

## 교류전동기 제어시스템을 위한 실시간 고장검출진단

박태건\*, 류지수\*\*, 이기상\*\*

\*충북과학대학 전자정보과, \*\*단국대학교 전기전자컴퓨터공학부

### Real-time FDI Schemes for AC Motor Control Systems

Tae-Geon Park\*, Ji-Su Ryu\*\*, and Kee-Sang Lee\*\*

\*Dept. of Electronic Information, Chungbuk Provincial College of Sci. & Tech.,

\*\*School of Electrical, Electronics, and Computer Engineering, Dankook Univ.

#### ABSTRACT

In many high performance engineering systems such as automated production system and transportation systems, AC-servo drives are employed as the most important driving parts. And the faults of servo drives result in overall system performance deterioration or an unscheduled shutdown in critical situations. The real-time fault detection and isolation(FDI) scheme is very useful to prevent them and to guarantee the desired reliability of the overall system. In this paper, the FDI schemes which can be applied to AC servo drives are introduced and some new results are presented.

#### 1. 서 론

벡터제어 이론과 인버터 기술의 발전으로 유도전동기의 고성능 가변속제어가 가능해짐에 따라 서보장치 응용분야에서는 기존의 직류전동기 구동방식을 교류전동기 구동시스템으로 대체하려는 노력이 계속되어 왔다. 최근에는 전철, 엘리베이터 등을 포함한 각종 운송시스템, 압연시스템, 전동펌프 등, 수KW에서 수십 kW이상의 중·대용량 시스템의 가변속 제어에도 교류서보전동기가 효과적으로 사용되고 있으며, 각종 자동화 공정에도 정밀급 유도전동기 구동 서보제어장치의 수요가 급증하고 있다<sup>[1]</sup>.

이러한 시스템은 대부분 복잡하며 대규모이므로 구동장치의 고장시 그 파급효과가 매우 크며 동시에 요구되는 신뢰도의 확보가 어렵다는 특징을 가진다. 예를 들어, 운송시스템에서의 서보장치 고장은 성능감퇴, 운전효율의 저하 뿐 만 아니라 안전상의 문제를 유발시키며, 자동화 공정에서 서보시스템의 고장은 제품의 질을 감퇴시키고, 경우에 따라서는 궤환 경로를 거쳐 확산됨으로서 전체 공정의 운전정지를 초래할 수도 있다. 따라서 교류서보계에서 발생하는 고장(fault)을 조기에 검출 식별할 수 있는 고장검출식별(Fault Detection and Isolation: FDI)기법과 고장의 경우에도 그 효과의 파급을 방지, 또는 보상함으로써 시스템의 가용성(availability)을 최대화하고 예상치 못한 공정의 운전 정지를 최소화하기 위한 고장허용제어시스템(Fault Tolerant Control System: FTCS)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문의 목적은 전동기 및 이를 포함한

서보시스템을 위한 실시간 고장검출진단 문제와 연구동향을 소개하고 새로운 구조의 장치고장검출진단 시스템(Instrument Fault Detection and Isolation System: IFDIS)을 제시함에 있다.

#### 2. 고장검출진단기법의 개요

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 신뢰성과 안전성을 확보하기 위해서는 고신뢰성 부품을 사용하여 시스템을 구성하고 예방정비를 철저히 함은 물론, 실시간 방식의 FDIS를 도입하여 운전 중 발생할 수 있는 고장을 조기에 검출, 식별하여 조치를 취함으로써 고장효과의 확산을 방지하고 규정된 성능을 유지하면서 전체 시스템의 임무를 수행할 수 있도록 하여야 한다.

온라인 방식의 고장검출진단에 대한 연구는 우주 항공, 원자력 발전 등 고신뢰성이 요구되는 분야를 중심으로 발전되어왔다. 70년대 중반까지의 계통 감시는 다중방식으로 설치된 센서와 투표방식(voting logic)을 채택한 하드웨어 중복방식(Hardware Redundancy Method: HRM)과 운전자의 경험에 의존하였다. 그러나 이 기법들은 구성 요소를 다중방식으로 설치하므로 요소 자체의 경비와 공간, 전력소모 등의 실현 및 운용 경비를 증가시킬 뿐만 아니라 고장 발생시 진단, 후속 조치 등의 실시간 처리가 불가능하여 운전자 또는 전문가의 개입이 불가피하였다. 현재 폭 넓게 연구되고 있는 온라인 FDI 기법은 디지털 컴퓨터 기술의 발달을 배경으로 신호처리 기법, 시스템 해석 기법 등에 근거하여 80년대 중반부터 개발되기 시작하였다.

