

碳排放及燃煤约束下的电源规划及其效益评价

罗金山^{1,2}, 路畅¹, 孟繁骏¹

(1. 国网北京经济技术研究院, 北京市 102209; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北省武汉市 430072)

摘要: 优化电源规划是应对电力系统“碳锁定”效应, 促进电力系统减少碳排放的重要举措。考虑到国内以煤炭为主的能源结构, 有必要分析碳排放及燃煤约束对电源规划的影响。在分析碳捕集电厂运行特性的基础上, 建立了考虑碳排放及燃煤约束的低碳电源规划模型, 并在模型中采用典型日的运行校验系统是否具备足够的调峰能力。基于国内典型地区电力系统, 对不同碳排放总量约束、不同可再生能源发展场景及不同煤炭资源供应约束下的常规火电及碳捕集电厂的扩展规划进行了优化分析, 分析结论表明碳捕集电厂可以充分适应电力系统的碳减排目标, 满足新能源大规模发展的调峰需求。

关键词: 低碳电力; 碳排放; 电源规划; 碳捕集电厂

0 引言

电力行业排放的二氧化碳占据国内每年化石燃料燃烧碳排放总量的一半, 实现碳减排是低碳经济形势下电力行业发展的新主题^[1-2]。电力行业具有显著的“碳锁定”效应, 即电力系统在未来相当长一段时期的碳排放状况将被当前系统的电源及电网结构锁定。为此, 在规划阶段需要充分考虑电力系统的低碳发展目标^[3]。发电环节作为电力行业碳排放的直接来源, 是实施碳减排的关键主体。考虑到国内以煤炭为主的能源结构在短期内难以改变, 在电源规划中需协调好火电的发展规划及低碳发展目标的实现。碳捕集电厂作为一种灵活的低碳火电电源^[4], 是国内电力生产低碳化的重要技术选项。

在低碳电源规划及碳捕集电厂的运行特性方面, 国内外已经开展了大量的研究工作。文献[5]分析了面向低碳目标的电源规划模式, 揭示研究了低碳电源规划的各类关键要素和技术。文献[6]考虑了风、光、水、火等各种发电形式的低碳成本效益, 建立了考虑碳减排效益的电源规划模型。文献[7]提出了基于区域比较的碳排放权分配机制, 并由此建立了考虑碳排放交易的低碳电源规划模型。在碳捕集电厂方面, 文献[8]评估了可用于发电厂的三种碳捕集技术, 分别为燃烧前捕集、燃烧后捕集及富氧燃

烧, 并对比分析了其成本和排放特性。在此基础上, 文献[9-12]总结分析了碳捕集电厂的灵活运行方法的发展潜力、实现方式和技术特性, 并建立了碳捕集电厂的灵活运行模型。文献[13]考虑了碳捕集技术的不同配置选项和发展路线, 主要研究了碳捕集电厂和碳捕集预留技术在规划中建模。文献[14]则从全寿命周期的角度出发, 建立了以实现低碳效益最大化为目标的碳捕集系统与风电的协调投资模型, 但没有计及碳捕集灵活调节能力对促进风电消纳的作用。文献[15]在考虑了系统投资决策的不可逆性和可延迟性以及碳价和碳减排成本的不确定性的基础上, 得出了投资时机临界值和开发发电厂碳捕集系统的最优投资策略。

碳捕集电厂为发电环节的规划与运行提供了多维的灵活调节空间, 碳捕集电厂可减少化石燃料燃烧造成的碳排放, 碳捕集预留则为规避低碳风险提供了技术途径, 在此方面的研究已经取得了丰富的成果。然而, 需要注意到碳捕集电厂是以额外的能量消耗为代价的, 由此会产生额外的煤耗。此外, 可灵活运行的碳捕集电厂具备优异的调峰性能, 能够更好地适应风电、光伏等新能源的大规模发展。在电源规划中充分计及碳捕集电厂在碳排放、调峰性能及煤耗等各方面的成本效益, 可以保证各类电源之间的协调发展及碳减排目标的顺利实现。

本文分析考虑碳排放及燃煤约束的低碳电源规划并对其效益进行评价。在分析碳捕集电厂运行特性的基础上, 建立了考虑碳排放及燃煤约束的低碳电源规划模型。结合典型日的用电负荷及新能源出

