

웨이블릿 에너지를 이용한 태양광 발전시스템의 단독운전 검출 기법

박해찬¹, 김일송[†]

Islanding Detection Technique using Wavelet Energy in Grid-Connected PV System

Hae-Chan Park¹ and Il-Song Kim[†]

Abstract

The new islanding detection method using wavelet energy is proposed in this paper. The proposed method is based on the autocorrelation of the wavelet energies, which is obtained from the high-frequency components of the grid voltage. It has the enhanced detection capabilities in the UV/OV/UF/OF region, which the conventional passive methods cannot obtain. The mathematical theories on the wavelet are presented, and the performance effectiveness is proved by the experimental results.

Key words: Wavelet, Islanding detection, Photovoltaic system, Wavelet energy

1. 서 론

태양에너지는 전 세계적으로 풍부하고 무공해라는 특성으로 인해 미래 전력 시스템에서 가장 중요한 신재생 에너지 공급원이 될 것이다. 전형적인 계통 연계형 태양광 발전 시스템의 구성요소는 그림 1에 보여준 것과 같이 태양전지, Power Conditioning System(PCS), local 부하와 계통시스템으로 구성되어 있다. PCS의 주요 기능은 직류(DC)인 태양에너지를 교류(AC)인 계통네트워크에 단위역률로 전달하는 것이다. 그러나 PCS와 같이 전력전자시스템을 사용하는 분산전원이 점점 증가함에 따라 계통 안정성에 문제가 발생하게 된다.

계통 연계 시스템과 관련된 주된 이슈는 신재생 에너지원과 계통연결점(PCC : Point of Common Coupling)에서 전력 공급의 신뢰성과 전력품질을 향상시키는 것이다.

태양광 발전시스템이 local 부하와 계통에 전력을 공급하고 있는 상태에서, 상위 계통과 분리되었을 때 부하

에 계속 전력을 공급하는 상태로 유지되면 이것을 단독 운전이라 한다. 단독운전이 발생하면 작업자의 안전을 보장하고 local 부하의 손상을 피하기 위해서 한전 배전 계통 연계기준으로 0.5초 이내에 PCS는 동작을 중지하여야 한다.

단독운전 상황을 검출하기 위해 많은 연구들이 진행되었으며 크게 passive와 active 기법으로 구분된다. Passive 기법은 단독운전 조건을 알아내기 위해서 PCC에서 전압과 주파수를 관찰하는 것으로 계통이 분리되었을 때 발생하는 태양에너지와 부하 사이의 전력의 차이로 인해 발생하는 부차적 현상을 검출하여 단독운전을 알아낸다^[1-5]. 일반적으로 전력의 불일치가 크다면 ($\Delta P > 20\%$ or $\Delta Q > 5\%$) 계통 전압과 주파수가 허용 변동범위를 벗어나기 때문에 쉽게 단독 운전 검출이 가능하다. 그러나 만약 전력의 불일치가 아주 작다면 전압과 주파수가 허용변동 범위 내에 남아 있기 때문에 단독운전 검출이 어려운 NDZ(Non Detection Zone)이 존재하게 된다. 따라서 passive 방법은 단독운전 검출과 NDZ를 제거하기 위해 적어도 하나의 active 검출기법을 포함하고 있다.

active 방법은 passive 방법의 대안으로 PCC에 강제로 외란을 투입하여 단독 운전이 발생할 때 외란에 의한 임계값을 검출하는 기법이다^[6-15]. 대표적인 방법으로는 active 주파수 드리프트 검출, 슬립 모드 주파수 천이 검출 그리고 유효전력과 무효전력 변화 검출 같은 알고

Paper number: TKPE-2015-20-5-11

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

[†] Corresponding author: iskim@ut.ac.kr, Dept. of Electrical Eng. Korea Nat'l Univ. of Transportation
Tel: +82-43-841-5142 Fax: +82-43-841-5140

¹ Dept. of Electrical Eng. Korea Nat'l Univ. of Transportation
Manuscript received Jul. 15, 2015; revised Aug. 12, 2015; accepted Sep. 17, 2015

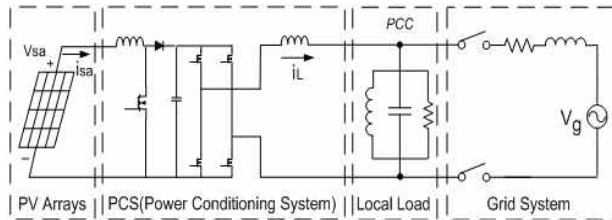


Fig. 1. Photovoltaic system configuration.

리즘들이 기존의 논문에서 소개되었다. 이런 방법들의 단점은 낮은 전력품질 과 투입된 외란에 의한 존재하는 제한된 NDZ 뿐만 아니라 유효전력의 감소도 포함하고 있다. 이 방법은 약화된 전력품질과 유효전력의 감소를 가져올 수 있기 때문에 불리하지만 상대적으로 단독운전의 검출이 쉽다는 장점으로 산업분야에서 많이 사용되고 있는 방법이다.

