



고압 대용량 전동기 구동장치 기술개발

현대중공업주식회사 기전연구소

제 1 장 서 론

1.1. 연구개발의 목적 및 배경

산업용 동력원의 주류를 이루고 있는 고압 대용량 유도 전동기의 부하로는 Pump, Fan, Blower 등의 유체이송 장치 및 철강 압연용 주기 또는 시멘트 공장의 원료 Mill 구동용 전동기 등 다양한 분야에 사용되고 있다. 특히 유체이송장치는 인버터에 의한 회전수 제어로 종래의 고정식 제어에 비해 약 30~70%의 전기에너지 절감이 가능하여 이 분야의 가변속 장치 채용이 급속히 확산되고 있으며 특히, 대형 Plant에 적용된 가변속 구동장치는 보수 및 감시 시스템을 결합시킨 가변속 구동장치 전체의 집중 Monitoring을 실시하는 것이 Plant의 운전 관리상 절실히 요구되므로 다른 설비들과 같이 Network화되어 Data를 공유하는 기능이 산업체에서 요구되어 왔다.

본 연구에서는 스위칭 특성이 우수한 전력용 반도체소자를 사용하여 3.3 KV 4MW급의 3레벨 구조의 전압형 대용량 인버터 시스템의 설계 기술을 연구하고 실용량 시제품을 제작하여 그 특성을 검증하였다. 또한 Web 기반에서 인버터 시스템의 운전상태 모니터링 및 Data관리가 가능한 정보관리 장치를 개발하였고 주 전원을 공급하지 않은 상태에서 시스템의 특성 검증 및 Tuning이 가능한 시스템 시뮬레이터를 개발하였다. 그리고 현장 적용시험을 통해서 개발된 기술의 신뢰성을 향상시키기 위해 한국 수자원공사 펌프전동기에 시제품을 적용하여 약 1년간 예정으로 시험 중에 있다.

1.2. 개발품의 최종목표 사양

표 1.1. 제품 사양

구분	내용
1. 정격용량	3,300V, 4,000KW
2. 입력 적용전압	3상, 3,300V ±10%
3. 출력주파수	0~120Hz
4. 주파수안정도	±0.01% at Max. Frequency
5. 속도제어정도	Below ±0.1% at Normal Speed
6. 시스템 구성방식	3 Level PWM Converter/Inverter(Using IGCT)
7. 인버터 제어방식	V/F, DTC(Direct Torque Control)
8. 과부하 내량	120% 60Sec
9. 보호방식	OC, OV, OH 등
10. 시스템 냉각방식	강제 수냉식
11. 적용 규격	KS, IEC, NEMA
12. 인버터정보관리	상위시스템연계 Networking, 가상운전
13. 기타	Digital Monitoring기능, Mini Printer 보유

제 2 장 본 론

2.1. 전력회로 설계 및 전력스택 개발

2.1.1. 전력소자 사양

본 연구에서 개발한 전력회로는 컨버터측과 인버터측이 동일구조로 설계되어 있고 1상 단위로 전력회로를 스택화하여 시스템을 간략화 하도록 설계하였으며 시제품 제작에 사용된 전력소자는 GTO 소자의 특성을 개선한 GCT소자로 선정하고, 이 GCT소자에 GATE 구동회로를 내장한 IGCT(Integrated Gate Commutated Thyristor) 소자를 채용하였으며 표 2.1는 소자의 특성을 나타낸다.

표 2.1. IGCT소자 특성

항목	사양
품명	5SHY35L4503
V_{DRM}	4500 V
V_{RRM}	19 V
I_{TORM}	4000 A
I_{TRMS}	2200 A
I_{AVM}	1400 A
V_{TM}	2.7 V
di / dt	1000 A/ μ S
I_G	4.0 A
R_{thjc}	0.012 $^{\circ}$ C/W
T_j	0~115 $^{\circ}$ C

그림 2.1은 전력스택 개발에 사용된 IGCT소자(5SHY-35L4503)의 Drive 내부 구성을 나타낸 것이다.

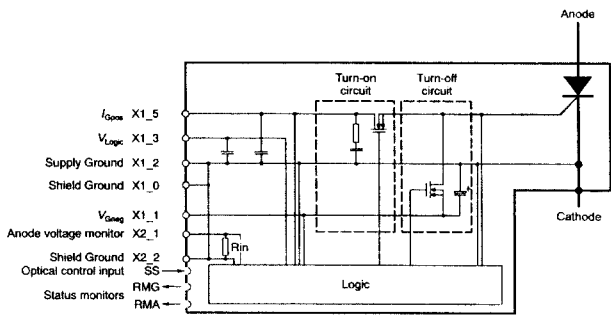


그림 2.1. IGCT 소자의 Drive Block Diagram(5SHY35L4503)

2.1.2. 전력회로 설계

전력회로 구성도는 그림 2.2와 같이 입력 정류부를 3레벨 PWM 컨버터로 구성하여 전원 계통의 역률을 향상시키고 고조파 함유율을 기존의 인버터 방식에 비해 대폭 저감시킬 수 있게 하였다. 인버터측도 컨버터부와 동일한 3레벨 구조로 설계하여 전력스택의 구조를 단순화할 뿐 아니라 출력전압의 고조파 성분도 크게 감소시킬 수 있는 방식이 적용되었다. 전력회로에 사용된 소자는 IGBT와 GTO의 장점만을 채택한 차세대 고압 대전력용 반도체 소자인IGCT(Integrated Gate Commutated Thyristor)로 스너버 회로 없이 대전력을 스위칭할 수 있으므로 회로의 단순화 및 시스템의 효율을 향상시킬 수 있다. 그림 2.3은 전력회로 설계를 토대로 제작된 고압 대용량 가변속 구동장치의 실물 사진이다.

