

工學碩士 學位論文

선형 및 비선형 부하에 적용 가능한
전력품질 외란 발생기



2007年 2月

釜慶大學校 大學院

電 氣 工 學 科

朴 成 大

工學碩士 學位論文

선형 및 비선형 부하에 적용 가능한 전력품질 외란 발생기

指導教授 魯 義 哲

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함.

2007年 2月

釜慶大學校 大學院

電 氣 工 學 科

朴 成 大

朴成大的 工學碩士 學位論文을 認准함.

2007年 2月



主 審 工學博士 金 仁 東 (印)

委 員 工學博士 張 允 碩 (印)

委 員 工學博士 魯 義 哲 (印)

목 차

표 목 차	iii
그림 목차	iv
abstract	vi
제 1 장 서 론	1
제 2 장 제안한 방식의 회로	6
2-1 제안한 전력품질 외란발생기의 회로구성	6
2-2 비선형 부하에 대한 커뮤테이션 허용구간 분석	8
2-2-1 전압변동 발생시 허용구간	9
2-2-2 정상상태 복귀시 허용구간	10
2-2-3 순간정전 후 위상급변시 커뮤테이션 구간	11
제 3 장 전력품질 외란 발생기의 동작원리	14
3-1 새그, 스웰, 순간정전 발생원리	14
3-2 전압불평형 발생원리	16
3-3 위상급변 발생원리	17

3-4 전압을 제어한 위상급변 발생원리	20
제 4 장 시뮬레이션 결과	23
4-1 새그, 스웰, 순간정전, 전압불평형	23
4-2 위상급변	28
4-2 전압을 제어한 위상급변	30
제 5 장 실험 결과	32
5-1 새그, 스웰, 순간정전, 전압불평형	32
5-2 위상급변	36
5-2 전압을 제어한 위상급변	39
제 6 장 결 론	41
참고문헌	44
감사의 글	49

표 목 차

표 2-1 전압변동에 따른 스위치 상태와 T-접점위치	10
-------------------------------------	----



그림 목차

그림 1-1 기존 방식의 전력품질 외란 발생기	3
그림 1-2 전력품질 외란 발생기의 접속	4
그림 2-1 전력품질 외란발생기-1	7
그림 2-2 전압변동 발생시 접속도	9
그림 2-3 전압변동 발생시 스위칭 상태	12
그림 2-4 정상상태로 복귀시 스위칭 상태	12
그림 2-5 위상급변시 스위칭 상태	13
그림 3-1 입출력 전압 벡터도(외란발생기-1)	19
그림 3-2 위상변위 α 에 따른 전압변동(외란발생기-1)	19
그림 3-3 전력품질 외란발생기-2	21
그림 3-4 입출력 전압 벡터도(외란발생기-2)	22
그림 3-5 위상변위 α 에 따른 전압변동(외란발생기-2)	22
그림 4-1 새그 발생	24
그림 4-2 스웰 발생	25
그림 4-3 순간정전 발생	26
그림 4-4 전압불평형 발생시 출력전압 : (위) $v_{ab} = 30\%$, (중간) $v_{bc} = 60\%$, (아래), $v_{ca} =$ 순간정전	27
그림 4-5 30° 위상급변	28

그림 4-6 40° 위상급변	29
그림 4-7 60° 위상급변	29
그림 4-8 전압을 제어한 15° 위상급변	31
그림 4-9 전압을 제어한 30° 위상급변	31
그림 5-1 30% 새그 발생시 전원 선간전압과 3상 출력전압	33
그림 5-2 30% 새그 발생시 a상 전류	33
그림 5-3 순간정전 발생시 전원 선간전압과 3상 출력전압	34
그림 5-4 30% 스웰 발생시 전원 선간전압과 3상 출력전압	34
그림 5-5 전압불평형 ($v_{as} = 0.5v_a$, $v_{bs} = 0.3v_b$, $v_{cs} = 0.6v_c$)	35
그림 5-6 30° 위상급변	37
그림 5-7 40° 위상급변	37
그림 5-8 60° 위상급변	48
그림 5-9 전압을 제어한 15° 위상급변	40
그림 5-10 전압을 제어한 30° 위상급변	40

A Power Quality Disturbance Generator Applicable to Linear and Nonlinear Loads

Sung-Dae Park

*Department of Electrical Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

This paper deals with a new power quality disturbance generator. In order to test the custom power device such as UPS(Uninterruptible Power Supply), DVR(Dynamic Voltage Restorer), SSTS(Solid State Transfer Switch), DSTATCOM(Distribution Static Compensator), etc. a power quality generator are not easy to use in laboratory because of its high cost. The proposed generator has good features of simple structure, low cost in implementation, high efficiency, reliability and easy control.

Furthermore, the generator can operate with nonlinear load as well as linear load. The generator provides voltage sag, swell, outage, unbalance and phase jump. In the generation of phase jump the magnitude of the phase jumped output voltage can be controlled too. The operating principle of the proposed generator is described and analysed. Each power quality disturbance generation mode is simulated with software package of Simpler.

The usefulness of the proposed scheme is proved through experimental results. The generator is expected to be used as a cost-effective power quality disturbance generator for the performance test of the custom power device.



제 1 장 서 론

최근에는 예고 없는 장시간 정전 사고의 발생은 거의 없으나 수ms~수초에 이르는 순간정전(outage or interruption), 새그(sag : 순시전압강하), 스웰(swell : 순시전압 상승), 전압불평형(voltage unbalance), 고조파왜곡(harmonic distortion), 과전압(over voltage), 저전압(under voltage) 등의 전력품질 외란은 지속적으로 증가하고 있다[1-5]. 이러한 외란이 발생하는 원인에는 전력계통의 고장, 낙뢰, 지락사고, 대형 부하나 커패시터 뱅크의 투입 및 차단, 전력변환장치 사용 등을 들 수 있다.

한편 컴퓨터, 자동화기기, 의료기기, PLC, 금융, 사무용기기 등 고도의 정밀급 정보처리 시스템을 요하는 기기들은 전압 변동에 매우 민감하게 반응하여 전력품질 외란 발생시 오동작 또는 동작이 정지되는 경우가 빈번히 발생한다.

예를 들어, 반도체, 광섬유, 광디스크, LCD디스플레이 등과 같은 제품의 생산라인은 각 공정마다 필요로 하는 정밀 자동화 장비들 뿐 아니라, 마이크로 스케일 공정의 특성상 요구되는 특수 작업환경을 조성하기 위한 온도, 습도, 공기청정도, 화재 및 유독가스 검출 등 정밀제어를 요하는 안전장치들로 구성된다. 이러한 정밀 자동화 장치들을 위한 전력공급에 순간적인 이상이라도 발생하게 된다면, 생산 공정의 정지, 불량품 발생, 공정 환경오염 등의 심각한 문제가 발생한다. 그 결과 막대한 제품 자체의 손실 뿐 아니라, 재가동을 위한 시스템 복구에 소요되는 상당한 인적 물적 경비지출을 초래하게 된다. 일반적으로 반도체 생산 공정의 일시 중단 후 재가동을 위한 비용손실은 약 5-10억원 정도로 알려져 있다. 또한 미국의 경우만 하더라도 새그와 순간정전

에 의해 자동화 공정라인에서 발생하는 경제적 손실이 매년 수백억 달러에 달한다는 조사보고서가 발표된 바 있다[6-8].

이러한 문제를 해결하기 위해 공급하는 전력품질에 이상이 발생하는 경우 이를 개선하여 양질의 전력을 공급하기 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 DVR(Dynamic Voltage Restorer), DSTATCOM(Distribution Static Compensator), SVC(Static Var Compensator), 능동전력필터 등에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[9-16].

그런데 이러한 전력품질 개선장치들의 성능을 테스트하기 위해서는 새그, 스웰, 순간정전, 전압불평형, 위상급변 등의 전압변동을 선형부하 뿐만 아니라 비선형 부하에서도 임의로 발생시켜 줄 수 있는 장치가 반드시 필요하다. 따라서 최근에 대용량에 적용 가능한 경제적이면서 실용적인 전력품질 외란 발생기를 구현하기 위한 목적으로 TCR(Thyristor Controlled Reactor)을 이용한 방식이 제안되었다[19]. 이 방식은 기본적으로 TCR의 원리를 이용하여 새그, 스웰, 순간정전, 저전압, 과전압을 발생시키고 있다. 여기서는 승압용과 강압용 변압기를 별도로 1대씩 설치하여 TCR을 구성하는 SCR 사이리스터의 전압정격을 최대한 낮추고 변압기의 누설리액턴스를 TCR의 리액터로 사용함으로써 별도의 리액터 없이 시스템을 구성하여 비용을 최소화 하는 장점은 있으나, TCR 구동으로 인한 과도한 무효전력을 필요로 한다는 단점이 있다.

또한 12-펄스 TCR의 불연속 전류에 의한 11차, 13차 고조파 발생을 흡수하

기 위해 별도의 노치 필터를 추가해야 한다는 문제가 발생하여 전체 시스템의 효율이 낮고 중량과 부피도 커진다는 단점이 있다. 따라서 실험실 레벨에서도 활용 가능한 경제적이며 간단한 구조의 전압변동 발생기에 대한 필요성이 제기되었다[20-26]. 그림 1-1은 간단한 구조의 전력품질 외란발생기를 나타낸다. 그림 1-1의 방식은 구조가 간단하고 경제적인 반면 위상 급변기능이 없고, 기존 연구에서는 비선형 부하에서의 동작을 위한 스위칭 패턴 분석이 이루어지지 않았다.

본 논문에서는 선형부하 뿐만 아니라 비선형 부하에서도 경제적이며, 구조가 간단하고, 효율이 높고, 신뢰도가 높은 위상급변기능이 있는 전압변동 발생장치를 제안하고자 한다.

