1999년도 대한전기학회 정기총회 및 추계학술대회 논문집 1999. 11. 20

송전계통의 인버터식 직.병렬 보상기에 관한 기초연구

한 병 문, 한 후 석
명지대학교 전기공학과, 기초전력연구소

Fundamental study on Inverter-type Series and Shunt Compensator for Transmission System

Byung-Moon Han, Hoo-sek Han
Myong-Ji University, EESRI

Abstract - This paper describes a simulation model and a scaled hardware 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. The design of control system was developed using vector control method. The results of simulation and scaled hardware test show that the developed control system works accurately. And both models are very effective to analyze the dynamic performance of the Unified Power Flow Controller.

1. 서 론

최근 급속히 발전하는 전력전자기술과 고속정밀제어기술을 이용하여 교류송전에 관련된 파라미터들을 신속·정확하게 조절하여 선로의 유·무효전력을 제어하는데 유연성을 갖도록 구성한 교류송전시스템을 유연 송전 시스템(FACTS: Flexible AC Transmission System)이라 한다.

지금까지 인버터식 FACTS 기기로서 STATCOM, SSSC, UPFC가 제안되었다. 이 중 UPFC는 계통의 모든 특성 Parameter를 총체적으로 보상하여 선로로 전송되는 무효전력뿐만 아니라 유효전력도 보상 가능한 FACTS 기기이다.[1] 또한 제어 응동이 신속하여 하나의 보상모드에서 다른 보상모드로의 실시간 천이가 가능하므로 전력계통의 위급상황시에 보다 효과적으로 대처할 수 있다. 따라서 정상상태에서는 효과적으로 전력조류를 조절하고 과도상태에서는 전력계통의 과도안정도와 동적안정도를 개선하는 기능을 가진다. 이러한 점에서 송전계통의 궁극적인 보상장치라 할 수 있다.

UPFC는 100MVA 이상의 대용량의 전압원인버터로 구성되어 있고 스위칭소자로는 GTO를 사용하며 출력전압의 형성은 다중펄스방식을 사용하고 있다. UPFC는 최근 선진국에서 많은 연구가 진행중에 있으며 많은 연구논문이 발표된 바 있다[2,3,4]. 특히 미국은 세계 최초로 160MVA 시스템을 가동시험중에 있다.[5]. 본 연구에서는 이러한 UPFC의 동작원리를 체계적으로 분석하고 제어기를 설계하여 제어기의 성능을 시뮬레이션 및 축소모형에 의한 실험으로 검증한다.

2. 본 론

2. 1 UPFC의 동작원리

UPFC는 그림 1에 보인바와 같이 2개의 전압원인버터가 직류 캐패시터를 공유해서 Link되어 있다. 인버터 하나는 송전선로에 병렬로 그리고 다른 인버터는 직렬로 연결되어 구조상 STATCOM과 SSSC가 직류 캐패시터 링크를 공유하고 있는 것과 같다. 편의상 병렬로 연결된 인버터를 병렬인버터 그리고 직렬로 연결된 인버터를 직렬인버터라고 한다. 병렬인버터의 주기능은 전력계통으로부터 직렬인버터에서 필요로 하는 유효전력을 직류 캐패시터 링크를 통해 공급하는 기능과 이와 독자적으로

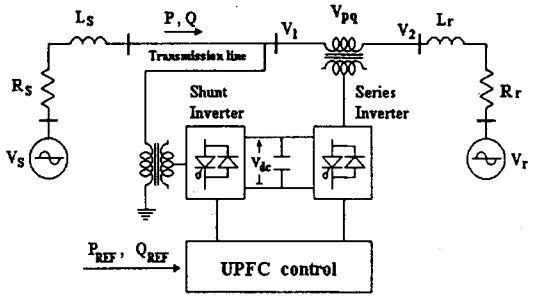


그림 3. UPFC의 시스템 구성
Fig. 1 System configuration of UPFC

송전선로에 무효전력을 공급하여 전압안정도를 향상시키는 STATCOM의 기능을 가지고 있다. 단, 직류 캐패시터 링크전압을 일정하게 유지하여 직렬인버터의 출력전압크기의 변동을 최소화하여야 한다. 직렬인버터의 주기능은 이러한 직류 링크 전압으로 적절한 위상각과 크기를 가진 주입전압을 형성, 선로의 유·무효전력을 동시에 제어하는 것이다. SSSC와 다른 점은 주입전압의 크기를 최대치 범위 안에서 임의대로 조절할 수 있고 유·무효분의 전압을 동시에 주입시킬 수 있다. 따라서, 직렬인버터의 주입전압은 계통과 동일한 주파수이며, 주입전압의 위상각은 인버터의 점호각 α_{pq}에 의해 결정되는데 $0<\alpha_{pq}<2\pi$인 범위 내에서 임의로 조정 가능하다. 한편 주입전압의 크기 V_{pq}는 직류 링크 전압의 크기를 제어하거나 V_{pq}의 최대치 범위 내에서 직렬인버터의 변조율 MI를 제어함으로써 조절된다. 계산된 주입전압 $V_{pq}(t)$는 직렬로 결합된 변압기에 의해 단자전압 $V_1(t)$에 벡터적으로 합해져 출력전압 $V_2(t)$를 생성한다. 그러므로 송전용 STATCOM과 SSSC에서의 제어변수는 무효분을 제어하기 위한 점호각 하나인 반면 UPFC에서는 유·무효분을 제어하기 위해 직·병렬인버터의 점호각 및 MI로서 4개의 변수를 가진다. 또한 유효전력흐름을 제어하기 위해 각 변수의 외란을 고려하므로 복잡하고 보다 정밀한 제어를 필요로 한다.

