

## 분산형전원이 도입된 배전계통에 대한 ISLANDING DETECTION METHOD

황진수 김재인  
충북대학교 전기전자공학부

### Islanding Detection Method of Embedded Generator connected to Power Distribution System

J.S. Hwang J.E. Kim  
Chungbuk National University

**Abstract** - The installation of small sized Embedded Generator(EG) in parallel with the utility supply was required several technical complications for protection of the system. One of the most important protection is to provide protection against islanding and out of synchronism reclosing with the utility source. This paper explains several current methods of detecting 'Loss Of Mains'(LOM). But they have not proved completely dependable, in particular when the islanded load's capacity matches that of the EG. A new loss of mains protection algorithm is presented in this paper which based on measurement of the reactive power and node voltage for detecting the islanding condition even though the EG operate in the capacity.

#### 1. 서 론

80년대 초반부터 기존 계통에 소/중용량의 분산형전원(Embedded Generator : EG)을 투입하여 연계운전하는 시스템에 대한 연구가 대두되었다. 그러나 이들이 기존계통에 도입되어 원활한 운전이 이루어지기 위해서는 전력계통에 대한 전반적인 보호협조가 검토되어야 한다[1]. 특히, 보호협조중에서도 선로 차단기의 개방에 의해 나타나는 고립운전현상(Islanding)이 중요한 문제로 지적되어 이를 해결하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.

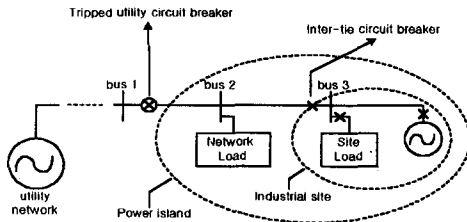


그림 1 분산형전원이 포함된 전력계통도

고립운전현상이란 그림 1과 같은 상황에서 어떠한 왜란에 의하여 버스 1과 버스 2 사이의 차단기가 개방되어 차단기 이하의 계통부하를 분산형전원이 감당하여 운전하고 있는 형태를 말한다. 이와 같은 상황에서 부하용량과 분산형전원의 용량이 어느정도 평형이 유지되지 않으면 계통의 전압이나 주파수가 한계 허용치에서 벗어나게 되어 고조파, flicker, distortion등의 전력품질특성상의 문제가 야기된다. 따라서 고립운전현상은 시스템의 수명을 단축시키고 기기의 오동작 및 손상을 초래한다. 또한, 부하용량과 분산형전원의 용량이 어느정도 평형을 유지할 경우에는 전압과 주파수가 허용치를 벗어나지 않

는 상태에서 운전되지만 버스 1과 버스 2 사이의 차단기가 비동기 재폐로가 되면 과도전류가 발생하여 분산형전원, 전력설비 및 부하기에 손상을 입힌다. 그러므로 분산형전원의 도입시 나타나는 고립운전 방지대책이 시급한 실정이다.

본 논문에서는 2장에서 기존의 고립운전 검출방식으로 소개하고 3장에서 새로 제안된 검출방식을 소개하기로 한다.

#### 2. 기존의 고립운전 방지 방법

가장 기본적인 고립운전 방지 방법은 선로에 있는 모든 차단기의 동작상태를 파악하여 고립운전시 inter-tie 차단기를 개방시키는 것이다. 그러나 현재의 시스템에서 모든 차단기의 동작상태를 파악하는 것은 불가능하지만 SCADA 시스템 및 배전자동화 시스템이 전체계통에 적용된다면 가능할 것이다.

현재까지 고립운전 방지대책으로 제안된 방법으로는 크게 능동적 방법과 수동적 방법이 있는데 이를 간략히 소개하기로 한다.

##### 2.1 능동적 방법

능동적 방법이란 분산형전원의 출력 및 주파수를 주기적으로 변동시켜 연계운전상태 및 고립운전상태를 판단하는 방법으로써 크게 위상이동 방식, 전력변동 방식 그리고 부하변동 방식으로 나누어진다.

