

정상상태 판별을 이용한 고전압전원장치의 Wireless 병렬운전

論 文

53B-4-6

Wireless Parallel Operation of High Voltage DC Power Supply using Steady-state Estimation

白 周 元* · 俞 東 旭* · 孫 鎬 燮*** · 金 長 睦§
(J. W. Baek · D. W. Yoo · H. S. Son · J. M. Kim)

Abstract - This paper presents an improved droop method which minimizes the voltage droop of a parallel-connected power supply. Conventionally, the droop method has been used to achieve a simple structure and no-interconnections among power sources. However, it has a trade-off between output voltage regulation and load sharing accuracy. In this paper, the droop is minimized with a current and droop gain control using steady-state estimation. The proposed method can achieve both good voltage regulation and good load sharing. A design example of two 10kV, 100mA parallel modules is made and tested to verify the proposed current-sharing method.

Key Words : parallel operation, wireless, droop, steady state estimation, DC power supply

1. 서 론

최근, 전원장치의 고 신뢰성, 대용량화가 요구되면서 하나의 전원에서 모든 전력을 부담하는 것 보다 여러 대의 전원을 병렬운전하여 신뢰성을 높이고 용량을 증대시키는 방안이 연구되어 왔다. 전원장치의 병렬운전은 확장이 용이하고, 유지·보수가 편리하며, 넓은 부하 변동 및 높은 신뢰성 등 많은 이점을 가지고 있다.[1,2,3]

전원장치의 병렬운전에서 가장 중요한 것은 부하전류를 균등히 부담하고 안정화시키는 것이다. 일반적으로, 강제적인 전류 분담기능이 없는 병렬운전은 각 모듈의 특성 및 배선임피던스 차이, 센서 및 구성부품들의 오차로 인해 부하전류는 하나 또는 일부 모듈로 집중하여 흐르게 된다. 이것은 시스템의 신뢰성을 감소시키고 특정 장치의 높은 열 스트레스 원인이 된다.[2,3,4,5]

여러 문헌에서 전원장치의 병렬운전에 관한 제어기법이 보고되어 왔다. 기존에 제안된 방식은 제어구조에 따라 능동전류 분담방식(active current sharing method)과 전압강하방식(voltage droop method)으로 나뉘어 진다.

능동전류 분담방식은 병렬 연결된 모듈간의 출력전류 정보교환을 통해 기준전류를 검출하여 부하분담을 이룬다. 이 방식은 각 모듈이 부담해야하는 기준전류를 설정함으로써 출력전압의 강하없이 균등한 부하분담을 이룰 수 있다.

그러나 모듈수가 증가함에 따라 신호선의 수는 2^N 배 만큼 필요로 하므로 분산전원 시스템에는 적합하지 않으며, 제어 방식에 따라 부가적인 전류검출과 복잡한 연산을 필요로 하게한다. 또한, 병렬 연결된 모듈의 고장 때에는 신뢰성이 저하되며, 신호선의 노이즈 대책도 필요하다.[2,3,4]

전압강하방식은 출력전압의 강하특성에 의존하여 부하분담을 이룬다. 이 방식은 병렬 연결된 모듈 상호간에 출력전류 정보교환 없이 독립적으로 제어되므로 구조가 간단하고 확장 및 모듈화가 용이하다. 그러나, 균등한 부하분담을 위해 내부 또는 외부의 부가적인 저항이나 출력전류에 비례한 전압강하에 의존하므로 전압변동에 대한 대책이 필요하다.[2,3,4,5] 이것을 보완하기 위해 부하에 맥동전압을 실어 주고 맥동 성분의 변화량을 감지하여 전류분배를 하는 방법이 소개되었으나 이 방법은 출력전압에 정현파 맥동주파수가 나타나는 단점이 있다.[6]

따라서, 본 논문에서는 기존의 병렬제어기법의 단점을 보완하기 위해 출력전류의 정보교환 없이 기준전류를 검출하여 출력전압의 강하특성을 개선 할 수 있는 새로운 방법을 제안한다. 기존의 전압 강하방식과 병렬 전원모듈의 전류정보 교환에 의한 제어의 장점을 가지도록 제어 알고리즘을 구현하였다. 제안하는 제어방식은 병렬 연결된 모듈간에 정보교환 없이 독립적으로 제어되므로 리던던시(redundancy) 확보, 핫 스왑(hot swap)기능 및 유지·보수의 편리성으로 인하여 경제적인 이점도 있다.

제안하는 제어기법을 검증하기 위해 시뮬레이션을 통하여 타당성을 확인하고, 10[kV], 100[mA] 고전압 직류 전원장치를 단위 모듈화하여 단위 모듈의 입출력 특성과 병렬운전에서 균등한 부하분담 특성을 실험을 통하여 검토 후 제안된 제어방법의 유용성을 확인하였다.

