

Development of a New Islanding Detection Method for Distributed Resources

張 成 一* · 金 光 鎬**

(Sung-Il Jang · Kwang-Ho Kim)

Abstract - The islanding detection for distributed resources (DR) becomes an important and emerging issue in power system protection since the distributed generator installations are rapidly increasing and most of the installed systems are interconnected with distribution network. In order to avoid 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 rapidly disconnect it from distribution network. Generally, it is difficult to detect islanding operation by monitoring only one system parameter. This paper presents a new logic based islanding detection method for distributed resources(DR) which are interconnected with distribution network. The proposed method detects the islanding operation by monitoring four system parameter: voltage variation, phase displacement, frequency variation, and the variation of total harmonic distortion(THD) of current; therefore, it effectively detects island operation of DR unit operating in parallel with the distribution network. We also verified the efficiency of the proposed algorithm using the radial distribution network of IEEE 34 bus model.

Key Words : Islanding Detection, Islanding Protection, Distributed Resources

1. 서 론

최근에 들어서 에너지 환경의 변화, 발전사업의 민영화 등에 따라 대체에너지를 포함한 다양한 형태의 분산전원 보급의 확대가 예상되고 있다. 그러나 분산전원의 계통연계는 단방향의 전력 조류만을 허용하던 기존 배전 시스템의 보호, 운용 및 관리 등에 여러 가지 새로운 영향을 미치게 될 것이다. 특히 분산전원이 연계되어 있는 계통에서 사고에 따른 차단기 동작 또는 보수 작업에 의해 전력공급이 중단되었을 경우, 분산전원이 계속해서 운전하면서 전력을 배전 계통으로 공급하게 된다면, 인명 피해, 재페로계전기의 재페로 시 상의 불평형으로 인한 기기 손상, 전력품질의 저하 및 계통 복구의 어려움 등 많은 문제를 일으킬 가능성이 높다. 따라서 재페로 계전기를 재페로하기 이전, 그리고 고립운전 후의 계통변화에 따라 분산전원 제어동작이 변화되기 이전에, 고립 운전을 신속히 검출하여 계통으로부터 분산전원을 절체시키는 것이 매우 중요하다.[1-3]

분산전원의 고립운전 상태는 분산전원 자체의 출력을 계속 조절하면서 연계 운전시와 고립 운전시의 계통 변화를 감지하여 검출할 수 있다. 그 대표적인 기법으로 Reactive Export Error Detector, Fault Level Monitor 등이 제안되어

있다.[2] 그러나 이러한 방법은 분산전원의 출력을 직접 조절하여야 함으로 계통에 여러 가지 의도하지 않았던 영향을 미칠 가능성이 있다. 또 다른 방법으로는 연계운전시와 고립운전시 계통의 여러가지 파라미터의 변화를 이용하여 고립운전을 검출하는 방법으로 전압변동, 주파수변동, 주파수 변화율, 위상변위, 발전기 출력변동, 계통임피던스 변동 등을 모니터링하는 방법들이 제안되어 있다.[2-4] 이런 방법들은 분산전원의 출력을 변화시키는 방법과는 달리 계통에 영향을 주지 않는다는 장점이 있으나, 고립 운전시 분산전원이 담당하는 부하가 고립운전 이전에 비해 변화가 적으면, 계통상의 파라미터의 변화가 적어서 고립운전 검출이 어렵다는 단점이 있다. 분산전원의 고립운전은 배전계통의 여러 차단기 및 스위치 등의 동작에 의해 발생하는 것이 일반적이며, 이때 나타나는 현상은 매우 복잡한 특성을 갖기 때문에 기존방법과 같이 하나의 시스템 파라미터를 이용하여 고립운전을 검출하는 것은 효과적이지가 않다고 판단된다.

본 논문에서는 기존의 방법들의 취약점을 종합적으로 개선하고자 다양한 시스템 파라미터들의 정보를 분석하여 분산전원의 고립운전을 검출하는 새로운 형태의 진단 알고리즘을 제안하고자 한다. 이 검출 알고리즘에서는 전압 변동, 주파수 변화율, 위상 변위 등의 시스템 파라미터와 새롭게 제안된 전류 고조파 왜형률의 변화를 감시하여 분산 전원의 고립운전 상태 여부를 판단하기 때문에 계통에 의도하지 않은 영향을 미치는 능동적인 고립 운전 검출 기법의 단점과 고립 운전 전후의 부하 변화가 적을 때에 검출이 곤란한 수동적인 검출 기법의 단점을 동시에 개선할 수 있다. 제안된

* 正 會 員 : 江原大 工大 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 江原大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 2001年 7月 2日

最終完了 : 2001年 9月 25日

방법을 평가하기 위해 IEEE 34-bus 배전 계통[6]에 분산전원을 연계한 모델을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였으며, 테스트 결과 전술한 계통조건하에서 고립운전 전후의 부하 변화가 클 때는 물론 적을 때도 신속하면서도 효과적으로 고립운전여부를 판단하였다. 또한 고립 운전과 유사한 특성을 가지는 부하변동에 대하여는 정상연계운전상태임을 정확히 구분하는 것을 확인할 수 있었다.

