

다중 분산전원으로 구성된 마이크로그리드의 유무효전력 제어원리 연구

論 文

57-4-7

Power Control Methods for Microgrid with Multiple Distributed Generators

丁一燁[†] · 元東俊^{*} · 文承逸^{**}
(Il-Yop Chung · Dong-Jun Won · Seung-II Moon)

Abstract - Microgrids are new distribution level power networks that consist of various electronically-interfaced generators and sensitive loads. The important control object of Microgrids is to supply reliable and high-quality power even during the faults or loss of mains (islanding) cases. This paper presents power control methods to coordinate multiple distributed generators (DGs) against abnormal cases such as islanding and load power variations. Using speed-droop and voltage-droop characteristics, multiple distributed generators can share the load power based on locally measured signals without any communications between them. This paper adopts the droop controllers for multiple DG control and improved them by considering the generation speed of distribution level generators. Dynamic response of the proposed control scheme has been investigated under severe operation cases such as islanding and abrupt load changes through PSCAD/EMTDC simulations.

Key Words : Microgrid, Distributed Generator, Inverter, Droop controller, Islanding

1. 서 론

최근 전력변환기술의 발전과 전력산업 환경의 변화에 따라 소규모 분산전원(Distributed Generator)의 네트워크인 마이크로그리드(Microgrid)에 대한 관심이 증가하고 있다. 마이크로그리드는 수용가 중심의 소규모 전력시스템으로서 고신뢰, 고품질의 전력을 공급하는 것을 목표로 한다[1-5]. 또한 신재생 에너지 전원, 마이크로가스터빈, 열병합 발전 등 다양한 형태의 전원이 연계될 수 있으며, 전력전송 손실 저감, 경제성 개선 등 기존의 대규모 전송시스템의 단점을 보완하고 극복할 수 있다는 데서 많은 가능성을 갖고 있다.

마이크로그리드에 접속되는 전원은 전력변환 인버터(Inverter)를 이용하여 연계되며, PWM (Pulse Width Modulation) 방식을 이용하여 빠르고 정밀하게 제어된다. 인버터와 함께 DC 커패시터와 계통연계 스위치(Solid State Breaker)는 마이크로그리드를 구성하는 중요한 장치들이다. 마이크로그리드에 연계되는 전원들은 회전기의 경우 관성(inertia)이 작거나 출력을 증감하는데 시간지연이 있어 DC 커패시터를 전원과 인버터 사이의 에너지 버퍼로 사용하는 것이 일반적이며[2-5] 배터리를 사용하여 평소 에너지를 배터리에 저장하였다가 피크부하 시에 에너지를 공급하는 방식도 있다[6].

마이크로그리드는 평상시에는 전력계통과 연계되어 운전(parallel operation)하며 전력계통에 사고가 발생하였을 때는 계통연계 스위치를 열고 단독으로 운전(islanding 혹은 autonomous operation)하여 부하가 정전이나 전기품질 문제를 겪지 않도록 한다[2-4]. 마이크로그리드가 전력계통과 연계 운전할 때에는 마이크로그리드의 부하변동은 크게 문제 되지 않는다. 마이크로그리드 내의 부하와 발전량이 일치하지 않는 경우는 전력계통에서 차이만큼을 공급받음으로써 전력수요와 공급을 자동으로 맞추어지고 계통이 안정되기 때문이다. 반면 마이크로그리드가 계통으로부터 고립되어 운전될 경우에는 마이크로그리드 내의 각 전원이 부하변동을 감지하여 각자 출력을 변동시켜야 한다. 이때 각 전원간의 적절한 협조제어가 이루어지지 않는다면 각각의 전원이 얼마씩 출력을 변동시켜야 하는지 혼동이 생기게 되고 각자 부하변동을 맞추려고(hunting) 하면 전체계통은 불안정하게 된다. 각 전원간 통신을 할 수 있다고 하여도 순시적으로 변화하는 부하를 따라 신속하게 제어명령을 전송하기가 쉽지가 않으며 통신지연, 오류 등에 대한 대책도 필요하다.

본 논문에서는 마이크로그리드 내의 각 전원간 통신이 없어도 고립운전 시 부하변동에 효율적으로 대처할 수 있는 제어원리를 제안하였다. 기본적으로 기존의 동기발전기에서 사용하던 드롭(Droop) 제어를 인버터에 적용한 제어방식을 이용하는데 유효전력(P)-주파수(f) 사이의 스피드 드롭(speed droop)과 무효전력(Q)-전압(V) 사이의 전압 드롭(voltage droop)으로 구성된다 [3][7-9]. 이는 부하의 유무효 전력 변동을 Droop 기술기에 비례하여 각 전원에서 분담하여야 하는 전력이 정해지는 방식으로, 전원간 데이터 통신이나 전원의 수에 관계없이 효과적으로 동작하는 방식이다.

기존의 논문들에서는 인버터의 제어에만 초점을 맞추어

† 교신저자, 正會員 : Virginia Tech 박사후연구원 · 工博

E-mail : iryop2@snu.ac.kr

* 正會員 : 인하대 전기공학부 전임강사 · 工博

** 正會員 : 서울대 전기컴퓨터공학부 教授 · 工博

接受日字 : 2007年 10月 29日

最終完了 : 2008年 2月 13日

에너지 전원을 이상적인 직류전원으로 가정하거나 충분한 DC링크 용량을 가정하여 에너지 전원의 발전 특성을 무시하였다[3][7-9]. 본 논문에서는 DC링크 용량이 작거나 발전 특성이 느려서 이상전원과 같이 동작하지 않는 경우를 고려한 제어원리를 제안한다. 즉 인버터에서 출력을 증감하는 비율을 제한하는 방식을 제안하고 이와 같은 전원이 연계된 마이크로그리드가 심각한 계통 과도상황에서도 안정적으로 동작할 수 있는 방법을 설명한다.

