

# UPFC의 제어기 설계와 시뮬레이션 모델

한 병문\*, 박덕희\*, 박지용\*

\*명지대학교 전기제어계측공학부

## UPFC Controller Design and Simulation Model

Byung-Moon Han\*, Duk-Hee Park\*, Ji-Yong Park\*

\*Myongji University

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

The basic operation was analyzed in detail using equivalent circuits and the design of control system was developed using vector control method. A simulation model with EMTP code was conceived to evaluate the performance of the Unified power Flow Controller. The simulation results show that the developed simulation model is very effective to analyze the dynamic performance of the Unified Power Flow Controller.

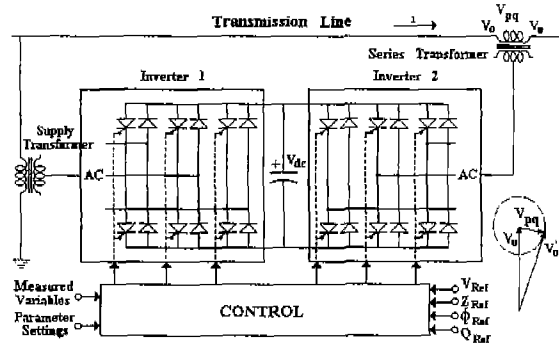


그림 1. UPFC의 시스템 구성

### I. 서론

FACTS 기기로 제안된 UPFC는 송전계통의 단자전압, 선로임피던스, 위상각을 총체적으로 보상하는 기능을 갖는다[1]. UPFC는 기본용량이 100MVA 이상인 대용량의 전압원인버터로 구성되어 있고 스위칭소자로는 GTO를 사용하고 출력전압의 형성은 다중펄스방식을 사용한다. UPFC는 최근 선진국에서 많은 연구가 진행중에 있으며 많은 연구논문이 발표된 바 있다[2,3,4]. 특히 미국은 세계 최초로 160MVA 시스템을 가동시험중에 있으나 제어기에 관한 상세한 내용은 공표되고 있지 않다[5]. 본 연구에서는 UPFC의 동작원리를 체계적으로 분석하고 제어기를 설계하여 제어기의 성능을 EMTP를 이용한 시뮬레이션으로 검증한다.

### II. UPFC의 동작원리

UPFC는 그림 1에 보인바와 같이 2개의 전압원 인버터가 직류 캐패시터를 공유해서 링크되어 있다. 컨버터 하나는 기능상 송전선로에 직렬로 그리고 다른 컨버터는 병렬로 연결되어 있다. 편의상 병렬 컨버터를 컨버터 I 그리고 직렬 컨버터를 컨버터 II로 정의 한다.

컨버터 II는 기본과 주파수가 계통 주파수와 동일하고 직류 링크 전압의 크기를 점호각으로 조정하여 주입전압 크기  $V_{pq}$ 를  $0 < V_{pq} < V_{pqmax}$  범위 내에서 제어하고 인버터 I은 주입전압의 위상각  $\alpha_{pq}$ 를  $0 < \alpha_{pq} < 2\pi$ 인 범위 내에서 조정하여 주입전압  $V_{pq}(t)$ 를 생성한다. 또한 생성된 주입전압으로 결합된 변압기에 의해 단자전압  $V_o(t)$ 에 벡터적으로 합쳐져 출력전압  $V'$ 를 생성한다. 선로에 직렬로 주입되는 컨버터의 출력전압은 원칙적으로 교류전압원으로 동작하고 주입되는 전압원을 통해 흐르는 전류는 송전선로의 전류와 동일 함으로 주입되는 전압원의 VA용량은 전력조류 제어가 이루어지는 동안 선로의 최대전류와 최대주입전압의 곱으로 정해진다.

