

현상적 모델에 기초한 보일러 플랜트 드럼 수위제어기의 고장감지

김정근, 장태규
 중앙대학교 전자전기공학부

Phenomenological model based failure detection of the boiler drum level control system of a power plant

J. K. Kim, T. G. Chang
 School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University

Abstract - 본 연구에서는 플랜트의 계측신호로부터 특징 패턴 파형들을 감지하고 패턴감지 정보로부터 플랜트의 운전상황 및 고장을 알아내도록 하는 새로운 기법을 제시하고, 이러한 기법의 실현에 필요한 신호처리 기초 연구를 수행하였다. 또한 보령화력 1,2호기 500MW급 드럼형 보일러 및 제어 시스템을 대상으로 보일러 플랜트의 dynamics 모델링과 운전 시뮬레이션을 통하여 여러 운전 패턴 및 고장 상황을 발생시켜 고장감지 알고리즘들의 개발 및 시험과정에 적용하였다. 본 연구에서 수행한 보일러 및 보일러 제어계통에 대한 모델링 및 시뮬레이션은 실제 수행한 발전소 시험 데이터와 비교할 때 높은 일치도를 보이는 결과를 보였다.

1. 서 론

복잡한 여러 기요소들의 유기적인 동작에 의해 운전되는 대규모 발전소에서는, 운전상황의 상시감시 및 조기 고장진단을 통해 플랜트의 trip의 사전예방을 발전소 이상상태의 파급을 최소화하고 운전의 신뢰성을 유지하는 것이 매우 중요시되고 있다. 최근 고성능 마이크로 프로세서 및 컴퓨터 기술의 발달로 인하여 dynamics 시스템 모델링, 상태추정(state estimation) 및 계수추정(parameter estimation) 등의 진보적인 제어 및 신호처리 기술들의 경제적인 구현이 가능해져서 디지털 방식을 도입한 플랜트 고장 진단에 관한 연구가 여러 연구자에 의해 수행되어지고 있다.

이러한 고장 진단에 관한 연구로서는 플랜트의 dynamic 모델을 정확히 얻을 수 있다는 전제에서 입력특성에 반영된 동특성으로부터 플랜트의 이상을 감지하는 해석적 모델에 기초한 고장감지 기법이 주종을 이루고 있다[3][4]. 이러한 고장감지 기법은 그 구현상의 용이성이나 정확성에도 불구하고 대상 시스템의 복잡도가 증가할 경우 신뢰성 있는 dynamics 모델을 얻기가 힘들고, 해석적으로 문제를 다루어 해를 구할 수 있는 플랜트의 대상 영역과 동작의 범위가 매우 제한적이어서 숙련된 운전자의 고장 진단 및 대처기능을 대신할 만한 자동시스템은 구현되지 못하고있는 실정이다.

숙련된 운전자는 시스템을 진단하고 고장을 감지하는데 있어서 일정시간동안 계측신호로부터 관찰되는 패턴신호의 시각적 특징을 핵심적인 정보로 이용하여 이를 경험적 지식에 비추어 고장과의 상관성을 판단한다. 따라서 운전자는 시스템의 진단에 있어서 대상의 dynamics 정보를 필요로 하지 않으며, 계측신호의 관찰과 고장패턴신호에 관한 경험적 지식만으로도 고장을 진단하는 것이 가능하다.

본 논문에서는 이러한 점에 착안하여 숙련된 운전자가 고장을 진단하는 과정을 직접적으로 묘사하는 기법으로, 계측신호로부터 발생하는 패턴신호들과 시스템의 고장을 관련지음으로써 고장을 진단하는 기법을 제안한다. 이 경우 계측신호들에 포함된 시스템 상태정보를 충분히 활용할 수 있을 뿐 아니라 대상 시스템의 dynamics 정보가 없이도 시스템의 계측신호와 경험적 지식만으로도 고

장을 진단할 수 있어 해석적 모델을 얻기 어려운 대규모의 플랜트의 고장진단에 유용하리라 생각된다.

본 논문에서는 이러한 기법을 현상적 모델에 기초한 고장진단 기법이라 칭하고 이의 구현 예로 500 MW 급 화력 발전소 보일러 시스템의 주요 고장을 자동으로 감지하는 시스템의 구성 과정과 동작 예를 제시하였다.