2.1.3 전력스택 설계

본 연구에서 개발된 3300V/4MW 인버터의 전력회로 구성은 고전압 대용량의 전력회로에 적합한 3레벨 PWM 컨버터 및 인버터 방식을 채용하고, 냉각 효율 및 장치의 소형화를 위하여 수냉각 방식을 채용하였다. 그림 2.4와 같이 1상분의 스택을 저 인덕턴스 형의 모듈화 구조로 설계하였고 이 모듈화 된 1상분의 스택을 6개 병렬 사용하여 3

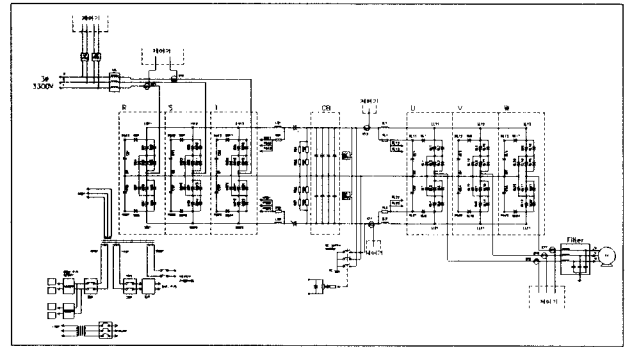


그림 2.2. 인버터 전력회로 구성도

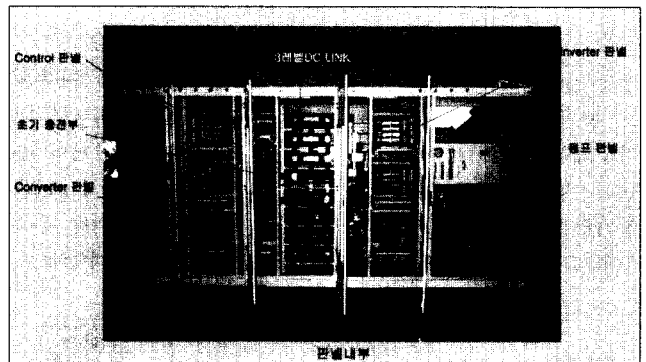


그림 2.3. 고압 대용량 가변속 구동장치 실물사진

상 컨버터 및 인버터의 구성을 손쉽게 할 수 있었을 뿐만 아니라 향후의 용량증대 및 A/S 유지보수에 편리한 구조로 설계하였다. 그림 2.5는 설계된 전력스택이 내장된 가변속 구동장치의 시험현장 모습이다.

2.2. 냉각시스템 설계

2.2.1. 냉각시스템 개요

일반적으로 전자장비의 열이 효과적으로 제거되지 않으면 전자장비의 작동온도가 상승하게 되고, 그에 따라 고장률이 높아지게 된다. 특히 발열소자가 이용되는 전기장치는

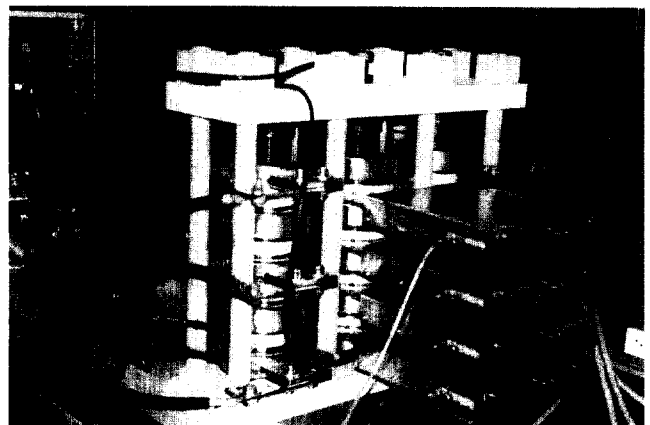


그림 2.4. IGCT 1상분 전력 STACK

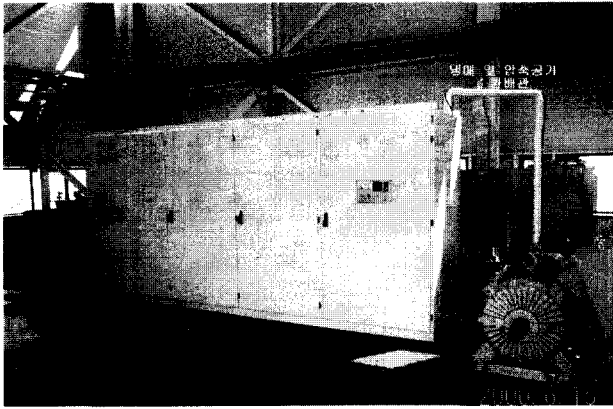


그림 2.5. 가변속 구동장치 시험현장

성능 및 수명이 온도에 지대한 영향을 받기 때문에 허용 온도 범위 내에서 안정된 운전을 위해 설계 초기단계부터 냉각문제를 고려하여야 한다. 그림 2.6은 대용량 인버터의 수냉시스템의 구조를 나타낸 것으로, 컨버터 및 인버터 Panel을 통과하여 온도 상승된 냉각수는 외부 열 교환기에 의해 응축되어 순환하는 2중 열교환방식의 냉각시스템을 구성하였다.

