

Power Plant 설비 효율 향상을 위한 Simulator

박세영 - 세이 플랜트 대표
syPark@sayplant.com

현대는 고도의 산업화와 정보화 사회로 발전함과 동시에 생활 수준의 도시화 및 고급화에 따라 전기 에너지의 수요는 더욱 늘어나고 있다. 전기 에너지는 주로 석유, 석탄, 가스 같은 화석 연료나 우라늄 같은 1차 에너지를 사용하여 발전 설비에서 생산되는데, 발전 설비의 효율을 향상하기 위한 노력은 열역학적인 면에서나 기계 성능 면에서 끊임없이 계속되고 있다. 특히 우리나라와 같이 대부분의 1차 에너지 원을 수입에 의존하고 가격이 급등하는 실정에서는 효율적인 에너지 활용이 더욱 절실한 문제로 부각되고 있다.

특히 발전 설비에 대한 성능 개선, 운전 위험 감소, 예상치 못한 가동 중단, 열 효율 향상, 환경 문제 개선, 운전에 대한 안전 및 신뢰 확보는 더 이상 선택 사항이 아니다.

따라서 발전 설비의 설계부터 설비의 효율 검증, 운전 조건 또는 설비의 변경 및 고장으로 인한 성능 변화를 소프트웨어로 Simulation 하고 할 수 있는 제품인 PEPSE(Performance Evaluation of Power System Efficiencies)의 다양한 기능 위주로 설비 개선을 위한 방법을 설명코자 한다.

I. PEPSE 개요

PEPSE는 전기를 생산하는 플랜트의 성능을 계산하는 정상상태¹의 에너지 수지²를 위한 소프트웨어 프로그램으로, 세계 도처의 화력발전소, 원자력발전소, 가스터빈 발전소, 복합화력 발전소 그리고 불규칙적인 유체 Stream을 포함한 플랜트에서 사용하고 있다.

플랜트 분석 모델은 사용자가 실제 플랜트의 Components의 연결을 모사한 도면(Schematic)을 사용하여 만들 수 있다.

사용자는 Windows 환경의 컴퓨터에서 각 구성 요소(Component)의 Library³를 화면에

Drag & Drop 함으로써 이 Schematic을 그릴 수 있으며, 이 Library는 어떤 Power Plant에서도 사용할 수 있도록 모든 종류의 Component를 포함하고 있다.

PEPSE는 발전소 전체 또는 개별 Component의 분석을 설계하고, 제어 가능한 매개변수(Parameter)를 정량화하기 위하여 경계 조건의 변화를 분석하고, 사용할 테스트 데이터 양을 줄여서 사용하기 편리한 양식(Form)을 만들고, "What-if"⁴ 연구를 수행하고, 다양한 Engineering 업무를 수행하기 위하여 사용한다.

¹ 정상상태 : Steady-State

² 에너지 수지 : Energy Balance

³ Library : 모든 컴퓨터 사용자가 사용할 수 있는 미리 만들어진 프로그램이나 루틴들의 모임.

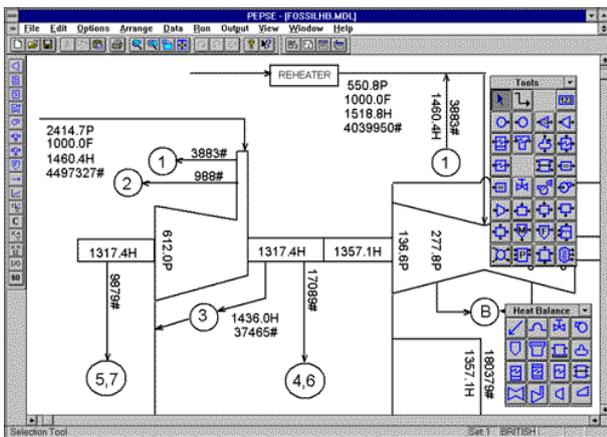
⁴ What-if : 기업 운영에 영향을 주는 여러 요소들 간에 적절한 관계를 세워놓고 각 요소를 변화 시킬 때 관계에 따라 전체 결과가 어떻게 나올 것인지에 대한 검토.

