

## 플라이휠 저장에너지 UPS의 성능 시험을 위한 순간정전 및 전압불평형 발생기

김중원, 이기수, 변우열, 노의철, 김인동, 전태원\*, 김홍근\*\*  
부경대학교, \*울산대학교, \*\*경북대학교

### Outage and Voltage Unbalance Generator for the Test of Flywheel Energy Storage UPS

J.W. Kim, K.S. Lee, W.Y. Byeon, E.C. Nho, I.D. Kim, T.W. Chun\*, H.G. Kim\*\*  
Pukyong National University, \*University of Ulsan, \*\*Kyungpook National University

#### ABSTRACT

This paper deals with a novel 3-phase power quality disturbance generator. The proposed generator can be applied to the performance that of custom power devices. Voltage sag, swell, outage unbalance and phase shift are provided by the generator. The control scheme for the disturbance generation is simple, and hardware setup is cost effective compared with conventional scheme. The operating principle of the generator is described and the usefulness verified through simulation with 10kVA power rating.

#### 1. 서 론

컴퓨터, 자동화기기, 의료기기, PLC, 금융, 사무용기기 등 고도의 정밀급 정보처리 시스템을 요하는 기기들은 공급 전원의 Sag, Swell, 순간정전, 과전압, 저전압, 전압 불평형 등의 전압 변동에 매우 민감하게 반응하여 오동작 또는 동작이 정지되는 경우가 빈번이 발생한다. 이러한 사고가 발생하면 생산라인이 정지되거나 또는 정보처리센터의 업무가 마비되는 등 막대한 피해를 초래하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 전력 품질 개선을 위한 다양한 방안들이 제시되어 사용되고 있다. 정전 및 전압변동에 대응하기 위해 UPS가 대표적으로 사용되고 있으며, 최근에는 고전압 대전류 전력제어기기인 Custom Power Devices에 대한 관심이 고조되어 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>[1]</sup>. 그런데 이러한 전력 품질 개선 장치들의 성능을 테스트하기 위해서는 Sag, Swell, 순간정전 등의 전원 변동을 임의로 발생시켜 줄 수 있는 장치가 반드시 필요한데 기존의 장치는 너무 고가이고 취급하기가 용이하지 않다. 최근 저가이면서 실용

적인 TCR(Thyristor Controlled Reactor)을 이용한 방식<sup>[2]</sup>이 제안되었으나 과도한 유효전력을 필요로 한다는 단점이 있다.

PSL사의 Sag 발생기<sup>[3]</sup>는 전원과 부하사이에 저항을 직렬로 연결하여 저항에 의한 전압강하를 이용하여 전압의 Sag를 얻는 것으로서, 조작성 간편하고 설치가 간단하며 각 상간 전압 불평형을 쉽게 만들 수 있는 장점이 있다, 그러나 저항을 사용하기 때문에 부하가 증가할 때 원래 설정된 Sag 값에서 변동이 발생하는 문제점이 있다. Swell의 발생 범위는 25% 정도로 제한되어 광범위한 Swell을 얻기가 곤란하다.

Elgar사의 SW5250A는 위상 변이 및 서지, 스파크 등의 발생기능도 있으나<sup>[4]</sup> Sag, Swell 발생 범위가 적고 가격이 고가이다.

본 논문에서는 간단한 구조와 고신뢰도를 갖는 새로운 방식의 전압 변동 발생 장치를 제안하고자 한다. 제안한 방식은 Sag, Swell, Outage 발생은 물론 전압 불평형 상태를 발생시킬 수도 있으며 특히 Outage 발생후 전원 재인가시 원래의 전압 위상보다 지연되거나 앞서게 할 수 있다.

#### 2. 제안한 방식의 회로

그림 1은 제안한 방식의 전압변동 발생기를 3상에 적용한 경우를 나타낸다. 일정한 전원전압  $V_a, V_b, V_c$ 로부터 Sag, Swell, Outage의 전압 변동이 있는 부하 상전압  $V_{as}, V_{bs}, V_{cs}$ 를 만들기 위해서  $V_a, V_b, V_c$ 와  $V_{as}, V_{bs}, V_{cs}$ 사이 에 직렬로 변압기  $V_{ad}$ 를 추가한다.  $V_{ad}$ 의 전압은  $V_{Ta}$ 에 의해 결정되며  $V_{Ta}$ 는 전원전압  $V_a$ 로부터 얻어진다.  $T_a \sim T_c$ 는 슬라이더스를 의미하며 점점