이 밖에 계통전압의 고차 하모닉 성분 변화를 검출하여 단독운전을 알아내는 방법도 많이 사용된다. 이 방법은 계통전압이나 PCS 출력 전류가 정격조건에서 총 고주파 왜곡(THD)이 5%(각 차 3차) 이하 보다 적은지 계속해서 모니터링을 한다. 이 값은 계통이 유지되는 한 존재하는 계통 임피던스 왜곡 범위이다. 그러나 계통이 분리되어 단독운전이 발생하면 임계범위를 벗어나는 큰 THD를 생성하게 된다. 이 방법의 장점은 왜란이 적어서 전력품질을 높일 수 있으며 passive 기법보다 적은 NDZ를 가진다는 것이다. 단점으로는 하모닉 성분을 얻어내기 위한 고가의 신호처리 회로와 고성능의 제어기를 필요로 한다는 점이다.

하모닉 성분을 검출하기 위해서는 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하여야 한다. 일반적으로 DFT (Discrete Fourier Transform)를 이용해서 n -차 스위칭 주파수까지의 고주파 성분들을 얻어낼 수 있다. 이 방법은 실시간으로 THD를 얻기 위해서 매우 높은 성능의 제어기가 요구되기 때문에 비용적인 면에서 단점이 된다. 고주파 성분을 얻어내기 위한 다른 방법으로 웨이블릿 변환(WT : Wavelet Transform)이 있다. DFT가 직교함수(orthogonal)인 sine과 cosine 함수를 이용하여 고주파 성분을 계산한 것과는 다르게 웨이블릿에서는 직교함수로 모함수(mother wavelet)을 사용하여 고주파 성분을 계산한다. 이때 모든 주파수 성분을 계산하는 것이 아니고 이항 주파수 필터(dyadic filter)를 이용하여 높은(High) 주파수 성분과 낮은(Low) 주파수 성분으로 나누어진다. 낮은 주파수 성분은 이항 필터를 이용하여 다시 높은 주파수와 낮은 주파수 성분으로 분해된다. 이 과정들이 다 단계로 이루어지면 이것을 MLD (Multi Level Decomposition)이라 한다. 이 방식을 이용하면 10 ms 이내에 모든 계산과정을 마칠 수가 있다.

복잡한 계산에 의해 정확한 주파수 성분을 얻어낼 수 있는 푸리에 변환에 비해, 웨이블릿 변환은 이항 필터

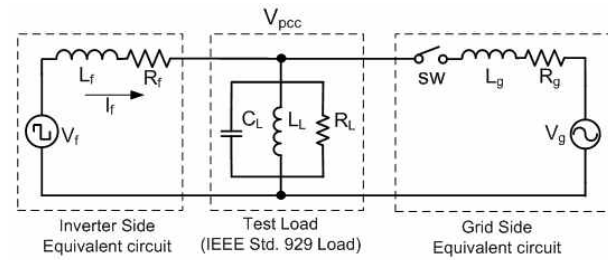


Fig. 2. Equivalent circuit configuration of PV system.

주파수 영역에서의 신호 레벨을 얻어낸다. 따라서 웨이블릿 변환에서는 이항 필터 주파수를 선정하는 것이 매우 중요하며, 많은 연구가 진행되었다. 계통 시스템에서 가장 많이 사용되는 모함수는 Daubechies 함수이며 차수에 따라서 DB n 으로 분류된다. 일반적으로 전력품질이나 하모닉 성분 검출에는 DB3, DB4 함수가 가장 많이 사용된다. 웨이블릿 변환의 장점은 간단한 구조로 DFT보다 더 적은 시간 내에 원하는 대역에서의 주파수 성분들을 얻어낼 수 있다는 것이다. 웨이블릿 변환의 이론적 배경은 다음 논문^{[8][9]}에 소개되어 있으므로 자세한 설명을 생략한다.

웨이블릿 변환을 적용해 단독운전 검출을 위한 연구가 그동안 진행되었으며 대표적인 내용으로는 웨이블릿 계수들의 RMAC(Root mean absolute coefficients) 값을 이용하여 단독운전 상태를 검출하는 방법^[16]과 웨이블릿 에너지의 표준 편차를 이용하는 방법^[17] 그리고 단수형 엔트로피(wavelet singular entropy)를 기반으로 한 방법^[18] 등이 있다. 이 방법들은 계통전압 변동에 따른 단독운전 임계값 레벨을 선택하기가 어렵고 NDZ 경계조건에서 단독운전을 명확하게 구별하기 어렵다는 단점이 있다.

이 논문에서는 MLD를 이용하여 검출된 웨이블릿 에너지를 이용한 단독운전 검출 방법이 소개된다. 이전 연구에서의 단점인 계통전압 변동에 따른 검출의 강인성을 가지기 위해 웨이블릿 에너지의 자기상관 (autocorrelation) 기법이 도입되었다. 제안된 방법의 장점은 전력품질의 감소없이 거의 모든 NDZ 영역에서 단독운전 검출이 가능하다는 것과 계통전압 변동에 따른 임계값 레벨 설정이 쉽다는 것이다. 이론적인 해석과 실험으로서 제안된 기법의 타당성을 입증하였다.

