

IPLAN을 사용한 SSSC와 UPFC의 모델링과 정태해석에 미치는 영향 분석

(A Modelling and Analysis of SSSC and UPFC in Static Analysis of Power Systems)

김덕영* · 조인중** · 이군재** · 이지열***

(Deok-Young Kim · Eon-Jung Cho · Kun-Jae Lee · Ji-Yeol Lee)

요 약

본 논문은 SSSC와 UPEC의 모델링과 정태해석에 미치는 영향을 분석하였다. SSSC는 선로전류와 90도의 위상차를 갖도록 삽입전압원을 제어함으로써 선로의 유효전력을 제어하도록 하였으며, UPFC는 선로에 직·병렬로 연결된 변압기를 통하여 삽입전압원의 크기와 위상을 제어함으로써 선로의 유효·무효전력과 모션전압을 제어하도록 하였다. 시뮬레이션은 전력계통해석용 소프트웨어인 PSS/E를 사용하였으며, PSS/E의 외부매크로 프로그램인 IPLAN을 사용하여 PSS/E에서 아직 제공되지 않는 SSSC와 UPFC의 모델링 구현하였다. 모의해석 결과 계통변화에 의한 모션전압 변화시에 UPFC에 의한 모션전압 개선의 효과가 SSSC보다 넓은 범위에 걸쳐 효과적임을 확인할 수 있었다.

Abstract

This paper presents an modelling and analysis of SSSC and UPFC in static analysis of power systems. SSSC is used to control active power flow in transmission lines by controlling the phase angle of the injected voltage source which is in rectangular to the line current. UPFC is used to control the magnitude and phase of the injected voltage sources which are connected both in series and in parallel with the transmission line to control power flow and bus voltage. To compare the effect of SSSC and UPFC in power system static analysis, the PSS/E simulation program is used. As the FACTS device model such as SSSC and UPFC is not provided in PSS/E yet, an equivalent load model is used. This procedure is implemented by IPLAN which is an external macro program of PSS/E. The simulation results show that UPFC is more effective to improve bus voltage than SSSC in power system static analysis.

key words : SSSC, STATCOM, UPFC, PSS/E, FACTS, IPLAN

* 정회원 : 군산대학교 전기전자제어공학부 조교수

E-mail : dykim@ks.kunsan.ac.kr

** 정회원 : 군산대학교 전자정보공학부 대학원

*** 정회원 : 한국전력공사 청양전력소

접수 일자 : 2001년 7월 11일

1차심사일 : 2001년 7월 25일

심사완료일 : 2001년 9월 4일

1. 서 론

산업사회에서 요구하는 전력수요의 지속적인 증가와 전력의 고품질화에 대한 요구를 충족시키면서, 동시에 전력공급측면에서의 경제성과 환경적인 제약을

모두 고려할 수 있는 새로운 개념의 제어설비 기술에 대한 필요성이 증가하고 있다. 이러한 이유에 의해서 전력계통의 안정도나 안전도에 악영향을 미치지 않으면서 기존의 전력계통 설비들을 보다 효율적으로 사용하고자 하는 새로운 개념이 필요하게 되었으며, 이러한 개념을 FACTS(Flexible AC Transmission System)라 부른다. FACTS의 두 가지 중요한 목적은 교류송전선로의 전송용량을 증가시키고, 기존의 송전선 경로에서 전력흐름을 제어하는 것이다.

이러한 FACTS 개념은 전력전자기술의 발달로 인하여 새로운 제어설비로 구체화되는 것이 가능하게 되었으며, 현재 연구 및 실용화 단계에 있는 제 3세대 FACTS 제어기는 전압원 인버터 개념에 기초하고 있다. 이들 인버터 개념의 FACTS 제어기로는 직렬 보상기(SSSC: Static Synchronous Series Compensator), 그리고 통합 조류제어기(UPFC: Unified Power Flow Controller)가 있다.[1, 2, 3, 4] 본 논문은 이 중에서 인버터가 송전선로에 직렬로 연결되어 주로 유효전력을 제어할 목적으로 사용되는 SSSC와 두 개의 인버터가 직·병렬로 송전선로에 연결되어 선로의 임피던스와 전압 그리고 위상각을 제어할 수 있는 UPFC에 대하여 정태해석을 위한 제어기의 모델링과 계통에 미치는 영향을 비교분석 하였다. SSSC와 UPFC의 정태해석을 위한 모델링은 전력계통 종합해석용 소프트웨어인 PSS/E 내부의 IPLAN 이라는 응용프로그램을 사용하여 구현하였다.