2. 분산전원 연계 배전 계통의 모델링

본 연구에서는 분산전원이 연계된 배전계통의 다양한 상황을 모의하기 위해 IEEE 34-bus 배전계통상에 자체 담당 부하를 갖는 분산전원이 연계된 모델을 전력계통 과도현상 해석프로그램인 워크스테이션용 PSCAD/EMTDC상에서 모의하였다.

2.1 분산 전원의 모델링

분산전원은 태양광, 연료전지, 일부의 풍력발전, 마이크로터빈 등과 같이 1차적으로 직류를 발생시키는 직류전원으로 가정하였다. 이때 분산전원 시스템은 DC 전압원과, 인버터, 필터 및 변압기로 모델링 하였다. 그림 1은 본 연구에서 모델링한 분산전원의 구조를 나타낸 것으로 변압기 후단과 계통에서 전압, 전류를 검출하고, 얻어진 정보를 이용하여 인버터를 제어하고 차단기를 동작시킨다. 분산전원 전압의 위상과 크기 제어기법으로는 SPWM(Sine Pulse Width Modulation)을, 고립 운전으로 인해 발생하는 계통 전압에 대한 위상상실을 방지하기 위하여 PLL(Phase Locked Loop) 기법을 적용하였다.[5]

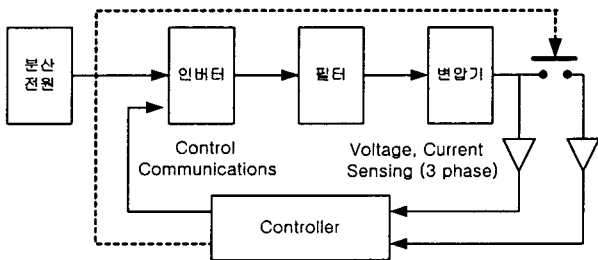


그림 1 분산 전원 시스템의 구조
Fig. 1 Structure of distributed resources system

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 가공선로로서 모의를 위하여 수정된 부하와 계통 평형을 위한 병렬 커패시터가 844, 848 버스에 각각 연결되어 있다. 그림 2에 모델링된 배전계통을 단선도로 나타내었다. 그림에서 분산 전원이 연계되는 위치에 따라 시스템 파라미터의 변화가 어떠한 특성을 갖는지를 분석하기 위하여 분산 전원을 840, 858, 808 버스에 차례로 투입시켜 고립 운전과 부하 변동을 모의하였다. 그리고 고립 운전시 분산전원이 담당하는 부하의

크기를 달리하기 위하여 모델링된 배전 계통에 임의의 스위치를 설치하여 시뮬레이션을 수행하였다. 여기에서 고립운전 상황은 분산전원이 연계된 지점에서 전원측에 설치된 차단기 중 하나가 동작함으로써 발생한다.

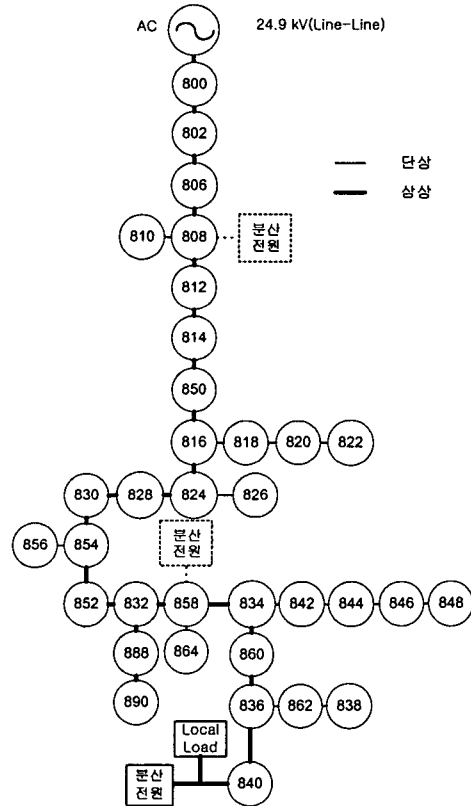


그림 2 34 모선 계통 단선도
Fig. 2 34 Bus circuit diagram

3. 고립 운전시의 계통 변화

고립운전 전후에 분산전원이 담당하는 부하는 일반적으로 변화하게 되지만, 경우에 따라서는 거의 동일한 부하가 유지되는 경우도 발생한다. 전자의 경우는 기존의 방법으로 쉽게 고립운전을 검출할 수 있으나, 후자의 경우는 계통 파라미터의 변화가 적기 때문에 검출에 어려움이 있다. 그림 2의 계통모델 상에서 두 가지 경우를 시뮬레이션한 결과를 통해 각각의 특성을 기술하면 다음과 같다.

3.1 고립운전 전후의 부하변동이 클 경우의 계통 변화

그림 2의 배전 계통에서 분산 전원이 840 버스에 연계되어 운전되고 있을 때, 53ms에서 858과 834 버스 사이의 차단기를 동작시켜 고립운전 전후의 부하 변화가 큰 상태를 모의하였다. 고립 운전 모드에서 분산 전원 부하에는 844, 848 bus에 연결된 큰 용량의 커패시터가 포함됨에 따라 그림 3처럼 큰 진상 역률이 나타나는 것을 볼 수 있다. 전술한 것처럼 분산 전원의 담당부하 변화가 큰 고립운전 시에 나타나는 일반적인 특성인 전압의 급격한 감소, 주파수 변화, 큰 위상차, 고조파의 많은 변화 등이 그림 3과 같이 나타남을 볼 수 있다.

