

무효전력을 고려한 마이크로그리드의 단독운전 판단 알고리즘

강용철*, 장성일**, 차선희*, 이병은*, 김연희*, 이지훈*, 김용균**
 *전북대학교, **(주)한국 아이이디 이엔지

Islanding detection algorithm for microgrid considering reactive power

Yongcheol Kang*, Sungil Jang**, Sunhee Cha*, Byungeun Lee*, Yeonhee Kim*, Jihoon Lee*, Yongguen Kim**
 *Chonbuk National University, **HANKOOK IED ENG

Abstract - A microgrid is a new type of power system which is formed by the interconnection of small generator to distribution systems. Microgrids are able to supply electric power to their loads independently, which is called with islanding operation, even if they're separated from the power system. As a result, microgrids must be equipped with specific islanding detection schemes for the islanding operation of microgrids. This paper studies an islanding detection method considering reactive power. The proposed method is dealing with the reactive power of the cable which connects between a microgrid and a power system. To show the validity of the proposed method, many islanding operation cases are tested by varying the load conditions of microgrids.

1. 서 론

전력산업 구조개편의 진행과 기후변화협약 및 고유가시대 등 에너지 환경변화에 따른 소비구조의 변화에 따라 전원 공급 형태가 달라지고 있다. 중앙 집중형의 전력에너지 공급 구조에서 다양한 수용가에서 요구하는 전력 품질을 만족시킬 수 있는 독립적인 전원공급 형태로 변화해 가고 있다. 새로운 전원공급 시스템의 하나인 마이크로그리드는 마이크로터빈, 가스터빈, 풍력, 태양광, 연료전지 등의 소형 분산 전원으로 구성되어 있으며, 계통과 분리되어서도 수용가에 단독으로 전력을 공급할 수 있는 소규모의 전력계통이다 [1].

마이크로그리드는 분산전원처럼 전원이 상실되었을 경우 즉시 계통으로부터 분리되어야 한다. 여기서, 계통전원 없이 분산전원이 전력을 공급하는 상태를 분산전원의 단독운전이라고 한다. 마이크로그리드의 단독운전은 의미상 분산전원의 단독운전과 일치하나, 분산전원의 단독운전 시에는 분산전원을 계통으로부터 분리하여 수용가로의 전력공급을 차단해야하지만 마이크로그리드는 단독 운전 시에도 전력을 수용가로 계속해서 공급해야 한다. 이에 단독운전을 검출한다는 측면에서는 기존의 분산전원에 적용이 가능한 단독운전 판단기법들이 마이크로그리드에도 그대로 적용될 수 있다. 전압변동, 주파수변동, 주파수 변화율, 위상변위, 발전기 출력변동, 계통임피던스 변동 등을 모니터링하여 마이크로그리드의 단독운전을 검출할 수 있다. 그러나 이러한 방식들은 분산전원이 담당하는 부하가 단독운전 이전에 비해 변화가 적으면, 단독운전 검출이 어렵다는 단점이 있다 [2][3].

본 논문에서는 무효전력을 고려한 마이크로그리드의 단독운전 판단 기법을 제안한다. 제안한 알고리즘은 마이크로그리드와 계통을 연계하는 케이블에서의 무효전력을 고려하여 단독운전을 판단한다. 제안된 기법을 적용하면 단독운전 전후에 마이크로그리드와 계통 사이의 전력변화가 큰 경우를 포함하여 전력변화가 적은 경우에서도 정확히 단독운전 검출이 가능하다.

2. 마이크로그리드의 단독운전 판단 알고리즘

본 장에서는 케이블의 무효전력을 이용한 마이크로그리드의 단독운전 판단 알고리즘을 설명하였다. 마이크로그리드는 케이블 전용선을 이용하여 배전계통에 연계된 것으로 가정하여 알고리즘을 전개하였다.

2.1 마이크로그리드의 단독운전 특성

케이블 전용선으로 계통과 연계된 마이크로그리드 연계점에서는 계통전원이 상실되었을 경우 케이블의 무효전력이 마이크로그리드로 공급된다. 이러한 케이블의 무효전력은 연계선로가 길어질수록 증가하는데, 계통 전압, 케이블의 종횡 및 길이가 주어지면 계산이 가능하다. 이에 마이크로그리드의 연계지점에서 무효전력을 고려한 전력의 변동을 모니터링하면 마이크로그리드의 단독운전 상태를 검출할 수 있다. 본 논문에서는 케이블의 무효전력과 마이크로그리드의 연계점에서의 전력변화를 고려한 새로운 형태의 마이크로그리드 단독운전 검출을 제안하였다.

