

역상분 전압 주입을 이용한 태양광 인버터의 단독 운전 검출

김병헌[†], 박용순¹, 설승기¹, 김우철², 이현영³

Anti-islanding Detection of Photovoltaic Inverter Based on Negative Sequence Voltage Injection to Grid

Byeong-Heon Kim, Yong-Soon Park, Seung-Ki Sul,
Woo-Chull Kim, and Hyun-Young Lee

Abstract - This paper presents an active anti-islanding detection method using negative sequence voltage injection to the grid through a three-phase photovoltaic inverters. Because islanding operation mode can cause a variety of problems, the islanding detection of grid-connected photovoltaic inverter is the mandatory feature. The islanding mode is detected by measuring the magnitude of negative sequence impedance calculated by the negative sequence voltage and current at the point of common coupling. Simulation and experimental test are performed to verify the effectiveness of the proposed method which can detect the islanding mode in the specified time. The test has been done in accordance with the condition on IEEE Std 929-2000.

Keywords: anti-islanding detection, negative sequence voltage injection, negative sequence equivalent circuit, photovoltaic systems

1. 서 론

태양광 인버터 등의 분산 전원에서 ‘단독 운전 (Islanding)’이란, 분산 전원이 부하와 함께 독립된 계통 시스템의 일부분을 이루고, 이 일부분이 나머지 전력 계통 시스템과 전기적으로 분리된 채 분산 전원이 부하에 에너지를 공급하고 있는 운전 상태를 말한다^[1].

단독 운전 상황은 전로 관리자들의 안전사고를 초래할 수 있으며, 계통과 분리되어 위상 정보를 손실하여, 재접속 시 위상차(out of phase)로 인한 단락 사고 등의 2차 사고를 일으킬 수 있다. 또한 태양광 인버터가 계통의 전압의 크기와 주파수를 제어할 수 없다는 특성으로 인하여, 단독 운전 발생 시 계통의 전압이 변동되며, 이로 인해 연결된 부하에 손상을 입힐 수 있다. 이러한 이유로 계통 연계형 인버터는 단독 운전 상황 발생 시,

반드시 이를 검출할 수 있어야 하며 제한된 시간 안에 인버터에 의한 에너지 공급을 중단하도록 요구된다.

기존에 연구된 인버터 내장형 단독 운전 검출 방법 (Inverter resident method)은 수동형(Passive method)과 능동형(Active method)으로 분류된다^[2].

수동형 검출 방법은 계통 시스템의 상수 변화를 감지하여 단독 운전을 검출한다. 계통의 전압이나 주파수가 동작 범위를 벗어나는 것을 검출하는 릴레이 (OUF/OUV)가 대표적인 수동형 검출 방법이다. 순간적인 위상 변이나 계통 전압의 고조파 성분 변동 등을 검출하여 단독 운전을 검출하는 방법도 제안되었다^[2,3]. 수동형 방법의 경우 즉각적 검출이 가능하지만, 검출 불가능한 영역(NDZ, Non-Detection Zone)이 필히 존재한다.

이에 반해, 능동형 검출 방법은 인버터의 특정한 신호 주입에 따른 반응을 관찰하여 단독 운전을 검출하는 방식으로^[4], 주입 후 나타나는 반응을 양성 피드백에 이용하거나 주입 신호를 바탕으로 계통 시스템 상수를 추정할 수도 있다. 수동형 방법에 비해 NDZ를 줄일 수 있지만, 신호를 주입하여 전고조파 왜율(THD) 증가나, 역률 보상의 문제를 야기한다.

계통의 시스템 상수를 추정하기 위해서 고주파 전압을 주입하거나^[5], 전류를 주입^[6,7]할 수도 있다. 전류를 주입하는 경우 별도의 제어기를 구성하여야 한다. 고조파 전압을 주입하는 경우, 계통 공진이나 필터 공진 등

Paper number: TKPE-2012-17-6-11 ISSN: 1229-2214

[†] Corresponding author: heon13@eepel.snu.ac.kr, Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

Tel: +82-2-880-7251 Fax: +82-2-878-1452

¹ Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

² P-Development Team, LG Uplus Corp.

³ PLASPO

Manuscript received Feb. 2, 2012; accepted Sep. 17, 2012

— 본 논문은 2011년 추계학술대회 우수추천논문임

을 고려하여 주입 주파수를 결정해야 하는 어려움이 있다. 게다가 부하에 캐패시터 부하가 있는 경우 주입 효과가 감소하여 단독 운전 검출 성능이 저하된다.

