

20kVA급 prototype UPFC의 전력조류제어와 모션전압보상

전진홍, 김지원, 전영환, 김학만, 국경수, 오태규
한국전기연구원 전력연구단

the power flow control and voltage compensation by 20kVA prototype UPFC

Jin-Hong Jeon, Ji-Won Kim, Yeung-Han Chun, Hak-Man Kim, Kyung-Soo Kook, Tae-Kyoo Oh
Power System Research Division, Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - FACTS technology is developed into the sophisticated system technology which combines conventional power system technology with power electronics, micro-process control, and information technology. Its objectives are achieving enhancement of the power system flexibility and maximum utilization of the power transfer capability through improvements of the system reliability, controllability, and efficiency[1]. As a series and shunt compensator, UPFC consists of two inverters with common dc link capacitor bank. It controls the magnitude of shunt bus voltage and real and reactive power flow of transmission line[2]. In this paper, we present the design, implementation and test results of developed 20kVA level prototype UPFC. It is applied to power system simulator and controls the real and reactive power flow and shunt bus voltage magnitude.

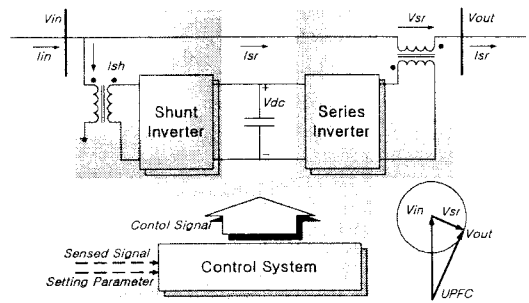


그림 1. UPFC의 구조

UPFC 시스템은 DC 링크 캐패시터 बैं크의 오른쪽의 직렬 인버터(Series Inverter)는 직렬삼입 변압기(Series Transformer)를 통해 송전선로에 연결되어 출력전압이 직렬삼입 변압기를 통해 송전선로 직렬로 삼입될 수 있으며, DC 링크 캐패시터 बैं크의 왼쪽의 병렬 인버터(Shunt Inverter)는 병렬 변압기(Shunt Transformer)를 통해 송전선로에 병렬로 연결되어 있는 구조를 가진다. 이와 같은 구성상의 특징으로 선로의 유효전력과 무효전력의 조류제어와 모션의 전압을 독립적으로 제어하는 것이 가능하다[2][3].

UPFC의 각 부분의 상세한 제어 기능과 제어를 위한 모형, 제어 알고리즘의 상세한 유도과정은 참고문헌 [3,4]에 자세히 설명되어 있다. 또한, UPFC의 직렬부분과 병렬부분의 제어 알고리즘의 블록 선도와 출력전압의 벡터 다이어그램과 dq 변환관계 역시 참고문헌[1,3]에 제시되어 있으며 본 논문에서는 지면관계상 생략한다.

1. 서 론

FACTS 기술은 전력용 반도체 소자의 고속 스위칭 특성을 이용한 전력전자 기술을 응용하여 송배전 계통의 기본특성을 결정하는 교류송전선로의 임피던스, 모션의 전압크기 및 위상각 조작을 통해 전력조류분포, 전압 및 계통안정도 등 계통특성을 개선하여 설비 이용율을 향상시키고, 특히 특정 전력수송로의 전력수송능력 증대를 통해 전체 계통의 공급신뢰도 향상을 목적으로 하는 전력제어 시스템 기술이다[1]. 이러한 FACTS 설비 중 UPFC(Unified Power Flow Controller)는 직병렬 보상기기로 두 개의 인버터가 하나의 DC Link를 공유하는 구조를 가지고 있으며, 모션전압의 크기를 제어하고 선로에 흐르는 유효전력과 무효전력 조류를 제어하는 기능을 가지고 있다[2].

