

**급수펌프 구동용 증기터빈 속도제어기 튜닝 사례 고찰**

김중안, 우주희, 최인규, 김병철, 신재호  
한국전력공사 전력연구원, 한밭대학교

**Study on the Speed Controller tuning of a Feedwater Pump Turbine**

Jongan-Kim, Joohee-Woo, Inkyu-Choi, Byungchul-Kim, Jaeho-Shin  
Korea Electric Power Research Institute, Hanbat National University

**Abstract** - 화력발전소 보일러의 급수량은 유출되는 증기량에 맞추어 자동 조절된다. 유출 증기량이 변하는 상황에서도 이에 상응하는 급수량은 실시간으로 조절되어야 한다. 증기량과 급수량에 차이가 있으면 보일러의 보유 수량과 드럼의 수위가 변하게 되므로, '드럼수위를 일정하게 유지하는 것'이 급수량제어의 목표라고 할 수 있다. 본 논문은 실제 운용되고 있는 설비를 대상으로 고찰한 내용이며, 급수펌프 구동력으로는 증기터빈을 사용한다. 증기터빈과 급수펌프는 같은 축으로 연결되어있으며, 급수량 조절은 급수펌프의 회전속도를 제어함으로써 이루어진다. 터빈에 사용되는 증기는, 고압과 저압 2종류이며, 저압 증기가 부족한 경우에 고압증기를 사용하는 구성으로 되어있다. 증기 밸브의 유량 특성에는 비선형성을 많이 포함하고 있었다. 이 외에도 급수펌프가 갖는 비선형성을 분석하였으며, 이 특성들을 모두 종합한 '증기터빈 속도제어기 튜닝 곡선'을 제시하였다.

급수시스템의 구성과 유량의 흐름은 그림 1과 같다. 급수제어제가 정상상태에서는 상부 드럼의 수위(Drum Level) 일정하게 유지되며, 이 때 증기의 유출량  $Q_s$ 와 급수유입량  $Q_w$ 은 서로 같다.  $Q_s=Q_w$ 이면, 수위는 일정하게 유지되며,  $Q_s \neq Q_w$ 이면, 수위변동량  $\Delta H$ 는  $\Delta H = \int Q dt$  관계가 성립한다.

**2.2 드럼(Drum) 수위 제어**

드럼의 수위가 목표치(Set Point)에서 벗어나거나, 증기 유출량이 변하면 급수량을 제어하여 드럼의 수위가 목표치 부근에 유지되도록 하는 것이 급수공급량 제어제의 역할이다. 제어회로의 구성은 다음 그림 2와 같다.

**1. 서 론**

유출 증기량과 유입 급수량이 서로 불균형이 되면 보일러 보유 수량이 변하며, 드럼 수위가 변하게 된다. 불균형이 심하거나 지속시간이 길면 수위 변화가 커지고 위험 상태에 처하게 된다. 급수펌프 구동력인 증기터빈은 전동기에 비해 속도 가변이 쉽고 에너지 이용 효율이 높은 장점을 갖고 있다. 터빈에 들어가는 증기량을 가감하여 속도제어하면 펌프 급수량을 제어할 수 있다. 속도제어의 품질은 터빈의 속응성과 계통에 포함된 비선형성에 많이 영향을 받는다.

