

단독운전 방지를 위한 능동적 주파수 변환 기법의 검출 성능 및 THD 분석

Detection Performance and THD Analysis of Active Frequency Drift for Anti-Islanding

조영민* · 최주엽*† · 송승호* · 최익** · 이영권***
Yeong-Min Jo*, Ju-Yeop Choi*†, Seung-Ho Song*,
Ick Choy** and Young-Kwoun Lee***

(Received 16 January 2015 ; accepted 20 April 2015)

Abstract : Islanding is a phenomenon that EPS(Electric Power System) is continuously energized by PV PCS(Photovoltaic Power Conditioning System) even when EPS is isolated from the grid. Unintentional islanding will result in safety hazard, power quality degradation and many other issues. So, islanding protection of grid-connected PV PCS is a key function for standards compliance. Nowadays, many anti-islanding schemes are researched. But existing anti-islanding schemes used in PV PCS have power quality degradation and non-detection zone issues. This paper analyses not only detection performance of existed anti-islanding schemes using active frequency drift but also THD of PCS output current according to each value disturbance for anti-islanding. In addition, the lowest value of disturbance in each scheme was tabulated under guarantee of anti-islanding condition.

Key Words : 계통 연계형 태양광 발전 시스템(Grid-connected photovoltaic power conditioning system), 능동적 단독 운전 방지 기법(Active anti-islanding), 주파수 변동(Frequency drift), 전력 품질(Power quality), 고조파 왜형률(Total harmonic distortion), 외란(Disturbance)

*† 최주엽(교신저자) : 광운대학교 전기공학과
E-mail : juyeop@kw.ac.kr, Tel : 02-940-5146
*조영민 : 광운대학교 전기공학과
*송승호 : 광운대학교 전기공학과
**최 익 : 광운대학교 로봇학부
***이영권 : 금비전자

*† Ju-Yeop Choi(corresponding author) : Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University.
E-mail : juyeop@kw.ac.kr, Tel : 02-940-5146
*Yeong-Min Jo : Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University.
*Seung-Ho Song : Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University.
**Ick Choy : Department of Robot Engineering, Kwangwoon University
***Young-Kwoun Lee : Keumbee Electronics

1. 서론

계통 연계형은 전력 계통과 연계되어 운전 되기 때문에 수용가 및 계통에 피해를 주지 않도록 전압 변동 범위, 고조파 억제, 역률 개선, 직류 성분 제거, 과도현상 보호, 단독운전 방지 등과 같은 문제점을 해결할 수 있는 기술이 필요하다. 그중에서 단독운전 방지를 위한 검출에 대한 연구의 경우 단독운전이 발생하는 빈도가 낮아 연구의 중요성이 떨어지는 분야였지만, 확대 보급 정책으로 인하여 태양광 발전 시스템을 비롯한 대체에너지 시스템의 설치량이 매우 빠른 속도로 증가하고 있고, 단일 시스템의 용량도 점점 증가하고 있는 추세이다. 따라서 인버터 출력 전력의 크기가 증가함으로써 부하 전력과 일치할 가능성이 높아지므로 이로 인한 단독운전의 발생 가능성이 증가함에 따라 단독운전에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 시점이다.¹⁾²⁾

그래서 현재 태양광 발전 시스템을 비롯한 계통 연계형 분산전원 시스템의 단독운전 방지를 위해 다양한 기법이 연구되었다. 본 논문에서는 현재 연구된 단독운전 방지 기법들에 대하여 기술하고, 그중 주파수 변환 기법들에 대하여 단독운전 검출 성능과 정상 상태 시 전력품질에 대하여 시뮬레이션과 실험을 통해 분석하도록 한다.

