

논문 2006-43IE-2-10

다양한 부하에 따른 계통연계형 태양광발전 시스템에 적용된 AFD 기법의 단독운전 불검출영역 시뮬레이션

(Simulation of Non-Detection Zone using AFD Method applied to
Utility-Connected Photovoltaic Systems for a Variety of Loads)

고 문 주*, 최 익*, 최 주 엽**, 원 영 진***

(Moon-Ju Ko, Ick Choy, Ju-Yeop Choi, and Young-Jin Won)

요 약

계통연계형 태양광발전 시스템(PV PCS : Photovoltaic Power Conditioning Systems)의 단독운전은 다양한 문제들을 야기할 수 있으며, 따라서 이는 반드시 방지되어야 한다. 실제로는 단독운전이 발생할 확률이 매우 낮지만, PV PCS가 공급하는 유·무효 전력이 부하가 요구하는 유·무효 전력과 거의 일치한다면, 수동적인 방법만으로는 단독운전 검출이 힘들게 된다. AFD(Active Frequency Drift) 기법은 주파수 바이어스 방법이라고 일컬어지는 방법으로, 단독운전 상태에서 계통과 연결된 노드전압의 주파수를 강제로 빠르게 또는 느리게 하여 단독운전을 검출하는 방법이다. 본 논문에서는 최근에 들어서 PV PCS의 능동적 단독운전 검출방법으로 많이 사용되는 AFD 기법의 불검출영역을 널리 사용되는 시뮬레이션 툴(PSIM)을 사용하여 분석하였다.

Abstract

Islanding phenomenon of utility-connected PV power conditioning systems(PV PCS) can cause a variety of problems and must be prevented. If the real and reactive powers 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 simulation tool PSIM.

Keywords : islanding, utility-connected, PV systems, active frequency drift, non-detection zone

I. 서 론

PV 시스템에서의 단독운전 검출은 계통을 유지보수하기 위한 작업자의 안전을 위해 첫 번째로 고려해야 할 사항이다.^[1] 그림 1은 전류제어모드로 동작하는 PV 시스템, 지역부하, 스위치 그리고 계통이 연결된 그림이다. 수식 (1)과 (2)는 인버터에서 공급하는 유·무효전력 (P_{inv} , Q_{inv}), 계통에서 전달되는 유·무효전력(ΔP , ΔQ) 그리고 부하단에서 소모되는 유·무효전력(P_{load} , Q_{load})에 관한 수식이다. 인버터에서 공급되는 유·무효전력

* 정회원, 광운대 정보제어공학과
(Department of Information and Control
Engineering, Kwangwoon University)

** 정회원, 광운대 전기공학과
(Department of Electrical Engineering, Kwangwoon
University)

*** 정회원, 부천대학 전자과
(Department of Electronics, Bucheon College)

※ 이 논문은 2004학년도 광운대학교 교내연구비 지원
에 의하여 연구되었음.

접수일자: 2006년2월28일, 수정완료일: 2006년6월9일

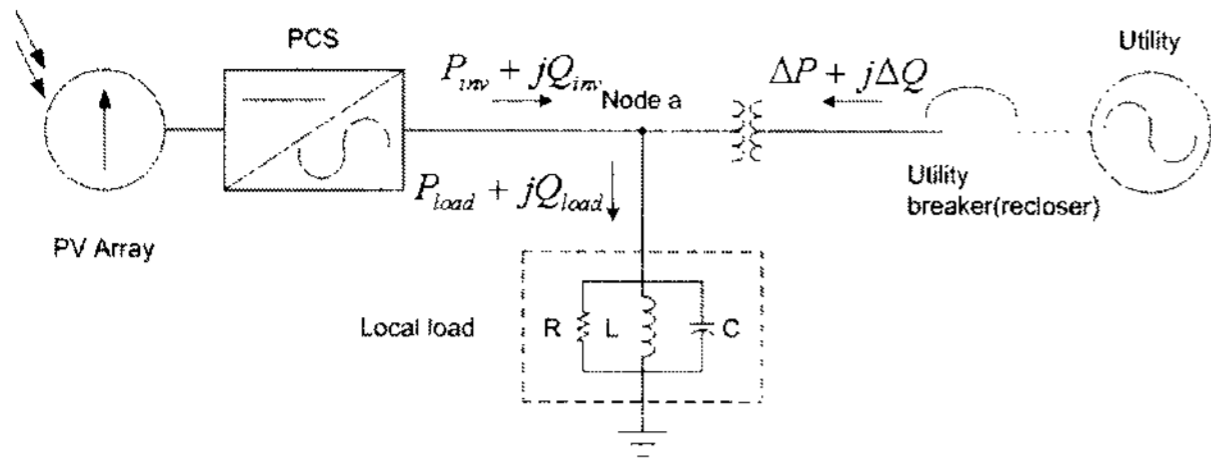


그림 1. 계통연계형 태양광발전 시스템

Fig. 1. Utility-connected photovoltaic system.

(P_{inv}, Q_{inv}) 이 부하단에서 필요로 하는 유·무효전력 (P_{load}, Q_{load}) 과 크기가 같으면, 계통에서 전달되는 유·무효전력 $(\Delta P, \Delta Q)$ 은 0이 된다. 한편, 인버터에서 공급되는 전력이 부하단에서 필요로 하는 전력보다 작다면, 계통에서 부하단으로 전력이 유입된다. 반대로, 인버터에서 공급되는 전력이 부하단에서 필요로 하는 전력보다 크다면, 남은 전력은 계통으로 전달된다.

수식 (1)에서 스위치가 열렸을 때 그 순간 PV 시스템이 공급하는 유효전력과 부하에서 요구되는 유효전력이 일치하지 않으면, 노드 a 에서의 RMS 전압 V_a 는 $P_{load} = P_{inv}$ 가 될 때까지 증가하거나 감소할 것이다.^[2] 수식 (2)에서 PV 시스템의 무효전력 생산량과 부하의 무효전력 요구량이 일치하지 않으면, 계통이 끊어졌을 때 노드 a 에서의 전압의 각주파수 ω 는 $Q_{load} = Q_{inv}$ 가 될 때까지 변할 것이다.

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

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

수식 (3)과 (4)는 RLC 부하에 의해 소모되는 유·무효 전력을 표현한다.

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

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

PV 시스템이 노드 a 전압에 대하여 역률 1로 전류제어를 하는 경우, $Q_{inv} = 0$ 이므로 노드 a 전압의 주파수는 부하의 공진주파수(식 (5))와 일치하게 된다.

