

# 진공차단기 3상 동시 차단시의 서지 특성 분석

## Surge Characteristics Analysis of Three-phase Virtual Chopping at Vacuum Circuit Breaker

김 종 겐\*  
(Jong-Gyeum Kim)

**Abstract** - Vacuum circuit breakers(VCB) are widely used for current interruption of high-voltage inductive loads such as induction motors. This VCB can be chopped off before the current zero due to its high arc-extinguishing capability. One of the outstanding features of VCB is that it can cut off high frequency re-ignition current more than other circuit breakers. If the transient recovery voltage generated in the arc extinguishing is higher than the dielectric strength of the circuit breaker, a re-ignition phenomenon occurs. The surge voltage of the re-ignition is very high in magnitude and the steepness of the waveform is so severe that it can act as a high electrical stress on the winding. If the high frequency current of one phase affects the other two phases when the re-ignition occurs, it may cause a high surge voltage due to the virtual current chopping. If the magnitude of the voltage allowed in the motor winding is high or the waveform level is too severe, it may lead to insulation breakdown. Therefore, it is necessary to reduce the voltage to within a certain range. In this study, we briefly explain the various phenomena at the time of interruption, analyzed the magnitude of the dielectric strength and the transient recovery voltage at the simultaneous three-phase interruption that can give the greatest influence to the inductive load, proposed a method to reduce the impact.

**Key Words** : Re-ignition, Surge, TRV(Transient Recovery Voltage), VCB(Vacuum Circuit Breaker), Virtual Current Chopping (Three-phase Simultaneous Interruption)

### 1. 서 론

진공차단기(VCB)는 다른 차단기에 비해 소형, 경량 및 유지보수가 간편하여 고압 유도성 부하의 전류차단에 가장 널리 사용되고 있다. 이 진공차단기는 차단시 발생하는 높은 아크 소호력에 의해 강제적으로 전류 영점을 만들어 내기 때문에 부하측에 높은 서지전압을 발생하는 것이 가장 큰 문제이다[1~4]. 진공차단기에 의한 투입 및 차단시에 발생하는 서지는 부하의 종류와 차단 조건에 따라 앞선 점호, 재점호, 재발호 및 다중 재발호 등 다양한 현상을 일으킬 수 있다[1~6].

유도성 부하에서는 주로 재발호(re-ignition)에 이은 다중 재발호(multi re-ignition)가 문제이고, 용량성 부하의 경우는 재점호(re-strike)에 의한 서지전압이 부하측 기기에 영향을 주게 된다. 유도성 부하의 경우 투입시보다 개방시에 그리고 용량성 부하의 경우 개방시 보다 투입시 급준도의 서지전압으로 더 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다[3~7].

진공차단기 개방시 발생하는 과도회복전압이 극간의 절연회복전압보다 높은 경우 아크소호가 완성되지 않는 상태의 재발호로

이어질 수 있다. 이 동작은 일시적이지만, 반복될 경우 부하측에 급준도 서지전압을 부하측에 전달하게 되어 권선절연을 열화시키는 주요 원인이 될 수 있다.

유도전동기와 같은 유도성 부하에 3상중 어느 한상에서 발생한 재발호가 다른 2개의 위상과 결합하여 고주파 전류를 흐르게 할 수 있다[2,3,6]. 이 현상이 나타날 경우 재발호시에 비해 아주 높은 급준도의 서지전압을 발생시키므로 유도전동기와 같은 유도성 부하의 권선에 전기적인 스트레스로 작용할 수 있으므로 크기를 분석하여 이를 줄일 수 있는 방법을 찾아내는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 재발호에 의한 고주파 전류가 인접된 상에 강제적으로 연계되어 3상이 동시에 차단될 때 발생하는 고주파 전류와 서지전압의 크기를 해석하여 서지전압의 크기를 줄이고, 파형의 급준도를 완화시킬 수 있는 방법에 대해 해석하였다.