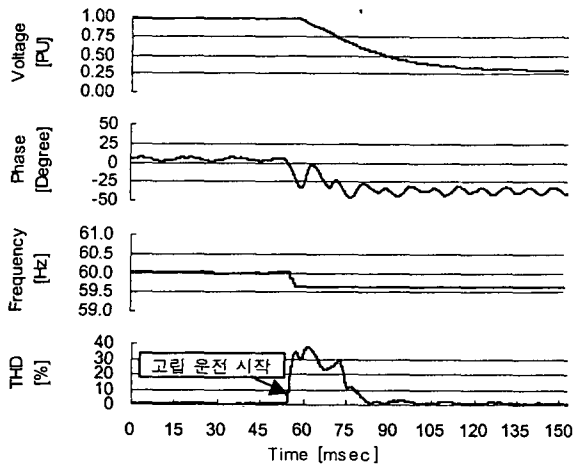


그림 3 부하 변동이 큰 경우의 파라미터 변화
Fig. 3 Change of parameter with large variation of load

3.2 고립운전 전후의 부하 변동이 적을 경우의 계통 변화

그림 2의 배전 계통에서 분산전원 투입 조건을 부하 변화가 큰 경우와 동일하게 구성하고, 840번과 836번 버스 사이의 스위치 동작으로 고립운전 전후의 부하변화가 적은 상태를 모의하였다. 그림 4에서 보이는 바와 같이 전압, 위상, 주파수 변동이 거의 발생하지 않기 때문에 기존의 방법으로는 고립운전의 검출이 거의 불가능하다.

그러나 고립운전 전후의 전류고조파 왜형률을 나타낸 그림을 살펴보면 알 수 있듯이, 분산전원 출력의 변화가 적더라도 고립운전에 의해 계통부하의 구성이 달라지기 때문에 고조파 왜형률은 고립운전 전후에 차이가 나타나게 된다. 따라서 전류고조파 왜형률의 변화를 이용하면 고립운전을 효과적으로 검출할 수 있다고 판단하였다.

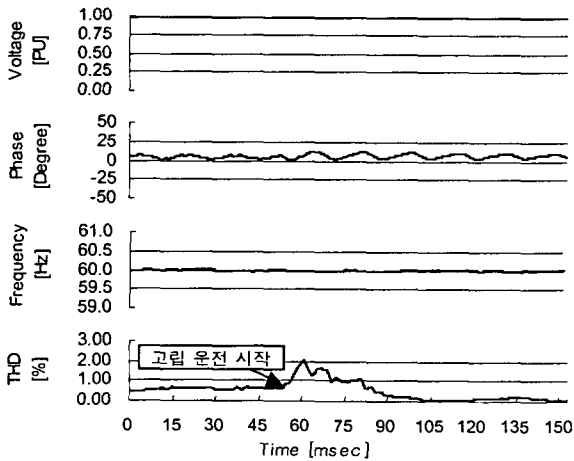


그림 4 부하 변동이 작은 경우의 파라미터 변화
Fig. 4 Change of parameter with small variation of load

4 고립 운전 검출을 위한 파라미터의 정의

본 연구에서는 기존의 분산 전원 고립 운전 검출 방법들

에서 사용되던 전압의 변동, 주파수 변화, 위상 변위 등과 함께 고립운전 전후의 부하변화가 적을 경우에도 효과적으로 이를 검출할 수 있는 전류 고조파 왜형률의 변화를 새롭게 도입하였다.

4.1 전압, 주파수 변화율, 위상 변위

분산전원이 고립운전을 하게 될 때는 분산전원이 담당하는 계통부하의 구성이 달라지기 때문에 전압, 주파수, 위상 등이 변동하게 된다. 이러한 특성은 기존 검출기법에서 도입 활용되던 것으로 본 연구에서도 다음과 같이 각각에 대한 지수를 정의하여 고립 운전 검출에 이용하였다.

전압에 대한 지수

먼저, 고립 운전 시 분산전원의 용량보다 큰 부하가 연결 되면 계통의 전압이 급격히 떨어지게 되며, 이를 통해 분산전원의 고립 운전 유·무를 판단 할 수 있다. 다음과 같이 t 시점에서의 전압 실효치($V_{rms,t}$)를 (1)처럼 정의한다.

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

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

주파수변동에 대한 지수

고립 운전시 부하변동으로 인하여 계통의 주파수가 변화하는 것을 검출하기 위하여 초당 주파수 변화율(CF_t)을 (2)와 같이 정의하였다.

$$CF_t = |F_t - F_{t-(1\text{sec})}| [Hz/sec] \quad (2)$$

여기서 F_t 는 t 시점에서의 주파수 크기이다.

