

분산전원의 구성 및 출력 제어 방법에 따른 Droop 계수 설정 방법

論 文

57-11-10

A Method to Determine the Droop Constant of DGs Considering the Configuration and Active Power Control Mode

安善柱[†] · 朴辰祐^{*} · 丁一燁^{**} · 文承逸^{***}

(Seon-Ju Ahn · Jin-Woo Park · Il-Yop Chung · Seung-Il Moon)

Abstract - Microgrid usually consists of a cluster of distributed generators(DGs), energy storage systems and loads, and can operate in the grid-connected mode and the islanded mode. This paper presents detailed descriptions of two different options for controlling the active power of DGs in the microgrid. One is regulating the power injected by the unit to a desired amount(Unit output power control) and the other is to regulate the flow of active power in the feeder where the unit is installed to a constant(Feeder flow control). Frequency-droop characteristics are used to achieve good active power sharing when the microgrid operates in the islanded mode. The change in the frequency and the active power output of DGs are investigated according to the control mode and the configuration of DGs when the microgrid is disconnected from the main grid. From the analysis, this paper proposes a method to determine the droop constant of DGs operating in the feeder flow control mode. Simulation results using the PSCAD/EMTDC are presented to validate the approach, which shows good performance as opposed to the conventional one.

Key Words : Microgrid, Distributed Generator, Droop Control, Active Power Control, Feeder Flow Control Mode

1. 서 론

마이크로그리드(Microgrid)는 독립적으로 전력과 열 등을 공급하는 소규모 전력 네트워크로 최근 신재생 에너지 등을 이용한 소규모 분산전원(Distributed Generator)의 대두와 함께 전력시스템의 새로운 패러다임으로 등장 하고 있다. 마이크로그리드에 연결되는 분산전원은 대부분 전력변환 인버터(Inverter)를 통해 계통에 연계되어 빠르고 정밀한 제어가 가능하다[1-3].

마이크로그리드는 정상시에 전력계통과 연계되어 운전되며(grid-connected operation mode) 전력계통에 사고가 발생하면 연계 스위치를 차단하여 단독으로 운전되며(islanded operation mode) 계통의 사고로부터 부하를 보호한다. 계통 연계 운전 시에는 필요에 따라 계통으로부터 전력을 공급받을 수 있기 때문에 마이크로그리드 내부부하의 변동에도 주파수의 변동 없이 계통이 안정적으로 운영된다. 계통에 사고가 발생하여 마이크로그리드가 단독운전 모드로 전환되는 경우 계통으로부터 유입(유출)되던 전력만큼을 각 분산전원이 분담하여 출력을 조정하여야 한다. 또한 단독운전 모드로 운전되고 있던 중에 부하변동이 발생할 경우에도 각 분산전원이 출력을 변동하여 마이크로그리드 내부의 수급 균

형을 맞추면서 운전해야 한다. 이러한 상황에서 계통의 안정적인 운영을 위하여 각 발전기 사이의 적절한 협조제어가 필요하며, 최근 많은 연구에서 기존 동기발전기에 적용하던 드롭(Droop)제어를 인버터에 적용하여 제어하는 방법을 제안하고 있다[2-5]. 유효전력(P) - 주파수(f) droop을 이용한 제어의 기본 원리는 주파수가 변동할 경우 각 분산전원이 droop 계수에 따라 전력을 분담하는 방식으로, 각 분산전원 사이 또는 분산전원과 상위 제어기 사이의 데이터 통신이 없이도 효과적으로 동작한다[6].

마이크로그리드에서 분산전원의 유효전력 출력 제어는 부하의 변동과 상관없이 일정한 출력을 내도록 하는 방법과 발전기 상단의 조류를 일정하게 제어하는 방법이 있다[4][7]. 전자의 방법이 적용되면 발전기는 지령 받은 출력을 고정적으로 내고 나머지 부하의 변동은 외부계통으로부터 공급을 받는다. 후자의 방법은 외부계통으로부터 공급받는 전력을 일정하게 유지하고 나머지 부하의 변동은 분산전원이 출력을 조정하여 감당하는 것이다. 각각의 방법은 장, 단점을 가지고 있기 때문에 계통의 구성 및 운영 방법, 전력 시장의 특성 등을 고려하여 출력 제어 방법을 결정해야 한다.

본 논문에서는 앞에서 설명한 두 가지 유효전력 출력 제어 방법에 따라 단독운전 모드로 전환될 때 분산전원의 출력이 제어되는 원리를 상세히 설명하였다. 발전기가 일정한 출력을 내도록 제어하는 방법은 기존의 동기 발전기들에 적용되던 droop 제어의 원리를 그대로 적용하면 되지만, 발전기 상단의 조류를 일정하게 제어하는 방법은 기존의 원리와는 다른 해석 방법이 필요하다. 본 논문에서는 다수의 분산전원이 있는 경우 그 구성 방법에 따라 단독운전 모드 전환 시 주파수의 변동 및 각 분산전원의 출력 변동을 정량적으

[†] 교신저자, 正會員 : 서울대 전기컴퓨터공학부 博士課程

E-mail : lion52@powerlab.snu.ac.kr

^{*} 正會員 : 서울대 전기컴퓨터공학부 博士課程

^{**} 正會員 : Florida State Univ. 박사후연구원 · 工博

^{***} 正會員 : 서울대 전기컴퓨터공학부 教授 · 工博

接受日字 : 2008年 8月 21日

最終完了 : 2008年 9月 3日

로 분석해 보았고 이를 바탕으로 하여 조류를 일정하게 제어하는 방법에서 각 발전기가 고르게 출력 변동을 분담할 수 있도록 하는 제어 방법을 제안하였다. PSCAD/EMTDC를 이용하여 분산전원 및 마이크로그리드의 해석 모델을 개발하였으며, 이를 이용해 제안된 제어 방법을 검증하였다.

