

마이크로그리드 독립운전 시 병렬 운전 인버터의 적절한 전력분담을 위한 가상임피던스 기반의 드롭제어 연구

고승우, 임경배, 최재호
충북대학교

Virtual impedance based droop control for proper power sharing of parallel inverters in islanded microgrid

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. 가상 임피던스에 따른 출력 임피던스에 대해서 연구하고 이에 따른 드롭제어를 분석하고, PSIM 시뮬레이션을 이용하여 검증하였다.

1. 서 론

최근 환경 인식 및 탄소배출 우려의 증가에 따라 태양광, 풍력, 연료전지, 마이크로서터빈 등의 분산 에너지 자원이 주목을 받고 있다. 마이크로그리드는 기존의 ac그리드와 이런 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 동작에서는 병렬로 연결된 분산전원에서 지역적 부하에서 요구하는 전력을 공급해주어야 한다. 따라서, 각 분산 발전 기반의 인버터의 주파수와 전압 조절함으로써, 각 인버터의 유효전력과 무효전력을 제어하기 위한 드롭제어 방식이 쓰인다. 그러나 이 방식은 유효전력과 무효전력의 분담에 있어서 몇 가지 오차를 발생시키는 문제가 있다. 우선 기존에 유도성 저항성 선로 가정 하에 나뉜 드롭제어 식이 실제 선로임피던스에서는 복합성분으로 되어있어 드롭제어 식 간에 커플링이 생겨 효력을 잃어버리게 된다. 또한, 병렬 인버터간의 선로 임피던스가 불평형으로 이루어져 있으면 서로 다른 선로 임피던스 전압 강하로 인한 전력 분담의 에러가 발생한다. 이에 대한 대책으로 가상 임피던스를 추가함으로써 전력조류의 문제를 해결하고, 선로 임피던스에 따른 전압강하 보상하는 방법으로 전력에러를 해결하기 위한 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 드롭제어의 오차를 해결하기 위한 대책으로 가상 임피던스 추가하는 방법과 여러 오차의 요인들을 고려하여 전력 분담을 개선하였고, 이를 PSIM 시뮬레이션을 이용하여 확인 하였다.

2. 드롭제어

2.1 기존 저항성 드롭제어

마이크로그리드에서 PCC에 연결된 하나의 분산전원을 등가 회로로 간단히 표현하면 그림 1과 같다. 여기에서 $E\angle\phi$ 는 분산 전원의 출력 전압, $V\angle 0^\circ$ 는 PCC전압, $Z\angle\theta$ 는 분산전원과 PCC사이의 선로 임피던스를 나타내낸다. 그림1의 회로를 바탕으로 저항성 성분을 기반으로 한 드롭제어 식은 다음과 같다.

$$\omega^* = \omega_{nom} + k_\omega(Q_{ref} - Q) \tag{1}$$

$$E^* = E_{nom} - k_v(P_{ref} - P) \tag{2}$$

ω_{nom} : 공칭주파수, ω^* : 지령주파수

E_{nom} : 공칭전압, E^* : 지령전압

k_ω : 주파수 드롭 계수, k_v : 전압 드롭계수

2.2 가상 임피던스 방식

저항성이 지배적인 선로 임피던스에서 드롭제어 식은 출력 임피던스가 저항성이라는 가정 하에 식을 유도하게 된다. 하지만 실제 선로 임피던스에 복합성분으로 존재하기 때문에 유,무효 전력 사이에 상호 간섭 성분으로 P-Q커플링이 생기게 된다. 이에 기존의 저항성 드롭제어 식 $P-E$ 와 $Q-\omega$ 관계가 모호해져 효력을 잃게 된다. 따라서, 선로 임피던스에 가상의 저항을 추가하여 상호 간섭 성분을 제거함으로써 P-Q디커플링

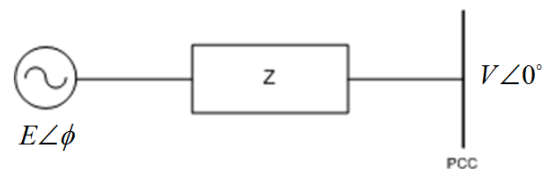


그림 1 분산 발전 시스템의 등가 회로

Fig. 1 Equivalent circuit of distributed generation system

이 되고, 기존의 저항성 드롭 제어 방식의 효력 가지게 된다. 이 방식은 임피던스 측 출력 전류를 피드백 받아 가상 저항의 전압 강하를 얻어 드롭 방정식을 통해 생성되는 지령전압에 가상 저항값에 대한 전압 강하를 빼줘서 시스템에 적용된다.

$$E_{ref} = E^* - Z_v i_o \quad (3)$$

2.2 정확한 유효전력 분담을 위한 전압 보상

인버터 병렬 운전에서 서로 다른 선로 임피던스에 각기 다른 전압 강하가 발생하면 가상 임피던스를 추가함으로써 유효전력 분담의 오차를 개선시키지 못한다. 또한 대용량 시스템에서는 출력 전류가 매우 커서 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 유효 전력 분담을 위한 전압을 보상 해주었다.