그림 2는 UPFC의 전압보상원리와 전력조류를 제어하기 위해 갖는 단자전압 조정기능(a), 선로임피던스 조정기능(b), 위상각 조정기능(c), 이 세 파라미터를 동시에 조정하는 기능(d)을 각각 나타낸 것이다. UPFC의 직렬주입전압 V_{pq}는 보상방식에 따라 ΔV_1, V_c, V_δ의 성분으로 구성되며, 주입전압의 크기와 위상을 적절히 변경시킬 수 있으므로 이러한 단자전압, 선로 임피던스, 위상각 조정을 동시에 수행할 수 있다.

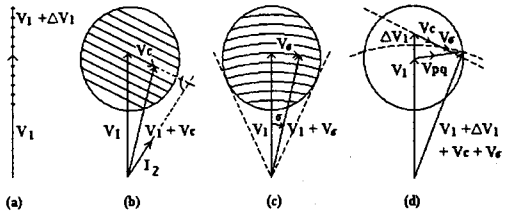


그림 1 UPFC의 보상기능별 벡터선도
Fig. 2 Compensation vector diagram of UPFC

2. 2 UPFC 수리모형

2.2.1 병렬인버터 등가회로

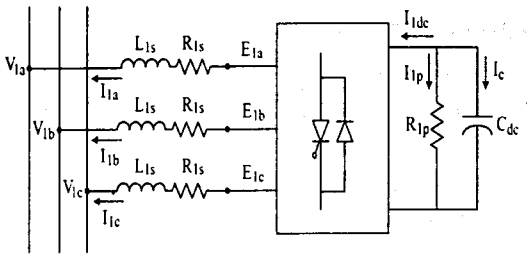


그림 3. 병렬인버터의 3상 등가회로
Fig. 3 3-phase equivalent circuit of shunt inverter

그림 3은 병렬인버터의 3상 등가회로이다. 모선전압은 V_{1a}, V_{1b}, V_{1c}이며, 인버터출력전압은 E_{1a}, E_{1b}, E_{1c}이다. 직렬인덕턴스 L_{1s}는 실제의 전력용 변압기의 누설인덕턴스를 나타내고, 직렬저항 R_{1s}는 인버터와 변압기의 전도손실을 나타낸다. 또한 캐패시터와 병렬로 연결된 저항 R_{1p}는 인버터의 스위칭 손실을 나타낸 것이다.

병렬인버터의 시스템이 3상 평형조건을 만족한다면 모선전압행렬 $V_{1abc}=[V_{1a}\ V_{1b}\ V_{1c}]^t$, 인버터출력전압행렬 $E_{1abc}=[E_{1a}\ E_{1b}\ E_{1c}]^t$, 주입전류행렬 $I_{1abc}=[I_{1a}\ I_{1b}\ I_{1c}]^t$는 다음과 같은 교류측 등가회로 행렬방정식으로 나타낼 수 있다.

$$E_{1abc}=(L_{1s}\frac{d}{dt}+R_{1s})I_{1abc}+V_{1abc} \qquad (1)$$

3상 전력을 효과적으로 제어하기 위해 동기속도로

회전하는 순간전압벡터 $|V_1|$에 d축을 설정하고 이와 수직인 위치에 q축을 설정하여 정지좌표 상에서의 전류의 3상 변수를 이 동기좌표 상에서의 2상 변수로 변환하면 d축 성분 전류 i_d는 순간유효전류와 관계하고 q축 성분전류 i_q는 순간무효전류와 관계된다. 이러한 전류, 전압의 3상 변수를 2상 변수로 회전좌표변환하기 위해서는 Park의 벡터좌표 변환을 수행해야 하는데 필요한 Park의 좌표변환 행렬은 다음과 같다.

$$P=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}\cos(\omega t) & \cos(\omega t-\frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t+\frac{2\pi}{3})\\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t-\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t+\frac{2\pi}{3})\\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}}\end{bmatrix} \quad (2)$$

이러한 Park 변환행렬의 역행렬을 P^{-1}이라고 하면 모선전압, 주입전류, 인버터출력전압행렬은 식 (4)와 같다.

$$P^{-1}=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}\cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & \frac{1}{\sqrt{2}}\\ \cos(\omega t-\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t-\frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}}\\ \cos(\omega t+\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t+\frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}}\end{bmatrix} \quad (3)$$

$$V_{1abc}=P^{-1}V_{1dqo},\ I_{1abc}=P^{-1}I_{1dqo},$$
$$E_{1abc}=P^{-1}E_{1dqo} \quad (4)$$

식 (4)를 식 (1)에 대입하면 다음과 같다.

$$P^{-1}E_{1dqo}=(L_{1s}\frac{d}{dt}+R_{1s})P^{-1}I_{1dqo}+P^{-1}V_{1dqo} \quad (5)$$

