

# 제주계통에서 동기조상기 기동에 따른 전압안정도 영향 검토

## Analysis of Impact on Voltage Stability by Starting Synchronous Condenser in Jeju AC Network

최 순 호\* · 이 성 두\* · 김 찬 기\*  
(Soon-Ho Choi · Seong-Doo Lee · Chan-Ki Kim)

**Abstract** - Two old synchronous condensers in Jeju are being replaced by new machines to operate Jeju AC network with Haenam-Jeju HVDC system stably. Before new synchronous condensers operate on site, voltage stability analysis is conducted to verify stable operation of jeju AC network. Through impedance analysis of the synchronous machine, transformer and ac network, the equivalent circuit is constructed and the voltage drop during start-up is calculated. Then, PSS/E fault analysis is performed to acquire short-circuit capacity according to the generator operation scenarios. Voltage variation when starting synchronous condenser is simulated in PSCAD/EMTDC and satisfies the operating condition of jeju AC network and HVDC #1 system.

**Key Words** : Synchronous condenser, Voltage stability, HVDC transmission

### 1. 서 론

전류형 HVDC는 사이리스터 반도체소자를 이용하여, AC/DC 전력을 변환하기 때문에 DC전력량의 약50~60%에 해당하는 무효전력을 AC계통으로부터 흡수한다. 이러한 무효전력의 흡수는 HVDC 송전용량이 증가함에 따라 함께 증가하며, 따라서 무효전력의 보상을 목적으로 HVDC 연계 모선에 콘덴서, 동기조상기, FACTS와 같은 무효전력 보상장치를 설치한다. 여기서 동기조상기는 1930년대 이후 AC 계통의 안정도 개선이나 전압 유지를 위해 순동무효전력을 공급하는 전원으로써 널리 사용되고 있다.

해남-제주간 HVDC 연계선의 제주변환소에는 55[MVar] 출력의 동기조상기가 2대 설치되어 운전되고 있으며, 각각 154[kV]/13.2[kV] 변압기에 연결되어 HVDC 시스템에 순동무효전력을 공급하고 있다. 이들 동기조상기는 1977년에 제작된 설비로 노후화로 인한 잦은 고장으로 인해 적기에 순동무효전력을 공급하기 어려운 경우가 있고, 시간이 경과할수록 유지보수비 증가하는 문제 등으로 인해 신규 동기조상기를 계획하여 설치하게 되었다. 신규 동기조상기는 2015년 운전목표로 구형 동기조상기와 교체작업중에 있다. 발전기 방식의 구형동기조상기가 자체기동능력을 가진 것과 다르게 신규 동기조상기는 계통전압을 이용하여 기동하며, 단권변압기를 이용한 기동방식을 채택하였다. 동기조상기의 기동 시에는 단권변압기에 의해 저감전압기동을 통하여 기동전류를 제

하고, 속도가 증가함에 따라 전전압이 인가되어 HVDC 시스템에서 필요한 무효전력을 공급하게 된다[1].

동기조상기는 기계적으로 동기전동기와 같은 설비지만 동기전동기가 전기에너지와 기계에너지간의 변환을 목적으로 하는 것과 달리, 동기조상기는 전기에너지의 조절을 통해 전력계통의 전압/무효전력을 조정하는 것이 목적이다. 동기기를 무부하상태로 운전하면서 AVR에서 동기조상기의 계자전압을 제어하여 무효전력을 공급/흡수하는 방식을 사용하며, 계통의 전압을 조정하거나 역률을 개선할 수 있고, 콘덴서와 비교하여 모선 전압이 낮은 경우에도 무효전력 공급능력이 우수한 장점이 있다.

본 논문에서는 동기조상기를 현장에 설치하기 전에 계통에 대한 기기의 영향을 검토하기 위해 제작사에서 제공한 자료를 토대로 제주계통 및 동기조상기의 임피던스분석을 수행하였으며, 등가회로를 구성을 통해 기동시 발생할 수 있는 전압변동을 계산하였다. 그리고 실제 동기조상기의 기동시 제주계통의 AC전압에 미치는 영향을 파악하기 위하여, PSS/E 조류해석 프로그램을 이용하여 제주계통 발전기 운전 시나리오별 단락용량을 구하였고, PSCAD/ EMTDC 과도해석 프로그램을 이용하여 동기조상기 기동에 따른 전압변동을 해석하여 안정도를 검토하였다.

