

발전소에서 터빈 제어밸브의 전환운전 알고리즘 구현 및 적용

우주희, 정창기, 김종안, 김병철, 최인규  
한국전력공사 전력연구원

Application of Valve Transfer Algorithm for Turbine Control Valve in Power Plant

Woo Joo-Hee, Jeong Chang-Ki, Kim Jong-Ahn, Kim Byung-Chul, Choi In-Kyu  
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - 증기터빈 발전소에서 터빈제어밸브는 운전중 적절히 개도를 조절하여 보일러에서 공급되는 유량을 조절하여 터빈속도 및 발전기의 전기적 출력을 제어할 수 있도록 해준다. 이러한 터빈제어밸브는 4개로 구성되어 있으며, 운전중 최적의 발전효율을 얻기 위해 저부하에서는 4개의 제어밸브가 동일하게 조절되다가 밸브 전환운전을 완료한 후 4개의 밸브가 주어진 특성에 따라 각기 조절되어야 할 필요성이 있다. 이때 수행되는 과도기적인 운전절차인 밸브 전환운전시 발전기 출력 등의 변화가 없어야 한다. 본 논문에서는 밸브전환 운전시 발전기 출력을 일정하게 유지하기 위하여 고압터빈 1단 압력을 제한받아 발전기 출력을 보상하는 제어알고리즘을 제시하고 실제 발전소에 적용한 결과를 소개하고자 한다.

압터빈 케이싱 및 CV 체스트 등 두꺼운 금속에 열응력을 발생시키는 원인이 되며, 이러한 열응력의 누적은 터빈수명을 단축시킨다. 따라서 기동 및 터빈 기동시 MSV를 전개하고 4개의 CV를 동시에 조절하여 운전(전주분사 운전 : Full Arc Admission, FA)함으로써 터빈을 일정하게 가열하고 온도변화를 감소시켜 국부적인 열응력 발생을 최소화시킨다. 그리고 터빈부하가 정격출력의 약 20%까지 상승되면 4개의 CV를 순차적으로 개폐(밸브전환 운전)하여 밸브의 교축손실을 감소시키며 전부하대까지 운전(부분분사 운전 : Partial Arc Admission, PA)한다 [1].

이러한 밸브 전환시 동일하게 열려 있는 4개의 CV중 CV4 및 CV3을 순차적으로 닫으면서 나머지 CV1, 2를 더 열어주어 발전기 출력의 변화가 없도록 하는 기능을 터빈제어시스템이 가져야 한다. 다음 절엔 국내 500MW급 화력발전소에 실제 적용한 내용을 기술하고자 한다.

1. 서 론

발전소에서의 터빈은 부하(Load) 또는 보일러에서 공급되는 증기상태(압력, 온도 등) 변화에 따라 회전속도가 바뀌므로 발전기에서 요구되는 정격주파수와 관련한 일정 회전속도를 유지하는 장치가 요구된다. 또한 급격한 부하변동 및 정지로 인한 터빈 과속을 방지하며, 일시에 계통으로부터 분리시키도록 제어하는 시스템이 터빈제어시스템이다. 터빈제어시스템이 운전중 보일러에서 공급되는 유량을 조절하여 터빈속도 및 발전기의 전기적 출력을 제어할 수 있도록 하기 위해 다음과 같은 밸브를 적절히 제어할 수 있어야 한다. 비상시나 정지시에 고압터빈에 공급되는 증기를 차단하는 기능을 가지는 주증기 정지밸브 (Main Stop Valve, MSV), MSV와 고압터빈 본체사이에 존재하여 유입되는 증기량을 미세하게 조절하는 주증기 조절밸브 (Control Valve, CV), 비상시나 정지시에 중압터빈에 유입되는 증기를 차단하는 재열증기 정지밸브 (Reheat Stop Valve, RSV) 및 RSV와 중압터빈 본체사이에 존재하여 터빈과속을 방지하기 위한 재열증기 조절밸브 (Intercept Valve, IV)가 있다. 이들 가운데 CV가 정상운전중에 터빈속도 및 부하를 조절하는 역할을 담당하며 일반적으로 4개로 구성되어 있으며, 운전중 열리는 순서가 달라 증기량의 미세한 변화에도 정확히 대응이 가능한 구조로 되어 있다 [1].

본 논문에서는 화력발전소에서 터빈 기동시 및 저출력시 터빈축의 기계적인 열응력을 감소하고, 전부하대까지의 밸브축의 교축손실을 최소화하고자 밸브전환운전이 필요하다. 이 전환운전중에 수반되는 발전기 출력의 변화를 최소화하고자 고압터빈축의 1단 압력을 제한하는 알고리즘을 국내 500MW급 발전소에 실제 적용한 결과를 소개하고자 한다.

