

# HVDC계통에서 동기조상기의 파라미터 선정에 관한 연구

논 문
59-8-2

## A Study on the Parameter Determination of Synchronous Compensator in AC network with HVDC system

이 석 진<sup>†</sup> · 이 흥 재<sup>\*</sup>  
(Seok-Jin Lee · Heung-Jae Lee)

**Abstract** - This paper presents the determination of synchronous compensator(S.C) rating and parameter in Cheju AC network. The role of S.C is to supply Inertia and reactive power to HVDC system which is a kind of a generator without the function of reactive power control and Inertia. Therefore, the parameters of S.C have to be determined by considering HVDC operating characteristics. The background of this paper is the determination of S.C parameters in Cheju AC network in the case of replacing current operating S.C to new S.C type.

**Key Words** : HVDC, Synchronous Compensator

### 1. 서 론

HVDC 시스템은 인위적인 전력제어가 가능하다는 장점 때문에 AC 계통망의 요소요소에 설치됨으로써 계통의 안정도를 높이는 역할을 하지만, 발전기가 없는 약한 독립계통에 연계되는 경우에는 관성문제, 과전압 문제, 저주파 공진문제 등 많은 문제점을 유발하고 있다. 이러한 이유 때문에 1992년 CIGRE Working 그룹에서는 “Guide for Planning DC links Terminal at AC system locations having low SCR”라는 보고서를 통하여 HVDC 시스템이 약한 계통에 연계되는 경우에 검토해야할 사항과 기준값을 제시하였다 [1]. 또한, 캐나다 Manitoba Hydro에서는 Nelson River HVDC 시스템의 안정적인 운전을 위하여 최적의 동기조상기 파라미터선정에 관한 논문을 발표하였다[2].

그러나 이러한 기준이나 방법은 AC계통의 환경과 운전조건에 따라 다르기 때문에 각각의 경우에 대하여 독자적으로 기준과 설계과정을 가져야 한다.

관성이 없는 독립계통에 HVDC 시스템이 연계되는 경우에는 HVDC 시스템은 동기조상기와 상호협조 운전하여 유효전력은 HVDC 시스템이 담당하고, 계통의 무효전력과 관성은 동기조상기가 담당하여 HVDC 시스템과 동기조상기가 하나의 이상적인 발전기 역할을 하도록 운전하여야 한다. HVDC가 연계된 계통에서 동기조상기의 역할은 다음과 같다.

- ① 계통의 단락용량 증대( $X_d''$ , Step-Up변압기)
- ② 계통의 관성유지( $H_{DC}$ )

- ③ 계통의 과전압제어(발전기 AVR)
- ④ 계통의 무효전력제어(전압제어)
- ⑤ 관성이 없는 계통에서 HVDC에 주파수 신호 제공
- ⑥ 동기조상기와 계통사이의 Interaction( $X_d''$ 와  $X_q''$ )

따라서, 본 논문에서는 위에서 제시한 항목에 대하여 HVDC 시스템을 가진 제주 AC계통에서 동기조상기의 파라미터의 적정성과 결정에 관한 기준을 제시하고자 한다.

제주도는 지역적인 특성상 그리고 경제성 때문에 추가적인 자체 발전기의 건설보다는 HVDC 시스템을 이용한 전원 공급이 유리하기 때문에 1998년부터 150[MW] x 2(Bipole)급 HVDC가 상업운전 중에 있으며, 2011년도에는 200[MW] x 2(Bipole)급 HVDC가 준공예정으로서 있으며 제주도의 HVDC 시스템의 각각의 정격에 대하여 검토해 보면 다음과 같다.

- HVDC #1 : 150MW x 2, Filter : 105MVA
- HVDC #2 : 200MW x 2, Filter : 240MVA

그리고 제주지역의 최대부하와 최소부하 그리고 년도별 최대 부하는 다음과 같다.

