

윤 문 규 ㈜인포트롤테크놀로지 기술연구소 과장

| e-mail : mkyoon@infotrol.co.kr

김 원 호 ㈜인포트롤테크놀로지 대표이사

| e-mail : weonhokim@infotrol.co.kr

에너지 다소비 산업에서 에너지 절감은 생산원가 경쟁력 제고에 매우 큰 영향을 미친다고 할 수 있다. 특히, 기후변화협약을 중심으로 한 환경규제는 제조업체 경쟁력 확보에 심각한 위협으로 대두되고 있으며, 지속 가능한 성장을 위해서는 에너지 절감 및 효율적 관리가 필요 불가결한 요소로 대두되었다. 이에 이 글에서는 공정산업에서 에너지 네트워크를 구성하고 최적화 기술을 적용하여 에너지를 체계적으로 관리하고, 절감하는 방법에 대하여 논하고자 한다.

산업화가 진행됨에 따라 오늘날 많은 국가에서 에너지 수요가 급격히 증가되고 이에 따라 에너지 비용 증가가 가속화되고 있다. 석유화학과 같은 공정산업에서 에너지 비용은 기업운영의 매우 큰 부분을 차지하고 있지만 원 부재료 및 최종제품과 비교하여 관리가 비교적 미흡한 실정이다. 또한 전 세계적으로 온실가스 감축에 대한 관심이 높아지고 있고 기업의 사회적 책임 요구가 증대되는 시점에서 기업의 온실가스 감축 의무 부담에 대비한 기업 경쟁력 확보를 위해 에너지 저감 노력이 절실하다.

공정산업에서 에너지를 저감하는 방법은 다음 5가지가 있다.

1. 공정 최적제어를 통한 에너지 사용량 감소
2. 에너지 관리 시스템을 활용한 에너지 저감 활동
3. 에너지 네트워크 최적운영
4. 설비효율 관리
5. 미활용 에너지 회수

상기 방법 중에서 에너지 공급 최적화, 즉 에너지 요구량을 만족하면서 에너지 원단위를 최소화하는 방법이 에너지 네트워크 최적운영이다.

에너지 네트워크를 이루는 주요 에너지원은 전기, 열(스팀, 물, 열매체), 연료 등 다양한 에너지원으로 구성가능하며, 구성설비로 Furnace, Boiler, Gas Turbine, HRSG(Heat Recovery Steam Generator), Turbine, Heat Exchanger, Electrical/Steam Motor, Let down Equipment, Heat Pump, Header line 등으로 구성된다.

국내 석유화학 공장에서 에너지 네트워크 실제 운영 현황 및 개선 방안은 표 1에서 볼 수 있다. 표에 열거된 문제점은 에너지 네트워크 최적화를 적용하기 전에 현장 조사를 통해서 도출 되었다. 이러한 문제점과 각 항목별 대응방안은 국내 석유화학, 정유 등과 같은 공정산업에 정도의 차이가 있지만 일반적으로 유사하다고 할 수 있다.

산업현장에서 발생하는 다양한 문제 해결을 위한 에너지 네트워크 최적화 시스템은 반드시 다음의 기능을 포함하고 있어야 한다.

