

고조파성분을 이용한 인버터기반 분산전원의 고립운전 감지기법 연구

이수형*, 박정욱*
연세대학교*

An Investigation of Islanding Detection Method by Using High-Frequency Component of Inverter-Based Distributed Generation

Soo-Hyoung Lee*, Jung-Wook Park*
Yonsei University*

Abstract - 고립운전이 발생하면 고립운전 자체로 안전성 문제가 발생할 뿐만 아니라, 기존의 계통과 재결합에 있어 계통과의 위상차 및 전압 차로 인한 기기손상 및 안전의 문제가 야기되므로, 고립운전을 감지할 수 있는 기술이 필요하다. 이번 논문에서는 인버터를 기반으로 하는 분산전원의 고조파 성분을 이용하여 기존의 고립운전 감지기술로는 찾아 내지 못하는 고립운전 상태를 감지하는 방법을 기술한다. 또한 외적작용이 없는 방법(passive method)을 사용함으로써, 능동적 고립운전 감지기법(active method)으로 인한 시스템의 안정성 저하문제를 근본적으로 해결한다.

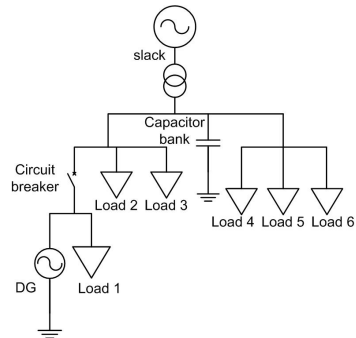
1. 서 론

전 세계적으로 에너지소비량은 지속적으로 증가하고 있고, 이중 전기 에너지가 차지하는 비율은 점차 커지고 있다. 그러나 환경 및 비용의 문제로 인해 새로운 발전 및 송전시설의 설치에 제약이 받고 있어, 전력을 지속적으로 공급하기 위해서는 새로운 방식의 접근이 필요하다. 이에 대한 대안으로 분산전원 기술이 각광을 받고 있으며, 분산전원은 짧은 건설기간, 첩두부하에 대한 높은 대응력 및 낮은 송전손실의 장점을 가지고 있다. 이러한 분산전원을 이용하기 위해서는 기존의 계통에 연결해야 하는데, 전력계통 전체 공급전력 대비 분산전원의 비율이 증가함에 따라 기존 계통에 주는 영향이 커지기 때문에 분산전원의 계통연계 연구가 많이 필요하다. 분산전원의 계통연계 연구를 전력공급의 신뢰성 및 안정성 확보와 계통 내 전력손실 감소로 나눌 때, 분산전원의 고립운전 방지는 전자에 해당한다. 분산전원의 고립운전이 발생하면, 설비 유지 보수 과정에서의 작업자 안전 문제 및 계통과의 재결합 과정에서의 기기손상 문제가 야기된다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 각 모선에서의 조류흐름 및 전압을 측정하여 제어하는 방법이 있으나, 이 경우 수많은 센서 및 데이터 전송선로와 고성능의 중앙제어장치가 필요하므로 비용을 고려할 때 효율적이지 않다. 또한 전력시스템의 규모가 방대하므로, 시스템 전체를 측정하여 일괄적으로 제어하는 것은 현실성이 없다. 따라서 개별 분산전원이 고립운전을 감지하여 계통으로부터 분리되는 것이 현실적인 방안이 된다. 분산전원의 고립운전을 감지하는 기존의 방법은 분산전원의 고정된 전력공급량과 고립운전발생시 부하의 전력소모량이 많은 차이를 보이는 경우에는 고립운전을 감지할 수 있지만, 그 용량이 서로 비슷한 경우에는 고립운전 상태를 감지하지 못한다[1]. 이러한 문제를 해결하기 위해서 인위적인 변화를 가하여 고립운전을 감지하는 방법(active method)이 많이 개발되었지만, 고립운전이 발생하지 않았을 때에도 고립운전으로 판단하는 문제 등이 발생한다[2]. 이번논문에서는 인위적인 변화를 가하지 않고(passive method) 고립운전을 보다 정확하게 감지하기 위해, 인버터기반 분산전원의 고조파성분을 이용한 감지기법을 제안하며, PSCAD/EMTDC를 이용하여 그 유효성을 보인다.

