

대규모 전력계통에서 STATCOM과 Switched Shunt의 동특성을 고려한 협조제어 검토

국경수, 오태규, 이정호, 김학만
한국전기연구원

Study on the control coordination of STATCOM and Switched Shunt considering their dynamic characteristics in bulk power system

Kook Kyung Soo, Oh Tae Kyoo, Lee J.H, Kim Hak Man
KERI

Abstract - As STATCOM is considered to be installed in bulk power system, various studies are conducted to establish strategies for system operation considering STATCOM. This paper describes control strategy for coordinating STATCOM with existing switched shunt in bulk power system.

릴 FACTS 설비를 모델링하기 위한 범용모델로써 모델에 주어지는 해당 입력파라미터를 대상 설비의 특성에 맞게 입력하여 적절히 조정함으로써 다양한 FACTS 설비를 모델링 할 수 있다.

1. 서 론

대규모 전력계통에서는 고전압 선로에 고장이 발생되는 경우, 단일 상정고장만으로도 상당한 무효전력 손실증가를 초래할 수 있으며, 더욱이 이중 상정고장 시에는 무효전력 손실이 훨씬 더 커질 수 있는 것으로 알려져 있다). 따라서 이러한 무효전력 손실이 상정고장 이후에 신속히 보상되지 않으면 이로 인한 저 전압이 지역 전방의 전압문제와 그 밖의 계통 문제들을 야기하게 된다. 따라서 대규모 실 계통에는 다양한 형태의 무효전력 보상장치가 설치 및 운용되고 있다.

한편, 기계적으로 스위칭 되는 병렬 캐패시터와 이에 대한 제어는 일반적으로 그 응답이 너무 느리기 때문에 속응성이 요구되는 과도상태의 무효전력 보상을 감당할 수 없으며 어떤 경우에는 병렬 캐패시터가 동작되지 못하거나(헤팅 문제) 전압을 과보정(over-correct)하여 또 다른 문제를 야기할 수도 있다.

이에 대해 FACTS 설비의 하나인 STATCOM은 인버터에 기반된 설비로써 이러한 속응성이 요구되는 과도상태 무효전력 보상에 매우 효과적으로 적용될 수 있다. 하지만 아직까지 STATCOM은 그 설치비용이 기존의 무효전력보상설비보다 높기 때문에 대규모 전력계통에 STATCOM이 설치될 경우에는 STATCOM의 속응성을 최대한 활용하면서 계통의 전압을 유지하기 위한 인근지역 모선의 조상설비와의 협조제어가 필요하다. 이를 통해 계통에 설치되어 있는 기존의 무효전력보상설비의 활용도 또한 높일 수 있다. 이를 위해 본 논문에서는 STATCOM과 Switched Shunt의 동특성을 살펴보고 설비간의 협조제어를 위한 제어전략을 수립한 후 이를 대규모 전력계통에 대한 사례연구를 통해 유용성을 검토하였다.

2. STATCOM 해석모형

본 절에서는 STATCOM의 해석모형을 살펴본다. 이를 위해 대규모 전력계통해석을 위한 PSS/E 프로그램에서 제공하는 정상상태 해석모형과 동특성 해석모형을 검토하였다.

2.1 정상상태 해석모형

대규모 전력계통 해석에 널리 사용되고 있는 PTI사의 PSS/E 프로그램은 다음 그림 1과 같은 FACTS 설비의 일반 모델을 기본적으로 제공한다. 이는 다양한 직병

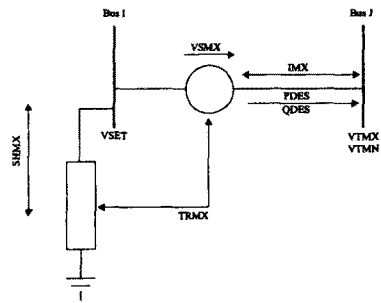


그림 1 PSS/E 프로그램의 FACTS Model

이를 위한 입력 자료는 다음과 같다.

