

## 분산 전원의 고립 운전 진단 알고리즘 개발

장성일 박재영 김광호  
강원대학교 전기전자정보통신공학부

## Development of a Islanding Protection Algorithm for Distributed Resources

S. I. Jang J. Y. Park K. H. Kim

Department of Electrical and Computer Engineering, Kangwon National University

**Abstract** - This paper presents the logic based islanding protection algorithm for distributed resources(DR) which are interconnected with distribution network. Due to the negative impacts from islanding operations of DR on protection, operation and management of distribution system, it is necessary to effectively detect the islanding operations of DR and disconnect it from distribution network rapidly. Generally, it is difficult to detect islanding operation by monitoring only one system parameter. The proposed islanding protection algorithm utilizes multi-criteria: voltage variation, phase displacement, frequency variation, the variation of total harmonic distortion(THD) of current; therefore it effectively detects island operation of DR unit. We also verified the efficiency of the proposed algorithm using the radial distribution network of IEEE 34 bus model.

## 1. 서 론

우리 나라의 에너지 수급과 환경적인 문제 및 발전사업의 민영화에 대처하기 위하여 대체에너지를 포함한 다양한 형태의 분산 전원이 최근에 급속하게 배전 시스템에 투입 될 것이 예상된다. 그러나 분산 전원의 계통 연계는 단일한 전원만을 고려하여 구축되어 있는 기존의 배전 시스템의 보호, 운용 및 관리 등에 여러 가지 새로운 영향을 미치게 될 것이다. 특히 분산전원이 연계되어 있는 계통이 사고에 따른 차단기 동작 또는 보수 작업에 의해 전력공급이 중단되었을 경우 (Loss of Mains), 분산전원이 계속해서 운전되면서 전력을 공급하게 된다면, 인명 피해, 리클로저의 재투입시 상의 불평형으로 인한 기기 손상, 전력품질의 저하 및 계통 복구의 어려움 등 많은 문제를 일으킬 가능성이 높다. 따라서 리클로저의 재투입 및 고립운전으로 인한 분산 전원 제어 알고리즘의 동작 이전에, 분산 전원의 고립 운전을 신속히 검출하여 계통으로부터 분산 전원을 절체시키는 것이 매우 중요하다[1][2].

분산 전원의 고립 운전 상태는 분산전원 자체의 출력 조절에 대한 계통 변화를 감지하여 검출할 수 있다. 그 대표적인 기법으로 Reactive Export Error Detector, Fault Level Monitor[1] 등이 제안되어 있다. 그러나 이러한 방법은 분산 전원의 출력을 직접 조절하므로 계통에 여러 가지 의도하지 않은 영향을 미칠 가능성이 있다. 또 다른 방법으로는 연계전선시와 고립 운전시 계통의 여러가지 파라미터의 변화를 이용하여 고립운전을 검출하는 방법으로 전압변동, 주파수변동, 주파수변화율, 위상변위, 발전기 출력변동, 계통임피던스 변동 등을 모니터링하는 방법들이 제안되어 있다[1][2]. 이런 방법들은 분산전원의 출력을 변화시키는 방법과는 달리 계통

에 영향을 주지 않는다는 장점이 있으나, 고립 운전시 분산전원이 담당하는 부하가 고립 운전 이전에 비해 변화가 적으면, 계통상의 파라미터의 변화가 적어서 고립 운전 검출이 어렵다는 단점이 있다.

본 논문에서는 기존의 방법들의 취약점을 종합적으로 개선하고자 다양한 시스템 파라미터들의 정보를 분석하여 분산전원의 고립운전을 검출하는 새로운 형태의 진단 알고리즘을 제안하고자 한다. 이 진단 알고리즘에서는 전압 변동, 주파수 변화율, 위상 변위등의 시스템 파라미터와 새롭게 제안된 전류 고조파 왜형률의 변화를 감시하여 분산 전원의 고립 운전 상태 여부를 판단하기 때문에 고립 운전 전후의 부하 변화가 클 때는 물론 적은 때도 신속하면서도 효과적으로 고립 운전 여부를 판단하게 된다. 제안된 방법을 평가하기 위해 IEEE 34-bus 배전 계통[3]에 분산전원을 연계한 모델을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였으며, 테스트 결과 전술한 계통조건하에서 효과적으로 고립운전을 검출하는 것을 확인할 수 있었다.

