

## 분산전원시스템의 계통연계를 위한 새로운 단독운전 방지방법

黃仁豪<sup>†</sup>

### A New Anti-Islanding Method for Utility Interconnection of Distributed Power Generation System

In-Ho Hwang

요 약

본 논문은 신·재생에너지를 이용한 분산전원시스템을 위한 새로운 단독운전 방지방법을 제시한다. 유효전력과 무효전력 불균형의 개념에 근거해서 3가지 다른 단독운전 조건이 분석된다. 단독운전 전압이 유효전력의 함수이고 그 주파수는 유효전력과 무효전력의 함수임이 분석을 통해 보여준다. 이 분석결과를 이용해서 새로운 단독운전 방지방법이 개발되었다. 제안된 보호 알고리즘은 분산전원에 의해 공급되는 무효전력을 계속적으로  $\pm 5\%$  변화시키면서 동시에 계통전압과 주파수를 관측한다. 만일 단독운전에 의해 측정할 정도의 주파수 이탈이 발생하면 더 나아가 분산전원의 유효전력을 80%로 감소시킨다. 이 검출방법은 공진부하에서도 빠르게 동작됨을 보여준다. 가능한 단독운전조건이 모의되고 분석 증명된다. 0.5 kW 연계형 연료전지 시스템의 실험결과가 제시된다.

ABSTRACT

This paper presents a new anti-islanding method for distributed power generation system (DPGS) using renewable energy. Based on the concept of real and reactive power mismatch, three different islanding conditions are analyzed. It is shown via analysis that islanding voltage is a function of real power alone, where as its frequency is a function of both real and reactive power. Using this analysis, a new anti-islanding method is developed. The proposed protection algorithm continuously perturbs ( $\pm 5\%$ ) the reactive power supplied by DPGS while simultaneously monitoring the utility voltage and frequency. If a measurable frequency deviation took place by islanding, the real power of DPGS is further reduced to 80%. This detection method is shown to be fast acting under resonant loads. Possible islanding conditions are simulated and verified with analysis. Experimental results on a 0.5kW utility-interactive fuel cell system are suggested.

**Key Words** : Anti-islanding, Distributed power generation system, Utility interconnection

### 1. 서 론

최근 자원고갈 및 환경문제에 대처하기 위해 태양

광, 풍력, 연료전지 등 신·재생에너지 발전방식을 이용한 분산전원 시스템(Distributed Power Generation System, DPGS)의 실용화 보급이 확대되는 추세에 있다. 그러나 이러한 분산전원시스템은 인접 배전계통에 연계되어 운전되기 때문에 계통의 전력품질 및 안전에 영향을 줄 수가 있다<sup>[1]</sup>. 특히 분산전원은 각 시스템이 독립적으로 제어되기 때문에 계통의 안전 측면에서 분

<sup>†</sup>교신저자 : 정회원, 충북과학대학 전기에너지시스템과 부교수  
E-mail : ihhwang@ctech.ac.kr  
접수일자 : 2004. 8. 17      1차 심사 : 2004. 9. 21  
심사완료 : 2004. 10. 4

산전원의 보급이 일반화될수록 단독운전(Islanding)에 대한 관심이 더욱 커지고 있다. 단독운전은 계통이 사고 또는 작업등으로 인하여 정전될 경우에도 분산전원 시스템이 운전을 계속하여 일정 구간의 계통을 역충전하는 현상으로 계통과 시스템의 안전을 확보하기 위해서는 이에 대한 대책이 필요하다<sup>[2]</sup>. 이러한 문제는 *IEEE Standard 929-2000* 및 *IEEE P1547*에 언급되고 있다<sup>[3-4]</sup>.

현재까지 단독운전 검출기법은 여러가지 방법들이 개발되어 왔고<sup>[5-10]</sup>, 이 검출기법들은 다음과 같이 두가지 접근방법으로 분류될 수 있다:

수동적방법(*Passive method*):

- Over/under voltage and frequency detection<sup>[5]</sup>
- Phase jump detection<sup>[5]</sup>
- Voltage harmonic monitoring<sup>[6]</sup>

능동적 방법(*Active Method*):

- Output power variation<sup>[7]</sup>
- Active frequency drift<sup>[8,9]</sup>
- Sliding mode frequency shift<sup>[8,10]</sup>

수동적 방법으로 가장 일반적인 과/저 전압 및 주파수 검출기법(Over/under voltage and frequency detection)은 계통의 전압/주파수가 설정치를 벗어날 때 인버터가 정지한다. 이 방법은 단순한 반면에 인버터 발전출력이 동일 계통에 연계된 부하와 일치될 때 단독운전을 검출하는데 실패한다<sup>[11]</sup>. 위상도약 검출기법(Phase jump detection)에서는, 인버터 전류의 위상이 PLL 회로를 통하여 계통전압과 순시적으로 동기되는데, 일정 크기의 위상차를 단독운전 발생으로 인식하는 것이다. 그러나 이 방법은 부하 역율이 1일때 실패한다<sup>[11]</sup>. 전압 고조파 감시기법(Voltage harmonic monitoring)은 계통이 단독운전 상태에 있을 경우 배전 변압기에 공급되는 여자전류로 인하여 전압 고조파 성분이 증가되는 원리를 이용한 것이다<sup>[2,11]</sup>. 그러나 인버터를 차단하기 위한 적정 고조파 값을 설정하는 것이 비선형 부하가 존재할 때에는 거의 불가능하다<sup>[6]</sup>.