##### 2.1 정의 및 용어

다음은 고장검출진단의 이해에 필요한 용어에 대한 간단한 설명이다.

- 이상/고장(fault): 시스템 특성 또는 파라미터가 규정 조건에서 허용편차 이상 벗어남
- 고장(failure): 시스템이 규정된 동작조건에서 부여된

기능의 수행능력을 상실한 상태

- 오동작(malfunction): 시스템이 기능을 수행함에 있어 발생하는 간헐적인 불규칙성
- 잔차(residual): 측정치와 공정모델에 의해 계산된 추정치의 편차 또는 그 편차에 근거한 고장 지시변수
- 고장검출(fault detection): 시스템 내 고장 발생여부의 결정
- 고장식별(fault isolation): 고장의 종류, 위치 및 검출시간의 결정
- 고장규명(fault identification): 고장의 크기와 시변 특성의 결정
- 고장진단(fault diagnosis): 고장 식별과 규명을 포함하며 고장의 종류, 위치, 크기와 검출 시간을 결정

## 2.2 고장검출진단시스템의 구성요소와 설계 개념

고장검출진단시스템은 다음의 네 가지 요소로 구성된다.

- 잔차 발생기구
- 고장 검출논리
- 고장진단 정보(특징량)의 추출 알고리즘
- 고장 식별 진단 논리와 추론 알고리즘

따라서 고장검출진단시스템의 설계문제는 일반적으로 다음 사항을 포함한다.

### (1) 검출진단 대상 고장의 선정

검출진단 대상 고장은 일반적으로 프로세스 자체의 고장, 구동장치의 고장, 측정장치의 고장, 제어기 고장으로 분류된다. 검출 대상 고장은 고장 해석 결과에 따라 선정하며, 고장 해석은 프로세스에 대한 정량적 모델을 수립하고, 각 고장을 모델 파라미터의 변화로 대응시킴으로서 고장의 영향을 분석하는 해석적 방법과 운전데이터 또는 고장 데이터에 근거한 분석 방법에 의해 수행된다.

### (2) 잔차 발생 알고리즘의 설계

잔차 발생 알고리즘은 FDIS의 핵심 요소이며 고장검출 성능에 가장 큰 영향을 끼친다. 이 알고리즘의 설계시 가장 중요한 고려 사항은 가능한 한 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) 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 진단에는 고장트리기법, 인공지능경망을 비롯한 매우 다양한 패턴 분류 및 인식기법들이 사용될 수 있다.

## 2.3 고장검출진단기법의 분류

현재까지 개발된 고장검출진단 기법은 매우 다양한 기준에 의해 분류할 수 있으며 중요한 분류기준의 하나는 프로

세스 모델의 사용여부이다. 이 기준을 적용할 경우, 고장진단기법은 모델기반 기법과 신호처리기법(무모델기법)으로 분류된다<sup>[2]</sup>.

### (1) 모델기반기법

이 기법은 대상계통의 수학적(정량적)모델 또는 정성적모델에 근거하여 운전 데이터를 분석함으로써 고장검출진단을 수행하는 해석적 기법으로 동적 시스템의 초기고장 검출에 유용하다. 정량적 모델기반 기법은 고장검출식별을 위해 추출된 정보(특징량)인 잔차 발생 방법에 따라 상태추정기법, 등가방정식(parity equations) 접근법, 및 파라미터추정을 이용한 기법 등으로 분류될 수 있다. 잔차 발생에 사용되는 상태추정기법은 검출필터, 칼만필터, 상태관측자, 미지입력관측자 등으로 구분된다. 등가방정식 접근법은 입력력 형태의 방정식에서 등가관계를 이용하여 고장검출진단을 위한 잔차를 발생시키는 방법이며<sup>[3]</sup>, 파라미터 추정 기법<sup>[4]</sup>은 고장 발생시 실제계의 파라미터가 변화한다는 사실에 입각하여 실시간 파라미터 추정 결과와 고장양상을 대응시킴으로서 고장을 검출, 진단하는 방법으로 프로세스 자체의 고장검출진단에 적합하다<sup>[5]</sup>.

