

PSS/E를 이용한 UPFC모델링

유일도<sup>1</sup>, 김준모<sup>1</sup>, 한영성<sup>1</sup>, 장병훈<sup>2</sup>  
 (주)효성중공업 연구소<sup>1</sup>, 한국전력공사 전력 연구원<sup>2</sup>

UPFC modeling using the PSS/E

Yoo il-do<sup>1</sup>, Kim jun-mo<sup>1</sup>, Han young-seong<sup>1</sup>, Chang byung-hoon<sup>2</sup>  
 Hyosung Corp.R&D Institute<sup>1</sup>, KEPRI<sup>2</sup>

**Abstract** - PSS/E offers a power flow model of UPFC in the new version. The Dynamic model was developed in a form of user-define model that is a external function. Now is a stage of verification through variety examples.

Importance of this model is in the point which it is necessary for the simulation on the stability. This paper presents the Dynamic model that is defined by user. First, the theory will be discussed, and then for verification on right operation, resultes of application to KEPRI network will be showed.

1. 서 론

PSS/E는 PTI(Power Technologies Inc.)사에서 개발한 전력계통 해석을 위한 프로그램으로서 정상상태에서의 부하조류계산은 물론 상정사고시 고장해석과 동적시스템의 해석까지 그 활용분야가 다양하다. 이 가운데 FACTS기기를 포함한 대규모 계통의 동적응답을 시뮬레이션 해볼 수 있도록 FACTS기기 모델을 제공하고 있는데 현재 STATCOM(STATIC Compensator)과 TCSC(Thyristor Controlled Series Compensator)의 모델을 제공하고 있다.

비교적 최근에 개발되어 2번째 상용운전을 준비중인 UPFC(Unified Power Flow Controller)의 경우 조류계산을 수행할 수 있는 모델을 새로운 버전에서 제공하고 있다. 동특성 시뮬레이션을 위한 Dynamic모델의 경우 user에 의해 개발된 외부함수로서 시뮬레이션 하도록 되어 있는 단계이고 다양한 시뮬레이션을 통해 동작여부를 검증하는 단계에 있다. 이 모델의 중요성은 UPFC에 의한 계통 안정도 향상을 시뮬레이션하기 위해 이 모델이 필수적이라는 데에 있다.

본 논문에서는 user정의 모델로 개발된 UPFC의 Dynamic모델에 관해 논의 하고자 한다. 먼저 모델의 이론적 배경을 설명하고 다음으로 동작여부를 검증하기 위해 이 모델을 우리나라계통에 적용한 결과를 제시할 것이다.

2. 본 론

2.1 UPFC 동적모델

계통의 동적응답에 관한 시뮬레이션의 목적은 시스템의 상정 사고시에 발전기 및 FACTS 기기, 기타 계통이 포함하고 있는 다른 동적 요소들간의 상호작용을 연구하기 위해서이다. 이를 위해서는 대략 몇 초 정도의 관심 있는 시간동안 각 기기의 응답을 적절히 표현해주는 모델이 필요하다. 대부분의 동적 해석 프로그램에는 발전기와 DC 터미널, 동기조상기, STATCOM의 동적 동작을 표현하는 동적 모델을 포함하고 있다. 하지만 UPFC와 같은 직렬주입 전압원을 표현할 수 있는 모델은 없기

때문에 User-defined 모델을 만들어야 한다. 이를 위해 모델은 병렬로 연결된 발전기처럼 계통에 연결되고, 계통에 전류를 주입하는 형태가 되어야 한다. 또한 동적 특성은 미분방정식의 형태로 표현되고, 수치적분을 이용하여 상태방정식을 풀어야 한다. 계산된 상태변수의 값을 이용하여 주입되는 전류의 값을 결정할 수 있다.

