

Oscillatory 파형감지에 의한 보일러 플랜트 드럼수위 제어계통의 고장진단

| |
|---------|
| 論 文 |
| 48A-1-7 |

Detection of Oscillatory Pattern Signals and its Application to the Fault Diagnosis of a Boiler Drum-Level Control System

金載和* · 徐烈圭** · 張泰圭***
(Jae-Hwa Kim · Yeol-Kyu Suh · Tae-Gyu Chang)

Abstract - This paper proposes a new approach of plant fault diagnosis which is based on detecting the characteristic pattern signals and associating them with the corresponding faults. The new approach does not require analytic modeling of the target system but best reflects the expertise embedded in the experienced human operation by mimicking them in a systematic way. This paper intends to illustrate the feasibility of the proposed approach by developing the algorithms to detect and estimate the typical characteristic pattern signals, i. e., oscillatory patterns, and applying them to the diagnosis of various faults of a 500MW boiler control system including tube rupture, feed-water leak, and controller failure.

Key Words : fault diagnosis, waveform detection, characteristic pattern signals, boiler control system, oscillatory patterns

1. 서론

Dynamic 플랜트 시스템의 고장진단(fault diagnosis)은 고장발생을 검출하고 고장부위를 판별(fault detection and identification : FDI)하는 것을 일컫는 것으로서, 플랜트의 규모와 복잡도가 증가하고 이에 따라 고신뢰도 운전에 대한 중요성이 증대되어 여러 연구자들의 주요 관심대상이 되어왔다 [1][2][3]. 지금까지의 연구들은 해석적 모델에 기초한 고장진단기법이 주를 이루고 있으며, 이는 대상플랜트에 대한 해석적 모델을 얻고 이러한 모델의 입출력 신호에 내포되어있는 해석적 redundancy를 고장감지 및 진단에 이용하는 기법으로서 크게 상태추정(state estimation) 및 계수추정(parameter estimation) 기법으로 구분할 수 있다 [1][4]. 지금까지의 많은 연구노력에도 불구하고, 일반적으로 여러 기기 요소들이 복잡하게 얽혀 동작하는 대규모 플랜트 시스템의 경우는 dynamics 모델을 얻기 어렵다는 이유와 모델을 얻는다 할지라도 시스템의 선형성(linearity), 가관측성(observability) 등에 따라 플랜트의 고장감지 대상영역 및 동작 범위가 제한되어 이러한 해석적 모델에 기초한 고장진단 기법들은 실제 적용에 많은 어려움이 있는 실정이다.

이에 본 논문에서는 플랜트의 해석적 모델을 이용하지 않고, 고장발생 시 계측신호에 나타나는 특징패턴신호들을 검출하고 이를 고장원인과 관련 지우는 고장진단기법을 제시하고 이의 유용성을 500MW급 화력발전소 드럼수위제어계통과 관

련한 고장들을 진단하는데 적용하여 알아 보고자하였다.

플랜트의 고장종류 및 형태에 따라서 나타나는 특징패턴신호들의 종류도 다양하겠으나, 본 논문에서는 이러한 패턴신호들 중 가장 전형적이고 감지를 위한 신호처리 측면에서 일반성을 갖는 damped oscillatory 패턴신호를 대상으로 하여 파형감지 알고리즘을 개발하고 적용하도록 하였다. Damped oscillatory 파형은 일정한 주기를 갖고 서서히 감쇠하는 포락선을 갖는 형태의 패턴신호로서 dynamic 시스템의 갑작스러운 고장 발생 시 나타나는 전형적인 신호이다. 이때 oscillatory 파형의 형태를 결정짓는 주파수와 감쇠지수는 시스템 고유의 극점(pole)에 따라 결정되는 oscillatory 모드들의 조합으로 나타나며, 이 값들은 고장의 원인에 따라 서로 다른 것이 일반적이다. 따라서 계측신호에 나타나는 oscillatory 파형의 주파수와 감쇠지수를 추정함으로써 이를 고장원인과 관련 지워 진단을 수행할 수 있다는 것이 본 논문에서 제시한 고장진단 기법의 주요 개념이다. 특히 이러한 고장진단 기법은 계측신호에 특징패턴 파형이 나타나는 것을 감지하는 방식으로서 해석적 모델을 필요로 하지 않는다는 차이에서 오는 장점은 물론이고, 숙련된 전문운전원이 오랜 경험을 통하여 계측신호에 나타나는 특징현상들을 관찰하여 습득한 고장감지 및 진단기능을 직접적으로 묘사하는데 가장 가까운 방식이라는 점에서, 전문운전원의 기능을 대체 할 수 있는 자동화된 고장진단시스템의 실현에 적합한 방식이라 할 수 있다.

본 논문에서는 파형감지 알고리즘 설계 및 적용시험을 위하여 보일러수위제어계통의 전형적인 고장인 파열기 튜브파열(tube rupture), 급수누출(feed-water leak), 수위제어기 고장(controller failure)의 세 경우를 대상으로 고장의 크기를 광범위하게 변화시키며 드럼수위제어에 대한 dynamics 모델링 및 고장상황을 시뮬레이션하였다. 고장부위를 이와 같이 설정한 것은 이들이 보일러제어계통의 고장에서 자주 발생되

* 準 會 員 : 中央大學 制御計測學科 博士課程

** 正 會 員 : 東洋工業專門大學 工場自動化科 助教授

*** 正 會 員 : 中央大學 制御計測學科 教授 · 工博

接受日字 : 1998年 5月 9日

最終完了 : 1998年 11月 20日

는 전형적인 고장이라는 점도 있지만 dynamics고장, 구동부 고장, 제어기고장을 모두 포함한다는 점에서 고장시뮬레이션과 고장감지 측면의 일반성을 부여한다는 의미가 있다. 또한 대표적인 스펙트럼추정 기법들인 periodogram[5], 예측모델(prediction model)[6], MUSIC (multiple signal classification)[7] 들에 기초하여 oscillatory파형 감지알고리즘들을 설계하였으며, 고장 시 드럼수위 계측신호에 나타나는 oscillatory 파형들을 감지하고 분류하는데 적용하여 얻은 결과비교를 통해 각 기법들의 성능특성을 알아보았다.