- \* 년도별 최대부하 (2011년)
- 2011년 : 700MW
- 2012년 : 735MW
- 2013년 : 763MW
- 2015년 : 815MW

- \* 제주 최대부하와 최소 부하(2011년)
- Peak Load : 700MW
- Off-Peak Load : 400MW

<sup>†</sup> 교신저자, 정회원 : 한전품질검사소장

E-mail : leeseokj@kepeco.co.kr

\* 시니어회원 : 광운대 공대 전기공학과 교수

접수일자 : 2010년 4월 7일

최종완료 : 2010년 7월 20일

따라서, HVDC 시스템이 제주계통의 50%이상의 전력을 공급함에 따라 제주계통에서 동기조상기의 역할은 대단히 중요하기 때문에 동기조상기의 파라미터는 HVDC 시스템의 동작 특성과 연계되어 결정되어야 한다.

## 2. 본 론

동기조상기의 역할 중에서 계통의 전압제어기능을 고려해 보면 동기조상기는 계통의 신뢰도 만족과 과전압제어 그리고 무효전력제어를 수행해야한다. 일반적으로, AC계통은 다음 조건을 만족하는 범위 내에서 운전된다.

① 계통의 전압은 정상상태에서 무효전력의 제어동작 없이 규정된 값 이내에 존재하여야 한다. 예를 들어 모선전압은 0.975~1.025사이를 유지해야 한다.

② 계통의 전압은 신뢰도 관점에서 Post-Fault Limit안에 존재해야하고, 무효전력 마진 내에서 무효전력의 제어동작 없이 규정된 값 이내에 존재해야 한다. 즉, 발전기의 변압기 탭 위치나 보상기의 전압의 인위적인 조정이 필요없어야 한다. 예를 들면, Post-Fault에서 AC계통전압은 0.95~1.05 사이를 유지해야 한다.

③ 전압의 스텝 동작이 규정 값을 넘어서는 안 된다. 예를 들면, 전압의 스텝 상승이 6%를 넘어서는 안 된다.

④ 시스템은 최소한의 민감도와 강인성을 만족해야 한다. 예를 들어, 정전에 수반해서, 전압붕괴에 대한 적당한 마진이 있어야하고, 시스템은 Radial fed 영역에 추가적으로 5%의 전력전송을 보장할 수 있어야 하며, 어떤 하나의 보상설비나 어떤 발전기가 상실되어도 문제가 없어야 한다.

### 2.1 단락비 관점

HVDC 시스템이 연계된 계통에서 단락비(SCR : Short Circuit Ratio)는 HVDC 송전량과 계통용량의 상대적인 비를 나타내고 있는 것으로서 HVDC 시스템의 안정적인 운전을 판단하는 하나의 지표가 된다.

일반적으로 단락비에서 HVDC용 커패시터를 고려한 유효 단락비(ESCR: Effective Short-Circuit Ratio)가 2이하가 되는 경우에는 계통에 안정도 문제를 유발하기 때문에 HVDC 시스템을 계통에 연계하는 경우에는 유효단락비가 2.5가 되는 조건으로 운전 시나리오를 상정하는 것이 일반적이다.

따라서, HVDC 시스템이 계통의 연계된 경우에는 HVDC 시스템과 발전기 또는 HVDC 시스템과 발전기와 동기조상기를 결합한 운전 시나리오를 상정해야 한다. 다음은 제주계통에서 가상의 운전시나리오를 상정한 것으로써 첫 번째 경우는 발전기 2대를 Must-Run으로 동작시키는 경우로써 유효단락비는 기준 값을 만족하는 경우이다. 본 논문에서는 HVDC 시스템이 제주부하의 50%이상을 공급하는 것을 기본으로 하고, 극단적인 경우인 HVDC의 정격용량 700[MW]와 500[MW]를 가정한 경우를 가정하여 시뮬레이션 하였다.

