

345[kV] 100[MVA] STATCOM 과도해석 모델 개발 및 동특성 분석

(The Development of Transient Analysis Model and Performace Analysis of
345[kV] 100[MVA] STATCOM)

윤중수*

(Jong-Su Yoon)

Abstract

This paper describes the development of the transient analysis model of 345[kV] 100[MVA] STATCOM and the result of the performance analysis. The Korea power utility company, KEPCO began a commercial operation of a 100[MVA] STATCOM(Static synchronous COMPensator) at 345[kV] Migeum substation in Seoul. In order to operate a new control device like STATCOM to the power system, suitable transient model is needed. Therefore, Korea Electric Power Coporation(KEPCO) developed a transient analysis models using EMTDC/PSCAD. The development of this transient analysis model is based on the actual STATCOM S/W algorithm and H/W specification that was provided by its manufacture. Through this model, the transient/dynamic performance of STATCOM at Migeum substation can be analyzed.

Key Words : STATCOM, EMTDC/PSCAD Program

1. 서 론

최근 급변하는 전력시장의 환경변화와 가중되는 송전설비 확충의 어려움으로 기존 송변전 설비의 활용도와 전력 계통의 신뢰도를 극대화 할 수 있는 유연송전기술, 즉 FACTS(Flexible AC Transmission System)기술에 대한 연구가 활발하다. 국내에서도 2005년 전남 강진 변전소에 국내 최초의 FACTS Pilot Plant인 154[kV] ±80[MVA] UPFC를 설치한 이래,

2010년에는 수도권 345[kV] 미금 변전소에 국내 기술로 제작한 ±100[MVA] STATCOM(STATIC synchronous COMPensator)설비를 설치하여 운영하고 있다.

STATCOM은 가장 기본적인 FACTS 설비중 하나로써 전력계통에 병렬로 연계되어 모션전압 제어와 무효전력 보상을 주로 수행하게 되며, 이를 통하여 전력계통의 안정도를 향상시킬 수 있다[1]. 미금 변전소 STATCOM의 경우, 인근 345[kV] 동서울 변전소에 설치된 ±200[MVA] SVC(Static Var Compensator)와 함께 수도권 계통의 전압 안정도 향상과 용통전력 증대에 기여하고 있다. STATCOM과 같이 신규로 개발한 FACTS 설비의 계통 적용을 위해서는 적절한 계통

* 주저자 : 한전 전력연구원
Tel : 042-865-5821, Fax : 042-865-5844
E-mail : dosa@kepcoco.kr
접수일자 : 2010년 12월 23일
1차심사 : 2010년 12월 31일
심사완료 : 2011년 5월 6일

영향 평가 모델의 개발과 이를 통한 계통영향 분석이 필요하다. 일반적으로, 계통 계획 및 계통영향 평가에는 PSS/E 프로그램이 주로 활용되고, 설비의 설계 및 제어 알고리즘 평가 등을 위해서는 EMTDC/PSCAD와 같은 과도현상 해석 프로그램이 활용된다. 본 논문은 미금 변전소에 설치된 345[kV] ±100[MVA] STATCOM의 회로 및 제어기 모델과 개발된 EMTDC/PSCAD 모델을 통한 STATCOM 설비의 동특성 분석 결과를 기술하였다.

2. 345[kV] 100[MVA] STATCOM 구성

2.1 시스템 회로 구성

그림 1은 345[kV] 미금 변전소에 설치된 ±100[MVA] STATCOM의 기본적인 회로 구성도이다. STATCOM의 주요 사양은 다음과 같다.

항 목	내 용
인버터 용량	±100[MVA], ±50[MVA] × 2Unit
인버터 방식	3-level 전압원 인버터
전압 합성 방식	자속 합성 변압기에 의한 전압 가산
DC bus 전압	정격 ±10[kVdc] (과전압 보호 ±15[kVdc])
출력전압, 전류	17,852Vac(rms), 1,867A
Pole 용량	16.7[MVA]
주 변압기	100[MVA], 345/31.18[kV], %Z= 11, Y/Δ
보조 변압기	55.5[MVA], 31.15/15.09[kV], %Z=7.2, Y/Δ

