전력플랜트 모델링

남 해곤
(전남대 공대 전기공학과 전강)

1. 서 론

전력계통에서 파워플랜트의 역할은 수시로 변동하는 유효 · 무효전력을 공급하는 일이다. 有效 및 無効電力의 需給불균형은 계통주파수 및 전압을 정격치로부터 離散시키고 심한경우 계통安定度를 해칠 수 있다. 양질의 전력은 정격주파수 · 전압 및 공급신뢰도로 평가되며 날로 심화되고 있는 양질의 전력에 대한 수용가의 욕구를 충족하기 위해서는 효율적인 파워플랜트의 제어가 先行되어야 함은 잘 인식되어 있다.[1) 2) 3)]

현재 국내의 경우 대부분의 전력을 화력 원자력으로 공급하고 있으며 원자력은 특성상 기저부하로 운전되어 화력발전의 효율적인 제어가 양질의 전력공급과 직결된다 할 수 있다. 따라서 여기서의 파워플랜트는 특별한 언급이 없는 한 화석연료를 사용하는 파워플랜트를 의미한다. 무효전력 · 전압제어는 발전기의 여자기를 통해 제어되고 보일러 / 터어빈에 의해 제어되는 유효전력의 제어와 decouple되어 시행되고 있고 여기서는 지면 제약상 보일러 / 터어빈 프로세스 모델링에 관하여만 언급하기로 한다. 여자기를 포함한 발전기의 모델에 관하여는 문헌 33) 및 34)에 상세히 기술되어 있다.

Hottenstine[4]과 미국의 에너지省[5]에 의하면 파워플랜트의 동특성 분석은 새로운 플랜트를 설계하거나 기존 플랜트 설계시 고려되지 않았던 새로운 운전모드(mode)의 實用可能性을 조사하는데 있다. 즉 전력계통 규모의 확장, 전원입지의 원격화, 부하추종능력이 불량한 원자력발전의 증가, 에너지파동 이후 에너지의 효율적 사용의 필요성 증대등은 파워플랜트의 운전조건에 급격한 변화를 요구하고 있다. 이를 종합하면

(1) 최소의 온도 · 압력변화를 유지하고 기기에 손상을 최소로 하면서 급격한 부하cycle운전을 할 수 있을 것.
(2) 심야 저부하시 플랜트를 정시키고 아침에 재기동 하여야 하며, 이때 기기손상, 환경영향을 최소로 하고 고효율을 유지할 것.
(3) 계통 또는 플랜트 사고시 플랜트를 정시시키기보다는 가급적 소내부하로 운전하면서 기기손상 및 환경영향을 최소로 할 것
(4) 정상 자동운전 영역(보통 정격부하의 40~100%)에서 성능개선.

이 외에도 플랜트 모델은 Simulator로서 운전원 훈련에 널리 쓰이고 있음은 잘 알려져 있다. 위에서 언급한 새로운 운전조건들은 플랜트 부하변동율을 증가시키면서 보일러 / 터어빈 각 부위의 온도 압력변화를 최소로 하여 각 기기에 가해지는 기계적 스트레스를 극소화하여 기기의 수명을 연장하고 자동운전영역을 전 부하에 확장시키는 것으로 요약할 수 있다. 미국의 에너지省[5]에 의하면 기존 플랜트 기계설비를 사용하고 보일러 / 터이빈 제어계만을 개선할 때 현재 분당 정격부하의 3-5% 부하변동율을 분당 10-15%로 개선할 수 있다고 한다. 또한 현재 보일러 / 터어빈 제어에 널리 쓰이고 있는 Coordinated Control System(CCS)은 위의 새로운 운전조건들을 만족시키는데 미흡하며 다변수제어이론을 보일러 / 터어빈 제어에 도입할 필요성을 역설하고 있다.

