

Novel Islanding Detection Method for Distributed Generation Interconnected with Utility Grid

裴炳烈* · 李斗榮** · 韓炳文† · 高宗宣*** · 崔南燮§

(Byung-Yeol Bae · Doo-Young Lee · Byung-Moon Han · Jong-Sun Ko · Nam-Sub Choi)

Abstract - This paper describes the development of a novel islanding detection method, which uses the signal cross-correlation scheme between the injected reactive current and the power frequency deviation. The existing method, which injects the reactive current of 2.5-5% to the rated current and detects the frequency deviation directly, brings about lowering the power quality due to the harmonic pollution. The proposed method eliminates the weak point of the existing method, because it injects the reactive current less than 1% to the rated current. The operational feasibility was verified through computer simulations with PSCAD/EMTDC software, and experimental works with a 10kVA hardware prototype. The proposed method can detect the islanding status effectively without lowering the power quality of interconnected distributed generation system.

Key Words : Islanding, Active Method, Reactive-Power Injection, PSCAD/EMTDC, Cross-correlation

1. 서 론

최근 화석에너지 고갈과 환경오염 문제로 대체에너지를 이용한 발전에 전 세계적으로 많은 관심이 집중되고 있다. 대체에너지를 통한 발전은 대용량 발전에 비해 용량이 작고 수요지 근처에 분산적으로 존재하여 분산전원이라 부른다. 초기에는 분산전원은 용량이 작아 기존 전력계통과는 분리된 상태로 운전 되다가, 최근에는 용량이 증가하면서 에너지 효율과 비용절감을 고려하여 전력계통과 연계된 상태로 운전하는 것이 일반적이다.

분산전원이 전력계통과 연계되어 운전될 경우 전력계통에 고장이 발생하면 이를 분리한 후 분산전원이 단독으로 연결된 부하에 전력을 공급하는데 이러한 상태를 단독운전(Islanding)이라고 한다. 단독운전 상태에서는 분산전원이 생산하는 유효전력의 크기와 부하의 크기에 따라 주파수의 상승 또는 하강이 발생하여 안정적인 전력공급이 불가능하다.

단독운전 상태를 판단하는 기법으로 초기에는 분산전원이 연계된 점에서 주파수나 전압의 변동을 측정하여 판단하는 수동기법이 사용되어 왔는데, 분산전원의 출력이 부하의 크기와 유사한 경우 판별이 어려운 단점을 갖는다[1]-[4]. 따라서 최근에는 수동기법의 약점을 보완할 목적으로 능동기

법에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다.

능동기법 중 대표적인 것이 무효전력을 분산전원이 연계된 전력계통에 연속적으로 주입한 후 주파수 편이를 측정하여 판별하는 주파수편이기법이다. 이 방식은 인버터를 통하여 전력계통에 연계되는 분산전원에 폭 넓게 적용되고 있으며 그 성능 또한 우수한 것으로 알려져 있다[5]-[9]. 그런데 이 방식은 충분한 주파수편이를 검출하고자 할 경우 주입하는 무효전력의 크기가 충분히 커야하는데, 이 때문에 계통전압에 고조파를 발생하고 전력품질이 저하되면서 전력설비의 수명단축을 유발한다[10],[11]. 이러한 현상은 주기적으로 정격유효전류의 수%에 해당하는 무효전류를 주입하기 때문이다.

본 논문에서는 정격유효전류의 1%정도 되는 연속적인 삼각파 형태의 무효전류를 주입하여 단독운전을 판별하는 새로운 기법을 제안한다. 이 방식은 계통에 영향을 안주는 낮은 수준의 무효전류를 주입하므로 고조파발생을 차단함과 동시에 우수한 단독운전 검출특성을 보이기 위해 주입하는 무효전류신호와 출력으로 나타나는 주파수편이신호를 Cross-Correlation 하여 검출한다.

2. 단독운전과 주파수편이

그림 1a는 분산전원으로 태양광발전이 전력계통과 연계된 구성을 간략히 나타낸 것이다. 태양전지에서 발생된 전력은 직류컨버터와 인버터를 거쳐 전력회사가 공급하는 그리드에 결합되고, 부하는 태양전지에서 발생하는 전력과 그리드에서 공급되는 전력을 공유하게 되어있다.

태양전지에서 발생하는 전력의 양이 부하가 소모하는 전력에 비해 클 경우에는 남은 전력은 그리드에 공급하며 부하가 소모하는 전력에 비해 적을 때는 모자라는 전력을 그

* 正 會 員 : 明知大 工大 電氣工學科 博士
 ** 學生會員 : 明知大 工大 電氣工學科 碩士課程
 † 교신저자, 正會員 : 明知大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 E-mail : erichan@mju.ac.kr
 *** 正 會 員 : 檀國大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博
 § 正 會 員 : 全南大 工大 電氣電子通信컴퓨터工學部
 教授 · 工博
 接受日字 : 2007年 10月 4日
 最終完了 : 2007年 11月 20日

리드를 통해 공급받는다. 태양전지가 전력을 공급하는 중에 계통에 사고가 발생하면 계통이 분리되면서 태양전지가 공급하는 전력과 부하가 소모하는 전력 사이에 불균형이 발생하여 주파수의 상승 또는 하강이 발생한다.

그림 1b는 인버터로 연계된 분산전원의 단독운전 발생 시 등가회로를 나타낸 것이다. 분산전원이 계통과 연계된 경우 계통전압은 스위치에 의해 연결되어 계통에서 공급되는 전력 P_S 와 분산전원이 공급하는 전력 P_{DG} 의 합은 부하전력 P_{Load} 와 동일한 값을 갖는다. 만일 계통에 사고가 발생하여 계통전압이 스위치에 의해 차단되면, 분산전원이 공급하는 전력 P_{DG} 는 부하에서 소모되는 전력 P_{Load} 와 동일한 값이 된다. 이 그림에서 분산전원은 전류원으로 표시했고 부하는 R, L, C 로 표시했으므로 연계점의 전압은 부하의 임피던스에 의해 결정되고 부하에서 소모되는 무효전력은 등가 리액턴스에 의해 결정된다.