본 논문에서는 역상분 전압 주입 후, 계통과의 접속점 (PCC, Point of Common Coupling)에서의 역상분 임피던스를 관측하는 단독 운전 검출 방법을 제안한다. 계통 주파수의 역상분을 주입하기 때문에 공진에 대한 고려가 필요 없으며, 부하에 의해 주입 효과가 감소하지 않아 단독 운전 검출 성능에 영향을 받지 않는다. 또한 제안된 방법은 단독 운전으로 인한 전압 변동과 계통 사고로 인한 전압 변동을 구별할 수 있다.

먼저, 제안된 방법을 구현하기 위해 사용된 방법을 설명하고, 검출 원리를 소개한다. IEEE Std 929-2000에 제시된 단독 운전 시험 회로를 이용해 모의실험과 실험으로 단독 운전 검출의 유효성을 검증하였다. 또한 모의 실험을 통해 계통 사고에 의한 전압 변동을 구별할 수 있음을 검증하였다.

2. 제안된 단독 운전 검출 방법

그림 1은 본 연구에서 제안할 단독 운전 검출 방법을 적용할 3상 계통 연계형 태양광 인버터가, 고조파 필터를 거쳐 변압기를 통해 계통과 연결된 시스템을 도식으로 나타낸 것이다.

제안된 단독 운전 검출 방법은 태양광 인버터를 통해 역상분 전압을 주입하고, 계통과의 접속점에서 추출한 역상분 전압/전류를 바탕으로 역상분 임피던스를 추정한다. 그리고 추정된 역상분 임피던스를 기준으로 단독 운전을 검출하게 된다.

2.1 역상분 전압 주입

역상분 전압은 태양광 인버터를 이용해 합성하여 주입한다. 계통 위상각에 동기화된 정상분 동기 좌표계를 $d^f - q^f$ 라 정의할 수 있으며, 이 좌표계와는 반대 방향, 같은 속도로 회전하는 역상분 동기 좌표계를 $d^e - q^e$ 를 정의할 수 있다. 그림 2는 설정된 좌표계를 나타내며 $d^s - q^s$ 는 기준 정지 좌표계를 나타낸 것이다.

주입할 역상분 전압은 역상분 동기 좌표계 상에 임의의 일정 전압을 인가하여 구현할 수 있다. 주입하는 전압의 각을 임의로 결정할 수 있으며, 간단히 역상분 동기 좌표계 d축에 주입하는 경우 식 (1)과 같은 복소수 벡터로 나타낼 수 있다. 이를 식 (2)와 같이 정지 좌표계 상으로 변환하고, 식 (3)과 같이 전류 제어기 출력에 더하여 최종 출력 전압 지령을 생성한다.

$$\vec{V}_{dq, neg}^{-e*} = V_{d, neg}^{-e*} + jV_{q, neg}^{-e*} = V_{neg, inj} \quad (1)$$

$$\vec{V}_{dq, neg}^{s*} = \vec{V}_{dq, neg}^{-e*} e^{-j\theta} = V_{neg, inj} e^{-j\theta} \quad (2)$$

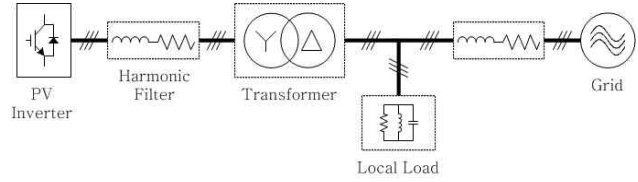


Fig. 1 System configuration

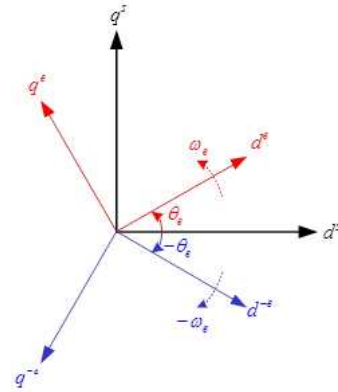


Fig. 2 Positive/negative sequence synchronous reference frame

$$\vec{V}_{dq}^{s*} = \vec{V}_{dq, CC}^{s*} + \vec{V}_{dq, neg}^{s*} \quad (3)$$

전압형 인버터를 사용하는 경우, 전압을 주입하는 경우, 별도의 제어기를 구성하지 않고 바로 전압을 합성할 수 있다. 또한, 주입하는 역상분 전압은 계통의 주파수와 같으므로 부하에 의한 추가 공진 성분이나 고조파 필터에 의한 공진 성분을 고려할 필요가 없다. 고조파 전압을 주입하는 경우, 캐패시턴스 부하에 의해 주입 성능이 저하되나, 계통 주파수의 역상분을 주입하는 경우 이러한 주입 성능의 저하가 발생하지 않는다는 장점이 있다.

