

工學碩士學位論文

위상급변 기능이 있는 전력품질 개선장치
시험용 전압변동 발생기

2006年 2月

釜慶大學校 大學院

電氣工學科

李 炳 哲

工學碩士學位論文

위상급변 기능이 있는 전력품질 개선장치
시험용 전압변동 발생기

指導教授 魯義哲

이 論文을 工學碩士學位論文으로 提出함.

2006年 2月

釜慶大學校 大學院

電氣工學科

李炳哲

李炳哲의 工學碩士 學位論文을 認准함.

2006年 2月

主 員 工學博士 金 千 德 (印)

委 員 工學博士 金 榮 學 (印)

委 員 工學博士 金 仁 東 (印)

목 차

표 목 차	iii
그림 목차	iv
Abstract	viii
제 1 장 서 론	1
제 2 장 제안한 방식의 회로	8
2-1 제안한 전력품질 외란발생기의 회로구성	8
2-2 커뮤니티션 허용구간 분석	10
2-2-1 전압변동 발생시 허용구간	11
2-2-2 정상상태 복귀시 허용구간	12
2-2-3 순간정전 후 위상급변시 허용구간	13
제 3 장 전력품질 외란 발생기의 동작원리	16
3-1 새그, 스웰, 순간정전 발생원리	16
3-2 전압불평형 발생원리	18
3-3 위상급변 발생원리	19

제 4 장	시뮬레이션 결과	22
4-1	새그, 스웰, 순간정전, 전압불평형	22
4-2	위상급변	28
제 5 장	실험 결과	33
5-1	새그, 스웰, 순간정전, 전압불평형	33
5-1-1	지상역률부하	33
5-1-2	단위역률부하	36
5-2	위상급변	39
5-2-1	지상역률부하	39
5-2-2	단위역률부하	45
제 6 장	결론	52
참고문헌		55
APPENDIX		60
A.	SCR 스위치와 변압기 및 슬라이다스의 결선도	60
B.	DSP 제어보드	61
C.	제어보드의 상세 회로	65

표 목 차

표 2-1 전압변동에 따른 스위치 상태와 T-접점위치	10
표 B-1 DSP 제어기(TMS320F2812) 사양	64

그림 목차

그림 1-1 기존 방식의 전력품질 외란 발생기	5
그림 1-2 전력품질 외란 발생기의 접속	6
그림 2-1 전력품질 외란발생기	9
그림 2-2 전압변동 발생시 접속도	11
그림 2-3 전압변동 발생시 스위칭 상태	14
그림 2-4 정상상태로 복귀시 스위칭 상태	14
그림 2-5 순간정전 발생후 위상급변시 스위칭 상태	15
그림 3-1 각 상전압 벡터도	21
그림 3-2 위상변위 α 에 따른 전압변동	21
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) $v_{as} = 100\%$ (중간) $v_{bs} = 80\%$, (아래) $v_{cs} = 50\%$	27
그림 4-5 10° 위상급변(지상)	28
그림 4-6 30° 위상급변(지상)	29
그림 4-7 40° 위상급변(지상)	29
그림 4-8 60° 위상급변(지상)	30

그림 4-9 45° 위상급변(진상)	31
그림 4-10 15° 위상급변(진상)	32
그림 5-1 30% 새그 발생시 전원 선간전압과 3상 출력전압	34
그림 5-2 50% 새그 발생시 a상 전원전압과 a, b상 출력전압 및 a상 전류	34
그림 5-3 순간정전 발생시 a상 전원전압과 3상 출력전압	35
그림 5-4 30% 스웰 발생시 전원 선간전압과 3상 출력전압	35
그림 5-5 전압불평형 ($v_{as} = 0.5v_a$, $v_{bs} = 0.3v_b$, $v_{cs} = 0.6v_c$)	36
그림 5-6 50% 새그 발생시 전원 선간전압, 출력전압, a상 전류	37
그림 5-7 순간정전 발생시 전원 선간전압, 출력전압 및 a상 전류	37
그림 5-8 30% 스웰 발생시 전원 선간전압, 출력전압 및 a상 전류	38
그림 5-9 전압불평형 ($v_{as} = 0.5v_a$, $v_{bs} = 0.2v_b$, $v_{cs} = 0.6v_c$)	38
그림 5-10 10° 위상급변(지상)	39
그림 5-11 30° 위상급변(지상)	40
그림 5-12 40° 위상급변(지상)	40
그림 5-13 60° 위상급변(지상)	41
그림 5-14 15° 위상급변(진상)	42

그림 5-15 30° 위상급변(진상)	42
그림 5-16 45° 위상급변(진상)	43
그림 5-17 60° 위상급변(진상)	43
그림 5-18 60° 위상급변구간 확대	44
그림 5-19 30° 위상급변구간 확대	44
그림 5-20 10° 위상급변(지상)	46
그림 5-21 30° 위상급변(지상)	46
그림 5-22 40° 위상급변(지상)	47
그림 5-23 60° 위상급변(지상)	47
그림 5-24 15° 위상급변(진상)	48
그림 5-25 30° 위상급변(진상)	49
그림 5-26 45° 위상급변(진상)	49
그림 5-27 60° 위상급변(진상)	50
그림 5-28 30°, 60° 위상급변구간 확대(지상)	50
그림 5-29 30°, 60° 위상급변구간 확대(진상)	51
그림 A-1 변압기 점점 결선도	60
그림 B-1 DSP의 내부구성	61
그림 B-2 DSP 인터페이스	63
그림 C-1 AC 입력전압 (v_d) 측정회로	65
그림 C-2 AC 입력전류 (i_d) 측정회로	66

그림 C-3 Relay 구동회로	67
그림 C-4 SPI를 이용한 DAC 출력회로	67
그림 C-5 SCR 구동회로	68

A voltage disturbance generator with phase jump for the test of power quality improving devices

Byung-Chul Lee

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

Abstract

In this paper a new voltage disturbance generator with phase jump function is proposed.

Power quality disturbances such as voltage sag and swell, outage, voltage unbalance, over and under voltage, periodic voltage notching, and harmonic distortion happen frequently with the increase of industry application. The voltage sags are power system events that present a temporary decrease in the rms voltage magnitude in one or more phases. Voltage sags are caused by a short duration increase in current somewhere in the system for instance, during faults, motor starting and power transformer engineering. Equipment used in modern industrial plants (process controllers, programmable logic controllers, adjustable speed drives, robotics, etc.) is actually becoming more sensitive to voltage sags as the complexity of the equipment increase. Even relays and contactors in motor starting mode can be sensitive to voltage sags, resulting in shut

down of a process when they drop out. To reduce the power quality disturbances custom power devices such as dynamic uninterruptible power supply, dynamic voltage restorer, distribution static compensator, dynamic sag correctors have been proposed. To test the performance of these devices power quality disturbance generator is necessary. Usually the conventional generators are too expensive to use in general purpose.

The proposed generator can provide phase jump as well as voltage sag, swell, outage, and unbalance conditions. The generator has good features such as cost effective hardware setup, simplified structure, high reliability and efficiency, no switching losses, and easy control. Operating principle and characteristics are described and analysed. The usefulness of the proposed voltage disturbance generator is verified through simulation and experimental results.

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), 주기적인 전압노치(periodic voltage notching) 등의 전력품질 외란은 지속적으로 증가하고 있다[1-5]. 이러한 외란이 발생하는 원인에는 여러 가지가 있으나 주로 전력계통의 고장, 낙뢰, 지락사고, 대형 부하나 커패시터 뱅크의 투입 및 차단, 전력변환장치 사용 등을 들 수 있다. 이 중에서 특히 산업현장에서는 전력계통의 사고에 의한 순간정전과 새그에 대한 관심이 고조되고 있다.

공급전원에 이상이 발생하면 전원에 연결되어 있는 장비들이 오동작하거나 동작이 정지되어 종종 시스템의 안전을 저해하고 생산라인을 정지시키는 결과를 초래하기도 한다. 공급전원이 허용범위를 벗어났을 경우 오동작 또는 동작이 정지되는 특성이 있어 일반적으로 전원전압의 품질에 민감한 부하로 분류되는 것들로서 스위칭 전원장치, 제어용 릴레이와 접촉기, 마이크로프로세서, 솔레노이드, Programmable Logic Controller, 가변속 전동기구동기, SCR 위상제어정류기 등을 들 수 있다. 그런데 이들 기기들은 대부분 자동화 시스템의 주요 부품들로 사용되고 있다는 것이 문제를 더욱 심각하게 만든다. 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, 공기

청정도, 화재 및 유독가스 검출 등 정밀제어를 요하는 안전장치들로 구성된다. 이러한 정밀 자동화 장치들을 위한 전력공급에 순간적인 이상이라도 발생하게 된다면 생산공정의 정지, 불량품 발생, 공정환경 오염 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 생산공정의 일시 중단후 재가동을 위한 비용손실은 약 5-10억원 정도로 알려져 있다. 또한 미국의 경우만 하더라도 새그와 순간정전에 의해 자동화 공정라인에서 발생하는 경제적 손실이 매년 수백억 달러에 달한다는 조사보고서가 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]. 근래에는 인터넷 데이터 센터(Internet Data Center)를 포함하는 다양한 첨단 사업장이 꾸준히 증가함에 따라 이에 부응하기 위한 최적의 전력품질 개선장치에 대한 연구의 필요성이 급증하고 있다.

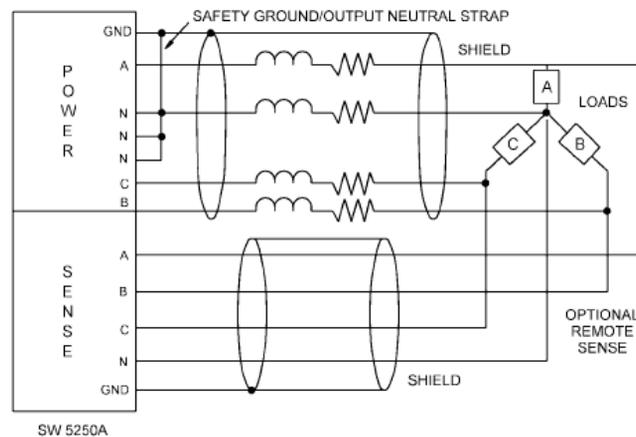
그런데 이러한 전력품질 개선장치들의 성능을 테스트하기 위해서는 새그, 스웰, 순간정전, 전압불평형, 정전발생후 위상급변 등의 전원변동을 임의로 발생시켜 줄 수 있는 장치가 반드시 필요한데 기존의 장치는 너무 고가이므로 대

규모 연구소가 아니면 활용하기가 용이하지 않다. 따라서 본 논문에서는 소규모 연구소나 학계에서 손쉽게 활용할 수 있는 새로운 방식의 전력품질 외란 발생기를 저렴한 비용으로 구성할 수 있도록 제안한다.

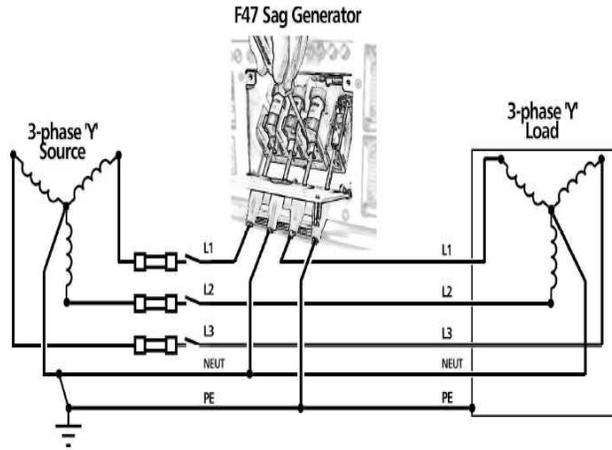
그림 1-1(a)는 Elgar사의 전력품질 외란 발생기(SW5250A)로서 새그, 스웰, 순간정전, 위상 변이, 고조파 발생, 서지 및 스파크 등의 발생기능을 갖추고 있으나 가격이 상당히 고가이며 효율은 약 70% 정도이다[17-18]. 그림 1-1(b)는 PSL사의 전력품질 외란 발생기(F47)로서 SW5250A보다 정밀도가 떨어지고 주로 새그, 스웰 및 순간정전 기능 위주로 되어 있다. 그림 1-1(c)는 제안된 전력품질외란발생기의 예로서 간단한구조와 고신뢰도를 갖는 전력품질외란 발생기의 구조이다. 하지만 위상급변기능이 없다는 단점을 가지고 있다. 이러한 기존의 전력품질외란발생기의 문제점을 해결하고 대용량에 적용 가능한 경제적이면서 실용적인 전력품질 외란 발생기를 구현하기 위한 목적으로 최근에 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. TCR은 주로 전력계통의 전압변동을 안정화하거나, 역률개선을 위한 무효전력 보상기로 활용되므로 근본적으로 무효전력을 없앨 수가 없다.

가령, 50%의 새그를 발생시키려면 TCR의 순환전류를 정격전류의 2.17배 까지 흘려주어야 한다는 문제가 있다. 또한 12-펄스 TCR의 불연속 전류에 의한 11차, 13차 고조파 발생을 흡수하기 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].

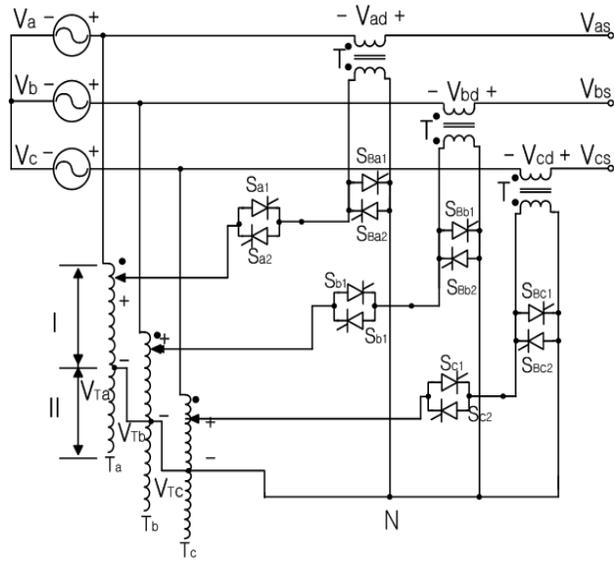
본 논문에서는 경제적이며, 구조가 간단하고, 효율이 높고, 신뢰도가 높은 위상급변기능이 있는 전압변동 발생장치를 제안하였으며 제안한 발생기의 주요 특징과 내용은 다음과 같다.



(a)Elgar사의 전력품질 외란발생기 (SW5250A)



(b) PSL사의 전력품질 외란발생기(F47)



(c) 전력품질외란발생기

그림 1-1 기존 방식의 전력품질 외란발생기

Fig. 1-1 Conventional power quality disturbance generator

그림 1-2는 제안한 방식의 전력품질 외란 발생기의 설치 및 제어에 관한 것으로 성능시험을 하고자 하는 전력품질 개선장치와 전원단 사이에 삽입하여 정상전원으로부터 외란이 발생된 전원을 공급할 수 있도록 한다. 직렬변압기, SCR 사이리스터, 미끄럼방식 단권변압기를 포함하는 시스템설계를 하였다. 동작원리 해석에서는 정상상태와 전압이상 상태 간의 모드 전환시 필요한 SCR 사이리스터의 스위칭 조건을 분석하여 스위칭이 가능한 구역과 불가능한 구역을 구분하였으며, 부하역률에 무관하게 항상 원하는 전압외란을 발생시킬 수 있는 조건을 설정하였다. 제안한 방식의 전력품질 외란 발생기로 새그, 스웰, 순간정전, 과전압, 저전압, 전압불평형, 위상급변이 가능하도록 하였다,

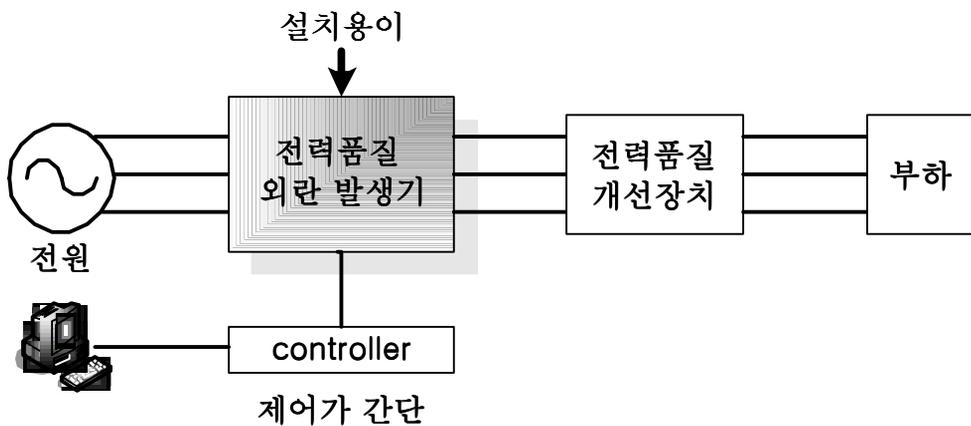


그림 1-2 전력품질 외란 발생기의 접속

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

본 논문의 구성은 2장에서 제안한 방식의 회로 구성과 커뮤테이션 구간에 대해 기술하고 3장에서는 제안한 방식의 원리 4장에서는 제안한 방식의 회로에 대한 시뮬레이션 결과에 대해서 살펴보고 5장에서는 실험을 통해 그 타당성을 입증하였다. 부록에서는 제안한 전력품질 외란 발생기를 제어하기 위한 DSP 제어보드의 각 부분 회로를 상세히 나타내었으며, 아날로그 입력전압과 전류 검출부, 디지털 출력 및 릴레이 구동부, SPI를 이용한 DAC 회로부, SCR 구동부 등을 포함한다.

