT}{\pi E w d^2 S} \left(1 + C_i \frac{R}{L}\right)^2$$

- 여기서, $I(rms)$: maximum interrupting current
 E : erosion rate
 d : atomic diameter of metal
 C_i : accomodation coefficient at the surface of electrode
 S : constant (1~2)
 w : angular frequency
 k : Boltzman's coefficient
 T : temperature of metallic atoms
 R : contact diameter
 L : gap length

로 표시된다. 즉, 遮断電流는 $\{1 + C_i(R/L)\}^2$ 에 비례하며, 만약 $C_i = 1$, $R \gg L$ 일 경우, 電流는 電極徑(R)의 2乘에 비례하게 된다. 그러나 실제의 경우 $C_i = 0.5 \sim 1.0$ 정도이며 $L \leq R$ 이므로 電極徑의 효과는 감소하여 約 1.4乘에 비례하게 된다.



〈그림 8〉 電極構造에 의한 遮断性能

둘째, 遮断電流는 陽極 spot가 형성되기 시작하는 電流值에 의해 결정된다는 것이다. 陽極

spot가 형성되면 電極의 溫度가 부분적으로 급상승하며 高密度의 蒸氣를 방출하여 遮断不能에 이르게 된다. 이 理論에 의하면, 이상적인 arc 상태에서의 遮断電流는 電極의 面積에 비례한다. 그러나, 실제의 arc는 適正縱磁界 中の 상태라 할지라도 이상적인 形態를 가지지 못하여 電極이 局部的으로 溶融된다. 이것은 遮断不能後의 電極을 관찰함으로써 陽極의 slit 부근의 電極溶融이 他部分에 비해 현저하게 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 원인으로 말미암아 遮断電流는 電極徑의 2 以下の 數乘에 비례한다는 것이다.

끝으로 〈그림 8〉에서 나타난 바와 같이, 縱磁界電極은 電極徑을 크게 한다면 遮断電流를 얼마든지 증가시킬 수 있으며, 他電極에 비해 그 성능이 극히 우수함을 알 수 있다.

VIII. 結 言

이상과 같은 縱磁界電極의 채용으로 大容量 眞空遮断器의 제작이 가능하게 되었다. 日本의 경우, 이 電極構造를 사용하여 12kV, 200kA의 大電流 遮断에 성공하였으며, 大容量 直流 眞空遮断器 및 多頻度用 眞空遮断器가 개발되어 제품화되고 있다.

국내에서도 근래에 眞空遮断器의 需要가 증가함에 따라 7.2kV 및 25.8kV 級 中容量(8kA ~ 25kA) 眞空遮断器가 개발되어 생산되고 있다. 그러나 아직 部品の 國産化 程度가 낮으며, 眞空 valve를 비롯한 主要部品을 半製品으로 수입하여 조립하는 초보적인 段階에 머물러 있다.

조속히 이 분야의 연구가 진행되어 全部品の 國産化는 물론, 보다 우수한 眞空遮断器가 개발되기를 기대한다.

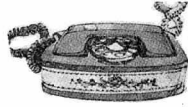
参 考 文 獻

1. 電氣学会通信教育會, 電力用 遮断器, 東京, 電氣学会, 1978.
2. Maller, V. N. & Naidu, M. S. "Advances in High Voltage Insulation and Arc interruption in SF 6 and Vacuum," Oxford, Pergamon press, 1981

3. Yanabu, S. et al., "Vacuum Arc under an Axial Magnetic Field and Its Interrupting Ability", Proc. IEE, Vol. 126, No. 4, April 1979
4. S. Yanabu, et al., "Characteristics and

Application of Vacuum Arc", Toshiba Review, Vol. 36, No. 7, 1980

5. Ishihara, T. & Koike, H., "Recent Progress of Vacuum Circuit Breakers", Toshiba Review, Vol. 34, No. 8, 1979



○공직자의 공정업무 너와나의 공동책임.