

UPFC의 전력계통 동요 억제 효과

손 광명\* 오 태규\*\* 김 학만\*\* 전 진홍\*\*

\* : 동의대학교 전기공학과 \*\* : 한국전기연구소 유연송전 연구팀

Effect of UPFC for Damping Power System Oscillations

Kwang M. Son\* Taekyoo Oh\*\* Hakman Kim\*\* Jinhong Jeon\*\*

\*: Dept. Electrical Eng., Donggeui Univ.

\*\* : FACTS Research Team, KERI.

**Abstract** - This paper focuses on the simulation and control of the Unified Power Flow Controller (UPFC). This paper gives a brief outline of the initial results of the effect of the UPFC on the damping of the power system oscillations. The nonlinear simulation results show the effectiveness of each UPFC control variable and gives the future research direction.

1. 서 론

최근 전압원 인버터를 채용한 FACTS 기기 중 Unified Power Flow Controller (UPFC)는 선로의 유효 전력과 무효 전력을 독립적으로 제어할 수 있는 능력으로 인해 전력계통에의 적용시 그 효과가 기대되고 있다 [1,2]. 현재 UPFC는 그 개념과 골격 및 효과가 소개된 이래, 기기의 현장 적용 시험이 진행되고 있으며 [3], 기존의 상용 프로그램에서의 전력 계통 계획용 모델이 개발되어 이용되고 있으나 아직 초보적인 단계에 있다 [4]. 또한, [5]에서는 전력계통 해석을 위한 조류계산 모형을 제안한 바 있으며, [6]에서는 전력계통 동적 해석을 위한 FACTS 기기의 모델링에 대하여 다룬바 있다. 여기에서는 UPFC를 등가적인 전류원으로 치환한 뒤 이를 이용하여 UPFC의 모선을 부하 모선으로 처리함으로써 기존의 Newton 타입의 알고리즘의 Jacobian을 수정하는 방식을 제안하였다.

본 논문에서는 UPFC를 전력계통에 적용할 경우 전력계통 동요 억제 효과를 분석하는 기초 단계의 연구 결과를 기술하고 있다. UPFC의 조류계산 및 동특성 해석 시간영역 비선형 시뮬레이션 프로그램의 초기 결과가 기술되었다. 이것은 UPFC의 제어효과 및 특성을 시간영역에서 해석하는 기본도구가 된다.

초기결과로부터 본 연구진은 향후 UPFC의 각 기능을 극대화 할 수 있는 제어 방식 및 알고리즘에 대한 연구가 필요하다고 판단하여 이에 대한 연구를 진행할 예정이다. 본 논문에서는 전력계통 해석을 위한 UPFC 모델과 이를 이용한 전력계통 모의 절차에 대하여 기술하였으며, 간단한 모델계통에 대한 사례 연구를 통해 제어 효과를 시험하였다.

2. UPFC 모델

본 논문에서는 [5]에서 제안된 바 있는 등가 부하 모델링 방식을 채택하여 이를 모의하는 프로그램을 개발하였다. 그리고, 이를 모델 계통에 대해 사례연구함으로써 프로그램의 타당성을 입증하였다. UPFC를 모델링함에 있어 선로에 직렬로 인가되는 전압원을 UPFC 모선상

의 부하 전력으로 치환하여 기존의 조류계산 프로그램에 적용한다. 이것은 기존의 자코비안 행렬을 수정하게 됨으로써 기존의 프로그램을 약간의 수정으로 이용할 수 있게 해준다.

직렬 전압원이 모선 i 와 j 사이에 연결되어 있다고 가정하면, 직렬 전압원은 이상전압원  $V_s$  와 직렬연결된 임피던스 요소  $X_s$ 로 모델링될 수 있다. 그림 1에서처럼  $V_s$ 는 이상 전압원  $V_i'$  은 가상의 직렬 리액턴스 배후 전압원으로 생각할 수 있다. 이때  $V_i'$ 은 다음 식을 만족한다.

$$V_i' = V_s + V_i \tag{1}$$

여기서  $V_i$  : 모선 i 의 전압

$V_s$  : 이상전압원

$V_i'$  : 직렬 리액턴스 배후 전압원



그림 1. 직렬 전압원 모델의 등가 회로

직렬 전압원  $V_s$ 는 다음과 같이 크기와 위상을 제어할 수 있는 전압원으로 생각할 수 있다. 여기서  $r$ 은 직렬 전압원의 크기이고  $\gamma$ 은 직렬 전압원의 위상각이다.

