

전압원 HVDC를 이용한 제주-해남 계통 특성 분석

박용희<sup>1</sup>, 백승택<sup>2</sup>, 최준영<sup>1</sup>, 한병문<sup>2</sup>

<sup>1</sup>명지대학교 전기공학과, <sup>2</sup>명지대학교 차세대전력기술연구센터

Characteristic Analysis of Jeju-Hanam transmission using VSC-HVDC

Yong-Hee Park<sup>1</sup>, Seung-Taek Baek<sup>2</sup>, Jun-Young Choi<sup>1</sup>, Byung-Moon Han<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. Electrical Engineering, Myongji University, <sup>2</sup>NPTC, Myongji University

**Abstract** - 본 논문은 전류원 HVDC로 연계되어 있는 제주-해남 계통을 전압원 HVDC로 연계하였을 경우에 대한 특성 분석에 대해서 기술하고 있다. 기존의 제주-해남 HVDC시스템은 교류계통 전압의 외란에 의해서 전류실패가 발생할 수 있으므로 연계되는 교류계통 모선에 무효전력보상설비들이 설치되어 있다. 따라서 기존의 전류원 HVDC 시스템은 대용량의 전력을 전송할 수 있다는 장점이 있는 반면 추가로 무효전력 보상설비들이 설치되어야 한다는 단점이 있기 때문에 최근에 선진국에서는 전압원 HVDC 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 전압원 HVDC 시스템은 계통사고 또는 교류전압강하로 인한 전류실패가 발생하지 않고, 무효전력을 HVDC 시스템의 용량내에서 유효전력과 독립적으로 제어할 수 있기 때문에 추가로 무효전력 보상설비가 필요하지 않다는 장점이 있다. 본 논문에서는 제주-해남 계통을 전압원 HVDC로 연계하는 모델을 PSCAD/EMTDC를 이용해서 개발하였다. 개발된 시뮬레이션 모델은 전압원 HVDC를 이용해서 제주-해남 계통을 연계하였을 경우에 대한 동특성을 분석하는데 유용하리라 사료된다.

향으로 다이오드가 연결되어야 하고 직류송전선에서 사고가 발생했을 경우 전압원 컨버터를 교류계통과 분리시키기 위해서 교류차단기를 반드시 열어야 한다.

IGBTs와 같은 반도체 스위치 소자가 계통 주파수 주기동안 여러 번 스위치 온, 오프가 되기 때문에 저차 고조파를 감소시키기 위한 스위칭 기법을 적용해서 출력 파형을 개선시킬 수가 있다. 이와 같은 스위칭 기법의 단점은 스위칭 주파수가 증가함에 따라 전력손실도 증가한다는 것이다. 하지만 전압원 컨버터의 스위칭 기법으로 인한 출력 파형을 개선함으로써 LCC HVDC보다 고조파 필터링이 훨씬 쉬워진다. 다시 말해서 LCC HVDC는 출력파형을 개선하기 위해서 아주 큰 용량의 고조파 필터가 필요하지만 VSC HVDC는 스위칭 기법으로 출력파형의 고조파를 저감시켰기 때문에 고조파 필터의 용량이 작아지게 된다. 따라서 VSC HVDC의 설치면적이 동일한 용량의 LCC HVDC보다 훨씬 작아지게 된다 [3,4].

본 논문은 전압원 컨버터를 이용한 전압형 HVDC 시스템의 시뮬레이션 모델을 개발하고 제주-해남 계통을 연계하였을 경우의 동특성을 검증하였다.

1. 서 론

HVDC 송전이득은 스웨덴의 mainland부터 Gotland까지 처음으로 건설된 1954년 이후부터 증명되어 오고 있다. 초기에 HVDC에 사용된 스위치 밸브는 mercury arc 밸브였지만 현재는 사이리스터 기술의 발달로 인해서 사이리스터 밸브로 교체되었다.

HVDC 시스템의 안정적인 동작을 위해서는 계통의 단락비가 큰 비교적 강한 교류계통이 필요하다. HVDC에 사용되고 있는 컨버터는 선전류형 컨버터이고 이를 이용한 HVDC 송전은 LCC(Line-Commutated Converter) HVDC라 불려지고 있다[1].

