저전압 불평형 라인임피던스를 고려한 Droop 방식의 인버터 병렬 운전 제어 연구

임경배*, 임상민*,안민호*,최재호*
충북대학교*

Droop method for parallel inverters operation in unbalanced low-voltage microgrids

Kyungbae Lim*, Sangmin Lim*, Minho Ahn*, Jaeho Choi*
Chungbuk National University*

ABSTRACT

마이크로그리드 계통 연계 운전시 분산 발전은 main grid와 함께 연계되어 부하의 수요를 담당한다. 하지만 계통사고나 의도적인 제어 전략으로 인해 분산 발전은 계통과 분리되어 단독으로 부하의 수요를 담당하게 된다. 이때 분산발전을 기반으로 한 인버터는 계통 연계 운전 시 하나의 전류원으로서의 역할을 하다가 시스템이 단독 운전 모드로 전환시 전압원으로 가정되게 된다. 이러한 특성으로 인해 단독운전 모드시의 인버터 병렬 운전은 시스템 파라미터와 라인 임피던스에 매우 민감해진다. 따라서 본 논문에서는 단독운전 모드시 불평형 저전압 마이크로그리드에서 대두되는 문제들에 대해 분석하고 가상 인덕터와 기준 전압 조정을 활용한 개선된 드룹 방식의 적용을 통해 이를 해결하고자 하였다. 제안된 이론은 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증되었다.

1. 서론

환경친화적인 요소와 안정적인 전력 수급과 같은 장점으로 인해 분산발전 시스템에 대한 관심은 최근 급격히 증가해오고 있다. 이때 마이크로그리드는 분산발전과 에너지 저장장치를 통합하여 부하의 수요를 담당한다. 평상시 마이크로그리드는 계통과 연계되어 운전하다가 계통에서의 사고발생시 마이크로그리드에서 이를 감지하여 단독 운전모드로 동작하게 된다. 단독운전시 인버터는 전압원과 같이 동작하며 계통연계시와 마찬가지로 양질의 전력을 지속적으로 부하에 공급할 의무를 가진다. 이때 드룹방식을 통한 분산발전의 제어는 분산발전유닛들간의 통신없이도 적절한 유효, 무효전력 sharing을 가능케한다. 하지만 각 분산발전들의 라인임피던스가 불평형 저전압 마이크로그리드일때 저항성 라인성분에 의한 파워 커플링과 불평형 라인임피던스에 의한 서로 다른 라인 전압 강하에 기인하여 기존의 드룹 방식은 주로 무효전력의 부하 분담에 있어서 효력을 잃게 된다.[1] 따라서 본 논문에서는 단독운전모드에서의 인버터 병렬 운전시 파워 디커플링을 위한 가상 인덕터와 기준 전압 조정을 통한 개선된 드룹방식을 사용하여 부하를 분담하는 방식을 제안한다.

2. 시스템 모델링

2.1 드룹 방식

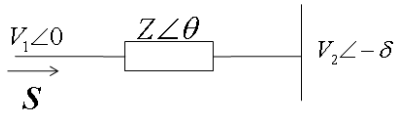

그림 1 전송라인에서의 전력 조류
Fig. 1 Power flow at transmisson line

그림 1은 전송라인에서의 전력 조류를 보여주고 있다. V_n은 각 지점에서의 전압이고 Z는 임피던스, S는 전송라인에 공급되는 복소 전력이다. 이때 각각의 P와 Q값은 다음과 같다.[2]

$$P=\frac{V_1^2}{Z}cos\theta-\frac{V_1V_2}{Z}cos(\theta+\delta) \quad (1)$$

$$Q=\frac{V_1^2}{Z}sin\theta-\frac{V_1V_2}{Z}sin(\theta+\delta) \quad (2)$$

여기서 $Ze^{j\theta}=R+jX$ 이다. 이를 통해 P와 Q는 아래와 같이 다시 나타내어진다.

