

고조파 주입에 의한 계통연계형 태양광발전시스템의 고립운전 검출

高再錫^{*}, 蔡榮敏^{**}, 姜秉燾^{***}, 崔圭夏^{****}

Islanding Detection by Harmonic Current Injection Method for Utility Interactive Photovoltaic System

Jae-Seok Gho, Young-Min Chae, Byoung-Hee Kang, and Gyu-Ha Choe

요 약

본 논문에서는 계통연계형 태양광발전시스템의 고립운전방지를 위한 새로운 고립운전 검출기법을 연구한다. 이를 위하여 계통연계형 태양광발전시스템 및 고립운전시의 특성에 대하여 기술하였다. 또한 고립운전의 검출특성을 향상시키기 위한 새로운 검출기법을 제시하고 해석하였으며 검출시험을 위한 부하조건 선정을 위한 부하임피던스 곡선을 해석적으로 유도하였다. ACSL 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제시한 고립운전 검출기법 및 해석결과를 검증하였다.

ABSTRACT

In this paper, the new islanding detection method is studied for utility interactive photovoltaic system(UIPVS). It describes the brief of UIPV system and the features of islanding phenomenon. The new islanding detection method for improving the detection characteristics, HCIM(Harmonic Current Injection Method), is proposed and analyzed. The impedance curve of AC load is derived from the complex power equation for testing islanding detection features. The proposed detection method and the derivation of islanding condition are verified by the simulation with ACSL and the laboratorial experiments.

Key Words : Utility interactive photovoltaic system, UIPV system, Islanding, Anti-islanding, HCIM

1. 서 론

계통연계형 태양광발전시스템(UIPVS)은 계통과 연계하여 동작하기 때문에 기기 및 사람의 안전을 위해

계통의 사고를 검출하여 시스템을 정지시키는 기능이 반드시 필요하다¹⁾. 계통의 사고는 지락, 선간 단락, 정전 및 인위적인 개폐기의 개방 등을 들 수 있다. 지락이나 선간 단락과 같은 사고가 발생하게 되면 계통쪽의 보호회로가 동작하여 수전단 개폐기가 개방되고 UIPV시스템은 이를 검출하여 운전을 정지하여야 한다. 그리고 정전이나 유지보수를 위한 의도적인 수전단 개폐기의 개방이 발생할 수 있는데 UIPV 시스템이 계통과 분리되지 않을 경우 안전을 위해 계통 사고시와 마찬가지로 개폐기 개방을 검출하여 운전을 정지하여야 한다.

전술한 어떤 원인에 의해서 수전단 개폐기가 개방되

* 정희원, (주)XILON 부설연구소장

E-mail : raputan@empal.com

** 정희원, 삼성전자 책임연구원

*** 정희원, (주)케이팩신기술 연구소장

**** 정희원, 건국대 전기공학과 교수

접수일자 : 2002. 4.22

1차심사 : 2002. 6.28

2차심사 : 2002.10.22

심사완료 : 2003. 3.24

어 UIPV 시스템이 계통과 분리된 채로 독립적으로 발전을 계속하는 것을 고립운전이라 하고, 개폐기 개방을 즉각적으로 검출하여 시스템을 정지시키는 것을 고립운전방지(anti-islanding)라 한다. 개폐기가 개방되는 순간 UIPV 시스템 출력 전력과 부하의 요구전력의 차에 의해서 UIPV 시스템의 전압, 전류의 크기 및 위상의 변동이 발생하게 되므로 이들의 변화를 검출하여 고립운전을 중단할 수 있다. 이 방법에 의한 고립운전 검출방법을 수동적인 검출 방법이라 한다^{[1][2]}.

그러나 부하의 요구전력과 UIPV 시스템의 출력 전력이 같을 경우 출력단 전압 및 전류의 변동이 없으므로 고립운전 여부를 판단하기 어려운 상태가 되고 출력전압 및 전류의 크기나 위상을 측정하는 것 이외에 다른 검출방법이 필요하다. 고립운전의 검출을 위해 전원측 개폐기의 작동에 따른 인버터 운전특성을 살펴보면 다음과 같다.

i) 인버터의 고속 스위칭 및 출력단 변압기의 비선형성에 의해서 인버터 출력단에는 필연적으로 고조파 전류성분이 발생한다. 따라서 개폐기가 개방되면 계통 임피던스가 증가된 것으로 되어 인버터 출력단에서 측정되는 고조파 전압의 크기가 증대된다.

ii) 계통이 정상일 때는 인버터의 출력전류의 크기나 위상을 변동시키더라도 무한용량의 계통 모선에 연결되어 있으므로 출력전압의 크기 및 위상은 거의 변화되지 않는다. 그러나 계통에 사고가 발생하여 개폐기가 개방되면 출력전압은 출력전류의 크기 및 위상의 변동에 영향을 받는다.

위의 운전특성을 이용하여 UIPV시스템의 발전출력과 부하의 요구전력이 일치하는 경우에도 고립운전을 검출할 수 있는 다양한 기법이 개발되었으며 이들을 능동적인 방법이라 한다. 능동적인 검출기법은 3고조파 검출법, 주파수 변동 방법, 비대칭 기준 신호법 등이 있다^{[3]-[5]}.

3고조파 검출방법은 i)의 특성을 이용한 것으로서 특히 변압기의 비선형성에 의해 나타나는 고조파의 크기를 감시하여 고립운전을 판별한다. 그러나 일반적으로 절연 변압기를 설계할 때 발전출력의 품질 향상을 위해서 선형영역 내에서 동작하도록 설계하므로 고조파 전압이 매우 작아 고립운전 여부를 판단하기 어렵다는 단점이 있다. 출력전류의 주파수 변동 방법이나 비대칭 기준 신호법 등은 ii)의 특성을 이용한 것으로서 검출특성 면에 있어서는 우수할 수 있으나 무효전력을 계통에 공급한다는 측면에서는 바람직하지 못하다. 이의 개선을 위해서 계통측에서 미소신호의 캐리

어(carrier)를 주입하고, UIPV 시스템에서 그 캐리어를 검출하여 운전여부를 검출하는 방법이 있는데, 고립운전 검출 기법 중에서 매우 적극적인 검출방법이라고 볼 수 있다^[6]. 이 방법은 계통측에서 주입한 캐리어 신호가 UIPV시스템에서 검출되면 계통과의 연계에 이상이 없으므로 운전을 지속하지만, 캐리어가 검출되지 않으면 개폐기가 개방되어 있는 것이므로 인버터의 운전을 정지한다. 그러나 모선 측에서 캐리어를 주입하자면 전력 공급자가 제시하는 전력 사용기준에 위배되어 전력 공급자의 협조를 얻어야 하므로 한국을 비롯한 대부분의 국가에서는 적용하기 어렵다.