본 논문에서는 20kVA급 prototype UPFC의 설계, 제작, 실험을 다루고자한다. 제작된 20kVA급 prototype UPFC를 실험실 계통에 적용하여 유효전력과 무효전력 조류제어를 수행하고 동시에 병렬측 모션전압 크기를 제어하였다. 실험결과를 통하여 UPFC의 제어 성능을 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 UPFC의 개요

UPFC 시스템은 2개의 전압원 인버터가 DC 링크 캐패시터 बैं크를 공유해서 연결되어 있는 구조로 되어 있으며 기본 구조는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

2.2 20kVA급 prototype UPFC

2.2.1 시스템 사양

20kVA급 prototype UPFC 시스템은 KERI 시뮬레이터를 기준으로 설계되었으며 그 사양은 표 1과 같다.

표 1. 20kVA급 prototype UPFC 시스템 사양

항목	사양
동작 주파수	60Hz
System Base Voltage	381V
System Base Power	10.0 KVA
직병렬 인버터	3kHz, PWM 구동
LC Filter	4.9 mH, 40uF
DC Link	2200uF, 900 WV
병렬 변압기	단상 5kVA 3모듈 Δ-Y
직렬 변압기	단상 5kVA 3모듈 1차측 Δ
최대 직렬 삼입 전압	190V

20kVA급 prototype UPFC 시스템의 각 모듈의 세부 설계 방법은 참고문헌(1,3)을 참고하기 바란다. 20kVA급 prototype UPFC 시스템의 전체 구성은 그림 2와 같으며, 제작된 시스템의 전체 사진은 그림 3과 같다.

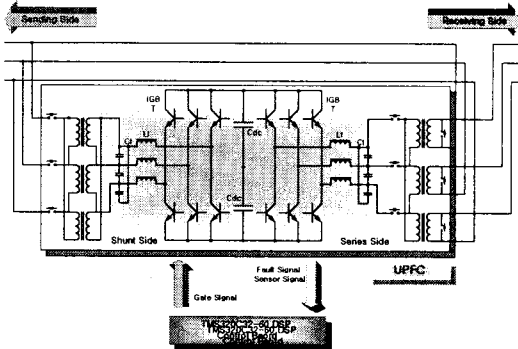


그림 2. 20kVA급 prototype UPFC 시스템 구성도

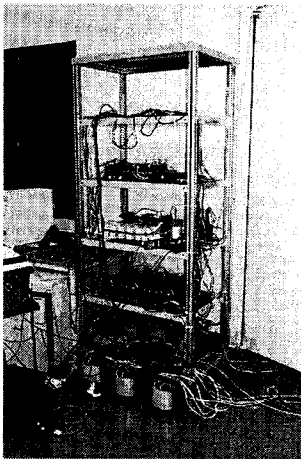


그림 3. 20kVA급 prototype UPFC 시스템

2.2.2 제어기

20kVA급 prototype UPFC 시스템의 제어기는 주연산부와 인터페이스부의 두 부분으로 구성되어 있다. 주연산부는 DSP와 아날로그 입력, 아날로그 출력, 인버터 구동부로 구성되어 있으며 제어 알고리즘과 각종 보호 알고리즘이 구현되어 실행되며, 인터페이스부는 주연산부의 상태와 각종 알고리즘의 동작상태를 표시하고, MC 스위치를 구동시키는 각종 릴레이와 표시장치로 구성되어 있다. 제어기의 주요 사양은 표 2와 같으며 제어기는 각각 그림 4와 같다.