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

이러한 주파수와 전압의 변화는 OVR(Over Voltage

Relay), UVR(Under Voltage Relay), OFR(Over Frequency Relay), UFR(Under Frequency Relay) 등을 사용하는 수동적인 방법으로 검출할 수 있다.

실제로는 단독운전이 발생할 확률이 매우 낮은 경우이지만, PV PCS가 공급하는 유·무효 전력이 부하가 요구하는 유·무효 전력과 거의 일치한다면, 수동적인 방법만으로는 단독운전 검출이 힘들게 된다. 이 경우는 수동적인 방법만으로 검출하기에는 전압과 주파수의 변화가 부족할 것이다. 그러므로 PV 시스템과 부하가 일치되었을 때도 단독운전을 검출할 수 있는 능동적인 기법이 필요하게 된다.

II. AFD 기법

Active Frequency Drift(AFD) 기법이란 PV 시스템에서 계통으로 공급하는 전류의 주파수를 정확히 계통의 주파수에 동기시키는 것이 아니라 출력전류의 주파수를 계통전압의 주파수보다 빠르게 또는 느리게 바꾸어 단독운전 발생 시 계통전압의 주파수에 변화가 발생하는 것을 이용하여 단독운전을 검출하는 방법이다.

그림 2는 AFD 기법을 사용한 출력전류파형이다. 여기서, $T_{V_{util}}$ 은 계통전압의 한 주기를 나타내고, $T_{I_{pv}}$ 는 PV 시스템의 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]}

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

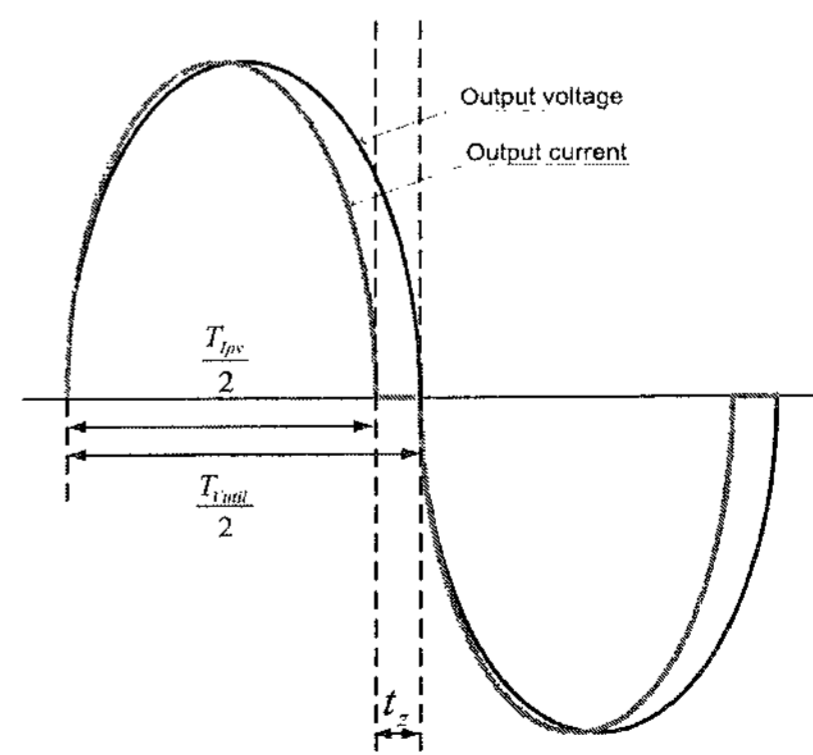


그림 2. AFD 기법을 사용한 출력전류파형

Fig. 2. A waveform of output current using AFD.

III. 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 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.

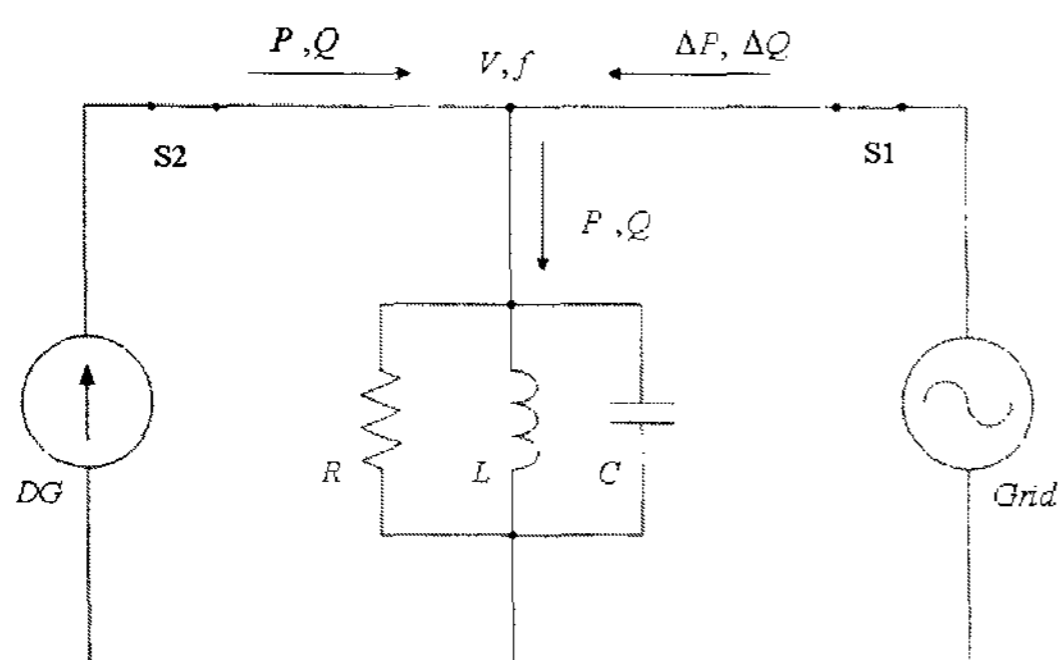


그림 3. 계통연계형 시스템의 일반적인 형태
Fig. 3. A generic form for utility connected system.

