

3상 모듈형 UPS용 PFC 제어기 설계

A PFC Controller Design for 3-Phase Modular UPS

김 상 훈* 박 내 춘**
Kim, Sang-Hoon Park, Nae-Chun

Abstract

In this paper a new PFC Controller for 3-Phase Modular UPS(Uninterruptible Power Supplies) is proposed. The PFC circuit for 3-Phase Modular UPS is implemented using three 1-phase 3-level boost PFC circuits. To control DC output voltage, single voltage controller considering imbalance of two capacitor voltages and to regulate AC input current three independent current controllers are used in proposed PFC controller. By the proposed method, without additional hardware, THD(Total Harmonic Distortion) of input currents can be readily limited below 5% which is the harmonic current requirements by IEEE std. 519. Its validity is verified by simulations and experiments.

키워드 : PFC, 모듈형 UPS
Keywords : PFC, Modular UPS

1. 서론

IEC 555-2, IEEE 519와 같은 국제규제범규에 의해 고조파에 대한 기준이 정해지면서 PFC (Power Factor Correction)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. UPS(Uninterruptible Power Supplies) 시스템에서도 입력단에 고조파를 저감시키고 역률을 1로 제어하기 위해서 PFC를 사용하는 것이 보편화되어 있다.

특히 병렬운전을 통한 용량 확장 및 시스템 신뢰성 확보를 위해서 최근에는 3상 모듈형 UPS 시스템이 많이 사용되고 있다. 이러한 시스템에서는 높은 효율을 갖는 소형의 시스템 구현을 위해서 PFC 회로에 3개의 단상 PFC 모듈을 3상으로 연결하는 구성이 통상 사용된다. 3개의 단상 PFC

모듈은 각 상에 연결되어 서로 간섭을 받지 않고, 3상의 입력 전류를 독립적으로 제어한다.

또한 단상 3-레벨 부스트 PFC는 높은 전력 밀도와 효율을 증가시키는 장점을 가지고 있어 모듈형 On-line UPS에서 널리 사용되고 있다.[1] 3-레벨 부스트 PFC에서는 두개의 스위치를 이용하여 두개의 커패시터의 전압과 인덕터 전류를 제어한다.[2] 이를 위한 제어 방법으로는 윗상과 아래상이 각각 독립된 DC전압 및 AC 전류 제어기로 계통전압의 극성에 따라 제어하는 방법[3]과 두 개의 DC 전압 제어기를 계통전압의 극성에 따라 사용하고 AC 전류 제어기는 공통으로 사용하는 방법 [4] 등이 있다.

본 논문에서는 3상 모듈형 UPS에 사용하는 3-레벨 부스트 PFC를 위한 새로운 제어기를 제안하였다. 제안하는 PFC 제어기는 DC 전압 제어기를 3개 모듈이 공통으로 사용하고, AC 전류 제어기는 각상이 독립적으로 사용하는 구조를 채택하였다. 제안한 방법은 계통전압 극성에 따라 제어기를 바꾸지 않아 제어기 절환에 의한 왜곡이 없고,

* 강원대학교 전기전자공학과 교수, 공학박사, 교신저자

** 강원대학교 전기전자공학과 박사 과정

제어기의 감소로 인하여 연산시간을 줄일 수 있다. 제안하는 PFC 제어기의 성능을 확인하기 위하여 3kVA급 3상 PFC에 시뮬레이션과 실험을 수행하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 3-Level Boost PFC

2.1 단상 PFC

모듈형 UPS에 사용되는 3-level PFC 회로는 그림 1과 같이 사이리스터 정류기(D_1, D_2)와 부스트 인덕터(L), 두 개의 커패시터(C_1, C_2), 그리고 두 개의 스위치(Q_1, Q_2)로 구성된다. 모듈형 UPS에서는 사이리스터 정류기를 사용하여 전원을 끄지 않고 각 모듈을 교체하는 핫스왑(Hot Swap) 기능을 사용할 수 있다.