2. 파워플랜트 프로세스 개략

그림1, 2, 3은 드럼형 파워플랜트의 단면도, 보일러 / 터어빈의 물 / 증기, 공기 / 연소개스의 흐름도를 보여주고 있다. 터어빈에 동력을 전달하고 난 포화증기는 콘덴서에서 응축되어 8개의 급수가열기에서 예열되어 보일러내의 첫 열교환기인 economizer에 보내진다. 이 물은 배기개스에 의해 가열되어 드럼으로 보내지고 드럼에서 물 / 포화증기와 합쳐지고 드럼내의 물은 포화증기와 분리되어 waterwalls로 보내져 가열되어 waterwalls 출구

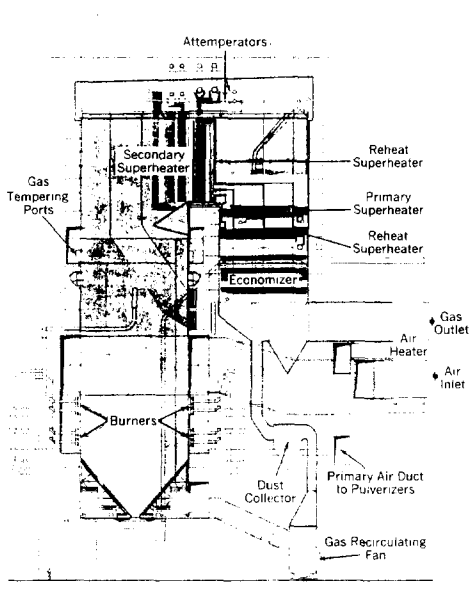

그림 1. 보일러 단면도

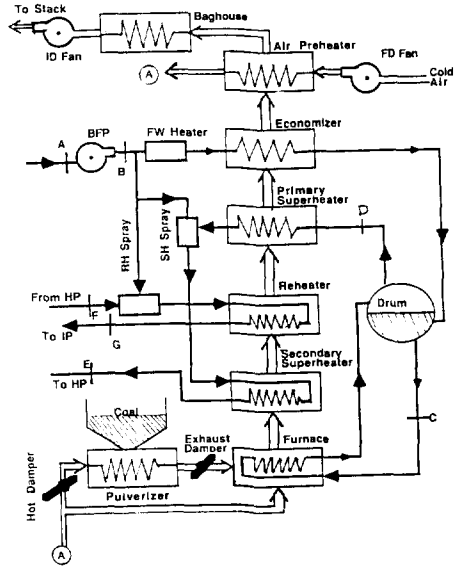

그림 2. 보일러 흐름도

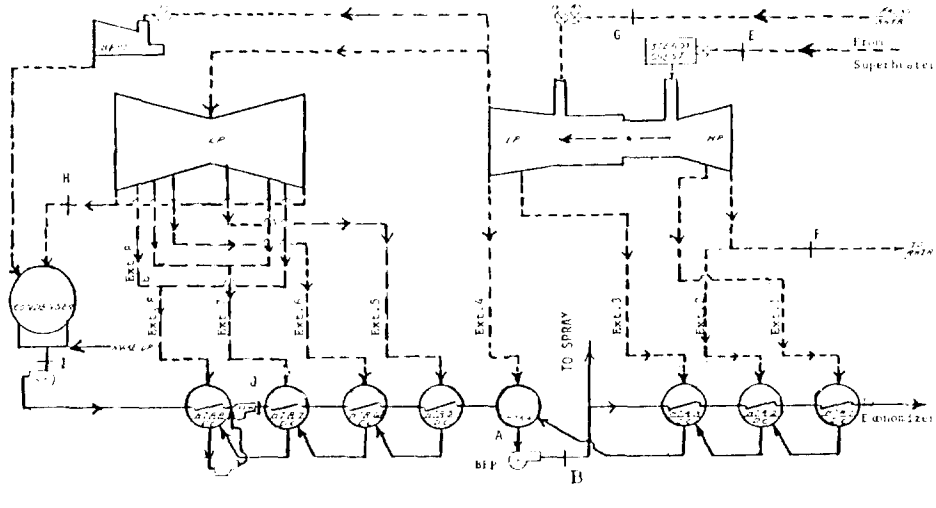

그림 3. 터어빈 흐름도

내에서는 물/포화증기의 혼합물로 드럼으로 보내진다.

드럼에서 분리된 포화증기는 primary 및 secondary superheaters에서 과열증기로 바뀌고 조속기발브를 통해 유량이 조절되어 HP터어빈에 동력을 전달한다. 이 증기는 다시 재열기에서 재 가열되어 IP및 LP터어빈에 동력을 전달하고 포화증기 상태가 되어 콘덴서로 돌아간다. 이 물/증기의 열전달 과정은 Rankine Cycle이라 불린다.