전압원 컨버터는 오랜 시간동안 전기기기 구동장치에서 사용되어 왔다. 요즘에 와서 HVDC 송전에 전압원 컨버터가 적용되고 있고 1997년부터 실용화되고 있다[2]. 현재까지 가장 큰 용량의 전압형 직류송전이 2002년에 설치 운용되고 있다. 이것은 뉴욕의 Connecticut과 Long Island를 연결한 Cross Sound cable인데 시스템 용량은 330MW이고 송전되는 직류전압은 ±150kVdc 이다.

LCC HVDC에 사용되는 사이리스터 밸브는 스위치로 흐르는 전류가 영이 될 때만 스위치를 오프시킬 수 있다. 따라서 스위치를 오프시키는 것은 선전압에 의존한다. 하지만 전압원 컨버터는 컨버터의 주전류가 밸브를 통해 흐르는 것에 의존하지 않고 외부에서 저전압의 제어신호를 인가함으로써 스위치를 온, 오프할 수 있는 제어가능한 반도체 스위치를 사용하고 있다.

LCC HVDC에서 전류실패로 인해서 발생하는 교류전압 파형의 왜곡은 전력 흐름을 일시적으로 방해하게 된다. 전압원 컨버터는 자기소호이므로 전류실패가 발생하지 않는다. 하지만 전압원 컨버터는 스위치 밸브와 역방

2. 본 론

2.1 전압원 컨버터 동작원리

전압원 컨버터가 한 쪽은 직류회로에, 다른 한 쪽은 교류회로에 연결되어 있는 일반적인 회로도를 그림 1에 나타내었다.

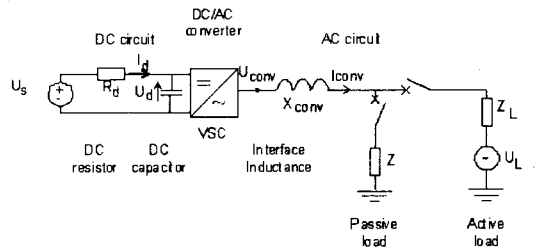


그림 1. 일반적인 전압원 컨버터 회로도

전압원 컨버터는 유효전력이 교류계통으로 주입되고 있는 ( $I_d \times U_d > 0$ ) 인버터로 동작될 수 있고, 교류계통으로부터 전력을 흡수하는 ( $I_d \times U_d < 0$ ) 정류기로 동작될 수도 있다. 또한 전압원 컨버터는 교류계통으로 무효전력을 주입하는 ( $I_{conv} \times U_{conv} > 0$ ) 용량성으로 동작할 수 있고, 교류계통으로 무효전력을 흡수하는 ( $I_{conv} \times U_{conv} < 0$ ) 유도성으로 동작할 수도 있다.

그림 1의 직류전압원  $U_s$ 는 직류회로 저항으로 표현되는 직류저항  $R_d$ 로 구성이 되고 직류 캐패시터는 컨버터의 직류단에 연결되어 있다. 직류 캐패시터는 직류전압  $U_d$ 를 안정화시키는 기능을 갖는다. 교류측의 연계용 인

덕턴스(interface inductance)는 두 가지 기능이 있다. 하나는 교류전류를 안정화하는 것이고 다른 하나는 전압원 컨버터가 유효전력과 무효전력의 제어를 가능하게 하는 것이다. 연계용 인덕턴스는 상 리액터, 변압기의 누설 인덕턴스, 또는 이들 두 가지의 조합으로 구현이 된다. 입력측의 직류 캐패시터와 출력측의 연계용 인덕턴스는 전압원 컨버터가 적절한 기능을 수행하도록 하는 중요한 요소이다.

### 2.1.2 유효전력 제어

유효전력 제어의 원리에 대해서 그림 2에 나타내었다. 연계 인덕턴스를 통한 유효전력은 컨버터의 전압위상각을 조절함으로써 제어될 수 있다.

