

기력발전소 터빈조속기 제어로직 개선에 의한 발전기 부하추종성 향상 (계통주파수저하방지)

李鍾河^{*}, 金泰雄[†]

Load Following Operation Improvement by Governor Control Logic Modification of Thermal Power Plant (System Frequency Drop Prevention)

Jong-Ha Lee and Tae-Woong Kim

요 약

기력발전소의 부하추종성능의 향상은 계통의 전력품질에 지대한 영향을 미치기 때문에 이를 위해서는 먼저 보일러, 터빈, 조속기 시스템과 제어알고리즘에 대한 분석이 필히 선행되어야 한다. 기력발전설비는 다양한 제어기구들에 의해 운영되고 있고 조속기가 고장 난 경우에는 문제를 해결하는데 많은 시간이 필요하여 발전설비를 정지하지 않고서는 메커니즘 정비가 불가능하다. 계획되지 않은 발전시스템의 정지는 전력발전의 감소로 인해 경제적인 문제 뿐만 아니라 전력공급의 차질에 지대한 영향을 주기 때문에 충분히 고려할 사항이다. 본 논문에서는 표준석탄화력 500MW 발전설비(삼천포화력발전소)에 있어서 계통주파수가 과다하게 장시간 저하될 경우에 기력발전기 제어특성이 나빠져 발전기의 출력이 저하되는 데 이에 대한 현상을 추이분석과 함께 제어로직의 분석 및 개선을 통해 계통주파수가 저하되는 것을 방지하였고 이에 대한 사례를 소개한다.

ABSTRACT

The improvement of load following operation of the thermal power plant is influenced to the electrical quality. Analysis of boiler, turbine, and governor system, and the study of control algorithm are necessarily preceded. The thermal power plant is operated by various control systems. In the case of faulty governor system, it takes long days to solve the problem and impossible to repair the mechanism without outage. A non-planned outage is taken into consideration because of economical power production. The paper introduces the followings; In case of system-frequency drop during long term, at 500MW thermal power plant, the generator output was drop. To clear this problem, the control logic is modified with analysis of trend and control algorithm. As a result system frequency drop is prevented during the long term and the electric grid operation is improved.

Key Words : Power plant, Governor, Control logic, System-frequency, Speed droop curve

1. 서 론

발전기의 부하추종성을 향상시키기 위해서는 보일러

와 터빈과 조속기 계통을 정확히 파악하고 또한 제어 알고리즘에 대한 분석 및 연구가 선행되어야 한다. 화력발전소의 계통도는 그림 1과 같고 발전소 제어계통은 다양한 제어기구들로 구성되어 있으며 이들의 유기적인 동작이 필연적이다.

계통의 전력품질은 계통전압과 주파수의 유지에 좌우된다. 전력계통의 주파수 유지를 위해 주파수별 운전기준의 운영과 계통운영보조서비스 중 주파수조정

^{*}교신저자 : 정희원, 경상대 제어계측공학과 조교수
E-mail : kimtw@gnu.ac.kr

[†]정희원, (주)한국남동발전 여수화력발전처

접수일자 : 2006. 1. 4 1차 심사 : 2006. 2. 10

심사완료 : 2006. 5. 5

서비스(주파수·부하 추종운전 및 자동발전제어운전)란 항목으로 전력거래장산에 반영하여 전력생산을 유도하고 있다^[1]. 그림 2는 자동발전제어운전과 부하추종운전에 대한 전체적인 개략도를 보여준다.

발전기의 불시정지 및 부하변동 등으로 인해 과다하게 계통주파수가 저하될 경우, 발전기의 제어특성불량으로 비정상적인 제어응답이 되어 장시간 계통주파수가 회복되지 못한다. 이에 대한 추이분석과 함께 제어로직을 개선하여 계통주파수가 저하되는 것을 방지하였고 이에 대한 사례를 본 논문을 통해 제시하고자 한다^[4,7].