위상 변화에 대한 지수

t 시점의 1주기 위상평균($PH_{avg,t}$)을 (3)과 같이 정의하고, 고립운전여부를 검출하기 위한 지수로서 (4)와 같이 정의된 위상변위(ΔPH_t)를 사용한다. N 은 1주기 샘플링 수를 나타낸다.

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

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

여기서 $PH_{avg,s}$ 는 위상의 기준이 되는 값을 의미하는데, 초기의 위상 설정 후, ΔPH_t 가 5° 이상으로 변화하지 않는 안정상태를 1주기 이상 계속 유지할 경우는 $PH_{avg,t}$ 로 갱신하여 계통의 정상적인 변화에 능동적으로 대처하도록 하였다. 또한 순간적인 과도 현상에 의해 부정확한 판단이 이루어지는 것을 방지하기 위해, 지나치게 과도한 지수변화는 검출 알고리즘 상에서 제외하였다. 이를 위해 (5)와 같이 정의된 위상의 경사지수 $PH_{DE,t}$ 를 이용하여 이 지수가 일정값

을 초과할 경우에는 판단에서 제외하도록 하였다. 설정치는 계통의 구성에 따라 달라지며, 본 논문에서는 이 값을 0.5°로 설정하였다.

$$PH_{DE,t} = PH_{avg,t} - PH_{avg,t-p} \text{ [Degree]} \quad (5)$$

여기서 p 는 1/4주기(4.17 msec)로 정하였다.

4.2 전류 고조파 왜형률의 변화

연계 운전 시 분산전원의 전류 고조파 왜형률은 분산전원 자체에서 생성되는 고조파 발생분과 계통부하, 분산전원이 담당하는 부하의 영향으로 발생하는 고조파의 합으로 나타난다. 이후 분산전원이 고립되어 운전할 경우에는 고조파를 발생시키는 계통부하의 구성이 달라지므로 분산 전원 출력 전류의 고조파 왜형률은 달라지게 된다. 따라서 전류 고조파 왜형률을 이용하면 효과적으로 고립 운전을 검출할 수 있을 것으로 판단하였다.

먼저 t 시점의 고조파 왜형률(THD_t)은 (6)과 같이 정의된다.

$$THD_t = \frac{t \text{ 시점의 고조파 크기의 합}}{t \text{ 시점의 기본파 크기}} \times 100 [\%] \quad (6)$$

또한 t 시점의 전류 고조파 왜형률 평균 $THD_{avg,t}$ 을 (7)과 같이 정의한다. 여기서 N 은 1주기 샘플링 수를 의미한다.

$$THD_{avg,t} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} THD_{t-i} [\%] \quad (7)$$

전류 고조파 왜형률의 변화를 평가하기 위하여 다음 (8)과 같은 변화율을 정의하였다.

$$\Delta THD_t = \frac{THD_{avg,S} - THD_{avg,t}}{THD_{avg,S}} \times 100 [\%] \quad (8)$$

여기서 $THD_{avg,S}$ 는 고조파 왜형률의 기준이 되는 값을 의미하는데, 초기치 설정 후, ΔTHD_t 가 -100%~+75%의 범위 이내의 안정상태를 1주기 이상 계속 유지하면 $THD_{avg,t}$ 로 갱신하여 계통의 정상적인 변화에 적응하도록 하였다. 또한, 위상 변화 검출에서와 마찬가지로 순간적인 과도 현상에 의해 부정확한 판단이 이루어지는 것을 방지하기 위해, 지나치게 과도한 지수변화는 검출 알고리즘 상에서 제외하였다. 이를 위해 (9)와 같이 정의된 고조파 왜형률의 경사지수 $THD_{DE,t}$ 를 이용하여, 이 지수가 일정값 이하가 되는 상태에서 고립운전 검출 판단을 수행하도록 하였다. 설정치는 계통의 구성에 따라 달라지며, 본 논문에서는 0.09[%]를 기준으로 책정하였다.

$$THD_{DE,t} = THD_{avg,t} - THD_{avg,t-p} \quad (9)$$

여기서 p 는 위상의 경사지수에서와 같이 1/4주기(4.17 msec)이다.

5. 고립운전 시 각종 지수의 변화

고립 운전시 나타나는 시스템 파라미터 변화 특성을 분석하기 위해, 2장에서 기술한 모델계통을 대상으로 분산전원이 계통에 연계되는 위치를 변화시키면서 PSCAD/EMTDC상에서 시뮬레이션을 수행하였으며, 분석결과를 표 1에 요약하였다. 표에서 알 수 있듯이 배전 계통의 전원단 가까이 위치한 분산전원이 고립운전 모드로 전환되었을 경우에는 감시하고 있는 시스템 파라미터의 변화가 매우 크게 나타났는데, 이와 같은 특징은 고립 운전 시 분산전원이 담당하는 부하의 변화가 크기 때문으로 판단된다. 이와는 반대로 분산전원이 계통 말단에 위치하였을 경우에는, 고립운전 상황을 제공하는 차단기의 위치에 따라 큰 특성 차이를 보인다. 분산전원에 인접한 차단기가 동작하여 고립운전이 이루어지면 분산전원이 담당해야 할 부하의 차이가 적기 때문에 출력 변동이 심하지 않아 $V_{rms,t}$, CF_t , ΔPH_t 의 변화가 적게 나타난다. 그러나 분산전원의 출력 변화가 적더라도 고조파를 발생시키는 부하의 구성이 달라지기 때문에 ΔTHD_t 는 많은 변화를 보인다.