2. 계통연계형 인버터 시스템

PV 시스템의 고주파 등가 회로가 그림 2에 나타나 있다. PCS는 구형과 펄스형태의 전압원과 직렬 인덕턴스로 모델링되며 계통시스템은 직렬 저항과 인덕턴스를 가지는 다수의 고주파 성분의 정현파 전압원으로 표현된다. 계통 시스템과 PCS의 연결점은 PCC(point of common coupling)에서 이루어지며 단독운전 조건은

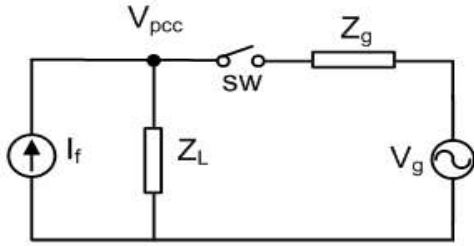


Fig. 3. Simplified configuration.

PCC에서 계통 스위치가 열릴 때 발생한다.

PCC에서 local 부하는 RL, LL, CL이며, Quality factor Q_L = 1.5 로 local 부하에 대한 조건과 단독 운전 방지 테스트 조건은 IEEE 표준 929-2000을 따라서 설정되었다. 계통 전압은 고조파 방정식을 사용해서 다음과 같이 표현된다.

$$V_g(t) = V_1 \sin(\omega t + \phi_1) + V_2 \sin(2\omega t + \phi_2) + \dots + V_n \sin(n\omega t + \phi_n) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (1)$$

유니폴라 사인파 변조특성을 가지는 단상 풀 브릿지 토플로지를 가지는 PCS에 대한 수학 방정식은 다음과 같이 표현된다^[19]. 여기서 N은 한 주기의 샘플 숫자이고, α는 notch 각이다.

$$I_f = \sum_{n=2}^N \left(\frac{I_n}{n} \sum_{i=1}^k (-1)^{i+1} \cos n\alpha_i \right) \quad (2)$$

PV시스템의 단순화된 구성을 그림 3의 임피던스 회로로 나타낼 수 있고 PCC 전압은 스위치 SW의 상태에 따라 아래 식으로 주어진다.

$$V_{pcc} = \frac{Z_L}{Z_g + Z_L} V_g + \frac{Z_L Z_g}{Z_g + Z_L} I_f \quad (SW \text{ ON}) \quad (3)$$

$$V_{pcc} = Z_L I_f \quad (SW \text{ OFF})$$

$$Z_g = R_g + j\omega L_g, Z_L = R_L \parallel j\omega L_L \parallel \frac{1}{j\omega C_L}$$

스위치 SW의 상태에 따라 PCC 전압의 하모닉 성분들이 변화되고 PCC에서 등가 임피던스도 바뀌게 된다. 그러므로 V_g 변화율 대비 V_{pcc}의 변화율은 스위치 상태에 따라 달라지며 식 (4)로 표시된다.

$$\left. \frac{\delta V_{pcc}}{\delta V_g} \right|_{ON} = \frac{Z_L}{Z_L + Z_g} \quad (SW \text{ ON}) \quad (4)$$

$$\left. \frac{\delta V_{pcc}}{\delta V_g} \right|_{OFF} = 0 \quad (SW \text{ OFF})$$

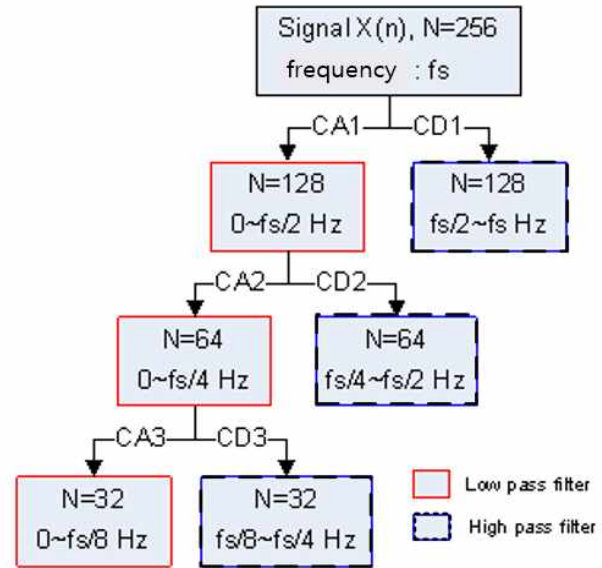


Fig. 4. Multi-level decomposition tree.

TABLE I
FIR FILTER COEFFICIENTS

Coefficient	LPF	HPF
k1	0.0352	-0.3326
k2	-0.0854	0.8068
k3	-0.1350	-0.4598
k4	0.4598	-0.1350
k5	0.8068	0.0854
k6	0.3326	0.0352

계통 전압의 민감도 레벨(Sensitivity level)은 단독운전 조건을 결정하는데 중요한 역할을 하기 때문에 많은 연구가 임계값(threshold level)을 결정하기 위해 행해졌다. 기존에 사용된 방식은 계통 하모닉 변화율이 10% 이상일 때 단독운전으로 검출하는 것인데 계통 외란이나 설치 장소에 따라서 달라질 수가 있기 때문에 정교하지 못하고 어느 정도의 오류를 포함하고 있다.

