발전소 시뮬레이션 툴을 위한 열수력 모델 구현

손기헌, 조병학, 김동욱, 이용관
(한전 전력연구원)

Implementation of Thermal-Hydraulic Models into a Power Plant Simulation Tool

Gi Hun Son, Byung Hak Cho, Dong Wook Kim, Yong Kwan Lee
(KEPRI)

요 약

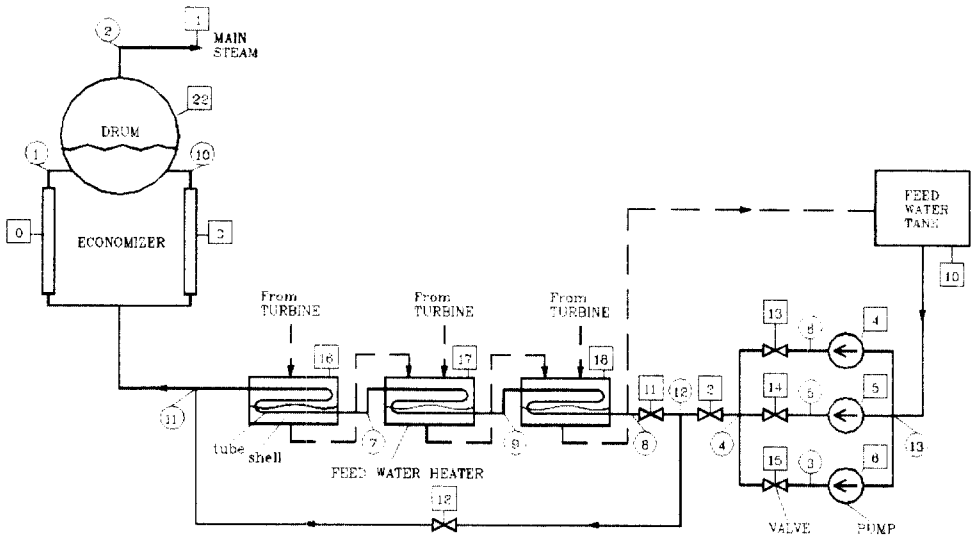
한전 전력연구원은 발전소의 복잡한 계통을 효과적으로 시뮬레이션하는 GUI(Graphical User Interface)에 기반을 둔 시뮬레이션 툴(PowerSim)을 독자적으로 개발하였다. 본 논문에서는 열교환기, 펌프, 밸브, 탱크등의 구성요소에 적합한 열수력 모델을 개발하고, 이 모델을 ORCAD로부터 생성된 Netlist의 연결정보에 맞게 연결하여 발전계통을 시뮬레이션하는 과정을 서술하였다. 또한, 발전계통의 열수력현상을 지배하는 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식을 실시간에서 풀 수 있는 알고리즘을 제시하였다.