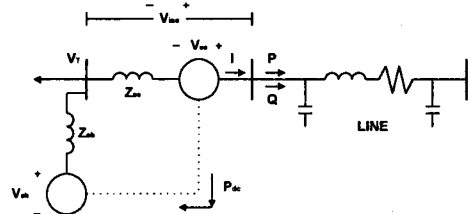


그림 1. 2개의 전압원으로 표현된 UPFC 모델

UPFC는 일반적으로 그림 1과 같이 각각 병렬인버터와 직렬인버터를 나타내는 두 개의 전압원으로 표현된다. 이 모델을 이용하여 시스템의 동적 해석을 수행하기 위해서는 매 Time-step마다 주입되는 전압을 계산해야 한다. 하지만 직렬로 연결된 전압원에 대한 네트워크 방정식의 형태가 존재하지 않으므로 이러한 문제를 해결하기 위하여 그림 2과 같이 직렬로 연결된 직렬전압원과 직렬변압기의 임피던스를 직렬전류원과 병렬로 연결된 임피던스의 형태로 등가변환한다.

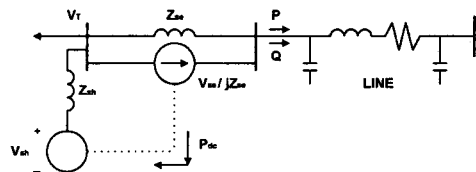


그림 2. 직렬전압원과 등가인 직렬전류원

그림 2에 나타난 직렬 전류원은 여전히 시스템에 직렬로 연결되어 있으므로 여전히 네트워크 방정식으로 나타낼 수 없다. 그러므로 이 직렬전류원을 두 개의 병렬전류원으로 등가변환을 해주어야 한다. 그림 3에서 보는 바와 같이 두 개의 전류원은 같은 전류를 UPFC의 양 단 버스에 주입하고, 병렬로 연결된 인버터 전압원도 전류원으로 변환하였다. 병렬인버터를 변환한 전류원과 직렬인버터를 변환한 두 개의 동일한 전류원간에는 같은 유효전력 전송  $P_{ser}$ 이 유지되어야 한다.

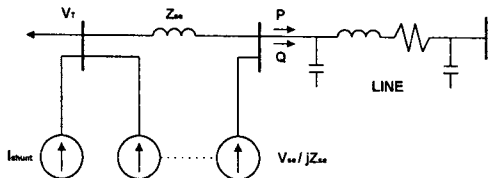


그림 3 세계의 병렬 전류원으로 표현된 동적모델

UPFC의 동적 해석모델은 병렬전류의 무효부분의 전달함수와 직렬부분의 주입전압의 전달함수를 분리하였다.

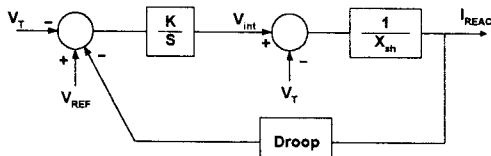


그림 4 병렬 동적모델

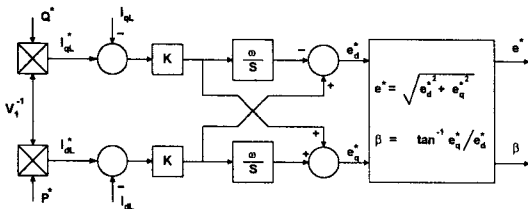


그림 5 직렬 동적모델

각각의 전달함수에 대한 Block diagram이 그림 4과 그림 5에 나타나 있다. 병렬 무효전류의 모델은 일반적으로 사용되고 있는 프로그램의 함수와 동일하다. 이 모델에서 적분기는 전압조정을 위해 사용되었으며, 모델 내에서 전압을 주입전류로 변환하기 때문에 별도로 전류원으로 변환하는 작업은 무시될 수 있다.

직렬부의 동적 모델 해석을 위해서는 두 가지의 단계를 거쳐야 한다. 그림 5의 직렬인버터 모델에서 구해진 전압의 크기와 위상각은 그림 1의 직렬 주입전압을 의미한다. 그러므로 네트워크 방정식에 적용할 수 있도록 그림 3과 같이 전류원 모델로 변환시켜 주어야 한다.

