

EMTP/ATPDraw를 이용한 UPFC 구현 및 동작 분석

장원혁, 이유진, 이상봉
성균관대학교

Modelling and Performance Analysis of UPFC Using EMTP/ATPDraw

Won-Hyeok Jang, You-Jin Lee, Sang-Bong Rhee
Sungkyunkwan University

Abstract - Among the Flexible AC Transmission Systems (FACTS) devices, Unified Power Flow Controller (UPFC) is considered as the most powerful and versatile one as it provides simultaneous, real time control of the transmission parameters, voltages, impedances, and phase angles which determine the power flow in AC transmission systems. This paper presents modelling of UPFC and describes its characteristics. The UPFC implemented in this paper is based on Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) and Electro-Magnetic Transients Program (EMTP)/ATPDraw is used to model and analyze it. The simulation results confirm advantages of UPFC in operational performance with respect to the steady state power flow regulation and the transient stability control.

1. 서론

산업의 발달로 요구되는 전력량은 증가하고 이에 따라 새로운 송전선로의 추가 건설이 필요한 실정이다. 그러나 이는 많은 비용을 필요로 하고 환경적으로도 많은 문제점을 가지고 있기 때문에 전력계통 운용자의 입장에서 항상 고민하는 사항들 중 하나가 현존하는 송전계통의 효율을 최대한 끌어 올려 송전용량을 증대시키고 안전하며 최적화된 운전을 하는 것이다. 신뢰성 있는 전압 품질을 유지하고 외란에도 계통의 안정성을 확보하기 위하여 송전계통의 전력 전송 능력을 향상시키기 위한 노력은 계속 되어 왔다. 최근 반도체 기술의 발달로 인하여 전력전자 기기들의 성능이 향상됨에 따라 FACTS 기기들 또한 성능이 많이 향상 되었고 많은 FACTS 기기들 중 가장 많은 장점을 가진 UPFC의 적용은 송전능력 향상의 강력한 방법 중의 하나로 인식되고 있다.

UPFC의 등가 전압원 모델은 수학적으로 간단하여 전력계통 모의 시 많이 쓰이고 있지만 인버터 스위칭 부분을 생략하고 등가화 시킬 경우 실제와는 다른 특성을 보일 수 있다. 본 논문에서는 SPWM기반의 UPFC를 모델링하고 모델링 시 인버터 스위칭을 포함하여 모의의 정확성을 확보하였다. 모델링된 UPFC는 Static Synchronous Compensator (STATCOM)의 역할을 하는 병렬로 연결된 인버터와 Static Synchronous Series Compensator (SSSC)의 역할을 하는 직렬로 연결된 인버터가 공통 DC 커패시터로 연결되어 있다. 또한 과도현상 분석에 강력한 시뮬레이션 툴인 EMTP/ATPDraw를 사용하여 이를 구현하고 동작을 분석하여 UPFC의 성능을 검증하였다[1].

2. UPFC 구성 및 동작 원리

2.1 UPFC 구성

UPFC를 구성하는데 이론적으로 많은 방법이 존재하나 실제 회로 구성의 가능성을 고려할 때는 동작 시 상세한 제어 알고리즘, 대전력용 전자기기들의 이용가능성 그리고 경제적인 요소 또한 고려되어야 한다. 기본적인 동작 원리를 설명하기 위하여 본 논문에서 구현한 UPFC의 개괄적인 구조를 그림이 그림 1에 나타내었다. 공통 DC 커패시터로 연결된 두 개의 전압원 인버터를 사용하여 직렬 및 병렬 제어기를 구현하였고 고장상에 과전류가 흐를 시 직렬 제어기를 보호하기 위한 bypass 역시 구현하였다[2].

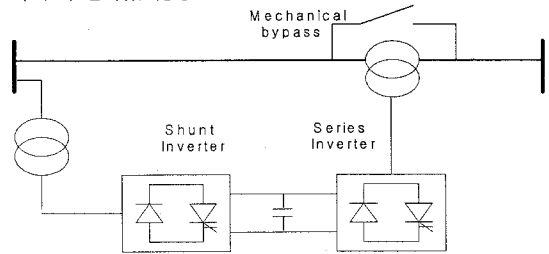


그림 1. UPFC 구성도

직렬 인버터는 선로에 직접 전압을 주입하도록 제어되어 송전선로와 유효 및 무효전력을 교환할 수 있다. 병렬 인버터는 독립적으로 무효전력을 선로와 교환하여 연결된 모선의 전압을 일정하게 유지하는 역할을 한다. 또한 UPFC는 전력계통으로부터 다양한 변수들을 입력받아 이미 설정된 기준 값들과 비교하여 두 인버터 제어를 위한 게이트 신호를 생성한다.