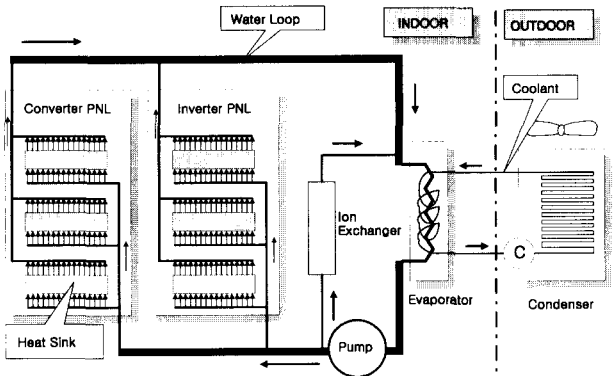


그림 2.6. 대용량 인버터를 위한 냉각 시스템

2.3. 제어시스템 설계

2.3.1. 제어보드 설계

그림 2.7은 제어시스템의 전체 구성도를 보인 것이다. 본 연구에서는 시스템의 유연성과 확장성을 위하여 산업전자 부문에서 널리 쓰이고 있는 VME Bus 표준구조를 사용하였다. 따라서 상용화되어 있거나, 이미 안정성이 확보된 VME 표준 규격의 보드를 사용할 수 있는 장점이 있다. VME Master 보드(KVME-041)의 역할은 VME Bus를 사용하는 시스템의 관리와 주변 장치(Digital Operator, 소형 프린터)의 제어, 그리고 상위 Device(SCADA, Console)와의 통신을 담당하고 있으며, 시스템 프로그래밍의 효율을 높이기 위하여, Real-Time OS를 사용하였다. 또한, 컨버터와 인버터를 제어하는 알고리즘의 연산만을 전담하는 DSP 보드가 각각 따로 장착되어 있어서 최근 현대 제어이론을 적용함에 있어, 수십에서 수백 μsec 이내에 수행되어야 하는

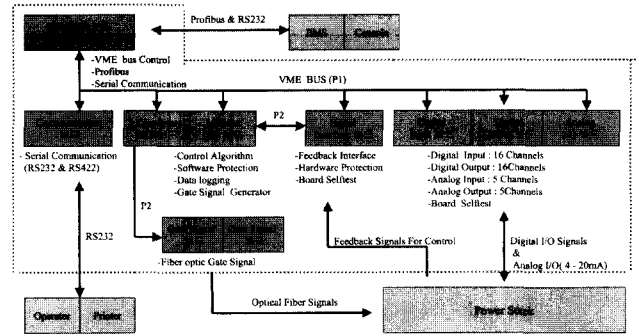


그림 2.7. 전체 시스템 구성도

연산을 VME Bus를 통하지 않고 할 수 있으므로 VME Bus를 통한 I/O access 시간 증가의 문제를 해결하였다.

이렇게 시스템을 관리하는 전용의 Master 보드를 따로 사용함으로써 시스템의 주변 장치 제어의 효율을 높이고, 상위 Device와의 연계운전을 위한 프로그램 Job의 할당이 용이하여, 전체 성능의 향상 및 안전성의 확보가 쉽다.

2.3.2. 컨버터제어 알고리즘

전원측에 다이오드 및 싸이리스터를 사용한 컨버터의 경우, 전동기의 회생동작시 부하측에서 직류측으로 유입되는 전류가 전원측으로 환원되지 못하고 직류링크 전압의 급격한 증가를 가져온다. 그리고 다이오드 정류기의 특성상 또는 싸이리스터를 사용한 정류기는 위상제어의 특성상 점호각이 증가함에 따라 역률이 나빠지고 입력 선간 전류가 구형파이므로 고조파 성분이 많이 포함되어 전원 및 출력의 질을 저하시키며 고조파 제거를 위한 필터의 크기가 증가함으로 인해 전체 시스템의 부피를 증가시키게 된다.

반면에 PWM컨버터는 그림 2.8의 제어 블록도와 같이 크게 전류제어기와 전압제어기로 구성되어 있는데 전류제어기는 하위레벨 제어기로서 전체 시스템의 성능 및 안정성에 절대적인 영향력을 가지며 전압제어기는 지령전압 및 피이드백전압을 입력값으로 정류기의 출력전압을 regulation하기 위한 상위레벨 제어기로 제어기의 출력값은 전류