이 I-영역에 있을 경우는 Sag, II-영역에 있는 경우는 Swell을 발생하며 Sag 및 Swell의 크기를 조절하려면 접점의 위치를 바꾸면 된다. 크기를 고정하여 사용하는 경우는 단권변압기로 사용하면 된다.  $S_{a1}$ ,  $S_{a2}$ ,  $S_{Ba1}$ ,  $S_{Ba2}$ ,  $S_{Pa1}$ ,  $S_{Pa2}$ 는 SCR 사이리스터로 구성된다. SCR 사이리스터는 최상의 순방향 전도 특성과 높은 전력 처리 능력을 가지고 있고, 양극 전압의 극성을 역전시켜 on 상태에서 역 저지 상태로 쉽게 스위칭된다. 한편 전력 반도체 소자중 가장 낮은 on 상태 전압을 가지므로 최소한의 손실로 출력을 발생시킬 수 있는 고효율 시스템 구현이 가능하다. 대용량의 Sag, Swell 발생기를 사용할 경우 각 단의 SCR을 병렬로 사용하여 전류 분담율을 높여 대전력에도 쉽게 적용 가능하다.

SCR을 양방향으로 설치한 것은 교류전원이므로 극성에 무관하게 Sag와 Swell을 발생시킬 수 있도록 하기 위해서이다.

직렬 변압기를 사용한 이유는 부하에 무관하게 일정한 크기의 Sag나 Swell을 발생시키기 위한 것이다.

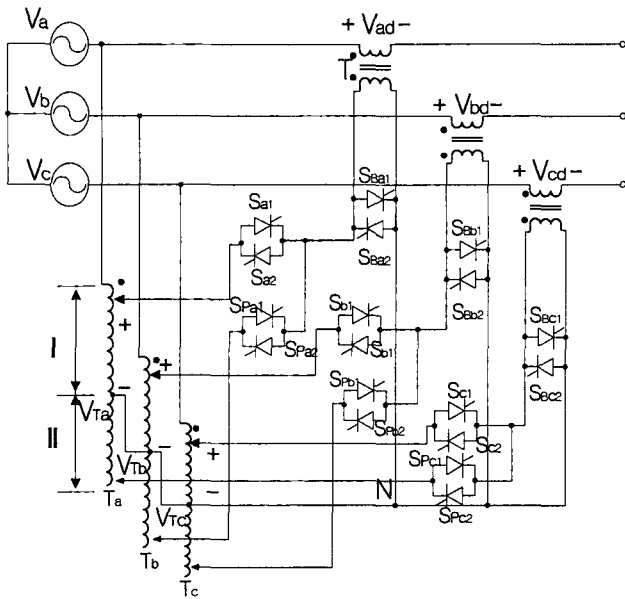


그림 1 3상 전압 외란 발생기  
Fig. 1 3-phase voltage disturbance generator

### 3. 제안한 방식의 회로원리

그림 1의 3상 전압 외란 발생기의 동작원리를 기술하면 다음과 같다. 표 1은 그림 1의 다이내믹

UPS로 공급되는 전압  $V_{as}$ 가 정상, Sag, Swell, Outage로 변하기 위해 필요한 SCR 사이리스터의 온/오프 상태와 슬라이더스 접점위치를 정리해서 나타낸 것이다. 각 상의 동작 원리가 모두 동일하므로 여기서는 a-상만 분석한다.

표 1 전압 변동에 따른 스위치 상태와 T-접점위치  
Table 1 Each switch operating condition and T-contact point

$V_{as}$	$S_{a1}, S_{a2}$	$S_{Ba1}, S_{Ba2}$	$S_{Pa1}, S_{Pa2}$	T접점
정상	OFF	ON	OFF	-
sag	ON	OFF	OFF	I-구간하단
swell	ON	OFF	OFF	II-구간
outage	ON	OFF	OFF	I-구간상단
위상지연	OFF	OFF	ON	