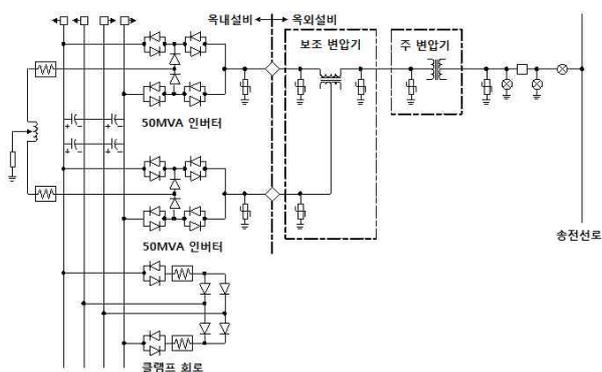


그림 1. 미금 345[kV] ±100[MVA] STATCOM 구성도
Fig. 1. 345kV ±100MVA STATCOM Configuration

미금 STATCOM은 50[MVA] 3-level 전압원 인버터 2대를 이용하여 24펄스 출력과형을 생성하는 3-level Multi-Pulse 방식을 사용한다. 이 방식은 1개의 변압기를 사용하는 PWM 구동방식보다 변압기 개수가 많고 구성방법이 복잡하지만, 전력소자 스위칭 횟수를 줄일수 있어(2[Hz]) 손실저감 측면에서 우수하므로 송전용 STATCOM에 적합한 것으로 알려져 있다[2]. 그림 2는 미금 345[kV] ±100[MVA] STATCOM 출력 전압 합성 개념도이다. 3-level의 출력과형을 생성하는 각 인버터의 출력과형이 1 : 1 변압비의 Y-Δ 보조 변압기를 통하여 합성되며, Δ-Y 주 변압기를 통하여 계통에 연계된다. 인버터의 DC 단자 측 전압은 +/-10[kV]이며, 제한 전압은 정격 DC전압의 150[%]이다.

2.2 제어 및 보호 알고리즘 구성

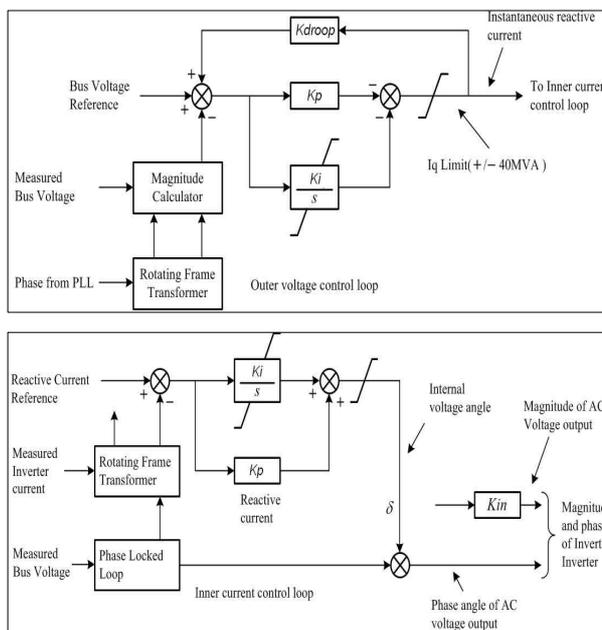


그림 2. 제어시스템 알고리즘
Fig. 2. Control System Algorithm

STATCOM의 제어알고리즘은 그림 2와 같이 외부 자동전압제어기(Outer Voltage Control)와 인버터의 제어 점호각을 생성하는 내부 무효전류제어기(Inner Current Control)로 나눌 수 있다. 이들 제어기들은

Cascade 형태로 구성되는데 주 제어기라고 할 수 있는 자동전압제어기에서 전압 설정치(V_{ref})를 지정해 주면 제어 알고리즘을 통해 무효전류설정치(I_{q_ref})가 생성되며, 전압제어기 출력(I_{q_ref})는 무효전류제어기를 통하여 인버터 점호각 α 를 생성한다. 제어기를 통한 인버터 점호각 제어를 통하여 STATCOM은 DC 모선 전압으로부터 계통과 동기를 이루는 AC 전압을 발생시키며 인버터 출력과 계통전압사이의 크기 차이로 송전선로와의 무효전력제어를 수행하게 된다. DC 커패시터 전압의 경우 STATCOM이 Multi Pulse 방식이므로 출력전압 제어를 위해 전압크기가 운전상태에 따라 가변된다. 그림 3은 외부 계통사고로 인한 과전류 및 저전압으로부터 STATCOM을 보호하기 위한 알고리즘이다.

