



(\*달국대 공대 전기공학과)

고장검출진단 및 고장허용제어 특집을 내면서..

최근 산업 플랜트의 자동화, 대형화 추세는 대량생산과 생산 경비의 절감을 가능하게 하였지만 고장 발생시의 경제적 손실과 위험성을 증폭시켰을 뿐 만 아니라 규정된 안전성과 신뢰성 확보에 어려움을 더하였다. 이러한 시스템의 신뢰도 개선을 위해서는 기존의 고장회피 개념과 함께 보다 적극적인 실시간 고장검출진단 및 고장허용 개념을 도입함으로써 요소 고장으로 인한 운전 중지 및 성능 감퇴를 최소화하여야 한다. 고장검출진단에 관한 연구는 당초 항공, 발전, 화학공정 등의 안전성 확보를 위해 발전되었지만, 최근에는 각종 산업공정과 제품의 경제성 제고를 위해 적극적으로 도입되고 있다. 본 특집은 고장검출 식별기법, 진단기법, 고장허용 제어의 개념과 적용분야 별 연구개발 동향을 소개하고, 그 중요성을 널리 인식시키기 위해 마련되었다. 특집 원고를 집필해주신 저자 여러분들께 깊이 감사드리며 이 특집이 고장검출진단 및 고장허용제어 분야 연구의 활성화를 위한 촉매가 될 수 있기를 기대한다.

1. 서론

자동화와 대형화로 특징지어지는 기술 집약적인 시스템에 요구되는 신뢰도와 안전성을 확보하기 위해서는 고신뢰성 부품을 사용하여 시스템을 구성하고 예방정비를 철저히 함은 물론, 운전 중 고장이 발생한 경우에도 규정된 성능 범위 내에서 임무를 수행할 수 있도록 감독기능을 가진 고장 감시 시스템(fault monitoring system)을 도입하여야 한다.[1] 이러한 고장감시 시스템은 고장검출 및 식별, 고장 효과와 원인의 진단, 고장 허용을 위한 제어기의 재구성 기능을 수행하도록 설계되며, 그 핵심은 고장검출 식별 및 진단기법이라 할 수 있다. 고장검출과 진단 기법은 매우 다양하므로 도입 효과를 극대화하기 위해서는 대상 프로세스의 구성요소, 동특성, 수학적 모델의 유무, 측정 가능한 변수와 오경보율, 검출율 등의 고장검출진단 시스템의 성능, 선정된 기법의 실현 경비 등 매우 많은 요인을 고려하여 선정하여야 한다. 이

글에서는 고장검출진단 분야의 이해를 돕기 위해서 이 분야에서 사용되는 용어의 의미와 기본적인 문제의 정의, 기법 및 연구동향을 간략하게 소개한다.

2. 고장 검출 진단 관계 용어

고장검출진단 관계 용어는 최근까지도 완벽한 통일을 보지 못했다. 그 주요 원인은 이 기술 분야의 연구가 통일적으로 이루어지지 않고 응용대상 시스템 위주로 발전되어 왔기 때문으로 판단된다. 80년대 이후 모델기반 기법에 대한 연구가 활성화되면서 통일적 개념의 정립이 필요하게 되었고 최근에는 고장진단관계 학술회의 등을 통하여 용어 정립을 위한 논의가 활발히 진행되고 있다. 본 절에서는 IFAC 심포지엄 SAFEPROCESS 기술위원회에서 검토하여 1997년 Isermann과 Balle의 논문[2]을 통해 제안한 고장검출 진단 관계 용어 중 기본적인 개념과 관련된 것을 기술한다. 단, 국문 번역에 관해서는 이에 관한 국내 연구자들 간의 토의가 이루어지지 않은 관계로 어휘의 선택에 이견이 있을 수 있으며, 따라서 이번 특집 원고에도 동일 개념에 대한 서로 다른 표현이 있을 수 있음을 밝혀둔다.