2. 단독운전 방지 기법

Fig. 1은 일반적인 계통 연계형 태양광 발전 시스템을 나타내며, 인버터(Inverter), 전력계통(Utility), 지역 부하(Local Load), 차단기(Recloser)로 구성이 되어 있으며, 인버터는 차단기를 통해 계통과 연결되며 부하는 인버터와 계통 사이의 연계점(Node a)에 연결된

다. 태양전지와 인버터로 이루어진 계통 연계형 태양광 전력변환기는 병렬연결된 부하와 계통에 정현파 전류를 공급한다. 계통 연계형 시스템에서의 단독운전(Islanding) 현상은 계통 측의 이상으로 태양광 발전 시스템 등의 분산전원이 전력계통에 연계되어 있는 상태에서 정전, 점검, 또는 사고 등에 의하여 전력 공급이 차단된 상태에서 전력변환 장치가 이를 감지하지 못하고 병렬연결된 부하에 전력 생산 또는 전력변환 동작을 계속하는 상태이다.³⁾

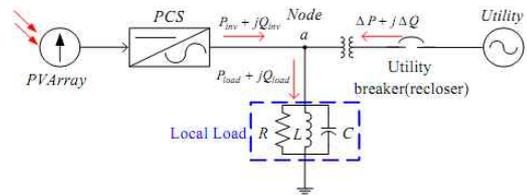


Fig. 1 Grid connected PV PCS system

단독운전 검출기법은 구현 주체에 따라 계통 측에 설치되어 있는 송·수신 장치를 통하여 계통의 이상을 검출하는 Remote 방식과 분산전원과 계통 연계점의 전력 상태를 검출하여 검출하는 Local 방식이 있다.

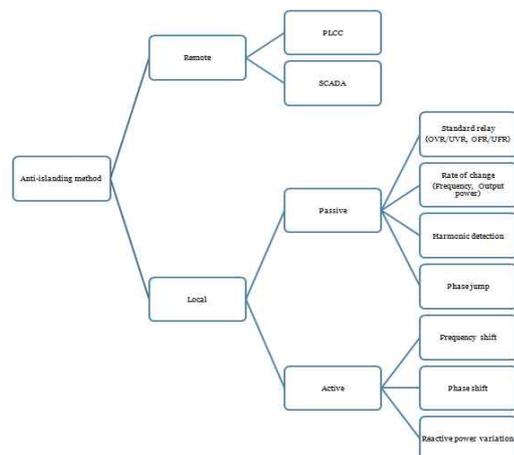


Fig. 2 Classification of anti-islanding method

Remote 검출기법들은 계통과 분산전원 사이의 통신을 기초로 한다. 보통 Remote 검출기법들은 불검출 영역이 없으며 단독운전을 검출하는데 유효하다. 하지만 분산전원과 계통의 통신을 하기 위해 별도의 송·수신 장치를 설치해야 하므로 비용이 높아지는 경향이 있으며, 통신에 의한 수신기 및 송신기를 보다 저렴한 가격으로 개발하는 연구들이 현재 많이 진행되고 있다. 이에 반해, Local 검출기법은 별도의 장치를 필요로 하지 않기 때문에 대부분의 소용량 계통 연계 시스템에서 사용되고 있고, 단독운전 현상을 감지하는 방식에 따라 수동적 기법과 능동적 기법 두 가지로 나눌 수 있다.

수동적 기법은 연계점의 전력 상태를 단순히 모니터링하고 연계점의 전압 및 위상 변동에 의하여 검출한다. 대표적인 수동적 기법에는 전압, 주파수 변동 기법, 전압 위상변위 기법, 분산전원 출력변동 기법, 제3고조파 감시 기법 등이 있다. 이러한 수동적 기법을 이용한 단독운전 검출 방식은 정상상태에서도 오동작을 일으킬 수 있어 불검출 영역이 광범위하며, 분산전원에서 공급하는 전력과 부하에서 소비하는 전력이 평형을 이루었을 때, 단독운전 검출이 불가능할 수 있다.⁴⁾

능동적 기법은 시스템 내 인버터의 출력에 어떠한 외란을 인가하여, 단독운전 상태에서 분산전원의 발전량과 부하의 소비 전력량이 동일하게 유지되는 평형 상태를 임의로 깨뜨려 단독운전에 적극적으로 대응하는 방법이다. 즉, 능동적 기법은 분산전원 시스템의 출력 전류를 계통에 크게 영향을 주지 않는 범위에서 변화를 주어, 연계점에서의 전압이나 주파수가 정상 범위를 벗어나도록 유도하여 시스템의 단독운전을 검출하는 방법이다.

