

정상상태 판별을 이용한 고전압 직류전원장치의 Wireless 병렬 운전

손호섭, 백주원, 유동욱, *김장복, **김홍근
한국전기연구원, *부산대학교, **경북대학교

Wireless parallel operation of high voltage DC power supply using steady-state estimation

H. S. Son, J. W. Baek, D. W. Yoo, *J. M. Kim, **H. G. Kim
Korea Electrotechnology Research Institute., *Pusan National Univ., **Kyungpook National Univ

Abstract - This paper presents an improved droop method of the high voltage DC power supply 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 the 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 high performance voltage regulation and load sharing. Two 10kV, 100mA parallel power modules were made and tested to verify the proposed current-sharing method.

1. 서 론

전원장치의 고 신뢰성, 대용량화가 요구 되면서 하나의 전원에서 모든 전력을 부담하는 것보다 여러 대의 전원을 병렬 운전하여 신뢰성을 높이고 용량을 증대시키는 방안이 연구되어 왔다. 전원장치의 병렬운전은 확장의 용이성, 보수의 편리성, 넓은 부하 변동, 높은 신뢰성 등 많은 이점을 가진다.[1-3]

병렬운전에서 가장 중요한 것은 부하전류의 분담을 균등히 하고 안정화시키는 것이다. 전원장치의 병렬운전은 각 모듈의 특성 및 배선임피던스 차이, 센서 및 각 구성 부품들의 오차에 매우 민감하기 때문에 강제적인 전류분담 제어가 없다면 부하전류는 하나 또는 일부 모듈로 집중하여 흐르게 된다. 이것은 시스템의 신뢰성을 감소시킬 특정 장치의 높은 열 스트레스 원인이 된다.[3]

전원장치의 병렬운전을 위한 방법으로는 병렬연결 된 모듈 상호간에 전류 정보 교환이 필요한 방식과 그렇지 않는 방식으로 나눌 수 있다. 전류정보 교환이 필요한 방식으로는 평균전류 제어방식과 마스터-슬레이브 제어 방식 등이 있다. 이 방식들은 모듈사이의 신호선을 필요로 하므로 제어 방식에 따라 부가적인 전류검출과 복합적인 제어를 필요로 한다. 또한 연결 실패시의 오동작문제와 신호선의 노이즈 대책이 필요하며 과도상태시의 응답특성이 좋지 못하다.[2],[3] 모듈 상호간에 정보교환선을 사용하지 않는 방식으로는 전압 droop 방식이 있다. 전압 droop 방식은 모듈사이에 연결선이 없으므로 구조가 간단하고 확장성 및 모듈화가 용이하다. 그러나, droop 방식은 균등한 전류 분배를 위해 내부 또는 외부에 부가적인 저항에 의존하므로 출력전압의 전압강하가 커지는 단점이 있다. 이것을 보완하기 위해 부하에 맥동 전압을 실어주고 맥동 성분의 변화량을 감지하여 전류분배를 하는 방법이 소개되었으나 이 방법은 출력전압에 정현과 맥동주파수가 나타나는 단점이 있다.[7]

본 논문에서는 출력전압이 고전압인 직류전원장치에 적용할 수 있는 새로운 전압 droop법을 제안한다. 제안하

는 방법은 높은 droop gain으로 과도응답 특성을 개선하고 균등한 전류 분담을 이룬 후 전류의 변동량을 검출하여 정상상태를 판정하고 단위 모듈의 기준전류를 검출한다. 각 모듈이 분담해야하는 기준전류가 검출됨으로 인해 매우 낮은 droop으로 균등한 전류분담을 이를 수 있다. 제안한 방식의 타당성을 검증하기 위하여 10kV, 100mA 컨버터 2대를 병렬 운전하여 이의 동작을 실험한다.

