계통연계형 PV 시스템의 주파수 변동에 의한 새로운 단독운전 검출기법

은석준, 최종우, 김흥근
경북대학교

Novel Islanding Detection Method using Frequency Drift for Grid-connected PV System

Seog-Jun Eun, Jong-Woo Choi and Heung-Geun Kim
Kyung-Pook National University

ABSTRACT

PV system's islanding occurs when the uitilty grid is removed but local sources continue to operate and provide power to local loads. Islanding is one of the serious problems in an electric power system connected with dispersed power sources. Also, this can present safety hazards and the possibility of damage to other electric equipments. If the real and reactive power of RLC load and PV system are closely matched, islanding detection by passive methods becomes difficult. Novel islanding detection method using frequency drift is proposed for grid-connected PV system.

1. 서 론

다수의 태양광발전 시스템을 포함한 배전선이 작업으로 인한 정전 혹은 사고 등의 원인으로 계통에서 분리되더라도 태양광발전 시스템의 출력과 배전선 부하의 소비전력이 균형을 이루면 태양광발전 시스템이 배전선 부하를 떠맡아 운전을 계속한다. 이 현상을 단독운전이라고 한다. 이런 상태가 지속되면 선로 유지·보수자의 감전사고가 발생할 우려가 있고 전기설비에 나쁜 영향을 줄 수 있다[1]. 또한 단독운전 중에 계통이 다시 복구되면 계통 전압과의 위상오차로 인하여 태양광발전 시스템이나 배전계통 설비가 손상될 수도 있다. 따라서 계통에서의 전원 공급이 끊겼을 경우에는 이를 즉시 검출하여 발전을 중단해야 한다.

단독운전 검출기법으로는 계통에 변화가 있을때만 검출하는 수동검출법과 인버터 출력전류에 변동을 주어 이를 이용하여 단독운전을 검출하는 능동검출법이 있다. 본 논문에서는 주파수 변동에 의한 새로운 단독운전 검출기법을 제안하고 Matlab 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

2. 본 론

2.1 단독운전 현상 고찰

계통연계형 태양광발전 시스템은 태양광발전 전력을 부하에 공급할 때, 부족전력은 상용 전력계통으로부터 공급받고, 잉여전력은 상용전력 계통에 공급하는 시스템이다. 그림 1은 PV(Photovoltaic)시스템과 계통간의 전력의 흐름을 나타내고 있는데, PV시스템, 수용가 그리고 스위치(퓨즈, 재폐로 차단기 등)로 구성되어 있다. 여기서 PV 시스템, 계통 그리고 수용가가 공통으로 연결된 마디 a를 PCC (point of common coupling : 공통연결점)라고 한다.

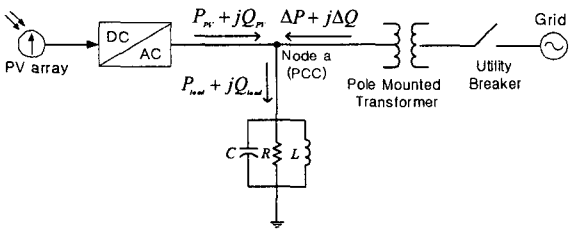


그림 1. PV 시스템과 계통의 전력흐름

수용가를 RLC병렬로 나타내었는데, 그 이유는 일반적인 부하인 경우에는 단독운전이 발생되면 PCC의 전압이나 주파수가 변하기 때문에 수동 검출법으로 단독운전을 쉽게 검출할 수 있는 반면에, RLC병렬부하인 경우에는 계통이 분리되더라도 LC공진에 의해서 PCC의 전압이나 주파수가 유지될 수도 있어 검출이 어렵기 때문에 이러한 조건을 가정하였다. PCC의 전압을 V_a 라고 하면 부하측 유효전력 P_{load} 와 무효전력 Q_{load} 는 각각 식 (1), (2)와 같다.

$$P_{load}=\frac{V_a^2}{R} \tag{1}$$

$$Q_{load} = V_a^2\left[\frac{1}{\omega L} - \omega C\right] \quad (2)$$

계통측에서 유입되는 유효전력 ΔP, 무효전력 ΔQ는 각각 식(3), (4)와 같다.

$$\Delta P = P_{load} - P_{PV} \quad (3)$$

$$\Delta Q = Q_{load} - Q_{PV} \quad (4)$$

PV시스템의 출력전류는 PCC전압과 동상이 되도록 제어되기 때문에 Q_{PV}는 영이 되므로 $\Delta Q = Q_{load}$가 된다. 따라서 $\Delta Q = 0$이 될 조건은 $\omega = 1/\sqrt{LC} = \omega_o$이다. 이 경우에는 계통이 분리되더라도 LC공진에 의해서 PCC에서의 주파수가 그대로 유지된다. 반면에 $\Delta Q > 0$이면 $\omega < \omega_o$이므로 주파수가 증가하고 $\Delta Q < 0$이면 $\omega > \omega_o$이므로 주파수가 감소한다.

