

# 發電設備의 모델링 및 제어

南海鯤

(韓國電氣研究所 先任研究員)

## 1. 개론

전력계통에서 발전설비의 역할은 수시로 변동하는 有效 및 無效電力을 공급하는 일이다. 유효 및 무효전력의 供給 불균형은 계통 주파수 및 전압을 정격치로부터 離散시키고 심한 경우 전력계통 안정도를 해칠 수 있으므로 良質의 전력공급을 위해서는 효율적인 발전설비의 제어가 先行되어야 함은 잘 인식되어 있다.<sup>1),2),3)</sup>

발전설비에는 원자력, 화력, 풍력, 지열 및 MHD 등 다양한 양식을 들수 있으나 국내의 경우 원자력 및 화력이 주종을 이루고 있고 최근 기저부하용인 원자력 발전의 급격한 증가와 전력계통 규모의 확대에 의한 수력 비중의 상대적 감소로 화력발전이 주로 부하추종운전을 하고 있어 이의 성능향상은 양질의 전력공급과 직결된다 하겠다.

본고에서는 화력발전설비의 제어계통 성능향상을 위한 외국의 노력을 문헌 5) 및 6)을 중심으로 定性的으로 소개하고 원자력등 다른 프로세스 제어도 거의 同一한 엔지니어링 과정을 거침을 부언한다 제어계통 향상은 hardware 및 man-machine interface" 의 개선등 다방면의 노력이 필요하나 여기서는 제어계통의 개념, 구조 및 설계방법에 국한하기로 한다.

## 2. 기존 제어계통의 문제점

발전소 제어계통은 AGC 또는 운전원에 의해 할당된 유효 및 무효전력을 생산하면서 프로세스 변수들의 set point로 부터의 이산을 최소 또는 허용치 이내로 유지토록 人力변수들을 조절한다. 예를 들면 드럼형 석탄연소 발전소에서는 드럼수위, 보일러-터빈 各部位의 증기압력 및 온도를 set point에 유지하고 보일러 효율의 최대화 및 공해물질 배출을 최소화하기 위해 feeder stroke, 조속기 위치, 연료/

### 차례

- 1. 개론
  - 2. 기존 제어계통의 문제점
  - 3. 모델링
  - 4. 다변수 제어이론의 적용
  - 5. 결론
- 참고문헌

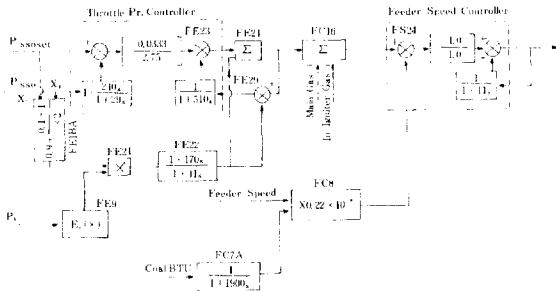


그림 1. 주증기 압력-연료 제어계통

공기 혼합비율, spray 및 burner tilt 등의 입력변수들을 조절한다. 그림 1은 석탄 발전소의 주증기 압력-연료제어계통의 block diagram이다.

현재 광범위하게 쓰이고 있는 Coordinated Control System (CCS)는 미국의 Combustion Engineering社가 50년대 말에 개발된 super critical once-through 보일러에 이전까지 사용되는 단일입출력(SISO) 제어계통을 적용한 결과 성능이 불량하여, 모델링과정을 거쳐 SISO 제어계통에 발전량과 증기압력 신호를 조속기 위치, 연료 및 급수계통등의 제어에 예측 신호(feedforward)로 사용한 것으로 feedback 및 feedforward controller 또는 The State of Art Controller 라고도 불리운다. 이 CCS는 supercritical once-through 보일러는 물론 다른 발전양식에도 모델링 노력없이 적용되어 많은 성능향상을 가져왔다. 그러나 60년대 대형화력 발전설비가 주로 기저부하용으로 쓰이고 부하중증 운전은 기동성이 좋은 수력 및 가스 터빈등 소규모 발전설비가 담당할시대적인 배경으로 정지상태 운전중 고효율 운전에 중점을 두고 설계되었고 이 목적에는 만족스러운 것으로 알려져 있다. 그러나 수력발전의 상대적 감소와 70년대 에너지 파동 이후 원자력발전의 급격한 증가와 전력계통의 경제적 운용을 위해 대형화력의 부하중증 운전이 불가피 하게 되었다. CCS의 구조 및 動的 tuning은 발전 설비가 large scale system 이고 프로세스 변수간의 interaction이 심하여 주로 엔지니어의

프로세스에 관한 지식과 경험에 의존하고 있다.

