

대용량 마이크로그리드 독립 운전 모드시 가상 인덕터를 활용한 인버터 병렬운전 제어 연구

정교선*, 김동환*, 최재호*
 충북대학교*

Droop Method For Parallel Inverters In High-Capacity Islanded Microgrid Using Virtual Inductance

Kyosun Jung*, Donghwan Kim*, Jaeho Choi*
 Chungbuk National University*

ABSTRACT

여러 가지 분산 발전 시스템들은 마이크로그리드의 형태를 지니고 있다. 하나의 분산 발전 시스템과 비교하여 마이크로그리드는 더 좋은 시스템 신뢰성과 제어 적응성을 가지고 있다. 이 마이크로그리드는 계통연계모드에서 부하의 수요를 담당하게 되고, 계통 사고가 발생할 시 단독운전모드로 동작을 해야 한다. 드롭제어방식은 이 때 각각의 분산발전시스템에서의 유효전력과 무효전력 부하 sharing을 통해 안정적으로 전력을 공급 할 수 있다. 본 논문에서는 드롭제어를 활용한 100KW급 대용량 인버터 병렬 운전 시스템을 제안하였다. 그리고 P Q decoupling을 위한 가상 인덕터를 이용하여 개선된 전력 sharing에 대해 연구하고 PSIM을 통해 이를 검증하였다.

1. 서 론

에너지의 환경과 비용에 대한 관심이 증가하는 가운데, 전력 산업은 태양광 셀, 풍력 터빈, 마이크로 터빈등과 같은 신재생 에너지 쪽의 변화를 겪고 있다. 이 여러 가지 분산 발전(DG) 시스템들은 마이크로그리드의 형태를 지니고 있는데, 이 것은 좋은 시스템 신뢰성, 수용성, 제어 적응성의 장점을 가지고 있다. 그리고 이 마이크로그리드는 통합된 열과 전력 발전을 통해 분산 발전을 최적화 할 수 있고, 에너지 효율을 개선하는데 이바지한다.

마이크로그리드는 계통연계모드로 동작을 하다가 계통에 고장이 발생할 시 독립운전모드로 전환하게 된다. 이러한 독립운전모드에서 로컬 부하에 전력을 공급하게 되는데 이 분산발전 시스템들의 유효전력과 무효전력을 제어하기 위하여 드롭제어 방식이 쓰이게 된다.^[1]

본 논문에서는 드롭제어를 통한 100KW급 대용량 인버터 병렬 운전에서 정확한 유효전력과 무효전력의 부하 sharing을 얻기 위한 시스템을 제안하였다.

2. 드롭 제어 및 시스템 모델링

2.1 기존의 드롭제어 방식

그림 1은 분산 발전 시스템의 등가 모델을 표현한 것이다. 이 등가 모델 회로를 바탕으로 각각의 전력 flow에 대하여 구할 수 있다. 여기서 $E \angle \phi$ 는 분산발전 출력전압, Z는 PCC와 분산발전시스템 사이의 임피던스, V는 PCC 전압을 뜻한다.

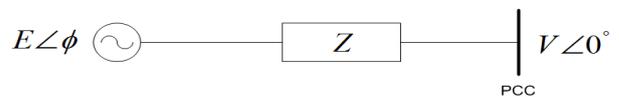


그림 1 분산 발전 시스템의 등가 회로

Fig. 1 Equivalent circuit of distributed generation system

$Z = R + jX$ 일 때

$$P = \frac{E}{R^2 + X^2} [(R(E - V \cos \phi) + XV \sin \phi)] \quad (1)$$

$$Q = \frac{E}{R^2 + X^2} [-RV \sin \phi + X(E - V \cos \phi)] \quad (2)$$

유도성 라인에서는 ϕ 가 매우 작고($\sin \phi \approx \phi, \cos \phi \approx 1$), $X \gg R$ 이므로 위의 식을 재정리 할 수 있다.

$$\phi \approx \frac{XP}{EV} \quad E - V \approx \frac{XQ}{E} \quad (3)$$

위의 식을 살펴보면 X와 E, V는 일정하기 때문에 ϕ 과 P는 비례하고 E V와 Q는 비례하는 것을 확인 할 수 있다. 이것을 토대로 P w, Q V에 대한 드롭방정식을 만들 수 있다.

$$\omega^* = \omega_{nom} - k_w (P_{ref} - P) \quad (4)$$

$$V^* = V_{nom} - k_v (Q_{ref} - Q) \quad (5)$$

2.2 가상 인덕터 방식

기존의 드롭제어 방식에서는 $X \gg R$ 이라는 가정하에 식을 증명하였다. 하지만 실제로 X와 R의 관계로 인해 P와 Q가 서로 coupling을 이루게 되고 정확한 제어가 이루어지지 않는다. 그러므로 가상의 인덕터를 추가하여 P와 Q의 decoupling을 이루는 것이 중요하다.