2. 기존의 병렬운전

2.1 droop 방식의 특성

droop 방식은 출력전압의 droop에 의존하여 출력전류를 제어한다. 이 방식은 병렬연결된 모듈 사이에 정보교환선을 사용하지 않는 방식으로 구현하기가 쉽다. 출력전압을 droop 하는 방법은 여러 가지가 있는데, 그 중 하나는 각 전원장치의 출력에 직렬저항을 추가하는 것이다. 이것은 간단히 구현할 수 있지만 그럼 1에서 보듯, 부가적인 소자를 필요로 하며, 출력전류가 큰 응용에서는 저항에서의 전력손실이 증가하는 단점이 있다.

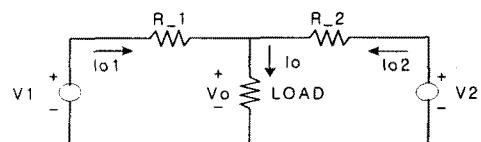


그림 1 Droop 방식의 전류 분배 회로

또 다른 방법으로 출력전류의 크기에 비례하여 기준 전압을 감소시키는 방법이 있다. 직렬저항을 사용하는 방식에 비해 손실은 줄어들고 droop 특성은 동일하게 얻을 수 있다. droop 방식의 부하변동 특성을 그림 2에서 나타내었다. 그림 2에서 보듯, 두 개의 전원장치는 초기 설정 출력전압에 오차가 있으며 부하 변동 특성 기울기는 동일하다고 가정 한다. 초기 설정 출력전압이 더 높은 $V_{init,1}$ 이 더 많은 출력전류를 분담하지만 출력전압 변동량은 더 크다. 또한, 분담하는 출력전류가 증가함에 따라 출력전압 droop 양은 비례하게 되며 부하특성 기울기 따라 분담 특성차이가 크게 나타난다.

출력전압의 droop특성은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_o = V_{init,n} - G \cdot I_{o,n} \quad (1)$$

여기서, V_o 은 출력전압으로 모든 모듈에서 동일하다. $V_{init,n}$ 은 n번째 모듈의 초기 설정 출력전압이며 G 는 droop gain을 나타낸다.

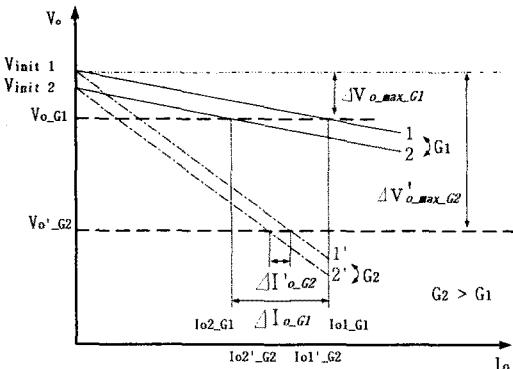


그림 2 droop 방식의 부하변동 특성

그림 2의 droop 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)과 (3)에 의해 출력전류 분담 오차 ΔI_o 는

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

여기서, ΔV_{init} 는 각 모듈의 초기 설정 출력전압 오차를 나타낸다. 최대 출력전압 변동 ΔV_{o_max} 은 V_{init1} 의 변동량으로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta V_{o_max} = V_{init1} - V_o \quad (5)$$

여기서, $V_{init1} = V_{init2} + \Delta V_{init}$ 이므로

$$\Delta V_{o_max} = \Delta V_{init} + G \cdot I_{o(min)} \quad (6)$$

여기서, $I_{o(min)}$ 은 V_{init2} 의 출력전류이며 I_{o2} 가 된다. 식 (4)에서 알 수 있듯이, 출력전류 분담 오차는 G 값을 크게 하거나 ΔV_{init} 를 작게 할 수록 정밀도가 증가되는 것을 알 수 있다.

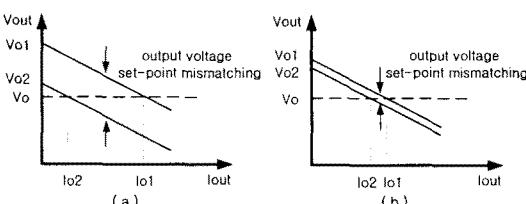


그림 3 초기 출력전압 오차에 따른 전류분담 정밀도

그림 3은 초기 설정 출력전압의 오차가 전류분담 정밀도에 미치는 영향을 보여준다. 부하변동 특성 기울기가 같다고 하면 그림에서 볼 수 있듯이, 각 모듈의 초기 설정 출력전압 오차가 작을수록 더욱 균등한 전류분담이 이루어 진다.