연계지점에서의 전력의 흐름은 세 가지 형태로 분류될 수 있으며 각각의 조건에서의 단독운전 검출 방법은 다음과 같다

첫 번째 경우는 마이크로그리드의 부하(μ_L)에서 사용하는 전력량보다 분산전원의 발전량(μ_G)이 커서 전력이 연계 계통으로 공급되는 경우이다. 이때 연계선로의 계통 측 차단기가 열리면 계통으로 공급하던 전력이 사라지고 케이블의 무효전력만이 남게 된다. 이러한 전력의 변동을 모니터링하면 마

이크로그리드의 단독운전을 검출 할 수 있다. 이와 같은 경우는 마이크로그리드의 발전량이 부하량 보다 크므로 마이크로그리드에 연결된 발전기의 주파수가 증가하고, 전압이 증가하게 되므로 기존의 단독운전 검출 기법으로도 정확히 단독운전을 검출 할 수 있다.

두 번째 경우로 마이크로그리드의 부하(μ_L)에서 사용하는 전력량보다 분산전원의 발전량(μ_G)이 적어 전력이 연계 계통으로부터 마이크로그리드의 부하로 공급되는 경우이다. 이때 연계선로의 계통 측 차단기가 열리면 부하측으로 공급하던 전력이 사라지고 케이블의 무효전력만이 남게 된다. 따라서 첫 번째 경우와 마찬가지로 간단히 단독운전 검출이 가능하다. 두 번째 경우의 운전 조건에서는 마이크로그리드의 발전량보다 부하량이 많으므로 마이크로그리드의 전압이 감소하고 주파수가 감소하므로 기존의 방법으로도 마이크로그리드의 단독운전을 검출하는 데에는 큰 어려움이 없다.

세 번째 경우로 마이크로그리드의 부하량(μ_L)과 분산전원의 발전량(μ_G)이 유사한 경우이다. 첫 번째와 두 번째 경우의 마이크로그리드의 단독운전은 분산전원의 발전량과 부하량의 큰 차이로 인해 기존의 분산전원 단독운전 검출 알고리즘으로도 쉽게 검출이 가능하다. 그러나 세 번째 경우는 단독운전 전후의 부하변동이 크지 않으므로 기존의 단독운전 검출 방법으로는 판단이 곤란하다. 그러나 단독운전 전후의 전력변동이 미소한 상태에서도 연계선로의 차단기가 개방되면 케이블의 무효전력이 마이크로그리드로 유입되므로 이를 모니터링하면 마이크로그리드의 단독운전을 검출 할 수 있다.

2.2 제안된 마이크로그리드의 단독운전 판단 알고리즘

본 논문에서는 먼저 DFT(Discrete Fourier Transform)로 계산된 전압 (V), 전류(I)의 기본파를 식 (1)~(3)에 적용하여 마이크로그리드 연계점에서 유효전력(P), 무효전력(Q), 케이블의 무효전력(Q_C)을 계산한다.

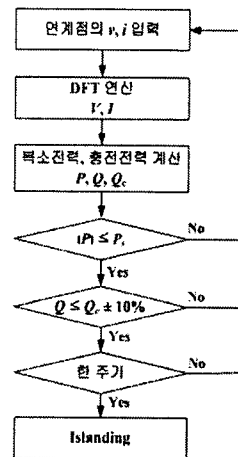
$$P = VI \cos \theta \tag{1}$$

$$Q = VI \sin \theta \tag{2}$$

$$Q_C = 3\omega CV^2 - 3\omega LI^2 \tag{3}$$

여기서, θ 는 전압과 전류사이의 위상차, ω 는 정격 주파수 60Hz에서의 각 주파수이다. C 와 L 은 각각 전송선 케이블의 커패시턴스와 인덕턴스를 의미한다.

제안된 알고리즘은 계산된 유효전력이 임계치(P_S) 이하로 공급되고, 무효전력이 케이블의 무효전력 부근으로 수렴하였을 경우에 마이크로그리드가 단독으로 운전하고 있는 것을 판단한다. 제안된 알고리즘은 순간적인 계통 변화에 대응하기위하여 단독운전 조건이 1주기 이상 만족하였을 경우에 트립 신호를 발생하도록 하였다. 그림 1은 제안한 알고리즘의 흐름도이다.