선로에 병렬로 연결된 인버터 I의 주기능은 전력계통으로 부터 인버터 II에서 필요로 하는 유효전력을 직류 링크를 통해 공급하는 것이다. 그런데 인버터 II는 그 자신이 직렬 전압주입과 동시에 무효전력 소모를 요하는 경우가 있는데 이 경우 UPFC는 무효전력조류도 제어 가능하다. UPFC에서는 두 인버터의 제어 변수인 점호각을 이용하여 인버터 I이 직류 링크단에 공급또는 흡수하는 유효전력과 독립적으로 교류 단자에서 요구되는 무효전력을 공급 또는 흡수 가능하기 때문이다. 결과적으로 인버터 I은 송전선로에 무효전력을 공급하는 STATCON의 기능과 인버터 II의 출력전압의 크기를

제어하는 기능을 모두 갖는다.

그림 2는 UPFC의 전압보상원리와 전력조류를 제어하기 위해 갖는 단자전압 조정기능, 직렬보상과 단자전압 조정기능, 위상각 조정과 단자전압 조정기능을 각각 나타낸 것이다. 또한 UPFC를 적절히 동작 시키면 단자전압 조정, 직렬선로 보상, 그리고 위상각 조정을 동시에 수행 가능하다. 이 모든 기능은 직렬주입 전압의 크기와 위상 변경에 의해 가능한데, 이 때문에 UPFC에서는 정밀제어가 가능한 콘트롤 시스템 구비가 절대적이다. UPFC는 주입되는 전압의 크기를 주어진 범위내에서 변경 가능하고 위상각을 360°내에서 자유로이 변경 가능하면 선전류의 크기와 위상각을 모두 제어하여 송전계통의 유/무효전력의 조류를 독립적으로 제어 가능하다.

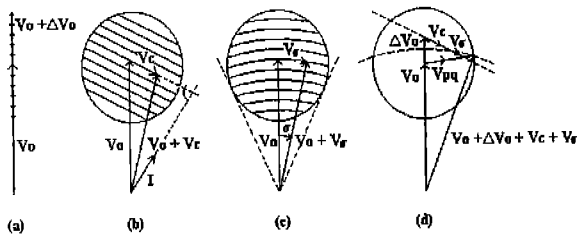


그림 2. UPFC의 보상기능과 벡터 선도  
 (a) 단자전압조정  
 (b) 단자전압과 선로임피던스 조정  
 (c) 단자전압과 위상각 조정  
 (d) 단자전압, 선로임피던스, 위상각 조정

UPFC는 전력 조류제어에 새로운 영역을 확장하는 결과를 가져왔고 이러한 접근은 위상각보상과 직렬 무효전력보상, 그리고 전압조정을 총체적으로 해결할 수 있게 하였다. 또한 전력 계통의 위급상황을 보다 효과적으로 처리하기 위해 하나의 보상모드에서 다른 보상모드로 실시간 천이도 가능하게 되었다. 따라서 UPFC는 전력계통의 확장이나 변화에도 하드웨어 변형없이 쉽게 적용 가능한 동작상의 유연성을 갖고 있다.

UPFC는 전력조류를 제어하면서 동시에 송전에 관련된 파라미터를 제어하고 또한 응답이 신속하여 거의 순시적으로 반응하는 UPFC의 성능은 정상상태에서 효과적인 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 실시간대에서 동적으로 변경할 수 있으며, 보상에 필요한 무효전력을 내부적으로 공급할 수 있기 때문에 송전선로의 어떤 지점에 도 설치할 수 있다는 장점이 있어, 전력계통운용의 개념을 혁신시킬 가능성이 있다.

UPFC는 그림 1에 보인 바와 같이 2개의 인버터가 하나의 직류 캐패시터를 공유한 형태로 구성되어 있어, 직렬 보상에 사용되는 인버터 II가 고장일 경우 이를 격리하여 인버터 I과 직류 캐패시터에 의해 STATCON으로

운용 가능하다. 또한 인버터 I이 고장일 경우 이를 격리하고 직렬연결 인버터와 직류 캐패시터를 이용하여 직렬 무효전력 보상기로 동작 가능하다.

