

불검출 영역 분석을 통한 주파수 이동 단독 운전 검출 기법의 설계 방법

김병현, 설승기
서울대학교 전력전자연구센터

Design Method for Frequency Drift Anti-islanding Detection Method Based on Analysis of Non Detection Zone

Byeong Heon Kim, and Seung Ki Sul
Seoul National University Power Electronics Center (SPEC)

ABSTRACT

AFD(Active Frequency Drift), SMS(Slip Mode frequency Shift)를 비롯한 주파수 이동 단독 운전 검출 방법은 단독 운전 발생 후, 계통의 주파수를 정상 운전 범위 밖으로 이동시켜 OUF(Over/Under Frequency) 릴레이를 동작하게 만들어 단독 운전을 검출한다. 이 방법들의 불검출 영역은 알고리즘에 의한 전류 위상각 변화율과 부하 역률 각 변화율 사이의 관계, 그리고 단독 운전 후 정상 상태(steady state) 운전 주파수에 의해 결정된다. 본 논문에서는 불검출 영역에 영향을 미치는 부하 역률 각 변화율을 분석하고 그를 바탕으로, 설계한 Q(Quality) factor보다 낮은 Q factor를 갖는 부하 조건에서는 항상 단독 운전을 검출할 수 있는 설계 방법을 제시한다. 제안된 방법의 유효성은 모의실험 및 실험으로 검증되었다.

1. 서론

단독 운전(Islanding) 상황은 분산 전원이 부하와 함께 일부 계통 시스템을 형성하고, 이 일부가 나머지 전력 계통 시스템과 전기적으로 분리되었을 때, 분산 전원이 부하에 에너지를 지속적으로 공급하고 있는 운전 상태를 말한다. 단독 운전 상황이 발생하는 경우 안전사고나 재접속 시 계통과의 위상 동기화의 불가능으로 인한 단락 사고 등이 발생할 수 있다. 이 때문에 분산 전원의 국내의 접속 규정에서는 단독 운전을 검출하여 제한된 시간 내에 검출할 것을 요구한다.

단독 운전을 검출하기 위한 방법 중 내장형 방법은 인버터의 프로그램에 내장할 수 있어 추가 설비가 필요치 않다. 내장형 방법은 단독 운전 발생 순간의 시스템 상수 변화를 감지하는 수동형 방법과 인버터로 외란을 일으켜 그로 인한 변화를 통해 단독 운전을 검출하는 능동형 방법으로 나뉜다.

본 논문에서는 능동형 방법의 하나인 주파수 이동 단독 운전 검출 기법의 설계 방법을 제안한다. 주파수 이동 단독 운전 검출 기법의 불검출 영역의 조건을 분석하고, 이 분석을 바탕으로 원하는 부하 조건에서 단독 운전을 검출할 수 있는 설계 방법을 제안한다. 제안된 방법은 모의실험 및 실험으로 그 유효성을 검증하였다.

2. 본론

2.1 주파수 이동 단독 운전 검출 기법

2.1.1 동작 원리

주파수 이동 단독 운전 검출 기법은 단독 운전 발생 후, 계통의 주파수를 정상 운전 범위 밖으로 이동시키고 OUF(Over or Under Frequency) 릴레이의 동작을 통해 단독 운전을 검출하는 방법이다. 이 기법은 계통 주파수를 다양한 형태의 함수

형태로 전류 지령의 위상각에 피드백하는 것으로 해석할 수 있다. θ_{FDM} 은 피드백 성분으로 계통 주파수 정보를 포함한다.

$$i^* = I \sin(\omega t + \theta_{FDM}) \quad (1)$$

단독 운전 발생 후, 계통 전압은 인버터의 출력 전류와 연결된 부하의 임피던스에 의해서 결정된다. 단독 운전 후, 정상 상태(steady state)에 이르렀을 때, 식 (2)와 같이 인버터에서 공급하는 전류의 위상각과 부하의 역률 각(θ_{load})이 같아진다. 식 (2)를 만족하는 정상 상태 운전 주파수가 정상 운전 범위 밖으로 벗어나는 경우 OUF 릴레이가 동작하여 단독 운전으로 검출하게 된다.

$$\theta_{FDM} = \theta_{load} \quad (2)$$

2.1.2 불검출 영역 분석^[1]

주파수 이동 단독 운전 검출 기법의 불검출 영역은, 정상 상태에 도달했을 때 계통 운전 주파수가 정상 운전 범위 안에 들어와 OUF 릴레이를 동작시키지 못하는 경우로 볼 수 있다.