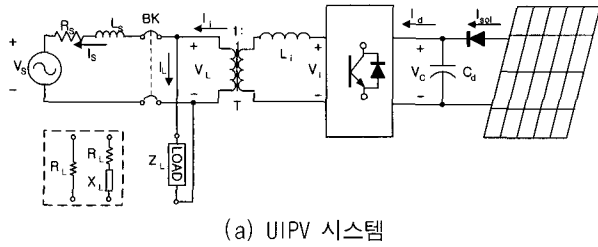
따라서 본 논문에서는 계통측이 아니라 인버터 측에서 미량의 고조파 전류를 주입하고 인버터의 출력단에서 고조파 전압의 크기를 측정하는 고조파 전류 주입법(HCIM : Harmonic Current Injection Method)을 제안하였고, 검출 특성을 분석하기 위해서 검출 방법의 기본원리와 주입할 고조파의 주파수, 크기의 결정 및 부하에 따른 검출특성 등에 대하여 기술하고 시뮬레이션 및 실험을 통하여 증명하였다.

2. UIPV 시스템 개요

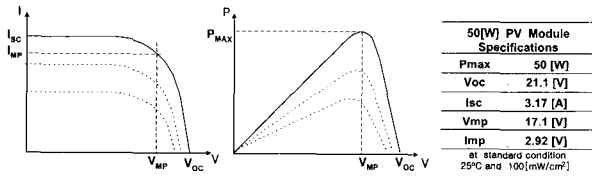
2.1 UIPV 시스템 구성

UIPV 시스템은 그림 1(a)와 같이 태양전지 어레이, 인버터, AC 인덕터 L_i , 절연변압기 T, DC 커패시터 C_d 및 제어기 등으로 구성된다. 태양전지 어레이는 태양광에너지를 전기에너지로 변환하는 부분으로서 그림 1(b)의 특성곡선을 갖는 여러 개의 50[W]용량 태양광 모듈로 구성된다. 전류-전압 곡선에서 태양전지모듈은 낮은 전압영역에서는 전류원의 특성을 가지며 높은 전압영역에서는 정전력 특성이 존재함을 알 수 있다. 전력-전압 곡선에서 하나의 최대전력점(MPP : Maximum Power Point) 만을 갖는 것을 보여주며 또한 동작점에 따라서 출력전력이 가변되기 때문에 태양전지의 출력전압을 적절히 조절하면 최대출력을 얻을 수가 있음을 알 수 있다. 절연변압기 T는 인버터의 교류 출력전류의 DC bias를 방지하고 전력용 스위칭 소자가 단락형태로 파손될 경우 인버터의 직류단 전압이 계통으로 직접 인가되는 것을 막기 위한 목적으로 이용된다. 변압기의 변압비는 직류단 전압 및 인버터의 스위칭 소자의 최대 역저지 전압, AC 인덕터의 전류용량 등을 고려하여 변압비를 선정한다.

제어기는 그림 2(a)와 같이 직류단 전압제어부, 교류단 전류제어부, 최대전력점 추적기(MPPT : Maximum



(a) UIPV 시스템



(b) 태양전지의 출력특성

(I-V, P-V, Module Output Characteristics)

그림 1 UIPV 시스템 및 태양전지 모듈 출력특성

Fig. 1 UIPV system and output characteristics of PV module

Power Point Tracker) 및 고립운전방지(anti-islanding)부 등으로 구성된다. 최대전력점 추적기는 그림 1(b)에서 나타난 출력전력의 최고치를 추적하는 제어기로서 태양전지의 출력단 전압 기준치를 만들어 낸다. 전압제어기는 MPPT에서 만들어진 기준전압으로 태양전지 출력단 전압을 제어하기 위해서 인버터 출력전류에 대한 기준치를 만들어 낸다. 전류제어기에서는 전압제어기에서 만들어진 전류 기준치를 출력 전류가 추종하도록 제어한다. 고립운전 검출부는 전원측의 개폐기(BK)의 개방 여부를 검출하여 고립운전을 방지하는 부분으로 ‘다’ 절 및 3장에서 자세히 다루었다.

2.2 UIPV 시스템 제어

태양광 발전시스템은 변화하는 태양전지 어레이의 표면온도나 일사량 조건에도 불구하고 최대출력을 낼 수 있어야 한다. 더구나 계통연계형 시스템의 경우 단위역률을 유지해야 할 뿐만 아니라 낮은 THD를 유지해야 될 필요성이 있다. 이와 같은 정밀 제어를 위해서 UIPV시스템의 제어부는 MPPT제어기, 직류단 전압제어기 및 교류단 전류제어기로 구성되어 있다.

그림 1(b)에 나타난 태양전지의 출력특성에 의하면 태양전지의 출력단 전압 v_c 를 최대전력점 전압 V_{MP} 가 되도록 제어하면 태양전지 어레이에서 최대출력 P_{MAX} 를 발생시킬 수 있다. 따라서 MPPT제어기는 최대전

력 발생을 위한 출력단 전압지령치 v_c^* 를 발생시킨다. 최대전력점을 추적하는 방식의 제어방식으로 P&O법이나 Incremental Conductance법 등을 들 수 있다^{[7][8]}.

인버터가 단위역률 운전을 한다고 가정할 때, 전압 v_c 는 인버터 출력전류의 실효치의 크기 I_i 에 의해서 변화시킬 수 있다. 따라서 직류단 전압제어기는 식 (1)과 같이 PI제어기로 구성할 수 있고, 전압지령치 v_c^* 와 직류단 전압 v_c 의 오차가 영이 되도록 AC 출력 전류 지령치 I_i^* 를 출력한다^[9]. 전압제어기의 제어특성을 개선하기 위해서 식 (1)의 마지막 항에 나타난 것처럼 전압제어기에 전향제어 항을 추가한다^[10].

$$I_i^* = K_P(v_c^* - v_c) + K_I \int (v_c^* - v_c) dt + K_{FW} i_{sol} \quad (1)$$

K_P, K_I : 전압제어기 비례, 적분이득

K_{FW} : 전향제어기 이득, i_{sol} : 태양전지 출력전류

직류단 전압제어기 출력 I_i^* 는 출력전류 지령치의 실효치이므로 순시 AC 전류지령치 i_i^* 로 바꾸기 위해 식 (2)를 적용할 수 있다. 식에서 $\sin(\omega t + \phi)$ 는 전류지령치를 전원전압에 대하여 위상 ϕ 만큼 위상차를 갖는 정현파가 되도록 한다. 전류지령치의 위상각을 $\phi=0$ 로 제어할 경우 단위역률 운전이 되며 태양광발전시스템은 유효전력 성분만 출력하게 된다. 그러나 AC부하에서 무효전력을 요구할 경우 ϕ 를 적절히 제어하여 부하의 무효전력을 태양광발전시스템에서 보상하도록 함으로써 전원측에서의 역률이 최대가 되도록 운전하는 방식을 갖을 수도 있다^[11].

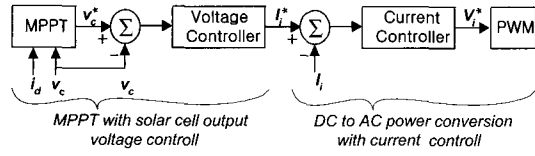
$$i_i^* = \sqrt{2} I_i^* \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

전류제어기는 순시 전류지령치 i_i^* 를 실제전류 i_i 가 추종하도록 제어하는데, 본 논문에서는 PI전류제어기보다 속응성이 좋고 고정된 스위칭 주파수를 갖는 예측전류제어기를 적용하였다. 식 (3)은 선로저항을 무시한 경우의 예측전류제어기로서 AC 측 KVL 방정식을 이산화 하여 얻을 수 있다^[12].