3. 웨이블릿 에너지를 이용한 단독운전 검출 알고리즘

주기 신호 X(t)을 fs 주파수로 샘플링하여 X(n), length N=256인 이산신호를 얻을 수 있다. 이항 필터(dyadic)를 통해 X(n)을 두 개의 주파수 대역(High와 Low)로 분해하여 N=128로 다운 샘플링된 CA1, CD1 계수들을 구할 수 있다. 저주파 신호 CA1을 이용하여 위의 과정을 되풀이 하여 CA2, CD2를 구하고 CA2를 이용하여 CA3, CD3를 구하는 과정을 MLD(Multi Level Decomposition)이라 한다. 웨이블릿을 이용한 MLD 트리 구조를 그림 4에 보여주고 있다.

High 와 Low 주파수 대역을 구분하는 이항필터는 원래 신호 fs를 절반으로 나누어 Low 주파수는(0~1/2fs)이고 High 주파수는 (1/2fs~fs)로 나누는 역할을 한다. 이항 필터는 FIR(Finite Impulse Response)로 구성되며 FIR 필터 계수는 표 1에 나타나 있다.

이항 필터를 통해 얻어진 계수들은 저주파인 Approximation 신호(CA1, CA2, CA3)와 고주파인 Detail 신호(CD1, CD2, CD3)로 분류된다. 얻어진 웨이블릿 계수들은 계통전압의 진동이나 의도치 않은 외란을 감소시키기 위해서 에너지로 변환된다. 윈도우 길이가 L 인 웨이블릿 계수들의 spectral 에너지는 다음과 같이 정의 된다.

$$E_n = \frac{\sum_{k=1}^L C_n^2}{L} \quad (5)$$

L은 PCC 전압의 한 주기 샘플 숫자이다.

단독운전이 발생하게 되면 식(4)에서 주어진 것처럼 PCC 전압에 포함된 고조파 성분들이 변화되기 때문에 검출된 웨이블릿 에너지도 역시 변화되게 된다. 하지만 에너지 레벨은 계통의 정상동작 동안 계통 상태에 따라서 변화될 수 있기 때문에 단독운전과 구별하기 위해 에너지의 표준화가 필요하다. 가장 좋은 방법은 웨이블릿 에너지에 자기상관(autocorrelation)을 사용하는 것으로 에너지의 자기상관 함수는 인접한 시간 샘플값들 사이의 일반적인 의존성을 설명한다. 연속신호 $x(t)$ 의 자기상관 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)x(t+\tau)dt \quad (6)$$

T는 관찰주기다.

샘플링된 이산 신호의 자기상관은 다음과 같이 정의 된다.

$$R_{xx}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-m+1} x(n)x(n+m-1) \quad (7)$$

N은 기록 길이이고 $m=1,2,\dots,N+1$ 이다.

단독운전 판정은 연속으로 대응되는 자기상관 값을 비교하여 그 차이가 일정크기 이상일 때 이루어진다. 본 연구에서는 임계값을 100% 이상으로 설정하여 외란이나 계통 변화에 강한 특징을 가지도록 설정하였다.

4. 실험결과

단독운전 실험을 위해 local 부하를 포함한 시스템 파라미터가 표 2에 표시되었다. Local RLC 부하는 유효전력 ΔP 를 흡수하는 저항과 무효전력 ΔQ 를 흡수하는

TABLE II
SYSTEM PARAMETERS

V_{dclink}, V_f	400V	C_L	120uF/ 0.1 Ω
L_f	2 mH	L_g	1 mH
R_f	0.2 Ω	R_g	1 Ω
R_L	30 Ω	f_{sw}	15.36k
L_L	58 mH /0.1 Ω	V_{grid} p.u.	210 V_{rms} /60Hz

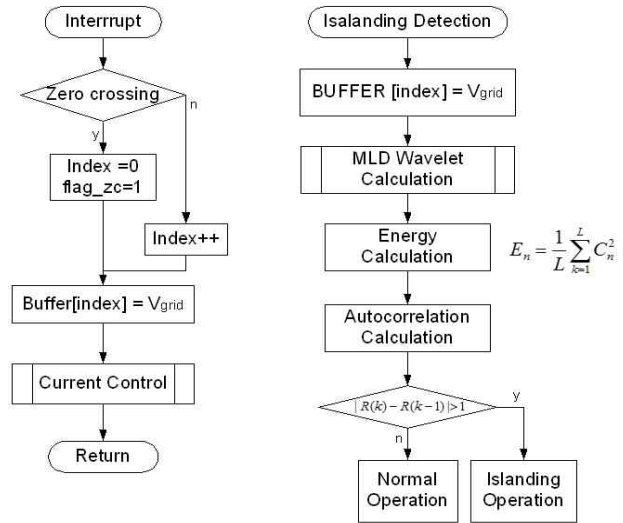


Fig. 5. Flowchart for algorithm.

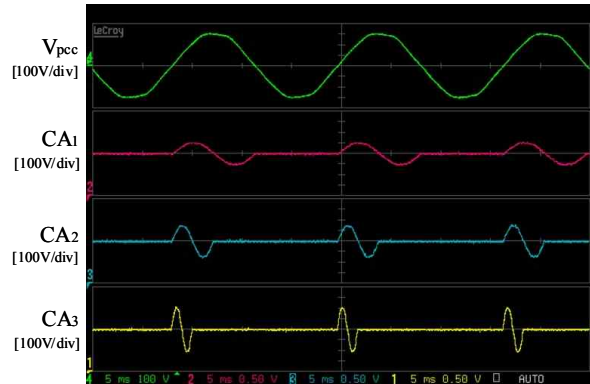


Fig. 6. DWT waveform (Upper : VPCC, Middle : CA1, CA2, Bottom: CA3).

