

해남-제주 HVDC 계통의 정상상태 및 지락 고장시 제어특성

곽주식, 우정호, 심용보
한국전력공사 전력연구원

The Control Characteristics of Haenam-Cheju HVDC system at Ground Fault and Steady State

J.S. Kwak, J.W. Woo, E.B. Shim
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - In Haenam-Cheju HVDC link several modes of operations and controls are provided, which are constant frequency control, constant power control and constant current control. This paper describes basic control action of converters under three control modes and shows EMTDC simulation results at ground fault and steady state respectively.

1. 서 론

내륙과 제주 계통을 해저 케이블로 연결하는 직류송전 시스템은 정주파수, 정전력, 정전류의 세 가지 제어 모드로 운전될 수 있으며 현재는 제주 부하의 50%에 해당하는 전력을 주파수 모드로 송전하고 있다. 전송되는 직류전력의 조절은 전력변환기의 제어 동작에 기초하여 이루어지며 연계되어 있는 교류계통 조건에 의해 동특성이 제한된다.

본 논문에서는 해남-제주 계통에 적용된 기본적인 전압-전류 제어 특성을 살펴보고 각 운전모드별 정상 및 지락고장시의 과도 특성을 EMTDC 시뮬레이션을 통하여 해석하였다.

2. 본 론

2.1. 직류 송전전력의 제어

해남-제주 직류송전선은 1회선당 DC 180 kV 150 MW, 2회선 ±180 kV 300 MW의 정격용량으로 설계되었다. 최대 300 MW 까지의 전력전송이 양방향으로 가능하며 1회선 고장을 고려하면 150 MW의 전력 전송이 가능하다.

HVDC 설비의 운전은 제주 변환소에서 해남을 동시에 자동으로 제어하며 기동/정지, 운전 및 제어모드 설정이 이루어진다. 직류전압과 직류전류의 제어기능이 정류기와 인버터 변환소에 각각 부여되어 있다. 연계되는 교류계통이 충분한 단락비를 갖고 있을 경우 전압/전류 제어 특성은 배분은 정류기나 인버터측 어느 쪽에 부여되어도 전체적인 시스템의 동특성과 안정도에 끼치는 영향이 크지 않으며 연계계통의 단락비가 큰 쪽에서 일반적으로 전압 제어를 담당하고 작은 쪽에서 전류 제어를 담당하도록 설계되어진다.

$$P_{dc} = V_{dc} I_{dc} \quad \Delta P_{dc} = V_{dc} \Delta I_{dc}$$

HVDC 시스템에서 전류/전압제어의 역할을 어느 변환소에 부여할 것인가의 문제는 전력계통의 안정도라는 관점에서 고려될 수 있다. 전송 전력량을 결정하는 변수는 직류전압 V_{dc} 와 직류전류 I_{dc} 이다. 전 운전범위에 걸쳐 직류전압 V_{dc} 는 거의 일정하게 유지되기 때문에 전력량을 결정하는 주요 변수는 직류전류 I_{dc} 가 된다. 전력량의 변화에 대하여 해남 변환소에 연결된 내류계통보다 제주측의 상대적으로 작은 계통이 더 민감하여 주파수나

전압 변동 및 인버터 전류실패 확률이 커지게 되므로 전류제어를 제주 변환소에서 담당하는 것이 적절할 수 있 것이다.

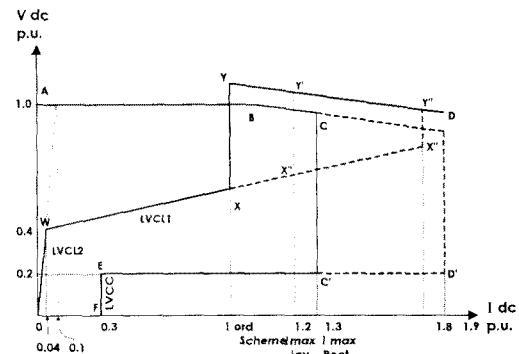


그림 1. 전압-전류 제어 특성 곡선

정상상태에서 해남의 정류기는 직류 전압을 184 kV로 유지하는 전압제어를 수행하며 1.0 p.u 이상의 과전류가 흐를 경우에는 6%의 기울기로 전압을 강하시키게 된다. 직류전압이 0.5 p.u. 이하가 되면 전압 저령값을 0.6 p.u.로 낮추게 된다.

