

# 디지털 조속기 시스템의 신뢰성 향상에 관한 연구

신 천 기\*, 전 일 영\*, 신 남 식\*, 하 달 규\*  
안 병 주\*, 황 춘 석\*, 노 창 주\*\*, 김 윤 식\*\*

## A Study on the Reliability Improvement of Digital Governor System

Cheon-Kee Shin\*, Il-Young Jeon\*, Nam-Sik Shin\*, Dal-Gyu Ha\*  
Byung-Joo Ahn\*, Choon-Suk Hwang\*, Chang-Joo No\*\*, Yoon-Sik Kim\*\*

### Abstract

In this study, turbine speed control algorithm is studied for Buk-Jeju steam turbine power plant and also digital governor system is designed for speed control of steam turbine in power plant. By using duplex I/O module, triplex CPU module, 2 out of 3 voting algorithm and adding self diagnostic ability, the reliability of the designed digital governor system can be acquired satisfactorily. Designed and manufactured digital governor system is implemented in a pilot steam turbine plant of 0.3kw output power installed in Korea Maritime University. After a series of experiment the reliability and availability is confirmed and also stable operation is achieved.

### 1. 개 요

최근 산업 현장에서는 실시간 처리와 시스템의 신뢰성 향상에 대한 관심이 고조되고 있다. 특히 항공 산업, 자동제어 시스템, 기력 발전소 등 시간적 특성이 중요하게 고려되어야 하는 응용에서 더욱 강조되고 있다. 실시간 처리는 주로 응용 시스템의 시간적 요구를 만족시켜주는 이론이며, 시스템의 신뢰성 향상은 동종의 제어카드를

중복으로 설치함으로써 제어 시스템의 부분적인 결함이 발생하더라도 연속적인 제어를 가능하게 하는 기법이다. 현재 운전중인 중·소형 기력발전소의 설비는 1970년 이전의 기술인 아날로그 및 기계유압식이 근간을 이루고 있어 단종 부품의 증가 및 관련 전문가의 감소 등으로 운전 및 유지·보수에 어려움이 많으며, 또한 아날로그 계통

\* 삼창기업(주) 중앙연구소

\*\* 한국해양대학교

의 경직성으로 신기술 이식 등을 통한 성능 향상에 제약을 받고 있다. 따라서 이와 같은 문제점들을 해결하기 위한 방안으로 발전설비의 계측제어 계통의 디지털화가 점차 요구되고 있다. 특히 차세대 신형 발전소에서는 디지털 기술의 적용을 기본 설계 요건으로 제시하고 있다.

본 연구는 기력 발전소의 터빈 속도 제어 장치인 가버너를 디지털화 하여 신뢰성을 확보하고 또한, 급속한 부하 변동에도 실시간적으로 대처하여 양질의 전력을 공급할 수 있는 디지털 조속기 시스템의 국산화 개발을 목표로 하고 있다. 산업용 발전 플랜트에 있어 시스템의 불시 정지에 따른 피해는 수치로 환산할 수 없을 정도로 막대하다. 따라서 스팀 터빈 제어계의 고신뢰성이 무엇보다 중요하며 I/O 모듈 이중화와 CPU 모듈 삼중화에 의한 유효 제어 데이터의 산출 기법인 투 아웃 오브 쓰리(2 out of 3) 보우팅 방법 및 자체 진단 기능을 갖춘 디지털 조속기 시스템을 설계하였다.

## 2. 시스템 구성

디지털 조속기 시스템의 전체 계통도는 Fig 2.1과 같이 CPU 모듈의 삼중화와 I/O 모듈의 이중화로 구성된다. CPU 모듈은 각기 독립된 프로세서와 메모리를 내장하고 있으며, 외부 센서로부터 입력된 신호(속도, 압력, 온도, 밸브 변위, 발전기 출력 등등)를 세 개의 CPU 모듈에서 개별적으로 연산 처리한 후 2 out of 3 voting 방식을 사용하여 유효 출력 제어신호를 결정한다.

CPU A와 CPU C 모듈은 제어권을 가지며, 입력 디바이스로부터 독립적으로 값을 받는다. 터빈의 회전수와 같은 중요한 입력 요소는 세 개 또는 그 이상의 센서로부터 입력을 받아 신뢰성을 높이는 것이 일반적이다. CPU A와 CPU C 모듈로 입력된 데이터 값은 CPU 내부 직렬 통신에 의해 세 개의 CPU 모듈이 데이터를 공유하게 되며,

각기 모듈은 독립적으로 연산을 수행한 후 유효 데이터를 재 교환함으로써 각각 2 out of 3 voting을 수행하도록 하였다.