식 (5)의 양변에 P를 곱하고 시스템이 중성선이 없는 3상 시스템이므로 영상분을 무시하면 식 (1)의 정지좌표의 3상 변수에 관한 미분방정식이 식 (6)의 회전좌표의 2상 변수 미분방정식으로 변환된다.

$$E_{1dq}=L_{1s}P\frac{d}{dt}P^{-1}I_{1dq}+R_{1s}I_{1dq}+V_{1dq}$$
$$=L_{1s}P(P^{-1}\frac{d}{dt}I_{1dq}+\frac{d}{dt}P^{-1}\cdot I_{1dq})+R_{1s}I_{1dq}+V_{1dq}$$
$$=L_{1s}\frac{d}{dt}I_{1dq}+L_{1s}P\frac{d}{dt}P^{-1}\cdot I_{1dq}+R_{1s}I_{1dq}+V_{1dq} \quad (6)$$

식 (6)에서 $P\frac{d}{dt}P^{-1}$는 식 (7)과 같으므로 간단히 정리하면 식 (8)과 같다.

$$P\frac{d}{dt}P^{-1}=\begin{bmatrix}0 & -w\\ w & 0\end{bmatrix} \quad (7)$$

$$E_{1dq}=L_{1s}\frac{d}{dt}I_{1dq}+\begin{bmatrix}0 & -wL_{1s}\\ wL_{1s} & 0\end{bmatrix}I_{1dq}+R_{1s}I_{1dq}+V_{1dq} \quad (8)$$

또는 각 성분별로 정리하면 다음과 같다.

$$E_{1d}=L_{1s}\frac{d}{dt}I_{1d}-wL_{1s}I_{1q}+R_{1s}I_{1d}+V_{1d} \quad (9)$$

$$E_{1q}=L_{1s}\frac{d}{dt}I_{1q}+wL_{1s}I_{1d}+R_{1s}I_{1q}+V_{1q} \quad (10)$$

병렬인버터가 모선전압 절대치 $|V_1|$를 기준으로 무효전류를 형성해야 하기 때문에 $|V_1|$를 V_{d1}로 설정한다. 따라서, UPFC 병렬인버터 모선전압 $|V_1|$는 식 (11)과 같으므로 위 식을 전류에 관한 식으로 전개하면 식(12), (13)과 같다.

$$V_{1d}=|V_1|,\ V_{1q}=0 \quad (11)$$

$$L_{1s}\frac{d}{dt}I_{1d}=-|V_1|+wL_{1s}I_{1q}-R_{1s}I_{1d}+E_{1d} \quad (12)$$

$$L_{1s}\frac{d}{dt}I_{1q}=-wL_{1s}I_{1d}-R_{1s}I_{1q}+E_{1q} \quad (13)$$

2.2.2 직렬인버터 등가회로

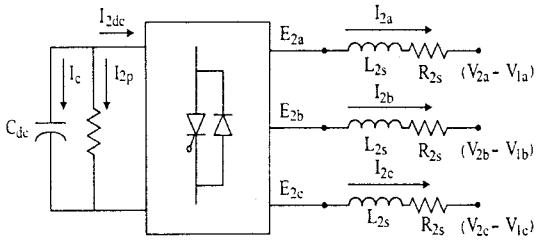


그림 4. 직렬인버터의 3상 등가회로

Fig. 4 3-phase equivalent circuit of series inverter

그림 4는 직렬인버터의 3상 등가회로이다. 그림 1에서 UPFC의 송전단전압행렬을 $V_{1abc}=[V_{1a}\ V_{1b}\ V_{1c}]^t$, 수전단전압행렬을 $V_{2abc}=[V_{2a}\ V_{2b}\ V_{2c}]^t$, 인버터출력전압행렬을 $E_{2abc}=$

$[E_{2a}\ E_{2b}\ E_{2c}]^t$, 선로전류행렬를 $I_{2abc}=[I_{2a}\ I_{2b}\ I_{2c}]^t$ 라 하고 직렬인버터의 시스템이 3상 평형조건을 만족한다면 교류측 등가회로는 다음과 같은행렬방정식으로 나타낼 수 있다.

$$V_{1abc}-V_{2abc}+E_{2abc}=(L_{2s}\frac{d}{dt}+R_{2s})I_{2abc} \quad (14)$$

식 (14)의 $V_{1abc}-V_{2abc}+E_{2abc}$는 선로측에서 본 UPFC의 등가 임피던스에 형성되는 직렬주입전압이므로 다음과 같이 정의한다.

$$V_{1abc}-V_{2abc}+E_{2abc}=V_{PQabc} \quad (15)$$

또한, 식 (14)를 인버터출력전압을 기준으로 정리하면 다음과 같다.

$$E_{2abc}=(L_{2s}\frac{d}{dt}+R_{2s})I_{2abc}-V_{1abc}+V_{2abc} \quad (16)$$

전 절의 병렬인버터 등가회로에서와 같이 정지좌표계의 3상 변수에 관한 미분방정식 (16)을 회전좌표계에서의 2상 변수의 미분방정식으로 정리하면 다음과 같다.

$$E_{2d}=L_{2s}\frac{d}{dt}I_{2d}-wL_{2s}I_{2q}+R_{2s}I_{2d}-V_{1d}+V_{2d} \quad (17)$$

$$E_{2q}=L_{2s}\frac{d}{dt}I_{2q}+wL_{2s}I_{2d}+R_{2s}I_{2q}-V_{1q}+V_{2q} \quad (18)$$

