

Analysis of the Carbon Emission Reduction Potential for Natural Gas Distributed Energy Applications

Haiwen Ye

China National Technology Import & Export Corporation, Beijing, 100055, China

Abstract

In order to combat climate change, the global governments need to promote carbon dioxide-based greenhouse gas emission reduction. China has proposed that carbon dioxide emissions will peak by 2030 and achieve carbon neutrality by 2060. In recent years, China's natural gas supply capacity has gradually strengthened, the development of natural gas distributed energy has also developed rapidly, and the proportion in the energy system is increasing. This paper calculates and analyzes the potential of applying natural gas distributed energy to replace traditional coal cogeneration.

Keywords

natural gas distributed energy; carbon emission reduction; desulfurization

天然气分布式能源应用的碳减排潜力分析

叶海文

中国技术进出口集团有限公司, 中国·北京 100055

摘要

为应对气候变化,全球要推动以二氧化碳为主的温室气体减排。中国提出,二氧化碳排放力争2030年前达到峰值,力争2060年前实现碳中和。近年来,中国的天然气供给能力逐渐加强,天然气分布式能源的发展也十分迅猛,在能源系统中的比例不断提高。论文对应用天然气分布式能源替代传统燃煤热电联产所产生的碳减排进行计算并分析其碳减排潜力。

关键词

天然气分布式能源; 碳减排; 脱硫

1 引言

近年来,随着全球气候变暖,全球气候正发生着急剧的变化,越来越多的自然灾害正威胁着人类的生存环境。中国是煤炭消费大国,由煤炭消费带来的二氧化碳排放是最主要的排放源。天然气分布式能源的应用,对碳减排有积极意义。论文以天然气分布式能源替代传统燃煤热电联产为例,分别采用国家发改委发布的《中国发电企业温室气体排放核算方法与报告指南》(以下简称《核算方法指南》)以及清洁发展机制发布的方法论来计算分析其碳减排潜力。

2 以《核算方法指南》为基础的碳减排核算

论文以某工业园区天然气热电联供能源站替代原有燃煤热电联产机组为例,采用《核算方法指南》中的方法计算二氧化碳减排量^[1]。

【作者简介】叶海文(1985-),男,中国甘肃武威人,硕士,工程师,从事分布式能源、环保研究。

2.1 核算边界

工业园区蒸汽需求约100t/h(0.8Mpa, 220℃)。此天然气热电联供能源站为燃气轮机+余热锅炉的独立循环的方式,以此工业园区的天然气热电联供能源站为独立核算单位,核算处于其运营控制权之下的所有生产场所和生产设施产生的温室气体排放。此天然气热电联供能源站的系统参数如下:

- ①机组供热能力: 105.4吨蒸汽(1Mpa, 220℃)/小时。
- ②机组额定装机容量: 49MW。
- ③机组最大外供电量: 45.815MW。
- ④机组电效率: 33.6%。
- ⑤机组热效率: 54.1%。
- ⑥机组总效率: 87.7%。
- ⑦年利用小时数: 7800h。
- ⑧厂用电率: 6.5%。
- ⑨凝结水回收率: 80%。

2.2 排放源

天然气热电联供装置核算边界内可能的温室气体排放源包括:

①机组燃烧化石燃料产生的二氧化碳排放。

②机组购入电力所对应的电力生产环节产生的二氧化碳排放。

③燃料系统泄露或未完全燃烧产生的甲烷排放。

2.3 天然气热电联供装置的排放核算

根据《核算方法指南》，此天然气机组的二氧化碳排放量计算如下。

2.3.1 机组燃烧化石燃料产生的二氧化碳排放

机组燃烧化石燃料产生的二氧化碳排放按式 1 计算：

$$E_{\text{燃烧}} = \sum_{i=1} (ADi \times EFi) \quad (1)$$

式中： $E_{\text{燃烧}}$ —化石燃料燃烧排放量（ tCO_2/GJ ）；

ADi —第 i 种化石燃料的活动数据（ GJ ）；

EFi —第 i 种化石燃料的二氧化碳排放因子（ tCO_2/GJ ）。

化石燃料活动数据用式 2 计算：

$$ADi = NCVi \times FCI \quad (2)$$

式中： ADi —第 i 种化石燃料的活动数据（ GJ ）。

FCI —第 i 种化石燃料的净消耗量，对固体或液体燃料，单位为吨（ t ）；对气体燃料，单位为万标准立方米（ $10^4 Nm^3$ ）。

$NCVi$ —第 i 种化石燃料的收到基低位发热量，对固体或液体燃料，单位为吉焦/吨（ GJ/t ）；对气体燃料，单位为吉焦/万标准立方米（ $GJ/10^4 Nm^3$ ）。