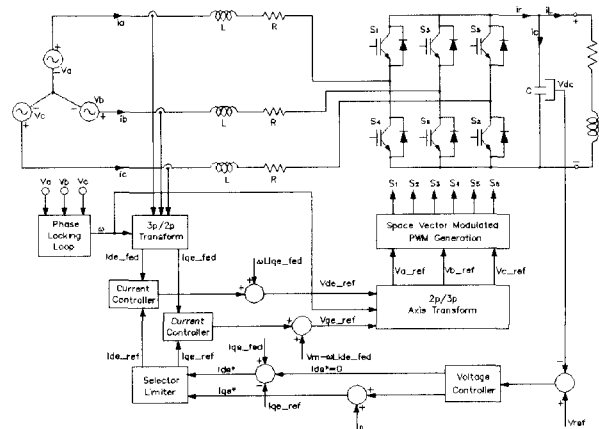


그림 2.8. PWM 컨버터 제어 블록도

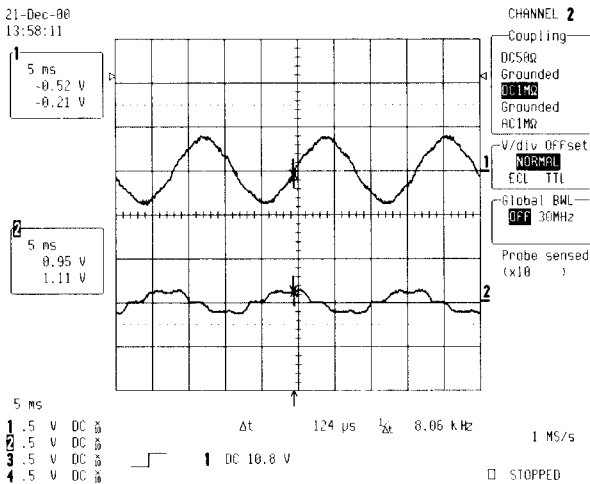


그림 2.9. Diode정류시 상전압과 상전류
CH1: Va (3,300V/div) CH2: Ib (500A/div)

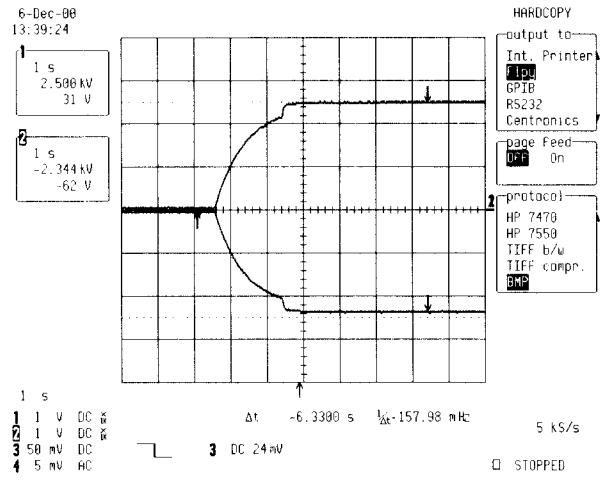


그림 2.11. 초기 충전시 양단 전압(Vdc1, Vdc2)

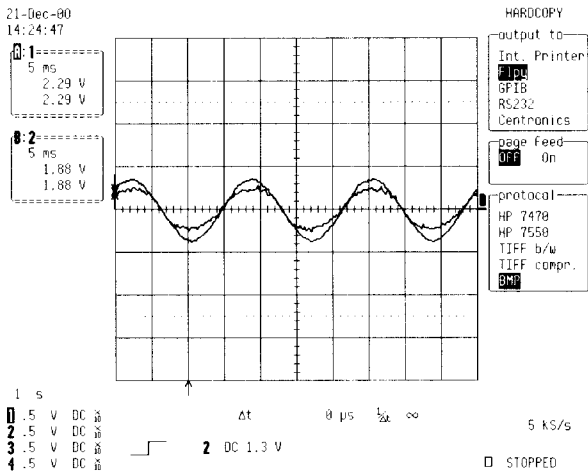


그림 2.10. PWM 컨버터 동작시 상전압과 상전류
CH1: Va (3,300V/div) CH2: Ia (500A/div)

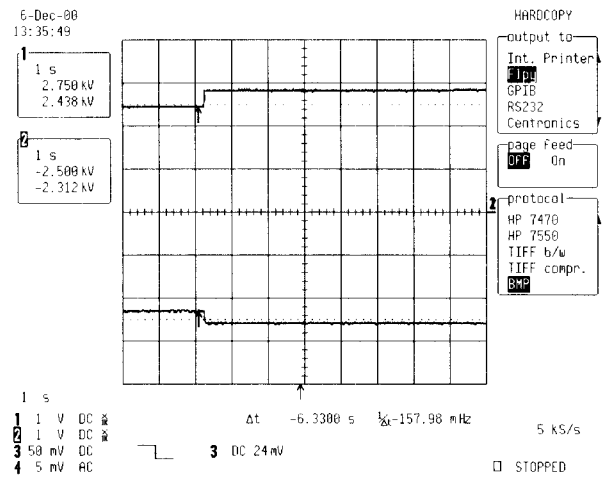


그림 2.12. 전압제어 (4660V → 5600V)

제어기의 크지령값(I_m)이 되며 이 때, 지령전류값의 위상은 입력원전압의 위상과 일치시켜 단위역율을 이루게 한다. 입력 전압 및 전류의 위상이 일치하여 단위역율이 되면 컨버터의 입력전류의 크기가 감소하게 되어 전력소자 및 인덕터의 용량 등이 줄어들며 무효전력이 없어짐으로 인해 전원 측의 부담도 줄어드는 장점이 있고 이것이 PWM 컨버터가 추구하는 개념이다.

전원 측의 컨버터 제어를 위한 PWM 컨버터 전압 제어기는 부하상태에 관계없이 안정된 직류링크단 전압을 확보함과 동시에 그림 2.10과 같이 전원측의 단위역율을 이루도록 제어하게 되나 다이오드정류의 경우, 그림 2.9와 같이 단위역률 제어가 불가능하다.

그리고, 전동기의 급가속이나 부하의 스텝인가와 같은 과도상태에서도 직류링크단 전압의 맥동감소 및 필터링 커패시터의 용량을 감소시키기 위해선 전원측으로 유입되는 전력과 부하측 전력사이의 차이를 순시적으로 일치시킬 필요가 있는데 이때, 직류 링크단 커패시터는 이의 완충작용

을 담당하게 된다.