2.2 역상분 임피던스 추정

역상분 전압을 계통에 주입한 후, 계통과의 접속점에서의 역상분 전압과 역상분 전류를 추출한 후 역상분 임피던스를 추정한다. 단독 운전 상황이 발생하게 되면 이 역상분 임피던스의 값이 변동하게 되며, 이를 통해 단독 운전을 검출할 수 있다. 역상분 임피던스의 크기는 접속점에서 추출한 역상분 전압과 역상분 전류의 크기 비를 통해 식 (4)와 같이 계산한다.

$$|\vec{Z}_{pcc, neg}| = \left| \frac{\vec{V}_{pcc, neg}}{\vec{I}_{pcc, neg}} \right| \quad (4)$$

여기서 $\vec{Z}_{pcc, neg}$ 는 역상분 임피던스, $\vec{V}_{pcc, neg}$ 는 추출한 역상분 전압, $\vec{I}_{pcc, neg}$ 는 추출한 역상분 전류를 의미한다. 정상분 성분에 의한 2고조파 성분, 잡음 등에 의한 영향

을 줄이기 위해서 저역 통과 필터(Low Pass Filter) 혹은 이동 평균 필터(Moving Average Filter)를 사용할 수 있다.

역상분 전압과 역상분 전류는 접속점에서 측정된 3상 선간 전압과 상전류로부터 식 (5), (6)와 같이 추출할 수 있다^[8].

$$\begin{bmatrix} V_{ab0} \\ V_{ab1} \\ V_{ab2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ 이며, 변수의 아랫 첨자에 0, 1, 2는 각각 영상분, 정상분, 역상분을 의미한다.

역상분은 3상 평형이므로 식 (5)와 (6)에서 얻은 *a-b* 상 선간 전압과 *a*상 전류의 역상분에 120도 위상 차이를 줌으로써 나머지 선간 전압과 상전류를 구할 수 있다. 식 (7)과 (8)은 3상 평형 역상분 선간 전압과 상전류를 구한 것이다. 수식의 복소수 *j*는 전역 통과 필터(All Pass Filter, APF)를 이용하여 구현하였다.

$$\begin{bmatrix} V_{ab2} \\ V_{bc2} \\ V_{ca2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} V_{ab} + \frac{1}{2\sqrt{3}} j(V_{ca} - V_{bc}) \\ -V_{ab2} - V_{ca2} \\ \frac{1}{2} V_{ca} + \frac{1}{2\sqrt{3}} j(V_{bc} - V_{ab}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} I_{a2} \\ I_{b2} \\ I_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} I_a + \frac{1}{2\sqrt{3}} j(I_c - I_b) \\ -I_{a2} - I_{c2} \\ \frac{1}{2} I_c + \frac{1}{2\sqrt{3}} j(I_b - I_a) \end{bmatrix} \quad (8)$$

역상분 임피던스의 크기를 추정하면 결국 정상분 임피던스의 크기를 추출하는 것과 같다^[11]. 정상분 임피던스의 크기는 접속점에서 관측한 계통 측의 임피던스의 크기와 같으므로, 추정된 역상분 임피던스는 접속점에서 관측한 계통 측 임피던스와 같게 된다. 즉, 역상분 임피던스의 추정은 계통 측 임피던스의 추정과 같게 된다.

2.3 역상분 등가 회로 분석

제안한 방법은 추정된 역상분 임피던스의 크기 변동을 이용해 단독 운전을 검출하게 된다. 각 운전 상태에 따른 역상분 임피던스의 크기는 역상분 등가 회로를 구성하여 분석 하였다.

그림 1의 시스템에서 인버터는 이상적으로 역상분 전압을 합성한다고 가정할 수 있으며, 역상분 전압원으로 등가 표현할 수 있다. 고조파 필터는 RL 회로로 등가 표현할 수 있다. 고조파 필터로 LCL 필터를 사용하는

경우, 필터에 사용된 캐패시터는 계통 주파수에서 임피던스의 크기가 상대적으로 크게 나타나므로 무시할 수 있으며, L필터와 같이 RL 회로로 등가 표현할 수 있다. 변압기는 이상적이라 가정하여 내부 임피던스를 무시하였다. 계통 전압이 3상 평형이라면, 역상분 전압을 생성하지 않게 되므로 역상분 등가 회로에서는 생략할 수 있다. 최종적으로 그림 3과 같이 역상분 등가회로를 구성할 수 있다.