2. 현상적 모델(Phenomenological Model)에 기초한 고장감지 기법

본 논문에서는 플랜트의 운전 중 발생하는 여러 형태의 패턴신호들과 이들의 특징변수가 시스템의 동작상태를 반영하는 직접적인 정보가 될 수 있음에 주목하여, 패턴신호의 검출과 특징변수의 추정에 디지털신호처리 기술을 적용한 플랜트 고장진단 기법을 제안하고 이를 "현상적 모델에 기초한 고장진단기법"이라 칭하였다. 현상적 모델에 기초한 고장감지기법은 계측신호에 발생하는 특징파형들을 현상적 모델로 간주하여 이들을 개별적 고장상황과 관련 지워 추론하는 기법으로 플랜트상태 진단에 계측신호 자체를 직접적으로 이용한다는 점이 기존의 해석적 redundancy에 기초한 고장진단기법들과 다른 가장 큰 특징이다. 다음의 그림 1.은 이의 개념적 구성도를 나타내었다.

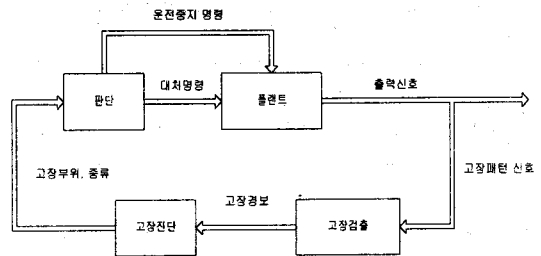


그림 1. 현상적 모델에 기초한 고장진단 시스템 구성도

그림 1.이 기존의 고장진단 시스템과 다른 점은 고장의 검출과 진단에 출력 신호로부터 얻어지는 패턴신호만을 이용하고 있다는 점이다. 현상적 모델에 기초한 고장진단 기법에서는 기존의 해석적 모델에 기초한 기법들에서와 같이 대상시스템의 dynamics정보에 의존하지 않고, 계측신호 자체를 고장의 주요 정보대상으로 취급하여 특징파형을 검출하고 이의 특징정보와 고장의 관련성을 경험적 지식으로 판정한다. 이 과정은 숙련된 운전자가 장시간 관찰되는 다채널 계측신호의 동작양태 및 상황정보를 이용하여 이상현상을 찾아내고 고장 상황과 관련 지워 추론하는 과정을 직접적으로 구현하는 기법이다. 따라서 이 기법은 계측신호에 포함된 잠재적 상태정보를 충분히 활용할 수 있으며, 진단에 있어 대상 시스템의 dynamics를 구할 필요가 없어 여러 기적 요소들이 복잡하게 연결되어있는 대규모 시스템의 고장 감지에 적용이 가능하며, 운전자 고장진단 기법에서 가능한

적응적 해독능력과 고장의 조기감지 능력을 자동화된 시스템으로 구현하기에 유리하다.

본 연구에서 제시한 현상적 모델에 기초한 고장감지 기법의 전체적인 처리단계에 따른 구성도를 그림 2에 나타내었다. 이 기법에서 추가 되는 요소는 signal conditioning filter와 시간영역 해석기법을 함께 적용하여 zero-crossing, peaks, line segment 등 시각적 특징 요소들을 추출하는 특징요소 검출부와 이러한 검출정보들을 조합하여 보다 긴 시간 영역에서 pattern screening 과정을 거쳐 다음에 기술한 여러 특징 패턴들을 검출하는 특징패턴 검출부라 할 수 있다. 이러한 패턴 검출정보들을 이용하여 고장감지 및 진단을 수행하는 과정은 보다 광범위한 시간흐름과 운전상황에 내포된 문맥정보들을 바탕으로 추론의 과정을 거쳐야한다.

본 논문에서는 이러한 고장감지 및 진단을 위한 추론 부분의 전 단계인 특징 패턴을 검출하기 위한 관련 알고리즘 및 신호처리 기법을 개발하고자 하는데 까지를 연구 범위로 설정하였고 플랜트의 운전 및 제어 상태와 밀접한 관련을 지을수 있는 전형적인 특징 패턴들을 특성에 따라, 과도상태의 사이사이 나타나는 baseline transitive 신호, 일정 주파수를 가지고 흔들리는 oscillatory 신호, 갑작스런 외란이나 변화에 기인하는 spike 신호들로 구분하고 본 연구에서는 이들의 특징 패턴에 대한 감지 기법을 제시하였다.

