

考虑输配协同的电网机组组合与技改计划联合优化模型

蔡杰¹,王廷涛²,徐小琴¹,熊炜¹,郭婷¹,苗世洪²,廖爽¹

(1. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院,湖北 武汉 430011;

2. 华中科技大学电气与电子工程学院 强电磁工程与新技术国家重点实验室 电力安全与高效湖北省重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要:进行考虑输配协同的电网机组组合与技改计划联合优化,对于提高输配整体新能源消纳率、保障系统中短期可靠经济运行具有重要意义。分别构建输电网、配电网的机组组合与技改计划联合优化模型。针对中短期优化中新能源随机性较大的问题,采用机会约束规划进行处理并将约束转化为确定性约束。分析输配分立式优化、集中式协同优化、分布式协同优化求解模型的可行性,综合比较后采用基于目标级联分析法的分布式协同优化算法实现模型的输配解耦与并行求解。算例分析表明,所提模型能够合理安排输配电网的机组启停机状态及技改项目的施工计划,并验证了目标级联分析法对于解决输配协同优化问题的有效性。

关键词:输配协同;机组组合;技改计划;ATC;机会约束规划

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202206015

0 引言

电网设备数量多、分布广,随着运行时间的累积,高故障风险的设备或难以满足电网运行需求的设备不断增加。为保障电网的安全稳定运行,电网公司每年都会投入大量人力财力开展电网设备技术改造工作,技改计划编制是其中的重要一环。

目前,技改计划编制方法主要有2种:一种是根据设备的运行状态评价结果和重要性评价结果进行改造紧迫程度定级排序,再根据专家经验编制计划;另一种是构建技改计划优化编制模型,采用某种算法求解得到技改计划。第一种方法由于编制过程过于依赖主观经验,逐渐被第二种方法所取代。但第二种方法目前大多不考虑与机组组合问题的联合优化,且仅面向输配两级中的一级。随着新型电力系统建设的不断推进,新能源在输配两级的渗透率不断提高,大量可控分布式发电(controllable distributed generation, CDG)接入传统配电网使其演变为主动配电网,输配两级间的供需关系变得更为复杂。因此,有必要综合利用系统协同理论实现输配两级电网机组组合与技改计划的联合优化。

理论上可以采用集中式协同优化方法进行输配协同优化,即参与协同优化的各个配电网将自身数据传输至输电网,由输电网开展优化求解。然而在实际电力系统中,输配两级的调控中心相互独立,各

主体的数据信息具有私密性。此外,配电网数据的信息量大且类型复杂,若将其统一传输至输电网,则将占用大量的通信资源,且会大幅增加输电网的计算成本^[1-3]。因此,宜采用分布式协同优化算法进行输配协同优化,目前常用的分布式协同优化算法有广义主从分裂法^[4-6]、交替方向乘法^[1,7-8]、分布式内点法^[3,9]、并行子空间法^[10]、目标级联分析法(analytical target cascading, ATC)^[2,11-14]等。文献[1]构建一种输-配-天然气系统分布式协同优化调度模型,采用二阶锥松弛将气网优化模型转化为凸优化模型,并采用交替方向乘法进行求解。文献[6]提出一种基于广义主从分裂理论的考虑输配协同的输电网规划策略,将输配优化问题解耦为输电网优化和配电网优化2个子问题,并采用Benders分解混合异质分解方法求解优化规划模型。文献[14]以最小化停电损失为目标,建立输配全局黑启动优化模型,利用ATC将其分解为输配两级子模型,并在充分考虑黑启动各时步电网设备恢复操作的情况下求解模型。综合而言,现有的输配协同优化研究涉及潮流分析、经济调度、系统规划、黑启动策略、阻塞管理、综合能源系统等内容,却鲜有针对考虑输配协同的技改计划优化编制问题展开深入探讨。

对于技改计划的优化编制,大多研究未将其与电网机组组合问题相联系,机组启停计划通常以给定的设备停运计划为前提进行制定,这在一定程度上限制了系统运行经济性的进一步提升。为此,国内外学者针对系统运行与检修计划联合优化方法开展了一系列研究。文献[15]以经济性和灵活性为目标,构建一种融合多种典型风电出力场景的检修-运行分层协同优化模型,并采用对潮流安全违约“轻容忍”的改进Benders分解法进行求解。文献[16]计及

收稿日期:2021-10-07;修回日期:2022-02-21

在线出版日期:2022-06-15

基金项目:国网湖北省电力有限公司科技项目(SGHBJSY00PSJS2100057)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Hubei Electric Power Company Limited (SGHBJSY00PSJS2100057)