한편 공기/배기개스 사이클을 보면 대기중의 공기는 Forced Draft(FD) fan에 의해 air preheater에 보내져 예열되고, 그중 일부는 보일러의 burner로 직접보내지고 일부는 pulverizer에서 분쇄된 분말상태의 석탄을 보일러로 운반하여 연소한다. 이 연소된 개스는 고온상태로 복사열로 상당부분의 에너지를 waterwalls에 전달하고 secondary superheater, 재열기, primary superheater, economizer, air preheater 순서로 대류현상에 의해 열을 방출, bag house 또는 precipitator에서 공해물질이 제거된다음 Induced Draft(ID) fan에 의해 대기중으로 방출된다.

3. DEDUCTIVE MODELING

파워플랜트의 모델링 방법에는 크게 다음절에서 설명할 Inductive Modeling(IM)과 본절에서 설명할 Deductive Modeling(DM) 두 가지로 분류할[6]수 있다. DM[7]~[21]에서는 다음의 물리법칙을 이용한다.

(1) 질량, 관성, 에너지 보존법칙
(2) Steam Table, 공기 및 연소개스 열상태식
(3) 열전도법칙(대류, 복사)
(4) 정상상태의 시험 데이터 및 설계자료
(5) 보조기기 특성

이 방법은 first principles 기법이라고도 불리며 모델개발에 오랫동안 입증된 물리법칙을 이용하고 플랜트의 각 부분마다 모델을 개발 조합하기 때문에 모델을 module화 할수있고 프로세스에 관한 깊은 이해를 할 수 있어 모델의 복잡성(model complexity)을 가감할 수 있다. 새로운 플랜트의 경우 준공전 각 기기공급자의 설계자료를 이용 모델을 개발 제어계통의 성능평가 및 개선대책을 수립하고, 기존 플랜트의 경우 정상상태에서 얻은 시험데이터와 건설자료를 이용 모델을 개발 과도상태에서 얻는 시험데이터와의 독립적 모델 검증이 가능하다.

DM 노력중 특기할만한 사항은 다음과 같다. 1960년대 초 Combustion Engineering社는[13] once-through형 보일러에 기존 드럼형에 사용하던 기본적으로 각 제어루프가 독립된 보일러 제어계를 사용한 결과 성능이 불량하여 Sulzers Brothers 및 Leeds and Northrop社와 공동으로 보일러 모델을 개발하여 현재 널리 사용되는 CCS를 개발하여 만족스러운 성능을 얻었고 곧 다른 형의 보일러에도 적용되어 많은 성능향상을 얻을 수 있었다고 알려졌으나 모델에 관한 것은 발표되지 않았다. Chien [14]은 선박용 보일러, Nicholson은 산업용 플랜트의 보일러 모델을 개발하였고 전력회사용 대규모 파워플랜트 모델로서 처음 발표된 것은 Philadelphia Electric Co(PECO)의 200MW급 Cromby 2호기이다.[16] [17] 그러나 이 모델은 제어용으로는 차수가 너무 높고 정확성이 결여되어 60년대 말 PECO의 McDonald 등은 같은 Cromby 2호기의 정상상태의 시험데이터와 건설자료만을 사용하여 모델을 개발하고 과도상태의 시험데이터와 독립적으로 모델을 검증함으로서 DM기법을 定立하였다. 또 PECO는 Fulton Station의 2300MW급 High Temperature Gas Cooled Reactor를 건설중 원자로, 보조기기 공급자, 용역회사들과 공동으로 모델을 개발[18] 시운전시 예상되는 문제점들을 진단예방하는 성격의 작업을 한점에서 특기할 만하다. Ray 및 Berkowitz는 386MW 급 subcritical once-through형 보일러의 不安定을 해결하기 위하여 모델을 개발 연료제어계통만을 개조한 결과 부하증가율을 분당 2MW에서 .9 MW로, 최저자동운전출력 수준을 220 MW에서 130 MW로 낮추어 해석적 DM기법이 당면문제 해결에 이용되었다는 데 큰 의의가 있다. 위의 예들은 물·증기 사이클에 초점을 두고 모델을 개발했으니 문헌 19) 및 20)은 furnace 압력 제어 및 furnace implosion방지를 위한 개스의 dynamic 모델이다.

