

원자력 터빈 제어 프로그램에 관한 고찰

김병철, 우주희, 정창기
한국전력공사 전력연구원

The Study on Turbine Control Algorithm in a Nuclear Power Plant

Kim Byung-Chul, Woo Joo-Hee, Jung Chang-ki
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - 국내 원자력 터빈 발전소의 아날로그 전기식 터빈제어시스템을 국내 기술에 의해 디지털 삼중화 제어시스템으로 개조하여 현재 성공적으로 운전되고 있다. 기존의 제어시스템과 적용된 신규 시스템의 터빈제어 알고리즘에 대해서 소개하고자 한다.

1. 서 론

국내에 오래전에 설치된 발전소의 주제어기는 주로 아날로그 전기회로로 구성되었고 오랜 사용으로 노화되어 유지보수가 힘들게 되었다. 이러한 상황에서 급속한 기술발전이 힘입어 디지털 제어시스템으로의 개조에 대한 필요성이 제기되었다. 이러한 취지로 국내에서 아날로그 제어시스템을 사용하고 있는 원자력 터빈 발전소의 터빈 제어시스템을 디지털 제어시스템으로 변환하기 위해 기존의 제어시스템의 분석과 최신의 제어시스템에 대한 분석이 필요하다. 개조대상 발전소의 터빈제어시스템은 GEC사의 아날로그 회로로 구성된 제어카드에 의해 제어되도록 수행된다.

터빈 제어시스템은 발전소의 핵심제어 설비중 하나로서 발전기를 구동하는 터빈의 속도를 저속회전 상태에서 정격속도까지 승속한 후, 발전기가 전력계통에 병렬로 운전되면 전기출력을 조절하게 된다. 전기 품질의 가장 중요한 요소인 정격주파수 유지를 위해서도 터빈 제어시스템의 건전성은 필수적인 요소이다. 이를 위해 적용대상 발전소는 터빈 승속중에는 고압 터빈축의 바이패스 밸브(HPSV, 4개)에 의해 터빈으로 유입되는 증기의 양을 제어하고, 발전기 출력 증감할 시에는 고압 터빈축의 조속 기능을 가지는 밸브(HPGV, 4개)에 의해 이루어진다. 그리고 저압 터빈축의 밸브(LPGV, LPSV 각 4개)들로 구성되어 있다. 이들 밸브를 적절히 조절하기 위해 제어시스템에서는 운전원이 설정하는 속도 설정값인 Speed Target 및 Speed Ref.가 있으며, 부하 설정값인 Load Target 및 Load Ref.가 있다. 본 논문에서는 이들 값들을 계산하는데 필요한 알고리즘을 기존 시스템과 신규 시스템을 비교 소개하고자 한다.

2. 기존 제어시스템에서의 제어 기능

가. 개요

기존 제어시스템은 아래와 같은 주요 제어 모듈로 구성되어 있다.

- Computing Channel Digital Module
- Computing Channel Analog Module
- Valve Control Module
- Control Module
- CVOL & Droop Bin
- Sequence Bin
- On Load Test Module
- Run Up Module

나. Arming Bin 등

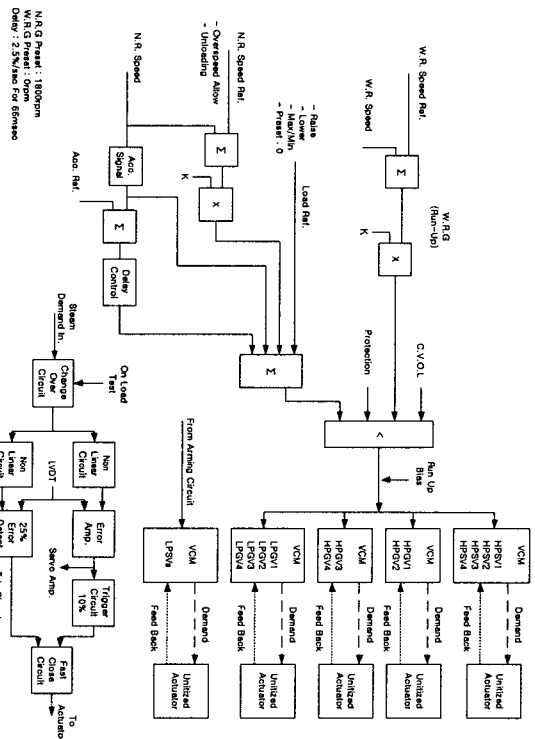


그림 1. 기존 제어시스템의 구성도

나. 모듈별 기능

(1) Computing Channel Digital Module(CCDM)