제 2 장 제안한 방식의 회로

2-1 제안한 전력품질 외란발생기의 회로구성

그림 2-1은 제안한 방식의 회로를 나타낸다. 그림 2-1의 회로 구성은 새로운 방식의 전력품질외란발생기로서 위상급변기능을 위하여 각상에 SCR스위치를 추가하여 정전발생후 위상급변이 가능하도록 하였다. 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 하였다. 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. 이러한 기본 개념을 전력품질 외란 발생기에 적용하여 시스템 구성을 하였으며 각 경우에 대한 동작원리 해석과 시뮬레이션을 수행하였다. 표 2-1은 새그, 스웰, 순간정전, 위상급변에

따른 스위치의 상태와 슬라이닥스의 접점의 위치를 나타내고 있다. 각상은 동일하므로 a상에 대해서만 기술하였다.

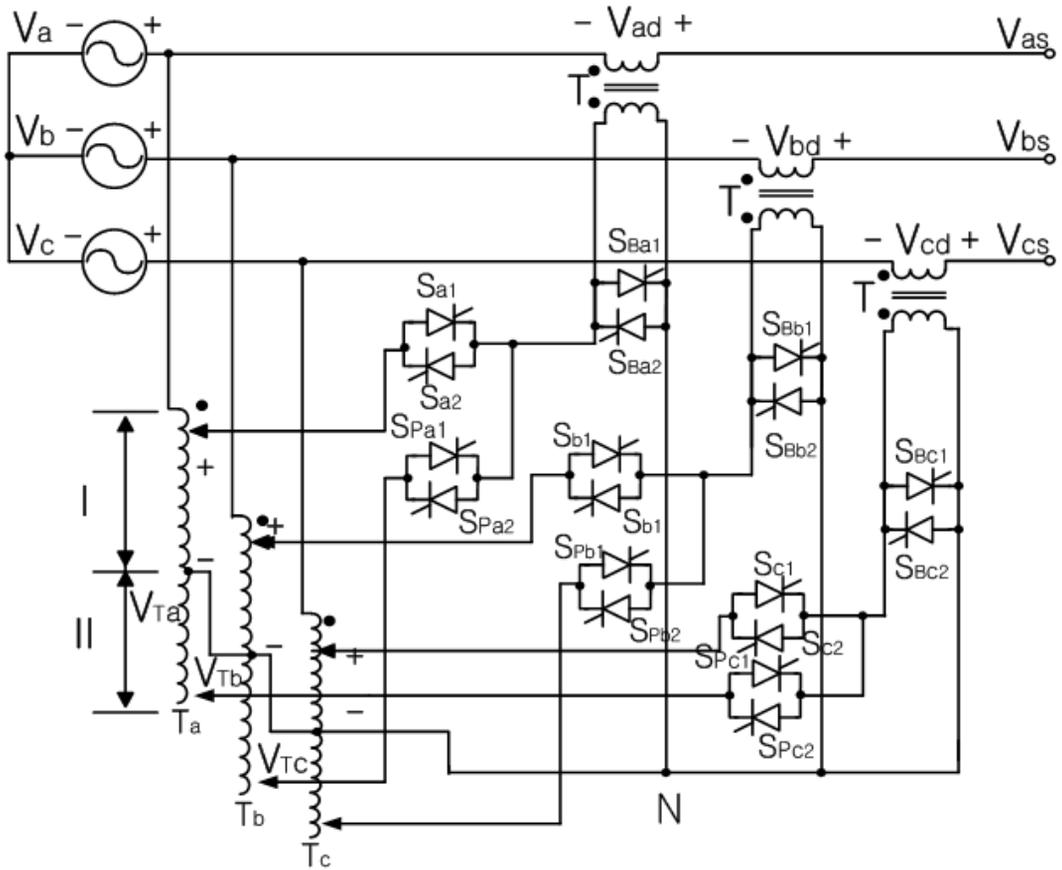


그림 2-1 전력품질 외란발생기

Fig. 2-1 Power quality disturbance generator

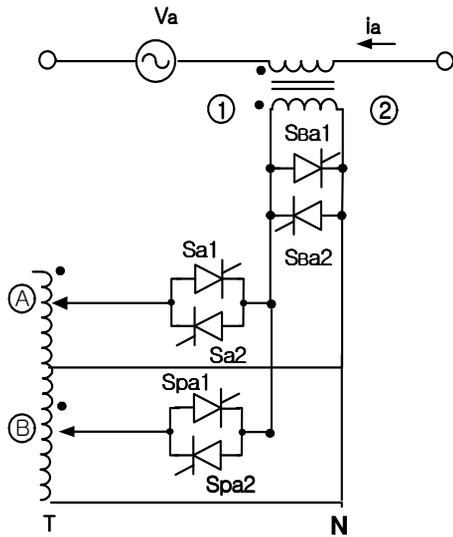
표2-1 전압 변동에 따른 스위치 상태와 T-접점위치
(a상의 경우)

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

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	

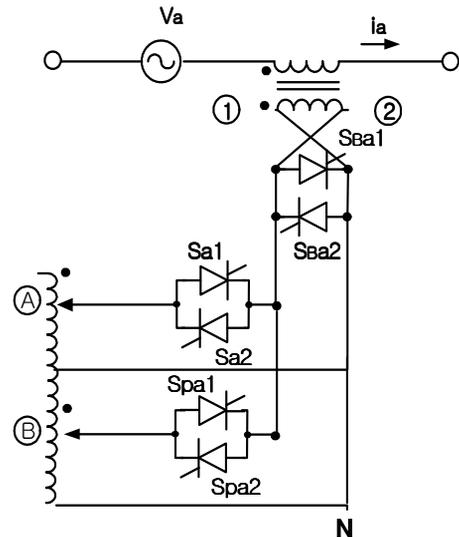
2-2 커뮤테이션 허용구간 분석

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 해주게 된다. a상에 c상을 더해주면 위상이 전원전압보다 앞서게 되고 b상을 더해주면 뒤지게 된다. 그림 2-2에서 첨자 a는 3상인 경우도 고려하여 a상을 예로들어 나타낸 것을 의미한다.



(a) 새그, 순간정전 발생시

(a) Connection diagram for sag and outage



(b) 스웰, 위상급변 발생시

(b) Connection diagram for swell and phase jump

그림 2-2 전압변동 발생시 접속도

Fig. 2-2 Connection diagram for voltage disturbance

2-2-1 전압변동 발생시 허용구간

먼저 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 서로 다른 구간에서만 가능하며 극성이 동일한 구간에서는 전류가 불가능하다. 그림 2-3에서 v_a 가 양(+)이고 i_a 가 음(-)인 구간을 살펴본다. i_a 가 음의 방향이므로 그림 2-2(a)에서 전류는 부하측에서 전원측으로 흐른다. 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, 그림 2-3에서와 같이 전원전압과 전류의 극성이 서로 동일한 구간에서만 가능하며 극성이 상이한 구간에서는 불가능하다. 이것은 새그의 경우와 상반되는 특징이 있다.

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 과

다한 단락전류에 의해 소자가 파괴되기 때문이다. 스웰이 발생한 상태에서 정상상태로 복귀하는 경우는 그림 2-2(b)에서 S_{Ba1} 과 S_{Ba2} 를 턴오프하고 S_{a1} 과 S_{a2} 를 턴오프하는데, 그림 2-4에서와 같이 전원전압과 전류의 극성이 서로 다른 구간에서만 가능하며 극성이 동일한 구간에서는 불가능하다.

2-2-3 순간정전 후 위상급변시 허용 구간

순간정전 후 위상급변시의 경우에 대해서 살펴본다. 순간정전 후 위상급변의 각각의 경우는 전압변동 발생시의 새그의 커뮤테이션과 스웰 발생을 연속적으로 해줌으로써 발생된다. 즉 그림 2-2(a)에서 정상상태에서는 S_{Ba1} , S_{Ba2} 가 턴오프되어 있고 S_{a1} , S_{a2} 와 S_{pa1} , S_{pa2} 턴오프되어 있다. 이때 순간정전을 발생하기 위하여 S_{a1} 과 S_{a2} 를 턴오프하고 S_{Ba1} 과 S_{Ba2} 를 턴오프하여 순간정전을 발생시킨다. 위상급변시에는 그림 2-2(b)에서 S_{a1} , S_{a2} 를 턴오프하고 S_{pa1} , S_{pa2} 를 턴오프하여 직렬변압기에 b상의 전압을 a상에 더해줌으로써 위상을 지연시킬수 있고 마찬가지로 c상의 전압을 더할경우 위상을 앞서게 만들 수 있다. 복귀시에는 스웰 복귀시와 동일하다. 발생시와 복귀시의 허용구간은 그림 2-6에서 나타내고 있다. 순간정전시에는 전원전압과 전류의 극성이 서로 다른 구간에서만 가능하며 극성이 동일한 구간에서는 전류가 불가능하고 위상급변시에는 전원전압과 전류의 극성이 서로 동일한 구간에서만 가능하며 극성이 상이한 구간에서는 불가능하다. 복귀시에는 전원전압과 전류의 극성이 서로 다른 구간에서만 가능하며 극성이 동일한 구간에서는 불가능하다.

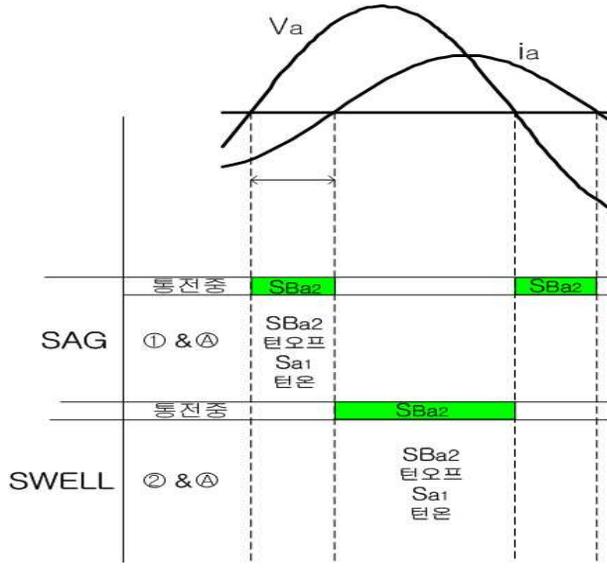


그림 2-3 전압변동 발생시 스위칭 상태

Fig. 2-3 Switching states in voltage disturbance generation

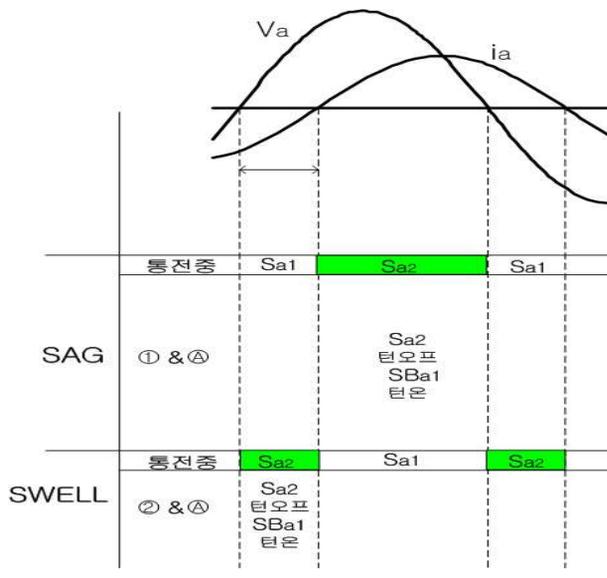


그림 2-4 정상상태로 복귀시 스위칭 상태

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

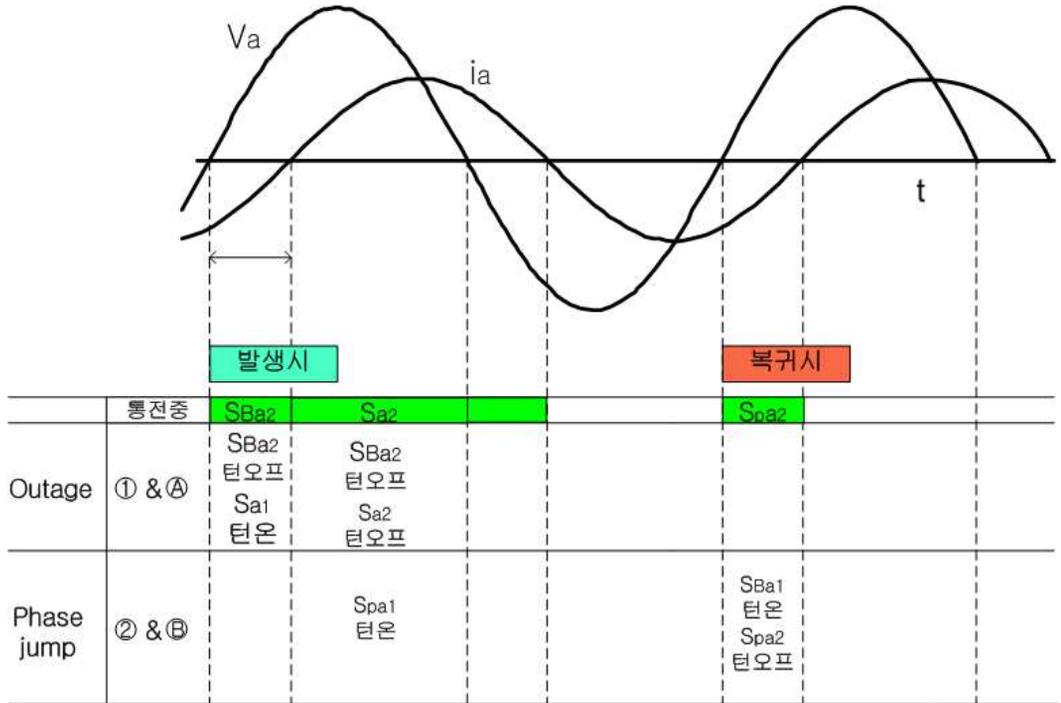


그림 2-5 순간정전 발생후 위상급변시 스위칭 상태

Fig. 2-5 Switching state in the phase jump after outage

제 3 장 전력품질 외란 발생기의 동작원리

그림 2-1의 전력품질 외란 발생기의 동작원리는 각상 동일하므로 한 상에 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 단락상태이므

로 v_{ad} 는 영이 되어 정상상태를 유지한다. 이때 S_{Ba1} 과 S_{Ba2} 를 턴오프하면서 S_{Ba1} 과 S_{Ba2} 를 턴온하면 T_d 의 1차측에는 슬라이더스 2차측 전압이 인가된다.

v_{ad} 의 극성이 마이너스가 되기 위해 v_T 에서는 T 의 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. 슬라이더스의 구조상 I, II 구간내의 임의의 지점에서 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.

T_a 의 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.

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

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

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

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 상이

하게 설정함으로써 간단히 얻을 수 있다. 또한 전압불평형정도도 용이하게 조절할 수 있다.

3-3 위상급변 발생원리

순간정전 발생 후 전원전압이 부하에 재인가된 경우 원래의 공급전원의 위상보다 앞서게 하거나 또는 뒤지게 할 수 있다. 우선 그림 2-1의 회로에서 S_{a1} , S_{a2} 를 사용하여 순간정전을 발생시키고 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 상 전압의 벡터도를 나타낸다. 그림 3-1에서

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

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

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

라 두면,

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

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,

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

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

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 가변하는 전압을 발생한다. 식 (3-16)과

(3-17)을 토대로 α 의 변화에 대한 v_{as} 의 크기를 나타내면 그림 3-2와 같다.