3.1. GOVERNNG EQUATIONS

파워플랜트 모델개발에 적용되는 주요법칙들은 다음과 같다.

3.1.1. 에너지 보존법칙

Rate of change of stored energy=rate of energy influx −rate of energy efflux+rate of heat input

-rate of work

lumped 열교환기에 위 에너지 보존법칙을 적용하면

$$\frac{d}{dt}(DV(U) = W_{in}\ H_{in} - \overline{W}out\,Hout + Q \quad (3-1)$$

D : 유체의 평균밀도

H : enthalpy

U : internal energy

W : rate of mass flow

V : Control Volume

보통 superheater와 재열기, economizer에서 열교환기 튜브에 저장되는 에너지를 유체의 질량에 등가화 하는 것이 관례이다. 이때 식 (3-1)은 식(3-2)로 간략화된다.

$$M_m S_m \frac{d}{dt} T_m + \frac{d}{dt}(DUV)$$

$$= M_e S_{vf} \frac{d}{dt} T_f = W_{in} H_{in} - W_{out}\ Hout + Q$$

$$M_e = M_m \frac{S_m T_m}{S_{vf} T_f} + DV \quad (3-2)$$

위 식에서 M은 질량, T는 온도, M_e는 effective mass, S는 비열 S_{vf}는 유체의 정적비열, 첨자 m은 튜브 metal, f는 유체(물 또는 증기)를 표시한다.

3.1.2. 관성보존의 법칙

$$P_{in} - P_{out} = f\frac{W^2}{D} + Dgz \quad (3-3)$$

위에서 P는 압력, f는 마찰계수, g는 중력가속도, z는 위치의 차이를 나나낸다.

3.1.3. 질량보존의 법칙

$$\frac{d}{dr}(DV) = W_{in} - W_{out} \quad (3-4)$$

3.1.4. 복사에 의한 열전달

furnace에서 개스의 온도는 매우 높아 furnace내의 개스로부터 waterwalls의 튜브로에의 열전달은 이상적으로 Stefan-Boltzman법칙에 의한다.

$$Q = \sigma A (T_g^4 - T_m^4) \quad (3-5)$$

위에서 T_g는 개스 평균온도 T_m은 열교환기 튜브의 온도이다. 그러나 burner tilt angle 및 사용되는 burner의 위치에 따라 effective flame position이 변하고 또 개스의 유량에 따라 유효열발산면적 A가 변화하므로 식(3-5)는 아래 식과 같이 수정되어야 한다.

$$Q \propto K_{gg} K_{ngg} K_{xgg} T_g^4 \quad (3-6)$$

위에서 K_{gg}는 load dependent factor, Kn_{gg}는 사용되는 burner수에 따른 교정계수, K_{xgg}는 burner tilt angle변화에 따른 교정계수이며 이의 정량적인 해석은 문헌[11]에 설명되어 있다. 최근까지 load dependent factor는 불분명하였으나 필자는 nonlinear optimization기법을 사용하여 least square fitting을 한 결과 $\sqrt{w_g}$에 비례하는 것을 발견하였다.

3.1.5. 대류열전달식

대류에 의한 열전달은 flow field및 유체매체의 성질에 따라 달라진다.McAdams[22]는 boiler내의 대류에 의한 열전달은 다음 관계식에 의해 표현하고

$$Q = KW^n(T_h - T_e) \quad (3-7)$$

개스에서 열교환기 튜브에로의 열전달에는 n=0.6, 열교환기 튜브에서 증기·물에로는 n=0.8을 추천하고 있다. Grimson[23]은 staggered in-line tube bank의 기하적 배열에 따라 n은 0.554~0.752 범위의 값을 갖는다고 한다. 필자는 정상상태에서 얻은 시험데이터를 이용 least square fitting을 한 결과 economizer, primary, secondary superheater, 재열기에 대해서 각각 0.54, 0.5, 0.71, 0.55의 값을 얻었다. secondary superheater의 값이 높은 것은 secondary superheater에서 복사에 의한 열전달이 상당량 존재하기 때문으로 해석된다.