인덕터와 커패시터의 결합으로 구성된다. 소자값들은 $R = 30\Omega, L = 58mH, C = 120uF$ 으로 $P_R = 1600W, Q_L = 2100var, Q_C = 2190var$ 로 주어지서 Quality factor Q_f 는 1.35이다.

샘플링 주파수는 계통주파수 60Hz에 대해서 2의 배수인 256 개의 샘플링을 얻을 수 있도록 15360Hz로 설정되었다. 따라서 샘플 수는 첫 번째 레벨은 256개, 다음

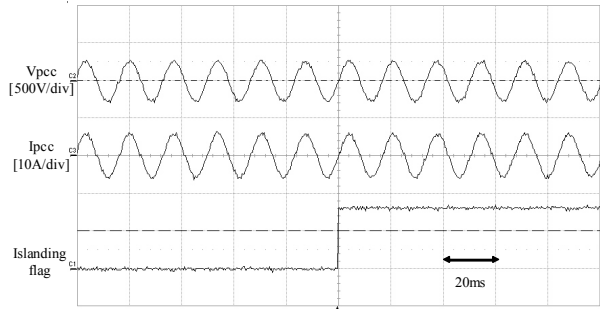


Fig. 7. PCS voltage and current waveform during islanding.

샘플링에 의해 두 번째 레벨은 128개, 세 번째 레벨은 64개이다. 그림 5에 표시된 알고리즘 흐름도를 보면 PCC 전압이 영점을 교차할때 샘플링 지수는 0으로 초기화 되고 새로운 샘플링이 시작되며 마지막 사이클에 저장된 256개의 샘플은 멀티 레벨 분해(MLD)에 의해서 웨이블릿 계수로 변환된다. 3-레벨 분해로 얻어진 웨이블릿 계수는 CA1,2,3 과 CD1,2,3 이다. CA3와 CD3는 높은 주파수 특징을 가지고 있어 CA1,2 와 CD1,2 보다 PCC 전압의 임피던스 변화를 발견하기가 더 쉽기 때문에 이들의 에너지가 단독운전 검출에 사용된다.

에너지 계산과 단독운전 검출을 위한 알고리즘은 이 단계에서 또한 실행된다. 단독운전 판정은 CA3, CD3의 자기상관 계수 변화율이 100% 이상일 때 이루어진다. 이것은 정상상태에서 계통의 고주파 변화율이 100% 이상 변하지 않는다는 사실에 바탕을 두고 정하였으며, 기존의 다른 논문에서 사용된 10% 변화율 보다는 훨씬 더 강인하고 신뢰성 높은 검출능력을 가지고 있다.

PCC 전압을 3 레벨로 분해한 MLD 파형을 그림 6에 나타내었다. 첫번째 파형은 PCC 전압이고 다음 파형들은 CA1, CA2와 CA3다. 각 분해 레벨에서 다른 샘플링 때문에 주기는 절반으로 축소되고 진폭은 2배로 확대된 파형을 관찰할 수 있다. 저주파에 해당하는 Approximation 값에 비해 고주파에 해당하는 Detail 값들은 진폭이 너무 작아서 (평균이 0인 고주파) 오실로스코프로 나타내면 그 차이점을 구별하기 어려워 표시하지 않았다.

단독운전 발생시 PCC 전압과 전류의 파형 변화를 그림 7에 보여준다. 첫 번째 파형은 PCC 전압, 두 번째는 PCC전류 그리고 마지막은 단독운전 플래그다.

첫 번째와 세 번째 파형 사이에서 계통 스위치가 open 되어 단독운전이 발생되고 단독운전 검출은 475 사이클 후에 이루어진다. 검출 시간은 자기상관에 대한 샘플 수에 의존하고 최악의 경우인 0.27초(=16*16.67ms)가 소요된다.

단독운전 발생시 웨이블릿 에너지 변화를 그림 8에 보여준다. 가로축 단위는 계통 한 주기를 샘플 숫자 1로 환산한 것이다. PCC 전압은 215 V에서 218 V까지 변화하여 NDZ 영역에 존재한다. 3 레벨 분해에 대한 단독