Oscillatory 파형감지기법 및 알고리즘에 대하여 2장에 기술하였고, 3 장에는 보일러제어계통에 대한 dynamics 모델링 및 고장시뮬레이션 과정을 기술하였으며, 4 장에서는 고장감지알고리즘 적용시험 및 결과, 5장에서는 결론을 기술하였다.

2. Oscillatory 파형감지

Oscillatory파형은 다음의 그림 1과 같이 고유의 주파수를 가지고 감쇠지수에 따라 크기가 감쇠 하는 형태의 파형으로서 식 (1)과 같이 일반화하여 나타낼 수 있다.

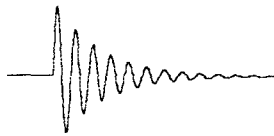


그림 1. 전형적인 oscillatory 파형의 모습
Fig 1. Typical pattern of An oscillatory waveform.

$$x(t) = Ae^{-\sigma t} \cos(2\pi ft + \theta) \quad (1)$$

여기서, σ : 감쇠지수, f : 주파수, θ : 위상각

이러한 oscillatory파형의 성공적인 감지는 본 논문에서 제안한 고장진단기법의 구현에 있어서 요구되는 가장 중요한 요소라 하겠다. 지금까지 제안된 파형감지기법들은 크게 periodogram/correlogram에 기초한 고전적인 spectral analysis, 신호 모델링에 기초한 parametric spectral analysis, 고해상 스펙트럼추정을 위한 고유공간 분할(eigenspace decomposition)기법으로 구분 할 수 있다[8]. 이러한 기법들을 이용한 파형감지 알고리즘들은 응용과 대상신호의 특성에 따라 구현기법 및 성능에 차이가 있는 것이 일반적이다. 이에 본 논문에서는 영역별로 대표적인 기법으로 periodogram, 선형예측필터, MUSIC 스펙트럼을 이용한 oscillatory 파형감지 알고리즘들을 구현하고 보일러 플랜트의 특정 고장패턴신호들에 대한 적용을 통해 이들의 성능을 비교하였다. 다음에 각 기법별로 구현한 oscillatory 파형감지 알고리즘들의 구성 및 동작원리를 요약 기술하였으며 개개의 고장 유형에 대한 알고리즘들의 상세 설계변수들은 4장에 기술하였다.

2.1 Periodogram에 기초한 oscillatory 파형감지

Periodogram이란 일정길이를 갖는 subblock 신호들의 Fourier transform에 의한 스펙트럼을 평균한 것으로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{X}(\omega) = \frac{1}{N-M+1} \sum_{i=0}^{N-M} \left[\sum_{n=0}^{M-1} x(n+i)e^{-j\omega n} \right] \quad (2)$$

N : 신호 길이

M : subblock 길이

Periodogram은 대상신호의 harmonic 성분의 존재여부를 가능하는 전형적인 방법으로서, 신호의 통계적 특성을 충분히 반영할 수 있는 길이의 데이터를 얻을 수 있을 경우에는 여타 방법에 비해 스펙트럼추정의 충실도(fidelity) 및 통계적 안정성(statistical stability) 측면에서 가장 우수한 방법이다. 이 기법은 제한된 데이터 길이에 기인한 근본적인 주파수해상도의 한계 및 spurious peak 발생 등의 단점이 있으나, FFT 알고리즘과 근사구현기법들의 적용으로 고속구현이 가능하여 실시간응용에 널리 쓰이는 유용한 기법이다. Periodogram 계산에 기초하여 구현한 oscillatory 파형감지 알고리즘의 구성도를 그림 2에 나타내었다.

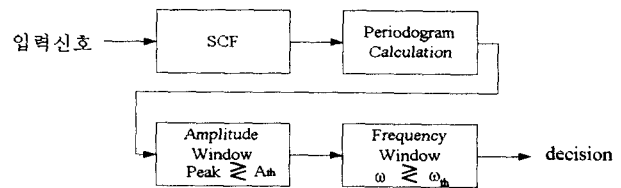


그림 2. Periodogram을 이용한 oscillatory 파형감지 알고리즘의 구성

Fig 2. Functional structure of the algorithm of the oscillatory waveform detector which is based on the calculation of the periodogram.

입력신호는 DC-bias제거 및 관심대역 파형의 SNR을 증대시키기 위한 SCF(signal conditioning filter)를 통과시킨다. SCF는 대상 파형들의 특성과 구현측면에서의 효율성을 함께 고려하여 설계하여야하며 상세 구조는 4 장에 제시하였다. Periodogram을 계산하는데 있어서 신호의 길이 N , subblock의 길이 M , averaging method 등은 스펙트럼 추정충실도, 주파수 해상도, 신호감지도(detectability) 등과 직접적인 관련이 있고 상호 trade-off 등을 가져오므로, 이러한 세부설계변수들을 설정하는 것은 대상파형의 특성을 고려하여 경험적으로 구현하여야 한다. 이들에 대한 세부사항들은 decision logic을 구성하는 amplitude window와 frequency window등의 상세구조와 함께 4장에 기술하였다.

2.2 선형예측 모델에 기초한 oscillatory 파형감지

일반적으로 parametric 모델링기법은 제한된 수의 모델계수의 함수형태로 스펙트럼을 구하는 방법이다. 전 절에 기술한 periodogram은 본 논문과 같은 고장감지 목적의 경우는 처리신호의 길이가 짧게 제한되어야 하므로, 이로부터 기인한 sidelobe에 의한 스펙트럼왜곡과 주파수해상도의 제한이 주된 단점으로 부각된다. 반면에 parametric 모델링 기법은 제한된 길이의 데이터 대해서도 상대적으로 월등한 주파수 해상도를 얻을 수 있고 또한 sidelobe에 의한 문제점이 제거되어 충실한 스펙트럼추정을 제공 할 수 있다.