1. 에너지 Network balance
  - DR(Data Reconciliation)기반의 에너지 balance

표 1 산업현장에서 발생하는 에너지 관리 문제점 및 개선방안

문제점	개선방안	기대효과
스팀의 생산과 사용 balance 불균형	Data Reconciliation을 이용한 Balance	스팀의 생산 및 사용 balance 신뢰도 향상
계기오차의 무관심	Data Reconciliation을 이용한 Balance	측정 계기 관리 및 정확한 balance
Unknown loss	Unknown loss의 systematic identification 필요	Unknown loss의 identification
Steam balance 에 개인별 편차 및 과다 시간이 소요	실시간 steam balance system 구축	Engineer load 감소 및 일관된 결과. 단위 공장 별 실시간 원단위 및 개선점 파악
운전자 부주의로 인한 에너지 원단위 상승	실시간 운전 감시 및 조치 시스템 구축	운전 부주의 방지를 통한 경제적 효과
운전 조건 혹은 steam 생산 및 소비 변화 시 전체 스팀 시스템 검토의 어려움	Complex-wide "what-if" simulator 구성	스팀관련 설비 및 공정 변경에 따른 complex-wide 경제성 평가
현재 운전이 최적인지 모른다	객관화된 검증 시스템이 필요	에너지 원단위 감소
Exergy: Steam의 효용가치를 최대화 하지 않는다.	에너지 네트워크 최적화 시스템 구축	High value steam의 최대 활용을 통한 경제적 효과
수 발전단가에 따른 대응 미흡	수 발전단가를 고려한 최적화 시스템	최적화의 경제적 효과

- 에너지 Loss Identification (Gross error detection 활용 등)
  - 실시간 에너지 생산 및 소비 관리
  - 공장 전체 에너지 네트워크 화면 제공
2. 에너지 원단위 이상운전 감시 분석
    - 각 공장, 공정별 원단위 실시간 관리
    - 주요 설비별 에너지 효율 관리
    - 이상운전 감시 및 분석
  3. 최적화 계산
    - 실시간 에너지 요구조건에 따른 최적 운전 제시
    - 최적운전 효과 제시
    - 최적화 결과를 실제 운전 반영
  4. 운전 조건 변경에 따른 에너지 simulation
    - 설비 및 공정 변경 시 에너지 네트워크 변화 예측
    - 단위공정의 에너지 저감량에 따른 전체 효과 분석
    - 신규 에너지 project 도출
  5. 에너지 표준 및 온실가스 시스템 지원
    - ISO50001 지원
    - 온실가스 배출권 거래제 지원
    - 에너지 원단위 원가관리 시스템 연동
- 이러한 기능을 포함한 에너지관리시스템은 다음과

같은 절차로 에너지 원단위 절감을 수행한다. 먼저 공장 전체 Energy Network Diagram을 기반으로 하여 실시간 모니터링 시스템을 구축한다. 이는 공정의 기본정보를 제공하는 가장 기초적인 작업으로 구축된 Network Diagram으로부터 에너지 생산, 공급 및 소비를 실시간으로 파악하며, 에너지 생산과 소비의 불일치(Imbalance)를 추적하여 계기오차 및 에너지 Loss 등의 분석을 수행한다. 에너지 발란스는 에너지 관리, Simulation 및 최적화를 위한 에너지 원단위, 설비 효율 등의 정확한 정보를 구축하는 데 활용된다. 이러한 정보를 활용하여 에너지 요구조건을 만족하면서 에너지 네트워크 전체 에너지 원단위를 최소화 하는 최적화 계산을 수행하고 최적 운전 조건을 제시 하여 원단위 절감을 꾀할 수 있다.

기 구축시스템을 활용한 Simulator를 통하여 운전 설비 변경 및 단가 변화에 대한 원단위 및 경제적 효과 분석 수행이 가능해지고 신규 에너지 과제 경제성 분석 및 효과검증 등에 활용될 수 있다. 또한 전기와 열을 동시에 생산하는 Co-generation Plant의 경우 에너지 요구량을 만족하면서 SMP(System Marginal Price) 단가, 에너지 생산설비 효율 및 생산단가, 그리

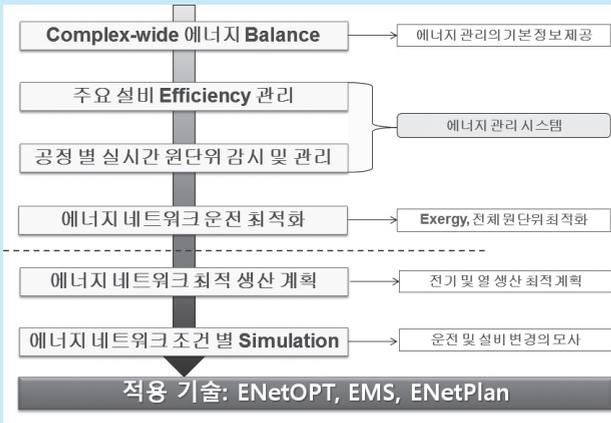


그림 1 에너지 네트워크 관리 적용 순서

고 운전 조건을 고려하여 최적의 생산계획의 수립을 통한 기업의 원가 경쟁력 확보가 가능해진다.