CCD 모듈은 Speed Error 신호를 계산, 터빈 가속도를 계산, 가속율이 설정치 (4.8%/sec, 66msec) 이상 지속시 Acceleration closing 신호발생 (가속설정치 및 지연시간은 변경 가능), Speed/Load Reference 신호 제공, Speed Error와 Speed/Load Reference, 안정화신호, Acceleration closing 신호를 조합하여 Speed Steam 신호 생성, Speed Pick-up 신호 점검을 위한 Watch Dog 회로, 터빈 과속도 시험시 Speed Reference 조정 및 Saturation Test 기능 가지고 있다.

Droop Setting은 2.5~7%로 설정이 가능하며 Droop Potentiometer 제거시 4%로 고정된다 MCB의 스위치 조작에 의해 Droop 확장이 17배까지 가능하다. Droop Amplifier의 OA1의 Gain은 2.5% (0.666), 4% (0.417),

7%(0.238), 119% (0.0153)이며, OA2의 Gain은 1% (1.666)이다. 터빈 속도가 약 103%에 이르면 OA2의 gain에 의해 1% Droop으로 전환된다.

(2) Computing Channel Analog Module

Low Value Gate 신호 (LVG)는 Run-up Steam 신호, Speed Steam, Control Valve Opening Limit (CVOL) 신호, Turbine Protection 신호 중 가장 낮은 값이 제어출력이 됨. High Way Drive 신호는 HW1(HPS/V#1, 2, 3, 4), HW2(HPG/V#1, 2), HW3(HPG/V#3, 4) 및 HW4(LP1G/V#1, 2, LP2G/V#1, 2)로 4개의 Group으로 구성되어 있으며 HW2와 HW3의 밸브 특성은 같으므로 3 개의 특성 Group으로 분류 가능하며 HW Driver PCB에서 밸브의 Gain을 부여한다.

(3) 제어모듈 (Control Module)

제어모듈은 Loss of Stator Cooling Water 및 Reactor OTΔT/OPΔT 인 터빈 출력감발 기능, 출력감발 Target 설정기능, Reactor OTΔT/OPΔT, Run-back 시험 회로 (회로기능만 주기시험), Unloader Operated Lamp 신호를 MCB에 제공하는 기능을 가지고 있다. 또한 컴퓨터 채널간 편차 감시기능으로는 채널간 10% 편차시 경보 제공한다.

(4) Run-up Module

Run-up Module의 운전범위는 0~1860RPM (0~10VDC)이며, 출력제한은 2V (20% Demand)이며 기동시 터빈밸브 20% 이상 열림 방지와 기동시 터빈의 과속을 방지하기 위해 5% 이하로 조정 검토 필요하다. Run-up Rate는 1분, 5분, 10분, 30분, 45분이며 0 RPM에서 1800 RPM까지 가속하는데 소요시간이다. 기능으로는 Target 와 Actual Speed가 120 RPM 이상 편차시 경보발생하는 Run-up Error 경보기능이 있다.

(5) ARMING Bin

Arming이 되기 전에는 모든 Dump 솔레노이드 코일이 무여자 되어있으므로 터빈 밸브 Open이 불가능하다. CCDM의 RL3,4가 여자되면 Arming 이 된 것이며, Arming 조건은 CVOL at zero, Run-up Target Speed at zero, Turbine trip Relay Reset 이다. Arming 이 되면 Speed Reference 가 Normal에 Set 되어 (RL3/1,2,3) LVG로 들어가는 NR 신호가 최대가 되게한다. Exercise 조건은 먼저 MSIV close 되어있어야 하며 터빈 Trip이 Reset 되어야 한다. 이것은 Arming Bin의 Latch relay가 모두 Reset 되어 터빈밸브 Open이 가능하게 하기 위함이다.

(6) Protection Bin

Protection Bin은 2 out of 3 Logic 으로 구성된 Arming Trip Relay (RL 1,2,3,4,5,6), Valve Lock Down Relay, 컴퓨터 채널 전원 상실, Speed Pick-up 신호 불량, SAT Fail, 특정 그룹의 밸브의 High way 신호 편차 발생 등 조건시 무여자가되고 2 out of 3 논리로 동작하며 TTR 동작시키는 Governor Trip Relay, SAT Inhibit Relay로 구성되어 있다.

