

UPFC Model for Stability Study Using IPLAN

金學萬* 吳泰圭** 張秉勳*** 秋鎮夫§
 (Hak-Man Kim · Tae-Kyoo Oh · Byung-Hoon Chang · Jin-Bu Chu)

Abstract - This paper presents an UPFC (Unified Power Flow Controller) model for stability study using PSS/E. The proposed UPFC model was implemented by IPLAN which is a high level language. As a control strategy for damping electromechanical oscillations, energy function method was adopted. By the adopted control law, the damping effect is robust with respect to loading condition, fault location and network structure. Furthermore, the control inputs are based on local signals. The effect of control of the UPFC model was demonstrated on an one machine infinite bus system and a two area system.

Key Words : UPFC, energy function, PSS/E, IPLAN

1. 서 론

1980년 말 FACTS(Flexible AC Transmission Systems)의 개념이 소개된 이후 이에 대한 활발한 연구가 진행되고 있으며, 일부 FACTS 기기들은 시운전을 거쳐 상용화 단계에 이르고 있다. UPFC(Unified Power Flow Controller)는 기능적인 측면에서는 병렬형 FACTS 기기인 STATCOM(Static Synchronous Compensator)과 직렬형 FACTS 기기인 SSSC(Static Synchronous Series Compensator)의 기능을 통합시킨 직·병렬형 FACTS 기기로서 모선의 전압제어 능력 뿐 만 아니라 조류제어 능력을 가진다[1].

최근 전력설비의 경과지 확보 난에 따른 계통 병목 해소 뿐 만 아니라 수송용량증대, 전압유지, 안정도 향상 등 전력 계통의 특성 개선에 FACTS의 도입 효과는 긍정적으로 평가되고 있다. 이러한 FACTS 적용 검토는 해석기법을 필요로 하며 이를 위해 해석 모형 수립이 중요하다. 특히, UPFC의 직렬부분은 직렬전압원이 선로에 삽입되는 형태로 전력 계통의 조류계산을 위한 수리적 모형 수립 측면에서는 다소 이례적이라 이에 대한 모델 수립의 연구가 진행되고 있으며, UPFC의 모델링으로 직렬 삽입 전압원을 부하로 등가화하는 기법이 소개되고 있다[2].

PSS/E는 PTI사가 개발한 계통해석용 패키지로서 계통계

획 및 운용해석의 도구로 많은 사용자를 확보하고 있다. 본 논문에서는 PSS/E용 UPFC의 안정도 해석 모형을 IPLAN을 이용하여 구현하였다. PTI사에서 개발된 IPLAN은 PSS/E의 사용에 유연성과 확장성을 제공하기 위해 개발된 고급언어로, 독립적인 고급언어로서 이용될 수 있지만 PSS/E와 결합하여 사용할 경우 PSS/E의 명령어(activity)를 직접 조작할 수 있는 장점을 제공한다[3,4].

UPFC 안정도 해석용 전산모형에서 제어기는 다양한 구조로 표현될 수 있으나, 본 논문에서는 인근의 측정 가능한 정보만을 입력받아 제어함으로써 계통의 조건과 설치 위치에 영향을 받지 않아 강인성을 보장하는 제어 기법으로 에너지 함수에 근거한 제어전략[5,6]을 이용하여 모형의 제어 부분을 구현하였다.

제안된 UPFC 안정도 해석 전산 모형을 1기 무한대 계통에 적용하여 3상고장에 대해 UPFC의 동요 억제 효과를 검토하였고 2 지역 계통(two area system)에서 3상고장에 의해 발생하는 interarea 모드에 대해서 UPFC의 제어 효과를 검토하였다.

2. UPFC 모델

2.1 UPFC

UPFC의 기본적인 구성은 그림 1과 같이 모선에 병렬로 연결되는 부분과 선로에 직렬로 삽입되는 부분 그리고 병렬 부분과 직렬부분을 연결시켜주는 DC 연계 커패시터 부분으로 구성되어 있다. UPFC 시스템의 병렬부분은 병렬 변압기와 병렬 변압기에 전압을 인가해주는 인버터 1 부분으로 구성되어 있으며, UPFC의 입력단 전압 V_i 의 크기를 일정하게 유지하는 기능과 DC 연계 커패시터의 전압을 일정하게 유

* 正 會 員 : 韓國電氣研究所 前任研究員 · 工博

** 正 會 員 : 韓國電氣研究所 責任研究員 · 工博

*** 正 會 員 : 韓電電力研究院 前任研究員

§ 正 會 員 : 韓電電力研究院 首席研究員 · 工博

接受日字 : 1998年 10月 30日

最終完了 : 1999年 1月 13日

지시하는 기능을 한다. 직렬부분은 선로에 직렬로 삽입된 직렬 변압기와 직렬 변압기를 통해 선로에 전압을 삽입시키는 인버터 2 부분으로 구성되어 있으며, 인가되는 전압을 적절히 제어하여 UPFC 출력단의 유효전력과 무효전력을 제어하는 기능을 한다.