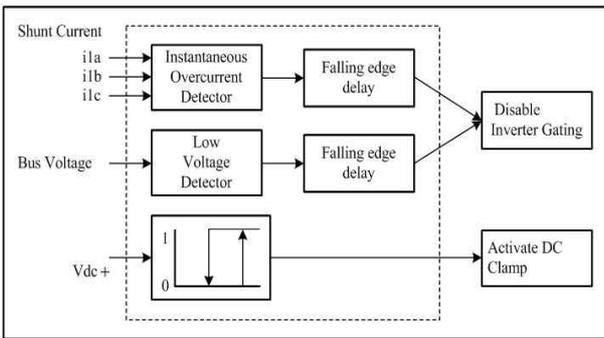


그림 3. 보호제어시스템 알고리즘
Fig. 3. Protection System Algorithm

3. 과도현상 해석모델 및 제어기 특성

3.1 과도현상 해석모델

그림 4는 345[kV] 100[MVA] 미금 STATCOM이 포함된 수도권 지역의 EMTDC/PSCAD 계통 모델이다. 그림 5는 그림 4의 미금 STATCOM 모델의 내부 회로 모델로써 주변압기, 보조 변압기, 인버터, DC 커패시터 회로가 포함된 STATCOM 구성 회로를 나타낸다. 그림 6은 그림 5에서 블록화된 인버터의 전력소자 스위칭 회로와 DC 커패시터단의 회로 모델을 나타낸다.

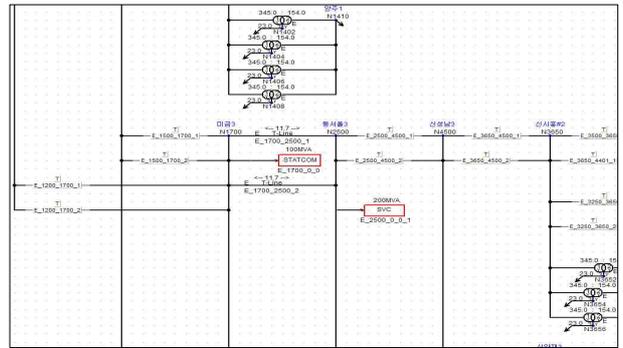


그림 4. 미금 STATCOM이 설치된 수도권 계통 EMTDC/PSCAD 모델
Fig. 4. Seoul Area Power System EMTDC/PSCAD Model

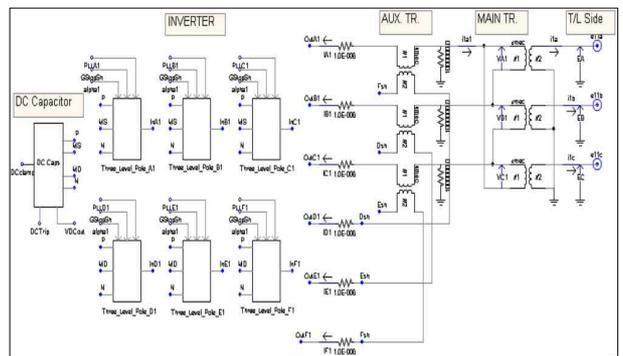


그림 5. 인버터 및 주/보조 변압기 모델
Fig. 5. Inverter and Transformer Model

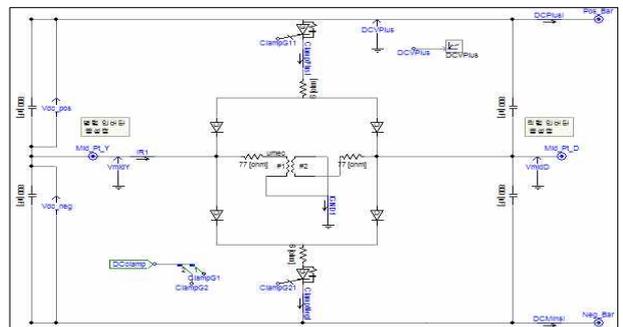
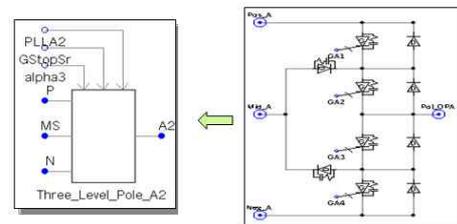