한편 $\Delta P = 0$인 경우에는 계통이 분리되더라도 PV시스템이 부하에서 요구되는 유효전력을 공급하기 때문에 PCC의 전압 변동이 없는데 $\Delta P > 0$이면 PV시스템 공급전력이 부족하여 전압이 감소하고 $\Delta P < 0$이면 PV시스템 공급전력이 부하 전력보다 크기 때문에 PCC 전압이 증가한다. 따라서 PCC에서의 전압과 주파수를 검출하여 단독운전 상태를 판단할 수 있다. 이를 그림으로 나타내면 그림 2과 같다.

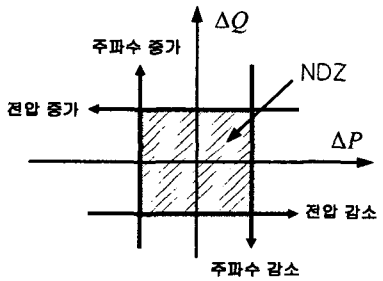


그림 2. NDZ(Non-Dection Zone)

전압이나 주파수가 특정 범위를 벗어나면 인버터의 보호기능에 의해 PV 시스템의 전력 공급을 차단하게 되는데, 계통전압의 허용범위는 정격실효치의 88%~110% (193.6~ 242.0[V]), 계통주파수의 허용범위는 59.3~60.5 [Hz]로 IEEE 규격 929-2000에서 규정하고 있다[2]. 따라서 단독운전 상태가 발생되더라도 검출할 수 없는 범위 즉, NDZ(Non Detection Zone)가 존재하게 되는데, 이 영역에서도 단독운전 상태를 검출할 수 있는 다양한 방법들이 연구되고 있다[3~6].

2.2 기존의 단독운전 검출법

수동검출법에는 전압/주파수 검출법[7], 위상점프 검출법[6], 고조파 검출법[6]등이 있다. PCC의 전압(또는 주파수)을 검출하여 허용한계를 벗어나면, 단독운전으로 판단하는 방법을 전압 검출법(또는 주파수 검출법)이라 한다. 한편 위상 점프 검출법은 인버터 출력전류와 PCC전압의 위상차를 검출하여 점프가 발생하면 단독운전으로 판단하는 방법이고, 고조파 검출법은 PCC전압의 THD를 모니터링하여 한계치보다 크면 단독운전으로 판단하는 방법이다.

본 논문에서의 시뮬레이션은 PCC전압의 주파수, 위상, 실효치를 검출하기 위해서 디지털 PLL제어기법[8]을 사용하였으며, RLC부하조건은 단독운전 발생시 검출하기 어려운 조건이 되도록 하였다. 즉, 저항 부하는 220[V]일때 부하전력이 3630[W], 3000[W], 2745[W]로서 ΔP=630[W] ΔP=0[W], ΔP=-255[W]에 해당하는 값으로 R=13.33[Ω], 16.13[Ω], 17.63[Ω]이 되는 값으로 하였다. L=3198.27[uH]로 선정하면 f_o=59.7[Hz], 60[Hz], 60.3[Hz]에 해당하는 C의 값은 각각 2222.16[uF], 2200.00[uF], 2178.16[uF]가 되고, 이 때 ΔQ는 각각 -404[Var], 0, +399[Var]이다.

그림 3은 정상운전 상태에서 0.5초인 순간 단독운전 상황이 발생하였다는 가정 하에 표 1의 조건으로 시뮬레이션하였다.