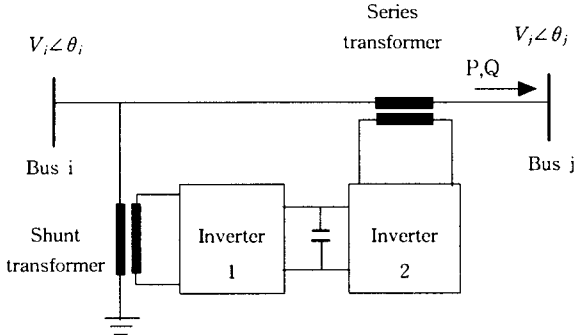


그림 1 UPFC 기본 구성
Fig. 1 Basic Configuration of UPFC

2.2 UPFC 모델링

본 논문에서는 UPFC의 모델링을 병렬부분과 직렬부분으로 나누어 병렬부분 중 모션전압제어 부분은 STATCOM으로 모델링하고 인버터 1의 그 외 기능 부분과 직렬부분은 부하로 등가 처리하는 주입모델(injection model)을 이용하였다. UPFC의 직렬부분은 그림 2와 같이 리액턴스 X_s 를 가지는 이상적인 직렬 전압원으로 이 직렬 전압원이 선로에 삽입된 형태의 등가회로에서의 벡터도는 그림 3과 같다.

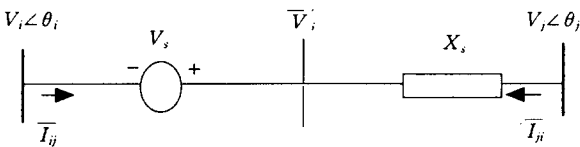


그림 2 직렬 전압원의 표현
Fig. 2 Representation of a series voltage source

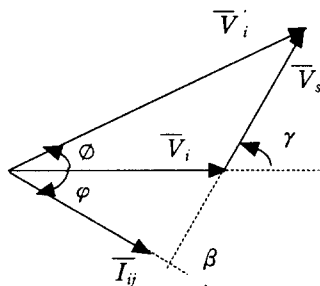


그림 3 직렬 전압원 등가회로의 벡터도
Fig. 3 Vector diagram of the equivalent circuit of a series voltage source

그림 2와 3에서 \overline{V}_s 는 삽입 전압원을 나타내며, \overline{V}_i' 는 직렬 리액턴스 배후 가상 전압을 나타낸다. 또한 각 γ

는 주입전압의 위상각으로 0 에서 2π 까지 제어 가능하다. r 을 $|\overline{V}_s|/|\overline{V}_i|$ 로 정의하고 $b_s=1/X_s$ 로 정의하고, 그림 2의 UPFC의 직렬부분의 등가회로를 부하로 등가 처리하는 주입모델(injection model)로 나타내면 그림 4와 같다[2].

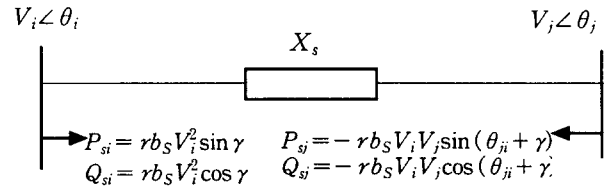


그림 4 주입모델로 표현한 직렬 전압원
Fig. 4 Injection model for a series voltage source

UPFC에서 인버터 1, 2 내에서 수수되는 유효전력은 손실이 없다는 가정과 인버터 1측의 무효전력은 독립적으로 제어된다고 가정 하에서 모션전압을 제어하는 부분을 제외한 UPFC 부분은 그림 5와 같은 주입모델로 표현된다[2].