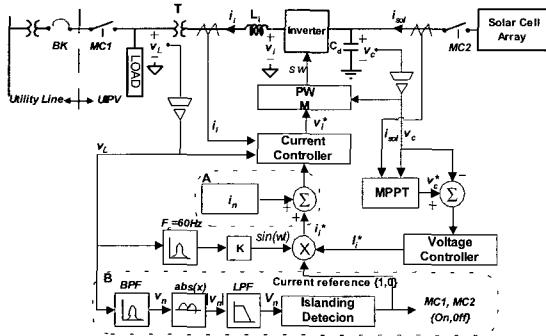
$$v_i^*(k+1) = v_L(k) + L_i \frac{i_i^*(k+1) - i_i(k)}{T_s} \quad (3)$$

v_L : AC 부하단 전압 L_i : AC 인덕턴스

v_i^* : 인버터 출력전압 지령치 T_s : 스위칭주기



(a) 간략화된 제어 블록선도



(b) 전체 제어 블록선도

그림 2 계통연계형 태양광발전시스템 제어 블록선도
Fig. 2 Control block-diagram of UIPV system

이상의 MPPT제어기, 전압제어기 및 전류제어기 제어 블록선도로 나타내면 그림 2(a)와 직류 등가신호로서 간략하게 나타낼 수 있다.

2.3 고립운전 검출

부하의 요구전력과 발전출력이 일치하는 임계 운전 조건에서는 능동적인 검출방법이 검출특성의 면에서는 우수하지만 그 이외의 조건 즉, 부하의 요구전력이 발전출력보다 크거나 작은 경우에는 수동적인 방법이 우수하므로, 최종적인 고립운전의 검출은 앞서 설명한 수동적인 방법과 능동적인 방법을 동시에 적용하여 모든 부하조건에서 빠르고 안정된 검출특성을 갖도록 설계하는 것이 일반적이다.

본 논문에서는 고립운전 검출을 위하여 인버터에서 미량의 고조파 전류를 주입하고 인버터의 출력단에서 고조파 전압의 크기를 측정하는 고조파 전류 주입법(HCIM : Harmonic Current Injection Method)을 제안하였다. 제안된 HCIM은 순저항 AC부하의 요구전력과 UIPV 시스템의 출력전력이 일치하는 상황에서 고립운전 검출을 목적으로 하며, 분류상으로는 능동적 검출 방식으로 분류될 수 있다. 그림 2(b)는 제어신호의 흐름을 전력 회로부와 함께 제어블록선도를 자세하게 나타내었으며, 그림에서 수동적인 고립운전검출에 대한 부분은 일반적인 방법에 의해 기본과 전압의 피크치 및 위상을 검출하기 때문에 생략하였다.

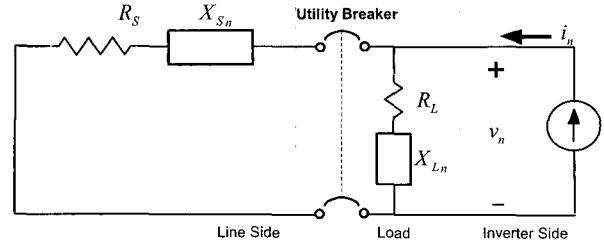


그림 3 AC단 등가회로

Fig. 3 Equivalent circuit of AC part

3. 제안된 HCIM에 의한 고립운전 검출

그림 2(b)에서 박스 A와 B는 HCIM을 구현하기 위하여 고조파 전류를 전류지령치에 주입하는 부분과 검출하는 부분이다. UIPV 시스템의 인버터는 AC단 전류제어기를 갖고 있기 때문에 전류원이 되고, 전류원에 고조파 전류를 주입하면 부하단 전압은 기본과 성분에 고조파 전압이 동반되어 나타난다. 전원이 무한용량의 모선임을 상기하면 개폐기가 닫혀있을 때에는 고조파 성분은 매우 작게 측정이 되고, 개폐기가 사고에 의해서 개방이 되면 주입한 고조파 성분의 전압이 증가한다. 따라서 고조파 전압의 크기의 증가를 감시하여 고립운전을 검출할 수 있다. 고립운전 검출부에서 계통이 정상일 때는 전류지령치가 전압제어기의 출력으로 유지가 되도록 하고, 개폐기 개방으로 판단되면 전류지령치를 영으로 하면서 UIPV내에 내장된 전자개폐기(MC1,MC2)를 차단한다.

본 논문에서 제안한 HCIM에 의해 고립운전을 검출하기 위해서 전류제어기의 지령치 i_i^* 에 고조파 전류 i_n^* 를 주입하여 인버터를 운전한다. 이를 식으로 표현하면 아래와 같이 나타낼 수 있다. 식 (4)에서 I_n 와 ω_n 그리고 ϕ_n 은 각각 주입할 고조파의 실효치와 주파수, 위상각을 말한다. 그리고 식 (5)의 i_{ref}^* 는 전류지령치 i_i^* 에 주입할 고조파 전류 i_n^* 를 더하여 새롭게 적용될 전류지령치이다. 그림 2(b)의 점선 박스A에 고조파 전류를 주입하는 제어블록선도를 나타내었다.

$$i_n^* = \sqrt{2} I_n^* \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad (4)$$

$$i_{ref}^* = i_i^* + i_n^* \quad (5)$$

이와 같이 고조파 전류지령을 인버터 출력 기준전류에 주입하여 운전하면 그림 1의 인버터 시스템에서 교류 출력단 전압 v_L 에 고조파 전압 성분으로 나타나게 된

다. 이를 대역통과필터로 통과시키면 주입한 고조파 전압 v_n 성분만이 나타나게 되고, v_n 의 크기를 취하여 저역필터를 통과시키면 고조파의 전압의 크기 V_n 를 구할 수 있다. 고조파 전압의 진폭 V_n 의 변화를 감시하여 고립운전상태 여부를 판단한다. 이상의 검출 블록선도를 그림 2(b)의 점선 박스B에 나타내었다.