능동적 방법들은 이러한 수동적방법의 단점을 극복하기 위하여 인버터 출력에 일정 변화분을 주입시키는 것이다. 출력전력변동방식(Output power variation)에서는 인버터 유효전력이 주기적으로 변화되면서 출력전압이 계속적으로 관측된다. 단독운전이 발생할 때 전압변동이 유효전력 불균형으로 인하여 눈에 띄게 변화가 생기고 이로 인해 시스템의 정지가 가능하다. 이

방법은 동일 계통에 연계되어 있는 다수의 분산전원이 동기화 될 필요가 있다. 만일 동기화가 되어 있지 않다면 그 방법은 평준화 효과로 인하여 효과가 없다<sup>[7]</sup>. 능동주파수 변동방식(Active frequency drift, AFD)은 인버터 출력전류의 주파수를 미소하게 증가 또는 감소시키면서 단자전압의 주파수를 관측하는 것이다. 측정할만한 단자전압 주파수의 이탈은 단독운전을 의미한다. 그러나 이 방법은 부하 위상각이 주파수 변화분에 의해 발생된 위상값과 일치할 때 실패하기 쉽다는 단점을 갖고 있다<sup>[8,12]</sup>. 슬라이딩 모드 주파수변동(Sliding mode frequency shift, SMS)기법은 AFD와 비슷한 방법을 적용한다. 이 방법에서는 인버터 전류의 초기 위상(starting angle)이 제어되는 것으로, 단독운전 상태에서 발생하는 주파수 변화를 관측한다. 이 방법은 또한 부하위상이 인버터 초기위상과 같다면 단독운전 검출에 실패한다<sup>[8,12]</sup>.

이러한 방법에 대응하여 본 논문에서는 새로운 단독운전 검출기법을 제시하고자 한다. 제안된 기법은 분산전원에 의해 공급되는 무효전력을 연속적으로  $\pm 5\%$  변화시키면서 계통 전압 및 주파수를 모니터링하는 것이다. 분산전원의 무효전력을 5%정도 변화시킴으로서 단독운전이 발생할 때 주파수가 1% 이상의 변화가 발생하게 된다. 더 나아가 제안된 알고리즘에서는 단독운전 상태를 확인하기 위해 분산전원의 유효전력 출력을 80%로 감소시킨다.

만일 그 단자전압이 0.9 pu 아래로 떨어진다면 단독운전 상태로 인지하여 분산전원은 계통으로부터 분리된다. 이 제어기법은 기존의 다른 기법에 비해 불검출영역(non-detection zone, NDZ)을 줄일 뿐 아니라 빠르고 강인한 응답 특성을 갖는 것으로 보여진다. 몇가지 경우의 단독운전 조건이 모의되어 분석되고 0.5kW 용량의 분산형 연료전지 발전시스템(distributed fuel cell powered generation, DFPG)을 이용한 실험결과가 검토된다.

2. 분산전원의 유효/무효전력관계 분석

단독운전 전압 및 주파수는 계통이 분리된 순간에 시스템의 유효/무효전력 관계에 의해 해석적으로 계산될 수 있다. 그림 1 (a)는 계통 연계시에 분산전원과 연결부하 사이의 전력흐름 관계를 보여준다. 그림 1 (b)는 계통이 분리됐을 때 분리된 순간의 유효/무효전력의 불균형(mismatch) 성분이  $\Delta P$  와  $\Delta Q$  로 정의됨을 보여준다.

분석의 목적상 분산전원은 전류원으로 모델링되고 부하는 등가의 병렬 RLC 성분으로 나타낸다. 이러한 조건을 위한 시스템 등가회로는 그림 2에 보여진다. 명확히 하기 위하여 단독운전전압  $V_i$  는 인버터 및 부하단에서의 전압으로 정의된다. 또 단독운전주파수는 계통이 분리될 때 인버터 단자전압의 주파수로서 정의된다.

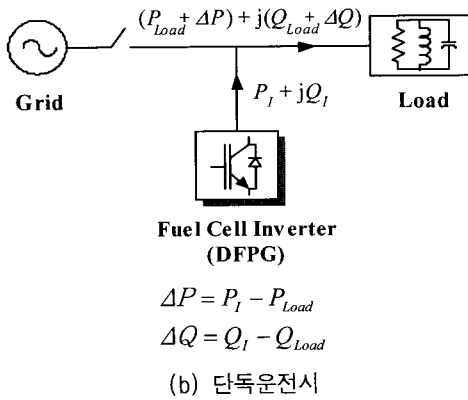
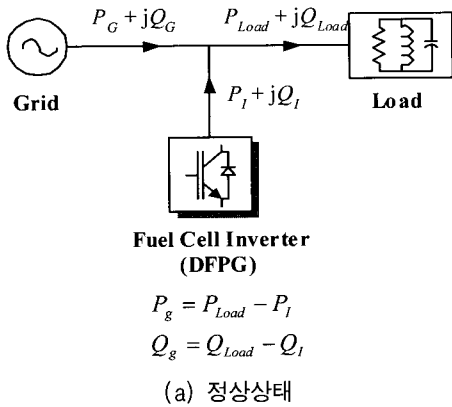


