

## Interaction and Transient Analysis to FACTS Devices in Seoul Area

윤종수<sup>†</sup> · 김재한<sup>\*</sup> · 이성두<sup>\*</sup> · 최장흠<sup>\*</sup> · 서보혁<sup>\*\*</sup>  
 (Jong-Su Yoon · Jae Han Kim · Seong-doo Lee · Jang-Hum Choi · Bo-hyeok Seo)

**Abstract** - This paper describes the operation effect of FACTS devices in the Korean power system. At the year of 2010, three FACTS devices is under commercial operation in the Seoul area. Among them, 345kV  $\pm 100$ MVA STATCOM at Mi-Geum substation and 345kV  $\pm 200$ MVA SVC at Dong-Seoul substation are very close at their electrical and geographical distance. Therefore, the additional analysis including interaction and mutual transient is necessary. Therefore, a detailed EMTDC/PSCAD simulation model was developed and steady-state/transient analysis was implemented.

**Key Words** : FACTS (Flexible AC Transmission System), STATCOM (Static Synchronous Compensator), SVC (Static Var Compensator)

### 1. 서론

최근 국내 전력계통에 FACTS 설비의 적용이 지속적으로 증가하고 있다. 1999년 대구 지역 계통의 전압안정도 향상을 위하여 345kV 서대구 변전소에  $\pm 100$ MVA SVC를 설치한 이래, 2003년에는 FACTS 운용 기술의 국산화를 위한 Pilot Plant로 154kV 강진 변전소에  $\pm 80$ MVA UPFC를 설치하였고, 2009년에는 수도권 계통의 전압안정도 향상을 위하여 345kV 미금 변전소에  $\pm 100$ MVA STATCOM, 345kV 동서울 변전소에는  $\pm 200$ MVA SVC를 설치하였다. 미금 STATCOM의 경우 최초의 국산화 설비로써 2010년 현재 실증 운전중에 있으며, 동서울 SVC도 2009년 하반기 운전을 시행한 이래, 설비보완을 거쳐 2010년 하반기 본격적인 상용운전을 시행할 예정이다. 수도권의 용통전력 제약해소를 위한 순동무효전력원 확보 필요성은 지속적으로 증가되고 있으며, 이로인한 FACTS 설비의 수도권 적용 또한 계속 늘어날 전망이다. 실제로 2008년에는 서대구 SVC가 수도권의 345kV 양주 변전소로 이설되었으며, 2011년 하반기에는 신파주 변전소에  $\pm 200$ MVA SVC 또는 STATCOM이 신규로 설치될 예정이다. 그림 1은 2010년 현재 수도권에 설치된 FACTS 설비들이다. FACTS 설비들이 인접한 지역에 설치됨에 따라, 이들 설비들에 대한 과도특성분석, 상호영향 분석 및 협조제어의 필요성이 증가하고 있다. 본 논문에서는 이들 FACTS 설비들에 대한 과도특성과 상호영향에 대한 분석을 수행한 결과를 기술하였다. 특히, 미금

STATCOM과 동서울 SVC의 경우 바로 인접한 변전소에 설치되어 있으므로, 상세한 과도특성과 설비간의 상호영향(Interaction) 분석이 수행되었다. 이를 위해서는 EMTDC/PSCAD를 이용하여 수도권 북상전로를 포함한 대규모 계통 모델을 작성하고, FACTS 설비들에 대한 모델링을 수행하여 결과를 분석하였다.

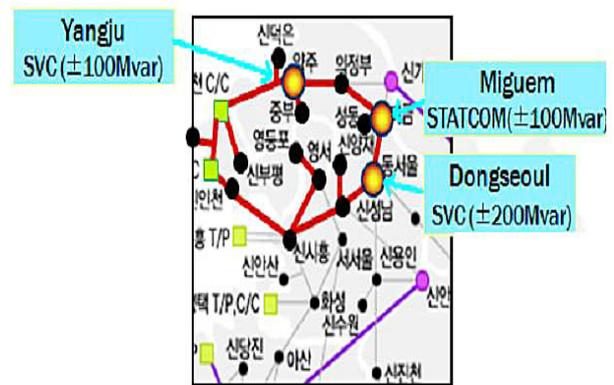


그림 1 수도권 FACTS 설비운용현황(2010년)  
 Fig. 1 FACTS operation in Seoul area(2010 year)

### 2. 수도권 FACTS 설비 구성

#### 2.1 미금 STATCOM 설비 구성

미금 변전소 345kV 100MVA STATCOM의 기본적인 구성은 그림 2와 같다. 미금 STATCOM은 50MVA 3-level 인버터 2대의 출력파형을 중재변압기로 합성하여, 24펄스의 출력 전압을 발생시키는 Muti-Pulse방식의 구조를 채택하고 있다. 이 방식은 최근 많이 사용되고 있는 PWM 방식에 비

<sup>†</sup> 교신저자, 정회원 : 한전 전력연구원 선임연구원  
 E-mail : yoonjs@kepri.re.kr  
<sup>\*</sup> 정 회원 : 한전 전력연구원  
<sup>\*\*</sup> 정 회원 : 경북대학교 전자전기공학부 교수  
 접수일자 : 2010년 7월 21일  
 최종완료 : 2010년 9월 16일

해 중재변압기를 사용해야 하는 단점이 있지만, 전력소자 스 위칭수가 적어 전력 손실에서 유리한 장점이 있다. 그림 3 은 미금 STATCOM의 전압-무효전류(전력) 제어특성을 나 타내며, 이를 구현하기 위한 전압제어기는 그림 4과 같다.

