

HVDC시스템에서 AC 필터 차단기의 TRV해석

김찬기[†], 김진영¹, 신진철¹

TRV Analysis for AC Filter Circuit Breaker in HVDC System

Chan-Ki Kim[†], Jin-Young Kim¹, and Jin-Chul Sin¹

Abstract

The circuit breaker in an electric power system is not operated when the voltage in the circuit breaker is higher than the rated transient recovery voltage (TRV). The TRV of a circuit breaker is characterized by re-ignition of the arc between two poles and determined by the value of connecting impedance. In this study, we simulated the peak value of TRV in the AC filter of the circuit breaker. The suitability of TRV is assessed by capacitive current switching test conditions defined by the international guide IEC62271-100.

Key words: Circuit breaker, ac filter, Capacitive switching, HVDC, Transient recovery voltage

1. 서 론

AC 회로차단기(AC Circuit Breaker)는 전력계통망에서 어떤 고장이 발생한 경우에 다른 설비에 피해가 가지 않도록 설비를 분리하는 것을 목적으로 한다. 고장전류를 차단하는 것 이외에도, 차단기는 폐로(Closed)상태에서 최대부하전류, 정상상태 최대전류 그리고 일시 과전류, 과도 과전류를 흘릴 수 있어야 한다. 이때 차단기의 접촉단과 절연물의 열용량을 넘어서는 안된다. 또한 폐로 상태에서 차단기는 정상상태 최대전압(대지간) 스트레스를 견디어야 하고, TOV(Temporary Overvoltage)와 개폐 및 뇌 과전압을 견디어야 한다. 차단기가 개방(Open)된 상태에서는 ACB는 정상상태와 과도상태에서 과전압을 견디어야 한다. ACB는 전류를 차단하기 위해서 가스나 액체 절연물에 의해서 둘러싸인 접촉단을 분리함으로써 동작하게 된다. 그러나 전류차단은 순간적으로 이루어지지 않으며, 차단기의 접촉면이 개방(Open)된 상태에서도 전류가 연속적으로 흐르는 짧은 아크기간을 가지게 된다. 이러한 아크기간을 되도록 짧게 만드는 것이 가장 중요하다. 차단기가 전류를 차단한 후에 전기적으로는 분리되었고 전류는 흐르지 않지만, 이때 차단기

의 접촉자간에 과도한 과전압이 나타나는 데 이를 TRV(Transient Recovery Overvoltage)라 부르며, 차단기는 TRV에도 견디어야 한다.

한편, HVDC시스템에서 회로에서 분리하는 경우에는 우선적으로 제어동작을 통해서 HVDC 시스템을 차단(Blocking)하고 다음에 HVDC시스템과 AC계통을 연결하는 AC 차단기를 개방함으로써 마무리된다. HVDC시스템이 포함된 AC계통은 일반적인 AC계통과 다르게 대용량의 커패시터와 고조파를 함유한 계통이기 때문에 HVDC시스템용 AC 차단기를 개방하는 경우에는 기존의 AC계통과는 다른 TRV특성을 가지기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다.

본 논문은 HVDC시스템이 포함된 계통에 사용하는 AC 차단기에 인가되는 TRV를 검토하여 HVDC시스템의 상정고장(Contingency)시 견딜 수 있는 AC 차단기의 정격을 새롭게 정립하는 데 있다.

2. 연구배경 및 사전검토

2.1 AC 차단기의 분류

AC 차단기는 일반적으로 아크를 소호하고 절연거리를 확보하기 위해 사용되는 절연체에 따라 분류되고 고압 송배전에서 사용되는 차단기의 절연체는 다음과 같다^[1].