1. 서론

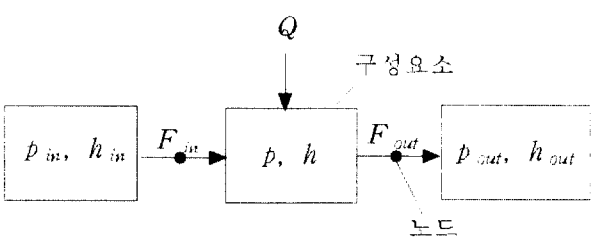
발전소는 화석에너지 또는 원자핵에너지를 이용하여 급수를 증기로 변환하고, 증기에너지를 이용하여 터어빈을 구동함으로 전력을 생산하는 시스템이다. 이러한 발전계통에는 열교환기, 펌프, 밸브, 탱크등의 구성요소가 복잡하게 연결되어 있기 때문에, 이를 시뮬레이션하는 프로그램을 수작업으로 코딩하는 것은 매우 비효율적이다. 이러한 발전소의 복잡한 계통을 효과적으로 시뮬레이션하기 위해, US3(Unix Simulation Software System), MMS(Modular Modeling System), PC-TRAX등의 GUI(Graphical User Interface)에 기반을 둔 시뮬레이션 툴이 개발되었다. 그러나, 국내에서는 아직까지 발전소를 시뮬레이션하는 툴이 개발되어 있지 않으며, 발전소의 운전원 훈련용 시뮬레이터와 보일러/터어빈 제어시스템의 검증용 시뮬레이터를 개발할때마다 외국의 시뮬레이션 툴을 수입해야하는 실정이다. 이에따라, 한전 전력연구원은 지난 10년간의 시뮬레이터 개발 경험[1]을 바탕으로 발전소 시뮬레이션 툴을 자체적으로 개발하는 연구를 수행하였다. 그 결과, 기존의 상용 소프트웨어인 ORCAD를 모델 builder를 위한 GUI로 활용함으로, Windows(NT)환경에서 운용되는 시뮬레이터 개발용 툴(PowerSim)을 개발하기에 이르렀다. ORCAD를 이용하여 열교환기, 펌프, 밸브, 탱크등의 발전소 구성요소의 심벌을 라이브러리화하고, 이로부터 각 구성요소간의 연결 정보를 갖는 Netlist를 얻는 과정과 시뮬레이터 환경을 구축하는 과정은 그 특성상 다른 논문에 분리하여 기술하였다[2]. 본 논문에서는 PowerSim에 적용된 발전소 구성요소의 열수력 모델과, 이 모델을 ORCAD로부터 생성된 Netlist의 연결정보에 맞게 연결하여 발전계통을 시뮬레이션하는 과정을 서술하였다. 본 연구에서 적용한 시뮬레이션 대상은 호남화력 발전소의 보일러 드럼 수위를 제어하는 시스템과 연계된 급수계통이다. <그림 1>은 호남화력 발전소의 급수계통을 AUTOCAD를 이용하여 개략적으로 도식화한 것이다.

2. 열수력 모델

<그림 2>는 열교환기, 펌프, 밸브, 탱크등과 같은



<그림 1> 호남화력 급수계통



<그림 2> 구성요소간의 연결상태

구성요소간의 연결상태를 나타내며, 노드는 각 구성요소를 연결하는 점으로 정의되었다. 구성요소의 열수력 현상을 지배하는 방정식은 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식이며, 다음의 형태로 표현할수 있다.

$$V\frac{d\rho}{dt} = F_{in} - F_{out} \quad (1)$$

$$F = a\Delta p + b \quad (2)$$

$$V\frac{d}{dt}\rho h = F_{in}h_{in} - F_{out}h_{out} + Q + V\frac{dp}{dt} \quad (3)$$

여기서, V, Q는 구성요소의 부피, 입력 열량이며, a, b는 일반적으로 압력의 함수이다. F, h, p 는 위의 식으로부터 결정되어야 하는 유량, 엔탈피, 압력이다. 밀도, ρ, 는 p, h의 함수형태로 표현되는 상태방정식에의해 결정되며, 이 연구에서는 EPRI의 RETRAN 마뉴얼에서 제공된 상태방정식을 사용하였다[3].

<그림 1>에 나타낸 호남화력 발전소의 급수계통은 다수의 펌프, 밸브, 급수 열교환기와 절탄기, 보일러 드럼으로 구성되어 있다. 각 구성요소의 열수력 모델링 과정을 간략하게 서술하면 다음과 같다.

