

# Electromagnetic Transient Program Modeling for Analysis of Switching Over-Voltage on Shunt Reactor

## 분로리액터 개폐 과전압 해석을 위한 EMTP 모델링

SeungRyle Oh, InYoung Jun, KiSun Han, JiWon Kang  
오승열, 전인영, 한기선, 강지원

### Abstract

Shunt reactor, a facility for reactive power compensation, is switched several times a day depending on the load pattern. When the circuit-breaker opens the shunt reactor over-voltage is generated by several factors which degrade the insulating performance of internal parts of the circuit-breaker and cause severe voltage stress on the equipment in the power system. Transient phenomenon occurring during the switching of shunt reactor are available in laboratories that verify the performance of the circuit-breaker by simulating the power system. However, it is difficult to measure the transient phenomenon that occurs during actual operation in actual power system due to many limitations. Therefore, this paper deals with the modeling using EMTP to analyze the reignition and current chopping which causes more severe transient recovery voltage in the small inductive current breaking in actual power systems. In addition, this paper analyzes the main phenomenon that cause circuit-breaker failure in opening shunt reactor using EMTP model.

무효전력 보상설비인 분로리액터는 전력계통의 부하 패턴에 따라서 하루에도 수 회 정도 차단기에 의해 운전되거나 정지된다. 분로리액터 개폐 시 몇 가지 요인에 의해 발생하는 과전압은 차단기의 절연 성능을 저하시키며, 계통을 구성하는 전력기에 심각한 전압 스트레스를 유발한다. 분로리액터 개폐 과정에서 발생하는 과도현상을 측정하는 것은 계통을 모의하여 차단기 성능을 검증하는 시험소 수준에서는 가능하나, 실제 계통 운전 중에 발생하는 과도현상을 측정하는 것은 여러 가지 제약으로 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 실 계통에서 지상 소전류 차단과정에서 가혹한 과도회복전압(TRV: Transient Recovery Voltage)을 유발하는 재발호(reignition)나 전류재단(current chopping) 현상에 대한 해석을 위해 전자계과도해석프로그램(EMTP: Electro-magnetic Transients Program)을 활용한 모델링 과정과 이를 토대로 분로리액터 개폐 과정에서 차단기의 고장을 유발하는 주된 현상에 대해 해석하고자 한다.

**Keywords:** Shunt Reactor, Reignition, Current Chopping, EMTP

### I. Introduction

분로리액터는 전력계통의 무효전력을 제어하기 위한 조상설비로 부하 패턴에 따라 하루에 수 회 계통에 병입과 분리된다. 분로리액터에 대한 개폐는 전력계통에 과전압을 발생시키는 주요한 원인이며, 전력설비의 주된 전압 스트레스 요인으로 간주된다. 우리나라 전력계통에서 분로리액터는 주로 345 kV 변전소에 설치되어 운전되고 있으며, 해외와 유사하게 송전선로, 커패시터뱅크, 변압기, 분로리액터 등 전체 362 kV 초고압 차단기의 사용 개소 비율에 비해 분로리액터용 차단기의 고장발생 빈도는 아주 높은 경향을 보인다. 이러한 이유는 분로리액터 차단 과정에서 발생하는 특징적인 과도현상에서 찾을 수 있다. 대체로 분로리액터 투입과정

에서 발생하는 과전압은 차단 과전압에 비해 가혹도가 낮은 수준이므로, 본 논문에서는 차단 시 발생하는 과전압 해석에 대해 다루었다.

### II. 분로리액터 차단 현상

차단기가 분로리액터를 개방하는 과정에서 차단하는 전류는 전압의 위상에 비해 전기적으로 90도 늦은 지상이며, 수천 암페어 수준인 차단기의 정격전류보다 낮은 수 백 암페어의 작은 전류이다. 단락전류 차단에 성능이 최적화된 초고압 SF<sub>6</sub> 가스 차단기는 정격전류보다 낮은 수준의 전류를 차단하는 경우에 자연영점 이전

### Article Information

Manuscript Received May 7, 2020, Revised July 30, 2020, Accepted September 7, 2020, Published online December 30, 2020

The authors are with KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Republic of Korea.

Correspondence Author: SeungRyle Oh (exp0510@kepc.co.kr)



This paper is an open access article licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>  
This paper, color print of one or more figures in this paper, and/or supplementary information are available at <http://journal.kepc.co.kr>.