## 2.2 모델을 이용한 시뮬레이션

현재 한국전력공사 전력연구원과 (주)효성이 공동으로 전남강진 소재에 Pilot Plant 80MVA UPFC설치를 진행중이다

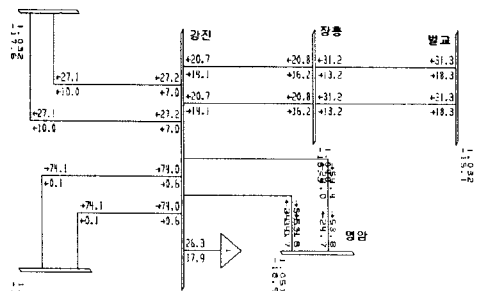


그림 6 강진주변의 계통

향후 개발된 Dynamic모델을 이용하여 80MVA UPFC의 설치효과가 좀더 상세하게 이루어질 계획이

만 본 논문에서는 모델의 입력에 대한 올바른 추종여부와 기기제한치의 올바른 반영여부를 확인하는 시뮬레이션만을 수행할 것이다.

UPFC는 강진-장흥간의 강진변전소에 설치될 계획이다. 현재 강진과 장흥간은 2회선이 연결되어 있고 향후 UPFC 설치시 2회선이 하나의 버스로 합해져 UPFC를 거치고 다시 2회선으로 분리되도록 계획되어 있다. 모델을 강진계통에 적용하여 시뮬레이션하기 위해 2001년 peak계통을 사용하였다. 그림 6은 강진주변을 나타낸 계통도이다.

표 1 시뮬레이션의 내용

구분	내용
시뮬레이션 1	강진-장흥간 유, 무효전력의 조류를 바꿈 유효전력 : 28MVAR → 15MVAR 무효전력 : -40MW → 50MW
시뮬레이션 2	UPFC 주입전압의 크기를 바꿈 전압의 크기 : 0.006 → 0.006(pu) 위상 : -112 → -136(degree)

표 2 적용될 UPFC의 정격

구분	내용
용량	직, 병렬 각각 40MVA
최대 주입 전압	6060 V (상전압)
직렬측 최대전류	2200 A
터미널 버스의 허용전압	0.9 ~ 1.1(pu)

표 1은 시뮬레이션의 내용을 간단히 표로 정리한 것이다. 시뮬레이션 1은 UPFC를 이용하여 조류를 바꾸는 시뮬레이션이고 시뮬레이션 2는 일정전압의 직렬전압을 주입하는 시뮬레이션이다. 표 2는 시뮬레이션에 사용될 UPFC의 정격이다. 터미널 버스의 전압제약을 제외한 나머지의 조건은 기기 정격에 관한 정격이어서 변동이 있을 수 없지만 터미널 버스의 전압은 계통운영에 따라 다른 값을 가질 수 있다.

## 시뮬레이션 1의 결과

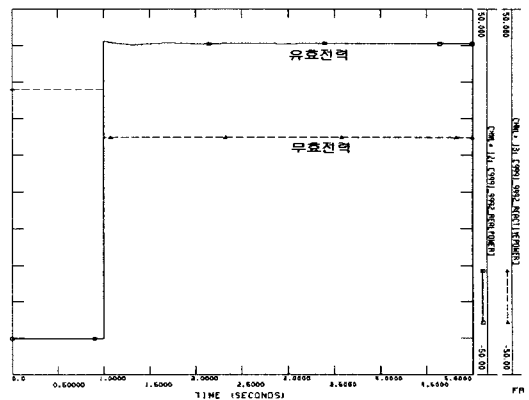


그림 7 유, 무효전력의 변화

그림 7은 시뮬레이션 1의 결과로 강진-장흥간 조류변화를 출력한 결과이다. 전력은 약간의 과도상태를 통해 정상상태에 도달하였다. 설치될 실제의 UPFC는 하드웨어 제약상의 문제로 주입전압을 step으로 변화시키지 않도록 되어 있지만 본 모델은 기기자체의 동적응답은 무시하므로 전력이 거의 step으로 변화하였다.

