

분산 전원의 고립 운전 검출 기법 개발

장성일 김광호
강원대학교 전기전자정보통신공학부

Development of a Loss of Mains Detection Method for Distributed Resources

S. I. Jang K. H. Kim
Department of Electrical and Computer Engineering, Kangwon National University

Abstract - The islanding protection 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 on distributed network resulting from islanding operations of DR, it is necessary to detect the loss of mains (LOM) effectively. This paper presents a new LOM detection method using the rate of change in total harmonic distortion (THD) of current. The proposed method effectively detects LOM of the DR unit operating in parallel with the distribution network. We also verified the efficiency of the proposed method using the radial distribution network of IEEE 34 bus model.

1. 서 론

최근에 들어서 에너지 환경의 변화, 발전사업의 민영화 등에 따라 대체에너지를 포함한 다양한 형태의 분산 전원 보급의 확대가 예상되고 있다. 그러나 분산전원의 계통연계는 기존 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 재투입 이상의 불평형으로 인한 기기 손상, 전력품질의 저하 및 계통 복구의 어려움 등 많은 문제를 일으킬 가능성이 높다^[1]. 따라서 리클로저의 재투입 이전 및 고립운전으로 인해 분산전원 운전의 변화가 생기기 이전에, 분산전원의 고립 운전을 신속히 검출하여 계통으로부터 분산전원을 절체시키는 것이 매우 중요하다.^{[1][2][3]}

분산전원의 고립운전 상태는 분산전원 자체의 출력을 계속 변동하면서 연계 운전시와 고립 운전시의 계통 변화를 감지하여 검출할 수 있다. 그 대표적인 기법으로 Reactive Export Error Detector, Fault Level Monitor^{[2][3]} 등이 제안되어 있다. 그러나 이러한 방법은 분산전원의 출력을 항상 변동하여야 하므로 계통에 여러 가지 의도하지 않은 영향을 미칠 가능성이 있으며, 검출에 많은 시간이 필요하다는 단점이 있다. 또 다른 방법으로는 연계운전시와 고립운전시 계통의 여러 가지 파라미터의 변화를 이용하여 고립운전을 검출하는 방법으로 전압변동, 주파수변동, 주파수변화율, 위상변위, 발전기 출력변동, 계통임피던스 변동 등을 모니터링하는 방법들이 제안되어 있다.^{[2][3]} 이런 방법들은 분산전원의 출력을 변화시키는 방법과는 달리 계통에 영향을 주지 않는다는 장점이 있으나, 고립 운전시 분산전원이 담당하는 부하가 고립운전 이전에 비해 변화가 적으면, 계통

상의 파라미터의 변화가 적어서 고립운전 검출이 어렵다는 단점이 있다.

본 논문에서는 기존의 방법의 취약점을 종합적으로 개선하고자 전류 고조파 왜형율의 변화를 분석하여 분산전원의 고립운전을 검출하는 새로운 형태의 고립운전 검출 기법을 제안하고자 한다. 새롭게 제안한 방법에서는 전류 고조파 왜형률 변화를 감시하여 고립운전 상태 여부를 판단하기 때문에 고립운전 전후의 부하 변화가 클 때는 물론 적을 때도 효과적으로 고립운전여부를 판단하게 된다. 제안된 방법을 평가하기 위해 IEEE 34-bus 배전 계통에 분산전원을 연계한 모델을 대상으로 시뮬레이션 수행하였으며, 테스트 결과 전술한 계통조건하에서 효과적으로 고립운전을 검출하는 것을 확인할 수 있다.

