

# 역상분 전압 주입을 이용한 태양광 인버터의 단독 운전 검출

김병헌\*, 박용순\*, 설승기\*, 김우철\*\*, 이현영\*\*\*

\*서울대학교 \*\*LG 유플러스 \*\*\*PLASPO

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

Byeong-Heon Kim\*, Yong-soon Park\*, and Seung-Ki Sul\*,

Woo-chull Kim\*\*, Hyun-young Lee\*\*\*

\*Seoul National University \*\*LG Uplus \*\*\*PLASPO

### ABSTRACT

본 논문에서는 3상 태양광 인버터의 단독 운전 검출 방법을 제안한다. 국내의 규정에서 10MW 미만의 태양광 인버터는 제한된 시간 내에 단독 운전을 검출하여 계통에 에너지 공급을 중단할 것을 요구한다. 제안된 단독 운전 검출 방법은 역상분 전압 주입 후 접속점(PCC, Point of Common Coupling)에서 관측되는 역상분 임피던스의 크기 변화에 근거한다. 제안된 검출 방법의 원리와 구현 기법을 제시하고, IEEE Std. 929-2000을 기준으로 유효성을 검증한다. 제안된 방법은 국내의 규정에서 요구하는 검출 시간 이내에 단독 운전을 검출할 수 있고, 단독 운전을 계통 지락 사고와 구별할 수 있으므로 계통 연계 시 요구되는 그리드 코드(Grid code)에 대한 대응도 가능하다.

### 1. 서 론

태양광 인버터의 발전 상황에서 계통의 분리를 감지하지 못한 채 에너지 공급을 지속하는 단독 운전이 발생할 수 있다. 단독 운전은 선로 관리자들의 안전사고를 초래할 수 있으며, 재접속 시 위상 차(out of phase)로 인한 단락 사고를 일으킬 수 있다. 이러한 이유로 각종 규정에서는 단독 운전 상황 발생 시 제한된 시간 안에 인버터에 의한 에너지 공급을 중단하도록 요구한다.

기존의 인버터 내장형 단독 운전 검출 방법(Inverter resident method)은 수동형(Passive method)과 능동형(Active method)으로 분류된다. 수동형 검출 방법은 계통 시스템의 상수 변화를 감지하여 단독 운전을 검출한다. 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 수동형 방법에 비해 NDZ를 줄일 수 있지만, THD 증가나, 역률 보상의 문제를 야기한다.

본 논문에서는 역상분 전압 주입 후, 접속점에서의 역상분 임피던스를 관측하는 단독 운전 검출 방법을 제안한다. 제안된 방법의 원리와 구현 기법을 소개하고, IEEE Std 929-2000<sup>[1]</sup>에서 제시된 단독 운전 시험 회로를 이용해 모의실험과 실험으로 그 유효성을 검증하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 동작 원리 및 구현 기법

본 절에서는 회로 이론을 이용한 모델링을 통해서 구현 원

리를 설명하고 구현 기법에 대해서 서술한다.

#### 2.1.1 동작 원리

그림 1은 제안된 방법의 동작 원리를 설명하기 위한 역상분 등가 회로를 도식적으로 나타낸 것이다. 계통이 이상적인 3상 평형인 경우 역상분 전압은 나타나지 않으며, 변압기와 계통 임피던스는 RL 회로로 모델링할 수 있다. 단독 운전 시 나타나는 부하는 RLC 회로로 모델링할 수 있다. 필터의 경우 L필터, LCL필터 등이 사용될 수 있으며 계통 주파수와 같이 낮은 주파수 영역에서는 RL 회로로 모델링 될 수 있다. 역상분 전압을 합성하는 태양광 인버터는 역상분 전압원으로 모델링할 수 있다.

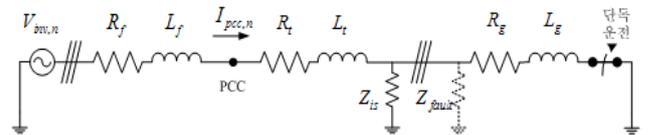


그림 1 제안된 방법의 역상분 등가 회로

Fig. 1 Negative sequence component equivalent circuit of proposed method

인버터에 의해 주입되는 역상분 전압으로 인해 계통에는 역상분 전류가 흐르게 된다. 이 때 PCC를 기준으로 역상분 전압과 전류를 추출하면, PCC 이후의 임피던스에 의한 전압 강하와 주입된 전압에 의한 전류가 측정된다. 이렇게 측정된 역상분 전압과 전류의 비를 이용하여, 다음과 같이 역상분 임피던스의 크기를 계산할 수 있다.

$$Z_{pcc,n} = \left| \frac{V_{pcc,n}}{i_{pcc,n}} \right| \quad (1)$$

일반적으로 부하의 임피던스는 계통 임피던스에 비해 훨씬 큰 값을 가지므로 계통 연결 시 PCC에서 관측되는 임피던스는 변압기와 계통 임피던스를 더한 값으로 근사될 수 있다.

$$Z_{pcc,n} = |Z_t + Z_g| \quad (2)$$

단독 운전 상황은 그림 1의 스위치가 차단되는 상황으로, 이 때 접속점에서 관측되는 임피던스는 변압기와 PCC 임피던스의 합으로 나타난다. 따라서 PCC 임피던스의 영향으로 관측되는 역상분 임피던스가 급격히 증가하며, 이를 통해 단독 운전을 판단할 수 있다.

$$Z_{pcc,n} = |Z_t + Z_{is}| \quad (3)$$

계통 지락 사고 상황은 계통 임피던스에 병렬로 임피던스가

추가되는 것으로 해석할 수 있으므로, PCC에서 관측되는 임피던스의 크기는 단독 운전 상황에 비해 여전히 작게 유지 된다. 그로 인해 계통 사고를 단독 운전 상황과 구별할 수 있어 향후 태양광 인버터에 적용될 그리드 코드에 대응할 수 있다.