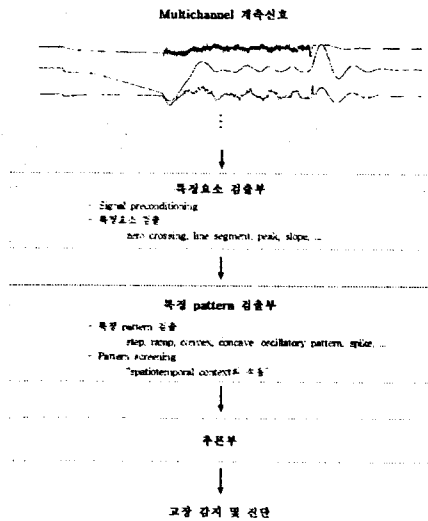


그림 2. 현상적 모델에 기초한 고장감지의 처리단계

동역학 시스템은 그의 운전 중 여러 형태의 패턴신호를 발생시키는 것이 일반적이며 이러한 패턴 신호들의 형태는 그의 발생 원인에 따라 결정된다. 대표적인 패턴 신호들로는 step, ramp, exponential, random 및 oscillatory파형을 들 수 있으며, 그 중 일정한 주기와 감쇄지수를 가지고 순간적으로 발생되는 burst oscillatory파형은 시스템의 입력 변화나 내부 고장 시 가장 일반적으로 발생하는 패턴신호이다. 보일러 시스템에서와 같이 입력의 급격한 변동이 흔치않은 대규모 플랜트의 경우 계측신호에 발생하는 burst oscillatory파형은 시스템의 고장에 그 원인이 있는 경우가 대부분이며 이의 구체적인 원인정보는 고장파형의 주파수와 감쇄지수 등의 특징변수에 반영되어 나타난다. 특징변수란 패턴신호들의 시각적 형태를 정량적으로 표현한 파라미터로 step 신호의 bias offset양, ramp 신호의 증감비율, exponential 신호의 지수 감쇄/증가율, random 신호의 분산, oscillatory 파형의 주파수 및 감쇄지수

등이 이에 속한다. Baseline transitive 패턴 신호들은 과도 구간의 transition 형태에 따라, ramp/step/convex/concave등으로 세분된다. 이들 그룹에 대한 패턴 검출을 위해서는 필터링과, zero-crossing, peaks 등을 검출하는 신호 전처리부(preconditioning)를 수행한 결과로 부터 line-segment와 corner point를 감지하고 이를 이용하여 baseline 존재여부를 검출한다. 이러한 시각적 특징요소들은 transition pattern descriptor에서 curvature, ramp, jump 등을 검출하게 되며 이에 threshold logic, pattern screening 과정을 통해 baseline transitive 패턴 신호들을 감지하게 된다.

Oscillatory 패턴에 대해서는 시간 영역에서 signal conditioning 과 peak, zero-crossing 등의 시각적 특징치 검출을 함께 적용한 감지 알고리즘을 제시하였고, oscillatory 패턴신호에 중첩되어 있는 잡음과 크기가 큰 배경 신호들을 제거하고 원하는 패턴의 형태를 뚜렷하게 하여주기 위한 목적으로 signal preconditioning filter를 적용한다. Zero-crossing과 peak, amplitude 등에 대한 threshold를 거쳐 해당 범위내의 wave 들을 검출하고 이에 grouping pattern 의 criteria를 적용하여 oscillatory 패턴의 감지를 수행한다. Grouping pattern screening은 zero-crossing period와 peak amplitude 치가 허용치 내에 들어가는 wave가 연속적으로 이웃하여 나타나는 형태를 확인 하는 작업으로서 screen에 포함하는 wave의 수, 감지에 필요한 최소 연속 wave의 수, pattern 진행의 종류에 대한 기준의 3종류의 기준치로 구성되어있다.

Spike 패턴은 highpass 필터에 의한 signal conditioning 과 zero-crossing, amplitude, grouping 패턴 screening의 과정을 거쳐 판정한다.