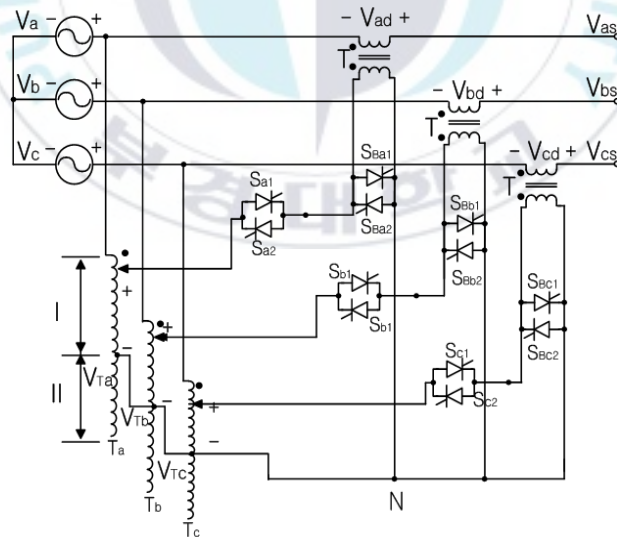


그림 1-1 기존 간단한 구조의 전력품질 외란발생기

Fig. 1-1 Conventional power quality disturbance generator with simple structure

그림 1-2는 제안한 방식의 전력품질 외란 발생기의 설치 및 제어에 관한 것으로 외란 발생기를 성능시험 하고자 하는 전력품질 개선장치와 전원단 사이에 삽입하여 정상전원으로부터 외란이 발생된 전원을 공급할 수 있도록 한다.

동작원리 해석에서는 정상상태와 전압이상 상태 간의 모드 전환시 필요한 SCR 사이리스터의 스위칭 조건을 분석하여 스위칭이 가능한 구역과 불가능한 구역을 구분하였으며[27, 28], 제안한 방식의 전력품질 외란 발생기는 선형 부하 뿐만 아니라 비선형 부하에서도 새그, 스웰, 순간정전, 과전압, 저전압, 전압불평형, 위상급변이 및 전압제어가 가능하도록 하였다.

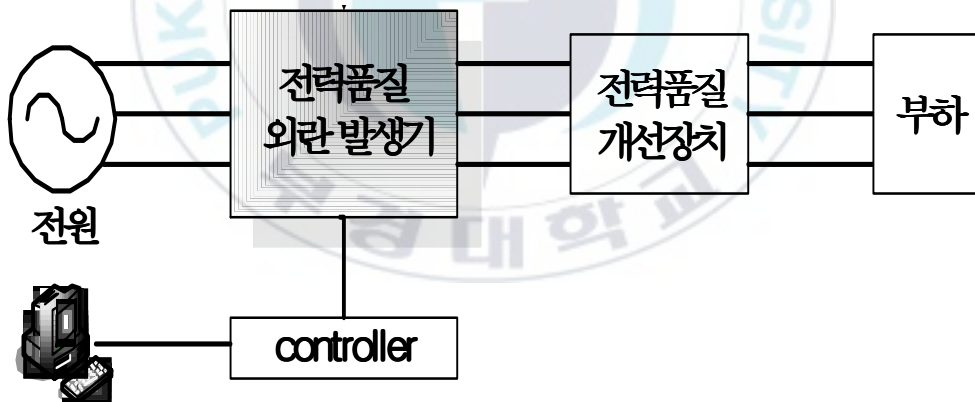


그림 1-2 전력품질 외란 발생기의 접속

Fig. 1-2 Connection of the power quality disturbance generator

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 제안한 방식의 회로 구성과
커뮤테이션 구간에 대해 기술하였고, 3장에서는 전력품질 외란 발생기의 동
작원리, 4장에서는 제안한 방식의 회로에 대한 시뮬레이션의 결과를 정리 하
였으며, 5장에서는 실험을 통해 그 타당성을 입증하였다.



제 2 장 제안한 방식의 회로

2-1 제안한 전력품질 외란발생기의 회로구성

그림 2-1은 제안한 방식의 회로를 나타낸다. 그림 2-1의 회로 구성은 그림 1-1의 회로를 기본으로 하여 위상급변이 가능하도록 하기 위하여 각상에 SCR스위치를 추가한 구조를 갖는다.

새그와 스웰을 발생하기 위하여 별도의 강압 및 승압변압기를 사용하지 않고 3상 전력공급선의 각 상에 직렬변압기를 설치하였으며, 이 직렬변압기에 인가되는 전압의 극성을 임의로 변경할 수 있도록 하고, 새그 및 스웰, 위상각의 크기를 임의로 설정할 수 있도록 하기 위하여 미끄럼방식의 단권변압기를 사용하였으며, 이 변압기의 2차측을 SCR 사이리스터 스위치를 통하여 직렬변압기에 인가하는 구조로 함으로써 부가적으로 흐르는 에너지는 변압기의 자화에너지에 국한하도록 하였다. 이렇게 함으로써 기존의 TCR을 이용한 경우에서 필요로 하는 과도한 무효전력에 비해 극히 미미한 정도 밖에 안되는 무효전력만 흐르게 하여 상대적으로 효율이 높고 중량과 부피 또한 현저히 감소되는 효과를 얻을 수 있었다. SCR 사이리스터 스택은 출력전압을 정상상태에서 전압이상 상태로의 전환이 용이하도록 구성되어 있으며 자연소호(natural commutation)에 의해 전환이 되므로 스위칭 손실이 없고 단지 도통 손실만 있으므로 효율을 최대화 하도록 하였다.

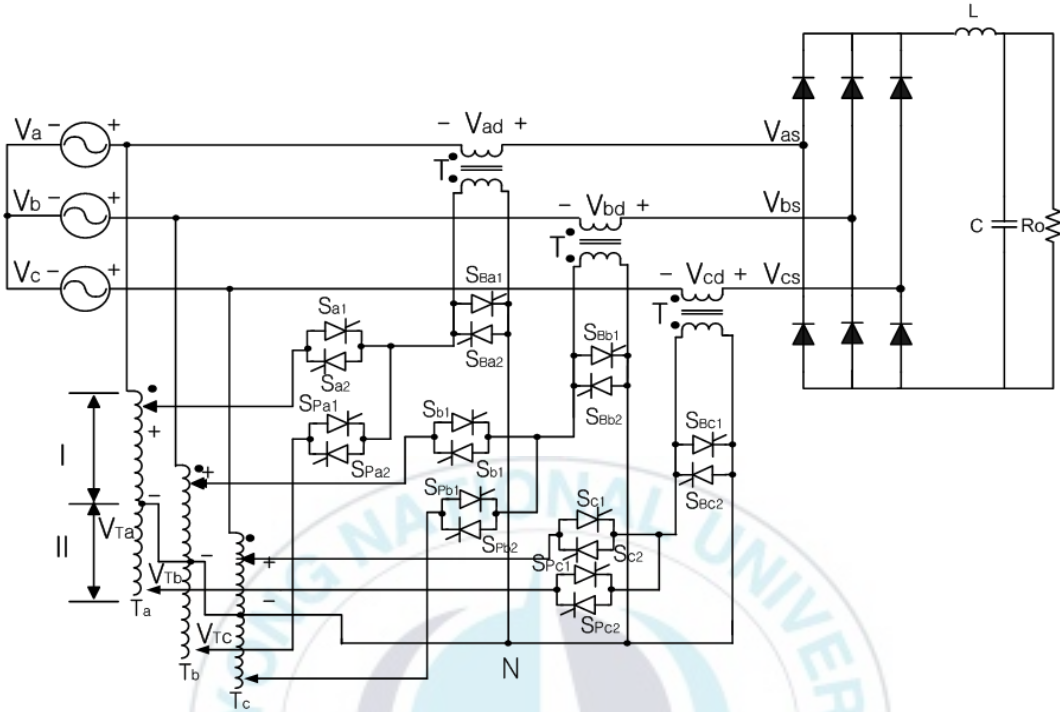


그림 2-1 전력품질 외란발생기-1

Fig. 2-1 Power quality disturbance generator-1

2-2 비선형 부하에 대한 커뮤테이션 허용구간 분석

그림 2-1의 회로에서 스위치 $S_{a1} \sim S_{c2}$, $S_{Ba1} \sim S_{Bc2}$, $S_{Pa1} \sim S_{Pc2}$ 의 온/오프 상태에 따라서 정상상태와 전압변동(새그, 스웰, 순간정전, 위상급변)을 발생하는 상태로의 교번적인 천이가 가능하다. 그러나 이러한 상태변화는 임의의 순간에 모두 가능한 것이 아니다. 전원전압과 전원전류의 방향이 일정한 조건에 맞을 경우에 한해서 원하는 상태로의 천이가 가능하다. 위상급변시의 커뮤테이션은 새그와 스웰발생을 연속적으로 해주

게 된다. a-상전압에 c-상전압을 더해주면 위상이 전원전압보다 앞서게 되고 b-상전압을 더해주면 뒤지게 된다. 그림 2-2에서 첨자 a는 a상을 의미한다.