- FACTS 기기번호 : FD#
- 송전단 모선번호 : SENDING BUS
- 끝단 모선번호 : TERMINAL BUS
- 제어모드 : MODE
- 유효전력 지정치(끝단 모선 기준) : PDES
- 무효전력 지정치(끝단 모선 기준) : QDES
- 송전단 모선전압 지정치 : V SET
- 송전단 모선의 병렬기기 전류상한 : SHNTMX
- 병렬-직렬기기 간 송전 유효전력 상한 : BRDGMX
- 끝단 모선의 전압 상한 : VTMAX
- 끝단 모선의 전압 하한 : VTMIN
- 직렬 전류 상한 : VSRMAX
- 직렬 가상 설비의 리액티스 : LINE X
- 소유자 : OWNER
- 기타 설정치(제어모드 추가 설정치) : SET1, SET2
- 직렬 전압기준 코드 : VSREF

STATCOM은 FACTS 설비의 일반 모델에서 병렬설비만을 이용하여 지정모선의 전압을 지정치로 유지하는 기능으로 모델링 된다. 따라서 STATCOM 모델링을 위한 PSS/E 프로그램의 FACTS 모델은 다음과 같이 설정되었다.

표 1 STATCOM 모델을 위한 입력자료

| FD# | 송전단 | 끝단 | MODE | PDES | QDES |
|-------|------|--------|-------|-------|--------|
| 기기번호 | 모선번호 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| V SET | 병렬용량 | BRDGMX | VTMAX | VTMIN | VSRMAX |
| 전압지정치 | 설비정격 | 9999 | 1.1 | 0.9 | 1.0 |

1) AEP 계통의 경우 1회선 선로 상정고장의 경우 약 700MVar 정도의 무효전력 손실이 증가되는 것으로 보고 됨

| ISRMX | LINE X | OWNER | VSREF | SET1 | SET2 |
|-------|--------|-------|-------|------|------|
| 0 | 0.05 | 1 | 0 | - | - |

- 끝단 모선번호 : 병렬요소만 모델링하기 위해 '0' 입력
- 제어모드 : 정상운전 모드를 선택
- 유효전력 지정치(끝단 모선 기준) : default=0.
- 무효전력 지정치(끝단 모선 기준) : default=0.
- 송전단 모선전압 지정치 : 전압 지정치를 입력
- 송전단 모선의 병렬기기 전류상한 : STATCOM의 정격
- 병렬-직렬기기 간 송전 유효전력 상한 : default=9999.
- 끝단 모선의 전압 상한 : default=1.1.
- 끝단 모선의 전압 하한 : default=0.9.
- 직렬 전류 상한 : 해당사항 없음. default=1.0
- 직렬 가상 설비의 리액턴스 : default=0
- 소유자 : 소유자 번호. default=1
- 기타 설정치(제어 모드에 따른 추가 설정치) : 없음.
- 직렬 전압기준 코드 : 해당사항 없음. default=0

2.2 동특성 해석모형

PSS/E에서 STATCOM의 동적해석모형으로는 CSTATT 모델과, CSTCON 모델의 2가지가 제공되는데 CSTATT 모델은 조류계산에서 동기조상기로 모델링 될 경우에 적용되며 CSTCON 모델은 조류계산에서 FACTS 기기로 모델링 될 경우에 적용되는 차이를 가진다. 본 연구에서는 CSTCON 모델을 이용하여 STATCOM의 동특성을 모의 해석하였다. 이 모델에서는 변압기 리액턴스 배후의 제어 가능한 전압원으로 콘덴서를 모델링하고, AC 전압은 단자전압과 동상으로 유지하여 손실은 고려되지 않는다. STATCOM의 전류는 GTO 컨버터의 정상상태 과부하 정격으로 제한되고 모델의 입력으로는 기준전압, 단자 전압, 전력계통안정화 장치(PSS) 출력이 가능하며, 최종적으로 STATCOM 출력전류를 계산한다. STATCOM의 전류가 양의 값인 경우, 이는 STATCOM이 무효전력 공급원으로 동작하고 있음을 의미한다.