미국 에너지부에 의하면 CCS는 부하중증 운전에 다음과 같은 단점이 있음을 지적하고 있다.

1. 부하증가율이 기계설비가 허용하는 양에 미달함.
2. 자동운전범위가 정격출력의 30-100%에 제한됨.
3. 기계 및 제어계통 일부가 오동작할 경우 발전소를 불필요하게 정지 시키거나 발전소에 손상을 가함.

부하증가율의 제한은 터빈 rotor 및 보일러 각 부위의 온도 변화를 제한등 발전설비 hardware에 가해지는 제약조건에 의해 결정된다. 온도변화율의 제한은 특히 저부하에서 부하를 증가시킬 때 심하며 일반적으로 현 기계설비가 허용하는 부하증가율은 분당 정격출력의 10-15%이며 이 목표는 제어계통이 새로 설치되었거나 또는 조정되었을때 고부하 운전에서 얻어지고 있다.<sup>5)</sup> 그러나 CCS는 파라미터 변화에 민감하여 상당시간이 지난후 분당 3% 이하로 제한 운전되는 것이 보통이다. 이 낮은 부하증가율은 필요이상의 발전소를 부하중증 운전케 하여 전력계통의 경제적 운용을 어렵게 하고 심한경우 전력계통 안전도를 손상시킬 수 있다.

자동운전 범위는 일반적으로 정격출력의 30-100%에 제한되어 있고 이는 자동운전을 저부하까지 적용하지 않은 설계에 기인한다. 자동운전을 전 출력범위에 확장하기 위해서는 비선형특성을 제어계통에 반영하고(adaptive control) 저부하에서 flame instability 등의 문제점을 해결해야 할 것이다. 특히 기저부하용인 원자력발전의 급격한 증가는 화력발전의日間 정지기동(DSS)을 불가피하게 할 전망이며 DSS로 인한 운전원의 과중한 부담을 덜고 또한 routine 작업은 자동화에 의해 더 신속하고 신뢰성있게 수행될 수 있으므로 자동화 영역의 확장은 적극 추진되어야 할 것이다. 또한계통사고시 발전소가 고립될 경우 발전소를 소내부하로 운전하여 사고 제거후 발전소를 신속하게

병입할 수 있어 계통운용면에서도 바람직 하다고 하겠다.

발전설비 일부 또는 제어계통 일부가 오동작할 경우 발전설비 전체를 불필요하게 정지시키기 보다는 고장성격을 파악, 정지 또는 감부하 운전 여부를 판단하고 대책을 수립하며 오동작 또는 고장의 가능성을 미리 진단예방하는 expert system의 개발 및 설치로 발전설비의 이용율을 提高함이 바람직하며 Westinghouse社의 Generator On-line Diagnostic System은<sup>7)</sup> 좋은 예이다. Expert system, adaptive 제어기능 및 DSS에 따른 복잡한 논리기능을 제어계통에 병합하기 위해서는 앞으로의 발전설비는 컴퓨터에 의해 수행되어야 할 것이다.

위에서 언급한 발전설비의 취약점은 모두 제어계통의 결함만으로 돌릴 수 없으며 기계설비 면에서의 성능향상도 동시에 고려되어야 한다. Fast turbine Valving,<sup>8)</sup> variable pressure operation 및 터빈 bypass<sup>9),10)</sup>을 이용 빠른 부하변동율을 얻을 수 있고 석탄연소 발전소의 경우 부하추종 특성이 불량함은 주로 slow fuel dynamics<sup>22)</sup>에 의하므로 (석탄가스화가 기술 및 경제적으로 타당할 때) 개스화된 석탄을 사용할 경우 석탄발전소가 개스연소 발전소가 갖는 우수한 부하추종 능력을 가질 수 있음은 좋은 예이다.

