

주기적 위상 변동 기법을 이용한 새로운 단독운전 검출 기법

정영석¹⁾, 최재호¹⁾, 소정훈²⁾, 유병규²⁾, 유권종²⁾
¹⁾충북대학교, ²⁾한국에너지기술연구원

Novel Anti-islanding method using phase shift with a periodic function

Youngseok Jung¹⁾, Jaeho Choi¹⁾, Junghoon So²⁾, Byunggyu Yu²⁾, Gwonjong Yu²⁾
¹⁾Chungbuk National University, ²⁾Korea Institute of Energy Research

Abstract - This paper proposes the optimal design method based on NDZ analysis to secure the islanding detection ability and to maintain the stability and power quality when the grid is connected. A PSiM-based model and analysis of the system is presented, specially aimed at improving the effectiveness of phase shift anti-islanding method with frequency feedback, which causes the inverter current to be generated slightly lower or higher in frequency than the frequency of the terminal voltage. The proposed method can cause frequency jump with leading and lagging phase of output current in two line cycles. As a result, the proposed algorithm is more sensitive and reliable than the conventional phase shift method. Experimental results, on a 3 kW inverter connected to 220 V, 60 Hz utility, are discussed.

1. 서 론

태양광발전을 포함한 대체에너지의 확대 보급이 활발히 전개되면서 연계형 시스템의 단독운전 현상의 발생에 대한 위험도 함께 증가하고 있다. 단독운전 현상이란 상용계통이 정전 등의 사고로 인하여 배전계통과 분리된 상태에서 대체에너지 발전 등의 분산전원이 이를 인지하지 못하고 독립된 배전계통을 구성하여 지속적으로 전력을 공급하고 있는 현상을 말한다. 이러한 단독운전 현상은 전력계통의 보호 장치의 오동작을 유발하거나, 위상 불일치로 인한 과전류 발생 등 전력계통 운용상의 문제점을 가지고 있으며, 배전계통과 연결된 부하의 고장 또는 배전계통 엔지니어의 감전 등을 유발할 수 있으므로 이에 대한 대책이 수립되어야 한다^[1]. 이러한 단독운전을 대한 대응방안으로 연계형 시스템의 전력변환 장치 내에 단독운전을 검출하고 즉시 시스템을 배전계통으로부터 분리시키는 기법에 대한 다양한 연구가 진행되었다^[2].

단독운전 검출기법은 크게 수동적 검출기법 (passive islanding detection method)과 능동적 검출기법 (active islanding detection method)으로 구분할 수 있는데 수동적 검출기법은 시스템의 제어에 사용되는 파라미터를 검출하여 그 크기나 변화량으로 단독운전을 판단하는 기법이다. 이러한 수동적 기법은 전력품질 및 제어에 영향을 주지 않고 검출 시간이 빠르다는 장점이 있는 반면 특정 부하 상태에서는 검출할 수 없는 영역인 불검출 영역 (non-detection zone: NDZ)이 존재한다는 단점이 있다. 능동적 기법은 출력전류에 미소한 왜란을 일정하게 인가하거나 가변시킴으로써 단독운전 발생 시 전압 및 주파수가 제한치를 벗어나도록 제어하여 단독운전을 검출하는 기법이다. 이러한 능동적 기법은 부하조건과 관계없이 단독운전을 검출하므로 매우 협소한 불검출 영역을 가지는 장점이 있으나, 발전전력과 부하의 소모 전력이 완전히 일치하는 경우와 시스템과 병렬로 연결된 RLC 공진 부하의 용량이 발전용량보다 큰 경우 검출을 보장할 수 없거나 검출 제한시간을 초과하여 검출하는 문제가 있으며, 또한 출력전류에 왜란을 인가하기 때문에 정상상태에서의 전력품질이 훼손되는 단점이 있다^[2].