위의 두 식을 전류에 관한 식으로 간단히 전개하면 식(19),(20)과 같다.

$$L_{2s}\frac{d}{dt}I_{2d}=wL_{2s}I_{2q}-R_{2s}I_{2d}+V_{PQd} \quad (19)$$

$$L_{2s}\frac{d}{dt}I_{2q}=-wL_{2s}I_{2d}-R_{2s}I_{2q}+V_{PQq} \quad (20)$$

여기서,

$$V_{PQdq0}=P\,V_{PQabc}=P(V_{1abc}-V_{2abc}+E_{2abc}) \quad (21)$$

2.2.3 DC 캐패시터 링크 등가회로

UPFC의 DC 캐패시터 링크에 대해서도 회로방정식이 유도되는데, 인버터의 교류와 직류 양 단자에서 순간전력은 동일하므로 전력평형방정식이 유도된다. 그림 5는 UPFC의 DC 캐패시터 링크의 등가회로를 나타낸다.

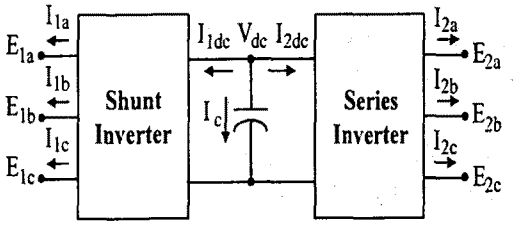


그림 5. UPFC DC 캐패시터 링크 등가회로
Fig. 5 Equivalent circuit of DC rink

병렬인버터의 경우 교류측 E_{1a},E_{1b},E_{1c}는 인버터 출력전압을 나타내고; I_{1a},I_{1b},I_{1c}는 주입전류를 의미한다.

직렬인버터의 경우 교류측 E_{2a},E_{2b},E_{2c}는 인버터 출력전압, I_{2a},I_{2b},I_{2c}는 선로전류를 의미한다. 먼저 병렬인버터의 전력평형방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$V_{dc}I_{1dc}=(E_{1a}I_{1a}+E_{1b}I_{1b}+E_{1c}I_{1c})=P_1 \quad (22)$$

또한 직렬인버터의 전력평형방정식은 다음과 같다.

$$V_{dc}I_{2dc}=(E_{2a}I_{2a}+E_{2b}I_{2b}+E_{2c}I_{2c})=P_2 \quad (23)$$

따라서 UPFC의 직·병렬인버터가 DC 링크를 공유한다면 DC 링크에 흐르는 유효전류 I_c는 다음과 같다.

$$I_c=-(P_1+P_2)/V_{dc} \quad (24)$$

결국 직·병렬인버터가 공유한 DC 링크의 전압은 손실을 무시하면 다음과 같이 유도된다.

$$V_{dc}=\frac{1}{C}\int I_c\,dt \quad (25)$$

2. 3 제어시스템 설계

2.3.1 병렬인버터 제어

UPFC의 병렬인버터은 유효전력제어부와 무효전력제어부로 크게 나누어 생각할 수 있다. 유효전력제어부는 직렬인버터에서 필요로 하는 유효전력을 알맞게 공급하도록 DC 캐패시터 링크의 전압을 일정하게 유지시켜주는 기능을 하며 무효전력제어부는 입력모선전압 V_1의 무효성분에 의한 전압변동을 무효전력의 교환을 통해서 안정화하는 기능을 한다. 그림 6은 병렬인버터의 제어 블록도를 나타낸다.

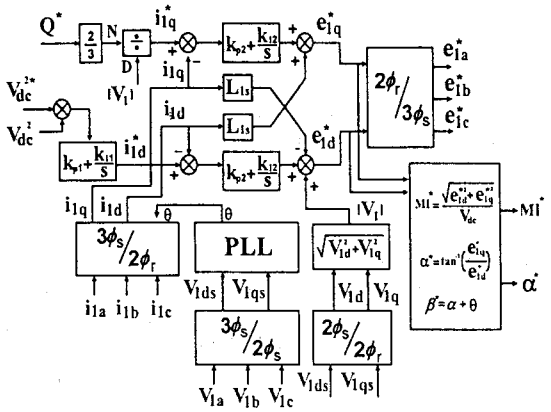


그림 6. 병렬인버터 제어 블록도
Fig. 6 Control block diagram of shunt inverter

먼저 병렬인버터의 유효전력의 흐름을 제어하기 위해서 전류의 유효분 기준치 i_{1d}^*를 설정하는 과정을 식을 나타내면 식 (26)와 같다.

$$i_{1d}^* = (K_{P1} + \frac{K_{I1}}{s})(V_{dc}^{2*} - V_{dc}^2) \qquad (26)$$

식 (26)에서 V_{dc}^*는 DC 캐패시터 링크전압에 대한 기준치로써 기준전압의 자승형태로 입력이 되며 또한 비교치인 V_{dc}도 자승의 형태고 들어감을 알 수 있다. 이러한 것은 전압의 관계를 에너지 형태로 취급하기 위한 것이다. 전 절의 병렬인버터 등가회로 방정식 (12),(13)에서 d축 전류에서는 q축 전류, 모선전압 $|V_1|$, q축 전류에서는 d축 전류가 외란으로 나타난다. 이러한 외란을 보상하고 주입전류 제어기로서 PI 제어기를 이용하여 인버터출력전압 기준치의 유효분 e_{1d}^*와 무효분 e_{1q}^*를 설정하면 식 (27),(28)과 같다. 식 (26)에서 설정된 i_{1d}^*는 PI 제어기를 거쳐 인버터출력전압의 유효분 기준치 e_{1d}^*를 생성시킨다. 또한 직렬인버터와 독립적으로 무효전력을 제어하기 위해 설정된 전류의 무효분 기준치 i_{1q}^*는 PI 제어기를 거쳐 인버터 출력전압 무효분의 기준치 e_{1q}^*를 생성시킨다.