- Air-Blast
- Oil
- SF6(Sulfur Hexafluoride)
- Vacuum

Paper number: TKPE-2015-20-4-11

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: cckim@kepri.re.kr, KEPRI

Tel: +82-42-865-5837 Fax: +82-42-865-5844

¹ KEPCO

Manuscript received Apr. 3, 2015; revised May 13, 2015; accepted July 13, 2015

ACB(Air-Blast Circuit Breaker)는 공기압을 이용하여 아크를 소호한다. 압축된 공기가 직접 아크에 분사되어 아크의 온도를 낮추고 이온화된 가스를 제거하여 절연 강도를 회복시킨다. 압축된 공기는 공기탱크와 콤프레셔로 구성된 별도의 시스템으로부터 공급된다. 공기차단기는 아주 빠르게 아크를 소호할 수 있다고 알려져 있는데, 이는 심각한 외란으로부터 전력공급의 안정도를 보장하기 위해 필요하다. 공기의 낮은 절연 강도 때문에 적절한 전압차단능력을 확보하기위해 여러 개의 차단부가 직렬연결 되어야 한다. 420[kV] 계통의 경우에는 보통 12개 정도의 차단 부가 필요하다. 이런 상황에서 각 차단부에 동일한 전압이 걸리도록 Grading Capacitors가 사용된다. 전류가 차단되지 못한 뒤에 발생하게 되는 외란에 대비하여 개방 저항을 사용할 수도 있다.

OCB(Oil Circuit Breaker)는 전기 아크로 인해 미네랄 오일이 수소, 아세틸렌, 메탄 그리고 에틸렌을 포함한 여러 가스성분으로 분해된다. 이러한 화학적 분해가 아크 에너지를 제거하는데 도움을 준다. 여기에 가스확산(주로 수소) 및 신선한 주위 오일에 의해 추가적인 냉각 효과가 더해지고 이는 또 전류가 차단될 때 절연 강도를 증가시켜준다. 차단기의 성능은 아크 주위에 고 압력을 형성하여 소호를 도와주는 아크제어장치를 설치함으로써 더 높일 수 있다. Dead tank 유입차단기와 Minimum-Oil Breaker로 불리는 두 가지 형태의 유입차단기가 있다. Dead Tank 유입차단기는 점점과 아크 제어장비로 이뤄진 접지된 탱크로 구성되어 있고 전력계통과는 부싱 단자로 연결되어 있다. Minimum-Oil Breaker는 점점들과 아크 소호설비가 딱 맞춰진 케이스로 둘러싸여 있고 모든 구성요소들이 전력계통에 직접 연결되어 있다. Minimum-Oil Breaker의 가장 큰 이점은 Dead Tank 유입차단기에 비해 작은 양의 오일을 사용하고 좀 더 컴팩트하다는 것이다.

GCB(Gas Circuit Breaker)는 대부분의 송전계통 차단기에서 사용되는 것으로 SF6는 인체에 무해하고 무색 무취 발화성이 없는 특징을 가진다. 대기압 상온조건에서는 기체 상태지만 고압이나 저온상태에서는 액체상태로 될 수 있다. SF6의 절연강도는 공기의 수배이며 1.9Bar 압력에서의 오일과 동등하다. SF6는 고온 아크를 이온들로 구성된 많은 조각으로 해리시켜 우수한 아크 제어 및 소호 그리고 절연 회복 특성을 나타낼 수 있게 한다. SF6 차단부는 GBI(Gas-Blast Interrupter) 그리고 PI (Puffer Interrupter)라 불리는 두 가지의 주요 형태가 있다. GBI는 보통 SF6를 고압으로 유지시키는 컴프레셔와 분리되어 있고 절연목적으로 사용되는 SF6와도 분리되어 있다. 차단기 점점이 분리될때, 아크를 소호시키도록 점점 주위에 고압의 가스를 분출하기위한 밸브가 열

린다. 저장된 가스는 다시 재 압축된다. Gas-Blast Interrupter의 한 가지 단점은 고압에서 SF6는 액화되기 때문에 가스 상태로 만들어 주기위한 히터가 필요하다는 것이다. PI(Puffer Interrupter)는 아크접촉자 분리이전 초기 개방시간 동안 가스를 압축함으로써 이러한 문제를 해결했다. 이를 위해 가스를 미리 압축할 수 있는데 강력한 운전 메카니즘이 필요하다. 이에 불구하고 Puffer Interrupter는 SF6 가스 차단기에서 가장 널리 사용되고 있다.

