

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 26, No. 4, 2006

계통연계형 태양광발전 인버터를 위한 주기적인 영전류 구간을 가지는 새로운 AFD 단독운전 검출기법

고문주*, 최 익*, 최주엽**, 송승호**, 이기옥**

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

**광운대학교 전기공학과(juyeop@kw.ac.kr), **광운대학교 전기공학과(ssh@kw.ac.kr),

**광운대학교 전기공학과(skall@kier.re.kr)

Novel AFD method of islanding detection with a periodic zero current for improving on islanding detection for grid-connected photovoltaic inverters

Ko, Moon-Ju*, Choy, Ick*, Choi, Ju-Yeop**, Song, Seung-Ho**, Lee, Ki-Ok**

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

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

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

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

**Dept. of Electrical Eng., Kwangwoon University(skall@kier.re.kr)

Abstract

This paper proposes a novel active frequency drift (AFD) method for the islanding prevention of grid-connected photovoltaic inverter. To detect the islanding phenomenon of grid-connected photovoltaic (PV) inverters concerning about the safety hazards and the damage to other electric equipments, many kinds of anti-islanding methods have been presented. Among them, AFD method using chopping fraction enables the islanding detection to drift up (or down) the frequency of the voltage during the islanding situation. In this paper, injecting the periodic zero current into the basic AFD method is proposed. This proposed method shows the analytical design value of cf to meet the test procedure of IEEE Std. 1547 with various load conditions. Detection of islanding is verified using simulation tool PSIM.

Keywords : 단독운전 (islanding), 계통연계형 (grid-connected), 태양광발전시스템 (PV systems), AFD (active frequency drift), 불검출영역 (non-detection zone), 인버터 (inverters)

접수일자: 2006년 8월 25일, 심사완료일자: 2006년 12월 13일

기 호 설 명

- P_{inv} : real power of the PV system [W]
 P_{load} : real power of the load [W]
 ΔP : real power of the grid [W]
 Q_{inv} : reactive power of the PV system [VAR]
 Q_{load} : reactive power of the load [VAR]
 ΔQ : reactive power of the grid [VAR]
 v_a : instantaneous voltage at PV system terminals or at node a [V]
 R : load resistance [Ω]
 L : load inductance [H]
 C : load capacitance [C]
 cf : "chopping fraction" the fraction of zero time in the AFD waveform per half-cycle
 ω : frequency of the voltage at the PV system terminals or at node a [rad/sec]

1. 서 론

계통연계형 태양광발전 시스템에서의 단독운전 검출은 계통을 유지보수하기 위한 작업자의 안전을 위하여 고려되어야 할 필수 사항이다.[1][2] 이러한 단독운전을 검출하는 기법은 크게 수동적 검출 기법과 능동적 검출 기법으로 분류할 수 있다.[3]

수동적 검출 기법은 연계형 시스템의 파라미터를 순시적으로 관찰하여 파라미터의 이상 유무나 변화량의 증감을 이용하여 단독운전을 검출하는 것이다. 이 기법으로는 인버터와 출력전류의 위상을 감시하여 단독운전 발생 시 부하전력의 차로 인한 전류 위상의 급변을 검출하여 단독운전임을 판단하는 전압 위상 도약 검출기법, 단독운전 발생 시 갑자기 증가한 고조파 성분을 검출하여 단독운전임을 판단하는 전압 고조파 검출기법, 인버터의 출력의 변화율을 검출하는 기법으로 동일한 부하의 변동에 대하여 단독운전 상태 시에는 출력 전력의 변화율이 높다는 점에 착안한 기법인 출력 변화율 검출기

법 등이 있다.

능동적 검출 기법은 수동적 검출 기법에서 시스템의 발전 전력과 부하의 소모 전력이 일치할 경우, 특히 RLC 공진 부하가 연결될 경우에는 검출이 불가능하게 되는 문제점을 개선하기 위하여 연계형 시스템의 출력전류에 다양한 외란을 인가함으로써 단독운전 발생 시 시스템의 발전전력과 부하의 소모 전력의 평형 상태를 깨뜨려 전압과 주파수 등의 시스템 파라미터가 변화되도록 한 후 단독운전을 검출하는 것을 말한다. 이 기법으로는 PV 시스템의 출력을 계통에 대한 전류원이라 생각하여 PV 시스템 출력전류의 크기, 출력 전류의 주파수 그리고 출력 전류의 위상 중 하나에 지속적인 변동을 인가하는 방법인 출력 전력 변동 방식, 출력 전류의 영교차점에 일정크기의 데드타임을 인가하여 단독운전 발생 시 주파수가 지속적으로 증가하도록 하는 일반적으로 AFD 기법이라고 칭하는 주파수 쉬프트 기법, AFD 기법의 단점을 개선한 기법으로 계통주파수마다 cf 의 크기를 가변시키는 AFDPF 기법 등이 있다.[4]

위에서 언급한 여러 가지 단독운전 검출 기법중에서 본 논문에서는 AFD 기법에 영전류 구간을 주기적으로 인가함으로써 단독운전 검출 성능 및 검출 시간을 개선(0.5초 이내)하는 새로운 기법을 제안하고 시뮬레이션 하였다.

