

Islanding Detection Based on Complex Power at the Intertie

姜龍澈^{*} · 車善熙[†] · 張成一^{**} · 姜海權^{***} · 金容均[§] · 朴君哲^{§§}

(Yong-Cheol Kang · Sun-Hee Cha · Sung-Il Jang · Hae-Gweon Kang · Yong-Gyun Kim ·
Goon-Cherl Park)

Abstract – A large scale embedded generator or a micro-grid is usually interconnected to the grid through the dedicated line. Immediately after the removal of the grid supply, it must be disconnected and remain disconnected until the normal grid supplies are restored. This paper proposes an islanding detection algorithm based on complex power at the intertie. Complex power at the intertie delivered to the grid has a value depending on power flow during normal operation. When loss of mains occurs, complex power at the intertie moves to a value depending on the parameters of the dedicated line. The performance of the proposed algorithm was investigated under various operating and fault conditions. The proposed algorithm can detect an islanding operation even if no power is exchanged prior to loss of mains and discriminate the fault condition from islanding.

Key Words : Complex Power, Islanding Detection, Dedicated line, and Intertie

1. 서 론

환경적·기술적 요인으로 인하여 현대의 배전 시스템은 소형 분산전원을 그리드에 연계하고 있으며, 지속적으로 증가하는 전력수요를 감당하기 위해 분산전원의 용량이 증가하고 있다. 용량이 큰 분산전원은 전용선을 통해 그리드에 직접 연계되고 있으며, 분산전원의 전력품질이 연계된 그리드의 전력 품질에 영향을 준다. 이에 따라 한국 전력공사의 분산전원 연계 규정에서는 고조파, 전압변동, 플리커 등 분산전원의 전력품질 허용범위를 정해 놓고 있으며, 분산전원의 단독운전 방지에 대한 규정도 포함하고 있다.

단독운전이란 연계된 그리드의 전원이 상실되어 분산전원 단독으로 전력을 공급하는 상태를 의미한다. 단독운전 발생 시에는 설비손상, 인명피해 등을 방지하기 위해 분산전원을 그리드로부터 신속히 분리하도록 명시되어 있다[1]. 따라서 분산전원을 그리드에 연계할 경우에는 단독운전 판단 기법이 필요하다.

한편, 최근에 분산전원 단독으로 부하에 전력을 공급할 수 있는 마이크로그리드 형태의 소규모 전력시스템이 제안되고 있다. 마이크로그리드는 분산전원과 자체 부하로 구성

되며 대부분 전용선을 통해 그리드와 연계되고, 그리드로부터 전력을 공급받거나 공급할 수 있으며, 그리드 전원이 상실된 경우에도 단독 운전이 가능한 특징을 가진다[2-4]. 그런데 그리드와의 연계 유무에 따라 마이크로그리드내의 고장전류의 크기가 달라지므로, 마이크로그리드 내 보호 계전기의 설정값이 그리드 연계 유무에 따라 달라져야 한다. 따라서 마이크로그리드의 보호를 위해 단독운전을 검출할 수 있는 기법이 필요하다.

기존의 단독운전 판단기법은 크게 능동적인 기법과 수동적인 기법으로 구분된다. 능동적인 기법은 분산전원의 출력을 조절하여 출력 변화에 대한 응답을 모니터링 하여 단독운전을 판단하는 방법으로 reactive export error detector와 fault level monitor 등이 있다[5]. 이 방식은 단독운전 발생 시 출력 변화에 대한 응답이 분명하므로 단독운전 판단기법으로는 뛰어나지만, 전력품질 저하의 원인이 될 수 있다. 또한 마이크로그리드의 경우에는 여러 대의 발전기가 포함되어 있으므로 단독운전 판단기법으로 적용하기 어렵다.

수동적인 기법은 단독운전 전후의 파라미터 즉, 전압의 크기나 위상, 주파수 등의 변화를 계측하여 설정 값 이상 변화하는 경우에 단독운전이라 판단한다[6, 7]. 이 방식은 추가적인 제어회로가 불필요하며, 계통의 품질에 영향 주지 않는 장점이 있다. 하지만, 단독운전 전후의 파라미터의 변화량이 적은 경우에는 단독운전을 판단하기 어렵다.

