

# 마이크로그리드 시험을 위한 전압 위상 변동 기능을 가지는 전력품질외란 발생기

## Power Quality Disturbance Generator with Phase Jump for the Test of Microgrid

정재현\* · 노의철†  
(Jae-Hun Jung · Eui-Cheol Nho)

**Abstract** - This paper describes a power quality disturbance generator for the test of a microgrid. The generator provides phase-angle jump as well as voltage sag with simple structure. The main components of the generator are SCR thyristors and transformers, therefore, high reliability and high efficiency can be obtained without switching losses. The operating principle of the proposed scheme is described and the voltage and current characteristics in case of voltage sag with phase-angle jump is analyzed. The usefulness of the proposed topology is verified through simulations and experimental results.

**Key Words** : Power quality disturbance generator, Voltage sag, Phase-angle jump

### 1. 서론

일반적으로 마이크로그리드는 플라이휠과 같은 ESS(Energy Storage System)와 연료전지, 태양광, 풍력, 엔진 발전기와 같은 분산 전원으로 구성된다. 계통이나 마이크로그리드 내에 사고가 발생하는 경우 마이크로그리드를 보호하기 위하여 SSTS(Solid State Transfer Switch)가 사용된다. 계통에 사용되는 SSTS는 SCR로 구성되고 SSTS의 정격은 계통 사고 발생 시 마이크로그리드에서 계통으로 흐르는 사고 전류의 크기에 따라 달라진다. SSTS가 포함된 마이크로그리드의 성능을 시험하기 위하여 계통과 마이크로그리드 사이에 전력품질외란을 발생시킬 수 있는 장치가 요구되며 이에 대한 다양한 토폴로지의 전력품질외란 발생장치가 제안되었다[1-8]. 일반적으로 전력품질외란 발생기의 가격이 상당히 고가이므로 실험실 레벨에서 사용하기에는 어려움이 많기 때문에 이러한 문제점을 개선한 저비용의 효율적인 전력품질외란 발생기가 제안되었다[4-6]. 그러나 참고문헌 [4]의 시스템은 고조파 필터가 필요하며 외란 발생 시 큰 무효전력이 발생하기 때문에 시스템의 부피가 증가하며 복잡해지는 문제점이 있다. 참고문헌 [5, 6]의 시스템은 참고문헌 [4]의 전력품질외란 발생기의 가장 큰 문제점인 비용에 대한 부분을 상당히 줄였으며, 특히, 참고문헌 [5]의 시스템은 참고문헌 [7]에서 마이크로그리드의 시험에 적용되어 그 성능이 검증이 검증되었으나 전원의 위상 변동에 대한 외란은 발생시킬 수 없다는 문제점이 있다.

본 논문에서는 위상 변동을 발생시킬 수 있는 전력품질외란 발생기를 제안하였다. 일반적으로 3상 전원의 각 상에 발생하는 전압 강하의 크기가 다르면 부하에 공급되는 3상 전원에 전압 위상 변동이 발생한다. 이와 같은 전압 위상 변동이 발생하는 경우에 대한 마이크로그리드의 운전 특성에 대한 분석이 필요하며 이를 모의하기 위하여 전압 위상 변동을 발생시킬 수 있는 전력품질외란 발생기가 필요하다. 제안하는 전력품질외란 발생기에 대한 동작 원리를 분석 하였으며 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안하는 시스템의 유용성을 입증하였다.

### 2. 계통의 외란 발생 시 특성

#### 2.1 전압 외란 발생

그림 1에 전압 강하의 몇 가지 예를 전압 벡터도를 이용하여 나타내었다.

그림 1(a)는 3상 전원의 모든 상에 50[%] 동일한 크기의 전압 강하가 발생한 경우에 대한 것이며 그림 1(b)-1(d)는 2선 지락 사고 발생 시 3상 전원의 각상에 다른 크기의 전압 강하가 발생한 경우에 대한 예를 각각 나타낸 것이다[9]. 전압 외란 발생이 유지되는 동안 3상 전원의 합이 영(Zero)인 경우를 평형, 3상 전원의 합이 영이 아닌 경우를 불평형으로 구분하였다.

#### 2.2 전압 강하 발생 시 사고 전압과 전류 특성

먼저 계통에 전압 외란 발생 시 분산 전원과 계통에 흐르는 전류와 전압의 특성 해석이 필요하다. 그림 2는 계통 전압 외란 발생 시 특성을 분석하기 위하여 가정한 하나의 분산 전원과 계통, 그리고 3상 부하로 구성된 마이크로그리드 시스템이다. 그림 2의 마이크로그리드 시스템의 파라미터를 표 1에 나타내었다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Pukyong National University, Korea  
E-mail : nhoec@pknu.ac.kr.