* 正 會 員 : 韓國電氣硏究員 電力電子그룹 先任硏究員 · 工博

** 正 會 員 : 韓國電氣硏究員 電力電子그룹 責任硏究員 · 工博

*** 正 會 員 : 그린과워 硏究員

§ 正 會 員 : 釜山大學校 電氣電子通信工學部 助敎授

接受日字 : 2003年 11月 18日

最終完了 : 2004年 1月 30日

2. 병렬운전 원리

2.1 출력전압 강하방식의 특성

전압강하방식은 출력전압의 강하특성에 의존하여 부하분담을 이룬다. 이것은 분담하는 부하전류에 비례하여 출력전압을 강하시키는 방식으로 병렬 연결된 모듈 사이에 전류정보교환선을 사용하지 않고, 각 모듈이 독립적으로 부하분담을 제어한다. 출력전압의 강하특성은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_o = V_{initn} - G \cdot I_{on} \quad (1)$$

여기서, V_o 는 출력전압으로 모든 모듈에서 동일하다. V_{initn} 은 n번째 모듈의 초기설정 출력전압이며, G 는 전압강하이득(droop gain)을 나타낸다.

전압강하방식의 부하변동 특성을 그림 1에서 나타내었다. 병렬 연결된 모듈은 특성 차이로 인해 초기 출력전압에 오차가 존재하며, 부하변동 특성 기울기는 동일하다고 가정한다. 그림에서 알 수 있듯이, 초기 출력전압이 높은 전원장치 #1이 전원장치 #2 보다 더 많은 부하전류를 분담하게 된다. 그러나, 출력전류에 비례하여 출력전압을 강하시키는 전압강하방식의 특성으로 인해 출력전압 변동량은 더 크게 나타난다. 또한 전압강하이득을 크게 할수록 출력전압의 변동은 크게 되지만 전류분담 정밀도는 개선되는 것을 볼 수 있다. 그림에서 ΔI_o 는 전류분담오차, ΔV_{o-max} 는 최대전압 강하량이다.

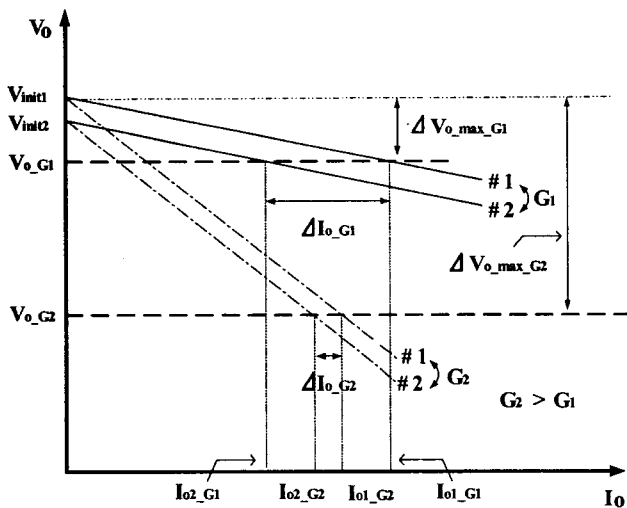


그림 1 전압강하방식의 부하변동 특성
Fig. 1 Load regulation characteristic of the droop method

그림 1의 부하변동 특성과 식(1)을 이용하여 각 모듈의 출력 전압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_o = V_{init1} - G \cdot I_{o1} \quad (2)$$

$$V_o = V_{init2} - G \cdot I_{o2} \quad (3)$$

식(2)와 식(3)에 의해 출력전류 분담오차 ΔI_o 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta I_o = \frac{\Delta V_{init}}{G} \quad (4)$$

여기서, ΔV_{init} 는 각 모듈의 초기설정 출력전압 오차를 나타낸다.

2.2 제안된 병렬운전 방식

2.2.1 정상상태 판정

본 논문에서는 기존 제어방식들의 단점을 보완하기 위해 출력전류의 정보 교환 없이 기준전류를 설정하여 부하분담을 제어한다. 각 모듈은 독립적으로 제어되므로 신호선으로 인한 문제를 해결할 수 있으며, 각 모듈이 분담해야 하는 기준전류를 설정할 수 있으므로 출력전압의 강하 특성에 의존하지 않고 부하분담을 이룰 수 있다.