2. 고조파성분을 이용한 고립운전 감지

2.1 고립운전에 따른 계통의 임피던스 변화

대체로 분산전원은 부하 가까이 위치하며, 또한 부하 주변에는 무효전력의 공급을 통한 전압보상을 위해 캐패시터뱅크가 설치되어 있다. 일반적으로 캐패시터뱅크는 비용대비 최대의 효과를 위해 부하가 집중되는 모선에 위치한다[3]-[5]. 그림 1은 분산전원이 연결된 배전계통을 나타낸 것이다. 고립운전 상태의 분산전원 공급전력량과 부하의 전력소모량이 일치할 경우, 기본 주파수(60Hz)에서의 분산전원에서 바라본 차단기 작동 전후의 회로 임피던스는 slack 모선 공급전력으로 인해 유사하게 판단되므로, 기본주파수의 정보만을 사용하는 기존의 방법으로는 고립운전을 감지하기 힘들다.



<그림 1> 분산전원 연결 배전계통

일반적으로 분산전원은 기존의 발전기에 비해 규모가 작아 인버터를 통해 계통에 연계된다. 인버터의 출력은 스위치의 동작으로 인해 필연적으로 고조파 성분이 포함되어 있으며, 이 성분은 부하에서 발생하는 고조파성분과 달리 특정 주파수에 집중되고 규칙적으로 반복된다. 인버터 스위치 주파수에 대한 차단기 작동 전후의 임피던스 변화를 나타내기 위해 다음과 같이 파라미터를 정의하였다.

- R_1 : Load 1의 저항
- L_1 : Load 1의 인덕턴스
- R_2 : Load 1을 제외한 다른 부하전체의 등가 저항
- L_2 : Load 1을 제외한 다른 부하전체의 등가 인덕턴스
- L_s : 변압기의 인덕턴스
- C : Capacitor bank의 캐패시턴스

그림 1의 회로에서 slack 모선에 연결된 변압기의 고조파에 대한 임피던스는 변압기의 인덕턴스 값으로 인해 매우 큰데 반해, 캐패시터뱅크의 고조파에 대한 임피던스는 매우 작으므로 대부분의 고조파 성분은 slack 모선으로 흘러가지 않고 캐패시터뱅크로 흘러들어간다. 따라서 고조파에 대한 등가회로에서 slack 모선의 영향은 무시할 수 있으므로, 차단기 작동 전 임피던스는 변압기의 영향을 고려하지 않고 계산하였다. 차단기 작동 전 임피던스를 Z_c 라 하면, 다음과 같은 등가 식으로 나타낼 수 있다.

$$Z_c = \frac{1}{1/R_1 + 1/R_2 + jwC - j/wL_1 - j/wL_2 - j/wL_s} \quad (1)$$

마찬가지로 차단기 작동 후의 임피던스를 Z_o 라 하면, 다음의 등가 식으로 정리된다.

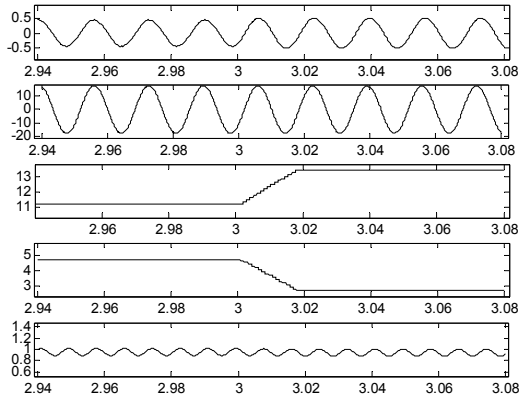
$$Z_o = \frac{1}{1/R_1 + 1/jwL_1} \quad (2)$$

식 (1), (2)로 부터 차단기 작동 전 임피던스에 대한 작동 후 임피던스의 비율을 구할 수 있으며, 이로부터 고립운전을 감지할 수 있다.

