

# 퍼지 논리를 이용한 원자력 발전소 고압터빈 밸브 고장진단

## Fault Diagnosis for High Pressure Turbine Valve using Fuzzy Logic

김연태, 정병욱, 백경동, 김성신

School of Electrical and Computer Engineering  
Pusan National University  
E-mail : dream0561@pusan.ac.kr

### 요 약

본 논문은 원자력 발전소의 주요 제어계통 중에서 터빈 조속기 제어계통에 관련한 성능평가를 목적으로 한다. 터빈 조속기 계통은 고압의 유압계통으로 구성되어 있어 구동설비가 복잡하다. 복잡한 기계설비는 운전 중 많은 오동작에 의한 고장을 일으키고, 유지보수에 어려움이 있다. 이러한 복잡한 기계설비에 있어 운전원에 의한 기계성능 평가는 불리한 점이 많다. 예를 들어 서로 다른 시간에서 일어나는 같은 상황에 대해 다른 판단을 내릴 수 있다는 점이다. 터빈 조속기 계통의 기계설비에 있어서 터빈 밸브 유압공급 및 구동장치는 각 터빈밸브 자체에 부착되어 있어 터빈밸브를 동작시킨다. 터빈밸브들은 구동기 유압 서보실린더(Actuator Hydraulic Servo Cylinder)에 의해 열리고 압축된 스프링에 의해 닫힌다. 이러한 시스템을 진단하기 위해서 본 논문에서는 밸브의 내부 압력의 특징정보를 입력으로 하는 퍼지이론을 적용하여 터빈 밸브 구동설비의 성능을 판단하고자 한다. 퍼지이론에 적용하기 위해 터빈 조속기 제어계통의 고압 터빈 조절 밸브와 고압 터빈 정지 밸브의 압력변화 데이터를 이용한다. 퍼지이론의 적용과정에서 퍼지 Rule은 실제 운전원이 압력변화 데이터에 대한 판단기준을 근거로 하여 정하기로 한다. 그리고 퍼지이론에 적용한 결과를 분석하고 실제 터빈 조속기 계통의 전문가가 판단 결과와 비교하였다.

**Key Words** : Diagnosis, Fuzzy logic, Turbine valve

### 1. 서론

원자력 발전은 1950년대 중반에 처음 도입된 이래 지속적으로 성장하여 현재는 350여기의 원자력 발전소가 전체 전력 생산량의 약 16%를 담당하고 있다. 현재 20기의 원자력 발전소가 국내 총 발전량의 약 38%를 차지한다. 국내에서 안정적인 전력생산과 원가절감 등을 고려할 때 원자력 발전소의 비중이 매우 크며, 특히 화석 원료에 의한 환경오염이 없어 지속적으로 원자력 발전의 건설 및 운영이 될 전망이다. 이에 따라 원자력 발전소의 안정적 운전과 이용률 향상은 국가 전력 생산을 위한 큰 과제이다[1]. 원자력 발전소의 안정적 운전과 이용률 향상은 계측제어설비의 높은 신뢰도를 요구한다. 원자력 발전소의 주요 제어계통으로

는 주 급수 제어계통, 원자로 출력제어 계통, 가압기 수위/압력 제어계통, 터빈 조속기 제어 계통 등이 있다. 이들은 원자력 발전소 운전을 위한 필수적인 기능들을 제공하며, 각 제어계통의 성능은 발전소의 효율적인 운전 및 이용률에 중요한 영향을 미치고 있다. 특히 제어계통 중 터빈 조속기 계통은 고압의 유압계통으로 구성되어 있어 구동설비가 복잡하다. 복잡한 기계설비는 운전 중 많은 오동작에 의한 고장을 일으키고, 유지보수에 어려움이 있다. 최근에 와서 고리 1.2호기는 기존 아날로그 제어방식 설비를 디지털방식 제어 설비로 교체하였으나, 현장 구동부의 설비를 진단하고 분석하는데 많은 어려움이 있다[2]. 특히 원자력 발전소에서 터빈 조속기의 제어는 매우 중요하게

고려되고 있으며, 보다 효율적인 운영을 위해 고장 발생 가능성을 사전에 예방하고 진단하여 본 계통의 안전성을 보강해야한다[3]. 최근에 와서 인공지능적인 기법 등을 이용하여 터빈 조속기의 고장 진단에 많은 연구가 이루어지고 있다[4]. 본 논문에서는 측정 가능한 신호를 이용해서 발전소의 주요 제어계통의 고장을 조기에 진단하여 효율적인 제어 시스템을 적용하고자 한다.