본 논문에 사용된 분산전원은 3레벨 전압원 인버터를 적용하여 기존의 논문들에 사용된 2레벨 인버터에 비해 고조파 특성이 크게 개선되었으며 동기회전 d-q 제어기를 사용하여 안정적인 특성을 가진다. 제안된 제어방식과 분산전원 해석모델은 PSCAD/EMTDC를 이용하여 개발하였으며 다양한 동적특성 모의결과를 설명한다.

2. 마이크로그리드 해석모델 개발

2.1 배전계통 모델링

그림 1은 마이크로그리드를 해석하기 위한 13.8kV 배전계통의 단선도이다. 배전계통은 IEEE Standard 399-1997를 기본으로 한 토론토 대학(University of Toronto)의 테스트 계통을 이용하여 구성하였다[3-4][10]. 테스트 계통은 13.8kV의 3상계통으로 69kV의 상위계통과 연결되어 있으며 방사형(radial) 계통으로 구성된다. 총 3대의 분산전원을 일방성을 갖도록 연결하였으며 정격은 그림과 같이 각각 2.5MVA, 1.5MVA, 2.0MVA로 모델링하였다.

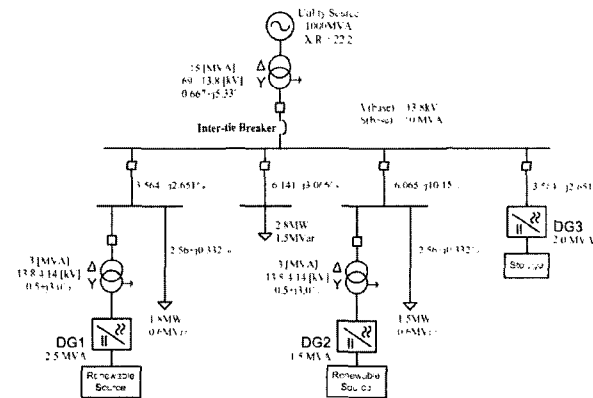


그림 1 마이크로그리드 계통의 단선도
Fig. 1 Single-line diagram of the Microgrid test system

본 논문은 발전특성이 다른 다양한 분산전원들이 고립운전, 부하변동 등의 계통변동에도 안정적이고 신뢰성 있게 운전될 수 있는 제어원리를 도출하는 것을 목표로 한다. DG 1과 2는 작은 용량의 DC링크를 가지며 발전 속도에 지연이 있는 신재생 에너지전원으로 모델링하였다. DG 1과 2는 마이크로그리드가 단독운전모드(autonomous mode)로 동작할 경우, 부하변동을 빨리 추종하는데 한계가 있다. 따라서 이를 극복하기 위하여 본 논문에서는 에너지 저장장치를 갖는 DG 3를 사용한다. DG 3는 DG 1과 2가 발전량을 증감하기까지 걸리는 시간동안의 빠른 부하변동을 담당하도록 한다.

에너지 전원 모델에 대한 자세한 설명은 2.3절에서 하도록 한다.

2.2 3레벨 PWM 전압원 인버터 모델링

전력전자소자, 특히 턴오프(Turn-off) 소자의 발전은 고속 스위칭 PWM과 제어가 용이한 대용량 전압원 인버터(Voltage Source Inverter)를 가능하게 하였다. 이러한 전압원 인버터를 이용하여 분산전원의 출력전압의 크기, 위상 뿐만 아니라 고조파 성분까지 쉽게 제어할 수 있다.

이상적인 인버터는 고용량의 전력을 공급할 수 있으면서 출력에 포함된 고조파 레벨이 낮은 것이라고 할 수 있다. IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)의 등장으로 전압원 인버터의 적용영역이 확대되었지만 여전히 대용량 부문에서는 출력의 고조파 저감, 스위칭 손실 등에 문제가 있다. 이에 본 논문에서는 다중레벨(Multi-level) 인버터인 3레벨 인버터를 적용하였다. 다중레벨 인버터는 같은 정격의 2레벨 인버터 보다 많은 소자들이 직렬로 연결되므로 더 높은 전압에 견딜 수 있어 스위칭 손실을 줄이고 출력의 고조파 성분을 저감할 수 있다[11]. 그림 2는 PSCAD/EMTDC로 구현한 3레벨 다이오드 클램프 회로를 이용한 인버터 연계형 분산전원의 회로를 보여준다. 3레벨에서는 2레벨 인버터에 두 개의 다이오드를 추가하여 출력전압이 $V_{dc}/2$, 0 및 $-V_{dc}/2$, 즉 3가지 레벨이 된다. 3레벨 PWM 전압원의 게이팅 신호 발생기는 다음 절에서 설명한다.

