

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 27, No. 2, 2007

디지털 위상검출기법을 적용한 능동적 주파수 변화 정제환기법

이기옥*, 정영석**, 최주엽*, 최익***, 송승호*, 고문주***

*광운대학교 전기공학과(skalrl@nate.com), **한국에너지기술연구원

***광운대학교 정보제어공학과(kmjoseph@empal.com)

Active Frequency Drift Positive Feedback Method for Anti-islanding using Digital Phase-Locked-Loop

Lee, Ki-Ok*, Jung, Young-Seok**,
Choi, Ju-Yeop*, Choy, Ick***, Song, Seung-Ho*, Ko, Moon-Ju***

*Dept. of Electrical Eng., Kwangwoon University(skalrl@nate.com),

**Korea Institute of Energy Research,

***Dept. of Information and Control Eng., Kwangwoon University(kmjoseph@empal.com)

Abstract

As photovoltaic(PV) power generation system becomes 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 the 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(AFDPF) 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 AFDPF considering output power quality and islanding prevention performance are performed by simulation and experiment according to IEEE Std 929-2000 islanding test.

Keywords : 태양광 전력변환기(PV PCS), 단독운전(Islanding), 능동 주파수 변화(Active Frequency Drift),
디지털 위상검출(Digital Phase-Locked-Loop)

접수일자 : 2007년 4월 3일, 심사완료일자:2007년 5월 28일

교신저자 : 최주엽(juyeop@kw.ac.kr)

1. 서론

향후 가까운 미래에 정부에서 주도하고 있는 10만호 보급사업 등을 포함한 대규모 태양광발전산업의 보급에 따라 특정지역에서는 계통연계형 태양광 전력변환기(PV PCS)의 고밀도 연계가 예상된다. 이 때 지금까지는 이론적으로만 가능할 것으로 여겨졌던 현상, 즉 실제적으로는 발전전력이 수용가가 필요로 하는 부하전력에 비해 턱없이 모자라기 때문에 거의 발생하지 않는 단독운전 현상이 발생할 수 있는 확률이 높아지게 된다. 특히 많은 가구에서 집단적으로 태양광발전시스템을 운전할 경우 PV PCS의 출력전력과 수용가의 소비전력이 평형을 이루게 되면 계통이 상실되어도 연계점전압의 실효값 및 주파수가 변동하지 않기 때문에 PCS가 이를 감지하지 못하고 전력변환운전을 계속하는 단독운전 현상이 발생하게 되는 것이다. 만약 단독운전 현상이 발생하면 전력계통의 유지보수 인력에 대하여 심각한 위험 및 계통의 재폐로 시 전력기기 및 부하기기의 손상이 예상된다. 따라서 PCS가 이러한 단독운전 발생 시 이를 신속히 검출하고, 계통연계 동작인 전력변환운전을 정지하여 배전계통의 사고에 대한 안전성 및 신뢰성 확보가 절실하게 필요하게 되었고, 단독운전을 검출하기 위한 단독운전 검출기법에 대한 연구가 선행되어야 한다. 기존에 제안된 수동적 단독운전 검출기법으로 출력전력과 부하의 소비전력의 불균형에 의하여 발생하는 계통전압의 위상 변화를 감시는 전압위상 급변 검출기법과 계통전원이 정상일 경우에 계통전원이 담당하던 주상변압기의 여자 전류를 단독운전 발생시 PCS가 담당하게 되어 발생하는 전압의 제 3고조파의 성분을 감시하는 제 3고조파 검출기법 등이 있다. 그리고 능동적 검출기법에는 PCS가 출력전류의 위상에 변화를 주어 연계하는 slip mode frequency shift기법 및 출력전력을 변동시키는 전력변동기법, 출력전류의 주파수를 계통전압의 주파수와 다르게 하여 연계하는 주파수 바이어스 기

법 등이 있다¹⁾.

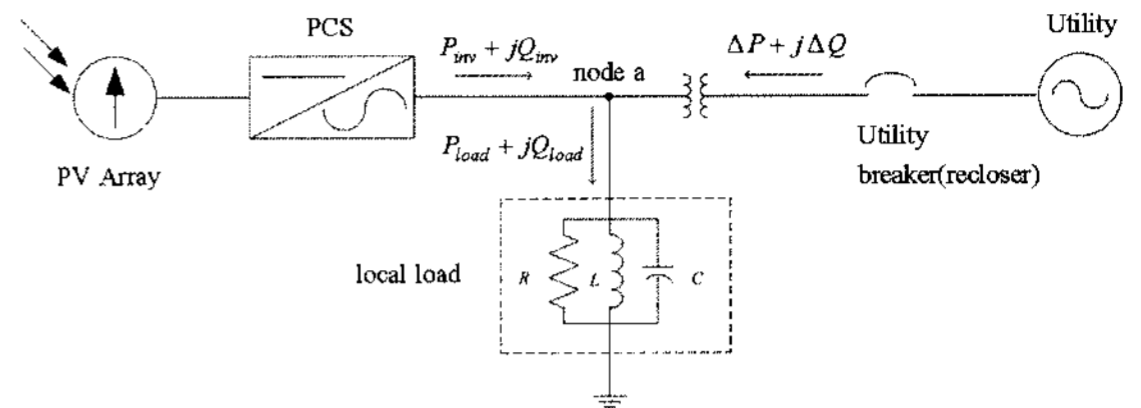


그림 1. 계통연계형 태양광시스템의 단독운전시험을 위한 계통과 부하의 구성도

PV PCS의 단독운전검출은 전압, 주파수를 감시하는 4개의 계전기인 과전압, 저전압, 과주파수, 저주파수 등의 계전기를 이용하는 방법이 쓰인다. 즉, 그림 1의 node a(연계점)의 전압이 계전기의 설정범위를 벗어나면 PCS는 적절한 trip 동작으로 전력변환운전을 정지하여 단독운전을 방지하게 된다. 시뮬레이션 및 실험에 사용한 계전기의 trip 설정기준은 표 1과 같고, 특히 전압계전기의 trip 설정은 IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic Systems⁴⁾의 기준을 참고하여 나타내었다.