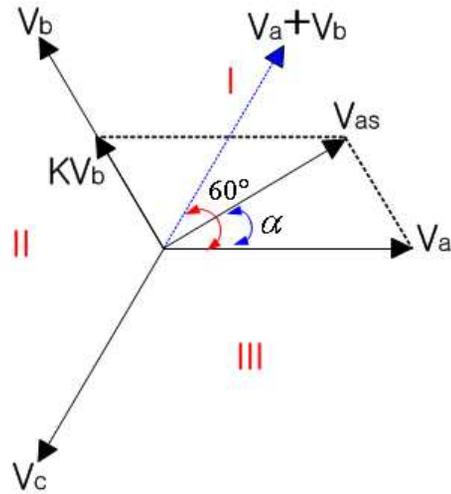


그림 3-1 각 상전압 벡터도

Fig. 3-1 Voltage vector diagram

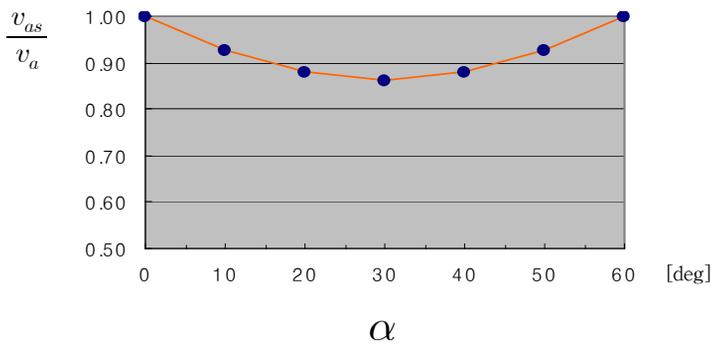


그림 3-2 위상변위 α 에 따른 전압변동

Fig. 3-2 Voltage variation with phase jump α

제 4 장 시뮬레이션 결과

4-1 새그, 스웰, 순간정전, 전압불평형

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

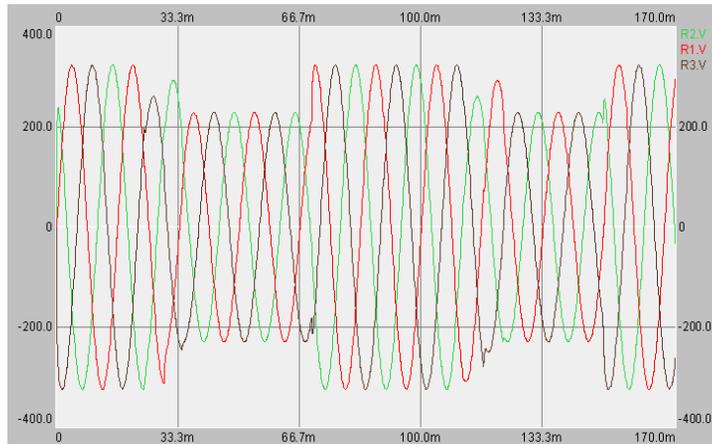
- 입력전압 : 3상 220V, 60Hz
- 출력용량 : 10kVA
- 부하역률 : 0.85(지상) 및 1.0
- 권선비 : 1

그림 4-1(a), (b), (c)는 정상상태 전압에 대해 30%, 50%, 70% 새그 발생시의 출력전압을 보여주는 파형으로서 새그의 범위가 매우 넓다는 것을 알 수 있다.

그림 4-2(a), (b), (c)는 각각 전원전압의 30%, 50%, 70% 스웰이 발생한 경우로서, 출력전압이 전원전압보다 증가한 것을 알 수 있다.

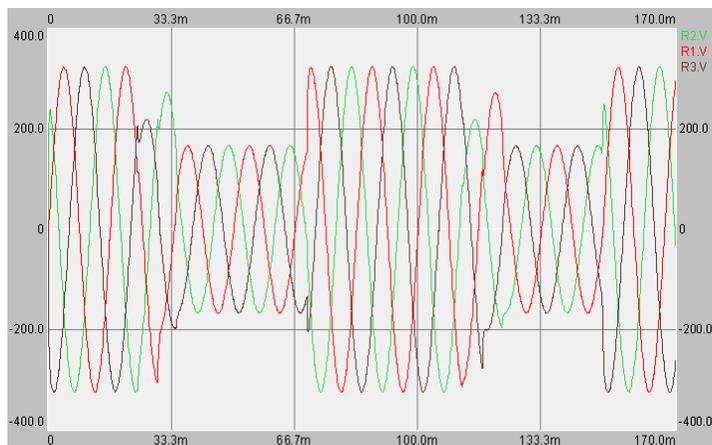
그림 4-3은 순간정전 발생시의 파형이다. 이는 순간정전 상태 및 정전시의 성능시험을 가능하게 한다.

그림 4-4는 3상 전압불평형이 발생하는 것을 나타내는데 a상 전압은 전원전압을 그대로 출력하고, b상과 c상은 각각 전원전압의 80%, 50%를 출력하는 경우이다.



(a) 30% Sag 발생

(a) 30% Sag generation



(b) 50% Sag 발생

(b) 50% Sag generation



(c) 70% Sag 발생

(c) 70% Sag generation

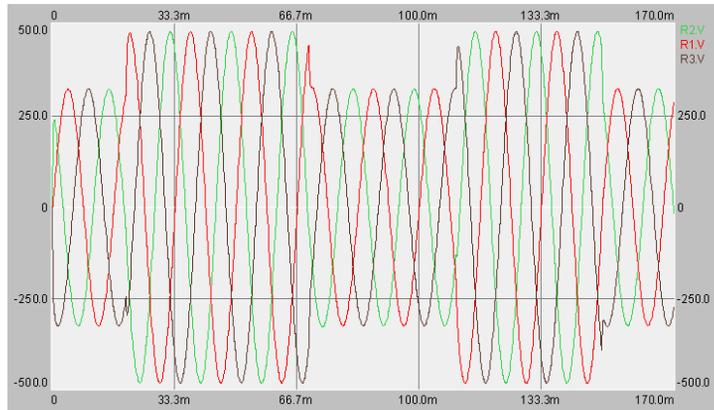
그림 4-1 새그 발생

Fig. 4-1 Sag generation



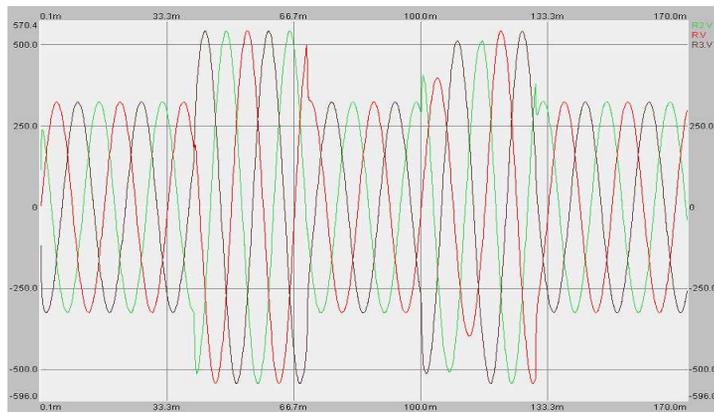
(a) 30% Swell 발생

(a) 30% Swell generation



(b) 50% Swell 발생

(b) 50% Swell generation



(c) 70% Swell 발생

(c) 70% Swell generation

그림 4-2 스웰 발생

Fig. 4-2 Swell generation

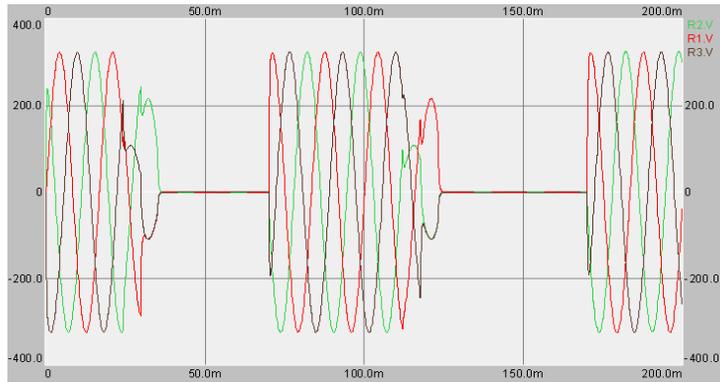


그림 4-3 순간정전 발생

Fig. 4-3 Outage generation

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

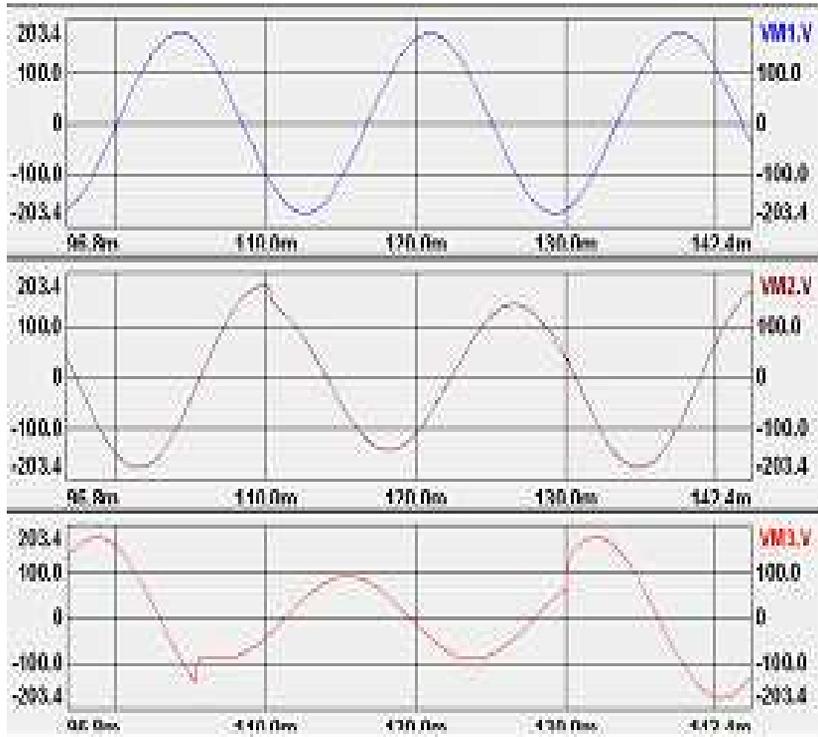


그림 4-4 전압불평형 발생시 출력전압 : (위) $v_{as} = 100\%$, (중간)

$v_{bs} = 80\%$, (아래) $v_{cs} = 50\%$

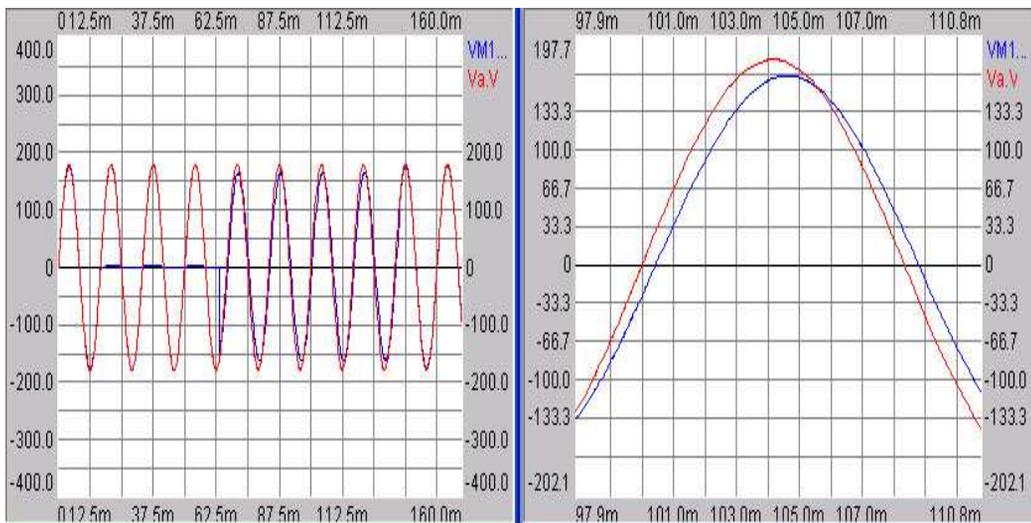
Fig. 4-4 Output voltage in case of unbalance : $v_{as} = 100\%$ (top),

$v_{as} = 80\%$ (middle), $v_{cs} = 50\%$ (bottom))

4-2 위상급변

위상급변발생은 삼상 동일하므로 한상에 대한 시뮬레이션 결과를 기술한다. 위상급변을 진상과 지상, 위상급변 폭을 조절하여 각각 시뮬레이션 하였다.

그림 4-5는 전원전압에 대해 출력전압이 10도 뒤진 과형을 나타내고 있다. 그림 4-6은 30도 뒤진 결과를 나타내고 출력전압의 크기가 점점 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그림 4-7은 40도 지상일 경우이고 30도를 중심으로 전압이 다시 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그림 4-8은 60도 지상일 경우의 결과 과형이다. 그림 4-8의 경우에는 그림3-2에서 보는 바와 같이 전원전압의 크기와 출력전압의 크기가 같아짐을 확인할 수 있다.

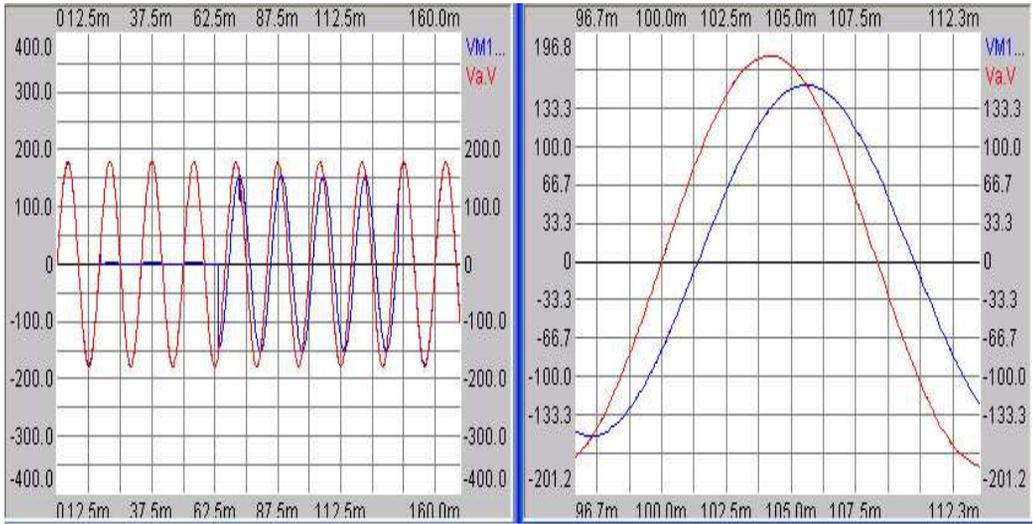


(a) 정상상태→순간정전→위상급변

(b) 위상급변구간 확대

그림 4-5 10° 위상급변(지상)

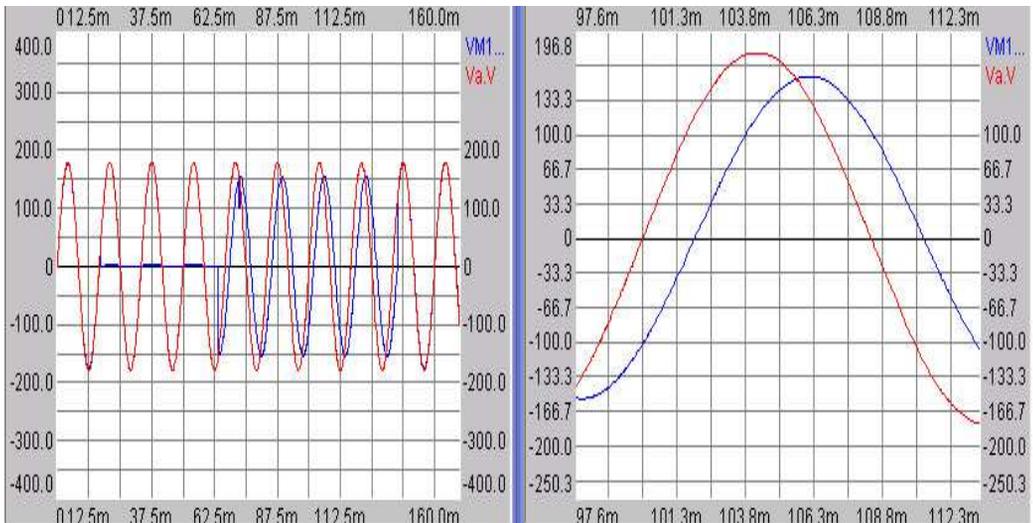
Fig. 4-5 10 degree phase jump generation(lagging phase)