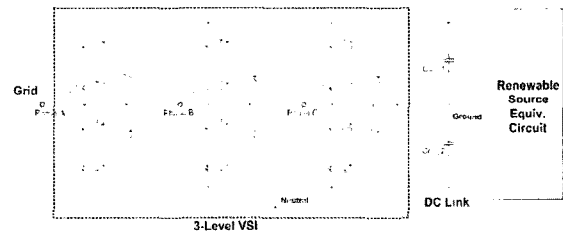


그림 2 3레벨 VSI를 이용한 분산전원 모델
Fig. 2 Inverter-interfaced DG model using 3-level VSI

2.3 신재생 에너지전원 모델링

신재생 에너지전원의 출력은 풍력, 태양광 등 환경적인 요소에 영향을 받으며 회전관성이 작거나 전기화학적 과정을 거치기 때문에 발전과정에서 시간지연이 발생한다[12-13]. 이 시간지연은 분산전원의 출력을 빠르게 제어하는데 제약으로 작용한다. 본 논문에서는 신재생 에너지전원 출력의 시간지연을 모의하기 위하여 그림 3과 같은 해석모델을 개발하였다.

해석모델은 DC 전원과 RC 회로로 구성되며 C 양단의 전압을 측정하여 목표치와의 차이를 보상하는 PI 제어기로 제어된다. 인버터 회로를 무시한다면 C 양단의 전압은 RC 회로의 특성을 따라 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_c(t) = v_{dc}(t)(1 - e^{-t/RC}) \quad (1)$$

즉, C 양단의 전압에 시정수 ($\tau = RC$) 만큼의 시간지연이 발생하게 된다. 본 논문에서는 DC 전원의 제어제인과

R, C 상수를 조절하여 에너지 전원에 시간지연 특성을 모의하였다.

그림 4는 1초에 인버터 유효전력 출력을 0에서 1 pu로 증가하였을 때 DC링크 전압의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 4의 위 그래프는 DC 전압 제어기의 제어명령 신호이며 아래 그래프는 C 양단에서 측정된 전압이다. 인버터 출력증가로 인해 DC링크 전압이 감소하게 되며 DC 전원은 DC링크 전압을 일정하게 유지하기 위하여 제어한다. 원하는 바와 같이 에너지 전원의 시간지연에 의하여 DC링크 전압은 바로 회복되지 못하는 것을 확인할 수 있다. 증가모델에서 R값을 증가하면 시간지연이 증가하며, 반대의 경우 시간지연이 감소한다.

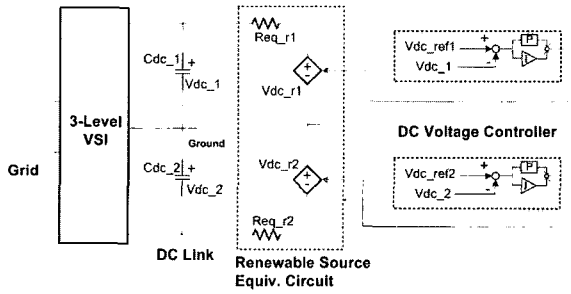


그림 3 시간지연을 갖는 신재생 에너지 전원 모델링
Fig. 3 Renewable energy source model with time delay

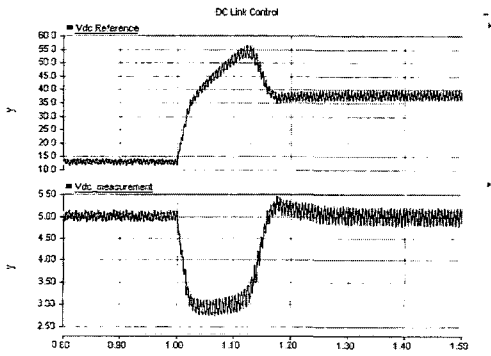


그림 4 신재생 에너지 전원의 DC 전압제어 모의 결과
Fig. 4 DC link voltage control of renewable energy source

3. 분산전원 제어이론

본 논문의 분산전원 제어는 d-q 동기회전축 상에서 순시 전력(instantaneous power)을 제어하는 방식을 이용하였다. 계통이 3상평형(balanced)이고 정상상태이면 동기회전좌표계 상의 d-q 전압, 전류는 일정한 직류성분으로 나타나며 순시 유효전력과 무효전력은 d축과 q축으로 분리되어(decoupled) 각각 따로 제어될 수 있다. 이러한 특성은 계통제어 및 해석에 매우 유용하며 정지좌표계에 비해 높은 정확도를 갖는다[14].

그림 5은 분산전원의 전체 제어 개념도이다. 먼저 측정된 전압, 전류는 필터(anti-aliasing filter)를 거쳐 고주파 노이즈를 제거하며 퍼 유닛(per unit) 값으로 변환된다. 이렇게

측정된 전압으로부터 위상과 주파수를 얻어 이후의 전압, 전류는 dq 동기회전좌표계에서 제어되며 마지막에 인버터 출력 기준전압을 다시 abc 정지좌표계로 변환하여 PWM 신호를 생성한다.

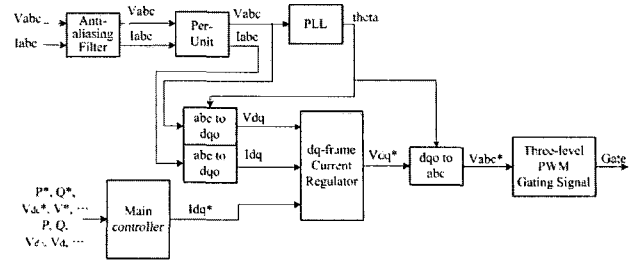


그림 5 전체 분산전원의 제어블록도
Fig. 5 Overall control block diagram

3.1 동기회전좌표축 상의 유효전력 분석

계통에 외란이 있거나 전압 전류에 왜곡이 있는 경우 무효전력을 제어하기 위해서 순시무효전력(instantaneous reactive power)이라는 개념을 도입한다[14]. 특히 동기회전좌표축에서는 순시무효전류를 정의할 수 있는데 이는 순시무효전력에만 관계되는 전류로서 유효전력성분과 분리시킬(decouple) 수 있다. 즉 dq축 상에서는 유효전력을 각각 제어할 수 있으며 이러한 특성은 본 논문에서 중요하게 다루는 Droop 제어에 매우 유용하다.