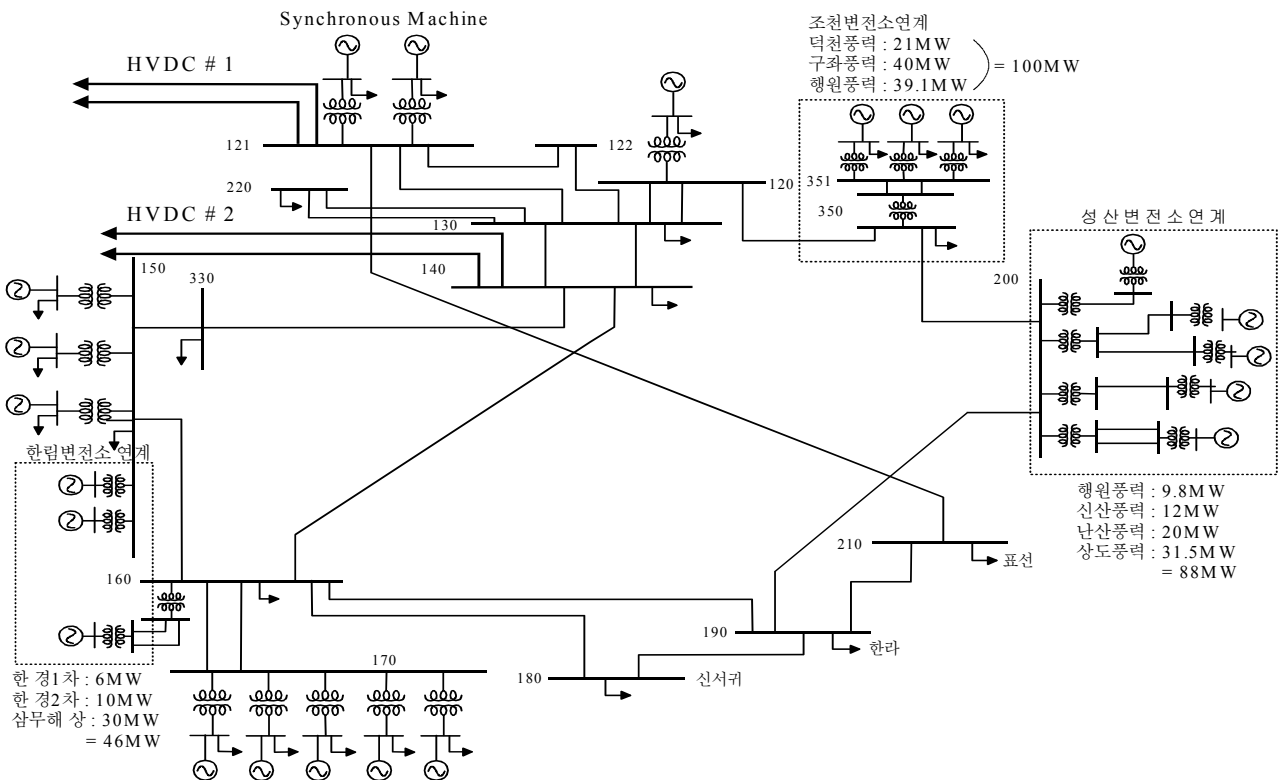


그림 1 제주 전력계통도  
Fig. 1 Cheju AC network Diagram

**운전 시나리오(Off-Peak시 400MW)**

- ① HVDC #1 + HVDC #2 + **G(40MVA) x 2**  
(150MW) (200MW) (50MW)  
▶ **Must-Run Gen.**

▶ 유효단락비 : 1.5

- ② HVDC #1 + HVDC #2 + S.C(70MVA) x 2  
(150MW) (250MW) (0MW)

▶ 유효단락비 :1.5

- ③ HVDC #1 + HVDC #2 +S.C(70MVA) x 4  
(150MW) (250MW) (0MW)

▶ 유효단락비 :2.5

따라서, Off-Peak시 HVDC 시스템만으로 제주계통의 필요전력을 공급하는 경우에는 계통의 안정도문제가 유발될 수 있으며, 신뢰도 관점에서 동기조상기의 고장이나 휴전을 (N-1)로 고려하여 검토해 보면 현재 검토되고 있는 동기조상기의 용량과 유사한 3개의 추가적인 동기조상기가 필요하다는 결론을 도출 할 수 있다.

또한, 만약 HVDC 시스템의 설비용량이 700MW이기 때문에 운전용량을 700MW로 가정하는 경우나 (N-1)을 고려하여 500MW로 가정하는 경우는 HVDC 시스템이 연계된 계통의 유효단락비가 2.5를 유지하기 위한 최소한의 동기조상기 수량을 계산하면 다음과 같다.