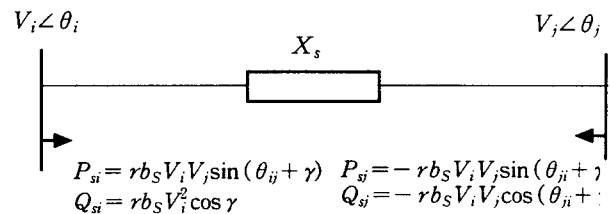


그림 5 주입모델로 표현한 UPFC
Fig. 5 Injection model for UPFC

UPFC의 병렬부분 중 모션전압을 제어하는 부분은 PSS/E에서 제공하는 STATCOM 모형인 그림 6의 CSTATC[3]을 이용하였다.

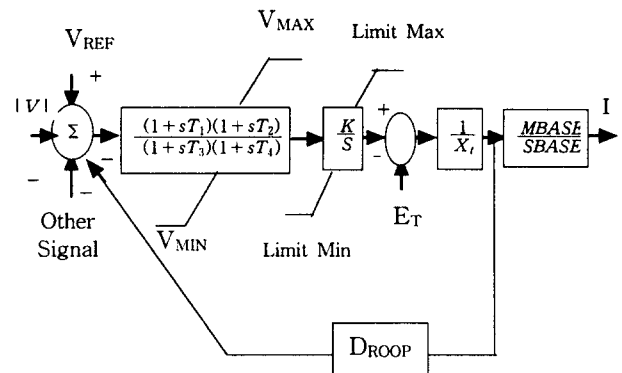


그림 6 STATCOM 모형
Fig. 6 STATCOM model

2.2 제어전략

UPFC의 병렬부분인 STATCOM은 직렬부분과 무관하게 개별적으로 모션의 전압을 일정하게 유지시킬 수 있도록 제어 파라미터를 결정하였는데, 여기서는 제동력 보강에 이용

되는 보조신호를 사용하지 않고 STATCOM을 전압유지 목적으로 활용하였고 제동력은 UPFC의 직렬부분을 이용하여 제공하는 것으로 하였다.

UPFC의 직렬부분에 대해서는 에너지 함수법에 근거하여 계통의 에너지수준을 감소시키는 방향으로 제어하는 제어전략을 적용하였다[5].

에너지 함수는 식 (1)과 같이 표현되는데, 식 (1)에서 E_{KE} 는 계통 운동에너지, E_{PE} 는 위치에너지, E_C 는 평형점에서의 상수를 나타낸다.

$$V = E_{KE} + E_{PE} + E_C \quad (1)$$

계통 외란에 대해 시스템을 안정화시키기 위해서는 UPFC는 에너지가 trajectory 상의 시간 미분이 항상 영 이하 즉, $\dot{V} \leq 0$ 가 되게 제어되어야 한다. 에너지의 시간 미분에 대해서 근사적인 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{V} = -rb_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) \frac{d}{dt}(\theta_{ij}) \leq 0 \quad (2)$$

식 (3)의 에너지 함수에 근거한 제어법칙을 나타낸 것으로 UPFC가 설치되어 있는 모선의 전압 주파수를 입력으로 하여 식 (2)가 항상 만족되도록 삼입 전압의 크기와 위상각을 제어함을 보인다. 전압의 크기는 이미 설정된 최대값을 투입하는 일종의 뱅뱅제어 형태를 보인다. 식 (3)에서 r_{max} 는 설정치이다.

$$\begin{cases} \text{if } \frac{d}{dt}(\theta_{ij}) < 0 \text{ then: } r = r_{max} \text{ and } \gamma = -\frac{\pi}{2} - \theta_{ij} \\ \text{if } \frac{d}{dt}(\theta_{ij}) \geq 0 \text{ then: } r = r_{max} \text{ and } \gamma = +\frac{\pi}{2} - \theta_{ij} \end{cases}$$

2.3 IPLAN을 이용한 구현

IPLAN이 PSS/E와 연결하여 시뮬레이션이 수행되는 관계는 그림 7과 같이 표현된다. IPLAN은 PSS/E 환경에서 매크로 기능인 명령어 EXEC가 실행되면, IPLAN 환경으로 전이하여 IPLAN으로 프로그래밍된 절차에 의해서 연산을 수행한 후 PUSH 등을 통해 PSS/E의 명령어를 적절히 조작하여 그 결과를 PSS/E의 연산 과정에 반영시키고, 제어종료 후 PSS/E 환경으로 복귀하는 일련의 과정으로 적용된다.

