

계통연계형 태양광 인버터의 IEEE Std. 1547.1 에 따른
단독운전 검출 알고리즘의 시뮬레이션

고문주*, 최익*, 최주엽*, 이기옥**, 유권중**
*광운대학교, **한국에너지기술연구원

Simulation of Anti-Islanding Algorithms regarding IEEE Std. 1547.1
for Grid-Connected Photovoltaic Inverters

Moon-Ju Ko*, Ick Choy*, Ju-Yeop Choi*, Ki-Ok Lee**, Gwon-Jong Yu**
*Kwangwoon Univ. **Korea Institute of Energy Research

Abstract - 본 논문에서는 계통연계형 태양광 발전 시스템에서의 단독운전 검출 시뮬레이션 과정을 설명한다. 전기적 시스템의 단독운전은 계통이 끊어진 상태에서 분산 전원이 계속 동작하여 지역 부하로 전력이 공급될 때 나타나는 현상이다. 이러한 현상은 계통 보수 작업자의 안전을 위협하며, 다른 전기적 장비에 악영향을 미칠 수 있다. 단독운전 검출 기능은 계통과 연계된 분산전원과 같은 기능을 가진 태양광 발전 시스템에 사용되는 인버터에서는 주요한 요구사항이다. IEEE Std. 1547.1 "IEEE Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems" 는 단독운전 검출을 필요로 하는 시스템의 테스트 요구사항을 정하고 있다.

본 논문은 단독운전 검출 알고리즘과 IEEE Std. 1547.1의 내용에 준한 인버터 시뮬레이션 테스트의 예를 보여준다. PSIM을 이용한 시뮬레이션 과정과 결과 파형의 분석을 토대로 계통연계형 인버터의 시뮬레이션 절차와 방법에 대해 알아 본다.

1. 서 론

단독운전이란 PCS(Power Conditioning System)의 출력전력과 수용가의 소비전력이 평형을 이루었을 경우, 계통이 상실되어도 연계점 전압의 실효값 및 주파수가 변동하지 않기 때문에 PCS가 이를 감지하지 못하고 전력변환운동을 계속하는 현상을 말한다. 단독운전이 발생하면 계통전력의 유지보수 인력에 대한 심각한 위험이 따르고, 계통의 재제로 시 전력기기 및 부하기기의 손상이 우려된다.

이러한 단독운전 검출에 대한 많은 연구가 여러 방법으로 진행되고 있으며, 본 논문에서는 단독운전 검출을 위한 시뮬레이션 과정을 PSIM을 이용해서 알아본다.

2. 단독운전 검출 방법

2.1 수동적인 방법

2.1.1 Under/over Voltage 와 Under/over Frequency

PV PCS의 단독운전검출은 전압, 주파수를 감시하는 4개의 over voltage relay(OVR), under voltage relay(UVR), over frequency relay(OFR), under frequency relay(UFR)를 이용한다.

그림 1의 node a의 전압이 계전기의 설정범위를 벗어나면 PCS는 적절한 trip 동작으로 전력변환운전을 정지하여 단독운전을 방지하게 된다.

아래 수식 (1), (2)는 계통의 유효전력과 무효전력을 인버터전력과 부하전력의 관계식으로 표현하였다.

$$\Delta P = P_{inv} - P_{load} \quad (1)$$

$$\Delta Q = Q_{inv} - Q_{load} \quad (2)$$

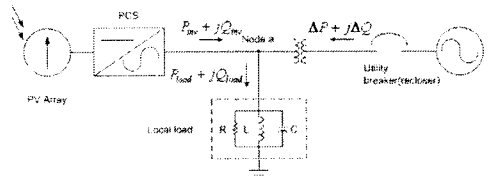


그림1. 계통연계형 태양광시스템의 계통 및 부하 연결도

Voltage range (% of base voltage) ^a	Clearing time(s) ^b
V < 50	0.16
50 ≤ V < 85	2.00
110 < V < 120	1.00
V ≥ 120	0.16

^aBase voltages are the nominal system voltages stated in ANSI C84.1-1995, Table 1.
^bDR ≤ 30 kW, maximum clearing times; DR > 30kW, default clearing times.