그림 2에서 부하분담에 따른 정상상태와 과도상태를 나타내었다. 균등한 부하분담이 이루어진 상태를 정상상태라고 하고 부하분담을 이루는 상태를 과도상태로 분류한다면 그림 2에서 정상상태와 과도상태의 출력전류의 변화량이 차이가 있는 것을 알 수 있다. 제안하는 제어기법에서 병렬 연결된 모듈간에 전류정보 교환이 없으므로 출력전류의 변화량을 통해 정상상태와 과도상태를 판별하였다. 그림 2에서 T2와 T4 구간은 부하분담을 이루는 과도상태이며, T3와 T5는 균등한 부하분담이 이루어진 정상상태 구간이다. 여기서 T1구간 역시 정상상태로 구분한다.

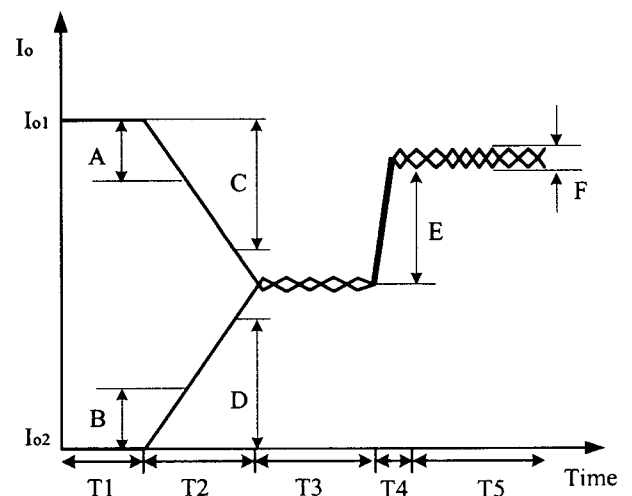


그림 2 정상상태와 과도상태의 부하분담 특성
Fig. 2 Load sharing characteristics of steady and transient states

그림 2에서 전체 출력전류 I_o 는 각 모듈의 출력전류 합이므로

$$I_o = I_{o1} + I_{o2} \quad (5)$$

여기서, I_o 값이 일정하다면, I_{o1} 의 변화량 ΔI_{o1} 은 I_{o2} 의 변화량 ΔI_{o2} 와 같아야 한다. 즉, 병렬 연결된 모듈과 부하 분담을 이루는 과도상태 T2구간에서 I_{o1} 의 출력전류 변화량 A는 I_{o2} 의 변화량 B 같으며, C와 D 역시 같은 크기를 가지게 된다. 부하변동으로 출력전류가 급변하는 T4 구간에서도 병렬 연결된 모듈은 같은 크기의 전류 변화량 E를 가지게 된다.

정상상태시 출력전류 변화량은 그림 2의 F와 같이 일정한 값을 유지하게 된다. 때문에, 전류 변화량을 통해 병렬 연결된 모듈의 과도상태와 정상상태를 판별할 수 있게 된다.

출력전류 변화량 ΔI_{err} 는 식(6)를 통해 검출 할 수 있다.

$$\Delta I_{err} = I_{avrn} - I_{on} \quad (6)$$

여기서, I_{avrn} 은 n번째 모듈의 일정구간 평균전류이며, I_{on} 은 n번째 모듈의 순시전류이다. ΔI_{err} 는 정상상태에서 일정한 값으로 유지되므로 일정 시간 동안 출력전류 변화량이 정해진 범위를 넘지 않는다면 각 모듈은 정상 상태로 인식하게 된다. 또한, 급격한 부하변동 또는 병렬 모듈의 추가 및 운전 실패시에는 출력전류 변화량 ΔI_{err} 가 정해진 범위를 초과 할 것이며, 이것을 통해 각 모듈은 과도상태를 판단하게 된다.

2.2.2 기준전류 설정

능동전류 분담방식은 각 모듈이 분담하는 전류정보를 교환하여 기준전류를 설정한다. 제안하는 방식에서는 모듈 사이에 정보교환선이 없으므로 부하분담을 이루는 과도상태와 균등한 부하분담이 이루어진 정상상태 판별을 통해 기준전류를 설정한다.

그림 3은 제안한 제어방식의 블럭도를 나타낸다. 블럭도에서 볼 수 있듯이, 각 제어기는 독립적으로 동작되며 모듈 간에 정보교환선을 사용하지 않는다. 일정구간 출력전류의 평균값 I_{avr} 과 순시 출력전류 I_o 를 통해 전류변화량 ΔI_{err} 를 검출하고 이 값의 변화량을 판별하여 정상상태와 과도상태를 결정한다.

