

다계 H-브리지 모듈로 구성된 UPFC(Unified Power Flow Compensator)의 실험적 동작분석

論 文

54B-9-4

Experimental Operation Analysis of Unified Power Flow Controller with Cascaded H-Bridge Modules

白承澤[†] · 韓炳文^{*} · 秋鎭夫^{**} · 張秉勳^{***} · 尹鍾秀[§]

(Seung-Tak Baek · Byung-Moon Han · Jin-Boo Choo · Byung-Hoon Chang · Jong-Su Yoon)

Abstract - This paper describes experimental analysis of UPFC, which is composed of cascaded H-bridge modules and single-phase multi-winding transformers for isolation. The operational characteristic was analyzed through experimental works with a scaled model, and simulation results with PSCAD/EMTDC. The UPFC proposed in this paper can be directly connected to the transmission line without series injection transformers. It has flexibility to expand the operation voltage by increasing the number of H-bridge modules. The analysis results can be utilized to design the actual UPFC system applicable for the transmission system.

Key Words : STATCOM (Static Synchronous Compensator), SSSC (Static Synchronous Series Compensator), UPFC (Unified Power Flow Controller), H-브리지모듈, 멀티브리지인버터

1. 서 론

현재 무효전력보상기의 동특성과 유연성을 증가시키기 위해서 강제소호가 가능한 컨버터 구조가 무효전력보상기에 적용되어 오고 있다. FACTS기기의 일반적인 범주 내에서 소자의 수를 감소시키는 컨버터 구조들이 제안되었는데 초기에는 주로 병렬로 연결되는 기기들에 적용되었다. 개발된 컨버터 구조들은 1) 삼상 PWM 전압원 컨버터, 2) 다중펄스 컨버터, 3) 다중모듈 컨버터, 4) 다중레벨 컨버터 등이 있다. 대부분의 컨버터들은 교류계통에 연결하기 위해서 변압기를 사용했지만 다중레벨 컨버터를 직접 선로에 연결하는 방법들이 제안되었다. 이것은 다중레벨 컨버터를 적용함으로써 동작전압을 증가시키는 것이 가능하다.[1,2] 병렬형 무효전력 보상기에 사용된 대부분의 컨버터 구조가 직렬형 보상기에 적용하는 것이 가능하다.

현재 개발된 FACTS 기기의 직렬링크전압은 전력계통의 동작전압보다 훨씬 낮은 전압이다. 이는 전력용 반도체 내압의 한계 때문이다. FACTS 기기의 직렬링크전압을 높이기 위해서 스위칭 소자의 직렬운용방법이 개발되었지만 기술적인 난이도와 최대허용 소자개수에 제약이 있다. 따라서 전력계통과의 원만한 결합을 위해 강압변압기를 사용하는 것이 보편적이다.[3]

강압변압기의 사용은 전압 매칭, 보호 그리고 절연이라는

관점에서는 잇점을 가지고 있지만 변압기의 사용은 시스템 비용을 증가시키고 시스템의 전체적인 효율을 감소시키는 단점이 있다. 또한 UPFC가 선로로 주입하는 전압 V_{pq} 는 실제 직렬측 인버터가 계통에 주입하는 전압으로 볼 수가 없다. 실제 선로에 주입되는 전압은 선로전류에 의한 변압기의 누설리액턴스 X_L 에 의한 전압강하분이 존재하므로 $(V_{pq} - jI_{line}X_L)$ 이 된다. UPFC가 정확한 선로 조류를 제어하기 위해서는 변압기의 누설리액턴스에 의한 주입전압의 강하분까지 고려해야 한다는 문제가 있다.

따라서 소자의 직렬운용을 피하고 시스템의 동작전압을 높이기 위해서 다중레벨 인버터가 제안되었다.[4] 그러나 다중레벨 인버터는 출력전압의 형성이 복잡하고 많은 역결합 다이오드와 플라잉캐패시터를 필요로 한다. 이러한 단점을 보완하고자 Peng은 한 상당 5개의 H-브리지로 구성된 다중브리지 STATCOM을 제안하고 그 동작과 성능을 축소모형을 통한 실험으로 분석하였다.[5] 상업적으로는 H-브리지 인버터로 구성된 75MVar STATCOM이 영국에서 개발되어 National Grid Company에 설치되어 운용되고 있다.[6,7] 한편 송전선로의 임피던스를 제어할 목적으로 H-브리지 인버터로 구성된 SSSC가 저자들을 포함한 몇몇 연구자에 의해 제안된 바 있다.[8,9] 이 시스템은 직렬주입변압기 없이 동작이 가능하고 H-브리지 모듈수를 증가함으로써 동작전압을 유연하게 확장할 수 있다.

본 논문에서 거론하고 있는 UPFC는 단상다중권선변압기로 절연된 H-브리지를 이용한 새로운 구조로 저자들에 의해 처음 제안되어 그 동작특성이 PSCAD/EMTDC에 의해 시뮬레이션을 통해서 확인된 바 있다.[10] 그러나 이 연구에서는 새로 제안하는 UPFC의 동작상 타당성만 확인하였다. 본 논문에서는 실제 시스템의 구현가능성을 검증할 목적으로 제안하는 UPFC와 간단한 송전계통의 축소모형을 제작하여 실험실 내에 설치하여 시험 및 분석한 내용을 기술한다.

[†] 교신저자, 正會員 : 明知大 차세대전력기술연구센터연구원 · 工博
E-mail : baektst@mju.ac.kr

^{*} 正會員 : 明知大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

^{**} 正會員 : 韓電電力研究院 電力系統研究所長 · 工博

^{***} 正會員 : 韓電電力研究院 電力系統研究所 先任研究員 · 工博

[§] 正會員 : 韓電電力研究院 電力系統研究所 先任研究員

接受日字 : 2005年 5月 23日

最終完了 : 2005年 7月 11日

2. 멀티브리지 UPFC

2.1 시스템 구성

본 논문에서 거론하고 있는 UPFC는 그림 1에 나타난 것처럼 각 상마다 여러 쌍의 H-브리지 모듈로 구성되어 있다. 각 쌍은 직류링크 커패시터를 통해서 두개의 H-브리지 모듈이 한 쌍으로 결합된 구조로 되어 있다. 병렬측은 각 H-브리지 모듈을 절연시킬 목적으로 단상다중권선변압기를 통해서 직렬로 연결되어 있다. 또한 직렬측은 각 H-브리지 모듈이 직렬로 연결되어 선로에 직접 결합되어 있다.

