

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 26, No. 1, 2006

계통연계형 태양광발전 인버터에 사용된 AFD기법의 다양한 부하에 따른 단독운전 불검출영역에 대한 고찰

고문주*, 최 익*, 최주엽**

*광운대학교 정보제어공학과(kmjoseph@kw.ac.kr), *광운대학교 정보제어공학과(ickchoy@daisy.kw.ac.kr),
**광운대학교 전기공학과(juyeop@daisy.kw.ac.kr)

A Study of Non-Detection Zone using AFD Method applied to Grid-Connected Photovoltaic Inverter for a variety of Loads

Ko, Moon-Ju*, Choy, Ick*, Choi, Ju-Yeop**

*Dept. of Information and Control Eng., Kwangwoon University(kmjoseph@kw.ac.kr),

*Dept. of Information and Control Eng., Kwangwoon University(ickchoy@daisy.kw.ac.kr),

**Dept. of Electrical Eng., Kwangwoon University(juyeop@daisy.kw.ac.kr)

Abstract

Islanding phenomenon of utility-connected photovoltaic power conditioning systems(PV PCS) can cause a variety of problems and must be prevented. If the real and reactive power supplied by PV PCS are closely matched to those of load, islanding detection by passive methods becomes difficult. The active frequency drift(AFD) method, called the frequency bias method, enables islanding detection by forcing the frequency of the voltage in the islanding to drift up or down. In this paper, non-detection zone(NDZ) of AFD is analyzed for the islanding detection method of utility-connected PV PCS by the simulation software tool PSIM.

Keywords : 단독운전(islanding), 계통연계/utility-connected, 태양광 시스템(PV systems), 능동주파수천이(active frequency drift), 불검출영역(non-detection zone), 인버터(inverters)

기호설명

P_{inv} : 인버터에서 공급하는 유효 전력

Q_{inv} : 인버터에서 공급하는 무효 전력

ΔP : 계통에서 전달되는 유효 전력

ΔQ : 계통에서 전달되는 무효 전력

P_{load} : 부하단에서 필요로 하는 유효 전력
 Q_{load} : 부하단에서 필요로 하는 무효 전력
 V_a : 노드 a에서의 RMS 전압
 ω_{res} : 공진주파수
OVR : Over Voltage Relay
UVR : Under Voltage Relay
OFR : Over Frequency Relay
UFR : Under Frequency Relay
 $T_{V_{Unit}}$: 계통전압의 한 주기
 $T_{I_{PV}}$: PV 시스템의 출력전류의 한 주기
 t_z : 출력전류파형이 0인 구간
 Q_f : Quality Factor

1. 서 론

계통연계형 태양광발전 시스템에서의 단독운전 검출은 계통을 유지보수하기 위한 작업자의 안전을 위하여 고려되어야 할 필수 사항이다.^[1] 그림 1은 단독운전 시험을 위한 계통연계형 태양광발전 시스템을 나타내고, Array, PV PCS, 지역부하, 스위치 그리고 계통으로 구성된다.

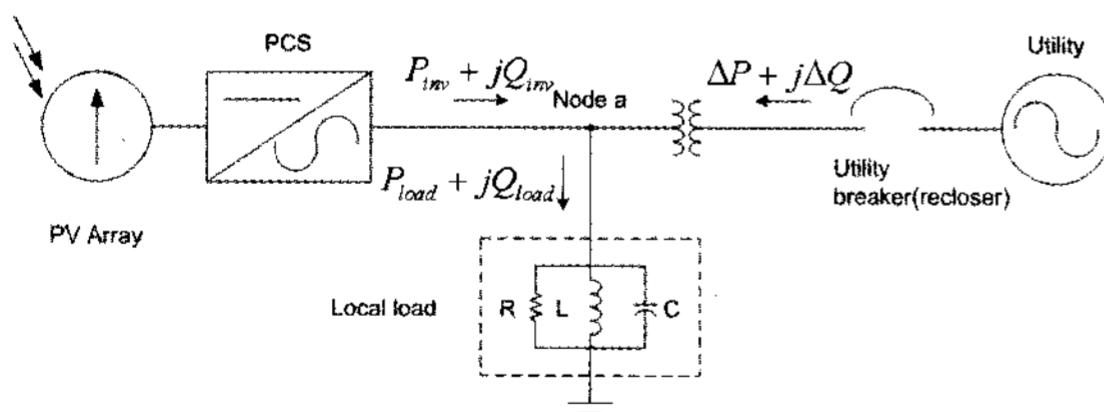


그림 1. 계통연계형 태양광발전 시스템

PV Array는 태양의 빛 에너지를 받아 전기 에너지로 변환시키고, PCS는 각종 제어를 통해 지역부하에 필요한 전력을 공급하며 지역부하에서 소비되고 남은 잉여전력을 계통으로 전달하기도하고, 지역부하에서 소비되는 전력이 오히려 PCS의 출력전력보다 커서 부족한 전력은 계통으로부

터 공급받기도 한다. 이러한 관계를 수식으로 표현하면 수식 (1), (2)와 같이 표현된다.

$$P_{load} = P_{inv} + \Delta P \quad (1)$$

$$Q_{load} = Q_{inv} + \Delta Q \quad (2)$$

수식 (1)과 (2)는 PCS의 출력전력과 계통의 전력을 합한 값이 부하에서 소모되는 전력과 같다 는 것을 나타낸다. 수식(1)은 유효전력에 관련된 수식이고, 수식(2)는 무효전력에 관련된 수식이다. 여기서 ΔP 는 전력의 전달방향에 따라서 부호가 바뀌게 되는데, 계통에서 부하단으로 전력을 공급받을 때는 양의 부호로 나타내고, PCS에서 계통으로 전력이 전달될 때는 음의 부호로 나타내도록 기준을 정하였다.

수식 (1)에서 스위치가 열렸을 때 그 순간 PCS가 공급하는 유효전력과 부하에서 소비되는 유효전력이 일치하지 않으면, 노드 a에서의 RMS 전압 V_a 는 $P_{load} = P_{inv}$ 가 될 때까지 증가하거나 감소할 것이다.^[2] 수식 (2)에서 PCS의 무효전력 생산량과 부하의 무효전력 요구량이 일치하지 않으면 계통이 끊어졌을 때 노드 a에서의 전압의 각주파수 ω 는 $Q_{load} = Q_{inv}$ 가 될 때까지 변할 것이다. 이렇게 노드 a의 전압에 대하여, 단독운전 발생 시 변동하는 주파수와 실효치를 살펴보기 위해서는 다음의 식 3과 4로 생각할 수가 있다.

$$P_{load} = \frac{V_a^2}{R} \quad (3)$$

$$Q_{load} = V_a^2 \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right) \quad (4)$$

PCS가 노드 a 전압에 대하여 역률 1로 전류 제어를 하는 경우, $Q_{inv} = 0$ 이므로 노드 a 전압의 주파수는 부하의 공진주파수와 일치하게 되고 수식 (5)와 같이 표현된다.

$$\omega_{res} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5)$$

만일 노드 a에서 단독운전으로 판단 될 수 있는 수준의 변화가 발생한다면, 이를 PCS는 OVR, UVR, OFR, UFR을 사용하여 단독운전을 검출 할 수 있다.