제안된 고조파전류 주입방식(HCIM)에 의한 고립운전 검출기법은 앞서 언급했듯이 전원의 고장시 증가 임피던스의 변화를 이용한 방식으로서 다른 검출에 비해 상대적으로 구현이 아주 간단하고 확실한 검출특성을 보여준다. 계통이 정상이고 부하소비전력과 태양광발전시스템의 출력전력이 일치할 경우 인버터 출력단과 전원측 사이에는 기본파 성분 전류가 흐르지 않을 것이고 기본파에 대하여 하이 임피던스 상태가 된다. 그러나 고조파 성분 전류는 전원측으로 유입이 될 수 있으며 그림 3과 같이 태양광발전시스템의 AC부분의 회로에서 인버터 출력단은 부하가 연결되어 있으므로, 전원이 정상일 때의 인버터 출력단 임피던스 Z_{NOM} 은 식 (6)과 같이 전원측 증가임피던스 $Z_{Sn} = R_s + jX_{Sn}$ 와 부하임피던스 $Z_{Ln} = R_L + jX_{Ln}$ 의 병렬회로의 증가 임피던스가 된다. 여기서 Z_{Sn} 와 Z_{Ln} 은 주입 고조파의 주파수 ω_n 에 대한 임피던스를 나타내고 있다.

$$Z_{NOM} = (R_s + jX_{Sn}) // (R_L + jX_{Ln}) \quad (6)$$

전원측의 사고나 유지보수를 위해 개폐기가 개방되어 태양광 발전시스템과 계통이 서로 분리될 경우 인버터에서 바라본 전체 증가임피던스 Z_{FLT} 는 부하임피던스 Z_{Ln} 이 되는데 이를 식 (7)에 나타내었다.

$$Z_{FLT} = R_L + jX_{Ln} \quad (7)$$

계통의 고장여부에 상관없이 고조파 전류 I_n 을 일정하게 주입한다면, 고조파전압 V_n 은 정상일 때와 이상일 때의 임피던스 Z_{NOM} 및 Z_{FLT} 에 대하여 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{n1} = Z_{NOM} I_n \quad (8)$$

$$V_{n2} = Z_{FLT} I_n \quad (9)$$

전원측 임피던스에 비해서 부하측 임피던스가 매우 크므로 식 (6)에 의해서 전원이 정상일 때는 증가 임피던스는 전원측 임피던스에 근사하고, 식 (7)에 의해

서 개폐기 개방시 증가 임피던스는 부하 임피던스에 근사해진다. 따라서 식 (8)과 (9)를 통해서 알 수 있듯이 주입한 고조파전류에 의한 고조파 전압을 측정하여 보면 사고발생 즉시 증가하게 된다. 여기서 정상상태의 증가 임피던스와 고장시의 증가 임피던스의 비를 x 라 하면 다음의 관계로 표현된다.

$$x = \frac{V_{n2}}{V_{n1}} = \frac{Z_{FLT}}{Z_{NOM}} \quad (10)$$

4. 고립운전 시험조건

UIPV시스템의 고립운전 검출특성을 테스트하기 위해서는 개폐기가 개방되었을 때 고립운전이 발생할 수 있는 부하조건을 구해야 한다. 이를 위하여 [1], [2]에서 Michael E. Ropp는 매우 유용한 해석적 시험 절차를 제시하였다. 이 방법은 매우 적절하고 정확한 테스트가 가능한 반면 직각적인 정보를 주지 못하기 때문에 본 논문에서는 AC 부하를 직렬 등가회로로 가정하여 임피던스 관점에서 쉽게 정보를 얻을 수 있는 고립운전 시험조건을 다음과 같이 고찰하여 적용하였다.

인버터 출력전류 \vec{I}_i 를 기준위상으로 놓을 때 식 (11)과 같이 페이저(phasor)로 표시할 수 있으며, 부하 임피던스를 식 (12)와 같이 저항과 리액턴스로 나타낸다.

$$\vec{I}_i = I_i \angle 0 \quad (11)$$

$$\vec{Z}_{L1} = Z_{L1} \angle \theta \quad (12)$$

$$= R_L + jX_{L1} \quad (13)$$

- 여기서, \vec{I}_i : 기본파 인버터 출력전류
 \vec{Z}_{L1} : AC 부하 복소 임피던스
 θ : 부하 임피던스 각
 R_L : 부하 저항 성분
 X_{L1} : 부하 리액턴스 성분

식 (11) 및 (12)를 써서 개폐기의 개방시의 AC 부하 전압 \vec{V}_{L1} 은 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다. 부하단 기본파 전압의 위상은 부하 임피던스의 특성에 의해서 부하가 유도성이면 θ 만큼 앞서게 되고, 용량성이면 θ 만큼 뒤지게 된다.

$$\vec{V}_{L1} = I_i Z_{L1} \angle \theta \quad (14)$$

태양광발전시스템이 출력하는 복소전력은 $\vec{S}_L = \vec{Z}_{L1} \vec{I}_i$ 이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{S}_L = I_i^2 Z_{L1} \angle \theta \tag{15}$$

$$= R_L I_i^2 + jX_{L1} I_i^2$$

여기서, v_{L1} 의 크기가 변화하지 않기 위한 인버터의 출력전류의 크기는 다음과 같이 오옴의 법칙에 의해서 나타낼 수 있다.

$$I_i = \frac{V_{L1}}{\sqrt{R_L^2 + X_{L1}^2}} \tag{16}$$

따라서 v_{L1} 의 크기가 변화하지 않기 위한 복소전력은 위의 식 (13) 및 (16)을 식 (15)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 기본파 유효전력 성분 P_L 및 무효전력 성분 Q_L 로 나타낼 수 있다.

$$\vec{S}_L = P_L + jQ_L \tag{17}$$

$$= \frac{R_L V_{L1}^2}{R_L^2 + X_{L1}^2} + j \frac{X_{L1} V_{L1}^2}{R_L^2 + X_{L1}^2} \tag{18}$$

여기서, P_L : 유효전력, Q_L : 무효전력

무효전력 Q_L 은 부하와 PV 인버터 간에 반주기 간격으로 서로 주고받는 전력이다. 따라서 Q_L 은 태양전지 출력과는 무관한 전력이고, 부하에서 소비하는 유효전력 P_L 은 태양전지 어레이에서 공급하는 직류 전력 P_{SOL} 과 같으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_L = \frac{R_L V_{L1}^2}{R_L^2 + X_{L1}^2} = P_{SOL} \tag{19}$$

여기서, P_{SOL} : 태양전지 발전 출력

태양전지의 출력전력을 열로서 소비하는 교류측 등가저항을 R_{EQ} 이라고 두고 식 (19)를 정리하면 다음과 같이 R_{EQ} 를 반지름으로 하여 도시한 원에 내접하는 방정식으로 나타낸다.

$$\left(R_L - \frac{1}{2} R_{EQ}\right)^2 + X_L^2 = \left(\frac{1}{2} R_{EQ}\right)^2 \tag{20}$$

여기서, $R_{EQ} = V_{L1}^2 / P_{SOL}$: 교류측 등가 저항

그림 4에 식 (20)을 등가부하저항 R_{EQ} 에 대하여 정규화 하여 나타내었다. 그림에서 점선은 등가부하저항의 크기로 원을 그린 것이고 실선 부분이 식 (20)의 궤적을 나타낸 것이다. 식 (20)은 인버터 출력전압을 일정하게 하는 조건을 가정하여 구한 것이므로, 테스

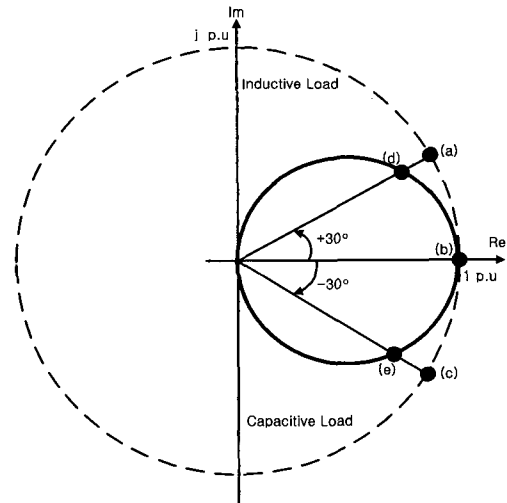


그림 4 UIPV 시스템의 임피던스 선도
Fig. 4 Load impedance curve of UIPV system

트 하고자 하는 부하임피던스가 실선 내부에 존재한다면 인버터 출력전압은 낮아지게 되고, 외부(a, c)에 존재한다면 인버터 출력전압은 상승하게 된다. 이 경우는 전압크기 검출 및 위상검출에 의해서 고립운전을 검출할 수 있다.