1) 계통 연결 상황

계통이 연결되어 있는 정상 동작 상태에서는 통상 부하의 임피던스가 계통의 임피던스보다 비교적 큰 값을 갖게 되어 부하의 임피던스를 무시할 수 있게 된다. 이 경우 등가 회로는 그림 4와 같이 나타낼 수 있으며, 이때 역상분 임피던스는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$|\vec{Z}_{pcc, neg}| = |\vec{Z}_g| \quad (9)$$

2) 단독 운전 상황

단독 운전이 발생하는 경우 계통 측이 차단되므로 역상분 등가 회로를 그림 5와 같이 구성할 수 있으며, 이 경우 계통 임피던스가 보이지 않고, 역상분 임피던스의 크기는 부하의 임피던스 크기와 같아 식 (10)과 같이 나타낼 수 있게 된다.

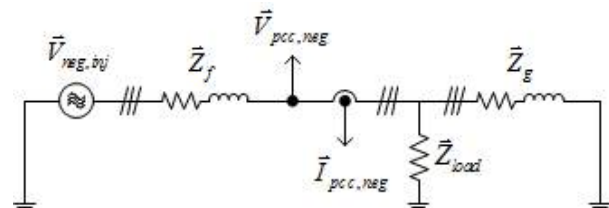


Fig. 3 Negative sequence equivalent circuit

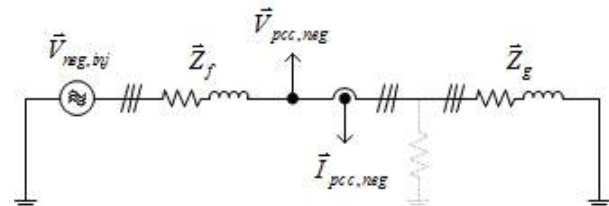


Fig. 4 Negative sequence equivalent circuit - normal operation

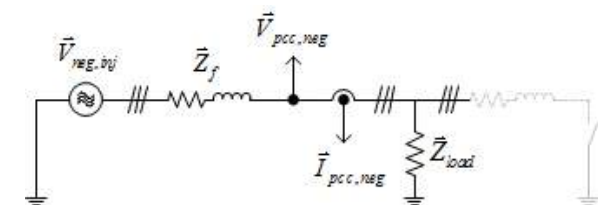


Fig. 5 Negative sequence equivalent circuit - Islanding operation

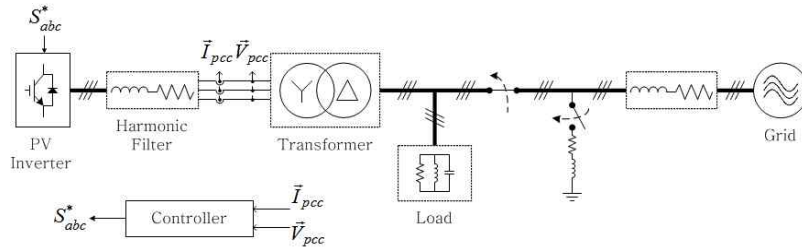


Fig. 7 System configuration for simulation and experiment

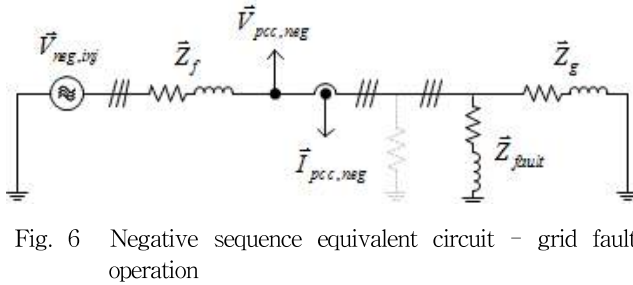


Fig. 6 Negative sequence equivalent circuit - grid fault operation

Table 1 System parameters on simulation

Output Power	5 kVA	Transformer	220Δ -140Y V
V _{grid}	220 V _{rms}	f _{grid}	60 Hz
R _f	0.4 Ω	L _f	1.5 mH
R _{load}	9.68 Ω	L _{load}	10.3 mH
C _{load}	685.1 μF	V _{neg.inj}	0.8V

3. 모의실험 결과

3.1 시스템 구성

제안한 방법을 검증하기 위하여 그림 7과 같은 시스템을 구성하여 모의실험을 시행하였다. 단독 운전 모의를 위한 차단기와 사고 상황 모의를 위한 분류 회로가 구성되어 있다. 모의실험에 사용한 시스템 상수는 표 1에 정리하였다.