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 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 전압원과, 인버터, 고조파 제거를 위한 필터 및 변압기, 차단기로 모델링하였다. 계통에 연계된 분산전원의 출력 전압의 위상과 크기를 계통 전압과 일치시키기 위해 SPWM (Sine Pulse Width Modulation) 기법을 이용하여 인버터 출력을 제어하도록 모델링 하였으며, 고립 운전으로 인해 발생하는 계통 전압에 대한 위상상실을 방지하기 위하여 PLL(Phase Locked Loop) 기법을 적용하였다.^{[4][5]}

2.2 배전 계통 모델링

배전 계통은 단락용량이 1800[MVA], 선간전압이 24.9[kV]인 IEEE 34-bus의 데이터틀 사용하였다.^[6] 배전선은 단상과 삼상이 혼합된 가공선로서 계통 평형을 위한 병렬 커패시터가 844, 848 버스에 각각 연결되어 있다. 그림 1에 모델링된 배전계통을 단선도로 나타내었다. 그림에서 SW1은 고립운전 후 분산전원이 담당하는 부하의 변화가 적은 경우, SW2는 고립운전 후 분산전원이 담당하는 부하의 변화가 큰 경우를 모의하기 위해 임의로 설치하였다.

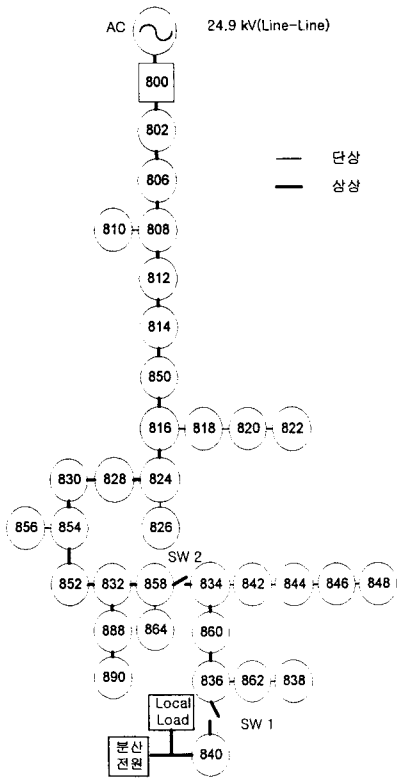


그림 1 배전 계통도

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 1의 계통모델 상에서 두가지 경우를 시뮬레이션한 결과를 통해 각각의 특성을 기술하면 다음과 같다.

3.1 부하의 변화가 클 경우의 계통 변화

그림 1의 배전 계통에서 SW2의 동작(53ms에서)으로 고립운전 전후의 부하변화가 큰 상태를 모의하였다. 고립 운전 모드에서 분산전원 부하에는 844, 848 bus에 연결된 큰 용량의 커패시터가 포함됨에 따라 그림 3처럼 진상역률이 나타나는 것을 볼 수 있다. 전술한 것처럼 분산전원의 담당부하 변화가 큰 고립운전 시에 나타나는 일반적인 특성인 전압감소, 전류증가, 주파수 변화, 큰 위상차, 많은 고조파 변화 등이 그림 2, 3, 4, 5와 같이 나타남을 볼 수 있다.

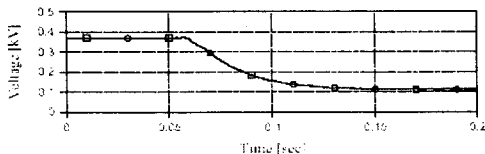


그림 2 분산전원 전압 실효치

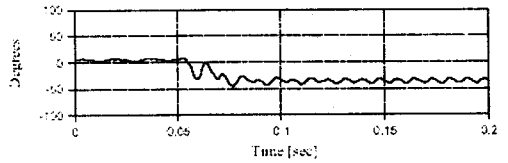


그림 3 분산전원 전압, 전류 위상차

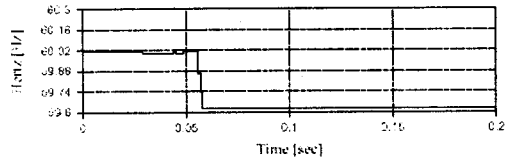


그림 4 분산전원 주파수

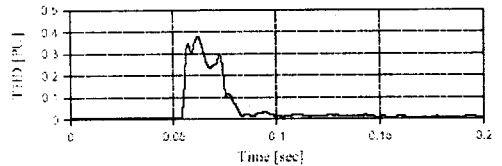


그림 5 분산전원 전류의 고조파 왜형률

3.2 부하의 변화가 적은 경우의 계통 변화

역시 그림 1의 배전 계통에서 SW1의 동작(53ms에서)으로 고립운전 전후의 부하변화가 적은 상태를 모의하였다. 그림 6, 7, 8에서 보이는 바와 같이 전압, 위상, 주파수 변동이 거의 발생하지 않기 때문에 기존의 방법으로는 고립운전의 검출이 거의 불가능하다.