### 2.1.2 구현 기법

역상분 전압 주입은 역상분 동기 좌표계 상에서 직류 전압을 주입하는 방식으로 구현할 수 있다. 전역 통과 필터(All pass filter)를 이용한 정상분 추출 방법<sup>[2]</sup>을 활용하면, PCC에서 측정된 전압과 전류의 역상분을 추출할 수 있다. 그 후 역상분 동기좌표계에서 저역 통과 필터를 사용하면 각각의 직류 성분만을 추출할 수 있어 역상분 임피던스를 계산할 수 있다.

## 2.2 모의실험 및 실험 결과

모의실험과 실험에서 사용한 시스템 상수는 표 1에 정리하였으며, 그림 2와 같은 IEEE Std. 929-2000에서 제공하는 단독 운전 시험 회로를 통해 제안한 방법의 유효성을 검증했다.

표 1 시스템 상수 값

Table 1 System parameters

$V_{grid}$	220V <sub>rms</sub>	$f_{grid}$	60Hz	변압기	220Δ-140Y V
$R_f$	0.4Ω	$L_f$	1.5mH	인버터 용량	5kVA
$R_{load}$	9.68Ω	$L_{load}$	10.3mH	$C_{load}$	685.1μF

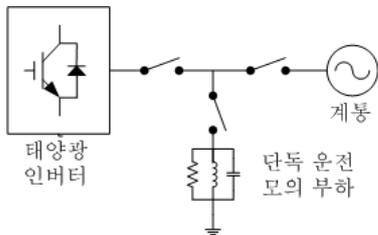


그림 2 단독 운전 시험 회로 - IEEE Std. 929-2000

Fig 2 Nonislanding inverter test circuit - IEEE Std. 929-2000

### 2.2.1 모의 실험 결과

그림 3은 PSIM을 이용한 모의 실험 결과이며 정상 동작 중 1.5초에 단독 운전이 발생한 상황을 나타낸 것이며, 역상분 임피던스의 값이 급격히 증가하는 것을 관측할 수 있다.

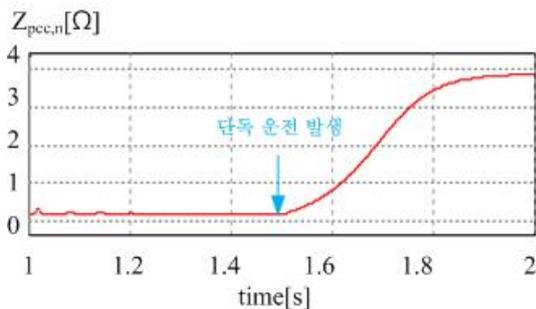


그림 3 제안한 방법의 단독 운전 검출 결과 - 역상분 임피던스의 크기 변화

Fig 3 Anti-islanding detection of proposed method - magnitude variation of negative sequence impedance

그림 4는 가장 빈번히 일어나는 단상 지락 사고를 모의한 것으로 단독 운전의 경우와 비교할 때 역상분 임피던스의 크기 변화가 크지 않음을 알 수 있다.

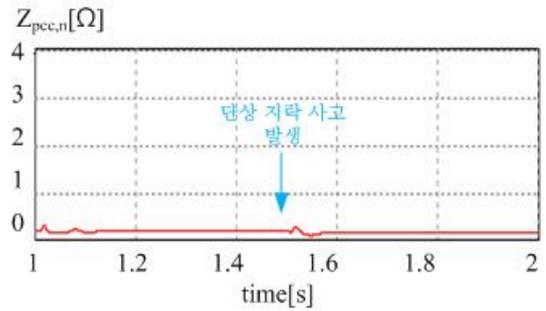


그림 4 단상 지락 사고 시 역상분 임피던스의 크기 변화

Fig 4 Single line-to-ground fault

### 2.2.2 실험 결과

그림 5는 단독 운전 시험 회로를 구성한 후, 실제 실험을 통해 얻은 파형이다. 계통이 차단되어 계통 입력 전류가 0이 되는 순간 역상분 임피던스의 크기가 급격히 증가하는 것을 관찰할 수 있다.

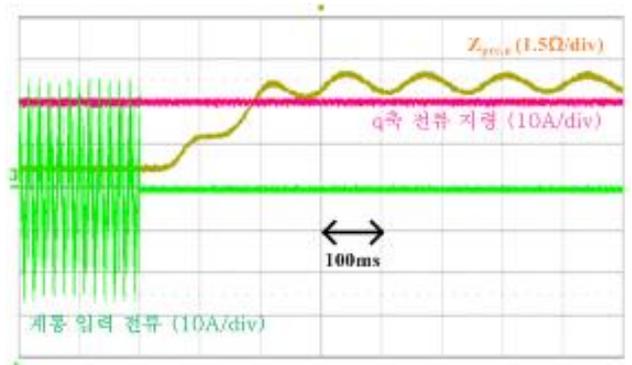


그림 5 제안한 방법의 단독 운전 시험 결과

Fig 5 Anti-islanding detection test result of proposed method

## 3. 결론

본 논문에서는 역상분 전압을 주입한 후, PCC에서 관측되는 역상분 임피던스를 이용하여 3상 태양광 인버터의 단독 운전을 검출하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 원리는 역상분 동기 회로를 이용하여 분석하였, 구현 기법을 설명하였다. 또한, 모의실험 및 실험에서는 IEEE Std. 929-2000의 단독 운전 시험 회로를 이용해 제안된 방법의 유효성을 검증하였다.

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] 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, 1999, pp. 2167-2172.