

## ESS를 이용한 발전소 터빈제어밸브 전개 운전 제어로직 제안

정인영<sup>\*†</sup>, 이재현<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>한국서부발전 서부발전연구소, <sup>\*\*†</sup>한양대학교 기계공학부

### Suggestion of Logic to Control Power Plant Equipped ESS in case of Full Open Turbine Control Valve

In Young Chung<sup>\*†</sup>, Jae-Heon Lee<sup>\*\*</sup>

<sup>\*†</sup>WP R&D Center, Korea Westernpower Company

<sup>\*\*</sup>School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

(Received Aug. 30, 2020; Revised Sept. 6, 2020)

**ABSTRACT** : In order to respond to the demand for flexible operation of thermal power generation, development of natural sliding pressure operation that minimizes throttle loss by opening the turbine control valve 100% and maximize power generation efficiency in conjunction with ESS in order to quickly respond to fluctuations in the system frequency is required. The logic development of natural sliding pressure operation with ESS was developed to modify the existing logic at the power plant's top-level control logic such as the unit master, the boiler master and the turbine master. Cooperative control algorithms that complement the advantages and disadvantages of ESS operation (quick response, limited capacity) and power plant operation (slow response, continuous operation) not only improve efficiency when applied to actual power plants, but also respond quickly and flexibly to load demands to ensure system stability.

**초록** : 신재생에너지 비중 증가에 따른 전력계통 불안정성과 탈원전, 노후 석탄화력 폐쇄로 인한 안정적인 발전자원 감소에 대한 대응 방안으로 터빈제어밸브 4개중 2~3개를 교축하여 발전기 출력 증·감발과 주파수를 추종하는 복합 변압 운전 방식을 터빈제어밸브를 전개하여 교축손실을 줄임으로서 발전 효율을 극대화하는 순 변압운전 방식으로 대체하고, 계통 주파수 변동에 신속하게 대응하기 위해 ESS를 연계하여 주파수 추종 및 자동발전운전을 하는 제어로직을 500MW 석탄화력인 태안 5호기를 대상으로 개발하였다. ESS 운전(신속한 응답, 용량 한계)과 발전소 터빈제어밸브 교축 운전(느린 응답, 지속적인 운전)의 장·단점을 보완하는 협조제어 알고리즘이 실제 발전소에 적용시 발전 효율 향상은 물론 전력 수요에 신속하고 유연하여 대응하여 계통 안정성에 기여할 것으로 확신한다.

**Key words** : Energy Storage System(에너지 저장장치), Natural Sliding Pressure Opeartion(순 변압운전), Automatic Generation Control (자동발전제어), Governor Fee Opeartion(주파수 추종운전)

† Corresponding Author, chung@iwest.co.kr

# ESS를 이용한 발전소 터빈제어밸브 전개 운전 제어로직 제안

## -기호설명-

SPO : 변압운전  
ADS : 자동급전운전  
BM : 보일러마스터  
PI : 비례미분제어기

TBN : 터빈  
TP : 주증기 압력  
MW : 발전기 출력  
BFP : 보일러 급수펌프  
Pr : 압력 (kg/cm<sup>2</sup>)

## 1. 서론

### 1.1 연구배경 및 목적

정부에서 추진하는 에너지 전환 로드 맵, 재생에너지 3020 이행계획 등에 따른 재생에너지 확대 정책의 목표 달성을 위해서는 전력계통 안정화에 대한 대비가 필요하며 특히 에너지 변동성이 높은 태양광, 풍력 설비 운영에 따른 부작용(덕 커브)에 대응하는 기술 개발이 요구되고 있다. 기존에 전력생산에서 기저발전으로서 역할을 하던 500MW 석탄화력기 부분부하 운전, 출력 증·감발 운전 또는 주말 기동정지를 빈번히 하고 있으며 앞으로는 최저부하 운전, 장기간 정지 등 더 혹독한 운전과 같은 전력생산 구조에서도 큰 변화가 예상되고 있다. 이와 같은 신재생에너지의 간헐성 문제에 대응하여 전력수요가 남아도는 낮 시간에는 전력생산을 줄이고 순간적인 부하상승이 요구되는 저녁시간에는 부하수요에 신속한 응답을 요구하는 유연 운전(Flexible operation)이 필요하게 되었다. 따라서 유연 운전과 전력계통의 안정적 운영은 물론 최적의 효율을 가진 발전소 운전을 위해서는 에너지 저장장치(Energy Storage System, ESS)와 연계 및 적용은 반드시 필요하다.