표 1. 각 현상들에 대한 시뮬레이션 조건

(a)	ΔP = 0[W]	ΔQ = 0[Var]
(b)	ΔP = 0[W]	ΔQ = 399[Var]
(c)	ΔP = -250[W]	ΔQ = 0[Var]
(d)	ΔP = 630[W]	ΔQ = -404[Var]

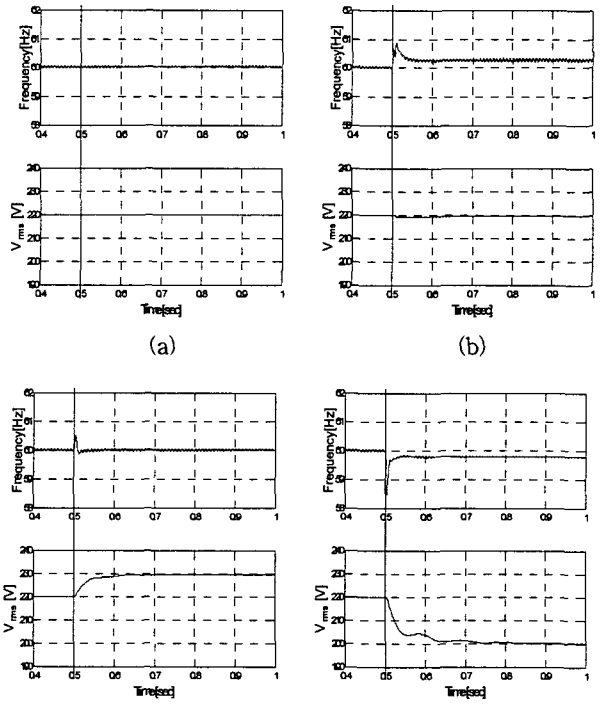
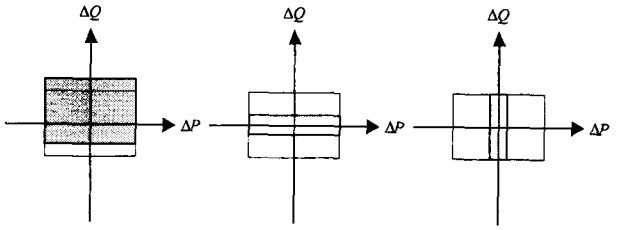


그림 3. 단독운전 현상 시뮬레이션

그림 3의 시뮬레이션 결과로부터 표 1의 조건인 경우는 단독운전이 발생되더라도 전압과 주파수가 허용범위 내에 있기 때문에 수동 검출법으로는 검출할 수 없음을 알 수 있다.

한편 능동검출법에는 주파수 바이어스 방법[FB], 샌디아 주파수 변동 방법[SFS][1], 주파수 점프 방법[FJ], 샌디아 전압 변동 방법[SVS][6] 등이 있는데, 주파수 바이어스 방법이나 주파수 점프 방법은 NDZ가 수동법에 비해 ΔQ의 양의 방향으로 이동하는 효과만 있을 뿐이다.

샌디아 주파수 변동 방법은 NDZ가 수동법에 비해 ΔQ에 대해서는 현저히 좁아 지지만 ΔP에 대해서는 효과가 없다. 반면에 샌디아 전압 변동 방법은 ΔP에 대해서는 NDZ가 줄어들지만 ΔQ에 대해서는 효과가 없다.



(a) FB (b) SFS (c) SVS

그림 4. 능동법에 따른 NDZ의 비교

2.3 주파수 변동 방식에 의한 새로운 능동 검출법

능동 검출법의 공통적인 단점은 단독운전상태를 검출하기 위해서 정상상태에서도 인버터 출력전류에 변동을 주기 때문에 전류의 THD가 증가하고, 역률 또한 다소 감소한다. 또한 그림 4에 보였듯이 NDZ를 완전히 없앨 수는 없다.

본 논문에서 제안하는 방법은 정상상태에서는 인버터 출력전류의 기준치를 PCC전압과 동상이 되도록 하여 THD가 증가하는 문제를 해결하면서, 단독상태가 발생하면 인버터 출력전류의 기준치를 전압에 비해 뒤지거나 앞서게 함으로써 결과적으로 PCC 전압의 주파수가 발산하게 하여 검출하는 방법이다.

