

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC DÂN LẬP HẢI PHÒNG**



**ISO 9001:2015**

**TÌM HIỂU PHƯƠNG PHÁP HIỆN ĐẠI TRONG LỖI  
MÁY ĐIỆN VÀ CÁC BỘ BIẾN ĐỔI CÔNG SUẤT**

**ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP ĐẠI HỌC HỆ CHÍNH QUY  
NGÀNH ĐIỆN TỰ ĐỘNG CÔNG NGHIỆP**

**HẢI PHÒNG - 2018**

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC DÂN LẬP HẢI PHÒNG**



**ISO 9001:2015**

**TÌM HIỂU PHƯƠNG PHÁP HIỆN ĐẠI TRONG LỖI  
MÁY ĐIỆN VÀ CÁC BỘ BIẾN ĐỔI CÔNG SUẤT**

**ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP ĐẠI HỌC HỆ CHÍNH QUY  
NGÀNH ĐIỆN TỰ ĐỘNG CÔNG NGHIỆP**

Sinh viên: Trần Văn Hoàn  
Người hướng dẫn: GS.TSKH Thân Ngọc Hoàn

**HẢI PHÒNG - 2018**

Cộng hoà xã hội chủ nghĩa Việt Nam  
**Độc lập – Tự Do – Hạnh Phúc**  
-----o0o-----  
BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC DÂN LẬP HẢI PHÒNG

## **NHIỆM VỤ ĐỀ TÀI TỐT NGHIỆP**

Sinh viên :Trần Văn Hoàn– MSV : 1412102009  
Lớp : ĐC1802- Ngành Điện Tự Động Công Nghiệp  
Tên đề tài : Tìm hiểu phương pháp hiện đại trong lỗi máy điện  
và các bộ biến đổi công suất

## NHIỆM VỤ ĐỀ TÀI

1. Nội dung và các yêu cầu cần giải quyết trong nhiệm vụ đề tài tốt nghiệp (về lý luận, thực tiễn, các số liệu cần tính toán và các bản vẽ).

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. Các số liệu cần thiết để thiết kế, tính toán

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

3. Địa điểm thực tập tốt nghiệp..... :

## CÁC CÁN BỘ HƯỚNG DẪN ĐỀ TÀI TỐT NGHIỆP

Người hướng dẫn thứ nhất:

Họ và tên : Thân Ngọc Hoàn  
Học hàm, học vị : GS.TSKH  
Cơ quan công tác : Trường Đại học dân lập Hải Phòng  
Nội dung hướng dẫn : Toàn bộ đề tài

Người hướng dẫn thứ hai:

Họ và tên :  
Học hàm, học vị :  
Cơ quan công tác :  
Nội dung hướng dẫn :

Đề tài tốt nghiệp được giao ngày tháng năm 2018.  
Yêu cầu phải hoàn thành xong trước ngày.....tháng.....năm 2018

Đã nhận nhiệm vụ Đ.T.T.N  
Sinh viên

Đã giao nhiệm vụ Đ.T.T.N  
Cán bộ hướng dẫn Đ.T.T.N

Trần Văn Hoàn

GS.TSKH Thân Ngọc Hoàn

Hải Phòng, ngày.....tháng.....năm 2018

HIỆU TRƯỞNG

GS.TS.NGUYỄN TRẦN HỮU NGHỊ

**PHẦN NHẬN XÉT TÓM TẮT CỦA CÁN BỘ HƯỚNG DẪN**

1. Tinh thần thái độ của sinh viên trong quá trình làm đề tài tốt nghiệp.

.....  
.....  
.....  
.....

2. Đánh giá chất lượng của Đ.T.T.N ( so với nội dung yêu cầu đã đề ra trong nhiệm vụ Đ.T.T.N, trên các mặt lý luận thực tiễn, tính toán giá trị sử dụng, chất lượng các bản vẽ..)

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

3. Cho điểm của cán bộ hướng dẫn  
(*Điểm ghi bằng số và chữ*)

Ngày.....tháng.....năm 2018  
Cán bộ hướng dẫn chính  
(*Ký và ghi rõ họ tên*)

**NHẬN XÉT ĐÁNH GIÁ CỦA NGƯỜI CHĂM PHẢN BIỆN  
ĐỀ TÀI TỐT NGHIỆP**

1. Đánh giá chất lượng đề tài tốt nghiệp về các mặt thu thập và phân tích số liệu ban đầu, cơ sở lý luận chọn phương án tối ưu, cách tính toán chất lượng thuyết minh và bản vẽ, giá trị lý luận và thực tiễn đề tài.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. Cho điểm của cán bộ chăm phản biện  
(Điểm ghi bằng số và chữ)

Ngày.....tháng.....năm 2018  
Người chăm phản biện  
(Ký và ghi rõ họ tên)

## MỤC LỤC

MỞ ĐẦU.....	1
<b>CHƯƠNG 1: GIỚI THIỆU VỀ MÁY ĐIỆN.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 . MÁY ĐIỆN XOAY CHIỀU .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1.1.Khái niệm .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1.2. Cấu tạo của động cơ không đồng bộ 3 pha.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2.ĐỘNG CƠ ĐIỆN MỘT CHIỀU .....</b>	<b>9</b>
<b>1.2.1.Khái niệm .....</b>	<b>9</b>
<b>1.2.2.Cấu tạo của máy điện một chiều .....</b>	<b>9</b>
<b>1.2.3.Các thông số định mức .....</b>	<b>12</b>
<b>CHƯƠNG 2. TỔNG QUAN CHẨN ĐOÁN LỖI VÀ KỸ THUẬT THỬ LỖI .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1.TỔNG QUAN CHẨN ĐOÁN LỖI VÀ KỸ THUẬT THỬ LỖI : CHẨN ĐOÁN LỖI DỰA TRÊN MÔ HÌNH VÀ DỰA TRÊN TÍN HIỆU .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1.1. Giới thiệu .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1.2. Phương pháp chẩn đoán lỗi dựa trên mô hình .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.3. Các phương pháp dự báo lỗi trên tín hiệu .....</b>	<b>28</b>
<b>2.2. TỔNG QUAN CHẨN ĐOÁN LỖI VÀ KỸ THUẬT THỬ LỖI: PHƯƠNG PHÁP DỰ BÁO LỖI VỚI MIỀN THỬ DỰA TRÊN ĐẶC TÍNH LAI / TÍCH CỰC. ....</b>	<b>32</b>
<b>2.2.1:Giới thiệu .....</b>	<b>32</b>
<b>2.2.2. Các phương pháp dự báo lỗi dựa trên hệ chuyên gia .....</b>	<b>33</b>
<b>2.2.3.phương pháp dự báo lỗi lai và tích cực .....</b>	<b>41</b>
<b>2.3. PHẦN KẾT LUẬN .....</b>	<b>44</b>



<b>CHƯƠNG 3 : NHỮNG TIẾN BỘ TRONG ĐIỀU KHIỂN VÀ GIÁM SÁT, PHÁT HIỆN LỖI TRONG MÁY ĐIỆN ĐIỆN TỬ CÔNG SUẤT : HIỆN ĐẠI NHẤT</b> .....	46
<b>3.1: GIỚI THIỆU</b> .....	46
<b>3.2. CHUẨN ĐOÁN LỖI MÁY ĐIỆN CẢM ỨNG</b> .....	47
<b>3.2.1. Chẩn đoán lỗi của rôto</b> .....	47
<b>3.2.2. Giám sát và dự báo lỗi cách điện của cuộn dây</b> .....	55
<b>3.2.3. Chẩn đoán lỗi hỏng hóc cơ khí</b> .....	62
<b>3.3. DỰ BÁO LỖI CỦA MÁY ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU</b> ..	68
<b>3.3.1. Chẩn đoán lỗi khử từ</b> .....	69
<b>3.3.2. Ngắn mạch cuộn dây stato</b> .....	70
<b>3.3.3. Chẩn đoán lỗi cơ khí</b> .....	71
<b>3.3.4. Nghiên cứu về đồng bộ nam châm vĩnh cửu đa pha</b> .....	72
<b>3.4. CHẨN ĐOÁN LỖI LINH KIỆN ĐIỆN VÀ BỘ BIẾN ĐỔI</b> .....	72
<b>3.4.1. Chẩn đoán lỗi trong bộ biến đổi công suất</b> .....	72
<b>3.4.2. Chẩn đoán lỗi các linh kiện điện tử công suất</b> .....	75
<b>3.4.3. Các hệ thống hút lỗi</b> .....	75
<b>3.5. KẾT LUẬN</b> .....	76
<b>KẾT LUẬN</b> .....	78
<b>TÀI LIỆU THAM KHẢO</b> .....	79

## LỜI NÓI ĐẦU

Ngày nay, nền kinh tế của nước ta đang trên đà phát triển mạnh mẽ, đời sống của người dân ngày càng nâng cao. Nhu cầu sử dụng điện năng trong đời sống sinh hoạt cũng như trong các ngành công nghiệp, nông nghiệp và dịch vụ là tăng không ngừng. Đây là cơ hội nhưng cũng là thách thức cho ngành điện với việc phát triển điện năng, phục vụ nhu cầu của xã hội. Sau thời gian học tập tại trường, được sự chỉ bảo hướng dẫn nhiệt tình của thầy cô giáo trong ngành Điện tự động công nghiệp trường Đại học Dân lập Hải Phòng, em đã kết thúc khoá học và đã tích lũy được vốn kiến thức nhất định. Được sự đồng ý của nhà trường và thầy cô giáo trong khoa em được giao đề tài tốt nghiệp: **“Tìm hiểu phương pháp hiện đại trong lỗi máy điện và các bộ biến đổi công suất”** do GS.TSKH Thân Ngọc Hoàn hướng dẫn.

Đề án tốt nghiệp của em gồm bốn chương:

Chương 1: Giới thiệu về máy điện

Chương 2: Tổng quát chuẩn đoán lỗi và kỹ thuật thử lỗi

Chương 3: Những tiến bộ trong điều khiển và giám sát, phát hiện lỗi trong máy điện, điện tử công suất: hiện đại nhất

## CHƯƠNG 1.

### GIỚI THIỆU TỔNG QUAN VỀ MÁY ĐIỆN ( 322)

#### 1.1 . MÁY ĐIỆN XOAY CHIỀU

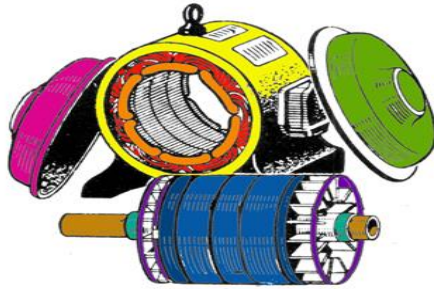
##### 1.1.1.Khái niệm

- Máy điện xoay chiều là các thiết bị điện hoặc biến đổi điện năng của dòng điện xoay chiều ( điện năng xoay chiều ) thành cơ năng ( động cơ điện ) hoặc biến đổi cơ năng thành điện năng xoay chiều ( máy phát điện )
- Máy điện xoay chiều là các thiết bị điện hoặc biến đổi điện năng của dòng điện xoay chiều ( điện năng xoay chiều ) thành cơ năng ( động cơ điện ) hoặc biến đổi cơ năng thành điện năng xoay chiều ( máy phát điện )
- - Dựa vào nguyên lí hoạt động, người ta phân chia các loại máy điện thành máy đồng bộ ( là máy mà tốc độ từ trường quay do phần tĩnh (stato) tạo ra luôn luôn bằng tốc độ quay của phần quay (rôto) và máy không đồng bộ ( là máy có tốc độ quay của rôto khác với tốc độ quay của từ trường quay do stato tạo ra.
- Trong thực tế tất cả các máy phát điện xoay chiều đều là máy đồng bộ. Căn cứ vào số pha của dòng điện xoay chiều, các loại máy điện lại được phân chia thành máy điện một pha và nhiều pha ( thường là ba pha ). Như vậy ta có các loại máy điện xoay chiều sau đây:
- **Máy phát điện:**  
Thường là máy phát điện đồng bộ một pha hay nhiều pha ( thường là ba pha ). Các máy phát điện không đồng bộ ít được sử dụng trong thực tế
- **Động cơ điện xoay chiều:**  
Động cơ đồng bộ một pha, ba pha  
Động cơ không đồng bộ một pha, ba pha

Ngoài các động cơ và máy phát điện xoay chiều ta vừa nói phần trước trong thực tế còn có các loại máy điện đặc biệt dùng để biến đổi tần số hoặc số pha của dòng điện xoay chiều. Các máy này nói chung được gọi là các loại máy biến đổi điện.

### 1.1.2. Cấu tạo của động cơ không đồng bộ 3 pha

- Cấu tạo của máy điện không đồng bộ ba pha gồm hai phần chính là: Phần tĩnh 1 ( Stato ) và phần quay 2 ( Rôto )



**Hình 1.1: Cấu tạo của động cơ 3 pha**

1- Phần tĩnh của máy điện gồm các bộ phận chính là: Vỏ máy, dây quấn Stato và lõi thép Stato



**Hình1.2. Phần tĩnh của máy điện**

a- Lõi thép Stato do nhiều lá thép kỹ thuật điện đã dập sẵn ghép lại với nhau, chiều dày các lá thép thường là 0.5mm, phía trong có các rãnh để đặt dây quấn.

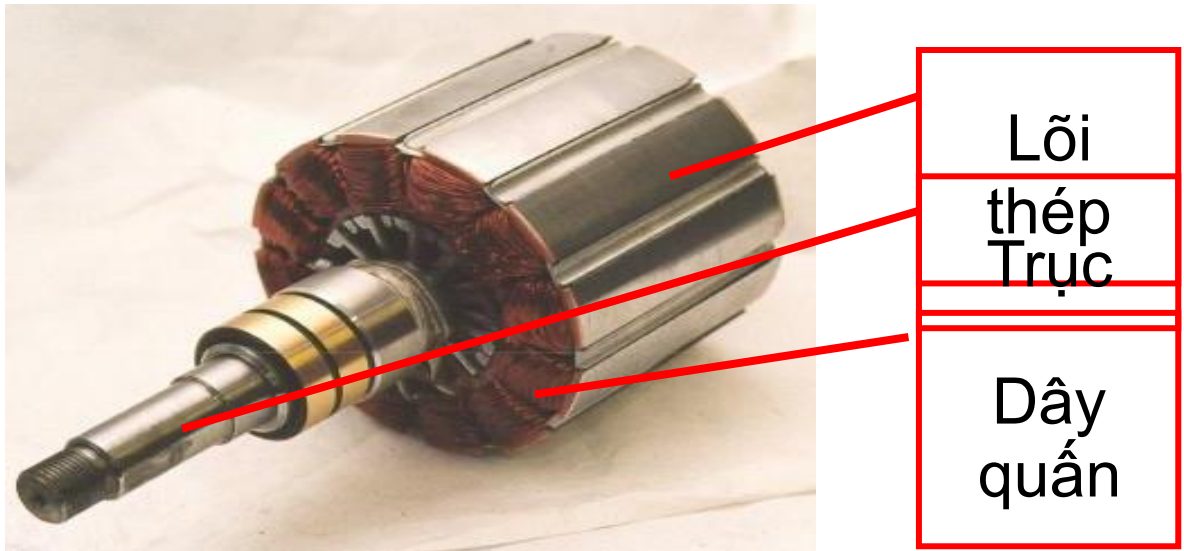
b- Dây quấn ba pha của Stato đặt trong các rãnh lõi thép, xung quanh dây có bọc các lớp cách điện để cách điện với lõi thép.

c- vỏ máy dùng để bảo vệ và giữ chặt lõi thép Stato. Vỏ máy được làm bằng nhôm, gang hay thép đúc tùy theo máy lớn hay nhỏ

2- Phần quay Rôto gồm: lõi thép, trục và dây quấn

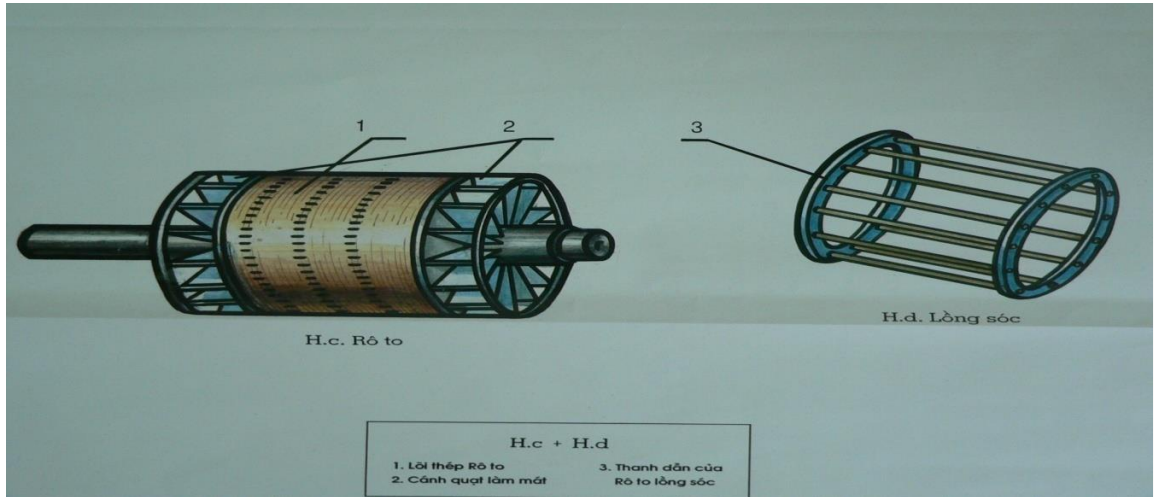
- Lõi thép rôto do các lá thép kỹ thuật điện ghép lại. Mặt ngoài của lõi thép có rãnh để đặt dây quấn, ở giữa có lỗ để lắp trục.

Trục máy gắn với lõi thép, được làm bằng thép tốt và được đỡ trên nắp máy nhờ ổ lăn hay ổ trượt.



**Hình 1.3. Phần roto quay**

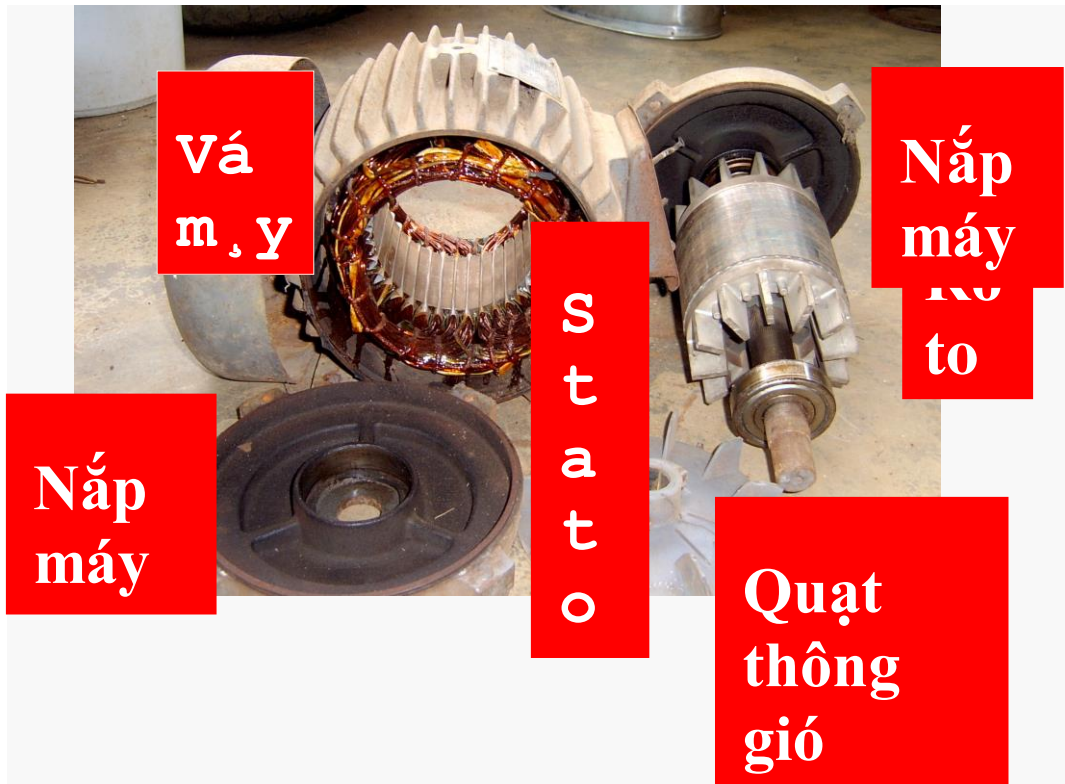
Dây quấn rôto tùy theo loại động cơ mà có cấu tạo khác nhau. Ở loại động cơ không đồng bộ rôto lồng sóc, dây quấn là những thanh đồng hay nhôm đặt trên các rãnh lõi thép rôto, hai đầu các thanh dẫn nối với hai vành đồng hay nhôm gọi là vòng ngắn mạch. Như vậy, dây quấn rôto hình thành một cái lồng ( giống như lồng sóc- Hình b ) người ta thường đổ nhôm nóng chảy vào các rãnh lõi thép rôto để chế tạo rôto lồng sóc ( Hình a )



**Hình 1.4. Cấu tạo roto lồng sóc**

Những bộ phận chính của động cơ không đồng bộ ba pha:

1. Phần tĩnh ( Stato và vỏ máy )
2. Phần quay roto
3. Quạt thông gió
4. Nắp máy



**Hình 1.5. Những bộ phận chính của động cơ không đồng bộ 3 pha**

### **1.1.2.3. Những bộ phận chính của động cơ không đồng bộ ba pha**

#### **1.1.2.3.1/ Nguyên lí làm việc của động cơ không đồng bộ ba pha**

Cho dòng điện ba pha tần số  $f$  chạy trong các dây quấn stato để tạo ra từ trường quay có  $p$  cặp cực, quay với tốc độ  $n_1 = \frac{60}{p} f$

Từ trường quay cắt các thanh dẫn của dây quấn rôto và gây ra các suất điện động cảm ứng. Dưới tác động của suất điện động này trong các dây quấn rôto có dòng điện chạy qua. Dòng điện này có cường độ phụ thuộc vào trở kháng và suất điện động cảm ứng tác động trong mỗi dây quấn của rôto; nó tác dụng tương hỗ với từ trường quay tạo ra mômen quay điện từ  $M$ . Theo định luật Lenz, rôto phải quay theo chiều quay của từ trường để cho tốc độ chuyển động tương đối giữa từ trường quay và các thanh dẫn ở dây quấn rôto giảm xuống. Khi mômen quay điện từ cân bằng với mômen cản cơ học trên trục rôto, động cơ ở trạng thái cân bằng và rôto sẽ quay với tốc độ  $n < n_1$

#### **1.1.2.3.2. Nguyên lí làm việc của máy phát điện không đồng bộ ba pha**

Ta nối stato của động cơ không đồng bộ ba pha vào lưới điện, trục của động cơ được nối với một động cơ sơ cấp. Dùng động cơ sơ cấp kéo rôto quay cùng chiều  $n_1$ , nhưng với tốc độ  $n > n_1$  của từ trường quay. Do rôto quay nhanh hơn từ trường nên dòng điện trong rôto sẽ có chiều ngược với chiều của dòng điện  $i_2$  ở trong rôto khi máy điện được dùng làm động cơ, trong khi đó chiều của từ trường quay vẫn như cũ nên điện từ tác dụng lên rôto sẽ đổi chiều và tạo ra mômen quay ngược chiều với chiều quay của rôto, gây ra mômen hãm cân bằng với mômen quay của động cơ sơ cấp. Lúc này máy điện làm việc ở chế độ máy phát, hệ số trượt của máy là:



$$S = n_1 - n < 0$$

$$n_1$$

Nhờ từ trường quay cơ năng động cơ sơ cấp đặt vào rôto được biến thành điện năng ở stato. Để tạo ra từ trường quay lưới điện phải cung cấp cho máy phát không đồng bộ công suất phản kháng Q; vì vậy hệ số công suất cos của lưới điện giảm xuống. Khi máy phát làm việc độc lập, do hiện tượng từ dư ta có thể dùng tụ điện nối ở đầu cực máy để kích từ cho máy. Đây là nhược điểm của máy phát không đồng bộ vì thế nó rất ít được sử dụng trong thực tế

## **1.2.ĐỘNG CƠ ĐIỆN MỘT CHIỀU**

### **1.2.1. GIỚI THIỆU**

Ngày nay mặc dù dòng điện xoay chiều được sử dụng rất rộng rãi, song máy điện một chiều vẫn tồn tại đặc biệt là động cơ một chiều. Động cơ một chiều thường được sử dụng ở những nơi yêu cầu mômen mở máy lớn hoặc yêu cầu điều chỉnh tốc độ bằng phẳng, phạm vi rộng.

Trong các thiết bị tự động, ta thấy các máy điện khuyếch đại, các động cơ chấp hành cũng là máy điện một chiều. Ngoài ra, các máy điện một chiều còn thấy trong các thiết bị điện ô tô, tàu thủy, máy bay... Các máy phát điện một chiều điện áp thấp dùng trong các thiết bị điện hóa, thiết bị hàn điện có chất lượng cao

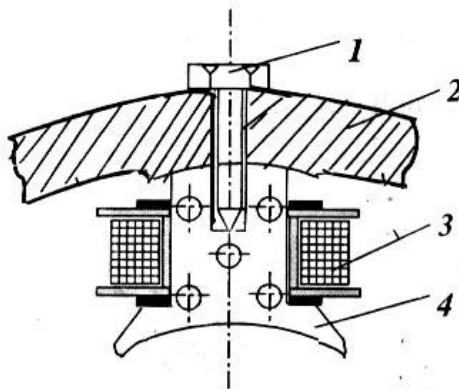
Thiếu sót chủ yếu của máy điện một chiều là có cở góp làm cho cấu tạo phức tạp, đắt tiền và kém tin cậy, nguy hiểm trong môi trường dễ nổ. Khi sử dụng động cơ một chiều, cần có nguồn điện một chiều kèm theo (máy phát điện một chiều hay bộ chỉnh lưu).

### **1.2.2. CẤU TẠO CỦA MÁY ĐIỆN MỘT CHIỀU**

#### **1.2.2.1. Stator**

Còn gọi là phần cảm, gồm có cực từ chính, cực từ phụ, gông từ nắp máy và cơ cấu chổi điện.

##### **1.2.2.1.1 Cực từ chính:**



**Hình 1.6. Cực từ chính**

Cực từ chính là bộ phận sinh ra từ trường, gồm có lõi sắt cực từ và dây quấn kích từ lồng ngoài lõi sắt cực từ. Lõi thép cực từ làm bằng các lá thép kỹ thuật điện hay thép các bon dày 0,5mm hay 1mm được ép chặt và tán lại. Trong máy điện nhỏ có thể dùng thép khối.

Cực từ được gắn chặt vào vỏ máy bằng bulông. Dây quấn kích từ được làm bằng đồng bọc cách điện, được quấn thành từng cuộn, mỗi cuộn dây đều được bọc cách điện kỹ thành một khối và tẩm sơn cách điện trước khi lồng vào thân lõi thép cực từ. Các cuộn dây ở các cực từ chính được nối nối tiếp nhau sao cho khi có dòng điện chạy qua chúng thì hình thành các cực từ trái dấu xen kẽ.

#### **1.2.2.1.2. Cực từ phụ:**

Cực từ phụ gồm có lõi thép và dây quấn. Lõi thép thường làm bằng thép khối còn dây quấn cực từ phụ có cấu tạo giống như dây quấn cực từ chính. Cực từ phụ được đặt xen kẽ với cực từ chính và được dùng để cải thiện đổi chiều. Dây quấn cực từ phụ được nối nối tiếp với dây quấn cực từ chính. Cực từ phụ được gắn vào vỏ máy nhờ những bu lông.

### **1.2.2.1.3 Gong từ:**

Gong từ làm mạch từ nối liền các cực từ, đồng thời làm vỏ máy. Trong máy điện công suất lớn gong từ làm bằng thép đúc, còn máy điện công suất vừa và nhỏ thường dùng thép tấm cuộn lại và hàn.

### **1.2.2.1.4. Cơ cấu chổi than:**

Gồm có chổi than đặt trong hộp chổi than và tỳ chặt lên cổ nhò lò xo. Hộp chổi than được cố định trên giá chổi than và cách điện với giá. Giá chổi than có thể quay được để điều chỉnh vị trí chổi than cho đúng chỗ. Sau khi điều chỉnh xong thì cố định lại bằng vít.

Chổi than làm bằng than hay gra-phít, đôi khi ta trộn thêm bột đồng để làm tăng độ dẫn điện. Chổi than có nhiệm vụ đưa dòng điện từ phần ứng ra ngoài hay ngược lại.

### **1.2.2.1.5. Nắp máy:**

Nắp máy để bảo vệ dây quấn và đảm bảo an toàn cho con người. Đối với các máy điện công suất vừa và nhỏ, nắp máy còn có tác dụng làm giá đỡ ổ bi và thường làm bằng gang.

### **1.2.2.2. Rotor:**

Còn gọi phần ứng gồm lõi thép, dây quấn phần ứng và cổ góp.

#### **1.2.2.2.1. Lõi théprotor:**

Hình trụ làm bằng các lá thép kỹ thuật dày 0,5 mm phủ sơn cách điện, ghép lại để giảm tổn hao do dòng điện xoáy gây ra. Các lá thép được dập có lỗ thông gió và rãnh để đặt dây quấn phần ứng. Trong những máy cỡ trung bình trở lên đôi khi còn có lỗ để tạo sự thông gió dọc trục còn ở máy lớn hơn thì lõi

sắt được chia thành từng đoạn nhỏ, giữa các đoạn ấy ta để một khe hở để thông gió ngang trục.

#### **1.2.2.2.2. Dây quấn phản ứng:**

Dây quấn phản ứng là phần sinh ra sức điện động cảm ứng và có dòng điện chạy qua. Dây quấn phản ứng làm bằng đồng có bọc cách điện, có tiết diện hình tròn (đối với máy có công suất bé) hay hình chữ nhật (đối với máy công suất lớn) được đặt trong các rãnh của lõi thép theo một sơ đồ cụ thể và được cách điện với rãnh. Để tránh dây quấn bị văng ra khi rotor quay (lực ly tâm), ở miệng rãnh có dùng nêm bằng tre hay bakelit.

#### **1.2.2.2.3. Cổ góp:**

Cổ góp gồm có các phiến góp bằng đồng có đuôi én được ghép lại thành hình trụ tròn, giữa các phiến góp được cách điện với nhau bằng các tấm mica dày 0,4 đến 1,2mm. Hai đầu vành én có 2 vành ốp hình chữ V ép chặt lại. Giữa vành ốp và phiến góp cũng được cách điện bằng các tấm mica. Đuôi vành góp nhô cao lên một ít để hàn các đầu dây của phần tử nối với phiến góp. Thông qua chổi điện và cổ góp, dòng điện xoay chiều trong dây quấn rotor được đổi thành dòng điện một chiều đưa ra mạch ngoài, do đó cổ góp còn gọi là vành đổi chiều.

### **1.2.3. CÁC THÔNG SỐ ĐỊNH MỨC**

Các thông số định mức của máy điện một chiều thường do nhà chế tạo quy định và được ghi trên biển tên (name plate). Gồm có: Công suất định mức  $P_{đm}$ , điện áp định mức  $U_{đm}$ , dòng điện định mức  $I_{đm}$

## **CHƯƠNG 2.**

# **TỔNG QUAN CHẨN ĐOÁN LỖI VÀ KỸ THUẬT THỬ LỖI**

## **2.1. TỔNG QUAN CHẨN ĐOÁN LỖI VÀ KỸ THUẬT THỬ LỖI : CHẨN ĐOÁN LỖI DỰA TRÊN MÔ HÌNH VÀ DỰA TRÊN TÍN HIỆU (319)**

### **2.1.1. GIỚI THIỆU**

Như đã biết , nhiều hệ thống kỹ thuật, chẳng hạn như động cơ aero, động cơ xe, quy trình hóa học, hệ thống sản xuất, mạng lưới điện, máy điện, hệ thống chuyển đổi năng lượng gió và thiết bị điện tử công nghiệp. Có một nhu cầu ngày càng tăng về độ tin cậy và an toàn của các hệ thống công nghiệp chịu sự bất thường của quá trình tiềm ẩn và các lỗi thành phần. Kết quả là, nó là tối quan trọng để phát hiện và xác định bất kỳ loại bất thường tiềm năng và lỗi càng sớm càng tốt và thực hiện hoạt động khoan dung để giảm thiểu sự suy giảm hiệu suất và tránh những tình huống nguy hiểm.

