

향상된 고조파 검출 능력을 갖는 계통연계 인버터의 하이브리드 단독운전 방지기법

강성욱¹, 김경화[†]

A Hybrid Anti-islanding Detection Scheme for Utility Interactive Inverter with Enhanced Harmonic Extraction Capability

Sung-Wook Kang¹, Kyeong-Hwa Kim[†]

Abstract - When distributed generation such as a wind power system is connected to the grid, it should meet grid requirements like IEEE Std. 1547, which regulates the anti-islanding method. Since the islanding may cause damage on electrical equipments or safety hazards for utility line worker, a distributed generation should detect it as soon as possible. This paper proposes a hybrid anti-islanding method coupled with the active and passive detection methods. To enhance the harmonic extraction capability for an active harmonic injection method, cascaded second-order band-pass filter and signal processing scheme are employed. Simulation and experiments are carried out under the islanding test condition specified in IEEE Std. 1547. Passive over/under voltage and over/under frequency methods are combined with the active method to improve the detection speed under certain condition. The simulation and experimental results are presented to verify that the proposed hybrid anti-islanding method can effectively detect the islanding.

Keywords: band-pass filter, distributed generation, enhanced harmonic extraction, hybrid anti-islanding method, utility interactive inverter

1. 서 론

대기오염과 지구온난화를 일으키는 온실가스 발생의 주원인이 되는 기존의 화력발전을 대체할 수 있는 풍력, 태양광 등과 같은 신재생 에너지에 대한 관심과 수요가 전 세계적으로 증가하고 있다. 신재생 에너지는 화석연료와 같이 매장량이 제한되지 않으며, 발전에 의한 오염물질의 배출이 없는 친환경적 에너지원이다. 이러한 신재생 에너지를 이용한 분산전원이 계통과 연계되어 운용되기 위해서는 계통연계 인버터(Utility interactive inverter)가 사용된다^{[1]-[2]}.

분산전원이 계통과 연계되어 운전 될 경우, IEEE Std. 1547^{[3]-[4]}과 같은 계통연계 규정에 따라야 하며 이러한 규정에서는 단독운전 방지기법(Anti-islanding method)을 요구하고 있다. 단독운전은 분산전원이 계통과 분리되었음에도 불구하고 이를 인지하지 못하고 분산전원이 지속적으로 전력을 공급하고 있는 상태를 말하며 이는 계통의 전기설비를 손상시킬 뿐만 아니라 선로 작업자의 안전사고를 유발할 수 있어 풍력발전 시스템과 같은 분산전원은 계통과 분리되었을 경우 이를 정확하고 신속하게 검출하여야 한다. 단독운전 발생 시 인버터는 전압과 주파수를 제어할 수 없어 가능한 신속히 정지하거나 독립 운전모드(Stand-alone mode)로 전환하여 중요부하에 전력을 공급하여야 한다. 단독운전 방지기법은 다음과 같이 크게 3 가지로 구분할 수 있다^[5].

- Grid-resident detection
- External switched capacitor detection
- Inverter-resident detection

Paper number: TKPE-2014-19-4-3

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: k2h1@seoultech.ac.kr, Dept. of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology

Tel: +82-2-970-6406 Fax: +82-2-978-2754

¹ Dept. of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology

Manuscript received Feb. 14, 2014; accepted Apr. 18, 2014

— 본 논문은 2013년 전력전자학술대회 외부장학금 수혜논문임

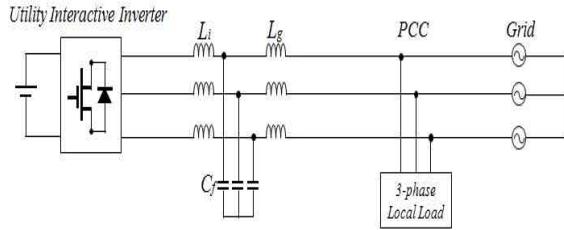


Fig. 1 Configuration of a utility interactive inverter with grid

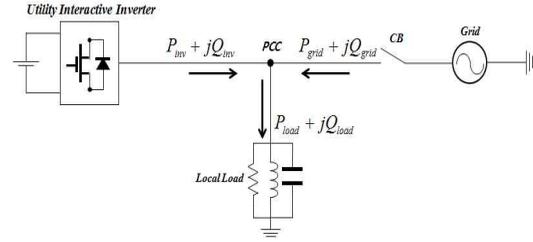


Fig. 2 System configuration of an utility interactive inverter in grid-connected mode

Grid-resident detection은 계통과 인버터의 통신에 의해 단독운전을 검출하는 방식으로 단독운전을 검출하는데 매우 효과적이거나 추가적인 송수신기의 설비를 요구하는 단점이 있다. External switched capacitor detection은 계통 임피던스에 비례하는 지연을 발생하도록 계통과 병렬로 커패시터를 설치하는 방법으로 역시 추가적인 설비를 필요로 하며 설치비용 발생과 유지보수가 필요한 단점이 있다.