표1. 비정상적인 전압에 대한 연계시스템 응답

DR size	Frequency range (Hz)	Clearing time(s) ^a
≤ 30 kW	> 60.5	0.16
	< 59.5	0.16
> 30 kW	> 60.5	0.16
	> (59.8 - 57.9) (adjustable set point)	Adjustable 0.16 to 300
	< 57.0	0.16

^aDR ≤ 30 kW, maximum clearing times; DR > 30kW, default clearing times.

표2. 비정상적인 주파수에 대한 연계시스템 응답

위의 표1,2는 계통과 연결된 3상 인버터가 출력전력을 계통과 부하로 전달하는 것을 중지시키기 위한 조건이다.

2.2 능동적인 방법

2.2.1 Active Frequency Drift(AFD)방법

AFD방법이란 PCS가 계통으로 주입하는 전류의 주파수를 가동하여 단독운전 발생 시 계통전압 주파수가 변동하는 것을 감지하여 단독운전을 검출하는 방법이다.

$$\text{Chopping Fraction}(cf) = \frac{2I_o}{I_{load}} \quad (3)$$

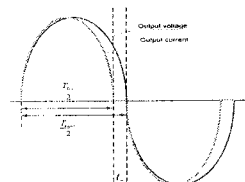


그림2. AFD방법에서의 출력전류 파형

위 그림2는 AFD방법의 출력전류 파형을 보여주고 있다. 여기서 CF를 가미한 전류파형은 계통과 연결되어 있을 때에는 전압에 무관하게 동작하다가, 계통이 끊어지면 전압에 영향을 미쳐서 전압의 주파수를 변동하게 만든다. 그림2에서 T_{pv} 는 PV PCS의 출력전류, T_{inv} 는 계통전압의 한 주기 시간, t_s 는 계통전압의 반주기 동안 0이 되는 시간이다.

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 수행 절차

위에서 설명한 단독운전 검출방법을 이용한 시뮬레이션을 수행하기 위하여 다음과 같은 절차로 진행을 한다.

1. 시뮬레이션 회로 구성
2. 부하 선정
3. 단독운전 검출 알고리즘 적용
4. 시뮬레이션 실행 및 분석

3.1.1 시뮬레이션 회로 구성

시뮬레이션 회로를 다음과 같은 내용을 전제로 하여 구성한다.

1. 태양전지에서 나온 전력은 최대전력추종제어기법을 거쳐서 일정 전력을 인버터로 공급하는 것으로 가정한다.
2. 인버터 출력은 Unity Power Factor라고 가정한다.

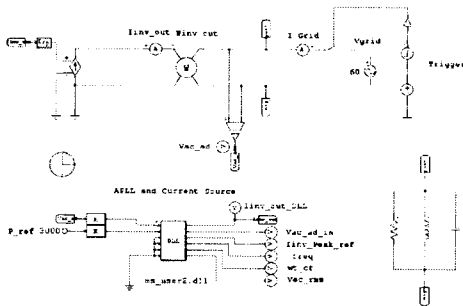


그림3. 시뮬레이션 회로도

그림3은 시뮬레이션에 사용한 회로를 보여주고 있다. 태양전지와 인버터를 전압제어 전류원으로 대체하고, 전력계를 이용하여 인버터 출력전력을 측정하였다. 계통과의 단락을 위하여 스위치를 사용하였고, 원하는 시간에 단락이 되도록 구성하였다. DLL(Dynamic Linked Library) 내부 구성은 PLL(Phase Locked Loop)회로와 단독운전 검출 알고리즘이 프로그래밍 되어 있다. 부하는 RLC를 병렬로 연결하여 구성하였다.

3.1.2 부하 선정

먼저, 무부하 상태에서 인버터의 유효전력을 측정한다. 그림4는 전력계에서 측정한 전력값을 보여주고 있다.