표 2. 제어기의 주요 사양

항목	사양
Main Processor	TMS320C32, 60MHz
RAM	4 MBytes
EPLD	EPM7256SQC208-10
AD Converter	AD1671(12Bit, 1.25Ms/s)
DA Converter	ADG664(12Bit, 4 Ch)
Analog Mux	ADG528(8 Ch)

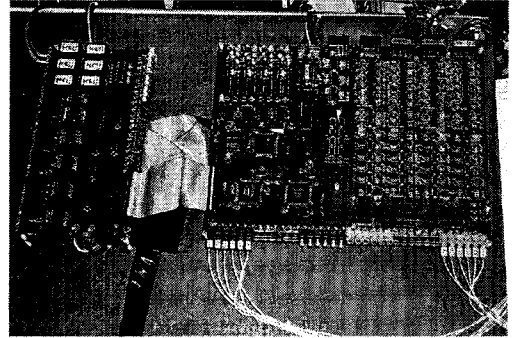


그림 4. 제어기

제어기 각 부분의 구성, 설계, 기능 등에 상세한 설명과 제어기의 전체 제어 알고리즘에 대한 흐름도 등은 참고문헌(1,3)을 참고하길 바란다.

2.3 전력계통 시뮬레이터 적용 실험

2.3.1 실험 시스템 구성

20kVA급 prototype UPFC 시스템의 성능 검증을 위한 실험 계통은 3상 380V의 일반 배전 계통이며 본 연구소의 전력 제어 실험실에 구성되어 있다. 그 구성은 그림 5와 같다. 그림 5에 나타나 있는 바와 같이 UPFC 시스템은 두 개의 3상 380V 전원의 사이에 삽입되어 있다. UPFC 시스템의 병렬 모션측의 전원은 편의상 송전단(Sending Side)라고 하였으며 송전선로 임피던스를 모의하기 위해 14.6mH의 인덕터를 삽입하였다. UPFC 시스템의 직렬 모션측의 전원은 편의상 수전단(Receiving Side)라고 하였으며 송전단과 마찬가지로 송전선로 임피던스로 18.7mH의 인덕터를 삽입하였다. 또한, 부하 변동에 따른 UPFC 시스템의 응답을 보기 위해 직렬 부분의 출력 모션에는 10kW급 전동-저항 부하 모듈이 연결되어 있다. 이 부하 모듈은 3단계로 부하 조절이 가능하며 필요에 따라 불평형 결선, Δ 결선, Y 결선 등을 자유롭게 할 수 있도록 설계되어 있다.

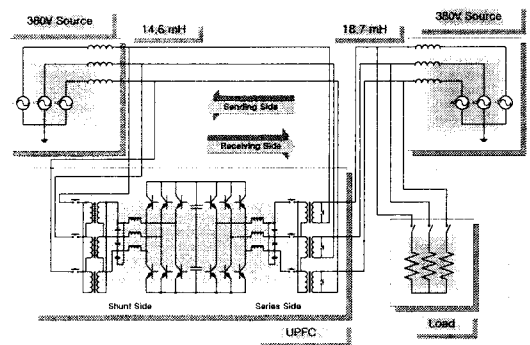


그림 5. 20kVA급 prototype UPFC 시스템 실험 계통 구성도

2.3.2 PLL(Phase Locked Loop) 실험 결과

UPFC 시스템은 전력조류 제어와 모션전압 제어를 위해서 직렬 인버터와 병렬 인버터의 전류를 제어한다. 인버터의 전류 제어는 동기회전 좌표변환 결과를 이용하여 이루어지며, 동기회전 좌표 변환은 PLL에 의한 직렬 모션의 a상 전압의 위상각 결과를 기준으로 이루어진다. 그러므로, PLL은 직렬 모션의 전압 신호가 과도상태를 보이더라도 빠른 시간 안에 정확히 위상각을

추종할 수 있어야 한다. UPFC 시스템은 송전계통에 적용되는 시스템이므로 3상 평형상태에서 동작한다. 따라서, 제작된 UPFC 시스템의 제어를 위한 PLL 알고리즘은 3상 PLL 알고리즘을 이용하였다. 상세한 내용은 참고문헌[5,6]을 참고하기 바란다. 3상 PLL 알고리즘의 실험결과를 그림 6과 같다.

