계통연계형 태양광발전시스템의 AFS 기법을 이용한 단독운전 방지

옥승규* · 강문성** · 양 오***

Anti-islanding using Active Frequency Shake Method for Grid-connected
PV Generation System

Seungkyu Ock* · Moonsung Kang** · Oh Yang***

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

요 약

계통연계형 인버터의 중요 성능 중 단독운전 검출기능 및 방지기능은 계통을 유지보수하기 위한 작업자의 안전을 위하여 고려되어야 할 필수 사항이다. 본 논문에서는 태양광을 이용한 계통연계형 태양광발전시스템에서의 AFS(Active Frequency Shake) 단독운전 검출기법을 제안하고자 한다. 먼저 AFS 단독운전 검출 알고리즘을 제안하기 위하여 기존의 능동 주파수 변이기법 알고리즘에 대해 기술한다. 그리고 단독운전 불검출영역을 줄이고, THD(Total Harmonic Distortion)를 개선하며, 기존 알고리즘 보다 검출 속도 또한 향상시킬 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 아울러 제안된 단독운전방지 기법을 3kW 계통연계형 태양광 인버터에 적용하고 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제안하는 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

ABSTRACT

The islanding detection and prevention function in the important performance of the grid-connected inverter is the essential details which should be considered for worker's safety to maintain the system. This paper tries to suggest the active frequency shake islanding detection technique in the grid-connected PV generation system using sunlight. The existing active frequency drift method algorithm is described to suggest active frequency shake method algorithm. And, the algorithm which can reduce the non-detection zone, improve THD, and improve the detection speed in comparison with the existing algorithm is suggested. And we applied the proposed algorithm to the 3kW grid-connected photovoltaic inverter generation and verified the feasibility of the technique through the simulation and experiments.

키워드

단독운전, AFS, 능동주파수변이기법, 고조파왜형률, 태양광발전시스템

Key words

Anti-islanding, AFS(Active Frequency Shake), AFD(Active Frequency Drift), THD(Total Harmonic Distortion),
PV(photovoltaic) generation system

* 정회원 : 청주대학교 전자공학과

접수일자 : 2012. 11. 06

** 정회원 : 청주대학교 전자공학과 교수

심사완료일자 : 2012. 12. 02

*** 정회원 : 청주대학교 반도체설계공학과 교수(교신저자, ohyang@cju.ac.kr)

I. 서 론

계통연계형 인버터의 중요 성능 중 단독운전 검출기법은 계통을 유지보수하기 위한 작업자의 안전을 위하여 고려되어야 할 필수 사항이다[1-2]. 단독운전 검출기법은 크게 수동적 기법과 능동적 기법으로 구분된다. 수동적 기법은 기본적으로 전압과 주파수 등 인버터의 제어에 필요한 시스템 파라미터를 이용하여 검출된 파라미터가 정상 범위를 벗어나는 경우 단독운전으로 판단하여 인버터를 정지시키는 기법이다. 그러나 인버터의 출력전력과 부하에서 소비하는 전력이 일치하는 경우에 단독운전 발생 시 전압과 주파수의 변화가 매우 미소하므로 단독운전 검출이 실패할 확률이 높아 단독운전 불검출영역이 매우 넓게 존재하는 단점이 있다[3-4]. 이러한 단점을 보완한 기법이 능동적 기법인데 인버터의 출력전류에 임의의 미소한 외란을 인가하여 단독운전 발생 시 전압의 크기 또는 주파수의 변화를 유도하는 기법이다. 기존 단독운전 검출기법 중 능동 주파수 변이기법은 계통으로 연계하는 출력 전류의 영교차점에 일정 크기의 데드타임을 인가하여 단독운전 발생 시 주파수가 지속적으로 증가하도록 하는 기법이다. 그러나 이 기법은 출력 전류에 왜곡을 인가함으로써 정상상태 시 $cf(chopping\ fraction)$ 의 크기에 따라 출력 전류의 THD(Total Harmonic Distortion)가 증가하게 된다. 국제 규격에 의하면 정격출력 시 출력 전류의 THD는 5% 이내로 제한되기 때문에 인가할 수 있는 cf 의 크기는 제한적이다. 규격에서 제시한 THD 5%의 규정을 만족하기 위해서는 이론적으로 cf 의 크기를 약 5%까지 인가할 수 있으나 실제로는 자체 THD가 있기 때문에 인가할 수 있는 cf 의 크기는 더욱 축소되고 이는 검출 성능에 제한적 요소로 작용한다[5].