제주의 인버터는 설정된 운전/제어모드에 따라 생성된 전류 저령값으로 직류전류를 유지하여 전력량을 조절하는 전류제어를 수행한다. AC 계통 사고등에 의하여 직류 전압이 감소하면 전력량을 유지하기 위하여 전류가 과도하게 증가하게 되며 이는 특히 사고 제거후 직류 시스템의 안정도를 위협하는 요인이 된다. 따라서 일반적으로 전압 의존 전류 제한기능(Voltage Dependant Current Order Limit)이 제공된다. 직류 전압이 0.5 p.u. 이하로 감소하면 그림 1의 LVCL1, LVCL2의 곡선을 따라 전류 저령값을 1.0 p.u. 이하로 제한한다.

2.2. HVDC 운전 및 제어 모드

양극(+)과 음극(-)의 두 풀은 독립적(Separate operation)으로 운전되거나 연계되어 하나의 풀처럼 통합운전(Joint operation)이 가능하다. 통합운전 모드에서는 두 개의 풀이 동일한 크기의 전류를 분담하여 중성 선로에 전류가 5 A 이내로 억제하는 "Current Balancing Control" 기능이 동작된다. 전류지령을 생성하는 방식에 따라 다음의 세 가지 제어 모드 중 하나로 전력이 제어된다.

◎ 정주파수 제어 모드

정주파수 제어기는 제주 계통의 주파수 편차를 제거하는 방향으로 전류 저령값을 생성하여 변환설비가 제주 지역의 부하변화량을 전담하게 된다. 주파수 제어는 전력 전송의 방향에 관계없이 제주에서만 이루어진다. 제주 계통의 주파수는 동기조상기의 회전축에서 검출된다. 주

파수 지령값은 최대 6%의 기울기로 변화될 수 있으며 $F_{slope} = 0\sim1\%$ 범위로 조정 가능하다.

$$F_{order}(Hz) = F_{demand}(Hz) - \frac{0.6}{150} P_{dc} F_{slope\%}$$

이 제어모드에서의 전류 지령값은 제주 부하의 50%에 해당하는 계산된 부하전류 I_{load} 와 동기조상기의 손실분에 해당하는 전류 I_{synch} 와 주파수변차로부터 발생된 I_{Fcon} 이 합해져서 인버터의 유입전류 지령값 I_{order} 를 형성한다. 바이풀 운전모드의 경우 풀 평형제어전류 $I_{balance}$ 가 추가된다.

$$I_{order} = I_{load} + I_{Fcon} + I_{synch} + (I_{balance})$$

◎ 정전력 제어 모드

설정된 요구 전력량을 일정하게 전송하는 운전모드이다. 실제 HVDC 시스템의 직류전압은 항상 일정하게 유지되지 않을 수 있으며 따라서 전력 지령값 P_{dc_order} 는 제주 인버터단의 직류전압 V_{dc} 으로 나누어져 전류 지령값 I_{order} 로 생성된다. 전력 지령값의 시간 변화율 dP/dt 는 $0.1 \sim 9.9$ MW/sec 의 값으로 제한된다.

$$I_{order} = \frac{P_{dc_order}}{V_{dc_inv}}$$

◎ 정전류 제어 모드

정전류 운전모드에서 직류전류의 크기는 제주 계통의 주파수나 전압의 크기에 무관하게 일정값으로 유지된다. 정주파수나 정전력 제어가 불가능한 조건에서 선택되는 제어 모드이다. 이 모드에서 전류 지령값의 시간 변화율 di/dt 는 $1 \sim 50$ A/sec 로 제한된다.