테스트하려는 부하임피던스가 실선 상에 위치할 때는 인버터의 출력전압의 크기는 일정하게 유지한 채로 유도성(d) 부하일 때는 전압의 위상이 앞서게 되며 용량성(e) 부하일 때는 전압의 위상이 뒤진다. 이 경우 위상검출에 의하여 고립운전 상태를 검출하게 된다. 부하가 순저항성 부하이므로 소비전력이 태양전지의 출력과 일치하는 (b)점의 경우에는 전압의 크기 변화나 위상의 변화가 없어 고립운전 검출이 용이하지 않으므로 본 논문에서 제시한 HCIM이 포함된 능동적인 방법에 의해 고립운전의 검출이 필요하다.

5. 컴퓨터 시뮬레이션

고립운전시의 UIPV 운전 특성과 제안된 HCIM의 고립운전검출 특성을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1에 나타난 단상 3[kW]급 계통연계형 태양광발전시스템을 대상으로 하였으며 시뮬레이션 툴은 ACSL(advanced continuous simulation language)를 이용하였다. 시뮬레이션에 적용된 부하조건은 계통에 이상이 발생하더라도 전압의 크기는 일정한 조건인 그림 4의 내접원 상에 존재하는 부하조건을 선정하였으며 표 2에 나타내었다.

표 1 태양광발전시스템 사양
Table 1 Specification of photovoltaic system

항목	정수값	단위
태양전지 어레이 출력	3.0	[kW]
인버터 출력정격	3.0	[kVA]
계통전압	220	[V]
계통주파수	60	[Hz]
샘플링주파수	10	[kHz]
스위칭주파수	10	[kHz]
인버터 인덕턴스	3	[mH]
직류커패시터	7050	[μ F]
주입 고조파전류 크기	0.1	[A]
주입 고조파전류 주파수	500	[Hz]
검출필터 밴드폭	5	[Hz]

표 2 고립운전 시험을 위한 부하조건
Table 2 Load condition for anti-islanding test

부하각	PF	Fig. 4	비고
30°	0.87	(d)	유도성부하
0°	1.00	(b)	저항성부하
-30°	0.87	(e)	용량성부하

HCIM을 적용하기 앞서 UIPV시스템의 정상 운전시 및 개폐기 개방시의 부하단 전압 v_L 의 주파수 분석을 하였고 그림 5에 결과를 나타내었다. 고조파를 주입하지 않더라도 계통에 이상이 발생하면 전체적으로 고조파가 증가됨을 알 수 있으며 특히 스위칭 주파수에서는 약 8배가량 고조파의 크기가 증대되는 것을 알 수가 있다. 따라서 별도의 고조파를 주입하지 않고 스위칭 주파수대의 고조파만을 검출하여 고립운전을 검출하는 방법도 생각할 수 있으나 이 경우 높은 스위칭 주파수대의 신호처리가 필수적이기 때문에 별도의 고성능 프로세서가 필요하다. 본 연구에서는 제어기와 고립운전 검출기를 동일한 프로세서에서 동일한 샘플링 비율로 구현하고자 스위칭 주파수의 1/20 정도인 고조파 전류의 주파수를 선정하였다.

HCIM을 적용 시에 주입 고조파크기 I_n 을 결정하기 위해서 정격 이내에서 I_n 의 크기를 변화시키면서 전류 i_s 의 THD를 고찰하였다.

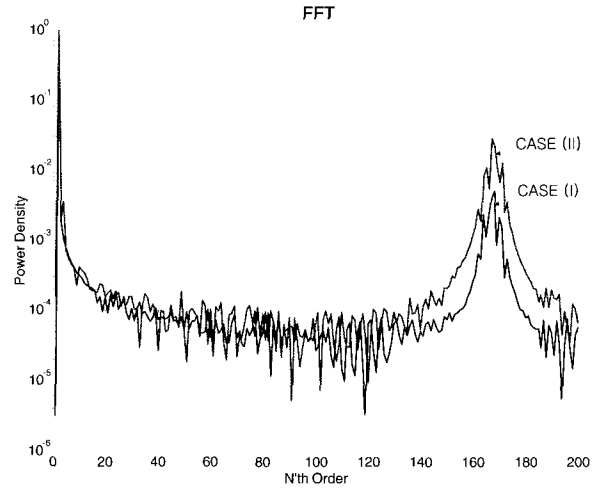


그림 5 v_L 의 주파수특성
(계통정상:Case I, 계통이상:Case II)
Fig. 5 Frequency characteristics of v_L
(Case I : Utility normal,
Case II : Utility fail)

그림 6은 계통이 정상일 때 주입 고조파의 크기와 부하크기에 따른 i_s 의 THD를 보여준다. 무부하에 가까울수록 계통측으로 흐르는 기본파 전류 i_s 가 커지므로 전류 THD는 특성이 좋아지고, 정격부하에 가까울수록 i_s 의 기본파 실효치가 작아지므로 전류 THD가 낮게 나타나는 특성이 있다. 이로 인해서 I_n 의 변화가 전류 i_s 의 THD에 미치는 영향이 경부하일 때는 줄어들고, 정격부하일 때는 커지게 된다. 따라서 무부하, 태양전지의 정격 출력시 전류 THD 사양에 의해서 주입 고조파의 크기가 결정된다. 그림에서 무부하에서는 주입 고조파 전류의 크기를 변화시켜도 THD에 주는 영향이 매우 적음을 보여주며 또한 0.1[A]보다 작은 크기를 주입할 경우 THD는 5[%] 미만이 됨을 알 수 있다.

그림 7은 HCIM를 적용시에 인버터 출력단 전압 THD에 주입고조파가 미치는 영향을 고찰하기 위한 것이다. 그림은 UIPV가 정상 동작할 때와 고립운전(islanding)할 때에 대하여 I_n 과 부하단 전압 v_L 의 THD를 보여주고 있다. 계통과의 연계가 정상일 때에는 부하단 전압 THD에 주입고조파에 의한 영향이 거의 나타나지 않고, 이상 시에는 THD는 5[%]이상 상승되게 된다. 또한 이 경우 주입 전류 고조파가 증가할수록 전압 THD가 미소하게 증가함을 볼 수가 있다.