### III. UPFC의 유·무효전력 제어원리

UPFC의 유효 및 무효전력 제어 원리를 세부적으로 설명하기 위해 그림 3과 같은 2개 발전기와 이를 연결하는 송전선로에 삽입된 UPFC의 등가회로와 벡터선도를 보였다. UPFC는 선로에서 발생하는 무효전력을 직렬 보상원리로 공급 또는 흡수하며, 보상되는 유효전력은 송전단 발전기가 공급 또는 흡수한다. 선로에 직렬로 주입되는 전압벡터  $V_{pq}$ 는 크기가  $0 < V_{pq} < 0.5pu$  이고 위상각이  $0 < \rho < 360^\circ$  범위인 값을 갖는다. 주입전압, 송전전압, 수신전압, 그리고 선로전압의 벡터선도는 그림 3과 같다. 직렬주입 전압원에 흐르는 선전류는 유/무효전력의 교환을 야기한다.

직렬주입 전압원은 선로의 무효전력 생성에만 관여하고 선로와 교환하는 유효전력은 송전단 발전기가 공급하는 것으로 가정 할 수 있는데, 이 경우 주입전압원과 송전단 발전기는 유효전력 조류제어를 위해 이상장비로 간주 할 수 있다. 이러한 원리로 2개의 인버터를 직류링크에 의해 연결하고 변압기를 통해 병렬로 송전단에 그리고 직렬로 선로에 연결하여 UPFC를 구성 가능하다.

그림 3에서는 단순한 직렬 삽입이기 때문에 병렬 무효전력 보상이 불가능하나 실제의 UPFC에서는 송전단에 병렬로 연결된 인버터에 의해 송전단의 무효전력을 STATCON 원리로 보상 가능하다. 따라서 UPFC의 병렬인버터는 역률 1이 되도록 운용 가능하고, 그 주 목적은 송전단 발전기에서 직렬 주입에 필요한 유효전력을 전달하는 것이다.

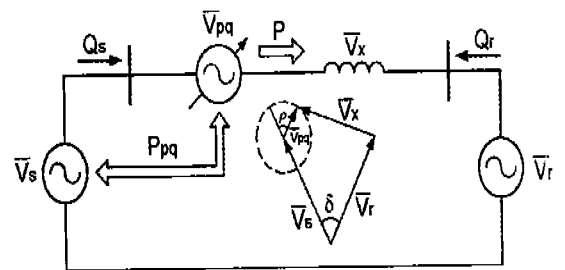


그림 3. UPFC의 단상등가 원리도

그림 3에서 송전선로에 실제 인가되는 전압은  $V_s + V_{pq}$  이고 선로에 흐르는 전류와 선로에 걸리는 전압은 주입 전압  $V_{pq}$ 의 크기와 각도를 변경함으로써 가능하다. 주입전압의 크기와 각도를 변경하면 결과적으로 송전단과 수신단 사이의 위상차 변경이 가능하여 전송되는 유효전력과 무효전력의 제어가 가능하다.

UPFC는 송전단과 수신단 어느 쪽의 무효전력 제어도 가능해야 한다. 물론 한쪽의 무효전력을 최소화 한다고 해서 다른 한쪽의 무효전력이 최소화 되는 것은 아니다. 이것은 선전류를 결정하는 선로전압 벡터가 송전단이나

수전단 전압에 대해 최적의 각도를 이루거나 양단 모두에 대해 최적의 각도를 이루는 것이 아니기 때문이다.

본 연구에서는 수전단의 무효전력 수요를 전송전력의 함수로 맨 먼저 고려한다. 수전단의 무효전력 수요는 부하변동에 따른 선전압 변동과 부하제거시 과전압, 그리고 정상상태 손실 때문에 중요 고려 요소이다.

