减碳中多阶段的煤电机组退役与新能源、储能规划协同

原一方，尚　策
（上海交通大学 电气工程系，上海 200240）

摘要：规划现役煤电机组的有序退役是电力系统低碳化转型中的关键问题：煤电机组退役会造成发电量缺额和系统灵活性不足的问题，尤其是在新能源占比逐渐增大的条件下，而储能是平衡电力供需、提升供电灵活性的有效技术途径。故应将电力系统规划与未来较长时间内煤电机组逐步退役一同考虑。为此，采用多阶段模型，在电力系统减碳背景下将煤电机组退役协同于新能源和储能规划。基于IEEE 39节点系统验证所提模型的有效性，从机组退役和电力系统减碳2个角度分析规划结果，结果表明通过合理规划新能源和储能能够辅助煤电机组退役的进程，从而实现电力系统低碳化转型。

关键词：煤电机组退役；多阶段规划；新能源；储能；灵活性约束
中图分类号：TM 715；TK 01　　**文献标志码**：A　　DOI：10.16081/j.epae.202109041

0　引言

在碳达峰、碳中和目标的引领下，加快电力系统低碳化转型是实现低碳发展的关键。目前，中国火力发电量仍占全国总发电量的70%以上，电力部门二氧化碳的排放量占全国排放总量的40%左右。若要2060年实现碳中和目标，2020年起应尽快停止煤电机组的投建，并有序规划现存煤电机组退役。Ryna Yiyun Cui等分析了当前中国碳排放目标下煤电机组退役路径，给出了涵盖技术、经济和环境等多方面指标的机组退役顺序评价方法，并对全国范围内的所有燃煤电厂退役顺序进行评估，指出合理的减碳路径应该使煤电机组装机容量在2020年达到峰值，并在2055年前实现煤电机组基本退出，以实现《巴黎协定》中提出的将全球平均气温上升幅度控制在高于工业化前水平2 ℃之内的治理目标[1]。

传统电源规划考虑在经济成本最小的条件下确定系统最优的发电投资组合，在电力系统低碳化转型的背景下，应将二氧化碳排放带来的影响纳入规划模型[2]，文献[2]在传统电源规划模型中考虑多种碳排放约束政策，将碳排成本加入模型的目标函数中，在模型约束条件中引入碳配额约束和碳交易机制。文献[3]指出采用不同类型的碳排放约束会对规划结果造成影响。除碳排放约束外，通过提高新能源渗透比例也能够实现电力系统深度减排，文献[4]提出考虑系统可靠性条件下针对满足既定清洁能源份额目标的源网协同规划模型。此外，文献[5]提出将各类低碳技术纳入规划模型，如配备碳捕集、储能等，以实现减排效应。目前关于机组退役问题的相关研究主要围绕以下几个方面展开：①将机组退役作为不确定性纳入规划模型[6]；②建立机组退役顺序综合评估模型，分析不同的退役方案对系统安全性和经济性的影响[7]；③建立规划模型决策煤电机组退役，这方面已有研究将机组退役与新能源规划、电网改造协同决策，以实现电力系统的低碳化转型[8]。

当前煤电机组退役规划多以单阶段规划为主，实际上煤电机组退役转型是一个逐步推进的过程，若仅考虑在规划初期将所有能源设备一次投入，必将造成超前投资以及资产闲置的问题。为解决上述问题，考虑采用多阶段规划方法，将整个规划周期分为若干个规划阶段，各阶段方案之间相互影响，上一阶段规划结果将作为后续规划的基础，各个规划阶段动态相连。目前，多阶段规划思想已在发电组合规划[9]、输电网规划[10]、配电网规划[11]等方面得到应用，文献[12]在多阶段规划的基础上考虑了不确定性，使规划决策具有一定的鲁棒性。部分研究采用多阶段规划方法分析煤电机组退役时，假设在整个规划期内负荷水平不变，忽略了实际电力系统中负荷需求逐年增长的情况，导致规划结果未能涵盖未来负荷变化的需求。

煤电机组逐步退役，应伴随着系统中新能源的逐步扩建，同时，煤电机组退役的容量和位置会对新能源投建中选址和定容结果造成影响，而目前少有研究在较长规划期内考虑机组逐步退役背景下的新能源扩建问题。此外，煤电机组的退役将改变现有的发电结构，会带来系统备用容量不足和灵活性资源欠缺的问题，在高比例新能源接入的背景下，系统灵活性不足会给电力系统的安全可靠运行带来挑

收稿日期：2021-06-30；**修回日期**：2021-08-16
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51807115）；上海市青年科技英才扬帆计划资助项目（18YF1411400）；中国电机工程学会青年人才托举工程项目（CSEE-YESS-2018016）
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51807115), Shanghai Sailing Program(18YF1411400) and the Young Elite Scientists Sponsorship Program by CSEE (CSEE-YESS-2018016)

战，随着储能技术的发展，合理配置储能能够解决煤电机组退役带来的系统中灵活性资源不足的问题[13]。除依靠储能装置满足系统灵活性需求外，源、荷两侧均可参与灵活性资源的供给。电源侧的灵活性主要依靠多种类型电源相济协调，如以天然气为燃料的燃气机组[14]。另外，水电机组和抽水蓄能能够为系统提供充足的容量和灵活性资源，增加系统的调峰能力，同时减少火电机组的频繁启停，进一步促进新能源的消纳[15]。然而水电易受到地理位置、水电资源、季节性条件的制约，相比之下燃气机组具有快速响应、运行灵活、热效率高、污染物排放低等特点，使其成为优质的调峰电源。此外，若负荷侧参与灵活性调节，则可以通过需求响应调节新能源出力的波动性和不确定性[16]。

因此本文在较长规划期内结合各阶段负荷需求增长以及煤电机组退役进度，充分考虑各阶段机组退役决策以及新能源规划决策给后续系统带来的影响，并结合整个规划期的总体要求，求解得到各阶段最优的新能源及储能规划结果。

1　煤电机组退役要素分析

煤电机组退役规划应优先规划到达使用寿命的机组退役，但对于装机容量较大、效率较高的机组即使到达额定寿命，对系统而言仍具有保证系统容量的充裕度、为系统提供灵活性资源的价值，应允许对这部分机组经翻新后继续留在市场。

1.1　煤电机组退役成本分析

用0-1变量$\alpha_{i,g}$表示第g阶段煤电机组i是否退役的决策，其值为0时表示机组退役，为1时表示不退役，$\alpha_{i,g}$应满足如下约束：

$$\alpha_{i,g+1} \leqslant \alpha_{i,g} \quad i \in \Omega_{\text{coal}}^{\text{G}} \tag{1}$$