2. 분산전원의 유효전력 출력 제어

분산전원의 유효전력을 제어하는 방법은 그림 1과 같이 발전기의 출력을 일정하게 유지하도록 제어하는 방법과 발전기 앞단의 선로의 조류를 일정하게 유지하도록 제어하는 방법이 있다[4][7]. 본 논문에서는 전자의 방법을 Unit 출력 제어모드, 후자의 방법을 Feeder 조류 제어 모드로 정의하도록 한다.

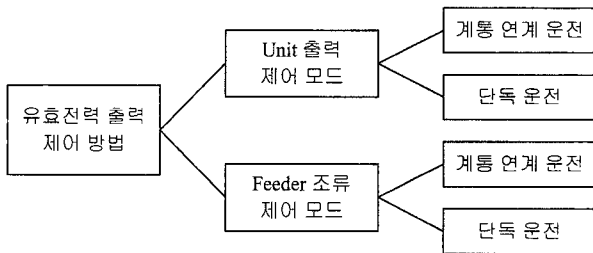


그림 1 분산전원 유효전력 출력 제어 모드
Fig. 1 Active power control mode of DGs

2.1 Unit 출력 제어 모드

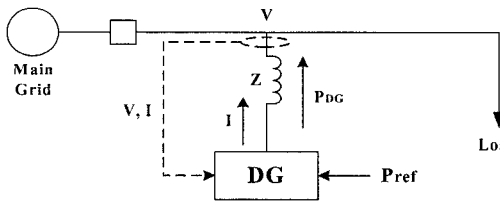


그림 2 Unit 출력 제어 모드
Fig. 2 Diagram of a Unit output power control mode

Unit 출력 제어 모드는 계통 상황의 변동에 무관하게 분산전원에서 출력 지령값(P_{ref})에 따라 고정된 출력을 내도록 제어하는 방법이다. 그림 2에서와 같이 발전기가 연결된 모선의 전압(V)과 발전기에서 계통으로 공급하는 전류(I)를 측정하여 발전기가 내는 유효전력(P_{DG})을 계산하고 이 값이 출력 지령값과 같아지도록 제어한다. 마이크로그리드가 계통과 연계되어 운전되는 경우에는 분산전원의 출력이 부하를 충족시키지 못하면 계통에서 필요한 전력을 공급받아 수요와 공급을 맞출 수 있고, 출력이 마이크로그리드 내부의 부하에 전력을 공급하고 남을 경우 잉여전력을 계통에 공급함으로써 주파수의 변동 없이 계통의 운전이 가능하다. 따라서 Unit 출력 제어 모드로 동작하는 분산전원은 부하 변동에 관계없이 경제성 등을 고려하여 원하는 만큼의 전력을 생산할 수 있다[8]. 계통에 문제가 발생하여 마이크로그리드가 단독운전을 해야 하는 경우에는 분리 이전에 계통에서

공급되던 전력을 분산전원이 공급해 주어야 하는데 이 때 앞에서 설명한 주파수 droop의 개념이 적용되어 분산전원의 출력 및 마이크로그리드 계통의 주파수가 결정된다. 분산전원의 droop 계수를 K^U 라고 하면, 단독운전 시 발전기의 출력과 주파수 사이에는 (1)과 같은 관계가 성립한다[9].

$$f' = f^0 - K^U(P' - P^0) \quad (1)$$

2.2 Feeder 조류 제어 모드

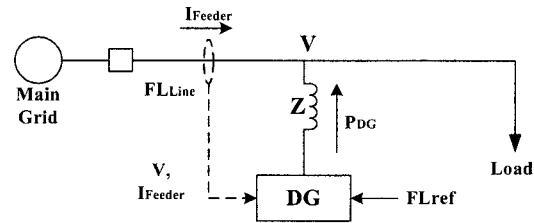


그림 3 Feeder 조류 제어 모드
Fig. 3 Diagram of a Feeder flow control mode

Feeder 조류 제어 모드는 마이크로그리드 내부의 부하가 변동하여도 계통으로부터 공급받는 전력의 양이 일정한 값으로 유지되도록 분산전원의 출력을 제어하는 방법이다. 이를 위해 그림 3에서와 같이 분산전원이 연계된 모선의 전압(V)과 발전기 상위 단에서 유입되는 전류(I_{Feeder})를 측정하여 선로의 조류(FL_{Line})를 계산하고 이 값이 조류 지령값(FL_{ref})과 같아지도록 제어한다. 이러한 제어방법을 적용하면 마이크로그리드 내부의 부하가 변동하더라도 내부의 분산전원이 출력을 조정하여 수급 균형을 맞추기 때문에 계통에서 볼 때 마이크로그리드는 항상 일정한 전력을 소비하는 부하와 같이 제어할 수 있는 장점이 있다. 마이크로그리드가 단독운전 모드로 전환되는 경우 주파수와 조류 사이에는 앞에서와 비슷하게 (2)와 같은 관계가 있다. 그런데, 발전기의 출력과 발전기가 제어하는 조류 사이에는 (3)과 같은 관계가 있기 때문에 단독운전 모드에서 주파수와 발전기의 출력 변동이 분산전원의 제어 방법에 관계없이 같은 값이 되기 위해 Feeder 조류 제어 모드에서의 droop 계수(K^F)를 Unit 출력 제어 모드에서의 droop 계수(K^U)와 크기는 같고 부호는 반대인 값으로 설정해 준다[7].

$$f' = f^0 - K^F(FL' - FL^0) \quad (2)$$

$$FL_1 + P_{DG} = Load \quad (3)$$

3. 다중 분산전원 계통의 유효전력 출력 제어

3.1 분산전원의 구성 및 제어 모드에 따른 특성 분석

2절에서는 1기의 분산전원이 설치된 마이크로그리드의 예를 통해 두 가지 유효전력 제어 모드의 특성을 살펴보았다. 다수의 분산전원이 설치된 마이크로그리드의 경우, 계통에서 분리되어 운전될 때 계통에서 유입(유출)되던 조류를 각 발

전기가 출력을 일정량만큼씩 나누어 변동시켜 마이크로그리드 내부의 수급 균형을 유지시킨다. 분산전원의 구성은 그림 4의 (a)와 같이 하나의 feeder에 여러 개의 분산전원이 연결되는 경우(직렬 구조)와 하나의 분산전원이 연결된 다수의 feeder로 구성되는 경우(병렬 구조)로 나눌 수 있다. 둘 이상의 다수의 분산전원의 구성은 이 두 가지 구성의 조합으로 나타낼 수 있기 때문에 여기에서는 두 가지 구성에 대하여 분산전원의 유효전력 출력 제어 모드에 따라 단독운전 모드 전환 시 주파수 변동 및 각 분산전원의 출력 변동을 분석해 보았다.

