

태양광발전시스템을 위한 단독운전 검출기법

유 병 규*, 유 권 종**

(에너지기술연구원 태양광연구단 *선임연구원, **책임연구원)

1. 서론

현대의 전력계통시스템은 환경오염 및 화석연료의 고갈 문제 등으로 태양광 발전, 풍력 발전 등 신재생에너지 분산발전원이 널리 보급됨에 따라, 점점 더 복잡한 형태로 구성되고 있는 실정에 있다. 이러한 계통에 연계된 분산 발전원의 적극적인 대두로 인해 전력 계통상의 안정성과 전력 품질에 대한 우려가 제기되고 있는데, 그 중 가장 큰 주목을 받고 있는 것이 분산발전원의 단독운전 현상이다. 본 논문에서는 신재생 에너지 분산발전원 중 가장 보급이 활발한 태양광 발전의 단독운전 현상 및 방지 기법을 중심으로 논하도록 한다.

계통연계형 태양광 발전시스템의 단독운전 현상은 연계된 상용계통이 정전이 발생하였음에도 불구하고, 태양광 발전이 정지하지 않고 지속적으로 단독으로 발전을 지속하는 것으로 정의된다. 이러한 단독운전 현상으로 인해 발생하는 문제점을 크게 두 가지로 요약할 수 있는데, 첫째, 정전으로 인식한 계통유지요원의 안전사고를 일으킬 수 있으며, 둘째, 상용계통이 정전이었다가 복전시 상용계통 전압과 태양광 발전 전압의 비동기 재접속으로 인한 주변 설비의 손상을 일으킬 수 있다는 점이다.

이에 본고에서는 태양광발전시스템의 단독운전 방지 기술 및 동향에 대해서 전반적으로 소개하고자 한다. 내용은 단독운전 현상을 방지하는 기능을 태양광 시스템에 적용시키기

위하여 관련한 국내, 국외 기준들이 제시되어 강제성을 가지고 운영되고 있는데, 본고에서는 이러한 관련 기준들에 대해 우선 설명하고, 다음으로 현재까지 제시되었던 단독운전 검출기법들에 대한 기술들을 전반적으로 소개하도록 한다.

2. 단독운전 방지 관련 기준

단독운전 방지를 위한 여러 기준들이 현재까지 각국가 별, 대륙별로 차이를 보이면서 운용이 되고 있는데, 대표적인 국제 단독운전 방지 시험 기준으로는 IEEE 기준과 IEC 기준, 그리고 독일, 일본, 미국, 오스트리아, 영국, 네델란드, 스페인, 프랑스, 한국 등 각국에서 독립적으로 운영하는 단독운전

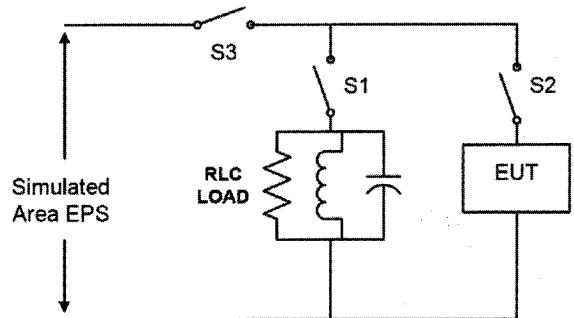


그림 1 IEEE Std. 1547.1의 단독운전 시험 회로도

방지 시험기준이 있다.

몇 가지 대표적인 기준을 살펴보면 다음과 같다.