그림 1 계통과 부하에 대한 DFGP 전원의 연계  
Fig. 1 Interconnection of DFGP source to the utility and the load

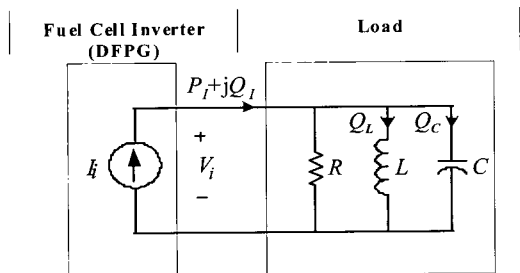


그림 2 계통이 분리된 순간의 DFGP와 부하의 등가회로  
Fig. 2 Equivalent circuit of the DFGP and the load at the instance the utility is disconnected

수식전개를 위한 전력, 전압 관련 변수는 다음과 같이 놓는다.

- $P_I$  : Real power output of the DFGP
- $Q_I$  : Reactive power output of DFGP
- $P_G$  : Real power output of the utility
- $Q_G$  : Reactive power output of the utility
- $Q_C$  : Capacitive reactive power (of the load)
- $Q_L$  : Inductive reactive power (of the load)
- $P$  : Real power mismatch between DFGP and utility
- $Q$  : Reactive power mismatch between DFGP and utility
- $V_i$  : Islanding voltage
- $V$  : Nominal system voltage

부하가 등가의 RLC 요소로 나타내어지고 병렬로 접속되기 때문에 RLC 양단의 각 전압은 같다. 그림 2의 병렬 LC의 임피던스는 주파수 함수로 표현하면 다음과 같다.

$$|Z_{LC}| = \frac{\omega_i L}{1 - \omega_i^2 LC} \quad (1)$$

여기서  $\omega_i$  는 단독운전주파수이다. 더 나아가  $Z_{LC}$  는  $P_I$  와  $Q_I$  를 이용해서 다음과 같이 표현될수 있다.

$$|Z_{LC}| = \frac{R \cdot P_I}{Q_I} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)로부터 다음식을 얻는다.

$$\omega_i^2 + \frac{Q_I}{RCP_I} \omega_i - \left( \frac{1}{\sqrt{LC}} \right)^2 = 0 \quad (3)$$

연결된 부하의 부하특성을 나타내는 quality factor,  $q$ 는<sup>[3]</sup>,

$$q = \frac{\sqrt{|Q_L| \cdot |Q_C|}}{P} = R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (4)$$

이 되고, 식(3)은  $q$ 의 항으로 표현하면 다음과 같다.

$$\omega_i^2 + \frac{R}{q^2 L} \frac{Q_I}{P_I} \omega_i - \left( \frac{R}{qL} \right)^2 = 0 \quad (5)$$

식 (5)으로부터 단독운전 주파수  $\omega_i$  는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\omega_i \approx \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \frac{Q_I}{P_I}\right) \quad (6)$$

계통이 분리됐을 순간의 전압, 즉 단독운전전압은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{V_i}{V} = \sqrt{\frac{P_I}{P_{Load}}} \quad (7)$$

단독운전전압  $V_i$ 는

$$V_i = \sqrt{k} \cdot V \quad (8)$$

이 되고, 여기서  $k$ 는

$$k = \sqrt{\frac{P_I}{P_{Load}}} \quad (9)$$

이다.

이상의 분석으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 단독운전주파수( $\omega_i$ )는 (6)식에 보이는 것처럼 분산전원의 유효전력( $P_I$ ), 무효전력( $Q_I$ )과 부하의 공진주파수( $1/\sqrt{LC}$ )의 함수이다.
- 계통이 분리될 순간에 인버터 출력단의 전압은 (8)식에 보이는 것처럼 분산전원의 유효전력과 부하의 함수이다.
- 단독운전 전압( $V_i$ )은  $P_I > P_L$  일 때 감소하고 반대의 경우 증가한다.
- 최악의 조건에서 다음과 같은 경우가 발생할 수 있다 : 분산전원과 부하의 유효전력이 같고( $P_I = P_{Load}$ ), 각각의 무효전력 또한 같은 경우( $P_I = P_{Load}$ ), 계통이 분리되더라도 인버터 출력단에서 전압과 주파수는 똑같은 상태가 지속된다. 이런 조건하에서는 인버터가 계통의 분리를 검출하는데 실패하고 운전을 계속해서 단독운전을 일으키게 된다. 위와 같은 조건이 거의 만족될 때 전압과 주파수의 변동은 아주 작게 되고 검출이 어려워진다. 이 영역을 불검출 영역(non-detection zone, NDZ)이라 한다.

### 3. 조건별 단독운전 가능성 분석

단독운전을 효과적으로 검출하기 위해서는 모든 가능한 단독운전 조건을 고려해 볼 필요가 있고 또 이에 대한 정확한 이해가 필요하다. 그 중에서 새로운 단독

운전 방지기법을 개발하기 위해 대표적인 3가지 경우의 가능성이 분석되었다.