Fig. 1과 같은 계통 연계형 태양광 발전 시스

템의 출력 주파수와 위상은 계통 전압과 동일하게 유지되고, 발전 시스템의 출력은 전류 제어 방식으로 계통 측에서 바라보는 태양광 발전 시스템은 다음과 같은 전류원 형태로 볼 수 있다.

$$i_{PV} = I_{PV} \cdot \sin(\omega_{PV} \cdot t + \phi_{PV}) \quad (1)$$

식(1)에서 세 파라미터 I_{PV} , ω_{PV} , ϕ_{PV} 는 주로 능동적 기법에 사용되는 파라미터로, 이 파라미터들을 변경함으로써 출력에 임의적 변화를 주어 단독운전을 검출하게 된다. 대표적인 능동적 기법에는 출력 전력 변동 방식, 주파수 쉬프트 기법, 위상 가변 기법, 무효 전력 변동 방식 등이 있다.

3. 주파수 변환 기법

3.1 AFD 기법

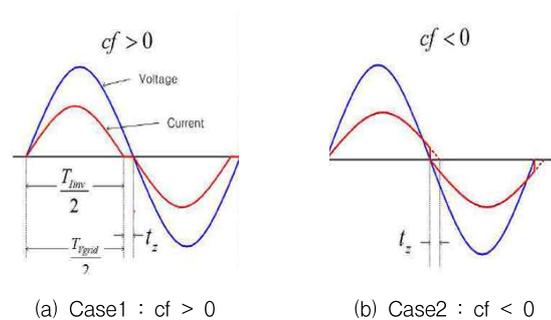


Fig. 3 Waveform used to AFD method

AFD(Active Frequency Drift) 기법은 주파수 쉬프트 기법 또는 주파수 바이어스(Frequency Bias) 기법이라 부르고, Fig. 3에 보이는 것처럼 출력 전류의 영교차점에 출력 전류가 0이 되는 시간인 일정 크기의 데드타임을 인가하여 단독운전 발생 시 주파수가 지속적으로 증가 또는 감소하도록 유도하는 기법이다. 여기서 인가하

는 데드타임의 크기를 cf (chopping fraction)이라고 칭하며 식(2)와 같이 전압의 반주기에 대한 데드타임 인가 시간의 비로 정의된다.⁵⁾

$$cf = \frac{2 \times t_z}{T_{Vgrid}} \quad (2)$$

정상상태 시에는 이러한 출력 전류의 왜곡이 단자 전압의 주파수에 영향을 주지 않으나 단독운전 발생 시 이러한 출력 전류의 왜곡으로 인하여 주파수가 증가 또는 감소하게 된다. 따라서 cf 값을 주파수 제한치를 벗어나게끔 설정한다면 단독운전을 검출할 수 있다. 또한, 제어 기법은 Fig. 4와 같이 무효전력 변동기법의 제어 블록과 같이 출력 전류의 지령치를 주파수와 출력 전류가 0인 구간을 가공하는 FS 블록을 이용하여 원하는 기준 신호를 만들게 된다.

