

UPFC의 스위칭레벨 상세 모의 및 동적 특성 고찰

원동준* 김선호* 한학근** 이송근*** 문승일*

*서울대학교 공과대학 전기공학부 **동양공업전문대학 전기전자통신공학부 ***전주대학교 이공대학 전기공학부

Study of Dynamic Characteristics of an UPFC Switching-Level Model

D.J. Won* S.H. Kim* H.G. Han** S.K. Lee*** S.I. Moon*

*Sch. of E.E. Seoul National University, **Sch. of E.E. Dongyang Technical College.

***Depart. of E.E. Jeon-Ju University.

Abstract - The UPFC(Unified Power Flow Controller) controls the magnitude and phase of the series injected voltage to exchange the real and reactive power with transmission line. The UPFC consists of two inverters connected together through the DC link capacitor.

This paper describes the detailed UPFC switching-level model. PWM (Pulse Width Modulation) method is chosen to operate the inverters. Automatic voltage control mode and automatic power flow control mode is selected to control the UPFC. EMTP simulation is offered to obtain the basic operation characteristics of the UPFC and the dynamic characteristics of the UPFC is studied in detail.

1. 서 론

교류 송전선로를 통해 전송되는 유효전력은 선로의 임피던스, 송수전단 전압의 크기와 그 위상에 대해 함수관계를 갖는다. 따라서 이 세 변수를 신속 정확하게 제어하면, 선로를 통해 전송되는 유효전력을 융통성 있게 조절하여 최대전력의 전송, 계통의 과도안정도 증대, 그리고 계통의 저주파공진 감쇠 등의 효과를 얻을 수 있다. 이러한 개념을 최근 급속히 발전하는 전력전자기술 및 고속 정밀제어기술과 접목하여 선로의 유효전력을 제어하는데 있어 유연성을 갖도록 구성된 교류송전시스템을 유연송전시스템(FACTS:Flexible AC Transmission System)이라 한다. 최근 대전력 GTO (Gate Turn Off)싸이리스터가 양산되면서 이것을 이용한 전압원인버터 방식이 보편화되고 있다. 이러한 인버터방식 FACTS기기에는 선로와 병렬로 연결되는 STATCOM(Static COMPensator), 직렬로 연결되는 SSSC (Static Synchronous Series Compensator), 그리고 이 두 가지를 결합한 형태의 UPFC(Unified Power Flow Controller)가 있다 [1].

지금까지 UPFC를 이상적인 전압원으로 모델링하여 UPFC의 동적 특성을 살펴본 연구들이 많이 진행되어 왔으나 이러한 이상전압원으로는 UPFC의 인버터가 가지고 있는 다양한 동적 특성을 모두 나타내기가 어려운 것이 사실이다. 따라서 본 논문에서는 UPFC를 GTO 싸이리스터를 포함하는 스위칭레벨의 상세 모델로 구성하여 UPFC의 동적 특성을 파악하고자 한다. 본 논문에서는 먼저 UPFC를 전압원 인버터를 포함하는 스위칭레벨 모델로 구성하고, UPFC의 기본 동작원리를 살펴본다. 또한 전압원 인버터를 구동하기 위한 PWM방법과 UPFC의 대표적 제어모드인 자동전압제어모드와 자동송전제어모드[1]를 살펴보고 이를 이용하여 UPFC의 제어를 설계한다. 이렇게 구성된 UPFC의 스위칭

레벨 모델과 제어를 전력시스템 모의 프로그램인 EMTP(Electro-Magnetic Transient Program)로 모의하여 UPFC 병렬인버터의 전압조정 특성과 직렬인버터의 조류제어 특성을 살펴보고, 이 두 가지를 결합하여 UPFC가 선로에 흐르는 유효전력 P와 무효전력 Q를 어떻게 능동적으로 조절하는지 분석한다.

2. 본 론

2.1 UPFC 스위칭레벨 상세 모델

UPFC는 그림 1과 같이 구성된다. UPFC는 두 개의 전압원 인버터로 구성되는데 하나는 변압기를 통하여 선로와 직렬로, 또 하나는 병렬로 연결되어 있다. 이 두 개의 인버터는 DC Link 커패시터를 통해서 서로 연결되어 있다. 직렬인버터는 선로에 전압 V_{12} 를 주입하도록 제어되고 있으며, 이렇게 전압을 주입함으로써 송전선로와 유효전력을 서로 교환할 수 있다. 병렬인버터는 독립적으로 무효전력을 선로와 교환하여 연결된 모선의 전압 V_1 를 일정하게 유지하는 역할을 하며, 직렬인버터에서 요구하는 유효전력을 DC터미널에 공급하여 V_{DC} 를 일정하게 유지하는 역할을 한다[2].