본 논문에서는 연계점에서의 복소전력을 이용한 단독운전 판단 기법을 제안한다. 제안한 방식은, 연계점에서 그리드로 공급되는 복소전력은 조류의 상태에 따라 다른 값을 갖지만, 단독운전 발생 시에는 전용선에 공급되는 복소전력만이 존재하므로, 복소전력 값이 일정한 값으로 수렴하는 특성을 이용한다. 제안된 알고리즘을 검증하기 위해 PSCAD/EMTDC

* 正 會 員 : 全 北 大 電 子 情 報 工 學 部 副 教 授
 † 교신저자, 學生會員 : 全 北 大 電 氣 工 學 科 碩 士 課 程
 E-mail : sh991219@chonbuk.ac.kr
 ** 正 會 員 : 全 北 大 電 氣 工 學 科 研 究 教 授
 *** 學生會員 : 全 北 大 電 氣 工 學 科 碩 士 課 程
 § 非 會 員 : 韓 國 IED Eng. 代 表 理 事
 §§ 非 會 員 : 東 京 大 原 子 核 工 學 科 教 授
 接受日字 : 2008年 7月 11日
 最終完了 : 2008年 10月 29日

를 이용하여 마이크로그리드의 다양한 운전상태와 사고 상태에서 제안한 방식의 성능을 검증하였다.

2. 연계점에서의 복소전력을 이용한 단독운전 판단기법

연계점에서 전용연계선을 통해서 그리드 방향으로 공급되는 복소전력은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$S_{cal} = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* \quad (1)$$

여기서 V_a, V_b, V_c 와 I_a, I_b, I_c 는 각각 A, B, C상의 전압, 전류이다.

S_{cal} 은 운전 상태에 따라 다른 값을 가지며, 연계되어 있는 경우 이 값에는 그리드로 공급되는 복소전력과 전용연계선으로 공급되는 복소전력을 포함한다.

하지만, 단독운전 발생시에는 그리드의 차단기가 개방되므로 S_{cal} 은 전용 연계선에 공급되는 복소전력이 되므로, 일정한 값을 갖게 된다. 따라서 S_{cal} 이 일정한 값이 되면 단독운전이라고 판단한다. 그림 1에 제안한 방식의 흐름도를 나타내었다.

제안한 알고리즘의 트립영역은 변류기, 전압 변성기 등의 계측 오차가 없는 경우에는, 전압 변동률만을 고려하였을 경우에 그림 2에서 점선위에 존재한다. 그런데, 실 계통에 적용하기 위해서는 계측 오차를 고려하여야 하고, 이 경우에는 그림 2와 같이 트립영역을 나타낼 수 있으며, 이를 식 (2)와 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_1 |S_{ref}| \leq |S_{cal}| \leq k_2 |S_{ref}| \quad (2)$$

$$|\angle S_{cal} - \angle S_{ref}| \leq k_3^\circ \quad (3)$$

여기서 S_{ref} 는 단독운전 상태를 판단하는 설정 값, k_1, k_2, k_3 는 여유를 나타내는 요소이다.

S_{ref} 는 식 (4)로 표현되며, 전용연계선의 파라미터에 따라 다른 값을 가짐을 알 수 있다. 연계선의 파라미터는 상수이므로, S_{ref} 는 일정한 값을 갖는다.

$$S_{ref} = \frac{|V_{rated, ll}|^2}{Z_{line}^*} \quad (4)$$

여기서 $V_{rated, ll}$ 는 연계점의 정격전압, Z_{line} 는 전용선의 선로 임피던스이다.

트립영역의 범위를 결정하는 k 는 연계점에서의 전압변동과 계측기의 측정오차를 고려하여 결정하였다. 본 논문에서 전압변동률은 정격전압의 $\pm 20\%$, 계측기의 측정오차는 크기 오차 $\pm 12\%$, 위상오차 $\pm 11^\circ$ 를 고려하여 $k_1=0.56, k_2=1.61, k_3=11$ 로 정하였다[8-9].

본 논문에서는 정상상태 시의 부하변동 또는 과도기간에 오동작을 방지하기 위해, 단독운전 상태의 복소전력 값이 트립 영역에 1주기 이상 지속될 때 단독운전을 판단하도록 하였다.

