

마이크로그리드 독립 운전 모드시 저전압 불평형 선로 임피던스를 고려한 드롭 방식의 인버터 병렬 운전 제어 연구

임경배¹, 최재호[†]

Droop Control for Parallel Inverters in Islanded Microgrid Considering Unbalanced Low-Voltage Line Impedances

Kyung-Bae Lim¹, and Jaeho Choi[†]

Abstract - This paper investigates the droop control of parallel inverters for an islanded mode of microgrid. Frequency and voltage droop control is one of power control and load demand sharing methods. However, although the active power is properly shared, the reactive power sharing is inaccurate with conventional method due to the unequal line impedances and the power coupling of active - reactive power. In order to solve this problem, an improved droop method with virtual inductor concept and a voltage and current controller properly designed have been considered and analyzed through the PSiM simulation. The performance of improved droop method is analyzed in not only low-voltage line but also medium voltage line.

Keywords: droop control, parallel inverters, microgrid, load sharing, distributed generation, islanded mode, virtual inductor

1. 서 론

최근 화석 에너지 고갈과 지구온 환경 문제에 대한 방편으로 친환경 에너지 기반의 분산 발전에 대한 관심이 급증하고 있다. 이러한 신재생에너지 기반의 분산 발전은 네트워크에 연결되거나 직접적으로 소비자에게 연결되는 전기적인 전력원으로서 정의된다^[1]. 부하에 대한 수요의 지속적인 증가와 중앙 발전시스템의 규모 확장을 위해서는 막대한 양의 자본이 필요하다는 사실에 근거하여 근래의 연구는 새로운 발전의 25%가 분산발전이 될 것이라고 예측하고 있다^[2]. 실제로 전기적 시스템에서의 분산발전의 보급률이 높을수록 마지막 소비자에 대한 전력 공급과 전압의 품질에 막대한 영향을 미치게 된다^[3]. 이러한 이유로 내연 기관, 가스 터빈, 태양광 발전, 연료 전지,

풍력 발전과 같은 분산 발전 요소들의 통합을 통한 거대한 잠재력의 실현을 위해 마이크로그리드의 개념이 제안되어왔다^{[4]-[9]}.

마이크로그리드는 무제한적인 자원, 부하에 대한 지역적 접근성 등 기존의 중앙 집중된 계통 시스템이 가지지 못하는 많은 장점들을 제공함과 동시에 분산 발전의 지역적 제어를 가능하게 하여 중앙집중화된 제어를 부분적으로 제거하거나 또는 줄일 수 있게 해준다. 따라서 마이크로그리드는 평소 계통과 연결되어 부하의 분담에 있어 보조적인 역할을 하는 전류원으로서 정의된다. 하지만 계통의 외란 또는 계통사고 발생시에 Static Switch를 개방함으로써 마이크로그리드는 독립 운전 모드(Islanded-Mode)로 전환된다. 이때는 마이크로그리드가 부하분담에 있어 단지 보조적인 역할을 수행하는 것이 아니고 하나의 전압원으로서 부하의 수요 전체를 담당해야 하는 책임을 갖는다. 따라서 이러한 독립 운전 모드에서의 제어는 부하에 지속적으로 신뢰할만한 전력을 공급하기 위한 중요한 요소 중 하나라고 할 수 있다. 수요가 큰 지역적 부하의 효율적 분담을 위해 전체 부하를 여러 분산요소 즉 여러 인버터가 담당하는 인버터

Paper number: TKPE-2013-18-4-11 ISSN: 1229-2214

[†] Corresponding author: choi@cbnu.ac.kr, Dept. of Electrical Eng., Chungbuk National University
Tel: +82-43-261-2425 Fax: +82-43-276-7217

¹ Dept. of Electrical Eng., Chungbuk National University
Manuscript received Feb. 8, 2013; accepted Apr. 22, 2013

— 본 논문은 2012년 추계학술대회 우수추천논문임

병렬 운전은 마이크로그리드 독립 운전 모드에서의 핵심 기술이라고 할 수 있다. 부하의 적절한 분담을 가능하게 하는 방법 중 하나로는 마스터 슬레이브 (Master-Slave) 제어 기법이 있다^[10,11]. 이 방식은 전압 제어 PWM 인버터가 마스터 모듈로서 동작되고 전류 제어 PWM 인버터가 슬레이브 모듈로서 동작되며 출력 전압을 제어하는 마스터 모듈이 슬레이브 모듈의 지령 전류를 출력하는 특징을 지닌다. 이러한 인버터간의 상호 통신을 전제로 한 마스터-슬레이브 제어는 선로 임피던스들의 존재에도 불구하고 매우 효과적인 부하 분담성능을 보이며 이와 동시에 시스템을 디자인하고 적용하는 부분에 있어서 매우 간단한 장점을 가지고 있다. 그러나 이 기법은 마스터 인버터의 제어 실패등의 원인으로 인한 사고발생시 이는 상호 연결된 통신선로에 기인하여 전체 시스템의 제어 실패로 이어진다. 따라서 이러한 문제에 대한 방편으로 PCS 간의 통신 없이 독립적인 제어를 가능케 하는 드롭 방식이 제안되어 왔다^[12,13]. 기존의 주파수-전압드롭 방식은 주파수와 유효전력, 전압과 무효전력의 관계에 기초한 방식으로 마이크로그리드의 인버터 병렬 운전 뿐만 아니라 UPS 병렬운전에도 널리 사용되어 왔다. 그러나 각각의 분산전원들이 불평형 선로 임피던스하에 있을 때 기존의 주파수-전압 드롭제어는 적절한 부하분담을 위한 제어로서의 효력을 잃게 된다. 다시말해 기존의 드롭제어를 통해 불평형 선로 임피던스하에서 유효전력의 적절한 분담은 가능하지만 무효전력은 적절히 분담되지 않게 된다. 이는 서로 다른 선로임피던스의 전압강하와 유효-무효 전력 커플링에 의한 시스템특성과 제어이론의 불일치에 기인한 것으로 이와 같은 문제의 해결을 위해서 근래에 많은 연구들이 진행되어 왔고 현재 진행중에 있다.

