

# 병렬 운전 인버터의 비선형 부하 분담 시 고조파 저감을 고려한 드롭제어 연구

고승우, 임경배, 최재호  
충북대학교

## Droop control considering harmonic reduction in the nonlinear load sharing of parallel operation inverter

Seungwoo Ko, Kyungbae Lim, Jaeho Choi

School of Electrical Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk, Korea

### ABSTRACT

여러 분산 발전 시스템으로 구성된 마이크로그리드는 계통 연계 모드에서 부하의 수요에 담당하게 되고, 계통 사고가 발생할 시 독립 운전 모드로 동작을 해야 한다. 본 논문에서는 독립운전 모드 동작 시 제어 방식 중에서 유, 무효 전력제어를 통한 적절한 전력 분담을 실현하기 위한 드롭제어 방식을 다룬다. 이 방식은 선로 임피던스가 복합 성분으로 구성되어 있거나 불 평형 일 경우 여러 문제로 유, 무효 전력 분담의 오차를 발생 시킨다. 이에 대하여 가상임피던스를 추가함으로써, 복합적 불 평형 임피던스에 기인한 유, 무효 전력 분담의 오차를 해결 하여, 시스템의 유, 무효 전력 분담을 개선 하고자 하였다. 또한, 비선형 부하 시 고조파의 문제를 비례 공진 제어기를 이용하여 고조파를 저감 할 수 있도록 하였다. 이에 PSIM 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다.

### 1. 서 론

최근 환경 인식 및 탄소배출 우려의 증가에 따라 태양광, 풍력, 연료전지, 마이크로터빈 등의 분산 에너지 자원이 주목을 받고 있다. 마이크로그리드는 기존의 계통과 이룬 분산전원을 통합 할 수 있는 매우 효과적인 기술이다. 평소 마이크로그리드는 계통과 연계되어 운전이 되다가 계통에 문제가 발생할 시 계통을 차단하여 독립운전 모드로 동작을 하게 된다. 독립운전 모드 시 부하를 효율적으로 분담 하기위해 인버터를 통신 없이 병렬 운전 하는 방법으로 드롭제어 방법이 연구되고 있다. 드롭제어는 유효전력과 무효전력의 분담에 있어서 몇 가지 오차를 발생시키지만 기존의 연구된 방법으로 드롭제어의 문제를 해결할 수 있었다. 하지만 지역적 부하가 비선형 부하 일 때 고조파로 인한 문제점들이 해결이 되지 않았다. 이에 본 논문에서는 부하가 비선형 부하 시 고조파를 저감 할 수 있도록 기존의 전압제어기에 비례 공진 제어기를 추가하여 고조파를 저감 하도록 하였다.

### 2. 드롭제어

#### 2.1 유도성 드롭제어

마이크로그리드에서 분산발전원을 병렬로 운전하기 위해 선로 임피던스가 유도성 성분을 기반으로 한 드롭제어 식은 다음과 같다.

$$\omega^* = \omega_{nom} - k_{\omega}(P_{ref} - P) \quad (1)$$

$$E^* = E_{nom} - k_v(Q_{ref} - Q) \quad (2)$$

$\omega^*$ : 지령주파수  $\omega_{nom}$ : 정격주파수  $k_{\omega}$ :  $P - \omega$  드롭계수  
 $E^*$ : 지령전압  $E_{nom}$ : 정격주파수  $k_v$ :  $Q - E$ 계수