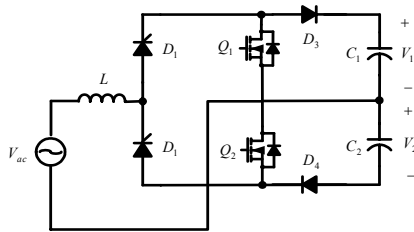


그림 1 3-level PFC 회로

3-level boost PFC의 계통전압에 따른 동작이 그림 2에 보인다. 계통전압이 (+)일 때 인덕터의 전류는 윗상 스위치 Q1에 의해 제어 된다. Q1이 on인 동안에 에너지는 인덕터에 저장되고, Q1이 off되면 인덕터에 저장된 에너지는 D3를 통하여 커패시터를 충전한다. 인덕터에 흐르는 전류는 계통 전압과 동상의 정현파가 되도록 제어된다. 계통 전압이 (-) 일 때는 아랫상이 윗상과 동일하게 동작한다.

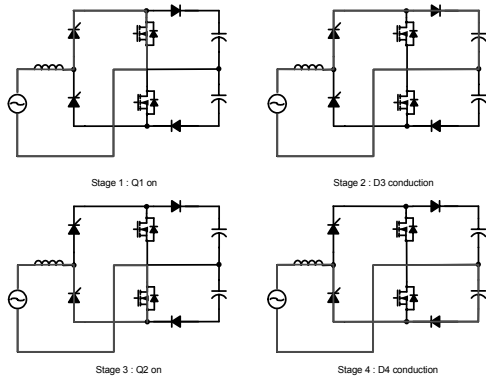


그림 2 회로 동작

2.2 삼상 PFC

3개의 단상 PFC 모듈을 이용하여 3상 PFC를 그림 3과 같이 구성할 수 있다. 중선점이 존재함에 따라 각 상은 디커플링(Decoupling)되고 3상 AC 전류는 각각 독립적으로 제어할 수 있다.

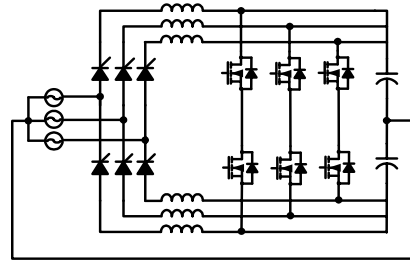


그림 3 삼상 PFC 회로

3. 3-Level PFC 제어

3.1 기존의 제어방법 I [3]

이 방법은 그림 4에서 보이는 것과 같이 윗상과 아랫상이 각각 독립된 DC전압 및 AC전류 제어를 사용하고 계통전압의 극성에 따라 윗상 제어기와 아랫상 제어기가 각각 동작하게 된다. 이때 계통전압과 동일한 위상에 전류지령을 만들기 위해 계통전압을 센싱하여 전압제어기 출력과 곱하게 된다. 이 방법은 계통전압에 왜곡이 발생할 경우 지령전류에도 왜곡이 발생하게 되고 3상으로 구성할 경우 제어기가 많이 사용되는 단점이 있다.

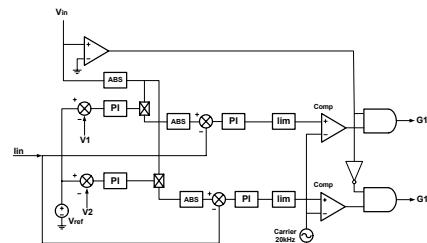


그림 4 기존에 제어방식 I

3.2 기존의 제어방법 II [4]

이 방법은 그림 5에서 보이는 것과 같이 윗상과 아랫상이 독립된 전압제어기를 사용하고 계통전압의 극성에 따라 한 개의 전류제어기를 번갈아 사용한다. 이 방법은 계통전압의 위상을 PLL(Phase Locked Loop)을 이용하여 가져옴으로서 계통전압 왜곡에 따른 전류지령의 왜곡은 피할 수 있지만 전압제어기를 스위치를 이용하여 선택함으로써 계통전압의 극성이 바뀌는 과도상태에서 지령전류에 왜곡이 발생할 수 있다.