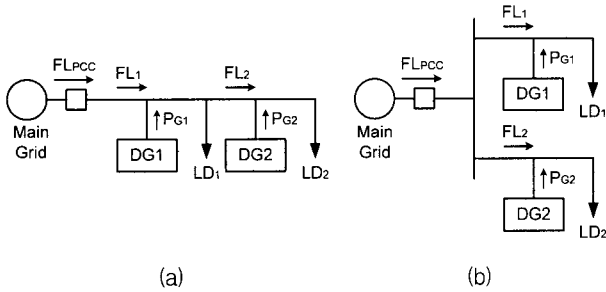


그림 4 분산전원의 구성 (a)직렬 구조, (b)병렬 구조
Fig. 4 DGs configuration (a)Series configuration, (b) Parallel configuration

3.1.1 Unit 출력 제어 모드 특성 분석

두 분산전원의 Droop 계수를 각각 K_1^U , K_2^U 라고 하고, 단독운전 모드로 전환 시 주파수가 Δf 만큼 변동하였다고 하면, 각 분산전원의 출력 변동은 (1)에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta P_{G1} = P_{G1}' - P_{G1}^0 = -\frac{1}{K_1^U} \Delta f \quad (4)$$

$$\Delta P_{G2} = P_{G2}' - P_{G2}^0 = -\frac{1}{K_2^U} \Delta f \quad (5)$$

계통에서 분리되는 순간에는 내부의 부하량의 변화가 없다고 가정하면 분산전원의 구성에 관계없이 계통 연계 운전 시 계통으로부터 유입(유출)되었던 만큼의 전력을 두 발전기가 분담하여 출력을 증가(감소)해야 한다. 만약 계통으로부터 분리되기 전에 일정량의 조류가 유입되고 있었다면, 그림 5에서와 같이 각각의 발전기의 출력 변화의 합이 기존에 유입되던 조류의 양과 같아지도록 증가시켜야 한다. 이를 식으로 나타내면 (6)과 같다.

$$\Delta P_{G1} + \Delta P_{G2} = FL_{PCC}^0 \quad (6)$$

따라서 (4)~(6)으로 부터 단독운전 시 주파수 변동 및 각 분산전원의 출력 변동은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta f = -\frac{K_1^U \cdot K_2^U}{K_1^U + K_2^U} \times FL_{PCC}^0 \quad (7)$$

$$\Delta P_{G1} = -\frac{1}{K_1^U} \Delta f = \frac{K_2^U}{K_1^U + K_2^U} \times FL_{PCC}^0 \quad (8)$$

$$\Delta P_{G2} = -\frac{1}{K_2^U} \Delta f = \frac{K_1^U}{K_1^U + K_2^U} \times FL_{PCC}^0 \quad (9)$$

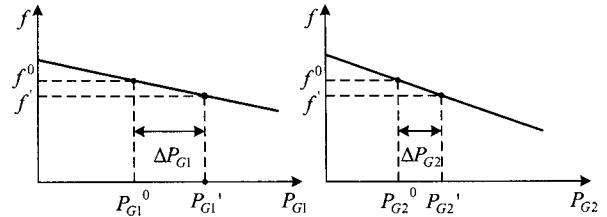


그림 5 Unit 출력 제어 모드로 동작 시 Power-frequency 드롭 특성

Fig. 5 P-f droop characteristics with Unit output power control

3.1.2 Feeder 조류 제어 모드 특성 분석

Feeder 조류 제어 모드의 droop 계수(K^F)를 [7]에서 제안하는 바와 같이 Unit 출력 제어 모드의 droop 계수와 크기는 같고 부호는 반대인 값($-K^U$)으로 설정하고, 단독운전 모드로 전환 시 주파수가 Δf 만큼 변동하였다면 각 분산전원에서 제어하고 있는 조류는 (2)에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$FL_1' = FL_1^0 - \frac{\Delta f}{(-K_1^U)} = FL_1^0 + \frac{\Delta f}{K_1^U} \quad (10)$$

$$FL_2' = FL_2^0 - \frac{\Delta f}{(-K_2^U)} = FL_2^0 + \frac{\Delta f}{K_2^U} \quad (11)$$

• 병렬 구조 : 두 분산전원이 병렬 구조로 연결되어 있는 경우 그림 6의 (a)에서처럼 두 feeder로 흐르는 조류의 합이 0이 되는 상태에서 계통의 주파수가 결정된다. 즉,

$$FL_1' + FL_2' = FL_1^0 + FL_2^0 + \frac{\Delta f}{K_1^U} + \frac{\Delta f}{K_2^U} = 0 \quad (12)$$

그런데 계통 연계 운전 시에 계통으로부터 마이크로그리드로 유입되는 전력량(FL_{PCC}^0)은 두 Feeder로 흐르는 조류의 합과 같으므로 (12)로부터 단독운전 시 마이크로그리드의 주파수 변동은 다음과 같이 결정되며, 이는 분산전원이 Unit 출력 제어 모드로 동작할 때의 결과와 같다.

$$FL_{PCC}^0 + \frac{\Delta f}{K_1^U} + \frac{\Delta f}{K_2^U} = 0 \quad (13)$$

$$\Leftrightarrow \Delta f = -\frac{K_1^U \cdot K_2^U}{K_1^U + K_2^U} \times FL_{PCC}^0$$