본 논문에서는 그림 7의 일련의 과정을 통해 STATCOM의 기능을 제외한 UPFC 부분이 IPLAN으로 구현되었다. PSS/E의 시뮬레이션 과정의 매 스텝마다 IPLAN과 상호 결합되어 UPFC의 STATCOM의 기능을 제외한 나머지 부분의 효과를 적절히 반영시킨다.

IPLAN으로 구현한 UPFC의 직렬부분을 동작시키기 위해서 다음과 같이 3가지 파일로 구성하였다.

- upfcser.irf
- initial.idv
- input.dat

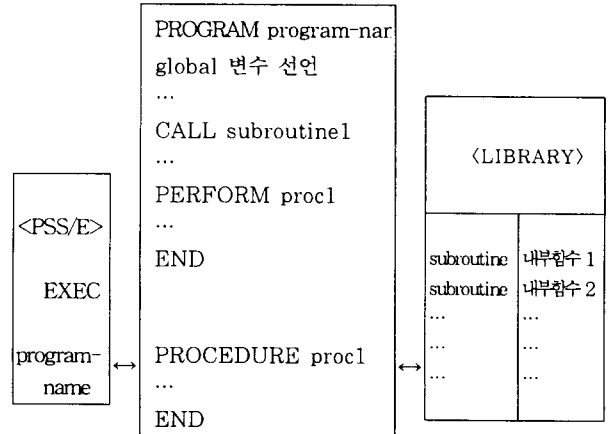


그림 7 PSS/E와 IPLAN의 수행
Fig. 7 Interaction of PSS/E and IPLAN

upfcser.irf 파일은 UPFC의 직렬 부분을 IPLAN을 이용하여 만든 소스파일(upfcser.ipl)을 컴파일한 파일로 소스파일을 수정하지 않는 한 초기에 한 번 컴파일하여 사용한다. 프로그램이 실행되는 동안 계통의 데이터와 UPFC 직렬 부분의 파라미터는 외부파일(initial.idv, input.data)로부터 취득하므로 계통의 데이터 또는 IPLAN으로 구현된 UPFC 부분의 파라미터의 변경은 initial.idv 또는 input.data에서 수정된다.

initial.idv 파일은 계통 데이터에 대한 정보가 포함되어 있으며, 고장전(0-초)까지 계통을 초기화하는 역할을 하는 것으로 부록 1과 같은 구조를 가진다. 부록 1에서 file1.snp 은 snap 파일이며, file2.sav는 변환한 초기 조건의 조류계산 파일이며, file3.out는 channel로 지정된 값들의 출력 파일로 PSS/E의 dynamic 시뮬레이션에서 적용하는 방법과 같다.

input.dat 파일은 upfcser.irf의 파라미터를 기록한 것으로 부록 2와 같이 파일로 구성된다. 부록 2의 input 파일의 각 변수들의 내용은 부록 3에 나타내었다. 부록 3에서 괄호 안은 단위 또는 변수형을 나타낸 것이다.

3. UPFC 제어 효과

3.1 1기 무한대 모선 계통

그림 8의 1기 무한대 모선 계통에 대해서 3상 고장에 대한 UPFC의 제어 효과를 검토하였다. 표 1은 1기 무한대 모선 계통의 선로 데이터를 나타낸 것이다. UPFC의 설치지점은 모선 2와 선로 2-3 사이로 하였다. 즉, 모선 2의 경우는 STATCOM을 설치하여 전압을 일정하게 유지하도록 제어하였고, 선로 2-3에 UPFC의 직렬부분을 삽입하여 조류제어를 수행하게 하였다. 안정도 해석을 위한 1번 모선의 발전기는 고전 모형(classical model)을 이용하였고 5번 모선의 발전기는 관성정수를 크게하여 5번 모선이 무한대 모선의 효과를 가지게 하였다. 상정사고는 모선 3에 3상 고장을 발생시켜 고장을 6 cycle(0.1초) 지속시킨 후 고장 제거와 동시에 345 kV 선로 3-4의 1회선을 차단하는 시나리오로 하였고, 이 상정사고에 대해서 UPFC의 제어 효과를 검토하였다. 이 때 1번 모선과 4번 모선의 부하는 유효전력의 경우

일정 전류 부하로 하였고, 무효전력의 경우는 일정 임피던스 부하로 처리하였다.