化石燃料燃烧二氧化碳排放因子用式 3 计算：

$$EFi = CCI \times OFi \times 44/12 \quad (3)$$

式中： EFi —第 i 种化石燃料的二氧化碳排放因子（ $t CO_2/GJ$ ）；

CCI —第 i 种化石燃料的单位热值含碳量（ $t C/GJ$ ）；

OFi —第 i 种化石燃料的碳氧化率（%）；

$44/12$ —二氧化碳与碳的相对分子质量之比。

机组燃烧的化石燃料仅为天然气，机组燃烧的天然气收到基低位发热量为 $36.885 MJ/Nm^3$ ，烃类的体积含量分别为 $CH_4(93.1629\%)$ 、 $C_2H_6(3.7439\%)$ 、 $i-C_4H_{10}(0.1098\%)$ 、 $n-C_4H_{10}(0.1109\%)$ 、 $i-C_5H_{12}(0.0866\%)$ 、 $n-C_5H_{12}(0.0868\%)$ 、 $C_6+(0.1009\%)$ 。根据各个烃类的体积含量占比，以及此天然气的低位发热量，将天然气中 C_6+ 的二氧化碳排放因子全部按 C_6 计，计算可得此天然气的二氧化碳排放因子为 $0.0543 t CO_2/GJ$ 。此项目天然气的年消耗量为 $92647482 Nm^3/a$ ，天然气燃烧的碳氧化率取 $0.99^{[2]}$ 。

根据式 1，计算得出此天然气热电联产系统由机组燃烧化石燃料产生的二氧化碳排放量为 $220162 t CO_2/a$ 。

2.3.2 燃料系统泄露或未完全燃烧产生的甲烷排放

天然气的主要成分甲烷也是造成温室效应的温室气体之一。在天然气热电联供系统中，甲烷可能的排放源为燃料系统的泄露以及燃气轮机排烟中未燃尽的甲烷。燃料系统的泄露会触发报警并自动切断燃料供给。在厂区内天然气管道

的长度非常有限，发生泄露的概率较低。甲烷泄漏量相比于燃气轮机烟气中的二氧化碳量，数量级很小，可忽略不计。

综上所述，此天然气热电联供装置的碳排放量为燃烧天然气产生的碳排放，为 $220162 t CO_2/a$ 。

2.4 燃煤热电联产机组的温室气体排放

2.4.1 核算条件及边界

被替代的燃煤热电联产机组由循环流化床锅炉和背压式汽轮机组成，系统参数如下：

①循环流化床锅炉：110t/h，4.9Mpa，435℃，排污率 2%，锅炉效率 88%。

②背压式汽轮机：B8-4.9/0.98，额定进汽 101.3t/h，排汽温度 268℃，排气压力 0.98Mpa。

③额定装机发电容量：8MW。

④额定最大外供电能力：7.12MW。

⑤煤种参数：烟煤，发热量 4226kcal/kg，煤固定碳含量 46.55%，含硫量 1.94%。

⑥年利用小时数：7800h。

⑦综合厂用电率：11%。

⑧凝结水回收率：80%。

2.4.2 排放源

燃煤热电联产机组可能的温室气体排放源包括：

①机组燃烧化石燃料产生的二氧化碳排放。

②机组购入电力所对应的电力生产环节产生的二氧化碳排放。

③烟气脱硫系统使用碳酸盐产生的二氧化碳排放。

④运煤、除灰渣用的运输车辆消耗的燃料产生的二氧化碳排放。

2.4.3 二氧化碳排放核算

①机组燃烧化石燃料产生的二氧化碳排放。

根据式 1、式 2、式 3 以及后面所列的机组参数，此燃煤机组的年煤炭消耗量为 $78254 t/a$ ，取煤的燃料氧化率为 $93\%^{[3]}$ ，计算可得，此燃煤机组燃烧化石燃料产生的二氧化碳排放为 $266848 t CO_2/a$ 。

