

단독운전검출을 위한 능동적 주파수 변화 정계환기법

소 정훈, 정 영석, 유 권종, 유 병규, 이 기옥, 최 주엽*

한국에너지기술연구원, *광운대학교 전기공학과

Active Frequency Drift Positive Feedback Method for Anti-islanding

J.H. So, Y.S. Jung, G.J. Yu, B.G. Yu, K.O. Lee, J.Y. Choi*,

Korea Institute Energy Research, *Kwangwoon Univ.

Abstract - As photovoltaic(PV) power generation systems become more common, it will be necessary to investigate islanding detection method for PV systems. Islanding of PV systems can cause a variety of problems and must be prevented. However, if the real and reactive power of load and PV system are closely matched, islanding detection by passive methods becomes difficult. Also, most active methods lose effectiveness when there are several PV systems feeding the same island. The active frequency drift positive feedback method(ADDPF) enables islanding detection by forcing the frequency of the voltage in the island to drift up or down. In this paper the research for the minimum value of chopping fraction gain applied digital phase-locked-loop (DPLL) to ADDPF considering output power quality and islanding prevention performance are performed by simulation and experiment in IEEE Std 929-2000 islanding test.

주상변압기의 여자 전류를 단독운전 발생시 PCS가 담당하게 되어 발생하는 전압의 제 3고조파의 성분을 감시하는 제 3고조파 검출기법등의 수동적 검출기법과 PCS가 출력전류의 위상에 변화를 주어 연계하는 slip mode frequency shift기법 및 출력전력을 변동시키는 전력변동기법, 출력전류의 주파수를 계통전압의 주파수와 다르게 하여 연계하는 주파수 bias기법 등의 능동적 검출기법이 있다[1].

이 논문에서는 능동적 검출기법인 주파수 bias기법의 하나인 ADFPF(active frequency drift positive feedback)기법의 위상동기화방식을 기존의 위상동기기법(phase locked loop : PLL)인 영점검출방식(zero crossing detection PLL)이 아닌 위상지연필터를 이용한 digital PLL(DPLL)방식을 적용하여 단독운전 발생시 이를 검출하기 위한 chopping fraction의 적정 이득에 대하여 시뮬레이션 하고, 이를 실험을 통하여 검증하였다.

2. Active Frequency Drift Positive Feedback(ADDPF)기법

ADDPF기법은 PCS가 계통으로 공급하는 전류의 주파수를 정확히 계통전압의 주파수에 동기시키는 것이 아니라 그림 2와 같이 출력전류의 주파수를 계통전압의 주파수보다 빠르게 또는 느리게 하여 단독운전 발생시 그림 1의 연계점 전압의 주파수에 변화가 발생하도록 하여 단독운전을 검출하는 방법이다[2].

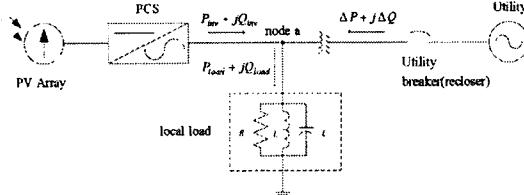


그림 1. 단독운전시험의 계통연계형 태양광시스템,
계통, 부하의 연결도

앞으로 특정지역에서는 계통연계형 태양광발전시스템의 고밀도 연계가 예상되는데, 이 태양광시스템의 출력전력과 수용가의 소비전력이 평형을 이루었을 경우에는 계통전원이 상실되어도 연계점 전압의 실효값 및 주파수가 변동하지 않아 power conditioning system(PCS)이 이를 감지하지 못하고 전력변환운전을 계속하는 단독운전이 발생할 가능성이 높아지며, 만약 단독운전이 발생하면 전력계통의 유지보수 인명에 대하여 심각한 위험 및 계통전원의 재투입 시 전력기기 및 부하기기의 손상이 초래될 수 있다. 따라서 PCS가 이러한 단독운전 발생시 이를 신속히 검출하고 전력변환운전을 정지하여 배전계통의 사고에 대한 안전성 및 신뢰성 확보를 위한 연구가 선제되어야 한다. 기존에 제안된 단독운전 검출기법은 출력전력과 부하의 소비전력의 불균형에 의하여 발생하는 계통전압의 위상 변화를 감시하는 전압위상 급변 검출기법과 계통전원이 정상일 경우에 계통전원이 담당하던