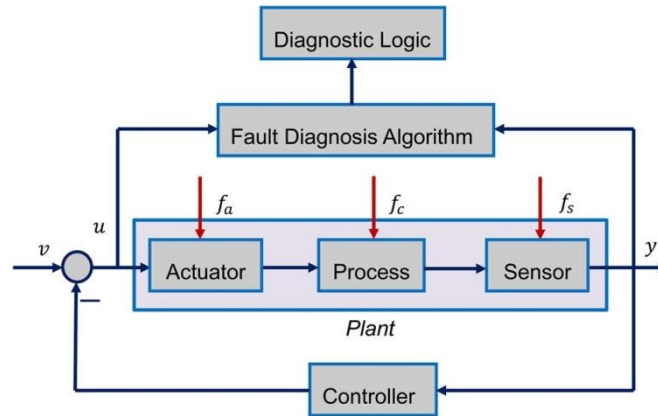
Một lỗi được định nghĩa là độ lệch không được chấp nhận của ít nhất một thuộc tính hoặc tham số đặc trưng của hệ thống từ điều kiện được chấp nhận / bình thường / tiêu chuẩn [1]. Ví dụ về các trục trặc như vậy là chặn thiết bị truyền động, mất cảm biến (ví dụ: cảm biến bị kẹt ở một giá trị cụ thể hoặc có biến thể trong hệ số vô hướng cảm biến) hoặc ngắt kết nối thành phần hệ thống. Do đó, lỗi thường được phân loại là lỗi thiết bị truyền động, lỗi cảm biến và lỗi thực vật (hoặc gọi là lỗi thành phần hoặc lỗi tham số), hoặc làm gián đoạn hoạt động điều khiển từ bộ điều khiển trên nhà máy hoặc tạo lỗi đo lường đáng kể hoặc thay đổi trực tiếp năng động đầu vào / đầu ra properties của hệ thống, dẫn đến suy thoái hiệu năng hệ thống và thậm chí cả thiệt hại và sụp đổ của toàn bộ hệ thống.

dụng khái niệm dự phòng, dự phòng phần cứng hoặc dự phòng phần mềm (hoặc được gọi là dự phòng phân tích). Ý tưởng cơ bản về dự phòng phần cứng là sử dụng các thành phần giống nhau với cùng tín hiệu đầu vào để có thể so sánh các tín hiệu đầu ra trùng lặp, dẫn đến quyết định chẩn đoán bằng nhiều phương pháp như kiểm tra giới hạn và bỏ phiếu đa số. Phần cứng dự phòng là đáng tin cậy, nhưng đắt tiền và tăng trọng lượng và chiếm nhiều không gian hơn. Nó là cần thiết cho các thành phần chính để trang bị với bản sao dự phòng, nhưng sẽ không thể áp dụng nếu phần cứng dự phòng được áp dụng cho toàn bộ hệ thống do chi phí hoặc khó khăn cho cài đặt vật lý khi không gian hoặc trọng lượng bị ràng buộc nghiêm ngặt.

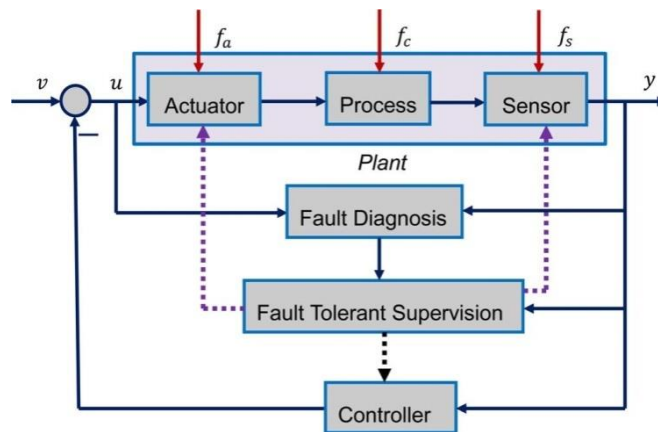
Với sự trưởng thành của lý thuyết điều khiển hiện đại, kỹ thuật dự phòng phân tích đã trở thành dòng chính của nghiên cứu chẩn đoán lỗi kể từ những năm 1980, có sơ đồ có thể được mô tả như trong hình 1. Đối với một hệ thống điều khiển bị lỗi thiết bị truyền động, quá trình / thành phần  $f_c$  lỗi và  $f_s$  lỗi cảm biến, đầu vào  $u$  và đầu ra  $y$  được sử dụng để xây dựng thuật toán chẩn đoán lỗi, được sử dụng để kiểm tra tính nhất quán của thông tin tính năng của quá trình thời gian thực được thực hiện bởi dữ liệu đầu vào và đầu ra so với biết trước về một hệ thống lành mạnh, và một quyết định chẩn đoán sau đó được thực hiện bằng cách sử dụng logic chẩn đoán. So với phương pháp redundancy phần cứng, phương pháp chẩn đoán phân tích dự phòng có hiệu quả chi phí hơn, nhưng khó khăn hơn do tiếng ồn môi trường, lỗi mô hình không thể tránh khỏi và độ phức tạp của động lực hệ thống và cấu trúc điều khiển.

Chẩn đoán lỗi bao gồm ba nhiệm vụ đó là phát hiện lỗi, cách ly lỗi và nhận dạng lỗi. Phát hiện lỗi là nhiệm vụ cơ bản nhất của chẩn đoán lỗi, được sử dụng để kiểm tra xem có sự cố hoặc lỗi trong hệ thống và xác định thời điểm xảy ra lỗi. Hơn nữa, cách ly lỗi là để xác định vị trí của thành phần bị lỗi, và nhận dạng lỗi là xác định loại, hình dạng và kích thước của lỗi.

Rõ ràng, vị trí của các thành phần bị lỗi và mức độ nghiêm trọng của các trục trặc được mô tả bởi các loại, hình dạng và kích cỡ của các lỗi là rất quan trọng để hệ thống có được các phản ứng chịu lỗi kịp thời và phù hợp để loại bỏ các tác động bất lợi từ các bộ phận bị lỗi cho hoạt động bình thường của hệ thống



**Hình 2.1. Chẩn đoán lỗi dựa trên dự phòng phân tích**



**Hình 2.2. Sơ đồ điều khiển khả năng chịu lỗi**

Sơ đồ kiểm soát khả năng chịu lỗi được mô tả trong hình 8, cho thấy rằng kiểm soát khả năng chịu lỗi được tích hợp với chẩn đoán lỗi về bản chất. Chẩn đoán lỗi thời gian thực có thể phát hiện xem hệ thống có bị lỗi hay không và cho biết lỗi xảy ra ở đâu và sự cố nghiêm trọng như thế nào. Dựa



trên thông tin có giá trị, hệ thống giám sát có thể thực hiện các hành động chịu lỗi thích hợp như bù đắp các tín hiệu bị lỗi bằng cách bù tín hiệu truyền động / cảm biến, điều chỉnh hoặc cấu hình lại bộ điều khiển, và thậm chí thay thế các thành phần bị lỗi bằng các bản sao dự phòng. rằng các tác động bất lợi từ lỗi được điều chỉnh hoặc loại bỏ.

Trong suốt bốn thập kỷ qua, các kết quả hiệu quả đã được đưa vào các phương pháp chẩn đoán lỗi, các công nghệ kiểm soát khả năng chịu lỗi và các ứng dụng của chúng trong các quy trình và hệ thống công nghiệp khác nhau. Một số giấy tờ khảo sát đã được viết, ví dụ, [2] - [38], được trình bày trong

**Bảng 2.1: Tổng quan các công trình chuẩn đoán lỗi và thứ lỗi**

Years	Fault Diagnosis Methods	Fault Diagnosis Applications	Fault Tolerance Methods	Fault Tolerance Applications
1970s	[2]			
1980s	[3,4]			
1990s	[5-8]	[18]	[27-29]	
2000s	[9-14], [33]	[19, 20], [22-24]	[30-32], [34]	[36]
2010s	[15-17], [35]	[21], [25,26]	[33], [35]	[37, 38]

Cụ thể, vào năm 1976, Willsky trình bày các khái niệm chính về dự phòng phân tích để phát hiện và chẩn đoán lỗi dựa trên mô hình trong bài khảo sát ban đầu [2]. Các phương pháp chẩn đoán lỗi dựa trên mô hình toàn diện hơn như các không gian chẩn lẻ, phương pháp dựa trên quan sát và các kỹ thuật ước lượng tham số được xem xét bởi [3] - [9]. Một cuộc khảo sát ba phần cho mỗi [10] - [12] về chẩn đoán lỗi đã được trình bày vào năm 2003 từ quan điểm của phương pháp dựa trên phương thức định lượng, dựa trên mô hình định tính, và quá trình dựa trên lịch sử, tương ứng. [13], một tổng quan có cấu trúc và toàn diện về nghiên cứu về phát hiện bất thường được cung cấp, được đề cập đến vấn đề tìm mẫu trong dữ liệu không phù hợp với hành vi mong đợi và sử dụng rộng rãi trong nhiều ứng dụng khác nhau như phát

hiện xâm nhập cho an ninh mạng, giám sát quân sự cho các hoạt động của kẻ thù và phát hiện lỗi trong các hệ thống an toàn quan trọng. Trong [14] - [16], các phương pháp chẩn đoán lỗi toàn diện được xem xét tương ứng từ góc nhìn dữ liệu. Trong [17], một đánh giá ngắn về phát hiện lỗi trong mạng cảm biến đã được cung cấp. Đối với các phương pháp chẩn đoán lỗi cho các ứng dụng hệ thống / quy trình khác nhau, một số tài liệu khảo sát đã được giải quyết cho thiết bị khai thác [18], động cơ điện [19] - [21], hệ thống xây dựng (như sưởi ấm, thông gió, điều hòa và làm lạnh) [22], [23], hệ thống máy móc [24], [25], và hệ thống swarm (bao gồm nhiều nút kết nối thông minh và sở hữu khả năng bày đàn) [26], tương ứng.

Để kiểm soát khả năng chịu lỗi, một bài đánh giá ban đầu đã được gửi trước [27] vào năm 1991, giới thiệu các khái niệm cơ bản về kiểm soát chịu lỗi và phân tích khả năng ứng dụng trí thông minh nhân tạo (ví dụ, mạng thần kinh và hệ thống chuyên gia) hệ thống kiểm soát khoan dung. Năm 1997, tổng quan về kiểm soát chịu lỗi được đưa ra từ quan điểm phát triển hệ thống [28]. Trong cùng năm đó, một đánh giá toàn diện đã được đóng góp bởi [29], trong đó trình bày các vấn đề chính của các hệ thống kiểm soát chịu lỗi và vạch ra trạng thái của nghệ thuật trong lĩnh vực này. Các hệ thống điều khiển khả năng chịu lỗi có thể cấu hình lại được xem xét một cách chi tiết bởi [30] - [32], tương ứng. Một số kết quả kiểm soát khả năng chịu lỗi đối với các hệ phi tuyến đã được xem xét bởi [33]. Cùng với chẩn đoán lỗi, các đánh giá ngắn gọn về kiểm soát khả năng chịu lỗi theo hướng dữ liệu và cấu hình lại khả năng chịu lỗi dựa trên mô hình được trình bày tương ứng [34] và [35]. Từ quan điểm của các ứng dụng công nghiệp, kỹ thuật dung sai lỗi đã được xem xét cho hệ thống truyền động điện [36] và các hệ thống điện tử công suất [37], [38], tương ứng.

Tài liệu khảo sát gồm ba phần nhằm mục đích đưa ra một cái nhìn toàn diện về chẩn đoán lỗi thời gian thực và kiểm soát khả năng chịu lỗi, đặc biệt chú ý đến kết quả được báo cáo trong thập kỷ qua. Nói chung, các phương pháp

chẩn đoán lỗi có thể được phân loại thành các phương pháp dựa trên mô hình, phương pháp dựa trên tín hiệu, phương pháp dựa trên tri thức, phương pháp lai (phương pháp kết hợp của ít nhất hai phương pháp) và phương pháp chẩn đoán lỗi hoạt động. Trong bài báo này, các kỹ thuật chẩn đoán lỗi sẽ được xem xét lại từ các quan điểm dựa trên mô hình và dựa trên tín hiệu; và các kỹ thuật chẩn đoán lỗi dựa trên tri thức, lai và hoạt động sẽ được xem xét trong phần thứ hai của bài khảo sát gồm ba phần. Bài viết này và phần thứ hai nhằm mục đích xem xét các phương pháp và các ứng dụng chẩn đoán lỗi hiện có trong một khuôn khổ bằng cách sử dụng các tài liệu tham khảo cập nhật.

### **2.1.2. PHƯƠNG PHÁP CHUẨN ĐOÁN LỖI DỰA TRÊN MÔ HÌNH**

Chẩn đoán lỗi dựa trên mô hình được bắt nguồn từ Beard [39] vào năm 1971 để thay thế dự phòng phần cứng bằng cách phân tích dự phòng và kết quả toàn diện được ghi lại trong một sổ sách được viết rõ (tức là, xem [40] và [41]). Trong các phương pháp dựa trên mô hình, các mô hình của các quy trình công nghiệp hoặc các hệ thống thực tế được yêu cầu có sẵn, có thể thu được bằng cách sử dụng các nguyên tắc vật lý hoặc các kỹ thuật nhận dạng hệ thống. Dựa trên mô hình, các thuật toán chẩn đoán lỗi được phát triển để theo dõi sự nhất quán giữa các đầu ra đo được của các hệ thống thực tế và các kết quả dự đoán mô hình. Ở đây, các phương pháp chẩn đoán lỗi dựa trên mô hình được xem xét sau bốn loại: chẩn đoán lỗi xác định các loại mô hình được sử dụng, phương pháp, phương pháp chẩn đoán lỗi ngẫu nhiên, chẩn đoán lỗi cho các sự kiện rời rạc và hệ thống lai, và chẩn đoán lỗi cho các hệ thống phân tán và làm việc rỗng, được phân loại theo thuật ngữ

#### **2.1.2.1. Phương pháp chẩn đoán lỗi trên mô hình cố định**

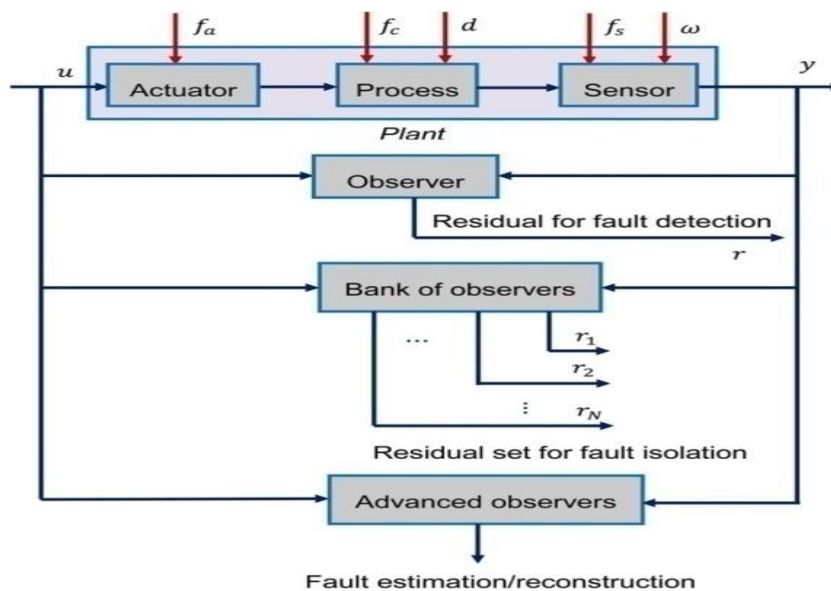
Quan sát viên đóng một vai trò quan trọng trong chẩn đoán lỗi dựa trên mô hình cho các hệ thống / quy trình được giám sát được mô tả bởi các mô hình xác định. Sơ đồ chẩn đoán lỗi dựa trên người quan sát được mô tả bằng hình 3, bao gồm phát hiện lỗi, cách ly lỗi và nhận dạng lỗi (hoặc được gọi là tái thiết lỗi hoặc ước lượng lỗi).

$$x(k+1) = (A+\Delta A)x(k) + (B+\Delta B)u(k) + B_d d(k)$$

$$+ B_a f_a(k) + B_c f_c(k)$$

$$y(k) = (C+\Delta C)x(k) + D_s f_s(k) + D_\omega \omega(k)$$

trong đó  $x(k) \in \mathbb{R}^n$ ,  $u(k) \in \mathbb{R}^m$ ,  $y(k) \in \mathbb{R}^p$ ,  $f_a(k) \in \mathbb{R}^{l_a}$ ,  $f_c(k) \in \mathbb{R}^{l_c}$ ,  $f_s(k) \in \mathbb{R}^{l_s}$ ,  $d(k) \in \mathbb{R}^{l_d}$  và  $\omega(k) \in \mathbb{R}^{l_\omega}$  là trạng thái hệ thống, ngõ vào điều khiển, ngõ ra đo, lỗi khởi động không mong muốn, lỗi thành phần / tham số, lỗi cảm biến, quá trình nhiễu và tiếng ồn đo lường tương ứng.  $A, B, C, B_d, B_a, B_c, D_s$  và  $D_\omega$  được gọi là ma trận tham số; và  $\Delta A, \Delta B$  và  $\Delta C$  là các lỗi thông số mô hình không xác định.



**Hình 2.3. Sơ đồ chẩn đoán lỗi dựa trên mô hình**

Một bộ lọc phát hiện lỗi dựa trên quan sát được đưa ra dưới dạng:

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bv(k) + Kr(k) \\ r(k) = y(k) - \hat{y}(k) \\ \hat{y}(k) = C\hat{x}(k) \end{cases}$$

trong đó  $x(k)$  và  $y(k)$  là các ước tính của trạng thái và đầu ra, tương ứng;  $r(k)$  là tín hiệu còn lại và  $K$  là thiết bị quan sát được thiết kế. Gọi  $e(k) = x(k) - \hat{x}(k)$ , tín hiệu dư miền tần số có thể được mô tả bằng

$$r(z) = t_d^-(z) \bar{d}(z) + t_f^-(z) \bar{f}(z)$$

Nó được chỉ báo từ (3) rằng tín hiệu còn lại phải chịu cả tín hiệu lỗi và tín hiệu nhiễu (bao gồm cả lỗi mô hình, nhiễu loạn quy trình và tiếng ồn đo lường). Để tín hiệu còn lại nhạy cảm với các lỗi, nhưng mạnh mẽ chống lại nhiễu, người quan sát có thể được thiết kế bằng cách giải quyết vấn đề tối ưu hóa trên một dải tần số cụ thể, tức là

$$\text{minimize } \| t_d^-(z) \| / \| t_f^-(z) \|_{\Sigma}.$$

Để giải quyết (4), cách tiếp cận phân bổ cấu trúc tham số để chẩn đoán lỗi được khởi tạo bởi [42] và được xem xét lại trong [43], trong đó người quan sát đạt được  $K$  được xây dựng như hàm của các giá trị riêng và các giá trị riêng; do đó, việc tìm kiếm một  $K$  tối ưu được chuyển thành vấn đề tìm ra các giá trị riêng và các giá trị riêng biệt. Gần đây, phương pháp chẩn đoán lỗi dựa trên phân bổ cấu trúc dựa trên cấu trúc riêng đã được áp dụng cho các phương tiện [44], động cơ tuabin khí [45], tàu vũ trụ [46] và hệ thống tuabin gió [47]. Ngoài ra, vấn đề tối ưu hóa multiobject được mô tả bởi (4) có thể được cải tiến bằng bất đẳng thức ma trận tuyến tính (LMI), một phương pháp phổ biến cho nghiên cứu và ứng dụng chẩn đoán lỗi do khả năng ứng dụng rộng rãi cho nhiều hệ thống động. Phát triển gần đây

chẩn đoán lỗi dựa trên LMI có thể được tìm thấy cho các hệ thống khác nhau như hệ thống phi tuyến Lipschitz [48], hệ thống phi tuyến mờ Takagi-Sugeno (TS) [49], [50], hệ thống trễ thời gian [51], hệ thống [52], và ứng dụng để phát hiện hư hỏng cấu trúc [53] và phát hiện vết nứt trực [54].

Một ngân hàng của dư lượng quan sát dựa trên thường được yêu cầu để thực hiện cách ly lỗi. Một ý tưởng tự nhiên là làm cho một phần còn lại nhạy cảm với lỗi liên quan, nhưng mạnh mẽ chống lại các lỗi khác, nhiễu loạn, và các lỗi mô hình, được gọi là cấu trúc lỗi tách biệt [4]. Logic cách ly lỗi thay thế là làm cho mỗi tín hiệu dư nhạy cảm với tất cả trừ một lỗi và mạnh mẽ chống lại các lỗi mô hình và nhiễu loạn, được gọi là cách ly lỗi còn lại tổng quát [5]. Các kết quả gần đây về cách ly lỗi mạnh mẽ được phát triển cho các hệ phi tuyến [55],[56] và nhiều ứng dụng khác nhau như cho động cơ máy bay [57], robot thao tác [58], và pin lithium-ion [59]. Người quan sát đầu vào không xác định, được đề xuất bởi [60], là một công cụ cách ly lỗi khác bằng cách tách nhiễu đầu vào, lỗi mô hình hóa và các lỗi khác trong các số dư tương ứng. Gần đây, các kỹ thuật cách ly lỗi không xác định dựa trên đầu vào được mở rộng cho các hệ phi tuyến [61], [62] và áp dụng cho các hệ thống máy bay [63], động cơ cuộn cảm [64] và nhà máy xử lý nước thải [65].

Nhận dạng lỗi (hoặc gọi là tái tạo lỗi / lỗi) là xác định loại, kích thước và hình dạng của lỗi liên quan, đây là thông tin quan trọng cho hoạt động chịu lỗi. Kỹ thuật quan sát tiên tiến như quan sát tỷ lệ và tích phân (PI) [66], [67], người quan sát nhiều phân tích (PMI) tỷ lệ [68] - [70], người quan sát thích nghi [71] - [73], người quan sát chế độ trượt [74], [75], và các nhà quan sát mô tả [76], [77] thường được sử dụng để ước lượng lỗi / tái thiết. Bản chất của các nhà quan sát tiên tiến là xây dựng một hệ thống tăng cường bằng cách giới thiệu các lỗi liên quan như một trạng thái bổ sung, và vector trạng thái mở rộng được ước tính sau đó, dẫn đến các ước lượng của tín hiệu lỗi liên quan cùng với các trạng thái hệ thống ban đầu. Do đó, các

nhà quan sát tiên tiến cũng được gọi là nhà quan sát đồng thời và lỗi. Quảng cáo nói trên kỹ thuật quan sát được cải thiện ở vị trí thuận lợi để tái tạo các lỗi phụ biến đổi chậm (quan sát PI và PMI), lỗi tham số biến đổi chậm (quan sát thích nghi), lỗi thiết bị truyền động với dạng sóng sin (tần số trượt) và tần số cao lỗi cảm biến (phương pháp tiếp cận hệ thống mô tả).

Một chẩn đoán lỗi dựa trên mô hình nội tiếng khác là cách tiếp cận quan hệ chẵn lẻ, được phát triển vào đầu những năm 1980 [80], [81]. Cách tiếp cận quan hệ chẵn lẻ là tạo ra số dư (vector chẵn lẻ), được sử dụng để kiểm tra sự nhất quán giữa đầu ra của mô hình và quy trình. Cách tiếp cận quan hệ chẵn lẻ có thể được áp dụng cho mô hình không gian trạng thái miền thời gian hoặc mô hình đầu vào-miền tần số, được xem xét lại bởi các sách [40], [41], [82]. Gần đây, phương pháp quan hệ chẵn lẻ đã được mở rộng để chẩn đoán lỗi cho các mô hình phức tạp hơn như hệ thống phi tuyến TS mờ [83] và mô hình cây mờ [84] và áp dụng cho các hệ thống công nghiệp khác nhau như thiết bị truyền động điều khiển máy bay [85] và điện tử- hệ thống phanh cơ khí [86].

Phương pháp tiếp cận hệ số ổn định là phương pháp di dời lỗi miền tần số, được khởi xướng năm 1987 bởi [87] và tiếp tục được mở rộng thêm [88] vào năm 1990. Ý tưởng cơ bản là tạo ra số dư, dựa trên hệ số đồng ổn định của chuyển giao mà trạng thái năng của hệ thống theo dõi, được tạo ra nhạy cảm với lỗi, nhưng mạnh mẽ chống lại nhiễu, bằng cách chọn một hệ số trọng số tối ưu. Những phát triển gần đây của phương pháp tiếp cận hệ số ổn định có thể được tìm thấy trong [89] đối với các hệ phi tuyến và [90], [91] đối với các ứng dụng trong quá trình tự động hóa bánh xe hai bánh và quy trình nhiệt tương ứng.

Nó là xứng đáng để chỉ ra rằng phương pháp quan hệ chẵn lẻ và phương pháp tiếp cận hệ số ổn định đều có một số loại kết nối với các nhà quan sát. Ví dụ, cách tiếp cận quan hệ chẵn lẻ tương đương với việc sử dụng

một người quan sát chết, và việc thực hiện hệ số nguyên tử bao gồm thiết kế quan sát được (cùng với lợi ích phản hồi của nhà nước).

### **2.1.2.2. Phương pháp chẩn đoán lỗi trên mô hình không cố định**

Song song với việc phát triển chẩn đoán lỗi cho các hệ thống phi chính thống, các phương pháp ngẫu nhiên cũng được phát triển để chẩn đoán lỗi vào đầu những năm 1970. Một thủ tục chẩn đoán lỗi và chẩn đoán chung được đề xuất lần đầu tiên [92] bằng cách sử dụng các thay đổi (hoặc đổi mới) do bộ lọc Kalman tạo ra với cấu trúc tương tự cho người quan sát, trong đó lỗi được chẩn đoán bằng kiểm tra thống kê về độ trắng, trung bình và hiệp phương sai của các căn hộ. Một loạt các công cụ thống kê, chẳng hạn như khả năng tổng quát [93], thử nghiệm  $\chi^2$  [94], thuật toán tổng tích lũy [95], và nhiều thử nghiệm giả thuyết [96], được phát triển thêm để thử nghiệm dư lượng dựa trên bộ lọc Kalman để kiểm tra khả năng xảy ra lỗi cụ thể.

Các nghiên cứu tiếp theo đã dẫn đến một số kỹ thuật lọc Kalman được sửa đổi để chẩn đoán lỗi, chẳng hạn như bộ lọc Kalman mở rộng (EKF), không có mùi. Bộ lọc Kalman (UKF), bộ lọc Kalman thích ứng và bộ lọc Kalman tăng cường. Không giống như các bộ lọc Kalman thông thường, EKF có thể được sử dụng để chẩn đoán các lỗi trong một quy trình công nghiệp phi tuyến [97]. UKF, tùy thuộc vào một xấp xỉ ngẫu nhiên chính xác hơn, tức là, biến đổi không tập trung, có thể nắm bắt tốt hơn trung bình thực sự và hiệp phương sai, dẫn đến hiệu quả chẩn đoán tốt hơn [98], [99]. Các bộ lọc Kalman thích ứng có thể được sử dụng để điều chỉnh ma trận hiệp phương sai nhiều quy trình, hoặc ma trận hiệp phương sai nhiều đo để có được chẩn đoán lỗi thỏa đáng [100], [101]. Các bộ lọc Kalman tăng cường có thể được sử dụng để đồng thời ước lượng các trạng thái hệ thống và các tín hiệu lỗi [102]. Các ví dụ ứng dụng gần đây về chẩn đoán lỗi dựa trên bộ lọc Kalman có thể được tìm thấy trong [103] - [105] cho động cơ đốt, hệ thống điện tử bị sốc cơ học và động cơ đồng bộ vĩnh cửu.



Một phương pháp chẩn đoán lỗi ngẫu nhiên quan trọng khác là ước lượng thông số dựa trên các công nghệ nhận dạng hệ thống (ví dụ, sai số vuông nhỏ nhất và các phương pháp có nguồn gốc của nó), được khởi tạo bởi [106]. Trong phương pháp này, các lỗi được cho là được phản ánh trong các tham số hệ thống, và chỉ cần cấu trúc mô hình cần biết. Ý tưởng cơ bản của phương pháp phát hiện là xác định các thông số của quy trình thực tế trực tuyến, được so sánh với tham số tham chiếu thu được ban đầu trong điều kiện lành mạnh. Các phương pháp chẩn đoán lỗi dựa trên tham số ước tính rất đơn giản nếu các tham số của mô hình có một ánh xạ rõ ràng với các hệ số vật lý. Phương pháp này được đánh giá kỹ trong các bài báo khảo sát ban đầu [3], [9] và sách [107]. Phát triển gần đây của phương pháp này có thể được tìm thấy trong [108] - [110].

Được thúc đẩy bởi quá trình đốt cháy, hệ thống làm giấy và quy trình hóa học, kết quả đầu ra của hệ thống được giám sát có thể được mô tả bằng các hàm mật độ xác suất. Đối với lớp hệ thống ngẫu nhiên này, chẩn đoán lỗi được giải quyết lần đầu tiên bằng [111], trong đó các đầu ra hàm mật độ xác suất được xấp xỉ bằng cách sử dụng các kỹ thuật mở rộng B-spline, và tiếng ồn / lỗi ngẫu nhiên có thể không phải Gaussian. Để cải thiện mạnh mẽ chống lại tiếng ồn đo lường, lỗi mô hình hóa, và các rối loạn quy trình, việc tích hợp bộ ước lượng mô tả và phân bố cấu trúc riêng biệt được sử dụng để phát hiện các lỗi trong [112]. Gần đây, phát triển chẩn đoán lỗi cho các hệ phi tuyến có thể được tìm thấy trong [113]. Ngoài ra, các phương pháp chẩn đoán lỗi cũng được phát triển cho các lớp khác của hệ thống ngẫu nhiên như các quá trình ngẫu nhiên với chuyển động Brown [114], [115] và Markovian nhảy [116].

### **2.1.2.3. Chẩn đoán lỗi cho các sự kiện rời rạc và hệ thống lai**

Trong quy trình công nghiệp, tín hiệu của một số hệ thống động chuyển từ giá trị này sang giá trị khác thay vì thay đổi giá trị của chúng liên tục. Loại hệ thống này được gọi là hệ thống sự kiện rời rạc. Chẩn đoán lỗi của các hệ thống sự kiện rời rạc đã được khởi tạo bởi [117] vào những năm 1990, và lý thuyết cơ bản về chẩn đoán lỗi cho các hệ thống sự kiện rời rạc đã được đề xuất. Bài toán chẩn đoán lỗi sự kiện cơ bản là thực hiện suy luận dựa trên mô hình trong thời gian chạy để xác định liệu một sự kiện lỗi không thể xảy ra đã xảy ra hay không trong quá khứ bằng cách sử dụng chuỗi các sự kiện quan sát được [118]. Theo mô hình được sử dụng, các phương pháp chẩn đoán lỗi cho hệ thống sự kiện rời rạc có thể được phân loại thành phương pháp lỗi dựa trên automata và phương pháp dựa trên mạng Petri. Để khắc phục sự phức tạp của nhiệm vụ, phương pháp chẩn đoán lỗi dựa trên automata đã phát triển thành phương pháp phi tập trung [119], phương pháp tượng trưng [120], và sự kết hợp của các phương pháp phi tập trung và biểu tượng [121].

Mặt khác, mạng Petri có bản chất phân bố nội tại, nơi mà các khái niệm về trạng thái và hành động là cục bộ, vốn là một tài sản để giảm độ phức tạp tính toán trong việc giải quyết các vấn đề chẩn đoán lỗi [122]. Tuy nhiên, kết quả cải tiến được phát triển để tránh sự phức tạp bằng cách áp dụng lập trình tuyến tính số nguyên cho lưới Petri [123] hoặc sử dụng lưới Petri được quan sát một phần [124]. Gần đây, các phương pháp tiếp cận dựa trên sự kiện được áp dụng cho các phân tách lỗi cho các quy trình động liên tục, trong đó có một chẩn đoán lỗi hệ thống rời rạc cấp cao được sử dụng để cải thiện độ mạnh của chẩn đoán lỗi đối với các rối loạn môi trường lớn [125] hoặc cô lập tham số đột ngột lỗi [126].

Một số hệ thống công nghiệp phức tạp được điều khiển bởi động lực liên tục dựa trên thời gian và động lực rời rạc theo sự kiện, được gọi là hệ thống lai, nổi lên từ các hệ thống cơ khí phức tạp, hệ thống sản xuất, quy trình hóa học phức tạp, hệ thống kỹ thuật hàng không và động cơ ô tô. kiểm

soát và hệ thống điều khiển nhúng. Giám sát và chẩn đoán lỗi cho các hệ thống lai đòi hỏi thách thức do thực tế là các biến động liên tục và các thay đổi sự kiện rời rạc phụ thuộc lẫn nhau và tương tác. Hybrid automata là các mô hình phổ biến nhất để đại diện cho các hệ thống lai, có thể được sử dụng để thiết kế các thuật toán chẩn đoán lỗi để phát hiện và cách ly các lỗi [127], [128]. Biểu đồ Bond đã trở thành một mô hình mạnh mẽ được sử dụng để chẩn đoán lỗi do khả năng mô hình hóa các hệ thống phức tạp một cách thống nhất và dễ dàng có được mối quan hệ dự phòng phân tích từ các nguyên nhân trên biểu đồ. Các kết quả gần đây về chẩn đoán lỗi Bond-graph-based và ứng dụng của chúng cho các hệ thống lai có thể được tìm thấy trong [129] - [132].