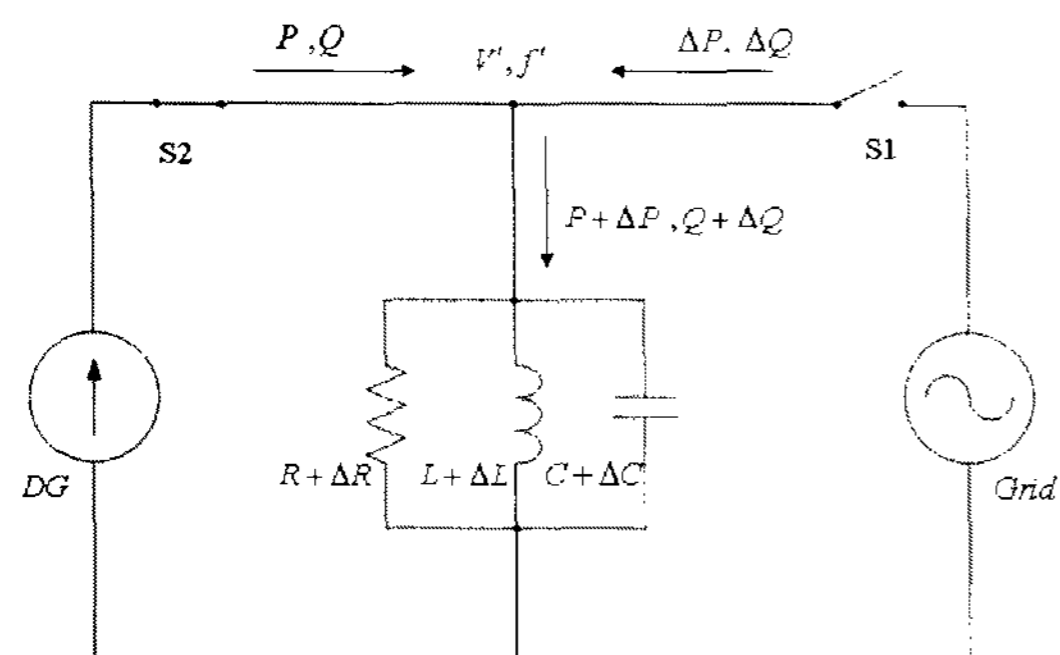


그림 4. 계통이 끊어진 후 태양광발전 인버터와 RLC
Fig. 4. Photovoltaic inverter and RLC circuit after the grid is disconnected.

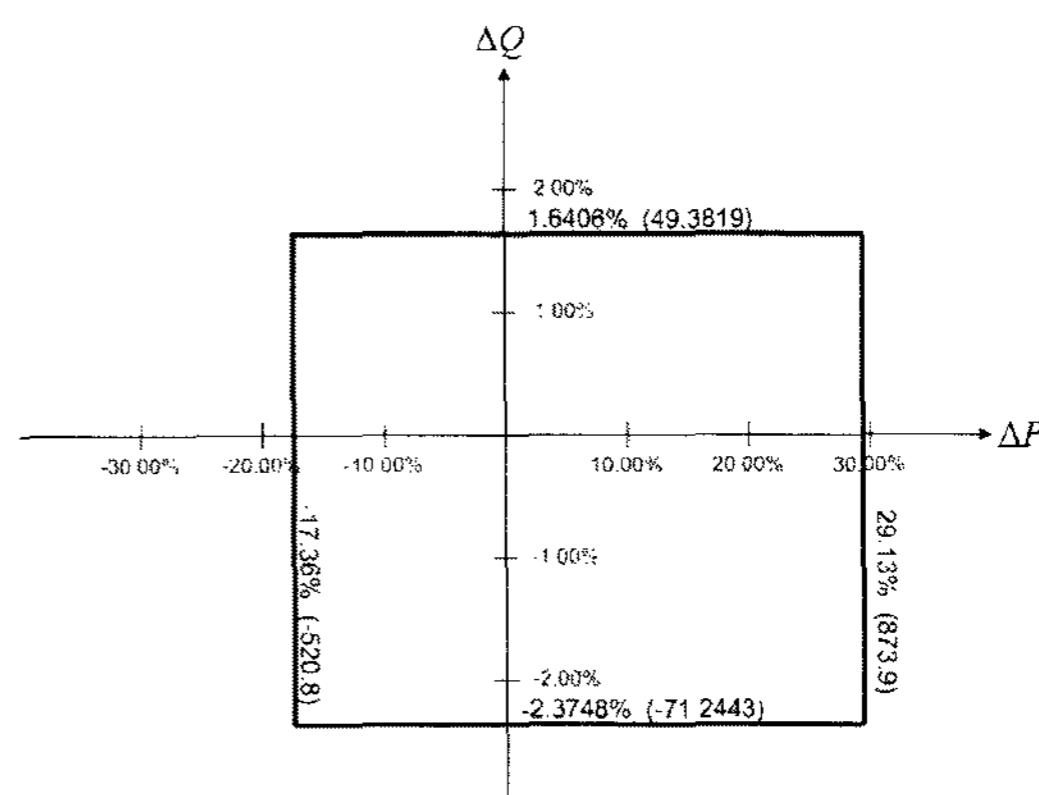


그림 5. OVR/UVR/OFR/UFR에 의한 불검출영역
Fig. 5. NDZ of OVR/UVR/OFR/UFR.

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

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

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.