전압강하방식에 의해 균등한 부하분담이 이루어진 정상상태시의 출력전류는 각 모듈이 분담해야하는 기준전류의 크기와 같다. 따라서, 출력전류 변화량을 통해 정상상태가 판별되면 그 때의 출력전류를 기준전류 I_{ref} 로 설정하여 능동전류 분담 방식과 같이 기준전류로서 부하분담을 이룬다. 제안하는 방식의 특성은 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_o = V_{ref} - G \times I_o + k \cdot (I_{ref} - I_o) \quad (7)$$

$$G = \begin{cases} G_{min} & , \text{Steady state.} \\ G_{max} & , \text{Transient state.} \end{cases}$$

$$k = \begin{cases} k & , \text{Steady state.} \\ 0 & , \text{Transient state.} \end{cases}$$

여기서, G_{min} 은 최소 전압강하이득을 G_{max} 는 최대 전압강하이득을 의미하며, k 는 정상상태시 전류오차 이득이다.

식(7)에서 알 수 있듯이, 과도상태 시에는 k 값이 0이므로 출력전류는 전압강하방식에 의해 제어된다. 정상상태가 판별되고 I_{ref} 가 설정되면, 각 모듈이 분담해야하는 기준전류에 의해 제어가 이루어진다. 이때 강하이득을 최소값으로 감소시켜 출력전압을 보상하며, 균등한 부하분담은 기준전류에 의해 유지된다. 그림 4는 제안한 방식의 제어 흐름도이다.

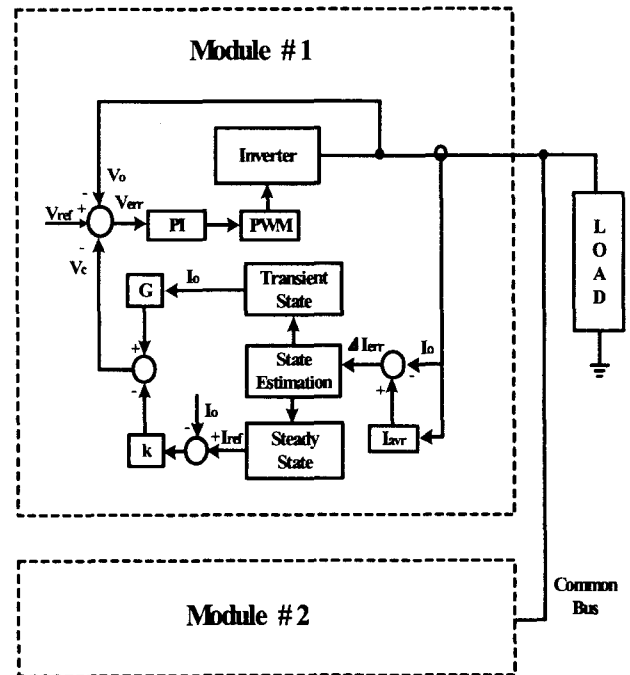


그림 3 제안된 제어방식의 블럭도
Fig. 3 Block diagram of the proposed control method.

병렬운전 초기에는 부하분담을 이루기 위해서 전압강하방식으로 제어된다. 출력전류 변화량을 통해 정상상태가 판별되면 기준전류를 설정하게 되고 기준전류에 의해 부하분담이 이루어진다. 이때 전압강하이득은 최소 값으로 감소시켜 출력전압을 보상하게 되는데, 전압강하이득의 최소 값은 최대 전압강하이득의 1/10 이하로 감소시킬 수 있다. 정상상태시에도 병렬운전의 상태판별은 이뤄지므로, 부하변동 또는 병렬 연결된 모듈의 운전실패 등으로 부하분담이 어긋나게 되더라도 새로운 기준전류 설정으로 안정적인 부하분담을 이루게 된다.

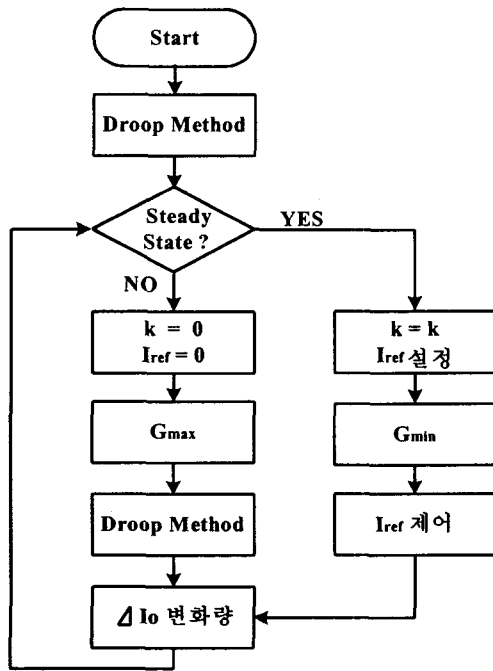


그림 4 제안된 방식의 제어 흐름도
Fig. 4 Flowchart of the proposed control method

3. 실험 결과

본 논문에서 제안한 제어기법을 적용하기 위해 10[kV], 100[mA] 고압 직류 전원장치를 제작하였다. 그림 5는 실험에 사용된 전원장치의 구성도이다. 전원장치는 크게 전 브리지 컨버터부와 고압 변압기 그리고 배압회로로 구성되었다. 2대의 고압 직류전원장치를 그림에서 나타낸 바와 같이 병렬 접속하여 실험을 하였다.