2. AFD 기법

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

그림 1은 AFD 기법을 사용한 출력전류파형이다. 여기서, $T_{V_{uni}}$ 은 계통전압의 한 주기를 나타내

고, $T_{I_{PV}}$ 는 PV PCS의 출력전류의 한 주기를 나타내며, t_z 는 출력전류파형이 0인 구간을 나타낸다. 수식 (1)에서 Chopping Fraction(CF)은 출력전류파형의 한 주기 동안에 전류가 0인 구간을 나타낸다.

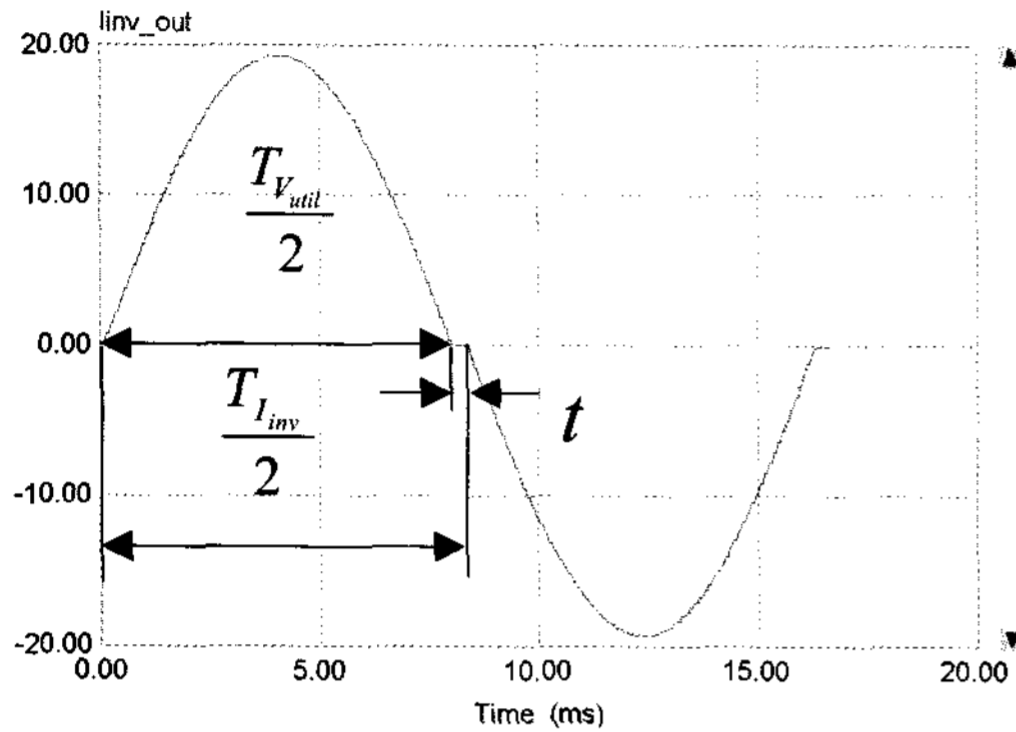


그림 1. AFD 기법을 사용한 출력전류파형

$$Chopping\ Fraction(cf) = \frac{2t_z}{T_{V_{util}}} \quad (1)$$

이 기법은 출력전류에 왜곡을 인가함으로써 정상상태 시 cf의 크기에 따라 출력 전류의 THD (Total Harmonic Distortion)가 증가하게 된다. 국제 규격에 의하면 정격출력 시 출력 전류의 THD는 5% 이내로 제한되기 때문에 인가할 수 있는 cf의 크기는 제한적이다. 규격에서 제시한 THD 5%의 규정을 만족하기 위해서는 이론적으로 cf의 크기를 약 5% 까지 인가할 수 있으나 실제로는 자체 THD가 있기 때문에 인가할 수 있는 cf의 크기는 더욱 축소되고 이는 검출 성능에 제한적 요소로 작용한다.

