

AC 라인 리액터와 병렬 및 직렬 능동필터를 가지는 새로운 3상 Line-Interactive UPS 시스템의 전압제어 방식

論 文

56-3-14

Voltage Control Strategy of new 3-phase Line-Interactive UPS System using AC Line Reactor and Parallel-Series Active Filter

池俊根[†] · 金長煥^{*} · 薛承基^{**}
(Jun-Keun Ji · Jang-Hwan Kim · Seung-Ki Sul)

Abstract - A new 3-phase line-interactive UPS(Uninterruptible Power Supply) system with parallel-series active power-line conditioning capability using AC line reactor and two four-leg PWM VSCs(Voltage Source Converters) was introduced recently. In this paper, the strategy of voltage control in suggested UPS system is explained. The objective of proposed voltage controllers in parallel(shunt) and series PWM VSC is to guarantee satisfactory characteristics in steady state and transient state. Therefore the experimental results to prototype UPS system having power rating of 60kVA is shown to prove the verification of voltage control strategy.

Key Words : AC 라인 리액터, 병렬 및 직렬 능동필터, 3상 Line-Interactive UPS(Uninterruptible Power Supply), 전압제어

1. 서 론

오늘날 무정전 전원 장치(UPS : Uninterruptible Power Supply)는 전력 계통에 정전이 발생할 경우 부하에 연속적인 전원을 공급해주는 기기이다. 이러한 무정전 전원 장치는 1970년대 대형 컴퓨터 시스템에 안정된 전력을 공급하기 위하여 처음 시장에 등장했다. 1980년대 이후 디지털 시스템의 발달과 함께 UPS의 중요성은 더욱 커지게 되었고, 제어 기술, 용량 및 운용 방법에 있어서도 급격한 발달이 이루어지게 되었다. 최근에는 UPS의 본래 목적인 전력 공급 기능 외에 공급자 및 수용가 양측에 영향을 주는 전력 품질 관리(Power Quality Conditioning) 기능을 가지고 있는 UPS에 관한 연구도 활발히 이루어지고 있다.

먼저, 1970년대부터 사용된 On-line UPS는 AC/DC 정류기/충전기, DC/AC 인버터, Static 스위치로 구성되어 있다. 입력단의 AC/DC 정류기/충전기는 교류 전원을 정류하여 배터리와 DC 링크의 충전 전원으로 이용한다. 인버터는 항상 일정한 크기와 일정한 주파수의 전압을 합성한다. 즉 정류기/충전기용 컨버터가 직류 전압을 만들고, 인버터가 교류 전압을 합성하게 된다. 이러한 방식을 이중 변환(double conversion) 방식이라고도 한다. 따라서, 이러한 방식의 UPS는 어떠한 전원 조건에서도 배터리의 전원이 충분하다면, 부하에 전원을 연속적으로 공급할 수 있어 신뢰도가 매우 높다.

그러나, 이러한 방식의 UPS는 정류기/충전기용 컨버터가 부하의 공급전력 및 배터리 충전 전력을 모두 감당해야 하

므로, 효율이 낮고 용량이 매우 커지게 된다. 또한 입력단 역률이 좋지 못하므로, 별도의 PFC를 추가해야 하는데 이때 추가 비용이 발생하게 된다. 부가되어 있는 Static 스위치는 바이패스(Bypass) 모드로 동작할 경우 이용하며, 이 경우 UPS는 동작하지 않는다.[1,2]

1980년대에 들어와서는 부하의 종류가 다양해지고 그 용량이 매우 커지게 되었고, 이와 맞맞추어 Off-line UPS가 개발되었다. Off-line UPS는 On-line UPS와 달리 교류 전압을 발생시키는 인버터가 선로에 병렬로 연결되어 있으며, 그리고 인버터를 연속적으로 동작시키지 않고, 전원 전압 사고시에만 인버터를 동작시킨다. 이러한 방식의 UPS의 장점은 구조가 간단하고 가격을 낮출 수 있으며 부피가 작다는 것이다. 그러나 전원측과 부하측의 완전한 절연이 이루어지지 않으며, 대기 모드에서 UPS 모드로의 신속한 전환이 어려워 신뢰도가 낮고, 비선형 부하에서의 전압 합성 특성이 나쁘다는 것이 단점이다.[1,2]

다음으로는 단일 변환(single conversion) Line interactive UPS가 개발되었다. 이러한 방식의 UPS는 구조가 간단하고, 저가격화 할 수 있으며, 효율이 높고 전원측의 전류 고조파를 제거할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 전원 계통과 부하 계통 사이의 절연이 완전하지 않고, 출력 전압의 조정이 어려우며, 출력 주파수 조정이 불가하다는 것이 단점이다.[3,4]

근래에 들어 델타 변환 Line interactive UPS가 개발되었다. 이러한 방식의 UPS는 현존하는 UPS중 가장 진보적인 형태의 토폴로지라고 알려져 있으며 APC사의 UPS 시리즈가 이에 해당한다. 입력단에는 UPS 모드 동작시 이용하는 static 스위치가 달려있으며 직렬 변압기가 있다. 컨버터, 인버터 모듈은 각각 직렬 변압기와 부하에 연결되어 있으며 배터리를 서로 공유하고 있는 형태이다. 이러한 형태는 기존의 알려진 UPQC의 토폴로지이지만, 그 제어 방법과 응용 분야에 의해 차별화된다. 델타 변환 Line interactive UPS의 제어방법은 매우 간단하다. 우선 병렬인버터는 전압제어를

[†] 교신저자, 正會員 : 順天鄉大 工大 情報技術工學部 教授 · 工博
E-mail : jkji@sch.ac.kr

^{*} 正會員 : 삼성전자 생산기술연구소 책임연구원 · 工博

^{**} 正會員 : 서울大 電氣 · 컴퓨터工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2006年 11月 7日

最終完了 : 2007年 1月 15日

통해 입력전원과 동기된 주파수의 일정크기의 전압만 합성하고, 직렬컨버터는 전원단에서 부하측으로 유효전력을 공급하기 위한 전류를 인덕터의 전류제어를 통해서 인가한다. 따라서 병렬인버터쪽으로는 부하측의 무효전류성분만 흐르게 된다. 즉, 델타변환 Line interactive UPS는 직렬 컨버터와 직렬 변압기를 통하여 전원단의 전류가 역률이 항상 1이 되도록 전류제어를 한다. 그리고 병렬인버터를 통하여 부하단 전압을 전원 전압과 동기된 주파수로 일정 크기의 정현파가 되도록 제어해 준다. 따라서 제어가 기본파에 대해서만 수행되어, 매우 간단한 구조로 수행된다. 만일 정전 모드로 동작할 경우에는 병렬 인버터에서 정현파 전압을 여전히 합성하면 된다. 이러한 방식의 UPS는 역률 제어가 매우 용이하고 출력 전압의 조정이 쉬우며 효율이 매우 높다. 그러나 출력단 주파수 조정이 불가능하다는 단점을 갖는다.[5-7]