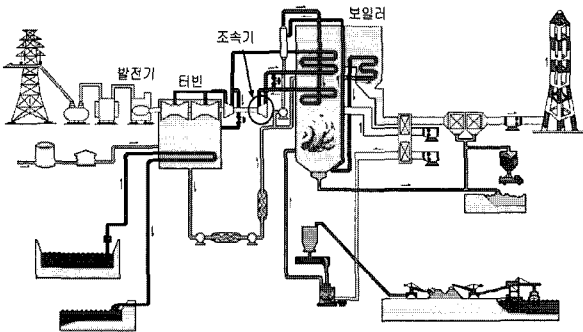


그림 1 화력발전소 계통도
Fig. 1 Distribution diagram of thermal power plant

가져가게 된다. 이 값은 전체 계통발전량과 전체 부하가 평형을 이루는 지점이 되고 부하변동에 따른 계통주파수 오차를 시정하기 위해 전력거래소에 설치된 제어장치는 계통주파수 및 전력을 기준값으로부터 편차를 검출하여 이에 기초를 둔 제어신호를 전송시스템을 통해서 또는 직접 조정용 발전소의 조속기에 보내어 부하변동에 대응한 발전기 출력을 변화시켜 오차를 시정하게 한다. 이에 대한 관계를 그림 3에 보여준다.

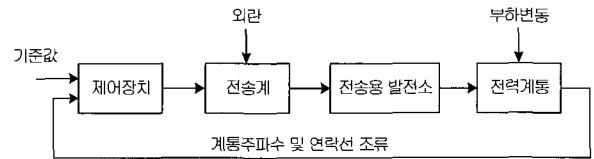


그림 3 자동주파수제어시스템
Fig. 3 Automatic frequency control system

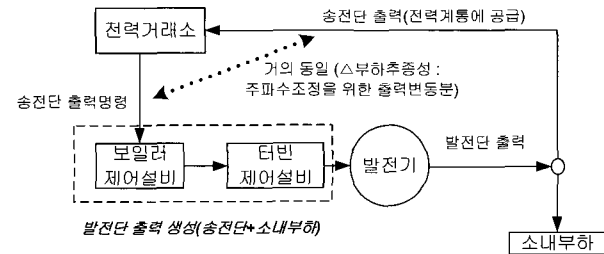


그림 2 자동발전제어운전과 부하추종운전에 대한 개략도
Fig. 2 Diagram for automatic generation control operation and load following operation

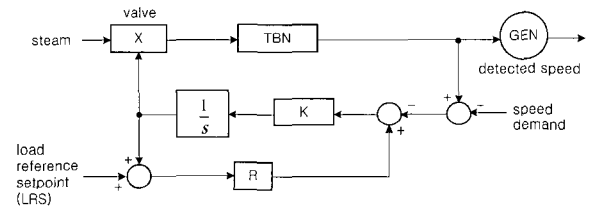


그림 4 부하기준 설정점을 가진 속도제어시스템
Fig. 4 Speed control system with load reference setpoint

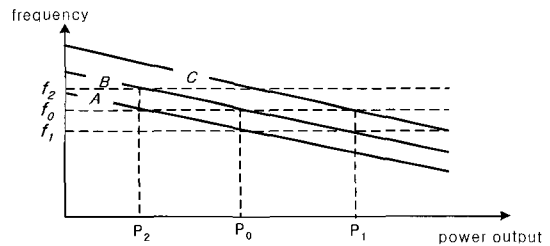


그림 5 부하기준 설정점에 의한 정주파수제어
Fig. 5 Constant frequency control with load reference setpoint

2. 계통주파수 제어

제어영역이 상호 연결되어 구성된 전력계통에서는 모든 발전기들이 주파수변동에 대하여 각각의 조속기 속도제어 메커니즘에 의해 반응한다. 즉, 전력계통에 새로운 부하가 연결되면 먼저 이 부하에 대해 터빈발전기의 회전수가 변화하여 결국 계통주파수가 낮아지기 시작하는데 이에 대해 계통상의 모든 발전기들이 응답되어 계통주파수를 어떤 새로운 정상상태 값으로