##### ■ 위상이동 방식

태양광전원과 같은 역변환장치를 이용하는 분산형전원에서 계통과의 위상동기 회로의 자주주파수를 계통주파수로부터 조금 벗어나도록 바이어스를 주는 방식이다. 만약, 단독운전이 될 경우에는 주파수를 자립적으로 변동시키게 되므로 검출이 가능하다. 단, 주파수의 바이어스를 크게 하면 변환기 출력전압의 위상이 벗어나서 큰 무효전력을 발생시켜 계통의 전압변동을 일으킬 가능성이 있다. 위상이동 방식은 위상동기 회로를 갖고 있는 역변환설비를 이용하는 발전장치에 대한 적용은 가능하지만 회전기에는 이러한 회로가 없기 때문에 이용이 불가능하다.

##### ■ 전력변동 방식

계통의 전압·고주파에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 분산형전원의 출력을 일정시간 간격으로 미소변동을 시켜 단독운전 상태로 되었을 때 출력변동에 의해서 나타나는 전압·주파수의 변동으로부터 단독운전을 검출하는 방식이다[2,3]. 변동시킬 수 있는 전력은 유효전력과 무효전력 모두 가능하지만 특히 무효전력 변동방식은 분산형전원의 유효전력 출력을 변동시킬 필요가 없고 회전기의 경우에는 여자로의 제어로부터 적당하게 변동주기를 짧게 할 수 있으므로 검출시간을 단축시킬 수 있다.

배전선에 대한 영향을 작게 하기 위해서 그림 2과 같

이 상시에는 계통에 영향을 주지 않는 정도의 미소변동을 하게 하고 단독운전 상태로 되는 어떤 변화가 발생시에는 변동을 크게 하여 단독운전을 검출하는 방법이 제시되기도 한다.

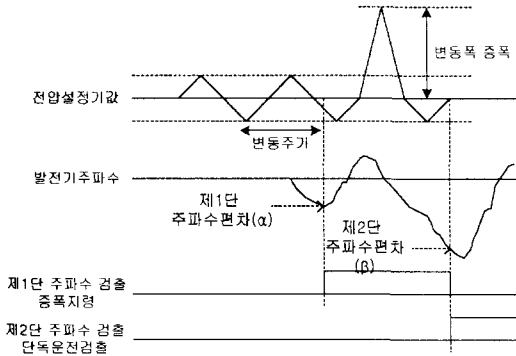


그림 2 무효전력 변동방식의 원리

■ 부하변동 방식

그림 3과 같이 분산형전원과 배전선 사이에 저항을 단시간(1ms 정도)동안 투입하면 이 저항에 흐르는 전류는 계통측과 분산형전원측의 임피던스비로 분할된다. 그러므로 연계운전시와 고립운전시의 분할비가 달라지므로 고립운전을 검출할 수 있다. 이 방법은 분산형전원의 제어기술에 의존하지 않고 독립적으로 설치가 가능하다.

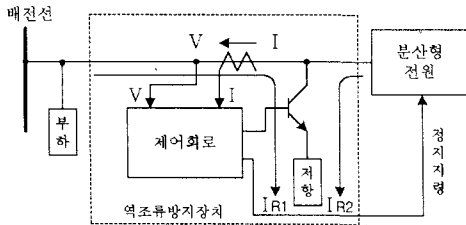


그림 3 부하변동방식의 원리

2.2 수동적 방법

수동적 방법은 고립운전 현상 발생시 부하의 변동에 의한 전압, 주파수 및 전류의 변화를 관찰하여 고립운전을 방지하는 방법이다. 이러한 방법은 크게 주파수 변화를 검출방식과 전압위상 검출방식으로 나뉘어진다.

■ 주파수 변화율 검출방식

전력계통의 주파수는 부하와 발전출력의 변동에 의해서 항상 미소변동하고 있지만 그 변동폭은 작다. 이에 반해 고립운전 모드의 경우 부하와 발전출력 사이에 불평형이 발생하면 주파수 변화율이 커지므로 이를 감지함으로써 단독운전을 검출할 수 있다[4]. 단, 전력계통에서 부하의 변동이 큰 경우에도 주파수 변동률이 커지기 때문에 오동작 하는 일이 발생할 수 있다.

■ 전압위상 검출방식

단독운전시의 주파수 변동에 따라서 배전선 전압위상도 변동하기 때문에, 이 위상변동을 관찰하면 고립운전 상태를 검출할 수 있다[5]. 주파수 변동과 마찬가지로 큰 부하의 변동이 있는 경우에도 전압위상이 변동하므로 오동작할 수 있다.