**2. 본 론**

**2.1 급수공급 계통 구성과 유량 관계**

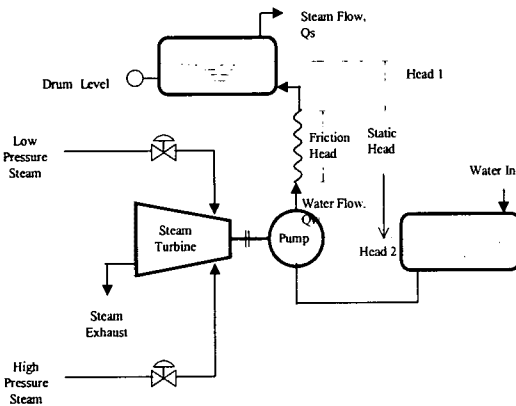


그림 1 급수공급 계통도

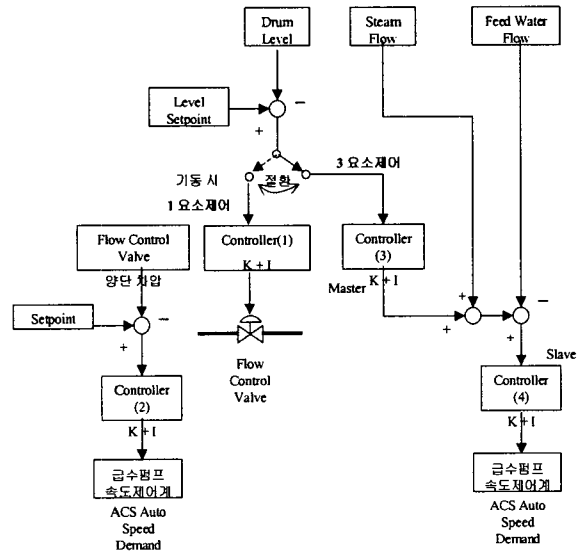


그림 2 드럼 수위제어 회로

**2.2.1 1 요소 제어**

보일러 기동 시 낮은 유량(25%이하)에서 사용되는 방식으로 드럼수위(Drum Level)만 받아 제어를 한다. 이 때에도 급수 펌프는 Flow Control Valve(FCV)의 입, 출구 양측의 차압을 일정하게 유지하도록 속도가 자동 제어된다. FCV는 비교적 유량계수가 적으므로 낮은 부하에서는 큰 밸브에 비해 제어성 좋고 교축 손실과 밸브손상 감소에 유리하다. 증기와 급수유량이 적은 구간에서는 1요소 제어방식으로도 시간적 여유를 갖고 수위제어를 할 수 있으며, 증기량과 급수량이 일시 급변하더라도 비교적 안정된 제어를 할 수 있다.

### 2.2.2 3 요소 제어

3요소, 즉 드럼수위, 유출증기량, 급수량의 3개 신호를 받아들여 수위를 제어하는 방식이다. 유출 증기량 신호를 받아 급수량을 선행제어함으로써 수위 변동 폭을 줄인다. 즉, 수위가 변동하기 전에 증기량 변화를 감지하여 급수량을 제어하는 Feed Forward 제어가 이루어진다. 이 방식은, 유출 증기량의 급변 상황에 동반하여 발생하는 수위의 '팽창과 수축(Shrink & Swell)' 상황에서도 1 요소 제어방식 보다 안정된 수위제어를 할 수 있다. 증기유량 급증과 수위팽창이 동시에 발생하면 급수량 요구가 서로 상쇄되어 과도상태 극복에 도움이 된다. 반대 상황에서도 좋은 결과를 얻게 된다.

1요소 제어에서 3요소 제어로의 전환은 유량이 증가함에 따라 자동으로 이루어지며, 그 조건은 다음과 같다.

- a) FCV 개도 요구 > 90 %
- b) 주증기 유량 > 25 %

전환이 진행되는 과정에서 저유량 제어용 FCV 서서히 닫히고 대유량 밸브가 완전히 열린다.

그림 2의 3요소 제어에서 드럼 수위제어기 Controller (1)은 Master로, 하위 제어기인 Controller (3)는 Slave로서 유량제어를 담당한다(Cascade 제어구조).

### 2.3 급수 유량제어

급수유량 조절은 펌프의 회전속도를 제어함으로써 이루어진다.

#### 2.3.1 급수펌프 회전속도와 유량 관계

급수펌프 회전수(N)와 유량, 에너지 관계식은 다음과 같다. 단, 펌프는 원심력 형식이며, 손실을 무시한 이상적인 경우이다.