**\* HVDC 운전용량을 700MW로 가정**

- ① HVDC #1 + HVDC #2 + S,C(70MVA) x 6  
(300MW) (400MW) (0MW)

▶ 유효단락비 :2.5

**\* HVDC 운전용량을 500MW로 가정**

- ① HVDC #1 + HVDC #2 + S.C(70MVA) x 5  
(300MW) (200MW) (0MW)

▶ 유효단락비 :2.5

**2.2 관성 관점**

발전기는 터빈에서 발생하는 기계에너지를 전기적인 에너지로 바꾸어 주는 장치로써, 기계적인 장치에 의해서 관성을 가지고 있다. 관성은 제어의 속응성을 더디게 하고, 저주파 공진을 유발시키는 단점을 가지고 있지만, 에너지를 기계적으로 저장시켜서 계통에서 필요할 때 뽑아 쓸 수 있는 장점도 가지고 있다. 따라서, 전력계통의 계획하는 경우에는 다음과 같이 최소한의 관성을 유지시켜 주는 것이 계통의 신뢰도 관점에서 유리하다.

$$df = \frac{\Delta P_e \times f_o \times dt}{2 \times H} \tag{1}$$

여기서,  $df$ 는 계통에서 허용하는 주파수변동,  $f_o$ 는 기준 주파수,  $\Delta P_e$ 는 전력변화량,  $dt$ 는 고장제거시간,  $H$ 는 관성 모멘트

위 식을 시간에 대한 함수로 표현하면 다음과 같이 표현될 수 있으며, 여기서 관성은 계통의 관성을 모두 합한 등가 관성이 된다.

$$f = f_o(0) \cdot \Delta P_e \cdot e^{-\sum_{n=1}^{n=k} \left( \frac{1}{2 \cdot H_n} \right) \cdot \frac{k \times t}{H_n}} \tag{2}$$

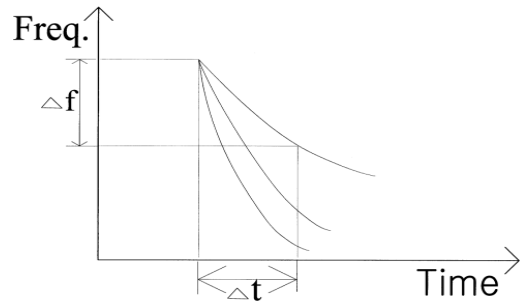


그림 2 관성에 따른 주파수 하락 범위  
Fig. 2 Frequency reduction rate according to inertia.

위 식으로부터 AC계통에서 허용하는 주파수 감소폭( $df$ )가 5%(일반적인 값)이고 고장회복시간( $dt$ )가 330ms인 경우에는 계통에서 필요로 하는 필요관성( $H$ )는 2.5로 계산되어진다.

따라서, AC 계통에서 동기조상기의 평균관성이 2.5이상인 경우에는 유효단락비만 고려하면 되지만 전동기형태의 동기조상기는 일반적으로 2.0이하가 되기 때문에 추가되어야 할 동기조상기는 늘어나게 된다.

한편, 계통 부하의 1/3은 발전기로 공급하고, 2/3는 HVDC 시스템으로 공급하는 경우에는 계통관점에서 발전기의 관성은 다음과 같이 등가 관성으로 변화게 된다.

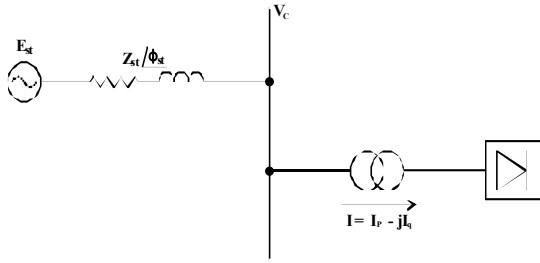
$$H_{DC} = \frac{H_{ac} \times AC \text{ power}}{DC \text{ power}} z \tag{3}$$

일반적으로 발전기의 관성은 6이상의 값을 가지며 터빈이나 Shaft의 크기 때문에 전동기로 운전되는 동기조상기보다는 관성이 커지는 경향이 있다. 따라서 발전기를 HVDC와 병렬 운전하는 경우에는 1~2대정도의 Must-Run 발전기만으로도 관성문제는 해결된다.

