

산업 시스템을 위한 고장 진단 및 고장 허용 제어 기술 An Overview of Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control Technologies for Industrial Systems

배 준 형*★

Junhyung Bae*★

Abstract

This paper outlines the basic concepts, approaches and research trends of fault diagnosis and fault tolerant control applied to industrial processes, facilities, and motor drives. The main role of fault diagnosis for industrial processes is to create effective indicators to determine the defect status of the process and then take appropriate measures against failures or hazardous accidents. The technologies of fault detection and diagnosis have been developed to determine whether a process has a trend or pattern, or whether a particular process variable is functioning normally. Firstly, data-driven based and model-based techniques were described. Secondly, fault detection and diagnosis techniques for industrial processes are described. Thirdly, passive and active fault tolerant control techniques are considered. Finally, major faults occurring in AC motor drives were listed, described their characteristics and fault diagnosis and fault tolerant control techniques are outlined for this purpose.

요 약

본 논문에서는 산업 공정, 설비 및 모터 드라이브에 적용되는 고장 진단 및 고장 허용 제어 기술의 기본 개념, 접근법과 연구 동향에 대해서 개괄적으로 기술하였다. 산업 공정을 위한 고장 진단의 주요 역할은 공정의 결함 상태를 파악할 수 있는 효과적인 지표를 만든 후 고장이나 위험한 사고에 대해 적절한 조치를 취하는 것이다. 산업 공정에 패턴이 있는지 특정 프로세스 변수가 정상적으로 동작하는지 확인하기 위해 많은 고장 검출 및 진단 기법이 개발되었다. 먼저 본 논문에서는 데이터 기반 기법과 모델 기반 기법에 대하여 살펴본다. 두 번째로 산업 공정을 위한 고장 검출 및 진단 기법을 살펴본다. 세 번째로 수동형 및 능동형 고장 허용 제어 기법을 살펴본다. 마지막으로 AC 모터 드라이브에서 발생하는 주요 고장을 열거, 그 특성을 살펴보고 이를 위한 고장 진단 및 고장 허용 제어 기술을 살펴본다.

Key words : Industrial Processes, AC Motor Drives, Fault Diagnosis, Fault Tolerant Control, Model based Method, Data-driven based Method

1. 서론

산업 시스템의 기계와 장비 성능은 노화 및 마모로 저하되고 이로 인해 신뢰성이 저하되어 고장에

대한 위험성이 증가한다. 액추에이터 고장으로 인해 제어시스템의 성능이 저하되고 심할 경우 시스템이 완전히 고장날 수도 있다. 센서 관독 오류는 최적점과 동떨어진 동작점으로 이끈다. 마모는 생

* School of Electronic and Electrical Engineering, Daegu Catholic University

★ Corresponding author

E-mail : baejh80@cu.ac.kr, Tel. : +82-53-850-2764

Manuscript received Aug. 23, 2021; revised Sep. 3, 2021; accepted Sep. 7, 2021.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

산라인의 효율성과 품질을 떨어뜨린다. 많은 고장 상황에서 인명 피해가 없고 기계가 손상되지 않도록 하기 위해서는 시스템 작동을 즉각 중지시켜야 한다. 고도로 자동화된 구성 요소들이 복잡한 방식으로 상호 작용하고 있어 단일 구성 요소의 고장이 전체 시스템의 오작동을 야기할 수 있다. 경제적 수요가 증가함과 동시에 높은 수준의 시스템 안전 및 신뢰성이 요구되고 있어 이상 상태에 대한 정확한 진단이나 예지 기술은 현대 산업 시스템의 유지보수에 중요한 역할을 한다. 플랜트가 제어 가능한 영역에서 가동되고 있는 동안 공정 결함을 조기에 발견하고 진단하는 것은 비정상적인 사건의 진행을 방지하고 생산 손실을 줄이는 데 도움이 될 수 있다[1].

지난 수 십 년 동안 두 가지 유형의 공정 감시 및 고장 진단 기법, 즉 데이터 기반 기법과 모델 기반 기법이 개발되어 왔다[2, 3]. 데이터 기반 접근법을 사용하면 막대한 양의 공정 데이터에서 필요한 정보를 직접 추출할 수 있다. 공정의 입/출력 정보를 활용하는 다변량 통계 감시 기법에는 특히 주성분 분석과 최소 제곱 기법이 널리 사용되고 있다. 모델 기반 공정 감시 및 고장 진단 시스템 설계는 산업 공정의 다양한 운영 조건과 제약으로 인해 주목 받은 연구 주제였다. 데이터 기반 기법과는 달리 이 기법은 공정에 대한 수학적 및 물리적 사전 지식이 필요하다. 물리 법칙에 기반한 공정 모델 개발 이후 확립된 모델을 고장 진단에 성공적으로 적용할 수 있다. 적용할 수 있는 이론으로 식별, 추정 기법 그리고 인공 지능 기법을 사용할 수 있다.