IEEE Std. 1547.1-2005⁽¹⁾ 기준은 그림 1에서 EUT (Equipment Under Test)인 PV inverter를 정격으로 운전 시키고, 인버터에서 생산된 유효전력이 지역부하의 R 로 모두 소모를 시키고, 지역부하에 식(1)로 정의되는 Quality Factor를 1로 하는 공진 L, C 부하를 연결하도록 한다. 그리하여 그림 1의 S3를 통해서 흐리는 전류를 기본적으로 0으로 하여 조류 유효 전력을 0으로하고, S3를 개방하여 단독운전이 2초 이내에 검출이 되는지를 측정한다.

$$Q_f = R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (1)$$

IEC 62116⁽²⁾ 기준은 IEEE 1547.1 기준을 바탕으로 제정되어 2008년 9월에 공표가 되었으나, 관련국들이 자국의 전력계통이 전압, 주파수, 그리고 배전계통의 구성이 차이로 인해 IEC 기준을 자국의 단독운전 검출 기준에 부합화 시키는 데는 일정한 시간일 걸릴 것으로 예측되고 있다.

독일의 경우는 VDE 0126-1-1-2006⁽³⁾로 규정되어 단독운전 관련 시험을 두 가지를 수행하도록 되어 있다. 우선 조류 유효 전력이 0이 되도록하고, 그림 1의 S3와 직렬로 연결된 계통 임피던스가 1Ω 이 증가했을 때 이를 5초 이내 검출하는 것과 IEEE Std. 1547.1 처럼 공진부하를 대상으로 시험을 수행하는 데 Quality Factor를 2로 하고, 검출 시간을 5초 이내로 규정한다.

일본은 JET(Japan Electrical Safety & Environment Technology Laboratories)에서 시험을 규정하고 있고⁽⁴⁾, 일본의 경우는 단독운전 시험용 부하를 R, L, C 병렬 공진 부하를 사용하지 않고, No load의 Motor 부하를 투입한 뒤 조류로 가는 유효, 무효 전력을 0으로 하여 단독운전을 시험한다. 이때 단독운전 검출기법이 수동적이나 능동적이나에 따라 판정기준이 달라지는 데, 수동적 기법일 경우는 0.5초 이내에 검출하여야 하고, 능동적기법일 경우에는 0.5초 이상 1초 이내에 검출하도록 세부규정을 두고 있다.

한국의 경우는 현 지식경제부 고시를 바탕으로 단독운전 시험법이 규정되어 있고⁽⁵⁾, 정부의 국내 규격의 IEC 규격화 방침에 발 맞추어 금년부터 전면적으로 IEC 62116 기준을 채택하여 운영해 오고 있으나, 검출시간은 한국의 전력 계통 상황을 반영하여 0.5초 이내로 규정하고 있다.

3. 단독운전 방지 기법

태양광 발전시스템의 단독운전 방지 기법은 대표적으로 그 구현 위치에 따라서 두 가지로 분류가 되는데, 태양광발전 시

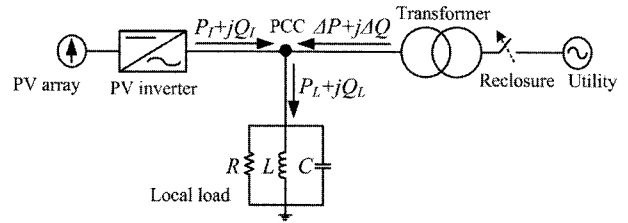


그림 2 전형적인 계통연계형 태양광시스템 구성도

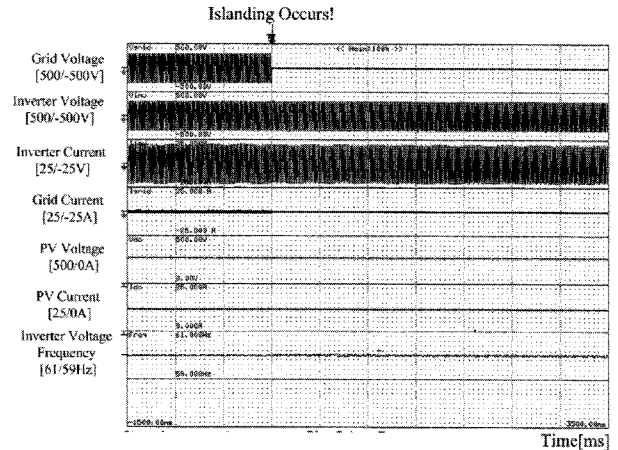


그림 3 태양광 시스템의 단독운전현상을 나타내는 실험파형

스템과 상용계통과의 통신을 바탕으로 하는 원격 단독운전 검출방식(Remote islanding detection method)과 태양광발전용 인버터의 내부에서 구현하는 지역 단독운전 검출 방법(Local islanding detection method)이 있다.