2. 본 론

SSSC는 전압원 인버터와 직류 커패시터로 구성되어 있으며, 선로에 직렬로 연결되어 선로에 흐르는 전류와 90°의 위상차를 갖는 직렬전압원을 주입하여 선로의 임피던스와 유효전력을 제어하는 효과를 갖는다. UPFC는 구조적으로 2개의 전압원 인버터가 직류 커패시터를 통하여 연결되어있는 형태로서, 병렬 변압기를 통하여 모선에 병렬 연결된 전압원은 해당 모선의 전압을 제어하고 직렬삽입 전압원에 의해 소요되는 유효전력을 공급 또는 흡수하는 역할을 한다. 또한 직렬 변압기를 통하여 선로에 직렬 연결된 전압원은 모선간 전압 위상각과 전압크기를 변화시켜서 선로에 흐르는 유효·무효전력을 제어하는 역할을 하게 된다.

2.1 SSSC의 조류계산 모형

전력계통의 정태해석에 미치는 SSSC와 UPFC의 영향을 해석하기 위한 해석도구로는 전력계통의 종합 해석용 소프트웨어인 PSS/E 프로그램을 사용하였다. PSS/E 프로그램은 FACTS 제어기 중에서 병렬형 제어기기인 STATCOM에 대해서는 해석모델을 제공하지만, 직렬 또는 직·병렬형 제어기기인 SSSC와 UPFC에 대한 표준모델은 아직 제공되지 않고 있다. 따라서, SSSC의 정태해석을 하기 위해서는 적절한 모델링 방법이 필요하며, 본 논문에서는 등가부하 모델을 사용하여 SSSC가 설치된 선로의 유효전력을 제어할 수 있도록 하였다. 이때 선로의 무효전력은 SSSC에 의해 선로에 직렬로 삽입된 전압원과 선로 전류가 90°의 위상차가 발생하도록 모델링을 하였다. SSSC의 조류계산 모형을 그림 1에 나타내었다.

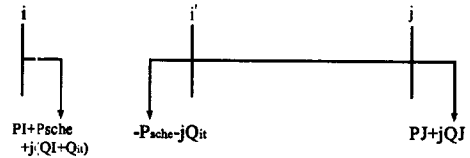


그림 1. SSSC 등가부하 모델
Fig. 1. Equivalent load model of SSSC

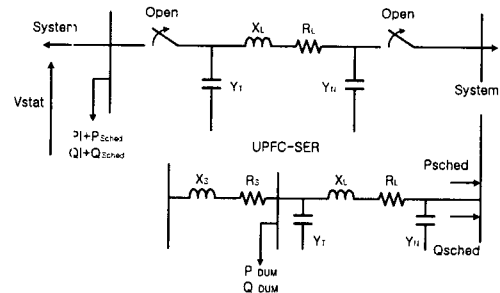


그림 2. UPFC의 등가모델
Fig. 2. Equivalent model of UPFC

2.2 UPFC의 조류계산 모형

UPFC의 정태해석을 하기 위한 조류계산 모형으로는 UPFC가 연결된 송전선로의 유효·무효전력 지정치와 모선의 전압크기 지정치를 설정하고 UPFC의 제어효과를 동기조상기와 부하로 등가화하여 조류계산의 해를 구하는 방법을 사용하였다. 즉, UPFC의 병렬부분은 병렬단 모선에 승압변압기를 이용하여 연결된 동기조상기와 부하로 취급하였으며, UPFC의 직렬부분은 직렬부분이 삽입되어 있는 선로를 절단

하고, 새로운 가상모선을 통해 선로에 목표하는 유효 전력과 무효전력을 주입하는 방법을 사용하였다. UPFC의 조류계산 모형을 그림 2에 나타내었다.

2.3 IPLAN을 이용한 SSSC의 조류계산 모형 적용

본 논문에서 SSSC의 조류계산 모형을 적용하기 위한 계산과정은 PSS/E 내부의 외부 매크로 프로그램인 IPLAN을 사용하여 실행하였으며, 이 때의 계산 과정은 다음과 같다.

