

분산전원의 고립운전 검출 알고리즘 적용에 관한 연구

정원욱, 정일엽, 문승일
서울대학교 전기컴퓨터공학부

A Study on Application of Islanding Detection Algorithm for Dispersed Generation Unit.

Won-Wook Jung, Il-Yop Chung, Seung-II Moon
School of EECS, Seoul National University

Abstract - The installation of small sized dispersed generation(DG) units operating in parallel with the utility supply presents several technical problems for the protection and control of the system. One of the critical concerns is the occurrence of islanding. Hence, this paper propose the Digital Universal Relay(DUR) including anti-islanding function as DG interconnection interface. The existent islanding detection algorithms are examined. And the most effective and reliable method of those is modified for DUR application. The modified algorithm is evaluated through the modeling of the test system by PSCAD/EMTDC.

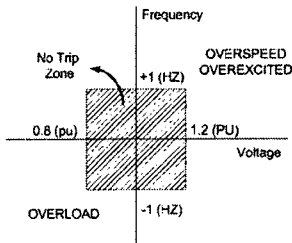
1. DUR에 고립운전 검출 알고리즘 적용

1.1 Digital Universal Relay

기존 계통에 분산전원이 투입됨에 따라 역조류 문제, 보호협보의 재조정, 계통 동기화 문제, 분산전원 보호 등 여러 가지 해결해야 할 문제가 야기된다. [그림.2]에서와 같이 다기능을 가진 DUR을 연계지점(Inter-tie Point)에 설치하고 시스템 파라미터를 모니터링하여 Inter-tie Circuit Breaker(CB)를 스위칭 함으로써 분산전원의 계통연계 문제를 해결할 수 있다. 본 논문에서는 DUR이 가지고 있는 여러 가지 기능 중에 고립운전 방지를 위한 검출 알고리즘의 적용에 대해 설명한다.

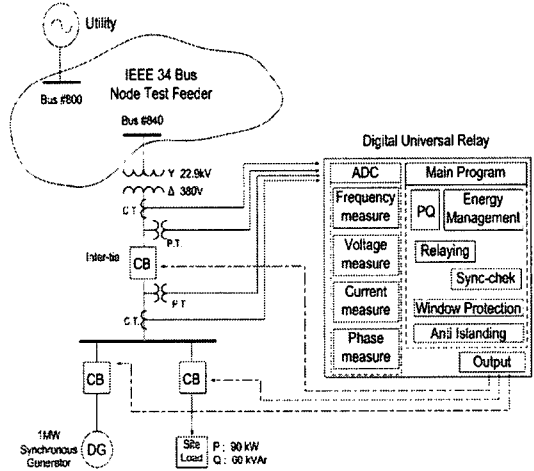
1.2 Window Protection 을 이용한 고립운전검출

가장 일반적인 보호방법은 시스템의 전압과 주파수를 모니터링해서 측정된 값이 허용범위 안에 있는가를 체크하고 허용범위를 초과할 경우 CB를 트립시키는 보호 방법이다. 고립운전 상황 발생시(Islanding) DG가 크게 Loading될 경우 고립지역(Island)에서의 주파수와 전압은 허용 범위를 벗어난다. DUR에서는 PT, CT 를 통해 전압 전류를 측정하여 전압과 주파수를 계산해 내고 이 값으로 고립운전을 검출할 수 있다[1].



[그림.1] Window Protection

그러나 Islanding 발생시 DG출력의 변동이 거의 없는 경우 시스템 파라미터의 변화가 두드러지게 나타나지 않



[그림.2] 모의 대상 계통 및 DUR 개념도.

아서 [그림.1]의 NO Trip Zone 안에서 운전되므로 이런 경우 Window Protection만으로 고립운전을 검출해내지 못한다. 따라서 이러한 상황에서 고립운전을 검출할 수 있는 추가적인 알고리즘이 필요하다.