### 2. 전류 재단과 서지전압

#### 2.1 전류재단 및 서지전압

AC회로에서 전류를 차단할 때 진공차단기에서 발생하는 아크는 전류가 제로가 되기 전에 차단되는 현상을 전류 재단(current chopping)이라고 한다[1,2,3]. 유도성 또는 용량성 부하가 VCB에

\* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,  
Gangneung-wonju National University, Korea.  
E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr

Received : April 27, 2018; Accepted : August 6, 2018

의해 차단되면 아크가 순간적으로 나타나고, 전원 주파수 전류가 아크를 통해 전도된다. VCB에 의한 차단된 전류의 크기는 접촉자 매질의 유형, 차단될 전류의 레벨 및 형태에 따라 달라진다. 이 차단전류의 크기는 회복 전압에 약간의 영향을 주게 된다. 전류재단이 발생하면 VCB 양단의 TRV(과도 회복 전압)가 증가한다. VCB 접점이 열리면 진공 갭의 절연 내력은 거의 선형적으로 증가한다. TRV의 모양과 레벨은 실제 차단전류 및 그에 따른 커패시턴스, 인덕턴스 및 부하의 저항에 따라 달라진다. 높은 차단전류는 부하측에서 높은 인덕턴스와 마찬가지로 높은 TRV를 발생시킨다. 따라서 차단시의 서지전압은 식 (1)과 같이 서지임피던스와 차단전류의 곱으로 표시된다[5,6,8].

$$V = I_{ch} \times \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{1}$$

여기서  $I_{ch}$ 는 차단전류이고,  $L$ 은 부하의 인덕턴스,  $C$ 는 부하와 선로의 커패시턴스이다.

### 2.2 전압상승과 재발호

유도성 부하나 용량성 부하에 연결된 진공차단기를 투입하거나 개방할 경우 재발호, 재점호 및 앞선 점호와 같은 서지현상이 발생한다. 이들 각각의 서지현상을 명확히 구별하여 크기를 줄이는 것이 매우 중요하다.

유도전동기와 같은 유도성 부하의 투입시에는 앞선 점호(pre-strike)가 발생하고, 유도전동기 기동 또는 운전 초기에 차단할 경우에는 재발호가 발생한다. 커패시터와 같은 용량성 부하의 차단시에는 재점호 현상이 주로 발생한다[6,8].

실제로, 유도성 부하의 차단 후 전기 아크가 아크 에너지 밸런스를 복원하기 위해 동일한 경로를 통해 즉시 재발호 될 때 개방 작동에서 재발호가 발생한다[3,4,5,6,7]. 재발호는 TRV 이전의 전압 점프 중에 차단 매질과의 열 교환 이후 아크가 재설정 될 때 주로 발생한다[2,3,6].

그림 1은 진공차단기의 차단시 절연 내력(Withstand voltage or Dielectric strength)과 과도회복 전압(TRV) 그리고 고주파 전

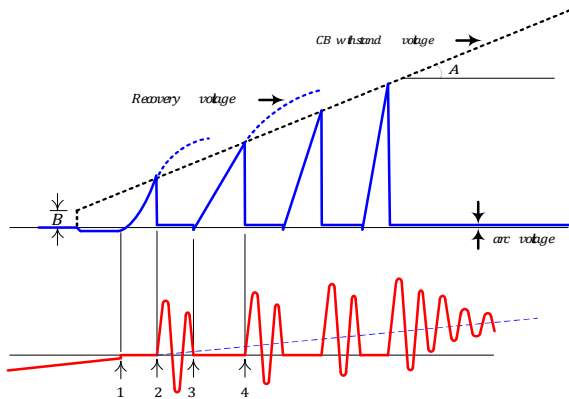


그림 1 발호 및 재발호 파형  
Fig. 1 Ignition and reignition oscillogram

류 특성을 나타낸 것이다.

그림 1의 위쪽부분에서 극간절연내력(점선부분)과 과도회복 특성(실선부분)을 나타낸 것으로서 A는 기울기, B는 초기 값을 나타내고 있으며, 그림 1의 아래쪽 부분은 고주파 전류특성을 나타낸 것으로서 1은 차단 전류이고, 2는 과도회복전압이 절연내력보다 클 경우 고주파 전류가 흐르는 포인트를 나타낸 것이며, 3은 고주파 전류가 소호되는 포인트로 절연내력이 과도회복전압보다 높은 순간을 나타낸 것이다. 4는 2와 같은 조건을 나타낸 것으로서 전압이 다시 상승하는 조건이 이루어지는 상황을 의미한다.