Inverter-resident detection은 소프트웨어 기반의 단독운전 검출 방식으로 인버터 제어기의 인위적인 외란(Disturbance) 주입 여부에 따라 수동 검출기법과 능동 검출기법으로 나뉜다. 이 방식은 단독운전을 검출하기 위한 추가적인 장비를 요구하지 않아 지금까지 많은 연구가 이루어졌다. 그림 1은 계통과 연계된 일반적인 계통연계 인버터의 구성을 나타낸다.

수동 검출기법은 단독운전 발생 시 나타나는 고조파, 주파수, 전압 및 위상 등의 파라미터 변화를 관찰하여 단독운전을 검출하는 기법이다. 수동 검출기법은 외란을 주입하지 않으므로 정상상태에서 인버터의 출력이 외란의 영향을 받지 않지만 파라미터의 허용범위인 NDZ라는 단점으로 인해 검출의 신뢰성이 제한된다. 대표적인 수동 검출기법으로 알려진 수동 전압/주파수 검출기법(Over/Under Voltage and Over/Under Frequency : OUV-OUF method)은 PCC의 전압과 주파수의 변화를 감지하여 단독운전을 검출한다^[6].

능동 검출기법은 외란을 주입하여 단독운전을 검출하는 방법으로 정확성이 높으며, 다음과 같은 방법들로 구분된다.

- Active frequency drift ^{[7]-[8]}
- Reactive power variation ^[8]
- Sandia frequency shift ^[9]
- Harmonic injection ^{[10]-[14]}

능동 검출기법은 인버터의 출력에 외란을 주입함으로써 검출불능 영역(Non Detection Zone : NDZ)없이 단독운전을 검출할 수 있어 신뢰성이 높으나 주입한 외란이 계통연계 모드의 정상상태에서도 존재하므로 전력품질(Power quality)이 낮아지는 단점이 있다.

본 논문에서는 능동 검출기법과 수동 검출기법의 장점을 조합한 하이브리드 단독운전 방지기법을 제안하며 특히, 능동 검출을 위해서는 기존의 고조파 검출 능력을 향상시키기 위한 대역통과 필터와 신호처리 기법에 기반한 새로운 기법이 제안된다. 인버터 출력에 주입된 7차 고조파 성분의 검출 능력을 향상시키기 위해 PCC에서의 계통전압이 DSP 내에서 디지털 방식으로 구현된 2단의 2차 대역통과 필터(Band Pass Filter : BPF)를 통해 처리되어 정확한 7차 고조파 성분이 추출된다. 구해진 7차 고조파 성분으로부터 푸리에 기법을 통해 7차 고조파의 크기가 계산된다. 이러한 향상된 고조파 검출 능력을 갖는 능동 검출기법을 통해 단독운전 여부를 정확하게 검출할 수 있으며 이를 대표적인 수동 검출기법인 전압/주파수 검출기법과 조합하여 신속하고 신뢰성 있는 하이브리드 단독운전 방지기법을 구현한다. 제안된 하이브리드 기법이 단독운전을 효과적으로 검출할 수 있음을 입증하기 위해 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 도출된 실험결과를 통해 수동 기법은 NDZ를 벗어날 경우 빠르게 단독운전을 검출할 수 있으며 제안된 능동 기법은 NDZ 하에서도 정확하게 단독운전을 검출할 수 있음을 확인하였다.

2. 계통연계 인버터와 단독운전 방지기법

그림 2는 계통연계 모드에서 인버터, PCC 부하 및 계통으로 이루어진 시스템의 구성도이다. 계통연계 인버터가 계통으로 단위역률의 전류를 공급하기 위해서는 계통전압과 동기화된 전류를 구하기 위해 계통전압의 위상각을 검출하는 PLL 기법이 사용된다. 전력용 스위칭 소자의 PWM 기법에 의한 스위칭 주파수 성분의 고조파를 제거하기 위해서는 LCL 필터가 일반적으로 사용되고 있다. LCL 필터는 파라미터 선정이 복잡하고 공진을 방지하기 위한 댐핑 기법이 요구되는 단점이 있으나 L필터에 비해 상대적으로 낮은 비용과 용량으로 고조파를 감쇄시킬 수 있는 특성을 가진다^[15].

계통 측 차단기가 동작하여 계통연계 인버터가 계통과 분리될 경우, 인버터는 전압과 주파수를 제어하지 못하므로 차단기 재투입에 의한 큰 과도전류가 전기설비를 손상시킬 수 있고, 선로 작업자의 감전사고 위험이

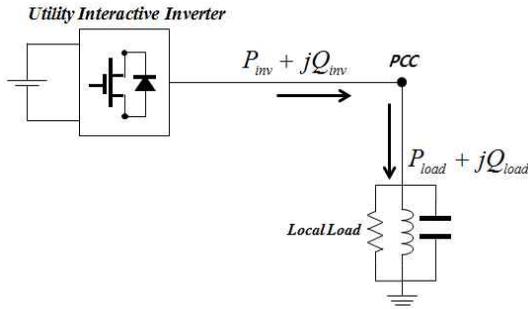


Fig. 3 System configuration of an utility interactive inverter in islanding mode

Table 1 Abnormal voltage range and clearing time

Abnormal voltage range(p.u)	Clearing time(s)
$V < 0.5$	0.16
$0.5 \leq V < 0.88$	2
$1.1 < V < 1.2$	1
$1.2 \leq V$	0.16

Table 2 Abnormal frequency range and clearing time

Abnormal frequency range(Hz)	Clearing time(s)
$f < 59.3$	0.16
$f > 60.5$	0.16

발생한다. 그림 3은 단독운전 모드시 시스템의 구성을 나타낸다. 단독운전 모드에서 PCC(Point of Common Coupling)의 전압은 PCC 부하 임피던스와 계통연계 인버터의 공급 전류에 의해 결정된다. 일반적으로 PCC 전압의 크기 및 주파수 정보를 이용하여 단독운전을 검출할 수 있다.