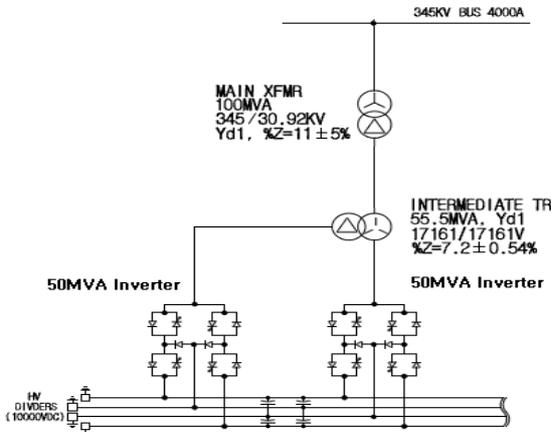


그림 2 미금 STATCOM 설비 구성도  
Fig. 2 Mi-Geum ±100MVA STATCOM configuration

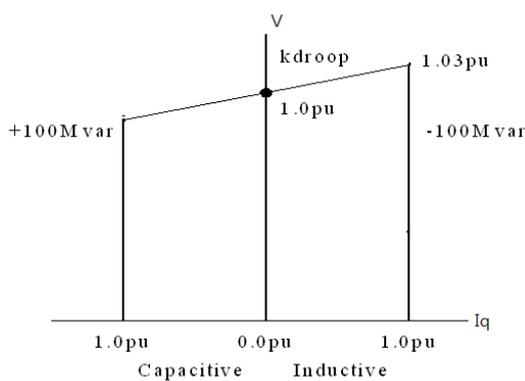


그림 3 미금 STATCOM 제어특성  
Fig. 3 STATCOM V-I Characteristics

표 1 미금 STATCOM의 주요 구성요소  
Table 1 Mi-Geum STATCOM specification

구성 기기	구성 내역
전체 시스템	용량 : 345kV, 100MVA 응답 시간 : 16.7ms 이내
인버터부	용량 : 100MVA (50MVA × 2대) 정격 출력 전압/전류 : 8.9kVrms(L-G)/1.8kArms 구성 : 50MVA 3-Level 전압원 인버터 2대, Vdc ±10kV
주변압기	용량 : 100MVA 정격 : 345kV/30.92kV, Y/Δ, 임피던스 : 11%
보조 변압기	용량 : 55.5MVA 정격 전압 : 17.1kV/17.1kV, Open Y/Δ, 임피던스 : 7.2%

그림 4는 STATCOM의 주 제어기인 자동 전압제어기이다. 운전자에 의해 주어지는 전압 제어설정치(V1qref)로 모 선전압(V1)을 제어하기 위한 무효전력 출력량(i1qref)을 도 출하고, 이를 기반으로 STATCOM 인버터의 위상각을 제어 하도록 하는 피드백 제어기이다. STATCOM은 모선전압과 동 일위상의 출력전압을 발생시키며, 출력전압의 크기를 변화 시켜 무효전력제어를 수행한다. 미금 STATCOM에서의 출 력전압의 제어는 모선전압과의 미세한 위상변화를 통해 인 버터 DC 커패시터의 충전전압을 조정함으로써 구현된다. 출력 전압을 모선전압과 동상(In Phase)으로 일치시키기 위해 PLL(Phase Lock Loop)이 사용되며, 이를 기반으로 DQ-변 환을 통해 무효전력성분(V1q)을 추출한다. 그림 4에서, Kdroop는 전압 제어기의 Droop으로써 미금 STATCOM의 경 우 3%를 설정하였다. 전압제어기의 Vref는 0.92~1.025pu 사 이에서 제어가 가능하며, 전압 제어기에 의한 STATCOM 의 응답속도는 SVC보다 빠른 1 cycle 이내이다.

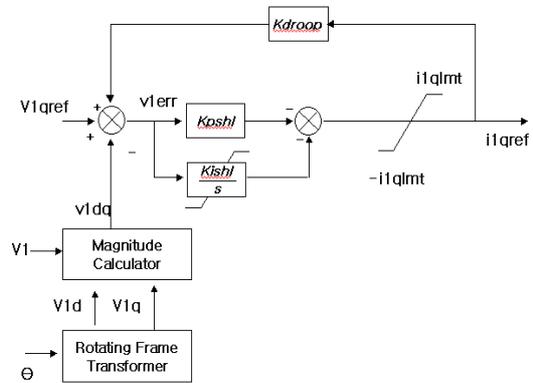


그림 4 STATCOM 자동 전압 제어기  
Fig. 4 STATCOM Automatic Voltage Control Mode

### 2.2 동서울 SVC 설비 구성

그림 5는 동서울 변전소 345kV ±200MVA SVC의 기본 적인 구성이다. 100MVar TSC(Thyristor Switched Capacitor)