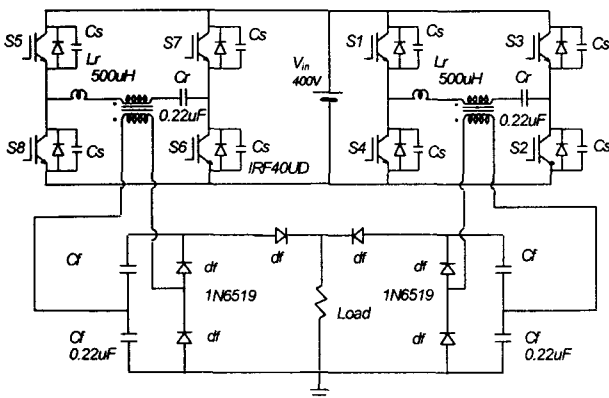


그림 5 실험장치 구성도
Fig. 5 Experimental system configuration

먼저, 제안한 방식의 병렬운전 특성과 비교하기 위해 기존의 전압강하방식의 병렬운전 특성을 확인하였다.

그림 6은 기존의 전압강하방식으로 병렬운전하였을 때 정상상태에서 출력전압과 각 모듈의 출력전류 파형이다. 출력

전압의 설정값은 10[kV]이며 2대의 전원장치가 전 부하에서 동작하도록 50[kΩ]의 부하저항을 사용하였다. 실험파형에서 알 수 있듯이 정상상태에서 각 모듈은 균등한 부하분담을 이루었지만, 약 150[V]의 출력전압 강하가 발생되었다.

그림 7과 그림 8은 기존의 전압강하방식에서 부하가 급변할 때의 출력전압 전류파형이다. 그림 7은 2대의 전원장치 용량의 50[%] 부하에서 100[%] 부하로 증가할 때의 출력전압 전류파형이며, 그림 8은 100[%] 부하에서 50[%] 부하로 감소할 때의 파형을 나타내었다. 그림에서 나타난 것처럼, 급격한 부하변동에도 균등한 부하분담을 이루며 동작되지만 부하변동에 따른 출력전압의 변동이 크다.

출력전압강하방식은 부하변동특성으로 인해 전원장치의 정격전압을 유지할 수 없으며 시스템의 정밀도를 저하시킨다. 비교결과를 얻기 위해 제안한 방식으로 모듈화한 두대의 전원장치를 병렬운전하여 특성을 확인하였다. 실험조건은 기존의 전압강하방식과 동일하게 하였다.

그림 9는 제안한 방식으로 병렬운전하였을 때 정상상태에서 출력전압과 전류 파형이다. 그림 6의 기존 방식과 비교하여 각 모듈은 균등한 부하분담을 이루며 출력전압 강하가 크게 개선된 것을 알 수 있다.

그림 10과 그림 11은 제안한 방식에서 부하가 급변할 때의 출력전압 전류파형이다. 실험조건은 그림 7, 그림 8과 동일한 조건이다. 그림 10에서 2대의 전원장치 용량의 50[%] 부하에서 100[%] 부하로 증가할 때 과도상태에서는 기존방식과 같이 약 150[V]의 출력전압 강하가 발생한다. 그러나 정상상태가 되면 출력전압의 강하는 약 1/10 이하로 보상되는 것을 볼 수 있다. 그림 11은 100[%] 부하에서 50[%] 부하로 감소할 때의 파형으로 균등한 부하분담을 유지하면서 출력 전압이 보상되는 것을 볼 수 있다.

그림 12와 그림13에서 제안한 방식으로 세 대의 전원장치를 병렬접속하여 동작하였을 때 출력전압과 전류파형을 나타내었다. 그림 12는 3대의 전원장치 전 부하의 50[%] 부하에서 100[%] 부하로 증가할 때의 출력전압 전류파형이며, 그림 13은 100[%] 부하에서 50[%] 부하로 감소할 때의 출력전압 전류파형이다. 제안한 제어기법은 다수의 전원장치가 병렬운전되어도 안정적으로 부하분담을 유지하며 출력전압의 보상이 이루어짐을 볼 수 있다.