진공차단기가 개방되면 갭의 절연 내력은 거의 선형적으로 증가하고, TRV의 레벨은 실제 차단전류 및 전원 및 부하 회로의 파라미터에 따라 달라진다. TRV는 VCB의 개방 점점을 가로 질러 아크를 발생시키고, 전류를 계속 흐르게 할 수 있다. TRV가 절연 내력을 초과하면 재발호가 발생한다[4,5,6,7].

### 2.3 3상 동시차단 현상

재발호에 의해 전압이 상승될 경우 차단기가 연결된 회로에서 고주파 과도전류가 각 재발호시에 상승할 수 있다.

그림 2와 3은 3상 회로에서 T상에서 재발호에 의한 고주파 전류가 아직도 전원주파수 전류를 전달하고 있는 다른 두상에 유도 및 용량성 결합을 통해 다른 위상에 전류를 주입하는 상황을 나타낸 것이다[2,6,7]. 그림 2는 T상에 흐르는 고주파 전류가 나머지 R, S상에 결합된 것을 나타낸 것이고, 그림 3에서는 이 고주파 전류(T상)가 나머지 두 상(R, S상)의 전류를 강제적으로 동

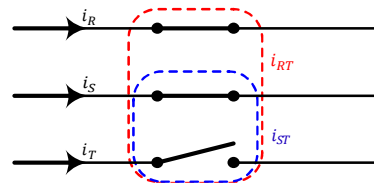


그림 2 T상에서 다중 재발호에 의해 S와 R 상의 결합  
Fig. 2 Coupling to the phases S and R due to multiple re-ignitions in the phase T

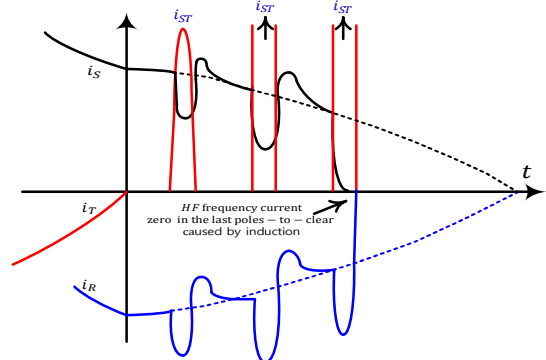


그림 3 S & R 상의 가상 전류 차단  
Fig. 3 Virtual current chopping in the phases S & R

시에 차단하는 것을 나타낸 것이다. 이런 메커니즘은 전류재단에 의해 재발호로 이어지는 것을 가상 전류재단(Virtual current chopping) 또는 3상 동시차단(three-phase simultaneous interruption)이라고 한다. 차단시 재발호에 의한 어느 한상의 전류가 다른 두상의 위상에 결합되어 발생한 고주파 전류가 선로 주파수 전류의 피크보다 높으면, 위상은 0을 자연스럽게 통과하기 전에 여러 번 반복하여 통과하게 됩니다. 이로 인해 전압을 상승시키는 여러 번의 다중 재발호 및 차단이 발생할 수 있습니다. 3상 동시차단시의 전류는 5A내외의 정상 전류재단에 비해 수백 암페어로 높아질 수 있다[3].

재발호가 발생하면 고주파(HF) 전류가 아크를 통과하는 전원 주파수 전류에 중첩된다. HF 전류에는 몇 개의 영점이 있으며, VCB에는 영점 중 하나에서 HF 전류를 소거할 수 있는 능력이 있다. 영점에서 HF 전류의 변화율은 VCB가 전류를 성공적으로 차단할 수 있는지의 여부를 결정한다. 재발호 단계에서의 재발호 전류의 일부는 인접 위상 도체에 유도 결합되어 전원 주파수 전류에 중첩된다. 동시 전류 차단은 항상 다중 재발호에 의해 시작되지만 때로는 다중 재발호 이벤트로 인해 가상 재단이 발생할 수 있다. TRV 주파수가 높을수록 재발호 발생 확률이 높아지므로 아크 발생 시간은 재발호의 발생 확률과 관련이 있다[2,6,7].

### 3. 해석 및 결과 분석

본 연구에서는 고압 3상 유도전동기에 진공차단기를 적용할 때 재발호에 의해 발생할 수 있는 3상 동시 차단시의 절연내력과 과도회복전압 그리고 각상의 전류차단과 부하측 단자에서의 서지전압의 크기를 모의하였다. 서지전압과 고주파 전류의 크기를 분석하기 위해 전자계과도전압해석 프로그램(EMTP)을 사용하였다[9].