다음 그림 2는 PSS/E의 CSTCON 모델을 나타낸다.

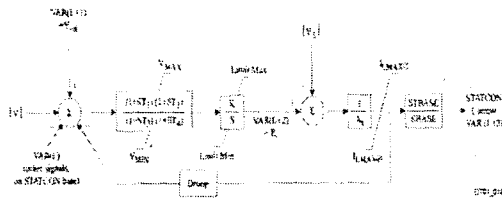


그림2 PSS/E의 CSTCON 모델

PSS/E의 CSTCON 모델을 이용한 STATCOM 모델링에 대한 입력 자료는 다음과 같다.

- 기기번호 : NF
- 모델명 : CSTCON
- 제어대상 모선번호 : IB
- 시정수 : T1, T2, T3, T4
- Gain : K
- 속도 조정율 : Droop
- 용량성 전류 상한 : LCMAX
- 유도성 전류상한 : LLMAX
- 변압기 리액턴스 : X_t
- 가속지수 : A_{cc}
- STATCOM base MVA : STBASE

다음 표2는 CSTCON 모델의 입력자료에 대한 일반적인 해석에서의 적용 권고치를 나타낸다.

표 2 STATCOM Dynamic Data 입력

| NF | 이름 | IB | T1 | T2 | T3 | T4 |
|------|--------|----|-------|-------|-------|-------|
| 기기번호 | CSTCON | 0 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |

| K | Droop | Vmax | Vmin |
|--|-----------|------|------|
| $\frac{25}{\Delta E_{rem}/\Delta E_{rat}}$ | 0.01~0.05 | 999 | -999 |

| L _{cmax} | L _{jmax} | V _{cutout} | E _{limit} | X _t | Acc | STBASE |
|-------------------|-------------------|---------------------|--------------------|----------------|-----|--------|
| 1.25 | 1.25 | 0.2 | 1.2 | 0.1 | 0.5 | 정격 |

3. STATCOM과 조상설비의 협조제어

3.1 제어목표

STATCOM의 용량이 과도시의 무효전력 보상에 최대한 활용될 수 있도록 정상상태에서 STATCOM 인버터의 용량성 예비력을 최대한 확보하도록 한다.

3.2 제어전략

STATCOM의 신속한 무효전력 보상능력을 계통 외란(빠른 dV/dt)의 보상에 최대한 투입하고 빠른 응답이 필요 없는 부하변동 등에 대한 보상은 기존에 계통에 설치되어 있는 병렬 캐패시터(Switched Shunt)들을 사용하여 보상함으로써 전체적으로 효과적인 무효전력 보상 효과를 얻을 수 있도록 한다.

3.3 제어기법

정상상태에서 STATCOM에 제어권한이 주어진 원격 모선의 병렬 캐패시터들을 제어하여(각 모선의 전압유지 기능을 병행) STATCOM의 병렬 인버터에 용량성 예비력이 최대가 되도록 운전하다가, 계통의 무효전력 수요가 증가하는 경우, 과도기간에 대해서는 STATCOM의 병렬 인버터가 무효전력 수요의 변동을 감당하게 한 후, 과도기간이 지난 후에는 사전검토에 의한 시나리오에 따라 원격모선의 병렬 캐패시터를 순차적으로 투입하여 계통의 무효전력 수요를 감당하게 함으로써 STATCOM의 용량성 예비력이 최대로 확보되는 상태로 환원시키는 방법으로 임의의 시점의 정상상태에서 STATCOM의 용량성 예비력을 최대한 유지해간다