신호의 적용모델은 일반적으로 AR(auto-regressive), MA(moving average) 및 ARMA(auto-regressive moving average)로 구분되며 이중 중 AR 모델은 계수추정 과정이 선형방정식의 형태로 주어져 계산측면에서 타 모델에 비하여 유리하기 때문에 가장 널리 쓰이는 모델이다. 본 논문에서와 같이 oscillatory 파형의 시각적 특성 자체가 파형감지의 주요 파라미터와 관련 지워지는 경우에는 해가 AR 모델의 스펙트럼 추정을 위한 normal equation의 형태로 나타나면서도 감지파형의 deterministic한 계수를 직접 데이터에 fitting 시키는 개념인 Prony 기법[8]의 적용이 detectability 측면에서 유리하다. Prony 기법을 적용하는 과정에서는 다음에 요약 기술한 것과 같이 BLPEF(backward linear prediction-error filter)의 prediction error에 대한 least square 해를 SVD(singular value decomposition)을 적용하여 구하였다.

주어진 N 샘플 데이터 $x(n)$ 에 대하여 신호모델은 다음의 식(3)에 나타난 것과 같이 M 개의 deterministic한 complex exponential의 선형 조합과 부가 잡음 $w(n)$ 의 합으로 나타난다. $s_k = -\alpha_k + j\omega_k$ 로 α_k 는 감쇠지수, ω_k 는 각주파수를 나타낸다.

$$x(n) = \sum_{k=1}^M a_k e^{s_k n} + w(n) \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

잡음 $w(n)$ 을 제외한 Σ 항은 M차 차분방정식의 homogeneous 해의 형태로, 신호 $x(n)$ 의 추정치로 생각할 수 있다. 따라서 식 (3)의 신호모델은 그림 3과 같이 입력을 $x(n)$ 으로 하고 출력을 추정오차 $\hat{x}(n-L) - x(n-L) = e(n)$ 로 하는 L차 BLPEF의 형태로 표현된다.

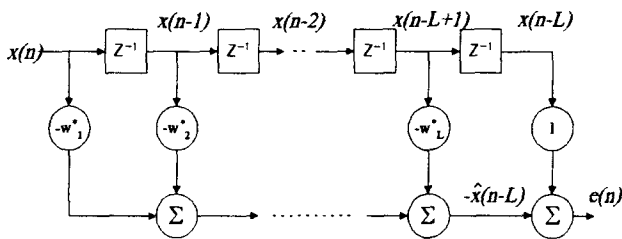


그림 3. Backward prediction-error filter(BLPEF)의 구조.
Fig 3. Structure of the backward prediction-error filter.

그림 3의 구조로 표현되는 식 (3)의 신호모델은 L차의 PF(prediction filter)모델로 생각할 수 있으며 이에 대한 예측 방정식은 식 (4)와 같이 나타난다. BLPEF로 신호를 모델링 하는 주된 이유는 대상 파형이 나타나는 경우 필터의 영점 위치가 복소수 평면상에서의 단위원 밖에 존재하도록 하여 감지 알고리즘의 적용이 용이하게 하기 위함이다.

$$\begin{bmatrix} x^*(1) & x^*(2) & \dots & x^*(L) \\ x^*(2) & x^*(3) & \dots & x^*(L+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x^*(N-L) & x^*(N-L+1) & \dots & x^*(N-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_L \\ w_{L-1} \\ \vdots \\ w_1 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x^*(0) \\ x^*(1) \\ \vdots \\ x^*(N-L-1) \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (4)의 최소자승 해는 auto-covariance 행렬에 대한 SVD를 수행하고 이로부터 저차근사를 적용하여 구하며, 이 해가 필터의 계수이다. 이를 필터계수로 하는 식 (5)의

PEF(prediction error filter)의 영점(zero)을 구하면, 입력신호의 oscillatory 모드에 해당되는 M개의 영점은 단위원 외부에 위치하고 L-M개의 영점은 단위원 내에 위치하게 되며, 이로부터 단위원 외부에 존재하는 영점 위치가 지정된 범위 내에 존재하는지 여부에 의해 해당 oscillatory 파형의 감지를 결정할 수 있다는 것이 파형감지의 개념이다. 이러한 특성은 BLPEF의 minimum phase 특성에 기인한다.

$$B(z) = 1 + w_L z^{-1} + w_{L-1} z^{-2} + \dots + w_1 z^{-L} \quad (5)$$

이 때 단위원 밖의 영점은 e^{-s_k} , $k=1, 2, \dots, K$ 임을 알 수 있으며 이에 따라 이들을 단위원을 중심으로 반사시킨 점의 각(angle)은 oscillatory 파형의 각주파수에 해당되고 크기(magnitude)는 감쇠량에 해당되어 파형의 주파수와 감쇠지수를 추정할 수 있으며, 이러한 특성을 이용한 파형감지 알고리즘 구성도를 그림 4에 나타내었다.

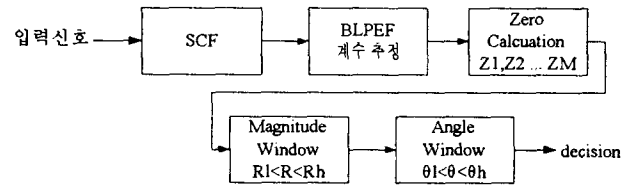


그림 4. BLPEF를 이용한 파형감지 알고리즘의 구성
Fig 4. Functional structure of the algorithm of the BLPEF-based oscillatory waveform detector.

2.3 MUSIC 스펙트럼을 이용한 oscillatory 파형감지

고유구조해석에 기초한 기법은 신호 상관행렬 (correlation matrix)의 고유벡터 및 고유치들에 반영된 구조적 특성을 이용하는 기법이다. 이들 중 MUSIC(Multiple Signal Classification) [7] 알고리즘은 신호의 위치추정, 고해상도스펙트럼 해석 목적에 사용되는 고유공간해석의 대표적인 기법이다.