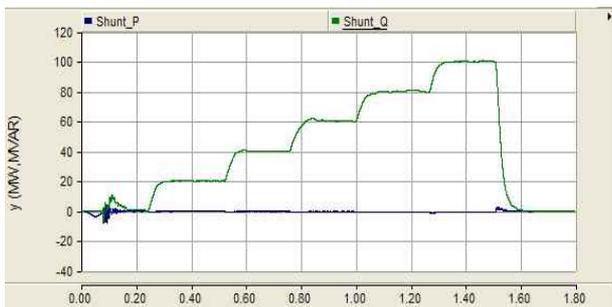
그림 6. 인버터 Pole 및 DC 커패시터(클램프 회로) 모델
Fig. 6. Inverter Pole and DC terminal Model

3.2 무효전류 제어기 특성 분석

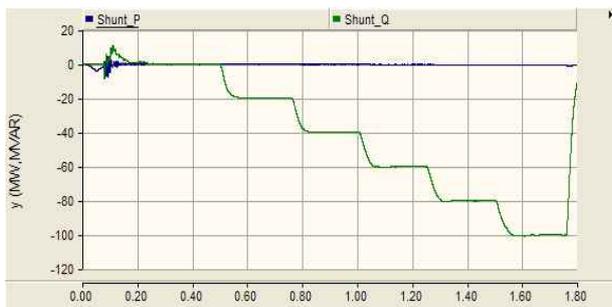
그림 7은 그림 2의 무효전류 제어기 구동 특성을 나타낸다. 무효 전류제어기의 특성분석을 커패시터 모드 운전(Case 1)과 인덕터 모드 운전(Case 2)로 구분하여 수행하였다. 각 모드의 시뮬레이션 시나리오는 다음과 같다.

		커패시터 모드(Case 1)						
Time(sec)		0.0	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75
[MVar]		0	20	40	60	80	100	0

		인덕터 모드(Case 2)						
Time(sec)		0.0	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75
[MVar]		0	-20	-40	-60	-80	-100	0



(a) Case 1



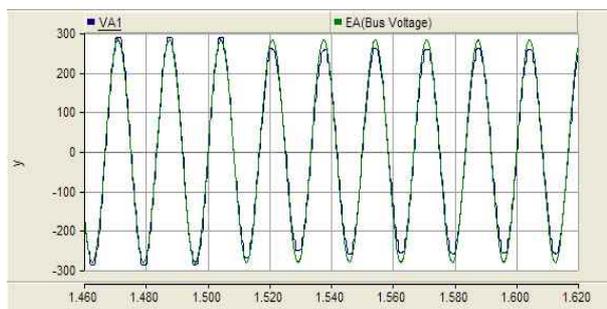
(b) Case 2

그림 7. STATCOM의 유효전력(Shunt_P) 및 무효전력 출력(Shunt_Q)

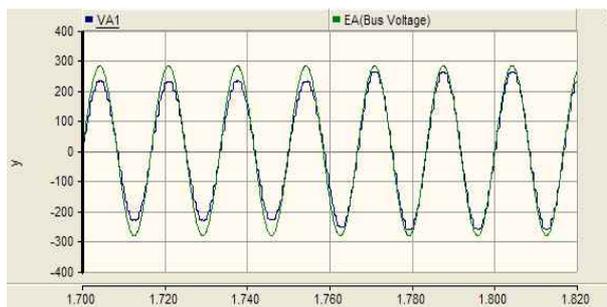
Fig. 7. STATCOM Output Power

그림 8 (a)는 커패시터 모드 출력(100[MVar])에서 출력 0으로의 변환과정에서의 STATCOM 출력전압

파형과 모선 전압 파형을 나타낸다. 100[MVar] 출력 시 STATCOM의 출력이 모선전압 보다 높은 전압을 나타내고 있으며, 출력 0의 경우에는 계통특성에 따라 모선전압보다 STATCOM 전압이 낮다. (b)는 인덕터 모드 출력 변환시의 파형으로 (a)와는 반대의 현상이 일어나고 있다. 모선전압과 같은 위상의 출력전압 크기 조절을 통하여 무효전력 제어가 이루어지고 있음을 알 수 있다.