### (2) 신호처리기법(무모델기법)

수학적 모델을 사용하지 않는 고장검출진단기법으로는 프로세스의 변수 또는 파라미터를 측정기록하고 이들의 통계적 특성에 대한 가설검사에 의해 고장을 검출하는 신호검증기법, 프로세스의 변수 또는 파라미터의 측정치를 도표를 이용하여 관찰함으로써 동적시스템의 상태를 감시하는 관리도기법, 진동 및 음향의 주파수 분석 결과에 의해 기계장치의 동작상태를 감시하는 기법 등이 있다<sup>[2]</sup>. 이 중 대표적인 기법은 진동분석기법과 음향분석기법이다. 진동 및 음향 측정치는 그 자체로서 고장검출 정보로 사용될 수 있지만, FFT를 이용하여 주파수 해석을 수행함으로써 훨씬 더 유용한 정보를 얻을 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<sup>[6]</sup>.

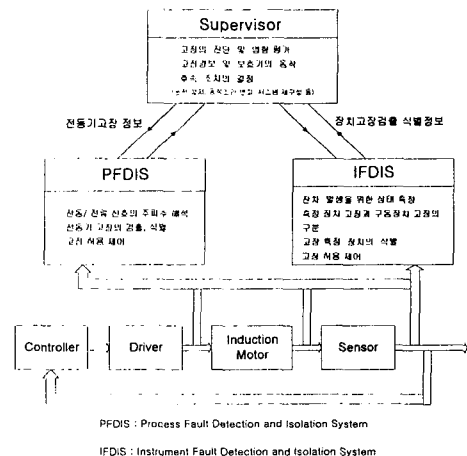


그림 1 유도전동기 구동시스템을 위한 고장허용제어계의 구성  
Fig. 1 FTCS for induction motor driven control systems

### 3. 유도전동기 제어계의 고장검출진단 문제 및 최근 연구 동향

서보제어를 위해 사용되는 정밀급 유도전동기 구동장치에서 발생할 수 있는 고장은 전동기의 기계적인 고장과 인버터를 포함한 구동회로, 제어 및 감시 정보인 전압, 전류, 속도 등의 센서들을 포함한 장치고장으로 분류된다. 따라서 고장검출 진단 기법도 베어링의 이상, 편심현상, 고정자와 회전자 구조적 결함 등의 기계적 고장을 검출진단하기 위한 전동기 이상검출기법과 구동회로 및 측정장치를 위한 장치고장 검출기법으로 분류된다. 그림 1은 이들 고장검출시스템을 포함한 고장허용제어계의 구성도이다.

#### (1) 전동기 이상 검출

유도전동기의 검출대상 고장은 고정자 결함, 회전자 도체의 결함, 축수 및 베어링 이상 등이다. 이들 고장은 일반적으로 서로 다른 주파수의 진동을 야기하므로, 진동신호 또는 고정자 전류의 주파수 스펙트럼을 기준 스펙트럼과 비교하면 고장의 검출 및 진단이 가능하다. 전동기의 고장진단 기법으로는 진동신호 해석기법<sup>[7]</sup>, 고정자 전류신호의 주파수 분석기법<sup>[8-9]</sup> 및 상태추정 및 파라미터 추정<sup>[10]</sup> 등을 도입한 해석적 기법이 사용된다. 진동신호 해석기법은 진동신호의 주파수 특성을 FFT를 이용하여 분석하고 이를 미리 알려진 고장 발생시의 주파수특성과 비교함으로써 고장원인을 식별하는 방법이다. 이 방법은 베어링의 결함으로 인한 편심 현상, 전동기 고정자 권선의 결함, 회전자 축과 지지체의 결함 검출에 효과적이며 다양한 회전기기의 이상검출진단에 가장 많이 사용된다. R.R.Schon등은 유도전동기 결함의 조기검출을 위해 고정자 전류에 대한 주파수 분석을 함으로써 고전적인 진동신호 해석결과와 동일한 정보를 얻을 수 있음을 밝히고 전류해석기법과 인공신경회로망을 이용한 회전자 도체 결함 및 기계적 불평형의 검출방법을 제안했다<sup>[8-9]</sup>. 또한 M.Chow등은 고정자 전류와 각속도 정보를 인공신경망에 의해 처리하는 유도전동기의 건전성 평가방법을 제시하기도 하였다<sup>[6]</sup>.

