

전향보상 전압의 위상 변화를 통한 단독운전 검출 방법의 계통 정상 상태의 성능 평가

김동욱¹, 김성민[†]

Performance Evaluation of Islanding Detection Method by Phase Shifted Feed-Forward Voltage in Steady-State Grid Condition

Dong-Uk Kim¹ and Sungmin Kim[†]

Abstract

This study proposes a new islanding detection method that uses the phase shift of feed - forward voltage and evaluates the performance of an existing method and the proposed method when the grid frequency changes within the allowable range under steady-state conditions. The investigated existing method, which is slip mode frequency shift (SMS), uses current phase shift to detect islanding. The SMS method supplies reactive current to the grid under this condition, but the proposed method does not generate additional reactive power because it does not depend on the current control loop. The performance in steady-state grid condition is evaluated through simulations and experiments.

Key words: Anti-islanding detection, Feed-forward voltage, Grid connected inverter, Grid frequency variation, SMS(Slip Mode Frequency Shift)

1. 서 론

최근 신재생 에너지에 대한 수요가 높아짐에 따라 계통 연계형 태양광 발전, 연료 전지 발전, 풍력 발전 등의 보급이 활발히 이루어지고 있다. 이러한 분산형 전원(Distributed Generation)의 계통 연계가 많아짐에 따라 각 나라들은 계통 연계 규정을 만들고 이를 충족하는 분산 전원만이 계통에 연계 될 수 있도록 하고 있다. 대표적으로 국외의 경우 IEEE 1547, IEC Standard 61727이 있고, 국내는 한전에서 제공하는 분산형 전원 배전 계통 연계 기술기준이 있다^{[1],[2]}. 계통 운영자가 분산 전원에 요구하는 기능 중에는 계통 사고로 주파수 혹은 전압이 허용 범위를 넘어갈 경우, 이를 계통 이상으로 판단하고 계통으로의 전력 공급을 즉시 중단해야

하는 규정이 있다. 이를 단독운전 검출이라 한다. 계통 사고로 계통의 전원과 계통이 분리되었을 때, 기술자가 유지 보수를 위해 접점을 건드릴 경우 분산 전원이 이를 판단하지 못하고 전력을 공급하면 또 다른 사고를 발생시킬 수 있다. 뿐만 아니라, 계통 전원이 복원되었을 때, 분산 전원이 계통 전원과 다시 연결되기 위해서는 분산 전원이 전력 공급을 정지해야 한다. 이러한 이유로 단독운전을 검출하는 기능이 분산 전원에 반드시 구현되어야 한다.

기존에 연구된 여러 단독 운전 검출 기법들 중 주파수를 이용한 검출 기법들은 계통 공칭 주파수를 기준으로 주파수가 변동하는 것을 판단하여 전류의 위상을 변화시키거나 전류의 영점(zero-crossing) 변화를 추정해 단독운전을 검출한다^{[3]-[8]}. 이러한 기법들은 계통 정상 상태에서 계통 주파수가 공칭 주파수에서 움직이지 않는다는 것을 가정한다. 그러나 계통의 전원 주파수는 공칭 주파수를 기준으로 일정 범위 안에서는 정상 상태로 인정된다. 예를 들어 우리나라의 계통 주파수는 59.3[Hz]부터 60.5[Hz]의 범위에서 가변이 가능하다. 기존의 주파수 변화를 이용한 기법들은 허용된 계통 주파수 범위 안에서 단독운전 검출을 위해 항상 전류의 위상을 변화시킨다. 이는 계통 전원이 정상 상태임에도 불구하고

Paper number: TKPE-2018-23-6-1

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: ksminmoon@hanyang.ac.kr, Division of Electrical Eng., Hanyang University, ERICA Campus
Tel: +82-31-400-5172 Fax: +82-31-436-8152

¹ Division of Electrical Eng., Hanyang University, ERICA Campus

Manuscript received Jul. 13, 2018; revised Jul. 23, 2018;
accepted Jul. 28, 2018

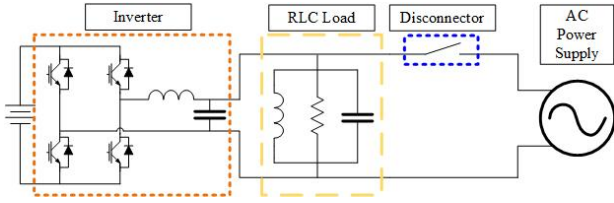


Fig. 1. Islanding detection test circuit.

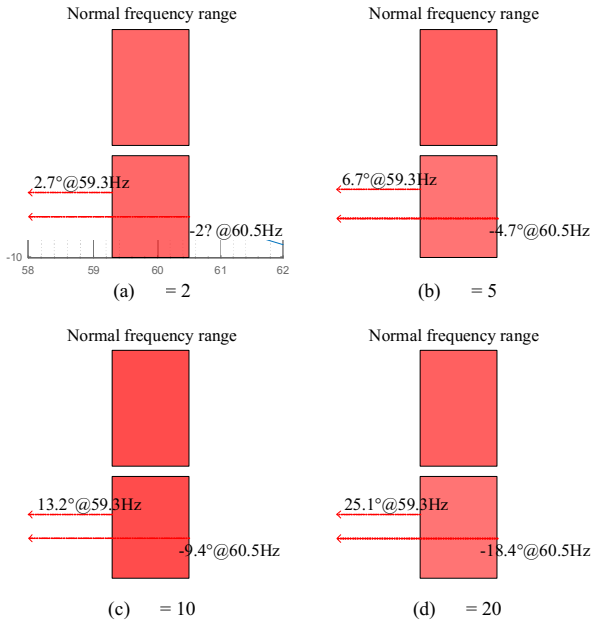


Fig. 2. Impedance characteristics of RLC load.

