

# 불평형 라인 임피던스를 가진 고용량 병렬형 인버터 구동을 위한 가상임피던스 기반의 드롭제어

임경배, 고승우, 최재호  
충북대학교

## Virtual impedance based droop method for high-capacity parallel inverters under unbalanced line impedances

Kyungbae Lim, Seungwoo Ko, Jaeho Choi

<sup>1</sup> School of Electrical Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk, Korea

### ABSTRACT

본 논문에서는 무효전력 오차를 야기하는 유도성-저항성 복합성의 불평형 임피던스 선로 하에서 가상 인덕터와 가상 저항을 사용한 드롭 제어 기반의 병렬형 인버터 시스템에 관해 다루고 있다. 여기서 무효 전력 분담 에러는 각 선로 임피던스의 전압 강하를 고려함에 따라 개선 가능하다. 그러나 병렬형 인버터 시스템이 고전류, 고용량일 경우 지령 출력 전압 크기는 정격 전압 크기에 미치지 못하게 되며 이는 가상 인덕터 및 저항값과 출력 전류의 곱을 통한 가상 임피던스의 전압강하 산출법에 기인한다. 이러한 이유로 본 논문에서는 기존의 드롭 방식에 선로 임피던스 전압 강하 뿐만 아니라 가상 임피던스의 전압 강하도 추가되었고 이를 통해 병렬형 인버터의 전압 출력이 정격 출력값의 범위 안에서 구동하도록 하였다. 가상 인덕터와 가상 저항의 적용법에 대한 비교에 기반을 둔 제안된 드롭 방식은 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증되었다.

### 1. 서론

분산발전 기반의 마이크로그리드는 평소 계통과 연계되어 운전되다가 계통의 고장이나 기준치 이상의 외란이 발생하면 PCC (Point of Common Coupling) 측과 분산발전을 연결하는 STS (Static Transfer Switch)를 개방함으로써 계통과의 연결을 차단하여 독립운전 모드로 전환하게 된다.

독립운전 모드에서는 분산발전 기반의 인버터가 병렬 운전할 때 분산전원만으로 지역적 부하의 전체 수요를 담당 해야 하기 때문에 각 인버터의 주파수와 전압을 조절하여 병렬 연결된 인버터간의 유효전력과 무효전력을 부하에 분담할 수 있게 만드는 드롭제어 방식은 이러한 독립운전시의 인버터 병렬 운전 구동 제어에 가장 널리 쓰이는 방식 중 하나이다. 이 때 이러한 드롭 방식은 다음과 같이 몇 가지 고려해야 할 사항들이 있다[1].

1) 선로 임피던스에 저항 성분이 존재하여 출력 임피던스에 영향을 줄 때 기존의 유도성 라인을 기반으로 하는 드롭제어는 저항성 라인의 존재에 기인한 R-X 복합 성분에 따른 P-Q 커플링으로 인해 그 효력을 잃는다. 2) 병렬운전에서 서로 간의 선로 임피던스가 다를 때 각 선로 전압강하의 오차가 발생하고 이로 인해 무효전력 분담 역시 오차가 발생한다.

위에 대한 문제를 해결하기 위한 기존의 방식으로는 가상 전력 및 주파수-전압 프레임 방식, 가상 임피던스 방식 그리고 그에 대한

보상을 위한 새로운 제어기를 추가하는 방식 등이 있다. 하지만 이러한 방식은 그 방식 단독적으로는 P-Q 커플링과 무효전력 보상 오차 발생 문제를 동시에 해결하지 못하며 특히 새로운 제어기를 추가하는 방식은 자칫 시스템 구성을 매우 복잡하게 만들 수 있다는 단점을 지닌다.

따라서 본 논문에서는 기존의 가상 인덕터 및 가상 저항법을 사용하여 P-Q커플링을 해소하고자 하였으며 또한 [2]에서 제시된 선로 전압 강하 보상기법을 채택하였다. 또한 출력 전류가 출력 전압에 비해 상대적으로 매우 큰 고용량 시스템을 고려하여 가상 인덕턴스와 출력전류의 영향에 대한 큰 전압 강하를 계산하여 추가적으로 지령 전압에 주입함으로써 설정된 유효전력 부하분담을 정확히 추종할 수 있도록 하였다. 제안된 드롭제어 방식은 PSIM과 MATLAB 시뮬레이션을 통해 그 효력을 검증되었다.

### 2. 제어기 설계

널리 알려진 바와 같이 기존의 유도성 성분은 기반으로 한 드롭 제어식은 다음과 같다.