PEPSE 는 세계도처에 1000 여명의 사용자가 있으며, 미국의 TOP 100 Utility 기업체의 70%를 포함해서 해외 15 개국에서 쓰여지고 있다.

PEPSE 는 25 년 동안 상업용으로 개발된 소프트웨어 상품이며, 지난 20 년 동안 사용자들은 아이디어를 교환하고 보완점을 제안하고 새로운 기술을 배우기 위해 매년 User Group Meeting 을 가졌다. 이 User Group Meeting 웹사이트에는 사용자들이 작성하여 발표한 100 여 개의 기술 논문이 있다. 또한 이 웹사이트는 매년 개최하는 User Group Meeting 에 대한 정보도 포함하고 있다.

1. PEPSE 사용 방법

PEPSE 는 사용하기 쉽다. PEPSE 는 윈도우 환경의 GUI⁵를 이용하여 화면상의 모듈화 (Modular⁶)된 ICON 을 선택하고 이를 끌어서 놓으면 (Drag & Drop) 플랜트 시뮬레이션 모델이 만들어진다. PEPSE 의 Module 화 된 특성으로 인하여, 어떤 플랜트의 열역학 공정 (Cycle)도 모사 (Simulation)할 수 있다.



정보를 교환할 때 그래픽을 통하여 작업할 수 있는 환경으로, 마우스를 이용하여 화면에 있는 메뉴를 선택하여 작업한다.

⁶ Modular : 큰 프로그램을 작성할 때 논리적으로 나뉘어질 수 있는 프로그램의 일부분을 따로 분리하여 독립적으로 작성하는 방법

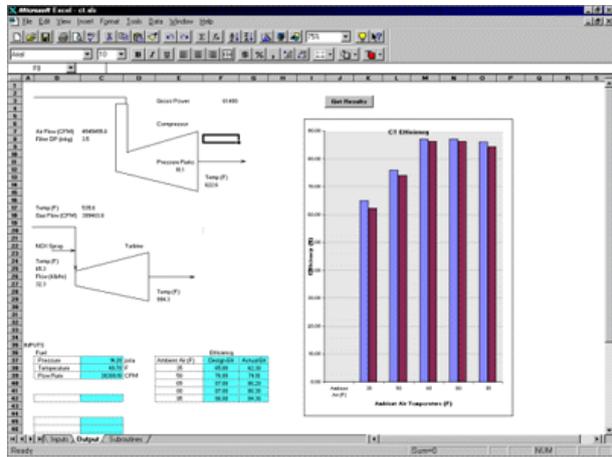
메뉴들과 대화식 사용 방법 (Dialog)으로 Schematic 의 작성, 데이터 입력, 결과물 표시 같은 기능을 사용하여 전체 공정을 쉽게 Simulation 할 수 있으며, 내부의 Routine 검사 기능으로 누락된 데이터를 찾아주고, 사용자에게 분석 결과를 즉시 보여준다.

2. 상세 모델 구성

- 1) Design Equipment (설비 설계)
Architect/Engineer 회사들은 PEPSE 의 다양한 기능들을 사용하여 플랜트, 터빈 사이클 열효율 그리고 구성요소와 유량 Stream 에 대한 Configuration 을 결정하기 위하여 Power Plant 의 설계 절차에 사용한다.
- 2) Confirm or Predict Data (확인 및 예측 데이터)
Test Engineers 는 플랜트 테스트 데이터를 처리하거나, 이전 테스트와 비교하기 위해 해야 할 수많은 작업 시간을 절약하기 위하여 PEPSE 를 사용한다.
- 3) Assess Performance (성능 평가)
플랜트 엔지니어들은 현재 발전소의 성능 (Performance)를 분석하거나, 분석을 위하여 제어 가능한 변수들을 찾아낸다.
- 4) Pinpoint Malfunctioning Hardware (하드웨어의 오동작 위치 확인)
엔지니어들은 PEPSE 를 장비의 성능 저하 문제를 진단하는데 사용한다.
- 5) Assess Planned Modifications (계획된 장비 교체 및 수리를 평가)
엔지니어들은 장비교체가 필요한지 아닌지 결정하기 위해 PEPSE 를 사용할 수 있다

3. OLE AUTOMATION

OLE Automation 은 MS Word, Excel, Visual Basic 또는 다른 다양한 프로그램에서 PEPSE 의 계산 기능을 실행할 수 있는 기능을 제공한다. OLE Automation 을 이용하여 PEPSE 의 계산 결과를 가져와서 다른 프로그램에 갖다 놓을 수 있으며, 필요한 데이터를 스프레드시트나 워드프로세서와 같은 다른 프로그램으로부터 PEPSE 안에 입력할 수 있다.



