

대기

<KEITI 중국사무소 차목승 연구원>

신장자치구 석탄화력발전 초저배출 개조 사례

▶ 개요

중국의 급격한 공업화로 인해 화력발전소에서 배출되는 주요 오염물질인 입자상물질, 이산화황, 질소산화물 등은 대기오염 문제와 국민 건강문제에 직·간접적으로 위협이 되고 있다. 따라서 화력발전 산업에서 배출되는 오염물질을 효과적으로 통제하지 않으면, 심각한 환경오염 및 경제 발전 문제에 직면할 수 있다.

2014년 9월, 국가발전개혁위원회(国家发改委), 생태환경부(生态环境部), 국가에너지국(国家能源局)에서 발표한 <2014~2020년 석탄화력발전 에너지배출 절감 및 개조행동계획(煤电节能减排升级与改造行动计划(2014~2020年))>(이하 '행동계획')에 따르면, 석탄화력발전 관련 초저배출 제한치는 입자상물질 10mg/m³, 이산화황 35mg/m³, 질소산화물 50mg/m³ 미만으로 규정되어 있다. 동 '행동계획'에서 2020년 말까지 기존의 300MW 이상 공용(公用) 석탄발전세트(燃煤发电机组) 및 10MW 이상 자가(自备) 석탄발전세트 또한 초저배출 개조를 완성하도록 하고 있어 올해까지 시행해야 되는 상황이다.

특히, 서부지역(西部地区)은 2020년 말까지 석탄화력발전에 대한 초저배출 개조를 모두 완성하도록 요구하고 있어, 관련 석탄발전(석탄화력발전소 등)은 중국 정부의 배출기준에 부합하기 위해 개조를 진행하고 있다. 그중 신장자치구는 중국의 대표적인 서부지역이며, 아울러 석탄화력발전의 주요 지역 중 하나이다. 따라서 본 기술동향은 신장자치구의 어느 발전소에서 실시한 330MW 석탄발전세트 2대에 대한 초저배출 개조방안을 제시하고 이를 분석하였다.

▶ 집진설비 개조

1) (개조前 현황) 동 발전소의 #1, #2발전세트에는 각각 집진설비가 설치되어 있다. 각 발전 세트에 설치된 집진설비 현황은 다음과 같다.

- ① (#1발전세트) 전기집진기는 란저우전력수조공장(兰州电力修造厂)에서 생산한 와식(卧式), 판식(板式) 2실4전장(双室四电场)¹⁾ 건식 정전기집진기(静电除尘器)이며, 전력공급설비는 GGAj02-1.1A/72kv 고압 실리콘 정류설비(整流设备)를 사용한다. 전기집진기의 집진효율은 99.6% 이상, 집진 후 배출농도 50m³ 미만이다.
- ② (#2발전세트) 탈황 후 습식·전기집진기를 사용하며, 전력공급구역을 4개로 나눠 양·음극(阴、阳极)²⁾ 길이 6m 이상, 연기처리량 1,709,907m³/h, 습식·전기집진기 배출구의 배출농도 20mg/m³ 미만이다.

1) 2실4전장(双室四电场) : 집진기 내 두개의 작업공간(실)이 병렬로 갖추어져 있고 각 실마다 4개의 전기장이 있다.(바이두 백과 등 내용 요약정리, 2020.8.11.)
2) 양·음극(阴、阳极) : 두 개의 전극 사이에 전류가 흐를 때, 두 극 중에서 전위가 높은 극(양극), 낮은 극(음극)이다.(네이버 지식백과 발췌, 2020.8.7.)

- 2) (집진설비 개조) #1, #2발전세트의 집진설비 후 배출농도 차이로 인하여 고주파 전원과 전력제어 기술을 개조를 통한 집진 처리효과 제고와 에너지를 절약하도록 하였다. 따라서 #1, #2발전세트의 집진설비는 현재 운전상황에 따라 개조방안은 2가지로 분류할 수 있으며, 이는 ▲‘고주파 전원(高频电源)+습식·전기집진(湿式电除尘)’와 ▲‘용량확대(扩容)+탈황효과 제고(脱硫提效)’이다.
- 3) (개조방안) 이번 개조공정은 ‘고주파 전원+습식·전기집진’ 방법을 사용하였고, 이는 설비에 대한 적응성(适应性)이 뛰어나기 때문에 개조 후 배출농도가 초저배출 요구사항에 부합할 수 있다. 특히 송풍기에 미치는 영향이 적을 뿐 아니라, 기타오염물질 처리효과도 분명하게 나타났다. 또한 기존 설비를 설치한 장소에 습식처리를 위한 전용공간을 일부 남겨 추가적으로 배출농도가 5mg/m³ 미만으로 배출될 수 있도록 설계가 가능하도록 하였다.