### 2. 터빈밸브의 고장진단 문제

전통적인 구동설비 고장진단 및 정비기법은 고장보수, 예방정비, 신뢰도 기법을 적용한 예측정비를 하고 있다. 그러나 그림 1의 원자력 발전소의 터빈 밸브구동설비는 유압설비의 기계적인 제어설비로 구성되어 있어 자료 취득이 어렵고 비선형성이 강해 예측정비에 어려움이 있다[5]. 특히 터빈 조속기의 경우 특정 동작점(110, 약 60% 밸브 개도) 근처에서 운전되며 압력 제어가 중요하다. 압력은 펌프에 의한 오일 압축과 기계식 밸브에 의해 압력이 유지되지만 누설부위가 많아 고장진단 및 유지보수에 많은 어려움이 있다. 그리고 솔레노이드 밸브에 의해 작동하는 비상 동작은 원인 없이 밸브 닫힘 또는 순간닫힘 후 열림현상이 연속적으로 일어난다. 또한 덤프 솔레노이드 코일 단선에 의한 밸브 긴급닫힘, 펌프 구동용 모터 마그넷 계전기 고장에 의한 펌프 정지, 서보밸브 내부 이물질에 의한 밸브 스윙 등 다양한 고장에 의해 밸브가 닫히거나 순간적으로 스윙한 후 그 증상이 사라지는 등 원인 파악이 어렵다. 복잡한 구동설비에 대한 계측과 고장진단은 simulator 및 유압조절, 실린더 누설 오일 등급, 각종 구동설비 자료도면 분석 등을 통해 판단한다. 2001년부터 2005년 말까지 고리 2호기에서 동설비 고장이 약 30여건 발생하였고 정확한 고장 진단에 고심하고 있다. 본 논문은 고장진단에 퍼지논리를 사용하여 이를 통해 문제점을 진단하고 그 해결 방안을 찾고자 한다.

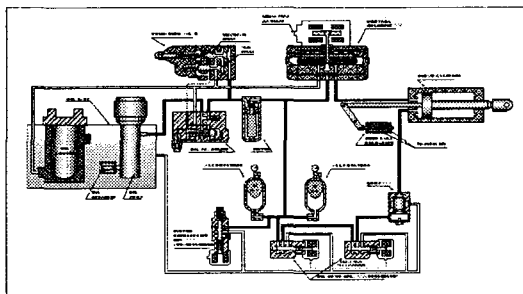


그림 1. 터빈 밸브 구동기 유압계통도.

### 3. 고장진단을 위한 특징정보 선택

본 연구에서는 비슷한 구조를 가지는 고압터빈 정지밸브와 조절밸브의 상태를 진단한다. 4개의 각 고압터빈 정지밸브(stop valve)와 조절밸브(governing valve)의 성능 평가는 퍼지논리로 평가한다. 퍼지 멤버십 함수는 고압터빈 정지밸브와 조절밸브의 입력과형을 관찰하여 얻는다. 그림 2와 3은 계측된 고압터빈 정지밸브와 조절밸브의 내부압력을 밸브의 성능이 좋은 순서대로 나열한 것이다. 정지밸브(SV)의 경우 SV1, SV2, SV3, SV4 순서로 우수하고, 조절밸브(GV)의 경우 GV1, GV2, GV3, GV4 순서로 우수하다.

