부하에 따른 차단기 극간의 과도회복전압 분석 및 제어기법

박성태, 김현수, 이상봉, 김철환
성균관대학교

A Study for Analysis of Transient Recovery Voltage and Control method of Circuit Breaker According to the Load condition

Sung-Tae Park, Hyoun-Su Kim, Sang-Bong Rhee, Chul-Hwan Kim
SungKyunKwan University

Abstract - 본 논문에서는 계통 부하에 따른 차단기의 최적 개폐시점 선정을 위해 지상 및 진상 부하별 과도회복전압 발생 추이를 분석하였다. 또한 모선 전압의 위상 변화에 따라 차단기의 개극 시점 변화를 통해 발생되는 과도 회복전압의 파형을 분석하여 최적의 개폐 시점 추정을 EMTP(Electro-Magnetic Transients Program) 시뮬레이션 결과로 얻고 부하에 따른 차단기 개폐 제어 방법에 대해 분석하였다.

1. 서 론

산업의 급속한 발달에 따라 현 사회는 양질의 전력을 요구하고 있으며 이러한 양질의 전력을 공급하기 위한 조건중의 하나로 적정 전압을 유지하기 위해 계통내 변전소에서는 전압 조정 및 계통의 조류 조정을 담당하고 있다. 이러한 목적의 변전설비로는 분로 리액터(Shunt Reactor) 및 전력용 콘덴서(Static Condenser)와 같은 조상설비가 있으며 이러한 조상설비는 전압 조정을 위하여 무효전력을 발생시키기도 하고 무효전력을 흡수하기도 한다.

최근 초고압 계통의 확립으로 전력공급의 신뢰도가 향상되고 유지보수 및 경제적인 측면에서 회전기기보다 정지기기가 주로 사용되고 있으며 이러한 정지기기는 개폐 과정에서 발생하는 과도현상 즉 투입시의 돌입전류(Inrush Current)에 의한 기계적 스트레스와 영상전류에 의한 주변 계전기의 오동작, 그리고 개방시 재단전류(Chopping Current)에 의한 재점호(Reignition)현상 등은 전력계통 운용에 영향을 주는 대표적인 장애요인 중에 하나이며 이러한 원인으로 인해 발생하는 계통의 고장은 연계된 기타 기기에 파급되어 전력공급의 신뢰도를 저하하고 장시간 운전 정지로 이어져 경제적으로도 막대한 지장을 초래하고 있다[1, 2].

본 논문에서는 정기기기인 분로 리액터(Shunt Reactor) 및 전력용 콘덴서(Static Condenser)와 같은 지상 및 진상 부하의 개폐 과정 모의를 통해 차단기 극간의 과도회복전압을 분석하고 최적의 개폐시점 선정을 위해 모선 전압을 기준으로 그 위상의 변화에 따라 차단기의 개극 시점을 변화시켜 발생하는 과도회복전압을 EMTP(Electro-Magnetic Transients Program)를 이용해 분석하고 부하에 따른 차단기 개폐 제어에 대한 방법을 제안하였다.

2. 차단기 동작 특성

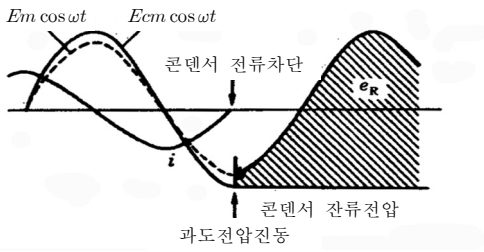
2.1 차단기의 소호 원리

고장 발생시 계전기 동작에 의해 차단기가 개극되면 차단기 양 전극간에 아크 상태로 전류가 흐르고 양 전극간의 절연내력이 전원측 전압보다 높아지면 다음의 전류 자연 영점에서 아크는 소호되며 전극간에 전원전압이 나타나고 이를 회복전압(Transient Recovery Voltage : TRV) 이라고 한다. 회복전압으로 안정화되기 전에 회로의 조건에 의해 고유진동을 갖는 이상전압이 발생하고 점차 감소되어 전원전압과 같은 회복전압으로 되는 과정의 전압을 과도회복전압이라고 하며 차단기 양 전극간의 절연내력이 이 과도회복전압보다 높지 않으면 차단 실패로 이어져 고장은 진전될 수 있다.

이러한 전극간의 절연내력은 차단기의 소호매질에 따라 상이하지만 부하의 조건 및 회로의 역율에 따라 차단기 양극간에 발생하는 과도회복전압의 상이함이 차단 성공과 실패를 결정하는 주요한 요인이 된다.