- 이상/고장(fault): 하나 이상의 시스템 특성 또는 파라미터가 규정된 조건으로부터 허용 편차 이상으로 벗어남
- 고장/파손(failure): 시스템이 규정된 동작조건에서 요구되는 기능의 수행능력을 상실한 상태
- 오동작(malfunction): 시스템이 요구되는 기능을 수행함에 있어 발생하는 간헐적인 불규칙성
- 외란(disturbance): 시스템에 작용하는 제어 불가능한 입력
- 잔차(residual): 측정치와 프로세스모델에 근거하여 계산된 추정치의 편차 또는 그 편차에 근거한 고장 지시변수
- 고장검출(fault detection): 시스템 내 고장 존재여부의 결정
- 고장식별/격리(fault isolation): 고장의 종류, 위치 및 검출 시간의 결정, 고장검출 후의 과정
- 고장규명(fault identification): 고장의 크기와 시변 특성의 결정, 고장식별 후의 과정

## 【 고장검출진단 및 고장허용제어의 개념과 동향 】

- 고장진단(fault diagnosis): 고장 식별과 규명을 포함하며 고장의 종류, 위치, 크기와 검출 시간을 결정, 고장검출 후의 과정
- 감시/모니터링(monitoring): 측정변수들의 허용범위 초과여부를 검사하여 물리적 시스템의 상태를 결정하고(연속-실시간) 이상 동작을 운전자에게 알림
- 감독(supervision): 물리적 시스템을 감시하고 고장의 경우 동작을 지속하도록 적절한 조치를 취함
- 보호(protection): 위험한 시스템 동작을 제거하는 수단, 위험한 시스템 동작의 결과를 회피하는 수단
- 정량적 모델(quantitative model): 시스템의 특성을 정량적 수학적 표현으로 나타낸 시스템 변수, 파라미터들의 관계
- 정성적 모델(qualitative model): 시스템의 특성을 인과관계, if-then 규칙 등의 정성적 표현으로 나타낸 시스템 변수, 파라미터들의 관계
- 해석적 중복도/여유도(analytical redundancy): 한 변수 값을 결정하기 위한 두 가지 이상의 방법
- 신뢰도(reliability): 주어진 시간구간 동안 설정된 동작조건 하에서 요구되는 기능을 수행하는 능력. 신뢰도의 척도로는 MTBF(Mean Time Between Failure), MTTR (Mean Time To Repair) 등이 사용됨.
- 안전성(safety): 인명, 장치 및 환경에 위험을 초래하지 않는 시스템의 속성
- 가용성(availability): 임의 시점(any point of time)에 시스템 또는 장치가 효과적으로 동작할 확률이며 다음 측도를 사용함.  

$$A = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})$$

### 3. 고장검출진단 시스템의 구성

고장 검출 식별 (Fault Detection and Isolation: FDI)은 일반적으로 프로세스 변수의 측정치를 가공하여 잔차를 추출하고 이를 분석하여 고장의 발생 여부를 판단하고, 고장 요인을 식별하는 과정을 의미한다. 또한 고장진단(fault diagnosis)은 식별의 다음과정으로서 식별된 고장의 원인, 파급효과, 고장의 정도(severity)등을 산정하는 과정을 의미한다. 이들을 포함하는 고장검출진단시스템은 일반적으로 다음 요소를 포함하고 있다.

- 잔차 발생기구
  - 고장 검출논리
  - 고장진단 정보(특징량)의 추출 알고리즘
  - 고장 식별 진단 논리와 추론 알고리즘
- 따라서 고장검출진단시스템의 설계문제는 일반적으로 다음 사항을 포함한다.

#### 3.1 검출진단 대상 고장의 선정

검출진단 대상 고장은 일반적으로 프로세스 자체의 고장, 구동장치의 고장, 측정장치의 고장, 제어기 고장으로 분류된다.

이중 센서 고장은 그 영향이 궤환경로를 통해 전 계통에 파급되어 계통의 성능을 저하시키는 물론 잘못된 감시정보를 제공함으로써 운전자의 오조작을 유발할 수 있으므로 프로세스 고장검출에 선행되어야 한다. 검출 대상 고장은 고장 해석 결과에 따라 선정한다. 고장 해석은 다음의 두 가지 방법으로 수행할 수 있다. 첫째는 선정된 프로세스에 대한 정량적 모델을 수립하고, 각 고장을 모델 파라미터의 변화로 대응시킴으로서 고장의 영향을 분석하는 해석적 방법이며, 둘째는 기존의 운전데이터 또는 고장 데이터에 근거한 분석 방법이다.

#### 3.2 잔차 발생 알고리즘의 설계

고장판별함수 또는 잔차 발생 알고리즘은 고장 검출 시스템의 핵심 요소이며 고장검출 성능에 가장 큰 영향을 끼친다. 이 알고리즘의 설계 시 가장 중요한 고려 사항은 가능한 단순한 검출논리에 의해 고장 발생이 감지되도록 양질의 고장 정보를 가진 잔차가 제공되어야 한다는 점이다. 따라서 잔차 발생기구는 검출 대상 고장에 민감하고, 기타 고장, 잡음 및 외란 등에는 둔감하도록 설계되어야 한다.