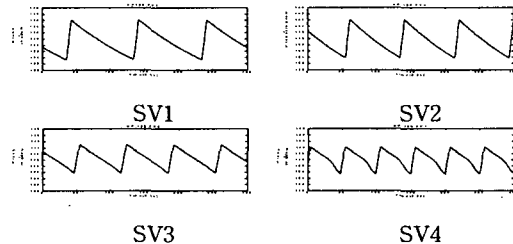


그림 2. 고압터빈 정지밸브 내부압력

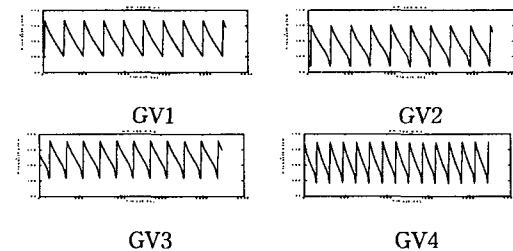


그림 3. 고압터빈 조절밸브 내부압력

본 연구에서 고압터빈 밸브의 성능 판단을 위한 특징 정보로 일반적으로 사용되는 loading 시간과 unloading 시간 그리고 새로이 unloading의 패턴을 이용하였다. 그러나 기존에 성능 평가지수로 사용되었던 loading 시간은 그림 4와 같이 정지, 조절밸브 두 밸브에서 동일하게 좋지 못한 분별력을 가짐을 볼 수 있었다. 이러한 이유로 본 논문에서는 unloading 시간과 unloading 패턴을 퍼지논리의 입력변수로 정하였으며, 이를 이용하여, 압력계의 상태를 진단하겠다.

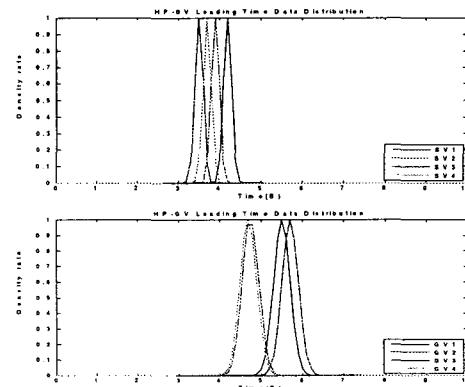


그림 4. 정지밸브(上)와 조절밸브(下) 상태별 loading 시간 분포도.

그림 5는 좋은 성능의 조절밸브와 비교적 나쁜 성능의 조절밸브의 압력 변화를 보여주고 있다. 여기서 unloading패턴이 좋은 조절밸브는 균일한 패턴으로 감소하지만, 나쁜 조절밸브는 어느 지점에서 급속도로 떨어짐을 볼 수 있다. 이는 밸브 내부 압력계에서 이상 누설이 있음을 보여줄 수 있다.

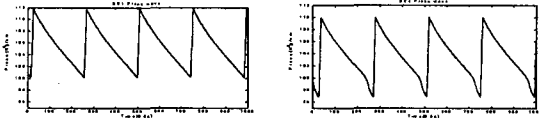


그림 5. 조절밸브 상태별 unloading 패턴.

다음 식은 밸브의 unloading 패턴에서 지속적으로 가파르게 감소하는 특징을 수치로 표현할 수 있는 수식이다.

$$Ratio = \frac{Observed\ data\ area - Triangular\ area}{Triangular\ area}$$

이는 밸브에서 loading완료 직후의 최고압력 포인트와 최저압력 포인트를 직선으로 연결했을 때의 삼각형면적과 삼각형면적을 뺀 실제 그래프에서 면적의 나머지를 비율로 수치화한다. 이를 고장 진단을 위한 퍼지 로직의 입력으로 사용하였다.

#### 4. 퍼지로직을 이용한 고장진단

입력과 출력을 위한 퍼지 멤버십 함수와 룰은 각 상태별 압력조건의 통계적 분포를 반영하여 완성하였다[6-7]. 다음의 그림 5, 6은 고압터빈 정지밸브와 조절밸브의 멤버십 구성을 보여준다. 여기서 unloading 시간과 unloading 패턴 특징의 입력 멤버십 함수와 압력계 누출율을 나타내는 출력 멤버십 함수이다.

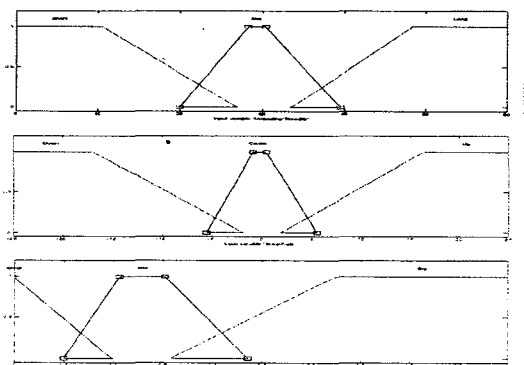


그림 5. 정지밸브의 unloading 시간 (上), unloading 패턴(中)입력 멤버십과 진단결과 출력 멤버십(下).