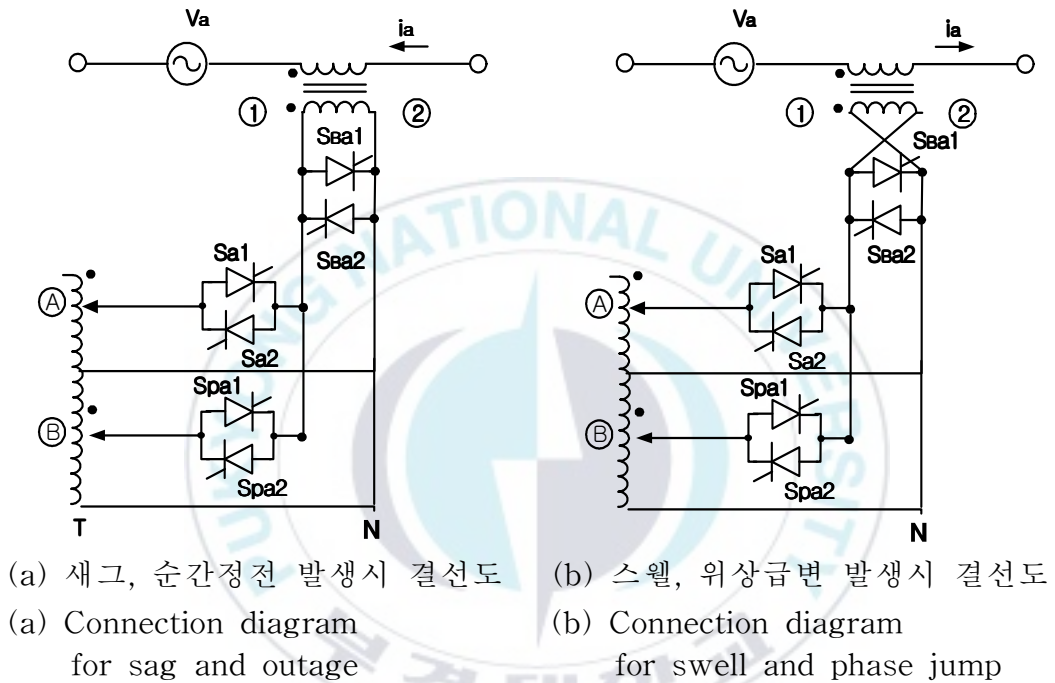


그림 2-2 전압변동 발생시 접속도

Fig. 2-2 Connection diagram for voltage disturbance

2-2-1 전압변동 발생시 허용구간

먼저 비선형 부하 접속시 정상상태에서 새그가 발생하는 경우를 살펴본다. 그림 2-2(a)에서 정상상태에서는 S_{Ba1} , S_{Ba2} 가 턴온되어 있고 S_{a1} 과 S_{a2} 는 턴오프되어 있다. 이때 새그를 발생하기 위하여 S_{a1} 과 S_{a2} 를 턴온하고 S_{Ba1} 과 S_{Ba2} 를 턴오프하는데, 그림 2-3에서와 같이 전원전압과 전류의 극성이 동일한 구간에서는 전류켜뮤테이션이 불가능하다. 그리고 비선형 부하에서는 전류의 불연속 구간이 생긴다. 따라서 전류의 극성이 없는 0인 구간에서 SCR을 스위칭 한다. 그러면 S_{Ba2} 가 통전중에 있으므로 S_{a1} 을 턴온하면 단권변압기의 2차측 전압이 S_{Ba2} 에 역방향으로 인가되어 S_{Ba2} 는 턴오프되고 직렬변압기의 1차측에 단권변압기 2차측 전압이 인가된다. 따라서 직렬변압기의 2차측에 인가되는 전압의 극성은 전원전압과 반대가 되어 최종 출력전압의 크기는 전원전압보다 작아진다. 정상상태에서 스웰이 발생하는 경우를 살펴보면, 그림 2-2(b)에서 S_{a1} 과 S_{a2} 를 턴온하고 S_{Ba1} 과 S_{Ba2} 를 턴오프하는데, 전원전압과 전류의 극성이 상이한 구간에서는 불가능하다. 따라서 전류의 극성이 없는 0인 구간에서 SCR을 스위칭 한다. 이것은 새그의 경우와 상반되는 특징이 있다.

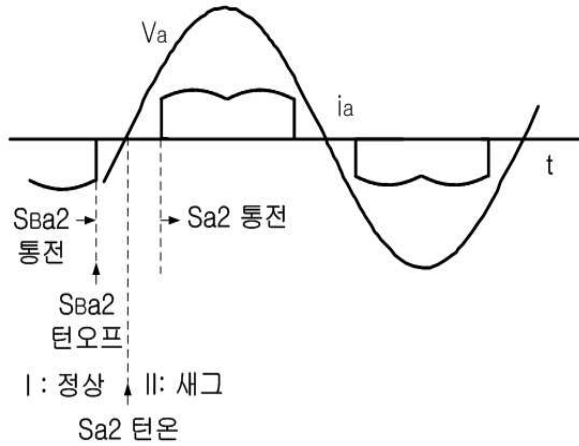


그림 2-3 전압변동 발생시 스위칭 상태

Fig. 2-3 Switching states in voltage disturbance generation

2-2-2 정상상태 복귀시 허용구간

새그가 발생한 상태에서 정상상태로 복귀하는 경우를 살펴본다. 그림 2-2(a)에서 새그가 발생한 상태하에서는 S_{a1} 과 S_{a2} 가 턴온되어 있고 S_{Ba1} 과 S_{Ba2} 가 턴오프되어 있다. 이때 정상상태로 복귀하려면 S_{Ba1} 과 S_{Ba2} 를 턴온하고 S_{a1} 과 S_{a2} 를 턴오프하는데, 그림 2-4에서 알 수 있듯이 전원전압과 전류의 극성이 동일한 구간에서만 가능하며 극성이 상이한 구간에서는 불가능하다. 왜냐하면 전원전압 v_a 는 양(+)이고 전류 i_a 는 음(-)인 구간에서 보면 전류는 전원쪽으로 흐르고 있으므로 S_{a1} 이 턴온 상태에 있는데, 이때 S_{Ba1} 을 턴온하면 단권변압기의 양(+)의 전압이 직렬연결된 S_{a1} 과 S_{Ba1} 에 순방향으로 인가되어 단락회로를 형성하면서 과다한 단락전류에 의해 소자가 파괴되기 때문이다. 스웰이 발생한 상태에서 정상상태로 복귀하는 경우는 그림 2-2(b)에서 S_{Ba1} 과 S_{Ba2} 를 턴온하고 S_{a1} 과 S_{a2} 를 턴오프하는데, 전원전압과 전류의 극성이 동일한 구간

에서는 불가능하다. 그러므로 전류의 극성이 없는 0인 구간에서 SCR을 스위칭 한다.

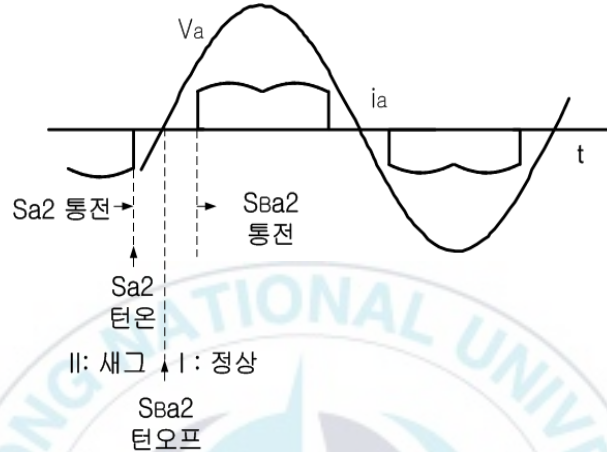


그림 2-4 정상상태로 복귀시 스위칭 상태

Fig. 2-4 Switching states in the recovery to normal condition

2-2-3 순간정전 후 위상급변시 커뮤테이션 구간

위상급변시의 경우에 대해서 살펴본다. 위상급변의 각각의 경우는 전압변동 발생시의 새그의 커뮤테이션과 스웰 발생을 연속적으로 해줌으로써 발생된다. 위상급변시에는 그림 2-2(b)에서 S_{a1} , S_{a2} 를 턴오프하고 S_{pa1} , S_{pa2} 를 턴온하여 직렬변압기에 b-상의 전압을 a-상에 더해줌으로써 위상을 지연시킬수 있고 마찬가지로 c-상의 전압을 더할 경우 위상을 앞서게 만들 수 있다. 복귀시에는 스웰 복귀시와 동일하다. 발생시와 복귀시의 허용구간은 그림 2-5에서 나타내고 있다. 위상급변시에는 전원전압과 전류의 극성이 상이한 구간에서는 불가능하다. 복귀시에는 전

원전압과 전류의 극성이 동일한 구간에서는 불가능하다.

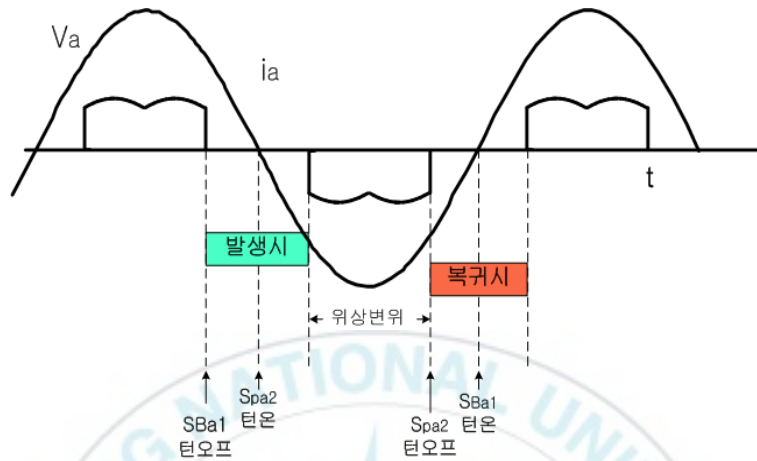


그림 2-5 위상급변시 스위칭 상태

Fig. 2-5 Switching state in the phase jump

제 3 장 전력품질 외란 발생기의 동작원리

표 1은 새그, 스웰, 순간정전, 위상급변에 따른 스위치의 상태와 슬라이닥스의 접점의 위치를 나타내고 있다. 각상의 동작원리는 동일하므로 a상에 대해서만 기술하였다.

표 1 전압 변동에 따른 스위치 상태와 T-접점위치
(그림 2-1의 경우)

Table 1 Each switch operating condition and T-contact point
(in case of Fig. 2-1)

그림2-1 의 경우	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
	위상급변	OFF	OFF	ON	각도에 따라 조절

그림 2-1의 전력품질 외란 발생기의 동작원리는 각상이 동일하므로 a-상의 한상에 대해서만 기술한다.

3-1 새그, 스웰, 순간정전 발생원리

그림 2-1에서 v_a, v_{as}, v_{ad} 의 관계는

$$v_{as} = v_a + v_{ad} \quad (3-1)$$

이며, 여기서

$$v_{ad} = v_T/n \quad (3-2)$$

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

이다, 여기서 n_T 는 슬라이더스 T의 변압비이다. 따라서 새그를 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_{Ba1} 과 S_{Ba2} 를 턴온하면 T_d의 1차측에는 슬라이더스 2차측 전압이 인가된다. v_{ad} 의 극성이 마이너스가 되기 위해 v_T 에서는 T의 I-구간에서 얻어져야 한다. 이때

$$v_{as} = v_a(1 - 1/n \cdot n_T) \quad (3-4)$$

이 되며 새그의 정도는 T 와 T_d 의 변압비로 결정된다. 슬라이닥스의 구조상 I, II 구간내의 임의의 지점에서도 v_{Ta} 를 용이하게 얻을 수 있으며, 새그 정도도 접점 위치에 따라 임의로 설정 가능하므로 0~100% 전 범위에 걸쳐 광범위한 새그를 얻을 수 있다. 접점이 T_a 의 상단부로 올라갈수록 새그의 정도는 증가하여 100%가 되면

$$v_{as} = -v_a \quad (3-5)$$

가 되어 식 (1)에서

$$v_{as} = 0 \quad (3-6)$$

이 되므로 순간정전을 발생하게 된다.

