

독립형 태양광 인버터의 병렬 운전 기법

Parallel operating technique for the stand alone PV PCS

정구인* · 권정민**†

Jeong Ku-In* and Kwon Jung-Min**†

(Received 06 October 2015; accepted 04 December 2015)

Abstract : In this paper, a parallel operating technique for the stand alone photovoltaic (PV) power conditioning system (PCS) is proposed. The proposed parallel operating technique can increase the power rating of the system easily. Also, it provide three-phase connection function. The proposed technique does not separated master and slave system. Also, it does not use the separated synchronization line. Therefore, the PCS can supply continuous power even if one of the PCS breaks down. This technique is composed of a phase locked loop (PLL) control, droop control, current limit control and etc. Experimental result obtained on 2-kW prototype to verify the proposed technique.

Key Words : 병렬운전(Parallel operation), 독립형 태양광 발전 장치(Stand alone photovoltaic power conditioning system.)

1. 서 론

독립형 태양광 발전 시스템은 상용전원을 공급받지 못하는 도서지역이나 산간지역 등에서 에너지 저장장치와 복합적으로 운전하여 부하에 전력을 공급하는 용도로 운용되고 있다.¹⁾ 독립형 태양광 발전 시스템은 수요가 적어 대량생산에 불리해 생산단가가 높다는 단

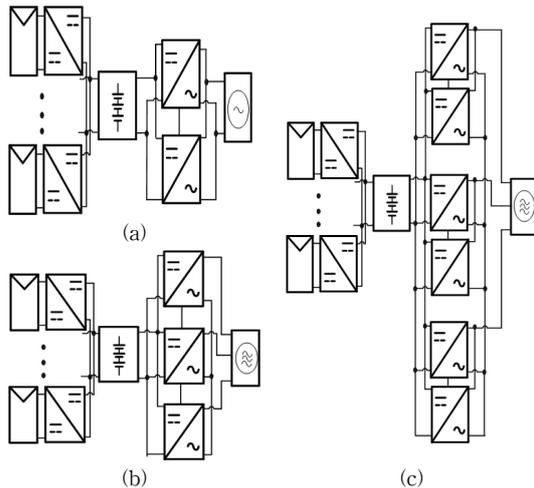
점이 있다. 이를 해결하기 위한 방안으로, 병렬연결 운전이 가능한 단일 독립형 인버터만을 생산하고, 필요에 따라 병렬 연결하여 사용하는 방안이 있다. 병렬 운전 기능과 삼상 운전 기능을 포함하고 있을 경우, Fig. 1과 같은 종류의 인버터를 필요로 하는 용량과 상황에 맞게 병렬 연결하여 대용량 단상 인버터 및 대용량 삼상 인버터를 구성할 수 있다. 이

**† 권정민(교신저자) : 한밭대학교 전기공학과
E-mail : jmkwon@hanbat.ac.kr
*정구인 : 한밭대학교 전기공학과

**† Kwon Jung-Min(corresponding author) : Department of Electrical Engineering, Hanbat National University.
E-mail : jmkwon@hanbat.ac.kr
*Jeong Ku-In : Department of Electrical Engineering, Hanbat National University.

경우, 인버터의 생산에 있어 한 종류의 인버터만 대량 생산하여 단상, 삼상, 대용량 단상, 대용량 삼상 인버터를 필요에 따라 만들 수 있으므로, 인버터의 생산 단가를 낮출 수 있는 장점이 있다.