2.2 밸브전환 알고리즘 구현

밸브 전환 알고리즘을 소개하기 전에 먼저 적용된 발전소의 터빈제어 알고리즘을 밸브전환 운전과 관련된 부분 위주로 간략히 소개하면 그림 1과 같다 [2].

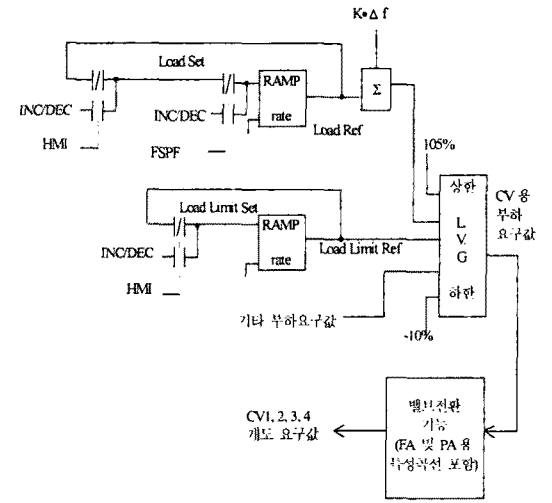


그림 1. CV용 개도 요구값 계산 개요도

아래 그림에서  $K \cdot \Delta f$ 는 터빈 속도오차( $\Delta f$ )에 이득(K)을 곱한 값이고, Load Ref는 운전원 조작시스템(HMI : Human Man Interface)에서 운전원의 증감 조작(INC : Increase 및 DEC : Decrease)에 의해 Load Set이 결정되면 정해진 기울기 (RAMP 블록)에 의해 자동 증감되

2. 본 론

2.1 발전소에서의 밸브 전환 운전 개요

터빈에 유입되는 증기의 온도변화는 주증기 배관, 고

어 결정된다. Load Limit Ref도 Load Ref와 유사하게 동작하며, 이외에 기타 부하요구값으로는 주증기압 저하에 따른 부하제한 등이 있다. 여기서 CV용 부하요구값은  $K \cdot f + \text{Load Ref}$ , Load Limit Ref 및 기타 부하요구값 가운데 작은 값(LVG : Low Value Gate) 선택회로에 의해 결정되며, 이 값이 밸브전환 알고리즘을 거쳐서 4개 CV의 개도 요구값을 결정하게 된다.

밸브 전환운전 알고리즘은 동일하게 열려있는 4개 CV를 순차적으로 닫게 해주는 부분과 이 과정에서 발생하는 발전기 출력의 변화를 없도록 해주는 부분으로 나눌 수 있다.

먼저 후자의 기능을 위해 발전기 출력을 제한받아 보상하는 알고리즘을 구현해야 되나, 현장 입력 신호의 사정에 따라 삼중화로 설치된 고압터빈 1단 압력(FSP : First Stage Pressure)을 사용하고자 한다. 이 FSP 신호는 발전기 출력과 선형으로 비례하므로 제어에 사용하도록 무방하다.

FSPF (FSP Feedback) 상태는 밸브전환 운전이 시작되면 자동으로 투입되며, 시작될 때의 FSP 값을 Load Set에 입력시켜 FSP가 시작될 때의 값보다 더 작아지면 INC가 동작되어 Load Ref 값을 증가시키도록 하고, FSP가 시작될 때의 값보다 더 커지면 DEC가 동작되어 Load Ref 값을 감소시키도록 하여 CV용 부하요구값을 변화시키도록 한다. 변화되는 폭은 Load Ref측의 RAMP 블록의 기울기에 의해 결정된다. 초기값은 1.67%/sec로 지정하였다.

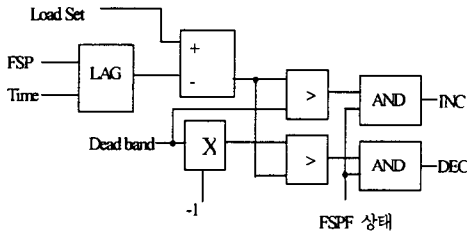


그림 2. FSPF에 의한 Load Ref 증감 신호 발생 개요도

밸브 전환운전을 위한 두 번째 기능으로 FA운전시 동일하게 열려 있는 4개의 CV를 PA로 전환을 시작하면 먼저 CV4를 닫고 이후에 CV3을 닫아주어야 한다. 이를 위해 그림 3에 CV4용 부하요구값 계산 알고리즘이 나타나 있다. 여기서 Transfer Value (TV)는 변환되는 정도를 0에서 100% 사이의 값으로 표시하며, 0%는 FA이고 100%는 PA 상태를 나타내며, 이 값은 운전원이 선택한 기울기(Slow, Medium 및 Fast)에 의해 결정된다. Transfer Value에 그림 4의 FA용 바이어스 값( $f_{BF}(x)$ ) 및 PA용 바이어스 값( $f_{BP}(x)$ )을 각각 CV용 공동 부하요구값에 더하여 FA 및 PA일 때의 각 CV의 특성곡선을 거치면 (그림 5 및 6) 각 CV의 개도요구값이 결정된다. 이 흐름에 의해 CV4가 먼저 닫히게 되고 이후에 CV3이 닫히게 된다.

