

# 페지추론을 이용한 전동기구동 펌프시스템의 고장진단

조운석\*, 류지수, 이기상  
단국대학교 전기공학과

## Fault Diagnosis of motor driven pump system based on fuzzy inference

Yun-seok Cho\*, Ji-su Ryu, Kee-sang Lee  
Dept. of Electrical Eng. Dankook Univ.

**Abstract** In this paper, a fault detection and isolation unit(FDIU) for a centrifugal pump system driven by DC-motor is proposed. The proposed scheme can be classified into the dedicated observer scheme(DOS). A fuzzy logic based inference engine is adopted for the isolation of each faults. Having the fuzzy inference engine, the proposed FDIU resolve a few important problems of the conventional DOSs with conventional two valued logic. The outputs of the proposed FDIU are not "ith fault occurred" but the grade of memberships that indicate the consistency of observed symptoms(residuals) with each fault symptoms stored in the rule base. The outputs can easily be transferred to the ranking of the fault possibilities and it will provide very useful informations in monitoring the process. The simulation results show that the FDIU has very good diagnostic ability even in the noisy environment.

## 1. 서 론

현대 산업용 프로세스의 동향은 자동화와 대형화로 특징 지어 질 수 있다. 이러한 동향은 고장으로 인한 운전정지와 손실을 증가시키므로 프로세스의 안정성 및 신뢰도의 수준이 더욱 높아져야 함을 의미하며 동시에 계통에 요구되는 안정성과 신뢰도 달성이 어려워지는 원인이 된다. 따라서 계통의 안정성 및 신뢰도 확보를 위한 기술의 개발을 요구한다.

고장 검출 기법에 관한 연구는 대규모 계통인 원자력 발전소, 비행 시스템 등과 같이 고도의 신뢰성이 요구되는 프로세스로부터 시작되었다. 그러나 70년대 초반까지는 주로 운전자의 경험과 하드웨어적 증거방식(Hardware Redundancy Methods : HRM)에 의존하는 고전적 기법이 사용되었다. 80년대 이후에는 고도의 컴퓨터 기술을 배경으로 신호 처리 기법, 시스템 해석 기법 등에 근거하여 기존의 HRM으로는 얻기 힘든 고성능을 갖는 여러 가지의 SRM(Software Redundancy Method)이 개발된 바 있다. [1][2]

본 연구에서는 화공 프로세스의 중요한 구성요소인 타이머 전동기구로 구동되는 원심 펌프에 의한 액체 수송관 시스템에 대하여 다루고자 한다. 고장 여부의 판별 기준이 되는 정보를 제공하기 위한 고장 판별 함수 발생 기구로서는 DOS(Dedicated Observer Scheme)이고, 고장 발생 시 습득된 데이터를 받아 저작 베이스를 참조하여 고장 요소(원인)를 식별하기 위한 고장 진단 논리로는 페지추론 알고리즘을 도입하였으며, 잊음 및 파라미터 불화설성이 어느정도 존재하는 경우에도 적용 할 수 있는 FDIU(Fault Detection and Isolation Unit)를 제안함으로서 신

질적 적용 가능성을 검토한다.

## 2. 진단 대상 시스템

### 2-1. 액체 수송계의 수학적 모델

본 논문에서 다루고자 하는 타이머 전동기로 구동되는 원심펌프에 의한 파이프 라인 액체 수송관 시스템의 수학적 모델 [3]을 상태 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a} & 0 \\ \frac{K_b}{J} & -\frac{(C_f + K_p)}{J} & -\frac{K_m}{J} \\ 0 & \frac{H_k}{A_{\infty}} & -\frac{(A_r + H_m)}{A_{\infty}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_a \quad (1)$$

$$\text{여기서, } x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta I_a(t) \\ \Delta w(t) \\ \Delta M(t) \end{bmatrix}, u = [u_a] = [\Delta u_a(t)]$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

위에서  $y_i$  ( $i=1, 2, 3$ )은 질량유속의 제어와 공정감시를 위하여 측정되어진 출력으로 본 계통의 경우에는 모든 상태변수를 측정 출력으로 선정하였다.