보일러 드럼과 급수 열교환기의 셸측에서는 물과 증기의 이상유동이 존재하며, 이의 모델링을 위해 열역학적 평형상태의 조건을 사용하였다. 또한, 드럼과 같이 부피가 큰 구성요소의 지배방정식을 시간에 대해서 차분화할때는 계산이 용이한 explicit 방법을 사용하였다. 이 경우, 식(1)과 식(3)는 다음과 같이 표현된다.

$$\rho^{n+1} = \rho^{n} + \frac{\delta t}{V}(F_{in} - F_{out}) \quad (4)$$

$$(\rho h - p)^{n+1} = (\rho h - p)^{n} + \frac{\delta t}{V}(F_{in}h_{in} - F_{out}h_{out} + Q) \quad (5)$$

여기서, δt는 수치계산에 사용된 시간 간격이며, 위첨자, n은 $n\delta t$를 나타낸다. 두 개의 미지수(p, h)를 갖는 식(5)를 풀때는 상태방정식 $\rho = \rho(p, h)$와 결합된 Newton-Raphson iteration법을 사용하였다.

절탄기와 같은 열교환기나 부피가 작은 구성요소에 에너지 보존방정식을 적용할때는 다음과 같이 시간간격의 수치적인 제한이 없는 implicit 방법을 사용하였다.

$$h^{n+1} = \frac{V\rho^{n}h^{n} + \delta t(F_{in}h^{n}_{in} + Q)}{V\rho^{n} + \delta t\, F_{in}} \quad (6)$$

위의 식에서, 압력변화량은 작기 때문에 무시되었고, $h_{out} = h$의 완전혼합 조건이 사용되었다.

급수 열교환기의 관-셸간의 열교환을 표현하는 식

은 셸측에 물이 접하는 구역(drain section)과 증기가 접하는 구역(steam section)으로 구분하여 표현된다.

drain section:

$$h_{shell,out} = h_{shell} - Q_{drain}/F_{shell,out}$$
$$h_{tube} = h_{tube,in} + Q_{drain}/F_{tube}$$
$$Q = (UA)_{drain}(T_{shell,out} - T_{tube,in} - T_{shell} + T_{tube}) / \ln[(T_{shell,out} - T_{tube,in})/(T_{shell} - T_{tube})]$$
$$Q_{drain} = Q_{drain} + \alpha(Q - Q_{drain}) \quad (7)$$

steam section:

$$h_{tube,out} = h_{tube} + Q_{steam}/F_{tube}$$
$$Q = (UA)_{steam}(T_{shell} - T_{tube} - T_{shell} + T_{tube,out}) / \ln[(T_{shell} - T_{tube})/(T_{shell} - T_{tube,out})]$$
$$Q_{steam} = Q_{steam} + \alpha(Q - Q_{steam}) \quad (8)$$

여기서, 열교환기의 열전달계수 UA는 유량과 증기/물 부피비의 함수이며, $T = T(p, h)$이다. 위 식을 풀 때, 식의 비선형성 때문에 이완계수(α)를 도입하였고, 그값은 시행착오를 거쳐 0.1로 정하였다.

급수계통의 운동량 보존식은 유량과 압력의 관계식으로 표현될 수 있다. 펌프를 포함하지 않는 유로에서, 대부분의 압력손실은 유량의 제곱에 비례함으로 다음의 관계식이 성립한다.

$$F = K\sqrt{\Delta p} \quad (9)$$

여기서, K는 유로의 특성에 의해 결정되는 상수이다. 펌프를 포함하는 유로에서는 다음과 같은 유량, 압력, 펌프속도(N)의 관계식을 이용하였다.

$$F = \sqrt{C_1 \Delta p + C_2 N^2} \quad (10)$$

여기서, 상수, C_1, C_2, 는 펌프의 성능곡선으로부터 결정된다.

압력과 유량을 구하기 위해서, 위에 표현된 유량과 압력의 관계식을 질량보존식(1)에 대입하였다. 급수가 통과하는 유로에서는 증기가 통과하는 유로와는 달리 비압축성의 조건을 사용할수 있음으로, 식(1)에서 밀도 변화량은 무시될수 있다. 그 결과, 다음과 같은 압력방정식을 얻었다.

$$-a_{in}p_{in} + (a_{in} + a_{out})p - a_{out}p_{out} = b_{in} - b_{out} \quad (11)$$

의의 식으로부터, 압력을 계산하기 위해서는 이웃하는 노드-노드간의 압력이 동시에 풀어져야하는 행렬연산이 필요함을 알 수 있다. <그림 1>에 나타난 바와같이 발전소의 구성요소는 다수의 다른 요소와 연결되어 있음으로 이를 수작업으로 코딩하는 것은 매우 비효율적이다. 이 연구에서는 ORCAD로부터 생성된 Netlist를 이용하여 압력을 자동으로 구하는 방법이 검토되었다.

