

단독운전방지를 위한 AFD 와 RPV 방식의 비교 분석

바이사, 이영진, 정병환*, 김홍성**, 최규하
 건국대학교, 삼성 탈레스* 한빛EDS**

Analytical comparison of AFD and RPV methods for Anti-Islanding

Bayasgalan, Young-Jin Lee, Byong-Hwan Jeong, Hong-Sung Kim, Gyu-Ha Choe
 Konkuk University, Samsung Tales*, Hanbit EDS**

ABSTRACT

To detect islanding mode when the grid is being tripped is a major safety issue in the Utility Interactive Distributed Generation (UIDG) system. In this paper, analytical design method is suggested for AFD & RPV method under IEEE929-2000 recommended islanding test condition. We have discussed that there is a same point. we injected reactive component of the current by AFD & RPV methods, but the current reference generated is other waveform. Possible if amount of reactive components in this methods are same each method, there is happened same rates frequency variation. To verify the validity of the analytical comparison, this paper presents simulation and experimental results from single phase, 3[kW] inverter for the transformerless UIDG system.

Keyword: Active Frequency Drift(AFD), Reactive Power Variation(RPV), Anti-Islanding, Active method

1. 서론

단독운전은 계통에서 전력공급이 중단된 상태로 계통의 사고 또는 정전발생시 전로의 유지/보수 및 기타의 사유로 계통을 차단하였을 때 분산전원 시스템이 이를 검출하지 못하여 배전선에 전력을 공급하는 현상이다[1]. 단독운전이 발생 할 경우 일차적으로 계통 수리, 유지 관리를 하는 전기 기술자의 안전사고의 가능성이 있으며, 또한 단독운전 중 상용라인에서의 전원 공급이 재개되는 순간에 계통과의 위상이 어긋나있게 되면 계통이나 계통연계형 시스템에 피해가 발생할 수 있다 [2].

단독운전 검출에 의한 다양한 기법들이 개발 되었으며, 수동적 그리고 능동적인 기법으로 나눌 수 있으며, 수동적인 기법은 PCS 출력에 영향을 주지 않고 단지 출력상태를 모니터링하고 단독운전 시에 생기는 특성의 변화를 이용한다. 그러나 단독운전 시에 분산전원에서 발전된 전력량과 부하 요구량이 평형이 되면 연계점에서의 전압 및 주파수 등의 특성이 변하지 않으므로 단독운전을 검출하지 못하게 되는 단점이 있다[4].

그림1에서와 같은 시스템의 출력 전력을 수식 (1)과 (2)로 표현할 수 있으며, 연계점 전압은 유효전력과, 주파수는 무효전력과 관련되어 있음을 볼 수 있다[5]. 반면에 능동적인 기법은 인버터의 출력전류에 영향을 주어, 단독운전 상태에서 분산전원의 발전량과 부하가 요구하는 전력량이 동일하게 유지되는 평형상태를 임의로 깨뜨려 단독운전에 적극적으로 대응하는 방

법이다. 그러나 기준전류에 주입시키는 왜곡 형태에 따라 다양한 방식들이 있다[3].

본 논문에서는 IEEE 929-2000에 제시한 단독운전시험조건 하에서 흔히 많이 사용 되고 있는 AFD와 RPV 방식을 해석하여 시뮬레이션 및 실험을 통해 확인하였다. 논의한 방식들은 전류 기준신호를 만드는 방식이 서로 다르지만 제어를 통해 발생된 무효 성분이란 관점에서 공통점이 있으며, 각각의 방식에서 같은 양의 무효 성분이 발생하도록 제어 할 경우 동일한 결과를 얻을 수 있다. 하지만 파형률, 고조파 특성 등 다른 관점에서 봤을 때 서로 차이가 있어서 각 방식들의 장-단점을 해석 및 실험을 통해 밝히며 어느 방식이 더 우수한지를 알아내는 것이 이 논문의 핵심이다. 시뮬레이션 툴로 PSIM 6.0을 이용했으며, 단상 풀브릿지 인버터를 통해 해석 및 시뮬레이션을 검증하기 위해 실험을 하였다.

$$P_{Load} = V_{scm} \frac{V_{scm}}{R} \quad (1)$$

$$Q_{Load} = V_{scm} \left[\frac{V_{scm}}{\omega L} - \omega C V_{scm} \right] \quad (2)$$

2. 계통연계형 분산전원 시스템

그림1에서는 신재생에너지의 대표로서 일반적인 계통연계형 연료전지 시스템 구성도를 보여 주고 있으며 분산전원과 계통간의 전력 흐름을 나타낸 것으로, 연료전지를 표현하는 정전류원, PCS 시스템, 부하 그리고 계통 연결 스위치 등으로 구성되어 있다. 제어 알고리즘은 계통연계형 분산전원시스템에서 필수적인 기술로서 저주파 리플 억제, PLL, 전압전류 제어로 나타나며, 이 중에서 단독운전방지 기술은 전류제어에 속하고 있다.