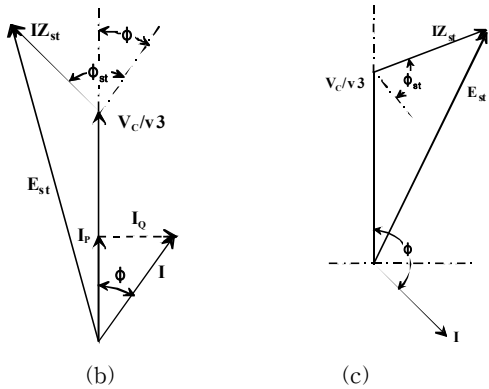
**2.3 과전압 제어**

HVDC 시스템이 연계된 계통은 HVDC가 소비하는 무효

전력을 보상하기 위해서 커패시터 뱅크를 계통에 병렬로 삽입해야 한다. 이러한 커패시터는 HVDC 시스템이 Blocking 상태나 부하차단과 같은 사고나 외란에 의하여 일시적인 정지(Temporary Stop)한 경우에는 계통의 전압을 상승시키는 효과를 가져다주기 때문에 과전압에 대한 고려가 필요하다.



(a)



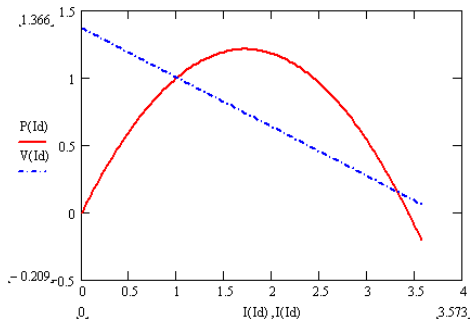
(b)

(c)

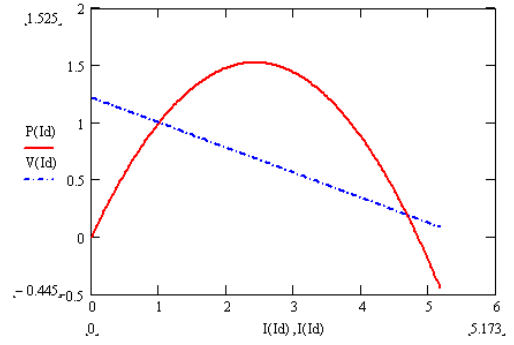
그림 3 HVDC 시스템이 연계된 계통의 과전압 개념도

Fig. 3 Concept diagram of overvoltage of AC network in the case of connected HVDC system.

커패시터에 의한 과전압은 계통의 유효단락비에 의해 결정되기 때문에 유효단락비가 작을수록 높은 과전압이 발생하고 유효단락비가 클수록 작은 과전압을 발생시킨다. 그림 4(a)는 유효단락비가 1.5인 경우를 MAP(Maximum Available Power) 방법을 이용하여 시뮬레이션한 경우으로써 안정도 및 과전압곡선을 보여주고 있는 것으로 HVDC가 정지한 경우(DC전류 Id가 영(零:Zero))에는 1.4근방의 과전압이 발생하는 것을 보여주고, 그림 4(b)의 경우는 유효단락비가 2.5인 경우의 HVDC 안정도 및 과전압 곡선을 보여주고 있다.



(a) SCR이 1.5인 경우



(b) SCR이 2.5인 경우

그림 4 MAP방법을 사용한 경우에 유효단락비에 따른 HVDC 안정도와 과전압 커브

Fig. 4 HVDC stability curve and overvoltage curve according to SCR in the case of using MAP method

그림 4에서 보여주는 HVDC 안정도와 과전압 커브에서 과전압을 규정 값 이하로 유지하기 위해서는 전압 제어 설비가 HVDC가 연계된 계통에서는 필수적이다.