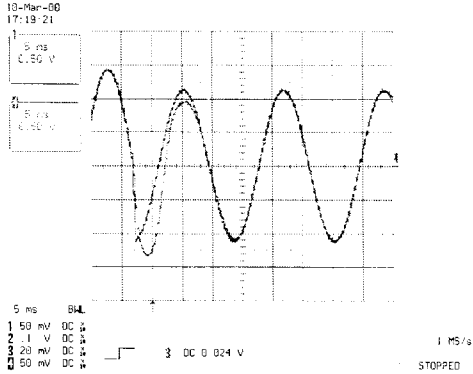


그림 6. PLL 실험결과
Ch 1 : Reference Signal, Ch 4 : PLL Output

그림 6의 결과는 reference signal을 RTDS(Real Time Digital Simulator)를 이용하여 임의의 시간에 위상을 90° 증가시켰을 때 PLL의 출력 결과를 나타낸 것이다. 그림 6의 실험 결과로 보아 UPFC 시스템에 사용된 PLL 알고리즘 모두 입력 신호의 스텝 변화에 대하여 한 주기 이내에 추종하는 우수한 성능을 보여 주고 있다.

2.3.3 병렬 시스템(STATCOM) 실험 결과

UPFC 시스템 병렬 부분의 DC Link 전압 제어와 병렬 모션 전압 제어의 기능은 STATCOM과 동일하다. 따라서, 본 논문에서는 제작된 UPFC 시스템의 병렬 부분의 제어성능 검증을 위하여 부하의 투입과 절체에 따른 모션 전압의 변화를 빠른 시간에 적절히 보상할 수 있는지를 실험하였다. 본 실험에는 병렬 모션 전압은 380V, DC Link 전압은 500V로 설정하였으며, 실험 결과는 그림 7, 그림 8과 같다.

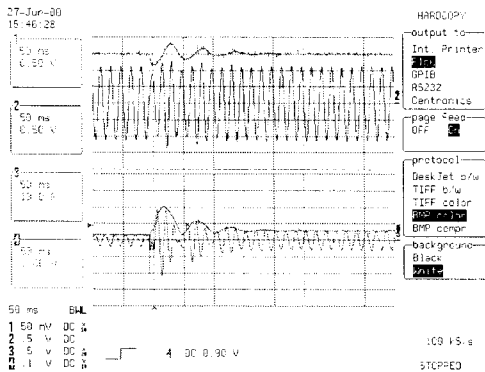


그림 7 전동-저항 부하 투입(모션전압과 전류)
Ch 1 : Vsh_mag, Ch 2 : Ish,
Ch 3 : Vsh, Ch 4 : Ish_mag

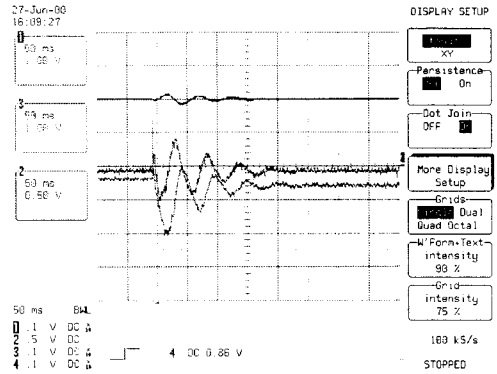


그림 8 전동-저항 부하 투입(DC 전압과 전류)
Ch 1 : Psh, Ch 2 : Qsh, Ch 3 : Vdc

그림 7은 부하의 투입에 따른 병렬 모션 전압의 크기와 순시 파형, UPFC 시스템 병렬 부분 전류의 크기와 순시 파형을 나타낸다. 그림 8은 DC Link 전압과 UPFC 시스템 병렬 부분에서 수수되고 있는 유효전력과 무효전력의 순시파형이다. UPFC 시스템의 병렬 부분이 전압제어를 하지 않을 시에는 부하의 투입과 제거에 따라 병렬 모션의 전압은 350V, 365V를 나타내며 부하의 투입시기가 제거시 보다 더 심한 과도 현상이 나타났다.