또한 최근에 AC 라인 리액터와 병렬 및 직렬 능동필터를 가지는 새로운 3상 Line-Interactive UPS 시스템이 저자등에 의해서 제안되어진 바가 있다.[8] 제안된 UPS 시스템은 AC 라인 리액터와 병렬 및 직렬 4-레그 PWM 인버터로 구성되어 있으며, 3-레그와 DC 링크 중성점을 이용하던 Half-bridge 인버터로 구성되던 기존의 UPS시스템이 갖는 단점을 보완하고자 제안된 시스템이다. 3개의 half-bridge 인버터와 4-레그 PWM 인버터는 3개의 독립적인 전압을 합성할 수 있다는 점에서는 같은 특성을 갖지만(3-Degree of Freedom), 동일한 출력전압의 크기를 위해서 필요로 하는 DC 링크 및 배터리 전압의 크기는 기존의 시스템이 4레그 PWM 인버터에 비해 15%정도 크다.[9]

그리고 동적 전압 보상기나 UPS같은 전력 품질 기기는 인버터에 LC 필터가 부착되어 있는 형태의 전압 보상기를 가지고 있다. 따라서 전압 제어기의 목적은 LC 필터의 커패

시터 전압을 제어하는 것이며, 이러한 전압 제어기의 성능은 매우 중요한 것으로 많은 연구가 진행되어 왔다.[10,11]

본 논문에서는 AC 라인 리액터와 병렬 및 직렬 능동필터를 가지는 새로운 3상 Line-Interactive UPS 시스템에 대한 간략한 소개와 병렬 및 직렬 인버터의 전압제어 방식에 대하여 제안한다. 제안하는 병렬 및 직렬 인버터의 전압제어 방식은 전압제어에 필요한 속응성과 정확도를 만족하는 제어방식임을 실제로 제작된 60kVA UPS 시스템의 실험을 통해서 검증하였다.

2. 제안된 UPS 시스템

제안된 UPS 시스템의 전력회로는 그림 1과 같이 AC 라인 리액터와 병렬 및 직렬 4-레그 PWM 인버터로 구성된다. 본 절에서는 제안된 UPS시스템의 각 부분에 대해서 간단히 설명하고, 동작모드별로 UPS의 제어방법에 대해서 소개하겠다.[8]

2.1 제안된 3상 Line-Interactive UPS 시스템의 전력회로

2.1.1 AC 라인 리액터

AC 라인 리액터는 전원의 기준임피던스의 10~20%정도로 설계되었으며, 전체 시스템의 정격 전류가 도통해야 하기 때문에 부피와 가격의 상승을 가져온다. 하지만, 전원 측의 전압 surge와 같은 전원급변상황에 대해서 시스템을 보호해주는 역할을 수행할 수 있으며, 병렬인버터의 제어모드를 전압제어모드로 수행하게 하여 전원측의 전류를 간접적으로 제어할 수 있게 한다.

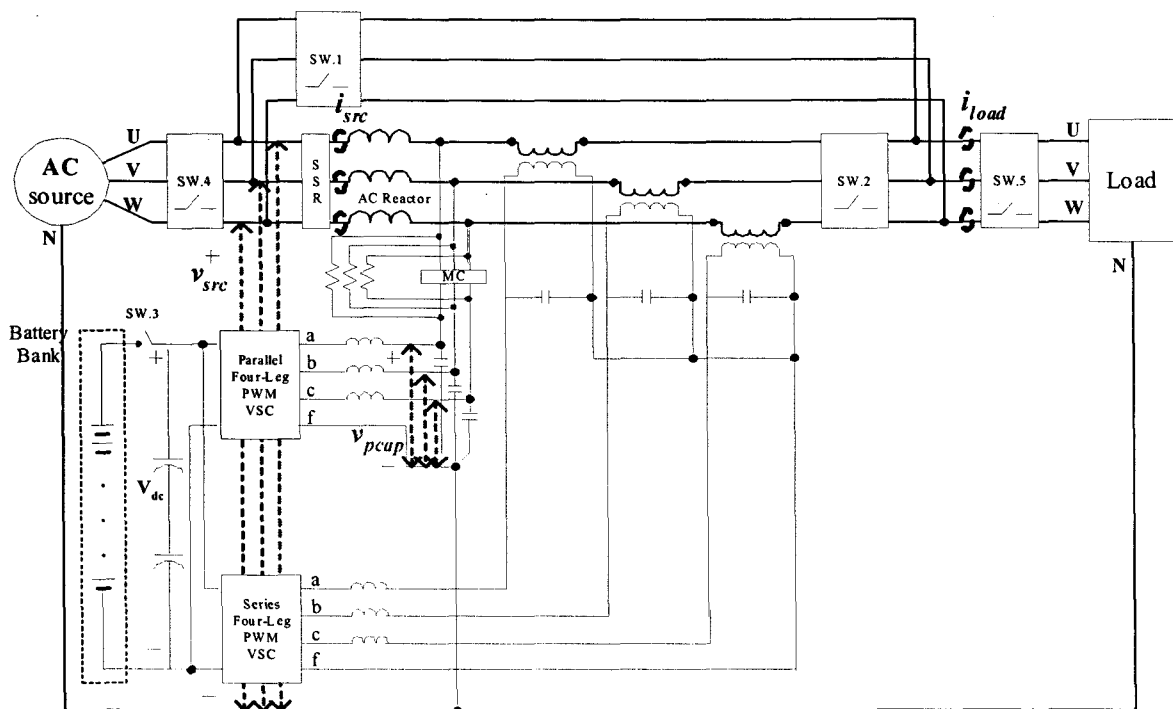


그림 1 제안된 UPS시스템의 전력회로도

Fig. 1 Power circuit diagram of suggested UPS system

2.1.2 병렬 PWM 인버터

병렬 PWM 인버터는 LC 필터의 전압제어를 통해서 간접적인 AC 리액터의 전류제어를 수행한다. 이를 통해 배터리뱅크(bank)를 충전시키는 역할과 부하측의 고조파전류를 공급함으로써 전원 측의 역률 1을 보장하게 한다.

2.1.3 직렬 PWM 인버터

직렬 PWM 인버터는 LC 필터의 전압제어를 통해 출력 전압파형을 전원과 동기된 전압으로 만들어 준다. 병렬인버터의 출력전압은 전원과의 위상이 AC 리액터와 전원전류에 의해서 벌어지게 되므로, 전원과 동기시키기 위해서는 AC 리액터의 전압 강하를 직렬인버터에서 보상해 주어야 한다. 부가적으로 병렬인버터에서 보상하지 못한 고조파도 직렬인버터에서 보상하는 역할을 한다.