그림 1은 에너지 네트워크 최저운영의 단별 적용 방안을 보여준다.

## ENetOPT

ENetOPT는 국내 순수 기술로 개발된 에너지 네트워크 최적화 솔루션으로 국내 석유화학, 정유회사, 지역난방시설 등에서 에너지 원단위 절감을 위해 사용되어 있으며 그 효과를 입증하고 있다. 특히 해외 에너지 네트워크 최적화 시장(태국 BCP refinery plant

wide energy network optimization and management)에 진출하여 해외 여러 에너지 네트워크 최적화 Solution들과의 비교에서도 전혀 뒤지지 않는 모습을 보여주며 그 우수성을 입증하고 있다.

ENetOPT는 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

1. visual modeling으로 에너지 네트워크 구성
  - drag & drop 방식의 손쉬운 에너지 네트워크 구성
  - built in model 구성
  - 사용자 model 제공 가능
2. Mass & Energy balance
  - DR 기반의 network balance
  - Gross error detection 분석을 통한 imbalance 감시 system
3. What If simulation
  - 운전 조건 변화에 따른 에너지 생산/소비 simulation
  - 신규 설비 추가에 따른 경제성 분석
4. Optimization
  - 에너지 비용 최소화
  - 설비 효율을 고려한 최적 운전
  - 세계 최고 수준의 MILP 최적화 엔진 적용 (Gurobi Optimization)
5. 설비 효율 관리 및 원단위 관리
  - 설비 효율 계산
  - 에너지 원단위 실시간 관리
  - 설비 이상감시 및 원단위 이상감시

이러한 우수성으로 인하여 국내 대표적인 석유화학기업인 한화토탈, LG화학(대산) 및 현대오일뱅크, 삼성정밀화학, BCP(태국)에 적용하였으며 에너지 네트워크를 활용한 최적화를 수행하고 있다.