인버터를 병렬 연결할 경우, 병렬 연결된 인버터들 사이에 출력전압의 위상과 크기가 다르면 순환 전류가 발생할 수 있다. 발생한 순환전류는 인버터의 전류 스트레스를 증가시킬 뿐만 아니라 시스템의 신뢰도를 떨어뜨린다.^{2),3)} 병렬 연결된 인버터 중 1개의 인버터만 고장이 나도 전체 시스템이 오동작할 수 있다. 고장이 발생한 인버터는 멈추고 나머지 인버터로 부하에 전력 공급이 가능하다면, 좀 더 높은 신뢰도를 가질 수 있다.^{4),5)} 병렬운전 인버터의 또 다른 요구사항으로는 핫 스왑 기능이 있다. 핫 스왑이 가능할 경우, 다른 인버터가 동작하는 상황에서 출력전압에 영향을 주지 않으면서 인버터를 추가로 연결하거나 분리할 수 있다.⁶⁾ 병렬운전을 위해 동기 신호선을



(a) Single-phase parallel operation.
 (b) Three-phase parallel operation.
 (c) High-power three-phase parallel operation.

Fig. 1 Parallel operation.

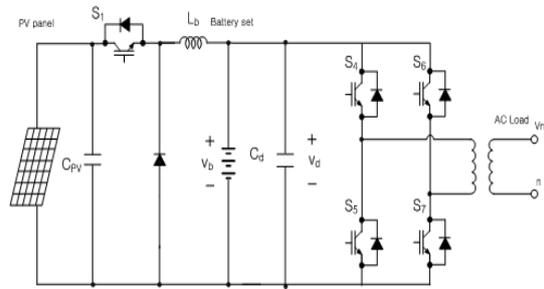


Fig. 2 Stand alone photovoltaic system.

사용하는 경우, 이 신호선이 끊어지거나 연결이 불량할 경우도 오동작 할 수 있다. 본 논문에서는 인버터 간 동기 신호선을 사용하지 않는 병렬운전 기법을 제안한다. 제안한 제어 방식은 순환 전류를 억제하고 병렬로 연결된 인버터가 같은 전력을 분담할 수 있도록 했다. 또한, 일부 인버터가 고장 날 경우, 고장 난 인버터만 멈추고 다른 인버터가 전력을 공급할 수 있다. 핫 스왑 기능도 가능하며, 전체 시스템 동작 중에, 인버터를 추가 및 제거가 가능하다. 따라서 전체 시스템의 안정성을 증가되고 유지보수가 용이하다. 또한 동기 신호선을 사용하지 않아, 동기 신호선 연결 불량에 대한 위험성이 없다. 제안한 기법의 검증을 위해 2[kW] 시스템을 제작하여 검증하였다.

2. 인버터 동작 및 MPPT 충전기

Fig. 2는 본 연구에서 적용된 독립형 태양광 시스템의 강전 회로이다. 일반적으로, 개발도상국에서는 48[V] 이하의 배터리 전압을 많이 사용하는 점을 고려하여 벽컨버터를 이용하여 최대전압추종(MPPT) 제어를 하며, 태양광 전력을 배터리와 인버터에 전송한다. 또한, 현지에서 인버터 수리가 힘든 점을 고려하여, 신뢰성이 높은 변압기형 인버터를 적용하였다.