3. 사례 연구

제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여, 그림 3과 같은 시스템을 모의하였다. 제안한 알고리즘은 분산전원 또는 마이크로그리드에 적용할 수 있는데, 본 논문에서는 마이크로그리드의 경우에 적용하였다. 그림 3의 시스템은 모델 시스템은 22.9 kV 배전계통인 강원도 횡계 계통이며, 마이크로그리드는 발전기 1대와 부하로 이루어진 6.6 kV의 저압계통이다. 전용선은 가공선로 ACSR 58mm², 1km로 구성하여 그리드와 연계하였다. PSCAD/EMTDC 시뮬레이터를 이용하여 모델링하였으며, 연계점에서의 3상 전압, 전류를 생성하였고, 샘플링 비율은 주기 당 32샘플, 버티컬스 2차 중첩방지 필터를 사용하였고, 저지영역 차단 주파수는 960Hz이다.

3.1 단독운전 시

제안한 알고리즘을 검증하기 위해 마이크로그리드의 다양한 출력조건에서 단독운전을 모의하였고, 단독운전을 위해 그리드 쪽 차단기를 개방한 시간은 0.1 초이다.

3.1.1 사례 1: 마이크로그리드의 발전량 < 부하량

사례 1은 단독운전 발생이전의 마이크로그리드의 발전량이 0.675 MVA, 부하량이 0.9 MVA로 발전량이 부하량보다 적어 그리드로부터 전력을 공급받고 있는 상태이다. 즉, 단독운전 전 S_{cal} 은 3사분면에 위치한다.

그림 4는 사례 1에 대한 결과를 나타낸다. 그림 4a는 연계점에서의 전압, 전류를 나타낸다. 단독운전 발생시, 전압은

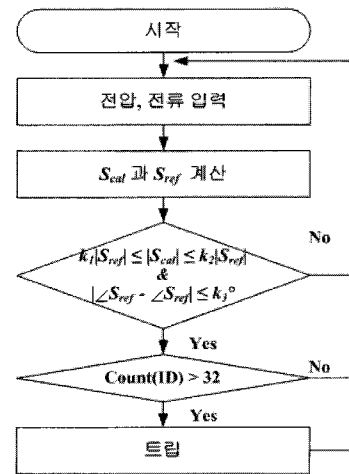


그림 1 제안한 방식의 흐름도

Fig. 1 Flow chart of the proposed algorithm

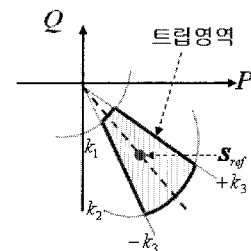


그림 2 트립영역

Fig. 2 Trip region

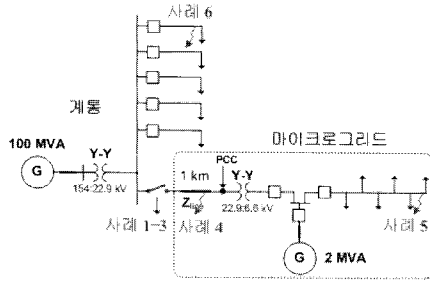
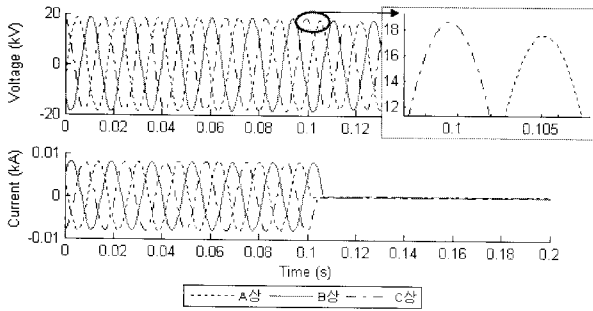
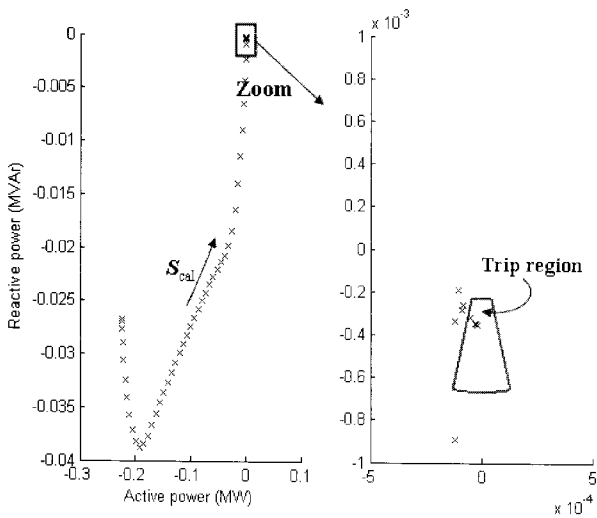