### 2-2. 진단 대상 시스템의 고장

직류전동기로 구동되는 펌프시스템의 각 구성요소에서 발생할 수 있는 고장과 그 원인은 표1에 나타내었다.

표1. 고장요소와 파라미터 변화의 관계[4][5]

고장 요소		파라미터 변화
직류 전동기	고장1: 브레이시 오손	1. 전기자 저항 증가
	고장2: 전기자 권선의 국부단락	2. 전기자 저항 감소, 전기자 인덕턴스 감소
	고장3: 베어링에 윤활유 과잉	3. 점성 마찰계수의 감소, 펌프 토크계수의 감소
원심 펌프	고장4: 베어링에 먼지가 있을때	4. 점성 마찰계수의 증가, 펌프 토크계수의 감소
	고장5: 공동화가 일어날때 (온도상승, gas bubble 생성)	5. 유체의 저항계수의 증가, 펌프의 특성계수의 감소
	고장6: 임펠러가 손상되었을때	6. 유체의 저항계수 증가, 펌프의 특성계수의 감소, 펌프 토크계수의 감소
	고장7: 파이프 내에서의 유량 유출	7. 출구 질량유속의 감소

### 3. 고장 검출 진단 유니트(FDIU)의 설계

본 장에서는 액체 수송계에 대한 「고장 검출 진단시스템」을 제안 설계한다. 제안된 FDIU는 고장 검출 및 진단에 사용될 정보 추출을 위한 잔차 발생 알고리즘과 잔차에 근거하여 고장 발생 여부를 판정하는 검출 논리 및 고장 원인 요소의 식별을 위한 퍼지 진단 논리로 구성되며, 구조는 그림1과 같다.

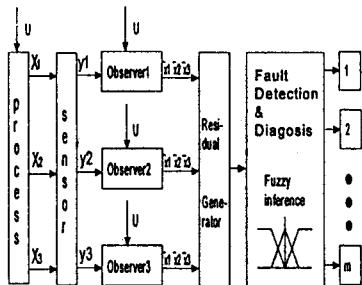


그림1. FDIU의 구조

#### 3-1. 관측자의 설계

식(1)은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (2)$$

이때 상태 관측자는 전기자전류, 전동기 및 펌프의 회전속도, 질량유속의 측정치에 의해 구동되며, 전차원 관측자 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{z}_k &= (A - I_k^T c_k)z + I_{kk}y_k + Bu_k \\ (k = 1, 2, 3), I_{kk} &: \text{관측자이동} \end{aligned} \quad (3)$$

위에서 k=1인 경우는 전동기의 전기자전류( $I_a$ ) 측정치에 근거하여 상태변수 ( $I_a, w, M$ )를 추정하도록 설계된 것이며 k=2, k=3인 경우는 각각 전동기로 구동된 원심펌프의 각속도 ( $w$ ), 파이프라인에서의 질량유속( $M$ )의 측정치에 근거하여 상태변수 ( $I_a, w, M$ )를 추정한다. 따라서 이들 세 관측자는 각 상태변수에 대한 3종의 정보를 제공한다.

#### 3-2. 센서 고장과 프로세스 고장의 검출

센서의 고장은 관측자에 오정보를 주게되므로 관측자 역시 잘못된 추정치를 출력하게 되어 FDIU 동작에 커다란 영향을 미치게 된다. 그러나 센서고장은 다음과 같이 정의되는

$$\begin{aligned} res(i, j, k) &= |\hat{x}_{ij} - \hat{x}_{ik}|, i = 1, 2, \dots, n, j, k = 1, \dots, m. \\ \hat{x}_{ij} &: DO(j) \text{ } \text{로 } \text{주정한 } i \text{ 번째 } \text{공정 } \text{출력변수의 } \text{추정치} \end{aligned}$$

$n$  : 공정 상태변수의 개수

$m$  : 측정 출력변수의 수

잔차를 서로 비교하므로 세 공정요소 고장과 구별되어지며, 또한 다수결 원칙에 의해 고장난 센서를 식별할수 있으므로 조기 예 검출되어질 수 있다.