## 2. 분산 전원의 연계 배전 계통 모델링

본 연구에서는 분산전원이 연계된 배전 계통의 다양한 상황을 모의하기 위해 IEEE 34-bus 배전 계통상에 자체 담당 부하를 갖는 분산전원이 연계된 모델을 PSCAD/ EMTDC 상에서 모의하였다.

## 2.1 분산 전원의 모델링

분산전원은 태양광, 연료전지, 일부의 풍력발전, 마이크로터빈 등과 같이 1차적으로 직류를 발생시키는 직류 전원으로 가정하였다. 이때 분산전원 시스템은 DC 전압 원과, 인버터, 고조파 제거를 위한 필터 및 변압기, 차단기로 모델링하였다. 분산 전원의 전압의 위상과 크기 제어 기법으로는 SPWM (Sine Pulse Width Modulation)을 이용하였으며, 고립 운전으로 인해 발생하는 계통 전압에 대한 위상상실을 방지하기 위하여 PLL(Phase Locked Loop) 기법을 적용하였다[4].

## 2.2 배전 계통 모델링

분산전원이 연계 운전 될 배전 계통은 단락용량이 1800 [MVA], 선간전압이 24.9 [kV]인 IEEE 34-bus의 데이터를 사용하였다. 배전선은 단상과 삼상이 혼합된 가공선로서 계통 평형을 위한 병렬 커패시터가 844, 848 버스에 각각 연결되어 있다. 그림 1에 모델링된 배전 계통을 단선도로 나타내었다. 그림에서 분산 전원이 연계되는 위치에 따라 시스템 파라미터의 변화가 어떠한 특성을 나타내는지 분석하기 위하여 분산 전원을 840, 858, 808번 버스에 차례로 투입시켜 고립 운전과 부하 변화를 모의하였다. 그리고 고립 운전시 분산전원이 담당하는 부하의 크기를 달리하기 위하여 모델링된 배전 계통에 임의의 스위치를 설치하여 시뮬레이션을 수행하였다. 여기에서 분산전원이 배전 계통에 투입되어 운전 될 경우 고립 운전은 전원측의 차단기가 동작하여 고립 운전이 발생하는 것으로 가정하였다.

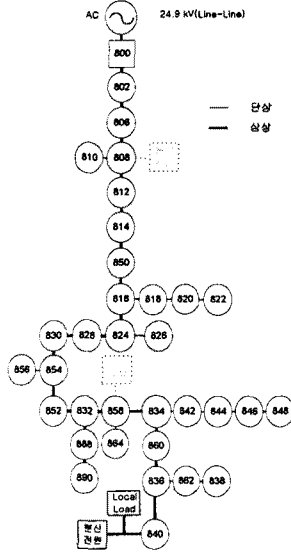


그림 1 배전 계통도

### 3. 고립 운전 진단용 시스템 파라미터의 설정

기존의 분산 전원 고립 운전 검출 방법들의 장·단점을 종합적으로 분석하여 전압 변동, 주파수 변화율, 위상 변위 및 전류 고조파 왜형률의 변화율을 진단 알고리즘의 파라미터로 설정하였다.

#### 3.1 전압, 주파수 변화율, 위상 변위

먼저, 분산전원이 고립 운전 모드로 전환 될 때 분산전원의 용량보다 큰 부하가 연결되면 계통의 전압이 급격히 떨어지게 되며, 이를 감지하면 분산전원의 고립 운전 유·무를 판단 할 수 있다. 따라서 다음과 같이  $t$  시점에서의 전압 실효치( $V_{rms,t}$ )를 (1)과 같이 정의한다.

$$V_{rms,t} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} v_{t-i}^2}{N}} \quad (1)$$

여기서  $N$ 는 1주기 샘플링 개수를 의미하고,  $v$ 는 전압 순시치 값이다.