전력 계통의 주파수제어는 주파수 추종(Governor Free, GF)운전과 자동발전제어(Automatic Generation Control, AGC)운전에 의해 제한된 범위 내로 유지하고 있다.

500MW 석탄화력 발전소 운전은 일정한 부하구간 (정격 출력의 30%~90%)에서는 부하요구량에 터빈제어밸브 4개 중 2~3개를 전개한 상태로 보일러에서 주증기 압력을 조절하여 발전기 출력을 증·감발하고, 고 부하 영역(정격 출력의 90% 이상)에서는 주증기 압력을 일정하게 하고 터빈 제어밸브를 교축하여 출력을 조절하는 복합 변압운전 방식을 적용하고 있다.

이러한 복합 변압운전 방식은 터빈제어밸브 교축손실로

인해 효율 저하가 발생되고 있으며 GF 운전으로 계통주파수를 정격주파수로 유지하기 위해 추가로 터빈제어밸브를 개폐하면 교축으로 인한 효율 저하가 추가로 발생하고 있다. 본 연구를 통해 교축 손실과 효율 저하가 발생하는 발전소 운전 방식인 복합 변압운전 방식을 터빈제어밸브를 전개 상태로 유지하고 주증기 압력 변화에 따라 발전기 출력을 조절하는 순 변압운전 방식으로 변경하고 GF 운전과 AGC 운전은 터빈제어밸브 교축 대신 ESS를 연계해서 부하 추종을 하는 로직을 개발하여 향후 실증을 위한 토대를 마련하고자 한다.

이번 연구를 통해서 개발한 ESS 연계 순 변압운전 알고리즘은 ESS의 장점과 터빈 발전기의 장점은 모두 살리고 서로의 단점은 상호 보완해 줄 수 있는 주파수 추종 방법이다. 즉, ESS의 장점인 신속한 응답 특성으로 발전기 단점인 느린 응답을 보완하며, 조속기의 잦은 동작에 따른 마모 예방과 및 보유 발전 예비력 감소를 통해서 비용을 절감 할 수 있다. ESS 단점인 제한된 보유 에너지는 발전기의 장점인 에너지의 지속적 공급 능력으로 보완이 가능하므로, 'ESS+터빈 발전기' 연계는 빠른 응답 특성과 지속적인 에너지 공급 능력 모두를 만족하여 전력 계통에 안정적 주파수 추종을 수행 할 수 있을 것으로 기대된다.

### 1.2 연구 내용

본 연구에서는 500MW 표준 석탄화력인 태안화력 5.6호기를 대상으로 현 운전방식인 복합 변압운전 방식의 분석을 위해 변압운전 방식, 변압운전 부하 및 압력 범위를 비교·검토하였다. 석탄발전소의 여러 가지 제어방식인 보일러 추종(Boiler Following) 모드, 터빈 추종(Turbine Following) 모드, 보일러-터빈 협조제어(Boiler-Turbine Coordination Control) 모드에 대해서도 비교·검토 하였다. 현재 발전소 운전을 위한 최상위 제어로직인 유니트 마스터, 보일러 마스터, 터빈 마스터, 터빈 출력제어 및 주파수 제어 로직을 분석하였다.

또, 주파수 조정용으로서의 ESS역할에 대해서 국내외 사례에 대해서도 조사하고 검토하였다. 순 변압운전 로직 개발은 기존의 유니트 마스터, 보일러 마스터, 터빈 마스터, 터빈 출력 제어 및 주파수 제어 로직 각각을 대상으로 운전원이 ESS 연계모드 On 선택시 터빈제어밸브는 전개하고 주증기압력은 보일러 마스터가 제어하고 GF 운전과 AGC

운전은 ESS가 담당할 수 있도록 로직을 신규로 개발을 하였다.