(a) 커패시터 모드 변환(+100[MVar] → 0[MVar])

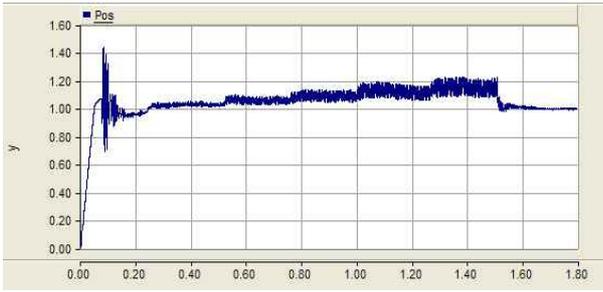


(b) 인덕터 모드 변환(0[MVar] → -100[MVar])

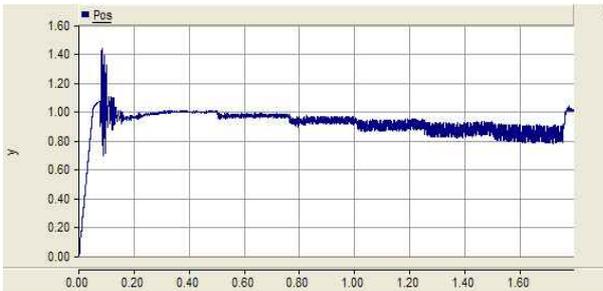
그림 8. STATCOM 변압기 출력 선간전압(VA1) 및 모선 선간전압(EA)

Fig. 8. STATCOM Operation Change

그림 9는 STATCOM의 인버터 DC 커패시터 단자 전압이다. 커패시터 모드시 무효전력의 공급출력을 위해서는 인버터 출력전압이 모선전압보다 높아야 하며 이를 위해서는 우선 DC 커패시터단의 전압을 상승하여야 함을 나타낸다. (b)는 반대로 인버터 모드시에는 DC 전압은 낮아져야 함을 의미한다. 그림 10은 STATCOM의 동작에 따른 모선전압과 선로 전류의 비교를 나타낸다. 선로전류가 전압보다 위상이 빠른



(a) Case 1



(a) Case 2

그림 9. DC 커패시터 전압([pu], 1[pu]=1.0[kVdc])
Fig. 9. DC Capacitor Voltage

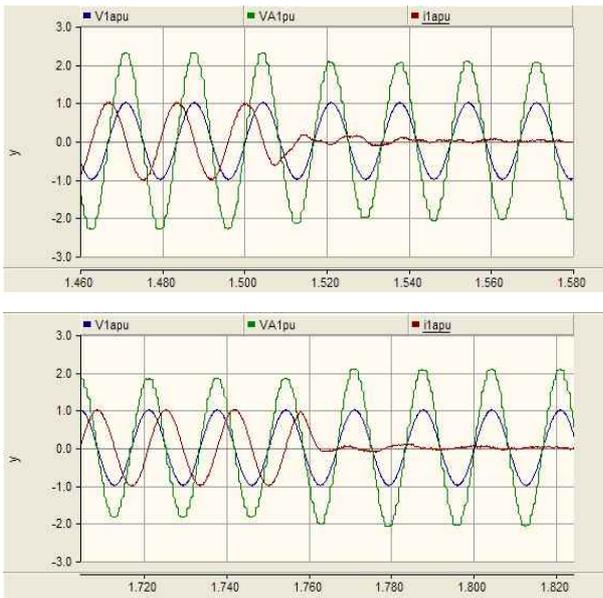


그림 10. 모선 상전압(V1pu)과 송전선로 상전류(i1pu)
Fig. 10. Bus Voltage and Current

커패시터 모드에서 정상운전으로 변환되는 모습과 선로전류가 전압보다 위상지연되는 인덕터 모드에서 정

상운전으로 변화되는 모습을 나타낸다. 그림에서 STATCOM에 의한 무효전력제어가 원활히 일어나고 있음을 알 수 있다.

3.3 전압 제어 특성 분석

STATCOM의 기본 제어기는 무효 전류제어기이지만, 실제 STATCOM의 운전은 상위 제어기인 전압제어기를 통하여 이루어지고 있다. 전압제어기의 경우 운전자가 모선 전압 제어 설정치를 입력하고 내부적으로 무효 전류제어기를 가동시켜 STATCOM을 운전하는 모드이다. 동특성 분석의 시나리오는 인덕터 모드에서 커패시터 모드로 전환하는 것으로 하였다. 그림 11~13에서 STATCOM의 인덕터 모드에서 커패시터 모드로의 전환에 따른 전압 제어가 원활히 이루어지고 있음을 알 수 있다.