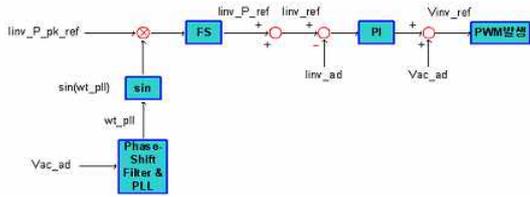


Fig. 4 Control block diagram of AFD method

그러나 이 기법에서 출력 전류 인가하는 외란의 크기를 키울수록 단독운전 검출 성능은 좋아지지만 이에 따라 정상상태 시 THD(Total Harmonic Distortion) 또한 증가하게 된다. 국제 규격에 의하면 정격 출력 시 출력 전류의 THD는 5% 이내로 제한되기 때문에 인가할 수 있는 cf 의 크기는 제한적이 된다. 또한 단독운전 시 부하의 무효 전력이 cf 에 의하여 발생하는 출력의 무효전력을 상쇄하는 경우 무효전력이 일치하게 되어 주파수의 변동이 발생하지 않아 단독운전을 검출하지 못한다. 따라서 이 기

법은 다른 능동적 기법에 비해 폭넓은 NDZ를 가지는 단점을 가지게 된다.

3.2 AFDPF 기법

AFDPF(AFD with Positive Feedback) 기법은 위의 AFD 기법의 단점을 개선한 기법으로서 SFS(Sandia Frequency Shift) 기법으로도 부른다. 이 기법은 AFD 기법과 달리 계통 주파수에 따라 cf 의 크기와 방향이 가변된다. 즉 식 (3)과 같이 단자 전압의 주파수를 검출하여 기준주파수에 대한 오차를 가속 이득 K 에 비례하여 초기 cf 에 더해주어 cf 의 크기를 가변하게 된다.

$$cf = cf_0 + K(\omega_k - \omega_0) = cf_0 + K \cdot \Delta\omega \quad (3)$$

정상상태에서는 주파수 오차 $\Delta\omega$ 가 매우 작으므로 cf 의 크기 또한 작고, 따라서 cf 에 의한 전류 THD의 증가도 매우 미소하다. 그러나 단독운전 발생 시 주파수 오차 $\Delta\omega$ 는 미소한 cf 에 의해서 변동할 것이고, 이는 cf 를 증가시켜 결국 주파수가 제한치를 벗어나도록 출력 전류가 제어된다. 이 기법의 장점은 정상상태 시 cf 의 크기가 작아 결국 출력 전류의 THD도 AFD 기법에 비해 현저히 감소하는 점이다.⁵⁾

3.3 FJP 기법

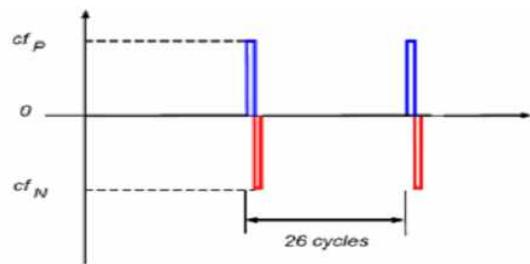


Fig. 5 Waveform of cf in FJP method

FJP(Frequency Jump with Pulsation) 기법 또한 AFD 기법의 단점을 개선한 기법으로서 cf를 일정한 값으로 인가하는 것이 아니라 Fig. 5와 같은 펄스 형태로 인가함으로써 주파수의 급변을 유도하여 단독운전을 검출하는 기법이다. 국내의 단독운전 검출 규정에 의해 0.5초 이내에 검출하기 위하여, 기준 주파수 60Hz를 기준으로 0.5초마다 30cycle의 주기를 가지는데 이 기법은 Fig. 5에 보이는 것과 같이 26cycle마다 cf를 서로 상반되는 부호의 값으로 한 번씩 펄스의 형태로 인가하는 방식이다. 이때 26cycle로 인가하는 이유는 정상 범위를 벗어난 주파수를 검출한 후 인버터가 정지하는 시간으로 4cycle의 여유를 둔 것이다. 이 기법의 장점은 cf를 26cycle마다 한 번씩 인가하고, 그 이외의 상태에서는 cf를 인가하지 않으므로 정상상태 시의 평균 THD는 현저히 감소하게 되고, 따라서 cf의 크기를 더욱 확대하여 단독운전 검출 성능을 높일 수 있는 장점이 있다. 또한 검출 시간의 제한에 따라 cf의 인가주기를 결정하므로 제한시간 이내에 검출을 보장할 수 있다.⁵⁾

