

# 마이크로그리드 단독 운전 모드시 Droop 방식의 인버터 병렬 운전 제어 연구

임경배\*, 최재호\*, 파자르\*\*  
충북대학교\*, LS산전\*\*

## Droop method for parallel inverters operation in microgrid standalone mode

Kyungbae Lim\*, Jaeho Choi\*, Fajar Sastrowidjoyo\*\*  
Chungbuk National University\*, LSIS Co. Ltd.\*\*

### ABSTRACT

마이크로그리드에서 계통 연계 운전시 분산발전시스템은 계통과 함께 부하의 수요를 담당하게 된다. 그러나 계통사고로 인해 시스템이 단독 운전모드로 동작시에는 계통과의 연결 없이 분산발전만으로 부하의 수요를 담당해야한다. 이때 드롭제어방식은 적절한 부하 sharing을 가능케하고 전압과 주파수를 안정적으로 유지할 수 있게해준다. 따라서 본 논문에서는 드롭제어방식의 단독운전모드시의 인버터 병렬 운전 제어를 통한 13kW급 풍력발전 시스템을 제안하였고 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 통해 이를 검증하였다.

### 1. 서론

환경친화적인 요소와 안정적인 전력 수급과 같은 장점으로 인해 분산발전 시스템에 대한 관심은 최근 급격히 증가해오고 있다. 이때 분산발전의 더 효율적인 사용을 위하여 국소적인 전력 공급시스템인 마이크로그리드가 제안되었다. 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 드롭방식을 통한 분산발전의 제어는 분산발전유닛들간의 통신없이도 적절한 유효, 무효전력 sharing을 가능케하며 전압과 주파수를 안정적으로 유지시킬 수 있게 해준다. 따라서 본 논문에서는 단독운전모드에서의 인버터 병렬 운전시 드롭방식을 사용하여 부하를 분담하는 방식을 소개하고 이를 구현하기위해 decoupling됨을 포함한 전압 전류 제어방식을 사용한 13kW급 풍력발전 시스템을 제안하였다.

### 2. 시스템 모델링

#### 2.1 드롭 방식

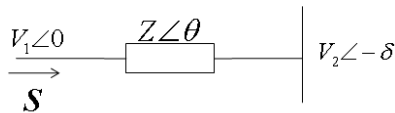


그림 1 전송라인에서의 전력 조류  
Fig. 1 Power flow at transmission line

그림 1은 전송라인에서의 전력 조류를 보여주고 있다.  $V_n$ 은 각 지점에서의 전압이고  $Z$ 는 임피던스,  $S$ 는 전송라인에 공급되는 복소 전력이다.

이때 전송라인을 흐르는 복소 전력은 다음과 같다.

$$S = V_1 \times I^* = V_1 \left( \frac{V_1 - V_2 e^{j\delta}}{Z e^{-j\theta}} \right) = \frac{V_1^2}{Z} e^{j\theta} - \frac{V_1 V_2}{Z} e^{j(\theta+\delta)} \quad (1)$$

이때 각각의 P와 Q값은 다음과 같다.

$$P = \frac{V_1^2}{Z} \cos\theta - \frac{V_1 V_2}{Z} \cos(\theta+\delta) \quad (2)$$

$$Q = \frac{V_1^2}{Z} \sin\theta - \frac{V_1 V_2}{Z} \sin(\theta+\delta) \quad (3)$$

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

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

$$Q = \frac{V_1}{R^2 + X^2} [-R V_2 \sin\delta + X(V_1 - V_2 \cos\delta)] \quad (5)$$

$$\sin\delta = \frac{XP - RQ}{V_1 V_2} \quad (6)$$

$$V_1 - V_2 \cos\delta = \frac{RP + XQ}{V_1} \quad (7)$$

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

$$\delta \approx \frac{XP}{V_1 V_2} \quad V_1 - V_2 \approx \frac{XQ}{V_1} \quad (8)$$

위의 식에서 볼 수 있듯 유효전력 P는  $\delta$ 에 무효전력 Q는 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  $V_1$ 을 제어함으로써 무효전력 Q도 제어된다.[1]

이를 토대로 아래와 같은 주파수 전압 드롭식을 이끌어낼 수 있다.

$$\omega^* = \omega_{nom} - k_w (P_{ref} - P) \quad (9)$$

$$V^* = V_{nom} - k_v (Q_{ref} - Q) \quad (10)$$

$\omega_{nom}, V_{nom}$ : 정격 주파수와 전압크기  
 $k_w, k_v$ : 주파수 전압 드롭계수 ( $k_w, k_v < 0$ ).

### 2.2 시스템 등가 모델

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{Od} \\ v_{Oq} \\ v_{Oo} \end{bmatrix} = \frac{1}{C_f} \begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \\ i_{Lo} \end{bmatrix} - \frac{1}{C_f} \begin{bmatrix} i_{Od} \\ i_{Oq} \\ i_{Oo} \end{bmatrix} - \omega \begin{bmatrix} -v_q \\ v_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \\ i_{Lo} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_o \end{bmatrix} - \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} v_{Od} \\ v_{Oq} \\ v_{Oo} \end{bmatrix} - \omega \begin{bmatrix} -v_q \\ v_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

### 2.3 전압-전류 제어기

드롭식을 통하여 전압의 지령값을 얻었다면 이를 제어하기 위해 시스템의 수학적 모델을 고려한 적절한 전압 전류 제어기를 구현해야 한다. 본 논문에서는 전압 전류 제어기를 d,q축 각각 decoupling됨을 포함한 PI제어[2][3]를 통해 아래 그림 2와 같이 구현되었다.