## 2. 운영현황 분석 및 제어로직 개발

### 2.1 변압운전 방식

변압운전(Sliding Pressure Operation, SPO) 방식은 터빈제어밸브를 전개 상태로 하고 보일러에서 주증기 압력을 부하조건에 따라 변화시킴으로써 터빈 제어밸브에서 교축 손실 없이 터빈을 운전하는 방식을 말한다. 변압운전 방식은 터빈제어밸브의 제어방식에 따라 다음의 3가지 방식으로 구분된다.

#### ① 순 변압(Natural Sliding Pressure)운전 방식

터빈제어밸브를 전개 상태로 유지하고 주증기 압력의 변화에 따라 발전기 출력을 조절하는 방식으로 터빈제어밸브의 교축 손실이 없기 때문에 열효율 측면에서 가장 유리한 운전방식이나 출력 증·감발률이 느리고 급격한 부하 변동시에 속응성이 떨어지는 단점이 있다.

#### ② 수정 변압운전 방식

순 변압운전 방식의 단점을 보완하기 위하여 처음부터 터빈제어밸브를 5~15% 닫은 상태로 변압운전을 하다가 급격한 부하 증감시 터빈제어밸브를 전개하여 보일러에 축적된 열용량을 일시적으로 사용하여 부하 증감에 대한 응답성을 높이는 운전방식이다. 수정 변압운전 방식은 변압운전의 효과도 얻을 수 있고 제한된 부하범위에서는 신속한 부하 추종도 가능하나 제어밸브 교축에 의한 효율 저하가 발생한다.

#### ③ 복합 변압(Hybrid Pressure)운전 방식

순 변압운전시 발생하는 부하변동을 저하와 수정 변압운전시 문제점인 제어밸브의 교축으로 인한 열소비율 저하를 해결하기 위해 순 변압운전과 수정 변압운전 방식을 복합한 방법으로 일정 부하 영역에서는 변압운전 방식으로 부하를 조절하고, 나머지 구간(최저 및 최고 부하영역)에서는 터빈제어밸브를 개폐하여 부하를 조절하는 운전방식으로

열소비율 향상 효과를 얻을 수 있고 제한된 부하범위에서 신속한 부하 추종도 할 수 있는 운전 방식이다. (1)

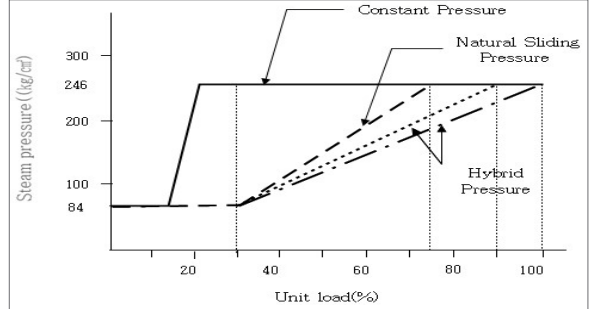


Fig. 1 ain steam pressure and load range by SPO

Fig. 1은 초임계압 보일러의 정압(Constant Pressure) 운전, 복합 변압운전, 순 변압운전 각 방식별 부하범위에 따른 주증기 압력 범위를 나타내고 있다. 순 변압운전 모드에서는 터빈제어밸브는 거의 전개 또는 아주 조금 조절하여 주증기압력을 증감하면서 발전기 출력을 제어한다. 저부하로 추가 출력 감발은 터빈제어밸브는 일정히 하고 주증기 압력을 감압하면서 제어한다.

복합 변압운전 2 Admission 모드는 1,2,3번 제어밸브를 동시에 먼저 열고 다음에 4번 밸브를 여는 운전방식으로 30%~90% 부하범위에서는 터빈제어밸브는 전개하고 주증기 압력을 증감하여 출력을 증·감발 한다. 변압 운전의 순 변압운전과 복합 변압운전(2Admission 모드) 방식별 열소비율, 부하 범위, BFP 소비 동력 및 운용방식은 Table 1과 같다.