제안하는 UPFC는 선로에 사고가 발생시 선로로부터 직렬인버터를 분리하기 위한 바이패스 기능이 있다. 바이패스 기능은 싸이리스터 스위치와 기계적인 차단기의 동작에 의해서 구현이 된다. 선로의 과전류가 싸이리스터 스위치에 의해서 바이패스가 된 후 기계적인 차단기가 동작한다. 하지만 사고전류의 최대치가 직렬인버터 스위치의 최대 전류 용량보다 작을 경우에는 싸이리스터 스위치에 의한 바이패스 기능을 이용하는 것보다 인버터의 제어를 통한 바이패스 기능을 적용할 수 있다. 제안하는 직렬인버터는 교류단에서 단락회로를 만듦으로써 두 가지의 가능한 바이패스 기능을 갖는다. 그 첫 번째는 직렬인버터의 상단 스위치 두 개를 동시에 턴온하는 것이고, 다른 하나는 직렬인버터의 하단 스위치 두 개를 동시에 턴온하는 것이다.

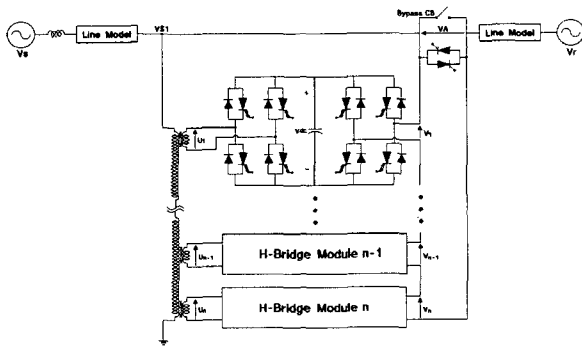
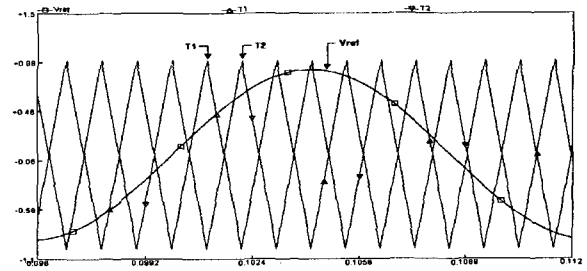


그림 1. 멀티브리지 UPFC의 구성도
Fig. 1. Configuration of the multi-bridge UPFC

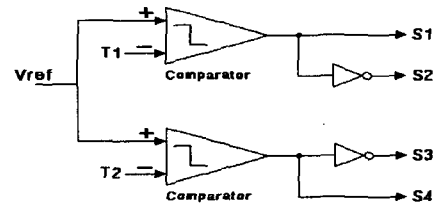
2.2 출력전압 형성

제안하는 UPFC의 인버터 구조는 시뮬레이션과 실험을 목적으로 병렬과 직렬측을 각각 한 상당 세 개의 H-브리지 모듈로 구성된 것으로 가정하였다. 그림 2는 다중브리지 인버터의 PWM 동작시 게이트 펄스 생성 원리를 나타낸 것이다.

그림 2(a)는 각 H-브리지의 게이트 펄스를 생성하기 위한 캐리어와 기준신호를 보여준다. 캐리어 T1과 T2의 주파수는 480[Hz]이며, 서로 180°의 위상차로 생성이 된다. 또한 나머지 두개 H-브리지의 게이트펄스를 생성하기 위해서는 각각 120°의 위상차를 갖는 2세트의 캐리어가 필요하다. 그림 2(b)는 기준신호와 캐리어를 이용하여 게이트펄스를 생성하는 방법을 보여주고 있다. 캐리어 T1과 T2는 기준신호와 함께 입력되어 비교기를 거쳐 4개의 PWM 펄스를 생성하여 각각 H-브리지의 게이트에 공급된다.



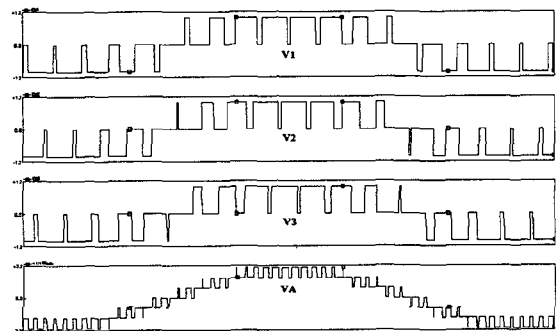
(a) 캐리어(T1, T2)와 기준신호(Vref)



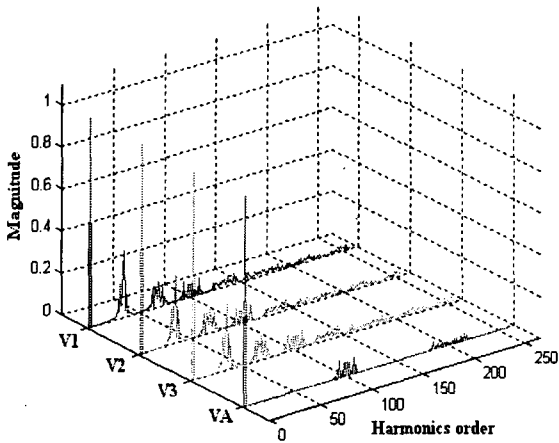
(b) Gate 펄스 생성 방법

그림 2. H-브리지의 PWM 펄스 생성
Fig. 2. Principle of gate pulse generation

그림 3은 한 상의 출력전압 형성과 고조파 분석 결과를 나타낸 것이다. 그림 3(a)는 각 H-브리지의 출력전압 V1, V2, V3 와 이들을 중첩하여 최종적으로 선로에 주입되는 전압 VA를 나타낸 것이다. 앞서 설명한 것처럼 그림 2(a)에 나타난 캐리어는 출력전압 V1을 형성하기 위한 게이트 펄스를 생성하는데 사용이 된다. 또한 서로 120°의 위상차를 가지는 두 쌍의 캐리어는 출력전압 V2와 V3를 형성하기 위한 게이트 펄스를 생성하는데 사용이 된다. 각각의 캐리어 주파수가 480[Hz]이고 총 6개의 캐리어가 존재하므로 약 3[kHz]의 스위칭 효과가 나타난다. 그러므로 H-브리지의 수가 N개라면 출력전압은 N*480[Hz]의 스위칭 효과를 가질 수 있다. 그림 3(b)는 한 개의 인버터 모듈 출력전압과 세 개의 H-브릿지가 직렬로 연결된 출력전압의 스펙트럼 분석 결과를 나타낸 것이다. 한 개 H-브리지모듈의 출력전압에는 많은 수의 고조파들이 포함되어 있지만 세 개 모듈이 직렬로 결합된 출력전압에는 고조파가 적게 포함되어 있다.