$$V_s = r V_i e^{j\gamma} \tag{2}$$

전류주입 모델은 전압원  $V_s$ 를 등가의 전류원  $I_s = -jb_s V_s$ 로 치환하고 이와 병렬로  $b_s = 1/X_s$ 인 선로를 추가함으로써 구해진다. 여기서 전류원  $I_s$ 는 주입 전력  $S_{is}$ 와  $S_{js}$ 를 나타내는데 이용된다.

$$S_{is} = V_i (-I_s)^* \quad S_{js} = V_j (I_s)^* \tag{3}$$

주입전력  $S_{is}$ 와  $S_{js}$ 는 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$S_{is} = V_i [jb_s r V_i e^{j\gamma}]^* = -b_s r V_i^2 \sin \gamma - jb_s r V_i^2 \cos \gamma \tag{4}$$

$$S_{js} = V_j [-jb_s r V_i e^{j\gamma}]^* = b_s r V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) + jb_s r V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \gamma) \tag{5}$$

이상과 같이 직렬로 인가된 전압원은 다음과 같은 2개의 종속적인 부하 모선으로 생각될 수 있다.

즉, 모선 i의 등가 유효부하 전력량은 식(6)과 같고,

$$P_{is} = rb_s V_i^2 \sin \gamma \tag{6}$$

$$Q_{is} = rb_s V_i^2 \cos \gamma$$

모선 j의 등가 유효 전력량은 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} P_{sj} &= -rb_s V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) \\ Q_{sj} &= -rb_s V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma) \end{aligned} \quad (7)$$

그런데, UPFC 모델은 위와 같은 직렬 전압원 모델에 병렬 보상 부분의 유효 전력 공급 부분을 고려하면 구할 수 있다. 즉, UPFC는 다음과 같은 유효 전력 조건을 만족하여야 한다.

$$P_{conv1} = P_{conv2} \quad (8)$$

인버터 1이 흡수하는 유효 전력은 손실을 무시한다면 인버터 2에 의해서 완전히 소모된다. 따라서 직렬 전압원 모델에 유효 전력 부분을 더해주면 그림 2와 같은 UPFC의 등가 모델을 구할 수 있다. 여기에서 각 모선의 등가 부하에 관한 식은 다음과 같다. 모선 i의 등가 유효 부하 전력량은 식(9)로 주어진다.

$$\begin{aligned} P_{si} &= rb_s V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) \\ Q_{si} &= rb_s V_i^2 \cos \gamma \end{aligned} \quad (9)$$

모선 j의 등가 유효 전력량은 식(10)과 같다.

$$\begin{aligned} P_{sj} &= -rb_s V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) \\ Q_{sj} &= -rb_s V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma) \end{aligned} \quad (10)$$

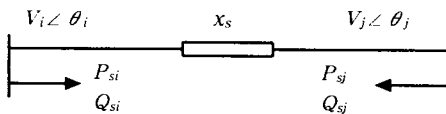


그림 2. UPFC 등가 모델

위와 같은 부하 모형을 기존의 전력계통 모델에 추가하면 자코비안 행렬의 모선 i, j에 해당하는 요소만 변경함으로써 UPFC가 포함된 계통의 조류계산이 가능하다. 추가되는 Jacobian의 각 요소는 [5]에 나와 있다.

### 3. UPFC의 동요역제 효과

UPFC의 전력계통 동특성 개선 효과를 분석하기 위한 기초 단계로서 동적 모형은 필수적이다. UPFC는 GTO 소자를 이용한 전압원 인버터의 구조를 가지고 있기 때문에 그 응답속도는 전력계통의 저주파 진동을 연구하는 경우 무시가능하다. 만약 SSR과 같은 현상을 연구할 경우 보다 자세한 상태공간 모델을 필요로 한다.

본 논문에서는 UPFC의 동특성을 무시하여 순간적 응답 가능한 모델로 작성하였다. 이 경우 전술한 모형을 이용할 수 있다.

본 연구에서 개발한 프로그램은 Modified-Euler 방법을 이용하여 대수 방정식과 미분 방정식을 번갈아 가며 수치적으로 풀이하게되며, UPFC를 대수 방정식의 형태로 모의한다.