3.1.6. 드럼-Waterwalls

지금까지 보일러모델링에서의 관례는[10] 드럼과 Waterwalls 에 각각의 control volume을 취하고 드럼과 Waterwalls에 각각 질량 및 에너지보존의 법칙을 가하되 Waterwalls내의 물·증기 혼합물에 발생되는 에너지 저장 효과는 Waterwalls 튜브질량에 lumping 하였다. 석탄연소발전소에서는 FD fan과 furnace사이에 공기·석탄이 전달되는데 약 30초의 time lag, furnace에서 ID

fan까지 약 60초의 time lag가 발생한다. 이 slow fuel dynamics와 함께 위에서 언급한 드럼 · waterwalls모델을 simulation 한 결과 플랜트는 안정한 반면 simulation은 불안정하였다. Waterwalls내의 에너지 저장효과를 분리하여 모델을 하면

드럼

$$\frac{d}{dt}(D_{drw}V_{drw}+D_{drs}V_{drs})=W_{eco}-W_{psi}+W_{wwo}-W_{wwi} \quad (3-8)$$

$$\frac{d}{dt}(D_{drw}V_{drw}H_{drw}+D_{drs}V_{drs}H_{drs})=W_{eco}H_{eco}-W_{psi}H_{drs}+W_{wwo}H_{wwo}-W_{wwi}H_{drw} \quad (3-9)$$

Waterwalls

$$\frac{d}{dt}(D_{drw}V_{www}+D_{drs}V_{wws}) = W_{wwi}-W_{wwo} \quad (3-10)$$

$$\frac{d}{dt}(D_{drw}V_{www}H_{drw}+D_{drs}V_{wws}H_{drs})=W_{wwi}H_{drw}-W_{wwo}H_{wwo}+Q_{mw} \quad (3-11)$$

$$Q_{mw}=K(T_{wwm}-T_{dr})^3 \quad (3-12)$$

위에서 첫 두 첨자 dr, ww, ec는 각각 드럼, waterwalls, economizer를 뜻하고 마지막 첨자 w, s, m은 각각 water, steam, tube metal을, i, o을 각각 inlet, outlet을 의미한다.

식(3-8)~(3-11)을 포화상태의 물 · 증기 상태식과 드럼과 waterwalls의 부피가 일정함을 이용하면 식(3--13) 과 같은 형태의 3개의 couple된 미분방정식으로 표시할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{P}_{dr} \\ \dot{V}_{drw} \\ \dot{V}_{www} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

3.1.7. 터어빈

터이빈에서 사용되는 중요한 관계식은 조속기 발브 통한 유량조절과 터어빈 각 스테이지에서의 효율이다. 터어빈의 응답속도는 보일러 응답속도에 비하여 무척 빠르기 때문에 대수식으로 표현하며 유일한 dynamics는 HP터어빈을 통과한 증기가 재열기에서 가열되어 IP 터어빈에 도달하는 약 10초간의 time lag이다.

Compressible Flow

Secondary superheater에서 생성된 과열증기는 조속기 발브를 통해 유량이 조절되는데 관계식은[28] 아래와 같다.

$$W=300A\sqrt{2g\frac{k}{(k-1)}\frac{P_1}{v_1}}f_4(r) \quad (3-14)$$

P_1 : 발브 입력측 압력
P_2 : 발브 출력측 압력
v_1 : 입력측 specific volume
$r : \frac{P_2}{P_1}$
A : 조속기 발브면적
$k : \frac{\text{정압비열}}{\text{정적비열}}$
W : 유량

$$f_4(r)=\begin{cases}\sqrt{r^{\frac{2}{k}}-r^{\frac{k+1}{k}}} & r>r_c \\ \sqrt{r_c^{\frac{2}{k}}-r_c^{\frac{k+1}{k}}} & r\leqq r_c\end{cases} \quad (3-15)$$

r_c : critical pressure ratio
$=0.5437$, $k=1.3$인 때

터어빈 효율

터어빈 각 스테이지의 효율은 그림4에서 식(3-16)로 표시된다.