收稿日期: 2015-07-14; 修回日期: 2015-12-01。

上网日期: 2016-02-15。

国家电网公司科技项目“电网规划社会安全、低碳化综合评估方法及实现技术研究”。

力曲线,校验系统的调峰约束,由此可以在规划中计及碳捕集电厂的调峰特性。结合国内典型的地区电力系统,应用所建立的模型开展了不同碳排放总量约束、可再生能源发展场景及煤炭供应约束下电源扩展方案的优化分析,分析结论可为电源环节的低碳发展提供借鉴与参考。

1 碳捕集电厂的运行特性

1.1 碳捕集电厂的基准运行

碳捕集电厂是在常规发电设备的基础上增加了碳捕集系统。按照实施流程的不同,碳捕集系统主要可分:燃烧后捕集、燃烧前捕集与富氧燃烧。其中,燃烧后捕集是目前技术成熟度最高的技术,本文以燃烧后捕集方式为例进行分析。

燃烧后碳捕集是指从火力发电厂的尾气中分离与捕集二氧化碳,该种捕集方式的原理简单,捕集之前的发电流程与常规电厂一致,因此能够利用现有成熟的火电技术,并实现对已有火电厂的碳捕集改造。燃烧后碳捕集的主要流程包括二氧化碳的吸收、分解、压缩,捕集出的二氧化碳则通过管道、车辆等方式输送至下级利用或封存地点。燃烧后碳捕集的过程需要消耗大量的能量,主要包括如下两个方面:一是从发电过程中直接抽取的热能,用于加热二氧化碳吸收溶剂以实现二氧化碳的分解,实现吸收溶剂的循环利用;二是为实现碳捕集系统的正常运行所必需的电能,用于维持二氧化碳吸收溶剂的循环流动及分解出二氧化碳的压缩等。

碳捕集电厂的能量流如图1所示。

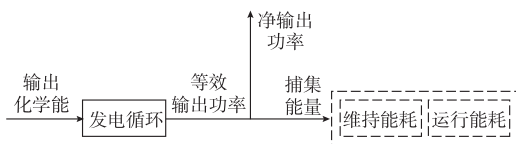


图1 燃烧后碳捕集电厂能量流示意图

Fig.1 Energy flow chart of carbon capture and storage (CCS) power plant

输入的化学能按照一定的转换效率通过发电循环输出电能,定义为“等效输出功率”,在扣除“捕集能量”之后,剩余部分才是电厂对外实际出力,定义为“净输出功率”。碳捕集能耗的存在使得碳捕集电厂在消耗等量燃料时的净发电出力小于常规机组。现有碳捕集电厂的运行数据表明,在碳捕集电厂与发电机组的运行水平完全对应的基准运行状态下,碳捕集系统所消耗的能量可达发电机组总输入能量的1/5~1/3。同时,在基准运行状态下,碳捕集系统可以捕集尾气中的大部分二氧化碳,捕集率主要取决于溶剂对二氧化碳的吸收率,典型值在85%~

95%之间。在电厂中引入碳捕集技术,可以减少常规火电机组的80%~90%的碳排放。

考虑到国内以煤炭为主的能源结构,碳捕集电厂成为国内电力生产低碳化的重要技术选项。然而必须意识到,碳捕集电厂低碳电能的产生是以更多的能源消耗为代价的。为供应固定的负荷,碳捕集电厂将比常规电厂消耗更多的化石燃料。针对某一区域的燃煤火电机组,若对其中比例为 γ 的燃煤火电机组进行碳捕集改造,则为满足固定的负荷,不同 γ 取值下系统煤炭需求总量及碳排放量的变化如图2所示。图中, α 为基准运行状态下碳捕集系统能耗占发电机组总输入能量的比例, β 为碳捕集系统对二氧化碳的捕集率。

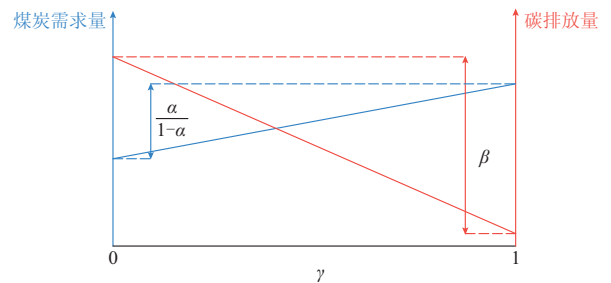


图2 不同碳捕集电厂比例下系统煤耗及碳排放量的变化

Fig.2 Variation of coal consumption and carbon emission under different CCS penetration levels