\* Dept. of Electrical Engineering, Pukyong National University, Korea

접수일자 : 2015년 5월 31일

수정일자 : 2015년 8월 26일

최종완료 : 2015년 8월 28일

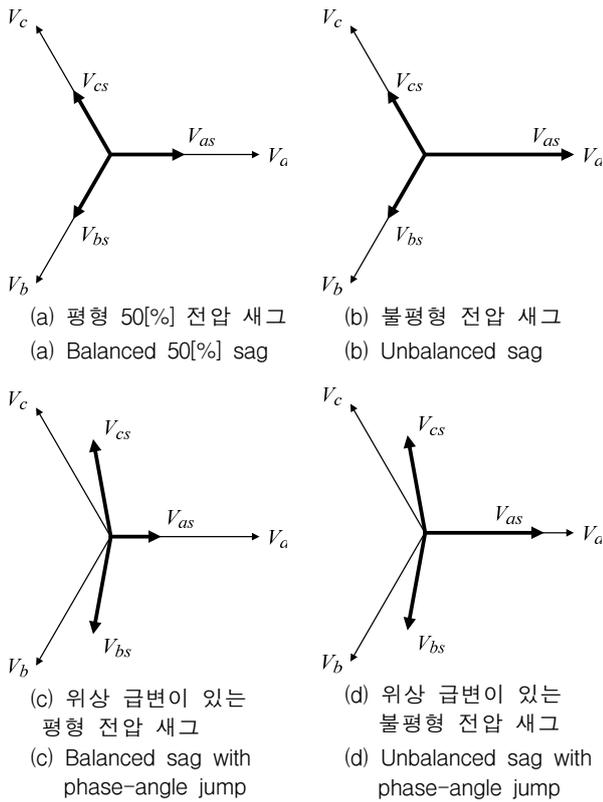


그림 1 전압 새그의 예  
Fig. 1 Examples of voltage sag

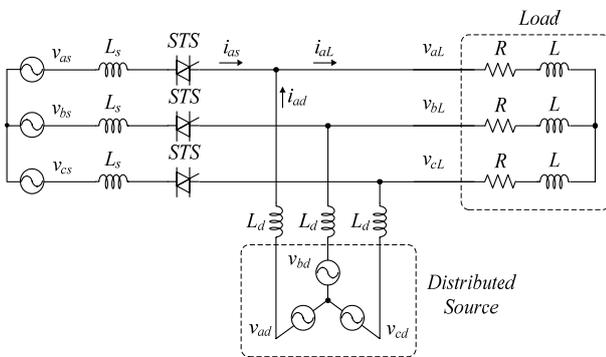


그림 2 전압과 전류 분석을 위한 회로도  
Fig. 2 Circuit diagram for the voltage and current analysis

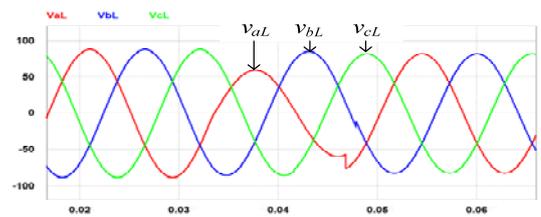
그림 3에 그림 1(c)의 경우에 대한 전압 강하 발생 시 전류와 전압의 변동을 나타내었다. 전압 강하는 33.3[mS]에 발생한다고 가정하였다. 계통의 a상 전압인  $V_{as}$ 에 위상 변동 없는 33[%]의 전압강하가 발생하며 이 때 계통 상전압  $V_{bs}$ 와  $V_{cs}$ 는 88[%]의 전압 강하가 발생한다. 그림 3(a)에서 알 수 있듯이  $V_{bs}$ 와  $V_{cs}$ 는 전압 크기뿐만 아니라 위상도 변동하는데  $V_{bs}$ 는 정상 상태의 위상에서 약  $19^\circ$  앞서며  $V_{cs}$ 의 위상은  $19^\circ$  뒤지게 된다. 계통, 분산 전원, 그리고 부하에 흐르는 전류의 파형을 각각 그림 3(b)~3(d)에 나타내었다.