<표1. 집진설비 개조현황>

구분	고주파 전원+습식·전기집진기	용량확대+탈황효과 제고
배출농도	<10	집진기 배출구<30, 탈황 후<10
기술성숙도	성숙단계	시범단계
안전신뢰도	높음	시범단계
개조 작업량	많음	많음
설비의 전용공간	필요함	필요 없음
송풍기에 미치는 영향	적음	적음
압력저항(Pa)	500	1,000
개조 후 에너지소모량(kWh)	342	270
초기투자비용(억 원)	83.3	65
연간 유지보수 비용(억 원)	2.6	2.5

<자료 출처 : 북극성대기망 자료 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

▶ 탈황설비 개조

- 1) (개조前 현황) 기존 탈황설비는 석회석-석고법인 습식 탈황법이 적용되어 있으며, #1, #2 발전세트 마다 1개의 탈황설비가 설치되어 있다. 각 발전세트의 탈황설비의 연기처리는 해당 보일러의 최대 연속 발열량(MCR, 最大连续蒸发量)³⁾기준으로, 배출 연기량 100% 조건에서 황함량 1.7%, 탈황효율 96%를 보였다. 공용 시스템(公用系统)은 주로 흡수제 준비, 석고 탈수시스템, 공정수 공급 시스템, 배기가스 시스템, 폐수처리 시스템 등으로 구성되어 있고, 탈황 부산물은 석고 탈수 후 함습량(含湿量)이 10% 미만이다.
- ① (#1발전세트) 탈황설비는 아직 개조 전(前)이며, 이산화황 배출농도는 100~200mg/m³이다.
- ② (#2발전세트) 집진설비와 탈황설비를 동시에 개조 중이며, 쌍탑이중순환공정(双塔双循环工艺)을 적용하였다. 이때, 흡수탑은 2급 흡수탑(两级吸收塔)을 설치하였고, 공탑(空塔)의 분무노즐로 분사되며, 기존에 설계된 이산화황 배출농도는 50mg/m³ 미만이다.

3) 최대 연속 발열량(MCR, maximum continuous evaporation, 最大连续蒸发量) : 보일러의 압력 증기 온도 등의 소정 조건 하에서, 보일러의 정비(整備)가 양호한 상태에서 장시간에 걸쳐 발생할 수 있는 최대 증발량을 최대 연속 증발량이라고 한다. 그것의 약 80% 정도의 발열량일 때 보일러 효율이 최대가 되는 것이 보통이므로 이것을 경제(經濟) 증발량 또는 경제 부하라고 한다.(네이버 지식백과 발췌, 2020.8.7.)

- 2) (탈황설비 개조) 동 발전소 탈황설비 운영현황에 따라 초저배출 개조시 다음을 고려해야 한다.
- ① (흡수탑 개조) 기존에 설계된 산화구(氧化槽)의 용적(容積)은 작고 유속이 높아 황분(硫分)과 연기량이 모두 증가될 경우, 흡수탑의 각 매개변수가 초저배출 표준 요구사항에 부합하지 못하기 때문에 흡수탑 시스템을 개조해야 한다.
 - ② (시스템 용적확장) 산화송풍기(氧化风机) 및 배관 등 용적이 작아 석탄황분(燃煤硫分, 석탄에 포함되어 있는 황성분)에 대한 효과가 떨어지기 때문에 시스템의 용적을 확장하여 설비에 대한 효율성을 높이도록 한다.
 - ③ (폐수처리 능력제고) 기존 폐수시스템의 처리능력은 낮기 때문에 탈황시스템에서 염소이온(Chloride ion, 氯离子)⁴⁾ 농도가 높아 폐수처리 능력 향상을 위해 개조해야 한다.