그림 4의 (a)에서 (d)는 수전단 발전기에 공급되는 무효전력  $Q_r$ 을 전송 유효전력  $P$ 에 대해 주입되는 전압  $V_{pq}$ 의 크기와 위상각의 함수로 나타낸 것이다. 이때 송전단과 수전단의 위상각 차는  $\delta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 로 하였다.  $V_{pq}=0$  이면, 각 그래프의 Q-P면 상에서 불연속선으로 표시되는데, 이 선은 각 그래프의 기준선으로 쓰인다.  $Q_r$ 과  $P$ 의 관계를 나타내는 곡선은 송전각이  $0 < \delta < 90^\circ$ 일 경우에 대해  $P(\delta)=MAX$ 로 하여 불연속선으로 나타내었는데, 이때 UPFC는 무효전력의 제어 없이 최대전송 전력을 공급한다.

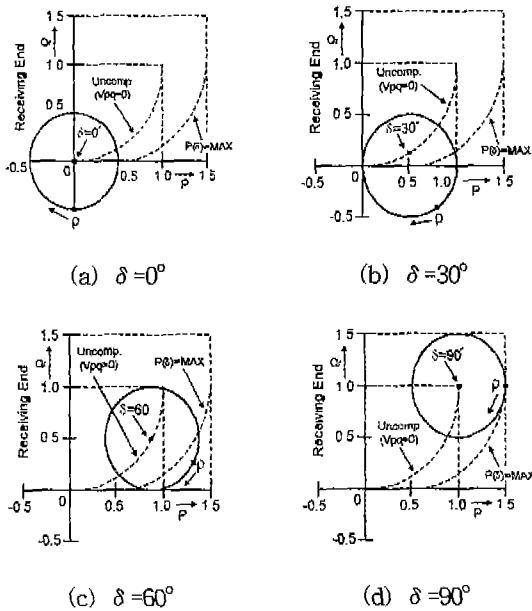


그림 4. 전송전력에 대한 수전단 무효전력

그림 4의 (a)는 전송 위상각이 0 일 경우인데,  $V_{pq}=0$  이면,  $P$ 와  $Q_r$ 은 모두 0으로 시스템은 좌표의 원점에 위치한다. 원점을 중심으로 한 원은 주입전압  $V_{pq}$ 가 최대치  $V_{pqmax}$ 로  $360^\circ$  회전 할 때 유효전력  $P$ 와 수전단 무효전력  $Q_r$ 의 변화를 나타낸다. 이 원내의 모든 영역은 주입전압  $V_{pq}$ 의 크기와 위상을 적절히 제어함으로 얻을 수 있다. 즉 이 원내의 영역은 UPFC를 가지고 달성할 수 있는  $P$ 와  $Q_r$ 의 모든 값을 의미 한다. 예를 들어 UPFC가 0.5pu의 주입전압을 갖는다고 하면, 0.5pu 유효전력의 흐름을 수전단 (또는 송전단) 발전기의 무효전력 수요를 충족시키면서 제어 가능하다. 일반적으로 주어진 임의의 송전각에 대해 전송 유효전력과 수전단의 무효전력 수요는 UPFC에 의해 주입전압의 크기와 위상각으로 결정되는 범위 내에서 완전히 제어 가능하다. 각 영역의 중심은  $V_{pq}=0$ 에서 얻어지는  $Q_r$ - $P$  평면상에 해당

전송각에 의해 정의되는 점으로 결정된다.  $\delta=30^\circ$ 인 경우를 그림 4의 (b)에 보였는데, 마찬가지로 수전단 무효전력의 제어 영역은 원으로 정의되고,  $\delta=60^\circ, \delta=90^\circ$ 인 경우도  $Q_r$ - $P$  평면에서 원으로 정의된다.

#### IV. 제어시스템 설계

이 절에서 소개하는 UPFC에 의한 전력 조류 제어는 설정된 유효전력량과 계통의 상태로부터 얻어지는 다른 기준치를 설정하는 부분과 앞에서 설정된 기준치와 보상할길 원하는 유, 무효전력을 제어하기 위해서 전류를 제어하는 부분으로 구성된다. 이러한 UPFC의 제어는 병렬 인버터와 직렬 인버터에서 독립적인 제어가 이루어진다.