(a) 정상상태→순간정전→위상급변 (b) 위상급변 구간 확대

그림 4-6 30° 위상급변(지상)

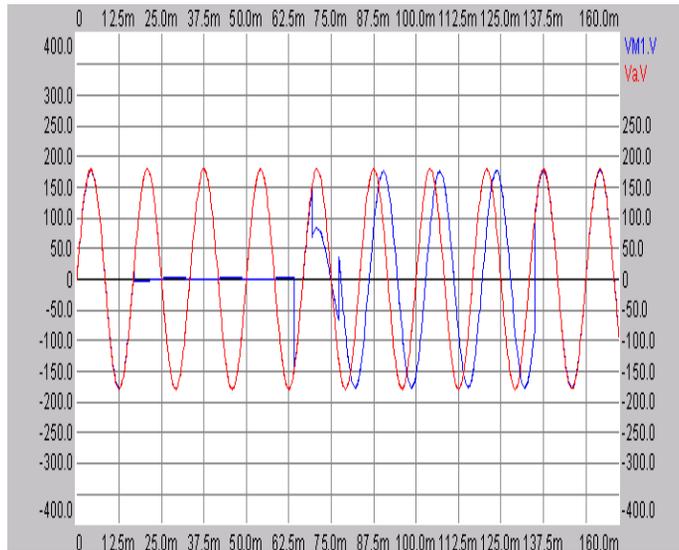
Fig. 4-6 30 degree phase jump generation(lagging phase)



(a) 정상상태→순간정전→위상급변 (b) 위상급변 구간 확대

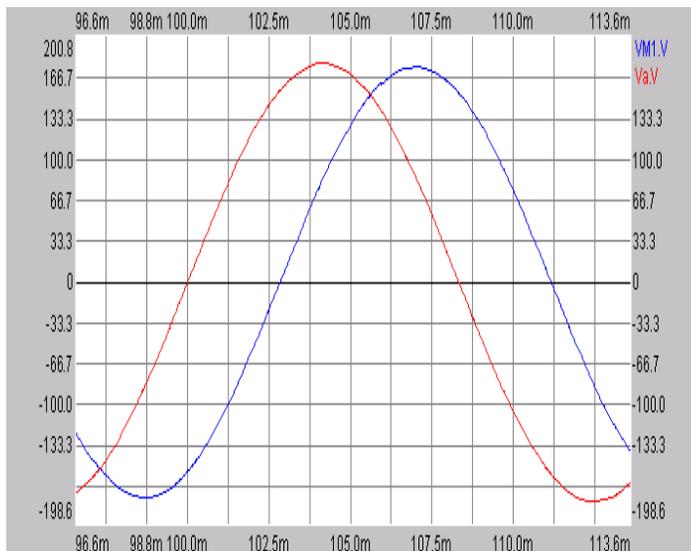
그림 4-7 40° 위상급변(지상)

Fig. 4-7 40 degree phase jump generation(lagging phase)



(a) 60° 위상급변

(a) 60 degree phase jump

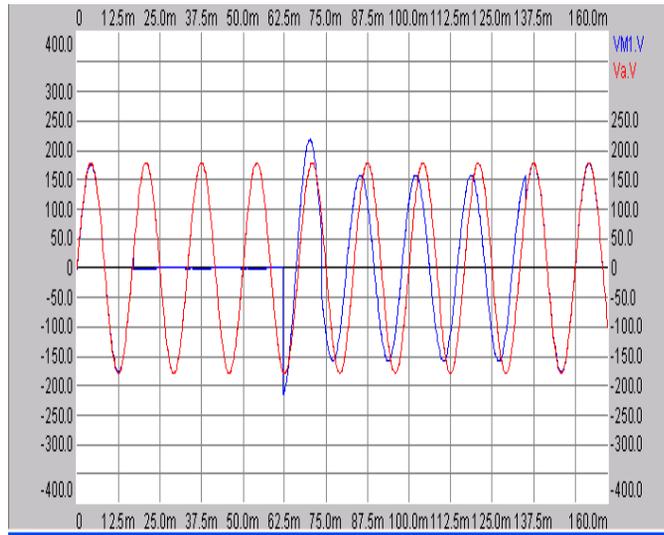


(b) 60° 위상급변-확대

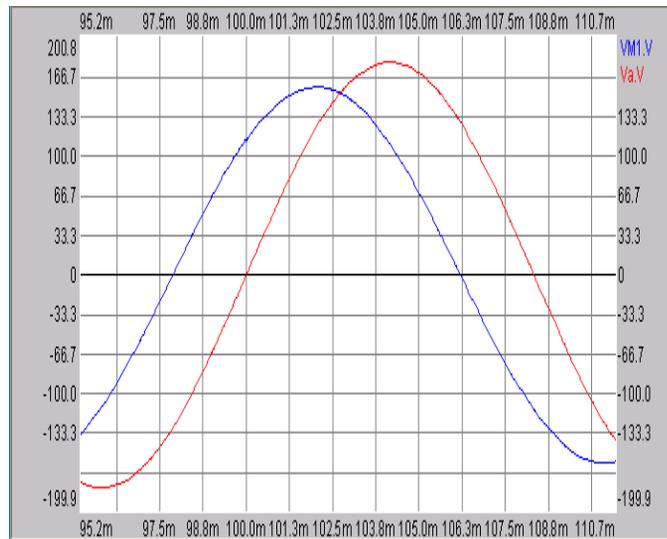
(b) 60 degree phase jump-zooming

그림 4-8 60° 위상급변(지상)

Fig. 4-8 60 degree phase jump generation(lagging phase)



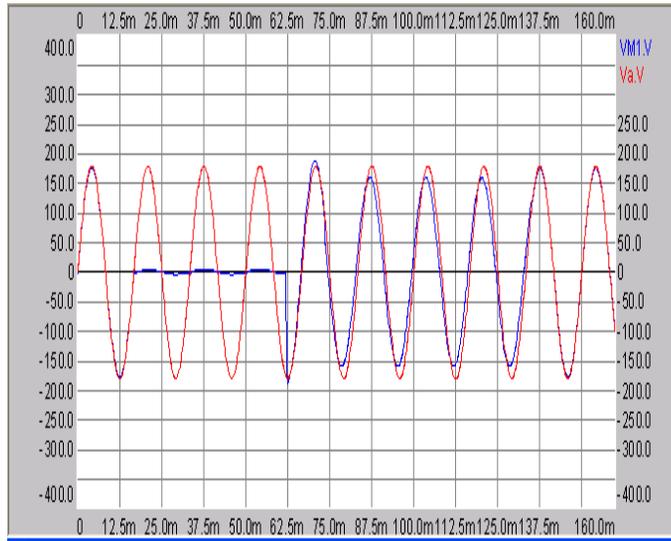
(a) 45° 위상급변
(a) 45 degree phase jump



(b) 45° 위상급변-확대
(b) 45 degree phase jump-zooming

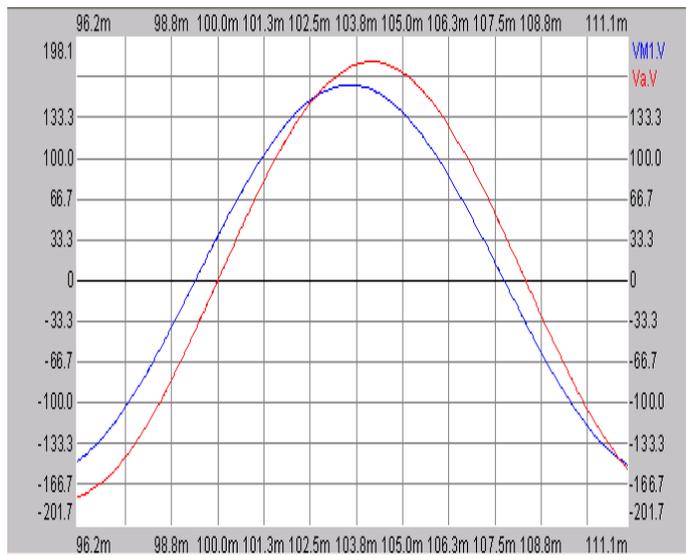
그림 4-9 45° 위상급변 (진상)

Fig. 4-9 45 degree phase jump generation (leading phase)



(a) 15° 위상급변

(a) 15 degree phase jump



(b) 15° 위상급변-확대

(b) 15 degree phase jump-zooming

그림 4-10 15° 위상급변 (진상)

Fig. 4-10 15 degree phase jump generation (leading phase)

제 5 장 실험 결과

실험 장치를 제작하고 시뮬레이션의 조건으로 새그, 스웰 및 순간정전발생, 순간정전 발생후 위상급변 실험을 하였다. 위상급변실험은 지상과 진상에 대해서 각각의경우에 대해서 실험하였다.

5-1 새그, 스웰, 순간정전, 전압불평형

5-1-1 지상역률부하(PF=0.85)

그림 5-1는 30% 새그가 2회 연속 발생시 전원 선간전압과 3상 출력전압을 나타낸다.

그림 5-2은 50% 새그 발생시 a상 전원전압과 a, b상 출력전압 및 a상 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 30%

- v_{cs} : v_c 의 60%

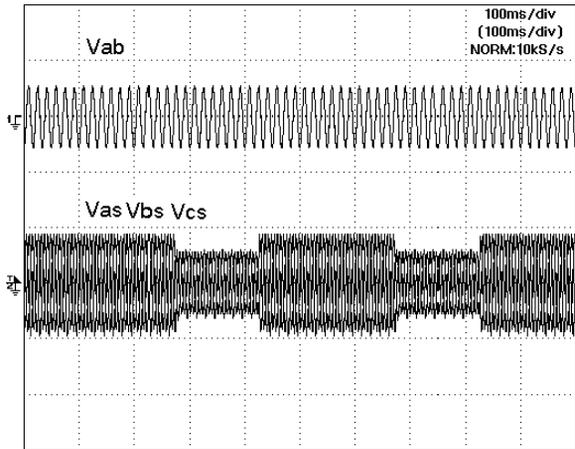


그림 5-1 30% 새그 발생시 전원 선간전압과 3상 출력전압
(200V/div., 100ms/div.)

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

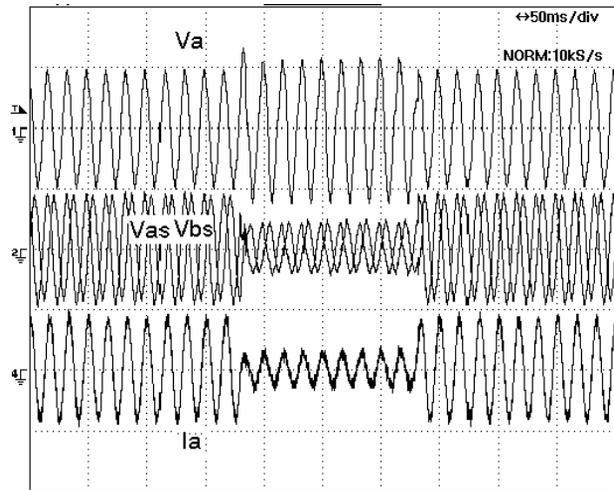


그림 5-2 50% 새그 발생시 a상 전원전압과 a, b상 출력전압 및 a상 전류
(200V/div., 20A/div., 50ms/div.)

Fig. 5-2 a-phase source voltage, a-phase and b-phase output voltage, and
a-phase current in case of 50% sag generation
(200V/div., 20A/div., 50ms/div.)

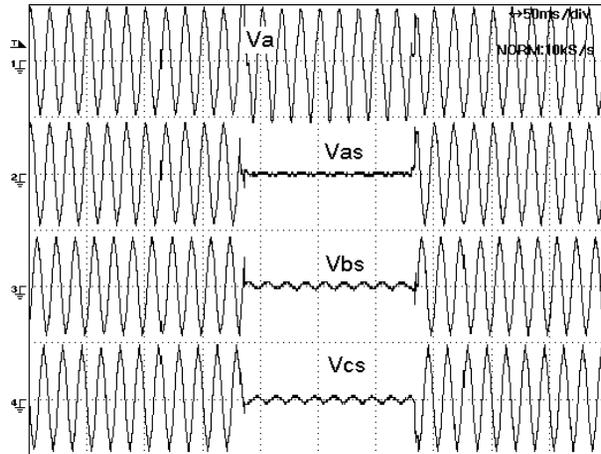


그림 5-3 순간정전 발생시 a상 전원전압과 3상 출력전압
(200V/div., 50ms/div.)

Fig. 5-3 a-phase source voltage and 3-phase output voltage in case of
Outage (200V/div., 50ms/div.)

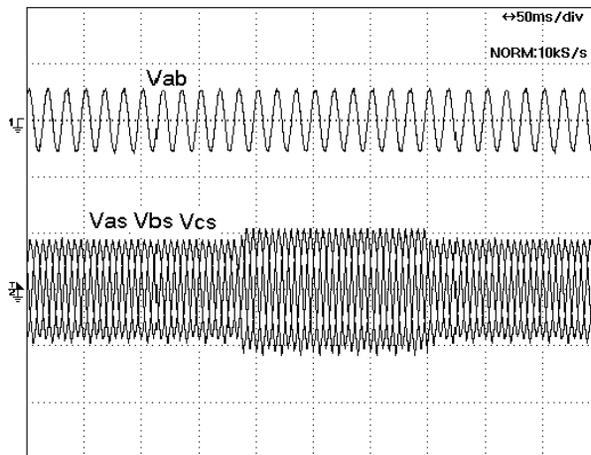


그림 5-4 30% 스웰 발생시 전원 순간전압과 3상 출력전압
(200V/div., 50ms/div.)

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

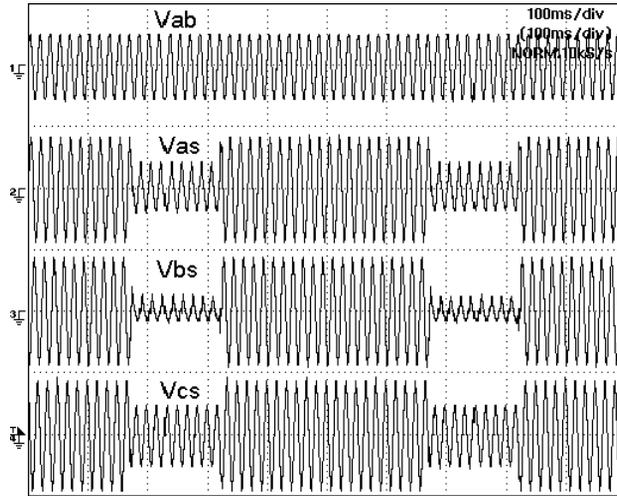


그림 5-5 전압불평형 ($v_{as} = 0.5v_a$, $v_{bs} = 0.3v_b$, $v_{cs} = 0.6v_c$)

(500V/div., 200V/div., 100ms/div.)

Fig. 5-5 Voltage unbalance ($v_{as} = 0.5v_a$, $v_{bs} = 0.3v_b$, $v_{cs} = 0.6v_c$)

(500V/div., 200V/div., 100ms/div.)

5-1-2 단위역률부하(PF=1.0)

그림 5-6은 50% 새그 발생시 전원의 선간전압, 출력전압, a상 전류를 나타낸다. 그림 5-7은 순간정전 발생시 전원 선간전압, 출력전압 및 a상 전류를 나타낸다. 그림 5-8은 30% 스웰 발생시 전원 선간전압, 출력전압 및 a상 전류를 나타낸다. 그림 5-9는 그림 5-5의 조건에서 v_{bs} 만 v_b 의 20%로 변경한 경우로서 역률과 무관하게 전압불평형의 발생이 가능함을 보이고 있다.

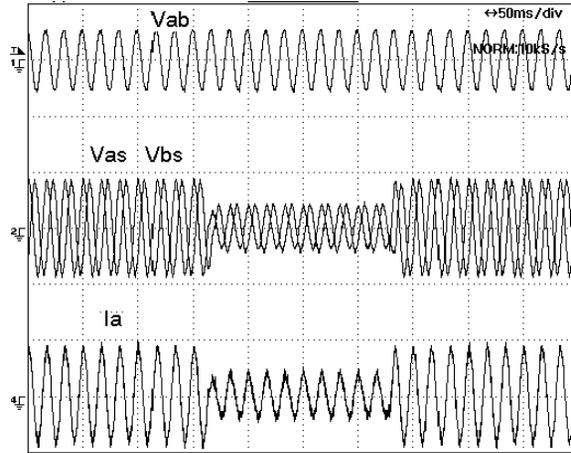


그림 5-6 50% 새그 발생시 전원 선간전압, 출력전압, a상 전류
(500V/div., 200V/div., 20A/div., 50ms/div.)