따라서 이 기법은 계통으로 유입되는 전류의 파형을 의도적으로 왜곡시킴으로써 계통 유입 전류의 THD가 좋지 않고, 단독운전 불검출 영역이 넓게 존재하며, 검출 속도 또한 느린 단점을 가지고 있다[6-7]. 이에 본 논문에서는 영전류 출력 구간이 없는 새로운 단독운전 방지 알고리즘을 제시하고, 이 기법에 의한 영향과 특성을 시뮬레이션하였다. 또한 3kW 계통연계형 태양광 인버터에 적용하고 실험을 통하여 제안하는 알고리즘의 타당성을 검증하고자 한다.

II. 기존 AFD 기법

기존 AFD(Active Frequency Drift) 기법은 계통으로 공급하는 전류의 주파수를 정확히 계통의 주파수와 동기시키는 것이 아니라 출력 전류의 주파수를 계통전압의 주파수보다 빠르게 또는 느리게 변화시켜 단독운전 발생 시 계통전압의 주파수에 변화가 발생하는 것을 이용하여 단독운전을 검출하는 방법이다[8-10]. 그림 1에 AFD 기법의 출력전류파형을 나타내었다.

그림 1. 기존 AFD 기법
Fig. 1 Existing AFD Method

T_{util} 은 계통전압의 한 주기를 나타내고, t_z 는 계통 연계형 태양광 인버터 출력전류의 한 주기 동안에 전류가 0인 시간을 나타낸다. 계통으로 연계하는 출력 전류의 영교차점에 일정 크기의 데드타임을 인가하여 단독운전 발생 시 주파수가 지속적으로 증가하도록 하는 기법이다. 여기서 인가하는 데드타임 크기는 cf 라고 칭하며 식 (1)과 같이 정의된다[11-12].

$$cf = \frac{t_z}{T_{util}/2} \quad (1)$$

이 기법은 출력전류에 왜곡을 인가함으로써 정상상태 시 cf 의 크기에 따라 출력 전류의 THD가 증가하게 된다. 또한 인버터의 출력전류와 계통전압과의 위상차가 없는 경우 단독운전 발생 시 부하의 무효전력이 cf 에 의하여 발생하는 출력의 무효전력을 상쇄하는 경우 주파수의 변동은 발생하지 않는다. 따라서 이 기법은 NDZ(Non Detection Zone)가 폭 넓게 존재하는 단점이 있다. NDZ 문제점을 개선한 단독운전 방지 기법이 AFDPF(Active Frequency Drift Positive Feedback)기법인데 이 기법은 정상상태에서의 주파수 변동에 민감하여

한국전력공사의 “분산형 전원 배전계통 연계 기술 기준”에 명시된 0.5초 이내의 단독운전 검출시간을 보장하지 못하는 문제점을 가지고 있다[13].

III. 제안한 AFS 기법

본 논문에서는 기존의 AFD 기법의 단점을 보완하고, 새로운 AFS(Active Frequency Shake)기법의 알고리즘 구현을 위해 단독운전 검출을 위한 중요한 요소인 주파수 계측의 정밀도를 높였다. 이를 위해 그림 2와 같이 하드웨어적으로 필터를 설계하였다. 또한 그림 3과 같이 정확한 주파수를 계측하기 위해 TMS320F28069의 eCAP(Enhanced Capture) Module을 이용하였다.