고장 검출 및 진단 기법의 주 목표는 1) 갑작스럽거나 일시적인 작은 결함의 조기 발견, 2) 액추에이터, 공정의 구성 요소 및 센서 고장 진단, 펌프에서의 고장 검출, 3) 과도 상태에서의 공정 관리, 4) 공정 상태 기반 유지관리 및 보수, 5) 제품의 제조 품질 관리, 6) 원격 고장 검출 및 진단, 7) 고장 관리 기준, 8) 고장 허용 및 재형상 제어시스템의 개발이다. 산업 공정의 수학적 지식을 기반으로 한 모델 기반 기법은 자동제어시스템, 산업용 전자 장치 등 다양한 공정에 적용되었다. 또한 산업 응용을 위한 모델 기반 고장 진단 기법이 전력전자 장치 및 AC 모터 드라이브에 성공적으로 적용되었다[4, 5].

본 논문에서는 고장 진단 및 고장 허용 제어 기법

의 기본 개념을 살펴보고, 산업 공정을 위한 고장 검출 및 진단 기법, 그리고 AC 모터 드라이브를 위한 고장 진단 및 고장 허용 제어 기법을 살펴본다.

II. 고장 진단 및 고장 허용 제어 개념

손상 방지는 보호, 하드웨어 또는 소프트웨어(해석적) 중복 및 고장 진단 기법과 같은 다양한 조치를 취하여 실현할 수 있다. 보호 시스템은 산업 공정의 고전적인 자동 감독 및 감시 기법에 속한다. 이 검사는 몇 가지 중요한 변수의 임계값 확인을 통해 이루어진다. 임계값 초과로 인해 경고가 표시되면 보호 시스템이 자동으로 작동된다. 많은 경우에 이는 더 큰 고장이나 손상을 방지하는 데 충분한 조치이다. 고전적인 임계값 기반 감독 기법의 장점은 단순성과 신뢰성에 있다. 이 기법은 다소 큰 갑작스러운 고장이나 점진적으로 증가하는 고장에 효과적이다. 단점으로 고장이 다소 늦게 감지될 수 있으며 상세한 고장 진단이 불가능하다.

산업 공정의 신뢰성은 하드웨어 중복을 통해서도 얻을 수 있다. 그러나 하드웨어 중복은 상당한 비용이 들고, 제어, 측정 및 감독 장비의 확장을 요한다. 이 솔루션은 중요 산업 공정 또는 설비에만 적용된다. 시스템 신뢰도를 높이는 또 다른 방법에 해석적 중복이 있는데 이는 플랜트의 수학적 모델, 제어 이론, 신호 처리 기법을 사용한다. 해석적 중복 기법은 상태 변수에 대한 정보를 얻는 방법에 따라 전문 지식에 입각한 방법, 수학적 모델에 기초한 방법, 데이터 분석에 기반한 방법으로 범주를 나눌 수 있다[4, 5].

진단의 주요 작업은 다음과 같다[1, 6].

- 진단 : 대상의 실제 기술적 조건을 명시하도록 설계된 조치
- 발생 : 대상의 이전(과거) 상태 인식
- 대상의 미래 상태에 대한 예지
- 대상의 상태를 다음 세 단계로 결정할 수 있다.
- 고장 검출 : 플랜트의 고장 검출 및 검출 시간
- 고장 분리 : 고장 유형, 위치 및 시간 결정
- 고장 식별 : 고장 크기 및 시간 경과에 따른 진화 초기 고장을 감지하고 원인을 진단하는 데 사용되는 고장 검출 및 진단 기법을 상태 감시라고 한다. 시스템 작동 감시는 실시간으로 실현되며 진단 신호(프로세스 변수) 획득 및 처리, 시스템 이상 작

등 인식(경보 신호)으로 구성된다. 상태 감시는 컴퓨터 기반 진단 시스템을 통해 온라인으로 구현된다. 감시가 전체 공정의 작동으로 확장되고 고장 발생 이후 공정의 적절한 상태를 보장하도록 설계된 기능을 감독이라고 한다. 감시 시스템은 다음의 작업을 수행한다[1, 4-6].

- 초기 또는 갑작스러운 고장의 조기 발견
- 공정 또는 공정 부품의 고장 진단
- 펌프 제어시스템의 고장 검출
- 과도 상태의 공정 감독

이러한 상태 감시 및 감독 시스템에는 다음 세 가지 수준의 조치가 있다.