2.3. 시뮬레이션 조건

전원은 Thevenine 등가임피던스를 갖는 전압원으로 등가화 하였다. 단락용량(Short Circuit Capacity: SCC)은 설계검토시 적용된 값(해남 : 850 MVA, 제주 : 545 MVA)을 적용하였으며 이 때의 단락비(Short Circuit Ratio: SCR)는 해남이 2.833이고 제주가 1.5이다.

표 1. 컨버터 변압기 데이터

정격전압 및 구조	154/79.2/79.2 kV, 3상 3권선
정격용량	188.2/94.1/94.1 MVA
% 임피던스	12%(2차 측 기준)
변압기 결선	Y-Y-△ (delta 권선 30° lag)

표 1은 모의에 이용한 변압기 데이터이다. 제주 및 해남 변환소에는 3상 3권선 컨버터 변압기 각 2대씩 설치되어 있다. 변압기에 내장된 부하시 템페러처는 그 동작시간이 상대적으로 길기 때문에 일반적으로 과도현상 해석시에는 고려하지 않는다. 따라서 이 번 모의에서는 변압기 부하시 템페러처의 동작은 고려하지 않았으며 3상 3권선 변압기로 처리하였다. 변압기의 % 임피던스는 2차측 기준으로 12 %로 하였다. 컨버터 변압기 포화특성곡선은 EMTDC 라이브러리에 제공되는 기본값을 이용하였다. 컨버터 변압기 2차 측 Y결선의 중성점을 접지하면 브릿지 하단 빙보가 턴은 될 때 변압기 권선이 단락 되므로 반드시 floating 하여야 한다.⁽⁴⁾

제주측에는 변환기에서 소비하는 무효전력을 보상하기 위한 동기조상기 2대가 설치되어 있다. 제주측 모선에 Y-△ 변압기를 통하여 연결되어 있는 동기조상기의 용량은 1기당 70 MVA, 관성계수는 1.86 kVsec/kVA이며 과도 리액턴스는 0.216 p.u.이다. 표 2는 모의에 이용된 동기 조상기 파라메타를 나타내고 있다.

동기조상기의 출력은 여자기애에 의해서 조정되는데 제주 변환소에 설치되어 있는 여자기의 제어 모델은 IEEE Type 2로 설계 검토시에 모의되었으나 이번 모

의에서는 EMTDC 프로그램 upgrade상의 문제로 IEEE solid state type 여자기애를 이용하였다. 그림 2는 이 여자기의 제어블록이다. 그림 2에서 E_m 은 측정된 154 kV 모선의 RMS 선간전압(p.u.)이고 V_{REF} 는 설정값으로 11.159 (154/13.8) p.u.이다.

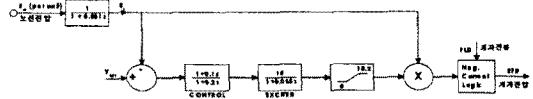


그림 2. 동기조상기 여자기 제어 모델

표 2. 동기조상기 데이터

정격(MVA)	70
관성계수 H (kWsec/kVA)	1.86
d축 과도리액턴스 X'_d (p.u.)	0.216
q축 과도리액턴스 X'_q (p.u.)	0.309
d축 동기리액턴스 X_d (p.u.)	2.11
q축 동기리액턴스 X_q (p.u.)	1.93
d축 차과도리액턴스 X''_d (p.u.)	0.157
q축 차과도리액턴스 X''_q (p.u.)	0.187
누설 리액턴스 X_p (p.u.)	0.184
전기자 저항 r_a (p.u.)	0.0013
T'_{do}	11.3
T'_{qo}	3.1
T''_{do}	0.05
T''_{qo}	0.05
Saturation factor (p.u.)	1.72
(개방상태에서 전기자 전압을 1.2 p.u.로 하기 위하여 필요한 계자전류)	