그림 3 모델 시스템의 단선도
Fig. 3 Single-line diagram of the simulated system

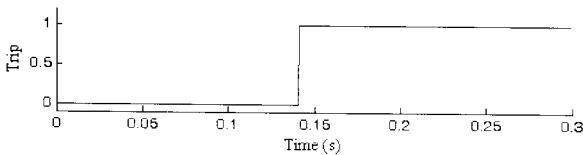
약간 감소하나, 전류는 거의 '0'이 되었다. 그림 4b는 S_{cal} 과 트립영역을 나타내며, 단독운전이 발생한 후에, S_{cal} 는 3사분면에서 트립영역으로 이동하였다. 제안한 단독운전 판단기법은 그림 4c와 같이 0.1413s에 단독운전을 판단하여 트립신호를 발생하였다. 이는 단독운전 발생 후 2.5주기 내이다.



(a) 연계점에서의 전압, 전류



(b) S_{cal} 과 트립영역



(c) 트립 신호

그림 4 사례 1의 결과
Fig. 4 Results for Case 1

연계점에서의 복소전력을 이용한 단독운전 판단기법

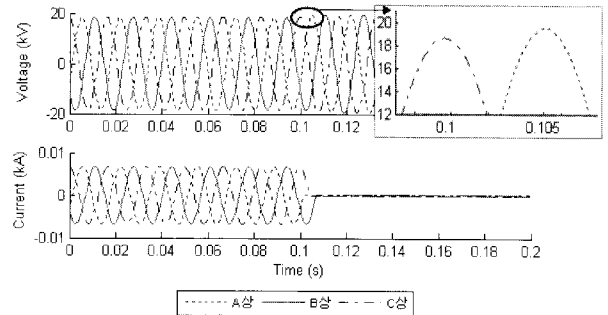
3.1.2 사례 2: 마이크로그리드의 발전량 > 부하량

사례 2는 마이크로그리드의 발전량이 1.05 MVA, 부하량이 0.9 MVA으로 발전량이 부하량보다 크므로 마이크로그리드의 잉여전력을 그리드로 공급하는 상태이다. 따라서 단독운전 전 S_{cal} 은 1사분면에 위치한다. 그림 5는 사례 2에 대한 제안한 단독운전 판단 알고리즘의 결과를 나타낸다.

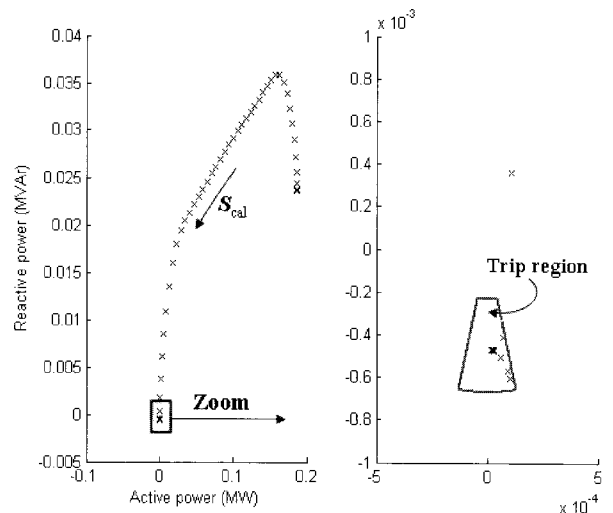
그림 5a에서 보듯이 단독운전 후에 전압은 약간 증가하였고, 전류는 거의 '0'으로 감소하였다. 단독운전 후에, S_{cal} 는 1사분면에서 트립영역으로 이동하였으며, 그림 5c와 같이 0.141s에 트립신호를 발생하였다.