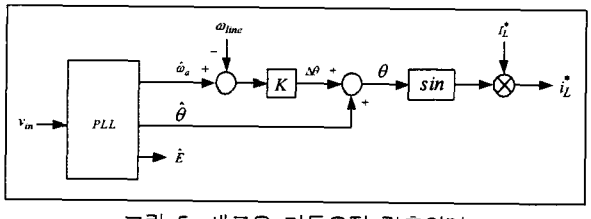


그림 5. 새로운 단독운전 검출원리

제안한 단독운전 검출의 원리를 그림 5에 나타내었다. 여기서, $\hat{\omega}_a$, $\hat{\theta}$, $\hat{E}$는 각각 PCC전압 정보로부터 PLL을 거쳐 추정한 계통전압의 주파수, 위상, 전압의 실효치의 추정값이며, ω_{line}은 60[Hz]에 대응하는 각 주파수로서 120π rad/s이다. I_L^*은 인버터 입력단 전압을 일정하게 제어하기 위한 전압제어기 출력으로서 인버터 전류 지령치의 크기이고, i_L^*은 인버터 출력전류의 지령치이다.

$$i_L^* = I_{L2}^* \sin(\hat{\theta} + \Delta\theta) \tag{5}$$

$$\Delta\theta = K(\hat{\omega}_a - \omega_{line}) \tag{6}$$

단독운전 상태가 발생되면 전류원 i_L^*에 대하여 RLC병렬회로에 의한 PCC전압은 식 (7)과 같다.

$$v_a = V_m \sin(\hat{\omega}_a t + \Delta\theta + \phi) \tag{7}$$

단, 여기서 $\phi = \tan^{-1}[R(1/(\omega_a L) - \omega_a C)]$이다. 그런데, PCC에서 검출되는 전압 위상 $\hat{\theta} = \hat{\omega}_a^*$이므로 $\Delta\theta + \phi = 0$이 된다. 따라서 $\Delta\theta = -\phi = \tan^{-1}[\omega_a C - R(1/(\omega_a L))]$이 되므로 ω_a대한 2차방정식으로 나타내면 식 (8)로 표현된다.

$$\omega_a^2 - \frac{1}{RC} \cdot \tan(\Delta\theta) \cdot \omega_a - \frac{1}{LC} = 0 \tag{8}$$

식 (8)의 근은 다음과 같다.

$$\omega_a = \frac{1}{2}\left[\frac{1}{RC}\tan(\Delta\theta) + \sqrt{\left\{\frac{1}{RC}\tan(\Delta\theta)\right\}^2 + \frac{4}{LC}}\right] \tag{9}$$

식 (9)로부터 $\Delta\theta = 0$이면 $\omega_a = \omega_o$이고 $\Delta\theta \neq 0$이면 ω_a가 발산되는데 그 방향은 $\Delta\theta$의 부호와 같다. 즉, 단독운전이 발생하여 추정 주파수가 계통 주파수보다 낮으면 주파수는 점점 감소하며, 추정 주파수가 계통 주파수보다 크면 PCC전압 주파수는 점점 증가한다.

그림 6과 그림 7은 단독운전이 일어났을 때의 전류지령을 시뮬레이션을 통하여 비교하였다. 두 그림에서 (a)는 원래의 전류지령이고 (b)는 본 알고리즘을 사용했을때 단독운전시의 전류지령의 변화를 나타내고 있다. (c)는 단독운전시 나타나는 변화를 원래의 전류지령과 비교한 파형이다.

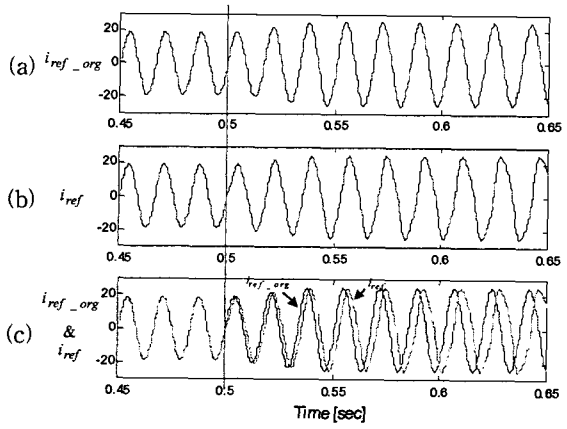


그림 6. f_o<60[Hz] 경우 단독운전시 전류지령
(a) 원래의 전류지령(i_{ref_org})
(b) 단독운전시 전류지령(i_{ref})의 변화
(c) (a)와 (b)의 전류지령 비교

그림 6의 0.5초 이후의 정현파에서 왼쪽은 원래의 전류지령이고, 오른쪽은 실제 전류 지령이다. 단독운전시 상용주파수인 60[Hz]보다 낮은 주파수를 갖는 LC부하인 경우 위상이 뒤진 전류지령을 출력하게 된다. 이 때, 가속이득인 K의 영향으로 주파수는 계속 하강하게 되고 PV인버터에서는 단독운전으로 판단하여 시스템을 차단하게 된다.