전원장치의 병렬운전은 각 모듈이 균등한 전류를 분배하도록 제어 하는 것이 가장 중요하다. 그러나, 전류분담 정밀도가 향상 될 수록 출력전압의 droop은 비례하게 된

다. 그러므로, 출력전압 변동 특성과 전류분담 정밀도는 trade off 관계이다.

3. 제안하는 병렬운전 방식

droop 방식의 특성상 초기 출력전압 오차가 작고, droop gain을 충분히 크게 한다면 병렬 연결 모듈은 균등한 출력전류를 분담하게 된다. 본 논문에서는 이러한 droop 특성을 이용하여 과도 상태시에는 큰 droop gain을 사용하여 응답 특성을 개선하고 각 모듈이 균등한 전류를 분담하도록 제어한다. 출력전류 변화량을 검출하여 정상상태가 판별되면 그때의 출력전류를 기준 전류로 설정하고, 전류분담을 제어하게 된다. 이때, 중요한 것은 각 모듈이 검출하는 기준전류 오차가 매우 작아야 하며 병렬연결된 모듈이 거의 동시에 정상상태를 판별해야 하는 것이다.

3.1 정상상태 및 과도상태 판별

그림 4는 일반적인 droop 방식에서 전류분담 특성을 개선한 병렬연결된 모듈에서 예상되는 과도상태 출력 전류 분담 특성을 나타내었다. 그림 4의 (a)는 전류 분담을 이루는 과도상태이며, (b)는 하나의 모듈이 모든 출력전류를 분담하려고 할 때의 과도상태를 나타낸다.

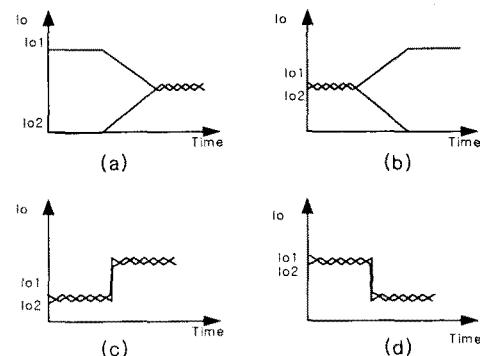


그림 4 병렬연결 모듈의 과도상태 출력전류 분담 특성

그림 4의 (c)와 (d)에서는 급격한 부하 변동에 따른 출력전류의 변화상을 나타내었다. 그림에서 나타낸바와 같이 병렬연결 된 모듈은 과도상태시 전류변화량을 가진다. 때문에, 전류 변화량으로 과도상태와 정상상태를 인식할 수 있게 된다. 출력전류 변화량 Δi_{err} 는 식 (7)를 통해 검출 할 수 있다.

$$\Delta i_{err} = I_{avr,n} - i_{o,n} \quad (7)$$

여기서, $I_{avr,n}$ 은 n 번째 모듈의 일정구간 평균전류이며, $i_{o,n}$ 은 n 번째 모듈의 순시전류이다. Δi_{err} 는 정상상태에서 일정한 오차 이내로 그 값이 유지되므로 일정시간 동안 출력전류 변화량이 정해진 값을 넘지 않는다면 각 모듈은 정상 상태로 인식하게 된다. 또한, 급격한 부하 변동 또는 병렬 모듈의 추가 및 운전 실패시에는 Δi_{err} 값이 정해진 오차 범위를 넘게 될 것이며, 이 변화량을 통해 각 모듈은 과도상태를 판단하게 된다.

3.2 I_{ref} 검출

과도상태시 각 모듈은 전류분담 정밀도를 높이기 위해 충분히 큰 droop gain을 사용한다. 높은 droop gain은 빠른 응답성을 위해서도 필요하다. droop 방식의 특성으

로 인해 충분히 큰 droop gain은 각 모듈이 균등한 출력 전류를 분담하도록 한다. 때문에 정상상태에 검출된 출력 전류는 각 모듈이 균등한 기준전류를 가질 수 있도록 해준다. 정상상태가 판별되면 그 때의 출력전류를 기준전류 I_{ref} 로 설정하며, 이 값으로 전류제어를 한다. 따라서, droop gain을 감소시켜도 출력전류 분담 정밀도는 유지된다. 즉, 출력 전류 분담 정밀도는 유지하며, 출력 전압 강하는 최대한 감소 시킬 수 있게 된다.