그림 6은 정지좌표계와 회전좌표계사이의 관계를 나타낸다. 먼저 abc 축의 3상 변수는 dq 정지좌표계로 변환될 수 있으며 변환 행렬식 [C]와 역변환 행렬식은 (2)와 같다.

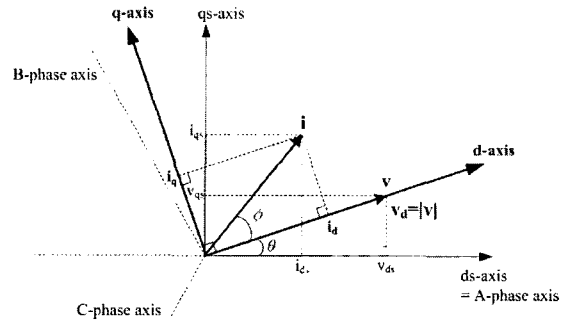


그림 6 정지좌표계와 회전좌표계 벡터도
Fig. 6 Vector representation of rotating reference frame

$$[C] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, [C]^{-1} = \frac{3}{2} [C], \quad (2)$$

이때 순시유효전력은 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$P = \frac{3}{2} (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) = \frac{3}{2} \cdot |v| \cdot |i| \cdot \cos \phi$$

$$Q = \frac{3}{2} (v_{ds} i_{qs} - v_{qs} i_{ds}) = \frac{3}{2} \cdot |v| \cdot |i| \cdot \sin \phi \quad (3)$$

정지좌표계에서 회전좌표계로의 변환행렬식 (4)를 (3)에 적용하면 회전좌표계에서의 유무효전력 방정식을 (5)와 같이 구할 수 있다. 전류벡터는 유효전력성분과 무효전력성분으로 나뉘어 각각 d축과 q축 값으로 나타내어지며 각각의 전류제어를 통해 유무효전력을 따로 제어할 수 있게 된다.

$$[C_i] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, [C_i]^{-1} = \frac{3}{2}[C_i] \quad (4)$$

$$P = \frac{3}{2} \cdot |v| \cdot i_d, \quad Q = \frac{3}{2} \cdot |v| \cdot i_q \quad (5)$$

3.2 위상측정회로 (Phase Locked Loop)

위상측정회로는 a상 전압의 위상각과 주파수를 측정하는 회로로서 인버터 제어에 있어 매우 중요한 구성요소이다. 위상측정회로에서 측정된 위상각과 주파수는 회전좌표계로의 변환 및 유효전력-주파수 Droop 제어에 사용되므로 그 성능이 전체 제어에 미치는 영향이 크다. 그림 7은 dq 회전좌표계에서 구현된 위상측정회로의 블록선도를 보여준다.

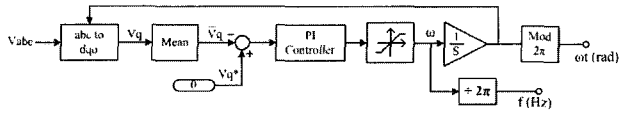


그림 7 위상측정회로의 블록선도
Fig. 7 Control block diagram of phase locked loop (PLL)

3.3 Droop 특성을 이용한 유무효전력 제어이론

마이크로그리드가 계통과 연계되어 병렬로 운전될 경우는 분산전원의 출력과 부하가 일치하지 않더라도 계통에서 전력을 공급받아 수요와 공급의 균형을 맞출 수 있다. 또한 계통에서 역조류(reverse power flow)를 허용한다면 마이크로그리드 내의 부하에 전력을 공급하고 남은 전력을 전력계통에 공급할 수도 있을 것이다. 따라서 각 분산전원은 부하 변동량에 크게 상관없이 경제성 등을 고려하여 내고자 하는 만큼의 전력을 생산할 수 있다.

반면 계통에 이상이 생겨 마이크로그리드가 계통에서 분리되어 운전되어야 할 경우에는 우선 분리 이전에 계통에서 공급되던 전력을 각 발전기가 일정량 만큼씩을 나누어 공급하여야 마이크로그리드 계통이 붕괴되는 것을 막을 수 있다. 또한 고립운전이 계속되는 가운데, 부하의 변동을 각 분산전원이 분담하여야 하며 각각이 분담한 전력의 총합은 부하의 변동과 일치하여야 한다.

분산전원 간의 통신 없이 자동으로 분담해야 하는 전력을 찾아내는 방법으로 동기기에서 사용되던 P-f speed droop 제어가 인버터 제어에 적용되어 왔다 [3][7-9][15]. 그림 8은 speed droop의 개념을 잘 보여주고 있다. 각 분산전원에서는 전력공급이 부족한 경우 주파수를 조금 낮추면서 출력전력을 증가시키는 제어를 하는데 전력과 주파수의 관계는 식 (6)과 같다.

$$P_i = P_{oi} - \frac{1}{R}(\omega - \omega_0) \quad (6)$$

한편 부하의 소비전력은 주파수에 대한 함수로 표현되는데 일반적으로 주파수가 떨어지면 소비전력도 감소하게 된다[15]. 즉, 부하를 포함한 계통특성곡선은 기울기가 양수인 함수로 나타낼 수 있다. 따라서 새로운 동작점은 droop 특성과 부하의 주파수 특성이 교차하는 지점이며, 이때 주파수는 이전에 비해 감소하며 각 전원의 출력전력은 droop 기울기인 R 값에 따라 자동으로 정해진다. R 값이 큰 전원은 출력변동이 적을 것이며 R 값이 작은 전원은 출력을 크게 변화시키게 된다.

