

## 현상적 모델에 기초한 플랜트시스템 고장감지방법

김재화 · 장태규  
중앙대학교 제어계측공학과

### Phenomenological Model Based Fault Diagnosis of Dynamic Plants

Jae-Hwa Kim · Tae-Gyu Chang

Dept. of Control & Instrumentation Engineering Chung-Ang University

**Abstract** - 본 논문에서는 플랜트의 계측신호들에 나타나는 현상적인 특징파형들을 감지하여 플랜트의 고장을 진단하는 기법을 제시하고, 플랜트의 고장시 나타나는 여러 특징 파형들의 전형인 oscillatory 파형을 감지하는 알고리즘을 prediction filtering 기법을 적용하여 얻는 과정을 기술하였다. 또한 이의 구체적 적용 예로 500MW급 화력발전소의 보일러 제어 시스템을 대상으로 여러 고장상황에 대한 고장감지 알고리즘을 설계하였고 제시한 기법의 유용성을 보이기 위한 시뮬레이션 적용 결과를 보였다.

한 고장감지 시스템을 얻기 위해서는 파형감지는 물론 많은 적용과 설계를 통한 연구 과정이 필요하다 하겠다. 본 논문에서는 이러한 기법을 정립하기 위한 초기 연구로서 플랜트의 고장시 나타나는 여러 파형들중 가장 전형적으로 나타나는 특징파형인 oscillatory 파형을 대상으로 이를 감지하고 파형의 주파수 및 감쇄지수를 추정하는 알고리즘을 prediction filtering 기법에 의해 얻어 이를 500MW급 화력발전소의 보일러 제어 시스템의 고장감지에 적용하는 과정을 기술하였다.

#### 1. 서 론

발전소와 같이 여러 요소들의 유기적인 관계에 의해 운전되는 복잡한 플랜트의 경우, 고장시 이를 조기에 감지해내고 적절한 조치를 취하는 것은 고장파급의 차단과 이에 수반되는 경제적 손실의 방지 및 안전 측면에서 매우 중요한 사항이다.

지금까지 연구되어온 기존의 해석적 모델링에 기초한 고장감지 기법들은 플랜트의 구조적인 복잡성에 기인하는 해석인 어려움과 비선형 특성에 따른 적용범위의 제한성 등의 이유 때문에 실제적인 응용은 미비한 실정이다[1][2].

이에 본 연구에서는 플랜트에 대한 모델링 없이 플랜트의 여러 부위에서 계측되는 신호들로부터 고장시 발생하는 특징 파형들을 감지하여 이러한 특징 파형들이 나타나는 상황과 고장과의 상관관계를 규명하여 줌으로써 고장진단을 수행하는 기법을 제시하고 이를 현상적 모델에 기초한 고장감지 기법이라 칭하였다. 이러한 고장감지 기법은 숙련된 운전원이 계측신호들에 나타나는 특징현상들을 감지하고 습득된 지식을 바탕으로 판단조치하는 기능을 직접적으로 묘사하고자 하는 점에 기초를 둔 기법이라 하겠다.

이러한 기법을 바탕으로 실질적인 적용이 가능

#### 2. Oscillatory 파형 감지 Algorithm

Oscillatory 파형을 감지하기 위한 parameter estimation 기법은 크게 FFT에 근간한 고전적인 spectrum 해석 기법, eigen space 기법, parametric modeling 기법등으로 구분할 수 있으며 응용에 따라 이들은 각기 특성과 장단점이 다르게 나타난다 [3]. 발전소 보일러 제어 플랜트에서와 같이 고장 발생시 한 두 개의 dominant 한 damped oscillatory 파형에 상대적으로 적은 양의 noise 가 첨가된 형태로 나타나는 경우는 신호 모델링을 explicit하게 damped oscillatory 신호와 잡음을 더한 형태로 구성하여 주고, 이에 prediction error filtering에 의한 parameter estimation 기법을 적용하는 것이 효과적이다. 이는 추정 변수 자체가 고장감지 및 진단의 직접적인 변수이기 때문에 주파수 spectrum 에 대한 별도의 interpretation 과정이 필요 없기 때문이다.