무효 전력을 계통에 공급하게 되어 전력 품질 저하를 일으킨다. 본 논문에서는 기존 방법의 정상상태 전력 품질 저하를 극복하는 전향 보상 전압 위상 변화를 이용한 새로운 단독운전 검출 기법을 제시한다. 제시한 기법은 앞서 말한 계통 주파수의 허용 범위에서 정상 상태 오차가 없을 뿐만 아니라 단독운전 검출 성능도 우수하다.

본 논문은 전향보상 전압 위상 변화를 사용하는 단독운전 검출 기법과 기존의 위상 변화 단독운전 검출 기법인 Slip-Mode frequency Shift(SMS) Islanding Detection Method(IDM)의 정상 상태 계통 조건에서 성능 비교를 시뮬레이션과 실험을 통하여 수행하였다.

2. 기존의 위상 변화를 이용한 단독운전 검출 기법

2.1 단독운전 검출 과정

그림 1은 IEEE 1547에서 제시하고 있는 단독운전 검출 시험을 위한 시험 설비의 구조이다^[2]. 시험 설비는 인버터와 필터, RLC 부하, 계통으로 구성된다. RLC 병렬 부하의 공진 주파수 f_o 는 공칭 주파수로 결정되고 그에 따라 부하의 Quality Factor(Q_f)값은 식 (1)과 같이 결정된다.

$$Q_f = R\sqrt{\frac{C}{L}} \quad (1)$$

단독운전 검출 시험을 위해서는 인버터가 부하로 전력을 공급하고 계통에서 부하로의 전력 공급이 거의 없을 때 계통 전원을 차단시킨다. 계통 전원이 차단된 상태에서 인버터가 주파수 혹은 전압의 변화 없이 정상적으로 동작할 때 이를 인버터의 단독운전이라고 한다. 각 나라마다 계통 분리 후 단독운전임을 검출하고 전력 공급을 중단시켜야 하는 시간을 규정해 놓고 있다. IEEE 1547에서는 주파수 변화로 인한 분리 시간을 최대 2초로 규정하고 있다.

계통 차단 시 주파수 변화를 이용한 다양한 단독운전 검출 기법 가운데, 능동형 단독운전 검출 방법은 일반적으로 무효 전력을 인가하면 계통 전원이 분리된 상태에서 계통 주파수가 변화하는 특성을 이용한다. 본 논문에서는 주파수의 변화에 따라 전류 지령의 위상을 변화시키는 SMS IDM을 적용하여 정상 운전 조건에서 성능을 확인한다.

2.2 SMS 단독운전 기법의 검출 과정

단독운전 조건에서는 계통 전원이 상실되기 때문에, 분산 전원이 만드는 무효 전력을 부하에서 모두 흡수해야 한다. 따라서, 분산 전원에서 무효 전력을 공급하면 부하의 무효 전력과 분산 전원의 무효 전력이 같아지게 되도록 계통 주파수가 변경된다. SMS IDM은 이러한 원리에 따라 계통 주파수에 따라 분산 전원의 무효 전력 공급량을 가변한다. 계통 전원이 연결된 조건에서는 분산 전원이 공급하는 무효 전력을 전원에서 흡수하므로 주파수에 변화가 없지만, 단독운전 조건에서는 분산 전원이 공급하는 무효 전력을 흡수하기 위한 부하의 주파수가 변경된다. 변경된 주파수에 따라 단독운전을 판단할 수 있다. 그림 2는 Q_f 가 2, 5, 10, 20일 때, RLC 부하의 임피던스 특성을 나타내고 있다. Q_f 가 5인 RLC 부하인 경우, 부하각이 6.7°가 되면 주파수가 59.3[Hz]가 되어 정상 범위를 벗어나게 된다. 따라서, SMS IDM에서 59.3[Hz]의 주파수에서 역률각이 6.7° 이상이 되도록 제어한다면, 단독운전 조건에서 계통의 주파수가 59.3[Hz] 이하로 떨어져서 단독운전을 판단할 수 있다. Q_f 가 20인 경우에는 59.3[Hz]에서 부하각은 25.1°까지 증가한다. 이러한 경우 SMS IDM이 주파수가 59.3[Hz]가 되었을 때 역률각을 25.1° 이상이 되도록 무효 전력을 공급해야 한다. 그보다 작은 역률각으로 무효 전력을 공급하면 단독운전 조건에서 주파수는 59.3[Hz] 보다 큰 정상 범위 안에 존재하게 되므로 단독운전을 판단할 수 없다. SMS IDM과 같은 무효 전력을 주입하여 단독운전을 판단하는 방법은 주입하는 역률각에 따라 단독운전을 판단할 수 없는 부하의 조건이 존재하게 된다. SMS IDM의 특성에 따라 단독운전을 검출할 수 없는

조건을 부하의 Quality Factor와 주파수로 도시할 수 있으며, 단독운전 검출이 불가능한 영역을 Non-Detection Zone(NDZ)이라고 칭한다. 일반적으로 Quality Factor가 큰 부하조건에서 단독운전을 검출하기 위해서는 역률각을 크게 설계해야 하기 때문에 Q_f 가 큰 부하에서 단독운전 검출이 어렵다.