4. SPECIAL FEATURES

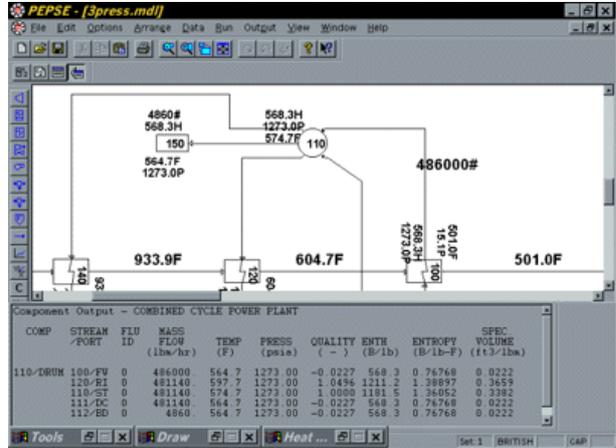
PEPSE 는 플랜트 제어 시스템을 시뮬레이션, 사용자 정의한 알고리즘 입력, 방정식 입력, 그리고 다른 컴퓨터와 통신할 수 있는 강력한 도구들을 제공한다.

5. DATA PRESENTATION

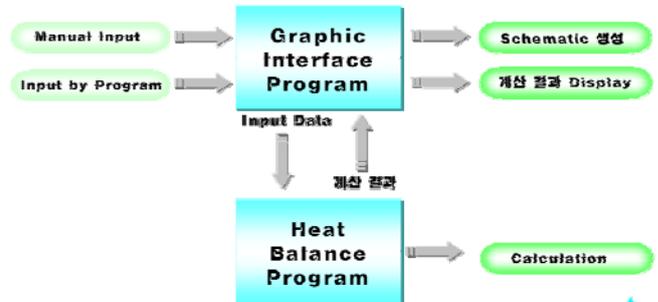
상세한 결과 표시는 플랜트의 성능과 응답을 이해하고 해석하는데 중대한 역할을 한다.

PEPSE 는 표와 그래픽 데이터로 상세 결과를 제공하고 Presentation 도구에 결과를 나타낸다.

표 데이터는 사이클 안의 모든 포인트에서 온도, 압력, 유량, 엔탈피 및 다른 열역학 특성들을 제공한다.



이들 결과는 사이클 내의 모든 Class 또는 Component Hardware 의 집단에 대한 Component 특성 데이터를 제공한다. 터빈그룹을 예로 들면, 터빈 단계와 부분별 효율, 출력, 압력 비, 유량 계수, 그리고 다른 중요한 데이터들을 제공한다. 이러한 모든 데이터는 그래픽 상에서도 나타난다.



II. PEPSE 의 사용 목적

PEPSE 는 열역학적 시스템의 정상상태 (Steady-State) 성능을 모델링 하기 위한 소프트웨어이다.

PEPSE 는 증기와 가스를 이용하는 전력 발전소를 모델링 하는데 주로 많이 사용하지만,

다른 연료를 사용하는 발전소에서도 사용에 제한은 없다.

PEPSE 는 두 개의 분리된 컴퓨터 프로그램을 가지고 있으며, 파일을 통하여 상호 통신한다.

첫 번째는 윈도우를 바탕으로 한 그래픽 인터페이스 프로그램으로, 발전소의 Schematic 을 작성하고, 필요한 데이터 입력, 계산 결과를 표현하기 위하여 사용한다. 하지만 스스로 계산할 수 있는 기능은 없다.