##### 2.1 Oscillatory 파형 parameter estimation

전절에서 기술한 바와 같이 대상 신호의 deterministic한 특성을 고려하여 신호를 식 (1) 과 같이 complex exponentials  $a_i e^{s_i n}$ 와 additive 잡음  $u[n]$ 의 합으로 모델링한다.

$$x(n) = \sum_{k=1}^M a_k e^{s_k n} + w(n) \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

따라서 식 (2)의  $L$ 차 backward prediction error filter(BPEF)에 대하여, 측정 신호  $x(n)$  의 conjugate 신호를 입력으로 하는 prediction equation으로 부터 minimum norm solution에 의한 필터 계수를 구하면  $M$ 개의 zero는 단위원 외부에 위치하고  $L-M$ 개의 zero는 단위원 내에 위치하게 되며, 이로 부터 단위원 외부에 존재하는 zero 위치가 지정된 범위내에 존재하는지 여부에 의해 해당 oscillatory 파형의 감지를 결정할 수 있다는 것이 파형감지의 기본적인 개념이다.

$$B(z) = 1 + b(1)z^{-1} + b(2)z^{-2} + \dots + b(L)z^{-L} \quad (2)$$

여기서 prediction error filter 의 차수  $L$ , data window의 길이  $N$ , 신호에 대한 상대적인 잡음의 크기 등은 zero location 에 대한 추정치의 accuracy 및 신호와 잡음의 구분 성능에 상호 관련이 있다. 따라서 고장감지 알고리즘을 설계하기 위해서는 이러한 설계변수들에 대한 해석적인 범위를 구하고, 다음절에서 기술하였듯이 고장감지 대상 플랜트의 신호특성에 맞는 설계치들을 선정하여야 한다. 실제 이러한 설계를 위해서는 다양한 형태의 고장상황에 대한 많은 시뮬레이션과 해석을 통한 최적치들을 얻는 과정이 필요하다 하겠으나, 본 논문에서는 파형감지기법의 적용을 이용한 고장감지의 적용 가능성을 보이기 위한 목적으로 제한된 경우에 대한 시험치를 대상으로 prototype 형태의 고장감지 알고리즘을 개발하고 적용한 결과를 제시하였다.

## 2.2 고장감지 시스템 설계

본 논문에서는 대규모 플랜트의 전형적인 예인 화력 발전소의 보일러 시스템에서 발생할 수 있는 일반적인 고장인 파열기 tube rupture, 급수의 누수, 제어기의 고장 등의 상황에서 드럼 수위에 발생하는 oscillatory 파형을 위의 BPEF를 적용하여 감지하고 감쇄지수와 주파수를 예측하여 각 고장시 발생하는 oscillatory 파형이 그의 감쇄지수와 주파수로 구분되어 고장을 진단하는 것을 보인다. 이의 구성도를 다음의 그림 1.에 나타내었다.

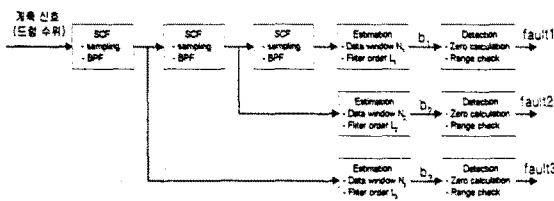


그림 1. 드럼수위 신호로부터 3개의 서로다른 고장을 감지하는 구성도

그림 1.은 드럼수위를 3단계의 sampling과 filtering 을 거쳐서 각각 3종류의 고장 즉 파열기 tube rupture, 급수의 누수, 제어기의 고장을 감지하는 구성도이다. 이의 각 단계별로 고려해야할 세부 사항을 다음과 같다:

첫째 각 단계별 signal conditioning filter(SCF)에서는 각각의 고장시 발생하는 oscillatory 파형의 주파수를 고려하여 적절한 주기로의 sampling과 noise의 영향을 줄이기위한 band pass filter로 구성된다. 각 고장 원인에 따른 신호의 주파수 범위는 보통 경험적 지식에 의해 결정되며 본 논문에서는 보일러 모델의 고장 시뮬레이션을 통해 얻은 data 를 이용하여 aliasing을 고려하여 최대 주파수의 2 배이상으로 sampling 하였다.

