

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2020.02.010

计及核电调峰的新能源电力系统两阶段随机优化调度

宁阳天¹, 罗翠云¹, 赵梓淇¹, 苗增强¹, 曾子彧², 丁涛²

(1. 广西电网电力调度控制中心, 广西南宁 530023; 2. 电力设备电力绝缘国家重点实验室, 陕西省智能电网重点实验室(西安交通大学), 陕西西安 710049)

摘要:近年来,随着世界范围内的能源危机越来越严重,新能源作为缓解能源危机的有效途径之一发展迅速。然而新能源具有不确定性的特点,大规模的新能源并网会给电力系统优化调度带来新挑战。在新能源和核电高速发展的情况下,电力系统峰谷差变大使得电力系统调峰压力增加。为解决调峰问题,建立了核电灵活调峰模型,同时构建了一种考虑新能源的运用核电进行灵活调峰的电力系统两阶段随机调度优化模型:第一阶段决定机组启停情况,第二阶段则根据第一阶段做出的决定对机组出力进行优化,以实现运行成本最小化。通过对 IEEE 标准 24 节点测试系统以及一个实际系统进行测试,验证了核电厂进行调峰的可行性和经济性。

关键词:新能源;核电;电力系统调峰;两阶段随机优化

中图分类号:TM732;TM623

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)02-0066-09

0 引言

近年来,随着世界经济的发展,化石能源等传统能源使用量逐年提高,我国能源消费由 2000 年的 14.7 亿 t 标准煤急速增长到 2017 年的 44.9 亿 t^[1]。然而,随着化石能源的大量消耗,其储量也日益减少。此外,大量使用化石能源也会导致能源危机并对生态环境造成严重破坏,能源结构转型刻不容缓^[2]。在这种情况下,新能源因其环境友好性成为了替代传统能源的能量来源^[3-4]。但是,新能源具有间歇性、随机性和不确定性等特点,大规模新能源接入电网会对电力系统造成冲击^[5-7]。

与此同时,核电由于其能量密度高、环境污染小和供电稳定而逐渐成为电力工业的主要组成部分。西方主流发达国家均在核电上大力发展,2017 年法国核电发电量占法国整体发电量的 71.6%^[8]。在核电占比很高的电力系统中,常规发电机组的调峰容量不足,因此,核电厂进行调峰的需求也越来越大^[9-11]。核电机组作为潜在的调峰手段能够补充一些电网缺少的调峰容量,通过灵活调度核电机组的出力能够增加电网的调峰容量。

在关于核电厂参与电网调峰方面,国内外已经有一部分研究工作,但相关成果较少。文献[12]从不同类型核电厂的运行原理和控制角度入手,分析了核电厂参与电网调峰的可能性,最终说明了压水堆核电厂可以参与调峰。同样的,文献[13-14]建立了核电机组的数学模型和电网调峰的平衡计算模型,通过仿真对比了核电调峰、火电调峰、抽水蓄

能机组调峰以及核电与抽水蓄能联运调峰的经济性,结果显示核电与抽水蓄能机组联运调峰具有很高的经济性。文献[15]考虑了核电机组日常输出性能的安全约束,对核电机组和抽水蓄能电站联运调峰进行了研究。文献[16]从需求侧出发,在拥有碳交易机制下的情况下,建立核-火-虚拟电厂三阶段联合调峰模型,并进行了仿真验证。此外,除了核电与抽水蓄能电站联合运行在调峰中能够得到很好的效果外,核电与风电联合运行也能够提高核电厂调峰的能力。文献[17-18]针对含风电以及核电的电力系统,建立了风电与核电联合运行的调峰系统,通过仿真验证了风电与核电联合运行调度的经济性与可行性。

根据国家发改委发布的《国家能源局关于有序放开发用电计划的通知》,国家规划内的既有大型水电、风电、太阳能等清洁能源发电通过优先发电计划予以保障。然而,新能源的不确定性使电力公司在进行电网日前调度时无法准确预测次日的新能源发电量。而两阶段随机优化广泛应用于日前调度中,能够在不确定性高的系统中统筹考虑可能出现的多场景,得到最佳的机组组合方式^[19-21]。

针对上述情况,文中提出了两阶段随机规划的方法对含核电以及新能源的电力系统日前调度进行优化,并通过算例分析验证了所提模型的准确性和可行性。

1 核电机组调峰模型

西方国家自上个世纪七十年代起便对核电调峰的性能进行了研究和试验。大量的核电站负荷

跟踪运行显示,现在主流核电站压水堆核电站可以通过改变控制棒在堆芯中的插入深度参与调峰^[22]。本节以压水堆核电站为例对核电的运行特性进行建模分析。

由于核电机组的安全性约束,核电机组出力无法快速变化,因此会对核电机组的调峰深度及爬坡速度进行限制。根据世界各国实施的核电负荷跟踪实验,核电机组爬坡速率一般在每分钟 1%到 5%之间^[12]。按照先前的运行经验,核电机组可以按照“12-3-6-3”模式或“15-1-7-1”模式进行调峰。“12-3-6-3”调峰模式即核电机组先满负荷运行 12 h,之后将机组出力线性下降 3 h 至机组额定出力的某个百分比,保持该功率稳定运行 6 h 后再将机组出力提升至最高^[23]。而关于调峰深度,原则来说核电机组调峰深度有几档固定的调峰深度,一般为机组最大出力的 30%,50%和 70%。例如,“12-3-6-3”模式下 50%调峰深度时核电机组调峰日出力曲线如图 1 所示。

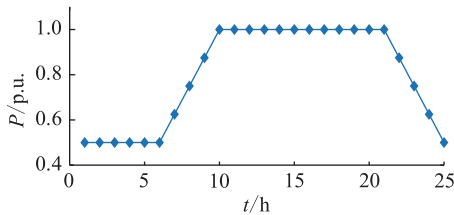


图 1 核电机组调峰出力曲线

Fig.1 The output curve of nuclear power plants participating in peak regulation

在先前研究中,核电机组进行调峰过程的开始时间点总是相同的,即核电总会在某一个固定的时间点开始向下爬坡进入非满负荷运行状态。而在实际的情况中,核电调峰的启动点应根据实际电网负荷的变化进行调整,进行灵活可变的调峰。如,我国某省 1 月份工作日与非工作日电网实际负荷曲线如图 2 所示,根据该负荷曲线,可以看出该省在工作日与非工作日进入高峰用电的时间有所差别,核电调峰的启动点也应做出相应调整。