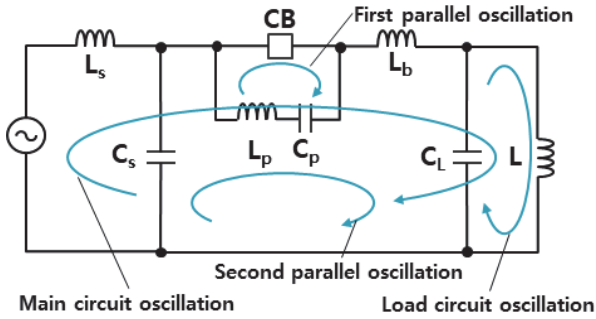


Fig. 1. 분로리액터 개폐시험 단상 등가회로.

TALBE 1  
진동 전압 주파수 범위

Oscillation mode	Frequency range	Oscillation mode	Frequency range
Main circuit	2 - 20 kHz	First parallel	1 - 10 MHz
Load circuit	1 - 5 kHz	Second Parallel	50 - 1,000 kHz

에 전류를 차단하는 전류재단(current chopping) 현상이 발생하게 된다. 이는 지상 소전류를 차단하는 과정에서 발생하는 현상의 하나이며 차단기의 성능검증 요건에는 포함되지 않으나 계통에 과전압을 유발하는 요인이다. 이로 인해 차단기는 더 높은 전압 스트레스에 노출되므로 가능한 재단전류는 낮아야 한다. 일반적으로 전류재단에 따른 과전압은 Eq. (1)과 같이 표현된다 [1][5].

$$E_m + E_e = \frac{1}{2} Li_{ch}^2 + \frac{1}{2} C_L u_c^2 = \frac{1}{2} C_L u_{c,max}^2$$

$$u_{c,max} = \sqrt{\frac{L}{C_L} i_{ch}^2 + u_c^2}$$

여기에서  $E_m$ : 인덕턴스 저장에너지(자기장 에너지) [J],  $E_e$ : 커패시턴스 저장에너지(전기장 에너지) [J],  $i_{ch}$ : 재단전류 크기 [A],  $L$ : 리액터 인덕턴스 [H],  $C_L$ : 부하단 대지 간 커패시턴스 [F],  $u_c$ : 전류재단 시점에서의 전압 [V],  $u_{c,max}$ : 최고 상승 전압 [V].

우리나라를 비롯한 각국의 송전전압 격상 추세에 따라 전력설비의 정격전압 또한 높아지고 있는 가운데 SF<sub>6</sub> 가스 차단기는 550 kV 전압 수준까지 하나의 차단부로 구성되는 단점절 차단기가 개발되었으나, 그 이상의 전력계통에서는 2개 이상의 차단부를 직렬로 연결하여 전압을 분담하는 방식의 다점절 차단기가 사용되고 있다. 다점절 차단기는 점절 간 균등한 전압분배 및 과도회복전압의 경감을 위해 균양용 콘덴서가 필수로 사용되고 있다 [2]. 단점절 차단기도 근거리 선로고장에 대한 차단성능 향상을 위해 차단부와 병렬로 콘덴서를 장착하고 있으며 이러한 콘덴서 장착 구조는 Eq. (2)와 같이 재단전류의 크기를 결정짓는 주요한 요인인 차단부의 병렬 커패시턴스를 증가시켜 재단전류 크기를 높이는 원인이 된다 [3].