마그네틱 픽업은 터빈 발전기의 축에 부착된 기어 치수(齒數)에 비례하는 신호(구형파, 사인파)를 발생한다. 이러한 신호는 DSSM에서 신호 처리를 수행한 후 유효 데이터를 CPU 모듈의 속도 피드백 값으로 사용된다.

SIOM은 시스템의 동작 및 파라미터 조절을 위한 키패드의 입력을 샘플링 방식으로 처리하며, VFD에 각종 운전 상태를 표시한다. 압력, 온도, LVDT, kW등의 입력 신호는 AIM에서 디지털 신호로 변환되며, DOM은 릴레이 보드를 통하여 A 또는 B 접점으로 온/오프 신호를 출력하도록 하였고, AOM은 아날로그형 지시계를 구동하기 위한 아날로그 신호를 출력한다. RS232C, RS485 통신 드라이버를 사용하여 운전 상황 및 데이터 전송을 가능하게 하였으며, 디지털 조속기 시스템이 원격으로 감시, 운용될 수 있도록 구성하였다.

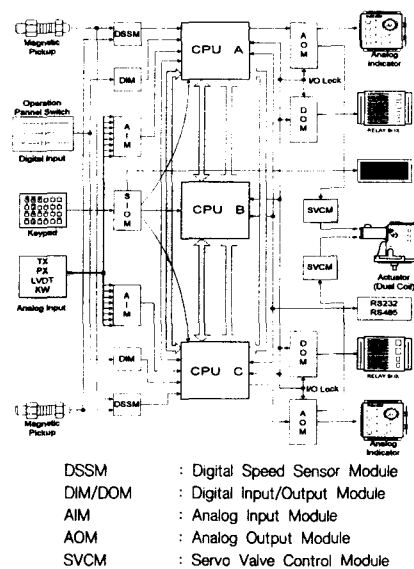


Fig 2.1 Digital Governor System

## 2.1 하드웨어

디지털 조속기 시스템은 Fig 2.2와 같이 하나의 캐비닛에 모듈 서브 랙, VFD, 키패드, 조작 패널 스위치, 파워 서플라이 등으로 구성된다. 각 모듈은 서브 랙의 마더 보드에 장착되며, 모듈별 ID를 가지므로 시스템 기동시 지정된 슬롯에 모듈이 제대로 장착되었는지를 진단할 수 있다.

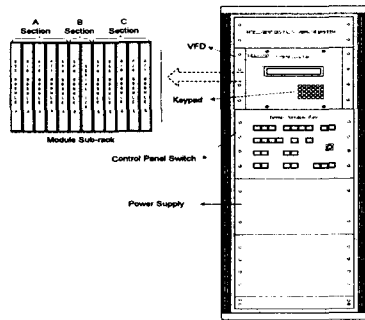


Fig 2.2 System cabinet

CPU 모듈은 산업 현장에서 널리 사용하는 MC68EC040 마이크로프로세서를 사용하여 모듈 자체의 높은 성능을 보장하였으며, 직렬 통신 컨트롤러를 사용하여 CPU 모듈간 데이터 전송을 안정하게 할 수 있도록 설계하였다. 세 개의 CPU 모듈에 고유 ID를 부여하여 시스템 초기화시 마더 보드가 장착된 CPU 모듈을 인식하도록 하여(A CPU=00, B CPU=01, C CPU=10) CPU간 데이터 교환 및 I/O 제어를 용이하도록 설계하였다.

디지털 속도 검출 모듈(DSSM)은 다수의 마그네틱 픽업으로부터 현재의 터빈 회전 속도와 속도 변화율을 입력받아 CPU 모듈에 디지털값을 제공하도록 설계되어 있으며, 아날로그 입력 버퍼, 프리스케일러, 디지털 시그널 프로세서, 16비트 카운터, CPU 인터페이스 회로 등으로 이루어져 있다.