(a) 출력전압 파형



(b) 스펙트럼 분석

그림 3. 출력전압과 고조파 분석

Fig. 3. Output voltage build-up and harmonic analysis

3. 직류전압 불평형 제어

3.1 불평형 제어기

멀티브리지 UPFC는 각 상당 세 개의 분리된(독립적인) 직류링크 캐패시터를 가지고 있다. 각 캐패시터는 H-브리지 모듈을 통해서 서로 절연이 되어있기 때문에 불평형 전압이 발생할 수 있다. 불균등한 캐패시터의 누설전류, 컨버터의 데드 타임, 과도와 외란시의 비대칭 동작 등과 같은 다양한 원인에 의해 직류링크 캐패시터 전압이 불균등하게 되고 이에 따라 출력 전압에 높은 수준의 고조파가 함유된다. 따라서 직류링크 캐패시터 전압을 균등하게 유지함으로써 컨버터 출력전압의 고조파 레벨을 감소시킬 수 있다. 그림 4는 직류 캐패시터의 전압불평형 제어기의 구조를 나타낸 것이다. 또한 각 상이 서로 캐패시터를 공유하고 있지 않기 때문에 각 상 분리 제어를 수행한다. 제어기의 동작은 병렬컨버터가 연결되어 있는 모션단의 전압을 측정하여 위상고정 루프(PLL)를 거쳐 선로 전압에 동기된 θ 를 발생하고 이 θ 는 각 상에 맞게 재조정된다.

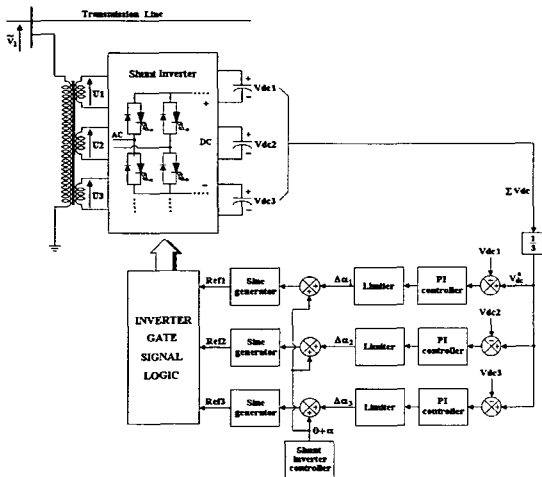


그림 4. 직류전압 불평형 제어기

Fig. 4. DC voltage unbalance controller

한 상의 직류 캐패시터 전압을 측정하여 그 값을 직류 캐패시터의 수인 3으로 나누어 평균값을 구한다. 평균값은 각 직류 캐패시터의 전압과 비교되고 PI제어기를 거친 후 위상각 보정 $\Delta\alpha$ 가 구해진다. 위상각 보정 $\Delta\alpha$ 는 병렬컨버터 제어기의 출력값인 $(\theta+\alpha)$ 와 더해지고 정현파 발생기를 통해 기준신호 Ref1, Ref2, Ref3를 생성한다. 다른 상의 직류 캐패시터 불평형 제어기도 동일한 과정을 반복 수행한다.

3.2 제어기 성능평가

직류전압 불평형 제어기의 타당성을 검증하기 위해서 시뮬레이션과 실험을 실시한 결과를 그림 5에 나타내었다. 시뮬레이션에서 전압 불평형 제어기를 검증하기 위해서 하나의 직류 캐패시터단에 임의로 저항을 연결하여 직류전압 불평형을 모의하였다. 병렬컨버터는 초기에 자동전압제어를 수행하다가 전압불평형이 발생한 후 0.1초 뒤에 전압불평형 제어기를 투입하였다. 시뮬레이션 시나리오를 표 1에 나타내었다.

표 1. 직류전압 불평형 제어 시뮬레이션 시나리오

Table 1. Simulation scenario

시간 [sec]	0 ~ 0.7	0.7 ~ 0.8	0.8 ~ 1.1
인버터제어	자동전압제어	직류전압 불평형 발생	전압불평형제어기 투입

그림 5(a)는 시뮬레이션 시나리오에 의해서 수행한 직류전압 불평형 제어를 나타낸 것이다. 직류전압 불평형이 발생되면 세 개의 직류전압이 불균등하게 나타남을 알 수가 있다. 하지만 직류전압 불평형 제어기가 투입되면 세 개의 직류전압이 직류전압 기준값(V_{dc}^*)을 추종하면서 평형을 이루고 있음을 확인할 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 전압 불평형이 발생되면 게이트 신호를 발생하는 기준전압 신호의 위상이 각각 달라지게 된다. 직류전압 기준값(V_{dc}^*)과 비교했을 때 불평형이 심한 직류전압 캐패시터를 가지고 있는 단상 풀브리지 컨버터의 기준 전압 신호의 위상이 다른 신호보다 훨씬 더 변화됨을 알 수가 있다. 세 개의 직류전압이 제어기 동작에 의해서 평형을 이루게 되면 세 개의 기준전압 신호 역시 위상이 동상이 된다. 그림 5(b)는 직류전압 불평형 제어를 실험으로 확인한 결과를 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과와 동일하게 제어가 잘 수행됨을 알 수가 있다. 따라서 그림 5의 시뮬레이션과 실험 결과를 통해서 직류전압 불평형제어기의 성능을 검증하였다.

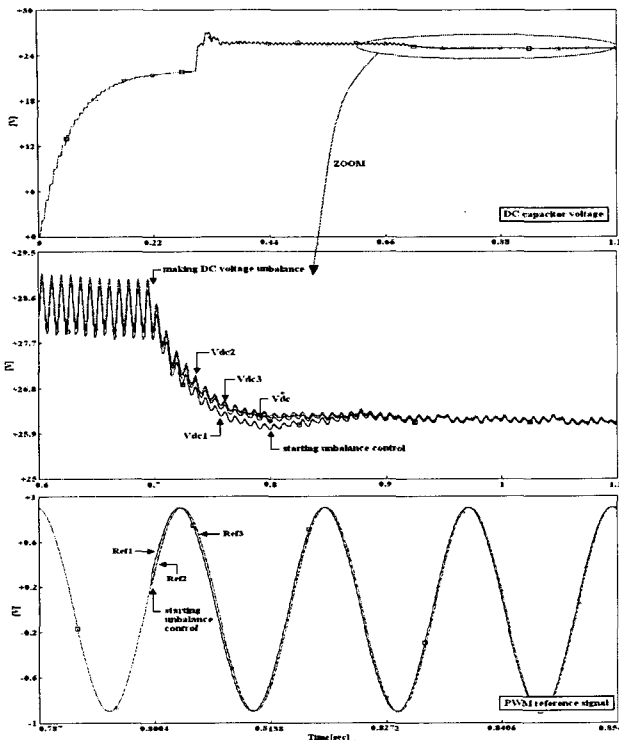
4. UPFC 기동 및 보호제어

UPFC 시스템이 안정적인 제어를 수행하고 과전압 및 과전류로부터 시스템을 보호할 수 있는 제어기를 설계하였다.

