

EMTP-RV를 이용한 HVDC 시스템 모델링 및 시뮬레이션 구현

장진영*, 김재문**, 김양수**, 김철환***, 유영식****
 *중앙대학교, **한국철도대학, ***성균관대학교, ****한국전력거래소

Implementation Simulation and Modelling of HVDC using EMTP-RV

ChinYoung Chang*, JaeMoon Kim**, YangSoo Kim**
 *Chung-Ang Univ., **KNRC, ***SKKU, ****KPX

Abstract - HVDC 시스템은 장거리 교류 송전 선로에서 생기는 전력시스템 안전성 문제나 전력손실의 문제를 해결하여 주는 기술적인 해결책이 될 뿐만 아니라 빠른 전력조류제어를 통하여 조류의 흐름을 능동적으로 제어할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 논문은 GUI 구현이 강한 EMTP-RV를 이용한 제주-해남 HVDC 시스템의 모델링을 확립하고 과도현상을 분석하기 위한 선행연구로 정상상태에 따른 시뮬레이션을 구현하였다.

1. 서론

현대 사회에서의 산업과 기술의 발달은 매우 빠른 속도로 전력수요의 증가를 가져왔다. 그러나 발전소 설비는 전력을 필요로 하는 부하 중심지에서 멀리 떨어져 있는 곳에 대부분 위치해 있다. 이러한 발전 단지의 원거리화와 다른 전력시스템간의 연계로 인하여 장거리 송전의 효율성을 높이는 것이 큰 관건으로 대두되었으나, 전압레벨을 높인 교류 송전만으로는 좋은 성과를 얻지 못했다.

HVDC(High voltage direct current)시스템은 1954년 스웨덴 본토와 Gotland 섬 사이에 약 100km 구간을 연계하는 20MW, ±100kV 급의 수은-아크 밸브(mercury-arc valve)를 이용한 최초의 시스템이 건설된 이후 1970년대 들어와 세계 각국에 도입되었다. 국내인 경우 1994년 해남과 제주를 해저케이블로 연계하는 300MW, ±180kV 급의 HVDC 시스템이 구축되어 운전중에 있다. HVDC 시스템은 장거리 교류 송전 선로에서 생기는 전력 시스템 안전성의 문제나 전력손실의 문제를 해결하여 주는 기술적인 해결책이 될 뿐만 아니라 빠른 전력조류제어를 통하여 계통의 안전운전을 가능하게 하고 조류의 흐름을 능동적으로 제어할 수 있도록 하는 등의 장점을 가지고 있다[1-3].

본 논문에서는 EMTP-RV를 이용하여 제주-해남 HVDC 시스템을 모델링하였으며, 과도현상을 분석하기에 앞서 정상상태에서의 시뮬레이션을 구현하여 모델링의 타당성을 입증하고자 하였다.

2. 본론

2.1 제주-해남 HVDC 시스템의 계통

현재 국내에서는 1998년부터 제주-해남 HVDC 시스템 연계 운전을 시작하여 가동 중에 있다. HVDC 시스템은 크게 변환소 설비 및 직류 선로 설비로 나눌 수 있다. 그림 1은 제주-해남 HVDC 시스템의 계통도를 나타낸 것으로 전형적인 12pulse Bipole 방식이다. 변환소는 점호각 제어에 따라 컨버터와 인버터로 운전이 가능하다. 따라서 직/교류를 변환하는 전력변환장치와 변환시 발생되는 고조파 처리를 위한 Filter 설비가 기본이 된다. 그러나 국내의 직류송전 운영경험 부족과 기술지원 체계구축 보안을 위해 지속적인 연구가 필요하다.