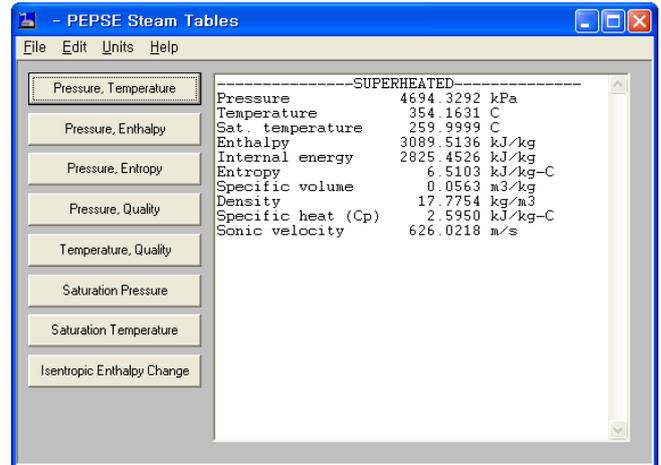
두 번째는 PEPSE 열 수지 (Heat Balance)를 위한 열수지 프로그램으로 그래픽 인터페이스 프로그램으로부터 입력파일을 받아서 계산을 수행하고, 그래픽 프로그램에서 사용할 결과 파일을 작성한다.

PEPSE 는 엔지니어들이 시스템 반응을 분석할 수 있도록 개발된 도구로써 엔지니어들이 개발하였다.

PEPSE 는 터빈사이클, 화석연료 보일러, 복합사이클 그리고 열 회수처리들을 포함하는 매우 다양한 플랜트의 모델을 만들기 위하여 사용된다.

PEPSE 는

- 증기 테이블 (Steam Table)
 - 용수 전달 요소들 (Water Transport Properties)
 - 가스 속성들 (Gas Properties)
 - 연소 화학 반응 (Combustion Chemistry)
 - 열전달 상호관계 (Heat Transfer Correlation)
 - 수력학적 상관관계 (Hydraulics Correlation)
- 들을 포함하고 있다.



PEPSE 는 각 시스템을 개별적인 Components 와 Stream 의 집합체 (Collection)로써 취급한다.

Components 는 시스템 설비 (예, 터빈, 콘덴서, 피드워트 히터 및 펌프)를 표현하며, Stream 은 한쪽 Component 에서 다른 쪽 Component 로 유체의 전송을 표현하기 위하여 각 Component 를 연결하기 위하여 사용한다.

PEPSE 는 지정한 Components 와 Streams 의 내부를 연결하고, 시스템의 성능 (Performance)와 반응 (Behavior)를 계산한다.

연결 순서는 어떤 시스템 구성을 가상적으로 모델링할 수 있도록 임의로 할 수 있다.

PEPSE 는 개별적인 MASS & ENERGY BALANCE 를 수행하는 시점에서 각각의 모델화 된 Components 와 Streams 를 검사한다. 이 결과는 전체 시스템의 성능 특성 (Performance Characteristics)을 계산하는데 사용한다.

PEPSE 의 디자인은 극대로 다양하게 응용할 수 있도록 만들어져 있으며, 모델링 절차는 4 가지 기본 단계로 분류된다.

- 1) 사전에 정의된 PEPSE Components 를 표현하기 위한 Icon 의 라이브러리를 사용하여 모델을 작성함,
- 2) 필요한 모든 입력을 화면 상의 모델에 입력함.
- 3) 데이터를 처리 중에 모델을 실행하거나 PEPSE 를 명령함.
- 4) 모델 Schematic 또는 다른 Diagram 상에서 결과 또는 출력을 볼 수 있음 (예, 열 평형 도형)

III. PEPSE 통한 이익

PEPSE 는 발전소 정보를 쉽게 모델화 하기 위해 사용하며, PEPSE 를 통하여 분석 및 평가함으로써 이익을 얻을 수 있다.

- 운전 조건을 변화함으로써 얻을 수 있는 효과
 - 플랜트 성능상에서 설비 변경의 영향
 - 플랜트 성능상에서 장비의 영향,
 - 개별적인 구성요소 성능,
 - 플랜트 테스트 데이터
 - 발전소 설계
 - Vendor Claim
 - Feed-water Heater 설계 변경
- 또한 엔지니어들의 업무 수행에도 도움이 된다.
- 보일러 효율 계산
 - 최적화 연구
 - 민감도 연구

IV. PEPSE 에서 사용하는 용어 및 개념

PEPSE 에서 사용하는 가장 기본적인 용어는 Component 와 Stream 이며, 주로 사용하는 용어는 다음과 같다.