표 1. 과전압/저전압/과주파수/저주파수의 Trip 설정값

Relay	설정값	검출시간(ms)
OVR	243 V_{rms} 이상	100 이상
UVR	193.6 V_{rms} 이하	100 이상
OFR	60.2 Hz 이상	100 이상
UFR	59.8 Hz 이하	100 이상

단독운전의 능동적 검출기법 중 하나인 AFD (active frequency drift) 기법의 AFD에 대한 논문은 이미 많은 연구결과가 발표되었다. 하지만 chopping fraction(cf)이 상수로 고정된 AFD기법은 단독운전검출 시험에서 이미 그 왜란에 대한 영향이 모두 상쇄되도록 설정된 상태에서 시험을 하므로 단독운전을 검출하지 못하는 상황이다. 이를 개선하기 위해서 cf을 고정시키지 않고 여러 가지 방법으로 변동시키는 법을 사용하는데, 그중 대

표적인 기법이 AFDPF(active frequency drift positive feedback)기법이다²⁾. AFDPF기법의 단독운전검출 성능은 위상의 검출 및 계통전압의 주파수 계산이 얼마나 빠르고 정확하나에 따라 결정될 수 있다. 따라서 이 논문에서는 이 계통전압의 위상을 검출하는 방법 중 영점검출방식(zero-crossing)과 위상 지연 필터가 고려된 digital PLL기법을 AFDPF에 각각 적용하여 단독운전을 검출하는 이득에 대하여 정량적으로 알아보았다. 단독운전을 검출하기 위해 계통으로 주입하는 왜란의 양을 기법이 검출하는 주파수의 오차성분을 이용하여 결정하는데, 이 주파수의 오차성분이 아주 작거나 0으로 계산되어 단독운전검출을 실패할 가능성이 높은 기존의 영점검출방식이 아닌 매 제어 주기마다 주파수 오차가 발생하여 단독운전을 검출할 가능성이 높은 위상지연필터를 이용한 digital PLL을 적용하였다^{3,5)}. 그 결과 AFDPF기법의 단독운전 검출성능을 향상시키며 기존 기법보다 cf의 이득을 줄일 수 있고, 이로 인해 계통전압이 단독운전이 아닌 정상 변동 범위에서 인가되는 PV PCS의 출력전류의 왜란도 줄일 수 있다는 것을 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다.

2. Active Frequency Drift Positive Feedback기법

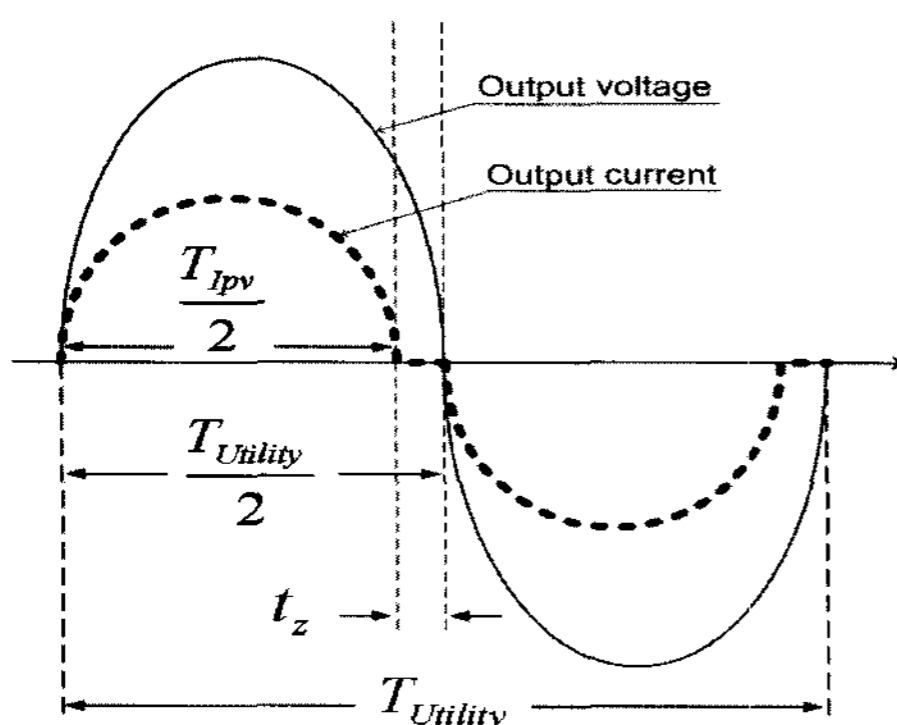


그림 2. Active Frequency Drift기법의 출력전압 및 출력전류 파형

그러나 그림 1에서 PV PCS의 출력전력과 부하의 소비전력이 평형을 이루어 계통에서 부하로 공급되는 전력($\Delta P + j\Delta Q$)이 거의 0에 가까운 상태에서는 계통에 사고 또는 인위적인 상황으로 인한 정전이 되면, 연계점전압의 실효값과 주파수는 변화가 발생하지 않아 기존의 수동적 단독운전 검출기법으로는 단독운전을 검출할 수 없다. 그러나 이 기법과 같이 출력전류의 주파수를 계통전압의 주파수와 다르게 하여 계통으로 전류를 주입한다면 단독운전 발생 시 그림 1의 연계점 전압은 옴의 법칙에 의하여 PV PCS의 출력전류에 의해 형성되므로 연계점전압의 주파수에 변화가 발생할 수 있고, 이를 PCS에 내장되어 있는 주파수 계전기기를 이용하여 단독운전을 검출하는 기법이다. PV PCS가 계통으로 주입하는 전류의 주파수가 계통전압주파수보다 빠른 정도를 계통전압의 반주기 동안 출력전류가 "0"이 되는 시간으로 나타낼 수 있으며, 이를 시간의 비율인 cf로 나타낼 수 있고, 이는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$cf = \frac{2 \times t_z}{T_{Util}} \quad (1)$$