병렬운전의 경우 발전기의 부하단에서 부하가 변동되면 계통주파수가 변하게 되고 주제어동작에 의해 각각의 발전기 조속기의 속도조정률에 따라서 자동적으로 부하를 분담하게 된다. 계통주파수의 변동은 부하단에 물려있는 각종 기기에 악영향을 끼치므로 이러한 주파수변동을 최소화하여 일정한 주파수를 유지해야한다. 이를 위한 제어동작을 부제어(supplementary con-

trol)라고 하는데 이것은 조속기에 그림 4에서 보여주듯이 부하기준 설정점(LRS; Load Reference Setpoint) 신호를 조정용 특성을 제어하기 위해 설치된 궤환루프에 인가하여 조속기의 속도드롭곡선(speed droop curve)을 평행 이동시켜 구현한다. 즉, LRS의 변동에 따라 그림 5와 같이 속도드롭곡선이 아래 또는 위로 이동하게 되어 주파수를 유지하게 되는데, 이는 계통에 부하가 증가하면 주파수가 떨어지고 이 떨어진 주파수 만큼에 해당하는 각 발전기 조속기가 부하를 올려주어 원래의 주파수로 회복하게 된다. 예를 들어 먼저 발전기가 B로 표시한 속도드롭곡선상에서 출력 P_0 와 주파수 f_0 로 운전되고 있었다고 가정하자. 만약 부하가 증가하여 그에 대한 응답으로 발전기의 출력이 P_1 이 되면 주파수가 f_1 으로 낮아지게 된다. 이와 같은 경우에는 LRS를 증가시켜 속도드롭곡선을 C로 되게 하여 P1의 출력을 유지하면서 주파수는 f_0 로 유지하게 된다. 마찬가지로 만약 부하가 감소하여 이에 따른 응답으로 발전기 출력이 P_2 로 되어 주파수가 f_2 로 상승한 경우에는 LRS를 감소시켜 발전기를 A의 속도드롭곡선상에서 운전되도록 하여 주파수를 f_0 로 유지하게 된다.

전력계통에 연결되어 병렬운전되고 있는 발전기들은 주속도제어동작을 통해 부하변동에 응답하는데 속도드롭 특성에 의해 정상상태 주파수가 변화하게 되며 전력계통의 주파수는 원래의 값으로 복구 유지하는 것이 중요한데 이를 LRS를 통해 제어한다. 즉, 전력계통의 주파수를 일정하게 유지하면서 발전기출력을 부하변동에 응동하여 제어하는 수단은 선택된 발전설비들의 LRS들을 제어하여 이루어진다. 실제 전력시스템의 부하는 시간에 따라 연속적으로 변동하기 때문에 발전기들의 출력도 자동적으로 응동되는 것이 필요하다.

3. 석탄기력발전소 발전기의 출력강하방지

3.1 현상개요

평상시 부하운용에 따라 계통주파수의 유지는 주로 $60 \pm (0.05 \sim 0.1) Hz$ 까지의 작은 변화폭으로 되나 대용량 부하를 공급하던 발전소가 전력계통에서 떨어져 나가면 주파수의 저하 폭은 상당히 크게 일어나고 이에 대한 발전기의 부하추종성에 대한 응동폭도 커지게 된다^[2,3]. 계통주파수가 일시적으로 과다하게 저하(00원 자력 불시정지: $59.74 Hz$, $0.26 Hz$ 저하)되더라도 단 시간일 경우(1분~2분)에는 주파수 회복시 발전기 출

력이 저하되는 사례는 거의 발생하지 않으며, 그림 6은 단시간 동안 계통주파수가 저하하였을 때의 주 증기압력과 출력에 대한 파형을 보여준다.