IEEE Std. 1547에서는 계통설비의 보호를 위한 전압과 주파수의 허용 범위가 명시되어 있다. 이 규정에 따르면 만약 전압과 주파수가 규정된 허용범위를 벗어나 비정상 영역(Abnormal range)내에 존재할 경우, 차단시간(Clearing time)안에 인버터를 정지시켜야 한다. 표 1과 표 2는 분산전원의 전력이 30[kW]이하 일 때, IEEE Std. 1547 규정에 따른 전압/주파수의 비정상 영역을 나타낸다.

만약 단독운전이 발생한다 하더라도 PCC 전압과 주파수가 위의 명시된 범위 내에 존재한다면 계통연계 인버터는 단독운전을 검출할 수 없게 되며 이러한 파라미터의 허용범위를 NDZ라 한다. 그림 4는 표 1과 표 2를 고려한 전압과 주파수의 NDZ를 나타낸다. 본 논문에서는 단독운전을 효과적으로 검출하기 위해 인버터 출력에 계통전압의 4[%]의 7차 고조파를 주입한다. 그림 5는 0.2[s]에서 인버터의 출력에 고조파를 주입하였을 때 출

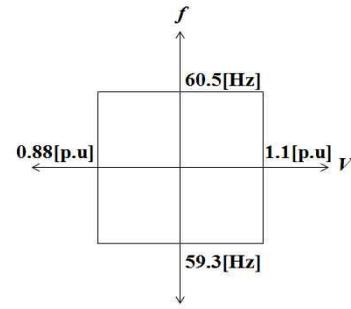


Fig. 4 NDZ

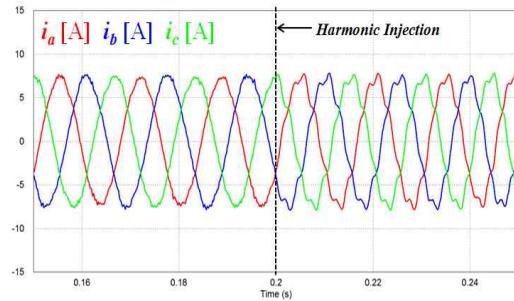


Fig. 5 Distorted waveform of inverter output currents by the seventh harmonic injection

력전류 i_a , i_b 및 i_c 의 특성을 나타낸다.

3. 제안된 하이브리드 단독운전 방지기법

제안된 하이브리드 단독운전 방지기법은 기존의 수동 전압/주파수 검출기법과 능동 검출기법을 조합하여 단독운전을 검출하게 되며 능동 검출기법에서는 향상된 고조파 검출을 위해 대역통과 필터와 신호처리 기법을 적용하여 주입된 7차 고조파 전압을 검출하게 된다.

3.1 향상된 고조파 검출 알고리즘

계통에 주입된 7차 고조파 성분만을 구하기 위해 3상 계통전압이 전압센서로 측정되고 측정된 전압은 DSP 내에서 디지털 방식으로 구현된 2단의 2차 대역통과 필터에 의해 처리되어 기본파 성분이 제거된 7차 고조파 성분을 추출하게 된다. 2차 대역통과 필터의 전달함수는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{BPF}(s) = \frac{k\beta s}{s^2 + \beta s + \omega_c^2} \quad (1)$$

여기서 k 는 필터의 이득, β 는 대역폭, ω_c 는 중심 주파수를 나타낸다. 식 (1)의 대역통과 필터는 DSP 내에서 소프트웨어 방식으로 구현되며 이산화를 위해 Bilinear transform 기법을 사용하면 라플라스 연산자 s 는 다음과 같이 변환된다.

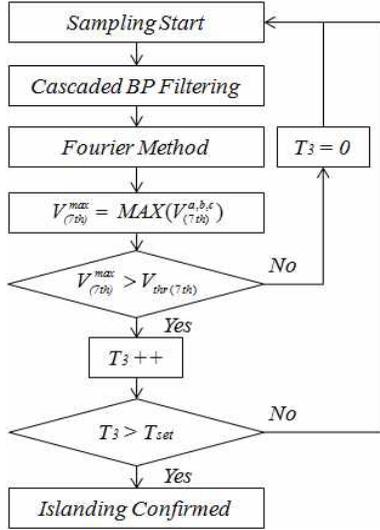


Fig. 6 Active islanding detection method with enhanced harmonic extraction algorithm

$$s = \frac{2}{T_s} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \quad (2)$$

여기서 T_s 는 샘플링 주기이며 z 는 z -연산자이다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하면 이산시간에서 2차 대역통과 필터의 펄스 전달함수(Pulse transfer function)를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G_{D,BPF}(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-2}}{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (3)$$