이 AFD의 특징은 cf가 크면 클수록 단독운전 검출성능은 개선되나 PCS의 출력전류의 고조파왜형율을 비례적으로 악화시키는 성분이므로, 이 기법을 PV PCS에 적용하기 위해서는 단독운전 검출성능과 출력전류의 고조파왜형율을 고려하여 cf를 결정해야 한다²⁾. 그런데 PV PCS는 스위칭에 의한 고유의 출력전류에 의한 고조파왜형율이 이미 존재하므로 이 기법이 최대한 허용할 수 있는 cf는 PV PCS의 출력전류의 고조파왜형율의 허용 규격인 총합 5% 미만이 되도록 cf를 설정하여야 한다. 그러나 출력전류의 고조파왜형율이 5%를 벗어나는 0.05의 cf는 실제 PV PCS에 적용하여 미국의 계통연계형 PV PCS의 단독운전시험방법인 IEEE

Std. 929-2000의 RLC 병렬부하(quality factor : $Q=2.5$)설정의 시험에서는 단독운전을 검출하지 못하는 현상이 발생한다. 단독운전을 검출하지 못하는 정확한 원인에 대하여는 앞으로 자세한 연구가 필요하나 현재 가장 크게 의심되는 요인은 상수로 고정된 cf 를 들 수 있다. 즉, 단독운전 발생시 RLC 병렬부하의 양단전압인 연계점전압은 인덕터(L)와 커패시터(C)에 의하여 공진하는데 cf 이 상수로 고정되어 있으면 단독운전이 발생하여도 그림 1의 연계점전압의 주파수를 변동시킬 수 없는 수준인 59.3Hz이상에서 60.5Hz이내의 주파수로 공진을 하게 되어 단독운전검출에 실패하게 된다. 이를 개선하기 위해서 cf 를 변동시키는 기법인 AFDPF기법은 cf 의 변동을 PCS의 샘플링 주파수에 의하여 계산되는 계통전압의 한주기 샘플링 개수와 기준 주파수와의 차이에 이득(K)을 곱한 값을 이용한 기법이다. 이 관계를 식 (2)에 나타내었다²⁾.

$$cf = cf_0 + K(f - f_r) \quad (2)$$

단, cf_0 는 초기값, K 는 이득

f : 계통전압의 주파수, f_r : 기준주파수(60Hz)

그러나 식 (2)의 적용에 있어서 주파수의 계산이 정밀하고, 고속일수록 확실하게 주파수의 가속이 되는데, 영점검출방식에 의하여 계산되는 위상은 샘플링에 의하여 계산되기 때문에 때에 따라서 오차가 발생하지 않아 cf 가 0으로 계산되어 단독운전이 발생하여도 이를 검출하는데 실패할 가능성이 크다. 또한 급격한 계통전압의 위상 점프가 발생하여도 계통전압의 한주기 내지 반주기 동안 open loop로 위상이 계산되므로 정밀한 위상 추종이 어렵고, 계통전압주파수의 정상 변동 범위인 60.2 Hz~59.8Hz이내의 변동을 정밀하게 계산하기 어렵다. 이를 개선하기 위한 DPLL방식은 매 제어주기마다 그림 1의 연계점전압의 값과 이 전압이 디지털 필터를 통과하여 위상이 지연된 전압의 사이에

존재하는 오차가 존재하고, 이 오차를 이용하면 매 제어주기마다 기존의 영점검출방식에 비하여 효과적으로 변동하는 cf 를 참고문헌 3, 5와 같이 계산하므로, AFDPF의 장점인 빠른 주파수 가속을 구현할 수 있다.