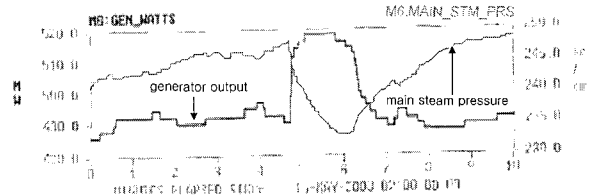


그림 6 단시간(1~2분) 동안 계통주파수 저하시의 발전기 출력과 주 증기압력의 파형

Fig. 6 Generator output and main steam pressure in case of system-frequency drop during short term(1~2 min)

대용량의 고효율 발전기의 경우 전력거래의 경제적 측면에서 평상시 발전기 출력이 거의 정격에 가깝거나 높게 운전된 상태로 운영되므로 계통주파수 과다 저하 등의 큰 외란이 장시간 계속될 때는 주 증기압력 강하와 제어계 불안정성 등으로 인하여 주파수가 매우 낮은데도 불구하고 주파수가 급변하기전의 출력보다 더 낮은 발전기 출력을 생산하거나 발전이 불시정지되는 등 계통을 장시간 악화시키는 사례가 발생하고 있다.

3.2 문제점 분석

3.2.1 추이분석

계통주파수 저하가 과다하고 또한 장시간동안 지속될 경우에는 높은 출력지령신호에 따른 제어밸브개도의 상승지령 값이 증가하나 이를 제한하는 터빈(TBN) 조속기의 밸브위치제한장치(VPL)가 동작하여 협조제어모드(CCM)에서 이탈되어 발전기 출력이 저하되고 주파수오차가 줄게 되어 회복될 때에는 주 증기압력 상승으로 인하여 배기밸브가 수차례 동작하는 것을 확인하였으며 이에 대한 요약은 표 1에 보여주며, 계통주파수의 추이파형과 주 증기압력과 출력에 대한 파형은 그림 7과 8에 각각 보여준다.

3.2.2 제어로직 분석

삼천토회력 5, 6호기의 경우에 있어서 주파수편차에 대한 터빈부하변화에 대응한 보일러 부하요구량계산과 터빈마스터지령의 보정범위를 계산하는 최적화모듈을 사용하고 있다. 보일러마스터는 최적화 모듈에서 주파수변화에 대한 계산된 선행동작명령을 내림으로서 느

린 석탄보일러의 시정수를 보완하도록 구성되어 있다. 또한 터빈마스터도 주파수에 대한 터빈조속기 지령치를 최적화 모듈에서 보상하도록 되어있다^[5,6].

표 1 장시간 동안 계통주파수 저하된 경우에 대한 요약
Table 1 Summary of generator outputs in case of system-frequency drop during long term

- date : ' 2003. 04.24 17:03.	
- status	
· frequency	: 59.93 → 59.5 → 58.8 → 60.00 Hz
· generator output	: 500 → 520 → 440MW
· main steam pressure	: 240 → 225→ 269 kg/cm ²
· gen MW reference (DWR)	: 84% → 54%(auto decrease by logic)
· excessive gen output drop → main steam pressure increase	
→ bypass valve open(4 times)	

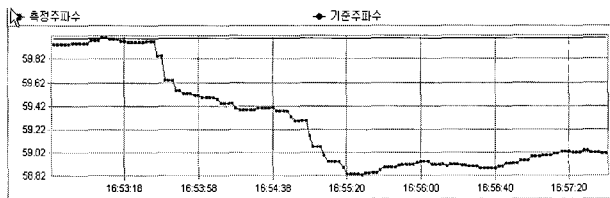


그림 7 장시간 동안 계통주파수 저하시의 추이파형
Fig. 7 Trend in case of system-frequency drop during long term (60Hz → 58.82Hz)

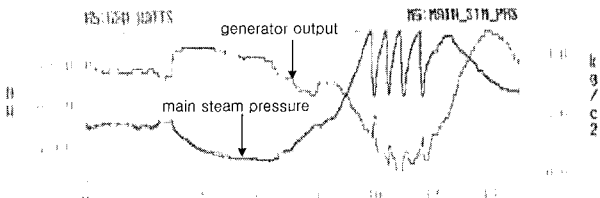


그림 8 장시간 동안 계통주파수 저하시의 발전기 출력과 주 증기압력의 파형
Fig. 8 Generator output and main steam pressure in case of system frequency drop during long term