	전압제어 모드	
Mode	인덕터 모드	커패시터 모드
Vref	9.9[pu]	1.0[pu]

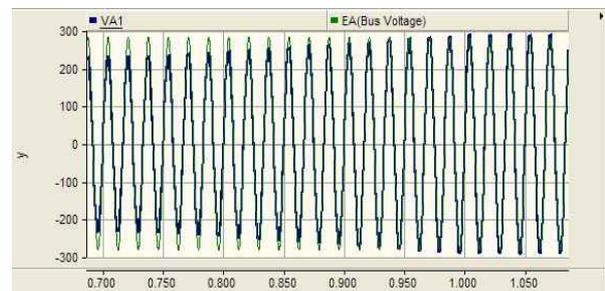
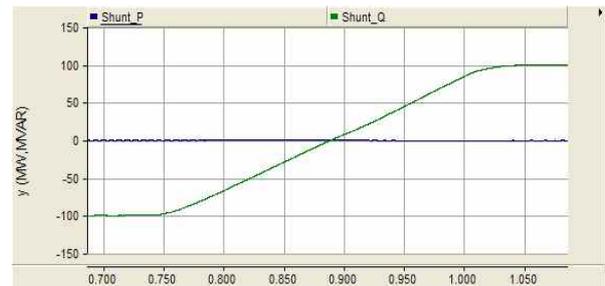


그림 11. STATCOM 출력 전력(유효 및 무효) 및 보조 변압기 출력 선간전압(VA1)과 모선 선간전압(EA)

Fig. 11. STATCOM Output Power and Voltage

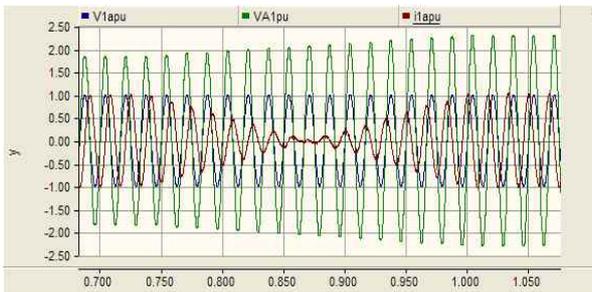


그림 12. 모선 상전압(V1pu)과 송전선로 상전류(i1pu)
Fig. 12. Bus Voltage and Current

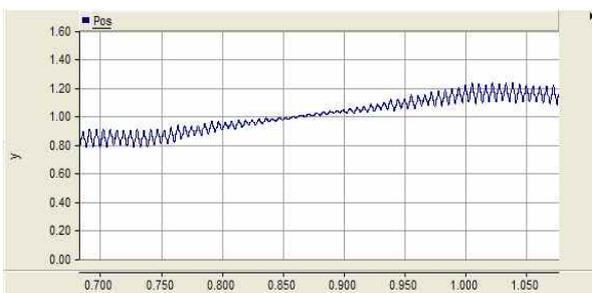


그림 13. DC 커패시터 전압 추의(kV)
Fig. 13. DC Capacitor Voltage

4. 수도권계통에서의 STATCOM 동특성 분석

이상의 결과에서 정상상태에서 미금 STATCOM의 전압제어와 무효전력제어가 원활히 이루어지고 있음을 알 수 있다. 수도권 계통에서의 미금 STATCOM 과도 운전특성 분석을 위하여 인근 계통사고 모의를 통하여 수행하였다. 그림 14와 15는 765[kV] 신태백-신가평 T/L의 단상 지락고장(A상, 5cycle)와 345[kV] 서인천-신파주 T/L 1회선 단상사고(A상, 6cycle)에 따른 미금 STATCOM의 전압제어, 무효전력출력, 인버터 DC 전압을 나타낸다. 모의한 결과에서 수도권 인근 계통 고장시 미금 STATCOM이 전압 보상에 효과적이지 않음을 알 수 있고, 고장 제거후 전압제어 특성은 상대적으로 우수함을 알 수 있다. 수도권 인근 계통사고에서 STATCOM의 효과가 미미한 것은 첫째, 수도권 계통의 특성상 ± 100 [MVA]라는 적은 보상 용량이 가장 큰 원인이고, 둘째는 그림 1 및 2와 같이 Multi-Pulse방식의 STATCOM 구조와 D-Q변환을