3.4 AEP 계통의 UPFC에 대한 적용 예

AEP 지역계통에 도입된 UPFC는 지역 내에 138kV의 병렬 캐패시터의 신설을 포함하고 있는데 이는 이 지역의 무효전력 수요 증가에 대응하기 위해 Inez(52.8MVar 2개)와 John Creek(52.8MVar 1개) 변전소에 설치되며 Spring과 Logan 138kV 변전소에는 각각 하나씩 2개의 138kV 병렬 캐패시터가 이미 설치되어 있고, Logan 변전소에는 용량이 증대된 두 번째의 138kV, 62.4 MVar 캐패시터 뱅크가 설치되었다. 그리고, 이러한 6개의 병렬 캐패시터는 UPFC에 의해 제어되며, 제어신호가 손실되거나 UPFC가 고장이 될 경우에는 각 변전소가 해당 캐패시터 뱅크에 대해 지역별 전압 제어를 계속하게 된다. 이러한 계통에 대해 병렬 캐패시터와 UPFC 병렬 인버터 사이에 다음 그림 3과 같은 협조제어기법이 적용되었다.

그림3은 계통의 무효전력 수요가 증가하는 상태를 나타낸다. 곡선에서 기존의 병렬 캐패시터 뱅크가 스위칭되어 투입되기 전에 병렬 인버터의 출력이 -120Mvar 까지 도달된다. 이 단계에서 병렬 인버터 출력을 -150Mvar로 환원시키기 위해 첫 번째 원격 병렬 캐패시터 뱅크(연구에 의해 사전에 결정됨)가 스위칭되어 투입된다. 이러한 시나리오가 4개의 모든 원격지의 병렬 캐패시터 뱅크가 운전될 때까지 반복된다.

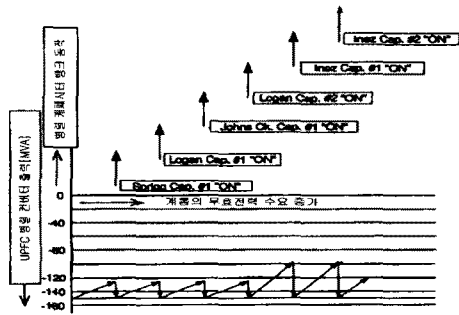


그림 3 캐패시터의 스위칭과 UPFC 병렬 인버터의 출력

이러한 절차에 의해 Inez 변전소에서는 항상 200Mvar 이상의 동적 무효전력 여유를 유지하게 된다. 또한 각 변전소 전압은 사전에 정의된 전압 범위 이내로 유지된다.

4. 사례연구

본 절에서는 위에서 검토된 협조제어 전략에 따라 정상상태에서 STATCOM의 용량성 가용용량을 최대한 확보하기 위한 운용전략을 대규모 실계통에 적용하여 모의하였다. 본 사례의 개요는 다음과 같다.

- 대상계통 : 한전 2008년 계통 (90%부하수준)
- STATCOM 설치위치 및 용량: 신포천(1910) 154kV 모선, 200Mvar
- 협조대상설비 : 신포천 모선 인근의 154kV모선(6개)에 설치되어 있는 Switched Shunt

표 3 STATCOM 인근 모선의 SW/Shunt 설치 용량

| 모선 | 1440 | 1545 | 1565 | 1575 | 1590 | 1595 |
|-------------|------|------|------|------|------|------|
| 설비용량 [Mvar] | 30 | 10 | 310 | 90 | 40 | 30 |

*수치는 본 논문에서 해석목적에 위해 정한 계통데이터 임

표4는 협조제어전략을 고려하지 않은 운전가능 조건을 나타낸다. 이때, STATCOM은 무효전력 51.4 Mavr를 계통에 공급하고 있고, 용량성 가용용량은 148.6Mvar이다.