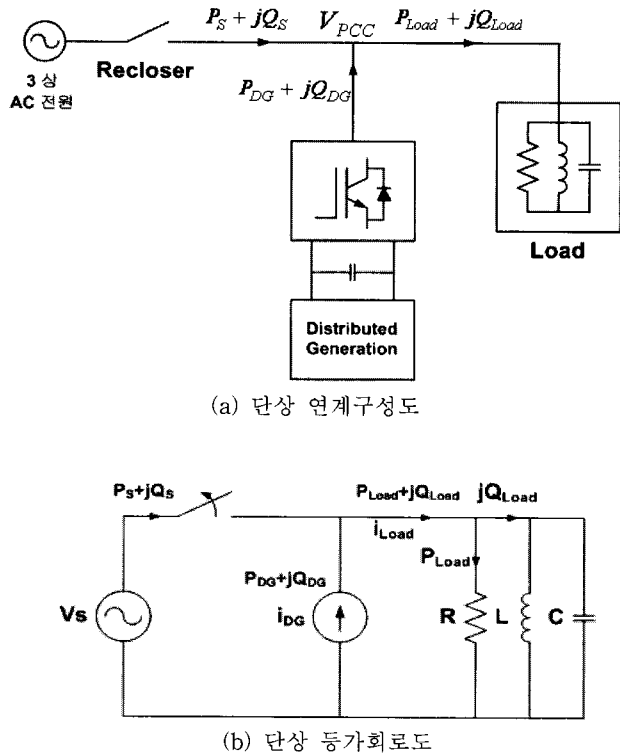


그림 1 분산전원의 계통연계도
Fig. 1 Interconnected distributed generation with grid

그림 1b의 등가회로에서 회로정수의 정의는 아래와 같다.

- R, L, C : 부하 등가모델
- P_S : 전원에서 공급되는 유효전력
- Q_S : 전원에서 공급되는 무효전력
- P_{DG} : 분산전원에서 공급되는 유효전력
- Q_{DG} : 분산전원에서 공급되는 무효전력
- P_{Load} : 부하에서 소모되는 유효전력
- Q_{Load} : 부하에서 소모되는 무효전력
- P_S : 등가부하 중 R에서 소모되는 유효전력

분산전원이 전력계통과 연계되어 운전될 경우 분산전원의 출력기준 역률각과 부하전류의 역률각에 따라 단독운전 발생 시 주파수편이현상이 다르게 나타난다. 이하 분산전원 출력 기준 역률각은 분산전원역률각으로 줄여서 표현된다. 즉 단독운전 발생 전 분산전원역률각 θ_{DG} 과 부하역률각 θ_{Load} 의 상호관계에 따라 3경우로 구분 가능하다. 그림 2는 분산전원역률각이 부하역률각에 비해 큰 $\theta_{DG} > \theta_{Load}$ 경우 단독운전 발생 전, 후의 전류와 전압의 벡터도를 나타낸 것이다.

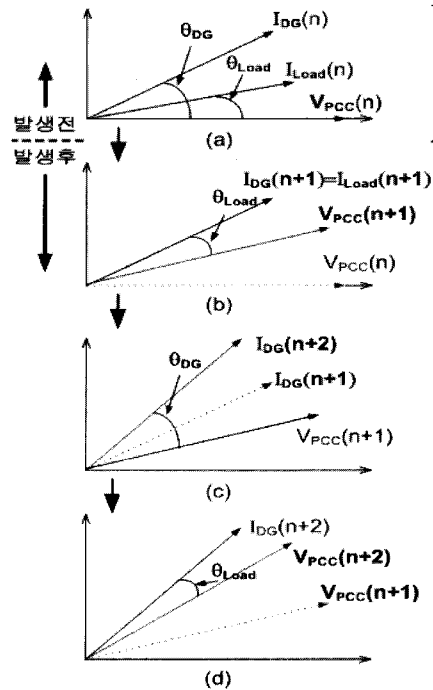


그림 2 $\theta_{DG} > \theta_{Load}$ 인 경우 단독운전 발생 전후 벡터도
Fig. 2 Vector diagram for $\theta_{DG} > \theta_{Load}$ when the islanding occurs

여기서 V_{PCC} 는 연계점의 전압벡터, I_{DG} 는 분산전원 전류벡터, I_{load} 는 부하전류벡터이다.

그림 2a는 연계운전 상태에서 $I_{DG}(n), I_{load}(n), V_{PCC}(n)$ 의 벡터도이다. 단독운전이 발생하면 폐회로가 1개 이므로 그림 2b에 보인 것처럼 $I_{load}(n+1)$ 는 $I_{DG}(n+1)$ 와 동일하게 되고 V_{PCC} 는 부하 임피던스와 전류의 곱으로 표현되므로 전류벡터 $I_{DG}(n+1)$ 와 부하 역률각 θ_{Load} 만큼의 위상각을 유지하기 위해 연계점 전압벡터인 V_{PCC} 는 $V_{PCC}(n)$ 위치에서 $V_{PCC}(n+1)$ 로 이동한다. 분산전원은 이 $V_{PCC}(n+1)$ 를 기준으로 θ_{DG} 위상을 갖는 기준전류 $I_{DG}(n+2)$ 을 발생하여 전류제어를 수행하므로 연계점의 새로운 전압은 전류벡터 $I_{DG}(n+2)$ 에 대해 θ_{Load} 만큼 떨어진 위치에 $V_{PCC}(n+2)$ 을 형성한다. 따라서 부하의 역률각과 분산전원역률각 차에 의해 주파수 편이가 발생하여 주파수가 증가하게 된다. 동일한 원리에 의해 분산전원역률각이 부하역률각에 비해 작은 $\theta_{DG} < \theta_{Load}$ 경우 주파수가 감소하게 되며, 분산전원역률각이 부하역률각과 동일할 $\theta_{DG} = \theta_{Load}$ 경우 주파수변동이 없다.