VCB(Vacuum Circuit Breaker)는 진공차단부의 기체 압력은 보통 10⁻⁴에서 10⁻⁸[Torr]의 범위에 있다. 이 압력에서 이온화되는 분자수는 감소되어 주어진 간격에서의 절연 강도가 증가한다. 진공 차단부에서의 15mm 접점 간격은 11kV 까지 견딜 수 있다. 차단기에 전류가 흐르면 bellows 점점이 고정 점점으로부터 떨어질 때 차단부내에 아크가 형성된다. 점점 표면의 열점에서 금속성 기체 형태로 아크가 발생한다. 전류 영점에서 아크는 소멸되어 아크기둥의 생성은 없고 금속성 기체의 아주 빠른 재결합 및 탈이온이 일어난다. 이 금속기체는 점점 표면이나 주위에 재축적된다. 이 때문에 개방 점점 간에 인가되는 과도 회복전압을 견디기 위해 차단부내에 깨끗한 상태가 유지되어야 한다.

2.2 AC 차단기에서 TRV 발생 메커니즘

AC시스템에서 전류는 자연적으로 한주기당 2번의 영점(零點)을 가진다. 전류가 영점을 가진다는 의미는 시스템에 저장된 자계에너지가 영(零)이라는 의미를 가진다. AC 차단기는 전류를 차단할 때 이러한 특징을 이용하는 것이다. 전류가 차단될 때 AC 차단기의 양쪽 접촉단의 전압차이를 TRV(Transient Recovery Voltage)라 부르며, 전류의 성공적인 차단을 위해서는 ACB의 아크 공간(Arc Space)은 열 스트레스(Thermal Stress)와 절연 스트레스(Dielectric Stress)에 견디어야 한다. 열 스트레스와 절연 스트레스는 TRV에 의해서 중첩된다.

Thermal Stress

아크 전류가 영(零)에 도달했을 때, 아크 Conductance $g(t)$ 는 영(零)이 아니고 시정수 때문에 어떤 값을 가지게 된다. TRV는 개방된 접촉단 사이에 Post-Zero Current를 인가할 것이며 아크 에너지($p_{arc} = i^2/g(t)$)를 발생시킨다.

시간이 경과함에 따라 아크에너지는 가스 플라즈마 온도(gas plasma temperature)를 증가시킬 것이며, 이것은 도전성을 증가시킬 것이다. 반면에 아크 냉각 효과는 TRV에 의한 에너지보다 높기 때문에, 시간이 경과함에 따라 도전성과 아크 온도는 떨어지게 된다. 만약 온도가 떨어지지 않는 경우에는 다음 전류주기(Current Cycle)에서 재 점호가 발생한다.

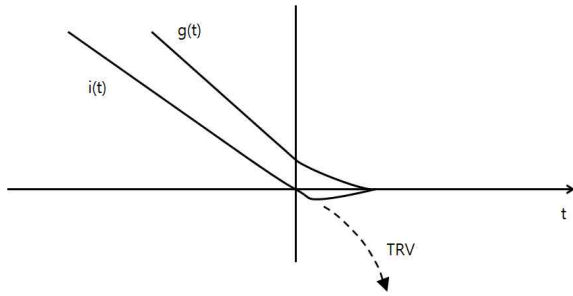


Fig. 1. Arc current and arc energy.

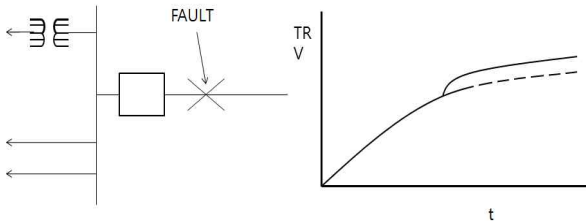


Fig. 2. Exponential TRV.

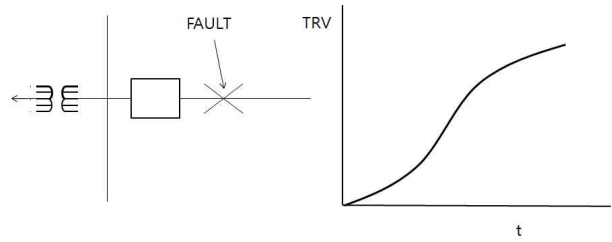


Fig. 3. Oscillatory TRV.

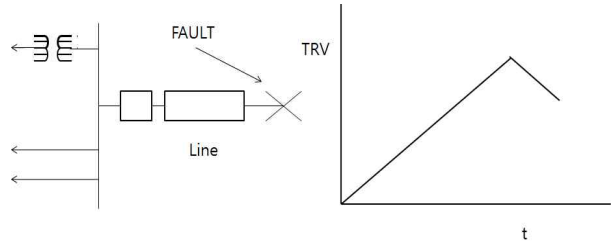


Fig. 4. Triangular TRV.