여기서 $a_0 = 4 + 2\beta T_s + \omega_c^2 T_s^2$, $a_1 = -8 + 2\omega_c^2 T_s^2$, $a_2 = 4 - 2\beta T_s + \omega_c^2 T_s^2$, $b_0 = 2\beta T_s$ 및 $b_1 = -2\beta T_s$ 이다. 계통전압에 포함된 7차 고조파 성분을 추출하기 위해 중심 주파수 $\omega_c = 2\pi \cdot 420$ [rad/sec] 및 대역폭 $\beta = 2\pi \cdot 20$ [rad/sec]가 사용된다. 대역통과 필터를 통해 추출된 계통전압의 7차 고조파 성분은 푸리에 기법을 이용하여 식(4)-(6)을 통해 고조파의 크기를 구할 수 있다.

$$|V_{(7th)}^{abc}| = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (4)$$

$$a_n = \frac{7}{T} \int_0^T v_{g(7th)} \cos(7\omega t) dt \quad (5)$$

$$b_n = \frac{7}{T} \int_0^T v_{g(7th)} \sin(7\omega t) dt \quad (6)$$

여기서 $v_{g(7th)}$ 는 대역통과 필터를 통해 추출된 각 계통상전압의 7차 고조파 성분이며, $V_{(7th)}^{abc}$ 는 푸리에 기법을 통해 계산된 계통 전압의 7차 고조파 성분의 크기를 나

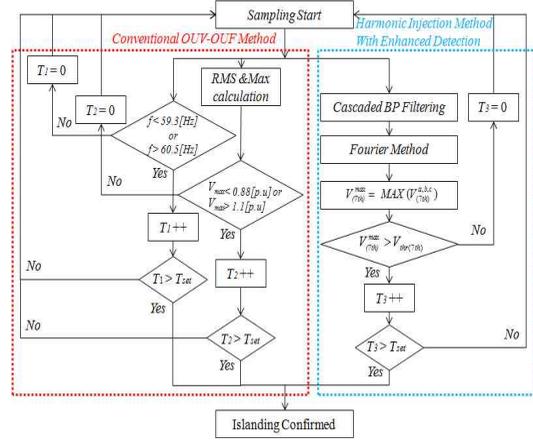


Fig. 7 The proposed hybrid anti-islanding method

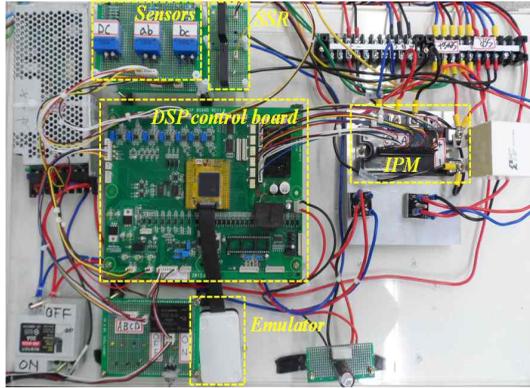
타낸다. T 는 계통 전압의 한 주기이며 7차 고조파의 크기를 계산해야 하므로 기본파의 1/7 주기 동안만 주기적분을 수행하게 된다. 그림 6은 제안된 고조파 검출 알고리즘을 이용한 능동 검출기법을 나타내며 향상된 고조파 검출을 위해 2차 대역통과 필터와 신호처리 기법이 사용된다.

3.2 하이브리드 단독운전 방지기법

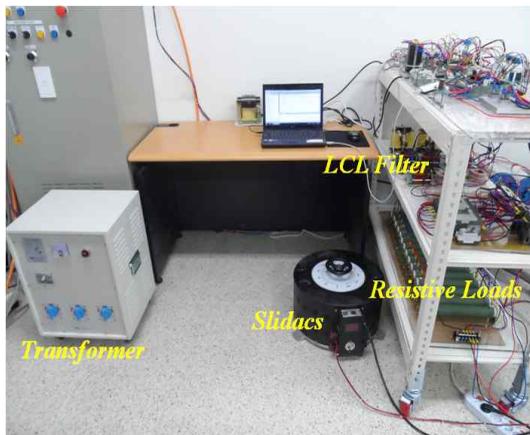
그림 7은 기존의 수동 전압/주파수 검출기법과 고조파 주입기법을 조합한 하이브리드 단독운전 방지기법을 나타낸다. 정상적 계통연계 모드시의 일시적인 계통의 전압, 주파수 및 고조파 변화로 인한 오검출을 최소화하고 검출의 신뢰성을 향상시키기 위해 단독운전 조건이 설정된 일정시간 T_{set} 이상 지속될 경우 제어기는 단독운전을 판정하게 되고 계통연계 인버터를 정지시킨다. 기존의 수동 검출기법에서는 PCC에서의 계통전압과 주파수가 그림 4에서의 NDZ를 벗어나게 되면 T_1 과 T_2 가 증가하게 되고 이 값이 T_{set} 이상 지속될 경우 단독운전을 판정하게 된다. 이때 전압은 계통 상전압의 실효치를 계산하여 사용하게 되며 실효치 중 최댓값 V_{max} 를 취하여 단독운전 판정에 사용한다.