2.2 고립운전에 따른 전류의 고조파성분 변화

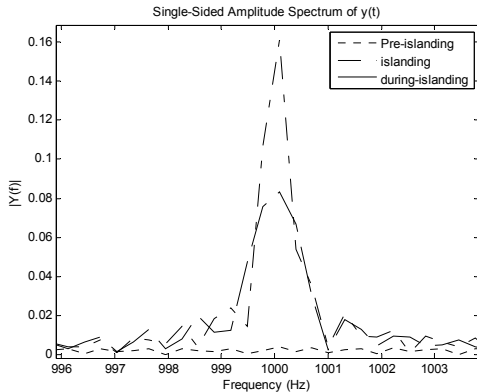
일반적으로 사용하는 인버터는 전류제어 인버터 이므로[6], 정격전압을 유지하며 전류의 고조파 성분을 일정하게 유지하는 전원을 구성하였다. 그림 1에서 DG, 부하 1, 부하 1을 제외한 부하총합의 값을 각각 15 MW, 15 MW + 3 MVAR, 500 MW + 100 MVAR로 설정하고, capacitor bank의 값은 103 MVAR로 구성하여 고립운전에 의한 기본주파수에서의 전압 및 전류변화가 거의 없는 상태를 설정하였다. 설정된

값으로부터 구한 R_1, R_2, L_1, L_2, C 와 식 (1), (2)로부터 차단기 작동에 따른 임피던스의 변화를 구하면, 인버터의 고조파 성분이 1 kHz일 때 작동 전 임피던스의 120 배로 증가한다. 따라서 전압의 고조파 성분은 차단기 작동에 의해 크게 증가하므로, 전압의 고조파 성분을 측정하여 고립운전을 감지할 수 있다. 그림 2는 DG의 기본주파수 선상전압 성분이 13.22 kV이고, 1 kHz전류 성분이 기본주파수 대비 약 1 %일 때 고립운전에 따른 변화를 보여준다.



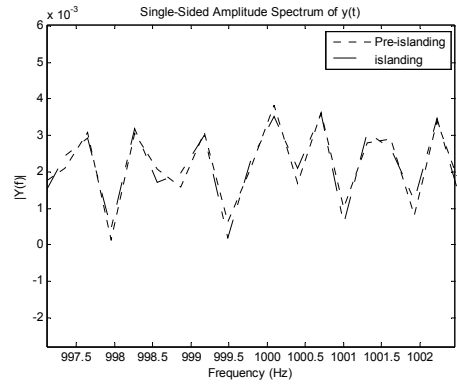
〈그림 2〉 고립운전에 따른 변화

그림 2의 아래쪽 그래프는 전압의 크기를 나타내며, 고립운전으로 인한 변화가 거의 없으므로 기존의 방법으로 고립운전을 감지할 수 없다. 가운데의 유효전력과 무효전력의 변화는 부하의 구성성분의 변화로 인한 것으로 고립운전이 아닌 부하의 변화에 의해서도 나타나므로 고립운전 감지로 사용하기에 적절하지 않다. 위에서 첫 번째, 두 번째 그래프는 각각 고립운전에 따른 전류 및 전압의 고조파 성분 변화를 나타내고 있으며, 그림 3은 푸리에 변환을 통한 전압의 고조파 성분의 변화를 나타낸 것이다.



