

시간영역에서의 유효/무효전력을 이용한 마이크로그리드의 단독운전의 판단 알고리즘

이영귀, 이해원, 김연희, 정태영, 강용철

전북대학교 전기공학과, 풍력에너지전력망기술연구센터, 스마트그리드연구센터

Islanding detection algorithm for a micro-grid based on the active and reactive power in the time domain

Young-Gui Lee, Hye-Won Lee, Yeon-Hee Kim, Tai-Ying Zheng, Yong-Cheol Kang

Chonbuk National University, Dept. of Electrical Engineering, WeGAT research center, Smart grid research center

Abstract - A micro-grid (MG) is usually interconnected to the main grid through the dedicated line. Immediately after the removal of the grid supply, the MG should be disconnected and remain disconnected until the main grid is re-energized. It should detect islanding condition as soon as it happens to adjust the setting of the protection relays in the MG. This paper proposes an islanding detection algorithm for the MG based on the active and reactive power delivered to the dedicated line in the time domain. The performance of the proposed algorithm is verified under islanding conditions and fault conditions using the PSCAD/EMTDC simulator. The results indicate that the proposed algorithm can discriminate the islanding conditions from the various fault conditions.

1. 서 론

현대의 배전시스템은 신재생에너지를 이용한 소형 분산전원을 연계하고 있으며, 환경적·기술적 요인으로 인하여 분산전원의 용량이 증가하고 있다. 최근에 분산전원의 단계에서 발전하여, 단독으로 담당 부하에 전력을 공급하고, 잉여시에는 주 그리드에 전력을 공급할 수 있는 마이크로그리드 형태의 소규모 전력시스템이 제안되고 있다.

마이크로그리드는 디젤발전기, 풍력, 태양광, 연료전지 등의 소형 분산전원과 자체 부하로 구성되어 있다. 대부분 전용연계선을 통해 그리드와 연계되어 그리드로부터 전력을 공급받거나 그리드로 전력을 공급할 수 있다. 그리드 사고 등으로 인해 전원이 상실된 경우, 그리드로부터 분리되어 단독운전이 가능한 특징을 가진다[1-2]. 이러한 특징은 그리드의 연계 유무에 따라 사고 시 사고전류 크기가 달라지므로 효과적인 보호를 위해 그리드의 연계 유무를 판별하여 마이크로그리드 내 보호 계전기의 설정값을 조절해야 한다.

기존 마이크로그리드의 단독운전 판단 알고리즘은 연계선으로 공급되어지는 복소전력을 이용하여 마이크로그리드의 단독운전을 판단한다[3]. 이 방법은 단독운전이 발생하면 PCC (Point of Common Coupling) 지점의 복소전력은 연계선의 파라미터로 인해 하나의 값으로 수렴하는 특징을 이용한다. PCC 지점에서 계산한 복소전력이 단독운전을 판단하는 트립영역 안으로 들어가면 단독운전이라 판단한다. 이 방법은 마이크로그리드의 발전량과 부하량이 거의 일치하는 경우에도 단독운전을 판단할 수 있는 장점으로 가지고 있다. 하지만 주파수 영역에서 복소전력을 계산하므로, 과도상태 시, 마이크로그리드의 발전원 특성으로 인하여 전압과 전류의 주파수가 기본 주파수와 심하게 달라지는 경우 계산 오차가 발생하는 문제점이 있다.

본 논문에서 시간영역에서 계산한 유효/무효전력을 이용하여 마이크로그리드의 단독운전 판단 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 연계선에 공급되는 유효/무효전력을 시간영역에서 계산하고, 그 값이 판단 영역에 수렴할 경우 단독운전이라 판단한다. 제안된 단독운전 판단 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 분산전원의 다양한 출력조건에 따른 단독운전과 사고의 위치에 따라 제안한 알고리즘에 성능을 검증하였다.