본 연구에서는 다채널 계측신호의 실시간 처리의 필요성과 현상적 모델에 기초한 고장감지의 처리 단계 구조에 부합한 계층적 처리구조를 구현하기 위하여 time-slot 할당에 의한 시분할 방식을 제시하고 감지 알고리즘의 여러 단계에서 사용되는 signal conditioning 필터의 구현법을 제시하였다. 이러한 계층구조는 특징요소 및 패턴에 따라 서로다른 처리시간 단위 적용과 광범위한 시간흐름에 내재된 상황(context)정보의 추출 및 적용 목적에 적합하다.

3. 보일러 시스템 적용 시뮬레이션

본 장에서는 현상적모델에 기초한 고장 감지 기법들을 적용하여 실제 500MW급 화력발전소 보일러 시스템의 oscillatory 고장패턴 감지를 통해 고장을 진단하는 과정을 보였다. 이를 위하여 본 논문에서는 현재 국내에서 운전 중인 보령화력 발전소를 모델로 하여, 드럼을 중심으로 파열기(Super Heater)와 상승관(Riser) 등을 포함한 보일러 시스템 dynamics 및 이의 제어 시스템을 모델링하고 이를 통하여 보일러 시스템의 고장 상황을 시뮬레이션 하였다.

3.1 보일러 플랜트 운전제어계통의 모델링

본 논문에서는 현재 국내에서 운전 중인 보령화력 발전소를 모델로 하여, 보일러 제어계통에서 중요한 관심 대상인 증기의 압력과 flow에 대한 응답특성과 water/steam의 포화 특성을 반영하는데 필요한 부분을 모델링과 시뮬레이션의 주요 범위로 선정하였다. 이런 사항들을 고려하여, 본 연구에서는 드럼과 파열기(super heater)에 질량, energy, 체적 평형식을 적용하고[1][5], 온도제어 계통은 현재의 시뮬레이션 모델에는 일정온도를 갖는 것으로 반영시켜 보일러 dynamics를 4차의 비선형 미분 방정식으로 구성하였다.

현재 보령화력 1,2호기의 보일러 시스템의 제어기는 analog방식의 Bailey 820 ACS(analog control system)에 의해 운전되고 있다. 이 시스템에는 발전출력

지령치를 결정하는 Unit load demand, 운전모드에 따른 turbine 과 보일러의 demand치를 설정하는 협조제어부, 급수유량제어, 연료제어, 공기량제어, 주증기 온도제어, 재열증기 온도제어, 노내압제어, 기타 유효류온도, 점화오일 압력등의 보조계통을 포함한 여러 구성요소들의 제어부가 포함된다. 본 연구에서는 이들 중 발전소 전체의 운전과 응답특성을 시뮬레이션하는데 필요한 부분인 coal demand 제어, turbine 주증기 밸브제어, 드럼 수위제어에 대한 subloop를 포함하는 제어기들을 software에 의해 구성하고 시뮬레이션을 수행하였다. 터빈 governor, 발전기를 포함하여 보일러 계통의 연료, 급수 등을 제공하는 구동부들은 시정수를 갖는 1차 모델로 구성하였다.

3.2 현상적 모델에 기초한 고장감지방법 적용시험

특징 패턴 감지 알고리즘들의 동작을 확인하기위한 목적으로 여러형태의 정상적인 운전상황과, 고장 발생 상황의 예들을 설정하고 본 연구에서 구현한 시뮬레이터를 적용하여 이들에 대한 운전을 수행하고 이에 알고리즘의 적용시험을 수행하여 특징패턴과 고장상태를 감지하는 것을 확인하는 시험을 수행하였다.

그림 3은 보일러의 드럼수위 제어기의 적분기 gain 값을 변경하여 주는 형태로 고장상태를 발생시키고 이때 나타나는 oscillatory 패턴을 감지하는 것을 나타낸 예이다. 이 경우 고장은 자동 운전모드와 Governor Free 운전모드 도중에 각 3분씩 발생시켰으며 약 0.18Hz의 oscillatory pattern 뒤에 따르는 spike는 자동에서 Governor Free, Governor Free에서 set-point maneuvering 모드운전으로 전환될 때 나타나는 불연속 현상이다.

그림 4는 드럼수위 제어부위의 controller 고장상황, feedwater pump로부터 공급되는 급수 계통에 누수가 생긴 고장 상황, 보일러 과열기 부위의 tube에 rupture 가 생긴 경우를 가정하여 이때 발생하는 고장 패턴 신호들을 비교하여 나타내었다.