UPFC의 저주파 진동 감쇠 효과를 보이기 위한 모델 계통은 그림 3과 같다. 여기에서 모선 3에 3상 3주기 사고가 발생한 경우를 상정하였다. 이때, 발전기 1은 무한대 모선이고, 발전기 2는 고전적 모델이며, 선로의 임피던스는 0.6 pu이다. 초기에 UPFC는 직렬 전압원 0.1 pu와 위상각 0 rad의 상태로 운전되고 있다고 가

정하였다.

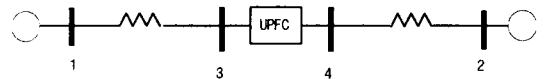


그림 3. 동적 해석을 위한 2기 모델 계통도

전력계통 동적 모델식은 식(11)과 같다. 여기에서  $u_{UPFC}$ 는 UPFC의 투입량으로서 직렬 전압원의 크기와 위상각으로 표현되는 2개의 입력항을 가진다.

$$\begin{aligned} \delta &= w_0(w-1) \\ 2H\dot{w} &= P_m - P_e(u_{UPFC}) \end{aligned} \quad (11)$$

제어기의 구조는 다음과 같다. 단순한 형태의 비례이득 제어기로서 직렬전압원의 크기와 위상각에 각각 양발전기의 각속도 차이를 입력으로 하였다. 비례 이득의 값은 선형화 모델을 이용하여 근계적을 토대로 결정할 수 있으나 아직 선형화 모델을 구하는 프로그램이 완성되지 않아 적당히 시행착오적으로 조정하였다. 본 모의에서는 비례 이득의 값은  $K_1 = K_2 = 100$ 으로 정하였다. 이득의 미세조정을 통하여 제어기의 성능은 개선될 수 있다.

$$u_{UPFC} = \begin{cases} |V_s| = K_1(w_2 - 1) \\ \angle V_s = K_2(w_2 - 1) \end{cases} \quad (12)$$

그림 4에 비제어시와 제어시의 각각의 경우의 발전기 2의 발전기 회전자 각의 응답을 나타내었다. 그림 4에서 보면, 직렬 전압원을 제어하였을 경우가 훨씬 더 효과적임을 알 수 있다. 이는 저주파 진동의 주원인인 유효 전력 동요는 양단전압의 위상각 차에 의해 효과적으로 제어될 수 있다는 사실로부터 명백하다. 직렬 전압원의 위상각과 크기를 동시에 제어하는 경우는 각각을 단독으로 제어할때의 효과보다 우수한 결과를 보였다.

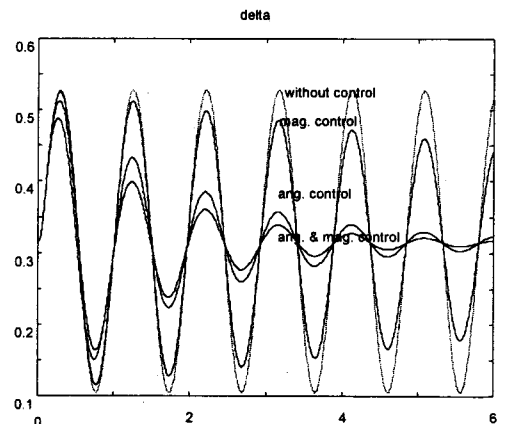


그림 4. 제어시와 비제어시의 발전기 위상각의 과도변화

그림 5에는 발전기 각속도의 과도 응답을 나타내었다. 그림 6에는 유효전력의 동요를 나타내었다. 발전기 각속도와 유효전력의 과도 응답도 위상각과 유사한 경향을 보인다는 것을 확인할 수 있다.