Table 1 Comparison of characteristics by sliding pressure operation method

Item	Natural SPO	Hybrid SPO
Heat rate improvement	Good	medium
BFP power consumption	small	medium
Load range	30~100%	30~90%
Operation method	Suitable for baseload operation Not suitable for GF, AGC operation	Suitable for medium load operation Suitable for GF, AGC operation

## 2.2 발전소 제어 방식

Fig. 2는 보일러 추종모드 (Boiler Following Mode, BF Mode)의 제어 개략도 이다. 발전소 부하변화시 터빈제어밸브를 조절하여 발전기 추력을 설정 값에 추종 시킨다. 터빈제어밸브의 개폐로 발생하는 주증기 압력의 변동은 보일러 마스터가 제어하는 방식이다. 보일러 추종 방식은 동작이 빠른 터빈제어밸브를 사용하므로 부하 추종성이 양호하기 때문에 AGC 운전이 가능한 방식으로 드럼 보일러를 가진 발전소에서 주로 사용하는 방식이다. 그러나 터빈제어밸브가 크게 동작하여 보일러 능력 이상으로 주증기 유량의 증감이 있는 경우 발전량 제어와 보일러 제어간의 상호 간섭에 의해 발전소 전체가 불안정한 상태에 빠질 수 있다.

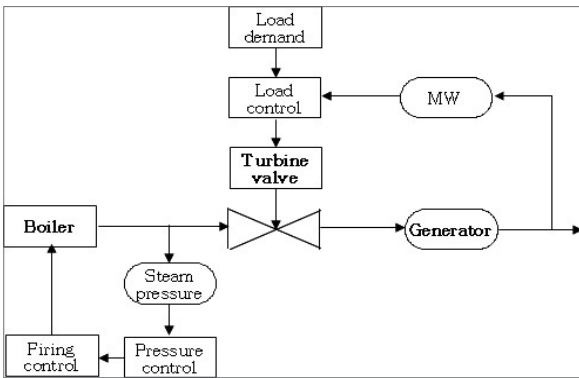


Fig. 2 Boiler following mode diagram

Fig. 3는 터빈 추종모드 (Turbine Following Mode, TF Mode)의 제어 개략도 이다. 발전소 출력 요구 신호에 먼저 보일러 입력(연료, 공기, 급수)을 제어하는 방식으로 보일러 입열량을 증감하여 발생한 주증기 유량을 변화시켜 발전기 출력을 제어하며 변동한 주증기 압력의 변화는 터빈 제어밸브가 제어한다. 이 방식은 응답이 빠른 터빈제어밸브가 주증기 압력을 제어하기 때문에 안정된 운전 특성을 갖고 있으나 응답이 느린 보일러 입열량을 가지고 출력을 제어하기 때문에 부하추종성이 떨어져 Runback시에 같이 안정 운전이 필요할 경우에 사용되고 있다.