3. Netlist를 이용한 구성요소 모델의 계통화

<표 1> 급수계통의 Netlist을 포함하는 파일

Component Connection List : c:/ctest/fw@flow.con

Node	Connected Components								Component Type			
	Input				output							
	(#)	1	2	3	(#)	1	2	3	1	2	3	4
0001	1	0			1	22			208	203		
0002	1	22			1	1			203	207		
0003	1	6			1	15			201	202		
0004	3	14	13	15	1	2			202	202	202	202
0005	1	5			1	14			201	202		
0006	1	4			1	13			201	202		
0007	1	17			1	16			205	205		
0008	1	11			1	18			202	205		
0009	1	18			1	17			205	205		
0010	1	0			1	22			208	203		
0011	2	16	12		1	0			205	202	208	
0012	1	2			2	12	11		202	202	202	
0013	1	10			3	5	6	4	207	201	201	201

앞에서 언급한바와 같이, ORCAD로부터 생성된 파일을 해독하는 프로그램으로부터 <표 1>에 나타낸 노드-구성요소간의 연결 정보를 포함하는 파일을 생성할 수 있다[2]. <표 1>에서 구성요소의 종류(Component Type)를 나타내는 숫자, 201, 202, 203, 205, 207, 208은 각각 펌프, 밸브, 드럼, 급수가열기, 경계, 절탄기에 해당한다. 각 구성요소(Component)에 주어진 번호는 사용자가 입력하는 데이타가 아니라 ORCAD에 의해 무작위로 생성된 번호이며, 이 번호의 연결상태를 보기위해 <그림 1>에 그 번호를 표시하였다. 이 그림에서 원속에 들어 있는 숫자는 노드의 번호를, 사각형속에 있는 숫자는 구성요소의 번호를 나타낸다. 이 번호의 연결상태를 통해 각 노드에 연결되어 있는 구성요소의 정보를 얻을수 있

다. 그러므로, <표 1>에 나타난 Netlist 파일은 <그림 1>에 도식화된 계통도에서 제공하는 모든 정보를 갖고 있으며, 각 구성요소의 모델을 연결하여 급수계통을 모델링하기위한 입력데이타로 이용되었다.

에너지 보존식(6)으로부터 엔탈피를 구하거나 압력방정식(11)로부터 압력을 구하기 위해서는 구성요소-구성요소간의 연결상태를 알아야하며, 이는 노드-구성요소간의 Netlist로부터 얻어졌다. 구성요소-구성요소간의 연결 정보로부터 에너지 보존식을 어려움없이 풀 수 있다. 그러나, 압력방정식을 풀기위해서는 다음과 같은 행렬연산이 필요하다.

$$A\vec{p}=\vec{q} \quad \rightarrow \quad \vec{p}=A^{-1}\vec{q} \qquad (12)$$

위의 역행렬을 구하는 과정은 열수력모델에서 가장 시간이 많이 소요되는 과정이며, 이를 실시간으로 수행하기 위해서는 효율적인 알고리즘이 필요하다. 행렬 A의 특징은 영이 많이 포함된 sparse 행렬이며, 영이 아닌 부분은 ORCAD에 의해 지정된 구성요소 번호의 무작위성때문에 연속성이 없다는 점이다. 또한, 행렬 A는 상수 행렬이 아니라 시간에 따라 변하기 때문에 역행렬을 구하는 과정은 매시간마다 수행되어야한다. 본 연구에서 개발된 압력벡터를 구하는 알고리즘의 기본 개념은, 기존에 알려진 Gauss Elimination 방법을 사용하되 행렬 A의 영에 해당하는 부분은 연산이 되지않도록 한다는 것이다. 그 알고리즘을 다음과 같다.