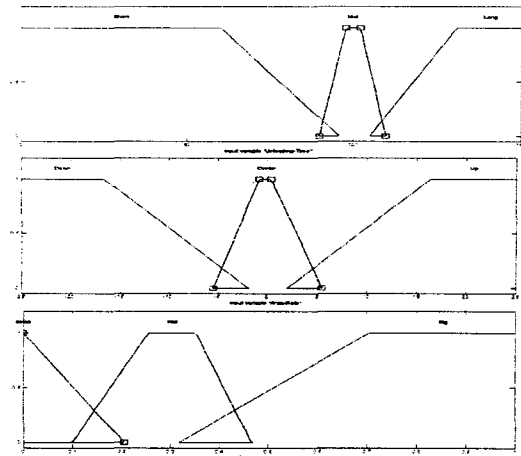


그림 6. 조절밸브의 unloading 시간 (上), unloading 패턴(中)입력 멤버십과 진단결과 출력 멤버십(下).

여기서, 출력은 상징적으로 본 밸브의 압력계의 압력 누출율을 나타내며 0~1의 범위를 가진다. 그러나 이는 실제 압력의 누출율과 일치한다고는 할 수 없으며, 단지 0~1의 값에서 1에 가까우면 누출이 최고조에 이르게 되며, 이는 본 밸브의 압력계가 노후나 고장으로 인한 파손으로 제 기능을 못하는 상태라고 여길 수 있다.

다음은 밸브의 상태 진단을 하기위한 룰을 보여주고 있다.

고압터빈 정지밸브의 퍼지 RULE:

- R1: IF Unloading-Time is Short and Area-Rate is Down then Gas-Leakage is Big
- R2: IF Unloading-Time is Short and Area-Rate is Center then Gas-Leakage is Big
- R3: IF Unloading-Time is Short and Area-Rate is UP then Gas-Leakage is Big
- R4: IF Unloading-Time is Mid and Area-Rate is Down then Gas-Leakage is Mid
- R5: IF Unloading-Time is Mid and Area-Rate is Center then Gas-Leakage is Mid
- R6: IF Unloading-Time is Mid and Area-Rate is UP then Gas-Leakage is Mid
- R7: IF Unloading-Time is Long and Area-Rate is Down then Gas-Leakage is Small
- R8: IF Unloading-Time is Long and Area-Rate is Center then Gas-Leakage is Small
- R9: IF Unloading-Time is Long and Area-Rate is UP then Gas-Leakage is Mid

고압터빈 조절밸브의 퍼지 RULE:

- R1: IF Unloading-Time is Short and Area-Rate is Down then Gas-Leakage is Big
- R2: IF Unloading-Time is Short and Area-Rate is Center then Gas-Leakage is Big
- R3: IF Unloading-Time is Short and Area-Rate is UP then Gas-Leakage is Big
- R4: IF Unloading-Time is Mid and Area-Rate is Down then Gas-Leakage is Mid
- R5: IF Unloading-Time is Mid and Area-Rate is Center then Gas-Leakage is Mid
- R6: IF Unloading-Time is Mid and Area-Rate is UP then Gas-Leakage is Mid
- R7: IF Unloading-Time is Long and Area-Rate is Down then Gas-Leakage is Small
- R8: IF Unloading-Time is Long and Area-Rate is Center then Gas-Leakage is Small
- R9: IF Unloading-Time is Long and Area-Rate is UP then Gas-Leakage is Mid

#### 5. 고장진단 결과

그림 7과 8은 앞의 장에서 구성한 퍼지로직을 이용한 두 밸브의 모든 입력에 대한 진단 결과를 보여주고 있다. 여기서 추론방법은 Mamdani를 사용하였으며, de-fuzzification하기 위한 방법으로는 COA(Centroid Of Area)방법을 사용하였다. 그림

7은 정지밸브의 de-fuzzy 결과는 값이 작은 어두운 영역이 누설량이 작고 설비의 건전함이 양호함을 나타낸다. 여기서 어두운 영역은 unloading 시간이 길고 area-rate 값이 작을 조건이다.

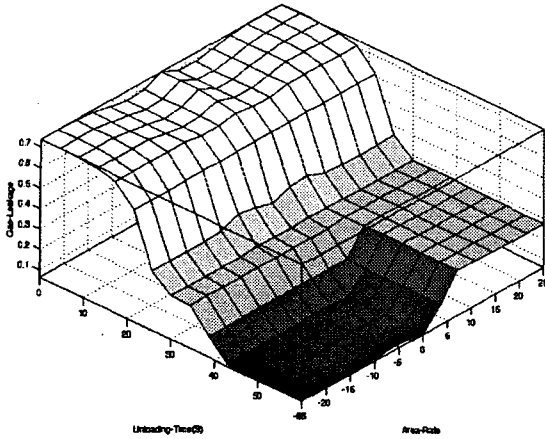


그림 7. 정지밸브의 추론결과

그림 8은 고압터빈 조절밸브의 de-fuzzy 결과를 보여준다. de-fuzzy 결과는 값이 작은 어두운 영역이 누설량이 작고 설비의 건전함이 양호함을 나타낸다. 어두운 영역은 unloading 시간이 길고 area-rate 값이 작을 조건이다. 고압터빈 조절밸브의 판단 결과가 고압터빈 정지밸브의 판단 결과와 유사한 형태를 보여준다.