##### (1) 병렬 인버터 제어

UPFC 시스템의 병렬 부분은 유효전력 제어부분과 무효전력 제어부분으로 크게 나누어 생각 할 수 있다. 유효전력 제어부분은 직렬 인버터에서 필요로 하는 유효전력을 알맞게 공급하는 기능과 DC Link Capacitor의 전압을 일정하게 유지시켜주는 기능을 하며 무효전력 제어부분은 입력단 전압의 크기를 무효전력의 교환을 통해서 제어하는 기능을 한다. 병렬 인버터의 전체적인 제어 블록도는 그림 5에서 보여지고 있다.

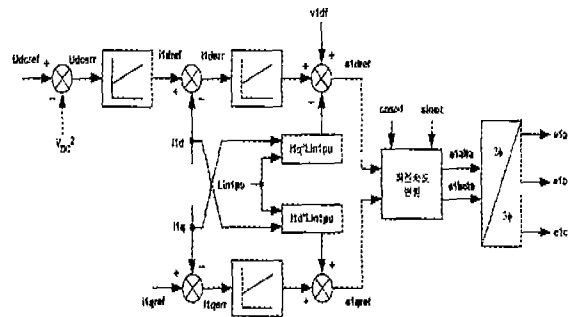


그림 5. 병렬 인버터 제어 블록도

먼저 인버터의 유효전력의 흐름을 제어하기 위해서 전류의 유효분 기준치  $i_{ldref}$ 를 설정하는 과정을 식을 나타내면 식 (1)과 같다.

$$i_{ldref} = \left( K_p + \frac{K_I}{s} \right) (U_{dcref} - V_{dc}^2) \quad (1)$$

식 (1)에서  $U_{dcref}$ 는 DC Link Capacitor의 전압에 대한 기준치로써 기준 전압의 자승형태로 입력이 되며 또한 비교치도 자승의 형태고 들어감을 알 수 있다.

이러한 것은 전압의 관계를 에너지 형태로 취급하기 위한 것이다. 그리고 설정된  $i_{ldref}$ 는 인버터 출력을 발생시키기 위한 기준 신호로 사용된다. 인버터 출력 전압의 유효분( $e_{ldref}$ )은 식 (2)에 의해 나타낼 수 있다.

$$e_{ldref} = (K_p + \frac{K_I}{s})(i_{ldref} - i_{ld}) - i_{lq} * L_{inlpu} + v_{ldf} \quad (2)$$

다음으로 병렬 인버터는 직렬 인버터와 독립적으로 무효전력을 제어할 수 있기 때문에 설정된  $i_{lqref}$ 는 인버터 출력 전압 무효분의 기준 신호( $e_{lqref}$ )를 생성하는데 이용된다.  $e_{lqref}$ 는 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$e_{lqref} = (K_p + \frac{K_I}{s})i_{ld} * L_{inlpu} \quad (3)$$

이렇게 생성된 인버터 출력 전압의 d-q축 성분은 회전좌표 변환 후 다시 3상으로 변환하여 인버터 출력을 내보내는 스위칭 소자의 게이트 신호를 발생하는 기준신호로 사용한다.

## (2) 직렬 인버터 제어

직렬 인버터의 기능은 선로에 흐르는 유효전력과 무효전력량을 설정한 값으로 유지하는 것이다. 제어기는 선로에 직렬로 삽입된 직렬 삽입 변압기를 통해 선로에 직렬로 전압을 인가한다. 이 직렬 주입전압의 크기와 위상에 따라서 유효전력과 무효전력을 조절할 수 있다.

그림 6은 전반적인 직렬 인버터의 제어 블록도를 나타낸다.