표 4 협조제어 전략을 고려하지 않은 운전조건

| 모선 | 1440 | 1545 | 1565 | 1575 | 1590 | 1595 | 1910 (STATCOM) |
|------------|------|------|------|------|------|------|----------------|
| 공급량 [Mvar] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 51.4 |
| 전압 [pu] | 1.05 | 1.04 | 1.05 | 1.05 | 1.04 | 1.05 | 1.050 |

표5는 협조제어전략을 고려한 운전가능 조건을 나타낸다. 이때, STATCOM은 무효전력 121.5Mavr를 계통으로부터 흡수하고 있고 이에 따라 용량성 가용용량은 321.5 Mvar이다.

표 5 협조제어 전략을 고려한 운전조건

| 모선 | 1440 | 1545 | 1565 | 1575 | 1590 | 1595 | 1910 (STATCOM) |
|------------|------|------|------|------|------|------|----------------|
| 공급량 [Mvar] | 30 | 10 | 30 | 20 | 40 | 30 | -121.5 |
| 전압 [pu] | 1.05 | 1.05 | 1.05 | 1.05 | 1.05 | 1.05 | 1.050 |

그림4는 표4의 운영조건에 대한 상정고장 시간모의해석 결과를 나타낸다.

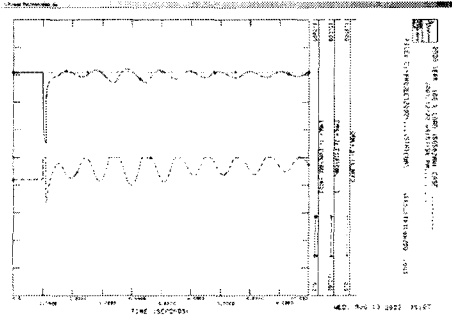


그림 4 상정고장 시간모의해석(협조제어 고려 전)

그림5는 표5의 운영조건에 대한 상정고장 시간모의해석 결과를 나타낸다.

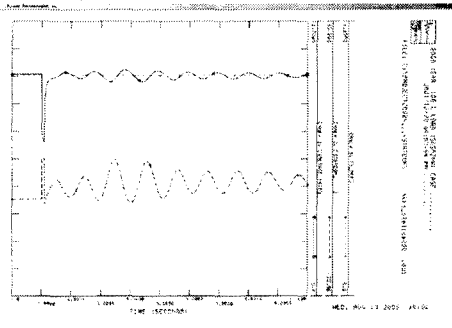


그림 5 상정고장 시간모의해석(협조제어 고려 후)

해석결과에서 협조제어를 고려한 경우, 이를 통해 확보된 STATCOM의 용량성 가용용량이 계통 외란에 의한 과도상태에서 효과적으로 발휘됨을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 STATCOM설비와 Switched Shunt 간의 협조제어 전략을 검토하고 이를 대규모 실계통에 적용하여 그 유용성을 확인하였다. 이러한 협조제어를 통해 속응성이 우수한 STATCOM의 동적 용량성 예비력을 정상상태에서 최대한 확보하여 고가 설비인 STATCOM의 우수한 동적 전압보상 성능을 과도상태에서 충분히 활용하면서 동시에 전력계통에 설치된 기존의 무효전력보상설비의 활용도도 높일 수 있다. 향후 STATCOM 설비가 우리나라 계통에도 도입되게 될 경우, 본 논문의 결과를 바탕으로 실 계통에서의 협조제어를 위한 운영전략 및 절차의 수립이 가능할 것으로 사료된다.

[참고 문헌]

- [1] 수도권 전력계통 안정도 향상을 위한 FACTS 설비 설치 타당성 연구, 산업자원부, 2003. 9.
- [2] 국경수, 김학만, 이영운, 오태규, 장병훈, 추진부, "대규모 계통에서의 조류제어를 위한 UPFC 적용", 대한전기학회 하계학술대회, 1998.
- [3] Manzar Rahman 외, "UPFC APPLICATION ON THE AEP SYSTEM - PLANNING CONSIDERATIONS", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 12, No. 4, November 1997.
- [4] PSS/E User Manual, PTI, 2003.