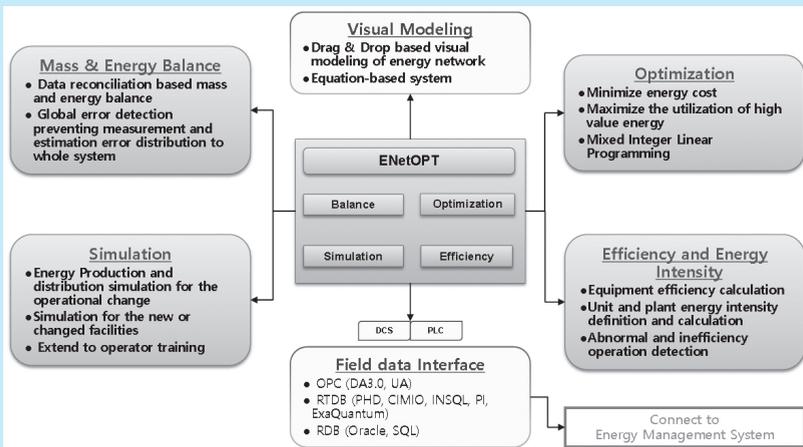


그림 2 ENetOPT 기능 구성도

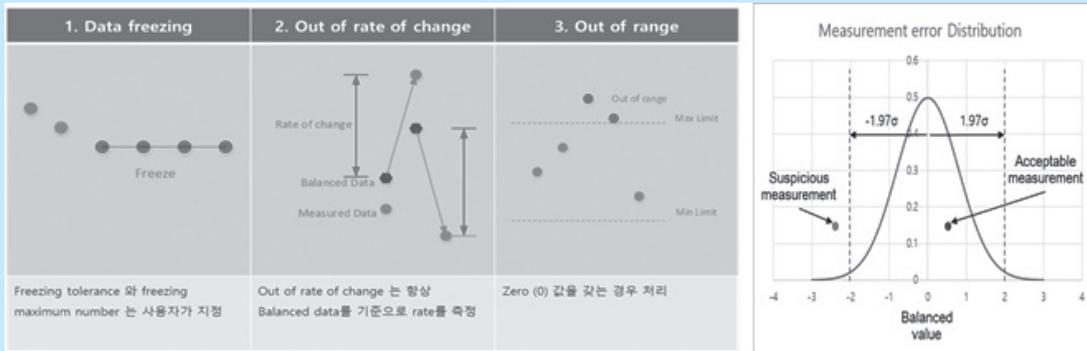


그림 3 EnetOPT의 Imbalance 검사 system

### 에너지 Network Balance

에너지 원가 절감을 위한 시스템 구축 시 가장 우선 시 되는 작업이 에너지 Network를 구성하고 Balance를 수행하는 것이다. 이로써 에너지 비용 상승 요인을 쉽게 파악하고 최적화의 기초 자료로 활용된다. Network Balance는 DR에 기반하여 수행한다. DR은 각 측정값 혹은 입력값과 Balance 값의 차이를 최소로 하는 값으로 Data를 조절하는 것을 말한다. 하지만 일부 측정계기 혹은 입력값이 계기 문제나 기타 다른 문제로 인하여 Error가 크게 발생되면 그 Error가 전체 시스템에 분산되는 문제를 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 Gross Error Detection을 이용하여 측정 혹은 입력 오류를 체계적으로 조절하는 기술이 필요하다.

EnetOPT는 다음과 같은 Imbalance 검사 시스템을 구축하여 Network Balance를 수행한다.

- Data filtering: freezing, Rate of change, range
- Gross error Test: Global test, Measurement test
- Final validation

이러한 Imbalance 검사시스템으로 에너지 Network의 신뢰도를 높여 정확한 Network Balance 결과값을 제공함으로써 최적화 계산을 수행한다.

### Plant-wide 에너지 Network 최적화

산업현장에서 발생하는 최적화 문제는 다음과 같다.

- Steam Turbine의 입출력 최적조건, gas turbine의 최적 load
- 보일러 효율을 고려한 보일러 최적 load 분배
- 전기 단가에 따른 전기 생산 및 구매 최적화
- Steam-전기 Motor 최적 swing 운전
- process fuel gas 및 도입 fuel oil의 최적 운영
- 외부 steam 도입 및 공급최적화 등

각 공장의 에너지 요구조건을 충족하면서 상기 문제에 대한 최적 운전 조건 제시를 위해 EnetOPT는 세계최고 수준의 최적화 계산 Tool인 Gurobi MIP 엔진을 인베디드하여 최적화를 문제를 수행한다. 이는 약 250,000개의 제약조건을 가진 최적화 문제를 5분 만에 계산할 정도로 안정적이고 빠른 최적화 수행능력을 지니고 있으며 MILP모형을 사용하므로 integer 조건(On/Off) 문제에 대한 최적해 도출이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한 EnetOPT는 GUI를 통해 사용자가 직접 최적화 제약조건 추가가 가능하며 실시간 최적화 및 최적운전 조건을 제시한다. 이로써 사용자에게 최적의 공정 운전 조건을 reporting하는 Open-loop 구성 또는 EnetOPT에서 계산한 결과값을 실제 DCS에 설정값 변경을 통해서 운전 조작하는 방법인 Close-loop 구성을 통하여 실시간 최적 운전

적용이 가능해진다.

다음은 국내 H사에 에너지 네트워크 최적화 시스템을 적용한 사례를 나타내었다.