#### **2.1.2.4. Chẩn đoán lỗi cho các hệ thống phân phối và nối mạng**

Sự phát triển nhanh chóng trong công nghệ mạng đã kích thích sự kiểm soát và giám sát thời gian thực thông qua các kênh cộng tác, được gọi là kiểm soát và giám sát mạng, có những lợi thế có giá trị như hiệu quả chi phí, trọng lượng và yêu cầu năng lượng thấp hơn bảo trì và chia sẻ tài nguyên [133]. Cần lưu ý rằng việc giới thiệu các cáp mạng có dung lượng giới hạn hoặc các mạng không dây vào các vòng điều khiển và giám sát đã mang lại một số vấn đề không lường trước được như sự chậm trễ truyền thông ngẫu nhiên, bỏ dữ liệu và lập lịch nhầm lẫn. Chẩn đoán khó khăn hơn so với các hệ thống điều khiển điểm và điểm thông thường. Do đó, trong chẩn đoán lỗi dựa trên mạng, lỗi ước lượng dư hoặc lỗi phải mạnh mẽ không chỉ chống lại lỗi mô hình, nhiễu loạn quy trình và tiếng ồn đo lường mà còn chống lại sự chậm trễ truyền dẫn, dữ liệu bỏ học và đo lường đầy đủ. các kênh thông tin liên lạc [134]. Gần đây, một loạt các kỹ thuật chẩn đoán lỗi đã được phát triển cho các hệ thống mạng khác nhau.

Ví dụ, bộ lọc phát hiện lỗi đã được phát triển trong [135] cho các hệ thống bị chậm trễ truyền thông và dữ liệu bị thiếu, trong đó trạng thái mạng được giả định thay đổi theo kiểu thời trang Markovian. Trong [136], ít nhất

bộ lọc vuông và bộ lọc Kalman được tích hợp để phát hiện lỗi, cách ly và ước tính cho các hệ thống cảm biến mạng. Trong [137], một kỹ thuật chẩn đoán lỗi dựa trên mạng đã được giải quyết cho các hệ phi tuyến, được đánh giá bởi một hệ thống thử nghiệm thực nghiệm với việc sử dụng IEEE802.15.4 mạng cảm biến không dây. Ngoài ra, nó cũng liên quan để phát hiện sự bất thường của mạng truyền thông, điều này có thể ảnh hưởng đến hiệu suất của các hệ thống điều khiển mạng. Để giám sát chất lượng dịch vụ được bảo đảm của bộ định tuyến và toàn bộ cấu trúc liên kết, các kỹ thuật quan sát chế độ trượt được sử dụng trong [138] và [139] để phát hiện bất thường trong giao thức điều khiển truyền. Gần đây, các phương pháp phát hiện và giám sát dựa trên mô hình đã được giải quyết trong [140] và [141] để theo dõi các kết nối liên tục hoặc các nút bị lỗi cho các mạng vùng điều khiển.

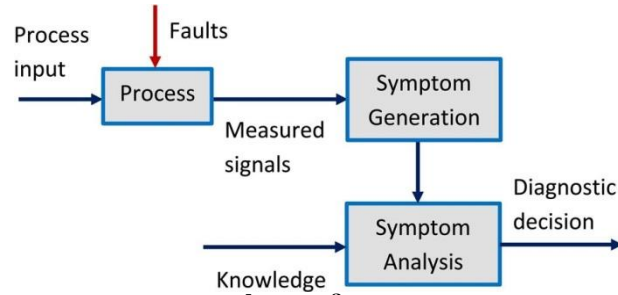
Các hệ thống công nghiệp phức tạp có thể được mô hình hóa như là một kết nối giữa các hệ thống con và mỗi hệ thống con có một điểm đánh dấu quyết định (agent thông minh), có thể truy cập vào các phép đo cục bộ, mô hình hệ thống con, bộ ước lượng cục bộ / bộ điều khiển và các kênh truyền thông hạn chế giữa tác nhân và các nước láng giềng [142]. Loại cấu trúc phân tán hoặc phân tán này đã trở thành dòng chính trong các quy trình phức tạp trong công nghiệp do ít sử dụng tài nguyên mạng, hiệu quả chi phí và thuận tiện cho việc mở rộng. Mặt khác, theo dõi thời gian thực và chẩn đoán lỗi cho các hệ thống phân tán là rất khó khăn do sự dư thừa thông tin bị hạn chế và khả năng giao tiếp hạn chế. Một ý tưởng chung về chẩn đoán lỗi phân phối là thiết kế các bộ lọc địa phương hoặc bộ lọc phát hiện lỗi của các tác nhân thông minh theo các nguồn cảm biến và tính toán cục bộ, và một chiến lược đồng thuận được sử dụng để đảm bảo toàn bộ hoạt động phát hiện hoặc ước tính của tất cả các tác nhân mạng. Các phát triển gần đây về phát hiện lỗi phân tán [143] và ước lượng lỗi phân phối [144] đã phát triển tương ứng bằng cách sử dụng các ngưỡng thích nghi và kỹ thuật chế độ

trượt để cải thiện độ mạnh mẽ chống lại tiếng ồn và lỗi mô hình hóa. Hơn nữa, các ứng dụng trên không quân không người lái [145] và mạng lưới điện[146] cũng được báo cáo.

### **2.1.3. CÁC PHƯƠNG PHÁP DỰ BÁO LỖI TRÊN TÍN HIỆU**

Các phương pháp dựa trên tín hiệu sử dụng các tín hiệu được đo thay vì các mô hình đầu vào-đầu ra rõ ràng để chẩn đoán lỗi. Các lỗi trong quá trình được phản ánh trong các tín hiệu đo được, có các tính năng được trích xuất và quyết định chẩn đoán sau đó được thực hiện dựa trên phân tích triệu chứng và kiến thức trước về các triệu chứng của hệ thống khỏe mạnh. Các phương pháp chẩn đoán lỗi dựa trên tín hiệu có ứng dụng rộng rãi trong việc theo dõi và chẩn đoán thời gian thực cho các động cơ cảm ứng, bộ chuyển đổi điện và các bộ phận cơ học trong một hệ thống. Sơ đồ chẩn đoán lỗi dựa trên tín hiệu được mô tả trong hình .

Tín hiệu tính năng được trích xuất để phân tích triệu chứng (hoặc mẫu) có thể là miền thời gian (ví dụ: trung bình, xu hướng, độ lệch chuẩn, pha, độ dốc và độ lớn như hình vuông trung bình và góc) hoặc miền tần số (ví dụ: phổ) . Vì thế, các phương pháp chẩn đoán lỗi dựa trên tín hiệu có thể được phân loại thành phương pháp dựa trên tín hiệu miền thời gian, phương pháp dựa trên tín hiệu miền tần số và phương pháp dựa trên tín hiệu tần số theo thời gian.



**. Hình2.1. Sơ đồ chuẩn đoán lỗi dựa trên tín hiệu**

### **2.1.3.1. Phương pháp dựa trên tín hiệu miền-thời gian**

Đối với một quá trình động liên tục được theo dõi, nó là tự nhiên để trích xuất các tính năng miền thời gian để chẩn đoán lỗi. Ví dụ, trong [147], bằng cách phân tích các thay đổi của các đặc tính dòng trung bình gốc có nghĩa giữa các trạng thái khỏe mạnh và các tình huống dưới mạch ngắn hoặc mạch hở đơn / kép, một phương pháp chẩn đoán lỗi được phát triển cho chuyển đổi năng lượng của động cơ miễn cưỡng chuyển đổi. Trong [148], giá trị tuyệt đối của đạo hàm góc pha vectơ của Công viên được sử dụng như một chỉ báo lỗi, được sử dụng để chẩn đoán nhiều lỗi mạch hở trong hai bộ biến tần của ổ đĩa đồng bộ nam châm vĩnh cửu cho các ứng dụng tuabin gió. Bằng cách quan sát độ dốc của dòng cảm ứng theo thời gian, một phương pháp chẩn đoán lỗi đã được giải quyết trong [149] để chẩn đoán lỗi chuyển mạch ngắn và mở trong các bộ chuyển đổi DC-DC không được phép, và mục tiêu kỹ thuật số mảng công có thể lập trình được sau đó được sử dụng để thực hiện thử nghiệm trong thời gian thực. Trong [150], bằng cách sử dụng dòng pha động cơ đo và tín hiệu tham chiếu tương ứng của chúng, một thuật toán thời gian thực được phát triển để phát hiện và định vị nhiều lỗi ngắt mạch chuyển đổi công suất trong các ổ đĩa động cơ xoay ngược. Trong [151], nó được chỉ ra rằng, dưới điện áp cung cấp cân bằng, góc pha và cường độ của các dòng âm và không thứ tự có thể được coi là các chỉ số đáng tin cậy của lỗi stator trong động cơ cảm ứng. Trong [152], một phương pháp thống kê cho việc

phát hiện các lỗi đột biến cảm biến trong các hệ thống máy bay đã được trình bày, trong đó hiệp phương sai của các tín hiệu cảm biến được sử dụng để trích xuất tính năng. Gần đây, một thuật toán chẩn đoán dựa trên tín hiệu miền thời gian đã được phát triển trong [153] để theo dõi lỗi bánh răng, bằng cách kết hợp các kỹ thuật cong vênh thời gian động nhanh (nhánh DTW) và kỹ thuật kurtosis (CK) tương ứng. Thuật toán DTW nhanh được sử dụng để trích xuất các kích thích xung định kỳ gây ra từ răng bánh răng bị lỗi, và tín hiệu được trích xuất sau đó được lấy lại để phân tích chẩn đoán tiếp theo bằng kỹ thuật CK. Lợi dụng tính chu kỳ của lỗi định hướng, thuật toán CK có thể xác định vị trí của lỗi bánh răng cục bộ trong hộp số.

Khác với các phương pháp phát hiện lỗi và chẩn đoán bằng các tính năng của tín hiệu đo được trong miền một chiều, phương pháp dựa trên tín hiệu hai chiều được đề xuất trong [154], nơi tín hiệu rung được dịch thành hình ảnh(hai chiều), và các tính năng cục bộ sau đó được trích xuất từ hình ảnh bằng cách sử dụng biến đổi tính năng biến đổi thang đo (SIFT) để phát hiện lỗi và cách ly theo khuôn khổ phân loại mẫu. Gần đây, một phương pháp hai chiều đã được báo cáo trong [155] để chẩn đoán lỗi của động cơ cảm ứng, nơi tín hiệu rung miền thời gian thu được từ động cơ vận hành lần đầu tiên được chuyển đổi thành hình ảnh hai chiều màu xám, và các tính năng kết cấu phân biệt đối xử sau đó được trích xuất từ những hình ảnh này bằng cách sử dụng kỹ thuật mô hình nhị phân cục bộ (LBP).

Các tính năng kết cấu được trích xuất cuối cùng đã được sử dụng để chẩn đoán lỗi với sự trợ giúp của một trình phân loại. Cần lưu ý rằng, khi chuyển đổi tín hiệu thành hình ảnh, nhiễu được thêm vào sẽ hoạt động như biến thể chiếu sáng. Vì cả kỹ thuật SIFT và toán tử LBP đều có khả năng chiếu xạ bất thường ở một mức độ nào đó, nên các phương pháp chẩn đoán lỗi được đề xuất trong [154] và [155] có độ chắc chắn ngay cả ở mức độ cao của tiếng ồn nền.

### **2.1.3.2. Phương pháp dựa trên tín hiệu miền tần số**

Phương pháp dựa trên tín hiệu miền tần số là để phát hiện các thay đổi hoặc lỗi bằng cách sử dụng công cụ phân tích phổ như chuyển đổi Fourier rời rạc. Một trong những phương pháp miền tần số mạnh nhất để chẩn đoán lỗi động cơ là phân tích chữ ký dòng động cơ (MCSA), sử dụng phân tích quang phổ của dòng stato để cảm nhận các lỗi rôto liên kết với các thanh rôto bị hỏng và cân bằng cơ học. Không cần truy cập vào động cơ, phương pháp MCSA đã nhận được nhiều sự chú ý, được xem xét kỹ lưỡng ở [19] và [20]. Phát triển gần đây về phân tích chữ ký phổ hiện tại để chẩn đoán lỗi có thể được tìm thấy trong [156] và [157]. Phân tích tín hiệu rung là một phương pháp phổ biến để theo dõi tình trạng và chẩn đoán các thiết bị cơ khí như hộp số, vì âm thanh máy cho biết rất nhiều về điều kiện làm việc của máy. Trong [158], một phương pháp phát hiện lỗi âm thanh đã được giải quyết cho hộp số trên cơ sở dòng cải thiện tần số mù miền cải tiến. Gần đây, trong [159], phổ Fourier và phổ giải điều chế biên độ biên độ đã được sử dụng để phát hiện và xác định nhiều lỗi bánh răng trong hộp số hành tinh.

### **2.1.3.3. Phương pháp dựa trên tín hiệu theo thời gian-tần số**

Đối với các máy trong điều kiện không tải, hoặc điện áp cung cấp không cân bằng, tải thay đổi hoặc dao động mômen tải, tín hiệu đo được thường thoáng qua và động trong phần thời gian liên quan. Do đó, phân tích số lượng cố định trong một số trường hợp cho thấy khó theo dõi hoặc phát hiện lỗi thông qua một miền thời gian thuần túy hoặc phương pháp miền tần số. Do phổ tần số thay đổi theo thời gian của tín hiệu thoáng qua, cần có các công cụ phân tích tần số thời gian thích hợp để theo dõi thời gian thực và chẩn đoán lỗi.

Phân tích tần số thời gian có thể xác định các thành phần tần số tín hiệu và tiết lộ các tính năng biến thể thời gian của chúng, đó là một công cụ



hiệu quả để theo dõi và chẩn đoán lỗi bằng cách trích xuất thông tin tính năng chứa trong tín hiệu không cố định [25].

Các phương pháp phân tích tần suất thời gian khác nhau đã được đưa ra và áp dụng cho chẩn đoán lỗi máy móc. Trong số các phương pháp tần số thời gian, biến đổi Fourier trong thời gian ngắn (STFT), biến đổi wavelet (WT), chuyển đổi Hilbert – Huang (HHT) và Wigner – Ville (WVD) là các phương pháp được sử dụng phổ biến nhất. Ví dụ, phương pháp STFT cho phép loại bỏ nội dung tần số tín hiệu của các phần cục bộ khi tín hiệu thay đổi theo thời gian, được áp dụng rộng rãi để phát hiện lỗi stator và rotor trong động cơ cuộn cảm [160]. Tuy nhiên, phương pháp STFT bị chi phí tính toán cao nếu nó được yêu cầu để có được độ phân giải tốt

## **2.2. TỔNG QUAN CHẨN ĐOÁN LỖI VÀ KỸ THUẬT THỬ LỖI: PHƯƠNG PHÁP DỰ BÁO LỖI VỚI MIỀN THỬ DỰA TRÊN ĐẶC TÍNH LAI / TÍCH CỰC. (320)**

### **2.2.1: GIỚI THIỆU**

Kỹ thuật chẩn đoán F AULT bao gồm chẩn đoán lỗi dựa trên phần cứng dự phòng và chẩn đoán lỗi dựa trên phân tích dự phòng. Kỹ thuật dự phòng phân tích đã trở thành dòng chính của nghiên cứu chẩn đoán lỗi từ những năm 1980, có thể được phân loại thành các lớp chẩn đoán lỗi dựa trên mô hình, chẩn đoán lỗi dựa trên tín hiệu, chẩn đoán lỗi dựa trên tri thức, chẩn đoán lỗi lai và hoạt động chẩn đoán lỗi. Đối với các phương pháp chẩn đoán lỗi dựa trên mô hình, một mô hình hệ thống, trong đó mô tả rõ ràng mối quan hệ giữa các biến hệ thống, có sẵn cho nhà thiết kế. Dựa trên mô hình, các lược đồ / thuật toán chẩn đoán lỗi có thể được thiết kế và sau đó được thực hiện trực tuyến để theo dõi và chẩn đoán hệ thống / quy trình thời gian thực. Đối với phương pháp chẩn đoán lỗi dựa trên tín hiệu, tín hiệu mô hình / triệu chứng của hệ thống dưới trạng thái khỏe mạnh là ưu tiên và chẩn đoán lỗi được thực hiện bằng cách kiểm tra tính nhất quán giữa mẫu tín hiệu lành mạnh đã biết và dấu hiệu tín hiệu của quy trình thời gian thực được

trích xuất bằng cách sử dụng miền thời gian, tần suất kỹ thuật xử lý tín hiệu tần số-miền hoặc thời gian.

Đối với các quy trình công nghiệp phức tạp, có một lượng lớn dữ liệu lịch sử, chứ không phải là mô hình hoặc mẫu tín hiệu, có sẵn. Kiến thức cơ bản, ngầm đại diện cho sự phụ thuộc của các biến hệ thống, có thể được trích xuất bằng cách sử dụng các kỹ thuật thông minh nhân tạo khác nhau và dữ liệu lịch sử có sẵn. Chẩn đoán lỗi được thực hiện bằng cách kiểm tra sự nhất quán của kiến thức đã thu được và tính năng hệ thống thời gian thực được trích xuất từ dữ liệu được giám sát trực tuyến. Chẩn đoán lỗi lai là sự tích hợp hoặc kết hợp của nhiều phương pháp chẩn đoán. Chẩn đoán lỗi hoạt động là tăng cường khả năng phát hiện các lỗi tiềm năng bằng cách tiêm tín hiệu đầu vào được thiết kế phù hợp trong khoảng thời gian thử để chế độ lỗi có thể được phân biệt với các chế độ bình thường một cách nhanh chóng và chính xác. Trong bài báo khảo sát phần 1 [1], các phương pháp chẩn đoán dựa trên mô hình và dựa trên tín hiệu đã được xem xét. Trong bài đánh giá phần hai, chẩn đoán lỗi dựa trên tri thức, chẩn đoán lỗi lai, và chẩn đoán lỗi hoạt động sẽ được xem xét một cách toàn diện. Những lợi thế đặc biệt và những hạn chế khác nhau của các phương pháp diagnosis này sẽ được thảo luận. Hơn nữa, việc bỏ qua sự phát triển tương lai của chẩn đoán lỗi sẽ được trình bày.

### **2.2.2. CÁC PHƯƠNG PHÁP DỰ BÁO LỖI DỰA TRÊN HỆ CHUYÊN GIA**

Khác với phương pháp dựa trên mô hình và dựa trên tín hiệu yêu cầu mô hình hoặc mẫu tín hiệu được biết trước, phương pháp chẩn đoán lỗi dựa trên tri thức bắt đầu từ nơi chỉ có một lượng lớn dữ liệu lịch sử có sẵn. Áp dụng một loạt các kỹ thuật thông minh nhân tạo (trí tuệ biểu tượng hoặc trí thông

minh tính toán) vào dữ liệu lịch sử có sẵn của các quy trình công nghiệp, kiến thức cơ bản, ngầm đại diện cho sự phụ thuộc của hệ thống biến, có thể được trích xuất. Sự nhất quán giữa hành vi bị phản đối của hệ điều hành và cơ sở tri thức sau đó được kiểm tra, dẫn đến một quyết định chẩn đoán lỗi với sự trợ giúp của một trình phân loại.

Cần phải chỉ ra rằng các phương pháp chẩn đoán dựa trên mô hình, phương pháp chẩn đoán dựa trên tín hiệu, và thuật toán chẩn đoán dựa trên tri thức đều phải sử dụng dữ liệu thời gian thực khi thực hiện theo dõi thời gian thực và chẩn đoán lỗi trực tuyến; tuy nhiên, chỉ những chẩn đoán dựa trên tri thức mới cần sử dụng một lượng lớn dữ liệu lịch sử có sẵn. Từ quan điểm này, chẩn đoán lỗi dựa trên tri thức cũng được gọi là chẩn đoán lỗi theo hướng dữ liệu. Sơ đồ chẩn đoán lỗi dựa trên tri thức được mô tả trong hình 2.1 . Quá trình khai thác của cơ sở tri thức có thể là định tính hoặc định lượng trong tự nhiên. Do đó, các phương pháp chẩn đoán lỗi dựa trên tri thức có thể được phân loại thành các phương pháp định tính và các phương pháp định lượng.

#### **2.2.2.1. Chẩn đoán lỗi hệ chuyên gia**

Một trong những phương pháp chẩn đoán lỗi định tính nhất được biết đến là phương pháp dựa trên hệ thống chuyên gia. Hệ thống chuyên gia nổi lên vào cuối những năm 1960 như một nhánh của trí thông minh nhân tạo, là một hệ thống dựa trên quy tắc bằng cách trình bày chuyên môn của con người trong một bộ quy tắc [162], [163]. Chẩn đoán lỗi dựa trên hệ thống chuyên gia đã được khởi tạo vào những năm 1980 [164], [165], được thực hiện dựa trên đánh giá dữ liệu được giám sát trực tuyến theo một bộ quy tắc, được các chuyên gia của con người học hỏi từ quá khứ. Do những ưu điểm như dễ phát triển, lý luận minh bạch, khả năng lý giải không chắc chắn và khả năng giải thích các giải pháp được cung cấp, các phương pháp chẩn đoán lỗi dựa trên hệ thống chuyên gia đã nhận được nhiều sự chú ý, đặc biệt trong những năm 1980 và 1990, đã được áp dụng thành công cho một loạt các hệ thống

kỹ thuật như buồng đốt tuabin khí [166], hệ thống năng lượng [167], quy trình hóa học [168], phương tiện [169], vv. phương pháp chẩn đoán lỗi là hệ thống cụ thể, có tính tổng quát thấp và khả năng mở rộng thấp. Được thúc đẩy bởi điều này, một hệ thống chuyên gia chẩn đoán dựa trên nhiệm vụ đã được đề xuất trong thời gian gần đây, nơi các phương thức biểu diễn hướng đối tượng được sử dụng để các quy tắc của một máy cụ thể có thể được tùy biến linh hoạt trên cơ sở các quy tắc chung. Trong [171], một hệ thống chuyên gia chẩn đoán lỗi phổ quát không khổ đã được trình bày, nơi mà các mô hình hướng đối tượng và hệ thống chuyên gia dựa trên quy tắc được tích hợp, cung cấp một môi trường linh hoạt và mạnh mẽ cho quá trình chẩn đoán lỗi.

Trong nhiều quy trình công nghiệp thực tế, quá trình trực trực để lại một xu hướng riêng biệt trong các cảm biến được theo dõi, có thể được sử dụng phù hợp để xác định những bất thường cơ bản trong quá trình. Do đó, nó được thúc đẩy để phân loại và phân tích các xu hướng của quá trình. Phân tích xu hướng định tính (QTA) là một kỹ thuật hướng dữ liệu để xác định xu hướng của quá trình từ dữ liệu quá trình ồn ào và liên kết các xu hướng được trích xuất với các xu hướng lỗi trong cơ sở dữ liệu, được xem xét toàn diện trong [172]. Kỹ thuật QTA đã được áp dụng rộng rãi để chẩn đoán lỗi trong các quy trình công nghiệp phức tạp, đặc biệt là cho các quy trình hóa học. Những phát triển gần đây của QTA đã được tích hợp với các công cụ định tính khác như đồ thị có chữ ký (SDGs) nhằm tăng cường lợi thế của chúng trong khi bù đắp cho bất lợi của chúng. Ví dụ, một khung SDG và QTA tích hợp đã được đề xuất trong [173] để chẩn đoán lỗi khẩn cấp bằng cách kết hợp tính chất hoàn chỉnh của SDG và thuộc tính phân giải chuẩn đoán cao của QTA. Trong một phương pháp chẩn đoán lỗi SDG – QTA đã được giải quyết cho một đơn vị chung cất điện, không chỉ đáp ứng các yêu cầu cơ bản về chẩn đoán, như tính chính xác, đầy đủ, và thời gian thực mà còn cung cấp độ phân giải tốt.

### **2.2.2.2. Chẩn đoán lỗi dựa trên đại lượng hệ chuyên gia**

Một phương pháp dựa trên tri thức định lượng là xây dựng cơ bản giải quyết vấn đề chẩn đoán như là một vấn đề mô hình lặp lại. Thông tin định lượng (hoặc các tính năng) có thể được trích xuất bằng cách sử dụng các phương pháp thống kê hoặc phi chính thống. Do đó, chẩn đoán lỗi dựa trên tri thức định lượng có thể được phân loại thành chẩn đoán lỗi dựa trên phân tích thống kê và chẩn đoán lỗi dựa trên phân tích phi hậu mã.

dựa trên thống kê phân tích phương pháp

#### **2.2.2.2.1. Phương pháp hệ thống dựa trên hệ thống dự báo lỗi**

Theo phương pháp thống kê, phương pháp chẩn đoán lỗi dựa trên tri thức chủ yếu bao gồm phân tích thành phần chính (PCA), phân nhỏ nhất (PLS), phân tích thành phần độc lập (ICA), các bộ phân loại thống kê thống kê và máy vectơ hỗ trợ phát triển gần đây nhất (SVM). Rõ ràng là các phương pháp nói trên đòi hỏi một lượng lớn dữ liệu đào tạo để nắm bắt các đặc điểm chính của quá trình bằng cách sử dụng phân tích thống kê. PCA là công nghệ giám sát dựa trên thống kê phổ biến nhất, được sử dụng để tìm các yếu tố có kích thước thấp hơn nhiều so với tập dữ liệu ban đầu để các xu hướng chính trong tập dữ liệu gốc có thể được mô tả chính xác. Các phương pháp chẩn đoán lỗi dựa trên PCA đã được nghiên cứu sâu và có các ứng dụng thành công trong các hệ thống công nghiệp phức tạp. Ví dụ, một phân mở rộng phi tuyến của PCA được phát triển trong [175] để chẩn đoán động cơ diesel. Đối với quy trình công nghiệp thay đổi theo thời gian (ví dụ, hệ thống lò phản ứng bể khuấy liên tục không nhiệt), một phương pháp chẩn đoán lỗi PCA đệ quy đã được trình bày trong [176]. Do khả năng từ chối tín hiệu gốc và cải thiện tỷ số tín hiệu thành nhiễu, các kỹ thuật chẩn đoán lỗi dựa trên xác suất PCA được sử dụng để theo dõi vòng bi lăn với lỗi bên ngoài [177]. Bằng cách tích hợp các chỉ mục y, các lỗi còn lại, và các chỉ số nhận dạng cảm biến bị lỗi với PCA, hai phương pháp chẩn đoán lỗi hiệu

quả tính toán dễ thực hiện và tính toán đã được giải quyết cho các động cơ tuabin khí [178].

PLS là một trong những công cụ định hướng dữ liệu cho các quy trình công nghiệp phức tạp. Việc phát triển gần đây việc giám sát dựa trên PLS và chẩn đoán lỗi có thể được tìm thấy trong [179] - [180]. Cụ thể, trong [179], một đề án chỉ báo hiệu suất và chẩn đoán chỉ báo hiệu suất chính đã được đề xuất cho cả các quy trình tĩnh và động, cung cấp giải pháp thay thế cho phương pháp PLS với các quy trình tính toán đơn giản. Bằng cách kết hợp các kỹ thuật phân tích phân biệt PLS dựa trên hạt nhân và chiếu pseudosample, phương pháp chẩn đoán lỗi được trình bày trong [180], cung cấp phân biệt lỗi hiệu quả và cho phép xác định chính xác các biến phân biệt trong các quy trình phi tuyến phức tạp. Cấu trúc được cải thiện, tức là tổng số phép chiếu cho các cấu trúc tiềm ẩn (T-PLS), được giải quyết trong [181] trên cơ sở phân hủy thêm cho cấu trúc PLS thu được. Phương pháp dựa trên T-PLS được đề xuất cũng có thể phát hiện các lỗi liên quan đến chất lượng trong các quy trình công nghiệp có nhiều nguyên liệu và điều kiện kiểm soát thay đổi.

ICA đóng một vai trò quan trọng trong việc theo dõi và chẩn đoán thời gian thực cho các quy trình công nghiệp thực tế vì nó cho phép các biến tiềm ẩn không tuân theo sự phân bố Gaussian. Gần đây, một phương pháp cách ly lỗi dựa trên hạt nhân-ICA đã được đề xuất trong [182] đối với các quy trình phi tuyến Gaussian. Trong [183], phát hiện lỗi đã được nghiên cứu cho các mô-đun năng lượng mặt trời bằng cách sử dụng phát hiện hình ảnh cơ sở ICA. Trong [184], một kỹ thuật chẩn đoán lỗi dựa trên ICA được áp dụng cho việc theo dõi và chẩn đoán vòng bi lăn.

Trên thực tế, các công cụ thống kê theo hướng dữ liệu như PCA, PLS và ICA đã được sử dụng rộng rãi trong việc khai thác tính năng cho dữ liệu biểu hiện gen microarray, giúp dễ dàng hiểu biết về các quá trình sinh học [185]. Mặt khác, một microarray cho phép biểu hiện hàng chục nghìn

gen được biểu diễn trên một mảng nhỏ các chấm ảnh màu, có thể được sử dụng để chẩn đoán lỗi nhanh chóng cho các quy trình công nghiệp. Được thúc đẩy bởi việc hiển thị trực quan vi mô và sử dụng phân tích thống kê đơn giản các giá trị đo được của các cảm biến khác nhau và tóm tắt đồ thị của các kết quả phân tích như vậy, chẩn đoán nhanh các biến / bước chính gây ra lỗi trong chất lượng cuối cùng đã đạt được trong [186] ].

VM là một kỹ thuật học máy tương đối mới dựa trên lý thuyết học thống kê, có khả năng đạt được sự khái quát hóa cao và giải quyết các vấn đề với các mẫu thấp và các tính năng đầu vào cao. SVM được coi là một kỹ thuật tiềm năng để phân loại tất cả các loại tập dữ liệu. Những nỗ lực ban đầu của việc áp dụng SVM để theo dõi tình trạng và chẩn đoán lỗi bắt đầu vào cuối những năm 1990 [187], [188]. Các phương pháp chẩn đoán điều kiện máy và dựa trên SVM từ năm 2006 đã được ghi nhận và xem xét kỹ lưỡng trong [189]. Các kết quả gần đây của chẩn đoán lỗi dựa trên SVM có thể được tìm thấy trong [190] - [193]. Cụ thể, bằng cách tích hợp chức năng hạt nhân và xác thực chéo, phương pháp chẩn đoán lỗi dựa trên SVM được đề xuất trong quy trình Tennessee Eastman, cho thấy khả năng phát hiện lỗi vượt trội so với thuật toán PLS thông thường. Với sự trợ giúp của một di truyền thuật toán điều chỉnh tham số, phương pháp chẩn đoán lỗi dựa trên SVM được trình bày trong [191], cho thấy cải thiện hiệu suất chẩn đoán. Sử dụng thuật toán k-lân cận gần nhất (kNN) để ước tính giá trị hợp lý để thay thế các giá trị còn thiếu trong tập dữ liệu trước khi học SVM, một kỹ thuật chẩn đoán lỗi dựa trên SVM hiệu quả đã được giải quyết trong [192] cho máy biến áp. Trong [33], một phương pháp chẩn đoán lỗi chức năng dựa trên SVM thông minh khai thác nhiều chức năng hạt nhân và sử dụng học tập tăng dần đã được đề xuất. Bằng cách tận dụng sự kết hợp tuyến tính của các hạt nhân đơn, phương pháp SVM đa nhân có thể đạt được phân loại thành phần lỗi chính xác trên cơ sở các lỗi được quan sát, trong khi đó việc

học tăng dần có thể cho phép hệ thống chẩn đoán nhanh chóng thích nghi với một lỗi quan sát mới.

#### **2.2.2.2.2. Phân tích không thống kê dựa trên hệ thống dự báo lỗi**

Dựa trên khả năng mạnh mẽ của nó trong sự chuẩn đoán phi tuyến và học tập thích ứng, mạng trung lập (NN) là công cụ chẩn đoán lỗi dựa trên dữ liệu không dựa trên nền tảng phi chính thống nhất. Về mặt cấu trúc liên kết, NN có thể được phân loại thành các mạng cơ sở xuyên tâm, các mạng động lặp lại, các bản đồ tự tổ chức, các mạng backpropagation và các mạng mở rộng. Theo chiến lược học tập, chẩn đoán lỗi dựa trên NN có thể được phân loại thành chẩn đoán lỗi dựa trên giám sát học tập và chẩn đoán lỗi dựa trên học tập không giám sát. Bằng cách sử dụng học tập không giám sát, cơ sở tri thức có thể được trích xuất từ dữ liệu lịch sử để mô phỏng hành vi hệ thống bình thường, được sử dụng để kiểm tra xem hành vi của quá trình thời gian thực có lệch khỏi hành vi hệ thống bình thường hay không. Bằng cách sử dụng học được giám sát, các cơ sở tri thức cho các hệ thống bình thường và các điều kiện bị lỗi đều được trích xuất, sau đó được sử dụng để theo dõi thời gian thực. Những phát triển gần đây của NN có thể được tìm thấy trong nhiều ứng dụng thời gian thực, ví dụ như động cơ đốt, máy phát tuabin hơi [195], quá trình hạt nhân [196], máy cảm ứng [197], [198] và chất lượng mạng lưới điện [199].

Logic mờ (FL) là một cách tiếp cận phân vùng không gian đặc trưng thành các tập mờ và sử dụng các quy tắc mờ cho lý luận, về cơ bản cung cấp lý luận gần đúng của con người. FL đã được sử dụng thành công để chẩn đoán lỗi. Để thực hiện, trong [200], FL được sử dụng để biểu diễn một cơ sở kiến thức mờ được trích xuất từ phân tích hiện tại và được áp dụng để phát hiện sự không hài lòng trong các công tắc trong một ổ đĩa cảm ứng biến tần xung PWM (PWM) . Những phát triển gần đây đã thể hiện sự quan tâm đến việc kết hợp FL với các kỹ thuật dựa trên tri thức khác như hệ thống chuyên gia hoặc NN để giải quyết vấn đề chẩn đoán hướng kỹ thuật hoặc đạt được



hiệu suất chẩn đoán tốt hơn. Ví dụ, trong [168], bằng cách tích hợp FL và một hệ thống chuyên gia, một chẩn đoán lỗi thời gian thực được phát triển và thử nghiệm trong một tình huống thực tế bằng cách sử dụng Công cụ sàng lọc hệ thống phản ứng nâng cao. Trong [201], một kiến trúc mới về động cơ phản ứng dữ liệu mờ ảo được tạo ra, gồm ba lớp để theo dõi và chẩn đoán.