Fig. 5-6 Source voltage, output voltage, and a-phase current in case of
50% sag generation (500V/div., 200V/div., 20A/div., 50ms/div.)

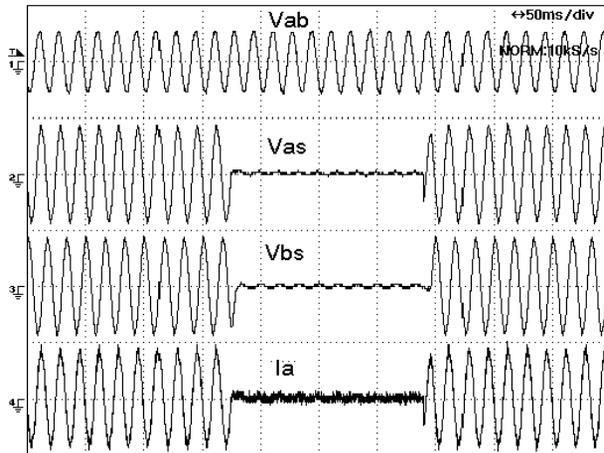


그림 5-7 순간정전 발생시 전원 선간전압, 출력전압 및 a상 전류
(500V/div., 200V/div., 20A/div., 50ms/div.)

Fig. 5-7 Source voltage, output voltage, and a-phase current in case of
outage generation (500V/div., 200V/div., 20A/div., 50ms/div.)

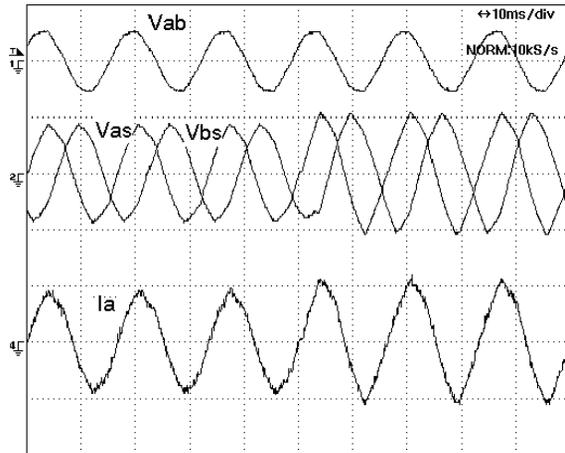


그림 5-8 30% 스웰 발생시 전원 선간전압, 출력전압 및 a상 전류
(500V/div., 200V/div., 20A/div., 10ms/div.)

Fig. 5-8 Source voltage, output voltage, and a-phase current in case of
30% swell generation (500V/div., 200V/div., 20A/div., 10ms/div.)

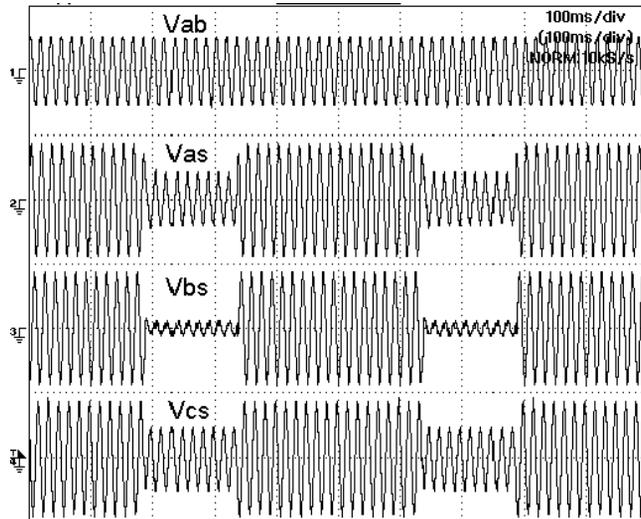


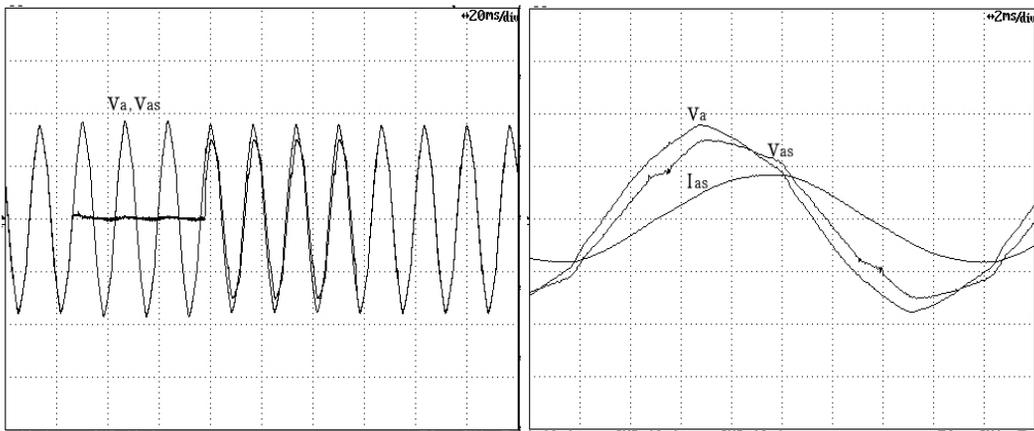
그림 5-9 전압불평형 ($v_{as} = 0.5v_a$, $v_{bs} = 0.2v_b$, $v_{cs} = 0.6v_c$)
(500V/div., 200V/div., 100ms/div.)

Fig. 5-9 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

5-2-1 지상역률부하(PF=0.85)

그림 5-10 ~ 5-13은 지상역률부하일 경우에 대한 실험결과 파형을 나타낸다. 그림 5-10은 10도 지상일 경우의 위상급변시 실험결과이다. 그림 (a)는 정상상태에서 순간정전 그리고 10도 위상급변, 정상상태로 복귀하는 파형이다. 그림 (b)는 위상급변구간을 확대한 그림으로서 부하전류가 뒤지고 출력전압이 10도 위상급변된 결과를 확인할 수 있다. 그림 5-11은 30도 위상급변시 결과이다. 위상 급변이 발생하는 구간에서 출력전압의 크기가 작아진 것을 확인할 수 있다. 그림 5-12는 40도 지상의 실험결과 파형이고 그림 5-13은 60도 지상일경우의 실험결과 파형이다. 60도의 경우 전원전압과 위상급변시 출력전압이 같다는 것을 확인할 수 있다.



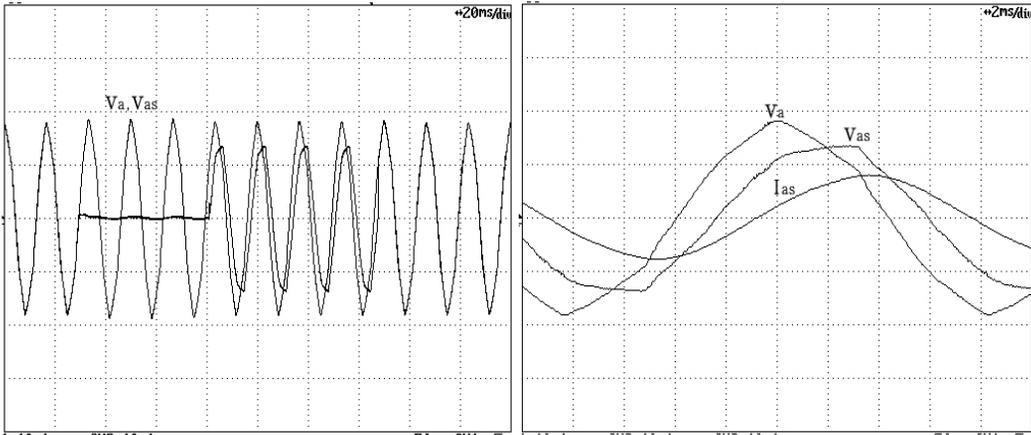
(a) 정상상태→순간정전→위상급변

(b) 위상급변구간 확대

그림 5-10 10° 위상급변(지상)(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

Fig. 5-10 10 degree phase jump generation(lagging phase)

(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

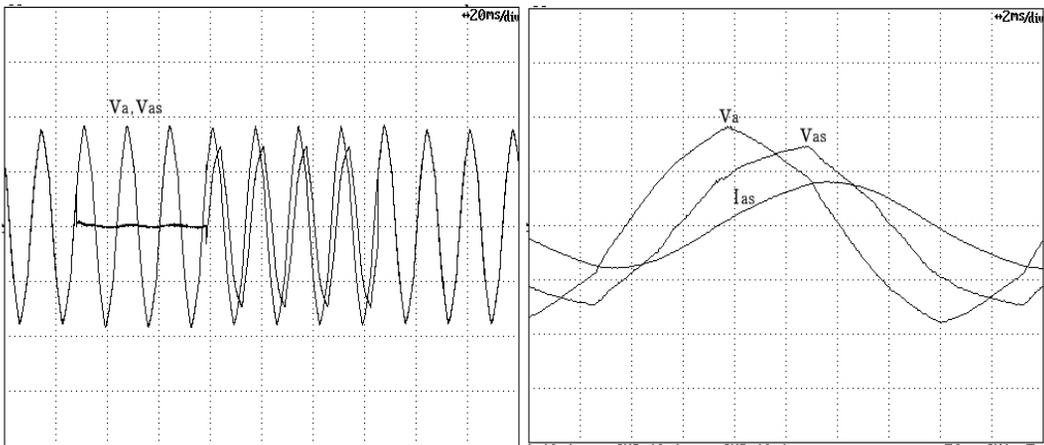


(a) 정상상태→순간정전→위상급변 (b) 위상급변구간 확대

그림 5-11 30° 위상급변(지상)(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

Fig. 5-11 30 degree phase jump generation(lagging phase)

(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

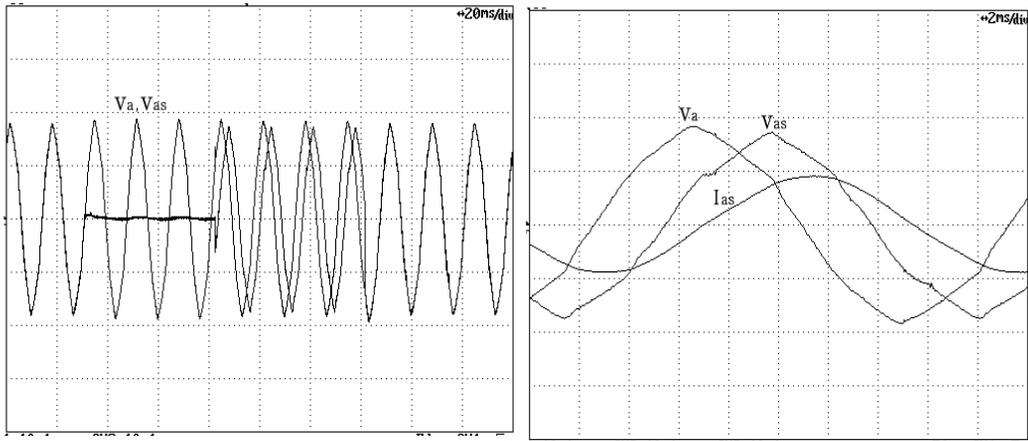


(a) 정상상태→순간정전→위상급변 (b) 위상급변구간 확대

그림 5-12 40° 위상급변(지상)(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

Fig. 5-12 40 degree phase jump generation(lagging phase)

(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

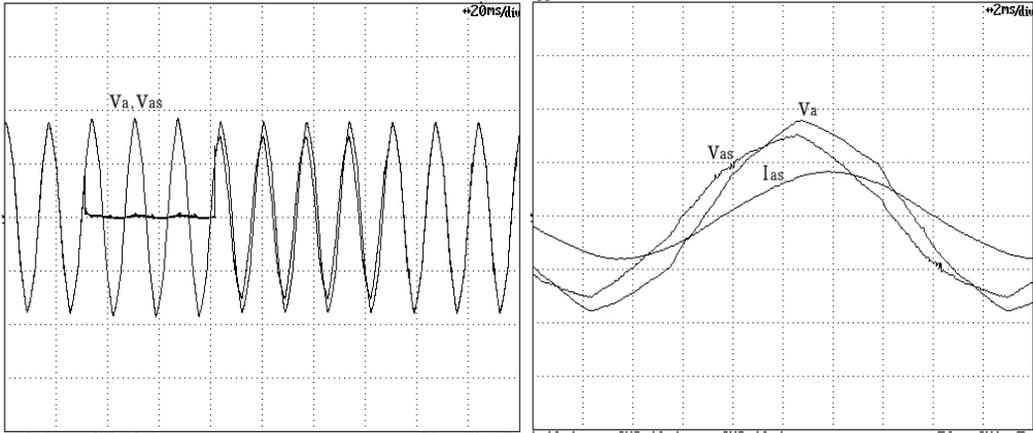


(a) 정상상태→순간정전→위상급변 (b) 위상급변 구간 확대

그림 5-13 60° 위상급변(지상)(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

Fig. 5-13 60 degree phase jump generation(lagging phase)
(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

그림 5-14 ~ 그림 5-17은 진상일 경우에 대한 실험결과 파형을 나타낸다. 그림 5-14는 15도 진상일경우의 위상급변시 실험결과이다. 그림 (a)는 정상 상태에서 순간정전 그리고 15도 위상급변 다시 정상상태로 복귀하는 파형이다. 그림 (b)는 위상급변 구간을 확대한 그림으로서 출력전압이 15도 위상급변된 결과를 확인할 수 있다. 그림 5-15는 30도 위상급변시 결과이다. 출력전압의 크기가 줄어들고 부하전류가 지상역률부하이므로 뒤지고 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 5-16은 45도 진상의 실험결과파형이고 그림 5-17은 60도 진상일경우의 실험결과파형이다. 60도의 경우 지상일경우와 마찬가지로 전원전압과 위상급변시 출력전압이 같다는 것을 확인할 수 있다.