표 1 고립 운전 특성 분석

Table 1 Analysis of a islanding operation characteristics

| 분산전원 위치 | 시스템 파라미터 | 고립 운전 위치 | | |
|---------|------------------------|----------|----------------------|-------------|
| | | 전원단 | 중간 | 말단 |
| 840버스 | $V_{rms,t}$ [PU] | 0.4-0.27 | 0.8-0.4 | 1-0.8 |
| | ΔPH_t [Degree] | 21-35 | 25-35 | 0-11 |
| | CF_t [Hz/sec] | 0.2-0.35 | 0.35-0.55 | 0-0.35 |
| | ΔTHD_t [%] | 100이상 증가 | 100-150증가 50이하 감소 | 40-85 감소 |
| 858버스 | $V_{rms,t}$ [PU] | 0.27 이하 | 0.27 이하 | |
| | ΔPH_t [Degree] | 21 이하 | 31-35 | |
| | CF_t [Hz/sec] | 0.7 이상 | 0.7 이상 | |
| | ΔTHD_t [%] | 100이상 증가 | 10이상 증가 | |
| 808버스 | $V_{rms,t}$ [PU] | 0.27 이하 | | |
| | ΔPH_t [Degree] | 21 이하 | | |
| | CF_t [Hz/sec] | 0.7 이상 | | |
| | ΔTHD_t [%] | 100이상 증가 | | |

6. 정상연계 운전시 부하 변화에 따른 각종 지수의 변화

고립운전이 일어나지 않고, 분산전원이 정상적으로 연계 운전되고 있는 상태라고 하더라도 경우에 따라 계통의 부하 변화는 위에서 정의한 여러 가지 시스템 파라미터의 변동을 가지고 오기 때문에 고립운전으로 오인할 가능성이 있다. 따라서 효과적인 고립운전 검출을 위해서는 이와 같은 부하 변화에 따른 특성을 분석하여 고립운전으로 판단하지 않도록 할 필요가 있다.

고립 운전과 마찬가지로 여러 형태의 부하 변동에 따른 시스템 파라미터의 특성을 얻기 위하여 840 버스의 부하 용량과 같은 R-L부하를 계통의 여러 곳에서 연결하였다. 표

2는 부하 증가에 따른 시스템 파라미터의 변화를 나타내었으며, 표에서 알 수 있듯이 부하증가에 있어서는 분산전원의 설치위치에 관계없이 각종 지수의 변화가 적음을 알 수 있었다.

표 2 부하증가에 따른 파라미터 변화
Table 2 Change of parameters for system load increment

| 분산전원 위치 | 시스템 파라미터 | 부하 증가 위치 | | |
|-----------------|------------------------|--------------------|----|----|
| | | 전원단 | 중간 | 말단 |
| 840,858, 808 버스 | $V_{rms,t}$ [PU] | 미소 변화 | | |
| | ΔPH_t [Degree] | | | |
| | CF_t [Hz/sec] | | | |
| | ΔTHD_t [%] | | | |
| | | 30-50 감소, 10-50 증가 | | |

부하 증가와 함께 부하 감소에 따른 특성을 분석하기 위해 반대로 각 노드에 연결된 부하들을 차례로 제거하여 파라미터의 변화를 살펴보았다. 모의 결과 부하 감소에 따른 시스템 파라미터의 변화는 분산전원이 설치되어 있는 위치보다는 제거되는 부하의 종류와 크기에 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 표 3은 감소되는 부하 종류에 따른 시스템 파라미터의 변화를 나타내었다. 특히 계통 평형을 위해 설치되어 있는 커패시터 뱅크를 포함한 부하가 제거되었을 경우 계통의 위상 변위가 5° 이상으로 증가하며, 전압의 크기도 0.95[PU] 이하까지 감소하고, 주파수 변화가 0.5 [Hz/sec] 이상 발생한다. 따라서 기존의 고립 운전 검출 기법에서 일반적으로 사용하는 설정치를 적용할 경우에는 위와 같은 정상적인 부하변화에 대하여 고립 운전으로 잘못 판단할 가능성이 있음을 알 수 있었다.

표 3 부하 제거에 따른 파라미터 변화
Table 3 Change of parameters for system load removal

| 분산전원 위치 | 시스템 파라미터 | 제거 부하 종류 | |
|-----------------|------------------------|----------|---------|
| | | R-L | R-L-C |
| 840,858, 808 버스 | $V_{rms,t}$ [PU] | 일정 | 0.95 |
| | ΔPH_t [Degree] | 일정 | 6 이하 |
| | CF_t [Hz/sec] | 0.1 이하 | 0.5 이하 |
| | ΔTHD_t [%] | 증·감, 일정 | 증·감, 일정 |

7. 분산전원의 고립 운전 검출 기법

7.1 시스템 파라미터 설정치

시스템 파라미터의 설정치의 선정은 제안된 고립 운전 검출 기법의 신뢰성에 있어서 대단히 중요한 요소로서, 기존의 고립 운전 검출 파라미터에 대한 면밀한 검토와 다양한 고립 운전 및 부하변동 모의를 통하여 이를 설정하였다. 본 연구에서 고립 운전 검출을 위해 적용한 주파수 변화율과 위상

변위에 대한 설정치는 기존에 발표된 방법에서 사용되던 값 [2][8]들을 참조하였다. 또한 본 연구에서 제안한 전류 고조파 왜형률에 대한 설정치는 6장에서 기술한 분석결과를 토대로 정하였다. 이 설정치는 계통구성에 따라 달라질 수 있다.