[14]에서는 전압-무효전력 식의 적분법에 유효전력의 외란을 주입함으로써 정확한 무효전력 분담을 실현하였다. 하지만 이 방식은 디젤 엔진과 같은 정상 상태 시스템 진동이 큰 분산전원 하에서는 성능이 떨어진다는 단점이 있다. [15]는 선로임피던스의 전압강하와 지역적부하 (Local Load)를 고려한 가상 인덕터 개념의 드롭제어를 통해 정확한 무효전력 분담을 실현하고자 하였다. 위의 방법을 통해 특히 높은 R/X 비를 가진 저전압 마이크로그리드의 부하 분담 성능이 개선되었다고 할 수 있다. [16]은 유효-무효 전력 커플링을 단순화하고 불평형 복합 선로 임피던스를 가진 분산 발전의 순환전류를 줄이기 위한 방편으로써 복잡성 가상 임피던스를 제안하고 있다. 이를 통해 특히 복잡성 선로 임피던스상에서의 순환전류는 상당히 개선되었다. 하지만 저항성 선로 임피던스 또는 유도성 선로 임피던스하에서의 순환전류 제거 성능은 그에 미치지 못하였다. [17]에서는 새로운 임피던스 매칭법에 기초한 가상 인덕터 기반의 드롭제어가 제안되었다. 여기서는 전체적인 시스템 임피던스가 단지 선로 임피던스에만 국한되지 않고 인버터의 출력

임피던스도 포함되어 고려되었다. 하지만 선로임피던스와 인버터 출력 임피던스의 관계를 고려한 정확한 시스템 모델링은 결여되어 있다. [12]은 실제 전력을 선로 임피던스의 R/X 비에 따른 가상 전력으로 변환함으로써 기존의 드롭제어를 통해 전력 커플링을 줄이고자 하였다. [18]역시 전력 커플링 감소를 위한 목적으로 제안된 방식 중 하나로 위의 방식과 비슷하게 R/X 비를 통한 가상 주파수-전압 프레임을 사용하여 전력 커플링을 줄이고자 하였다.

마이크로그리드의 독립운전모드에서는 분산전원이 제한적인 시스템 용량과 단지 전압원으로 동작한다는 점에서 시스템 환경과 파라미터에 매우 민감한 특성을 가진다. 따라서 위의 방식들을 포함한 다양한 이론들이 현재까지 많은 연구를 통해 다루어져 왔음에도 불구하고 선로의 저항성 성분으로 인한 유효-무효 전력 커플링과 서로 다른 선로 임피던스 전압강하로 인한 정확한 무효 전력 분담은 여전히 해결해야할 과제로 남아있다.

본 논문에서는 이러한 무효전력 분담 오차를 개선하고 유효-무효 전력 디커플링을 실현하고자 시뮬레이션 기반의 드롭 제어 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 기존에 연구된 방식들을 토대로 선정된 가상인덕터와 유효-무효 전력의 크기와 선로 임피던스 값에 따른 선로 임피던스의 전압 강하를 통해 드롭 기준 출력 전압을 재설정하는 방식으로서 제안된 이론은 같은 파라미터를 가진 2개의 인버터와 불평형 저전압 선로 임피던스를 포함한 분산발전유닛들의 병렬 구성을 통해 PSIM으로 검증되었으며 가상 임피던스의 유무와 드롭 계수와 R/X 비에 따른 시스템 동특성 등이 비교되고 분석되었다.

2. 드롭 모델링 및 제어기 설계

2.1 부하 분담을 위한 기존의 드롭 방식

그림 1은 전송 선로에서의 전력 조류를 나타내고 있다. V_n 은 각 지점에서의 전압이고 Z 는 임피던스, S 는 전송선로에 공급되는 복소 전력이다. 이때 전송선로를 흐르는 복소 전력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 S &= \mathbf{V}_1 \times \mathbf{I}^* = \mathbf{V}_1 \left(\frac{\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2}{Z} \right)^* = V_1 \angle 0 \left(\frac{V_1 \angle 0 - V_2 \angle \delta}{Z e^{-j\theta}} \right) \\
 &= \frac{V_1^2}{Z} e^{j\theta} - \frac{V_1 V_2}{Z} e^{j(\theta + \delta)}
 \end{aligned} \quad (1)$$

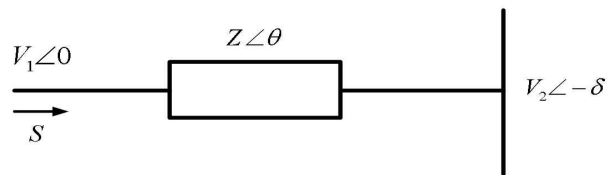


Fig. 1 Power flow at transmission line

이때 각각의 유효전력(P)과 무효전력(Q)값은 다음과 같다. ($e^{j\theta} = \cos\theta + jsin\theta$)

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

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

여기서 $Z e^{j\theta} = R + jX$ 이다. 이를 통해 P 와 Q 는 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 전송선로에서는 저항성 성분 R 은 무시되며 δ 는 아주 작다고 가정되기 때문에 ($\sin\delta \approx \delta$, $\cos\delta \approx 1$)이 된다. 따라서 위 식 (6)과 (7)은 아래와 같이 다시 쓰여질 수 있다.

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

$$V_1 - V_2 \approx \frac{XQ}{V_1} \quad (9)$$

위의 식에서 볼 수 있듯이 유효전력 P 는 δ 에 무효전력 Q 는 전압 차이 ($V_1 - V_2$)에 의존적이다. 따라서 Power angle δ 를 제어함으로써 유효전력이 제어가능하고 인버터 출력 전압 V_1 을 제어함으로써 무효전력 역시 제어 가능하게 된다. 이때 Power angle δ 대신 주파수 ω 를 제어하여 유효전력의 부하분담 동특성을 더 향상될 수 있다. 따라서 기존의 주파수-전압 드롭 방식은 그림 2와 같이 측정된 유효-무효 전력을 입력으로 하여 지령 전압의 주파수와 크기를 가변하는 방식으로써 아래두식과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$\omega^* = \omega_{nom} - k_\omega (P_{ref} - P_{measured}) \quad (10)$$

$$V^* = V_{nom} - k_v (Q_{ref} - Q_{measured}) \quad (11)$$

ω_{nom}, V_{nom} : 정격 주파수, 정격 전압
 k_ω, k_v : 주파수-전압 드롭계수 ($k_\omega, k_v < 0$).

k_ω, k_v 는 주파수-전압 드롭계수이며 계수가 커질수록 드롭 방식에 의한 부하분담의 동특성은 더 빠르고 정확해진다. 하지만 큰 드롭계수의 사용은 자칫 분산 유닛간의 허용 주파수와 전압 차이 범위를 넘어서게 할 수 있기 때문에 드롭 동특성과 시스템의 안정성을 모두 만족시키는 드롭 계수의 선정이 요구된다. 이러한 주파수-전압 드롭 계수는 분산 전원이 최대 유효-무효 전력 출력을 가질때 최대 허용 주파수-전압 범위를 벗어나지 않게끔^[15,19] 아래 식 (12) 같이 최대 초기치가 설정되었으며 이는 시스템의 안정성을 갖는 동시에 빠른 부하 분담 동특성을 갖도록 표1의 주파수 드롭 계수 값과 같이 선정되었으며 전압 드롭 계수 선정에 대해 2.3 절에서 논의 될 것이다.

$$k_\omega \leq \frac{\omega_{nom} - \omega_{min}}{P_{ref} - P_{max}} \quad (12)$$

P_{ref}, P_{max} : 지령 유효전력, 최대 공급 유효 전력
 $\omega_{nom}, \omega_{min}$: 정격 주파수, 최소 허용 주파수