식 (2)의 조건을 만족하는 주파수가 정상 운전 범위 내에 있더라도, 해당 주파수에서 알고리즘에 의한 전류 위상각 변화율이 부하 역률 각 변화율보다 커서 식 (3)을 만족할 때에는 정상 운전 범위 밖으로 주파수를 이동시킬 수 있어 단독 운전으로 검출할 수 있다. 즉, 식 (2)의 조건에서 식 (3)의 조건을 만족시키지 못하는 경우 불검출 영역에 속하게 된다.

$$\frac{d\theta_{FDM}}{df} > \frac{d\theta_{load}}{df} \quad (3)$$

2.1.3 제안된 설계 방법

제안된 방법은 정상 주파수 운전 범위 내에서, 제시된 부하 조건 하에 항상 식 (3)의 조건을 만족할 수 있는 θ_{FDM} 을 설계하여 단독 운전을 검출할 수 있도록 한다. 즉, $d\theta_{FDM}/df$ 가 항상 식 (3)을 만족하도록 설계하는 방안을 제시한다. 부하를 RLC 병렬 회로로 가정하여 부하의 역률 각을 식 (4)와 같이 계산한다면, 식 (3)의 우변은 식 (5)와 같이 정리할 수 있다.

$$\theta_{load} = -\tan^{-1} \left[Q_f \left(\frac{f_0}{f} - \frac{f}{f_0} \right) \right] \quad (4)$$

$$\Phi_{load} = \frac{d\theta_{load}}{df} = \frac{Q_f f_0 f^2 + Q_f f_0^3}{Q_f^2 f^4 + (1 - 2Q_f^2) f_0^2 f^2 + Q_f^2 f_0^4} \quad (5)$$

여기서 Q_f 는 부하의 Q(Quality) factor로 $R\sqrt{C/L}$, f_0 는 부하의 공진 주파수로 $(2\pi\sqrt{LC})^{-1}$ 로 구할 수 있다.

그럼 1은 Φ_{load} 를 운전 주파수에 대해 그 값을 나타낸 것이

다. 부하의 공진 주파수가 일정할 때, Q factor가 커질수록 Φ_{load} 는 커진다. 결과적으로, 동일 조건으로 설계된 알고리즘에 대해, Q factor가 높을수록 단독 운전 검출이 어려워진다. 부하 공진 주파수는 식 (5)의 크기 변동에 큰 영향을 미치지 않는다.

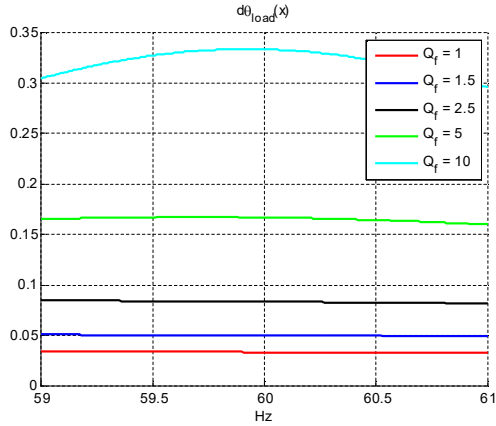


그림 1 Q-factor에 따른 부하 역률 각의 변화율

Fig 1 Derivative of load phase angle according to Q-factor

그림 1의 결과를 통해, 검출하려는 부하 조건의 Q factor보다 큰 Q factor의 Φ_{load} 를 $d\theta_{FDM}/df$ 로 사용하면 항상 단독 운전을 검출할 수 있다는 사실을 알 수 있다. 그러나 식 (5)를 사용하는 경우, θ_{FDM} 이 arctan 함수가 되므로 Φ_{load} 를 식 (6)과 같이 테일러 2차 근사하고 이를 적분하여 θ_{FDM} 을 얻는다.

$$\Phi_{load} \simeq \Phi(f_g) + \Phi'(f_g)(f - f_g) + \frac{1}{2}\Phi''(f_g)(f - f_g)^2 \quad (6)$$

f_g 는 계통의 기준 주파수를 나타낸다. 규정에 따라 최대 부하 Q factor 2.5까지 검출할 수 있어야 한다.^[2] Q factor를 5로 설계하면 이러한 부하 조건을 충분히 검출할 수 있으며, 정상 운전 주파수에서 역률 0.99 이상의 운전이 가능하다.