컨버터 출력전압의 위상각이 교류계통 전압보다 앞선다면 컨버터는 교류계통으로 유효전력을 주입할 것이다. 즉, 인버터로 동작한다. 직류측에서는 등가전류  $I_d$ 가 직류전원으로 부터 흐를 것이고 직류전압  $U_d$ 는 오옴의 법칙( $U_d=U_S-R_d \cdot I_d$ )에 의해서 감소한다.

컨버터 출력전압의 위상각이 교류계통 전압보다 뒤진다면 컨버터는 교류계통으로부터 유효전력을 흡수할 것이다. 즉, 정류기로 동작한다. 직류측에서는 등가전류  $I_d$ 가 직류전원으로 주입될 것이고 직류전압  $U_d$ 는 오옴의 법칙( $U_d=U_S+R_d \cdot I_d$ )에 의해서 증가한다.

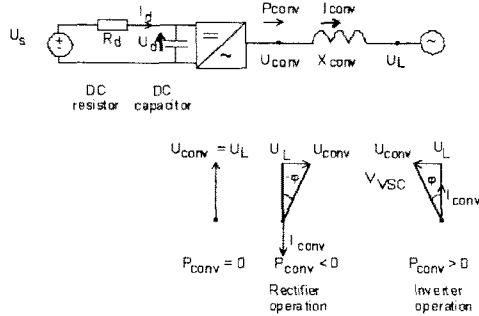


그림 2. 유효전력 제어의 원리

### 2.1.3 무효전력 제어

무효전력 제어의 원리에 대해서 그림 3에 나타내었다. 연계 인덕턴스를 통한 무효전력은 컨버터 출력교류전압의 크기를 조절함으로써 제어될 수 있다.

컨버터 출력전압  $U_{conv}$ 의 크기가 교류계통 전압  $U_L$ 보다 크다면 VSC는 무효전력을 교류계통으로 주입할 것이다. 즉, 컨버터는 용량성 모드로 동작한다. VSC 출력전압  $U_{conv}$ 의 크기가 교류계통 전압  $U_L$ 보다 작다면 컨버터는 유도성 모드로 동작한다.

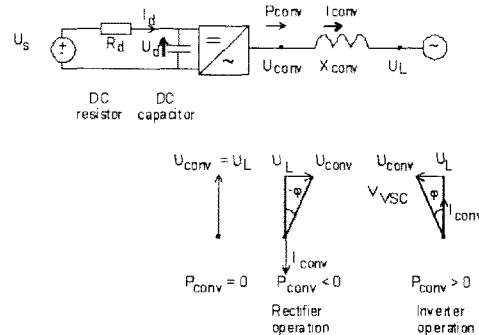


그림 3. 무효전력 제어의 원리

### 2.3 전압형 HVDC 시뮬레이션 해석 모델

전압형 HVDC 시스템의 동적해석 모델을 EMTDC 시뮬레이션을 이용하여 개발하였고, 제주계통은 하나의 발전기와 부하모델로 등가화하여 개발하였다. 전압원 제주-해남 계통연계 정상상태 모델을 그림 4에 나타내었다. 전기적인 에너지는 교류송전시스템과 직류시스템 사이에 연결되어 있는 변압기를 통해서 전달된다. 교류 필터는 전압원 컨버터에 의해 발생된 고조파를 제거하는데 사용된다. 그림 4의 모델에 사용된 회로정수를 표 1에 나타내었다.

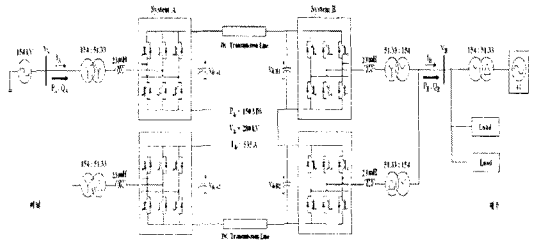


그림 4. 전압원 HVDC 시뮬레이션 모델

표 1. 시뮬레이션 회로 정수

교류계통전압( $V_A, V_B$ )	154kV
제주측 발전기 용량	300MVA
제주측 부하용량	370MVA
장격직류전송전력( $P_{dc}$ )	300MW
직류전압( $V_{dc}$ )	280kV
직류전류( $I_{dc}$ )	1.07[kA]
전압원 컨버터 용량	150MVA×2대
스위칭 주파수	3kHz