2.2 SPWM기반 전압원 인버터

인버터의 기본적인 기능은 DC 입력전압을 원하는 크기와 주파수의 AC 출력전압으로 바꾸는 것이다.

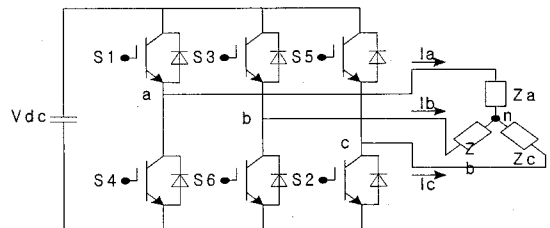


그림 2. 6-pulse 삼상 인버터 회로도

그림 2는 기본적인 6개 스위칭을 가진 삼상 인버터 회로를 나타낸다. 인버터는 DC 전압을 제어하거나 인버터 이득을 조절하여 다양한 출력전압을 구할 수 있다. 인버

터의 이득과 출력 전압의 위상은 PWM(Pulse Width Modulation) 스위칭 방식을 사용하여 쉽게 제어할 수 있다. PWM 스위칭 방식은 기준 제어 신호를 삼각파와 비교하여 인버터의 내부 GTO 싸이리스터의 소자 점호 시기를 결정하는 출력전압을 제어한다. 그림 3은 EMTP에서 SPWM 스위칭 시 생성되는 기준파 (V_{ref})와 제어파 ($V_{con a,b,c}$)의 파형을 나타낸다[3].

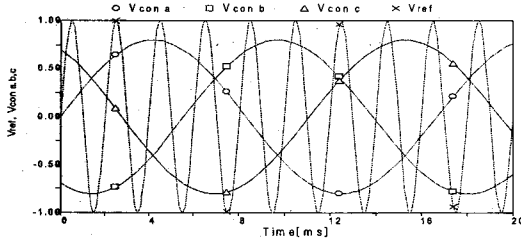


그림 3. EMTP에서 SPWM의 기준파와 제어파의 파형

세 개의 반송파가 기준파보다 클 때 인버터의 위쪽에 위치하는 각각의 스위치들 (S1, S3, S5)은 닫히고 아래쪽에 위치하는 스위치들 (S4, S6, S2)은 열리게 되고 반송파가 기준파보다 작을 때 반대로 동작하면서 교류전압을 만들게 된다. 기준파는 진폭이 $V_{ref,peak}$ (=1)이고 주파수가 f_{ref} 인 삼각파이고 제어파는 진폭이 $V_{con,peak}$, 주파수가 f_{con} , 위상각이 θ 인 정현파이다. 여기서 MF를 진폭변조비수라고 하여 다음과 같이 정의 된다[1].

$$MF = \frac{V_{con,peak}}{V_{ref,peak}} = V_{con,peak} \quad (1)$$

이때, 인버터 출력전압의 기본파 성분은 다음과 같다[3].

$$V_{out} = V_{con,peak} V_{dc} \sin(2\pi f_{con} t - \theta) \quad (2)$$

3. 계통모의 및 결과 분석

3.1 UPFC 모의

SPWM기반의 UPFC의 동작을 분석하기 위해 두 개의 발전기가 있는 송전선로로 구성된 간단한 전력계통을 구성하였다. UPFC가 적용된 모의 계통도가 그림 4에 나타나 있다[4].

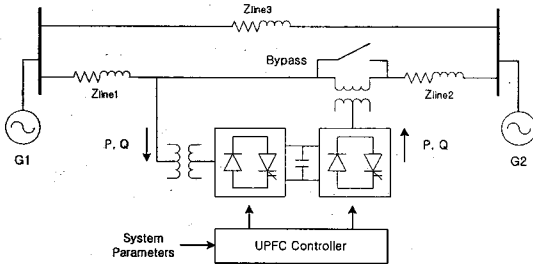


그림 4. UPFC가 적용된 모의 계통도

송전단과 수전단 사이에 동일한 두 개의 병렬선로를 구성하고, UPFC는 두 병렬 선로 중 하나의 선로에 중간에 설치하여 UPFC의 제어에 의한 선로에서의 변화를 관찰할 수 있게 하였다. 각 계통 파라미터들은 UPFC제어기에 전달되어 계통 변화 시 계통을 제어하기 위한 UPFC 자체 파라미터들을 변경하는데 사용되도록 하였다. 모의 계통도에 쓰인 파라미터는 표 1에 정리되었다.

표 1. 모의 계통도 파라미터

G1	765kV	G1 θ	0°
G2	765kV	G2 θ	-3°
Z1, Z2	50:50 %	Z3	100%

UPFC가 계통의 미치는 영향을 분석하기 위해 4가지 모드를 구성하여 모의하였다.