3.1.3 사례 3: 마이크로그리드의 발전량 ≈ 부하량

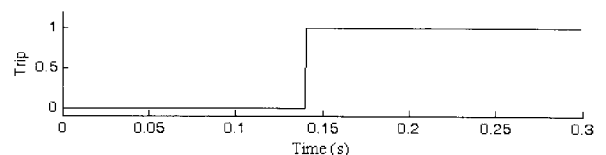
사례 3은 마이크로그리드의 발전량이 0.914 MVA, 부하량이 0.9 MVA으로, 발전량이 부하량과 유사하여 마이크로그리드와 그리드 사이의 전력 교환이 거의 없는 상태 즉, S_{cal} 의 유효전력이 '0'에 가까운 값이다. 그림 6은 사례 3에 대한 결과를 나타낸다. 그림 6a의 단독운전 후에 전압의 크기가



(a) 연계점에서의 전압, 전류



(b) S_{cal} 과 트립영역



(c) 트립 신호

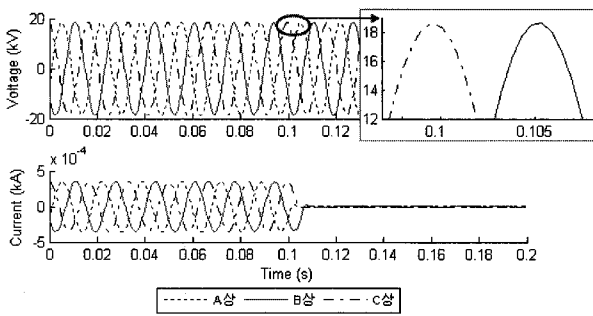
그림 5 사례 2의 결과
Fig. 5 Results for Case 2

같으나 전류는 거의 '0'이 된다. 그러므로 그림 6b와 같이 S_{cal} 은 단독운전 후에 1사분면에서 트립영역 안으로 이동하였다. 따라서 제안한 알고리즘은 단독운전 발생 후 0.04s 후인 2.4주기 안에 트립신호를 발생하였다.

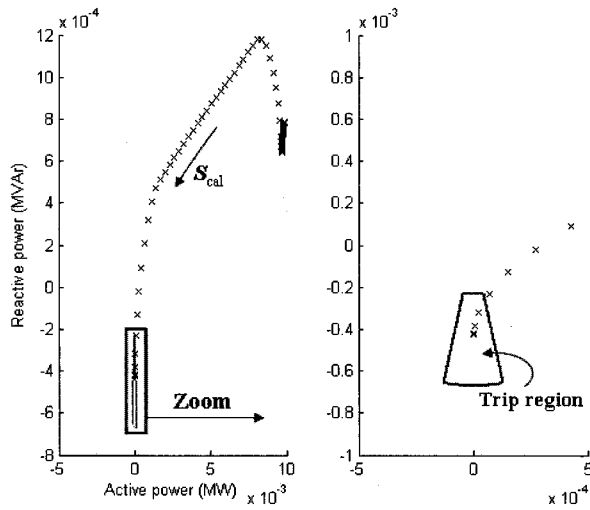
사례 3의 경우에는 단독운전 후에 전압의 크기, 위상, 주파수의 변동이 작아 기존의 단독운전 판단기법으로는 단독운전을 판단하기 어렵다. 하지만, 제안한 알고리즘은 이 경우에도 성공적으로 마이크로그리드의 단독운전을 판단할 수 있었다.

3.2 사고 발생시

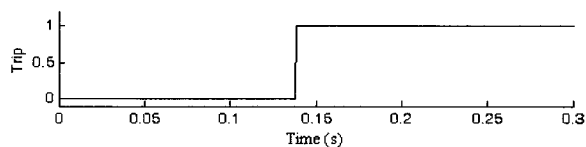
단독운전 판단 기법은 연계선 또는 그리드 내의 사고 발생 시 트립하지 않아야 한다. 제안한 단독운전 판단 알고리즘이 사고 시 오동작하지 않음을 검증하기 위해 사고 위치를 달리하여 다양한 사고를 모의하였다(그림 3 참조). 사고 전 정상상태는 사례 1과 같으며, 사고 종류는 A상 지락, 사고 발생시간은 0.1 초이다.



