

계통연계 분산전원의 새로운 단독운전 판별기법

이지현, 전지혜, 주영아, 한병문  
 명지대학교 전기공학과

Novel Islanding Detection Method for Distributed Generation Interconnected with Utility Grid

Ji-Hern Lee , Ji-Hye Jeon, Young-Ah Ju, Byung-Moon Han  
 Depart. of Electrical Engineering, Myong-Ji University

**Abstract** - 현재 개발된 분산전원 단독운전 판별기법중 하나인 무효전력주입방식은 판별성능은 우수하나 정격의 2.5~5%의 무효전력을 주입하므로 계통전압에 고조파를 발생하여 전력품질을 저하하는 단점을 갖는다. 본 논문에서는 적은 양의 연속적인 무효전력을 주입하므로 전력품질 저하를 최소화하고 동시에 검출성능이 우수한 인버터연계방식 분산전원의 단독운전 판별기법을 개발하였다. 개발한 판별기법의 타당성을 검증하기위해 EMTDC 소프트웨어를 이용하여 전체시스템의 시뮬레이션모형을 개발하여 시뮬레이션을 실시하였다.

해 주파수가 상승 또는 감소하게 된다.

표 1. 분산전원과 부하의 유무효전력 관계

$P_{DG} > P_{Load}$	$Q_{DG} > Q_{Load}$
	$Q_{DG} < Q_{Load}$
	$Q_{DG} = Q_{Load}$
$P_{DG} < P_{Load}$	$Q_{DG} > Q_{Load}$
	$Q_{DG} < Q_{Load}$
	$Q_{DG} = Q_{Load}$
$P_{DG} = P_{Load}$	$Q_{DG} > Q_{Load}$
	$Q_{DG} < Q_{Load}$
	$Q_{DG} = Q_{Load}$

1. 서 론

분산전원이 연계된 지점의 계통정보만을 이용하여 단독운전(Islanding) 여부를 판단하는 수동기법은 분산전원의 출력이 부하의 크기와 유사한 경우 판별이 어렵다. 그 이유는 수동기법은 계통조건에 대한 의존도가 크기 때문이다[1], [2]. 따라서 최근에는 수동기법의 약점을 보완할 목적으로 능동기법에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다.

능동기법 중 대표적인 것이 주파수바이어스기법인데, 이 방식은 전압, 전류, 무효전력 등을 불연속적으로 주입하여 주파수 편이를 측정하여 판별하는 방식이다. 특히 무효전력을 주입하는 방식은 계통에 연계된 태양광발전 등 다양하게 적용되고 있으며 그 성능 또한 우수한 것으로 알려져 있다. 그런데 이 방식의 문제점은 계통전압에 고조파를 발생하고 그로 인하여 전력품질이 저하되면서 전력설비의 수명단축을 유발하는 것이다[3], [4]. 이러한 문제점은 주기적으로 정격유효전류의 %에 해당하는 전류를 주입하기 때문에 발생된다.

본 논문은 정격유효전류의 1%정도 되는 연속적인 삼각파 형태의 무효전류를 주입하여 단독운전을 판별하는 기법을 제안하였다. 이 방식은 기존의 불연속적인 제어 파라미터에 의한 전압 고조파 발생 및 전력품질 저하 요인을 차단함과 동시에 기존의 방식과 같이 우수한 단독운전 검출특성을 보인다.

2. 본 론

2.1 분산전원 연계점의 주파수 특성

그림 1은 인버터로 연계된 분산전원시스템의 Islanding 시 등가회로를 나타낸 것이다. 이 그림에서 분산전원을 전류원으로 나타냈으므로 연계점의 전압은 부하의 임피던스에 의해 결정됨을 알 수 있다. 또한 피상전력의 대소 차에 의해 연계점에서의 전압크기는 증가 또는 감소하게 된다.

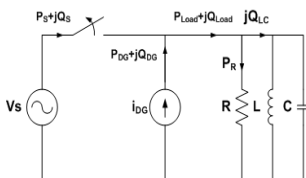


그림 1. Islanding 발생 시 등가회로

전원전력과 부하전력의 상호관계를 나타내면 표 1과 같은 9개의 형태로 구분 가능하다. 이러한 형태를 주파수 변화 관점에서 보게 되면 Islanding 발생 시 분산전원 연계 시스템의 역률과 부하 역률 각 차에 의해 주파수 변화가 발생하게 된다. 분산전원 계통연계 시스템은 연계점의 전압을 기반으로 주파수 및 위상을 검출하여 제어를 수행하게 되는데 Islanding 발생 시 연계 시스템의 출력 유무효전력과 부하의 유무효전력의 역률각의 차에 의

한 단독운전 시 전원역률각과 부하역률각의 차이는 주파수변화를 야기하므로 이 특성을 이용하여 삼각파 무효전력을 일정한 주기로 계통에 주입하면 주파수는 유사한 패턴을 형성한다. 기존의 무효전력주입방식의 단독운전 판별기법은 시스템 정격의 2.5%~5%정도 사각파 무효전력을 주입하므로 스텝변화 시 전류에 불연속 구간 발생과 불연속 전류가 전원 임피던스와 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 출력 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 무효전력이다.