2.2 제안된 UPS 시스템의 동작모드

제안된 Line-Interactive UPS 시스템은 3가지 모드를 갖는다. 바이패스(Bypass) 모드는 전원단이 어떠한 전력품질 관리없이 바로 부하단에 연결되어, 순시적으로 유효전력과 무효전력을 모두 공급하는 상태를 의미한다. 정상(Normal) 모드시에 전원단은 병렬인버터와 직렬인버터를 통해서 부하단에 연결되어, 순시적으로 유효전력만을 공급하여 전원측 역률을 1로 유지하게 되고, 부하의 전류고조파는 병렬인버터에서 공급하여 전원전류에는 배터리 뱅크의 충전전류와 부하전류의 유효전력성분의 전류만이 흐르게 제어된다. 이때 부하측에서 필요로 하는 무효전력은 병렬인버터를 통해서 공급하게 된다. 백업(Stored-energy) 모드는 일반적으로 전원계통에 문제가 발생하여 정상 모드 동작을 완벽히 수행하지 못할 경우에 부하단에 일정하고 연속적인 전원을 공급하기 위해 존재한다. 이 경우 전원단이 완전히 부하단과 분리된 상태에서 모든 전력은 배터리를 이용하여 병렬인버터와 직렬인버터를 통해 부하측에 공급된다. 각 모드시의 단상등가회로 개념도는 그림 2에서 보여준다. 또한 각 모드에 따른 회로상 스위치들의 동작상태를 표 1에 정리하였다.

2.2.1 바이패스(Bypass) 모드

그림 2(a)에서 볼 수 있듯이, 바이패스 모드시에 부하단에 전원단 전압을 그대로 공급할 뿐만 아니라, 일정한 시퀀스(SSR을 ON 시키고 초기충전용 저항을 통해 DC 링크 캐패시터의 초기 충전후에 병렬 인버터를 동작시켜 DC 링크 캐패시터의 전압을 배터리 뱅크 전압만큼 제어하고, DC 스위치 SW.3를 ON시킨 후에 DC 링크 전압지령치를 변화시킴으로써 충전전류를 제어한다)를 통하여 배터리 뱅크의 충전동작을 수행할 수 있다.

2.2.2 정상(Normal) 모드

그림 2(b)에서 볼 수 있듯이, 정상 모드시에 부하단에서 보이는 전압은 병렬인버터의 출력전압과 직렬인버터의 출력전압만이 보인다. 따라서 두 인버터의 전압제어를 통해 전원과 동기된 일정 크기의 전압을 부하단에 공급해야 한다. 부하단에서 요구하는 유효전력성분의 전류만을 전원측에서 공급하고, 무효전력성분의 전류는 병렬인버터를 통해서 공급하게 된다. 따라서 전원전류는 전원전압과 동기된 사인파를

유지하며 역률 1을 만족시키게 된다. 자세한 제어방법에 대해서는 다음절의 제안된 UPS 시스템의 전압제어기에서 설명한다.

2.2.3 백업(Stored-energy) 모드

전원측에 문제 발생시 이를 판단하여, 전원측을 부하측과 완전히 분리시키고, 사고전의 전압과 연속적인 전압 및 주파수의 전압을 병렬인버터와 직렬인버터를 통하여 부하측에 공급한다. 그림 2(c)에서 보듯이, 전원측은 완전 분리된 상태이며 배터리에 충전된 에너지를 이용하여 부하측에서 필요로 하는 전력을 공급하게 된다.

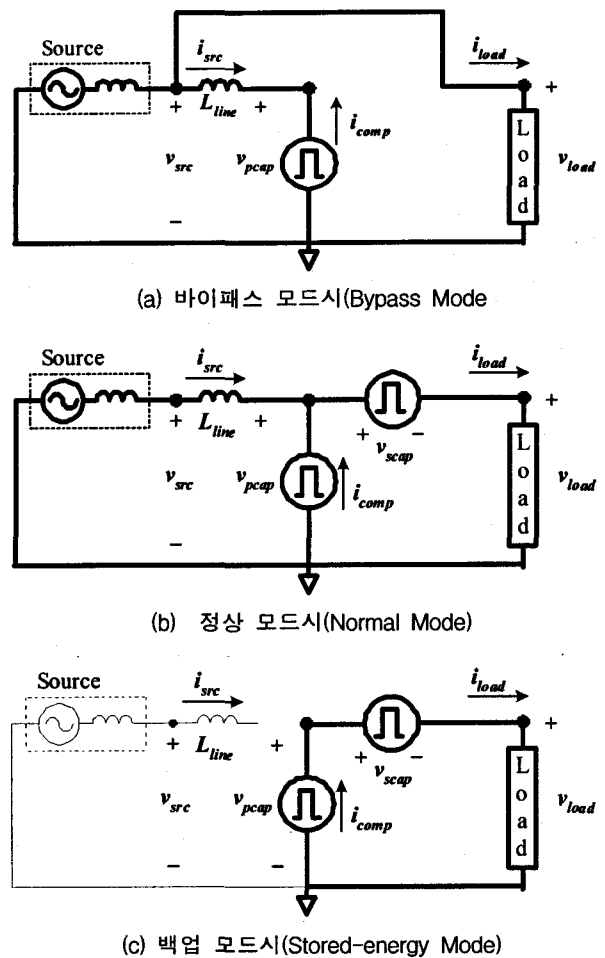


그림 2 각 모드시의 단상등가회로
Fig. 2 Single-phase equivalent circuit in each mode

표 1 동작모드에 따른 스위치 상태

Table 1 Switch state according to operating mode

동작 모드	SW.1	SW.2	SW.3	SW.4	SW.5	SSR	MC
바이패스 모드	ON	OFF	OFF / ON	ON	ON	OFF / ON	OFF / ON
정상 모드	OFF	ON	ON	ON	ON	ON	ON
백업 모드	OFF	ON	ON	ON	ON	OFF	ON

2.3 제안된 UPS 시스템의 동작 시퀀스

2.3.1 UPS 초기동 및 DC 링크 캐패시터 초기충전

UPS의 초기 설치 후에 SW.4와 SW.5를 ON시키고 나서, SW.1을 ON시키면 부하는 전원에서부터 전력을 공급받는다. 이 상태는 앞에서 설명한 바와 같이 바이패스(Bypass) 모드라고 정의하였다. 초기 바이패스(Bypass)모드에서 초기 충전 위해서 SSR을 ON 시키면, 전원은 AC 리액터와 초기 충전저항을 거쳐서 병렬인버터의 다이오드를 통해 DC 링크를 충전시키고 MC가 ON되면 초기 충전이 완료된다. 이 상태에서 배터리 뱅크(bank)와 DC 캐패시터의 연결을 위해 배터리 뱅크의 전압크기만큼 DC 캐패시터의 전압을 올려야 한다. 이를 위해 병렬인버터는 DC 캐패시터를 충전시킬 수 있는 유효전력성분의 전류가 AC 리액터에 흐르게 하는 간접전류제어를 함으로써 DC 캐패시터 전압을 상승시킨다. DC 캐패시터 전압이 배터리 뱅크의 전압만큼 충전되면, SW.3를 ON시키고, 충전전류를 제어함으로써 DC 전압을 일정 레벨로 조정한다.