(a) 연계점에서의 전압, 전류



(b) S_{cal} 과 트립영역



(c) 트립 신호

그림 6 사례 3의 결과
Fig. 6 Results for Case 3

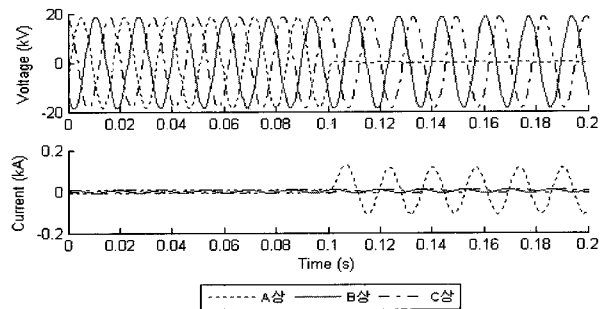
3.2.1 사례 4: 연계선로 0.5 km, A상 지락 사고

사례 4는 마이크로그리드로부터 0.5 km 떨어진 연계선로에서 A상 지락사고를 모의하였다. 사고 전 마이크로그리드의 출력은 사례 1과 같으므로, S_{cal} 은 사고 전에 3사분면에 위치한다. 그림 7은 사례 4에 대한 결과를 나타낸다.

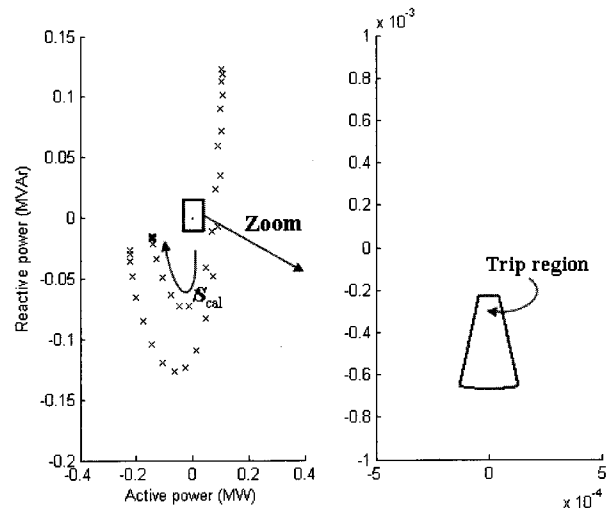
그림 7a와 같이 A상 지락사고 발생 시, A상 전압, 전류는 크게 감소, 증가하였다. 그림 7b에서 보듯이 S_{cal} 은 트립영역으로 이동하지 않았다. 따라서 그림 7c와 같이 제안한 알고리즘은 연계선에서의 사고를 단독운전으로 판단하지 않아 트립신호를 발생하지 않았다.

3.2.2 사례 5: 마이크로그리드의 배전계통 1 km, A상 지락 사고

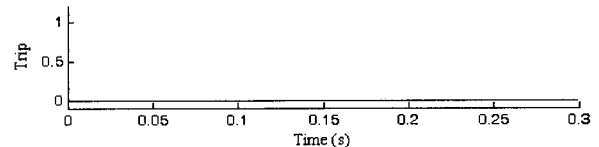
사례 5는 마이크로그리드의 발전기로부터 1 km 떨어진 마이크로그리드의 배전계통에서 A상 지락사고를 모의하였고, 사고 전 S_{cal} 은 사례 1과 같다. 그림 8은 사례 5에 대한 결과를 나타낸다. 그림 8a에서 보듯이 마이크로그리드의 배



(a) 연계점에서의 전압, 전류



(b) S_{cal} 과 트립영역



(c) 트립 신호

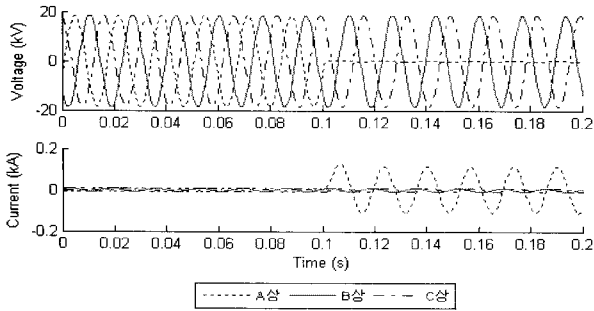
그림 7 사례 4의 결과
Fig. 7 Results for Case 4

전계통에서 A상 지락 사고 시, A상 전압은 감소하였으며, 전류는 크게 증가하여, S_{cal} 은 트립영역 안으로 이동하지 않았다. 그림 8b에서 정상상태의 S_{cal} 값이 S_{ref} 값과 유사하게 보이는 것은 사고 상태의 복소전력 값이 정상상태 복소전력 값과 차이가 크므로 나타난 결과이다. 그림 8c에 나타난 바와 같이 단독운전이라 판단하지 않아 트립신호를 발생하지 않았다.