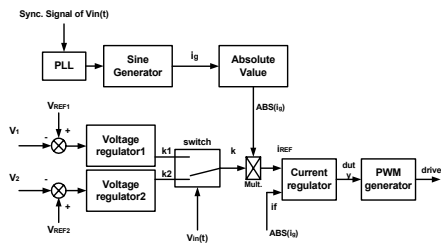


그림 5 기존에 제어방법 II

3.3 제안한 제어 방법

그림 6은 제안한 방법의 제어 블럭도를 나타내고 있다. 제안한 방법은 하나의 전압제어기와 전류제어기를 사용하여 극성에 따라 제어기를 바꾸지 않고, PLL과 사인과 발생기를 이용하여 계통전압이 왜곡 되었을 경우에도 입력 전류를 정현차에 가깝게 제어 할 수 있다. 전압제어기를 공통으로 사용함에 따라 발생할 수 있는 양단 커패시터 사이에 전압 불평형 성분을 보상하기 위하여 커패시터 전압 V_1 과 V_2 의 오차를 불평형 제어기를 이용하여 전압제어기 출력에 보상하였다.

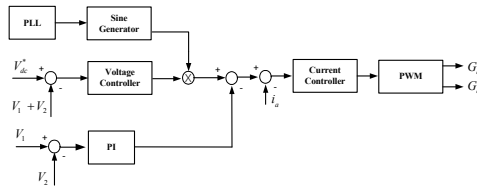


그림 6 제안한 제어방법

3.4 삼상 PFC제어

그림 7은 제안한 방법을 삼상 PFC에 적용한 블럭도를 나타내고 있다. DC 전압을 제어하기 위해서 한 개의 전압제어기를 사용하였고, 전압제어기 출력에 PLL을 이용하여 얻은 각 상의 위상을 곱하여 각 상의 지령전류를 생성한다. 각 상전류를 독립적으로 제어하기 위해서 세 개의 전류제어기를 사용하였고, 불평형 전압 제어기를 이용하여 커패시터의 불평형 성분을 보상하였다.

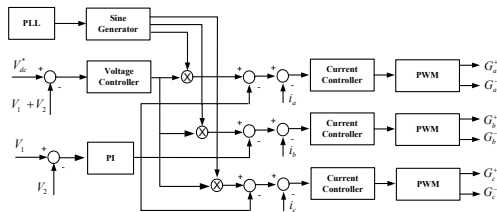


그림 7 삼상 PFC 제어기

3.5 단상 PLL

위상정보의 검출 및 동기화를 위해 PLL이 사용되는데, 본 논문에서는 가상 2상 방식의 단상 PLL 기법을 사용하였다. 이 방법은 계통전압과 90° 위상의 가상의 전압을 만들어 동기좌표계상에서 위상을 검출한다. 단상 PLL 모델을 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다[5].

$$\begin{bmatrix} V_{gs}^s \\ V_{ds}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cos \theta \\ V_m \sin \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ds}^e \\ V_{gs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta^* & -\sin \theta^* \\ \sin \theta^* & \cos \theta^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds}^s \\ V_{gs}^s \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (1)에 식(2)을 대입하여 정리하면 식(3)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} V_d^e \\ V_g^e \end{bmatrix} = V_m \begin{bmatrix} \cos(\theta^* - \theta) \\ \sin(\theta^* - \theta) \end{bmatrix} = V_m \begin{bmatrix} \cos \Delta \theta \\ \sin \Delta \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

계통 전압의 위상 θ 와 PLL의 위상 θ^* 의 차이인 $\Delta\theta$ 를 0으로 제어함으로써, 계통전압과 동일한 위상정보를 얻을 수 있다.

그림 8은 가상 2상 방식의 단상 PLL의 블럭도를 나타내고 있다. 계통전압과 90° 위상의 전압을 만들기 위해 APF(All Pass Filter)를 사용하였고, 왜곡 성분을 제거하기 위해 LPF(Low Pass Filter)를 입력단에 사용하였다.