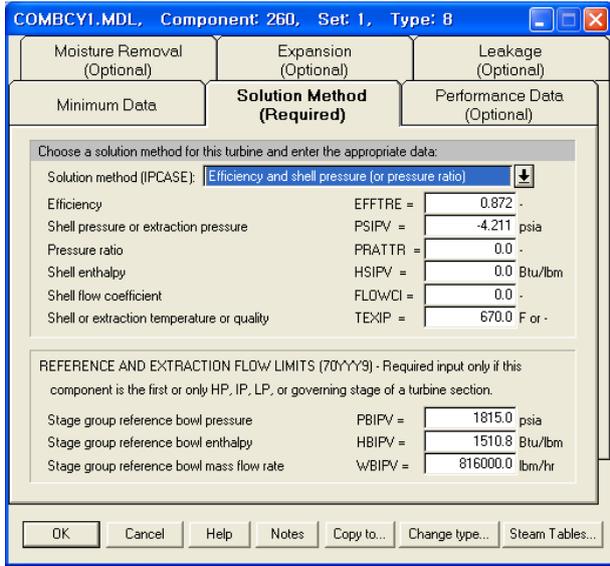
1. PEPSE Model

PEPSE 모델은 관심 있는 시스템의 그래픽 도식과 입력 데이터를 포함한다.

2. Components

PEPSE 의 Components 는 모델화된 시스템에서 장비를 Simulation 하기 위하여 사용한다. PEPSE 는 50 여개의 서로 다른 Components 를 포함하고 있으며, 8 개의 일반적인 범주로 구분된다.

- 1) Turbines
- 2) Feed-water Heaters 및 Condensers
- 3) Heat Exchangers
- 4) Source, Sink 및 Valves
- 5) Pumps, Fans, Compressors
- 6) Mixers
- 7) Splitters
- 8) 그외 구성요소들 -
Furnace/Combustors, Fluid Bed Combustors, 보일러 드럼, 석탄 분쇄기, 냉각 탑, 원자력 발전소의 증기 발생기, 가스 터빈 엔진, 그리고 원자로.



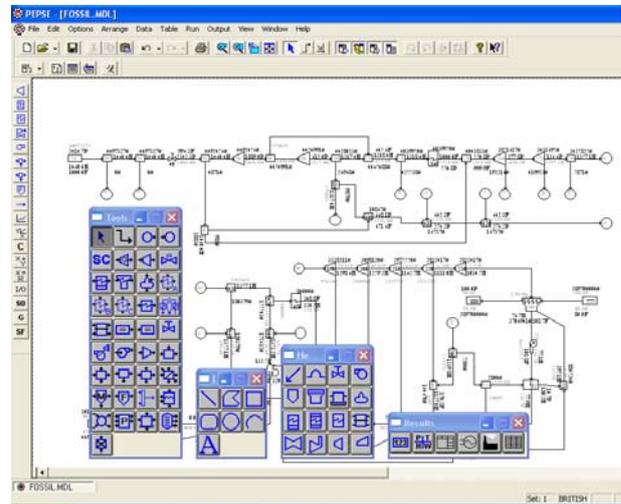
- 17 Feedwater Heater with Desuperheater, no Drain Cooler
- 18 Feedwater Heater with Desuperheater, Drain Cooler
- 19 Feedwater Heater with Desuperheater, no Drain Cooler
- 20 General Heat Exchanger
- 21 Rotary Regenerative Air Preheater
- 22 Nuclear Turbine Preheater
- 24 Fluid Bed Heat Exchanger
- 25 Fossil Boiler Reheater
- 26 Generator Cooler Heat Exchanger
- 27 General Heat Exchanger with Specified Heat Source
- 29 Fossil Boiler Radiant Stage
- 30 Infinite Sink
- 31 Infinite Source
- 32 Output Component
- 33 Input Component
- 34 Standard Valve
- 35 Throttle Valve
- 40 Steam Driven Pump
- 41 Electric Motor Driven Pump
- 42 Turbine Shaft Driven Pump
- 43 Electric Motor Driven Fan/Compressor

각 구성요소들은 하기와 같이 관련된 Type Number 를 가지고 있다. 예를 들면, Type 2 Component 는 Nuclear HP stage 그룹이다.