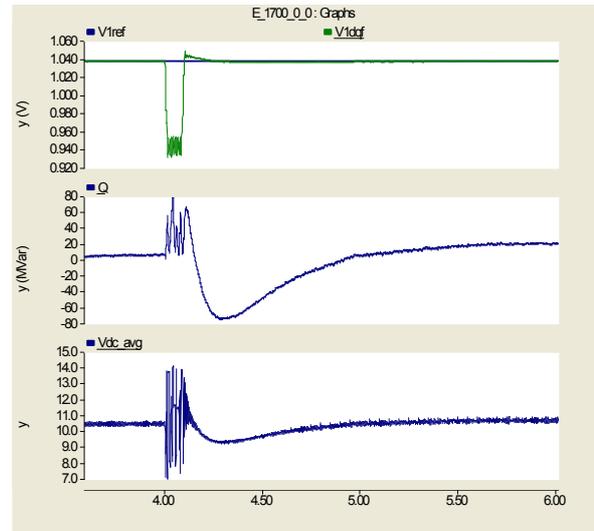


그림 14. 미금 STATCOM 동작특성 분석(765[kV] 신태백-신가평 1회선 단상[A상]지락사고 영향)
Fig. 14. Migeum STATCOM operation

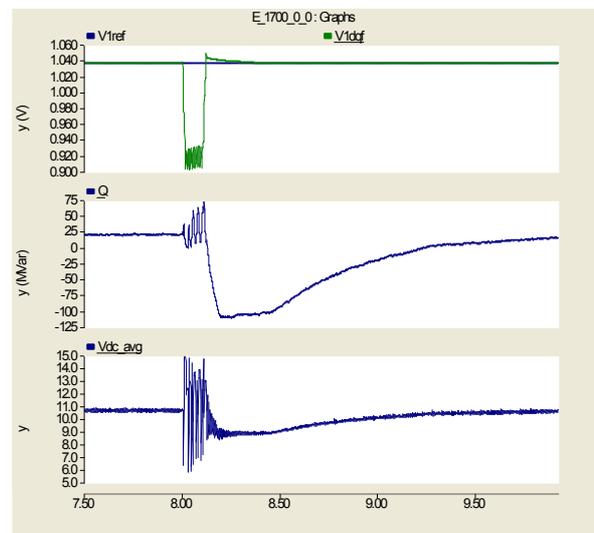


그림 15. 미금 STATCOM 동작특성 분석(345[kV] 서인천-신파주 T/L 1회선 단상[A상]지락사고)
Fig. 15. Migeum STATCOM operation

기반으로 하는 제어 알고리즘 구조상 1선 지락과 같은 불평형 과도현상에 취약하기 때문이다. 향후 수도권 계통의 FACTS 설비적용시 이러한 정상상태와 과도상태 특성을 고려하여 계통계획이 수립될 필요가 있다.

5. 결 론

본 논문은 2010년부터 미금변전소에서 운용중인 345[kV] 100[MVA] STATCOM에 대한 과도 동특성 분석을 위한 해석 모델의 개발과 동특성 분석에 관한 내용을 기술하였다. 본 논문에 사용된 EMTDC/PSCAD 해석모델은 STATCOM 제작사의 상세 설계서와 제어/보호 알고리즘을 근거로 개발되었다. 본 해석모델은 100[MVA] STATCOM의 제반 전력회로와 제어/보호 알고리즘을 동일하게 반영하였다. 전력회로 및 제어기 모델의 설계사양 및 제어기 분석 실험데이터를 통하여 실제 STATCOM의 응답 특성을 예측하였고, 제어알고리즘의 타당성을 검증하였다. 본 해석 모델을 통하여 수도권 계통에 대한 STATCOM 제어 효과와 사고시의 원인 분석이 가능할 것으로 전망된다.

References

- [1] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, "Understanding Facts: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems" December 1999, Wiley-IEEE Press.
- [2] Schauder; et al ; "Development of a +/- 100[MVAR] Static Condenser for Voltage Control of Transmission Systems", IEEE PES Summer Meeting, San Francisco, July 1994, Paper No. 94 SM 479-6.
- [3] Gole AM; Nayak O.B., Sidhu,T.S. and Sachdev M.S. ; "A graphical Electromagnetic Simulation Laboratory for Power Systems Engineering Programs", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No 2, May 1996, pp 599-606.

◇ 저자소개 ◇



윤종수 (尹鍾秀)

1968년 5월 30일생. 1993년 경북대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 졸업. 2000년 동대학원 박사과정 수료, 기술사. 한전 전력연구원 선임연구원.