그림 2.11은 PWM 컨버터가 동작하기 전의 초기 충전전압을, 그림 2.12는 정류전압(4,666V)이 충전된 상태에서 지령전압을 5,500V로 설정하여 PWM 컨버터를 동작시켰을 경우에 직류 링크단의 상,하단 전압(V_{dc1}, V_{dc2})을 계측한 것이다. 나타난 바와 같이 전압제어가 되고 있음을 알 수 있다.

2.3.3. 인버터제어 알고리즘

대용량 인버터의 제어 알고리즘을 설계할 때 가장 큰 제약점은 스위칭 소자의 스위칭 주파수 제약이다. 이것은 고정자 전류의 정현파적인 원활한 제어가 쉽지 않게 되고, 이 문제는 순시토크제어, 순시 전류제어를 목표로 하는 벡터제어 성능을 달성하는데 장애 요인이 된다. 따라서, 본 연구에서는 상대적으로 작은 스위칭 주파수에서도 스위칭 주파수가 증가한 효과를 볼 수 있는 3-Level 전압형 인버터를 사용하였고, Fan, Pump와 같은 비교적 단순한 부하에도 고성능 제어 알고리즘을 구현하기 위하여, DTC(Direct Torque Control)를 구현하였으며 또한 속도추정기 알고리즘을 설계,

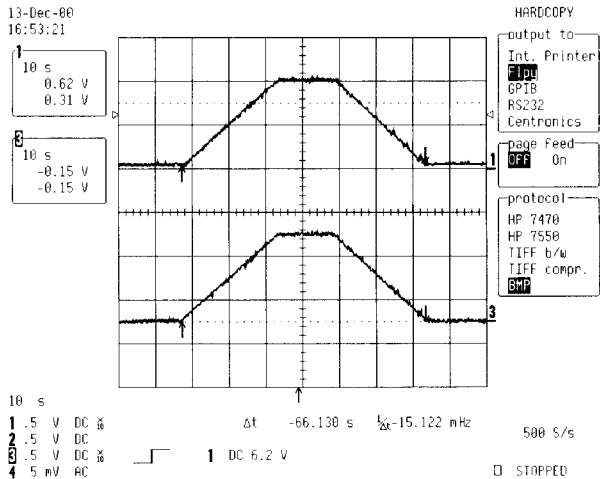


그림 13. 전동기 가감속 운전시 지령 속도와 추정속도
CH1: 지령 속도 CH2: 추정 속도(600rpm/div)

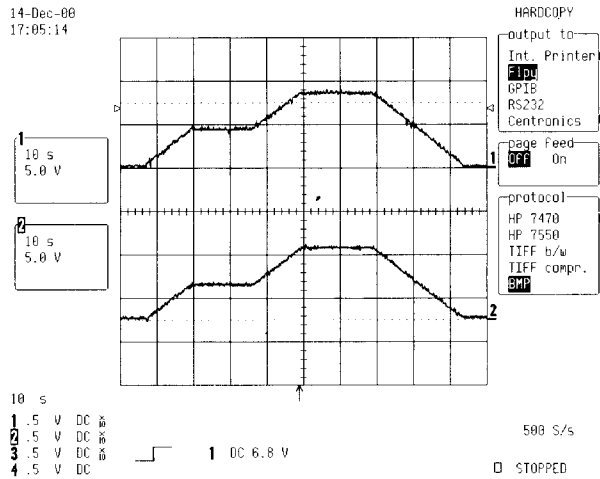


그림 2.14. 다단계 가감속시 지령속도와 추정속도
CH1: 지령속도 CH2: 추정 속도(600rpm/div)

적용하였다.

속도 추정기는 전류와 고정자 및 회전자의 자속을 추정하는 Observer와 추정된 정보를 입력으로 하는 속도 추정기(Velocity Estimator)로 구성되어 있다. 그림 2.13과 2.14는 전동기를 정격속도(운전 지령 주파수 50Hz)까지 가속과 감속, 그리고 다단계 운전을 하였을 경우에 지령 속도와 추정 속도를 비교한 것이다.

본 연구에서는 Sensorless 백터제어와 거의 같은 스위칭 주파수(500Hz)에서도 제어응답특성이 뛰어난 DTC (Direct Torque Control)에 대하여, Adaptive Observer 알고리즘을 이용, 속도제어기를 구현하였다. 그림 2.15는 DTC 제어기 블럭도이다.

그림 2.16은 정격속도(± 1760 rpm)를 기준으로 정역 운전을 하였을 때 출력 토크, 그리고 Optical Encoder로 측정된 전동기의 속도, Adaptive Observer에 의한 전동기의 속도 추정 값을 출력한 것이다. 그림 2.17은 Adaptive Observer를 이용한 속도 제어기를 사용하여 Reference 속도를 각각