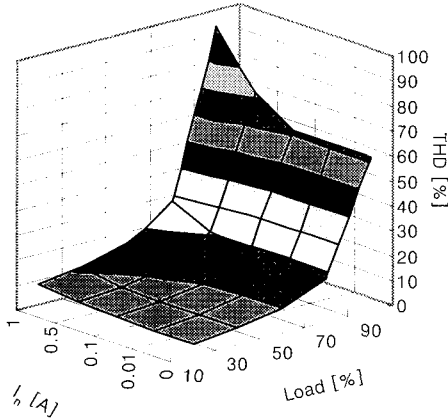


그림 6 I_n 및 부하율에 따른 전원측 전류 i_s 의 THD
 Fig. 6 Current THD on i_s under variation of I_n and load rate

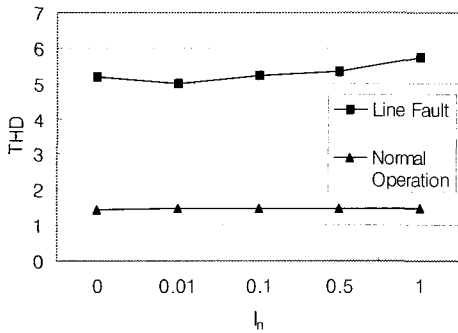
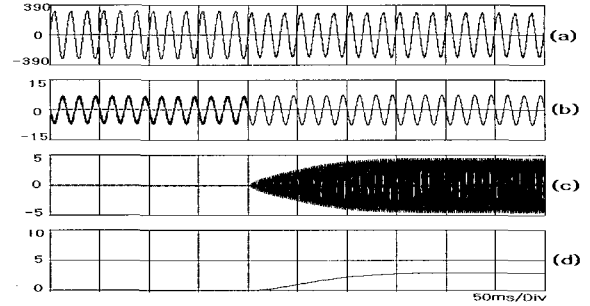


그림 7 I_n 의 변화에 따른 부하단 전압 v_L 의 THD
 Fig. 7 Voltage THD on v_L under I_n variation

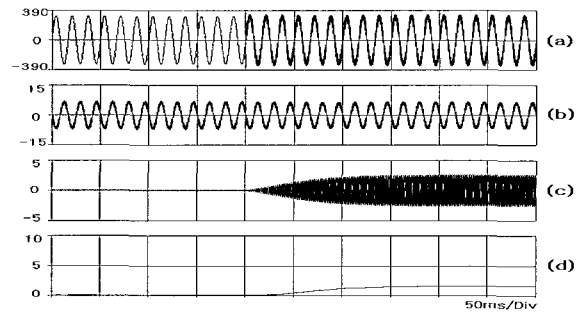
그림 8은 역률 0.87의 유도성 부하에 대하여 계통 고장시 전압이 변동하지 않는 부하 조건인 그림 3의 (d)로 부하를 인가했을 때의 시뮬레이션 파형이다. 그림 8(a)와 (b)는 부하단 전압 v_L 및 인버터 출력전류 i_i 인데 계통에 고장이 발생해도 v_L 및 i_i 의 크기 변동이 거의 없다. 그러나 위상변동이 발생하고 v_L 과 i_i 는 약 30°의 위상차가 발생한다. 계통 고장이 발생하는 즉시 고조파 전류에 대한 이득이 증가하므로 그림 8(c)와 같이 고조파 전압의 크기가 증가된다. 그림 8(d)는 고조파 전압의 실효치로서 약 0.1[sec]의 과도상태가 경과 된 뒤 약 3.4[V]가 된다.

그림 9는 역률 1인 저항성 부하일 경우로서 그림 4의 (b)점에 해당하는 부하를 인가한 경우이다. 그림 9(a) 및 (b)가 보여주는 것처럼 계통의 고장시 v_L 과 i_L 의 크기 및 위상 변화가 전혀 없다.



(a) 전압 v_L [390V/Div] (b) 전류 i_i [15A/Div]
 (c) 고조파 v_n [5V/Div] (d) 고조파크기 V_n [5V/Div]

그림 8 유도성 부하(PF =0.87) 시뮬레이션 파형
 Fig. 8 Simulated waveforms obtained with inductive load (PF=0.87)



(a) 전압 v_L [390V/Div] (b) 전류 i_i [15A/Div]
 (c) 고조파 v_n [5V/Div] (d) 고조파크기 V_n [5V/Div]

그림 9 저항성 부하(PF =1.0) 시뮬레이션 파형
 Fig. 9 Simulated waveforms obtained with resistive load(PF=0.87)

따라서 고립운전의 검출이 가장 어려운 조건이다. (c)는 고립운전 발생시 주입고조파 전류에 의해서 부하단 전압 v_L 에 포함된 고조파 전압 v_n 이 증가하고 있는 것을 보여주며, (d)는 고조파 전압의 실효치 V_n 로서 0.1[sec]정도의 과도상태가 경과 된 뒤 1.85[V]정도가 된다.

그림 10은 역률 0.87의 용량성 부하일 경우로서 그림 4의 (e)점일 때의 부하조건이 주어졌을 때의 운전 특성을 보여주고 있다. 그림 10(a), (b)는 부하단 전압과 인버터 출력전류의 파형으로서 고립운전이 발생하여도 크기의 변화는 작은 반면에 전압 및 전류는 -30°의 위상차가 발생하게 된다. (c) 및 (d)는 고조파 전압의 순시치 및 실효치 파형으로서 고립운전 발생 즉시

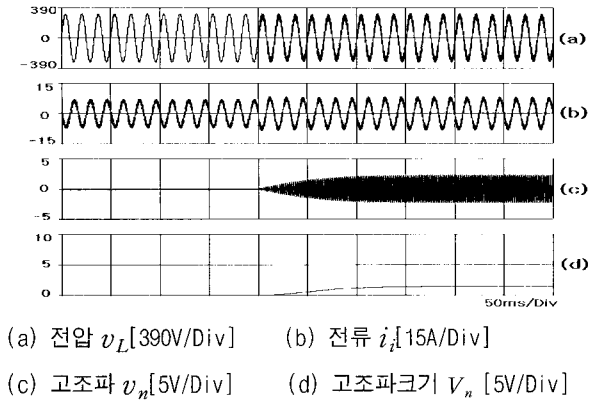


그림 10 용량성 부하(PF =0.87) 시뮬레이션 파형
 Fig. 10 Simulated waveforms obtained with capacitive resistive load(PF=0.87)

증가하여 0.1[sec]의 과도상태 후 실효치는 약 1.5[V]가 된다.

이미 예측했던 바와 같이 (20)에 의해서 부하를 결정할 경우 고장 발생시 유도성, 저항성, 용량성 부하에 대하여 기본파 전압의 크기가 변화하지 않음을 확인할 수 있었고, 이러한 부하에 대해서도 HCIM에 의해서 계통의 고장을 판별할 수 있음을 확인할 수 있었다. 발생 고조파 전압의 크기는 유도성 부하일 때 크고, 용량성 부하일 때 작아지는 것을 볼 수 있다. 또한 산술적으로 예측된 고조파 전압과 시뮬레이션에서 검출된 고조파 전압의 비는 표 3에 나타난 것과 같이 약 0.37으로서 주입된 고조파가 전류제어기의 밴드폭 및 PWM 변조에 의해서 감쇄되어 주입되는 것을 확인할 수 있다.