실제로는 단독운전이 발생할 확률이 매우 낮은 경우이지만, PCS가 공급하는 전력이 부하가 요구하는 전력과 거의 일치한다면, 수동적인 방법만으로는 전압과 주파수의 변화가 부족하여 단독운전 검출이 불가능하게 된다. 그러나 만일 이런 상황에서 단독운전이 발생하게 된다면, 예상하기 어려운 커다란 피해가 발생할 수 있으므로 PV PCS의 출력전력과 부하의 소비전력이 일치되었을 경우에도 단독운전을 검출할 수 있는 능동적인 기법이 필요하게 된다.

본 논문에서는 능동적인 기법 중에서 일반적으로 많이 사용하고 있는 AFD 기법에 대해 알아본다. 또한 전력에 의한 단독운전 불검출 영역을 나타내면 동일한 전력이라 하더라도 이를 구성하는 RLC 병렬 부하의 조합은 무수히 많은 상태가 존재하게 되어 부하 임피던스에 따른 불검출영역을 알 수 있기에 부족함이 있다. 전력에 의한 불검출 영역을 나타내는 방법이 아닌 또 다른 표현 방법은 부하의 임피던스를 이용하여 나타내는 방법이다. 즉 부하의 임피던스에 의한 단독운전 불검출 영역을 인덕턴스와 커패시턴스로 나타내는데, 이 때 직교좌표계의 x축을 인덕턴스로 y축을 인덕턴스와의 공진주파수를 이용하여 일반화시킨 커패시턴스로 나타낼 수 있다. 이와 같은 방법으로 PCS에 내장되어 있는 relay의 trip 설정값에 의한 OVR, UVR, OFR, UFR이 갖는 단독운전 불검출 영역을 자세히 살펴보겠다.

2. AFD 기법

Active Frequency Drift(AFD) 기법이란 PCS가 계통으로 공급하는 전류의 주파수를 정확히 계통의 주파수에 동기 시키는 것이 아니라 출력전류의 주파수를 계통전압의 주파수보다 빠르게 또는 느리게 바꾸어 단독운전 발생 시 노드 a의 전압의 주파수에 변화가 발생하는 것을 이용하여 단독운전을 검출하는 방법이다.

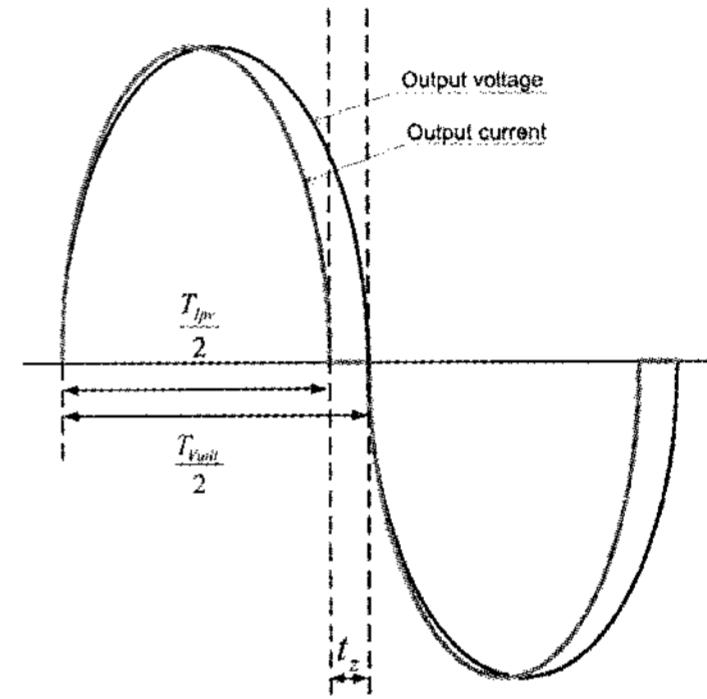


그림 2. AFD 기법을 사용한 출력전류파형

$$Chopping Fraction(cf) = \frac{2t_z}{T_{V_{out}}} \quad (6)$$

그림 2는 AFD 기법을 사용한 출력전류파형이다. 여기서, $T_{V_{out}}$ 은 계통전압의 한 주기를 나타내고, $T_{I_{pv}}$ 는 PCS의 출력전류의 한 주기를 나타내며, t_z 는 출력전류파형이 0인 구간을 나타낸다. 수식 (6)에서 Chopping Fraction(CF)은 출력전류파형의 한 주기 동안에 전류가 0인 구간을 나타낸다.^{[3][4]}

3. 시뮬레이션 조건

그림 3은 계통연계형 시스템의 단독운전검출 성능시험에 사용되는 구성도를 나타낸다. 여기서

RLC 부하의 시뮬레이션 조건은 다음과 같이 정의한다.

- 1) RLC 부하의 공진주파수는 계통의 선간전압의 주파수(60Hz)와 동일하다.
- 2) RLC 부하의 Q_f (Quality Factor)는 1.0으로 한다. 물리적으로 L 혹은 C에 저장된 무효전력을 R에서 소모되는 유효전력에 Q_f 를 곱한 것으로 정의한다.
- 3) 인버터에서 공급되는 전력은 RLC부하의 전력과 일치한다. (그림 3에서 $\Delta P = \Delta Q = 0$)