또한 시스템의 출력전류와 단자 전압과의 위상차가 없는 경우(dpf=1) 인버터에서 발생하는 무효전력의 크기는 식 (2), (3)과 같으며, 단독운전 시 부하의 무효전력이 cf에 의하여 발생하는 출력의 무효전력을 상쇄하는 경우 무효전력이 일치하게

되어 주파수의 변동은 발생하지 않는다. 따라서 이 기법은 다른 능동적 기법에 비해 NDZ가 폭 넓게 존재하는 단점도 가지고 있다.[10]

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{1}{\sqrt{1+THD_i^2}} \quad (2)$$

$$\frac{Q}{P} = THD_i \quad (3)$$

이러한 문제점을 개선한 기법이 AFDPF (Active Frequency Drift Positive Feedback) 기법이다. 그러나 이 기법은 정상상태에서의 주파수 변동에 민감하고 한국전력에서 2005년도에 공시한 “분산형 전원 배전계통 연계 기술 기준”에 명시된 0.5초 이내의 검출시간을 보장하지 못하는 문제점들을 가지고 있다.[5][6][8]

본 논문에서는 이러한 문제점들을 개선하기 위해서 AFD 기법이 적용된 인버터의 출력전류에 주기적인 영전류를 투입하여 단독운전을 검출하는 방법을 제안한다.

3. Active Frequency Drift Adding Zero Current (AFDAZC) 기법

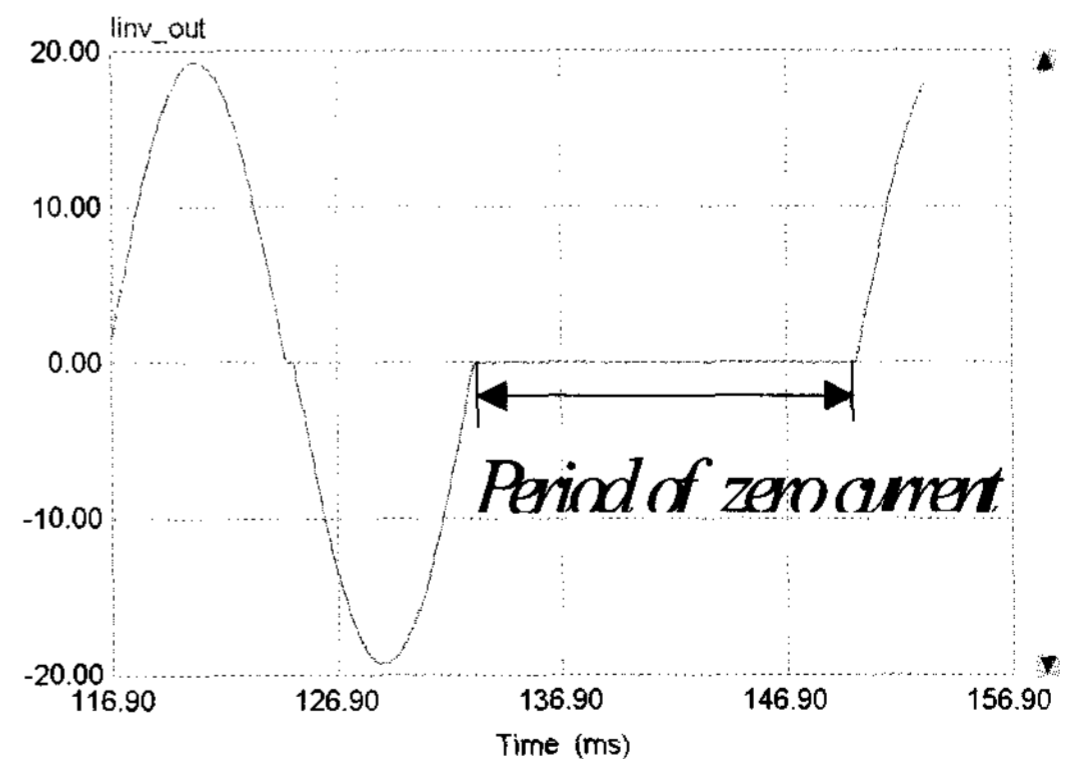


그림 2. AFDAZC를 적용한 PV 시스템의 출력전류파형

본 논문에서 제안한 AFDAZC 기법은 cf와 영전류

구간을 동시에 가지면서 단독운전을 검출하는 방법으로 AFD 기법을 개선한 기법이다. 이 기법은 AFD 기법에 근간을 두고 있으며, 특정한 주기 동안 PV 시스템의 출력 전류를 다음 주기가 시작되기 전까지 0으로 만드는 기법이다.

이러한 영전류를 투입하게 된 동기는 cf를 가짐으로써 생기는 왜란을 최소화시키기 위해 cf의 크기를 줄여나가는 것이 아니라 일정한 주기로 출력전류 전체에 cf를 가한 것과 같은 파형을 투입하게 되었는데, 결국 영전류를 투입한 것과 같은 효과를 가져 오게 되었다.