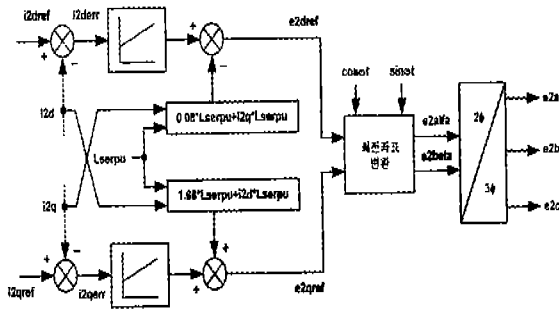


그림 6. 직렬 인버터 제어 블록도

선로의 유효전력과 무효전력을 설정한 값으로 유지하기 위해서 직렬 인버터의 d-q축 전류의 기준치가 설정된 제어기가 구성되었다. 각기 독립적으로 각각 요구되어지는 전류의 유효분( $i_{2dref}$ )과 무효분( $i_{2qref}$ )의 기준치가 PI 제어기를 거쳐서 인버터 출력 전압의 기준치( $e_{2dref}$ ,  $e_{2qref}$ )의 생성에 관여한다. 이 전압의 기준치는 식 (4), (5)에서 보여진다.

$$e_{2dref} = (K_p + \frac{K_I}{s})(i_{2dref} - i_{2d}) - (0.08 * L_{serpu} + i_{2q} * L_{serpu}) \quad (4)$$

$$e_{2qref} = (K_p + \frac{K_I}{s})(i_{2qref} - i_{2q}) + 1.68 * L_{serpu} + i_{2d} * L_{serpu} \quad (5)$$

식 (4), (5)로부터 생성된 전압의 기준치들은 회전좌표 변환과 3상 변환을 통하여 인버터 출력을 내보내는 스위칭 소자의 게이트 신호를 발생하는 기능을 한다. 따라서 직렬 인버터 전류의 유효분과 무효분의 기준치에 의해서 직렬 인버터의 출력 전압을 조정하고 따라서 선로의 유효, 무효전력을 제어할 수 있다.

## (3) PI 제어기 계수 설정

위에서 UPFC의 병렬 인버터와 직렬 인버터의 제어기에 대해서 살펴보았다. 이 제어기에 포함된 PI 제어기의 계수 설정에 대해서 간단한 계수 설정 방법을 알아보면 다음과 같다. 인버터의 전달함수를 간단히 나타내면 식 (6)과 같이 된다.

$$G(s) = \frac{1}{sL + R} \quad (6)$$

여기서, L과 R은 직렬/병렬 인버터의 저항과 인덕턴스이다.

PI 제어기가 식 (7)와 같은 구조이므로 만약 우리가 원하는 bandwidth ( $\omega_c$ )와 phase margin ( $\psi_m$ )를 알고 있다고 가정하면  $T_z$ 와  $T_I$ 를 결정할 수 있다. 먼저  $T_z$ 는 식 (8)에 의해서 계산된다.

$$C(s) = \frac{1 + s T_z}{s T_I} \quad (7)$$

$$T_z = \frac{1}{\omega_c} \tan[\psi_m - \frac{\pi}{2} - \arg(G(j\omega_c))] \quad (8)$$

여기서 “arg”는 원하는 bandwidth에서 전달 함수의 위상 계산이다. 다음으로  $T_I$ 는 식 (9)에서 계산될 수 있다.

$$|C(j\omega_c)G(j\omega_c)| = 1 \quad (9)$$

$$\Rightarrow T_I = \frac{1}{\omega_c} |1 + j\omega_c T_z| |G(j\omega_c)|$$

위의 식 (8), (9)의  $T_z$ ,  $T_I$ 로부터 PI제어기의 두 계수 ( $K_p$ ,  $K_I$ )를 구할 수 있다. 제어기의 계수를 식을 나타내면 다음과 같다.

$$K_p = \frac{T_z}{T_I} = \frac{\tan[\psi_m - \frac{\pi}{2} - \arg(G(j\omega_c))]}{|1 + j\omega_c T_z| |G(j\omega_c)|} \quad (10)$$

$$K_I = \frac{1}{T_I} = \frac{\omega_c}{|1 + j\omega_c T_z| |G(j\omega_c)|} \quad (11)$$

## V. UPFC의 시뮬레이션

UPFC의 동작원리와 제어시스템의 성능을 검증하기

위해 EMTP에 의한 모델링과 시뮬레이션을 실시하였다. 본 연구에서 고려한 UPFC의 단상등가회로 모형을 그림 7에 보였다. 이 그림은 임의의 전력계통에서 2점을 선택하여 한 점은 송전단으로 다른 한 점은 수전단으로 가정하였고, 모든 단위는 pu로 환산되어 있어 송전전압에 관계없이 그 결과를 활용 할 수 있도록 하였다.