동기조상기의 경우는 전압 제어기능과 관성 그리고 유효단락비를 높이는 기능이 있기 때문에 약한 계통에서는 HVDC 설비와 하나의 pair로 계통에 설치되는 것이 일반적이다. 그림 5는 HVDC 시스템의 Blocking 시에 과도 과전압을 보여주고 있는 것으로 HVDC 시스템의 과도과전압을 제어하기 위한 용량과 시간을 보여준다.

과도과전압의 제어시간은 무효전력 보상장치의 종류에 따라 결정되는데, 전압의 크기가 작을수록 시간도 작아지는 경향이 있다.

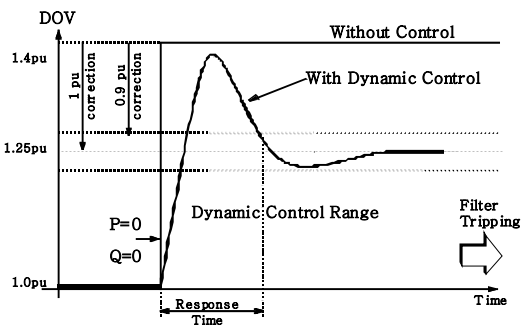


그림 5 HVDC 시스템의 Blocking 시의 과도 과전압

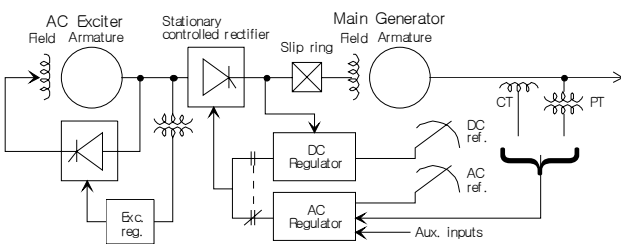
Fig. 5 Dynamic overvoltage at the blocking of HVDC system.

동기조상기는 SVC나 STATCOM과 다르게 전압을 제어하는 기능 이외에 계통의 유효단락비를 증대시키는  $X_d''$ 이 존재하기 때문에 동기조상기가 HVDC 시스템과 병렬 운전하는 경우에는 차과도 리액턴스  $X_d''$ 의 선택이 중요하다.  $X_d''$ 는 과도상태에서 동기조상기의 과도 무효공급능력을 결정짓는 파라미터로써 제작의 한계 내에서 최대한 크게 결정하면 된다.

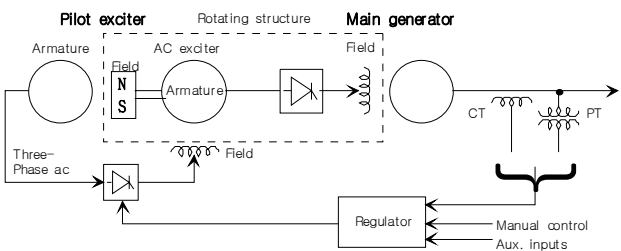


있다. 반면에 정지형 여자 시스템은 발전기의 축이 짧아지는 장점이외에 계통사고에 대해 민감하다는 단점을 가지고 있다. 또한, AC여자시스템은 0[V]근처에서 운전이 가능한 반면 정지형 여자 시스템은 정격의 30%~40%정도에서 운전이 가능하다. 그러나 이러한 값도 이론적인 값이며 실제적으로는 AC여자시스템의 경우 정격의 10%~40%이상, 정지형 여자시스템은 70%이상으로 하고 있다.

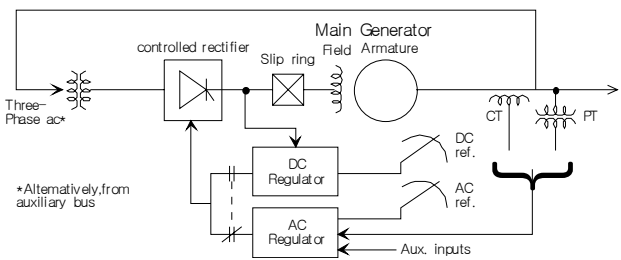
제주계통에 적합한 동기조상기용 AVR은 속응성과 AC계통의 영향에 민감한 형태를 가져야 한다. 제주계통에서 동기조상기의 속응성은 그림 5에서 보여주는 과도 과전압을 정해진 IDMT(Inverse Definite Minimum Time)이하로 제어하는 시간이 AVR의 속응성이 된다. 또한, 극단적인 경우에 AC계통에서 지락사고가 발생하여 계통전원이 무압(No-Voltage)이 되는 경우에는 정지형 여자시스템의 전원이 상실되어 여자시스템이 정지하게 되기 때문에 속응성이 보장되는 시스템에서는 AC회전형 여자시스템이 HVDC용 동기조상기에 적합한 AVR로 제시하였다. 그림 8은 현재 상용화된 AVR의 종류를 보여주고 있다.