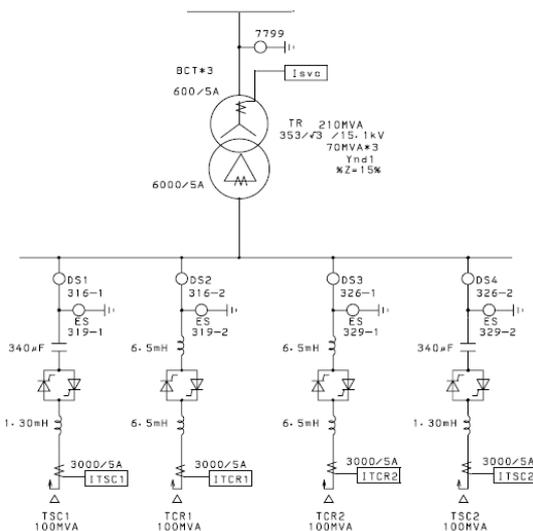


그림 5 동서울 SVC구성(353kV Base로 설계됨)  
Fig. 5 200MVA Dong-Seoul SVC configuration

2대와 100MVar TCR(Thyristor Controlled Reactor) 2대로 구성되어 있고, 고조파 필터는 별도로 설치되어 있지 않다. 그림 6은 동서울 SVC의 전압-(무효)전류 출력 제어특성을 나타낸다. 동서울 SVC가 각 100MVar용량의 TSC와 TCR 2대로 구성되어 있으므로, 최대 ±200MVar 연속적인 출력제어를 위해서는 표 2와 같은 TCR과 TSC의 기기별 운전조합이 필요하다.

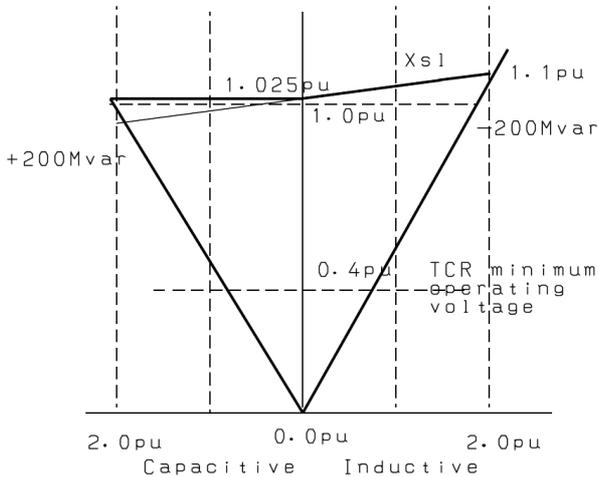


그림 6 동서울 SVC 제어특성(V-I 제어특성)  
Fig. 6 SVC V-I Characteristics(353kV Base)

표 2 동서울 SVC의 TCR 및 TSC 운전조건  
Table 2 Dong-Seoul SVC operation condition

SVC 출력구간	TCR #1	TCR #2	TSC #1	TSC #2
200Mvar ~ 100Mvar (Inductive)	ON	ON	-	-
100Mvar ~ 0Mvar (Inductive)	ON	-	-	-
0Mvar ~ 100Mvar (Capacitive)	ON	-	ON	-
100Mvar ~ 200Mvar (Capacitive)	ON	-	ON	ON