2.2 진상전류의 차단

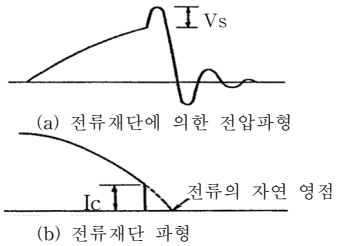
진상전류의 단자 전압은 전류보다 90° 뒤져있기 때문에 차단기 개극 순간 양 단자에는 그림 1과 같은 최대값으로 잔류전압이 남아 있게 된다. 여기서 $E_{cm}\cos\omega t$ 는 콘덴서의 잔류전압, $E_m\cos\omega t$ 는 콘덴서 개방상태에서의 전원측 전압이며 e_R은 회복전압을 나타낸다. 개극후 차단기 극간에 나타나는 회복전압은 부하의 잔류전압과 전원전압과의 차로 주어지기 때문에 개극 순간의 차단기 극간 전압은 상대적으로 작지만 차단 후 1/2사이클이 경과하면 전원전압의 약 2배로 높은 값이 나타나게 되며 극간의 전압은 회로의 인덕턴스에 의해 전원 전압값과의 차를 진폭으로 하는 과도전압 진동을 일으킨다[4].



<그림 1> 진상전류 개극시 회복전압

2.3 지상전류의 차단

지상전류 개폐시 진공차단기와 같이 소호력이 강한 차단기로 개방할 경우 전류의 자연 영점에서 차단되지 않고 강제로 전류 영점을 만들어 차단하게 된다. 이를 전류 재단(Current Chopping)현상이라고 하며 이로 인해 높은 서지가 발생하게 되며 그 원리는 그림 2와 같다. 여기서 V_S 는 개폐과전압, I_C 는 재단 전류값을 나타내며 개폐과전압은 식 (1)과 같이 간략화하여 표현할 수 있다.



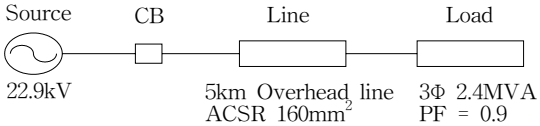
<그림 2> 지상전류 재단에 의한 서지 전압

$$V_S = k\, I_C\, Z_S \tag{1}$$

여기서 k는 감쇄계수, Z_S 는 서지 임피던스를 나타낸다.

3. 부하에 따른 차단기 극간의 과도회복전압 모의

부하 개폐시 발생하는 과도회복전압에 영향을 미치는 요소로는 회로의 저항, 차단기의 개폐 특성, 전원 및 부하의 종류 등이 있다. 저항의 크기가 0인 경우 부하의 인덕터 및 커패시터 사이에 에너지가 충·방전되어 하나의 에너지 소비원으로 작용하여 영구적인 진동을 일으킬 수 있으며 차단기의 소호 특성에 따라 전류 재단(Current Chopping)현상이 상이하므로 재단 전류가 큰 것은 높은 파고치의 서지 전압을 발생한다.



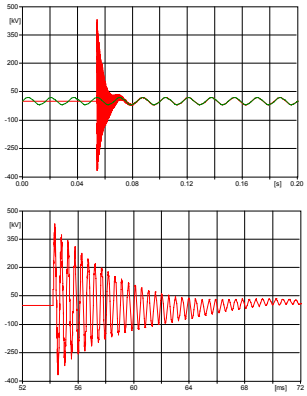
<그림 3> 부하 모의 회로 단선도

본 논문에서는 전원전압의 위상을 기준으로 0°, 45°, 90° 에서 각각 차단기를 개극 시키고 지상 및 진상전류에 따른 과도회복전압을 EMTP로 모의하였다. 모의에 사용된 계통은 그림 3과 같다.

3.1 사례연구 결과

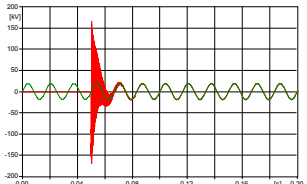
3.1.1 지상부하 개폐

지상부하 개폐를 위해 그림 3의 부하를 지상전류가 흐르도록 구성하고 모의시험 하였다. 그림 4의 상단에서 전원 전압 기준 90도 경우의 차단기 극간 전압 파형이 최고 304kV까지 TRV가 상승함을 확인하였다.