제안된 고조파 주입 기법은 인버터 출력에 7차 고조파를 주입하여 단독운전 모드에서 관찰되는 7차 고조파의 크기를 이용하여 단독운전을 검출하게 되며 그림 6의 고조파 검출 알고리즘이 사용된다. 각 상의 7차 고조파 중 가장 큰 값이 $V_{(7th)}^{max}$ 으로 선정되고 $V_{(7th)}^{max}$ 가 설정치 $V_{thr(7th)}$ 보다 큰 경우 T_3 가 증가하게 되며 이 값이 T_{set} 이상 지속될 경우 단독운전을 판정하게 된다. 제안된 고조파 주입기법은 정확하고 신뢰성 있게 단독운전을 검출할 수 있지만, 7차 고조파 전압이 증가하여 $V_{thr(7th)}$ 보다 커지는데 약간의 시간이 소요된다.

IEEE Std. 1547에 명시된 단독운전 시험조건에 따르면 부하는 정격 주파수에서의 LC 공진을 일으키는 부하



(a) DSP-based controller



(b) Configuration of the experimental setup

Fig. 8 Experiment setup of three-phase utility interactive inverter

로 구성된다^[3]. 또한 인버터가 공급하는 출력전력과 부하에서 소모되는 전력은 같으므로 단독운전 모드시 전압과 주파수는 NDZ를 벗어나기 어렵게 된다. 이러한 조건은 아주 특수한 조건이므로 실용적인 측면에서는 기존의 수동 검출기법으로 대부분의 단독운전을 신속하게 검출할 수 있다고 판단된다. 따라서 본 논문에서는 두 기법의 장점을 조합한 하이브리드 단독운전 방지기법을 제안하였다.

4. 전체 시스템 구성

그림 8은 제안된 하이브리드 단독운전 방지기법의 실험을 위해 사용된 전체 시스템 및 하드웨어 제어기의 구성을 나타낸다. 인버터 제어기로는 TI사의 DSP TMS320F28335가 사용 되었으며 계통연계 인버터의 전류제어로는 동기좌표계 PI 제어기가 사용되었다. 샘플링 시간은 100[μsec]로 설정되었으며 전류제어기에서 계산된 전압명령은 공간벡터 PWM 기법에 의해 인가된다. 계통연계 및 단독운전 조건을 발생시키기 위해 전자접촉기(Magnetic Contactor : MC)가 사용되었으며 부하는

Table 3 System parameters

Parameter	Value
Grid line-to-line voltage	220 [Vrms]
DC-link voltage	360 [V]
Rated frequency	60 [Hz]
Switching frequency	10 [kHz]
Load resistance	25 [Ω]
L_i	1.8 [mH]
L_g	1.5 [mH]
C_f	8 [uF]

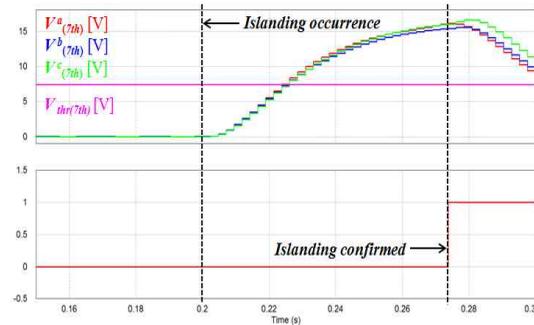


Fig. 9 Islanding detection by the calculated harmonic magnitude in three-phase voltages

IEEE Std. 1547에 따라 Quality factor가 1이 되도록 3상 순 저항부하로 구성하였다. 계통과 시스템의 절연을 위해 권수비 1:1의 3상 Wye-delta 변압기가 사용되었다. 전체 시스템의 파라미터는 표 3과 같다.

5. 시뮬레이션 및 실험결과

제안된 하이브리드 단독운전 방지기법이 효과적으로 단독운전을 검출할 수 있음을 입증하기 위해 표 3에 명시된 시스템 파라미터를 이용하여 비교 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 시뮬레이션에서는 PSIM을 사용하였으며 인버터 전류의 지령치를 변경한 두 동작 조건에서 각각 능동 및 수동 기법에 의해 검출이 이루어짐을 확인 하였다. 계통 사고에 의해 0.2[s]에서 인버터가 계통과 분리되도록 구성 하였으며, 설정시간 T_{set} 은 50[ms]로 선정하였다.