이 기법에서 기본적인 단독운전 검출은 AFD 기법의 cf에 의해 생기는 주파수의 변화에 의해 수행되고, THD를 줄이기 위해 cf의 크기를 줄이는 과정에서 단독운전을 감지하지 못하는 부하의 범위에서는 투입한 영전류에 의해 수행된다.

영전류 투입 구간에 대한 설정을 위해 수식 (4)를 사용하였다. 아래 수식 (4)는 앞에서 언급한 한국 전력에서 공시한 기준에 따라 0.5초 이내에 단독운전을 검출하기 위해 전체 수식 전체 구간을 0.5초로 잡았고, 출력 전류의 한주기에 해당하는 1/60을 대입하여 출력 전류에 인가되는 영전류 구간의 최대 주기를 계산 할 수 있다.

$$\frac{t_d}{T_f} > C_z \quad (4)$$

where :

t_d is time of detection (0.5sec)

T_f is period of line frequency (1/60Hz)

C_z is maximum period of zero current

위의 수식 (4)를 정리해서 C_z 의 값을 구하면 최대 30 이 나오는데, 이것은 영전류를 투입하는데 필요한 최대한의 주기이다. 다시 말해 영전류를 최대 30주기 미만으로만 인버터 출력전류에 투입하면 단독운전 검출을 할 수 있다는 것이다.