- (1) Base Case 조류계산
- (2) SSSC 제어 기준치 입력
 - 대상선로의 전력조류 지정치
- (3) SSSC의 조류계산을 위한 계통구성
 - 대상선로의 절단
 - 가상모선 삽입
 - 가상모선에 대상선로를 연결
 - 대상모선과 가상모선에 등가 부하주입
- (4) 조류계산(SSSC의 등가모델 사용)
- (5) 대상선로의 선로조류 무효분 수정
 - 등가부하의 무효전력량 수정
 - SSSC의 삽입전압이 선로전류와 90°의 위상차가 날 때까지 계산을 반복
- (6) 조류계산

2.4 IPLAN을 이용한 UPFC의 조류계산 모형 적용

UPFC의 조류계산을 위한 계통구성은 UPFC를 적용하기 이전의 계통에 대한 조류계산, 선로의 절단, 발전기나 부하의 삽입, 조류계산 반복 등의 계산절차가 필요하다. 이러한 일련의 계산절차는 IPLAN으로 프로그래밍하여 PSS/E 프로그램에 적용하게 되며, 이때의 계산과정은 다음과 같다.

- (1) Base Case 조류계산
- (2) UPFC 제어 기준치 입력
 - 대상모선의 모선전압 지정치
 - 대상모선의 전력조류 지정치
- (3) UPFC의 조류계산을 위한 계통구성
 - 대상선로의 절단
 - 가상모선 삽입
 - 가상모선에 대상선로를 연결
 - 대상모선에 동기조상기 설치
 - 대상모선과 가상모선에 등가 부하주입
- (4) 조류계산(UPFC의 등가모델 사용)
- (5) UPFC 직·병렬 컨버터 사이의 전력수급 등가

- UPFC 직렬컨버터의 유효전력 공급량 계산
- 대상모선의 부하 주입량 중 계산값을 발전량으로 치환

(6) 조류계산

3. 사례연구

전력계통의 정태해석에 미치는 SSSC와 UPFC의 영향을 해석하기 위해 10발전기 39모선 계통인 New England 계통을 대상으로 하였다. 이때의 계통도는 그림 3과 같다.

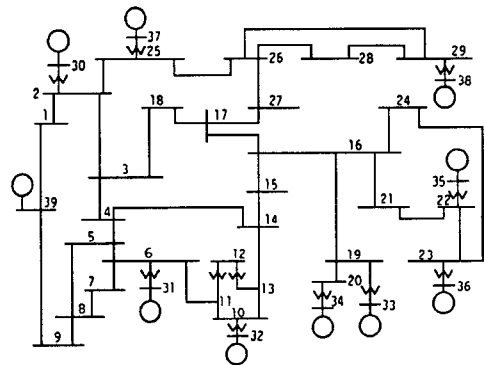


그림 3. New England 계통의 구조도
Fig. 3. Diagram of New England System

표 1. 선로조류변화 (MVA)
Table 1. Transmission line power flows (MVA)

선로	기준사례	과부하조건
4 - 5	-163.3 - j3.1	-326.6 - j35.7
5 - 6	-481.2 - j52.0	-645.5 - j75.5
4 -14	-262.1 - j49.6	-184.3 + j23.7
13-14	296.4 - j8.1	429.4 - j99.3
14-15	33.0 - j43.0	243.0 + j127.1
15-16	-287.1 - j158.6	-398.5 - j511

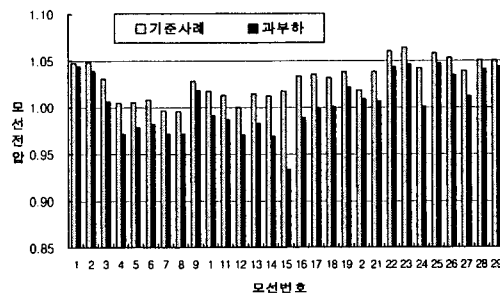


그림 4. 모선전압 변화
Fig. 4. Variation of bus voltages

New England 계통에서 발전기가 연결된 모선에 직접 또는 인접해 있는 부하를 제외한 나머지 부하 중에서 15번 모선의 부하를 두 배로 증가시키고 역률 0.7의 과부하 조건으로 모의하였다. 이때의 모선 전압과 선로조류를 그림 4와 표 1에 나타내었다.

그림 4에서 모선전압이 전반적으로 감소한 것을 알 수 있으며, 특히 4-14번 선로를 중심으로 좌측 인접모선인 4, 5, 6번 모선과 우측 인접모선인 14, 15, 16번 모선의 전압변화가 비교적 큰 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 모선전압의 변화가 큰 두 지역을 연결하는 4-14번 선로를 SSSC와 UPFC의 설치위치로 설정하여 모선전압과 선로조류에 미치는 영향을 해석하였다.