式中：$\Omega_{\text{coal}}^{\text{G}}$为所有煤电机组集合。约束式(1)表示煤电机组一旦做出退役决策，不能再次投入使用。

$$\alpha_{i,g} \geqslant \bar{\alpha}_{i,g} \quad i \in \Omega_{\text{coal}}^{\text{G}} \tag{2}$$

式中：$\bar{\alpha}_{i,g}$为煤电机组寿命到期标志，其值为0时表示第g阶段煤电机组i达到使用寿命，为1时表示未达到使用寿命。由于本文考虑的煤电机组退出情况仅针对达到使用寿命的机组做出退役或保留决策，因此约束式(2)用以限制未达到使用寿命的煤电机组不退役。

在规划期内，对于达到使用寿命且退役的机组，其退役成本$C_{i,g}^{\text{rt}}$应考虑单位容量对应的处置成本C_{d}和回收收益C_{s}两部分，具体如下：

$$C_{i,g}^{\text{rt}} = R_{Y_g}(C_{\text{d}} - C_{\text{s}})I_{i,g}^{\text{rt}} \quad i \in \Omega_{\text{coal}}^{\text{G}} \tag{3}$$

式中：$I_{i,g}^{\text{rt}}$为第g阶段系统规划退役的煤电机组i的容量；在计算规划期内的各类成本费用时，应将不同年份产生的费用通过现值系数折算至规划周期初期时的等效现值，R_{Y_g}为第g阶段的决策费用对应的现值系数，Y_g为第g阶段做出规划决策的时间与规划期初期相隔的年数。假定费用发生时与距离规划期初期相隔年数为Y，则该年对应的现值系数R_{Y_g}的计算公式为：

$$R_Y = (1+d)^{-Y} \tag{4}$$

式中：d为年折现率。

1.2　煤电机组碳排放量分析

规划期内单台煤电机组的总碳排放量与机组实际退役时间有关，退役后将不产生碳排放量，考虑机组退役决策的煤电机组i的全规划周期碳排放量Q_i^{c}的计算公式如下：

$$Q_i^{\text{c}} = e_i \sum_{g \in \Omega^{\text{stage}}} \left(\alpha_{i,g} \sum_{t \in g\{T\}} p_{i,t} \right) \quad i \in \Omega_{\text{coal}}^{\text{G}} \tag{5}$$

式中：e_i为煤电机组i的碳排因数；$p_{i,t}$为t时刻煤电机组i的出力值；Ω^{stage}为各个规划阶段的集合；$g\{T\}$为规划阶段g内时间集合。

对于在计划退役时间需要经翻新后保留在系统中的机组，用0-1变量$r_{i,g}$表示第g阶段煤电机组i达到使用寿命时是否做出翻新保留决策，其值为1时表示机组翻新并保留在系统，为0时表示机组不翻新并退役，$r_{i,g}$应满足如下关系：

$$r_{i,g} = (\alpha_{i,g} - \bar{\alpha}_{i,g})(1 - \bar{\alpha}_{i,g}) \quad i \in \Omega_{\text{coal}}^{\text{G}} \tag{6}$$

式中：$r_{i,g}$的取值与寿命到期标志$\bar{\alpha}_{i,g}$和煤电机组退役决策变量$\alpha_{i,g}$的取值有关，因此式(6)限制了仅当第g阶段煤电机组i已达到使用寿命，即$\bar{\alpha}_{i,g}=0$时，做出该台机组不退役决策，当$\alpha_{i,g}=1$时，变量$r_{i,g}$才被置1，表示机组做出保留决策。

对于翻新且保留的煤电机组i，其翻新成本$C_{i,g}^{\text{rp}}$与计划翻新的机组容量有关，表达式如下：

$$C_{i,g}^{\text{rp}} = R_{Y_g} C_{\text{r}} I_{i,g}^{\text{rp}} \quad i \in \Omega_{\text{coal}}^{\text{G}} \tag{7}$$

式中：C_{r}为煤电机组单位容量对应的翻新成本；$I_{i,g}^{\text{rp}}$为第g阶段做出翻新保留决策的煤电机组i的容量。

1.3　模型线性化

考虑机组退役的煤电机组碳排放量计算公式（式(5)）中，含有二进制变量与连续变量乘积项，在模型求解的过程中需要将该双线性项线性化[17]，引入非负连续变量$q_{i,g}$，利用式(8)—(11)等效表达式(5)。

$$Q_i^{\text{c}} = e_i q_{i,g} \quad i \in \Omega_{\text{coal}}^{\text{G}} \tag{8}$$

$$q_{i,g} \leqslant \sum_{t \in g\{T\}} p_{i,t} \quad i \in \Omega_{\text{coal}}^{\text{G}} \tag{9}$$

$$q_{i,g} \leqslant M\alpha_{i,g} \quad i \in \Omega_{\text{coal}}^{\text{G}} \tag{10}$$

$$q_{i,g} \geqslant \sum_{t \in g\{T\}} p_{i,t} - M(1-\alpha_{i,g}) \quad i \in \Omega_{\text{coal}}^{\text{G}} \tag{11}$$

式中：M为一个充分大的常数。

2 模型描述

本文所建立的多阶段规划模型在规划煤电机组退役的同时，对新能源扩建容量和储能的投建进行规划，为了简化模型，假设在每个阶段的首年年初做出新能源投建、储能投建及煤电机组退役决策。

2.1 目标函数

模型的目标函数为最小化规划期内的电力系统总成本 C^{total}，如式(12)所示，其包括机组退役成本 C^{retire}、机组翻新保留成本 C^{repair}、风电投建成本 C^{wind}、光伏投建成本 C^{pv}、储能投建成本 C^{storage}、碳排放成本 C^{carbon}、切负荷惩罚成本 C^{loadshed} 和系统运行成本 C^{op}，具体计算公式分别如式(13)—(20)所示，均为折现到规划期初期的现值。

$$\min C^{\text{total}} = C^{\text{retire}} + C^{\text{repair}} + C^{\text{wind}} + C^{\text{pv}} + C^{\text{storage}} + C^{\text{carbon}} + C^{\text{loadshed}} + C^{\text{op}} \tag{12}$$

$$C^{\text{retire}} = \sum_{g\in\Omega^{\text{stage}}}\sum_{i\in\Omega^{\text{G}}_{\text{coal}}} C^{\text{rt}}_{i,g}(\alpha_{i,g-1}-\alpha_{i,g}) \tag{13}$$

$$C^{\text{repair}} = \sum_{g\in\Omega^{\text{stage}}}\sum_{i\in\Omega^{\text{G}}_{\text{coal}}} C^{\text{rp}}_{i,g} r_{i,g} \tag{14}$$

$$C^{\text{wind}} = \sum_{g\in\Omega^{\text{stage}}}\sum_{n\in\Omega^{\text{node}}} R_{Y_g} C_{\text{w}} I^{\text{w}}_{n,g} \tag{15}$$