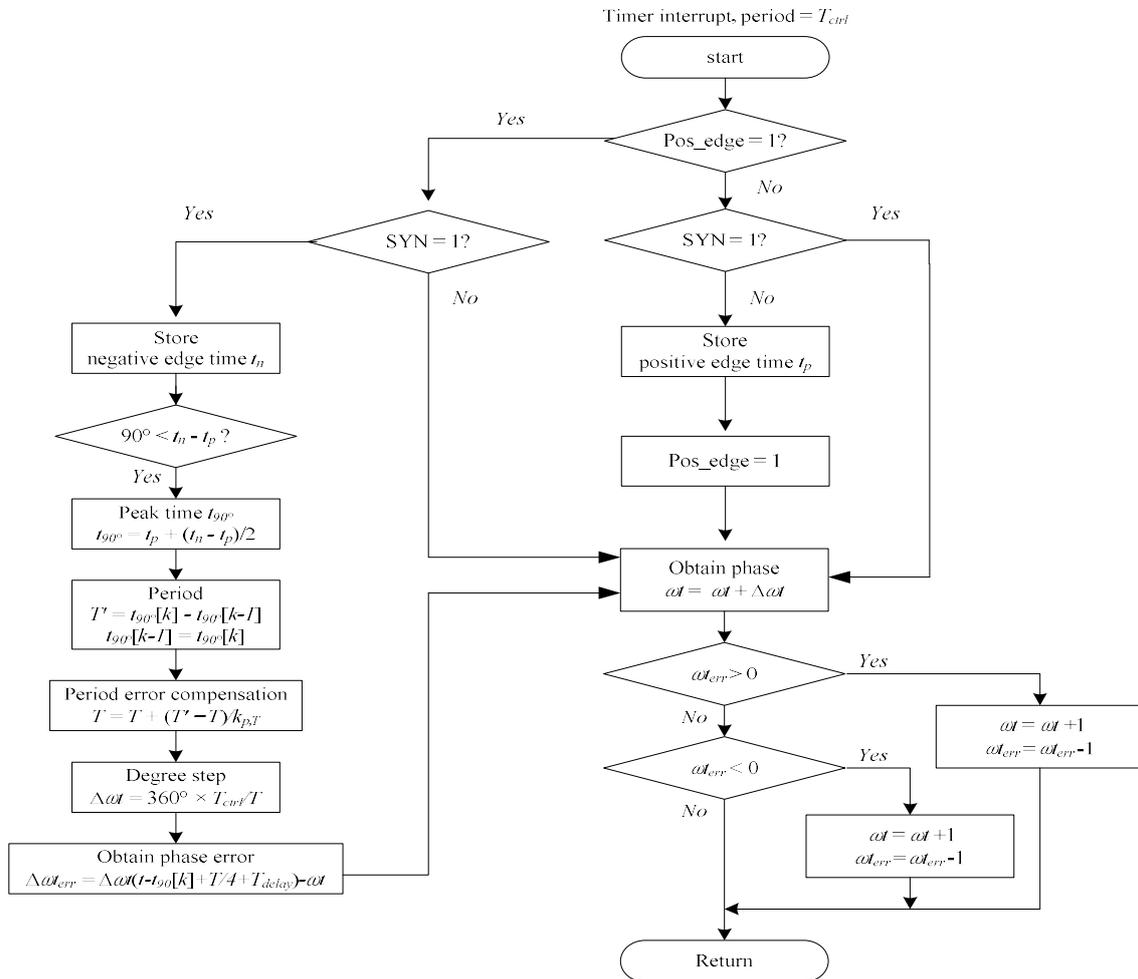


Fig. 3 Flowchart of a phase-locked loop(PLL) for parallel operation. ⁸⁾

제안된 제어기법을 사용하는 인버터는 일반적인 단상 독립 인버터의 기능 외에도 병렬운전기능과 3상 기능을 포함하고 있어, 다양한 상황에 맞게 동작할 수 있다. 예를 들어 부하에서 인버터 정격 이상의 전력을 필요로 하는 경우, 개발된 인버터를 Fig. 1(a)와 같이 병렬로 연결하여 구동할 수 있다. 그림에서 병렬 연결된 두 대의 인버터는 부하가 필요로 하는 전력의 절반을 각각 부담하며, 전체 인버터 용량을 두 배로 증가시킨다. 이렇게 인버터를 부

하가 필요로 하는 전력에 따라 추가로 병렬 연결하면, 대용량 인버터를 새로 구매할 필요 없이 전체 인버터 용량을 부하가 필요로 하는 전력에 맞게 증가시킬 수 있다. 다음으로 3상 인버터가 필요한 경우, 개발된 인버터를 Fig. 1(b)와 같이 연결하면 3상 인버터로 동작할 수 있다. 제안된 병렬 운전 기법을 사용하는 인버터는 기준 전압을 측정하여 위상을 120° 또는 240° 이동시켜서 이것을 출력할 과형의 위상으로 사용한다. 따라서 위상이동이 없는

인버터, 120° 이동시킨 인버터 그리고 240° 이동시킨 인버터 3대를 이용하여 3상 인버터를 만들 수 있다. 마지막으로 대용량 3상 인버터가 필요할 경우, 개발된 인버터의 병렬운전기능과 3상 기능을 사용하여 대용량 3상 인버터를 만들 수 있다.