<표2. 탈황설비 개조 현황>

구분	주요내용	구분	주요내용
개조작업량	많음	황분에 대한 적응성	높음
시공난이도	어려움	시스템 압력(Pa)	1,000
설비면적	비교적 큼	총 투자액(억원)	64.7
개조내용	<ul style="list-style-type: none"> · 흡수탑 개조, 시스템 용적확장, 폐수처리 능력 제고 등 · 기존 흡수탑을 1급 흡수탑으로 교체 및 2급 흡수탑 신규 설치 등 		

<자료 출처 : 북극성대기망 자료 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

- 3) (개조방안) #1, #2발전세트 및 탈황폐수 처리시스템 개조로 분류된다.
- ① (#1발전세트) 흡수탑 개조는 단탑이중순환기술(单塔双循环技术), 쌍탑이중순환기술(双塔双循环技术) 등이 있으며, #1발전세트는 쌍탑이중순환기술과 산화공기시스템을 개조하였다. 이는 황분의 증가로 인해 기존 산화송풍기는 초저배출 요구사항에 부합하기 어렵기 때문에 1급 흡수탑(一级吸收塔)을 산화송풍기 2대로 교체하고, 각각 1급 고속원심송풍기(单级高速离心风机)를 사용하도록 개조한다.
 - ② (#2발전세트) 동 발전세트 또한 1#발전세트와 같이 쌍탑이중순환기술을 사용하였다. 이때, 2급 흡수탑을 설치하고, 흡수탑은 모두 공탑에서 분무노즐로 분사된다. 또한 발전세트의 공용 탈황시스템은 모두 배출표준에 부합하여 개조가 필요 없는 상황이지만 #2발전세트의 1급 흡수탑의 분사노즐이 마모가 심해 교체가 필요하다.
 - ③ (탈황폐수 처리시스템) 대용량 폐수를 순환시키는 급수펌프와 스윌러(Swirlor, 旋流器)⁵⁾의 교체가 필요하다. 알칼리성 수산화나트륨(NaOH) 폐수가 포함되어 있기 때문에 알칼리 제거펌프 1대, 알칼리 저장탱크 1대, 알칼리 계량펌프 2대를 신규로 설치한다. 또한 기존의 정화조 용량이 작기 때문에 추가로 하나 설치하고, 슬러지처리 시스템은 원판압력여과기(plate and frame filter press, 原板框压滤机)⁶⁾로 교체한다.

4) 염소이온(Chloride ion, 氯离子) : NaCl(염화나트륨) 등의 염화물 전해질을 물에 녹일 때, 전리하는 음이온으로서, Cl-로 표시된다. 보일러수의 농축 정도를 알기 위하여 이것을 측정하는데 보일러수 속의 Cl-농도가 높으면 부식이 촉진되므로 유해한 이온이다. (네이버 지식백과 발췌, 2020.8.7.)

5) 스윌러(Swirlor, 旋流器) : 압력 분무 오일 버너나 고압 기류 분무 오일 버너의 보염기(保焰器)로서 사용되는 것인데, 선회 날개를 이용하여 공기를 선회시키고, 중심부가 부압이 되도록 함에 의해 착화가 가능한 저속의 고온 순환역을 형성하는 것. 선회기는 축류식, 반경류식, 혼류식으로 나누어진다. (네이버 지식백과 발췌, 8.10)

6) 원판압력여과기(plate and frame filter press, 原板框压滤机) : 판형태의 압력여과기는 화학공업 탈수에 가장 우선적으로 사용되는 기계이다. 판자 여과기는 일반적으로 간헐식 조작, 고(高) 초기투자비용, 저(低) 여과능력의 특징이 있지만, 큰 여과동력, 높은 함고율로 인해 여과 액체가 맑고 고체폐기물 회수가 용이하다. 또한 약품소모량이 적어 소형 오수처리장에 널리 응용되고 있다. (바이두 백과 발췌, 2020.8.10.)