### 3. 모델링

제어계통의 설계시 가장 중요한 단계는 프로세스를 정확히 기술할 수 있는 모델의 개발이다. 만일 모델이 부정확하면 제어계통 연구시 수학적 조작 결과는 오류를 범할 수 밖에 없다. 또한 모델이 필요이상으로 복잡하여 과다한 계산시간을 요하는 일이 없어야 한다. 모델링 방법은 크게 Inductive Modeling (IM)과 Deductive Modeling으로 분류할 수 있다.

IM에서는<sup>12)~15)</sup> 주로 discrete time domain에서 入出力 관계식을 표시하고 未知의파라미터를 시험에서 얻은 입출력 데이터와 least square estimator 또는 maximum likelihood est-

imator 등의 identification 기법을 이용하여 구한다. 이 방법은 시스템 엔지니어가 프로세스 지식없이 전달함수를 구할 수 있으나 모델의 적절여부가 모델 identification에 사용한 trajectory에 의존하며 DM에서와 같이 모델의 독립적 validation이 어렵다. 특히 프로세스가 open loop에서 운전이 어려워 closed loop에서 identification 할 경우 이 기법의 신뢰성에 의문이 제기되고 있고 Bell은<sup>12)</sup> closed loop 운전에서 얻은 데이터를 이용 IM기법을 적용한 결과 더 많은 人力이 소요되었고 simulation의 병용(並用)이 필요했음을 보고하고 있다.

DM에서는<sup>16)~23)</sup> 모델개발에 다음의 물리 법칙을 이용한다.

1. 질량, 관성, 에너지 보존법칙
2. Steam table, 공기 및 연소개스의 열상 태식
3. 열전도 법칙(대류, 복사)
4. 정지상태의 시험 데이터 및 설계자료
5. 보조기기 동특성

이 방법은 first principles 기법이라고도 불리며 장점으로써 각 기기 공급자의 데이터를 이용 발전설비 준공전에 모델을 개발 제어계통의 적절여부를 조사할 수 있고 기존 발전소의 경우 건설자료와 정지상태 운전에서 얻은 데이터 만을 이용 모델을 개발 dynamic test에서 얻은 데이터와의 독립적 모델 validation이 가능하다.

모델링 노력중 특기할 만한 사항은 다음과 같다. 60년대 초 Combustion Engineering社의 supercritical once-through 보일러 모델링 작업은<sup>6)</sup> 제어계통 개선을 위한 것이며 현재 널리 쓰이고 있는 CCS를 낳았다. Philadelphia Electric Co. (PECO)는 60년대 초 200 MW 드럼형 보일러인 Cromby 2 호기 모델을 개발 현장시험을 통해 모델 입증을 시도했으나 모델이 복잡하고 부정확하여 60년대 말 McDonald<sup>20)</sup>는 Cromby 2 호기의 정지 상태의 시험 데이터와 건설자료만으로 모델을 개발 DM 기법을 定立하였다. PECO는 Fulton Station의 2300 MW High Temperature Gas-Cooled Reactor

를 건설중 원자로, 보조기기의 공급자 및 용역 회사의 협동으로 모델을 개발 시운전시 예상되진 문제점들을 진단, 예방하는 성격의 모델이라는 점에서 특기할 만하다. Ray<sup>17)</sup>는 386MW subcritical once-through 보일러의 불안정을 해결하기 위해 모델을 개발 연료 제어계통만을 개조 부하증가율을 분당 2MW에서 9MW로, 최저 자동운전 출력수준을 220 MW에서 130MW로 개선 해석적 DM기법이 당면문제 해결에 응용되었다는데 의의가 있다.

### 4. 다변수 제어이론의 적용

프로세스 변수간의 interaction이 심한 다변수를 同時에 제어해야 하는 발전설비 제어에는 다변수 제어이론의 적용이 이상적이라 하겠다. 다변수 제어이론은 크게 다음의 네 가지로 분류할 수 있다.<sup>5)</sup>

