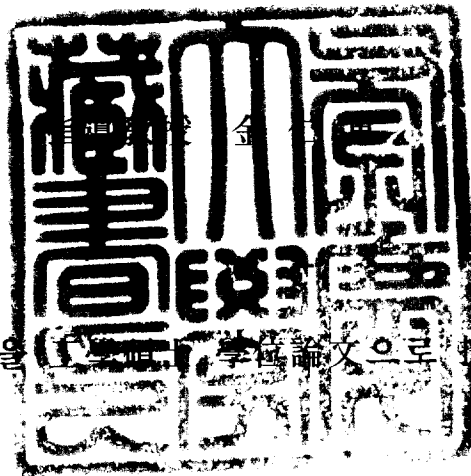


工學碩士學位論文

전압보상 기능을 갖는 플라이휠을 이용한
다이나믹 UPS



이 論文을 () 學位論文으로 提出함

2005年 2월

釜慶大學校 大學院

電氣工學科

李 起 守

李起守의 工學碩士 學位論文을 認准함

2005년 2월

主 審 工學博士 金 千 德



委 員 工學博士 金 榮 學



委 員 工學博士 魯 義 哲



목 차

표 목 차	iii
그림 목 차.....	iv
ABSTRACT	vi
1. 서 론	1
2. 다이내믹 UPS 전체시스템 구성	3
3. 다이내믹 UPS 및 전압보상 시스템	6
3 - 1 PLL 동작원리	6
3 - 2 순간정전보상 UPS 모드	7
3 - 3 전압보상 모드	8
4. 시뮬레이션 결과	9
4 - 1 순간정전보상 UPS 모드	9
4 - 2 전압보상 모드	11
4 - 3 전압불평형 모드	12
4 - 4 위상 변이된 전원전압 재인가시 추종특성	14

5. 시스템 구성	19
5 - 1 DSP 제어보드의 전체 구성	19
5 - 2 기동 및 제어 시퀀스 알고리즘	23
5 - 3 각종 신호 검출 회로 설정	25
5 - 4 인터페이스 회로	26
5 - 5 제어전원	27
6. 실험 결과	31
6 - 1 순간정전보상 UP 모드	31
6 - 2 전압보상 모드	34
6 - 3 PLL을 이용한 전압추종 특성	37
7. 결론	40
참고문헌	42
감사의 글	46

표 목차

표 4-1 시뮬레이션 파라미터	9
표 5-1 DSP controller(TMS320F2812) spec과 사용용도	22
표 5-2 각종신호 검출회로 설정	25

그림 목차

그림 2-1	다이나믹 UPS 시스템 회로도	4
그림 2-2	전원상태에 따른 SSTS와 CONV/INV 동작모드	5
그림 3-1	PLL 블록다이어그램	7
그림 3-2	UPS 모드 제어기 블록 다이어그램	8
그림 3-3	전압 보상 모드 제어기 블록 다이어그램	8
그림 4-1	UPS 모드 시뮬레이션 결과	10
그림 4-2	전압 보상 모드 시뮬레이션 결과	12
그림 4-3	전압불평형 시뮬레이션 결과	13
그림 4-4	전원 전압 30°, 60° 지상 시뮬레이션 결과	14
그림 4-5	전원 전압 90°, 120° 지상 시뮬레이션 결과	16
그림 4-6	전원 전압 30°, 60° 진상 시뮬레이션 결과	17
그림 4-7	전원 전압 90°, 120° 진상 시뮬레이션 결과	18
그림 5-1	DSP를 중심으로 구성된 디지털 제어기	19
그림 5-2	DSP의 내부구성	20
그림 5-3	시스템 기동 시퀀스	24
그림 5-4	제어전원의 구성	27
그림 5-5	SCR 구동용 Interface Board	28
그림 5-6	DSP 보드	28
그림 5-7	다이나믹 UPS 및 전압보상용 실험세트	30
그림 5-8	플라이휠 M/G set(우)와 부하설비(좌)	30

그림 6-1 입력 선간전압과 출력 선간전압 (200V/div)	31
그림 6-2 입력 선간전압(500V/div)과 a상 출력전압(200V/div) 및 전류(20A/div)	33
그림 6-3 입력 선간전압(500V/div)과 a상 출력전압(200V/div) 및 인버터 출력 전류(20A/div)	33
그림 6-4 입력 선간전압(500V/div), a상 출력전압(200V/div), a상 입력전류(20A/div)	34
그림 6-5 입력 선간전압(500V/div), 출력 선간전압(200V/div), a상 출력전류(20A/div)	35
그림 6-6 입력 선간전압(500V/div), S4 전류(20A/div), 출력 선간전압(200V/div)	35
그림 6-7 입력 선간전압(500V/div), 인버터 출력전류(20A/div), 출력 선간전압(200V/div)	36
그림 6-8 입력 선간전압(500V/div), 인버터 출력전류(20A/div), 직렬 변압기 인가전압(200V/div)	36
그림 6-9 입력 선간전압(500V/div), 인버터 출력필터 출력전류(20A/div), 인버터 출력필터 선간전압(200V/div)	37
그림 6-10 PLL 전압 추종특성	39

Dynamic UPS using Flywheel with Voltage Compensation Function

Ki-Su Lee

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

Abstract

This paper deals with the operation of a flywheel energy storage UPS. The ups has good features such as long life-time, improved efficiency, no environment problems, reduced size and space, and low maintenance cost compared with the conventional UPS using battery. The operating principle of the UPS is analysed in each mode including charging, voltage compensation, discharging, and voltage unbalance compensation. Especially, the tracking characteristic of the disturbed phase of the source voltage after outage is analysed. A 3ϕ 10kVA UPS and flywheel energy storage system have been implemented. The flywheel is driven by induction motor and the rotating speed is 3,000 rpm. Various experiments are carried out to investigate the performance of the UPS system. The usefulness of the system is proved through experiments.

1. 서 론

고기능 첨단 자동화 산업이 급속도로 발전함에 따라 마이크로 프로세서, PLC, 컴퓨터, 로봇, 디지털 시스템 등의 사용이 급증하고 있으며 이들 기기는 전원 전압의 변동에 매우 민감하게 작동하므로 안정된 양질의 전원 공급에 대한 중요성이 심각하게 대두되고 있다. 근래에 들어서는 예고 없는 장시간 정전 사고는 거의 없으나 수ms ~ 수초에 이르는 순간정전, 순시전압강하, 순시전압상승, 전압불평형, 고조파발생 등의 전력품질 외란은 지속적으로 증가하고 있다[1-4]. 이러한 외란은 전력품질에 매우 민감한 전자, 전기, 정보통신 관련 기기에 직접적인 영향을 주어 시스템이 오동작 또는 동작정지에 이르는 치명적인 사고를 초래할 가능성이 매우 높다. 이러한 문제를 해결하기 위해 전력 품질을 개선하기 위한 다양한 방안들이 제시되어 사용되고 있다 [1-6]. 이러한 외란에 대한 대책으로 UPS가 보편적으로 사용되고 있다.

기존의 배터리 방식 UPS는 주로 소용량에 사용되어 용량이 커지면 구입비용 및 유지비용이 매우 높아지며 수명이 짧고 많은 공간을 차지하는 등의 문제점들을 가지고 있어 그 적용범위가 좁다[7-10]. 또한 미국, 독일 등의 선진국에서는 대용량 자동화 생산 라인에서도 저비용으로 무정전이 가능하며 전력품질 외란을 없애주는 브리지 전력 시스템(Bridge Power System)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[11]. 한 전원에서 다른 전원으로 절환 될 때 제어된 유효전력 및 무효전력을 해당 부하에 연속적으로 공급이 가능하도록 하는 브리지 전력시스템의 에너지 저장매체로는 플라이휠, 슈퍼 커패시터, 초전도체등이 사용되고 있으나 현재 플라이휠이 가장 경제적이고 실용성이 높다[11-16]. 현재 국내에서는 하나로 통신, 서울대 병원 등에서 다이내믹

UPS를 사용 중이지만 모두 수입해 사용하고 있어, 주기적인 점검이나 사소한 이상이 생기더라도 자체적으로 해결하지 못하고 해당 제조업체에 의존하고 있는 실정이다.

따라서 다이내믹 UPS 분야에서의 첨단 기술력을 확보함으로써 국가 경쟁력 향상에 기여하고자 본 연구를 시작하게 되었다.

본 논문에서는 고속 플라이휠 구동, 순간적인 에너지 흐름 제어 등 고난도의 기술을 요하지만 실용적이라고 인정되는 플라이휠 에너지 저장장치를 이용한 다이내믹 UPS[17-21]를 구현하여 그 성능을 확인하고자 한다. 무순단 전원공급뿐 아니라 전압보상도 가능함을 실험을 통해 입증하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다.

2장에서는 제안한 다이내믹 UPS의 전체시스템 구성과 단품의 기능에 대해 간략히 기술하고 시스템의 회로도와 전원상태에 따른 SSTS와 CONV/INV 동작모드를 보인다. 3장에서는 UPS 동작 후 정상전압을 재인가할 때 위상을 일치시키기 위한 PLL(Phase Locked Loop)의 원리에 대해 설명하고 제안한 시스템이 갖는 순간정전보상 UPS 모드와 전압보상 모드에 대해 기술한다. 4장에서는 각각의 모드에 대한 시뮬레이션 결과를 제시하고, 본 논문에서 제안한 회로의 특성이 우수함을 알아본다. 5장에서는 실제로 구현한 시스템의 주요 구성품의 특징과 제어 시퀀스 알고리즘, 신호 검출 회로, 인터페이스 회로 및 제어전원에 대해 기술하고 실제의 구성을 살펴본다. 6장에서는 구현한 시스템의 각각의 모드에 대한 실험 결과를 제시하고, 무순단 전원보상이 가능함을 보임으로써 다이내믹 UPS의 효용성을 입증한다. 마지막으로 7장에서는 제안한 시스템의 요약 및 결과에 대해 정리·기술하고 기대 효과에 대해 기술한다.

2. 다이나믹 UPS 전체시스템 구성

본 논문에서 제안하는 다이나믹 UPS 시스템의 구성도는 그림 2-1과 같다. 시스템을 구성하는 주요 단품으로는 SAG/SWELL GENERATOR, Solid State Transfer Switch (SSTS : S1-S4), 전압보상용 변압기(Ta-Tc), PWM 컨버터/인버터 (CONV/INV), PWM 인버터/컨버터(INV/CONV), 필터(FILTER), 전동발전기와 플라이휠(M/G Flywheel), 엔진발전기(ENG. GEN.)가 있다. 각 단품의 기능을 간단히 정리하면 다음과 같다.

- SSTS : S1은 정상상태에서 온되어 있고 3상 전원이 정전되었을 때에만 오프되어 전력의 역류를 방지한다. S2는 정상상태에서 온되어 있고 Sag/Swell 발생시에만 오프되어 전압 보상용 변압기에 보상전원이 인가될 수 있도록 한다. S3은 정상상태시 온되어 전압보상용 변압기를 바이패스하고 Sag/Swell 발생시 오프되어 전압보상이 가능하도록 한다. S4는 정상상태에서 오프되어 있고 Sag/Swell 발생 시에만 온되어 전압보상용 변압기에 인버터 출력전압이 인가되도록 한다. S5는 정상상태시 오프되어 있고 전원의 정전이 10-40초 이상 지속되는 경우에 온되어 엔진 발전기 출력을 부하에 공급할 수 있도록 한다.
- 전압 보상용 변압기 : 전원 전압에 Sag 발생시 CONV/INV 출력 전압으로 부족분을 보상하여 부하에 일정전압이 공급되도록 한다.
- PWM 컨버터/인버터 : 정상상태시에는 PWM 컨버터로 동작하여 3상 전원에서부터 플라이휠에 에너지를 공급하고 Sag, Swell이나 정전 시에는 인버터로 동작하여 전원전압을 보상하거나 부하에 전원을 공급한다.

- PWM 인버터/컨버터 : 평상시에는 인버터로 동작하여 전동발전기와 플라이휠을 구동한다. Sag/Swell 발생시와 정전시에는 PWM 컨버터로 동작하여 DC 링크 전압을 약 400V로 일정하게 제어하여 CONV/INV에 직류전원을 공급한다.
- 필터 : THD를 3% 이내로 하기 위한 필터역할을 하며 고주파 공진 현상이 발생하지 않도록 설계한다.
- 전동발전기와 플라이휠 : 전동발전기는 유도전동기를 사용하여 플라이휠을 구동하며 플라이휠에 저장된 에너지를 전기에너지로 변환하는 경우에는 유도기를 발전기로 동작하도록 제어한다. 여건상 운전 속도는 3000rpm으로 한다[22-26].