해남-제주 연계계통의 컨버터의 각 벨브는 제주가 48개, 해남이 46개의 싸이리스터로 구성되어 있으나 모의에서는 한 개의 벨브를 한 개의 싸이리스터로 처리하였다. 또한 스너버 회로의 소자도 단일 소자로 처리하였으며 벨브 보호를 위해 연결되어 있는 피뢰기는 고려하지 않았다. EMTDC 컨버터 모델에 내장된 Phase Lock Oscillator(PLO)에 의해 phase reference가 발생되도록 하였으며 이 PLO의 입력전압은 154 kV 측 모선 전압을 검출하여 사용하였다. 6 펄스 브릿지를 변압기 2차 측 Y, △ 단자에 각각 연결하고 이들 두 컨버터를 직렬로 연결하여 12 펄스 컨버터가 구성되도록 하였다.

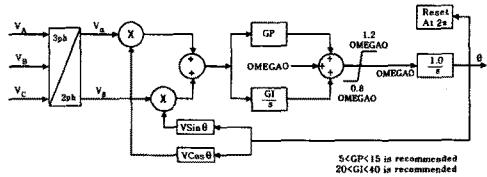


그림 3. Phase Lock Oscillator 다이어그램

그림 3은 EMTDC의 컨버터에 내장된 Phase Lock Oscillator의 블록다이어그램이다.⁽⁴⁾ 그림에서 V_A , V_B , V_C 는 154 kV 모선에서 검출한 모선전압이며 이와 동상의 위상정보 θ 를 출력한다. DC 케이블 선로는 단일 소자로 된 π 등가회로로 모의하였으며 선로 양단에는 평활 리액터를 연결하였다. 평활 리액터의 인덕턴스는 설계값인 60 mH를 적용하였다.

전력변환과정에서 고조파가 발생되고 이로 인하여 AC 계통의 파형이 왜곡된다. 해남-제주 연계계통에는 2가지의 필터가 설치되어 있다. 하나는 11차 및 13차 고조

파에 이중으로 동조되어 있는 용량이 27.5 MVAR인 이중동조 필터이고 또 하나는 23차 이상의 고조파에 동조되어 있는 high pass 필터로 용량이 27.5 MVAR이다. 또한 해남 측에는 변환기에서 소비하는 무효전력을 보상하기 위한 커패시터 뱅크가 설치되어 있는데 용량이 27.5MVAR이다. 그림 4는 모의에 적용한 이들 필터 및 shunt capacitor의 회로도이다. 모의에서 필터 및 커패시터 뱅크의 각 소자(커패시터, 저항, 리액터)는 각 상별로 1개의 소자로 표현하였다.

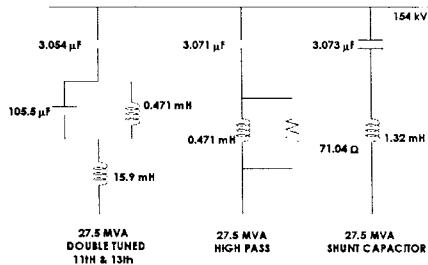


그림 4. 변환소 필터 및 커패시터 뱅크

2.4. 시뮬레이션 결과

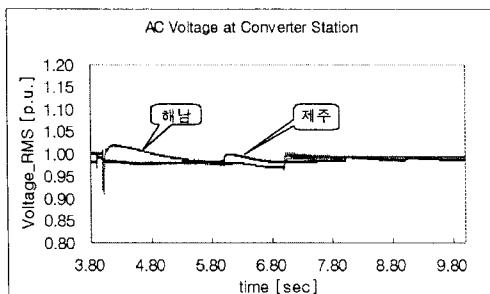


그림 5. 주파수모드 운전시 해남과 제주의 전압

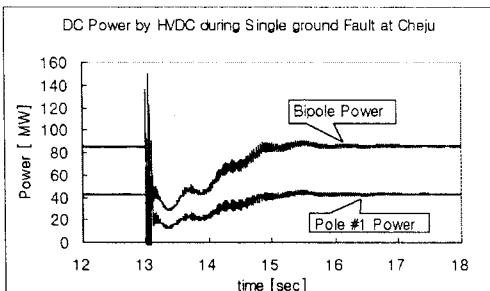


그림 6. 단상 지락시 직류 전력량의 변화

제주계통의 부하는 실효전력 160 MW, 무효전력 74.55 Mvar의 조건을 상정하였으며 변환소의 필터는 3개, 82.5 Mvar(용량성)가 그리고 리액터는 2개 41.5 Mvar(유도성)가 투입되어 있는 것으로 하였다.