7.2 고립 운전 검출 룰의 구성

분산전원의 고립 운전을 검출하기 위하여 전술한 파라미터 설정치를 이용하여 다음과 같은 고립 운전 검출 룰을 구성하였다. 각 룰은 고립 운전 전후의 부하변화가 큰 경우와 적은 경우를 효과적으로 검출하고, 정상적인 부하변동에 대하여 고립 운전과의 구분을 정확히 수행하도록 구성되었다.

- Rule 1: $V_{rms,t}$ 이 0.90[PU] 이하, CF_t 가 0.3[Hz/sec] 이상, ΔPH_t 가 1주기동안 5° 이상
- Rule 2: $V_{rms,t}$ 이 0.90[PU] 이상, CF_t 가 0.3[Hz/sec] 이하, ΔPH_t 가 5° 이하, ΔTHD_t 가 1주기동안 75% 이상 감소
- Rule 3: $V_{rms,t}$ 이 0.90[PU] 이하, CF_t 가 0.3[Hz/sec] 이하, ΔPH_t 가 1주기동안 5° 이상, ΔTHD_t 가 1 주기동안 100% 이상 증가

위에서 정의된 룰상의 특정파라미터가 설정치를 초과할 경우는 동일 룰상의 다른 파라미터의 결과와 함께 논리곱(AND)을 취하기 위하여 100 msec 동안 계속해서 트립 상태를 유지하도록 조정하였다.

8. 사례 연구

제안된 분산전원의 고립 운전 검출 알고리즘을 검증하기 위하여 고립 운전 전후의 분산전원이 담당해야 하는 부하의 변화가 큰 경우와 적은 경우, 정상 연계 운전시의 부하 증가 및 감소 등에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 제안된 알고리즘을 검증하기 위해 사용된 계통상황은 고립 운전 검출 룰을 도출하기 위해 사용한 계통 상황과 다른 것으로 선정하여 올바른 평가가 이루어지도록 하였다. 테스트 결과 제안된 검출 알고리즘은 분산전원이 담당하는 부하의 크기 변화와 무관하게 고립 운전을 효과적으로 판단하였다. 또한 단순한 계통 부하의 변동에 대해서는 고립 운전으로 잘못 판단하는 경우가 나타나지 않아 제안된 검출 기법이 안정적인 성능을 갖고 있음을 알 수 있었다.

8.1 분산전원의 고립 운전 검출 결과

그림 5는 분산전원이 배전 계통의 834 버스에 연결되었을 때, 53 msec에서 834 버스 전단에 설치되어 있는 차단기가 동작하여 고립 운전이 발생한 경우의 검출 알고리즘 모의 결과이다. 이와 같은 고립 운전시에는 고립 운전 전후의 부하 변화가 심하여 검출 룰 1에 의해 119 msec에서 고립 운전으로 판단하게 된다. 각 파라미터의 값을 나타낸 그림에서 각각의 굵은 실선은 해당 파라미터만으로 고립 운전을 판단한다고 가정했을 때의 고립 운전 판단 여부를 나타내는 트

립신호를 예시한 것이다. 이 경우 고립운전 판단의 기준값은 검출 룰에서 사용한 값을 적용하였다.

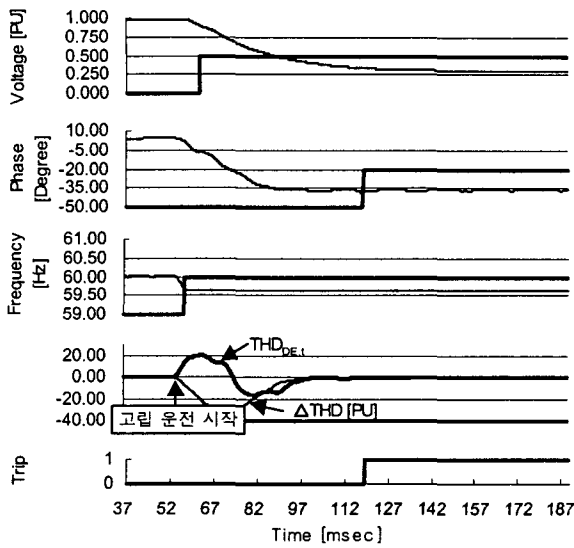


그림 5 부하 변화가 큰 경우의 고립 운전 검출 결과
 Fig. 5 Detection results for islanding operation with large variation of load of DR

그림 6은 분산전원을 858 버스에 연결되어 있는 계통 부하에 투입시키고 부하 전단의 차단기를 동작시켜, 고립 운전 후 분산전원이 담당하는 부하의 변화를 적게 한 경우에 대한 모의 결과이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 부하 변화가 적기 때문에 전압, 주파수, 위상의 변화가 고립운전 판단 기준치 이하가 된다. 그러나 고조파 왜형률의 변화율은 적지 않은 변동을 보이기 때문에 제안된 고립운전 검출 룰 2에 의해 121 msec에서 고립운전이 효과적으로 검출되었다.