$$\eta=\frac{h_1-h_2}{h_1-h_3} \quad (3-16)$$

그림4에서 상태a(P_1, T_1, H_1)에 있던 증기는 이상적으로 isentropic expansion을 하면 상태 c(P_2, T_3, H_3)로 되나 실제로 점선을 따라 상태 b(P_2, T_2, H_2)로 변화된다. 따라서 isentropic expansion에서 h_1-h_3의 에너지를

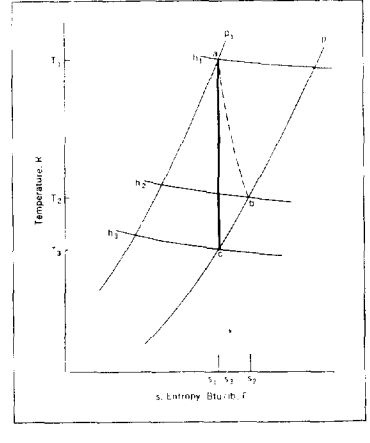

그림 4. 터빈에서의 증기 팽창

터어빈 블레이드에 전달가능하나 실제로 h_1-h_2의 동력밖에 전달할 수 없다. HP 터어빈에서는 전체 터어빈 출력의 30-40%를 발생하고 효율은 부하변동에 따라 크게 변하는 반면 IP 및 LP터어빈에서는 효율은 부하에 크게 영향을 받지 않는다.

3.1.8. 열상태식

보일러 터어빈의 Rankine사이클에서 물·증기는 상태변화를 하면서 에너지를 흡수·방출하는데 물·증기의 상태를 표시하는 변수에는 enthalpy, entropy, 온도, 압력, 밀도등이 있다. 이들 중 2개 또는 1개 만이 독립변수로서 이들간의 관계식은 steam table[24] 또는 Computer software[25]로 주어진다. 필요에 따라서 이들 관계식은 least square fitting 알고리즘을 이용 다항식으로 표시될수 있다. 공기·개스에서는 보통 온도와 비열(또는 enthalpy)의 관계식이 이용되는데 간략화된 도표를[26]이용하거나 좀더 정확히 표현하여 각 연료의 연소분석(combustion calculation)을 하여[26] 생성되는 여러 종류의 개스량을 결정하고 각 개스에 대한 온도·비열 관계식[27]을 이용할 수 있다.

3.1.9. 모델의 적절차수

제1절에서 언급한 새로운 운전모드를 검토·분석할 때 그 신뢰성은 플랜트 모델의 정확성에 달려있다. 따라서 정확한 모델개발 필요성은 아무리 강조해도 지나침이 없다. 한편 모델은 필요이상으로 복잡하여 불필요한 simulation 비용을 유발하지 않도록 주의하여야 한다.

1절에서 언급한 보일러/터어빈 모델링 목적중 대부분의 경우 furnace내의 배기 개스 및 보조기기 특성은 이미 언급된 time lag를 제외하고 보일러 프로세스에 비하여 응답속도가 빠르므로 이들의 동특성은 무시되고 간단한 대수식으로 표현될 수 있다. 그러나 비상사태의 경우 매우 급격한 부하변동을 요구하므로 보조기기의 포화상태등 비선형 특성을 충실히 반영하여야 하고 furnace 의 압력제어나 furnace implosion 방지를 위한 모델이라면 개스 dynamics도 상세히 모델링 되어야 한다. 따라서 적절한 모델차수는 모델의 사용목적에 따라 달라진다 하겠다. 필자의 경험에 의하면 비상사태가 아닌 1절에서 언급된 보일러·터어빈의 새로운 운전모드의 분석을 위한 모델에서는 primary 및 secondary superheaters, 재열기, economizer, air preheater에 각각 1개의 상태변수, 드럼 waterwalls에서 V_{drw}, V_{www}, P_{dr} 및 T_m등 4개의 상태변수, fuel dynamics(석탄연소 발전에 한함)에 두개의 상태변수, 증기가 HP터어빈에서 IP터어빈에 도달하는데 소요되는 time lag등 함께 12차 모델 정도면 보일러·터어빈 프로세스를 적절하게 표현할 수 있다고 생각된다.