Lớp đầu tiên sử dụng các ngưỡng đã biết của các điều kiện hoạt động bình thường để theo dõi các bất thường của quá trình. Lớp thứ hai bao gồm hệ thống FL tự tổ chức được đào tạo ngoại tuyến bằng cách sử dụng các mẫu hành vi bình thường được quan sát trước đây. Một công cụ xử lý trực tuyến được sử dụng để kiểm tra sự giống nhau giữa hành vi hệ thống hiện tại và mô hình hành vi bình thường bằng cách diễn giải từng quy tắc mờ của hệ thống FL. Lớp thứ ba sử dụng một dự báo NN để xử lý dữ liệu lịch sử tạm thời để dự đoán các mẫu hành vi gần như dự đoán, trong đó các giá trị dự đoán được sử dụng để thay thế các dữ liệu còn thiếu này để duy trì nhận thức trạng thái mạch lạc của hệ thống theo dõi.

#### **2.2.2.2.3. Hợp nhất dữ liệu dự báo lỗi**

Trong một số ứng dụng thực tế, các phương pháp chẩn đoán lỗi dữ liệu thống kê và phi tuyến tính thường được sử dụng cùng nhau. Ví dụ, trong mạng, một mạng Bayesian và một NN lặp lại được tích hợp để chẩn đoán và cô lập lỗi trong động cơ cảm ứng, nơi mà NN được sử dụng để đào tạo dữ liệu từ hệ thống trong điều kiện hoạt động bình thường và các điều kiện bị lỗi. Mạng Bayesian được sử dụng để tạo ra số dư ngẫu nhiên. Trong [203], một thuật toán kết hợp của PCA động và một lan truyền nguồn cấp dữ liệu NN được áp dụng để phát hiện lỗi cách ly stator, thanh rôto bị hỏng và lỗi mang. PCA được sử dụng để trích xuất các tính năng đặc biệt được gọi là số dư, sau đó được gửi đến NN để đào tạo để tạo ra tín hiệu để xác định các lỗi tiềm ẩn. Thuật toán là thời gian thực được thực hiện bằng cách sử dụng Matlab, C ++ và bảng thu thập dữ liệu National Instruments (DAQ). Trong

[204], dựa trên SVM mờ và bản đồ tự tổ chức NN, một phương pháp chẩn đoán lỗi đã được trình bày để theo dõi và chẩn đoán các hệ thống máy móc luân phiên, cho thấy độ chính xác phân loại thỏa đáng cho các hệ thống có nhiều hệ thống.

Một phương pháp được giám sát và một phương pháp không giám sát là hai cách thức đào tạo và tìm kiếm chính trong định hướng lỗi dữ liệu.

Đối với cách tiếp cận không giám sát, dữ liệu được ghi lại từ hoạt động bình thường của hệ thống thực tế được huấn luyện để tạo thành một cơ sở tri thức, sau đó được sử dụng để theo dõi các sai lệch so với một quy trình thời gian thực. Trong phương pháp được giám sát, một trình phân loại được đào tạo về dữ liệu lịch sử được chú thích được ghi lại từ cả hai điều kiện bình thường và bị lỗi, sau đó được sử dụng để dự đoán lỗi. Các phương pháp được giám sát và không giám sát có những ưu điểm và nhược điểm riêng. Để nâng cao lợi thế của họ, một ý tưởng tự nhiên là kết hợp phương pháp được giám sát và phương pháp không giám sát để phát hiện lỗi. Gần đây, một khuôn khổ phát hiện lỗi bắt đầu lạnh được đề xuất trong [205], nơi chỉ có dữ liệu hoạt động bình thường có sẵn ngay từ đầu và dữ liệu hoạt động bị lỗi có sẵn khi các lỗi xảy ra.

Phương pháp được đề xuất đưa ra quyết định tích hợp từ khóa đào tạo không giám sát ban đầu và đào tạo giám sát được cập nhật từng bước, dẫn đến cải thiện tổng thể về tính chính xác của phát hiện lỗi. mối quan hệ đầu vào-đầu ra; hiệu suất chẩn đoán dựa trên độ chính xác của mô hình.

## **2.2.3. PHƯƠNG PHÁP DỰ BÁO LỖI LAI VÀ TÍCH CỰC**

### **2.2.3.1. Phương pháp chẩn đoán lỗi tích cực**

Nó là xứng đáng để chỉ ra rằng các phương pháp di truyền lỗi nói trên không xâm lấn; nói cách khác, việc thực hiện giám sát và chẩn đoán không làm ảnh hưởng đến hiệu suất thời gian thực của các quá trình công nghiệp. Mặt khác, để tăng cường khả năng phát hiện các lỗi tiềm ẩn trong

một số hệ thống thực tế, tín hiệu đầu vào được thiết kế phù hợp sẽ được phép đưa vào các quy trình động trong khoảng thời gian thử nghiệm để chế độ lỗi có thể được phân biệt với các chế độ bình thường một cách nhanh chóng và chính xác .

Loại chẩn đoán lỗi này được gọi là chẩn đoán lỗi hoạt động, trong đó các tác động bất lợi của tín hiệu đầu vào phụ được bổ sung vào hiệu năng hệ thống thời gian thực phải được giảm thiểu. Những nỗ lực ban đầu để xây dựng và giải quyết phát hiện lỗi hoạt động dựa trên ý tưởng tạo ra một tín hiệu kích thích ảnh hưởng đến số liệu thống kê của phép thử tỷ lệ xác suất tuần tự [211], [212], được gọi là phương pháp chẩn đoán lỗi hoạt động ngẫu nhiên. Song song, phát hiện lỗi hoạt động xác định được khởi tạo trong [213] trong một khuôn khổ đa mô hình, trong đó hai mô hình ứng cử viên không chắc chắn được sử dụng để đại diện cho hệ thống danh nghĩa và lỗi, và một tín hiệu phụ trợ với năng lượng tối thiểu được thiết kế để xác định mô hình chính xác trong một giai đoạn thử nghiệm nhất định.

Một công việc mở rộng có thể được tìm thấy trong [214], cho phép phát hiện lỗi hoạt động cho nhiều lỗi xảy ra tuần tự hoặc đồng thời. Gần đây, một phương pháp chẩn đoán lỗi ngẫu nhiên xác định ngẫu nhiên lai đã được đề xuất trong [215], điều này cung cấp bảo đảm trường hợp xấu nhất trong chẩn đoán lỗi trong một khoảng thời gian trong khi tối đa hóa khả năng chẩn đoán lỗi tại một thời điểm trước đó. Phương pháp lai được trình bày đã giảm thời gian trung bình cần thiết cho chẩn đoán và tính bảo thủ của tín hiệu kích thích. Những phát triển gần đây đã chú ý đến chẩn đoán lỗi hoạt động theo một khung điều khiển vòng kín [216], [217]. Cụ thể, một công thức thống nhất của phát hiện lỗi hoạt động và một vấn đề kiểm soát đã được giải quyết trong [216] theo khuôn khổ ngẫu nhiên. Ba trường hợp đặc biệt của chẩn đoán lỗi hoạt động đã được nghiên cứu, bao gồm máy dò hoạt động và máy phát hiện, máy dò hoạt động và bộ tạo tín hiệu đầu vào, và máy dò hoạt động với bộ tạo tín hiệu đầu vào cho trước.

Trường hợp đầu tiên là tìm kiếm sự thỏa hiệp mong muốn giữa điều khiển tối ưu và phát hiện lỗi tối ưu. Trường hợp thứ hai là tạo ra một tín hiệu đầu vào tối ưu để cải thiện khả năng phát hiện lỗi. Trường hợp cuối cùng là thiết kế một máy dò tối ưu mà các quyết định có thể kích thích hệ thống giám sát thông qua bộ tạo tín hiệu đầu vào đã cho. Ba trường hợp nói trên được xây dựng như các vấn đề kiểm soát tối ưu ngẫu nhiên, cải thiện chất lượng phát hiện lỗi và cung cấp hiểu biết tốt hơn về cách thông tin vòng kín ảnh hưởng đến chất lượng phát hiện lỗi. Trong [217], một tín hiệu ngoại sinh tối ưu được thiết kế theo khung hệ thống xác định vòng khép kín, cho thấy phản hồi phù hợp có thể làm giảm chức năng chi phí so với giám sát vòng hở và phát hiện lỗi, cho thấy phát hiện lỗi tốt hơn bằng cách giới thiệu vòng kín thông tin.

Có thể tìm thấy các ứng dụng gần đây của các phương pháp chẩn đoán lỗi hoạt động trong [218] - [220]. Cụ thể, trong [218], một phương pháp hoạt động được đề xuất cho chẩn đoán lỗi của tụ điện liên kết dc trong bộ chuyển đổi PWM ba pha, nơi một thành phần ac được điều khiển được bơm vào phía đầu vào của bộ chuyển đổi ac – dc, và các gợn sóng ac kết quả trên đầu ra dc sau đó được chiết xuất và phân tích để phát hiện lỗi. Trong [219], một xung ngắn dòng được đưa vào dòng d trục để tạo ra một tập phương trình trạng thái trục dq bổ sung, dẫn đến mô hình biến / tham số đầy đủ, sau đó được sử dụng cho đồng thời trục tuyến tính của điện trở quanh co và các dòng thông gió rotor được sử dụng như các chỉ số để theo dõi các cuộn dây đồng bộ stator động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu và nam châm vĩnh cửu rotor. Trong [220], chẩn đoán lỗi hoạt động được xử lý cho các hệ thống pin theo khuôn khổ mô hình sự kiện rời rạc. Trạng thái bình thường và trạng thái bị lỗi (bao gồm cả cell cũ và kháng nội bộ tăng) được phân chia thành các bộ khác nhau, và một thuật toán điều khiển hoạt động thích hợp được thực hiện để kích thích sự tiến hóa hệ thống dọc theo các quỹ đạo nhất định. chế độ của hệ thống giám sát thuộc về.

### 2.3. PHẦN KẾT LUẬN

Trong phần đầu, các kỹ thuật chẩn đoán lỗi và ứng dụng của chúng đã được xem xét toàn diện từ các quan điểm dựa trên mô hình và tín hiệu, tương ứng. Cụ thể, chẩn đoán lỗi dựa trên mô hình được xem xét theo các loại phương pháp chẩn đoán lỗi cho các hệ thống xác định, phương pháp chẩn đoán lỗi ngẫu nhiên, phương pháp chẩn đoán hệ thống rời rạc và sự kiện, và kỹ thuật chẩn đoán hệ thống được phân phối và nối mạng. Trong khi đó, chẩn đoán lỗi dựa trên tín hiệu được khảo sát theo các phân loại của miền thời gian, miền tần số và miền thời gian-tần số phương pháp tiếp cận, tương ứng. Tổng quan về chẩn đoán lỗi dựa trên kiến thức và chẩn đoán lỗi lai và hoạt động sẽ được thực hiện trong phần thứ hai của bài khảo sát gồm ba phần, sẽ hoàn thành toàn bộ tổng quan về kỹ thuật chẩn đoán lỗi và ứng dụng của chúng.

Trong phần hai này, các kỹ thuật chẩn đoán lỗi và các ứng dụng của chúng đã được xem xét toàn diện theo các loại phương pháp dựa trên tri thức, lai ghép và tích cực. Các phương pháp chẩn đoán lỗi dựa trên tri thức được xem xét theo bản chất của cơ sở tri thức được trích xuất, bao gồm các phương pháp dựa trên định tính và phương pháp dựa trên định lượng, nơi tiếp cận dựa trên định lượng được phân loại thành các phương pháp thống kê và phương pháp phi tuyến. Các phương pháp chẩn đoán lai được xem xét từ nhiều kết hợp / tích hợp của nhiều phương pháp chẩn đoán. Các phương pháp chẩn đoán lỗi hoạt động được xem xét từ các quan điểm ngẫu nhiên và xác định, tương ứng. Cùng với tổng quan về các phương pháp chẩn đoán dựa trên mô hình và dựa trên tín hiệu trong khảo sát phần 1, khảo sát đầy đủ về các kỹ thuật và ứng dụng chẩn đoán lỗi đã được thực hiện theo các loại dựa trên mô hình, dựa trên tín hiệu, phương pháp dựa trên tri thức và lai / hoạt động. Chúng tôi đã xem xét hơn 220 nghiên cứu kỹ thuật tổng thể với sự chú ý nhiều hơn vào những phát triển gần đây của phương pháp chẩn đoán lỗi và ứng dụng của chúng trong thập kỷ qua, làm sáng tỏ cho độc giả

từ các xã hội và cộng đồng công nghiệp tiếp cận nhanh chóng những phát triển gần đây của lĩnh vực này.

Kỹ thuật chẩn đoán lỗi được phân phối và nối mạng và các ứng dụng của chúng có thể được kích thích hơn vì ngày càng nhiều hệ thống công nghiệp hiện đại có cấu trúc phân tán được trang bị với mạng truyền thông không dây. Các kỹ thuật dựa trên tri thức (dựa trên dữ liệu) đang tìm kiếm nhiều cơ hội hơn trong các ứng dụng như hệ thống điều khiển giám sát và thu thập dữ liệu (SCADA) và đồng hồ thông minh thường được cài đặt trong các hệ thống tự động hóa công nghiệp ngày nay. Sự tích hợp của một loạt các kỹ thuật chẩn đoán là một xu hướng để có được hiệu suất đơn giản và chẩn đoán thời gian thực tốt hơn. So với các phương pháp chẩn đoán không xâm lấn, phương pháp chẩn đoán lỗi hoạt động còn xa trường thành, và các kết quả lý thuyết và ứng dụng tiếp theo được dự đoán.

Chúng tôi đã cố gắng bao gồm càng nhiều tài liệu tham khảo cập nhật nhất có thể theo các danh mục của kỹ thuật. Thật không may, nó không thể bao gồm tất cả các ấn phẩm hiện có do giới hạn về không gian. Ngoài ra, bài báo khảo sát phân ba tập trung vào các kỹ thuật kiểm soát khả năng chịu lỗi đang được tiến hành.

## **CHƯƠNG 3**

# **NHỮNG TIẾN BỘ TRONG ĐIỀU KHIỂN VÀ GIÁM SÁT, PHÁT HIỆN LỖI TRONG MÁY ĐIỆN**

## **ĐIỆN TỬ CÔNG SUẤT : HIỆN ĐẠI NHẤT (321)**

### **3.1: GIỚI THIỆU**

Ở những năm gần đây, hoạt động nghiên cứu trong các máy điện và điều khiển khu vực bảo trì tiên đoán đã trải qua sự năng động ngoạn mục. Điều này một phần là do sự kết hợp của các yếu tố này trong một số lượng lớn các quy trình và ứng dụng công nghiệp. Hơn nữa, các yếu tố này thường rất quan trọng trong các quy trình mà chúng hoạt động. Các động cơ và máy phát điện lớn có thể dẫn đến hậu quả nghiêm trọng trong điều kiện kinh tế (chi phí sửa chữa, tắt máy sản xuất) cũng như các chi phí hữu hình khác (chậm trễ giao hàng của khách hàng, nguy cơ người dùng, giảm hiệu quả).

Tất cả những yếu tố này đã chứng minh những nỗ lực ngày càng tăng để phát triển các kỹ thuật mới có thể phát hiện sự phát triển của bất kỳ lỗi nào đủ trước để bảo trì thích hợp hành động có thể được lên kế hoạch và áp dụng.

Theo truyền thống, máy cảm ứng lồng sóc (IM) đã thu hút sự chú ý nhất trong nghiên cứu chẩn đoán lỗi máy điện (FD) do sử dụng rộng rãi của chúng. Gần đây, các loại máy điện xoay khác, như máy đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM), máy cảm ứng rôto quấn (WRIM), máy đa pha AC ( $n$ PIM hoặc  $n$ PPMSM với  $n$  là số pha và lớn hơn 3) và chuyển máy miễn cưỡng (SRM), ngày càng được sử dụng. Điều này là do sự xuất hiện của các ứng dụng mới (tạo năng lượng gió, xe điện, cần cẩu, thang máy, tàu cao tốc, vv) hoặc sự cần thiết phải đảm bảo hoạt động ngay cả khi có lỗi (hệ thống chịu lỗi). Do đó, tầm quan trọng của các dòng nghiên cứu mới trong khu vực nói trên, nhanh chóng tăng lên.

Sự năng động đáng chú ý của cộng đồng nghiên cứu FD máy điện được chứng minh bằng một số chỉ số không thể nghi ngờ liên quan đến số lượng giấy tờ gần đây ngày càng tăng trong khu vực. Hơn nữa, những chủ đề này đã góp phần vào sự thành công của các hội nghị liên quan.

Mặc dù có những giấy tờ đánh giá gần đây xuất sắc trong lĩnh vực này [221], [222], hoạt động năng động nói trên đã dẫn đến sự xuất hiện của những đóng góp rất mới của lõi suất không thể khấu trừ. Những sự kiện này đã khuyến khích các tác giả của bài báo này phát triển một bài thuyết trình hiện đại, dự định tổng hợp những tiến bộ mới nhất trong máy điện, ổ đĩa và điện tử FD. Cụ thể hơn, tác giả muốn bình luận về những đóng góp được công bố trong các ấn phẩm liên quan.

Xem xét số lượng lớn các đóng góp đối phó với IM FD, bài báo đã được cấu trúc để phân tích chi tiết các đóng góp liên quan đến các máy này sẽ được đưa ra trong Phần II. Lỗi IM đã được phân loại thành ba nhóm chính: lỗi rotor, lỗi cuộn dây stato và lỗi cơ học (lệch tâm, lỗi mang, hỏng hộp số). Các phần tiếp theo sẽ trực tiếp giải quyết các tiến bộ nghiên cứu gần đây trong FD của các máy và ổ đĩa khác: Phần III sẽ tập trung vào PMSM, trong khi Phần IV sẽ giải quyết FD trong các bộ chuyển đổi điện tử và các linh kiện điện tử công suất. Mặc dù được phân loại trong lĩnh vực kỹ thuật điện năng, bài báo này sẽ không giải quyết vấn đề phát hiện lỗi hệ thống điện một cách toàn cầu (ví dụ, đường dây, dây cáp, cách điện và bộ phận ngắt

## **3.2. CHUẨN ĐOÁN LỖI MÁY ĐIỆN CẢM ỨNG**

### **3.2.1. CHẨN ĐOÁN LỖI CỦA RÔTO**

Các đứt gãy của rotor thường liên quan đến sự không đối xứng trong lồng rôto trong máy lồng sóc (thanh bị hỏng hoặc vòng kết thúc, tổn thương lõi rotor) hoặc cuộn dây rôto trong các máy quấn rôto (các trở kháng cuộn dây khác nhau). Những lỗi này có thể do nhiều nguyên nhân khác nhau, như tóm tắt trong: nhiệt và điện từ, nhiễu điện từ và dao động, ứng



suất môi trường hoặc cơ học, mệt mỏi một phần, vòng bi bị hư hỏng, lực li tâm hoặc khuyết tật kết nối. Một đánh giá kỹ lưỡng cụ thể tập trung vào IM rotor FD có thể được tìm thấy trong [223]. Công trình này giải thích cơ sở vật chất của lỗi rô-bốt, tóm tắt các bài báo và nhận xét cổ điển phù hợp nhất về các tác phẩm gần đây, chỉ ra các xu hướng mới nổi trong lĩnh vực này.

### **3.2.1.1. Kỹ thuật phân tích tín hiệu kỹ thuật số được áp dụng cho chẩn đoán lỗi rôto**

Một đánh giá toàn diện dành cho các kỹ thuật phân tích tín hiệu kỹ thuật số được áp dụng cho IM FD có thể được tìm thấy trong [224]. Bài báo này đề xuất một tiêu chí phân loại dựa trên tên miền trong đó các tính năng được trích xuất được xác định: tần số tên miền, miền có quy mô thời gian-tần suất và miền thời gian

Kỹ thuật miền tần số về cơ bản dựa vào việc phát hiện các tần số liên quan đến lỗi đặc trưng trong phổ Fourier của tín hiệu được kiểm tra. Như đã nêu trong [223], chúng rất thích hợp cho hoạt động trạng thái ổn định và các chế độ hoạt động định mức, mặc dù một số hạn chế phát sinh khi các kỹ thuật này được áp dụng trong môi trường công nghiệp. Các điều kiện tải trọng thấp, dao động tải và thời gian thay đổi cũng như cấu trúc từ đặc biệt [223] hoặc lỗi kết hợp có thể làm mất hiệu lực kỹ thuật miền tần số cơ bản. Các công việc gần đây đối phó với những vấn đề này có thể được tìm thấy trong [225] - [226].

Vấn đề chẩn đoán sự không đối xứng rotor ở điều kiện tải rất thấp được tổng quan trong [225], nơi mà các tác giả đề xuất nhà điều hành năng lượng Teager-Kaiser như một kỹ thuật giải điều chế. FD trong miền tần số, khi điều kiện làm việc không hoàn toàn dừng, yêu cầu sử dụng các khoảng thời gian lấy mẫu ngắn. Trong những trường hợp này, các kỹ thuật dựa trên ước tính quang phổ như ESPRIT [226] có thể hữu ích vì chúng có lợi thế là phát hiện tần số từ dữ liệu ngắn với độ phân giải cao trong các khoảng tần số cụ thể. Tuy nhiên, các phương thức không gian con như ESPRIT hoặc

MUSIC có độ phức tạp tính toán của  $O(N^3)$  khiến ứng dụng của chúng thành các hệ thống thời gian thực không phù hợp [224]. Xu hướng gần đây dựa trên sự phát triển của các kỹ thuật mới với các yêu cầu tính toán thấp có thể được thực hiện trong bộ điều khiển số của bộ chuyển đổi điện tử hoặc thiết bị điện tử giá rẻ, như nhà điều hành năng lượng Teager-Kaiser (TKO) [225]. Trong công việc này, TKO được sử dụng để giải điều chế tín hiệu hiện tại thay vì biến đổi Hilbert, giảm chi phí tính toán từ  $O(N \cdot \log N)$  sang  $O(N)$ . Tuy nhiên, tất cả các phương pháp này giả định rằng tín hiệu thử nghiệm là cố định và dẫn đến kết quả không đạt yêu cầu khi áp dụng cho các máy điện làm việc trong điều kiện không cố định. Đối với các trường hợp như vậy, các kỹ thuật dựa trên miền thời gian-miền và thời gian dựa trên miền được coi là phù hợp hơn so với các phương pháp tiếp cận miền tần số.

Trong điều kiện không cố định, các tần số liên quan đến lỗi được sử dụng bởi phân tích chữ ký hiện tại của máy thông thường (MCSA) hoặc các kỹ thuật miền tần số ổn định khác dẫn đến các thành phần có độ lớn và tần số biến thiên. Sử dụng các biến đổi tần số thời gian thích hợp, các thành phần liên quan đến lỗi này có thể được theo dõi trong mặt phẳng tần số thời gian [227]

Phương pháp dựa trên phân phối Wigner Ville (WVD) đã được giới thiệu trong [228], nơi các tác giả đề xuất xử lý trước tín hiệu phân tích bằng cách sử dụng các bộ lọc xung hữu hạn (FIR) cải tiến, có khả năng loại bỏ các tần số không liên quan đến lỗi. sóng hài không gian quanh co, tần số cung cấp và hài hòa bão hòa) và làm giảm hiệu quả các thuật ngữ chéo mà không ảnh hưởng đến độ phân giải của biểu diễn mật độ năng lượng tần số thời gian.

Trong [229], một biến đổi tuyến tính được tối ưu hóa được giới thiệu. Kỹ thuật này, được gọi là biến đổi thích nghi (AT), đã được thiết kế để khắc phục một số nhược điểm của biến đổi Fourier thời gian ngắn (STFT) nổi

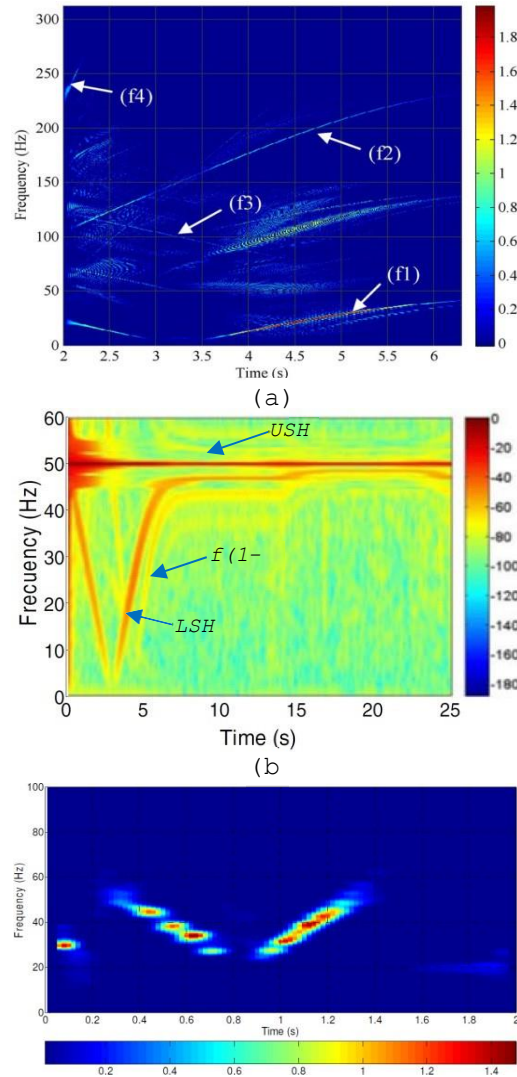
tiếng và biến đổi wavelet liên tục (CWT). AT, sử dụng một hàm gọi là nguyên tử tần số thời gian tại mỗi điểm của mặt phẳng t-f. Chức năng này đã được tối ưu hóa để trích xuất năng lượng của thành phần lỗi được tìm kiếm vào thời điểm đó.

Biến đổi Hilbert-Huang (HTT) là một kỹ thuật khác được sử dụng gần đây để theo dõi các thành phần tần số lỗi trong một máy bị lỗi làm việc trong các điều kiện không cố định [230]. Trong bài báo này, thành phần tần số biên thấp hơn được kết hợp với phá vỡ thanh được trích xuất trong khi khởi động thay đổi liên tục và ngẫu nhiên trong điều kiện tải hoặc cung cấp [227]. Trong những trường hợp này, độ lớn và tần số của các thành phần lỗi cũng thay đổi ngẫu nhiên và không có các mẫu được xác định trước trong miền thời gian cho phép mô tả đặc tính của các lỗi này.

Các công trình gần đây, như [231], [232], đã giải quyết vấn đề này, và các kỹ thuật được phát triển trong đó đã được áp dụng cho FD trong máy phát điện cảm ứng rôto (WRIG) được sử dụng trong phát điện gió. Về cơ bản, cả hai công trình được đề cập đều có chung nguyên tắc khái niệm, trong đó bao gồm phát hiện tăng năng lượng tín hiệu thành các băng tần cụ thể, nên chứa các thành phần lỗi khi lỗi phát sinh. Cho đến nay, DWT đã được sử dụng như một công cụ lọc, để cô lập khoảng thời gian quan tâm tần số. Tuy nhiên, DWT có một số hạn chế cố hữu để lựa chọn giới hạn của các băng tần. Do đó, việc sử dụng các loại bộ lọc chính xác hơn sẽ được nghiên cứu để tăng cường kết quả với phương pháp tiếp cận này.

Kỹ thuật phân tích tín hiệu tiên tiến, như những nhận xét trong các phần này, dường như là ứng cử viên tốt để cải thiện hệ thống chẩn đoán trong ngành công nghiệp sản xuất điện gió. Tuy nhiên, chúng hiếm khi được kết hợp trong các hệ thống thương mại. Điều này có thể là do thiếu sự phối hợp giữa các yêu cầu tín hiệu của các kỹ thuật này và giới hạn áp đặt bởi các hệ thống truyền dữ liệu được sử dụng bởi chương trình giám sát điều kiện tập trung (CM), thường được sử dụng trong thế hệ gió. Các nỗ lực nghiên cứu nên

được thực hiện để khắc phục vấn đề này, theo cách mà các công cụ mạnh mẽ này có thể được kết hợp với chương trình bảo trì tiên đoán của các trang trại gió.



**Hình 3.1. FD của một thanh bị hỏng trong quá trình khởi động bằng cách sử dụng các phương pháp tiếp cận tần số thời gian khác nhau**

a) Phân phối Wigner-Ville [8] - b) Biến đổi thích nghi được tối ưu hóa [7] - c) Hilbert-Huang transform [10]. sử dụng phân tích chế độ thực nghiệm (EMD) và phổ Hilbert.

Hình 11 cho thấy các kết quả được cung cấp bởi ba kỹ thuật tần số thời gian nói trên: phân phối Wigner-Ville [8], biến đổi thích ứng tối ưu hóa [7]; Hình 1 (c) Hilbert-Huang biến đổi [10].

### **3.2.1.2. Thiết kế thuật toán dựa trên AI mới để tự động phát hiện lỗi rôto phân loại và dự báo.**

Việc áp dụng các công cụ tiên tiến đã dẫn đến sự gia tăng của các thuật toán mới để phát hiện và phân loại lỗi tự động dựa trên các tính năng thu được với các công cụ nói trên. Một số thuật toán phân loại này dựa trên các công cụ trí tuệ nhân tạo cổ điển (AI) đã được điều chỉnh cho những tiến bộ trong khu vực xử lý tín hiệu. Về vấn đề này, việc áp dụng các phương pháp dựa trên mạng nơ-ron (NN) vào lỗi của rôto IM là không xa mới. Một số công trình gần đây đã kích hoạt lại việc sử dụng công cụ AI này, tận dụng lợi thế của cấu trúc mạng mới và tối ưu hóa hoặc kết hợp các công cụ xử lý tín hiệu tiên tiến (để trích xuất tính năng) và NN (để phân loại).

Ngoài ra, một số đóng góp gần đây kết hợp việc sử dụng dữ liệu thống kê và mạng nơ-ron để phát hiện và phân loại lỗi. Cụ thể hơn, [233] đề xuất một phương pháp dựa trên sự kết hợp của kỹ thuật trích xuất tính năng dựa trên mặt phẳng không rõ ràng được thiết kế để tối đa hóa khả năng phân tách giữa các lớp sử dụng tỷ lệ phân biệt đôi xử của Fisher và kỹ thuật lựa chọn tính năng dựa trên mô hình xác suất lỗi chọn số lượng tối ưu các tính năng được trích xuất. Đề án đề xuất cung cấp kết quả tốt về FD không chỉ các thanh bị hỏng mà còn là stator hoặc vòng bi. Tài liệu tham khảo [234] sử dụng các tính năng thống kê của dữ liệu miền thời gian cũng như dữ liệu phổ làm cơ sở cho việc xây dựng một NN để phát hiện và phân loại lỗi rôto.

Một cái gì đó tương tự có thể được nói về phương pháp tiếp cận dựa trên máy hỗ trợ vector (SVM), mà đã nhận được sự chú ý mới trong những năm gần đây. Tài liệu tham khảo [235] cung cấp các ví dụ điển hình về các ứng dụng gần đây của các phương pháp dựa trên SVM để phân loại lỗi hỏng hóc rotor.

Trong [236], việc ngoại suy thành công tiềm năng của các kỹ thuật không thông thường được biết đến trong các lĩnh vực khoa học khác đối với lĩnh vực IM FD đã được mô tả. Các tác giả đề xuất một kỹ thuật phân loại

không giám sát được gọi là phân cụm nhân tạo để phát hiện và phân loại các thất bại rotor và mang trong IM ở các mức tải khác nhau.

Các tác giả khác sử dụng các phương pháp được sử dụng rộng rãi trong các trường xử lý hình ảnh và nhận dạng mẫu để phát hiện tự động các lỗi rôto. Ví dụ, [237] sử dụng cách tiếp cận biểu tượng thông minh để đánh giá tự động điều kiện rôto dựa trên phân tích dòng khởi động. Phân tích thành phần chính kết hợp với ước lượng mật độ hạt nhân được đề xuất trong [238] để xác định các mẫu không gian trạng thái hiện tại của stator của động cơ khỏe mạnh và động cơ với các lỗi khác nhau (các thanh gãy, lệch tâm và sai số kết nối), đạt được kết quả phân loại chính xác cao.

### **3.2.1.3. Sử dụng sự biến đổi các đại lượng để phát hiện sự phá hủy rotor.**

Lợi ích của việc sử dụng số lượng khác cho các mục đích FD đã được nghiên cứu trong một bộ công trình khác. Việc tìm kiếm các phương pháp tiếp cận không xâm lấn cho phép FD đáng tin cậy của một số lỗi nhất định mà không dễ dàng phát hiện được với dòng điện hoặc rung động là một thách thức chung đối với nhiều tác giả.

