

UPFC의 동적 성능해석을 위한 시뮬레이션 모형

한 병 문, 최 대 길, 신 의 상
명지대학교 전기공학과

Simulation Model for Dynamic Performance Analysis of UPFC

Byung-Moon Han, Dae-Gil Choi, Ik-Shang Shin
Department of Electrical Engineering
Myongji University

ABSTRACT

This paper describes a simulation model to analyze the dynamic performance of Unified Power Flow Controller which can flexibly adjust the active and reactive power flow through the ac transmission line.

An equivalent circuit to analyze the basic principle for the whole system operation was developed and a control system for the Unified Power Flow Controller was derived using vector control method. A computer simulation model with EMTP code was also conceived to evaluate the performance of the Unified power Flow Controller. The simulation results show that Unified Power flow Controller is very effective for controlling the power flow and damping the subsynchronous resonance in the power system.

서론

교류 송전선로를 통해 전송되는 전력은 선로의 임피던스, 송/수전단 전압의 크기와 위상에 대해 함수관계를 갖는다. 따라서 이 세 독립변수를 신속 정확히 제어하면, 선로를 통해 전송되는 전력을 유연성 있게 조정 가능하여 최대전력의 전송, 계통의 과도안정도 증대, 그리고 계통의 저주파공진 감쇄 등의 효과를 얻을 수 있다 [1].

최근 개발된 대전력 GTO 소자로 제작한 대용량 전압원인버터를 이용해 위의 세 변수를 제어하는 연구가 FACTS (Flexible AC Transmission Systems) 이라는 명칭으로 미국에서 활발히 진행 중에 있다.

본 논문에서는 전송전력을 결정하는 세 변수를 총체적으로 신속히 제어하도록 제안된 UPFC (Unified Power Flow Controller) [2,3]에 의한 보상원리를 기술하고, 전체 시스템의 동작을 효과적으로 제어하기 위한 제어시스템을 고안하고 단순전력계통을 예로 하여 상호응동을 시뮬레이션을 통해 분석한다.

UPFC의 동작원리

재래의 위상변이기 [4]는 템변환 변압기를 이용해 전압의 직렬주입으로 선로의 유무효전력을 제어하는 기능을 갖으나, 위상변이기 자체가 유무효전력을 직접 흡수 또는 공급하는 것이 아니고, 송전계통이 흡수 또는 공급하도록 제어하는 기능을 갖는다. 그러나 전압원인버터를 사용한 UPFC는 유무효전력을 선로에 직접 공급 또는 흡수하는

기능을 갖으며, 선로의 임피던스, 송/수전단 전압의 크기와 위상을 총체적으로 제어하는 기능을 갖는다.

UPFC는 그림 1에 보인바와 같이 2개의 전압원 인버터가 직류 캐패시터를 공유해서 링크되어 있다. 인버터 I는 기능상 송전선로에 병렬로 그리고 인버터 II는 직렬로 연결되어 있다. 인버터 I은 직류 링크전압의 크기를 절호각으로 조정하여 주입전압 $V_{pq}(t)$ 의 크기를 $0 < V_{pq} < V_{pq\max}$ 범위 내에서 제어하고 동시에 독립적으로 교류 단자에서 요구되는 무효전력을 공급 또는 흡수하는 STATCON의 기능을 갖는다 [5,6,7]. 인버터 II는 주입전압 $V_{pq}(t)$ 의 위상각 α_{pq} 를 $0 < \alpha_{pq} < 2\pi$ 인 범위 내에서 조정한다.

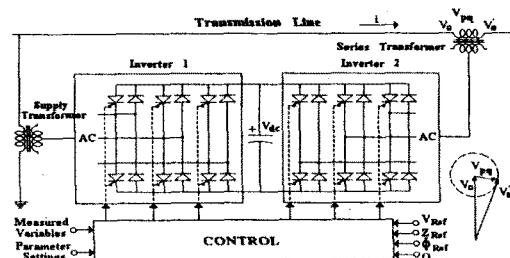


Fig. 1. UPFC system configuration

또한 생성된 주입전압 $V_{pq}(t)$ 는 직렬로 결합된 변압기에 의해 송전계통의 단자전압 $V_o(t)$ 에 벡터적으로 합해져 출력전압 $V'(t)$ 를 생성한다. 선로에 직렬로 주입되는 컨버터의 출력전압은 원칙적으로 교류전압원으로 동작하고 주입되는 전압원을 통해 흐르는 전류는 송전선로의 전류와 동일 함으로 주입되는 전압원의 VA용량은 전력조류제어가 이루어지는 동안 선로의 최대전류와 최대주입전압의 곱으로 정해진다.