결과에서 나타난 것처럼 과도상태에서 정상상태로 천이하는 데에 0.6s~1s가 소요되었다. 고전압 전원장치에서 맥동전압이 10~20V에 이르므로 상호간의 순환전류가 발생할 수 있으며 출력단에 다이오드를 두어서 이를 방지하였다. 따라서 과도전압이 안정화되는데 걸리는 시간이 최대 600ms 정도가 소요되며 이후에 정상상태를 인지하는 데에 상당한 여유를 두어서 약 300ms 후에 전압보상이 이뤄지게 하였다. 특히, 정상상태 판별의 오동작을 막기 위해 전원의 맥동전류가 안정화된 후에 정상상태 판별을 하였다.

그림 14는 전 부하전류의 변화에 따른 출력전압의 강하량을 보여준다. 기존 전압강하방식은 분담하는 전류에 비례하여 최대 130[V]의 출력전압 강하가 발생된다. 그러나, 제안한 방식은 기준전류에 의해 전압강하이득을 1/10 이하로 감소시킬 수 있으므로 출력전압의 강하를 90[%] 이상 보상할 수 있었다.

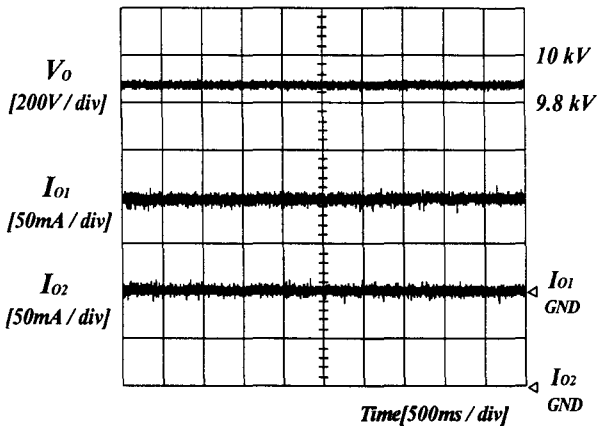


그림 6 기존 전압강하방식의 정상상태 특성
 Fig. 6 Steady state with the conventional droop method

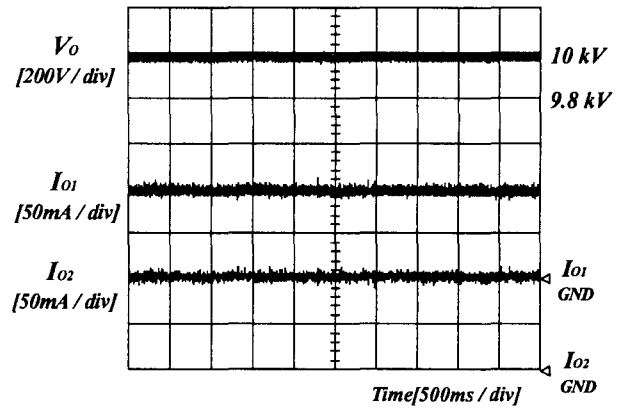


그림 9 제안한 방식의 정상상태 특성
 Fig. 9 Steady state with the proposed method

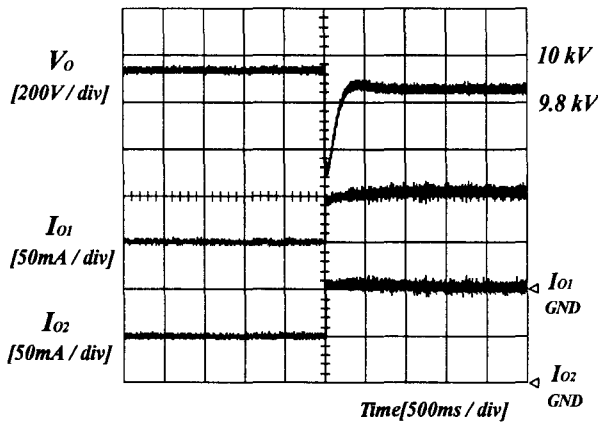


그림 7 기존 전압강하방식에서 부하 증가시 과도응답 특성
 Fig. 7 Transient responses of load step up change with the conventional droop method

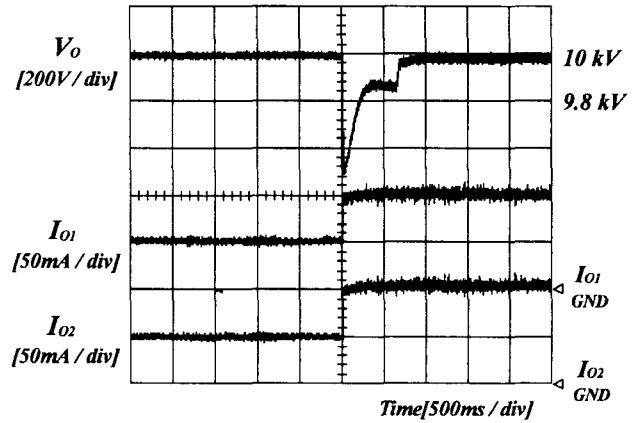


그림 10 제안한 방식에서 부하 증가시 과도응답 특성
 Fig. 10 Transient responses of load step up change with the proposed method