입력 신호가 K개의 uncorrelated된 복소수 exponential 신호와 잡음의 합으로 구성되었을 경우, MUSIC 스펙트럼은 $L \times L$ 상관행렬 R의 고유벡터들로 구성되는 신호공간을 $K \times K$ 신호 부공간 (signal subspace) V_S 와 $(L-K) \times (L-K)$ 잡음 부공간 (noise subspace) V_N 으로 구분하고 검색신호 벡터 $s(\omega)$ 의 잡음 공간 내에서의 power를 구하여 이의 역수로 정의하여 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{S}(\omega)_{MUSIC} = \frac{1}{s^H(\omega) V_N V_N^H s(\omega)} \quad (9)$$

여기서 $s(\omega) = [1, e^{j\omega}, \dots, e^{j(L-1)\omega}]^T$ 는 주파수 검색 벡터 (frequency scanning vector)이고, 이것이 실제 계측신호공간 내에 존재하는 신호 벡터와 일치하는 경우에는 잡음공간 V_N 과의 직교 성질 때문에 상호 내적 값이 아주 작게 되어서 MUSIC 스펙트럼에 sharp한 peak가 형성되어 이로부터 파형의 존재여부를 판별할 수 있다.

MUSIC 스펙트럼은 입력신호에 존재하는 정현 파형의 주파수 대역에서 매우 작은 값의 역수로 정의되기 때문에 periodogram이나 AR 모델기법 등에 비해 상대적으로 높은 주파수 해상도를 갖게되며, 신호에 포함된 주파수성분의 에너지

지 분포를 나타내다기보다는 개별 정현파형들의 존재여부를 표시하는 특성을 지닌다. MUSIC 스펙트럼을 이용한 파형감지 알고리즘의 구성은 2.1에 나타난 periodogram의 경우와 동일하다.

3. 보일러 시스템 모델링 및 고장 시뮬레이션

본 장에서는 2 장에서 제시한 oscillatory 파형감지기법들을 적용하여 실제 500MW급 화력발전소 보일러시스템의 고장을 진단하는 과정을 보였다. 이를 위하여 본 논문에서는 보령화력 발전소를 모델로 하여, 드럼을 중심으로 과열기(Super Heater)와 상승관(Riser) 등을 포함한 보일러 시스템 dynamics와 제어시스템을 모델링하고 이를 통하여 보일러 시스템의 고장 상황을 시뮬레이션하였다.

3.1 보일러 제어시스템 모델링

본 논문에서 적용대상으로 선정한 보일러 제어 시스템에 대한 블록 구성도를 그림 5에 나타내었다. 보일러 시스템의 모델은 보일러 자체의 열역학적 dynamics와 제어기 부위로 크게 나눌 수 있다.

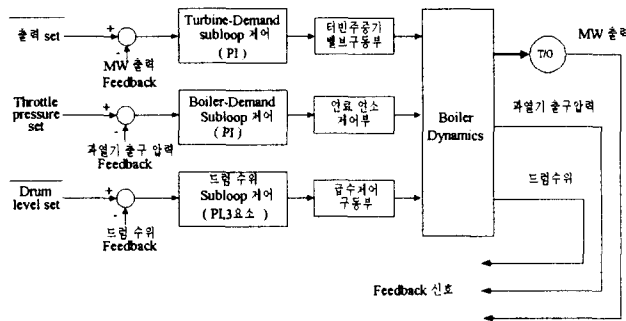


그림 5. 보일러 제어시스템 블록구성도
Fig. 5. Block-diagram of the boiler control system

본 연구에서는 보일러제어계통에서 중요한 관심대상인 증기의 압력과 flow에 대한 응답특성과 water/steam의 포화특성을 반영하는데 필요한 부분을 모델링과 시뮬레이션의 주요 범위로 선정하고, 이를 드럼과 과열기(super heater)에 질량, 에너지, 체적 평형식을 적용하고 온도제어계통은 현재의 시뮬레이션 모델에는 일정온도를 갖는 것으로 반영시켜 보일러 dynamics를 4 차의 비선형미분방정식으로 구성하였다[9][10].

보일러시스템제어기의 기본적인 구성은 각 sub-loop 에 대하여 PI제어기를 적용하는 형태이고, 제어기의 각 계수들은 보령화력 1호기의 설정치들을 적용하였다. 기본적으로 보일러 플랜트는 드럼 수위를 feed back받아 급수를 제어하는 드럼 수위 제어부, throttle pressure를 feed-back받아서 연료 연소량을 제어하는 보일러제어부, 그리고 발전기 출력을 feed back받아서 제어밸브를 제어하는 터빈제어부로 구성된다.

보일러시스템모델에 사용된 계수들은 보령화력 1,2호기의 사양에 따라 결정되었으며 제어시스템도 실제 보령화력의 제어구조에 따라 제어하였다. 현재 보령화력 1,2호기의 보일러

시스템의 제어기는 아날로그 방식의 Bailey 820 ACS 시스템 [11]에 의해 운전되고 있다. 이 시스템에는 발전출력 지령치를 결정하는 unit load demand, 운전모드에 따른 터빈과 보일러의 demand치를 설정하는 협조제어부, 급수유량제어, 연료제어, 공기량제어, 주증기 온도제어, 재열증기 온도제어, 노내압제어, 기타 유회유온도, 점화오일 압력 등의 보조계통을 포함한 여러 구성요소들의 제어부가 포함된다. 본 논문에서는 이들 중 발전소 전체의 운전과 응답특성을 시뮬레이션하는데 필요한 부분인 coal demand 제어, 터빈 주증기 밸브제어, 드럼 수위제어에 대한 subloop를 포함하는 제어기들을 소프트웨어에 의해 구성하고 시뮬레이션을 수행하였다. 터빈 governor, 발전기를 포함하여 보일러 계통의 연료, 급수 등을 제공하는 구동부들은 시정수를 갖는 1차모델로 구성하였다.