아날로그 입력 모듈(AIM)은 터빈의 케이싱 온도, 복수기의 진공, 스팀의 압력, 밸브의 개도 및 발전기의 출력값인 아날로그 신호(4~20[mA], 0~5[V] 등)를 처리하는 모듈이다. 입력은 총 8채널이고 멀티플렉서를

통해 시분할 되어 처리되며, 80C196KB 마이크로프로세서에 의해 자체적으로 A-D 변환을 수행한다.

아날로그 출력 모듈(AOM)은 CPU로부터 디지털 신호를 입력받아, 액추에이터나 외부 계기를 구동하기 위해 4~20[mA]의 전류 신호를 발생시킨다. 12비트 해상도, 8개의 정전류 출력, 2 out of 3 voting의 출력을 위한 I/O Lock 회로 등이 내장되어 있다.

## 2.2 소프트웨어

디지털 조속기 시스템의 소프트웨어는 운영 프로그램과 터빈 제어에 필요한 응용 프로그램으로 구분된다. 운영 프로그램은 전원인가 후 하드웨어 리셋에 의해 프로세서 내의 프로그램 카운터 초기화나 벡터 테이블을 정렬하고 레지스터, 메모리, 입·출력 등의 이상 유무를 테스트하며, 시스템에 사용되는 모든 슬레이브 디바이스를 초기화한다. 응용 프로그램은 터빈 제어에 필요한 입·출력 프로세싱, 속도제어, PID, 내부 프로세서간 통신, 시스템의 각종 기능 프로그램을 수행한다.

Fig 2.3은 조속기 제어(응용) 동작의 실시간 처리를 위한 레이트(rate) 프로세싱 그룹을 나타낸 것으로 중요도에 따라 각기 다른 그룹에 속하며, 타이머에 의해 매 10[ms]마다 주기적으로 프로그램을 수행한다.

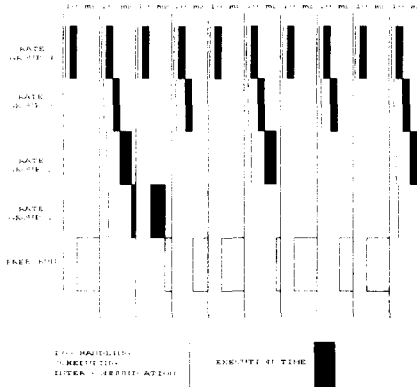


Fig 2.3 Rate processing group

### 2.3 제어 알고리즘

속도제어 알고리즘은 속도 측정용 센서로부터 신호를 받아 이를 목표치(회전수 설정치)와 비교하여 그의 편차에 따른 PID 동작을 수행하며, 부하제어 알고리즘은 부하변동에도 불구하고 희망 유효전력을 계속적으로 출력하기 위하여 동작한다. Fig 2.4는 발전용 증기 터빈의 속도 및 부하제어를 위한 블록 선도를 보여주고 있다.

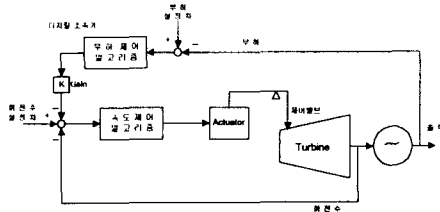


Fig 2.4 Speed & load control block diagram

블록선도로부터 제어대상의 입출력 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$Y(s) = \frac{K_v K_a K_t}{(1 + T_a s)(1 + T_t s)(b + Js)} U(s) - \frac{1}{(b + Js)} T_l s \quad (2.1)$$

여기서  $u$ 는 제어입력 (액츄에이터의 입력),  $y$ 는 회전수(속도),  $T_l$ 는 전기적 부하토크 신호이고,  $K_a$ 는 액츄에이터의 이득,  $K_v$ 는 제어밸브의 비례상수,  $K_t$ 는 증기터빈의 비례상수이다. 한편  $T_a$ 는 액츄에이터의 시정수,  $T_t$ 는 증기터빈의 등가 시정수,  $J$ 는 회전부의 등가 관성모멘트,  $b$ 는 등가 마찰계수이다. 식 2.1로부터 제어입력에서 출력 회전수까지의 전달함수는 다음 식과 같이 표시된다.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0}{s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3} \quad (2.2)$$

Fig 2.5는 매개변수 결정을 위하여 실제 발전소의 터빈 발전기를 무부하 상태에서 동조 실험을 한 결과 취득된 입·출력 값을 나타낸다. 발전시스템이 무부하로 운전되고 조속기의 속도 설정치를 정격회전수 3600

[rpm] 부근에서 변경할 동안 제어입력 신호 전압과 회전수를 계측하였고, 샘플링 시간은  $T=0.01$  [sec]로 선정하였다.