그림 5은 제안하는 방식의 제어 블럭도이다.

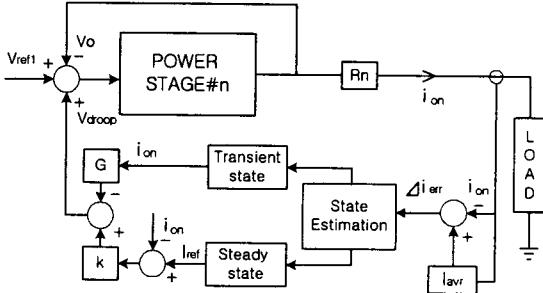


그림 5 제안한 방식의 제어 블럭도

블럭도에서 볼 수 있듯이, 각 제어기는 독립적으로 동작하게 된다. 일정 구간 출력전류의 평균값(I_{avr})과 출력전류를 통해 전류변화량(Δi_{err})을 검출하고 이 값의 변화량을 판별하여 정상상태와 과도상태를 결정한다. 제안하는 방식의 특성은 식(8)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_o = V_{init,n} - G \times i_{o,n} + k \cdot (I_{ref} - i_{o,n}) \quad (8)$$

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

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

여기서, G_{min} 은 최소 droop gain을 G_{max} 은 최대 droop gain을 의미한다. 과도상태시에는 k 값이 0이므로 출력전류는 일반적인 droop 방식에 의해 제어된다. 정상상태가 판별되고 I_{ref} 가 검출되면, G_{min} 으로 출력전압을 보상하고, 기준전류로서 출력전류를 제어한다. 이때, droop gain을 급격히 감소 시키더라도 기준전류로 인해 균등한 전류 분담은 유지 되지만, Δi_{err} 값의 증가를 고려하여 선형적인 감소가 좀 더 바람직 하다. 때문에 정상상태 판별에 시점에 오차가 있더라도 시스템은 영향을 받지 않는다.

4. 실험 결과

기존의 droop 방식의 문제점을 확인하고 제안하는 방식의 우수성을 검증하기 위해 10kV, 100mA 고전압 직류 전원장치를 모듈화하여 병렬운전을 수행하였다. 그림 6은 실험에 사용된 전원장치 구성도이다. 전원장치는 크게 풀 브리지 인버터부와 고압 변압기, 배암 회로로 구성되어 있다. 또한 출력단에 다이오드를 추가하여 단방향으로만 전류가 흐를 수 있도록 했다.

그림 7은 기존 droop 방식으로 병렬운전 할 때 정상상태에서의 출력전압과 전류파형이다. 병렬연결 된 모듈이 균등한 부하전류를 분담하기 위해 비교적 큰 값의 droop 이득이 사용되었다. 때문에 전류분담 정밀도는 높지만 출력전압의 droop이 문제가 됨을 볼 수 있다. 그림 8은 제안한 방식으로 병렬운전 할 때 정상상태에서의 출력전

압과 전류파형이다. 전류분담 정밀도가 매우 높으며 출력전압 변동 특성이 개선 되었음을 볼 수 있다.

그림 9과 10은 기존 droop 방식에서 부하가 급변할 때의 출력전압 전류 파형을 나타낸 것이다. 그림 9에서는 분담하는 전류가 반으로 줄어들 때 출력전압 droop 역시 작아짐을 볼 수 있고, 그림 10에서는 분담하는 출력전류가 두배 증가함에 따라 전압강하 역시 두배로 증가함을 볼 수 있다. 그림 11와 그림 12은 제안한 방식에서 부하가 급변 할 때의 출력전압 전류 파형을 보여준다. 제안한 방식에서는 부하가 급변해도 정상 상태에 도달하게 되면 출력전압의 droop은 확연히 개선 되었음을 볼 수 있다. 그림 13은 전 부하전류의 변화에 따른 출력전압의 droop 양을 보여준다. 기존 droop방법은 모듈이 분담하는 출력전류에 비례하여 출력전압을 droop 시키는 방식이므로 분담하는 전류가 클 수록 비례하여 큰 값의 전압강하가 일어난다. 제안한 방법은 기준전류를 검출하여 전류 분담을 이루므로 기존의 방식에 비해 매우 작은 전압 강하가 일어남을 알 수 있다.