Fig. 4는 보일러-터빈 협조제어모드(Coordination Control Mode, CC Mode)의 제어 개략도이다. 보일러 마

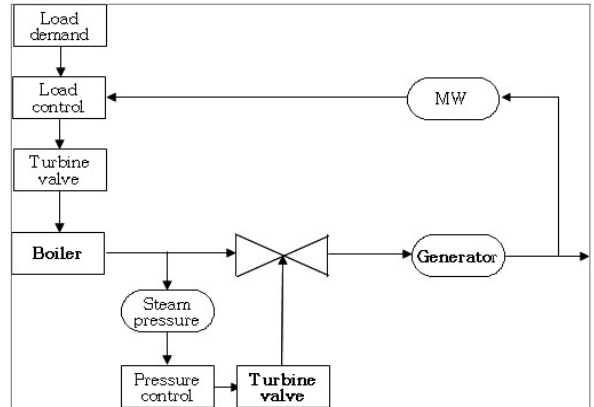


Fig. 3 Turbine following mode diagram

스터와 터빈 마스터가 발전기 출력과 주증기 압력을 협조하여 동시에 제어하기 때문에 주증기 압력과 발전기 출력의 안정적 제어에 기여하는 제어방식이다. 보일러 마스터는 주증기 압력을 주로 제어하고 보조적으로 발전기 출력을 제어하며 터빈 마스터는 출력을 주로 제어하고 주증기 압력을 보조적으로 제어한다. 협조제어방식은 보일러와 터빈이 협조하여 발전기 출력과 주증기 압력을 제어하기 때문에 신속한 부하 추종성 및 안정된 운전 특성을 얻을 수 있어 초임계압 관련보일러에서 주로 사용하고 있으나 제어계가 다소 복잡하다. (2)

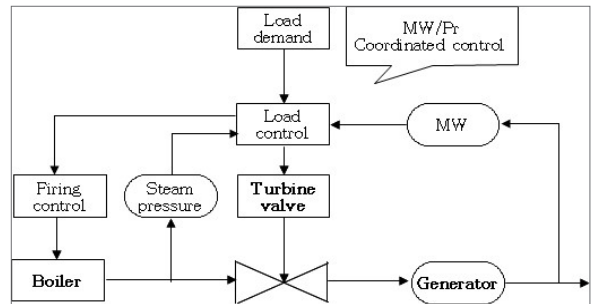


Fig. 4 Boiler-Turbine Coordinated mode diagram

## 2.3 주파수 조정용 ESS 역할

주파수조정용 에너지저장장치(이하 FR용 ESS)는 발전기의 출력 증감 또는 부하증감에 따라 전력계통 주파수가

60Hz를 벗어날 경우 ESS의 충전과 방전으로 주파수를 규정 범위 ( $60 \pm 0.2\text{Hz}$ )내로 유지시켜주는 장치를 말한다. 순간적인 수요 변동 등에 따른 주파수 변동에 대비하기 위해 발전소 출력을 감발(5%)하여 운전중인 발전기의 출력을 조절하여 주파수를 조정하는 것으로 FR용 ESS는 석탄화력 발전의 주파수 조정분 5%인 AGC와 GF 기능을 대체하여 석탄화력 발전량을 95%→100% 상향운전토록 함으로써 SMP(System Marginal Price) 결정의 비싼 발전원을 대신하여 전력 구입 비용을 절감하고자 하는 용도로 한전에서 FR용 ESS 사업은 신재생에너지 전원의 전력 평준화 실증을 위해 제주 조천발전소에서 MW급 리튬이온 배터리에 대한 실증 사업을 시작한 이래 총 주파수 조정용으로 총 13개 발전소에 376MW 설비 용량을 건설하여 상업 운전 중에 있다. 동서발전 울산화력에서 2017년 국내 최초 발전소 내 ESS를 설치한 케이스로 탈황설비(울산화력 4~6호기)에 전력 요금 절감 목적의 2MWh급 ESS를 설치하여 운영하고 있으나, 계통 전력 공급 및 주파수 조정 분야는 아니다. [3]

### 2.4 순 변압운전 제어로직 개발

500MW 화력발전소 출력 제어는 일정한 부하 구간(30%~90%NR)에서는 부하요구량에 4개의 터빈제어밸브 중 2~3개를 전개한 상태로 주증기압력을 조절하여 발전기 출력을 증·감발 하고, 고 부하 영역에서는 주증기압력은 일정하게 하고 터빈제어밸브를 개폐하여 출력을 조절하는 복합 변압운전 방식을 적용하고 있다. 전력 수요와 공급간 편차 발생시 계통주파수를 정격주파수로 유지하기 위해 추가로 터빈제어밸브를 개폐하여 발전기 출력을 증감 하는 GF운전을 하고 있으나 터빈제어밸브 교축에 따른 효율 저하 현상이 발생하고 있다.