(a) AC회전형 여자시스템



(b) Brushless 여자시스템



(c) 정지형 여자 시스템

그림 8 여자 시스템의 종류  
Fig. 8 Excitation system types

## 2.8 동기조상기의 Interaction

우선적으로 동기조상기와 HVDC 시스템 사이의 Interaction을 고려해 보면, 동기조상기는 무효전력을 보상하는 기기임으로 HVDC 시스템과 무효전력관점에서 협조제어 기능을 가져야 한다. 즉, HVDC 시스템의 무효전력을 보상하기 위해서 기계적인 스위치를 가진 커패시터가 동작하기 전에 동기조상기가 동작하는 경우, 혹은 AC계통의 무효전력을 보상하기 위해서 동기조상기의 무효전력 출력이 과도한 경우에는 동기조상기와 커패시터 그리고 HVDC 시스템 사이에는 협조제어 기능이 있어야 한다. 따라서, HVDC 시스템의 운전조건에 동기조상기의 운전조건을 설정하였다.

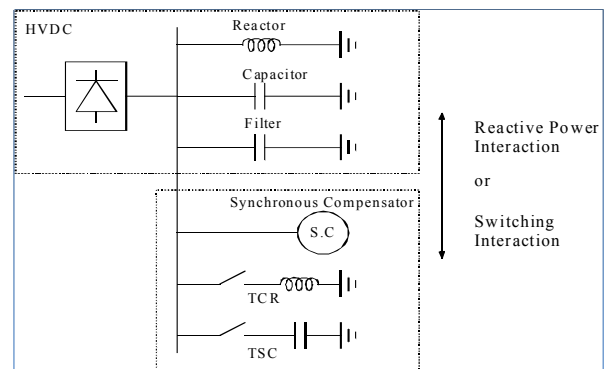


그림 9 동기조상기와 HVDC 시스템 사이의 상호작용  
Fig. 9 Interaction between HVDC and synchronous compensator

또한, 동기조상기와 HVDC 시스템의 커패시터사이의 상호작용에 대하여 검토해 보면, 동기조상기는  $X_d''$ 과  $X_q''$ 같은 리액턴스를 가지고 있는데, 이 값이 HVDC 시스템의 무효전력을 공급하는 커패시터 값과 상호작용을 일으킬 경우에는 동기조상기는 조건에 따라 Negative 시정수를 가질 수 있는데, 즉, 동기기가 유도기 작용을 하면서 자기여자현상을 유발할 수 있다. 동기기가 커패시터에 의해서 Negative 시정수를 가지는 조건은 다음 식과 같다.

$$T_d = T_{d0} \frac{X_c - X'_d}{X_c - X_d} \quad \text{and} \quad T_q = T_{q0} \frac{X_c - X'_q}{X_c - X_q} \quad (5)$$

“자기여자현상”은 그림 10에서 보는 바와 같이 AC계통이 동기조상기와 커패시터만이 존재하는 경우에 강하게 발생할 수 있는데, 이 조건은 위 식과 같다.

위 식에서 파라미터  $X_d$ 는 여자시스템의 제어루프에 포함된 제어 게인으로 해석될 수 있기 때문에 어느 정도 무시할 수 있으나,  $X_q$ 는 개회로 파라미터(Open Loop Parameter)이기 때문에 동기조상기의 자기여자현상의 결정적인 변수라

할 수 있다. 따라서, 동기조상기의 파라미터  $X_q$ 는 1.9[p.u.]이고  $X_q'$ 는 0.3[p.u.]인 경우를 고려해 보면 제주 계통에서는 동기조상기의 자기여자 현상은 발생하지 않는 것으로 검토되었다.

