

진공차단기 다중재발호 썬지에 미치는 회로 파라미터의 영향

김종겸\*, 정종호\*\*, 조현길, 이은웅\*\*\*  
한국수자원공사\*, 청담중학교\*\*, 충남대학교\*\*\*

The Effect of VCB's Multiple Reignition Surge being Affected due to Circuit Parameters

Jong-Gyeum Kim\*, Jong-Ho Jeong\*\*, Hyoung-Gil Cho, Eun-Woong Lee\*\*\*  
KOWACO, Cheong Dam Middle School, Chungnam National University

Abstract : As VCB has many advantages which is an excellent interruption capability, compact structure, easy maintenance and light weight, it has been widely used as a load breaker. But steep-fronted surge voltage due to high frequency extinguishing capability in switching has been occurred.

If it impinges into induction motor, it acts on the electrical stress, and causes to deteriorate winding insulation.

In this research, in order to protect motor insulation from the steep-fronted reignition surge, the occurring condition, the cause of the reignition surge and the influence of circuit parameters which have been an effect on the occurrence of reignition and multiple reignition surge has been also analyzed.

1. 序論

진공차단기는 용도와 기능면 등에서 많은 장점을 가지고 있기 때문에 산업현장에서 널리 사용되고 있다. 그러나 전류재단시 고주파 전류의 발생과 강력한 소호작용 때문에 급속도의 재발호 썬지가 발생하여 전동기의 고정자 코일에 전기적인 스트레스로 작용하므로 썬 전동기 권선의 절연파괴가 일어날 수 있다. 따라서 이와 같은 스트레스를 저감시키기 위해서는 재발호 썬지의 발생 메카니즘을 해석하고 회로파라미터와 재발호썬지에 미치는 영향의 규명을 실행하여 이를 토대로 재발호썬지의 파괴치를 저감시키고 반복회수를 줄이는 방법등을 찾는다면 전동기의 수명을 연장시키고 구동 시스템의 안정을 이루게 할 수 있다.

2. 裁斷썬지(Chopping surge)와 再發弧썬지(Reignition surge)

2.1 裁斷썬지

진공차단기로 개폐시 容器內에서 음극으로 부터 공급되는 금속 중기 이온, 電子등의 量이 擴散되는 量보다 적으면, 接點사이의 아크 維持가 어려우 不安定性 現象이 일어나 電源電流가 自然零點이 되기 전에 강제적으로 零點에 이르는 현상을 말한다.[1]

이와 같은 진공차단기의 썬이난 소호력때문에 재단전류 발생이 재발호 썬지로 진행될 수 있게하여 다른 차단기 보다 큰 개폐썬지가 일어나게 되는데 이 썬지를 저감시키는 것이 연구의 課題이다.

2.2 再發弧썬지(Restriking surge, Reignition surge)

차단기의 극이 충분히 열리지 않은 상태에서 遮斷되거나 차단후 부하측의 인덕턴스 L 과 캐패시턴스 C 성분 에 의해 생겨나는 遮斷 回復電壓(TRV)이 遮斷器 極間 絶緣回復電壓을 上廻하여 閃絡하는 現象으로서 設막시 흐르게 되는 高周波電流가 차단기의 강력한 消弧力에 의해 電流裁斷이 反復되면서 전압이 상승하는 多重再發弧 (Multiple reignition surge) 現象이 식(1)과 같이 발생하게 된다.[1,2]

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

즉, 전류 i 의 변화율이 클수록 썬지전압 V 는 커지게 된다. 유도전동기와 같은 유도성 부하를 차단하는 경우 재발호 썬지 전류가 고주파전류이기 때문에 다중재발호의 큰 과도전압이 발생하게 된다.

이 다중재발호 썬지는 3 相 동시 차단되거나, 억제되어 더 이상의 高周波 電流가 발생되지 못하면 60 [Hz] 전원 전류로 되면서 終結된다. 또한 多重再發弧썬지는 연속적인 고주파 전류 차단으로 부하의 유도성 에너지가 減少되어서 끝나게 된다.

고주파 재발호 썬지가 두번째와 세번째 상에 유도 결합될 경우는 3 相 同時遮斷(3 phase virtual current chopping)의 결과를 낳게 된다.[1,2]

이와 같은 재발호 썬지 현상은 과도전압의 峻度가 급상승하고 크기 때문에 유도전동기의 권선에 侵入하게 되면 진행파로서 전동기 권선 입구에 편중 분포되면서 전기적인 스트레스로 작용하여 권선의 絶緣을 劣化시키고 결국에는 捲線消損을 일으키게 한다.[3]

2.3 再發弧썬지의 發生原因[2,4]

진공차단기의 개폐로 인하여 재발호 썬지가 일어날 수 있는 조건은 다음과 같이 분석할 수 있으며 이 조건들의 조합으로 발생한다.