STS 사이리스터의 게이트 신호는 전압 강하 발생 순간 오프 된다. 따라서 전압 강하 발생 후 STS의 턴-온 유지 시간은 사고 발생 순간부터 사고 전류의 극성이 바뀌어

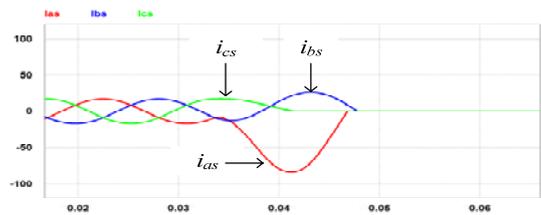
표 1 시뮬레이션 파라미터

Table 1 Simulation parameters

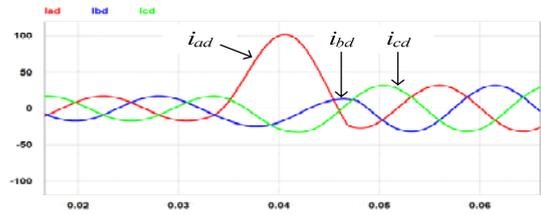
Parameter	Description
$V_{as}-V_{cs}$	Utility voltage, 110[V <sub>rms</sub> ] line-to-line
$V_{ad}-V_{cd}$	Distributed source voltage, 110[V <sub>rms</sub> ] line-to-line
$L_s$	Utility side impedance, 1.3[mH]
$L_d$	Distributed source impedance, 1.3[mH]
STS	Static Transfer Switch
$R, L$	Load $R=2.23[\Omega]$ , $L=3.67[mH]$



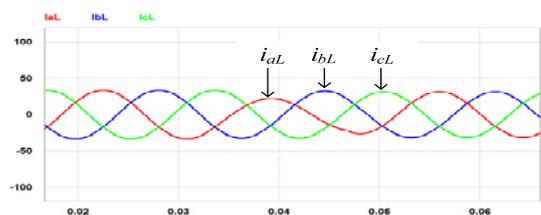
(a)  $v_{aL}, v_{bL}, v_{cL}$



(b)  $i_{as}, i_{bs}, i_{cs}$



(c)  $i_{ad}, i_{bd}, i_{cd}$



(d)  $i_{al}, i_{bl}, i_{cl}$

그림 3 위상 급변이 있는 전압 새그 발생 시 전압과 전류  
Fig. 3 Voltage and current in case of voltage sag with phase-angle jump

STS의 사이리스터가 턴-오프 하는데 까지 걸리는 시간이 되며 사고 전류의 크기는 계통과 분산 전원 사이를 연결하는 선로의 임피던스의 크기, 계통과 분산 전원의 내부 임피

턴스 및 사고 발생 시 전압 강하의 크기에 의해 결정된다. 사고 발생시 STS 사이리스터에 흐르는 상전류  $i_{as}$ ,  $i_{bs}$ , 그리고  $i_{cs}$ 의 크기는 정상 상태 전류의 최대치를 기준으로 각각 5, 1.6, 그리고 약 1배가 되는 것을 알 수 있다.

### 3. 전압 위상 변동 발생 원리

참고문헌 [5]의 시스템은 그림 1(a)와 1(b)와 같은 전압 외란을 발생 시킬 수 있지만 1(c)와 1(d)에 나타난전압 위상 변동은 발생 시킬 수 없다. 그림 4는 그림 1(c)과 그림 1(d)에 나타난 전압 위상 변동을 발생시키는 원리를 설명하기 위한 전압 벡터도이다.

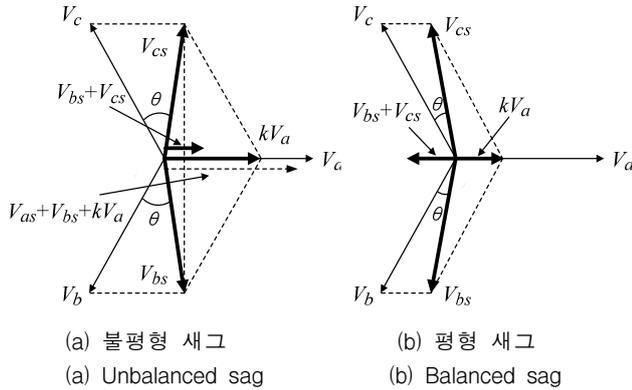


그림 4 전압 벡터도  
Fig. 4 Vector diagram of voltages

평형 3상 전원의 전압은 다음 식 (1)~식 (3)과 같다.

$$V_a = \sqrt{2} V \sin(\omega t) \tag{1}$$

$$V_b = \sqrt{2} V \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \tag{2}$$

$$V_c = \sqrt{2} V \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \tag{3}$$

