

선로 임피던스에 따른 분산전원 기반의 인버터 병렬 운전 드롭 방식 연구

임경배*, 최재호*, 권경민**
충북대학교*, 우진산전**

Droop method for parallel inverters operation considering the line impedances

Kyungbae Lim*, Jaeho Choi*, Kyoungmin Kwon**
Chungbuk National University*, Woojin Co**

ABSTRACT

마이크로그리드 독립 운전 모드시 분산전원 기반의 인버터 병렬 운전은 인버터가 전압원과 같이 정의됨에 따라 계통과의 연결 없이 병렬 연결된 인버터가 전체 부하를 담당해야 하는 의무를 가진다. 이때 드롭 방식은 병렬형 인버터 각각에 적용됨으로써 전체 부하 분담능을 향상시킨다. 하지만 각 분산전원과 PCC단을 연결하는 선로 임피던스가 불평형 이거나 서로 다른 R/X 비를 가지고 있을때 유도성 선로에 적용을 목적으로 하는 기존의 드롭 방식을 사용하면 유효전력 분담은 어느 정도의 효력을 보이지만 무효 전력 분담에 있어서 오차가 발생하게 된다. 이와 반대로 저항성 선로에 적용을 목적으로 하는 드롭 방식을 적용하면 무효 전력 분담은 잘 이루어지지만 유효 전력 분담은 서로 다른 선로 임피던스 전압 강하로 인해 오차가 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 PSIM을 활용하여 고, 중, 저전압 마이크로그리드 뿐만 아니라 R성분이 매우 지배적인 초저전압 마이크로그리드에 각기 다른 드롭 방식을 적용할때의 영향을 분석하고 이에 제안된 선로 임피던스를 고려한 기준 전압 조정법을 추가하여 유효, 무효 전력 분담 오차를 개선하였다.

1. 서론

태양광, 풍력과 같은 분산 발전과 에너지 저장 장치를 통합한 개념인 마이크로그리드는 최근 그에 대한 관심이 급격히 증가해 오고 있는 분야 중 하나로서 환경친화적인 요소와 안정적인 전력 수급과 같은 장점을 가지고 있다. 평상시 마이크로그리드는 계통과 연계되어 운전되다가 계통에서 사고가 발생하거나 전략적인 독립 운전 구동이 필요할시 마이크로그리드에서 이를 감지하여 독립 운전모드로 동작하게 된다. 독립 운전시 인버터는 전압원과 같이 동작하며 계통과의 연결 없이도 계통 연계 모드에서와 마찬가지로 신뢰할만한 전력을 지속적으로 부하에 공급할 의무를 가진다. 이때 이러한 분산 유닛 기반의 인버터 병렬 운전은 마이크로그리드의 독립 운전 모드에서 부하 분담을 위한 핵심 기술이라고 할 수 있다. 부하의 적절한 분담을 가능하게 하는 방식 중 하나로 ‘마스터슬레이브’ 방식이 있다. 이 방식은 적용이 쉽고 간단하며 각기 다른 선로 임피던스들의 존재에도 불구하고 독립 운전시 뛰어난 부하 분담 성능을 보인다. 하지만 이 방식은 각 인버터 PCS간의 상호 통신을 전제로 하고 있기 때문에 마스터 모듈에서 제어가 실패할시 시스템 전체의 제어에 영향을 미치는 단점을 지니고 있다. 이러한 단점에 대한 대안으로 주파수 전압 드롭 방식이 제안되어왔으며 이 방식은 통신 선로 없이 각 PCS의 독립적인 제어를 가능하게 하며 주파수 유효전력, 전압 무효전력과의 관계를 통해 부하분담을 실현한다. 하지만 드롭 방식은 각 인버터의 선로임피던스 R/X 비가 다르거나 선로 임피던스가 불평형일때 어느 정도의 유효전력 분담은 실현 가능 하지만 무효전력 분담에 있어서는 오차를 발생시킨다. 이는 선로 임피던스의 R/X 관계와 드롭관계가 불일치하며 선로 임피던스의 서로

다른 전압 강하가 발생한다는 점에 기인한 것으로 이와 같은 문제의 해결을 위해 유효전력의 외란을 무효전력 제어됨에 주입하거나^[1] 가상임피던스를 활용하는 방식을 통하여 무효 전력의 오차를 개선하는 방식 등이 연구되어 왔다.^[2]

본 논문에서는 [3]에서 제안한 선로 임피던스 전압강하에 따라 전압 드롭식의 기준 전압을 재설정하는 방식이 유도성 성분이 지배적인 선로하에서 기존의 주파수 유효전력, 전압 무효전력의 관계를 갖는 드롭식을 사용하였을때 뿐만 아니라 R성분이 X성분에 비해 매우 지배적인 저압 선로 임피던스에서 기존의 주파수 유효전력 전압 무효전력 기반의 드롭식 대신 전압 유효전력, 주파수 무효전력의 관계를 갖는 드롭식을 사용하였을때도 효력이 있음을 검증하였다. 제안된 방식은 PSIM을 사용하여 수행되었다.