Trong bối cảnh này, [239] xác nhận các khả năng và tiềm năng được cung cấp bởi việc phân tích dòng thông lượng cho mục đích phát hiện lỗi, xem xét hai loại lỗi: thanh gãy và các mạch ngắn liên. Các tác giả phát triển một mô hình phân tích của từ trường bên ngoài và máy bị lỗi. Nghiên cứu của họ kết luận rằng từ trường trong vùng lân cận của máy chứa thông tin rất hữu ích liên quan đến sức khỏe của nó và sử dụng các mô hình đơn giản như vậy, có thể xác định sự biến thiên tương đối của các vạch phổ mà không cần độ lớn.

Trong [240], các tác giả đã sử dụng FEM để nghiên cứu ảnh hưởng của số khe rôto trên biên độ của chữ ký lỗi thanh bị hỏng. Các tác giả phân tích các đại lượng khác nhau, bao gồm dòng điện, mô men xoắn, công suất biểu kiến và dòng điện zero, và kết luận rằng, theo ý kiến của họ, số lượng

sau này là tốt nhất cho mục đích FD bị hỏng vì nó ít bị ảnh hưởng bởi số khe rotor và cung cấp chữ ký lỗi mạnh nhất cho mỗi trường hợp số khe rôto được nghiên cứu.

#### **3.2.1.4. Phát triển các mô hình và nghiên cứu lý thuyết mới tạo điều kiện thuận lợi cho phân tích sự khởi đầu và phát triển lỗi và các hiệu quả của nó.**

Sự phát triển của các nghiên cứu lý thuyết và các mô hình cụ thể để nâng cao sự hiểu biết về các khía cạnh khác nhau của rotor FD là động lực của một số công trình gần đây.

Về vấn đề này, [241] trình bày một biểu diễn phân tích đơn giản nhưng hiệu quả của IM với các lỗi rôto được dựa trên khung tham chiếu đồng bộ và trên các phasor của Steinmetz. Nó tạo điều kiện cho sự hiểu biết về hiện tượng vật lý đằng sau sự thất bại và cải thiện định lượng mức độ nghiêm trọng của kỹ thuật MCSA thông thường, dựa trên tổng biên độ biên hiện tại, bằng cách sử dụng các thành phần hoạt động và phản ứng của gợn sóng hiện tại cũng như phasors.

Vật lý của quá trình tạo lỗi rotor cũng như ảnh hưởng của quá trình này lên các chỉ số khác nhau được nghiên cứu trong [242]. Các tác giả phát triển một bài kiểm tra mật môi được thiết kế để gây ra vỡ thanh rotor theo cách tự nhiên. Họ phát triển các mô hình mật môi dựa trên kết quả của họ và đánh giá hiệu suất các chỉ số dựa trên hiện tại dựa trên cả phân tích trạng thái ổn định và thoáng qua.

Tham khảo [243] là một công việc thú vị và độc đáo, thay vì tập trung vào các điều kiện lỗi, phân tích phổ tần số stator hiện tại của IM với rôto khỏe mạnh. Nghiên cứu của họ giúp làm sáng tỏ và mô tả các thành phần sẽ xuất hiện trong phổ hiện tại trong điều kiện lành mạnh, xem xét các sóng hài không gian MMF, sóng hài uốn khe và độ bão hòa của đường thông lượng từ chính thông qua biến thiên permeance khoảng trống ảo. Công

việc của họ tạo điều kiện cho việc xác định thêm các thành phần liên quan đến lồng bị lỗi khi có lỗi trong máy.

Biến thể tham số của máy theo mức độ thất bại tiến bộ của rotor được nghiên cứu trong [244]. Các tác giả thay đổi sự liên kết của rotor đối với trục từ stator và thu được sự phụ thuộc của các thông số máy trên góc rotor. Ưu điểm của phương pháp này là chúng có thể phân tích các kết hợp khác nhau của các thanh bị hỏng mà không cần các mẫu động cơ thực tế.

Các nghiên cứu thú vị về ảnh hưởng của sự thất bại rôto đối với các đại lượng cơ điện khác được trình bày trong một số công trình.[245] nghiên cứu ảnh hưởng của đứt gãy đứt gãy trên nội dung hài hòa của mật độ từ thông và trên phổ mômen điện từ, kết luận rằng nghiên cứu phổ thứ hai này hữu ích ở tần số gần 300 Hz. Mặt khác, [246] thực hiện phân tích thú vị về các sóng chênh lệch không khí khác nhau, như mật độ thông lượng và ứng suất cơ học, bị ảnh hưởng bởi lỗi lồng bằng cách trình bày phân tích quang phổ hai chiều dựa trên cả hai đại lượng.

### **3.2.2. Giám sát và dự báo lỗi cách điện của cuộn dây**

Cách điện quanh co là một trong những hệ thống máy điện dễ bị lỗi nhất. Các lỗi liên quan đến cách điện quanh co chiếm từ 21% đến 40% tổng số lỗi trong các máy điện [247], [248] tùy thuộc vào loại và kích thước của máy. Một đánh giá toàn diện về CM và phát hiện lỗi liên quan đến cách điện quanh co có thể được tìm thấy trong [258], [249].

Lỗi quanh co thường là kết quả cuối cùng của sự lão hóa chậm và liên tục của lớp cách nhiệt. Một cuộn dây quanh co có thể cục bộ không thành công do một ứng suất nhỏ (quá nóng, rung quá nhanh, quá áp thoáng qua) tạo ra một lỗi ngắn mạch liên tiếp, sau đó một dòng điện chạy qua các vòng bị hỏng. Hiệu ứng nhiệt của dòng điện hỏng dần dần làm giảm sự cách nhiệt của các lượt rẽ bị ảnh hưởng và lân cận. Lỗi lan truyền dần, và dòng lỗi tăng lên. Cuối cùng, khe cách điện hoặc cách nhiệt của một pha khác có thể bị ảnh hưởng, dẫn đến hỏng pha hoặc giai đoạn thất bại thảm khốc. Quá



trình này phát triển khá nhanh chóng [249]. Nếu các biện pháp thích hợp không được thực hiện trong vòng vài giây, sự thất bại cục bộ có thể phát triển thành thất bại thảm khốc [248]. Như được chỉ ra trong [249], vấn đề về các lỗi cuộn dây phải được giải quyết khác nhau, tùy thuộc vào tầm quan trọng và kích thước của máy.

### **3.2.2.1. Giám sát điều kiện hệ thống cách điện.**

Kỹ thuật này được sử dụng cho các máy lớn, quan trọng, cao áp. Đối với các máy như vậy, kiến thức về điều kiện cách nhiệt là rất quan trọng vì nó cho phép tối ưu hóa việc khai thác của chúng. Mục tiêu của các phương pháp này là CM của mức độ lão hóa của các chất cách điện. CM của cách điện quanh co có thể được thực hiện theo hai cách khác nhau [249]:

- Sử dụng các thử nghiệm tiêu chuẩn ngoại tuyến định kỳ (các phép đo điện trở cách điện, kiểm tra Hipot, kiểm tra hệ số công suất, các phép thử cách nhiệt lần lượt, các thử nghiệm xả một phần).

- Thông qua liên tục CM của số lượng khác nhau, chẳng hạn như nhiệt độ quanh co, thành phần hóa học của khí và rung động hoặc thậm chí xả một phần trên dòng CM. Cách tiếp cận như vậy là tốn kém và chỉ được sử dụng trong các máy quan trọng. Một ví dụ về dòng xả một phần CM được mô tả trong [30], trong đó các chỉ thị về sự suy giảm hệ thống cách điện của động cơ cảm ứng hạ áp được cung cấp bởi bộ chuyển đổi tần số thu được theo tiêu chuẩn IEC 60034-18-41.

Hơn nữa, trong lĩnh vực này, các nỗ lực nghiên cứu cũng được dành riêng để phát triển các mô hình để dự báo tuổi thọ còn lại của vật liệu cách nhiệt máy [247], [251]. Tài liệu tham khảo [247] trình bày một phương pháp mô hình hóa tuổi thọ của vật liệu cách nhiệt dựa trên thiết kế thí nghiệm. Trong [251], mô hình này được cải thiện bằng cách sử dụng các công cụ thống kê, chẳng hạn như bề mặt phản ứng và phân tích phương sai.

### **3.2.2.2. Chẩn đoán lỗi cách điện**

Những kỹ thuật này thường được sử dụng trong các máy điện áp thấp. Phương pháp chẩn đoán cách nhiệt quanh co không cung cấp thông tin về mức độ lão hóa cách điện [249]; thay vào đó, mục tiêu của chúng bị hạn chế trong việc phát hiện các lỗi ngắn mạch liên tiếp trong giai đoạn đầu của chúng, cho phép các hành động thích hợp để ngăn chặn các lỗi này từ thoái hóa thành các lỗi thảm khốc. Do đó, để được quan tâm thực tế, các phương pháp FD ngắn mạch liên tiếp phải có khả năng phát hiện lỗi rất nhanh, ở giai đoạn đầu, khi dòng điện vẫn còn thấp hoặc ít nhất trước các hệ thống bảo vệ thông thường (role quá dòng hoặc vi sai) ) hành động. Có các kỹ thuật khác nhau cho FD mạch ngắn:

### **Chẩn đoán lỗi ngắn mạch giữa các vòng dây qua MCSA**

Trong các máy cảm ứng, các mạch ngắn liên kết tạo ra các thành phần hài hòa trong dòng pha stator. Tần số đặc trưng của chúng đã được phân tích rộng rãi trong tài liệu [248]. Nhiều kỹ thuật dựa trên phương pháp MCSA truyền thống hoặc các phương pháp gần đây khác dựa trên phương pháp phân tích tín hiệu hiện đại đã được đề xuất. Trong [224], một đánh giá toàn diện được thực hiện trên các công cụ xử lý tín hiệu kỹ thuật số được phát triển gần đây được áp dụng cho dòng stator của máy cảm ứng để phát hiện lỗi điện và cơ khí.

Mặt khác, nhiều kỹ thuật MCSA dựa trên việc so sánh phổ của máy được chẩn đoán với phổ của cùng một máy ở trạng thái khỏe mạnh. Để tạo thuận lợi cho việc áp dụng các phương pháp như vậy, tài liệu tham khảo nói trên [243] phát triển một đặc điểm toàn diện và phân loại các thành phần hài có mặt trong phổ của dòng stato của một máy rotor lồng khỏe mạnh.

Một hiện tượng vật lý khác cho phép FD của các mạch ngắn liên tiếp là sự xuất hiện của một thành phần chuỗi âm trong các dòng cung cấp [249]. Giai đoạn bị lỗi có ít lượt hơn các pha khỏe mạnh và do đó tạo ra ít lực điện động và có trở kháng khác nhau, dẫn đến một hệ thống không cân bằng của các

dòng ba pha. Ví dụ về các phương pháp FD gần đây dựa trên thành phần chuỗi ngược có thể được tìm thấy trong [252], [253].

Trong [252], các tác giả suy ra các biểu thức phân tích cho các thành phần đối xứng của dòng pha stato trong Znp từ các dòng tích cực tới điện áp thứ tự âm của động cơ. Trong các thử nghiệm trong phòng thí nghiệm, các tác giả thí nghiệm cho thấy rằng có thể phát hiện lỗi stator một lần trong một ổ đĩa nhiều động cơ kín với 432 lượt mỗi pha các lỗi cuộn dây stator khác nhau (các lỗi ngắn mạch liên pha, các pha pha và các pha nối đất). Từ những biểu thức này, các tác giả đề nghị sử dụng độ lớn và pha của các thành phần nghịch đảo và không chuỗi của dòng pha như các chỉ số lỗi stator. Tài liệu tham khảo [253] đề xuất một cách tiếp cận để phát hiện và xác định vị trí lỗi biên tần trong một hệ thống truyền động nhiều động cơ dựa trên sự thay đổi trở kháng chuyển đổi

Tuy nhiên, các phương pháp này có chung một nhược điểm chung: các nguyên nhân khác không liên quan đến lỗi ngắn mạch cũng có thể giới thiệu một thành phần chuỗi âm trong hiện tại, chẳng hạn như điện áp cung cấp không cân bằng, không đối xứng xây dựng và cảm biến hiện tại không điều chỉnh. Cần lưu ý rằng nhược điểm này là quan trọng bởi vì nó làm giảm độ nhạy cảm với các lỗi phát sinh, điều này rất quan trọng trong việc phát hiện lỗi ngắn mạch. Gần đây, một số cuộc điều tra đã cố gắng khắc phục vấn đề này, như trong [254], nơi các tác giả đưa ra một kỹ thuật để đền bù các thành phần dòng âm không liên quan đến lỗi stator, bao gồm cả trường hợp mất cân bằng điện áp.

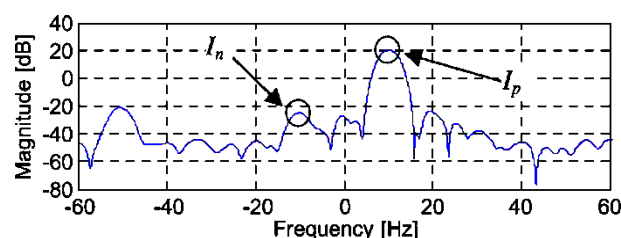
Một vấn đề hiếm khi được giải quyết là sự cần thiết cho một phản ứng nhanh chóng để ngăn chặn thiệt hại thảm khốc khi một lỗi ngắn mạch xen kẽ phát sinh. Nếu FFT thông thường được sử dụng để phát hiện các thành phần bị lỗi trong giai đoạn đầu, cần có độ phân giải tần số cao. Nhưng điều này dẫn đến thời gian lấy mẫu dài, có thể dài hơn thời gian cần thiết để phát triển một sự thất bại thảm khốc. Hình 2 [253] minh họa sự cân bằng giữa độ phân giải và đáp ứng nhanh; các tác giả của tác phẩm đó sử dụng thời gian lấy mẫu là 0,25 giây (năm giai đoạn của tín hiệu lấy mẫu cho tần số cung cấp là 20 Hz), dẫn đến độ phân giải tần số 4Hz, để tính phổ của vector hiện tại phức tạp, để phát hiện các dòng chuỗi âm và dương ( $I_n$ ,  $I_p$ ).

Các phương pháp hiệu quả cần sử dụng các kỹ thuật xử lý tín hiệu để đạt được độ phân giải tần số phù hợp với các giai đoạn lấy mẫu ngắn. Đồng thời, chúng không nên có các yêu cầu tính toán nặng, do đó việc xử lý hầu như trong thời gian thực là khả thi. Ví dụ, [253] sử dụng thuật toán Goertzel để tính toán các thùng quan tâm cho FD, gần như trong thời gian thực. Dù sao, vấn đề này cần nghiên cứu thêm trong lĩnh vực ngắn mạch Inter-turn bằng các phương pháp MCSA.

Một vấn đề khác có liên quan là liệu thời gian phản ứng đó có đủ ngắn để tránh hậu quả thảm khốc hay không. Về mối quan tâm này, nhiều nghiên cứu về sự phát triển của lỗi ngắn mạch trong các ứng dụng thực tế là cần thiết, để giúp thiết lập các tiêu chí về thời gian phản ứng thích hợp để chẩn đoán loại lỗi này.

### **Chẩn đoán lỗi ngắn mạch giữa các vòng dây qua phân tích từ thông tải.**

Hình 4.2 Cân bằng giữa yêu cầu độ phân giải và đáp ứng nhanh, để phát hiện thành phần chuỗi âm trong vector hiện tại (độ phân giải tần số 4Hz, thời gian lấy mẫu 0,25 s) [253].



Các phương pháp FD dựa vào phép đo hiện tại được sử dụng rộng rãi vì chúng không xâm lấn và tránh sử dụng các cảm biến cụ thể. Tuy nhiên, như đã nêu [249], các cường độ khác, chẳng hạn như thông lượng đi lạc [239], [255], [256], có những ưu điểm cụ thể khiến chúng hấp dẫn đối với một số ứng dụng nhất định.

FD của cuộn dây dựa trên các phép đo thông lượng đi lạc gần đây đã thu hút sự quan tâm đáng kể [239]. Các phương pháp FD dựa vào thông lượng đi lạc hoàn toàn không xâm lấn và dễ thiết lập. Mặt khác, chúng đòi hỏi các cảm biến đặc biệt, và sự phân bố của thông lượng từ xung quanh máy có thể khó biết và phụ thuộc mạnh vào đặc tính xây dựng của khung máy [221].

Trong [255], FD thông qua dòng thông lượng được dựa trên việc sử dụng hai đầu dò được đặt ở các vị trí cụ thể gần khung máy. Phân tích dựa trên so sánh sự thay đổi với tải trọng biên độ của một điều hòa cụ thể trong cả hai đầu dò. Các tác giả nói rằng một tính năng liên quan của phương pháp này là nó không đòi hỏi kiến thức về hành vi của máy ở trạng thái khỏe mạnh. Tham khảo [239] giới thiệu một mô hình phân tích đơn giản cho phép xác định gần đúng của thông lượng từ bên ngoài trong điều kiện lành mạnh và bị lỗi đối với các trường hợp của các thanh bị đứt mạch và các thanh bị hỏng.

Các phương pháp FD ngăn mạch khác dựa trên phép đo dòng thông lượng có thể được tìm thấy trong [256], nơi các tác giả sử dụng các đầu dò thông lượng khác nhau được đặt tại các vị trí khác nhau xung quanh máy. FD dựa trên sự phân tích của các sóng hài của tần số chính thông qua đánh giá thống kê. So với phương pháp MCSA, nhược điểm của FD thông qua các thông số stray là kết quả phụ thuộc vào vị trí của đầu dò, và không thể xác định quy tắc chung cho vị trí tối ưu, vì nó liên quan trực tiếp đến các đặc tính cấu trúc khung. Mặt khác, khả năng thay đổi vị trí của đầu dò mang đến cơ hội phát triển các phương pháp cho một vị trí chính xác

của lỗi.

### **Các phương pháp tiếp cận trí tuệ thông minh để chẩn đoán lỗi ngắn mạch**

Các kỹ thuật AI có thể được sử dụng để phân loại trạng thái của máy thành một loạt các lớp được xác định trước, bao gồm trạng thái khỏe mạnh, các loại trạng thái lỗi khác nhau và mức độ lỗi nghiêm trọng khác nhau, mà không cần sử dụng các thuật toán phức tạp và hỗ trợ các quy trình ra quyết định [221]. Một đánh giá về việc áp dụng các kỹ thuật AI vào FD của các lỗi liên tiếp có thể được tìm thấy trong [248]; sau khi đánh giá một số đóng góp quan trọng trong các lĩnh vực này, các tác giả kết luận rằng các mô hình nhân tạo, một khi được đào tạo, cung cấp một mô phỏng nhanh và chính xác của máy.

Tuy nhiên, các mô hình này là máy cụ thể và yêu cầu đào tạo mở rộng để cung cấp kết quả tốt trong mọi điều kiện. Trong các công trình gần đây, các mạng nơon nhân tạo (ANN) được áp dụng cho FD của các mạch ngắn trong các máy cảm ứng trong các ứng dụng khác nhau. Trong [257], cách tiếp cận ANN được áp dụng cho máy phát điện cảm ứng rôto. Các tác giả áp dụng ANN cổ điển với truyền ngược, nhưng nó được đào tạo trực tiếp bằng tín hiệu số từ cảm biến, dẫn đến hệ thống chẩn đoán với kiến trúc đơn giản có thể được thiết lập bằng phân cứng chi phí thấp, chẳng hạn như mảng công lập trình trường (FPGA). Trong [258], một cách tiếp cận ANN được áp dụng cho một động cơ cảm ứng lồng sóc được nạp thông qua một biến tần. Trong công việc này, chỉ báo tiên trình lỗi chỉ số dựa trên sự thay đổi của giai đoạn dịch chuyển giữa điện áp pha và dòng dòng trong máy khỏe mạnh và bị lỗi.

Purpose	Techniques	Industrial penetration	Remarks	
Insulation system CM	Knowing aging degree and remaining life of windings	Periodical of-line test: Insulation Resistance, Hipot test, Partial Discharges [29] Continuous monitoring of: Windings temperature, Gases composition, vibrations, Partial Discharges [29], [30]	Done, standard methods  Done, special cases	High-power, High-Voltage, critical Machines
	Insulation Fast Fault detection & diagnosis	Detection of inter-turn short-circuits	MCSA: Spectral analysis, negative sequence component analysis [4], [23], [32], [33], [34], [35] Stray Flux Analysis [19], [36], [37]	
		Artificial Intelligence Approaches [1], [28], [38]	Low, Feasible	

**Bảng 3.1: Kỹ thuật đối với CM và FD cho động cơ ảm ứng**

### 3.2.3. CHẨN ĐOÁN LỖI HỒNG HỌC CƠ KHÍ

#### 3.2.3.1 Chẩn đoán lỗi lệch tâm rotor.

Một mức độ lệch tâm nhất định là bình thường trong mọi máy. Các dung sai sản xuất của rôto và stator hoặc không chính xác trong quá trình lắp ráp máy, trong số các yếu tố khác, có thể dẫn đến độ dài khoảng cách không khí không đồng đều. Những bất đối xứng này thường được khuếch đại trong quá trình vận hành máy do sự suy giảm của một số phần tử máy (mang mòn, hư hỏng cánh quạt...), lệch hướng với tải trọng định hướng, hỏng hộp số, vv

Tăng giá trị lệch tâm có thể dẫn đến việc kéo từ không cân bằng, rung động, dòng chảy trực (có thể làm hỏng vòng bi), khung và cuộn lồng, cách nhiệt và thậm chí chà xát stator-rotor [221]. Mục đích là để xác định ngưỡng lệch tâm cho các vấn đề nghiêm trọng với máy. Các nhà nghiên cứu vẫn chưa đạt được thỏa thuận về một giá trị như vậy.

Một chuỗi nghiên cứu quan trọng đã được thực hiện qua nhiều năm để xác định mức độ lệch tâm trong IM bằng cách phát triển các kỹ thuật mới hoặc khai thác tiềm năng của các kỹ thuật hiện có. fr và xem xét tương tác giữa dòng lệch tâm tĩnh và động sóng mật độ. Một số công trình khác đã mở rộng FD lệch tâm thành các máy hoạt động theo chế độ không cố định. Ví dụ, trong [260], phân tích tần số tức thời của các thành phần lỗi trong dòng stato được sử dụng để phát hiện lệch tâm trong hoạt động IM của vết thương

hoạt động dưới tải dao động. Việc sử dụng dòng stator như là một cơ sở của các phương pháp này là một điểm chung cho nhiều công trình phát triển. Một số công trình nghiên cứu sâu hơn về phân tích và tối ưu hóa phương pháp MCSA truyền thống, chẳng hạn như [259], trình bày chỉ số mức độ lỗi mới dựa trên biên độ của các thành phần hiện tại tại  $f$

Một số đóng góp gần đây đã khám phá khả năng tồn tại của các đại lượng khác cho các mục đích FD. Tài liệu tham khảo [261] đề xuất việc sử dụng phổ điện áp đầu cuối khi chuyển đổi để phát hiện mức độ trung bình của tĩnh cũng như độ lệch tâm động. Cách tiếp cận được đề xuất hoạt động tốt cho bất kỳ máy, khắc phục các ràng buộc của các phương pháp dựa trên tần số cao dựa trên thành phần truyền thống chỉ hoạt động tốt đối với một số kết hợp khe cảm cực và khe cảm rotor. Tài liệu tham khảo [262] trình bày một phương pháp dựa trên phân tích thông lượng dọc trục, sử dụng cảm biến cuộn dây bên ngoài. Phân tích của họ hướng tới việc phát hiện các thành phần tần số thấp của phổ FFT (chẳng hạn như  $s \cdot f$  và  $3 \cdot s \cdot f$ ).

Việc sử dụng phổ hiện tại trình tự không được đề xuất trong [263] để phát hiện lập dị tĩnh trong IM kết nối delta. Cuối cùng, việc phát triển các mô hình mới tạo thuận lợi cho việc nghiên cứu máy dưới lỗi lệch tâm cũng là động lực của một số công trình gần đây, chẳng hạn như [264], trong đó mô hình đơn điệu có thể tái tạo tất cả các loại lập dị là đề xuất. Mặc dù số lượng các tác phẩm gần đây trong chủ đề vẫn còn một số vấn đề chưa được giải quyết, vì tránh ảnh hưởng tải cũng như sự phân biệt khó khăn giữa lập dị tĩnh và động [221]. Một số nỗ lực có ý định khắc phục một số vấn đề này [261], nhưng vẫn có ưu thế về kỹ thuật FD dựa vào các chỉ số dựa trên việc phát hiện mức độ lệch tâm hỗn hợp tổng thể.

### **3.2.3.2. Chẩn đoán lỗi vòng bi**

Tùy thuộc vào loại và kích thước của máy, lỗi mang chiếm khoảng 40% (máy lớn) đến 90% (máy nhỏ) lỗi [265]. Mặc dù việc sử dụng tín hiệu



rung hoặc thậm chí là tiếng ồn phổ biến, nhu cầu của họ đối với các cảm biến cụ thể và sự phân biệt khó khăn thường xuyên giữa các lỗi đã kích thích nghiên cứu theo phương pháp FD dựa trên số lượng khác [221].

Dòng stato đã được đề xuất như một giải pháp thay thế thú vị, và một số nghiên cứu đã tăng cường so sánh hiện tại so với độ rung để phát hiện các lỗi như vậy [265]. Trong bối cảnh này, [221] báo cáo một số khó khăn khi chẩn đoán lỗi mang khi sử dụng phân tích hiện tại, chẳng hạn như ảnh hưởng của sự mất cân bằng cung cấp hoặc biến tần (VSD) trên các dấu hiệu lỗi mang. Thật vậy, vấn đề thứ hai này đã là động lực của một số công trình gần đây đã tập trung vào ảnh hưởng của người chuyển đổi về thiệt hại vòng bi. Ví dụ, [266] nghiên cứu ảnh hưởng của các dòng điện trở trên các số lượng khác nhau của IM chuyển đổi. Trong [267], cùng một nhóm tác giả phát triển một nghiên cứu hoàn chỉnh chứng minh rằng có thể tính toán trước các dòng điện trong IM được đảo ngược để ước tính tuổi thọ của vòng bi.

Mặc dù có vấn đề với việc đánh giá vòng bi dựa trên hiện tại, [221] khuyến nghị sự tiện lợi của việc sử dụng các cảm biến hiện tại hoặc điện áp có sẵn để chẩn đoán các lỗi như vậy. Một số công trình đã theo đề xuất này và phát triển các kỹ thuật dựa trên hiện tại thú vị cho FD của các loại thiệt hại vòng bi khác nhau. Tài liệu tham khảo [268] đề xuất một phương pháp kết hợp phân tích entropy của tín hiệu wavelet và mạng nơron để phát hiện lỗi và phân loại lỗi.

Các tác giả khác đã đề xuất sử dụng các đại lượng khác để chẩn đoán các vấn đề về mang trong IM. Tài liệu tham khảo [269] cho thấy việc xử lý thống kê dữ liệu thông lượng đi lạc để chẩn đoán ba loại lỗi mang khác nhau. Kết quả cho thấy tầm quan trọng lớn hơn của phân tích dựa trên số lượng so với phân tích dòng stato.

Mặc dù những tiến bộ trong việc sử dụng các dòng điện và các đại lượng khác cho mang FD, việc sử dụng các kỹ thuật dựa trên rung động vẫn phổ biến hơn. Một số công trình đã tập trung vào việc tối ưu hóa hoặc thậm chí là tự động hóa vòng biquá trình phát hiện lỗi, chẳng hạn như [270]. Tài liệu tham khảo [271] cũng đề xuất một cách tiếp cận dựa trên SVM để tự động phát hiện và phân loại các vấn đề mang, dựa vào giảm nhiễu để tạo điều kiện phát hiện các thành phần rung động. Tài liệu tham khảo [272] kết hợp phân tích phong bì của tín hiệu rung, kỹ thuật biến đổi Fourier nhanh (FFT) và phân tích thành phần chính (PCA) để chẩn đoán lỗi mang. Ưu điểm chính của phương pháp này là nó vượt qua ước tính trước đây thông thường của các tần số lỗi mang đặc trưng.

Cuối cùng, [273] trình bày một cách tiếp cận thú vị để mang nhựa FD dựa trên một quá trình hai giai đoạn kết hợp phân tích phong bì và EMD để xử lý tín hiệu rung và trích xuất các tính năng liên quan đến lỗi. Mặc dù nhiều thuật toán dựa trên các mô hình khác nhau và các kỹ thuật xử lý tín hiệu, không có sự lựa chọn chung rõ ràng nào xuất hiện [221].

Tiên lượng của lỗi mang cũng là một chủ đề phổ biến trong một số công trình gần đây [221]. Tài liệu tham khảo [274] trình bày một nghiên cứu thú vị về các quá trình tạo vòng bi và ổ trục, mô tả các phương pháp khác nhau để xác định chúng. Các công trình nói trên chú trọng đặc biệt vào các xu hướng nghiên cứu trong các khu vực tiên lượng mang và lỗi bánh răng. Sự tiện lợi của việc sử dụng nhiều hơn một cảm biến, sự phù hợp của cả hai kỹ thuật dựa trên dữ liệu và dựa trên mô hình và việc sử dụng các kỹ thuật lai để tuân theo xu hướng của một lỗi được ghi nhận bởi tác giả. Tài liệu tham khảo [275] sử dụng các tín hiệu rung để dự đoán sự suy thoái của các vòng bi bằng cách sử dụng một mô hình dự báo chuỗi thời gian được gọi là nơ-ron neo mờ. Sự phát triển của các mô hình dựa trên vật lý cũng là một chủ đề phổ biến, chẳng hạn như trong [276], trong đó phát triển một mô hình để phát hiện thiệt hại vòng bi có khả năng dự đoán sự phát triển lỗi.

Mặc dù những tiến bộ không thể tránh khỏi trong tổn thất mang FD và tiên lượng dựa trên số lượng khác nhau, vẫn còn một số câu hỏi mở trong chủ đề. Về vấn đề này, việc tìm kiếm các kỹ thuật dựa vào số lượng có thể đo trực tiếp trong các đầu cuối của ổ đĩa thay vì trên các vòng bi là một mục tiêu chưa được giải quyết (đặc biệt, xem xét các vấn đề của phân tích hiện tại). Ngoài ra, việc phát triển các kỹ thuật có thể phân biệt các lỗi với các chữ ký tương tự và phù hợp để được thực hiện trong các hệ thống CM chi phí thấp là một môi quan tâm mở đối với nhiều nhà nghiên cứu trong lĩnh vực này [221].

### **3.2.3.3. Chẩn đoán lỗi phá hủy của hộp số.**

Trong lĩnh vực IM FD, lỗi hộp số cũng đã thu hút được sự chú ý đáng kể gần đây. Tham khảo [274] ghi chú hai phương thức lỗi có thể xảy ra phổ biến trong bánh răng: 1) bánh răng mặc đồng đều, dẫn đến phản ứng dừ dôi và 2) một hoặc nhiều răng bị mòn do va chạm hoặc lỗi sản xuất. chia lười và suy thoái hơn nữa.

Như một số nghiên cứu gần đây đã báo cáo [277], các phân tích âm thanh và rung đường như là cách tiếp cận thích hợp nhất để phát hiện lỗi răng bánh răng, trong khi phân tích hiện tại có nhiều vấn đề hơn do biên độ hài có liên quan đến lỗi gần mức ồn và cần thiết để sử dụng thu thập dữ liệu dài và các hệ thống có độ phân giải cao để phát hiện một số trong những biên độ này một cách chính xác. Bảng III cho thấy một so sánh định tính về khả năng FD của ba đại lượng này khi phát hiện lỗi hao mòn răng bánh răng trong hộp số, dựa trên kết luận của [277]. Tuy nhiên, các kỹ thuật đặc biệt dựa vào tức thời số của vector không gian hiện tại stator đã cung cấp kết quả tốt [278-279] do các sóng hài số nguyên nhiều của tần số quay xuất hiện do lỗi.

Cụ thể hơn, [279] đề xuất việc xây dựng lại cấu hình lỗi từ mômen đo được và tần số tức thời (IF) của vector không gian hiện tại stator và tính toán năng lượng hồ sơ lỗi tiếp theo. Hình 3 cho thấy sự khác biệt lớn giữa

các cấu hình lỗi từ IF của vector không gian hiện tại stator ở tải trọng định mức cho các điều kiện bị lỗi khác nhau liên quan đến bánh răng (P), bánh xe (W), bánh răng đồng bộ đồng bộ (SSPW) và bề mặt răng bánh răng bánh răng không đồng bộ (SAPW) đồng thời làm hỏng các lỗi tương ứng. Công trình chứng minh rằng, về mặt năng lượng, IF của vector không gian stator hiện tại cung cấp độ nhạy lỗi tương đương với mômen đo được cho các điều kiện bị lỗi khác nhau.

Các yếu tố phân tích âm thanh trong việc phát hiện lỗi thiết bị được phê chuẩn trong [280], trong đó một cảm biến không dây thông minh dựa trên phát xạ âm thanh kết hợp với việc sử dụng các mạng thần kinh được trình bày.