- 1 Nuclear Turbine Governing Stage
- 2 Nuclear Turbine High Pressure Stage
- 3 Nuclear Turbine Low Pressure Stage
- 4 Fossil Turbine Governing Stage
- 5 Fossil Turbine High Pressure Stage
- 6 Fossil Turbine Intermediate Pressure Stage
- 7 Fossil Turbine Low Pressure Stage
- 8 General Turbine Stage
- 9 Gas Turbine Expander
- 10 Condenser
- 14 Closed Feedwater Heater, Straight Condensing
- 15 Deaerator
- 16 Feedwater Heater with Integral Drain Cooler

- 44 Turbine Shaft Driven Fan/Compressor
- 45 Combustion Gas Turbine Compressor
- 50 Standard Mixer
- 51 Special Drain Mixer
- 52 Dual Extracting Mixer
- 53 Cooling Steam Admission Mixer
- 54 Triple Mixer
- 55 Attenuator Mixer
- 60 Demand Flow Splitter
- 61 Fixed Flow Splitter
- 62 Moisture Separator
- 63 Fixed Percent Splitter
- 64 Turbine Shaft Leakage Splitter
- 66 Splixer (Splitter/Mixer)
- 67 Steam Seal Regulator
- 68 Throttle Valve Steam Leakage Splitter
- 69 Constituent Separator
- 70 Furnace/Combustor
- 71 Fluidized Bed Combustor
- 72 Duct Burner (available only in PEPSE-GT)
- 73 Boiler Drum
- 74 Coal Pulverizer
- 75 Cooling Tower
- 76 Nuclear Steam Generator

- 77 Gas Turbine Engine (available only in PEPSE-GT)
- 78 Nuclear Reactor



각 Component 는 Streams 의 연결점을 제공하는 한 개 이상의 “Ports”를 가지고 있으며, Ports 는 특별한 문자로 나타낸다. (예, I : General Inlet, U: General Outlet, T : Tube Side Inlet 및 Outlet. 어떤 Component Ports 에서 연결점은 선택적으로 사용할 수 있으며 (예, Extraction Port (E Port)의 Turbine Stage Group), 필요하지 않으면 연결하지 않아도 된다.

3. Streams

PEPSE Stream 은 한 Components 에서 다른 Components 로 물질의 흐름을 전달한다. Streams 은 단일 Inlet (시작)과 단일 Outlet(끝)를 가지며, 모델화된 Stream 은 선택된 옵션에 따라 압력강화와 열 손실을 고려할 수도 있고 안 할 수도 있다.

8개 다른 Stream 형태의 특징

Type 0 - 압력강화와 열 손실이 계산되지 않음 (stream 종료 조건이 stream 시작 조건과 동일). 이는 “Passive Stream”으로 PEPSE 모델에서 가장 많이 사용되는 형태이다.

Type 1 - 수력학적 원리로부터 압력 강하가 계산됨. (마찰, 형태 손실, 고도 변화)

Type 2 - 유량 조건을 포함하는 이차방정식의 관계에서 압력강하가 계산됨.

Type 3 - 압력강하가 일정 상수로 설정됨.

Type 4 - 알려진 압력 강하를 생성하기 위하여 온압 보상 (Mass Flow)이 계산됨.

Type 4 Stream 은 Type 1 과 반대 방법으로 동작함.

Type 5 - Stream 말단의 압력, 온도를 지정된 값으로 설정함.

Type 6 - 특별한 모델링 상황을 위하여 초기 유량 조건의 지정을 허용함.