〈그림 3〉 차단기 동작에 따른 고조파성분의 변화

그림 3은 분산전원에서 공급되는 전압을 푸리에변환을 통해 주파수 분석을 하여, 차단기 동작 전후의 1 kHz 성분을 비교한 것이다. 푸리에 변환에 사용한 값은 샘플링 시간이 2 초이며, 가장 위쪽부터 고립운전 전, 고립운전 전환시점, 고립운전 후의 값을 나타낸다. 각 값은 0.161, 0.083, 0.004 이며, 이는 고립운전 전후 고조파 성분은 각각 기본주파수 대비 0.03 %, 1.22 %임을 나타낸다. 고립운전 전후의 값을 각각 1 초씩 샘플링 한 경우는 0.61 %이므로, 기본주파수 대비 고조파 성분의 변화가 약 0.6 %를 넘을 때를 기준으로 하면, 1 초 내에 모든 고립운전을 감지할 수 있고, 이는 IEEE std. 929-2000을 만족한다. 고립운전 전후의 고조파 성분 차이는 약 40 배정도이며, 본 절 서두에서 언급한 수치와 차이를 보인다. 앞서 언급한 수치는 계통에 연결된 성분들의 기본적인 특징만을 고려하여 단순화한 모델을 통한 결과이므로, 두 결과의 단순한 수량적 비교보다는, 차단기 작동 전후 고조파성분이 크게 변화함을 통해 인버터에서 발생하는 고조파 성분을 이용해 고립운전을 정확하게 감지할 수 있음을 확인한 것에 의미가 있다.



〈그림 4〉 부하 변화에 따른 전압의 고조파성분의 변화

그림 4는 부하가 515 MW + 103 MVAR에서 565 MW + 113 MVAR로 갑자기 증가할 때의 전압의 고조파 성분 변화로, 부하의 증가에 따른 고조파 성분의 변화가 거의 없다. 고립운전이 발생하기 전 전압의 1 kHz 성분은 0.03 %로 THD성분에 포함되지는 않으나 이와 가까운 17th 고조파 성분을 고려할 때, IEEE std 1547-2003규정을 만족한다.

3. 결 론

본 논문은 PSCAD/EMTDC를 이용해 고립운전에 따른 고조파성분의 변화를 분석하였으며, 배전계통이 전체 전력계통에 연결될 때에는 변압기를 통하여 연결되기 때문에 변압기의 큰 인덕턴스 성분으로 인해 고조파 성분이 전체 전력계통에 주는 영향은 매우 작다. 또한 같은 이유로 전체 전력계통에서의 고조파 성분이 배전계통에 주는 영향도 매우 작다. 따라서 다기의 분산전원이 계통에 연계 될 때에도 상호간 영향을 주지 않으면서 고립운전을 정확히 감지할 수 있으며, 변압기를 거치지 않고 배전계통 내에서 다기의 분산전원을 연계 할 때에는 각 인버터의 스위치 주파수를 다르게 하여 고립운전을 감지할 수 있다. 이번 논문을 통해 고립운전을 감지하여 스스로 전력공급을 중단할 수 있는 인버터 개발에 스위치작동으로 인한 고조파 성분이 적극적으로 사용되리라 기대된다.

[감사의 글]

본 연구는 산업자원부 대학전력연구센터의 에너지자원 인력양성사업을 통한 연세대학교 계통적용 신전력기기 연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] S.H. Jang, and K.H. Kim, "An Islanding Detection Method for Distributed Generations Using Voltage Unbalance and Total Harmonic Distortion of Current" IEEE Transactions on power delivery, Vol.19, No. 2, April 2004.
- [2] H.H. Zeineldin, E.F. El-Saadany, and M.M.A Salama, "Islanding detection of inverter-based distributed generation" in proc of IEE Generation, Transmission and Distribution, Vol.153, No. 6, Nov. 2006.
- [3] J.J. Grainger, and S.H. Lee, "Optimum size and location of shunt capacitors for reduction of losses on distribution feeders" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.100, pp. 1105-1118, March 1981.
- [4] M. Baran, and F.F Wu, "Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.4, pp. 735-743, January 1989
- [5] M. Baran, and F.F Wu, "Optimal capacitor placement on radial distribution systems" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.4, pp. 725-734, January 1989.
- [6] F. De Mango, M. Liserre, A.D. Aquila, A. pigazo, "Overview of Anti-Islanding Algorithms for PV Systems. Part I:Passive Methods" in proc. of IEEE EPE-PEMC 2006, 12th International, pp. 1878-1883. Aug. 2006.