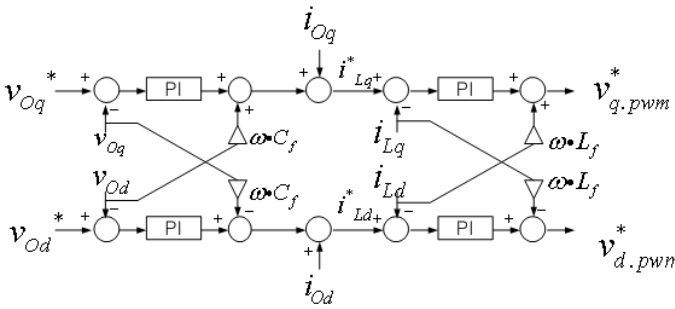


그림 2 전압-전류 제어기  
 Fig. 2 Voltage and current controller

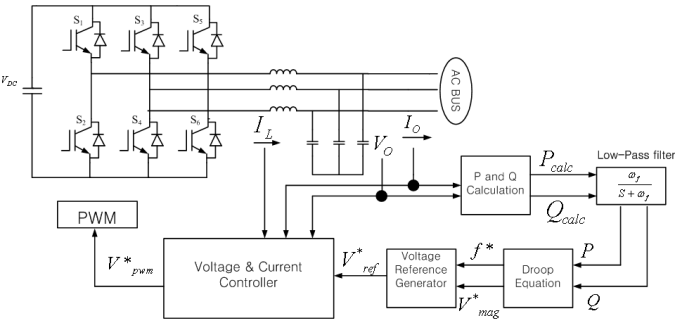


그림 3 전체 제어 방식 블럭도  
 Fig. 3 Voltage and current controller

그림3에서의 전압전류제어기는 위에 언급된 그림2와 같다.

### 3. 시뮬레이션

표 1 시뮬레이션 파라미터  
 Table 1 Parameters of Simulation

DC link voltage	750 V
$P_{rated}, Q_{rated}$	12.25 kW, 860 VAR
Output line voltage	380 V
Filter C, L	15 $\mu$ F, 1 mH
Line Impedance	DG1 : 0.1 $\Omega$ , 1 mH DG2 : 0.09 $\Omega$ , 0.1 mH
$k_w, k_v$	$-8 \times 10^{-6}, -5 \times 10^{-5}$

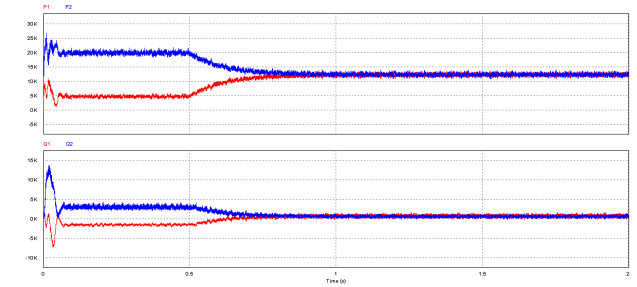


그림 4 시뮬레이션 결과 (유효전력(위), 무효전력(아래))  
 Fig. 4 Simulation Result (P(top), Q(bottom))

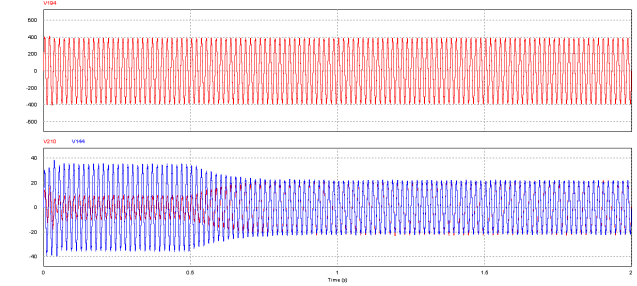


그림 5 시뮬레이션 결과 (출력전압(위), DG1,2출력전류(아래))  
 Fig. 5 Simulation Result ( $V_{out}$ (top),  $I_{out}$ (bottom))

그림 4는 DG1과 DG2에서의 유효전력과 무효전력을 나타낸다. 의도적인 라인임피던스 불평형으로 인해 초기에는 DG1과 DG2의 공급전력이 서로 다른 값으로 분담되고 있는 것을 볼 수 있다. 시뮬레이션에서는 0.5s에 드롭 제어가 적용되었고 앞서 언급된 드롭원리를 통해 지령 주파수와 전압크기가 가변되어 Load를 적절히 분담하였다. 그림 5는 각각 버스단의 출력 전압(380V)과 출력 전류를 보여준다. 출력 전압은 380v로 정류 되고 출력 전류는 초기에는 라인임피던스 불평형으로 인해 서로 다른 값을 가지고 있다가 드롭제어가 시작 되면서 서서히 동기화되어 0.7s이후 부터는 거의 같은 값으로 부하를 분담하고 있는 것을 확인하였다.

### 4. 결론

본 논문에서는 13kW급 풍력발전을 위한 단독운전시의 마이크로그리드의 드롭방식을 통한 Load Sharing 제어 전략을 제안하였고 시뮬레이션을 통해 드롭방식의 제어를 적용하였을때 부하 분담이 잘 이루어지고 출력 전압이 일정하게 유지되는 것을 확인하였다. 이번 논문에서는 시뮬레이션만을 통해서 검증하였으나 다음 단계에서는 실험을 통해 본 논문의 이론을 검증하겠다.

### 참고 문헌

[1] 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.

[2] M.N. Marwali and A. Keyhani. "Control of distributed generation systems Part I: Voltages and currents control," Power Electronics, IEEE Transactions on, vol.19, pp. 1541-1550, 2004.

[3] N. Pogaku, M. Prodanovic and T.C. Green. "Modeling, Analysis and Testing of Autonomous Operation of an Inverter Based Microgrid," Power Electronics, IEEE Transactions on, vol.22, pp. 613-625, 2007.