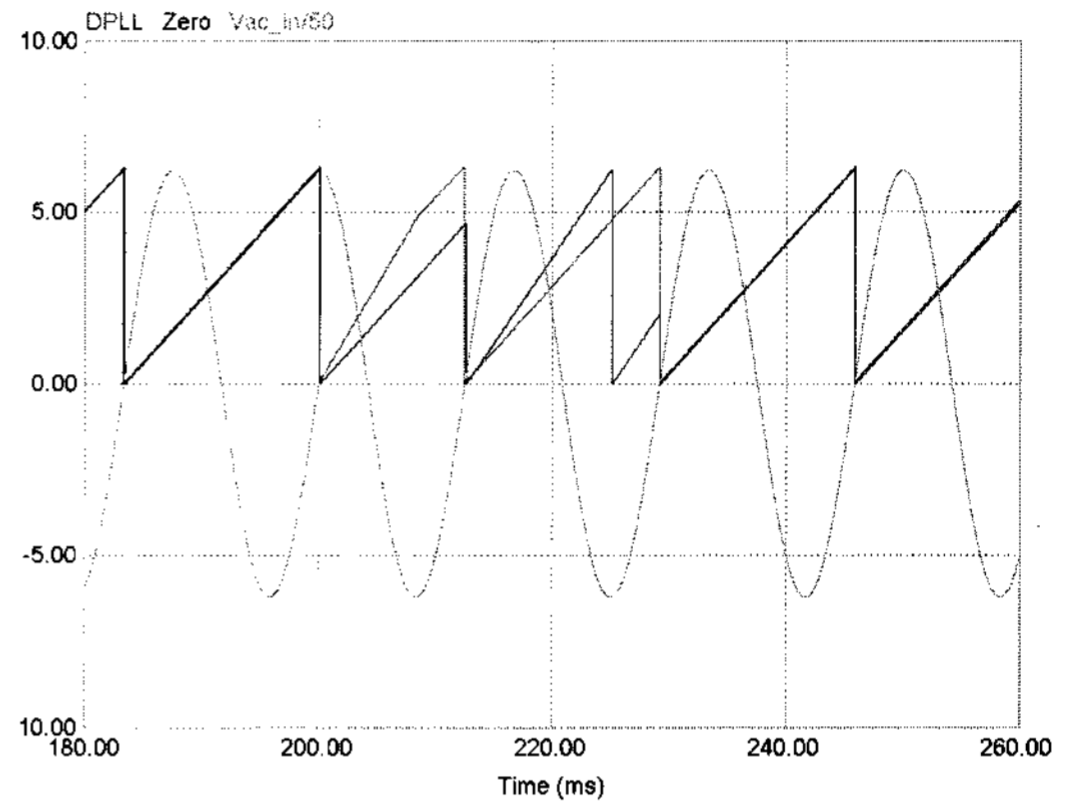


그림 3. 계통전압 위상 점프시 영점검출방식과 DPLL방식의 추종 특성

영점검출방식과 DPLL방식의 계통 전압의 위상 점프 발생 시 추종하는 동특성은 그림 3과 같다. DPLL방식은 제어 이득의 설계에 따라 위상 추종 특성이 달라지지만, 이 논문에서는 한 주기 내에 추종하도록 제어이득을 설정하였다. 그림 3에서 보듯이 200ms에서 계통전압의 위상을 약 90도 점프가 발생하도록 하였을 경우, DPLL방식의 위상추종은 한 주기 내에 추종하나, 영점 검출 방식은 위상 증분의 계산을 open loop로 계산하기 때문에 두 주기 이상 위상동기가 지연되고 있음을 알 수 있다.

위상지연필터를 이용한 DPLL방식에 의하여 검출된 계통전압의 위상은 매 제어주기마다 계통전압의 위상을 검출하는데 그 증분(Δwt_k)은 식(3)과 같고, 위상(wt_k)은 증분이 누적된 값인 식(4)와 같다. 단, t_k 는 제어주기이다.

$$\Delta wt_k = 2\pi ft_k \quad (3)$$

$$wt_k = wt_{k-1} + \Delta w_{tk} \quad (4)$$

그러므로 cf가 반영된 증분과 위상은 식 (5), 식 (6)과 같다.

$$\Delta wt_{cf_k} = (1 + cf) \times \Delta wt_k \quad (5)$$

$$wt_{cf_k} = wt_{cf_k-1} + \Delta wt_{cf_k} \quad (6)$$

DPLL방식을 적용함에 있어서 좀 더 효과적이고, 안정적으로 변동하는 cf를 인가하기 위하여 식 (7)과 같이 과거의 값이 누적되지 않는 형태를 사용하였다²⁾. 또한, 다음 식 (7)의 적용 시 단독운전 발생 시 연계점전압의 주파수를 증가하는 방향을 고려하였고, 계통전압 주파수의 정상범위인 외란(60Hz±0.5Hz)으로 발생하는 cf의 발산을 제한하기 위해 최대값은 0.15, 최소값은 0으로 설정하였다. 그리고 단독운전 발생 시 연계점전압의 주파수를 증가하도록 하여 이를 PCS의 과주파수 계전기로 검출하도록 하였고, 시뮬레이션과 실험은 IEEE Std 929-2000 부하조건에서 단독운전을 검출하기 위한 적정 이득에 대하여 살펴보았다⁴⁾.

$$cf = cf_o + K(\Delta wr_pld)^2 \quad (7)$$

단, cf_o 는 0.

시뮬레이션 회로는 그림 4와 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, 인버터의 정격 출력 시 단독운전의 검출 특성을 고찰하기 위하여 DC-DC boost converter의 출력을 이상적인 DC 전압원으로 가정하였다. H-bridge Inverter의 스위칭은 10kHz인 unipolar

PWM 스위칭 기법을 적용하였다. LC filter는 차단주파수가 649.74Hz가 되도록 선정하였다. RLC 병렬부하는 단독운전시험방법인 IEEE Std 929-2000에 의하여 설정하였고⁴⁾, 계통전원은 우리나라의 한국전력과 같이 220Vrms, 60Hz의 이상적인 전압원으로 선택하였다. PWM controller는 사용자의 제어목적에 따라 C언어로 코딩을 할 수 있는 PSIM의 dynamic link library(DLL)로써 계통연계제어, DPLL방식, AFDPF기법 등의 연산 및 제어 기법이 포함되어 있고, 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 2에 나타내었다.