4. 시뮬레이션

시뮬레이션을 하기 전에 국제 규격인 IEEE Std 929-2000과 국내 규정을 참고하여 Table 1과 같이 파라미터를 선정하였고, PSIM을 사용하여 Fig. 6과 같이 시뮬레이션 회로를 구성하였다. 단독운전 발생 시 주파수 변화가 없어 단독운전을 검출하기에 최악의 경우인 R, L, C 부하의 공진조건을 만족하도록 설정하였으며, 이러한 R, L, C 부하의 실제의 경우에 인버터에서 자체적으로 발생하는 무효전력 성분까지는 고려되지 않았다.

Table 1 Parameter of simulation

Parameter	Value
V_{util}	220V
f_0	60Hz
P_{inv}	3kW
P_{load}	3kW
R	16.13Ω
L	17.118mH
C	411.26uF
Q_f	2.5
Nominal frequency range	$59.3\text{Hz} < f < 60.5\text{Hz}$

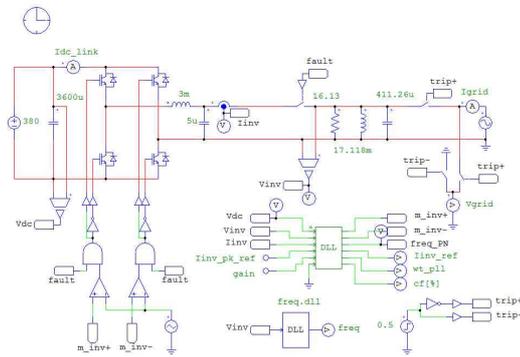


Fig. 6 Simulation circuit in PSIM

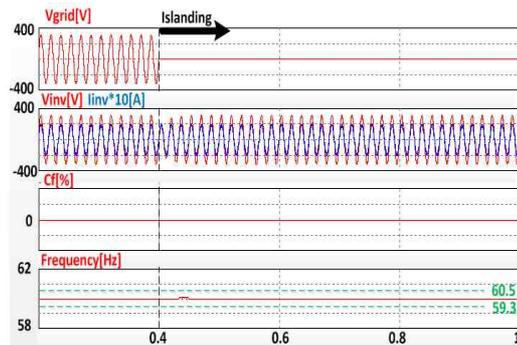


Fig. 7 Waveform without any anti-islanding method

Fig. 7은 단독운전 검출 기법을 적용하지 않았을 경우 단독운전 현상을 보인다. 계통이 차단되었을 때 주파수가 미소하게 변동하지만

정상 범위 내에 있으므로 PCS 측에서 단독운전을 인식하지 못하고 계속해서 출력하는 것을 확인할 수 있다.

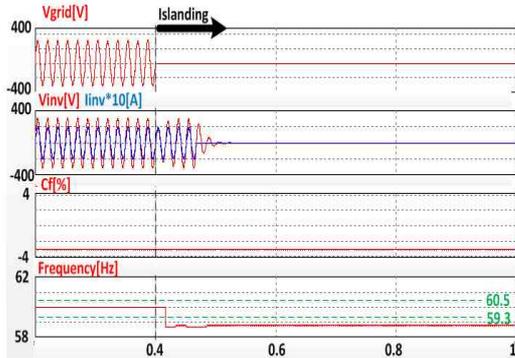


Fig. 8 Waveform used to AFD method

Fig. 8은 AFD 기법을 적용하여 cf를 -3[%] 인가하였을 경우 주파수를 정상 범위 밖으로 유도하여 PCS의 출력을 차단하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 AFDPF 기법을 적용한 파형인데, 초기 cf를 0.5[%]로 미소하게 인가하므로 주파수가 정상범위 내에서 변동하지만, 이 미소한 변동이 cf를 키워 결국 주파수를 정상범위 밖으로 유도하여 PCS의 출력을 차단하는 것을 확인할 수 있다.