从图2可见,碳捕集技术的推广使用虽然可以有效减少火电的碳排放,但会造成化石能源的额外消耗,可能进一步加剧能源供应危机。在电源规划,尤其是长期电力系统碳减排计划的制订中,需要结合碳排放的控制目标、化石燃料的短期供应条件及长期开采战略等合理安排各类技术的发展及实施。

1.2 碳捕集电厂的灵活运行

在基准运行状态的基础上,通过加装烟气分流装置及二氧化碳溶剂存储器,碳捕集电厂可以在改变锅炉运行状态的基础上,进一步调节碳捕集系统的运行,使得碳捕集电厂具有更大的出力运行区间。如果碳捕集装置不运行,则碳捕集电厂可运行于常规火电机组的最大出力状态;当碳捕集机组的锅炉运行于最小出力状态时,可以调节碳捕集装置使其运行于捕集解析压缩状态,由于碳捕集装置的能量分流作用,碳捕集电厂的净发电出力可小于机组锅炉的额定最小出力。碳捕集机组的出力运行区间一方面取决于其所配套常规火电机组的运行区间,另一方面取决于碳捕集装置中解析塔等的配置情况^[11-12]。

另外,对常规火电机组而言,爬坡速率主要取决于锅炉的运行状态,爬坡速度较为缓慢。对于碳捕

集机组,通过调整蒸汽阀门可以迅速调整发电机组抽取到碳捕集系统的蒸汽量,可以增强碳捕集机组的净发电出力的爬坡能力。碳捕集机组的最大出力上调/下调速率在常规火电调整速率的基础上,进一步受碳捕集装置捕集功率调节速度的影响。

由于碳捕集装置与火电机组间可灵活调节的能量耦合特性,碳捕集机组将具有更快的出力调整速度和更大的调峰深度^[16]。不同电碳输出关系间的灵活运行使碳捕集电厂自身可以更好地适应电价及碳价的波动。对系统而言,碳捕集机组的快速出力调节能力能够充分适应新能源电源出力的波动性,相比常规火电机组能够以更小规模装机容量支撑更大规模的新能源消纳。在电源规划中,可在充分考虑碳排放约束、煤炭供应约束及支撑新能源消纳等条件的基础上,合理布局常规火电和碳捕集电厂的建设。

2 计及碳排放及燃煤约束下的电源规划

相比常规火力发电厂,碳捕集电厂具有更加灵活可控的碳排放特性及出力调节特性,且碳捕集装置运行会造成额外的煤耗。鉴于中国在未来相当长的一段时间内仍将保持以煤炭为主的能源结构,在电源规划中必须结合煤炭供应约束、碳排放约束及新能源接入下系统安全约束等综合考虑碳捕集电厂和常规火电机组的合理配置。为了分析不同约束下碳捕集电厂与常规火电厂配比的影响,本文建立了规划与典型日运行校验相结合的静态低碳电源规划模型。模型采用“抱团式”的规划思路^[17],即在机组类型的层面规划各类机组的扩展容量,由此降低模型的复杂度。

电源规划模型的目标函数为系统总成本最小,包括电源投资成本、发电成本及碳排放成本等。

$$\min C = \sum_{m \in \Omega_M} X_m c_m^I + \sum_{m \in \Omega_M} G_m c_m^G + c^{\text{CO}_2} \sum_{m \in \Omega_M} G_m e_m \quad (1)$$

式中: C 为系统的总成本; Ω_M 为待规划电源类型的集合; X_m 为第 m 类电源的扩展容量; c_m^I 为第 m 类电源的单位投资成本; G_m 为第 m 类电源的年度发电量; c_m^G 为第 m 类电源的单位发电成本; c^{CO_2} 为单位碳排放成本; e_m 为第 m 类电源的碳排放密度。