### 2. 제주 동기조상기

동기조상기의 운전방식은 일반적인 동기기와 동일하다. 여자전류를 증가시킴으로써 계통에 무효전력을 공급하며, 반대로 여자전류의 감소를 통해 무효전력을 흡수하기도 한다. 주요 장점은 DC 여자전류의 제어를 통해 무효전력 공급/흡수량을 쉽게 조절할 수 있다는 것이다. 그리고 기기의 회전자에 저장된 운동에너지는 전기아크로와 같은 급격한 진동 부하나 단락회로 동안에 전

\* Corresponding Author : Power Transmission Laboratory, KEPCO Research Institute, Korea

E-mail : shchoi@kepcoco.kr

\* Power Transmission Laboratory, KEPCO Research Institute, Korea

Received : August 28, 2014; Accepted : November 20, 2014

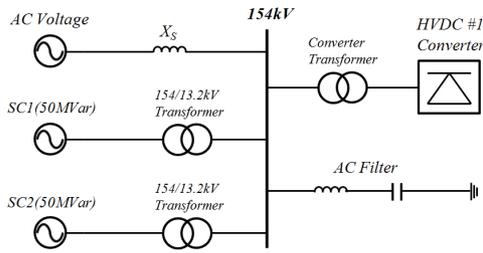


그림 1 제주 신규 동기조상기 단선도  
 Fig. 1 SLD of Jeju new synchronous condenser

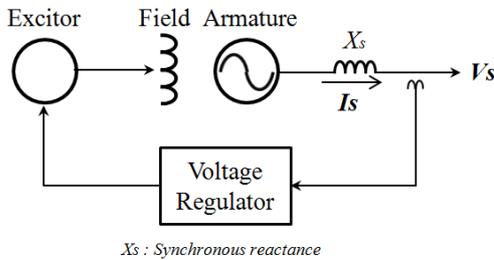


그림 2 동기조상기 회로도  
 Fig. 2 Synchronous condenser electrical circuit

력계통의 주파수를 안정화하는데 도움을 줄 수도 있다. 콘덴서와 달리 동기조상기의 무효전력 입출력은 연속적인 조정이 가능하다. 콘덴서로부터의 무효전력은 계통전압이 감소하면 비례하여 감소하지만, 동기조상기는 계통전압이 감소하여도 무효 전류를 증가시킴으로써 무효전력량을 제한값에 도달하기 전까지 유지할 수 있으며, 대부분의 동기조상기는 20~200[MVar]의 정격으로 계통에 연결된다.

동일한 기계적인 부하에 대해, 계자전류에 따라 전기자 전류는 넓은 영역에서 변하게 되며, 역률도 변하게 된다. 과여자시에, 조상기는 진상 역률로 운전되며 일종의 콘덴서 역할을 하므로 무효 전력의 공급을 통해 송전선로 역률을 개선하고, 전압강하를 감소시킨다. 부족여자시에는 지상역률로 운전되며, 리액터와 같이 계통에서 무효전력을 흡수하여 전압을 제어한다. 전압과 전류가 동 위상이 되면 역률이 1이 되며, 최소전기자전류에 해당한다. 그림 3은 동기조상기의 회로도와 V-곡선을 나타내었다[2].

해남-제주 HVDC 연계선의 제주측에 설치될 신규 동기조상기의 주요 파라미터를 표 1에 나타내었다. 13.2[kV]의 정격 전압에서 50[MVar]의 무효전력 공급능력을 가지며, 극수는 4극으로 1,800[rpm]의 정격속도를 갖는다. 단권변압기 기동방식을 채택하였기 때문에 기동시에는 유도전동기와 같은 방식으로 기동하여 속도가 증가하고, 정격속도에 가까워지면, 전전압이 인가되어 동기속도로 회전하게 된다[3].