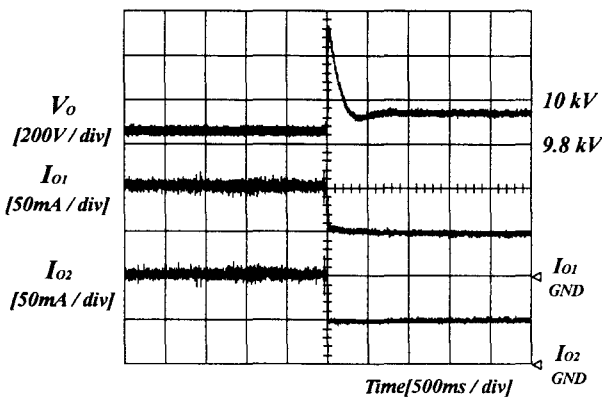


그림 8 기존 전압강하방식에서 부하 감소시 과도응답 특성
 Fig. 8 Transient responses of load step down change with the conventional droop method

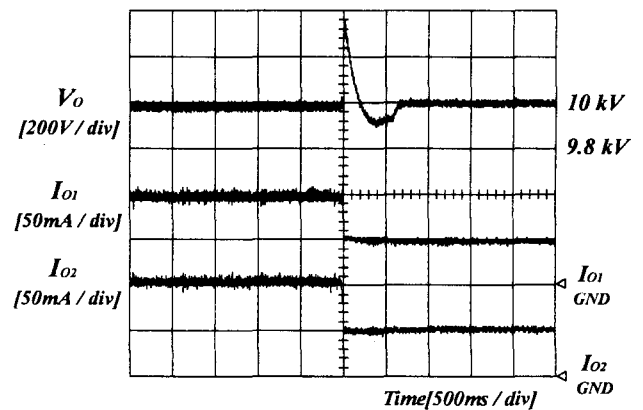


그림 11 제안한 방식에서 부하 감소시 과도응답 특성
 Fig. 11 Transient responses of load step down change with the proposed method

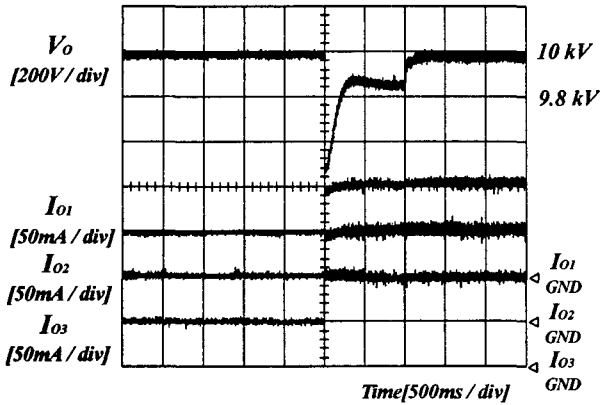


그림 12 제안한 방식으로 3대 운전시 과도응답 특성
 Fig. 12 Transient responses of three module operation with the proposed method

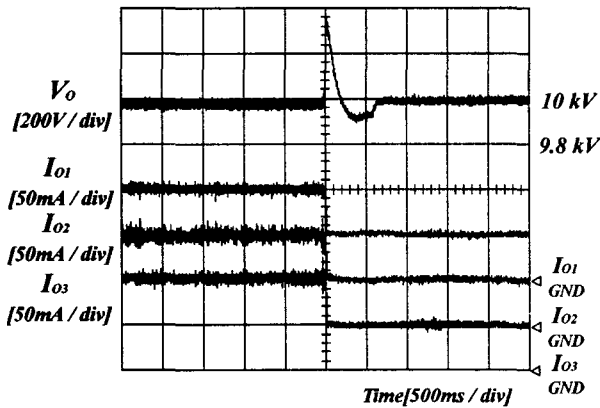


그림 13 제안한 방식으로 3대 운전시 과도응답 특성
 Fig. 13 Transient responses of three module operation with the proposed method