둘째 각각의 주기로 sampling된 신호들로부터 최적 prediction error filter 계수를 estimation 하는 부분에서는 고장 상황시 발생하는 oscillatory 파형의 지속 시간과 신호에 포함된 주파수 성분 등을 고려하여 data window의 길이와 filter의 order를 결정한다. Data window의 길이와 filter의 order는 parameter estimation의 성능에 영향을 미치는 주요 설계 변수로 본 연구에서는 대상신호가 한 data window안에 1주기 이상 포함하도록 하였고 filter의 order는 시뮬레이션을 통해 trial and error로 얻은 최적 값을 택하였다.

셋째 detection 과정에서는 estimation된 계수로부터 zero를 계산하고 이들의 크기와 각도 범위를 조사하여 고장여부를 판정한다. 본 논문에서의 대상 파형들은 1개의 주파수 성분을 가지는 실수 신호 이므로 대상 파형이 감지되기 위해서는 1개의 공액 복소수 쌍이 단위 원밖의 대상 영역에 위치하는 것을 감지하도록하였다.

이상의 설계에 의해 얻은 구체적 수치들은 표 1.에 실제 고장패턴을 감지하고 추정한 parameter 값과 함께 제시하였다.

## 3. 고장 시뮬레이션 및 적용 시험

본 절에서는 보일러 시스템의 dynamic 모델을 바탕으로 고장 상황을 시뮬레이션 하여 이때 발생하는 oscillatory 파형을 감지하고 이때 예측되는 주파수와 감쇄지수로 각 고장을 구분하는 결과를 보였다.

### 3.1 고장 시뮬레이션

제어계통을 포함한 10차의 드럼형 보일러 모델을 이용하여 파열기 튜브 파열(tube rupture), 급수 누수(feedwater leak), 제어기 고장(controller failure)상황 등에 대한 고장 시뮬레이션을 수행하

였다. 다음의 그림 2.에서는 부하조건 495MW에서 운전중 과열기 튜브에서 1%의 증기가 유출된 상황(상단), 급수가 1% 누출된 상황(중단), 수위제어기의 적분기 gain이 갑자기 커진 상황(하단)에 대하여 시뮬레이션 결과에 의해 나타난 드림 수위에 나타나는 oscillatory 파형을 보였다. 그림 2.에서 보듯이 보일러시스템은 그의 주요 고장상황에서 뚜렷이 구분되는 oscillatory파형을 보임을 알 수 있다.

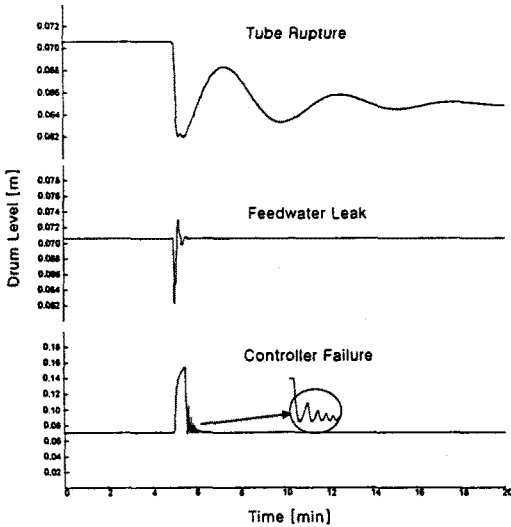


그림 2. 고장 원인에 따라 드림수위 신호에 서로 다른 주파수의 oscillatory파형을 보이는 예

### 3.2 파형 감지 적용 시험

전절에서 얻은 tube rupture, feedwater leak, controller failure 감지 algorithm과 고장 시뮬레이션에 의해 얻은 신호를 적용하여 각각의 고장 상황별로 추정된 parameter 값들을 표 1.에 나타내었다.