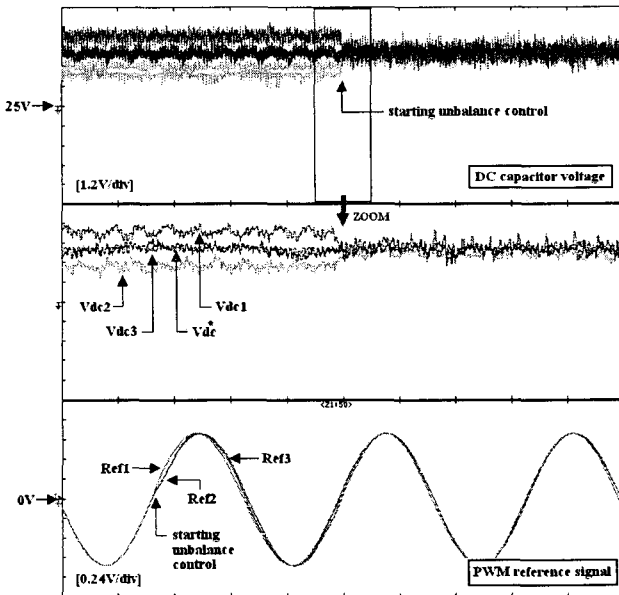
시스템의 보호제어기는 기동시퀀스, 병렬측 인버터 보호제어기, 직렬측 인버터 보호제어기로 구성되어 있다.

4.1 기동시퀀스

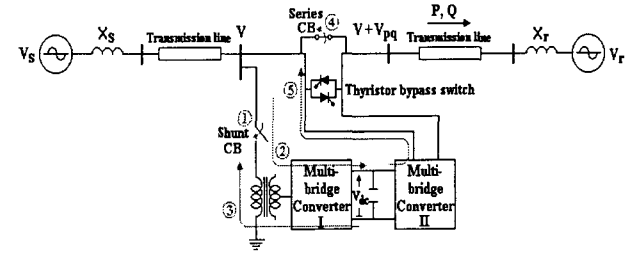
시스템의 초기 기동시에는 그림 6과 같은 기동 시퀀스에 의해 동작된다.



(a) 시뮬레이션 결과



(b) 기동시퀀스 순서도



(a) 기동시퀀스 동작 개념도

(b) 축소모형 실험 결과

그림 5. 직류전압불평형 제어 성능
Fig. 5. Performance analysis of DC voltage unbalance controller

여기서 병렬측 차단기(CB, 그림 10의 SHBRK)를 닫은 후 바로 인버터의 게이팅을 시작하는 것이 아니라 DC 충전을 위해서 0.075s 후에 게이팅을 시작한다. 직렬인버터는 병렬 인버터가 정상적인 동작을 시작할 때 인버터가 동작을 하고 있는 상태지만 선로에는 바로 투입을 하지 않는다. 그러다가 0.1s 후에 직렬측 차단기(CB, 그림 10의 SRBRK)를 열어 선로에 전압을 주입하기 시작한다.

그림 6. UPFC 시스템의 기동시퀀스
Fig. 6. Start-up concept and sequence

4.2 과전류보호제어

그림 7은 과전류 발생시의 보호제어 시퀀스를 나타내고 있다. 병렬측 보호제어를 살펴보면 과전류가 발생시 즉시 차단기를 트립시키지 않고, 우선 게이팅을 멈춘다. 10ms 동안 게이팅을 멈춘 후 다시 게이팅을 시작한다. 여전히 과전류 상태이면 다시 게이팅을 10ms 동안 멈춘다. 이 과정을 8회 반복하여도 여전히 과전류가 없어지지 않을 때 비로소 차단기를 트립시킨다.

직렬측 보호제어를 살펴보면 선로전류를 감시하고 있다가 사고가 발생하여 과전류가 검출이 되면 직렬컨버터의 게이팅을 중지시키고 바이패스(bypass) 스위치를 턴온 시킨다. 그 다음 0.1s 후에 직렬측 차단기를 닫음으로써 직렬인버터를 선로와 격리시킨다. 사고가 제거되고 병렬인버터가 정상적인 동작을 수행하면 보호제어기의 수동복귀 스위치를 눌러서 수동으로 직렬인버터를 복구시킨다.

스위치를 누르면 바이패스 스위치가 턴오프가 되고 게이팅이 다시 시작된다. 0.1s 후에는 직렬측 차단기가 열리면서 직렬컨버터가 선로에 전압을 주입하기 시작한다.

4.3 저전압보호제어

저전압 보호제어기는 병렬측 인버터가 자동전압제어를 수행하므로 모션단 전압이 일정 값 이하로 떨어졌을 경우 인버터를 보호한다. 모션단 전압이 0.3 pu보다 작은 경우는 그림 8과 같이 단순히 게이팅을 멈춘 후 전압이 회복되기를 기다린다. 전압이 회복되면 다시 게이팅을 시작한다.

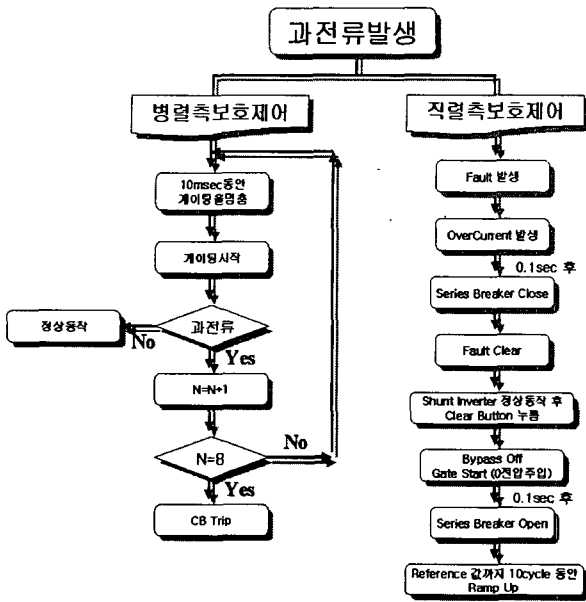


그림 7. 과전류 보호제어 시퀀스
Fig. 7. Over-current protection sequence

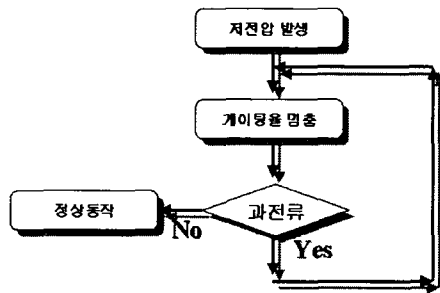


그림 8. 저전압 보호제어 시퀀스
Fig. 8. Low-voltage protection sequence

UPFC 시스템의 보호제어시퀀스에 의해 설계된 제어기의 동작을 그림 9에 나타내었다.