3.1 제어목표값이 기준사례와 같은 경우

SSSC와 UPFC를 4-14 선로에서 14번 모선에 설치하고 SSSC의 유효전력과 UPFC의 유효·무효전력 그리고 모선전압을 기준사례와 같은 값이 되도록 제어하였다.

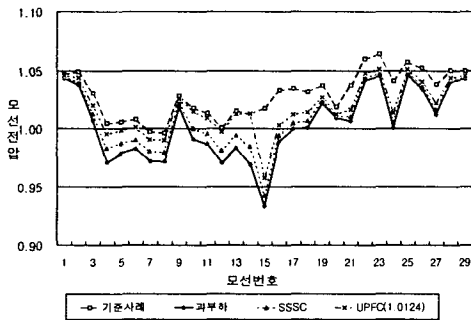


그림 5. SSSC와 UPFC에 의한 모선전압개선효과 (제어전압이 1.0124 [pu]인 경우)
Fig. 5. Improvement of bus voltages by SSSC and UPFC (the controlled voltage is 1.0124 [pu])

표 2. 조류해석 결과 (MVA) (제어전압이 1.0124 [pu]인 경우)
Table 2. Result of power flow analysis (MVA) (the controlled voltage is 1.0124 [pu])

선로	기준사례	과부하조건	SSSC적용	UPFC(1.0124)
4-14	-262.1-j49.6	-184.3+j23.7	-262.1-j12.7	-262.1-j49.6

그림 5에서 SSSC를 4-14선로의 14번 모선에 설치하고 선로의 유효전력을 기준사례와 같이 한 경우, 전반적으로 모선전압이 개선되었지만 14, 15, 16번

모선의 경우 전압개선폭이 매우 작음을 알 수 있다. UPFC를 설치한 경우는 모선전압의 개선이 SSSC보다 큰 폭으로 이루어졌으나 15, 16번 모선의 전압개선은 충분치 않음을 알 수 있다. 이때의 선로조류는 표 2와 같다.

3.2 UPFC의 제어전압을 증가한 경우

앞 절에서 UPFC를 설치한 경우 15, 16번 모선의 전압을 개선하기 위해 14번 모선의 제어전압을 기준사례에서의 최고 전압값인 1.0643[pu]과 10% 증가한 값인 1.1[pu]로 하고 계통해석을 하였다. 이때 선로의 조류값은 SSSC와 UPFC 모두 기준사례와 같이 하였다.

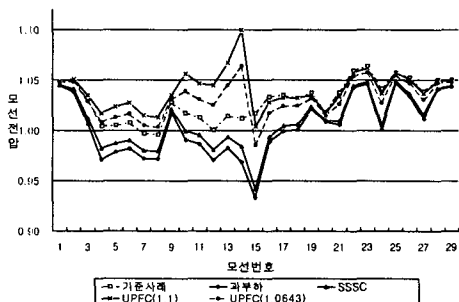


그림 6. SSSC와 UPFC에 의한 모선전압 개선효과 (제어전압이 1.1 [pu], 1.0643 [pu]인 경우)
Fig. 6. Improvement of bus voltages by SSSC and UPFC (the controlled voltages are 1.1 and 1.0643 [pu])

그림 6에서 UPFC의 전압제어값이 증가할수록 15번 모선의 전압이 큰 폭으로 상승함을 알 수 있으나, 인접모선인 10, 11, 12, 13번 모선의 전압도 다른 모선에 비해 크게 증가한 것을 알 수 있다. 이 경우 UPFC의 제어전압값은 인접모선의 전압까지 고려하여 1.0643[pu]로 제어한 경우가 적합한 것을 알 수 있다. 이때의 선로조류는 표 3과 같다.

표 3. 조류해석 결과(MVA)(제어전압이 1.1[pu], 1.0124[pu]인 경우)
Table 3. Result of power flow analysis(MVA)(the controlled voltages are 1.1 and 1.0126[pu])

선로	4-14
기준사례	-262.1-j49.6
과부하조건	-184.3+j23.7
SSSC적용	-262.1-j12.7
UPFC적용(V=1.1[pu])	-262.1-j49.6
UPFC적용(V=1.0643[pu])	-262.1-j49.6

3.3 SSSC의 유효전력 제어값을 변화한 경우

SSSC를 4-14선로에 설치한 경우, 선로 유효전력 값의 변화에 따른 전압개선효과를 관찰하기 위해 선로의 유효전력을 기준사례의 조류값을 기준으로 최대 60%에서 최소 -60%까지 단계별로 변화하면서 계통해석을 하였다. 그림 7에서 선로의 조류를 증가시킨 경우 모선전압은 전반적으로 증가하였으나, 개선 폭이 작은 것을 알 수 있다. 특히 15번 모선의 경우 전압개선이 거의 이루어지지 않았음을 알 수 있다.