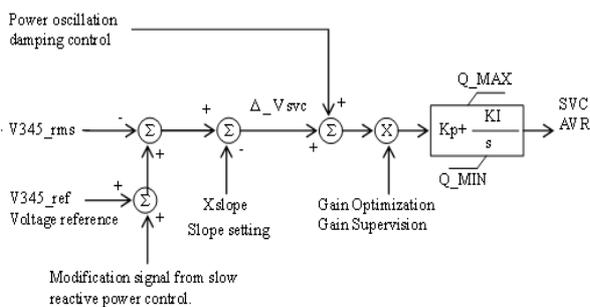


그림 7 SVC 자동 전압 제어기  
Fig. 7 SVC Automatic Voltage Control Mode

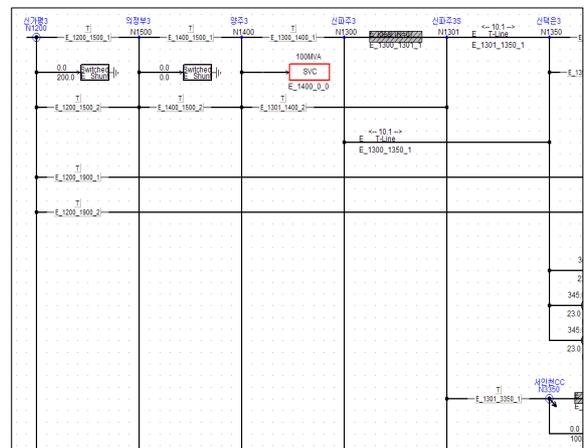
그림 7은 SVC의 주 제어기인 자동 전압제어기이다. 자동 전압제어기는 운전자에 의해 주어지는 전압 제어 설정치 지령값(Vref)으로 모션 전압(V345\_rms)을 제어하는 피드백 제어기(Feedback Regulator)이다. 본 제어기의 출력은 SVC의 무효전력출력량(SVC\_AVR)이 되고, 이를 통하여 SVC 사이리스터 점호각 제어가 이루어진다. 변동가능한 전압제어 설정치(Vref)는 0.92~1.025pu 사이이며, SVC의 응답속도는 2 cycle 이내이다. 그 밖에 다양한 보조제어기능이 있는데, Slow Reactive Power Controller는 SVC 출력이 전체 용량을 벗어날 때 일시적으로 동작하는 제어기이며, Gain Optimization/Supervision은 계통고장시 제어기 파라미터를 일시적으로 변동시키는 제어기이다. Power Oscillation Damping Controller는 계통 동요 억제용 제어기이나, 동서울 SVC에는 사용하지 않는다. 그 밖에 그림 7에서 Xslope는 SVC 전압제어기의 Droop에 해당하며, 동서울 SVC의 경우 3%로 설정되어 있다.

### 2.3 양주 SVC 설비 구성

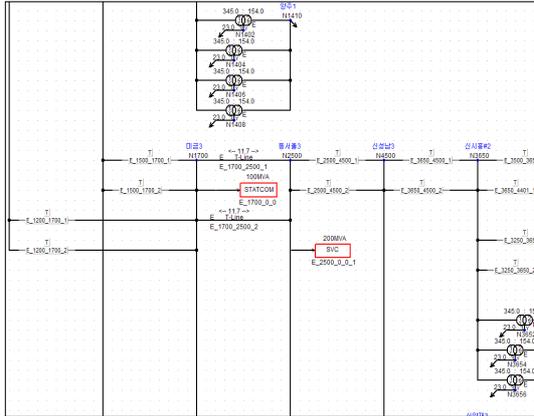
동서울 ±200MVA SVC가 100MVar TCR 2대, 100MVar TSC 2대로 구성된 데 반해, 양주 SVC의 총 용량은 ±100MVA이며 100MVar TSC와 TCR이 1대씩으로 구성되어 있다. 그 이외에 양주 SVC의 설비 및 제어기의 기본 구성은 그림 5 및 그림 7과 거의 일치하므로 세부적인 설명은 여기서 생략한다.

## 3. EMTDC/PSCAD 모델 구성

동서울 SVC와 미금 STATCOM의 제어특성 분석을 위하여, EMTDC/PSCAD를 이용하여 각 설비모델과 수도권 지역계통에 대한 해석모델을 구성하였다. 미금 STATCOM의 경우도 마찬가지지만, 특히 동서울 SVC의 경우 765kV 송전선로의 고장에 대비한 순동 무효전력원으로의 역할을 수행하는 것이 주요한 설치 목적중 하나이므로, 765kV 선로 및 주요 수도권 북상선로를 포함하도록 계통모델을 구성하였다.



(a) 양주 SVC 적용 계통모델



(b) 미금 STATCOM, 동서울 SVC 적용 계통모델

그림 8 미금 STATCOM, 동서울 SVC 양주 SVC가 포함된 EMTDC/PSCAD 수도권 계통 모델(일부)

Fig. 8 Migeum STATCOM, DongSeoul SVC, Yangju SVC EMTDC anysis model

이러한 계통모델은 규모가 매우 커져 수작업으로 작성하기 어려우므로 E-TRAN 프로그램을 이용하여 구축하였다. 그림 8은 동서울 SVC, 미금 STATCOM 그리고 이들 설비와는 지역적으로 떨어져 있지만 양주 SVC가 적용된 수도권 지역계통 해석모델의 일부분이다. 본 모델을 기반으로 FACTS 설비 상호 영향 분석, 계통 고장에 따른 FACTS 제어 효과 분석 등을 수행하였다.

#### 4. 시뮬레이션 분석

##### 4.1 정상상태 FACTS 상호영향 분석

인접 FACTS 설비인 동서울 SVC와 미금 STATCOM간의 상호영향 분석을 위하여, 동서울 SVC의 운전제어에 따른 각 모선 전압 변화와 미금 STATCOM 동작 영향을 분석하였다. 그림 9는 동서울 SVC의 시간대별 운전 제어 설정치의 변화에 따른 SVC 제어특성을 나타낸다. STATCOM의 제어 시뮬레이션은 동서울 모선전압이 실제 평균전압과 유사한 1.033pu(356.3kV)로 운전하다가 1.5초에서 커패시터모드 1.053pu(363kV)로 운전한 후 3.0초에 인덕터모드 1.012pu(349.1kV)로 운전하는 것으로 하였다. 그림 9는 동서울 SVC의 운전에 따른 동서울 모선전압과 SVC 운전상태를 나타낸다.