#### 3.3 고장 검출논리와 고장 진단논리의 설계

고장 검출은 단순히 고장의 발생 여부만을 판단하는 과정이므로 그 논리는 진단논리에 비해 단순하다. 그러나 고장검출을 위한 문턱값은 검출율(detection rate)과 오경보율(false alarm rate)에 매우 큰 영향을 주므로 잔차 발생기구에서 제공된 정보의 양과 질에 따라 적절히 선정되어야 한다. 프로세스 고장의 진단을 위해서는 먼저 센서를 통해 얻어진 정보를 고장 진단에 적합한 정보로 가공하여야 하며 이 과정을 특징량 추출 과정이라 한다. 특별히 잔차가 특징량으로 사용될 수도 있지만 일반적으로 특징량은 잔차의 처리 결과 또는 더욱 포괄적인 의미를 가질 수 있다. 진단시스템의 성능은 이 과정에서 선정된 특징량에 의해 좌우되며 특징량의 적절한 선정은 진단논리의 단순화에도 기여한다. 고장 진단 알고리즘으로는 인공지능망을 비롯한 매우 다양한 패턴 분류 및 인식기법들이 사용될 수 있다.

### 4. 고장 검출 식별 기법의 분류

고장검출진단에 대한 연구는 지난 20여 년 간 우주 항공, 원자력 발전 등 고도의 신뢰성이 요구되는 분야를 중심으로 발전되어왔다. 70년대 중반까지 운전 중의 계통 감시는 다중방식으로 설치된 센서 정보에 의한 하드웨어 중복방식(Hardware Redundancy Method: HRM)과 운전자의 경험에 의존하였다. 이 기법들은 해당 요소를 다중방식으로 설치하므로 요소 자체의 경비와 공간, 전력소모 등의 실현 및 운용 경비를 증가시킬 뿐만 아니라 고장 발생시 진단, 후속 조치 등을 운전자의 지식에 의존하여 수행하여야 한다. 현재 폭 넓게 연구되고



고 있는 온-라인 FDI 기법은 디지털 컴퓨터 기술의 발달을 배경으로 신호처리 기법, 시스템 해석 기법 등에 근거하여 개발되기 시작하였다. 현재까지 개발된 고장검출진단 기법은 사용된 프로세스 모델의 형태, 잔차발생 방법, 그리고 채택된 고장검출진단 알고리즘에 따라 다양하게 분류될 수 있지만 대표적인 분류 방법은 프로세스 모델의 사용여부에 따라 정량적 모델 또는 정성적 모델에 근거하여 설계되는 모델기반 기법과 모델을 사용하지 않는 무모델 기법으로 분류하는 것이다.

#### 4.1 정량적 모델 기반 기법

정량적 모델 기법은 대상계통의 수학적(정량적)모델에 근거하여 운전 데이터를 분석함으로써 고장검출진단을 수행하는 해석적 기법으로 동적 시스템의 초기고장 검출에 유용하다. 모델기반 기법은 잔차발생 방법에 따라 상태추정을 이용한 기법, 등가방정식(parity equations) 접근법, 및 파라미터 추정을 이용한 기법 등으로 분류될 수 있다. 잔차 발생에 사용되는 상태추정기법으로는 고장 검출필터, 칼만 필터, 상태 관측자, 미지 입력 관측자 등으로 구분된다. 등가방정식 접근법은 입출력 형태의 방정식에서 등가관계를 이용하여 고장검출진단을 위한 잔차를 발생시키는 방법이며, 파라미터 추정을 이용한 기법은 고장 발생시 실제 계통의 파라미터가 변화한다는 사실에 입각하여 실시간 파라미터 추정 결과와 고장양상을 대응시킴으로써 고장을 검출, 진단하는 방법으로 프로세스 자체의 고장검출진단에 적합하다.

해석적 기법은 근본적으로 계통의 정확한 정량적 모델을 요구하므로 불확실성을 포함한 계통, 비선형성이 강한 계통 등에서의 적용이 곤란하며 이를 극복하기 위한 연구가 진행되고 있다 [3][4].