위의 실험 결과로부터 제작된 UPFC 시스템의 병렬 부분이 전압 제어를 함으로써 모션전압이 부하의 투입과 제거시에 정상상태에서 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다. 그러나, 부하의 투입시에는 시스템에 과도현상이 발생하였다. 이는 제어기의 게인을 적절히 조절하면 더 좋은 결과를 얻을 수 있으리라 생각한다. 본 실험을 통해 제작된 UPFC 시스템의 병렬 부분은 모션의 전압과 DC Link 전압을 일정하게 유지하기 위해 적절한 유효전력과 무효전력의 수수를 제어하고 있음을 알 수 있다.

2.3.4 직렬 시스템 실험 결과

UPFC 시스템의 직렬 부분은 직렬 시스템 전체가 연계 변압기를 통해 선로에 삽입되어 있는 형태를 취하고 있으므로 선로에 흐르는 전류를 직접 제어 할 수 있다. 따라서 전류의 크기를 직렬 부분의 출력 모션 전압에 대하여 적절한 크기와 위상각으로 제어해 주면 선로의 유효전력 조류와 무효 전력 조류를 제어할 수 있게 된다.

본 실험에서는 선로의 유효 전력 조류 기준치와 무효 전력 조류 기준치를 상호 증감하여 그 결과를 검토함으로써 UPFC 시스템의 유효 전력 조류 제어와 무효 전력 조류 제어 기능을 검증하고자 한다. 실험은 유효전력과 무효전력의 기준치를 각각 사사간으로 변화하여 제어 성능을 시험하였으나 본 논문에서는 그 중 하나의 결과만을 제시하였다. 모든 실험결과에 대한 상세한 정리는 참고문헌[1]에 제시되어 있다.

본 논문에서는 유효전력과 무효전력의 기준치를 각각 +3kW와 +3kVAR로 설정했을 때의 실험결과에 대해서만 나타내었으며 그 결과는 그림 9, 그림 10과 같다.

그림 9는 유효전력과 무효전력 설정치 변화에 따른 선로의 유효전력 조류와 무효전력 조류의 파형을 나타낸다. 그림 10은 이 때의 병렬 모션과 직렬 모션, 삽입 전압, 선로 전류의 순시 파형을 나타낸 것이다.

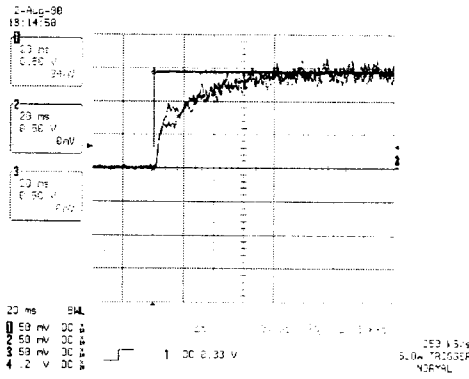


그림 9. 직렬 조류 제어 결과(전력)
 (Psr_ref = +3kW, Qsr_ref = -3kVar)
 Ch 1 : Psr_ref, Ch 2 : Psr, Ch 3 : Qsr

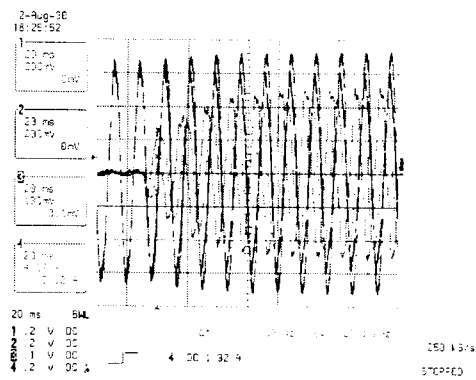


그림 3.2.32 직렬 조류 제어 결과(순시 전압, 전류)
 (Psr_ref = +3kW, Qsr_ref = -3kVar)
 Ch 1 : Vsh, Ch 2 : Vsr,
 Ch 3 : Vinv1, Ch 4 : Isr

