

## HVDC 변환설비 고장원인 분석시 PSCAD/EMTDC 활용방안 검토

고민중, 이병훈, 박문규, 황경석  
한전KPS

### A Study of the application plan of use the PSCAD/EMTDC for HVDC trouble analysis

M. j Ko, B.H Lee, M.K Park, K.S Hwang  
KPS

**Abstract** - 제주-해남간 HVDC 변환설비는 제주 전력수요의 40%를 담당하는 주요 설비로, 국내에서는 처음으로 도입되어 상용 운전중인 직류송전 설비이다. 그동안 여러 차례의 크고 작은 고장이 발생하였으며, 이 중에는 원인을 정확히 알 수 없었던 고장도 있었고, 변환설비 주요기에 고장 과급 영향을 미칠만한 큰 고장도 있었으나, 정확한 분석이 어려웠던 사례도 있었다. 본 논문은 PSCAD/EMTDC 프로그램을 도입하여 변환설비 고장원인 분석에 활용하는 방안에 대하여 고찰하였다.

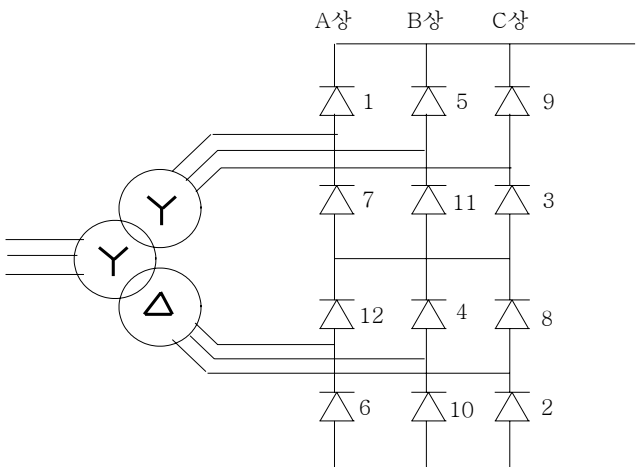
#### 1. 서 론

PSCAD/EMTDC 프로그램은 전력계통이나 HVDC 설비에 대한 시뮬레이션을 할 수 있는 프로그램으로 각종 AC 전력계통이나, HVDC 변환설비 고장발생시 발생 원인별로 시뮬레이션을 실시하여 이때 전압, 전류의 이상 유무, 고장과급 영향과 고장원인을 파악하는데도 사용되고 있다. 현재 캐나다의 Dorsey 변환소에서 이 프로그램을 고장원인 분석에 활용하고 있다. 제주-해남간 변환설비의 주요고장 사례 파형을 캐나다 Dorsey 변환소의 시뮬레이션 파형과 비교하여 서로 유사한 파형이 나타나는가를 확인하고 이를 제주 변환소 고장 분석에 활용할 수 있는 방안을 검토하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 12밸브중 1밸브 미점호 사례

제주변환소는 12펄스 점호방식을 사용하고 있으며, 이에 따라 한 Pole 당 12밸브로 구성된다. 구성은 다음의 <그림 1>과 같다. 여기서 밸브 1, 3, 5, 7, 9, 11은 Y-Y 그룹을 담당하고, 밸브 2,4,6,8,10,12는 Y-Δ 그룹을 담당하며, 두 밸브 그룹의 출력의 합으로 직류 전압 180kV를 생성한다. 12밸브를 사용하기 때문에 6밸브만 사용하는 것 과 비교하여 좀 더 직류 파형에 가까운 파형을 얻을 수 있다.

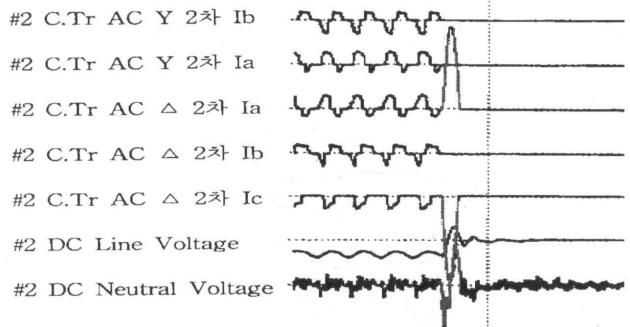


<그림 1> 제주변환소 #2 Pole Thyristor Valve 구성

2003년 1월 28일 Y-Δ그룹의 8번 밸브 점호를 담당하는 부품중 점호 신호 전달을 위한 광신호 전송카드에 문제가 발생하여 지속적인 점호 실패가 발생하였고 이에 따라 변환설비가 Trip된 사례가 있었다. 이때 파형은 <그림 2> 와 같다.