#### 4.2 정성적 모델 접근법과 지식기반 진단기법

정성적 모델은 프로세스 내의 변수간의 상호 작용과 고장의 전과과정 등을 인과관계 표현에 적합한 방향성 그래프, 퍼지 인식맵, 페트리-네트, 사건-트리 등을 사용하여 표현한 결과이며 모두 고장진단을 위해 사용되고 있다. 지식기반 진단기법은 사용된 지식의 속성에 따라 SKM (Shallow Knowledge Model)에 근거한 방법과 DKM(Deep Knowledge Model)에 근거한 방법으로 나눌 수 있다. SKM 기법은 고장원인과 증상간의 직접적인 관계에 근거한 것으로 IF-THEN 구조의 규칙 베이스와 추론엔진으로 구성되는 전형적인 전문가시스템으로 실현된다. 이 방법은 원인과 결과 사이의 중간 과정이 포함되지 않아 지식기반의 완전성을 보장하지 못한다는 문제점을 갖는다. DKM 기법은 프로세스 고장 발생시 변수간의 상호 작용과 고장의 전과 과정에 대한 구조적 지식에 근거한 것으로 주어진 고장원인에 대한 계통의 동작을 추론할 수 있으며, 상황 변화에 대한 영향을 예측할 수 있다. 고장 트리, SDG 등의 정성적 모델은 DKM의 일례로 간주할 수 있다 [5].

#### 4.3 무모델 기법

수학적 모델을 사용하지 않는 고장검출진단기법으로는 프로세스의 변수 또는 파라미터의 측정기록하고 이들의 통계적 특성에 대한 가설검사에 의해 고장을 검출하는 신호검증 기법, 프로세스의 변수 또는 파라미터의 측정치를 도표를 이용하여 관찰함으로써 동적 시스템의 상태를 감시하는 관리도 기법, 진동 및 음향의 주파수 분석 결과에 의해 기계장치의 동작상태를 감시하는 기법 등이 있다 [1].

**A. 신호검사기법**은 플랜트 변수의 측정치를 미리 선정된 문턱값과 비교하는 한계값 검사(limit check), 단위시간 당 증분을 이용한 경향검사(trend check)와 평균치, 공분산, 상관관계 등의 통계적 특성에 대한 검사를 포함한다.

**B. 프로세스 관리도 기법**은 순차적으로 얻어지는 공정신호의 통계적 특성, 예를 들어 평균값, 에 대한 범위를 설정하고 그 상한 또는 하한을 벗어나는가의 여부에 따라 이상여부를 판별하는 방법이다. 이 기법은 W.A. Shewhart에 의해 제안되어 공정감시에 도입된 바 있으나 몇 가지 문제점으로 인하여 일반화되지는 못했지만 최근까지 문제점의 해결을 위한 연구가 계속되고 있으며 다음과 같은 개선된 기법이 제시되었다..

- 누적합(Cumulative Sum: CUSUM) 관리도
- EWMA(Exponentially Weighted Moving Average) 관리도

#### C. 신호해석 기법

대표적인 신호해석기법으로는 진동분석기법과 음향분석기법을 들 수 있으며 이들은 고전적인 시스템 감시기법으로 분류된다. 기계에서 고장의 발생은 관련된 주파수의 진동 및 음향을 발생시킨다. 일반적으로 진동 또는 음압의 증가는 동작조건이 악화를 의미하며 그 수준을 시간의 함수로 간주하여 경향검사를 수행한다면 기계의 수명 또는 수리시기를 예측할 수도 있다. 진동 및 음향 측정치는 그 자체로서 고장검출 정보로 사용될 수 있지만, FFT를 이용하여 주파수 해석을 수행함으로써 훨씬 더 많은 정보를 얻을 수 있으며 고장의 조기 검출은 물론, 고장 종류도 매우 단순히 식별될 수 있다. 이 기법은 회전기기, 기어박스, 베어링 등의 이상검출과 식별에 매우 유용하다. 최근에는 진단 성능의 개선을 위하여 신호해석과 인공지능경망 기법의 결합 등이 활발히 연구되고 있다.