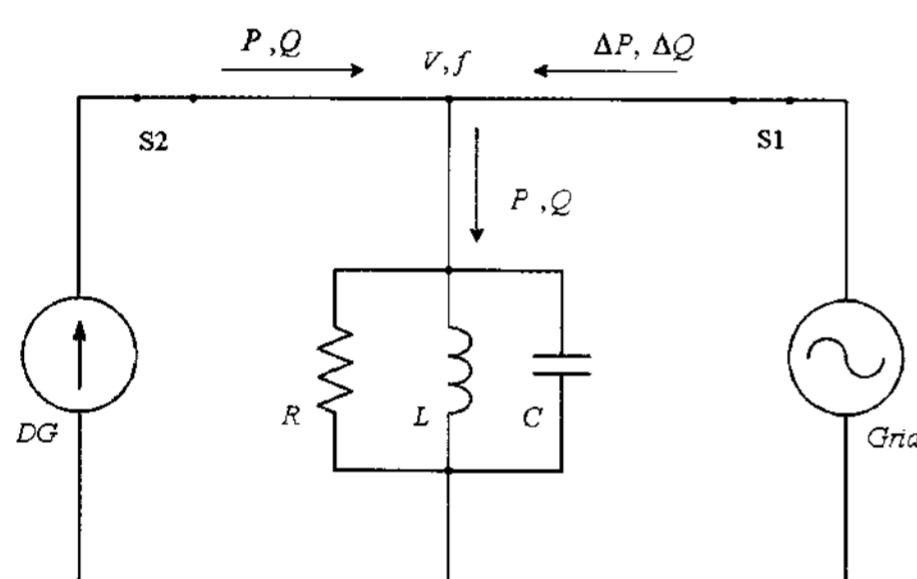


그림 3. 계통연계형 시스템의 일반적인 형태

그림 4는 인버터가 일정전력제어를 한다고 가정하고 $\Delta P \neq 0, \Delta Q \neq 0$ 인 조건에서 계통이 끊어졌을 때, 전압과 주파수가 V' , f' 로 바뀌는 것을 보여준다. 전력 불일치 경계값과 전압 주파수 경계값의 관계는 수식 (7), (8)과 같이 나타낸다.^{[5][6][7]}

앞의 이상적인 조건 1) ~ 3)에서 스위치 S1이 열렸을 때 수동적인 방법으로는 단독운전을 감지하지 못할 것이다.

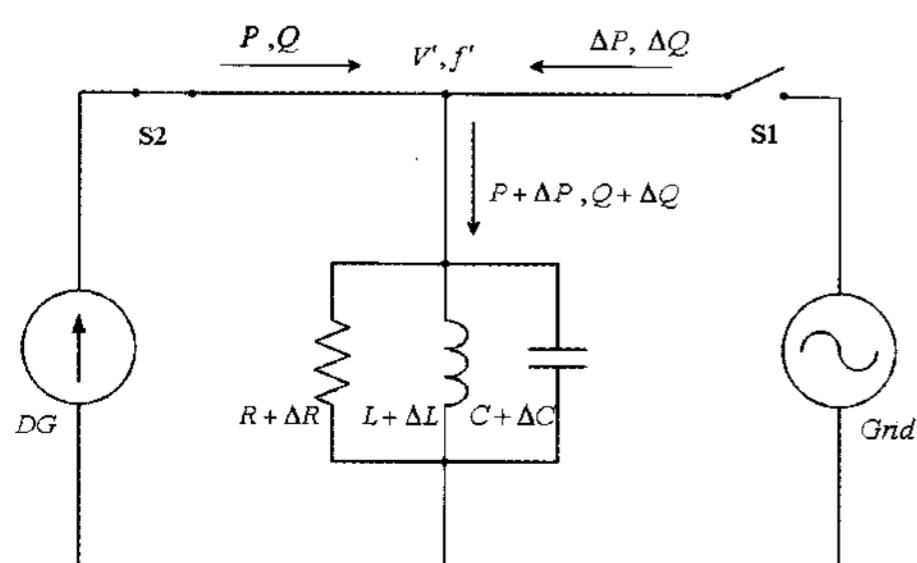


그림 4. 계통이 끊어진 후 태양광발전 인버터와 RLC

$$\left(\frac{V}{V_{\max}}\right)^2 - 1 \leq \frac{\Delta P}{P} \leq \left(\frac{V}{V_{\min}}\right)^2 - 1 \quad (7)$$

$$Q_f \left\{ 1 - \left(\frac{f}{f_{\min}} \right)^2 \right\} \leq \frac{\Delta Q}{P} \leq Q_f \left\{ 1 - \left(\frac{f}{f_{\max}} \right)^2 \right\} \quad (8)$$

여기서 V_{\max} , V_{\min} , f_{\max} , f_{\min} 은 각각 UV/OV UF/OF 경계값이다. UL1741에 의하면 $V_{\max} = 110\% * V$, $V_{\min} = 88\% * V$, $f_{\max} = 60.5\text{Hz}$, $f_{\min} = 59.3\text{Hz}$ 이다.^[8] $Q_f = 1.0$ 을 적용하면 위의 수식은 다음과 같은 결과를 나타낸다. 단 수식 (11), (12)는 P가 3 kW일 때의 값이다.

$$-17.36\% \leq \frac{\Delta P}{P} \leq 29.13\% \quad (9)$$

$$-2.3748\% \leq \frac{\Delta Q}{P} \leq 1.6406\% \quad (10)$$

$$-520.8 \leq \Delta P \leq 873.9 \quad (11)$$

$$-71.2 \leq \Delta Q \leq 49.4 \quad (12)$$

그림 5는 수식 (9) ~ (12)의 결과를 ΔP 와 ΔQ 를 축으로 하여 나타낸 그림이다. 이 그림은 OVR, UVR, OFR, UFR만을 사용하는 수동적인 방법에서의 불검출영역을 나타내는데, 실선으로 표시된 사각형 안쪽이 불검출영역이 된다.