据此,文中建立了灵活可变的核电调峰模型,使得核电调峰的启动点可以根据实际需要进行调整。该模型首先预设了 T 种核电机组出力方案,其中 T 为调度的时段总数,在研究日前调度时通常为 24。这 T 种核电机组出力方案的调峰启动点各不相同且位于不同的调度时段,以调度时间间隔 1 h 为例,核电机组调峰模式共有 24 种,分别对应不同的调峰启动点。核电机组的实际出力可由式(1)、式(2)表达,式(1)限制了在给定的核电调峰 24 种运行方式中选择一种预设的调度方案,式(2)限制了

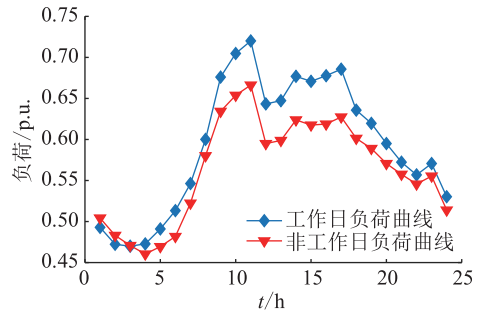


图 2 工作日与非工作日典型日负荷曲线

Fig.2 The typical daily load demand curve of the weekday and weekend

最终核电机组的运行状态只能是 24 种运行方式中的一种。

$$P_{n,t} = \sum_{m=1}^T \chi_{n,m} P_{n,m,t}^{\text{Default}} \quad n \in \Omega_N, t = 1, 2, \dots, T \quad (1)$$

$$\sum_{m=1}^T \chi_{n,m} = 1 \quad n \in \Omega_N, m = 1, 2, \dots, T \quad (2)$$

式中: $P_{n,t}$ 为核电机组 n 在 t 时段的出力功率; $\chi_{n,m}$ 为判断核电机组 n 是否采用预设核电机组出力方案 m 的 0-1 变量,若 $\chi_{n,m}$ 等于 1,则采用第 m 个预设出力方案,若 $\chi_{n,m}$ 等于 0,则不采用该方案; $P_{n,m,t}^{\text{Default}}$ 为第 n 个核电机组第 m 个预设运行方案在 t 时段的出力; Ω_N 为所有核电机组的集合。

2 两阶段随机优化调度模型

由于新能源出力存在不确定性,现在的预测方法还无法完全准确的预测第二天新能源出力情况。文中将确定性的日前调度问题转化成两阶段随机优化调度问题,通过对多个新能源出力场景的综合评估,得出一套可以支持所有新能源出力场景的调度方法,最终得到一个更为合理的优化结果。两阶段随机优化方法的应用可以减少新能源出力预测的难度,在新能源预测结果不确定时仍然能够给出合理的电力系统调度方案。该方法还考虑到各个新能源出力场景出现期望的不同,可以有针对性的增加出现概率最大场景的权重。具体来说,两阶段随机优化调度模型用多个场景模拟新能源的不确定性,每个场景对应一个新能源的日出力,所有场景概率之和为 1。在第一个阶段确定各个发电机组的启停状况,第二阶段则根据电网实际情况调整各个机组出力,而实际上执行一次优化计算即可得到优化结果,具体分析模型如下。

2.1 目标函数

文中在常规电力系统中考虑了核电参与调峰与新能源的接入,以火电、核电运行费用最小为优化目标,具体包括机组运行成本、启停成本。目标

函数如下:

$$\min C = \sum_{k=1}^K (C_{H,k} + C_N + R_N + C_{R,k}) E_k \quad (3)$$

式中: $C_{H,k}$ 为火电机组在第 k 个场景下的运行成本; C_N 为核电机组的运行成本; R_N 为核电机组的调峰成本; $C_{R,k}$ 为第 k 个场景下新能源弃用成本; E_k 为第 k 个场景出现的概率。

2.1.1 火电机组运行成本

火电机组运行成本包括煤耗费用和机组启停成本,具体如下:

$$C_H = \sum_{t=1}^T \sum_{h \in \Omega_H} (\alpha_h u_{h,t} + \beta_h P_{k,h,t} + \gamma_h P_{k,h,t}^2) + (v_{h,t} C_h^{\text{start}} + w_{h,t} C_h^{\text{shut}}) \quad \forall k \quad (4)$$

式中: Ω_H 为所有火电机组组成的集合; $\alpha_h, \beta_h, \gamma_h$ 为火电机组 h 煤耗费用参数; $u_{h,t}$ 为 0-1 变量,当火电机组 h 在 t 时段处在运行状态时为 1,否则为 0; $P_{k,h,t}$ 为第 k 个场景下火电机组 h 在 t 时段的出力功率; $v_{h,t}, w_{h,t}$ 为 0-1 变量,分别表示机组启停状态,当 t 时段火电机组 h 启动时 $v_{h,t}$ 为 1, $w_{h,t}$ 为 0,当 t 时段火电机组 h 关停时 $w_{h,t}$ 为 1, $v_{h,t}$ 为 0; $C_h^{\text{start}}, C_h^{\text{shut}}$ 分别为机组启动和关停成本。

值得注意的是,火电机组煤耗费用计算部分为二次函数,在求解机组组合问题中会耗费较多的时间。为了减少计算时间,文中将火电机组煤耗费用函数进行分段线性化,将二次函数转化为许多段的一次函数进行近似。煤耗曲线分段线性化后的火电机组运行成本可以写为:

$$C_{H,k} = \sum_{t=1}^T \sum_{h \in \Omega_H} (Q_{h,t} + v_{h,t} C_h^{\text{start}} + w_{h,t} C_h^{\text{shut}}) \quad \forall k \quad (5)$$