3. 시스템의 제어

3.1 인버터 제어

병렬 연결된 인버터들은 조금의 위상과 크기의 차이로 인해 연결된 인버터들에게 과부하 및 손상 등의 문제를 발생시킬 수 있다.⁷⁾ 따라서 두 인버터 사이의 동기화는 필수적이며 본 연구에서는 인버터의 출력에서 측정된 전압과 전류를 이용해 두 인버터를 병렬 운전했다. 개발된 인버터는 출력에서 측정된 전압이 없는 경우, 병렬 연결된 인버터가 없는 것으로 판단하고 독립적으로 동작한다. 반면에 전압이 측정되면, PLL을 통해 전압의 위상을 측정하여 출력할 파형의 위상을 결정하고 인버터에 흐르는 출력 전류의 크기에 따라 출력 전압의 크기를 제어한다.

Fig. 3은 인버터의 동기화를 위해 사용한 PLL의 흐름도를 나타내고 있다.⁸⁾ 사용된 PLL은 출력전압의 극성이 양극에서 음극으로 바뀌는 시점에서의 시간(t_n)을 저장하고, 음극에서 양극으로 바뀌는 시점에서의 시간(t_p)을 저장한다. 저장된 두 시간을 이용하여 파형이 최댓값에 도달했던 시점(t_{90})을 다음과 같이 계산한다.

$$t_{90} = t_p + \frac{t_n - t_p}{2} \quad (1)$$

계산된 시점과 과거에 최댓값에 도달한 시

점을 이용하여 병렬 연결된 인버터의 주기와 위상을 계산한다. 또한, 제어 주기마다 발생하는 실제 위상과 계산된 위상의 오차(Δwt)를 다음과 같이 계산한다.

$$\Delta wt = 360^\circ \times \frac{T_{ctrl}}{T} \quad (2)$$

식(2)에서 T_{ctrl} 은 제어 주기를 의미하고 T 는 측정된 주기를 의미한다. 계산된 위상차이(Δwt)만큼 출력할 파형의 위상(wt)을 보정하여 측정된 위상과 출력할 전압의 위상을 일치시킨다.

다음으로 두 인버터 사이의 출력 전압 및 전류 균형을 위해 인버터의 출력전류를 기준으로 전압을 조정하는 방식의 드롭제어 방식을 사용했다. 그림 4는 드롭제어와 PLL을 포함하는 인버터의 제어 블록다이어그램이다. 출력 전류가 커질수록 출력 전압이 줄도록 하여, 병렬 연결된 다른 인버터의 전압보다 낮아질 경우 다른 인버터가 출력 전력을 좀 더 부담하게 되어 전력 균형이 맞춰진다. 인버터의 출력에 과전류가 흐를 경우 전류제한을 하여 과전류를 막는다.

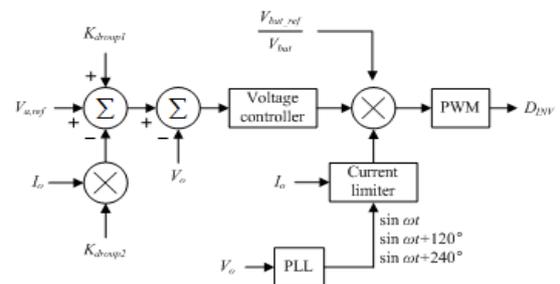


Fig. 4 Control block diagram of the inverter.