Dielectric Stress

Thermal Stress 영역에서 전류가 차단될 때 아크에너지의 입력과 출력의 균형이 이루어진다면, 도통 아크공간(Arc Space)은 절연적으로 TRV의 침투 값을 견디어야 한다. 이 값은 전류가 차단된 후 수십ms에서 수백ms 안에서 나타날 것이다. 이것이 성공적으로 이루어진 후에 아크공간은 충분히 냉각되고 ACB의 접촉단의 간격은 충분히 커지게 된다.

2.3 TRV의 종류

TRV는 전력계통에서 ACB의 전원 측과 부하 측 사이의 전압에 응답하는 차에서 발생하는 것으로 TRV의 특성은 회로의 저항, 용량성, 인덕티브 성분에 의해서 결정되며, 이러한 회로의 조합에 따라 진동적(oscillatory), 삼각파적(triangular) 그리고 지수적(exponential)으로 발생한다^[2].

Exponential TRV

전형적인 exponential TRV는 그림 2에서 볼 수 있다. AC 차단기를 기준으로 고장위치 반대측에 최소 1개 변압기 및 선로가 있고 고장위치에서 발생한 3상 단락고장을 차단하는 경우에 전형적으로 나타난다.

Oscillatory TRV

그림 3에서 볼 수 있는 Oscillatory TRV는 변압기나 리액터로 인해서 단락전류가 제한되고 댐핑효과가 있는 송전선로나 케이블의 서지 임피던스가 존재하는 경우에 발생한다.

Triangular TRV

Triangular TRV는 송전선로가 존재하는 경우에 나타

나는 특성으로 그림 4에서는 Short-Line Fault(SLF)의 특성을 보여준다. 송전선 서지 임피던스는 TRV의 특성을 결정한다. 톱니 모양인 TRV의 상승률은 일반적인 exponential 또는 oscillatory TRV 보다 더 높다.

2.4 HVDC시스템에서 요구되는 AC 차단기의 특성 Pole Breaker

HVDC시스템의 Pole Breaker는 TOV하에서 정격차단 시간을 만족하면서 고장을 제거할 수 있어야 한다. HVDC시스템에서 가장 심각한 고장은 “사이리스터 밸브양단에서 절연파괴가 일어나는 현상”으로써 이때 AC계통에서 DC단으로 고장전류가 흐르게 된다^[1]. 이때 HVDC 보호시스템은 반 주기안에 고장을 감지하고 한 사이클이 경과되는 시점에서 사이리스터 밸브를 차단하도록 되어 있다. AC 차단기처럼 사이리스터 밸브도 곧바로 전류를 차단하지 못하고 전류 영점까지 기다려야 하는데, 고장전류의 열적 영향 때문에 비정현파 형태의 전압이 밸브에 인가되면 밸브에서 한주기내에 고장을 제거하지 못할 수도 있다. 일반적으로 대전력 HVDC 컨버터에서 고장전류는 3주기이상 지속되어서는 안된다.

전류형 HVDC시스템은 위상제어를 수행하기 때문에 시스템 자체적으로 무효전력을 소모하게 된다. 이러한 무효전력은 AC계통에 커패시터를 투입하여 보상하는데, “HVDC시스템의 순간적인 Blocking은 AC계통에 과전압(TOV:Temporary Overvoltage)을 유발한다.” 여기에 차단기 상별 차단시간 차이가 종합되어 차단기 접촉자간 과도회복전압(Transient Recovery Voltage)을 유발하기 때문에 AC Breaker를 선정하는 경우에는 이러한 점을 고려하여 선정하여야 한다.