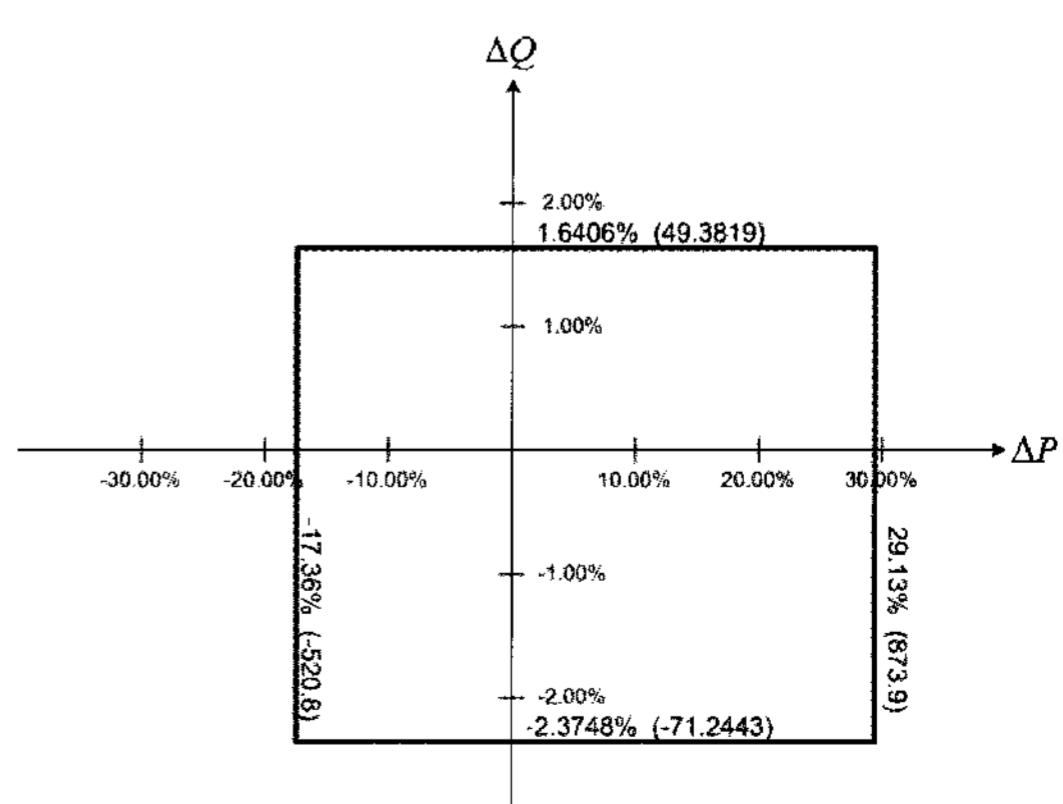


그림 5. OVR/UVR/OFR/UFR에 의한 불검출영역

4. 시뮬레이션

그림 6은 PSIM 프로그램에 사용된 시뮬레이션 회로를 나타내고 있다. 이 시뮬레이션 회로에서 PCS를 전압제어 전류원으로 대체하였고, DLL(Dynamic Linked Library)을 이용하여 PV 시스템과 계통과의 연계점의 전압 정보를 받아 필요한 PCS의 출력전류 및 PLL(Phase Locked Loop)의 계산과 CF를 추가한 파형을 생성하는데 이용하였다.

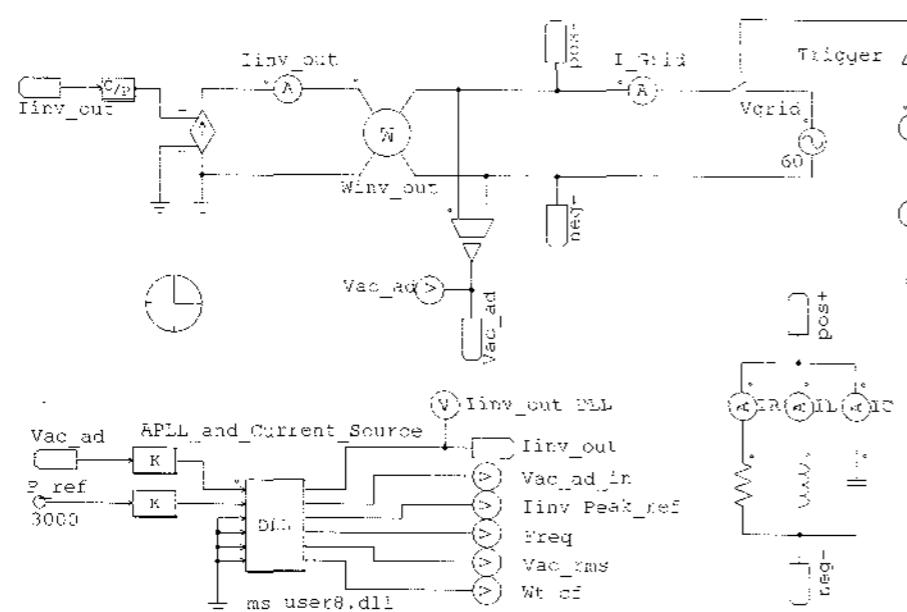


그림 6. 시뮬레이션에 사용된 회로(PSIM)

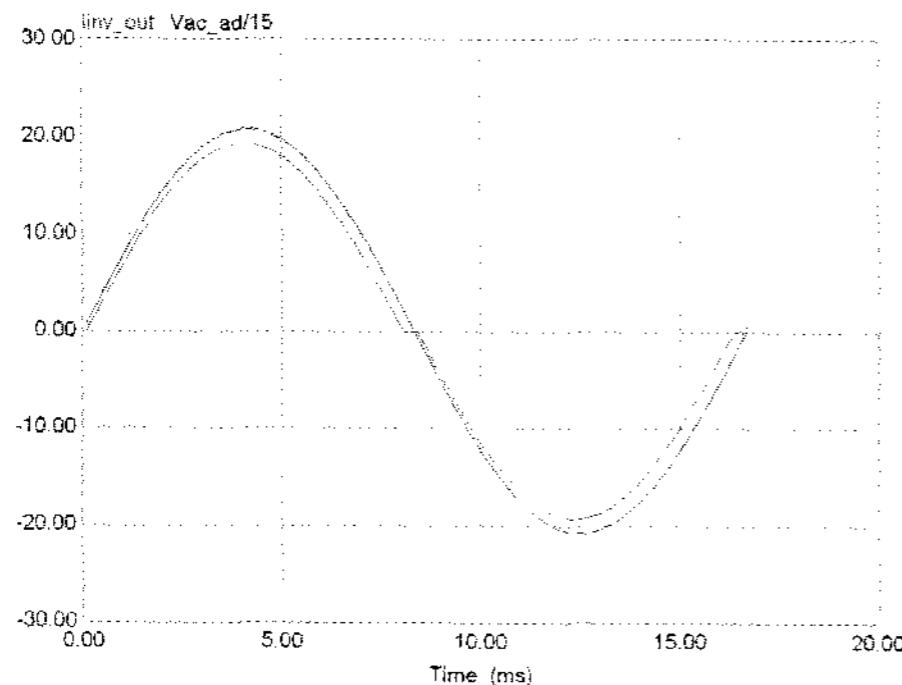


그림 7. AFD 기법을 이용한 PV 시스템의 출력전압전류파형

그림 7은 CF를 추가한 인버터 출력전압전류파형을 나타내고 있다. 전압과 전류의 두 파형을 같은 화면에 담기 위해 전압파형은 실제 크기에 1/15로 축소한 파형이고, 전류 파형은 CF를 5%로 한 파형이다.