$$e_{1d}^* = (K_{P2} + \frac{K_{I2}}{s})(i_{1d}^* - i_{1d}) - i_{1q} * L_{1s} + |V_1| \qquad (27)$$

$$e_{1q}^* = (K_{P2} + \frac{K_{I2}}{s})(i_{1q}^* - i_{1q}) + i_{1d} * L_{1s} \qquad (28)$$

이렇게 생성된 인버터출력전압의 유·무효분은 제어블록도에 나타낸 바와 같이 2상에서 3상으로 역변환되거나 또는 이들로부터 MI 및 점호각을 계산하여 인버터 스위칭소자의 게이트신호를 발생하는 기준신호로 사용된다.

2.3.2 직렬 인버터 제어

직렬인버터의 기능은 선로에 흐르는 유효전력과 무효전력량을 설정한 값으로 유지하는 것이다. 직렬인버터는 선로에 직렬로 삽입된 변압기를 통해 선로에 전압을 주입한다.

이 주입전압의 크기와 위상에 따라서 선로전류를 조절함으로써 선로의 유효전력과 무효전력을 조절할 수 있다.

그림 7은 직렬인버터의 제어 블록도를 나타낸다.

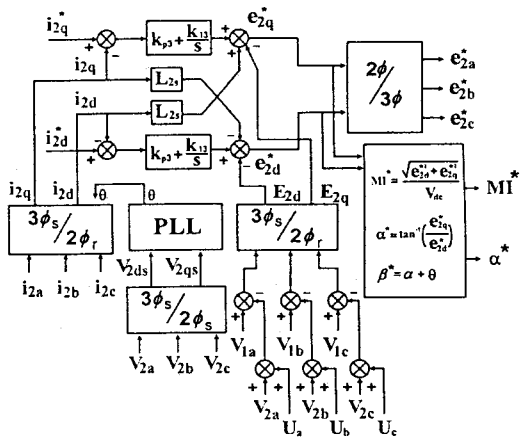


그림 7. 직렬인버터 제어 블록도
Fig. 7 Control block diagram of series inverter

선로의 유효전력과 무효전력을 설정한 값으로 유지하기 위해 직렬인버터의 유·무효전류의 기준치

가 설정된다. 이러한 전류의 유효분 i_{2d}^*와 무효분 i_{2q}^*의 기준치가 PI 전류 제어기를 거쳐서 인버터 출력전압의 유·무효분 기준치 e_{2d}^*, e_{2q}^*의 생성에 관여한다.

또한 전 절의 직렬인버터 등가회로방정식 (19), (20)에서 병렬인버터에서와 마찬가지로 d축 전류에서는 q축 전류와 V_{PQd} , q축 전류에서는 d축 전류와 V_{PQq}가 외란으로 나타나므로 이러한 외란을 보상하고 선로전류 제어기로서 PI 제어기를 이용하여 인버터출력전압 기준치 유효분 e_{2d}^*와 무효분 e_{2q}^*를 설정하면 식 (28), (29)와 같다. 여기서 U_{abc} ($[U_a \ U_b \ U_c]'$)는 직렬인버터의 주입전압 V_{PQabc}에서 저항손실분을 제외한 인덕턴스 L_{2s}에 형성되는 전압으로 등가화한다.

$$e_{2d}^* = \left(K_{3P} + \frac{K_{3I}}{s} \right)(i_{2d}^* - i_{2d}) - L_{2s} * i_{2q} - E_{2d} \quad (28)$$

$$e_{2q}^* = \left(K_{3P} + \frac{K_{3I}}{s} \right)(i_{2q}^* - i_{2q}) + L_{2s} * i_{2d} - E_{2q} \quad (29)$$

여기서, $U_{abc} = V_{PQabc} - I_{2abc} R_{2abc}$ (30)

$$E_{2d,0} = P(V_{1abc} - V_{2abc} - U_{abc}) \quad (31)$$

식 (28), (29)로부터 형성된 인버터출력전압의 기준치들은 병렬인버터와 마찬가지로 스위칭 소자의 게이트신호를 생성하는데 이용된다.

2. 4 MATLAB Simulink 시뮬레이션

그림 8은 UPFC 시뮬레이션 모형이며 이를 기준으로 Simulink 블록도를 구성, 시뮬레이션하였다.