기존의 연구에서는 이러한 단독운전 검출 기법의 검출 성능을 개선하기 위하여 수동적 기법과 능동적 기법을 혼용하여 적용함으로써 단독운전 발생 시의 조건에 따라 두 가지의 기법 중 하나의 기법으로 검출하는 방식이 제안되었다^[3]. 그러나 이러한 경우 상호 보완적인 효과를 얻을 수 있으나 각각의 기법이 서로 결합되지 못하고 개별적으로 동작함으로써 결과적으로 단독운전 검출 성능의 개선은 이루지 못하였다. 예를 들어 발전전력과 부하전력의 차이가 큰 경우는 단독운전 발생 시 전압 및 주파수의 변화가 크므로 수동적 기법으로 검출하여 빠른 시간 내(0.5초 이내)에 검출할 수 있으나, 발전전력과 부하의 소모전력이 일치하는 경우 수동적 기법으로는 단독운전을 검출하지 못하고 능동적 기법으로만 검출할 수 있다. 따라서 이러한 수동적 기법과 능동적 기법의 단순 적용은 성능의 개선을 이루었다고 보기 어렵다.

이러한 전력의 평형상태에서 능동적 검출기법의 성능 개선을 위하여 2개 이상의 능동적 기법을 조합하는 기법이 제안되기도 하였다. 예를 들어 단독운전 시 주파수의 변화를 유도하여 일정이상의 주파수 변화가 검출되면 유도전력을 변화시켜 전압의 크기를 변화시키는 기법 등이 있다^[4]. 이러한 기법은 단독운전 검출 성능을 개선할 수는 있으나, 능동적 기법의 결정인 출력전류에 왜란을 인가함으로써 발생하는 전력품질의 훼손 문제를 개선하지 못하였고, 특히 이종의 왜란이 인가되는 경우에는 전력품질에 대단히 나쁜 영향을 미칠 수 있다.

본 논문에서는 이러한 수동적 기법과 능동적 기법의 장점만을 효과적으

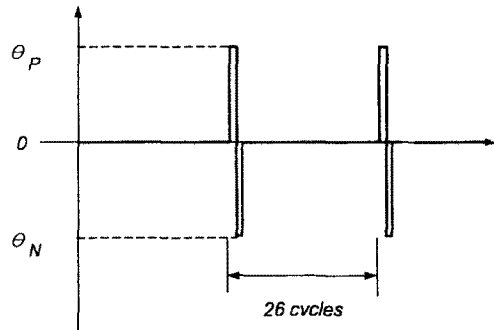
로 결합하는 새로운 단독운전 검출기법을 제안한다. 결합을 위한 수동적·능동적 기법은 다양한 종류를 적용할 수 있으며, 본 논문에서는 능동적 기법으로서 주기적으로 왜란을 인가하여 단독운전 발생 시 주파수의 급변을 유도하는 주기적 위상 가변 기법 (Periodic Phase Shift Method)과 수동적 기법으로서 이러한 주파수의 급변을 검출하는 주파수 급변 검출 기법 (Frequency Jump Detection method)을 적용하였다^[2]. 제안된 기법은 수동적 기법과 능동적 기법이 직접 결합되어 단독운전 발생 시 주기적 왜란의 인가로 검출에 소요되는 최대 시간을 결정할 수 있으며 전력품질의 영향을 최소화하는 장점이 있다.

본 논문에서 제안하는 단독운전 검출기법의 원리와 파라미터의 설계 방법에 대하여 서술하고 제안된 기법의 타당성을 검증하기 위하여 국제 규격인 IEEE 929-2000에서 규정한 시험조건에서 한전의 분산형 전원 배전계통 연계 기술기준에서 규정한 검출시간 (0.5초)과 전력품질 조건을 만족하고 있는지 실험을 통해 결과를 제시한다^[5-6].