2. 기존 고립운전 검출 알고리즘의 문제점 및 개선

2.1 기존 고립운전 검출 알고리즘

기존에 개발된 고립운전 검출 알고리즘은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, Active 방법과 Passive 방법이다. Active 방법은 DG의 출력단에서 작은 변동을 인가하여 시스템의 반응을 보고 고립운전을 판단하는 방법이다. 그러나 이 방법은 DG 출력단에서 주기적으로 변동을 일으키기 위해 추가적인 제어회로가 필요하고, DG 출력단에 인위적인 변동을 인가하는 것은 전기품질을 저하시키거나 원하지 않는 효과를 시스템에 줄 수 있다. 또한 다수의 분산전원이 계통에 연계됐을 때 CB를 트립시킬 수 있는 응답을 얻기 힘들다. 따라서 시스템의 파라미터를 모니터링해서 고립운전을 판별하는 Passive 방법이 효과적이다. Passive 방법으로는 주파수의 변동률(Rate of change of frequency), 유효전력의 변동률(Rate of change of power), 위상의 변위 등을 보고 판별하는 방법들이 있다. 그러나 이들 방법도 고립상황 발생 시 Power mismatch가 작은 경우 검출 능력의 한계를 보인다. 가장 신뢰성 있는 검출 알고리즘은 최근에 개발된 고립운전 검출 인덱스인 $\partial f/\partial P_L$ 을 이용한 고립운전 판별방법이다[2]. 그러나 이 방법을 DUR에 그대로 적용하기에는 몇 가지 보완해야할 점이 있다. 본 논문에서는 기존 알고리즘이 갖고 있는 단점을 보완하여 개선된 고립운전 검출 인덱스를 제안하고 DUR에 적용하였다.

2.2 기존에 개발된 고립운전 검출 Index

고립운전 검출 인덱스인 $\partial f/\partial P_L$ 은 부하의 변동에 따른 주파수의 변동률을 보고 고립운전을 판별하는 인덱스이다. 우선 개발된 인덱스의 특징을 알아보기 위해 다음과 같이 정의한다[2].

$$K_A = \frac{\partial f_A}{\partial P_A}, K_B = \frac{\partial f_B}{\partial P_B} \quad (1)$$

계통에 연계되어 운전되다가 어느 한부분의 CB 트립 시 Utility 측을 System A, 분산전원 측을 System B로 정의한다. 각각의 System에서 주파수에 대한 Power mismatch의 변화율은 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{\partial P_B}{\partial f_B} = \frac{\partial P_I}{\partial f_B} - \frac{\partial P_L}{\partial f_B}, \quad \frac{\partial P_A}{\partial f_A} = -\frac{\partial P_I}{\partial f_A} \quad (2)$$

∂P_A : 분산전원 측의 Power mismatch

∂P_B : Utility 측의 Power mismatch

∂P_L : 부하의 변동량

∂P_I : Power transfer from system A to system B

계통 연계 운전 시, $\partial f_A = \partial f_B$ 이므로

$$\frac{\partial P_B}{\partial f_B} = -\left(\frac{\partial P_A}{\partial f_A} + \frac{\partial P_L}{\partial f_B}\right) \quad (3)$$

따라서 부하변동에 대한 주파수의 변동은 다음과 같다.

$$\frac{\partial f_B}{\partial P_L} = -\frac{K_A K_B}{K_A + K_B} \quad (4)$$

고립운전 시 $\partial P_B = \partial P_L$ 이므로 (1)로부터 다음과 같다.

$$\frac{\partial f_B}{\partial P_L} = K_B \quad (5)$$

결국, (3)과 (5)를 비교해 보면 인덱스 $\partial f/\partial P_L$ 은 계통과 연계운전 시 보다 고립운전 시 큰 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 또한 Power mismatch가 작은 경우에도 $\partial f/\partial P_L$ 은 인지할 수 있는 값을 보여준다.

그러나 위의 인덱스를 DUR에 그대로 적용하기에는 다음과 같은 단점이 있다. 첫째, (2)번식에서 System B의 Power mismatch를 계산할 때 분산전원의 출력 변동량 (∂P_{DG})을 고려하지 않았다. 빠른 동작 특성을 갖는 분산전원의 경우 부하변동(∂P_L)에 대해 빠르게 출력(∂P_{DG})을 낸다. 따라서 고립상황 발생 시 분산전원의 출력 변동량도 함께 고려해야 한다.

둘째, 인덱스 $\partial f/\partial P_L$ 에서 계통의 주파수는 측정할 수 있지만 부하량의 변동을 측정하기는 어렵다. 모의계통에서는 이미 알고 있는 값이지만 실 계통에서 전체 부하량의 변동을 실시간으로 측정해내는 것은 불가능하다.

2.3 개선된 고립운전 검출 Index

앞에서 언급한 인덱스 파라미터를 다음과 같이 새롭게 정의한다.

∂P_{dGL} : Islanding 발생시 DG에 걸리는 부하의 변화

∂P_{DG} : Islanding 발생시 DG 출력의 변화

∂P_{Island} : Power mismatch in Island area.

Islanding 발생시 Power mismatch를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\partial P_{Island} = \partial P_{dGL} - \partial P_{DG} \quad (6)$$

Islanding 발생하는 순간, 즉 계통의 CB 트립 시 DG에 걸리는 부하의 변동량이 상대적으로 적을 때 DG의 출력이 부하의 변동을 커버하는 경우 다음과 같이 정리될 수 있다.