D-EHC(Digital Electro-Hydraulic Control) 제어로직회로(그림 9)를 살펴보면 계통주파수가 급강하 할 경우에 밸브개도제한장치(VPL)의 동작(VPL의 설정값: 92.75%)에 의해 터빈제어밸브 지령신호를 92.75% 이내(CVR4)로 유지시켜 과도한 주 증기압력저하를 방지한다. 약 59.6Hz이하로 급강하할 때는 밸브개도제한장치가 동작하고 터빈제어밸브 지령신호의 중간값(CVR3)이 97.75% 이상(VPL+ 5%)일 때에 보일러·터빈 협조제어모드(CCM)가 자동으로 분리되어 Local Mode로 전환된다. 또한 동시에 터빈제어밸브 지령신

호의 중간값(CVR3)이 VPL+ 4% (96.75%)가 될 때까지 자동으로 발전기 출력설정값(DWR)을 내리는 동작을 하게 된다. 그리고 주파수가 회복될 때에 보일러·터빈협조제어모드(CCM)로의 전환이 제때에 이루어지지 않으면 발전기 출력설정값이 자동적으로 내려간 것 때문에 주파수가 회복한 만큼 발전기출력이 감발되는 사례가 발생됨을 확인하였다^[4].

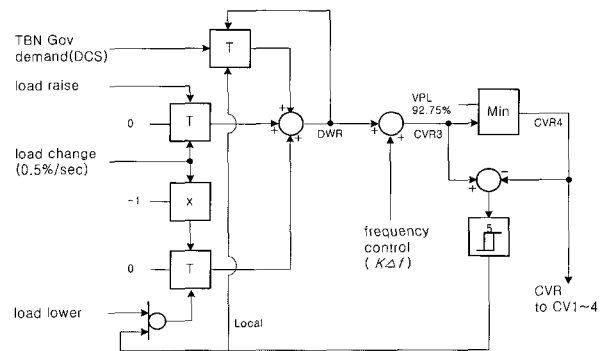


그림 9 D-EHC 터빈마스터의 제어로직 간략도
Fig. 9 Overview of control logic of D-EHC turbine master

3.2.3 분석결과

계통주파수가 단시간 급강하 할 때는 운전원이 협조 제어운전 절체시점만 잘 지켜진다면 별 영향이 없으나 장시간(5분 이상) 유지될 때에는 협조제어모드절환 조작시점을 맞추기 어려워 설비안정운전에 저해요소가 되었고, 또한 출력설정 값을 자동으로 내리는 회로(84% → 54%)가 동작하여 협조제어모드 절환시에 정상출력설정 값으로 회복하는 데에 있어서 시간이 과다 소요되어 주 증기압 과다 상승으로 인하여 바이패스밸브 동작 및 주파수 회복시에 출력이 떨어짐을 그림 10을 통해 확인하였다.

4. 개선방안, 결과 및 검토

그림 11은 상기의 문제점에 분석결과를 통해 기존의 제어로직을 개선한 터빈마스터의 제어로직을 보여준다. 본 제어로직을 살펴보면, 터빈제어로직에서 주파수의 과다저하 현상이 장시간 발생할 경우에 동작하는 터빈유량제한기능(VPL)을 가진 출력설정값 자동감소 회로를 제거하였고 선택적으로 협조제어모드를 유지하기 위한 지역모드의 오버라이드 기능을 추가하였다. 장시간 주파수가 과다하게 저하할 경우에 출력설정값의 자동강하를 방지하도록 하여 발전기 출력강하를 최

소화하였고 협조제어모드운전의 유연성을 제고하였다. 장시간 주파수변화가 지속될 때에 제어밸브 개도를 VPL의 설정값만큼 유지함으로써 상승된 출력의 유지가 가능하여 전력계통에 기여할 수 있고, 또한 주파수가 회복될 때 과도한 주 증기압력 상승을 방지할 수 있었다.