3. New islanding protection method

본 연구에서는 분산형전원의 여자전류(Ix)를 변화시켜

발전기전압을 미소 조정하는 방법을 사용하였다. 일반적으로 분산형전원은 동기발전기를 사용하기 때문에 분산형전원의 등가모델을 그림2와 같이 나타내었다.(단, 발전기의 저항성분은 무시한다).

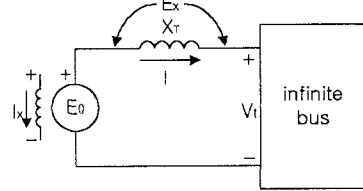


그림 4 동기발전기의 등가모델

그림 4에서 알 수 있듯이 무한모션으로 주입되는 전류는 다음과 같은 관계식에서 얻을 수 있다.

$$I = (E_0 - V_t) / X_r \quad (1)$$

여기서, 여자전류를 증가시키면 발전기전압이 증가하게 되고 또한 전류가 증가하는데, 발전기의 임피던스는 인덕터 성분만 존재하므로 전류(I)는 전압(Vt)보다 90° 뒤지게 되므로 전류의 증가는 무한모션으로 전달되는 무효전력량이 증가를 가져온다.

그러나 고립운전 상황에서는 여자전류의 증가에 의하여 무효전력이 증가하여야 하나 시스템에서 소비하는 무효전력량이 한정적이므로 전체적으로 계통의 전압이 상승하게 된다.

$$P = \frac{|E_0| |V_t|}{X_r} \sin \delta \quad (2)$$

$$Q = \frac{|V_t|}{X_r} (|E_0| \cos \delta - |V_t|) \quad (3)$$

그러므로 분산형전원에서 일정시간 간격으로 일정량의 여자전류를 증가시켜 발전기 전압을 일정시간 간격으로 미소량 상승시킨 후 각 노드의 전압 및 무효전력량을 측정하면 계통의 상태를 파악할 수 있다.

4. simulation

시스템 모델은 분산형전원이 고립운전시에 한계용량 내에서 운전되고 또한 연계운전시에 계통내에서 각각 독립적으로 운전하고 있는 특수환경을 택하였다.

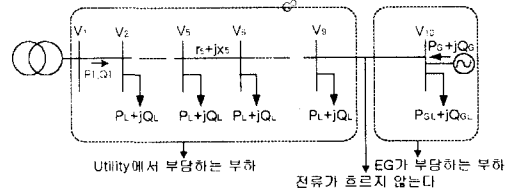


그림 5 simulation을 위한 system model.

4.1 Utility와 분산형전원이 병렬운전 되는 경우 (simulation 1)

그림 5에서 각 node의 유효전력(P), 무효전력(Q), 전압(V)을 branch equation(식 4~6)에 의하여 구해 보면 표1과 같다.

$$P_{i+1} = P_i - r_i \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} - P_{Li+1} + P_{Gi+1} \quad (4)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - x_i \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} - Q_{Li+1} + Q_{Gi+1} \quad (5)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) + (r_i^2 + x_i^2) \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} \quad (6)$$

위의 식에서  $P_0$ 는 분산형전원의 유효전력 출력이며  $Q_0$ 는 분산형전원의 무효전력 출력을 나타낸다.

	node 1	node 2	node 3	node 4	node 5
P	0.48330	0.42227	0.36147	0.30089	0.24049
Q	0.24707	0.21486	0.18316	0.15191	0.12014
V	1.00000	0.99646	0.99336	0.99071	0.98850
	node 6	node 7	node 8	node 9	node 10
P	0.18023	0.12008	0.06002	0.00000	-0.10000
Q	0.09049	0.06017	0.03003	0.00000	-0.05000
V	0.98673	0.98540	0.98452	0.98407	0.98407

표1 simulation 1의 결과

유효전력과 무효전력은 node i에서 node i+1로 전달되는 방향을 양의 값으로 하였다.

#### 4.2 연계운전시 $E_0$ 의 전압을 1% 상승시킨 경우 (simulation 2)

연계운전 상태에서 여자전류를 조정하여 발전기전압을 1% 상승시킨 후 유효전력, 무효전력, 전압을 측정하였다.

	node 1	node 2	node 3	node 4	node 5
P	0.48283	0.42192	0.36124	0.30074	0.24040
Q	0.16203	0.13009	0.09862	0.06756	0.03684
V	1.00000	0.99710	0.99464	0.99263	0.99106
	node 6	node 7	node 8	node 9	node 10
P	0.18019	0.12008	0.06002	0.00000	-0.10000
Q	0.00639	-0.02386	-0.05398	-0.08403	-0.13422
V	0.98994	0.98925	0.98901	0.98921	0.98984

표2 simulation 2의 결과

분산형전원이 달린 node에서의 무효전력은 약 0.08 p.u.가 증가하였고 계통의 전압상승은 최대 0.006 p.u. 정도 나타났다. 이는 여자전류의 증가로 인하여 계통으로 전달되는 무효전력이 증가하고 또한 무효전력의 증가로 인하여 약간의 전압이 상승함을 나타낸다.