2.2 파워디커플링을 위한 가상 인덕터

지배적인 유도성 선로하에서의 드롭방식을 통한 부하 분담은 2절과 같은 기존의 드롭방식으로도 실현 가능하다. 그러나 마이크로그리드의 전송선로는 대부분 지배적인 저항성 성분을 가지는 저전압 마이크로그리드이다. 때문에 저전압 마이크로그리드에서 유도성 선로만을 고려한 기존의 드롭방식을 사용할 경우 드롭 동특성이 매우 느려지거나 시스템의 제어실패를 초래하기도 한다. 이에 본 논문에서는 파워 디커플링을 실현하기 위하여 저항성 성분으로 이루어진 선로에 가상 인덕터를 추가하는 방식을 사용하여 기존의 저항성 선로임피던스가 유도성 지배적인 성분을 갖게끔 한다^[15,20]. 이때 가상 인덕터 L_V 값은 부하 전류 분담 특성의 향상을 위해 매우 크게 설정될 수 있다. 하지만 가상 인덕터의 값을 크게 선정하는 것은 시스템을 불안정하게 만드는 요소가 될 수 있고 이러한 문제는 출력 전류가 큰 시스템일수록 가상 인덕터가 출력 전류와 곱하여 적용되기 때문에 더 심화되는 특성을 보인다. 따라서 가상 인덕터의 값 선정은

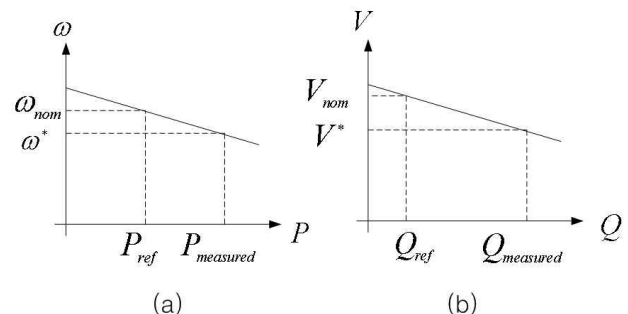


Fig. 2 $\omega - V$ droop characteristics

2.1에서 언급된 드롭 계수의 선정과 마찬가지로 드롭 동특성과 시스템의 안정성을 동시에 만족시키도록 선정되어야 한다. 이와같은 가상 인덕터 값의 선정아래 추가된 가상 인덕터는 그림 3과 같이 드롭 전력 제어를 거쳐 출력된 지령 전압에 출력 전류와 가상 인덕터와의 곱으로 표현된 가상 인덕터의 전압 강하만큼을 감해줌으로써 시스템에 적용된다. 이때 지령 전압 V_o^* 은 인버터의 지령 출력 전압을 나타내는 의미로써 식 (11)에서의 지령 전압 V^* 와 같다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 가상 인덕터의 전압 강하에 대한 계산은 (13)과 같은 미분법을 포함한 식으로 표현된다.

$$v_{ref} = v_o^* - L_V s i(o) = v_o^* - L_V \frac{di(o)}{dt} \quad (13)$$

하지만 위 식은 출력 전류의 미분항으로 인해 고주파 잡음에 대한 증폭문제를 야기할 수 있다. 이에 대한 대안으로 본 논문에서는 식 (14)과 같이 정지 좌표계 $\alpha-\beta$ 프레임에서 미분항 없이 직접적으로 가상 인덕터의 전압 강하를 계산하는 방법을 활용하였다^[15].

$$(V_\alpha + V_\beta) = j\omega L_V(I_\alpha + jI_\beta) = \omega L_V(-I_\beta + jI_\alpha) \quad (14)$$

직교좌표계나 극좌표계 형식에서의 상호 전환없이도 식 (14)과 같은 단순하고 직접적인 계산 방식을 통하여 가상 인덕터의 전압 강하에 대한 적용이 가능하다. 또한 위와 같은 방식은 정지좌표계 $\alpha-\beta$ 축 뿐만 아니라 회전좌표계 $d-q$ 축 상에서의 계산 역시 가능하게 하여 산출된 전압 강하 정보는 제어기에 즉시 적용된다.

위에서 언급하였듯이 이러한 가상 인덕터의 사용으로 저전압 마이크로그리드에서도 가상임피던스 추가로 인해 유도성 성분이 지배적인 방향으로 전력디커플링이 가능하게 되어 식 (10)과 (11)이 효력을 얻게된다. 뿐만 아니라 가상 인덕터 이외의 가상 레지스터^[19,20], 가상 복합성 임피던스와^[16] 같은 방식도 그에 맞는 드롭 방식을 사용한다는 전제하에 적용이 가능하다.

2.3 제안된 드롭 방식

기존의 드롭방식은 저항성 선로의 지배적인 저전압 마이크로그리드하에서는 그 효력을 잃는다. 이에 위에 언급된 것처럼 가상 인덕터를 추가함으로써 전력디커플링을 가능하게하여 기존의 드롭 방식이 효력을 가지게 되었다.

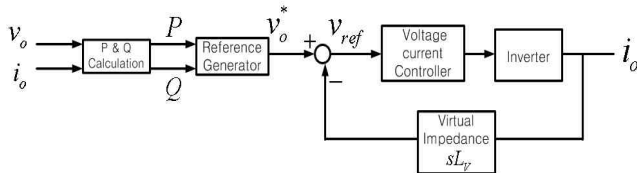


Fig. 3 Block diagram of the closed loop system with the virtual output impedance

이때 만약 각각의 분산유닛과 PCC단 사이의 저전압 선로임피던스가 불평형 상태일 경우 가상 임피던스를 사용하여 전력디커플링이 가능하며 출력 전류에 비례하여 가상 임피던스와 곱해주는 항으로 인해 순환 전류 감소 효과도 상당부분 개선된다. 또한 이를 통해 무효 전력 분담 오차 역시 감소하게 된다. 그러나 이러한 가상 임피던스의 추가에도 불구하고 선로임피던스의 저항성 성분과 선로 불평형에 의한 서로 다른 전압 강하에 기인하여 무효전력 분담오차는 여전히 존재한다. 이때 이러한 무효전력 분담오차를 유발하는 각 선로 임피던스의 일반적인 전압 강하는 식 (15)와 그림 4와 같이 표현된다^[14,15,21].

$$V_o = V_{PCC} + \frac{RP + XQ}{V_{PCC}} \quad (15)$$

V_o, V_{PCC} : DG 출력 전압 피크값, PCC 정격전압 피크값
 R, X : 선로임피던스의 레지스턴스, 인덕턴스
 P, Q : 인버터 출력 유효-무효 전력