<표3. 탈황설비 개조방안>

구분	세부내용
#1발전세트	<ul style="list-style-type: none"> · 쌍탑이중순환기술 적용 및 산화공기시스템 개조 · 황분의 증가로 인해 기존 산화송풍기는 초저배출 요구사항에 충족하기 어렵기 때문에 1급 흡수탑을 산화송풍기 2대로 교체
#2발전세트	<ul style="list-style-type: none"> · 쌍탑이중순환기술 적용, 2급 흡수탑 설치 · 흡수탑은 모두 분무노즐로 분사되며 1급 흡수탑의 분무노즐 마모 심해 개조 필요
탈황폐수 처리시스템	<ul style="list-style-type: none"> · 대용량 폐수를 회전시키기 위해 급수펌프와 폐수 스월러 교체 필요 · 정화조 용량이 작아 추가로 설치 및 슬러지처리 설비를 원판압력여과기로 교체

<자료 출처 : 북극성대기망 자료 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

▶ 탈질설비 개조

- 1) (개조前 현황) #1, #2발전세트 모두 SCR법을 적용하였다. 이때 SCR반응기와 요소(尿素) 저장·공급시스템은 절탄기(Economizer, 省煤器⁷⁾)에서 공기에열기(air pre-heater, 空气预热器⁸⁾)로 유입되기 전에 설치되어 있다. #1, #2발전세트 보일러의 설비 부하능력이 낮아지면서 연기통로 유입구의 질소산화물 농도가 점차 증가하였다. 설비부하가 240MW 이상 일 때, 유입구의 질소산화물 농도는 최고 350mg/m³로 나타났으며, 집진처리 후 배출구의 질소산화물 배출농도는 70~80mg/m³로 초저배출 요구사항에 부합하지 못하고 있는 상황이다.
- 2) (탈질설비 개조) 탈질설비 운영현황에 따라 초저배출 개조는 다음과 같은 측면을 고려해야 한다.
 - ① (처리효율 제고) SCR공법을 사용하며, 현재 설계된 처리효율은 75%이지만 이는 초저배출 요구사항에 부합하지 못하기 때문에 처리효율을 86% 이상으로 향상시켜야 한다.
 - ② (촉매제 부피) 기존의 촉매제는 연기의 회분(ash content, 灰分⁹⁾)이 적어 초저배출 요구사항에 부합할 수 있었다. 하지만 설비의 과부하로 인해 촉매제의 부피가 줄어들면서 초저배출 요구사항을 충족하기 어렵기 때문에 촉매제의 부피를 확대하여 탈질효율을 높이도록 한다.
 - ③ (회분 생성억제) 연기가 SCR 반응기의 촉매제를 통과할 때, 공기에열기 하단부분에서 삼산화황(SO₃)과 암모니아(NH₃)를 황산수소암모늄(NH₄HSO₄)으로 형성하면서, 146~207°C에서 대량의 회분을 생성하게 된다. 이때 생성된 회분은 공기에열기의 열전달 부품에 부착되어 설비의 부식, 재 막힘 등 문제가 발생하기 때문에 회분 생성을 억제할 수 있어야 한다.
- 3) (개조방안) 촉매제 개조 및 공기에열기를 개조하여 질소산화물 배출농도를 감소시키도록 한다.
 - ① (촉매제 개조) 신규 촉매제 설치와 기존 촉매제를 이중 촉매제로 교체하는 방법이 있다. 신규 촉매제의 경우, 추가로 설치 가능한 용적이 비교적 작아 적절하지 않기 때문에 투자비용 절감과 기존 촉매제의 성능을 충분히 활용할 수 있는 이중 촉매제로 교체하였다.

7) 절탄기(Economizer, 省煤器) : 보일러 전열면(传热面)을 가열하고 난 연도(烟道) 가스에 의하여 보일러 급수를 가열하는 장치. 이것의 장점은 열 이용률의 증가로 인한 연료 소비량의 감소, 증발량의 증가, 보일러 몸체에 일어나는 열응력(热应力)의 경감, 스케일의 감소 등이 있다.(네이버 지식백과 발췌, 2020.8.10.)

8) 공기에열기(air pre-heater, 空气预热器) : 연소실에 공급하는 공기를 배기하는 열을 이용해서 덥게 하는 장치이다.(네이버 지식백과 발췌, 2020.8.10.)

9) 회분(ash content, 灰分) : 유기성 물질을 태우면 탄소 화합물은 날라가고 무기 성분만이 찌꺼기로 남는 재이다.(네이버 지식백과 발췌, 2020.8.10.)