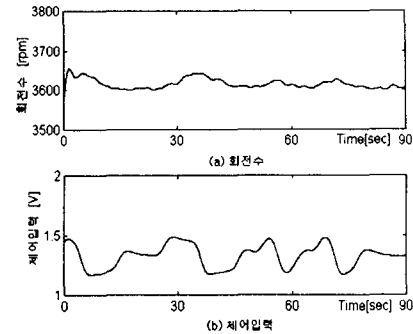


Fig 2.5 Dynamic data of turbine generator

계측된 입력 신호를 조정모델에 인가하였고, 유전알고리즘은 시스템 출력과 모델의 출력 차가 최소가 되도록, 즉 모델의 특성이 시스템의 동특성에 가까워지도록 계속적으로 모델의 매개변수를 조정하게 된다. 모의실험 결과 추정치로  $\hat{a}_1 = 2.51$ ,  $\hat{a}_2 = 4.64$ ,  $\hat{a}_3 = 0.04$ ,  $\hat{b}_0 = 0.08$ 를 얻을 수 있었다.

### 3. 신뢰성 향상 기법

신뢰성이란 주어진 시간과 조건에서 요구되는 임무(mission)를 수행할 수 있는 가능성으로 정의되며, 수식적인 표현은 식 3.1과 같다.

$$R(t_m) = e^{-\int_0^{t_m} \lambda(t) dt} \quad (3.1)$$

[ $R(t_m)$  = 신뢰성,  $\lambda(t)$  = 고장률,  $t_m$  = 수행 시간]

고장률은 순간적인 고장 가능성으로 생각될 수 있으며,  $\lambda(t)dt$ 는 ( $t$ ,  $t+dt$ ) 시간 사이에 생길 수 있는 결함의 가능성이다. 고장률은 임무 수행 시간의 전 범위에서 볼 때 상수로 취급 가능하며 식 3.1을 간략히 하면 식 3.2와 같다.

$$R(t_m) = e^{-\lambda t_m} \quad (3.2)$$

테일러 전개에 의해

$$e^{-\lambda t} = 1 - \lambda t + (\lambda t)^2/2! - (\lambda t)^3/3! + \dots$$

$\lambda t$ 의 값이 적으므로 신뢰성은 식 3.3으로 간단히 표현할 수 있다.

$$R(t) \cong 1 - \lambda t \quad (3.3)$$

Fig 3.1은 삼중화 시스템을 나타내는 벤 다이어그램이며, 신뢰성을 구하는 논리식은 다음과 같다.

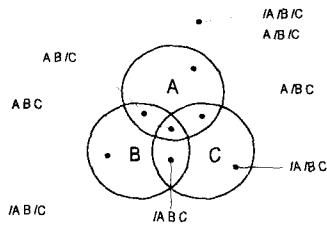


Fig 3.1 Triple modular system venn diagram

각 모듈의 고장률을

$$P(\bar{A}) = P(\bar{B}) = P(\bar{C}) = 0.01$$

이라 가정하면, 모듈의 신뢰성은

$$R(A) = R(B) = R(C) = 0.99 \text{ 이다.}$$

$$P(F) = P(\bar{A}\bar{B}\bar{C}) + P(\bar{A}\bar{B}C) +$$

$$P(A\bar{B}\bar{C}) + P(\bar{A}BC) = 0.000298$$

$R(S) = 1 - P(F) = 0.999702$  이므로 신뢰성은 99.9702[%]로 표시한다.

### 3.1 내(耐)고장 시스템 구현

본 연구에서 다루는 시스템은 I/O 모듈 이중화와 CPU 모듈 삼중화로 구성되어, 이중화의 기능적 단점을 보완하였으며 전 삼중화에 비해 경제적으로 유리한 장점이 있다. 내고장 시스템의 I/O 모듈은 입력 종류에 따라 각기 전용 모듈을 두 개씩 가지며, 마이크로프로세서를 내장하여 독자적으로 A-D 변환한다. 이때 입력값은 2 out of 3 voting에 의해 유효 데이터를 결정한다. CPU 모듈은 입력된 디지털 값을 서로 공유하며, 정해진 연산을 수행하고 다시 값을 교환하여 유효 출력값을 결정하게 된다. 통

상 먼저 부팅된 CPU 모듈이 제어권을 가지며 나머지는 항상 제어권을 넘겨받을 수 있도록 준비한다.