외란이 발생된 전압  $V_{bs}$ 는 그림 4(a)의 벡터도에서  $V_b$ 와  $kV_a$ 의 합으로 나타낼 수 있으며  $V_{bs}$ 의 크기와 위상 변동의 크기  $\theta$ 는 다음 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 나타낼 수 있다. 위상 변동 발생 시 정상 상태의 위상과 비교하여 위상이 앞서게 된다.

$$V_{bs} = V_b + kV_a = \frac{\sqrt{3+k^2}}{2} V \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \theta) \tag{4}$$

$$\text{여기서, } \theta = \tan^{-1}(\frac{\sqrt{3}}{k}) - \frac{\pi}{3} \tag{5}$$

동일한 방법으로  $V_{cs}$ 의 위상 변동을 발생 시킬 수 있다. 다만  $V_{bs}$ 의 위상 변동 시 위상이 앞서는 것과는 다르게  $V_{cs}$ 의 위상 변동은 정상 상태의 위상보다 뒤지게 된다. 전압 위상 변동 발생 기능은 전압 외란 발생 후  $V_{as} \sim V_{cs}$  합에 따라 불평형과 평형 외란 발생으로 구분할 수 있고 각각은 다음 식 (6)과 식 (7)로 결정된다.

#### 1) 평형 전압 새그인 경우

$$kV_a + V_{bs} + V_{cs} = 0 \tag{6}$$

#### 2) 불평형 전압 새그인 경우

$$kV_a + V_{bs} + V_{cs} \neq 0 \tag{7}$$

위상 변동 기능을 구현하기 위하여 참고문헌 [5]의 시스템에 추가로 회로를 구성한 시스템을 그림 5에 나타내었다. 추가로 구성된 반도체 소자의 구별을 위하여 기존의 양방향 스위치는 블록다이어그램으로 나타내었다.

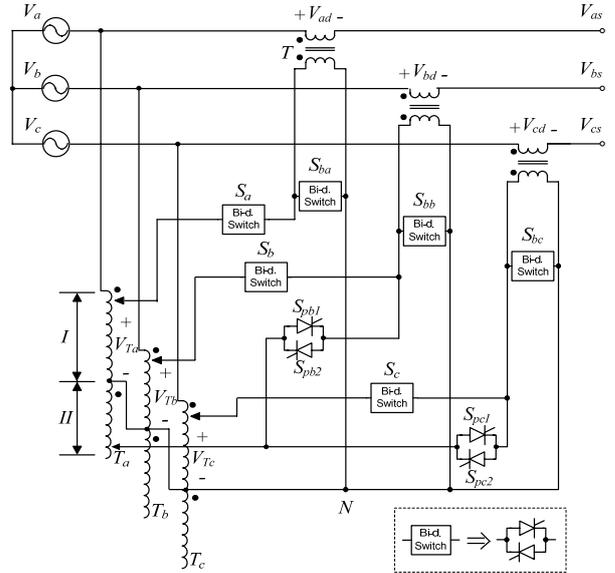


그림 5 위상 변동 발생 기능을 가지는 전압 외란 발생기  
Fig. 5 Voltage disturbance generator with phase jump

정상 동작 시  $S_{ba} \sim S_{bc}$ 는 턴-온 상태를 유지한다.  $V_{as}$ 에 전압 강하를 발생하기 위하여  $S_a$ 에 턴-온,  $S_{ba}$ 에는 턴-오프 신호를 인가한다.  $S_{ba}$ 는 슬라이딩 타입의 단권 변압기  $T_a$ 의 2차 측 전압  $V_{Ta}$ 가 역방향으로 인가되어 턴-오프 되고,  $V_{Ta}$ 가 직렬 변압기  $T$ 의 1차 측에 연결되므로 부하에 공급되는 전압  $V_{as}$ 는 다음 식 (8)으로 나타낼 수 있다.

$$V_{as} = kV_a = V_a - V_{Ta} \times n \tag{8}$$

여기서,  $n$ 은 직렬 변압기  $T$ 의 권선비이다.