$$i_{ch} = \lambda \sqrt{NC_t}$$

$$C_t = C_p \frac{C_s C_L}{C_s + C_L}$$

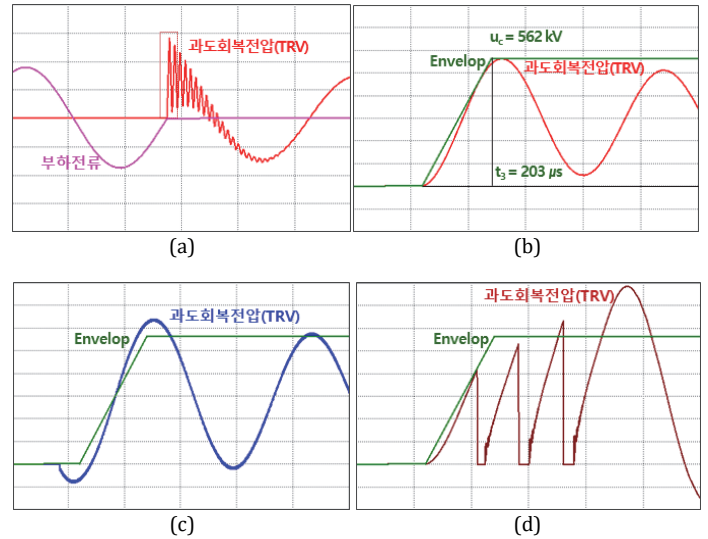


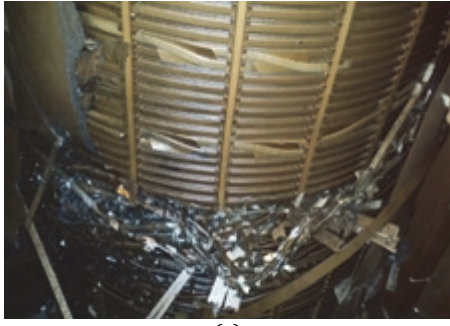
Fig. 2. 전류재단 및 재발호에 따른 TRV 비교. (a) 정상차단시 TRV. (b) TRV 확대 파형. (c) 전류재단시 TRV. (d) 재발호시 TRV.

여기에서  $i_{ch}$ : 재단전류 크기 [A],  $C_t$ : 차단기 병렬 총 커패시턴스 [F],  $\lambda$ : 단일 차단부에 대한 전류 재단수 [AF-5],  $N$ : 차단기 극당 차단장치 수,  $C_s$ : 전원측 커패시턴스 [F],  $C_L$ : 부하측 커패시턴스 [F].

전류재단이 발생하면 리액터에 축적된 에너지는 리액터단 커패시턴스 사이에서 높은 주파수로 진동하는 과전압이 발생하며 리액터 내부저항에 의해 감소하는 특성을 보인다. 또한, 분로리액터를 차단하는 과정에서는 다수의 재발호(reignition)에 의해 과전압이 발생될 수 있다. 차단하는 과정에서 차단 전류에 대해 요구되는 최소 아크시간보다 짧은 경우 재발호가 발생하며, 공인시험기관에서 수행한 지상 소전류 개폐시험 데이터를 분석해 볼 때 재발호(reignition)에 의한 과전압은 접지방식에 따라 달라질 수 있으나 대체로 1.9-2.85 pu 수준이며 다중 재발호가 발생할 경우 이 범위를 초과한다. Fig. 1은 IEC 62271-110에 따른 분로리액터 개폐시험 회로이며 차단 시 발생하는 전압의 L-C 진동은 TABLE 1과 같이 4개 영역으로 구분될 수 있다 [4].

Fig. 2에 나타난 것과 같이 분로리액터 개방 시 전류재단이나 재발호가 발생하면 정상 개방 시 보다 가혹한 TRV가 야기된다. 재발호 과전압의 주파수는 수 MHz에 이르며 차단기 내부 노즐 천공, 아크점점과 주점점 사이의 아크 발생 등으로 차단기의 차단 성능 및 절연성능 저하를 일으킨다. 또한, 재발호에 의한 매우 큰 기울기의 과도 전압은 리액터 권선에 불균형하게 분포되어 권선 초입부에 가장 높게 나타나게 되는데, 이로 인한 가혹한 전압 스트레스는 리액터 권선의 절연을 파괴할 수 있다. 분로리액터 개폐 과정에서 발생하는 과전압은 계통에 병입되어 운전되고 있는 전력기기의 절연을 손상시킬 뿐만 아니라 차단기 자체 고장의 원인이 되기도 한다. 2012년 CIGRE에서 발표한 자료에 따르면 SF<sub>6</sub> 가스 차단기 중 분로리액터 개폐용으로 사용되는 비율은 전체의 1.32% 수준이다. 그러나 전체 차단기 중대고장 발생건수 중에서 분로리액터용 차단기의 고장 비율이 23.9%를 차지할 정도로 고장빈도가 높게 나타났다 [5].

이러한 현상은 해외는 물론 국내에서도 비슷한 경향을 보이



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. 분로리액터 개폐 과도현상에 의한 고장사태. (a) 리액터 권선 인입부 절연파괴. (b) 차단기 노즐 천공. (c) 균압콘덴서 소손.