3. 무효전력주입과 주파수편이

단독운전 시 분산전원역률각과 부하역률각의 차이는 주파수변화를 야기하므로 이 특성을 이용하여 삼각파 무효전력을 일정한 주기로 계통에 주입하면 주파수는 유사한 패턴으로 변동한다. 기존의 무효전력주입방식의 단독운전 판별기법은 시스템 정격의 2.5~5%정도 사각파 무효전력을 불연속적으로 주입하므로 주입 시 발생하는 불연속구간 발생과 불연속전류가 전원임피던스와 함께 전압의 THD를 높이는 결과를 갖는다.

본 논문에서 제안하는 방법은 이러한 단점을 극복하기 위해 무효전력주입 양을 분산전원 출력 정격의 1%로 감소시켰다. 이렇게 할 경우 분산전원 계통연계 시스템의 변동하는 역률은 식 (1)에 의해 결정된다.

$$P.f = P_{DG} / \sqrt{P_{DG}^2 + Q_{inj}^2} \quad (1)$$

여기에서 P_{DG} 는 분산전원 계통연계 시스템의 출력 유효전력, Q_{inj} 는 분산전원 계통연계 시스템의 출력 무효전력이

다. 시스템을 정격으로 운전하고 무효전력을 1% 주입할 때 역률은 최소 0.99995가 되어 역률변동의 정도는 무시할 정도이다. 또한 무효전력을 연속적인 값으로 주입함으로써 연계점의 전압품질저하에는 영향이 거의 없다.

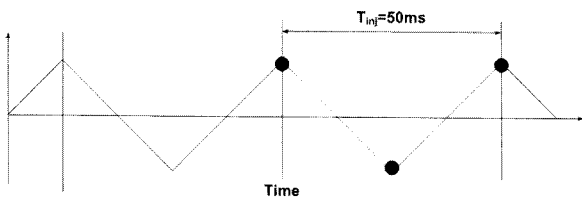


그림 3 무효전력 주입 패턴
Fig. 3 Shape of injecting reactive current

본 논문에서는 그림 3과 같이 일정한 주기성을 갖는 삼각파 형태의 무효전력을 주입하여 단독운전 발생 시 분산전원이 연계된 계통전압의 주파수가 무효전력 주입패턴과 유사한 모양으로 흔들리는 현상을 검출하여야 한다. 무효전력은 무효전류에 의해 발생되므로 무효전류로 무효전력을 대신하여 수행하였다. 그런데 주입무효전류의 양이 적어 주파수편이를 직접 측정하여 단독운전 여부를 판단하기는 어렵다. 따라서 주입무효전류신호와 검출된 주파수편이신호를 cross-correlation을 수행하여 같은 패턴이 나타날 때 cross-correlation 시퀀스의 출력을 확인하여 분산전원의 단독운전 여부를 판별한다.

분산전원 계통연계 시스템을 정격으로 운전하고 있다고 할 때 그림 4와 같이 정격전류 1%로 제한된 삼각파형태의 무효전류를 주입하는 경우를 가정한다. 계통연계 시스템의 제어주기를 10kHz라고 하면 식(2)에 의해 무효전류 주입에 따른 최대 주파수 변동량의 산출이 가능하다.

$$\Delta f_{inj} = \sum_{n=1}^N \tan^{-1} \left(\frac{I_{inj}(n)}{I_{d-DG}} \right) \quad (2)$$

여기서 $I_{inj}(n)$ 는 무효전류 주입 함수, I_{d-DG} 는 분산전원 연계시스템의 정격 유효전력, Δf_{inj} 는 무효전력 주입에 따른 주파수 최대 편이량이다.

무효전력주입 삼각파의 주파수는 20Hz이므로 $I_{inj}(n)$ 가 0에서 최대값까지 증가하는데 소요되는 시간은 12.5ms이다.

그러므로 제어주기 100μs를 고려할 때 N 은 125가 되며 이때 Δf_{inj} 는 0.1Hz가 된다.

4. Cross-correlation에 의한 검출

Cross-correlation은 신호들의 유사성을 평가하기 위해 두 신호 $x_1(n)$ 과 $x_2(n)$ 를 양적인 또는 에너지차원의 비교를 하는데 유효하고 식(3)를 적용함으로써 산출 가능하다. 함수 $C_{x_1, x_2}(k)$ 는 특정 지연된 값에서 신호들이 유사할 때 최대값을 갖게 된다.

$$C_{x_1, x_2}(k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_1(n)x_2(n+k), \quad (k=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (3)$$

식(3)을 프로세서에 적용 가능하게 위해 주입하는 무효전류 $I_{inj}(n)$ 를 $x_1(n)$ 으로, 분산전원 계통연계점 주파수인 $f_{pcc}(n)$ 를 $x_2(n+k)$ 로 설정한다.

무효전력 주입함수인 $I_{inj}(n)$ 는 한주기가 500개인 시퀀스이다. 이 데이터를 기반으로 식 (3)을 무효전류 주입함수 한 주기에 대해 cross-correlation을 수행할 경우 곱셈은 50000번, 덧셈은 50000번 이상 수행하게 된다. 디지털 시그널 프로세서(DSP)의 1 인스트럭션타임이 13ns라고 가정하면 3.25ms정도 소요된다. DSP에서의 연산량을 줄이기 위해 $I_{inj}(n)$ 와 $f_{pcc}(n)$ 를 2kHz로 다운샘플링하면 연산시간은 130 μs가 소요된다. DSP연산 주기마다 cross-correlation 함수의 연산을 1회만 하게 되면 1회 연산하는데 소요되는 시간은 2.6μs이고 cross-correlation 최대값 산출에는 50제어주기인 5ms가 소요된다.