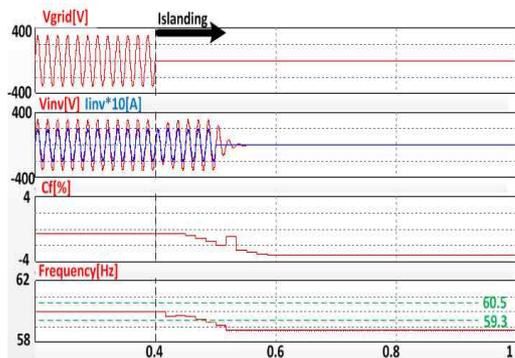


Fig. 9 Waveform used to AFDPF method

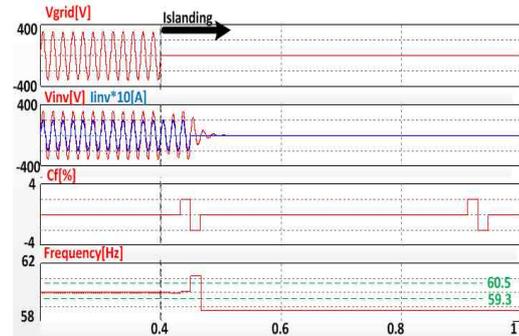


Fig. 10 Waveform used to FJP method

그리고 Fig. 10은 FJP 기법으로 cf를 ± 2 [%] 인가하였을 경우 단독운전 발생 시에는 주파수가 정상범위 내에서 변동하지만, cf가 펄스형태로 인가될 때 주파수를 정상범위 밖으로 유도하여 단독운전을 검출하는 것을 확인할 수 있다.

5. 실험

실험을 하기 위하여 국제 규격인 IEEE Std 929-2000과 국내 규정을 참고하여 최대한 시뮬레이션 조건과 같게 파라미터를 선정하였고, 단독운전 발생 시 주파수 변화가 없어 단독운전을 검출하기에 최악의 경우인 R, L, C 부하의 공진 조건을 만족하도록 설정하였다. 기본적인 실험 구성은 PV array를 대신하여 Fig. 11에 보이는 태양광 시뮬레이터 pCube를 사용하였고, AC power source로 앞단에 차단기를 두어 Grid를 구성하였다. 그리고 병렬 R, L, C 부하를 구성하여 각 단독운전 검출 기법들의 검출 성능을 확인하기 위해 우선 단독운전 검출기법이 적용되지 않은 상태로 실험을 수행하여 단독운전 발생 시 주파수 변화를 확인해 보고, 이와 비교해 각 검출 기법을 적용한 후 실험을 수행하여 각 기법들의 단독운전 검출 성능을 확인해 보았다. 또한 연계점에 전력 측정기기를 사용하여 출력 전류의 THD를 측정하였다.



Fig. 11 PV Simulator (pCube)

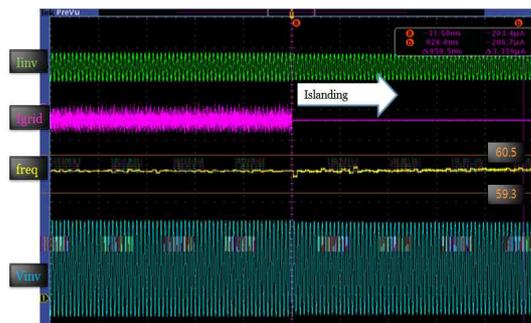


Fig. 12 Waveform without any anti-islanding method

Fig. 12는 단독운전 검출 기법을 사용하지 않은 상태에서의 단독운전 현상을 나타낸다. 이때 계통이 차단되었을 시 주파수가 미소하게 변동하지만 정상 범위 내에서 운전하므로 단독운전으로 인식하지 못하고 PCS가 계속하여 출력하는 것을 확인할 수 있다.