环境、经济以及系统可靠性目标,构建一种考虑需求响应的发电检修调度四阶段联合优化模型,并利用词典编纂算法进行求解。文献[17]构建一种计及短期机组组合与中期检修决策的协同优化模型,并采用拉格朗日松弛方法来实现模型的分解优化。然而,现有研究并没有考虑输配协同。随着配电网中 CDG、新能源的接入水平不断提高,配电网“源”的属性逐渐凸显,亟需探索适应新环境的技改计划优化编制方法。

基于上述分析,本文提出一种考虑输配协同的电网机组组合与技改计划联合优化模型。该模型包含输电网与配电网 2 个层级,各层级模型均由机组组合模型和技改优化模型构成。本文新能源主要考虑风电,由于联合优化模型面向系统中短期的运行需求,较长的时间尺度使得风电难以预测,因此采用机会约束规划进行处理。由于 ATC 能够实现不同层级主体的并行协调求解,且有较高的计算效率,因此本文采用该方法来求解模型。算例分析结果表明,ATC 应用于输配协同机组组合与技改计划联合优化问题是有效的。

1 输配机组组合与技改计划联合优化模型

1.1 输电网优化模型

1.1.1 目标函数

为实现机组组合与技改计划的联合优化,在目标函数中需要对二者进行综合考虑,如式(1)所示。

$$\min F_T = C_{G,run}^T + C_{G,start}^T + C_{w,waste}^T - C_{pro}^T + C_{labor}^T + C_{load}^T \quad (1)$$

式中: F_T 为输电网优化目标; $C_{G,run}^T$ 、 $C_{G,start}^T$ 、 $C_{w,waste}^T$ 、 C_{pro}^T 分别为火电机组运行成本、火电机组开机成本、输电网弃风成本、输电网向配电网售电的增益,这4项属于输电网机组组合成本; C_{labor}^T 、 C_{load}^T 分别为施工成本、切负荷成本,这2项属于输电网技改成本。由于技改工程的设备及材料购置成本为固定值,因此在目标函数中不予考虑。各项成本的具体计算公式如式(2)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} C_{G,run}^T &= \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} (a_i^G P_{t,i}^G + u_{t,i}^G b_i^G) \\ C_{G,start}^T &= \sum_{i=1}^{T-1} \sum_{i=1}^{N_G} \frac{C_i^{Gstart}}{2} [(u_{i+1,i}^G - u_{t,i}^G) + |u_{i+1,i}^G - u_{t,i}^G|] \\ C_{w,waste}^T &= \sum_{i=1}^T C_{Twf} (P_i^{Twf} - P_i^{Tw}) \\ C_{pro}^T &= \sum_{i=1}^T \sum_{k=1}^{N_D} C_{t,k}^B P_{t,k}^{TB} \\ C_{labor}^T &= \sum_{d=1}^D \sum_{m=1}^{N_{Tref}} C_{d,m}^{Tlabor} u_{d,m}^{Tref} \\ C_{load}^T &= \sum_{i=1}^T \sum_{n=1}^{N_{Tnode}} (C_{t,n}^{Tcut} + M) P_{t,n}^{Tcut} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中: T 为机组组合优化总时长,单位优化时长为 1 h, D 为技改计划优化总时长,单位优化时长为 1 d, D 与 T 在数值上满足 $T=24D$; N_G 为火电机组数量; a_i^G 、 b_i^G 为火电机组 i 的购电成本系数; $P_{t,i}^G$ 为 t 时火电机组 i 的出力; C_i^{Gstart} 为火电机组 i 的开机成本; $u_{t,i}^G$ 为 t 时火电机组 i 的启停状态,开机时其值为 1,停机时其值为 0; C_{Twf} 为输电网弃风成本系数; P_i^{Twf} 、 P_i^{Tw} 分别为 t 时输电网的风电预测出力、实际出力; N_D 为输配边界节点数量; $C_{t,k}^B$ 为 t 时输配边界节点 k 的电价; $P_{t,k}^{TB}$ 为 t 时输电网在输配边界节点 k 的等效负荷,其正方向为输电网指向配电网; N_{Tref} 为输电网技改对象数量,本文主要考虑线路技改工程的计划编制; $C_{d,m}^{Tlabor}$ 为 d 日技改工程 m 的施工费; $u_{d,m}^{Tref}$ 为 d 日技改工程 m 的施工状态,施工时其值为 1,未施工时其值为 0; N_{Tnode} 为输电网节点数量; $C_{t,n}^{Tcut}$ 为 t 时节点 n 的单位切负荷成本; $P_{t,n}^{Tcut}$ 为 t 时节点 n 的切负荷量; M 为一个足够大的正数,增加该系数是为了尽可能减小切负荷量,实际切负荷成本仍由 $C_{t,n}^{Tcut}$ 和 $P_{t,n}^{Tcut}$ 决定。