#### Case #1 : $\Delta P$ 가 큰 경우

분산전원과 부하의 유효전력이 같지 않을 때  $\Delta P$ 는 큰 값을 갖는다. 이 조건에서는 만일 계통이 분리된다면 (8)식으로부터 인버터 단자전압이 현저히 변화한다. 그림 3은  $\Delta P$ 에 따른 단독운전전압  $V_i$ 의 변화를 보여준다. IEEE Standard 929-2000<sup>[3]</sup>에 따르면 인버터 동작전압은  $0.88 \leq V_i \leq 1.10$  [pu] 범위안에 있어야 한다. 만일  $\Delta P > \pm 20\%$ 인 경우에 이 동작전압의 제한치가 선택되어 있다면 단독운전 상태는 효과적으로 검출될 수 있다(그림 3).

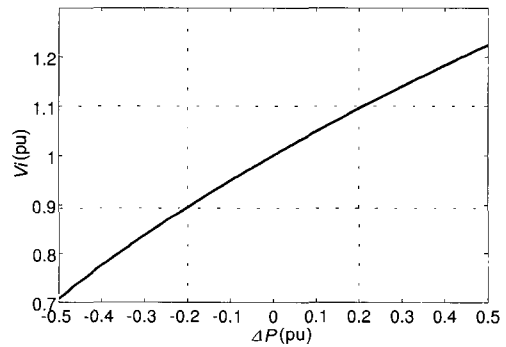


그림 3  $\Delta P$ 에 따른 단독운전전압  $V_i$ 의 변화  
Fig. 3 Variation of islanding voltage  $V_i$  versus  $\Delta P$

#### Case #2 : $\Delta P$ 는 작고 $\Delta Q$ 가 큰 경우

분산전원과 부하의 유효전력은 거의 같지만 무효전력의 차이는 일정 크기를 갖는 경우이다. 계통이 분리된 상태에서 (6)식으로부터 유도된 관계는 주파수에 변화가 발생함을 알 수 있다. 그림 4 (a)는  $\Delta P$ 와  $\Delta Q$ 에 따른 단독운전 주파수의 변화를 보여준다. 그림 4 (b)는  $\Delta P$ 가 0 일 때  $\Delta Q$ 에 따른 단독운전 주파수의 변화를 보여준다. 또한 그 변화는 부하의 quality factor  $q$ 의 함수라는 것을 보여준다. IEEE Standard 929-2000<sup>[3]</sup>에 따르면 인버터 동작전압은 59.3Hz와 60.5 Hz의 범위 안에 있어야 한다. 때문에 분산전원은 그 주파수가 이 제한치를 벗어날 때 차단되어야 한다. 그러나, 만일 이런 조건이 단독운전 보호를 위해 채택되어 있더라도 부하가  $q = 2.5$ ,  $\Delta P = 0$ , 그리고  $\Delta Q < \pm 5\%$ 인 경우라면 인버터는 차단하는데 실패한다(그림 4 (b) 참조).

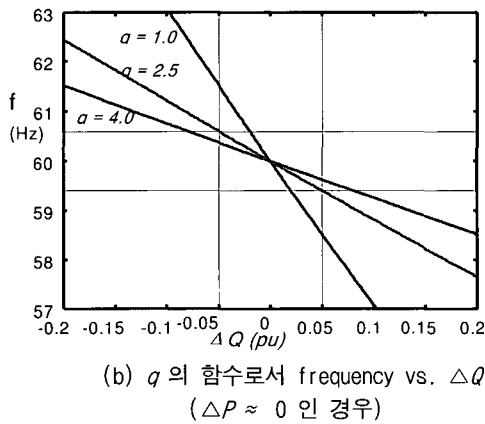
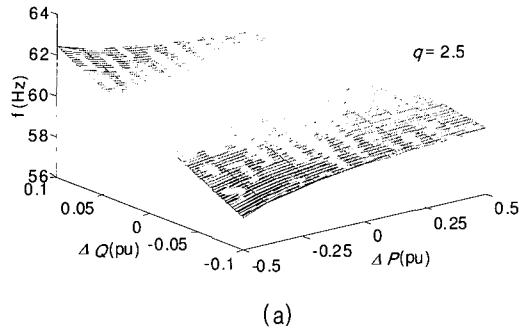


그림 4 단독운전 주파수 변화  
Fig. 4 Variation of Islanding frequency

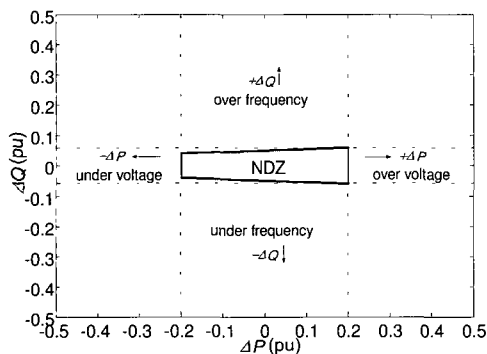


그림 5 과/저 전압 & 주파수방법의 불검출 영역  
Fig. 5 Non-detection zone (NDZ) of over/under voltage & frequency method

**Case # 3 : ΔP와 ΔQ가 작은 경우**

Case #1과 #2의 분석으로부터 작은 ΔP (< ±20%) 와 ΔQ (< ±5%)의 조건에서는 전압 및 주파수의 변화가 불충분하기 때문에 효과적으로 분산전원을 차단

하여 단독운전을 방지하는 것은 쉽지 않음을 알 수 있다. 이 영역은 단독운전 검출을 위한 수동적 방법에 있어서 보통 불검출 영역(non-detection zone, NDZ)으로 알려져 있고 그림 5에 보인다. 이러한 불검출 영역을 최소화하기 위한 새로운 단독운전 검출기법이 다음장에 제시된다.