2.3.2 바이패스(Bypass) 모드 ⇒ 정상(Normal) 모드

SW.1을 OFF함과 동시에 SW.2를 ON하면서 직렬인버터를 동작시키면 바이패스(Bypass) 모드에서 정상(Normal) 모드로 전환하게 되며, 반대로 직렬인버터를 OFF시키고, SW.2를 OFF하면서 SW.1을 ON하면 정상(Normal) 모드에서 바이패스(Bypass) 모드로 전환이 된다.

2.3.3 정상(Normal) 모드 ⇒ 백업(Stored-energy) 모드 ⇒ 바이패스(Bypass) 모드

전원측의 문제 발생시 이를 판단하여, SSR을 OFF하여 전원공급을 차단하고 배터리 뱅크를 에너지원으로 하여 부하단에 연속적으로 고품질의 전원을 공급하는 백업(Stored-energy) 모드로 전환한 후에, 계속해서 전원전압을 관측하고 있다가 전원측의 전압이 정상으로 돌아오면 제안된

PLL[12]을 이용하여 주파수의 변화를 제한하면서 천천히 부하전압의 주파수를 전원전압과 동기되게 조정한 후, 동기가 맞게 되면 SW.1을 ON하고 SW.2를 OFF함으로써 바이패스(Bypass) 모드로 전환(동기 투입)을 완료한다. 정전이나 전원 고장이 일어났을 때는 항상 백업(Stored-energy) 모드에서 동기 투입 후 바이패스(Bypass) 모드로 절환하며, 바이패스(Bypass) 모드이후에 다시 정상(Normal) 모드로 절환하게 된다.

3. 제안된 UPS 시스템의 전압제어기

그림 3은 제안된 UPS 시스템의 전체 제어 블록도이다. 앞서 설명한 병렬 및 직렬 인버터의 역할을 수행하기 위해서 각 인버터의 전압제어 방법에 대해서 설명하기로 한다.

3.1 병렬인버터의 전압제어기

병렬인버터의 전압제어기는 LC 필터단의 커패시터 전압을 제어함으로써 AC 리액터에 흐르는 전류를 간접적으로 제어하여야 한다. 제어하는 전압의 과도상태나 정상상태의 특성을 높이는 것이 목적이 아니고 AC 리액터에 흐르는 전류의 제어가 주요 목표라 할 수 있다. 전향보상형 전압제어기의 경우 과도한 응답방지를 위해 뎀핑성분을 늘렸기 때문에 위상지연이 발생할 수 있고, 전압계환형 전압제어기는 제어기 대역폭 제한이나 과도상태 응답성이 문제가 되며, 또한 전압축정지연이나 데드타임과 같은 원인으로 완벽한 전압제어가 수행되기 힘들다. 따라서 전향보상형 전압제어기나 전압계환형 제어기만으로는 이상적인 전류제어 성능을 발휘하기 힘들다.[10,11] 실제 실험상에서도 병렬인버터의 전압제어기는 전향보상형 전압제어기나 전압계환형 제어기만으로는 과도상태와 정상상태 응답을 동시에 만족스럽게 구현하는데 한계가 있음을 확인할 수 있었다.

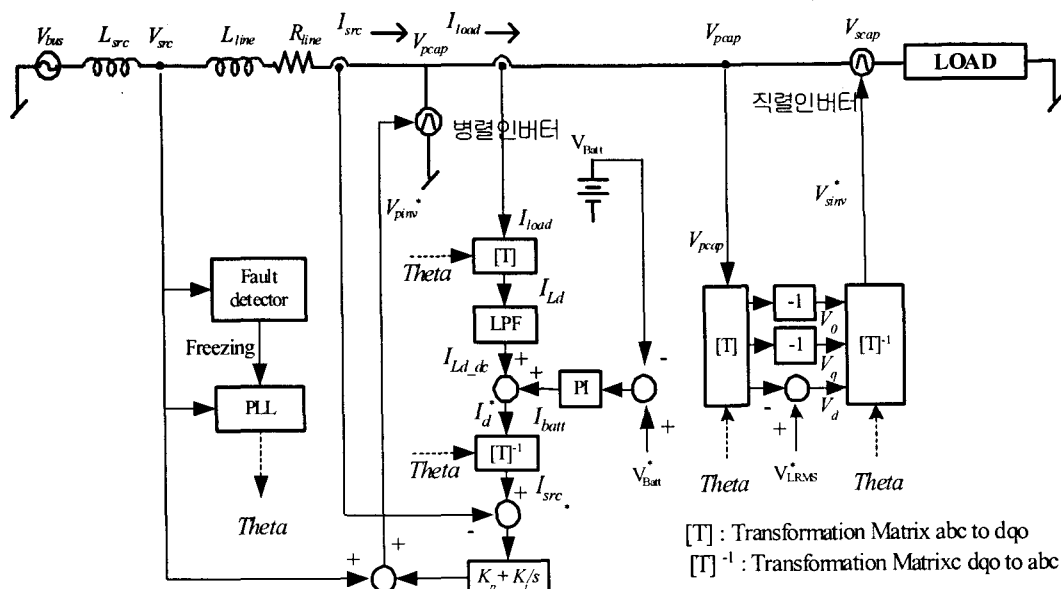


그림 3 전체 제어 블록도

Fig. 3 Entire control block diagram

병렬인버터의 전압제어기에서 한 가지 고려해야 할 점은 출력할 전압지령이 실제 전원전압과 AC 리액터에 걸리는 전압만큼의 차이만 있다는 점이다. 또한 주요 제어 목적이 영상분 전류의 제거 및 유효전력분 전류만 흐르게 하여 역률을 1로 유지하는 것이기 때문에 AC 리액터의 전류제어가 중요한 부분이 된다는 점이다. 따라서 본 논문에서 사용한 병렬인버터의 전압제어기는 그림 4와 같이 AC 리액터에 흐르는 전류를 궤환하여 PI 전류제어기를 구현하였고, 전원전압의 전향보상 부분을 첨가하였다. 기본적으로는 전원전압을 따라가다가, 유효전력성분의 전류가 필요할 때는 PI 전류제어기가 병렬 커패시터 전압의 위상을 전원전압의 위상과 차이를 만들어서 유효전력성분의 전류가 흐르게 하는 역할을 담당하게 된다. 따라서 전압제어기의 응답에 따른 병렬인버터 출력전압 파형에는 왜곡이 존재할 수 있지만, 병렬인버터의 전압제어에 의해 발생할 수 있는 전압왜곡은 직렬인버터에서 보상하게 되므로 부하측에서는 전혀 문제가 되지 않는다.