为了保证结果的合理性,电源规划需满足如下约束条件。

1) 负荷电量供应充裕度约束

$$\sum_{m \in \Omega_M} H_m^{\max} (X_m^0 + X_m) \geq D \quad (2)$$

式中: H_m^{\max} 为第 m 类电源的年度最大利用小时数; X_m^0 为第 m 类电源在规划期的初始容量; D 为规划

年份的负荷用电量。

2) 最大最小利用小时数约束

$$(X_m^0 + X_m) H_m^{\min} \leq G_m \leq (X_m^0 + X_m) H_m^{\max} \quad (3)$$

式中: H_m^{\min} 为第 m 类电源的年度最小利用小时数。

3) 一次资源供应约束

$$\sum_{m \in \Omega_f} G_m c_m^F \leq S_f^F \quad \forall f \quad (4)$$

式中: Ω_f 为燃烧第 f 类燃料的机组类型集合; c_m^F 为第 m 类电源的燃料特性; S_f^F 为第 f 类燃料的供应总量。

4) 最大装机容量约束

对于水电、风电、光伏等可再生能源电源,其最大扩展容量受可开发资源量、设备生产供应能力等的限制,存在如下约束:

$$X_m \leq X_m^{\text{Cap}} \quad \forall m \quad (5)$$

式中: X_m^{Cap} 为第 m 类电源的最大扩展容量。

5) 碳排放约束

$$\sum_{m \in \Omega_M} G_m e_m < E^{\text{Cap}} \quad (6)$$

式中: E^{Cap} 为碳排放总量的控制目标。

6) 负荷供应平衡约束

$$\sum_{m \in \Omega_M} P_{m,t,d} = L_{t,d} \quad \forall t, d \quad (7)$$

式中: $P_{m,t,d}$ 为第 m 类电源在第 d 个典型日 t 时刻的出力; $L_{t,d}$ 为相应时刻的负荷水平。

基于各类机组在各典型日各时刻的出力和典型日的持续时间,可以计算规划年份各类机组的总发电量,存在如下等式关系:

$$G_m = \sum_{d \in \Omega_D} \sum_{t \in \Omega_T} P_{m,t,d} T_d \quad \forall m \quad (8)$$

式中: T_d 为第 d 个典型日的持续时间; Ω_D 为典型日的集合; Ω_T 为持续时间的集合。

7) 机组出力上下限约束

$$\delta_m^{\min} (X_m^0 + X_m) \leq P_{m,t,d} \leq X_m^0 + X_m \quad \forall t, d \quad (9)$$

式中: δ_m^{\min} 为第 m 类电源的最低出力水平(百分比)。

8) 负荷正负备用约束

$$\sum_{m \in \Omega_M} (X_m^0 + X_m) \geq L^{\max} (1 + \sigma) \quad (10)$$

$$\sum_{m \in \Omega_M} \delta_m^{\min} (X_m^0 + X_m) \leq L^{\min} (1 - \sigma) \quad (11)$$

式中: L^{\max} 和 L^{\min} 分别为规划年份的最高、最低负荷水平; σ 为系统要求满足的备用率。

9) 典型日系统爬坡能力校验

$$-\sum_{m \in \Omega_M} \delta_m^D (X_m^0 + X_m) \leq L_{t,d} - L_{t-1,d} \leq \sum_{m \in \Omega_M} \delta_m^U (X_m^0 + X_m) \quad \forall t, d \quad (12)$$

式中: δ_m^D 和 δ_m^U 分别为第 m 类电源的向下、向上爬坡率。

本文所形成的电源规划模型为线性模型,可通过 CPLEX 和 GAMS 等商用软件实现求解。

3 算例分析及效益评价

利用上节建立的电源规划模型,分别考虑碳排放总量约束、高比例可再生能源及煤炭供应约束三种场景下的电源规划方案,并对相应的电源规划方案进行低碳效益评价与分析。

3.1 基本数据

以某一地区的目标年电源规划为例,结合上述电源规划模型就燃煤约束、碳排放约束对该地区常规火电和碳捕集电厂的规划的影响进行分析。该地区当前年用电量为 $50 \text{ TW} \cdot \text{h}$,最高负荷为 8 GW ,预计到目标年负荷用电量将增长到 $110 \text{ TW} \cdot \text{h}$,最高负荷达到 16.6 GW 。为简化算例,仅考虑燃煤火电、碳捕集燃煤火电、风电、光伏及水电等 5 种电源类型。该地区现有的电源装机情况如表 1 所示,其中碳捕集电厂发电煤耗按与常规煤电等效输出功率情况设定。

表 1 某地区初始电源装机参数
Table 1 Initial generation parameters of a region

电源类型	装机容量/GW	发电成本/ (元·(MW·h) ⁻¹)	碳排放密度/ (t·(MW·h) ⁻¹)	发电煤耗/ (t·(MW·h) ⁻¹)
煤电	7.5	350	0.80	0.3
碳捕集电厂	0	400	0.08	0.3
风电	1.0	0	0	0
光伏	0.2	0	0	0
水电	0.5	0	0	0