**4. 제안된 단독운전방지 알고리즘**

제안된 알고리즘의 요점은 기존의 방법에서 존재하는 불검출 영역을 최소화하기 위한 것이다. 알고리즘은 2단계로 구성되어 있다. 1단계에서는 분산전원의 유효전력(P)은 일정하게 유지하면서 무효전력(Q)을 계속적으로 ±5%씩 변화시키면서 전압과 주파수를 동시에 관측한다. 이때 P<sub>i</sub>과 Q<sub>i</sub>의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{Q_i}{P_i} = K \cdot \text{sgn}(V_i) \tag{10}$$

여기서, K는 무효전력의 변화분을 의미하고 5% (또는 0.05 per-unit)로 설정된다. 이러한 설정으로 부하가 q < 2.5 인 조건에서 그림 4에 보인 것처럼 뚜렷한 주파수 이탈이 관측될 수 있다. (6)으로부터 이 변화분에 대한 단독운전 주파수는 아래와 같이 계산될 수 있다.

$$\omega_i = \frac{1}{\sqrt{LC}} \left( 1 - \frac{K \cdot \text{sgn}(V_i)}{2q} \right) \tag{11}$$

주파수 변동치(Δω<sub>i</sub>)는 다음과 같이 정의 된다.

$$\Delta\omega_i = \omega_{i[k]} - \omega_{i[k-1]} \tag{12}$$

계통이 연계되어 있을 때 주파수 변동(Δω<sub>i</sub>)은 아주 작거나 거의 0에 가깝다. 그러나, 계통이 분리되면 Q<sub>i</sub>의 ±5% 변화분 주입으로 인하여 Δω<sub>i</sub>는 그에 상응하는 뚜렷한 변화가 발생하게 된다. 그 변화가 ±1% ≤ Δω<sub>i</sub> ≤ ±2% 범위에 있을 때, IEEE Standard 929-2000 [3]의 규정된 제한치(59.3Hz to 60.5Hz)를 고려하면 단독운전이 발생할 가능성이 어느 정도 있을 것으로 생각되어진다. 이 변화는 최소한 4 사이클 동안 관측되고, 만일 이 기간동안 주파수 변화가 빠르게 증가하면 단독운전으로 인식되고 분산전원은 분리된다. 그러나 만일 Δω<sub>i</sub>가 계속 위에서 정의한 제한치내

에 존재한다면 제안된 알고리즘은 2단계 동작으로서 다음 10 사이클 동안 분산전원의 유효전력을 80%(i.e. 0.8 per-unit)로 감소시킨다. 이때 전압  $V_i$ 의 크기가 0.9 per-unit 아래로 떨어진다면 분산전원은 단독운전이 발생한 것으로 인식되어 계통으로부터 분리된다. 그러나 전압  $V_i$ 의 크기가 정상이라면 분산전원은 동작을 계속하게 된다. 제안된 2단계의 접근방법은 IEEE Standard 929-2000 기준을 만족하는 빠른 응답 특성을 갖는다. 그림 6은 제안된 단독운전 방지 알고리즘의 흐름도를 보여준다.

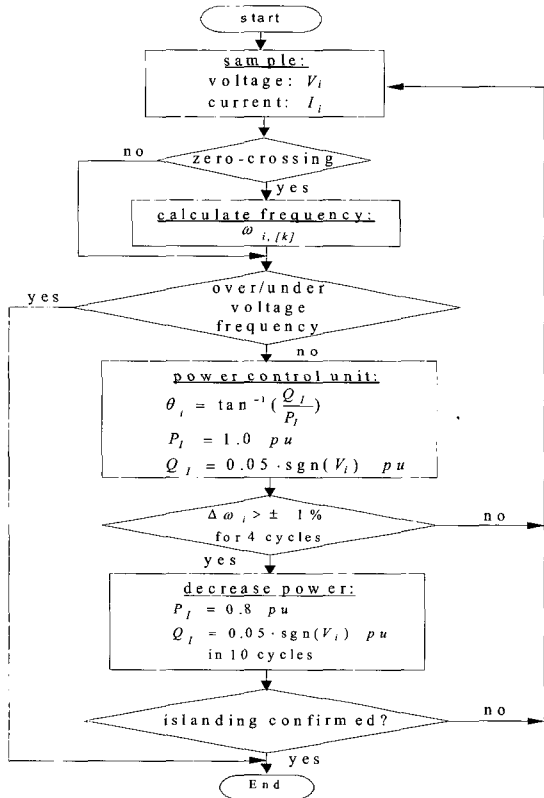


그림 6 제안된 단독운전 검출 알고리즘  
Fig. 6 A proposed islanding detection algorithm

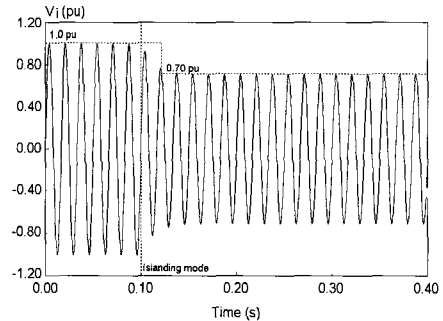
### 5. 시뮬레이션

본장에서는 제안된 단독운전 방지 알고리즘의 타당성을 검토하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 예상할 수 있는 3가지 경우의 단독운전 조건이 모의되었다. 분산전원은 전류제어 전압형 시스템으로 정의되고 그 주파수는 실시간으로 1/2 사이클마다 모니터링 된다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 계통 및 부하조건을 나타낸다.