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

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

$\omega_{nom}$  : 공칭주파수,  $E_{nom}$  : 공칭전압

$\omega^*$  : 지령주파수,  $E^*$  : 지령전압

$k_{\omega}$  : 주파수 드롭 계수,  $k_v$  : 전압 드롭 계수

위와 식을 저항성 성분이 포함된 불평형 라인임피던스하의 시스템 제어에 사용할 때 서론에서 언급한 것처럼 R-X복합성분으로 인한 P-Q커플링과 불평형 선로 임피던스 전압 강하로 인한 무효 전력 분담 에러가 발생한다. 따라서 본 논문에서는 P-Q커플링 해소를 위해 [1- 3]과 같은 가상 임피던스 방식을 채택하였다. 그러나 가상임피던스 추가 만으로는 불평형 선로 임피던스 전압 강하에 의한 무효 전력1 분담 문제를 직접적으로 해결할 수 없기 때문에 [2]에서 제안된 식 (3)과 같은 선로 임피던스 전압 강하 보상 기법을 채택하였다.

$$E_{nom}^* = E_{nom} + \frac{2}{3} \frac{R}{V_{PCC,peak}} P_{ref} + \frac{2}{3} \frac{X}{V_{PCC,peak}} Q_{ref} \quad (3)$$

$E_{nom}^*$  : 제안된 공칭 전압

$V_{PCC,peak}$  : PCC단의 피크 전압

저용량 시스템에서는 이와 같은 방식만 적용하여도 정격값에서 구동되는 정확한 유-무효 전력 분담이 가능하다. 하지만 만약 이러한 드롭 제어 방식이 출력 전압 값에 비해 매우 큰 출력 전류 성분을 가지는 고용량 인버터에 적용된다면 인버터간의 전력 분담은 정확히 이루어 진다 할지라도 매우 큰 가상 임피던스 전압 강하로

인해 분담되는 값이 출력 전압 감소에 기인하여 정격값에 비해 매우 감소하게 되는 약점을 지니게 된다. 따라서 본 논문에서는 기존의 선로 임피던스 전압 강하 산출법에 유도성선로에 적용되는 가상 인덕터 전압강하[3] 뿐만 아니라 저항성 기반의 드롭식에 가상 저항을 추가할때의 경우도 고려하여 각각 유도성, 저항성 선로에 따른 출력 지령 전압의 감소 문제에 대해 대처하고자 하였다.

$$E_{ref}^* = E_{nom} + \frac{2}{3} \frac{R}{V_{PCC, peak}} P_{ref} + \frac{2}{3} \frac{Q_{ref}}{V_{PCC, peak}} (X + X_o) - k_v (Q_{ref} - Q) \quad (4)$$

$$E_{ref}^* = E_{nom} + \frac{2}{3} \frac{R + R_o}{V_{PCC, peak}} P_{ref} + \frac{2}{3} \frac{Q_{ref}}{V_{PCC, peak}} X + k_v (P_{ref} - P) \quad (5)$$

### 3. 시뮬레이션

표 1은 100kW급 병렬형 인버터의 시뮬레이션 파라미터를 보여 준다. 그림 1에서 시뮬레이션은 2가지 경우로 나뉘는데 첫 번째 경우는 유도성 기반의 선로에 가상 인덕터와 유도성 기반의 기존 또는 제안된 드롭식을 사용하였고 두 번째 경우는 저항성 기반의 선로에 가상 저항을 추가하고 저항성 기반의 기존 또는 제안된 드롭식을 사용하였다. 그림 1의 (a)와 (c)에서 확인가능하듯 기존의 드롭 방식을 사용하였을때는 불평형 선로 임피던스 전압 강하로 인해 (a)의 경우 무효전력 분담 오차가 (b)의 경우 유효전력 분담 오차가 발생하였고 큰 전류값에 기인한 매우 큰 가상 임피던스 전압 강하로 인해 출력 전압 감소에 기인하여 유효전력 분담치가 정격에 비해 감소한 것을 확인하였다. 하지만 (b)와 (c)와 같이 제안된 드롭 식 (4),(5)를 각각 사용 하였을 때 (a)와 (c)의 무효전력과 유효전력의 분담 오차가 거의 제거되었고 각 유효전력의 분담치가 정격 전력 값에서 출력되는 것을 확인할 수 있다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Parameters		Value
P <sub>ref</sub>		100kW
Q <sub>ref</sub>		6.6kVar
V <sub>dc</sub>		158V
Frequency Droop Gain		-1 × 10 <sup>-5</sup> rad/ω
Voltage Droop Gain		-5 × 10 <sup>-7</sup> V/Var
Filter Capacitor		2100 uF
Filter Inductance		15 uH
DG1 Line Impedance	X based Line (Case1)	0.08mH, 0.02 Ω
DG2 Line Impedance		0.17mH, 0.15 Ω
DG1 Line Impedance	R based Line (Case2)	0.008mH, 0.03 Ω
DG2 Line Impedance		0.033mH, 0.15 Ω
Virtual Inductance X <sub>o</sub>		0.265mH
Virtual Resistor		0.1 Ω
Switching Frequency		4kHz