• 직렬 구조 : 다음으로 분산전원이 직렬 구조로 연결되어 있는 경우에는 DG1이 제어하는 조류가 계통에서 마이크로그리드로 유입되는 전력(FL_{PCC}^0)과 같으므로 그림 6의 (b)

에서와 같이 이 값이 0이 되는 상태에서 계통의 주파수가 결정된다. 즉, 주파수 변동은

$$FL_1' = FL_{PCC}^0 + \frac{\Delta f}{K_1^U} = 0 \quad (14)$$

$$\Leftrightarrow \Delta f = -K_1^U \times FL_{PCC}^0$$

와 같이 결정된다. 이 때, DG2의 출력 변화량은 (11)과 (14)로부터

$$\Delta P_{G2} = -\Delta FL_2 = -\frac{\Delta f}{K_2^U} = \frac{K_1^U}{K_2^U} \times FL_{PCC}^0 \quad (15)$$

이고, DG1의 출력 변화량은 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta P_{G1} = \Delta FL_2 - \Delta FL_1 = \frac{K_2^U - K_1^U}{K_2^U} \times FL_{PCC}^0 \quad (16)$$

이 결과를 분산전원이 Unit 출력 제어 모드로 동작할 때와 비교해 보면, 주파수의 변동이 커지고 DG1의 출력 변동은 감소하나 그 만큼을 DG2의 출력 변동이 감당해야 한다. 즉, 두 분산전원이 마이크로그리드의 수급 균형에 고르게 기여하는 것이 아니고 하단의 분산전원이 더 많은 출력 변동을 해야 한다. 특히, 두 발전기의 Droop 계수에 따라 K_1^U 이 K_2^U 보다 큰 경우에는 DG1의 출력이 Unit 출력 제어 모드로 동작할 때와 반대로 변동한다. 예를 들어 계통 연계 운전 시 계통으로부터 전력이 유입되고 있었다면 두 발전기가 출력을 증가시켜 마이크로그리드 내의 수급 균형을 맞추어야 하는데, K_1^U 이 K_2^U 보다 큰 경우에는 DG1은 오히려 출력이 감소하게 되는데, 이로 인해 DG2는 기존에 계통에서 유입되던 전력보다 더 많은 양의 출력을 증가시키게 된다. 이러한 상황은 계통 상황의 변동을 각 발전기들이 자동적으로 분담하여 주파수를 유지하려는 droop 제어의 목적과도 맞지 않을 뿐 아니라 DG2의 출력이 제한되어 있는 경우 계통의 붕괴로 이어질 수도 있다. 따라서 다음 절에서는 Feeder 조류 제어 모드로 동작하는 분산전원이 직렬 구조로 연결되어 있을 때 이러한 문제가 발생하지 않도록 droop 계수를 설정하는 방법을 제안하도록 한다.

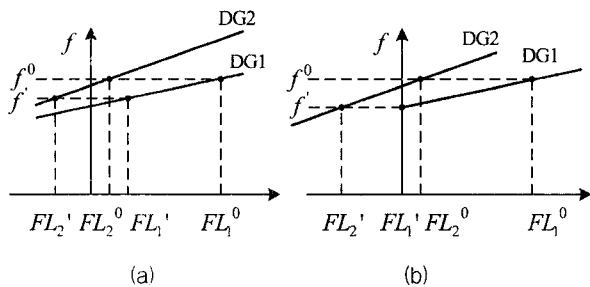


그림 6 Feeder 조류 제어 모드로 동작 시 Flow-frequency 그룹 특성 (병렬 구성의 경우(a), 직렬 구성의 경우(b))
 Fig. 6 Flow-frequency droop characteristics with Feeder flow control (Parallel configuration(a), Series configuration(b))

3.2 Feeder 조류 제어 모드의 Droop 계수 결정

그림 7과 같이 N개의 분산전원이 직렬 구조로 연결되어 있는 마이크로그리드에서 각각의 분산전원이 Feeder 조류 제어 모드로 동작하고 있다고 가정하였다. 각각의 발전기의 출력(P_{Gi})과 제어하고 있는 선로의 조류(FL_i), 부하(LD_i) 사이에는 (17)과 같은 관계가 있다.

$$FL_i + P_{Gi} = LD_i + FL_{i+1}, i = 1, 2, \dots, N-1 \quad (17)$$

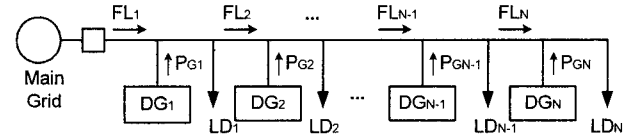


그림 7 직렬 구조의 다수 분산전원으로 구성된 마이크로그리드
 Fig. 7 Microgrid with series connected DGs

마이크로그리드가 계통에서 분리되어 단독운전 모드로 전환되는 경우에는 앞 절에서 설명한 것과 같이 최상단의 발전기가 제어하고 있는 선로의 조류(FL_1)가 0이 되는 상태에서 주파수가 결정되고 이후 각 선로의 조류 및 발전기의 출력은 이 주파수에 따라 결정된다. 본 논문에서는 이러한 운전 상태에서 각 발전기의 출력 및 계통의 주파수가 분산전원이 Unit 출력 제어 모드로 동작할 때와 동일하게 결정되도록 Feeder 조류 제어 모드에서의 droop 계수를 결정하는 방법을 제안한다. 이렇게 하면 계통 연계 운전 시에는 Feeder 조류 제어 모드의 특성을 살려 운전을 할 수 있고, 단독운전 시에는 Unit 출력 제어 모드에서처럼 계통의 변동을 각 분산전원이 고르게 분담하여 운전할 수 있다.