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

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

3. 시뮬레이션

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 parameters droop control simulation

| | | | |
|-----------|---------------------------|-----------|---------------------------|
| P_{ref} | 100kW | Q_{ref} | 6.6KVar |
| 라인 임피던스1 | 0.03Ω $0.008mH$ | 라인 임피던스2 | 0.15Ω $0.033mH$ |
| DC 링크 전압 | 158V | 가상 저항 | 0.1Ω |

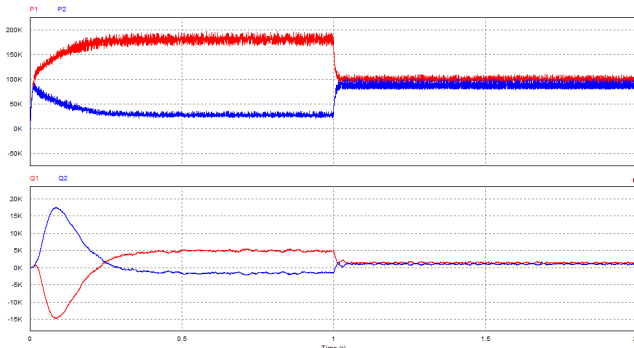


그림 2 기존의 저항성 드롭 방식을 적용한 시뮬레이션
Fig. 2 Conventional resistive droop control

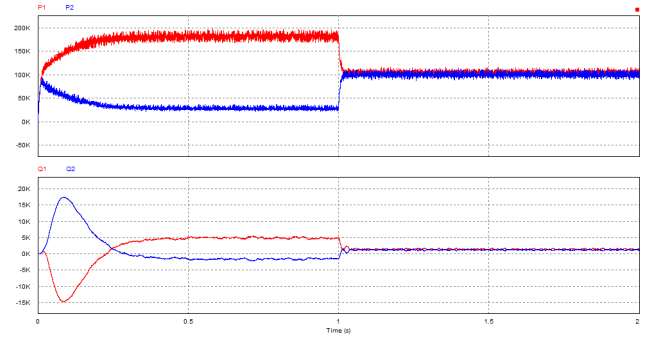


그림 3 제안한 저항성 드롭 방식을 적용한 시뮬레이션
Fig. 3 Proposed resistive droop control

시뮬레이션은 100kW 급 병렬형 인버터로 진행 되었으며, 표1은 시뮬레이션의 파라미터를 보여준다. 그림2은 기존의 저항성 기반의 선로 임피던스를 고려한 드롭 제어 식을 사용하여 DG1과 DG2의 유효전력과 무효전력을 나타 낸다. 그림3은 제안된 드롭 제어 식을 이용한 시뮬레이션을 나타낸다. 그림2에서 무효전력의 분담은 비교적 잘 이루어지나 유효전력은 불평형 라인 임피던스로 인하여 분담이 제대로 이루어지지 않고 가상 임피던스로 인한 전압 강하도 설정 전압 보다 낮게 부하를 분담이 이루어 졌다. 하지만 그림3에서 제안된 드롭 제어 식을 적용을 하였을 때 무효전력의 분담은 여전히 잘 이루어지고 있고, 유효전력 분담의 오차는 개선되고 더불어 유효전력의 분담 치가 정격 값으로 개선된 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 인버터 병렬 운전에서 저항성 선로 임피던스가 지배적인 상황에서의 부하 분담을 연구하였다. 기존의 드롭 제어의 문제로 선로 임피던스의 복합 성분으로 인한 파워 커플링 문제와 불평형 선로 임피던스로 인한 전압 강하에 따른 전력 분담의 예리가 있었다. 이에 파워 커플링을 해결하기 위해 가상 저항 값이 추가된 상황에서 불평형 선로 임피던스의 영향과 가상 저항의 추가로 인한 전압 강하를 개선 되도록 하여 유효전력 분담이 개선 되도록 하였다. 시뮬레이션을 통해 결과를 확인해 보았다.

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, pp2977-2988, 2009.
- [2] 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.
- [3] 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.