그림 9는 제안된 능동 고조파 주입기법으로 단독운전을 검출한 결과를 나타낸다. 이상적인 3상 계통 전원이 사용되고 계통연계 모드에서는 인버터에 의해 주입된 7차 고조파가 나타나지 않는 반면, 단독운전 모드에서는 주입된 고조파에 의해 7차 고조파가 나타나게 된다. 주입된 고조파 성분은 2차 대역 통과 필터와 신호처리 기법에 의해 효과적으로 계산되어 각 3상 계통전압에서 계산된 7차 고조파의 크기 $V_{(7th)}^a, V_{(7th)}^b$ 및 $V_{(7th)}^c$ 를 비교하여 구한 최댓값이 7.2[V]로 선정된 $V_{thr(7th)}$ 를

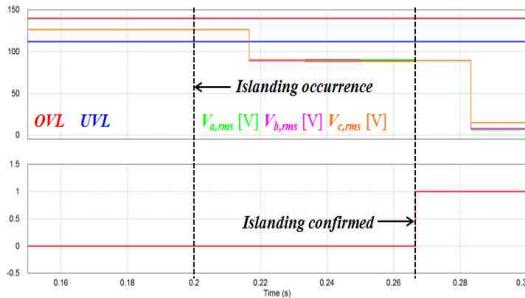


Fig. 10 Islanding detection by OUV-OUF method

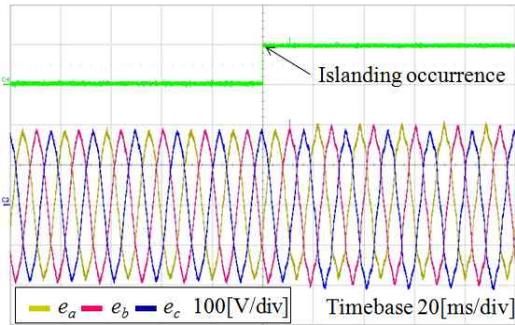


Fig. 11 Waveform of three-phase grid voltages at PCC

넘어서는 경우 50[ms] 후, 단독운전을 확정한다. 그림 10은 인버터 전류의 지령치가 변경된 동작 조건에서 수동 전압/주파수 검출기법으로 단독운전을 충분히 검출할 수 있는 경우의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. OVL(Over Voltage Limit)과 UVL(Under Voltage Limit)은 그림 4의 전압 NDZ의 경계인 0.88[p.u]과 1.1[p.u]를 나타낸다. 낮은 인버터의 출력 전류로 인해 3상 계통전압의 실효치 $V_{a,rms}$, $V_{b,rms}$ 및 $V_{c,rms}$ 가 NDZ를 즉각 벗어나게 되며 전압의 실효치가 NDZ를 벗어난 뒤 50[ms] 후, 단독운전을 판정함을 확인할 수 있다.

하이브리드 단독운전 방지기법을 입증하기 위해 시뮬레이션과 동일한 조건하에서 실험을 수행하였다. 그림 11은 단독운전 발생 시, 계통의 3상전압 파형 e_a , e_b 및 e_c 를 나타낸다. 시뮬레이션과는 달리 실제 계통은 이상적인 3상 전원이 아닌 고조파 성분을 포함하게 된다. 단독운전 모드시, 계통에 주입된 고조파로 인해 약간의 파형 왜곡이 발생하지만 전압의 크기는 크게 변하지 않아 기존의 수동 검출기법으로는 단독운전 검출이 쉽지 않음을 확인할 수 있다. 그림 12는 그림 11에서의 각 상전압의 실효치 중 최댓값을 취하여 구한 전압이 NDZ 안에 존재하는 것을 나타낸다. 이러한 조건 하에서도 제안된 고조파 검출 알고리즘은 단독운전 검출을 위해 효과적으로 사용할 수 있다. 그림 13은 a상의 계통전압으로부터 2차 대역통과 필터를 통해 추출된 7차 고조파 전

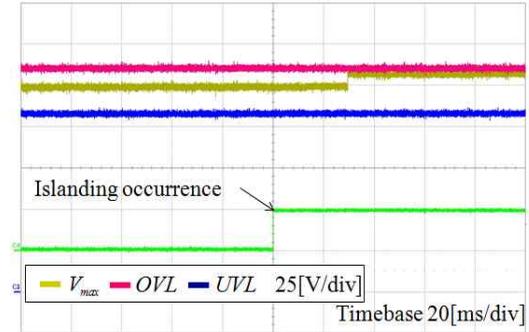


Fig. 12 Variation of maximum rms voltage at PCC after islanding occurrence

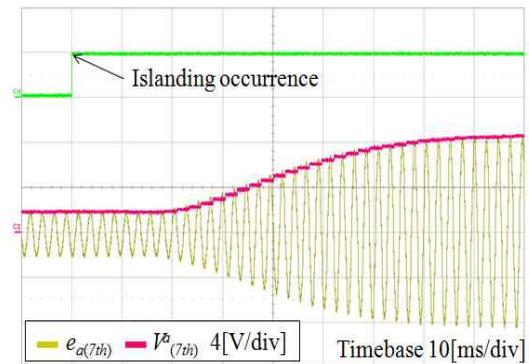


Fig. 13 The seventh harmonic characteristics in a-phase voltage by the proposed harmonic detection algorithm

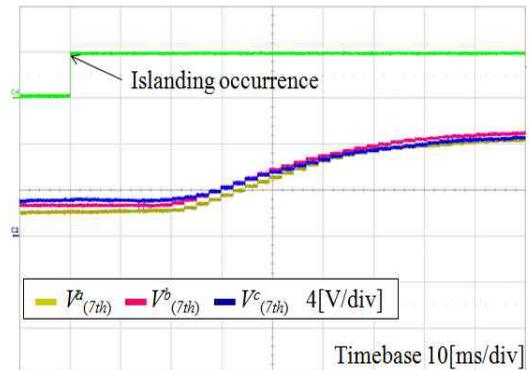


Fig. 14 The seventh harmonic characteristics in three-phase voltages by the proposed harmonic detection algorithm

압 성분 $e_{a(7th)}$ 과 푸리에 기법을 이용하여 구한 7차 고조파의 크기 $V_{(7th)}^a$ 를 나타낸다.