### 5. 고장 허용 제어

고전적인 폐환 제어계는 구동장치, 센서 및 기타 시스템 구성요소의 오동작 또는 고장에 의해 제어성능이 크게 감퇴되며 경우에 따라서는 전체 제어시스템이 불안정해질 수도 있다. 최근 고전적 폐환제어와 관련된 이러한 문제점을 극복하기 위하여 고장허용제어 기법이 연구되고 있다. 고장허용 제어는 모든 구성요소가 정상적으로 동작하는 경우는 물론, 측정장치, 구동장치 또는 기타 구성요소의 고장이 발생한 경우에도 안정도와 요구되는 제어성능을 보장해 주는 적절한 구조의 제어를 설계하는 것이다. 고장허용 제어계는 능동

## 【 고장검출진단 및 고장허용제어의 개념과 동향 】

형 고장허용 제어계와 수동형 고장허용 제어계로 분류할 수 있다. 능동형과 수동형의 구분은 고장검출 시스템의 포함 여부 또는 고장검출 정보에 근거한 제어 및 수정동작의 수행 여부에 따른다. 능동형 고장허용 제어계는 고장검출식별 시스템과 검출 식별된 고장이 발생한 경우에 대비한 재구성 제어계 등이 포함된다. 수동형 고장허용 제어계는 일반적으로 고장검출식별 유니트를 포함치 않으며 기본제어계 설계시에 고장에 대한 둔감성을 갖도록 강인제어 기법 등에 의해 설계된 제어계를 의미한다 [6][7].

### 6. 응용 분야 및 사례

고장검출진단에 관한 연구는 우주 항공 시스템, 발전계통, 화학공정 등 고신뢰성이 요구되는 분야를 중심으로 발전되어 왔지만, 최근에는 각종 산업공정 뿐 만 아니라 제품의 신뢰도 개선을 위한 대책으로도 적극 활용되고 있다. Isermann [2]은 1991년에서 1996년까지 이 분야 주요학술회의에서 발표된 연구결과 및 적용 사례를 전기공학, 기계공학, 화학공학의 세 분야 별로 체계적으로 정리하였다. 대표적인 적용 대상으로는 각종 엔진계통, 보일러 및 이를 포함한 화력 발전 프랜트, 열교환기, 각종 공작기계, 산업용 펌프, 역전자 제어시스템, 직류서보 제어계, 화학 반응기, 원자력발전 프랜트, 산업용 로봇시스템 등이며 공조 및 에너지설비 분야 등을 꼽을 수 있다. [8]에서는 전력계통의 고장검출진단기법과 국내의 연구동향을 검토하였으며, [9]에서는 공조설비의 진단기법과 최근 연구결과를 상세히 설명하였다.

### 7. 최근의 연구동향

**A. 고장검출시스템의 강인성 개선:** 최근 들어 고장검출 진단이 실제 계통 및 공정분야에 응용되면서 잡음, 외란 및 모델링 오차 등에 대한 강인성 확보가 이 분야의 중요 과제로 인식되고 있으며, 강인제어 이론 등을 도입하여 모델링 오차, 외란 및 잡음에 둔감하고 고장에 민감한 잔차 발생기를 설계하는 능동적 접근 방법과 적응 문턱값 (adaptive threshold) 및 인공신경망, 퍼지 이론을 사용하여 보다 신뢰성 있는 고장검출진단 논리부를 설계하는 수동적 접근 방법이 연구되고 있다 [10].

**B. 비선형 계통을 위한 FD기법 개발:** 선형계통에 대해 잘 정립된 고장검출진단 기법을 비선형 계통의 고장검출 진단에 적용하기 위한 연구가 매우 활발히 진행되고 있다. 비선형 계통의 일종인 쌍선형 시스템에의 적용을 위한 미지입력 관측자 및 고장검출 필터 기법, 선형화가 가능한 비선형 시스템을 위한 다양한 구조의 관측자 기법 등이 연구되었고, 최근에는 비선형 등가방정식 접근법, 적응 비선형 관측자 및 비선형 고장검출 필터에 관한 연구 사례가 보고된 바 있다. 그러나 비선형 시스템을 위한 해석적 고장검출 진단기법은 앞으로 연구되어야 할 가장 중요한

과제의 하나라 할 수 있다 [10].

**C. 고장허용제어 기법의 연구:** 고장허용제어 연구 역시 초보적인 단계라 할 수 있다. 특히 능동형 고장허용 제어계의 경우에는 제어기법의 선정기준, 고장검출 시스템과 고장허용제어 간의 상호작용 등에 대한 연구가 중요 과제로 지적되고 있다.

**D. 실현 연구와 적용 범위 확대:** 현재 많은 공정에서 도입된 감시시스템은 그 대부분은 고전적 기법을 도입한 것이다. 검출과 보상이 가능한 모델기반 기법들은 이론적으로 많은 발전을 하였음에도 프로세스 모델의 가용성, 실시간 처리의 어려움 등으로 인하여 실질적 도입 사례는 아직 많지 않아 이에 대한 연구가 요구된다 [11].