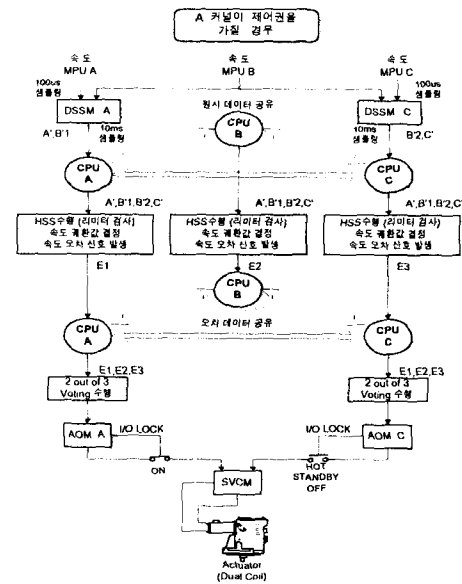


Fig 3.2 2 out of 3 voting method

Fig 3.2의 삼중화 시스템은 제어에 필요한 입력 데이터를 세 개의 커널이 공유함으로써 시스템의 고장 진단을 수행할 수 있으며, 입력 센서들의 유효성을 판단할 수 있다. CPU 모듈은 Z85C30 통신 전용 컨트롤러를 채용하고 있어 데이터 교환시 메인 프로세서에 부담을 주지 않으므로 실시간 처리를 가능하게 한다. 사용하는 통신 프로토콜은 고속통신 및 데이터 전송의 투명성이 높은 IBM 표준 방식인 SDLC(synchronous data link control) 모드를 채택하였으며, 2 채널, 전이중 방식을 지원하므로 A, B, C 세 개의 커널이 동시에 데이터 교환이 가능하다. Fig 3.3은 2 out of 3 voting 알고리즘으로 세 개의 CPU가 특정한 마스터 없이 스스로 데이터를 결정할 수 있다. 각 CPU에서 연산된 데이터는 2 out of 3 voting을 사용하여 비교할 수 있으며, CPU가 정상이라면 독립적으로 연산된 데이터는 항상 동일한 결과를 가진다.

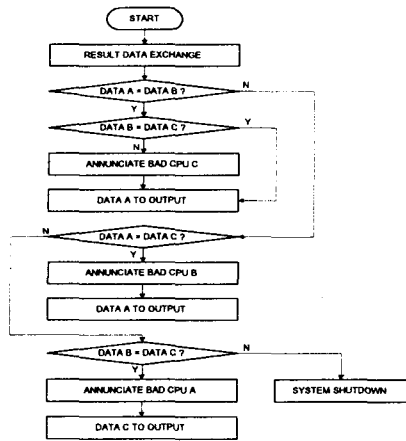


Fig 3.3 2 out of 3 voting flowchart

#### 4. 시스템 성능시험

본 연구에서 다루는 디지털 조속기 시스템은 북제주 화력발전소의 10[MW] 스팀 터빈 제어를 목적으로 개발되었으며, 현재 가동중에 있으므로 터빈의 제어 및 시스템 성능 시험이 불가능하다. 따라서 현장의 조건과 흡사한 파일럿 플랜트를 이용하여 성능 시험을 실시하였다. 파일럿 플랜트는 0.3[KW]의 출력을 가지며 기계식 조속기를 포함하고 있으므로 개발된 시스템의 성능 시험을 위하여 기계식 조속기 및 기구물을 제거하였고, 디지털 제어에 사용되는 입력 센서와 스팀의 양을 조절하기 위한 컨트롤 밸브를 구동하는 액추에이터를 부착하였다. 삼중화 성능 시험을 위하여 터빈 속도제어 단일 루프를 구성하였고, 입력 요소는 속도만을 취했으며, PID 제어를 수행한다. 시스템을 기동하면 운전 모드에 따라 자동/수동으로 정격 속도(3600[rpm])에 도달할 수 있으며, 삼중화 시스템은 입력된 속도값을 각기 독립적으로 연산하여 2 out of 3 voting을 수행한 후 액추에이터를 구동한다. 이때 고장 발생의 한 방법으로 A, B C 커널의 전원을 임의로 차단함으로써 삼중화→이중화→단일화 제어동작을 고찰하였다.