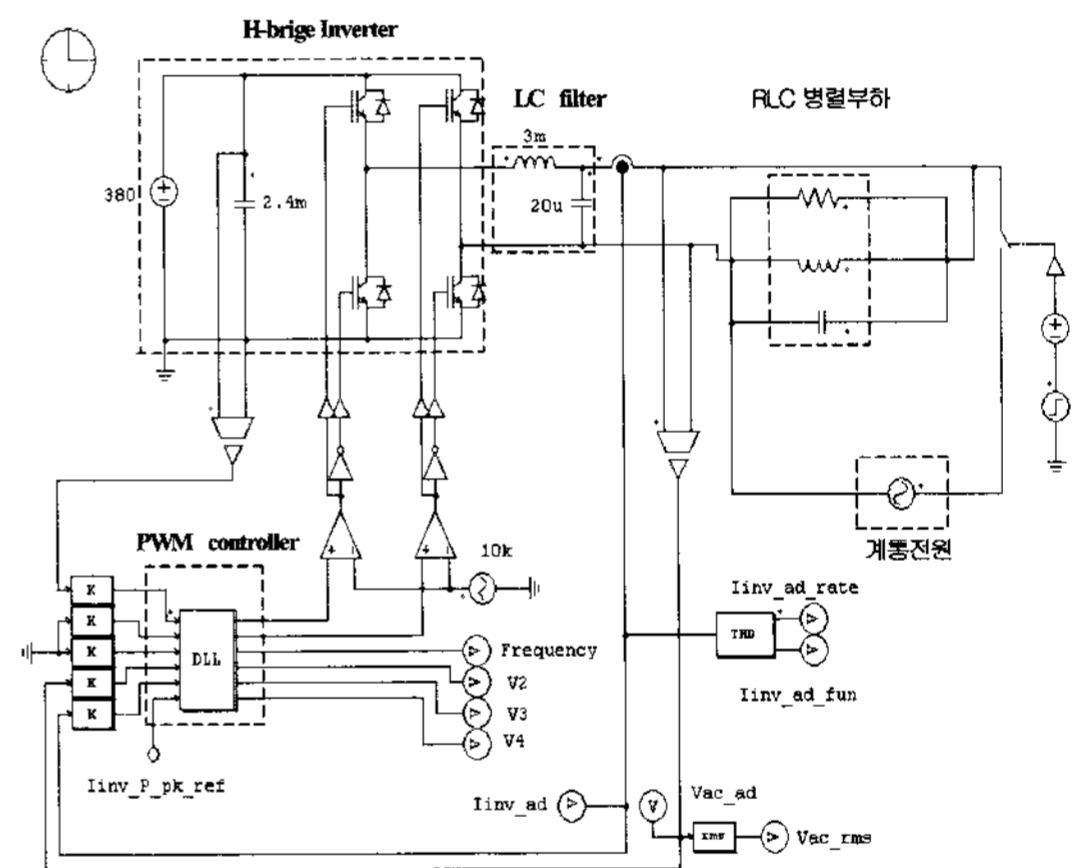


그림 4. 단독운전 시뮬레이션을 위한 PSIM 회로

표 2. 시뮬레이션에 사용한 RLC 병렬부하 및 PV CS의 파라미터

PV PCS	제어주파수	10 [kHz]		
	LC filter	인덕턴스	3[mH]	커패시턴스
IEEE Std 929-2000의 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]		

2.1 시뮬레이션결과

표 2의 조건을 적용하여 PSIM에서 단독운전 시뮬레이션을 하였다. 식 (7)의 이득 K 가 0.005, 0.010, 0.050의 시뮬레이션결과는 각각 그림 5, 그림 6, 그림 7에 나타내었다.