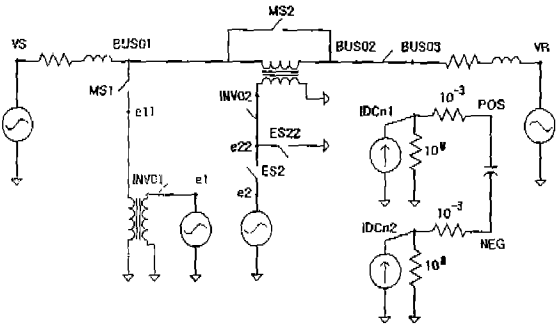


그림 7. UPFC 시뮬레이션 모델

본 시뮬레이션 모델에서는 UPFC에 포함된 2개 인버터를 12-펄스 또는 24펄스로 모델링하는 대신에 2개의 교류전압원이 직류링크에 의해 결합된 구조로 모델링하고, 제어 시스템은 전 절에서 설명한 제어기에 의한 세부모형으로 구성하였다. 본 연구에서 그림 7에 보인 전력계통의 3상세부회로를 근거로 하여 EMTP 코드를 작성하였으며, 특히 제어시스템은 전 절에서 보인 그림 5와 6의 제어 블록선도를 이용하여 TACS를 이용하여 모델링 하였다.

시뮬레이션 내용은 먼저 모든 시뮬레이션 시간 동안에 DC link 전압의 기준치인  $U_{dcref}$ 는 5.29pu를 유지하고 있고  $t=50ms$ 동안 직렬 인버터의 전류 유효분 기준치 ( $i_{2dref}$ )가 정상상태 값인 -1.6484pu를 유지하다가 -1.184pu로 변화한다. 그리고  $t=150ms$ 동안 직렬 인버터의 전류 무효분 기준치 ( $i_{2qref}$ )가 정상상태 값인 -0.081pu를 유지하다가 0.419pu로 변화한다. 병렬 인버터의 전류 무효분 기준치 ( $i_{1qref}$ )는  $t=250ms$ 에서 -1pu(지상)로 설정이 되며  $t=350ms$ 에서 다시 1pu(진상)로 변화한다.

그림 8은 UPFC의 DC link 전압과 수전단의 유, 무효 전력을 나타낸다. 직렬 인버터의 전류 기준치의 변화에 따라서 유, 무효전력이 변화하는 것을 볼 수 있으며 DC link 전압은 항상 일정하게 유지된다. 그림 9는 병렬 인버터의 출력 전압과 전류 그리고 BUS01의 전압이 나타난다. 이 그림에서 병렬 인버터는 직렬 인버터에서 요구되는 유효전력을 공급하고  $i_{1qref}$ 가 변화하는 250ms부터 350ms까지는 전류( $i_{1a}$ )가 버스01( $v_{1a}$ )전압보다 90° 뒤지고 350ms부터는 전류가 전압보다 90° 앞선다. 따라서 직렬 인버터와 독립적으로 무효전력을 선로와 교환을 한다. 그림 10에는 직렬 인버터의 출력전압과 송전선로에 흐르는 전류가 보여진다. 요구되는 기준치의 변화에 따라서 직렬 인버터의 전압이 선로에 주입되어 유, 무효전력의 흐름을 조정하게 된다.