SMS IDM이 만드는 주파수에 대한 위상각은 일반적으로 식 (2)과 같다^{[3],[6]}.

$$\theta_{SMS} = \theta_M \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{f - f_g}{3}\right) \quad (2)$$

여기서 θ_M 은 θ_{SMS} 의 최댓값, f 는 추정된 계통 주파수, f_g 는 계통 공칭 주파수이다.

그림 3은 SMS IDM을 적용한 단상 인버터의 제어 블록도를 나타낸다. SMS IDM은 전류 지령을 결정할 때 PLL을 통해 얻은 계통 전압 위상각에 θ_{SMS} 를 더한 값을 사용한다. 계통 차단 시 주파수가 증가하는 경우, 양의 값의 θ_{SMS} 이 더해져 전류 지령의 위상이 의도된 전류 위상보다 앞서도록 결정되기 때문에 진상 무효전력이 생성된다. 계통이 차단된 상황에서 인버터가 만든 진상 무효전력을 RLC 부하에서 흡수하기 위해서 주파수가 증가하게 된다. 주파수가 더 커지면 더 큰 θ_{SMS} 을 더해 주게 되어 주파수는 더욱 증가하게 되고, 결국 허용된 주파수 범위를 벗어나게 된다. 계통 주파수가 감소하는 경우에는 음의 값의 θ_{SMS} 이 더해져 전류 지령의 위상이 의도된 전류 위상보다 뒤서도록 결정되기 때문에 지상 무효전력이 생성된다. 계통이 차단된 상황에서 인버터가 만든 지상 무효전력을 RLC 부하에서 흡수하기 위해서 주파수가 감소하게 된다. 이로 인해 주파수가 더 감소하면, 전류 위상을 더 지연하게 하여 주파수는 점점 감소하는 Positive Feedback을 유발한다.

식 (2)에서 알 수 있듯이 SMS 기법은 계통 주파수가 계통 공칭 주파수 f_g 와 같지 않은 경우에는 반드시 θ_{SMS} 가 생기게 된다. 즉 계통이 정상 상태이지만, 주파수가 허용 범위 안에서 움직일 경우 SMS는 θ_{SMS} 를 증가 혹은 감소시키며, 이는 계통이 정상 임에도 불구하고 인버터 전류 지령의 위상을 틀어주게 되고 불필요한 무효전력을 생성한다. 이를 계통에 공급할 경우 전력 품질의 저하를 발생 시킨다.

그림 4는 SMS IDM의 전류 위상각(θ_M)에 따른 단독운전 검출 불가 영역(NDZ)를 도시하고 있다. 전류 위상각을 크게 인가하면 NDZ가 줄어들고, 전류 위상각을 작게 인가하면 NDZ가 증가함을 알 수 있다. SMS IDM에서 NDZ를 줄이기 위해 전류 위상각을 증가시키면, 계통 정상 상태에서 허용되는 주파수 변화에 대해 주입되는 무효 전력의 양이 증가하는 단점이 있다. 반면, SMS IDM의 전류 위상각을 감소시키면, 정상 상태에서 주입되는 무효 전력의 양은 줄어들지만, NDZ가 증가하게 된다.

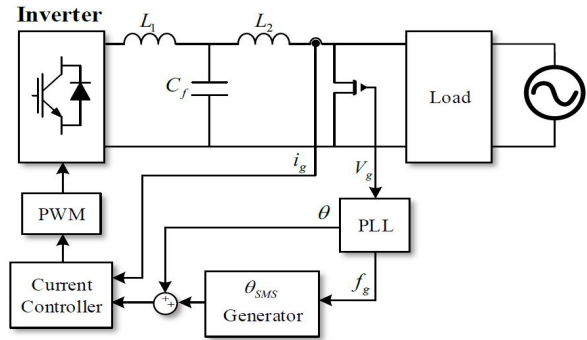


Fig. 3. Control of grid connected single phase system with SMS IDM.

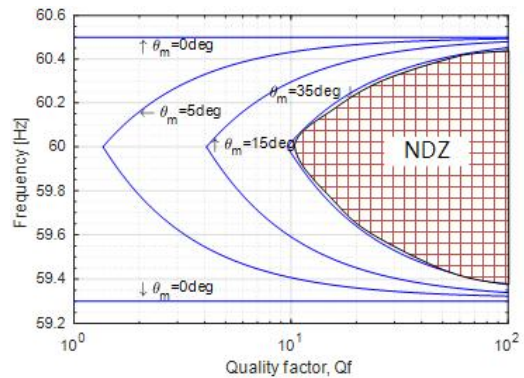


Fig. 4. Non-Detection Zone for SMS IDM.

3. 전향보상 전압의 위상 변화를 통한 단독운전 검출 기법

계통 연계형 인버터는 계통으로 전력을 전달하기 위해서 계통 전류를 제어하며, 전력을 전달하기 위한 전류 지령을 결정하는데 있어서 계통 전압 정보가 필수적이다. 계통 전압은 계통 전원의 위상각을 판단하고, 측정된 전압을 전향 보상하여 전류 제어 성능을 향상시킨다. 반면, 전향보상하는 전압의 위상을 계통 전압의 주파수에 따라 가변함으로써, 단독운전을 검출할 수도 있다. 전향보상 전압의 가변하는 위상(θ_V)은 식 (3)와 같다.

$$\theta_V = \theta_M \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{f - f_g}{3}\right) \quad (3)$$

이때, θ_M 은 가변하는 위상값인 θ_V 의 최댓값으로 설계한다. f 는 측정된 계통 전압의 주파수이며, f_g 는 계통 전압의 공칭 주파수이다.