(7) CVOL & Droop Bin

CVOL section은 운전 중 터빈밸브 열림을 제한하기 위해 설치했으나 현재는 터빈 밸브 수동운전의 도구로 사용되며 LVG에 CVOL 신호 제공 (Motorized Potentiometer, 0~15VDC), CVOL 저시계 신호 제공 (MCB)한다.

(8) Auto Load Control Module

Load Control Module 운전조건은 Narrow range Governor 운전 중일 것이며, 계통병입 상태, 터빈 속도 Error가 정격의 2~6%값 이하 (CCDM DAC 출력 2 out of 3), Raise 또는 Lower push Button 조작이 없을 것, Load Control Module 내의 Control과 Check 신호 불일치 없어야 한다. Load Control Rate는 1MW/sec (OLT 시 사용), 10MW/hr, 15MW/hr, 30MW/hr, 50MW/hr, Pulse 당 출력변화 0.05% 이다

(9) Valve Control Module

Valve Control Module은 Type 2 (제어용) 12개 및 Type 4 (LPS/V용) 4개로 구성되어있고 터빈 밸브 구동기 제어는 3개의 입력신호를 평균하고 1 개의 신호가 2 개의 다른 신호들과 10%이상 편차가 있을 경우 이 신호가 제거된 후 2개의 신호만으로 평균 하며, 3개의 신호 입력이 모두 제거되면 출력을 -0.5V로 bias 시킨다. Error Amp (A14)는 Control LVDT 신호와 비선형 카드 출력인 Reference 신호와 비교하여 제어신호 발생하고 Module fail시는 -15V로 입력이 들어가 밸브 닫김 신호 발생시킨다. 서어보 Amp (B2)는 외부에 Servo Gain 및 Bias용 가변저항기 있고 서어보밸브 구동용 전류신호 발생한다. LVDT 회로는 5KHz Sine파 (약 6.6 Vp-p)의 전류를 LVDT 입력으로 사용하고 LVDT는 38-152mm의 Stroke에 사용 가능하다.

(10) On Load Test(OLT) Module

MCB의 OLT 관련 푸시버튼의 종류는 Valve Test, Protection Test, Test Reset, De-Select, Dump A Test, Dump B Test, Valve Select, Mode Select (Selector Switch)이며 OLT 관련 Lamp는 Valve selected, Valve Lock-down 이다.

3. 신규 제어시스템에서의 제어 기능

가. 터빈 Trip 및 Arming 관련 기능

(1) 터빈 Trip 조건

- Micronet 외부의 Trip 조건 발생시
- 터빈 속도가 과속도 설정치(110.5%)를 초과할 때
- Micronet 내부 고장시
- 터빈 속도 감지 센서 (Magnetic Pickup) 3개에 이상이 있을 때

(2) 터빈 Arming 조건

- 터빈 Trip 조건이 해소된 상태이고
- CVOL ≤ 0%일 때

나. 터빈 속도제어 관련 기능

(1) Speed Target의 결정

- Speed Target은 Speed Ref가 추종해야 될 최종 목표 값임
- Speed Target
 - 600, 1440, 1680, 1800 RPM,
 - OST (113%, 2034RPM, Over Speed Test용),
 - Closed(-10%, -180RPM)
 - 임의 Speed Target을 HMI에서 지정

(2) Speed Ref Rate의 결정

- Speed Ref가 Speed Target에 추종하기 위해 적용되는 증감율임
- 5분(360RPM/MIN), 10분(180RPM/MIN), 30분(60RPM/MIN), 45분(40RPM/MIN), Hold

(3) Speed Ref의 결정

일반적으로 Speed Ref는 Speed Target을 목표로 하여 증감율(Speed Ref Rate)에 의해 변함

- (4) Droop값 선정
 - 터빈속도가 103% 이상이고 과속도 비상정지 시험 상태가 아닐 때 : 1%
 - 이외의 경우 : 7%

다. 발전기 출력제어 관련 기능 (Load Ref의 결정)