그러나 진동 및 전류신호 해석기법은 주파수 특성 분석(FFT)이 배치(batch)처리를 전제하므로 실시간 적용이 쉽지 않다. 이를 해결할 수 있는 방법은 실시간 방식의 파라미터추정기법 또는 상태추정기법을 이용한 특징량 추출알고리즘을 도입하는 것이다. 1988년 Shibata 등은 파라미터 추정기법을 이용한 교류전동기의 고장진단기법을 제안하였으며<sup>[10]</sup>, 1993년 Peter Vas는 교류전동기의 파라미터추정, 상태감시와 진단 문제를 소개하였다<sup>[7]</sup>.

#### (2) 장치고장검출

교류서보시스템에서 장치는 각종 전류 및 각속도 측정장치와 전동기 구동회로를 포함한다. 이들 장치의 고장은 전동기 자체의 고장보다 발생빈도가 높을 뿐 아니라 궤환 경로를 통해 전파되어 계통 전체의 성능 및 안정도에 매우 큰 악영향을 주어 계통의 운전정지를 초래할 수도 있다. 따라서 장치고장 검출식별시스템의 성능은 전동기 자체에 대한 FDIS의 성능 이상으로 중요하다. 인버터를 도입한 유도전동기 제어시스템에서 이들 장치의 이상검출을 다룬 연구사례는 거의 없는 것으로 판단된다. 일반적으로 장치고장의 검출식별에는 여러개의 상태 추정

기를 사용하는 다중관측자기법이 유용하다. 그러나 고장검출시스템에 도입될 상태추정기는 고장에 민감하게 반응하는 동시에 외란 및 모델링되지 않은 동특성에는 둔감해야하므로 일반적인 상태관측자와 차별되는 특성을 갖도록 설계되어야 한다. 최근까지 선형계통의 FDIS에 사용될 수 있는 상태추정 알고리즘에 대한 연구가 진행되고 있으며 강인성 설계기법, 미지입력관측기 등이 제안되었다. 그러나 유도전동기는 본질적으로 비선형 특성을 가지므로 상태추정을 이용한 FDIS설계를 위해서는 먼저 이에 적합한 비선형 상태추정기법의 개발과 FDIS의 구조에 관한 고찰이 선행되어야 한다.

### 4. 새로운 장치고장검출진단 시스템

#### 4.1 병렬다중관측자형 IFDIS

병렬다중관측자형 IFDIS의 구조는 그림 2와 같고 각 EKF(Extended Kalman Filter)에 투입되는 측정치는 표 1과 같다.

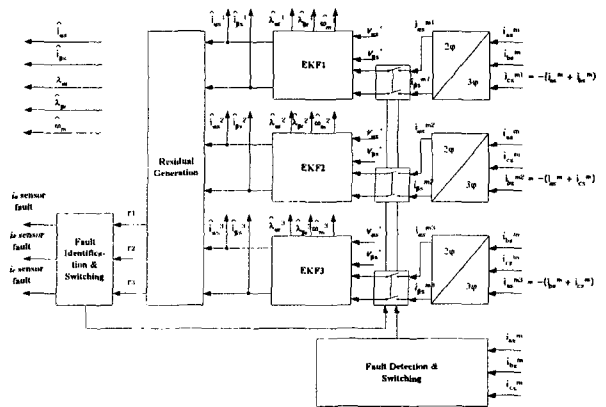


그림 2 병렬다중관측자형 IFDIS의 구조  
Fig. 2 IFDIS of Parallel-multiple observers type

표 1 각 EKF의 투입 전류

Table 1 Input currents of each EKF

EKF	상전류
EKF1	$i_{as}^m, i_{bs}^m, i_{cs}^m = -(i_{as}^m + i_{bs}^m)$
EKF2	$i_{cs}^m, i_{as}^m, i_{bs}^m = -(i_{cs}^m + i_{as}^m)$
EKF3	$i_{bs}^m, i_{cs}^m, i_{as}^m = -(i_{bs}^m + i_{cs}^m)$