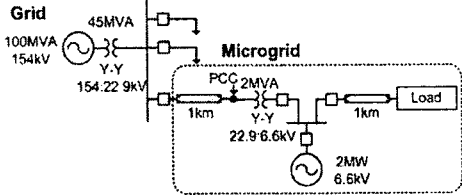


<그림 1> 마이크로그리드의 단독운전 판단 알고리즘 흐름도

3. 사례연구

3.1 모델계통

제안된 알고리즘을 검증하기 위해 그림 2와 같은 모델 배전계통을 구성하였으며, 배전계통과 마이크로그리드는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하였다. 마이크로그리드는 2 MW 용량의 마이크로소스와 역률 1.0 부하로 구성하였으며, 전압계급은 6.6 kV로 설정하였다. 수용가들이 밀집된 지역에 건설될 마이크로그리드는 케이블형태의 전용선으로 계통과 연계된다. 이에 전압계급에 맞는 케이블 데이터를 이용하여 연계선을 모델링하였다. 또한 마이크로그리드의 배전계통도 케이블로 구성하였다. 케이블 선로의 길이는 각각 1 km로 설정하였다. 계전점 PCC (Point of Common Coupling)은 마이크로그리드와 계통과의 연계지점이며, 계전점에서 전압, 전류를 측정하여 전력의 변동을 모니터링 하였다.



〈그림 2〉 모델 계통도

3.2 마이크로그리드의 단독운전 판단 사례

마이크로그리드의 단독운전 판단은 그림 2의 계통에서 세 가지 사례를 통해 검증하였다. 첫 번째 사례는 마이크로그리드 부하량(μ_r)보다 분산전원의 발전량(μ_s)이 큰 경우이며 두 번째 사례는 마이크로그리드 부하량(μ_r)보다 분산전원의 발전량(μ_s)이 적은 경우, 마지막 사례는 마이크로그리드 부하량(μ_r)과 분산전원의 발전량(μ_s)이 유사한 경우이다. 차단기에 의해 계통 전원이 제거되는 시간은 3.5초이며, 시뮬레이션 시간은 5초이다. 그림에서는 모니터링된 유효전력, 무효전력과 단독운전 판단 트립신호를 나타냈다.

3.2.1 마이크로그리드 부하량(μ_r)보다 발전량(μ_s)이 큰 경우

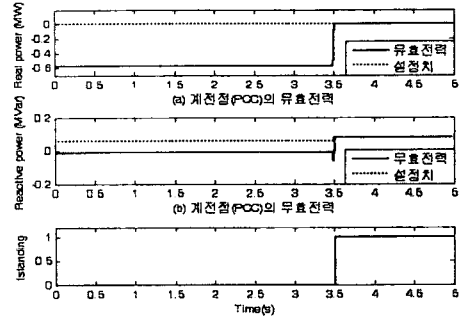
첫 번째 사례에서는 μ_r 보다 μ_s 가 큰 경우를 모의하였다. μ_r 는 0.3 MW이며, μ_s 는 0.86 MW로 발전하도록 제어하였다. 그림 3에서 알 수 있듯이 발전량이 부하량보다 크므로 0~3.5초 동안 잉여전력이 마이크로그리드에서 계통으로 공급되어 진다. 계통으로 공급되는 유효전력은 -0.57 MW이며 무효전력은 -0.01 MVar이다. 여기서 음의 값은 마이크로그리드에서 계통으로 전력을 공급함을 의미한다. 3.5초에 계통 측 차단기를 동작시켜 마이크로그리드가 단독으로 운전하도록 모의하였다. 단독운전 시에는 유효전력 값이 -15 W, 무효전력 값은 0.078 MVar로 계산되었다. 계산된 유효전력과 무효전력이 제안된 알고리즘에 포함되므로 단독운전이 발생한 후 29 ms 만에 트립신호를 발생하였다. 첫 번째 경우의 무효전력의 설정치는 0.0787 MVar이다. 발전량이 부하량보다 큰 경우의 단독운전은 기존의 단독운전 검출 기법으로도 쉽게 판단이 가능하다.