시스템을 정격으로 운전하고 무효전력을 1% 주입할 때 역률은 최소 0.99995가 된다. 또한 무효전력은 연속적인 값으로 주입함으로써 연계점의 전압품질저하에는 영향이 거의 없다,

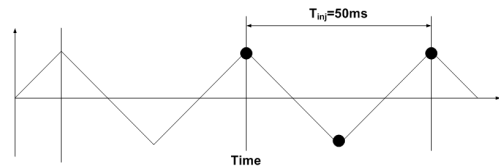


그림 2. 무효전력 주입 패턴

본 논문에서는 그림 2와 같이 일정한 주기성을 갖는 삼각파 형태의 무효전력을 주입하여 단독운전 발생 시 분산전원이 연계된 계통전압의 주파수가 무효전력 주입패턴과 유사한 모양으로 흔들리는 현상을 이용한다. 이를 위해 주입무효전력신호와 검출된 주파수동요신호를 cross-correlation을 수행하여 같은 패턴이 나타날 때 cross-correlation 시퀀스의 출력을 확인하여 분산전원의 단독운전 여부를 판별한다.

분산전원 계통연계 시스템이 정격으로 운전하고 있다고 가정하고 그림 2와 같은 정격 1%로 제한된 삼각파형태의 무효전력을 주입한다. 계통연계 시스템의 제어주기를 10kHz라고 가정하면 식(2)에 의해 무효전력 주입에 따른 최대 주파수 변동량의 산출

이 가능하다.

$$\Delta f_{inj} = \sum_{n=1}^N \tan^{-1}(Q_{inj}(n)/P_{DG}) \quad (2)$$

여기서  $Q_{inj}(n)$ 는 무효전력 주입 함수,  $P_{DG}$ 는 분산전원 연계시스템의 정격 유효전력,  $\Delta f_{inj}$ 는 무효전력 주입에 따른 주파수 최대 변동량이다.

무효전력 주입 삼각파의 주파수는 20Hz이므로  $Q_{inj}(n)$ 가 0에서 최대값까지의 시간은 12.5ms이다. 그러므로 제어주기 100us를 고려할 때  $N$ 은 125가 되며 이때  $\Delta f_{inj}$ 는 0.1Hz가 된다.

### 2.2 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  $C_{x_1x_2}(k)$ 는 특정 지연된 값에서 신호들이 유사할 때 최대값을 갖게 된다.

$$C_{x_1x_2}(k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_1(n)x_2(n+k), (k=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (3)$$

마이크로 프로세서에 적용 가능하도록 하기 위해  $Q_{inj}(n)$ 를  $x_1(n)$ 로, 분산전원 계통연계점 주파수인  $f_{pcc}(n)$ 를  $x_2(n+k)$ 로 설정하면 식 (4)와 같이 표현된다.

$$C_{seq}(k) = \frac{1}{K_{nor}} \frac{1}{100} \sum_{n=0}^{100} Q_{inj}(n)f_{pcc}(n+k), (k=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm 25) \quad (4)$$

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

DSP에서의 연산량을 줄이기 위해  $Q_{inj}(n)$ 와  $f_{pcc}(n)$ 를 2kHz로 샘플링하여 한주기에 한 번씩 식(4)를 수행하였다. 따라서 cross-correlation 최대값은 무효전류 주입 주기의 반에 해당하는 시간 안에 산출된다.

그림 3에서  $iqe\_inj$ 는 분산전원 계통연계 시스템이 주입하는 무효전력이고  $\Delta f\_pcc$ 는 단독운전시 계통연계점의 주파수 변화분이다. 위의 두 신호를 이용하여 cross-correlation 인덱스를 연산하여 정규화를 실시하여 식 (4)과 같이 cross-correlation 시퀀스를 계산하고 그중 최대값을 단독운전 판별 인덱스,  $I_{INDEX}$ 로 이용한다.