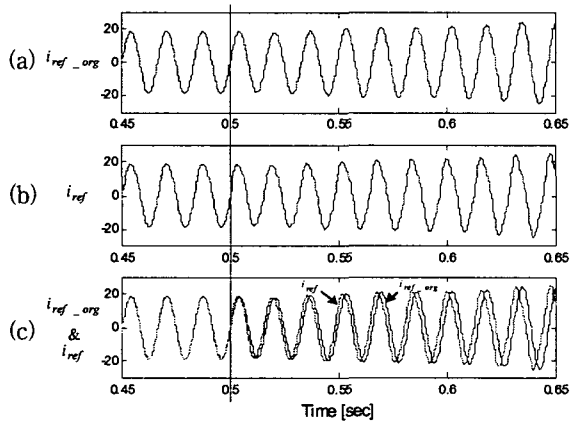


그림 7. f_o>60[Hz] 경우 단독운전시 전류지령
(a) 원래의 전류지령(i_{ref_org})
(b) 단독운전시 전류지령(i_{ref})의 변화
(c) (a)와 (b)의 전류지령 비교

그림 7의 0.5초 이후 정현파에서 오른쪽은 원래의 전류지령이고, 왼쪽은 실제 전류 지령이다. 단독운전시 상용주파수인 60[Hz]보다 높은 주파수를 갖는 LC부하인 경우 위상이 앞선 전류지령을 출력하게 된다. 이 때, 가속이득인 K의 영향으로 주파수는 계속 증가하게 되고 PV인버터에서는 단독운전으로 판단하여 시스템을 차단하게 된다.

그림 8은 제안한 알고리즘을 적용하여 표1의 조건 각각에 대하여 단독운전 현상을 시뮬레이션하였다. 우선 (a)의 경우는 $\Delta P=0$, $\Delta Q=0$인 경우로서 수동법의 경우에는 전압이나 주파수가 전혀 변동이 없기 때문에 검출불능 조건이었으나 본 논문에서 제안한 방법에 의하면 주파수가 64[Hz]로 증가하기 때문에 쉽게 검출할 수 있다.

(b)는 $\Delta P=0$, $\Delta Q\neq 0$로서 f_o=60.3[Hz]인 경우인데 수동검출법인 경우 60.3[Hz]는 정상 주파수 범위로 간주되기 때문에 단독운전으로 판정할 수 없지만 제안한 방법에 의하면 주파수가 64[Hz]로 증가하여 검출가능하다.

(c)는 $\Delta P\neq 0$, $\Delta Q=0$인 경우이며 (d)는 $\Delta P\neq 0$, $\Delta Q\neq 0$인 경우로서 역시 수동법에서는 검출할 수 없었으나 제안한 방법에 의하면 주파수가 각각 64[Hz], 56[Hz]가 되어 검출가능하다.

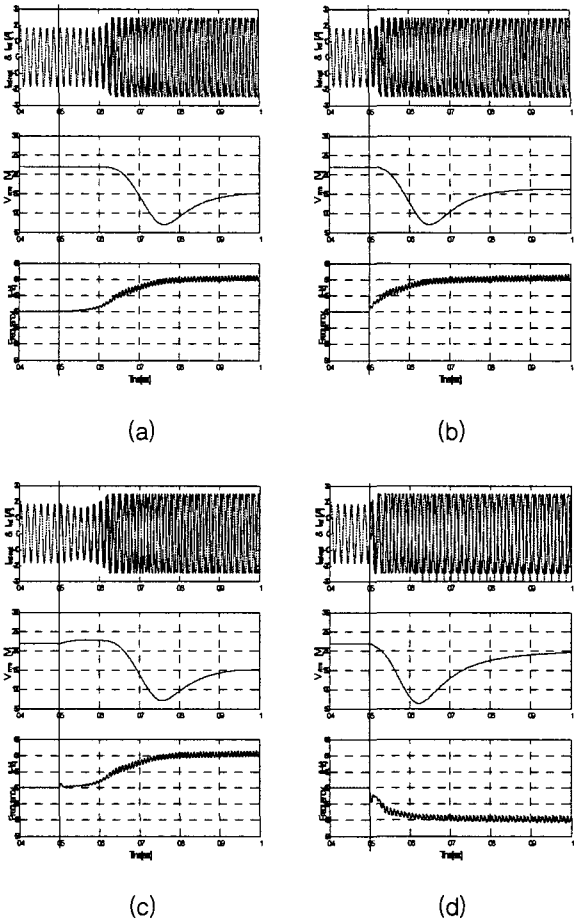


그림 8. 제안한 알고리즘 사용 시 단독운전 시뮬레이션

3. 결 론

본 논문에서는 우선 계통연계형 태양광 발전 시스템에서 계통이 차단되었을때 이를 검출하는 단독운전 검출법으로서 기존의 수동법과 능동법에 대하여 비교 분석하였다.