$$C^{\text{pv}} = \sum_{g\in\Omega^{\text{stage}}}\sum_{n\in\Omega^{\text{node}}} R_{Y_g} C_{\text{pv}} I^{\text{pv}}_{n,g} \tag{16}$$

$$C^{\text{storage}} = \sum_{g\in\Omega^{\text{stage}}}\sum_{n\in\Omega^{\text{node}}}\sum_{s\in\Omega^{\text{storage}}} R_{Y_g}\left(C^{\text{sto}}_{\text{c}} z_{n,s,g}\bar{E}_s + C^{\text{sto}}_{\text{p}} z_{n,s,g}\bar{P}_s\right) \tag{17}$$

$$C^{\text{carbon}} = \gamma^{\text{tax}}\sum_{g\in\Omega^{\text{stage}}} R_{Y_g}\left[\sum_{i\in\Omega^{\text{G}}_{\text{coal}}} e_i\left(\alpha_{i,g}\sum_{t\in g\{T\}} p_{i,t}\right) + \sum_{i\in\Omega^{\text{G}}_{\text{gas}}} e_i p_{i,t}\right] \tag{18}$$

$$C^{\text{loadshed}} = \rho^{\text{loadshed}}\sum_{g\in\Omega^{\text{stage}}}\sum_{n\in\Omega^{\text{node}}}\sum_{t\in g\{T\}} R_{Y_g} l_{n,t} \tag{19}$$

$$C^{\text{op}} = C^{\text{var}} + C^{\text{startup}} + C^{\text{fixed}} \tag{20}$$

式中：C_{w} 和 C_{pv} 分别为常规机组和光伏投建成本；Ω^{node} 为系统中所有节点的集合；Ω^{storage} 为所有投建储能类型的集合；$I^{\text{w}}_{n,g}$ 和 $I^{\text{pv}}_{n,g}$ 分别为第 g 阶段节点 n 处风电和光伏投建容量决策变量，均为连续变量；$C^{\text{sto}}_{\text{c}}$ 和 $C^{\text{sto}}_{\text{p}}$ 分别为与储能容量相关的单位容量成本系数和与储能功率相关的单位功率成本系数；$z_{n,s,g}$ 为整数变量，表示第 g 阶段节点 n 处投建单位容量储能类型 s 的数量；$\bar{E}_s$、$\bar{P}_s$ 分别为储能类型 s 单位储能容量和单位储能的最大充放电功率；γ^{tax} 为碳税；$\Omega^{\text{G}}_{\text{gas}}$ 为系统中所有燃气机组的集合；ρ^{loadshed} 为切负荷惩罚系数；$l_{n,t}$ 为 t 时刻节点 n 处的切负荷量。

式(17)为各阶段储能投建总成本，假设各节点均投建相同单位容量的储能装置，储能成本计算应考虑两部分，分别为与储能容量相关的单位容量成本系数 $C^{\text{sto}}_{\text{c}}$ 和与储能功率相关的单位功率成本系数 $C^{\text{sto}}_{\text{p}}$，前者用于描述与储能蓄电能力相关的成本耗费，后者用于描述与储能内部电力电子变换器等设备相关的成本耗费[18]。式(18)为系统中碳排放成本计算公式，系统中的碳排放均来自常规机组(煤电机组和燃气机组)，式(18)中含有双线性项，处理方法与式(5)的线性化方法相同，引入充分大的常数 M，利用式(8)—(11)等效线性表达。式(19)为切负荷惩罚。式(20)为系统总运行成本计算公式，包括机组可变成本 C^{var}、机组启停成本 C^{startup} 和固定成本 C^{fixed}，启停成本中停机成本较小，此处忽略不计，其他各部分具体计算公式分别如式(21)—(23)所示，均为折现到规划期初期的现值。

$$C^{\text{var}} = \sum_{g\in\Omega^{\text{stage}}}\sum_{i\in\Omega^{\text{G}}}\sum_{t\in g\{T\}} R_{Y_g} c^{\text{var}}_i p_{i,t} \tag{21}$$

$$C^{\text{startup}} = \sum_{g\in\Omega^{\text{stage}}}\sum_{n\in\Omega^{\text{node}}}\sum_{t\in g\{T\}}\sum_{k\in K_n} R_{Y_g} c^{\text{st}}_k v_{n,k,t} \tag{22}$$

$$C^{\text{fixed}} = \sum_{g\in\Omega^{\text{stage}}} R_{Y_g}\left(\sum_{i\in\Omega^{\text{G}}_{\text{coal}}} c^{\text{fixed}}_i \alpha_{i,g}\bar{I}_i + \sum_{i\in\Omega^{\text{G}}_{\text{gas}}} c^{\text{fixed}}_i \bar{I}_i\right) \tag{23}$$

式中：c^{var}_i 和 c^{fixed}_i 分别为常规机组 i 单位容量对应的可变成本和固定成本；c^{st}_k 为机组组群 k 单位容量对应的启动成本；Ω^{G} 为系统中所有常规机组的集合；$v_{n,k,t}$ 为 t 时刻节点 n 处机组组群 k 的启动容量；K_n 为节点 n 处所有机组组群的集合；$\bar{I}_i$ 为系统中常规机组 i 的容量。

2.2 约束条件

模型中机组退役规划及模型线性化后相关约束如式(1)、(2)、(5)、(6)、(9)—(11)所示，此外，还需考虑系统中多阶段新能源投建约束、多阶段储能规划及运行约束、系统网络约束、功率平衡约束和机组运行约束等，具体如下。

$$0 \leqslant p^{\text{w}}_{n,t} \leqslant \bar{\alpha}^{\text{w}}_{n,t}\left(\sum_{g_0\in\Xi^g} I^{\text{w}}_{n,g_0} + I^{\text{w}}_{n,g}\right) \quad t\in g\{T\} \tag{24}$$

$$0 \leqslant p^{\text{pv}}_{n,t} \leqslant \bar{\alpha}^{\text{pv}}_{n,t}\left(\sum_{g_0\in\Xi^g} I^{\text{pv}}_{n,g_0} + I^{\text{pv}}_{n,g}\right) \quad t\in g\{T\} \tag{25}$$

$$\sum_{g\in\Omega^{\text{stage}}}\sum_{n\in\Omega^{\text{node}}}\sum_{t\in g\{T\}}\left(p^{\text{w}}_{n,t} + p^{\text{pv}}_{n,t} - s_{n,t}\right)\Delta t \geqslant \Gamma^{\text{r}}\sum_{g\in\Omega^{\text{stage}}}\sum_{n\in\Omega^{\text{node}}}\sum_{t\in g\{T\}}\left(\bar{d}_{n,t} - l_{n,t}\right) \tag{26}$$