원격 단독운전 검출방식은 상용계통과 태양광시스템과의 통신을 이용하는 것으로 대표적으로 PLCC(Power Line Carrier Communication)이나 SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition) 시스템 등이 있다. 단독운전 검출 성능은 가장 우수함을 보일 수 있으나, 추가적으로 통신 관련 장치의 설치가 필요하여 가격적 측면과 시스템 복잡도 측면에서 단점이 있다.

이에 본고에서는 현재 대부분의 태양광 시스템, 특히 태양광 인버터에서 채택하고 있는 지역 단독운전 검출기법 중 수동적 방법과 능동적 방법을 중심으로 설명한다.

3.1 수동적 단독운전 검출 방식

수동적 단독운전 검출 방식은 그림 2에서 Reclosure가 개방되어 단독운전이 발생할 때, 태양광 발전전력과 R, L, C 지역부하의 소모전력이 어느 정도의 차이가 나게 되면, 태양광 인버터의 출력 매개변수들이 변하는 사실에 기반을 두고 있다. 즉, 상시 계측되는 태양광 인버터 출력 매개변수들이 일정값을 넘어서게 되면 단독운전이라 판단하는 기법이다.

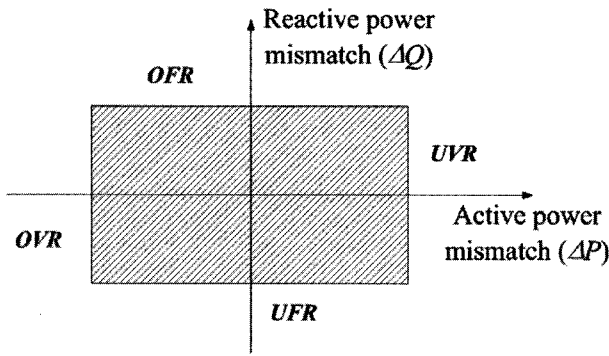


그림 4 Standard Relays의 단독운전 비검출영역 (NDZ)

여기서 판정기준이 되는 출력 매개변수에 따라 수동적 기법이 달라지는데 대표적인 방식은 다음과 같다.

우선 OVR (Over Voltage Relay), UVR (Under Voltage Relay), OFR (Over Frequency Relay), UFR (Under Frequency Relay)로 대변되는 Standard Relays가 있다. 이 방식은 전압의 크기와 주파수가 기준치 이상으로 벗어나면 단독운전 현상이라 판정하는 기법이고, 전압 고조파 검출 기법은 전압의 고조파를 검출하여 기준치 이상인지를 판정하고, 위상점프기법은 단독운전 발생시 전압의 위상이 급변하는 지를 계측하여 단독운전을 판정하는 기법이다.

이러한 수동적 단독운전 검출 기법은 단독운전을 태양광 발전과 지역부하의 불균형에 기반해서 수동적으로 모니터링만 수행하는 방식으로, 만일 태양광 발전전력과 지역부하가 거의 균형 조건에 이르게 되면 그림 3과 같이 단독운전을 전혀 검출할 수 없게 된다. 이러한 전력 균형조건이 단독운전 비검출영역(Non-Detection Zone)으로 표현되는데, 대표적 표현기법으로 그림 2의 조류 유효전력 (ΔP)와 무효전력 (ΔQ)으로 비검출 영역을 표현한다. 수동적 기법 중 대표적인 Standard Relay의 이러한 단독운전 비검출 영역을 정량적으로 나타하면 그림 4와 같이 표현된다⁶⁾. 이러한 비검출 영역은 그림 2의 지역부하의 L, C 공진의 Quality Factor, Standard relays의 설정값 등에 따라 그 범위가 넓어지게 된다.