고장 검출 및 진단논리에 사용되어질 또 다른 잔차를 다음과 같이 정의한다.

$$res2(i, j) = y_i - \hat{x}_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, \dots, m.$$

$y_i$  :  $i$  번째 공정 출력변수의 측정치

$\hat{x}_{ij}$  :  $DO(j)$   $\text{로 } \text{주정한 } i \text{ 번째 } \text{출력변수의 } \text{추정치}$

$m$  : 측정 출력변수의 수

위에서 정의된 잔차는 프로세스가 정상적으로 동작하는 경우 모두 영인 값을 가지며 고장 발생시 특정한 양상을 가지게 되므로써 공정 요소의 고장은 검출되어진다.

#### 3-3. 퍼지 추론을 이용한 공정요소 고장 진단논리

본 연구에서는 각각의 진단대상고장에 대한 시뮬레이션을 수행하여 각 고장이 발생한 경우, 공정 출력변수의 측정치들과 관측자에서 추정한 상태변수 추정치들 간의 잔차의 분포를 분석하고 이를 퍼지 이론에 도입하였다.

대상 시스템에서 진단하고자하는 대표적인 고장요소와 관련된 매개변수 영향을 표1에 나타내었고, 대상 시스템에서 한번에 하나의 고장만 발생한다는 가정을 전제로 하였다.

공정요소 고장 검출 진단 모사에서 발생된 잔차들은 3-2절에서 정의한 res2형이며 구체적인 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_1 &= x_1 = I_a(t), y_2 = w(t), y_3 = x_3 = M(t) \\ r_{11} &= x_1 - \hat{x}_{11}, r_{12} = x_1 - \hat{x}_{12}, r_{13} = x_1 - \hat{x}_{13}, \\ r_{21} &= x_2 - \hat{x}_{21}, r_{22} = x_2 - \hat{x}_{22}, r_{23} = x_2 - \hat{x}_{23}, \\ r_{31} &= x_3 - \hat{x}_{31}, r_{32} = x_3 - \hat{x}_{32}, r_{33} = x_3 - \hat{x}_{33}, \\ r_4 &= M_0(t) - \hat{M}_0(t) \end{aligned}$$

위에서 구해진 잔차들중 다음의 조건에 부합하도록 퍼지화할 잔차를 선정한다.

①  $r_i$ 에서  $i \neq j$  이도록 선정한다.

② 각각의 관측자로부터 하나씩 선정한다.

③ 각각의 잔차들이 서로 분류가 분명히 되는것을 선정한다.

구체 기반의 구축은 고장진단의 주축을 이루는 부분으로 입력 작용이 존재하지 않는 상태에의 모의 실험결과를 참조하여 다음과 같이 구축하였다.

- Rule1 : If( r1, r2, r3, r4 )=( AZ, AZ, AZ, AZ ) THEN Normal
- Rule2 : If( r1, r2, r3, r4 )=( NE, AZ, PS, AZ ) THEN Fault 1
- Rule3 : If( r1, r2, r3, r4 )=( PO, AZ, NS, AZ ) THEN Fault 2
- Rule4 : If( r1, r2, r3, r4 )=( AZ, AZ, PO, AZ ) THEN Fault 3
- Rule5 : If( r1, r2, r3, r4 )=( AZ, AZ, NE, AZ ) THEN Fault 4
- Rule6 : If( r1, r2, r3, r4 )=( AZ, PO, AZ, AZ ) THEN Fault 5
- Rule7 : If( r1, r2, r3, r4 )=( AZ, PO, PO, AZ ) THEN Fault 6
- Rule8 : If( r1, r2, r3, r4 )=( AZ, AZ, AZ, NE ) THEN Fault 7

앞의 규칙군에서 전진부 변수와 후진부 변수에는 다음과 같이 언어화가 부가되었다.