1. Decoupling
2. Pole Placement
3. Linear Quadratic Regulator (LQR)
4. 주파수 영역에서의 전달함수 loci 방법

Decoupling 방법은 각 loop간의 interaction이 없도록 decoupling compensator를 구한 후 SISO 제어이론을 적용할 수 있는 장점이 있으나 decoupling compensator가 필요이상으로 복잡할 수 있다. 이 방법은 Borsi<sup>23)</sup> 및 Chau<sup>24)</sup>에 의해 발전소 모델에 적용되었으며 Borsi에 의한 제어계통은 실제통에 설치되어 파라미터 변화에 민감하지 않고 좋은 결과를 보여주고 있다고 보고하고 있다. Pole placement<sup>25)</sup>의 근본제약은 closed loop system의 반응은 pole뿐만 아니라 설계자가 변경할 수 없는 zero에도 영향을 받는다. 이 방법의 발전설비 제어에의 응용은 알려져 있지 않다. LQR은 연구가 가장 활발한 설계방법이다. 선형계통이

$$\dot{x} = Ax + B\mu \tag{1}$$

$$y = Cx + D\mu \tag{2}$$

로 표시될 때 목적함수

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} (x^t Q x + \mu^t R \mu) dt \tag{3}$$

를 정의하면  $t_f \rightarrow \infty$ 일 때 식 (3)을 최소로 하는 해는 다음 식으로 주어진다.

$$\mu = -R^{-1} B^T K x \tag{4}$$

식 (3)과 (4)에서 Q 및 R은 각각 emipositive 및 positive definite matrix이며 K는 다음 Riccati식의 해이다.

$$KA + A^T K - K B R^{-1} B^T K = 0 \tag{5}$$

LQR을 출력을 수시로 변동해야 하는 발전설비에 적용하기 위해서는 reset action을 추가하여야 하며, reset action은 모델에 disturbance model을 추가하거나<sup>26),27)</sup> 그림 2에서와 같이 spectral decoupling 기법<sup>29)</sup>을 이용 과도상태 제어에 state feedback을, quasi-steady state에서 output integral 제어를 추가하는 방법이 있다. 그림 2의 제어계통은 F-100 turbofan 제트엔진에 응용을 목표로 System Control Inc., NASA, 미공군, Pratt Whitney社가 공동연구한 것으로 실 계통에 적용한 결과는 알려져 있지 않으나 disturbance 모델을 추가한 방법보다 설계방법이 실용적으로 생각된다. 이같은 활발한 연구활동에도 불구하고 LQR을 발전설비 제어에 응용하는 데는 다음의 연구가 더 필요하다.<sup>5),23)</sup>

1. LQR이 모델링 오차 및 파라미터 변화에

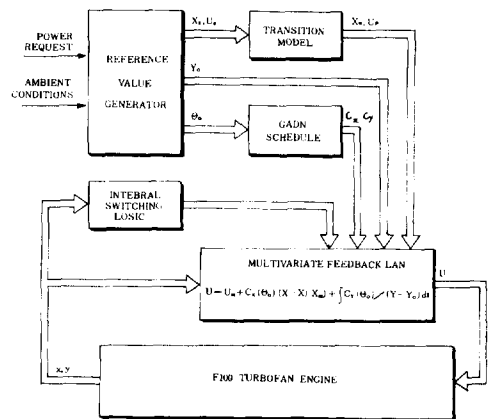


그림 2. F-100 Turbofan 엔진 제어계통

민감하여 정교한 모델을 요하나 프로세스 제어에서는 이의 실현이 어렵다.

2. 많은 상태변수들이 측정이 불가능하거나 어렵고 이를 위해 state estimator를 사용하여야 하며, 이 경우 robustness가 현저히 감소한다<sup>30)</sup>

3. 비상시 운전원이 어떻게 개입할 수 있는지 알려져 있지 않다.

LQR을 발전설비 제어에 응용한 예로는 Kwatny<sup>28)</sup>가 Cromby 2호기 모델에 LQR을 적용한 결과 많은 성능향상을 가져왔고, Dettinger<sup>31)</sup>는 LQR 제어계통을 Stuttgart 대학교의 heating plant에 설치한 결과 부하변동율을 3배 이상으로 증가시킬 수 있음을 보고하고 있다. Rees<sup>32)</sup>는 time delay가 있는 발전소 모델에 LQR을 적용한 결과 CCS가 더 우수한 것으로 결론을 짓고 있다.