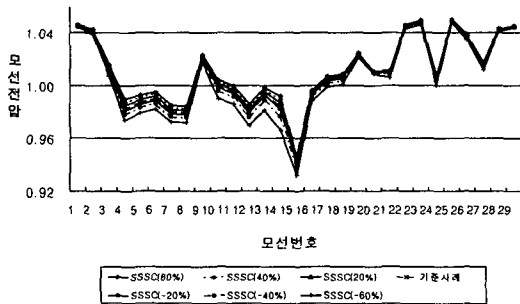


그림 7. SSSC에 의한 모선전압 개선효과
Fig. 7. Improvement of bus voltages by SSSC

4. 결 론

본 논문은 SSSC와 UPFC의 모델링과 정태해석에 미치는 영향을 비교하였다. 전력계통의 정태해석을 위한 해석도구로는 전력계통의 종합해석용 소프트웨어인 PSS/E를 사용하였으며, PSS/E에서 제공되지 않는 SSSC와 UPFC의 정태해석을 위한 모델은 외부 매크로 프로그램인 IPLAN을 사용하여 모델링하였다. 이때 SSSC는 등가부하 모델을 사용하여 선로의 유효전력을 제어할 수 있도록 하였으며, UPFC는 동기 조상기와 등가부하로 모델링하여 선로의 전력과 모선전압을 제어할 수 있도록 하였다. 사례연구는 New England 계통을 대상으로 발전기에 직접 또는 인접해있는 부하를 제외한 나머지 부하 중에서 용량이 큰 15번 모선의 부하를 과부하의 지역을 조건으로 모의하여, 전압이 큰 폭으로 감소한 두 개 지역을 연결하는 선로를 SSSC와 UPFC의 설치위치로 설정하였다. 사례연구 결과 SSSC는 선로의 유효전력을 큰 폭으로 제어하여도 모선전압의 개선에 큰 영향을 미치지 못하는 반면에, UPFC는 선로조류와 모선전압

을 적절히 제어함에 따라 모선전압의 개선에 매우 큰 효과가 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) "FACTS overview", IEEE power engineering society, 95TP 108, 1995.
- (2) L. Gyugyi, T. R. Rietman, A. Edris, C. D. Schauder, D. R. Torgerson, S.L. Williams, "The unified power flow controller: A new approach to power transmission control", IEEE Tr. Power Delivery, Vol. 10, No. 2, April 1995.
- (3) Kalyan K. Sen, Eric J. Stacey, "UPFC-Unified power flow controller: theory, modeling, and applications", IEEE Tr. Power Delivery, Vol. 13, No.4, October 1998.
- (4) 국경수, 김학만, 전진홍, 이영운, 오태규, 장병훈, 추진부, "대규모 계통에서의 조류제어를 위한 UPFC 적용", 대한전기학회, 춘계학술대회, 1999.
- (5) 김덕영, 이지열, 국경수, 노대석, "전력계통의 정태해석에 미치는 STATCOM과 UPFC의 영향에 대한 비교연구", 대한전기학회, 추계학술대회, 2000.

◇ 저자소개 ◇

김 덕 영 (金德泳)

1964년 11월 22일생. 1988년 고려대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996~현재 군산대학교 전기전자제어공학부 조교수.

조 언 중 (趙言衆)

1975년 1월 14일생. 2001년 군산대 전기공학과 졸업. 2001년~현재 군산대학교 전자정보공학부 대학원재학생.

이 군 재 (李君宰)

1974년 11월 15일생. 2001년 군산대 전기공학과 졸업. 2001~현재 군산대학교 전자정보공학부 대학원재학생.

이 지 열 (李枝烈)

1971년 7월 10일생. 1997년 원광대 전기공학과 졸업. 2001년 군산대 산업대학원 전기전자제어공학과 졸업(석사). 1998년~현재 한국전력공사 청양전력소 직원.

이 논문은 2001년도 군산대학교 두뇌한국21 사업에 의하여 일부 지원되었음