T의 접점을 II-구간에 두면 식 (3-1)~(3-3)으로부터

$$v_{as} = v_a (1 + 1/n \cdot n_T) \quad (3-7)$$

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

3-2 전압불평형 발생원리

그림 2-1에서 전력품질 외란 발생기의 3상 출력전압 v_{as}, v_{bs}, v_{cs} 는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{as} = v_a(1 - 1/n \cdot n_T) \quad (3-8)$$

$$v_{bs} = v_b(1 - 1/n \cdot n_T) \quad (3-9)$$

$$v_{cs} = v_c(1 - 1/n \cdot n_T) \quad (3-10)$$

여기서, n_{Ta}, n_{Tb}, n_{Tc} 는 각각 슬라이더스 T_a, T_b, T_c 의 변압비를 의미하며 접점위치에 의해 결정된다.

n_{Ta}, n_{Tb}, n_{Tc} 는 서로 동일한 값을 취할 수도 있고 상이하게도 할 수 있으므로 v_{as}, v_{bs}, v_{cs} 의 전압불평형은 각 슬라이더스의 접점 위치만 상이하게 설정함으로써 간단히 얻을 수 있고 전압불평형정도도 용이하게 조절할 수 있다.

3-3 위상급변 발생원리

전원전압이 비선형부하에 인가된 경우 원래의 공급전원의 위상보다 앞서게 하거나 또는 뒤지게 할 수 있다. 우선 그림 2-1의 회로에서 S_{pa1} , S_{pa2} 를 사용하여 전원전압보다 위상을 지연시킬 수 있다. 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. 진상일 경우에도 아래와 같이 동일하고 단지 v_a 와 v_c 합으로 결정된다. 그림 3-1은 각 상전압의 벡터도를 나타낸다. 그림 3-1에서

$$v_a = \sqrt{2}V\sin\omega t \quad (3-11)$$

$$v_b = \sqrt{2}V\sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (3-12)$$

$$v_c = \sqrt{2}V\sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) \quad (3-13)$$

라 두면,

$$v_a + v_b = \sqrt{2}V\sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (3-14)$$

이 되어 v_a 보다 위상이 지연된 전압을 얻을 수 있다. 유사한 원리로 각 상 전압의 크기를 조절하여 α 의 각도 만큼 위상 변위를 발생시킬 수 있다. 가령, v_b 의 K 배 전압을 얻는다고 가정하면,

$$v_{ad} = \pm K v_b \quad (3-15)$$

$$v_{as} = v_a + v_{ad}$$

$$\begin{aligned} &= \sqrt{2} V \sin \omega t \pm \sqrt{2} V \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) \\ &= \sqrt{2} V \sqrt{1 \pm K + K^2} \sin (\omega t \pm \alpha) \end{aligned} \quad (3-16)$$

여기서,

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{K \sin \frac{2}{3} \pi}{1 + K \cos \frac{2}{3} \pi} \right) \quad (3-17)$$

이 되어 크기와 위상이 가변 하는 전압을 발생한다. 식 (3-16)과 (3-17)을 토대로 α 의 변화에 대한 v_{as} 의 크기를 나타내면 그림 3-2와 같다.

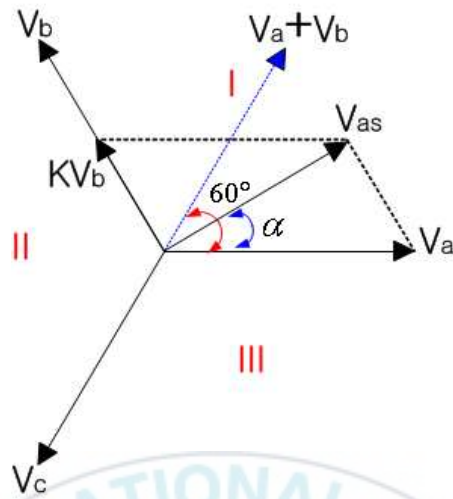


그림 3-1 입출력 벡터도(외란 발생기-1)

Fig. 3-1 Vector diagram for input and output voltage
(Disturbance generator-1)

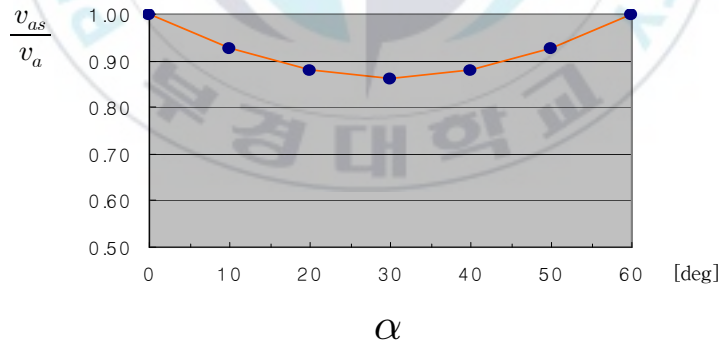


그림 3-2 위상변위 α 에 따른 전압변동(외란 발생기-1)

Fig. 3-2 Voltage variation with phase shift α
(disturbance generator-1)

3-4 전압 제어도 가능한 위상급변 발생원리

그림 2-1의 회로는 위상급변이 가능하지만 위상급변된 출력전압의 크기는 제어할 수 없다. 그림3-3은 위상급변은 물론이고 위상급변된 출력전압도 제어 가능한 회로를 나타낸다. 그림 3-3에서 T_1 과 T_2 는 3상 슬라이닥스이며 $S_{oa}-S_{oc}$ 는 새그, 스웰, 순간정전 발생을 위한 것이며 $S_{Ta}-S_{Tc}$, $S_{pa}-S_{Pc}$ 는 식 (3-18)~(3-20)을 구현하기 위한 것이다. 그림 3-3의 회로에서 새그, 스웰, 순간정전을 발생하려면 $S_{oa}-S_{oc}$ 를 턴오프한다. 이때 $S_{Ta}-S_{Tc}$, $S_{pa}-S_{Pc}$, $S_{Ba}-S_{Bc}$ 도 모두 오프상태를 유지한다. 위상변위된 전압을 출력하고자 하면 T_1 과 T_2 의 2차측 설정전압을 식 (3-19)와 (3-20)에 따라 정해두고 $S_{Ta}-S_{Tc}$, $S_{pa}-S_{Pc}$ 를 턴온하고 $S_{Ba}-S_{Bc}$ 를 턴오프한다. 그림 3-4는 각 상전압의 벡터도를 나타낸다.

표 2 전압 변동에 따른 스위치 상태와 T-접점위치
(그림 3-3의 경우)

Table 2 Each switch operating condition and T-contact point
(in case of Fig. 3-3)

	V_{as}	$S_{oa} \sim S_{oc}$	$S_{Ta} \sim S_{Tc}$	$S_{Pa} \sim S_{Pc}$	T접점
그림3-3 의 경우	전압을 제어한 위상급변	OFF	ON	ON	각도에 따라 조절

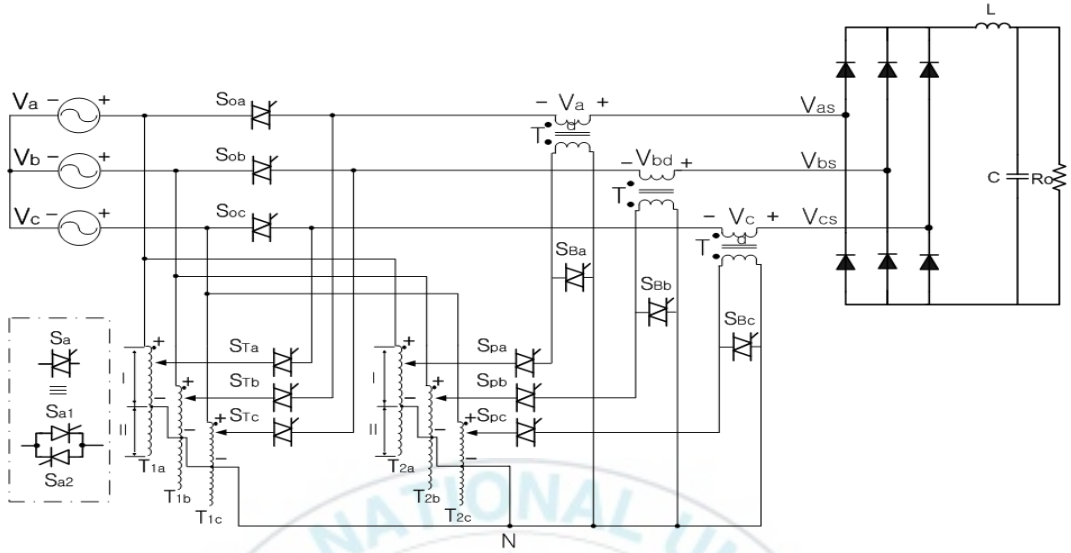


그림 3-3 전력품질 외란발생기-2

Fig. 3-3 Power quality disturbance generator-2

a-상 출력전압 v_{as} 의 크기는 v_a 와 동일하게 하고 위상은 α 만큼 지연되게 하려면, v'_a 와 v'_c 의 전압을 만들어서 벡터적으로 합하면 된다. 이때 v'_a , v'_c , v_{as} 의 관계는 다음과 같다.

$$v_{as} = \sqrt{(v'_a + v'_c \cos 60^\circ)^2 + (v'_c \sin 60^\circ)^2} \quad (3-18)$$

$$v'_a = V \cos \alpha - V \frac{\sin \alpha}{\tan 60^\circ} \quad (3-19)$$

$$v'_c = V \frac{\sin \alpha}{\sin 60^\circ} \quad (3-20)$$

그림 3-4 입출력 전압 벡터도(외란발생기-2)

– 22 –

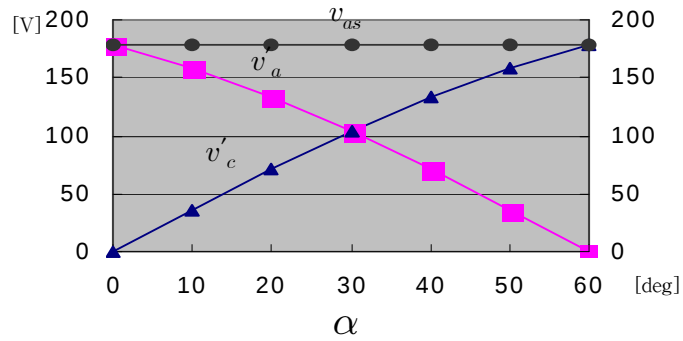


그림 3-5 위상변위 α 에 따른 전압변동(외란발생기-2)

