

PSCAD/EMTDC를 이용한 과도전압 모의를 위한 진공차단기 모델 개발

이옥화*, 이주훈, 이진, 최종웅
LG신전 전력연구소

A Vacuum Circuit Breaker Model for simulation of Transient Overvoltages Using the PSCAD/EMTDC

Wook-Hwa Lee, J.H. Lee, Jin Lee, J.W. Choi
LG Industrial Systems Electrotechnology R&D CENTER

Abstract - A Vacuum Circuit Breaker Model for simulation of transient overvoltages was developed by using the PSCAD/EMTDC. The Model includes the power frequency chopping current, Breaker withstand voltage, and Quenching capability of High frequency currents. To verify the abilities of the breaker model, the simulation on the Lindmayer's single-phase circuit was carried out. The results show that using the proposed model, the transient overvoltages, current chopping, and multiple reignitions of vacuum breaker are properly reproduced as real phenomena. In further study, virtual chopping current will be incorporated into the model for 3 phase system.

1. 서론

진공차단기는 다른 차단기에 비해 우수한 전류 차단 능력과 절연복구 특성을 가지고 있고 저가격, 유지보수의 용이성 등으로 계통 적용에 많은 이점들이 있다. 하지만, 차단과정에서 고주파수 전류 재단이 생기며 이는 급준파 스위칭 과전압을 야기 시킨다. 차단 순간에 수많은 전류재단과 스위칭 과전압이 발생되는데 이를 재발호(reignition)라고 말한다. 진공차단기의 상세 모델링에서는 이러한 재발호가 포함되어야 한다. 일반적으로 재발호 과정을 주도하는 특성으로, 정격 주파수 전류 재단(Current chopping), 내압 특성(Breaker withstand voltage), 고주파수 전류 차단 특성 등이 있는데 발생되는 과정을 그림 1을 통하여 살펴보면 다음과 같다.

그림 1[1]은 진공차단기의 재발호 과정을 보이고 있다. 그림 A부분은 정격 주파수 전류 재단 과정이다. 정격 전류 재단 현상은 소전류 스위칭시 아크의 불안정성이 발생되어 전류영점 이전에 차단되는 현상이다. 일반적으로 CuCr 접점에서는 2~8A사이에서 차단된다[1]. 정격 전류 재단으로 접점 사이에는 과도 회복 전압(Transient Recovery Voltage:TRV)이 생성된다. TRV의 크기는 재단 전류의 크기와 차단기에 연결된 부하쪽의 인덕턴스, 커패시턴스, 저항 등 회로 특성에 직접적으로 관련이 있다. 그림 B는 접점사이의 갭이 매우 적은 경우에 TRV가 진공차단기의 내압 특성(그림 $U_z(t)$)보다 크게 되어 재점화가 발생된 경우이다. 재점화시 차단기를 통하여 기존 부하 전류 외에 수백kHz 수준의 고주파수 전류가 합쳐져 흐른다[1]. 진공차단기의 우수한 고주파수 전류 차단 특성으로 다음 전류 영점들 중 하나에서 고주파수 전류는 차단된다.(그림 C) 만약 TRV가 내압 특성보다 큰 경우 재점화가 발생되며 고주파수 전류가 계속 흐르게 된다. 이상의 재발호 과정이 반복되는 과정을 다중 재발호(Multiple reignition)이라 한다.(그림 D) 차단 시간이 경과함에 따라 접점 갭이 크지게 되며 결과적으로 접점의 절연 능력(dielectric strength)도 커지게 되어 높은 전압에서

재발호가 발생되는데 이러한 전압 증가 현상을 "Voltage escalation"이라 한다. 기존 논문들에서는 EMTTP를 이용한 진공차단기 다중 재발호 현상을 재현할 수 있는 모델이 보고되었다[1,2,3]. 그러나, EMTTP에 비하여 GUI가 우수하며 사용하기 매우 편리한 PSCAD/EMTDC를 통한 진공차단기 상세 모델링에 대한 발표는 없었다. 본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 재발호 과정이 포함된 진공차단기 상세 모델을 구성하였고 단상 회로를 통하여 그 모델의 타당함을 확인하였다.