그림 5는 주파수제어모드에서 HVDC가 기동하여 정상상태에 이르기까지의 해남과 제주의 AC 전압을 보여준다. 전압의 크기가 변화하는 부분은 전력이 상승함에 따라 필터가 투입되는 시점이다. 그림 6은 $t = 13$ 초에서 75 msec 동안 단상지락이 제주 변환소에서 발생하였을 경우의 제주 계통 주파수의 변동을 보여준다. 단상지락발생하자 HVDC에 의한 전송 전력량이 80 MW \rightarrow 40 MW 수준으로 급감하였다가 사고가 제거되자 2

초후에 사고전의 전력으로 복귀하고 주파수도 유지범위 이내로 회복되고 있음을 그림 6에서 볼 수 있다. 그림 8은 단상지락으로 직류전압이 강하할 때 직류전압 저령 값이 강하였다가 고장 제거후 1.0 p.u.로 회복되고 있는 과정을 보여준다. 이때 직류전류가 일시적으로 급상승하게되나 전류 저령 값의 즉각적인 강하에 따라 과전류는 억제된다. 사고가 제거되고 직류전압이 상승하면서 전류도 사고전의 값으로 회복하고 있음이 그림 9에서 보여진다.

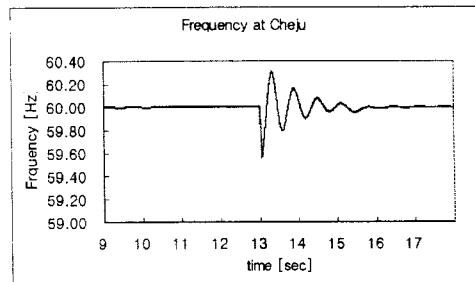


그림 7. 단상 지락시 제주계통 주파수

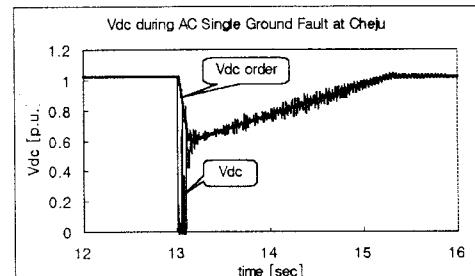


그림 8. $t=13$ 초 단상 지락시 직류전압 Vdc

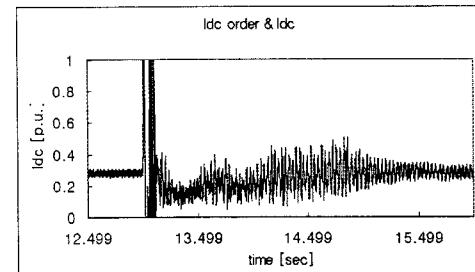


그림 9. 직류전류 Idc ($t=13.0$ 초 C상 지락)

3. 결 론

해남-제주 직류송전계통의 제어특성과 운전모드를 살펴보고 각 모드에 대하여 EMTDC 시뮬레이션을 통하여 직류송전시스템의 동작을 살펴보았다.

[참 고 문 헌]

- [1] 심웅보외, 직류송전 시스템 기반기술 개발 - 중간보고서, 한국전력공사 전력연구원 1998
- [2] Haenam and Cheju Operations Maintenance & Instruction Manual GEC-Alsthom
- [3] IEEE Std. 1204-1997 : IEEE Guide for Planning DC Links Terminating at AC Locations Having Low short-Circuit Capacities 1997
- [4] PSCAD/EMTDC Manual Part - II, Manitoba HVDC Research Centre