- 공정 작업 감시
- 플랜트 보호
- 고장 진단

III. 산업 공정을 위한 고장 진단 및 고장 허용 제어 기법

일반적으로 고장 검출 및 진단(Fault Detection and Diagnosis, 이하 FDD)은 이상 발생 시 이를 신속하게 검출하고 신속한 대응을 원활히 수행하는데 그 목적이 있다. FDD는 센서 또는 프로세스 변수 및 측정된 진단 신호를 기반으로 한다. 측정된 신호의 처리에는 해석적 지식이 필요한 반면, 측정 변수의 평가에는 휴리스틱(Heuristic) 지식이라고 하는 직관적이고 경험적인 지식이 필요하다[7].

해석적 지식은 측정된 신호의 한계값을 정의하는 간단한 규칙에서부터 스펙트럼 분석, 필터링, 상태 및 파라미터 추정 등과 같은 복잡한 신호 분석 기법에 이르기까지 다양한 방법으로 구성된다. 휴리스틱 지식에는 노이즈, 진동, 색상, 냄새, 온도, 마모 및 인열 등의 발견적 특정 값이 포함된다. 또한 공정 이력, 유지보수 및 수리 작업에 대한 경험, 공정 또는 대상에서 획득한 통계 데이터는 추가적인 발견적 정보로써 활용된다.

따라서 해석 및 발견적 지식과 함께 측정된 신호 및 변수를 통해 고장 증상(Symptom)을 분리하고 적절한 고장 진단을 수행할 수 있다.

증상 생성 기법을 고려하여 다음과 같이 고장 검출 기법을 두 가지로 나눌 수 있다.

- 프로세스 모델 기반 고장 검출 기법(비교 방법)
- 신호 모델 기반 고장 검출 기법(직접적 방법)

때로는 비교 방법이라고 하는 프로세스 모델 기반 기법은 진단 대상과 병렬로 작동하는 프로세스의 수학적 모델에 기반한다. 프로세스 모델 기반 고장 검출 시스템의 기본 구조가 그림 1에 나타나 있다[4-6].

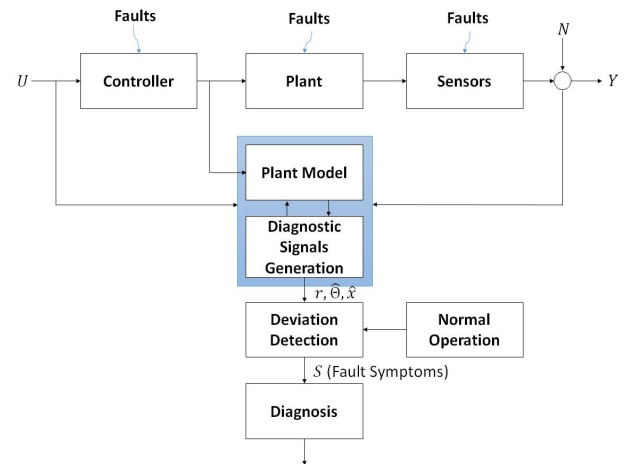


Fig. 1. Process-model-based Fault Detection.
그림 1. 프로세스 모델 기반 고장 검출

검출 방법은 측정된 입력 신호 U 와 출력 신호 Y 를 기반으로 잔차를 생성하고 파라미터 $\hat{\theta}$ 또는 상태 추정치 \hat{x} 를 계산한다. 이를 특징점(Feature)이라고 한다. 정상 특징점(공칭 값)과 비교하여 특징점의 변화를 감지하여 해석적 징후 s 를 출력한다. 진단 신호는 대상에서 측정된 출력 신호와 모델의 출력 신호 간의 차이로 계산된다. 대상이 정상적으로 작동하는 경우, 이 값은 거의 0 주변에서 진동한다. 대상에 고장이 있는 경우 이 값이 훨씬 커지므로 고장임을 알 수 있다.

상태 추정기 또는 관측기, 칼만 필터, 패리티 방정식과 같은 다양한 수학적 모델을 프로세스 모델 기반 기법에 적용할 수 있다. 비교 방법은 수학적 모델을 가지기 때문에 이러한 유형의 중복을 해석적 중복이라고 한다. 측정 신호와 정성적 또는 정량적 모델인 뉴턴 또는 퍼지 모델을 통해 얻은 신호를 비교하여 잔차를 구할 경우, 해석적 중복의 특수한 유형으로 간주할 수 있다[2, 3].

프로세스 모델 기반 고장 진단 기법은 사용된 모델의 적절성 여부와 측정 노이즈에 매우 민감하다는 특징을 가지고 있다. 온라인 구현을 위해서는 높은 계산 성능도 요구된다. 전기기계, 공작기계 및 산업용 로봇 등과 같은 시스템의 복잡성, 많은 과

라미터에 대한 지식의 필요, 식별의 어려움 등이 해석 모델의 신뢰성에 심각한 문제를 일으킨다. 부정확한 모델은 잘못된 진단 정보를 제공하여 오보를 생성하게 된다.