2.2 모의실험 및 실험 결과

5kW 용량의 태양광 전력 변환 장치에 대해, 모의실험과 실험을 통해 제안된 방법으로 설계된 단독 운전 검출 기법의 성능을 확인하였다. 모의실험은 MATLAB과 PLECS를 이용했다.

2.2.1 모의실험 결과

그림 2와 3은 각각 Q factor 2.5로 설정된 RLC 병렬 회로 부하와 PWM 컨버터로 구성된 능동 부하에 대해 단독 운전 시험을 모의한 결과다. 두 경우 모두 단독 운전 발생 후, 주파수가 정상 운전 범위를 벗어나 단독 운전을 검출할 수 있었다.

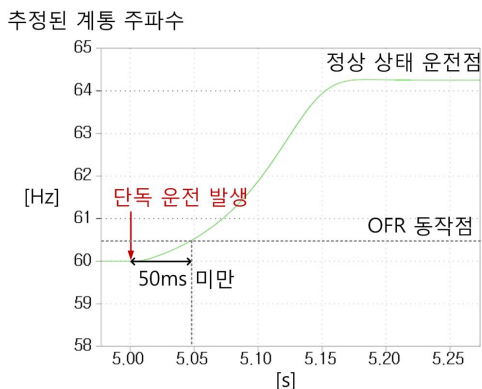


그림 2 단독 운전 시험 결과 (Q-factor 2.5의 부하 조건)

Fig 2 Islanding test simulation (Q-factor 2.5)



그림 3 단독 운전 모의실험 (능동 부하)

Fig 3 Islanding test simulation (active load)

2.2.2 실험 결과

그림 4는 Q factor 2.5로 설정된 RLC 병렬 회로 부하로 단독 운전 시험 회로를 구성한 후, 실제 실험을 통해 얻은 파형이다. 계통이 차단되어 계통 입력 전류가 차단된 후, 주파수가 이동하여 OFR을 동작시키게 된다. 20ms 내에 단독 운전으로 검출되어 국내의 접속 규정이 만족됨을 확인할 수 있다.

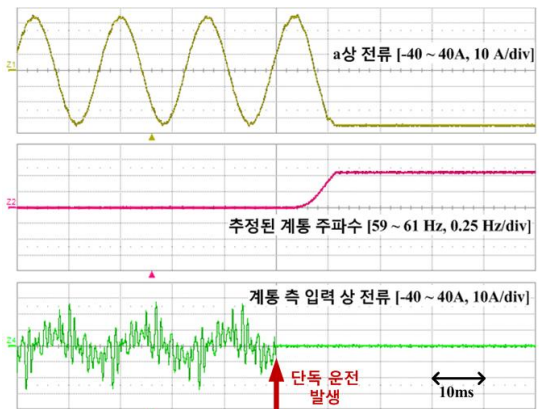


그림 4 단독 운전 실험 결과

Fig 4 Result of islanding test experiment

3. 결론

본 논문에서는 주파수 이동 단독 운전 검출 기법의 동작 원리와 불검출 영역을 분석하고, 그를 바탕으로 제시된 부하 조건에서 항상 단독 운전을 검출할 수 있는 설계 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 제시된 부하 조건보다 낮은 Q factor를 갖는 부하에 대해 단독 운전을 검출할 수 있었으며, 운전 역률 역시 고려하여 설계할 수 있었다. 또한, 모의실험 및 실험을 통해 제안된 설계 방법의 단독 운전 검출 성능을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] Luiz A. C. Lopes and Huili Sun, "Performance Assessment of Active Frequency Drifting Islanding Detection Methods." *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 21, no. 1, pp. 171-180, Mar. 2006.
- [2] IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic(PV) Systems, IEEE Std. 929-2000.