式中: $Q_{h,t}$ 为经过分段线性化后的火电机组 h 在时段 t 时的运行燃料成本。

运用分段线性化的方法,在火电机组运行功率区间内取 N_s 个分段点,其中火电机组 h 的最小发电功率和最大发电功率 $P_h^{\text{min}}, P_h^{\text{max}}$ 分别为第 1 个和第 N_{s+1} 个分段点,将火电机组功率分为 N_s 段。这样,煤耗费用可以用如下约束替代:

$$Q_{h,t} \geq a_{h,s} P_{k,h,t} + b_{h,s} u_{h,t} \quad s = 1, 2, \dots, N_s, \quad \forall k \quad (6)$$

$$\begin{cases} a_{h,s} = \gamma_h (P_{h,s} + P_{h,s+1}) + \beta_h \\ b_{h,s} = \alpha_h - \gamma_h P_{h,s} P_{h,s+1} \end{cases} \quad \forall s = 1, 2, \dots, N_s, \quad \forall k \quad (7)$$

式中: $a_{h,s}, b_{h,s}$ 分别为分段线性化过程中火电机组 h 在第 s 段的系数; P_h^s 为火电机组 h 出力的第 s 个分界值。

2.1.2 核电机组的运行成本

核电机组的运行成本函数如下所示:

$$C_N = \sum_{t=1}^T \sum_{n \in \Omega_N} (\alpha_n + \beta_n P_{n,t}) \quad (8)$$

式中: α_n, β_n 为核电机组 n 运行费用参数。

2.1.3 核电机组的调峰成本

核电机组的调峰成本包括调峰增加的运行成本 and 安全性成本两部分,综合考虑可以得出核电调峰成本 R_N 如下^[21]:

$$R_N = \sum_{t=1}^T \sum_{n \in \Omega_N} F_n^N (P_n^{\text{max}} - P_{n,t}) \quad (9)$$

式中: F_n^N 为核电调峰成本系数; P_n^{max} 为核电机组 h 的最大出力功率。

2.1.4 新能源弃用成本

电网公司在调度过程中通常会优先调度新能源上网发电,然而由于新能源的不确定性,在一些时刻不得不弃用一些新能源以保证电网的稳定运行。文中考虑到我国在政策上要求新能源优先发电^[16],增加了弃用新能源的惩罚项,新能源弃用成本如下:

$$C_{R,k} = F_R \sum_{t=1}^T \sum_{r \in \Omega_R} (P_{k,r,t}^C - P_{k,r,t}) \quad \forall k \quad (10)$$

式中: F_R 为弃用新能源成本系数; $P_{k,r,t}$ 为第 k 个场景下第 r 个新能源发电站在 t 时段的发电功率; $P_{k,r,t}^C$ 为第 k 个场景下第 r 个新能源发电站在 t 时段的最大可发电功率; Ω_R 为全部新能源发电站的集合。

2.2 第一阶段约束条件

第一阶段针对火电机组的启停状态,应满足如下系列约束,其中式(11)~式(15)限制了机组在启停时要持续一定的时间,式(16)限制了火电机组的启动和关停不能在同一时段进行,式(17)定义了机组状态和机组启停的关系:

$$\sum_{t=0}^{G_h} (1 - u_{h,t}) u_{h,0} + \sum_{t=0}^{L_h} u_{h,t} (1 - u_{h,0}) = 0 \quad h \in \Omega_H \quad (11)$$

$$G_h = \min\{T, \max[(T_h^{\text{on}} - U_h) u_{h,t}, 0]\} \quad h \in \Omega_H \quad (12)$$

$$L_h = \min\{T, \max[(T_h^{\text{off}} - D_h)(1 - u_{h,t}), 0]\} \quad h \in \Omega_H \quad (13)$$

$$\sum_{d=t}^{t+T_h^{\text{on}}-1} u_{h,d} \geq T_h^{\text{on}} v_{h,d} \quad h \in \Omega_H, t = G_i + 1, \dots, T \quad (14)$$

$$\sum_{d=t}^{t+T_h^{\text{off}}-1} (1 - u_{h,d}) \geq T_h^{\text{off}} w_{h,d} \quad h \in \Omega_H, t = L_i + 1, \dots, T \quad (15)$$

$$v_{h,t} + w_{h,t} \leq 1 \quad h \in \Omega_H, t = 1, 2, \dots, T \quad (16)$$

$$u_{h,t} - u_{h,t-1} = v_{h,t} - w_{h,t} \quad h \in \Omega_H, t = 1, 2, \dots, T \quad (17)$$

式中: $u_{h,0}$ 为火电机组 h 在初始时间段的启停机状态; G_i 为初始时刻机组 h 仍需要持续开机的时间; L_i 为初始时刻机组 h 仍需要持续关机的时间; $T_h^{\text{on}}, T_h^{\text{off}}$ 分别为火电机组 h 启停机所需要的时间; U_h, D_h 分别为火电机组在第一时刻之前已经持续启动或关停的时间。

2.3 第二阶段约束条件

第二阶段的约束会在第一阶段确定了机组状态的基础上,对火电机组及核电机组的出力进行决策。其中,式(1)和式(2)决定了灵活调峰的核电机组的出力,也在第二阶段中做出决策,前文已做详细描述,此处不赘述。

此外,约束条件还包含了一系列常规约束以保持电网的稳定运行。第二阶段约束条件具体如下,其中式(18)为各个场景下的电力系统功率平衡;式(19)和式(20)限制了火电机组和新能源电站的出力;式(21)限制了传输线输出的功率;式(22)给出了电力系统直流潮流的计算公式;式(23)为火电机组爬坡约束。

$$\sum_{h \in \Omega_{H,b}} P_{k,h,t} + \sum_{r \in \Omega_{R,b}} P_{k,r,t} + \sum_{n \in \Omega_N} P_{n,t} + \sum_{l \in \Omega_{L,b}^{\text{in}}} fp_{k,l,t} - \sum_{l \in \Omega_{L,b}^{\text{out}}} fp_{k,l,t} = D_{b,t} \quad \forall k, \forall b, t = 1, 2, \dots, T \quad (18)$$

$$0 \leq P_{k,r,t} \leq P_{k,r,t}^C \quad \forall k, r \in \Omega_R, t = 1, 2, \dots, T \quad (19)$$

$$P_{h,t}^{\min} u_{h,t} \leq P_{k,h,t} \leq P_{h,t}^{\max} u_{h,t} \quad \forall k, h \in \Omega_H, t = 1, 2, \dots, T \quad (20)$$

$$-p_l^{\max} \leq p_{k,l,t} \leq p_l^{\max} \quad \forall k, l \in \Omega_L, t = 1, 2, \dots, T \quad (21)$$

$$p_{k,l,t} = (\theta_{k,l,t}^{\text{from}} - \theta_{k,l,t}^{\text{to}}) / X_l \quad \forall k, l \in \Omega_L, t = 1, 2, \dots, T \quad (22)$$

$$-R_h^{\text{dn}} - P_{h,t}^{\max} w_{h,t} \leq P_{k,h,t} - P_{k,h,t-1} \leq R_h^{\text{up}} + P_{h,t}^{\max} v_{h,t} \quad \forall k, h \in \Omega_H, t = 2, 3, \dots, T \quad (23)$$