式中：$p^{\text{w}}_{n,t}$ 和 $p^{\text{pv}}_{n,t}$ 分别为 t 时刻节点 n 处风电和光伏的出力，其上限由目前各节点新能源装机总量和小时级新能源容量因数的乘积决定，且当前阶段的新能源装机容量应为之前各阶段投资容量和当前阶段初期投资容量之和；$\bar{\alpha}^{\text{w}}_{n,t}$ 和 $\bar{\alpha}^{\text{pv}}_{n,t}$ 分别为 t 时刻节点 n 处风电和光伏的小时级容量因数；Ξ^g 为规划期内在现规划阶段第 g 阶段前的所有规划阶段的集合；$s_{n,t}$ 为 t 时刻节点 n 处的新能源弃电量；$\bar{d}_{n,t}$ 为 t 时刻节点 n 处的负荷；Γ^{r} 为新能源渗透率目标。式(24)、(25)分别为多阶段风电、光伏出力约束。式(26)为新能源渗透率约束。

$$0 \leqslant p_{n,s,t}^{\mathrm{ch}} \leqslant \bar{P}_s^{\mathrm{ch}} \tag{27}$$

$$0 \leqslant p_{n,s,t}^{\mathrm{dc}} \leqslant p_{n,s,t}^{\mathrm{dca}} \leqslant \bar{P}_s^{\mathrm{dc}} \tag{28}$$

$$z_{n,s,g} \underline{E}_s^{\mathrm{soc}} \leqslant e_{n,s,t}^{\mathrm{soc}} \leqslant z_{n,s,g} \bar{E}_s^{\mathrm{soc}} \tag{29}$$

$$e_{n,s,t}^{\mathrm{soc}} = \eta_s^{\mathrm{dB}} e_{n,s,t-1}^{\mathrm{soc}} + \left(\eta_s^{\mathrm{ch}} p_{n,s,t}^{\mathrm{ch}} - \frac{p_{n,s,t}^{\mathrm{dc}}}{\eta_s^{\mathrm{dc}}} \right) \tag{30}$$

$$e_{n,s,t_1}^{\mathrm{soc}} = e_{n,s,t_2}^{\mathrm{soc}} \quad t_1 \in g\{T^{\mathrm{end}}\},\ t_2 \in g\{T^{\mathrm{initial}}\} \tag{31}$$

式中：$p_{n,s,t}^{\mathrm{ch}}$、$p_{n,s,t}^{\mathrm{dc}}$和$p_{n,s,t}^{\mathrm{dca}}$分别为t时刻节点n处储能类型s的充电功率、放电功率和最大可能放电功率；$\bar{P}_s^{\mathrm{ch}}$和$\bar{P}_s^{\mathrm{dc}}$分别为储能类型s最大允许充电和放电功率；$e_{n,s,t}^{\mathrm{soc}}$为t时刻节点n处储能类型s的荷电状态；$\bar{E}_s^{\mathrm{soc}}$和$\underline{E}_s^{\mathrm{soc}}$分别为储能类型$s$的荷电状态上限和下限；$\eta_s^{\mathrm{dB}}$、$\eta_s^{\mathrm{ch}}$和$\eta_s^{\mathrm{dc}}$分别为储能类型$s$的存储效率、充电效率和放电效率。式(27)—(31)为多阶段储能规划和运行约束。式(27)、(28)分别为储能充、放电功率约束；式(29)为储能荷电状态约束；式(30)为储能电量平衡约束；为了简化分析，式(31)限制储能在每日的结束时刻储能的荷电状态与该日初始时刻荷电状态保持一致，$g\{T^{\mathrm{end}}\}$为第g阶段每日末时时刻的集合，$g\{T^{\mathrm{initial}}\}$为第$g$阶段每日初始时刻的集合。

$$\sum_{i \in \Omega^{\mathrm{G}}} a_{n,i}^{\mathrm{G}} p_{i,t} + \sum_{l \in \Omega^{\mathrm{line}}} a_{n,l}^{\mathrm{L}} p_{l,t}^{\mathrm{line}} + p_{n,t}^{\mathrm{w}} + p_{n,t}^{\mathrm{pv}} + \sum_{s \in \Omega^{\mathrm{storage}}} \left[\left(\sum_{g_0 \in \Xi^g} z_{n,s,g_0} + z_{n,s,g} \right) \left(p_{n,s,t}^{\mathrm{dc}} - p_{n,s,t}^{\mathrm{ch}} \right) \right] = \bar{d}_{n,t} - l_{n,t} + s_{n,t} \tag{32}$$

$$\sum_{s \in \Omega^{\mathrm{storage}}} \left[\left(\sum_{g_0 \in \Xi^g} z_{n,s,g_0} + z_{n,s,g} \right) \left(p_{n,s,t}^{\mathrm{dca}} - p_{n,s,t}^{\mathrm{dc}} \right) \right] + \sum_{i \in \Omega^{\mathrm{G}}} \left(p_{i,t}^{\mathrm{a}} - p_{i,t} \right) \geqslant R \bar{d}_{n,t} \tag{33}$$

$$\underline{P}_l^{\mathrm{line}} \leqslant p_{l,t}^{\mathrm{line}} = b_{ij} \left(\theta_{i,t} - \theta_{j,t} \right) \leqslant \bar{P}_l^{\mathrm{line}} \tag{34}$$

$$\underline{\theta} \leqslant \theta_{i,t} \leqslant \bar{\theta} \tag{35}$$

式中：$a_{n,i}^{\mathrm{G}}$为节点机组关联矩阵中与节点n、机组i相对应的矩阵元素，若机组i连接于节点n，则该元素取1，否则取0；$a_{n,l}^{\mathrm{L}}$为节点线路关联矩阵中与节点n、线路l相对应的矩阵元素，若线路l潮流从节点n流出，则该元素取−1，若线路l的潮流方向为流入节点n，则该元素取1；$p_{i,t}^{\mathrm{a}}$为t时刻节点n处常规机组最大可能出力；Ω^{line}为系统中所有线路的集合；R为备用系数；$p_{l,t}^{\mathrm{line}}$为t时刻线路l流过的潮流；$\bar{P}_l^{\mathrm{line}}$和$\underline{P}_l^{\mathrm{line}}$分别为线路$l$允许流过的潮流上限和下限；$b_{j,t}$为$t$时刻线路$l$的电纳；$\theta_{i,t}$和$\theta_{j,t}$分别为$t$时刻与线路$l$相连的节点$i$和节点$j$的相角值；$\bar{\theta}$和$\underline{\theta}$分别为节点相角值的上限和下限。式(32)为节点功率平衡约束。式(33)为系统备用需求约束，系统中备用容量来自于常规机组和储能设备。式(34)为线性化潮流约束。

$$0 \leqslant p_{i,t} \leqslant p_{i,t}^{\mathrm{a}} \leqslant \bar{P}_i \quad i \in \Omega^{\mathrm{G}} / \Omega_{\mathrm{coal}}^{\mathrm{G}} \tag{36}$$

$$0 \leqslant p_{i,t} \leqslant \alpha_{i,g} \bar{P}_i \quad i \in \Omega_{\mathrm{coal}}^{\mathrm{G}} \tag{37}$$