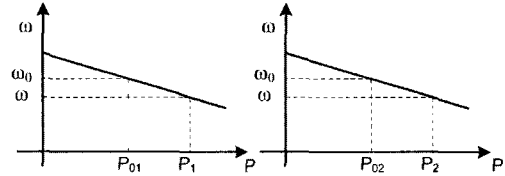


그림 8 유효전력-주파수 드롭 특성
Fig. 8 Speed droop (P-f) characteristics

마이크로그리드가 단독운전을 할 경우 유효전력과 마찬가지로 무효전력의 변동 역시 각 분산전원에서 분담하여 전체 수요와 공급의 균형을 맞추어야 한다. 무효전력은 계통의 전압과 관계가 있으며 이는 유효전력-주파수의 관계와 유사하다. 즉, 무효전력이 부족한 경우 전압이 떨어지며, 반대로 과잉일 경우 전압이 상승한다. 따라서 각 전원에서 측정된 (local measurement) 전압이 떨어지는 경우 무효전력공급을 증가하도록 한다. 무효전력과 전압의 관계는 (7)과 같으며 이때 M은 Voltage-droop의 기울기이다.

$$Q_i = Q_{oi} - \frac{1}{M}(V - V_0) \quad (7)$$

3.4 신재생 에너지 전원의 발전지연을 고려한 제어원리

기존의 마이크로그리드 제어원리 연구에서는 에너지 전원을 이상적이라고 가정하고 에너지 전원의 제어특성을 고려하지 않았다[3][7-9]. 충분한 용량의 DC링크 혹은 에너지 저장장치가 있다면 충분히 의미가 있는 가정이다. 그러나 DC링크의 크기는 경제성과 관련이 있으며 마이크로그리드에 보다 일반적인 형태의 분산전원이 연계되어 운전되기 위해서는 2.3절에서 언급한 바와 같이 에너지 전원의 발전지연을 고려하여야 한다. 본 절에서는 발전지연 특성을 가지는 신재생에너지 전원의 제어원리를 제안한다.

인버터 출력이 증가했을 때 발전지연 및 DC링크 용량부족은 그림 4와 같은 DC링크의 전압강하를 유발한다. 이는 DC링크로 공급되는 전력보다 방출되는 전력이 많기 때문에 발생하는 것이다. 이로 인해 DC링크의 전압이 일정수준 이하로 떨어지면 정상적인 인버터 동작이 불가능해져 마이크로그리드의 전기품질을 악화시키게 된다. 따라서 본 논문에서는 인버터 출력을 제어하여 에너지 전원의 시간지연에 따라 인버터의 출력을 제한하는 방식을 제안한다.

인버터의 출력을 제한하는 방식으로 2가지 방법이 있다. 한 가지는 인버터 출력지령신호에 시지연 상수를 가지는 1차 필터를 인가하는 방식이다.

다른 하나는 비율제한기(Rate limiter)를 사용하는 방식이

다. 비율제한기는 두 개의 제한치 - 최대입력증가율(R), 최대입력감소율(F)을 가지며 제어신호의 증감비율(r)을 (8)과 같이 구한다. 이때 $i(k)$ 와 $t(k)$ 는 현재 입력과 시간이며 $o(k-1)$ 과 $t(k-1)$ 은 한 스텝 전의 출력과 시간이다.

$$r(k) = \frac{i(k) - o(k-1)}{t(k) - t(k-1)} \quad (8)$$

$r(k)$ 를 두 제한치 R, F와 비교하여 다음과 같이 인버터 출력제어명령 신호를 얻는다.

$$\begin{aligned} r(k) > R &\rightarrow y(k) = i(k-1) + R\Delta t \\ r(k) < F &\rightarrow y(k) = i(k-1) + F\Delta t \\ F \leq r(k) \leq R &\rightarrow y(k) = i(k) \end{aligned} \quad (9)$$

그림 9는 Droop 제어기에서 구해진 인버터 출력지령신호(○)와 1차 필터(□) 및 비율제한기(△)를 거친 지령신호를 보여준다. 1차 필터를 이용한 방식보다는 비율제한기를 이용한 방식이 에너지전원의 특성을 고려하기 용이함을 알 수 있다.

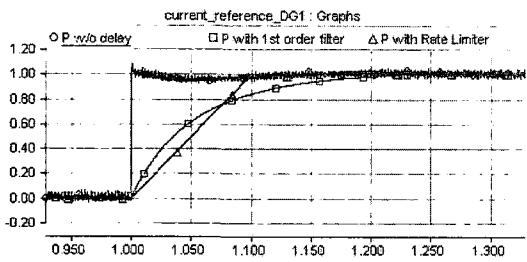


그림 9 에너지전원 특성을 고려한 인버터 출력제어신호[pu]
Fig. 9 Inverter output reference signal considering energy source characteristics