式中: $\Omega_{H,b}, \Omega_{R,b}$ 分别为所有在母线 b 上的火电机组和新能源发电站集合; $\Omega_{L,b}^{\text{in}}, \Omega_{L,b}^{\text{out}}$ 分别为所有注入和注出母线 b 的传输线集合; $p_{k,l,t}$ 为第 k 个场景下传输线 l 在 t 时段的传输功率; $D_{b,t}$ 为母线 b 上 t 时段的负荷; P_h^{\min}, P_h^{\max} 分别为火电机组 h 的最小和最大出力; p_l^{\min}, p_l^{\max} 分别为传输线 l 的最小和最大传输功率; $\theta_{k,l,t}^{\text{from}}, \theta_{k,l,t}^{\text{to}}$ 分别为传输线 l 注入和注出母线的电压角度; X_l 为传输线 l 的电抗; $R_h^{\text{up}}, R_h^{\text{dn}}$ 分别为火电机组向上和向下爬坡的最大值。

式(1)~式(23)为计及新能源不确定性的考虑核电参与调峰的两阶段随机优化调度的完整模型。可以通过在日前对次日新能源负荷进行预测并给出各种场景出现的期望值,运用上述模型进行求解,从而给出一个更加全面的模型。

3 算例分析

本节应用计及新能源不确定性的两阶段随机优化电力系统核电调峰模型对 IEEE 24 节点标准测试系统和某省实际测试系统进行了仿真计算。在这 2 个算例中,部分参数是一致的,如核电调峰成本系数 F_n^N 为 50 元/(MW·h);弃用新能源成本系数 F_R 为 2 000 元/(MW·h)。

3.1 IEEE 24 节点标准测试系统

本节以 IEEE 24 节点标准测试系统运用上述模型进行仿真计算,并与传统机组组合模型进行对比,验证上述模型的正确性以及核电调峰在电力系统中应用的必要性。

文中对 IEEE 24 节点标准测试系统进行了一些修改,测试系统的网络拓扑如图 3 所示。该系统共有 27 台火电机组,4 台新能源机组以及 2 台核电机组,负荷水平及机组详细数据详见附录 A。文中给出了 4 种不同的新能源场景,4 种场景出现的概率分别为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 出力曲线如图 4 所示。根据图 4 可以看出,4 种场景的新能源出力差别很大,充分考虑了新能源的不确定性。

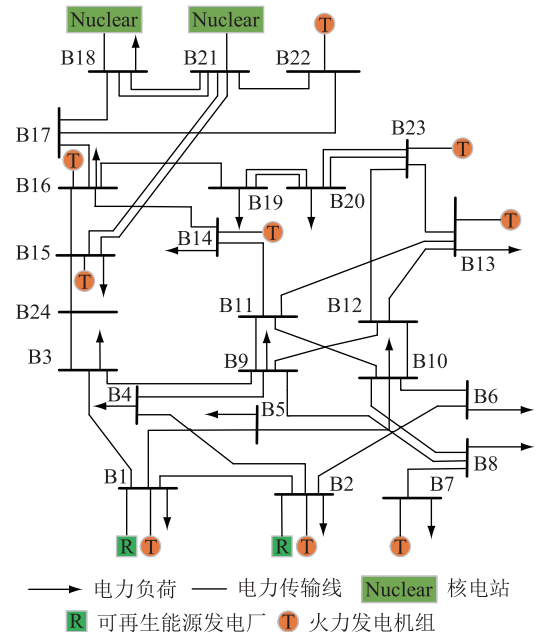


图 3 测试系统网络拓扑图

Fig.3 The topology of the IEEE 24 bus test system

此外,在核电机组调峰运行方式的选择上,由

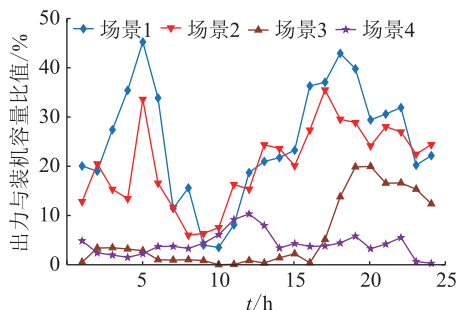


图4 4个场景下的新能源出力曲线

Fig.4 Renewable energy output in 4 scenarios

于核电机组的调峰模式和调峰深度是根据核电机组的性能以及电力系统调峰的需要来决定的,核电机组在安全性要求下能达到的爬坡速度越快,调峰深度就可以设置的越深,且也能够按照“15-1-7-1”调峰模式进行调峰。文中为了能够覆盖大多数核电机组,综合选取了“12-3-6-3”调峰模式下50%调峰深度作为核电机组的调峰运行方式。

表1对比了有无核电调峰情况下的电力系统运行成本。可以看出,在核电参与调峰的情况下新能源的消纳量比核电不参与调峰时要大(这里的新能源消纳量是4个场景下的可能发生概率的期望值)。这主要是因为现在已经大规模开发利用的新能源中有很大大一部分是风电厂,在凌晨和晚间风力资源丰富,在白天风力较小,风力资源总体上呈现出反调峰特性。当核电参与调峰时,可以根据预测对核电出力进行调整,在晚间减少出力,从而加大了风能资源的消纳量。此外,在核电参与调峰的情况下,电力系统运行的成本变低了,主要是因为新能源的消纳能力增强,火力发电站的出力降低,从而减少了火力发电站的运行成本。同时,新能源的消纳能力增强,也减少了新能源的弃用成本。