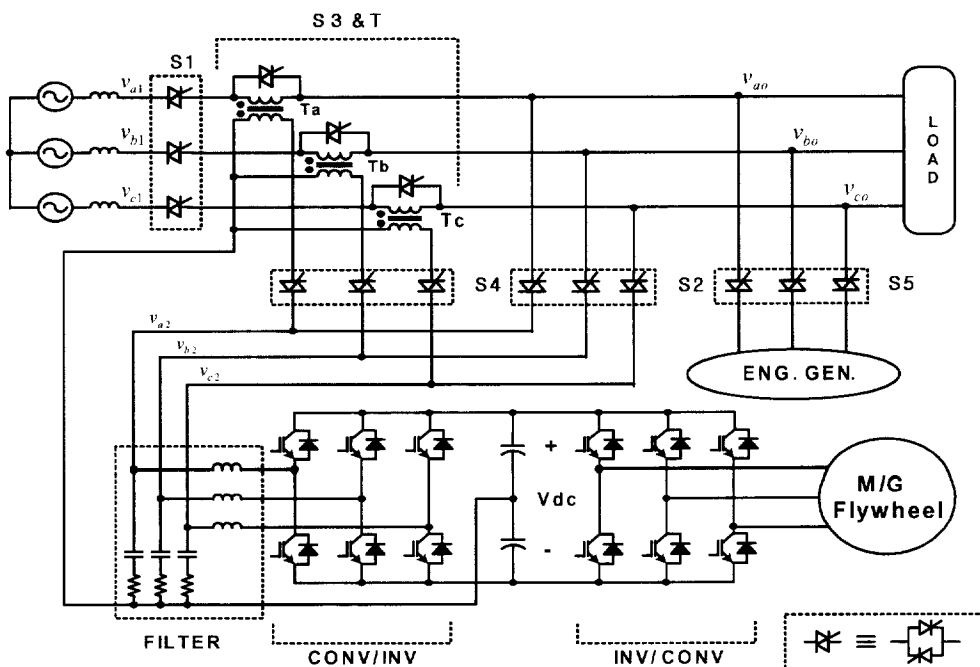


그림 2-1 다이내믹 UPS 시스템 회로도

- 엔진 발전기 : 플라이휠에 저장된 유효 에너지가 방출된 후에도 계속 정전상태가 유지되면 엔진 발전기 출력으로 정원공급을 전환한다. 그런데 실험실에서는 엔진 발전기의 설치 및 구동이 곤란하여 상용전원을 이용하여 유사한 효과를 얻도록 한다.

전원상태가 Normal, Sag/Swell, Short Outage, Long Outage, 등으로 변동하는 경우 5개의 SSTS (S1-S5)와 CONV/INV의 동작모드를 정리하면 그림 2-2와 같다.

Source	Normal	Sag/Swell	Normal	Short Outage	Normal	Long Outage		Normal
Mode	Charging	Vol. Comp.	Charging	UPS	Charging	UPS	Charging	Charging
S1		ON		OFF	ON	OFF		ON
S2	ON	OFF			ON			
S3	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF		ON
S4	OFF	ON		OFF				
S5				OFF			ON	
CONV/INV	CONV	INV	CONV	INV	CONV	INV	CONV	CONV

그림 2-2 전원상태에 따른 SSTS와 CONV/INV 동작모드

3. 다이나믹 UPS 및 전압보상 시스템

플라이휠 저장 에너지 UPS는 크게 충전 모드, 전압 보상 모드, UPS 모드 등 세 개의 동작 모드를 가지고 있다. 먼저 충전 모드는 입력되는 전원 전압이 정상일 경우에 작동하는 모드로 입력 전원으로로부터 플라이휠에 에너지를 저장하는 동작이 이루어진다.

전압 보상 모드에서는 전원 전압에 Sag, Swell 등이 발생하였을 때 플라이휠에 저장된 에너지를 전압 보상을 직렬 변압기를 통해 보상해 준다. 전원 전압이 50% 이하로 내려가게 되면 UPS 모드로 동작하여 전원 측의 SSTs를 차단해 전력의 역류를 막고 플라이휠의 에너지로 부하에 전원을 공급하게 된다.

그림 2-1에서 보듯이 플라이휠 저장 에너지 UPS에는 정전 시간이 길어지는 경우 사용할 디젤 엔진 발전기와 이를 연결시키기 위한 SSTs(S5)가 포함되어 있다. 그리고 직렬 변압기는 전압 보상 모드에서만 사용되므로 그 외의 모드에서 바이패스 하기 위해 SSTs(S3)가 설치되어 있다.

3 - 1 PLL 동작원리

입력 전원 전압에 Sag, Swell, 전압불평형, 위상 지연 등의 문제가 발생하였을 때, 부하단에 인가해 주어야 할 기준 전압과의 차이를 UPS에서 보상해 주게 된다. 이때 부하단에 인가할 기준 전압을 PLL(Phase Locked Loop)을 통해 만들어 내었다. 그림 3-1은 본 논문에서 사용한 PLL의 블록 다이어그램이다.

세 상의 전압을 입력받아 이를 d-p 정지 좌표계로 변환하고 이를 다시 d-p 회전 좌표계로 변환한 다음 이중 d-축 좌표를 일정하게 유지하여 기준 전압의 위상을 제어하게 된다. 좌표 변환을 위한 수식은 각각 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} U_{qs} \\ U_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{as} \\ (U_{cs} - U_{bs})/\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

$$\begin{bmatrix} U_{qe} \\ U_{de} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta^*) & -\sin(\theta^*) \\ \sin(\theta^*) & \cos(\theta^*) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{qs} \\ U_{ds} \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

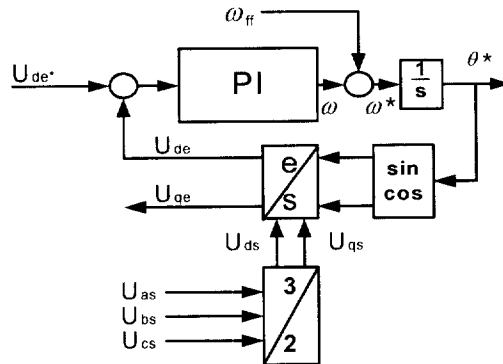


그림 3-1 PLL 블록다이어그램

이를 통해 전원 전압의 위상 변이 뿐만 아니라 UPS 동작 후 정상적인 전원 전압이 재인가 될 때에도 즉시 위상을 일치시켜주게 된다.

3 - 2 순간정전보상 UPS 모드

전원측 전압강하가 50%를 초과하면 다이내믹 UPS는 UPS 모드로 동작한다. 이때 전원부와 연결된 SST(S1)은 차단하여 전력의 역류를 방지한다.

그림 3-2는 UPS 모드에서 a상에 대한 제어 블록 다이어그램이다. UPS 모드에서는 변압기를 거치지 않고 부하단과 직접 연결이 되어 인버터의 출력이 필터를 거친 후 부하에 인가되게 된다.

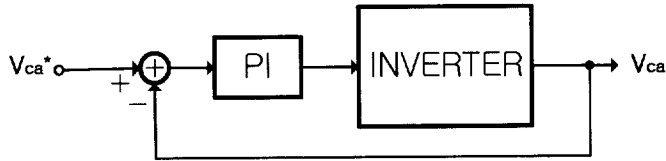


그림 3-2 UPS 모드 제어기 블록 다이어그램

3 - 3 전압보상 모드

입력 전원에 Sag나 Swell, 또는 전압불평형 등의 문제가 발생하면 이를 보상하기 위해 다이내믹 UPS는 전압 보상 모드로 동작한다. 이 경우에는 플라이휠에 저장된 에너지를 컨버터를 통해 DC 링크 전압을 일정하게 유지하고, 인버터로 보상해야할 전압을 직렬 변압기를 통해 인가한다.

그림 3-3은 전압 보상 모드에서 a상에 대한 제어 블록 다이어그램이다. 부하에 인가되는 전압과 기준 전압과의 차이만큼 변압기의 2차 측에 인가해 준다. 이때 $n1$ 과 $n2$ 는 변압기의 1차 측과 2차 측의 권선비를 의미한다.

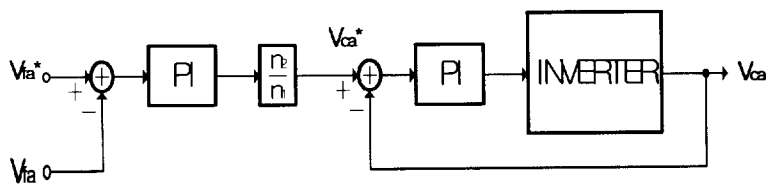


그림 3-3 전압 보상 모드 제어기 블록 다이어그램

4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에 사용한 파라미터는 표 4-1에서와 같다.

표 4-1 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Value
Source voltage	3 ϕ , 220V, 60Hz
Load(L, RL)	10.9mH, 4.11 Ω
DC link voltage	400V
Switching frequency	10kHz
Filter(Cf, Lf, Rf)	280uF, 2mH, 0.5 Ω

시뮬레이션에서 플라이휠은 PWM제어를 통해 쉽게 구동할 수 있으므로 제외하고 대신 전압 보상 모드와 UPS 모드에서 사용하기 위해 400V DC 전압원을 연결하여 시뮬레이션 하였다. 샘플링 시간은 1 μ s 이고, 각각 250ms 까지 시뮬레이션 하였다. 각 모드에 대한 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

4 - 1 순간정전보상 UPS 모드

그림 4-1은 UPS 모드에서의 시뮬레이션 결과이다. 입력 전원 전압을 임의로 50ms 와 150ms 에서 차단하고 100ms 와 200ms 에서 다시 인가해 주었다. 그림 4-1에서 보이는 바와 같이 입력 전원 전압이 차단되더라도 다이내믹 UPS에서 정상 전원을 만들어 부하에 인가해 주고 있음을 알 수 있다.