IV. 시뮬레이션

그림 6은 PSIM 프로그램에 사용된 시뮬레이션 회로

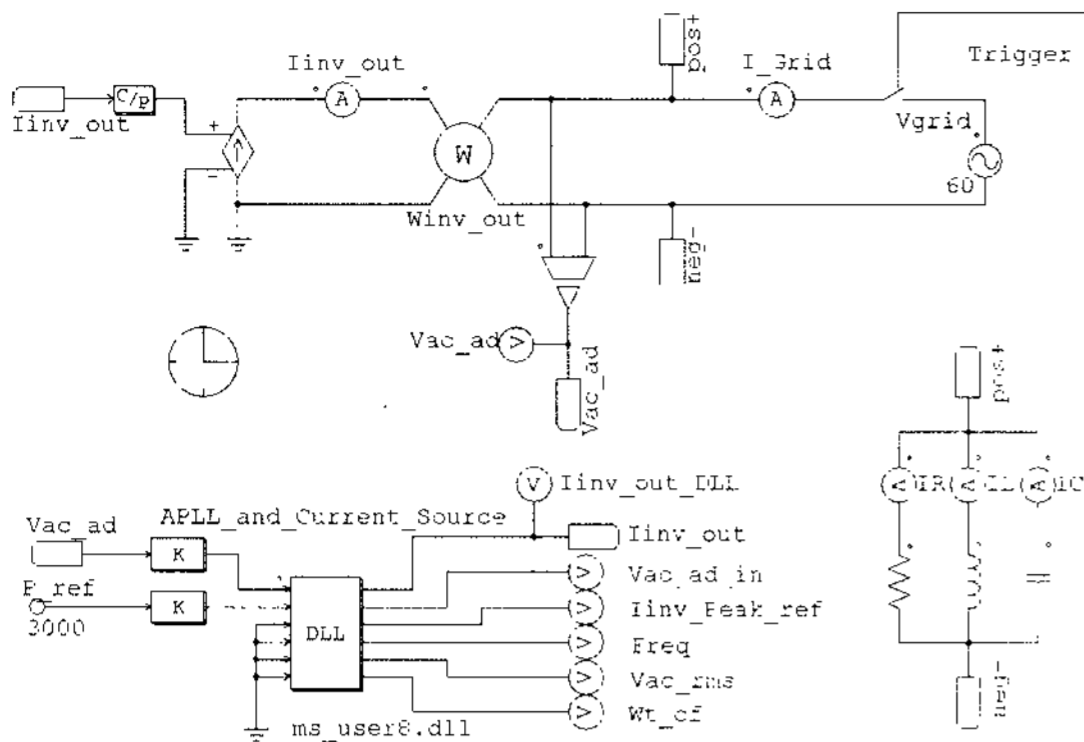


그림 6. 시뮬레이션에 사용된 회로(PSIM)
Fig. 6. A circuit using simulation(PSIM).

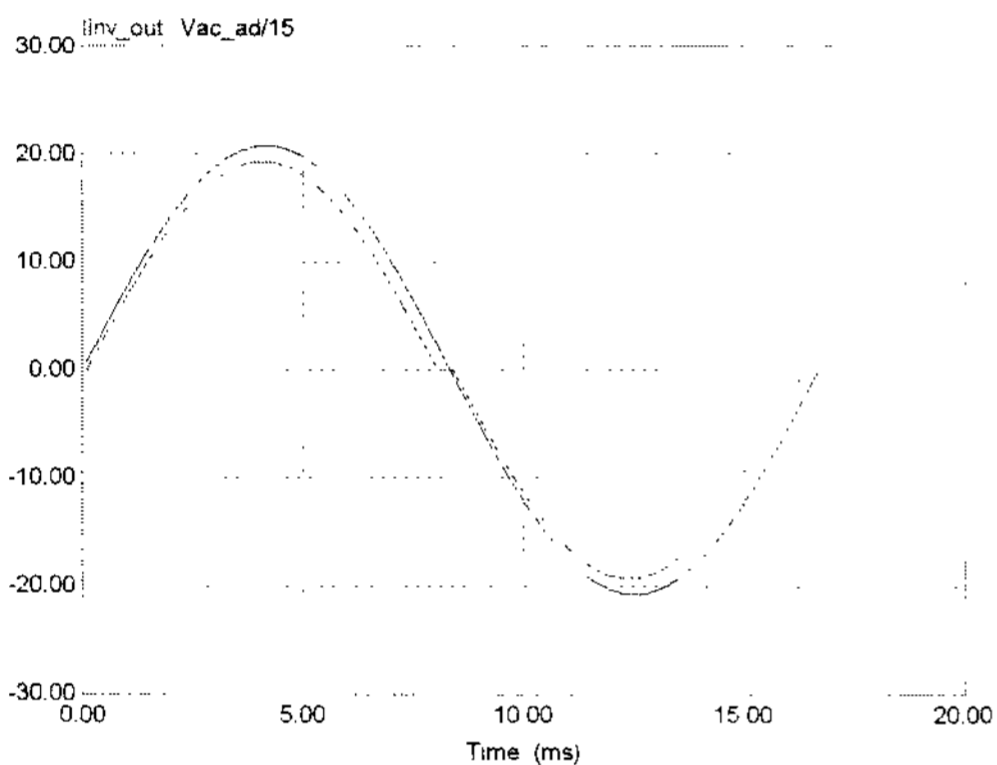


그림 7. AFD 기법을 이용한 PV 시스템의 출력전압전류파형
Fig. 7. An output voltage and current waveform of PV system using AFD method.

를 나타내고 있다. 이 시뮬레이션 회로에서 PV 시스템을 전압제어 전류원으로 대체하였고, DLL(Dynamic Linked Library)을 이용하여 PV 시스템과 계통과의 연계점에서의 전압의 정보를 받아 필요한 인버터 출력전류 및 PLL의 계산과 CF를 추가한 파형을 생성하는데 이용하였다.

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

그림 8은 CF가 5% 일 때의 태양광발전 인버터 출력전류파형의 FFT를 보여주고 있다. 60Hz 기본파를 제외한 나머지 고조파들은 무시해도 될 정도로 작은 값을 가진다.

그림 9는 태양광발전 인버터 출력전류의 CF와 고조파의 관계를 나타내고 있다. THD가 5% 이하인 구간은 CF가 5% 이하인 구간으로 이 이상 CF를 증가시키면