그림 5는 동기 좌표계 상에서 PI 제어를 사용한 단상 계통 연계형 컨버터의 전류 제어 블록도이다. 측정된 계통 전압을 입력으로 받은 PLL은 계통의 주파수와 위상을 추출한다. PLL의 입력 신호는 Dual Second Order Generalized Integrator(Dual-SOGI)를 통하여 계통 전압과 계통 전압보다 90도 앞서는 전압을 합성하여 사용하

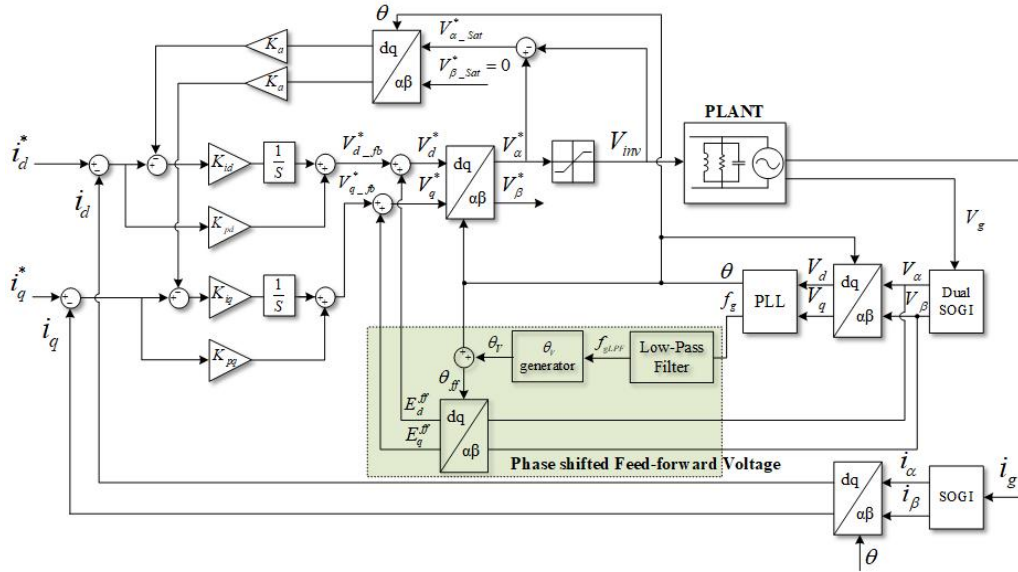


Fig. 5. Synchronous reference frame PI-current controller with phase shifted feed-forward voltage method.

TABLE I
SIMULATION PARAMETER OF SINGLE PHASE
INVERTER FOR ISLANDING DETECTION

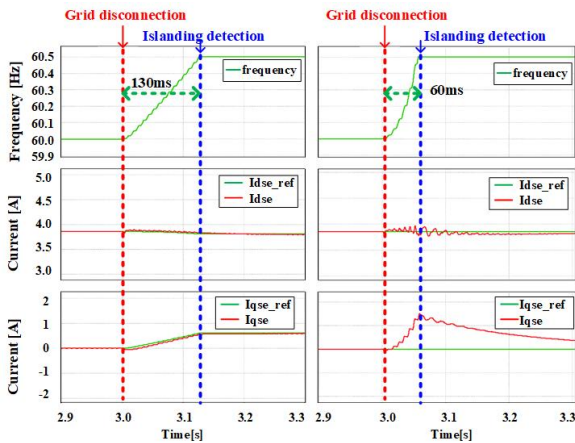
Parameter	Value
Rated power	600 [W]
Voltage	220 [Vrms]
Rated current	3.86 [A]
Grid Frequency variation	0.4 [Hz]
Switching frequency	20 [kHz]
Q_f	10
R	80 [Ω]
L	21.2 [mH]
C	331 [μ F]

대로 사용하지만, 전향보상 전압의 위상을 사용하는 단독운전 검출 방법은 계통 주파수에 따라 계통 전압의 위상을 가변하여 전향 보상하도록 구현한다. PLL을 통해 얻어진 계통 전압의 위상 θ 에 θ_V 를 더한 새로운 위상 θ_{ff} 로 전향보상 전압을 합성한다. 전향보상 전압은 식 (4), (5)을 통해 얻어진다.

$$\theta_{ff} = \theta + \theta_V \tag{4}$$

$$E_{ds_ff}^e = \cos \theta_{ff} \cdot E_{ds}^s + \sin \theta_{ff} \cdot E_{qs}^s \tag{5}$$

$$E_{qs_ff}^e = -\sin \theta_{ff} \cdot E_{ds}^s + \cos \theta_{ff} \cdot E_{qs}^s$$



(a) SMS IDM (b) Phase shifted FF IDM

Fig. 6. Islanding detection performance of SMS IDM and phase shifted feed-forward voltage IDM.

였다^[9]. 유효 전류는 d축에 위치하고 무효 전류는 q축에 위치하도록 계통 위상각을 결정하였다. 일반적으로 전류 제어를 위한 전향 보상 전압은 측정된 계통 전압을 그

전향보상 전압의 위상 변화를 사용하는 방법은 측정된 계통 전압의 주파수가 공칭 주파수보다 커지면 계통 전압보다 진상 위상을 가진 전압으로 전향 보상하고, 측정된 주파수가 공칭 주파수보다 낮을 때는 계통 전압보다 지상 위상을 가진 전압으로 전향 보상하게 된다.