단독운전 모드로 변경될 때 부하의 변동이 없다고 해도 각 발전기가 제어하고 있는 선로의 조류는 하단의 선로의 조류의 변동에 영향을 받는다. 따라서 최하단에 있는 발전기의 출력과 그 발전기가 제어하고 있는 조류의 변동을 가장 먼저 계산하고 순서대로 그 바로 앞의 발전기의 출력 및 제어하고 있는 조류를 결정해야 한다. 단독운전 시 분산전원이 Unit 출력 제어 모드로 동작할 때 발전기의 출력과 Feeder 조류 제어 모드로 동작할 때 제어하는 선로의 조류는 (18), (19)와 같다. 이후의 수식에서 아래첨자 i, N 등은 분산전원의 순서를 나타내며, 위첨자 0은 계통으로부터 분리되기 직전의 상태를 U는 Unit 출력 제어 모드로 동작할 때의 값을 F는 Feeder 조류 제어 모드로 동작할 때의 값을 나타낸다.

$$P_{Gi}^U = P_{Gi}^0 - \frac{\Delta f^U}{K_i^U} \quad (18)$$

$$FL_i^F = FL_i^0 - \frac{\Delta f^F}{K_i^F} \quad (19)$$

두 모드로 동작할 때 주파수의 변동이 동일하고 ($\Delta f^U = \Delta f^F = \Delta f$), N번째 발전기의 출력도 같아지려면

($P_{GN}^U = P_{GN}^F$), 출력과 제어하고 있는 선로의 조류 관계식으로부터 (20)과 같이 정리된다.

$$FL_N + P_{GN} = FL_N^0 - \frac{\Delta f}{K_N^F} + P_{GN}^0 - \frac{\Delta f}{K_N^U} = LD_N \quad (20)$$

따라서 (3)과 (20)으로부터 다음과 같이 droop 계수를 정할 수 있다.

$$K_N^F = -K_N^U \quad (21)$$

즉, 최하단에 있는 분산전원은 Feeder 조류 제어 모드에서 droop 계수는 발전기 한 대만 설치되어 있을 때와 마찬가지로 Unit 출력 제어 모드의 droop 계수와 크기는 같고 부호만 반대인 값을 선택하면 된다.

다음으로 N-1번째 발전기의 droop 계수를 결정하는 방법은 다음과 같다. 앞에서와 마찬가지로 두 모드에서 주파수의 변동이 동일하고, N-1번째 발전기의 출력도 같아지면, (17)의 관계식으로부터 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} FL_{N-1} + P_{GN-1} &= FL_{N-1}^0 - \frac{\Delta f}{K_{N-1}^F} + P_{GN-1}^0 - \frac{\Delta f}{K_{N-1}^U} \\ &= LD_{N-1} + FL_{N-1}^0 - \frac{\Delta f}{K_{N-1}^F} \end{aligned} \quad (22)$$

여기에서 계통 연계 시 선로 조류와 발전기 출력, 부하 사이의 관계에 의해

$$FL_{N-1}^0 + P_{GN-1}^0 = LD_{N-1} + FL_{N-1}^0 \quad (23)$$

이므로, N-1번째 분산전원의 droop 계수는 다음과 같이 결정된다.

$$\frac{1}{K_{N-1}^F} = -\frac{1}{K_{N-1}^U} + \frac{1}{K_N^F} = -\left(\frac{1}{K_{N-1}^U} + \frac{1}{K_N^U}\right) \quad (24)$$

즉, N-1번째 분산전원의 Feeder 조류 제어 모드 동작 시 droop 계수는 N번째와 N-1번째 분산전원의 Unit 출력 제어 모드 droop 계수로부터 결정된다. 이를 일반화 하여 i번째 분산전원의 Feeder 조류 제어 모드에서의 droop 계수를 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{K_i^F} &= -\frac{1}{K_i^U} + \frac{1}{K_{i+1}^F} \\ &= -\left(\frac{1}{K_i^U} + \frac{1}{K_{i+1}^U} + \dots + \frac{1}{K_N^U}\right) \\ &= -\sum_{g=i}^N \frac{1}{K_g^U} \end{aligned} \quad (25)$$

이러한 방법으로 Feeder 조류 제어 모드의 droop 계수를 결정하면 단독운전 모드로 전환 시 모든 분산전원이 Unit 출력 제어 모드로 동작할 때와 같이 출력을 분담하게 된다. 따라서 하나의 feeder에 Unit 출력 제어 모드로 동작하는 분

산전원과 Feeder 조류 제어 모드로 동작하는 분산전원이 같이 연결된 구성의 마이크로그리드에서도 Feeder 조류 제어 모드로 동작하는 발전기의 droop 계수만 이와 같은 방법으로 바꾸어 주면 각각의 발전기가 고르게 출력변동을 분담하게 된다.

4. 시뮬레이션 및 결과분석

4.1 모의 계통 구성 및 모의 시나리오

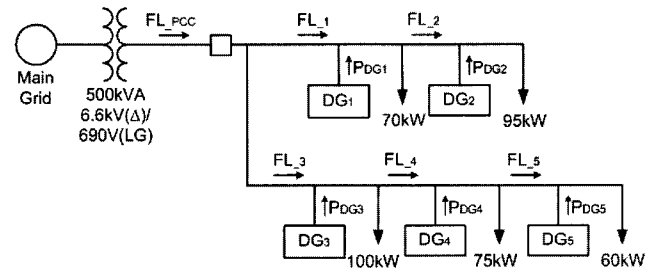


그림 8 마이크로그리드 계통의 단선도
Fig. 8 Single-line diagram of the Microgrid test system

그림 8과 같은 마이크로그리드 계통을 전력계통 동적해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 구현하였다. 각각의 분산전원은 전압원 인버터로 모델링하였으며, 유효전력 출력 제어는 앞의 2절에서 설명한 것과 같이 연결점의 전압 및 전류, 그리고 발전기 상위 단에서 유입되는 전류를 측정하여 출력 레퍼런스 또는 조류 레퍼런스에 따라 출력이 조정되도록 설계하였다. 본 논문에서는 분산전원의 무효전력 및 전압제어는 고려대상이 아니기 때문에 각 분산전원은 무효전력을 0으로 출력하게 하는 제어를 하였고, 계통의 부하도 유효전력 부하로만 구성하였다. 테스트 계통은 690V의 3상 계통으로 6.6kV의 상위 계통과 연결되어 있으며, 2개의 Feeder를 가지는 방사형(radial) 계통으로 구성되었다. 총 5대의 분산전원을 설치하였으며 계통 내 총 부하량은 400kW이다. 이와 같은 계통에서 다음과 같은 세 가지 경우를 모의하였으며, 각각의 경우에 상위 계통에서 유입되는 조류의 양, 각 분산전원의 출력, 분산전원이 제어하고 있는 조류, 그리고 계통의 주파수의 변동을 그래프로 나타내었다.