$V_{bs}$ 에 위상 변동 및 전압 강하 외란을 발생시키기 위하여  $S_{bb}$ 에 턴-오프,  $S_{pb1}$ 과  $S_{pb2}$ 에 턴-온 신호를 인가한다. 단권 변압기  $T_a$ 의 2차 측 전압  $n_T \cdot V_a$ 가 b상에 연결된 직렬 변압기 1차 측에 인가되며 부하에 공급되는 전압  $V_{bs}$ 는 다음 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$V_{bs} = V_b + n_T V_a \times n \tag{9}$$

여기서,  $n_T$ 는 슬라이딩 형태의 단권 변압기  $T_a$ 의 권선비

며 크기는  $T_a$ 의 접점 위치에 따라 결정된다.  
 이와 유사하게  $V_{cs}$ 는 다음 식 (10)로 나타낼 수 있다.

$$V_{cs} = V_c + n_T V_a \times n \quad (10)$$

식 (8)의  $V_{Ta}$ 는 단권변압기의 접점 위치에 따라 결정되기 때문에 그림 1(c)와 1(d)에 나타난 평형 및 불평형 시 전압 위상 변동 및 크기 변동을 가지는 전압 외란을 간단하게 발생 시킬 수 있다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

그림 5의 시스템을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 2에 나타내었다.

그림 6은 그림 1(c)의 3상 전원이 평형이고 위상 변동과 전압 강하가 발생한 경우에 각 부 전압 파형을 나타낸 것이다. 전원 전압  $V_a-V_c$ 는 일정하다. 약 140[mS] 시점에 전압 외란이 발생한다고 가정하였으며 이 시점에  $S_a, S_{pb1}, S_{pb2}, S_{pc1}$ , 그리고

표 2 시뮬레이션 파라미터

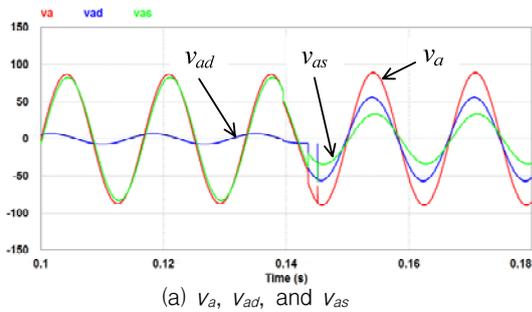
Table 2 Simulation parameters

Parameter	description
$V_a-V_c$	110[V <sub>rms</sub> ], 60[Hz], line-to-line
$n$	Series transformer turn-ratio, 1
%Z of $T$	5[%]
Load	$R-L$ load, 500[VA]
Load PF	0.85 lagging

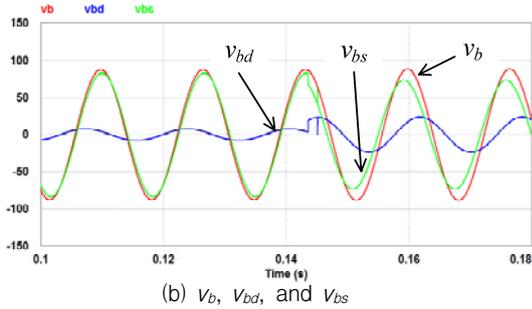
$S_{pc2}$ 가 턴-온 되었다.

$V_{as}$ 는 위상 변동 없이  $V_{ad}$ 크기의 전압 강하가 발생하는 것을 알 수 있으며  $V_{bs}$ 와  $V_{cs}$ 는 크기뿐만 아니라 약 20[°]의 위상 변동이 발생한다.그림 6(b)와 6(c)를 통하여  $V_{bs}$ 와  $V_{cs}$ 의 위상 변동은 각각 지상과 진상으로 반대인 것을 알 수 있으며 그림 6(c)에 보이는 것처럼 외란 발생 후 3상 전원의 합은 영 (Zero)[V]인 것을 알 수 있다.