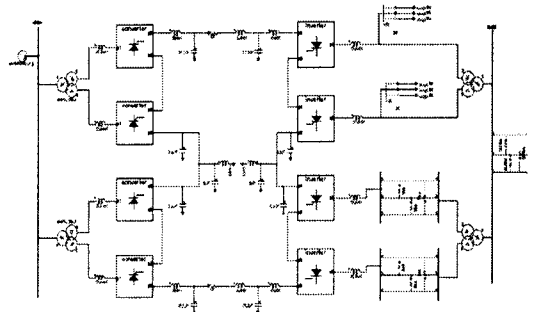


그림 1. 제주-해남 HVDC 시스템 계통도

HVDC 시스템은 정상상태에서 이상적인 경우 주파수 성분이 없어 이에 따른 리액턴스 성분이 없기 때문에 교류송전에서 필요로 하는 여러 가지 설비가 불필요하다. 그러나 HVDC 시스템에서 컨버터나 인버터는 교류계통에 대해 지상 무효전력부하와 진상 운전발전기로 동작한다. 이때 필요로 하는 무효전력량이 상당히 많기 때문에 컨버터/인버터 시스템 주위에 AC 필터나 직렬로 연결된 커패시터가 필요하다. 하지만 AC 계통과 분리되어 있고 전력을 자유롭게 조정할 수 있기 때문에 안정도에는 문제가 없어 도체의 열적 용량까지 송전 가능하므로 송전전력이 양 모선단 전압과 전류크기에만 의존하므로 송전용량 증대가 가능하다. 제주-해남 HVDC계통의 데이터는 표 1과 같다.

표 1. 제주-해남 HVDC 계통 데이터

구분	파라미터
정격 DC전압	±180kV
정격 DC전류	±833A
정격 DC전송전력	300MW (Bipole)
변압기 정격전압	154/79.2/79.2kV
변압기 정격용량	188.2/94.1/94.1MVA
케이블 길이	101km X 2회선
케이블 종류	Cu MI

2.2 전력변환장치 모델링

이전까지 제주-해남 HVDC 시스템을 모델링을 하고 시스템의 과도현상을 분석하기 위해 EMTDC 등 다양한 프로그램을 사용하였다. 그러나 최근에 GUI 구현이 용이한 프로그램이 만들어지고 있어 본 논문에서는 GUI 구현이 용이한 EMTP-RV 프로그램을 이용하여 시스템의 각 부분별로 모델링을 하여 각각에 대한 세부 시뮬레이션 결과로 모델링의 타당성을 확인했으며, 이를 토대

로 해남 변환소, 제주 변환소를 모델링하였다.

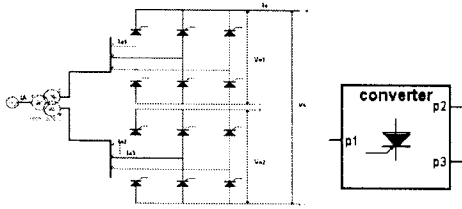


그림 2. 3상 12pulse 위상제어 컨버터 (해남측)

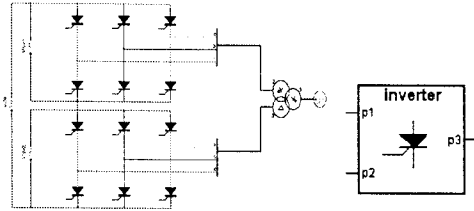


그림 3. 3상 12pulse 위상제어 인버터 (제주측)

Basic data			
Winding 1	Winding 2	Winding 3	
Voltage 15kV	79.2	79.2	4V RMS/L1
Normal power 1800 MVA	54.1	54.1	MVA
R ₁₂	Q ₁₂	Q ₂₃	
Winding R 0.00001	0.00001	0.00001	[M]
X ₁	X ₂	X ₃	
Winding x 15.2362	0.245	10.766	[Ω]

그림 4. 3상 Y-Y-Δ 변압기 데이터 (해남측)

그림 2는 HVDC 시스템의 가장 기본적인 전력변환장치로 3상 위상제어 컨버터를 직렬로 연결한 컨버터이고 각각의 컨버터는 변압기의 Y-Y-Δ 결선으로 30°의 위상차를 가지게 되어 12pulse 컨버터로 구동된다.

컨버터의 용량이 커질수록 6pulse 위상제어 컨버터의 직렬 접속에 의한 다중화 방식을 채택하는 것이 유리하다. 따라서 계통과 컨버터 사이에 변압기를 설치한다. 3상 위상제어 컨버터의 출력전압의 평균값은 식 (1)을 통해 얻어진다.

$$\begin{aligned}
 V_o &= \frac{3}{\pi} \int_{\alpha+60}^{\alpha+120} V_{at}d(\omega t) \\
 &= \frac{3}{\pi} \int_{\alpha+60}^{\alpha+120} \sqrt{2} V_{sin}\omega t d(\omega t) \\
 &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cos\alpha, (0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ) \quad (1)
 \end{aligned}$$

12 Pulse 위상제어 컨버터에서는 교류 전원측의 고조파와 역률개선뿐만 아니라 직류 출력측 파형도 개선된다. 출력전압 V_o 의 리플 주파수는 전원전압 주파수의 12배이다. 6 Pulse 위상제어 정류회로에서의 6배에 비해 2배 증가된 셈이다. 따라서 직류 출력을 평활하게 하기 위한 필터의 크기와 용량도 줄어든다. 그림 3은 2대의 6 Pulse 위상제어 컨버터를 역병렬 접속하여 4상한 동작이 가능하도록 구성된 회로이다. 동작원리는 기본적으로 어느 하나의 컨버터는 정류모드로, 다른 하나는 인버전 모드로 동작하도록 하되 각 컨버터 직류측 출력전압의 평균값은 항상 동일한 값을 갖도록 각각의 컨버터를 제어하는 것이다. 컨버터 1과 컨버터 2의 지연각을 각각 α_1 , α_2 라 하고 컨버터 1은 정류모드로 컨버터 2는 인버전

모드로 동작하게 하면 각 컨버터의 직류 출력전압의 평균값은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$V_{o1} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V \cos\alpha_1, V_{o2} = -\frac{3\sqrt{2}}{\pi} V \cos\alpha_2 \quad (2)$$

식 (2)에서 음(-)의 부호를 갖는 이유는 컨버터 2가 인버전 모드로 동작하므로 컨버터 2의 직류 측 전압 V_{o2} 의 극성이 반대로 되기 때문이다.

$$\begin{aligned}
 \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V \cos\alpha_1 &= -\frac{3\sqrt{2}}{\pi} V \cos\alpha_2 \\
 \cos\alpha_2 &= -\cos\alpha_1 = \cos(\pi - \alpha_1) \quad (3)
 \end{aligned}$$

3상 인버터는 서로 독립적으로 동작할 수 있는 3개의 pole로 구성되며 각 출력 상전압은 120°의 위상차를 갖고 각 pole의 상단과 하단이 180° 간격으로 번갈아 스위칭을 하므로 부하의 상전압은 한 주기 동안 60° 씩 6차례에 걸쳐 단계적으로 변하는 6step 제어가 된다.

제주-해남 변환소에는 3상 3권선 변환용 변압기가 각각 2대씩 설치되어 운행된다. 변압기의 탭절환 장치는 동작시간이 상대적으로 길기 때문에 일반적으로 과도현상 해석 시에는 고려하지 않는다. 따라서 그림 4와 같이 본 논문에서도 변압기 탭 절환 장치의 동작은 고려하지 않았으며 3상 Y-Y-Δ 변압기로 처리하였다.

2.3 HVDC 제어기 모델링

컨버터, 인버터의 제어시스템은 그림 5와 같이 계층적으로 구성되어 있다. 각각의 기능을 살펴보면 Master Control은 HVDC 시스템의 운전모드와 지령값을 설정하며, Pole Control은 Master Control로 부터의 제어 모드와 전송방향을 받아 Phase Control로 제어 신호를 보내주는 역할을 한다. Pole Control 방법에는 Frequency Control, Power Control, Voltage Control, Current Control 등이 있다[4].

그림 6은 해남-제주 HVDC시스템의 제어 특성 곡선을 나타내고 있다. 곡선 ABCDEF부분은 컨버터의 동작을 나타내고, 곡선 ZYXW부분은 인버터의 동작을 한다. 정상상태시 AB영역에서는 DC전압제어를 수행하고, 사고시 CD영역에서는 DC전류제어, DEF영역에서는 기준전압 하강시 전류 제한 동작을 수행한다. 인버터의 동작을 살펴보면 정상상태시 YX영역에서는 DC전류제어를 수행하고, 사고시 YZ영역에서는 최소각 제어, XW영역에서는 전류상승 곡선을 따라 동작한다.

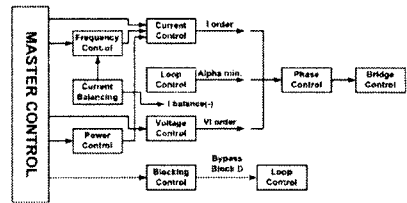


그림 5. 직류계통 제어구조

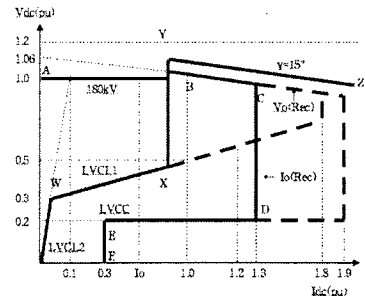


그림 6. 제주-해남 HVDC 제어특성 곡선

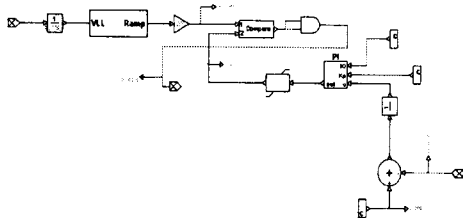


그림 7. 컨버터 제어기 모델링 (해남측)

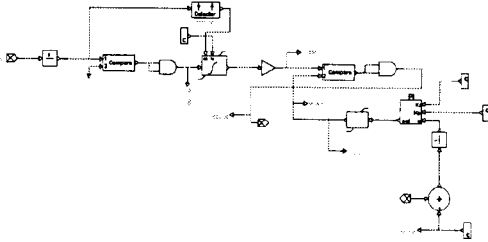


그림 8. 인버터 제어기 모델링 (제주측)

해남측 컨버터를 제어하기 위한 제어방식은 크게 DC 전압제어와 DC전류제어로 나누어진다.

DC전압제어에는 정전압제어와 사고시 전압 지령치를 조정해 주는 Ramp Control로 구성되어 있다. 반면 외란이나 계통 사고시에는 DC전류제어를 실시하게 된다. 결과적으로 정상상태에서는 DC전압제어를 하며 외란이나 사고시에는 DC 전류제어를 실시하며 사고 복구시에는 컨버터측은 계통의 전압이 크기 때문에 사고시 V-I 곡선에서 볼 수 있듯이 급격한 기울기의 제어가 가능하다. 기준 전압은 180kV, 전류는 833A를 1[p.u]로 설정한다. 그림 7은 EMTD-RV 컨버터 제어기 모델링을 나타낸 것이다.

제주 측 인버터를 제어하기 위한 제어방식은 정상 상태에서는 DC전류제어로 동작하고 있으며 외란이나 AC 계통 사고시에는 최소 γ 제어기로 동작하고 있다.

전류 제어기는 주파수 제어와 조류 제어 중 택일하여 사용하게 되고 이때 인버터에 필요한 DC 전류 값을 결정하여 출력 값으로 보내게 된다. 사고시에는 최소 γ 제어기가 주 제어기로 동작하게 된다. 결정된 두 개의 인버터 점호각 지령치 중에서 값을 비교하여 작은 값을 선택하게 되어 최종적으로 시간 값으로 변환하여 인버터의 점호각 신호를 출력하게 된다. 그림 8은 EMTD-RV 인버터 제어기 모델링을 나타낸 것이다.

3. 시뮬레이션 결과

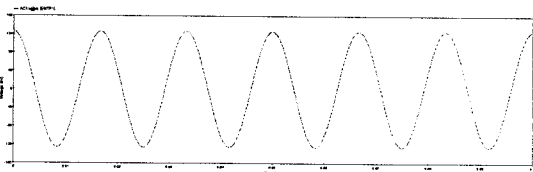


그림 9. 변압기 1차측 선간 전압 (해남측)

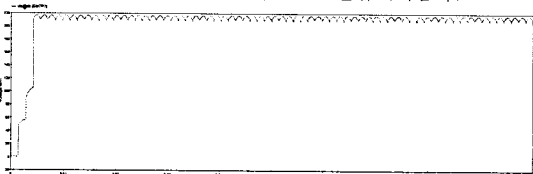


그림 10. 12pulse 컨버터 출력전압 (해남측)

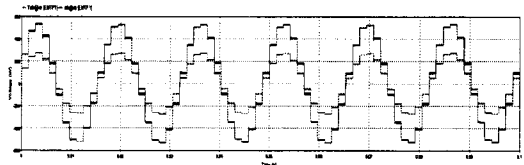


그림 11. 12pulse 인버터 출력전압 (제주측)

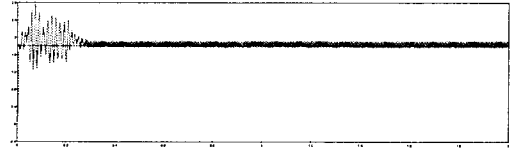


그림 12. DC전압 (해저케이블)

그림 9는 해남 계통에서 인가되는 154[kV]전압이 Y-Y 변압기를 거쳐 79.2kV로 변압된 전압파형이고, 그림 10은 해남측 3상 12pulse 위상제어 컨버터의 출력파형으로 계통전원 한 주기에 12펄스형태의 직류전압을 보여준다. 그림 11은 제주측 12pulse 위상제어 인버터의 출력 선간전압 파형이고, 그림 12는 해저케이블의 DC전압 180[kV] 파형이다.

4. 결 론

본 논문은 GUI 구현이 용이한 EMTD-RV를 이용한 제주-해남 HVDC 시스템의 동작특성을 모델링을 하였다. HVDC 시스템의 제어동작은 AC 계통의 과도현상이나 고장현상을 분석하기 위해서 반드시 필요한 부분으로 실시시스템에 가까운 시스템 모델링을 수립하여야 한다. 시뮬레이션 결과는 기존에 연구된 결과와 비교할 때 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 향후 EMTD-V를 이용하여 HVDC 시스템의 과도현상에 대해서도 모델링을 수립하여 실시시스템에 대한 해석을 하는데 있어 도움을 얻고자 한다.

후 기

본 연구는 “EMTD 활용도 제고 및 과도현상 분석에 관한 연구”의 일환으로 한국전력거래소(KPX)의 연구지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김세일, “HVDC에 대하여”, 전기학회지, 41권 10호, 10, 199 2. 10.
- [2] 성균관대학교, “EMTD 활용도 제고 및 과도현상 분석에 관한 연구”, 한국전력거래소, 중간보고서, 2007. 10.
- [3] 한국전기연구소, “초고압 대용량 직류송전 기술개발”, 과학기술처, 최종보고서, 1996.
- [4] 김찬기, “제주-해남 HVDC 시스템의 EMTDC 모델링”, 전력전자학회 논문지, 6권 1호, ppl-2, 2001.