그림 5. 제안한 AFS 알고리즘 흐름도
Fig. 5 Flowchart of the proposed AFS algorithm

본 논문에서 제안한 AFS 기법은 기존 방법처럼 영전류 출력 구간을 가지면서 단독운전을 검출하는 방법이 아니라 전류 한 주기 전체를 (+)로 5주기, (-)로 5주기 동안 흔들리는 기법이다. 이 기법은 기존의 AFD 기법과 달리 영전류 출력 구간에 의해 끊어지는 현상이 없이 이어지면서 전류를 일정 주파수만큼 흔들기 때문에 THD를 줄일 수 있고 단독운전 검출 시간도 크게 단축시킬 수 있는 것이 큰 특징이다. 본 논문에서 제안한 알고리즘 흐름도를 그림 5에 나타내었다.

그림 5에서 주파수 최대값(Freq_Max)과 주파수 최소값(Freq_Min)의 차를 이용하여 주파수 편차값(Diff_Freq)을 찾고, 주파수 계측 오차 범위값(Limit_Val) 보다 주파수 편차값(Diff_Freq)이 크면 최초 전류의 주파수를 1Cycle 전체를 (+)로 5주기, (-)로 5주기 동안 계통 주파수를 SF(Shake Frequency)만큼 흔들기 시작한다. 계통에 이상이 생겨 계통 주파수가 주파수 계측 오차 범위값(Limit_Val) 이상으로 계속되면 Inc_Val 만큼 주파수를

증가시켜 다시 흔들리게 된다. 이때 계속해서 계통 주파수가 주파수 계측 오차 범위값(Limit_Val)을 벗어나면 다시 Inc_Val 만큼 계속 증가시키게 된다. 만약 계통이 정상적으로 복구되면 SF는 더 이상 증가 또는 감소하지 않고 초기 값 SF는 0.1Hz로 유지된다. 따라서 계통 주파수와 추종 주파수가 거의 차이가 없게 되어 계통으로 유입되는 전류의 THD에는 영향을 거의 주지 않는다.

초기 SF 값을 인가하고 계통 주파수의 변화를 관찰할 때 계통 주파수의 변화가 없다면 SF는 더 이상 증가하지 않고 초기 값으로 유지되고, 만약 변화가 발생했다면 주파수를 증가시키고 과 주파수를 판단하여 인버터를 바로 정지시켜 단독운전을 방지하게 된다. 또한 본 논문의 기법은 계통이 정상적이면 SF는 더 이상 증가 또는 감소하지 않고 초기 값으로 유지되기 때문에 순간정전과 같은 현상에서도 인버터가 정상적으로 동작이 가능한 것이 큰 특징이라고 할 수 있다.

그림 6. PSIM 시뮬레이션 회로도
Fig. 6 PSIM simulation circuit

IV. 시뮬레이션

본 논문에서는 제안된 새로운 단독운전 검출기법의 알고리즘 검증을 위해 국내 주택보급용 태양광발전시스템의 기본 용량인 3KW급 계통연계형 단상 태양광 인버터를 대상으로 IEEE Std.929-2000에 규정된 단독운전 검출 시험 조건하에서 PSIM 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

디지털 전류제어기의 전류제어 주기는 16.8kHz로 설정하였다. 시뮬레이션을 수행하기 위해 앞서 먼저 시스템의 파라미터를 선정하였으며, 파라미터의 선정은 단독운전 검출시험에 대한 국제규격인 IEEE Std. 929-2000에 부합하도록 하였다. 또한 시뮬레이션 시 사용된 계통연계형 인버터와 병렬 RLC 부하 및 상용계통 전원의 파라미터 값을 표 1에 나타내었다. 시뮬레이션은 먼저 단독운전 검출기법이 적용되지 않은 상태로 시뮬레이션을 수행하여 단독운전 발생 시의 주파수 변화를 확인하였다. 이를 통해 주파수 변화가 없도록 보정된 RLC 공진 부하에 대하여 단독운전 검출기법을 적용한 시뮬레이션을 수행하여 제안된 새로운 단독운전 방지 알고리즘의 특성을 고찰하였다.