며, 한전 계통에서는 2001년부터 현재까지 분로리액터 개폐 과전압으로 인해 20여건의 유사고장이 지속적으로 발생하고 있어 문제 해결을 위해 리액터 절연 보강 및 차단기 내부 노즐 형상과 재질 등을 변경하는 노력을 해 왔으나, 최근에는 과도현상을 최소화하기 위해 최적시점에 투입, 개방하는 개폐 제어기술을 개발하여 실계통에 적용함으로써 전력기기의 스트레스를 저감하였다 [6]. 한전에서 사용되는 초고압차단기는 구매 당시에 공인시험기관에서 진행되는 개발시험(type test)의 지상 소전류 개폐시험을 통해 해당 차단기의 소전류 차단특성을 볼 수 있으나, 실 계통에서 운전 중인 차단기의 개폐 과정에서 발생하는 과도현상은 여러 가지 제약으로 인해 실측에는 한계가 있다. 따라서 전력계통의 과도현상 해석에 적합한 전자계과도해석프로그램(ATP-EMTP)을 활용한 모델링을 통해 분로리액터 개폐 과정에서 발생하는 여러 가지 현상을 해석할 필요성이 있다.

### III. 전자계과도해석프로그램(EMTP) 모델링

Fig. 4는 ATPDraw를 활용하여 분로리액터 개폐 과전압 해석을 위해 진행된 EMTP 모델링이며, 이는 실제 시험 데이터와의 비교를 위해 공인시험기관에서 362 kV 초고압 차단기의 지상 소전류 개폐시험이 단상으로 진행되는 것을 고려하였다.

#### A. 분로리액터 모델링

현재 우리나라 계통에서 분로리액터는 345 kV 변전소에 70 여대 가량 운전되고 있으며, 100 Mvar, 200 Mvar 2가지의 정격용량

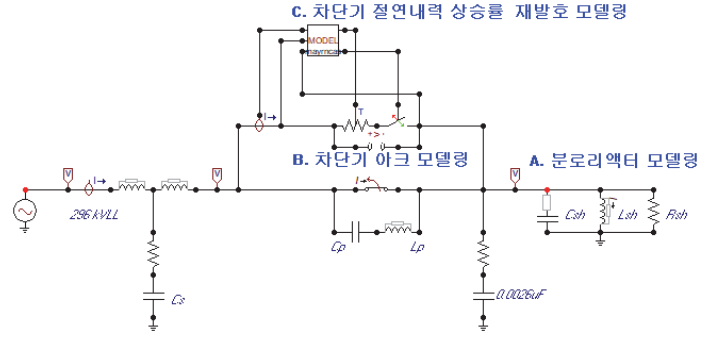


Fig. 4. 분로리액터 개폐 과전압 해석을 위한 EMTP 모델.

을 가진다. EMTP 모델링을 위한 분로리액터의 용량별 회로 정수 값은 Eq. (3)과 TABLE 2에 따라 계산된 값을 사용하였으며, 단상 기준으로  $L_{sh}$ 값은 분로리액터의 인덕턴스,  $C_{sh}$ 는 분로리액터의 정전용량,  $R_{sh}$ 는 분로리액터의 손실을 나타낸 것이다.

$$L_{sh} = \frac{U_r^2}{S \times 2\pi f} \text{ [H]}$$

$$C_{sh} = \frac{C_s}{3} \text{ [F]} \tag{3}$$

$$R_{sh} = \frac{U_r^2}{P_{loss}} \text{ [\Omega]}$$

#### B. 차단기 아크 모델링

EMTP 해석을 통해 다중 재발호에 의해 발생하는 과전압의 크기와 경향을 분석하였다. EMTP 해석을 위해 사용된 아크 모델은 두 가지로 나누어지며, 각 모델의 장점을 고려하여 전류가 영점에 도달하기 전에는 Cassie's equation, 전류 영점 이후에는 Mayr's equation이 적용되었으며, 최종 아크 저항은 두 모델의 합으로 표현된다 [7]-[9]. 개폐 명령 및 아크저항 계산을 위해 MODELS를 이용하며, TACS resistances는 아크 저항 모의, TACS switch는 MODELS를 통해 출력되는 차단기 개폐 명령을 수행하는 역할을 한다.

$$\text{Cassie: } \frac{1}{g_c} \frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left( \frac{i^2}{U_0^2 g_c^2} - 1 \right) \tag{4}$$

$$\text{Mayr: } \frac{1}{g_m} \frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left( \frac{i^2}{P g_m} - 1 \right) \tag{5}$$