이 IFDIS는 고장검출 직후 고장센서의 식별을 위해 3개의 EKF가 병렬적으로 운영되고, 고장센서가 식별이 되면, 다시 정상센서에 의해서 구동되는 하나의 EKF로 전환되는 구조이다. 식별에 사용되는 잔차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 r_1 &= |i_{as}^{m1} - \hat{i}_{as}^{m1}| + |i_{bs}^{m1} - \hat{i}_{bs}^{m1}| \\
 r_2 &= |i_{as}^{m2} - \hat{i}_{as}^{m2}| + |i_{bs}^{m2} - \hat{i}_{bs}^{m2}| \\
 r_3 &= |i_{as}^{m3} - \hat{i}_{as}^{m3}| + |i_{bs}^{m3} - \hat{i}_{bs}^{m3}|
 \end{aligned}$$

여기서  $i_{xs}^{m1}$ ,  $i_{xs}^{m2}$ ,  $i_{xs}^{m3}$ 은 각각 시험입력(Test Input Set : TIS)의 2상 정지좌표계 표현이며,  $\hat{i}_{xs}^1$ ,  $\hat{i}_{xs}^2$ ,  $\hat{i}_{xs}^3$ 은 각각 EKF1, EKF2, EKF3에 의해서 추정된 고정자 전류이다. 고장 검출 및 식별논리는 다음과 같다.

검출규칙:

IF  $((i_a + i_b + i_c) > th)$  THEN fault  
ELSE normal

식별규칙:

IF  $(r_1 > th_1 \wedge r_2 > th_2 \wedge r_3 < th_3)$  THEN  
 $i_a$  sensor fault  
IF  $(r_1 > th_1 \wedge r_2 < th_2 \wedge r_3 > th_3)$  THEN  
 $i_b$  sensor fault  
IF  $(r_1 < th_1 \wedge r_2 > th_2 \wedge r_3 > th_3)$  THEN  
 $i_c$  sensor fault

#### 4.2 직렬관측자형 IFDIS

단일관측기형 고장검출식별시스템의 구조는 그림 3과 같다. 이 구조는 병렬관측자형 IFDIS의 실시간 구현의 어려움을 극복하기 위해 제안된 것으로 알고리즘의 복잡성이 단일관측자의 경우와 거의 같아 중속의 DSP에 의해 실현이 가능하며 그 고장식별 성능은 병렬형 구조와 거의 동일하다. 이 IFDIS구조에서 잔차는 한개의 관측기와 TIS 스케줄링 기법에 의해 발생되며, 검출과 식별과정은 TIS의 스케줄링 결과에 의해 결정된다. 이 IFDIS의 운용방법은 표 1과 같은 전류측정치를 미리 계획된 순서에 따라 관측자 또는 EKF에 투입하고 역시 계획된 논리에 따라 임계치검사를 수행함으로써 고장센서를 식별하는 것이다. 이 IFDIS의 검출식별의 성능을 좌우하는 임계치는 다양한 조건에서의 고장 시뮬레이션과 고장 실험 결과에 근거하여 선정되어야 한다.

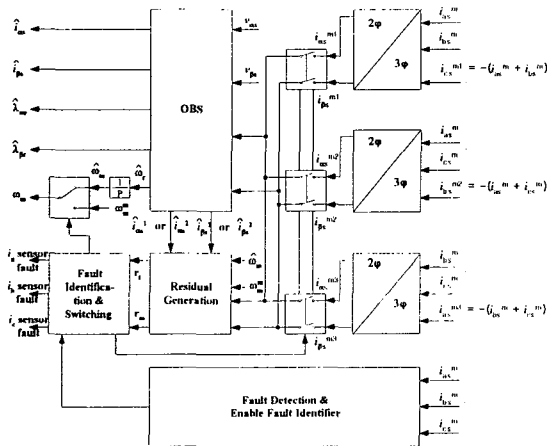


그림 3 직렬관측자형 IFDIS의 구조

Fig. 3 IFDIS of serial-single observer type

#### 4.3 제안한 IFDIS의 검출식별 및 보상 성능

제안된 IFDIS의 성능검토를 위해 2.2Kw인 3상 유도전동기에 대한 제어시스템을 구성하고 시뮬레이션을 수행하였다. 유도전동기 드라이브의 제어를 위해 벡터제어기법이 도입되었다.