그림4. 전력계에서 측정한 값

$$P_{gl} = P_{inv} \times Q, \quad Q = 1 \quad (4)$$

$$\therefore L = \frac{V_L^2}{2 \times \pi \times f \times P_{gl}} \quad (5)$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6)$$

$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 \times L} = \frac{1}{4 \times \pi^2 \times 60^2 \times L} \quad (7)$$

$$R = \frac{V_{grid}^2}{P_{inv}} \quad (8)$$

수식(4)~(8)을 이용하여 부하에 사용될 RLC값을 계산할 수 있고, 그림5의 회로를 이용하여 위에서 계산된 파라미터를 적용하여 전류를 측정한다.

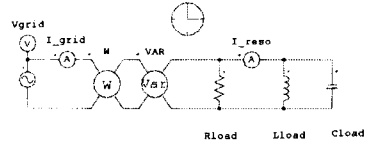


그림5. 공진전류 계산을 위한 회로도

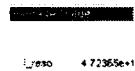


그림6. 전력계를 이용한 공진 전류값

그림5에서 측정된 공진전류를 RLC병렬 부하의 인덕터 초기 전류에 대입한다. 단, 방향은 반대이므로 아래의 그림과 같이 - 부호를 붙여야 한다.

Inductor		Help
Name	Display	
Name	Load	
Inductance	50.75m	
Initial Current	-48.652	

그림7. 인덕터 초기 전류값

3.1.3 단독운전 검출 알고리즘 적용

그림3에서 보여진 DLL 에 시뮬레이션에 적용할 알고리즘을 프로그래밍한다. 그림8은 DLL에 포함된 프로그램의 순서도를 나타낸다.

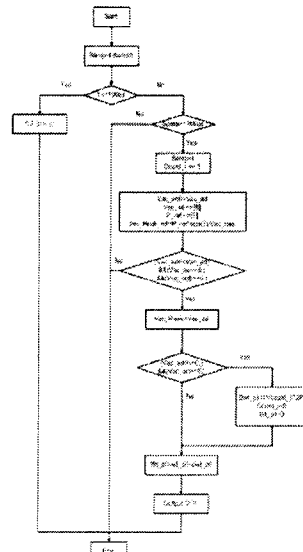


그림8. DLL에 적용한 PLL과 알고리즘 순서도

3.1.4 시뮬레이션 실행 및 분석

인버터 출력 전력 및 부하 설정은 다음 표3과 같이 하여 시뮬레이션 하였다.

인버터 출력전력(P_{inv})	3[KW]
스위칭 주파수	10[KHz]
기본 주파수	60[Hz]
단독운전 발생	0.5[초]
R	16.13[Ω]
L	42.79[mH]
C	164.43[μF]

표3. 시뮬레이션에 사용된 파라미터 값

표3에서 주어진 파라미터 값으로 시뮬레이션 하였고, RLC 부하값은 수동적인 방법을 이용하여 시뮬레이션 할 때 60Hz에서 공진이 일어나도록 설정한 값이다.

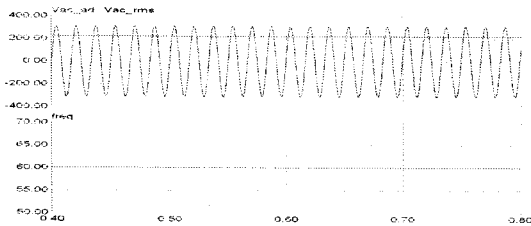


그림9. 수동적인 방법으로 시뮬레이션한 전압 및 주파수 파형

그림9는 CF를 포함하지 않은 수동적인 방법을 사용한 시뮬레이션 결과 파형으로써, 단독운전이 발생하여도 주파수의 변화가 거의 일어나지 않아 검출이 되지 않는 상태를 알 수 있다.

능동적인 방법을 사용하여 시뮬레이션 할 때에는 각각의 CF를 적용하여 만들어지는 새로운 공진점을 찾아내고, 그 공진주파수에 맞는 부하를 다시 설정하여 시뮬레이션 하였다.