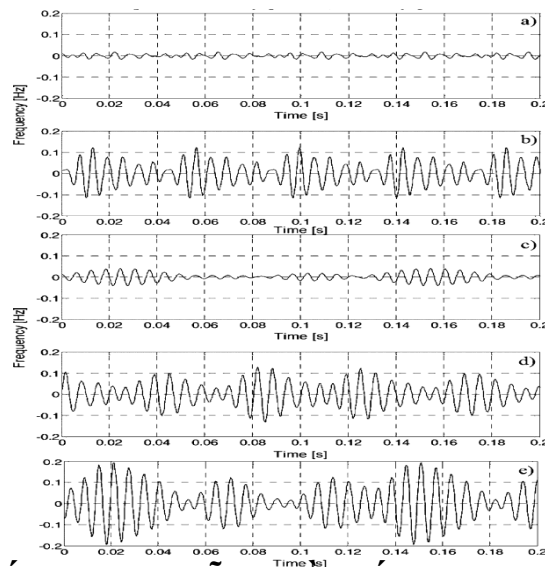
Các nghiên cứu gần đây khác đã tập trung vào thiết bị FD trong nhiều ứng dụng khác nhau, chẳng hạn như ổ xi măng lò nung [281], hệ thống kéo đường sắt [282] và hệ thống tạo gió [283].

Bảng III. So sánh chất lượng giữa các khả năng FD của dao động âm thanh, áp suất và dòng điện khi phát hiện lỗi phù bánh răng của hộp số

Quantity	Processing approach	Amplitude sensitivity for diagnosis	Industrial penetration	Comments
Vibration	Envelope analysis	High	High	Best amplitude sensitivity
Acoustic pressure	Envelope analysis	High for load levels near the rated load	Low	Good candidate for high load levels
Stator current	Spectrum	Low	Low	Harmonics amplitudes near the noise level
	Envelope analysis	Acceptable		Long register + high resolution acquisition required

### 3.2.4. NGHIÊN CỨU MÁY CẢM ỨNG ĐA PHA

Sự quan tâm ngày càng tăng trong các máy AC đa pha đã dẫn đến việc hợp nhất các hoạt động nghiên cứu trên các máy đa pha và các ổ đĩa đa pha. Như các ghi chú [284], mối quan tâm này một phần là do số độ tự do của các máy này liên quan đến các máy ba pha



**Hình 3.3. Tái thiết cấu hình lỗi từ tần số tức thời gian của vectơ không gian hiện tại stator tại tỉ trọng định mức**

a) Thiết bị khỏe mạnh - b) Thiết bị lỗi P -c) Bánh răng bị lỗi - d) Bánh răng bị lỗi SSPW -e) Bánh răng bị lỗi của SAPW [279].

Tính năng này cho phép một số các sóng hài không gian của từ trường khoảng trống được điều khiển độc lập với nhau. Trong bối cảnh này, [284] và [285] điều tra hành vi của IM đa pha với một số pha lẻ theo giả định rằng các điện trở của cuộn dây stator không cân bằng do các kết nối kém. Các tác giả trình bày một chiến lược kiểm soát thú vị có thể phát hiện sự mất cân đối kháng stator và bản địa hóa giai đoạn bị lỗi trong khi giữ cho hành vi của ổ đĩa không thay đổi trong cả điều kiện hoạt động tạm thời và trạng thái ổn định.

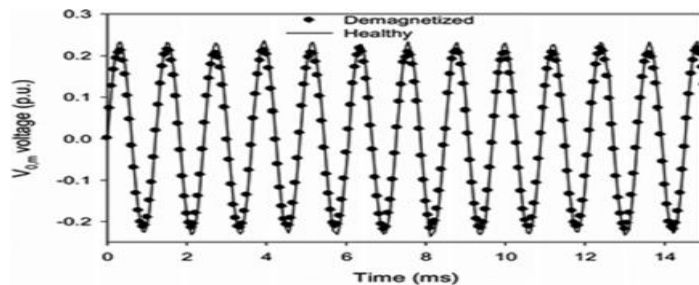
### 3.3. DỰ BÁO LỖI CỦA MÁY ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU

PMSMs đã tăng nhanh trong những năm gần đây nhờ sự phát triển của vật liệu từ tính đất hiếm, chẳng hạn như Sm-Co và Nd-Fe-B. Những nam châm vĩnh cửu mới này có thể cải thiện sức mạnh, hiệu suất và hệ số công suất riêng của PMSM so với các động cơ cảm ứng tương đương [286]. Thế hệ gió, xe điện và robot là một số lĩnh vực mà PMSM đang được sử dụng ngày nay. Do đó, sự quan tâm đến kỹ thuật CM và FD cho những máy này đang gia tăng nhanh chóng trong ngành công nghiệp và học thuật. Các lỗi chính trong PMSM bao gồm các lỗi điện từ, chẳng hạn như khử từ của

nam châm vĩnh cửu rotor và các mạch ngắn stator-winding, và lỗi cơ học, chẳng hạn như lệch tâm rotor và tổn thương vòng bi [286].

### 3.3.1. Chẩn đoán lỗi khử từ

Khi một khiếm khuyết cục bộ phát sinh trong một nam châm, các sóng hài cụ thể xuất hiện trong sự phân bố không gian của mật độ từ thông [287]. Trong công trình này, các tác giả kết luận rằng sự thay đổi tiếp theo của nội dung hài hòa ở phía sau EMF có thể phù hợp cho việc khử từ địa phương FD mặc dù phụ thuộc mạnh mẽ của nội dung hài hòa vào cấu hình cuộn dây stato. Ngược lại, để khử từ đồng đều, không có sóng hài mới xuất hiện trong quang phổ của EMF, và các tác giả này đề xuất việc phát hiện các biến thiên của biên độ liên quan đến cơ bản của các sóng hài hiện có như một phương pháp FD.



**Hình 3.4. Điện áp ZSVC thử nghiệm của một SPMSM được khử từ một phần khỏe mạnh và một phần hoạt động ở 6000 vòng / phút [288].**

Sự khử từ địa phương cũng được phân tích trong [288]. Trong công trình này, các tác giả chứng minh rằng lỗi này tạo ra các sóng hài phân đoạn đặc trưng trong EMF ngược của một cuộn dây đơn, mặc dù các sóng hài này có thể biến mất trong pha EMF sau tùy thuộc vào cấu hình cuộn dây. Để tránh nhược điểm này, các tác giả đề xuất theo dõi thành phần điện áp không tuần tự (ZSVC). Mô phỏng và thử nghiệm cho thấy lỗi khử từ địa phương dẫn đến giảm biên độ của ZSVC có thể cho phép phát hiện lỗi, mặc dù cách tiếp cận

này yêu cầu cuộn dây có trung tính để tiếp cận và cũng có thể là điểm trung lập nhân tạo. mạng điện trở cân bằng pha được kết nối với các đầu cuối của máy. Hình 3.4 [248] so sánh ZSVC được đo bằng một PMSM sáu cực trong trạng thái khỏe mạnh và dưới điều kiện khử từ một phần quay ở 6000 vòng / phút. Rõ ràng, cách tiếp cận được đề xuất trong [287], [288] yêu cầu thông tin chính xác về hành vi của máy trong tình trạng khỏe mạnh. Trong [289], các tác giả đề xuất một mô hình phần tử hữu hạn có tính đến sự dịch chuyển trục động cơ do các lực từ không cân bằng mà một phần khử từ tạo ra.

Mô hình cải tiến này cho phép mô phỏng thực tế hơn về các dòng điện hơn các mô hình FEM thông thường. Tuy nhiên, nhược điểm chính của mô hình này là nó đòi hỏi kiến thức về sự phát triển chuyển dịch trục, mà trong tác phẩm này các tác giả thử nghiệm bằng cách sử dụng một cảm biến laser sáng tạo. Một trong những mục tiêu của công trình này là chứng minh tầm quan trọng của các hiệu ứng cơ học trong lõi khử từ một phần. FD khử từ trong điều kiện không cố định được trình bày trong [286]; mục đích của phương pháp này là trích xuất các tính năng tối ưu cho FD từ các tín hiệu tạm thời. Điều này được thực hiện trong giai đoạn tiền xử lý dựa trên việc áp dụng phân phối Choi-Williams, sau đó tính toán kích thước phân đoạn dựa trên tính toán phương pháp đếm hộp.

### **3.3.2. Ngăn mạch cuộn dây stato**

Lỗi ngăn mạch Stator là một vấn đề đặc biệt quan trọng đối với các máy nam châm vĩnh cửu (PM) vì chúng có thể tạo ra cường độ từ trường cao hơn lực cơ giạt của nam châm, do đó khử từ nam châm vĩnh viễn và trong quá trình làm hư hại máy [248] . Tài liệu tham khảo [290] giới thiệu một phương pháp FD dựa trên việc so sánh một lực điện động dự phòng thời gian thực (EMF) với một EMF tham chiếu. Trong công việc này, bộ ước lượng EMF dựa trên sơ đồ theo dõi dòng stato, và bao gồm các hiện tượng nhiệt và bão hòa. EMF tham chiếu phải được tính toán trước đó bằng cách phân tích FE hoặc đo thực tại tốc độ đã biết cho máy khỏe mạnh và được

lưu trữ trong bảng tra cứu. Quá trình xây dựng bảng tra cứu này phải được thực hiện cho mỗi máy trước khi bắt đầu sử dụng thực tế, và có thể là nhược điểm trong các ứng dụng thực tế; đối tác, một khi được điều chỉnh, hệ thống có thể phản ứng ngay lập tức chống lại các mạch ngắn.

Một chỉ báo lỗi cho các mạch ngắn liên tiếp trực tuyến dựa trên phương pháp lọc Kalman mở rộng được giới thiệu trong [291]. Mục đích của công việc này là phát triển phương pháp phát hiện với khả năng phản hồi rất nhanh. Các tác giả báo cáo rằng chỉ báo lỗi được đề xuất cho phép phát hiện đáng tin cậy một lỗi liên quan đến 4% số lượt của một pha. Quan trọng hơn, nó phản ứng nhanh chóng, vào khoảng thời gian của một chu trình điện.

Các máy đặc biệt được sử dụng trong một số ứng dụng liên quan, như các máy tạo móng được sử dụng trong các phương tiện thông thường, yêu cầu các phương pháp FD cụ thể; một phương pháp cho stator biến FD trong máy phát điện móng được đề xuất trong [292]. Do khó khăn trong việc truy cập các đại lượng vật lý thường được giám sát, các tác giả đề nghị kiểm tra điện áp đầu ra DC và dòng điện và cho thấy, trong dòng đầu ra của máy phát điện được điều chỉnh, hài hòa ở một phần ba tần số gợn sóng chỉnh lưu là chữ ký mạnh mẽ của stator biến lỗi.

### **3.3.3. Chẩn đoán lỗi cơ khí**

Việc chẩn đoán lệch tâm và tổn thương vòng bi cục bộ đã được thực hiện theo cách truyền thống thông qua các phương pháp tiếp cận miền tần số áp dụng cho các tín hiệu hiện tại và rung. Tuy nhiên, những kỹ thuật này thất bại khi tần số đặc trưng thay đổi do các biến thể của tốc độ quay. Để khắc phục vấn đề này, [293] đề xuất giải điều chế tần số của tín hiệu hiện tại bằng thuật toán vòng lặp khóa (PLL) và giải điều chế biên độ dựa trên thuật toán luật hình vuông. Sau giải điều chế, thuật toán PSD bất biến 1P được sử dụng để khám phá các kích thích tại biên tần mang đặc tính lỗi.

### **3.3.4. Nghiên cứu về đồng bộ nam châm vĩnh cửu đa pha**



Việc sử dụng các máy PM đa pha là một công nghệ mới nổi đặc biệt thích hợp cho các ứng dụng đòi hỏi độ tin cậy cao, chẳng hạn như trong các ứng dụng phát điện gió, hải quân, vận tải hoặc gió ngoài khơi. Trong các máy đa điểm, khi lỗi xảy ra trong một hoặc nhiều pha, máy có thể duy trì hoạt động của nó bằng các pha khỏe mạnh còn lại, không có phần cứng bổ sung và hiệu suất hợp lý [294].

Các nghiên cứu quan trọng về PMSM đa pha đang được tiến hành dựa trên việc phát hiện các loại lỗi khác nhau [295] cũng như các chiến lược kiểm soát chịu lỗi để tối ưu hóa hiệu suất máy sau khi phát sinh lỗi [294].

### **3.4. CHẨN ĐOÁN LỖI LINH KIỆN ĐIỆN VÀ BỘ BIẾN ĐỔI**

Mặc dù ổ đĩa điện tử được phổ biến rộng rãi và được sử dụng trong nhiều ứng dụng khác nhau, chúng dễ bị hỏng hóc nhiều lần [296]. Như các ghi chú [7297], hai thành phần có khả năng thất bại nhất trong các ổ đĩa chuyển mạch là các tụ lọc điện phân và các chất bán dẫn điện. Trong số này, lỗi bán dẫn điện điển hình nhất là lỗi mạch ngắn và mạch hở.

Mặc dù hầu hết các công trình trong bộ chuyển đổi nguồn điện địa chỉ FD chuyển đổi ac – dc hoặc ac – ac, nhưng ngày càng có nhiều giấy tờ gần đây tập trung vào FD trong bộ chuyển đổi dc – dc [298].

#### **3.4.1. Chẩn đoán lỗi trong bộ biến đổi công suất**

Một đánh giá chi tiết về các tài liệu gần đây về biến tần FD được phát triển trong [299]. Tham khảo [300] ghi chú các đặc tính của từng loại lỗi chuyển mạch chính trong các biến tần: trong khi lỗi ngắn mạch thường rất phá hoại và yêu cầu áp dụng các hành động để tắt ngay lập tức, lỗi mạch hở không nhất thiết dẫn để tắt hệ thống và có thể vẫn không bị phát hiện trong một thời gian dài (tuy nhiên, các lỗi như vậy có thể dẫn đến lỗi thứ cấp trong các thành phần chuyển đổi khác mà cuối cùng có thể dẫn đến chi phí sửa chữa cao) [300].

Một loạt các kỹ thuật khác nhau đã được áp dụng để phát hiện lỗi mạch hở trong bộ chuyển đổi nguồn. Về vấn đề này, việc sử dụng các phương pháp tiếp cận vector Park là khá rộng rãi. [221] so sánh các tính năng chính của các thuật toán phổ biến khác nhau, một số trong số đó dựa trên phương pháp vector Park: 1) một kỹ thuật được báo cáo trong [301] dựa trên việc sử dụng mô đun của vector Park để bình thường hóa dòng pha (được gọi là 'sai số của dòng chuẩn hóa giá trị tuyệt đối trung bình' (ENCAAV)), 2) phương pháp được trình bày trong [302] dựa trên giá trị của đạo hàm pha vector tuyệt đối (được gọi là pha vector công viên hiện tại và cực phân cực hiện tại (CPVPCP)), 3) các giá trị trung bình hiện tại đã chuẩn hóa [83] và 4) các lỗi hiện hành chuẩn hóa (NRCE) [300]. Như [221] cho thấy, kết quả thử nghiệm thu được từ việc tích hợp bốn phương thức vào bộ điều khiển kỹ thuật số của ổ PMSM cho thấy mỗi phương pháp đều có độ mạnh, tốc độ phát hiện, nỗ lực thực hiện gánh nặng tính toán và nỗ lực điều chỉnh.

Cụ thể hơn, Bảng IV cho thấy tất cả các phương pháp có hiệu quả FD rất cao ngay cả đối với các mức tải thấp. Phương pháp CPVPCP có độ mạnh đặc biệt chống lại các báo động giả do hậu quả của tải và tốc độ chuyển tiếp. Mặt khác, phương pháp NRCE cho phép phát hiện nhanh nhất, trong khi các phương pháp NRCE và ENCAAV có gánh nặng tính toán thấp nhất. Cuối cùng, phương pháp ENCAAV liên quan đến nỗ lực điều chỉnh thấp nhất [221]. Các đóng góp khác đã sử dụng các giải pháp thay thế khác nhau cho các lỗi hở mạch nói trên trong ổ đĩa PE.

Giá trị tuyệt đối của các điện áp lỗi điều chế được sử dụng trong [304] cho FD mạch mở trong bộ chuyển đổi ma trận, trong khi góc nhìn dựa trên mô hình được trình bày trong [305] để cô lập lỗi chuyển mạch mở trong các ổ đĩa IM. Lược đồ phát triển cho phép cô lập các lỗi đơn và đồng thời trong các chất bán dẫn điện với một phản ứng nhanh. Tài liệu tham khảo [306] trình bày một phương pháp không cảm biến dựa trên việc giám sát sự

hiện diện thời gian vector điện áp trong các lĩnh vực cụ thể của mặt phẳng cố định phức tạp. Tài liệu tham khảo [307] xem xét nghiên cứu các lỗi mạch hở trong bộ biến tần và đề xuất các kỹ thuật dựa trên phân tích thành phần chính, trong khi [308] đề xuất sử dụng các phương pháp dựa trên SVM

Bảng IV. Các tính năng chính đánh giá của FD với bộ biến đổi công suất dựa trên biến đổi vecto Park.

	ENCAAV	CPVPCP	NCAV	NRCE
<b>Localization capabilities (fault signatures)</b>	15	27	27	27
<b>Effectiveness</b>	High	High	High	High
<b>Robustness (robustness factor)</b>	0.76	1.00	0.23	0.94
<b>Detection speed (average) (% currents period)</b>	39.6	71.2	58.3	28.7
<b>Implementation effort (file size in kB)</b>	64.9	73.1	74.7	63.4
<b>Computational burden (execution time in <math>\mu</math>s)</b>	3.40	4.25	4.89	3.37
<b>Tuning effort (parameters number)</b>	2	4	3	3
<b>Most important feature concerning industrial application</b>	Low computational burden	Robustness against false alarms	Low computational burden	Fast detection

Nghiên cứu về tụ điện DC-link đã là động lực của một số công trình. Được sử dụng như bộ đệm năng lượng giữa lưới điện và tải trọng, các tụ điện điện phân thường là những yếu tố quan trọng trong các hệ thống chuyển đổi năng lượng. Tham khảo [309] thực hiện một sự tổng hợp thú vị của các lỗi cuối cùng trong phần tử này và phát triển một hệ thống FD cho các tụ điện hoạt động trong bộ chuyển đổi PWM ac / dc. Tài liệu tham khảo [90] phân tích hiệu suất của động cơ cảm ứng nạp cho biến tần dưới một tụ điện liên kết nối mạch hở.

Về bộ chuyển đổi dc-dc, việc sử dụng bộ lọc Kalman cho FD dựa trên mô hình của bộ chuyển đổi tăng cường dc dc được đề xuất trong [91], trong khi [312] trình bày cách tiếp cận dựa trên các thành phần hài hòa của từ trường gần bộ chuyển đổi dc-dc.

Mặc dù số lượng các công trình nghiên cứu ngày càng tăng nhằm nâng cao độ tin cậy của các bộ chuyển đổi năng lượng, có một mối quan tâm quan trọng trong ngành về tính bền vững của các thiết bị này. Một cuộc

khảo sát công nghiệp thú vị được thực hiện trong [296] để xác định các yêu cầu và kỳ vọng về độ tin cậy trong các công cụ chuyển đổi PE. Các kết luận cho thấy rằng các thiết bị bán dẫn điện là những thành phần dễ vỡ nhất. Nghiên cứu cũng nhấn mạnh nhu cầu quan trọng trong ngành cho các phương pháp và chỉ số CM tốt hơn (nghiên cứu chỉ ra rằng sự hài lòng với phương pháp CM là thấp (50%) và kiến thức về các chỉ số về độ tin cậy thậm chí là thấp hơn (23%)). Các tác giả của bài báo này đồng ý với [295] nỗ lực nghiên cứu sâu hơn vào lĩnh vực quản lý sức khỏe điện tử (như FD, tiên lượng và CM) và chuyển giao hiệu quả hơn cho ngành công nghiệp là cần thiết.

### **3.4.2. Chẩn đoán lỗi các linh kiện điện tử công suất**

Một số công trình gần đây đã giải quyết các lỗi FD khác nhau trong các thành phần điện tử công suất. Về vấn đề này, FD của IGBT được nghiên cứu trong [297], [313]. Trong [313], các tác giả đề xuất một CM mới về sự lão hóa của các lớp hàn trong IGBT cho các ứng dụng xe điện, trong khi [297] đề xuất một thuật toán dựa trên PCA trực tuyến để phát hiện lỗi sớm trong các công tắc IGBT. Phát hiện lỗi và suy thoái các thành phần khác, như MOSFETs, được nghiên cứu trong [314].

Mặc dù có một số bài báo mô tả và phân tích vật lý của sự thất bại trong các thành phần công suất như MOSFET hoặc IGBT, vẫn còn thiếu các công trình đề xuất sử dụng các tính năng của thiết bị (ví dụ như điện trở trạng thái, điện áp ngưỡng...) chuyển đổi dòng CM. Sự thiếu hụt này một phần là do khó khăn trong việc thu thập các tín hiệu cần thiết thường nhỏ và dễ bị tham nhiễu do tiếng ồn [297].

### **3.4.3. Các hệ thống hút lỗi**

Nghiên cứu và phát triển các hệ thống chịu lỗi đảm bảo việc tiếp tục hoạt động bất chấp sự xuất hiện của một lỗi đã được theo đuổi trong nhiều công trình gần đây trong khu vực lái xe PE. Dòng nghiên cứu này đã kết

hợp với sự gia tăng của các máy đa pha AC, kết hợp với các bộ biến tần đa pha, là một lựa chọn thú vị cho các ứng dụng công suất cao [284].

Trong bối cảnh này, nghiên cứu về khả năng chịu lỗi của các bộ chuyển đổi đa cấp đã trở thành động lực của một số công trình. Ví dụ, trong [315], IM được cung cấp bởi các bộ chuyển đổi đa cấp với các chiến lược điều khiển chịu lỗi được xem xét về hiệu quả và hành vi nhiệt của chúng. Ngoài ra, các cấu trúc liên kết đa cấp với FD và khả năng chịu lỗi nhưng được áp dụng để hiệu chỉnh hệ số công suất cũng đã được đề xuất trong [316]. Các chiến lược điều chế lai cho các bộ chuyển đổi đa tầng không đối xứng (ACMC) hoạt động trong điều kiện lỗi trong các tế bào tần số cao (LVHF) tần số thấp cũng đã được đề xuất [317].

Cụ thể hơn, các bộ chuyển đổi ma trận cũng được nhiều tác giả xem xét, chẳng hạn như trong [318], nơi mà các hệ thống truyền động cơ chuyển đổi ma trận chịu lỗi thực hiện chiến lược phát hiện lỗi tốc độ cao để phát hiện và xác định các công tắc mạch hở bị lỗi. Những tiến bộ trong lĩnh vực ổ đĩa điện tử có khả năng chịu lỗi đang nổi tiếng và được chứng minh bởi nhiều loại cấu trúc liên kết dự phòng đã được sửa đổi cho các bộ biến đổi đa cấp, bộ chuyển đổi ma trận và biến tần cầu ba pha thông thường. Tuy nhiên, sự gia tăng dư thừa mà các cấu trúc liên kết mới này hàm ý thường làm tăng độ phức tạp, chi phí của hệ thống và thậm chí giảm một số hiệu suất. Nó vẫn cần thiết một thiết kế dự phòng cấp thành phần hiệu quả hơn cho các hệ thống PE, như một số nghiên cứu đã chỉ ra [319].

### **3.5. KẾT LUẬN**

Máy điện và ổ đĩa CM và FD đã trở thành một lĩnh vực nghiên cứu năng động đáng chú ý, với các cấu hình và ứng dụng máy và chuyển đổi mới, các công cụ phân tích tín hiệu kỹ thuật số mới, thiết bị phần cứng và các thách thức công nghiệp liên tục xuất hiện. Mặc dù công trình đánh giá xuất sắc nhằm mục tiêu các lĩnh vực cụ thể đã được xuất bản, rất khó để có được một cái nhìn tổng quan về những đóng góp gần đây nhất được công bố

trong cả hai tạp chí và hội nghị. Một tập hợp lớn các giấy tờ quan trọng được công bố trong ba năm qua trong lĩnh vực FD và CM của các máy điện, điện tử công suất và ổ đĩa đã được phân tích để giúp người đọc xác định xu hướng trong các lĩnh vực khác nhau của lĩnh vực này. Ứng dụng các kỹ thuật phân tích tín hiệu tiên tiến cho các ứng dụng FD, PMSM, các ổ đĩa chịu lỗi với các bộ chuyển đổi đa nhân và các máy đa pha đã được giới thiệu kể từ khi chúng xuất hiện trong 5 năm qua và chúng sẽ được phát triển hơn nữa trong tương lai gần.

## KẾT LUẬN

Sau khoảng thời gian quy định để thực hiện đề tài tốt nghiệp, với sự nỗ lực, cố gắng tìm hiểu của bản thân cũng như sự chỉ bảo giúp đỡ tận tình của các giảng viên trong khoa, đến nay em đã hoàn thành đề tài tốt nghiệp của mình. Trong đề tài tốt nghiệp, em đã thực hiện được những nội dung sau:

- Tổng quát chuẩn đoán lỗi và kĩ thuật thứ lỗi:
  - + Chuẩn đoán lỗi dựa trên mô hình và dựa trên tín hiệu
  - + Phương pháp dự báo lỗi với miền thức dựa trên đặc tính lai / tích cực
- Những tiến bộ trong điều khiển và giám sát, phát hiện lỗi trong máy điện, điện tử công suất : hiện đại nhất

Tuy nhiên do thời gian có hạn cũng như trình độ của bản thân còn có nhiều hạn chế, việc hoàn thành đề án còn nhiều thiếu sót.

Em rất mong muốn nhận được sự chỉ bảo, sửa chữa, đóng góp ý kiến của thầy cô, bạn bè trong lớp để em có thể thực hiện, hoàn thành đề tài tốt hơn cũng như củng cố thêm kiến thức cho bản thân.

Một lần nữa em xin chân thành cảm ơn sự chỉ bảo, hướng dẫn tận tình của GS.TSKH. Thân Ngọc Hoàn, các thầy cô trong khoa Điện - Điện Tử, bạn bè trong lớp đã giúp đỡ em rất nhiều.

Em xin chân thành cảm ơn!

Hải Phòng, ngày ... tháng .... năm 2018

Sinh viên thực hiện

Trần Văn Hoàn

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] D. Schrick, “Remarks on terminology in the field of supervision, fault detection and diagnosis,” in Proc. IFAC Symp. Fault Detection, Supervision Safety Techn. Process, Hull, U.K., Aug. 1997, pp. 959–964.
- [2] A. Willsky, “A survey of design methods for failure detection in dynamic systems,” *Automatica*, vol. 12, no. 6, pp. 601–611, Nov. 1976.
- [3] R. Isermann, “Process fault detection based on modelling and estimation methods: A survey,” *Automatica*, vol. 20, no. 4, pp. 387–304, Jul. 1984.
- [4] J. Gertler, “Survey of model-based failure detection and isolation in complex plants,” *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 8, no. 6, pp. 3–11, Dec. 1988.
- [5] P. Frank, “Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy—A survey and some new results,” *Automatica*, vol. 26, no. 3, pp. 459–474, May 1990.
- [6] E. Garcia and P. Frank, “Deterministic nonlinear observer-based approaches to fault diagnosis: A survey,” *Control Eng. Pract.*, vol. 5, no. 5, pp. 663–670, May 1997.
- [7] R. Isermann, “Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes,” *Control Eng. Pract.*, vol. 5, no. 5, pp. 709–719, May 1997.
- [8] P. Frank and X. Ding, “Survey for robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems,” *J. Process Control*, vol. 7, no. 6, pp. 403–424, Dec. 1997.
- [9] R. Isermann, “Model-based fault-detection and diagnosis—Status and applications,” *Annu. Rev. Control*, vol. 29, no. 1, pp. 71–85, Jan. 2005.
- [10] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin, and S. Kavuri, “A review of process fault detection and diagnosis—Part I: Quantitative



model-based methods,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 27, no. 3, pp. 293–311, Mar. 2003.

[11] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, and S. Kavuri, “A review of process fault detection and diagnosis—Part II: Qualitative models and search strategies,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 27, no. 3, pp. 313–326, Mar. 2003.

[12] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, S. Kavuri, and K. Yin “A review of process fault detection and diagnosis—Part III: Process history based methods,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 27, no. 3, pp. 313–326, Mar. 2003.

[13] V. Chandola, A. Banerjee, and V. Kumar, “Anomaly detection: A survey,” *ACM Comput. Survey*, vol. 41, no. 3, pp. 1–58, Jul. 2009.

[14] C. Angeli and A. Chatzinkolaou, “On-line fault detection techniques for technical systems: A survey,” *Int. J. Comput. Sci. Appl.*, vol. 1, no. 1, pp. 12–30, 2004.

[15] X. Dai and Z. Gao, “From model, signal to knowledge: A data-driven perspective of fault detection and diagnosis,” *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 9, no. 4, pp. 2226–2238, Nov. 2013.

[16] S. Yin, S. Ding, X. Xie, and H. Luo, “A review on basic data-driven approaches for industrial process monitoring,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 11, pp. 6418–6428, Nov. 2014.

[17] H. Dong, Z. Wang, S. Ding, and H. Gao, “A survey on distributed filtering and fault detection for sensor networks,” *Math. Probl. Eng.*, vol. 2014, 2014, Art. ID. 858624.

[18] J. Sottile Jr. and L. Holloway, “An overview of fault monitoring and diagnosis in mining equipment,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no. 5, pp. 1326–1332, Oct. 1994.

- [19] M. Benbouzid, "A review of induction motor signature analysis as a medium for faults detection," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, no. 5, pp. 984–993, Oct. 2000.
- [20] S. Nandi, H. Toliyat, and X. Li, "Condition monitoring and fault diagnosis of electric motors—A review," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, no. 4, pp. 719–725, Dec. 2005.
- [21] S. Mortazavizadeh and M. Mousavi, "A review on condition monitoring and diagnostic techniques of rotating electric machines," *Phys. Sci. Int. J.*, vol. 4, no. 3, pp. 310–338, May 2014.
- [22] S. Katipamula and M. Brambley, "Methods for fault detection, diagnostics and prognostics for building systems—A review, Part I," *HVAC & R Res.*, vol. 11, no. 1, pp. 3–25, Jan. 2005.
- [23] S. Katipamula and M. Brambley, "Methods for fault detection, diagnostics and prognostics for building systems—A review, Part II," *HVAC & R Res.*, vol. 11, no. 2, pp. 169–187, Apr. 2005.
- [24] A. Widodo and B. Yang, "Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, no. 6, pp. 2560–2574, Aug. 2007.
- [25] Z. Feng, M. Liang, and F. Chu, "Recent advances in time–frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: A review with application examples," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 38, no. 1, pp. 165–205, Jul. 2013.
- [26] L. Qin, X. He, and D. Zhou, "A survey of fault diagnosis for swarm systems," *Syst. Sci. Control Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 13–23, Jan. 2014.
- [27] R. Stengel, "Intelligent failure-tolerant control," *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 11, no. 4, pp. 14–23, Jun. 1991.

- [28] M. Blanke, R. Izadi-Zamanabadi, S. Bogh, and C. Lunau, "Fault-tolerant control systems—A holistic view," *Control Eng. Pract.*, vol. 5, no. 5, pp. 693–702, May 1997.
- [29] R. Patton, "Fault-tolerant control systems: The 1997 situation," in *Proc. IFAC Symp. Fault Detect., Supervision Safety Techn. Process*, Hull, U.K., Aug. 1997, pp. 1033–1054.
- [30] J. Jiang, "Fault-tolerant control systems—An introductory overview," *Acta Autom. Sinica*, vol. 31, no. 1, pp. 161–174, Jan. 2005.
- [31] J. Lunze and J. Richter, "Reconfigurable fault-tolerant control: A tutorial introduction," *Eur. J. Control*, vol. 14, no. 5, pp. 359–386, 2008.
- [32] Y. Zhang and J. Jiang, "Bibliographical review and reconfigurable fault-tolerant control systems," *Annu. Rev. Control*, vol. 32, no. 2, pp. 229–252, Dec. 2008.
- [33] M. Benosman, "A survey of some recent results on nonlinear fault tolerant control," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2010, 2010, Art. ID. 586 169.
- [34] H. Wang, T. Chai, J. Ding, and B. Martin, "Data driven fault diagnosis and fault tolerant control: Some advances and possible new directions," *Acta Autom. Sinica*, vol. 35, no. 6, pp. 739–747, Jun. 2009.
- [35] I. Hwang, S. Kim, Y. Kim, and C. Seah, "A survey of fault detection, isolation, and reconfiguration methods," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 18, no. 3, pp. 636–653, May 2010.
- [36] D. Campos-Delgado, D. Espinoza-Trejo, and E. Palacios, "Fault-tolerant control in variable speed drives: A survey," *IET Elect. Power Appl.*, vol. 2, no. 2, pp. 121–134, Apr. 2008.
- [37] Y. Song and B. Wang, "Survey of reliability of power electronic systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 1, pp. 591–604, Jan. 2013.