그림 8은 CF가 5% 일 때의 태양광발전 인버터 출력전류파형의 FFT를 보여주고 있다. 이 그림 8에서 60Hz의 기본파를 제외한 나머지 고조파 성분이 존재함을 알 수가 있다. 이 고조파 성분에 CF가 얼마나 기여를 하는지 알아보기 위해서 CF에 의한 PCS의 출력전류의 THD를 도시하면 그림 9와 같다.

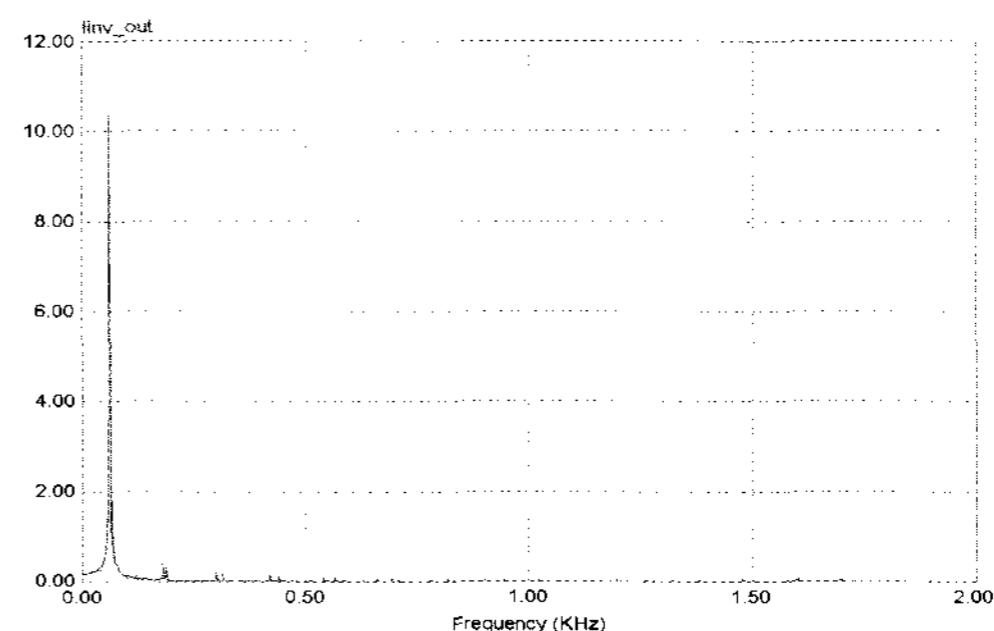


그림 8. 태양광발전 인버터 출력전류의 FFT(CF=5%)

그림 9에서 보면, CF가 약 5%이면, PCS의 출력전류 THD가 5%인 관계를 알 수가 있다. 국내 PV PCS의 규격에 의하면, PCS의 출력전류 THD는 총합 5% 이내로 규정하고 있고, 더구나 PCS내의 PWM(Pulse Width Modulation)에 의한 고유의 THD 성분도 있으므로 CF는 5%보다 작은 값을 인가해야 한다.

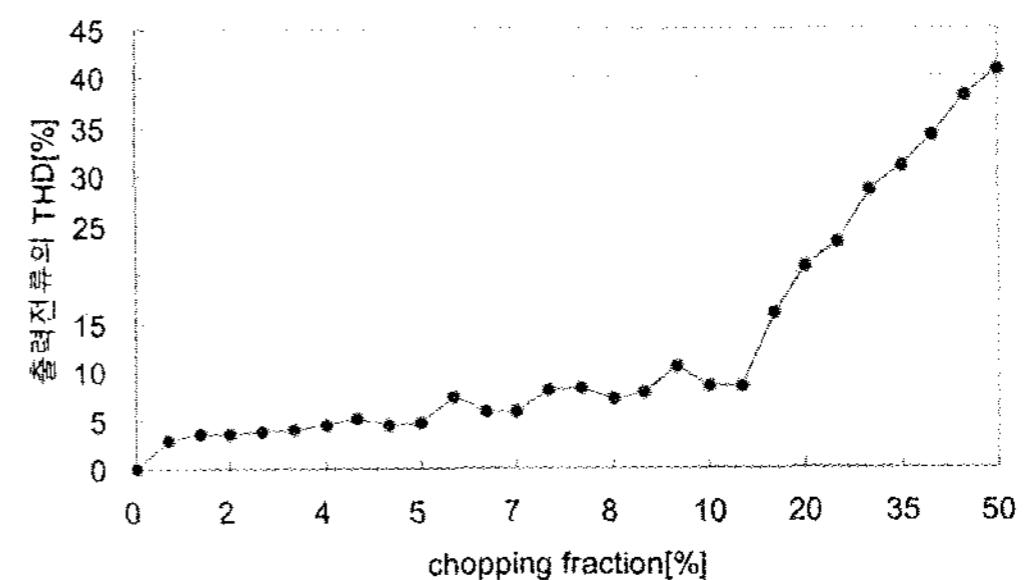


그림 9. 태양광 인버터 출력전류의 CF와 고조파의 관계

그림 10은 CF = 1%, 5%, 10%, R = 16.13 Ω , L = 0.1mH ~ 100mH 일 때의 표준화된

C 값에 대한 불검출영역을 표시하고 있다. 직선으로 된 점선부분은 수동적인 방법을 사용한 경우의 불검출영역이고, 꺾어진 실선부분과 점선부분이 AFD 기법으로 시뮬레이션 한 불검출영역이다.