Fig. 3-5 Voltage variation with phase shift α
(disturbance generator-2)

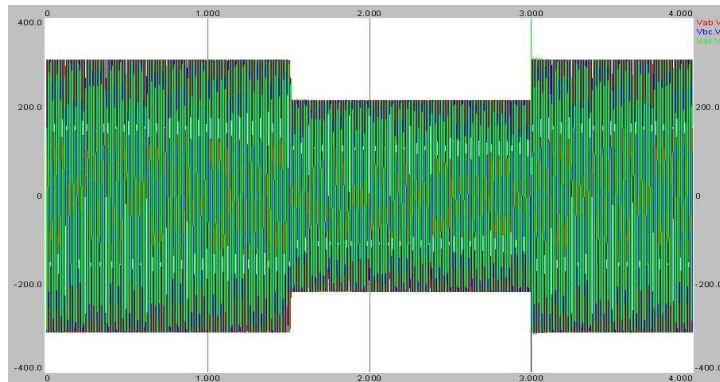
제 4 장 시뮬레이션 결과

4-1 새그, 스웰, 순간정전, 전압불평형

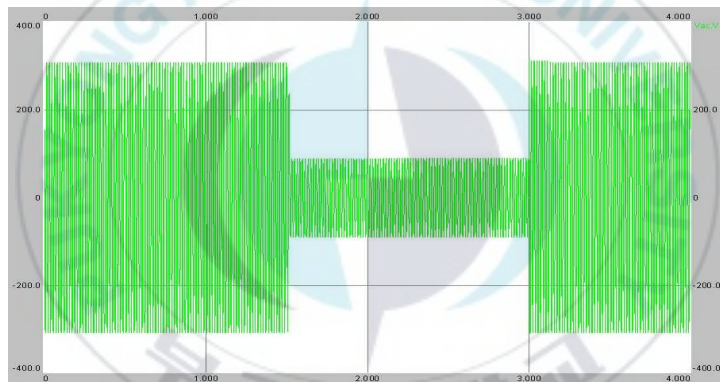
그림 2-1의 전압변동 발생기에 대한 시뮬레이션은 다음과 같은 조건에서 수행하였다.

- 입력전압 : 3상 220V, 60Hz
- 출력용량 : 10kVA
- 권선비 : 1
- 비선형 부하 : 다이오드 정류기

그림 4-1(a), (b)는 정상상태 전압에 대해 30%, 70% 새그 발생시의 출력전압을 보여주는 파형으로서 새그의 범위가 매우 넓다는 것을 알 수 있다. 그림 4-2(a), (b)는 각각 전원전압의 정상상태에서 30% 스웰이 발생한 경우와, 50% 스웰이 발생 후 정상상태로 복귀 하는 경우로서, 출력전압이 전원전압보다 증가한 것을 알 수 있다. 그림 4-3은 순간정전 발생시의 출력전압과 비선형 부하의 전압을 나타낸 파형이다. 이는 순간정전 상태 및 정전시의 성능시험을 가능하게 한다. 그림 4-4는 3상 전압불평형이 발생되는 것을 나타내는데 v_{ab} 상, v_{bc} 상과 v_{ac} 상은 각각 전원전압의 30%새그, 60%새그, 순간정전을 출력하는 경우이다.

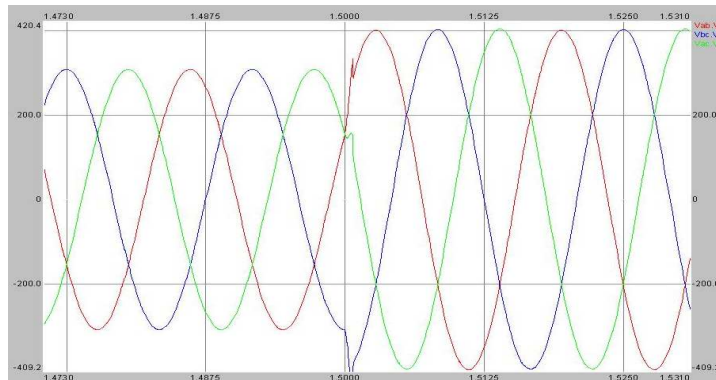


(a) 30% 새그 발생
(a) 30% Sag generation



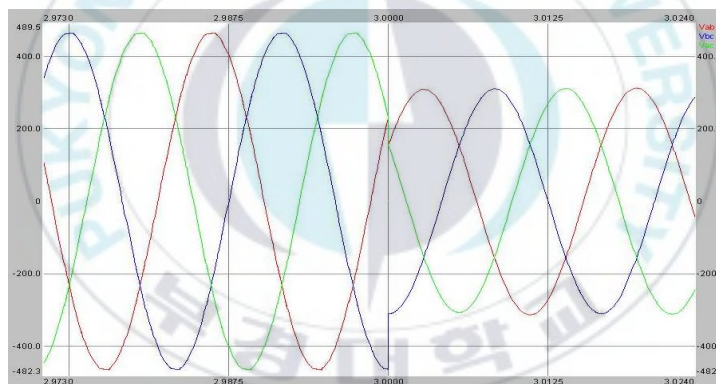
(b) 70% 새그 발생
(b) 70% Sag generation

그림 4-1 새그 발생
Fig. 4-1 Sag generation



(a) 정상상태에서 30% 스웰 발생

(a) 30% Swell generation



(b) 50% 스웰 발생 후 정상상태로 복귀

(b) 50% Swell generation

그림 4-2 스웰 발생

Fig. 4-2 Swell generation

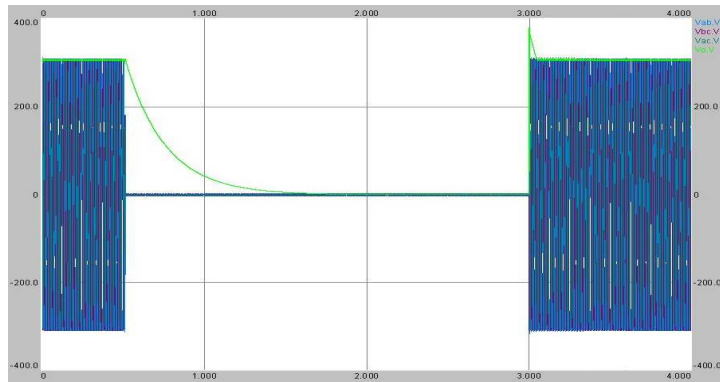
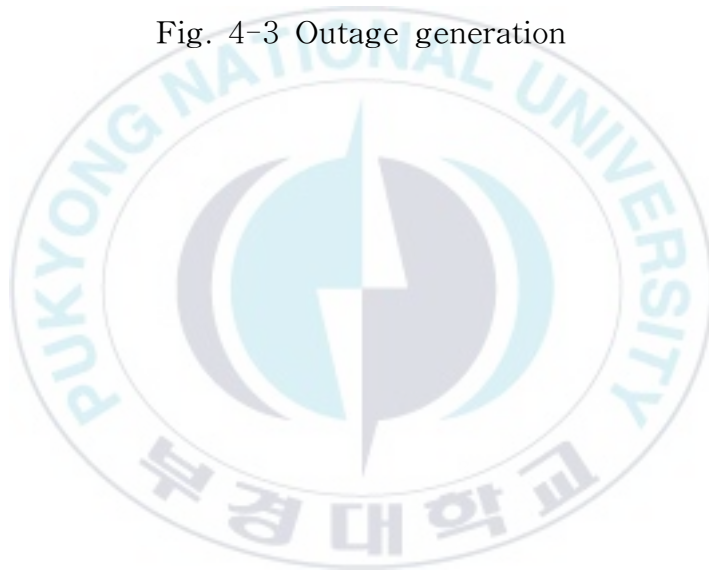


그림 4-3 순간정전 발생

Fig. 4-3 Outage generation



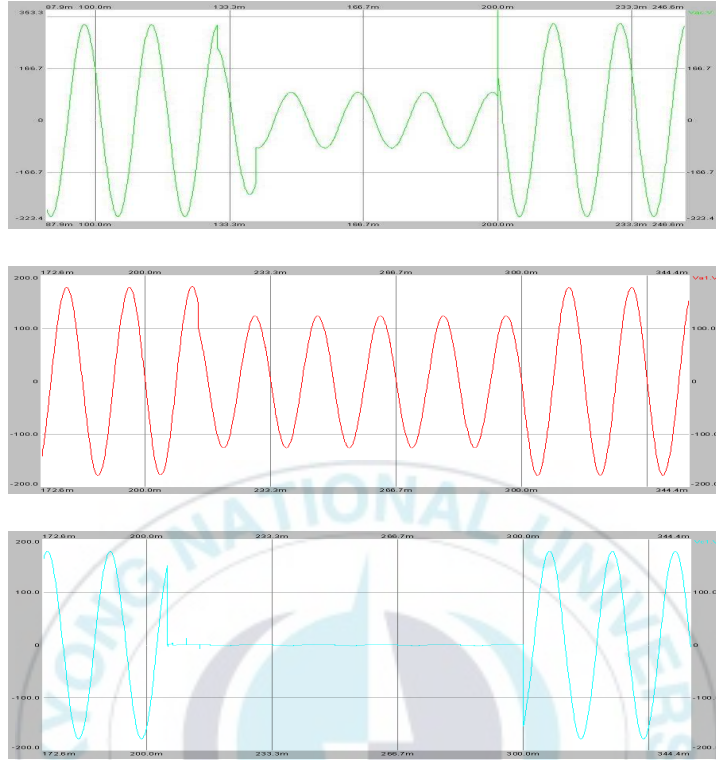


그림 4-4 전압불평형 발생시 출력전압 : (위) $v_{ab} = 30\%$, (중간) $v_{bc} = 60\%$, (아래), $v_{ca} =$ 순간정전

Fig. 4-4 Output voltage in case of unbalance : $v_{ab} = 30\%$ (top), $v_{bc} = 60\%$ (middle), $v_{ca} =$ outage (bottom))

이상의 파형을 통해서 정리해보면 전압변동 발생기의 출력전압을 전원 전압보다 크거나 작게 할 수 있으며 그 변동 범위도 광범위하게 할 수 있음을 알 수 있다.

4-2 위상급변

위상급변발생에서도 삼상의 동작원리가 동일하므로 a-상의 한상에 대한 시뮬레이션 결과를 기술한다. 그림 2-1의 회로도를 통하여 위상급변 폭을 조절하여 각각 시뮬레이션 하였다.