Fig 4.1은 삼중화 동작이 정상적으로 이루어

어지고 있는 경우의 액추에이터 드라이브 전류를 나타내었다. 아날로그 출력 모듈에서 4~20[mA]의 전류를 입력받아 서보 밸브 제어 모듈에서 실제 액추에이터를 구동할 수 있는 40~200[mA]로 증폭시켜 동작한다. A 커널이 액추에이터의 제어권을 가지고 동작될 경우 A 커널의 전원을 차단시키면 10[ms] 레이트 프로세싱 시간 동안 제어권을 C 커널로 전환시킨 후 Fig 4.2와 같이 정상적으로 제어함을 고찰하였다.

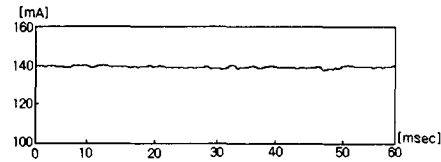


Fig 4.1 Actuator drive current (Normal)

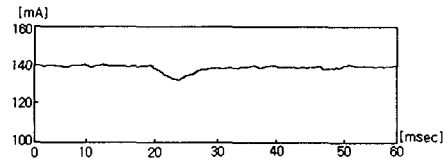


Fig 4.2 Actuator drive current (A kernel fault)

#### 5. 결론

본 연구에서는 디지털 조속기의 신뢰성 향상에 주안점을 두어 설계하였으며, 고신뢰성 디지털 조속기의 설계 조건으로 다음과 같은 것이 있다. 첫째, 모듈을 분산함으로써 고장 부위의 확산을 방지해야 하고 둘째, 모듈을 중복 설치함으로써 중단됨이 없는 제어 동작이 가능해야 하며 셋째, 삼중화에 의한 2 out of 3 voting으로 유효 데이터를 결정할 수 있어야 한다.

이상의 설계 조건을 만족하는 시스템을 개발하여 성능시험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 첫째, 입력모듈에 마이크로프로세서를 내장하여 멀티프로세서 환경에 의한 보다 빠르고 정확한 제어가 가능하였으며
- 둘째, CPU 모듈간 삼중화 통신 및 2 out of 3 voting 알고리즘에 의해 신뢰성이

항상됨을 성능시험에서 입증하였으며 셋째, 시스템이 정상적인 동작을 하고있을 때 A, B, C 커널의 전원을 임의로 차단시켜도 터빈 제어는 지속적으로 이루어졌으며, 일정시간 후 전원을 투입하면 현재 제어중인 모듈의 클럭에 동기되어 다시 제어 동작이 일어남을 확인하였다. 이런 결과로써 운전중 모듈 교체 및 수리가 가능함을 입증하였다.

13. 한국전력공사 전력연구원, “주파수 조정 운전을 위한 터빈 조속기 및 보일러 제어계의 성능개선”, 자동제어 연구실, 1987
14. 한국전력공사 전력연구원, “발전기 제어계 성능시험 및 조사 분석에 관한 연구”, 1989
15. IEEE Std 352-1987, “IEEE Guide for General Principles of Reliability Analysis of Nuclear Power Generating station Safety Systems

### 참 고 문 헌

1. Levi Agrawala, “Fault Tolerant System Design”, McGraw-Hill, 1994
2. Paul Horowitz, Winfield Hill, “The Art of Electronics”, Cambridge University Press, 1980
3. Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schafer, “Discrete Time Signal Processing”, Prentice Hall, 1989
4. A. W. Ordys, A. W. Pike, “Modelling and Simulation of Power Generation Plants”, Springer-Verlag, 1994
5. Nikitas Alexandridis, “Microprocessor Based System”, Prentice Hall
6. Gobind Daryanani, “Principles of Active Network Synthesis and Design”, Bell Telephone Laboratories
7. Joseph J. Carr, “Sensors and Circuits”, Prentice Hall, 1993
8. Simon Haykin, “Digital Communications”, John Wiley & Sons, Inc, 1988
9. Motorola Inc., “M68040 User’s Manual”, 1993
10. Intel Corporation, “8XC196KC / 8XC196KD User’s Manual”, 1992
11. Robert F. Coughlin, Robert S. Villanucci, “Introductory Operational Amplifiers and Linear ICs”, Prentice Hall, 1990