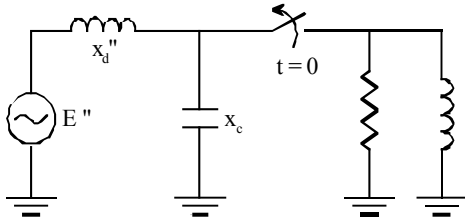


그림 10 자기여자현상의 시나리오  
**Fig. 10** Scenario of self-excitation of synchronous compensator

### 3. 결 론

논문에서는 제주 HVDC 시스템운영과 관련된 동기조상기의 역할과 특성에 대하여 분석하였다. 동기조상기는 계통의 유효단락비와 무효전력 보상 그리고 적절한 관성유지에 영향을 미친다. 본 논문의 결론은 다음과 같다.

- ① HVDC 시스템의 운전용량에 따라 추가적인 동기조상기가 필요하다.
- ② HVDC 시스템이 최소한의 Must-Run 발전기와 병렬 운전하는 경우에는 무효전력과 관성유지에 적당하다.
- ③ 선택된 동기조상기의 파라미터는 다음과 같다.

#### 선정된 동기조상기 파라미터

- Rating Base (for pu) : 70 MVA
- Rated Voltage : 13.8 kV
- Rotating Inertia : 7315 Kgm<sup>2</sup>
- Power Factor (lagging) : 0.9
- Speed 3600 rpm
- Transient Reactance  $X'd$  0.216 pu
- Transient Reactance  $X'q$  0.309 pu
- Synchronous Reactance  $X_d$  2.11 pu
- Synchronous Reactance  $X_q$  1.93 pu
- Subtransient Reactance  $X''d$  0.157 pu
- Subtransient Reactance  $X''q$  0.187 pu
- Potier (leakage) Reactance  $X_p$  0.184 Pu
- Stator (armature) Resistance  $R_a$  0.0013 pu
- Open Circuit Timer Constants
  - $T'do$  : 11.3 sec
  - $T'qo$  : 3.1 sec
  - $T''do$  : 0.05 sec
  - $T''qo$  : 0.05 sec

### 감사의 글

이 논문은 2010년도 광운대학교 연구년 수행에 의하여 연구되었으며 본 연구를 위하여 자료 및 조언을 해준 전력연구원의 김찬기 박사에게 감사를 전합니다.

### 참 고 문 헌

- [1] "GUIDE FOR PLANNING DC LINKS TERMINATING AT AC SYSTEMS LOCATIONS HAVING LOW SHORT-CIRCUIT CAPACITIES, PART I : AC/DC INTERACTION PHENOMENA", CIGRE Working Group Report, 1992.
- [2] "New Synchronous Compensators for the Nelson River HVDC System Planning Requirements and Specification", IEEE Transaction on Power Delivery Vol. 6, NO.2, April 1991.
- [3] "제주 추가연계선 타당성 검토", 전력연구원 보고서, 2005.운전현황", 전력거래소 보고서, 2007
- [4] Kundur, "Power System Stability and Control", 1993.
- [5] "Cheju-Haenam HVDC manual, AREVA, 1996.
- [6] "Self-Excitation Operating Constr-Int for Generators Connected to DC Lines", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 3, August 1999.
- [7] "Dynamic Performance of Static and Synchronous Compensators at an HVDC Inverter Bus in a Very Weak AC System", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9. No. 3. August 1994
- [8] "Cheju-Jindo HVDC #2 Specification report, AREVA, 2010.

### 저 자 소 개



#### 이 석 진 (李錫珍)

1957년생. 1982년 서울대학교 대학원졸업. 1997년 한국전력공사 송변전기술팀장. 2001년 계통계획팀장. 현재 한전품질검사소장



#### 이 흥 재 (李興載)

1958년 1월 28일생. 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~1996년 미국 워싱턴 주립대 방문교수. 현재 광운대 전기공학과 교수