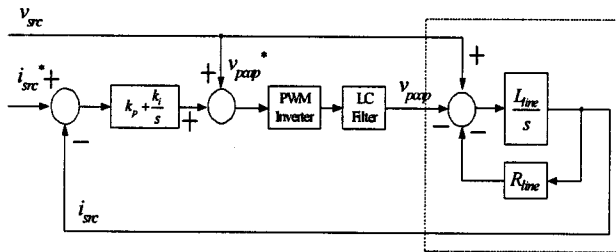


그림 4 병렬 인버터의 전압제어기
Fig. 4 Voltage controller of parallel(shunt) inverter

제어 시스템의 전달함수를 계산하기 위해서 그림 4로부터 병렬인버터에서 전압지령값 V_{pcap}^* 을 제대로 합성한다고 하면 시스템 분석을 통해 식 (1)을 구할 수 있으며, 이로부터 식 (2)와 같은 폐루프 전류응답 전달함수를 구할 수 있다.

$$v_{src} - [(i_{src}^* - i_{src})(k_p + \frac{k_i}{s}) + v_{src}] = i_{src}(R_{line} + sL_{line}) \quad (1)$$

$$\frac{i_{src}}{i_{src}^*} = \frac{-k_p s - k_i}{L_{line} s^2 + (R_{line} - k_p) s - k_i} \quad (2)$$

따라서 원하는 2차 시스템의 감쇠비 ζ 와 대역폭 ω_n 을 결정하면, 계수 비교방식에 의해서 비례 및 적분 이득을 식 (3)으로부터 계산할 수 있다.

$$2\zeta\omega_n = \frac{R_{line} - k_p}{L_{line}}, \quad \omega_n^2 = \frac{-k_i}{L_{line}} \quad (3)$$

본 논문에서는 적절한 과도상태 응답과 정상상태 응답을 동시에 만족하도록 하기 위해서, 시스템의 감쇠비와 대역폭은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 설계한 $\zeta=3, \omega_n=300\text{rad/s}$ 을 사용하였다.

3.2 직렬인버터의 전압제어기

직렬인버터는 앞 절에서도 언급했듯이 병렬인버터에 의해 제어되는 AC 리액터 전류에 의한 전압강하에 해당되는 전압부분과 병렬인버터 커패시터 전압의 기본파를 제외한 고조파 전압부분을 보상해야 한다. 본 논문에서 사용한 직렬인버터의 전압제어기는 과도상태 응답을 개선하기 위해 LC 필터의 감쇠성분을 증가시킨 전향보상형 제어기를 사용하였다.[10,11] 직렬 인버터의 전압제어에서는 일반적으로 출력단 LC 필터의 특성상 과도 상태에서의 오버슈트가 문제가 되며, 기본파 대역의 파형 합성에 있어서도 인버터 합성 전압 지령과 LC 필터 출력 전압 사이에 반드시 위상 지연이 발생하게 된다.

그리하여 과도상태에서의 전압제어기의 동특성을 개선하기 위해서는 전압제어기에 감쇠 요소를 증가시켜야 하는데, 또한 이 감쇠 요소가 정상상태에서의 제어 성능을 저하시키지 않아야 한다. 감쇠 역할을 담당하는 것은 필터의 저항성분인 R_f 로서 실제 인버터 회로에서 이 값을 조절하지 않고 제어기에서 감쇠 성분을 증가시키기 위해서는 인버터의 출력 전류 I_o 에 적절한 이득을 곱한 값을 궤환하여 출력 지령으로 내보내는 방법이 제안되었는데, 그림 5에 그러한 제어기의 블록도를 나타내었다. 본 논문에서 사용한 직렬인버터의 전압제어기는 그림 5에서 보는 것처럼 인버터 출력 전류 I_o 에 궤환 이득 R_{damp} 를 곱한 값을 직렬인버터의 전압 지령 V_c^* 에서 빼주어 전체 시스템의 감쇠 성분을 증가시킨 것이다. 여기서, G_{cr} 는 부하 전류 I_o 로 인한 전압 왜곡을 방지하기 위한 전향보상 요소이다. G_c 는 LC 필터로 인한 출력전압의 강하가 있는 경우 보상하기 위해 직렬인버터의 전압 지령에 곱해지는 이득 요소인데 여기서는 1이다.

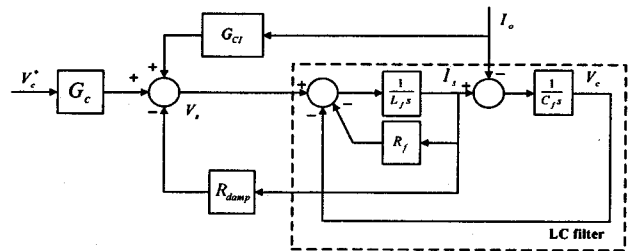


그림 5 직렬 인버터의 전압제어기
Fig. 5 Voltage controller of series inverter

인버터의 출력전압 V_s 와 부하단의 전류 I_o 에 대하여 캐패시터 전압 V_c 의 전달 함수를 구해보면 식 (4)와 같다.

$$V_c(s) = \frac{1}{L_f C_f} V_s(s) - \frac{1}{L_f C_f} (L_f s + R_f) I_o(s)$$

$$= G_v(s) V_s(s) + G_I(s) I_o(s) \quad (4)$$

감쇠를 증가하기 위한 제어 이득을 R_{damp} 라고 하면, 식 (5)와 같이 직렬인버터의 전압제어기를 설계할 수 있다.

$$V_s(s) = V_c^*(s) - R_{damp}I_s(s) + G_{CI}(s)I_o(s) \quad (5)$$

이렇게 결정된 인버터 전압을 식 (4)에 대입하면, 식 (6)과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} V_c(s) &= G_V(s)(V_c^*(s) - R_{damp}I_s(s) + G_{CI}(s)I_o(s)) + G_I(s)I_o \\ &= G_V(s)V_c^*(s) - G_V(s)R_{damp}C_f s V_c(s) \\ &\quad + (G_{CI}(s)G_V(s) - G_V(s)R_{damp} + G_I(s))I_o(s). \end{aligned} \quad (6)$$