### 3. 동기조상기 기동

#### 3.1 동기조상기 기동방법

제주 동기조상기의 기동방식은 단권변압기를 이용한 저감전압

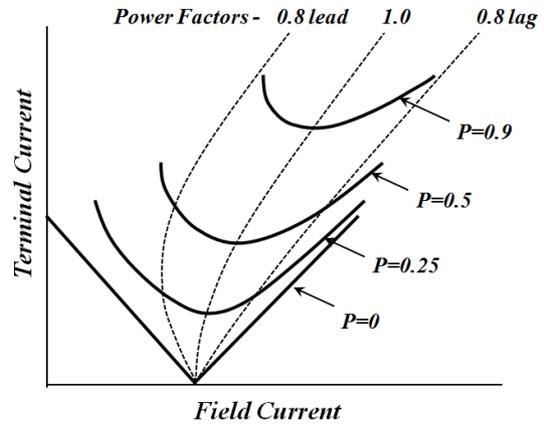


그림 3 자계여자와 동기모터의 역률과의 관계  
 Fig. 3 Relationship between magnetic excitation and power factor of synchronous machine

표 1 신규 동기조상기 파라미터  
 Table 1 New synchronous condenser parameters

항 목	값
정격연속 출력(진상/지상)	+50/-25 [MVar]
공칭 정격전압	13.2[kV]
정격전류	2,187[A]
전전압 기동전류	595 [%]
극수	4 [Pole]
RPM	1800
$X_d$	2.0
$X'_d$	0.3
$X''_d$	0.16

기동방식이다. 단권변압기 기동방법의 장점은 기동전류대비 높은 출력토크와 변압기탭을 활용하여 기동특성에 유연성이 있다는 것이다. 단점으로는 변압기 탭의 제한으로 인해 기동전압을 넓은 범위로 조정하는 것이 어려우며, 단권변압기의 개폐를 위한 차단기가 추가되기 때문에 전체 설비 규모가 증가하게 된다.

초기에는 단권변압기를 이용하여 전동기에 저감전압을 인가하여 기동하고 전동기가 가속된 이후에 정격속도에 가까워지면, 회로에서 단권변압기를 제거하고 전전압을 인가함으로써 정격속도로 구동한다. 이러한 방법은 전동기가 기동할 때 더 낮은 돌입전류를 발생시키지만, 단권변압기에 의해 낮아진 전압으로 인해 기동시 출력토크가 낮아지고 결과적으로 기동시간이 증가한다[4, 5] 단권변압기의 정격전압은 13.2[kV]이며, 권선은 29[%], 34[%], 39[%]의 3개 전압레벨에 대한 탭이 설정되어 있다. 출력토크는 다음 식에 의해 전 전압시의 출력 토크와 연관되어 있다.

$$\tau_{RV} = \tau_{FV} \cdot \left( \frac{T_{ap}}{100} \right)^2 \quad (1)$$

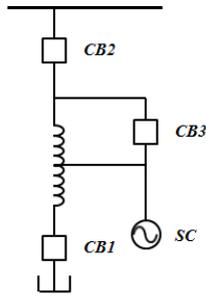


그림 4 단권변압기 기동회로  
Fig. 4 Autotransformer start-up circuit

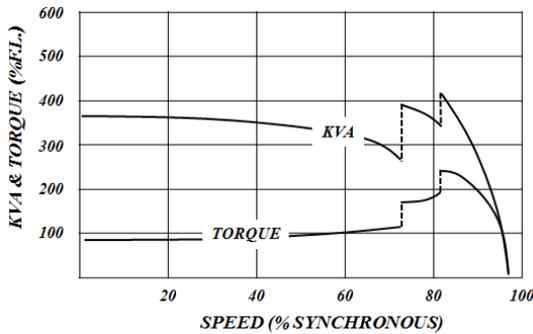


그림 5 동기조상기 속도 vs 토크, 전류 곡선  
Fig. 5 speed vs. torque, current curve of synchronous condenser

여기서,  $\tau_{RV}$  : 회로에 단권변압기가 있을 때 저장된 전압에서의 출력 토크

$\tau_{FV}$  : 전 전압이 적용되었을 때 출력 토크

29%의 단권변압기 탭에서 출력토크는 전 전압 토크값의 8.41%, 34% 탭에서는 전 전압 토크의 11.56%, 39% 탭에서는 전 전압 토크의 15.21%로 각각 감소한다. 따라서, 단권변압기 기동을 위해서는 감소된 출력토크가 기동시 부하토크보다 높도록 설계하여야 한다.