表1 有无核电参与调峰下电力系统运行成本

Table 1 The operation cost of the power system in different situation

核电是否参与调峰	电力系统运行成本 / (万元·d ⁻¹)	新能源弃用量 / [(MW·h)·d ⁻¹]
是	430.39	10.23
否	447.21	56.77

图5给出了场景1情况下核电调峰及不调峰时24h新能源实际出力与可利用功率的曲线图。可以看出,核电机组不参与调峰时,新能源的弃用主要发生在第3到第7个时间段内,而核电机组参与调峰后新能源的弃用主要发生在第4到第6个时间段内,弃用时间段减少。同时,根据新能源出力曲线与可利用曲线间的面积可以看出,核电参与调峰

后新能源弃用率减少。此外,图5给出了核电参与调峰时的核电厂出力曲线,可以看出核电在第3到第7个时间段内刚好处于出力低谷时段,即核电参与调峰使得发电系统可以将第3到第7个时间段内的新能源消纳量大大增加。这说明核电参与调峰能够有效增强电网消纳新能源的能力。

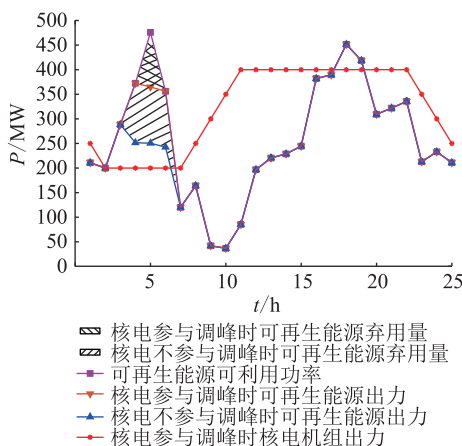


图5 核电机组不参与调峰时场景1下新能源发电功率和弃用功率

Fig.5 The renewable energy generation power and curtailment in the scenario 1 when nuclear plants do not participate in peak regulation

图6给出了核电参与调峰与不参与调峰情况下场景1系统中火力发电站每时段的出力之和与核电运行方式曲线。

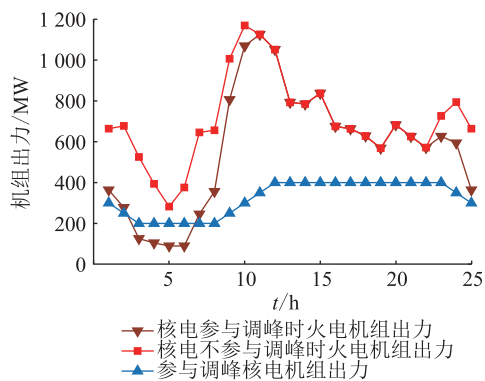


图6 不同情况下场景1中火力发电站及核电机组出力曲线

Fig.6 The output of power plants and nuclear plants in different situations in scenario 1

从图中可以看出,当核电不参与调峰时,火电机组在凌晨时段的出力会被压得很低,这对火电机组的性能造成了极大的考验,同时也会缩短火电机组的运行年份,间接增加了成本。而核电参与调峰则显著地缓解了这个情况。通过将火电机组的出力曲线与核电参与调峰的运行方式进行对比,可以看出核电机组减少出力的时段刚好对应了2种情况

下火力发电机组出力不同的时段,通过在合适的时间段降低核电出力,能够使得火电机组的出力曲线变得平稳,从而能够避免火电机组为了调峰而进行大范围的功率调整,提高机组的使用寿命。

图7给出了采用两阶段随机调度模型时7号火力发电机组的启停情况,以及不采用两阶段随机调度模型时每个场景下同一机组的启停情况,其中黑色矩形表示该时刻火力发电机组处在运行状态,反之为白色矩形。从图中可以看出,运用两阶段随机调度能够综合考虑各种可能发生的场景,从而给出一套能够覆盖全部可能的机组组合方案。而如果运用传统的经济调度优化模型,4种场景下的机组启停状况会有所不同,当对于新能源出力的预测有所偏差时,系统的经济性将会很差。因此,两阶段随机调度模型的应用有助于充分考虑新能源可能出现的各种场景,综合进行优化,从而保证系统整体的期望成本最小,从长期运行来看将会大大节约电力系统运行的成本,适宜推广运用。

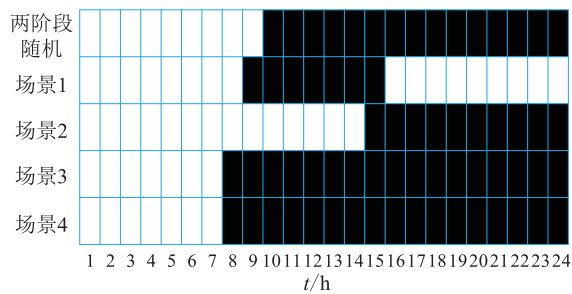


图7 不同场景下7号机组启停状况

Fig.7 No.7 power plants output in different scenarios

3.2 我国某省实际电力系统

本节对我国某省实际电网进行考虑新能源不确定性和核电调峰的电力系统两阶段随机优化调度,并研究核电参与调峰的经济性和可行性,同时也分析了不同核电调峰成本系数下的经济性。

本节采用我国某省部分电力系统作为测试算例,该部分电网是该省电网的主要部分。所应用的部分电网的总装机容量为31 065 MW,其中火电机组装机容量为22 360 MW,占总装机的71.98%,新能源装机为6 469 MW,占总装机的20.82%,核电机组装机容量为2 236 MW,占总装机的7.20%。该省部分电网的某日负荷如图8所示,各类型发电机组的详细信息见文献[23]。新能源的出力所占装机的百分比与图4相同。由于该省核电装机较少,为了更为明显地体现出核电调峰的能力,文中假设该省的核电装机为实际装机的2倍,新能源装机为实际装机的70%,每个时段的电力负荷减少了5 000 MW。