그림 4-5는 30도 위상급변을 나타내고 출력전압의 크기가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그림 4-6은 40도일 경우이고 30도보다는 출력전압이 다시 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그림 4-7은 60도일 경우의 결과 파형이다. 그림 4-7의 경우에는 그림 3-2에서 보는 바와 같이 전원전압의 크기와 출력전압의 크기가 같아짐을 확인할 수 있다.

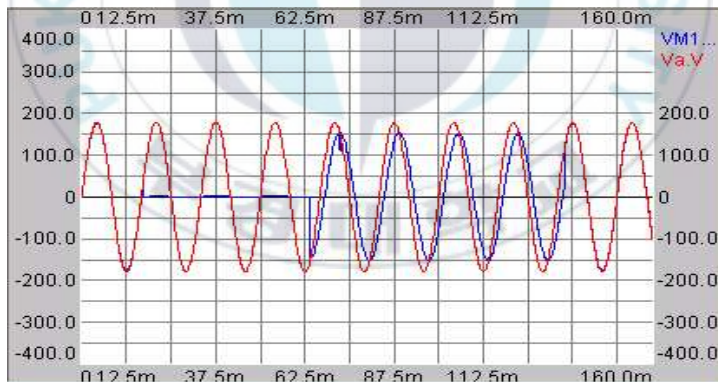


그림 4-5 30° 위상급변

Fig. 4-5 30 degree phase shift generation

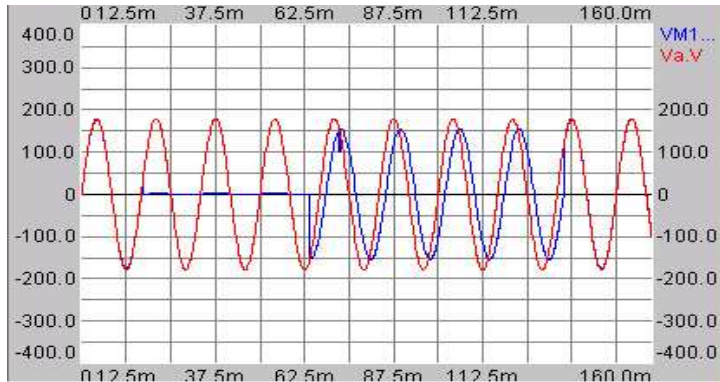


그림 4-6 40° 위상급변

Fig. 4-6 40 degree phase shift generation

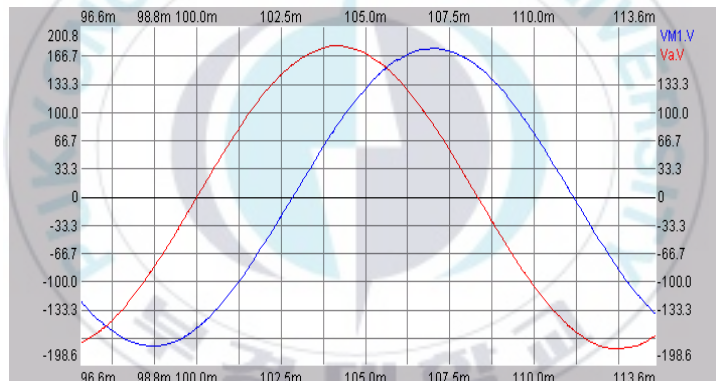


그림 4-7 60° 위상급변(확대)

Fig. 4-7 60 degree phase shift generation

4-3 전압 제어가 가능한 위상급변

그림 3-3의 회로도를 통하여 위상급변 폭과 크기를 조절하여 각각 시물레이션 하였다.

그림 4-8은 15도 위상급변을 나타내고 출력전압의 크기가 전원전압의 크기와 같아짐을 확인할 수 있다. 그림 4-9는 30도일 경우이고 역시 출력전압의 크기가 전원전압의 크기와 같아짐을 확인할 수 있다. 그림3-5에서 보는 바와 같이 전원전압의 크기와 출력전압의 크기가 같아짐을 확인할 수 있다.



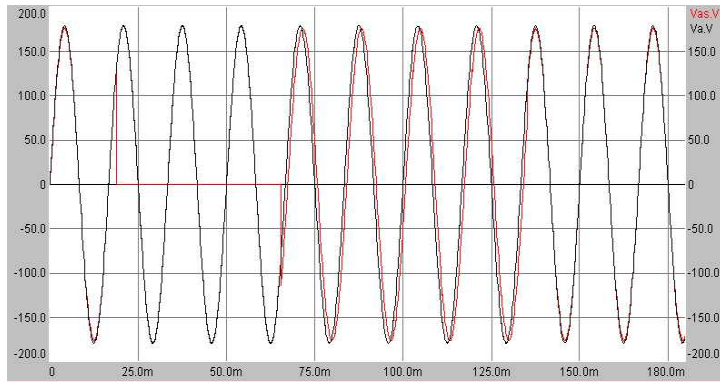


그림 4-8 전압을 제어한 15° 위상급변

Fig. 4-8 15 degree phase shift generation

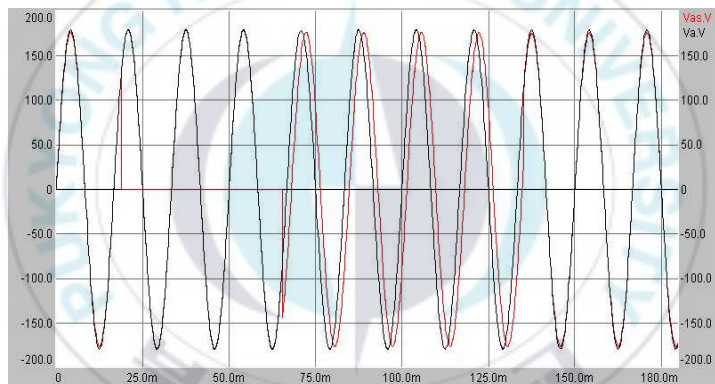


그림 4-9 전압을 제어한 30° 위상급변

Fig. 4-9 30 degree phase shift generation

제 5 장 실험 결과

실험 장치를 제작하고 시뮬레이션의 조건으로 새그, 스웰 및 순간정전발생, 위상급변을 하였다. 위상급변 실험은 그림 2-1과 그림 3-3에 대해서 각각의 경우에 대해서 실험하였다.

5-1 새그, 스웰, 순간정전, 전압불평형

그림 5-1는 30% 새그가 2회 연속 발생시 전원 선간전압과 3상 출력전압을 나타낸다. 그림 5-2는 a상의 전류를 나타낸다. 그림 5-3은 순간정전 발생시 a상 전원전압과 3상 출력전압을 나타낸다. 그림 5-4는 30% 스웰 발생시 전원의 선간전압과 3상 출력전압을 나타낸다. 그림 5-5은 다음의 조건으로 전압불평형을 발생시킨 경우를 나타낸다.

$-v_{as} : v_a$ 의 50%

$-v_{bs} : v_b$ 의 20%

$-v_{cs} : v_c$ 의 60%

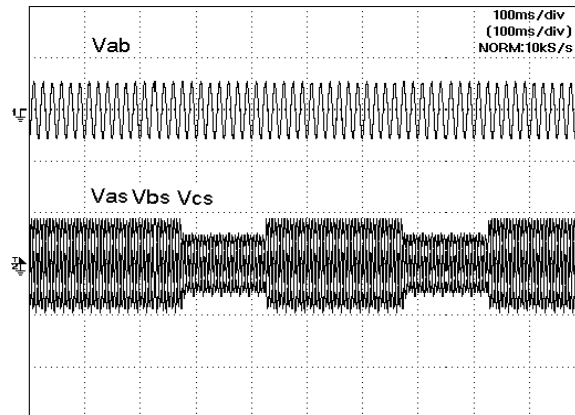


그림 5-1 30% 새그 발생시 전원 선간전압과 3상 출력전압
(200V/div., 100ms/div.)

Fig 5-1 Source voltage and 3-phase output voltage in case of
30% sag generation (200V/div., 100ms/div.)

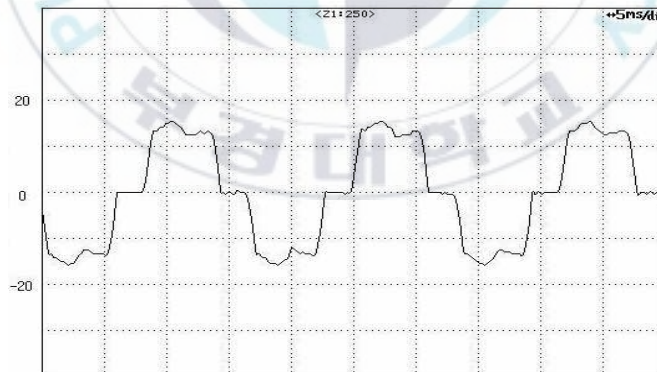


그림 5-2 30% 새그 발생시 a상 전류
(10A/div., 5ms/div.)

Fig. 5-2 a phase current in case of 30% sag generation
(10A/div., 5ms/div.)

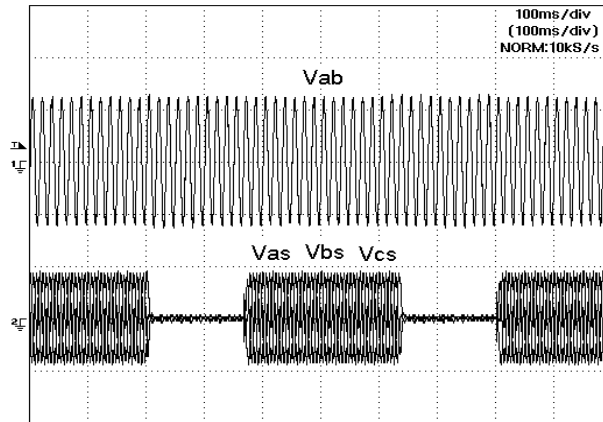


그림 5-3 순간정전 발생시 전원 선간전압과 3상 출력전압
(500v/div., 200V/div., 100ms/div.)

Fig. 5-3 Source voltage and 3-phase output voltage in case of Outage
(500v/div., 200V/div., 100ms/div.)