이러한 무효 전력 분담 문제에 대한 대안으로서 선로 전압 강하를 무시할 수 있을 정도로 만들거나^[13] 전압 드롭계수를 매우 크게 선정할 수 있다. 하지만 경우에 따라서 매우 큰 전압 드롭 계수의 선정은 자칫 시스템의 허용 가능한 전압 구동 영역을 벗어나게 하여 시스템을 불안정하게끔 하거나 정상상태의 시스템 진동을 증가시킨다는 치명적인 단점을 지닌다. 따라서 [15]에서는 저전압 마이크로그리드에서 가상 인덕터를 추가하여 전력디커플링을 실현함과 동시에 유효-무효 전력과 선로의 저항성 성분과 유도성 성분 전부가 선로 임피던스에 미치는 영향을 고려하여 기존의 드롭 전력 제어를 개선하였다. 위 방식은 계통 연계 모드에서 유효-무효 전력과 그에 따른 선로 임피던스 전압 강하 변동을 분석하고 시스템이 독립 운전 모드로 동작할 때 계통 연계시 저장된 정보를 사용하여 기존 드롭 방식을 재설정하는 방식을 통해 정확한 무효 전력 분담을 실현하고 있다. 그러나 이 방식은 계통연계시에 유효-무효 전력이 선로 임피던스의 전압 강하에 미치는 영향을 분석하는 과정이 쉽지 않다는 점과 획득한 변수들을 매끄럽게 하기위해 저역 통과 필터를 추가해야한다는 점 등과 같이 시스템 설계에 있어서 다소 복잡성을 띤다. 또한 계통 연계 모드로 동작하지 않고 분산 유닛들을

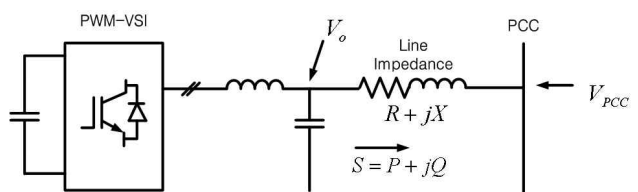


Fig. 4 General voltage drop of line impedance

독립운전만으로 병렬 운전 하는 경우 위 방법을 적용할 수 없다는 점에서 제약성을 갖는다. 따라서 본 논문에서는 식 (15)를 3상 전력 조류에 맞게 조절하고 [21]의 계통 연계 모드시 과도상태 무효전력 제어 방식을 참고하여 식 (16)~(18)와 같이 지령 유효-무효 전력값과 각각의 불평형 선로임피던스의 R 과 X 의 값을 통해 각 분산유닛 전력제어기들의 기준전압 V_{nom} 을 재설정하는 직접적이고 단순화된 방식을 제안하였고 이를 통해 계통연계형 분산 전원의 독립 운전 뿐만 아니라 독립 운전만으로 동작하는 분산 전원 시스템하에서도 정확한 유효-무효 전력 분담을 실현하고자 하였다.

$$V_{nom}^* = V_{nom} + \text{Line voltage drop}_{-Mag} \quad (16)$$

$$V_{nom}^* = V_{nom} + \frac{2}{3} \left(\frac{R}{V_{Peak,PCC}} \right) P_{ref} + \frac{2}{3} \left(\frac{X}{V_{Peak,PCC}} \right) Q_{ref} \quad (17)$$

$$V_o^* = V_{nom}^* - k_v (Q_{ref} - Q_{measured}) \quad (18)$$

위 식 (16)~(18)에서 V_{nom} 과 V_{nom}^* 은 각각 기존 드롭 방식과 제안된 드롭 방식의 기준 전압 피크 값을 의미하고 R 과 X 는 각각 선로임피던스의 저항성 성분과 유도성 성분을 나타낸다. 식 (18)의 V_o^* 는 개선된 드롭 방식의 재설정된 기준 전압을 의미한다. 개선된 드롭 방식의 새로운 기준전압은 기존 드롭 방식의 기준 전압에 지령 유효-무효 전력과 선로임피던스의 R 과 X 를 통해 고려된 선로 임피던스 전압강하만큼을 더하는 방식으로 재설정되었다. 이와 같은 전향 보상 방식의 기준 전압이 조정된 드롭 제어를 통해 불평형 저전압 선로임피던스를 갖는 각각의 분산유닛들은 서로 다른 출력 기준 전압을 갖게 될 것이고 이를 통해 큰 전압 드롭 계수의 설정이 불필요해지기 때문에 정확한 무효 전력 분담이 실현됨은 물론 기존의 드롭 방식보다 더 안정적인 제어가 가능하게 되며 선로 임피던스의 전압 강하를 고려하였다는 점에서 PCC단의 전압도 정격전압으로 유지될 수 있다. 또한 [15]와 [21]에서의 기준전압 조정방식과 비교하여도 시스템의 순시값 대신 진동이 없는 DC성분의 지령 값을 제어에 사용함으로써 전력의 진동이 큰 시스템에서 제안된 방식이 더욱 효력을 갖게 하였고 제어에 무효 전력에 관한 텀을 추가시킴으로써 큰 전압 드롭 계수의 필요성을 더욱 감소시켰다. 그림 5는 제안된 전력제어기의 블럭다이어그램을 보여준다.

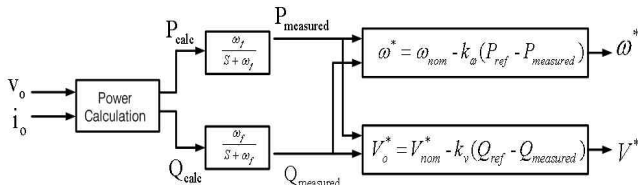


Fig. 5 Proposed power controller

2.4 전압-전류 제어기 설계

마이크로그리드의 계통연계모드에서 분산전원은 계통과 함께 부하의 수요를 담당하는 보조 전류원으로서 동작된다. 그러나 계통사고나 전략적 필요성에 의해 마이크로그리드가 계통연계 모드에서 독립운전 모드로 전환시 계통과의 연결없이 분산 유닛만으로 부하의 수요를 담당해야 하기 때문에 독립운전 모드시에는 PCC단의 전압과 주파수가 일정구동범위 내에서 안정적으로 유지되어야만 한다. 그렇지 못하면 시스템은 계통 연계 모드와는 달리 쉽게 불안정해지기 때문에 독립 운전 모드시 인버터는 전압원과 같이 동작하게 되며 이때 적절한 시스템 모델링 및 전압-전류 제어기 설계는 결과적으로 시스템의 안정성 확보에 있어 필수요소이다.