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_c} + \frac{1}{g_m} \tag{6}$$

$$\tau_m = \tau_0 g^\alpha$$

$$P = P_0 g^\beta$$

여기에서  $g$ : 아크 컨덕턴스 [ $\Omega^{-1}$ ],  $g_c$ : Cassie모델 아크 컨덕턴스 [ $\Omega^{-1}$ ],  $g_m$ : Mayr모델 아크 컨덕턴스 [ $\Omega^{-1}$ ],  $\tau_0, \tau_m$ : 시정수,  $U_0$ : 아크 전압 [V],  $\alpha, \beta$ : 실험상수,  $P$ : 전력손실 [W],  $P_0$ : 냉각 상수.

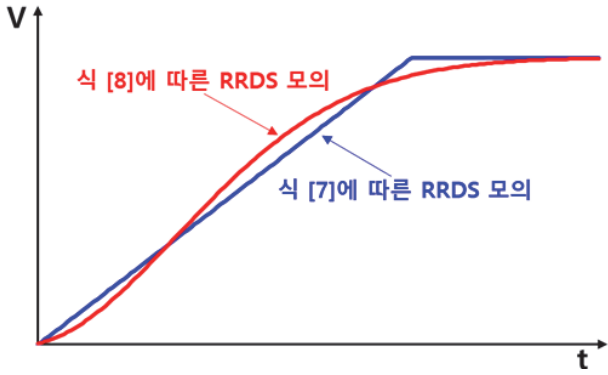


Fig. 5. 차단기 절연내력 상승률(RRDS) [kV/μs] 모의.

C. 차단기 절연내력 상승률, 재발호 모델링

셴트TBM 공법 적용 시 커터헤드 설계 및 굴진을 예측에 기본이 되는 디스크커터 당 차단기 개방 과정에서 절연내력 상승률은 차단기 극간에 인가되는 회복전압 크기와 비교해 재발호 유무를 판단하는 기준이 된다. 절연내력 상승률은 차단기에 따라 특성을 고려하여[Eq. (7)] [10], Eq. (8)을 활용할 수 있으며, 각각의 식에 따른 차단기 절연내력 회복 상승률 비교를 위해 모의 결과를 Fig. 5에 나타냈다. EMTP에서 제공하는 MODELS를 통해 차단기의 절연내력 상승률을 구현하였으며, 매 연산 step 마다 차단기 극간에 인가되는 전압과 절연내력을 비교한다.

$$U_{CB,RRDS} = A(t - t_{open}) + B \tag{7}$$

여기에서  $U_{CB,RRDS}$ : 차단기 개방 과정에서의 절연내력 [V],  $A$ : 차단기 절연내력 상승률,  $B$ : 차단기 절연내력 상수,  $t_{open}$ : 차단기 개극 시점 [s].

$$U_{CB,RRDS} = KU_r(1 - e^{-\tau}) \tag{8}$$

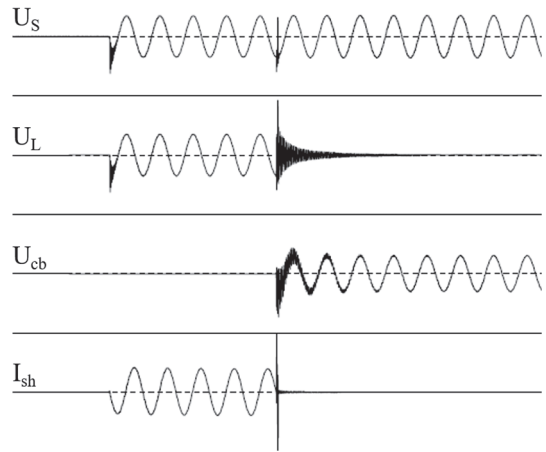
$$\tau = \frac{(t + \gamma)^\alpha}{t_{open}^\beta}$$

여기에서  $K$ : 차단기 개방상태에서 양단 절연내력 상수[pu],  $U_r$ : 차단기 정격전압[V],  $\alpha, \beta, \gamma$ : 지상 소전류 차단 시 차단기 절연회복 특성 상수.