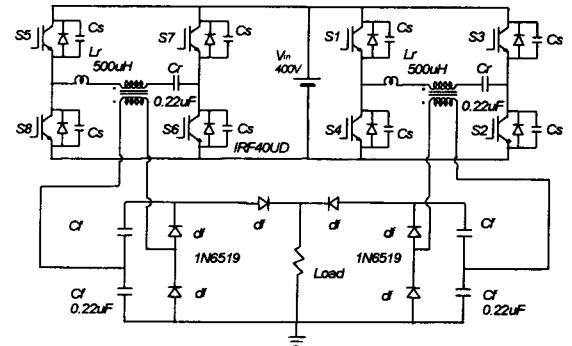


그림 6 실험에 사용된 전원장치 구성도

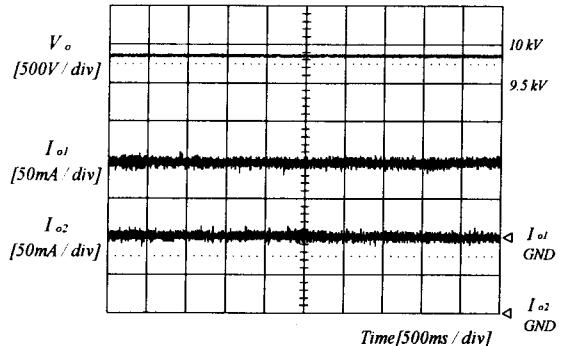


그림 7 기존 droop 방식의 정상상태

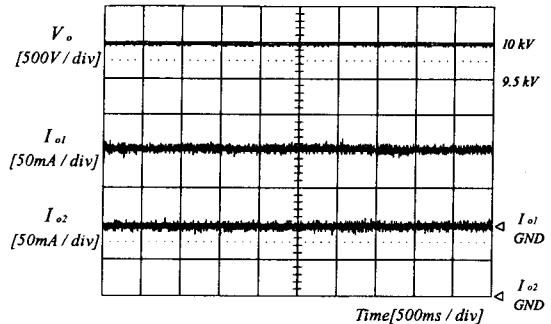


그림 8 제안한 방식의 정상상태

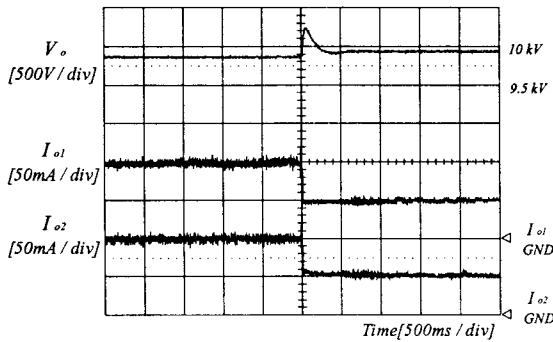


그림 9 기존 droop 방식에서 부하가 반으로
감소 할 때의 출력전압 전류 파형

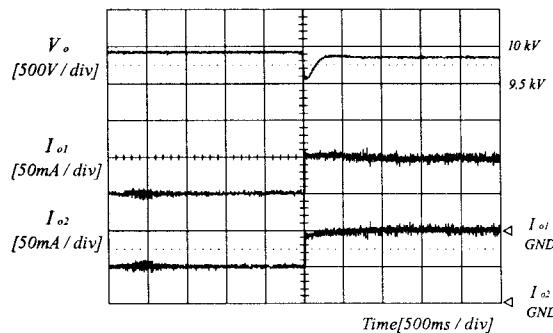


그림 10 기존 droop 방식에서 부하가 두배
증가 할 때의 출력전압 전류 파형

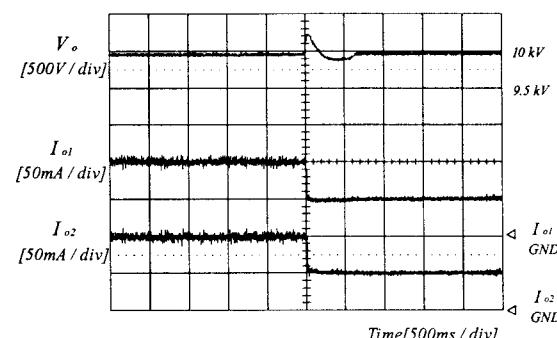


그림 11 제안한 방식에서 부하가 반으로
감소 할 때의 출력전압 전류 파형

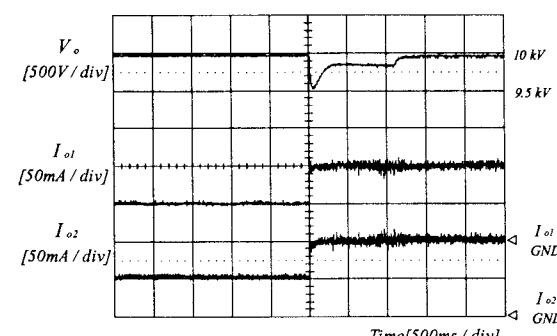


그림 12 제안한 방식에서 부하가 두배
증가 할 때의 출력전압 전류 파형

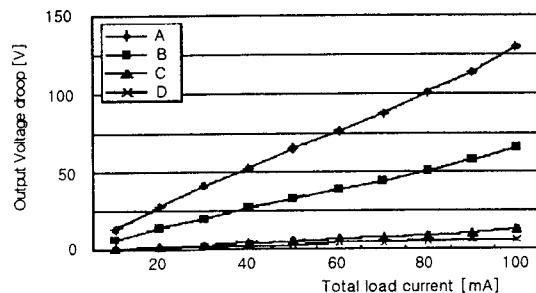


그림 13 droop 전압 변화량과 출력전압 관계

- A : 기존 droop 방법 (단독운전)
- B : 기존 droop 방법 (병렬운전)
- C : 제안한 droop 방법 (단독운전)
- D : 제안한 droop 방법 (병렬운전)

5. 결 론