Fig. 5와 같이 인버터 사이에 출력전압의 차이($v_{INV1} > v_{INV2}$)가 발생하여 INV1에서

INV2로 흐르는 순환전류가 발생하면, 출력전류의 방향이 양의 방향이 되어 INV1의 듀티비가 감소하고 출력전압(v_{INV1})의 크기 또한 점차 감소한다. 반면 INV2의 경우 출력전류의 방향이 음의 방향이 되어 듀티비가 증가하고, 출력전압(v_{INV2})의 크기 또한 점차 증가한다. 출력 전압이 증가하면 자연스럽게 전압이 큰 인버터의 출력 전류가 증가하고, 이로 인해 출력 전압이 내려간다. 이러한 출력전압의 변화는 두 인버터의 전압 크기가 일치할 때까지 지속되며, 결과적으로 두 인버터의 전압 크기가 일치되어 같은 양의 전력을 부하에 공급한다. 두 인버터에서 출력하는 파형의 위상이 일치하고 전압의 크기가 같아지는 때를 기준으로, 병렬 연결된 인버터들은 동일한 전력을 부담하며 병렬운전 된다.

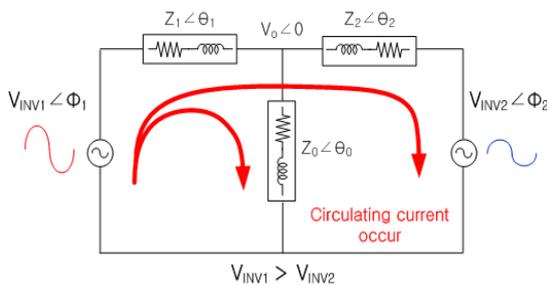


Fig. 5 Circulating current according to the Inverter voltage.

3.2 3상 제어

제안된 병렬운전 기법을 사용하는 인버터는 3상 기능을 포함하고 있어 개발된 인버터 3대를 이용하여 3상 인버터를 만들 수 있다. 3상 기능을 사용할 경우, 선행 동작하고 있는 인버터의 전압을 PLL을 통해 측정하고 동기화 한다. 이후에 연결될 보조인버터는 측정된 위상을 기준으로 각각의 위상을 120° 또는 240° 이 동시켜 출력할 파형의 위상을 결정한다.

3.3 전류 제한 제어

인버터의 출력에 커패시터 성분이 큰 부하가 접속되는 경우, 인버터에 순간적으로 과전류가 흐르게 되며, 이 과전류로 인한 스위치 소자의 손상이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해 전류 제한 제어방식을 적용하였다. 가격 절감을 위해 추가적인 회로를 사용하지 않고, 제어 알고리즘만을 이용하였다. 사용된 전류 제한 제어는 부하에 과전류가 흐를 경우, 출력 전압을 줄여 부하로 공급되는 전류를 제한한다. 부하로 공급하는 전류를 제한하기 위해 \sin_ref 의 값을 출력전류의 크기에 따라 제어했다. Fig. 6은 사용된 전류제한 제어의 흐름도를 보여준다.⁹⁾

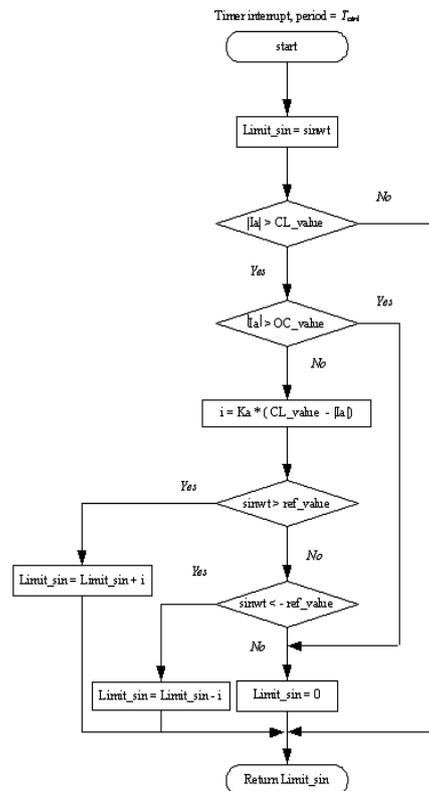


Fig. 6 Flowchart of a current limiter.