신호 모델 기반 고장 검출 기법은 통신 이론을 토대로 만들어진 기법이며, 시스템의 출력 신호만을 활용하는 것이 특징이다. 이 기법은 특정 대상에 대한 특성으로 물리적 변수의 분석 및 검사에 의존하여 때로는 직접적 방법이라고도 한다. 가장 단순한 방법으로 신뢰도 한계 또는 한계값(임계값)을 확인하는 것이다. 또 다른 솔루션으로 분석된 신호의 유형에 따라 통계적 결정, 푸리에 분석, 상관 분석, 스펙트럼 분석, 웨이블릿(Wavelet) 분석 등이 적용될 수 있다[2, 3, 7].

위에 제시한 방법은 프로세스의 수학적 모델이 필요하지 않기 때문에 비교적 간단하지만, 고장과 증상 사이의 관계를 결정짓기가 어렵다는 단점이 있다. 따라서 최근 고장 감시 및 진단에 인공 지능 기법(뉴럴 네트워크, 퍼지, 뉴럴-퍼지 등)의 적용에 대한 관심이 증가하고 있다[7-9].

FDD와 함께 고장 허용 제어(Fault Tolerant Control, 이하 FTC) 기법도 활발히 연구되고 있다 [10]. 바람직한 성능 및 안정성 특성을 유지하면서 구성 요소 오작동을 허용할 수 있는 폐루프 제어시스템을 FTC 시스템이라고 한다. 좀더 쉽게 표현하면, 강인하거나 재형상이 가능한 제어시스템을 FTC 시스템이라 한다. FTC는 결함이 발생한 후에도 지속적인 시스템 기능을 보장하는 것을 목표로 한다. FTC 시스템은 적절한 FDD를 사용하여 구성 요소 고장을 자동으로 감지하는 기능을 갖추고 있다. FTC 시스템의 일반적인 구성은 그림 2에 나타나 있다[4, 5].

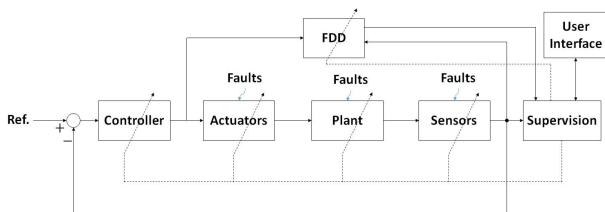


Fig. 2. FTC with Supervision System.
그림 2. 감시 기능을 가진 FTC 시스템

FDD는 FTC 시스템의 일부로 구성되며 모든 고장의 위치와 심각도에 대한 정보를 감독 시스템에 제공해야 한다. 감독 시스템은 적절한 조치를 취할

수 있는데 센서 또는 액추에이터를 재구성하고 고장을 분리한다. 그림 2에 나타난 구성과 전략에 따라 고장의 영향을 수용하도록 제어기를 조정하거나 적응시킬 수 있다.

앞 장에서 설명한 바와 같이 하드웨어 중복은 전체 시스템 기능 측면에서 매력적이지만 센서 및 액추에이터의 중복이 요구되므로 상당한 비용이 발생한다. 그러므로 이러한 솔루션은 중요 산업 공정/설비에만 주로 적용한다.

해석적 중복에 기반한 FTC 시스템은 일반적으로 수동형 및 능동형의 두 가지로 분류된다. 수동형 FTC는 강인 제어 기술에 기반하고 있으며 페루프 시스템을 예기치 않은 고장에 둔감하게 하는 강인 제어기 설계를 목표로 한다. 고장이 있는 상태에서도 공정은 동일한 구조 및 파라미터를 사용하여 계속 작동한다[11, 12].

수동형 FTC 접근법은 온라인 고장 검출이 필요하지 않으므로 계산적으로 효율적이다. 수동형 FTC의 제어기 설계는 적응 이론, 예측 제어 또는 인공 지능 기법과 같은 고급 제어 기술을 기반으로 한다.

그러나 수동형 FTC에 단점도 있다. 수동형 FTC 시스템 설계에서 고장의 선별적인 부분 집합을 고려할 수 있는데, 일반적으로 시스템의 운영에 큰 영향을 미치지 않는 고장은 이 방식으로 처리할 수 있지만, 특정 조건에서만 건전성을 달성할 수 있다. 그리고 시스템의 공칭 성능을 저하시켜 특정 고장에 대한 강건성을 높일 수 있지만, 실제로 고장은 거의 발생하지 않기 때문에 시스템의 성능을 크게 저하시키는 것은 좋지 않다.