그림 4는 대표적인 3.3kV급 고압 유도전동기가 전원, 케이블 및 진공차단기에 연결된 회로를 나타낸 것이다. 차단기 개방시 과도전압의 크기를 분석하기 위해서는 전원측, 케이블, 차단기 및 유도성 부하인 전동기 부분으로 크게 분류할 수 있다. 전원측 및 케이블의 파라미터는 각각의 용량과 규격 그리고 설치 조건에 따라 구할 수 있다[5,6].

그림 4에서 전원측 파라미터는 변압기를 포함시켜 해석해야 하므로 단락용량으로부터 인덕턴스와 커패시턴스를 다음과 같이 구할 수 있다.

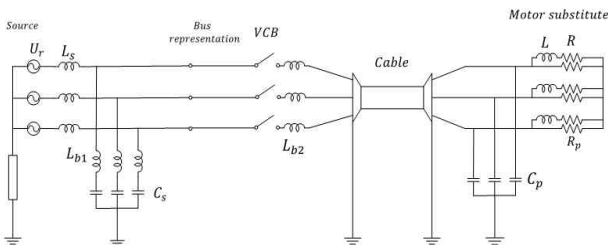


그림 4 회로도  
Fig. 4 Circuit diagram

$$\begin{cases} L_s = \frac{V^2}{wP_s} \\ C_s = \frac{1}{L_s(2\pi f_s)^2} \end{cases} \quad (2)$$

여기서  $P_s$ 는 단락용량이고  $f_s$ 는 공진주파수이다. 모선에서 부하까지 케이블의 파라미터에 대해서는 집중정수 또는 분포정수를 적용할 수 있다. 유도전동기는 운전조건에 따라 파라미터가 달라지는데 정격속도로 운전하는 조건에서의 역률은 일반적으로 높은 편이지만, 기동시나 무부하로 운전하는 경우의 역률은 정격속도로 운전하는 경우에 비해 매우 낮은 편이다[2,4,5,6]. 또한 전압의 크기와 전동기의 용량에 따라 임피던스가 달라진다[2,5,6]. 같은 전압에서도 부하용량이 클수록 서지임피던스는 낮고, 같은 용량에서도 전압이 높을수록 서지임피던스는 높다. 이와 같이 운전 조건, 전압 및 전동기의 용량 등을 고려하여 부하측에 표시한 저항과 인덕턴스를 구하면 된다. 그림 4에서 전원측 커패시턴스( $C_s$ ) 및 부하측의 커패시턴스( $C_p$ )는 상별 대지에 해당되는 것으로서 부하측의 커패시턴스는 부하의 서지임피던스로부터 운전 조건 등을 고려하여 계산해야 한다.

그림 5는 진공차단기의 개방시 다중 재발호가 발생한 것으로서 그림에서 극간절연내력(U[□], UN[△])과 과도회복전압(TRV [O])의 관계를 나타낸 것이다. 전류 차단 후 일정 시간 동안 아킹이 진행되는 동안에 과도회복전압은 절연내력보다 높아 다중 재발호를 일으킬 가능성이 있음을 알 수 있다. 차단 후 일정 시간이 지남에 따라 절연회복 특성이 과도전압의 크기를 상회할 경우 차단이 성공하게 되어 완전한 차단이 이루어지게 된다. 여기서 문제가 되는 것은 아주 짧은 기간 동안(8.0~8.5ms사이) 재발호 시에 다른 두상에 고주파 전류를 유입시켜 강제적으로 전류를 차단하는 경우이다.