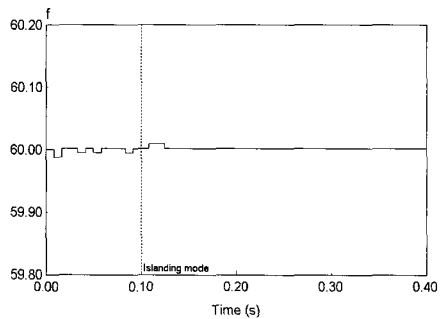
표 1 시뮬레이션 파라미터  
Table 1 Simulation parameters

Parameters	Value
Voltage	220 V
Frequency	60 Hz
$P_{Load}$	0.5 kW
$Q_L$	1.25 kVAR
$Q_C$	1.25 kVAR

그림 7은 case #1의 경우, 즉 분산전원과 부하 사이의 유효전력 불균형이 큰 경우( $\Delta P = -0.5$  per-unit,  $\Delta Q = 0$  per-unit)이다. 정상상태에서 분산전원은 계속적으로 일정 유효전력( $P_L = 1.0$  per-unit,  $Q_L = 0$  per-unit)을 부하에 공급한다. 그 순간 계통이 분리되면 전압의 크기는 분산전원으로부터의 불충분한 전력 공급으로 인하여 0.7 per-unit (그림 7(a))으로 즉시 떨어지고, 부족전압검출에 의하여 단독운전 발생이 쉽게 확인될 수 있다.  $\Delta Q$ 가 0이기 때문에 주파수 변화는 나타나지 않는다.

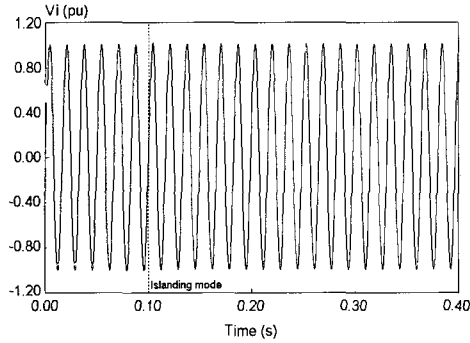


(a) islanding voltage

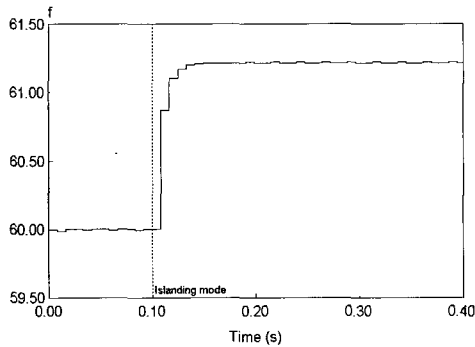


(b) islanding frequency

그림 7 Case #1의 시뮬레이션 결과( $\Delta P = -0.5$ ,  $\Delta Q = 0$ )  
Fig. 7 Simulation results for Case #1:  $\Delta P = -0.5$  and  $\Delta Q = 0$



(a) islanding voltage

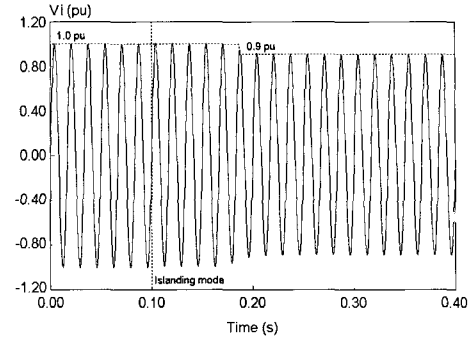


(b) islanding frequency

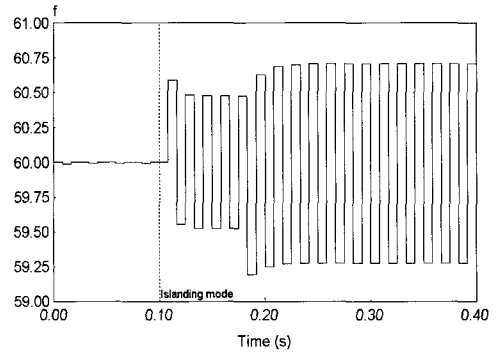
그림 8 Case #2의 시뮬레이션 결과( $\Delta P = 0$ ,  $\Delta Q = -0.1$ )  
Fig. 8 Simulation results for case #2:  $\Delta P = 0$  and  $\Delta Q = -0.1$

그림 8은 case #2 ( $\Delta P = 0$ ,  $\Delta Q = -0.1$  per-unit)에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 이 경우 분산전원의 유효전력은 부하의 유효전력과 같지만, 무효전력은 부하보다 0.1 per-unit 정도 작다. 따라서 계통이 분리된 순간에 전압의 크기는 거의 변하지 않지만 주파수는 61.22Hz 정도로 증가한다. 이 새로운 동작 주파수는 분산전원과 부하 사이의 무효전력 공급 불균형으로 생긴 것이며 이 값은 IEEE 929-2000의 기준을 초과하기 때문에 단독운전 조건으로 인식된다.