各类电源的单位容量投资成本参考文献[18]中的参数。碳排放价格取为 100 元/t。采用冬、夏两个典型日对电源规划方案进行校验,典型日中风电和光伏出力曲线均取自国内典型数据。在算例中,设定常规火电每分钟的可调节出力为装机容量的 1%,最小出力水平为装机容量的 50%,碳捕集电厂的对应参数则分别为 3% 和 20%^[12]。假设常规火电机组中有 10% 参与系统调峰,其他运行于固定出力,而碳捕集电厂则全部参与系统调峰。

3.2 碳排放总量约束

在风、光、水等低碳能源贫乏的情况下,电力生产的低碳化仅能通过发展碳捕集电厂实现,由此将导致额外的煤炭需求。设定风电、光伏和水电的最大开发潜力分别为 2, 2, 0.5 GW,在不同的碳排放总量约束下,新建电源的规划结果及对应的年煤耗总量见附录 A 图 A1。

由附录 A 图 A1 可以看出,为了减少碳排放,有

限的风电、光伏及水电等可再生能源将被充分开发利用。在此基础上,随着碳排放总量管制目标的收紧,碳捕集电厂将逐渐取代常规燃煤火电厂承担大量的供电任务,以在满足负荷电力需求的同时满足碳排放总量约束。然而碳捕集装置的运行将造成额外的能量消耗,使得系统的煤耗总量随着碳排放管制目标的收紧而增加。由于煤炭等化石资源不可再生,在选择碳捕集电厂的低碳化路径时,需在长远时间范围内结合煤炭资源供应情况分析能源供应的安全及保障问题。碳捕集电厂需要耗费一部分出力用于捕集二氧化碳,为满足一定负荷用电需求的装机容量也高于常规火电机组,使得系统的总装机容量随碳排放管制目标的收紧而增加。

3.3 高比例可再生能源场景

为了大幅削减能源消耗造成的碳排放,需要大力发展可再生能源。在高比例可再生能源接入的场景下,在不考虑储能、需求侧响应等调节能力的情况下,具备更强调峰能力的碳捕集电厂将更能适应风电及光伏等出力的波动性及不确定性。设置固定的风电装机规划容量,分别形成若干不同比例的可再生能源发展场景,对各场景下的电源发展进行优化规划,所得结果见附录 A 图 A2。各场景下均设定系统碳排放总量约束为 6 000 万 t。

由附录 A 图 A2 可以看出,随着风电装机比例的升高,常规火电机组的装机比例逐渐降低,而碳捕集电厂的装机比例则呈现先下降后上升的趋势。结合碳排放总量和风电装机容量的变化,可知在风电装机容量较小时,风电装机容量的增加在一定程度上缓解了系统的碳减排压力,使得经济性相对较差的碳捕集电厂装机容量减少,而常规火电机组在经济性方面有相对优势,承担了大量供电任务。此时系统电源规划以实现系统碳排放控制为主要目标,系统碳排放总量保持在约束目标值。如果系统具有更严格的碳排放控制目标,风电装机容量进一步增加时,风电波动性所带来的调峰压力成为系统电源规划的主要问题。为了满足系统调峰需要,碳捕集电厂的规划容量随着风电装机容量的增加而增加,进一步减少了系统的碳排放量。此时,碳捕集电厂将挤压常规火电的发电空间,减少了常规火电的规划容量。在此过程中,风力发电的增加减少了火力发电的需求,从而减少了系统的煤炭消耗量。因此,除碳排放总量控制目标外,系统调峰也是影响常规火电与碳捕集电厂规划的重要因素。

3.4 煤炭供应约束

除资源储量外,煤炭资源的供应还受地质开采条件、水资源、生态环境及运输能力等多方面因素的

制约。严格的煤耗总量约束限制了火电厂的发电能力。在风电、光伏、水电等可再生能源也面临经济开发上限的时候,基于有限的煤炭资源,在常规火电及碳捕集电厂间的技术选择意味着系统在供电量及碳排放总量之间的权衡。以附录 A 图 A1 中风电装机容量为 6 GW 的场景为基础,分析煤炭供应总量约束对电力系统的影响。在此基础状态下,系统的煤耗总量为 2 467 万 t 时,可通过建设一定容量的碳捕集电厂满足碳排放总量为 6 000 万 t 的控制目标。针对不同的煤炭供应总量(2 200, 2 300, 2 400, 2 500 万 t)约束条件,分别针对不同比例的常规火电和碳捕集电厂建设场景进行分析,所得结果如图 3 所示。