- ① M1-M2 : 병렬측 차단기를 닫은 후 0.075s 후에 병렬과 직렬측 인버터가 게이팅을 시작한다.
- ② M2-M3 : 병렬인버터는 정상동작을 하고, 인버터 게이팅 시작 0.1s 후에 직렬측 차단기를 열어 직렬인버터를 투입한다.
- ③ M4-M5 : 모션전압을 0.3 p.u. 이하로 감소시켰을 경우 저전압보호제어기에 의해서 인버터 게이팅이 멈추고 모션단 전압이 정상적으로 올라가면 인버터는 정상 동작한다.
- ④ M6-M7 : 선로에 과전류가 발생했을 경우 직렬인버터는 동작을 멈추고 0.1s 후에 직렬측 차단기가 닫히면서 직렬인버터를 선로에서 분리한다.
- ⑤ M8-M9 : 사고가 제거되면 수동으로 직렬인버터를 재동작시키고 0.1s 후에 직렬측 차단기를 열어 직렬인버터를 선로에 투입한다.
- ⑥ M10-M11 : 병렬측 인버터에서 과전류가 검출되면 보호제어기 시퀀스에 의해 10ms 간격으로 8번에 걸쳐 사고전류를 판단해서 마지막까지 사고전류가 검출이 되면 UPFC 시스템 전체를 트립시킨다.

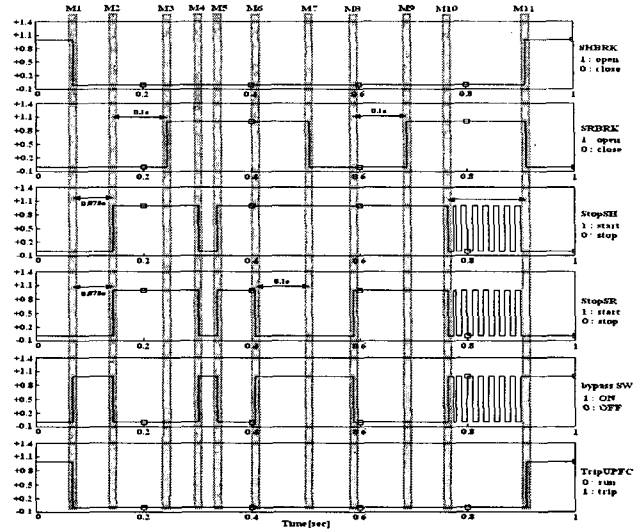


그림 9. UPFC 시스템의 보호제어기 동작
Fig. 9. Timing diagram of start-up and protection sequence

5. UPFC 실험장치 구현

그림 10은 멀티브리지 UPFC의 축소모형과 이를 시험하기 위한 간단한 모의송전계통의 축소모형의 실험장치 구성도를 나타낸 것이다. 실험에서 V_S 와 V_R 를 송전선에서의 송전단과 수신단으로 가정하였다. 축소모형으로 제작된 UPFC는 V_S 와 V_R 간의 유효전력과 무효전력을 제어하는 것이다. 인덕터 L_1 과 L_2 는 송전선로에 존재하는 인덕턴스를 표현한 것이다. 직렬과 병렬인버터는 단상 풀브리지 인버터 3대를 각각 직렬로 연결한 구조로 되어 있고 스위칭 주파수는 480 Hz로 설정하였다. 병렬인버터를 계통과 연계하기 위해서 단상 다중권선 변압기를 사용하였고, 직렬인버터는 변압기 없이 직접 계통에 연결되어 있다.

축소모형으로 제작한 모의 계통은 참고문헌 [9]에서 제안한 위상변이 변압기를 사용하여 구성하였다. 그림 10에 나타낸 위상변이 변압기(Phase-shifting transformer)는 직렬 투입용 단상 변압기 3대와 3상 슬라이드 조정기로 구성되어 있다. 이 위상변이 변압기는 송전단과 수신단과의 위상차를 발생시키기 위해서 사용하였다. 위상변이 변압기는 90° 지상 또는 90° 진상 전압을 계통에 투입함으로써 송전단 전압 V_S 전압의 위상을 조절하는 것이 가능하다. 따라서 축소모형으로 제작된 모의계통의 송전단과 수신단의 위상차는 15° 로 설정하였다. 실험실의 전원용량으로 제작된 멀티브리지 UPFC의 축소모형을 그림 11에 나타내었고 실험에 사용된 회로정수는 표 2와 같다.

표 2. UPFC 시스템 회로정수

Table 2. Experimental parameter

시스템 용량	2kVA	
송·수전단 전압(V_{LL})	174V, 60Hz	
송·수전단 위상각	15°	
선로인덕턴스	L_1	28mH
	L_2	15mH
직류 캐패시터	1000 μ F	