기존의 전류 제어기를 그대로 사용할 경우, 주입 역상분 전압에 의한 반응 역상분 전류가 전류 제어기에 의해 영향을 받기 때문에 역상분 임피던스의 추정이 제대로 이루어 지지 않는다. 그림 8과 같이 정상분만을 추출하여 전류 제어기를 구성하여 사용하면 역상분 임피던스를 보다 정확하게 추정할 수 있다.

3.2 단독 운전 상황 모의

그림 9, 10은 PSIM을 이용한 단독 운전 상황 모의실험 결과다. 정격 출력을 내보내고 있는 정상 동작 중 단독 운전이 발생하였으며 IEEE Std 929-2000의 규정에 해당하는 RLC 병렬 회로를 부하로 설정하여 모의하였다.

단독 운전 발생 시점은 1.5초로, 그림 9에서와 같이 효과적으로 차단됨을 알 수 있다. 단독 운전 발생 전 인버터에서 공급하는 전류의 양과 부하에서 소비하는 전류의 양을 거의 같게 맞추어 계통 측의 입력 전류는 작은 양만 존재한다.

그림 10에서 볼 수 있듯이 1.5초에 단독 운전이 발생한 후 추정된 역상분 임피던스의 크기가 급격히 증가하며, 2.3절에서 예상한 것과 같이 저항의 크기와 같게 된다. RLC 부하는 변압기의 계통 측에 연결되기 때문에 인버터 측에서 관측되는 저항의 크기는 3.92 Ω이며, 그림 9의 추정된 임피던스의 크기 역시 3.92에 수렴한다. 단독 운전 발생 후, 추정된 임피던스의 크기는 계통이

$$|\bar{Z}_{pcc,neg}| = |\bar{Z}_{load}| \quad (10)$$

특히, 규정에서 제시하는 단독 운전 시험 부하는 RLC 병렬 회로이며, LC에 의한 무효 전력 성분은 상쇄되므로 실제 측정되는 부하 임피던스는 저항 성분이라고 할 수 있다. 따라서 단독 운전 발생 시 추정된 역상분 임피던스의 크기는 단독 운전 부하 중 저항의 크기와 같게 된다.

부하의 임피던스의 크기는 통상 계통 임피던스의 크기보다 훨씬 큰 값을 가지므로 단독 운전 발생 시 역상분 임피던스의 크기는 급격히 커지게 된다. 이러한 계통 크기 변화를 판단하는 기준은 각종 규정에서 단독 운전 검출을 위해 제시하는 값^{1[9]}을 이용할 수도 있다.

3) 계통 지락 사고 시

단독 운전으로 인해서 전압 변동이 발생할 수 있으나, 계통에서 일어날 수 있는 각종 사고로 인하여 접속점에서 전압 변동이 일어날 수도 있다. 최근 20MW 미만의 태양광 인버터에도 LVRT 규정을 적용하려는 추세에 있다. 이러한 계통 사고 시에는 규정에 따른 적절한 대응을 하여야 한다^{10[10]}. 따라서 계통 사고로 인한 전압 변동과 단독 운전으로 인한 전압 변동을 구별할 수 있어야 한다.

계통 지락 사고는 역상분 등가 회로에서 계통 임피던스에 병렬로 연결되는 '사고 임피던스'로 모델링할 수 있으며, 그림 6과 같이 등가 회로를 나타낼 수 있다. 사고 발생 시 역상분 임피던스의 크기는 정상 동작 상태에 비해 작아지므로 단독 운전으로 검출하지 않게 된다. 즉, 제안한 방법으로 계통 사고에 의한 전압 변동과 단독 운전에 의한 전압 변동을 구별할 수 있게 된다.