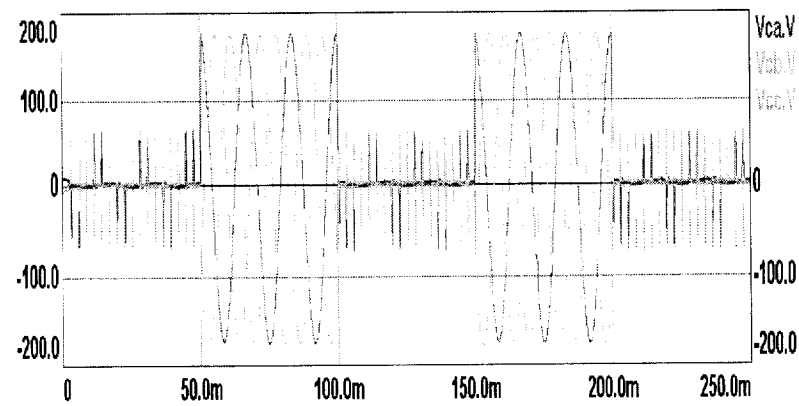
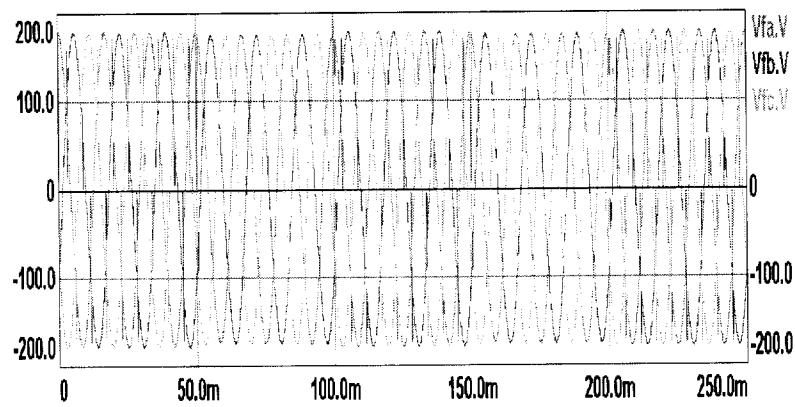
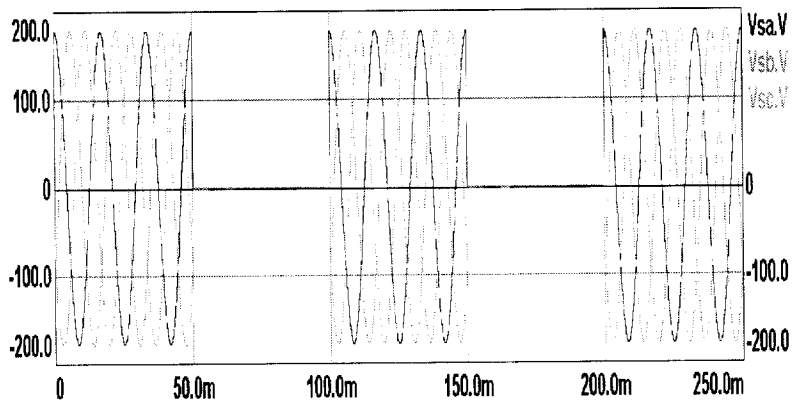
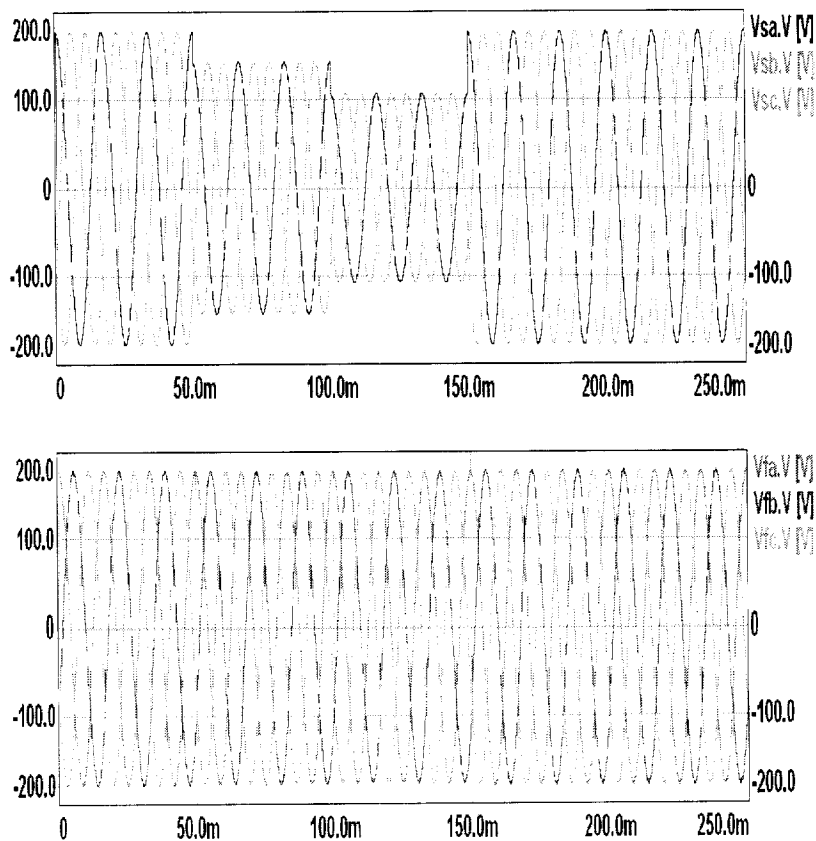


그림 4-1 UPS 모드 시뮬레이션 결과

4 - 2 전압보상 모드

그림 4-2는 전압 보상 모드에서의 시뮬레이션 결과이다. 입력 전원 전압에 임의로 50ms 에서 20% Sag를 발생시켰고 100ms 에서 40% Sag를 발생시킨 뒤 150ms 에서 정상 전원으로 복구하였다. V_{sa} , V_{sb} , V_{sc} 는 입력 전원 전압이고, V_{fa} , V_{fb} , V_{fc} 는 부하에 인가되는 전압이며, V_{ca} , V_{cb} , V_{cc} 는 컨버터에서 직렬 변압기 2차측에서 보상하여주는 전압이다. 그림 4-2에서 보이는 바와 같이 입력 전원 전압에 Sag가 발생하더라도 부하단에는 정상적인 전압이 인가되고 있음을 알 수 있다.



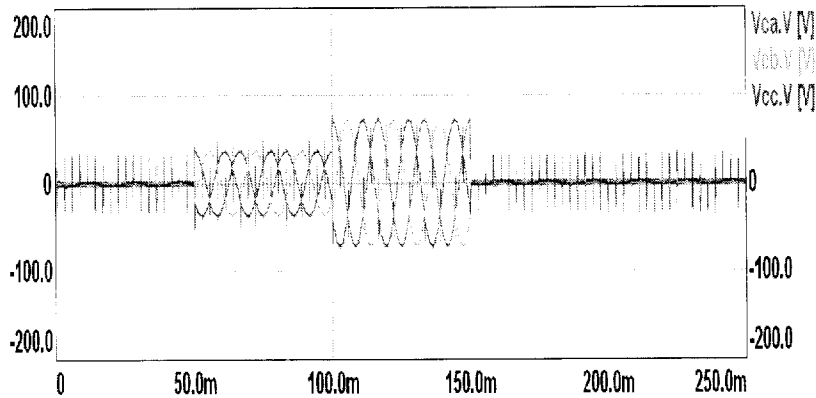


그림 4-2 전압 보상 모드 시뮬레이션 결과

4 - 3 전압불평형 모드

그림 4-3은 입력 전원에 전압불평형이 일어났을 경우의 시뮬레이션 결과이다. 이 시뮬레이션을 위해서 50ms 에서 100ms 까지 a상 전압은 그대로 두고 b상과 c상 전압을 50%로 줄였다. 그리고 150ms 에서 200ms 까지 마찬가지로 a상 전압은 그대로 두고 b상과 c상 전압을 50%로 줄인 뒤 7차 고조파를 추가하고 b상과 c상을 각각 -15° 와 $+15^\circ$ 로 위상변조 하였다. 전압불평형이 일어나더라도 각 상이 독립적으로 제어되어 부하에는 항상 정상적인 전압을 공급하여줄 수 있음을 알 수 있다.

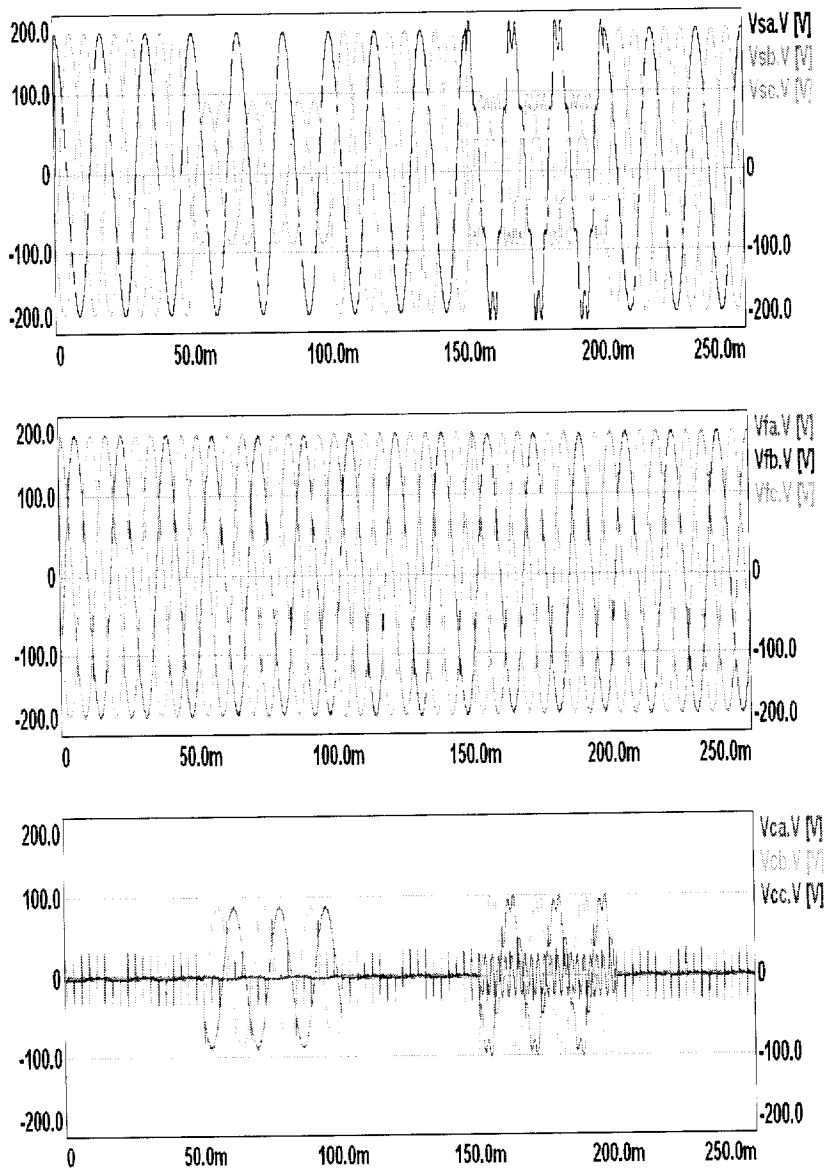
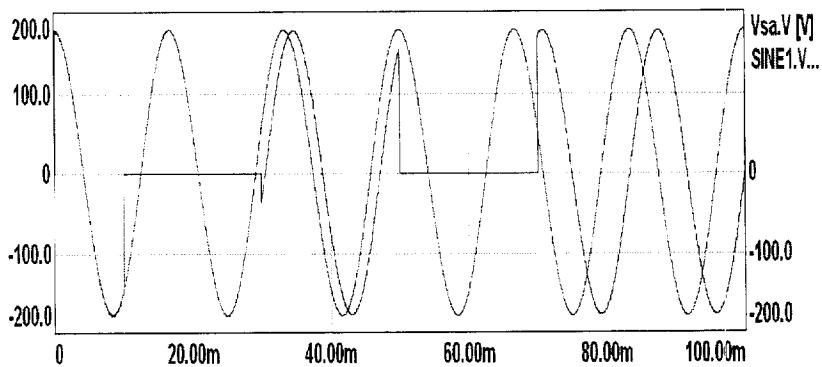


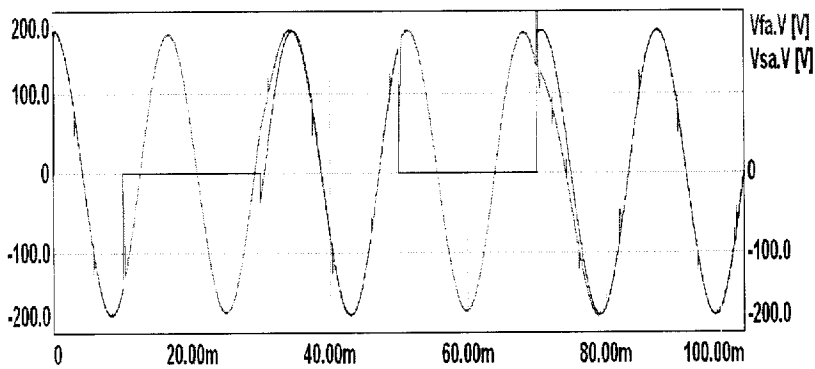
그림 4-3 전압불평형 시뮬레이션 결과

4 - 4 위상 변이된 전원전압 재인가시 추종특성

계통의 사고로 인한 Outage 발생 후 공급 전원이 정상으로 재인가되는 경우 이전의 전압에 비해 위상이 변동될 수가 있다. 이러한 경우 UPS 모드에서 정상 모드로 전환될 때 위상 보정이 이루어져서 전원 전압을 추종할 수 있어야 한다.