- ① 작은 유도성 전류를 차단하는 경우(소용량의 전동기인 경우)  
전동기의 용량이 작을수록 캐패시턴스가 커지고 리액턴스 성분이 작게 되면서 썬지임피던스가 크게되어 썬지임피던스와 裁斷電流의 積에 比例하는 큰 과도전압이 발생하게 된다.

② 전원측과 부하측의 임피던스차가 너무 클 경우(전원측이 큰 경우)

전원측의 임피던스가 부하측의 임피던스에 비하여 상당히 클 경우, 고주파전류의 차단에 의해 급준파 써지전압이 부하측 케이블을 따라 전동기 입구측에 도달하게 되면, 전동기의 임피던스가 케이블의 임피던스에 비하여 상당히 크기 때문에 거의 그대로 전원측으로 반사되어 차단기 절연회복전압의 상승보다 빠르게 차단기 극간에 나타나기 때문에 재발호 써지의 발생을 더욱 가중시킨다.

③ Inching 운전

기동시 전동기의 회전자는 정지에 가까운 상태로서 차단에 의한 전류제한이 발생하였더라도 써지전압은 회전자 내부에 역기전력이 유기되지 않기 때문에 리액터 전류의 제한과 같게 되어 큰 써지전압으로 진전된다.

④ 차단기의 절연내력이 부하측의 과도회복전압에 비해 작은 경우

차단기의 접점을 분리할 경우 부하측의 인덕턴스와 캐패시턴스 성분에 의해 발생하는 과도회복전압이 진공차단기의 극간격에 의해 시간에 따라 회복되는 절연회복내력을 초과할 경우 재발호 써지가 생겨난다.

⑤ 電流 零點前에서 개극한 경우

이는 진공차단기가 다른 차단기에 비해 뛰어난 소호력을 지니고 있기 때문에 개극시 전류의 자연영점이 되기 전에 강제적인 전류의 차단으로 급준도의 고주파전류가 발생하게 되고 이 고주파전류와 리액턴스와의積의 크기의 과전압이 생겨난다.

⑥ 역률이 매우 낮은 경우

기동전류의 차단은 회전자가 정지상태와 같으므로 리액턴스 성분이 많기 때문에 역률은 매우 낮고 임피던스 성분이 상당히 커짐에 따라 매우 큰 써지전압이 발생하게 된다.

## 2.4 多重再發弧(MRI)의 解析方法[2]

다중재발호 써지에 대한 영향을 저감시키기 위해서는 무엇보다도 다중재발호 써지에 대한 발생원인과 다중재발호 써지의 크기에 영향을 미치는 회로 파라미터를 조사하여야 한다.

실제 모의 회로를 구성하여 반복되는 측정을 통하여 발생원인 및 크기를 조사하고, 이를 저감시키는 회로 구성도 모의 회로에 그대로 실시하여 실험을 통해 다중재발호 써지를 찾아내는 방법이 있으나 실험실에서 다중재발호 발생 확률이 매우 낮기 때문에 실험을 통하여 분석하는 것에는 한계점이 있다. 따라서 실제와 같은 조건을 그대로 구성하여 해석하는 TNA(Transient Network Analyzer), Monte Carlo법, Runge Kutta법 등이 있으나 본 연구에서는 현재 과도현상의 해석에 널리 사용되고 있는 전자계과도프로그램(EMTP)을 이용하여 다중재발호의 크기, 준도등의 현상을 시뮬레이션하였다.

재발호 써지의 발생가능성은 확률분포적으로 발생하는 현상이므로 EMTP의 TACS(Transient Analysis of Control Systems)서브루틴[4]을 이용하여 해석하고 있다. 이 기법은 급준파의 준도 및 크기를 줄이는 해석에도 유리한 장점을 지니고 있다.

다음은 위에서 설명한 조건등을 고려하여 실제 유도전동기의 다중재발호써지를 시뮬레이션 한 것이다. 해석을 위한 구성회로는 그림 1 과 같이 널리 사용되는 모델의 회로로 선정하였다.

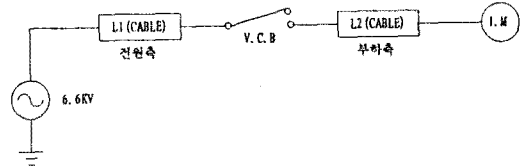


그림 1. 일반적인 구성회로

해석을 위한 회로의 구성의 요소들은 표 1 과 같다. 해석에 사용되는 조건으로서의 전류제한값, 극간내전압의 상승율, 고주파전류 차단특성 그리고 전동기 용량 및 케이블길이등이 고려되어진다.