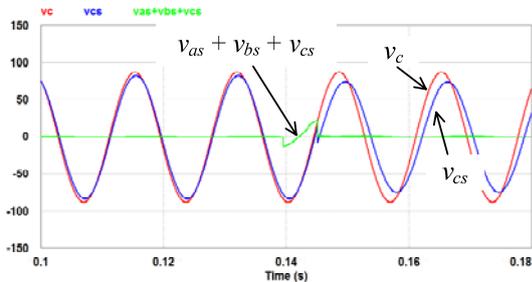
그림 7에 그림 1(d)의 3상 전원이 불평형이며 위상 변동과



(a)  $V_a, V_{ad},$  and  $V_{as}$



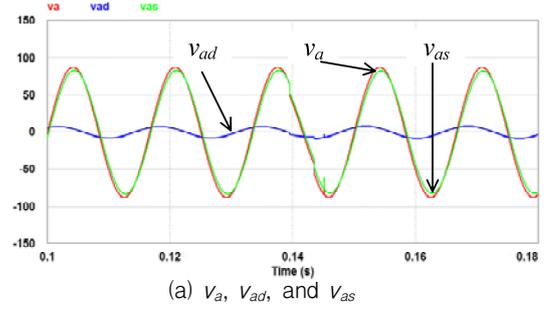
(b)  $V_b, V_{bd},$  and  $V_{bs}$



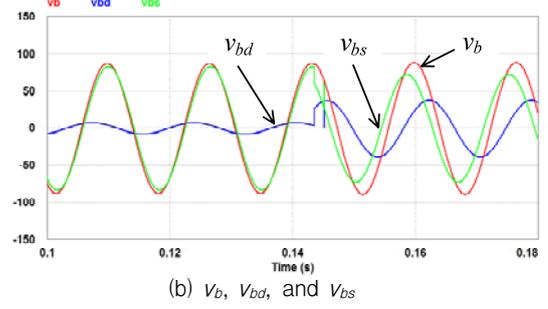
(c)  $V_c, V_{cs},$  and sum of  $V_{as}, V_{bs},$  and  $V_{cs}$

그림 6 평형 위상 변동을 가지는 전압 세그 발생 시 각부 전압

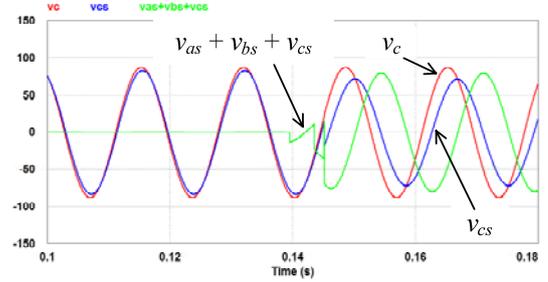
Fig. 6 Voltages of the generator in case of balanced sag with phase jump



(a)  $V_a, V_{ad},$  and  $V_{as}$



(b)  $V_b, V_{bd},$  and  $V_{bs}$



(c)  $V_c, V_{cs},$  and sum of  $V_{as}, V_{bs},$  and  $V_{cs}$

그림 7 불평형 위상 변동을 가지는 전압 세그 발생 시 각부 전압

Fig. 7 Voltages of the generator in case of unbalanced sag with phase jump

전압 강하가 발생한 경우 각 부 전압 파형을 나타내었다.

그림 6의 결과와 유사한 것을 알 수 있고 그림 7(c)에 나타난 것처럼 외란 발생 후 3상 전원의 합이 영(Zero)이 아닌 것을 알 수 있다.

### 5. 실험 결과

그림 8은 실험에 사용한 시스템이다. 그림 5의  $S_{ba} \sim S_{pc}$ 는 하나의 모듈에 두개의 SCR 사이리스터가 들어 있는 SEMIKRON 사의 SKKT57/16E 를 사용하였고 각 상전원에 연결된 직렬 변압기의 권선비는 1이다. 실험의 편의를 위하여 단권변압기는 단상 슬라이다스를 사용하였고 부하는 정격 2.5[kVA]의 저항-인덕터-커패시터 बैं크를 이용하여 실험을 수행하였다. 스위칭 신호 발생은 Texas Instruments사의 TMS320F28335를 이용하여 제어하였다.

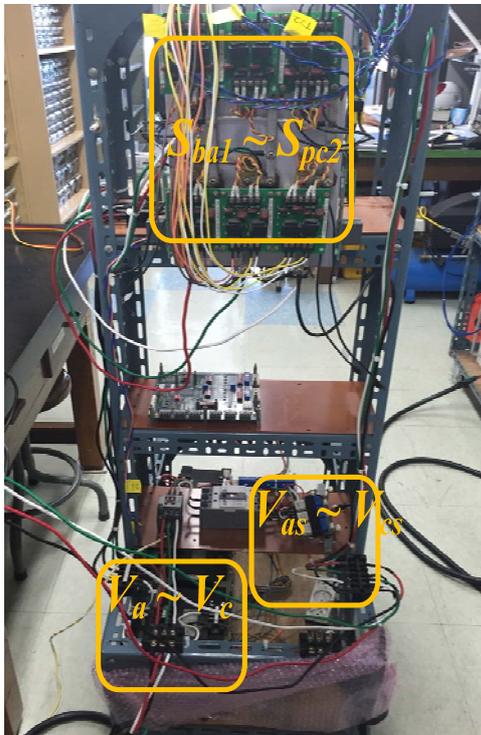
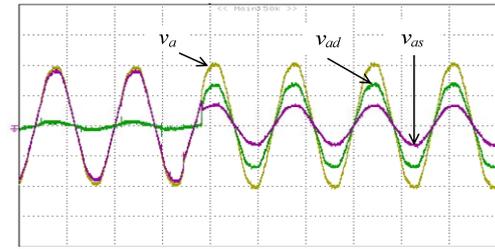