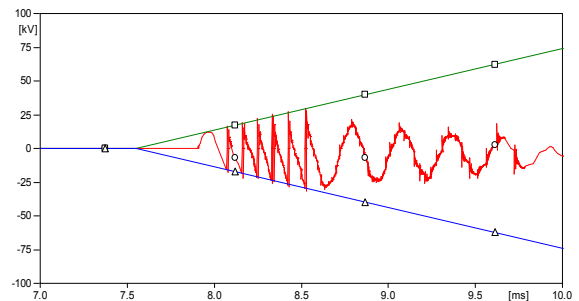
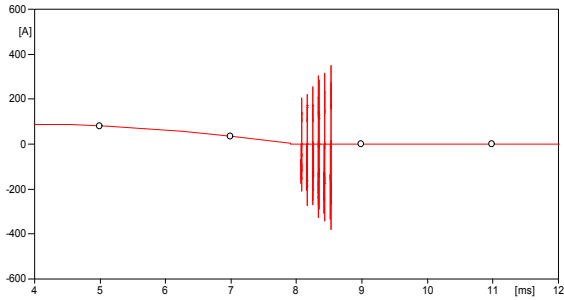


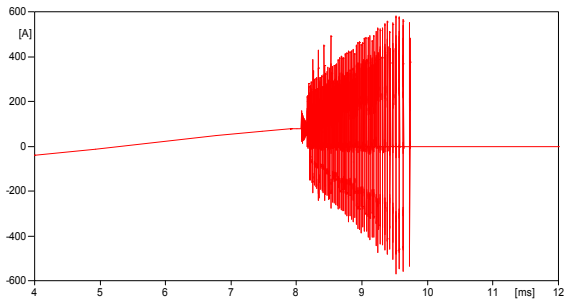
그림 5 절연내력과 과도회복전압  
Fig. 5 Dielectric strength & TRV

그림 5에서 과도회복전압이 극간절연내력보다 높은 경우 그림 2,3에서와 같이 어느 한상의 고주파 전류에 의해 다른 두상을 강제적으로 동시에 차단하게 하는 경우가 존재할 수 있다. 3상 동시차단을 모의하기 위해 3상의 개방시간을 동일 조건으로 입력하였다. 그림 6은 3상 동시 차단시 각 상의 전류재단현상을 나타낸 것이다. 이 상황은 그림 1에서 나타낸 것과 같이 과도회복전압이

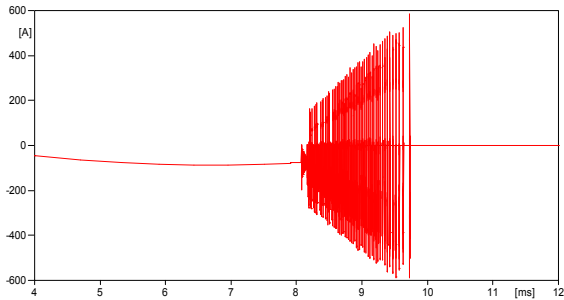
극간 절연내력보다 높을 경우 짧은 시간동안 고주파 전류가 차단기에 존재하게 되는 것이다. 이것이 나머지 상에 영향을 주어 동시차단의 원인이 될 수 있기 때문이다. 그림 6에서 A상에서 발생한 고주파 전류가 B, C상과 결합하여 더 큰 고주파 유도전류를 발생시킬 수 있다.



(a) A phase current



(b) B phase current



(c) C phase current

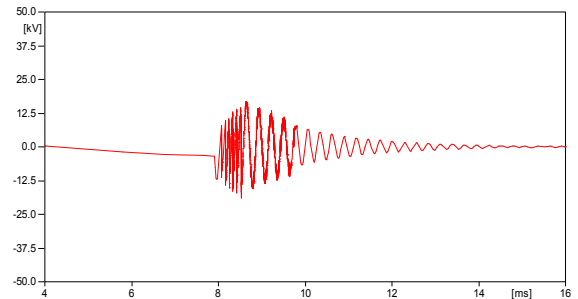
그림 6 개방시 차단기의 전류

Fig. 6 Current of circuit breaker during open operation

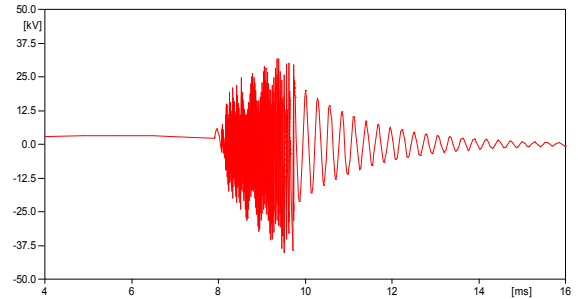
그림 6(a)와 같이 차단기 개방시 발생한 고주파 전류는 첫 단계에서 여러 번의 재발호로 인해 다른 두 상에 영향을 주게 된다. 그림 6(b), (c)는 첫 번째 상의 재발호에 의한 영향으로 전원 주파수 전류와 고주파 전류를 강제적으로 0으로 만드는 성분이 다른 두상에 나타나게 된다. 이와 같이 재발호에 의해 한상의 고주파 전류가 다른 두상에 결합되어 더 많은 고주파 전류를 일으킬 경우 급준파 서지전압을 발생시킬 수 있다.