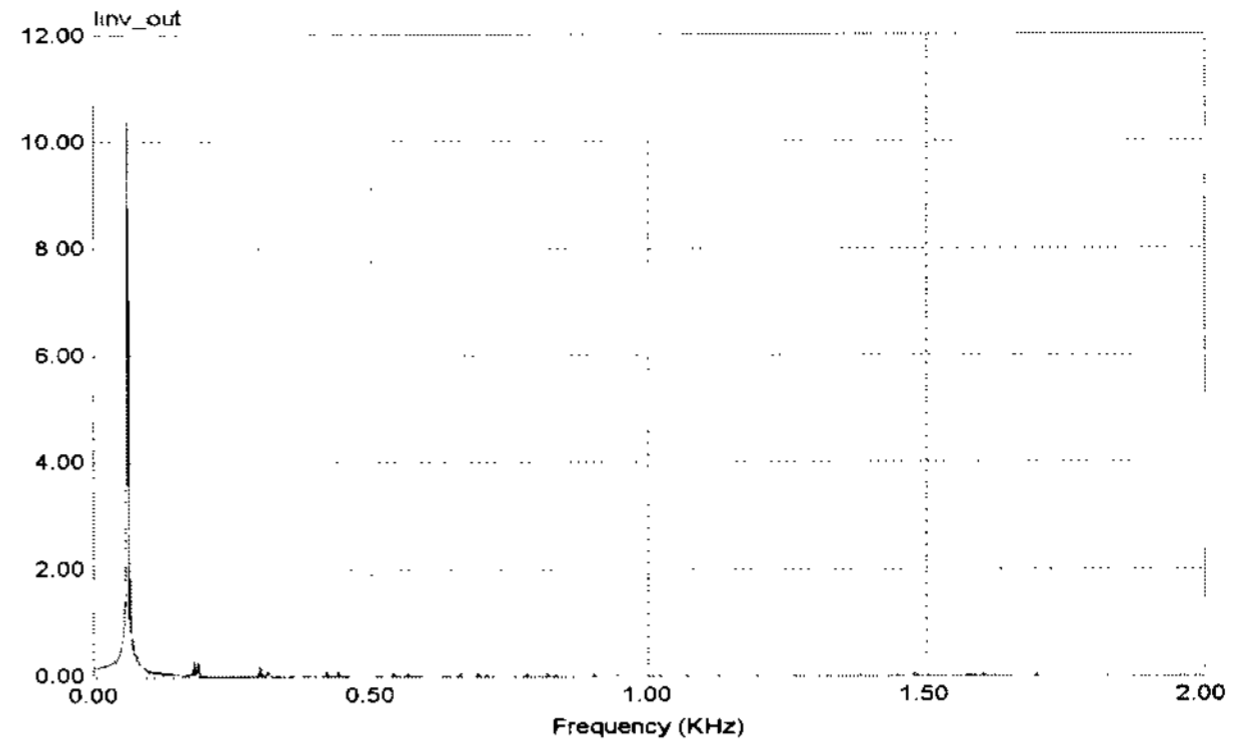


그림 8. 태양광발전 인버터 출력전류의 FFT(CF=5%)
Fig. 8. FFT of output current of PV inverter(CF=5%).

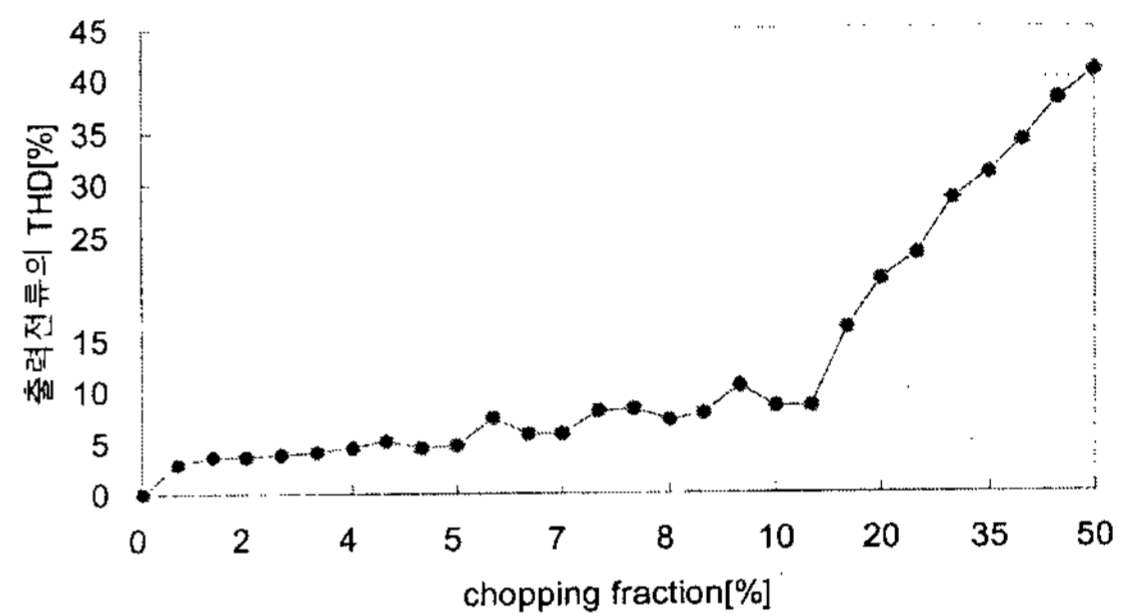


그림 9. 태양광 인버터 출력전류의 CF와 고조파의 관계
Fig. 9. Relationship between CF and THD of output current of PV inverter.

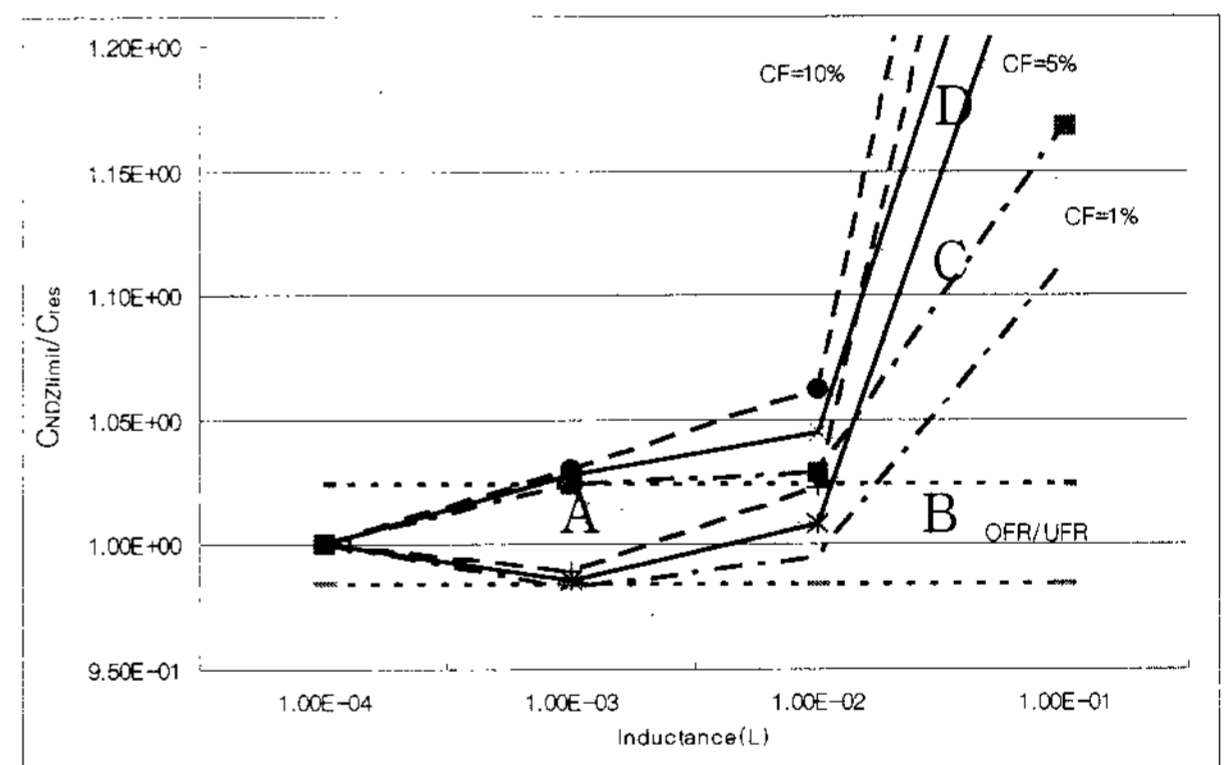


그림 10. CF=1%, 5%, 10%를 갖는 간략화한 분석적 모델에 의한 AFD의 불검출영역
Fig. 10. NDZ of AFD found by the simplified analytical model for CF=1%, 5%, 10%.