고장 시뮬레이션을 위해  $i_a$ 센서에 약 1[A]의 바이어스를 1.5[sec]에 투입하였다. 그림 4에 나타난 바와 같이 바이어스 고장이 발생하면 토크리플이 커지고 결과적으로 속도리플이 증가한다. 그림 5는  $i_a$ 센서 고장시 잔차를 나타내며, 식별규칙에서 예측할 수 있듯이  $r_3$ 는 변화가 없고  $r_1$ ,  $r_2$ 는 증가하였다. 그림 6은 제안한 고장허용제어를 수행하였을 때의 제어성능을 보여주고 있다. 리플이 잠시 발생하였다가 원상 복구되어 고장에도 불구하고 속도 기준치를 잘 추종하고 있다.

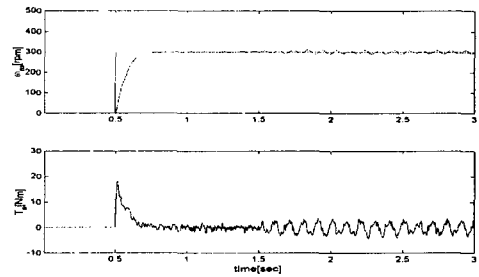


그림 4  $i_a$  센서고장시 제어성능

Fig. 4 Control response under  $i_a$  sensor fault

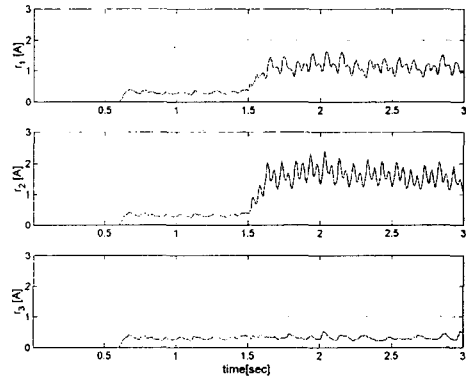


그림 5  $i_a$  센서고장시 잔차

Fig. 5 Residuals under  $i_a$  sensor fault

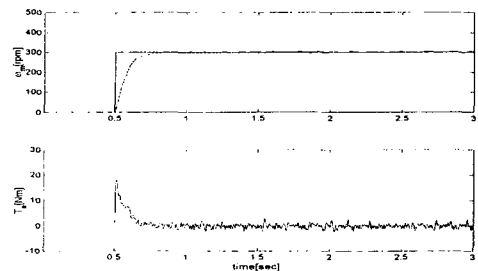


그림 6 고장허용제어시의 제어성능

Fig. 6 Control response under fault tolerant control

## 참 고 문 헌

- [1] Peter Vas, *Sensorless vector and direct torque control*, Oxford Science Publications, 1998.
- [2] A.D. Pouliezos and G. S. Stavrakakis, *Real time fault monitoring of industrial processes*, Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [3] J. Gertler, "Residual generation in model-based fault detection", *Control-Theory and Advanced Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 259-285, 1993.
- [4] R. Isermann, "Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing - tutorial paper", *Automatica*, Vol. 29, No. 4, pp. 815-835, 1993.
- [5] R. Isermann, "Supervision fault-detection and fault-diagnosis methods - An introduction", *Control Eng. Practice*, Vol. 5, No. 5, pp. 639-652, 1997.
- [6] M.Y. Chow, "On the application and design of artificial neural networks for motor fault detection I and II", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 40, No. 2, pp. 89-96, 1993.
- [7] Peter Vas, *Parameter estimation, condition monitoring and diagnosis of electrical machines*, Oxford Science Publications, 1993.
- [8] R.R. Schon and T.G. Habetler, "A new method of current-based condition monitoring in induction machines operating under arbitrary load conditions", *Electric machines and power systems*, Vol. 26, pp. 141-152, 1995.
- [9] R.R. Schon et. al., "Motor bearing damage detection using stator current monitoring", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 31, No. 6, pp. 1274-1279, 1995.
- [10] H. Shibata et. al., "Application of estimation techniques to failuer detection for AC electric machines, Identification and system parameter estimation", selected papers from *the 8th IFAC Symposium*, pp. 1147-1152, 1993.