부하전류에 대한 영향을 제거하기 위하여 제어기 $G_{CI}(s)$ 를 식 (7)과 같이 구성하면, 캐패시터 전압 지령치에 대한 캐패시터 전압의 전달함수는 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$G_{CI}(s) = L_f s + R_f + R_{damp} \quad (7)$$

$$\frac{V_c}{V_c^*} = \frac{G_V(s)}{1 + G_V(s)R_{damp}C_f s} \quad (8)$$

$$G_V(s) = \frac{1}{L_f C_f s^2 + R_f C_f s + 1}$$

여기서, 식 (8)을 다시 정리하여 보면,

$$\begin{aligned} \frac{V_c}{V_c^*} &= \frac{1}{L_f C_f s^2 + (R_f + R_{damp})C_f s + 1} = \frac{\frac{1}{L_f C_f}}{s^2 + \left(\frac{R_f + R_{damp}}{L_f}\right)s + \frac{1}{L_f C_f}} \\ &= \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{여기서, } \zeta = \frac{R_f + R_{damp}}{2\omega_n L_f}, \quad \omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}}$$

식 (9)의 전달 함수는 특성 방정식이 2차이므로 널리 알려져 있듯이 감쇠 계수 ζ 의 값에 따라 시스템의 단위 계단 응답(step response)이 달라지게 된다. 인버터 전류의 되먹임을 이용한 제안된 제어기의 목적이 과도 상태에서 캐패시터 전압의 오버슈트나 진동을 제한하기 위한 것이었으므로 ζ 값의 선정으로부터 제어 기준을 만족시키는 제어기를 설계할 수 있다. 먼저 캐패시터 전압에 오버슈트가 존재하지 않도록 설계하기 위해서는 ζ 값을 1보다 크게 설계하면 되는데, 우선 ζ 값이 1이 되는 임계 제동(critical damping)의 경우를 설계하면 식 (10)과 같이 R_{damp} 를 선정할 수 있다.

$$R_{damp} = 2\omega_n L_f - R_f \quad (10)$$

4. 실험 결과

전체적인 실험장치의 구성은 그림 1의 제안된 UPS 시스템의 전체 구성도에서 보듯이, 전원은 3상 4선식으로 접속하며, 전원단과 UPS를 포함한 부하부분을 분리하기 위한 SW.4가 있다. 또한 바이패스를 위한 SW.1이 있으며, 인버터 및 LC필터를 분리하기 위한 SSR과 SW.2가 있다. SSR의 뒷단에는 L_{line} 이 있고, 그 뒤에는 전압을 보상하기 위한 직렬인버터의 LC필터와 시스템을 접속해주는 직렬 변압기가 있다. 직렬 변압기와 AC 리액터 사이에는 병렬 인버터와 LC필터가 있다. AC 리액터 뒷단의 전압을 제어하여 AC 리액터의 전류 제어를 위한 병렬 인버터와 전압 보상을 위한 직렬 인버터는 각각 3상 4레그 형태를 취하고 있다. 인버터의 DC 링크 캐패시터의 초기 충전을 위한 저항, 타이머는 MC1과 함께 연결되어 있어서 초기 충전이 시작되고 일정 시간이 지난 후에 접속이 해제되어 정상 운전 모드에서는 아무런 영향을 주지 않는다. DC 링크 캐패시터와 배터리를 접속 및 차단하기 위한 SW.2가 있다. 마지막으로 전류 센서와 전압센서의 위치는 그림 1에서 보는 바와 같다. 전원각을 얻기 위해, PLL의 입력으로 필요한 전원전압을 위해 SSR 앞에 전압센서를 위치하였으며, 병렬인버터가 제어하는 병렬 캐패시터의 전압을 측정하기 위해 병렬 인버터 출력 필터의 캐패시터단에 전압센서를 위치하였다. AC 리액터에 흐르는 전류는 정상 모드시의 전원전류이므로 전원전류 측정을 위해 AC 리액터에 전류센서를 위치하였으며, 부하전류 측정을 위해 부하단 측에 전류센서를 위치시켰다.

직렬 인버터는 제안된 UPS에서 전압을 보상하기 위한 인버터로써, 고조파 전압 합성 및 새그(sag)나 스웰(swell) 같은 순간 전압 변동 보상이 그 목적이다. 제안된 UPS에서는 직렬 인버터를 3상 4레그 형태로 구성하였으며, Semikron사의 SKiiP2 모듈을 이용하여 구성하였다. SKiiP2 모듈은 소자 보호 및 게이트 시그널의 전원분리 및 게이트 회로가 내장되어 있다. 직렬 인버터를 구성하는 모듈의 최대 용량은 1200V/150A이다. 직렬 인버터 뒷단에는 PWM의 고주파 성분을 제거하기 위한 LC 필터가 장착되어 있으며, L은 0.4mH, C는 100uF이다. LC필터 출력부는 라인에 직렬로 전압을 합성하기 위하여 직렬 변압기에 연결되어 있다. 직렬 변압기의 권선비는 2.8:1이다. 따라서, 보상 전압이 인버터로 합성하기 어려운 저전압이라 할지라도 인버터는 보상할 전압보다 2.8배의 전압을 합성하면 되므로, 보다 정확한 보상이 가능하게 했다. 표 2에 관련 사항을 정리하였다

표 2 직렬인버터와 LC 필터 설계
Table 2 LC filter design of series inverter

항 목	값
직렬 인버터 인덕턴스	0.4mH
직렬 인버터 캐패시턴스	100uF
LC필터 차단 주파수	795Hz
최대 정격 전압	1200V
최대 정격 전류	150A
직렬변압기 권선비(가변가능)	2.8 : 1

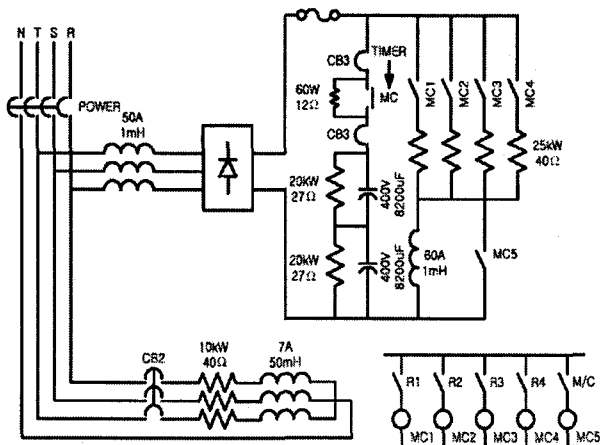
병렬 인버터는 시스템에 삽입된 AC 리액터인 L_{line} 뒷단의 전압을 적절히 합성하여 간접적으로 전류 제어를 하는 역할을 한다. 병렬 인버터는 직렬 인버터와 마찬가지로 3상 4레그 형태로 구성하였으며, 역시 Semikron사의 SKiiP2 모듈을 이용하여 구성하였다. 병렬 인버터를 구성하는 모듈의 최대 용량은 1200V/300A이다. 병렬 인버터가 직렬 인버터보다 전류 용량이 큰 까닭은, 부하의 무효 전력과 관계되는 성분뿐만 아니라, 백업(stored-energy) 모드시 정격전류를 부담하여야 하기 때문이다. 병렬 인버터 뒷단에는 직렬 인버터와 마찬가지로 PWM의 고주파 성분을 제거하기 위한 LC 필터가 장착되어 있으며, L은 0.35mH, C는 100uF이다. 표 3에 관련 사항을 정리하였다. 본 UPS에서 이용된 직렬 및 병렬 LC 필터의 인덕터들은 탭을 두어 필요에 따라 인덕턴스를 적절히 조절하여 성능 개선에 이용할 수 있다.