3.2 능동적 단독운전 검출 방식

수동적 단독운전 검출기법이 태양광 발전전력과 지역부하의 소모전력이 균형이 되었을 경우, 검출을 못하는 문제점을 안고 있는데, 이에 대해 능동적 단독운전 검출 기법은 태양광 인버터에서 능동적으로 전류의 주파수나 위상 혹은 전류의 크기 등을 소량 변동시켜, 계통 정전시 전압의 크기나 주파수의 변동량을 바탕으로 단독운전을 검출하는 방식이다. 하지만, 수동적 기법과는 달리 능동적 기법은 주입하는 신호가 무

엇이냐에 따라 고조파 발생, 역률 저감 등으로 전력품질이 떨어지는 단점이 있다. 이러한 능동적 방식은 주입하는 능동신호가 무엇이냐에 따라 기법들이 달라지게 되는 데, 이에 대한 연구는 현재까지 많이 진행되어 왔다⁷⁾. 대표적인 기법들을 살펴보면 다음과 같다.

3.2.1 Active Frequency Drift (AFD) 기법

AFD 기법은 그림 5에서 처럼 태양광 인버터 출력 전류의 주파수를 계통 전압의 주파수보다 약간 빠르게 혹은 느리게 주입하는 기법이다. 단독운전 발생 전에는 강인한 상용계통 전압원이 태양광 인버터 출력전압을 그대로 계통공칭 주파수로 유지시키지만, 단독운전이 발생하면 약간 빠르거나, 느리게 주입되는 인버터 출력 전류에 의해서 인버터 출력전압의 주파수가 빨라지거나 느려지게 되어 주파수 릴레이 (OFR 혹은 UFR)로 단독운전을 검출하게 된다.

기존에는 전류의 주파수를 변동시키는 파라미터를 고정으로 하여 제안되었으나, 고정되는 주파수 변동분에 대해 지역부하 L, C 로 상쇄됨에 따라 여전히 단독운전 비검출 영역이 존재하게 된다. 이에 고정 AFD 기법을 개선하여 최근에는 계통전압 주파수의 변동분에 따라서 AFD의 주파수 변동분을 변화시키는 AFD with positive feedback 기법⁷⁾과 시위 변지남에 따라 주기적으로 AFD 기법의 주파수 변동분을 변동시키는 기법이 제안되었다⁸⁾. 이러한 개선된 기법들 역시 전류 고조파 주입에 따른 전력품질을 고려하여 관련 기준 및 지역변지남에계통 사정에 따라 설계되어야 할 것이다.

3.2.2 Slip Mode Frequency Shift (SMS) 기법

SMS 기법은 인버터의 출력 전압의 주파수에 따라 미리 정해져 SMS filter를 PLL에 적용하여, 인버터 출력전류의 위상을 전압보다 빠르거나 혹은 느리게 변화시키는 방식이다⁷⁾. 단독운전이 발생하기 전에는 강인한 계통 전압이 마찬가지로 계통의 주파수를 고정시켜서 공칭주파수시 전압, 전류의 위상차가 크지 않아 고역률을 유지할 수 있게 된다. 하지만 단독운전 발생 후에는 PLL 내부의 SMS filter로 인해 전압, 전류의 위상차가 커지는 방향으로 전류의 위상이 바뀌게 되고 이에 따라 인버터 출력전압의 주파수가 변동하여 단독운전을 검출할 수 있게 된다.