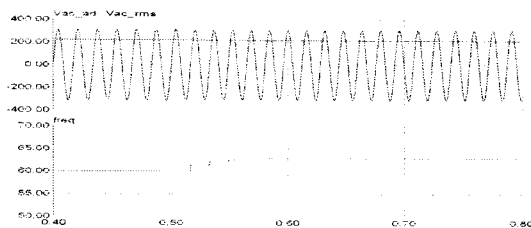


그림10. CF=0.05에서 공진주파수를 찾는 파형

그림10은 CF=0.05에서의 공진주파수를 찾기 위한 시뮬레이션 파형이다. 시뮬레이션 결과 62.89Hz에 수렴하는 것을 알 수 있다. 결국 62.89Hz에서 공진이 일어나므로 다시 이 주파수에 맞는 부하를 수식(5),(6),(7)을 이용하여 재설정하여 시뮬레이션 한다.

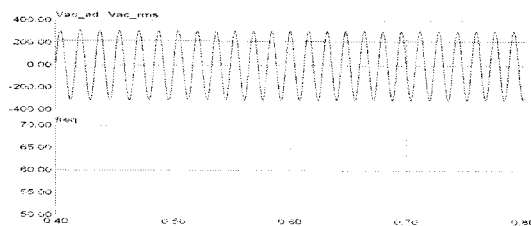


그림11. CF=0.05에서 새로운 공진주파수로 시뮬레이션한 전압 및 주파수 파형

그림11은 새로이 만들어진 공진주파수에 맞게 재설정된 부하로 시뮬레이션 한 파형이다. CF=0.05를 적용한 시뮬레이션 결과 파형으로써, 단독운전이 발생하여도 주파수의 변화가 감지되지 않아 단독운전을 검출할 수 없다. 그러나, 부하가 변동되어서 공진점을 벗어난다면 단독운전을 검출할 수 있게 된다. 이와 같이 같은 방법을 사용하여도 부하의 변동에 따라 단독운전을 검출할 수 있는 경우와 없는 경우가 발생하지만, 시험 기준으로는 앞에서 설명한 절차와 같이 진행하여 어떠한 경우에도 단독운전을 검출할 수 있도록 요구하고 있다.

4. 결 론

앞에서 단독운전 검출 방법, 부하설정 및 시뮬레이션 절차에 대하여 간단히 살펴보고, 시뮬레이션에 적용한 수동적인 방법과 능동적인 방법 모두 단독운전 발생 시 검출을 하지 못 하는 것을 확인하였다. 그러나, 이 두 가지 방법을 같이 적용하여 단독운전을 검출하는 방법들과 CF값을 변동하여 단독운전을 검출하는 방법들도 여러 논문에서 제시되고 있다.

계속적으로 다양한 단독운전 검출에 대한 시뮬레이션 방법 및 절차에 대한 연구를 통하여, 실험 시 발생할 수 있는 여러 가지 위험 요소를 더욱더 줄여나가야 할 것이라 생각된다.

감사의 글

『이 논문은 2004년도 에너지관리공단 신재생에너지 학술진흥사업의 지원에 의한 것임』

[참 고 문 헌]

- [1] 최주엽 외 “태양광발전 시스템의 계통연계 보호를 위한 단독운전검출기법의 기술 개발에 관한 연구”, 최종 보고서, 2003.5, 산업자원부, 2001-N PV03 01.
- [2] IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems, IEEE Std 929-2000, 3 April 2000.
- [3] UL 1741, Inverters, Converters, and Controllers for Use in Independent Power Systems, Copyright by the Underwriters Laboratories Inc, ISBN 0-7629-0421-6, Tue Aug 27 2002.
- [4] Michael Ropp, “Evaluation of Islanding Detection Methods for Utility Interactive Inverters in Photovoltaic Systems”, SAND2002-3591.
- [5] M.E.Ropp, M.Begovic, A.Rohatgi, “Analysis and Performance Assessment of the Active Frequency Drift Method of Islanding Prevention”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, September 1999.
- [6] 이기욱, “단독운전검출을 위한 Active Frequency Drift Positive Feedback기법의 Chopping Fraction Gain”, 평운대학교 전기공학과 석사학위 청구논문, 2004.