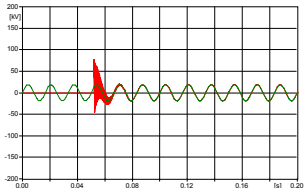
u_c : 304kV
t_3 : 118μs
RRRV : 2.58
(u_c /t_3)

<그림 4> 지상부하, 전압 90° 에서 개극



u_c : -120kV
t_3 : 119μs
RRRV : 1.01
(u_c /t_3)

<그림 5> 지상부하, 전압 0° 에서 개극

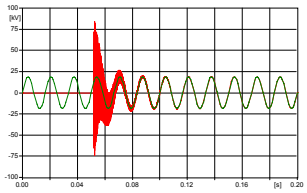


u_c : 52.7kV
t_3 : 119μs
RRRV : 0.44
(u_c /t_3)

<그림 6> 지상부하, 전압 45° 에서 개극

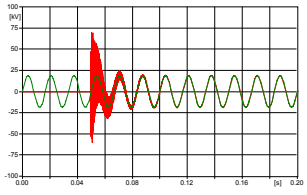
3.1.2 진상부하 개폐

진상전류 차단에 있어서는 45도에서 최대의 TRV를 확인할 수 있었으며 TRV의 값이 지상부하시의 차단보다는 수준이 낮음을 확인하였다.



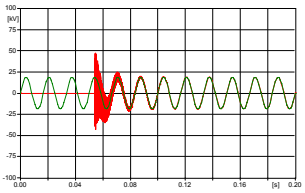
u_c : 40.4kV
t_3 : 33μs
RRRV : 1.22
(u_c /t_3)

<그림 7> 진상부하, 전압 45° 에서 개극



u_c : 33.4kV
t_3 : 35μs
RRRV : 0.95
(u_c /t_3)

<그림 8> 진상부하, 전압 0° 에서 개극



u_c : 23.1kV
t_3 : 34μs
RRRV : 0.68
(u_c /t_3)

<그림 9> 진상부하, 전압 90° 에서 개극

3.2 부하에 따른 차단기 극간의 과도회복전압 분석

일반적으로 차단기 극간에 인가되는 과도회복전압은 파고치전압(u_c), 파고치전압까지 도달하는 시간(t_3) 그리고 기울기(RRRV, Rate of Rise of Recovery Voltage)로 나타내고 동일한 부하조건 또는 차단전류이면 기울기에 따라 차단 성공 또는 실패여부가 결정된다[3].

시뮬레이션을 통해 얻은 결과와 같이 부하 및 전원전압의 위상에 따라 차단기 극간에 발생하는 과도 회복전압은 상이함을 함인할 수 있다. 부하에 따른 차단기 극간의 과도회복전압의 차이는 표 1과 같다.

<표 1> 부하에 따른 차단기 극간의 과도회복전압 차이

부하의 종류	지상부하			진상부하		
개극시 전원위상	0°	45°	90°	0°	45°	90°
uc[kV]	-120	52.7	304	33.4	40.4	23.1
t3[μs]	119	118	118	35	33	34
RRRV	1.01	0.44	2.58	0.95	1.22	0.68

시뮬레이션 결과와 같이 개극시 전원 전압의 위상에 따라 최대 6배 이상의 과도회복전압 차이를 보이며 진상부하보다는 지상부하가 더 높은 과전압을 발생함을 확인할 수 있다.

지상부하의 경우 전원전압이 45°일 때, 진상부하의 경우 전원전압이 90°일 때 차단하는 것이 가장 안정적인 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 계통의 부하에 따른 차단기의 최적 개폐시점 선정을 위해 지상 및 진상 부하별 과도회복전압 발생 추이를 분석하였다. 또한 모선 전압의 위상 변화에 따라 차단기의 개극 시점 변화를 통해 발생되는 과도 회복전압의 파형을 EMTP로 분석하여 최적의 개폐 시점을 시뮬레이션 결과로 얻고 부하에 따른 차단기 개폐 제어 방법에 대해 확인할 수 있었다.

향후 분로 리액터(Shunt Reactor) 및 전력용 콘덴서(Static Condenser)와 같은 지상 및 진상 부하용 차단기의 개극시 개극거리, 개극 속도와 같은 동작특성을 고려하여 전원전압의 위상에 따라 차단기를 투입 및 개방하는 연구의 수행이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 지식경제부의 출연금으로 수행한 특성화대학원사업의 연구결과입니다.

[참 고 문 헌]

[1] 이우영, 박경엽, 정진교, 김희진, “비접지 분로 콘덴서 뱅크의 투입제어방식에 대한 시뮬레이션 검증”, 대한전기학회논문지, 제52권, 9호, pp.448-453, 2003.

[2] 이우영, 박경엽, 정진교, 김희진, “분로 리액터용 개폐제어 차단기의 최적 개폐시점 선정”, 대한전기학회논문지, 제51권, 12호, pp664-669, 2002.

[3] IEC 62271-100 2005, Part 100 : High voltage alternating-current circuit breakers.

[4] Edgar Dullni, “Switching of capacitive current and the correlation of restrike and pre-ignition behavior”, IEEE Transactions, Vol.13, No. 1, February 2006.