이상에서 개발된 모델은 implicit파라메터를 갖는 식(3-17)와 같은 비선형 모델이다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, \theta) \\ g(x,\ u,\ \theta) &= 0 \\ y &= h(x,\ u,\ \theta) \end{aligned} \qquad (3-17)$$

위에서 x는 상태변수백터, u는 입력변수백터, θ는 implicit 파라메터벡터이다.

4. INDUCTIVE MODELING

IM에서는 플랜트를 black box로 놓고 입력측에 특정한 신호를 가해 입·출력 데이터를 이용 전달함수를 구한다. 사용하는 입력신호의 종류에 따라 주파수 응답법, 펄스 테스트법, random signal 테스트법등으로 분류할 수 있다.

4.1. 주파수 응답법

입력으로 정현파 신호 u를 가할 때 출력 y가 측정되면 이때 전달함수 G(jw)는 식(4-1)에 의해 정의된다.

$$G(jw) = \frac{Y(jw)}{U(jw)} \qquad (4-1)$$

위에서 Y(jw), U(jw)는 출력Y, 입력 U의 Fourier 변환이다. 이 방법은 excitation source가 어느 한 주파수에 있고, 따라서 큰 입력을 가할 수 있어 양호한 signal to noise ratio(SNR)을 가질 수 있어 비교적 정확한 모델을 얻을 수 있다. 단점으로 시험에 많은 소요시간을 요하고 time varying system에는 적용이 어렵다는 점이다. 이 방법을 파워플랜트에 적용한 예로 Kerlin[29]을 들 수 있으나 Kerlin도 정현파보다는 원하는 주파수를 강조하는 펄스체인을 사용하였다.

4.2. 펄스 테스팅

이 방법에서는 여러 종류의 펄스를 가하고 식(4-1)로 전달함수를 구한다. 짧은 시간을 요한다는 장점은 있으나 SNR이 불량하고 플랜트에 적용한 예는 알려져 있지 않다.

4.3. Random Signal Testing

보통 identification 방법이라고 불리는 기법이며 주파수응답이나 펄스방법이 deterministic한 반면 이 방법은 확률적 모델에 기초한다. discrete time(z) domain에서 입출력 관계식을 식(4-2)와 같이 표현하고 least square estimator나[30] maximum likelihood estimator를[31] [32]사용한다.

$$A_z Y_t = B_z U_t + C_z E_t \qquad (4-2)$$

excitation source로는 white noise가 가장 이상적이나 pseudo-random binary sequence(PRBS)를 사용해도 white noise에 가까운 특성을 얻을 수 있다고 한다. 이 방법은 모델의 적절여부가 모델 identification에 사용한 trajectory에 의존하여 모델의 독립적 검증이 어렵고 closed loop에서 identification할 경우 기법의 신뢰성에 의문이 제기되고 있다. Bell은[21] closed loop운전에서 얻은 데이터를 이용 IM기법을 적용한 결과 DM기법보다 더 많은 인력이 소요되었고 simulation의 並用이 필요했음을 보고하고 있다.

5. 결 론

전력계통 규모의 확장, 전원입지의 원격화, 원자력발전의 증가, 효율적 에너지 사용의 필요성은 파워플랜트의 운전모드의 급격한 변화를 요구하고 있다. 새로운 운전모드를 검토함에 있어 플랜트 모델은 필수적인 도구이며 발표된 문헌들을 중심으로 모델링 노력을 소개하였다. 특히 우리나라의 경우 원자력발전 비중이 최근에 급속히 증가하여 파워플랜트의 새로운 운전모드 채용이 불가피하여 이 분야연구에 대한 투자 및 인력의 양성은 당면과제라 하겠다.