계통이 정상 상태일 때 주파수가 허용 범위 안에서 움직이면 θ_{ff} 가 생기게 되어 위상이 달라진 전압을 전향 보상 하게 되지만 전류 제어를 통해 틀어진 위상을 제어할 수 있다. 따라서 전향보상 전압의 위상 변화를 사용하는 방법은 계통 주파수가 허용 범위 안에서 공칭 주파수에 벗어나 있는 상황에서 무효 전력을 만들어 내지 않는다. 이러한 점에서 기존의 SMS 기법과 비교했을 때 계통 정상 상태에서 좋은 성능을 보인다.

4. 시뮬레이션

본 논문에서 제시한 전향보상 전압의 위상을 이용한 단독운전 검출 기법의 성능을 시뮬레이션을 통해 확인하고 SMS IDM과의 검출 성능을 비교한다. 그 후 정상

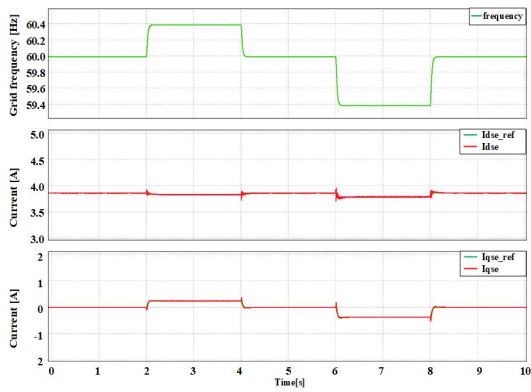


Fig. 7. Current characteristics of SMS IDM in grid frequency variation condition.

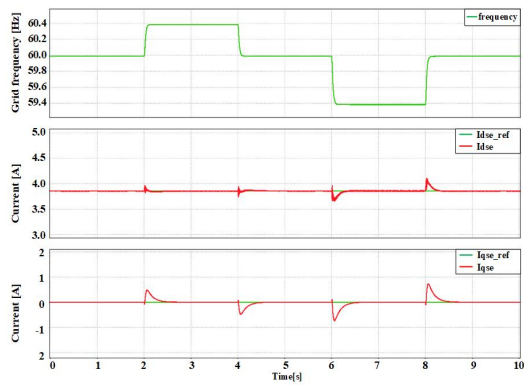


Fig. 8. Current characteristics of phase shifted feed-forward voltage IDM in grid frequency variation condition.

상태에서 계통 주파수가 움직이는 경우 SMS IDM과 논문에서 제시한 방법의 계통 전류 특성을 비교한다. 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다.

그림 6(a)는 SMS IDM을 적용하였을 때 계통 주파수, d축 전류와 지령, q축 전류와 지령 과형에 대한 시뮬레이션 결과이다. Q_f 가 10인 부하 조건에서 단독운전을 검출하기 위해 θ_M 은 35° 로 설정되었다. 계통 차단은 3초에 이루어졌고 단독운전임을 판별하는데 130[ms]가 소요되었다. 그림 6(b)는 전향보상 전압의 위상을 이용한 단독운전 검출 기법을 적용하였을 때 과형이다. 시뮬레이션 조건은 SMS IDM을 적용한 조건과 동일하다. 시뮬레이션 결과 단독 운전 검출에 60[ms]가 소요되었다. 따라서 동일한 부하 조건에서 전향보상 전압의 위상 변화를 이용한 단독운전 검출 방법이 빠른 시간 안에 검출할 수 있음을 확인할 수 있다. 전향보상 전압의 위상 변화를 통한 방법이 SMS IDM보다 더 빠르게 검출할 수 있는 것은 부하의 주파수를 변경시키는 방법의 차이로 설명할 수 있다. 부하의 주파수는 인버터에서 공급하는 무효 전력에 의해서 결정되는데, SMS IDM은 전류 지령을 변경하여 무효 전력을 공급하기 때문에 전류 제어 성능보다 늦게 무효 전력이 부하로 전달된다. 반면, 전향보상 전압의 위상을 변화시키는 방법은 인버터에서

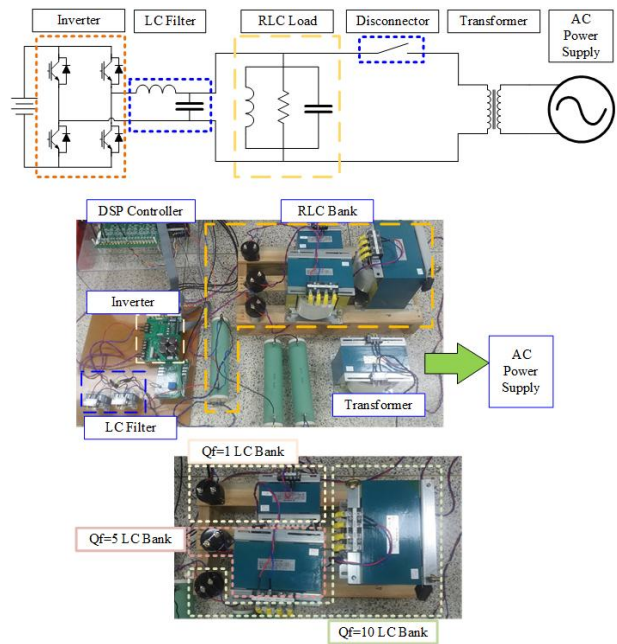


Fig. 9. Experimental setup for anti-islanding detection.

출력하는 전압의 위상을 직접 변경하여 무효 전력을 발생시키기 때문에, 전류 제어 성능보다 빠르게 무효 전력을 부하에 공급하게 되고, 따라서 부하 주파수가 더 빨리 변화게 된다.