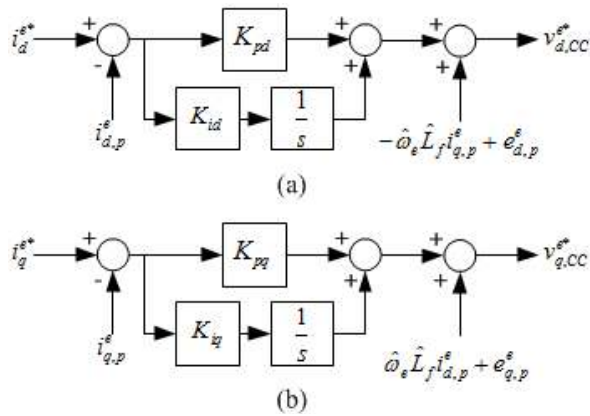


Fig. 8 (a) *d*-axis positive sequence current controller
(b) *q*-axis positive sequence current controller

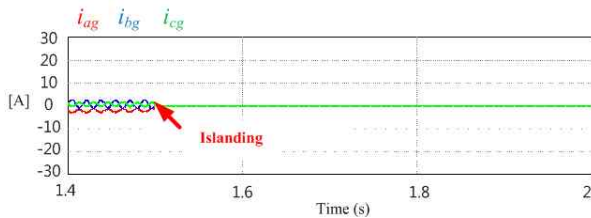


Fig. 9 Islanding simulation

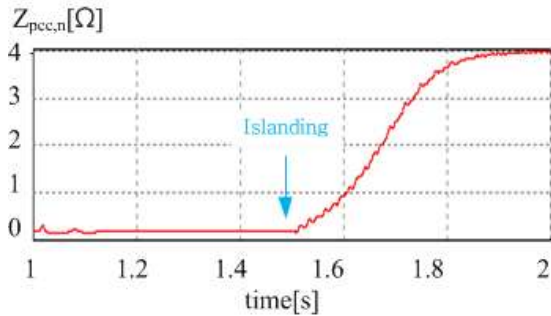


Fig. 10 Anti-islanding detection with proposed method - variation of magnitude of negative sequence impedance

연결 되었을 때보다 훨씬 큰 값이 된다. 이 차이를 통해 단독 운전을 검출할 수 있다.

3.3 계통 사고 상황 모의

그림 11은 가장 빈번히 일어나는 단상 지락 사고를 모의한 것으로, 계통 전압 강하 60%를 만들도록 설정하였다.

1.5초에 단상 지락 사고가 발생하였지만, 추정된 임피던스의 크기가 단독 운전으로 검출할 만큼의 변화를 일으키지 않는다. 따라서 계통 사고에 단독 운전으로 반응하지 않기 때문에, 사고에 의한 전압 변동과 단독 운전으로 인한 전압 변동을 효과적으로 구별할 수 있음을 확인 하였다.

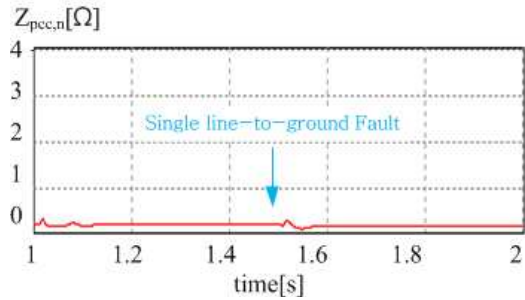


Fig. 11 Single line-to-ground fault

Table 2 System parameters on experiment

Output Power	5 kW	Transformer	220Δ -140Y V
V _{grid}	220 V _{rms}	f _{grid}	60 Hz
R _{load}	9.8 Ω	L _{load}	10.3 mH
C _{load}	685 μF	V _{neg.inj}	0.6V

4. 실험 결과

그림 12와 같이 단독 운전 시험 회로를 구성한 후, 실험을 통해 제안한 방법의 단독 운전 검출 성능을 확인하였다. 표 2는 실험에 사용한 시스템 상수를 나타내었다.

그림 13은 단독 운전 검출 시험의 결과를 나타낸 것이다. 계통이 연결되어 있을 때, 계통에 존재하는 역상분 전압의 크기가 작으므로 추출한 역상분 전압이 작은 값을 유지한다. 추정된 역상분 임피던스 역시 작은 값을 유지한다.

계통이 차단되어 계통의 입력 전류가 0이 되는 순간, 주입한 역상분 전압에 의해 부하에 역상분 전압이 인가되며, 그림 13의 그림과 같이 추출한 역상분 전압이 상승하게 된다. 추정된 역상분 임피던스의 크기 역시 급격히 증가하는 것을 관찰할 수 있으며, 인버터 측으로 환산된 부하 저항의 크기 3.96 Ω에 수렴하게 된다. 추정된 역상분 임피던스의 크기가 단독 운전 이전과 구별할 수 있을 만큼 증가하므로 이를 바탕으로 단독 운전을 검출할 수 있게 된다.