그림 6은 분산 발전 인터페이스를 나타내고 있으며 시스템은 외부 전압제어루프와 내부 전류제어루프를 포함하고 있다. 그림에서 V_{DC} 는 DC Link단의 전압을 의미하고 $V_{a,b,c}$ 는 각 상의 레그 전압, V_o 은 필터커패시터에 걸리는 전압으로서 출력전압을 나타낸다. I_L 과 I_o 은 각각 인덕터에 흐르는 전류와 출력 전류를 나타낸다. 그림 6 으로부터 전력 전자 인터페이스의 등가 모델을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{oa} \\ V_{ob} \\ V_{oc} \end{bmatrix} = \frac{1}{C_f} \begin{bmatrix} I_{La} \\ I_{Lb} \\ I_{Lc} \end{bmatrix} - \frac{1}{C_f} \begin{bmatrix} I_{Oa} \\ I_{Ob} \\ I_{Oc} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{La} \\ I_{Lb} \\ I_{Lc} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} - \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} V_{Oa} \\ V_{Ob} \\ V_{Oc} \end{bmatrix} \quad (20)$$

위 두 식은 a,b,c 상의 변수들로 이루어져 있다. 이러한 a,b,c 상의 변수들은 회전좌표계 d-q축으로 변환하여 제어할 수 있다. 이때는 d-q축으로 변환시 d-q축 변수와 시스템 각속도와와의 곱을 통해 추가되는 d-q 커플링 항을 제거하는 디커플링 항을 포함한 PI제어기를 사용하여 제어가 수행된다. 본 논문에서는 이러한 d-q 축에서의 제어가 아닌 정지좌표계 $\alpha-\beta$ 축하에서 PI제어기 대신 P+ 공진 제어를 사용하여 전압-전류 제어를 구성하였다 [15,17,21], [23]-[25].

적용된 전압 전류 제어기는 그림 7과 같이 외부 전압루프와

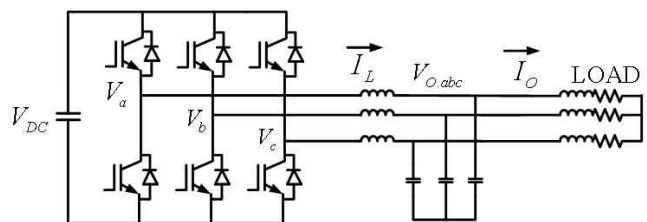


Fig. 6 Configuration of inverter based distributed generation

내부 전류 루프로 구성되었다. K_P 는 P+ 공진 전압 제어기의 비례 이득값을 나타내고 K_I 값은 공진 최대치를 조정하기 위한 공진 이득이다. ω_o 는 제어기의 공진 주파수로서 시스템의 기본파 주파수와 함께 설정되며 전압 제어기는 이 공진 주파수 부근에서 상당한 이득을 가지게 되어 정상상태오차가 거의 없게끔 하여 제어가 이루어지도록 한다. $K_{c,P}$ 는 전류 제어기의 비례 이득이다. 결과적으로 정지좌표계 $\alpha-\beta$ 축하에서 출력 전압의 오차가 전압제어기를 거쳐 지령 전류 값이 생성되고 이를 전류 제어기에 적용하여 PWM 모듈레이션 값을 얻게된다. 그림 8은 전체 제어 방식 블록도를 보여준다. 그림 8과 같은 방식을 통해 기존의 방식에서 문제가 되었던 저전압 마이크로그리드시의 유효-무효 전력 커플링 문제와 불평형 선로 임피던스로 인해 발생하는 무효 전력 분담오차에 대한 문제에 대하여 제안된 방식은 저전압 마이크로그리드에서 유효-무효 전력 디커플링을 이루어나고 각 분산유닛의 선로임피던스 전압강하를 단순한 계산을 통해 얻어냄으로써 더 정확한 무효 전력 분담의 실현을 가능하게 한다.

Table 1 Simulation parameter of distributed generation system for parallel inverters

Parameters	Value	
P_{ref}	8 [kW]	
Q_{ref}	200 [Var]	
Frequency droop k_w	-2×10^{-5} [rad/W]	
Voltage droop k_v	-5×10^{-4} [V/Var]	
DC Link Voltage	750 [V]	
PCC Voltage	380 [V] (Line to line)	
Filter Capacitor, C_f	15 [μ F]	
Filter Inductor, L_f	1 [mH]	
Line Impedance Case 1	(DG1)	0.1 [Ω], 0.1 [mH]
	(DG2)	0.05 [Ω], 1 [mH]
Line Impedance Case 2	(DG1)	0.1 [Ω], 0.1 [mH]
	(DG2)	0.2 [Ω], 0.4 [mH]
Line Impedance Case 3	(DG1)	0.8 [Ω], 0.1 [mH]
	(DG2)	0.9 [Ω], 0.4 [mH]
Switching Frequency (f_s)	10 kHz	
K_P, K_I	0.2, 500	
$K_{c,P}$	0.8	
Virtual Inductor(L_V)	0.7 [mH]	

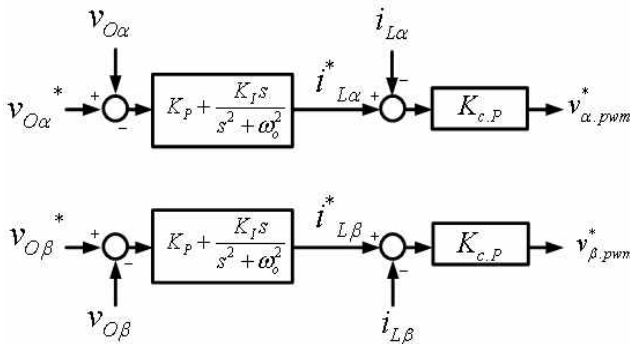


Fig. 7 Voltage and current controller

3. 시뮬레이션

이번 장에서는 정지좌표축을 위한 P+ 공진 제어기를 가진 병렬 운전하는 분산 유닛 인버터의 시뮬레이션 파라미터와 마이크로그리드 구성, 그리고 시뮬레이션 결과를 분석한다. 표 1은 시뮬레이션 파라미터이고 그림 9는 시뮬레이션의 구성을 보여주고 있다. 시뮬레이션의 선로 임피던스는 표 1에서 나타나듯 3가지 경우를 두었다.

첫째로 Case 1은 DG1의 선로 임피던스가 저항성 지배적인 특성을 갖게 하였고 DG2는 유도성이 지배적인 특성을 갖도록 하였으며, Case 2는 두 분산 유닛의 선로 임피던스가 모두 저항성 성분이 지배적인 특성을 갖도록 하였다. Case 3은 DG1과 DG2 모두 선로임피던스의 저항성 성분이 유도성 성분에 비해 매우 높도록 설정되었다. Case 1-3 세 가지 경우 모두 제안된 드롭 방식의 성능을 확인하고자 각 분산유닛의 선로임피던스를 불평형을 이루도록 설정하였다.