<그림 2> 파형은 제주변환소 Fault Recorder 출력파형으로 여기서, #2 CTr 2차 전류 파형을 보면 8번 밸브가 담당해야하는 C상 전류의 “+”

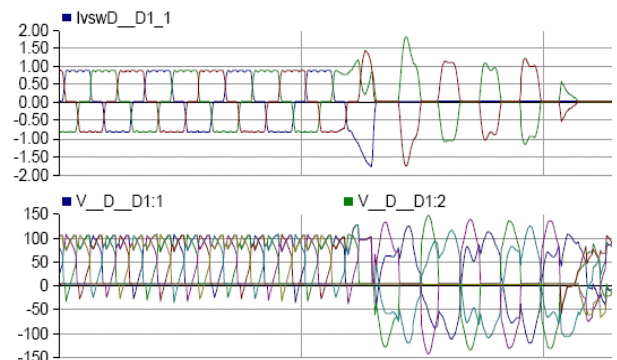
부분의 파형이 나타나지 않는것을 확인할 수 있다. 이것은 해당 밸브가 점호되지 않았기 때문에 발생한 파형이다. DC 전압 파형을 보면 파형이 일정하게 180kV를 유지하지 못하고, 불평형하게 나타나고 있으며 불평형 파형의 주기를 확인해 보았을 때 60Hz 성분이 지속적으로 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. 이때 중전선의 전압파형도 비정상적인 파형이 나타나고 있는 것을 확인 할 수 있다. CTr 2차 측의 나머지 상의 전류 파형도 한상이 정상적으로 도통되지 않는 상황에서 전류 파형이 왜곡되는 것을 확인 할 수 있다. 이후 Commutation Fail 에 의하여 매우 큰 5PU 이상의 큰 단락 전류가 발생하는것도 확인 할 수 있다. 이에 따라 DC>AC 계전기가 동작하여 #2 Pole 설비가 Trip 되었다.



<그림 2> 8번 Valve 점호 상실시 고장 파형

##### 2.1.1 Dorsey 변환소 1밸브 미점호 Simulation 파형

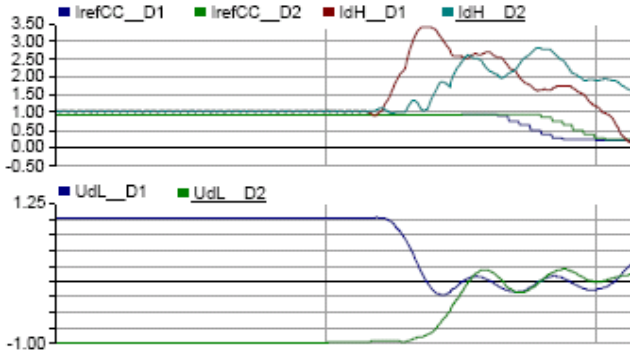
현재 Dorsey 변환소의 12밸브중 1밸브의 점호신호를 임의로 상실시킨 경우를 모델링한 파형을 보면 <그림 3>과 같다.



<그림 3> 1밸브 미점호시 시뮬레이션 파형

위 파형에서 보면 IvsW는 인버터 측의 전류 파형이고, V\_D\_D 파형은 인버터 측의 각 밸브에 걸리는 전압파형이다. 우선 전류 파형을 보면 임의로 점호신호를 상실시킨 1번 밸브가 담당하는 A상의 전류파형이 “+”부분과 “-” 부분 파형 모두 나타나지 않는것을 볼 수 있다. 이것은 <그림 2>의 제주측 Fault Recorder 파형과는 조금 다른 결과로, 이는 Dorsey 변환소는 제주 변환소에 비하여 용량이 10배 이상으로 크기 때문에 제주변환소와 구조가 서로 다르고, 이에 따라 서로 특성이 다른 제어 시스템을 모델링한 결과이기 때문이라고 추정된다. 하지만, 점호가 실패하였을 경우 전류 파형이 나타나지 않고, 정상적인 점호를 수