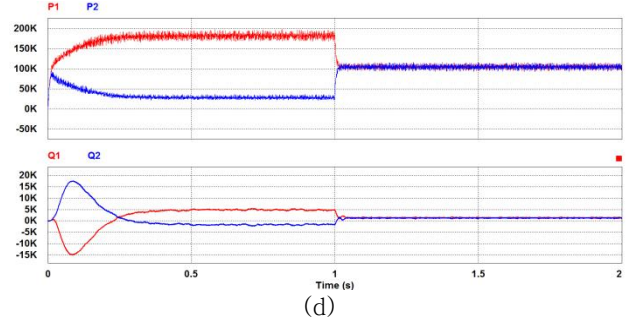
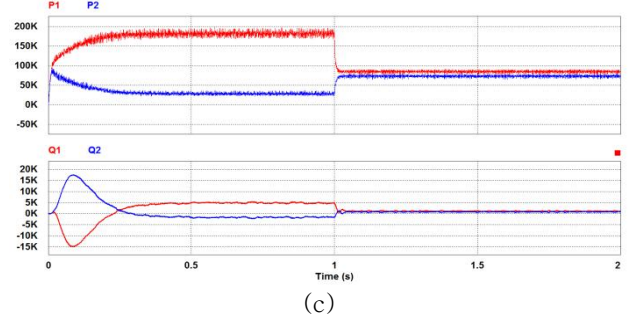
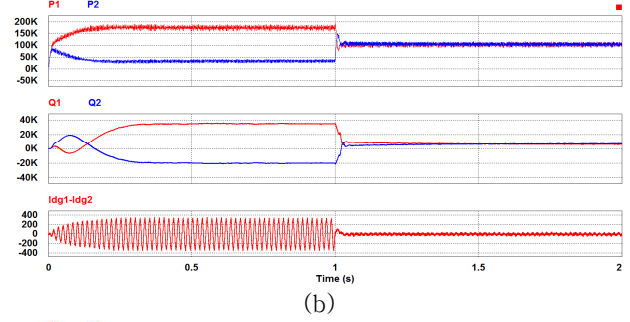
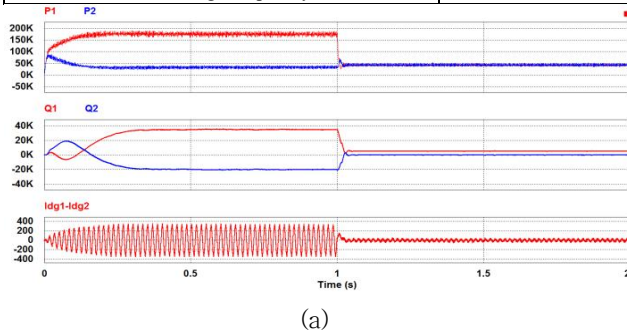


그림 1. 드롭 방식을 적용한 유-무효 전력 시뮬레이션 결과

- (a) case1 에 기존 유도성 드롭 방식 적용시
- (b) case1 에 제안된 유도성 드롭 방식 적용시
- (c) case2 에 기존 저항성 드롭 방식 적용시
- (d) case2 에 제안된 저항성 드롭 방식 적용시

### 4. 결론

본 논문에서 제안된 방식은 소신호 안정도 분석에 기초하여 선정된 가상 인덕터 값을 기반으로 하여 유도성 또는 저항성이 지배적인 선로 임피던스들 모두에서 드롭제어가 효력을 가지도록 하였다. 기존 드롭 제어에 실제 선로 임피던스 뿐만 아니라 가상 인덕터에 의한 전압강하까지도 추가적으로 고려함으로써 병렬운전 시에 유효전력과 무효전력의 분담특성이 개선되도록 하였으며 따라서 인버터의 순환전류가 최소화되도록 하였다. 제안된 방식은 유도성 라인을 기반으로 한 드롭 제어 뿐만 아니라 저항성 라인 지배적인 시스템에 가상 저항이 추가된 경우에도 효력을 보임을 입증하였다.

### 참고 문헌

- [1] Y. W. Li and C. N. Kao, "An accurate power control strategy for power-electronics-interfaced distributed generation units operation in a low voltage multibus microgrid," *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 24, no. 12, pp. 2977-2988, December 2009.
- [2] K. Lim and J. Choi, "Droop Control for Parallel Inverters in islanded microgrid considering unbalanced low-voltage line impedance," *Trans. of Korean Institute of Power Electronics*, vol. 18, no. 4, pp.387-396, 2013.
- [3] K. Jung, K. Lim, D. Kim and J. Choi, "Droop method for high-capacity parallel inverters in islanded mode using virtual inductor," *Trans. of Korean Institute of Power Electron*, vol. 20, vo. 1, pp. 81-90, 2013.