3.2.3 Power Variation Method

계통으로 넘어가는 조류 유효 전력과 무효전력을 직접 변동시키는 방식으로, 유효전력변동방식⁹⁾과 무효전력변동방식¹⁰⁾이 대표적이다. 유효전력변동 방식은 주기적으로 출력전류의 크기를 up/down으로 변동시키는 방식으로, 단독운전이 발생하기 전에는 강인한 계통전압원으로 인해 인버터 전압의 크기가 유지되지만, 단독운전이 발생하면 주기적으로 변동되

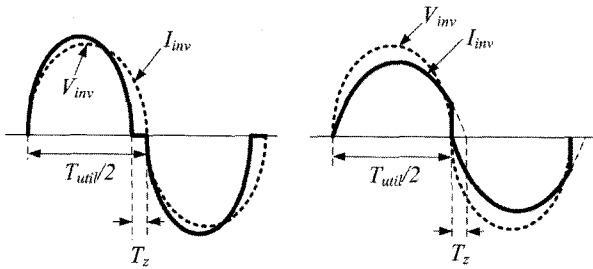


그림 5 AFD 기법의 인버터 전압, 전류 파형

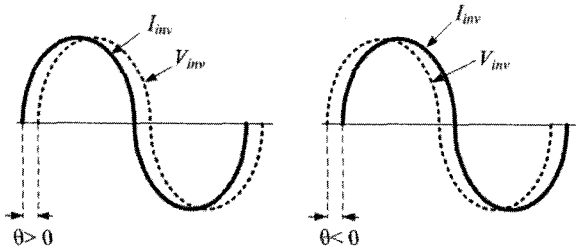


그림 6 SMS 기법의 인버터 전압, 전류 파형

는 출력전류에 의해 인버터 출력전압이 변동하여 변동된 출력전압을 바탕으로 단독운전을 검출하는 방식이다. 이는 기존의 전류의 주파수 위상 변동기법에 비해 전력품질이 좋아지는 장점이 있다. 무효전력변동 방식은 SMS처럼 위상을 변동시키는 방식이지만, SMS 방식과는 달리 주기적으로 시간에 따라 무효전력 성분을 변동시켜 주파수를 변동시키는 방식이다.

3.2.4 Grid Impedance Estimation 기법

본 기법은 독일의 단독운전 시험 기준인 VDE 0126-1-1에 부합하기 위한 검출 방식으로, 계통의 라인임피던스가 1Ω 변화했을 때 이를 감지하기 위한 방식으로, 대표적으로 인버터의 출력에 고조파 전류를 주입하여 그에 대응하는 전압성분을 계산하고, 이를 바탕으로 계통의 임피던스를 추정하여 단독운전을 판정하는 기법이다^[11]. 계통 임피던스 측정 기법은 전력계통의 안정성이 낮은(Weak) 조건에서 신재생에너지 분산발전원의 계통연계에 대한 대응조치로 제안되어 독일을 비롯한 일부 유럽에서 많은 연구가 진행되고 있다.

3.3 단독운전 검출기법의 향후 동향 및 고찰

현재까지 제안된 많은 단독운전 기법들은 주로 Single Unit을 대상으로 연구가 진행되어 왔고, 또한 관련한 기술 가이드라인도 마찬가지로 Single Unit을 대상으로 실험실 레벨에서 검증되어 왔다.

하지만 향후에는 다음 두 가지로 연구방향이 설정될 것으로 보인다. 단독운전 검출 기법의 성능 측면에서 다수의 태양광

발전시스템이 보급되었을 때 서로 간의 상호 간섭현상에 대한 분석 및 단독운전 검출 성능 저하 여부에 대한 검토가 더욱 활발히 진행될 것으로 보인다. 또 다른 한 측면에서는 안정적이지 못한 전력계통에서 태양광 인버터의 단독운전 검출 기법으로 인해 정전으로 오판하여 빈번하게 정지하는 Nuisance tripping을 방지하는 것이다. 태양광 발전이 많이 보급되지 않은 시점에서는 태양광발전의 Nuisance Tripping이 발전량에 따른 금액적 손실에 불과했지만, 향후 대규모로 에너지원으로 보급이 되었을 때, 단독운전 오판으로 인한 대규모 태양광 시스템의 계통 이탈은 전력계통의 안정성에 치명적인 영향을 줄 것으로 보임으로 이에 대한 대응 연구도 필요할 것으로 보인다.