4. 실험 결과



Fig. 7 Photograph of the paralleled inverter

Fig. 7은 인버터의 병렬운전 실험 사진이다. 인버터에 사용된 마이크로 컨트롤러는 dsPIC30F6015로 30MIPS의 동작 속도를 갖고 있으며, 10 bit A/D 컨트롤러를 이용해 출력전류와 전압을 측정했다. 100 [us] 주기로 제어했으며, 스위칭 주파수는 15 [kHz]이다.

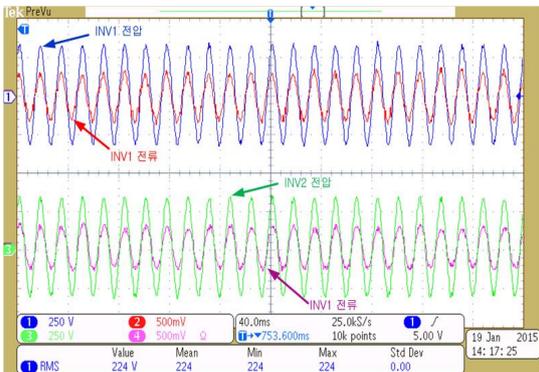


Fig. 8 Output Voltage and current of the inverter.

Fig. 8은 병렬 운전하는 인버터의 전압 및 전류 파형이다. 전압과 전류의 위상이 동일함을 알 수 있고, 두 인버터에 동일한 크기의 전류가 흐르는 것을 알 수 있다. 또한, 두 인버터가 부하가 필요로 하는 전력의 절반을 각각

부담함을 보여주며, PLL과 드롭제어가 정상적으로 동작하고 있음을 알 수 있다.

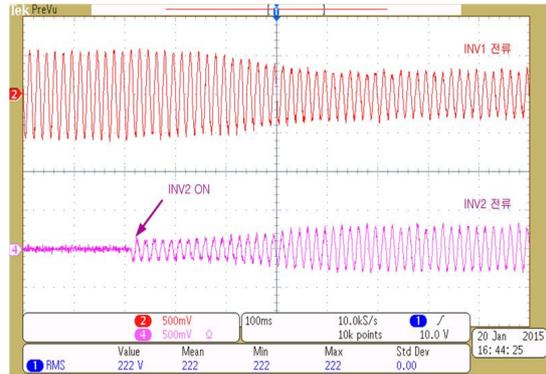


Fig. 9 Output current of the paralleled inverter.

Fig. 9는 한 대의 인버터(INV1)가 먼저 동작하고 있는 상황에서 다른 인버터(INV2)를 병렬 연결하고 동작시켰을 때의 전류 파형을 보여주고 있다. INV1의 전류 파형이 크기만 변할 뿐 파형의 일그러짐이 없는 것을 볼 수 있으며, 이것은 개발된 인버터의 핫 스위칭기능이 정상적으로 동작함을 보여준다. 또한, INV1의 전류 크기가 감소함에 따라 INV2의 전류 크기가 증가함을 볼 수 있고, 전류의 변화는 INV1과 INV2의 전류크기가 같아질 때까지 지속되어 두 인버터가 동일한 전력을 부담함을 알 수 있다.

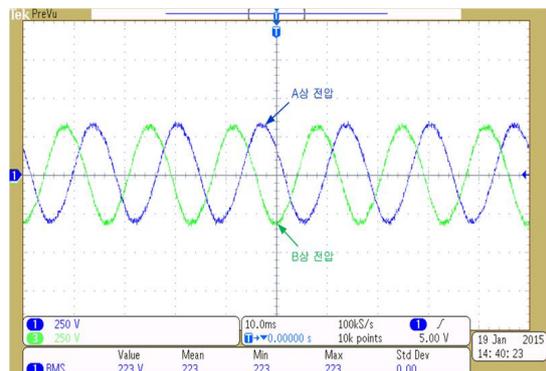


Fig. 10 3 phase output voltage.