#### 2.3.1 전압형 직류송전의 제어기법

전압형 직류송전 시스템을 구성하고 있는 두 개의 전압원 컨버터에서 해남측 컨버터는 일정직류전압제어를 하게 되며 제주측 컨버터는 일정조류제어모드나 주파수 제어모드 중 하나의 모드로 유효전력제어를 수행하게 된다. 또한 각 전압원 컨버터가 자체적으로 무효전력을 제어하므로 전압원 컨버터와 연결되어 있는 교류계통의 전압안정도를 향상시킬 수가 있다. 특히, 두 개의 전압원 컨버터가 무효전력 제어기만으로 동작한다면 시스템 두 개의 STATCOM으로 한정되어 동작하게 된다.

#### 2.3.2 EMTDC 시뮬레이션

전압형 HVDC를 이용한 제주-해남 계통연계 시스템의 동특성을 검증하기 위해서 EMTDC 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션에 적용된 시나리오를 표 2에 나타내었다. 해남측(A-side)에서는 일정직류전압제어를 수행하고 제주측(B-side)에서는 일정조류제어와 주파수제어모드를 각각 실행한다. 일정조류제어모드는 0-60초까지 실행되며 주파수제어모드는 60-80초까지 수행된다.

표 2. 시뮬레이션 시나리오

시간[sec]	0-35	35-45	45-60	60-65	65-80
해남측	일정 직류전압 제어				
제주측	일정조류제어				
$P_e$ [MW]	150	200	150	주파수제어	
$Q_b$ [MVar]	0	50	0		
$V_{ac}$ [kV]	280	280	280	280	280
부하조건	360MW, 90Mvar			300MW	360MW
				75Mvar	90Mvar