表2给出了核电参与调峰与不参与调峰及不同

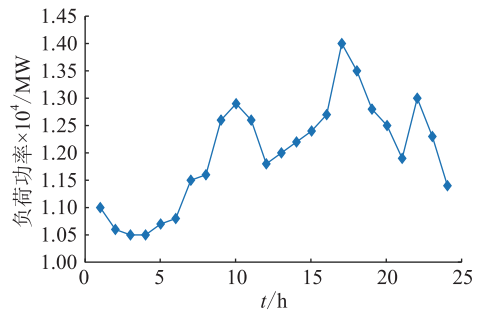


图8 我国某省日负荷曲线

Fig.8 The daily load curve of a province of China

核电调峰成本系数情景下电力系统运行成本和新能源弃用量。通过表中的数据可以看出,核电参与调峰与不参与调峰时电力系统新能源弃用量分别为511.3 MW·h/d和1 077.4 MW·h/d,核电参与调峰后新能源消纳量大幅度增加的同时,电力系统运行成本也相应降低了。

表2 有无核电参与调峰下电力系统运行成本

Table 2 The operation cost of the power system in different situation

核电是否参与调峰	核电调峰成本系数 F_n^N / [元·(MW·h) ⁻¹]	电力系统运行成本 / (亿元·d ⁻¹)	新能源弃用量 / [(MW·h)·d ⁻¹]
是	50	2.940	511.3
	100	2.948	660.4
	200	2.969	585.1
否		3.512	1 077.4

图9展示了在场景1及默认核电调峰成本系数下核电参与调峰与不参与调峰时新能源发电功率和新能源可利用功率。

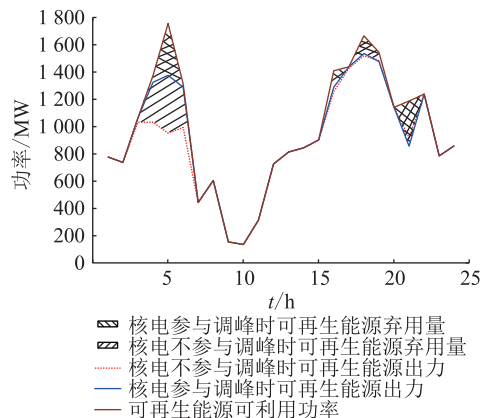


图9 场景1在不同情况下新能源发电功率和弃用功率

Fig.9 The renewable energy generation power and curtailment in different situations of the scenario 1

由图可见,核电参与调峰时,新能源的消纳量在2:00—7:00间大幅增加,在15:00—22:00之间

有增有减,但差别不明显。可以看出核电参与调峰能够有效增加新能源的消纳量。此外,对比了不同核电调峰成本系数下的优化结果,可以看出,随着核电调峰成本系数的增加,电力系统运行成本也随之增加,然而新能源的弃用量却并非一直增加。出现这种情况的原因可能在于,首先核电调峰成本系数的增加提高了电力系统运行成本,而随着核电调峰成本的增加,为了降低电力系统的运行成本,更多的火电机组启动热备用,新能源的弃用量也就随之减少,但同时火电机组总的启停成本增加了,因此最终形成了表2所示的情况。

4 结语

文中从实际情况出发,考虑到新能源发电在我国乃至全世界未来电力系统发展中所占的重要地位,基于新能源的随机性,研究核电参与电力系统调峰的形式,构建了两阶段随机优化调度模型,给出了电力系统综合成本最低的优化方法。通过对IEEE 24节点测试系统和我国某省实际电网的仿真计算,验证了该模型的经济性及可行性,同时也验证了核电参与调峰的可行性。

从仿真可以看出,核电参与调峰后电力系统的运行成本会降低,因此核电参与调峰有一定的经济性。此外,两阶段随机优化模型的应用综合考虑了新能源出力的各种可能场景,从长期上看提高了电网运行的经济性,较传统经济调度方法更为经济。

然而,文中所应用的新能源出力场景都是根据实际数据改变而来,在今后的工作中,可以探究新能源的随机性,研究切实可行的新能源预测方法,进一步降低电网运行成本,增强新能源的消纳,实现可持续发展与低碳发展。

本文得到广西电网有限责任公司管理咨询项目(0400002019082001DD00120)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2018[M]. 北京:中国统计出版社,2018.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Statistical yearbook of China 2018[M]. Beijing:China Statistics Press,2018.
- [2] 江泽民. 对中国能源问题的思考[J]. 上海交通大学学报, 2008(3):345-359.
JIANG Zemin. Reflections on energy issues in China [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2008(3):345-359.
- [3] 张海龙. 中国新能源发展研究[D]. 吉林:吉林大学,2014.
ZHANG Hailong. Research on the new energy development in China[D]. Jilin:Jilin University,2014.
- [4] DING T,BO R,LI F,et al. Interval power flow analysis using linear relaxation and optimality-based bounds tightening (OBBT) methods [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015,30(1):177-188.
- [5] BARTON J P,INFIELD D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2004,19(2):441-448.
- [6] HEYDT G T. The future renewable electric energy delivery and management(FREEDM) system;The energy internet [J]. Proceedings of the IEEE,2011,99(1):133-148.
- [7] DING T,YANG Q,LIU X,et al. Duality-free decomposition based data-driven stochastic security-constrained unit commitment [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2019,10(1):82-93.
- [8] Electricite de France:2017 annual electricity report [EB/OL]. [2018-08-29]. https://www.rte-france.com/sites/default/files/rte_elec_report_2017.pdf.
- [9] 彭波,余文奇,刘云. 国外核电机组参与系统调峰情况分析 [J]. 南方电网技术,2011,5(3):23-26.
PENG Bo, YU Wenqi, LIU Yun. Overview of foreign nuclear power plants in load-following [J]. Southern Power System Technology,2011,5(3):23-26.
- [10] 宋卓然,商文颖,宋颖巍,等. 核电发展现状及调峰可行性分析 [J]. 东北电力技术,2015,36(5):40-44.
SONG Zhuoran, SHANG Wenying, SONG Yingwei, et al. Development of nuclear power and analysis on peak shaving [J]. Northeast Electric Power Technology,2015,36(5):40-44.
- [11] 叶鹏,马晓东,朱钰,等. 核电机组参与电网联合调峰策略研究综述 [J]. 东北电力技术,2014,35(9):55-59,62.
YE Peng, MA Xiaodong, ZHU Yu, et al. A research summary on combined peaking load strategies of nuclear power plant [J]. Northeast Electric Power Technology,2014,35(9):55-59,62.
- [12] 赵洁,刘涤尘,雷庆生,等. 核电机组参与电网调峰及与抽水蓄能电站联合运行研究 [J]. 中国电机工程学报,2011,31(7):1-6.
ZHAO Jie, LIU Dichen, LEI Qingsheng, et al. Analysis of nuclear power plant participating in peak load regulation of power grid and combined operation with pumped storage power plant [J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(7):1-6.
- [13] ZANG T,LI H N,LI J J,et al. Economic benefits of nuclear power plant participating in peak load regulation of power system [C]//2018 International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA), Changsha,2018.
- [14] WANG J,ZHAO J,YE X,et al. Safety constraints and optimal operation of large-scale nuclear power plant participating in peak load regulation of power system [J]. IET Generation, Transmission & Distribution,2017,11(13):3332-3340.
- [15] 李旭东,艾欣,胡俊杰,等. 计及碳交易机制的核-火-虚拟电厂三阶段联合调峰策略研究 [J/OL]. (2019-04-22) [2019-06-28]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2018.2133>.
LI Xudong, AI Xin, HU Junjie, et al. Three-stage combined