2. 본론

2.1 드롭 방식

그림 1은 전송선로에서의 전력 조류를 보여주고 있다. V_n 은 각 지점에서의 전압이고 Z는 임피던스, S는 전송선로에 공급되는 복소 전력이다. [4]에서는 위의 그림으로부터 기존의 유도성 선로를 목적으로 하는 아래와 같은 드롭식을 이끌어 내었다.

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

$$V^* = V_{nom} - k_v (Q_{ref} - Q_{measured}) \quad (2)$$

ω_{nom}, V_{nom} : 정격 주파수와 전압, k_w, k_v : 주파수-전압 드롭계수

하지만 위 두 식은 유도성 선로를 목적으로 하고 있기 때문에 저항성 성분이 지배적인 저전압 마이크로그리드하에서는 그 효력을 잃게 된다. 그런 이유로 위에 언급되었듯이 [2]에서는 가상 인덕터를 사용하여 저항성 성분이 더 큰 저전압 선로에서도 기존의 드롭식이 효력을 갖도록 하였다. 하지만 저항성 성분이 유도성 성분보다 상대적으로 매우 지배적인 저전압 선로의 경우 기존의 가상 인덕터 방식은 지배적인 저항성 성분을 유도성 지배적인 성분으로 만들기 위해 그 만큼의 큰 가상 인덕터를 추가해야 하기 때문에 이는 시스템의 불안정을 초래할 수 있다는 단점을 가진다. 따라서 이러한 경우에는 저항성 선로에서의 제어를 목적으로 하는 아래와 같은 드롭식이 효력을 갖게 된다.^[5]

$$\omega^* = \omega_{nom} + k_w (Q_{ref} - Q_{measured}) \quad (3)$$

$$V^* = V_{nom} - k_v (P_{ref} - P_{measured}) \quad (4)$$

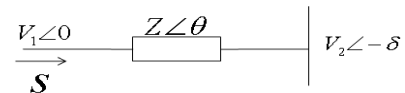


그림 1 전송선로에서의 전력 조류.
Fig. 1 Power flow at transmission line.

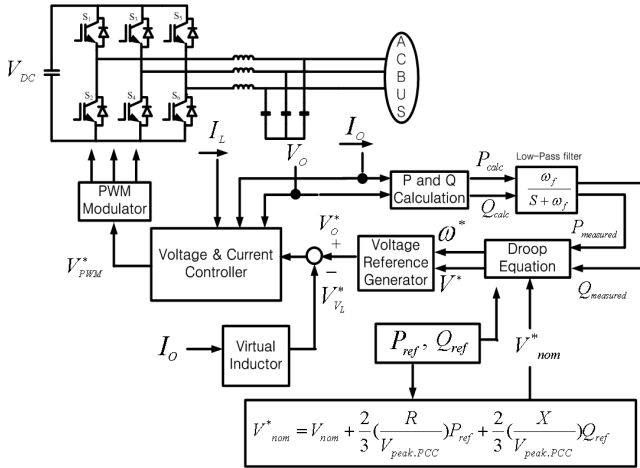


그림 2 전체 제어 방식 블럭도
Fig. 2 Overall control scheme

2.2 기준 전압 조정 방식

기존의 유도성 지배적인 선로를 고려한 드롭 제어시 서로 다른 선로 임피던스 전압강하로 인해 무효 전력 분담 오차가 발생하며 이와 반대로 저항성 지배적인 선로를 고려한 드롭 제어시는 유효 전력 분담 오차가 발생한다. 그런 이유로 [3]에서 제안된 일반적인 전압 강하 식으로부터 도출된 기준 전압 조정 방식은 식(1),(2) 뿐만 아니라 (3),(4) 와도 같이 적용되어 유효 무효 전력의 정확한 부하 분담을 실현할 수 있게 되며 이때 기준 전압 조정 방식은 3상 시스템에 적용됨에 따라 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{nom}^* = V_{nom} + \frac{2}{3} \left(\frac{R}{V_{Peak.PCC}} \right) P_{ref} + \frac{2}{3} \left(\frac{X}{V_{Peak.PCC}} \right) Q_{ref} \quad (5)$$

V_{nom} 과 V_{nom}^* 은 각각 기존 드롭방식과 제안된 드롭 방식의 기준 전압 피크 값을 의미하고 R 과 X 는 각각 선로임피던스의 저항성 성분과 유도성 성분을 나타낸다. 그림 2는 기준 전압 조정 방식을 사용하여 재설정된 V_{nom} 을 포함한 전체 제어 방식을 보여준다. 제안된 방식이 본 논문의 시뮬레이션과 같이 저항성 선로를 위한 식(3), (4)와 같이 적용될때는 가상 인덕터가 적용되지 않는다.