그림 9와 그림 10의 결과는 유효 전력 조류 설정치와 무효 전력 주류 설정치가 상호 증감할 때의 유효 전력 조류와 무효 전력 조류, 그 때의 계통 전압, 전류의 순시 파형을 나타낸 것이다. 위의 결과로 유효 전력 조류와 무효 전력 조류의 제어가 모두 UPFC 시스템에 의해 적절히 제어되고 있음을 알 수 있다. 계통의 전압, 전류 파형을 보면 유효 전력의 제어를 위해 UPFC 시스템이 전압의 위상각을 적절히 변화시키고 있음을 알 수 있다. 또한 무효 전력의 제어를 위해서는 전압의 크기를 적절히 변화시킴을 알 수 있다. 삼입 전압과 선로 전류의 위상 관계도 파악할 수 있다. 이 때, UPFC 시스템의 유효 전력 조류 제어기와 무효 전력 조류 제어기의 상승시간은 60msec 정도이다.

3. 결 론

본 논문에서는 UPFC 시스템의 기본개념과 시뮬레이터 적용을 위해 제작된 20kVA급 prototype UPFC 시스템의 기본 구조와 제어에 대하여 검토하여 보았다. 또한, 제작된 20kVA급 prototype UPFC 시스템의 기본 사양과 제어기의 구조와 알고리즘에 대해서도 검토해 보았다. 제작된 UPFC 시스템의 성능 검증을 위해 두 가지 실험을 하였다. 병렬 부분에 대한 성능 평가를 위해 부하의 투입, 제거 시에 모선 전압의 제어와 DC 링크 전압의 제어에 대한 성능을 검증하였으며, 직렬 부분에 대한 성능 평가를 위해 각각 유효전력과 무효전력의 설정치를 변경하여 선로의 유효전력 조류와 무효전력 조

류의 변화를 검토하여 보았다. 위의 두 가지 실험을 통해 제작된 20kVA급 prototype UPFC 시스템이 병렬 부분에서는 모선전압 유지 및 DC 링크 전압 제어 성능이 우수함을 보였으며, 직렬 부분에서는 선로의 유효전력 조류와 무효전력 조류 제어 성능이 우수함을 보였다. 향후 연구에서는 UPFC 시스템을 이용한 계통 동요 현상의 제어에 관한 연구와 UPFC 시스템의 용량 증대에 의한 실규모급 연구가 필요할 것으로 생각된다.

[참 고 문 헌]

- [1]. 한국전기연구소, "FACTS 엔지니어링 기술분석", 1 단계 최종보고서, 과학기술부, 1998
- [2]. Narain G. Hingorani and Laszlo Gyugyi, "Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems(Book)", IEEE Press, 2000
- [3]. 한국전기연구소, "1MVA 급 통합전력제어기 개발", 최종 보고서, 과학기술부, 1999
- [4]. Tae-Kyooo Oh, Jin-Hong Jeon, Byoung-Hoon Chang, Jin-Boo Choo, "Design of UPFC Controller for Steady-State Power Flow Control", Proceedings of ICEE, Vol. 1, pp.358-361, July 1998.
- [5] 전진홍 외 5인, "실시간 계통제어를 위한 동기위상측정장치 의 패이저 측정", 전력계통 연구회 춘계학술대회 논문집, pp81-85, 2000년
- [6] 전진홍 외 5인, "실시간 계통제어를 위한 동기위상측정장치 개발", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp85-87, 2000년
- [7]. Tae-Kyooo Oh, Jin-Hong Jeon, Hak-Man Kim, Young-Won Lee, Kyoung-Soo Kook, "Transient Response Analysis of UPFC Controller for Power Flow Control", Proceedings of ICEE, Vol. 2, pp. 409-412, July 1998.