다음으로, 주파수가 변동하는 현상을 분석하기 위하여 주파수 변화율( $ROCOF_t$ )을 (2)와 같이 정의하였다.

$$ROCOF_t = |F_t - F_{t-1sec}| / \text{sec} \quad (2)$$

여기서  $F_t$ 는  $t$  시점에서의 주파수 크기이다.

세 번째 파라미터인 위상 변위는, 순간적인 과도 현상의 영향을 고립 운전 판단에서 제거하기 위하여 이전 1주기 평균으로부터  $t$  시점의 위상( $PH_{avg,t}$ )을 (3)으로 정의한다.

$$PH_{avg,t} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} PH_{t-i}}{N} \quad (3)$$

위상 변위( $\Delta PH_t$ )를 평가하기 위하여 (4)와 같은 식을 정의하였다.

$$\Delta PH_t = PH_{avg,s} - PH_{avg,t} \quad (4)$$

여기서  $PH_{avg,s}$ 는 위상의 기준이 되는 값을 의미하는데, 초기의 위상으로 설정된 후에도 변화율  $\Delta PH_t$ 가  $5^\circ$  이내에서 1주기 이상 계속 유지되면 이때는  $PH_{avg,t}$ 로 갱신하여 계통의 정상적인 변화에 능동적으로 대처하도록 하였다.

#### 3.2 전류 고조파 왜형률의 변화율

연계 운전시 분산전원의 전류 고조파 왜형률은 분산전원 자체에서 생성되는 고조파 발생분과 계통부하, Local load의 영향으로 발생되는 고조파의 합으로 나타난다. 이후 분산전원이 고립 운전 모드로 될 때 고조파를 발생시키는 계통부하의 구성이 달라지므로 분산 전원 출력 전류의 왜형률은 달라지게 된다. 따라서 전류 왜형률을 이용하여 고립 운전을 검출하기 위하여 다음과 같은 지수들을 정의한다.

먼저  $t$  시점의 고조파 왜형률( $THD_t$ )을 (5)와 같이 정의한다.

$$THD_t = \frac{t \text{ 시점의 고조파 크기의 합}}{t \text{ 시점의 기본파 크기}} \quad (5)$$

또한 고조파 왜형률의 순간적인 과도값이 판단에 영향을 주는 것을 방지하기 위해  $t$  시점의 이전 1 주기의  $THD_t$  평균을 취하여  $t$  시점의 전류 고조파 왜형률 평균  $THD_{avg,t}$  을 식 6과 같이 정의한다. 여기서  $N$ 은 1주기 샘플링 개수를 의미한다.

$$THD_{avg,t} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} THD_{t-i}}{N} \quad (6)$$

전류 고조파 왜형률의 변화를 평가하기 위하여 다음 (7)과 같은 변화율을 정의하였다.

$$\Delta THD_t = \frac{THD_{avg,s} - THD_{avg,t}}{THD_{avg,s}} \times 100 \quad (7)$$

여기서  $THD_{avg,s}$ 는  $PH_{avg,s}$ 의 특징과 같이,  $\Delta THD_t$ 가 75% 이내로 감소하거나 100% 이하로 증가되는 현상이 1주기 이상 계속 유지되면  $THD_{avg,t}$ 으로 갱신된다.

### 4. 분산 전원의 고립 운전 진단 알고리즘

#### 4.1 시스템 파라미터 설정치

기존의 고립 운전 검출 파라미터의 고려와 다양한 고립 운전 및 부하 변동 모드를 통하여 표 1과 같이 시스템 파라미터에 대한 설정치 [1][4][5]를 선택하였다.