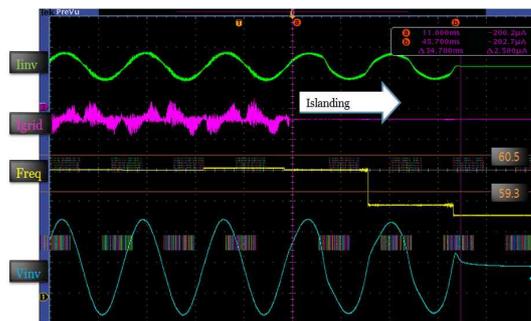


Fig. 13 Waveform used to AFD method

Fig. 13은 앞서 시뮬레이션으로 확인했던

것처럼 AFD 기법으로 cf를 -3[%]로 인가하였을 경우 주파수를 정상범위 밖으로 유도하여 단독운전을 검출하는 파형이다.

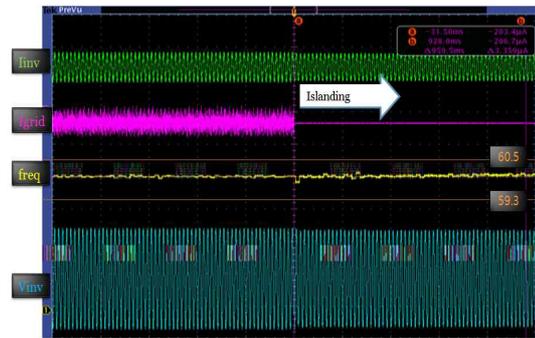


Fig. 14 Waveform used to AFDPF method

Fig. 14도 마찬가지로 시뮬레이션 조건과 같게 AFDPF 기법에서 초기 cf를 -0.5[%]로 인가하고 가속 이득 K=0.1로 설정하였을 경우 단독운전을 검출하는 파형이다. 단독운전이 발생 시에는 주파수가 정상범위 내에서 변동하지만 cf가 증가함에 따라 주파수가 정상범위를 벗어나 단독운전을 검출할 수 있게 된다. AFD 기법과 AFDPF 기법 적용 시 초기 cf의 크기에 따른 PCS의 출력 전류의 THD의 변화는 Fig. 15와 같다.

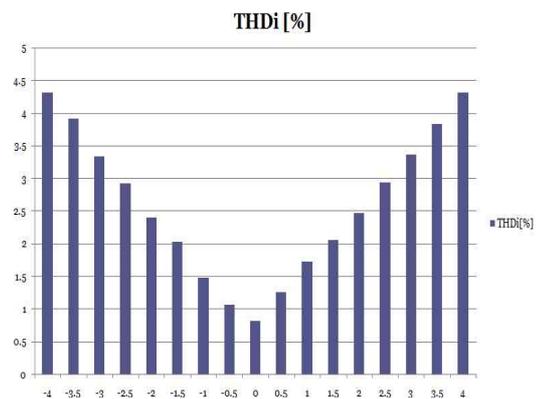


Fig. 15 Characteristics of THDi versus chopping fraction

Fig. 16도 시뮬레이션 조건과 같게 cf를 $\pm 2\%$ 로 인가하였을 경우 펄스 형태로 cf가 인가됨에 따라 주파수 또한 펄스 형태로 변동하게 되면서 정상 범위를 벗어나 단독운전을 검출하는 것을 확인할 수 있다. 인가하는 cf의 크기에 따른 PCS 출력 전류의 THD는 Fig. 17과 같은 관계를 가지며, FJP 기법은 26cycle마다 펄스 형태로 인가하므로 앞선 다른 기법들과는 다르게 cf를 키워도 THD가 많이 증가하지 않는 것을 확인할 수 있다.