전류 차단 이후에 발생한 다중 재발호 시점에 다른 두 상에 고주파 전류가 유도 될 수 있습니다. 세 개의 극이 모두 동시에 열렸으므로 다른 두 극은 여전히 아크를 통해 전류가 흐르게 된다. 이런 다음 회로의 위상 간에 용량성 및 유도성 결합이 일어나는 특수한 경우에 유도된 고주파 전류가 전원 주파수 전류의 진폭을 초과하는 진폭에 도달하면, 전류 제로가 만들어진다. 이런 경우 자연적으로 0보다 몇 ms 앞서 전류를 차단시킬 경우 이 영향의 단점을 보완할 수 있습니다. 그러한 경우 재단 전류는 수십 또는 수백 암페어가 될 수 있으며, 전압은 매우 높아진다. 물론 진공 차단기에서 매우 빠른 절연과괴의 발생으로 인해 아주 높은 과도 과전압이 발생하는 것은 당연하다.

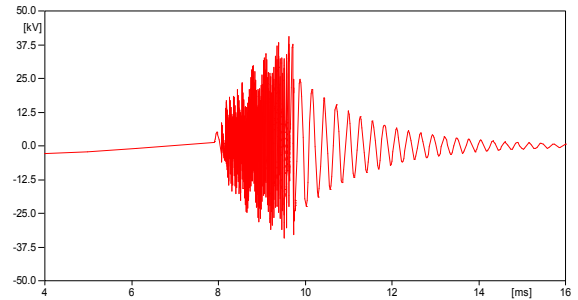
그림 7은 3상 동시 차단이 발생할 때 부하측에서 급준도 서지 전압을 나타낸 것이다.



(a) A phase voltage



(b) B phase voltage



(a) C phase voltage

그림 7 SA를 부착하지 않을 시 부하측 전압

Fig. 7 Load side voltage(w/o SA)

그림 7(a)에서의 급준과 과도전압은 그림 6(a)에서 고주파전류에 의해 부하측에서 나타난 것으로 전동기 정격의 5[pu]에 해당되는 전압의 크기를 부하측에 나타내고 있다. 그림 7(b), (c)는 첫 번째 상의 고주파 전류가 나머지 두상에 결합되어 강제적으로 전류차단이 일어난 경우 부하측에서의 급준과 서지전압의 크기를 나타낸 것으로서 그 크기는 약 10[pu]로서 매우 높은 전압크기를 나타내고 있으며, 파형의 준도는 IEEE에서 권고하는 허용범위를 훨씬 초과하고 있다[10]. 그림 8은 IEEE에서 권고하고 있는 임펄스전압의 크기를 나타낸 것이다.

이와 같이 높은 크기의 급준과 서지전압의 크기 저감과 파형의 준도를 완화시킬 수 있는 대책이 필요하다. 본 연구에서는 큐비를 내부의 차단기 2차측에 ZnO(Metal-Oxide type) 고압용 서