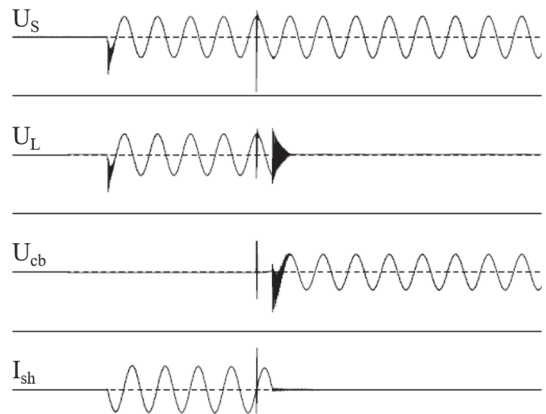
IV. EMTP 다중 재발호 현상 시뮬레이션

지상 소전류 개폐 과정에서 차단기는 개극 후 첫 영점에서 극간에 인가되는 과도회복전압보다 차단기 극간 절연내력이 작을 경우 재발호가 발생한다. 이때 순간적으로 여러 번의 절연회복과 절연파괴가 반복되는 다중 재발호가 발생하게 되며 차단기의 절연회복 특성에 따라 전류는 Fig. 6(a)와 같이 첫 번째 영점에서 차단되거나, Fig. 6(b)와 같이 절연내력이 충분히 확보되는 다음 영점에서 차단이 이루어진다. Fig. 6은 관련 표준규격인 IEC 62271-110에 따라 진행되는 지상 소전류 개폐시험에서 발생하는 대표적인 두 가지 형태의 재발호 현상을 나타낸 것이다.

앞서 언급된 일련의 과정을 통해 구현된 EMTP 모델에서는



(a)



(b)

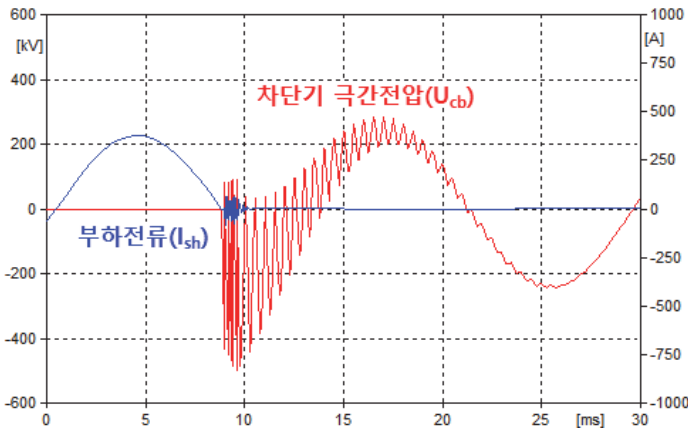
$U_s$ : 전원측 전압 [kV],  $U_L$ : 부하측 전압 [kV],  $U_{cb}$ : 차단기 극간 전압[kV],  $I_{sh}$ : 부하전류 [A]

Fig. 6. 전류재단 및 재발호에 따른 TRV 비교. (a) 지상 소전류 개폐시험 (재발호-1). (b) 지상 소전류 개폐시험(재발호-2).

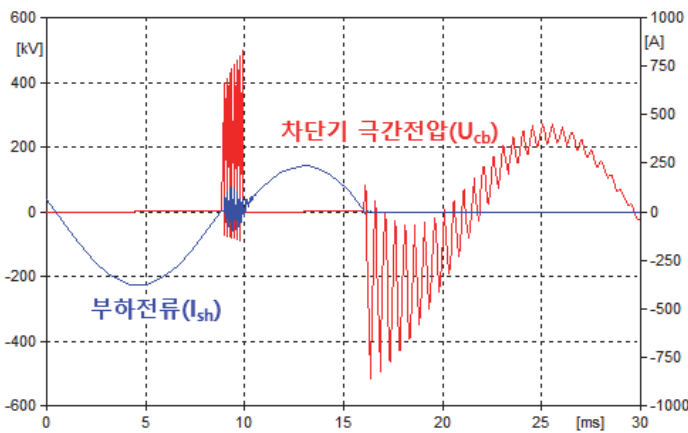
재단전류의 크기와 차단기 개극시간, 점점 개리 속도, 절연내력 회복 특성 등 해석하고자 하는 차단기 특성에 맞도록 필요한 변수 값을 구현된 모델에 입력할 수 있다. Fig. 7은 앞서 언급한 대표적인 재발호 발생 경향에 따른 현상을 해석한 결과이다. Fig. 7(a)는 차단기 개극 후 첫 번째 전류 영점에서 차단기 절연내력 부족으로 인해 재발호가 발생하였으나 곧바로 절연이 회복되는 현상이며, Fig. 7(b)는 첫 번째 전류 영점에서 절연이 회복되지 않아 다음 영점에서 긴 아크 시간으로 인해 재단되는 전류가 커지면서 차단되는 현상이다.