#### 2.2 향상된 드롭제어

유도성이 지배적인 선로 임피던스에서 드롭제어 식은 출력 임피던스가 유도성이라는 가정 하에 식을 유도하게 된다. 하지만 실제 선로 임피던스에 복합성분으로 존재하기 때문에 유, 무효 전력 사이에 상호 간섭 성분으로 P Q커플링이 생기게 된다. 이에 가상 인덕터를 사용하여 간섭 성분을 제거하여 기존의 유도성 드롭제어 방식의 효력 가지게 된다. 또한 인버터 병렬 운전에서 서로 다른 선로 임피던스에 각기 다른 전압 강하가 발생하면 가상 임피던스를 추가만으로 유효전력 분담의 오차를 개선시키지 못한다. 그리고 대용량 시스템에서는 출력 전류가 매우커서 가상 임피던스에서의 전압강하 또한 커지기 때문에 지령 출력전압 이 실제 PCC단 기준 공칭 전압 값에 못 미치는 작은 값을 갖게 되며 설정한 전력에 비해 낮은 유효 전력의 분담을 이루게 된다. 이에 대하여 불평형인 선로 임피던스와 가상 임피던스에 의한 전압 강하를 고려하여 유효전력 분담을 위한 전압을 보상 해주었다.

$$\begin{aligned} E_{ref}^* &= E_{nom}^* - k_v(P_{ref} - P) \\ &= E_{nom} + \frac{2}{3} \frac{R}{V_{PCC, peak}} P_{ref} \\ &\quad + \frac{2}{3} \frac{(X + X_0)}{V_{PCC, peak}} Q_{ref} - k_v(P_{ref} - P) \end{aligned} \quad (3)$$

#### 3. 고조파 보상을 위한 전압제어기

비선형 부하로 인해 출력 전압 파형에 5차, 7차 고조파와 같은 저차 고조파가 포함되는데 이는 출력 전압 파형의 왜곡을 유발 하는 문제가 발생한다. 따라서 고조파를 저감 하기위한 방법으로 동기 좌표축 상에서 고조파를 제거하는 제어기 설계하는 방법이 있으나 제어하는 고조파 차수에 비례하여 연산과정이 복잡에 지는 단점이 있다. 이에 비례 공진(Proportional Resonant) 제어기를 이용하여 복잡한 연산과정 없이 간단하게 고조파를 보상

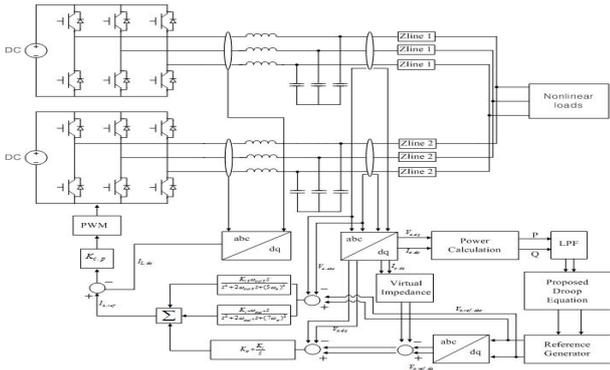


그림 2 전체 시스템 구성도

Fig. 11. Overall control scheme

하도록 하는 방법을 인버터 병렬 운전의 전압 제어기에 적용하였다. 기본과는 PI제어기, 5차, 7차 고조파는 PR제어기를 이용하여 보상 하였다. 그림2는 전체 시스템 구성도이며 식 (4)는 PR제어기의 전달함수 이다.

$$G_h(s) = \sum_{h=5,7} K_{ih} \frac{s}{s^2 + 2\omega_{cut}s + \omega_h^2} \quad (4)$$

#### 4. 시뮬레이션 및 실험

표 1 시뮬레이션 및 실험 파라미터

Table 1 parameters droop control simulation

$P_{ref}$	450W	
$Q_{ref}$	180Var	
PI control	P gain	1
	I gain	5000
PR control	5th Resonant gain	1100
	7th Resonant gain	1100

그림2의 시뮬레이션 결과에서 상단의 기존 제어기 PI제어 시 전압파형의 왜곡이 발생 하였고, 하단의 PR제어기로 보상 한 결과 고조파 저감으로 개선 할 수 있었다. THD 또한 4% 가량 좋아 졌다. 그림 3을 통해 유,무효 전력분담 또한 잘 이루어지고 있는 걸 볼 수 있다.