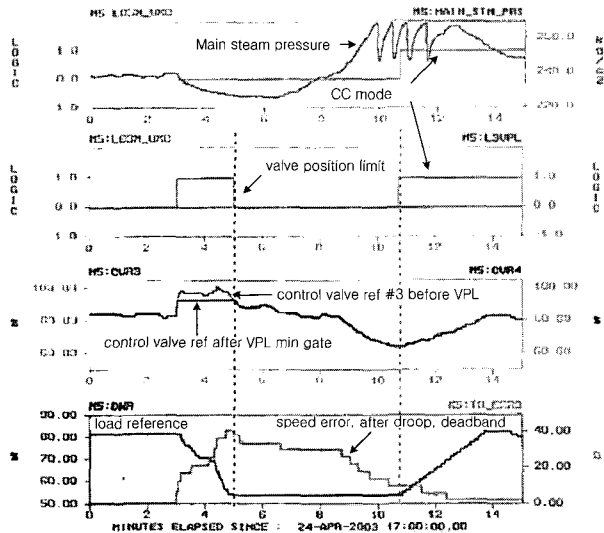


그림 10 장시간 동안 계통주파수 저하시의 추이파형
Fig. 10 Trend in case of system frequency drop during long term

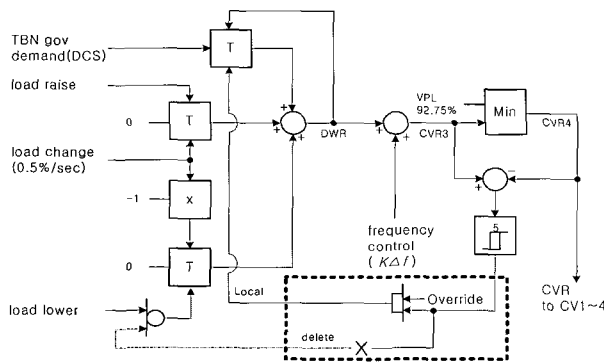


그림 11 개선된 터빈마스터의 제어로직
Fig. 11 Modified control logic of turbine master

5. 결 론

본 논문에서는 삼천포화력 5, 6호기(표준화력발전소)에서 계통주파수 저하가 과도하게 장시간 유지될 경우에 발생한 발전기 출력저하의 제어변수 등에 대한 경향분석과 관련 마스터 제어로직을 해석하여 자동출력

감발 제어회로 삭제와 운전모드 추가 등의 개선을 통하여 문제를 해결하여 대용량발전소의 주파수 기여도를 향상시켰고 이에 대한 사례를 소개하였다.

참 고 문 헌

- [1] 전력거래소, 전력시장 운영규칙, 2002.
- [2] "제어계 특성시험 대상 발전기 선정," 한국남동발전(주) 공문, 2004.
- [3] "터빈 부하추종성 시험 개요," 맥스파워(주), 2004.
- [4] "계통주파수 급강하시 발전기 출력저하현상 방지를 위한 제어로직 개선(안)," 한국남동발전(주) 보고서, 2004.
- [5] "삼천포화력 제5, 6호기 보일러 제어로직 해설집," 한국전력공사, 삼천포화력본부, 2000.
- [6] 한국남동발전(주) 삼천포화력본부, 터빈주제어설비 정비절차서, 2003.
- [7] 이종하, "기력발전소(중유 및 석탄) 조속기의 제어개선에 의한 부하추종성능 향상," 경상대학교, 석사논문, 2005.08.

저 자 소 개



이종하(李鍾河)

1969년 7월 21일생. 1992년 창원대 제어계측공학과 졸업. 2005년 8월 경상대 산업대학원 전기전자공학과(제어계측공학전공) 졸업(석사). 1996년~2002년 삼천포화력본부. 2004년~현재 (주)한국남동발전 여수화력발전처 계측제어부 근무.



김태웅(金泰雄)

1964년 12월 29일생. 1990년 충북대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 일본 요코하마국립대학 졸업(공학박). 1996년~2001년 일본 야스가와전기 서보개발 담당. 2001년~2002년 울보대학 연구조교수. 2000년 IEEE/IES논문지논문상 수상. IEEE, IEEJ, 공학연구원 정회원. 2002년~현재 경상대 제어계측공학과 조교수.