### 3.1 Sag, Swell, Outage 발생

그림 1에서  $v_a$ ,  $v_{as}$ ,  $v_{ad}$ 의 관계는

$$v_{as} = v_a + v_{ad} \quad (1)$$

이며, 여기서

$$v_{ad} = v_T / n \quad (2)$$

$$v_T = v_a / n_T \quad (3)$$

이다, 여기서  $n_T$ 는 슬라이더스 T의 변압비이다. 따라서 Sag를 발생시키려면  $v_a$ 보다 작아지도록 해야 하며, 이를 위해서는  $v_{ad}$ 가 마이너스(-)로 출력되어야 한다.  $S_{Ba1}$ 과  $S_{Ba2}$ 가 온되어 있으면 T의 1차와 2차는 단락상태이므로  $v_{ad}$ 는 영이 되어 정상상태를 유지한다. 이때  $S_{Ba1}$ 과  $S_{Ba2}$ 를 턴오프하면서  $S_{a1}$ 과  $S_{a2}$ 를 턴온하면 T의 1차측에는 슬라이더스 2차측 전압이 인가된다.  $v_d$ 의 극성이 마이너스가 되기 위해  $v_T$ 에서는 T의 I-구간에서 얻어져야 한다. 이때

$$v_{as} = v_a (1 - 1/n \cdot n_T) \quad (4)$$

이 되며 Sag의 정도는 T와 T<sub>d</sub>의 변압비로 결정된다. 슬라이더스의 구조상 I, II 구간내의 임의의 지점에서  $v_{Ta}$ 를 용이하게 얻을 수 있으며, 전압 Sag 정도도 접점 위치에 따라 임의로 설정 가능하므로 0~100% 전 범위에 걸쳐 광범위한 Sag를 얻을 수 있다.

접점이 T<sub>a</sub>의 상단부로 올라갈수록 Sag의 정도는 증가하여 100%가 되면

$$v_{as} = -v_a \quad (5)$$

가 되어 식 (1)에서

$$v_{as} = 0 \quad (6)$$

이 되므로 Outage 즉, 정전상태를 발생하게 된다.

$T_a$ 의 접점을 II-구간에 두면 식 (1)~(3)으로부터

$$v_{as} = v_a(1 + 1/n \cdot n_T) \quad (7)$$

이 되어 Swell 이 발생하며 Swell의 정도는  $n_T$ 로 조절하며 변압기의 용량과 권선비에 따라 조절 범위가 매우 다양한 값을 얻을 수 있다.

### 3.2 전압 불평형 발생

Sag 발생 원리를 활용하여 전압 불평형을 발생시킬 수 있다. 각상의 직렬 변압기에 인가되는 전압의 크기를 서로 다르게하면 불평형전압을 얻을 수 있으므로 단권 변압기의 접점 위치를 서로 다르게 설정한다.

### 3.3 위상 변동 발생

정전이 발생한 후 전원전압이 부하에 재인가된 경우 원래의 공급전원 위상과는 다르게 위상 변위가 발생될 수 있다. 이러한 경우를 발생시키기 위하여 그림 1의  $S_{Pa1}$ ,  $S_{Pa2}$ 가 사용된다.  $S_{Pa1}$ ,  $S_{Pa2}$ 를 턴온하면  $V_{ad}$ 에는  $V_b$  전압이 인가되어 출력 전압  $V_{as}$ 는  $V_a$ 와  $V_b$ 의 합으로 결정된다. 그림 2는 각 상전압의 벡터도를 나타낸다.

그림 2에서

$$v_a = \sqrt{2}v \sin \omega t \quad (8)$$

$$v_b = \sqrt{2}v \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \quad (9)$$

$$v_c = \sqrt{2}v \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \quad (10)$$

라 두면,

$$v_a + v_b = \sqrt{2}v \sin(\omega t - \frac{\pi}{3}) \quad (11)$$

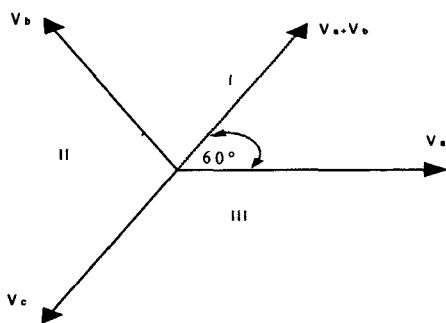


그림 2 각 상전압 벡터도  
Fig. 2 Voltage vector diagram

이 되어  $v_a$  보다 위상이  $60^\circ$  지연된 전압을 얻을 수 있다. 유사한 원리로  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 60^\circ$ 의 위상 변위를 발생시킬 수 있다. 더욱 미세하게 임의의 위상지연을 발생시키려면 단권 변압기의 접점을 이동하여 크기를 가변하면 된다.  $v_b$ 의 K배 전압을 얻는다고 가정하면,