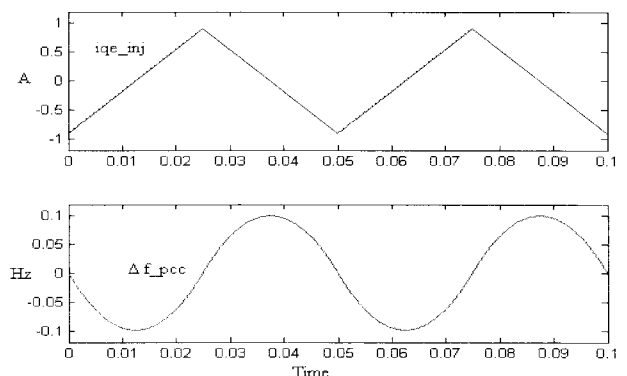


그림 4 무효전류 주입에 따른 주파수 변화분
Fig. 4 Frequency deviation due to injection of reactive current

그림 4는 삼각파 무효전류를 주입하여 나타나는 주파수편이를 그래프로 나타낸 것이다. i_{qe_inj} 는 분산전원 계통연계 시스템이 주입하는 무효전류이고 Δf_pcc 는 단독운전 시 계통연계점에서의 주파수 편이량이다. 위의 두 신호를 이용하여 cross-correlation 인덱스를 연산하고 정규화를 실시하여 식 (4)과 같이 cross-correlation 시퀀스를 계산한다. 그리고 그중 최대값을 단독운전 판별 인덱스, I_{INDEX} 로 사용된다.

$$C_{seq}(k) = \frac{1}{K_{nor}} \frac{1}{100} \sum_{n=0}^{100} Q_{inj}(n) f(n+k), (k=0, \pm 1, \dots, \pm 25) \quad (4)$$

여기에서 K_{nor} 는 정규화 계수로서 0.03748이다. 그리고 $C_{seq}(k)$ 는 cross-correlation 시퀀스이다.

5. 시뮬레이션에 의한 검증

제안하는 분산전원 단독운전 판별기법의 타당성을 검증하기 위해 PSCAD/EMTDC 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 회로정수이다.

표 1 시뮬레이션 회로정수

Table 1 circuit parameters for simulation

정격전압	220V
정격주파수	60Hz
인버터 연계방식 분산전원	
정격용량	20kVA
정격전압	220V
스위칭 주파수	10kHz
DC-link 전압	450V
연계 리액터	2mH
구내부하	
정격용량	20kW

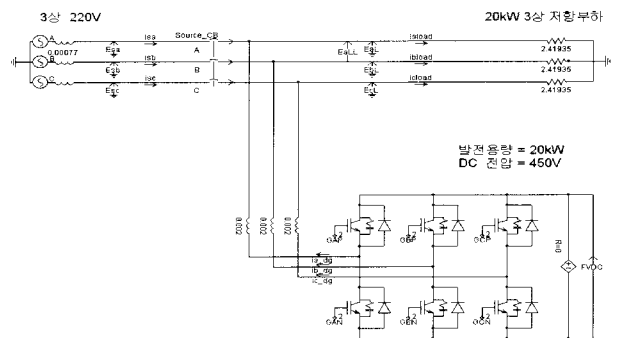
그림 5a는 시뮬레이션에 사용된 계통연계 분산전원의 전력회로도이다. 전원은 3상 220V이고 전원 임피던스는 0.7mH로 설정하였다. 분산전원은 이상적인 직류 전압원으로 설정하였으며 전압은 450V로 설정하였다. 시스템 정격은 20kVA, 스위칭 주파수는 10kHz로 설정하였으며 분산전원이 연계된 지점의 구내부하로 간주할 수 있는 20kW 용량의 저항부하를 설정하였다.

그림 5b는 계통연계 인버터를 제어하고 전지에서 설명한 단독운전 시 이를 판별하는 알고리즘을 포함하고 있는 제어기를 나타낸 것이다. 이 제어기는 모든 알고리즘을 C-언어로 프로그래밍하여 사용자정의 모듈로 구성하였다. 이 제어기 내부에는 주파수 검출을 위한 PLL(Phase-Locked Loop)[12], d-q 변환, 인버터 전류제어에 관한 알고리즘이 포함되어 있다. 이 제어기의 왼쪽 단자들은 검출 파라미터들과 지령들로 구성되어 있고 오른쪽 단자들은 PWM 발생을 위한 기준전압 신호와 내부변수 관찰단자로 구성되어 있다. 오른쪽 상단 시지연기를 통해 3상 기준전압 신호가 출력됨을 알 수 있다.

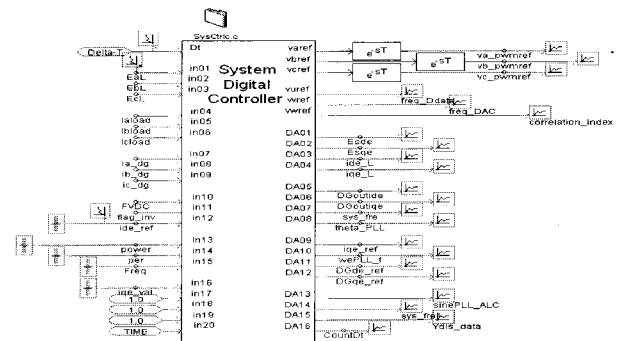
이 기준신호는 그림 5c의 PWM 발생부의 기준파형으로 전달되어 캐리어신호와 비교되는데 시뮬레이션의 정밀성을 위해 10kHz의 1주기인 100 μ s 지연기를 통해 출력되도록 하였으며 이를 통해 생성되는 PWM은 제어기의 제어주기와 동기화되어 PWM 펄스를 생성하도록 되어있다.