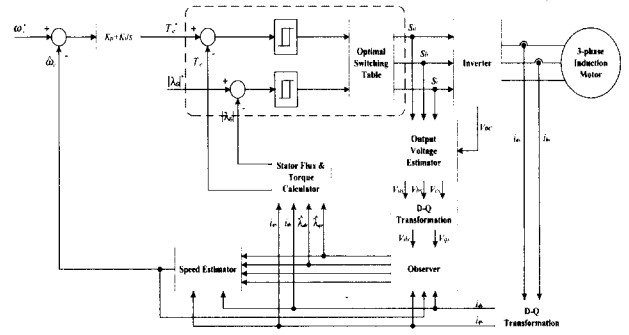


그림 2.15. Adaptive Observer를 이용한 DTC 제어기 블럭도

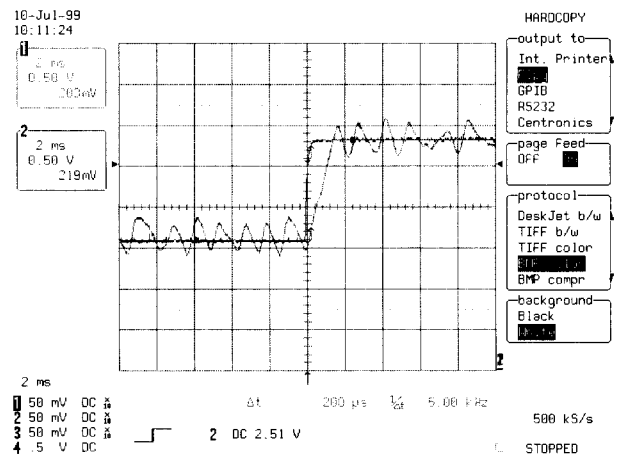


그림 2.16. 3레벨 DTC의 토크 응답 특성

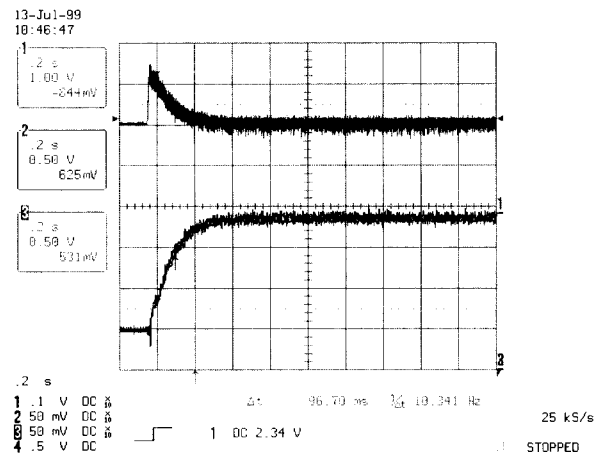


그림 2.17. 속도응답특성(Wrpm_ref = 1760rpm)
(CH1: 출력 토크, CH2: Encoder속도, CH3: Observer추정속도)

정격속도(1760 rpm), 900 rpm, 300 rpm으로 하였을 때 속도 응답 특성을 나타낸 것이다.

그림 2.18과 2.19는 전원 3300V 입력에서 전동기 운전 주파수에 따른 시험운전한 인버터의 출력 전압·전류 파형을 나타낸다.

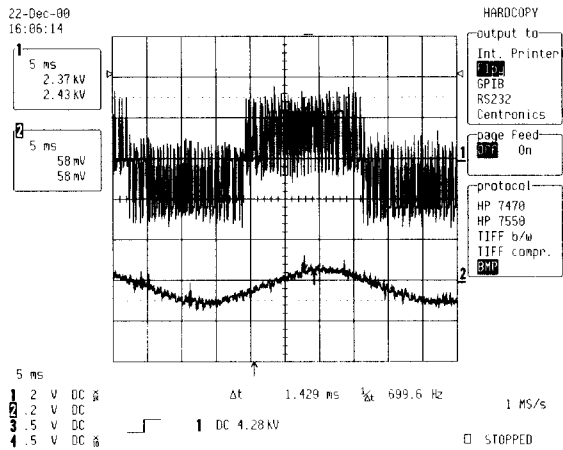


그림 2.18. 전동기 30Hz 운전시 출력 선간전압 및 전류

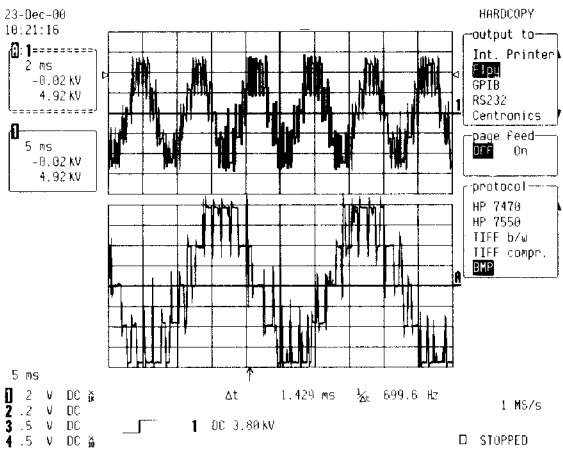


그림 2.19. 전동기 120Hz 운전시 출력 선간전압 및 전류

2.4. 인버터 정보관리 시스템(Inverter Information Management System) 설계

2.4.1. 인버터 정보관리 시스템 구성

인버터 정보관리 시스템은 현재 인버터의 운전상황을 실시간으로 사용자에게 보여주고 고장검지상황을 통보하는 등의 기능을 제공하는 GUI기반의 콘솔 기능과 현장설치제어기 전반에 대한 검증작업 및 부하에 따른 최적의 운전상수를 검출할 수 있는 가상운전 기능, 인버터시스템과 외부와의 통신을 위한 web기반 통신 기능으로 구성되어 있다. 그림 2.20은 시스템의 기본 구성도이며 그림 2.21은 현장 적용시험을 위한 팔당취수장 IIMS 구성도이다.