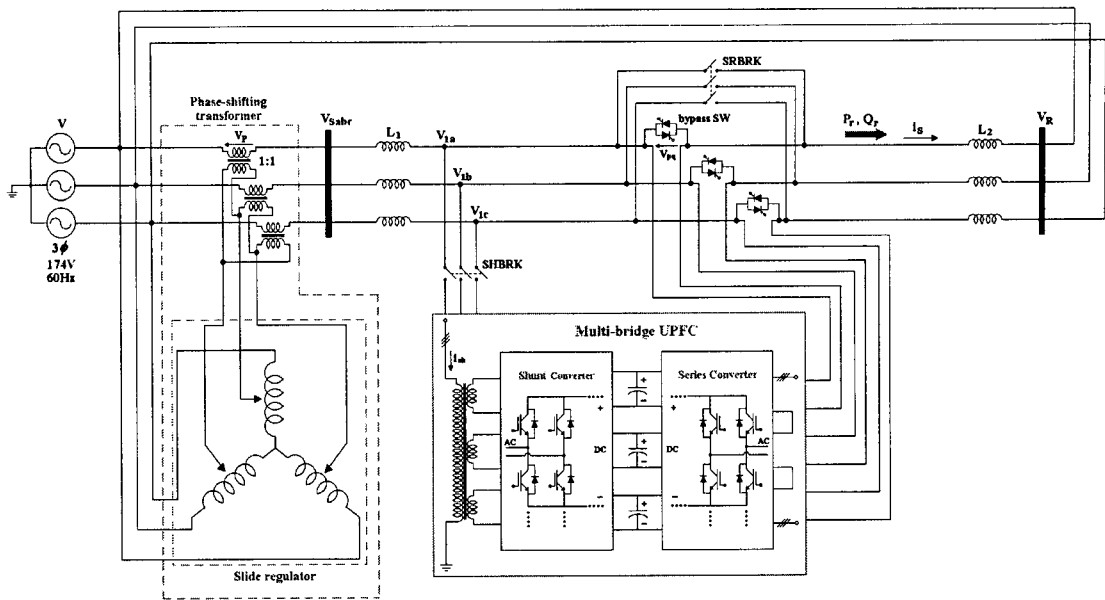


그림 10. UPFC 실험장치 구성도
Fig. 10. Circuit diagram of experimental set-up

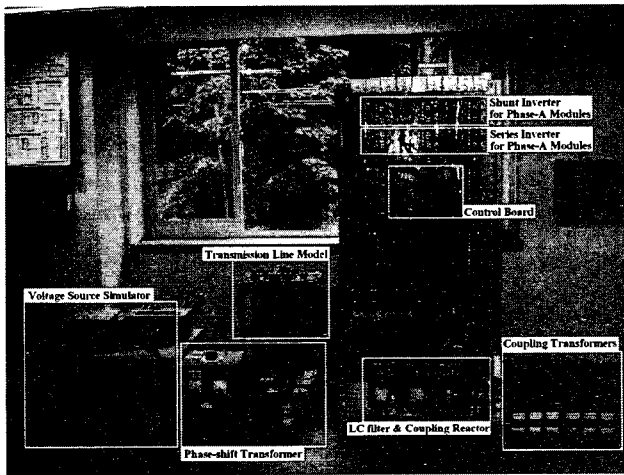


그림 11. 멀티브리지 UPFC 축소모형
Fig. 11. Scaled hardware of experimental set-up

6. UPFC 동작분석

제안하는 UPFC의 성능을 검증하기 위해서 동일한 구조의 시스템으로 시뮬레이션과 실험을 실시하였다. UPFC 제어는 일반적으로 병렬측은 모션전압 자동제어, 직렬측은 자동조류제어를 수행한다. 따라서 시뮬레이션 및 실험도 이 두 가지 제어의 성능을 검증하였다.

UPFC 제어 블록도를 그림 12에 나타내었다. 자동전압 제어모드에서 모션단 전압 기준값(V_1^*)을 송전선로 전압인 174V로 설정하였고, 자동조류제어모드에서는 선로전류의 유효분 기준값(i_{sd}^*)과 무효분 기준값(i_{sq}^*)에 의해서 적절한 크기와 위상을 갖는 전압을 선로에 직렬로 주입함으로써 선로의 유효전력과 무효전력을 제어할 수 있으므로 선로전류의 유·무효전류 기준값을 변경하면서 조류제어의 성능을 검증하였다.

시뮬레이션에 사용된 시나리오를 표 3에 나타내었다. 시뮬레이션 결과를 실험으로 검증하기 위해서 동일한 시나리오로 실험을 실시하였다.

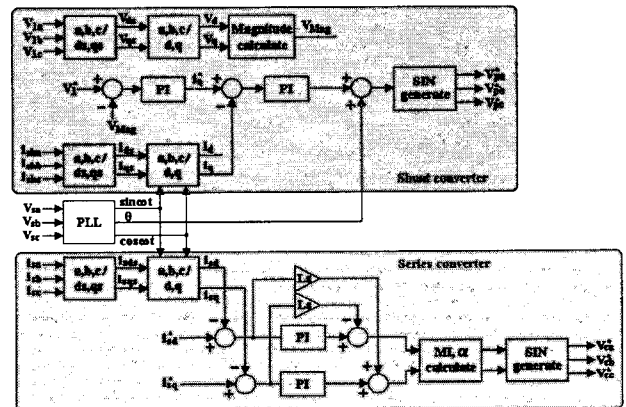


그림 12. UPFC 축소모형의 제어 블록도
Fig. 12. Control diagram for shunt and series converter

표 3. UPFC 시나리오

Table 3. UPFC scenario

모드	시간[sec]	0~0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0
유효전력 제어	V_1^*	174V	174V	174V	174V
	i_{sd}^*	0A	2A	4A	6A
	i_{sq}^*	0A	0A	0A	0A
무효전력 제어	V_1^*	174V	174V	174V	174V
	i_{sd}^*	2A	2A	2A	2A
	i_{sq}^*	0A	-2A	2A	4A

그림 13은 표 3의 송전선로 유효전력제어 시나리오로 시뮬레이션과 실험을 실시한 결과를 나타낸 것이다.

시간에 따라 선로 유효전류 기준값(i_{sd}^*)을 변경함으로써

UPFC 조류제어의 성능을 확인하였다. 선로 유효전류 기준값(i_{sd}^*)에 따라 직렬인버터가 송전선로에 적절한 크기와 위상을 갖는 전압을 주입함으로써 선로 유효전력 P_r 을 제어하고 있음을 알 수 있다. 시뮬레이션 및 실험 초기에 유효전류 기준값을 0A로 설정하였기 때문에 UPFC의 직렬인버터는 선로전압에 대해서 진상인 0.27 p.u.의 전압을 주입하고 병렬인버터는 지상동작을 하면서 모선전압을 1 p.u.로 유지시킨다. 유효전류 기준값을 2A 증가시키면 직렬인버터는 선로전압에 대해서 진상인 0.16 p.u.의 전압을 주입하고 병렬인버터는 진상모드로 동작한다. 유효전력 기준값을 4A로 증가시키면 직렬인버터는 선로전압에 대해서 지상인 0.14 p.u.의 전압을 주입하고 병렬인버터는 진상모드로 동작한다. 유효전력 기준값을 6A로 증가시키면 직렬인버터는 선로전압에 대해서 지상인 0.33 p.u.의 전압을 주입하고 병렬인버터는 진상모드로 동작한다. 따라서 UPFC 제어에 의해서 선로로 전송되는 유효전력을 조절할 수가 있음을 시뮬레이션과 실험결과를 통해서 확인할 수가 있다.