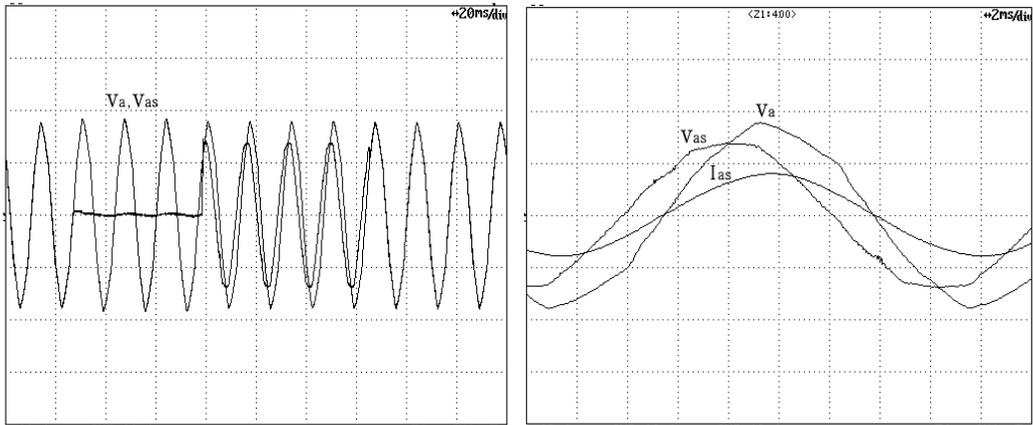


(a) 정상상태→순간정전→위상급변 (b) 위상급변 구간 확대

그림 5-14 15° 위상급변(진상)(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

Fig. 5-14 15 degree phase jump generation(leading phase)

(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

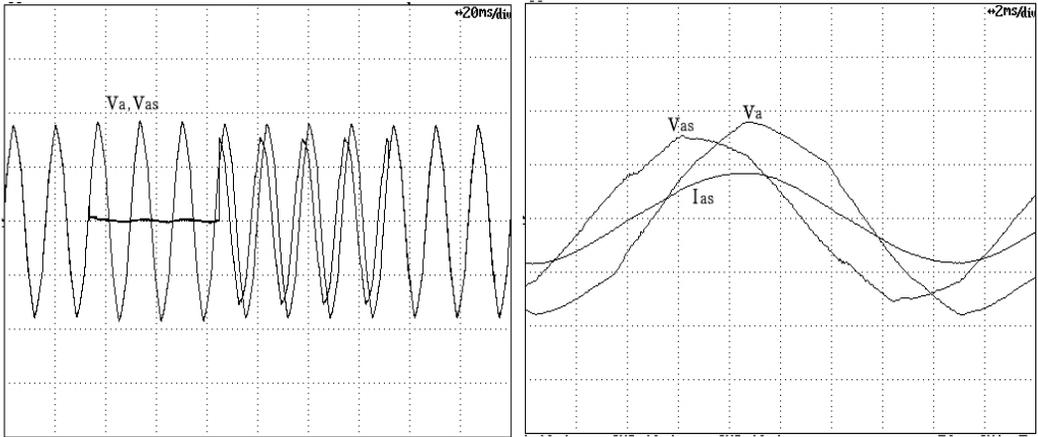


(a) 정상상태→순간정전→위상급변 (b) 위상급변 구간 확대

그림 5-15 30° 위상급변(진상)(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

Fig. 5-15 30 degree phase jump generation(leading phase)

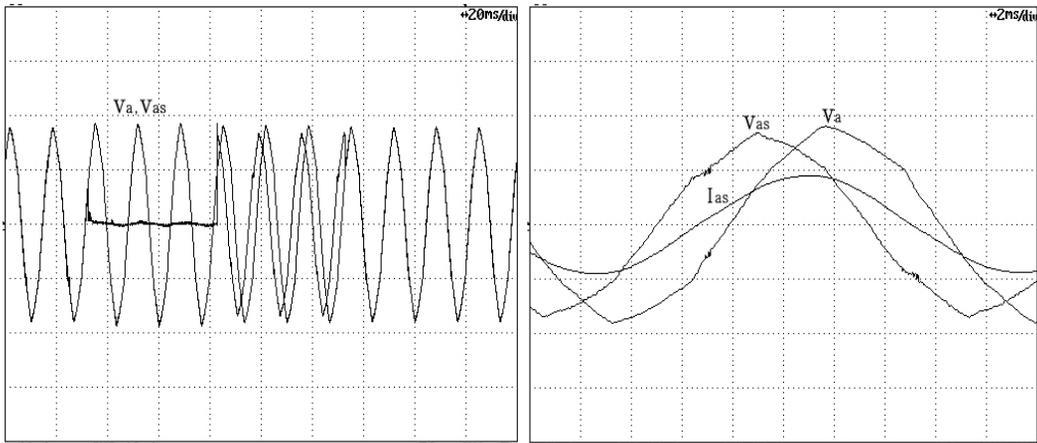
(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)



(a) 정상상태→순간정전→위상급변 (b) 위상급변 구간 확대

그림 5-16 45° 위상급변(진상)(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

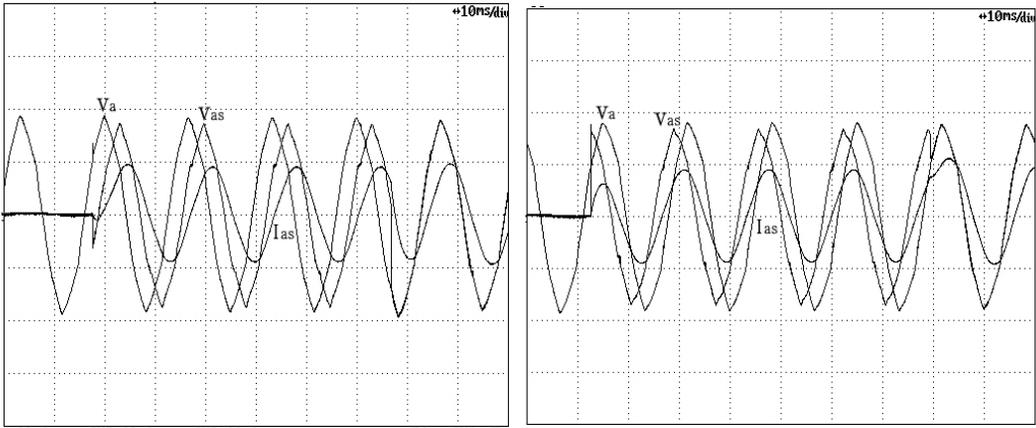
Fig. 5-16 45 degree phase jump generation(leading phase)
(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)



(a) 정상상태→순간정전→위상급변 (b) 위상급변 구간 확대

그림 5-17 60° 위상급변(진상)(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

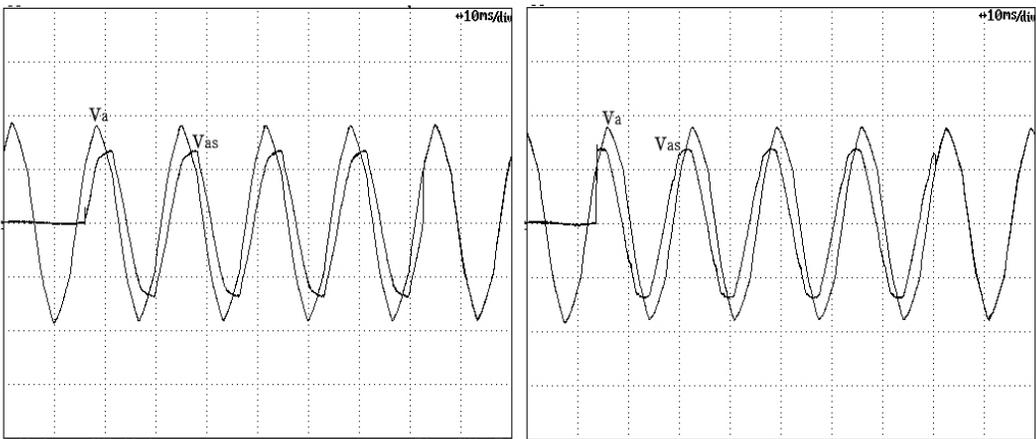
Fig. 5-17 60 degree phase jump generation(leading phase)
(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)



(a) 지상일 경우(lagging phase) (b)진상일 경우(leading phase)

그림 5-18 60° 위상급변구간 확대(100V/div.,10ms/div.,20A/div.)

Fig. 5-18 60 degree phase jump generation section zooming
(100V/div.,10ms/div.,20A/div.)



(a) 지상일 경우(lagging phase) (b)진상일 경우(leading phase)

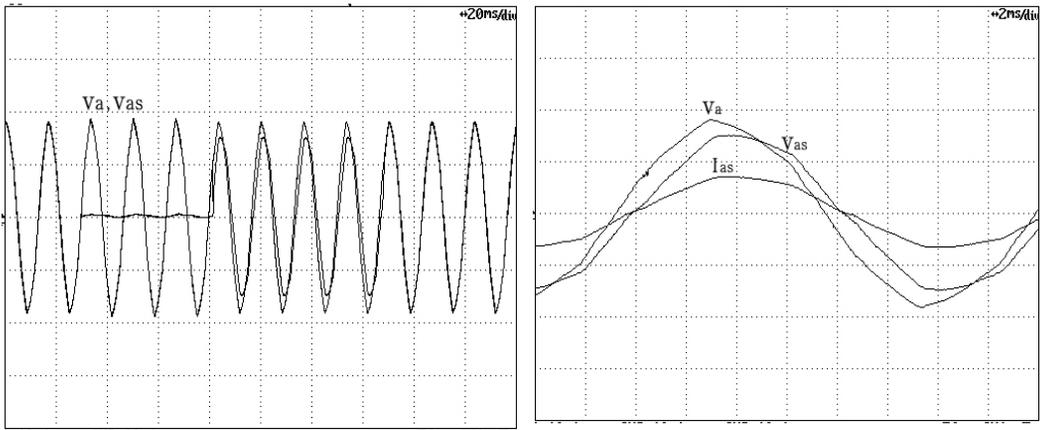
그림 5-19 30° 위상급변구간 확대(100V/div.,10ms/div.)

Fig. 5-19 30 degree phase jump generation section zooming
(100V/div.,10ms/div.)

그림 5-18은 60도 위상급변시 위상급변구간을 확대한 실험파형으로서 각각 지상과 진상일 경우의 출력전압과 출력전류, 전원전압을 확인할 수 있다. 5-19는 30도 위상급변시 위상급변구간을 확대한 파형이다.

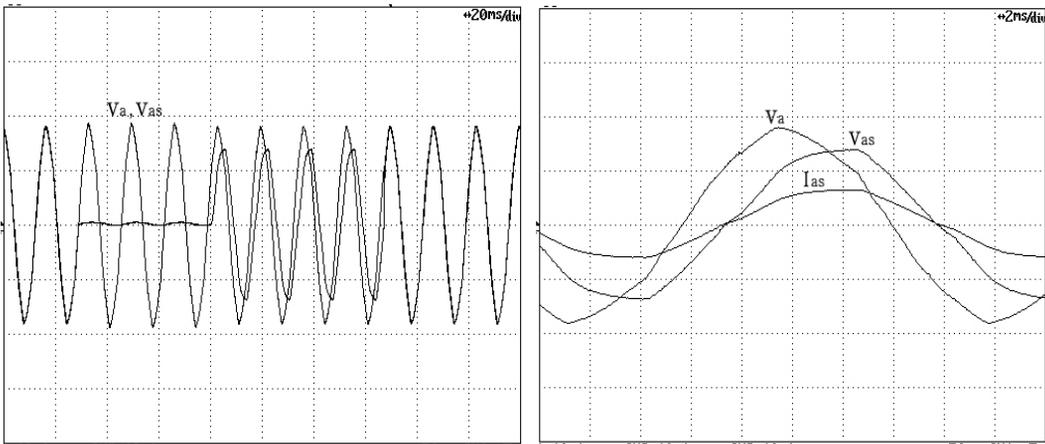
5-2-1 단위역률부하(PF=1.0)

그림 5-20 ~ 5-23은 단위역률 부하에서 지상일 경우에 대한 실험결과이다. 그림 5-20은 10도 지상일경우의 위상급변시 실험결과이다. 그림 (a)는 시뮬레이션 결과와 같은 결과를 보여주고 있고 그림 (b)는 위상급변구간을 확대한 그림으로서 출력전압이 10도 위상급변된 결과를 확인할 수 있다. 그림 5-21은 30도 지상일때의 실험결과파형이다. 그림 3-2에서 나타낸 바와 같이 출력전압이 전원전압에 비해서 위상급변시 가장 적은 전압의 크기를 확인할 수 있다. 그림 5-22는 40도 위상급변으로서 30도 위상급변 시와 비교해서 출력전압이 상승한 것을 알 수 있다. 그림 5-23은 60도 지연시킨 결과 파형이고 출력전압이 전원전압의 크기와 같다는 것을 확인할 수 있다. 시뮬레이션결과 파형과 실험결과 파형이 동일함을 알 수 있다.



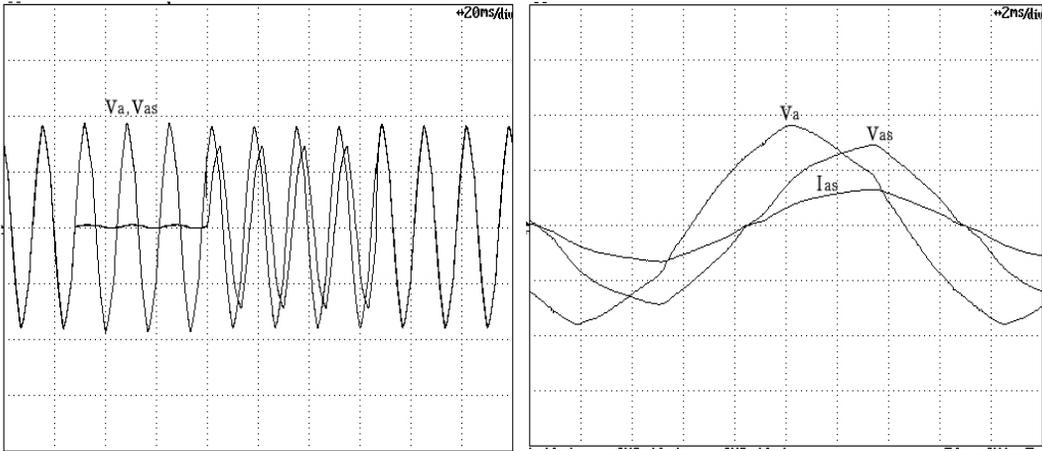
(a) 정상상태→순간정전→위상급변 (b) 위상급변 구간 확대
 그림 5-20 10° 위상급변(지상)(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

Fig. 5-20 10 degree phase jump generation(lagging phase)
 (100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)



(a) 정상상태→순간정전→위상급변 (b) 위상급변 구간 확대
 그림 5-21 30° 위상급변(지상)(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

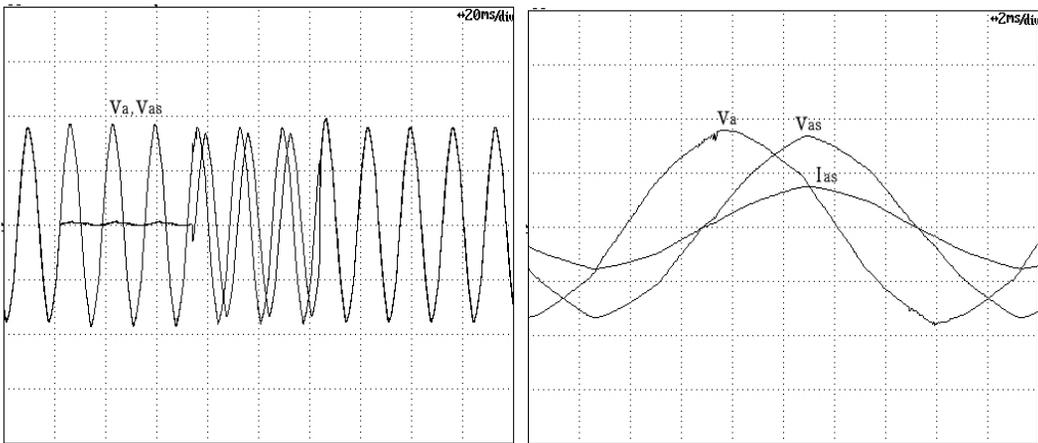
Fig. 5-21 30 degree phase jump generation(lagging phase)
 (100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)



(a) 정상상태→순간정전→위상급변 (b) 위상급변 구간 확대

그림 5-22 40° 위상급변(지상)(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

Fig. 5-22 40 degree phase jump generation(lagging phase)
(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

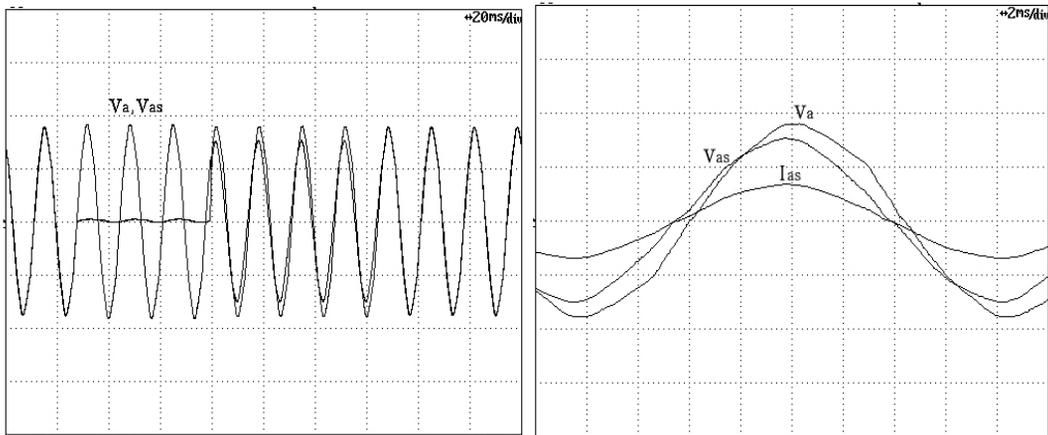


(a) 정상상태→순간정전→위상급변 (b) 위상급변 구간 확대

그림 5-23 60° 위상급변(지상)(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

Fig. 5-23 60 degree phase jump generation(lagging phase)
(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

그림 5-24 ~ 5-27은 단위역률 부하시 진상일 경우의 실험결과 파형을 나타낸다. 진상일 경우도 지상과 동작원리는 동일하며 단지 b상의 전압을 더해주는 대신 c상의 전압을 더해주면 된다. 그림 5-24는 15도에 대한 실험결과이고 그림 5-25는 30도 위상급변의 결과파형이다. 지상과 마찬가지로 전압의 크기는 가장 작아지는 경우이다. 그림 5-26은 45도 위상을 앞서게 한 결과이다. 그림 5-27은 60도 진상의 결과이다. 전원전압의 크기와 출력전압의 크기가 같다는 것을 확인할 수 있다. 그림 5-28과 그림 5-29는 30도와 60도에 대해서 지상과 진상의 위상급변 구간을 확대한 결과이다. 출력전압의 크기에 차이가 있다는 것을 확인할 수 있다.