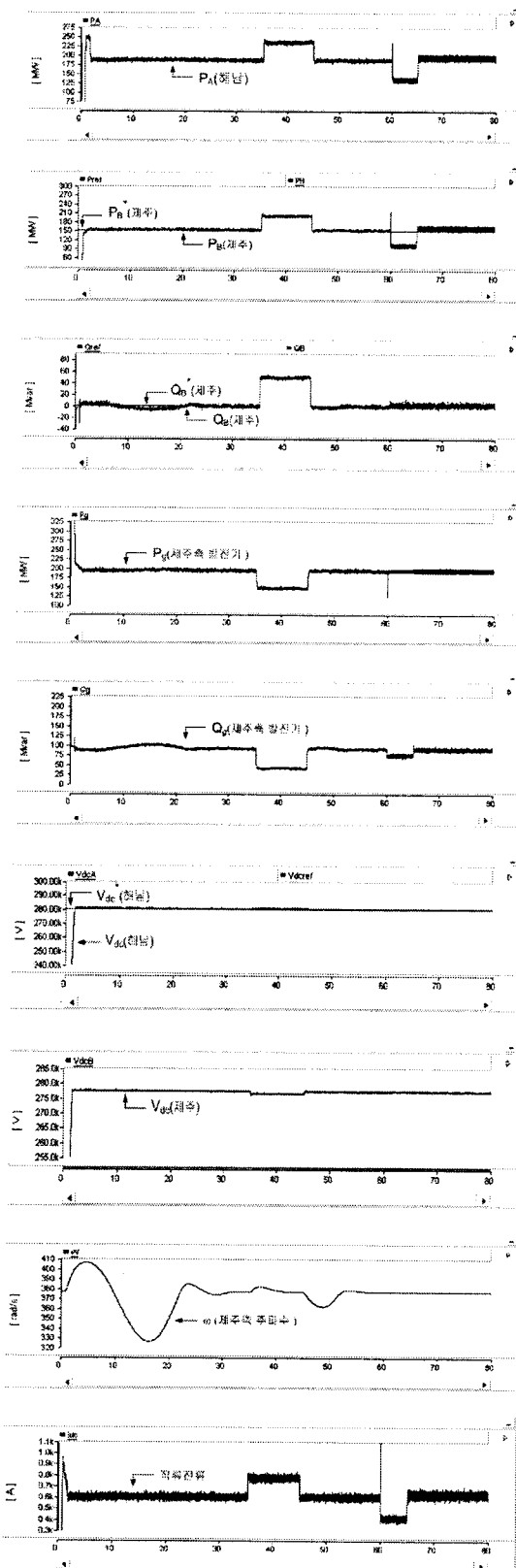


그림 5. 시뮬레이션 결과

그림 5에 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 앞에서 설명했듯이 해남측은 DC-Link 전압제어를 전 구간에서 걸쳐 수행한다. 제주측 시스템의 경우 0초에서 60초구간은 일정조류제어모드로 동작하는데 0-35초간은 HVDC 투입과 발전기 과도 상태를 나타내고 35-45초와 45-60초구간은 HVDC의 전송전력의 기준값을 바꾸어 일정조류제어모드로 동작을 하는지 살펴보았다. 또한 무효전력도 독립적으로 제어가 되는지를 살펴보았다. 그림 5에서 볼수 있듯이 원활히 제어가 수행되고 있음을 알 수 있다. 이때 제주계통의 주파수는 HVDC의 전송전력이 바뀔때 따라 제주측 발전기의 출력전력이 바뀌게 되므로 주파수가 흔들림을 볼 수 있다. 초기 0초에서 35초구간에서 주파수가 크게 흔들리는 현상은 부하투입에 대한 발전기 조속기 동작의 영향이다. 또한 HVDC의 전송전력은 직류전류에 비해한다는 것을 알 수 있다. 60초에서 80초구간은 주파수제어모드로 동작시켰다. 주파수제어가 원활히 수행되는지 알아보기 위하여 부하조건을 가변시켜서 특성을 확인해 보았다. 60-65초 구간은 부하탈락 조건이다. 이때 일정한 주파수가 유지됨을 알 수 있다. 이것은 탈락된 부하만큼 HVDC가 공급량을 자동으로 조절하므로 나타나는 특성이다. 65-80초 구간은 다시 부하를 투입하는 조건으로 이때에도 주파수에는 변함이 없는 것이 확인되었다. 만일 일정조류제어모드시라면 주파수는 앞 구간과 같이 흔들렸을 것이다. 한편 제주측의 직류전압이 해남측에 비해서 약간 떨어지는데 이것은 직류전송선에 의한 전압강하분이 존재하기 때문이다.

### 3. 결 론

본 논문은 전압형 HVDC 시스템을 이용하여 제주-해남계통을 연계하였을 경우에 시스템의 제어를 설계하고 EMTDC 시뮬레이션 모델을 개발하여 그 동특성을 분석한 내용에 대해 기술하였다. 시뮬레이션 모델은 154kV 교류계통에 연결되어있고 전압형 HVDC가 300MW의 정격에 200MW까지 전송하는 것으로 시뮬레이션하였다. 전압형 HVDC는 기존의 전류형 HVDC와는 달리 유효전력과 무효전력을 독립적으로 제어하는 것이 가능하고 스위칭 주파수가 높기 때문에 수동필터 규모가 작아져서 설치면적이 감소한다는 장점이 있다. 또한 직류선로 사고로 인해 선로가 분리될 경우 각 컨버터는 독립적으로 연계계통에 대해 무효전력보상기로 동작하게 된다. 본 논문에서 개발한 시뮬레이션 모델은 향후 실 시스템의 설계시 중요한 자료로 사용될 수 있으리라 사료된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Hingorani, N.G., "High-voltage DC transmission: a power electronics workhorse", Spectrum, IEEE, Vol. 33, No. 4, pp. 63-72, April 1996.
- [2] SCHETTLER E, HUANG, H., CHRISTL N., "HVDC transmission system using voltage source converters-design and applications", IEEE PES Summer Meeting, July 2000.
- [3] LARSSON, T., et al, "Eagle pass hack-to-back tie: a dual purpose application of voltage source converter technology", IEEE PES Summer Meeting, 2001.
- [4] Andersen, B.R. Xu, L. Horton, P.J. Cartwright, P., "Topologies for VSC transmission", Power Engineering Journal, Vol. 16, No. 3, pp. 142-150, June 2002.