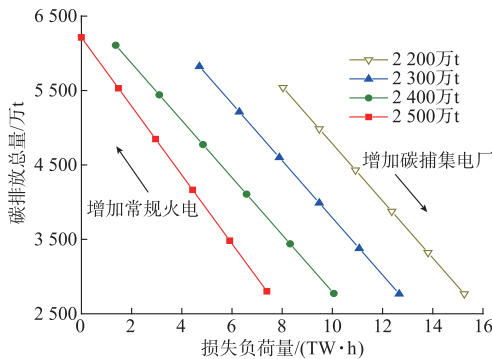


图 3 煤炭总量约束对系统的影响

Fig.3 Effect of coal supply constraint on the system

从图 3 可以看出,在一定的煤炭供应能力及其他类型电源开发能力固定的情况下,增加常规火电可充分利用有限的煤炭资源满足更多的用电负荷,而碳捕集电厂则由于捕集二氧化碳将损失一定的负荷供应能力。随着煤炭供应能力的收紧,显然负荷的供应保障将进一步受到威胁。

4 结论

本文针对低碳电源规划进行研究,建立了考虑系统调峰约束的水平年低碳电源规划模型,考虑到国内以燃煤火电为主的电源结构,主要对比分析了不同碳排放总量管制目标、不同可再生能源发展场景及不同煤炭供应约束对常规火电及碳捕集电厂规划结果的影响,所得结论如下。

1)碳捕集电厂能够大幅削减火力发电的碳排放。在可再生能源发展不能满足低碳发展要求时,随着碳排放总量管制目标的收紧,碳捕集电厂将逐渐取代常规火电成为电源规划的选择,然而碳捕集装置运行需要大量耗能,由此将导致系统的煤耗总量增加。在煤炭资源供应短缺时,碳捕集电厂的大规模应用可能进一步导致负荷供电紧张。

2)风电、光伏等可再生能源的大规模发展可以大幅削减发电的碳排放,却给系统带来了巨大的调峰压力。具备更大调峰空间及出力调节速率的碳捕集电厂能够更好地满足系统的调峰需求,可充分适应未来高比例可再生能源的发展场景。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 康重庆,陈启鑫,夏清.低碳电力技术的研究展望[J].电网技术, 2009,33(2):1-7.
KANG Chongqing, CHEN Qixin, XIA Qing. Prospects of low-carbon electricity[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 1-7.
- [2] 宋永华,杨霞,孙静.低碳高效安全可靠的智能电网[J].中国能源, 2009,31(10):23-27.
SONG Yonghua, YANG Xia, SUN Jing. Smart grid with low carbon and high efficiency and safety[J]. Energy of China, 2009, 31(10): 23-27.
- [3] 娄素华,卢斯煜,吴耀武,等.低碳电力系统规划与运行优化研究综述[J].电网技术, 2013,37(6):1483-1490.
LOU Suhua, LU Siyu, WU Yaowu, et al. An overview on low-carbon power system planning and operation optimization[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1483-1490.
- [4] 汤蕴琳.低碳排放燃煤电厂的开发和未来趋势[J].电力建设, 2007,28(10):1-6.
TANG Yunlin. Development of low carbon emission coal-fired power plant and its trend[J]. Electric Power Construction, 2007, 28(10): 1-6.
- [5] 陈启鑫,康重庆,夏清,等.电力行业低碳化的关键要素分析及其对电源规划的影响[J].电力系统自动化, 2009,33(15):18-23.
CHEN Qixin, KANG Chongqing, XIA Qing, et al. Key low-carbon factors in the evolution of power decarbonisation and their impacts on generation expansion planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 18-23.
- [6] 段建民,王志新,王承民,等.考虑碳减排效益的可再生能源规划[J].电网技术, 2015,39(1):11-15.
DUAN Jianmin, WANG Zhixin, WANG Chengmin, et al. Renewable power planning considering carbon emission reduction benefits[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 11-15.
- [7] 宋旭东,向铁元,熊虎,等.考虑碳排放权分配的低碳电源规划[J].电力系统自动化, 2012,36(19):47-52.
SONG Xudong, XIANG Tiejuan, XIONG Hu, et al. Low carbon generation expansion planning based on carbon emission right allocation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 47-52.
- [8] DAVISON J. Performance and costs of power plants with capture and storage of CO₂[J]. Energy, 2007, 32(7): 1163-1176.
- [9] CHALMERS H, LUCQUIAUD M, GIBBINS J, et al. Flexible operation of coal fired power plants with postcombustion capture of carbon dioxide[J]. Journal of Environmental Engineering,