분산전원이 연계된 전력계통과 분리되어 단독운전이 발생되었을 때 분산전원의 출력과 부하용량이 유사하면 연계점에서 측정된 전압의 크기와 주파수는 그 변동량이 적어 단독운전 여부를 판별하기가 어렵는데 이러한 영역을 NDZ(None Detection Zone)로 정의한다. IEEE Std 929-2000에 의하면 NDZ는 연계점의 전압이 0.88과 1.1pu 사이에 존재하고 주파수가 59.3과 60.5Hz 사이에 존재하여 0.5초 이내에 벗어나지 않는 영역으로 정의되어 있다.[2]

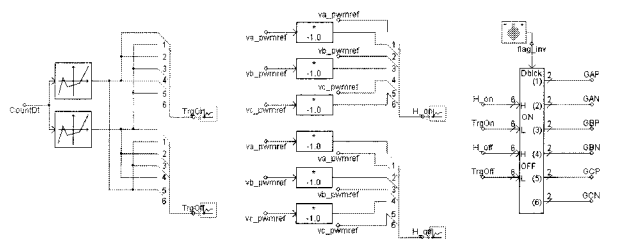
이러한 NDZ 영역 내에서 제안하는 방식이 단독운전을 검출하는데 유효한가를 확인하기 위해 시뮬레이션을 실시하였다.



(a) 전력회로도



(b) 디지털제어기



(c) PWM발생기

그림 5 시뮬레이션 구성도

Fig. 5 Simulation model with PSCAD/EMTDC

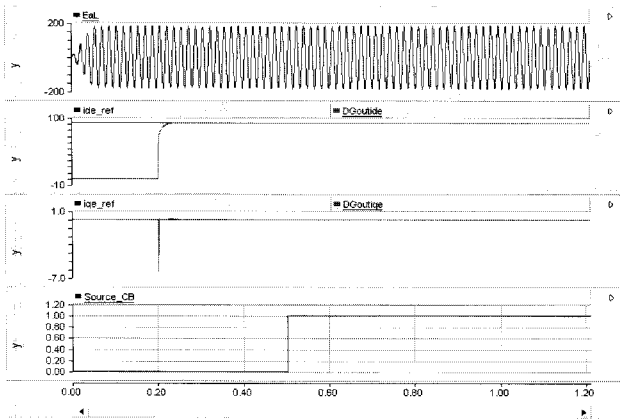
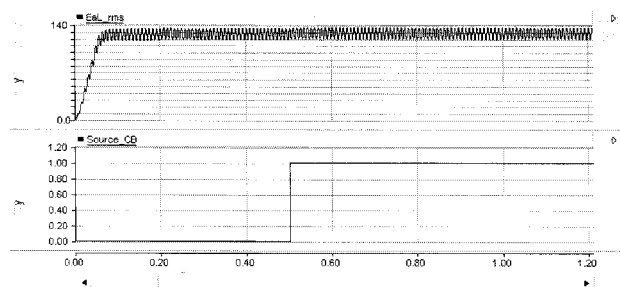
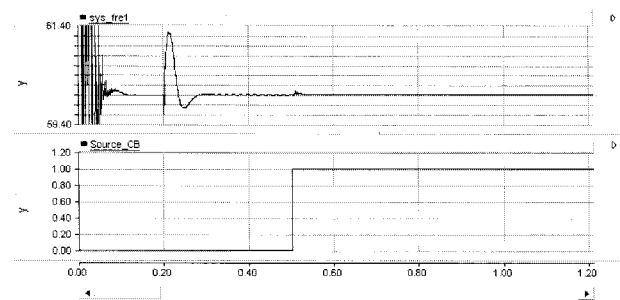


그림 6 단독운전 발생 시 전압과 전류제어
Fig. 6 Voltage and current control in islanding situation



(a) 상전압 실효치와 단독운전 발생 CB

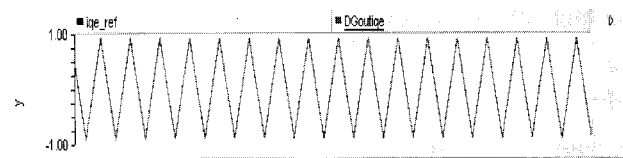


(a) 주파수와 단독운전 발생 CB

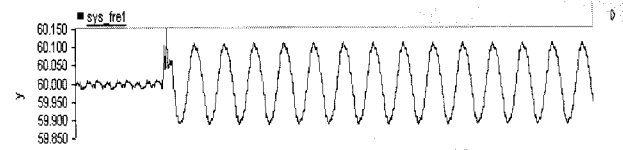
그림 7 NDZ 동작확인 결과
Fig. 7 Operational verification NDZ condition

그림 6은 계통연계 분산전원의 기동에서부터 단독운전 발생까지 각부 파라미터의 파형을 보여주고 있다. 전원 전압은 0.05초에 정격전압까지 상승하며 계통과 연계된 분산전원의 전류제어는 0.2초에 시작된다. 전력계통을 연계한 차단기를 오픈함으로써 0.5초에서 단독운전을 발생시켰다.

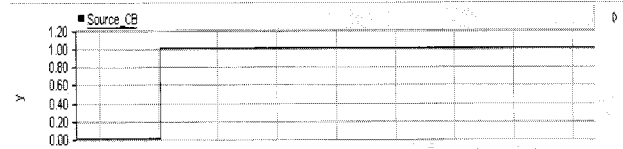
그림 7a는 계통연계점 전압의 실효치를 나타내고 있다. 여기서 실효치의 눈금은 10V/div을 나타낸다. 그림에 보이는 바와 같이 단독운전 발생한 후 0.5초가 지난 1.0초에서도 전압의 크기는 $0.88 < V_{PCC} < 1.10$ p.u.의 범위를 벗어나지 않는 것을 확인할 수 있다. 그림 7b는 계통연계점 전압의 주파수변동을 나타내고 있다. 여기서 주파수의 눈금은 0.2Hz/div을 나타낸다. 시뮬레이션이 시작되고 주파수가 안정화된 후 단독운전을 발생시킨 0.5초부터 1.0초까지 $59.3 < f_{PCC} < 60.5$ Hz의 범위를 벗어나지 않는 것을 확인할 수 있다.