式中：$\bar{P}_i$为机组i的出力上限。式(36)为除煤电机组外的常规机组出力约束。式(37)表示对于考虑机组退役的煤电机组，其出力约束与机组退役决策0-1变量有关。

在每台机组满足出力限制的条件下，为了简化模型，将系统中运行特性相同、位置临近的常规机组进行组合，对组合后不同组群的常规机组添加灵活性约束条件[19]，包括机组最大/最小出力约束、爬坡约束、最小在线/离线时间约束。引入连续变量$\tilde{p}_{n,k,t}$表示t时刻节点n处常规机组中组群k的出力值之和，连续变量$w_{n,k,t}$表示t时刻节点n处常规机组组群k的关断容量，以及上文提到的t时刻节点n处机组组群k的启动容量$v_{n,k,t}$，常规机组灵活性约束表示如下：

$$\tilde{p}_{n,k,t} - \tilde{p}_{n,k,t-1} = v_{n,k,t} - w_{n,k,t} \tag{38}$$

$$\underline{\mu}_k \sum_{i \in \Omega_k} \bar{I}_i \leqslant \tilde{p}_{n,k,t} \leqslant \bar{\mu}_k \sum_{i \in \Omega_k} \bar{I}_i \quad k \in K_n^{\mathrm{gas}} \tag{39}$$

$$\underline{\mu}_k \sum_{i \in \Omega_k} \alpha_{i,g} \bar{I}_i \leqslant \tilde{p}_{n,k,t} \leqslant \bar{\mu}_k \sum_{i \in \Omega_k} \alpha_{i,g} \bar{I}_i \quad k \in K_n^{\mathrm{coal}} \tag{40}$$

$$\tilde{p}_{n,k,t} - \tilde{p}_{n,k,t+1} \leqslant U_{n,k} \tag{41}$$

$$\tilde{p}_{n,k,t-1} - \tilde{p}_{n,k,t} \leqslant D_{n,k} \tag{42}$$

$$\begin{cases} 0 \leqslant w_{n,k,t+1} \leqslant \tilde{p}_{n,k,t} - \sum_{\tau=0}^{t-1} v_{n,k,t-\tau} \\ \qquad t = 1, 2, \cdots, U_{n,k} - 1 \\ 0 \leqslant w_{n,k,t+1} \leqslant \tilde{p}_{n,k,t} - \sum_{\tau=0}^{U_{n,k}-2} v_{n,k,t-\tau} \\ \qquad t = U_{n,k}, U_{n,k} + 1, \cdots, T - 1 \end{cases} \tag{43}$$

$$\begin{cases} 0 \leqslant v_{n,k,t+1} \leqslant \sum_{i \in \Omega_k} \bar{I}_i - \tilde{p}_{n,k,t} - \sum_{\tau=0}^{t-1} w_{n,k,t-\tau} \\ \qquad t = 1, 2, \cdots, D_{n,k} - 1 \\ 0 \leqslant v_{n,k,t+1} \leqslant \sum_{i \in \Omega_k} \bar{I}_i - \tilde{p}_{n,k,t} - \sum_{\tau=0}^{D_{n,k}-2} w_{n,k,t-\tau} \\ \qquad t = D_{n,k}, D_{n,k} + 1, \cdots, T - 1 \end{cases} \quad k \in K_n^{\mathrm{gas}} \tag{44}$$

$$\begin{cases} 0 \leqslant v_{n,k,t+1} \leqslant \sum_{i \in \Omega_k} \alpha_{i,g} \bar{I}_i - \tilde{p}_{n,k,t} - \sum_{\tau=0}^{t-1} w_{n,k,t-\tau} \\ \qquad t = 1, 2, \cdots, D_{n,k} - 1 \\ 0 \leqslant v_{n,k,t+1} \leqslant \sum_{i \in \Omega_k} \alpha_{i,g} \bar{I}_i - \tilde{p}_{n,k,t} - \sum_{\tau=0}^{D_{n,k}-2} w_{n,k,t-\tau} \\ \qquad t = D_{n,k}, D_{n,k} + 1, \cdots, T - 1 \end{cases} \quad k \in K_n^{\mathrm{coal}} \tag{45}$$

式中：$\bar{\mu}_k$、$\underline{\mu}_k$分别为机组组群k的最大和最小出力比例；Ω_k为机组组群k中所有传统机组的集合；K_n^{gas}为节点n处所有燃气机组组群的集合；K_n^{coal}为节点n处所有煤电机组组群的集合；$U_{n,k}$、$D_{n,k}$分别为节点n处常规机组组群k最大上爬和下爬功率。式(38)为常规机组组群启停容量和前后时刻出力逻辑约束。式(39)为常规机组组群的最大/最小出力约束。考虑

煤电机组退役决策变量对灵活性约束的影响，式(40)为煤电机组组群最大/最小出力约束。式(41)、(42)为爬坡约束。式(43)为所有常规机组最小在线时间约束。式(44)、(45)分别为燃气机组和煤电机组最小离线时间约束。

3 算例分析

3.1 算例参数及场景设置

本文采用IEEE 39节点系统测试所提的规划模型。选取的规划周期为15 a，将5 a作为一个规划阶段，共分为3个阶段。规划初期系统中所有机组装机容量共13 600 MW，其中包括煤电机组装机容量11 400 MW，燃气机组装机容量2 200 MW，系统规划初期无新能源装机。综合机组剩余寿命及实际碳排放要求，煤电机组退役容量应逐阶段提高，假定系统中现存的煤电机组计划剩余寿命均为5的整数倍，第一阶段初期计划有2台机组退出运行，该阶段煤电计划退役容量为1 600 MW，占煤电机组总装机容量的14%；第二阶段初期计划有3台机组退出运行，该阶段煤电退役容量为2 000 MW，占煤电机组原总装机容量的17.5%；第三阶段初期计划有4台机组退出运行，该阶段煤电计划退役容量为2 100 MW，占煤电机组总装机容量的18.4%；规划期结束时计划共退役5 700 MW的煤电机组，共占原总煤电装机容量的50%。除煤电机组外，系统另有5台燃气机组，此处假设在规划期内所有燃气机组均未达到使用寿命，不考虑燃气机组的退役问题。