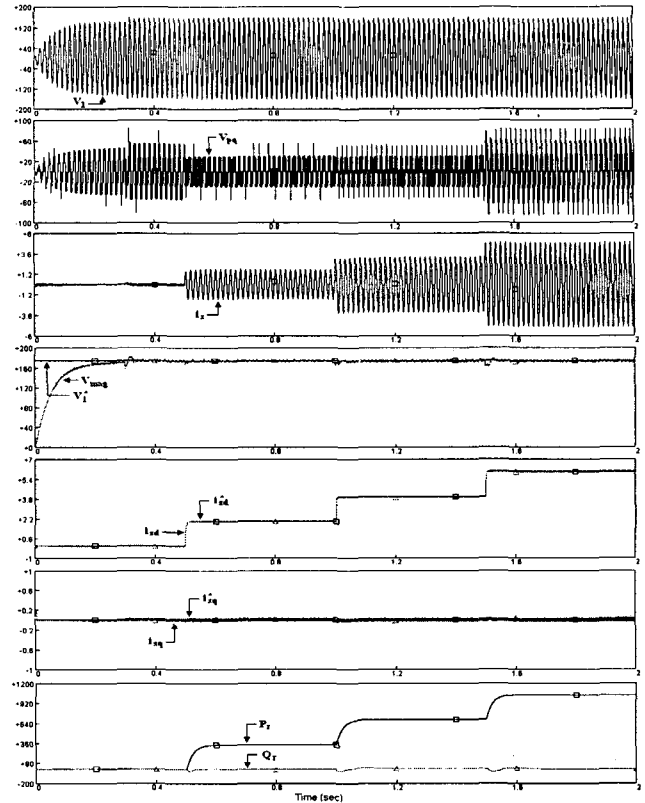
그림 14는 표 3의 송전선로 무효전력제어 시나리오로 시뮬레이션과 실험 결과를 나타낸 것이다.

유효전류 기준값(i_{sd}^*)은 2A로 고정된 상태에서 무효전력 기준값(i_{sq}^*)을 스텝으로 가변하였다. 무효전류 기준값(i_{sq}^*)을 선로전류의 무효분(i_{sq})이 잘 추종하고 있고, 또한 유효전류 기준값은 고정시킨 상태에서 무효전력 기준값만을 변경하였으므로 유효전류 기준값(i_{sd}^*)과 선로전류 유효분(i_{sd})이 거의 변화가 없이 제어가 되고 있음을 확인할 수가 있다. 즉, UPFC의 자동조류제어는 선로의 유효전력과 무효전력을 각각 독립적으로 제어할 수가 있으므로 선로의 무효전력이 무효전류 기준값에 의해서 증감될 때 선로의 유효전력은 일정하게 제어가 되고 있다. 또한 병렬인버터의 자동전압제어에 의해서 모선전압이 일정하게 유지되고 있음을 확인할 수가 있다. 따라서 UPFC가 선로로 전송되는 무효전력을 조절할 수가 있음을 그림 14의 시뮬레이션과 실험결과를 통해서 검증하였다.

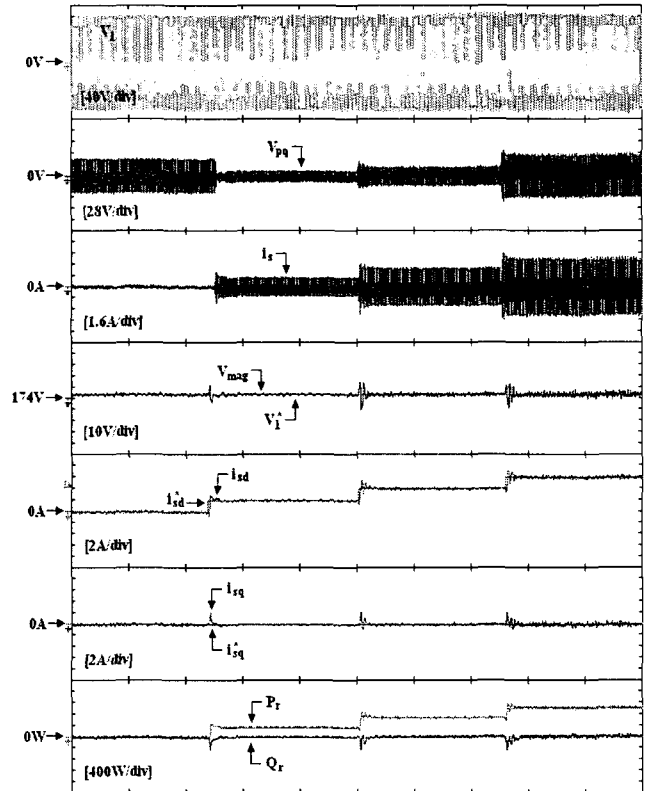
7. 결 론

본 논문은 H-브리지모듈을 이용하여 직렬주입변압기가 없는 새로운 구조를 갖는 UPFC의 동작을 실험실에서 축소 모형으로 분석한 내용에 대해 기술하였다. 축소모형에 의한 실험결과를 PSCAD/EMTDC에 의한 시뮬레이션 결과와 비교 분석하여 그 타당성을 확인하여 향후 실규모 시스템 개발에 엔지니어링 자료로 활용가능 하도록 하였다. 실험장치에서 송전단과 수신단의 위상차는 위상변이변압기를 이용하여 구성하였고 선로는 리액터로 구성하였다. 제안하는 시스템은 직렬 주입변압기 없이 선로에 직접 연결이 가능하다. 또한 인버터의 브리지 수를 증가시킴으로써 유연하게 동작 전압을 높일 수 있다.

본 논문의 기여는 직렬주입변압기가 없는 새로운 구조의 UPFC를 제안하는 것이다. 기존 UPFC에 있어 직렬주입변압기는 낮은 포화특성과 누설임피던스를 갖도록 설계해야 하기 때문에 외형과 손실이 크고 가격이 높은 단점을 갖는다.



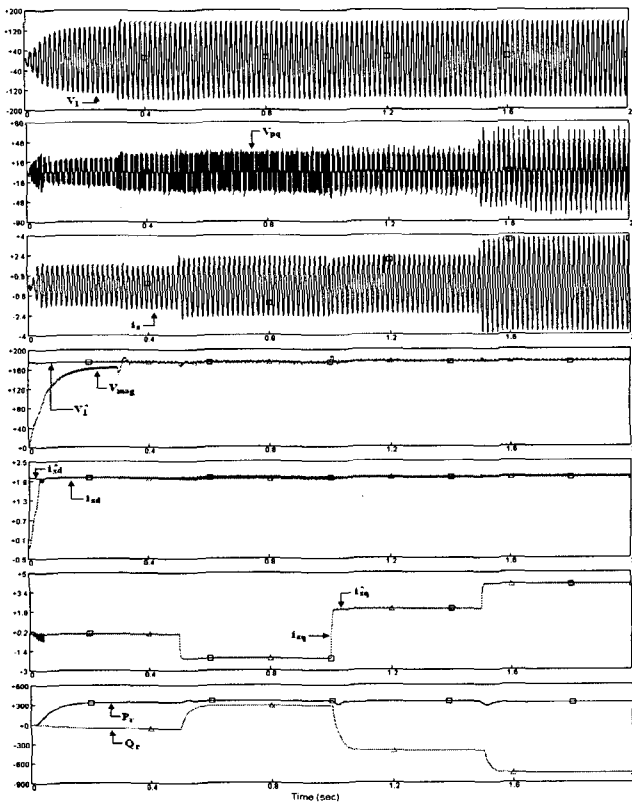
(a) UPFC 유효전력제어(시뮬레이션)