동서울 SVC를 통하여 1.053pu까지 전압보상을 하였을때는 TSC 1, 2 Bank의 투입과 TCR 1 Bank의 완전 차단과 2Bank의 일부차단을 통하여, 모선전압을 1.0345pu(356.9kV)에서 1.0375pu(357.9kV), 약 1kV정도 상승시키고 SVC의 용량 한계에 근접한 +184Mvar의 무효전력을 출력하였다. 이때 2차 TSC의 투입에 따른 과전압이 발생이 나타났다(15kA). 그후 전압 설정치를 1.012pu(349.1kV)로 낮추었을 경우 TSC 1,2 Bank의 차단과 TCR 1의 완전투입 TCR 2 Bank의 일부 투입을 통하여 -155MVar의 무효전력을 흡수하고 모선전압을 1.0375pu에서 1.0315pu로 약 2.1kV하강시켰다. 그림 10은 그림 9와 같이 동서울 SVC를 운전할 때,

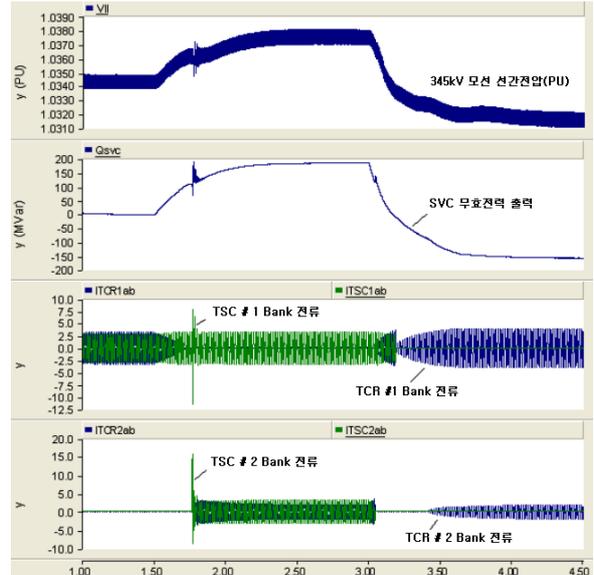


그림 9 동서울 SVC 제어동작(동서울 모선전압, SVC 무효전력 출력, TSC 및 TCR 전류[kA])

Fig. 9 200MVA SVC operation at 345kV Dong-Seoul substation

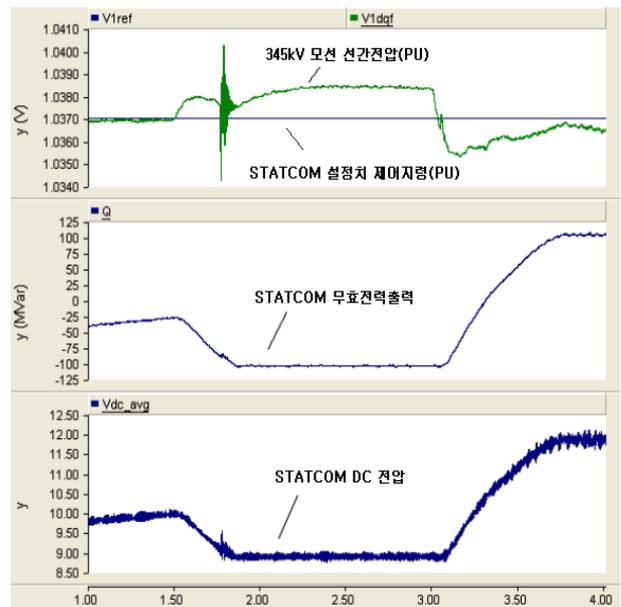


그림 10 동서울 SVC 제어에 따른 미금 STATCOM의 영향 (모선전압, STATCOM 무효전력출력, 인버터 DC전압)

Fig. 10 Operation influence of 100MVA Mi-Geum STATCOM by Dong-Seoul SVC operation

미금 STATCOM의 영향을 나타낸다. 동서울 SVC의 운전에 따라 미금 STATCOM이 초기 1.037pu(357.7kV)로 운전하다가 1.5초에서 동서울 SVC가 커패시터 동작을 통하여 동서울 모선 전압을 상승시키므로, STATCOM은 인덕터모드 -100MVar 출력제어를 통하여 모선 전압을 저하시키도록 하였고, 그후 3.0초에서 동서울 SVC가 동서울 모선 전압을 다시 낮춤에 따라 미금 STATCOM은 커패시터모드

+100MVar의 출력을 통하여 모선 전압을 상승시키고자 하였다. 그러나 STATCOM의 용량이 ±100MVar 이므로 용량한계에 의하여 전압유지에 한계가 있음을 알 수 있다. 즉 -100MVar 흡수로도 미금 모선전압이 1.038pu(358kV)에 머물렀고, +100MVar의 무효전력공급으로도 1.0363pu(357.5kV)까지 보상이 가능하였다. 그러나 STATCOM이 설치되지 않았다면 당연히 모선전압의 변동폭은 더욱 클것이다. 동서울 SVC의 경우 TSC Bank 투입에 따른 돌입전류와 이에 따른 과도 전압이 발생하고 있으며, 이의 영향이 미금 모선에 그대로 미치고 있으며, STATCOM으로 제어가 어려움을 알 수 있다.