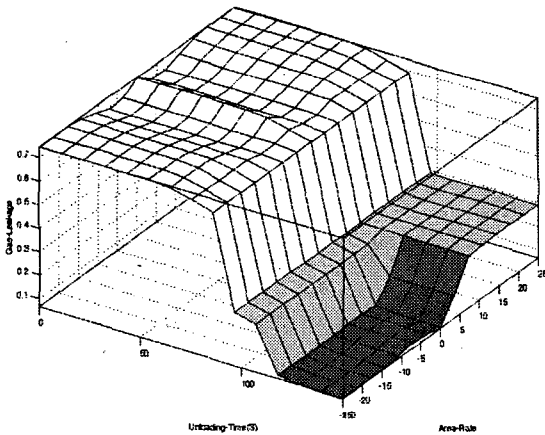


그림 8. 조절밸브의 추론결과

## 6. 결론

본 논문은 고리 원자력 발전소 고리 1, 2호기의 고압터빈 밸브의 유압계 고장진단을 연구하였다. 고압터빈의 운전을 제어하는 밸브는 4개의 정지밸브와 4개의 조절밸브로 구성되어 있으며 모든 밸브의 구동은 유압으로 이루어진다. 이들 밸브로부터 얻을 수 있는 계측 정보는 한정적으로 내부 유압계의 압력의 변화만을 관찰 할 수 있었다. 이러한 압력 정보의 분석을 통해 정지밸브와 조절밸브의 운용을 위한 내부 유압계의 노후정도 혹은 고장을 퍼지 논리를 이용하여 추론 하였다. 퍼지 논리를 이용하기 위한 입력 변수로 기존의 전문가의 밸브 성능판별 요소인 압력의 loading/unloading 시간의 관찰 방법이 아닌 밸브의 내부 압력의 unloading 시간 관찰과 함께 unloading 패턴을 사용하여 압력 누출을 간접적으로 추론 할 수 있었다. 이를 이용하여 고압터빈의 정지밸브와 조절밸브의 상태진단이 효과적으로 이루어 질 수 있음을 실험적으로 증명 하였다. 본 연구에서 제시한 진단 알고리즘의 응용으로, 밸브 구조 변화에 따른 밸브 성능 변화를 즉각적으로 판별할 수 있게 도와줌으로써, 밸브 유압계 누설을 줄일 수 있는 실험과 성능 검증을 보다 더 정확하고, 빠르게 진행 할 수 있는 좋은 도구로 사용 될 수 있음을 보여주었다.

## 감사의 글

이 논문은 교육인적자원부 지방연구중심대학육성사업(차세대물류IT기술연구사업단)의 지원에 의하여 연구되었음

## 참고문헌

- [1] 장순홍, 백원필외, 원자력 안전(Nuclear Safety), 청문각 pp 1-37,1998.
- [2] 원전 터빈 조속기 디지털 제어설비 개발, 한국전력 전력연구원.
- [3] 고리원자력 2호기 조속기 제어로직 도면 고리원자력본부 제1발전소, 전력연구원 발전연구실.
- [4] 전력사업의 인공지능 도입 연구 Technical Report, 한국전력공사 정보처리처 1990.8
- [5] 터빈 조속기 제어계통, 한국전력공사 원자력 발전처, 1995.
- [6] Ken Nozaki, Hisao Ishibuchi, and Hideo Tanaka, "A simple but powerful heuristic method for generating fuzzy rules from numerical data," *Fuzzy Set and Systems*, Vol. 86, pp.251-270, 1997.
- [7] S. Chiu, "Method and software for extracting fuzzy classification rules by subtractive clustering," *Biennial Conference of the North American(NAFIPS'96)*, pp.461-465, 1996.
- [8] GEC MANUAL VOLUME 4 Sub-Contractor's Instrumentation Book 30(Electro-Hydraulic Governor).