UPFC의 보상원리

그림 2는 UPFC의 전압보상원리와 전력조류를 제어하기 위해 갖는 단자전압 조정기능, 직렬보상과 단자전압 조정기능, 위상각 조정과 단자전압 조정기능을 각각 나타낸 것이다. 또한 UPFC를 적절히 동작시키면 단자전압 조정, 직렬선로 보상, 그리고 위상각 조정을 동시에 수행 가능하다. 이 모든 기능은 직렬주입 전압의 크기와 위상변경에 의해 가능한데, 이 때문에 UPFC에서는 정밀제어가 가능한 콘트롤 시스템 구비가 절대적이다. UPFC는 주입되는 전압의 크기를 주어진 범위 내에서 변경 가능하고

위상각을 360° 내에서 자유로이 변경 가능하면 선전류의 크기와 위상각을 모두 제어하여 송전계통의 유/무효전력의 조류를 독립적으로 제어 가능하다.

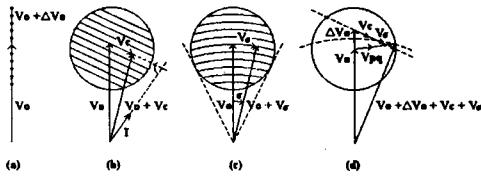


Fig. 2. UPFC compensation vector diagram

- (a) voltage magnitude
- (b) voltage and line impedance
- (c) voltage and phase angle
- (d) voltage, line impedance, phase angle

UPFC는 전력조류를 제어하면서 동시에 송전에 관련된 파라미터를 제어하고 또한 웅동이 신속하여 거의 순시적으로 반응하는 UPFC의 성능은 정상상태에서 유효적인 전력조류 제어와 과도와 동적안정도 개선에 상당한 기능을 한다. 송전에 영향을 미치는 3가지 파라미터(위상각, 전압, 선로 임피던스)를 종합적으로 제어할 수 있다는 점에서 궁극적인 송전계통 보상장치라고 할 수 있다. 예를 들면, 대상 전력계통의 사고에 보다 효율적으로 대처하기 위해, 계통보상방식을 실시간에서 동적으로 변경할 수 있으며, 보상에 필요한 무효전력을 내부적으로 공급할 수 있기 때문에 송전선로의 어떤 지점에도 설치할 수 있다는 장점이 있어, 전력계통운용의 개념을 혁신시킬 가능성 이 있다.

제어시스템 설계

UPFC는 주어진 송전단과 수전단의 위상차 δ 에 대해 송전선로의 P, Q 동작영역을 설정하는데 유효하게 활용 가능하다. UPFC는 직렬주입 전압벡터의 크기와 위상을 고속으로 스위칭 되는 인버터에 의해 하는데, 이것은 단지 넓은 영역에서 동작 가능하다는 것을 의미하는 것이 아니고 하나의 동작점에서 신속히 다른 동작점으로의 전이도 쉽다는 것을 의미한다.

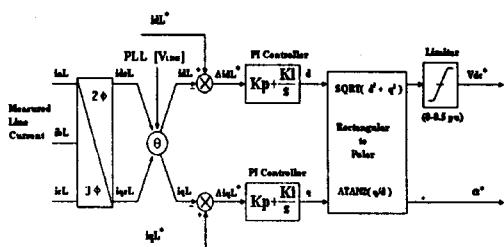


Fig. 3. UPFC control system

UPFC의 제어시스템은 기능상으로 내부 제어시스템과 외부 제어시스템으로 구분된다. 내부 제어시스템은 2개의 인버터를 조작하여 직렬로 주입되는 전압의 크기와 위상각을 정하고 병렬 무효전류를 적절히 흡수하는 기능을 갖는다.

외부 제어시스템은 직렬 주입전압의 크기와 위상각, 그리고 병렬 무효전류의 크기와 위상을 정하는 것이다. 이러한 요구도는 운용자가 임의로 설정한 일정값에 대해

자동제어 루프에 의해 동작조건과 고장대책에 알맞도록 제어하는 기능이다.

내부 제어시스템은 인버터 스위치에 적절한 게이트 신호를 가하여 인버터의 출력전압이 그림 3에 보인 제어구조에 따라 웅동하도록 한다. 이 그림에서 직렬 인버터는 직렬 주입전압의 수요에 따라 직접 독립적으로 웅동하도록 되어 있다. 직렬전압 V_{pq} 의 변화는 가상적으로는 거의 순간적으로 반응한다. 반면에 병렬 인버터는 유효 및 무효전력의 독립적인 제어를 위해 폐루프 전류벡터제어를 요한다. 그림 3은 내부제어시스템의 수리모형을 나타낸 것이다. 전압조정을 위한 병렬 무효전력의 제어는 STATCON에서 이미 사용하던 제어원리를 포함하고 있다.