$$P=\frac{V_1}{R^2+X^2}[R(V_1-V_2\cos\delta)+XV_2\sin\delta] \quad (3)$$

$$Q=\frac{V_1}{R^2+X^2}[-RV_2\sin\delta+X(V_1-V_2\cos\delta)] \quad (4)$$

$$\sin\delta=\frac{XP-RQ}{V_1V_2} \quad (5)$$

$$V_1-V_2\cos\delta=\frac{RP+XQ}{V_1} \quad (6)$$

유도성의 전송라인에서는 R은 무시되며 δ는 아주 작으므로 ($\sin\delta=\delta$, $\cos\delta=1$) 따라서 위식은 아래와 같이 다시 쓰여질 수 있다.

$$\delta\simeq\frac{XP}{V_1V_2} \qquad V_1-V_2\simeq\frac{XQ}{V_1} \quad (7)$$

위의 식에서 볼 수 있듯 유효전력 P는 δ에 무효전력Q는 전압차이 V_1-V_2 에 주로 영향을 받는다. 다시 말해 주파수를 제어함으로써 위상각을 제어하고 더 나아가 유효전력 P도 제어될 수 있으며 또한 인버터 출력 전압 V_1을 제어함으로써 무효전력 Q도 제어된다.[1]

이를 토대로 아래와 같은 주파수 전압 드룹식을 이끌어낼 수 있다.

$$\omega^*=\omega_{nom}-k_w(P_{ref}-P) \quad (8)$$

$$V^*=V_{nom}-k_v(Q_{ref}-Q) \quad (9)$$

ω_{nom}, V_{nom}:정격 주파수와 전압크기
k_w, k_v:주파수 전압 드룹계수($k_w, k_v<0$).

2.2 가상 인덕터

높은 R/X ratio를 가진 라인에서 가상 인덕터를 추가함에 따라 인덕티브성분이 라인의 주된 성분이 되게끔 함으로써 기존의 드룹 관계가 효력을 갖게 된다. 가상 인덕터는 그림 2와 같이 기존의 지령 전압에 가상 인덕터의 전압 강하만큼을 감해줌으로써 적용된다.[3]

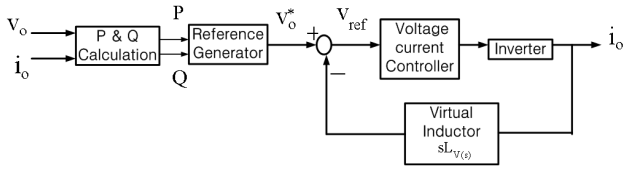

그림 2 가상 인덕터의 적용
Fig. 2 Implementation of Virtual Inductor

2.3 기준 전압 재설정

라인 전압 강하 불일치에 기인한 무효 전력 분담 에러를 극복하기 위해 기준 전압 재설정에 대한 필요성이 고려되었다. 식()는 시스템의 전압 강하에 대한 식을 나타내며 이를 통해 서로 다른 라인 전압 강하가 계산되고 계산된 서로 다른 전압 강하만큼을 기준 전압 V_{nom}에 더해줌으로써 무효 전력 분담 성능이 개선될 수 있다.

$$E = V_{\in v} + (R/V)P + (X/V)Q \qquad (10)$$

이때 E는 PCC단의 전압을 의미하고 $V_{\in v}$는 인버터의 출력 전압을 의미하며 각각의 R과 X를 포함한 텀들은 각 성분에 대한 전압 강하를 나타낸다.
그림 3은 전체 제어 방식을 나타낸다.

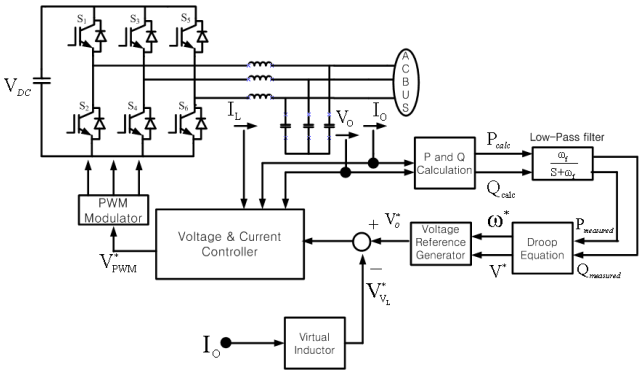

그림 3 전체 제어 방식 블락도
Fig. 3 Overall control scheme

3. 시뮬레이션

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Parameters of Simulation

DC link voltage	$750\,V$
P_{rated}, Q_{rated}	$8kW,\ 300\ VAR$
Output voltage	$312.7\,V(DG1), 311.9\,V(DG2)$
Filter C, L	$15\mu F,\ 1mH$
Line Impedance	$DG1: 0.1\Omega, 0.1mH$ $DG2: 0.5\Omega, 1mH$
k_ω, k_v	$-2\times10^{-5},\ -5\times10^{-4}$