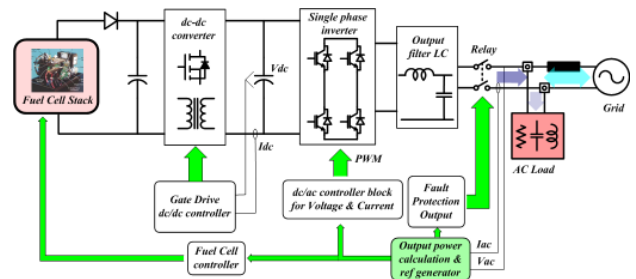


그림 1. 계통연계형 분산전원시스템의 개념도
 Fig.1. Concept of UIDG system.

3. 단독운전 방지 기법

A. AFD: Activer frequency drift 방식

주파수변동방식 (이하 AFD라 함)은 인버터출력 전류의 주파수를 정확히 계통의 주파수 보다 빠르게 또는 느리게 바꾸어 단독운전 발생시 주파수 변함을 이용하여 검출하는 방법이다.[2][9] 그림 2에서 AFD방식의 인버터출력 전류의 기준 신호를 보여 주고 있으며 수식은 주파수를 빠르게 또는 느리게 함에 따라 식(3, 4)과 같다.

- 반주기 주파수를 높게 할 경우

$$f(t) = \begin{cases} \sin((\omega+k'\omega)t) & 0 < t < t'_1 \\ = 0 & t'_1 < t < t'_1 \\ = \sin((\omega+k'\omega)(t-\Delta t_1)) & t_1 < t < t'_2 \\ = 0 & t'_2 < t < t_2 \end{cases} \quad (3)$$

여기서 $\omega(t)$: PLL 추정 계통 각 주파수
 $0 \leq k' \leq 1$ 임

- 반주기 주파수를 낮게 할 경우

$$f(t) = \begin{cases} \sin((\omega+k'\omega)t) & 0 < t < t_1 \\ = \sin((\omega+k\omega)(t+\Delta t_2)) & t_1 < t < t_2 \end{cases} \quad (4)$$

여기서 $-1 < k' \leq 0$

식(3, 4)과 같이 구분적 연속으로 표현된 퍼유니트화된 전류를 푸리에급수를 이용하여 표현하면 식(5)과 같으며 a_n, b_n 은 신호의 유효 및 무효 성분의 크기를 각각 나타내며 주파수가 높일 시 기본파에 대한 계수를 구하면 식(6)과, 주파수가 낮을시 식(7)과 같다.

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (5)$$

$$a_1 = \frac{1}{\pi} \left[\frac{-1}{k'} \left(\cos\left(\frac{k'\pi}{1+k'}\right) - 1 \right) - \frac{1}{k'+2} \left(\cos\left(\frac{k'\pi+2\pi}{1+k'}\right) - 1 \right) \right] \\ b_1 = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{k'} \sin\left(\frac{k'\pi}{1+k'}\right) - \frac{1}{k'+2} \sin\left(\frac{k'\pi+2\pi}{1+k'}\right) \right] \quad (6)$$

$$a_1 = \frac{1}{\pi} \left[\frac{-2(k'+1)}{k'(k'+2)} (\cos(k'\pi) - 1) \right] \quad (7)$$

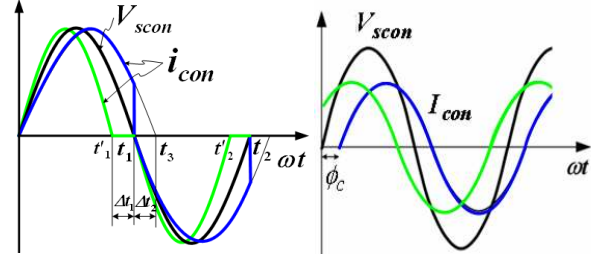
$$b_1 = \frac{1}{\pi} \left[\frac{2}{k'(k'+2)} \sin(k'\pi) \right]$$