수동형 FTC가 유리할 때도 있다. 그 중 하나는 제어기의 하드웨어 및 소프트웨어 요구 사항이 비교적 합리적이라는 점이다. 능동형 FTC 시스템에 비해 복잡도가 낮은 것도 장점이다.

수동형과는 달리 능동형 FTC 시스템은 제어기 재구성 또는 미리 설계된 몇 가지 제어기의 선택을 기반으로 한다. 이 기술에는 고장이 시스템에서 발생할 경우 이를 감지하고 위치를 파악하는 작업을 실현하는 FDD가 필요하다.

FDD는 시스템의 입출력 측정치를 사용하여 고장을 감지하고 위치를 지정한다. 예상 결함은 파라미터 또는 제어기 구조를 변경하는 재구성 메커니즘으로 전달된다. 능동형 FTC 시스템은 고장을 식별하기 위해 검출기 또는 상태 관측기를 사용한다.

배치 및 고장 허용 제어 알고리즘의 선택은 시스템 요구 사항과 구성 요소에 따라 달라진다.

이러한 시스템을 설계하는 것은 전체 공정에서 구성 요소 고장 후 전체 또는 일부 기능을 유지하면서 안정적인 작동을 보장해야 하기 때문에 어려운 문제이다. 복잡한 시스템이 올바르게 작동하도록 하려면 적절한 시간 내에 고장을 감지하고 제어 구조의 반응을 보장할 수 있는 진단 기법을 고려해야 한다.

능동형 FTC은 고장 후 제어기가 형성되는 방식에 따라 투영 기반 기법과 온라인 재설계 기법으로 나뉠 수 있다. 투영 기반 기법에서는 사전 설계된 오프라인 제어기 집합에서 고장 발생 후 제어기를 선택한다. 집합 내의 각 제어기는 특정 고장 상황에 맞게 설계되며, FDD에서 해당 고장 패턴을 진단하였을 때 재구성 메커니즘에 의해 선택된다. 따라서 이 솔루션은 제한된 수준의 시스템 고장만 고려할 수 있다. 반대로 온라인 재설계 기법은 제어기 파라미터의 온라인 재계산으로 재구성 가능한 제어이고 이를 재형상 제어라고 한다. 고장 후 시스템 성능을 비교하면 온라인 재설계 기법이 수동형 또는 오프라인 투영 기반 기법보다 우수하다. 그러나 온라인 최적화가 필요하므로 계산적으로 복잡하고 비용이 많이 든다.

능동형 FTC 시스템을 설계할 때 가장 중요한 점 중 하나는 FDD와 FTC의 통합이다. 대부분 각각 완전하다는 가정하에 이 두 부분을 독립적으로 설계한다. 이는 대부분의 FDD 알고리즘이 시스템의 페루프 작동을 고려하지 않는다는 것을 의미하고, 반대로 FTC은 FDD에 의해 실현된 고장 추정기가 완전하다고 가정한다. 실제로 이러한 가정은 고장 후 성능을 보장하지 못하거나 심지어 시스템의 불안정성을 초래할 수 있다. FDD와 FTC의 통합을 위해서는 먼저 FTC가 필요로 하는 정보가 무엇인지, FDD가 제공할 수 있는 정보가 무엇인지 조사하여야 한다. FDD의 부정확한 정보는 FTC 시스템의 안정성을 상실시킬 수 있다. 이러한 문제는 로봇, 자동차, 항공기 등과 같은 고안전 동력 시스템에 특히 중요하다[13].

IV. AC 모터 드라이브를 위한 고장 진단 및 고장 허용 제어 기법

속도 및 토크 제어를 위한 벡터 제어 AC 모터

드라이브는 고성능으로 인해 산업 분야에서 널리 사용되고 있다[11, 14]. 전기 구동 시스템에서 AC 모터는 펄스폭 변조 또는 공간 벡터 변조를 거친 인버터로부터 전원을 공급받는다. 대부분의 인버터는 절연 게이트 바이폴라 트랜지스터(IGBT)를 기반으로 하는 파워 스위치를 사용하기 때문에 높은 효율성, 높은 스위칭 주파수 등과 같은 이점을 가진다. 페루프 속도 또는 위치 제어시스템으로 작동하는 AC 모터 드라이브에는 디지털 제어시스템이 장착되어 있다. 그림 3에 AC 모터 드라이브 시스템의 구성이 나타나 있다[4, 5]. 여기에는 물리적 센서 이외에 상태 추정기 또는 관측기가 도입되어 시스템의 해석적 중복을 보여주고 있다.