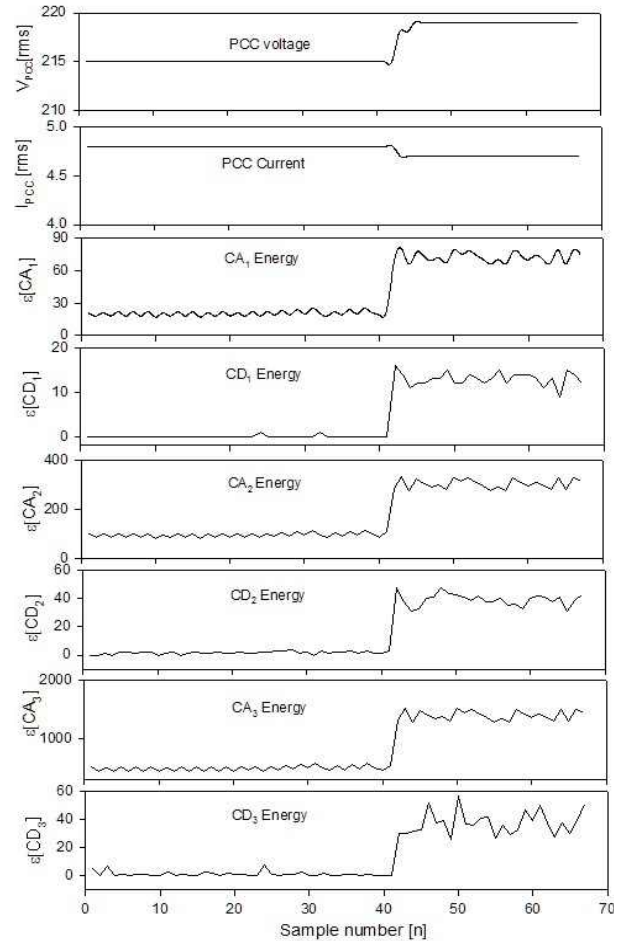


Fig. 8. Wavelet coefficients energy during islanding.

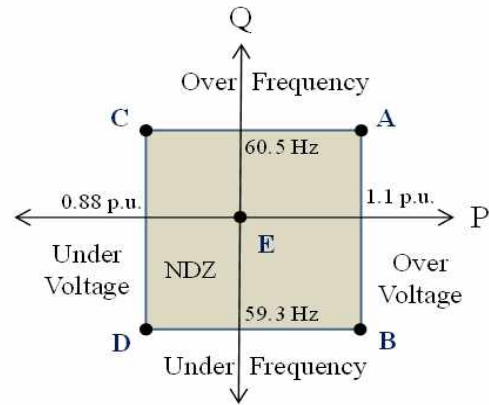


Fig. 9. NDZ by the OV/UV/OF/UF boundary conditions.

운전 발생시에 웨이블릿 에너지가 급격히 변화하는 것을 볼 수 있다. 에너지 변화량은 계통과 local 부하 조건에 의존한다.

기존의 OV/UV/OF/UF passive 검출 방법은 그림 9와 같이 전압과 주파수의 정상 변동 범위로 인해 단독운전 검출이 되지 않는 NDZ를 가지고 있다. 그 경계 값은 일반적으로 0.88 pu/1.1 pu와 59.3/60.5 Hz로 규정된다.

NDZ 경계 조건에서 제안된 검출 방식을 검증하기 위해 다양한 실험으로 분석되어졌다. 주파수 분석기로 해석된 계통전압의 표현식의 예를 아래에 표시하였다.

$$V_{grid}[p.u.] = 1\sin(f_1) + 0.08\sin(f_3) + 0.016\sin(f_5) + 0.019\sin(f_7) + 0.032\sin(f_9) + 0.096\sin(f_{11}) + 0.064\sin(f_{17}) + 0.032\sin(f_{19})$$

계통전압의 주파수를 변동시킬 수 없기 때문에 모의 계통으로 대처하였다. 모의 계통은 임의의 파형발생이 가능한 AC 전원장치인 Elgar 사의 SW1750과 저항으로 구성되었다. 주파수 분석기로 얻어진 하모닉 계수들을 이용하여 파형을 생성하고 전압과 주파수의 크기는 경계조건에 맞도록 입력하였다.

실험은 4곳 모서리 NDZ 경계조건(A,B,C,D)과 원점의 power match 조건(E)에서 수행되었다. 모서리 NDZ 조건은 다음과 같이 정의된다: OV/OF 조건은 포인트 A, OV/UF는 B, UV/OF는 C 그리고 UV/UF는 D이며, 파워 매치 조건은 NV(nominal voltage)/NF(nominal frequency)로 일치한 포인트 E다. OV/OF 조건은 계통전압의 1.1 p.u.와 계통 주파수의 60.5Hz로 대응되며 NV/NF는 1.0 p.u. 전압과 주파수 60Hz이다. 제안된 방법으로 수행된 실험결과는 그림 10에 보여준다. 계통전압의 매 주기에서 계산된 에너지값들을 autocorrelation을 수행하는데 앞 주기의 데이터를 현 주기의 데이터와 적분비교를 하게 되는데 실험에서는 8번의 autocorrelation을 수행하여 각 단계마다 자기상관값을 그림 10에 표하였다. 따라서 그림에 보이는 여러 개의 그래프는 총 8개의 그래프가 중첩되어 나타난 것으로 그래프의 차이가 100%이상 나는 경우를 단독운전으로 설정하였다.

포인트 A(OV/OF)에서 CA3 와 CD3의 에너지를 이용한 자기상관이 첫 번째 그래프에서 보여진다. 포인트 C(UV/OF)에 대한 결과는 두 번째 그래프, 포인트 B(OV/UF)는 세 번째 그래프, 점 D(UV/UF)는 네 번째 그래프에서 보여준다. 그래프에서 볼 수 있듯이 자기상관 값은 단독 운전이 일어날 때 급격히 변화하는 것을 알 수 있다.