표 1. 해석모델

전원	6.6 [KV], 12.5 [KA]
케이블 길이	L1 = 100[m], L2 = 200[m]
케이블 써지임피던스	200 [Ohm]
전파속도	180 [m/us]
전동기	80 [KW]
전류제한값	5 [A]

그림 2 는 계산된 다중재발호써지의 파형을 나타낸 그림이다. 이 그림에서는 보통의 재단써지보다 상당히 큰 과전압 및 급준도의 써지가 발생한다는 것을 알 수 있다. 극간내전압의 상승율과 고주파전류의 차단특성은 실험을 통해 평균치를 구한다음 입력자료로 사용하여야 하나,

여기서는 각각  $V_{\text{reb}} = 3.7 \times 10^8 \times T^{1.6}$ ,  $di/dt_{is} = 150[A/us]$  을 적용하였다. 이와 같은 급준파의 써지전압이 발생하면 전동기 권선에 전기적인 스트레스를 가할 수 있다.

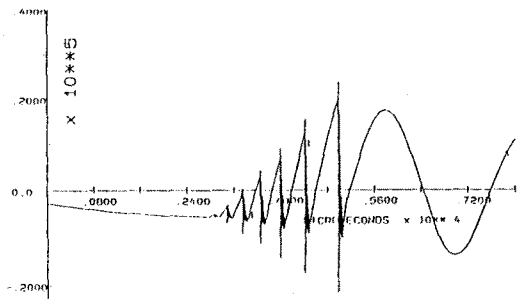


그림 2. 계산한 다중재발호 써지

따라서 이와같은 다중재발호 써지를 줄이는 것이 손실을 줄이는 지름길이다.

## 3. 再發弧써지 低減方法[1,2,4]

재발호 써지를 억제하는 방법으로 첫째로 전류 차단시 차단기의 절연회복전압이 회로의 과도회복전압보다 빠르게 하여 재발호가 일어날 수 없도록 차단기를 만드는 것이며,

둘째로는 차단기 고주파 전류의 차단성능을 낮게하여 재발호 발생으로 고주파전류가 전류영점에서도 續弧되어 다음의 전류영점에서 차단되게 하므로써 재발호를 반복되지 않게 하는 것이다.

그러나 진공차단기는 다른 차단기에 비해 우수한 차단성능을 가지고 있어 고주파전류 차단성능만을 낮춘다는 것은 쉽지 않기 때문에 별도의 다른 대책이 마련되어야 한다. 따라서 전동기 권선의 상대적 절연에 영향을 미치는 전압의 피크치와 턴사이 절연에 스트레스를 가하는 전압파형의 준도를 다음과 같은 방법으로 줄일 수 있다.

① 재단전류가 적은 집적재료의 採擇

급속증기압이 높고, 열전도율이 낮은 특성이 요구되기 때문에 재단전류가 낮으면서 높은 차단성능을 가지고 있는 집적재료  $CuAgSe$  등을 최근 사용하여 재단전류값을 낮춘다.

② C-R Surge Absorber 設置

과전압의 크기를 줄이고, 동시에 파형의 준도를 줄일 수 있도록 저항으로 파고치의 크기를 줄이고, 캐패시턴스로는 급준파의 준도를 완화시킬 수 있도록 C-R 을 직렬 연결한 보호기를 부하에 병렬로 설치한다.

그림 1 과 같은 조건에서 전동기 입구단에  $R = 100[\Omega]$  와  $C = 0.1[\mu F]$  그리고  $R = 100[\Omega]$ ,  $C = 0.3[\mu F]$  의 보호장치를 각각 부착한 후 전동기에 나타나는 영향을 그림 3 에 각각 나타내었다. 그림 2 에서 보호장치를 부착하지 않은 것에 비해, 그림 3 의 (a)와 같이 저항과 콘덴서를 부착한 경우 과전압의 크기가 줄어들고 같은 저항에서도 콘덴서의 크기를 다소 크게(그림 3(b)) 한 것이 급준도의 진행이 크게 완화됨을 알 수 있었다.