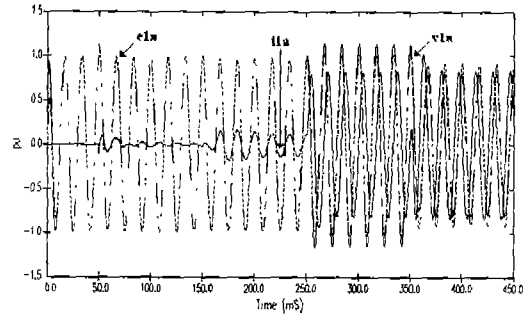


그림 8. DC link 전압과 유, 무효전력

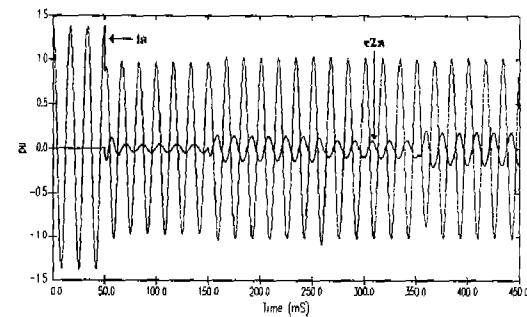


그림 9. 병렬 인버터 전류( $i_{1a}$ ), 전압( $e_{1a}$ )과 BUS01 전압( $v_{1a}$ )

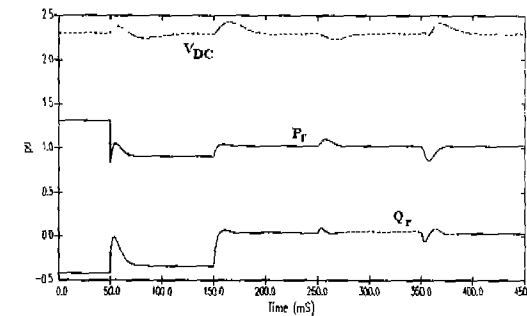


그림 10. 직렬 인버터 출력전압( $e_{2a}$ )와 선로전류( $i_a$ )

## VI. 결 론

교류 송전선로를 통해 전송되는 전력은 선로의 임피던스, 송/수전단 전압의 크기와 위상에 대해 함수관계를 갖는다. 본 논문에서는 위의 세 변수를 총체적으로 신속히 제어하는 UPFC의 동작원리를 등가회로를 이용해 상술하였으며, UPFC의 새로운 제어기를 설계하고 이 제어기의 동작과 전체 시스템의 성능을 평가하기 위해 개발한 EMTP 시뮬레이션 모형에 대해 기술하고 있다.

설계한 UPFC의 제어기는 병렬인버터와 직렬인버터부로 나누어 기술하였고, 각각의 PI계수를 설정하는 방법에 대해 상세히 기술하여 실제시스템을 설계하는데 도움이 되도록 하였다. 또한 고안된 시뮬레이션 모형은 제

여기를 UPFC의 전력회로와 연계하여 성능을 검증하는데 대단히 유용하고, 특히 UPFC와 전력계통의 동특성을 해석하는데 효과적이다. 향후 더욱 심도 있게 연구할 내용은 축소모형을 제작하고 시뮬레이션 결과를 비교 검증하는 내용이다.

### 참 고 문 헌

- [1] L. Gyugyi, et. al., "The Unified Power Flow Controller : A New Approach to Power Transmission Control", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, April 1995.
- [2] M. Iravani, et. al., "Steady-state and Dyanamic Models of Unified Power Flow Controller for Power System Studies", IEEE/PES Winter Meeting, 96WWM257-6 PWRS, Baltimore, Maryland, January, 1996.
- [3] X. Lombard and P. Therond, "Control of Unified Power Flow Controller : comparision of methods on the basis of a detail numerical model", IEEE/PES Summer Meeting, 96SM511-6 PWRS, Denver, Colorado, July, 1996.
- [4] D. Ramey, et. al., "A Study of Equipment Sizes and Constraints for A Unified Power Flow Controller", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 3, July 1997.
- [5] L. Gyugyi, et. al., "Operation of The Unified Power Flow Controller under Practical Constraints", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, April 1998.