발전소 운전은 터빈제어밸브를 전개 상태로 유지하고 주증기 압력 변화에 따라 출력을 조절하는 순 변압운전 방법으로 운전하고 주파수 추종은 주파수 편차의 크기와 지속 시간의 길이에 따라 ESS에 의해 발전기 출력을 증감하는 기술을 활용함으로써 발전소는 열효율 측면에서 가장 유리한 방법으로 운전할 수 있고 부하 추종은 응답시간이 빠른 ESS가 담당 함으로써 신속한 부하 추종이 가능하여 발전소 효율 향상뿐 만 아니라 계통의 전기 품질 향상도 동시에 기

대할 수 있다. 이를 위해 유니트 마스터, 터빈 마스터, 보일러 마스터, 거버너 마스터가 순 변압운전에서도 동작할 수 있도록 로직을 개발하였다.

#### 2.4.1 ESS 연계 순 변압운전을 위한 유니트 마스터 로직

아래의 Fig 5는 500MW 석탄화력의 발전소를 총괄 제어하는 유니트 마스터 로직으로 출력 지령은 출력 증·감발률 값에 의해 분당 출력 일정한 증·감발율로 증·감발 되고 주파수 보정 신호가 더해진 값과 출력 하한값(Unit low limit) 중 작은 값이 선택되고 이 값과 출력 상한값(Unit high limit) 중 작은 값이 선택되어 MW Demand가 된다. 이 값은 보일러 마스터와 터빈 마스터로 보내져 발전소의 출력, 연료량, 공기량, 급수량, 압력, 온도 등을 제어하는 가장 핵심 신호가 된다. ESS 연계 순 변압운전 모드로 운전시 주파수 편차 보정은 ESS가 담당하게 되므로 MW Demand 신호에 더해지는 보정 회로는 0으로 절체 되어 동작하지 않도록 구성하였다.

#### 2.4.2 ESS 연계 순 변압운전을 위한 보일러 마스터 로직

아래의 Fig. 6는 보일러마스터 로직으로 주증기 압력을 발전기 출력 요구량에 해당하는 설정 값으로 유지하기 위

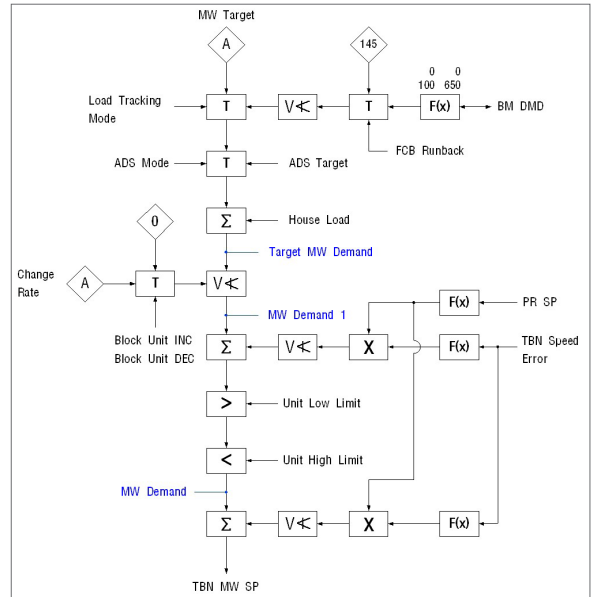


Fig. 5 Unit master logic for natural SPO linked with ESS

## ESS를 이용한 발전소 터빈제어밸브 전개 운전 제어로직 제안

해 주증기 압력 편차를 제어하며 보일러 입열량인 연료, 공기 및 급수를 증감하게 된다.

TRC(Transit Compensation) 회로는 출력 증감발시 보유 열량의 과부족을 보상하기 위해 사용하는 Overfiring 또는 Underfiring 회로로 보일러에 과도기적으로 외란을 주는 요소이므로 TRC 회로가 담당하는 출력 증감분을 ESS가 대체하게 되면 보일러는 안정적으로 운전할 수 있다. ESS 연계 순 변압운전 모드로 운전시에는 TRC 기능은 ESS가 담당하게 되므로 보일러 마스터에 합산되는 TRC 회로는 0으로 절체 하여 동작하지 않도록 구성하였다. 복합 변압운전에서 순 변압운전으로 절체 되면 주증기 압력 설정값은 발전기 출력 요구량에 따라 일정한 값이 감소한 값으로 설정하기 위해 함수 발생기 F3(X)에서 F4(X)로 절체 되도록 구성하였다.