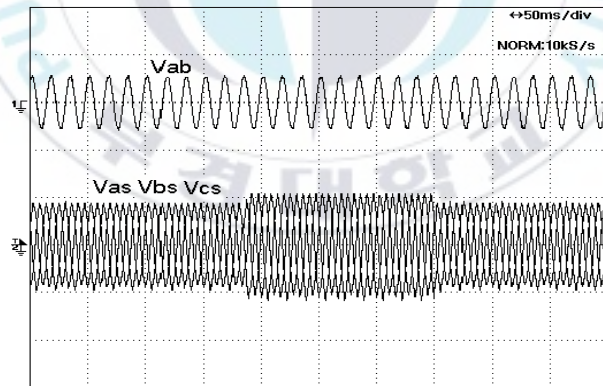


그림 5-4 30% 스웰 발생시 전원 선간전압과 3상 출력전압
(500V/div., 200V/div., 50ms/div.)

Fig. 5-4 Source voltage and 3-phase output voltage in case of
30% swell generation (500V/div., 200V/div., 50ms/div.)

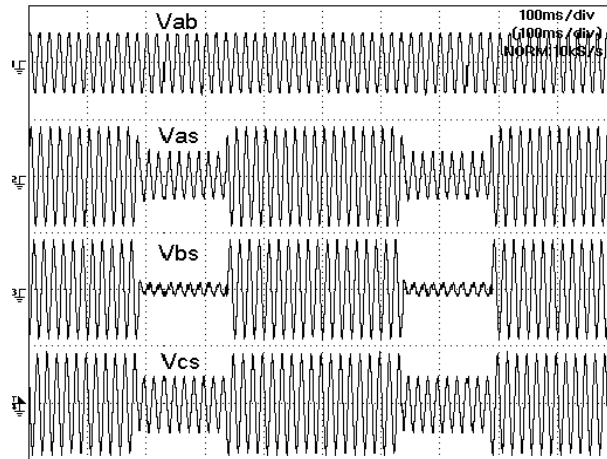


그림 5-5 전압불평형 ($v_{as} = 0.5v_a$, $v_{bs} = 0.2v_b$, $v_{cs} = 0.6v_c$)
(500V/div., 200V/div., 100ms/div.)

Fig. 5-5 Voltage unbalance ($v_{as} = 0.5v_a$, $v_{bs} = 0.2v_b$, $v_{cs} = 0.6v_c$)
(500V/div., 200V/div., 100ms/div.)

5-2 위상급변

그림 2-1의 회로도에 대하여 위상급변 폭을 조절하여 각각 실험 하였다.

그림 5-6은 30도 위상변위시 결과이다. 출력전압의 크기가 작아진 것을 확인할 수 있다. 그림 5-7은 40도 지상의 실험결과파형이고 그림 5-8은 60도 지상일경우의 실험결과파형이다. 60도의 경우 전원전압과 위상변위시 출력전압이 같다는 것을 확인할 수 있다.



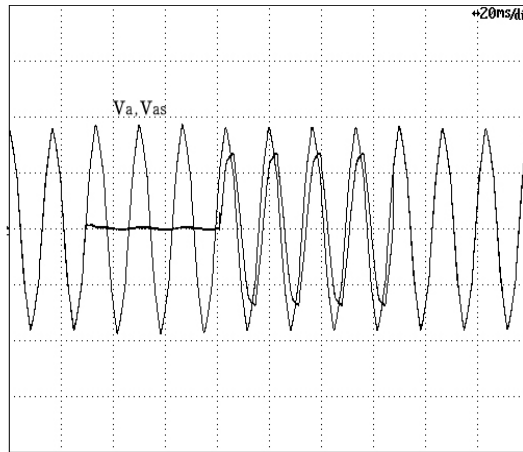


그림 5-6 30° 위상급변 (100V/div., 20ms/div.)

Fig. 5-6 30 degree phase jump generation
(100V/div., 20ms/div.)

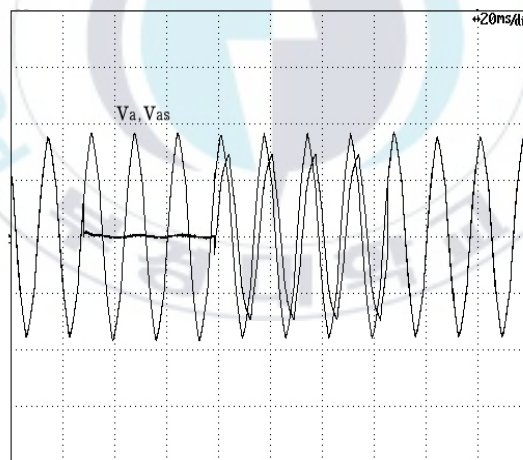


그림 5-7 40° 위상급변 (100V/div., 20ms/div.)

Fig. 5-7 40 degree phase jump generation
(100V/div., 20ms/div.)

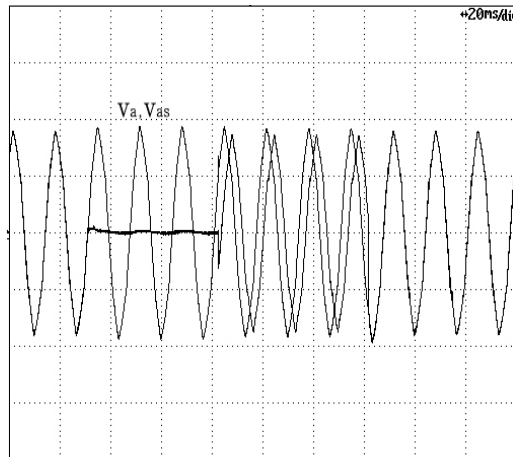


그림 5-8 60° 위상급변 (100V/div., 20ms/div.)

Fig. 5-8 60 degree phase jump generation
(100V/div., 20ms/div.)

5-3 전압 제어가 가능한 위상급변

그림 3-3의 회로도에 대하여 위상급변 폭과 크기를 조절하여 각각 실험 하였다.

그림 5-9는 30도 위상급변을 나타내고 출력전압의 크기가 전원전압의 크기와 같아짐을 확인할 수 있다. 그림 5-10은 45도일 경우이고 역시 출력전압의 크기가 전원전압의 크기와 같아짐을 확인할 수 있다. 그림3-5에서 보는 바와 같이 전원전압의 크기와 출력전압의 크기가 같아짐을 확인할 수 있다.



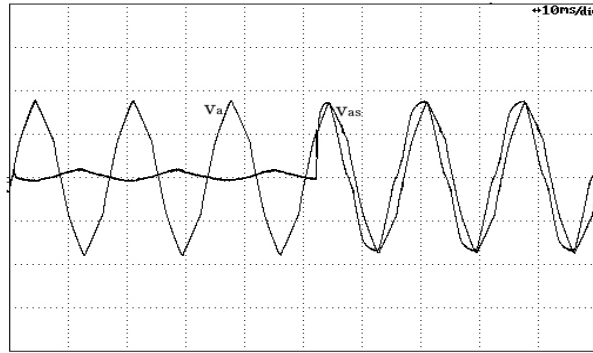


그림 5-9 전압을 제어한 30° 위상급변
 Fig. 5-9 30 degree phase shift generation

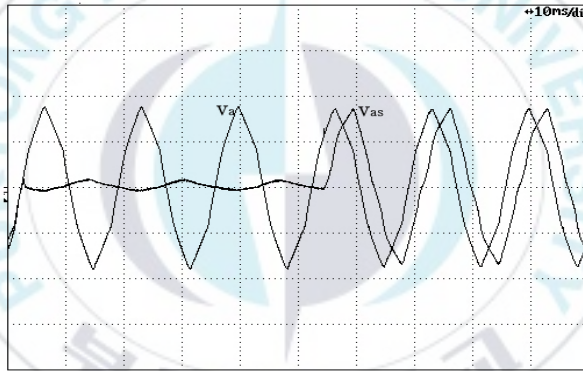


그림 5-10 전압을 제어한 45° 위상급변
 Fig. 5-10 45 degree phase shift generation

제 6 장 결 론

본 논문에서는 전력품질 개선을 위한 UPS, DVR, SSTs 등 Custom Power Devices의 성능 테스트를 위한 실용적인 전력품질 외란 발생기를 제안하였다.

제안한 방식은 선형부하 뿐만 아니라 비선형 부하에서도 새그, 스웰, 순간 정전, 전압불평형, 위상급변과 전압제어까지 가능하다는 특징이 있다. 제안한 방식으로 비선형 부하인 다이오드정류기를 부하로 사용하여 새그 30% 및 70% 발생과 스웰 30% 및 50% 발생, 그리고 정상상태로 복귀시 모드로 나누어 시뮬레이션하였고, 새그와 스웰을 각각 30% 발생시켜 실험하였다. 순간정전 그리고 전압불평형에 대해서도 각각 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 전압불평형 시뮬레이션에서 선간전압에 대해서도 v_{ab} 는 새그 70%, v_{bc} 는 새그 40%, v_{ac} 는 순간정전을 발생시키는 경우를 다루었으며, 실험 v_{as} 는 새그 50%, v_{bs} 는 새그 80%, v_{cs} 는 새그 40%를 발생시켰다. 위상급변은 30°, 40°, 60°의 경우에 대하여 시뮬레이션과 실험을 하였으며 그림 3-2와 같이 출력전압의 크기가 변화하는 것을 볼 수 있다. 또 SCR과 슬라이닥스를 추가함으로써 위상급변시 출력전압의 크기를 일정하게 제어할 수 있다는 것을 위상급변 15°, 30°의 시뮬레이션과 30°, 45°의 실험을 통하여 입증하였다. 특히 비선형 부하에서도 전압 변동을 발생시킬 수 있도록 하기위해서 SCR스위치의 커뮤테이션 구간을 전압변동 발생시와 복귀시로 나누어 분석함으로써 그 타당성을 확인하였다.

제안한 방식의 장단점을 정리하면 다음과 같다.

- 기존의 저항을 이용한 방식에 비해 비용은 다소 상승하지만 새그 설정값이 거의 일정하고, 순간정전 발생이 용이하며 스웰도 쉽게 발생할 수 있다.
- 자연 소호 방식의 SCR 사이리스터를 사용함으로써 신뢰도가 높고 스위칭 손실이 없어 효율을 극대화 할 수 있다.
- 시스템을 구성하는 요소가 변압기와 자연소호 방식의 SCR 사이리스터로 구성되어 있어서, 고주파 스위칭 소자에 의존하는 기존 방식에 비해 신뢰도를 극대화 하였다.
- 한 주기 동안 새그나 스웰, 위상급변의 발생 및 정상상태로의 복귀를 임의의 시점에서 항상 할 수는 없고 특정 조건에서만 가능하다는 제약사항이 있으나, 이것은 제어상에서 고려되어야 할 사항이며 전력품질 외란 발생기의 성능에는 전혀 지장을 주지 않는다.
- 제안한 방식에서의 SCR 사이리스터 반도체 소자는 강제 스위칭이 없으므로 방열판을 포함한 스택의 크기를 최소화 할 수 있다.