전력품질의 저하를 가져올 수 있으므로, CF 값은 5% 이하로 하는 것이 바람직하다.

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.

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.

그림 11은 CF=5%인 상태에서 인덕턴스값에 대해 표준화된 커패시턴스값일 때 다양한 저항 부하에 대한 변화를 나타낸 그림이다. R값을 3.6~57.6Ω으로 변화시키면서 시뮬레이션 한 결과 R값이 커질수록, 즉 저전력부하에서, 수동적 방법에 의해 나타난 NDZ영역에 접근하는 것을 알 수 있다. R값이 작은 경우, 즉 대전력부하인 경우, 일정 영역이상의 L값을 가지면 모든 C값에 대해 단독운전을 검출할 수 있는 구간이 나타남을 알 수 있다. 이와 반대로, 일정 영역의 L값에서는 C값이 넓은 범위에서 변화여도 단독운전을 검출할 수 없다는 것을 알 수 있다.

그림 12는 R=16.13Ω, L=50mH, CF=5% 그리고 0.5초에서 단독운전이 발생하도록 설정하였고, 커패시턴스의 변화에 따른 시간에 대한 주파수특성을 나타내고 있다.

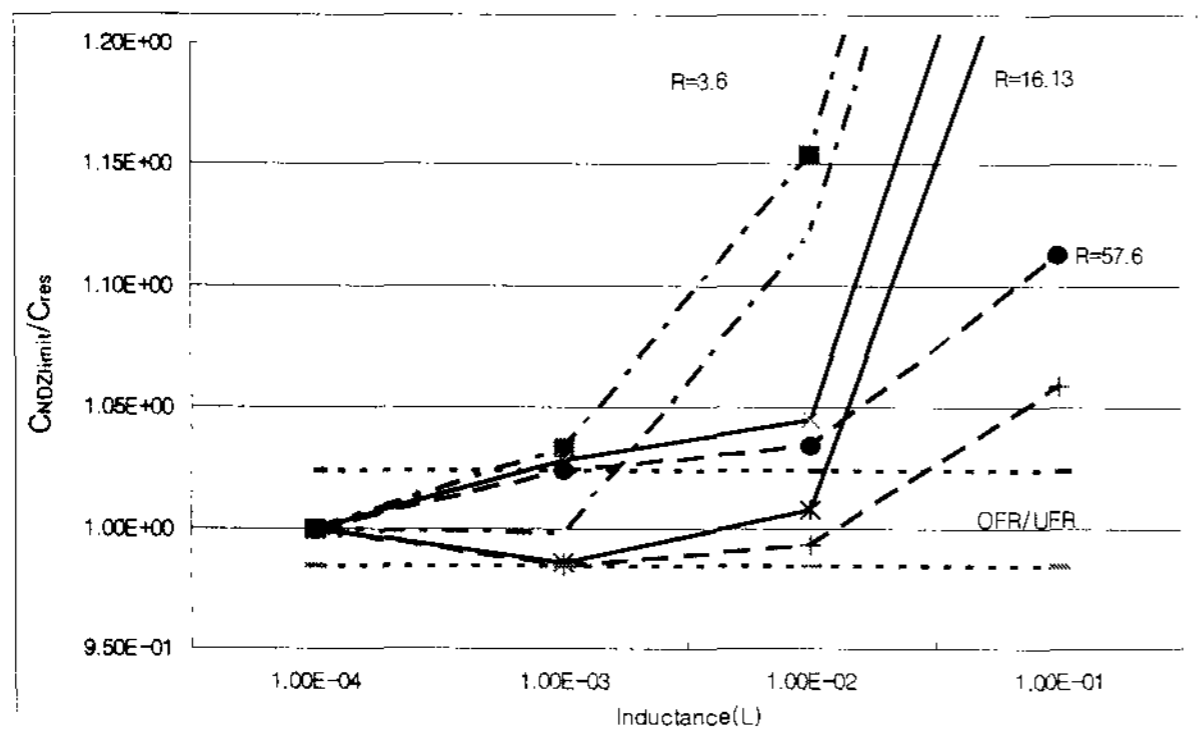


그림 11. CF=5%와 다양한 저항부하에 따른 간략화한 분석적 모델에 의한 AFD의 불검출영역
Fig. 11. NDZ of AFD found by the simplified analytical model for CF=5% and several values of R.

CF를 추가하지 않은 상태에서의 50mH에 대한 공진 커패시턴스는 140.72uF 이지만, CF=5%를 추가한 상태에서는 공진커패시턴스의 변화가 발생한 것을 알 수 있다. 커패시턴스값이 공진커패시턴스값보다 커지거나 작아지는 경우에는 시간당 주파수 변동폭이 커짐을 알 수 있고, 결국 153uF과 163uF에서 불검출영역의 경계 값을 벗어나 검출할 수 있는 영역으로 넘어감을 알 수 있다.

그림 10에서 수동적인 방법을 사용한 불검출영역과 AFD 기법을 사용한 불검출영역의 공통된 부분이 실제 불검출영역이 되는데 이것은 그림 6의 DLL 파일을 수정하여 두 가지 방법을 조합하여 사용하는 것으로 확인할 수 있다.

그림 13, 14, 15는 각각 그림 10의 B, C, D지점에서의 수동적인 방법과 AFD 기법의 조합에 의한 주파수 변화 파형이다. 시뮬레이션 시작 1초 경과 후 단독운전이 발생하도록 설정하여 시뮬레이션 한 결과파형으로 주파수