- a) 유량  $Q = k_1 \cdot N$  ----- 1)
- b) 토출압력  $H_p = k_2 \cdot N^2$  ----- 2)

보일러 드럼 내의 압력이 일정하다면, 급수펌프 출구에서 유지해야 하는 토출 Head,  $H_b$ 는 다음과 같다.

$$H_b = \text{Static Head}(H_s) + \text{Friction Head}(H_f) \text{ ----3)}$$

여기서,  $H_s$ 는 급수펌프가 최소한 유량을 공급할 수 있는 Head로서 유로의 저항에 영향받지 않으며 그 값  $H_s = \text{드럼 압력} + \text{펌프와 드럼의 높이 차이}$ 가 된다.

Friction Head( $H_f$ )는 유량의 제곱에 비례하는 마찰손실 Head (=  $kQ^2$ )이다. 그림 3과 같은 펌프 토출 Head가 필요하게 된다.

드럼에 공급되는 유량을 증가시키는 방법으로는,

- a) 펌프 출구 측의 토출 Head 증가
  - b) Friction Head 감소
- 가 있으나, 3요소 제어에서는 a)를 사용한다.

#### 2.3.2 급수 유량에 증감에 요구되는 펌프회전수

초기 급수유량이  $Q_1$ 이고 발전소 출력 증가에 따라 유량  $Q_2$ 가 필요하다면 펌프회전수는 얼마나 증가해야 하는지 살펴본다.

식 1)에 의하여 산출되는  $N_2 = N_1 + (Q_2 - Q_1)/k_1$ 이다.

그러나 유량 증가에 따라 발생하는 펌프 내부의 손실(Head) 증가분  $\Delta H_i$ 와 펌프 외부 배관 등에서 발생하는 외부 손실 증가분  $\Delta H_o$ 를 보상할 수 있는 회전수( $N_c$ )만큼을 더 필요하게 된다(식 3) 참조).

실제 필요한 회전수  $N_{2act} = N_2 + N_c$  ----- 4)가 되며, 선형 비례관계를 벗어나게 된다.

#### 2.3.3 펌프의 특성 곡선(Characteristic Curve)

원심펌프의 유량이 증가하면 펌프 내부 손실 Head 증가함에 따라 공급할 수 있는 토출 Head가 그림 4와 같이 감소한다. 감소하는 기술기는 펌프 구조에 따라 달라지며, 특히 Impeller 형상에 영향을 많이 받는다.

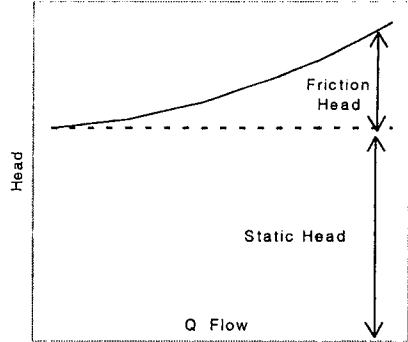


그림 3 급수 공급에 필요한 토출 Head

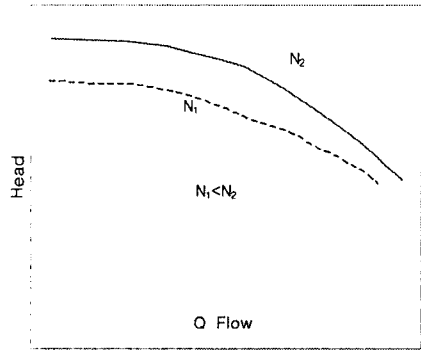


그림 4 펌프 Q-H 특성곡선

#### 2.3.4 펌프의 운전점 이동

펌프 급수유량  $Q_1 \rightarrow Q_2$ 로 증가시키려면 펌프가 유지해야 하는 토출 Head는 커지나, 펌프 Q-H 특성곡선에 따라 Head는 감소한다. 펌프의 회전수를  $N_1 \rightarrow N_2$ 로 높여서 양 곡선이 일치하는 새로운 운전점  $P_2$ 에서 유지되도록 한다.