주파수영역에서 전달함수를 이용한 다변수 제어이론은 Inverse Nyquist Array (INA)<sup>33)</sup>과 Characteristic Loci(CL)<sup>34)</sup> 방법이 있으며 이들 제어계통 구조는 그림 3과 같다. CL에서는 입출력 보상기 K 또는 L과 프로세스 전달함수 G가 commute 해야 되는 제약이 있어여기서는 언급하지 아니한다. INA에서는 입출력 보상기 K 및 L을 보상된 새로운 open loop transfer function

$$Q = LGK$$

가 diagonal dominant 하도록 구한 후 각 loop가 원하는 gain 및 phase margin 얻도록 SISO 이론을 적용한다. Rosenbrock<sup>33)</sup>에 의하면 이 방법은 모델링 오차 및 파라미터 변화에 민감하지

않고 프로세스 제어에 적합하다. 그러나 이 방법은 동일 數의 입출력 계통에만 적용이 가능하고 Nyquist Stability Criterion과 singular value<sup>35)</sup>에 기준한 robustness가 相異함에 더 연구가 필요하다. 필자는 360 MW 석탄연소 발전소의 中次 모델을 개발 이에 INA 방법에 의한 제어계통을 적용한 결과 약 3배의 부하증가율을 얻을 수 있었고 출력보다 많은 입력을 heuristic approach를 이용 설계에 반영했다.

### 5. 결 론

전력계통 확대로 수력발전 비중의 상대적 감소와 원자력 발전 비중의 급격한 증가로 대형화력 발전소가 대부분의 부하추종 운전을 하고 있어 이의 효율적인 제어는 양질의 전력공급과 직결된다. 하겠다. 발전설비 제어에 광범위하게 쓰이고 있는 Coordinated Control System은 설계 당시의 시대적 배경으로 정지상태에서 고효율 운전 중점을 두고 설계되었으며 미래의 부하추종 운전에는 부적합한 것으로 생각된다. 프로세스 변수간의 interaction이 심한 발전설비 제어에는 다변수 제어이론의 적용이 이상적이며 가까운 장래에 예상되는 DSS에 부응하기 위해서는 자동운전을 전 출력범위에 확장함이 바람직하다 하겠다. 본고에서는 이 방면에서의 외국의 노력을 定性的으로 소개하였다. 특히 국내의 경우 저부하용인 원자력 발전비중의 급격한 상승으로 화력발전 성능향상 문제가 심각히 대두되고 있고 외국의 발전설비를 turn-key base로 수주한 실적도 있어 기술개발 및 국제경쟁력 향상의 관점에서 이 방면의 연구투자가 바람직하다.

### 참 고 문 헌

- 1) Bonneville Power Admimistration, "Areas of Interest for Automatic Generation Control," Unpublished Memorandum, 1976.
- 2) Federal Power Commission, Prevention of Power Failures, U. S. Government Printing. Office, Washington, D.C., 1967.
- 3) H. Nam, Design of Co-ordinated Economic