(a)



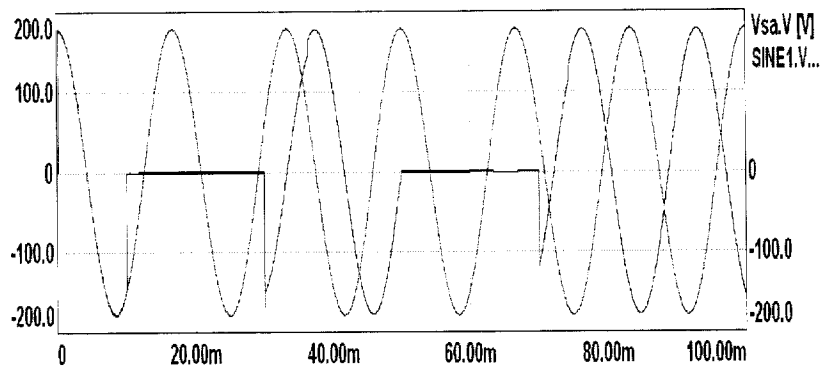
(b)

그림 4-4 전원 전압 30°, 60° 지상 시뮬레이션 결과

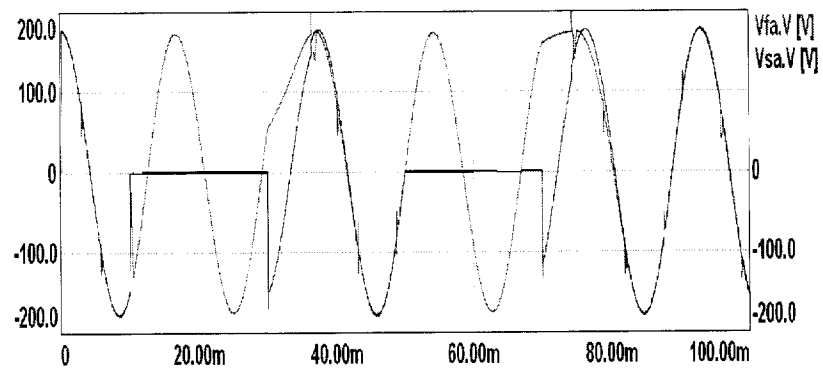
그림 4-4는 전원 전압이 30° 와 60° 지상 되었을 때의 시뮬레이션 파형이다. 그림 (a)는 초기의 전원 전압과 위상 지연된 전원 전압 파형을 보여주고 있다. 그림 (b)는 위상 지연된 전원 전압과 보상이 된 부하 전압을 보여주고 있다. 10ms와 30ms에서 전원 전압이 0이 되어 UPS모드로 동작하고 50ms와 70ms에서 정상 전원이 각각 30° 와 60° 지상인 상태로 인가되었으나 그림 (b)에서 보는바와 같이 1 사이클 안에 정상 전원과 위상을 일치시키고 있음을 알 수 있다.

그림 4-5는 전원 전압이 90° 와 120° 지상 되었을 때의 시뮬레이션 파형이다. 마찬가지로 10ms와 30ms에서 전원 전압이 0이 되어 UPS모드로 동작하고 50ms와 70ms에서 정상 전원이 각각 90° 와 120° 지상인 상태로 인가되었으나 그림 (b)에서 보는바와 같이 1 사이클 안에 정상 전원과 위상을 일치시키고 있음을 알 수 있다.

그림 4-6은 전원 전압이 30° 와 60° 진상 되었을 때의 시뮬레이션 파형이다. 10ms와 30ms에서 전원 전압이 0이 되어 UPS모드로 동작하고 50ms와 70ms에서 정상 전원이 각각 30° 와 60° 만큼 진상인 상태로 인가되었으나 그림 (b)에서 보는바와 같이 1 사이클 안에 정상 전원과 위상을 일치시키고 있음을 알 수 있다.

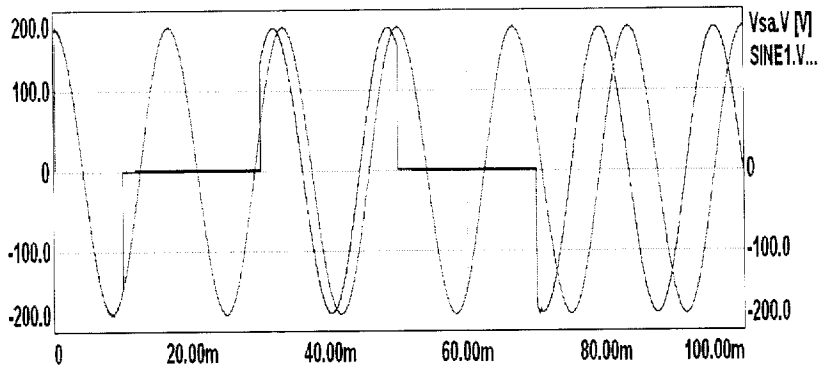


(a)

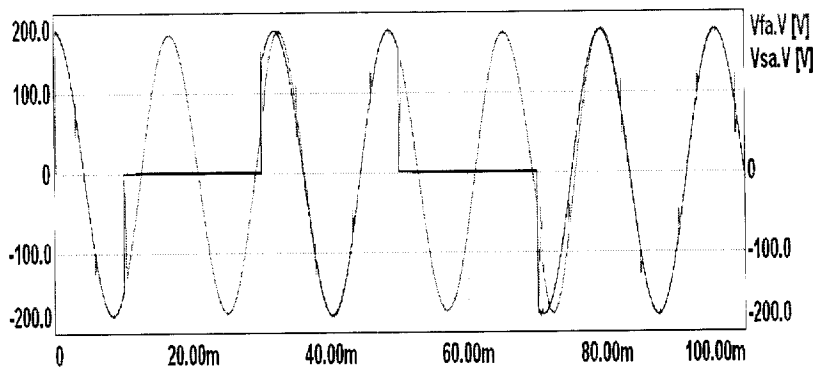


(b)

그림 4-5 전원 전압 90° , 120° 지상 시뮬레이션 결과



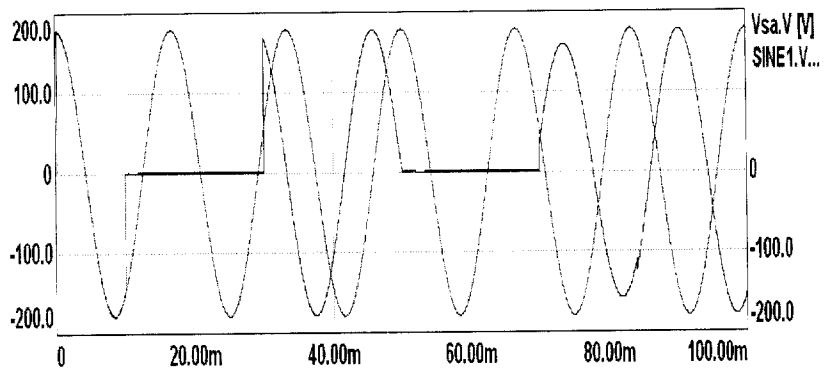
(a)



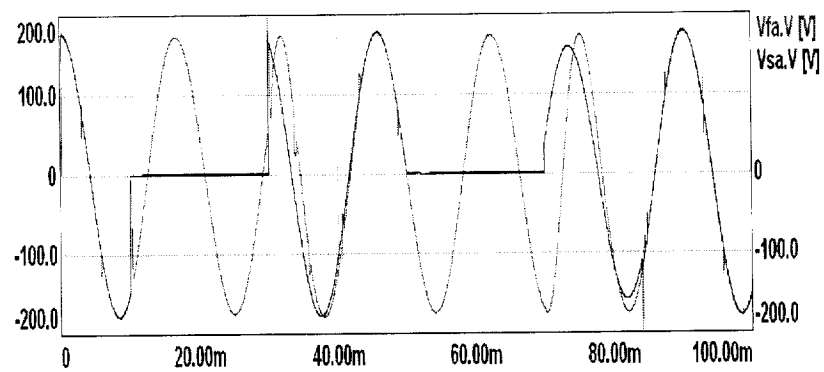
(b)

그림 4-6 전원 전압 30°, 60°진상 시뮬레이션 결과

그림 4-7은 전원 전압이 90°와 120°진상 되었을 때의 시뮬레이션 파형이다. 10ms와 30ms에서 전원 전압이 0이 되어 UPS모드로 동작하고 50ms와 70ms에서 정상 전원이 각각 90°와 120°만큼 진상인 상태로 인가되었으나 그림 (b)에서 보는바와 같이 1 사이클 안에 정상 전원과 위상을 일치시키고 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 4-7 전원 전압 90°, 120°진상 시뮬레이션 결과

5. 시스템 구성

5 - 1 DSP제어보드의 전체 구성

제어부는 DSP(TMS320F2812)를 중심으로 그림 5-1과 같이 구성하였다.

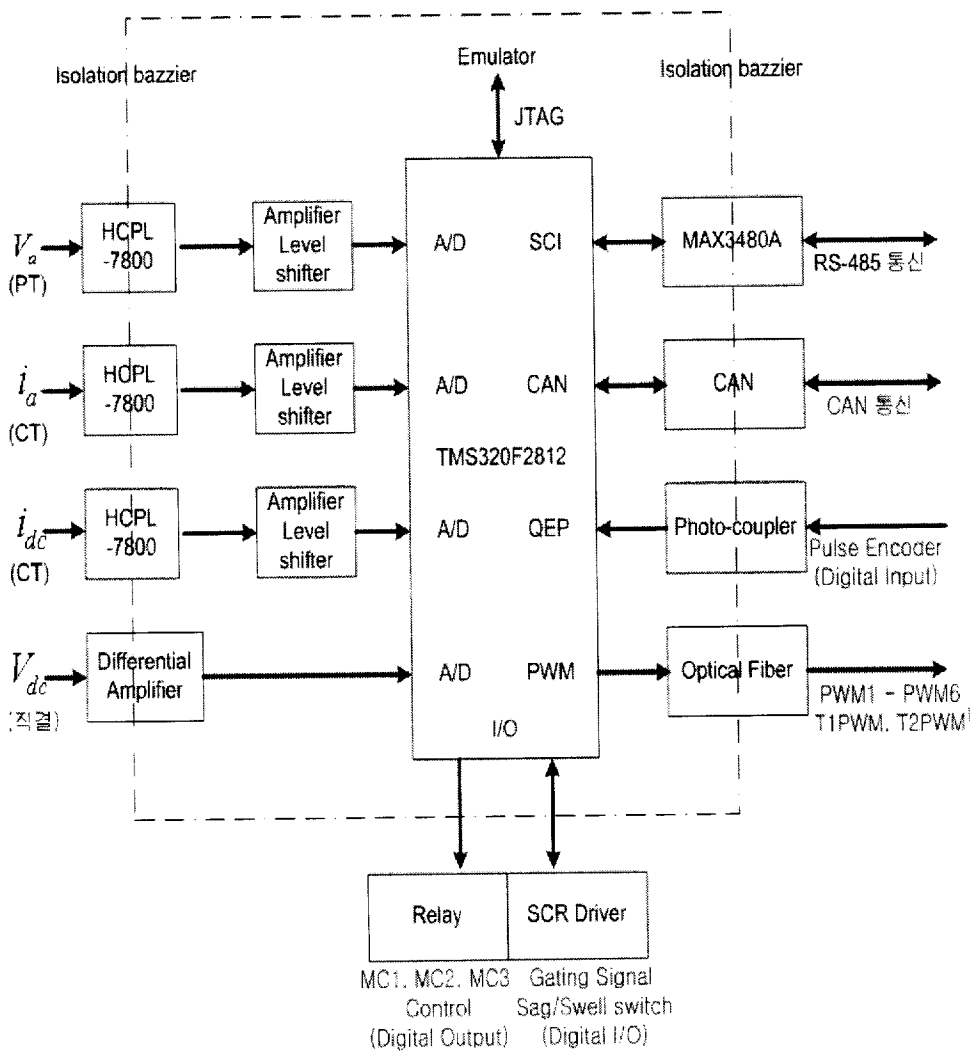


그림 5-1 DSP를 중심으로 구성된 디지털 제어기

TMS320F2812는 microcontroller 형식의 DSP 칩으로 그림 5-2에서 보이는 것처럼 제어부에 필요한 대부분의 기능을 칩 내부에 포함하고 있어 매우 간단하게 제어기를 구성할 수 있다. 표 5-1은 본 논문에서 사용하고 있는 TMS320F2812의 기능을 보이고 있다[27-28].