- peak regulation strategy for nuclear-thermal-virtual power plant considering carbon trading mechanism[J/OL]. (2019-04-22) [2019-06-28]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2018.2133>.
- [16] 邵尤国,赵洁,刘涤尘,等. 考虑核电调峰的风电-核电协调优化调度[J]. 中国电机工程学报,2019,39(4):1018-1029. SHAO Youguo,ZHAO Jie,LIU Dichen, et al. Coordinated optimal dispatch of wind-nuclear power considering peak load shaving of nuclear power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2019,39(4):1018-1029.
- [17] 冯汝明. 抽水蓄能-核电-风电联合调峰控制策略研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2017.
FENG Ruming. The research on the joint load control strategy of pumped storage-nuclear power-wind load[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology,2017.
- [18] 肖远兵,程浩忠,杨卫红,等. 含光伏随机出力的配电网两阶段无功优化[J]. 现代电力,2016,33(4):38-43.
XIAO Yuanbing, CHENG Haozhong, YANG Weihong, et al. Two-stage reactive power optimization of distribution network with random PV output[J]. Modern Electric Power, 2016, 33 (4):38-43.
- [19] 姜少睿. 区间两阶段随机优化方法在电力日调度规划中的应用研究[D]. 北京:华北电力大学,2016.
JIANG Shaorui. A two-stage interval stochastic programming method and its application to electric power daily dispatch planning[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [20] 雷宇,杨明,韩学山. 基于场景分析的含风电系统机组组合的两阶段随机优化[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(23):58-67.
LEI Yu, YANG Ming, HAN Xueshan. A two-stage stochastic optimization of unit commitment considering wind power based on scenario analysis[J]. Power System Protection and Control, 2012,40(23):58-67.
- [21] 邬国伟,陶瑾. 压水堆核电站负荷跟踪的研究[J]. 核动力工程,2012,40(23):58-67.
WU Guowei, TAO Jin. Research of load follow for nuclear power plant with pressurized water reactors[J]. Nuclear Power Engineering, 2012,40(23):58-67.
- [22] 王小磊. 面向核电调峰的电力系统联合优化调度[D]. 大连:大连理工大学,2016.
WANG Xiaolei. Combined optimal dispatch of power system with nuclear power participating in peak load regulation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [23] 王骏,赵洁,刘涤尘,等. 考虑核电参与的调峰优化运行模型[J]. 中国电机工程学报,2018,38(6):1665-1674,1903.
WANG Jun, ZHAO Jie, LIU Dichen, et al. Optimal scheduling model of peak load regulation considering participation of nuclear power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(6): 1665-1674,1903.

作者简介:



宁阳天

宁阳天(1990),男,硕士,工程师,从事电网调度运行管理工作(E-mail:ning_yt.dd@gx.csg.cn);

罗翠云(1989),女,硕士,工程师,从事电网调度运行管理工作;

赵梓淇(1990),男,硕士,工程师,从事电网调度运行管理工作。

附录 A

表 A1 核电机组信息

母线	最大出力/MW	$\alpha_n/\text{元}$	$\beta_n/(\text{元}\cdot\text{MW}^{-1})$
18	400	5 395.374 9	126.346 5
21	400	5 395.374 9	126.346 5

表 A2 可再生能源发电厂信息

编号	母线	装机容量/MW	编号	母线	装机容量/MW
1	1	114	3	2	114
2	1	114	4	2	114

表 A3 4 个场景可再生能源可用量占装机容量的百分比

时段/h	场景 1/%	场景 2/%	场景 3/%	场景 4/%
1	48.24	25.64	1.03	9.71
2	44.83	40.97	6.76	4.82
3	42.59	30.64	6.91	3.94
4	40.92	26.84	6.37	2.98
5	40.01	67.17	5.71	4.46
6	39.73	33.15	2.02	7.40
7	40.92	23.18	1.88	7.47
8	46.34	12.01	2.04	6.61
9	57.84	12.68	1.67	8.75
10	66.90	15.07	0.00	12.18
11	70.57	32.61	0.14	18.36
12	71.87	30.66	1.70	20.62
13	63.63	48.71	0.71	15.90
14	63.64	47.19	2.81	6.79
15	66.04	40.19	4.44	8.60
16	65.17	54.69	0.79	7.43
17	65.03	71.00	10.28	7.60
18	65.96	59.09	27.60	8.83
19	62.71	57.72	39.72	11.60
20	62.89	48.27	39.93	6.52
21	61.33	56.07	33.12	8.35
22	59.90	53.94	33.21	11.00
23	57.53	44.90	30.67	1.32
24	57.10	48.81	24.72	0.55

表 A4 母线上基准负荷大小

Table A4 The base load on buses

母线	基准负荷/MW	母线	基准负荷/MW
1	108	13	265
2	97	14	194
3	180	15	317
4	74	16	100
5	71	17	0
6	136	18	333
7	125	19	181
8	171	20	128
9	175	21	0
10	195	22	0
11	0	23	0
12	0	24	0