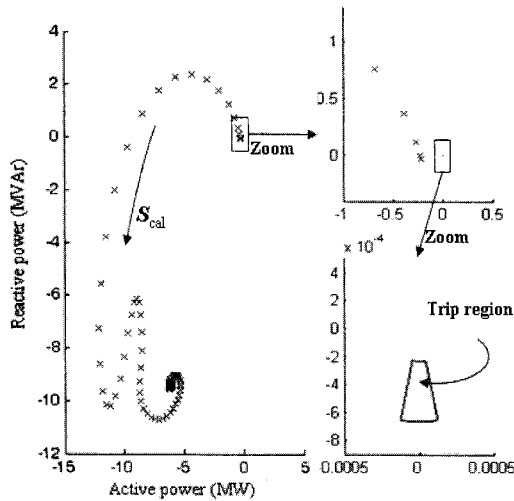
3.2.3 사례 6: 인접선로 13.8 km, A상 지락 사고

사례 6은 인접선로의 13.8km 지점에서 A상 지락사고를 모의하였고, 사고 전 S_{cal} 은 사례 1과 같다. 그림 9는 사례 6에 대한 결과를 나타낸다.

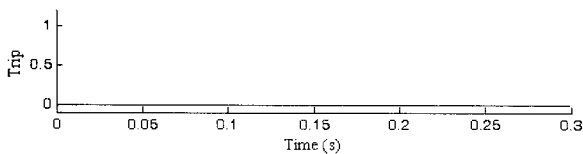
그림 9a의 인접선로에서 A상 지락 사고 후, A상 전압은 약간 감소하였고, 전류는 증가하였다. 그림 9b의 S_{cal} 은 사고 후에 3사분면에서 2사분면으로 이동하였다. 예상했듯이 S_{cal} 은 S_{ref} 과의 차이가 큰 차이가 났으며, 최종 트립신호를 발생하지 않았다.



(a) 연계점에서의 전압, 전류



(b) S_{cal} 과 트립영역



(c) 트립 신호

그림 8 사례 5의 결과
Fig. 8 Results for Case 5

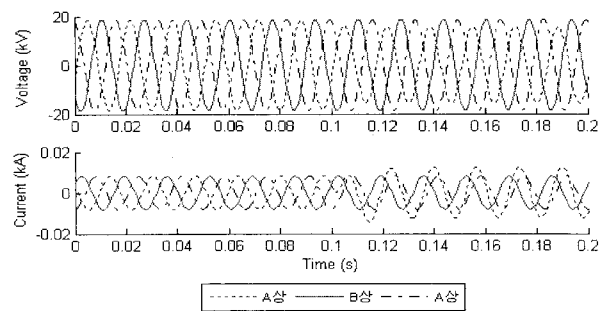
4. 결 론

본 논문에서는 분산전원 또는 마이크로그리드가 전용연계선을 통하여 그리드와 연계되어 있는 경우, 연계점에서의 복소전력을 이용한 단독운전 판단기법을 제안하였다. 제안한 방식은 연계점의 복소전력을 모니터링 하여, 복소전력 값이 단독운전 상태의 복소전력 값인 설정 값에 수렴할 때 단독운전으로 판단하였다.

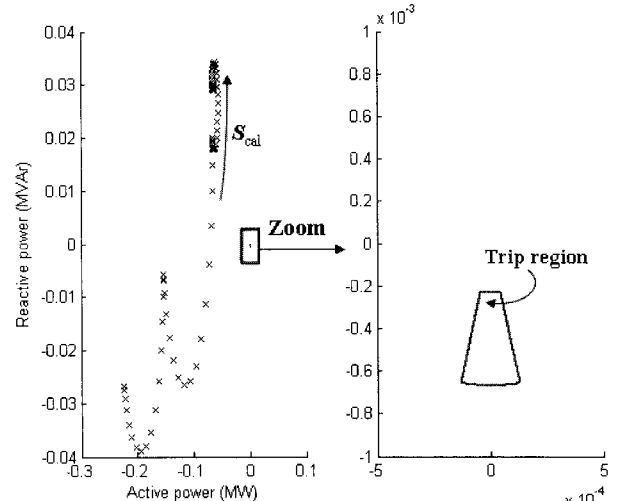
제안된 단독운전 판단 방식의 성능을 검증하기 위해 PSCAD/EMTDC 시뮬레이터를 이용하여 마이크로그리드의 다양한 출력에 따른 단독운전과 사고 위치를 달리 하여 A상 지락사고를 모의 하여 성능을 검증하였다.