표 3 시뮬레이션의 고조파 검출특성
 Table 3 Harmonics detection characteristics in simulation

부하각	예측값	검출값	이득
30°	10.70[V]	3.40[V]	0.32
0°	4.80[V]	1.85[V]	0.39
-30°	3.60[V]	1.50[V]	0.42

6. 고립운전 검출 실험

시뮬레이션과 같은 조건인 표 1의 단상 3[kW]급 계통연계형 태양광발전시스템을 대상으로 실험하였다. 부하조건 또한 시뮬레이션과 마찬가지로 표 2의 부하조건에 대해 검출 특성을 분석하였다.

그림 11은 그림 4의 (d)에 해당하는 역률 0.87의 부하를 인가했을 때의 실험 파형이다. 그림 11(a)와 (b)에 의해 부하단 전압 v_L 및 인버터 출력전류 i_L 는 계통에 고장이 발생하면 크기변동은 없고 위상변동(30°)만 있음을 보여준다. 그림 11(c)와 (d)는 계통 고장시 고조파 전압의 크기가 증가됨을 보여주는데 고조파 전압의 실효치가 약 0.1[sec]의 과도상태가 경과된 뒤 2.6[V]정도가 된다.

그림 12는 그림 4의 (b)에 해당하는 순저항 부하를 인가했을 때의 파형이다. 그림 12(a)와 (b)에 의해 부하단 전압 및 인버터 출력전류의 변화가 없음을 알 수 있고, 그림 12(c)와 (d)는 계통 고장시 고조파 전압의 크기가 증가됨을 보여준다. 고조파 전압의 실효치가 약 0.1[sec]의 과도상태가 경과된 뒤 1.5[V]정도가 된다.

그림 13은 역률 0.87의 용량성 부하일 경우의 실험 파형으로서 그림 4의 (e)점인 때의 부하조건이 주어진 경우이다. 그림 13(a)와 (b)는 유도성 부하일 때와 마찬가지로 계통의 고장시 출력전압 및 전류의 크기변화는 없지만 -30°의 위상차가 있음을 보여준다. 그림 14(c) 및 (d)는 고조파 전압의 크기가 고립운전 발생 즉시 증가하여 0.1[sec]의 과도상태 후 실효치는 약 1.25[V]가 된 것을 보여주고 있다.

그림 14는 검출 고조파의 크기를 감시하여 1.25[V]에 이르게 되면 시스템의 운전을 정지시키는 것을 보여준다. 고립운전의 발생 시점부터 시스템 정지까지 약 0.18[sec]정도 시간이 소요되었다.

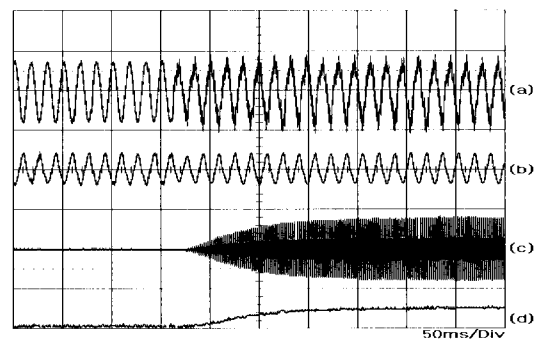
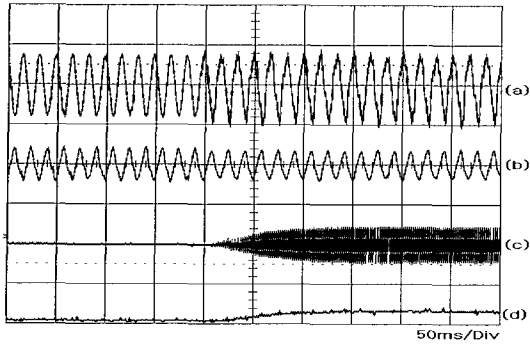
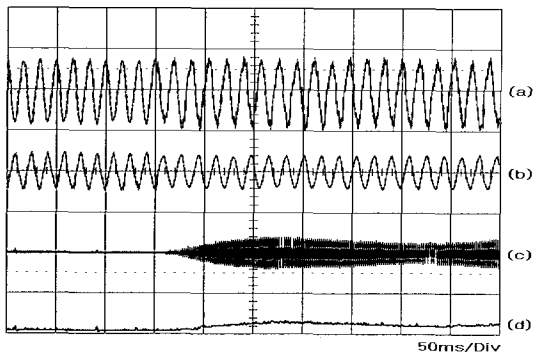


그림 11 유도성 부하(PF =0.87) 실험 파형
 Fig. 11 Experimental waveforms obtained with inductive load(PF=0.87)



(a) 전압 v_L [390V/Div] (b) 전류 i_i [15A/Div]
 (c) 고조파 v_n [5V/Div] (d) 고조파크기 V_n [5V/Div]

그림 12 저항성 부하(PF =1.0) 실험 파형
 Fig. 12 Experimental waveforms obtained with resistive load(PF=1.0)

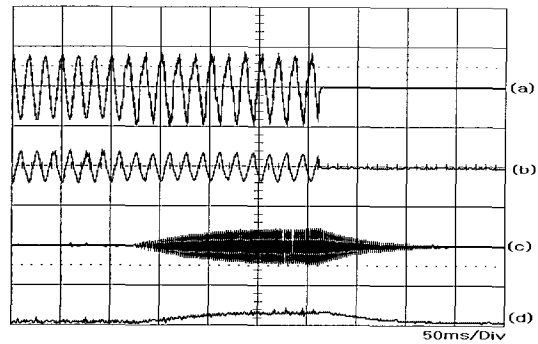


(a) 전압 v_L [390V/Div] (b) 전류 i_i [15A/Div]
 (c) 고조파 v_n [5V/Div] (d) 고조파크기 V_n [5V/Div]

그림 13 용량성 부하(PF =0.87) 실험 파형
 Fig. 13 Experimental waveforms obtained with capacitive load(PF=0.87)

제안된 HCIM의 부하별 동작 특성을 분석하기 위하여 시뮬레이션의 경우와 같은 부하조건을 만들어 실험하였다. 식 (20)에 의하여 결정된 유도성, 저항성 및 용량성 부하에 대하여 기본파 전압의 크기가 변화하지 않음을 확인할 수 있었고, 이러한 부하에 대해서도 HCIM에 의해서 계통의 고장을 판별할 수 있음을 확인할 수 있었다. 발생 고조파 전압의 크기는 유도성 부하일 때 크고, 용량성 부하일 때 작아지는 것을 볼 수 있다.

표 4는 산술적으로 예측된 고조파 전압과 실험에서 검출된 고조파 전압의 비를 나타낸 것과 같이 약 0.3의 평균비를 나타내었다. 예측값과 실제 검출된 고조파의 차이는 주입된 고조파가 전류제어기의 밴드폭 및 PWM 변조에 의해서 감쇄되기 때문이다. 표 3의 시뮬레이션과도 결과가 차이를 보이는데 이는 실 시스템의 정수값이 오차를 갖고 있기 때문이다.