H사는 공장 내 Complex-Wide 에너지 네트워크의 최적운동을 통한 원단위 감소를 위하여 에너지 최적화 시스템과 Plant-Wide 에너지 관리 System 구축을 추진하였다. 이를 위하여 자사에서 개발한 EnetOPT Solution과 Web-Monitoring System인 EMS를 도입하여 에너지 네트워크 Balance와 에너지 원단위 관리를 수행하였다. 주요 구축 내용으로는 주요 공장(NCC, C4, OCU, ARO, SM 등) Complex-Wide Steam/전기/연료에 대한 What-If Simulation 및 최적화 수행이 가능하도록 Network를 구축하고 이를 On-line Monitoring하여 운전감시 및 이상징후를 관리하도록 system을 구축하였다. 구축된 에너지 네트워크를 활용하여 최적화를 수행하였으며 그 결과로 두 대의 SS보일러, 한 대의 HS보일러는 가동하는 조건하에서 보일러, STG, GB201, GB501 및 Letdown 설비의 운전 변경을 통하여 최적 운전을 제시하였으며 이를 통하여 연간 약 22억 9,000만 원의 비용절감 효과를 얻을 수 있었다.

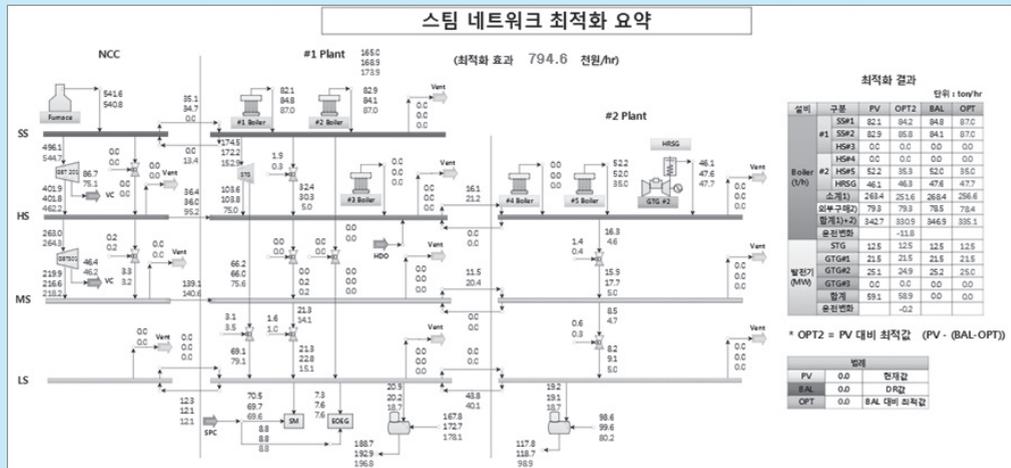


그림 4 에너지 네트워크 최적화 사례

계 monitoring 하여 balance를 계산하며 에너지 loss를 감소하고 원단위를 절감하는 일은 단연 우선 시 되어야 하는 문제로 대두되고 있다. 이에 자사의 에너지 네트워크 solution은 최신 최적화 기법 및 최고 수준의 기술을 바탕으로 산업현장에 에너지 네트워크 최적운전 system을 적용하여 에너지 원단위 절감 효과를 입증하고 있다. 더 나아가 Pinch technology 기술을 적용한 에너지 네트워크 최적 Design을 통한 수요관리 최적화 기술 개발에 적극 박차를 가하고 있다. 따라서 현재 적용된 정유 및 석유 화학공정에 더욱 폭넓게 적용가능하며 기타 산업 전반에도 확대 도입 가능할 것으로 예상된다. 또한 이러한 최적화기술은 단위 기업뿐만 아니라 기업간 에너지 네트워크를 통한 에너지 교환에서 산업단지 전체의 통합 에너지 네트워크 구축 및 최적화 적용으로 확대 적용가능하다. 이러한 접근 방식을 통해 산업단지 내 에너지 연계망으로 연결된 각 기업의 에너지 원단위를 저감하면서 전체 산업단지의 에너지 원단위를 실시간으로 최소화 가능해진다. 이러한 에너지 네트워크 연계 시스템 구축은 업종 간, 기업 간 에너지 공유의 시너지효과를 극대화하여 상생 경제를 이룰 수 있을 것이다.

### 결론

세계적으로 에너지절약에 대한 관심이 높은 요즘 공장 전체의 Steam온도와 압력, 소비량 등을 정확하