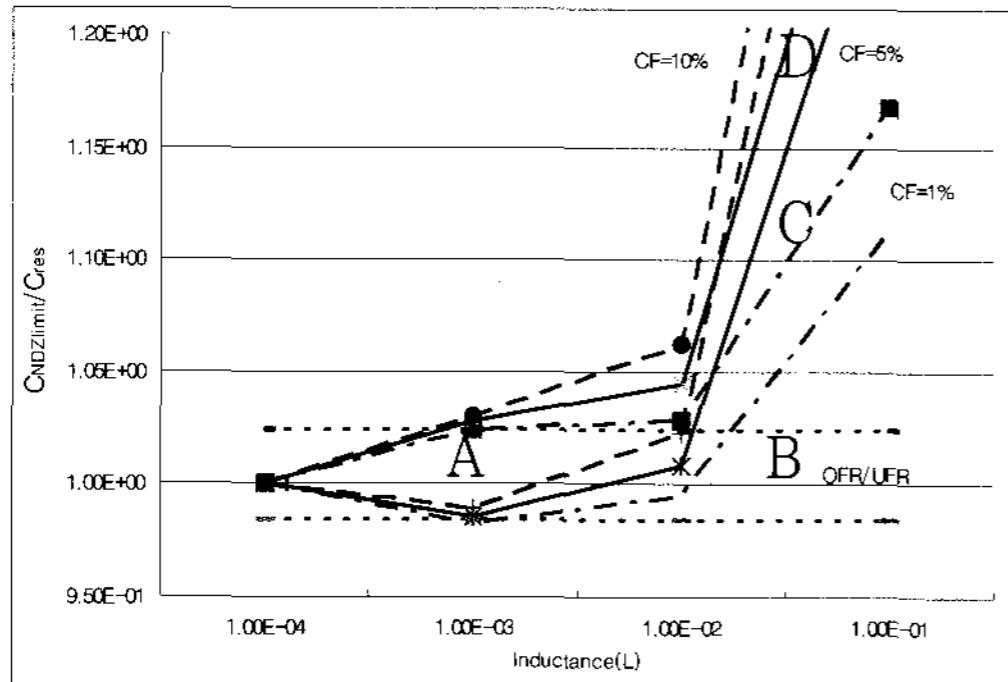


그림 10. CF = 1%, 5%, 10%를 갖는 간략화한 분석적 모델에 의한 AFD의 불검출영역

CF = 1%에서 CF = 10%까지 결과파형을 비교하면, CF가 크면 클수록 AFD 기법의 효과를 충분히 볼 수 있으나, THD도 선형적으로 증가하여 전력품질에 나쁜 영향을 미칠 수 있어 적당한 CF의 선정이 필요한데, 일반적으로 CF는 5% 이내로 제한하여 사용하고 있다. 그러나 결국 CF를 사용하여도 불검출영역이 존재하게 되는데, 그 이유는 CF를 사용한 상태에서 새로운 공진주파수가 형성 되고, 결국 단독운전이 발생하여도 주파수의 변화 범위가 검출할 수 있는 영역으로 벗어나지 못해 불검출영역으로 나타나게 된다.

그림 10에서 A지점은 수동적인 방법과 AFD방법 모두 불검출영역인 구간이고, B지점은 수동적인 방법은 불검출영역이고 AFD방법으로는 검출할 수 있는 영역이고, C지점은 수동적인방법과 AFD방법 모두 검출할 수 있는 영역이고, D지점은 수동적인 방법은 검출할 수 있는 영역이고 AFD방법으로는 불검출영역이다. 결과 파형은 그림 11 ~ 14에 나타낸다.

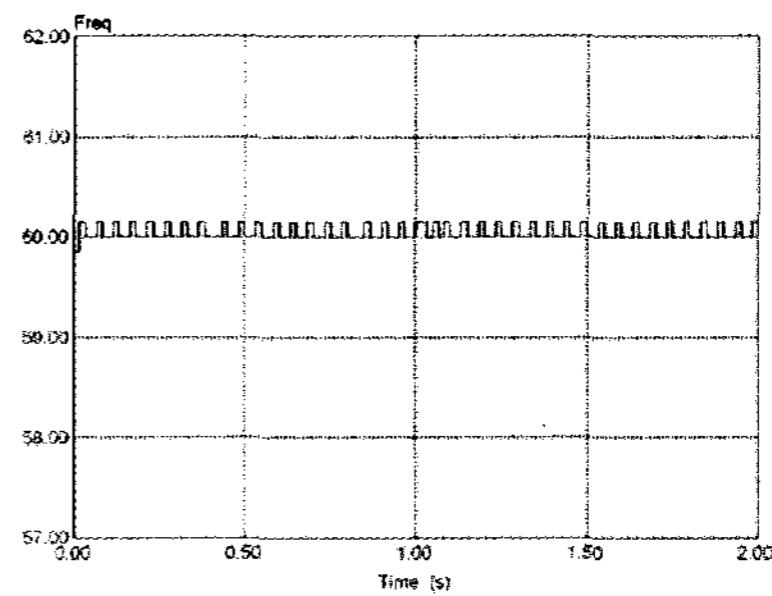


그림 11. A지점에서의 주파수파형

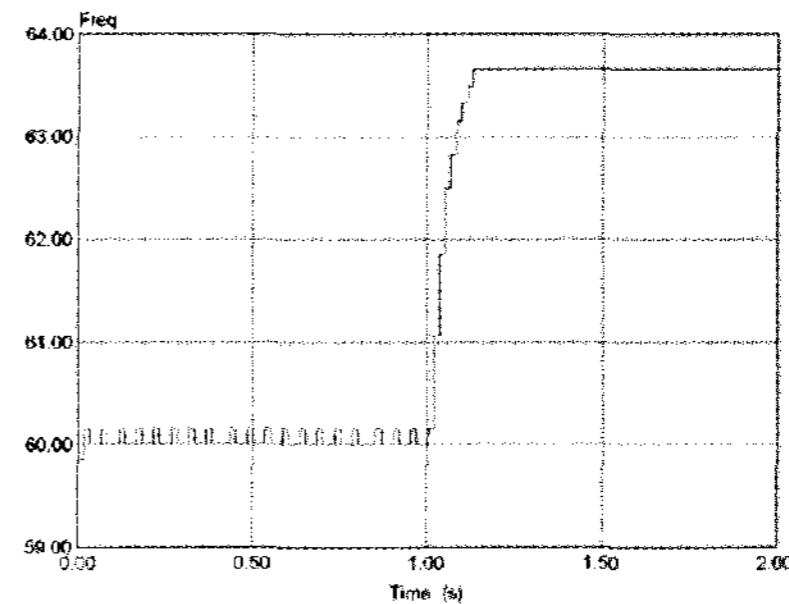


그림 12. B지점에서의 주파수파형(CF=5%)