- 2009, 135(6): 449-458.
- [10] 康重庆, 季震, 陈启鑫. 碳捕集电厂灵活运行方法评述与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 1-10.
KANG Chongqing, JI Zhen, CHEN Qixin. Review and prospects of flexible operation of carbon capture power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 1-10.
- [11] 陈启鑫, 季震, 康重庆, 等. 碳捕集电厂不同运行方式的电碳特性分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 109-115.
CHEN Qixin, JI Zhen, KANG Chongqing, et al. Analysis on relation between power generation and carbon emission of carbon capture power plant in different operation modes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 109-115.
- [12] CHEN Q, KANG C, XIA Q. Modeling flexible operation mechanism of capture power plant and its effects on power-system operation[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2010, 25(3): 853-861.
- [13] 季震, 陈启鑫, 张宁, 等. 含碳捕集电厂的低碳电源规划模型[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2689-2696.
JI Zhen, CHEN Qixin, ZHANG Ning, et al. Low-carbon generation expansion planning model incorporating carbon capture power plant[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2689-2696.
- [14] 卢志刚, 卢聪颖. 碳捕集系统与风电协调投资的低碳效益分析[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3303-3309.
LU Zhigang, LU Congying. Low-carbon benefit based analysis on coordinating investment for carbon capture system and wind power system[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3303-3309.
- [15] 王宗耀, 苏浩益. 基于实物期权理论的碳捕集系统最佳投资时机决策模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 137-142. DOI: 10.7500/AEPS20130926002.
WANG Zongyao, SU Haoyi. A decision model for carbon-capture systems best investment opportunity based on real option theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 137-142. DOI: 10.7500/AEPS20130926002.
- [16] 陈启鑫, 康重庆, 夏清. 碳捕集电厂的运行机制研究与调峰效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 22-28.
CHEN Qixin, KANG Chongqing, XIA Qing. Operation mechanism and peak-load shaving effects of carbon-capture power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 22-28.
- [17] 田鑫, 孙彦龙, 牛新生, 等. 促进负荷中心实现低碳发展的送电模式[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 663-668.
TIAN Xin, SUN Yanlong, NIU Xincheng, et al. Power transmission mode to promote low-carbon development of load center[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 663-668.
- [18] CHEN Q, KANG C, XIA Q, et al. Power generation expansion planning model towards low-carbon economy and its application in china[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(2): 1117-1125.
-
- 罗金山(1980—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 电力系统规划、低碳电力技术。E-mail: dayspring_js@126.com
路畅(1986—), 男, 硕士, 主要研究方向: 低碳电力、电力系统规划。E-mail: luchang010@126.com
孟繁骏(1985—), 男, 通信作者, 博士, 主要研究方向: 电网规划、可再生能源、智能电网。E-mail: fanjun506@126.com
- (编辑 万志超)

Generation Expansion Planning and Its Benefit Evaluation Considering Carbon Emission and Coal Supply Constraints

LUO Jinshan^{1,2}, LU Chang¹, MENG Fanjun¹

(1. State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To reduce carbon emissions is a new task of power industry in the new era of low-carbon economy. Considering the coal-dominated energy structure in China, it is necessary to conduct analysis on the effect of carbon emission and coal-supply constraints on generation expansion planning. Based on the analyses of the operational characteristics of carbon capture and storage (CCS) power plant, a low-carbon generation expansion planning model considering carbon emission and coal-supply constraints is formulated. Typical days are adopted in the model to check if the system has sufficient peak load regulation capacity. By taking a regional power system as an example, expansion planning of regular thermal power plant and CCS power plant is conducted in different scenarios of carbon emission constraints, renewable energy development and coal supply constraints. The results show that CCS power plant can adapt to the low-carbon emission target while providing regulation capacity for large-scale renewable energy development.

This work is supported by State Grid Corporation of China.

Key words: low-carbon electricity; carbon emission; generation expansion planning; carbon capture and storage (CCS) power plant