②烟气脱硫系统使用碳酸盐产生的二氧化碳排放。

循环流化床锅炉通常通过在炉内添加石灰石进行脱硫，当采用较高的钙硫比时，炉内脱硫效率可达 80% 以上。剩余未脱除的硫大部分随烟气进入烟气脱硫系统进一步处理。当采用炉内脱硫或烟气湿法（石灰石-石膏）脱硫时，脱硫剂碳酸钙的使用会产生二氧化碳。

此燃煤机组所用煤的含硫量为 1.94%，在仅考虑炉内脱硫的情况下，钙硫比为 1.8 时，脱硫所产生的二氧化碳为 $8072 t CO_2/a$ 。

③运煤、除灰渣用的运输车辆消耗的燃料产生的二氧化碳排放。

煤的运输由卖方承担，煤的运输过程中产生的碳排放并不在法人企业的运营核算范围内。灰的运输由买方负责，

灰渣外运所产生的二氧化碳也不计入核算范围。与运煤除灰相关的厂内燃油运输机械的二氧化碳排放非常有限,年排放量的数量级在几吨以内,可忽略不计。

此燃煤机组的总碳排放为燃煤产生的碳排放加上脱硫产生的碳排放,为 $266848\text{t CO}_2/\text{a}+8072\text{t CO}_2/\text{a}=274920\text{t CO}_2/\text{a}$ 。

2.5 二氧化碳减排量核算

根据上述计算结果,将此燃煤机组替代为天然气热电联产装置后,直接碳减排量为燃煤机组二氧化碳排放减去天然气机组二氧化碳排放,为 $274920\text{t CO}_2/\text{a}-220162\text{t CO}_2/\text{a}=54758\text{t CO}_2/\text{a}$ 。

在天然气分布式能源替代此燃煤机组后,供热能力与之前相当,但供电量远高于燃煤机组,增加的供电量为 38.695MW 。由供电量的增加带来的碳减排量为:增加的供电量乘以所在电网的简单电量边际排放因子。以华北电网的电量边际排放因子 $0.9419\text{t CO}_2/\text{MWh}$ 计算,增加的供电量带来的碳减排为 $38.695\text{MW} \times 0.9419\text{t CO}_2/\text{MWh} \times 7800\text{小时/年}=284285\text{t CO}_2/\text{a}$ 。

碳减排总量为直接减排量与新增供电量产生的减排量之和,为 $54758\text{t CO}_2/\text{a}+284285\text{t CO}_2/\text{a}=339043\text{t CO}_2/\text{a}$ 。

3 以 CDM (清洁发展机制) 的方法论为基础的碳减排计算

CDM (清洁发展机制) 是《京都协议书》中引入的灵活履约机制之一。CDM 发布了许多应用于不同工业领域的碳减排方法论,其中 AM0107^[4] 为利用新建天然气热电联产以降低温室气体排放的方法论。本章以 CDM 的方法论 AM0107 为基础,仍以前面描述的天然气热电联产装置为例,计算其碳减排量。

3.1 项目排放

根据方法论 AM0107,此天然气热电联产装置的二氧化碳排放计算过程如下。

①由燃烧化石燃料产生的二氧化碳排放由式 4 计算:

$$\text{PE}_{\text{FC},j,y} = \sum_i^n (\text{FC}_{i,j,y} \times \text{COEF}_{i,y}) \quad (4)$$

式中: $\text{PE}_{\text{FC},j,y}$ —燃烧化石燃料产生的二氧化碳排放;

$\text{FC}_{i,j,y}$ —第 i 种燃料在第 j 工艺过程下燃烧的消耗量;

$\text{COEF}_{i,y}$ —第 i 种燃料的年二氧化碳排放系数 ($\text{tCO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{a}$)。