2. Hybrid Islanding Detection Method

2.1 동작 원리

본 논문은 기존의 단독운전 검출 기법이 가지는 단점을 보완하고 장점만을 결합하는 새로운 복합형 단독운전 검출기법 (Hybrid Islanding Detection Method)을 제안한다. 제안된 기법은 단독운전 발생 시 주파수의 급변을 유도하고 이러한 주파수의 급변이 발생 시 단독운전을 판단하는 기법이다. 주파수의 급변을 유도하는 방법에는 다양한 기법들이 존재하고 있으나 왜란 발생 원리의 측면에서 데드타임을 인가하여 단독운전 시 주파수를 가변시키는 AFD (Active Frequency Drift) 기법과 전류의 위상을 이동시켜 무효전력의 차가 발생되어 주파수를 가변시키는 SMS (Slip Mode Frequency Shift) 기법으로 구분할 수 있다^[7]. 본 논문에서는 수동적 기법으로는 주파수 급변 검출 기법을 채택하였으며, 능동적 기법으로는 전류의 위상만을 가변하므로 전류의 THD (Total Harmonic Distortion)과 무관한 위상변동 기법을 선택하였다. 이러한 복합 검출 기법을 위상가변을 이용한 주파수 급변 검출 기법 (Frequency Jump with Phase Shift: FJPH)으로 명명하였다. 그림 1에 단독운전 발생 시 주파수의 급변을 유도하기 위하여 주기적으로 인가하는 전류의 위상변위 θ_P 와 θ_N 을 보이고 있다.



<그림 1> FJPH 기법에서의 위상변위의 인가방법.

단독운전 발생 시 주파수의 급변을 검출하여 즉시 인버터를 차단할 수 있으므로 위상변위를 지속적으로 인가할 필요가 없고 단지 주기적으로 인가하면 충분하다. 인가하는 주기는 단독운전 검출 제한 시간이 0.5초 (30계통주파수 주기)이므로 본 논문에서는 인가하는 위상변위의 주기를 26계통주파수 주기 (약 0.43초)로 결정하였다. 인가하는 위상변위의 크기는 무효전력 차와 주파수의 변화관계식을 이용하여 결정할 수 있다^[7].

$$Q_r \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{f}{F} \right)^2 \right\} = \frac{\Delta Q}{P} = \tan(\theta) \quad (1)$$

식 (1)에서 변화시킬 주파수 f' 는 60.5 Hz, 기본 주파수 f 는 60 Hz, 병렬 공진부하와 관계된 품질계수 Q (Quality Factor)는 2.5로 선정하면 위상변위의 크기는 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$\theta = \arctan(0.0412) = 0.0412 \quad (2)$$

따라서 위상동기를 위한 PLL (Phase Locked Loop) 제어의 오차와 주파수의 검출 오차 등을 고려하여 위상변위 θ 의 크기를 0.05로 결정하면 양의 위상변위 θ_p 와 음의 값 θ_n 을 연속적으로 인가함으로써 단독운전 발생 0.9 Hz 이상의 주파수 급변을 유도할 수 있다. 또한 정상상태 시에는 이러한 0.9 Hz 이상의 주파수 급변할 가능성은 거의 없으므로 이러한 주파수 급변이 발생한다는 것은 단독운전이 발생한 것으로 판단하여 인버터를 차단할 수 있다.

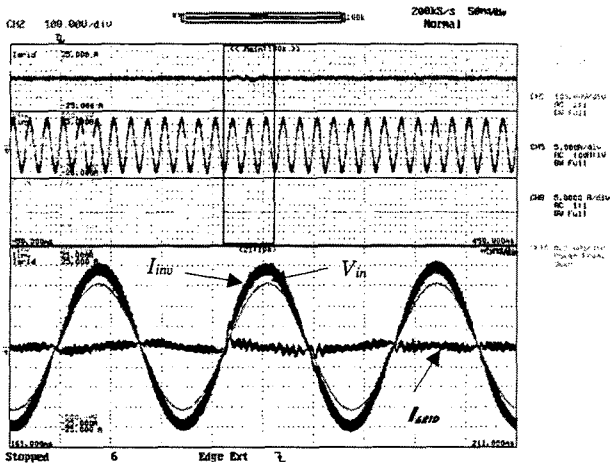
2.2 실험 결과

제안된 단독운전 검출기법의 타당성을 입증하기 위하여 3kW급 계통연계형 인버터를 제작하여 단독운전 검출시험을 수행하였다. 시험에 사용된 시스템 파라미터는 표 1에 보이고 있다.