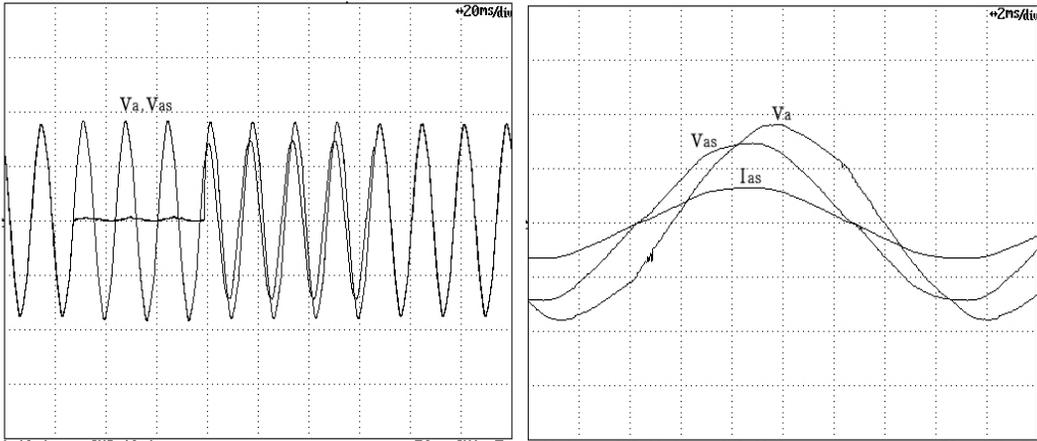


(a) 정상상태→순간정전→위상급변 (b) 위상급변구간 확대

그림 5-24 15° 위상급변(진상)(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

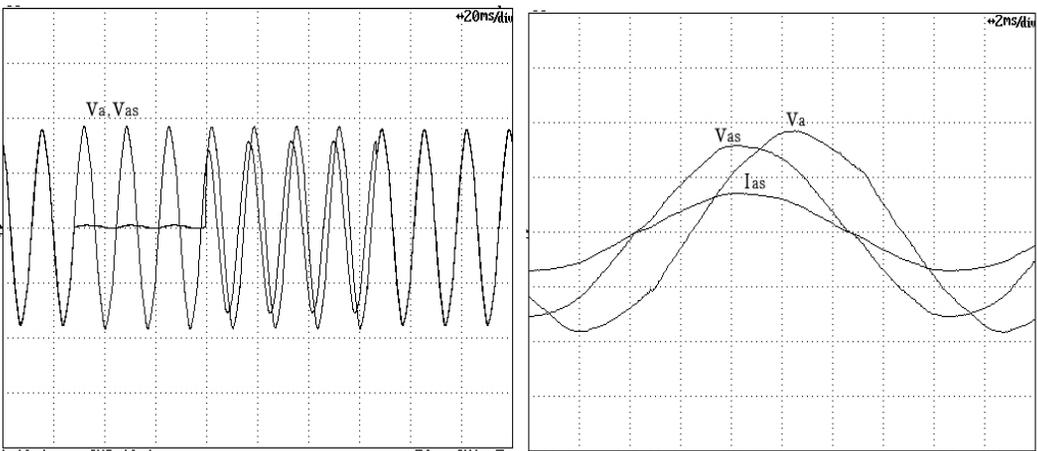
Fig. 5-24 15 degree phase jump generation(leading phase)

(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)



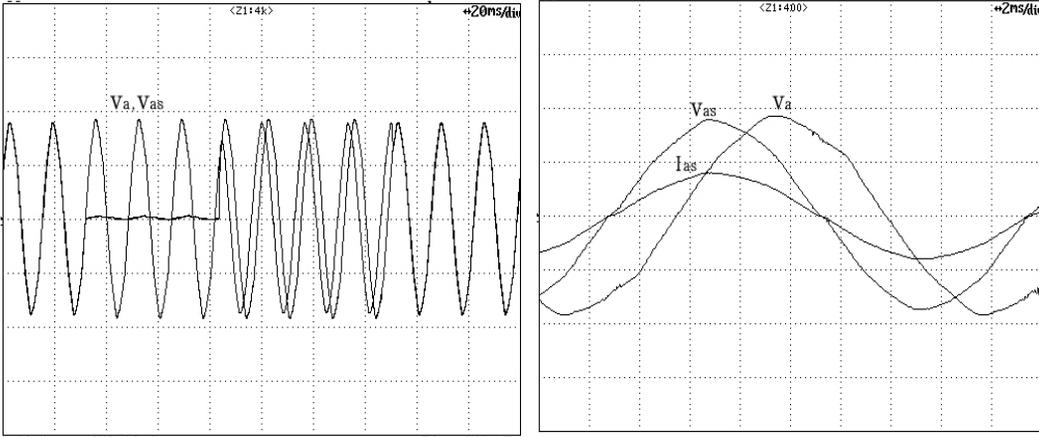
(a) 정상상태→순간정전→위상급변 (b) 위상급변구간 확대
 그림 5-25 30° 위상급변(진상)(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

Fig. 5-25 30 degree phase jump generation(leading phase)
 (100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)



(a) 정상상태→순간정전→위상급변 (b) 위상급변구간 확대
 그림 5-26 45° 위상급변(진상)(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

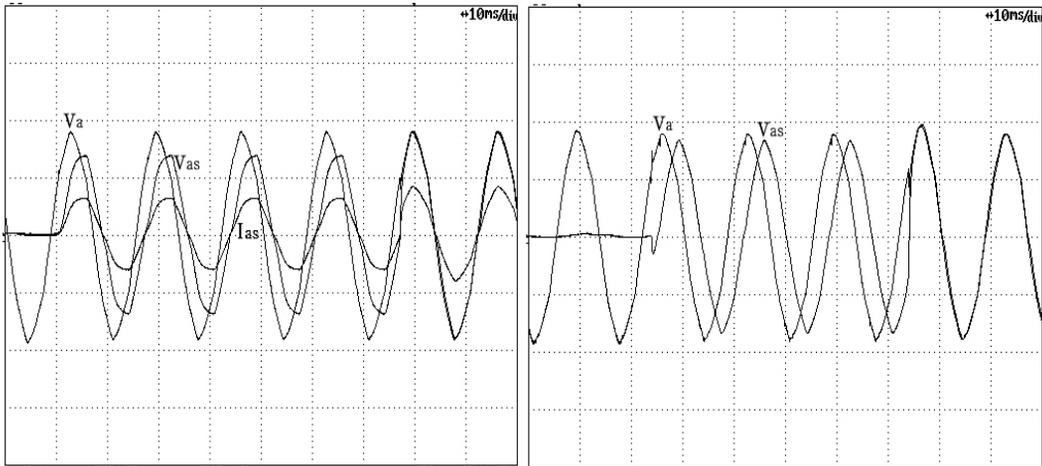
Fig. 5-26 45 degree phase jump generation(leading phase)
 (100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)



(a) 정상상태→순간정전→위상급변 (b) 위상급변 구간 확대

그림 5-27 60° 위상급변(진상)(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

Fig. 5-27 60 degree phase jump generation(leading phase)
(100V/div.,20ms/div.,20A/div.,2ms/div.)

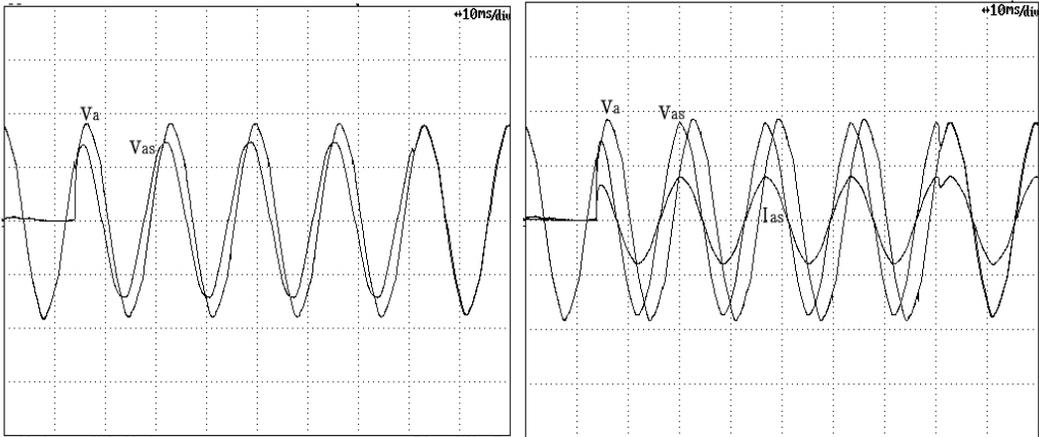


(a) 30° 위상급변 구간

(b) 60° 위상급변 구간

그림 5-28 30°,60° 위상급변 구간 확대(지상)(100V/div.,10ms/div.,20A/div.)

Fig. 5-28 30, 60 degree phase jump generation section zooming
(lagging phase)(100V/div.,10ms/div.,20A/div.)



(a) 30° 위상급변구간

(b) 60° 위상급변구간

그림 5-29 30°,60° 위상급변구간 확대(진상)(100V/div.,10ms/div.,20A/div.)

Fig. 5-29 30, 60 degree phase jump generation section zooming
(leading phase)(100V/div.,10ms/div.,20A/div.)

제 6 장 결론

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

전압 새그, 스웰, 순간정전, 전압불평형을 발생할 수 있는 기존의 전력품질 외란 발생기를 기본으로 하여 위상급변 기능이 가능한 새로운 방식의 전압변동 발생기를 제안하여 동작해석을 하였으며 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 성능의 타당성을 입증하였다.

제안한 방식으로 부하 역율이 0.85 및 1.0인 조건에서 Sag와 Swell이 각각 30%, 50%, 70% 발생되도록 시뮬레이션을 하였으며, Sag 30%, 50%와 Swell 30% 대해 실험적으로 동작의 타당성을 확인하였다. 또한 순간정전도 부하의 역률에 무관하게 발생할 수 있음을 확인하였다. 그리고 전압 불평형을 $v_{as} : v_a$ 의 50%, $v_{bs} : v_b$ 의 30%, $v_{cs} : v_c$ 의 60%가 되도록 설정한 후 실험적으로 전압불평형이 제대로 발생됨을 확인하였으며, 임의의 전압불평형율에 대해서도 동작이 가능함을 알 수 있었다. 또한 순간정전 후 위상급변이 발생하는 경우에 대한 실험을 위하여 부하가 저항부하인 경우와 지상부하인 경우로 나누어서 실험을 하였으며, 각 경우에 대하여 위상이 앞서는 경우와 뒤지는 경우 모두 동작이 정확하게 이루어짐을 확인하였다.

제안한 방식의 장단점을 정리하면 다음과 같다.

- 새그, 스웰, 순간정전, 전압불평형의 기능을 갖는 기존의 방식에 위상급변 기능이 가능한 새로운 방식을 제안하였다.
- 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.
- 부하가 무부하 상태에서는 SCR 사이리스터의 턴온과 턴오프가 불가능하므로 전압변동을 발생시킬 수가 없다.
- 제안한 방식에서의 SCR 사이리스터 반도체 소자는 강제 스위칭이 없으므로 방열판을 포함한 스택의 크기를 최소화 할 수 있다. 따라서 직렬변압기와 단권변압기의 크기와 무게가 시스템 전체의 대부분을 차지한다.

전력품질 개선을 위한 Custom Power Device들은 그 중요성에 힘입어 성능 향상 및 새로운 토폴로지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으므로 본 논문

에서 제안한 전력품질 외란 발생기는 그 활용도가 매우 클 것으로 기대된다. 특히 실험실 레벨에서 저비용으로 전력품질 외란을 발생시키고자 하는 시스템 구현에 크게 기여할 것으로 기대된다.

향후 제안한 방식의 전력품질 외란 발생기의 성능향상을 위해서는 다음과 같은 연구가 지속될 필요가 있다고 사료된다.

- 위상급변시 전압의 크기가 변한다는 단점이 있으므로 전압의 크기를 일정하게 유지할 필요가 있는 경우에는 개선된 회로가 필요하다.
- 서지발생의 기능을 갖도록 하여 기존의 고가품이 갖는 성능을 가능한 한 대부분 구현한다.
- 무부하 상태에서도 전압변동 발생이 가능한 구조를 고안한다.
- 직렬변압기의 누설임피던스에 의한 영향을 최소화 한다.

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,” *전력전자학회지* 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] Texas Instruments, *TMS320F28xDSP Peripherals Reference Guide*,

2002.

- [28] Texas Instruments, *TMS320F28xDSP CPU and Instruction Set Reference Guide*, 2002.

APPENDIX

A. SCR 스위치와 변압기 및 슬라이닥스의 결선도

슬라이닥스와 SCR 스위치, 직렬변압기는 그림 A-1과 같이 각각 결선 하도록 한다. 즉 새그를 발생 시킬 때는 ①과 ㉑를 연결하고 스웰을 발생시킬 경우는 ②와 ㉑를 연결함으로써 얻을 수 있다. 위상급변을 얻고자 할 경우에는 ②와 ㉒를 연결하여 a상의 전원전압과 b상의 전원전압을 직렬변압기를 통하여 더해 줌으로써 부하에는 a상보다 지연된 전압이 나타난다.

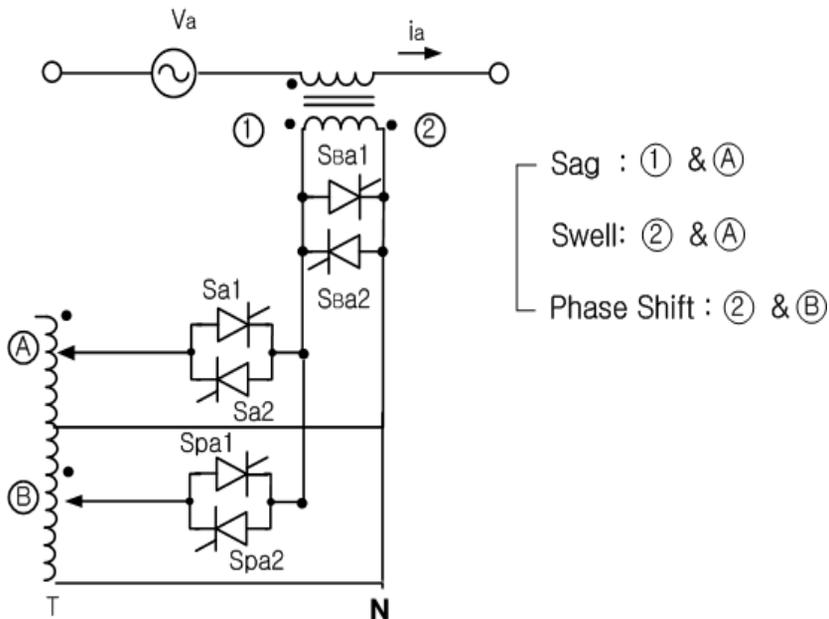


그림 A-1 변압기 접점 결선도

Fig. A-1 Transformer connection

B. DSP 제어보드

DSP는 TMS320F2812를 사용하였으며, TMS320F2812는 마이크로콘트롤러 형식의 DSP 칩으로 그림 B-1에서 보이는 것처럼 제어부에 필요한 대부분의 기능을 칩 내부에 포함하고 있어 매우 간단하게 제어기를 구성할 수 있다[27, 28]. 제어를 위한 DSP의 인터페이스는 그림 B-2와 같이 구성하였다.

표 B-1은 TMS320F2812의 기능을 보이고 있다.