此天然气机组仅消耗天然气为燃料,根据 AM0107 中的天然气参数的缺省值,二氧化碳排放系数 $\text{COEF}_{i,y}$ 为 $0.0642\text{t CO}_2/\text{GJ}$ 。根据式 4 计算可得,由燃烧天然气产生的二氧化碳排放为 $188604\text{t CO}_2/\text{a}$ 。

②上游燃料泄露排放。

在上游的燃料生产、处理及运输环节,不可避免的产生泄露、逃逸并消耗一定的燃料以及电能,根据 AM0107 中的简单估算方法,由上游燃料泄露产生的这部分二氧化碳排放由下式计算:

$$\text{LE}_{\text{US},y} = \sum_x (\text{EF}_{\text{US},x,\text{default}} \times (\text{FC}_{\text{PJ},x,y} - \text{FC}_{\text{BL},x,y})) \quad (5)$$

$$\text{FC}_{\text{BL},x,y} = (\text{HG}_{\text{PJ},y} / \eta_{\text{BL,HG}} + \text{EG}_{\text{PJ},y} \times 3.6 / \eta_{\text{BL,EG}}) / 1000 \quad (6)$$

如果式 5 的计算结果大于 0,则结果取计算值。如果式 5 的计算结果小于 0,则结果取 0。

式中: $\text{LE}_{\text{US},y}$ —上游燃料泄露产生的二氧化碳排放;

$\text{FC}_{\text{PJ},x,y}$ —新建项目中天然气的年消耗量 (TJ/a);

$\text{FC}_{\text{BL},x,y}$ —燃料 x 在基准线情况下的年消耗量 (TJ/a);

$\text{EF}_{\text{NG},x,\text{default}}$ —燃料 x 的泄露排放因子的缺省值 (tCO_2/TJ);

$\text{HG}_{\text{PJ},y}$ —新建机组的供热量 (GJ);

$\text{EG}_{\text{PJ},y}$ —新建机组的供电量 (MWh);

$\eta_{\text{BL,HG}}$ —假设的基准线的热电联产机组的供热效率;

$\eta_{\text{BL,EG}}$ —假设的基准线的热电联产机组的供电效率。

按照基准线排放是基于燃煤热电联产机组,基准线的供热效率和供电效率按照 GB 35574—2017《热电联产单位产品能源消耗限额》中的规定的 2 级能耗限额等级,即供电煤耗 280g 标准煤/ kWh ,供热煤耗 40.5g 标准煤/ GJ ,折合供电效率为 43.9% ,供热效率为 84.3% 。根据 AM0107,假设燃煤来源为中国,则上游燃煤泄露排放因子为 $21.4\text{t CO}_2/\text{TJ}$ 。根据相关数据可知,新建天然气机组的天然气的年消耗量为 $92647482\text{Nm}^3/\text{a}$,低位发热量为 44.2MJ/kg 。根据 AM0107,天然气泄露排放因子的缺省值为 $2.9\text{t CO}_2/\text{TJ}$,LNG (液化天然气) 的泄露排放因子的缺省值为 $16.2\text{t CO}_2/\text{TJ}$ 。根据式 5、式 6 计算可知,当上游燃料供应来源为气态天然气时, $\text{LE}_{\text{US},y}$ 的计算结果为 $-114777\text{t CO}_2/\text{TJ}$;当上游燃料供应来源为 LNG 时, $\text{LE}_{\text{US},y}$ 的计算结果为 $-75740\text{t CO}_2/\text{TJ}$ 。计算结果均小于 0,则由于上游燃料泄露产生的二氧化碳排放取 0。

3.2 基准线排放

根据方法论 AM0107,热电联产机组的基准线排放用式 7 计算:

$$\text{BE}_y = (\text{HG}_{\text{PJ},y} / \eta_{\text{BL,HG}} + \text{EG}_{\text{PJ},y} \times 3.6 / \eta_{\text{BL,EG}}) \times \text{EF}_{\text{BL},y} \quad (7)$$

式中: BE_y —燃煤热电联产年二氧化碳基准线排放 (tCO_2/a);

$\text{HG}_{\text{PJ},y}$ 为项目年供热量 (GJ/a);

$\text{EG}_{\text{PJ},y}$ 为项目年供电量 (MWh/a);