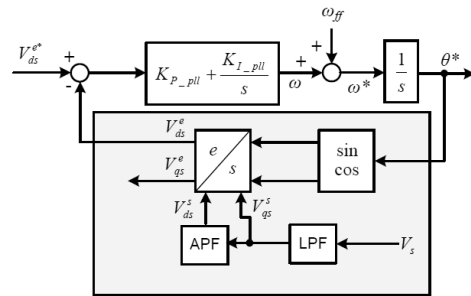


그림 8 단상 PLL 블럭도

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 조건

제안된 제어기의 성능을 확인하기 위하여 3kVA 급 3상 PFC를 PSIM을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다, 스위칭 주파수는 20[kHz]이며, 스위칭 소자로는 MOSFET를 사용하였고, 직류단 전압은 400[V]로 제어하였다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 시뮬레이션 파라미터

계통전압	110 [V]
인덕턴스	750 [uH]
커패시턴스	2200[uF]

그림 9는 전체 시뮬레이션 구성도를 나타내고 있다. 시뮬레이션에서 제어기는 PSIM의 dll 라이브러리를 사용하여 C언어로 디지털 제어를 구현하였다.

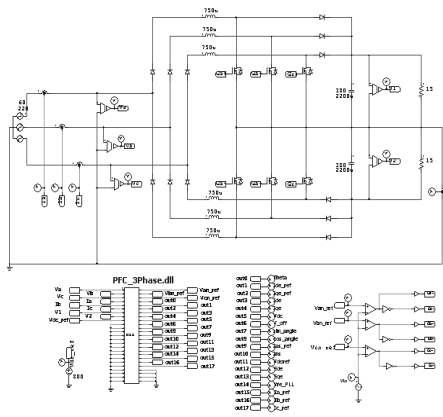


그림 9 시뮬레이션 구성도

4.1 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 두 개의 커패시터 양단의 부하가 평형인 경우와 부하가 33% 불평형인 경우에 대하여 수행하였다.

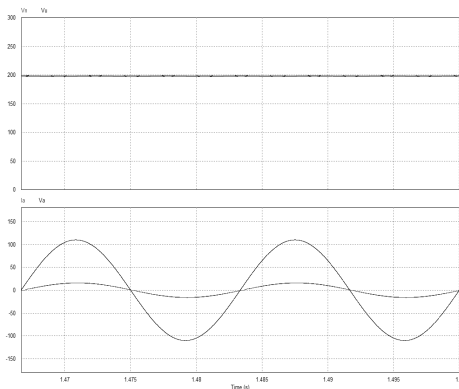


그림 10 시뮬레이션 결과(평형부하인 경우)

그림 10은 계통전압과 입력 전류, 그리고 직류 출력단 전압파형을 나타내고 있다. 역률은 거의 1이고, 전류의 THD는 2.6%로 나타나고 있다. 직류 출력단 전압은 동일하게 200[V]로 제어되고 있다.

그림 11은 두 개의 커패시터 양단의 부하가 각각 30[Ω]과 20[Ω]으로 약 33%의 차이가 있는 불평형 부하인 경우에 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다.

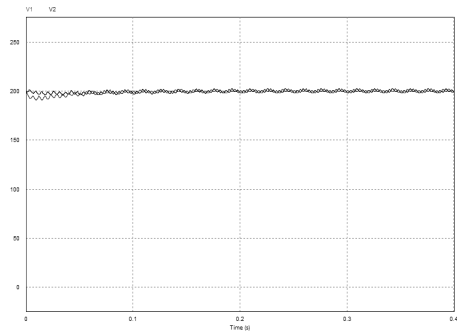


그림 11 시뮬레이션 결과(33% 불평형부하인 경우)

부하에 약 33%의 불평형에 대해 입력 역률은 거의 1로 잘 제어되고 있으며, 직류 출력단 두 개의 커패시터 전압도 동일하게 제어된다.

4. 실험 결과

제안한 제어기의 타당성을 검증하기 위하여 3kVA급 3상 PFC에 실험을 수행하였다. 제어기로는 TI(Texas Instrument)사의 DSC TMS320F28335를 사용하였다. 스위칭 주파수는 16[kHz]이고 직류단 전압은 400[V]로 제어하였다. 실험에 사용한 파라미터는 시뮬레이션과 동일하다. 실험에 사용한 3상 모듈형 UPS용 PFC는 그림 12와 같다.

