

RPV 기법의 단독운전 검출에 대한 분석

박권식, 서병준, 김학수, 노의철
부경대학교

Analysis of Islanding Detection with Reactive Power Variation Method

Gwon Sik Park, Byeong Jun Seo, Hak Soo Kim and Eui Cheol Nho
Pukyong National Univ.

ABSTRACT

본 논문에서는 분산전원의 계통 연계형 시스템에서의 단독운전 검출 방식인 RPV(Reactive Power Variation)기법에 대한 고찰과 주파수 검출 방식을 분석한다. IEEE 929 2000에 근거하여 RPV 기법에서의 NDZ에 대하여 살펴보고, PLL(Phase Locked Loop) 기법을 이용한 주파수 검출에 대한 분석 및 설계와 이를 통한 단독운전 검출을 하고자 한다. 시뮬레이션을 통하여 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

최근 분산전원이 늘어나고 있는 가운데 계통과 연계 시 안전성에 대한 관심이 증가하고 있다. 계통 사고 발생 시 안전성을 위해 분산전원은 단독운전을 검출하여 차단동작을 수행하여야 한다^[1]. 단독운전을 검출하기 위한 방식으로 수동 방식과 능동 방식이 있다. 능동적 방식 중 RPV(Reactive Power Variation) 기법은 일정 비율의 무효전력을 주입하여 계통 사고 시 PCC(Point of Common Coupling) 지점에서 부하의 위상을 변화시킨다. 이는 가장 간단한 방법으로서 ADF(Active Drift Frequency) 방식과는 다르게 전류의 왜곡이 없어 전류의 THD를 높이지 않는 장점이 있다^[2]. 그러나 일정 부하에서 NDZ(None Detecting Zone)을 벗어나지 못하는 문제가 있어 주기적으로 무효전력의 위상을 변화시키는 방법이 제시되었다.

본 논문에서는 단상 계통 연계형 인버터에서 주기적으로 무효전력의 위상을 바꾸는 방법에 대한 분석과 그에 대한 설계 기법을 고찰하고자 한다.

2. RPV 기법 및 설계

2.1 RPV방식에서의 NDZ

RPV 기법은 임의의 무효전력을 계통으로 투입하면서 차단 시 PCC에서의 주파수 변화를 OFP(Over Frequency Protection), UFP(Under Frequency Protection)를 통해 검지한다. IEEE 929 2000에 따르면 주파수에 대한 NDZ의 범위는 $59.3 \leq f \leq 60.5$ 이다. 유효전력에 대한 무효전력 변화량의 범위로 나타내면

$$Q_f[1 - (\frac{f}{f_{\min}})^2] \leq \frac{\Delta Q}{P} \leq Q_f[1 - (\frac{f}{f_{\max}})^2] \quad (1)$$

로 표현 가능하다. Q_f 는 Quality Factor이며, 규정상 2.5를 따른다. 각 파라미터를 대입 후 계산하면

$$-5.83[\%] \leq \frac{\Delta Q}{P} \leq 4.16[\%] \quad (2)$$

으로 NDZ를 없애기 위한 최소 무효전력 투입 비를 알 수 있다.

2.2 Phase Lock Loop

투입한 무효전력에 의해 변화하는 주파수를 정확히 검출하기 위해서 강인한 PLL기법이 필요하다. 본 논문에서는 무효전력의 투입을 DQ변환을 한 후, Q_{ref} 값을 변수로 제어하였다.

DQ변환 후 전압의 무효 성분인 V_q 에 대하여, PLL시 위상이 일치할 경우 근사적으로 $\sin(\theta_i - \theta_o) \approx \theta_i - \theta_o$ 로 볼 수 있다. 하지만 계통 주파수의 2배인 120 [Hz]성분의 리플이 존재하므로 Notch 필터를 이용하여 이를 제거한다. Notch 필터의 전달함수는

$$G_n(s) = \frac{s^2 + \zeta_2 \omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + \zeta_1 \omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

이다. $f = 120$ [Hz], $\zeta_2 = 0.0001$, $\zeta_1 = 0.1$ 일 경우 120 [Hz]성분의 리플 크기는 10^3 배 감소한다. 직류 성분에 대해서는 위상 지연이 없기 때문에 PLL의 폐루프에서 Notch 필터는 고려하지 않는다. 따라서 간략화 된 PLL의 폐루프 전달함수는 식 (4)와 같다.

$$\frac{\theta_o}{\theta_i} = \frac{K_p s + K_i}{s^2 + K_p s + K_i} \quad (4)$$

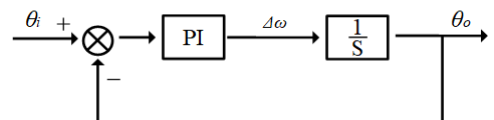


그림 1 간략화된 PLL 블록선도

Fig. 1 Simplified PLL Block Diagram

식 (4)에서 Band Width = 1000 [rad/s], Phase Margin = 90° 일 때, $K_p = 1000$, $K_i = 17500$ 이다.

2.3 주파수 검출

PLL을 통하여 구한 ω 에 대하여 주파수 성분으로 변화시킨다. 이때 주파수에 대한 NDZ 영역이 작으므로 주파수의 리플 또한 작아야 한다. 2차 LPF의 전달함수는 식 (5)와 같다.

$$G_{LPF}(s) = \frac{\omega_f^2}{s^2 + 2\zeta\omega_f s + \omega_f^2} \quad (5)$$

실제 계통의 주파수가 흔들릴 경우가 존재하므로, 과제동으로 설계한다. 따라서 제동비는 0.9, 차단 주파수 $f = 25$ [Hz]로 설계한다.