5. 결 론

본 논문에서는 계통 주파수의 역상분 성분을 이용해 계통 연계형 태양광 인버터에서 단독 운전을 검출하는 방법을 제안하였다. PWM 전압형 인버터에 의해 계통에 역상분 전압을 주입하며, 계통 접속점에서의 역상분 임피던스를 추정하여 단독 운전을 검출한다. 역상분 전압 주입은 역상분 동기 좌표계를 구성하고, 좌표계 상에 일정 전압을 주입함으로써 구현한다. 단독 운전 검출의 기준이 되는 역상분 임피던스는, 계통 접속점에서 추출한 역상분 전압과 역상분 전류의 비로 추정한다. 또한, 전

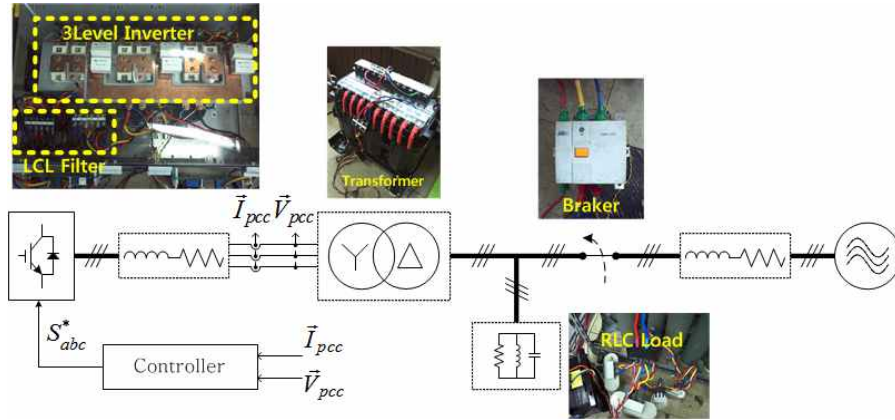


Fig. 12 Test configuration for islanding test

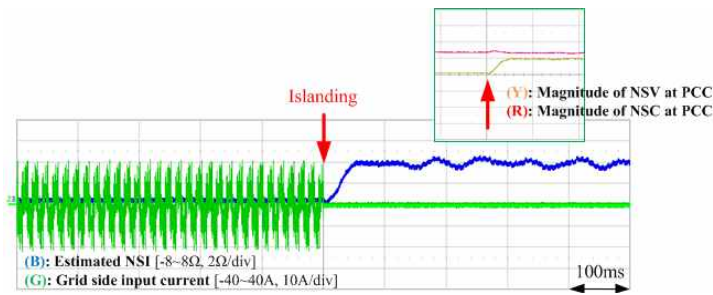


Fig. 13 Anti-islanding detection test result of proposed method

류 제어가 역상분 전압 주입 효과에 영향을 미치지 않도록 정상분만을 추출하여 사용하도록 수정되었다.

제안한 방법을 적용하였을 때, 운전 상태에 따른 역상분 임피던스의 변화는 역상분 등가 회로를 이용해 분석되었다. 정상 동작 상태인 경우 역상분 임피던스는 계통 임피던스와 같게 된다. 단독 운전이 발생하는 경우, 역상분 임피던스는 정상 상태와 구별할 수 있을 만큼 증가하여 단독 운전으로 판단할 수 있었다. 계통 사고로 인해 전압 변동이 일어난 경우에는 역상분 임피던스가 감소하는 방향으로 변화하여 단독 운전으로 검출되지 않으며, 단독 운전으로 인한 전압 변동과 계통 사고로 인한 전압 변동을 구별할 수 있었다.

제안한 방법은 모의실험 및 실험을 통해 성능을 검증하였다. 단독 운전 시험은 IEEE Std 929-2000에서 제시한 부하 조건을 따랐다. 모의실험 및 실험을 통해 제안한 방법으로, 각 규정에서 제공하는 시간 내에 단독 운전을 검출할 수 있음을 확인하였다. 또한, 모의실험을 통해 제안한 방법을 적용하였을 때, 계통 사고 상황에서는 검출 기준이 되는 역상분 임피던스의 변화가 단독 운전 상황과 반대로 일어나며, 계통 사고와 단독 운전에 의한 전압 변동을 구별할 수 있었다.