B. RPV: Reactive Variation Method 방식

RPV방식은 인버터 출력전류에 미소한 무효 성분일 투입하는 방식이며 유효성분에 대한 무효 성분의 크기를 k 로 표현하면 그림2에서의 신호는 식(8)과 같다. 무효전력의 크기가 커질수록 주파수 변동이 더 많이 생기는 반면 계통에 끼치는 영향이 나빠지며, 역률이 감소된다. 단독운전시 주파수 변동을 주파수 허용범위 안에서 벗어 날수 있도록 무효 전력의 적절량을 주입하는 것이 유리하다.

$$i_{con}^* = i_{ac} + i_{re} = \sqrt{2} I_{con}^* (\sin \omega t + k \cos \omega t) \quad (8)$$

$$k = \frac{Q_{PV}}{P_{PV}} = \frac{V_{scon} I_{con} \cos \omega t}{V_{scon} I_{con} \sin \omega t} \quad (9)$$



AFD를 위한 / for AFD

RPV를 위한 / for RPV

그림 2 단독운전 방지를 위한 전류 기준신호 파형

그림. 2 Current reference for anti-islanding

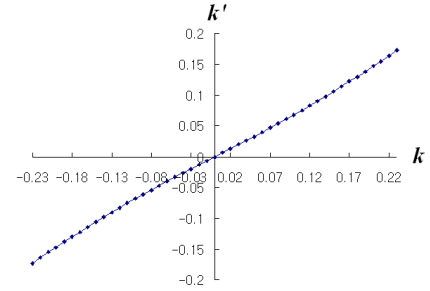


그림 3. k와 k'의 관계그림

Fig. 3 Relationship between k and k'

무효 성분의 크기를 AFD 방식에서 $a_1/b_1 = k'$ 로 RPV 방식에서 k로 표시해 같은 무효 성분의 크기를 중심으로 k'와 k의 관계는 그림3과 같다.

4. 단독운전시의 주파수 변동 해석

단독운전시에 가정용 부하의 병렬 LC의 임피던스는 식(10)과 같으며 이는 시험규정에 따르면 상용전원주파수에서 공진을 유지함으로 계통과 병렬운전 시에는 0이다. 주입된 무효전력을 등가 임피던스 Z_{inj} 로 표현 하면 이는 식(11)과 같다.

$$Z_{LC} = \frac{\omega_i L}{1 - \omega_i^2 LC} \quad (10)$$

$$Z_{inj} = \frac{R \cdot P_{PV}}{Q_{PV}} = j \frac{R}{k} \quad (11)$$

여기서 ω_i 는 단독운전시의 주파수

단독운전시에 임피던스 Z_{LC} 가 변하게 되는 원인이 Z_{inj} 이므로 식(10)과 식(11)에 의한 임피던스는 서로 같게 되며 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\omega_i^2 + \frac{Q_{PV}}{RCP_{PV}} \omega_i - \frac{1}{LC} = 0 \quad (12)$$

$$\omega_i = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot \left(\frac{1}{2} \frac{k}{q} + 1 \right) \quad (13)$$

$$f_i = f_{res} \cdot \left(\frac{k}{2q} + 1 \right) \quad (14)$$

여기서: f_i 는 단독운전시의 전압 주파수

f_{res} 는 RLC 부하에 의한 공진 주파수

식(14)에서 k 가 0일 때 수동방식이 되어 단독운전시의 주파수는 RLC의 공진주파수와 같음을 알 수 있다. IEEE 929-2000 규정에 따르며 q 를 2.5, RLC 부하의 공진 주파수가 60Hz 일 때의 주파수 허용범위를 $59.3 \leq f_i \leq 60.5$ 라면 단독운전 시 주파수가 이 범위를 벗어나기 위해서 k 는 다음 범위의 밖에 있어야 한다.

$$\left(\frac{f_{\min}}{f_{res}} - 1\right) \cdot 2q \leq k \leq \left(\frac{f_{\max}}{f_{res}} - 1\right) \cdot 2q \quad (15)$$