BUS	9991 TERMINAL	AREA	CKT	MW	MVAR	MVA	%I	1.0471PU	-11.86	9991
		6						KV		
TO	7420 SENDING	154	6 # 1	40.1	-28.0	48.9	8	0.0990	77.13	UPFC
TO	7420 SENDING	154	6 # 1	34.5	0.6	34.6				
TO	9992 RECEIVING	6	1	-40.6	14.8	43.2				
	M I S M A T C H			-115.2	12.6	115.9				

병렬기기의 주입량

BUS	7420 SENDING	154	AREA	CKT	MW	MVAR	MVA	%I	1.0500PU	-17.27	7420
			6								
									161.70KV		
TO	UPFC SHUNT	FACTS DEV # 1		0.2	-23.0	23.0	56				
TO	9991 TERMINAL	6 # 1		-40.3	27.8	48.9	8	0.0990	77.13	UPFC	
TO	9991 TERMINAL	6	1	-34.5	2.7	34.7					
TO	9993 KANGJIN	6	1	-40.9	9.7	42.1					
	M I S M A T C H			115.6	-17.1	116.8					

주입전압, 각

\*\*\* WARNING: INSERTED VOLTAGE OF THE FACTS DEVICE # 1 HAS \*\*\*  
 \*\*\* REACHED TO ITS LIMIT = 0.0725 AT TIME = 1.000 SEC \*\*\*

그림 8 출력된 조류계산 결과와 제한치에 대한 정보

그림 8은 정상상태의 결과를 출력한 것이다. 여기서 주목할 것은 강진-장흥간의 조류(9991버스와 9992버스 사이의 조류)가 각각 40.6MW와 14.8 MVAR로 변화한 것을 볼 수 있는데 원래의 설정치는 각각 50MW와 15MVAR이었다. 이처럼 설정치를 완전히 추종하지 못한 이유는 그림 8의 하단에 출력된 텍스트에서 볼 수 있듯이 적렬 주입전압이 제한치에 도달하여 조류의 설정치를 만족할 수 없음을 나타내고 있다. 상단에 출력된 텍스트는 주입전압의 크기와 위상, 병렬측에서 주입되는 전력의 양을 보여주고 있다.

시뮬레이션 2의 결과

최초의 상용 UPFC는 현재 AEP(American Electric Power)에 설치되어 운전중이다. 그 이유는 정확히 알려져 있지 않지만 운전전략으로 전압주입모드가 사용되고 있는 것으로 알려져 있다.