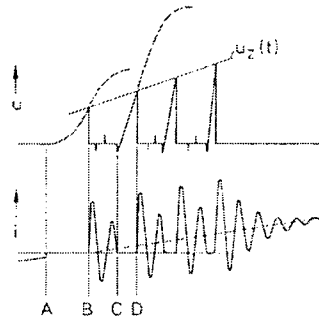


그림 1. 진공차단기의 아크 재발호 과정[1]

2. 진공차단기 모델링

진공차단기의 재발호 모의를 위한 모델링 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 진공차단기와 전력계통간 양방향 상호작용이 가능한 모델이다. 이 모델은 차단기 아크 상태를 가변 저항[2]으로 표현하여 계통으로부터 전압/전류를 측정하여 이를 근거로 아크 저항을 가변시키며 아크 전압/전류를 계통으로 되돌려 주는 모델이다. 두 번째는 접점 개방 후 계통의 전압/전류를 받아서 차단기의 차단 특성을 모의하는 단방향 모델이다. 첫 번째 모델이 바람직하나 본 논문의 중심이 차단기의 모든 차단과정 보다는 과도전압 특성 모의에 있기 때문에 더 간편하며 결과도 유사한 단방향 방법을 사용하였다. 본 논문에서 개발된 진공차단기 모델링은 다음의 주요 차단 특성들을 포함하고 있는데, 각각 살펴보면 다음과 같다.

- 정격 주파수 전류 재단
- 진공차단기 접점의 내압 특성
- 고주파수 전류 차단 능력

2.1 정격 주파수 전류 재단

그림 1의 A는 정격 주파수 전류 재단 현상을 보이고 있다. 차단시 아크전류가 작으면 음극에서 공급되는 급속증기 및 전자가 진공 중에서 확산되는 양보다 적어 접점사이 아크의 불안정이 발생되고 회로 고유의 특성에

의해 전류영점 이전에 전류가 차단되는 전류재단 현상이 발생된다. 즉, 전류영점이 아닌 임의의 전류값($i = I_0$)에서 차단되는 현상으로 차단전류(I_0)를 재단전류라 한다. 재단전류의 값은 차단기 접점 재질에 따라 다르며 매우 통계적인 특성을 보이고 있는데, 접점 재질이 cu-co로 구성된 대부분의 진공차단기의 경우에는 2~8A사이에서 정격 주파수 전류 재단이 발생한다[2]. 본 논문에서는 정격 주파수 전류 재단 현상을 모의하기 위해서 재단 전류값을 2A로 설정하였다. 즉, 트립신호 후 차단기 통과 전류가 2A 미만인 경우에 정격 주파수 전류 차단이 발생된다고 모델링하였다.

2.2 진공차단기 접점의 내압 특성

차단기 접점 내압 특성은 개방시 접점의 절연 강도를 나타낸다. 특히 내압 특성에 따라서 차단기의 재발호 특성이 결정되기 때문에 내압 특성에 대한 상세 모델링이 요구된다. 그림 1 A에서 첫 번째 전류 차단이 발생한 후 그림의 점선을 따라 TRV가 증가하기 시작하다가 내압 특성을 나타내는 절연 전압 $U_2(t)$ 보다 크지는 순간 재발호가 발생된다.(B점) 이상과 같은 내압 특성을 모델링하기 위해서 Lindmayer[1], Glinkowski[3] 등은 시험을 통하여 차단기 내압 특성 곡선을 발표하였다. 특히 Glinkowski는 시험을 통하여 얻어진 데이터를 통계적 과정을 거쳐 내압 특성을 나타내는 간결한 형태의 선형방정식으로 유도하였다. 내압 특성을 나타내는 전압(Breakdown Voltage: BV) 선형 방정식은 다음과 같다.

$$BV = A_A(TIME - TOPEN) + B_B \quad (1)$$

여기서

- A_A : 내압특성 곡선 기울기
- B_B : 내압특성 곡선 절점
- TIME : 시뮬레이션 실제 시간(EMTDC 변수)
- TOPEN : 차단기 실제 개방 시간