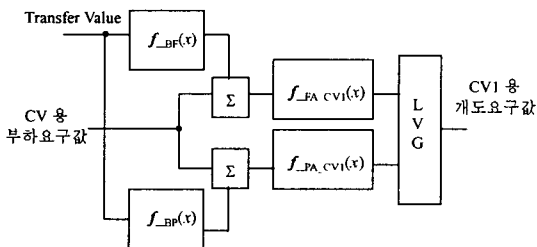


그림 3. CV4용 부하요구값 계산 개요도

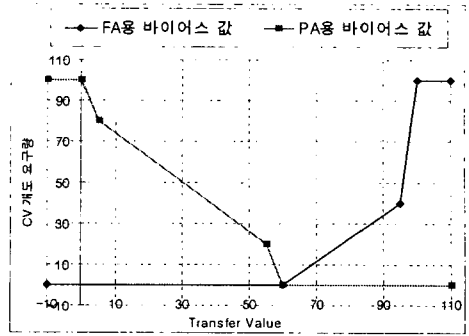


그림 4.  $f_{BF}(x)$  및  $f_{BP}(x)$  특성곡선

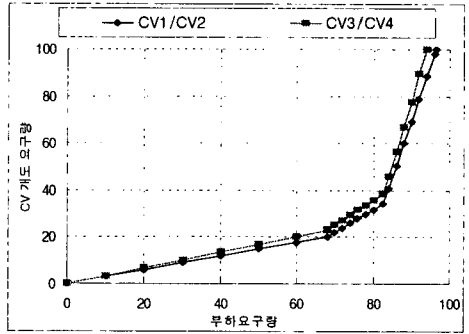


그림 5. FA일 때의 CV 특성곡선 :  $f_{FA, CV}(x)$

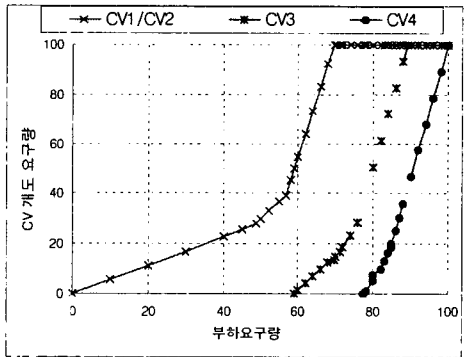


그림 6. PA일 때의 CV 특성곡선 :  $f_{PA, CV}(x)$

터빈 운전원이 밸브 전환운전을 할 수 있도록 아래 그림 7과 같이 운전조작 화면을 구현하였다.

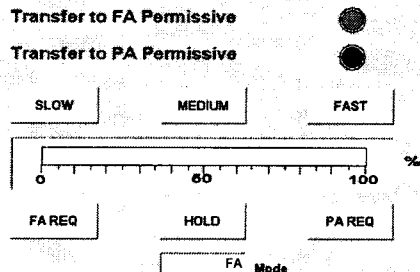


그림 7. 밸브 전환운전을 위한 HMI 화면

여기서 Transfer to FA Permissive 램프는 FA로 전환할 수 있는 허용상태를 표시하고, Transfer to PA

Permissive 램프는 PA로 전환할 수 있는 허용상태를 표시한다. 또한 조작단추로서 SLOW / MEDIUM / FAST 선택단추가 있으며 이들은 각각 전환할 때의 변화율(Slow:20분, Medium:10분, Fast:5분)을 선택하는 단추이다. 또한 FA REQ / HOLD / PA REQ 선택단추가 있는데 모드 전환할 때 선택하는 단추이고, 변환 도중에 HOLD 단추를 누르면 그 상태가 유지되며 (TV가 변하지 않음), 계속 진행하려면 진행하고자 하는 단추를 누르면 되고, 취소하고자 할려면 반대 모드의 단추를 누르면 된다.