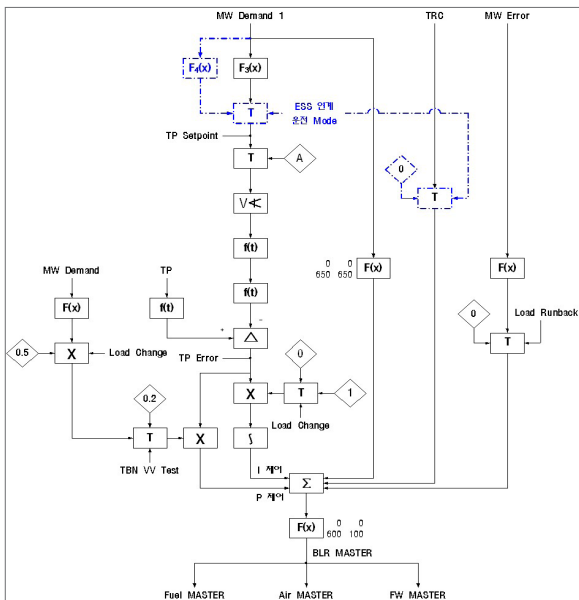


Fig. 6 Boiler master logic for natural SPO linked with ESS

### 2.4.3 ESS 연계 순 변압운전을 위한 터빈 마스터 로직

아래의 Fig. 7는 터빈 마스터 로직으로 터빈 마스터는 부하량 요구(MW Demand)에 따라 터빈에 유입되는 증기 유량을 조절하여 발전기 출력을 제어하게 된다. 협제어 모드에서 터빈 마스터는 주증기 압력 편차 및 발전기 출력 편

차를 PI제어하며 MW Demand에 따른 선행(Feedforward) 신호가 합산되어 생성된다. ESS 연계 순 변압운전 모드로 운전시에는 MW Demand에 따른 선행(Feedforward) 신호는 30% 정격부하(150MW) 이상에서는 터빈제어밸브가 100% Open되어 순 변압운전이 될 수 있도록 함수 발생기 F5(X)에서 F6(X)로 절체 되도록 구성하였다.

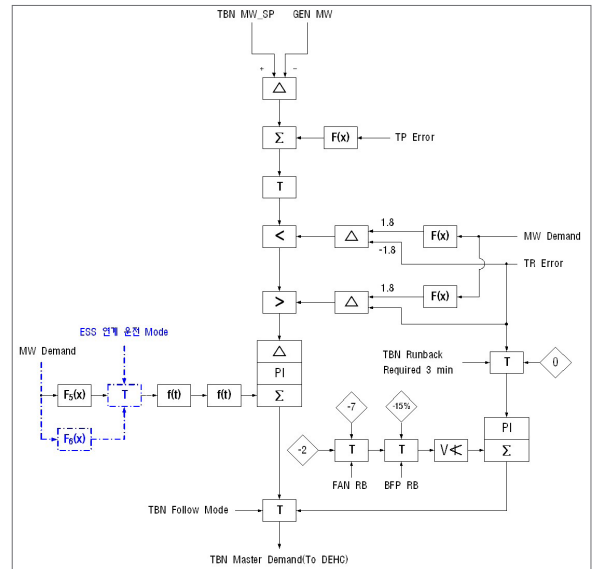


Fig. 7 Turbine master logic for natural SPO linked with ESS

### 3.2.4 ESS 연계 순 변압운전을 위한 거버너 마스터 로직

아래의 Fig 8는 거버너(Governor) 마스터 로직으로 거버너 마스터는 터빈제어기가 자체 운전시에는 운전원 터빈 속도 요구량 및 발전기 출력 요구량에 따라 터빈 속도 및 발전기 출력 편차를 PI제어하며 원격 운전시에는 터빈 마스터 Demand 신호에 따라 터빈 제어밸브를 Open/Close 하여 발전기 출력을 조정한다.