여기서 f_{\min}, f_{\max} 는 단독운전시 주파수의 최대 및 최소 허용 값이다. k 는 식(15)에서와 같은 범위 안에 있을 때 단독운전 시 주파수변동은 허용범위를 벗어나지 않으며 단독운전 검출이 되지 않을 것이다. IEEE 929-2000 규정에서의 주파수의 최대 및 최소 허용범위에 의해서 k 는 다음 범위를 충분히 넘어야 검출이 가능하다. $-5.83\% \leq k \leq 4.16\%$

5. 시뮬레이션 및 실험결과 중요파형

A. 시뮬레이션 및 실험 조건

본 장에서는 AFD와 RPV 방식을 비교 해석 기법을 검증하기 위해서 단상 풀 브릿지 인버터를 통해 시뮬레이션 및 실험 결과를 다루었다. 계통연계형 인버터는 분산전원의 종류와 무관하게 일반적으로 많이 사용되는 단상 풀 브릿지 인버터를 사용하였다. Power Sim사의 P SIM6.0을 사용하여 시뮬레이션 하였으며 시뮬레이션 회로도에는 그림 4와 같으며 시뮬레이션 및 실제 회로에 사용된 각 파라미터 값은 다음과 같다.

$$P = 3[kW], \quad \Delta P[\%] = 0, \quad \Delta Q[\%] = 0,$$

$$f_{sw} = 10[kHz], \quad V_{dc} = 330[V],$$

$$C_{dc} = 3200[\mu F], \quad C_{ac} = 10[\mu F] \quad L_{ac} = 4[mH]$$

B. 시뮬레이션 중요 파형들

그림5의 a)에서 AFD와 RPV 방식의 의한 인버터 출력 전압 및 전류를 보이고 있으며 그림의 전단에는 지상의 무효 성분을 후단에는 진상의 무효 성분이 주입됨을 볼 수 있다. b)에서는 AFD 방식의 전류 기준신호의 FFT 파형을 보이고 있으나 dead time에 의해서 THD가 발생 되는 반면에 RPV 방식에서는 기준신호는 단순한 정현파임으로 THD의 측면에서 봤을 때 RPV 방식의 특성이 좋다고 말할 수 있다. 그림 6에서는 k 와 k' 에 따른 단독운전시 주파수 변동을 보이고 있으며 k 를 8%로 했을 때 k' 의 값의 0.054에 해당되며 단독운전 검출이 됨을 볼 수 있다. 그리고 그림 7에서는 0.5초에 단독운전 발생 하였을 때 검출이 되는 것을 보인다. 2개의 방식에서 거의 비슷하게 위쪽 허용 범위를 2주기 내, 아래쪽 허용범위를 4주기 내에 검출이 된다. IEEE 929-2000에서 제시한 검출 최대시간인 0.5초 내에서 검출이 가능함을 볼 수 있다.

C. 실험 중요 파형들

그림 8에서 AFD와 RPV 방식에서 실제 실험 파형을 보여 주고 있으며 단독운전시 주파수변동 상태를 파악하기 위해서 허용 범위를 넘는 후에도 인버터를 차단시키지 않았다. 그리고

예상대로 두 방식의 결과가 같음을 확인 할 수 있었다.

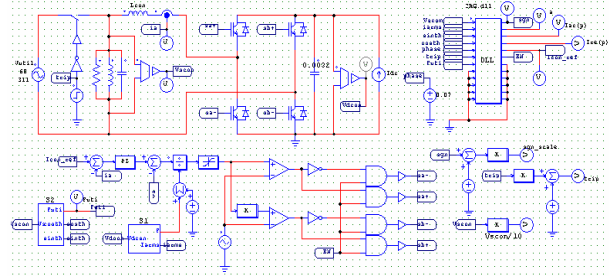
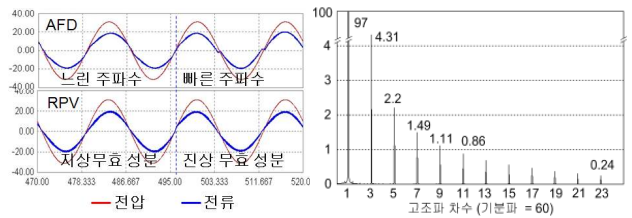


그림 4. 시뮬레이션 회로
Fig. 4 Simulation circuit



a) 전압 전류 파형 b) AFD에서 기준신호의 FFT
a) voltage current waveform b) FFT of ref signal for AFD