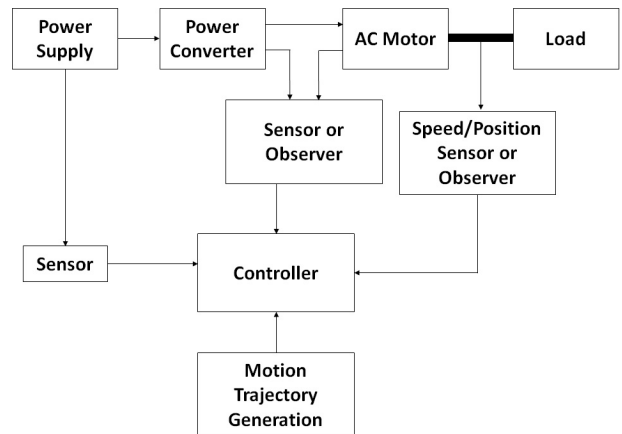


Fig. 3. AC Motor Drive System.
그림 3. AC 모터 드라이브 시스템

AC 모터 드라이브는 전력 변환기, 모터 및 제어 시스템에서 발생하는 다양한 고장에 민감하다. 모

Table 1. Component Faults of AC Motor Drives.

표 1. AC 모터 드라이브 구성 요소 고장

Power Electronics	Electric Motor	Sensors
Semiconductor faults - Open circuits - Short circuits	Electrical faults - Broken rotor bars and rings - Winding short circuits - Insulation deterioration	Electrical sensors - Total failure - Noise - Offset - Saturation
DC bus faults - Capacitor faults - DC link capacitor short-circuits	Mechanical faults - Bearing faults - Rotor eccentricity - Misalignment - Resonance	Mechanical sensors - Total failure - Periodic interruptions of signal - Offset

든 고장은 전기 구동 시스템의 작동 중단으로 이어진다. 예기치 않은 시스템의 정지는 높은 재정적 손실을 초래할 수 있기 때문에 고장 허용 제어뿐만 아니라 신뢰성 있는 감시 및 신속한 고장 검출 기법의 개발이 요구된다. 표 1에 AC 모터 드라이브에서 발생할 수 있는 고장들을 나열하였다[4, 5, 10].

AC 모터 드라이브의 고장 중 전력 변환기 고장이 약 80%의 비중을 차지한다[10]. 전력 변환기 고장으로 인해 드라이브 성능이 저하되거나 시스템이 예기치 않게 중단될 수 있다.

전원 공급 장치 고장은 단락 고장과 개방 스위치 고장의 두 가지로 분류할 수 있다. 잘못된 게이트 전압, 과전압, 애벌런치 스트레스 또는 온도 오버슈트와 같은 여러 가지 이유로 인해 단락 고장이 발생할 수 있다. 단락 고장은 비정상적인 과전류로 인해 다루기가 어려우며 매우 짧은 시간에 다른 부품에 심각한 손상을 일으킬 수 있다. 따라서 단락 고장에 대한 일반적인 진단 기법은 영구적인 손상을 받기 전에 고집적 트랜지스터 드라이버 하드웨어 회로에서 트랜지스터를 끈다. 실제로 스위치를 끄면 드라이브 성능이 저하되지만 고전류가 전력 변환기로 흐르지 않아 더욱 심각한 고장을 피할 수 있다.

개방 스위치 고장은 열 사이클링으로 인한 본딩 와이어의 인양으로 인해 발생한다. 전류가 매우 높을 경우 발생할 수도 있다. 개방 스위치 고장은 전류 왜곡을 초래한다. 유도 노이즈와 진동을 통해 다른 부품에 이차적인 문제를 일으킬 수도 있다. 개방 스위치 고장은 단락 고장에 비해 심각한 손상을 일으키지는 않지만 높은 고정자 전류와 높은 과도 전자기 토크는 드라이브를 손상시킬 수 있기 때문에 감시 및 보상을 해야 한다. 따라서 전력 변환기 시스템의 신뢰성을 높이기 위해서는 전원 장치 결합의 진단 기법이 필요하며 트랜지스터 고장 진단 기법, 하드웨어 중복 또는 동시 작동 고장 허용 제어 기법이 개발되었다[4, 5]. 개방 회로 고장 검출 기법은 전류 또는 전압 기반 접근법으로 분류할 수 있다. 이는 일반적으로 전력 변환기 회로 재구성 과 주 드라이브 제어 알고리즘의 변경으로 조치를 취한다. 고장 검출 및 위치 파악, 오보에 대한 강건성 및 빠른 고장 진단을 통해 부분 또는 전체 모터 드라이브 기능을 되살리는 적절한 조치를 수행할 수 있다.