- Mode 1: UPFC가 적용되지 않은 계통
- Mode 2: 지락 고장 시 bypass 작동 영향
- Mode 3: 병렬 제어기에 의한 전압제어
- Mode 4: 직렬 제어기에 의한 조류제어

3.2 UPFC 모의결과 분석

3.2.1 Mode 1

모드 1에서 UPFC는 전력계통에서 제외된다. 그림 5는 UPFC를 적용하지 않았을 시 수전단에서 측정된 계통의 유효전력과 무효전력을 나타낸다. 측정된 유효전력은 434[MW]을 그리고 무효전력은 116[MVar]의 값을 가지는 것을 확인 할 수 있다. 측정된 유효 및 무효전력으로 구한 역률은 0.99로 송전 효율은 아주 높은 계통임을 알 수 있다.

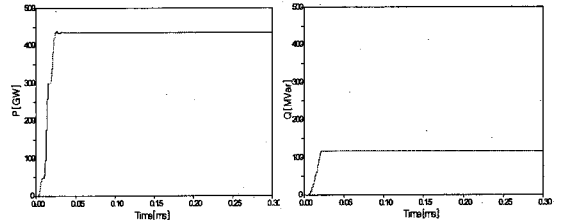


그림 5. 계통의 초기 유효전력과 무효전력

그림 6은 UPFC를 적용하지 않았을 시 수전단에서 측정된 계통의 전압과 전력을 나타낸다. 발전기를 765[kV]로 설정하였지만 EMTP에서는 상전압으로 나타나므로 전압은 최대값 약 624[kV]을 보이고 전류는 최대값 약 1400[A]를 보인다.

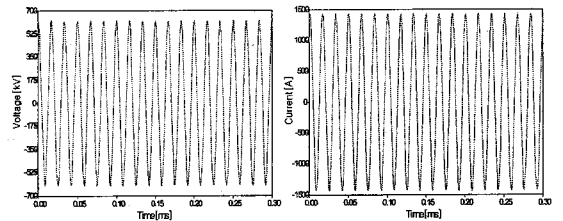


그림 6. 계통의 초기 전압 및 전류

3.2.2 Mode 2

모드 2에서는 1선 지락 고장 시 일어나는 상황을 모의하여 보았다. 고장은 UPFC가 설치된 송전선로에서 UPFC와 수전단 사이에서 0.1초에 A상 지락 고장을 내고 0.2초에 고장을 제거하였다. 그림 7은 A상 지락 고장 시 나타나는 선로전류와 직렬 변압기로 유입되는 전류 그리고 선로 전압을 보여준다. A상 지락 고장으로 인하여 A상 선로전류는 고장 즉시 급격히 증가하고 UPFC는 고장 난 A상의 과전류를 감지하고 직렬 변압기를 보호하기 위하여 즉각적으로 bypass를 작동시켜 과전류가 직렬 전압기에 흐르는 것을 막아 준다. 고장 난 선로 A상의 전압 역시 고장으로 인하여 전압이 인가되지 않다가 고장이 제거 된 후 약간의 고조파가 포함된 전압으로

회복되는 것을 확인 할 수 있다.

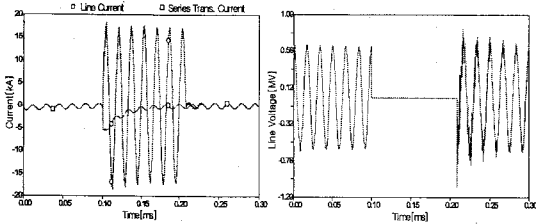


그림 7. A상 지락고장 시 전류와 전압 파형

3.2.3 Mode 3

Mode 3에서는 병렬 제어기의 진폭변조지수, MF를 변화시켜 모선에 무효전력을 공급 혹은 흡수함으로써 모선의 전압을 변화시키는 UPFC의 특성을 관찰한다. 그림 8은 직렬 제어기의 MF를 0.8로 고정하고 병렬 제어기의 MF를 0.5에서 1.2로 증가시켰을 때 나타나는 수전단의 무효전력의 변화를 측정된 결과이다. 값을 측정하여 시 -81.1[MVar]에서 -85.7[MVar]로 약 -4.6[MVar] 증가하여 약 0.06[p.u.]증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

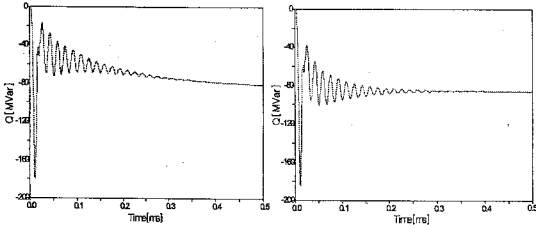


그림 8. 병렬 제어기에 의한 무효전력 변화

그림 9는 같은 조건에서 유효전력의 변화를 측정된 결과이다. 측정 시 355[MW]에서 352[MW]로 0.008[p.u.] 감소하였지만 무효전력의 증가량에 비하여 미비한 수준임을 확인할 수 있다. 따라서 병렬 제어기의 MF를 제어하면 모선에 무효전력을 공급하거나 모선으로부터 흡수하여 계통의 조류를 제어할 수 있다.