式(2)中, P_i^{Twf} 为随机变量,因此采用确定性目标函数没有意义,本文采用机会约束规划对该式进行处理,并将其转化为确定性形式,处理过程如附录 A 第 A2 节所示。

1.1.2 约束条件

输电网优化模型约束条件分为机组组合约束和技改计划约束 2 类。

机组组合约束包括火电机组的出力约束、备用约束、启停时间约束、爬坡率约束,以及风电出力约束、系统功率平衡约束、系统备用约束、直流潮流约束、切负荷约束、线路容量约束。前 8 种约束可参考文献[18],其中系统备用约束和风电出力约束中含有随机变量 P_i^{Twf} ,需要采用机会约束规划进行处理,处理过程如附录 A 第 A3、A4 节所示。切负荷约束为:

$$0 \leq P_{t,n}^{Tcut} \leq P_{t,n}^{Tload} \quad t=1, 2, \dots, T \quad (3)$$

式中: $P_{t,n}^{Tload}$ 为 t 时节点 n 的负荷预测值。

线路容量约束为:

$$-P_{n_1, n_2}^{Tline, max} \leq P_{t, n_1, n_2}^{Tline} \leq P_{n_1, n_2}^{Tline, max} \quad t=1, 2, \dots, T \quad (4)$$

式中: P_{t, n_1, n_2}^{Tline} 、 $P_{n_1, n_2}^{Tline, max}$ 分别为 t 时节点 n_1 、 n_2 之间线路传输的有功功率及其上限。

技改计划约束包括施工状态约束和施工关联约束。根据目前电网公司开展技改工作的实际情况,技改对象通常从工程第一天 08:00 开始退出运行,到工程最后一天 20:00 恢复供电。据此,施工状态约束如式(5)~(11)所示。

$$\sum_{d=1}^D u_{d,m}^{Tref} = T_m^{Tref} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sum_{\tau=d}^{d+T_m^{\text{Tref}}-1} u_{\tau,m}^{\text{Tref}} \geq T_m^{\text{Tref}} (u_{d,m}^{\text{Tref}} - u_{d-1,m}^{\text{Tref}}) \\ d=2, 3, \dots, D-T_m^{\text{Tref}}+1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\sum_{d=1}^{T_m^{\text{Tref}}} u_{d,m}^{\text{Tref}} \geq T_m^{\text{Tref}} u_{1,m}^{\text{Tref}} \quad (7)$$

$$\begin{cases} u_{d,m}^{\text{Tref},s} = \frac{1}{2} [(u_{d,m}^{\text{Tref}} - u_{d-1,m}^{\text{Tref}}) + |u_{d,m}^{\text{Tref}} - u_{d-1,m}^{\text{Tref}}|] \\ d=2, 3, \dots, D \end{cases} \quad (8)$$

$$u_{1,m}^{\text{Tref},s} = u_{1,m}^{\text{Tref}} \quad (9)$$

$$\begin{cases} u_{d,m}^{\text{Tref},f} = \frac{1}{2} [(u_{d,m}^{\text{Tref}} - u_{d+1,m}^{\text{Tref}}) + |u_{d,m}^{\text{Tref}} - u_{d+1,m}^{\text{Tref}}|] \\ d=1, 2, \dots, D-1 \end{cases} \quad (10)$$

$$u_{D,m}^{\text{Tref},f} = u_{D,m}^{\text{Tref}} \quad (11)$$

式中： T_m^{Tref} 为技改工程 m 所需的工期； $u_{d,m}^{\text{Tref},s}$ 为 d 日技改工程 m 的施工开始状态，若 d 日为技改工程 m 的施工首日，则其值为1，否则其值为0； $u_{d,m}^{\text{Tref},f}$ 为 d 日技改工程 m 的施工结束状态，若 d 日为技改工程 m 工期内的最后一日，则其值为1，否则其值为0。式(5)表示在整个优化周期内技改工程 m 的施工状态之和等于预定工期。式(6)、(7)表示技改工程 m 开始施工后会持续进行直至竣工。式(8)、(9)与式(10)、(11)分别对施工开始状态与施工结束状态作出约束。