병렬 무효전력은 입력수요에 직접 반응하도록 되어 있으며, 병렬 유효전력제어는 2개의 인버터사이의 유효전력이 평형을 이루도록 직류링크전압을 미리 설정한 전압수준으로 유지하는데 필요한 제어 루프로 되어 있다. 이 때 2개의 인버터 사이에는 무효전력의 교환이 없도록 한다.

UPFC의 시뮬레이션

UPFC의 동작원리와 제어시스템의 성능을 검증하기 위해 EMTP에 의한 모델링과 시뮬레이션을 실시하였다. 본 연구에서 고려한 UPFC의 단상동가회로 모형을 그림 4에 보였다. 이 그림은 임의의 전력계통에서 2점을 선택하여 한 점은 송전단으로 다른 한 점은 수전단으로 가정하고 2개의 병렬선로가 이 2점을 연결하는 것으로 가정하였다. UPFC는 2 선로중 하나에만 설치된 것으로 가상하였고, 모든 단위는 pu로 환산되어 있어 송전선압에 관계없이 그 결과를 활용 할 수 있도록 하였다.

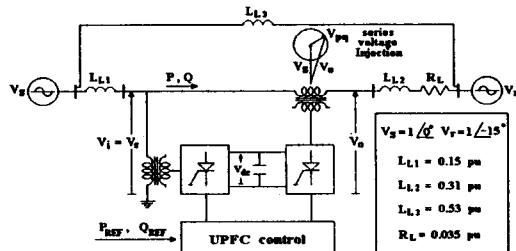


Fig. 4. 2-point power system with UPFC

본 시뮬레이션 모델에서는 UPFC에 포함된 2개 인버터를 12-펄스 또는 24-펄스로 모델링하는 대신에 2개의 교류전압원이 직류링크에 의해 결합된 구조로 모델링 하고, 제어 시스템은 전 절에서 설명한 베터제어에 의한 세부모형으로 구성하였다. 인버터를 STATCON에서와 같이 세부적으로 모델링하지 못한 것은 컴퓨터의 처리시간을 고려하고, 또한 인버터의 세부적인 특성은 STATCON에서 이미 검증되었기 때문에 본 연구에서는 이를 근거로 제어시스템 동작과 성능 해석에 역점을 두었다.

본 연구에서 그림 4에 보인 전력계통의 3상세부회로를 근거로 하여 EMTP 코드를 작성하였으며, 특히 제어 시스템은 전 절에서 보인 그림 3의 제어 블록선도와 전달함수를 TACS를 이용하여 모델링 하였다.

그림 5에서 8은 유효전력 P와 무효전력 Q가 계단적으로 변하는 경우 UPFC가 이에 따라 유효 및 무효전력을 공급하는 추종 특성과 이 때 직렬로 주입되는 전압의 크기와 위상을 나타낸 것이다. 그림 5은 유효전력 P가

0.75pu에서 1.0pu로 갑자기 변하고, 무효전력 Q가 0.25pu에서 0.5pu로 변경 될 때 UPFC의 인버터 II에 의해 전압을 주입함으로 기준치를 추종하는 특성을 나타낸 것이다. 이 때 주입되는 전압의 크기와 위상을 그레프로 나타낸 것이 그림 6 이다. 주입전압은 크기가 0.05pu에서 최대 0.28pu정도이고 위상각은 -138° 에서 -72° 범위에 존재한다.

그림 7은 유효전력 P가 0.75pu에서 1.0pu로 유효전력 Q가 0.25pu에서 0.5pu로 계단 변화를 할 때 UPFC의 추종특성을 나타낸 것이다. 이 경우도 UPFC는 주어진 기준치의 변화를 신속히 추종하는 것을 알 수 있다. 또한 주입전압은 그림 8에 보인바와 같이 그 크기는 0.0pu에서 시작하여 최대 0.2pu에 까지 달하며 위상각은 -50° 에서 시작하여 $+117^\circ$ 에 달한다.