$$v_{ad} = \pm K v_b \quad (12)$$

$$\begin{aligned} v_{as} &= v_a + v_{ad} \\ &= \sqrt{2}V \sin \omega t + \sqrt{2}KV \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ &= \sqrt{2}V \sqrt{1 \pm K + K^2} \sin(\omega t \pm \alpha) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{K \sin \frac{2}{3}\pi}{1 + K \cos \frac{2}{3}\pi} \right) \quad (14)$$

이 되어 크기와 위상이 가변하는 전압을 발생한다.

## 4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 회로 시뮬레이션 패키지 Simplorer를 사용하였고 시뮬레이션에 사용된 각 파라미터 및 회로는 각각 표 2와 그림 3과 같다.

표 2 시뮬레이션 파라미터  
Table 2 Parameters for the simulation

파라미터	값
교류 3상전원	220V, 60Hz
부하 리액터(L1,L2,L3)	2mH
변압기 main inductance	0.1H
변압기 leakage inductance	600μH
부하 저항	20Ω
SCR Forward voltage	0.8V
SCR Bulk resistance	1mΩ

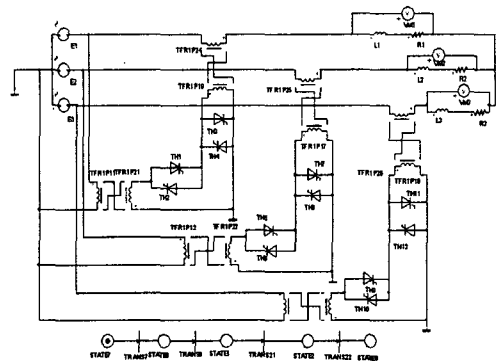
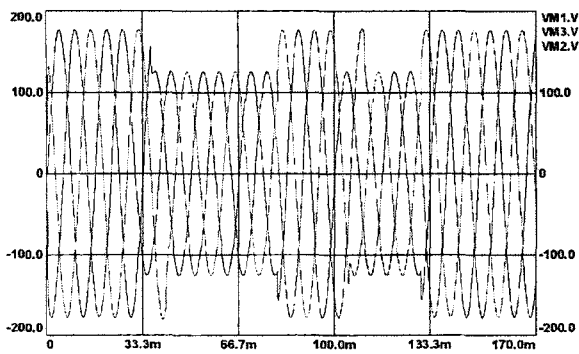
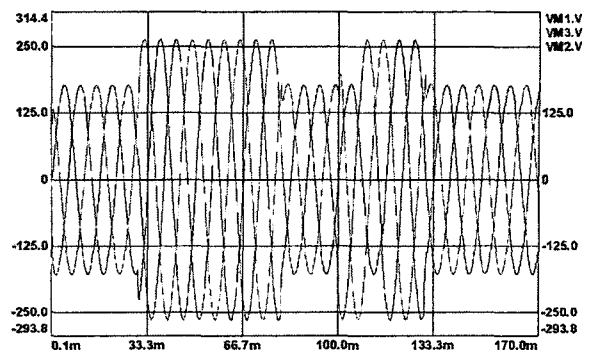


그림 3 시뮬레이션 회로도  
Fig. 3 Simulation Circuit

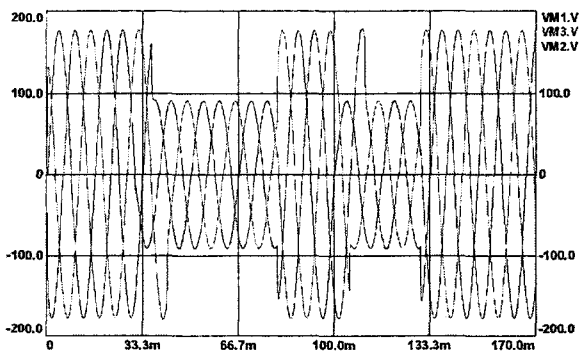


(a) 30% Sag 발생  
(a) 30% Sag generation



(b) 50% Swell 발생  
(b) 50% Swell generation  
그림 5 Swell 발생  
Fig. 5 Swell generation

그림 5(a),(b)는 각각 전원전압의 30%, 50%, Swell 발생 파형으로서 역시 Swell 발생 만큼 출력전압이 전원전압보다 증가함을 알 수 있다.