표 1. 각 고장 상황에 따라 발생하는 oscillatory파형 감지 시스템의 설계변수들과 estimation 결과

고장	설계사양 및 결과 window length N	filter order L	sampling frequency [Hz]	감쇄 지수	주파수 [Hz]
tube rupture	12	4	0.025	0.0043	0.0032
feedwater leak	12	8	0.39	0.12	0.051
controller failure	24	4	1.2	0.065	0.27~0.48

또한 고장 감지 알고리즘의 동작 예로 드림 수위 신호로부터 tube rupture시 발생하는 oscillatory 파형(그림 2.의 상단 참조)에 대해 BPEF가 추정한 zero의 위치에 대한 결과를 그림 3.에 나타내었다. 여기서 좌측 상단의 zero들은 모두 단위원 내에 있으므로 하단의 좌측 time window내에는 oscillatory파형이 없음을 보여주며 우측 상단의 zero들 중 1쌍이 단위 원밖에 존재하므로 그림 하단의 우측 time window내에

oscillatory 파형이 감지됨을 보인다. 감지된 oscillatory 파형의 주파수와 감쇄지수는 단위 원 밖의 zero의 위치로부터 알 수 있다.

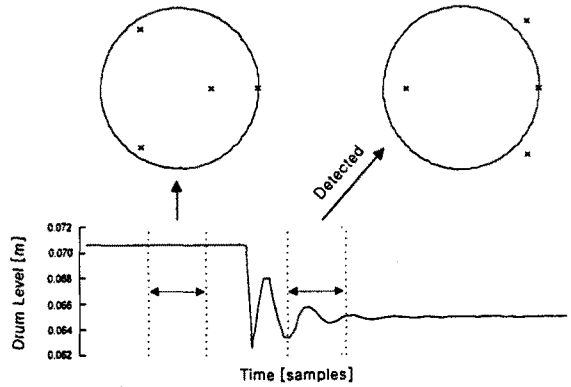


그림 3. 과열기 튜브 파열시 발생하는 oscillatory파형을 감지하는 예 (우측 상단)

이상의 결과에서 보듯이 발전소 보일러 제어 시스템은, 전형적인 고장 상황에 대하여 서로 뚜렷이 구분되는 주파수와 감쇄지수를 갖는 oscillatory파형을 발생시키므로 이를 감지하여 각 고장 상황을 구분할 수 있음을 확인할 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 파형 감지에 의해 복잡한 플랜트 시스템의 고장을 진단하는 기법을 제시하였으며 이의 적용 실례를 보이기 위해 500MW급 화력 발전소의 보일러 시스템 모델을 이용하여 이의 고장 상황을 시뮬레이션 하였고 이때 각 고장 상황에 발생하는 oscillatory파형을 감지하는 과정을 보였다. 이 결과 보일러 플랜트에서는 각각의 고장 원인에 따라 서로 다른 특징(주파수, 감쇄지수 등)의 파형이 감지됨에 따라 이를 통하여 각 고장상황을 구별할 수 있음을 보였다.

### (참고 문헌)

- [1] Yasuji Sekine, et al., "Fault Diagnosis of Power Systems," Proceedings of IEEE, Vol. 80, No.5, pp.673-683, May 1992.
- [2] 발전소 운전감시 및 고장진단을 위한 계측기기 신호의 전처리방법에 관한 연구, 기초전력공학공동연구소, 1996.
- [3] S. Lawrence Marple Jr., Digital Spectral Analysis, Prentice-Hall, Inc., 1987.