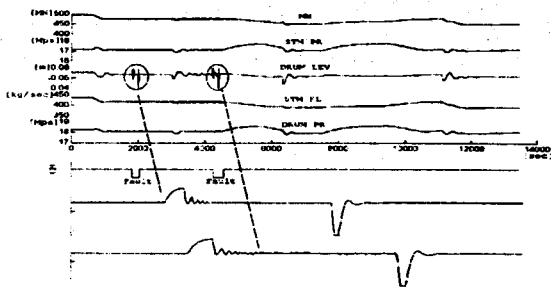


그림 3. 자동운전모드와 Governor Free 운전 모드 상에서 각각 3분간의 드럼 수위의 고장상태를 발생시키고 이때 나타나는 oscillatory 패턴을 감지하는 예

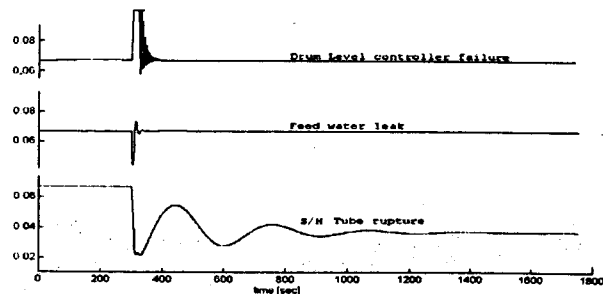


그림 4. 고장 원인에 따라 서로 다른 주파수를 갖는 oscillatory 패턴들이 드럼수위에서 관찰되는 예

그림 4에서 알 수 있듯이 드럼 수위에 나타나는 oscillatory 패턴 신호들은 그 주기의 양태가 고장부위에 따라 현격히 달리 나타나는 것을 관찰 할 수 있다. 즉 드럼 수위 제어기 failure 상황시는 약 0.18Hz의 높은 주파수인데 비해, feedwater leak의 경우는 0.06Hz, tube rupture의 경우는 0.003 Hz로 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이러한 예는 본 연구에서 제안한 현상적 모델에 기초한 고장감지, 즉 플랜트 신호에 나타나는 특징 패턴 신호들을 감지하고 이러한 정보를 플랜트의 동작 상황 및 고장상태와 관련 지운다는 기법의 적용가능성을 뒷받침하여 주는 좋은 예이다.

4. 결 론

본 논문에서는 기존의 해석적 모델에 기초한 고장진단기법들의 한계로 지적된 모델링의 난점, 동작범위의 제한, 시스템자체의 해석적 제약 등을 극복하기 위한 고장진단 기법으로 계측신호의 패턴 감지, 특징 변수 추정 등의 신호처리 기술을 적용한 현상적 모델에 기초한 고장진단 기법을 제시하였다.

설계된 알고리즘의 검증에 위하여 여러 운전 모드 및 이상상태의 경험이 필요한바 본 논문에서는 실제 운전중인 500MW급 보령화력 1,2호기 드럼형 보일러 및 제어시스템을 대상으로 모델링 및 보일러 운전제어 시뮬레이터를 개발하고 실측 데이터와의 비교를 통해 운전제어 시뮬레이션의 실제 운전 일치도를 검증하여 시뮬레이션의 타당성을 보였으며, 다양한 운전 모드 및 고장 발생을 시뮬레이션할 수 있도록 하였다.

다양한 운전 상황에서의 고장 시뮬레이션 결과 보일러시스템은 그의 주요 고장 시 드럼수위에 뚜렷이 구분되는 oscillatory 파형이 발생됨을 확인하였고, 고장 부위에 따른 상이한 고장 패턴이 발생하는 것을 확인함으로써 계측 신호의 고장 패턴 감지 알고리즘을 통해 고장을 진단하는 예를 보였다. 이를 통하여 현상적 모델에 기초한 고장 감지 기법의 적용 가능성을 보였다.

(참 고 문 헌)

- [1] "보일러 계수 추정에 의한 최적 보일러 제어기 개발," 한국전력공사 기술연구원, 1993년 2월.
- [2] Yasuji Sekine, et al. "Fault Diagnosis of Power Systems," Proceedings of IEEE, Vol. 80, No.5, pp.673-683, May 1992.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] K. J. Astrom, "Simple drum-boiler model," IFAC Symposium Power System, Modeling and Control Applications, september 1988.
- [6] 보령화력 1,2호기 기본운전지침서 한국전력공사.