4. 결론

본고에서는 태양광 발전시스템에 필수적으로 요구되는 단독운전 검출 기법의 개요 및 연구동향, 그리고 관련기준에 대해서 소개하였다

단독운전 현상에 대한 기술 기준을 각국별로 그리고 국제적으로 운용되는 현황에 대해서 살펴보고, 태양광 발전용 인버터에 많이 적용되고 있는 단독운전 방지기법에 대해서 전반적으로 설명하였다.

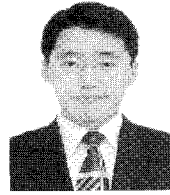
향후 점차 고밀도화되는 신재생에너지 분산발전원에 대해서 서로간의 단독운전 방지 기법의 상호 간섭현상에 대한 분석 및 전력품질의 고급화 대한 연구개발의 필요성이 대두될 것으로 예측된다.

참고 문헌

- [1] IEEE Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems, IEEE Std. 1547.1-2005, Jul. 2005. ISBN 0-7381-4736-2 SH95346s
- [2] Test Procedure of Islanding Prevention Measures for Utility-Interconnected Photovoltaic Inverters, IEC 62116 Ed. 1.0, Jan. 2000. ISBN 0-7381-1934-2 SH94811.
- [3] Automatic Disconnection Device Between a Generator and the Public Low-Voltage Grid, DIN V VDE 0126-1-1, DIN Electrotechnical Preliminary Standard V/01, Feb. 2006.
- [4] Test Procedure for Grid-Connected Protective Equipment, etc. for Photovoltaic Power Generation Systems, JET Std. 2002.
- [5] 신재생에너지 설비심사 세부기준-소형 태양광 인버터,

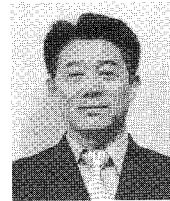
- PV 501 : 2009.
- [6] Z. Ye, A. Kolwalkar, Y. Zhang, P. Du, and R. Walling, "Evaluation of anti-islanding schemes based on nondetection zone concept," IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, no. 5, pp. 1171-1176, Sep. 2004.
 - [7] W. Bower and M. Ropp, "Evaluation of islanding detection methods for utility-interactive inverters in photovoltaic systems," Sandia National Lab., Albuquerque, NM, SANDAI Rep. SAND2002-3591, Nov. 2002.
 - [8] Y. Jung, J. Choi, B. Yu, J. So, and G. Yu, "A novel active frequency drift method of islanding prevention for the grid-connected photovoltaic inverter," in Proc. IEEE 36th PESC, 2005, pp. 1915-1921
 - [9] B. Yu, M. Matsui, J. So, and G. Yu, "A high power quality anti-islanding method using effective power variation," Solar Energy Journal, vol. 82, no. 4, pp. 368-378, Apr. 2008.
 - [10] J. Jeong, and H. Kim, "Active anti-islanding method for PV system using reactive power control," IET Electronics Letters, vol. 42, no. 17, pp. 1004-1005, Aug. 2006.
 - [11] L. Asiminoaei, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, U. Borup, "A digital controlled PV-inverter with grid impedance estimation for ENS detection," IEEE Trans. Power Electron., vol. 20, no. 6, pp. 1480-1490, Nov. 2005.

〈 필 자 소 개 〉



유병규(俞炳圭)

1976년 8월 31일생. 2002년 부산대 전기공학과 졸업. 2004년 한국과학기술원 전자전산학과 졸업(석사). 2010년 동경공예대 전기공학과 졸업(공학박). 2004년~현재 한국에너지기술연구원 태양광연구단 선임연구원.



유권종(劉權鍾)

1955년 8월 5일생. 1982년 조선대 전기공학과 졸업. 1985년 일본고베대학 전기공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1990년~현재 한국에너지기술연구원 태양광연구단 책임연구원.