- (1) Load Target의 결정
 - 허용 상태에서 다음과 같은 조건에서 변경됨
 - 운전원의 조정에 의한 경우 (HMI의 증감 단추를 누를 때)
 - 외부의 Synchro Panel에서 증감 신호가 입력될 때
 - 외부의 Panel에서 Speed/Load 증감 신호가 동작될 때
 - Loss Of Stator Cooling Water 상태일 때
 - Reactor OTΔT/OPΔT 상태일 때
 - ICP Feedback 제어 상태가 선택 및 해제되는 순간일 때
 - Acc. Closing 상황시
- (2) Load Ref Rate의 결정
 - Load Ref가 Load Target에 추종하기 위해 적용되는 증감율임
- (3) Load Ref의 결정
 - 터빈 Trip일 때 : 0%가 선택됨
 - GCB Closed 된 이후부터 5초 동안 : Blocking Load를 형성
 - Loss Of Stator Cooling Water 상태일 때
 - Reactor OTΔT/OPΔT 상태일 때, 아래와 같이 동작함
 - ICP Feedback 제어 상태일 때 : 운전원이 지정한 Load Set값으로 현재의 총동실 압력(ICP)을 일치시키는 것을 목적으로 함
 - Acc. Closing 상황시 : 0%(무부하 정격속도 값)
 - Exercise 상황시
 - 이외의 경우 : Load Ref는 Load Target을 목표로 하여 증감율(Load Ref Rate)에 의해 변함

라. 발전기 출력제어 관련 기능 (CVOL Ref의 결정)

- (1) CVOL Target의 결정
 - 허용 상태에서 다음과 같은 조건에서 변경됨
 - 운전원의 조정에 의한 경우 (HMI의 증감 단추를 누를 때)
 - 외부의 CVOL 증감 누름 버튼을 누를 때
 - 터빈 Trip일 때
 - 터빈 리셋이 되는 순간일 때
 - 운전원이 Rapid Unload를 선택할 때
 - Auto Tracking 상태일 때
- (2) CVOL Ref Rate의 결정
 - CVOL Ref가 CVOL Target에 추종하기 위해 적용되는 증감율임
- (3) CVOL Ref의 결정
 - 터빈 Trip인 경우 : 0%
 - 터빈 리셋이 되는 순간일 때 : 10%
 - 이 외의 경우일 때, CVOL Ref는 CVOL Target을 목표로 하여 증감율(CVOL Ref Rate)에 의해 변함

마. 밸브 위치 요구값

- 밸브 위치 요구값이란 운전원이 터빈속도 및 부하증감발을 위해 조정한 값을 고려하여 조속 기능을 가진 모든 밸브의 개도 위치 요구신호의 기

준이 되는 값을 말함
○ 단계별로 밸브 위치 요구값 (A), (B), (C)의 값이 정의되어 있음

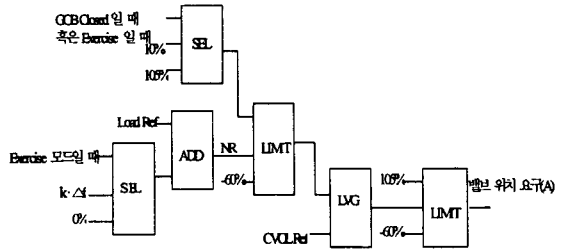


그림 2 밸브 위치 요구값 (A) 개요도

사. 밸브 시험 기능

- 언제나라도 운전원이 밸브시험 요구시 밸브가 선택되어 시험 될 수 있도록 함
- 개요도

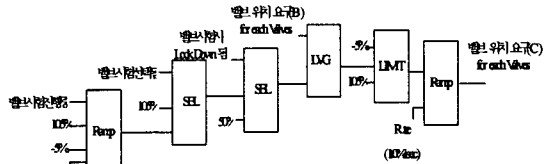


그림 3. 밸브 위치 요구값 (B, C) 개요도

3. 결 론

국내에서 아날로그 제어시스템을 사용하고 있는 원자력 터빈 발전소의 제어시스템을 디지털 제어시스템으로 변환하기 위해 필요한 터빈 제어 알고리즘을 기존의 시스템과 신규 시스템에서 비교하였다. 분석한 결과를 근거로 지난 2003. 01. 29일부터 시작된 계획예방정비공사 기간에 제작된 시작품을 설치하고, 02. 28일 계통병입, 중발하여 03. 03일 전부하운전과 최적 시험조정을 성공적으로 완료하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 고리1발전소, 매뉴얼, "터빈 밸브 구동기 정비 및 운전 편람", 2000
- [2] 정창기 외 3명, "원전 터빈 디지털 제어시스템 개발 (중간 보고서)", 전력연구원 기술보고서, 2003