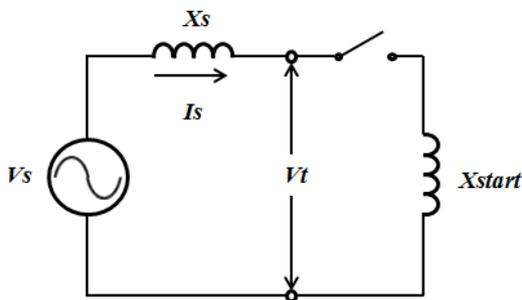


그림 6 AC계통과 동기조상기 등가회로  
Fig. 6 AC system and synchronous condenser equivalent circuit

### 3.2 동기조상기 기동에 따른 전압강하

그림 6과 같이 구성된 동기조상기는 기동시 역률이 낮기 때문에, 기동전류의 대부분이 지상무효전류이며, 따라서 연계된 AC 모선의 전압강하를 발생한다. AC 계통에 동기조상기를 투입하여 기동시 단자전압의 변화는 그림 7과 같다[6]. 동기조상기 투입 직후, 돌입전류에 의해 전압이 즉시 감소하며, 크기는 발전기의 차과도 리액턴스와 거의 동일하다. 계속되는 전압강하는 과도 리액턴스에 의한 것이며, 과도 시정수  $T_d'$ 는 전압강하율을 반영한다. 차과도 리액턴스와 과도 리액턴스에 의해 전압이 감소한 후에 계통의 AVR 시스템은 빠르게 응답하여 수~수십 주기 이내에 계통 전압을 정상상태로 회복시킨다. 일반적으로는 기존전압의 3[%] 이내로 회복이 0.3[s] 이내에 이루어진다.

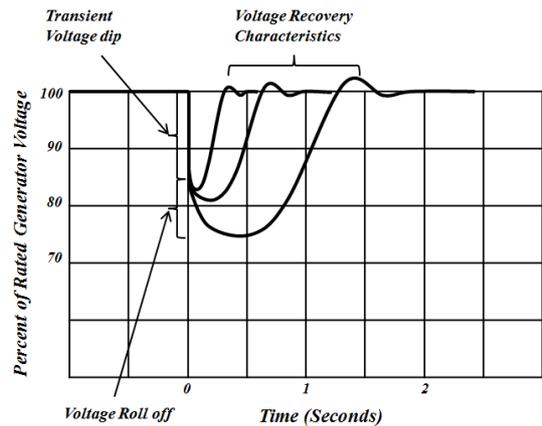


그림 7 전부하 인가시 단자전압의 변화  
Fig. 7 Terminal voltage variation when full-load is applied

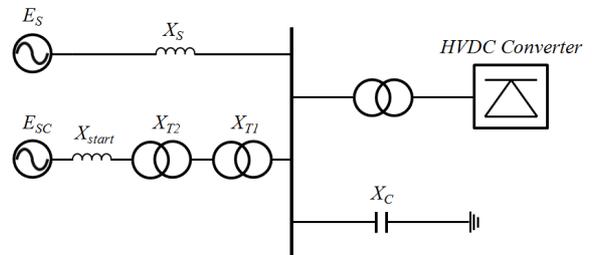


그림 8 제주계통 등가임피던스 회로도  
Fig. 8 Jeju AC system equivalent impedance circuit

## 4. 제주 계통의 동기조상기 기동시 과도전압 해석

### 4.1 동기조상기 투입에 따른 과도전압강하

제주 AC 계통은 육지 계통과 같은 기준에 의해 운영되고 있으며, 송전계통은 154[kV] 직접접지 방식으로 운전되고 있다. 표 2는 제주 계통의 운전조건을 나타내고 있다. 동기조상기는 HVDC#1 제주변환소에 최대 100[MVA]의 순동무효전력을 공급