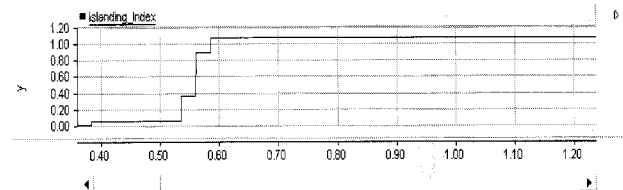
(a) 주입 무효전류 기준값과 무효전류



(b) 연계점 전압의 주파수



(c) 단독운전 발생을 위한 전원 차단용 CB



(d) 단독운전 판별 인덱스

그림 8 단독운전 발생 시 판별인덱스
Fig. 8 Cross-correlation index for islanding detection

그림 8은 제안하는 cross-correlation 방식의 분산전원 단독운전 판별방식을 적용하였을 때 각부 파형이다. 삼각파 무효전류의 최대값은 정격의 1%로써 20kVA를 정격으로 하였을 때 최대값은 동기좌표계상에서 0.909A이다. 그림 8a는 주입하는 무효전류값을 나타낸 것이며, 그림 8b는 무효전류 변동에 따른 주파수 변동을 보이고 있다. 단독운전이 발생하기 전에는 미소의 변화만 보이던 주파수가 0.1Hz의 크기만큼 변동하는 것을 나타내고 있다. 그리고 그림 8d는 무효전류 주입 기준값과 주파수 변동 신호와의 cross-correlation 후 최대값은 취하여 이상적인 값으로 정규화한 단독운전 판별 인덱스를 나타낸 것이다. 이 값은 그 크기가 p.u.로 나타났으며 단독운전 발생 후 50ms 이내에 0.9pu, 그 이후에는 1.04pu를 나타낸다. 따라서 제안하는 방법은 NDZ 영역 내에서도 단독운전을 우수한 속도로 검출함을 알 수 있다.

6. 축소 모형실험

제안하는 분산전원 단독운전 판별기법의 실용성을 검증하기 위해 하드웨어 프로토타입을 제작하고 실험을 실시하였다. 시뮬레이션에서는 전원 임피던스, 부하 파라미터, 그리고 계통연계용 리액턴스 등을 이상적인 값을 사용하므로 제안하는 단독운전 판별기법을 실제 적용 시 정확하지 않은 파라미터 등으로 전류제어의 리플 증가 및 인덱스 연산의 오차 등이 발생할 가능성이 있다. 이러한 오차들이 항상 존재하는 실제 환경에서도 제안하는 단독운전 판별기법이 유효한지 검증하기 위해 다음과 같은 실험을 실시하였다.

표 2 실험 회로정수

Table 2 Circuit parameters for experiment

정격전압	220V
정격주파수	60Hz
전원측 변압기용량	50kVA
인버터 연계방식 분산전원	
정격전압	220V
시스템 출력전력	2.9kW
스위칭 주파수	10kHz
DC-link 전압	450V
연계용 리액터	2.5mH
구내부하	
정격용량	2.9kW

표 2는 실험에 사용된 실험환경 파라미터이다. 전원전압은 220V, 전원 측 변압기 용량은 50kVA이다. 그림 9는 단독운전 판별기법의 실험수행을 위한 하드웨어의 배치 및 구성을 나타낸 것이다. 전원은 380/220V 변환비의 50kVA 변압기를 통해 실험실로 전원이 공급되고 단독운전을 발생시키기 위한 배전용 차단기를 사용하였다. 배전용 차단기 후단에는 분산전원 계통연계 인버터와 부하 그리고 분산전원을 모의하기 위한 직류전원장치로 구성되어있다. 분산전원 계통연계 시스템의 정격전압은 220V이고 직류전압은 직류전원장치에 의해 450V를 유지하도록 설정하였으며 계통연계 인버터의 연계용 리액터 값은 2.5mH로 구성되어있다.

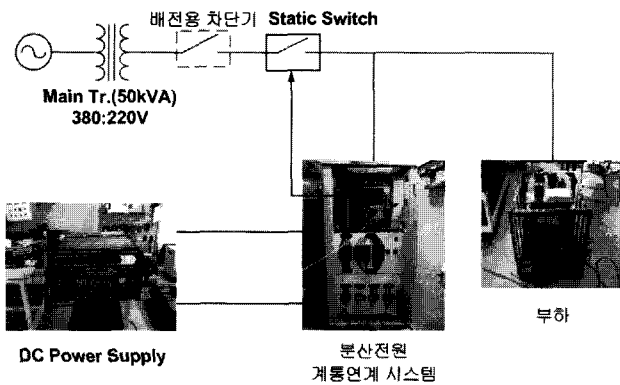


그림 9 단독운전판별 실험 구성도
Fig. 9 Configuration of experimental set-up

계통연계 인버터는 TMS320vc33 DSP로 구성된 제어기를 가지고 있는데, 이 제어기 내에 단독운전을 판별하는 알고리즘을 C-언어로 프로그램하여 외부에서 에뮬레이터를 통해 메모리에 다운로드하여 동작하게 되어있다.

시뮬레이션에서 모의한 것과 마찬가지로 분산전원 계통연계 인버터의 출력전력과 연계되어있는 부하와의 전력 수급이 비슷하여 전압과 주파수가 IEEE Std 929-2000에 정의되어 있는 것과 같이 전압은 $0.88 < V_{PCC} < 1.10$ per-unit, 주파수는 $59.3 < f_{PCC} < 60.5$ Hz의 범위에 만족하도록 전력조건을 구성하여 실험을 실시하였다.