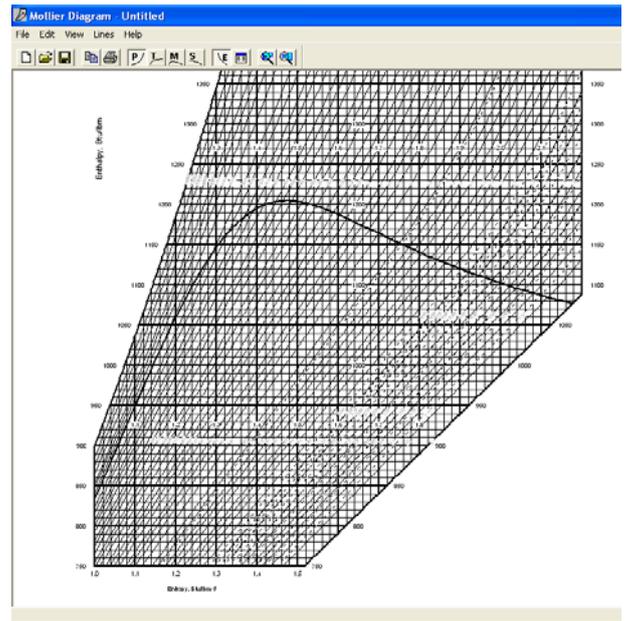
Type 7 - 마찰, 형태 손실, 체적 형태의 유량을 공식화한 고도를 근거로 압력 강하가 계산된다.

또한, Stream Types 1 ~ 5 와 7 은 열 손실을 계산하기 위해서도 사용된다.

4. Heat Balance Diagram

Heat Balance Diagram 은 시스템 내의 많은 장소에서 선택된 매개변수 (압력, 온도, 유량, 등)를 보여줄 수 있는 시스템의 그래픽적인 표현이다. 많은 터빈 판매자 들은 Turbine Cycle Component

하드웨어의 설계 정보를 사용하는 Turbine Cycle 의 Heat Balance Diagram 을 공급한다. PEPSE 모델이 작성된 후, PEPSE 계산을 기초로 해당되는 결과를 표현하기 위하여 Heat Balance 가 그려진다.



5. Data Record

모든 Components 와 Stream 정보를 포함해서 그 모델에 대한 다른 관계된 정보를 모두 기록한다.

6. Special Features

PEPSE 는 특별 기능이라고 불리는 추가적인 기술들을 제공하는데, 개인적으로 관리하는 계산을 추가 하거나 또는 PEPSE 의 표준 분석 기능에는 포함되지 않은 결과를 구하기 위하여 사용한다.

가장 일반적으로 사용되는 특별 기능은 아래와 같다.

- **Schedules** -한 개 (또는 두 개)의 독립 변수와 한 개의 종속 변수로 곡선을 표현함으로써 PEPSE 변수들 사이의 기능적인 관계를 정의함.
- **Operation and Compiled Algorithm** - PEPSE 변수를 수학 방정식, 스텝 또는 가스 Table 과 연결함.
- **운전상의 변수들**- 사용자가 숫자 값을 지정하거나 결정한 계산 결과를 저장하기 위하여 사용하는 "dummy variables".
- **특별한 입력/출력** - 입력 Data Set 또는 출력 Data Set 의 분리된 구역에서 변수 값의 선택된 List 를 입/출력 할 수 있도록 허용함 (PEPSE 를 시작 시 선택된 변수의 값을 지정하고, 출력 값을 구성하고, 정의한 데이터 표현을 위하여 특정한 출력 Table 을 정의하며, PEPSE 가 외부 Files 를 통하여 통신할 수 있도록 허용함).
- **Control** - 원하는 출력 값을 얻기 위하여 입력 변수가 PEPSE 에 의하여 내부적으로 계산될 수 있도록 허용함 (입력 변수 x 와 원하는 출력 값을 얻기 위하여 필요한 y 를 계산함. $y=f(x)$ 에서 x 를 찾으면 y 값을 구할 수 있음).
- **Special Options**- 여러 개의 Computer 를 가동하지 않고도 여러 가지 형태의 일반적인 조건에 대한

플랜트 효율을 예측할 수 있도록 허용함.