다음은 미금 STATCOM의 운전제어에 따른 동서울 SVC의 운전영향을 분석하였다. 그림 11은 미금 STATCOM의 시간대별 운전 제어 설정치의 변화에 따른 STATCOM 제어특성을 나타낸다.

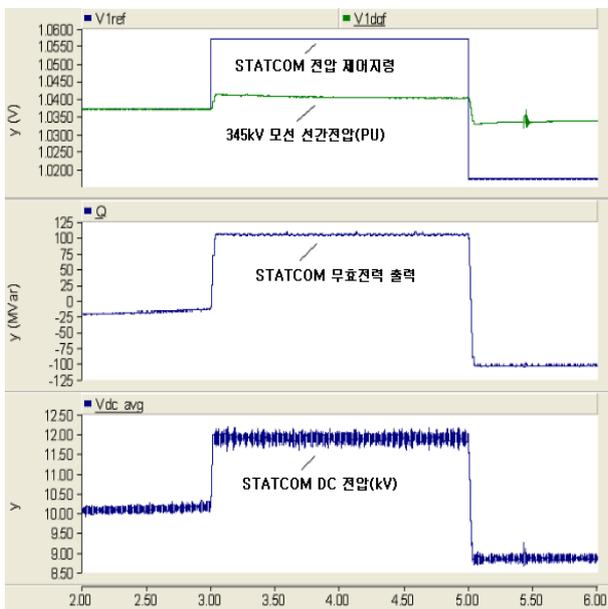


그림 11 미금 STATCOM의 제어변화(모선 전압, 무효전력 출력, DC 커패시터단의 전압)

Fig. 11 100MVA STATCOM operation at 345kV Mi-Geum substation

시뮬레이션은 STATCOM의 운전전압을 1.037pu로 운전하다가, 3초에서 커패시터모드(1.057u)로 운전하고 5초에 리액티브 모드(1.017pu)로 운전하는 것으로 하였다. 그림 11에서 3.0초에서 STATCOM을 1.057pu로 운전할 때 STATCOM에서 100MVar의 무효전력을 공급하여 모선전압을 1.04pu(358.8kV)로 상승시켜며, 5.0초에서 STATCOM을 1.017pu(356.5kV)로 운전하여 모선전압을 하강시킬때 -100MVar의 무효전력을 흡수함을 알 수 있다. 그림 12는 미금 STATCOM의 운전에 따른 동서울 SVC의 제어특성 변화를 나타낸다. 당초 모선전압이 1.0345pu(356.9kV)에서 운전되던 SVC가 3초에서 인근 STATCOM으로 인한 모선전압상승으로 1.0365pu(357.6kV)까지 상승하며 이때 SVC는 -26MVar의 무효전력을 흡수제어를 하게된다. 그후 5.0초에서는 미금 STATCOM의 영향으로 동서울 모선전압이 1.032pu(356kV)

까지 내려가게 되며 이때 SVC는 16.2MVar를 공급하는 커패시터 모드로 제어가 이루어지게 된다. 그림 12에서 커패시터모드 동작에서 TSC의 가압으로 인한 돌입전류로 인하여 모선전압에 과도현상이 발생함을 알 수 있으며 이러한 영향은 미금 변전소 모선에까지 영향이 나타나게 된다.

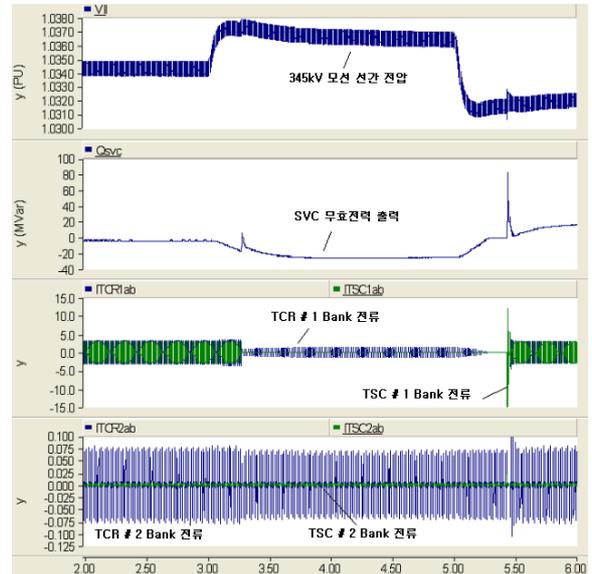


그림 12 미금 STATCOM제어에 따른 동서울 SVC의 영향(모선 전압, 무효전력출력, TSC 및 TCR 전류 [kA])

Fig. 12 Operation influence of 200MVA Dong-Seoul SVC by Mi-Geum STATCOM operation

#### 4.2 과도상태 FACTS 상호영향 분석

다음은 주요 계통사고에 따른 수도권 FACTS 제어효과를 분석한 그림이다.