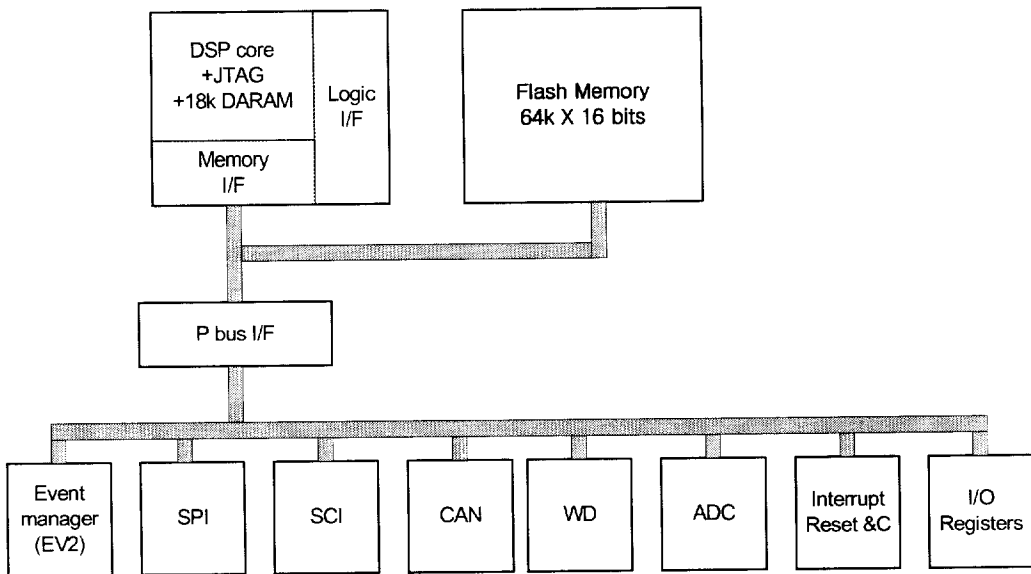


그림 5-2 DSP의 내부구성

TMS320F2812는 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, 본 과제에서는 AC/DC PWM 컨버터의 교류입력전압 (V_a), 교류입력전류 (I_a), DC Link 전압 (V_{dc}), DC Link 전류(I_{dc})의 A/D 변환에 사용하고 있으며, 디지털로 변환된 값은 DSP내에서 제어 알고리즘 연산에 사용된다. 위에서 언급한 Analog 신호는 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.

AC/DC 컨버터와 DC/AC 컨버터를 제어하기 위한 PWM 신호는 DSP내에 내장되어 있는 PWM 발생기에 의해 만들어지며, 이 PWM 신호는 Optical Fiber를 통해 Gate driver를 구동하는 신호로 사용된다

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 SCI(Serial Communication Interface)포트가 2개 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.

위에서 설명한 것처럼 제어부의 핵심인 DSP로 입출력되는 모든 신호는 그림 5-1에서 보는 것처럼 절연증폭기(HCPL-7800), Photocoupler (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 제어에서 사용하고 있는 전원은 그림 5-4에서 보는 것처럼 제어 보드 중에서 DSP를 중심으로 한 부분은 제어전원 I (CPS I)를 사용하였으며, 제어보드에서 주변회로부분과 CT, 부분은 제어전원 II (CPS II)를 사용하였다.

표 5-1 DSP controller(TMS320F2812) spec과 사용용도

	기 능	사 양	용 도	기 타
Memory	SARAM	18K×16bits	데이터 메모리	
	Flash	64K×16bits	주 프로그램	
External Interface			외부 메모리 확장용	
Analog I/O	A/D channel	16ch. 12bits	교류입력전압 (Va)	9개
			교류입력전류 (Ia)	5개
			DC Link 전압, 전류 (Vdc, Idc)	2개
Digital I/O	PWM	8ch.	Gate drive 출력	PWM1- PWM6 T1PWM, T2PWM
	SCI	2ch. (4 lines)	Sequence control, 외부 통신(RS-485) RS-232C	
	CAN	1ch. (2 lines)	보드간 네트워크 연결	
	DAC	4ch. (4 lines)	내부 연산 결과 출력	
	Parallel digital I/O	4 ports	SCR signal 출력, Fault 입력, Encoder Pulse 입력	
Emulator Port	JTAG	7 pins	Emulator에 연결	

5 - 2 기동 및 제어 시퀀스 알고리즘

전체 시스템의 원활한 동작을 위해서는 시퀀스 제어가 잘 되어야 할 필요가 있다. 그림 5-3은 시스템 기동 시퀀스를 나타내며, 기동 시퀀스를 설명하면 다음과 같다.

- 1) start 지령과 동시에 전자접촉기 MC1이 Close된다.
- 2) MC1이 Close 되면 교류 입력전원은 초기 충전저항 R_p 와 PWM 컨버터의 다이오드를 통하여 3상 전파정류되어 직류 링크단 커패시터를 충전하기 시작한다. 이때 충전 시정수는 1sec이다.
- 3) MC1이 Close 된 3sec 후 MC2를 Close한다.
- 4) MC2가 Close 되면 직류 링크단 전압은 $220V_{AC} \times \sqrt{2} \approx 311V_{DC}$ 로 된다.
- 5) MC2가 Close 되고 나서 약 1sec 후에 VVVF PWM Converter가 동작을 개시하여 Flywheel이 회전하기 시작한다.
- 6) 유도전동기에 의해 구동되는 Flywheel이 정상 속도에 도달하면, VVVF PWM 컨버터를 잠시 동안 회생모드로 작동시켜 DC LINK 전압 V_{dc} 를 400[V]로 제어한 후 Voltage compensation mode 혹은 UPS mode를 대기한다. DC Link 전압은 출력단 전압의 고조파상분과 필요로 하는 기본파성분과 충전모드에서의 전압확보 등을 고려하여 작동모드에 따라 300V(충전모드)와 400V(전압보상모드 및 UPS 모드)로 가변 제어 한다
- 7) Line voltage가 10-50% sag 범위에 있을 때는 전압보상모드(voltage compensation mode)에서 작동하고, 50% 이상의 sag가 발생시는 UPS 모드(UPS mode)로 전환한다.

- 8) 전압보상모드나 UPS 모드에는 다음 상황에 대비하기 위해 충전모드 (charging mode)로 전환하여 Flywheel에 충분한 에너지를 저장시킨다.
- 10) 정상 동작 중 인버터 작동을 정지시키고자 하거나 전체 시스템의 어느 한 부분의 고장이 발생한 경우는 Stop 혹은 Fault 신호를 발생한다.
- 11) Stop 혹은 Fault 신호가 발생되면 즉시 컨버터의 작동을 중지시킨다.
- 12) 컨버터와 인버터 작동 중지 후 0.2sec 경과 후 MC1과 MC2를 Open하고 MC3를 Close한다. 그러면 컨버터-인버터 시스템은 교류전원으로부터 차단되고 직류 링크단 커패시터의 에너지는 Rd를 통하여 방전하기 시작한다. 방전 시정수가 4sec이므로 약 15sec 경과 후 MC3를 Open한다.
- 13) Fault가 발생하였을 경우는 고장원인 제거 후 reset을 취급하여 기동 대기 상태로 하고, 정상적인 Stop을 취급하였을 경우는 그대로 둔다.
- 14) 원하는 시점에 다시 기동을 하기 위해서는 Start 지령에 따라 작동한다.

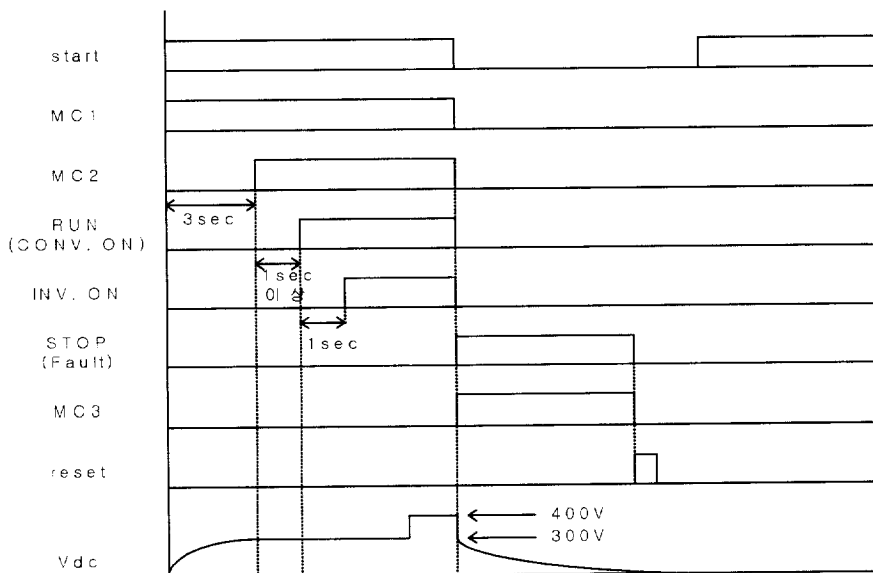


그림 5-3 시스템 기동 시퀀스

5 - 3 각종 신호 검출 회로 설정

DSP로 입력되는 각 전압 및 전류 값의 측정범위 및 정밀도 등을 표 5-2와 같이 보여준다.

표 5-2 각종신호 검출회로 설정

DC LINK전압 (V_{DC}) 변환	최대측정 전압값	400[V]	0[V]	
	ADC 입력값	3[V]	0[V]	
	디지털 값	4096	0	
	전압변환비(KRVLT) = $\frac{4096}{400V} = 10.24$			
교류전원전압 (V_a) 변환	최대측정 전압값	400[V]	0[V]	-400[V]
	ADC 입력값	3[V]	1.5[V]	0[V]
	디지털 값	2048	0	-2048
	전압변환비(KRVLT) = $\frac{4096}{800V} = 5.12$			
교류 및 직류전류 (i_a) 변환	최대측정 전류값	25[A]	0[A]	-25[A]
	ADC 입력값	3[V]	1.5[V]	0[V]
	디지털 값	2048	0	-2048
	전류변환비(KRCUR) = $\frac{4096}{50A} = 81.92$			

5 - 4 인터페이스 회로

제어부와 CVCF 컨버터 및 VVF 컨버터 게이트 구동부 간의 인터페이스는 IGBT 소자의 온·오프 신호, 게이트 구동부 전원공급, 직류 링크단 전압 검출 신호, 컨버터 및 인버터 입출력 전류 신호, 방열판 온도검출 신호 등을 위하여 설치되며 그 연결은 다음과 같다.

가. Fiber Optic Cable

제어부에서 발생된 PWM신호는 광케이블을 통하여 게이트 구동부로 전송됨으로써 외부 노이즈에 의한 영향을 최소화한다.

나. 교류 및 직류단의 전압과 전류 검출

교류전압은 절연변압기를 사용하여 검출하였으며, 교류 및 직류전류는 Hall 센서를 통해 검출하며, DC link 전압은 저항분압에 의해 검출한다. 이렇게 검출된 아날로그 신호는 노이즈에 강하게 하기 위해 Photo-coupler 내장형 절연증폭기인 HCPL-7800을 통해 DSP 보드의 wave shaping circuit에 인가된다.

다. 디지털 신호 입/출력

릴레이 구동이나 스위치 상태 입력과 같은 디지털 신호는 노이즈에 강하게 하기 위해 Photo-coupler를 통해 입출력된다.

라. 통신 버스

통신에 사용된 포트는 CAN, SCI(RS-232C), JTAG port, SCI(RS-485)로 4개가 있다. CAN는 컨트롤러내의 DSP 사이의 데이터 통신에 사용하며, SCI(RS-232C)는 Host computer와의 통신에 사용하며, JTAG port는 In-

circuit emulator를 통해 에뮬레이션 및 Flash ROM 프로그램을 위해 사용한다. 이들 3개 포트는 전기적으로 절연이 되어 있지 않으나, SCI(RS-485)는 노이즈에 강한 통신을 필요로 할 때 사용할 수 있게 하여 전기적으로 절연을 하였다.

5 - 5 제어전원

제어전원은 그림 5-4에 보인바와 같이 PS I, PS II, PS III, PS IV, PS V로 구성된다.

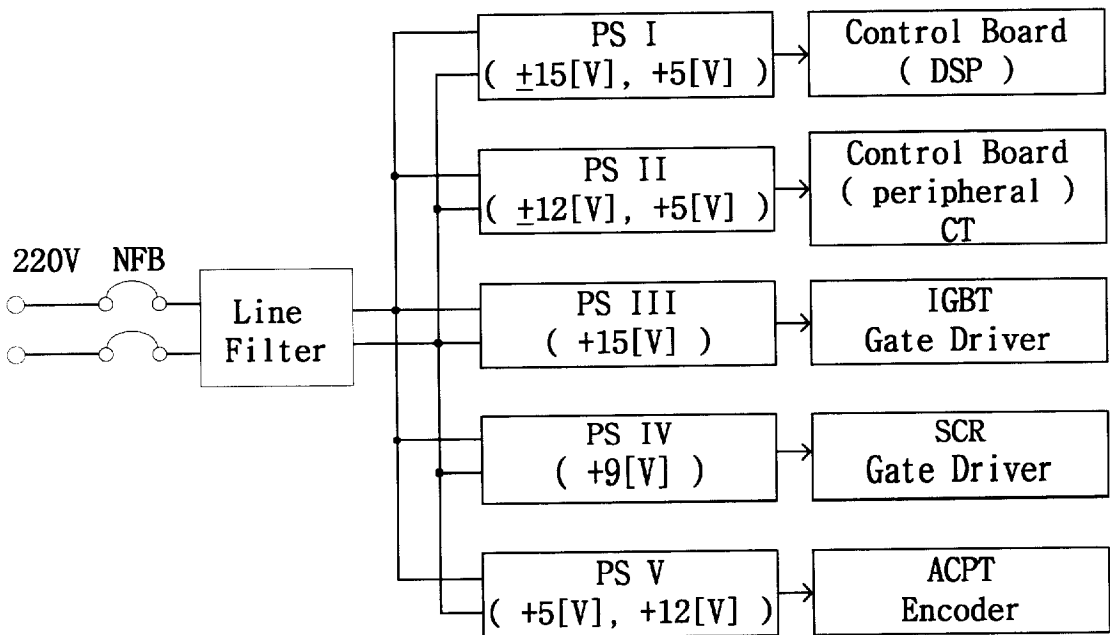


그림 5-4 제어전원의 구성

그림 5-5는 SCR 구동을 위한 Interface Board를 나타내고 그림 5-6은 Control Board에 사용된 DSP 보드를 나타낸다.