**표 2** 제주 AC 계통 조건

**Table 2** Jeju AC system condition

항목	값	단위
공칭전압	154	[kVrms]
과부하	160±4	[kVrms]
경부하	156±4	[kVrms]
최소운전전압	139	[kVrms]
역상분	1	[%]
최대단락용량	8402	[MVA]
최소단락용량	840	[MVA]
등가 X/R	10	

**표 3** 동기조상기에서 바라본 제주 등가 임피던스

**Table 3** Equivalent impedance from synchronous condenser

항목	값 (154kV측)
$X_s$ (840MVA, 최소단락용량)	28.23[Ω]
$X_s$ (8402MVA, 최대단락용량)	2.823[Ω]
$X_{T1}$ (변압기 #6)	30.91[Ω]
$X_{T1}$ (변압기 #8)	49.33[Ω]
$X_{T2}$ (단권변압기)	31.42[Ω]
$X_{start}$ (동기조상기)	689.28[Ω]

하기 위해 154[kV] 모선에 154[kV]/13.2[kV] 변압기를 통해 연계된다. HVDC#1 제주변환소의 154[kV] 모선에서 바라본 제주 AC계통과 HVDC 시스템의 구성은 그림 8과 같다. 동기조상기에 고장전류를 공급할 수 있는 것은 AC 계통의 등가전원이며, HVDC 컨버터는 영향을 주지 못한다. 따라서, 동기조상기 기동에 따른 전압강하를 계산하기 위해서는 발전기, 변압기, 송전선로 임피던스 등으로 구성된 계통임피던스  $X_s$ , 변압기 임피던스  $X_{T1}$ , 단권변압기 임피던스  $X_{T2}$ , 그리고 동기조상기 기동임피던스  $X_{start}$ 를 적용하며, 이들의 직렬회로에 의해 동기조상기 기동에 따른 154[kV] 모선에서 전압강하가 결정된다.

표 2와 그림 8을 바탕으로 동기조상기에서 바라본 제주계통의 등가임피던스를 계산하였으며, 결과를 표 3에 나타내었다. 제주계통은 계통부하에 따른 발전기 운전조건에 의해 최소단락용량과 최대단락용량으로 구분되며, 154[kV]/ 13.2[kV] 변압기의 경우, 임피던스가 다른 두 종류의 변압기가 설치되어 운영되고 있다. 동기조상기의 기동을 위한 단권변압기는 두 대가 설치되었으며, 파라미터는 동일하며, 동기조상기도 두 대가 동일한 파라미터를 갖는다. 동기조상기가 연계된 154[kV] 모선에서 전압강하를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_{drop} = \frac{X_s}{X_s + X_{T1} + X_{T2} + X_{start}} [p.u.] \quad (2)$$

최소단락용량 840[MVA]에서 동기조상기 투입시 전압강하를

**표 4** HVDC #1 운전각

**Table 4** HVDC #1 operating angle

항 목	HVDC #1	
	해남변환소	제주변환소
최소 점호각/소호각	2[Deg.]	12[Deg.]
역상분 마진	1[Deg.]	1[Deg.]
변압기 공통임피던스 마진	-	1.5[Deg.]
측정 오차	1[Deg.]	1[Deg.]
AC전압 변동율( $\Delta V_{ac}$ )	14[Deg.]	8.5[Deg.]
제어 데드밴드	5[Deg.]	3[Deg.]
운전각	23[Deg.]	27[Deg.]