그림 9는 case #3 ( $\Delta P \approx 0$  per-unit,  $\Delta Q \approx 0$ )인 경우, 즉 분산전원과 부하 사이의 유효/무효전력이 거의 균형을 이루고 있는 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 이전의 분석 결과로부터 알 수 있듯이 이러한 조건은 실제 발생할 가능성은 많지 않지만 가장 단독운전 검출이 어렵다는 것은 분명한 사실이다. 이 경우에 제안된 단독운전 방지 알고리즘이 적용되었다. 분산전원의 유효전력은 일정하게 유지되고



(a) islanding voltage



(b) islanding frequency

그림 9 Case #3의 시뮬레이션 결과( $\Delta P \approx 0$ ,  $\Delta Q \approx 0$ )  
Fig. 9 Simulation results for case #3:  $\Delta P \approx 0$  and  $\Delta Q \approx 0$

그 무효전력은  $\pm 5\%$ 씩 변동분이 주입되고 있는 상황에서 계통이 분리되면 그 순간에 그림 9(b)에 보이는 것처럼 주파수 변동이  $\Delta\omega_i = \pm 0.50\text{Hz}$  정도 발생하는 것이 감지된다. 제안된 알고리즘에 의하여 분산전원은 주파수 변동이 설정치(59.3Hz to 60.5Hz)안에 있는 한 운전을 계속한다. 한편 알고리즘은 4 사이클이 지나는 동안 주파수 변화를 인식하고 2단계로 분산전원의 유효전력을 다음 10 사이클 동안 80%로 줄이게 된다. 이에 따라 그림 9(a)에 보이는 것처럼 단자전압 크기가 0.9 per-unit으로 감소하게 되기 때문에 단독운전 상태임을 확인하게 된다.

## 6. 실험결과

그림 10은 분산전원 형태로 계통에 연계되어 있는 0.5 kW 단상 연료전지 인버터 시스템을 이용한 실험 장치 구성을 보여준다. 인버터는 TMS-320-F243 DSP

를 채용한 전류제어 전압형이다. 제안된 단독운전 방지 알고리즘은 DSP내에서 소프트웨어적으로 구현된다. 정상적인 상태에서 인버터는 연료전지 출력을 계통으로 계속적으로 공급하도록 프로그램 되어 있다. 인버터 무효전력은 이전에 서술한 것처럼 일정하게  $\pm 5\%$ 씩 변화 시키게 된다. 분산전원 인버터에 의해 공급되는 유효 및 무효전력은 계통전압과 인버터 전류의 위상차를 변화함으로써 제어될 수 있다.

그림 11은 제안된 알고리즘의 2단계 보호동작 여부를 확인할 수 있는 case # 3( $P \approx 0$  per-unit,  $Q \approx 0$ ), 즉 분산전원과 부하 사이의 유효/무효전력이 거의 균형을 이루고 있는 최악의 조건에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 인버터는 그림의 주파수, 전압, 전류, 파형에서 보듯이 4 사이클 동안 운전을 계속하다가 1단계에서 무효전력 변동에 따른 주파수 변화를 감지하여 2단계에서 유효전력을 0.8 per-unit으로 감소시키게 되고 이에 따라 전압( $V_i$ )이 감소하게 됨으로써 단독운전 상태를 확인할 수 있음을 보여준다. 표 2는 분산전원과 부하 사이의 유효/무효전력 불균형(mismatch) 값인  $\Delta P$ ,  $\Delta Q$  조건에 따른 시뮬레이션 및 실험결과를 비교 분석한 것이다.

표 2 시뮬레이션 및 실험결과 요약  
Table 2 Summary of simulation and experimental results

Case	$\Delta P$ (pu)	$\Delta Q$ (pu)	Simulation		Experiment	
			$V_i$ (pu)	Hz	$V_i$ (pu)	Hz
1	-	0	0.71	60	0.7	60
2	0	-0.1	1.0	61.22	1.0	61.30
3	0	0	0.89	60 $\pm$ 0.73	0.89	60 $\pm$ 0.80