UPFC가 설치된 대상계통은 두 개의 전압원이 송전선로를 통하여 연결되어 있는 형태로 구성하였고, 스위치 MS1은 병렬인버터를 선로와 연결하는 역할을 하고, 스위치 MS2는 직렬인버터를 선로에 투입하는 역할을 하고 있다[3]. 인버터는 각각 6개의 GTO싸이리스터로 구성되어 있으며, 인버터의 손실은 싸이리스터에 직렬로 연결된 저항으로 표현하였다. 인버터의 출력전압은 스위칭으로 생기는 고조파를 감쇄시키기 위하여 고조파 필터를 통하여 변압기에 인가되고 있으며, 병렬인버터와 직렬인버터를 각각 독립적으로 운전할 수도 있도록 중간에 스위치를 삽입하였다.

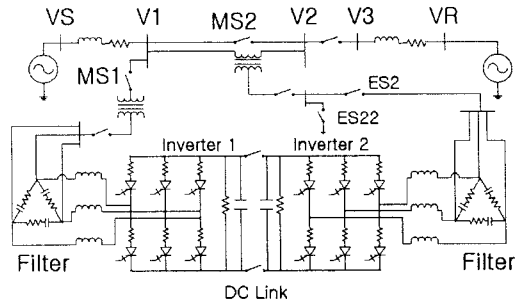


그림 1. 대상계통과 UPFC 시스템 구성도

2.2 PWM과 UPFC의 제어모드

2.2.1 인버터 PWM 제어

UPFC의 인버터 제어에는 PAM(Pulse Amplitude Modulation)방식과 PWM(Pulse Width Modulation)방식이 사용되고 있다. PAM방식은 여러 가지 단점에도 불구하고[4][6], 스위칭 손실과 고조파 관점에서 PWM방식보다 훨씬 우수한 성능을 보여[5] 많은 연구에서 채택되어 왔으나 향후 전력전자소자들의 발전에 따라 점차적으로 PWM방식이 더욱 우수한 성능을 얻을 것으로 보인다. 본 논문에서는 위 두 방식 중 PWM 방식을 채택하여 UPFC를 제어하였다.

2.2.2 인버터 제어모드

UPFC는 제어기의 기준입력에 따라서 다양한 모드를 가질 수 있다. 이 중에서 병렬인버터가 병렬 모선의 전압을 조정하고, 직렬인버터가 선로에 흐르는 조류를 제어한다는 기본 동작 원리에 가장 충실한 모드는 자동전압제어모드와 자동조류제어모드이다[1]. 병렬인버터 제어에 사용되는 자동전압제어모드는 병렬인버터가 연결되어 있는 병렬 모선의 전압 V_1 을 입력으로 받아 V_1 을 일정하게 유지하도록 병렬인버터 출력전압의 크기와 위상을 제어한다. 또한 직렬인버터의 자동조류제어모드는 선로에 흐르는 유효전력과 무효전력을 입력으로 하여 그에 해당하는 직렬전압을 선로에 주입한다[4]. 본 논문에서는 위의 두 가지 모드를 채택하여 UPFC의 제어기를 설계하였다.

2.3 제어기 설계

2.3.1 병렬인버터 제어기

병렬인버터 제어기는 크게 유효전력 제어부분과 무효전력 제어부분으로 나누어진다[1]. 유효전력 제어부분은 DC Link 커패시터의 전압을 일정하게 유지하기 위해서 위상각 θ_{sh} 를 생성하며, 무효전력 제어부분은 전압 V_1 의 크기를 유지하기 위해서 Modulation index m_{sh} 를 생성한다. 이렇게 생성된 m_{sh} 와 θ_{sh} 는 삼각파와 비교되어 병렬인버터를 구성하고 있는 GTO싸이리스터의 게이트 펄스를 생성하게 된다.

$$\alpha_1 = (K_p + \frac{K_s}{s}) \times (V_{DC}^* - V_{DC}) \quad (1)$$

$$\Delta m_{sh} = (K_p + \frac{K_s}{s}) \times (V_1^* - V_1) \quad (2)$$

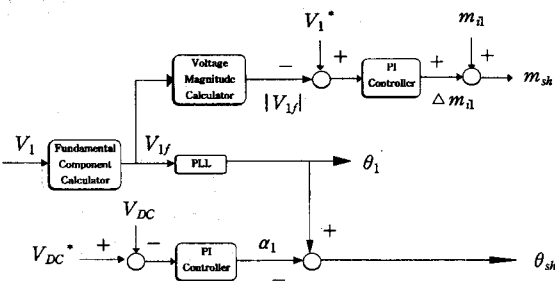


그림 2. 병렬인버터 제어기 구성도

2.3.2 직렬인버터 제어기

직렬인버터 제어기는 선로에 흐르는 유효전력을 입력

으로 받아 위상각 θ_{se} 를 생성하고, 무효전력을 입력으로 받아 m_{se} 를 생성한다. m_{se} 와 θ_{se} 역시 삼각파와 비교되어 직렬인버터의 게이트 펄스를 생성한다. 병렬인버터와 직렬인버터 출력전압의 기준 위상각 θ_1 은 병렬모선 전압 V_1 의 위상각에 고정되어 제어되고 있다.