그러나 고립운전 전후의 전류고조파 왜형률을 나타낸 그림 9를 살펴보면 알 수 있듯이, 분산전원 출력의 변화가 적더라도 고립운전에 의해 계통부하의 구성이 달라지기 때문에 고조파 왜형률에 있어서는 변화가 발생하게 된다. 따라서 전류고조파 왜형률의 변화를 지속적으로 모니터링하면 고립운전을 효과적으로 판별할 수 있다고 판단하였다.

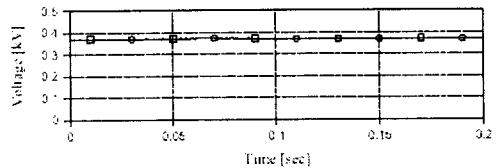


그림 6 분산전원 전압 실효치

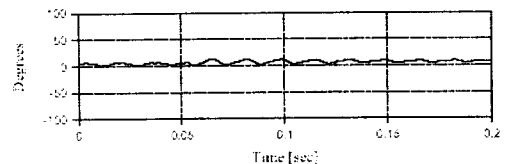


그림 7 분산전원 전압, 전류 위상차

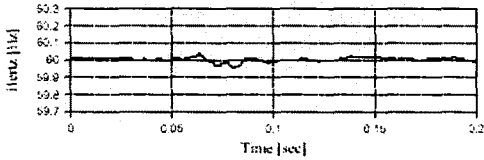


그림 8 분산전원 전압 주파수

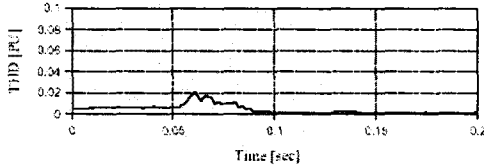


그림 9 분산전원 전류의 고조파 왜형률

4. 전류 고조파 왜형률을 이용한 고립운전 검출

연계운전시 분산전원의 전류 고조파 왜형률은 분산전원 자체에서 생성되는 고조파 발생분과 계통 부하, Local load의 영향으로 발생하는 고조파의 합으로 나타난다. 이후 분산전원이 고립운전 모드로 될 때 고조파를 발생시키는 계통부하의 구성이 달라지므로 분산전원 출력 전류의 왜형률은 달라지게 된다. 본 연구에서는 다음과 같은 지수들을 정의하여 고립운전을 검출하도록 하였다.

먼저 t 시점의 고조파 왜형률(THD_t)을 (1)과 같이 정의한다.

$$THD_t = \frac{t \text{ 시점의 고조파 크기의 합}}{t \text{ 시점의 기본파 크기}} \quad (1)$$

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 2와 같이 정의한다. 여기서 N 은 1주기 샘플링 개수를 의미한다.

$$THD_{avg,t} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} THD_{t-i}}{N} \quad (2)$$

전류 고조파 왜형률의 변화를 평가하기 위하여 다음 (3)과 같은 변화율을 정의하였다.

$$\Delta THD_t = \frac{THD_{avg,S} - THD_{avg,t}}{THD_{avg,S}} \times 100 \quad (3)$$

여기서 $THD_{avg,S}$ 는 고조파 왜형률의 기준이 되는 값을 의미하는데, 초기의 고조파 왜형률로 설정된 후에도 변화율 ΔTHD_t 가 70%이내에서 1주기 이상 계속 유지되면 이때는 $THD_{avg,t}$ 로 갱신하여 계통의 정상적인 변화에 적응하도록 하였다. 본 검출 알고리즘에서는 ΔTHD_t 가 70%이상의 값으로 1주기 이상 유지될 경우 고립운전으로 판단하도록 하였다.