전기 구동 시스템의 다양한 고장 중에서 AC 모터 자체의 전기적 및 기계적 고장이 많은 부분을 차지한다. 전기적 고장은 유도 모터 및 영구자석 동기 모터의 고정자 권선 및 회전자 바 또는 링 과손과 관련된다. 고정자 권선 고장은 절연 응력, 내부 권선 단락 또는 상 권선의 단락으로 인해 발생한다. 영구자석 동기 모터의 회전자 고장은 주로 영구자석의 성능 저하, 기계적 변위 또는 진동으로 이어진다. 모터의 기계적 결합은 구동 모터와 부하 사이의 기계적 연결과 관련된다. 여러 문헌에 따르면 전체 유도 모터 결합 중 베어링 결합이 약 40%, 고정자 권선 고장은 38%, 회전자 고장은 약 10%인 것으로 나타났다[10].

AC 모터의 고장 검출은 상 전류 및 기계적 진동에 대한 분석을 통해 이루어진다. FFT(Fast Fourier Transform), STFT(Short Time Fourier Transform), 웨이블릿 분석 등과 같은 다양한 신호 분석 기법을 사용하여 보다 정확한 고장 분리를 할 수 있다. 추출된 고장 증상에 기반한 고장 진단은 다차원 통계 기법, 상태 추정기, 인공 지능 기법 등과 같은 방법을 사용하여 수행된다[3].

마지막으로 살펴볼 AC 모터 드라이브의 고장은 센서 고장이다. 전기 구동 시스템에는 제어 알고리즘의 원활한 작동을 위해 전류 및 전압 센서가 필요하다. 이러한 센서는 손상에 매우 민감하다. 전기 구동 시스템의 추정은 고정자 전압 센서의 정보가 없어도 안정적으로 작동할 수 있지만 전류 센서의 신호 없이는 제대로 구동할 수 없다. 전류 신호는 전기 구동 시스템의 내부 전류 제어 루프에 사용된다. 회전자 속도 측정은 전기 구동 시스템의 외부 속도 또는 위치 제어 루프를 위해 필요하다. 속도는 기계식 센서(주로 인코더)를 사용하여 측정하며, 인코더 역시 실제 드라이브 및 환경 조건에 매우 민감하여 파괴될 수 있다. 속도 센서가 고장 난 경우 드라이브 토폴로지를 변경해야 한다. 대부분의 경우 속도 추정기 또는 관측기가 적용된 센서리스 제어 기법이 사용된다[15, 16].

FTC 기능을 갖춘 모터 드라이브를 고장 허용 드라이브라고 부른다. 적응, 예측 또는 슬라이딩 모드 제어 기법과 같은 현대 제어 전략을 도입하면 모터 또는 전력 변환기 고장 발생 시 안정적이고 안전한 동작을 어느 정도 보장할 수 있다[17].

고장 허용 드라이브의 목표는 고장 유형이나 안

전 보장 수준에 따라 지속적인 안정적 작동(전체 또는 일부 기능 유지) 또는 안전을 위한 정지이다. 드라이브의 특성상 드라이브 기능의 기본 특성을 유지하는 고장 보상 기법을 선택해야 한다. 일반적으로 해석적 중복을 사용하면 드라이브의 이전 기능이 유지되지는 않는다. 대부분의 경우 능동형 FTC 전략이 적용된다. 하드웨어 중복을 제대로 사용하려면 결함이 있는 드라이브의 기능을 완전히 복원해야 한다.

AC 모터 드라이브에 FTC 전략을 효과적으로 구현하려면 알고리즘적 기법(진단 신호, 상태 또는 파라미터 추정) 또는 인공 지능 기법(뉴럴 네트워크, 퍼지 논리, 뉴럴-퍼지 등)과 같은 방법을 적용할 필요가 있다. 예를 들어 AC 모터 드라이브가 속도 센서와 함께 백터 제어 구조에서 구동할 때 고장 발생 시 고장 허용 구조는 속도 추정기에 기반한 새로운 제어 전략으로 전환되어야 한다. 또한 전류 센서에 고장이 발생한 경우 백터 제어 구조를 스칼라 제어 전략으로 전환해야 한다. 왜냐하면 전류 신호가 부족하면 전류 제어 루프가 파괴되어 AC 모터의 내부 상태 변수 추정이 불가능하기 때문이다. AC 모터의 제어 전략을 이렇게 변경하면 드라이브 작동 성능은 저하되지만 안정성과 안전성을 보장할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 산업 공정 및 AC 모터 드라이브를 위한 고장 진단, 고장 허용 제어 기법을 개괄적으로 살펴보았다. 최근 산업 시스템을 위한 고장 진단 기술이 급속하게 발전하고 있다. 이는 고장 진단 기법의 산업 시스템에 대한 응용이 관심이 높아진 결과임에 의심할 여지가 없다. 고급 제어 및 고장 진단 기술을 적용한 새로운 솔루션으로 첨단 산업 자동화 시스템이 출현할 수 있고 이로 인해 경제적인 이득을 얻을 수 있다.