煤电机组的退役会造成系统中发电容量缺额，需要在规划煤电机组退役的同时，规划系统中风电和光伏发电的投建，同时考虑投建储能设备作为系统灵活性资源补充，模型在每个阶段初期做出机组退役决策、储能规划和新能源投建决策。系统中各类发电设备的投资、运行成本和碳排放系数如附录A表A1所示，仅考虑煤电机组的退役及翻新保留，其对应的退役及翻新成本同见表A1。此外，表A1中风电单位投资成本为796万元/MW，光伏单位投资成本为598万元/MW，风电和光伏的预期寿命均为25 a。待选储能参数如附录A表A2所示。负荷的年增长率为4%。系统切负荷惩罚系数ρ^{loadshed}为3万元/(MW·h)，碳税为256元/t，并假设碳税价格的年增长率为5%，年贴现率取8%。

系统中风电和光伏出力小时级出力因数参考文献[20]，负荷功率基于历史运行数据模拟得到其小时级时序曲线，规划期内各阶段峰值负荷和年最大年用电量如表1所示。

由于新能源出力呈现较强的季节性特征，故将规划期内的每个规划阶段按照季节划分为冬季、夏季、过渡季3个时段，对每阶段内各个季节的新能源出力及负荷数据进行聚类，每阶段内各个季节选取3个代表日，基于聚类后的代表日内的新能源出力以及负荷时序曲线求解上述规划模型，得到规划期的决策方案。为验证本文所提模型，共设置以下4个场景进行对比分析：场景Ⅰ，不规划储能投建，考虑碳税约束下的新能源投建和煤电机组退役的多阶段规划；场景Ⅱ，不考虑碳税约束的新能源、储能投建和煤电机组退役的多阶段规划；场景Ⅲ，同时考虑碳税约束下的新能源、储能投建和煤电机组退役的多阶段规划；场景Ⅳ，考虑碳税约束的新能源、储能投建和煤电机组退役的单阶段规划，即煤电机组仍按计划多阶段顺序退役，新能源和储能设备的投建仅在规划初期进行决策。

表1 规划期内各阶段负荷

Table 1 Load in each stage during planning period

规划阶段	峰值负荷/MW	最大年用电量/(MW·h)
1	12 750.00	59 426 107.61
2	18 873.12	67 299 045.02
3	20 739.23	83 400 431.19

所提优化模型采用CPLEX求解器进行求解，并设置求解精度为0.1%。

3.2 规划结果分析

3.2.1 容量配置及经济成本分析

求解上述4个场景得到规划结果，煤电机组规划退役容量如表2所示。

表2 各场景煤电机组退役容量规划结果

Table 2 Planning results of coal-fired units retirement capacity in each scenario

规划阶段	煤电机组退役容量/MW				
	计划值	场景Ⅰ	场景Ⅱ	场景Ⅲ	场景Ⅳ
1	1 600	0	1 600	1 600	1 600
2	2 000	0	0	2 000	2 000
3	2 100	0	3 000	2 100	2 100
总计	5 700	0	4 600	5 700	5 700

在煤电机组退役方面，场景Ⅰ由于不规划储能，将导致系统的灵活性资源不足，为了保证系统灵活性和充裕度，所有计划退役的煤电机组全部做出延期保留决策。系统中到达使用寿命的煤电机组无法按期退役，必将导致系统低碳化转型缓慢。此外，超期运行的煤电机组由于老化等原因也将导致单位发电量对应的煤耗量增加，碳排放量也随之增加。场景Ⅱ的规划阶段2、3中，部分计划退役的煤电机组做出延期退役决策，其主要原因是在不考虑碳税约束的情况下，将有限满足系统运行经济性需求，因此规划结果中将能耗高、碳排放量高的部分煤电机组保留，用以系统供电和灵活性资源需求，以减少新能源和储能设备的投入，通过牺牲环境成本换取规划的经济成本。场景Ⅲ采用本文所提多阶段规划模型，同时规划新能源和储能设备的投建，在新能源投建保证系统供电和储能设备提供灵活性资源的条件

下，系统各阶段计划退役的煤电机组全部按期退役。场景Ⅳ下各阶段煤电机组退役容量与场景Ⅲ相同，均为所有煤电机组按计划退役容量退出市场。

储能容量规划结果如表3所示，风电及光伏投建容量如表4所示，新能源和储能新增容量如图1所示，各场景下经济成本对比如表5所示。场景Ⅰ中新能源投建容量高达49 869.52 MW，包含风电投建容量39 136.53 MW和光伏投建容量10 733.02 MW，用以满足负荷增长的发电需求，大量新能源接入，同时系统中灵活性资源不足，导致该场景下系统切负荷率和新能源弃电率较高。场景Ⅱ中新能源投建容量共计18 318.08 MW，储能投建容量共计12 300 MW，相比于场景Ⅰ，储能设备能够有效减少系统的切负荷情况和新能源弃电量，同时减少新能源设备的过量投入，使系统规划的总成本大幅降低。此外，储能设备提供电能缓冲用于削峰填谷，减少传统机组出力带来的碳排放，有效减少系统运行过程中的碳排放量。场景Ⅲ中新能源投建容量共计17 957.03 MW，储能投建总容量为19 150 MW，相比于场景Ⅱ，储能投建容量略有升高，用以补充煤电机组退役造成的系统灵活性资源缺额，同时储能设备容量的增加也使得系统中弃风和弃光情况得到改善。场景Ⅳ中新能源投资容量共计17 481.56 MW，储能投资容量共计2 300 MW，由于忽略规划决策的顺序实现过程，仅在规划初期进行一次投资规划决策，难以避免设备的超前投资，使规划决策难以涵盖长期规划中后期系统运行特点，由此带来新能源弃电量的升高以及碳排放量的增加。对比场景Ⅰ和场景Ⅲ可以看出，由于新能源本身具有不确定性和间歇性的特点，若缺少储能等灵活性资源的协同，将影响新能源的消纳和系统可靠运行。

表3　各场景储能规划结果

Table 3　Planning results of energy storage in each scenario

规划阶段	储能容量 / MW			
	场景Ⅰ	场景Ⅱ	场景Ⅲ	场景Ⅳ
1	0	9550	10950	2300
2	0	2750	8200	0
3	0	0	0	0
总计	0	12300	19150	2300

表4　各场景新能源规划结果

Table 4　Planning results of renewable energy in each scenario

新能源种类	规划阶段	新能源容量 / MW			
		场景Ⅰ	场景Ⅱ	场景Ⅲ	场景Ⅳ
风电	1	6583.28	1722.77	909.84	0
	2	18957.03	0	0	0
	3	13596.22	0	0	0
	总计	39136.53	1508.76	909.84	0
光伏	1	962.63	4825.46	6078.71	17481.56
	2	11349.67	5441.66	4788.50	0
	3	0	6542.20	6179.97	0
	总计	12312.30	16809.32	17047.18	17481.56