② (공기에열기) 기존의 공기에열기에서 발생하는 회분, 재 막힘 등으로 인한 정산운영에 영향을 미치는 문제를 해결하기 위해 탈질설비를 개조할 때, 이미 증설된 절탄기의 버킷(bucket, 灰斗)¹⁰⁾의 운전조건에 대한 관리를 강화하여 일정한 온도와 정상운행을 보장한다. 특히, 공기에열기 개조는 설비교체의 최소화를 위해 증기터빈 회전부의 열교환 부품만 개조를 진행한다. 그 중 열단자(热端)·냉단자(冷端) 부품은 현장에서 세척만 하도록 한다.

<표4. 탈질설비 개조방안>

구분	세부내용
촉매제 개조	<ul style="list-style-type: none"> · 신규 촉매제 설치와 기존 촉매제를 이중 촉매제로 교체 방법 적용 가능 · 기존 촉매제 성능을 활용하고 투자비용이 낮은 이중 촉매제 적용
공기에열기	<ul style="list-style-type: none"> · 기존 절탄기에서 발생하는 회분, 재 막힘 등의 문제로 정상운영에 영향을 미치는 문제를 해결하기 위해 절탄기의 버킷을 강화하여 일정한 온도로 정상운영 보장 · 증기터빈 회전부의 열교환 부품 개조하며, 열단자·냉단자 부품은 현장에서 세척 실시

<자료 출처 : 북극성대기망 자료 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

▶ 초저배출 개조공정 결과

동 발전소 #1, #2발전세트의 초저배출 개조공정에 대한 결과, 탄질(coal property, 煤种)¹¹⁾과 공정현황에 따라 차이가 있다. 하지만 일반적인 #1, #2발전세트의 오염물질 배출농도는 <표5>와 같으며, 각 발전세트에서 배출되는 오염물질은 모두 석탄화력발전 초저배출 표준(입자상물질 10mg/m³, 이산화황 35mg/m³, 질소산화물 50mg/m³ 미만)에 부합하는 것을 확인하였다.

<표5. 초저배출 개조 후 배출농도>

구분	입자상물질(mg/m ³)	이산화황(mg/m ³)	질소산화물(mg/m ³)
초저배출 표준	10	35	50
#1발전세트	7.1	13	46
#2발전세트	7.6	12	44

<자료 출처 : 북극성대기망 자료 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

▶ 시사점

본 기술동향은 신장자치구 지역의 330MW 초임계 압력 석탄발전세트 2대에 대한 초저배출 개조공정이다. ▲집진설비는 #1발전세트는 기존의 전기집진기의 성능검측, 고주파전원, 예비전압 응집기(预留相变凝聚器), 습식정전기 집진기 장치 개조이며, 2#발전세트는 기존 집진설비에 고주파 전원을 추가하여 전기제어기술 개조를 진행하였다. ▲탈황설비는 초저배출 개조를 위해 #1, #2발전세트에 쌍탑이중순환기술 및 고주파전원을 적용하였다. ▲탈질설비는 두 발전세트 모두 SCR법을 적용하며, 이중 촉매제로 교체하였고 #1발전세트는 공기에열기를 추가로 설치하였다. 특히, 개조공정 후 #1, #2발전세트에서 배출되는 오염물질(입자상물질, 이산화황, 질소산화물)은 모두 초저배출 표준에 부합한 것으로 나타났다. 또한 2020년 말까지 석탄화력발전 초저배출 개조 완성 목표를 달성하기 위해 향후 서부지역의 개조 수요가 많을 것으로 전망된다.

북극성대기망, <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20200804/1094481.shtml>, 2020.8.11.접속

10) 버킷(bucket, 灰斗) : 석탄·자갈·광석 등 야적되어 있는 비포장물을 담아 올려 운반하는 기구를 뜻한다.(네이버 지식백과 발췌, 2020.8.10.)
11) 탄질(coal property, 煤种) : 석탄의 물리적 성질과 화학적 성질을 가리킴을 뜻한다.(네이버 지식백과 발췌, 2020.8.10.)



중국환경산업 주간기술동향

발행

2020년 8월 11일 KEITI 중국사무소

기획총괄

▶ 박재현 소장(korea@keiti.re.kr)

주저자

▷ 차목승(cms0522@keiti.re.kr)

자료제작

▷ 김종균(jaykim@keiti.re.kr)

국민과 함께
미래를 여는
글로벌 환경전문기관

중국환경산업 주간기술동향은 매주 화요일 발행됩니다.

문의 : +86-10-8591-0997~8