표 1. 시스템 파라미터
Table. 1 System parameters

System parameter	Parameter value
Q_f (Quality factor)	2.5
Load impedance(RLC)	$R=16.13[\Omega]$
	$L=17.118[mH]$
	$C=411.26[\mu F]$
SF(Shake frequency)	0.1Hz
PV inverter nominal power	3[kW]
Nominal voltage	220[V]
Nominal frequency	60[Hz]
Nominal frequency range	$59.3[Hz] < f < 60.5[Hz]$

시뮬레이션을 위한 회로도 구성은 그림 6과 같다. 시뮬레이션 회로는 전술한 바와 같이 국내 주택보급용 태양광발전시스템의 기본 용량인 3[kW]로 구성하였으며, 계통 전압은 220[Vrms], 주파수는 60[Hz]로 하였다. 부하 임피던스 값은 $R=16.13[\Omega]$, $L=17.118[mH]$, $C=411.26[\mu F]$

으로써, 품질 계수 Q_f (Quality factor)는 2.5로 설정하고 시뮬레이션을 수행하였다. 단독운전 발생 시간은 시뮬레이션 시작 0.2초 후로 설정하였으며, RLC 부하 설정은 전력이 전부 소비되고 주파수는 60Hz에서 공진하는 것으로 설정하였다. 단독운전 결과 파형을 그림 7에 나타내고 있다. 시뮬레이션 시작 0.2초 후 단독운전이 발생하고 주파수는 59.972Hz에서 60.028Hz를 유지하고 있다.

그림 7. 단독운전 시뮬레이션 결과 (SF=0.0Hz, $Q_f=2.5$)
Fig. 7 Simulation results with islanding (SF=0.0Hz, $Q_f=2.5$)

SF를 0.01Hz로 했을 때 시뮬레이션 결과 파형을 그림 8에 나타내고 있다. 시뮬레이션 시작 0.2초 후 단독운전이 발생하였다. 하지만 주파수는 SF에 의해 매 주기마다 최대 59.92Hz에서 최소 59.88Hz 사이에서 변동되지만 SF값이 너무 작아서 단독운전 검출을 하지 못하고 계속해서 단독운전을 유지하고 있다.

그림 8. 새로운 AFS 기법 단독운전 검출 시뮬레이션 결과 (SF=0.01Hz, $Q_f=2.5$)
Fig. 8 Simulation results with new AFS method (SF=0.01Hz, $Q_f=2.5$)

이제 SF를 0.1Hz로 했을 때 시뮬레이션 결과 파형을 그림 9에 나타내고 있다. 시뮬레이션 시작 0.2초 후 단독 운전이 발생하였다. 주파수는 SF에 의해 매 주기마다 SF 값만큼 변동되다가 주파수 오차 범위에 들어오면 증가 주파수(Delta_Freq)를 SF값에 증가시켜 단독운전을 하게 된다. 계속해서 단독운전을 유지하다가 주파수 오차 범위가 계속해서 커지면 증가주파수는 점점 더 증가되고 SF값을 더 증가시켜 그림 9에서 보는 것처럼 주파수를 60.5Hz이상으로 증가시켜 단독운전을 157.8ms에서 검출 하게 된다.

그림 9. 새로운 AFS 기법 단독운전 검출 시뮬레이션 결과 (SF=0.1Hz, $Q_f=2.5$)

Fig. 9 Simulation results with new AFS method (SF=0.1Hz, $Q_f=2.5$)

V. 실험

본 논문의 실험을 위해 그림 10과 같이 3kW급 단상 계통연계형 태양광 인버터를 구성하였다. Solar Input, Grid Out, DC/DC Boost, DC/AC Inverter 및 DSP 제어부 등으로 구성된다. DSP에 대한 자세한 사양은 표 2에 나타내었다. 본 논문에서는 태양광용 전원을 입력하는 대신 DC/AC Inverter의 입력단인 직류단(dc-link)에 일정 전압 380V를 직접 인가하여 단독운전 검출 성능에 대한 실험을 수행하였다.