NDZ 경계로 동작 조건이 옮겨짐에 따라서 변화량은 더욱 커지게 된다. R(CD3)보다 R(CA3)을 사용했을 때 정상 동작과 단독운전 동작을 더욱 쉽게 구별할 수 있는데 그 이유는 동작점이 NDZ 경계점으로 이동함에 따라 단독운전이 발생할 때 에너지 변화량이 R(CD3) 보다 R(CA3)가 더욱 커지기 때문이다. 따라서 경계조건에서 단독운전 검출을 위해서는 R(CA3)을 사용하는 것이 타당하다.

매치된 power 조건(NV/NF)은 5번째 그래프에서 보여준다. CA3에 대한 자기상관은 일치된 power match 때문에 R(CA3)의 차이를 구별하기 어려워져 단독운전을

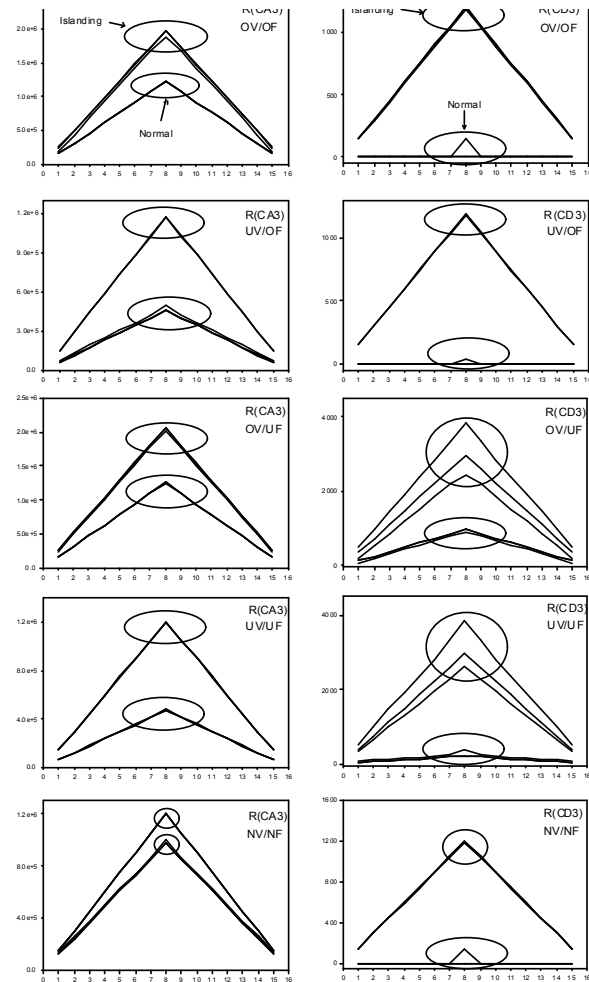


Fig. 10. Analysis results for 4-boundary and matched conditions.

판정하기 쉽지 않다. 따라서 전체 에너지는 적게 변화하지만 상대적으로 고주파 성분이 많이 변하는 R(CD3)를 사용하는 것이 단독운전 검출에 유리하다.

경계 조건 그림에서 알 수 있듯이 정상상태와 단독운전 발생시의 차이점이 크게는 1000%에서 적게는 100% 까지 발생하는 것을 알 수 있습니다. 단 매치된 조건에서는 R(CA3)의 차이가 100% 가 되지 않기 때문에 R(CD3)를 사용해야 한다는 점을 제외하고는 모든 상태에서 차이가 100% 이상인 것을 알 수 있다.

위에서 얻어진 결과들을 보면 R(CA3) 와 R(CD3)을 관찰함으로써 NDZ에서 단독운전 검출이 가능하다는 것을 알 수 있다. R(CA3)는 경계조건에서 분명한 차이점을 보여주고 R(CD3)는 power match 조건에서 확실하게 구별이 가능하다. 또한 R(CA3) 와 R(CD3)을 관찰함으로써 동작 환경 조건을 확인하는 것도 가능하다.

기존의 단독운전 검출 방법에 비해 제안된 알고리즘의 장점은 정확한 power match 조건에서 강력한 검출 기능을 얻을 수 있다는 것이다. 그러므로 제안된 방법은 수동적인 UV/OV/UF/OF 기술보다 감소된 NDZ를 가지

고 있고 외란을 투입하는 동적기법 보다 효율이 향상되고 고조파가 감소되는 장점을 가지고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 웨이블릿 에너지를 사용하는 새로운 단독운전 검출 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 PCC 전압의 고조파 성분들의 스펙트럴 변화를 검출하기 위해 다중 레벨 분해(MLD)로 얻어진 웨이블릿 계수의 자기상관을 통해 단독운전 상황을 알아내는 것이다. 정상 동작하에서 외란이나 계통전압의 동작 환경이 변화할지라도 웨이블릿 에너지의 자기 상관을 통해 단독운전 검출을 명확하게 구별할 수 있는 장점을 가지고 있다. 실험을 통해 제안된 방식의 성능을 확인하였으며 기존의 UV/OV/UF/OF 기법으로 검출하지 못했던 영역에서도 단독운전의 검출이 가능함을 입증하였다. 다만 voltage sag, swell, transient 등의 계통 과도상태에서의 동작 성능에 대해서는 이론적인 해석과 실험내용이 부족함으로 이는 차후의 연구과제로 남겨둔다.