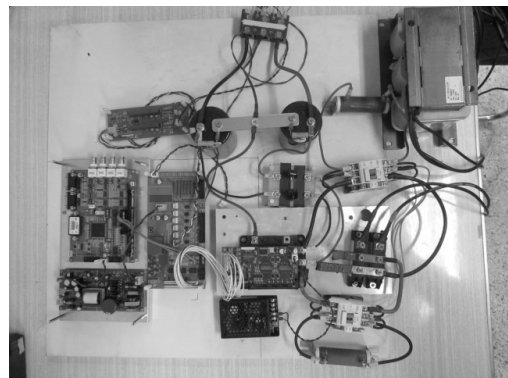


그림 12 3상 모듈형 UPS용 PFC

그림 13은 평형부하인 경우에 입력전압과 전류 그리고 출력 직류전압을 나타내고 있다. 역률은 거의 1로 제어되고 두 개의 커패시터의 전압도 동일하게 제어되는 것을 확인할 수 있다.

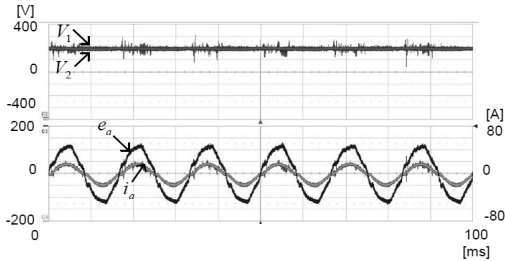


그림 13 실험 결과(평형부하인 경우)

그림 14는 부하에 15% 불평형이 발생한 경우에 실험 파형을 나타내고 있다. Flag가 1이 된 시점부터 불평형 제어기가 동작하게 되고 불평형 제어기가 동작함에 따라 두 개의 커패시터의 전압은 동일하게 제어되게 된다.

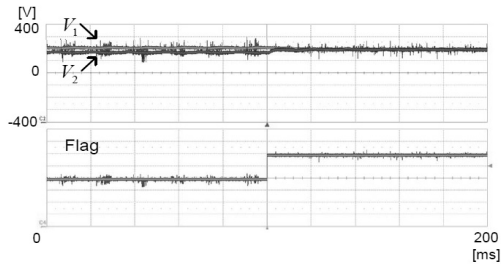


그림 14 실험 결과(33% 불평형부하인 경우)

4. 결론

본 논문에서는 단상 3-레벨 부스트 PFC 3개를 사용한 3상 모듈형 UPS용 PFC의 출력전압과 입력전류 제어를 위한 새로운 제어기를 제안하였다. 제안한 PFC 제어기로 시뮬레이션과 실험을 수행한 결과 입력단 역률은 항상 거의 1이 되고 전류의 THD도 평형 부하인 경우 약 5% 이하가 되며, 불평형 부하인 경우에도 직류 출력단에 두 개의 커패시터 전압은 동일하게 잘 제어되는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] Jingtao Tan, Yang Li, Zhiqiang Jiang, Li Cai, Jianping Ying, "A Novel Three-Phase Three-Level Power Factor Correction Converter using Two Single-Phase PFC Modules"

IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp.3060-3064, 2007.

- [2] Lin Chen, Jingtao Tan, Zhiqiang Jiang, Jianping Ying, "A Three-Level Power Factor Correction Converter with Digital Control" *IEEE APEC2005*, pp.1119~1123, 2005.
- [3] S. B. Bekiarov and A. Emadi, "A New On-line Single-Phase to Three-phase UPS Topology with Reduced Number of Switches," *in Proc. IEEE PESC*, pp. 451-456. 2003.
- [4] Zhiqiang Jiang, Jingtao Tan, Yonghua Cheng, Lin Chen, Hongjian Gan, "Fast Controller Based on Active-Power-feed-forward for PFC Converter Applied to UPS" *IEEE APEC 2005*, pp.573~540. 2005.
- [5] R.A. Gayakwd, *Op-Amps and Linear Integrated Circuits*, Upper Saddle River, New Jersey 07458, Prentice-Hall, Inc., 2000.