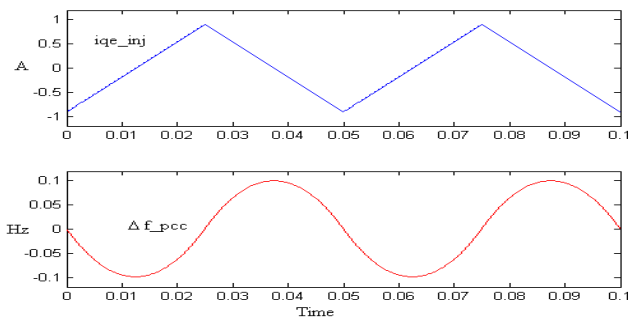


그림 3. 무효전류 주입에 따른 주파수 변화분

### 2.3 시뮬레이션에 의한 검증

제안하는 분산전원 단독운전 판별기법의 타당성을 검증하기 위해 PSCAD/EMTDC 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다.

그림 4는 시뮬레이션 회로도이다. 전원은 3상 220V이고 전원 임피던스는 0.77mH로 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.

IEEE Std 929-2000에 의하면 NDZ(None Detection Zone)은 연결점의 전압이 0.88과 1.1pu 사이에 그리고 주파수가 59.3과 60.5Hz 사이에 존재하고 0.5초 이내에 벗어나지 않는 것으로 정의되어 있다. 이러한 조건에서 제안하는 방식이 단독운전 검출에 유효한가를 확인하기 위해 시뮬레이션을 실시하였다.

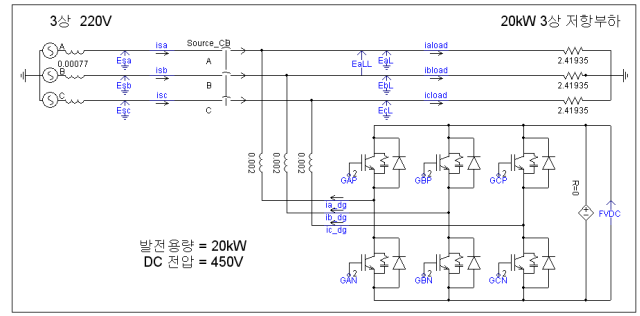


그림 4. 시뮬레이션 회로도

그림 5는 제안하는 cross-correlation 방식의 분산전원 단독운전 판별방식을 적용하였을 때 각부 파형이다. 삼각파 무효전류의 최대값은 정격의 1%로써 최대값은 동기과표계상에서 0.909A이다. 그림 5는 단독운전 발생 시 무효전류 주입에 따른 주파수 변화를 나타내고 있다. 그림 5의 첫 번째 파형은 무효 전류값이며 두 번째 파형은 무효전류 변동에 따른 주파수 변동을 보이고 있다. 단독운전이 발생하기 이전에는 미소의 변화만 보이던 주파수가 0.1Hz의 크기만큼 변동하는 것을 나타내고 있다. 그리고 두 번째 파형은 무효전류 주입 기준값과 주파수 변동 신호와의 cross-correlation한 후 최대값을 취하여 이상적인 값으로 정규화한 단독운전 판별 인덱스인  $I_{INDEX}$ 를 보이고 있다. 이 값은 pu.의 단위를 갖고 있으며 단독운전 발생 후 50ms 이내에 0.9pu, 그 이후에는 1.04pu를 나타낸다. NDZ에서 단독운전을 우수한 속도로 검출함을 알 수 있다.

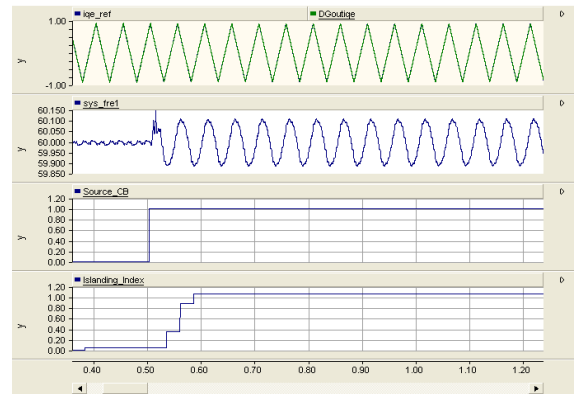


그림 5. 단독운전 발생시 단독운전 판별 인덱스

## 3. 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 시뮬레이션모형을 개발하여 시뮬레이션을 실시하였다.

### [참고 문헌]

- [1] Woyte, A., Belmans, R., and Nijs, L., "Testing the islanding protection function of photovoltaic inverter", IEEE Trans. Energy Convers., 2003, 18, (1), 99-157-162
- [2] Agematsu, S., and Imai, S, "Islanding detection system with active and reactive power-balancing control for the Tokyo metropolitan power system and actual operational experiences", Proc. IEE Conf. on Developments in Power Protection, 2001, IEE Conf. Publ., Vol. 479, pp. 351-354
- [3] 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
- [4] 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