- Case1 : 분산전원이 Unit 출력 제어모드로 동작
- Case2 : 분산전원이 Feeder 출력 제어모드로 동작하며, droop 계수는 기존의 연구에서 제안하는 방법으로 설정
- Case3 : 분산전원이 Feeder 출력 제어모드로 동작하며, 본 논문에서 제안한 방법으로 droop 계수 설정

4.2 Unit 출력 제어 모드

우선 Unit 출력 제어 모드로 마이크로그리드 내의 분산전원을 제어하였다. 표 1에 나타난 바와 같이 2.0초에서부터 0.5초 간격으로 DG1~5를 차례로 계통에 투입하였으며, 5.0초에 마이크로그리드와 계통을 연결하는 스위치를 분리시켜 단독운전 모드로 운전하도록 하였다. 그림 9는 이러한 모의 시의 결과를 나타내고 있다.

표 1 Unit 출력 제어 모드 모의 시나리오 및 결과

Table 1 Simulation scenario and results (Unit power control mode)

분산 전원	출력 레퍼런스 Pref [kW]	계통 투입 시간[s]	Droop계수 (K^U) [Hz/kW]	최종 출력 [kW]
DG1	65	2.0	0.018	80
DG2	45	2.5	0.012	67.5
DG3	75	3.0	0.012	97.5
DG4	65	3.5	0.018	80
DG5	60	4.0	0.018	75

그림에서 볼 수 있듯이 계통에서 유입되는 조류는 각 분산전원이 계통에 투입됨에 따라 점점 감소하여 4.0초 이후에는 90 [kW]의 전력이 계통으로부터 유입되고 있다. 5.0초에 단독운전 모드로 전환되면 계통으로 유입되는 전력이 0이 되었으며, 각 분산전원은 앞에서 설명한 것과 같이 각각의 droop 특성에 따라 출력을 증가시켜 운전하게 된다. 표 1은 각 분산전원의 droop 계수 및 단독운전 이전과 이후의 출력을 나타내고 있다. Droop 계수가 0.012인 발전기는 22.5 [kW]의 출력 증가가, 0.018인 발전기는 15 [kW]의 출력 증가가 나타났으며, 마이크로그리드 계통의 주파수는 59.73 [Hz]로 떨어졌다. 이는 분산전원의 droop 제어가 잘 이루어져 각 발전기가 고르게 출력 변동을 분담하고 있음을 보여주고 있다.

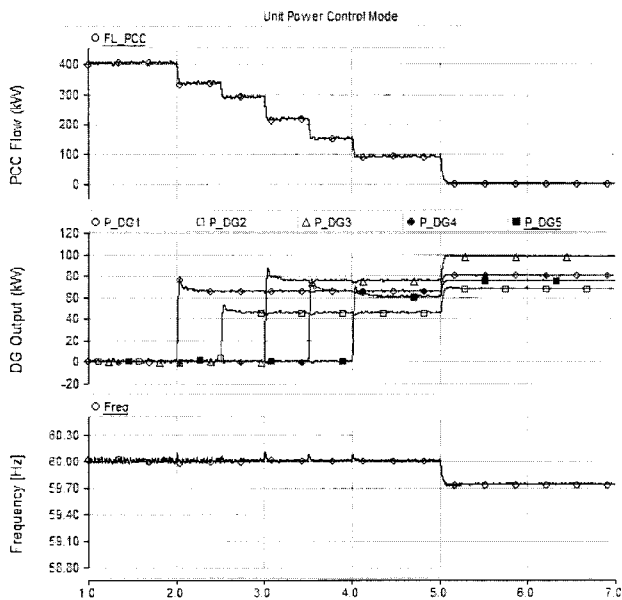


그림 9 Case1의 모의 결과
Fig. 9 Simulation results of Case1

4.3 기존 droop계수를 이용한 Feeder 조류 제어 모드

제안한 방법과의 결과 비교를 위해 기존의 연구에서 제안하는 것과 같이 Feeder 조류 제어 시 droop 계수를 Unit 출력 제어 모드의 droop계수와 크기는 같고 부호는 반대인 값으로 설정하고 모의를 진행하였다. 각 분산전원은 feeder 조

류 지령값(FL_{ref})을 처음에는 0으로 설정하였다. 이때에는 계통에서 전력을 공급받지 않아도 각 분산전원이 자신의 하단의 부하량 만큼 출력을 내며 운전하고 있다. 2.0초에는 각 분산전원의 feeder 조류 지령값을 표 2와 같이 변경하였다. 이때 지령값은 앞의 Unit 출력 제어 모드에서 4.0초 이후의 계통상황과 같아지도록 하여, 단독운전 모드 시 주파수 및 분산전원 출력의 변화를 비교할 수 있게 하였다.