GF 운전 On하면 계통 주파수 편차에 따라 속도조정률로 설정한 터빈 밸브 요구량 값을 터빈 마스터 Demand 신호에 가감되어 최종 거버너 마스터 출력 신호를 생성한다. ESS 연계 운전모드로 운전시에는 계통 주파수 편차에 따라 속도조정률에 따라 설정한 출력을 ESS가 대체하게 되므로 터빈 마스터 Demand 신호에 가감되는 신호는 0으로 절체한다.

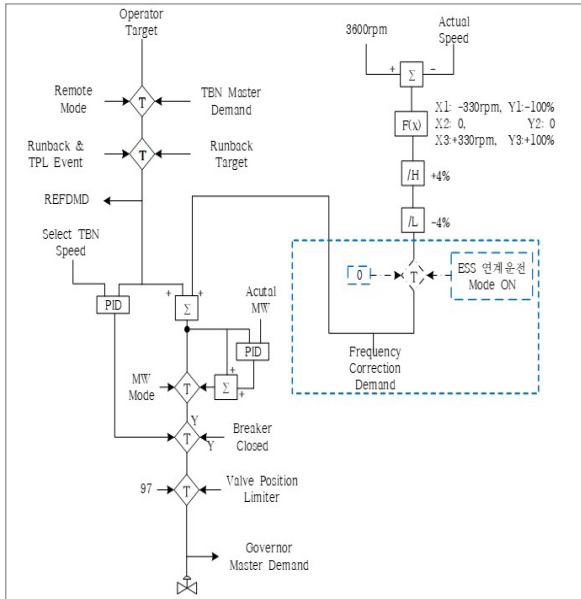


Fig. 8 Governor master logic for natural SPO linked with ESS

운전시 주파수 편차 보정은 ESS가 담당하게 함으로서 MW Demand 신호에 더해지는 주파수 편차보정회로는 0으로 절체 하여 부하 요구량 변동을 최소화 할 수 있도록 구성하였다.

(2) 보일러 마스터에서는 순 변압운전이 될 수 있도록 일정한 값이 감소한 주증기 압력 설정값으로 절체 되도록 하였고, 출력 증·감발시 Overfiring 및 Underfiring을 하는 TRC 회로는 보일러에 과도기적으로 외란을 주는 요소로 ESS가 이 기능을 대체함으로써 보일러는 더 안정적으로 운전할 것으로 판단된다.

(3) 터빈 마스터는 순 변압운전 모드로 운전시에는 MW Demand에 따른 선행(Feedforward) 신호가 30% 부하 (150MW) 이상에서는 터빈 제어밸브가 100% 전개되어 운전함으로써 교축손실이 최소화 될 것으로 판단된다.

이번 로직 개발을 통해서 발전소는 열효율이 가장 우수한 순 변압운전 방식으로 운전하고 ESS가 부하 및 주파수 추종을 함으로서 빠른 출력 응답으로 고 신뢰성과 고품질의 전력을 안정적으로 공급할 수 있을 것으로 확신한다.

### 3. 결론

전력계통에서 전력 수요와 공급의 불균형을 해소하기 위해 사용하는 ESS가 화력발전소에서 복합 변압운전 방식을 순 변압운전 방식으로 대체하여 GF, AGC 운전을 하는 방식으로 로직 개발은 세계최초로 시도되는 기술이다. ESS 연계 순 변압운전을 위한 제어로직 개발은 500MW 석탄화력발전소인 태안 5호기를 기존 제어로직에 다음과 같이 개선안을 도출하였다.

- (1) 유니트 마스터에서는 ESS 연계 순 변압운전 모드로

### 참고문헌

- (1) 고동현, 2011, 기술검토보고서 『변압운전 범위 및 최저 안정부하 검토』, 한국전력기술주식회사, pp 16~19
- (2) SAM G. DUKELOW, 1991, The control of boilers, ISA, pp 121~136
- (3) 백남길, 2015, 한전의 주파수조정용(FR) 전기 저장장치 추진현황, pp12~17 (KIPEG)