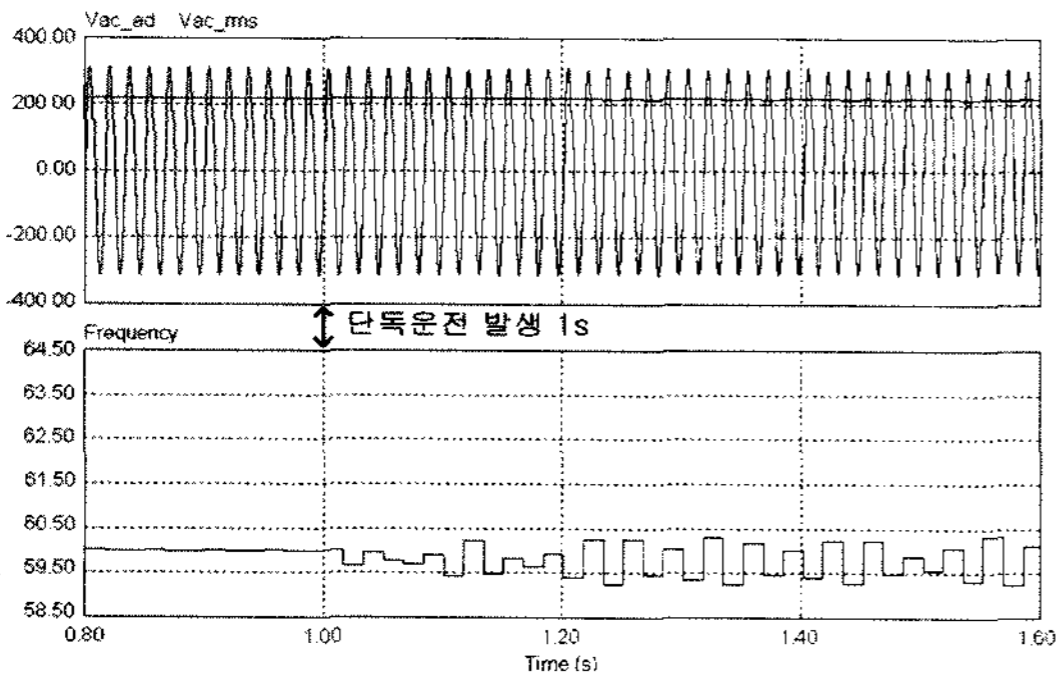


그림 5. $K=0.005$, 연계점의 전압, 실효값, 주파수, 단독운전검출 불가능

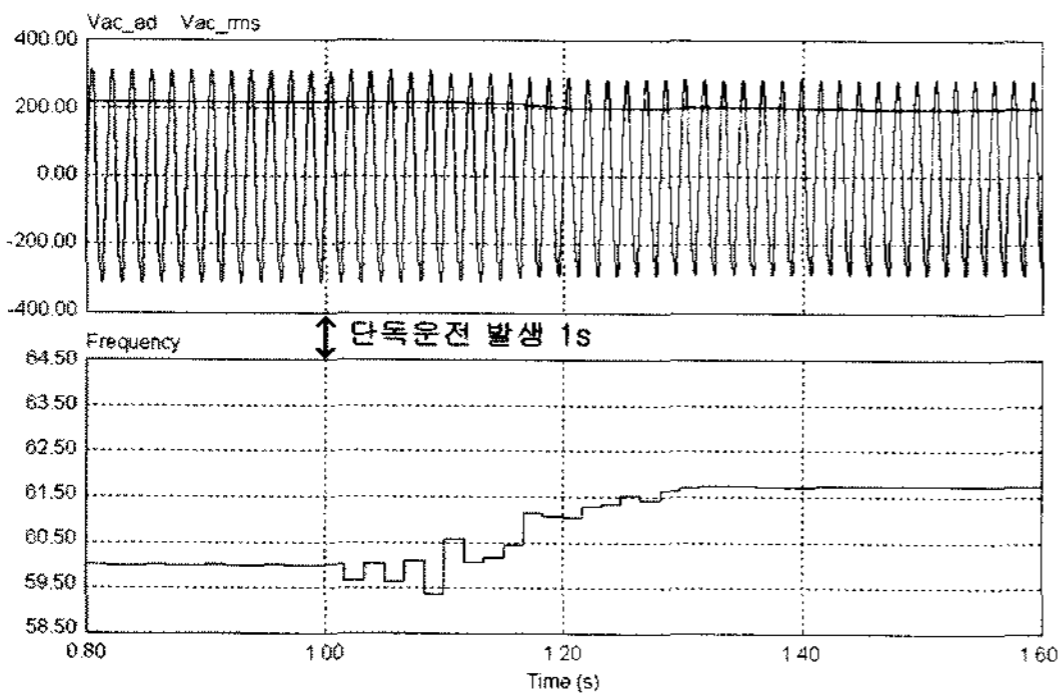


그림 6. $K=0.010$, 연계점의 전압, 실효값, 주파수, 단독운전검출 가능

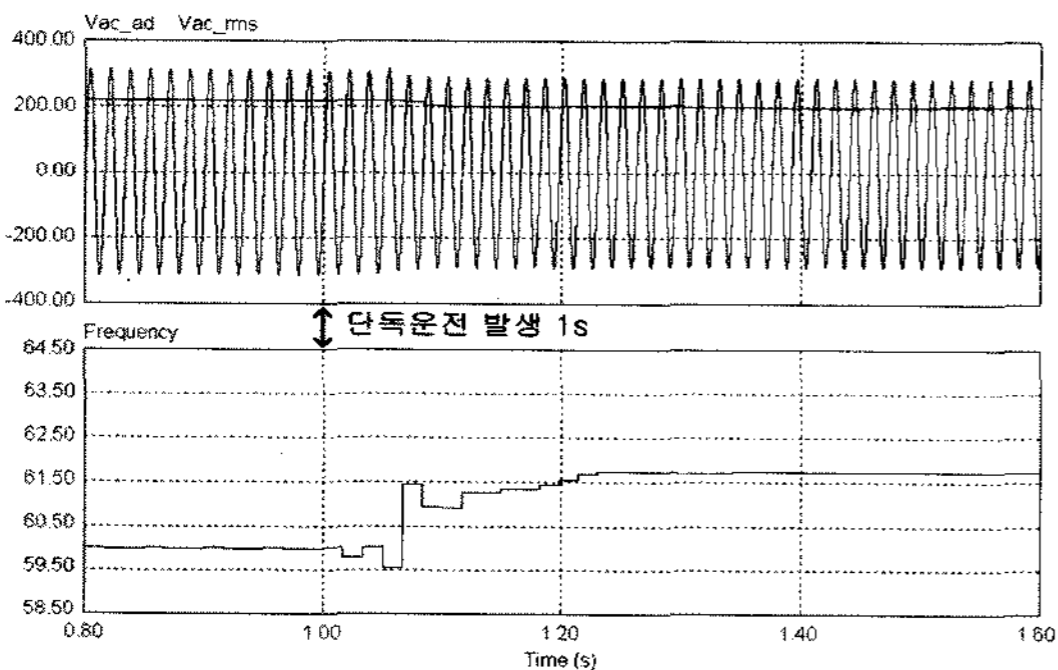


그림 7. $K=0.050$, 연계점의 전압, 실효값, 주파수, 단독운전검출 가능

시뮬레이션 결과를 살펴보면 식 (7)의 이득이 0.010이상부터 단독운전을 검출할 수 있음을 알 수 있다. 위상 검출 기법의 차이에 의한 검출 성능을 표 3에 나타내었다.

표 3. 위상 검출기법에 따른 단독운전검출 유무 및 cf평균값

DPLL			영점검출방식		
K	cf평균	검출유무	K	cf평균	검출유무
0.021	1.06%	실패	0.028	2.66%	실패
0.022	1.11%	실패	0.029	2.71%	실패
0.023	1.16%	실패	0.030	2.76%	실패
0.024	1.21%	가능	0.031	2.81%	가능
0.025	1.26%	가능	0.032	2.87%	가능
0.026	1.31%	가능	0.033	2.92%	가능

위의 표 3에서 보는 바와 같이 좀 더 정확한 위상 검출 방법을 사용하게 되면, 단독운전을 검출할 수 있는 이득을 더 작은 값으로 고려할 수 있고, 정밀한 위상 검출기법을 적용하면 결과적으로 PCS의 출력전류에 인가되는 왜란인 cf도 감소하게 되어 계통전압의 정상 범위의 변동인 60.2Hz~59.8 Hz의 범위에서 출력전력의 품질 저하(고조파왜형률 등)를 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다. 이를 근거로 표 4와 같은 PV PCS 및 RLC 병렬부하의 파라미터를 이용하여 실험을 하였다.