2.4.2. 인버터 정보관리를 콘솔

콘솔에서는 필드버스 또는 TCP/IP 인터페이스를 통하여 인버터 및 부하의 운전상황에 대한 운전 데이터를 실시간으로 보여주고 인터넷을 통해 외부의 인버터 정보 관리 시스템 서버 및 상위 SCADA에게 제공한다. 또한, 인버터 시스템의 고장발생시 고장내용을 3차원 애니메이션을 통해 사용자가 이해하기 쉽도록 고장내용을 제공한다. 자기진단 기능은 제어기 보드들의 이상유무를 검지하기 위해 제공되

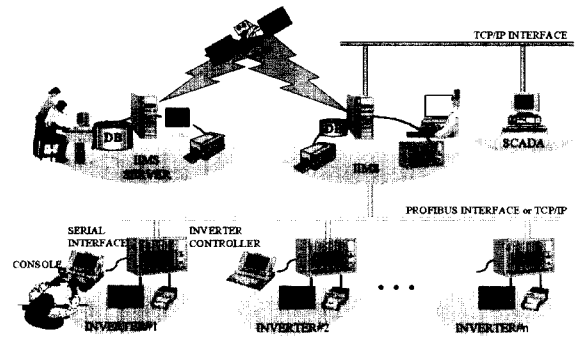


그림 2.20. 인버터 정보관리 시스템 기본 구성도

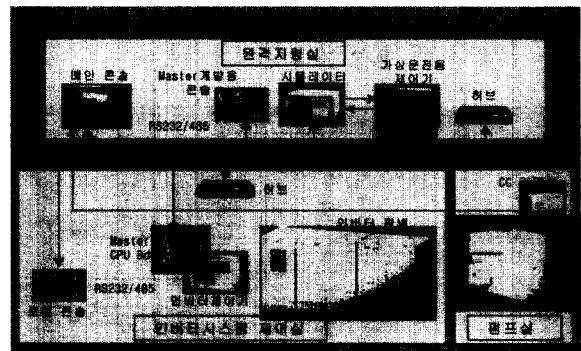


그림 2.21. 팔당취수장 적용 IIMS 구성도

는 기능으로서 자기진단이 가능한 소자단위의 모듈기능 이상유무를 판별할 수 있다. 운전조작 기능은 ActiveX기술을 이용하여 인버터의 운전 및 조작을 통신을 통하여 가능하게 하는 기능으로서 기존의 기기에 의한 운전조작보다 간편하며 비용이 절감되고 보안조치의 장점이 있다.

(1) ActiveX구현 콘솔화면 상세구성도

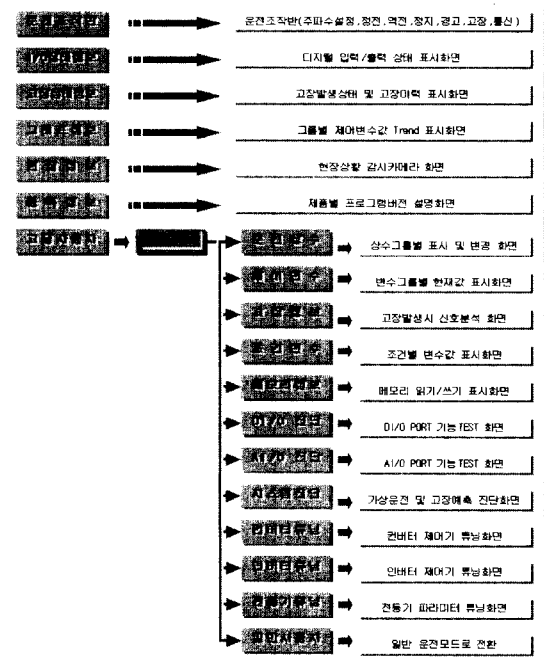


그림 2.22. 콘솔화면 상세 구성도

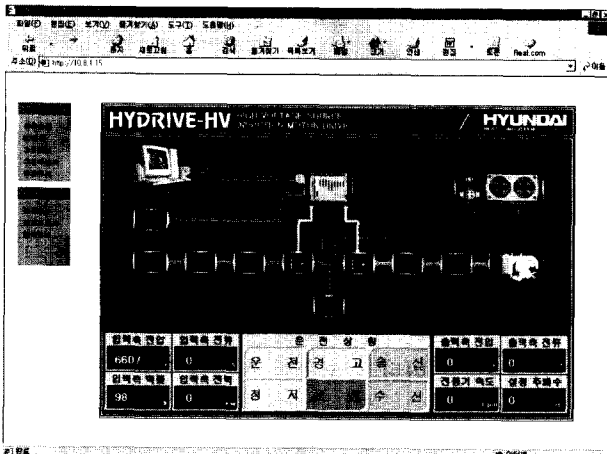


그림 2.23. IIMS 홈페이지 초기 화면

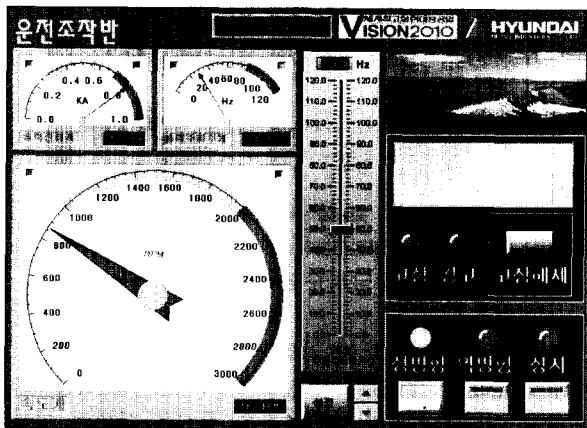


그림 2.24. 운전조작반 화면

(2) ActiveX구현 콘솔화면

기존의 그래픽 이미지를 이용한 화면보다 각종 계기 등 ActiveX Component를 이용함으로써 더욱 현실감이 있는 화면 구축이 가능해졌으며 시스템의 네트워크 환경이 인터넷 이거나 LAN이든지 간에 인버터가 설치된 현장의 네트워크 환경에 따라 인버터 마스터 제어기에 이식한 IP를 브라우저로 호출하면 그림 2.23과 같은 해당 인버터시스템의 홈페이지가 뜨게 된다.