최근 산업 자동화는 플랜트 기기 간 연결성을 높이는 사이버 물리 시스템 또는 인터스트리 4.0과 같은 새로운 패러다임으로 인해 더욱 관심이 높아지고 있다. 향후 이러한 연결성 증가가 산업 시스템에 어떤 영향을 주는지 분석하는 작업이 중요하다 할 수 있겠다.

References

- [1] K. S. Lee, "Concepts and Trends of Fault Detection, Diagnosis, and Fault Tolerant Control," *KIEE Magazine*, Vol.48, No.4, pp.4-8, 1999.
- [2] Y. J. Park, S. K. S. Fan, and C. Y. Hsu, "A Review on Fault Detection and Process Diagnostics in Industrial Processes," *Processes*, Vol.8, No.9, pp.1123, 2020. DOI: 10.3390/pr8091123
- [3] D. Gonzalez-Jimenez, J. del-Olmo, J. Poza, F. Garramiola, and P. Madina, "Data-Driven Fault Diagnosis for Electric Drives: A Review," *Sensors*, Vol.21, No.12, pp.4024, 2021. DOI: 10.3390/s21124024
- [4] R. Isermann, *Fault-Diagnosis Applications: Model-based condition monitoring: Actuators, drives, machinery, plants, sensors and fault-tolerant systems*, Springer-Verlag, 2011.
- [5] R. Isermann, *Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*, Springer-Verlag, 2006.
- [6] A. D. Pouliezios, and G. S. Stavrakakis, *Real Time Fault Monitoring of Industrial Processes*, Springer, 1994.
- [7] A. Merabet, "Advanced Control for Electric Drives: Current Challenges and Future Perspectives," *Electronics*, Vol.9, no.11, pp.1762, 2020. DOI: 10.3390/electronics9111762
- [8] C. T. Kowalski, and T. Orłowska-Kowalska, "Neural Networks Application for Induction Motor Faults Diagnosis," *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol.63, no.3-5, pp.435-448, 2003. DOI: 10.1016/S0378-4754(03)00087-9
- [9] D. An, N. H. Kim, and J. H. Choi, "Statistical Aspects in Neural Network for the Purpose of Prognostics," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.29, no.4, pp.1369-1375, 2015. DOI: 10.1007/s12206-015-0306-8
- [10] B. A. Welchko, T. A. Lipo, T. M. Jahns, and S. E. Schulz, "Fault Tolerant Three-phase AC Motor Drive Topologies: A Comparison of Features, Cost, and Limitations," *IEEE Int. Electric Machines and Drives Conference*, 2003.

DOI: 10.1109/TPEL.2004.830074

[11] M. Zhixun, S. Saeid, K. R. “FPGA Implementation of Model Predictive Control with Constant Switching Frequency for PMSM Drives,” *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, Vol.10, No.4, pp.2055–2063, 2014. DOI: 10.1109/TII.2014.2344432

[12] M. Stephens, C. Manzie, and M. Good, “Model Predictive Control for Reference Tracking on an Industrial Machine Tool Servo Drive,” *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, Vol.9, no.2, pp.808–816, 2013. DOI: 10.1109/TII.2012.2223222

[13] D. H. Kum, D. H. Bahn, S. H. Kwon, S. H. Jin, S. H. Lee, “Design of Fault Detection and Countermeasures for Automotive EMB System,” *The Journal of The Korean Institute of Communication Sciences*, Vol.34, no.5, pp.19–26, 2017.

[14] S. Ganesan, P. W. David, P. K. Balachandran, and D. Samithas, “Intelligent Starting Current-Based Fault Identification of an Induction Motor Operating under Various Power Quality Issues,” *Energies*, Vol.14, no.2, pp.304, 2021.

DOI: 10.3390/en14020304

[15] S. K. Sul, *Control of Electric Machine Drive Systems*, Wiley-IEEE Press, 2011.

[16] K. Urbanski, and D. Janiszewski, “Sensorless Control of the Permanent Magnet Synchronous Motor,” *Sensors*, Vol.19, No.16, pp.3546, 2019.

DOI: 10.1109/VPPC.2008.4677421

[17] F. M. Zaihidee, S. Mekhilef, and M. Mubin, “Robust Speed Control of PMSM Using Sliding Mode Control-A Review,” *Energies*, Vol.12, No.9, pp.669, 2019. DOI: 10.3390/en12091669