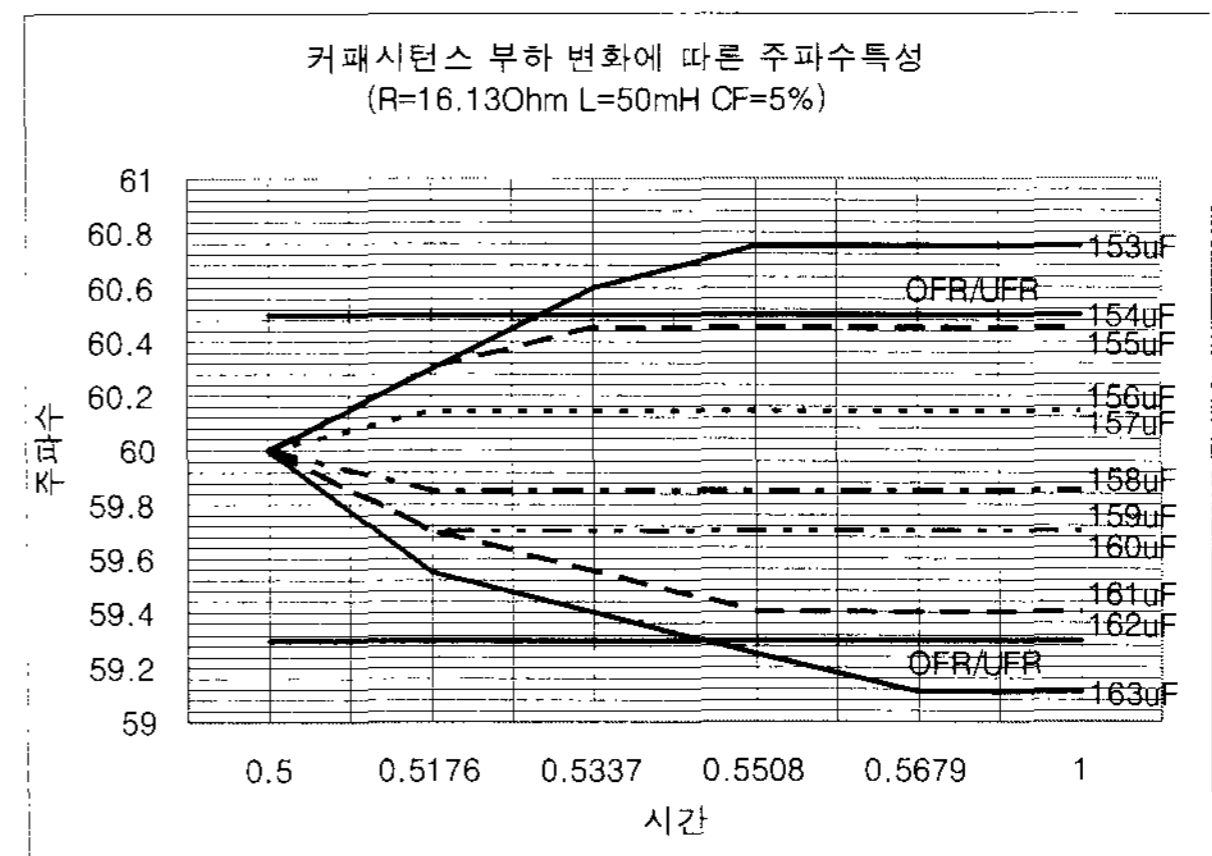


그림 12. 커패시턴스 부하 변화에 따른 주파수특성
Fig. 12. Characteristic of frequency for several values of C.

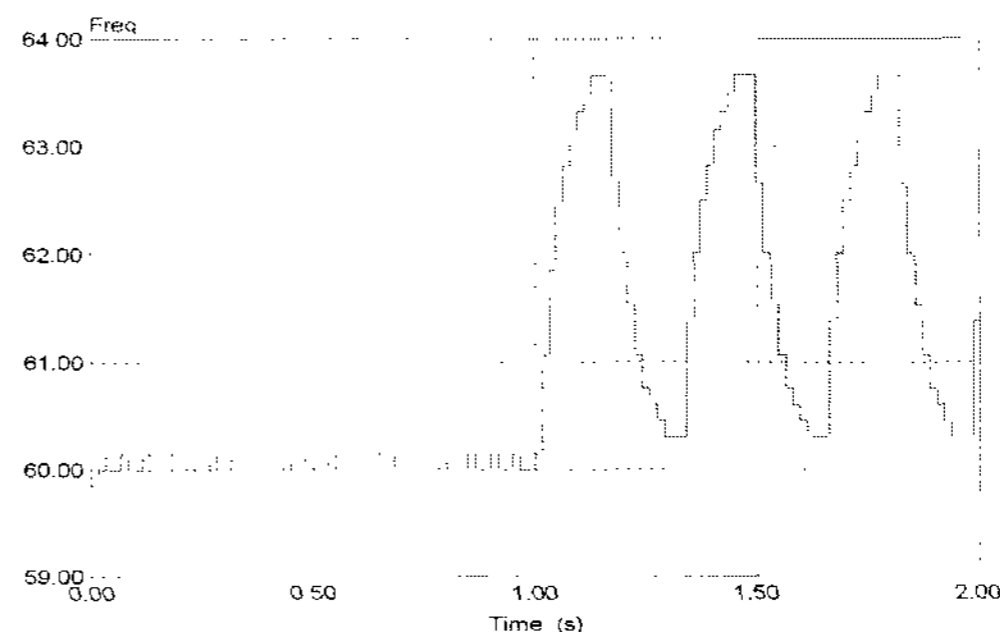


그림 13. B지점에서의 수동적인 방법과 AFD 기법의 조합에 의한 파형(CF=5%)
Fig. 13. Waveform of B for combine AFD method with passive method(CF=5%).

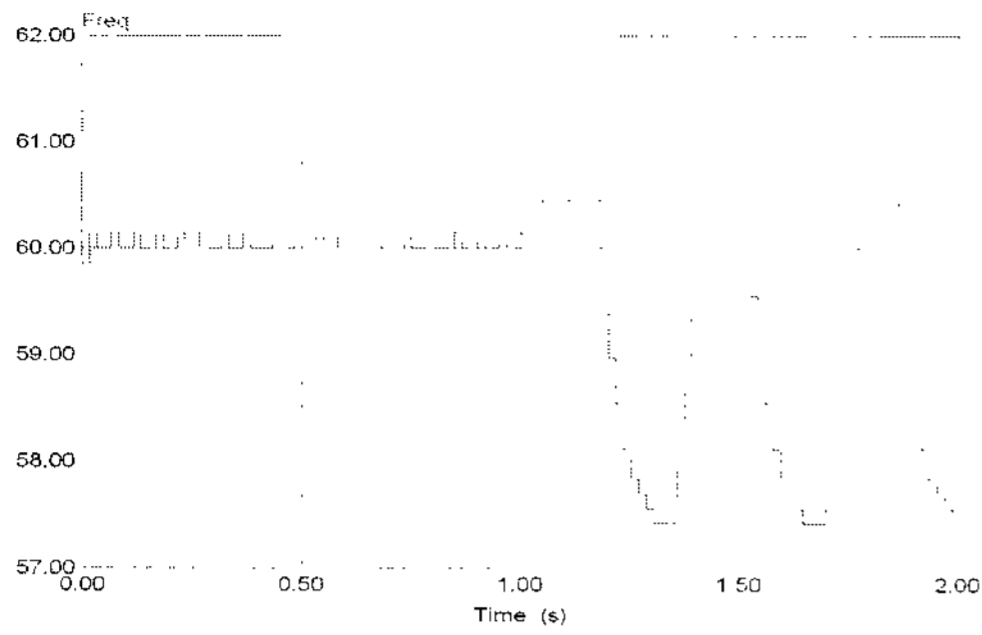


그림 14. C지점에서의 수동적인 방법과 AFD 기법의 조합에 의한 파형(CF=5%)