그림 2는 분산발전 인버터에 대한 회로와 제어 블록도를 그린 것이다. 본 논문에서는 P PI제어를 사용하였고, 각각의 파라미터 게인 값을 근궤적을 이용하여 구하였다. 그림 2를 살펴보면 선 전류를 센싱 받아 가상의 인덕터 값과 곱한 후 지령 전압에서 빼주게 된다. 하지만 보통의 가상 인덕터 방식은 선 전류의 미분을 필요로 하기 때문에 ($V_L = X_o (di_L/dt) = sX_o i_L$) 고주파 노이즈가 증폭되어진다. 그리고 이것은 과도상태 동안 인버터 제어가 불안정하게 되는 원인이 된다.

Yun wei Li는 기본 성분을 응용하여 미분을 필요로 하지 않는 가상인덕터 방식을 제안하였다. 제안된 가상 인덕터 방식은 그림 3에 표현되어있다.^[1]

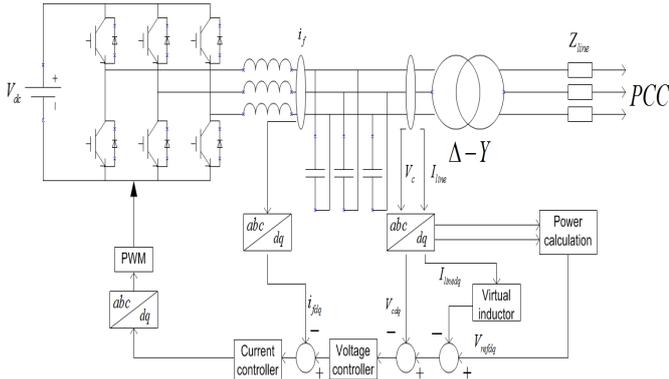


그림 2 분산 발전 인버터에서의 전류-전압 제어 블록도
Fig. 2 Current-voltage control scheme for the DG interfacing inverter

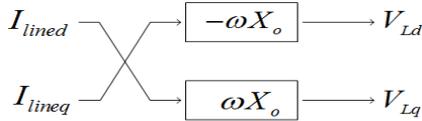


그림 3 미분이 없는 가상 인덕터 방식
Fig. 3 Virtual inductor scheme without differentiation

2.2.1 미분이 없는 가상 인덕터

그림 3처럼 sX_o 을 jwX_o 로 간략화 시킴으로써 미분을 피할 수 있다. 여기서 w 는 시스템 각 주파수를 뜻한다.

$$(V_d + jV_q) = jwX_o(I_d + jI_q) = wX_o(-I_q + jI_d) \quad (6)$$

2.2.2 라인 임피던스를 고려한 가상 인덕터 값의 선정

본 논문에서는 $\Delta-Y$ 변압기를 쓰고 있기 때문에 라인 임피던스를 임피던스 변환에 의하여 새로운 값을 입력해야한다. 만약 변압기 비가 $1:a$ 라고 가정하면, 라인임피던스는 다음과 같은 수식처럼 $Z_n = Z_l/a^2$ 로 임피던스 변환가능하다. 여기에서 Z_n 는 임피던스 변환 값, Z_l 은 라인 임피던스를 뜻한다.