표 2 기존 droop계수를 이용한 Feeder 조류 제어 모드 모의 시나리오 및 결과

Table 2 Simulation scenario and results (Feeder flow control mode with conventional droop constant)

분산 전원	조류 레퍼런스 F_{ref} [kW]	Droop계수 (K^F) [Hz/kW]	최종 출력 [kW]	
			연계 운전	단독 운전
DG1	55	-0.018	65	47
DG2	50	-0.012	45	99
DG3	35	-0.012	75	93
DG4	10	-0.018	65	65
DG5	0	-0.018	60	96

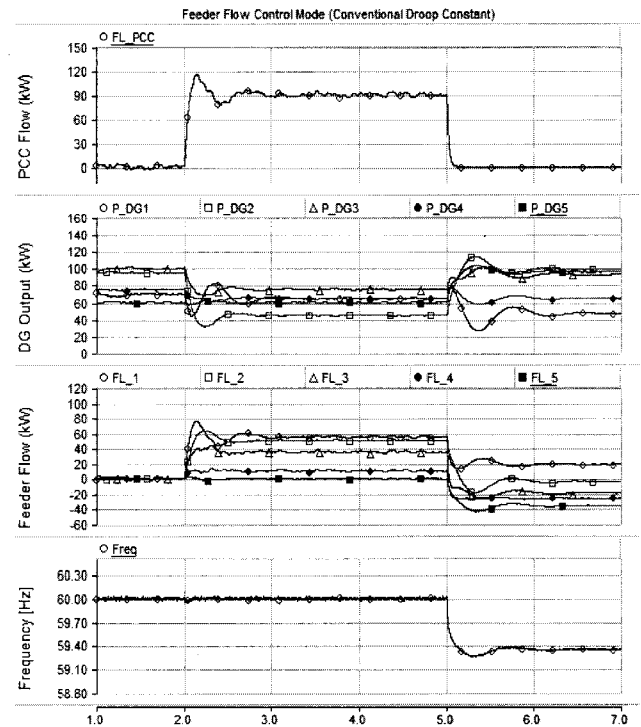


그림 10 Case2의 모의 결과
Fig. 10 Simulation results of Case2

그림 10에서 2초 이후 계통으로부터 유입되고 있는 전력이 90kW로 유지되고 있으며 각 분산전원의 출력도 앞의 Unit 출력 제어 모드로 모의한 경우와 같아짐을 확인할 수 있다. 앞서서와 마찬가지로 5.0초에 연결 스위치를 분리시켜 단독운전을 모의하였다. 표 2에서와 같이 단독 운전 시

DG2, DG3, DG5에서는 각각 54 [kW], 18 [kW], 36[kW] 만큼의 출력이 증가함을 확인할 수 있다. 반면 DG4는 출력의 변동이 없으며, DG1에서는 18 [kW] 만큼 출력이 감소하였다. DG2와 DG5는 각 Feeder에서 가장 하단에 위치한 분산전원으로 앞의 3.1절에서 분석한 것과 같이 계통 내의 변화를 하단의 발전기들이 과도하게 부담해야 함을 확인할 수 있으며, 첫 번째 Feeder의 가장 상단에 위치한 DG1에서는 전체 발전기들이 출력을 증가해야 하는 계통의 변화에도 불구하고 오히려 출력을 감소하여 운전하게 됨을 확인할 수 있다. 계통의 주파수도 59.352 [Hz]까지 떨어지는데, 이는 Unit 출력 제어 모드로 운전할 때보다 2.4배나 주파수의 변동이 커진 것이다. 이처럼 다수의 분산전원으로 구성된 마이크로그리드에서 Feeder 조류 제어 모드로 동작하는 발전기의 droop 계수를 잘못 설정하면 각 분산전원들이 계통의 변화를 고르게 부담하지 못하게 되며, 단독운전 모드에서 주파수의 변동도 커지게 된다.

4.4 제안된 droop계수를 이용한 Feeder 조류 제어 모드

다음으로 본 논문에서 제안하는 방법으로 Feeder 조류 제어 모드의 droop 계수를 설정하고 모의하였다. 각 feeder에서 상위에 설치된 분산전원일수록 droop 계수의 크기(절대값)는 작아짐을 알 수 있다. 모의 시나리오는 Case2와 같다. 즉, 처음에는 조류 지령값을 0으로 하였고, 2.0초 이후에는 각 분산전원의 조류 지령값을 표 2와 같이 설정하였다.

표 3 제안된 droop계수를 이용한 Feeder 조류 제어 모드 모의 시나리오 및 결과

Table 3 Simulation scenario and results (Feeder flow control mode with proposed droop constant)

분산전원	조류 레퍼런스 Fref [kW]	Droop계수 (K ^F) [Hz/kW]	최종 출력 [kW]	
			연계 운전	단독 운전
DG1	55	-0.0072	65	80
DG2	50	-0.012	45	67.5
DG3	35	-0.00514	75	97.5
DG4	10	-0.009	65	80
DG5	0	-0.018	60	75

계통 연계 운전 시에는 계통에서 주파수를 60 [Hz]로 유지하므로 droop 계수를 설정하는 것에 관계없이 각 분산전원에서는 조류 지령값에 따라 출력을 변동시키기 때문에 그림 11에서 5.0초 까지는 앞의 경우와 동일하게 운전됨을 확인할 수 있다. 5.0초에 단독운전 모드로 전환된 후의 결과는 표 3에서와 같이 DG2과 DG3에서는 22.5 [kW], DG1, 4, 5에서는 각각 15 [kW]의 출력이 증가하였다. 이는 4.2절의 모의 결과와 동일한 것으로 Feeder 조류 제어 모드로 동작하는 분산전원의 droop 계수를 본 논문에서 제안한 방법으로 설정하면, 단독운전 시에 Unit 출력 제어 모드로 동작하는 것과 동일하게 출력이 변동하여 계통의 변화를 고르게 부담함을 확인할 수 있다. 주파수도 약 59.73 [Hz]로 4.2절의 결과와 동일함을 알 수 있다.