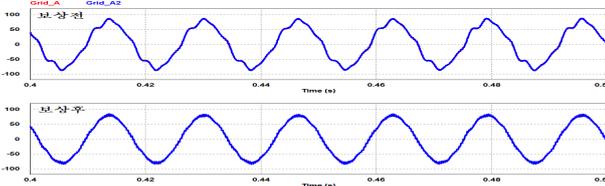


그림 2 출력전압 시뮬레이션 파형

Fig. 2 Simulation result of output voltage waveform

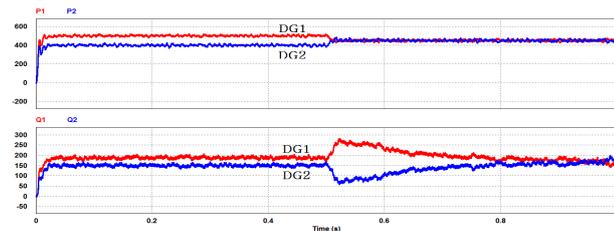


그림 3 전력 분담을 위한 드롭 방식을 적용한 시뮬레이션

Fig. 3 Simulation result of power sharing

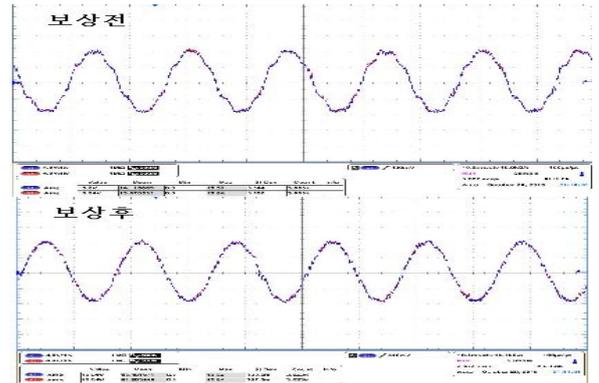


그림 3 출력전압 실험 파형

Fig. 3 Experiment result of output voltage waveform

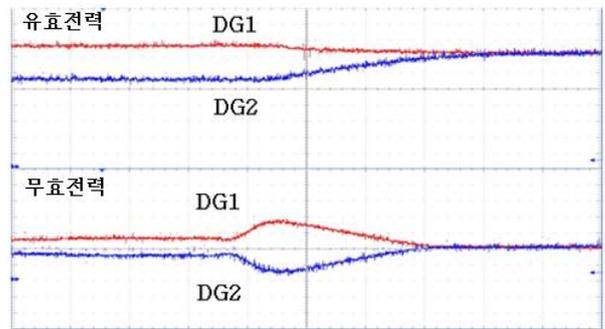


그림 4 전력 분담을 위한 드롭 방식을 적용한 시뮬레이션

Fig. 4 Experiment result of power sharing

그림 4와 그림 5는 시뮬레이션과 같은 파라미터를 이용하여 실험을 한 결과이다. 시뮬레이션과 동일하게 비선형 부하 시 고조파를 저감하고 전력분담이 이루어지는 것을 확인 하였다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 마이크로그리드 독립 운전 시 지역적 비선형부하의 분담으로 인한 출력 전압파형의 왜곡문제를 개선하는 방법을 연구하였다. 기존의 제안된 드롭제어기는 방식에 비선형 부하 시 고조파 문제가 발생 하였다. 이에 기존의 전압제어기에서 PI제어에 5차, 7차 고조파를 저감 할 수 있도록 비례공진 제어기(PR 제어기)를 추가하여 비선형 부하에 의한 고조파를 저감 할 수 있도록 하였다. 이에 고조파에 의한 출력 전압파형의 왜곡은 많이 개선되었다. PSIM 시뮬레이션과 실험을 통해 결과를 확인해 보았다.

#### 참고 문헌

- [1] Donghwan Kim, Kyosun Jung, Kyungbae Lim, Jaeho Choi, "A Droop Method for High Capacity Parallel Inverters Considering Accurate Real Power Sharing," *Journal of Power Electronics*, Vol.16 No.1, pp38-47, 2016.
- [2] D. De, V. Ramanarayanan, "Decentralized Parallel Operation of Inverters Sharing Unbalanced and Nonlinear loads," *IEEE Trans. on Power Electron*, Vol.25, No.12, pp3015-3025, 2010.