表 A5 实际负荷占基准负荷的百分比

Table A5 The proportion of actual load in base load

时段/h	实际负荷占基准负荷的百分比/%	时段/h	实际负荷占基准负荷的百分比/%
1	48.244 3	13	63.629 9
2	44.832 2	14	63.637 0
3	42.592 5	15	66.039 0
4	40.922 3	16	65.172 1
5	40.011 8	17	65.026 2
6	39.732 1	18	65.959 0
7	40.915 3	19	62.707 3
8	46.337 8	20	62.887 5
9	57.840 4	21	61.328 2
10	66.898 1	22	59.903 4
11	70.570 0	23	57.525 2
12	71.868 3	24	57.102 7

表 A6 火力发电机组信息

Table A6 The parameters of thermal power generating units

编号	母线	P_h^{\max} /MW	P_h^{\min} /MW	R_h^{up} / (MW·h ⁻¹)	R_h^{dn} / (MW·h ⁻¹)	C_h^{start} / (元·次 ⁻¹)	C_h^{shut} / (元·次 ⁻¹)	α_h /元	β_h / (元·MW ⁻¹)	γ_h / (元·MW ⁻²)
1	1	20	16	4	4	10 000	10 000	3 205.479 2	520	0
2	1	20	16	4	4	10 000	10 000	3 205.479 2	520	0
3	2	20	16	4	4	10 000	10 000	3 205.479 2	520	0
4	2	20	16	4	4	10 000	10 000	3 205.479 2	520	0
5	7	100	25	20	20	10 000	10 000	6 252.168	174.646	0.210 688
6	7	100	25	20	20	10 000	10 000	6 252.168	174.646	0.210 688
7	7	100	25	20	20	10 000	10 000	6 252.168	174.646	0.210 688
8	13	197	69	39.4	39.4	10 000	10 000	6 662.06	194.321 6	0.028 68
9	13	197	69	39.4	39.4	10 000	10 000	6 662.06	194.321 6	0.028 68
10	13	197	69	39.4	39.4	10 000	10 000	6 662.06	194.321 6	0.028 68
11	15	12	2.4	2.4	2.4	10 000	10 000	691.081 6	226.256	1.313 648
12	15	12	2.4	2.4	2.4	10 000	10 000	691.081 6	226.256	1.313 648
13	15	12	2.4	2.4	2.4	10 000	10 000	691.081 6	226.256	1.313 648
14	15	12	2.4	2.4	2.4	10 000	10 000	691.081 6	226.256	1.313 648
15	15	12	2.4	2.4	2.4	10 000	10 000	691.081 6	226.256	1.313 648
16	15	155	54.3	31	31	10 000	10 000	3 057.912 8	49.553 2	0.033 368
17	16	155	54.3	31	31	10 000	10 000	3 057.912 8	49.553 2	0.033 368
18	22	50	10	10	10	10 000	10 000	1 200	80	0.032
19	22	50	10	10	10	10 000	10 000	1 200	80	0.032
20	22	50	10	10	10	10 000	10 000	1 200	80	0.032
21	22	50	10	10	10	10 000	10 000	1 200	80	0.032
22	22	50	10	10	10	10 000	10 000	1 200	80	0.032
23	22	50	10	10	10	10 000	10 000	1 200	80	0.032
24	23	155	54.3	31	31	10 000	10 000	3 057.912 8	49.553 2	0.033 368
25	23	155	54.3	31	31	10 000	10 000	3 057.912 8	49.553 2	0.033 368
26	23	350	140	70	70	10 000	10 000	5 320.875 2	47.398	0.019 58

Optimal capacity configuration of hydro-wind-diesel microgrid considering uncertainty of renewable energy and load

ZHANG Wenjie, WU Jiekang, ZHAO Junhao, YE Huiliang, REN Dejiang

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The uncertainty of hydro, wind resources and load will affect the economics and robustness of microgrid configuration, this paper proposes a bi-level optimal planning and design model for grid-connected hydro-wind-diesel microgrid, considering uncertainty of renewable energy and load. The up-level optimization is a microgrid configuration model. The low-level optimization is a microgrid economic dispatch model considering the uncertainty of hydro-wind power and load. Based on the robust linear optimization theory proposed by Seng-Cheol Kang (SCK-type robust linear optimization), the uncertainty model is transformed into a deterministic model. Then, combined with the fast non-dominated sorting genetic algorithm with elite strategy (NSGA-II) and mixed integer linear programming (MILP), the multi-objective optimal configuration problem of microgrid is solved. Finally, a distribution system in Shaoguan city is taken as a simulation example. The results show that the model not only improves the robustness of the microgrid, but also ensures the economics and reliability of the configuration.

Keywords: hydro-wind-diesel microgrid; optimal capacity configuration; robust linear optimization; multi-objective; bilevel optimization

(编辑 陈静)

(上接第 74 页)

A two-stage stochastic optimization for power system nuclear power plants participating in peak regulation with the consideration of renewable energy uncertainty

NING Yangtian¹, LUO Cuiyun¹, ZHAO Ziqi¹, MIAO Zengqiang¹, ZENG Ziyu², DING Tao²

(1. Guangxi Power Grid Power Dispatching Control Center, Nanning 530023, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Shaanxi Key Laboratory of Smart Grid (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China)

Abstract: The energy crisis is getting more and more serious around the world. In recent years, renewable energy has developed rapidly as one of the ways to relieve the energy crisis. However, renewable energy has the characteristics of uncertainty. Therefore, high renewable energy penetrated power system will bring new challenge to the optimal dispatching for the power system. In the case of rapid development of renewable energy power generation and nuclear power station, the peak and valley difference of the power system becomes larger, which increase the pressure on the power system peak regulation. In order to increase the peak regulation capacity, a model for flexible participation in peak regulation is proposed in this paper. Meanwhile, a two-stage stochastic optimization for power system nuclear power plants participating in peak regulation with the consideration of the stochastic renewable energy output is given. The first stage of optimization determines the status of the power plants. In the second stage of optimization minimize the expected operation cost of power system based on the decision made in first stage. The model is tested by IEEE 24 bus system and a real power system. The results verify the feasibility and economy of the nuclear plants participating in peak regulation.

Keywords: renewable energy; nuclear power plant; peak regulation; two-stage stochastic optimization

(编辑 陈静)