(i) 행렬 A의 영이 아닌 부분을 연속적으로 저장하기 위한 순서를 특정한 행렬에 저장한다.

(ii) Gauss Elimination에 동반되는 연산 순서를 *MIND*, *MN1*, *MN2*, *MN3*의 벡터에 저장한다.

(iii) 행렬 A의 영이 아닌 부분을 AX벡터에 연속적으로 저장하고 식(12)의 $\vec{q}$ 를 P 벡터에 저장한다.

(iv) 단계 (ii)에서 저장된 순서대로 연산을 수행하여 압력을 나타내는 P 벡트를 구한다. 이 과정을 나타내는 FORTRAN 프로그램은 다음과 같다.

```
      DO 300 K=1,KM
        IND=MIND(K)
         N1= MN1(K)
         N2= MN2(K)
C
        IF(IND .EQ. 1) THEN
        FAC=1./AX(N1)
        P(N2)=P(N2)*FAC
        ELSEIF(IND .EQ. 2) THEN
        AX(N1)=AX(N2)*FAC
        ELSEIF(IND .EQ. 3) THEN
        N3= MN3(K)
        FAC=-AX(N1)
        P(N2)=P(N2)+P(N3)*FAC
        ELSEIF(IND .EQ. 4) THEN
        AX(N1)=AX(N1)-AX(N2)*FAC
        ENDIF
300     CONTINUE
```

이 알고리즘에서, 단계 (i)과 (ii)는 모델계산 전에 한번만 실행되며, 매시간 모델계산 동안 수행되는 단계 (iii)과 (iv)에서는 행렬 A의 영에 해당하는 부분에 대한 불필요한 연산이 포함되지 않는다.