3.2 보일러 시스템 고장 시뮬레이션

본 논문에서는 보일러시스템의 대표적인 고장인 과열기 튜브파열(tube rupture), 보일러 급수누수(feed-water leak), 드럼수위 제어기고장(controller failure)와 경우에 대한 고장 시뮬레이션을 수행하였다. 이와 같이 고장 부위를 설정한 것은 이들이 보일러 제어계통의 고장에서 자주 발생하는 전형적인 고장이라는 점도 있지만 dynamics고장, 구동부고장, 제어기 고장을 모두 포함한다는 점에서 고장 시뮬레이션과 고장감지 측면의 일반성을 부여한다는 의미가 있다.

드럼수위는 MW 출력 및 과열기 출구압력과 함께 보일러 시스템의 주요 제어 변수이다. 드럼내의 물은 포화수와 포화증기의 혼합상태로 일정량의 에너지를 비축하여 시스템의 급격한 에너지 입출력 요구에 원활히 응답하도록 하여주는 역할을 한다. 따라서 드럼 내에 일정량의 물을 유지하는 것은 시스템 전체의 효과적인 운전에서 필수 사항이며, 이에 따라 실제 보일러 플랜트 운전에서 드럼수위는 상시로 관찰되는 주요 계측변수 중에 하나이다. 이에 본 논문에서는 드럼수위 계측신호를 고장감지 목적으로 사용하는 공통 입력신호로 사용하였으며 위에 언급한 3가지 경우의 고장을 감지하는 것은 드럼수위에 나타나는 특징파형을 찾아냄으로써 수행하도록 하였다. 고장시뮬레이션은 이러한 기법들의 유용성을 가늠하기 위한 목적으로 고장범위를 크게 변화시켜 수행하였다.

튜브파열 시뮬레이션은 보일러 dynamics에서 과열기 증기량을 바이어스 형태로 감소시키는 방식으로 고장을 반영하였다. 이때 감소시키는 양은 500 MW 정격으로 동작하는 상태에서 과열증기 기준으로 1.0 %에서 10 %까지 누출시키면서 고장을 시뮬레이션하였다. 누출증기를 정격치의 10 %까지 가변시키는 것은 상대적으로 넓은 범위의 고장을 반영시킨 것이라 할 수 있다. 급수누수 시뮬레이션도 보일러 dynamics에서 급수량을 바이어스 형태로 감소시키는 방식으로 고장을 반영하였으며 마찬가지로 감소량은 500 MW 정격에서의 급수량에 대해 1.0%에서 8.0 %까지 누출시키어 고장을 반영하였다. 8.0 %를 초과하는 급수누수의 경우는 드럼수위에 발생하는 파형의 형태가 oscillatory 파형의 특성을 잃게 되어 시뮬레이션의 범위를 이와 같이 설정하였다. 제어기 고장 시뮬레이션은 드럼수위 제어기의 적분기 gain을 통상 설정치의 100배에

서 1000배까지 증가하는 방식으로 고장을 반영하였다.

각 고장발생 시 드럼수위에 발생하는 oscillatory 파형의 예를 그림 6에 나타내었으며, 이는 부하조건 500MW에서 운전중 과열기 튜브에서 1.0 %의 증기가 누출된 상황(상단), 급수가 1.0 % 누출된 상황(중간), 수위제어기의 적분기 gain이 100배 커진 상황(하단)에 대해 시뮬레이션한 결과이다.

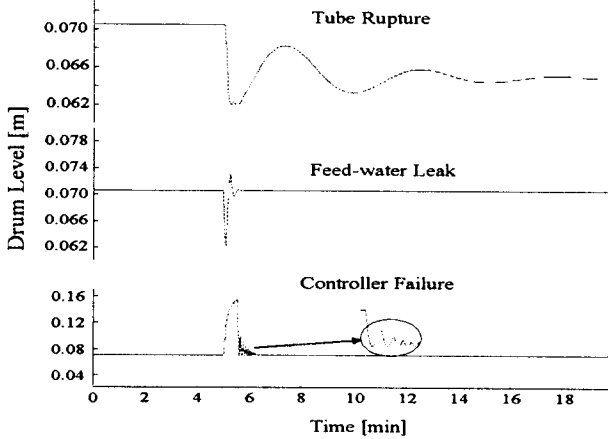


그림 6. 고장 원인에 따라 드럼수위 신호에 서로 다른 주파수와 감쇠지수의 oscillatory 파형을 보이는 예

Fig 6. Illustration of the oscillatory waveforms occurring in the drum-level signal. Each shows the different frequency and decaying pattern according to the cause of the fault.

그림 6에서 보듯이 보일러시스템은 그의 주요 고장상황에서 드럼수위에 뚜렷이 구분되는 oscillatory 파형을 보이고 있으며 이들 파형들의 주파수와 감쇠지수를 근사적으로 추정할 결과를 표 1에 제시하였다. 각 파형들의 주파수는 서로 10배 이상의 지수 차이를 가지는 것을 확인할 수 있다. 제어기 고장의 경우는 oscillatory 파형의 주파수가 발생 초기에서부터 후반부까지 증가하는 현상을 고려하여 최대값과 최소값의 범위로 나타내었다.

표 1. 각 부위별로 정격치에 대한 1 % 고장발생 시 발생하는 oscillatory 파형의 주파수와 감쇠지수를 추정한 결과.
Table 1. The estimated frequency and damping ratio of the oscillatory waveform obtained from the application of fault of size 1 % with respect to the rated value.

| 구분 | 감쇠지수 σ [1/sec] | 주파수 대역 f [Hz] |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|
| Tube Rupture | $3.340e-3$ | $3.007e-3$ |
| Feed-water Leak | $1.153e-1$ | $4.981e-2$ |
| Controller Failure | $6.696e-2 \sim 1.901e-1$ | $1.240e-1 \sim 5.385e-1$ |

고장의 크기를 변화시키며 시뮬레이션했을 때 각 고장별로 발생하는 oscillatory 파형의 주파수 추정결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서도 확인할 수 있듯이 보일러시스템의 3 가지 주요 고장 시 발생하는 oscillatory 파형들의 주파수는

넓은 범위의 고장크기 변화에도 서로 10배 이상의 차이를 유지하는 것을 알 수 있으며, 이러한 사실은 oscillatory 파형을 감지함으로써 고장을 효과적으로 진단 할 수 있는 근거가 된다 하겠다.