2.4 무효전력 변동 기법

2.1절의 식 (2)에서 알 수 있듯이, 부하에 따라 NDZ를 벗어나기 위한 무효전력 투입 비가 다르다. 또한 인버터 출력 전류의 역률이 부하 역률과 일치할 때, 계통 차단 시 주파수가 변하지 않는다. 따라서 NDZ를 벗어나 수 있는 최소한의 무효전력 비를 투입하고, 일정 주기로 무효전력을 변동시킨다. 국내 규정을 만족하기 위해선 0.5초 이내에 단독운전을 검출하고 차단동작을 수행하여야 한다. 무효전력을 변동시킬 때, PLL, LPF의 지연시간을 고려하여야 한다. PLL의 정착시간이 충분히 작을 경우 LPF의 영향이 지배적이므로 LPF에서의 정착시간만을 고려한다. 설계한 LPF에서 정착시간은 대략 30 [ms]이다. 단독운전을 검출을 위한 최소한의 무효전력이 인버터 출력 유효전력의 6[%]일 때, Q_{ref} 가 음에서 양으로 변화 시 정착시간의 2배정도 고려를 해주어야 하므로 무효전력 변동 주기를 4 cycle로 정한다.

3. 시뮬레이션

앞서 설계한 PLL, LPF를 디지털로 구현하여 시뮬레이션을 진행하였다. 부하는 $Q_f = 2.5$, $P = 3$ [kW]로 계산하였다. 투입하는 무효전력의 비는 6[%]이다. 인버터 출력과 동일하고 60 [Hz]로 공진하는 R L C 부하, 인버터 출력과 역률이 같은 R L 부하 두 가지 상황에 대해서 시뮬레이션을 하였다. 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation Parameters

| | | | |
|--------------------|-------------|--------------------|--------------|
| L | 3 [mH] | R | 1 [mΩ] |
| V _{dc} | 380 [V] | R _{load1} | 16.13 [Ω] |
| L _{load1} | 17.118 [mH] | C _{load1} | 411.042 [μF] |
| L _{load2} | 713.25 [mH] | | |

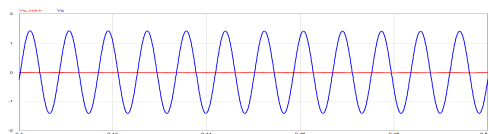
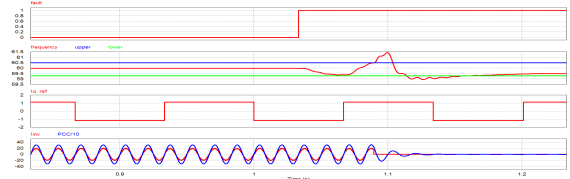
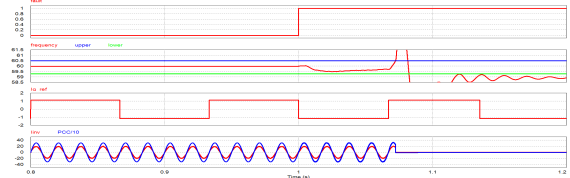


그림 2 Notch 필터 적용 전과 후의 V_q
Fig. 2 V_q with (Red) and without (Blue) Applying Notch Filter



(a) R-L-C 부하일 경우



(b) R-L 부하일 경우

그림 3 부하에 따른 단독운전 검출 파형

Fig. 3 according to load Islanding detection waveforms

시뮬레이션 결과 그림 2와 같이 V_q 의 120 [Hz]성분의 리플은 약 0.003배 감소하였다.

계통 주파수로 공진하는 부하일 경우, 그림 3 (a)와 같이 최악의 경우를 고려하였을 때 약 4 cycle 후 단독운전 검출이 가능하다. 무효전력을 유효전력의 6[%], 즉 역률 0.998인 부하에서의 단독운전 검출 시간은 (b)에서 4.5 cycle 정도 이다. 이에 따라 앞서 설계한 PLL, LPF, Notch와 지연시간을 고려한 변동 주기의 설정이 타당함을 보인다.

4. 결론

본 논문에서는 분산전원에서의 단독운전 검출 방식 중 능동 방식인 RPV 기법에 대하여 설계 및 분석을 하였다. NDZ에 대한 무효전력 변동 주기를 적절히 설정함으로써 규정된 시간 내에 차단동작을 제대로 수행함을 확인하였다.

주파수에 대한 NDZ가 작으므로 실제 계통의 주파수가 흔들리는 경우가 존재한다. 따라서 PLL 후 변환하는 주파수의 리플 성분이 아주 작아야 한다. 앞서 설계한 방식은 주파수의 리플이 작고 변화하는 주파수에 대하여 빠르게 추종함으로써 설계 방식에 대한 타당성을 보였다. 또한 RPV 기법은 전력 품질에 영향을 미치지 않을 뿐만 아니라 역률 또한 0.99 이상으로 실제 계통에서의 신뢰성이 높을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] Ropp M. E., Begovic M., Rohatgi A., "Determining the Relative Effectiveness of Islanding Prevention Techniques Using Phase Criteria and Non detection Zones", IEEE Tran. on Energy Conversion, Vol. 15, No. 3, pp. 290-296, 2000.
- [2] G. H. Choe, Bayasgalan D, Y. J. Lee, D. H. Han, "Characteristic Analysis of RPV and AFD for Anti Islanding in Active Method", Transaction of the Korea Institute of Power Electronics, Vol. 14, No. 2, Apr. 2009.