제안된 기법의 장점은 추가 하드웨어 또는 원래의 PCS 기능 변경 없이 소프트웨어 모듈 추가만으로 가능하기 때문에 제시된 알고리즘을 라이브러리 함수로 추가하는 것으로도 단독운전 검출이 가능하게 된다.

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임
(No.: 2014R1A1A2056443)

References

- [1] De Mango, F., Liserre, M., Aquila, A. D, and Pigazo, A., "Overview of anti-islanding algorithms for pv systems. part I: passive methods," *12th Int. Power Electronics and Motion Control Conf*, 2006.
- [2] Skocil, T., Bellmunt, O. G., Montesinos-Miracle, D., Galceran-Arellano, S. and Rull-Duran, J. "Passive and active methods of islanding for PV systems," *EPE'09*, 1 - 10, 2009.
- [3] Zhihong, Y., Kolwakar, A., Zhang, Y., Pengwei, Du and Waling, R., "Evaluation of anti-islanding schemes based on non-detection zone concept," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 19, No. 5, pp. 1171 - 1176, Sep, 2004.
- [4] Jeraputra, C. and Enjeti, P. N. "Development of a robust anti-islanding algorithm for utility interconnection of distributed fuel cell powered generation," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 19, No. 5, pp. 1163 - 1170, Sep., 2004.
- [5] Velasco, D., Trujillo, C. L., Garcera, G. and Figueres, E. "Review of anti-islanding techniques in distributed generators," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 14, No. 6, pp. 1608 - 1614, Aug., 2010.
- [6] B. G. Yoo and G. J. Yoo, "Islanding detection algorithm for photovoltaic system," *KIPE Magazine*, Vol. 15, No. 3, pp. 30-34, Jun. 2010.
- [7] A. Arulampalam, M. Barnes, A. Engler, A. Goodwin and N. Jenkins, "Control of power electronic interfaces in distributed generation microgrids," *International Journal of Electronics*, Vol. 91, No. 9, pp. 503-523, 2004.
- [8] J. E. Lee and I. S. Kim, "A study on the fault detection technique of the grid-connected photovoltaic system using wavelet transformation," *The Transactions of the KIPE*, Vol. 19, No. 1, pp. 79-87, Feb. 2011.
- [9] I. S. Kim, "Study on the islanding detection technique of the grid-connected photovoltaic system using grid voltage harmonic coefficients," *The Transactions of the KIPE*, Vol. 15, No. 6, pp. 417-424, Dec. 2010.
- [10] S. W. Kang and K. H. Kim, "A hybrid anti-islanding detection scheme for utility interactive inverter with enhanced harmonic extraction capability," *The Transactions of the KIPE*, Vol. 19, No. 4, pp. 312-319, Aug. 2014.
- [11] H. M. Oh and S. W. Choi, "Anti-islanding method by harmonic injection for utility interactive inverter with critical load," *The Transactions of the KIPE*, Vol. 17, No. 4, pp. 315-321, Aug. 2012.
- [12] G. H. Chol and Visgalang, "Characteristics analysis of RPV and AFD for anti-islanding in active method," *The Transactions of the KIPE*, Vol. 14, No. 2, pp. 160-167, Apr. 2009.
- [13] H. S. Kim and H. K. Kim, "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 KIPE*, Vol. 12, No. 1, pp. 47-49, Feb. 2007.
- [14] S. I. Jang and K. H. Kim, "An islanding detection method for distributed generations using voltage unbalance and total harmonic distortion of current," *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 19, No. 2, pp. 745 - 752, 2004.
- [15] Wilkinson, W. A. and Cox, M. D. , "Discrete wavelet analysis of power system transients," *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 11, No. 4, pp. 2038 - 2044, Nov., 1996.
- [16] Hanif, M., Basu, M. and Gaughan, K. "Development of EN50438 compliant wavelet-based islanding detection technique for three-phase static distributed generation systems," *IET renewable power generation*, Vol. 6, No. 4, pp. 289-301, July, 2012.
- [17] Ray, P. K., Kishor, N. and Mohanty, S. R. . "Islanding and power quality disturbance detection in

grid-connected hybrid power system using wavelet and transform,” *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 3, No. 3, pp. 1082-1094, Sept., 2012.

- [18] Samui, A. and Samantaray, S. R. , “Wavelet singular entropy-based islanding detection in distributed generation,” *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 28, No. 1, pp. 411-418, Jan. 2013.
- [19] E. C. Nho, G. B. Jung, and N. S. Choi, “Power Electronics”, MunEunDang



박해찬(朴海燦)

1990년 7월 23일생. 2015년 한국교통대 전기공학과 졸업. 2015년~현재 한국교통대 대학원 전기공학과 석사과정.



김일송(金一松)

1968년 7월 3일생. 1991년 연세대 공대 전자공학과 졸업. 1994년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 졸업(공학박). 1994년~1999년 현대전자 위성사업단. 2005년~2007년 LG화학 배터리 연구소 책임연구원. 현재 한국교통대 전기공학과 부교수.