施工关联约束体现的是施工状态对机组组合约束的影响。首先是对切负荷量的影响，在没有技改工程施工的时间不允许切负荷，如表1所示。

表1 d 日输电网施工状态对切负荷量的影响

Table 1 Influence of construction state of transmission grid on load shedding quantity in Day d

组别	所有技改对象的施工状态 ($u_{d,m}^{\text{Tref},s}, u_{d,m}^{\text{Tref},f}$)	d 日内时段	$P_{t,n}^{\text{Tcut}}$
1	全为(0,0,0)	1—24	0
2	存在1组(1,0,0)	1—24	—
3	不存在(1,0,0)和(1,0,1), 至少存在1组(1,1,0)	1—7 8—24	0 —
4	不存在(1,0,0)和(1,1,0), 至少存在1组(1,0,1)	1—20 21—24	— 0
5	不存在(1,0,0)、(1,1,0)和 (1,0,1),至少存在1组(1,1,1)	1—7, 21—24 8—20	0 —

注： $P_{t,n}^{\text{Tcut}}$ 取值“—”表示对相应时段的切负荷量不加限制。

采用大“M”法将表1转化为线性表达式，可得到对应约束条件，如式(12)–(15)所示。

$$\begin{cases} -M \sum_{m=1}^{N_{\text{Tref}}} u_{d,m}^{\text{Tref}} \leq P_{t,n}^{\text{Tcut}} \leq M \sum_{m=1}^{N_{\text{Tref}}} u_{d,m}^{\text{Tref}} \\ \delta(d-1)+1 \leq t \leq \delta d \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} -M \sum_{m=1}^{N_{\text{Tref}}} (u_{d,m}^{\text{Tref}} - u_{d,m}^{\text{Tref},s}) \leq P_{t,n}^{\text{Tcut}} \leq M \sum_{m=1}^{N_{\text{Tref}}} (u_{d,m}^{\text{Tref}} - u_{d,m}^{\text{Tref},s}) \\ \delta(d-1)+1 \leq t \leq \delta(d-1)+7 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} -M \sum_{m=1}^{N_{\text{Tref}}} (u_{d,m}^{\text{Tref}} - u_{d,m}^{\text{Tref},f}) \leq P_{t,n}^{\text{Tcut}} \leq M \sum_{m=1}^{N_{\text{Tref}}} (u_{d,m}^{\text{Tref}} - u_{d,m}^{\text{Tref},f}) \\ \delta(d-1)+21 \leq t \leq \delta d \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} -M \sum_{m=1}^{N_{\text{Tref}}} (2u_{d,m}^{\text{Tref}} - u_{d,m}^{\text{Tref},s} - u_{d,m}^{\text{Tref},f}) \leq P_{t,n}^{\text{Tcut}} \leq \\ M \sum_{m=1}^{N_{\text{Tref}}} (2u_{d,m}^{\text{Tref}} - u_{d,m}^{\text{Tref},s} - u_{d,m}^{\text{Tref},f}) \\ \delta(d-1)+1 \leq t \leq \delta(d-1)+7, \delta(d-1)+21 \leq t \leq \delta d \end{cases} \quad (15)$$

式中： $d=1, 2, \dots, D$ ； $\delta=24$ h。

技改对象的施工状态还对其自身支路潮流有影响。在未进行施工的时间，其支路潮流满足直流潮流表达式，而在进行施工的时间，其支路潮流为0，如表2所示。

表2 d 日输电网施工状态对支路潮流的影响

Table 2 Influence of construction state of transmission grid on branch power flow in Day d

组别	技改对象的 施工状态 ($u_{d,m}^{\text{Tref},s}, u_{d,m}^{\text{Tref},f}$)	d 日内时段	技改对象 m 的 支路潮流
1	(0,0,0)	1—24	直流潮流
2	(1,0,0)	1—24	0
3	(1,1,0)	1—7 8—24	直流潮流 0
4	(1,0,1)	1—20 21—24	0 直流潮流
5	(1,1,1)	1—7, 21—24 8—20	直流潮流 0