〈표 1〉 시험에 사용된 시스템 파라미터

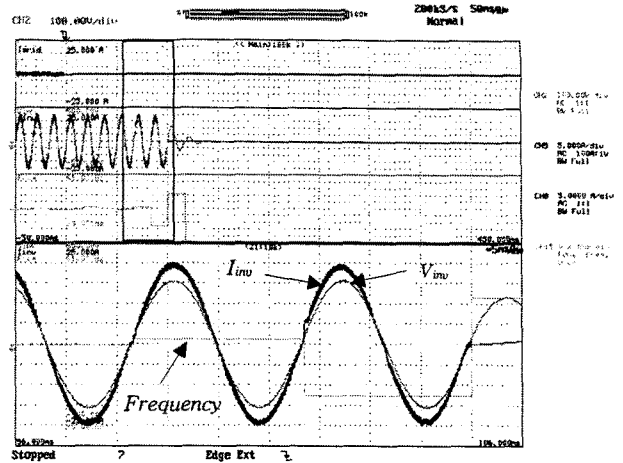
Parameter	Value	
f_0 (기본주파수)	60 Hz	
V_{grid} (계통전압)	220 Vrms	
P_{inv} (인버터 유효전력)	3 kW	
Q_{inv} (인버터 무효전력)	0.08 kVar	
P_{load} (부하 유효전력)	3 kW	
R (부하저항)	16.13 Ω	
$Q_f = 2.5$	Q_L	7.5 kVar
	Q_C	7.42 kVar
	L (유도성부하)	17.12 mH
	C (용량성 부하)	406.61 μF

표 1에서 유도성 무효전력 (Q_L)과 용량성 무효전력 (Q_C)가 일치하지 않는 이유는 IEEE Std. 929-2000에서 규정하고 있듯이 인버터에서 발생하는 무효전력 성분을 포함하여 부하의 공진 주파수가 60 Hz가 되도록 설정하기 때문이다. 그림 2에서 정상상태 시 제안된 기법의 출력파형을 보이고 있다. 약 166 ms에서 음의 위상변위 θ_n 가 인가되어 인버터의 출력 전류 I_{inv} 의 위상이 출력 전압 V_{inv} 에 비해 약간 지연되고 있으며 그 다음 주기에 θ_p 가 인가되어 전류의 위상이 전압에 앞선 있음을 확인할 수 있다. 또한 이러한 위상변위는 무효전력 차를 발생시키므로 계통 유입전류 I_{grid} 가 약간 변동되고 있음을 알 수 있다.



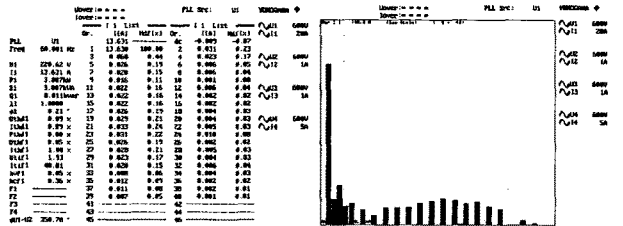
〈그림 2〉 정상상태 시 FJPH 기법의 출력 파형.