신재생 에너지 전원의 출력지원은 마이크로그리드의 고품질 전력공급의 개념에 상충되는 면이 있다. 즉 신재생 에너지 전원만으로는 계통에서 요구하는 전력의 변화에 빠르게 대처하는데 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 에너지 저장장치를 가지는 분산전원을 이용하여 부하의 변동에 빠르게 대처할 수 있도록 한다. 에너지 저장장치는 최소한 신재생 에너지 전원이 정격 출력을 낼 때까지 시간지연에 따라 발생하는 전력의 부족분을 저장하고 있어야 한다. 즉, 각 발전기의 정격출력을 $P_{rated}(i)$ 라고 하고 출력증감비율을 $r(i)$ 라고 하면 에너지 저장장치의 최소용량(W_{stor})은 (10)과 같이 구할 수 있다. 이때 $r(i)$ 의 역수는 각 발전기가 0에서 정격 출력을 낼 때까지 걸리는 시간이므로 $(1/2)\{P_{rated}(i)/r(i)\}$ 값은 출력제한에 따라 부족해지는 에너지의 양을 의미한다.

$$W_{stor} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \frac{P_{rated}(i)}{r(i)} \quad (10)$$

이상의 마이크로그리드의 분산전원 제어원리를 정리하면 그림 7과 같다. (6)과 (7)의 Droop 특성으로부터 출력 유무효전력(P_{ref} , Q_{ref})을 구하고 (9)에 근거하여 전원의 발전지연을 고려하여 유효전력 기준신호를 계산한다. 이를 식 (5)에 근거하여 d축 전압으로 나누면 dq축 기준전류를 구할 수 있다. 제어특성을 개선하기 위하여 PI 제어기를 사용하였다.

인버터 출력전압과 전류를 회로방정식으로 나타내고 이를 dq 회전좌표계로 변환하면 그림 10의 아래와 같은 전류제어

기(current controller)를 구할 수 있다. 자세한 도출원리는 참고문헌 [9]번에 보다 정확하게 설명되어 있다. L은 인버터 출력과 계통과 연계되는 버스 사이의 등가임피던스를 의미한다. d와 q축의 기준전류와 인버터 출력전류를 비교하여 그 오차로부터 인버터 기준출력전압을 생성한다.

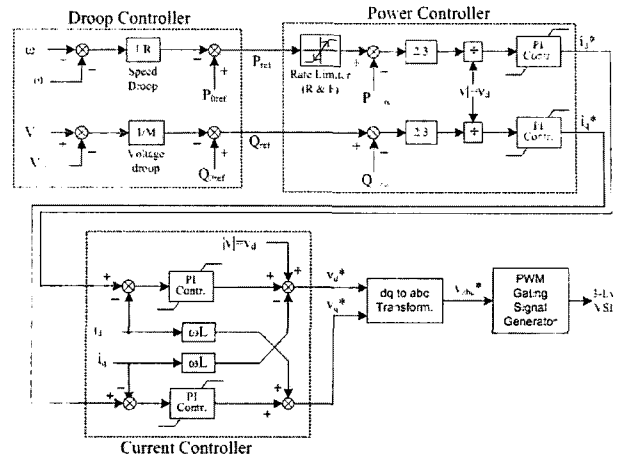


그림 10 제안하는 마이크로그리드 분산전원 제어원리
Fig. 10 Proposed power controller for distributed generator

3.5 3레벨 PWM 게이팅 신호 발생회로

그림 10에서 구한 전압원 인버터의 출력전압은 abc 정지좌표계로 변환된 후 그림 11과 같이 게이팅 신호를 생성한다. 한 가지의 carrier만 사용하는 2레벨 인버터와 달리 3레벨 인버터는 positive carrier와 negative carrier, 2가지의 carrier와 기준출력전압과 비교하며 +1, 0, -1의 3가지 상태를 도출하고 각각의 펄스상태에서 그림 11의 표와 같이 4개의 IGBT를 스위칭 한다. 그 결과 출력파형은 보다 정현파에 가까워져 고조파를 저감할 수 있다[11].

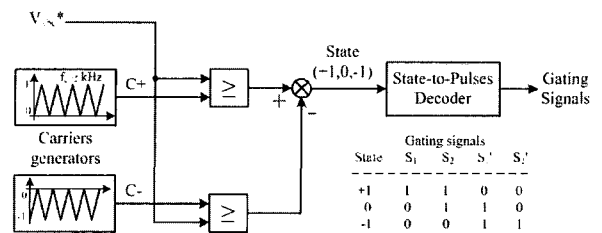


그림 11 3레벨 PWM 전압원 인버터의 게이팅 신호 생성
Fig. 11 3-level VSI gating signal generator

4. 시뮬레이션

그림 1의 마이크로그리드 계통을 전력계통 동적해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 구현하였다. PSCAD는 스위칭 소자 레벨에서 인버터를 구현하며 전력계통을 구성하는 변압기, 선로, 스위치 등이 실제와 유사하게 모델링되어 있고 동적해석 모의결과가 신뢰성 있어 많은 연구 및 논문에서 사용되고 있다.

본 논문에서는 2가지 시뮬레이션을 수행하였는데 계통연계 운전 시에 계통으로부터 유무효전력을 공급받던 경우

(순방향 조류)와 반대로 마이크로그리드에서 계통으로 유무효전력을 공급하던 경우(역방향 조류)를 모의하였다. 각각의 경우 계통연계 스위치(Inter-tie breaker)의 개방으로 고립운전 상태가 되면 마이크로그리드 내에는 순간적으로 유무효전력 부족하거나 남는 상태가 되는데 이때 제안하는 제어원리가 어떻게 동작하는지 살펴보았다.