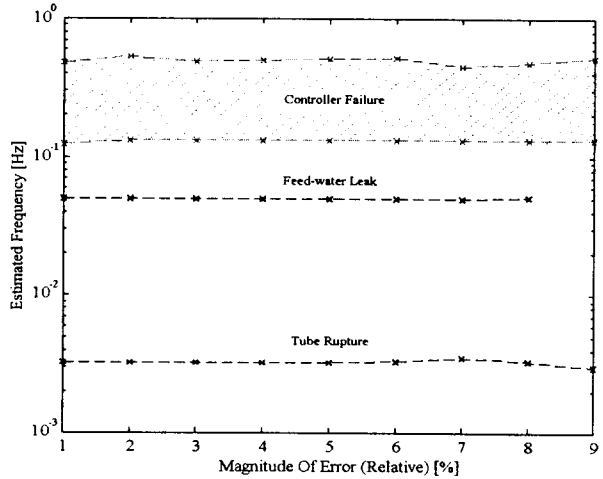


그림 7. 보일러 제어계통의 dynamics에 각 부위별로 고장의 크기를 바꾸며 고장 시뮬레이션을 수행할 때 드럼수위 신호에 발생하는 oscillatory 파형의 주파수 추정결과 Fig 7. The estimated frequencies of the oscillatory waveforms in the drum-level signal obtained from the fault simulations where varying magnitudes of three different types of faults are applied to the system dynamics.

4. 고장감지 시스템 구성 및 적용 시뮬레이션

본 논문에서 보일러 시스템의 3가지 주요 고장, 즉 과열기 튜브파열, 급수의 누수 및 제어기 고장을 감지하기 위하여 적용한 고장 감지 시스템의 전체적인 구성도를 그림 8에 나타내었다. 이는 SCF와 각 고장 부위별 감지 알고리즘으로 구성되며 드럼수위를 공통 입력으로 하여 서로 다른 3 가지 고장을 감지하여 출력하는 구조이다.

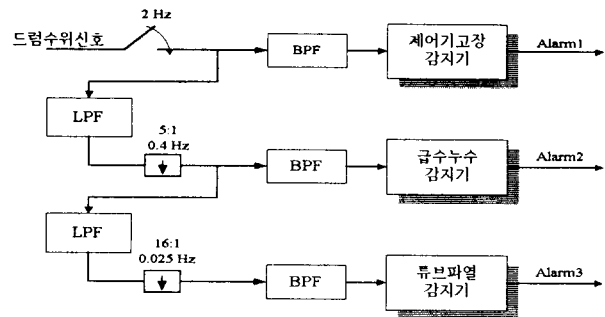


그림 8. 드럼수위 신호로부터 oscillatory 파형을 감지하여 3 개의 고장을 구분하는 고장감지 시스템의 구성도.

Fig 8. Structure of the fault-detector which identifies the three different types of faults by detecting the oscillatory waveforms occurring in the drum-level measurement signal.

각 고장감지기는 감지 대상에 따라 고유의 감지 영역을 가지고 있다. 이들 감지 영역들은 기법별 주파수/감쇠지수들의

문턱값들로 표시되며, 이들은 시스템의 고유 특성에 따라 결정되는 oscillatory 고장파형의 형태를 광범위한 고장크기 별 시뮬레이션을 통해 관찰함으로써 얻어진다. 본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 얻어진 데이터를 통하여 결정하였으며 이들 고장부위별로 표 2에 나타내었다.

표 2. 고장 종류별 감지 영역

Table 2. Detection thresholds.

| 감지영역 고장 종류 | 감쇠지수 [1/sec] | | 주파수 [Hz] | |
|--------------------|--------------|------------|----------|--------|
| | σ_l | σ_h | f_l | f_h |
| Tube Rupture | 0.01 | 0.05 | 0.003 | 0.0035 |
| Feed-water Leak | 0.002 | 0.2 | 0.04 | 0.06 |
| Controller Failure | 0.02 | 0.2 | 0.12 | 0.4 |

또한 각 감지기들은 감지 기법에 따라 고유의 필터 차수, 데이터 길이, averaging 방법들을 설정하여야 하며 이들 설계변수들은 감지기의 성능을 좌우하는 주요 요소이다. 일반적으로 데이터길이와 필터차수는 oscillatory 파형의 지속시간과 신호에 포함된 주파수 성분의 개수와 관련이 있으며 이들의 값도 시뮬레이션을 통해 경험적으로 결정하였고 이를 표 3에 나타내었다.

표 3. 파형감지 기법별 설계변수

Table 3. Design parameters of the detection methods.

| 기법 고장 | Periodogram | | BLPEF | | MUSIC | |
|----------|-------------|-----------------|-------------|--------------------|-------------|------------|
| | 데이터 블록 길이 N | FFT window 길이 M | 데이터 블록 길이 N | Prediction order L | 데이터 블록 길이 N | 상관 행렬 차수 L |
| 튜브 파열 | 16 | 12 | 16 | 2 | 16 | 7 |
| 급수 누수 | 16 | 8 | 32 | 2 | 16 | 8 |
| 제어기 고장 | 32 | 8 | 32 | 4 | 32 | 8 |

본 논문에서는 각 고장별로 차이가 큰 oscillatory 파형을 효과적으로 감지하기 위해 multi-rate 샘플링 기법의 다단계 필터링 구조를 이용하였다. 이는 드럼수위의 신호만으로 3개의 서로 다른 고장을 감지하기 위한 구조로, 가장 고주파인 제어기 고장신호를 감지하기 위해 2 Hz로 드럼수위 신호를 샘플링하고 이를 5 : 1로 sub-sampling하여 급수누수를 감지하는 신호로 사용하고 이를 다시 16 : 1로 sub-sampling하여 파열기 튜브파열을 감지하는 신호로 사용하는 구조이다. 이는 고장별로 주파수 차이가 큰 oscillatory 파형들을 서로 다른 비율로 샘플링하여 이산신호의 각주파수를 조정함으로써 신호의 구분성능을 증대하기 위함이다.