- [38] B. Mirafzal, "Survey of fault-tolerance techniques for three-phase voltage source inverters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 10, pp. 5192–5202, Oct. 2014.
- [39] R. Beard, "Failure accommodation in linear system through self reorganization," Ph.D. dissertation, MIT, Cambridge, MA, USA, 1971.
- [40] J. Chen and R. Patton, *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Boston, MA, USA: Kluwer, 1999.
- [41] S. Ding, *Model-Based Fault Diagnosis Techniques: Design Schemes, Algorithms, and Tools*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2008.
- [42] R. Patton, S. Willcox, and S. Winter, "A parameter insensitive techniques for aircraft sensor fault analysis," *J. Guid. Control Dyn.*, vol. 10, no. 3, pp. 359–367, Jul. 1987.
- [43] R. Patton and J. Chen, "On eigenstructure assignment for robust fault diagnosis," *Int. J. Adaptive Control Sig. Process.*, vol. 10, no. 14, pp. 1193–1208, Dec. 2000.
- [44] L. Xu and H. Tseng, "Robust model-based fault detection for a roll stability control system," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 15, no. 3, pp. 519–528, May 2007.
- [45] X. Dai, Z. Gao, T. Breikin, and H. Wang, "Disturbance attenuation in fault detection of gas turbine engines: A discrete robust observer design," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. C, Appl. Rev.*, vol. 39, no. 2, pp. 234–239, Mar. 2009.
- [46] R. Fonod, D. Henry, C. Charbonnel, and E. Bornschlegl, "Robust thruster fault diagnosis: Application to the rendezvous phase of the Mars sample return mission," in *Proc. 2nd CEAS Spec. Conf. Guid., Navig. Control*, Delft, The Netherlands, Apr. 2013, pp. 1496–1510.
- [47] Y. Zhu and Z. Gao, "Robust observer-based fault detection via evolutionary optimization with applications to wind turbine systems," in *Proc.*

IEEE 9th Conf. Ind. Electron. Appl., Hangzhou, China, Jun. 2014, pp. 1627–1632.

[48] A. Pertew, H. Marquez, and Q. Zhao, “LMI-based sensor fault diagnosis for nonlinear Lipschitz systems” *Automatica*, vol. 43, no. 8, pp. 1464–1469, Aug. 2007.

[49] D. Zhang, H. Wang, B. Lu, and Z. Wang, “LMI-based fault detection fuzzy observer design with multiple performance constraints for a class

[50] S. Aouaouda, M. Chadli, V. Cocquempot, and M. Khadir, “Multi-objective  $H/H$  fault detection observer design for Takagi–Sugeno fuzzy systems with unmeasurable premise variables: Descriptor approach,” *Int. J. Adapt. Signal Process.*, vol. 27, no. 12, pp. 1031–1042, Dec. 2013.

[51] H. Karimi, M. Zapateiro, and N. Luo, “A linear matrix inequality approach to robust fault detection filter design of linear systems with mixed time-varying delays and nonlinear perturbations,” *J. Franklin Inst.*, vol. 347, no. 6, pp. 957–973, Aug. 2010.

[52] D. Wang, P. Shi, and W. Wang, “Robust fault detection for continuous-time switched delay systems: An linear matrix inequality approach,” *IET Control Theory Appl.*, vol. 4, no. 1, pp. 100–108, Jan. 2010.

[53] B. Chen and S. Nagarajaiah, “ $H/H$  structural damage detection filter design using an iterative linear matrix inequality approach,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 17, no. 3, pp. 1–9, Apr. 2008.

[54] Z. Kulesza, J. Sawicki, and A. Gyekenyesi, “Robust fault detection filter using linear matrix inequalities’ approach for shaft crack diagnosis,” *J. Vib. Control*, vol. 19, no. 9, pp. 1421–1440, Jul. 2013.

[55] X. Zhang, M. Polycarpou, and T. Parisini, “Fault diagnosis of a class of nonlinear systems with Lipschitz nonlinearities using adaptive estimation,” *Automatica*, vol. 46, no. 2, pp. 290–299, Feb. 2010.

- [56] M. Du and P. Mhaskar, "Isolation and handling of sensor faults in nonlinear systems," *Automatica*, vol. 50, no. 4, pp. 1066–1074, Apr. 2014.
- [57] X. Zhang, L. Tang, and J. Decastro, "Robust fault diagnosis of aircraft engines: A nonlinear adaptive estimation-based approach," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 21, no. 3, pp. 861–868, May 2013.
- [58] F. Caccavale, A. Marino, G. Muscio, and F. Pierri, "Discrete-time frame- work for fault diagnosis in robotic manipulators," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 21, no. 5, pp. 1858–1873, Sep. 2013.
- [59] W. Chen, W. T. Chen, M. Saif, M. Li, and H. Wu, "Simultaneous fault isolation and estimation of lithium-ion batteries via synthesized design of Luenberger and learning observers," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 22, no. 1, pp. 290–298, Jan. 2014.
- [60] J. Chen and H. Zhang, "Robust fault detection of faulty actuators via un- known input observers," *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 22, no. 10, pp. 1829–1839, Oct. 1991.
- [61] W. Chen and M. Saif, "Fuzzy nonlinear unknown input observer design with fault diagnosis applications," *J. Vib. Control*, vol. 16, no. 3, pp. 377–401, Mar. 2010.
- [62] J. Zarei and E. Shokri, "Robust sensor fault detection based on nonlinear unknown input observer," *Measurement*, vol. 48, no. 2, pp. 355–367, Feb. 2014.
- [63] D. Wang and K. Lum, "Adaptive unknown input observer approach for aircraft actuator fault detection and isolation," *Int. J. Adapt. Control Signal Process.*, vol. 21, no. 1, pp. 31–48, Mar. 2007.
- [64] K. Gaeid and H. Ping, "Induction motor fault detection and isolation through unknown input observer," *Sci. Res. Essays*, vol. 5, no. 20, pp. 3152–3159, Oct. 2010.

- [65] S. Methnani<sup>1</sup>, F. Lafont, J. Gauthier, T. Damak, and A. Toumi, “Actuator and sensor fault detection, isolation and identification in nonlinear dynamical systems, with an application to a waste water treatment plant,” *J. Comput. Eng. Informat.*, vol. 1, no. 4, pp. 112–125, Oct. 2013.
- [66] Z. Gao, “Discrete-time proportional and integral observer and observer-based controller for systems with both unknown input and output disturbances,” *Opt. Control Appl. Methods*, vol. 29, no. 3, pp. 171–189, May 2008.
- [67] K. Zhang, B. Jiang, V. Cocquempot, and H. Zhang, “A framework of robust fault estimation observer design for continuous-time/discrete-time systems,” *Opt. Control Appl. Methods*, vol. 34, no. 4, pp. 442–457, Aug. 2013.
- [68] Z. Gao and D. Ho, “Proportional multiple-integral observer design for descriptor systems with measurement output disturbances,” *Proc. Inst. Elect. Eng.—Control Theory Appl.*, vol. 151, no. 3, pp. 279–288, May 2004.
- [69] D. Koenig, “Unknown input proportional multiple-integral observer design for linear descriptor systems: Application to state and fault estimation,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 50, no. 2, pp. 212–217, Feb. 2005.
- [70] Z. Gao, S. Ding, and Y. Ma, “Robust fault estimation approach and its application in vehicle lateral dynamic systems,” *Opt. Control Appl. Methods*, vol. 28, no. 3, pp. 143–156, May 2007.
- [71] Q. Zhang and G. Besancon, “An adaptive observer for sensor fault estimation in a class of uniformly observable nonlinear systems,” *Int. J. Model. Identification Control*, vol. 4, no. 1, pp. 37–43, Jan. 2008.

- [72] K. Zhang, B. Jiang, and V. Cocquempot, "Adaptive observer-based fast fault estimation," *Int. J. Control Autom. Syst.*, vol. 6, no. 3, pp. 320–326, Jun. 2008.
- [73] M. Gholizadeh and F. Salmasi, "Estimation of state of charge, unknown nonlinearities, and state of health of a lithium-ion battery based on a comprehensive unobservable model," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 3, pp. 1335–1344, Mar. 2014.
- [74] H. Alwi and C. Edwards, "Robust fault reconstruction for linear parameter varying systems using sliding mode observers," *Int. J. Robust Nonlin. Control*, vol. 24, no. 14, pp. 1947–1968, Sep. 2014.
- [75] X. Han, F. Emilia, and S. Sarah, "Sampled-data sliding mode observer for robust fault reconstruction: A time-delay approach," *J. Franklin Inst.*, vol. 351, no. 4, pp. 2125–2142, Jun. 2014.
- [76] Z. Gao and H. Wang, "Descriptor observer approaches for multivariable systems with measurement noises and application in fault detection and diagnosis," *Syst. Control Lett.*, vol. 55, no. 4, pp. 304–313, Apr. 2006.
- [77] Z. Gao, X. Shi, and S. Ding, "Fuzzy state/disturbance observer design for T–S fuzzy systems with application to sensor fault estimation," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B, Cybern.*, vol. 38, no. 3, pp. 875–880, Jun. 2008.
- [78] J. Zhang, A. Swain, and S. Nguang, "Robust sensor fault estimation scheme for satellite attitude control systems," *J. Franklin Inst.*, vol. 350, no. 9, pp. 2581–2604, Nov. 2013.
- [79] Z. Gao, X. Dai, T. Breikin, and H. Wang, "Novel parameter identification by using a high-gain observer with application to a gas turbine engine," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 4, no. 4, pp. 271–279, Nov. 2008.
- [80] L. Mironovski, "Functional diagnosis of linear dynamic systems," *Autom. Remote Control*, vol. 40, no. 8, pp. 1198–1205, Aug. 1980.



- [81] E. Chow and A. Willsky, "Analytical redundancy and the design of robust detection systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 29, no. 7, pp. 603–614, Jul. 1984.
- [82] J. Gertler, *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. New York, NY, USA: Marcel Dekker, 1998.
- [83] S. Nguang, P. Zhang, and S. Ding, "Parity relation based fault estimation for nonlinear systems: An LMI approach," *Int. J. Autom. Comput.*, vol. 4, no. 2, pp. 164–168, Apr. 2007.
- [84] Z. Zhang, J. Hu, and H. Hu, "Parity space approach to fault detection based on fuzzy tree model," *Int. J. Adv. Comput. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 657–665, Jan. 2013.
- [85] H. Odendaal and T. Jones, "Actuator fault detection and isolation: An optimized parity space approach," *Control Eng. Pract.*, vol. 26, no. 5, pp. 222–232, May 2014.
- [86] W. Huang and K. Huh, "Fault detection and estimation for electromechanical brake systems using parity space approach," *J. Dyn. Syst., Meas., Control*, vol. 137, no. 1, Aug. 2014, Art. ID. 014504.
- [87] N. Viswanadham, J. Taylor, and E. Luce, "A frequency-domain approach to failure detection and isolation with application to GE-21 turbine engine control systems," *Control, Theory Adv. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 45–72, Mar. 1987.
- [88] X. Ding and P. Frank, "Fault detection via factorization approach," *Syst. Control Lett.*, vol. 14, no. 5, pp. 431–436, Jun. 1990.
- [89] M. Abid, A. Khan, W. Chen, and S. Ding, "Optimal residual evaluation for nonlinear systems using post filter and threshold," *Int. J. Control*, vol. 84, no. 3, pp. 526–539, Mar. 2011.
- [90] J. Hu and M. Tsai, "Design of robust stabilization and fault diagnosis for an auto-balancing two-wheeled cart," *Adv. Robot.*, vol. 22, no. 2, pp. 319–338, Mar. 2008.

- [91] M. Deng, I. Akira, and E. Kazunori, "Fault detection system design for actuator of a thermal process using operator based approach," *Acta Autom. Sinica*, vol. 36, no. 4, pp. 580–585, Apr. 2010.
- [92] R. Mehra and J. Peschon, "An innovation approach to fault detection and diagnosis in dynamic systems," *Automatica*, vol. 7, no. 5, pp. 637–640, Sep. 1971.
- [93] A. Willsky and H. Jones, "A generalized likelihood ratio approach to the detection and estimation of jumps in linear systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 21, no. 1, pp. 108–121, Feb. 1976.
- [94] R. Da and C. Lin, "Sensitivity analysis algorithm for the state chi-square test," *J. Guid. Control Dyn.*, vol. 19, no. 1, pp. 219–222, Jan. 1996.
- [95] I. Nikiforov, V. Varavva, and V. Kireichikov, "Application of statistical fault-detection algorithms to navigation system monitoring," *Automatica*, vol. 29, no. 5, pp. 1275–1290, Sep. 1993.
- [96] S. Bogh, "Multiple hypothesis-testing approach to FDI for the industrial actuator benchmark," *Control Eng. Pract.*, vol. 3, no. 12, pp. 1763–1768, Dec. 1995.
- [97] R. Li and J. Olson, "Fault detection and diagnosis in a closed-loop nonlinear distillation process: Application of extended Kalman filters," *Ind.*
- [98] H. Liu, D. Liu, C. Lu, and X. Wang, "Fault diagnosis of hydraulic servo system using the unscented Kalman filter," *Asian J. Control*, vol. 16, no. 6, pp. 1713–1725, Nov. 2014.
- [99] M. Laila, N. Naveen, and K. Vishakh, "Comparison of estimation capabilities of extended and unscented Kalman filter in an RLV," *Int. J. Adv. Res. Elect. Electron. Instrum. Eng.*, vol. 2, no. 7, pp. 3480–3488, Jul. 2013.
- [100] C. Hajiyeve and H. Soken, "Robust adaptive Kalman filter for estimation of UAV dynamics in the presence of sensor/actuator faults," *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 1, pp. 376–383, Jul. 2013.

- [101] A. Izadian, "Self-tuning fault diagnosis of MEMS," *Mechatronics*, vol. 23, no. 8, pp. 1094–1099, Dec. 2013.
- [102] F. Hmida, K. Khemiri, J. Ragot, and M. Goss, "Three-stage Kalman filter for state and fault estimation of linear stochastic systems with unknown inputs," *J. Franklin Inst.*, vol. 349, no. 7, pp. 2369–2388, Sep. 2012.
- [103] S. Helm, M. Kozek, and S. Jakubek, "Combustion torque estimation and misfire detection for calibration of combustion engines by parametric Kalman filtering," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 12, pp. 4326–4337, Nov. 2012.
- [104] P. Lall, R. Lowe, and K. Goebel, "Prognostics health management of electronic systems under mechanical shock and vibration using Kalman filter models and metrics," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 11, pp. 4301–4314, Nov. 2012.
- [105] G. Foo, X. Zhang, and D. Vilathgamuwa, "A sensor fault detection and isolation method in interior permanent-magnet synchronous motor drives based on an extended Kalman filter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 8, pp. 3485–3495, Aug. 2013.
- [106] C. Bakiotis, J. Raymond, and A. Pault, "Parameter and discriminant analysis for jet engine mechanical state diagnosis," in *Proc. Conf. Decision Control*, Fort Lauderdale, FL, USA, Dec. 1979, pp. 648–650.
- [107] S. Simani, C. Fantuzzi, and R. Patton, *Model-Based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification Techniques*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2002.
- [108] R. Doraiswami, C. Diduch, and J. Tang, "A new diagnostic for identifying parametric faults," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 18, no. 3, pp. 533–544, May 2010.

- [109] M. Dohler and L. Mevel, "Subspace-based fault detection robust to changes in the noise covariances," *Automatica*, vol. 49, no. 9, pp. 2734–2743, Sep. 2013.
- [110] A. Akhenak, E. Duviella, L. Bakoa, and S. Lecoeuechea, "Online fault diagnosis using recursive subspace identification: Application to a dam-gallery open channel system," *Control Eng. Pract.*, vol. 21, no. 6, pp. 797–806, Jun. 2013.
- [111] H. Wang and W. Lin, "Applying observer based FDI techniques to detect faults in dynamic and bounded stochastic distributions," *Int. J. Control*, vol. 73, no. 15, pp. 1424–1436, Aug. 2000.
- [112] Z. Gao, H. Wang, and T. Chai, "A robust fault detection filtering for stochastic distribution systems via descriptor estimator and parametric gain design," *IET Control Theory Appl.*, vol. 1, no. 5, pp. 1286–1293, Jan. 2007.
- [113] S. Cao, Y. Yi, and L. Guo, "Anti-disturbance fault diagnosis for non-Gaussian stochastic distribution systems with multiple disturbances," *Neurocomputing*, vol. 136, no. 20, pp. 315–320, Jul. 2014.
- [114] L. Wu and D. Ho, "Fuzzy filter design for Itô stochastic systems with application to sensor fault detection," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 17, no. 1, pp. 233–242, Feb. 2009.
- [115] M. Liu, X. Cao, and P. Shi, "Fault estimation and tolerant control for fuzzy stochastic systems," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 221–229, Apr. 2012.
- [116] H. Dong, Z. Wang, and H. Gao, "Fault detection for Markovian jump systems with sensor saturations and randomly varying nonlinearities," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol. 59, no. 10, pp. 2354–2362, Oct. 2012.
- [117] M. Sampath, R. Sengupta, S. Lafortune, K. Sinnamohideen, and D. Teneketzis, "Diagnosability of discrete-event systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 40, no. 9, pp. 1555–1575, Sep. 1995.

- [118] L. Carvalho, M. Moreira, J. Basilio, and S. Lafortune, "Robust diagnosis of discrete-event systems against permanent loss of observations," *Automatica*, vol. 49, no. 1, pp. 223–231, Jan. 2013.
- [119] Y. Pencole and M. Cordier, "A formal framework for the decentralized diagnosis of large scale discrete event systems and its application to telecommunication network," *Artif. Intell.*, vol. 164, no. 2, pp. 121–170, May 2005.
- [120] A. Shumann, Y. Pencole, and S. Thiebaux, "A spectrum of symbolic on-line diagnosis approaches," in *Proc. 19th Nat. Conf. Artif. Intell.*, 2007, pp. 335–340.
- [121] A. Grastien and A. Anbulagan, "Diagnosis of discrete event systems using satisfiability algorithms: A theoretical and empirical study," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 58, no. 12, pp. 3070–3083, Dec. 2013.
- [122] M. Cabasino, A. Giua, and C. Seatzu, "Fault detection for discrete event systems using Petri nets with unobservable transitions," *Automatica*, vol. 46, no. 9, pp. 1531–1539, Sep. 2010.
- [123] M. Dotoli, M. Fanti, A. Mangini, and W. Ukovich, "On-line fault detection in discrete event systems by Petri nets and integer linear programming," *Automatica*, vol. 45, no. 11, pp. 2665–2672, Nov. 2009.
- [124] D. Lefebvre, "On-line fault diagnosis with partially observed Petri nets," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 59, no. 7, pp. 1919–1924, Jul. 2014.
- [125] N. Meskin, K. Khorasani, and C. Rabbath, "A hybrid fault detection and isolation strategy for a network of unmanned vehicles in presence of large environmental disturbances," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 18, no. 6, pp. 1422–1429, Nov. 2010.
- [126] M. Daigle, X. Koutsoukos, and G. Biswas, "A qualitative event-based approach to continuous systems diagnosis," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 17, no. 4, pp. 780–793, Jul. 2009.

- [127] F. Zhao, K. Koutsoukos, H. Haussecker, J. Reich, and P. Cheung, "Monitoring and fault diagnosis of hybrid systems," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B, Cybern.*, vol. 35, no. 6, pp. 1225–1240, Dec. 2005.
- [128] J. Guo, D. Ji, S. Du, S. Zeng, and B. Sun, "Fault diagnosis of hybrid systems using particle filter based hybrid estimation algorithm," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 33, no. 1, pp. 145–150, Sep. 2013.
- [129] S. Arogeti, D. Wang, C. Low, and M. Yu, "Fault detection isolation and estimation in a vehicle steering system," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 12, pp. 4810–4820, Dec. 2012.
- [130] M. Yu and D. Wang, "Model-based health monitoring for a vehicle steering system with multiple faults of unknown types," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 7, pp. 3574–3586, Jul. 2014.
- [131] P. Levy, S. Arogeti, and D. Wang, "An integrated approach to model tracking and diagnosis of hybrid systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 4, pp. 1024–1040, Apr. 2014.
- [132] M. Yu, D. Wang, and M. Luo, "Model-based prognosis for hybrid systems with mode-dependent degradation behaviors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 1, pp. 546–554, Jan. 2014.
- [133] G. Walsh, H. Ye, and L. Bushnell, "Stability analysis of networked control systems," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 10, no. 3, pp. 438–446, May 2002.
- [134] D. Zhou, X. He, Z. Wang, G. Liu, and Y. Ji, "Leakage fault diagnosis for an Internet-based three-tank system: An experimental study," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 20, no. 4, pp. 857–870, Jul. 2012.
- [135] X. He, Z. Wang, and D. Zhou, "Robust fault detection for networked systems with communication delay and data missing," *Automatica*, vol. 45, no. 11, pp. 2634–2639, Nov. 2009.
- [136] X. He, Z. Wang, Y. Liu, and D. Zhou, "Least-square fault detection and diagnosis for networked sensing systems using a direct state estimation

approach,” *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 9, no. 3, pp. 1670–1679, Aug. 2013.

[137] S. Alavi and M. Saif, “Fault detection in nonlinear stable systems over lossy networks,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 21, no. 6, pp. 2129–2142, Nov. 2013.

[138] S. Rahme, Y. Labit, F. Gouaisbaut, and T. Floquet, “Second order sliding mode observer for anomaly detection in TCP networks: From theory to practice,” in *Proc. Conf. Decision Control*, Atlanta, GA, USA, Dec. 2010, pp. 5120–5125.

[139] S. Rahme, Y. Labit, F. Gouaisbaut, and T. Floquet, “Sliding modes for anomaly observation in TCP networks: From theory to practice,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 21, no. 3, pp. 1031–1038, May 2013.

[140] Y. Lei, Y. Yuan, and J. Zhao, “Model-based detection and monitoring of the intermittent connections for CAN networks,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 6, pp. 2912–2921, Jun. 2014.

[141] S. Kelkar and R. Kamal, “Adaptive fault diagnosis algorithm for controller area network,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 10, pp. 5527–5537, Oct. 2014.

[142] S. Stankovic, M. Stankovic, and D. Stipanovic, “Consensus based overlapping decentralized estimation with missing observation and communication faults,” *Automatica*, vol. 45, no. 6, pp. 1397–1406, Jun. 2009.

[143] C. Keliris, M. Polycarpou, and T. Parisini, “A distributed fault detection filtering approach for a class of interconnected continuous-time nonlinear systems,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 58, no. 8, pp. 2032–2047, Aug. 2013.

[144] P. Menon and C. Edwards, “Robust fault estimation using relative information in linear multi-agent networks,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 59, no. 2, pp. 477–482, Feb. 2014.

- [145] N. Lechvin and C. Rabbath, "Decentralized detection of a class of non-abrupt faults with application to formations of unmanned airships," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 17, no. 2, pp. 484–493, Mar. 2009.
- [146] A. El-Zonkoly, "Fault diagnosis in distribution networks with distributed generation," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 7, pp. 1482–1490, Jul. 2011.
- [147] H. Chen and S. Lu, "Fault diagnosis digital method for power transistors in power converters of switched reluctance motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 2, pp. 749–763, Feb. 2013.
- [148] N. Freire, J. Estima, and A. Cardoso, "Open-circuit fault diagnosis in PMSG drives for wind turbine applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 3957–3967, Sep. 2013.
- [149] M. Shahbazi, E. Jamshidpour, P. Poure, S. Saadate, and M. Zolghadri, "Open and short-circuit switch fault diagnosis for nonisolated dc–dc converters using field programmable gate array," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 4136–4145, Sep. 2013.
- [150] J. Estima and A. Cardoso, "A new algorithm for real-time multiple open-circuit fault diagnosis in voltage-fed PWM motor drives by the reference current errors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 8, pp. 3496–3505, Aug. 2013.
- [151] M. Bouzid and G. Champenois, "New expression of symmetrical components of the inductor motor under stator faults," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 4093–4102, Sep. 2013.
- [152] P. Samara, G. Fouskitakis, J. Sakellariou, and S. Fassois, "A statistical method for the detection of sensor abrupt faults in aircraft control systems," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 16, no. 4, pp. 789–798, Jul. 2008.



- [153] L. Hong and J. Dhupia, "A time domain approach to diagnose gearbox fault based on measured vibration signals," *J. Sound Vib.*, vol. 333, no. 7, pp. 2164–2180, Mar. 2014.
- [154] V. Do and U. Chong, "Signal model-based fault detection and diagnosis for induction motors using features of vibration signal in two-dimension domain," *J. Mech. Eng.*, vol. 57, no. 9, pp. 655–666, Sep. 2011.
- [155] M. Shahriar, T. Ahsan, and U. Chong, "Fault diagnosis of induction motors utilizing local binary pattern-based texture analysis," *EURASIPJ. Image Video Process.*, vol. 2013, no. 1, pp. 1–11, May 2013.
- [156] G. Joksimovic, J. Riger, T. Wolbank, N. Peric, and M. Vasak, "Stator-current spectrum signature of healthy cage rotor induction machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 4025–4033, Sep. 2013.
- [157] X. Gong and W. Qiao, "Bearing fault diagnosis for direct-drive wind turbines via current-demodulated signals," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 8, pp. 3419–3428, Aug. 2013.
- [158] N. Pan, X. Wu, Y. Chi, X. Liu, and C. Liu, "Combined failure acoustical diagnosis based on improved frequency domain blind deconvolution," *J. Phys., Conf. Ser.*, vol. 364, no. 1, pp. 1–7, Jan. 2012.
- [159] Z. Feng and M. Zuo, "Fault diagnosis of planetary gearboxes via torsional vibration signal analysis," *Mech. Syst. Process.*, vol. 36, no. 2, pp. 401–421, Apr. 2013.
- [160] S. Nandi, T. Ilamparithi, S. Lee, and D. Hyun, "Detection of eccentricity faults in induction machines based on nameplate parameters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 5, pp. 1673–1683, May 2011.
- [161] Z. Gao, C. Cecati, and S. X. Ding, "A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques—Part I: Fault diagnosis with model-based and signal-based approaches," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 6, pp. 3757–3767, Jun. 2015.

- [162] C. Angeli and A. Chatzinkolaou, "On-line fault detection techniques for technical systems: A survey," *Int. J. Comput. Sci. Appl.*, vol. 1, no. 1, pp. 12–30, 2004.
- [163] X. Dai and Z. Gao, "From model, signal to knowledge: A data-driven perspective of fault detection and diagnosis," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 9, no. 4, pp. 2226–2238, Nov. 2013.
- [164] E. Henley, "Application of expert systems to fault diagnosis," in *Proc. AICHE Annu. Meet.*, San Francisco, CA, USA 1984.
- [165] D. Chester, D. Lamb, and P. Dhurjati, "Rule-based computer alarm analysis in chemical process plants," in *Proc. 7th Micro-Delcon*, New York, NY, USA, 1984, pp. 22–29.
- [166] N. Afgan et al., "An expert system concept for diagnosis and monitoring of gas turbine combustion chambers," *Appl. Thermal Eng.*, vol. 26, no. 7, pp. 766–771, May 2006.
- [167] A. Toffolo and A. Lazzaretto, "Energy system diagnosis by a fuzzy expert system with genetically evolved rules," *Int. J. Thermodyn.*, vol. 11, no. 3, pp. 115–121, Sep. 2008.
- [168] C. Nan, F. Khan, and M. Iqbal, "Real-time fault diagnosis using knowledge-based expert system," *Process Safety Environ. Protection*, vol. 86, no. 1, pp. 55–71, Jan. 2008.
- [169] S. Mostafa, M. Ahmad, M. Mohammed, and O. Obaid, "Implementing an expert diagnostic assistance system for car failure and malfunction," *Int. J. Comput. Sci.*, vol. 9, no. 2, pp. 1–7, Mar. 2012.
- [170] B. Ma, Z. Jiang, and Z. Wei, "Development of the task-based expert system for machine fault diagnosis," *J. Phys., Conf. Series*, vol. 364, no. 1, May 2012, Art. ID. 012043.
- [171] D. Kodavade1 and S. Apte, "A universal object oriented expert system frame work for fault diagnosis," *Int. J. Intell. Sci.*, vol. 2, pp. 63–70, Jul. 2012.

- [172] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, S. Kavuri, and K. Yin “A review of process fault detection and diagnosis part III: Process history based methods,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 27, no. 3, pp. 313–326, Mar. 2003.
- [173] M. Maurya, R. Rengaswamy, and V. Venkatasubramanian, “A signed directed graph and qualitative trend analysis-based framework for incipient fault diagnosis,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 85, no. 10, pp. 1407–1422, Oct. 2007.
- [174] D. Gao, C. Wu, B. Zhang, and X. Ma, “Signed directed graph and qualitative trend analysis based fault diagnosis in chemical industry,” *Chin. J. Chem. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 265–276, Apr. 2010.
- [175] X. Wang, U. Kruger, G. Irwin, G. McCullough, and N. McDowell, “Nonlinear PCA with the local approach for diesel engine fault detection and diagnosis,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 16, no. 1, pp. 122–129, Jan. 2008.
- [176] L. Elshenawy and H. Awad, “Recursive fault detection and isolation approaches of time-varying processes,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 51, no. 29, pp. 9812–9824, Jun. 2012.
- [177] B. Jiang, J. Xiang, and Y. Wang, “Rolling bearing fault diagnosis approach using probabilistic principal component analysis denoising and cyclic bispectrum,” *J. Vib. Control*, to be published, DOI: 10.1177/1077546314547533.
- [178] Y. Zhang, C. Bingham, and M. Gallimore, “Fault detection and diagnosis based on extensions of PCA,” *Adv. Mil. Technol.*, vol. 8, no. 2, pp. 1–15, Dec. 2013.
- [179] S. Ding, S. Yin, K. Peng, H. Hao, and B. Shen, “A novel scheme for key performance indicator prediction and diagnosis with application to an industrial hot strip mill,” *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 9, no. 4, pp. 2239–2247, Nov. 2013.

- [180] R. Vitalea, O. De-Noordb, and A. Ferrera, "A kernel-based approach for fault diagnosis in batch processes," *J. Chemometrics*, vol. 28, no. 8, pp. 697–707, May 2014.
- [181] X. Zhao, Y. Xue, and T. Wang, "Fault detection of batch process based on multi-way Kernel T-PLS," *J. Chem. Pharm. Res.*, vol. 6, no. 7, pp. 338–346, Jul. 2014.
- [182] Y. Zhang, N. Yang, and S. Li, "Fault isolation of nonlinear processes based on fault direction and features," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 22, no. 4, pp. 1567–1572, Jul. 2014.
- [183] D. Tsai, S. Wu, and W. Chiu, "Defect detection in solar modules using ICA basis images," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 9, no. 1, pp. 122–131, Feb. 2013.
- [184] Y. Guo, J. Na, B. Li, and R. Fung, "Envelope extraction based dimension reduction for independent component analysis in fault diagnosis of rolling element bearing," *J. Vib. Control*, vol. 333, no. 13, pp. 2983–2994, Jun. 2014.
- [185] C. Tan et al., "A review of feature extraction software for microarray gene expression data," *Biomed Res. Int.*, Sep. 2014, Art. ID. 213656.
- [186] M. Ma, D. Wong, S. Jang, and S. Tseng, "Fault detection based on statistical multivariate analysis and microarray visualization," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 6, no. 1, pp. 18–24, Feb. 2010.
- [187] D. Tax, A. Ypma, and R. Duin, "Pump failure determination using support vector data description," in *Proc. Lecture Notes Comput. Sci.*, Jul. 1999, vol. 1642, pp. 415–420.
- [188] M. Rychetsky, S. Ortman, and M. Glesner, "Support vector for engine knock detection," in *Proc. Int. Joint Conf. Neural Netw.*, Washington, DC, USA, Jul. 1999, pp. 969–974.

- [189] A. Widodo and B. Yang, "Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, no. 6, pp. 2560–2574, Aug. 2007.
- [190] S. Yin, X. Gao, H. Karimi, and X. Zhu, "Study on support vector machine- based fault detection in Tennessee Eastman Process," *Abstract Appl. Anal.*, vol. 2014, 2014, Art. ID. 836895.
- [191] M. Namdari, H. Jazayeri-Rad, and S. Hashemi, "Process fault diagnosis using support vector machines with a genetic algorithm based parameter tuning," *J. Autom. Control*, vol. 2, no. 1, pp. 1–7, Jan. 2014.
- [192] Z. Sahri and R. Yusof, "Support vector machine-based fault diagnosis of power transformer using k-nearest-neighbor imputed DGA dataset," *J. Comput. Commun.*, vol. 2, no. 9, pp. 22–31, Jul. 2014.
- [193] F. Ye, Z. Zhang, K. Chakrabarty, and X. Gu, "Board-level functional fault diagnosis using multikernel support vector machines and incremental learning," *IEEE Trans. Comput.-Aided Design Integr. Circuits Syst.*, vol. 33, no. 2, pp. 279–290, Feb. 2014.
- [194] Y. Shatnawi and M. Al-Khassaweneh, "Fault diagnosis in internal combustion engines using extension neural network," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 3, pp. 1434–1443, Mar. 2014.
- [195] C. Yan, H. Zhang, and L. Xu, "A novel real-time fault diagnosis system for steam turbine generator set by using strata hierarchical artificial neural network," *Energy Power Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 7–16, Aug. 2009.
- [196] O. Elnokity, I. Mahmoud, M. Refai, and H. Farahat, "ANN based sensor faults detection, isolation and reading estimates-SFDIRE: Applied in a nuclear process," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 49, no. 11, pp. 131–142, Nov. 2012.
- [197] S. Toma, L. Capocchi, and G. Capolino, "Wound-rotor induction generator inter-turn short-circuits diagnosis using a new digital neural

network,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 4043–4052, Sep. 2013.