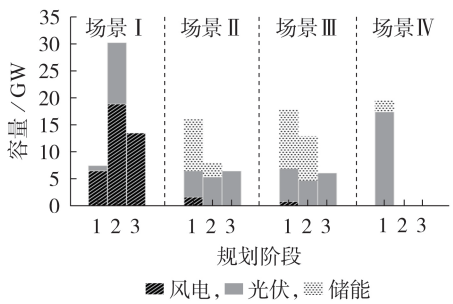


图1　各场景下各规划阶段新能源和储能新增容量

Fig.1　New installed capacity of renewable energy and energy storage at each planning stage under different scenarios

表5　各场景经济成本分析

Table 5　Economic analysis of each scenario

类别	场景Ⅰ	场景Ⅱ	场景Ⅲ	场景Ⅳ
总成本 / 亿元	10371.84	2796.22	3342.09	2761.14
储能成本 / 亿元	0	1039.37	1504.30	209.30
新能源成本 / 亿元	2571.80	828.38	801.90	1045.40
煤电机组退役成本 / 亿元	0	0.98	1.33	1.33
煤电机组翻新保留成本 / 亿元	53.87	15.06	0	0
总碳排放量 / 万 t	57732.82	35340.91	20921.10	28289.50
切负荷率 / %	2.73	0	0	0
新能源弃电率 / %	12.77	0.13	0	7.10

基于场景Ⅲ分析本文所提考虑机组退役的多阶段新能源及储能协同规划模型的规划结果，图2为场景Ⅲ下各规划阶段的能源结构对比。为满足电力系统低碳化转型要求，规划期末期时常规煤电机组装机减少至初期装机容量的一半，装机比例由原来的83.3%降低至22%，传统煤电机组将由主要供电者逐步转为为系统提供辅助服务，而未来充当主要

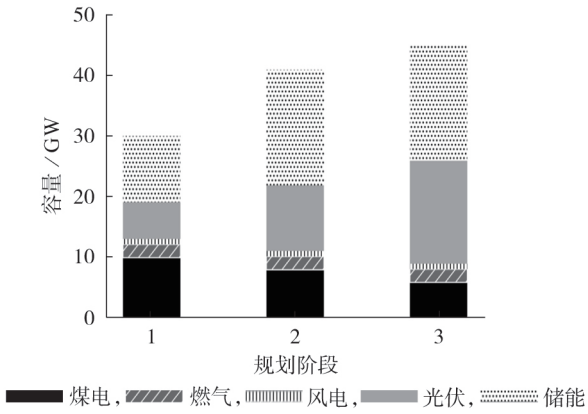


图2　新能源和储能多阶段协同规划下各阶段设备容量对比

Fig.2　Comparison of equipment capacity at each stage under multi-stage planning of renewable energy and energy storage

功能者的新能源发电设备的装机容量增至69%，在规划期末期共规划投建储能设备总容量19 150 MW，可见高比例新能源接入的系统更加依赖于以储能为代表的灵活性调节资源，以保证系统运行的可靠性和充足的运行灵活性。

3.2.2 求解效率分析

单阶段规划和多阶段规划的求解效率对比如表6所示。从表中可见，多阶段规划模型的求解难度大于单阶段规划模型，其中多阶段规划模型中整数变量总数为单阶段规划模型中整数变量总数的3倍，多阶段规划模型求解时间是单阶段规划模型求解时间的3.6倍。原因是多阶段规划中将规划期划分为多个阶段，随着规划决策的逐步推进，在每个阶段均需做出相应决策，导致模型中变量数量的增加，其中整数变量数量的增加会使模型的求解难度大幅增加。

表6 单阶段规划与多阶段规划求解效率对比

Table 6 Comparison of computational efficiency between single-stage and multi-stage planning

规划类型	二进制变量数	整数变量数	连续变量数	约束条件数	求解时间/s
单阶段	120	39	267 762	358 768	227.79
多阶段	120	117	267 918	392 464	820.40

3.2.3 碳排放量对比

图3为4种场景下不同阶段的碳排放量对比，其中，场景Ⅲ下系统碳排放量随着规划阶段的推移逐渐减少，其长期减碳效果最好，主要原因在于煤电机组按退役计划逐渐退出系统，取而代之的是新能源和储能设备承担主要负荷用电需求。相比于场景Ⅲ，场景Ⅳ在整个规划期内的碳排放量总体也有所减小，但是由于场景Ⅳ采用单阶段规划，其规划结果难以覆盖整个规划期内的运行特性，导致规划结果对阶段1的减碳效果较差，其规划结果难以兼顾整个规划周期。场景Ⅰ在各阶段碳排放量均为4种规划场景中最多的情况，原因在于达到使用寿命的煤电机组仍被大量保留在系统中，以及缺少储能装置消纳新能源，仍需依靠传统高碳排的机组提供灵活性调节能力等。

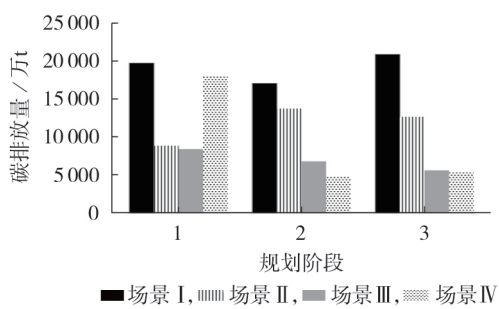


图3 各场景下不同阶段碳排放量对比

Fig.3 Comparison of carbon emissions at different stages in each scenario

4 结论

电力系统低碳化转型意味着在较长一段时间内煤电机组应有序退役，本文充分考虑了机组退役给电力系统规划决策带来的影响并建立多阶段规划模型，在模型中考虑灵活性约束条件，伴随机组退役进行新能源扩容和储能投建规划，选取规划周期为15 a，充分考虑长时间尺度下煤电机组退役对电力系统规划产生的影响。基于IEEE 39节点测试系统进行算例分析，该系统能使规划结果更加贴合未来大规模新能源并网的背景，并围绕储能投建对机组退役和电力系统碳排的影响，以及多阶段规划和整体规划方法对机组退役和电力系统碳排放量的影响进行分析。算例结果验证了碳排放政策以及煤电机组逐阶段的退役容量均会对新能源和储能规划结果产生影响，同时合理规划新能源和储能的投建也有利于煤电机组如期退役，从而实现电力系统低碳化转型。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献：

[1] CUI R Y, HULTMAN N, CUI D, et al. A plant-by-plant strategy for high-ambition coal power phaseout in China[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 1-10.