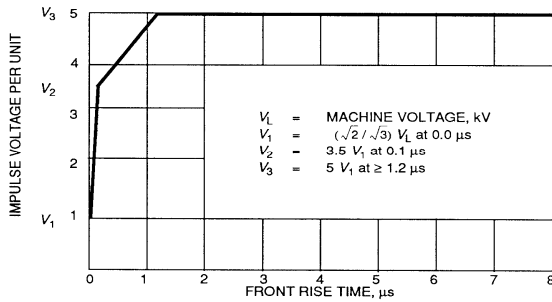


그림 8 코일 임펄스 절연내력 곡선  
Fig. 8 Coil electrical impulse withstand envelope

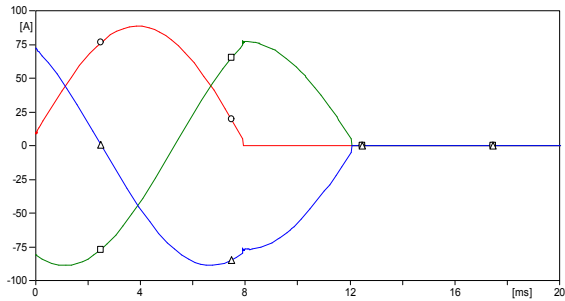


그림 9 SA 부착시 재단전류  
Fig. 9 Chopping current after SA attachment

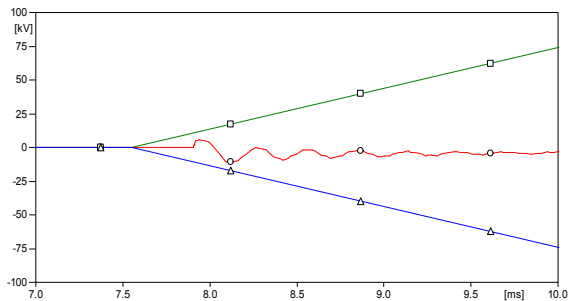
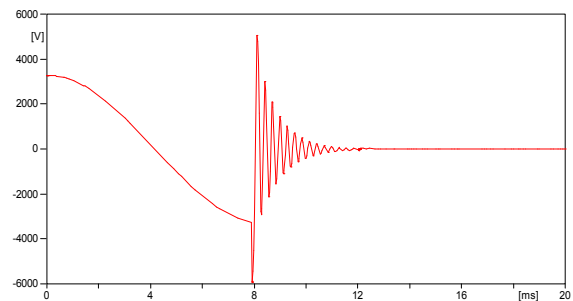


그림 10 SA 부착 후 절연내력과 과도회복전압  
Fig. 10 Dielectric strength & TRV after SA attachment

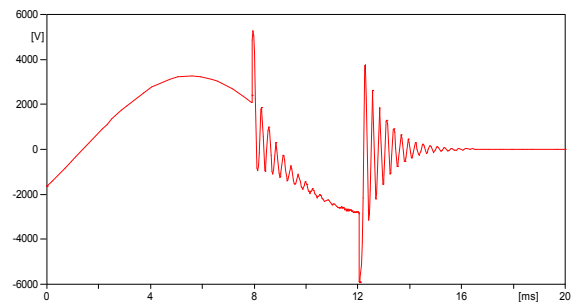
지흡수기(SA)를 설치하여 서지 전압의 크기완화와 파형의 준도를 낮출 수 있는 효과에 대해 분석하였다.

그림 9는 SA 부착시 진공차단기의 개방시 각 상에서의 전류 재단현상을 나타낸 것이다. 3상 동시차단의 조건에서도 재발호와 같은 조건이 성립하지 않아 고주파 전류가 나타나지 않으므로 재발호에 의한 3상 동시차단의 조건이 발생할 수 없게 된다. 그러나 한상의 전류재단에 의한 영향이 다른 두상에 일정시간이 지난 다음 동시에 차단하게 한다. 따라서 단순한 재단전류에 의한 서지전압의 크기만 존재하게 된다.

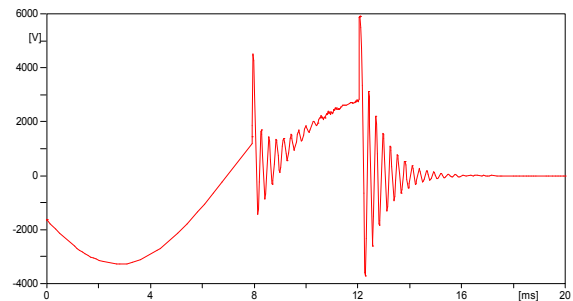
그림 10은 SA를 설치한 경우 과도회복전압과 극간절연내력을 나타낸 것이다. SA를 부착한 결과 과도회복전압(TRV)이 극간 절연내력보다 높지 않아 재발호가 발생하지 않음을 알 수 있다. 따라서 재발호에 의해 고주파 전류를 강제적으로 차단하여 다른 상에 영향을 주는 그림 5와 같은 조건이 나타날 확률을 줄일 수 있음을 알 수 있다.