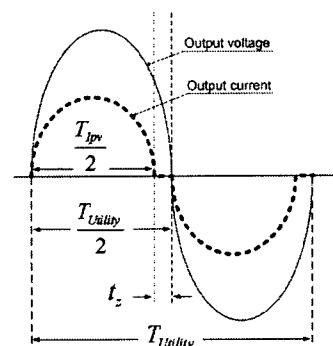


그림 2. ADFPF기법의 출력전압
및 출력전류 파형

T_{ipv} : PV PCS의 출력 전류,

$T_{Utility}$: 계통전압의 한 주기 시간,

t_z : 계통전압의 반주기 동안 0이 되는 시간

출력전류의 주파수가 계통전압주파수보다 빠른 정도를 계통전압의 반주기 동안 출력전류가 “0”이 되는 시간의

비율인 chopping fraction으로 나타낼 수 있고, 이는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\text{chopping fraction} = \frac{2 \times t_s}{T_{V_{util}}} \quad (1)$$

이 기법의 특징은 chopping fraction이 크면 클수록 단독운전 검출성능은 개선되나 chopping fraction은 PCS의 출력전류의 고조파 왜형률(total harmonic distortion : THD)을 비례적으로 악화시키는 성분이므로 이 기법을 PCS에 적용하기 위해서는 단독운전 검출성능과 출력전류의 품질인 THD를 고려하여 chopping fraction을 결정해야 한다[2]. 그런데 계통이 허용하는 PCS의 최대 THD는 5% 미만이어야 하는데, 스위칭에 의한 영향을 고려하면 허용할 수 있는 chopping fraction값은 더 적은 값으로 한정된다. 하지만 출력전류 THD가 5%를 벗어나는 0.05의 chopping fraction을 실제 PCS에 적용하여 IEEE Std 929-2000의 RLC 병렬부하(quality factor: $Q = 2.5$) 시험에서는 단독운전을 검출하지 못하는 결과가 발생한다. 단독운전을 검출하지 못하는 정확한 원인에 대하여는 앞으로 자세한 연구가 필요하나 현재 가장 큰 요인은 상수로 고정된 chopping fraction을 들 수 있다. 이 상수로 고정되어 있는 chopping fraction을 변동시키기 위한 ADFPF기법은 chopping fraction의 변동을 식 (2)와 같이 PCS에 의하여 계산되는 계통전압의 주파수와 기준 주파수의 차이에 이득(K)을 곱한 기법이다 [2].

$$\text{chopping fraction} = cf_o + K(f - f_r) \quad (2)$$

cf_o 는 초기값, K 는 이득,

f : 샘플링에 의한 계통전압의 주파수,

f_r : 계통전압의 기준 주파수(60Hz).

식 (2)를 기준의 영점검출방식의 위상동기기법 대신 위상지연필터를 이용한 DPLL방식을 이용하면, 비교적 상대적으로 정확한 위상동기를 할 수 있다. 좀 더 효과적이고, 안정적으로 변동하는 chopping fraction을 인가하기 위하여 식 (3)과 같이 과거의 값(cf_o)이 누적되지 않는 형태를 사용하면서 동시에 위상동기화 기법이 가지는 위상 추종 오차(Δur_pll)를 이용하였다. 식 (3)의 적용시 단독운전 발생시 연계점전압의 주파수를 증가하는 방향을 고려하였고, 계통전압 주파수가 정상으로 허용되는 주파수외란($60\pm0.5\text{Hz}$)으로 인하여 발생하는 chopping fraction의 값이 발생하지 않도록 하기 위해 chopping fraction의 최대값은 0.15, 최소값은 0으로 설정하였다. 그리고 단독운전 발생시 연계점 전압의 주파수를 증가하도록 하여 이를 PCS의 OFR로써 검출하도록 하였다[4].

$$\text{chopping fraction} = K(\Delta ur_pll)^2 \quad (3)$$

3. 시뮬레이션 및 실험

시뮬레이션 회로는 그림 3과 같이 단상 H-bridge Inverter, LC filter, 계통전원, PWM controller, RLC 병렬부하 등으로 구성된다. 계통연계형 PV PCS는 주로 DC-DC boost converter와 H-bridge Inverter등으로 구성되는데, 이 논문에서는 DC-DC boost converter에서 태양전지 어레이의 최대전력점(maximum power point : MPP)을 추종하는 기법(maximum power point tracking : MPPT)이 적용되어 있다고 가정하여 DC-DC boost converter의 출력인 H-bridge Inverter의 입력전원을 이상적인 DC 전압원으로 가정하였다. H-bridge Inverter의 스위칭은 반송파(carrier wave)의 주파수는 10[Hz]인 unipolar PWM(pulse width modulation) 스위칭 기법을