즉, $\partial P_{Island} \approx 0$ 이면 (6)식에서 다음의 결과를 얻는다.

$$\partial P_{dGL} \approx \partial P_{DG} \quad (7)$$

따라서 기존의 고립운전 검출 인덱스는 다음과 같이 수정될 수 있다.

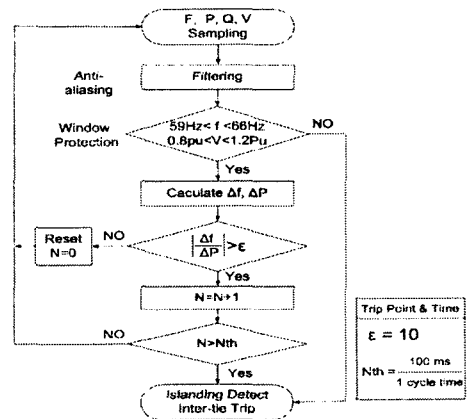
$$\frac{\partial f_B}{\partial P_L} \rightarrow \frac{\partial f_{Island}}{\partial P_{dGL}} \approx \frac{\partial f_{Island}}{\partial P_{DG}} \quad (8)$$

[그림. 2]에서와 같이 DUR은 Inter-tie에 설치되어 파라미터를 모니터링할 것이다. Islanding 발생하는 순간에 Site Load의 변동량이 작다고 가정하면 (8)식은 다음과 같이 수정될 수 있다.

$$\frac{\partial f_{Island}}{\partial P_{DG}} \approx \frac{\partial f_{DUR}}{\partial P_{DUR}} \quad (9)$$

개선된 인덱스를 DUR에 탑재하여 Power mismatch가 클 경우 앞에서 제안한 Window Protection에 의해 고립운전을 검출하고 Power mismatch가 적은 경우에는 (9)의 개선된 인덱스를 이용하여 고립운전을 검출할 수 있다. 개선된 알고리즘은 여러 군데에서 시스템 파라미터를 모니터링할 필요 없이 DUR을 Inter-tie에 설치하는 것만으로 고립운전을 판별할 수 있으므로 구현하기가 용이하고, 특히 다수의 분산전원 투입 시 각 DG의 Inter-tie에 DUR을 설치하여 효과적으로 고립운전 검출을 구현할 수 있는 장점을 갖는다.

3. 사례연구



[그림.3] 고립운전 검출 Flow Chart.

3.1 모의대상 계통 모델링

모의실험을 위해 [그림. 2]와 같이 IEEE 34Bus Node Test Feeder의 840번 버스에 1MW 용량의 동기발전기와 70kW, 60kvar 로 구성된 Site Load를 구성하여 모델링하였다[3],[4].

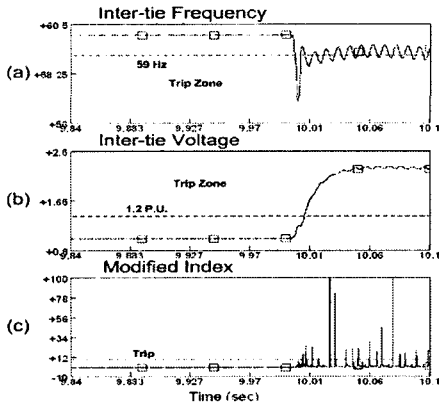


[그림.4] 시스템 파라미터 Sampling

DUR에서 데이터 취득을 구현하기 위해 [그림. 4]와 같이 Anti-Aliasing을 위해 Low-Pass 필터로 50차 이상의 고조파를 제거하고 128 sample/cycle로 데이터를 취득하도록 PSCAD/EMTDC에 모델링하였다.

3.2 Islanding 발생 시 모의실험

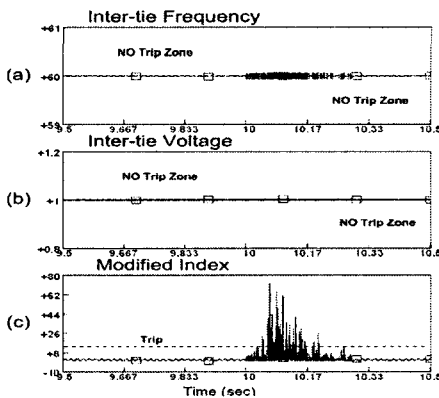
제안한 알고리즘의 검출 신뢰도를 검증하기 위하여 Islanding 발생 시 DG에 50%의 큰 부하변동이 있는 경우와 1% 정도의 거의 변동이 없는 두 가지 경우에 대해 모의실험 하였다.