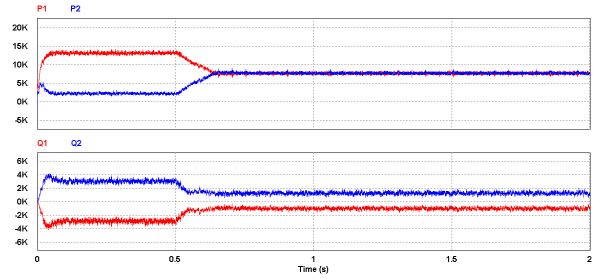

그림 4 시뮬레이션 결과 (유효전력(위), 무효전력(아래))
Fig. 4 Simulation Result (P(top), Q(bottom))

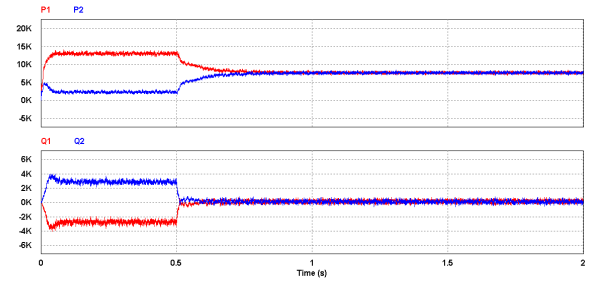

그림 5 시뮬레이션 결과 (유효전력(위), 무효전력(아래))
Fig. 5 Simulation Result (P(top), Q(bottom))

그림 4와 5에서 드룹제어는 0.5s에서 적용되었다. 그림 4는 기존 드룹 방식을 적용한 DG1과 DG2에서의 유효전력과 무효전력을 나타낸다. 그림 4에서 보여지듯 유효전력의 부하 분담은 잘 이루어지지만 무효전력은 서로 다른 라인 임피던스 전압 강하로 인해 부하 분담 에러가 발생 되고 있다. 따라서 이런 문제를 해결하고자 라인임피던스 전압강하를 고려하여 기준 전압을 재설정을 통한 가상 임피던스 기반의 제안된 드룹 방식이 그림 5에 적용되었으며 그림 5에서 보여지듯 0.5s이전에는 서로 다른 라인 임피던스로 인해 각각의 인버터의 출력 전력 값이 다르지만 0.5s 에 드룹을 적용하였을때 적용 후 빠른 시간 내에 각 분산 전원이 정확하게 부하를 분담하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 8kW급 풍력발전을 위한 마이크로그리드 단독운전시의 드룹방식을 통한 Load Sharing제어 전략을 제안하였고 시뮬레이션을 통해 제안된 드룹방식의 제어를 적용하였을때 기존의 드룹 방식보다 무효 전력 부하분담이 개선된 것을 확인하였다. 이번 논문에서는 시뮬레이션만을 통해서 검증하였으나 다음 단계에서는 실험을 통해 본 논문의 이론을 검증하겠다.

참 고 문 헌

[1] J. He and Y. W. Li, “An Accurate Reactive Power Sharing Control Strategy for DG Units in a Microgrid,” *in Conf . Rec .ICPE ECCE Asia*, pp.551 556,May,2011.

[2] K. De Brabandere, B. Bolsens, J. Van den Keybus, A Woyte, J. Driesen, and R. A. Belmans, “”Voltage and frequency droop control method for parallel inverters,”“IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 4, pp. 1107 1115, Jul. 2007.

[3] 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 IE*, vol.52 no.4, pp.1126 1135, 2005.