그림 8 실험 세트  
Fig. 8 Experimental setup

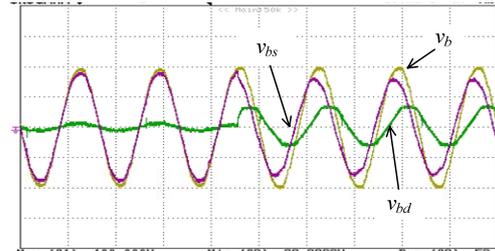
그림 9와 그림 10에 3상 평형과 불평형인 경우에 대한 위상 변동 발생 실험 결과 파형을 각각 나타내었다. 시뮬레이션 결과와 유사한 것을 알 수 있다. 그림 9와 그림 10에 보이는 각 상의 외란 발생 순간이 다른 이유는 측정의 편의상 한번의 외란을 발생시켜 한상의 파형을 측정하였기 때문이다. 외란이 발생 하는 경우 3상 부하 전압의 변동을 확인하기 위하여 그림 9(d)와 그림 10(d)에 3상 부하 전압을 함께 나타내었다.

### 6. 결 론

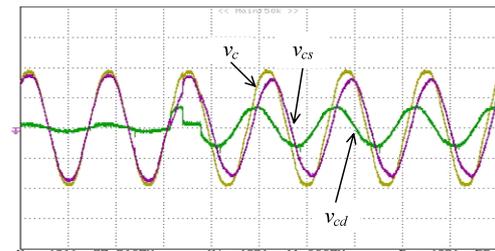
본 논문은 전압 위상 변동 기능을 가지는 전력품질외란 발생기에 하여 다루었다. 계통 전압 외란 발생으로 인하여 발생



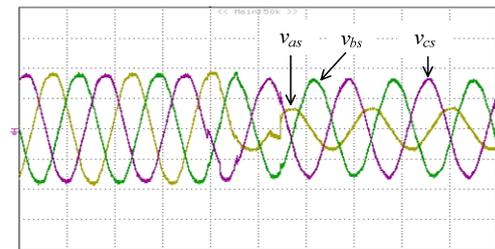
(a)  $V_a$ ,  $V_{ad}$ , and  $V_{as}$



(b)  $V_b$ ,  $V_{bd}$ , and  $V_{bs}$



(c)  $V_c$ ,  $V_{cd}$ , and  $V_{cs}$



(d)  $V_{as}$ ,  $V_{bs}$ , and  $V_{cs}$

그림 9 평형 위상 변동 발생을 가지는 전압 새그 발생 시 실험 결과 파형(50[V/DIV], 10[mS/DIV])

Fig. 9 Experimental waveforms of the generator in case of balanced sag with phase jump(50[V/DIV], 10[mS/DIV])

하는 계통 사고 시 큰 사고 전류로부터 마이크로그리드를 보호하기 위하여 STS가 턴-오프 된다. 계통 전압의 위상 변동 시 계통과 마이크로그리드의 전압 전류 특성을 분석하였으며 마이크로그리드의 성능을 시험 할 수 있는 전압 위상 변동이 가능한 전력품질외란 발생기를 제안하였다. 제안한 시스템의 동작 원리를 설명하였고 시뮬레이션과 실험을 통하여 시스템

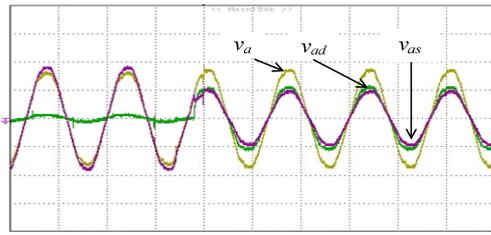
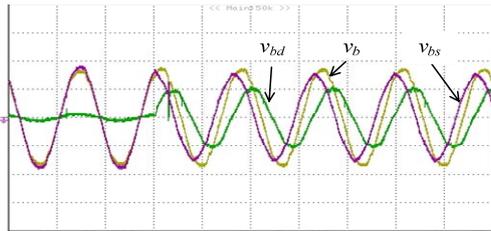
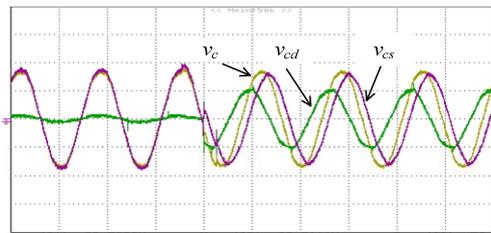
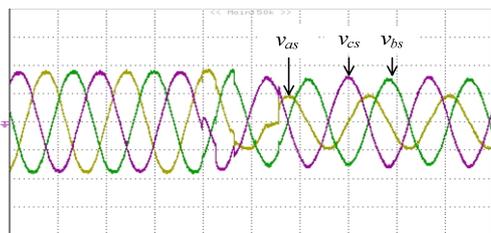
(a)  $V_a$ ,  $V_{ad}$ , and  $V_{as}$ (b)  $V_b$ ,  $V_{bd}$ , and  $V_{bs}$ (c)  $V_c$ ,  $V_{cd}$ , and  $V_{cs}$ (d)  $V_{as}$ ,  $V_{bs}$ , and  $V_{cs}$ 