수동법의 경우 IEEE 규격 929-2000에서 규정한 정상전압 범위(193.6~242.0[V])와 허용 주파수 범위(59.3~60.5[Hz]) 때문에 단독운전이 발생되더라도 이를 검출할 수 없는 영역, 즉, NDZ가 존재한다.

능동법 중에서 주파수 바이어스 방법이나 주파수 점프 방법은 수동법과 비교할 때 NDZ의 크기를 변하지 않으면서 ΔQ 축의 양의 방향으로 NDZ가 이동한다.

샌디아 주파수 변동 방식은 ΔQ에 대해서는 NDZ가 현저히 줄어드는 반면에 ΔP에 대해서는 효과가 없고, 샌디아 전압 변동 방식은 ΔP에 대해서는 NDZ가 현저히 줄어드는 반면에 ΔQ에 대해서는 효과가 없다.

능동검출법의 공통적인 단점은 정상상태에서 인버터 출력전류의 THD가 증가하며, 역률이 다소 감소한다는 점인데 이를 해결하기 위한 새로운 주파수 변동 방식을 제안하였다.

PCC전압의 주파수가 계통주파수와 같으면 인버터 출력 전류의 지령치를 PCC전압과 동상으로 하여 정상상태에서의 단점을 극복하였으며, 단독운전이 발생되면 전류 지령치의 위상을 점점 뒤지거나 앞서게 함으로써 결과적으로 PCC전압 주파수가 발산하도록 하는 방법이다.

제안한 방법을 적용하여 수동법에서 검출 불가능했던 조건들에 대해 단독운전 현상을 시뮬레이션한 결과 극단적인 경우인 $\Delta P=0$, $\Delta Q=0$ 인 조건에서도 주파수가 64 [Hz]로 증가하여 쉽게 검출할 수 있음을 보였다.

본 논문에서 제안한 새로운 주파수 변동 방법에 의한 단독운전 검출법은 태양광 발전 시스템 뿐 만 아니라 다양한 분산전원의 단독운전 검출에도 적용할 수 있다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2002-B-051) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

[1] M. E. Roop, M. Begovic, A. Rohatgi, "Analysis and Performance Assisment of The Active Frequency Drift Method of Islanding Prevention", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, pp. 810-816, 1999.

[2] IEEE Std. 929-2000, IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic(*PV*) Systems, Sponsored by IEEE Standards coordinating Commitee 21 on Photovoltaics, Published by IEEE, New York, NY, Apr 2000.

[3] Hiromu Kobayashi, Kiyoshi Takigawa, "Statical Evaluation of Optimum Islanding Preventing Method for Utility Interactive Small Scale Dispersed PV systems", *Proceedings of the IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Convesion(1994)*, pp. 1085-1088, 1994.

[4] Kobayashi. H., Takigawa. K., Hashimoto. E., "Method for Preventing Islanding Phenomenon on Utility Grid with a Number of Small Scale PV systems", Twenty Second IEEE PVPS, pp. 695-700, 1991.

[5] Kiyoshi Takigaya, Hiromu Kobayashi, "Development of Compact and Reliable Protective Control Unit for Grid Connected Small Residential Systems", 7th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, pp. 491-492

[6] Evaluation of Islanding Detection Methods for Photovoltaic Utility interactive Power Systems, IEA-PVPS Report, IEA-PVPS T5-09: March 2002.

[7] G. Kern, "SunSine300: Utility Interactive AC Module Anti-Islanding Test Results", *Proceedings of the 1997 IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Anaheim, CA.

[8] 김용균, 최종우, 김홍근, "계통연계형 태양광 발전 시스템의 위상 동기화를 위한 디지털 PLL제어", 전기학회 논문지 53권 9호, pp. 562-568, 2004.

[9] 은석준, 최종우, 김홍근, "태양광발전 시스템의 단독운전 검출법 비교", 전력전자하계학술대회 논문집, pp. 92-96 2004. 7.