표 4. 실험에 사용된 RLC 부하 및 PV PCS의 Parameter

PCS Rated Power	$P_{inv} = 3 \text{ kW}$
	$P_{q-inv} = 0.242 \text{ kVAR}$
RLC 부하	$P_R = 3 \text{ kW}$
	$P_L = 7.45 \text{ kVAR}$
	$P_C = 7.25 \text{ kVAR}$

2.2 실험결과

결과에서 보듯이 이득 K 가 0.010 이상에서는

PCS가 연계점전압의 주파수이상을 감지하여 단독운전을 검출하고, 전력변환운전을 정지했음(300ms 이내)을 알 수 있다. 또한 출력전류의 고조파왜형율을 살펴보면 이득이 0.010 일 경우의 정상적인 동작에서 출력전류 고조파왜형율은 2.64%로 PWM 스위칭에 의한 PCS의 출력전류 고조파왜형율인 2.31%에서 불과 0.31%정도만 증가함을 알 수 있다. 또한, 표 3에서 보듯이 단독운전을 검출할 수 있는 이득은 0.024이상부터 가능한 것을 볼 수 있는데, 이 시뮬레이션 결과와 그림 9의 실험결과에 차이가 발생하는 것은 실험 장비의 스위칭에 의한 기본적인 고조파 성분이 있으므로 이득이 0.01이상이 인가된 효과라고 여겨진다.

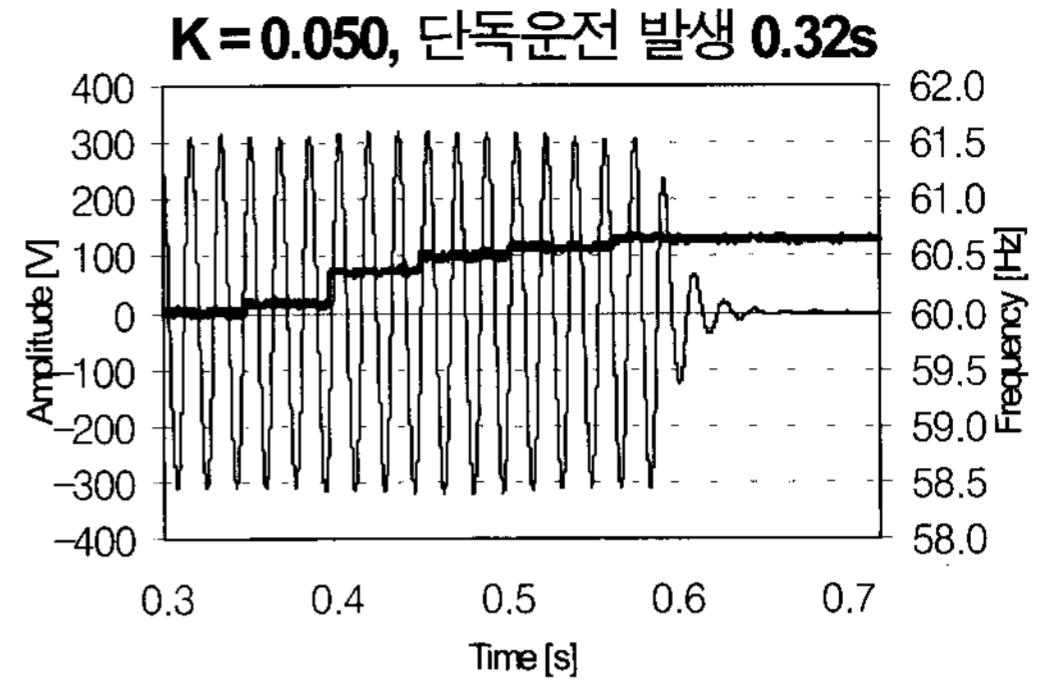


그림 10. 연계점의 전압, 주파수, 단독운전검출 성공

그러므로 실험결과에서 보듯이 0.010이상의 검출 결과가 시뮬레이션 결과와 부합함을 알 수 있다. 따라서 위상검출기법의 정확도 및 신속성에 따라 단독운전을 검출하기 위한 왜란의 크기를 결정할 수 있다.

3. 결론 및 향후계획

본 논문에서는 단상 계통연계형 태양광 발전시스템의 단독운전 검출기법 중 능동적 검출기법인 AFDPF (active frequency drift positive feedback)기법의 단독운전 검출성능 및 출력전류의 고조파왜형율에 대하여 살펴보았다. 단독운전 발생 시 이를 신속히 검출하기 위한 능동적 기법 중 AFDPF기법의 성능을 향상시키기 위해서는 정확, 정밀, 신속한 위상검출이 필요한데, 이 위상 검출기법 중 영점검출방식과 digital PLL방식을 각각 적용하여 단독운전검출 성능에 대하여 알아보았다. 그 결과로, 계통에 급격한 위상 점프가 발생해도 계통전압의 반주기 내지 한주기 동안 open loop로 위상을 추종하는 영점검출기법보다 매 제어 주기마다 위상을 추종하는 digital PLL기법을 사용하면, AFDPF기법에 적용된 왜란(chopping fraction : cf)의 이득을 절감할 수 있고, 이 왜란의 크기가 줄어들면, 계통전압주파수의 정상적인 변동 범위인 60.2Hz~59.8Hz에서 인가되는 왜란