그림5. 제어 방식에 따른 교류 전압 및 전류 파형

Fig.5 AC voltage¤t wave dependent on method

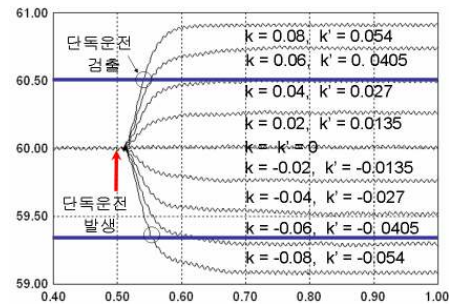


그림 6. k 와 k' 에 따른 주파수 변동 특성

Fig.6 Characteristic of frequency variation depending on k & k'

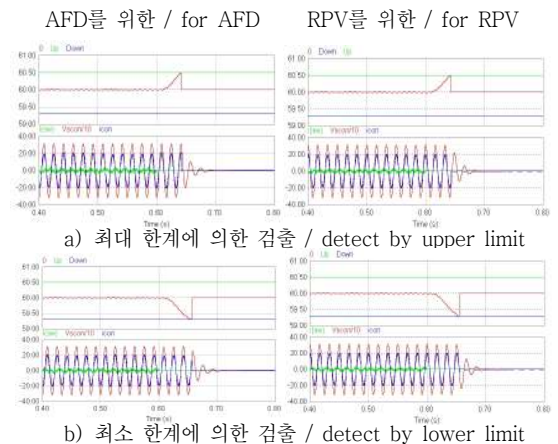


그림 7. 주파수의 변동에 의한 단독운전 검출
Fig. Islanding detect by frequency variation

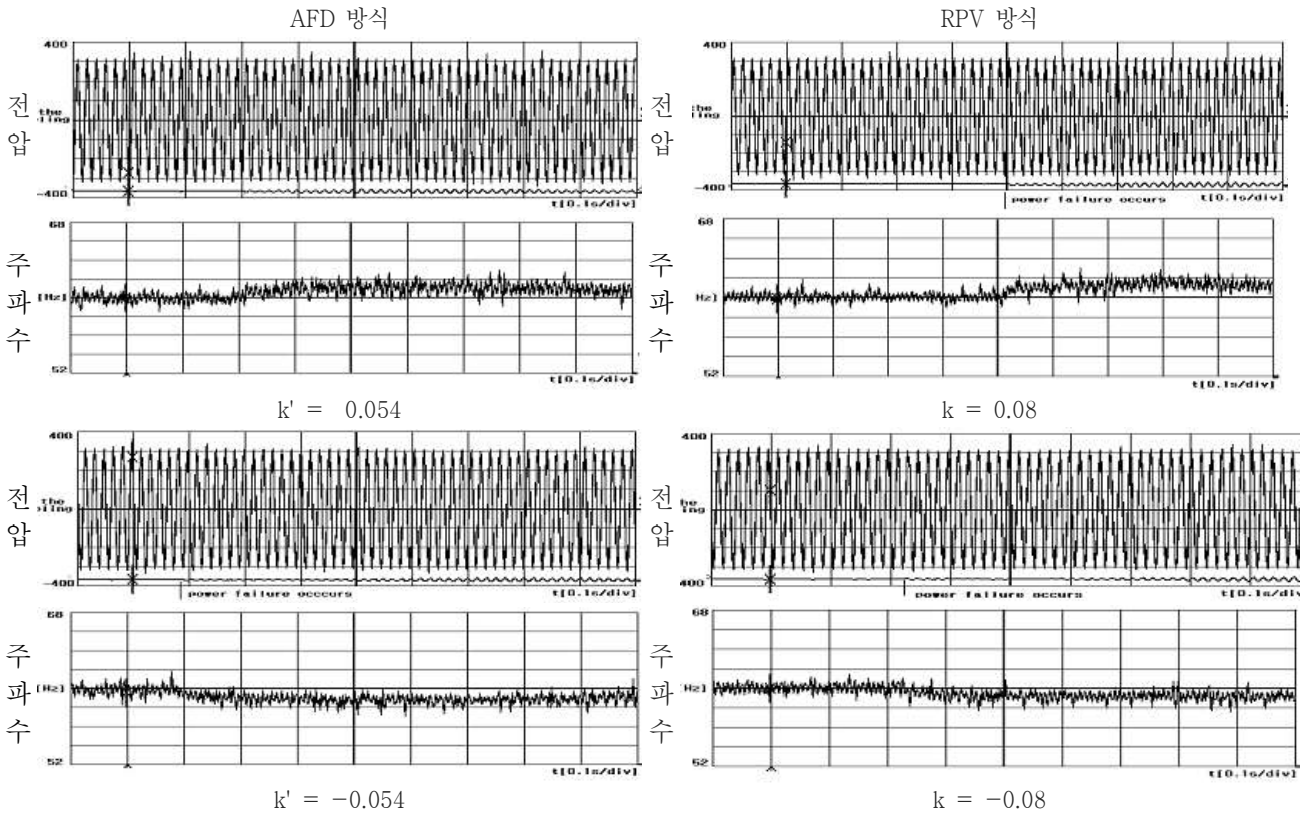


그림 8. AFD 및 RPV 방식 적용시 단독운전 실험 파형
Fig. 8 Experimental waveforms of AFD & RPV

표 1. 각 방식에서 k 와 k' 에 따른 시뮬레이션 및 실험 결과

k	k'	분석	시뮬레이션		실험	
			AFD	RPV	AFD	RPV
-0.08	-0.054	59.04	59.08	59.08	59.02	58.65
-0.06	-0.0405	59.28	59.28	59.30	59.21	58.98
-0.04	-0.027	59.52	59.52	59.53	59.43	59.30
-0.02	-0.0135	59.76	59.76	59.77	59.69	59.77
0	0	60.00	60.00	60.01	60.13	60.17
0.02	0.0135	60.24	60.25	60.25	60.29	60.35
0.04	0.027	60.48	60.48	60.49	60.61	60.79
0.06	0.0405	60.72	60.72	60.74	60.96	61.23
0.08	0.054	60.96	60.90	60.90	61.50	61.67

4. 결론

본 논문에서는 계통연계형 분산전원 시스템에 단독운전방지를 위한 능동적 기법 중 RPV 방식과 AFD 방식에 관하여 이론적 분석을 통하여 단독운전시의 주파수 변동특성 해석과 정량적 설계기준을 제시하였다. 무효성분의 주입량 $k=0.08$ 즉 8%로 하였을 때 이에 의해 전원 측 역률의 감소가 크지 않으므로(99% 정도) 실제로 문제가 없으며, 단독운전 검출이 되지 않는 경우가 없게 된다. 해석 및 실험 결과 모두 일치 하였으며 특히 AFD와 RPV 방식 상호 상관관계를 잘 표현 하였다. 동일한 양의 무효 성분이 발생하도록 k 와 k' 값을 설계하면 단독운전시 주파수특성 변화가 정확히 같았다. 그러나 THD 측 면에서 볼 때 AFD 방식의 경우 데드타임 구간이 커질수록 주파수 변동치가 커져서 단독운전 검출에 유리한 지점을 제공하나 전류고조파가 증가하는 특성을 가졌다. 본 연구의 결론으로