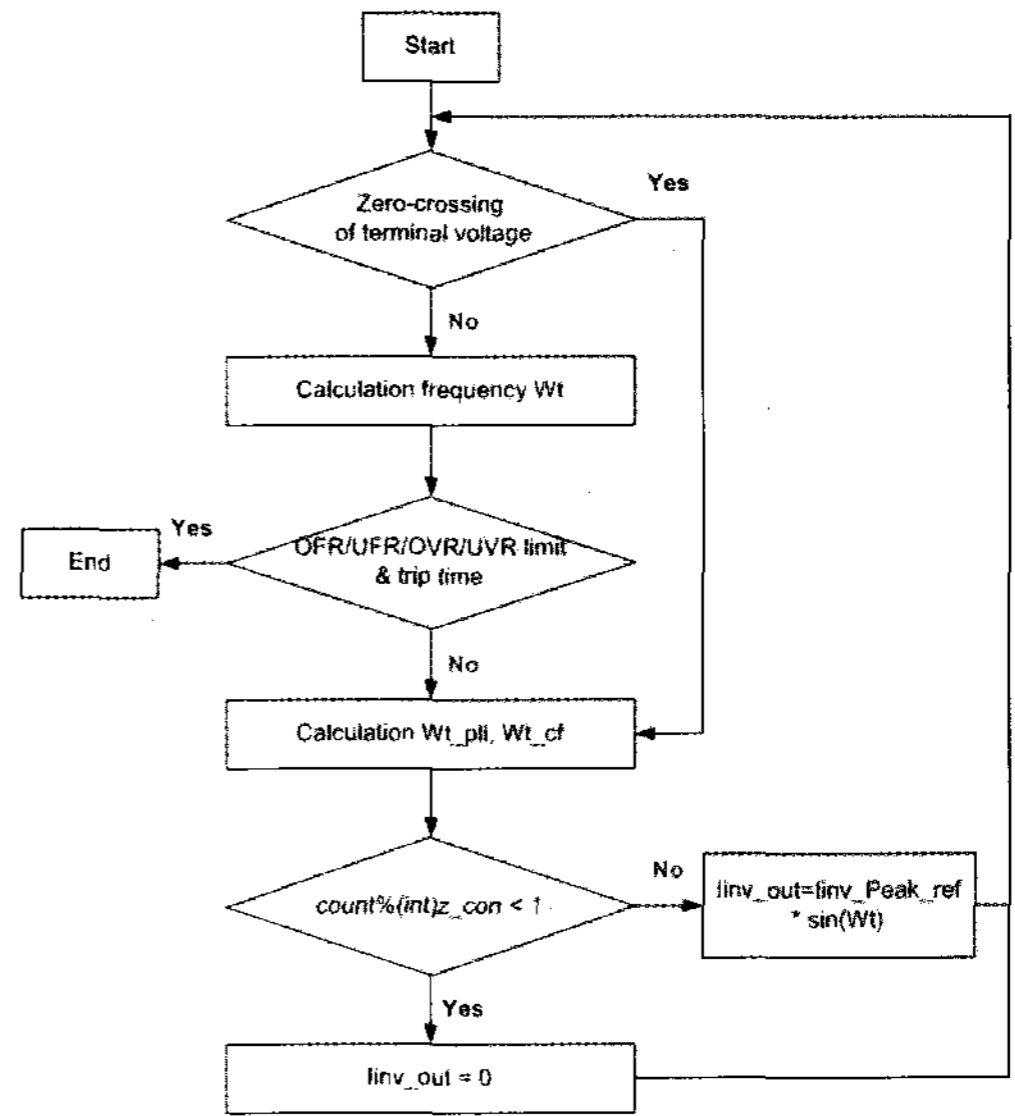


그림 3. AFDAZC 흐름도

그림 3은 시뮬레이션에 사용된 AFDAZC의 흐름도를 나타내고 있다.

4. 시뮬레이션 조건

그림 4는 계통연계형 시스템의 단독운전 검출 성능시험에 사용되는 구성도를 나타낸다. 여기서 RLC 부하의 시뮬레이션 조건은 다음과 같이 정의한다.

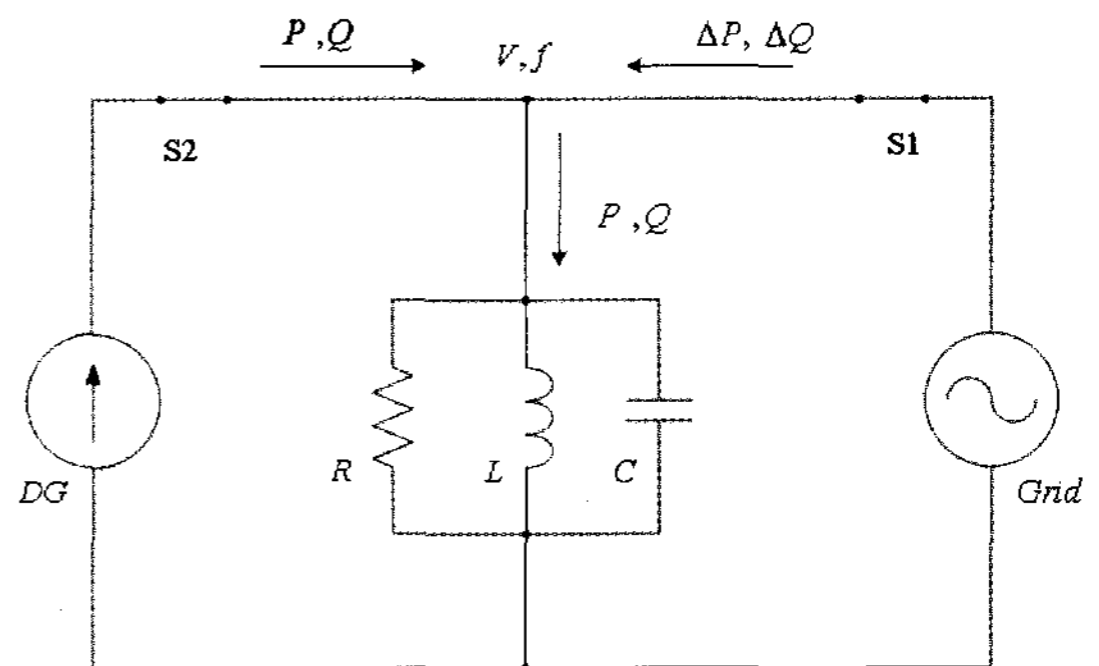


그림 4. 계통연계형 시스템의 일반적인 형태

- 1) RLC 부하의 공진주파수는 계통의 선간전압의 주파수(60Hz)와 동일하다.

- 2) RLC 부하의 Qf (Quality Factor)는 1.0으로 하며, 물리적으로 L 혹은 C에 저장된 무효 전력을 R에서 소모되는 유효전력에 Qf 를 곱한 것으로 정의한다.
- 3) 인버터에서 공급되는 전력은 RLC부하의 전력과 일치한다. (그림 3에서 $\Delta P = \Delta Q = 0$)^{[7][9]}

5. 시뮬레이션

그림 5는 PSIM 프로그램에 사용된 시뮬레이션 회로를 나타내고 있다. 이 시뮬레이션 회로에서 PV PCS를 전압제어 전류원으로 대치하였고, DLL(Dynamic Linked Library)을 이용하여 PV 시스템과 계통과의 연계점에서의 전압의 정보를 받아 필요한 인버터 출력전류 및 PLL의 계산과 cf를 추가한 파형을 생성하는데 이용하였다.