행하고 있는 다른 상의 파형도 영향을 받아 비정상적으로 나타나는 것은 확인 할 수 있었다. 한편 제주변환소에서는 현재 실측하지 못하고 있는 각 Valve의 양단 전압 파형을 모델링 할 수 있었는데, 향후 제주 변환소를 정확히 모델링하고 시뮬레이션을 할 경우 이를 고장 원인 분석에 활용할 수 있을 것으로 보인다.

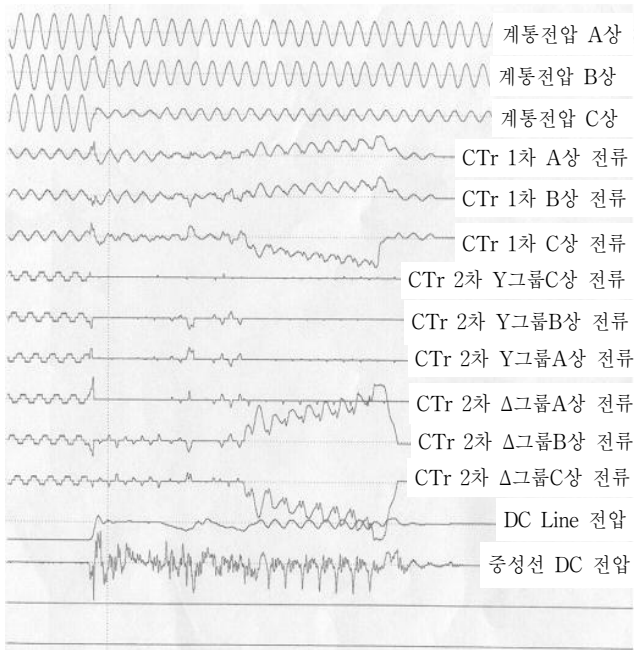


<그림 4> 인버터측 DC 전압, 전류 시뮬레이션 파형

<그림 4>는 Dorsey 변환소의 DC 전류, 전압의 시뮬레이션 파형으로 IdH 는 인버터측 전류 파형이고, UdL\_D 는 인버터측 전압파형이다. DC 전압, 전류 시뮬레이션 파형을 보면 인버터측 DC 전류가 3.5 PU 까지 크게 증가하고 DC 전압은 0V 까지 감소하였다. 두 파형은 제주측 고장 파형과 유사한 결과가 나타남을 확인할 수 있다. 다만 제주변환소 Fault Recorder 파형과는 다르게 DC 전압에 60Hz 성분이 나타나지 않고 바로 전압이 크게 감소하게 나타났다. 이 차이는 제주 변환소와 Dorsey 변환소의 제어 특성이 서로 다르기 때문에 모델링 결과가 실제 파형과 다르게 나타난 것으로 보이는데, 제주는 한 밸브가 미접촉된 상태에서 Trip 될 때 까지 수분간 운전을 계속하였고, Dorsey 변환소의 경우 미 접촉 상황이 발생하자마자 설비가 Trip 되었기 때문에 상황이 다소 차이가 있는 것으로 보인다.