전술한 2개의 방식 중 RPV방식이 우수하다고 볼 수 있었다.

이 논문은 지식경제부 (R-2007-1-015-01) 지원의 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] Chuttchaval Jeraputra, Prasad N. Enjeti, "Development of a robust anti-islanding algorithm for utility interconnection of distributed fuel cell powered generation," IEEE Trans, On Power Electronics, vol. 19, no. 5, pp. 1163-1170, Sept, 2004.
- [2] 김홍성, 김한구, 최규하, 김재철, 최영호, "IEEE 929-2000 단독운전 시험조건 하에서 단상 계통연계형 PV 시스템의 Anti-Islanding을 위한 RPV 방식 및 AFD방식의 해석 및 설계" 전력전자학회 논문지, pp. 37-49, 2007.
- [3] IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic Systems, IEEE Std 929-2000, Approved 30 Jan, 2000.
- [4] M. E. Ropp, M. Begovic, A. Rohatgi, "Analysis and performance assesment of the active frequency drift method of islanding prevention," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 14, no. 3, pp. 810-816, Sept. 1999.
- [5] J.B. Jeong, H.J. Kim, S.H. Back, K.S. Ahn, "An improved method for anti-islanding by reactive power control," Electrical machines & System, ICEMS, vol. 2, pp. 965-970, 27-29, Sept. 2005.