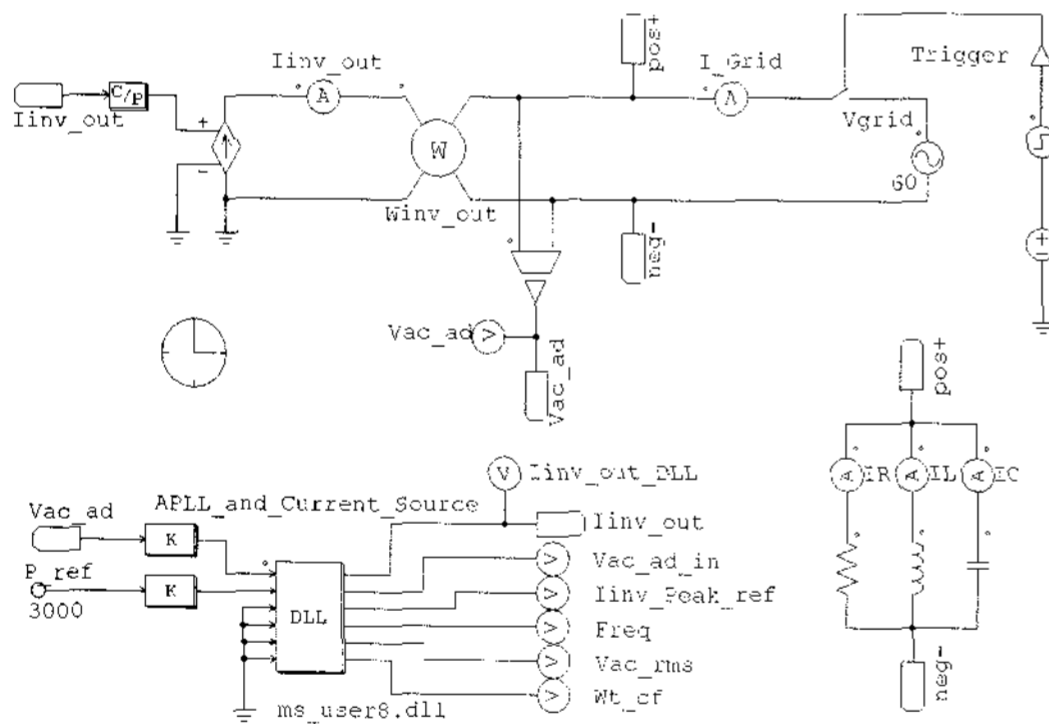


그림 5. 시뮬레이션에 사용된 회로(PSIM)

단독운전 발생 시간은 시뮬레이션 시작 0.5초 후로 설정하였다. RLC 부하 설정은 전력이 전부 소비되고 주파수는 60Hz에서 공진하는 것으로 설정하였다.

그림 6은 $cf = 1\%$, $Cz = 29$ 인 경우로 시뮬레이션 한 인버터의 출력전류, 연계점 전압 그리고 주파수 파형을 보여주고 있다. 위에서 제시한 부하 조건에서는 $cf = 1\%$ 로 시뮬레이션 시작 후 0.5

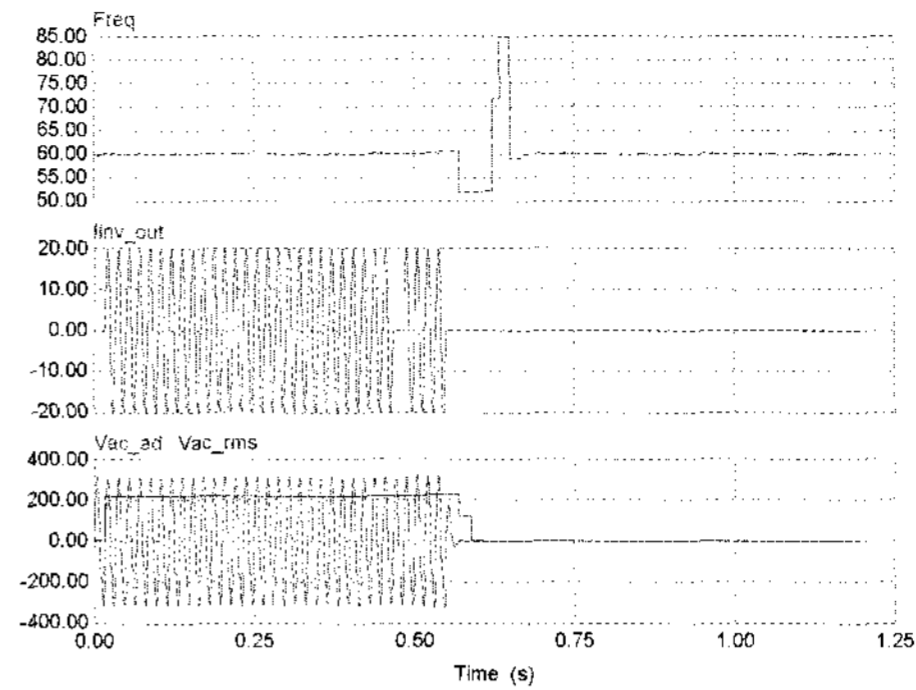


그림 6. 인버터 출력전류, 연계점 전압과 주파수의 파형($cf=1\%$, $Cz=29$) Ch1 : 출력전류, Ch2 : 연계점 전압, Ch3 : 주파수