적용하였다. LC filter는 차단주파수가 649.74[Hz]가 되도록 인덕턴스를 3[mH]와 커패시터를 20[μF]로 선정하였다. RLC 병렬부하는 단독운전시험방법인 IEEE Std 929-2000에 의하여 설정하였고[4], 계통전원은 우리나라의 한국전력과 같이 220[V_{rms}], 60[Hz]의 이상적인 계통전원으로 선정하였다. PWM controller는 사용자의 제어목적에 따라 C언어로 코딩을 할 수 있는 PSIM의 dynamic link library(DLL)로써 계통연계제어, DPLL방식, ADFPF기법 등의 연산 및 제어기법이 포함시켰다. 또한, 시뮬레이션에 사용된 parameter는 표 1과 같다.

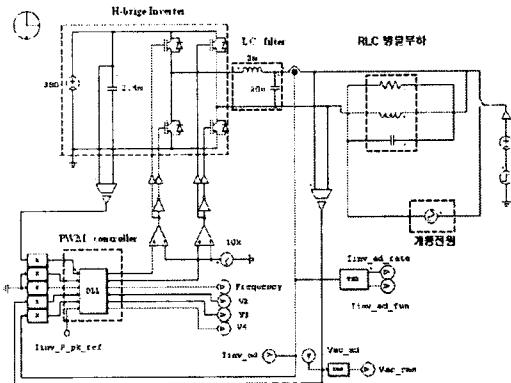


그림 3 단독운전 시뮬레이션을 위한 PSIM 회로
표 1. 시뮬레이션에 사용한 RLC 병렬부하 및 PV PCS
의 Parameter

PV PCS	스위칭 주파수	10 [Hz]	
	LC filter	인덕턴스	3[mH]
		커패시턴스	20 [μF]
IEEE Std 929-2000 부하설정	P_{inv}	2952.9 [W]	
	Q	2.5	
	P_{qL}	7382.25 [W]	
	L_{load}	17.391 [mH]	
	C_{load}	404.588 [μF]	
	R_{load}	16.391 [Ω]	

3.1. 시뮬레이션결과

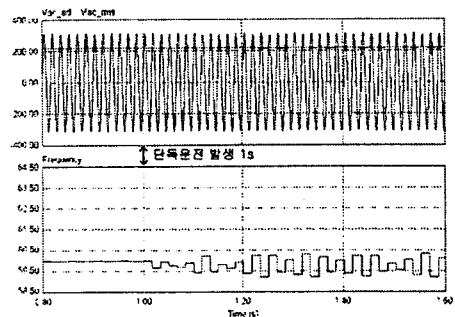


그림 5. $K = 0.005$, 연계점의 전압, 실효값,
주파수, 단독운전불검출

표 1의 parameter를 적용하여 단독운전 시뮬레이션을 하였다. 식 (3)의 이득 K 가 0.005, 0.010의 결과는 각각

그림 5, 그림 6에 나타내었다. 단, 여기에서 V_{ac_ad} 는 연계점전압의 파형이고, V_{ac_rms} 는 연계점전압의 실효값, Frequency는 연계점전압의 주파수를 나타낸다. 시뮬레이션 결과를 살펴보면 식 (3)의 이득(K)이 0.010이상부터 IEEE Std 929-2000에 의한 RLC 병렬부하조건에서 단독운전을 검출할 수 있고, 이를 근거로 표 2와 같은 PCS 및 RLC 병렬부하의 parameter를 설정하였다.

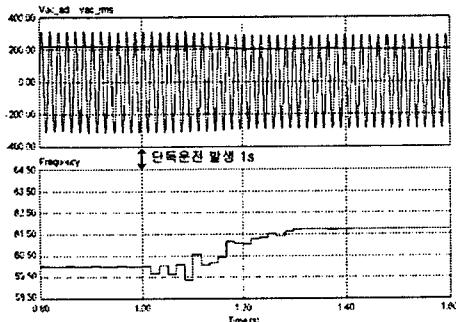


그림 6. $K = 0.010$ 이상, 연계점의 전압, 실효값, 주파수, 단독운전검출

표 2. 단독운전 실험에 사용한 RLC 병렬부하 및 PV PCS의 Parameter

PCS Output Power	$P_{inv} = 3 [W]$
	$P_{q-inv} = 0.242 [kVar]$
RLC 병렬부하	$P_R = 3 [W]$
	$P_L = 7.45 [kVar]$
	$P_C = 7.25 [kVar]$