$$\alpha_2 = (K_p + \frac{K_s}{s}) \times (P_{line}^* - P_{line}) \quad (3)$$

$$\Delta m_{se} = (K_p + \frac{K_s}{s}) \times (Q_{line}^* - Q_{line}) \quad (4)$$

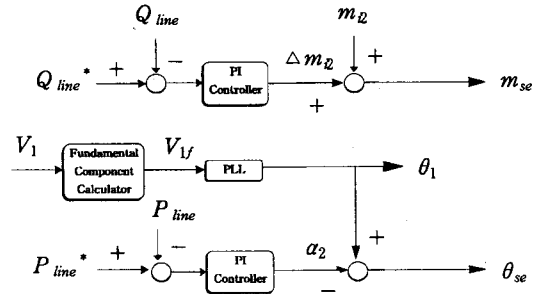


그림 3. 직렬인버터 제어기 구성도

2.4 모의 실험 결과 및 동적 특성 분석

UPFC를 STATCOM으로만 동작시켰을 때의 동적 특성을 그림 4에 나타내었다.

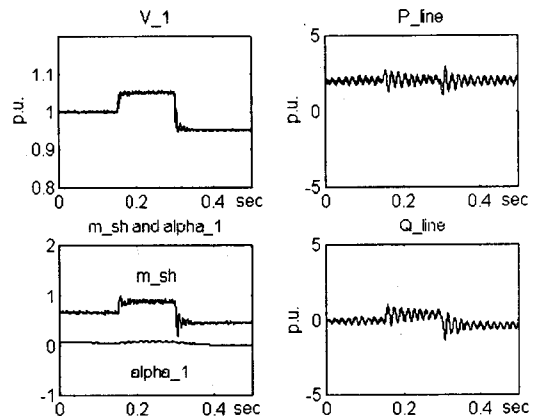


그림 4. STATCOM 단독 동작시 응답 특성

UPFC가 연결되어 있는 병렬 모선의 전압 V_1 은 처음에 1p.u.을 유지하고 있다. 0.15s에 전압을 1.05p.u.으로 변화시키고 0.3s에 0.95p.u.으로 변화시켰다. m_{sh} 의 변화에 따라 병렬 모선 전압이 기준입력을 약 10ms이내의 시간지연을 가지고 추종하는 것을 확인할 수 있으며, V_{DC} 를 유지하기 위해서 α_1 이 변화하고 있음을 볼 수 있다. V_2 에서 측정된 유효전력 P_{line} 과 무효전력 Q_{line} 은 병렬모선의 전압이 변화함에 따라서 많이 흔들리고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 STATCOM이 단독으로 병렬모선의 전압을 조정할 때 전체 선로에 흐르는 유효전력과 무효전력이 변할 수 있음을 보여주는 것이다. 따라서 STATCOM을 이용하

여 병렬 모선의 전압을 변화시킬 때에는 직렬인버터를 자동조류제어모드로 동작시켜 선로에 흐르는 조류를 일정하게 유지해야만 한다. STATCOM이 전압을 변화시키고 직렬인버터가 조류를 일정하게 제어하고 있을 때의 동적 특성은 그림 5에 나타나 있다.

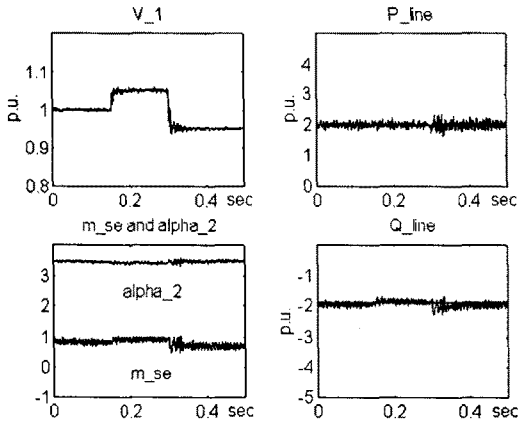


그림 5. STATCOM과 직렬인버터를 같이 동작시킬 때의 UPFC의 응답 특성 I (V_1 을 변화)

위 그림에서 직렬인버터가 투입됨으로써 선로에 흐르는 유효전력 P_{line} 이 2.0p.u.으로 일정하게 유지되고 있으며, 무효전력 Q_{line} 역시 -1.9p.u.으로 거의 일정하게 유지되고 있음을 볼 수 있다.