표 3 병렬인버터와 LC 필터 설계
Table 3 LC filter design of parallel inverter

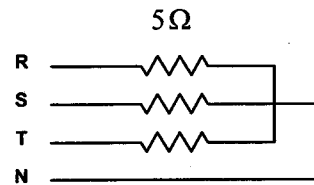
항 목	값
병렬 인버터 인덕턴스	0.35mH
병렬 인버터 캐패시턴스	100uF
LC필터 차단 주파수	850Hz
최대 정격 전압	1200V
최대 정격 전류	300A

AC 리액터는 간접 전류 제어를 위하여 삽입되었으며, 전원단의 서지와 같은 사고가 발생시 그 영향으로부터 직·병렬 인버터 모듈 및 부하를 보호하는 역할을 한다. 이용된 라인 인덕터의 인덕턴스는 1.4mH 이며 역시 탭을 이용해 그 값을 조절할 수 있다. 하지만, 이 인덕터는 UPS의 정격 전류를 모두 감당해야 하므로 그 크기나 값의 증가가 단점일 수 있다.

실험에 사용된 계통 라인은 3상 선간 220V를 기본으로 하였다. 부하는 R 선형부하와 3상 다이오드 정류기와 직류 단 저항 및 RL로 구성된 선형 + 비선형 부하를 사용하였다. 실험에 사용된 부하장치는 그림 6에 도시하였다.



a) 선형 + 비선형 부하(linear + nonlinear load)



b) 선형 부하(linear load)

그림 6 실험용 부하 장치

Fig. 6 Experimental load equipment

그림 7과 8은 비선형 정류기 부하조건에서 제안된 60KVA UPS 시스템의 정상모드에서의 전압 및 전류 실험 파형이다. 그림 7에서 보듯이 병렬 및 직렬 인버터의 출력 전압 V_{pcap} 과 V_{scap} 은 부하에서 요구하는 정현파 부하전압을 합성하기 위하여 각각 제어가 잘 되는 것을 V_{load} 파형을 통해서 알 수 있다. 또한 정상모드에서는 배터리 충전전류와 부하전류의 유효전류성분만을 전원단에서 공급받으므로 그림 8에서 보듯이 비선형 부하전류 I_{load} 에도 불구하고 전원전류 I_{src} 는 전원과 동기된 정현파가 되어 역률 1 운전을 하게 된다.

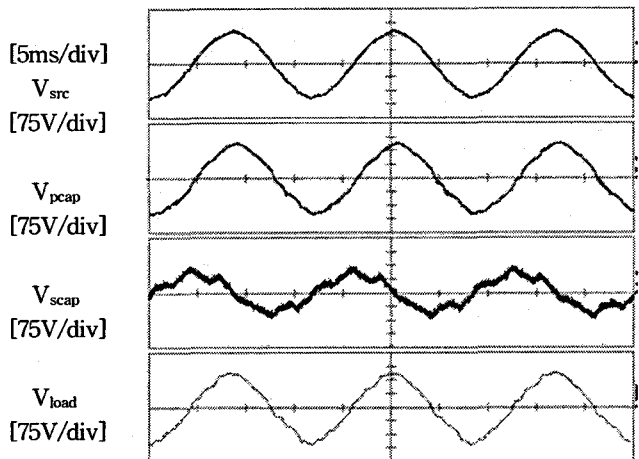


그림 7 정상모드에서의 전압파형

Fig. 7 Voltage waveform in normal mode

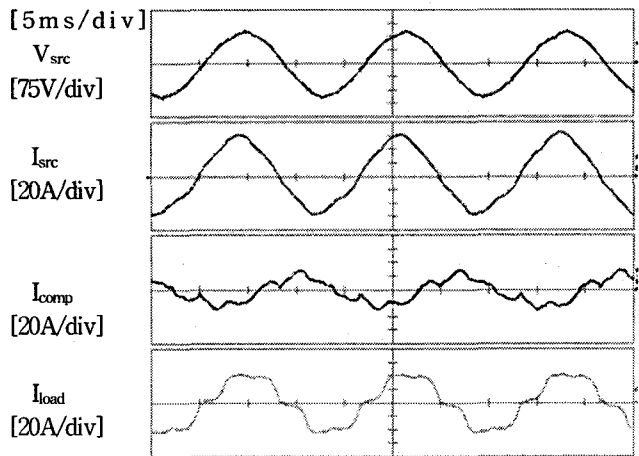


그림 8 정상모드에서의 전류파형

Fig. 8 Current waveform in normal mode

그림 9와 10은 선형 및 비선형 정류기 부하가 결합된 부하조건에서 제안된 60KVA UPS 시스템의 과도상태에서의 전압제어기의 응답특성을 확인하기 위하여 모드전환 실험을 한 결과파형이다. 먼저 그림 9는 정상 모드에서 바이패스 모드로의 전환시 전원측과 부하측 전압 전류 실험파형을 보여주고 있다. 전원전류는 바이패스 모드로 전환함과 동시에 배터리 충전전류만 흐르게 되고, 이에 따라 병렬인버터에서는 전원과 동기된 전압을 만들게 되므로, 부하전압에는 전환시 발생하는 과도상태가 거의 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 그림 10은 바이패스 모드에서 정상모드로의 전환시 전원측과 부하측 전압 전류 실험파형을 보여주고 있다. 모드전환을 통해 충전전류와 부하전류를 병렬인버터에서 공급하게 되므로 전원전류는 역률을 유지하면서 증가하게 된다.