3.2. 실험 결과

식 (3)의 이득(K)이 0.005, 0.010의 결과는 각각 그림 7, 그림 8과 같다. 결과에서 보듯이 이득(K)이 0.010 이상에서는 PCS가 연계점전압의 주파수이상을 감지하여 단독운전을 검출하고, 전력변환운전을 정지했음(300ms이내)을 알 수 있다. 또한 출력전류의 THD를 살펴보면 이득(K)이 0.010일 경우, 출력전류 THD는 2.64%로 스위칭에 의한 THD인 2.31%에서 불과 0.31%정도가 증가함을 알 수 있다.

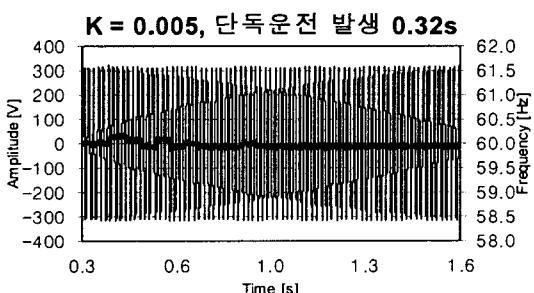


그림 7. $K = 0.005$, 연계점전압, 주파수, 단독운전불검출

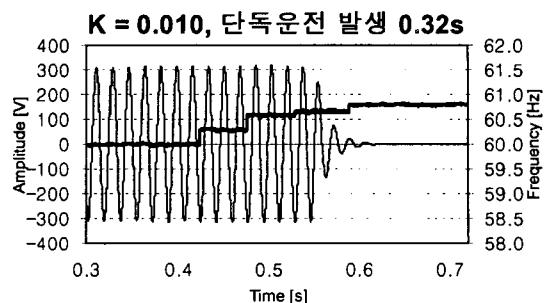


그림 8. $K = 0.010$ 이상, 연계점전압, 주파수, 단독운전검출

4. 결론 및 향후계획

본 논문에서는 단상 계통연계형 태양광 발전시스템의 단독운전 검출기법 중 능동적 검출기법인 AFDPF(active frequency drift positive feedback)기법에 대하여 단독운전 검출성능 및 출력전류의 THD에 대하여 살펴보았다. 단독운전 발생시 이를 신속히 검출하기 위한 능동적 기법 중 AFDPF기법을 기준에 제안된 영점검출방식이 아닌 위상지연필터를 이용한 digital PLL방식을 적용하여 IEEE Std 929-2000의 시험에서 단독운전을 검출하기 위한 chopping fraction의 적정 이득(K)을 시뮬레이션과 실험을 통하여 알아보았다. 그 결과 chopping fraction의 이득(K)이 0.010 이상부터 단독운전을 검출할 수 있음을 보였고, 동시에 단독운전이 아닌 정상적인 동작에서 출력전류품질의 기준인 고조파 왜형율의 증가도 적게 할 수 있는 것을 보였다. 이는 PCS 출력전류의 THD에 비례적으로 악영향을 미치는 chopping fraction의 크기가 이득(K)의 영향으로 계통이 정상일 경우에는 비교적 적은 값이 되도록 하여, PCS의 출력전류 THD를 최소화할 수 있음을 확인하였다.

앞으로는 상수로 고정된 chopping fraction의 AFDPF기법이 IEEE Std 929-2000의 시험에서 단독운전이 발생하여도 단독운전을 검출하지 못하는 원인을 RLC 병렬부하의 각 부분 전류와 PV PCS의 출력전류, 계통으로부터의 유입전류 등을 고려하여 그 상관관계를 자세히 분석함으로써 단독운전을 검출하지 못하는 원인 및 문제해결 방안에 대하여 연구할 계획이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 최주업 외 “태양광발전 시스템의 계통연계 보호를 위한 단독운전검출기법의 기술개발에 관한 연구,” 최종 보고서, 2003. 5, 산업자원부, 2001-N-PV03-P-01.
- [2] M. E. Ropp, “Design Issues For Grid-connected Photovoltaic systems,” Doctoral Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, October 12, 1998.
- [3] 박용성, “단상 계통연계형 PCS의 위상동기화 기법,” 충북대학교 전기공학과 석사학위청구논문, 2004, pp. 17 - 20.
- [4] IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic Systems, IEEE Std 929-2000, 3 April 2000.