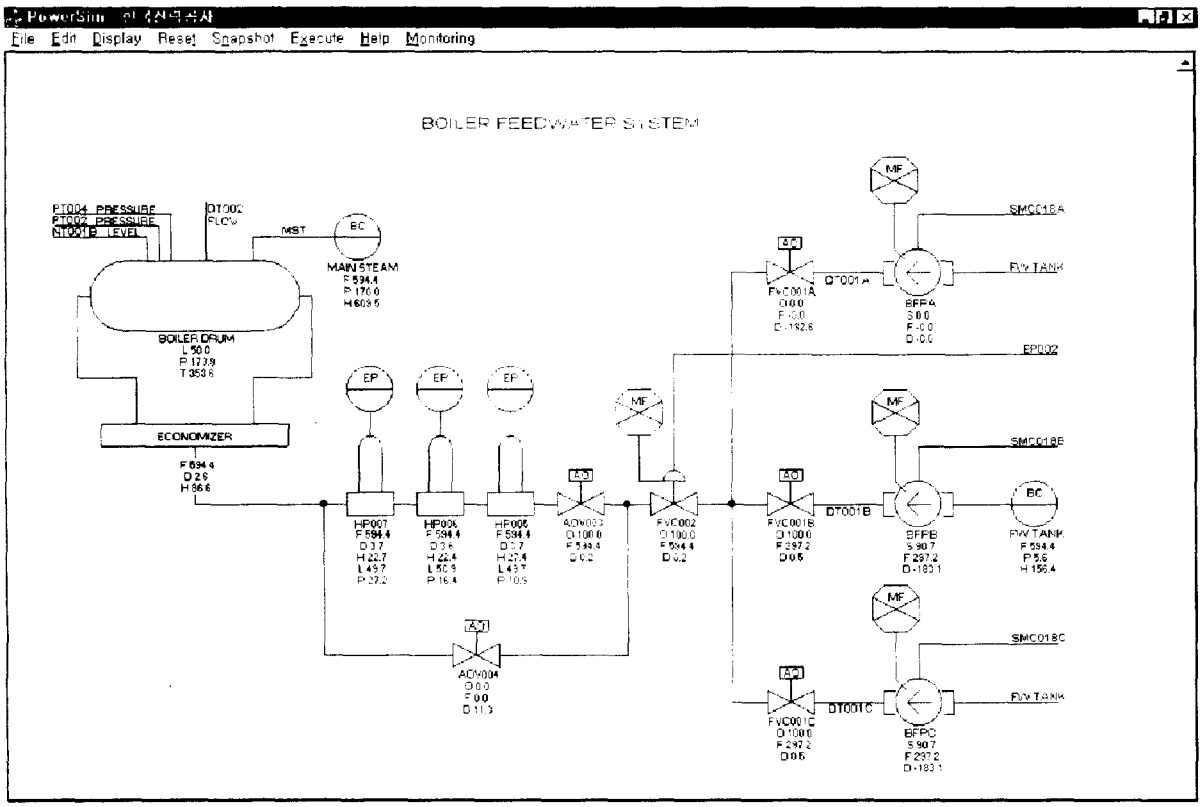
4. 시뮬레이션 결과

위에 설명한 발전소의 열수력모델을 이용하여 호남화력의 급수계통을 시뮬레이션한 결과를 <그림 3>에 나타내었다. <그림 3>은 ORCAD에서 편집된 그림을 Microsoft Visual C++을 이용하여 Windows 환경의 그림으로 변환되어 생성되었다 (참고 [2]). 또한, 열수력모델에 필요한 입력데이타는 각 구성요소에 배정된 대화상자를 통하여 입력되었다. 급수계통의 시뮬레이션에서, 압력방정식의 경계조건으로 급수탱크의 압력과 주증기의 압력을 선택하였다. <그림 3>에서, 각 구성요소 밑에 출력된 숫자는 드럼의 수위를 50%로, 압력을 174 kg/cm^{2}으로 유지했을 때 유량(F), 엔탈피(H), 압력차(D), 수위(L), 압력(P), 밸브의 개도(O)등의 계산 결과를 나타낸다. 여기에 나타난 급수계통의 열수력 계산은 드럼의 수위와 압력을 제어하는 로직과 연계되어 수행되었다. <그림 3>에 나타난바와 같이, 정상상태에서 급수탱크로부터 입력되는 유량은 주증기로 출력되는 유량과 같다. 이는 질량 보존을 지배하는 압력방정식이 바르게 풀렸음을 증명한다.

5. 결론

본 논문에서는 한전 전력연구원에서 독자적으로 개발한 Windows 환경에서 운용되는 GUI에 기반을 둔 발전소 시뮬레이션 툴(PowerSim)에 구현된 열수력모델링에 대해 서술하였다. PowerSim을 이용하여 호남화력의 급수계통을 시뮬레이션함으로 PowerSim의 모델 builder 기능이 정상적으로 수행됨을 증명하였다.

추후로 급수계통뿐만아니라 연료계통, 통풍계통, 증기계통, 복수계통을 구성하는 요소에대한 열수력 모델을 추가하여, 발전소 전계통을 시뮬레이션하고자



<그림 3> 호남화력 급수계통의 시뮬레이션 결과

한다.

참고문헌

[1] 이용관 외 9명, "발전소 운전원 훈련용 모의제어반 국산화 개발 적용 [최종보고서]", KEPRI Technical Report, 1998.

[2] 조병학 외 5명, "Windows(NT) 환경의 발전소 실시간 시뮬레이터 개발 툴", 한국시뮬레이션학회 '98추계 학술대회 발표예정, 1998.

[3] McFadden, J.H. et. al., "RETRAN-02-A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow Systems, Volume 1: Theory and Numerics(Revision 5)", EPRI NP-1850-CCM, 1992.