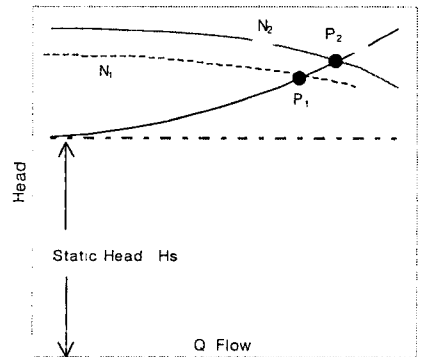


그림 5 유량 증가에 따른 운전점 이동

### 2.4 급수펌프 구동용 터빈 제어

구동 터빈은 급수펌프와 축으로 직결되어 있으며, 펌프 토출 유량에 맞는 속도제어가 이루어진다. 유량에 대응하는 속도 관계는 다음 그림 6 과 같다.

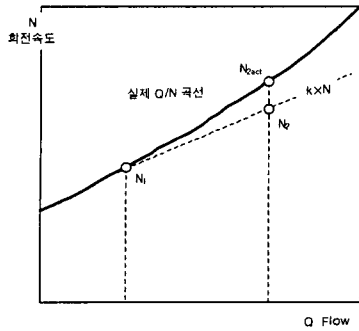


그림 6 급수유량 Q와 펌프 회전수 N 급수 유량이 Q1에서 Q2로 증가해야 하는 경우 속도증가분을 구해보면

$$N_{2act} = N_2 + N_c$$

여기서,  $N_{2act}$ 는  $Q_2$ 를 공급하는 실제 속도  
 $N_2$ 는 손실을 무시한 이론적 회전수  
 $N_c$ 는 유량 증가분에 따라 발생하는 펌프 내, 외부 손실 Friction Head를 극복하기 위한 회전수 증가분이며, 대략  $N_c = k_1 Q^2$  관계를 갖는다.  
 유량증가에 따라서 보상해야 할  $N_c$ 가 커지므로 터빈 속도제어기의 이득(Gain)도 속도 신호에 따라 상승하는 값이 되어야 한다.

### 2.4.1 급수 유량과 터빈의 속도제어

그림 2의 Controller(4)는 필요한 급수유량을 터빈속도 제어계에 요구한다. 터빈속도제어계에서는 이 유량을 속도로 환산하여 그 속도를 유지하기 위한 제어작용을 한다. 유량-속도(Q/N) 환산은 그림 6의 곡선이 작용하도록 제어 회로에 들어가 있다. 다음 그림 7의 F(x)가 Q/N 변환 기능이다.

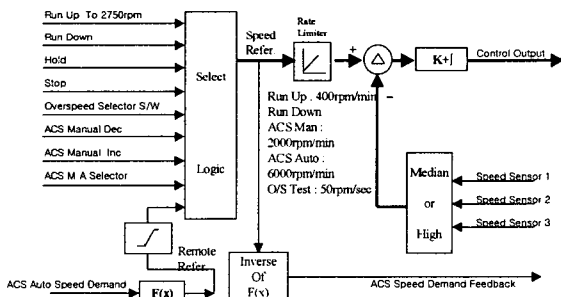


그림 7 터빈 속도제어 회로

### 2.4.2 터빈에 필요한 증기유량

증기의 엔탈피가 일정하다면 급수유량 요구에 비례하여 증기유량을 공급하면 된다.

급수유량 Q에서의 필요한 동력 P는,  
 $P = \text{펌프 토출압} \times \text{급수유량} = H_p \times Q$ ,  
 $P \propto \text{증기엔탈피} \times \text{증기유량}(Q_s)$   
 $Q_s = P \div \text{증기엔탈피} + \text{터빈과 펌프의 효율}$

위에서 구한 증기유량  $Q_s$ 에 급수 펌프 내, 외부 손실 Head 극복에 필요한 만큼의 증기량을 더해야 한다.

그림 2 '드럼수위 제어 회로'와 그림 7 '터빈 속도제어 회로' 그리고 그림 8의 '터빈 증기량 제어계통'이 직렬연결되어 있으므로, 증기량  $Q_s$ 는 자동적으로 조절된다.