계통연계시스템의 출력 d축 유효전력 기준값은 13.2A로 설정하여 단독운전시 연계점 전압조건을 만족하였으며 계통연계용 리액터와 변압기의 유도성 성분에 의해 발생하는 무효전력 성분으로 인한 불균형성분은 q축 무효전류 기준값을 0.65를 설정하여 주파수 조건에 만족하도록 하였다.

그림 10은 NDZ 조건을 만족시키는 계통구성을 한 후의 결과파형이다. 그림 10a는 계통 연계점 전압으로 단독운전 발생 후의 전압 변동이 거의 없이 공칭전압을 유지한다. 그림 10b와 10c는 각각 유효전류와 무효전류 변화를 나타낸 것이다. 그리고 그림 10d는 주파수변동을 나타낸 것인데, 주파수는 0.25Hz 이내의 변동을 유지하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 IEEE Std 929-2000의 NDZ 정의에 만족하도록 하드웨어 정수를 설정하였다.

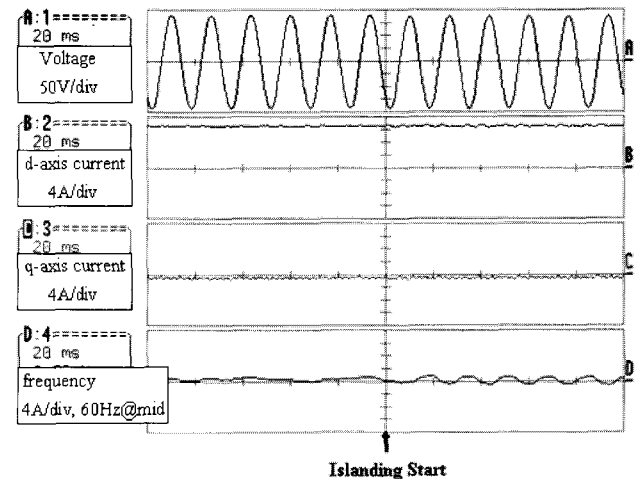


그림 10 단독운전 발생 시 NDZ 조건 확인
Fig. 10 Verification of NDZ condition

이와 같은 NDZ 조건에서 연계계통 유효전류의 1%에 해당하는 0.132의 최대값을 갖는 삼각파형태의 무효전류를 주입하고 이때 발생하는 주파수변동을 감지하여 두 신호에 대해 cross-correlation을 실시하여 단독운전 인덱스를 연산하였다.

그림 11은 주입하는 무효전류의 기준값과 실측값 그리고 단독운전 전후의 주파수변화를 나타낸다. 여기서 주입하는 무효전류의 기준값은 삼각파형태이나 실측값은 기준값을 추종하는 패턴은 보이지만 리플들에 섞여서 명확히 보이지 않는다. 그렇지만 이 리플들은 삼각파 주파수의 정수배에 해당하므로 cross-correlation 연산시 연산값에 미치는 영향은 무시할 수 있다. 그리고 주파수 파형은 단독운전 발생 전과 달리 주입하는 무효전류의 주파수와 동일한 주파수로 리플이 더 커지는 것을 확인할 수 있다.

그림 12는 단독운전 발생 시 무효전류 주입에 따른 주파수변동과 두 신호를 cross-correlation 한 결과를 나타내고 있다. 단독운전이 발생하기 전에는 미소의 변화만 보이던 주파수가 앞에서 검증한 형태와 0.1Hz의 크기만큼 변동하는 것을 나타내고 있다. 그림 12d는 무효전류 기준값과 주파수 변동 두 신호 사이의 cross-correlation한 후 최대값은 취하여 이상적인 값으로 정규화한 단독운전 판별 인덱스를 보이고 있다. 이 값은 p.u.의 단위이며 단독운전 발생 후 50ms

이내에 0.9p.u., 그 이후에는 1.04 p.u.를 나타낸다. 따라서 제안하는 단독운전 판별기법은 NDZ 에서도 단독운전 상태를 우수하게 검출함을 알 수 있다.

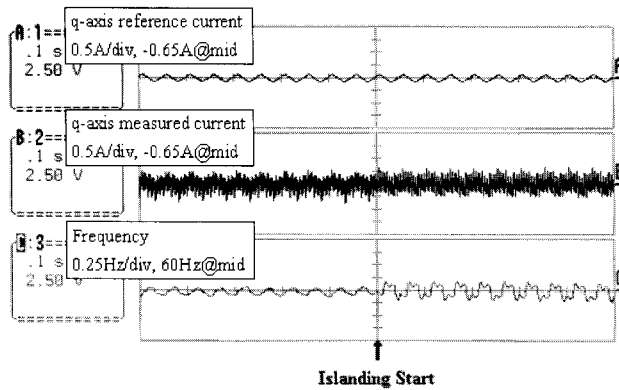


그림 11 단독운전 발생 전·후의 주파수 변동
 Fig. 11 Frequency deviation before and after islanding