(a) 전압 v_L [390V/Div] (b) 전류 i_i [15A/Div]
 (c) 고조파 v_n [5V/Div] (d) 고조파크기 V_n [5V/Div]

그림 14 저항성 부하(PF =1.0)일 경우 고립운전정지
 Fig. 14 Anti-islanding under resistive load(hPF=1.0)

표 4 실험에서의 검출특성
 Table 4 Harmonics detection characteristics in experiment

부하각	예측값	검출값	이득
30°	10.70[V]	2.60[V]	0.24
0°	4.80[V]	1.50[V]	0.31
-30°	3.60[V]	1.26[V]	0.35

5. 결 론

본 연구에서는 계통 이상이 발생시 고립운전을 검출을 위하여 새로운 고주파 주입에 의한 고립운전 검출 알고리즘(HCIM)을 제시하였다. 또한 이의 검출 특성 테스트하기 위해 전압의 크기가 변하지 않는 임계부하 곡선을 유도하였고 고립운전시의 전압 및 전류의 특성을 직각적으로 예측할 수 있었다. 시뮬레이션을 통해 유도성 및 저항성, 유도성 부하에 대해서 각각 고립운전 검출 특성을 고찰하였으며, 실험을 통해서 순저항 부하시의 HCIM에 의한 검출특성을 검증하였다.

시물레이션에 의해서 유도성 부하일 경우 용량성 부하에 비해 고조파 전압이 크게 나타나는 것을 확인하였으며 이는 부하의 고조파 임피던스의 주파수 특성에 기인한다. 용량성 부하의 경우 고조파 임피던스는 작아지므로 검출된 고조파 전압 또한 작아지는 경향이 나타낸다. 고조파 전압의 산술적 예측치와 시물레이션에서 얻은 값을 비교하였는데 예측치의 37% 크기인 고조파 전압이 검출되었다. 이는 전류제어기의 밴드폭 및 PWM에 의해서 크기가 제한되기 때문이다. 전압 고조파의 과도시간은 약 0.1[sec] 정도로 빠른 검출 특성을 보였다.

시물레이션과 동일한 조건에 의해 실험을 수행하였으며, 실험에 의해서 HCIM의 검출특성을 분석하였다. 시물레이션과 마찬가지로 실험에서도 부하의 임피던스가 유도성이 될수록 큰 고조파 전압이 얻어지는 것을 확인할 수 있었으며 고조파의 산술적 예측치와 실험치와의 비교를 통해서 예측치의 30%의 실험치가 얻어졌다. 실험의 경우 부하 및 시스템 정수값의 오차가 있기 때문에 시물레이션과 차이를 보였다. 실험의 경우 전압 고조파의 과도시간은 시물레이션과 마찬가지로 약 0.1[sec]정도가 되는 것을 확인하였다. 또한 검출 레벨을 1.25[V]로 설정한 경우 약 0.18[sec]만에 고립운전을 검출하여 시스템을 정지하였다.

본 연구에서는 제안된 기법인 고조파 주입방식만을 이용하여 고립운전 현상을 검출하였으나, 다양한 부하 조건에 대해서 보다 안정적이고 빠른 검출 특성을 갖기 위해서는 기존의 수동적, 능동적 방식을 병용하게 되면 검출특성이 더욱 향상될 것으로 예상된다.

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의
지원에 의하여 연구되었음.
(KRF-2002-협동연구지원사업-1999-042-E00027)

참 고 문 헌

- [1] *IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems*, IEEE Std 929-2000, April 3, 2000.
- [2] M.E Ropp, M. Begovic, A. Rohatgi, G.A. Kern, R.H. Bonn, and S. Gonzalez, "Determining the relative effectiveness of islanding detection methods using phase criteria and nondetection zones", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 15, Issue 3, pp. 290~296, Sept. 2000.
- [3] H. Kobayashi, K. Takigawa, E. Hashimoto, A. Kitamura, and H. Matsuda, "Method for preventing islanding phenomenon on utility grid with a number of small scale PV systems", *Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty Second IEEE*, vol. 1, pp. 695~700, 1991.
- [4] M.E. Ropp, M. Begovic, and A. Rohatgi, "Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 14, Issue 3, pp. 810~816 Sept. 1999.
- [5] S.J. Huang and F.S. Pai, "Design and operation of grid-connected photovoltaic system with power-factor control and active islanding detection", *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, Vol. 148, Issue 3, pp. 243~250, May 2001.
- [6] M.E. Ropp, K. Aaker, J. Haigh, and N. Sabbah, "Using power line carrier communications to prevent islanding of PV power systems", *Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE*, pp. 1675~1678, 2000.
- [7] K. Heumann and W. Wienhofer, "Optimization of Photovoltaic System by Controlled DC-DC-Converter under Consideration of Power-Output-Statistics", *IPEC Tokyo '83 Conference*, pp. 1049~1060, 1983.
- [8] Ziyad Salameh and Daniel Taylor, "Step-up Maximum Power Point Tracker For Photovoltaic Arrays", *Solar Energy*, Vol. 44., No. 1, pp. 57~61, 1990.
- [9] V. Blasko and V. Kaura, "A new mathematical model and control of a three-phase AC-DC voltage source converter", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 12, Issue 1, pp. 116~123, Jan. 1997.
- [10] Ming-Tsung Tsai and W.I. Tsai, "Analysis and design of three-phase AC-to-DC converters with high power factor and near optimum feed forward", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 46, Issue 3, pp. 535~543, June 1999.
- [11] S. Kim, Gwonjong Yoo, and Jinsoo Song, "A bifunctional utility connected photovoltaic system with power factor correction and UPS facility", *Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty Fifth IEEE*, pp. 1363~1368, 1996.
- [12] R. Wu, S.B Dewan, and G.R Slemmon, "Analysis of a PWM AC to DC voltage source converter under the predicted current control with a fixed switching frequency", *Industry Applications, IEEE Transactions on*, Vol. 27, Issue 4, pp. 756~764, July/Aug. 1991.

저 자 소 개



고재석(高再錫)

1967년 6월 3일생. 1994년 건국대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년~1997년 (주)삼성전자 연구원 1997년~2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 (주)XILON 부설연구소장.



채영민(蔡榮敏)

1967년 2월 24일생. 1993년 건국대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1999년~2003년 미국 Delta Co, R&D 연구원. 2003년~현재 삼성전자 Digital Media총괄 Digital Printing 사업부 책임연구원.



강병희(姜秉熹)

1966년 9월 19일생. 1993년 건국대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 졸업(석사). 1995년~1998년 삼성종합기술원 전문연구원. 1999년~2002년 동 대학원 졸업(박사). 2002~현재 (주)케이펙신기술 연구소장.



최규하(崔圭夏)

1978년 서울대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 졸업(석사). 1986년 동 대학원 졸업(박사). 1987년~1988년 미국 오레곤 주립대 Post-Doc. 1997년~1998년 건국대 연구처장. 현재 건국대 전기공학과 교수 및 전력전자기술연구센터 소장. 대한전기학회 기획이사. 건국대학교 교무처장.