### 2.3 시운전 결과

밸브 전환알고리즘을 구현하여 국내 500MW급 화력 발전소에 두 차례 실제 적용한 결과는 다음과 같다. 130MW, FSP 34kg/σ에서 변환을 Medium으로 시작한 결과는 그림 8과 같다. CV4가 닫히면서 CV 1, 2, 3이 더 열리고, CV3이 닫히면서 CV1, 2가 더 열리는 결과를 보여주고 있다. 그런데 발전기 출력의 변화가 약 20MW의 변화가 있었으며, FSP가 약 2~3kg/σ정도 진동하는 결과를 볼 수가 있었다. FSP가 진동하는 문제는 Load Ref의 기울기를 감소하면 해결할 수가 있다.

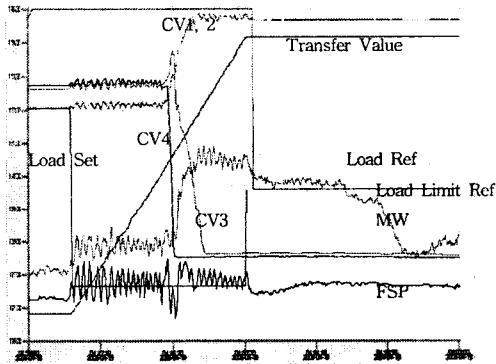


그림 8. 1차 시운전 결과 트렌드

두 번째 시운전 결과로 80MW, FSP 19kg/σ에서 변환을 Slow으로 시작한 결과는 그림 9와 같다. 이때는 Load Ref의 기울기를 1.67%/sec에서 0.17%/sec로 감소시켰으며 그 결과 1차 시운전시 FSP가 진동하던 현상은 감소시켰으나 1차에서와 마찬가지로 발전기 출력이 10MW 변화였다. 참고로 CV4가 닫히는 도중에 Load Limit Limiting 상태가 되어서 운전원이 이 제한상태를 해제한 후 다시 전환운전을 계속한 모습을 보여주고 있다.

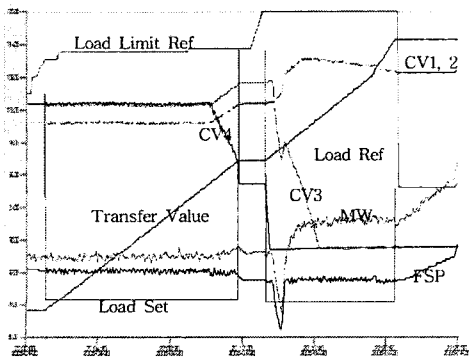


그림 9. 2차 시운전 결과 트렌드

이상의 시운전 결과를 보면 CV3이 닫히는 구간에서 발전기 출력의 변화가 발생되었는데, 이는 Load Ref의 기울기와 그림 4의 바이어스 특성곡선을 수정함으로써 극복할 수 있을 것으로 판단된다.

표 1. 그림 8 및 9의 x축 및 y축 범위

태그 명칭	범위 (1차)	범위 (2차)	태그 색
발전기 출력 (MW)	115 ~ 175	60 ~ 120	녹색
FSP (kg/σ)	30 ~ 50	15 ~ 35	흑색
Load Set (%)	20 ~ 80	10 ~ 70	갈색
Load Ref (%)	"	"	황색
Load Limit Ref (%)	"	"	적색
CV1 개도 (%)	-10 ~ 30	-10 ~ 30	청색
CV2 개도 (%)	"	"	연청색
CV3 개도 (%)	"	"	보라색
CV4 개도 (%)	"	"	흑색
Transfer Value (%)	-10 ~ 110	-10 ~ 110	청색
트렌드 시간 (x축)	총 25분	총 25분	

### 3. 결 론

화력발전소에서 터빈 기동시 및 저출력시 터빈축의 기계적인 열응력을 감소하고, 전부하대까지의 밸브축의 교축손실을 최소화하고자 밸브전환운전이 필요하다. 이 전환운전중에 수반되는 발전기 출력의 변화를 최소화하고자 고압터빈축의 1단 압력을 재환하는 알고리즘을 국내 500MW급 발전소에 실제 적용한 결과를 보여주었다. 각종 제어변수를 조정함으로써 대체적으로 양호한 결과를 얻었으나, CV3을 닫는 과정에서 생긴 발전기 출력의 변화를 방지하기 위한 추가적인 방안이 필요하며 이는 FSP시 적용되는 Load Ref의 기울기나 바이어스를 위한 특성곡선을 변화시킴으로써 가능할 것으로 판단된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] "터빈운전실무", 한국전력공사 발전교육원, 1998
- [2] "기력 터빈 디지털 제어시스템 개발"(최종보고서), 한전 전력연구원, 2002
- [3] "500MW급 화력발전소 증기터빈 디지털 제어시스템 개발"(중간보고서), 한전 전력연구원, 2004