假设技改工程 m 的施工线路两端节点分别为 n_1, n_2 ，采用大“M”法将表2转化为线性表达式，以第3组为例给出约束条件，如式(16)、(17)所示。

$$\begin{cases} -M(2 - u_{d,m}^{\text{Tref}} - u_{d,m}^{\text{Tref},s} + u_{d,m}^{\text{Tref},f}) + \frac{\theta_{t,n_1}^T - \theta_{t,n_2}^T}{X_{n_1,n_2}^{\text{T}*}} \leq P_{t,n_2}^{\text{Tline}*} \leq \\ M(2 - u_{d,m}^{\text{Tref}} - u_{d,m}^{\text{Tref},s} + u_{d,m}^{\text{Tref},f}) + \frac{\theta_{t,n_1}^T - \theta_{t,n_2}^T}{X_{n_1,n_2}^{\text{T}*}} \\ \delta(d-1)+1 \leq t \leq \delta(d-1)+7 \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} -M(2 - u_{d,m}^{\text{Tref}} - u_{d,m}^{\text{Tref},s} + u_{d,m}^{\text{Tref},f}) \leq P_{t,n_1,n_2}^{\text{Tline}*} \leq \\ M(2 - u_{d,m}^{\text{Tref}} - u_{d,m}^{\text{Tref},s} + u_{d,m}^{\text{Tref},f}) \\ \delta(d-1)+8 \leq t \leq \delta d \end{cases} \quad (17)$$

式中： $d=1, 2, \dots, D$ ；上标“*”表示标么值； $\theta_{t,n_1}^T, \theta_{t,n_2}^T$ 分别为 t 时节点 n_1, n_2 的电压相位； $X_{n_1,n_2}^{\text{T}*}$ 为节点 n_1, n_2 之间线路的电抗。

1.2 配电网优化模型

1.2.1 目标函数

与输电网模型优化目标类似，配电网目标函数包括机组组合成本和技改成本两部分，如式(18)所示。

$$\min F_{D,k} = C_{G,run,k}^D + C_{pur,k}^D + C_{w,waste,k}^D + C_{labor,k}^D + C_{load,k}^D + C_{CB,k}^D \quad (18)$$

式中: $F_{D,k}$ 为输配边界节点 k 处配电网的优化目标; $C_{G,run,k}^D$ 、 $C_{pur,k}^D$ 、 $C_{w,waste,k}^D$ 分别为 CDG 运行成本、配电网向输电网购电的成本、配电网弃风成本, 这 3 项属于配电网机组组合成本; $C_{labor,k}^D$ 、 $C_{load,k}^D$ 、 $C_{CB,k}^D$ 分别为施工成本、切负荷成本、联络支路投切成本, 这 3 项属于配电网技改成本。其中, CDG 运行成本、配电网弃风成本、施工成本、切负荷成本的表达式与输电网类似, 此处不再赘述, 其他成本的计算公式为:

$$\begin{cases} C_{pur,k}^D = \sum_{t=1}^T C_{t,k}^B P_{t,k}^{DB} \\ C_{CB,k}^D = \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{q=1}^{N_{CB}} C_q^{CB} |u_{t+1,q}^{CB} - u_{t,q}^{CB}| \end{cases} \quad (19)$$

式中: $P_{t,k}^{DB}$ 为 t 时配电网在输配边界节点 k 的等效有功注入, 正方向为输电网指向配电网; N_{CB} 为联络支路数量; C_q^{CB} 为联络支路 q 的单次投切成本; $u_{t,q}^{CB}$ 为 t 时联络支路 q 的投切状态, 投入时其值为 1, 不投入时其值为 0。

1.2.2 约束条件

配电网优化模型约束条件分为机组组合约束和技改计划约束 2 类。

机组组合约束包括 CDG 出力约束、切负荷约束、线路容量约束、风电出力约束、节点功率平衡约束、配电网潮流约束、配电网拓扑约束、节点电压约束和变电站容量约束。由于配电网中 CDG 通常为装机容量较小且调节灵活的微型燃气轮机等, 因此本文忽略其启停时间约束和爬坡率约束。机组组合约束中的前 5 种约束与输电网模型约束条件类似, 此处不再赘述。配电网潮流约束采用改进直流潮流模型进行计算, 可参考文献[19]。配电网拓扑约束用于规范配电网网络结构, 避免出现线路闭环和电气孤岛, 如式(20)~(22)所示。

$$0 \leq u_{i,n_1,n_2}^{MS} + u_{i,n_2,n_1}^{MS} \leq 1 \quad t=1, 2, \dots, T \quad (20)$$

$$u_{i,n_1,n_2}^{MS} + u_{i,n_2,n_1}^{MS} = \begin{cases} u_{i,q}^{CB} & n_1, n_2 \in S_q \\ f(u_{d,m}^{Dref}, u_{d,m}^{Dref,s}, u_{d,m}^{Dref,f}) & n_1, n_2 \in S_m \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

$$\sum_{j \in H_n} u_{i,j,n}^{MS} = \begin{cases} 1 & n \neq 1 \\ 0 & n = 1 \end{cases} \quad (22)$$