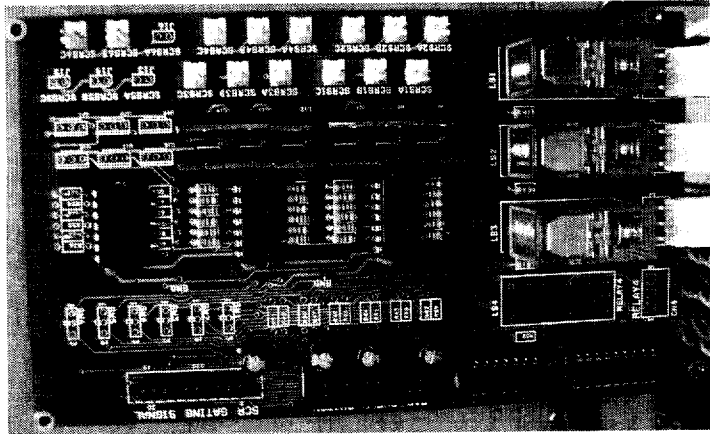


그림 5-5 SCR 구동용 Interface Board

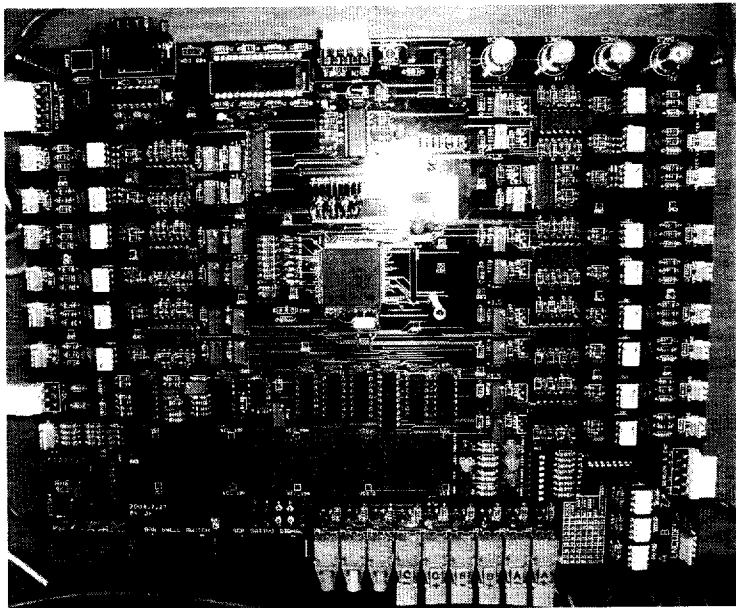
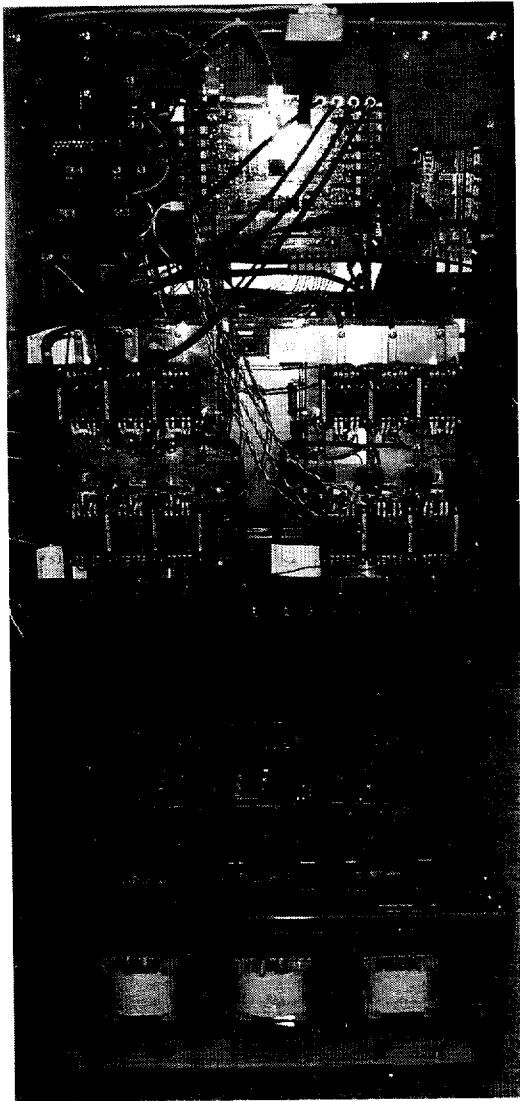
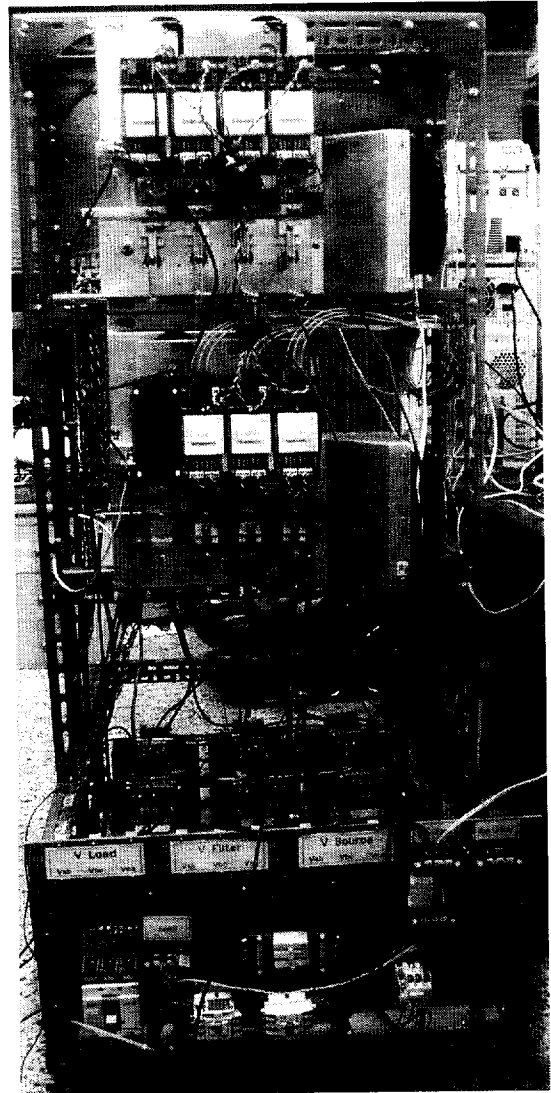


그림 5-6 DSP 보드

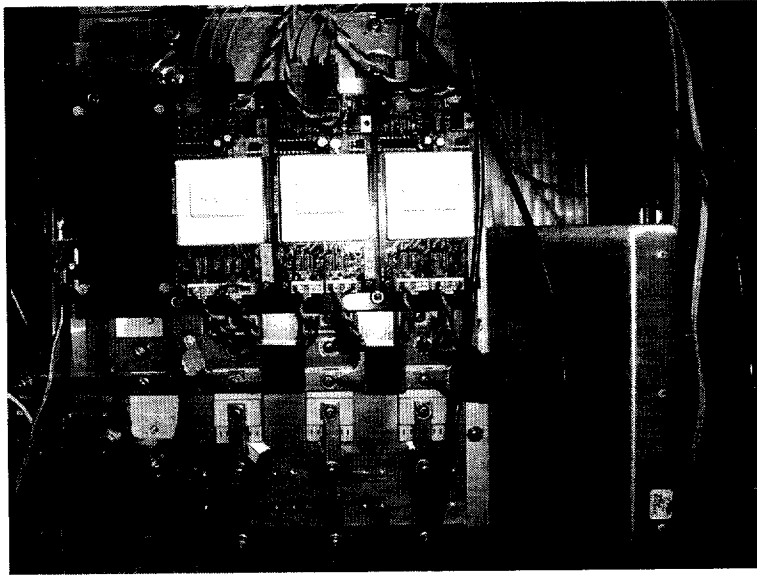
그림 5-7은 다이내믹 UPS 및 전압보상을 위해 제작한 실험세트이다.



(a) 전면 (SSTS, Control Board 등)



(b) 후면 (CONV/INV, INV/CONV)



(c) IGBT STACK

그림 5-7 다이내믹 UPS 및 전압보상용 실험세트

그림 5-8은 플라이휠 M/G set와 부하설비를 나타낸다.

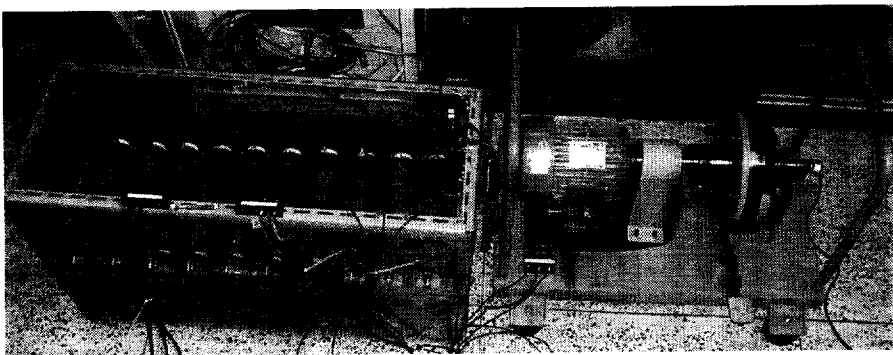


그림 5-8 플라이휠 M/G set(우)와 부하설비(좌)

6. 실험 결과

6 - 1 순간정전 보상 UPS 모드

그림 6-1은 약 10 사이클 동안 순간 정전이 발생하였을 경우 다이내믹 UPS의 입력 선간전압 V_{a1b1} 과 출력 선간전압 V_{aobo} 를 나타낸다. 거의 완벽하게 정전보상이 이루어짐을 알 수 있다.