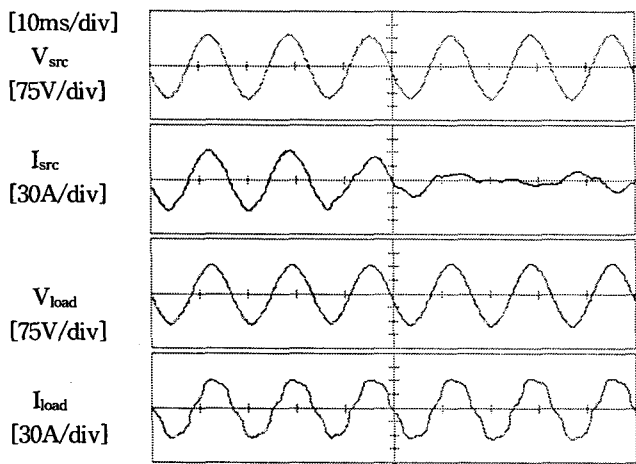


그림 9 정상모드에서 바이패스모드로 전환시
Fig. 9 Mode change from normal to bypass

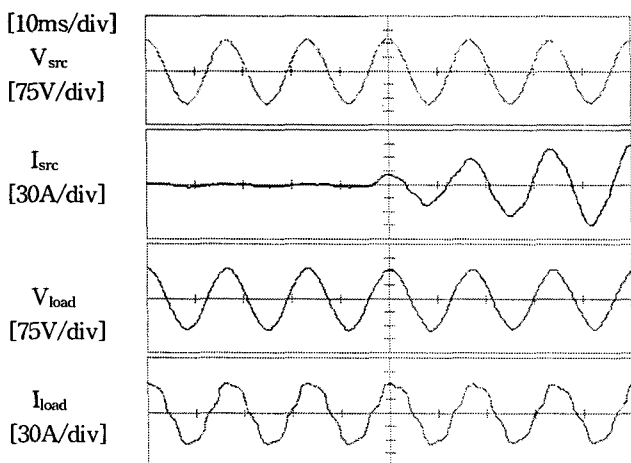


그림 10 바이패스모드에서 정상모드로 전환시
Fig. 10 Mode change from bypass to normal

5. 결 론

본 논문에서는 AC 라인 리액터와 병렬 및 직렬 능동필터를 가지는 새로운 3상 Line-Interactive UPS 시스템의 전압 제어 방식에 대해 제안하였다. 병렬인버터의 전압제어기는 AC 리액터에 흐르는 전류를 궤환하여 PI 전류제어기에다 전원전압의 전향보상 부분을 추가하여 구현함으로써, 전원전류의 역률 1제어를 만족할 수 있었다. 또한 직렬인버터의 전압제어기는 과도상태 응답을 개선하기 위해 LC 필터의 감쇠성분을 증가시킨 전향보상형 전압제어기를 사용함으로써, 병렬인버터에 의해 제어되는 AC 리액터 전류에 의한 전압강하에 해당하는 전압부분과 병렬인버터 커패시터 전압의 기본파를 제외한 고조파 전압부분을 직렬인버터에서 보상하여 원하는 부하 전압을 출력할 수 있었다. 제안한 병렬 및 직렬 인버터의 전압제어방식은 새로운 3상 Line-Interactive UPS 시스템에서 병렬 및 직렬 인버터의 전압제어에 필요한 속응성과 정확도를 만족하는 제어방식임을 60KVA UPS 시스템의 정상모드에서의 비선형 부하 실험과 모드 전환 실험 등을 통해서 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행한 연구임(R05-2004-000-11094-0)

참 고 문 헌

- [1] Shri Karve, "Three of a Kind UPS topologies, IEC standard," IEE Review, vol. 46, Mar. 2000, pp. 27-31.
- [2] Bekiarov S. B. and Emadi A., "Uninterruptible Power Supplies : Classification, Operation, Dynamics, and Control," in Proc. APEC' 2002, pp. 597-604.
- [3] Jinn-Chang Wu and Hurng-Liahng Jou, "A New UPS Scheme Provides Harmonic Suppression and Input Power Factor Correction," IEEE Trans. Ind. Electron. vol. 42, Dec. 1995, pp.629-635.
- [4] G. Joos, Y. Lin, and et al. "An ON-line UPS with Improved Input-Output Characteristics," in Proc. APEC'92, 1992 pp. 598-605.
- [5] Soren Rathmann and Henry A. Warner, "New Generation UPS Technology, The Delta Conversion Principle," in Proc. IEEE IAS Annu. Meeting 1996, pp. 2389-2395.
- [6] Farrukh Kamran and Thomas G. Habetler, "A Novel On-line UPS with Universal Filtering Capabilities," IEEE Trans. Power Electron., vol. 13, May 1998, pp. 410-418.
- [7] S.A.O. da silva, and et al. "A Three-phase Line-interactive UPS System Implementation with series-parallel Active Power-Line Conditioning Capabilities," IEEE Tran. Ind. Applcat. vol. 38

Nov./Dec. 2002, pp. 1581-1590.

- [8] Jun-Keun Ji, Jang-Hwan Kim, Seung-Ki Sul, Hyo-Sung Kim, "A Novel Three-Phase Line-Interactive UPS System with Parallel-Series Active Power-Line Conditioning Capabilities Using AC Line Reactor," Conference Record of IECON'04, Ind. Application, vol. 38, FB2-6, Nov, 2004.
- [9] Jang-Hwan Kim and Seung-Ki Sul, "A Carrier-Based PWM Method for Three-Phase Four-Leg Voltage Source Converters," IEEE Tran. Power Electron., vol. 19, Jan. 2004, pp. 66-75
- [10] Sang-Joon Lee, Hyo-Sung Kim, Seung-Ki Sul, Frede Blaabjerg, "A Novel Control Algorithm for Static Series Compensators by Use of PQR Instantaneous Power Theory," IEEE Trans. Power Electronics, vol. 19, No. 3, pp. 814-827, May, 2004.
- [11] Sang-Jun Lee, "New PLL Method and Voltage Controller of Series Compensator for Voltage Sag Compensation," Ph. D Thesis, 2003.
- [12] 지준근, 김효성, 설승기, 김경환, "무정전전원장치에 적합한 주파수 제한기와 안티 와인드업을 가지는 PLL 방식", 전력전자학술대회논문집(2004. 7. 12~15), pp. 778-782.



설 승 기 (薛 承 其)

1958년 3월 25일생. 1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1986년~1988년 Univ. of Wisconsin-Madison 연구원. 1989년~1990년 LG산전 책임연구원. 1991년~현재 서울대 전기·컴퓨터공학부 교수.
 Tel : 02-880-7251, 02-883-7641
 Fax : 02-878-1452
 E-mail : sulsk@plaza.snu.ac.kr

저 자 소 개



지 준 근 (池 俊 根)

1964년 8월 13일생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1994년~현재 순천향대 정보기술공학부 교수.
 Tel : 041-530-1371
 Fax : 041-530-1548
 E-mail : jkji@sch.ac.kr



김 장 환 (金 長 煥)

1975년 8월 22일생. 1999년 2월 서울대 전기공학부 졸업. 2001년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2004년 9월~2005년 8월 미국 Texas A&M 대학교에서 Power Quality and Power Electronics Lab.의 객원 연구원. 현재 삼성전자 생산기술연구소 책임연구원.
 Tel : 031-200-6399
 Fax : 031-200-2420
 E-mail : janghwane.kim@samsung.com