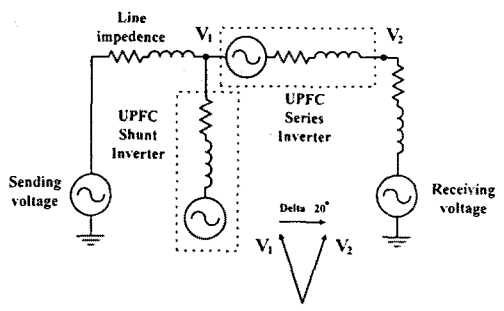


그림 8. UPFC Simulink 시뮬레이션 모형
Fig. 8 Simulink simulation model of UPFC

본 시뮬레이션에서 송전단과 수전단의 위상차는 20° 이며 직·병렬인버터 제어기는 전 절의 그림 7, 6의 제어시스템을 그대로 모델링하였다. 또한 결합변압기의 등가임피던스와 선로임피던스는 UPFC의 용량 및 선로길이를 감안하여 산정, 모델링하였다. 각각의 인버터는 24 펄스 인버터 모델을 사용하는 대신 교류 전압원이 DC link에 의해 결합된 구조로 모델링하였다. PI 제어계수는 직·병렬인버터와 DC 링크의 전달함수를 구하고 적절한 Phase margin과 Bandwith를 정하여 Matlab function으로 구하였다.

제어기를 비롯하여 전체 시스템을 모델링한 후 4개의 변수(병렬인버터 V_{dc}^*, i_{1q}^*, 직렬인버터 i_{2q}^*, i_{2q}^*)를 시간에 따라 동시에 변화시키면서 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 Time은 120(ms)이며 각 변수의 기준치는 표 1과 같다.

표 1. UPFC Simulink 시뮬레이션 조건
Table. 1 Condition of UPFC Simulink simulation

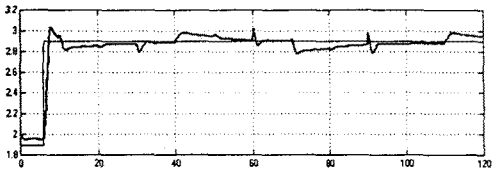
병렬인버터				
시간 (ms)	0 - 6		6 - 120	
V_{dc}^*	1.9 pu		2.9 pu	
시간 (ms)	0 - 30	30 - 60	60 - 90	90 - 120
i_{1q}^*	0 pu	1 pu	-1 pu	1 pu

직렬인버터					
시간 (ms)	0 - 20	20 - 50	50 - 80	80 - 120	
i_{2d}^*	0 pu	1 pu	0 pu	1 pu	
시간 (ms)	0 - 10	10 - 40	40 - 70	70 - 110	110 - 120
i_{2q}^*	-1 pu	1 pu	-1 pu	1 pu	-1 pu

그림 9는 UPFC의 주요 Simulink simulation 결과이다.

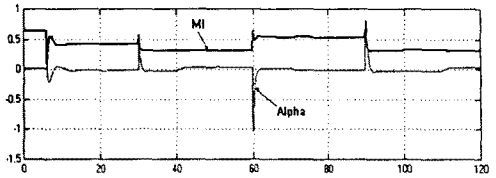
그림 9(a)는 DC 링크 기준치 V_{dc}^*와 DC 링크전압 V_{dc}을 나타낸다. 출력된 DC 링크전압은 병렬인버터의 유효전력제어에 의해 직렬인버터 보상모드에 관계없이 기준치를 추종함을 볼 수 있다.

그림 9(b)는 병렬인버터의 유·무효전류 기준치 i_{1d}^*, i_{1q}^*와 유·무효전류 i_{1d}, i_{1q}를 나타낸다. 유효전류기준치 i_{1d}^*는 V_{dc}^*와 V_{dc}의 error가 PI 제어기를 거친 값이며 무효전류기준치 i_{1q}^*는 무효전력기준치 Q^*가 모선전압절대치로 나누어진 값이다. 결과 파형에서 주입전류의 유·무효성분이 기준치를 실시간 추종하고 있음을 볼 수 있다.

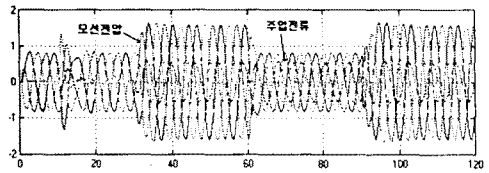


(a) DC 링크 기준치 V_{dc}^* 와 DC 링크 전압 V_{dc}

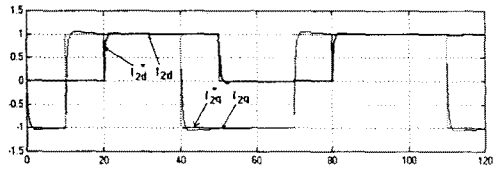
(b) 병렬인버터 I_{1d}^*, I_{1d}, I_{1q}^*, I_{1q}



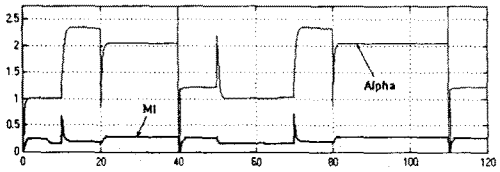
(c) 병렬인버터 MI*, 점호각 α^*



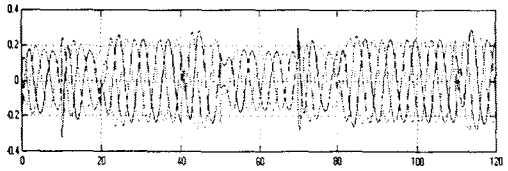
(d) 병렬인버터 주입전류 I_{1abc}, 모선전압 V_{1abc}



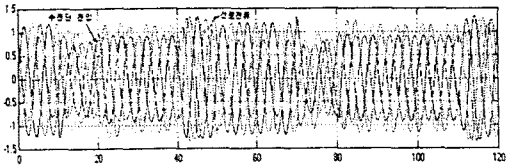
(e) 직렬인버터 I_{2d}^*, I_{2d}, I_{2q}^*, I_{2q}