2. 시간영역에서 유효/무효전력을 이용한 단독운전 판단 알고리즘

그림 1은 마이크로그리드의 단독운전시, 연계선의 등가회로를 나타낸다. 이 경우에는 연계선에 사고가 발생한 경우가 아니므로, 연계선의 파라미터에 해당하는 값에 따라 달라지는 복소전력의 값을 갖게 된다. 측정 장비의 오차와 전압변동을 감안하면 복소전력의 값은 한 값이 아니고, 영역으로 존재하는데, 그림 2에 단독운전 판단에 사용되는 트립영역을 나타내었다. 제안한 방법은 부하변동과 과도 기간에서의 오동작을 방지하기 위해 계산한 유효/무효전력이 판단영역에서 1주기 이상 지속되면 단독운전을 판단한다.

2.1 계산한 유효/무효전력, $P_{cal}(t)$, $Q_{cal}(t)$

연계선을 통해서 그리드 방향으로 공급되는 3상 유효전력 $P_{cal}(t)$ 와 무효전력 $Q_{cal}(t)$ 는 PCC지점의 전압과 전류를 측정하여, 식 (1), (2)와 같이 계산한다. 여기서 $v_a(t)$, $v_b(t)$, $v_c(t)$ 와 $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$ 는 a, b, c상의 전압과 전류이다.

$$P_{cal}(t) = v_a(t)i_a(t) + v_b(t)i_b(t) + v_c(t)i_c(t) \quad (1)$$

$$Q_{cal}(t) = v'_a(t)i_a(t) + v'_b(t)i_b(t) + v'_c(t)i_c(t) \quad (2)$$

$$(v'_a, v'_b, v'_c: 90^\circ \text{ phase-delayed } v_a, v_b, v_c)$$

2.2 단독운전 판단조건인 트립영역

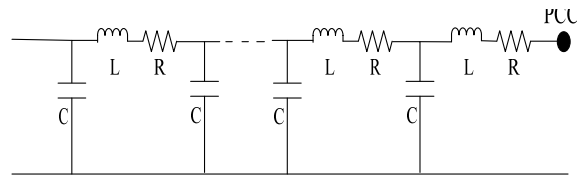
S_{ref} 는 단독운전 시 PCC 지점의 정격전압으로 계산한 복소전력이다. S_{ref} 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 연계선에 따라 파라미터가 달라지지만, 연계선이 결장이 되면 그 값은 상수이므로 S_{ref} 는 일정한 값을 갖는다. 여기서 $V_{rated, ll}$ 과 $Z_{l, e}$ 연계선의 정격전압과 선로임피던스이다.

$$S_{ref} = \frac{|V_{rated, ll}|}{Z_{l, e}^*} \quad (3)$$

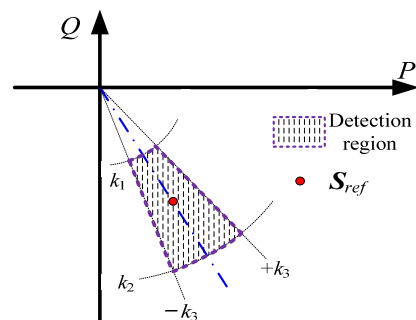
단독운전을 판단하는 트립영역은 설정 값에서 연계선에서의 전압변동과 계측기의 측정오차로 인해 영역으로 정해진다. 트립영역은 크기의 오차로 인한 범위와 위상의 오차에 의한 범위로 그림 2와 같이 나타난다. 크기에 대한 범위는 식 (4)에 나타내었고, 위상에 대한 범위는 식 (5)에 나타내었다. 전압변동률은 PCC지점에서의 정격전압에 $\pm 20\%$, 변류기와 전압 변성기 등의 측정오차는 크기오차 $\pm 12\%$, 위상오차 $\pm 15^\circ$ 를 고려하여 $k_1=0.5$, $k_2=1.8$ $k_3=15^\circ$ 로 정하였다.

$$k_1|S_{ref}| \leq \sqrt{P_{cal}^2(t) + Q_{cal}^2(t)} \leq k_2|S_{ref}| \quad (4)$$

$$\left| \tan^{-1} \frac{Q_{cal}(t)}{P_{cal}(t)} - \angle S_{ref} \right| \leq k_3^\circ \quad (5)$$