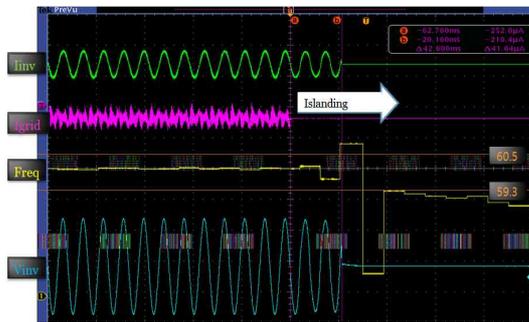


Fig. 16 Waveform used to FJP method

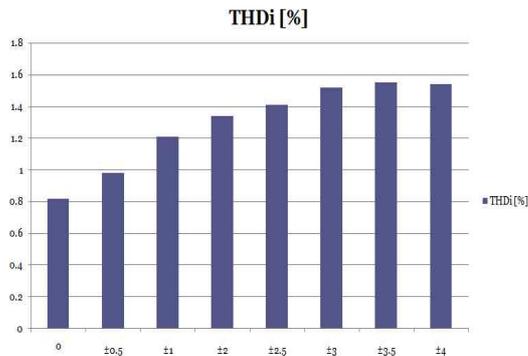


Fig. 17 Characteristics of THDi versus chopping fraction

6. 결론

본 논문에서는 계통 연계형 태양광 발전 시스템을 비롯한 분산 전원 시스템에서의 단

독운전 현상을 방지할 수 있는 기법들에 대하여 기술하였고, 그중 주파수의 변동을 이용한 기법들에 대하여 중점적으로 알아보았으며 시뮬레이션과 실험을 통해 타당성을 검증하였다. 현재 사용되고 있는 능동적 단독운전 검출 기법들은 검출 성능 자체의 경우에는 타당성을 가지지만 전력품질의 측면에서는 출력 전류가 다수의 고조파 성분을 가지거나 역률의 변동이 지속적으로 발생되고 있기 때문에 주파수 변동 기법들에 대하여 시뮬레이션과 실험을 통해 각 기법들의 검출 성능뿐 아니라 전력품질의 영향에 대하여 알아보았다.

단독운전 검출 성능을 높이기 위해서는 주파수의 변동을 유도하는 외란의 크기를 키우면 되지만, 이에 따라 정상상태 시 출력 전류의 THD에 악영향을 미치는 것을 확인하였고, 각 기법의 외란의 크기에 따른 THD를 분석하였다. 결과적으로 각 기법마다 검출 성능을 보장할 수 있는 최소 외란 인가 시 PCS의 출력 전류의 THD는 Table 2와 같다.

Table 2 THDi versus the lowest value of cf

AI scheme	Chopping fraction [%]	THDi [%]
AFD	2.5	2.94
	-3	3.34
AFDPF	0.5	1.27
FJP	± 2	1.34

후 기

본 연구는 광운대학교 교내연구비 지원사업과 미래창조과학부에서 지원하는 학연 공동 기업부설연구소 연계 후속 연구개발 지원 사업에 의해 수행되었습니다.

Reference

1. Ki-Ok Lee, "Output Power Analysis for Active Frequency Drift Method", Journal of the Korea Solar Energy Society, Vol. 29, No. 6, pp. 75~80, 2009
2. Jung-Hun So, "A Study on Performance Analysis of 3kW Grid-Connected PV System", Journal of the Korea Solar Energy Society, Vol. 24, No. 2, pp. 9~15, 2004
3. Moon-Ju Ko, "Novel AFD Method of Islanding Detection with a Periodic Zero Current for Improving on Islanding Detection for Grid-Connected Photovoltaic Inverters", Journal of the Korea Solar Energy Society, Vol. 26, No. 4, pp. 17~23, 2006.
4. Z. Ye, A. Kolwalkar, Y. Zhang, P. Du and R. Walling, "Evaluation of Anti-Islanding Schemes Based on Non Detection Zone Concept", IEEE Trans. on Power Electronics. pp. 1171~1176, 2004
5. Young-Seok Jung, "Analysis of Active Islanding Detection Methods for a Single-Phase Photovoltaic Power Conditioning Systems", Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 1477~1479, 2004.