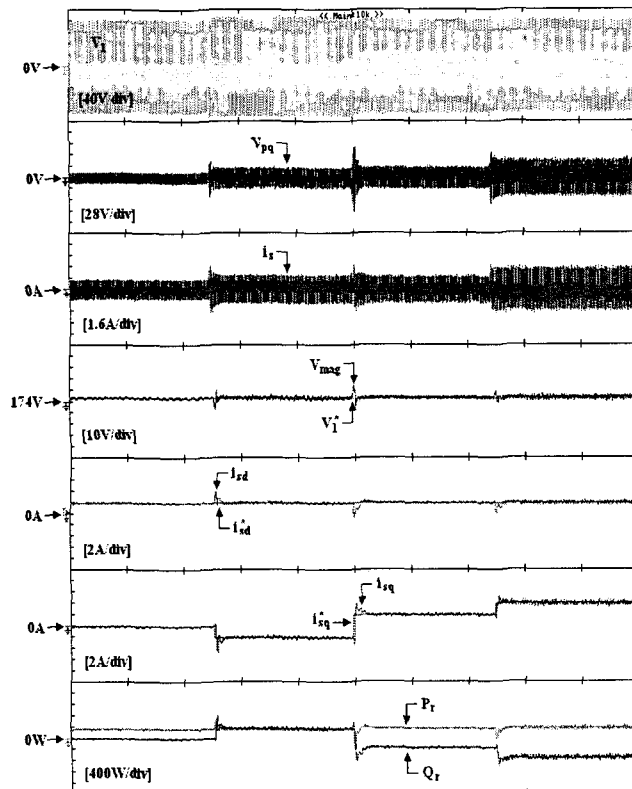
(b) UPFC 유효전력제어(실험)

그림 13. UPFC 유효전력 제어 결과

Fig. 13. Analysis results of active power control



(a) UPFC 무효전력제어(시뮬레이션)



(b) UPFC 무효전력제어(실험)

그림 14. UPFC 무효전력 제어 결과

Fig. 14. Analysis results of reactive power control

감사의 글

본 연구는 2003년도 한국전력공사의 전력산업연구개발산업 위탁기술개발 과제 "Transformerless FACTS기기의 축소모형 개발에 관한 연구" 지원으로 이루어 졌으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] J. S. Lai, F. Z. Peng, "Multilevel converters-A new breed of power converters," IEEE Trans. on Industry Application, Vol. 32, pp. 509-517, May/June 1996.
- [2] Renz, B. A., Gyugyi, L., "AEP Unified Power Flow Controller Performance," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 4, pp.1374-1381, October 1999.
- [3] Yiqiang Chen, Mwinyiwiwa, B, Z. Wolanski, Boon-Teck Ooi, "Regulating and Equalizing DC Capacitance Voltages in Multilevel STATCOM," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol 12, No.2, pp.901-907, April 1997.
- [4] F .Z. Peng, J. S. Lai, "Dynamic performance and control of a static var compensator using cascade multilevel inverter," IEEE/IAS Annual Meeting. pp.1009-1015, San Diego, CA, Oct. 6-10, 1996.
- [5] J. D. Ainsworth, M. Davies, P. J. Fitz, K. E. Owen, D. R. Trainer, "Static Var compensator(STATCOM) based on single-phase chain circuit converters," IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 145, No. 4, pp.381-386, July 1998.
- [6] D. J. Hanson, C. Horwill, B. D. Gemmill, D. R. Monkhouse, "A STATCOM-Based Relocatable SVC Project in the UK for National Grid," IEEE/PES Winter Meeting, pp.532-537, Vol. 1, 2002.
- [7] G. Joos, X. Huang, B. Ooi, "Direct-Coupled Multilevel Cascaded Series Var Compensator," IEEE Trans. on Industry Application, Vol. 34, No. 5, pp.1156-1163, September/October 1998.
- [8] B. Han, S. Baek, H. Kim, G. Karady, "Dynamic Characteristic Analysis of SSSC Based on Multibridge Inverter," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, pp.623-629, April 2002.
- [9] B. Han, S. Baek, H. Kim, J. Choo, G. Jang, "Novel unified power flow controller based on H-bridge modules," Elsevier Science Journal, Electric Power System Research, Vol. 70, pp. 64-75, May, 2004.
- [10] H. Fujita, H. Akagi, et al, "Transient Analysis of a Unified Power Flow Controller and its Application to Design of the DC-Link Capacitor," IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 16, No. 5, pp. 735-740, Sept. 2001.

저 자 소 개



백 승택 (白承澤)

1971년 11월 24일생.
1997년 명지대 전기공학과 졸업.
1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박).
현재 명지대 차세대전력기술연구센터
전임연구원.
Tel : 031-333-1542
FAX : 031-321-0271
E-mail : baekst@mju.ac.kr



장 병훈 (張秉勳)

1964년 3월 21일생.
1989년 고려대 전기공학과 졸업.
1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박).
현재 한전전력연구원 전력계통연구소
선임연구원.
Tel : 042-865-5843
FAX : 042-865-5844
E-mail : jang7@kepri.re.kr



한 병문 (韓炳文)

1953년 7월 5일생.
1976년 서울대 전기공학과 졸업.
1988년 미 아리조나주립대 대학원 전기
공학과 졸업(석사).
1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박).
미 Westinghouse중앙연구소 선임연구원.
현재 명지대 전기공학과 교수
Tel : 031-330-6366
FAX : 031-321-0271
E-mail : erichan@mju.ac.kr



윤 종수 (尹鍾秀)

1968년 5월 30일생.
1993년 경북대 전기공학과 졸업.
1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
현재 한전전력연구원 전력계통연구소
선임연구원.
Tel : 042-865-5846
FAX : 042-865-5844
E-mail : yoonjs@kepri.re.kr



추 진부 (秋鎭夫)

1950년 1월 7일생.
1977년 서울대 전기공학과 졸업.
1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박).
현재 한전전력연구원 전력계통연구소장
Tel : 042-865-5830
FAX : 042-865-5844
E-mail : jbc@kepri.re.kr