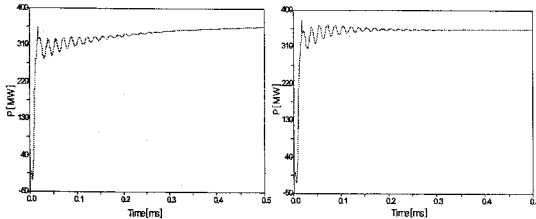


그림 9. 병렬 제어기에 의한 유효전력 변화

3.2.4 Mode 4

Mode 4에서는 직렬 제어기의 진폭변조지수, MF를 변화시켜 그에 따른 조류의 변화를 관찰한다.

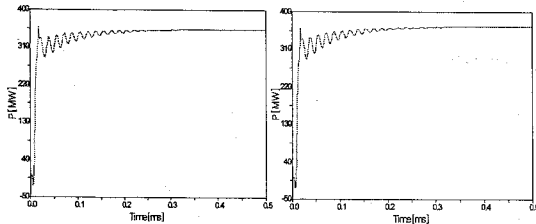


그림 10. 직렬 제어기에 의한 유효전력 변화

병렬 제어기의 MF를 0.8로 고정하고 직렬 제어기의 MF를 0.5에서 1.2로 증가시켜 계통에 직렬로 주입하는 유효전력을 증가시킨다. 직렬 제어기는 병렬 제어기와 DC 커패시터로 연결되어 있기 때문에 무효전력의 교환은 일체 없다고 볼 수 있다. 그림 10은 직렬 제어기의 MF를 증가시킨 결과 나타나는 수전단에서 유효전력의 변화를 나타낸다. 수전단에서 유효전력 측정 시 352[MW]에서 365[MW]로 0.037[p.u.] 증가함을 확인 할 수 있다.

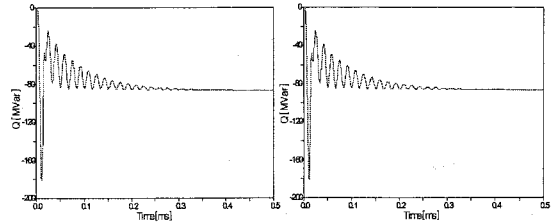


그림 11. 직렬 제어기에 의한 무효전력 변화

그림 11은 직렬제어기에 의한 무효전력의 변화를 나타낸다. 유효전력과 마찬가지로 수전단에서 측정 시 -86.5[MVar]에서 -86.3[Mvar]로 약 -0.0002[p.u.]증가하여 거의 변화가 없음을 확인할 수 있다. 따라서 직렬 제어기의 MF를 제어하면 모선에 유효전력을 공급하거나 모선으로부터 흡수하여 계통의 조류를 제어할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 UPFC를 모델링하고 여러 가지 조건을 정하여 그 특성을 분석하였다. UPFC는 SPWM기반의 인버터 두 개를 변압기와 함께 병렬과 직렬로 송전선로에 연결하고 인버터 사이를 DC 커패시터를 사용하여 연결하였다. 모의와 결과 분석을 위하여 EMT/ATPDraw를 사용하였고 계통 고장 시 UPFC 투입 여부에 따른 영향을 동작특성을 분석하였다. 구현된 UPFC는 계통의 지락 고장 시 효과적인 계통 보호를 위한 동작 가능성을 나타내었으며 병렬 제어기와 직렬 제어기의 진폭변조지수를 변화시켜 조류를 제어 할 수 있었다. 향후 연구로는 UPFC설치에 따른 보호계전기 영향과 이에 따른 계통 안정도 분석에 관한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 지식경제부의 출연금으로 수행한 특성화대학원 사업의 연구결과입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] K. L. Lo, T.T. Ma, J. Trecat, M. Crappe, "Detailed Real-Time Simulation and Performance Analysis of UPFC Using Electromagnetic Transients Program (EMTP)", IEEE Power System Technology International Conference, Vol.2, p.889-p.894, 1998
- [2] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, "Understanding FA CTS", IEEE PRESS, p.297-p.333, 2000
- [3] 노의철, 정규범, 최남섭, "전력전자공학 제2판", 문운당, 2004
- [4] L. Gyugyi, C.D. Schauder, et. al., "Operation of the Unified Power Flow Controller (UPFC) under Practical Constraints", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.13, p.630-p.639