초에 발생한 단독운전을 검출하고 있다. 이것은 $cf = 1\%$ 인 경우에는 기본적인 AFD 기법으로도 충분히 단독운전을 검출할 수 있는 영역이며 첫 번째 영전류 구간을 지난 직후 단독운전이 발생했을 때 기본적인 AFD 방법으로도 단독운전을 검출할 수 있음을 보여주는 시뮬레이션 결과 파형이다.

그림 7은 $cf = 0.7\%$, $Cz = 29$ 인 경우로 시뮬레이션 한 인버터의 출력전류, 연계점 전압 그리고 주파수 파형을 보여주고 있다. $cf = 0.7\%$ 로는 기본적인 AFD 기법으로는 단독운전을 검출하지 못하고 있다. 첫 번째 영전류 구간이 지난 후 0.5초에서 단독운전이 발생하였기 때문에 다음 영전류 투입 구간 전에서는 단독운전을 검출하지 못하고 있다.

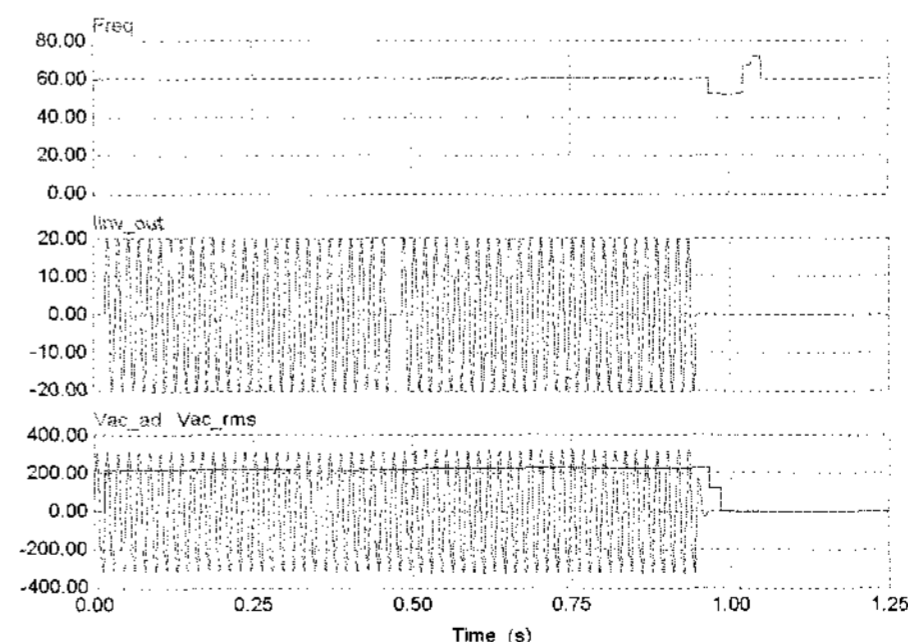


그림 7. 인버터 출력전류, 연계점 전압과 주파수의 파형($cf=0.7\%$, $Cz=29$) Ch1 : 출력전류, Ch2 : 연계점 전압, Ch3 : 주파수