그림 14는 제안된 고조파 검출 알고리즘을 사용하여 구한 각 상의 7차 고조파의 크기를 나타낸다. 그림 13과 그림 14에서 단독운전이 발생하기 전에 약간의 7차 고조파 성분이 관측되는데 이는 주입한 7차 고조파 성

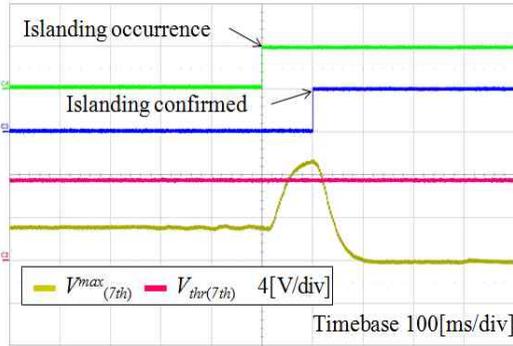


Fig. 15 Islanding detection by the proposed harmonic injection method

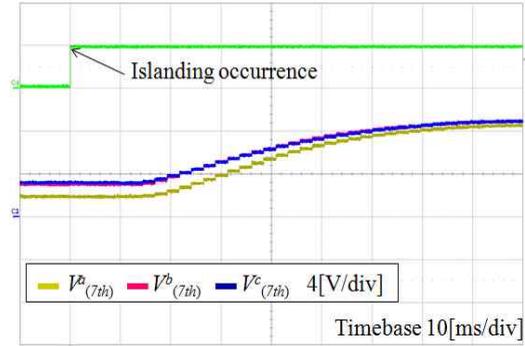


Fig. 17 The calculated seventh harmonic in three-phase voltages

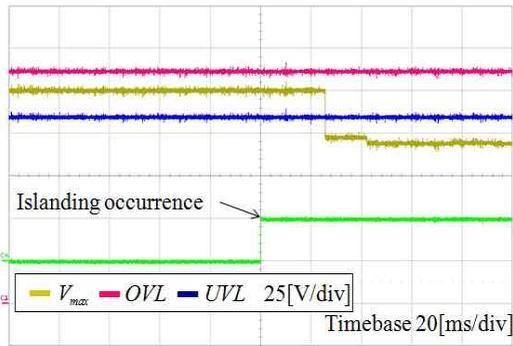


Fig. 16 Variation of maximum rms voltage beyond NDZ at PCC after islanding occurrence

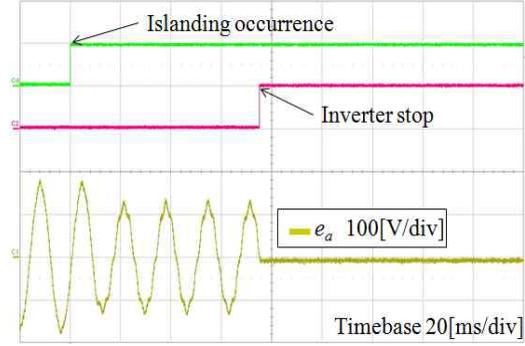


Fig. 18 Waveform of a-phase grid voltage at PCC

6. 결 론

분이 아닌 실제 계통에 존재하는 7차 고조파 성분이다. 주입된 7차 고조파 성분의 크기는 단독운전 발생 후 정확히 관찰되며 이를 통해 제안된 고조파 검출 알고리즘의 성능을 확인할 수 있다.

그림 15는 그림 14에서의 능동 고조파 주입기법으로 단독운전 발생 시점에서 100[ms] 후에 효과적으로 단독운전이 검출되는 결과를 나타낸다. 단독운전 검출 후, 제어기는 인버터를 정지시키게 되며 이로 인해 7차 고조파의 크기가 검출 후에 영으로 감소함을 확인할 수 있다.

그림 16은 단독운전 발생 시, 최대 실효치 전압이 NDZ를 즉각 벗어나 쉽게 수동 검출기법으로 단독운전을 검출할 수 있는 결과를 나타낸다. 그림 17은 위와 같은 조건에서도 능동 검출기법이 효과적으로 7차 고조파를 정확히 추출하여 크기를 계산할 수 있음을 보여준다.

그림 18은 수동 검출기법에 의해 단독운전 발생 시점에서 75[ms] 후에 단독운전으로 판정되어 인버터가 정지되는 것을 나타낸다. 이상의 시물레이션 및 실험결과를 통해 제안된 능동 검출기법은 NDZ에 영향을 받지 않고 단독운전을 정확히 검출할 수 있으며, 기존의 수동 검출기법은 특정조건에서 파라미터가 NDZ를 신속하게 벗어나 단독운전을 검출할 수 있음을 확인할 수 있다.