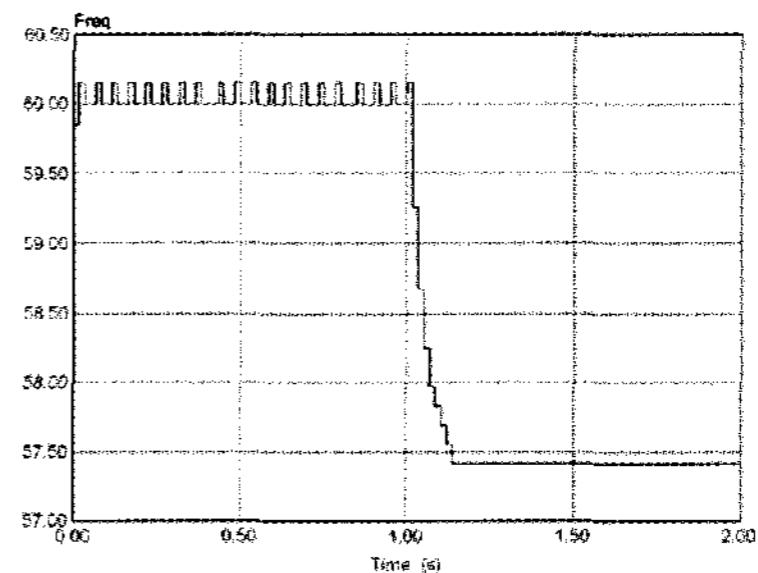


그림 13. C지점에서의 출력전류와 주파수파형

그림 11 ~ 14는 그림 10에서 나타낸 A, B, C, D 각 지점에서의 주파수변화를 나타낸 그림이다. 시뮬레이션은 샘플링주파수를 24kHz로 실시하였고, 시뮬레이션 시작 1초경과 후 단독운전이 발생하도록 설정하였다. 0초에서 1초까지의 주파수변화는 샘플링주파수의 오차에 의한 PLL (Phase-Locked Loop)파형의 오차에 의해 나타난 것이다.

그림 11은 그림 10에서 A 지점에 대한 주파수 변화를 보여주는 그림으로 단독운전이 발생하여도 주파수가 60.5Hz와 59.3Hz 사이에 있으므로 검

출할 수 없음을 보여주고 있다.

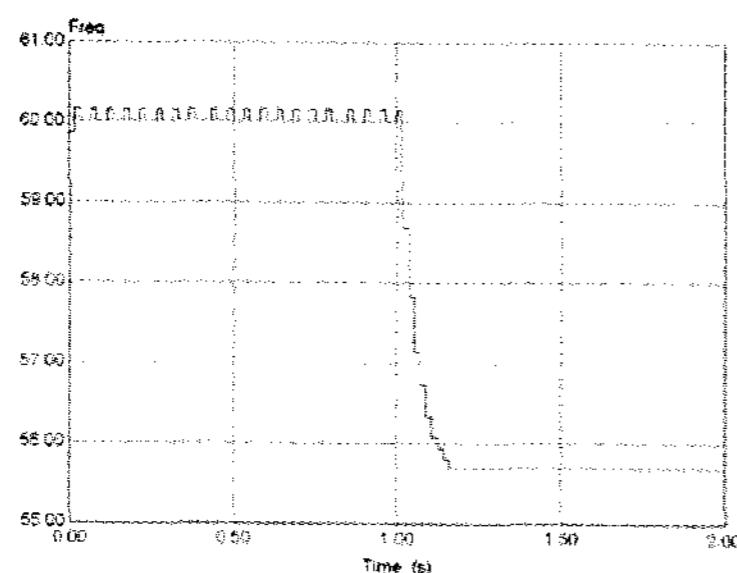


그림 14. D지점에서의 출력전류와 주파수파형

그림 12는 그림 10에서 B 지점에 대한 주파수 변화를 보여주는 그림으로 수동적인 방법으로는 단독운전 검출이 불가능하여 AFD기법을 이용하여 주파수의 변화를 강제로 시켜 단독운전을 검출한 것이다.

그림 13은 그림 10에서 C 지점에 대한 주파수 변화를 보여주는 그림으로 이 지점에서는 수동적인 방법과 AFD기법 모두 단독운전이 가능한 영역이다. 그림 13은 수동적인 방법으로 단독운전을 검출한 경우를 보여주고 있다.

그림 14는 그림 10에서 D 지점에 대한 주파수 변화를 보여주는 그림으로 AFD기법으로는 단독운전 검출이 불가능하여 수동적인 방법을 이용하여 단독운전을 검출한 것이다. 이와 같이 AFD기법을 사용하여 단독운전 검출이 불가능한 원인은 CF를 부가하면서 재생성 되는 공진주파수의 이동 때문이다.

그림 15는 $CF=5\%$ 인 상태에서 인덕턴스값에 대해 표준화된 커패시턴스값일 때 다양한 저항 부하에 대한 변화를 나타낸 그림이다. R 값을 $3.6 \sim 57.6\Omega$ 으로 변화시키면서 시뮬레이션 한 결과 R 값이 커질수록, 즉 저전력부하에서, 수동적 방법에 의해 나타난 NDZ영역에 접근하는 것을 알 수 있다. R 값이 작은 경우, 즉 대전력부하인 경우, 일정 영역이상의 L 값을 가지면 모든 C 값에 대해 단독운전을 검출할 수 있는 구간이 나타남을

알 수 있다. 이와 반대로, 일정 영역의 L 값에서는 C 값이 넓은 범위에서 변하여도 단독운전을 검출할 수 없다는 것을 알 수 있다.

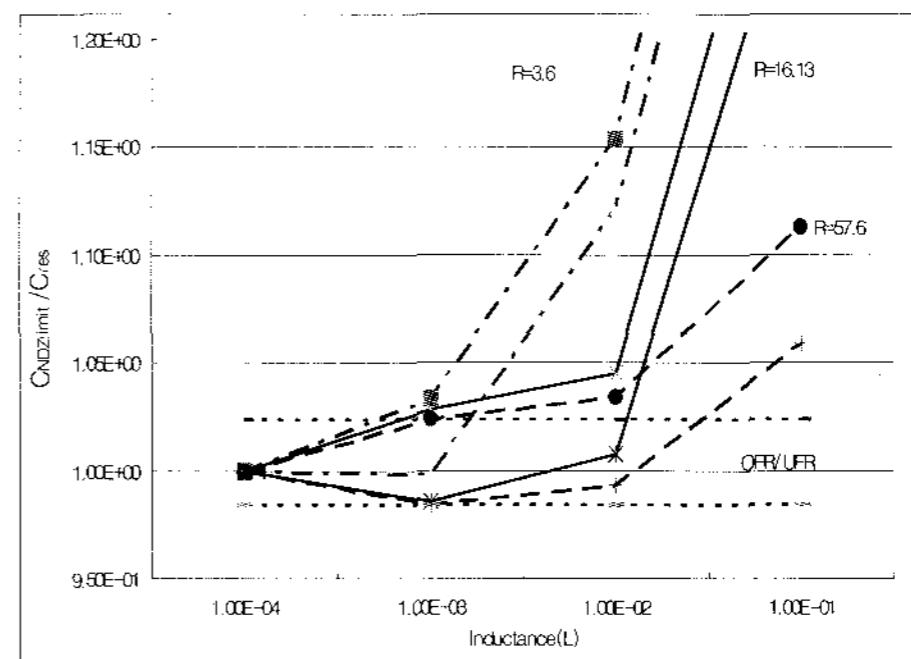


그림 15. $CF=5\%$ 와 다양한 저항부하에 따른 간략화한 분석적 모델에 의한 AFD의 불검출영역

그림 16은 $R=16.13\Omega$, $L=50mH$, $CF=5\%$ 그리고 0.5초에서 단독운전이 발생하도록 설정하였고, 커패시턴스의 변화에 따른 시간에 대한 주파수특성을 나타내고 있다.