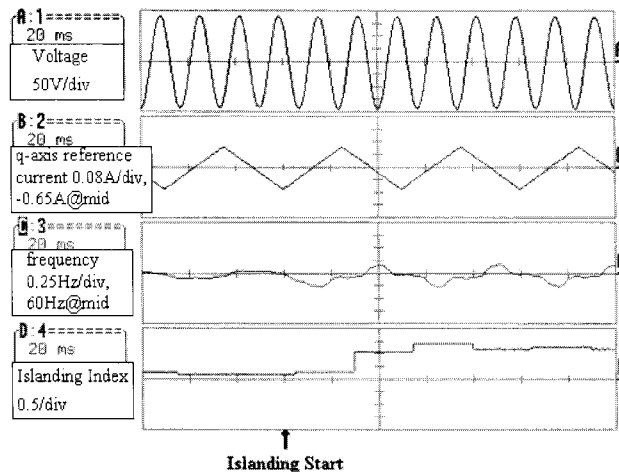


그림 12 단독운전 발생 시 인덱스 연산결과
 Fig. 12 Islanding index through cross-correlation

7. 결 론

본 논문에서는 인버터방식 분산전원 계통연계 시스템의 단독운전을 판별하는 새로운 능동기법을 제안하였다. 제안하는 방법은 적은 양의 연속적인 무효전력을 주입하므로 전력품질 저하를 최소화하고 동시에 검출성능이 우수하다. 개발한 판별기법의 타당성을 검증하기 위해 EMTDC 소프트웨어를 이용하여 전체시스템의 시뮬레이션모델을 개발하여 시뮬레이션을 실시하였다. 제안하는 단독운전 판별기법은 전력품질에 영향을 주지 않는 적은 양의 무효전력주입으로 단독운전 상태를 판별할 수 있는 장점을 가지고, DSP 제어기와 인버터로 연계된 분산전원에 효율적인 적용이 가능하다.

그러나 제안하는 알고리즘은 단독운전이 발생하기 전에 전원입피턴스의 변동에 의해 발생하는 주파수 변동에 오동작을 할 가능성이 있다. 따라서 실제 적용 시에는 연계하는 전력계통의 주파수과도특성을 분석할 필요가 있다. 또한 2기 이상의 분산전원이 하나의 전력계통에 연계된 경우 각

기기의 무효전력주입에 따라 검출특성이 상쇄될 소지가 있다. 이를 위해서는 같은 계통에 연계된 분산전원과의 무효전류 주입 주파수 규격 설정에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력 연구원(과제 번호 R-2005-B-136) 주관으로 수행된 과제입니다.

참 고 문 헌

- [1] M. E. Ropp, M. Begovic, A. Rohatgi, "Determining the Relative Effectiveness of Islanding Prevention Techniques Using Phase Criteria and Non-detection Zones", IEEE Transactions on Energy Conversion Vol. 15 no. 3, September 2000, p. 290-296.
- [2] IEEE Std. 929-2000, IEEE Recommended practice for Utility Interface of Photovoltaic(PV) Systems, Sponsored by IEEE Standards Coordinating Committee 32 on Photovoltaics, IEEE Std. 929-2000, Published by the IEEE, New York, NY, April 2000.
- [3] S. J. Ranade, N. R. Prasad, S. Omick, L. F. Kazda, "A Study of Islanding in Utility-Connected Residential Photovoltaic Systems, Part I: Models and Analytical Methods", IEEE Transactions on Energy Conversion, 4(3), pp. 436-445, September 1989.
- [4] D. Handran, R. Bass, F. Lambert, J. Kennedy, "Simulation of Distribution Feeders and Charger Installation for the Georgia Tech Olympic Electric Tram System", Proceedings of the 5th IEEE Workshop on Computers in Power Electronics, pp. 168-175, August 11-14 1996.
- [5] Thomas R. Sims, Robert A. Jones, and Ali F. Imece, "Investigation of Potential Islanding Problems of a Line-Commutated Static Power Converter in Photovoltaic Systems." IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 5, No. 3, September 1990.
- [6] K. Takigawa and H. Kobayashi, "A Development of Compact and Reliable Protective Control Unit for Grid Connected Small Residential PV systems." IEEE, No. CH3365-4/94/0000-1081, 1994.
- [7] M. A. Redfern, J. I. barrett, and O. Usta, "A New Microprocessor Based Islanding Protection Algorithm for Dispersed Storage and Generation Units." IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, July 1995.
- [8] P. O'Kane and B. Fox, "Loss of mains Detection for Embedded Generation by System Impedance Monitoring." IEE Conference Publication on Developments in Power System Protection, 25-27th March 1997.

[9] Cooper C B, "Standby Generation Problems and Prospective Gains from Parallel Running." Power System Protection '89, Singapore 1989.

[10] Ropp, ME., Begovic, M., and Rogatgi, A. : "Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention", IEEE Trans. Energy Convers., 1999, 14, (3), pp. 810-816

[11] Hung, G.K., Chang, C.C., and Chem, C.L. : "Automatic phase-shift method for islanding detection of grid-connected photovoltaic inverters", IEEE Trans, Energy Convers., 2003, 18, (1), pp. 169-173

[12] B. Han, B. Bae, "Novel Phase-Locked Loop Using Adaptive Linear Combiner" IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 21, No. 1, Jan, 2006.

저 자 소 개



배 병 열 (裴炳烈)

1975년 11월 17일생.
 2001년 명지대 전기공학과 졸업.
 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박).
 현재 명지대학교 분산전원복합응용연구센터 전임연구원.



이 두 영 (李斗榮)

1980년 12월 23일생.
 2006년 명지대 전기공학과 졸업.
 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



한 병 문 (韓炳文)

1953년 7월 5일생.
 1976년 서울대 전기공학과 졸업.
 1988년 미 아리조나주립대 대학원 전기공학과 졸업(석사).
 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박)
 미 Westinghouse중앙연구소 전임연구원.
 현재 명지대 전기공학과 교수.



고 종 선 (高宗宣)

1960년 3월 20일생.
 1984년 서울대 전기공학과 졸업.
 1989년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사).
 1994년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(박사).
 1996년~2003년 7월 원광대 전기전자 정보공학부 조교수.
 2003년 8월~현재 단국대학교 전기공학과 부교수.



최 남 섭 (崔南燮)

1963년 3월 5일생.
 1987년 고려대 전기공학과 졸업.
 1989년 KAIST 전기 및 전기공학과 졸업(석사).
 1994년 KIASI 전기 및 전자공학과 졸업(공학박).
 1995년~현재 전남대학교 전기·전자통신·컴퓨터공학부 교수