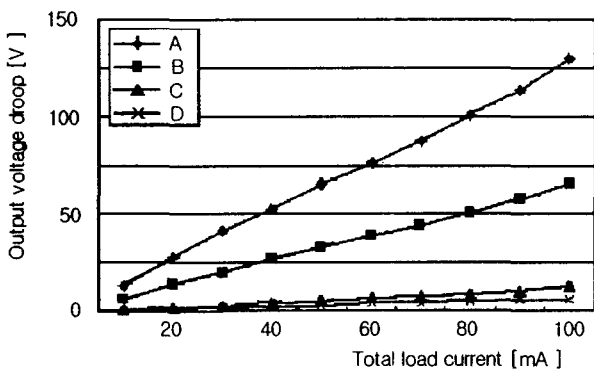


그림 14 전 부하전류 변화에 따른 출력전압 강하
 Fig. 14 Output voltage droop as total load current
 A : The conventional droop method (parallel operation)
 B : The conventional droop method (single operation)
 C : The proposed method (parallel operation)
 D : The proposed method (single operation)

4. 결론

최근, 전원장치의 빈번한 용량 증설과 보조전원 확보에 대응하기 위해 여러 대의 전원을 병렬운전하여 신뢰성을 높이고 용량을 증대시키는 방안이 확산되고 있다. 전원장치의 병렬운전을 위해서는 병렬 연결된 모듈의 출력전압이 일치해야하므로 각 모듈의 특성 차이, 센서 및 제어 오차에 의한 모듈간의 출력전압 불일치를 보상할 수 있는 병렬 제어기법이 수반되어야 한다.

본 논문에서는 출력전류의 정보교환 없이 기준전류를 검출하여 출력전압의 강하에 의존하지 않고 균등한 부하분담을 이루기 위한 병렬제어 알고리즘을 제안하였으며 10kV, 100mA의 고전압 직류전원 장치를 제작하여 제안한 병렬운전 기법을 검증하였다.

병렬 연결된 모듈간의 정보교환 없이 기준전류를 검출함으로써 출력전압의 변동특성을 기존 방식에 비해 약 90[%] 이상 개선하였고 부하분담은 안정적이며 균등하게 유지하였다. 특히, 제안된 병렬운전 알고리즘을 고전압 전원장치에 적용하여 맥동전압이 높은 전원에서의 활용 가능성을 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] B. T. Irving and Milian M. Jovanovic, "Analysis, Design, and Performance Evaluation of Droop Current Sharing Method," IEEE APEC Proc., pp 235-241, 2000.
- [2] Shiguo Luo, Zhihong Ye, Ray-Lee Lin and F. C. Lee, "A classification and evaluation of paralleling methods for power supplymodules", IEEE Power Electronics Spec. Conf, pp.901-908, 1999.
- [3] Jung Won Kim, Hang Seok Choi, Cho, B.H., "A Novel Droop Method for Converter Parallel Operation" APEC 2001., pp959 -964, 2001.
- [4] Perreault, D.J., Sato, K., Kassakian, J.G., "Switching-ripple-based current sharing for paralleled power converters," Power Conversion Conference-Nagaoka 1997., pp473-478, 1997.
- [5] Wu, R.-H., Kohama, T., Kodera, Y., Ninomiya, T., Ihara, F., "Load-current-sharing control for parallel operation of DC-to-DC converters," PESC '93 pp. 101-107, 1993.
- [6] D. J. Perreault, R. L. Selders Jr., J. G. Kassakian, "Frequency-based current-sharing techniques for paralleled power converters," IEEE Power Electronics Spec. Conf, pp.1073-1080, 1996.

저 자 소 개



백 주 원(白 周 元)

1967년 1월 2일생. 1990년 경북대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전력전자연구그룹 선임연구원. 전력전자학회 학술이사.

Tel : 055-280-1432
Fax : 055-280-1436
Email : jwbaek@keri.re.kr



손 호 섭(孫 鎭 燮)

1975년 12월 27일생. 2001년 경남대 전기공학과 졸업(학사) 2003년 부산대 전기공학과 졸업(석사). 현재 주) 그린과워 연구원.

Tel : 055-285-8908
Fax : 055-285-8905
Email : dolph21c@empal.com



유 동 옥(兪 東 旭)

1959년 11월 3일생. 1983년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1985년 연세대 전기공학과 졸업(석사). 1997년 성균관대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전력전자연구그룹 책임연구원(T/L). 전력전자학회 학술이사.

Tel : 055-280-1430
Fax : 055-280-1436
Email : dwyoo@keri.re.kr



김 장 목(金 長 睦)

1961년 8월 6일생. 1988년 부산대 전기공학과 졸업. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년~2001년 한전 전력연구원 선임연구원. 현재 부산대 전기전자통신공학부 조교수. 2001. 5~현재 부산대 컴퓨터 및 정보통신연구소 연구원

Tel : 051-510-2366
Fax : 051-513-0212
Email : jmok@pusan.ac.kr