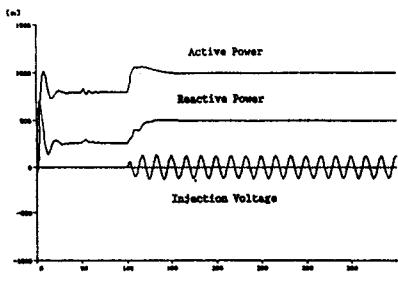


Fig. 5. Step response of UPFC ($P=1.0$, $Q=0.5$)

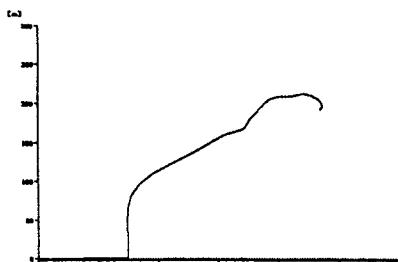


Fig. 6. Injected voltage and angle ($P=1.0$, $Q=0.5$)

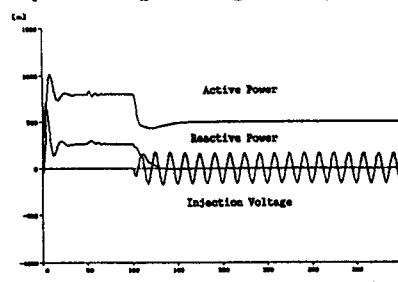


Fig. 7. Step response of UPFC ($P=0.5$, $Q=0.0$)

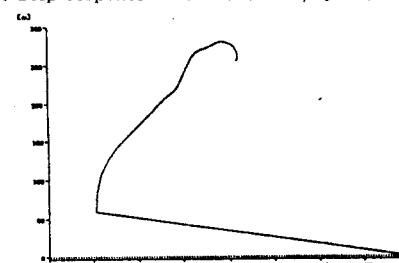


Fig. 8. Injected voltage and angle ($P=0.5$, $Q=0.0$)

그림 9는 UPFC에 의한 전력계통의 저주파공진감쇄 효과를 시뮬레이션에 의해 확인 한 것인데 $t=100ms$ 에서 2.5Hz의 저주파 공진 현상이 발생하였을 때 그림에 보인 주입전압을 인가하므로 이 저주파공진이 감쇄하는 것을 알 수 있다.

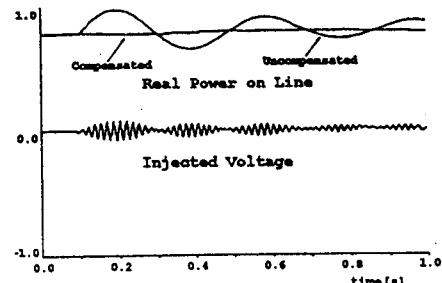


Fig. 9. damping low frequency oscillation

결 론

본 논문에서는 전송전력을 결정하는 세 변수를 총체적으로 신속히 제어하도록 제안된 UPFC (Unified Power Flow Controller)에 의한 보상원리를 기술하고, 전체 시스템의 동작을 효과적으로 제어하기 위한 제어시스템을 제안하고 단순전력계통을 예로 하여 상호운동을 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 분석결과 고안된 UPFC 제어시스템은 계통의 유무효전력 변화에 적절히 추종하는 특성을 갖으며, 제안된 위상변이기는 디아리스터 스위치와 템변환 변압기를 이용한 종전의 위상변이기에 비해 속응성과 제어성이 좋으며, 설비규모의 감소, 설치비용의 절감, 그리고 계통의 용통성을 부여한다. 또한 이렇게 단일 인버터를 사용함으로서 표준화와 모듈화가 가능하여 제작비용의 절감과 정비용이도가 증가된다. 따라서 생산성을 증대하고 리드타임 (lead time)을 감소시켜 비용대효과면에서 전력회사나 장비제작사에 큰 잇점을 준다.

참 고 문 헌

- [1] N. G. Hingorani, "Flexible AC Transmission", IEEE SPECTRUM April, 1993, pp. 40-45.
- [2] L. Gyugyi, "A Unified Power Flow Control Concept for Flexible AC Transmission Systems", 5th IEE International Conference on AC/DC Transmission, Sep. 17-20, 1991.
- [3] L. Gyugyi, et al., "The Unified Power Flow Controller for Independent P and Q Flow Control in Transmission Line", EPRI FACTS Conference, Oct. 5-7, 1994, Baltimore, Maryland.
- [4] P. Wood, et al., "Study of Improved Load Tap-Changing for Transformers and Phase-angle Regulator", EPRI Report EL-6709, Project 2763-1, 1988.
- [5] Westinghouse Science & Technology Center, "Development of Advanced Static Var Compensator", Final Report for Electric Power Research Institute, Nov., 1990.
- [6] C. Schauder, et al., "Development of 100Mvar Static Condenser for Voltage Control of Transmission System", IEEE/PES Summer Meeting, Paper No. 94SM 479-6 PWRD, San Francisco, CA, July 1994.