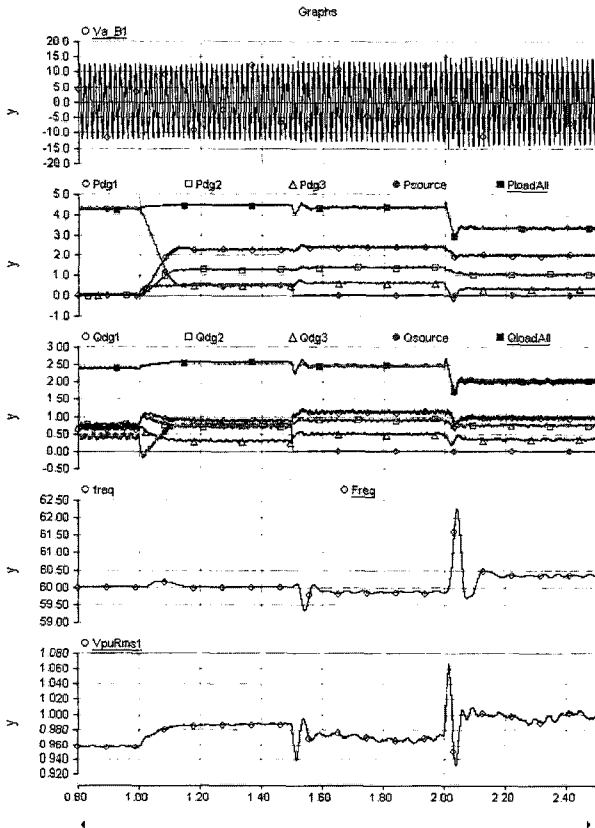


그림 12 시뮬레이션 결과 1: 순방향 조류 시 (위로부터 전압파형[kV], 유효전력[MW], 무효전력[MVar], 주파수 [Hz], 전압 RMS[pu])
 Fig. 12 Simulation results 1: forward power flow (voltage, P, Q, frequency, Vrms from top)

그림 12는 고립운전에 의하여 마이크로그리드 내에 유무효전력이 순간적으로 부족해지는 경우이다. 1.0초 이전에는 마이크로그리드 내에서 필요한 모든 유무효전력을 외부계통에서 공급받다가 1.0초에 DG 1~3이 각각 (2.25MW, 0.625MVar), (1.25MW, 0.375MVar), 그리고 (0.5MW, 0.0MVar)을 공급한다. 계통과 연계되어 있으므로 주파수는 계통 주파수인 60Hz로 유지되며 분산전원들에서 무효전력이 공급됨으로써 마이크로그리드의 정전압특성이 개선됨을 볼 수 있다.

2.3절에서 설명한 바와 같이 DG 1과 2는 DC 전압제어에 시지연(time delay)이 있는 신재생 에너지 전원으로 모델링 하였으며 시뮬레이션 시간을 단축시키고자 시지연을 0.1초와 0.2초로 각각 모의하였다. 3.4절에서 언급한 바와 같이 시지연을 고려한 인버터 출력 비율제한기는 DG 1과 2, 각각 10[1/s], 5[1/s]로 두었다. 즉, 신재생 에너지 전원의 시지연

을 고려하여 출력 0에서 정격 출력을 낼 때까지 각각 0.1초와 0.2로 두어 DC전압이 크게 강하하는 것을 막았다. 그림 13은 DG 1의 인버터 유효전력 출력 제어신호와 DC 링크 전압을 보여준다. 인버터 출력을 증감할 때 10[1/s]로 비율이 제한됨을 볼 수 있으며 DC 링크의 전압도 최초 0에서 0.9 pu로 출력을 낼 때 DG 1의 시지연 상수에 해당하는 0.1초 후부터는 정상전압(5kV)으로 복구됨을 볼 수 있다.

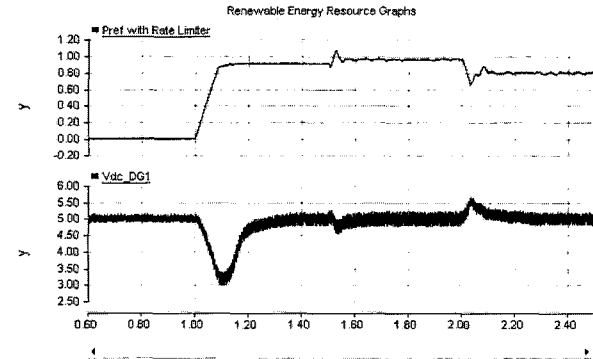


그림 13 시뮬레이션 결과 1: DG1의 인버터 출력제어신호와 DC 링크 전압(위: [pu], 아래: [kV])
 Fig. 13 Simulation results 1: DG1 output power reference and DC link voltage

그림 12에서 1.5초에 마이크로그리드와 계통을 연결하는 Circuit Breaker를 분리시켜 고립운전(islanding) 상황을 모의하였다. 고립운전 시에는 계통에서 전력을 공급받을 수 없으므로 부하에서 필요한 모든 유, 무효전력을 분산전원들이 나누어 공급하여야 한다. 3.3절에서 언급한 바와 같이 세 분산전원은 주파수를 낮추면서 유효전력을 증가시키며 두 분산전원의 유효전력(P_{dg1}, P_{dg2}) 부하(P_{load}) 일치되는 순간 계통은 평형에 이르게 된다. 무효전력도 마찬가지로 각 분산전원이 연결된 버스의 전압을 줄이면서 무효전력 출력을 증가하여 계통은 평형상태에 도달한다. 그림 12에서 고립운전 상태가 될 때, 전압과 주파수가 조금씩 떨어지면서 유무효전력이 평형상태로 됨을 확인할 수 있다.