V. Conclusion

분로리액터는 계통의 무효전력을 보상하기 위한 필수 설비이나, 개폐 시 빈번하게 발생하는 전류재단과 재발호 현상으로 인해 높은 과전압이 발생하고 있으며, 이러한 과전압은 계통에 설치되어 있는 전력기기의 절연에 악영향을 미친다. 하지만 현재 분로리액터



(a)



(b)

Fig. 7. EMTP 다중 재발호 현상 시뮬레이션 결과. (a) 해석결과-1. (b) 해석결과-2.

개폐 과정에서 발생하는 여러 가지 과도현상에 대해서는 적절한 설비가 갖춰진 시험소 수준에서만 측정 가능하며, 실 계통에서 분로리액터 개폐 과정에서 발생하는 전류재단 및 재발호 현상에 대해서는 여러 제약으로 인해 측정에 한계가 있다. 본 논문에서는 실

계통에서 분로리액터 개폐 동작과정에서 발생할 수 있는 과도현상 분석을 위해 차단기의 특성을 고려할 수 있도록 ATPDraw를 활용한 EMTP 모델링 과정에 대해 다루었으며, 이에 따른 해석 결과는 초고압차단기의 유도성 소전류 개폐 성능에 대한 표준규격인 IEC 62271-110에 따라 시험소에서 수행된 시험 결과와 비교하여 차단기 개극시점 및 절연내력상승 특성에 따라 발생하는 대표적인 재발호 현상에 대해 유사성을 확인할 수 있었다. 향후에는 현재 단상 모델을 삼상으로 확대하여 상간 커패시턴스 영향에 의한 가상전류 재단(virtual current chopping)에 대한 현상을 추가로 분석하며, 현재 미금변전소에 개폐 과전압 측정을 위해 설치되어 있는 GIS 장착형 분압기와 과도현상측정시스템을 통해 취득되는 실 계통 운전 데이터와 EMTP 모델 해석 결과를 비교 검토할 예정이다.

References

- [1] René Smeets, Lou van der Sluis, Mirsad Kapetanoviü, David Peelo, Anton Janssen, "Switching in Electrical Transmission and Distribution System," WILEY, 2015.
- [2] 오승열, 한기선, 김태균, "Study on the Performance Verification Method and Failure Mechanism of Grading Capacitor of a Two-break Circuit-breaker," KEPCO Journal on Electric Power and Energy, vol. 5, no. 1, March 2019, DOI 10.18770/KEPCO.2019.05.01.011.
- [3] J.A. Bachiller, E. Caverio, F. Salamanca, J. Rodriguez, "The operation of shunt reactors in the Spanish 400 kV network - study of the suitability of different circuit breakers and possible solutions to observed problems," CIGRE, 1994.
- [4] IEC 62271-110: 2017, "High-voltage switchgear and controlgear - Part 110: Inductive load switching."
- [5] "Final Report of the 2004 - 2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment," CIGRE Working Group A3.06, 2012.
- [6] 오승열, 전인영, 한기선, 강지원, 김태균, "362kV 개폐제어형 차단기 개발 및 한전 실계통 적용 결과 고찰," 대한전기학회 하계학술대회논문집, 2019.
- [7] G. W. Chang, H. M. Huang, J.H. Lai, "Modeling SF6 Circuit Breaker for Shunt Reactor Switching Transient Analysis," IEEE, 2004.
- [8] H. A. Darwish and N. I. Elkalashy, "Universal Arc Representation Using EMTP," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, pp. 772-779, April 2005.
- [9] 김창환, 오승열, 곽주식, 이상봉, "EMTP/MODELS를 이용한 차단기 모델링," 한국조명전기설비학회 학술대회논문집, 2015.
- [10] Navalkar, Prashant V, Gopal Gajjar, "Modeling of Vacuum Circuit Breaker and its use for Studying Medium Voltage Reactor Switching," SWICON, 2011.