[그림.5] Islanding 발생시 50% DG출력 변동

[그림.5]는 Islanding 발생 시, DG에 큰 부하가 걸리는 경우의 모의실험 결과이다. (a)에서 Islanding 발생 시 주파수는 허용범위인 59Hz이하로 떨어졌고 (b)에서도 1.2PU이상으로 전압이 상승하였다. 따라서 DUR의 Window Protection으로 Islanding이 검출 된다. 또한 (c)의 Detection Index로도 역시 Islanding이 검출되는 것을 확인할 수 있다.

두 번째로 Islanding 발생 시, DG출력의 변화가 거의 없어서 시스템의 주파수 및 전압의 변동이 거의 없는 경우에 대해 모의실험 하였다.

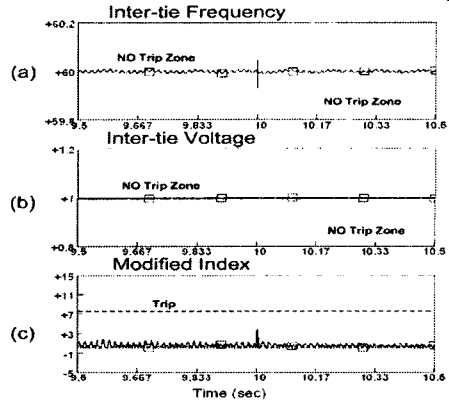


[그림.6] Islanding 발생시 1% DG출력 변동

[그림.6]에서 Islanding이 발생하는 순간에도 (a), (b)의 주파수와 전압은 모두 Window Protection의 No Trip Zone에 있음을 볼 수 있다. 이러한 경우 Window Protection만으로 검출이 불가능하다. 그러나 Detection Index는 굉장히 크게 변동하였다. (c)에서 Islanding 발생시 Trip Point인 10을 초과하여 150ms이상 지속되었다. 따라서 시스템 파라미터의 변동이 작은 경우에도 제안한 Index로 Islanding이 검출 가능하다.

3.3 계통 연계운전 시 모의실험

검출 알고리즘의 신뢰도를 높이고 전력공급 신뢰도를 함께 향상시키기 위해서는 제안된 알고리즘이 Islanding 상황과 부하변동 상황을 구별할 수 있어야 한다. 그래서 분산전원이 계통과 연계하여 운전되고 있을 때, 부하의 변동에 대한 검출 알고리즘의 작용을 알아본다.



[그림.7] 연계운전 시 100% 부하증가

분산전원이 계통과 연계되어 운전되고 있는 상황에서 부하가 100% 증가하는 경우, [그림.7]과 같이 주파수, 전압 모두 허용범위 내에서 운전되고 있고 Detection Index 값도 트립점에 도달하지 않았다. 이 결과로부터 연계 운전 시 제안한 인덱스가 부하변동에 따라 오동작이 일어나지 않는다는 것을 검증할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 분산전원의 계통연계 시 야기되는 문제를 해결하기 위한 연계 인터페이스인 DUR에 고립운전 검출 알고리즘을 적용하였다. 기존의 검출 방법 중 가장 신뢰성 높은 방법을 택하여 디지털 릴레이에 적용할 수 있도록 개선하였다. 개선된 검출 인덱스는 분산전원의 계통 연계 지점에서 시스템 파라미터를 모니터링 하여 고립운전을 판별할 수 있다. 사례연구를 통해 알아본 결과, 적용된 알고리즘은 여러 가지 상황에서도 오동작 없이 고립상황을 판별할 수 있었다. 본 논문에서 제안한 고립운전 알고리즘은 현재 수행중인 과제의 디지털 릴레이에 탑재하여 실 계통 테스트를 통해 좀 더 보완해 나갈 계획이다.

감사의 글

본 연구는 기초전력공학공동연구소 전력과제인 21세기 다품질 전력공급시스템 개발(과제번호 : 00-전-01)의 지원으로 수행되었음.

[참고 문헌]

- [1]C. Mattison, "Protective Relaying For The Cogeneration Intertie Revisited", Industry Applications Conference, Thirtieth IAS Annual Meeting, Vol.2, P. 1135 - 1141, 1995
- [2]Fu-Sheng Pai, Shyh-Jier Huang "A Detection Algorithm for Islanding-Prevention of Dispersed Consumer Owned Storage and Generating Units.", IEEE Trans. Energy Conversion. Vol. 15, No. 2, P. 346 351, April 2000.
- [3]W. Kersting, W. Phillips, "Modeling and Analysis of Rural Electric Distribution Feeders.", IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 28, No. 4, P. 767 773, July Aug. 1992.
- [4]William B. Gish, "Small Induction Generator and Synchronous Generator Constants for DSG Isolation Studies.", IEEE Trans. Power systems. Vol. PWRD 1, No.22, P. 232 238, April 1996