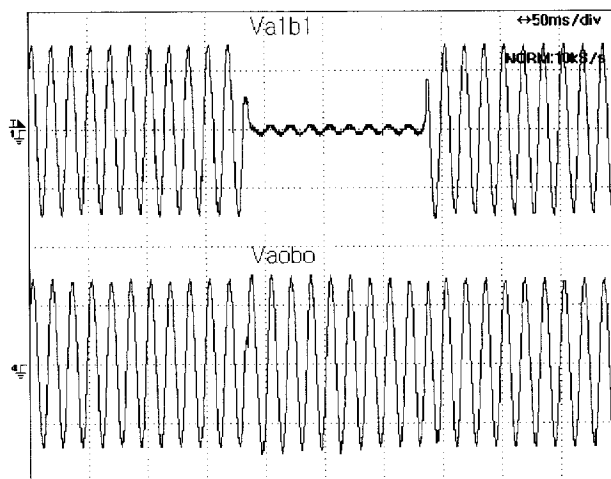
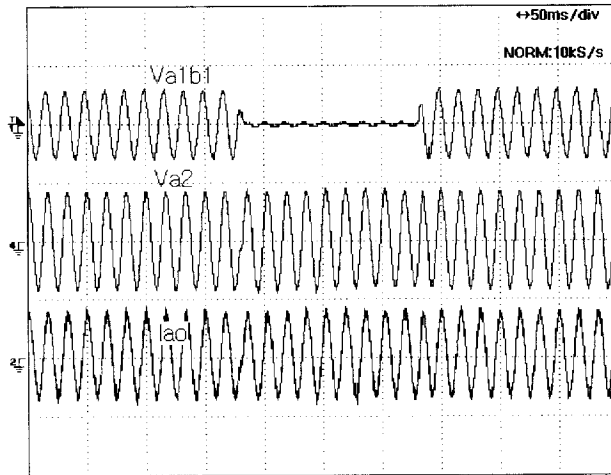
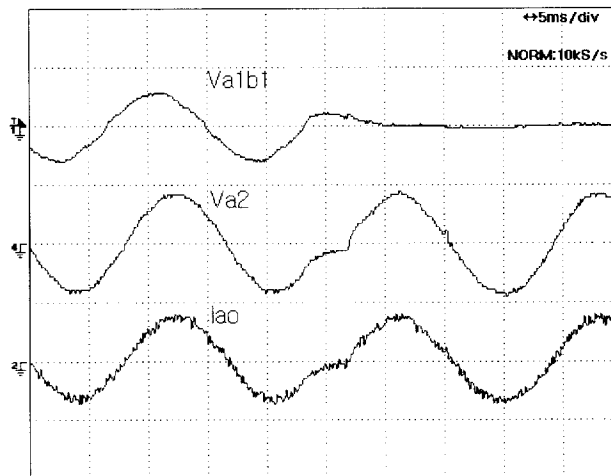


그림 6-1 입력 선간전압과 출력 선간전압 (200V/div)

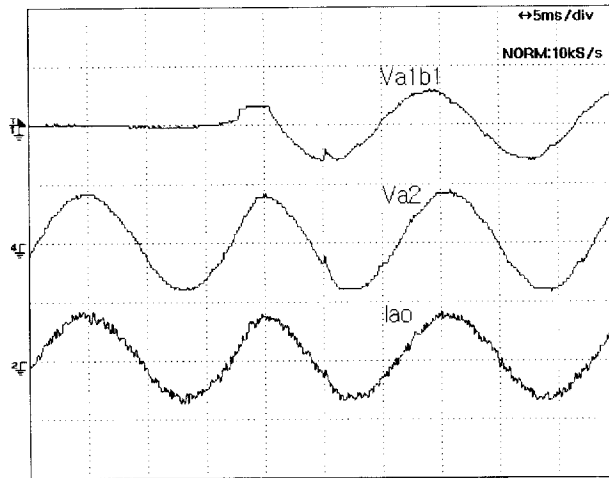
그림 6-2 (a)는 순간정전 발생시 입력 선간전압과 a상 출력전압 및 전류를 나타낸다. (b)는 정상상태에서 순간정전 발생이 시작되는 부분을 확대한 것이고 (c)는 정전상태에서 정상으로 복귀되는 부분을 확대한 것이다.



(a) 10 사이클 정전 발생



(b) 정상 → 정전 발생시



(c) 정전 → 정상 복귀시

그림 6-2 입력 선간전압(500V/div)과 a상 출력전압(200V/div) 및 전류(20A/div)

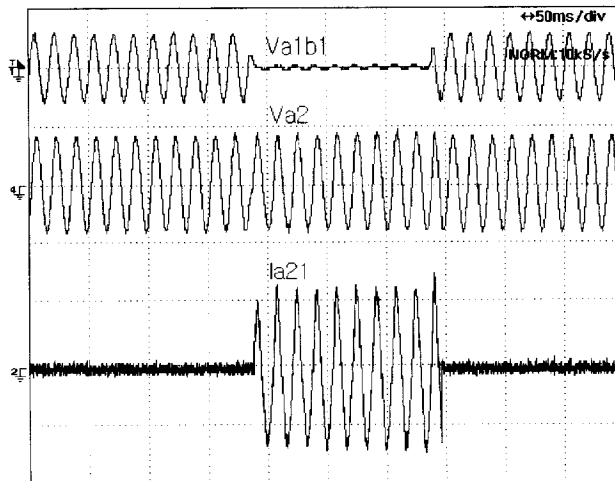


그림 6-3 입력 선간전압(500V/div)과 a상 출력전압(200V/div) 및 인버터 출력 전류(20A/div)

그림 6-3은 입력 선간전압과 a상 출력전압 및 CONV/INV의 a상 출력전류를 나타낸다. 정전이 발생함과 동시에 CONV/INV가 인버터로 동작하여 출력을 공급함을 알 수 있다. 그림 6-4는 10 사이클 동안의 순간정전이 2회 연속 발생한 경우 입력 선간전압과 a상 출력전압 및 a상 입력전류를 나타낸다. 정전이 발생하면 SCR 사이리스터로 구성된 SSTS S1과 S3이 턴오프되어 입력 전류가 0으로 감소하고 인버터 출력에 의한 전류의 역류가 저지되고 있음을 알 수 있다.

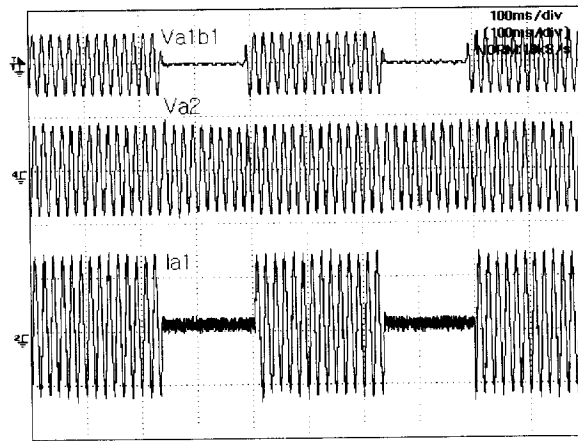


그림 6-4 입력 선간전압(500V/div), a상 출력전압(200V/div),
a상 입력전류(20A/div)

6 - 2 전압보상 모드

그림 6-5는 다이내믹 UPS의 입력전압에서 30% Sag가 연속 2회 발생한 경우 입력 선간전압과 출력 선간전압 및 a상 출력전류를 나타낸다. 전압 Sag가 발생하여도 전압보상이 이루어져서 출력전압은 정상상태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 그림 6-6은 30% 전압 Sag가 발생한 경우 입력 선간전압과 SSTS

S4의 a상 전류 및 출력 선간전압을 나타낸다. 전압보상을 위하여 S2가 턴오프되고 S4가 턴온되면서 전류의 변화가 있음을 알 수 있다.

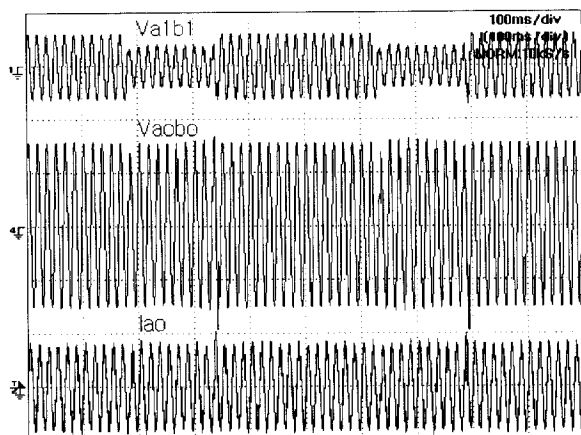


그림 6-5 입력 선간전압(500V/div), 출력 선간전압(200V/div),
a상 출력전류(20A/div)

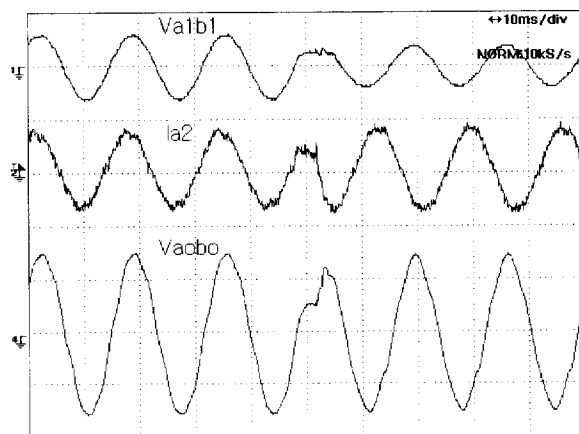


그림 6-6 입력 선간전압(500V/div), S4 전류(20A/div),
출력 선간전압(200V/div)

그림 6-7은 입력 선간전압, 인버터 출력 a상 전류, 출력 선간전압을 나타낸다.

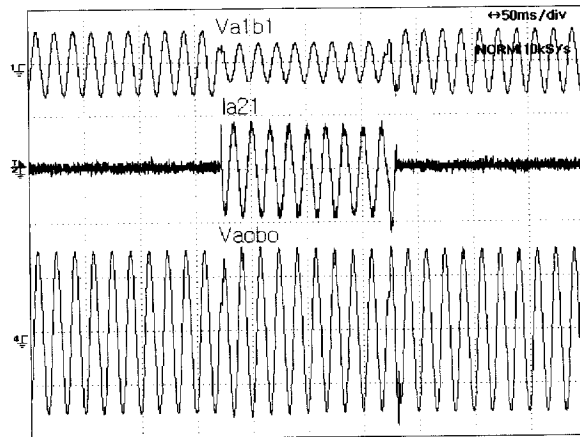


그림 6-7 입력 선간전압(500V/div), 인버터 출력전류(20A/div), 출력 선간전압(200V/div)

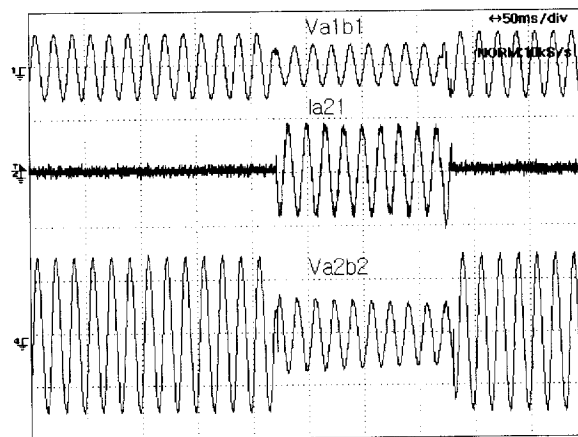


그림 6-8 입력 선간전압(500V/div), 인버터 출력전류(20A/div), 직렬 변압기 인가전압(200V/div)

전압 보상이 필요한 구간 내에서 인버터가 동작하여 전류를 출력하고 있음을 알 수 있다. 그림 6-8은 입력 선간전압과 인버터 출력 a상 전류 및 SST S4 입력 전압을 나타낸다. 정상상태에서 S4의 입력전압은 S2가 온 되어 있으므로 전원 전압과 동일하나, 전압 보상모드에서는 보상에 필요한 전압으로 크기가 감소하여 S4를 통하여 직렬 변압기에 인가됨을 알 수 있다. 그림 6-9는 입력 선간전압, 인버터 출력필터 후단의 전류 및 인버터 출력필터 선간전압을 나타낸다. 전압보상 모드에서 전류의 방향에 변화가 있음을 알 수 있다.

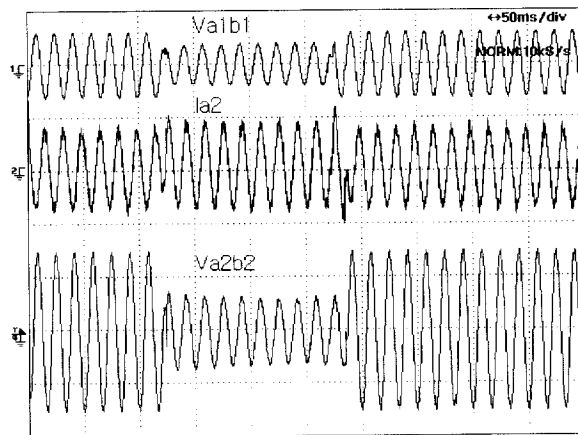


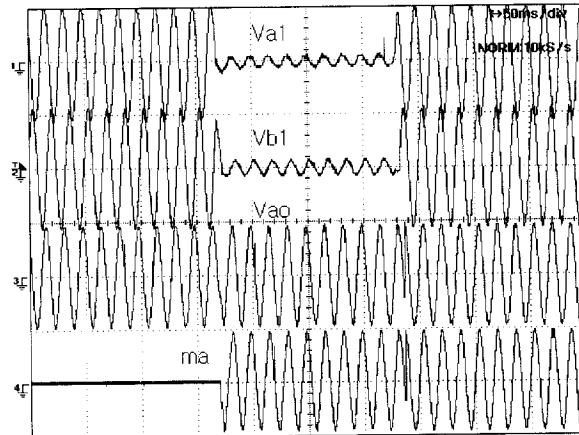
그림 6-9 입력 선간전압(500V/div), 인버터 출력필터 출력전류(20A/div),
인버터 출력필터 선간전압(200V/div)

6 - 3 PLL을 이용한 전압 추종특성

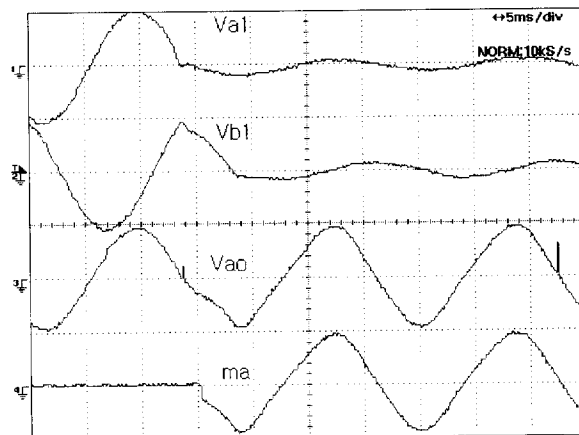
그림 6-10은 PLL 특성을 알아보기 위한 실험파형이다. 위에서 2개의 파형은 다이내믹 UPS 입력단 전압이 정전되는 것을 나타내고 세 번째 파형은 a상 전압에 동기된 기준파형이다. 네 번째 파형은 인버터 구동을 위한 변조지

수를 나타낸다.