제안된 병렬운전 기법을 사용하는 인버터는 A상 전압 측정을 통해 얻은 위상을 120° 또는 240° 이동시켜 출력 파형의 위상으로 사용할 수 있으며, Fig. 10은 인버터의 3상 기능을 이용하여 출력한 기본파형과 120° 위상차를 갖는 출력 파형을 보여주고 있다. 개발된 인버터 3대는 3상 기능을 사용하여 3상 인버터로 동작할 수 있으며 다수의 인버터를 사용하여 대용량 3상 인버터로서도 동작할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 독립형 태양광 발전 시스템에서 사용하는 인버터의 새로운 병렬운전 기법을 제안했다. 제안된 병렬운전 기법을 사용하는 인버터는 병렬로 연결되어 인버터의 용량을 늘릴 수 있으며, 3개의 인버터를 연결하여 3상 인버터를 만들 수 있다. 또한, 병렬운전 기능과 3상 운전 기능을 사용하여 대용량의 3상 인버터로서 동작할 수 있다. 이것은 인버터의 생산에 있어 한 종류의 인버터만 대량 생산하여 단상, 삼상, 대용량 단상, 대용량 삼상 인버터를 필요에 따라 만들 수 있으므로 인버터의 생산 단가를 낮출 수 있는 장점이 있다. 인버터 제어에는 드롭 제어를 이용하여 인버터 병렬연결 시 두 인버터 사이의 전압을 맞춰 두 인버터 사이의 순환 전류를 억제하고 각 인버터가 동일한 전력을 부담하도록 했다. 또한, 전류 제한 제어를 사용하여 인버터에 순간적으로 과전류가 흐르는 것을 막아 인버터를 보호했다.

후 기

본 연구는 2013년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받았음.

Reference

1. Yang. S. D, Jung. S. H, Choi. J. Y, Choy .I, Lee, S. C, Lee. D. H, The Study of Stand-alone Photovoltaic Power Conditioning System, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 31, No. 2, pp. 249-255, 2011.
2. C. Liangliang, X. Lan, and Y. Yangguang, A novel parallel inverter system based on coupled inductors, inProc. 25th INTELEC, Oct. 19 - 23, 2003, pp. 46 - 50.
3. Z. Ye, P. Jain, and P. Sen, Circulating current minimization in high frequency AC power distribution architectures with multiple inverter modules operated in parallel, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 5, pp. 2673 - 2687, Oct. 2007.
4. H. van der Broeck and U. Boeke, A simple method for parallel operation of inverters, in Proc. IEEE INTELEC Conf., 1998, pp. 143 - 150.
5. Shungang Xu , JianpingXu and Tai Qiang , Parallel control strategy of single-phase voltage-source inverter base on synchronous signal bus, Communications, Circuits and Systems, 2009. ICCAS 2009.
6. T. F.Wu, H.M. Hsieh, and Y. E.Wu, Parallel inverter system with failure isolation and hot-swap features, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, no. 5, pp. 1329 - 1340, Sep./Oct. 2007.
7. S. Xu, J. Wang, and J. Xu, A current decoupling parallel control strategy of single-phase inverter with voltage and current dual closed-loop feedback, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 4, pp. 1306 - 1313, Apr. 2013.
8. J. M Kwon, B H Kwon, and K. H Nam, Grid-Connected Photovoltaic Multistring PCS With PV Current Variation Reduction Control, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, s, vol. 56, no. 11, pp. 4381-4388, Nov. 2009.
9. J. K. Park, J. M. Kwon, E. H. Kim, and B. H. Kwon, High-performance transformerless online UPS, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 8, pp. 2943 - 2953, Aug. 2008.