각 sub-sampling단 마다 적용된 저역통과 필터는 aliasing 방지필터로, 낮은 비율로 샘플링할 때 높은 대역의 신호가 관

심 저주파대역 신호를 침범하는 것을 차단하는 역할을 하며, 본 논문에서와 같이 고장을 감지하는 시스템에 있어서는 고주파의 고장패턴신호를 차단하여 관심고장 보다 높은 주파수의 고장패턴 발생 시 오경보를 막는 역할을 한다. 본 논문에서는 샘플링 주파수와 고장패턴의 주파수대역을 고려하여 cut-off 주파수가 $\pi/10$ [rad/sample]인 32 차의 raised cosine window FIR 필터를 적용하였다.

각각 고유의 샘플링 비율로 채집된 단계별 신호들은 대상 파형의 강화와 DC 바이어스 제거를 위한 대역통과 필터를 거쳐 고장 감지기의 입력신호로 사용된다. 일반적으로 파형 감지에 적용되는 대역통과 필터는 파형의 왜곡을 최소화하기 위해 완만한 형태의 천이특성을 갖도록 설계하는 것이 적합하다. 따라서 본 논문에서는 저차의 comb 필터를 기본으로 주요 저지대역에 영점들을 첨가시킨 형태의 FIR 대역통과필터를 설계하여 적용하였다.

그림 8의 구조에 감지기로 MUSIC 알고리즘을 적용한 감지시스템을 통하여 보일러 시스템의 3가지 주요 고장을 감지하는 예를 그림 9에 나타내었다. 그림 9에서는 각 경보들이 오경보(false alarm) 없이 각 고장들을 잘 구분하여 감지하고 있음을 알 수 있으며 이러한 구분성은 계측잡음이 없을 경우 1.0~ 10 %까지의 고장 범위에서도 잘 유지되었다. 튜브파열 경보(Alarm3)는 처리시간블록의 길이가 길어 다른 경보들에 비하여 지연되어 발생하였다.

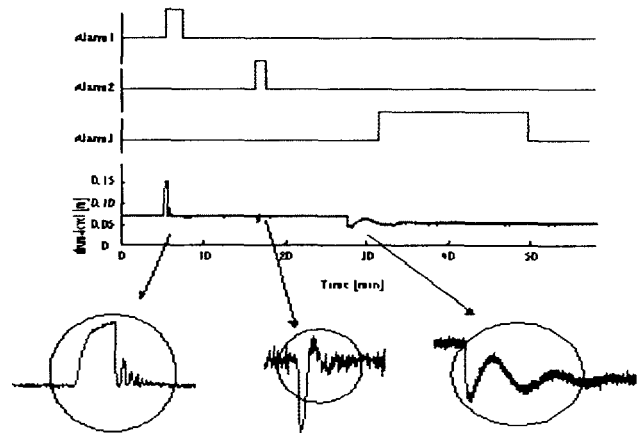


그림 9. 드럼수위에 발생하는 고장파형을 감지하여 3가지의 고장을 감지하는 예. 감지기는 MUSIC 알고리즘이 적용되었으며 계측 잡음은 -10 dB의 경우이다.

Fig 9. Illustration of different types of faults-related waveforms occurring in the drum-level signal (SNR : 10 dB). The MUSIC based oscillatory waveform detector is applied.
 Alarm1 : Drum-level controller failure (abrupt change of the integrator gain to 300)
 Alarm2 : Feed-water Leak (3 % of feed-water leak)
 Alarm3 : Tube Rupture (3 % of super heater steam leak)

본 논문에서는 고장감지시스템의 신뢰도를 나타내기 위한 기준으로 식 (10)과 같이 감지율 ρ 와 오감지율 δ 를 정의하였다. 오감지율 ρ 는 고장이 발생되었을 때 경보가 발생하는 비율이고 오감지율 δ 는 전체 고장 경보 중 오경보의 비율을

나타낸다.

$$\rho = \frac{\text{정확한 경보수}}{\text{실제 고장이 발생된 수}}, \delta = \frac{\text{오경보수}}{\text{전체 경보 발생수}} \quad (10)$$

감지율과 오감지율을 구하기 위해 본 논문에서는 과열기 튜브파열과 급수누수의 경우 1.0~10%의 누출과 제어기 고장의 경우 100 배에서 1000 배까지의 증가상황을 시뮬레이션하여 이들 고장에 경보가 발생하는 비율을 감지율로 하였고, 계측잡음이나 감지기 성능 제약에 의해 오경보가 발생하는 경우를 전체 경보수의 비율로 나타내어 오감지율로 하였다. 이를 계측잡음의 비율에 따라 표 4에 나타내었다. 계측잡음의 비율은 각 기법별로 amplitude window의 최소 분턱값에 해당되는 전력에 대한 가우스 계측 잡음의 전력 비율을 dB로 나타내었다.