본 논문에서는 저전압 전원장치에서 연구되어 온 병렬 운전 기법들에서 모듈간의 신호선이 없는 제어방법을 개선하여 고전압 직류전원장치에 적용할 수 있는 병렬운전 방법을 제안하였다. 기존의 방법들은 분담하는 출력전류에 비례하여 출력전압을 droop 시키므로 인해, 전류 분담 정밀도를 높게 할 수록 출력전압 droop이 커지는 단점이 있었다. 제안한 방법은 과도 상태시에는 기존의 droop 방식으로 균등한 전류 분담을 이루고, 출력전류 변화량을 통해 정상상태를 판별하여 각 모듈이 분담해야 할 기준전류를 검출한다. 그러므로, 모듈간의 신호선이 없이 정밀한 기준전류를 구할 수 있다. 각 모듈이 분담하는 전류는 기준전류에 의해 균등히 분배되므로 전압 droop이 없이 정밀한 제어가 가능한 장점이 있다.

제안하는 제어기의 타당성을 검증하기 위해 10kV, 100mA 전원을 병렬 운전하여 출력전류 특성을 살펴보았다. 제안된 제어기는 전원의 병렬운전을 잘 이뤄지게 하였으며 직류전원장치의 병렬운전에 적합한 것을 알 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] B. T. Irving and Miljan M. Jovanovic, "Analysis, Design, and Performance Evaluation of Droop Current Sharing Method," IEEE APEC Poc., pp235-241, 2000.
- [2] Shiguo Luo, Zhihong Ye, Ray-Lee Lin and F. C. Lee, "A classification and evaluation of paralleling methods for power supply modules", 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.