차단기 내압특성은 접점 개방 후 시간이 지남에 따라 커지게 되는데, A_A 는 증가율을 나타낸다. B_B 는 차단초기에 접점이 갖는 절연 특성을 나타낸다. 이 계수값들은 차단기마다 다르기 때문에 특정 차단기의 내압 특성을 나타내는 선형방정식 계수를 구하기 위해서는 특정 차단기에 수많은 시험을 수행함으로써 내압특성 곡선에 해당하는 기울기와 차단 초기 절연 특성을 얻어야 한다. 또 얻어진 데이터에 대한 통계적 처리가 요구되며 수많은 반복 시험이 요구되는 부분이다. Glinkowski는 시험을 통하여 상용 차단기 정격별로 근사적인 내압 특성 방정식을 제공하였다[3]. 본 논문에서는 참고문헌[3]의 데이터를 기준 삼아 반복 모의를 통해 특정 계수를 추출하여 내압 특성 곡선을 모델링하였다. 즉, 시뮬레이션 상에서 정격 재단 후 재발호를 위한 조건으로 TRV와 선형방정식 값을 비교하여 TRV가 큰 경우에 재발호를 수행하며 그렇지 못한 경우에 계속 차단기 개방을 유지시키는 절차를 따르도록 하였다. 추후 저자들이 속해 있는 LG산전의 고압 차단기의 내압 특성 곡선을 유도하여 이를 기반으로 한 모델링 작업을 수행할 예정이다.

2.3 고주파수 전류 차단 능력

그림 1에서 TRV가 내압 특성보다 크지면 재발호가 발생되는데(B점) 이후 고주파수(MHz)의 아크 전류가 도통된다. 그림 1처럼 진공차단기의 우수한 차단 능력으로 전류영점들 중 한 점(C점)에서 재차단이 이루어지며 그림 D이후에는 재발호 및 재차단 현상이 반복적으로 일어난다. 진공차단기 고주파수 전류 차단 능력(Quenching capability of High frequency currents)을 수치적으로 모델링하기 위해서는 앞절의 내압 특성의 모델링과 마찬가지로 반복적인 시험을 통하여 특정 진공차단기의 고주파수 전류 차단 능력에 대한

시험 데이터를 얻고 이를 통계적 과정을 거쳐 일정한 수식으로 유도하는 과정이 필요하다. Glinkowski는 이상의 과정을 수행하여 고주파수 전류 차단 능력에 해당하는 선형방정식을 유도했고 상용차단기 정격별로 선형식의 기울기 및 접점에 대한 데이터를 제공했다.[3] 본 논문에서는 Glinkowski의 선형방정식과 데이터를 기준으로 수치적 모델링을 수행했다. 즉, 재발호로 인해 차단기에 고주파수 전류가 인가된 후 전류 영점 근처에서의 고주파수 전류의 변화율(di/dt)의 절대치를 구하여 이를 진공차단기의 고주파수 차단 능력(DI/DT)값과 비교하여 초과하면 재차단이 발생되지 않고 지속적인 고주파수 전류가 흐르게 되며, 차단 능력값 이하이면 바로 재차단이 발생되는 절차로 구성되어 있다. 본 논문에서 사용된 Glinkowski의 선형방정식은 식(2)와 같고 계수는 참고문헌[3]의 저압쪽의 DI/DT 계수를 사용하였다.

$$DI/DT = C_C(TIME - TOPEN) + D_D \quad (2)$$

여기서,

- C_C : 고주파수 차단 능력 곡선 기울기
- D_D : 고주파수 차단 능력 곡선 절점
- TIME : 시뮬레이션 실제 시간(EMTDC 변수)
- TOPEN : 차단기 실제 개방 시간