**표 5** 제주지역 발전기 운전시나리오

**Table 5** Operation scenario of Jeju generator

발전기	정격용량	Case1	Case 2	Case3	Case4	Case5	Case6
제주내연#1	40	●	●	●	●	●	●
제주내연#2	40		●	●	●	●	●
남제주기력#3	100	●	●	●	●	●	●
남제주기력#4	100				●	●	●
제주기력#2	75			●		●	●
제주기력#3	75						●

**표 6** 제주지역 발전기 운전시나리오별 제주변환소 단락용량

**Table 6** Short-circuit capacity according to the scenario of Jeju generator

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
단락용량 [MW]	693.55	784.93	1139.43	1178.11	1532.41	1881.04

구하면, 기동임피던스에 의해 약 3.6[%]의 전압강하가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 최대단락용량 8,400[MVA]에서 동기조상기 투입시 전압강하는 0.36[%]가 발생한다. 제주계통의 공칭운전전압은 154[kV]이며, 허용전압 범위는 ±10[%]이다. 따라서, 계산상으로 구한 동기조상기 투입 및 기동시 발생하는 전압강하는 공칭운전전압 범위 이내에 해당한다. 하지만, 동기조상기와 같은 모선에 연계되어 있는 HVDC #1 제어기의 제어범위를 고려할 필요가 있으며, 제어기의 운전각을 결정하는데 사용된 기준을 표 4에 나타내었다. HVDC #1 제어기의 운전각에 적용된 AC전압 변동율은 5[%]이며, 동기조상기 기동시 3.6[%]의 AC전압변동분은 제어기의 안정운전범위 이내에 해당한다.

#### 4.2 제주 발전기 투입조건에 따른 전압강하 해석

동기조상기 투입 및 기동에 따른 제주 변환소 154[kV] 모선

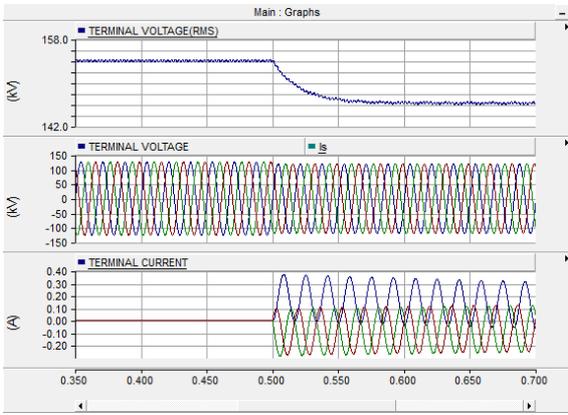


그림 9 제주계통에서 동기조상기 기동시 RMS전압, 선간전압, 상전류 (case1)

Fig. 9 RMS voltage, line-to-line voltage, phase current during start-up of synchronous condenser (case1)

표 7 제주지역 발전기 운전시나리오별 제주 C/S 154[kV] 모선 전압강하

Table 7 Voltage drop at 154[kV] bus of Jeju C/S according to the Jeju generator operation scenario

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
전압 [kV]	146.3	147.2	149.2	150.6	151.3	151.7
전압강하 [%]	5.0	4.4	3.1	2.2	1.8	1.5

의 전압강하를 실제제주계통에서 해석하기 위해서는 우선 해당 모선의 단락용량을 구해야 한다. 제주지역 전력계통내 발전기 운전시나리오별 단락용량을 구하기 위해 PSS/E 프로그램을 이용하여 고장계산을 수행하였으며, 결과를 표 6에 나타내었다. 제주변환소의 동기조상기는 투입전으로 가정하였다[7].

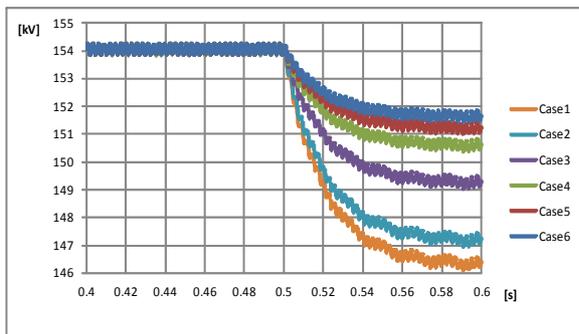


그림 10 제주지역 발전기 운전시나리오별 제주 변환소 154[kV] 모선 전압강하

Fig. 10 Voltage drop at 154[kV] bus of Jeju C/S according to the Jeju generator operation scenario

PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용하여 제주계통에서 동기조상기 투입에 따른 과도전압변동을 해석하였다. 그림 9에 Case1의 경우 동기조상기 기동에 따른 RMS전압, 선간전압, 상전류를 나타내으며, 높은 기동전류에 의해 전압이 154[kV]에서 146.3[kV]로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 제주발전기 투입 시나리오별 단락용량을 적용하여, 동기조상기 투입시 AC전압 변동 추이를 그림 10에 나타내었고, Case별 최대 전압강하량을 표 7에 정리하였다. Case1의 단락용량 1033.96[MVA]값을 적용한 경우, 계통전압은 154[kV]에서 146.3[kV]로 감소하였고 이 값은 공칭전압 대비 5[%]에 해당한다. 계통전압이 최소운전전압 139kV 이상의 값을 만족하지만, HVDC #1의 정상운전범위 마진에 해당하므로, HVDC의 안정적인 운전을 보장하기 위해서는 발전기 1대가 추가적으로 투입되어야 한다. Case2의 단락용량 784.93[MVA]값을 적용한 경우, 계통전압은 154[kV]에서 147.2[kV]로 감소하였고 이 값은 4.4[%]에 해당하므로, 제주계통 최소운전전압 및 HVDC 제어범위를 만족한다. Case 2~6의 경우에는 동기조상기 기동에 따른 전압강하량이 제주계통 최소운전전압 및 HVDC 제어범위를 만족하므로, 과도전압으로 인한 전압불안정 문제가 발생하지 않으며, 발전기의 운전 대수가 증가할수록 전압변동폭은 작아진다.

### 5. 결 론

해남-제주 HVDC 제주변환소는 컨버터에서 소비하는 무효전력의 일부를 동기조상기에서 공급하고 있다. 제주계통의 안정적인 운영을 위해 노후화된 동기조상기를 신규기기로 교체하는 공사가 진행중이며, 신규 동기조상기를 계통에 투입하여 기동할 때 발생할 수 있는 문제를 검토하였다. 제작사에서 제공한 자료를 토대로 제주계통 및 동기조상기의 임피던스분석을 통한 등가회로를 구성하고, 기기의 기동에 따른 전압강하를 계산하였다. 다음으로 동기조상기를 제주계통에 투입하여 기동하였을 때 제주계통의 AC전압에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 제주계통 발전기 운전시나리오별 단락용량을 구하고, 동기조상기 기동에 따른 전압변동을 해석하였으며, Case1의 경우 이외에는 계통 운전조건 및 HVDC #1 제어가 운전조건을 만족하며 전압변동이 허용치 이내로 유지되어 전압안정도 문제가 없음을 확인하였다.

### References

- [1] B. H. Jang, J. S. Yoon, J. Y. Han, J. W. Shim, S. K. Kang, B. J. Lee, "The Affections of System Stability on Replacing the Synchronous Condenser in Jeju Island", Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 56, No. 10, pp. 1715~1720, 2007
- [2] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994
- [3] "Jeju Synchronous Condenser Report", GE Power Conversion, 2012

- [4] W. J. Horvath, "Concepts, Configurations, & Benefits of Motor Starting and Operation with MV AC Adjustable Speed Drives", IEEE-IAS Cement Industry Committee, 2008
- [5] "Technical note : Starting methods for AC motors", ABB, 2010
- [6] B. Larry, I. Jim, "Starting Large Motors from an Onan Engine-Generator Set", Onan Corporation, 1997
- [7] S. Y. Lee, "A Study on the operating strategies of Multi-Infeed HVDC system related to the Jeju power system in the future", Thesis of Master's degree, Korea University, 2013

---

## 저 자 소 개



### 최 순 호(Soon-Ho Choi)

2007년 충남대 전기공학과 졸업.  
2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).  
2010년~현재 한전 전력연구원  
선임보연구원.



### 이 성 두(Seong-Doo Lee)

1998년 부산대 전기공학과 졸업(석사)  
1999년~현재 한전 전력연구원  
선임연구원.



### 김 찬 기(Chan-Ki Kim)

1991년 서울산업대 전기공학과 졸업.  
1993년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학박). 1996년~현재 한전 전력연구원 책임연구원.