- **최적화 특징**- 선택된 여러 입력 값들에 의해 영향을 최소로 받을 수 있는 어떤 PEPSE 결과를 찾기 위하여 여러 가지 경우 (Multiple Case)를 자동으로 돌려주는 기능임.
- **민감도 분석 특징**- 입력 변수 상에서 계산된 결과의 종속성을 정량화하기 위하여 PEPSE 로 여러 번 분석한 결과를 빠르고 쉽게 설정할 수 있도록 함 (예, mW Power 는 Condenser 압력에 종속적임).
- **Watch-Variable (Alarm) 특징**- 선택한 변수에 대하여 상, 하 경계를 지정하고, 계산 결과가 경계를 벗어나면 알려 줌.

V. Special Options

특별한 계산을 쉽게 수행하기 위하여 Special Option Number 11 개가 Tool 로써 제공된다.

- 1) Throttle Valve 설정 상수를 유지한다; throttle state point 와 valve 의 Flow passing 능력에 따라 Main Steam Flow 를 조절한다.
- 2) 계산된 Generation 이 측정된 Generator Power 와 일치하도록 만들기 위하여 LP Turbine 확장을 조절한다.
- 3) 주어진 Generator Power 를 위하여 필요한 Main Steam Flow 를 계산한다.
- 4) Turbine Cycle Thermal Power 의 지정된 값과 일치토록 원자력 Turbine Generator Cycle 내의 Main Steam Flow 를 계산한다.

- 5) Turbine Expansion Line 을 Customization 하기 위하여 Efficiency Multiplier 와 Shape Factors 를 계산한다.
- 6) 테스트 데이트를 줄이기 위하여 자동화된 절차를 제공한다.
- 7) 원인에서 결과 변수에 이르기까지 불확실한 영향을 전파하기 위한 방법을 제공한다.
- 8) Turbine Expansion Line Customization 을 포함하면서 Special Option Number 5 를 지원한다.
- 9) 기준 상태 (Reference State)를 기초로 Heat Recovery Steam Generators 의 효율을 예측하기 위하여 자동화되고 사용자 편리한 방법을 제공한다.
- 10) Steam Turbine 압력을 계산하기 위하여 Stodola 공식을 사용한다.
- 11) Turbine Cycles 와 Boilers 같은 분리된 하부 시스템 모델을 Interface 하기 위한 방법을 제공한다.

비록 많이 성가시기는 하지만, Special Option 에 의한 결과와 같은 결과를 PEPSE Controls 또는 PEPSE 를 여러 번 Trial-Error 방식으로 돌려서 얻을 수도 있다.

VI. 진보된 기술

- PEPSE 계산의 Customization
 - 데이터 표시의 Customization
 - 고급 분석 수행
 - 모델 접근 문제의 수정
- PEPSE 의 진보된 기술들은 쉽게 배울 수 있고, 다양한 Modeling 을 제공한다.

PEPSE 의 진보된 기술은 다음과 같다.

1. Table Suppression,
2. Backup Demand Splitters,

3. Relaxation Factors,
4. Update Maximum,
5. Intervals And Initiators For Calculations
6. Envelopes,
7. Boiler Efficiency Calculation Options,
8. Solution Order 선택,
9. Default Material Properties 의 변경,
10. Extraction Qualities 를 결정하기 위한 Nuclear Turbine Cycle Method.

발전 설비들을 효율적으로 운전하려면 제어 가능한 변수들의 시스템적인 효과에 대한 지식이 필요하며, 효율은 수리학 변수, 설비, 배관의 배열, Components 의 특성, 환경 조건에 영향을 받으므로 효율을 높이기 위하여 플랜트 전체에 대한 통합된 연구가 필요하다.

이러한 변수들을 적절하게 분석하는 엔지니어의 능력은 컴퓨터의 계산 보조 기능을 얼마나 빠르고 효과적으로 사용하는 것에 달려 있다.

PEPSE 는 발전 설비의 효율 향상을 도와주는 대표적인 계산보조 기능으로, Steady-State 상태에서 전체 플랜트를 Simulation 할 수 있다.

Components 의 내부 연결을 지정만 함으로써 배관 연결과 Unit Configuration Layout 을 작성할 수 있으므로, Energy Balance, Test Data 에 대한 평가, Trouble-Shooting, 재설계 등을 쉽고 정확하게 할 수 있다. (끝)