2.3 제안된 정확한 무효 전력 Sharing 알고리즘

만약 병렬 운전하고 있는 분산 발전 시스템들이 서로 다른 라인 임피던스를 가지고 있다면, 전압 강하로 인하여 무효전력 sharing이 올바르게 이루어지지 않는다. 본 논문에서는 이것을 해결하기 위하여 각각의 임피던스, 변압기를 고려하여 출력 전압을 정하도록 하였다.^{[2][3]}

$$V_{nom}^* = V_{nom} + \frac{R/a^2}{V_{nom}} P_{ref} + \frac{X/a^2}{V_{nom}} Q_{ref} + \frac{X_o}{V_{nom}} Q_{ref} \quad (7)$$

식(5)에서 식(7)을 대입 시키면, 최종 지령 전압 값은

$$V^* = V_{nom} + \frac{R/a^2}{V_{nom}} P_{ref} + \frac{X/a^2}{V_{nom}} Q_{ref} + \frac{X_o}{V_{nom}} Q_{ref} - k_w(Q_{ref} - Q) \quad (8)$$

3. 시뮬레이션

표 1 드롭제어 시뮬레이션 파라미터

Table 1 Parameters of droop control simulation

DC link 전압	158V	Pref	100KW
Qref	7KVA	L,C 필터	15uH,700uF
라인 임피던스1	82.9uH,17.3mΩ	라인 임피던스2	0.165mH,34.6mΩ
가상인덕터	10uH	PCC 전압	380V(line to line RMS)

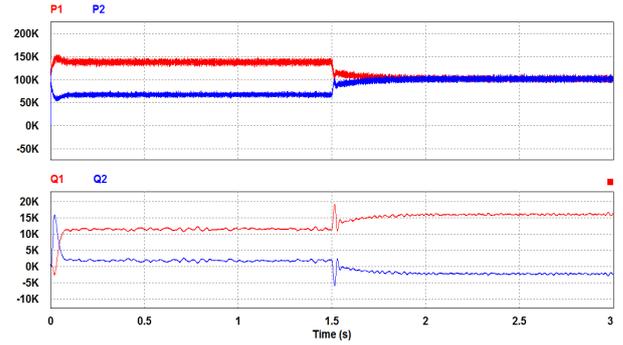


그림 4 가상 인덕터를 포함한 드롭제어 시뮬레이션(유효전력(위), 무효전력(아래))
Fig.4 Droop control simulation with virtual inductor(P(top),Q(bottom))

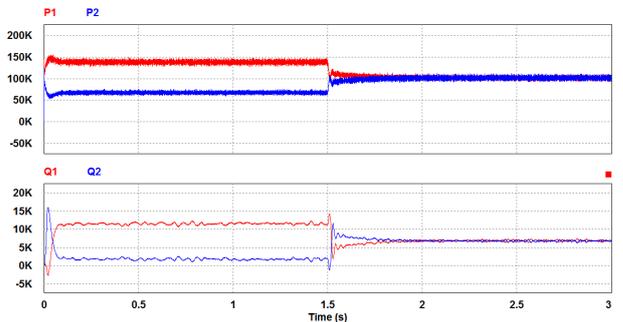


그림 5 제안된 무효전력 알고리즘을 포함한 드롭제어 시뮬레이션(유효전력(위), 무효전력(아래))
Fig.5 Droop control simulation with proposed reactive power sharing algorithm(P(top),Q(bottom))

그림 4는 가상 인덕터를 포함한 드롭제어에서 DG1과 DG2의 유효전력과 무효전력을 나타낸다. 무효전력은 불평형 라인 임피던스로 인하여 sharing이 제대로 이루어지지 않는다. 하지만 그림 5에서는 제안된 무효전력 알고리즘을 추가하여 시뮬레이션을 하였을 때 정확한 무효전력 sharing을 이루는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 100kW급 인버터 병렬운전에서의 Load sharing에 대하여 연구하였다. 불평형 라인 임피던스로 인한 정확한 무효전력 알고리즘을 사용하여 sharing을 가능케 하였다. 후에 소신호 모델링을 통한 과도상태 해석을 통해 좀 더 안정적인 드롭제어가 될 수 있다고 생각한다.

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] J.He and Y.W.Li, "Analysis, design, and implementation of virtual impedance for power electronics interfaced distributed generation," *IEEE Trans. Ind. Appl*, Vol.47, No.6, pp 2525-2538, 2011.
- [3] 임경배, 최재호, "마이크로그리드 독립운전모드시 저전압 불평형 선로 임피던스를 고려한 드롭 방식의 인버터 병렬 운전," *전력전자 학회 논문집*, Vol.18, No.4, pp387-396, 2013.