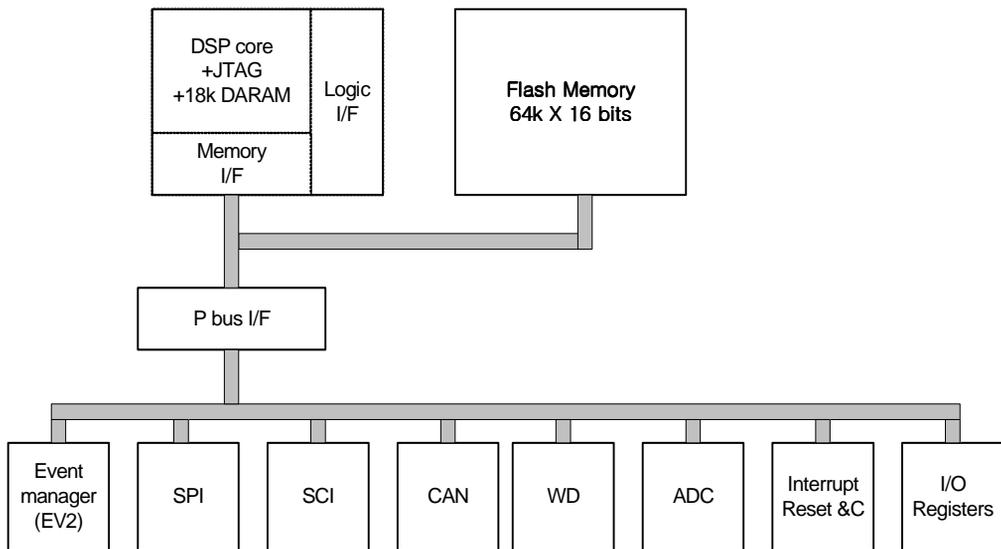


그림 B-1 DSP의 내부구성

Fig. B-1 DSP inner construction

TMS320F2812은 32-bit 연산의 고정 소수점 방식의 연산을 하며 150 MIPS의 연산속도로 프로그램을 실행하고 있다. A/D 컨버터로는 12-bit 16채널의 A/D 컨버터(A/D converter)를 가지고 있으며, 교류입력전압 (V_a), 교류입력전류(I_a)의 A/D 변환에 사용하고 있고, 디지털로 변환된 값은 DSP내에서 스위칭 시점을 파악하는데 사용된다. 그림 B-2는 위에서 언급한 Analog 신호의 잡음 대책으로 입력단에 삽입되어 있는 절연 증폭기(Isolation Amplifier HCPL-7800)를 통과하여 A/D 컨버터에 입력되거나 Differential Amplifier 통과한 후 A/D 컨버터에 입력된다.

Digital I/O로는 여러 개의 포트를 갖고 있으며 이들 신호는 photocoupler를 통해 외부와 전기적으로 절연되어 있다.

DSP core에는 IEEE1149.1 규격의 JTAG(Joint Test Action Group) 신호 핀들이 있어 JTAG로 scan-based emulator와 통신을 하여 프로그램 개발이 용이하도록 되어 있다. TMS320F2812에는 2개의 SCI(Serial Communication Interface)포트가 있으며 하나의 SCI는 상위에 있는 Host Computer와의 통신채널로 쓰이고 있다. 나머지 하나에서의 SCI 입/출력 신호는 잡음대책과 RS485 통신을 위해 Isolated RS-485 칩을 통과하도록 설계되어 있다.

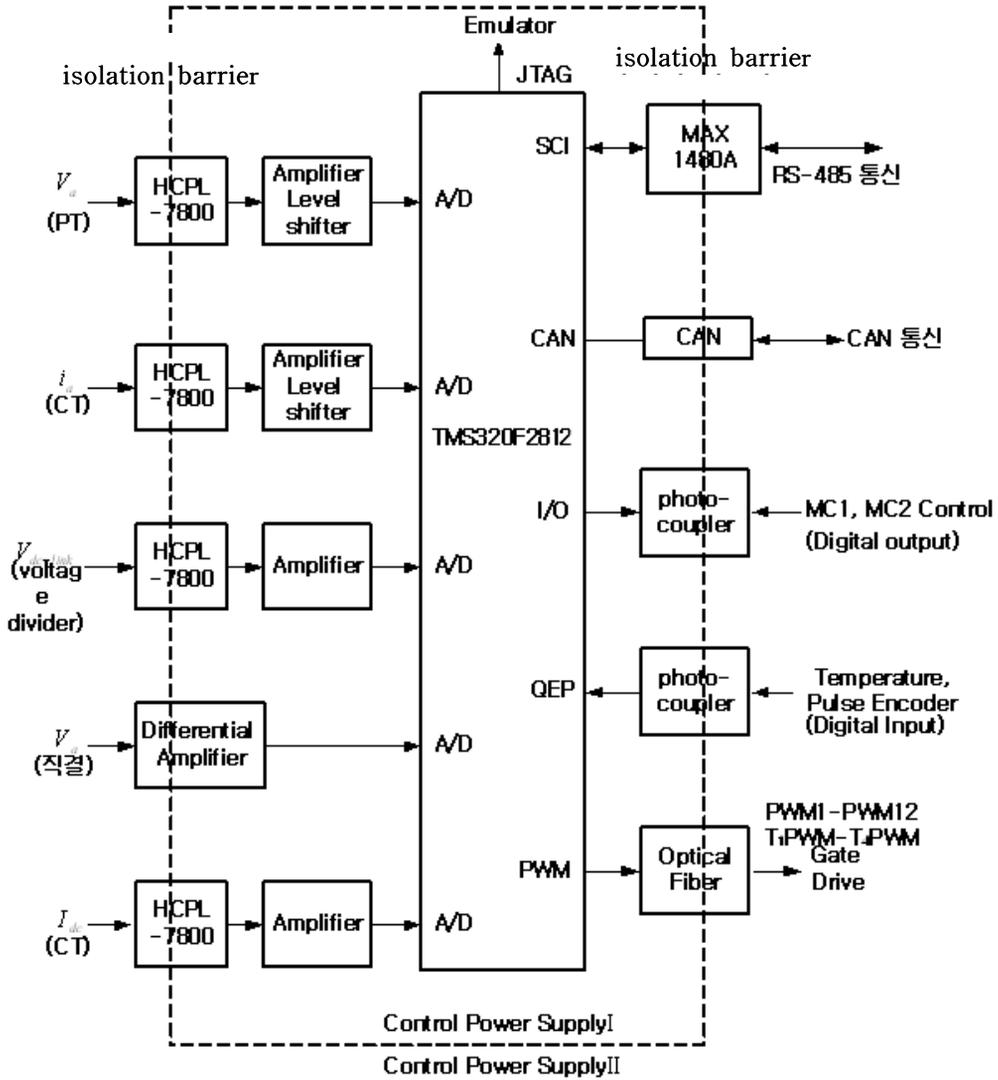


그림 B-2 DSP 인터페이스

Fig. B-2 DSP interface

표 B-1 DSP 제어기 (TMS320F2812) 사양

Table B-1 DSP controller (TMS320F2812) spec.

	기능	사양	용도	
Memory	SARAM	18K×16bits	데이터 메모리	
	Flash	64K×16 bits	주 프로그램	
Analog I/O	A/D channel	12bits, 16 ch.	교류입력전압 (Va)	3개
			교류입력전류 (Ia)	3개
Digital I/O	I/O	9 channels	SCR Gate drive 출력	
	SCI	2 ch.(4 lines)	Sequence control, 외부 통신(RS-485) RS-232C	
	CAN	1ch.(2 lines)	내부 연산 결과 출력	
	Parallel digital I/O	4 ports	MC1, MC2 출력, fault 입력,	
Emulator Pot	JTAG	7 pins	Emulator에 연결	

위에서 설명한 것처럼 제어부의 핵심인 DSP로 입출력되는 모든 신호는 그림 B-2에서 보는 것처럼 절연증폭기(HCPL-7800,AD202), Photocoupler(PC817, TLP550), Isolated Communication chip(MAX 3480B), Optical Fiber를 통해 전기적으로 절연되어 있으며 이를 통해 제어보드가 현장에서 주변 잡음에 대해 충분한 Noise Margin을 갖도록 설계되어 있다. 또한 제어기에서 사용하고 있는 전원은 제어 보드 중에서 DSP를 중심으로 한 부분은 5V를 사용하였으며, 제어 보드에서 주변회로부분과 CT 부분은 15V를 사용하였다.

C. 제어보드의 상세 회로

1) AC 입력전압(v_a) 측정회로

그림 C-2 에서처럼 AC입력전원 전압은 PT변압기를 통해 저압으로 강하된 후 DSP보드에 연결된다. 또한 이 입력전압은 잡음대책으로 삽입된 절연 증폭기(HCPL-7800)을 통과하여 전기적으로 입력전원회로와 이중으로 절연된 채 차동증폭기에 입력된다. 차동증폭기의 출력은 Band pass filter(BPF)를 통과하여 입력전원 전압에서의 맥동성분을 제거한다. 본 논문에서는 입력전원부의 측정점에서 AC capacitor($20\ \mu\text{F}$, $370\ \text{V}_{ac}$, 2.79A)를 부착하여 전원전압의 맥동성분을 현저히 감소시켰으므로 BPF를 거치지 않고, 마지막 단의 *Level shifting* 증폭기를 직접 통과하여 직류전압으로 만든 후 DSP의 A/D 컨버터의 입력단에 연결하였다. 물론 절연증폭기의 전단과 후단의 제어전원은 서로 전기적으로 절연되어 있다.

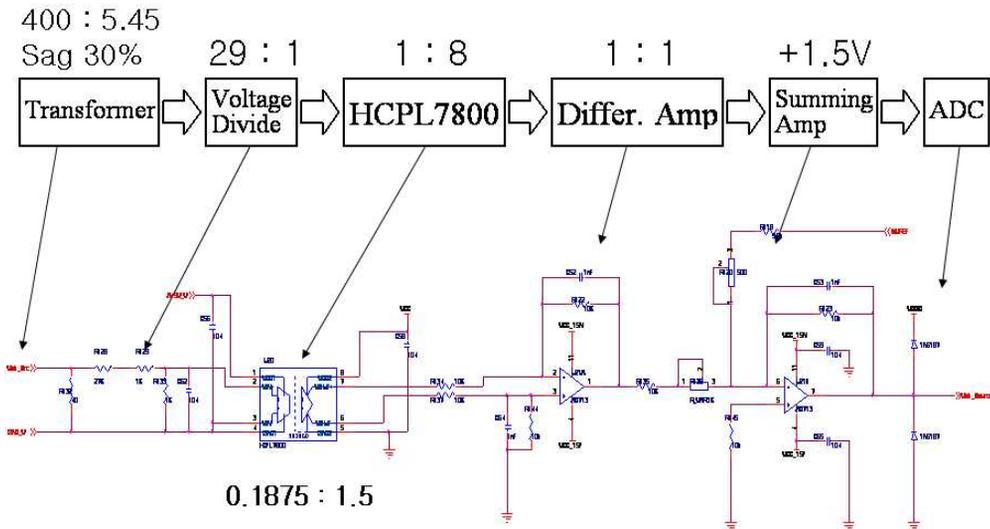


그림 C-1 AC 입력전압 (v_a) 측정회로

Fig. C-1 AC input voltage (v_a) measuring circuit

2) AC 입력전류 (i_a) 측정회로

그림 C-3처럼 입력전원 전류는 CT를 통해 검지된 이후 DSP보드에 연결된다. 또한 이 입력전원은 잡음대책으로 삽입된 절연증폭기를 통해 전기적으로 전원부와 이중으로 절연되어, 차동증폭기에 입력된다. 차동증폭기의 출력신호는 마지막 단의 Level shifting 증폭기를 통해 직류전압으로 만들어진 후 DSP의 A/D 컨버터의 입력단에 연결된다.

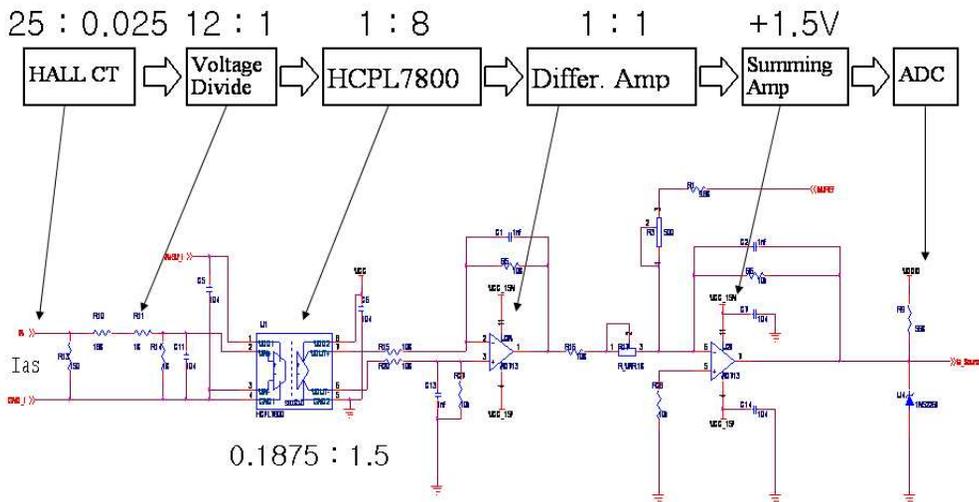


그림 C-2 AC 입력전류 (i_a) 측정회로

Fig. C-2 AC input Current (i_a) measuring circuit

3) Digital 출력 및 Relay 구동회로

그림 C-4에서처럼 DSP의 Digital output 신호는 Photocoupler를 통해 Relay의 조작회로의 전류를 제어하여, 릴레이의 접점을 ON/OFF 제어하고 있다.

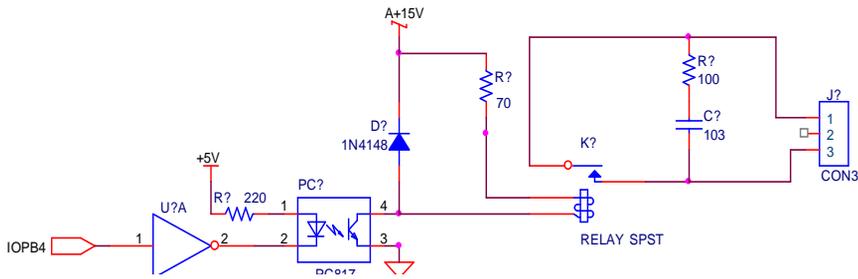


그림 C-3 Relay 구동회로

Fig. C-3 Relay driver

4) SPI를 이용한 DAC회로

TMS320F2812로 프로그램을 실행할 시 내부의 변수값을 아날로그 신호로 출력하기 위해, SPI 포트에 DAC8420 Digital-to-Analog Converter를 연결하여, 동시에 4개의 변수값을 아날로그 신호형태로 출력할 수 있게 하였다. 또한 BNC connector로 출력하게 하여 오실로스코프로 파형을 측정할 때 잡음에 강하게 하였다.

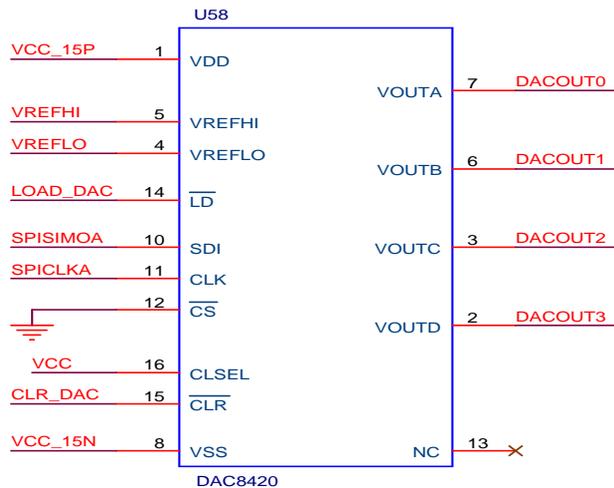


그림 C-4 SPI를 이용한 DAC 출력회로

Fig. C-4 DAC output using SPI

5) SCR 구동 회로

그림 C-9는 SCR 구동용 게이트 드라이버의 일부이다. DSP에서 나오는 출력 신호는 펄스 트랜스의 전류가 흐를 수 있도록 20kHz의 주파수의 구형파가 들어간다.

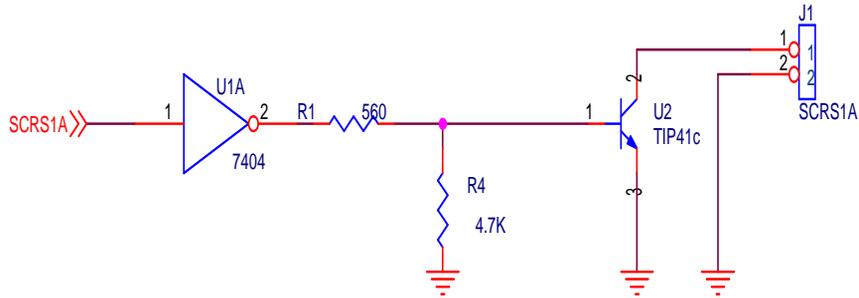


그림 C-5 SCR구동회로

Fig. C-5 SCR driver