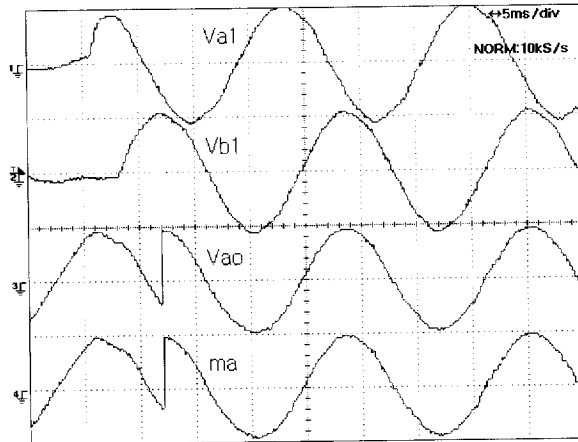
그림 (a)는 전체 파형을 나타내고 (b)와 (c)는 각각 정전이 발생된 시점과 정상으로 복귀되는 시점을 확대한 것이다.



(a) 입력 전원전압(V_{a1} , V_{b1}), a상 기준전압, a상 변조지수



(b) 정상 → 정전 발생시



(c) 정전 → 정상 복귀시
그림 6-10 PLL 전압 추종특성

정전이 되면서 변조지수는 기준파형에 따라 출력되고 있다. PLL 특성을 확인하기 위하여 정전에서 정상상태로 복귀 시 기준전압 파형을 a상에서 b상으로 순간적으로 변화시켰다. 순간적 변화에도 불구하고 변조지수는 정확히 기준전압을 추종하고 있음을 알 수 있다.

7. 결론

본 논문에서는 Sag, Swell 등의 전압 외란 발생 시에는 이를 보상하여 주고, 정전이 발생했을 시에는 무순단으로 전원을 공급하여 주는 플라이휠을 이용한 다이내믹 UPS를 제안하였다.

제안한 다이내믹 UPS는 세 가지의 동작 모드를 가지고 있어 전원 전압이 정상적으로 공급될 때에는 충전 모드로 동작하여 PWM Converter를 통해 플라이휠에 에너지를 저장하여 둔다. 전원 전압에 Voltage Sag, Swell, Unbalance 등의 전압 외란이 발생하게 되면 UPS는 전압 보상 모드로 동작하여 부하에서 요구하는 정상 전압이 인가되도록 함으로써 전압 외란이 부하에 영향을 미치지 않도록 한다. 전원 전압에 Short Outage가 발생하면 UPS 모드로 동작해 전원 측 SSTS를 Off 하여 전력의 역류를 막고 플라이휠에 저장된 에너지를 PWM Inverter를 통해 부하에 무순단으로 정상적인 전압을 공급하게 된다. 만약 30초 이상의 Long Outage가 발생하면 엔진 제네레이터를 기동시킨 후 엔진 제네레이터에서 부하로 전원을 인가하여주고 플라이휠에는 UPS 모드에서 소모된 에너지를 다시 충전한다.

만약 Outage 발생 후 정상 전원이 인가될 때 전원 전압에 위상차가 생길더라도 PLL을 통해 1 사이클 안에 전원 전압의 위상을 따라가 부하에는 정상적인 전원이 공급된다.

제안한 방식의 회로와 동작원리를 상세히 설명하였으며 회로의 동작특성에 대해 분석하였다. 회로의 동작원리와 동작특성에 따라 시뮬레이션 해본 결과, 전압 외란이 발생하였을 때 이를 효과적으로 보상하여 실제로 적용할 수 있음을 확인하였고, 양호한 특성을 얻을 수 있었다. 실제 시스템을 구성하여

실험을 통해 다이내믹 UPS가 효율성이 있음을 입증하였다.

본 논문에서 제안한 방식의 플라이휠 에너지 저장장치, 무순단 전력공급 및 전압보상, 다이내믹 UPS 등의 기술 확보로 플라이휠 에너지 저장 장치 관련 산업의 저변 확대 및 활성화와 수입대체 효과, 전력품질 향상 등을 통해 국제 경쟁력 확보에 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 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, pp. 549-558, May/June 1998
- [2] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, and H. W. Beaty, Electrical Power Systems Quality, First Edition, McGraw-Hill, 1996.
- [3] A. Ghosh and G. Ledwich, Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices, Electrical Power Systems Quality, First Edition, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [4] 최재호, "전력품질 장애와 대책," 전력전자학회지 5권 1호, pp. 13-18, 2000.
- [5] 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, pp. 159-167, Apr. 1992.
- [6] 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, pp. 983-990, Nov. 1990.
- [7] R. S. Weissbach, G.G Karady, and R.G. Farmer, "A Combined Uninterruptible Power Supply and Dynamic Voltage Compensator Using a Flywheel Energy Storage System," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 16, no. 2, pp. 265-270, Apr. 2000.

- [8] 정환명, 최재호, "초전도 플라이휠 에너지 저장 시스템을 이용한 off-line 방식의 UPS 설계," 2002년도 대한전기학회 전력전자연구회 춘계학술대회 논문집, pp. III-4-48-53, 4월 2000년.
- [9] R.G. Lawrence K. L. Craven, and G. D. Nichols, "Flywheel UPS," IEEE Industry Applications Magazine, May/June 2003, pp. 44-50.
- [10] R.G.Lawrence, K.L.Craven, and G.D.Nichols, "Energy Storage for Industrial Processes," Proceedings of Annual Conference Petroleum and Chemical Industry Technical conference, pp.209-215, 2001.
- [11] 홍순찬, "브리지 전력시스템(Bridging Power System) -Flywheel UPS를 중심으로-," 전력전자학회지 8권 2호, pp.43-49, 2003.
- [12] H.Darrelmann, "Comparison of High Power Short Time Flywheel Storage Systems," Proceedings of the IEEE INTELEC '99, pp.30-32, 1999.
- [13] H.Darrelmann, "Alternative Power Storages," Proceedings of the Telescon'97 , pp.33-40 , 1997.
- [14] I.Takahashi, I.Ando, Y.Ito, and K.Amei, "Developemnt of Long Life Three Phase Flywheel UPS using an Electrolytic Capacitor-Less converter/Inverter," Trans. of the IEE of Japan D, Vol.118-D, No.2, pp.173-178, 1998.
- [15] A.M.Wolsky, "An Overview of Flywheel Energy Systems with HTS Bearings," Superconductor Science & Technology, Vol.15, No.5, pp.836-837, 2002.
- [16] R.N.Bowyer, and G.West, "Uninterruptible Power System with a Flywheel -Driven Source of Standby Power," U.S. Patent, Patent No. 5646458, 1997.
- [17] 이기수, 김중원, 변우열, 노의철, 김인동, 전태원, 김홍근, "플라이휠 저장

- 에너지를 이용한 다이내믹 UPS 동작 특성 분석," 한국조명·전기설비학회 부산·울산·경남지회 춘계학술회 발표회 논문집, pp.43-46, 2004.
- [18] 이기수, 김중원, 변우열, 노의철, 김인동, 전태원, 김홍근, "플라이휠 저장 에너지를 이용 UPS의 전압불평형 보상성능 해석," 대한전기학회 합동 춘계학술대회 논문집, pp.10-14, 2004.
- [19] 이기수, 김중원, 변우열, 노의철, 김인동, 전태원, 김홍근, "플라이휠 저장 에너지를 이용한 무순단 전압보상 기능을 갖는 UPS," 전력전자학술대회 논문집, pp.592-596, 2004.
- [20] 이기수, 김중원, 변우열, 노의철, 김인동, 전태원, 김홍근, "다이내믹 UPS의 모드별 동작특성 분석," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1257-1259, 2004.
- [21] K.S.Lee, J.W.Kim, E.C.Nho, I.D.Kim, T.W.Chun, H.G.Kim, J.Y.Seo, "A Flywheel Energy Storage UPS with Unbalanced Voltage Compensation," ICPE' 04, pp.226-229, 2004.
- [22] R.G. Lawrence K. L. Craven, and G. D. Nichols, "Flywheel UPS," IEEE Industry Applications Magazine, May/June 2003, pp. 44-50.
- [23] H.Darrelmann, "Comparison of High Power Short Time Flywheel Storage Systems," Proceedings of the IEEE INTELEC '99, pp.30-32, 1999.
- [24] H.Darrelmann, "Alternative Power Storages," Proceedings of the Telescon'97, pp.33-40, 1997.
- [25] I.Takahashi, I.Ando, Y.Ito, and K.Amei, "Development of Long Life Three Phase Flywheel UPS using an Electrolytic Capacitor-Less converter/Inverter," Trans. of the IEE of Japan D, Vol.118-D, No.2, pp.173-178, 1998.
- [26] A.M.Wolsky, "An Overview of Flywheel Energy Systems with HTS

Bearings," *Superconductor Science & Technology*, Vol.15, No.5, pp.836-837, 2002.

[27] Texas Instruments, *TMS320F28xDSP Peripherals Reference Guide*, 2002.

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

감사의 글

그렇게 길게만 느껴지던 2년이란 시간이 이렇게 짧게 지나가고 이제 이 한편의 논문과 함께 대학원 생활을 마무리 하고자 합니다. 뒤돌아보면 기뻐했던 일, 힘들었던 일들도 많이 있었지만 혼자가 아니었기에 오늘까지 무사히 올 수 있었던 것 같습니다. 항상 앞에서 저희를 바르게 이끌어주시고 가르쳐 주신 엄하시면서 자상하신 두 분 김인동 교수님과 노의철 교수님께 진심으로 깊은 감사를 드립니다. 바쁘신 와중에도 제 논문을 심사해 주시고 조언과 격려를 아끼지 않으신 김천덕 교수님과 김영학 교수님, 그리고 학과를 위해 항상 노력하시는 많은 전기공학전공 교수님들께도 깊이 감사드립니다.

실험실에 먼저 들어오셔서 여러 길을 열어 놓고 닦아두셨던 이민수, 권영원, 성현제, 정용후, 강성관 선배님께 감사드리고, 대학원생으로써 항상 노력하시고 본보기가 되었던 친형과도 같은 문상호 학형, 대학원 선배이자 학부동기로 많이 가르쳐 주고, 서로서로 모자란 부분을 채워나갔던 안종수 학형, 생체전기실험실의 김성훈 학형, 그리고 김보경 학형께 진심어린 감사를 드립니다. 언제나 함께 생활하며 한 형제처럼 지낸 김중원 학형, 그리고 정인하, 문형준, 이미현 학형께도 감사드립니다. 그리고 후배지만 항상 든직하고 서로를 감쌀 수 있는 이병철, 최성훈, 팽성환 그리고 정승환 학형에게도 진심어린 감사의 말을 드립니다. 또, 학과 사무실에서 언제나 크고 작은 많은 일들을 도와주었던 강경숙, 박정민 조교에게도 감사의 말을 전합니다.

그리고 저의 정신적 지주이자 고향과도 같은 높낮이의 선배님, 동기, 후배들, 힘들 때는 언제나 마음 놓고 기댈 수 있고 좋은 일엔 자신의 일처럼 기뻐해 주었던 우리사이 친구들, 가족보다 더 가족 같은 우리 패밀리, 멀리 있어 자주 보진 못하지만 나의 절친한 친구들에게 깊은 감사드립니다.

마지막으로 사랑하는 가족인 아버지, 어머니, 지현이, 민우에게 사랑한다는 말과 함께 이 논문을 바치고자 합니다.