[198] D. Leite, M. Hell, P. Costa, and F. Gomide, “Real-time fault diagnosis of nonlinear systems,” *Nonlinear Anal.*, vol. 71, no. 12, pp. 2665–2673, Dec. 2009.

[199] M. Valtierra-Rodriguez, R. Romero-Troncoso, R. Osornio-Rios, and A. Garcia-Perez, “Detection and classification of single and combined power quality disturbances using neural networks,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 5, pp. 2473–2482, May 2014.

[200] F. Zidani, D. Diallo, M. Benbouzid, and R. Nait-Said, “A fuzzy-based approach for the diagnosis of fault modes in a voltage-fed PWM inverter induction motor drive,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 2, pp. 586–593, Feb. 2008.

[201] O. Linda, D. Wijayasekara, M. Manic, and C. Rieger, “FN-DFE: Fuzzy-neural data fusion engine for enhanced resilient state-awareness of hybrid energy systems,” *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 44, no. 11, pp. 2065–2075, Nov. 2014.

[202] H. Cho, J. Knowles, M. Fadali, and K. Lee, “Fault detection and isolation of induction motors using recurrent neural networks and dynamic Bayesian modelling,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 18, no. 2, pp. 430–437, Feb. 2010.

[203] O. Ozgonenel and T. Yalcin, “A complete motor protection algorithm based on PCA and ANN: A real time study,” *Turkish J. Elect. Eng. Comput. Sci.*, vol. 19, no. 3, pp. 317–334, May 2011.

[204] Z. Wang, “Fault diagnosis method based on fuzzy support vector machines and self-organizing map neural network,” *Int. J. Adv. Comput. Technol.*, vol. 4, no. 9, pp. 139–147, Oct. 2012.

- [205] M. Grbovic, W. Li, N. Subrahmanya, A. Usadi, and S. Vucetic, "Cold start approach for data-driven fault detection," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 9, no. 4, pp. 2264–2273, Nov. 2013.
- [206] D. He, R. Li, and J. Zhu, "Plastic bearing fault diagnosis based on a two- step data mining approach," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 8, pp. 3429–3440, Aug. 2013.
- [207] A. Soualhi, G. Clerc, and H. Razik, "Detection and diagnosis of faults in induction motor using an improved artificial ant clustering technique," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 4053–4062, Sep. 2013.
- [208] J. Seshadrinath, B. Singh, and B. Panigrahi, "Vibration analysis based in- terturn fault diagnosis in induction machines," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 10, no. 1, pp. 340–350, Feb. 2014.
- [209] B. Ebrahimi, M. Roshtkhari, J. Faiz, and S. Khatami, "Advanced eccentricity fault recognition in permanent magnet synchronous motors using stator current signature analysis," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 4, pp. 2041–2052, Apr. 2014.
- [210] N. Sheibat-Othman, N. Laouti, J. Valour, and S. Othman, "Support vector machines combined to observers for fault diagnosis in chemical reactors," *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 92, pp. 685–694, Apr. 2014.
- [211] X. Zhang, *Auxiliary Signal Design in Fault Detection and Diagnosis*. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 1989.
- [212] F. Kerestecioglu, *Change Detection and Input Design in Dynamic Systems*. Taunton, U.K.: Research Studies Press, 1993.
- [213] S. Campbell and R. Nikoukhah, *Auxiliary Signal Design for Failure Detection*. Princeton, NJ, USA: Princeton Univ. Press, 2004.
- [214] J. Scott, R. Funderisen, R. Braatz, and D. Raimondo, "Input design for guaranteed fault diagnosis using zonotopes," *Automatica*, vol. 50, no. 6, pp. 1580–1589, Jun. 2014.

- [215] J. Scott, G. Marseglia, L. Magni, R. Braatz, and D. Raimondo, "A hybrid stochastic-deterministic input design method for active fault diagnosis," in Proc. IEEE Conf. Decision Control, Florence, Italy, Dec. 2013, pp. 5656–5661.
- [216] M. Simandl and I. Puncochar, "Active fault detection and control: Unified formulation and optimal design," *Automatica*, vol. 45, no. 9, pp. 2052–2059, Sep. 2009.
- [217] A. Ashari, R. Nikoukhah, and S. Campbell, "Active robust fault detection in closed-loop systems: Quadratic optimization approach," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 57, no. 10, pp. 2532–2544, Oct. 2012.
- [218] X. Pu, T. Nguyen, D. Lee, K. Lee, and J. Kim, "Fault diagnosis of DC-link capacitors in three-phase AC/DC PWM converters by online estimation of equivalent series resistance," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 4118–4127, Sep. 2013.
- [219] K. Liu, Z. Zhu, and D. Stone, "Parameter estimation for condition monitoring of PMSM stator winding and rotor permanent magnets," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 12, pp. 5902–5913, Dec. 2013.
- [220] Z. Chen, F. Lin, C. Wang, L. Wang, and M. Xu, "Active diagnosability of discrete event systems and its applications to battery fault diagnosis," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 22, no. 5, pp. 1892–1898, Sep. 2014.
- [221] H. Henao, G.-A. Capolino, M. Fernández-Cabanas, F. Filippetti, C. Bruzzese, E. Strangas, R. Pusca, J. Estima, M. Riera-Guasp, and S.H. Kia, "Trends in Fault Diagnosis for Electrical Machines," *IEEE Ind. Electron. Magazine*, June 2014, pp. 31–42.
- [222] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, and G.-A. Capolino, "Advances in diagnostic techniques for induction machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 12, pp. 4109–4126, 2008.



- [223] F.Filippetti, A. Bellini, G.-A.Capolino, “Condition Monitoring and Diagnosis of Rotor Faults in Induction Machines: State of Art and Future Perspectives” ,” in Proc. IEEE Workshop Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD’2013), Paris, France March 11–12, 2013, pp. 194–207.
- [224] S. H. Kia, H. Henao, and G.-A. Capolino, “Efficient digital signal processing techniques for induction machine fault diagnosis,” in Proc. IEEE Workshop Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD’2013), Paris, France, March 11–12, 2013, pp. 230–244.
- [225] M. Pineda-Sanchez, J. Perez-Cruz, J. Roger-Folch, M. Riera-Guasp,A.Sapena-Baño, and R.Puche-Panadero, “Diagnosis of Induction Motor Faults using a DSP and Advanced Demodulation Techniques,” in Proc. IEEE Int. Symp. Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED’2013), Valencia, Spain, Aug. 27– 30, 2013, pp. 69–76.
- [226] B. Xu, L. Sun, L. Xu, G. Xu, “Improvement of the Hilbert Method via ESPRIT for Detecting Rotor Fault in Induction Motors at Low Slip,” IEEE Trans. Energy Conv., Vol. 28, No. 1, pp. 225–233, March 2013.
- [227] M.Riera-Guasp, J. Pons-Llinares, V. Climente-Alarcon, F. Vedreño-Santos, M. Pineda-Sanchez, J. A. Antonino-Daviu, M. Puche- Panadero, J. Perez-Cruz, and J. Roger-Folch, “Diagnosis of induction machines under non-stationary conditions: Concepts and tools,” in Proc. IEEE Workshop Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD’2013), Paris, France, Mar. 11–12, 2013, pp. 218–229.
- [228] V.Climente-Alarcon, J.A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, and M. Vlcek, ”Induction Motor Diagnosis by Advanced Notch FIR Filters and the Wigner–Ville Distribution”, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 8, pp.4217–4227, August 2014.

- [229] J.Pons-Llinares, M.Riera-Guasp, J.A. Antonino-Daviu, F. Vedreño-Santos, “Transient Diagnosis of Induction Generators via Atom-Based Time-Frequency Transforms”, in Proc. Int. Conf. Electrical Machines (ICEM’2014), Berlin, Germany, Sept.2–5, 2014. pp. 1787 – 1793
- [230] J.Antonino-Daviu, S.Aviyente, E. G. Strangas, M. Riera-Guasp, J.Roger-Folch ,Rafael B. Pérez, “An EMD–based invariant feature extraction algorithm for rotor bar condition monitoring”, in Proc. IEEE Int. Symp. Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives (SDEMPED’2011), Bologna, Italy, Sept.5–8, 2011, pp.679– 675.
- [231] F, Vedreño-Santos, M.Riera-Guasp, H,Henao, M.Pineda-Sánchez, and R,Puche-Panadero, ”Diagnosis of Rotor and Stator Asymmetries in Wound-Rotor Induction Machines Under Nonstationary Operation Through the Instantaneous Frequency”, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 9, pp.4247–4259, Sep. 2014.
- [232] Y. Gritli, L. Zarri, C. Rossi, F. Filippetti, G.-A. Capolino, and D. Casadei, “Advanced diagnosis of electrical faults in wound rotor induction machines,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 9, pp. 4012–4024, Sep. 2013.
- [233] T. Boukra, A. Lebaroud, and G. Clerc, “Statistical and neural-network approaches for the classification of induction machine faults using the ambiguity plane representation,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 9, pp. 4034–4042, Sept. 2013.
- [234] P. Gardel, D. Morinigo-Sotelo, O. Duque-Perez, M. Perez-Alonso, and L.A. Garcia-Escudero, “Neural network broken bar detection using time
- [235] S. Hamdani, H. Mezerreg, B. Boutikar, N. Lahcene, O. Touhami, and R. Ibtouen, “Rotor Fault Diagnosis in a Squirrel–Cage Induction Machine Using Support Vector,” in Proc. Int. Conf. Electrical Machines (ICEM’2012), Marseille, France, Sept. 2–5, 2012, pp. 1815– 1820.

- [236] A. Soualhi, G. Clerc, and H. Razik “Detection and Diagnosis of Faults in Induction Motor Using an Improved Artificial Ant Clustering Technique,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 4053–4062, Sept. 2013.
- [237] P. Karvelis, G. Georgoulas, C.D. Stylios, I.P. Tsoumas, J. Antonino-Daviu, and V. Climente-Alarcón, “An Intelligent Icons Approach for Rotor Bar Fault Detections,” in *Proc. IEEE Annu. Conf. Ind. Electron. (IECON’2013)*, Vienna, Austria, Nov. 10–13, 2013, pp. 5526–5531.
- [238] F. Ferracuti, A. Giantomassi, S. Iarlori, G. Ippoliti, and S. Longhi, “Induction Motor Fault Detection and Diagnosis using KDE and Kullback-Leibler Divergence,” in *Proc. IEEE Annu. Conf. Ind. Electron. (IECON’2013)*, Vienna, Austria, Nov. 10–13, 2013, pp. 2923–2928.
- [239] R. Romary, R. Pusca, J. P. Lecoite, and J. F. Brudny, “Electrical machines fault diagnosis by stray flux analysis,” in *Proc. IEEE Workshop Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD’2013)*, Paris, France, Mar. 11–12, 2013, pp. 245–254.
- [240] K.N. Gyftakis and J.C. Kappatou, “Evaluation of the Broken Bar Fault Detectability Depending on the Rotor Bar Number,” in *Proc. IEEE Annu. Conf. Ind. Electron. (IECON’2013)*, Vienna, Austria, Nov. 10–13, 2013, pp. 2798–2803.
- [241] C. Concari, G. Franceschini, C. Tassoni, and A. Toscani, “Validation of a Faulted Rotor Induction Machine Model With an Insightful Geometrical Interpretation of Physical Quantities,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 4074–4083, Sept. 2013.
- [242] V. Climente-Alarcon, J.A. Antonino-Daviu, E. Strangas, M. Riera-Guasp, “Bar Breakage Mechanism and Prognosis in an Induction Motor,” in *Proc. IEEE Int. Symp. Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED’2013)*, Valencia, Spain, Aug. 27–30, 2013, pp. 592–599.

- [243] G.M. Joksimovic, J. Riger, T.M. Wolbank, N. Peric, and M. Vašak, “Stator–Current Spectrum Signature of Healthy Cage Rotor Induction Machines,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 4025–4033, Sept. 2013.
- [244] R. Fiser, K. Drobnic, H. Lavric, M. Nemec, V. Ambrozic, and D. Makuc, “Induction motor parameters in case of rotor electrical asymmetry,” in *Proc. IEEE Workshop Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD’2013)*, Paris, France, Mar. 11–12, 2013, pp. 271–278.
- [245] D.V. Spyropoulos, K.N. Gyftakis, J. Kappatou, E.D. Mitronikas, “The Influence of the Broken Bar Fault on the Magnetic Field and Electromagnetic Torque in 3–phase Induction Motors,” in *Proc. Int. Conf. Electrical Machines (ICEM’2012)*, Marseille, France, Sept. 2–5, 2012, pp. 1866–1872.
- [246] J. Martinez, A. Belahcen, and A. Arkkio, “Combined FE and Two Dimensional Spectral Analysis of Broken Cage Faults in Induction Motors,” in *Proc. IEEE Annu. Conf. Ind. Electron. (IECON’2013)*, Vienna, Austria, Nov. 10–13, 2013, pp. 2674–2679.
- [247] N. Lahoud, J. Faucher, D. Malec, and P. Maussion, “Electrical Aging of the Insulation of Low-Voltage Machines: Model Definition and Test With the Design of Experiments”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp.4147–4155, Sep. 2013.
- [248] A. Gandhi, T. Corrigan, and L. Parsa, “Recent Advances in Modeling and Online Detection of Stator Interturn Faults in Electrical Motors”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 5, pp.1567–1575, May 2011.
- [249] M.F. Cabanas, J.G. Normiella, M.G. Melero, C. H. Rojas, J.M. Cano, F.Pedrayes, G. A. Orcajo, ” Detection of Stator Winding Insulation Failures: On–line and Off–line Tests”, in *Proc. IEEE Workshop Electrical Machines*

Design, Control and Diagnosis (WEMDCD'2013), Paris, France, March 11–12, 2013, pp. 208–217.

[250] L. Fornasari, A. Caprara, G. C. Montanari, “Partial Discharge measurements in Electrical Machines controlled by Variable Speed Drives: from Design Validation to permanent PD Monitoring”, in Proc. IEEE Int. Symp. Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED'2013), Aug.27–30, 2013, pp.384– 390.

[251] A.Picot, D. Malec, P. Maussion, “Improvements on Lifespan Modeling of the Insulation of Low Voltage Machines with Response Surface and Analysis of Variance”, in Proc. IEEE Int. Symp. Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED'2013), Valencia, Spain, Aug. 27–30, 2013, pp.77–84.

[252] K. Bouzid and G. Champenois, “New Expressions of Symmetrical Components of the Induction Motor Under Stator Faults,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 9, pp. 4093–4102, Sep. 2013. main and current spectrum data,” in Proc. Int. Conf. Electrical

[253] S. Cheng, P. Zhang, and T.G. Habetler, “An Impedance Identification Approach to Sensitive Detection and Location of Stator Turn-to-Turn Faults in a Closed-Loop Multiple-Motor Drive,” IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 58, No. 5, pp. 1545–1554, May 2011.

[254] S. Bakhri, N. Ertugrul, and W.L. Soong, “Negative Sequence Current Compensation for Stator Shorted Turn Detection in Induction Motors”, in Proc. IEEE Annu. Conf. Ind. Electron. (IECON'2012), Montréal, Canada, Oct.25–28, 2012, pp. 1921–1926.

[255] R. Pusca, C. Demian, D. Mercier, E. Lefevre, and R. Romary, “An improvement of a diagnosis procedure for AC machines using two external flux sensors based on a fusion process with belief functions” in Proc. IEEE Annu. Conf. Ind. Electron. (IECON'2012), Montréal, Canada, Oct.25–28, 2012, pp.5096–5101.

- [256] L. Frosini, A. Borin, L. Girometta, G. Venchi, “A novel approach to detect short circuits in low voltage induction motor by stray flux measurement”, in Proc. Int. Conf. Electrical Machines (ICEM’2012), Marseille, France, Sept. 2–5, pp. 1536–1542.
- [257] S. Toma, L. Capocchi, G.-A. Capolino, “Wound–Rotor Induction Generator Inter–Turn Short–Circuits Diagnosis Using a New Digital Neural Network”, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 9, pp.4043– 4052, Sep. 2013.
- [258] Wolkiewicz M., Kowalski C.T., “On-line Neural Network-based Stator Fault Diagnosis System of the Converter-Fed Induction Motor Drive”, in Proc. IEEE Annu. Conf. Ind. Electron. (IECON’2013), Vienna, Austria, Nov. 10–13, 2013, pp. 5561-5566
- [259] C. Concari, G. Franceschini, and C. Tassoni, “Toward practical quantification of induction drive mixed eccentricity,” IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 47, no. 3, pp. 1232–1239, May/June 2011.
- [260] F. Vedreño-Santos, M. Riera-Guasp, H. Henao, M. Pineda-Sanchez, and J. A. Antonino-Daviu, “Diagnosis of eccentricity in induction machines working under fluctuating load conditions, through the instantaneous frequency,” in Proc. IEEE Annu. Conf. Ind. Electron. (IECON’2012), Montréal, Canada, Oct. 25–28, 2012, pp. 5108–5113.
- [261] S. Nandi, T. C. Ilamparithi, S. B. Lee, and D. Hyun, “Detection of eccentricity faults in induction machines based on nameplate parameters,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 5, pp. 1673– 1683, May 2011.
- [262] A. Ceban, R. Pusca, and R. Romary, ”Study of rotor faults in induction motors using external magnetic field analysis,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 5, pp. 2082–2093, May 2012.
- [263] K. N. Gyftakis and J. C. Kappatou, “The Zero–Sequence Current Spectrum as an On–Line Static Eccentricity Diagnostic Mean in  $\Delta$ –Connected PSH–Induction Motors,” in Proc. IEEE Int. Symp. Diagnostics

for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED'2013), Valencia, Spain, Aug. 27–30, 2013, pp. 302–308.

[264] A. J. Fernández Gómez, A. Dziechciarz, and T. J. Sobczyk, “Mathematical Modeling of Eccentricities in Induction Machines by the Mono–harmonic Model,” in Proc. IEEE Int. Symp. Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED'2013), Valencia, Spain, Aug. 27–30, 2013, pp. 317–322.

[265] F. Immovilli, C. Bianchini, M. Cocconcelli, A. Bellini, and R. Rubini “Bearing Fault Model for Induction Motor With Externally Induced Vibration ,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 8, pp. 3408–3418, Aug. 2013.

[266] H. Tischmacher and S. Gattermann, “Investigations on Bearing Currents in Converter–Fed Electrical Motors,” in Proc. Int. Conf. Electrical Machines (ICEM'2012), Marseille, France, Sept. 2–5, 2012, pp. 1762–1768.

[267] M. Kriese, E. Wittek, S. Gattermann, H. Tischmacher, G. Poll, and B. Ponick, “Influence of Bearing Currents on the Bearing Lifetime for Converter Driven Machines,” in Proc. Int. Conf. Electrical Machines (ICEM'2012), Marseille, France, Sept. 2–5, 2012, pp. 1733–1737.

[268] H.L. Schmitt, L.R.B. Silva, P.R. Scalassara, and A. Goedel, “Bearing fault detection using relative entropy of wavelet components and artificial neural networks,” in Proc. IEEE Int. Symp. Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED'2013), Valencia, Spain, Aug. 27–30, 2013, pp. 538–543.

[269] C. Harlişca, L. Szabó, L. Frosini, and A. Albini , “Bearing Faults Detection in Induction Machines Based on Statistical Processing of the Stray Fluxes Measurements,” in Proc. IEEE Int. Symp. Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED'2013), Valencia, Spain, Aug. 27–30, 2013, pp. 371–376.

- [270] M. Delgado, G. Cirrincione, A. Garcia, J. A. Ortega, and H. Henao, "Bearing fault detection by a novel condition–monitoring scheme based on statistical–time features and neural networks," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 8, pp. 3398–3407, Aug. 2013.
- [271] L. Batista, B. Badri, R. Sabourin, and M. Thomas, "Detecting Bearing Defects under High Noise Levels: A Classifier Fusion Approach," in *Proc. IEEE Annu. Conf. Ind. Electron. (IECON'2012)*, Montreal, Canada, Oct. 25–28, 2012, pp. 3880–3886.
- [272] J. Harmouche, C. Delpha, and D. Diallo, "Global Approach for the Classification of Bearing Faults Conditions Using Spectral Features," in *Proc. IEEE Annu. Conf. Ind. Electron. (IECON'2013)*, Vienna, Austria, Nov.–13, 2013, pp. 7352–7357.
- [273] He, L. Ruoyu, and Z. Junda, "Plastic Bearing Fault Diagnosis Based on a Two–Step Data Mining Approach," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 8, pp. 3429–3440, Aug. 2013.
- [274] E. G. Strangas, "Response of electrical drives to gear and bearing faults—Diagnosis under transient and steady state conditions," in *Proc. IEEE Workshop Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD'2013)*, Paris, France, March 11–12, 2013, pp. 287–294.
- [275] A. Soualhi, G. Clerc, H. Razik, and F. Rivas, "Long–Term Prediction of Bearing Condition by the Neo–Fuzzy Neuron," in *Proc. IEEE Int. Symp. Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED'2013)*, Valencia, Spain, Aug. 27–30, 2013, pp. 586–591.
- [276] B. Zhang, C. Sconyers, C. Byington, R. Patrick, M. Orchard, and G. Vachtsevanos, "A Probabilistic Fault Detection Approach: Application to Bearing Fault Detection," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 5, pp. 2011–2018, May 2011.



- [277] S. H. Kia, H. Henao, and G.-A. Capolino, "A comparative study of acoustic, vibration and stator current signatures for gear tooth fault diagnosis," in Proc. Int. Conf. Electrical Machines (ICEM'2012), Marseille, France, Sept. 2–5, 2012, pp. 1512–1517.
- [278] S.H. Kia, H. Henao, G.-A. Capolino, "Gear Tooth Surface Damage Fault Detection Using Induction Machine Electrical Signature Analysis," in Proc. IEEE Int. Symp. Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED'2013), Valencia, Spain, Aug. 27–30, 2013, pp. 358–364.
- [279] S.H. Kia, H. Henao, G.-A. Capolino, "Gear Tooth Surface Damage Fault Profile Identification Using Stator Current Space Vector Instantaneous Frequency," in Proc. IEEE Annu. Conf. Ind. Electron. (IECON'2013), Vienna, Austria, Nov. 10–13, 2013, pp. 5482–5488.
- [280] D. Zurita, M. Delgado, J.A. Ortega, L. Romeral, "Intelligent Sensor based on Acoustic Emission Analysis applied to Gear Fault Diagnosis," in Proc. IEEE Int. Symp. Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED'2013), Valencia, Spain, Aug. 27–30, 2013, pp. 169–176.
- [281] I.X. Bogiatzidis, A.N. Safacas, A.N., and E.D. Mitronikas, "Plastic Bearing Fault Diagnosis Based on a Two-Step Data Mining Approach," IEEE [282] Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 8, pp. 3441–3453, Aug. 2013.
- H. Henao, S.H. Kia, G.-A. Capolino, "Torsional-Vibration Assessment and Gear-Fault Diagnosis in Railway Traction System," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 5, pp. 1707–1717, May 2011.
- [283] Z. Daneshi-Far, H. Henao, and G.-A. Capolino, "Planetary Gearbox Effects on Induction Machine in Wind Turbine: Modeling and Analysis," in Proc. Int. Conf. Electrical Machines (ICEM'2012), Marseille, France, Sept. 2–5, 2012, pp. 1788–1794.

- [284] L. Zarri, M. Mengoni, Y. Gritli, A. Tani, F. Filippetti, G. Serra, and D. Casadei, "Detection and Localization of Stator Resistance Dissymmetry Based on Multiple Reference Frame Controllers in Multiphase Induction Motor Drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 8, pp. 3506–3518, Aug. 2013.
- [285] L. Zarri, M. Mengoni, A. Tani, Y. Gritli, G. Serra, F. Filippetti, D. Casadei, "Full Detection of High-Resistance Connections in Multiphase Induction Machines," in *Proc. IEEE Int. Symp. Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED'2013)*, Valencia, Spain, Aug. 27–30, 2013, pp. 505–511.
- [286] M. Delgado Prieto, A. Garcia Espinosa, J.R. Riba Ruiz, J.C. Urresty, J.A. Ortega, "Feature Extraction of Demagnetization Faults in Permanent-Magnet Synchronous Motors Based on Box-Counting Fractal Dimension", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 58, No. 5, pp. 1594–1605, May 2011
- [287] D. Casadei, F. Filippetti, C. Rossi, and A. Stefani, "Magnets faults characterization for Permanent Magnet Synchronous Motors," in *Proc. IEEE Int. Symp. Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED'2009)*, Cargèse, France, Aug. 31 – Sept 3, 2009, pp. 1–6.
- [288] J. Urresty, J.R. Riba, M. Delgado, L. Romeral, "Detection of Demagnetization Faults in Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors by Means of the Zero-Sequence Voltage Component", *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 27, No. 1, pp. 42–51 March 2012.
- [289] J. Urresty, R. Atashkhoei, J.R. Riba, L. Romeral, S. Royo "Shaft Trajectory Analysis in a Partially Demagnetized Permanent-Magnet Synchronous Motor", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, No. 8, pp. 3454–3461, August 2013.
- [290] A. Sarikhani, O.A. Mohammed, "Inter-Turn Fault Detection in PMSynchronous Machines by Physics-Based Back Electromotive

- ForceEstimation”, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 60, No. 8, pp.3472–3484, August 2013
- [291] B. Aubert, J. Regnier, S.Caux, D. Alejo, “On–line Inter–Turn Short–Circuit detection in Permanent Magnet Synchronous Generators”, in Proc. IEEE Int. Symp. Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED’2013), Valencia, Spain, Aug. 27–30, 2013, pp.329–335.
- [292] S.Cheng, T.G. Habetler, “Using Only the DC Current Information to Detect Stator Turn Faults in Automotive Claw–Pole Generators”, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 60, No. 8, pp.3462–3471, August 2013.
- [293] X.Gong, W. Qiao, “Bearing Fault Diagnosis for Direct–Drive Wind Turbines via Current–Demodulated Signals”, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 60, No. 8, pp.3419–3428, August 2013.
- [294] Mohammadpour A., Sadeghi S. , Parsa, L. , “A Generalized Fault–Tolerant Control Strategy for Five–Phase PM Motor Drives Considering Star, Pentagon, and Pentacle Connections of Stator Windings”, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 61, No. 1, pp.63–75 January 2014.
- [295] H. Saavedra, J.R. Riba, L. Romeral “Inter–turn Fault Detection in Five–Phase PMSMs. Effects of the Fault Severity”, in Proc. IEEE Int. Symp. Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED’2013), Valencia, Spain, Aug. 27–30, 2013, pp.520–526.
- [296] S. Yang, A. Bryant, P. Mawby, X. Dawei, L. Ran and P. Tavner, “An industry–based survey of reliability in power electronic converters,” IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 47, no. 3, pp. 1441–1451, May/June 2011.
- [297] J.M. Anderson, R.W. Cox, and P. O’Connor, “Online Algorithm for Early Stage Fault Detection in IGBT Switches,” in Proc. IEEE Int. Symp. Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED’2013), Valencia, Spain, Aug. 27–30, 2013, pp.1–8.

- [298] M. Shahbazi, E. Jamshidpour, P. Poure, S. Saadate, and M.R.Zolghadri, "Open- and Short-Circuit Switch Fault Diagnosis for Nonisolated DC-DC Converters Using Field Programmable Gate Array," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 4136-4146, Sept. 2013.
- [299] J. O. Estima, N. M. A. Freire, and A. J. M. Cardoso, "Recent advances in fault diagnosis by Park's vector approach," in *Proc. IEEE Workshop Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD'2013)*, Paris, France, Mar. 11-12, 2013, pp. 277-286.
- [300] J. O. Estima and A. J. M. Cardoso, "A new algorithm for real-time multiple open-circuit fault diagnosis in voltage-fed PWM motor drives by the reference current errors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 8, pp. 3496-3505, Aug. 2013.
- [301] J. O. Estima and A. J. M. Cardoso, "A new approach for real-time multiple open-circuit fault diagnosis in voltage source inverters," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 47, no. 6, pp. 2487-2494, Nov./Dec. 2011.
- [302] N. M. A. Freire, J. O. Estima, and A. J. M. Cardoso, "Open-circuit fault diagnosis in PMSG drives for wind turbine applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 3957-3967, Sept. 2013.
- [303] W. Sleszynski, J. Nieznanski, and A. Cichowski, "Open-transistor fault diagnostics in voltage-source inverters by analyzing the load currents," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, pp. 4681-4688, Nov. 2009.
- [304] S.M.A. Cruz, M. Ferreira, A.M.S. Mendes, and A.J.M. Cardoso, "Analysis and Diagnosis of Open-Circuit Faults in Matrix Converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 5, pp. 1648-1661, May 2011.
- [305] D.U. Campos-Delgado and D. R. Espinoza-Trejo, "An Observer-Based Diagnosis Scheme for Single and Simultaneous Open-Switch Faults

in Induction Motor Drives,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol.58, no. 2, pp. 671–679, Feb. 2011.

[306] T. Orłowska-Kowalska, P. Sobanski, “Simple Sensorless Diagnosis Method for Open–Switch Faults in SVM–VSI–fed Induction Motor Drive,” in Proc. IEEE Annu. Conf. Ind. Electron. (IECON’2013), Vienna, Austria, Nov. 10–13, 2013, pp. 8210–8215.

[307] J.F. Martins, V.F. Pires, C.Lima, and A.J.Pires, “Fault detection and diagnosis of grid–connected power inverters using PCA and current mean value,” in Proc. IEEE Annu. Conf. Ind. Electron. (IECON’2012), Montreal, Canada, Oct. 25–28, 2012, pp. 5185–5190.

[308] C. Delpha, H. Chen, and D. Diallo, “SVM based diagnosis of inverter fed induction machine drive a new challenge,” in Proc. IEEE Annu. Conf. Ind. Electron. (IECON’2012), Montreal, Canada, Oct. 25–28, 2012, pp. 3931–3936.

[309] X-S. Pu, T. H. Nguyen, D-C. Lee, K-B. Lee, and J-M. Kim, “Fault Diagnosis of DC–Link Capacitors in Three–Phase AC/DC PWM Converters by Online Estimation of Equivalent Series Resistance,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 9, pp. 4118–4127, Sept. 2013.

[310] H.A. Sher, K.E Addoweesh, Y. Khan, and S.A.R. Kashif, “Performance of Inverter Fed Induction Motor under Open Circuit DC link Capacitor,” in Proc. IEEE Annu. Conf. Ind. Electron. (IECON’2012), Montreal, Canada, Oct. 25–28, 2012, pp. 651–655.

[311] A. Izadian and P. Khayyer, “Application of Kalman filters in model–based fault diagnosis of a DC–DC boost converter,” in Proc. IEEE Annu. Conf. Ind. Electron. (IECON’2010), Glendale, USA, Nov. 7– 10, 2010, pp. 369–372.

- [312] Y. Chen, X. Pei, S. Nie, and Y. Kang, "An Observer-Based Diagnosis Scheme for Single and Simultaneous Open-Switch Faults in Induction Motor Drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 5, pp. 1634–1647, May 2011.
- [313] B. Ji, V. Pickert, W.P. Cao, and L. Xing, "Onboard condition monitoring of solder fatigue in IGBT power modules," in *Proc. IEEE Int. Symp. Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED'2013)*, Valencia, Spain, Aug. 27–30, 2013, pp. 9–15.
- [314] I. Vaalasaranta, J. Pippola, and L. Frisk, "Power MOSFET failure and degradation mechanisms in flyback topology under high temperature and high humidity conditions," in *Proc. IEEE Int. Symp. Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED'2013)*, Valencia, Spain, Aug. 27–30, 2013, pp. 16–22.
- [315] B. R. O. Baptista, M.B. Abadi, A.M. S. Mendes, S. M. A. Cruz, "The Performance of a Three-Phase Induction Motor fed by a Three-Level NPC Converter with Fault Tolerant Control Strategies," in *Proc. IEEE Int. Symp. Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED'2013)*, Valencia, Spain, Aug. 27–30, 2013, pp. 497–504.
- [316] T.T.L.Pharm, F. Richardeau, and G. Gateau, "Real-Time Monitoring for a Five-Level Double-Boost Power Factor Controller Including Postfault Reconfiguration," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 4128–4135, Sept. 2013.
- [317] F. Carnielutti and H. Pinheiro, "New Modulation Strategy for Asymmetrical Cascaded Multilevel Converters Under Fault Conditions," in *Proc. IEEE Annu. Conf. Ind. Electron. (IECON'2013)*, Vienna, Austria, Nov. 10–13, 2013, pp. 1074–1079.
- [318] S. Khwan-on, L.de Lillo, L. Empringham, and P. Wheeler, "Fault-Tolerant Matrix Converter Motor Drives With Fault Detection of Open

Switch Faults,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 1, pp. 257–268, Jan. 2012.

[319] Y. Song, and B. Wang, “Survey on Reliability of Power Electronic Systems,” IEEE Trans. on Power Electronics vol. 28, no.1, pp. 591– 604, Jan. 2013.

[320] A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Techniques—Part I: Fault Diagnosis With Model-Based and Signal-Based Approaches

[321A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Techniques—Part II: Fault Diagnosis With Knowledge-Based and Hybrid/Active Approaches

[322] Advances in Electrical Machine, Power Electronic and Drive Condition Monitoring and Fault Detection: State of the Art

[322] <https://tailieu.vn/doc/may-dien-133577.html>