(f) 직렬인버터 MI*, 점호각 α^*



(g) 직렬인버터 주입전압 V_{PQ}



(h) UPFC 수전단 전압과 선로전류

그림 9. Simulink 시뮬레이션 결과

Fig. 9 Simulation results with Simulink

그림 9(c)는 병렬인버터의 출력전압 기준치 e_{1d}^*, e_{1q}^*에 의해 계산된 인버터출력전압의 MI*와 점호각 α^*을 나타낸다. DC링크에 출입하는 유효전력을 일정하게 제어하기 위해 외란을 보상한 결과로서 무효전력 제어시 MI*와 α^*가 서로 상보관계에 있음을 볼 수 있다.

그림 9(d)는 병렬인버터의 주입전류와 그에 따라 조절되는 모선전압를 나타낸다. 무효전력기준치에 따라 선로의 무효전력을 조절함으로써 모선전압을 조절함을 알 수 있다.

그림 9(e)는 직렬인버터의 유·무효전류 기준치 i_{2d}^*, i_{2q}^*와 유·무효전류 i_{2d}, i_{2q}를 나타낸다. 역시 유·무효전류가 기준치의 변화에 빠른 응답을 보여준다. 그림 9(f)는 직렬인버터의 출력전압기준치 e_{1d}^*, e_{1q}^*에 따른 MI*와 점호각 α^*를 나타낸다. 설계된 제어기가 실시간 보상을 위해 외란을 보상한 결과로서 MI*와 점호각 α^*를 형성하는 것을 볼 수 있다. 그림 9(g)는 이러한 MI*와 α^*에 의해 형성되는 주입전압을 나타낸다. 기준치에 따라 적절한 크기와 위상을 가지고 있다. 그림 9(h)는 직렬인버터의 주입전압에 의해 조절되는 선로전류와 수전단 전압을 보여준다. 결과적으로 선로의 유·무효전력이 조절되는 것을 알 수 있다.

2.5 축소모형 실험

본 연구에서 제작된 UPFC 축소모형의 병렬인버터 및 직렬인버터용량은 3상 220V 1KVA, 3KVA로서 용량면에서 실 시스템과는 차이가 있다. 그림 10은 제작된 축소모형의 전체 등가회로모델을 나타낸다. 인버터의 스위칭 소자로는 각각 6-pack IGBT를 이용하였으며 스위칭패턴은 실 시스템의 다중펄스방식과는 달리 축소모형이므로 3고조파 주입 PWM 방식을 채택하였다. 시스템의 제어장치로

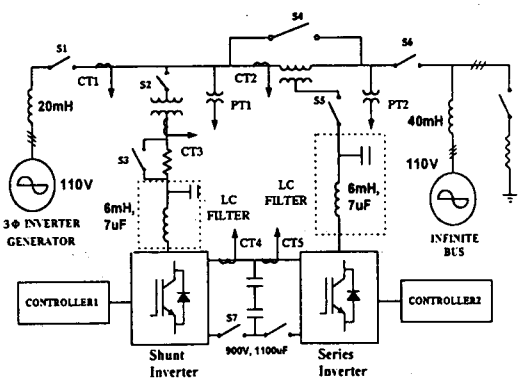


그림 10. UPFC 하드웨어 축소모형

Fig. 10 UPFC scaled hardware system

는 각각의 인버터에 마이크로프로세서 80C196KC

와 EPLD 및 아날로그제어회로를 사용하였다. 표 2는 축소모형의 주요 회로정수이다.

표 2. UPFC 축소모형의 주요 회로정수

Table. 2 Parameter of UPFC scaled model

발전기 출력 전압	110V(L-L)
발전기 출력 주파수	60Hz
스위칭 소자	IGBT module (6-pack)
스위칭 주파수	3060Hz
인버터 출력단 필터	L: 6mH, C: 7uF
결합 변압기	직렬부 3상, Δ-Y, 3KVA, 1:1 병렬부 3상, Y-Y, 1KVA, 2:1
직류 캐패시터	900V, 1100uF
선로 인덕터	전원측: 20mH, 부하측 30mH

그림 10에서 볼 수 있듯이 UPFC 송전단은 인버터 발전기, 수전단은 무한모선으로 한 모의계통을 제작하였고 송전단과 수전단의 위상차는 30° 로 하였다. 이러한 위상차에 의해 발전기가 무한모선으로 전력을 공급하도록 하였으며 송전단과 수전단에 선로 인덕턴스모형을 삽입하고 중간에 UPFC를 투입하여 각각의 인버터의 기준치에 따라 선로의 유·무효전력이 조절되도록 하였다.