2.3 시뮬레이션

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Parameters of Simulation

Output Voltage		380 V (60Hz)
P_{rated}, Q_{rated}		8kW, 300 VAR
Filter L, C		1mH, 15μF
Line impedance	Case 1	DG1 : 0.1 + j0.0377 [Ω]
		DG2 : 0.2 + j0.1508 [Ω]
	Case 2	DG1 : 0.8 + j0.0377 [Ω]
		DG2 : 0.9 + j0.1508 [Ω]

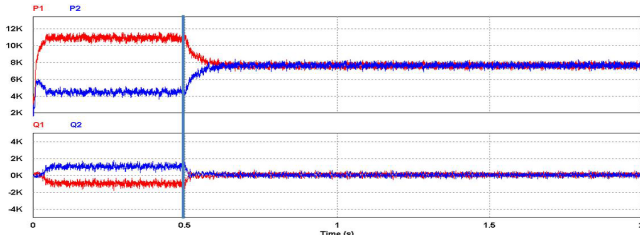


그림 3 Case 1의 선로 임피던스에서 제안된 방식을 적용할때의 유효-무효 전력.
Fig. 3 Proposed droop performance on case 1.

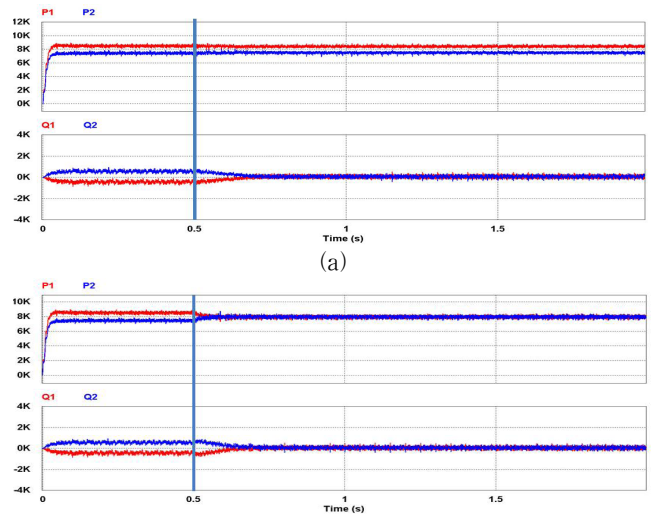


그림 4 (a) Case2에서 기존 드롭 방식 적용시의 유효-무효전력
(b) case2에서 제안된 드롭 방식 적용시의 유효-무효전력.
Fig. 4 (a) Conventional droop performance in case 2
(b) proposed droop performance in case 2.

그림 3은 case1의 중전압과 저전압 선로가 혼재된 선로 임피던스에서 식(1), (2)에 제안된 방식을 적용하였을때 유효 무효 전력을 보여준다. 제안된 방식은 각기 다른 분산 유닛들의 선로 임피던스에도 불구하고 정확한 유효 무효 전력 분담을 실현하고 있다. 그림 4는 R/X 비가 case1의 R/X 비에 대해 상대적으로 매우 큰 case 2의 초저전압 선로에서 식 (3),(4)를 적용하고 각각 기존의 드롭 방식과 제안된 방식을 사용하였을때의 유효 무효 전력을 보여준다. 그림 4의 (a)에서 보여지듯 식(1),(2)를 적용시와는 반대로 선로 임피던스 전압강하 차이가 유효 전력의분담오차를 발생시키게 되는데 이 역시 제안된 기준 전압 조정 방식을 통해 그림 4의 (b)와 같이 무효전력 뿐만 아니라 유효전력의 정확한 분담도 실현되었다.

3. 결론

본 논문에서는 기존에 필자가 제안한 기준 전압 조정 방식이 중전압이나 R/X 비가 매우 크지 않은 저전압 선로에서 가상 인덕터와 식(1), (2)와 같이 적용될때 뿐만 아니라 R/X 비가 매우 큰 선로에서 식(3), (4)와 같이 적용될때에도 유효 무효 전력 분담에 효력이 있음을 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

참고 문헌

- [1] J. He and Y. W. Li, "An accurate reactive power sharing control strategy for DG units in a Microgrid," in *Conf. of Rec. ICPE ECCE Asia*, pp. 551 556, 2011.
- [2] 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, 2009.
- [3] 임경배, 임상민, 안민호, 최재호, "저전압 불평형 라인 임피던스를 고려한 Droop 방식의 인버터 병렬 운전 제어연구", *전력전자학회 추계학술대회 논문집*, pp. 181 182, 2012.
- [4] K. D. Brabandere, B. Bolsens, J. V. Keybus, A. Woyte, J. Driesen, and R. A. Belmans, "Voltage and frequency droop control method for parallel inverters," *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 22, no. 4, pp. 1107 1115, 2007.
- [5] J. M. Guerrero, L. G. Vicuna, J. Matas, M. Castilla, and J. Miret, "Output impedance design of parallel connected UPS inverters with wireless load sharing control," *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 52, no. 4, pp. 1126 1135, 2005.