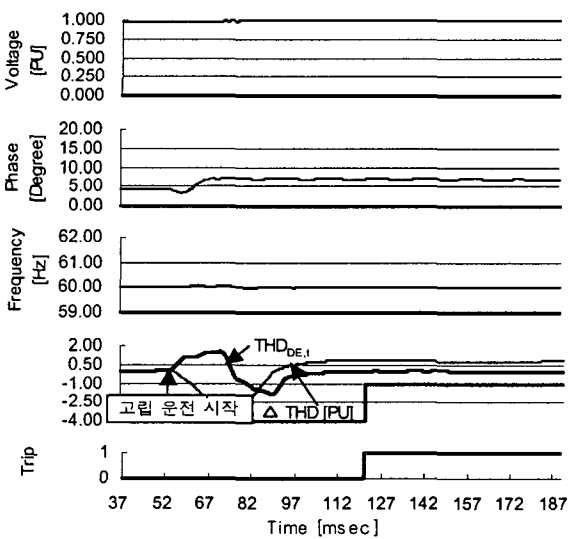


그림 6 부하 변화가 적은 경우의 고립 운전 검출 결과
 Fig. 6 Detection result for islanding operation with small variation of load of DR

8.2 정상적인 연계운전시 부하 변화에 따른 영향

제안된 고립 운전 검출 기법의 신뢰성을 테스트하기 위하여 정상적인 분산전원의 연계운전상황에서 계통 부하가 증가하거나 감소하는 것에 의해 검출알고리즘이 영향을 받는지에 대해 모의하였다.

8.2.1 부하 증가 시의 영향

분산전원을 858 버스에 투입시키고, 53 msec에서 834 버스의 부하를 840 버스 용량의 5배 만큼을 증가시켰다. 일반적인 계통 부하증가의 형태인 R-L부하 증가에서는 전압, 주파수, 위상특성에 대하여 변화가 적으므로, 부하 변화가 적을 때의 고립 운전과 비슷한 특성을 갖는다. 그러나 이와 같은 큰 부하 증가에서는 과도기적인 고조파의 변화가 나타나지만, 고립 운전과 다르게 부하증가 전후의 고조파의 크기 변화가 심하게 나타나지 않으므로 정상상태로 판단하였음을 알 수 있다.

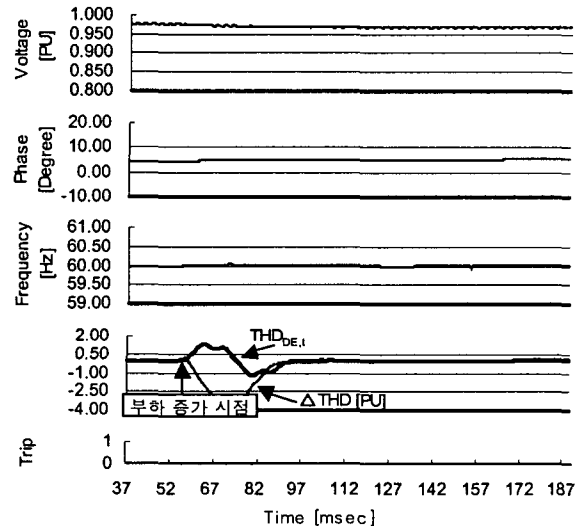


그림 7 부하 증가 시 판단 결과

Fig. 7 Detection result for increase of system load

8.2.2 부하 감소 시의 영향

첫 번째로 분산전원이 840 버스에 연결되었을 경우에 대해, 844 버스와 848 버스에 계통 평형용으로 설치되어 있는 커패시터 뱅크를 동시에 제거하여 검출 알고리즘을 적용하였다. 두 번째로 분산전원이 858 버스에 연결되었을 경우에 대해, 834 버스 부하단의 계통부하를 일시에 모두 제거하여 큰 계통 변화에 대하여 검출 알고리즘을 적용시켜 보았다. 커패시터 뱅크의 제거시에는 위상 변위와 주파수 변화율이 고립운전 판단 기준치보다 큰 변화를 나타내었다. 그러나 이러한 파라미터의 급격한 변화에도 불구하고 제안된 검출 알고리즘은 효과적으로 부하 변동과 고립 운전을 구분함을 보였다. 마찬가지로, 두 번째의 계통 부하의 제거에 대해서도 고립 운전과 부하변동을 정확히 판단하였다. 커패시터

뱅크 제거와 계통 부하제거에 대한 시뮬레이션 결과를 그림 8, 9에 나타내었다.