표 3. 축소 모형 동작 조건

Table. 3 Operation condition of UPFC scaled model

병렬인버터		
시간 (ms)	0 - 170	170 - 340
V_{dc}^*	80V	80V
i_{1q}^*	0.5 pu	-0.5 pu

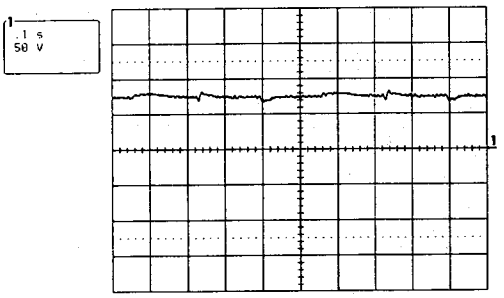
직렬인버터			
시간 (ms)	0 - 170	170 - 340	340 - 510
i_{2d}^*	-1.6 pu	-1.8 pu	0.2 pu
i_{2q}^*	0.1 pu	0.3 pu	-0.4 pu

UPFC 동작 조건은 표 3과 같으며 그림 11은 실험결과이다.

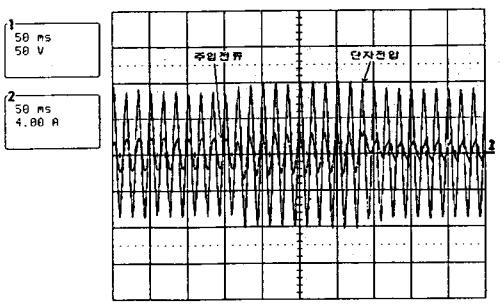
그림 11(a)는 DC 캐패시터 링크전압파형을 나타낸다. 보상모드 전환시를 제외하곤 병렬인버터에 의해 일정하게 유지하는 것을 볼 수 있다.

그림 11(b)는 병렬인버터의 주입전류에 따른 모선전압을 나타낸다. 병렬인버터가 직렬인버터에 유효전력을 공급하면서 독자적으로 모선에 무효전류를 공급하여 모선전압을 조절하고 있음을 보여준다.

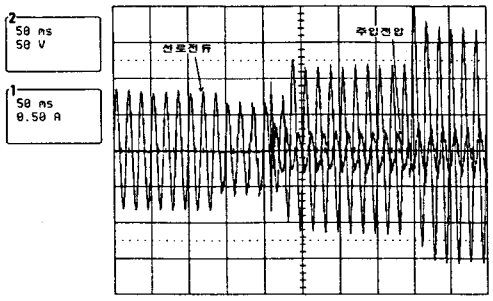
그림 11(c)는 직렬인버터가 투입되는 순간의 형성되는 주입전압과 그에 따른 모의 계통의 선로전류를 나타낸다. 직렬인버터가 기준치에 따라 주입전압의 위상과 크기를 형성하여 선로전류를 조절하는 것을 볼 수 있다. 주입전압의 최대치 범위 안에서 크기제어와 360^0 위상제어가 가능하므로 무효전력뿐만 아니라 유효전력도 보상함을 볼 수 있다.



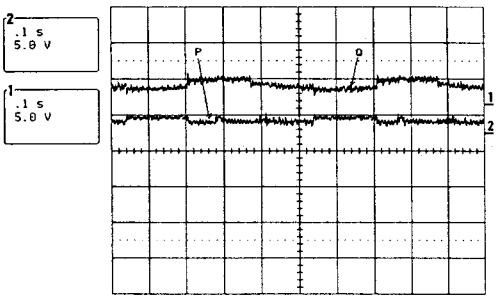
(a) DC 링크 캐패시터 전압



(b) 병렬인버터 주입전류와 모선전압



(c) 직렬인버터 주입전압과 선로전류



(d) 계통의 유효전력과 무효전력의 변화

그림 11. 축소모형 실험결과

Fig. 11 Scaled model experimental results

그림 11(d)는 직렬인버터의 전압주입에 따른 계통의 유효전력 및 무효전력의 변화를 프로세서에 의한 연산을 거쳐 디지털-아날로그컨버터로 출력한 것을 나타낸다. 모의 계통의 유·무효전력이 UPFC의 보상모드에 따라 조절되는 것을 보여준다.

3. 결 론

본 논문에서는 UPFC의 새로운 제어기를 설계하고 이 제어기의 동작과 전체 시스템의 성능을 평가하기 위해 개발한 MATLAB Simulink 시뮬레이션 모형과 하드웨어 축소모형에 대해 기술하고 있다.

설계한 UPFC의 제어기는 병렬인버터와 직렬인버터부로 나누어 기술하였고, 또한 고안된 시뮬레이션 모형은 제어기를 UPFC의 전력회로와 연계하여 성능을 검증하는데 대단히 유용하고, 특히 UPFC와 전력계통의 동특성을 해석하는데 효과적이다. 또한 하드웨어 축소모형은 UPFC의 제어성능과 전력조류제어효과를 확인하는데 효과적이며 대규모 실시스템으로 확장하는 도움이 된다.

앞으로의 과제는 UPFC의 보다 정밀한 제어를 위해 콘트롤러의 향상이 절실하므로 DSP 프로세서로 제어기를 설계하여 동특성을 확인하는 것이다.

4. 참고문헌

[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, 96WM257-6 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.

[6] R. Mihalic, et. al. "Improvement of Transient Stability using Unified Power Flow Controller", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, January 1996.

[7] K. Sen and E. Stacey, "Unified Power Flow Controller: Theory, Modeling, and Application", IEEE PES 98 Winter Meeting, Tampa, Florida, Feb. 1-5, 1998.