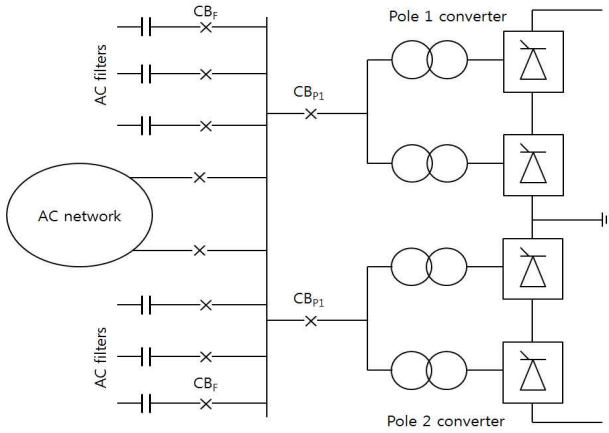


Fig. 5. Typical CB arrangement for HVDC system.

필터 Breaker

필터는 커패시터성분을 가지고 있기 때문에, 부하전류에 비하여 부하전압은 90도 위상차이가 난다. 따라서, 부하전류가 영(零)인 지점에서 Breaker를 차단하는 경우에는 Breaker양단의 전압은 0.5[Cycle] 안에 2[p.u]까지 올라간다. 정상상태에서 AC필터의 부하전류는 작기 때문에 접촉자 개방 초기단계에서 차단기가 전류를 쉽게 차단한다. 차단기 접촉단이 충분히 개방(Open)되지 않은 경우에는 (1-cos)파형의 TRV가 나타난다. AC필터가 AC모선에 접속된 상태에서 HVDC 컨버터가 차단(Block : AC모선에서 완전히 전기적으로 분리된 것이 아니라 5[Cycle]~ 12[Cycle] 정도 일시적인 분리)될 경우, AC모선에는 과전압(TOV)이 발생한다. TOV를 제한하기 위해 불필요한 필터는 순차적으로 개방되는데, 이때 처음 개방되는 필터차단기에서 가장 큰 TOV가 나타나고 차단기는 이 전압에 충분히 견디어야 한다^[1].

HVDC 시스템이 있는 계통에서 AC차단기의 TRV

일반적인 AC계통에서 AC차단기의 과도 과전압(TRV)은 식 (1)과 같이 계산되어진다.

$$E_2 = k_a \times k_{pp} \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times V_{ac} \quad (1)$$

여기서, E_2 는 과도회복전압(Transient Recovery Voltage), k_a 는 과도전압 크기계수, k_{pp} 는 FPCF(First pole to clear factor)계수 그리고 V_{ac} 는 시스템 정격전압 그러나, HVDC시스템이 있는 계통에서 AC차단기의 과도 과전압(TRV)은 일반적인 AC계통의 과도 과전압과는 다른 형태를 가진다. HVDC시스템의 AC차단기에 인가되는 과도 과전압은 다음과 같다.

$$E_{HVDC} = k_{capacitor} \times k_{pp-HVDC} \times k_{TOV} \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times V_{ac}$$

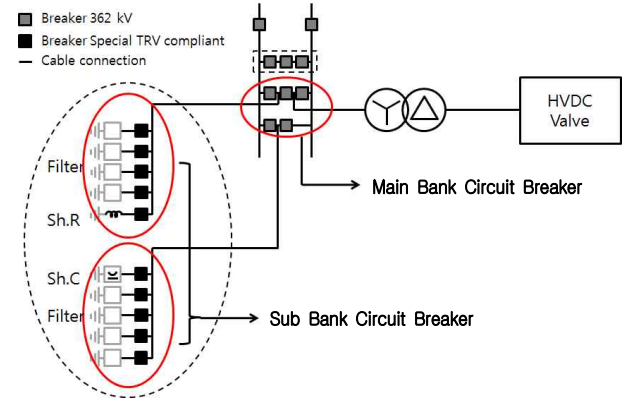


Fig. 6. Filter circuit single line diagram for dangjin-goduk HVDC system.

$$k_{pp-HVDC} = \frac{1}{\sqrt{L_{ac} \cdot C_{HVDC}}}, \quad k_{TOV} = \frac{V_{TOV}}{V_{ac}},$$

$$V_{TH} = V_{ac} + \frac{V_{ac} \cdot Q_{HVDC}}{X_{ac}} + j \frac{V_{ac} \cdot P_{HVDC}}{X_{ac}},$$