3.2.2 마이크로그리드 부하량(μ_r)보다 발전량(μ_s)이 적은 경우

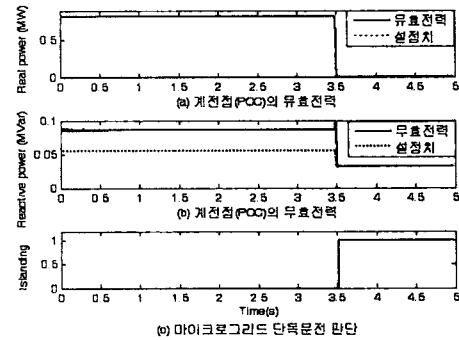
두 번째 사례에서는 μ_r 보다 μ_s 가 적은 경우를 모의하였다. μ_r 는 2 MW이며, μ_s 는 1 MW로 발전하도록 제어하였다. 첫 번째 경우와 달리 발전량이 부하량보다 적으므로 0~3.5초 동안 부족전력이 계통에서 마이크로그리드로 공급되어진다. 그림 4에서 알 수 있듯이 계통에서 공급되는 유효전력은 0.83 MW이며 무효전력은 0.087 MVar이다. 여기서 양의 값은 마이크로그리드에서 계통으로 전력을 공급받음을 의미한다. 단독운전 발생 시간은 첫 번째 경우와 일치하도록 설정하였다. 단독운전 시에는 유효전력 값이 65 W, 무효전력 값은 0.032 MVar로 계산되었다. 유효전력과 무효전력이 제안된 알고리즘에 포함하므로 단독운전이 발생한 후 30 ms 만에 트립신호를 발생하였다. 두 번째 경우의 무효전력의 설정치는 0.0318 MVar이다. 두 번째 경우에도 마이크로그리드의 발전량과 부하량 사이에 큰 차이를 보이지므로 기존의 단독운전 검출 기법으로도 쉽게 판단이 가능하다.

3.2.3 마이크로그리드 부하량(μ_r)과 발전량(μ_s)이 유사한 경우

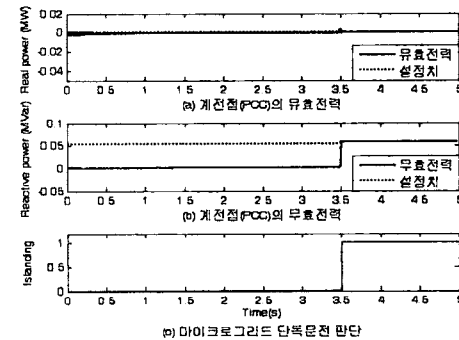
마지막 사례에서는 μ_r 와 μ_s 가 유사한 경우에서의 단독운전이다. 부하량과 발전량이 유사하므로 마이크로그리드에 포함된 부하들이 분산전원에 의해 필요한 전력을 대부분 공급받게 되어 단독운전 이후에도 발전량과 부하량 사이에 큰 변화가 나타나지 않는다. 따라서 기존의 단독운전 검출 알고리즘은 판단하기 곤란하다. 그러나 제안한 알고리즘은 이러한 경우에도 확실하게 마이크로그리드의 단독운전 판단이 가능하다. 마이크로그리드의 발전량을 1 MW로 제어하고, 부하량도 1 MW로 설정하였으며, 모의결과를 그림 5에 제시하였다. 그림에서 나타났듯이 단독 운전 이전의 계전점 유효전력은 -600 W이고 무효전력은 899 Var이다. 그러나 단독운전 후 계전점 전력은 유효전력이 -15 W, 무효전력이 0.059 MVar로 무효전력이 급격히 증가하여 제안된 알고리즘으로 단독운전 발생 후 24 ms 만에 단독운전 판단이 가능하다. 세 번째 경우의 케이블의 무효전력 설정치는 0.0587 MW이다.



〈그림 3〉 마이크로그리드 부하량보다 발전량이 큰 경우



〈그림 4〉 마이크로그리드 부하량보다 발전량이 작은 경우



〈그림 5〉 마이크로그리드의 부하량과 발전량이 비슷한 경우

4. 결 론

본 논문에서는 케이블의 무효전력을 이용한 마이크로그리드의 단독운전 판단 알고리즘을 제안하였다. 제안된 단독운전 판단 알고리즘은 유효전력이 일정 설정치 이하를 만족하고 무효전력이 케이블의 무효전력 부근으로 수렴하였을 경우에 마이크로그리드가 단독으로 운전하고 있는 것으로 판단하는 방식이다.

제안한 방식은 마이크로그리드의 부하량과 발전량의 차이가 큰 경우는 물론 작은 경우에 대해서도 신속히 단독운전을 판단하였다. 특히, 단독운전 전후의 부하변동이 적은 경우에는 기존의 단독운전 검출 알고리즘으로는 판단이 어렵지만 케이블의 무효전력을 고려한 단독운전 검출 방식은 정확한 단독운전 판단이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력선 행연구에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] R.H.Lasseter, "MicroGrids", Power Engineering Society Winter Meeting, 2002, vol. 1, pp. 305 - 308, Jan. 2002
- [2] F. Katiraei, M.R. Irvani, P.W. Lehn, "Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process", Power Delivery IEEE Transactions on Vol. 20(1), pp. 248 - 257, Jan. 2005
- [3] 장성일, 김광호, "분산 전원의 고품 운전 검출 기법의 개발", Trans. KIEE Vol. 50A(11), pp. 506 - 513, Nov. 2001