또한, 보다 안정적인 판단을 위해 순간적으로 큰 값의 고조파 왜형률의 변화가 발생하는 과도기는 판단에서 제외하였다. 이를 위해 다음 (4)와 같은 고조파 왜형률의 경사지수 $THD_{DE,t}$ 를 정의하고, 이 지수가 일정값이하가 될 경우에만 고립운전 검출 판단을 수행하도록 하였다. 본 논문에서는 이 값을 0.1로 설정하였다.

$$THD_{DE,t} = \frac{THD_{avg,t} - THD_{avg,t-1}}{t_s} \quad (4)$$

여기서 t_s 는 샘플링 간격을 의미한다.

5. 테스트 결과

본 논문에서 제안된 분산전원 고립 운전 검출 기법을 검증하기 위해 고립 운전 전후의 부하 변화가 큰 경우와 적은 경우, 또한 기존 검출 기법에서는 고립운전으로 오인하기 쉬운 계통 부하의 변동에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 테스트 결과 제안된 검출 기법은 부하 변화의 크기에 무관하게 고립 운전을 효과적으로 검출하였으며 계통 부하의 변동에 대해서는 고립운전으로 오인하지 않는 안정적인 특성을 나타내었다.

5.1 분산전원의 부하 변화가 적은 고립 운전

그림 1의 배전 계통에서 SW1의 동작(53ms에서)으로 고립운전 전후의 부하변화가 적은 상태에 대해서 제안된 검출기법을 적용하였다. 그림 10에서 나타난 것처럼 ΔTHD_t 가 70% 이상 1주기 이상 유지되는 122ms에서 고립운전상태임을 판단함을 볼 수 있다. 특히 고립 운전 검출 시간이 122ms로, 일반적인 리클로저의 재투입 시간인 500 ms 보다 빠른 동작을 보여 리클로저의 재투입으로 발생하는 기기 손상의 예방 가능성을 보여주고 있다.

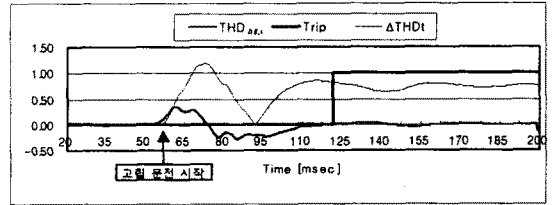


그림 10 고립 운전 검출 결과

5.2 분산전원의 부하 변화가 큰 고립 운전

그림 1의 배전 계통에서 SW2의 동작(53ms에서)으로 고립운전 전후의 부하변화가 큰 상태에 대해서 제안된 검출기법을 적용하였다. 역시 그림 11에서 나타난 것처럼 ΔTHD_t 가 70% 이상 1주기 이상 유지되는 134ms에서 고립운전상태임을 판단함을 볼 수 있다.

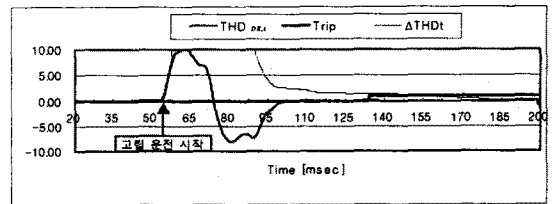


그림 11 고립 운전 검출 결과

5.3 계통 부하 변동 (R-L 부하의 감소)

분산전원의 연계 운전시, 840-bus에 연결된 R-L부하를 제거하여 계통 부하 변동을 모의하였다. 그림 12는 본 검출 기법의 적용상황을 나타내고 있는데, 부하 변동 이후의 ΔTHD_t 가 50%이하의 값을 갖고 변화함으로써 고립운전이 아닌 것으로 판단하고 있음을 보여주고 있다.