그림 10 불평형 위상 변동 발생을 가지는 전압 새그 발생 시 실험 결과 파형(50[V/DIV], 10[mS/DIV])

Fig. 10 Experimental waveforms of the generator in case of unbalanced sag with phase jump(50[V/DIV], 10[mS/DIV])

의 유효성을 입증하였다. 제안하는 전력품질외란 발생기의 특징을 요약하면 다음과 같다.

- 전압 위상 변동을 간단히 발생 시킬 수 있다.
- 전압 강하와 순간 정전 시 흐르는 큰 전류를 견딜 수 있다.
- 간단하고 신뢰성이 높으며 저비용으로 구현 가능하다.
- SCR 소자를 이용하여 스위칭 손실이 작다.

제안하는 전압 위상 변동이 가능한 전력품질외란 발생기는 마이크로그리드의 계통 사고 발생 시에 대한 성능 시험에 유용하게 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- [1] K. Oranpiroj, S. Premrudeepracharn, and K. Higuchi, "SagWave for the 3-phase 4-wire voltage sag generator prototype," 2010 CCA, pp. 2209-2212, Sep. 2010.
- [2] W. Muangjai, S. Premrudeepracharn, K. Oranpiroj, W. Jantee, and K. Higuchi, "An implementation algorithm of a carrier-based PWM technique for three-phase four-leg voltage sag generator with microcontroller," 2013 PEDS, pp. 852-855, Apr. 2013.
- [3] K. Daychosawang and Y. Kumsuwan, "Balanced and unbalanced three-phase voltage sag generator for testing electrical equipment," 2014 ECTI-CON, pp. 1-6, May. 2014.
- [4] Y.H. Chung, G.H. Kwon, T.B. Park, G.Y. Lim, "Voltage sag and swell generator with thyristor controlled rectifier," IEEE Power con., Vol. 3, pp. 1933 - 1937, 2002.
- [5] E.C. Nho, I.D. Kim, T.W. Chun, and H.G. Kim, "Cost-effective power quality disturbance generator for the performance test of custom power devices," IEEE-IECON, pp. 1606-1610, Nov. 2004.
- [6] E.C. Nho, I.D. Kim, S.D. Park, N.S. Choi, T.W. Chun, and H.G. Kim, "3-phase voltage disturbance generator for the custom power devices with nonlinear load," ICEMS, pp. 1-4, Nov. 2006.
- [7] E.C. Nho, Y.H. Lee, J.K. Seok, I.D. Kim, N.S. Choi, T.W. Chun, and H.G. Kim, "Characteristics of a power quality disturbance generator for the test of microgrid with STS," IEEE-INTELEC, pp. 1-4, Oct. 2009.
- [8] E.C. Nho, J.H. Jung, I.D. Kim, T.W. Chun, H.G. Kim, N.S. Choi, and J.H. Choi, "Voltage disturbance generator with phase jump for the test of microgrid," 2010 IPEC, pp. 487-491, Jun. 2010.
- [9] Math H. J. Bollen, Understanding Power Quality Problems. IEEE PRESS, 2000.

## 저 자 소 개



### 정 재 현 (Jae-Hun Jung)

1981년 10월 19일생. 2007년 부경대 공대 전기제어공학부 졸업. 2009년 부경대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년~현재 동 대학원 박사과정.

E-mail : jaehunjung1981@outlook.com



### 노 의 철 (Eui-Cheol Nho)

1960년 8월 2일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 졸업(공학박사). 1997년~1998년 미국 University of Wisconsin-Madison 방문교수. 2005년~2006년 미국 University of California-Irvine 방문교수. 1995년~현재 부경대 전기공학과 교수.

E-mail : nhoec@pknu.ac.kr