표 2. 인버터 DSP 사양
Table. 2 Specification of inverter DSP

항 목	사 양
DSP	TMS320F28069
최대동작 주파수	80MHz
PWM	16ch
ADC	16ch (12bit)
Timer	3ch (32bit)
Core 전압	1.8V
I/O 전압	3.3V
GPIO	54 Port
동작 온도 범위(℃)	-40 to 85

그림 10. 단상 계통연계형 태양광 발전시스템
Fig. 10 Single phase grid-connected PV generation system

그림 11은 SF를 0.1Hz로 했을 때 실험 결과 파형을 나타내고 있다. 계통전압이 끊어지고 단독운전을 유지하다가 그림 11에서 보는 것처럼 167.9ms에서 단독운전을 검출하여 인버터를 정지시키는 것을 확인할 수 있었다. 그림 12는 본 논문에서 제안한 알고리즘을 적용하였을 때 실제 주파수의 변화를 관찰하기 위해 YOKOGAWA DL750 계측 장비를 이용하여 SF를 0.1Hz로 했을 때 주파수 측정 결과 파형을 나타내고 있다.

그림 11. 새로운 AFS 기법 단독운전 검출 실험 결과 (SF=0.1Hz, $Q_f=2.5$)

Fig. 11 Anti-islanding test results with new AFS method (SF=0.1Hz, $Q_f=2.5$)

주파수는 SF에 의해 매 주기마다 변동되는 것을 확인할 수 있으며, 주파수 오차 범위가 계속해서 커지면 증가 주파수는 점점 더 증가되고 그림 12에서 보는 것처럼 주파수는 60.614Hz까지 증가 되어 인버터 Fault(Over Frequency)를 발생시켜 인버터가 정지됨을 확인하였다.

그림 12. 주파수 측정 실험 결과 (SF=0.1Hz, $Q_f=2.5$)

Fig. 12 Frequency test result with SF=0.1Hz, $Q_f=2.5$

그림 13과 14는 SF를 각각 0.0Hz, 0.1Hz 흔들었을 때 Newtons4th PPA5530 파워 분석기를 통하여 THD를 측정 한 그림을 나타내고 있다. 그림 13에서 보는 것처럼 주파수를 흔들지 않을 때 THD가 1.458%로 나왔고, 그림 14에서 보는 것처럼 SF를 0.1Hz 흔들었을 때 기준 5%를 초과하지 않는 1.54%로 나오는 것을 알 수 있다. 따라서 THD 차이는 0.082%로 SF를 0.1Hz 흔들어도 전류 THD에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

그림 13. 전류 THD (SF=0.0Hz)

Fig. 13 THD of current (SF=0.0Hz)

그림 14. 전류 THD (SF=0.1Hz)

Fig. 14 THD of current (SF=0.1Hz)

VI. 결 론

본 논문에서는 단독운전 불검출영역을 줄이고, THD를 개선하며, 단독운전 검출 속도 또한 향상 시킬 수 있는 새로운 단독운전 방지 알고리즘을 제시하였다. 기존의 AFD 기법에 비해 제안하는 검출 기법은 영전류 구간 없이 한주기를 흔드는 기법을 이용하여 단독운전을 검출하는 방식이다. 제안된 단독운전 검출 기법을 계통연계형 태양광 인버터에 적용하여 시뮬레이션 및 실험을 한 결과 SF를 0.1Hz흔들었을 때 THD가 1.54%로 국내 기준치 5%를 초과 하지 않음을 확인하였고, 단독운전 검출 속도는 국내 기준치 500ms보다 적은 167.9ms로 제안한 알고리즘의 우수성을 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인 하였다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