전력품질 개선을 위한 Custom Power Device들은 그 중요성에 힘입어 성능 향상 및 새로운 토폴로지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으므로 본 논문에서 제안한 전력품질 외란 발생기는 그 활용도가 매우 클 것으로 기대된다. 특히 실험실 레벨에서 저비용으로 전력품질 외란을 발생시키고자 하는 시스템 구현에 크게 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] R. S. Weissbash, G. G. Karady, and 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, April 2001, pp. 265-270.
- [2] R. G. Lawrence, K. L. Craven, and G. D. Nichols, "Flywheel UPS," IEEE IA Magazine, May/June, 2003, pp. 44-50.
- [3] A. Ghosh and G. Ledwich, "Compensation of distribution system voltage using DVR," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, 2002, Oct, pp. 1030-1036.
- [4] M. C. Jiang, "Analysis and design of a three-phase active power filter," IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 37, No. 3, 2001, pp. 824-831.
- [5] 최재호, "전력품질 장애와 대책," 전력전자학회지 5권 1호, 2000, pp. 13-18.
- [6] W. E. Brumsickle, R. S. Schneider, G. A. Luckjiff, D. M. Divan, M. F. McGranaghan, "Dynamic sag correctors: cost-effective industrial power line conditioning," IEEE Trans. on Ind. Appl. vol. 37, No. 1, 2001, pp. 212-217.
- [7] C. J. Melhorn, T. D. Davis and G. E. Beam, "Voltage sags: Their

- impact on the utility and industrial customer,” IEEE Trans. Ind. Applications, vol 34, May/June 1998, pp. 549-558.
- [8] 이승요, 최규하, “배전계통에서의 전압 변동의 원인 및 대책,” 전력전자학 회지 5권 1호, 2000, pp. 13-18.
- [9] S. A. O. Silva, P. F. Donoso-Garcia, P. C. Cortizo and P. F. Seixas, “A three-phase line interactive UPS system implementation with series-parallel active power-line conditioning capabilities,” IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 38, No. 6, 2002, Nov./Dec, pp. 1581-1590.
- [10] M. C. Jiang, “Analysis and design of a three-phase active power filter,” IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 37, No. 3, 2001, pp. 824-831.
- [11] A. Ghosh and G. Ledwich, “Compensation of distribution system voltage using DVR,” IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, 2002, Oct, pp. 1030-1036.
- [12] Z. Luowei and L. Zicheng, “A novel active power filter based on the least compensation current control method,” IEEE Trans. on PE, Vol. 15, No. 4, 2000, pp. 655-659.
- [13] A. Campos, G. Joos, P. Ziogas and J. Lindsay, “Analysis and design of a series Voltage Compensator for Three-Phase Unbalanced Sources,” IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.

- 39, No. 2, Apr. 1992, pp. 159-167.
- [14] F. Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae, "A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems-A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters," IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 26, No. 6, Nov. 1990, pp. 983-990.
- [15] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, and H. W. Beaty, Electrical Power Systems Quality, First Edition, McGraw-Hill, 1996.
- [16] A. Ghosh and G. Ledwich, Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices, First Edition, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [17] Power Standards Lab. "Industrial Power Corruptors-standard power quality disturbance generators," 2003.
- [18] Elgar electronics Co., "Smart wave Switching amplifier operation manual," 2002.
- [19] Y. H. Chung, G. H. Kwon, T. B. Park, and G. Y. Lim, "Voltage Sag and Swell generator with thyristor controlled rectifier," IEEE Power Con 2002, Vol. 3, 2002, pp. 1933-1937.
- [20] 김중원, 이기수, 변우열, 노의철, 김인동, 전태원, 김홍근 "3상 다이내믹 UPS의 성능 시험을 위한 Sag-Swell 발생기," 한국조명·전기설비학회 부산·울산·경남지회 춘계학술회 발표회 논문집 2004년 4월 16일, pp. 47-50.

- [21] 김중원, 이기수, 변우열, 노의철, 김인동, 전태원, 김홍근 “다이나믹 UPS의 성능 시험을 위한 전력품질 외란 발생기,” 대한전기학회 합동 춘계학술대회 논문집 2004년 5월 28일, pp.5-9.
- [22] 김중원, 이기수, 변우열, 노의철, 김인동, 전태원, 김홍근 “플라이휠 저장 에너지 UPS의 성능 시험을 위한 순간정전 및 전압불평형 발생기,” 전력전자학술대회 논문집II, 2004. 7.12~7.15, pp. 570-574.
- [23] J. W. Kim, K. S. Lee, E. C. Nho, I. D. Kim T .W, Chun H. G. Kim ,S. S. Lee “3-Phase Voltage Disturbance Generator for the Performance Test of A Flywheel Energy Storage UPS,” 2004 International Conference on Power Electronics II, 2004. 10.18~10.22, pp. 222-225
- [24] 변우열, 김중원, 이기수, 노의철, 김인동, 전태원, 김홍근, “다이나믹 UPS 시스템의 전력품질 외란발생을 위한 전압 Sag-Swell 발생기,” 전력전자학회 논문지 Vol. 10, No. 1, 2005, pp. 102-107
- [25] 변우열, 노의철, 김인동, 최남섭, 정규범, “단상 무정전 전원공급장치의 성능시험을 위한 전압변동 발생기,” 한국해양정보통신학회 논문지 Vol. 9, No. 1, 2005, pp. 146-151
- [26] 이병철, 최성훈, 팽성환, 노의철, 김인동, 전태원, 김홍근, “위상 급변 기능이 있는 전력품질 외란 발생기,” 전력전자학회 추계학술대회 논문집 2004, pp. 96-100
- [27] 박성대, 노의철, 김인동, 전태원, 김홍근, “전력품질 개선장치의 성능시험

- 을 위한 3상 전압변동 발생기의 동작특성 분석,” 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, 2006, pp. 244-246
- [28] 박성대, 이병철, 노의철, 김인동, 전태원, 김홍근, “비선형부하특성을 갖는 전력품질 개선장치의 성능시험을 위한 전압변동발생기,” 대한전기학회 제 37회 하계학술대회 논문집 B부문, 2006, pp. 935-936
- [29] Texas Instruments, *TMS320F28xDSP Peripherals Reference Guide*, 2002.
- [30] Texas Instruments, *TMS320F28xDSP CPU and Instruction Set Reference Guide*, 2002.
- [31] E. C. Nho, I. D. Kim, S. D. Park, N. S. Choi, T. W. Chun, H. G. Kim, "3-Phase Voltage Disturbance Generrator for the Custom Power Device with Nonlinear Load," The 2006 International Conference on Electrical Machines and Systems November 20-23, 2006, Nagasaki, Japan.
- [32] 박성대, 한홍수, 노의철, 김인동, 최남섭, 전태원, 김홍근, “비선형 부하에 대하여 위상급변이 가능한 전압변동 발생기,” 전력전자학회 추계학술대회 논문집, 2006, pp. 75-77

감사의 글

2년이라는 대학원생활을 마무리 하는 시점에서 지난 세월을 되돌아보니 감회가 새롭습니다. 학부시절 전력전자공학을 수강하면서 노의철 교수님을 깊이 알게 되어 대학원에 진학하게 되었으며 어느덧 2년이라는 세월이 흘러 이제 학위논문을 발표하고 나니 가슴 뿌듯한 성취감을 느낍니다. 대학원 과정은 저 자신을 학문적으로나 인격적으로 더욱 성숙하게 해 준 소중한 시간이었습니다. 항상 저희들에게 모범을 보이시고 아낌없는 애정과 가르침으로 이끌어 주신 노의철 교수님과 김인동 교수님께 고개 숙여 감사드립니다. 두 분 교수님께 가르침을 받은 것이 저에게는 어떤 무엇보다 커다란 기쁨이었고, 기대에 어긋나지 않는 사람이 되도록 부단히 노력하겠습니다. 그리고 바쁘신 와중에도 저의 학위논문을 심사해 주시면서 많은 조언과 격려를 해 주신 장윤석 교수님께 진심으로 감사드리고 아울러 학과를 위해 많은 노력과 학문적 지도를 해주신 전기공학과 교수님들께 깊이 감사드립니다.

전력전자 실험실에서 부족한 저를 아낌없는 관심과 배려로 지도해 주신 이병철, 팽성환, 최성훈 선배님들, 항상 틈만 나면 실험실을 찾아와 좋은 말씀을 해 주신 실험실 출신 선배님들에게 감사드리고 실험실에서 항상 묵묵히 자기 맡은바 일을 성실히 하며 기쁜 일 슬픈 일을 함께 나누면서 가족처럼 지낸 후배 이영호, 최진혁, 민병호, 김형운 학형에게 감사드립니다.

2년이라는 시간동안 함께 동고동락하며 지낸 대학원생 김기영, 정승환, 강형경, 김영규, 배수열, 김대권 학형에게 감사드리고 학과동기인 김동우, 김경료, 방기영 학형에게 감사드립니다. 또 학과사무실에서 크고 작은 많은 일들을 도와준 강경숙, 박정민 조교님에게도 감사의 말을 전합니다.

항상 저의 옆에서 힘들고 어려운 일 있을 때 함께 했던 손기용, 권봉성, 윤주현, 이영훈, 고종민, 박진형, 유상훈, 친구들에게 감사의 말을 전합니다. 그리고 힘들 때

쉬어갈 수 있는 쉼터가 되어준 용마 기우회 선배님, 후배님들에게 감사드리고 옆에서 많은 힘이 되어주고 따뜻한 격려를 아끼지 않은 서지영 양에게 감사드립니다.

무엇보다도 저를 믿고 말없이 따뜻한 마음으로 저의 뜻을 이해해 주신 아버님, 항상 걱정하시면서 사랑으로 감싸 주신 어머님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 옆에서 많은 힘과 격려를 아낌없이 보내 준 형, 밝은 모습으로 나에게 힘과 용기를 준 동생에게 감사의 말을 전합니다. 끝으로 일일이 거명할 수는 없지만 저를 믿고 도와주신 모든 분들에게 감사드립니다.