$r_{12} : AZ, PO, NE$	$Fault : AZ, PO$
$r_{23} : AZ, PO, NE$	$Normal : AZ, PO$
$r_{31} : AZ, PS, NS, PO, NE$	
$r_4 : AZ, NE$	

추론 방식은 FUZZY MODUS PONENS이며 퍼지 추론의 실제적 연산방법으로 Mamdani의 Max-Min 연산법을 채택하였다.[6]

#### 4. 모의 실험 및 성능 검토.

본 연구에서 제안한 FDIU의 성능을 검토하기 위하여 모의 실험에 사용된 타여자 직류 전동기로 구동되는 원심펌프 시스템의

파라메터는 표2와 같고 식(3)의 상태관측자의 고유치는 (-85, -25, -10)으로 선정하였다. 입력 잡음 및 센서의 출력잡음이 없다는 가정하에 표1과 같이 분류되는 고장들에 대해서 파라메터값의 변화를 10%~30%까지 10%간격으로 투입하여 잔차를 얻었으며 파라메터가 30%이상 변했을때는 완전한 고장으로 보고 30%변화시의 잔차로 규정화(Nominalize)하여 퍼지진단 규칙을 구축하였다. 고장진단 시스템을 실제로 적용할 때 잡음은 큰 문제 가 된다. 따라서 모의실험시 1%의 측정잡음을 넣은 상태에서 행 하여 겠으며 잡음이 존재하는 상태에서도 우수한 진단 성능을 보였다. 또한 이 시스템의 경우  $H_p$ 가 뷰프의 특성곡선에서 언이 지는 불화실성을 포함한 값이므로 표2의  $H_p$ 값을 5% 변화시킨 상태에서도 진단이 가능하였다. 그 결과는 그림3~그림9에 나타내 있다. 그림2에는 고장량의 Normal과 Fault에 대한 소속함수값을 보여 주고 있다.

표2. 타이자 직류 전동기로 구동되는 원심펌프 시스템의 파라메터

파라메터	파라메터 값
Ra	전기자 저항 0.45 [Ω]
La	전기자 인덕턴스 0.0054 [H]
Kb	역기전력 상수 1.433 [V · Sec/rad]
J	관성모멘트 : 0.398 [kg · m <sup>2</sup> ] Jm=0.199 Jp=0.199
Cf	점성마찰계수: Cf=0.005 Cf <sub>p</sub> =0.015 0.02 [N · m · Sec/rad]
Km	모터의 토크 계수 0.1459 [N · m · Sec/rad]
Kp	펌프의 토크 계수 0.2736 [N · m · Sec/rad]
Hm	모터의 특성 계수 0.015 [m <sup>2</sup> /kg · Sec/rad]
Hp	펌프의 특성 계수 0.564 [m <sup>2</sup> /rad · Sec]
Aac	유체의 가속화 계수 17.13 [m <sup>2</sup> /kg]
Ar	유체의 저항 계수 13.704 [m <sup>2</sup> /kg · Sec]

## 5. 결론

본 연구에서는 타이자 직류 전동기로 구동되는 원심펌프에 의한 파이프라인 액체 수송관 시스템에 대하여 고장 검출 및 퍼지 추론을 이용한 진단 시스템을 제안 설계하였으며, 모의실험을 통하여 성능을 확인하였다.

본 연구에서 제안된 고장 진단 시스템은 모의 실험 결과인 그림2에서 보았듯이 고장량의 정도를 소속함수 값으로 표현하고 있어 고장 판별을 위한 임계치 설정이 용이하다. 잡음이 존재하는 경우에도 우수한 진단 성능을 보였으며 잡전적 고장(incipient fault)도 초기에 검출할 수 있으므로 고장의 확산을 방지 할 수 있는 장점을 가지게 된다. 또한 어느정도 파라메터의 불화실성을 포함하는 시스템에도 적용가능하다.

그리나 문제점으로서는 우리가 알지 못하는 고장이나 본 연구에서 제안하고 있는 퍼지규칙에 위배되는 고장에 대한 진단이 불가능하다는 점이다. 이 점에 대해서는 앞으로도 계속 연구가 되어야 하겠다.