### 8. 관련 학술회의 및 참고 도서

고장검출진단 및 보상에 관한 연구는 본질적으로 매우 다양한 대상과 관련되므로 전기공학 뿐 아니라 기계, 우주항공, 화학공학 등 전 공학 분야의 학술회의에서 중요 영역으로 다루어진다. 다음은 모든 응용 영역의 시스템 감시와 고장검출진단 문제를 함께 다루는 전문 학술회의이다.

- IFAC symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes( SAFEPROCESS )
- IFAC workshop on On-line fault Detection and Supervision In the Chemical Process Industries
- International Conference on Fault Diagnosis

한편, 이 분야의 전반적 이해를 도울 수 있는 주요 참고 도서로는 [1]을 비롯하여 [12-14]를 추천한다.

### 9. 결 언

본고에서는 고장검출진단과 고장허용제어의 기본 개념과 접근방법, 연구 동향을 개괄적으로 기술하였다. 고장검출 진단 시스템의 도입효과는 자명하다. 즉, 시스템의 고장을 조기에 발견하여 고장 파급으로 인해 발생할 수 있는 계통 요소의 손상 및 사고를 방지함으로써 시스템의 신뢰도를 개선함은 물론, 고장 진단과 예측에 근거한 예방정비 계획의 합리화를 통한 경제성 개선 효과를 가져올 수도 있다. 큰 부가가치를 지닌 기술 집약적인 시스템에서 안전성과 신뢰도가 경제성과 경쟁력의 중요한 지표임을 고려할 때 이 분야의 연구는 매우 중요한 의미를 가진다고 할 수 있다. 국내의 경우 고장검출진단 분야의 연구는 1980년대 중반부터 시작되었다. 최근 상당한 수준의 연구 결과가 국내외에 발표되고, 연구 인력도 뚜렷한 증가 추세를 보이고 있음은 기술 집약 산업 분야의 경쟁력 제고를 위해 매우 고무적인 현상으로 판단된다. 이 특집을 계기로 이 분야 연구가 더욱 활성화되기를 기대해본다.

참고문헌

- [1] Pouliezios, A.D. and G.S. Stavrakakis, Real time fault monitoring of industrial processes, Kluwer Academic Publishers, 1994
- [2] Isermann, R. and P. Balle, "Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes," Control Engineering Practice, Vol.5, No.5, pp.709-719, 1997
- [3] Isermann, R., "Supervision, fault-detection and fault-diagnosis methods - An introduction," Control Eng. Practice, Vol. 5, No. 5, pp. 639-652, 1997.
- [4] 박재홍, "모델기반의 고장검출 기법에 관한 고찰," 전기학회지, 제48권 4호, 1999
- [5] 김성호, 이상윤 "정성적 모델에 기반한 고장진단 기법," 전기학회지, 제48권 4호, 1999
- [6] 손원기, 권오규, "이상허용제어에 관한 연구동향" 전기학회지, 제48권 4호, 1999
- [7] Patton, R. J. , " Fault-tolerant control: The 1997 situation," Preprints of the IFAC SAFEPROCESS symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, pp.1033-1055, 1997
- [8] 이홍재, "전력계통분야에서의 고장진단 기술 현황" 전기학회지, 제48권 4호, 1999
- [9] 이원용, "공조설비의 고장진단 기술," 전기학회지, 제48권 4호, 1999
- [10] 박태건, 상태관측자 및 등가방정식에 근거한 고장검출 식별기법, 박사학위논문, 단국대학교 전기공학과, 1999.2
- [11] 홍일선, 권오규, 김대규, "이상검출 및 진단에 관한 연구 동향," 전기학회지, 제45권 11호, pp. 36-45, 1996
- [12] Patton, R. J., P. M. Frank and R. N. Clark, *Fault Diagnosis in Dynamical Systems: Theory and Applications* (1st Ed.), Prentice Hall, New York, 1989
- [13] Himmelblau, D. M., *Fault Detection and Diagnosis in Chemical and Petrochemical Processes*, Elsevier Scientific Publishing Company, 1978
- [14] Pau, L. F., *Failure Diagnosis and Performance Monitoring*, Marcel Dekker, 1981

**저 자 소 개**



**이기상(李起常)**

1952년 10월 24일생. 1978년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1995- 1996년 Univ. of Washington. 방문교수. 현재 단국대학교 공과대학 전기공학과 교수. 당학회 편집위원