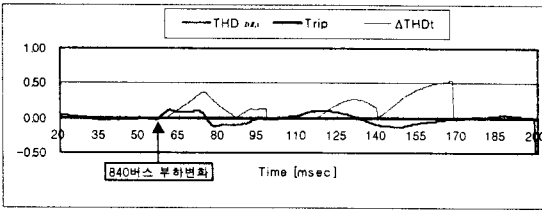


그림 12 부하(R-L) 감소 시 검출 결과

5.4 계통 부하 변동 (R-L-C 부하의 감소)

분산전원이 연계되어 있는 배전 계통에 더 큰 변화를 주기 위하여 848버스에 연결되어있는 R-L-C 부하를 제거하였다. 848버스에는 계통평형을 위해서 큰 용량의 커패시터가 투입되어 있어, 부하 제거 시 계통에 매우 큰 과도 상태가 나타난다. 따라서 큰 과도상태로 인하여 기존 검출기법에서는 고립 운전상황으로 오인되는 경우가 자주 발생한다. 그림 14는 이러한 계통상황에서의 주파수 변화를 나타낸 것으로 주파수 변동을 통해 고립운전을 판별하는 기존 방법에 있어서는, 이 방법에서 일반적으로 사용하는 고립운전 판단 설정치 0.3 Hz/sec을 적용할 경우, 정상적인 계통부하 변화임에도 불구하고 고립 운전으로 오인하게 된다. 그러나 그림 13에서 보인 바와 같이 제안된 검출기법은 정상적인 연계운전 상황으로 판단하고 있음을 보여주고 있다.

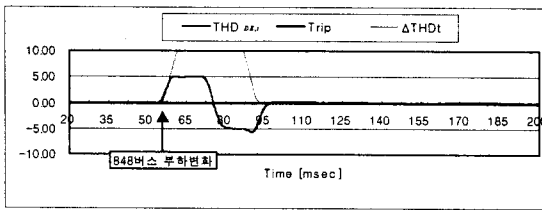


그림 13 부하(R-L-C) 감소 시 검출 결과

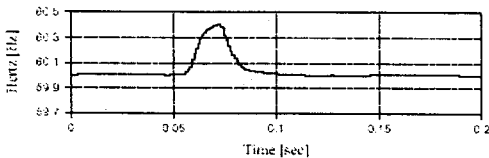


그림 14 분산전원 전압 주파수

6. 결 론

본 논문에서는 전류 고조파 왜형을 분석을 통하여 분산전원의 고립운전을 검출하는 새로운 형태의 고립운전 검출기법을 제안하였다. 시뮬레이션 결과를 통해서, 제안된 기법이 분산전원 출력변화에 관계없이 고립운전을 효과적으로 검출할 수 있으며, 고립운전과 부하변화를 정확히 구별함을 볼 수 있었다. 제안된 방법은 전류 고조파분석을 통해, 기존의 검출방법들과는 달리 분산전원 출력과 계통에 변화를 주지 않으며, 고립 운전 전후 부하변화가 적을 경우에도 효과적으로 이를 검출할 수 있음을 보여주었다. 특히 계통에 고조파를 발생시키고, 분산전원의 출력에 변화가 적을 가능성이 많은 고저항 사고시, 제안된 방법은 효과적인 검출 특성을 보이리라 기대된다.

향후에는 보다 많은 계통 상황에 대해 적절히 대처할 수 있도록 다양한 계통 시뮬레이션을 진행하고, 추가적

인 검출 파라미터를 선정할 예정이다. 다양한 계통 운전 형태 하에서 고립운전은 단일의 파라미터만을 사용하여서는 효과적으로 검출하기가 거의 불가능하다고 보여진다. 따라서 향후에는 다양한 파라미터를 종합적으로 고려하여 고립 운전을 검출하는 지능형의 알고리즘을 개발할 예정이다.

(참 고 문 헌)

- [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] P. O'Kane, B. Fox, "Loss of Mains Detection For Embedded Generation by System Impedance Monitoring." IEE, Conference Publication No. 434, 1997
- [4] 장성일, 박준식, 김광호, 박종근, 김재인, "PSCAD/EMTDC를 이용한 분산전원의 계통연계 운전 특성 분석" 2000년 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2000. 7월, pp. 113-115
- [5] 박준식, 장성일, 김광호, "PSCAD/EMTDC를 이용한 분산전원이 연계된 배전계통의 사고 모의" 전력계통 보호제어 연구회 기술세미나 논문집, 2000. 11월, pp. 112-117
- [6] IEEE Distribution Planning Working Group Report, "Radial Distribution Test Feeders." IEEE Tr. on Power Systems, Vol. 6, No. 3, August 1991