가상 인덕터의 값은 0.7mH로 적용하였고 드롭 계수는 표 1의 주파수-전압 드롭 계수값으로 선로임피던스의 R/X ratio에 따른 제안된 드롭 특성을 비교 분석하고자 그림 12의 (a)와 (b)를 제외하고는 모두 같은 값으로 적용되었다. 모든 시뮬레이션의 드롭 제어는 0.5초 이후에 시작하였고 두 분산 발전 유닛 DG1, DG2의 시스템 파라미터와 지령 전력은 제안된 방식의 성능을 검증하기 위해 같은 값으로 설정되었다. 그림 10은 제안된 방식을 사용하였을때 각기 다른 가상 인덕터의 값에 따른 인버터의 출력 전류 분담 특성을 보여준다. (a)와 같이 가상

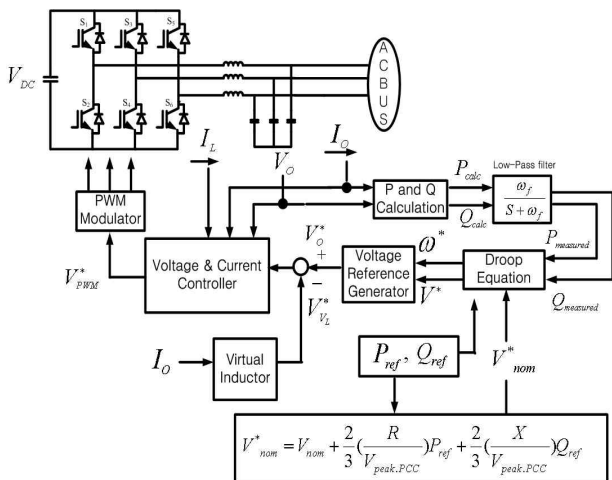


Fig. 8 Overall control scheme

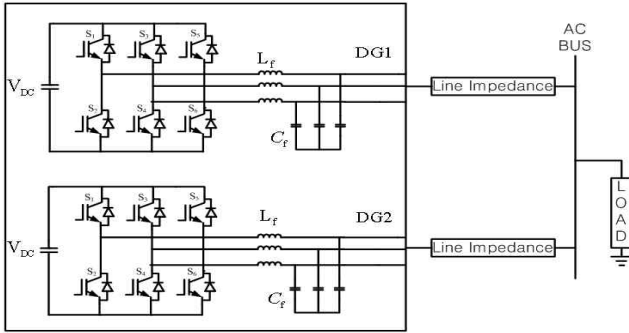
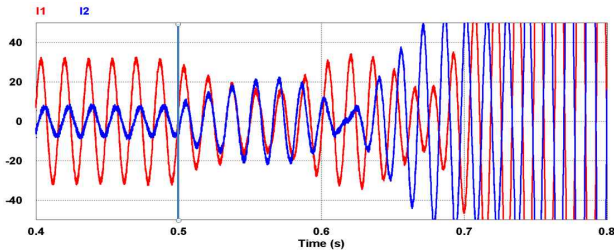
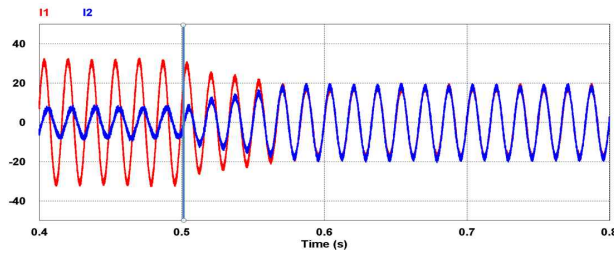


Fig. 9 Network microgrid in simulation



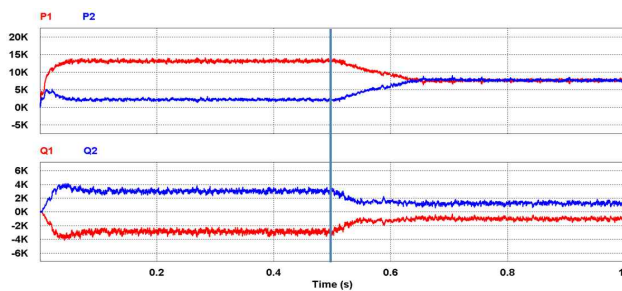
(a)



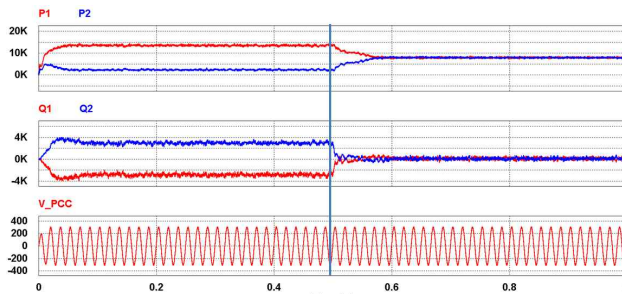
(b)

Fig. 10 Current waveforms with different value of L_V (Case1):

(a) $L_V = 1.4mH$, (b) $L_V = 0.7mH$



(a)



(b)

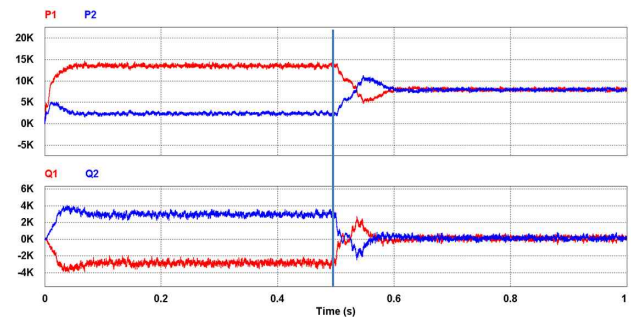
Fig. 11 Droop performances in case 1:

(a) Conventional droop, (b) improved droop

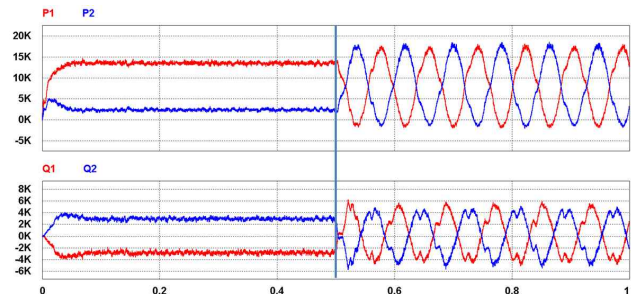
인덕턴스의 값을 선정하였을 때 0.53초 부근까지 시스템의 전류가 분담되며 이때의 동특성이 더 작은 가상 인덕터 값을 갖는 (b)보다 더 향상되는 듯 하였으나 시스템의 안정 범위를 초과한 가상 인덕턴스로 인해 이내 시스템이 불안정해졌다. 하지만 (b)와 같이 0.7mH로 가상 인덕터를 선정하였을 때 시스템이 안정영역에서 동작하고 두 인버터의 전류가 적절히 분담되는 것을 확인할 수 있다.