단독운전 상황을 발생시킨 후 제안된 기법의 출력 파형을 그림 3에 보이고 있다. 단독운전 발생 후 약 68 ms에서 음의 위상변위 θ_n 가 인가되어 인버터의 출력 전류 I_{inv} 의 위상이 출력 전압 V_{inv} 에 비해 약간 지연되고 있으며 그 다음 주기에 θ_p 가 인가되어 전류의 위상이 전압에 앞선 있음을 확인할 수 있다. 또한 이러한 위상변위의 인가로 주파수가 59.49 Hz에서 60.47 Hz로 약 0.98 Hz 정도로 급변하여 단독운전을 검출하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 제안된 기법은 품질계수 $Q_f = 2.5$ 이고 병렬로 연결된 부하와 인버터에서 발생하는 유·무효전력이 정확히 일치하는 최악의 조건에서도 0.5초 이내에 단독운전을 검출하고 있음을 알 수 있다.



〈그림 3〉 단독운전 발생 시 FJPH 기법의 출력 파형.

또한 제안된 기법은 위상변위 θ 를 26 계통주파수 주기 동안 단 2 주기만 최소한의 크기 ($\theta = 0.05$ rad)로 인가하기 때문에 전력품질의 영향을 최소화할 수 있다. 그림 4에 제안된 기법의 정상상태 시의 출력 전류에 대한 THD와 스펙트럼 분석을 보이고 있다. 출력전류의 THD는 약 0.89%로써 전력품질이 매우 높음을 알 수 있다.



〈그림 4〉 정상상태 시 출력전류의 THD 및 스펙트럼 분석.

3. 결 론

본 논문에서는 기존의 단독운전 검출기법의 단점을 보완하고 장점을 결합하는 새로운 단독운전 검출기법을 제안하였다. 제안한 기법은 현재 국제규격에서 제시한 최악의 조건하에서도 제한시간 (0.5초) 이내에 단독운전을 검출하면서도 정상상태에서 높은 전력품질 (THD = 0.89%)을 유지하였다. 본 논문에서는 주파수의 급변을 유도하는 방법으로 위상변위를 인가하는 방법을 사용하였지만 데드타임을 인가하는 AFD 기법을 적용하여도 유사한 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 제안된 기법을 검증하기 위하여 3kW급 단상 계통연계형 인버터에 대하여 실험을 수행하였지만 3상 시스템에서도 쉽게 적용이 가능하다. 향후 3상 시스템에 대한 연구를 진행할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] Tadao Ishikawa, "Grid-connected photovoltaic power systems: survey of inverter and related protection equipments," IEA-PVPS Report, IEA-PVPS T5-05: 2002.
- [2] Ward Bower and Michael Ropp, "Evaluation of islanding detection methods for photovoltaic utility-interactive power systems," IEA-PVPS Report, IEA-PVPS T5-09: 2002.
- [3] Y. Takeda, K. Takigawa, H. Kobayashi, K. Nakahara, T. Morishita, A. Kitamura, A. Miyoshi, H. Matsuda, and S. Komatsu, "Test and study of utility interface and control problems for residential PV systems in Rokko Island 200 kW test facility," Proc. of IEEE PVSC'88, vol. 2, pp. 1062-1067 1988.
- [4] C. Jeraputra, P.N. Enjeti, "Development of a robust anti-islanding algorithm for utility interconnection of distributed fuel cell powered generation," IEEE Trans. Power Electronics, vol. 19, no. 5, pp. 1163-1170, 2004.
- [5] "IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems," IEEE Std 929-2000, 2000.
- [6] "분산형 전원 배전계통 연계 기술기준," 한국전력 홈페이지 배전용 전기설비용이용규정, http://cis.kepco.co.kr/csagent/cyber_spot_new/03.law/law02_01_07_1.jsp.
- [7] Z. Ye, A. Kolwalkar, Y. Zhang, P. Du, and R. Walling "Evaluation of anti-islanding schemes based on nondetection zone concept," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 19, no. 5, pp. 1171-1176, 2004.