모의 결과 마이크로그리드의 다양한 출력 상태에서 단독운전 발생 시 단독운전을 정확히 판단하였으며, 사고 발생 시에는 오동작하지 않았다.

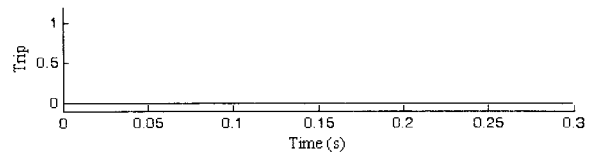
제안한 방식은 단독운전 전후의 전력량 변화가 큰 경우뿐 아니라 변화량이 거의 없는 경우에도 단독운전 검출이 가능



(a) 연계점에서의 전압, 전류



(b) S_{cal} 과 트립영역



(c) 트립 신호

그림 9 사례 6의 결과
Fig. 9 Results for Case 6

하다. 또한 단독운전의 전후의 파라미터의 변화를 계산하지 않고 현재의 순간의 복소전력 값만을 기반으로 하기 때문에 적용이 용이한 장점이 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-B-100) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] 한국전력공사, "분산형 전원 배전계통 연계 기술기준", pp. 4-9, 2005년 4월
- [2] R.H. Lasseter, "Micro-grids", IEEE PES 2002 WM, vol. 1, pp. 305-308, Jan. 27-31, 2002
- [3] F. Katiraei, M.R. Iravaniand, 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
- [4] N. Jayawarna, N. Jenkins, M. Lorentzou, S. Papathanassiou and N. Hatziagyriou, "Safety analysis of a microgrid", IEEE FPS 2005 IC, pp. 1-7, Nov. 16-18, 2005
- [5] M.A. Redferm, O. Usta and G. Fielding, "Protection against loss of utility grid supply for a dispersed storage and generation unit", IEEE Trans. on PWRD, vol. 8, no. 3, pp. 948-954, July 1993
- [6] P.O. Kane and B. Fox, "Loss of mains detection for embedded generation by system impedance monitoring", IEE DPSP Sixth IC, no. 434, pp. 95-98, March 25-27, 1997
- [7] S.I. Jang and K.H. Kim, "Development of a new islanding detection method for distributed resources", KIEE Trans. vol. 50A, no. 11, pp. 506-513, Nov. 2001
- [8] KS C IEC Std 60044-1, "Instrument transformers - Part 1 : Current transformers", 2003
- [9] KS C IEC Std 60044-2, "Instrument transformers - Part 2 : Inductive voltage transformers", 2003

저 자 소 개



강 용 철 (姜 龍 澈)

1964년 8월 2일생. 1991년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재, 전북대 공대 전자정보 공학부 부교수.

Tel : 063-270-2391
 Fax : 063-270-2394
 E-mail : yckang@chonbuk.ac.kr



차 선 희 (車 善 熙)

1983년 2월 12일생. 2006년 전북대 공대 전자정보공학부 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).

Tel : 063-270-2391
 Fax : 063-270-2394
 E-mail : sh991219@chonbuk.ac.kr



장 성 일 (張 成 一)

1971년 8월 30일생. 1996년 강원대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전북대 공대 전자정보 공학부 BK21연구교수

Tel : 063-270-2391
 E-mail : sijang@chonbuk.ac.kr



강 해 권 (姜 海 權)

1982년 5월 16일생. 2008년 전북대 공대 전자정보공학부 졸업. 2008년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 063-270-2391
 E-mail : khgforever@chonbuk.ac.kr



김 용 균 (金 容 均)

1973년 7월 4일생. 1993년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2005년~현재 한국IED Eng. 대표이사

Tel : 02-529-2113
 Fax : 02-571-9207
 E-mail : codacoda@naver.com



박 군 철 (朴 君 哲)

1952년 7월 29일생. 1975년 서울대 공대 원자핵공학과 졸업. 1997년 동 대학원 원자핵공학과 졸업(석사). 1983년 Rensselaer Polytechnic Institute (RPI) 대학원 원자핵공학과 졸업(공학박사). 현재, 서울대 공과대학 원자핵공학과 교수.

Tel : 02-880-7210
 E-mail : parkgc@snu.ac.kr