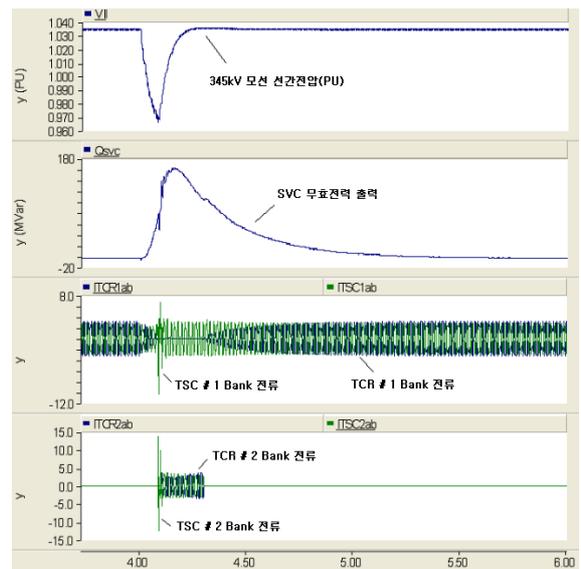


그림 13 765kV 신태백-신가평 1회선 단상[A상]지락사고시 동서울 SVC 보상제어

Fig. 13 Dong-Seoul SVC Operation by 765kV Shin-Taebeak T/L 1 line ground fault

과도상태 FACTS 영향분석을 위한 여러 가지 상정사고 중, 동서울 SVC의 경우 765kV 신태백-신가평 송전선로의 고장에 대비한 순동무효전력공급이 주 목적임을 감안하여 신태백-신가평 T/L의 단상 지락고장(A상, 5cycle)에 따른 동서울, 미금 FACTS 설비들의 제어효과에 대한 분석을 수행하였다.

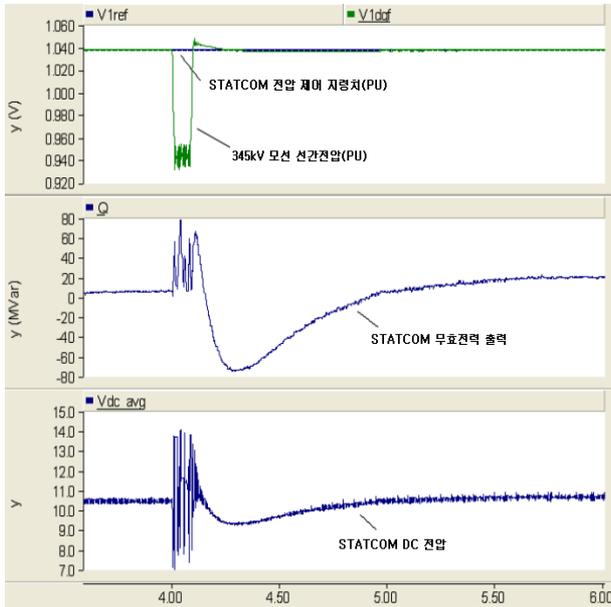


그림 14 765kV 신태백-신가평 1회선 단상[A상]지락사고시 미금 STATCOM 동작  
 Fig. 14 Mi-Geum STATCOM Operation by 765kV Shin-Taebeak T/L 1 line ground fault

765kV 신태백-신가평 송전선로 단상 지락사고의 경우, 가장 인접한 동서울 SVC 모선에서의 영향이 제일 큼을 알 수 있고 이에 따른 SVC의 보상효과도 가장 크게 일어난다. SVC와 STATCOM의 제어특성을 비교할 때 SVC 보다 STATCOM이 신속히 보상제어를 수행함을 알 수 있다. SVC의 경우 TSC의 보상시간등으로 보상이 완만하게 진행됨을 알 수 있다. 고장도중에 STATCOM의 무효전력 출력 특성이 좋지 못한것은 미금 STATCOM이 D-Q변환 신호에 의한 3상 일괄제어를 수행하는 방식이므로, 단상 고장시 적절한 출력제어에 어려움이 있음을 보여주고 있다. 그러나 고장해소 직후 우수한 제어특성을 보여주고 있다. 다음은 345kV 서인천-신파주 T/L에 대하여 1회선 단상사고를 낸 경우이다. 이 경우 단상 지락고장에 따른 동서울, 미금, 양주 FACTS설비들의 제어효과를 분석하였다.

345kV 서인천-신파주 T/L 1회선 단상지락사고의 경우 양주 SVC 모선에서의 영향이 제일 큼을 알 수 있고 이에 따른 SVC의 보상효과도 가장 크게 일어남을 알 수 있다. SVC와 STATCOM의 제어특성을 비교할 때 SVC 보다 STATCOM의 보상이 가장 즉시, 효과적으로 일어남을 알 수 있다. SVC의 경우 TSC의 보상시간등으로 보상이 약간 완만하게 진행됨을 알 수 있다. 반면 STATCOM의 경우 고장이 복구된 이후에 약간의 과도현상이 일어남을 보여주고 있다.