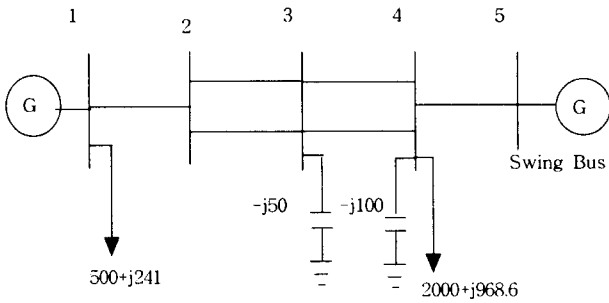


그림 8 1기 무한대 모선 계통
Fig. 8 One machine infinite bus system

표 1 1기 무한대 모선 계통의 선로 데이터

Table 1 Line data of one machine infinite bus system

선로	$R+jX_L$	B
1-2	$j0.0045$	-
4-5	$j0.00005$	-
2-3(per 1circuit)	$j0.002+j0.035$	$j1.0$
3-4(per 1circuit)	$j0.002+j0.035$	$j1.0$

적용 UPFC 모델 중 STATCOM 모형인 CSTATC는 제 동력 보상 부분은 고려하지 않고 단지 모선 전압 제어 목적으로 활용하였으므로 보조 신호는 제공하지 않았다. 그림 6의 진상/지상 제어블록 및 그 외의 파라미터는 해당 상정사고 적용시 그림 9와 같이 모선 2의 전압이 일정하게 유지되도록 설정하였으며, 전압제어 효과는 그림 9와 같이 비교적 우수함을 보인다.

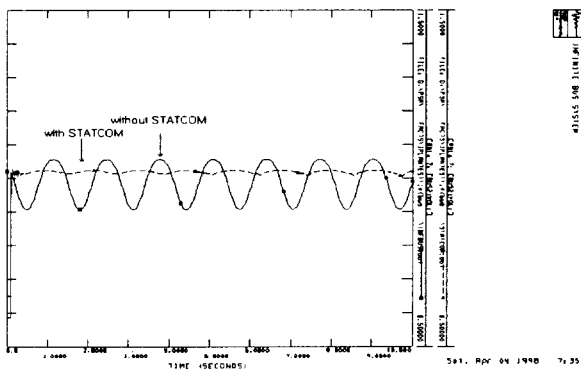


그림 9 STATCOM에 의한 모선전압 제어
Fig. 9 Bus voltage control by STATCOM

그림 10은 해당 상정사고 적용시의 1번 모선의 발전기 회전자각을 나타낸 것이다. 적용 상정사고에 대해 동요가 지속되는 모드가 나타나지 UPFC 적용시는 모선의 전압과 선로의 조류 제어에 의해서 동요 지속 모드가 신속히 제어됨을 보인다.

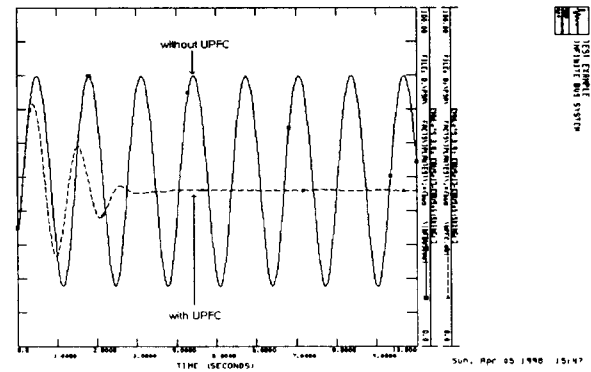


그림 10 UPFC의 제어 효과
Fig. 10 Control effect of UPFC

3.2 Two area system

2 지역 계통에 발생하는 interarea 모드에 대한 UPFC의 제어 효과를 검토하기 위해서 그림 11의 2 지역 계통을 테스트 계통에 대해서 검토하였다. 그림 11의 선로 데이터는 표 2와 같다.