$$V_{TOV} = V_{th} + \frac{Q_{HVDC}}{X_{ac}} \quad (2)$$

여기서, L_{ac} 는 증가화된 AC계통의 리액턴스, C_{HVDC} 는 HVDC무효전력 보상용 필터의 커패시턴스, V_{TOV} 는 AC계통의 과전압, V_{TH} 는 증가화된 AC계통의 테브난 전압, X_{ac} 는 $2\pi f L_{ac}$, Q_{HVDC} 는 HVDC시스템이 소모하는 무효전력, P_{HVDC} 는 HVDC 시스템이 전송하는 유효전력 식 (2)에서 E_{HVDC} 는 과도회복전압(TRV)을 보여주고 있으며, $k_{capacitor}$ 는 커패시터의 과도전압계수로 전류파형과 전압파형은 커패시터에 있어서는 90도 위상차이가 있기 때문에 과도전압계수는 순수한 커패시터의 경우는 "2"가 된다, 그리고 $k_{pp-HVDC}$ 는 과도전압 마진으로 커패시터나 리액터의 스위칭으로 인한 자연공진주파수(Natural Resonance Frequency)에 의해서 결정되는 것으로 식 (2)와 같이 계산되어진다. 또한 k_{TOV} 는 AC계통에서 부하탈락에 의해서 발생하는 과도전압의 크기로써 계통의 단락용량과 커패시터의 조합에 의해서 결정되어진다. 예를 들면, 일반적인 345[kV]계통에서 634[kV]정도의 TRV를 선정하는 것에 비하여 HVDC시스템에서는 다음 예제와 같은 2배이상의 TRV가 관측되고 있다.

$$\text{예) } E_{HVDC} = 2 \times 1.5 \times 1.5 \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times 345 [kV] = 1268 [kV]$$

3. 북당진-고덕 HVDC 시스템에서 요구되는 AC 필터차단기

3.1 시뮬레이션 조건

TABLE I
PARAMETERS FOR TRV SIMULATION

		Goduk
Max. AC system voltage	$V_{LL\ rms}$	362
Frequency	Hz	60
Min. Short Circuit Level	MVA	3000
X/R ratio		40
DC Power	MW	1500
C,Tr Rate Power(6-pulse)	MVA	945
C.Tr %Z(6-pulse)	p.u.	0.17

북당진~고덕 간 HVDC 연계 시스템에서 필터차단기는 그림 6과 같이 구성된다. HVDC 컨버터의 부하가 순간적으로 차단(Block)되는 경우 모션전압은 피뢰기의 개폐임펄스 보호레벨까지 상승할 수 있고, 이어서 AC 모션 과전압을 제한하기 위해 필터차단기가 개방되고 차단기 극간에서는 과도회복전압이 발생한다. 특히 단락용량이 상대적으로 작은 고덕측 AC모선에 연결된 필터차단기가 동작할 때 나타날 수 있는 가혹한 과도회복전압(TRV)이 발생할 수 있는데, 적절한 차단기 적용을 위해 과도회복전압을 시뮬레이션을 통해 예측하였다.

PSCAD 모델 구성

TRV 모의를 위한 PSCAD 모델은 다음 요소로 구성되고, 시뮬레이션 설정값은 표 1에 기술하였다^[3].

- AC 등가계통 : 이상적인 3상 전압원과 최소단락용량 및 계통 최고전압으로 계산한 등가임피던스로 구성
- AC 필터 : 2개의 주회로 차단기와 9개의 보조차단기를 통해 9개의 필터뱅크로 구성됨
- AC 피뢰기 : AC 345kV 피뢰기
- 변환용 변압기 : 345kV/220kV 변환용 변압기
- HVDC 컨버터 : 최대무효전력을 소모하는 운전조건을 고려하여 유효/무효전력 부하처리

부하탈락시 주회로 차단기와 보조차단기에서 나타나는 과도회복전압이 최대값은 다음과 같다. 그림 7은 부하차단시 주회로 차단기 극간에 나타나는 과도회복전압이며, 그림 8은 보조차단기 극간에 나타나는 과도회복전압이다.

시뮬레이션 결과 주회로 차단기와 보조차단기에서 나타나는 최대 과도회복전압은 그림 7과 그림 8에서 볼 수 있는 것처럼 각각 **1094.8kV**와 **1173.7kV**로 나타났다.