〈그림 1〉 연계선의 등가회로



〈그림 2〉 단독운전 판단 트립영역

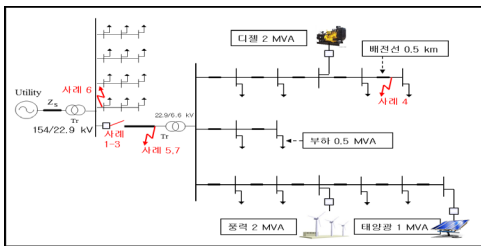
3. 사례 연구

3.1 마이크로그리드 모델링

제한한 단독운전 판단 알고리즘을 검증하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 그림 3과 같이 마이크로그리드를 모델링하였다. 모의한 계통은 22.9 kV 배전계통이며, 마이크로그리드는 디젤, 풍력, 태양광발전기와 부하로 이루어진 6.6 kV의 저압계통으로 전용선을 통해 계통과 연계하고 있다. 표 1에 제한한 알고리즘을 시험하기 위한 여러 가지 조건을 나타내었다. 단독운전을 모의하기 위해 계통 쪽 차단기를 개방한 시간은 0.1초이다.

3.2 사례 1: MG내의 발전량<부하량

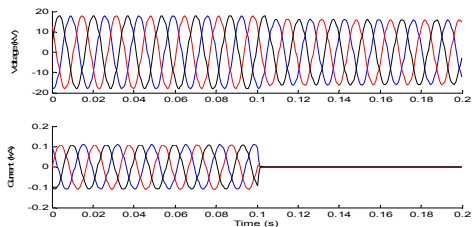
그림 4는 사례 1의 결과를 나타냈다. 사례 1은 마이크로그리드의 발전량이 부하량 보다 적어, 마이크로그리드는 계통으로부터 전력을 공급받는 상태이다. 즉, 단독운전 전 $P_{cal}(t)$, $Q_{cal}(t)$ 는 3사분면에 위치하며, 이는 마이크로그리드에서 연계선으로 공급하는 전력을 기준으로 설정했기 때문이다. 그림 4a는 PCC지점에서 측정된 전압, 전류이다. 단독운전 시, 전압의 크기는 약간 감소하고 전류는 거의 '0'의 값을 갖는다. 그림 4b는 $P_{cal}(t)$, $Q_{cal}(t)$ 의 궤적을 나타내며, $P_{cal}(t)$, $Q_{cal}(t)$ 가 트립영역으로 이동하였다. 트립영역에서 1주기 이상 지속되어 단독운전을 판단하며, 그림 4c와 같이 0.1235초에 트립신호를 발생하였다.



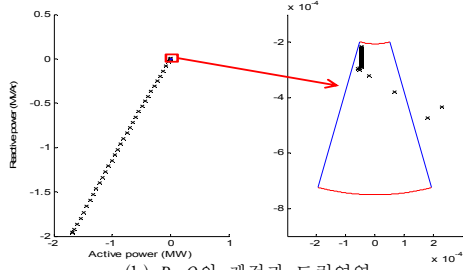
〈그림 3〉 마이크로그리드의 단독운전 판단 사례 모델 계통도

〈표 1〉 사례 연구에서 사용된 단독운전/사고 조건

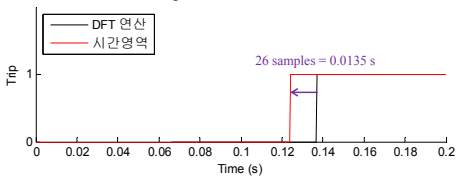
| 구분 | 사 례 | |
|---------|------|--------------|
| 단독운전 발생 | 사례 1 | 발전량<부하량 |
| | 사례 2 | 발전량≈부하량 |
| | 사례 3 | 발전량>부하량 |
| 사고 발생 | 사례 4 | 피더1 내부 3상 사고 |
| | 사례 5 | 연계선 3상 사고 |
| | 사례 6 | 인접 피더 3상 사고 |
| | 사례 7 | 연계선 A상 사고 |