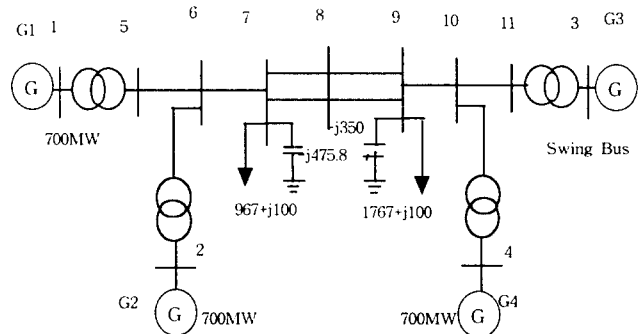


그림 11 2지역 계통
Fig. 11 Two area system

표 2 2지역 계통의 선로 데이터

Table 2 Line data of the two area system

선로	$R+jX_L$	B
1-5	$j0.0167$	-
2-6	$j0.0167$	-
3-11	$j0.0167$	-
4-10	$j0.0167$	-
5-6	$0.0025+j0.25$	$j0.0438$
6-7	$0.001+j0.01$	$j0.0175$
7-8(per 1circuit)	$0.011+j0.11$	$j0.125$
8-9(per 1circuit)	$0.011+j0.11$	$j0.125$
9-10	$0.001+j0.01$	$j0.0175$
10-11	$0.0025+j0.25$	$j0.0438$

UPFC의 설치위치는 모선 7과 선로 7-8 사이에 2회선 각각에 설치하였다. 동적 모의에서 발전기들은 PSS/E에서 제공하는 GENROU[3]을 이용하였고 여자시스템은 EXAC1[3]을 이용하였다. 상정사고는 9번 모선에 3상 고장을 발생시

켜 0.04초 지속시킨 후 고장 제거와 동시에 선로 8-9 1회선을 차단하는 것으로 하였다. 안정도 해석을 위한 부하모형으로는 유효전력은 정전류 부하로 하였고 무효전력은 정임피던스 부하로 모의하였다.

이 상정사고에 대해서 CSTATC의 제어 파라미터는 그림 12와 같이 모선 7의 전압이 일정하게 유지하도록 설정하였다

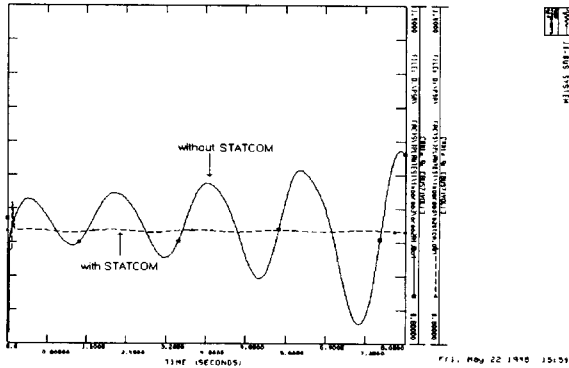


그림 12 STATCOM에 의한 모선전압 제어
Fig. 12 Bus voltage control by STATCOM

그림 13은 상정사고에 대해서 1번 모선의 발전기 회전자 위상각을 나타낸 것이다. 상정사고에 대해서 그림 13과 같이 0.5Hz 근방의 interarea 모드가 발생하며, 동요가 점차 증가하는 추이를 보이고 있다. 이 경우 UPFC의 제어에 의해서 interarea 모드가 효과적으로 제어됨을 보인다.

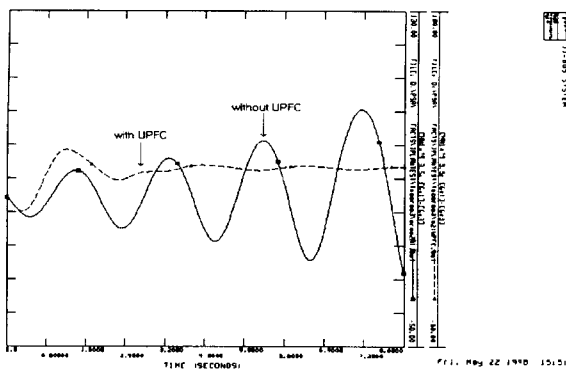


그림 13 UPFC 제어 효과
Fig. 13 Control effect of UPFC

4. 결 론

본 논문에서는 UPFC 병렬부분은 STATCOM 모델을 이용하고 그 외 직렬부분은 IPLAN으로 구현한 PSS/E용 UPFC 모델을 제시하였다. 특히, IPLAN으로 구현된 UPFC의 부분은 에너지 함수에 근거한 제어전략을 채택함으로써 부하조건, 고장위치, 계통 구성 등 시스템 조건에 따라 제어 파라미터 설정이 필요치 않으므로 UPFC의 계통 적용 효과 검토시 편의성을 제공한다.