본 논문에서는 계통에 연계되어 운전되는 계통연계 인버터에서 단독운전이 발생할 경우 이를 신속하고 정확하게 검출하기 위하여 능동 및 수동 검출기법을 조합한 새로운 하이브리드 단독운전 방지기법을 제안하였다. 능동 검출기법의 정확성을 위하여 대역통과 필터와 신호처리 기법을 이용한 향상된 고조파 검출 방식이 구현되었으며 DSP 내에서 정확한 7차 고조파 전압의 크기가 계산되었다. 이를 이용하여 NDZ와 관계없이 정확하게 단독운전을 검출할 수 있음을 확인 하였다. 실제 분산전원 시스템에서 고조파 주입 기법의 신속성을 보완하기 위해 대표적인 수동 검출기법인 전압/주파수 검출기법과 조합하여 신속하고 신뢰성 있는 하이브리드 단독운전 방지기법을 구현하였다. 특히 제안된 방식을 사용한 고조파 주입기법은 IEEE Std. 1547의 단독운전 시험조건을 만족하는 환경에서 시물레이션 및 실험이 수행 되었으며, 제안된 하이브리드 기법이 신속하고 신뢰성 있게 단독운전을 검출할 수 있음을 입증하였다.

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2012R1A1A2042759).

References

- [1] J. J. Kim and S. H. Song, "PSCAD/EMTDC Simulation Model of Variable Speed Wind Power Generation system Using Permanent Magnet Synchronous Machine," *The Transactions of the Korean Institute Power Electronics*, Vol. 10, No. 6, pp. 610-617, Dec. 2005.
- [2] Z. Chen, J. M. Guerrero, and F. Blaabjerg, "A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 24, No. 8, pp. 1859-1875, Aug. 2009.
- [3] IEEE standard conformance test procedures for equipment interconnecting distributed resources with electric power systems. (IEEE Std. 1547.1, 2005)
- [4] IEEE application guide for IEEE Std 1547™, IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems. (IEEE Std. 1547.2, 2009)
- [5] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodriguez, "Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems," WILEY, 2011.
- [6] F. D. Mango, M. Liserre, A. D. Aquila, and A. Pigazo, "Overview of anti-Islanding algorithms for PV systems. part I: passive methods," *IEEE 12th International Conference on EPE-PEMC*, pp. 1878-1883, 2006.
- [7] H. S. Kim, H. G. Kim, G. H. Choe, J. C. Kim, and Y. H. Choi, "An Analysis and Design of RPV and AFD Method for Anti-Islanding of Single-Phase UIPV System under The Test Condition Recommended by IEEE 929-2000," *The Transactions of the Korean Institute Power Electronics*, Vol. 12, No. 1, pp. 37-49, Feb. 2007.
- [8] G. Hernandez-Gonzalez and R. Iravani, "Current Injection for Active Islanding Detection of Electronically-Interfaced Distributed Resources," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, No. 3, pp. 1698-1705, Jul. 2006.
- [9] H. H. Zeineldin and S. Conti, "Sandia Frequency Shift Parameter Selection for Multi-inverter Systems to Eliminate Non-detection Zone," *IET Renewable Power Generation*, Vol. 5, No. 2, pp. 175-183, Mar. 2011.
- [10] M. Ciobotaru, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "On-line Grid Impedance Estimation based on Harmonic Injection for Grid-connected PV Inverter," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 2437-2442, 2007.
- [11] F. Bertling and S. Soter, "A Novel Converter Integrable Impedance Measuring Method for Islanding Detection in Grids with Widespread Use of Decentral Generation," *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, pp. 503-507, 2006.
- [12] L. Asiminoaei, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, and U. Borup, "A Digital Controlled PV-Inverter with Grid Impedance Estimation for ENS Detection," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 20, No. 6, pp. 1480-1490, Nov. 2005.
- [13] H. M. Oh, S. W. Choi, T. H. Kim, G. P. Lee, and T. W. Lee, "Anti-islanding Method by Harmonic Injection for Utility Interactive Inverter with Critical Load," *The Transactions of the Korean Institute Power Electronics*, Vol. 17, No. 4, pp. 315-321, Aug. 2012.
- [14] S. W. Kang and K. H. Kim, "A Novel Hybrid Anti-islanding Method to Improve Reliability of Utility Interactive Inverter for a PMSG-based Wind Power Generation System," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 27, No. 11, pp. 27-36, Nov. 2013.
- [15] J. H. Park, M. H. Choi, H. G. Kim, T. W. Chun, and E. C. Nho, "LCL Filter Design for Grid-connected PCS Using Total Harmonic Distortion and Ripple Attenuation Factor," *The Transactions of the Korean Institute Power Electronics*, Vol. 15, No. 3, pp. 235-243, Jun. 2010.



강성욱(姜星旭)

1988년 5월 26일생. 2013년 2월 서울과학기술대 전기공학과 졸업. 2013년 3월~현재 동 대학원 전기정보공학과 석사과정.



김경화(金庚和)

1969년 3월 11일생. 1991년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1993년 2월 KAIST 전기및전자공학과 졸업(석사). 1998년 2월 동 대학원 졸업(공학박). 1998년~2000년 삼성전자 선임연구원. 2000년~2002년 KAIST 연구교수. 2002년~현재 서울과학기술대 전기정보공학과 교수. 당 학회 편집위원.