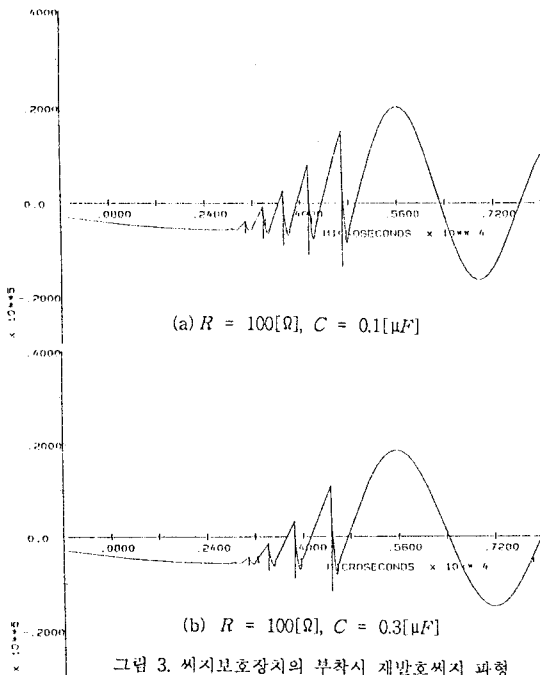


그림 3. 써지보호장치의 부착시 재발호써지 파형

③ 써지흡수용 콘덴서 설치

부하측에 병렬로 콘덴서를 접속하면 전체적인 임피던스가 줄어들게 되어 재단에 의한 써지전압의 크기가 작게 하고, 차단후 극간에 나타나는 전압의 상승률을 줄이는 효과도 있다.

④ 직렬리액터 설치

리액터를 부하와 직렬로 연결하므로써 차단기의 높은 고주파전류를 줄이므로써 전동기의 턴사이 스트레스를 줄인다.

⑤ 콘덴서와 어레스터를 병렬 구성

콘덴서로 급준파 써지의 준도를 저감하고, 어레스터에 의해 파고치를 제한하는 가장 확실한 방법이지만, 高價이고 적은 空間에 설치할 수 없다.

⑥ 써지어레스터

보통의 어레스터보다 방전전압을 더욱 낮게 設計한 것으로서 多重再發弧써지가 전개해 나가는 중에 放電開始電壓에 도달하게 되면, 그 에너지를 對地에 방전시키므로써 多重再發弧의 지속성을 없게 한다.

파고치를 낮게 할 수 있지만, 파형의 峻度를 낮출 수는 없는 缺點이 있다.

⑦ 비직선형 저항을 가진 제한기 설치

非直線形 抵抗體를 대시간에 접속하므로써, 써지 어레스터와 같이 재발호 써지가 진전되는 과정에 저항성의 특징에 의해 고주파전류를 대지로 흘려 전압상승을 억제하고 써지의 에너지를 소비시켜 재발호의 지속성을 상실케한 것이다.

⑧ 전동기 권선의 절연보강

재단 및 재발호 써지의 과전압 및 급준한 써지전압으로 부터 전동기의 절연을 열화 시키는 것을 줄이기 위해서는 전동기의 절연을 저급보다는 더욱 높이면 재발호 써지와 같은 급준파로부터의 턴사이 절연열화를 줄일 수 있지만, 이는 전동기의 가격상승의 요인이 되고 형체가 커지기 때문에 소형화를 추구하는 추세에 역행하는 결과되어 고려되어야 한다.

4. 結 論

고압 전원개폐기로서 가장 많이 사용되고 있는 진공차단기는 차단시 發生하는 높은 消弧力에 의해 부하측의 인덕턴스와 캐패시턴스 성분에 의한 과도회복전압이 차단기의 겹 절연회복내력을 초과하여 급준파 진행 써지로서 전동기의 턴사이 絶緣을 劣化시키거나 파괴시키는 이론을 요약하였다. 이 재발호써지를 저감시키는 여러 가지 회로조건의 영향을 규명하였으며, 급준파 과도 전류에 의한 써지전압의 크기와 준도를 줄일 수 있는 방법을 제시하였다.

參考文獻

- [1] J.F.Perkins and D.Bhasavanich, "Vacuum Switchgear application studied with reference to switching surge protection", IEEE Trans on IAS, vol.19, no.5, pp.879-888, 1983.
- [2] 日本電氣學會 技術報告書 第 422 號, "眞空遮斷器의 開閉써지와 適用技術", 1992
- [3] G.C.Stone. et al, "Investigation of turn insulation failure mechanism in large AC motors", IEEE Trans on PAS, vol.103, no.9, pp.2588-2593, 1984.
- [4] CIGRE WORKING GROUP 13.02, " Interruption of small inductive current: part 3, 1981
- [5] 조병욱, 김병희, "TACS를 이용한 제어해석", 대한전기학회 학술지 EMTP 특집, vol.40, no.10, pp.30-35, 1991.