## 2.2 AC 계통 사고 파급에 의한 변환설비 영향

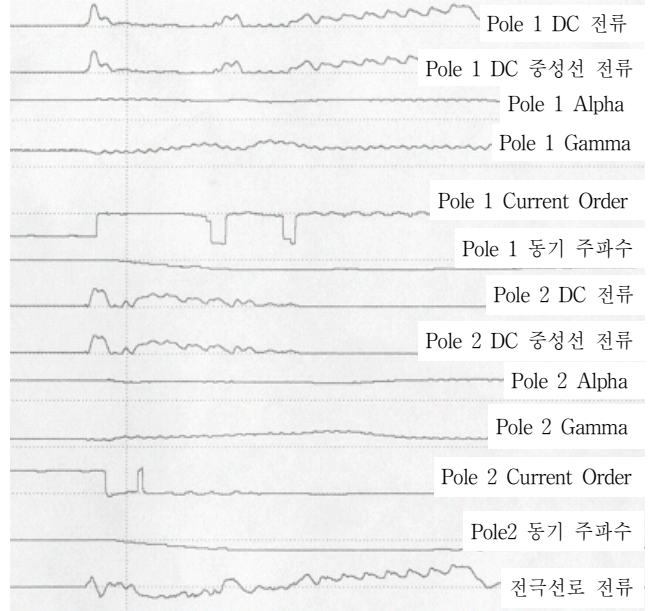
변환소 인근의 AC 계통에 지락 사고가 발생할 경우 AC 전압이 강하게 되고 이는 특히 인버터 측인 제주변환소에 Commutation Fail 을 발생시키게 되고, 고장이 지속될 경우에는 변환설비가 Trip 되는 상황이 발생하기도 한다.



<그림 5> 계통사고 파급에 따른 전류 파형 변화

<그림 5>는 제주 변환소가 연결되어 있는 154kV 계통의 C상 지락사고 파급으로 인하여 제주 변환소가 Trip 되었던 사례의 Fault Recorder 파형이다. <그림 5>에 보면 AC 계통의 C상에 지락이 발생하면서 C상

전압이 크게 감소하였다. HVDC 설비에서 위와 같은 지락사고로 인하여 AC 계통 전압이 감소하게 되면 현재 도통중인 밸브를 Commutation 시켜주기 위한 역전압을 충분히 인가할 수 없게 되어 도통중인 밸브가 계속하여 도통하게 되는 Commutation Fail이 발생하게 된다. Commutation Fail 발생하게 되면 밸브 그룹 안에서 단락회로가 형성되면서 매우 큰 단락전류가 흐르게 되어 DC 전류는 크게 증가한다. 한편 이 단락현상으로 인하여 DC 전압은 0V 까지 감소하게 된다. <그림 5>의 Fault Recorder 파형에서도 DC 전류는 증가하고, DC 전압은 0V 까지 감소하는 현상을 확인할 수 있다.

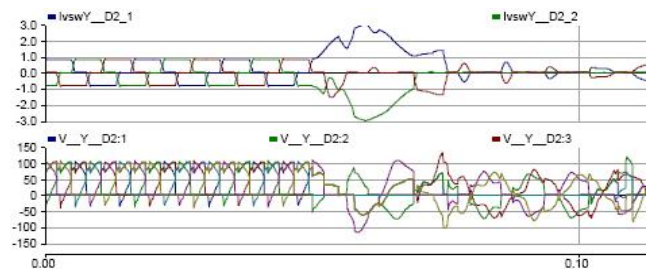


<그림 6> 계통 사고 파급시 DC 전류 및 제어각 변화

<그림 6>은 계통 파급 사고 당시의 각 Pole 당 DC 전류의 변화와 점화각등 제어신호의 변화이다. 처음에는 154kV AC 계통 전압 감소로 인한 Commutation Fail로 인해 발생한 밸브 그룹 내부의 단락 현상으로 DC 전류가 크게 증가한다. 이후 DC 전류를 감소시키기 위하여 제어기에서 DC Current Order를 감소시키는 동작을 하게 되고, 이에 따라 Alpha 각이 감소하게 된다. 이후 Commutation Fail에서 회복하기 위하여 Gamma 각 증가하는 방향으로 제어기가 동작되는 확인할 수 있다. 동기 주파수가 감소한 것은 DC Current Order를 감소시켰기 때문에 제주변환소의 출력이 떨어지게 되고 이에 따라 제주 계통 전체적으로 전력이 부족하게 되면서 주파수가 떨어지게 된 것이다. 한편 변환 설비 내부 고장이 아니라 외부 계통으로부터의 파급이기 때문에 #1 Pole 과 #2 Pole 이 서로 비슷하게 Current Order를 감소시키고, Alpha각을 감소시키고, Gamma 각을 증가시키는 제어기 동작과 고장 파형을 보이는 것도 확인할 수 있다. 만약 내부 고장으로 어느 한 Pole만 고장이 발생할 경우에는 #1 Pole 과 #2 Pole 은 서로 다른 제어기 동작과 고장 파형이 나타나게 된다. 전극선로 전류가 증가한 것은 #1 Pole 과 #2 Pole 이 서로 완벽하게 똑같이 제어기가 동작하지는 않기 때문에 두 Pole 사이에 전위차가 생기고, 이에 따라 전극선로 전류는 증가하게 되는 것이다.