표 1 고립 운전 진단 알고리즘의 파라미터 설정치

파라미터	$V_{rms,t}$	$\Delta PH_t$	$ROCOF_t$	$\Delta THD_t$
설정치	10 %	$5^\circ$	0.3 Hz	75% 감소 100% 증가

#### 4.2 진단 알고리즘의 룰 구성

분산전원의 고립 운전을 진단하기 위하여, 표 1에서 제시한 파라미터 설정치를 이용하여 다음과 같은 고립 운전 진단 룰을 구성하였다. 각 룰은 고립 운전을 효과적으로 검출하고, 정상적인 부하변동에 대하여 고립 운전과의 구분을 정확하게 수행하도록 구성되었다.

Rule 1:  $V_{rms,t}$ 이 0.90[PU] 이하,  $ROCOF_t$ 가 0.3[Hz/sec] 이상,  $\Delta PH_t$ 가 1주기동안  $5^\circ$  이상

Rule 2:  $V_{rms,t}$ 이 0.90[PU] 이상,  $ROCOF_t$ 가 0.3[Hz/sec] 이하,  $\Delta PH_t$ 가  $5^\circ$  이하,  $\Delta THD_t$ 가 1주기동안 75% 이상 감소

Rule 3:  $V_{rms,t}$ 이 0.90[PU] 이하,  $ROCOF_t$ 가 0.3[Hz/sec] 이하,  $\Delta PH_t$ 가 1주기동안  $5^\circ$  이상,  $\Delta THD_t$ 가 1주기동안 100% 이상 증가

### 5. 사례 연구

제안된 분산 전원의 고립 운전 진단 알고리즘을 검증하기 위하여 룰 생성에 이용되지 않은 경우의 고립 운전

모의로서, 고립 운전 전후의 부하 변동이 큰 경우와 적은 경우, 또한 기존 검출 기법에서는 고립 운전으로 오인하기 쉬운 부하 변동 등에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 테스트 결과 제안된 진단 알고리즘은 부하 변화의 크기에 무관하게 고립 운전을 효과적으로 진단하였으며 계통 부하의 정상적인 변동에 대해서는 고립 운전으로 판단하지 않는 안정적인 특성을 보였다.

### 5.1 분산 전원의 고립 운전 진단 결과

그림 2는 분산전원이 배전 계통의 834 버스에 연결되었을 때, 53 msec에서 전원단 차단기가 동작하여 고립 운전이 발생한 경우의 파라미터 변화이다. 이와 같은 고립 운전에서는 고립 운전 전후의 부하 변동이 많아 119 msec에서 고립 운전이 쉽게 검출된다.

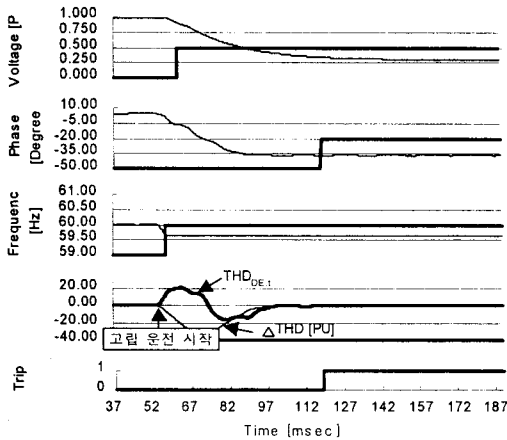


그림 2 부하 변화가 큰 경우의 고립 운전 진단 결과

그림 3은 부하 변화가 적은 경우의 고립 운전 시뮬레이션 결과를 나타낸 것으로, 858버스에 연결된 부하측에 분산전원을 투입하고, 이곳에 설치된 차단기를 동작시켰다. 고립 운전 전후의 부하변화가 적으므로 전압, 위상, 주파수의 파라미터는 변화가 적다. 그러나 전류 고조파 왜형률의 변화율은 고조파 발생부하의 구성이 달라져 큰 변화를 나타내므로 121 msec에서 고립 운전으로 판단된다.