참 고 문 헌

1) Bonnevile Power Administration, "Areas of Interest for Automatic Generation Control," Unpublished Memcrandom, 1976

2) Federal Power Commission, "Prevention of Power Failures", U.S. Government Printing Office, Washington D.C, 1967

3) H. Nam, "Design of Coordinated Economic Areawise Automatic Generation Control," MS thesis, University of Houston, 1980

4) R.D. Hottenstine, "Meeting the Industry's Needs in Dynamic Modeling," Boiler Modeling, MITRE Co, 1974

5) Dapartment of Energy, U.S.A, "System Engineering for Power Research and Dovelopment Announcement : B. Electric Generating Plant Control," Department of Energy ET-78-D-01-3038, 1978

6) L.A. Fink, "Evolution of a Successful Modeling Program," Boiler Modeling, MITRE Co., 1974

7) D.A Berkowitz, R.T. Toner and A.L. Markunas, "Dynamic Model for Boston Mystic No. 4," Boiler Modeling, MITRE, 1974

8) A. Ray and D.A. Berkowitz, "design of a Practical Controller for a Commercial Scale Fossil Power Plant," Trans, of ASME, 101, 1979

9) P.B. usoro, modeling and Simulation of a Drum Boiler-Turbine Power Plant under Emeryeney state Control, MS thesis, MIT, 1977

10) J.P. McDonald, H.G. Kwatny and J.A. Spare," A nonlinear Model for Reheat Boiler Turbine Generator System, Part I and Ⅱ," Proc of the 12th Joint Automatic Control Conference, 1971

11) H. Nam, Modeling and Control System Design Study of a Coal Fired Power Plant, P.A.D. thesis, the University of Texas at Austin, 1986

12) G.Y. Masada and D.N. Wormley, "Dynamic Model of a 1400MW Supercritical Pressure Steam Plant," ASME paper 82-JPGC-13

13) F. Fenton, "Manufacturer's View Point in Utilizing Boiler Dynamic Modelling," Boiler Modeling, MITRE, 1974

14) K.L. Chien, et. al., "Dynamic Analysis of a Boiler," Trans, ASME Series A, System Eng for Power, vol. 80. 1958

15) H. Nicholson, "Dynamic Optimization of a Boiler," proc. IEE, vol.111, No.8, 1964

16) J.H. Daniels, M Enns, R.D. Hottenstine, "Dynamic Representation of a Large Boiler-Turbine Unit," ASME Paper No. 61-SA-69, 1961

17) F.T. Thomson, "A Dynamic Model of a Drum-Type Boiler System," IEEE, PAS-86, No.5, 1967

18) J.P. McDonald, "Fulton Station : Plant Dynamic Simulation," Boiler Modeling, MITRE, 1974

19) P.J. Clelland, "Recent Furnace Draft Control Considerations," proc IEEE Conference on Decision and Control, 1977

20) P.J. Clelland and H.G. Kwatny, "Modeling and Simulation of Gas Dynamics in a Fossil-Fuel Power Boiler," ISA Paper 73-505, ISA Annual Conference and Exhibit, 1973

21) 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

22) W.H. Mc Adams, Heat Transmission, McGraw-Hill Book Co., 1954

23) J.P. Holman, Heat Transfer, McGraw-Hill Book Co., New York, 1981

24) ASME, ASME Steam Tables, New York, 1979

25) J. Thatcher, PAG Software Manual, the Performance Assurance Group, the University of Texas at Austin, 1981

26) Babcock and Wilcox, Steam / Its Generation and use, Babcock and Wilcox Co., 1975

27) K.A. Kobe, Thermochemistry of Petrochemicals Technical Report, Bureau of Engineering Research, the University of Texas at Austin, 1958

28) J.K. Salisbury, Steam Turbines and Their Cycles, Robert E. Krieger Publishing Co., New York, 1950

29) T.W. Kerlin, "Dynamic Testing in Nuclear Reactors for Model Verification", Boiler Modeling, MITRE, 1974

30) C.B. Speedy, R.D. Bell and G.C. Goodwin, "Dynamic Modeling of a Steam Generator using Least Square analysis," Proc. of Joint Automatic Control Conference, 1970

31) R.L. Morris, Low Order Identification for a Drum Type Power plant, MS thesis, MIT, 1978.

32) R.L. Moore and F.C. Scheppe, "Model Identification for Adaptive Control of a Nuclear Power Plant," Automatica, 1973

33) M.L. Crenshaw, et. al., "Excitation system Models For Power System stability studies," IEEE Trans., PAS-100, No.2, 1981

34) P.M. Anderson and A.A. Fouad, Power System Control and stability, volumel, the Iowa State University Press, Iowa, 1977