한편, 관련 IEC규격에 따르면 충전전류 개폐시험시 나타날 수 있는 과도회복전압의 최대값은 시험전압의 1.98배 이상이며 이에 이르는 시간은 7.3ms 이하를 만족하여야 한다^[4]. 충전전류 개폐시 362kV급 및 550kV급 차단기에서 견디어야 하는 TRV 최대값은 식(3), (4)로 계산된다.

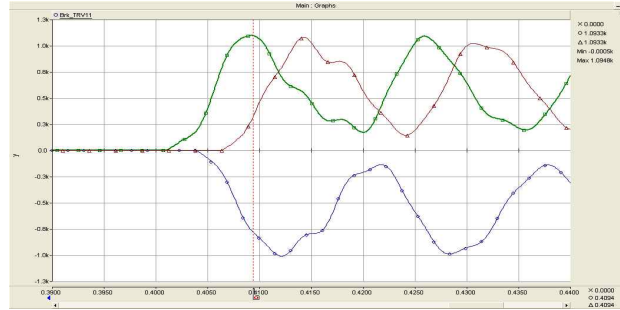


Fig. 7. Main bank Circuit Breaker TRV.

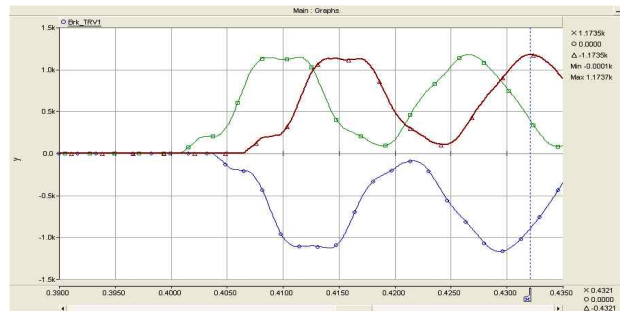


Fig. 8. Sub bank Circuit Breaker TRV.

$$362\text{kV급} : u_c = 1.98 \times 1.4 \times 362 \times \frac{\sqrt{2}}{3} = 820[\text{kV}] \quad (3)$$

$$550\text{kV급} : u_c = 1.98 \times 1.4 \times 550 \times \frac{\sqrt{2}}{3} = 1245[\text{kV}] \quad (4)$$

시뮬레이션 결과 나타난 최대 과도회복전압을 만족하기 위해서는 550kV급 차단기가 적용되어야 하는 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 논문에서는 HVDC용 AC 필터 개폐시 발생하는 TRV를 시뮬레이션하였다. 적절한 차단기를 선정하기 위해서는 차단시 양 극간에 발생하는 과도회복전압이 기준치 이내여야 한다. 특히 AC 필터와 같이 충전전류를 차단하는 경우에는 인가된 전압의 2배에 해당하는 과도회복전압이 나타날 수 있기 때문에 차단기 선정시 이를 별도로 검토해야 한다. 345kV 모선에 연결된 HVDC 용 필터 개폐시 최대 1173.7kV의 과도회복전압이 발생함을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 이는 345kV급 차단기의 충전전류 개폐시 정격(820kV)을 초과하고 550kV급 차단기 정격(1250kV) 이내이다. 따라서 해당위치에는 550kV급 차단기가 설치되어야 적절한 것으로 판단된다.

References

- [1] A. Grid, "HVDC Connecting to the future," 1st edition, pp. 358-367, 2010.
- [2] IEEE Std C37.011-2005, "IEEE application guide for transient recovery voltage for AC high-voltage circuit breakers," pp. 2-6, 2006.
- [3] Alstom Grid Power Electronics Dangjin - Godeok HVDC (PTP) Converter Station AC Filter Circuit Breaker TRV (Technical Note), 2014.
- [4] IEC 62271-100, First edition 2003-05, "High-voltage switchgear and controlgear - Part 100: High voltage alternating-current circuit breakers," pp. 255-281, 2003.



김찬기(金燦起)

1968년 12월 17일생, 1993년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996년~현재 전력연구원 책임연구원.



김진영(金鎭伶)

1981년 8월 30일생. 2008년 중앙대 전자전기공학부 졸업. 2007년~현재 한국전력공사 경기지역본부 주임.



신진철(申珍澈)

1961년 11월 4일생. 1985년 조선대 전기공학과 졸업. 1985년~현재 한국전력공사(現 신승전사업체) 처장. CIGRE 전력용변압기 연구회 회장.