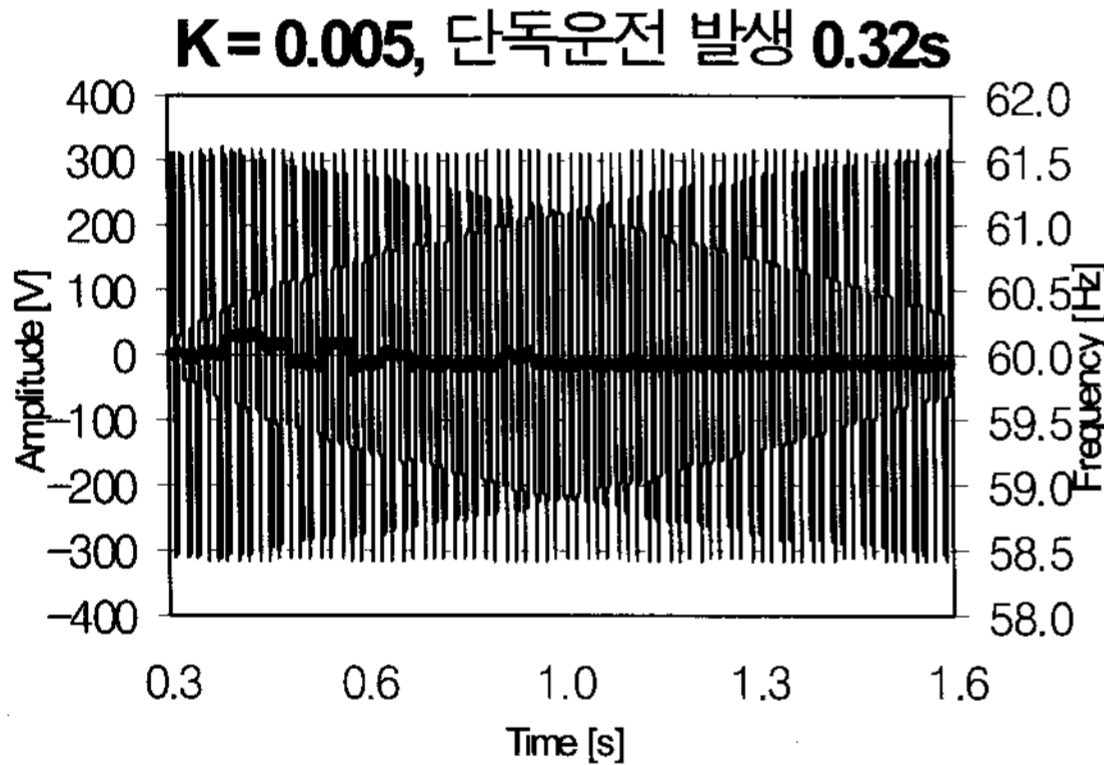


그림 8. 연계점의 전압, 주파수, 단독운전검출 실패

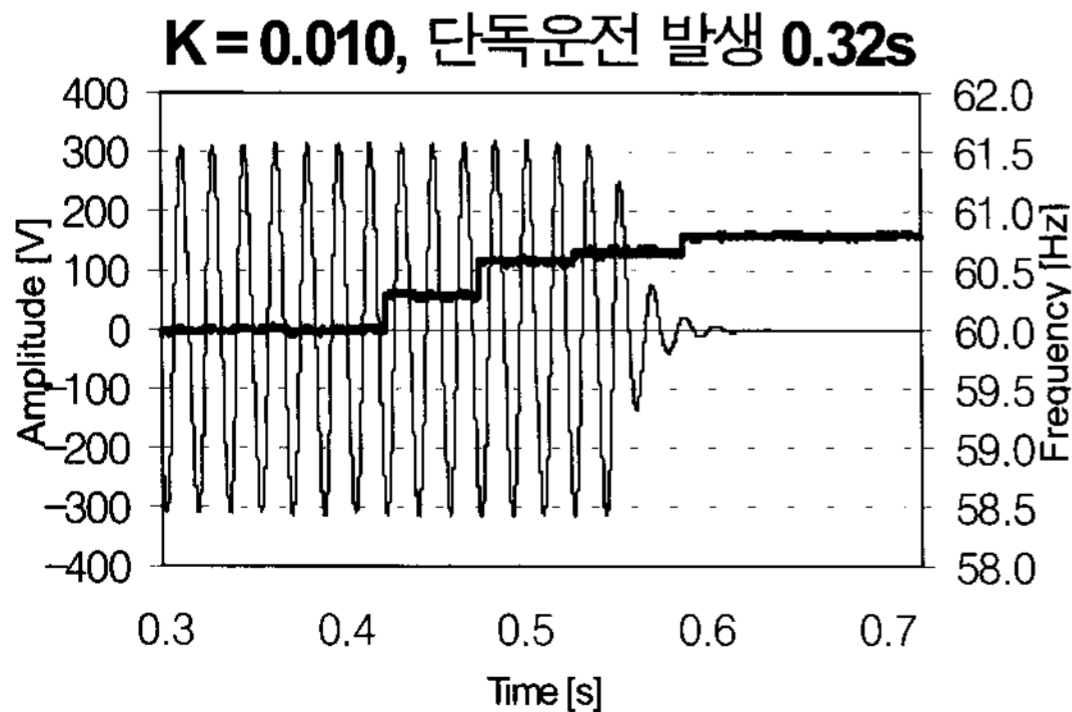


그림 9. 연계점의 전압, 주파수, 단독운전검출 성공

이 최소로 적용되어 출력전력의 고조파왜형율도 최소화 할 수 있음을 실험과 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 실험과 시뮬레이션은 계통연계형 태양광 발전용 PCS의 단독운전검출 시험방법인 IEEE Std 929-2000의 시험을 적용하였다.

앞으로는 상수로 고정된 chopping fraction의 AFD기법이 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 연구하고, 계통연계형의 단독운전시험을 국제규격인 IEEE Std. 15476)의 시험 규격에 합당하도록 chopping fraction의 수리적 모델링 및 최적화에 대하여 연구할 계획이다.

이 논문은 2006년도 광운대학교 교내 학술 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

1. 최주엽 외 “태양광발전 시스템의 계통연계 보호

를 위한 단독운전검출기법의 기술 개발에 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 석사학위 청구논문, 2004, pp. 17 - 20.

4. IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic Systems, IEEE Std 929-2000, 3 April 2000.

5. 배병열, 한병문, 박용희, 조윤희, “외란에 강인한 새로운 구조의 3상 Phase-Locked Loop (Novel Structure of 3-Phase Phase-Locked Loop with Stiffness against Disturbance)”, 대한전기학회논문지, 전기기기및에너지변환시스템부문 B, 제55권1호, pp.39-46, 2006

6. IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, IEEE Std 1547, 2003