(a) PCC지점의 전압, 전류



(b) P, Q의 궤적과 트립영역



(c) 트립 신호

〈그림 4〉 사례 1의 결과

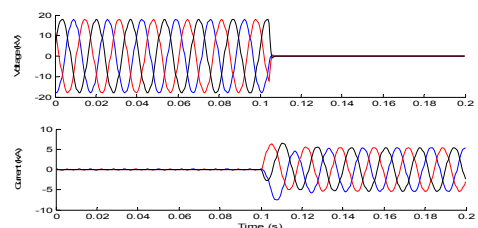
3.3 사례 5: 연계선 3상 사고

그림 5는 사례 5에 대한 결과를 나타낸다. 사례 5는 연계선에서 3상 사고를 모의하였다. 그림 5a는 PCC지점의 전압과 전류를 나타낸 그림으로, 사고 발생 시 전압은 크게 감소하고, 전류는 크게 증가하였다. 그림 5b에 나타난 $P_{cal}(t)$, $Q_{cal}(t)$ 의 궤적은 단독운전 상태와 다르게 큰 값으로 수렴하여 궤적이 트립영역으로 이동하지 않았다. 이는 단독운전이 아니라고 판단하고 그림 5c와 같이 단독운전 트립신호를 출력하지 않았다.

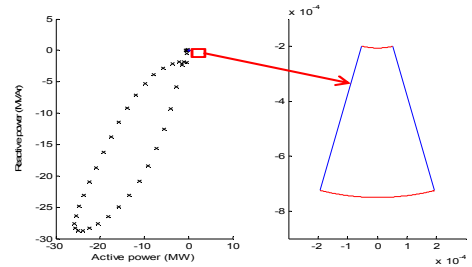
4. 결 론

본 논문에서 시간영역에서 계산한 유효/무효전력을 이용하여 마이크로그리드의 단독운전을 판단하는 알고리즘을 제안하였다. 제한한 알고리즘은 단독운전 발생 시 연계선에 공급되는 유효/무효전력을 시간영역에서 계산하여, 그 계산한 값이 단독운전 판단영역에 수렴할 경우 단독운전으로 판단한다.

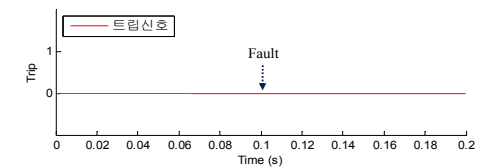
제한한 알고리즘은 연계선에서 전력의 변화량이 거의 없는 경우 단독운전 시에도 단독운전 검출이 가능하여 기존 수동적 검출기법의 한계를 극복하였으며, 시간영역에서의 유효/무효전력을 계산하여 주파수 변화로 인한 오차가 적다는 장점이 있다. 또한 단독운전 발생 시와 사고 발생 시에 대한 구분으로 단독운전을 명확하게 판단하였으며, 판단 속도도 빠르다.



(a) PCC지점의 전압, 전류



(b) P, Q의 궤적과 트립영역



(c) 트립 신호

〈그림 5〉 사례 5의 결과

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (과제번호: 2009T100100597)과 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 (과제번호: 2010-0029426) 지원을 받아 수행된 것임.

참고 문헌

- [1] F. Katiraei, M. R. Iravani, and P. W. Lehn, "Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process," *IEEE, Trans. on PWRD*, vol. 20, no. 1, pp. 248–257, Jan 2005
- [2] N. Jayawarna, N. Jenkins, M. Lorentzou, S. Papathanassiou and N. Hatziagyriou, "Safety analysis of a microgrid," *IEEE FPS 2005 IC*, pp. 1–7, Nov 2005
- [3] Y. C. Kang, S. H. Cha, S. I. Jang, B. M. Kim, and Y. G. Kim, "Islanding detection for the micro-grid considering the complex power," *International Workshop on Next Generation Regional Energy System Development*, Seoul, Korea, 24–27 Jan 2007