(a) A phase voltage



(b) B phase voltage



(a) C phase voltage

그림 11 SA를 부착한 후 부하측 전압  
Fig. 11 Load side voltage(with SA)

그림 11은 재발호에 의해 고주파 전류가 발생하는 조건하에서 급준파 서지전압의 크기와 파형의 준도를 완화시키기 위해 차단기 2차측에 SA를 부착한 후 부하측 각상에 나타나는 전압의 크기를 계산한 결과이다. 서지 흡수장치를 사용하지 않은 그림 7과 비교해서 서지 보호장치를 부착한 결과 전압의 크기를 줄이는 동시에 파형의 준도를 완화시키는데 아주 우수한 결과를 얻을 수 있다. 전압파형의 크기는 2[pu] 정도 이하로 유지할 수 있으므로 IEEE에서 권고하는 전압허용범위 이내로 유지 가능함을 알 수 있다.

그림 11에서 첫 번째 상(A상)에 한번만 과도현상이 나타나지만, 두 번째(B상)와 세 번째 상(C상)에서 두 번의 과도전압이 나타났다. 이는 그림 9에서 알 수 있듯이 A상은 개방 후 바로 재단이 이루어지지만, 나머지 두 상에서 A상에 의해 일시적으로 영향을 받은 후 일정시간이 지난 다음 재단이 이루어지기 때문이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 유도성 부하인 진공차단기의 전류를 차단하기 사용할 때 다중 재발호와 같은 현상으로 인해 고주파 전류가 인접 상과 결합하여 3상이 동시에 차단할 때 발생하는 고주파전류의 변화와 서지전압의 크기를 분석한 것이다. 전류 차단 후 첫 번째 상에서 발생한 다중 재발호의 영향으로 다른 두상에 영향을 주어 동시 차단이 일어날 경우 전압의 크기는 매우 높아 급준파에 발생시에 허용하는 전압의 크기를 크게 벗어나게 된다. 따라서 이들 서지전압의 크기와 급준파를 허용할 수 있는 범위 이내로 완화시키기 위해 서지흡수장치를 부착한 결과 전압의 크기 저감과 파형의 준도를 완화시킬 수 있음을 확인하였다.

#### References

[1] Rene Smeets et al., "Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems", *Wiley*, pp. 134~138, 2015.

[2] Helmer J., Lindmayer M., "Mathematical Modeling of the High Frequency Behaviour of Vacuum Interrupters and Comparison with measured transients in power systems", *XVIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in vacuum*, Berkley, USA, 1996.

[3] B. Kondala Rao, and Gopal Gajjar, "Development and Application of Vacuum Circuit Breaker Model in Electromagnetic Transient Simulation", *IEEE Transactions on Power Delivery* 2006.

[4] Jong-Gyeum Kim., "Surge Characteristics Analysis and Reduction Method of Vacuum Circuit Breaker", *KIEE*, Vol. 62, No. 2, pp. 190-195, 2013.

[5] Jong-Gyeum Kim et al., "A Study on the Reduction Method and the Analysis of VCB Switching Surge for High Voltage Induction Motor", *KIEE*, Vol. 43, No. 5, pp.

761-769, 1994.

[6] JIEE Technical Report., "Opening/closing Surge and Its Application Technology of Vacuum Circuit and Switch", No. 4222, 1992.

[7] J. Panek & K.G. Fefrle, "Overvoltage Phenomena Associated with Virtual Current Chopping in Three Phase Circuits", *IEEE Trans on PAS*, Vol. 94, No. 4, pp. 1317-1325, 1975, Jul/Aug.

[8] T. Ithoh et al., "Voltage Escalation in the Switching of the Motor Control Circuit by the Vacuum Contactor", *IEEE Trans on PAS*, Vol. 91, No. 91, pp. 1897~1903, 1972.

[9] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA 1986.

[10] IEEE Std 522-2004, "IEEE Guide Testing Turn Insulation of Formed-Wound Stator Coils for Alternating-Current Electric Machines", p. 5, 2004.

### 저 자 소 개



#### 김 종 겹 (Jong-Gyeum Kim)

1961년 10월 3일생. 1996년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987.1~1988.1 KT 근무. 1988.1~1996.3 K-water 근무. 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수. 2013년~2014년 위스콘신 매디슨 대학교 방문교수. 현재 당학회 평의원 및 B부문회 부회장  
Tel : 033) 760-8785  
E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr