

# 진도-제주 HVDC 시스템의 개념설계에 관한 연구

김제한, 김찬기, 이성두, 최장흠  
한전 전력연구원

## A Study on the Concept Design of Jindo-Jeju HVDC System

Jae-Han Kim, Chan-Ki Kim, Seong-Doo Lee, Jang-Hum Choi  
KEPCO

### ABSTRACT

The background of this paper is the HVDC concept design of Jeju HVDC #2, which will be operated at 2011. The concept design is the first step of HVDC design procedures and the contents handled in this procedure are operation conditions, short circuit ratios(SCR) and interactions between AC network and HVDC. The operating conditions are based on the reliability of HVDC and AC network, SCR is related to HVDC stability and overvoltage and the interaction is between HVDC and other AC equipments, that are FACTS, generator and HVDC. The results of this paper are a keystone of HVDC #2 design.

### 1. 서론

본 논문은 제주지역의 안정적 전력공급을 위하여 2011년 준공예정인 HVDC #2시스템의 AC계통과 상호작용(Interaction)에 관한 내용을 담고 있다. HVDC시스템은 전력을 수전받는 인버터 관점에서 관성이 없는 발전기로 생각할 수 있기 때문에 그림 1과 같이 제어계층을 가지고 있다. 즉, 계통을 통합 제어하는 변전소 SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition)에 해당하는 Master 제어기와 발전기의 터빈제어기에 해당하는 Pole제어기 그리고 HVDC 자체의 컨버터를 제어하는 Phase 제어기를 가지고 있으며, 그림 1에서 보는 바와 같이 각 제어기가 가지고 있는 역할과 제어 시정수를 가지고 있다. 따라서, HVDC 시스템의 각 제어기에는 제어하려는 목적에 따라 제어 신호를 가져야 한다.

예를 들면, 고조파 제어기는 Phase제어기에 입력되어야 하고, 저주파 영역(10Hz)의 Modulation신호는 Master제어기에 입력되어야 한다. 또한, HVDC 시스템은 AC계통의 주파수와 전압을 인위적으로 제어하는 능동설비이기 때문에 AC계통에 연결되어 운전되는 발전기와 변압기등과 같은 전력설비와 상호작용을 일으킬 수 있다. 따라서, 이러한 Interaction에 관한 검토가 필수적이며, HVDC시스템이 계통에서 차지하는 비중이 작다면 문제가 없으나 계통에서 차지하는 비중이 크면(즉, SCR(Short Circuit Ratio)이 크면,) 이러한 현상에 대해서는 심도 있는 검토가 필요하다.

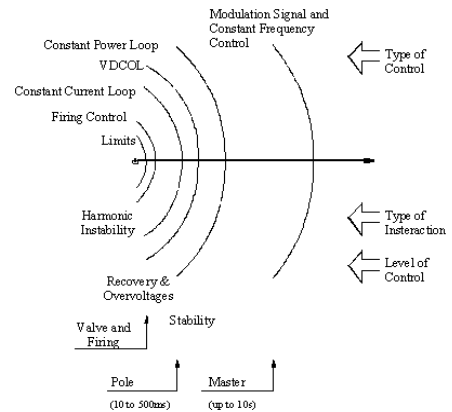


그림 1 시간에 따른 HVDC 제어영역  
Fig. 1 HVDC control region according to time

### 2. 제주 HVDC #2 동작특성

#### 2.1 제주 HVDC #2의 동작모드

제주 HVDC #2는 250[kV]와 800[A]의 정격을 가진 HVDC 2개로 구성되어 있으며, 정상상태에서 Double-Mono Pole를 기본으로 하고 있으며, 중성선에 고장이 있을 경우에는 Bipole동작으로 절체되며, 전력선에 고장이 발생하여도 전력전송에 지장이 없는 구성으로 되어 있다. 그림 2는 신뢰성과 확장성을 고려하여 4개의 HVDC MI케이블로 구성되어 선로 고장 시에도 전력용동에 문제가 없이 운전되는 운전모드를 보여주고 있다.

#### 2.2 제주 HVDC #2의 동작특성

제주 HVDC #2를 설계하기 위한 AC계통조건은 표 1과 같다. HVDC용 필터의 용량은 전력전송량 x 0.65 정도로 계산되며, 필터의 단위용량은 필터가 스위칭할 때 계통전압의 변화량이 5%이하로 억제되어야 하기 때문에 단락용량 x 0.05로 계산되어 진다.

한편, HVDC 시스템은 발전기관점에서 관성이 영(零: Zero)이면서 무효전력을 콘덴서와 동기조상기로 공급하는 발전기로 모의될 수 있으며 계통관점에서는 가상적인 무효전력을 소비하는 비선형 부하로 모의될 수 있다. 이러한 특성을 고려하여 HVDC 시스템은 전압안정도기법에 기반을 둔 MAP(Maximum Available Power)방법을 이용하여 안정도를 평가한다.

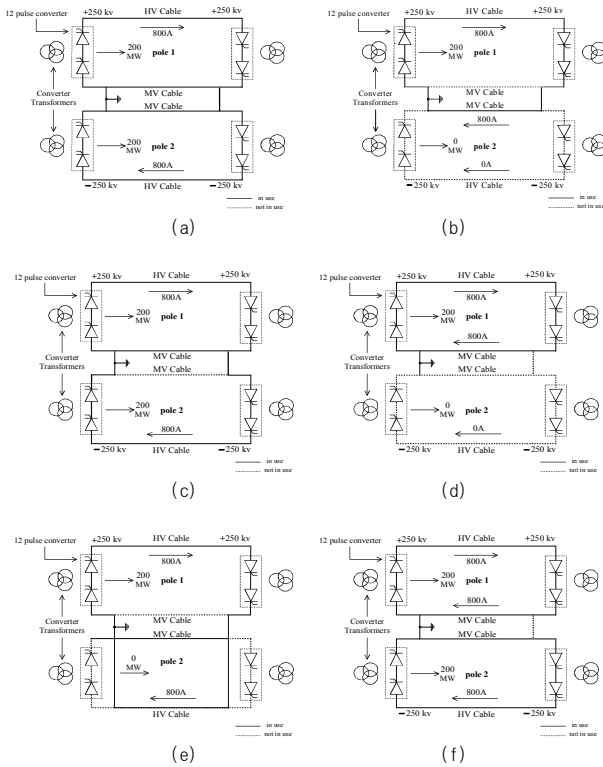


그림 2 제주 HVDC #2의 동작모드  
Fig. 2 Operating Mode of Jeju HVDC #2

표 1 2011년도 제주계통의 조건  
Table 1 AC network Condition for Jeju, 2011

	제주	진도
<AC 전압>		
- 정격전압	154kV	154kV
- 최대전압	160±4kV	160±4kV
- 최저전압	139kV	139kV
- 상 불평형율	3%	3%
<주파수>		
- 정격주파수	60[Hz]	60[Hz]
- 변동율	±0.2[Hz]	±0.2[Hz]
<단락용량>		
- 최대단락용량	13000[MVA]	8400[MVA]
- 최소단락용량	1300[MVA]	840[MVA]
- 임피던스 Ratio	20	20

HVDC 시스템의 안정도를 평가하는 MAP기법은 HVDC 시스템의 용량과 계통의 단락용량(SCR: Short Circuit Ratio: 단락용량)의 비를 이용하여 구하는 것으로 계통의 단락용량은 계통의 운전조건에 따라 바뀌기 때문에 계통의 최소 단락용량에 기반을 둔 안정도를 구하여야 한다. 표 2를 통하여 제주계통의 단락용량을 구해보면, 다음과 같다.

표 2에서 제시한 계통의 최소단락용량은 동기조상기 2대를 상시 운전하는 조건에서 구한 값이며, 부하량이 최소가 되는 시점을 기준으로 하여 설정한 값이다. 이러한 계통의 최소단락용량은 발전기나 동기조상기의 운전 대수 그리고 계통의 운영 조건에 따라 바뀔 수 있는 값이다. 그림 3은 단락비에 따른 HVDC 시스템의 안정도를 평가한 것으로서 붉은 선은 HVDC 시스템의 안정도 커브 그리고 푸른 선은 전압안정도 커브를 보

여주고 있다.

표 2 제주 계통의 단락비  
Table 2 SCR of Jeju AC network

840[MVA]	HVDC 운전량	SCR
Case 1 (N-2)	HVDC #1 : 150 HVDC #2 : 200	2.4
Case 2 (N-0)	HVDC #1 : 300 HVDC #2 : 400	1.2
Case 3 (N-1)	HVDC #1 : 300 HVDC #2 : 200	1.68

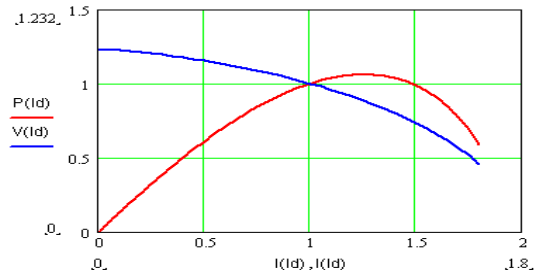


그림 3 단락용량에 따른 HVDC 안정도 커브  
Fig. 3 HVDC Stability Curve due to SCR

그림 4는 HVDC 시스템의 전압/전류 특성곡선을 보여주고 있는 것으로 정상상태에서 렉티파이어 단에서는 전류제어를 수행하고 인버터 단에서는 전압제어를 수행하는 것을 보여주고 있다. 그림 5와 그림 6은 그림 4의 특성곡선에 기반을 둔 PSS/E 모델을 시뮬레이션한 결과로, 그림 5는 렉티파이어 단에서 3상 지락사고를 일으킨 경우의 HVDC 응답특성을 보여주고 있는 것이며, 그림 6은 인버터 단에서 3상 지락사고를 일으킨 경우에 HVDC 응답특성을 보여주고 있다. 그림 5에서 a)파형은 AC계통의 모션전압을 보여주고 있는 것으로 인버터 단은 커패시터에 의해서 고장시간동안 과전압이 인가되는 것을 보여주고 있으며, b)파형은 인버터단에서 HVDC탈락에 의해서 주파수가 하강하고, HVDC가 회복했을 경우에는 주파수가 상승하는 것을 보여준다.

그림 6에서 b)파형은 지락사고 동안에 잉여전력에 의해서 계통의 주파수가 증가하는 것을 보여주고 있다.

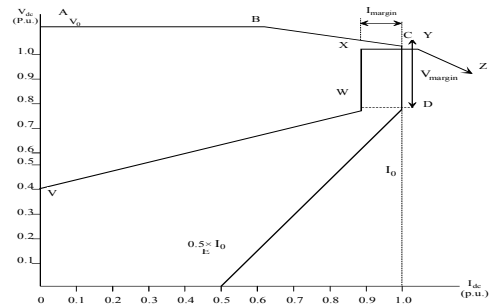
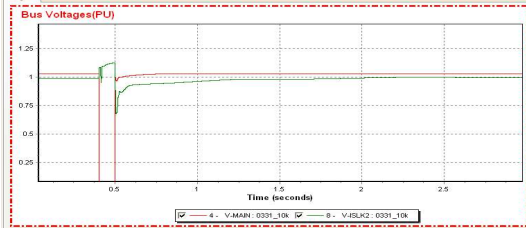
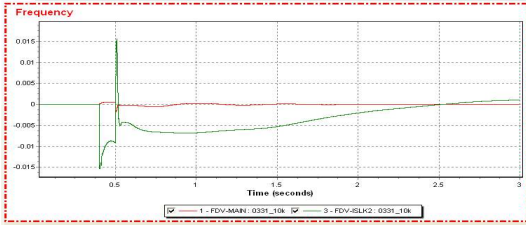


그림 4 제주 HVDC #2의 전압/전류 특성곡선  
Fig. 4 V/I Characteristics of Jeju HVDC #2

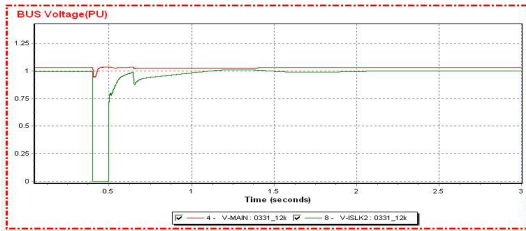


a) 렉티파이어 단과 인버터 단의 AC 모션전압

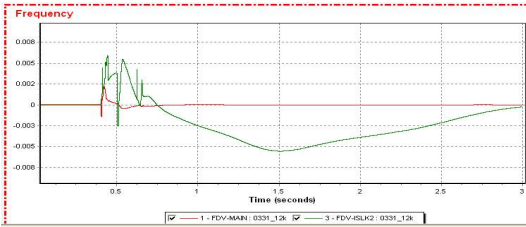


b) 렉티파이어 단과 인버터단의 주파수

그림 5 제주 HVDC #2의 동작특성(렉티파이어 단의 AC 3상고장 시나리오)  
Fig. 5 Jeju HVDC #2 operating characteristics (AC 3-phase failure scenario on rectifier)



a) 렉티파이어 단과 인버터 단의 AC 모션전압



b) 인버터단의 주파수신호 (HVDC #1 단과 HVDC #2 단)

그림 6 제주 HVDC #2 동작특성 (인버터 단의 AC 3상고장 시나리오)  
Fig. 6 Jeju HVDC #2 operating characteristics (AC 3-phase failure scenario on inverter)

### 3. HVDC Interaction

#### 3.1 HVDC Interaction의 종류

AC계통에 HVDC 시스템이 설치되는 경우에는 HVDC와 HVDC 그리고 HVDC와 발전기 또는 HVDC와 FACTS설비 사이에 상호작용(Interaction)이 발생할 가능성이 있다. 이러한 Interaction은 발생 주파수에 의해서 표 3과 같이 분류될 수 있다.

#### 3.1.1 HVDC/HVDC Interaction

HVDC 시스템들 간에 상호작용은 주로 HVDC사이의 정류 실패에 의한 Interaction이 주된 요인이고, 주파수제어에 의한 Interaction은 Speed Droop에 의해서 제어된다.

표 3 발생주파수에 의한 Interaction의 분류

Table 3 Classification of interactions according to generated frequency

	주파수	분류
1	약 0 Hz	정상상태 제어기
2	0에서 3/5Hz	전기기계적 진동
3	2에서 15 Hz 또는 이상	소신호 혹은 제어 진동
4	10에서 50/60 Hz	저주파 공진
5	> 15Hz	15Hz 전자기 과도, 고주파 혹은 고조파공명, DC 정류실패 영향

#### 3.1.2 HVDC/FACTS Interaction

HVDC시스템이 FACTS설비와 Interaction을 유발할 수 있는 가능성은 검토되어야 한다. 현재까지 FACTS설비와 HVDC 사이의 Interaction이 보고된 적은 없지만, 위에서 검토되었던 주파수대역에 다른 Interaction에 대해서는 검토를 하여야 한다.

FACTS 설비와 HVDC 정상상태 제어기들 간의 상호작용은 주로 무효전력에 관계되어 나타난다. 예를 들어 HVDC설비의 필터는 기계적인 스위치이기 때문에 속응성이 낮지만, FACTS 설비의 무효전력설비의 스위치는 전기적인 작용으로 동작되기 때문에 HVDC와 FACTS설비사이에는 정상상태 Interaction이 존재하게 된다. 따라서 HVDC설비와 FACTS사이에는 중앙제어장치가 필요하다.

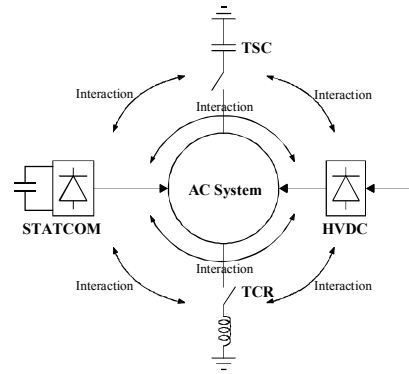


그림 7 HVDC와 FACTS사이의 Interaction  
Fig. 7 Interaction between HVDC and FACTS

#### 3.1.3 HVDC/Generator Interaction

HVDC와 발전기가 서로 커플링되어 있는 AC계통에서 HVDC와 발전기사이에는 다양한 형태의 Interaction이 존재한다. 그리고 이러한 문제는 그동안 많은 문헌을 통하여 보고되어 왔으며 다양한 해석적인 방법과 대책이 제시되고 있다. 계통의 고장이나 부하의 가감에 의해서 발전기의 축이 중요하다고 가정하면, HVDC 모션전압의 크기와 위상각이 변동하고 위상각의 변화에 의해서 HVDC의 점호각이 변하고 각의 변동을 가져온다.

HVDC의 전압과 전류도 변화하고, HVDC의 전류제어는 이러한 전류변화를 억제시키는 제어동작을 하지만, HVDC시스템의 전류제어동작은 AC계통의 무효전력을 변화시키기 때문에 AC계통에 연결되어 있는 발전기의 토크에 영향을 미친다. 이러한 토크의 변화가 터빈 발전기축의 토크방향과 일치하면, 진동은 억제되지 않고 커지게 된다.

### 3.2 제주 HVDC #2에서 Interaction 검토

#### 3.2.1 HVDC/Generator Interaction

일반적으로 SSTI(SUBSYNCHRONOUS Torsional Interaction)는 인버터 모드에서는 발생하지 않는다고 보고 되고 있다. 이러한 현상은 인버터에 연계되어 있는 발전기의 Damping이 Positive로 동작하기 때문에 터빈-발전기와 HVDC사이에서는 저주파 진동은 발생하지 않는다. 따라서, 제주 HVDC에서 SSTI를 검토하는 경우에는 제주에서 잉여전력을 육지로 전송하는 경우를 고려해 볼 수 있는데, 제주 HVDC를 렉티파이어 모드(전력의 전송방향이 제주에서 육지)로 운전되면, 실제로 제주에서 SSTI가 발생할 가능성은 거의 없다. 또한, 2011년 이후에 제주 부하와 풍력전원이 증가하는 경우를 가정해 볼 수 있는데, 이 경우는 SSTI의 발생 가능성을 더욱 떨어뜨린다.

#### 3.2.2 자기여자 현상

HVDC는 전력전송량의 60%정도의 무효전력을 소모하기 때문에 HVDC 단에 필터나 커패시터의 설치가 필수적이다. 이러한 커패시터는 경제적인 면에서는 대단히 좋은 면을 가지고 있으나 계통의 임피던스와 결합하여 저주파 진동이나 고조파 불안정(Harmonic Instability) 그리고 발전기의 자기여자현상을 유발한다. 표 1에서 보여주는 HVDC의 운전 조건은 HVDC인 근의 발전기에 영향을 줄 수 있는 것으로 앞에서 검토했던 자기여자현상에 대한 상황을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

먼저 계통의 단락용량과 HVDC 운전용량 그리고 발전기의 단락용량 사이의 관계를 검토하면 다음과 같다. 발전기가 자기여자현상으로 진입하는 조건은  $X_c < X_d$ 와  $X_c < X_q$ 으로써  $X_c$ 는 발전기 터미널에서 바라본 등가 커패시터( $X_{ce}$ )로 생각할 수 있다. 그러므로  $X_c$ 는 계통의 단락용량을 고려하여 다음과 같이 재유도 할 수 있다.

$$X_{ce} = X_c - X_e = X_c - Z_{ac} \quad (1)$$

따라서, HVDC에 연결된 발전기가 자기여자현상을 유발할 수 있는지에 관한 수식이 다음과 같이 유도 될 수 있다.

$$X_d > \frac{E_{ac}^2}{P_{dc}} \cdot \left( \frac{1}{0.7} - \frac{1}{SCR} \right) \quad (2)$$

$$X_q > \frac{E_{ac}^2}{P_{dc}} \cdot \left( \frac{1}{0.7} - \frac{1}{SCR} \right)$$

이상에서 검토한 수식을 바탕으로 표 4의 각 조건에 대하여 검토하면, 제주계통에서 자기여자현상이 예상되는 경우는 없는 것으로 판단된다.

표 4 제주 발전기의 Xd, Xq  
Table 4 Xd, Xq of generator in Jeju

발전기	Xd	Xq
북제주 GT	1.276	1.000
남제주 GT1	1.075	1.040
남제주 GT2	1.456	1.405
남제주 GT3	1.456	1.405
남제주 TP1	1.456	1.920
남제주 TP2	1.456	1.920
남제주 TP5	1.456	1.630

#### 3.2.3 정류실패

정류실패(Commutation Failure)는 사이리스터를 이용한 직류송전 시스템에서는 피할 수 없는 문제이다. 이러한 이유는 사이리스터는 도통 능력은 있으나 자체적인 소호 능력이 없는 반도체 소자로서 사이리스터에 역 방향 전압을 인가해야만 소호가 되기 때문이다. 따라서, 정류실패는 HVDC시스템의 밸브와 무효전력 그리고 보호 계전기 정정 문제와 같은 많은 문제를 유발하기 때문에 시스템을 설계하기 전에 반드시 검토되어야 하는 문제이다. HVDC 시스템에서 정류실패에 대한 검토는 많은 문헌을 통하여 보고되어 왔으나 Thio에 의한 검토가 가장 단순하면서 신뢰성이 높은 방법으로 평가되고 있다. 다음은 Thio가 제안하는 정류실패의 가능성에 대한 수식이다. 인버터에서 3상 지락 고장시에 정류전압의 감소에 따른 정류실패 가능성에 대한 수식은 다음과 같다.

$$\Delta V = 1 - \frac{I_d'}{I_d} \frac{(I_d/I_{dFL})X_{cpu}}{(I_d/I_{dFL})X_{cpu} + \cos\gamma_0 - \cos\gamma} \quad (3)$$

또한, 단상 지락사고시에 정류실패에 관한 수식은 다음과 같다.

$$\Delta V = 1 - \frac{I_d'}{I_d} \frac{(I_d/I_{dFL})X_{cpu}}{(I_d/I_{dFL})X_{cpu} + \cos(\gamma_0 + \phi) - \cos\gamma} \quad (4)$$

식 (3)과 (4)에서 보여주는 정류실패에 대한 수식을 통하여 정류실패를 억제하는 알고리즘이 도출될 수 있으며 가장 일반적인 정류실패 억제 알고리즘은 그림 8에서 보여주는 것과 같이 정류실패가 발생하는 경우에 HVDC 제어기의 제한기가 165도에서 145도로 줄어들어 제어특성을 어느 정도 희생하더라도 정류실패를 억제하는 알고리즘이 가장 일반적인 알고리즘이다.

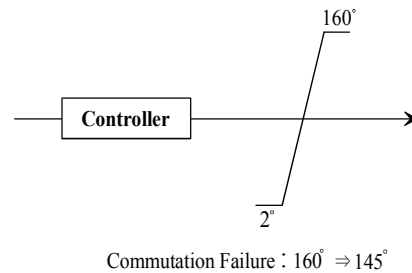


그림 8 정류실패 억제 알고리즘

Fig. 8 Commutation failure suppression algorithm

## 4. 결론

본 논문은 제주 HVDC #2시스템의 운전특성을 분석한 논문으로써 HVDC #2 시스템의 운전특성 그리고 전압/전류 특성 곡선을 다루었으며, HVDC 시스템이 운전하고 있는 경우에 AC계통에서 발생할 수 있는 Interaction 작용을 분석하였다.

## 참고 문헌

- [1] “제주 추가연계선 타당성 검토”, 전력연구원 보고서, 2005.
- [2] “제주 발전설비 및 운전현황”, 전력거래소 보고서, 2007
- [3] Kundur, “Power System Stability and Control”, 1993.
- [4] “Cheju-Haenam HVDC manual”, AREVA, 1996.