표 4. 각 기법별 고장감지 적용결과 [감지율/오감지율]
Table 4. Summary of the fault detection. [ρ/δ]

| 기법 잡음비 | Periodogram | MUSIC | BLPEF |
|-----------|-------------|-------------|-------------|
| 잡음없음 | 0.96 / 0.16 | 0.96 / 0.08 | 0.96 / 0.0 |
| -20 dB | 0.92 / 0.19 | 0.96 / 0.08 | 0.96 / 0.28 |
| -10 dB | 0.96 / 0.23 | 0.96 / 0.28 | 0.88 / 0.49 |
| 0 dB | 0.92 / 0.35 | 0.96 / 0.28 | 0.08 / 0.98 |

표 4에서 계측 잡음이 없을 경우는 모든 기법들이 비교적 높은 감지율과 낮은 오감지율을 보이고있다. 이는 본 연구에서 목표료한 드럼수위 신호만으로도 보일러 제어계통에서 과열기 tube rupture와 같은 보일러 자체 dynamics 고장, feed-water leak를 통한 보일러 시스템 actuator고장, 수위제어기 자체의 고장을 포함한 광범위한 부위의 고장을 감지하고 구분할 수 있음을 확인한 것이며 이는 본 논문에서 제시한 과형감지에 의한 고장진단 기법의 적용가능성을 시사해 주는 결과라 할 수 있다. 특히 드럼수위 신호를 관찰하여 고장을 진단하는 것은 실제 숙련된 전문 운전원의 고장진단 기능을 직접적으로 묘사하는 의미가 있어 숙련기능의 대체를 목표로 하는 자동화 측면에서는 기존의 해석적 모델에 기초한 고장진단 기법들이 dynamics 모델링을 통한 간접적인 정보를 제공하는 것과 구별되는 우월한 특징이라 할 수 있다.

여러 고장이 동시에 일어날 때 상호 결합현상이 심한 경우에는 과형의 변형이 심해 본 기법을 적용하기에 어려움이 따를 것으로 예상하지만 결합현상이 상대적으로 작을 경우에는 독립적으로 고장을 감지하고 이러한 정보를 상위 단계에서 조합하여 고장의 파급현상까지를 진단하는 것이 가능하리라 생각한다. 다중고장의 발생에 관하여서는 보다 많은 연구가 필요하리라 생각한다.

5. 결론

본 논문에서는 계측신호에 나타나는 oscillatory 과형을 감지하여 이를 고장과 관련 지우는 방식의 고장진단 기법을 제안하고 이를 500 MW급 화력발전소 보일러 드럼수위 제어

계통의 전형적인 고장인 과열기 튜브파열, 급수 누수, 수위 제어기 고장 등의 발생을 검출하는데 적용하여 이러한 기법의 유용성을 확인하였다.

고장진단을 위해 multi-rate구조에 의한 signal conditioning 기법과 periodogram, 예측 모델링, MUSIC 알고리즘에 기초한 oscillatory 과형감지 알고리즘들을 설계하였으며, 보일러 시스템의 dynamics 모델링과 고장 시뮬레이션을 수행하여 얻은 드럼수위 신호에 적용하였다. 시뮬레이션 적용 결과 보일러 제어계통은 본 논문에서 설정한 고장들에 대하여 드럼수위에 뚜렷이 구분되는 oscillatory 과형들이 발생함을 확인하였으며 이에 따라 드럼수위 계측신호만으로도 상대적으로 높은 잡음환경에서도 서로 다른 세 가지 고장을 효과적으로 구분하여 감지 할 수 있음을 보였다. 또한 본 논문에서 설정한 고장 종류는 보일러 제어계통에서 주요 관심대상인 전형적인 고장이며, dynamics 고장, 구동부 고장, 제어기 고장을 모두 포함한다는 점에서 고장감지 기법으로서의 일반성 및 적용 효용성 측면에서 긍정적인 결과를 얻었다고 할 수 있겠다.

앞으로 실제적인 응용을 위한 진단 시스템을 실현하기 위해서는 oscillatory 과형 외에 다양한 특징 패턴 신호들에 대한 감지 알고리즘을 개발하고, 실시간 적용을 위한 구현기법에 대한 연구와 실제 플랜트 계측신호에 대한 적용을 통한 고장진단 시스템의 개발과정이 필요하다.

본 논문은 기초전력공학 공동연구소의 지원을 받아 수행한 연구 내용임 (과제번호 95-85)

참 고 문 헌

- [1] P. M. Frank, "Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy--a survey and some results," *Automatica*, Vol. 26, No. 3, pp. 459-474, 1990.
- [2] Janos J. Gertler, "Survey of Model-Based Failure Detection and Isolation in Complex Plants", *IEEE Control Systems Magazine*, December 1988.
- [3] E. Y. Chow and A. S. Willsky, "Analytical redundancy and the design of robust failure detection system," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. AC-29, No. 7, July 1984.
- [4] John E. White, "Detection Filter Design : Spectral Theory and Algorithms," *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. AC-32, No. 7, July 1987.
- [5] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Digital Signal Processing*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1975.
- [6] J. Makhoul, "Linear Prediction: A Tutorial Review," *Proc. IEEE*, vol.63, pp.561-580, April 1975.
- [7] R. O. Schmidt, "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-34, pp. 276-280, March 1986.
- [8] S. Lawrence Marple Jr., *Digital Spectral Analysis*,

- Prentice-Hall, Inc., 1987.
- [9] K. J. Astrom, "Simple drum-boiler model," *IFAC Symposium Power System, Modeling and Control Applications*, september 1988.
- [10] F. P. de Mello, "Boiler models for system dynamic performance studies," *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 6, No. 1, Feb 1991.
- [11] Bailey Instruction Book, Bailey 820 analog control system description for KEPCO, May 1983.

저 자 소 개



김재화(金載和)

1974년 2월 18일생. 1996년 중앙대학교 제어계측공학과 졸업. 1998년 동 대학원 제어계측학과 졸업(공학석사). 현재 동 대학원 박사 과정



서열규(徐烈圭)

1957년 12월 21일생. 1981년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1983년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1983년-1992년 대우통신 책임연구원. 1992년-현재 동양공업전문대학 공장자동화과 조교수



장태규(張泰奎)

1955년 11월 13일생. 1979년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1981년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1981년-1982년 현대엔지니어링(주). 1982년-1984년 현대전자산업(주). 1987년 University of Florida 전기공학과 졸업(공학박사). 1987년-1990년 Tennessee State University, Assistant Professor. 1990년-현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수.