이 논문은 LG 유플러스의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [1] *IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems*, IEEE Std 929-2000.
- [2] R.Teodorescu, M.Liserre, and P.Rodriguez, "Islanding Detection," in *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, Chichester, West Sussex:Wiley, 2011.
- [3] H. M. Oh, S. W. Choi, T. H. Kim, G. P. Lee, and T. W. Lee, "Anti-islanding Method by Harmonic Injection for Utility Interactive Inverter with Critical Load," *Transactions of Korean Institute Power Electronics*, Vol. 17, No. 4, pp 315-321, Aug. 2012.
- [4] F.D.Mango, M.Liserre and A.D.Aquila, "Overview of Anti-Islanding Algorithms for PV Systems. Part II: Active Methods," in *Proc. EPE-PEMC*, Portoroz, Slovenia, pp. 1884.1889, Aug. 2006.
- [5] D.Reigosa, F.Briz, C.Banco, P.Garcia and J.M.Guerrero, "Active Islanding Detection Using High Frequency Signal Injection," *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 2183-2190, 2011.
- [6] G. Hernandez-Gonzalez, and R. Iravani, "Current Injection for Active Islanding Detection of Electronically-Interfaced Distributed Resources," *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 21, No. 3, Jul. 2006.
- [7] H. Karimi, A. Yazdani and R. Iravani, "Negative-Sequence Current Injection for Fast Islanding

Detection of a Distributed Resources," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 23, No. 1, Jan. 2008.

- [8] S. J. Lee, J. K. Kang and S. K. Sul, "A new phase detecting method for power conversion systems considering distorted conditions in power system," in *IEEE Industrial Application (IAS) Annual Meeting Conference Record*, pp. 2167-2172, 1999.
- [9] DIN-VDE, "Automatic Disconnection Device Between a Generator and the Low-Voltage Grid," DIN-VDE Std 0126-1-1, 2005.
- [10] H. J. Shin and S. K. Sul, "LVRT Control Strategy of Grid-connected Wind Power System," *Transactions of Korean Institute Power Electronics*, Vol. 16, No 2, pp 182-190, Apr. 2011.
- [11] P.M.Anderson, "Symmetrical Components," in *Analysis of Faulted Power Systems*, Piscataway, NJ:IEEE Press, 1995.

부 록

3상 시스템에서 불평형 전압이나 불평형 전류는 2개의 평형 성분인 정상분, 역상분 그리고 1개의 영상분으로 분해할 수 있다^[11]. 각 상의 임피던스와 상호 임피던스를 고려하여 *abc*상의 임피던스를 행렬로 표현할 수 있으며, 이를 정상분, 역상분, 영상분의 임피던스 행렬로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{012} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}$$

수동 소자의 경우 *abc*상의 임피던스 행렬이 대칭이므로 다음과 같이 정리할 수 있게 된다.

$$Z_{012} = \begin{bmatrix} Z_{S0} + 2Z_{M0} & Z_{S2} - Z_{M2} & Z_{S1} - Z_{M1} \\ Z_{S1} - Z_{M1} & Z_{S0} - Z_{M0} & Z_{S2} - 2Z_{M2} \\ Z_{S2} - Z_{M2} & Z_{S1} + 2Z_{M1} & Z_{S0} - Z_{M0} \end{bmatrix}$$

임피던스 행렬에서 요소 (2,2) 성분과 (3,3) 성분은 각각 정상분 임피던스, 역상분 임피던스를 의미하며, 그 값이 같다. 제안한 방법에 의해 역상분 임피던스를 추정하는 것은 정상분 임피던스를 추정하는 것과 같다.



김병헌(金炳憲)

1988년 11월 16일생. 2010년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 2012년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기컴퓨터공학부 박사과정.



박용순(朴容淳)

1985년 11월 26일생. 2008년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 2010년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.



설승기(沈承基)

1958년 5월 13일생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1986년~1988년 University of Wisconsin, Madison 연구원. 1988년~1990년 LG산전 책임연구원. 2003년~2004년 Yaskawa Electric Corp. 상임연구고문. 1991년~현재 서울대 전기컴퓨터공학부 교수. 2005년~2007년 서울대 공대 부학장. 2008년~2011년 기초전력원 원장. 2011년 ICPE'11 General Chairman. 현재 서울대 전기정보공학부 교수.



김우철(金祐徹)

1976년 9월 12일생. 2003년 수원대 정보통신공학과 졸업. 현재 LG유플러스 P개발팀 과장.



이현영(李賢寧)

1976년 11월 19일생. 2002년 울산대 제어계측공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기전자공학부 졸업(석사). 2004년~현재 (주)플러스포 기술연구소 차장.