$\eta_{\text{BL,HG}}$ 为燃煤热电联产的基准线供热效率 (%);

$\eta_{\text{BL,EG}}$ 为燃煤热电联产的基准线供电效率 (%);

$\text{EF}_{\text{BL},y}$ 为燃煤热电联产的基准线二氧化碳排放因子 ($\text{t CO}_2/\text{GJ}$)。

根据上面可知,项目外供电功率为 45.815MW ,年有效小时数 7800h ,折合年供电量为 357357MWh 。项目外供蒸汽为 105.4t/h ,折合年供热量为 2084074GJ 。基准线的供热效率和供电效率按照 GB 35574—2017《热电联产单位产品能源消耗限额》中规定的 2 级能耗限额等级,即供电煤耗 280g 标准煤/ kWh ,供热煤耗 40.5g 标准煤/ GJ ,折合供电效率为 43.9% ,供热效率为 84.3% 。根据方法论 AM0107

引用的IPCC2006中无烟煤的二氧化碳排放因子为0.0946t CO₂/GJ。根据式7计算得出基准线排放为511095t CO₂/年。

3.3 碳减排量

碳减排量由式8计算：

$$ER_y = BE_y - PE_y - LE_y \quad (8)$$

式中： ER_y —一年二氧化碳减排量；

BE_y —基准线年二氧化碳排放量（由3.2节计算得到）；

PE_y —项目燃烧化石燃料产生的年二氧化碳排放量（由3.1节计算得到）；

LE_y —上游燃料泄漏产生的年二氧化碳排放量（由3.1节计算得到）。

则碳减排量 $ER_y = 511095t \text{ CO}_2/\text{年} - 188604t \text{ CO}_2/\text{年} - 0 = 322419t \text{ CO}_2/\text{年}$ 。

4 计算结果分析

根据2.3的计算结果，此天然气分布式热电联产机组（替代原有的燃煤热电联产机组），采用《核算方法指南》进行计算，碳减排量约为339043t CO₂/a，单位供能碳减排量为0.21t CO₂/MWh，单位供能碳减排量下降了48.9%。根据3.3的计算结果，当新建一个参数相当的天然气分布式机组，采用CDM的方法论AM0107计算，碳减排量约为322419t CO₂/a，单位供能碳减排量为0.34t CO₂/MWh，与基准线排放相比，单位供能碳减排量下降了63.1%。

两种计算方法计算的项目的总碳减排量在同一个数量级，但折算为单位供能的碳减排量差别较大，这主要是因为采用《核算方法指南》计算时，被替代的燃煤机组有较高

的热电比，热电比越高，单位供能燃料消耗越低，由此带来的碳减排量会低于替代低热电比机组的减排量。采用CDM AM0107计算时，是以替代与天然气机组同样热电比的燃煤机组，此时单位供能的碳减排量会更大。相对《核算方法指南》，方法论AM0107还包含了上游燃料加工、运输过程中的碳减排估算。无论采用哪种计算方法，我们都可以看到，应用天然气分布式能源替代原有燃煤机组有可观的二氧化碳碳减排量。

5 结语

论文以实际天然气热电联供项目为例，分别以《中国发电企业温室气体排放核算方法与报告指南》和CDM的方法论AM0107对碳减排量进行核算，计算结果和数量级较为接近。无论采用哪种方法计算，应用天然气分布式能源替代煤炭热电联产具有可观的二氧化碳碳减排量。除了发展新能源以降低煤炭消费比重，天然气的高效利用也是降低煤炭消费，改进能源结构的重要手段。天然气作为中国现阶段的重要过渡性能源，在碳减排方面发挥着重要作用。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家发展与改委委员会.中国发电企业温室气体排放核算方法与报告指南[EB].2013.
- [2] 政府间气候变化专门委员会.2006年IPCC国家温室气体清单指南第二卷[EB].2006.
- [3] H.I.H. Saravanamuttoo, G.F.C. Rogers, H. Cohen P.V. Straznicky, A.C. Nix. Gas Turbine Theory[M].北京:航空工业出版社,2015.
- [4] 洪方明.中小型循环流化床锅炉SO₂超低排放技术研究及应用[J].电力学报,2011,26(3):34-35.