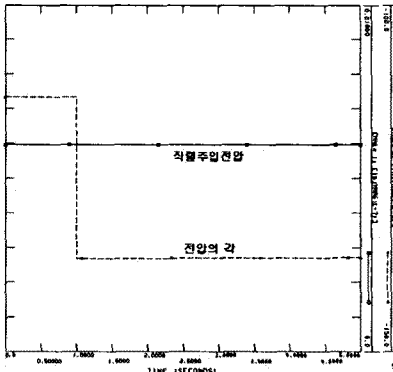


그림 9 주입된 전압과 위상

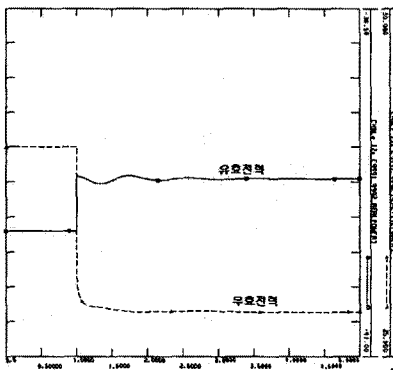


그림 10 유효전력과 무효전력의 변화

이는 제어기의 구조상 전압주입모드에서 운전자가 조류 제어를 할 수 있도록 되어 있고 상위제어기에서 명령을 받아서 전압을 주입할 수 있도록 구성되어 있기 때문이다. 이러한 측면에서 전압주입 모드에 관한 시뮬레이션은 의미가 있다. 그림 9는 주입된 전압을 출력한 결과이다. 전압의 크기는 변화시키지 않고 위상만을 변화시켰다. 그림 10은 전압주입에 따른 조류의 변화를 출력한 결과이다.

BUS	9991 TERMINAL	AREA	CKT	MW	MVAR	MVA	%I	1.0470PU	-16.74	9991
		6						KV		
TO	7420 SENDING	154	6 # 1	40.1	-28.0	48.9	8	0.0990	-136.46	UPFC
TO	7420 SENDING	154	6 # 1	-1.8	-1.0	2.1				
TO	9992 RECEIVING	6	1	-39.7	25.6	47.3				
	M I S M A T C H			1.4	3.4	3.7				

병렬기기의 주입량

BUS	7420 SENDING	154	AREA	CKT	MW	MVAR	MVA	%I	1.0500PU	-16.45	7420
			6								
									161.70KV		
TO	UPFC SHUNT	FACTS DEV # 1		0.2	-23.0	23.0	56				
TO	9991 TERMINAL	6 # 1		-40.3	27.8	48.9	8	0.0990	-136.46	UPFC	
TO	9991 TERMINAL	6	1	-34.5	1.8	1.0	2.1				
TO	9993 KANGJIN	6	1	-40.9	-4.4	40.0					
	M I S M A T C H			-1.4	-1.4	2.0					

주입전압, 각

그림 11 출력된 조류계산 결과

그림 11은 조류계산 결과를 텍스트로 출력한 것인데 이를 이용해 결과에 관한 검증이 가능하다. 강진-장흥간 삽입된 UPFC에서 유입되는 전력의 합을 구함으로써 검증할 수 있다.

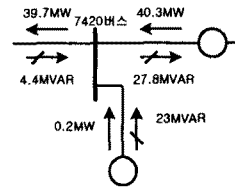


그림 12 조류계산 결과의 검증

$$\sum P = 39.7 - 40.3 + 0.2 = 0.3(MW) \quad \text{--- 식 1}$$

$$\sum Q = -4.4 + 27.8 - 23.0 = 0 (MVAR)$$

식 1에서 보듯이 무효전력의 합은 0으로 에러가 발생하지 않았지만 유효전력의 경우 약 0.3MW의 에러가 발생하였다. 그러나 이러한 에러는 수용할 수 있는 정도이다.

3. 결론

PSS/E는 전력계통 해석을 위한 프로그램으로서 넓은 활용분야를 가지고 있는 프로그램이다. 현재 UPFC모델의 경우 조류계산 모델만을 제공하고 있고 동적응답 해석을 위한 Dynamic모델의 경우 user정의 모델로서 개발된 단계이고 그 성능에 관한 검증이 진행중이다. 본 논문에서는 user정의 UPFC Dynamic모델에 관해 논의 하였다. 먼저 이 모델의 이론적 배경을 언급하였고 성능검증을 위해 우리나라계통에 적용한 결과를 예로 제시하였다. 이를 통해 모델의 올바른 동작여부를 확인하였다. 향후 이 모델을 이용하여 80MVA Ploit Plant UPFC에 관한 효과분석이 진행될 예정이다.

(참고 문헌)

[1] Gyugyi, L., "A Unified Power Flow Control Concept for Flexible AC Transmission System", IEEE, Proceeding C, Vol. 139, No. 4, July, 1992  
 [2] Rahman, et. al., "UPFC Application on the AEP System : Planning Considerations", IEEE Winter Power Meeting, 1997, PE-582-PWRS-0-01-199