3. EMTDC를 이용한 진공차단기 모델 구현

그림 2은 PSCAD/EMTDC를 이용하여 진공차단기를 구현한 것을 보이고 있다. 먼저, 진공차단기의 스위칭 동작을 위해서는 EMTDC의 이상 스위치 모델을 사용하였다. 페로시 저항이 0.00001Ω 값을 가지고 개방시는 무한대($10^9 \Omega$) 값을 가진다. 이 스위치는 단지 개폐만을 담당하게 된다. 실제적으로 진공차단기의 재발호 과정을 제어하는 부분은 EMTDC의 Custom Component로 구현하였다. 계통로부터 차단기 양단의 전압(U_S, U_L) 및 차단기 통과 전류(I_S) 값을 받아서 2절에서 서술된 진공차단기의 정격 주파수 전류 재단, TRV, 전류영점 근처에서의 고주파수 전류 변화율(di/dt) 등을 계산하고 이를 각각 진공차단기 내압특성 곡선 및 고주파수 차단 능력(DI/DT)과 비교하여 진공차단기의 재발호 과정을 모의한다. 실제 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션이 시작되는 과정을 살펴보면 다음과 같다. 회로 특성이 정상상태에 오히려, 차단기 트립 신호가 인가되면 즉시 정격 주파수 재단 신호가 발생되며 그 이후 TRV와 차단기 내압특성 곡선의 비교 과정, 고주파수 전류의 변화를 및 DI/DT 등의 비교 과정을 통하여 재발호 과정을 모의한다. 다음 그림에서 U_S :전원측 전압, U_L :부하측 전압, I_S : 차단기 통과 전류를 나타낸다.

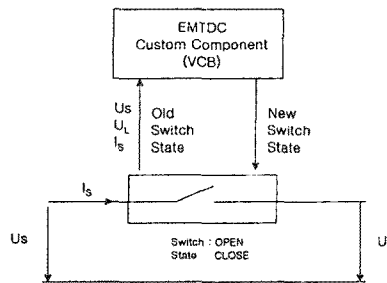


그림 2. EMTDC를 이용한 진공차단기 모델 구현

4. 사례 연구

4.1 모의 회로도

본 사례연구에서는 개발된 진공차단기 모델이 적절한 재발호 과정을 생성하는지를 확인하기 위해서 진공차단기 아크 모의시험에 많이 사용되는 단상 회로도[1]를

사용하였다. 회로 파라미터는 다음 그림 3과 같다. 회로에서 U는 전원 전압을 나타내며, L_N , C_N 는 시스템 인덕턴스와 커패시턴스를 각각 나타내며, R_K , L_K 는 차단기에 연결된 케이블 정수를 나타낸다. R_L , L_L , C_L 는 부하를 나타낸다. 그리고 R_S 는 차단기 갭 사이의 감쇄 저항을 나타내며 C_S 는 갭 사이의 커패시턴스를 나타낸다.

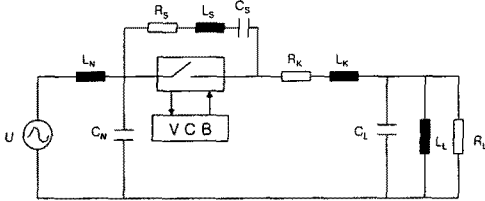


그림 3. 모의 회로도

여기서,

U:5.134kV, L_N :5mH, C_N :0.1 μ F
 R_S :50 Ω , L_S :50nH, C_S :200pF
 R_K :2 Ω , L_K :40 μ H
 R_L :10k Ω , L_L :120mH, C_L :10nF

4.2 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과

사례 회로도 및 진공차단기 모델을 PSCAD/EMTDC로 구현하면 그림 4와 같다. 전원은 이상 전압원($R=0$)을 사용하였다. 기 서술된 것처럼 EMTDC 스위치를 사용하여 차단기 개폐상태를 표현하였고 실제적인 진공차단기의 복잡한 개폐 과정은 VCB 제어기라고 명명된 EMTDC Custom 컴포넌트에 의해 제어된다. 제어 컴포넌트의 입력 신호로는 차단기 통과전류(IA), 차단기 양단의 전원측 전압(E_a) 및 부하측 전압(E_b), 트립 신호(TRIP)이다. 여기서, 전압 및 전류의 취득은 EMTDC METER를 사용하였고 차단기 트립 신호는 사용자가 수동작(CPanel)으로 임의의 시점에서 직접 트립시킨다.