그림 7은 계통이 정상상태이면서 계통 주파수가 허용된 범위 안에서 변화할 때, SMS IDM의 동작 특성에 대한 시뮬레이션 결과이다. 계통 주파수가 정상 허용 범위인 0.4[Hz] 변할 때 식 (2)를 통해 θ_{SMS} 가 7.28° 임을 예측할 수 있다. 이때 무효 전류 지령은 0.5[A]이다. 그림 7에서 2초에 계통 주파수가 60[Hz]에서 60.4[Hz] 증가하고 2초간 지속된다. 그 결과 예측한 대로 θ_{SMS} 가 생겨 q축 전류가 일정한 값으로 흐른다. 4초에 정상 범위로 돌아온 후 6초에 59.4[Hz]로 감소하였을 때에도 동일한 이유로 q축 전류가 발생한다. 따라서 정상 상태에 계통 주파수가 움직일 때 SMS 단독운전 검출 방법을 불필요한 무효 전력을 발생시킴으로써 계통 전력의 품질을 저하시키게 됨을 확인할 수 있다.

그림 8은 전향보상 전압의 위상을 변화를 사용하는 단독운전 검출 기법을 정상 계통 조건에서 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 2초 이후 계통 주파수가 60.4[Hz]로 증가할 때, 무효 전류가 0으로 안정되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 정상 상태에 계통 주파수가 허용된 범위 안에 있으면 전향보상 전압의 위상 변화를 사용하는 방법은 무효 전력을 발생시키지 않는다. 이는 동기좌표계 전류 제어기에 의해 위상 지연 각이 제어되어 q축 전류 지령을 추정하도록 작동하기 때문이다. 계통 주파수가 6초에 59.4[Hz]로 감소하였을 때 q축 전류가 0으로 제어된다. 따라서 계통 정상 상태에서 계통 주파수가 움직이지만 단독운전으로 판별되지 않는 범위에서 인버터가

공급하는 전력 품질은 전향보상 전압을 이용한 단독운전 기법이 더 좋은 성능을 보임을 확인할 수 있다.

그림 8을 자세히 살펴보면, 계통 주파수가 급격히 변하는 과도 상태에서는 전향보상 전압의 위상을 변경하는 방법의 과도 특성이 좋지 않아 보인다. 시뮬레이션에서 계통 주파수를 순간적으로 변화시켰기 때문에 전향보상 전압의 위상이 급격히 변경된다. 이는 전류 제어기 측면에서는 왜란으로 작용하게 되어 전류 제어의 과도 특성이 저하된다. 하지만, 실제 전력 계통에서 계통 사고를 제외한 계통 정상 운전 조건에서 계통 주파수의 변화는 급격하지 않기 때문에 그림 8과 같이 과도 특성이 저하되는 경우는 발생되기 어렵다.

5. 실험 결과

그림 9는 전향보상 전압의 위상 변화를 사용하는 방법의 특성을 확인하기 위해 구현한 단독운전 검출 실험 세트이다. 인버터의 용량은 600[W]의 전력을 전달하도록 설계되었으며, 단독운전 검출을 위한 RLC 부하는 정격 입력 전압이 단상 220[Vrms] 기준 600[W] 부하가 되도록 저항은 80[Ω]를 사용하였다. 다양한 조건에서 실험하기 위해 Q_f 는 각각 1, 5, 10이 되도록 구축하였다.

실험 세트의 기본적인 제정수는 표 1과 동일하다. 다만, AC Power Supply의 성능 제한으로 단상 교류 전원의 정격 전압을 130[Vrms]로 실험을 수행하였으며, 따라서 인버터의 정격 전류는 2.9[A]이며, 정격 전력은 450[W]이다.

그림 10은 전향보상 전압의 위상 변화를 통한 단독운전 검출 기법의 성능을 확인하기 위해서 Q_f 가 1과 5인 조건에서 단독운전 검출 시험 결과이다. 계통 전원이 차단되면서 계통 전류는 흐르지 않으며, Q_f 가 1과 5인 경우 각각 48[ms]와 110[ms] 이후 단독운전을 검출할 수 있었다.

기존 방법인 SMS IDM과 전향보상 전압의 위상 변화를 통한 단독운전 검출 기법의 성능 비교를 위해 Anti-islanding detection에 가장 어려운 $Q_f=10$ 인 조건에서 실험을 수행하였다. 그림 11은 SMS IDM의 단독운전 검출 실험을 수행한 실험 파형이다. 그림 11은 위에서부터 차례로 인버터에서 추정된 계통 주파수와 출력 상전류를 도시하고 있다. 실험에서 계통 전원은 약 0.3초에 차단되었다. SMS IDM은 주파수에 따라 무효 전류를 인가한다. 계통 전원이 차단된 시점부터 무효 전류가 인가되며, 무효 전류가 인가됨에 따라 계통 주파수가 증가한다. 계통 차단 후 약 300[ms] 이후 계통 주파수는 허용 범위인 60.5[Hz]를 초과하게 되며, 이 시점에 Islanding을 판단하게 된다.