2.0초에는 마이크로그리드가 고립운전 중에 부하가 변동되는 상황을 모의하였다. 1.2MW, 0.6MVar에 해당하는 부하가 갑자기 정지하는 상황을 모의하였다. DG 1과 2는 출력비율제한을 하였으므로 Droop에 의한 새 운전점으로 이동하는데 시간지연이 있으며 그 중에 발생하는 과도상태는 DG 3가 담당한다. 마이크로그리드가 계통에 연계되었을 때에 비해 고립운전을 하는 경우 계통이 약한 계통(weak system)이 되기 때문에 과도특성이 악화되지만 수주기 이내에 안정된 새 운전점으로 수렴함을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 인버터 연계형 분산전원으로 구성된 마이크로그리드를 구현하였으며 마이크로그리드의 유무효전력 제어원리를 제안하였다. 제어원리는 dq 회전좌표계에서 구현되어 유무효전력을 독립적으로 제어할 수 있으며 Speed droop과 Voltage droop를 이용하여 분산전원 간 통신연결이

없이도 계통상황이나 부하변동에 상관없이 마이크로그리드가 안정되게 운영된다. 여러 다양한 형태의 분산전원도 제안하는 제어원리를 탑재한 인버터를 통해 마이크로그리드에 쉽게 연계시킬 수 있다. 특히 본 논문에서는 인버터 출력의 변화를 제한하는 방식을 이용하여 신재생 에너지 전원의 발전지연을 고려한 제어원리를 제안하였다. 개발된 해석모델을 통해 고립운전 발생, 부하변동 등과 같은 상황에서 마이크로그리드의 동특성을 모의하였고 제안하는 제어방식의 실효성을 확인하였다.

현재 제안한 제어방식에서 개선할 점은 droop 특성에 의해 변동된 주파수와 전압을 계통이 안정된 후에 원래의 정격 (60Hz, 1.0 pu 등)으로 되돌려 주는 것이다. 이는 droop에 비해 속도가 느린 제어를 추가하거나 마이크로그리드 전체를 포괄하는 상위 제어를 통해 가능할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

[1] N. Hatzigiorgiou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, "Microgrids," *IEEE power & energy magazine*, pp.78-94, Jul./Aug. 2007.

[2] R.H. Lasseter, "Control and Design of Microgrid Components," *PSEFC Final Report*, Jan. 2007.

[3] F. Katiraei, M.R. Iravani, "Power management strategies for a Microgrid with multiple distributed generation units," *IEEE Trans. on Power Systems*, 2006.

[4] F. Katiraei, and M.R. Iravani, "Micro-Grid autonomous operation during and subsequent to islanding process," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, Jan. 2005, pp.248-257.

[5] Y. Zoka, H. Sasaki, N. Yorino, K. Kawahara, and C.C Liu, "An interaction problem of distributed generators installed in a MicroGrid," in *Proc. 2004 IEEE Conf. of Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies*, vol. 2, pp. 795-799, Apr. 2004.

[6] T. Funabashi, R. Yokoyama, "Microgrid field test experiences in Japan," *IEEE PES General Meeting*, Jun. 2006.

[7] M. Chandorkar, D. Divan, and B. Banerjee, "Control of distributed UPS systems," *IEEE PESC'94*, 1994, pp. 197-204.

[8] J. Guerrero, L. Na, M. Castilla, and J. Miret, "A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters in distributed generation systems," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 19, no. 5, Sep. 2004, pp. 1205-1213.

[9] N. Pogaku, M. Prodanovic, and T. Green, "Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 22, no. 2, Mar. 2007, pp. 613-625.

[10] *IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial PowerSystem Analysis*, IEEE Std. 399-1997.

[11] M. Molina and P. Mercado, "Control design and simulation of DSTATCOM with energy storage for power quality improvements," *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin*

America, Venezuela, 2006.

[12] J. Larminie, "Current interrupt techniques for circuit modeling," *IEE Colloquium on Electrochemical Measurement*, London, UK, 1994.

[13] K. Runtz, and M. Lyster, "Fuel cell equivalent circuit models for passive mode testing and dynamic mode design," *Canadian conference on electrical and computer engineering*, May 2005, pp. 794-797.

[14] C. Schauder and H. Mehta, "Vector analysis and control of advanced static VAR compensators," *IEE Proceedings-C*, vol. 140, No. 4, July, 1993, pp. 299-306.

[15] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw Hill, 1994.

저 자 소 개



정 일 업 (丁 一 燁)

1976년 3월 16일생. 1999년 서울대 전기 컴퓨터공학부 졸업. 2001년, 2005년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 석사, 박사 취득. 2006년 미국 Virginia Tech 박사후연구원, 2007년~현재 ABB US Corporate Research Center 박사후연구원.
Tel : 02-886-3103
E-mail : iryop2@snu.ac.kr



원 동 준 (元 東 俊)

1975년 1월 1일생. 1998년 서울대 전기 컴퓨터공학부 졸업. 2000년, 2004년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 석사, 박사 취득. 2004년 서울대학교 공학연구소 연구원, 2004년 미국 U of Washington APT Center 박사후연구원, 2006년~현재 인하대학교 전기공학부 전임강사
Tel : 032-860-7404
E-mail : djwon@inha.ac.kr



문 승 일 (文 承 逸)

1961년 2월 1일생. 1985년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1989년, 1993년 Ohio State University 석사, 박사 취득. 1993년~1997년 전북대학교 조교수, 1997년~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 교수
Tel : 02-880-1821
E-mail : moonssi@plaza.snu.ac.kr