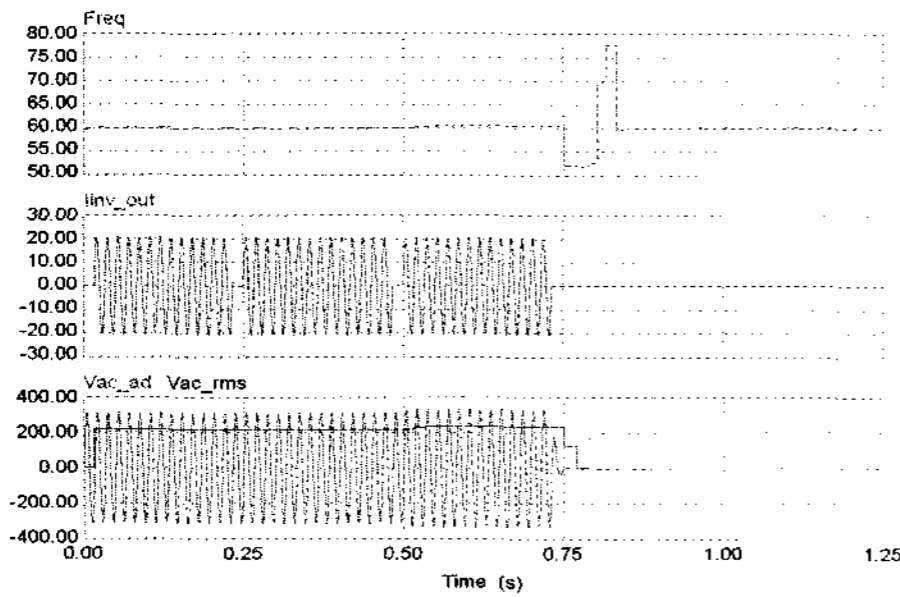


그림 8. 인버터 출력전류, 연계점 전압과 주파수의 파형(cf=0.7%, Cz=15)
Ch1 : 출력전류, Ch2 : 연계점 전압, Ch3 : 주파수

두 번째 영전류 투입이 이루어지고 단독운전을 검출하여 단독운전이 일어난 후 0.5이내인 시뮬레이션 시작 후 1초 이내에 인버터를 정지 시키는 것을 확인할 수 있다. **그림 7**은 단독운전이 발생한 시점을 영전류 투입 바로 직후로 설정을 한 것으로 사실상 일어날 수 있는 가장 최악의 조건이라 할 수 있다.

그림 8은 $cf = 0.7\%$, $Cz = 15$ 인 경우로 시뮬레이션 한 인버터의 출력전류, 연계점 전압 그리고 주파수 파형을 보여주고 있다. 역시 $cf = 0.7\%$ 로는 기본적인 AFD 기법으로는 단독운전을 검출하지 못하고 3번째 영전류 투입 후 단독운전을 검출 하는 것을 알 수 있다.

위의 시뮬레이션 결과 파형에서 보이는 것과 같이 **그림 6**은 기본적인 AFD 기법만으로도 단독운전을 검출을 할 수 있고, 그렇지 못한 경우에 대해서는 그림 7과 8에서 영전류 투입 구간에서 단독운전을 검출하는 것을 보여주고 있다. 이것은 본 논문에서 제시한 방법이 AFD 기법에 근간을 두면서 영전류 투입 구간을 둔 것은 두가지 방법 모두 사용하여 최대한 빠른 시간 안에 단독운전을 검출하는 데 중점을 두고 있기 때문이다.

시뮬레이션 결과 파형에서 알 수 있듯이 영전류 투입 주기인 Cz 가 29 이하의 값을 가진다면 단독운전이 어디서 발생하던지 간에 단독운전 발생 후 0.5초 이내에는 충분히 검출하여 인버터 출력을

중지 할 수 있음을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 단독운전 검출을 위한 새로운 AFD 방법을 제시하였다. 기존의 AFD 기법에서 사용된 cf 를 최소화 시키면서도 충분히 단독운전을 검출해 낼 수 있었고, 계산되어진 수식에 의해 Cz값을 적용한 결과 충분히 0.5초 이내에 단독운전을 검출하는 것을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 이번 논문은 주기적인 영전류 투입 시 주파수 과도상태와 단독운전 검출을 주어진 시간 내에 할 수 있는지에 대한 부분을 중점적으로 하였고, 앞으로 역률 및 고조파 특성 등에 대한 연구를 계속할 예정이다.

이 논문은 2005학년도 광운대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

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. 정영석, “태양광발전용 계통연계형 인버터의 단독운전 검출기법” 충북대학교 전기공학과 박사 학위청구논문, 2006.
5. 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.
6. 분산형 전원 배전계통 연계 기술기준, 한국전력 홈페이지 배전용 전기설비이용 규정, http://cis.kepco.co.kr/csarent/cyber_spot_new/03.law/law02_01_07_1.jsp.
 7. Copyright by Underwriters Laboratories inc., “Inverters, Converters, and Controllers for Use in Independent Power Systems”, UL 1741, 2002. 8, ISBN 0-7629-0421-6.
 8. 이기욱, “단독운전검출을 위한 Active Frequency Drift Positive Feedback기법의 Chopping Fraction Gain”, 광운대학교 전기공학과 석사학위청구논문, 2004.
 9. 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.
 10. Y. Jung, J. Choi, B. Yu, G. Yu, J. So, J. Choi, “A Novel Active Frequency Drift Method of Islanding Prevention for the grid-connected Photovoltaic Inverter”, 0-7803-9033-4/ 2005. IEEE.