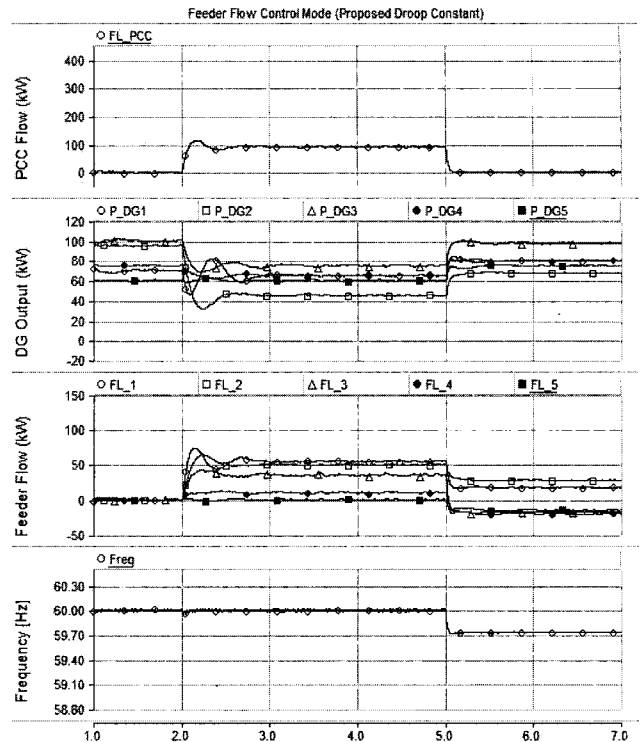


그림 11 Case3의 모의 결과
Fig. 11 Simulation results of Case3

5. 결 론

본 논문에서는 여러 분산전원의 출력의 협조제어를 위해 droop 제어를 포함한 경우, 분산전원의 유효전력 출력을 제어하는 두 가지 방법에 따라 마이크로그리드가 단독운전 모드로 전환될 때 분산전원의 출력이 제어되는 방법에 대하여 설명하였다. Unit 출력 제어 모드로 동작할 때에는 계통의 구성에 관계없이 droop 특성에 따라 각 발전기가 계통의 변화에 대하여 고르게 출력을 부담하지만, Feeder 조류 제어 모드로 동작하는 분산전원이 직렬구조로 설치되어 있는 경우에는 droop 계수를 기존의 연구에서처럼 설정하면 각 분산전원 간의 출력 변동이 고르게 되지 않고 계통의 주파수 또한 크게 변화함을 확인하였다. 따라서 본 논문에서는 이러한 경우에도 각 분산전원이 Unit 출력 제어 모드로 동작할 때처럼 고르게 부담하여 출력을 변동하고 계통 주파수의 변동도 작게 유지되도록 Feeder 조류 제어 모드의 droop 계수를 설정하는 방법을 제안하였다. PSCAD/EMTDC를 이용해 5개의 분산전원으로 구성된 마이크로그리드 계통을 구성하였고, 기존의 방법 및 제안된 방법으로 droop 계수를 설정하고 모의하여 제안된 방법의 실효성을 검증하였다.

풍력, 태양광 등 신재생에너지원 발전기와 연결되어 이러한 발전기의 출력 변동이 계통에 미치는 영향을 줄이기 위해 에너지 저장 장치 및 연료전지 등을 하이브리드로 연결하는 경우 Feeder 조류 제어 모드는 에너지 저장장치의 의 출력을 제어하는 방법으로 활용될 수 있으며, 이러한 하이브리드 시스템이 다수 연결된 마이크로그리드에서는 본 논문에서 제안된 방법을 활용하여 단독운전 모드에서도 안정적으로 운영을 할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국서부발전(주)에서 지원한 '신재생 에너지 및 분산전원 설비의 계통연계 및 최적운용 기술 개발' 과제에 의하여 이루어진 연구로, 한국서부발전(주) 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] R. H. Lasseter, "Microgrids," IEEE PES Winter Meeting, Jan. 2002.
- [2] F. Katiraei, M. R. Iravani, "Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 21, no. 4, pp. 1821-1831, Nov. 2006.
- [3] C. L. Moreira, F. O. Resende, J. A. Lopes, "Using low voltage microgrids for service restoration," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 22, no. 1, pp. 395-403, Feb. 2007.
- [4] P. Piagi, R. H. Lasseter, "Autonomous control of microgrids," IEEE PES General Meeting, Jun. 2006.
- [5] A. Engler, N. Soutanis, "Droop control in LV-Grids," International Conference on Future Power System, Nov. 2005.
- [6] J. Guerrero, L. G. Vicuna, J. Matas, M. Castilla, 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, pp. 1205-1213, Sep. 2004.
- [7] R. H. Lasseter, "Control and design of microgrid components," PSERC Final Project Report, Jan. 2006.
- [8] 정일엽, 원동준, 문승일, "다중 분산전원으로 구성된 마이크로그리드어 유무효전력 제어원리 연구," Trans. KIEE., vol. 57, no. 4, pp. 582-588, Apr. 2008.
- [9] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw Hill, 1994.

저 자 소 개



안 선 주 (安善柱)

1980년 1월 14일생. 2002년 서울대 전기 컴퓨터공학부 졸업. 2004년 동대학원 석사학위 취득. 2004년~현재 동대학원 박사과정.

Tel : 02-886-3101

E-mail : lion52@powerlab.snu.ac.kr



박진우 (朴辰祐)

1980년 12월 20일생. 2004년 서울대 전기 컴퓨터공학부 졸업. 2004년~현재 동대학원 석박사 통합 과정.

Tel : 02-886-3103

E-mail : jwpark@powerlab.snu.ac.kr



정일엽 (丁一燁)

1976년 3월 16일생. 1999년 서울대 전기 컴퓨터공학부 졸업. 2001년, 2005년 동대학원 석사, 박사 취득. 2006년~2007년 미국 Virginia Tech 박사후연구원, 2008년~현재 미국 Florida State Univ. 박사후연구원.

Tel : 02-886-3103

E-mail : iryop2@snu.ac.kr



문승일 (文承逸)

1961년 2월 1일생. 1985년 서울대 전기공학과 졸업. 1989년, 1993년 미국 Ohio State Univ. 석사, 박사학위 취득. 1993년~1997년 전북대학교 조교수, 1997년~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 교수

Tel : 02-880-1821

E-mail : moonsi@plaza.snu.ac.kr