그림 12는 전향보상 전압의 위상 변화를 이용한 단독운전 검출 기법의 단독운전 검출 성능을 확인하는 실험

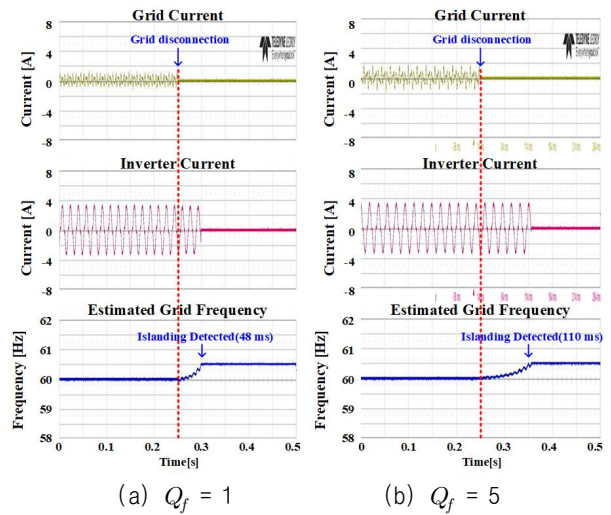


Fig. 10. Islanding detection performance of phase shifted feed-forward voltage IDM at $Q_f = 1$ and 5.

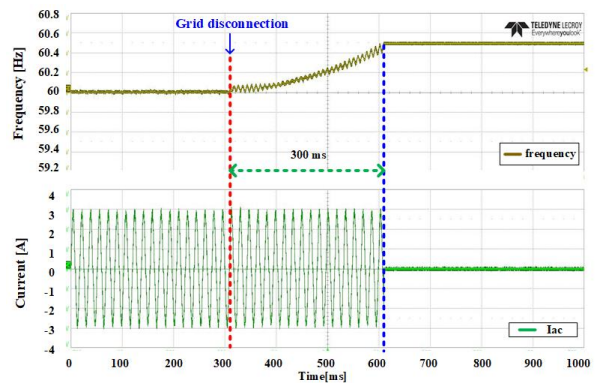


Fig. 11. Islanding detection performance of SMS IDM at $Q_f=10$.

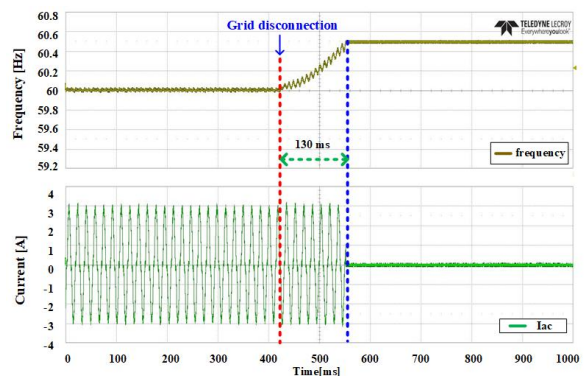


Fig. 12. Islanding detection performance of phase shifted feed-forward voltage IDM at $Q_f=10$.

결과이다. 기존 방법인 SMS IDM의 실험 조건과 동일한 조건에서 수행되었다. 실험에서 계통 전원은 0.41초에서 분리되었다. 계통이 분리된 시점에 추정된 계통 주파수가 변화되자 전향보상 전압의 위상 변화를 사용하는 방법은 전향보상 전압의 위상을 앞서도록 한다. 전향보상 전압의 위상 변화로 인하여 무효 전류가 증가하게 되고, 이로 인해 계통 주파수가 증가한다. 증가된 계통

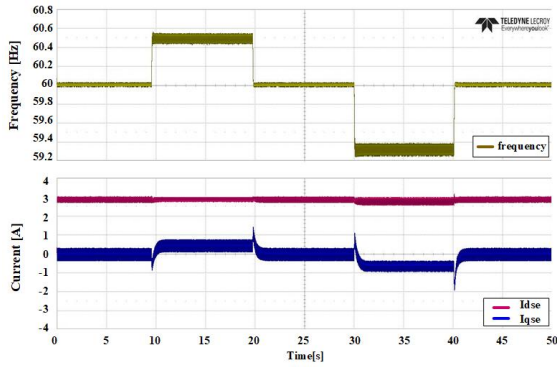


Fig. 13. Current characteristics with SMS IDM under grid frequency variation condition in experiment.

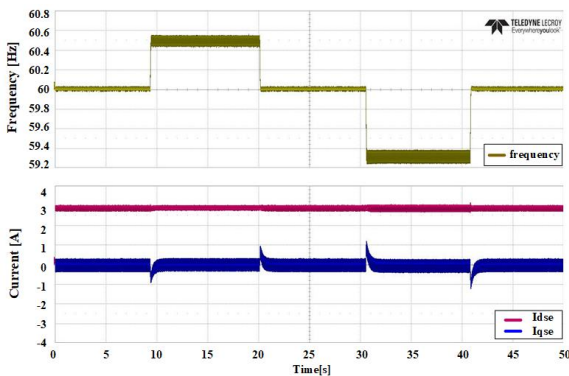


Fig. 14. Current characteristics with phase shifted feed-forward voltage IDM under grid frequency variation condition in experiment.

주파수로 전향보상 전압의 위상은 더 앞서게 되는 Positive Feedback이 발생하고, 이로 인해서 계통 주파수가 허용된 범위를 벗어나게 되어 단독운전을 검출하게 된다. 전향보상 전압의 위상 변화를 사용하는 방법으로 단독운전을 검출하는데 약 130[ms]의 시간이 소요되었다. 따라서 동일한 조건에서 SMS IDM보다 2배 이상 빠른 성능을 보임을 실험으로 증명하였다.