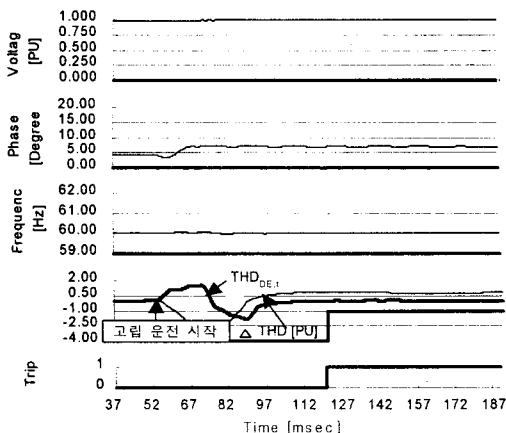


그림 3 부하 변화가 적은 경우의 고립 운전 진단 결과

### 5.2 부하 변동과 고립 운전의 구분

부하변동에 대한 알고리즘의 신뢰성을 검증하기 위하여 분산전원이 840 버스에 투입되었을 경우, 844 버스와 848 버스에 계통 평형용으로 설치되어 있는 커패시터 뱅크를 동시에 제거하여 계통의 큰 변화를 갖는 시뮬레이션을 수행하였다. 일부 파라미터의 급격한 변화에도 불구하고 제안된 진단 알고리즘은 그림 4의 결과와 같이, 안정적으로 부하 변동과 고립 운전을 구분하였다.

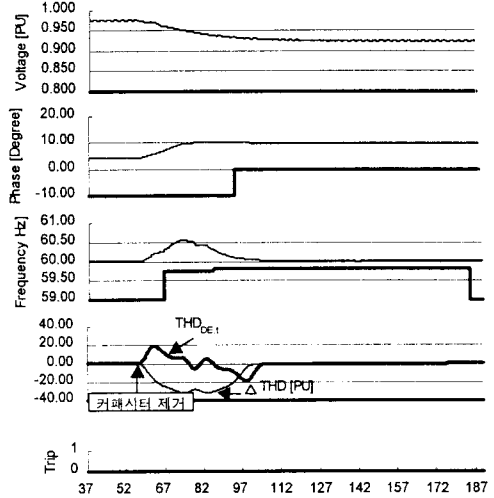


그림 4 커패시터 뱅크 제거 시 고립 운전 진단 결과

### 6. 결론

본 논문에서는 시스템 파라미터를 이용하여 분산전원의 고립운전을 검출하는 새로운 형태의 고립 운전 진단 알고리즘을 제안하였다. 시뮬레이션 결과를 통해서, 제안된 기법이 고립 운전 모드에서 분산전원 출력변화에 관계없이 고립운전을 효과적으로 검출할 수 있으며, 고립 운전과 부하변화를 정확히 구별함을 볼 수 있었다. 제안된 방법은 전압, 주파수 변화율, 위상 변위, 전류 고조파 분석을 통해 진단 알고리즘을 구성하여, 기존의 검출방법들과는 달리 분산전원 출력과 계통에 변화를 주지 않으며, 고립 운전 전후 부하변화가 적을 경우에도 효과적으로 이를 검출할 수 있음을 보여주었다.

향후에는 보다 안정적이고 신뢰성이 높은 분산전원 진단 알고리즘을 구현하기 위하여 새로운 파라미터를 추가할 예정이다. 또한 분산전원의 고립 운전과 유사한 특성을 가질 수 있는 유도 기기의 기동 및 정지를 모의하여 지능형의 진단 알고리즘을 구축할 계획이다

#### [참고 문헌]

- [1] O Usta, M. A. Refern, "Protection of Dispersed Storage and Generation Units Against Islanding." IEEE, No.0-7803-1772-6/94, 1994
- [2] P. O'Kane, B. Fox, "Loss of Mains Detection For Embedded Generation by System Impedance Monitoring." IEE, Conference Publication No. 434, 1997
- [3] IEEE Distribution Planning Working Group Report, "Radial Distribution Test Feeders." IEEE Tr. on Power Systems, Vol. 6, No. 3, August 1991
- [4] 장성일, 김광호, "분산 전원의 고립 운전 검출 기법 개발" 2001년 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, 2001. 5월, pp.42-45
- [5] Engineering Recommendation G.59 (June 1985) : "Recommendations for the connection of Private Generating Plant to the Electricity Boards' Dist. Sys."