[2] CHEN Qixin, KANG Chongqing, XIA Qing, et al. Power generation expansion planning model towards low-carbon economy and its application in China[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 1117-1125.

[3] SIRIKUM J, TECHANITISAWAD A, KACHITVICHYANUKUL V. A new efficient GA-Benders' decomposition method: for power generation expansion planning with emission controls [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1092-1100.

[4] MOREIRA A, POZO D, STREET A, et al. Reliable renewable generation and transmission expansion planning: co-optimizing system's resources for meeting renewable targets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 3246-3257.

[5] BAKKEN B H, VON S. Linear models for optimization of infrastructure for capture and storage[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(3): 824-833.

[6] CHEN Bokan, WANG Lizhi. Robust transmission planning under uncertain generation investment and retirement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 5144-5152.

[7] 倪禛霖，李延和，张红丽，等. 全清洁能源发电转型过程中火电退出顺序评估[J]. 电网与清洁能源，2021，37(1)：127-134.
NI Zhenlin, LI Yanhe, ZHANG Hongli, et al. Evaluation of the exit sequence of thermal power units in the transition to all clean energy generation[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(1): 127-134.

[8] SHEN Wei, QIU Jing, MENG Ke, et al. Low-carbon electricity network transition considering retirement of aging coal generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4193-4205.

[9] AKBARZADE H, AMRAEE T. A multi-stage generation expansion planning for low carbon power systems[C]//Iranian Conference on Electrical Engineering(ICEE). Tabriz, Iran: IEEE, 2020: 1-5.

[10] QIU Jing, DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, et al. A risk-based

approach to multi-stage probabilistic transmission network planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2016,31(6):4867-4876.

[11] MUNOZ-DELGADO G,CONTRERAS J,ARROYO J. Multistage generation and network expansion planning in distribution systems considering uncertainty and reliability[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2016,31(5):3715-3728.

[12] 丁涛,李澄,胡源,等. 考虑非预期条件的电力系统多阶段随机规划建模理论与方法[J]. 电网技术,2017,41(11):3566-3573.
DING Tao,LI Cheng,HU Yuan,et al. Multi-stage stochastic programming for power system planning considering nonanticipative constraints[J]. Power System Technology,2017,41(11):3566-3573.

[13] 徐国栋,程浩忠,马紫峰,等. 用于缓解电网调峰压力的储能系统规划方法综述[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):3-11.
XU Guodong,CHENG Haozhong,MA Zifeng,et al. Overview of ESS planning methods for alleviating peak-shaving pressure of grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(8):3-11.

[14] CONEJO A J,CHEN S,CONSTANTE G E. Operations and long-term expansion planning of natural-gas and power systems:a market perspective[J]. Proceedings of the IEEE,2020,108(9):1541-1557.

[15] POUSINHO H,CONTRERAS J,BAKIRTZIS A,et al. Risk-constrained scheduling and offering strategies of a price-maker hydro producer under uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(2):1879-1887.

[16] 刘天琪,卢俊,何川,等. 考虑联合热电需求响应与高比例新能源消纳的多能源园区日前经济调度[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):261-268.
LIU Tianqi,LU Jun,HE Chuan,et al. Day-ahead economic dispatch of multi-energy parks considering integrated thermo-electric demand response and high penetration of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(8):261-268.

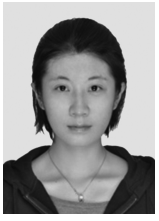
[17] 葛玉友,尚策. 寿命约束的储能规划[J]. 中国电机工程学报,2020,40(19):6150-6161.
GE Yuyou,SHANG Ce. Energy storage planning constrained by its life[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(19):6150-6161.

[18] POONPUN P,JEWELL W. Analysis of the cost per kilowatt hour to store electricity[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2008,23(2):529-534.

[19] PALMINTIER B,WEBSTER M. Impact of operational flexibility on electricity generation planning with renewable and carbon targets[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2016,7(2):672-684.

[20] ZHUO Zhenyu,ZHANG Ning,YANG Jingwei,et al. Transmission expansion planning test system for AC/DC hybrid grid with high variable renewable energy penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2020,35(4):2597-2608.

作者简介:



原一方

原一方(1997—),女,广东惠州人,硕士研究生,主要研究方向为能源电力系统运行与规划(**E-mail**:yuanyifang@sjtu.edu.cn);

尚　策(1988—),男,吉林吉林人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为能源电力系统运行规划与可靠性评估(**E-mail**:shangce@sjtu.edu.cn)。

(**编辑　李玮**)

Coordination of multi-stage renewable energy,energy storage planning and coal-fired unit retirement under carbon reduction goal

YUAN Yifang,SHANG Ce

(Department of Electrical Engineering,Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China)

Abstract:The key issue in the low-carbon transformation of power system is to plan for the orderly retirement of existing coal-fired units. The retirement of coal-fired units will result in a shortage of power generation and insufficient system flexibility,especially under the condition of the proportion of renewable energy increasing step by step. While energy storage is an effective technological way to balance the power supply and demand,and improve flexibility of power supply. Thus,the power system planning should be considered together with the retirement of coal-fired units for a long time. For that,a multi-stage planning model is adopted to coordinate the planning of renewable energy and energy storage with the coal-fired unit retirement under the background of carbon reduction for power system. The effective of the proposed model is verified based on IEEE 39-bus system,the planning results are analyzed from the perspective of unit retirement and carbon reduction for power system. Results show that the reasonable planning for renewable energy and energy storage can achieve faster coal-fired unit retirement,so as to realize the low-carbon transformation of power system.

Key words:coal-fired unit retirement;multi-stage planning;renewable energy;energy storage;flexibility constraint

附录 A

表 A1 各类发电设备参数

Table A1 Parameters of different generation equipments

电源	投资成本/(万元・MW^{-1})	可变成本/[万元・$(MW・a)^{-1}$]	启动成本/(万元・MW^{-1})	固定成本/(万元・MW^{-1})	CO_2 排放系数/[kg・$(kW・h)^{-1}$]	退役成本/(万元・MW^{-1})	翻新保留成本/(万元・MW^{-1})
煤电机组	322.1	0.027	0.099	21.079	0.77	3.22	80.53
燃气机组	225.0	0.039	0.032	17.821	0.3	/	/
光伏	598.0	0	0	16.950	0	/	/
风电	796.0	0	0	15.561	0	/	/

表 A2 待选储能参数

Table A2 Parameters of candidate energy storages

参数	数值
单位容量/(MW・h)	50
单位最大充、放电功率/MW	35
单位最小充、放电功率/MW	0
存储效率	1
充电效率	0.9
放电效率	1
容量相关成本/[万元・$(MW・h)^{-1}$]	450
功率相关成本/(万元・MW^{-1})	910