Fig. 14. Waveform of C for combine AFD method with passive method(CF=5%)

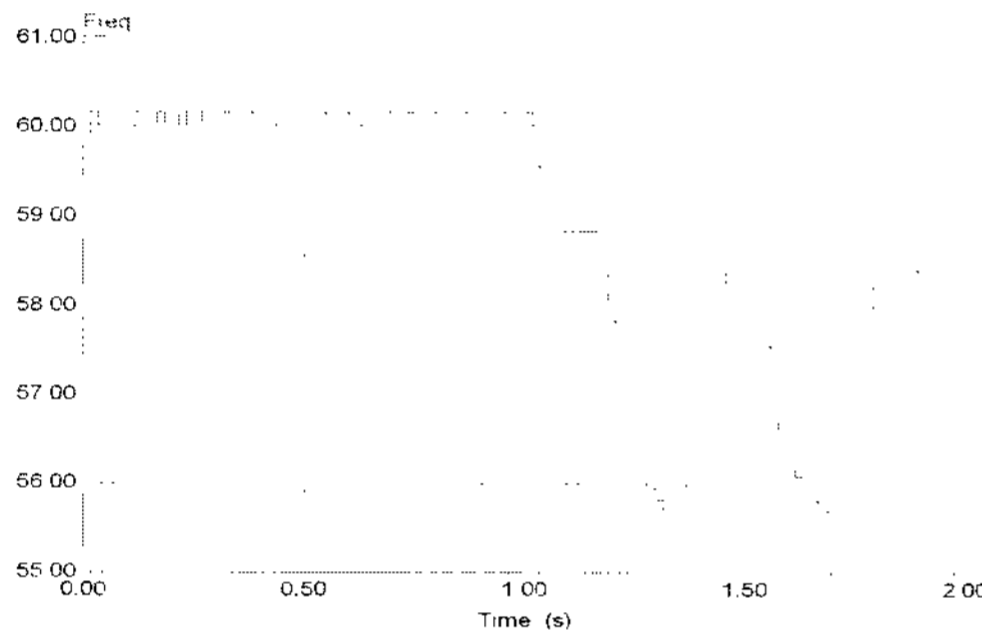


그림 15. D지점에서의 수동적인 방법과 AFD 기법의 조합에 의한 파형(CF=5%)

Fig. 15. Waveform of D for combine AFD method with passive method(CF=5%).

수가 각각 60.5Hz 이상과 59.3Hz 이하로 벗어난 것을 알 수 있다.

수동적인 방법과 AFD 기법의 조합에 의한 시뮬레이션 결과로서, 수동적인 방법과 AFD 기법의 조합에 의한 방법을 사용하면 그림 10의 수동적인 방법과 AFD 기법의 불검출영역의 공통부분을 제외한 나머지 부분은 검출할 수 있는 것으로 나타났다.

V. 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 평평해진다는 것을 알 수 있었다. AFD 기법을 사용한 방법이 수동적인 방법을 사용한 불검출영역보다 줄어든 상태이

면서 부하 영역이 변경된 상태로 존재한다는 것을 시뮬레이션 결과를 통해 확인할 수 있었다.

AFD 기법을 이용하면 비록 불검출영역이 수동적인 방법에 의한 불검출영역보다는 감소되고 부하에 따라 변경되기는 하지만 여전히 존재한다. 이러한 불검출영역을 좀 더 줄일 수 있는 방법으로 능동적인 방법과 수동적인 방법을 조합하는 방법과 AFDPF(Active Frequency Drift Positive Feedback)라는 방법이 사용되고 있다. 그렇지만 이러한 방법들도 줄어들긴 하였지만 여전히 불검출영역이 존재하고 이러한 방법들을 연구하여 불검출영역을 더욱 적극적으로 없앨 수 있는 방법에 대해 앞으로도 계속해서 연구되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 최주엽 외 “태양광발전 시스템의 계통연계 보호를 위한 단독운전검출기법의 기술 개발에 관한 연구”, 최종 보고서, 2003. 5, 산업자원부, 2001-N-PV03-01.
- [2] J. Stevens, "Utility Intertied Photovoltaic System Islanding Experiments", Proceedings of the 17th IEEE Photovoltaic Specialists Conference(1987), p.1134-1138.
- [3] Michael Ropp, "Evaluation of Islanding Detection Methods for Utility-Interactive Inverters in Photovoltaic Systems", SAND2002-3591.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 이기욱, "단독운전검출을 위한 Active Frequency Drift Positive Feedback기법의 Chopping Fraction Gain", 광운대학교 전기공학과 석사학위 청구논문, 2004.
- [7] 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.
- [8] Copyright by Underwriters Laboratories inc., "Inverters, Converters, and Controllers for Use in Independent Power Systems", UL 1741, 2002. 8, ISBN 0-7629-0421-6.

저 자 소 개



고 문 주(정회원)-교신저자
 1997년 광운대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1999년 광운대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 2003년~현재 광운대학교 정보
 제어공학과 박사 과정.
 <주관심분야 : 전력전자 및 태양광발전 인버터>



최 익(정회원)
 1979년 서울대학교 전기공학과
 학사 졸업.
 1981년 서울대학교 전기공학과
 석사 졸업.
 1990년 서울대학교 전기공학과
 박사 졸업.
 1982년~2003년 한국과학기술연구원(KIST)
 책임연구원
 2003년~현재 광운대학교 정보제어공학과 교수
 <주관심분야 : 서보제어, 지능제어, 전력전자>



최 주 엽(정회원)
 1983년 서울대학교 전기공학과
 학사 졸업.
 1990년 M.S. degree in electrical
 engineering from the
 Texas University,
 Arlington.
 1994년 Ph.D. degree from the Virginia Tech.
 2000년~현재 광운대학교 전기공학과 교수
 <주관심분야 : 통신, 컴퓨터, 신호처리, 반도체>

원 영 진(정회원)
 전자공학회논문지 제 42권 1E편 제3호 참조