그림 13은 SMS IDM을 적용하였을 때 계통 전원이 연결되어 있지만, 계통 주파수가 허용 범위 안에서 움직이는 조건에서 실험한 파형이다. 약 10초에 계통 주파수가 정상 허용 범위인 60.5[Hz]로 증가하게 되면, SMS IDM은 단독운전 판별을 위해 무효 전류를 인가하게 되며, 그림 13에서 나타난 것과 같이 0.5[A]의 무효 전류가 흐르게 된다. 계통 주파수가 공칭 주파수인 60[Hz]로 다시 돌아오면 무효 전류도 설계된 SMS IDM의 위상각에 따라 0으로 돌아온다. 반대로 약 30초 지점에서 계통 주파수가 59.3[Hz]로 감소하였을 때 같은 이유로 무효 전류 지령이 -0.8[A]가 됨을 확인할 수 있다. SMS IDM은 단독운전 판별을 위해 계통 주파수에 대해서 무효 전력을 인가하기 때문에, 정상 조건에서 주파수 변화에 대해 불필요한 무효 전력을 인가하는 단점을 가지고 있음을 알 수 있다.

그림 14는 계통 전원이 연결되어 있지만, 정상 허용 범위 안에서 주파수가 변동하는 조건에서 전향보상 전압의 위상 변화를 이용한 단독운전 검출 기법의 특성을 확인하기 위한 실험 결과이다. SMS IDM의 실험 조건과 동일한 조건에서 실험하였다. 계통 주파수가 60.5[Hz], 59.3[Hz]로 바뀌는 조건에서 순간적으로 무효 전류가 흐른다. 이는 주파수의 급변으로 전향보상 전압의 위상을 변경했기 때문에 이로 인한 무효 전류가 발생한 것으로 생각할 수 있다. 그러나 계통 전원이 연결되어 있기 때문에 추정된 계통 주파수가 계통 주파수에서 변동하지 않게 된다. 따라서 전향보상 전압의 위상의 변화가 없으므로, 전류 제어가 무효 전류를 0으로 제어하게 된다. 따라서 계통 주파수가 허용된 범위에 존재하는 경우, 전향보상 전압의 위상을 이용한 단독운전 검출 방법은 무효 전류를 발생시키지 않으므로, 단독운전 판별을 위한 계통 전력 품질이 나빠지지 않는다.

6. 결 론

본 논문에서는 단독운전 검출에 일반적으로 적용되는 전류의 위상을 변화시켜 단독운전을 검출하는 SMS IDM과 전향보상 전압의 위상 변화를 통한 단독운전 검출 방법의 특성을 비교하였다. 계통 전원이 정상적으로 계통과 연결되어 있을 때, 계통 주파수가 허용 범위 안에서 움직이는 조건에서 기존의 단독운전 검출 방법인 SMS IDM과 전향보상 전압의 위상을 변화시키는 단독운전 검출 방법의 성능을 비교하였다. 전향보상 전압의 위상을 변화시키는 방법은 계통의 정상 조건에서 무효 전력을 공급하지 않을 뿐만 아니라 빠른 단독운전 검출 성능을 가진다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 전향보상 전압의 위상 변화를 통한 단독운전 검출 기법의 타당성을 검증하였다.

전향보상 전압의 위상 변화를 통한 단독운전 검출 기법이 실제 계통 연계형 시스템에 적용되기 위해서는 전향보상 전압의 위상 변화 크기에 따른 단독운전 검출 성능에 대한 분석이 필요하다. 뿐만 아니라 전류 제어기의 제어 대역폭, 저역 통과 필터의 차단 주파수 등의 설계 변수가 단독운전 검출 성능에 미치는 영향 등에 대한 연구가 추가되어야 한다.

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20163030031830)

References

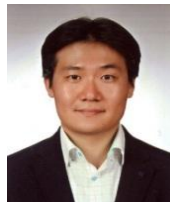
- [1] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodriguez, *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*, John

- Wiley & Sons, pp. 93-121, 2011.
- [2] IEEE Std 1547.1-2005, "IEEE standard conformance test procedures for equipment interconnecting distributed resources with electric power systems," 2005.
- [3] M. E. Ropp, M. Begovic, and A. Rohatgi, "Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 14, No. 3, pp. 810-816, Sep. 2003.
- [4] L. A. C. Lopes and H. Sun, "Performance assessment of active frequency drifting islanding detection methods," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 21, No. 1, pp. 171-180, Mar. 2006.
- [5] C. Jeraputra and P. 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, Sep. 2004.
- [6] B. M. Solantro, M. Zareje, S. Eren, and M. Pahlevani, "Stability analysis of the slip mode frequency shift islanding detection in single phase PV inverters," *IEEE 26th ISIE*, pp. 873-878, Jun. 2017.
- [7] G. A. Smith, P. A. Onions, and D. G. Infield, "Predicting islanding operation of grid connected PV inverters," *Proc Inst. Elect. Eng.*, Vol. 147, No. 1, pp. 1-6, Jan. 2000.
- [8] M. E. Ropp, M. Begovic, and A. Rohatgi, "Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention," in *IEEE Trans. Energy Conu.*, Vol. 14, pp. 810-816, Sep. 1999.
- [9] J. Li, J. Zhao, J. Wu, and P. Xu, "Improved dual second-order generalized integrator PLL for grid synchronization under non-ideal grid voltages including DC offset," in *2014 IEEE ECCE*, pp. 136-141, Sep. 2014.



김동욱(金東昱)

1995년 12월 8일생. 2018년 한양대 에리카 캠퍼스 전자공학부 졸업. 2018년~현재 한양대 전자공학과 석사과정.



김성민(金成旻)

1980년 7월 18일생. 2003년 서울대 전기공학부 졸업. 2009년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(석사). 2014년 동 대학원 전기정보공학부 졸업(공학박). 2012년~2013년 NCSU 방문 연구원. 2014년~2015년 삼성전자 책임 연구원. 2015년~현재 한양대 에리카캠퍼스 조교수. 당 학회 학술위원.