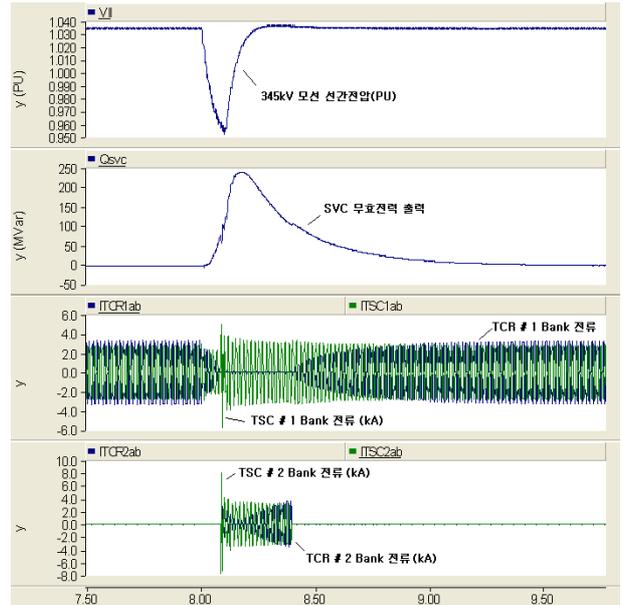


그림 15 345kV 서인천-신파주 1회선 단상[A상]지락사고시 동서울 SVC 보상제어  
 Fig. 15 Dong-Seoul SVC Operation by 345kV Seoinchun-Shinpaju T/L 1 line ground fault

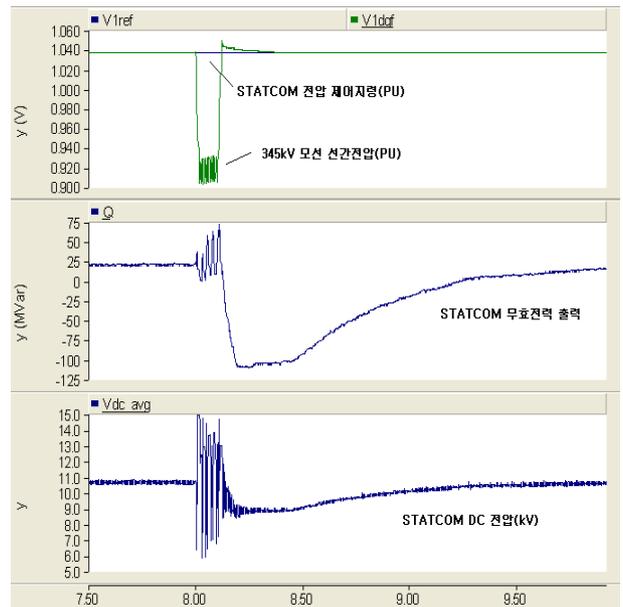


그림 16 345kV 서인천-신파주 T/L 1회선 단상[A상]지락사고시 미금 STATCOM 보상제어  
 Fig. 16 Mi-Geum STATCOM Operation by 345kV Seoinchun-Shinpaju T/L 1 line ground fault

### 5. 결 론

본 논문은 수도권 계통에 설치되는 FACTS 설비들에 대한 과도현상 및 상호영향을 분석한 내용이다. 수도권에 설치된 FACTS 설비중, 특히, 인접설비인 345kV 동서울 변전소 ±200MVA SVC와 345kV 미금 ±100MVA STATCOM에 대

한 특성분석을 중점적으로 수행하였다. 분석결과, 정상상태에서의 상대 설비의 운전에 따른 비정상적인 상호영향은 나타나지 않았으나, STATCOM으로 제어가 힘든 SVC의 복수개의 TSC 투입에 따른 순시적인 과도영향이 나타났다. 또한 계통고장에 따른 STATCOM 및 SVC에 대한 영향분석 결과 STATCOM이 보다 신속한 응답특성을 보이고 있으나, 3상 일괄제어 방식의 STATCOM인 경우 불평형 고장시 제어가 원활치 않을수 있음을 알 수 있다.

**참 고 문 헌**

- [1] Hingorani N and Gyugyi, L, "Understading FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission System", IEEE Press 2000.
- [2] TMEIC, "Dong-Seoul 345kV 200MVA SVC Manual", 2008
- [3] Hyosung Heavy Industry, "Mi-Geum 345kV 100MVA STATCOM Documentation", 2009
- [4] ABB "SEO-DAEGU 345kV 100MVA SVC Documentation", 1999

**저 자 소 개**



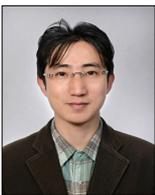
**윤 종 수(尹 鍾 秀)**

1968년 5월 30일생, 1996년 경북대학교 대학원 졸업(석사), 2005년 동 대학원 박사과정수료, 발송배전기술사, 1996년~현재 한전 전력연구원 선임연구원.



**김 재 한(金 宰 漢)**

1979년생, 2008년 2월 건국대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2007년 12월 한국전력공사 입사, 2009년 12월~현재 전력연구원 근무.



**이 성 두(李 性 斗)**

1973년생, 1996년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 한전전력연구원 선임연구원.



**최 장 흠(崔 章 欽)**

1972년생, 2008년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 한국전력공사 전력연구원 근무.



**서 보 혁(徐 輔 赫)**

1952년생, 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 경북대 공대 전자전기공학부 교수.