개발된 UPFC의 모델을 이용하여 1기 무한대 모선 계통

과 2 지역 계통에서 동요에 대한 UPFC의 제어 효과 검토 결과에서 확인할 수 있듯이 UPFC의 동요억제 제어 효과는 우수하며 기존의 FACTS 기기를 특징을 통합한 제어기로서 실제계의 적용 측면에서도 많은 잠재력을 가진다. 그러므로 실제계에서 UPFC의 효과 검토 시 PSS/E를 이용할 경우, 본 논문에서 제시한 UPFC 모델은 많은 활용이 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Laszlo Gyugyi, Colin D. Schauder and Kalyan K. Sen, "Static Synchronous Series Compensator : A Solid-State Approach to the Series Compensation of Transmission Lines", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 12, No. 1, pp. 406-417, Jan. 1997.
- [2] M. Noroozian, L. Angquist, M. Ghandhari and G. Andersson, "Use of UPFC Optimal Power Flow Control", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, pp. 1629-1634, Oct. 1997.
- [3] Power Technologies Inc., PSS/E-24 Power System Simulator Program Operation Manual & Application Guide, Dec. 1995.
- [4] Power Technologies Inc., PSS/E-24 IPLAN Version 11.0, Dec. 1995.
- [5] M. Noroozian, L. Angquist, M. Ghandhari and G. Andersson, "Improving Power System Dynamics by Series-Connected FACTS Devices", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, pp. 1635-1641, Oct. 1997.
- [6] M. Noroozian, "A Robust Control Strategy for Shunt And Series Reactive Compensators to Damp Electromechanical Oscillations", PE-244-PWRD-0-12-1997, 1997.
- [7] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill Inc., 1994.

부 록 1

```

MENU,OFF
rstr file1.snp
lofl
case file2.sav
fact
rtrn
str.
file3

run
0 2 2
TEXT EOF
@end
    
```

부 록 2

IBUS
JBUS
FROMBUS
TOBUS
CKTID
FAULTBUS
RMAX
XS
TSTOP
TCLEAR
CSTP
IBFCHN
JBFCHN
CPP
CIP
CZP
CPQ
CIQ
CZQ

부 록 3

변수명	의 미
IBUS	UPFC의 병렬보상이 이루어지는 모선(정수)
JBUS	UPFC의 병렬보상이 이루어지지 않는 상대단 가상 모선(정수)
FROMBUS	고장 제거후 개방 선로의 한 쪽 모선(정수)
TOBUS	고장 제거후 개방 선로의 상대단 모선(정수)
CKTID	고장 제거후 개방 선로의 회선 번호(정수)
FAULTBUS	3상 평형 고장을 발생시키는 모선(정수)
RMAX	IBUS의 전압 크기에 대한 직렬 삼입 전압의 크기 비의 최대값(실수)
XS	삼입 직렬 변압기의 등가 리액턴스 값 (P.U., 실수)
TSTOP	모의시간(초, 실수)
TCLEAR	고장제거시간(초, 실수)
CSTP	UPFC 제어 시간간격(정수)
IBFCHN	UPFC 제어 입력정보로서 IBUS의 모선 주파수를 의미, 채널 파일에서의 채널값(정수)
JBFCHN	UPFC 제어 입력정보로서 JBUS의 모선 주파수를 의미, 채널 파일에서의 채널 값(정수)
CPP	제어량의 등가 부하 처리시 적용 정전력 유효전력 비(실수)
CIP	제어량의 등가 부하 처리시 적용 정전류 유효전력 비(실수)
CZP	제어량의 등가 부하 처리시 적용 정임피던스 유효전력 비(실수)
CPQ	제어량의 등가 부하 처리시 적용 정전력 무효전력 비(실수)
CIQ	제어량의 등가 부하 처리시 적용 정전류 무효전력 비(실수)
CZQ	제어량의 등가 부하 처리시 적용 정임피던스 유효전력 비(실수)

저 자 소 개



김 학 만(金學萬)
 1966년 2월 11일 생. 1991년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구소 선임연구원(FACTS 연구팀 근무)



오 태 규(吳泰圭)
 1951년 4월 30일 생. 1978년 서울대 공대 공업교육과 졸업. 1984년 Iowa State Univ. 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991~1992년 미국 Pennsylvania State Univ. 전기공학과 Visiting Scholar. 현재 한국전기연구소 책임연구원(FACTS 연구팀장)



장 병 훈(張秉勳)
 1964년 3월 31일 생. 1989년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 (석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원



추 진 부(秋鎭夫)
 1950년 1월 7일 생. 1977년 서울대 공대 전기공학과. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 수석연구원