### 2.2.1 계통파급에 따른 시뮬레이션 파형

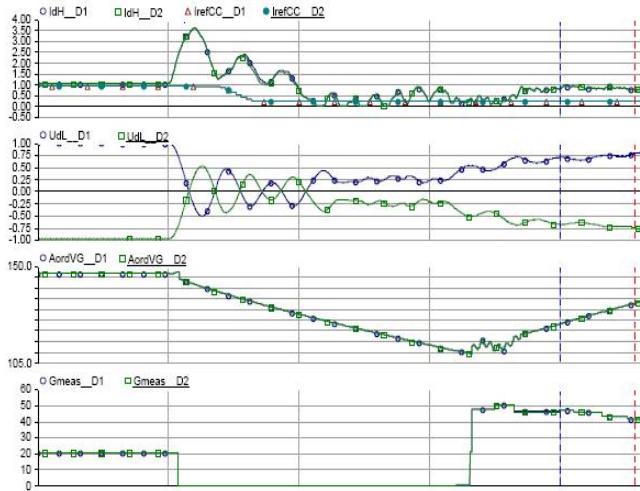
Dorsey 변환소 근방의 AC 계통의 한상이 지락된 경우의 DC 전류, 전압의 Simulation 결과는 <그림 7>과 같다.



<그림 7> 1상 지락 사고 파급시 밸브당 전류, 전압 시뮬레이션 파형

이 시뮬레이션 파형에서 IswY 는 인버터측 DC 전류이고, V\_Y\_D2

는 인버터측 밸브 양단에 인가되는 전압이다. 위 시뮬레이션 과정에서도 Commutation Fail 이 발생하여 밸브 그룹내부의 단락현상으로 인하여 비정상적인 매우 큰 전류 파형이 나타나고, 각 밸브의 전압 파형도 Commutation Fail로 인하여 비정상적으로 나타나는 것을 확인 할 수 있다.



**<그림 8> 1상 지락사고 파급시 DC 전압, 전류, Alpha, Gamma변화**

<그림 8>은 1상 지락 사고 파급시 DC 전압과 전류, Alpha각과 Gamma 각이 변화를 Simulation 한 것으로 IdH 는 인버터측 DC 전류, UdL 은 인버터측 DC 전압, AordVG\_D 는 인버터측 Alpha Order, Gmeas\_D는 인버터측 Gamma 각이다. 위 시뮬레이션 파형도 제주변환소 Fault Recorder 파형과 비슷한 결과가 나타난다. DC 전류는 Commutation Fail로 인한 단락 현상으로 크게 증가하고, 이때 DC 전압은 0V 이하로 감소한다. 이에 따라 제어기에서는 Alpha Order를 감소시켜서 Alpha각을 서서히 감소시키다가 이후 지속적인 Commutation Fail을 방지하기 위해 운전모드를 Gamma Control 모드로 전환하여 Gamma각을 크게 증가시키는 것을 확인 할 수 있다. 또한 이 파형은 제주 변환소 DTR에 나타난 실측 파형과 비슷한 결과를 보인다.

### 3. 결 론

캐나다 Dorsey 변환소를 모델링한 시뮬레이션 결과와 제주변환소 고장시 Fault Recorder 파형이 유사함을 확인 할 수 있었으며, 일부는 제주 변환소와 결과가 서로 다르게 나타나기도 하였다. 향후 제주 계통과 제주 변환소의 제어기를 좀 더 정확하게 모델링을 할 수 있다면 현재 시행하고 있는 Fault Recorder 파형 분석과 함께 시뮬레이션을 사용하여 변환설비 고장 원인 분석과 고장방지 대책에 많은 도움이 될 것이라 생각된다.