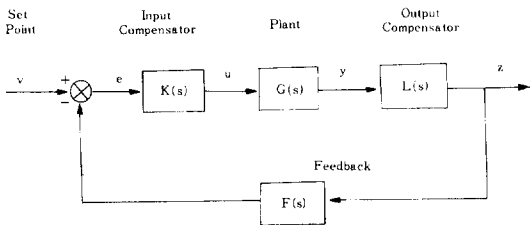


그림 3. 일반적 다변수 제어계통

- Areawise Automatic Generation Control, Master's thesis, the University of Houston, 1980
- 4) 이 건용, "Control of modern Power Plant: Recent Trends and Prospects," 1986 하계 학술회의 논문집, p 286
  - 5) Department of Energy, U.S.A., "System Engineering for Power Research and Development announcement," Department of Energy ET-78-D-01-3038, 1978
  - 6) F.Fenton, "Manufacturer's View Point in Utilizing Boiler Dynamic Modeling", Boiler modeling, MITRE Co., 1974.
  - 7) Westinghouse Co., Generator On-line Diagnostic, June 1985.
  - 8) R.H.Park, "Fast Turbine Valving," IEEE Trans, PAS-92, No. 3, 1983.
  - 9) W, Trassl, "Safe Cyling of High Pressure steam Turbines," Proceedings of the American Power Conference, Vol.3, 1969.
  - 10) A. Rudd, "Design and Systems for Large Fossil-Fuel units Intended for Cycling service", Proceedings of the American Power Conference, Vol.36, 1974.
  - 11) H Kuerten and H. Termehlen, "Design and Operating for Fossil-Fueled Power Plant in Europe," IEEE-ASME Joint Power Conference, 1976, Paper No. 76-JPGC-Pwr-14
  - 12) R.D. Bell, N.W. Rees and K.B.Lee "Models of Large Boiler-Turbine Plant," Automatic Control and Protection of Electric power System, IFAC Symposium, Melbourne, 1977.
  - 13) C.B.Speedy, R.D. Bell and G.C. Goodwin, Dynamic Modeling of a steam Generator using Least Square Analysis," Proceedings of Joint Automatic Control Conference, 1970
  - 14) R.L. Moore and F.C. Scheppe, "Model Identification for Adaptive Control of a Nuclear power plant", Automatica, 1973
  - 15) R.L. Morris, Low Order Identification For a drum Type power plant, Master's Thesis, MIT, EE Department, 1978
  - 16) D.A. Berkowitz, R.T. Tones and A.L. Markunas, "Dynamic Model for Boston Mystic No. 4," D.A. Berkowitz ed., Boiler Modeling, MITRE, 1974.
  - 17) A. Ray and D.A. Berkowitz, "Design of a practical Controller for a Commercial Scale Fossil power plant," Trans, of ASME, 101, 1979.
  - 18) L.H. Fink, "Evolution of a Successful Modeling Program," D.A. Berkowitz ed., Boiler Modeling, MITRE, 1974.
  - 19) P.B. Usoro, Modeling and Simulation of a Drum Boiler-Turbine Power Plant Under Emergency state control, Master's Thesis, MIT, 1977.
  - 20) J.P. McDonald, H.G. Kwatny and J.H. Spare, "A Nonlinear Model for Reheat Boiler-Turbine Generator system, Part I and II," Proc. of the 12th Joint Automatic Control Conference, 1971
  - 21) R.Pena, Modeling of Jones 2 power plant, Ph. D. Thesis, the University of Texas at Austin, 1983
  - 22) H. Ham, Modeling and Control System Design study of a coal fired Power Plant, Ph. D. Thesis, The University of Texas at Austin, 1986.
  - 23) L. Borsi, "Design and Experimental Evaluation of Decoupling Control for a Boiler-Turbine Unit," Proc of U.S. Australian Seminar on Boiler Control, Sidney, Australia, 1977.
  - 24) O.B. Chou, P.K. Kar and J.K. Wong, "Design of Coordinate power plant unit control using state Feedback Decoupling Technique," IFAC Symposium, Automatic Control and Protection of Electric Power Systems, Melbourne, 1977.
  - 25) F. Fallside, ed. Control System Design by Pole-zero Assignment, Academic Press, London, 1977.
  - 26) C.D. Johnson, "Accommodation of External Disturbances in Linear Regulator and Servomechanism Problems," IEEE Trans. AC-16, No.6, 1971.
  - 27) H.G. Kwatny, "Power plant Control System Design; Application of Analytical Technique," D.A. Berkowitz ed., Boiler Modeling, MITRE, 1974.

- 28) R.L. Dehoff and W.E. Hall, Multivariable Control System Design Procedure For F-100 Turbofan Engine, System Control Inc., 1977, Final Report for Contract No. F33615-75-C-2053.
- 29) J.C. Doyle and G. Stein "Robustness with Observers", IEEE Trans. Ac 24, 1979.
- 30) R. Dettinger and E. Welforder, "Application of optimal multivariable Control with process Computer in a thermal power plant," IFAC symp., 1977, Melbourne, Australia
- 31) N.W. Rees, K.B. Lee and R.D. Bell "optimal Coordinated Control of Boiler-Turbine Plant," IFAC Symp., 1977, Melbourne.
- 32) H.H. Rosenbrock, "Computer Aided Control system Design, Academic Press, 1974.
- 33) A. MacFarlane and B. Kouvaritakis "A Design Technigue for Linear Multivariable Feedback System," Int. J. of Control 25(5), 197.
- 34) J. Doyle and G. Stein, "Multivariable Feedback Design: Concepts for a classical/ Modern Synthesis," IEEE Trans. AC-26 No.1, 1981.