#### 4.3 고립운전시 $E_0$ 의 전압을 1% 상승시킨 경우 (simulation 3)

utility와 분산형전원이 연계운전 상태에서 node 9와 node 10 사이에서 사고로 인하여 차단기가 개방되어 분산형전원이 고립운전을 하게 되는 경우에 발전기전압을 1% 상승시킨 후의 시스템의 변화를 표3에 나타내었다.

	P	Q	V
node 10	-0.10000	-0.05000	0.99410

표3 simulation 3의 결과

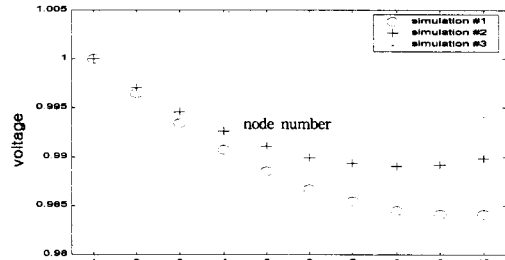
발전기전압의 상승에 따라 무효전력이 증가하나 시스템에서 소비하는 무효전력량은 한정적이므로 무효전력을 감소시키기 위하여 계통의 전압이 약 0.0101 p.u. 상승함을 볼 수 있다.

### 5. 결과 및 고찰

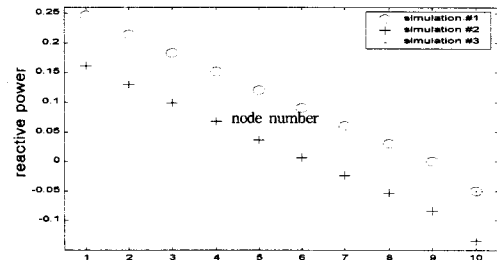
본 실험을 통하여 발전기전압을 1% 상승시킨 경우 연계운전 및 고립운전 상태에서 무효전력 및 계통의 전압이 큰 폭의 변화가 나타나는 것을 볼 수 있었다.

	전압	무효전력
연계운전	미소증가	큰 폭의 증가
고립운전	1%이상 증가	미소증가

표 4 전압을 1% 증가시에 나타나는 V, Q의 변화



그래프 1 각 node에서의 전압 비교



그래프 2 각 node에서의 무효전력 비교

그러므로, 분산형전원의 고립운전 검출을 위해서는 여자전류를 증가시켜 분산형전원의 발전기전압을 1% 증가시킨 후 전압과 무효전력의 변화량을 파악함으로써 검출이 가능하다. 또한, 기존의 방식은 계통에 영향을 미치거나 경우에 따라서 검출할 수 없는 상황이 나타나지만 본 논문에서 제안된 방법은 전압을 미소변화 시키므로 계통에 영향을 미치지 않으며 어떠한 상황에서라도 검출이 가능하다.

#### [참고 문헌]

- [1] ANSI/IEEE Standard 1001-1998, 'IEEE Guide for Interfacing Dispersed Storage and Generation Facilities with Electric Utility Systems,' IEEE, New York, 1989.
- [2] Warin J.W. 'Loss of Mains Protection' ERA Conference Circuit Protection for Industrial and commercial Installations, London, 1990.
- [3] M.A. Redfern 'Protection against Loss of Utility Grid Supply for a Dispersed Storage and Generation Unit,' IEEE Trans PWRD, Vol 8, No. 3, pp. 948-954, July, 1993.
- [4] S.K. Salman, D.J. King 'Monitoring Changes in System Variables Due to Islanding Condition and Those Due to Disturbances at the Utilities' IEEE transmission and distribution Conference, pp. 460-465 vol.2, 1999.
- [5] M.A. Redfern, O. Usta 'Loss of Grid protection for an embedded Generator' IEE, Savoy Place, London, UK, 1993