- [1] S.A.M. Verhoeven, "Utility aspects of grid-connected photovoltaic power systems," IEA-PVPS Report, IEA-PVPS T5-01, 1998.
- [2] Tada Ishikawa, "Grid-connected photovoltaic power systems: surveys of inverter and related protection equipments," IEA-PVPS Report, IEA-PVPS T5-05, 2002.
- [3] Moon-Ju Ko, Ick Choy, Ju-Yeop Choi, Seung-Ho Song, Ki-Ok Lee, "Novel AFD method of islanding detection with a periodic zero current for improving on islanding detection for grid-connected photovoltaic inverters", Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol.26, April 2006, pp. 17-22.
- [4] Jin-Ung An, Gwon-Jong Yu, Ich Choy, Ju-Yeop Choi, Ki-Ok Lee, "Modeling and Analysis of Modified Active Frequency Drift Method", Power electronics annual conference, Vol.16, No.2, 2011, pp. 145-151.
- [5] KEPCO, "분산형전원 배전계통 연계 기술기준", 2010
- [6] IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic(PV) Systems, IEEE Standard 929-2000, April 2000.
- [7] Ropp M.E., Begovic M. and Rohatgi A., "Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, pp.810-816, Sept. 1999.
- [8] J. Yin, L. Chang, and C. Diduch, "Recent developments in islanding detection for distributed power generation," in Proc. 2004 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, pp. 124-128, 2004.
- [9] Jung Y., Choi J., Yu B., So J. and Yu G., "A Novel Active Frequency Drift Method of Islanding Prevention for the grid-connected Photovoltaic Inverter", in Proc. 2005 Power Electronics Specialists Conference, pp. 1915 - 1921.
- [10] Y. S. Jung, J. H. Choi, and G. J. Yoo, "A novel active anti-islanding method for grid-connected photovoltaic inverters," J. Power Electron., vol. 7, no. 1, pp. 64 - 71, Jan. 2007.
- [11] JANG S.-I., KIM K.-H.: 'An islanding detection method for distributed generations using voltage unbalance and total harmonic distortion of current', IEEE Trans. Power Deliv., 2004, 19, (2), pp. 745 - 752
- [12] IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems, IEEE Std 519-1992, 1992.
- [13] 이기옥, "주파수 변이 단독운전 검출기법의 모델링 및 분석", 박사학위논문, 광운대학교, 2010.

저자소개

옥승규(Seung-Kyu Ock)

2001년 : 서원대학교
정보통신공학과(학사)
2009년 : 청주대학교 전자공학과
(석사)

2009년 ~ 현재 : 청주대학교 전자공학과 박사 과정.
※ 관심분야 : ASIC 설계, DSP 응용제어, 마이크로
프로세서 응용 및 제어

강문성 (Moonsung Kang)

1978년 : 한양대학교 전기공학과
학사 졸업
1980년 : 한양대학교 전기공학과
석사 졸업

1991년 : 일본 교토대학 전기공학과 박사 졸업
1979년 12월 ~ 1991년 8월 : 한국전력공사 기술연구원
1991년 9월 ~ 현재 : 청주대학교 전자공학과 교수
※ 관심분야 : 제어 및 시스템공학

양오(Oh Yang)

1983년 : 한양대학교 전기공학과
학사 졸업

1985년 : 한양대학교 전기공학과
석사 졸업

1997년 : 한양대학교 전기공학과 박사 졸업

1985년 1월 ~ 1997년 8월 : LG산전연구소 책임 연구원

1997년 9월 ~ 현재 : 청주대학교 반도체설계공학과
교수

2006년 ~ 2007년 : Texas A&M University 방문교수

※ 관심분야 : 디지털 시스템 설계 및 DSP 응용제어
시스템 설계, 계통연계형 태양광 인버터 설계, ASIC
설계