## 참고문헌

1. Patton, R.J., Frank, P.M., and Clark, R.N., "Fault Diagnosis in Dynamic Systems Theory and Application", Prentice Hall, 1989
2. Kee-Sang Lee and Sang-Wook Bae., "A Fault Detection Filter Design by Fault Vector Model Approach and Application", TKIEE., 36, 6, June, 1987
3. Isermann, R., "Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods-A Survey", Automatica, Vol. 20, No. 4, pp. 387-404, 1984
4. Watanabe, K., Sasaki, M. and Himmelblau, D.M., "Determination of optimal measuring sites for fault detection of non-

linear systems", INT. J. SYSTEMS SCI., Vol. 16, No. 11, pp1345-1363, 1985

5. Yedich, S., "Diagnosing trouble of centrifugal pumps", Chem. Eng., 24, 124, Oct., 1977., 21, 193, Nov., 1977., 5, 141, Nov., 1977
6. Zimmermann, H.-J., "Fuzzy Set Theory and Its Applications", KAP, 1991

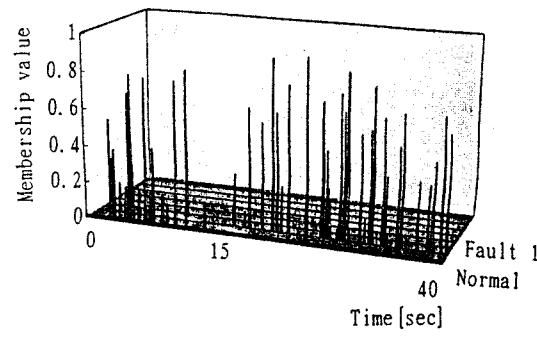


그림2

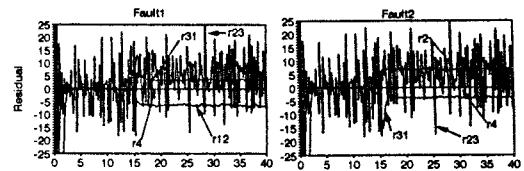


그림3

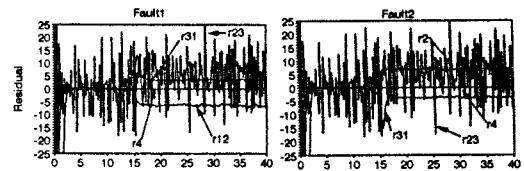


그림4

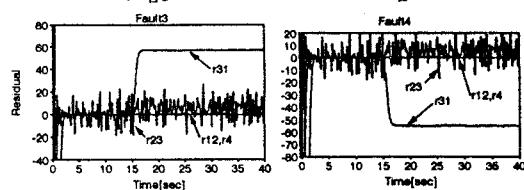


그림5

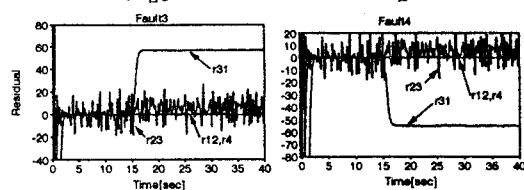


그림6

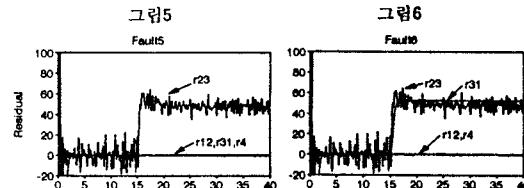


그림7

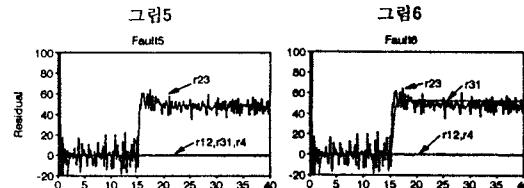


그림8

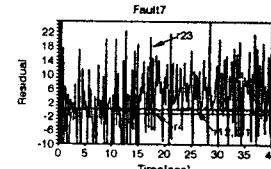


그림9