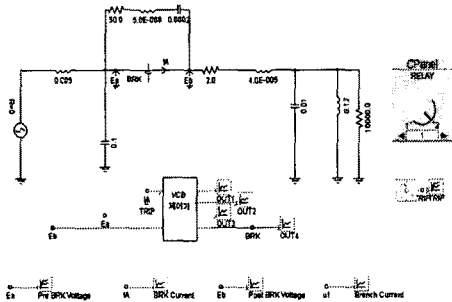


그림 4. PSCAD/EMTDC로 구현된 진공차단기 모델

사용된 시뮬레이션 조건은 극미소 시간(μ sec)에서의 진공차단기의 과도현상을 보기 위해서 EMTDC의 시뮬레이션 타임스텝 및 출력시간을 각각 1 μ sec로 하였고, 전체 모의 시간은 0.3초로 하였다. 부하 전압이 정상상태(5kV, rms)에 도달 후 트립 신호를 주면(트립 시간:0.16초) VCB 제어기 컴포넌트는 차단기 통과 전류를 모니터링 하다가 2A이하가 되는 순간에 정격 주파수 전류 재단을 발생시킨다. 그림 5의 BRK current에서 0.1623초에 정격 주파수(60Hz) 전류 재단이 발생됨을 볼 수 있다. 또한 그림 5의 BV & TRV를 통해서 -OUT1는 TRV, OUT2는 내압 특성 곡선을 나타냄-TRV와 진공차단기 내압 특성 곡선을 비교하면서 재발

호 여부를 판단하는 과정을 확인할 수 있다. 즉 TRV가 BV보다 크지는 순간 재발호가 발생함을 알 수 있고 동일 시점에서 그림 5의 BRK current의 고주파수 전류가 흐름을 확인할 수 있다. 그러나 진공차단기의 고주파수 전류 차단 능력이 우수하여 다음 전류영점에서 재차단 시기를 볼 수 있다. 이후 TRV가 다시 회복되어 BV 곡선까지 성장하며 곡선을 상회하는 순간 재발호된다. 이러한 재발호 및 재차단이 반복되는 다중 재발호 과정이 0.1622초~0.1630초까지 지속함을 모의를 통하여 확인하였다. 끝으로, 그림 5는 0.1630초 후에 TRV가 BV곡선보다 낮은 값을 갖게 됨으로 재발호 과정은 끝이 나며 전류는 완전히 차단되었음을 보이고 있다. 이상의 모의 과정을 통하여 본 논문에서 개발된 PSCAD/EMTDC용 진공차단기 모델이 진공차단기의 복잡한 다중 재발호 과정을 적절하게 구현할 수 있음을 확인하였다.

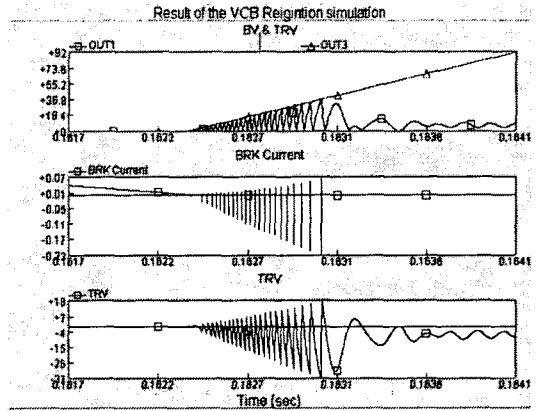


그림 5. PSCAD/EMTDC를 이용한 진공차단기의 다중 재발호 과정 모의

5. 결론

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 과도전압 모의를 위한 진공차단기 상세 모델을 구현하였다. 개발된 진공차단기의 모델은 점점 개방시 재발호 조건에 중요한 영향을 미치는 정격 주파수 전류 재단, 진공차단기 점점의 내압 특성, 고주파수 전류 차단 특성 등을 EMTDC Custom component를 이용하여 구현하였다. 개발된 EMTDC 모델을, 진공차단기 모델링 검증단계에서 많이 사용되는 Lindmayer 교수[1]의 단상 회로시스템에 적용하여 진공차단기의 재발호 및 다중 재발호 현상이 적절하게 발생됨을 확인하였다. 추후 3상 시스템의 3상 동시 전류 차단(virtual chopping current) 기능을 포함한 진공차단기 모델을 구성할 예정이다.

[참고 문헌]

- [1] Helmer, M.Lindmayer, "Mathematical Modeling of the High Frequency Behavior of Vacuum Interrupters and Comparison with Measured Transients in Power Systems", XVIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum-Berkely-1996
- [2]Janko Kosmac, et al, "A statistical Vacuum circuit model for simulation of transient overvoltages", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No.1, Jan., 1995.
- [3]Glinkowski, et al., "Voltage Escalation and Reignition Behavior of Vacuum Generator Circuit Breakers during load shedding", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.12, No. 1, Jan., 1997