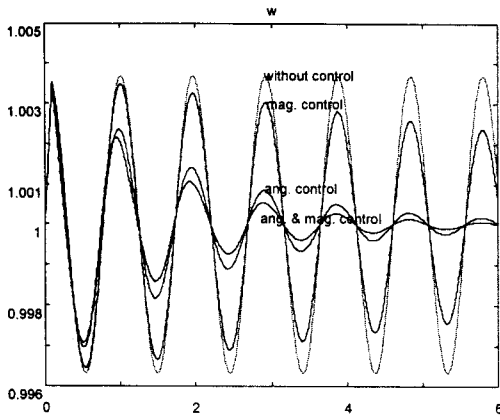


그림 5. 제어시와 비제어시의 발전기 각속도의 과도변화

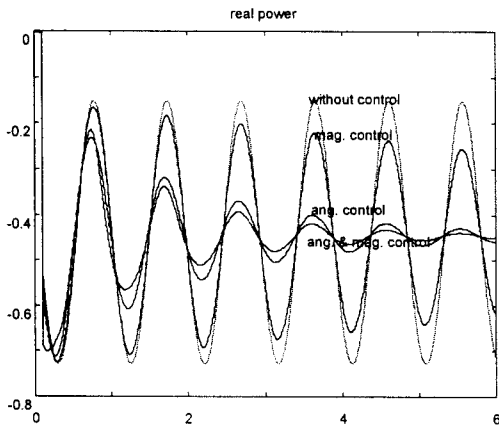


그림 6. 제어시와 비제어시의 유효전력 조류의 과도변화

그림 7의 위그림은 직렬 전압원의 위상각만 단독으로 제어한 경우의 직렬 전압원의 위상각을 나타낸 것이고, 아래그림은 직렬 전압원의 크기만을 단독으로 제어한 경우의 크기를 나타낸 것이다.

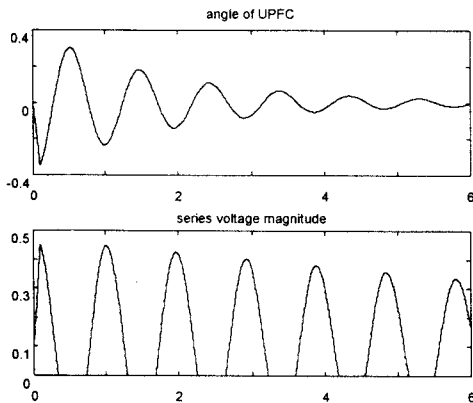


그림 7. UPFC의 제어량  
( 위상각과 전압크기 단독 제어시)

그림 8은 직렬 전압원의 위상각과 전압크기 동시 제어시 각 제어입력량을 나타낸다. 그림 8과 그림 7을 비교하면 동시 제어의 경우가 UPFC를 효율적으로 이용할

수 있음을 알 수 있다.

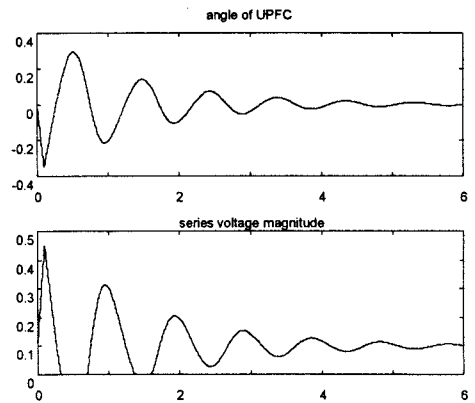


그림 8. UPFC의 제어량  
( 위상각과 전압크기 동시 제어시)

### 3. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 UPFC가 포함된 계통의 동특성 해석을 위한 UPFC의 시간영역 시뮬레이션 프로그램을 구현하고, 이를 통해 UPFC의 전력계통 동요 억제 효과 검토를 위한 간단한 시스템에서의 모의를 통해 그 효과를 검토하였으며, 이를 향후 연구의 기초로 활용하려 한다. 상기하 기초적 결과로부터 향후 UPFC의 각 제어 입력의 효율적인 상호 협조 제어 방식을 도출하는 것이며, 각 제어량이 한계치에 이르는 경우의 효율적 운전 문제에 대한 연구가 필요하리라고 본다.

#### [참고 문헌]

- [1] L. Gyugyi, G.D. Schauder, S.L. Williams, T.R. Rietman, D.R. Torgerson, A. Edris, "The Unified Power Flow Controller: A New Approach to Power Transmission Control", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.10, No.2, April 1995, pp. 1085-1097.
- [2] M. Rahaman, M. Ahmed, R. Gutman, R.J. O'Keefe, R.J. Nelson, J. Bian, "UPFC Application on the AEP System: Planning Considerations", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.12, No.4, Nov. 1997, pp. 1695-11701.
- [3] G.D. Schauder, L. Gyugyi, M.R. Lund, D.M. Hamai, T.R. Rietman, D.R. Torgerson, A. Edris, "Operation of the Unified Powerflow Controller (UPFC) under Practical Constraints" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.13, No.2, April 1998, pp. 630-639.
- [4] M. Noroozian, L. Angquist, M. Ghandhari, G. Anderson, "Use of UPFC for Optimal Power Flow Control", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.12, No.4, Oct. 1997, pp. 1629-1634.
- [5] M. Noroozian, L. Angquist, M. Ghandhari, G. Anderson, "Improving Power System Dynamics by Series-Connected FACTS Devices", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.12, No.4, Oct. 1997, pp. 1635-1641.