그림 11은 case1의 선로 임피던스하에서 기존의 드롭 방식과 개선된 드롭 방식을 비교하고 있다. 0.5초부터 드롭 제어가 시작되었으며 그 전까지는 서로 다른 불평형 선로임피던스로 인해 각 분산 유닛의 유효-무효 전력값이 서로 다른 것을 확인할 수 있다. 그림 (a)에서 기존의 드롭 방식을 사용하였을 때 0.5초부터 드롭 제어가 시작되면서 유효전력 부하 분담은 잘 이루어진다. 하지만 앞서 언급하였듯이 무효전력은 서로 다른 선로임피던스의 전압 강하로 인해 무효전력분담 오차를 보인다. 이에 그림 (b)에서 개선된 드롭 방식을 사용하였을 때는 유효 전력 분담은 물론 무효 전력 분담도 기존의 드롭 방식의 성능과 비교하였을 때 더 정확하게 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 동시에 드롭 제어가 수행되는 과도 상태동안에도 PCC단의 전압 역시 일정하게 유지되었다.

그림 12의 (a)와(b)는 case 1의 선로 임피던스 조건에서 개선된 드롭 방식하에 주파수 드롭 계수를 다르게 하였을때의 유효-무효 전력을 보여준다. 2.1 절에서 언급되었듯 드롭 계수가 커짐에 따라 시스템의 동특성은



(a)



(b)

Fig. 12 Droop Performances with different k_{ω} in case 1:

(a) $k_{\omega} = -7 \times 10^{-5}$ [rad / W],

(b) $k_{\omega} = -2 \times 10^{-4}$ [rad / W]

향상된다. 하지만 그림 12의 (a)와 (b)를 통해 확인이 가능하듯이 시스템의 안전 구동 범위를 초과하여 드롭계수가 선정될 경우 시스템은 불안정해지기 때문에 그림 11의 (b)와 같은 동특성과 안정성을 모두 만족하는 드롭계수의 선정이 요구되어진다.

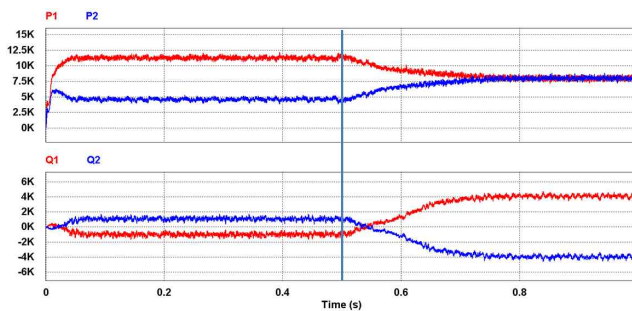
그림 13에서는 case 2의 선로임피던스 하에서 기존의 드롭 방식과 개선된 드롭 방식의 성능이 비교되었다. 그림 13에서의 case2는 저전압 마이크로그리드에 해당되지만 그림 14와 같이 R/X 비가 매우 큰 저항성이 대부분을 차지하는 선로 성분은 아니기 때문에 그림 13의 (a)에서 볼 수 있듯이 기존의 드롭 방식을 사용하여도 유효전력의 분담은 만족할만한 특성을 보이게 된다. 하지만 무효 전력의 부하 분담은 역시 서로 다른 선로임피던스 전압 강하로 인해 잘 이루어지지 않고 있는 것을 확인할 수 있다. 이에 그림 13의 (b)와 같이 개선된 드롭 방식을 사용하여 유효 전력과 무효 전력 모두의

부하 분담 정확성을 획득하였고 개선된 방식에 가상 인덕터를 추가함으로써 파워디커플링 역시 실현되어 기존의 드롭 방식과 비교하여 시스템의 과도 동특성이 개선된 것을 확인 할 수 있다.

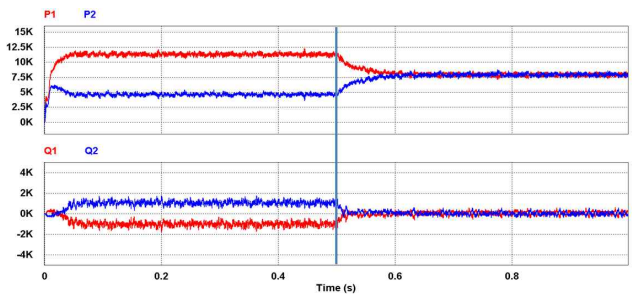
그림 14는 저항성 성분이 매우 지배적인 선로에서의 기존 드롭 방식의 성능을 알아보려고 설계되었다. 이때 분산 유닛 선로임피던스는 R/X 비가 매우 큰 저항성 성분을 갖도록 하였다. 그림에서 확인 가능하듯 매우 큰 저항성 성분으로 인해 가상 인덕터를 가진 기존의 드롭 제어가 시스템의 전력 조류와 부합되지 않아 동특성이 매우 느릴 뿐만 아니라 시스템이 발산하는 불안정한 영역에서의 동작이 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있다. 이처럼 매우 큰 저항성 선로하에서도 그만큼 큰 가상 인덕터를 추가한다면 역시 어느 정도의 제어 동특성은 가질 수 있다. 하지만 저항성 성분이 매우 지배적일 경우 이를 무시할 수 있을 만큼의 큰 가상 인덕터를 추가해 주어야만 하는데 이때 이러한 큰 가상 인덕터의 추가는 앞에서 언급되었던 것처럼 시스템을 불안정하게 하기 때문에 이처럼 R/X 비가 매우 큰 저전압 선로에서는 기존의 $\omega - P, V - Q$ 드롭제어 대신 $\omega - Q, V - P$ 드롭 제어를 사용하는 것이 더 빠른 동특성과 정확한 전력 분담의 실현을 가능하게 한다.

그림 15는 부하 변동시에 가상 인덕터를 갖는 개선된 드롭 제어 방식의 시스템 동특성을 보여주고 있다.

마찬가지로 0.5초에서 드롭제어가 시작되었으며 1초에서는 부하가 2배로 증가하여 적용되었다. 그림에서 볼



(a)



(b)

Fig. 13 Droop performances in case 2:
(a) Conventional droop, (b) improved droop

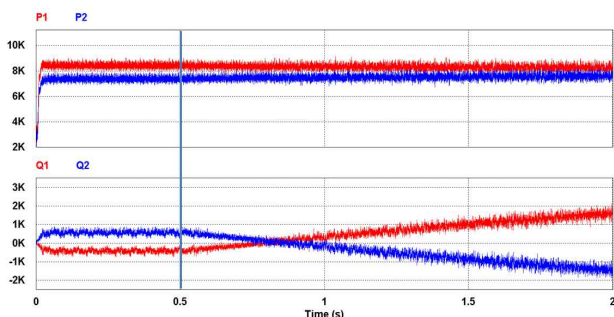
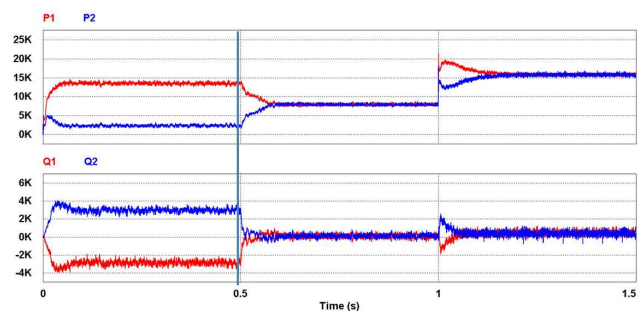
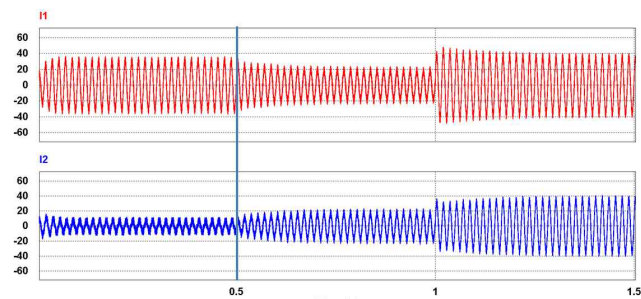


Fig. 14 Conventional droop performances in case 3



(a)



(b)

Fig. 15 Proposed droop performances in load change (8kw→16kW) in case 1:
(a) Output power sharing dynamic,
(b) output current sharing dynamic.