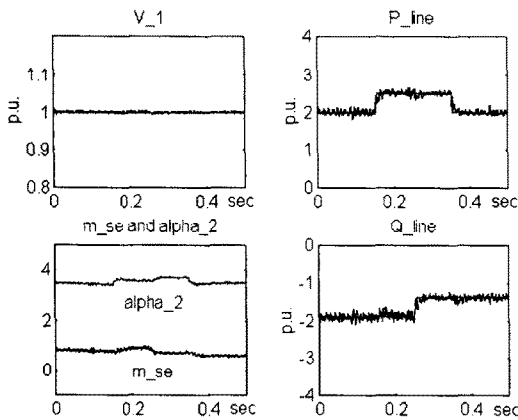


그림 6. STATCOM과 직렬인버터를 같이 동작시킬 때의 UPFC의 응답 특성 II (P_{line} , Q_{line} 을 변화)

그림 6은 STATCOM이 병렬모선의 전압을 일정하게 유지하고 있는 상황에서 직렬인버터가 P_{line} 과 Q_{line} 을 변화시킬 때의 동적 특성이다. 병렬 모선의 전압은 1.0p.u.으로 일정하게 유지되고 있다. 선로에 흐르는 유효전력 P_{line} 은 0.15s에 2.0p.u.에서 2.5p.u.으로, 그리고 0.35s에 다시 2.0p.u.으로 변화시켰다. 이와 동시에 무효전력 Q_{line} 도 0.25s에 -1.9p.u.에서 -1.5p.u.으로 변화시켰다. 각각의 경우 모두 약 10~20ms이내의 시간지연을 가지고 기준 입력을 추종함을 볼 수 있다. 또한 P_{line} 의 변화에 따라서 Q_{line} 이 순

간적으로 변하지만 곧 다시 되돌아가는 것을 볼 수 있고, P_{line} 역시 순간적인 변화를 곧 회복하고 있음을 볼 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 기존의 이상전압원 모델이 아닌 스위칭레벨에서 UPFC를 상세하게 모델링하고 그것을 EMTP를 이용하여 모의하였다. 인버터의 제어에는 제어기법이 간단한 PWM방식을 이용하였으며, 병렬인버터부분에는 자동전압제어모드를, 직렬인버터부분에는 자동조류제어모드를 채택하여 제어하였다. 병렬인버터 제어기는 m_{sh} 와 θ_{sh} 를 생성하여 병렬 모선의 전압과 DC Link전압을 일정하게 유지하고, 직렬인버터 제어기는 m_{se} 와 θ_{se} 를 생성하여 선로에 흐르는 유효전력과 무효전력을 조절하도록 설계하였다. 이렇게 설계한 UPFC 제어기는 명령추종 측면에서 좋은 성능을 보여주고 있다. EMTP 모의 결과 UPFC가 선로에 흐르는 유효전력과 무효전력의 변화없이 병렬 모선의 전압을 변화시킬 수 있음을 볼 수 있었으며, 선로에 흐르는 유효전력과 무효전력을 원하는 값으로 변화시킬 수도 있음을 볼 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] L. Gyugyi, et. al., "Operation of The Unified Power Flow Controller under Practical Constraints", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 13, No. 2, pp.630-639, April 1998
- [2] L. Gyugyi, C.D. Shauder et. al., "The Unified Power Flow Controller : A New Approach to Power Transmission Control", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 10, No. 2, pp.1085-1093, April 1995
- [3] Kalyan K. Sen, Eric J. Stacey, "UPFC-Unified Power Flow Controller : Theory, Modeling, and Applications", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 13, No. 4, pp.1453-1460, October 1998
- [4] J.Y. Liu, Y.H. Song, A.M. Foss, "Digital Simulations of the PWM UPFC using EMTP", *Proceedings, IEE Sixth International Conference on AC and DC Transmission*, April 29 - May 3, 1996
- [5] X. Lombard, P. Therond, "Control of Unified Power Flow Controller : Comparison of Methods on the Basis of a Detail Numerical Model", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 12, No. 2, pp.824-830, May 1997
- [6] 원동준, 김선호, 한학근, 이송근, 한병문, 문승일, "EMTP를 이용한 UPFC의 스위칭레벨 모델 상세 모의", 전력계통연구원, 춘계학술대회 논문집, pp.55-57, 1999. 5.28-29.