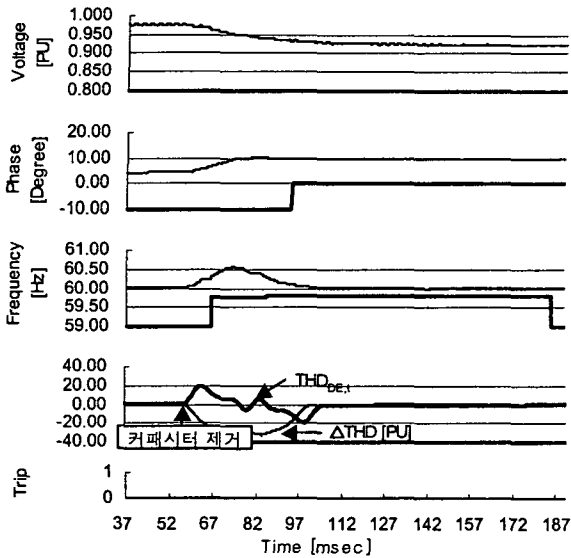


그림 8 커패시터 뱅크 제거 시 검출 결과

Fig. 8 Detection result for removal of a capacitor bank

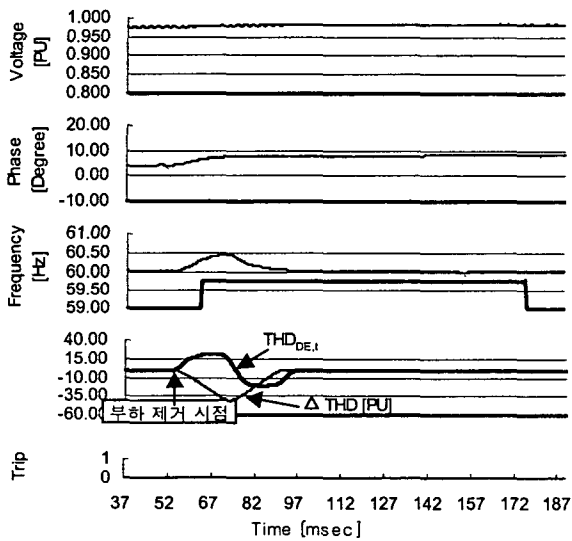


그림 9 계통 부하 제거 시 검출 결과

Fig. 9 Detection result for removal of system loads

9. 결 론

본 논문에서는 다양한 시스템 파라미터를 이용하여 분산전원의 고립운전을 검출하는 새로운 형태의 고립 운전 검출 기법을 제안하였다. 시뮬레이션 결과를 통해서, 제안된 기법이 고립 운전 모드에서 분산전원 출력변화에 관계없이 고립운전을 효과적으로 검출할 수 있으며, 고립운전과 부하변동을 정확히 구별함을 볼 수 있었다. 제안된 방법은 전압, 주파수 변화율, 위상 변위, 전류 고조파분석을 통해 검출 알고

리즘을 구성하여, 기존의 능동적인 검출방법들과는 달리 분산전원 출력과 계통에 변화를 주지 않으며, 고립 운전 전후 부하변화가 적을 경우에도 효과적으로 이를 검출할 수 있음을 보여주었다. 그리고 고립 운전과 유사한 특성을 가지고 있는 부하증가, 부하제거, 커패시터 뱅크의 제거 등에 대하여도 고립운전으로 잘못 판단하지 않음을 보였다.

향후에는 새로운 검출 파라미터의 추가, 유도기기 부하의 운전 모의, 검출 알고리즘의 지능화 등을 통해 더욱 향상된 분산전원 고립운전 검출 기법을 개발할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 명지대학교 차세대 전력기술 연구센터의 지원에 의한 것입니다

참고 문헌

- [1] Philip P. Barker, Robert W. de Mello, "Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part1- Radial Distribution Systems." IEEE, No. 0-7803-6420-1/00, 2000
- [2] O Usta, M. A. Refern, "Protection of Dispersed Storage and Generation Units Against Islanding." IEEE, No. 0-7803-1772-6/94, 1994
- [3] M A Redfern, O Usta and J I Barrett, "Loss of Grid Protection for an Embedded Generator." IEE, 1993
- [4] P. O'Kane, B. Fox, "Loss of Mains Detection For Embedded Generation by System Impedance Monitoring." IEE, Conference Publication No. 434, 1997
- [5] 장성일, 박준식, 김광호, 박종근, 김재연, "PSCAD/EMTDC를 이용한 분산전원의 계통연계 운전 특성 분석" 2000년 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2000. 7월, pp. 113-115
- [6] IEEE Distribution Planning Working Group Report, "Radial Distribution Test Feeders." IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, No. 3, August 1991
- [7] 장성일, 김광호, "분산전원의 고립 운전 검출 기법 개발" 2001년 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, 2001. 5월, pp. 42-45
- [8] Engineering Recommendation G.59 : "Recommendations for the connection of Private Generating Plant to the Electricity Boards' Distribution System, June 1985.

저 자 소 개



장 성 일 (張 成 一)

1971년 8월 30일 생. 1996년 강원대 전기 공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 033-250-6290, Fax : 033-241-3775

E-mail : sijang@mirae.kangwon.ac.kr



김 광 호 (金 光 鎬)

1966년 1월 17일 생. 1988년 서울대 전기 공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1995년~현재 강원대 전기 전자정보통신공학부 부교수

Tel : 033-250-6298, Fax : 033-241-3775

E-mail : khokim@kangwon.ac.kr