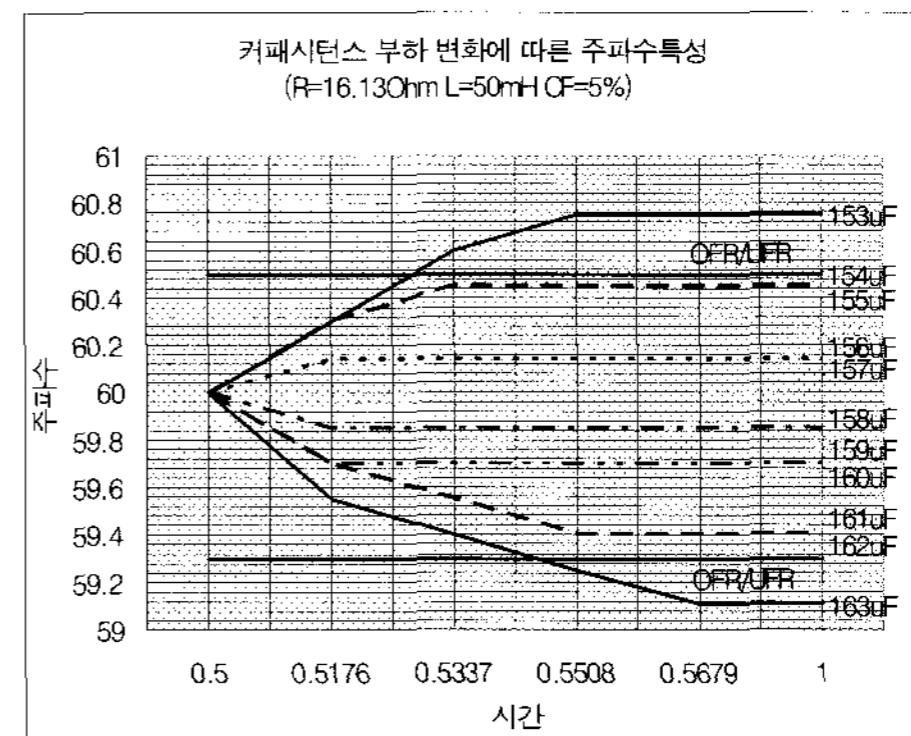


그림 16. 커패시턴스 부하 변화에 따른 주파수특성

CF 를 부가하지 않은 상태에서의 $50mH$ 에 대한 공진커패시턴스는 $140.72\mu F$ 이지만, $CF=5\%$ 를 부가한 상태에서는 공진커패시턴스의 변화가 발생한 것을 알 수 있다. 커패시턴스값이 공진커패시턴스값보다 커지거나 작아지는 경우에는 시간당 주파수 변동폭이 커짐을 알 수 있고, 결국 $153\mu F$

과 163uF에서 불검출영역의 경계값을 벗어나 검출할 수 있는 영역으로 넘어감을 알 수 있다.

5. 결 론

앞에서 AFD 기법에 대한 설명과 간략화한 모델로 시뮬레이션 한 결과를 보였다. CF을 증가시키면 단독운전 검출능력은 높아지나 THD도 선형적으로 증가하여 전력품질의 저하를 가져오는 것을 알 수 있었다. 인덕턴스가 1mH 이하인 경우는 NDZ 영역이 급격히 감소하는 것을 알 수 있었고, 부하가 큰 인덕턴스 값과 작은 커패시턴스 값을 가질수록 부하의 응답이 더욱 평평해 진다는 것을 알 수 있었다. AFD 기법을 사용한 방법이 수동적인 방법을 사용한 불검출영역보다 줄어든 상태이면서 부하 영역이 변경된 상태로 존재한다는 것을 시뮬레이션 결과를 통해 확인할 수 있었다.

그러나 AFD 기법을 이용하면 비록 불검출영역이 수동적인 방법에 의한 불검출영역보다는 감소되고, 부하에 따라 변경되기는 하지만 여전히 존재한다. 이러한 불검출영역을 좀 더 줄일 수 있는 방법으로는 현재 능동적인 방법과 수동적인 방법을 조합하는 방법과 AFDPF(Active Frequency Drift Positive Feedback)라는 방법 등이 사용되고 있으나, 여전히 불검출영역이 존재한다. 그러므로 단독운전 불검출영역을 더욱 적극적으로 없앨 수 있는 방법에 대해 앞으로도 계속해서 연구되어야 할 것이다.

후 기

본 논문은 2004학년도 광운대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- 최주엽 외 “태양광발전 시스템의 계통연계 보호

를 위한 단독운전검출기법의 기술 개발에 관한 연구”, 최종 보고서, 2003. 5, 산업자원부, 2001-N-PV03 -01.

- J. Stevens, "Utility Intertied Photovoltaic System Islanding Experiments", Proceedings of the 17th IEEE Photovoltaic Specialists Conference(1987), p.1134-1138.
- Michael Ropp, "Evaluation of Islanding Detection Methods for Utility-Interactive Inverters in Photovoltaic Systems", SAND2002-3591.
- M.E.Ropp, M.Begovic, A.Rohatgi, "Analysis and Performance Assessment of the Active Frequency Drift Method of Islanding Prevention", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, September 1999.
- Zhihong Ye, Amol Kolwalkar, Yu Zhang, Pengwei Du, Reigh Walling, "Evaluation of Anti-Islanding Schemes Based on Nondetection Zone Concept", IEEE Trans. on power electronics, Vol. 19, No. 5, Sep, 2004.
- 이기옥, “단독운전검출을 위한 Active Frequency Drift Positive Feedback기법의 Chopping Fraction Gain”, 광운대학교 전기공학과 석사학위청구논문, 2004.
- IEEE Standards Coordinating Committee 21, "IEEE Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems", IEEE Std 1547.1 – 2005, 2005.
- Copyright by Underwriters Laboratories inc., "Inverters, Converters, and Controllers for Use in Independent Power Systems", UL 1741, 2002. 8, ISBN 0-7629-0421-6.