(b) 50% Sag 발생  
(b) 50% Sag generation  
그림 4 Sag 발생  
Fig. 4 Sag generation

그림 4(a),(b)는 기본파에 대해 30%, 50% Sag 발생시의 출력 전압을 보여주는 파형으로서 전압 Sag의 범위가 매우 넓다는 것을 알 수 있다.

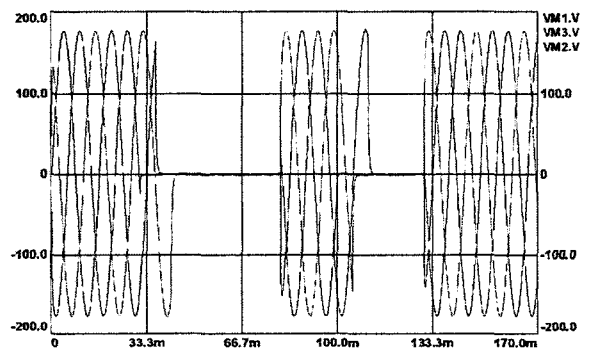
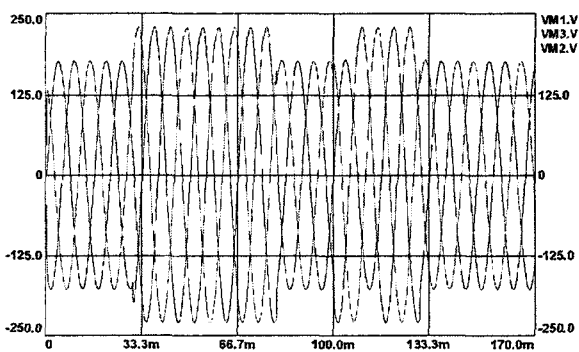
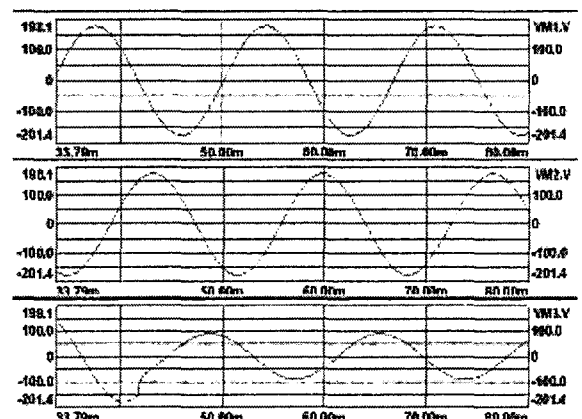


그림 6 정전 발생  
Fig. 6 Outage generation

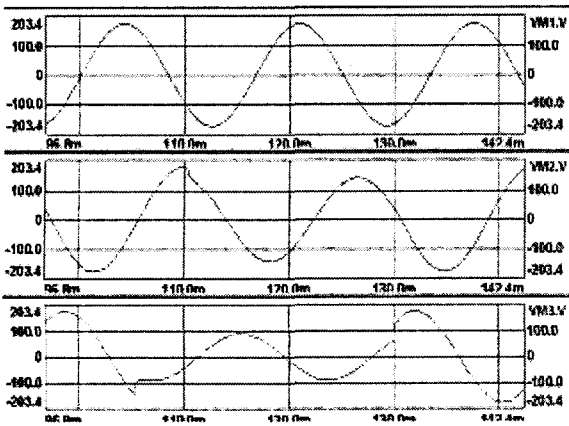
그림 6은 정전 상태시의 파형이다. 이는 순간 정전 상태 및 정전시의 성능시험을 가능하게 한다.



(a) 30% Swell 발생  
(a) 30% Swell generation



(a)  $V_{as}$ ,  $V_{bs}=100\%$ ,  $V_{cs}=50\%$



(b)  $V_{as}=100\%$ ,  $V_{bs}=80\%$ ,  $V_{cs}=50\%$   
 그림 7 전압 불평형 발생  
 Fig. 7 Generation of the Unbalance Voltage

그림 7(a),(b)는  $V_{as}$ ,  $V_{bs}$ ,  $V_{cs}$ 를 각각 100%, 100%, 50%로 하였을 경우와 100%, 80%, 50%로 하였을 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 보인다.