(그림 7의 오른쪽 상부의 'Control Output' 신호가 다음 그림 8 왼쪽 상부 'Control Input Signal(mA)'로 연결됨)  
 일시적으로 터빈 구동증기량  $Q_s$ 가 급수유량 Q를 공급하는 값에 맞추지 못한다면, 결과적으로 드럼 수위가 목표치를 벗어나게 되며, 그림 2의 '드럼수위 제어계' 작용에 의해 '에너지 보존 법칙'에 맞는  $Q_s$ 로 최종 수렴된다.

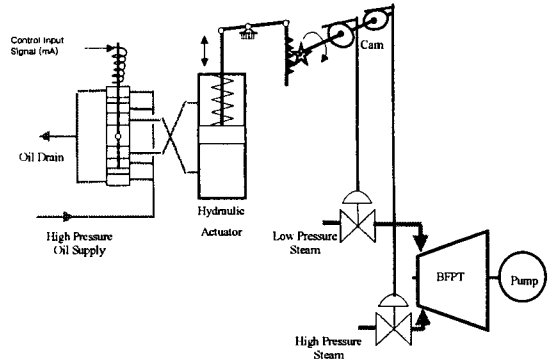


그림 8 터빈 증기량 제어계통

### 2.4.3 터빈 증기가 2 종류인 경우

터빈에 사용하는 증기 종류가 그림 8과 같이 2개이다. 발전소 운전조건에 따라 에너지 이용 효율을 높이기 위한 구성이다. 초기에는 저압증기(Low Pressure Steam)용 조절밸브가 열려서 터빈 속도 조절을 담당하며, 저압 증기로 부하를 극복하지 못하면 고압증기(High Pressure Steam) 밸브가 동작한다. 증기압 변동 =  $k \times (\text{증기유량 변동})^2$  관계가 있으므로, 고압증기 사용구간에서 터빈속도 변동 폭이 훨씬 더 커진다. 즉, 고압증기 사용 구간에서는 그림 7의 제어기(K+f) Gain 값이 저압증기 사용 때보다 감소 시켜야 한다.

또한 증기밸브들의 개도-유량특성의 비선형성도 제어기 Gain 설정에 반영되어야 한다. 전체 구간에서 속도제어가 일정한 특성(또는 이득)을 유지하도록 해야 한다.

### 2.4.4 터빈 속도제어기 이득 설정(튜닝) 곡선

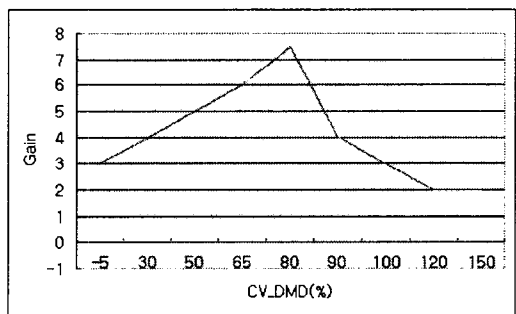


그림 9 속도제어기의 비례이득 설정곡선

그림 9는 실제 적용한 터빈 속도제어기 비례이득 K 값 적용곡선이다. 터빈 증기 밸브개도 요구(CV\_DMD)에 증가에 따라 제어기 이득 값도 커지다가, CV\_DMD 80%에서 최고에 도달하고 이후에 감소한다. 펌프 특성, 터빈 증기 유량 특성, 그리고 CV\_DMD 80%이상에서는 고압증기 사용구간이 반영된 결과이다.

## 3. 결론

급수펌프의 유량제어는 a)펌프의 특성, b) 급수 공급배관계의 손실 특성, c)구동용 터빈의 특성과 조건 등 전체 시스템에 포함된 주요 특성을 파악하여 제어기 설정에 반영해야 한다. 즉, 모든 구간에서 공정이득과 응답이 비교적 일정하도록 제어장치 또는 알고리즘에 반영해서 제어 품질향상을 도모해야 한다. 이 논문에서 고찰하지 못한 부분도 향후 연구를 계속할 예정이다. 끝.

### [참고 문헌]

- [1] "Controlling Centrifugal Pumps", Walter Driedger, 2000, [http://www.driedger.ca/ce1\\_cp/CE1\\_CP.html](http://www.driedger.ca/ce1_cp/CE1_CP.html)