수 있듯이 유효전력과 무효전력은 기존 부하에서 적절히 부하 수요를 분담하고 있다가 부하 변동시에도 빠른 응답 속도를 보이며 요구된 부하 수요에 부응하여 적절히 분담된다. PCC전압 역시 드롭제어가 시작될 때 뿐만 아니라 부하변동시에도 일정하게 유지되어 시스템이 안정 영역하에서 계속 동작할 수 있음을 보여주고 있다. 출력 전류도 마찬가지로 0.5초 이전에는 불평형 선로임피던스로 인해 전류를 적절히 분담하고 있지 못하다가 개선된 드롭 방식이 사용된 0.5초 이후와 1초 이후에 부하 변동에 맞춰 두 분산 유닛의 전류가 적절히 분담되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 마이크로그리드 독립운전 모드시 인버터의 병렬 운전을 위한 가상 인덕터를 가진 개선된 드롭 방식이 제안되었다. 불평형 저전압 선로에서 기존의 드롭 방식은 유효 전력 분담은 잘 이루어진다 할지라도 빠른 동특성을 갖지 못하며 각 분산 유닛 선로 임피던스의 서로 다른 전압 강하로 인해 무효전력 분담은 실현되지 않는다. 정확한 유효-무효 전력 분담을 실현하기 위해 개선된 드롭 방식은 아래와 같이 요약된다.

1. 시스템 환경과 안정성을 모두 고려한 가상 인덕터를 선정하여 유효-무효 전력 디커플링을 실현하여 유도성 선로를 기준으로 한 기존의 드롭식이 효력을 갖도록 하였다.
2. 선로 임피던스의 저항성, 유도성 값과 지령 유효-무효 전력값을 모두 고려한 선로 임피던스 전압 강하식을 활용하여 드롭 식의 기준 출력 전압을 재설정함으로써 큰 전압 드롭 계수의 선정없이도 서로 다른 선로 전압 강하에 기인한 무효 전력 분담 오차가 대폭 개선되었다.

References

- [1] T. Ackermann, G. Andersson, and L. Soder, "Electricity market regulations and their impact on distributed generation," in *Conf. Rec. of Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pp. 608-613, 2000.
- [2] T. Ackermann, G. Andersson, and L. Soder, "Distributed generation: A definition," *Electric Power System Research*, Vol. 57, pp. 195-204, 2001.
- [3] M. Marie, E. El-Saadany, and M. Salama, "Flexible distributed generation: (FDG)," *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Vol. 1, pp. 49-53, 2002.
- [4] Distributed generation at Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), <http://der.lbl.gov>.
- [5] The Consortium for Electric Reliability Technology Solutions (CERTS), <http://certs.lbl.gov>.
- [6] The GridWise alliance, <http://www.gridwise.org/>.
- [7] Large Scale Integration of Micro-generation to Low Voltage Grids(MICROGRIDS), <http://microgrids.power.ece.ntua.gr>.
- [8] Distributed Intelligence in Critical Infrastructures for Sustainable Power (CRISP), <http://www.crisp.ecn.nl>.
- [9] Distributed Generation with High Penetration of Renewable Energy Sources (DISPOWER), <http://www.dispower.org>.
- [10] A. Tuladhar, H. Jin, T. Unger, and K. Mauch, "Parallel operation of single phase inverter modules with no control interconnections," in *Conf. Rec. of IEEE APEC 97*, pp. 94-100, 1997.
- [11] K. S. Parlak, M. Ozdemir and M. T. Aydemir "Active and reactive power sharing and frequency restoration in a distributed power system consisting of two UPS units," *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 31, pp. 220-226, 2009.
- [12] 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.
- [13] J. W. Kim, H. S. Choi, and B. H. Cho, "A novel droop method for converter parallel operation," *IEEE Trans. on Power Electron.*, Vol. 22, No. 1, pp. 25-32, 2002.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] W. Yao, M. Chen, J. Matas, J. M. Guerrero, and Z. M. Qian, "Design and analysis of the droop control method for parallel inverters considering the impact of the complex impedance on the power sharing," *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, Vol. 58, No. 2, 2011.
- [17] H. Gu, X. Guo, and W. Wu, "Accurate power sharing control for inverter-dominated autonomous microgrid," in *Conf. of Rec. IPENC -ECCE Asia*, pp. 368-372, 2012.
- [18] Y. Li and Y. W. Li, "Power management of inverter interfaced autonomous microgrid based on virtual frequency-voltage frame," *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 2, No. 1, pp. 30-40, 2011.
- [19] N. Pogaku, M. Prodanovic, and T. C. Green, "Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid," *IEEE Trans. on Power Electron.*, Vol. 22, No. 2, pp. 613-625, 2007.

- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] M. N. Marwali and A. Keyhani, "Control of distributed generation systems—Part I: Voltages and current control," *IEEE Trans. on Power Electron.*, Vol. 19, No. 6, pp. 1541-1550, 2004.
- [23] D. N. Zmood and D. G. Holmes, "Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 18, No. 3, pp. 814-822, 2003.
- [24] D. De and V. Ramanarayanan, "A proportional + multi resonant controller for three-phase four-wire high-frequency link inverter," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 25, No. 4, pp. 899 - 906, 2010.
- [25] D. De and V. Ramanarayanan, "Decentralized parallel operation of inverters sharing unbalanced and non-linear loads," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 25, No. 12, pp. 1126-1132, 2010.



임경배(林敬培)

1985년 12월 19일생. 2011년 충북대 전자정보대학 졸업. 2013년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2013년 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



최재호(崔載昊)

1955년 9월 27일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1981년~1983년 중경공업전문대학 전자과 전임강사. 1983년~현재 충북대 전기공학부 교수. 1993년, 1998년, 2003년, 2009년 University of Toronto 객원교수. 2002년 Aalborg University Danfoss 객원교수. 2005년~2008년 당 학회 부회장. 2009년~2011년 Journal of Power Electronics(JPE) Editor-in-Chief. 2012년 당 학회 회장.