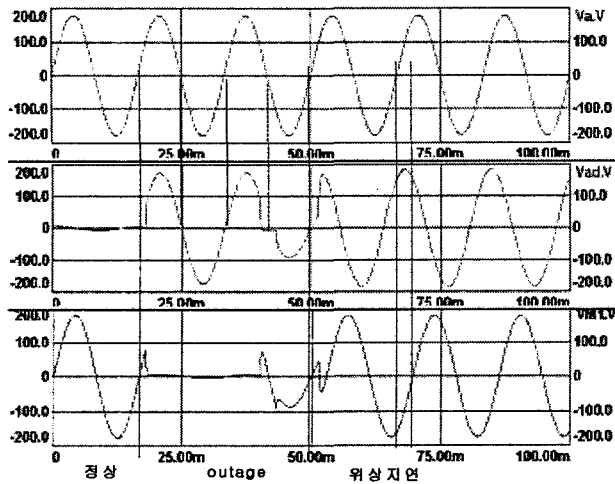


그림 8 위상 변위 발생  
 Fig. 8 generation of the phase shift

그림 8은 정전 발생후 전원 전압 재인가시 위상 변위를 발생시킨  $V_a$ ,  $V_{ad}$ ,  $V_{as}$  파형으로서  $V_a$ 보다  $V_{as}$ 는 Outage 발생 전에는 동상이었으나 발생 후에는  $V_{as}$ 가 약  $60^\circ$  지연됨을 알 수 있다.

이상의 파형을 통해서 정리해보면 Sag-Swell 발생기의 출력전압을 전원전압보다 크거나 작게 할 수 있으며 그 변동 범위도 광범위하게 할 수 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 전력품질 개선을 위한 custom

power devices의 성능 테스트를 위한 새로운 방식의 전압변동 발생장치를 제안하였다. 제안한 방식은 전압 Sag, Swell, Outage는 물론이고 전압 불평형 및 위상 변위도 임의로 발생할 수 있으며 기존 방식에 비해 구조가 간단하고 제어가 용이하여 저비용으로 고성능 구현이 가능하다. 또한 용량에 무관하게 광범위한 용량을 대상으로 적용 가능하다. 제안한 방식에 대한 시뮬레이션 결과 광범위한 전압변동 발생이 가능함을 확인하였다.

제안한 방식이 갖는 주요 특징을 정리하면 다음과 같다.

- 구조가 매우 간단하여 경제적 구현이 가능하며 효율이 높고 소형 경량화 가능하다.
- 슬라이드스와 SCR 사이리스터를 사용하여 경제적이고 신뢰도가 높다.
- Sag와 Swell의 크기를 임의로 바꿀 수 있다.
- 전압 Sag 변동 범위가 매우 넓다(0 ~ 100%).
- Outage, 저전압, 과전압 발생도 가능하다.
- 전압 Sag, Swell, Outage 발생을 위한 제어가 간단하다.
- 3상 전압 불평형 발생이 용이하다.
- 전압의 위상 변위도 임의로 발생 시킬 수 있다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행된 과제(02-중-02)임

## 참 고 문 헌

- [1] 최재호, "전력품질 장애와 대책," 전력전자학 회지 5권 1호, pp. 13-18., 2000
- [2] Y. H. Chung, G. H. Kwon, T. B. Park, G. Y. Lim, "Voltage Sag and Swell generator with thyristor controlled rectifier," IEEE Power Con 2002, Vol. 3, pp. 1933-1937, 2002
- [3] Power Standards Lab. "Industrial Power Corruptors-standard power quality disturbance generators." 2003.
- [4] Elgar electronics Co., "Smartwave Switching amplifier operation manual." 2002
- [5] R. S. Weissbash, G. G. Karady, P. G. Farmer, "A combined uninterruptible power supply and dynamic voltage compensator using a flywheel energy storage system," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 16, No. 2, pp. 265-270, April 2001
- [6] R. G. Lawrence, K. L. Craven, G. D. Nichols, "Flywheel UPS," IEEE IA Magazine, pp. 44-50, may/June, 2003