기본적인 홈페이지의 구성은 모니터링 내용 선택 버튼과 현장별로 디자인된 인버터 운전상황을 표시하는 감시화면으로 이루어지고 감시내용으로는 일반적으로 제어기 통신상태표시, 입출력차단기 점점상태표시, 냉각장치 동작상태표시, 입·출력단 전압/전류값 표시, 전동기 운전상태표시(정전, 역전, 정지)와 전동기 속도표시(RPM) 등이 있다.

그림 2.24는 운전조작반 화면으로 두 개의 작은 아날로그 계기판은 출력전류계와 출력주파수계이며 표시 값은 아날로그 값뿐만 아니라 디지털 값도 표시하며 큰 계기판은 전동기의 속도를 아날로그 및 디지털 값으로 표시한다. 주파수 설정은 슬라이더 Table의 슬라이더 아이콘을 움직여 조정하며 미세조정을 위해 아래에 UP/DOWN 버튼을 마련하여 정밀조정이 가능하도록 하였다. 일단 설정값이 결정되면 설정버튼을 눌러 주파수 설정을 완료한다. 주파수 설정 값을 변경하더라도 이전의 설정 값을 비교, 확인을 위해 여전히 디지털 값으로 표시되게 되어 있다.

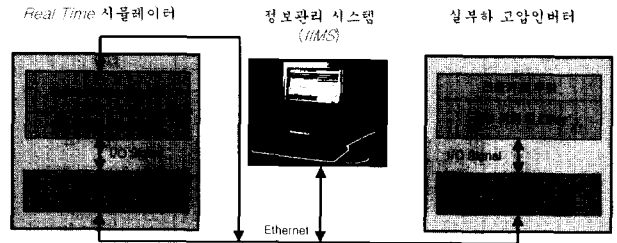


그림 2.25. 가상운전 시스템 구성도

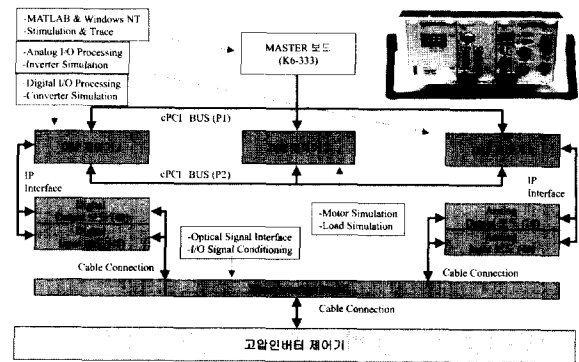


그림 2.26. 가상운전 시뮬레이터 구성도

운전관련 버튼은 LED가 포함된 버튼으로써 버튼의 선택 여부를 바로 확인할 수 있으며 실제 전동기의 동작상태는 바로 위의 램프의 점멸 상태로 확인하게 된다. 고장발생시에는 적색의 고장표시램프가, 경고발생시에는 주황색의 경고표시램프가 계속 점멸하게 된다. 고장이나 경고 원인이 해제되면 고장해제 버튼에 의해 램프의 점멸이 해제된다.

또한 LCD표시판에는 현재 운전상황에 대한 설명과 이벤트 발생시에는 발생내용과 조치해야 될 사항 및 결정해야 될 사항 등 운전조작에 관련된 모든 상황을 문자로 상세하게 안내하여 운전조작에 어려움이 없도록 배려하였다.

2.4.2. 인버터 가상운전 시스템 개발

가상운전 시스템은 컨버터, 인버터, 유도전동기 및 제어 대상 플랜트를 모의 실험하는 일종의 시뮬레이터로 인버터 제어기의 기능 검증 및 인버터 시스템을 현장에 적용하기 위한 사전 엔지니어링 기능을 제공한다. 즉 전력 변환장치, 전동기를 포함한 적용 대상 플랜트의 수학적 모델을 탑재하고 인버터 제어기로부터 입력된 스위칭 패턴에 대한 제어변수를 수학적 해법을 통하여 계산하여 인버터 제어기에 변환시킴으로써 인버터 제어기의 기능을 실제 시스템에 적용하기 전에 시험할 수 있다. 그림 2.25는 가상 운전시스템의 구성도 나타내며 그림 2.26은 가상 운전 Simulator의 구성도이다.

제 3 장 결 론

국내 시장의 개방화로 인해 날로 치열해지고 있는 기술 경쟁력 시대에 국내 기술이 미진한 고압 대용량 인버터 설계, 제조 및 운용기술 개발은 국내 기술의 자립화와 수입 대체에 큰 기여를 할 것으로 사료되며 향후에는 자동제어반의 수출까지도 고려한 전략구축도 마련할 계획이다.