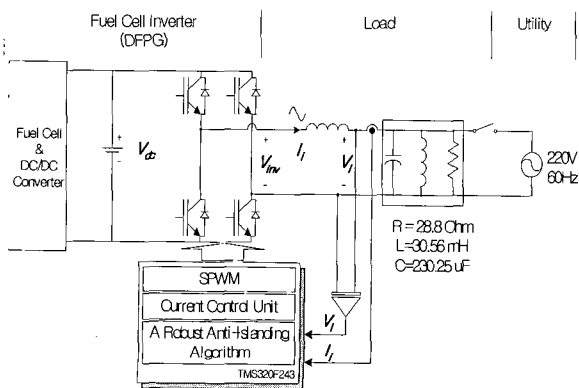


그림 10 실험장치  
Fig. 10 Experimental set up

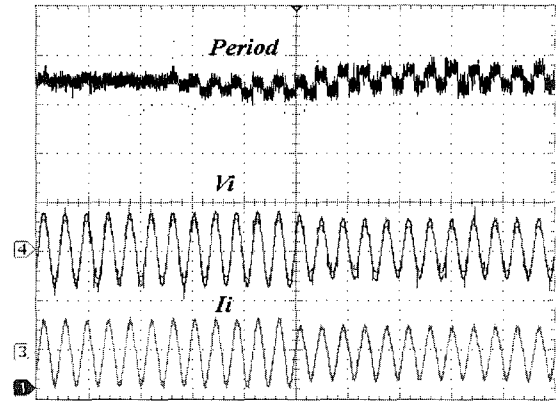


그림 11 제안된 알고리즘에 의한 단독운전 검출 실험 결과(CH1:주파수 변화 2.60 ms/div, CH3: 출력전류( $I_i$ ) 10A/div, CH4: 단자 전압( $V_i$ ) 500V/div.

Fig. 11 Experimental result of islanding detection by the proposed anti-islanding algorithm

### 7. 결 론

본 논문에서는 분산전원시스템의 계통연계 운전시 단독운전을 검출할 수 있는 새로운 알고리즘이 제시되었다. 단독운전 전압이 유효전력 관계에 의해 좌우되고 단독운전 주파수는 유효전력과 무효전력의 함수임을 이론적으로 검토하였고, 이를 바탕으로 단독운전 방지 알고리즘이 분석되고 구현되었다. 알고리즘은 2단계로 구성되어 있다. 1단계에서는 무효전력을  $\pm 5\%$  변화 시키면서 전압과 전류를 연속적으로 관측한다. 주파수의 변화가 관측되면 단독운전 상태로 인식되고, 다음단계에서 단독운전 상태를 확인하기 위해 출력의 유효전력을 80%로 줄이게 된다. 이에 따라 더 큰 주파수 이탈이나 전압 저하가 관측되면 단독운전 상태로 감지된다. 이 검출기법은 빠른 응답특성을 갖으며 단독운전 상태를 감지하기 어려운 조건에서도 불검출영역(NDZ)을 상당히 감소시킬 수 있음을 보여 주었다. 시뮬레이션과 실험결과를 통하여 제안된 검출기법이 효과적으로 동작됨을 확인하였다.

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연구지원에 의하여 연구되었음.

### 참 고 문 헌

[1] 황인호 외, “계통연계 태양광발전시스템의 제어기법 및 연계운전특성,” 전력전자학회 논문지, 제5권 제2호, 2000.



pp.123~129.

- [2] John Stevens, Russel Bonn, Jerry Ginn, Sigifredo Gonzalez, Greg Kern, "Development and Testing of an Approach to Anti-Islanding in Utility -Interconnected Photovoltaic Systems," *SAND 2000-1939*, Unlimited Release, August 2000.
- [3] IEEE, Standard 929-2000, *IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems*.
- [4] IEEE P1547, *Draft Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*.
- [5] H. Kobayashi, K. Takigawa, E. Hashimoto, "Method for Preventing Phenomenon of Utility Grid with a Number of Small Scale PV Systems," in Proc. 22nd *IEEE Photovoltaic Specialists Conf*, 1991, pp.695~700.
- [6] A. Kitamura, M. Okamoto, F. Yamamoto, K. Nakaji, H. Matsuda, K. Hotta, "Islanding Phenomenon Elimination Study at Rokko Test Center," *Proceedings of the 1st IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (1994)*, pt. 1, pp. 759~762.
- [7] Gregory A. Kern, "Sunsine300 Utility Interactive AC Module Anti-Islanding Test Results," Proceedings of the 26th IEEE Photovoltaic Systems, 1997, pp. 1265~1268.
- [8] G. A. Smith, P. A. Onions, D. G. Infield, "Predicting Islanding Operation of Grid Connected PV Inverters," *IEE Proc. Electrical Power Application*, Vol.147, No.1, January 2000, pp. 1~6.
- [9] M. E. Ropp, M. Begovic, A. Rohatgi, "Analysis and Performance Assessment of the Active Frequency Drift Method of Islanding Prevention," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 14, No.3, September 1999, pp. 810~816.
- [10] Yuyuma, S. Ichinose, T., Kimoto, K., Itami, T., Ambo, T., Okado, C., Nakajima, K., Hojo, S., Shinohara, S., Ioka, S., and Kuniyoshi, M, "A high speed frequency shift method as a protection for islanding phenomena of utility interactive PV systems", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 1994, 35, (1-4), pp.477~486.
- [11] M. E. Ropp, "Design Issues for Grid-Connected Photovoltaic Systems," Ph.D., Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 1998.
- [12] Guo-Kiang Hung, Chih-Chang Chang, Chern-Lin Chen, "Automatic Phase-Shift Method for Islanding Detection of Grid-Connected Photovoltaic Inverters," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol.18, No.1, March 2003, pp.169~173.

## 저 자 소 개



### 황인호(黃仁豪)

1962년 7월 10일생. 1985년 충남대 공대 전기공학교육과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과(공박). 1990년~1998년 한전 전력연구원 선임연구원. 2003년~2004년 Texas A&M University 방문교수. 1998년~현재 충북과학대학 전기에너지시스템과 부교수.