式中: u_{i,n_1,n_2}^{MS} 为 t 时节点 n_1 、 n_2 之间的主从状态, 若节点 n_1 为节点 n_2 的父节点, 则其值为 1, 若节点 n_1 不为节点 n_2 的父节点, 则其值为 0; $u_{d,m}^{Dref}$ 为配电网中技改工程 m 的施工状态, 其取值与 $u_{d,m}^{Tref}$ 类似, 同理, $u_{d,m}^{Dref,s}$ 、 $u_{d,m}^{Dref,f}$ 的含义与取值分别与 $u_{d,m}^{Tref,s}$ 、 $u_{d,m}^{Tref,f}$ 类似; S_m 为技改工程 m 施工线路两端节点的集合; S_q 为联络支路 q 两端节点的集合; H_n 为与节点 n 相连的节点集合。式(20)表示, 节点 n_1 、 n_2 之间的主从状态可用于指示两

节点间线路的连通状态: 线路连通时, 节点 n_1 、 n_2 之间主从关系唯一确定, 主从状态之和为 1; 线路断开时, n_1 、 n_2 之间不存在主从关系, 主从状态之和为 0。式(21)表示主从状态的取值情况: 若节点 n_1 、 n_2 之间的线路为常规线路, 则其恒为连通状态, 主从状态之和为 1; 若该线路为联络支路, 则主从状态之和为联络支路投切状态, 取值由式(22)决定; 若该线路为技改对象, 则主从状态之和受线路自身施工状态的影响, 在未进行施工的时间, 主从状态之和为 1, 而在进行施工的时间, 主从状态之和为 0。式(22)表示, 输配边界节点没有父节点, 其余节点中有且仅有 1 个父节点, 从而使配电网拓扑为辐射状。当 $n_1, n_2 \in S_m$ 时, 主从状态取值如表 3 所示。

表 3 d 日主从状态取值 ($n_1, n_2 \in S_m$)

Table 3 Master-slave status value in Day d

$(n_1, n_2 \in S_m)$			
组别	技改对象 m 的施工状态 ($u_{d,m}^{Dref}, u_{d,m}^{Dref,s}, u_{d,m}^{Dref,f}$)	d 日内时段	技改对象 m 的主从状态之和 $u_{i,n_1,n_2}^{MS} + u_{i,n_2,n_1}^{MS}$
1	(0, 0, 0)	1—24	1
2	(1, 0, 0)	1—24	0
3	(1, 1, 0)	1—7	1
		8—24	0
4	(1, 0, 1)	1—20	0
		21—24	1
5	(1, 1, 1)	1—7, 21—24	1
		8—20	0

表 3 中, $d=1, 2, \dots, D$ 。将该表转化为线性约束条件的方法与表 2 类似, 此处不再赘述。

节点电压约束为:

$$U_{\min}^D \leq U_{i,n}^D \leq U_{\max}^D \quad t=1, 2, \dots, T \quad (23)$$

式中: $U_{i,n}^D$ 为 t 时节点 n 的电压幅值; U_{\min}^D 、 U_{\max}^D 分别为配电网节点电压的最小值、最大值。

变电站容量约束为:

$$\left\| \begin{matrix} P_{i,k}^{DB} \\ Q_{i,k}^{DB} \end{matrix} \right\|_2 \leq S_{k,\max}^B \quad t=1, 2, \dots, T \quad (24)$$

式中: $Q_{i,k}^{DB}$ 为 t 时配电网在输配边界节点 k 的等效无功注入; $S_{k,\max}^B$ 为输配边界节点 k 处的变压器传输容量上限。

配电网技改计划约束包括施工状态约束及施工关联约束。施工状态约束与输电网中的类似, 此处不再赘述。施工关联约束包括施工状态对切负荷量、支路潮流的影响, 其中施工状态对切负荷量的影响与输电网中的类似, 此处不再赘述。配电网施工状态对支路潮流的影响可转化为节点主从状态对支路潮流的影响。任意两节点间的线路连通时, 其潮流满足改进直流潮流约束, 线路断开时, 其潮流为 0, 如式(25)~(28)所示。

$$-M(1-u_{t,n_1,n_2}^{MS}-u_{t,n_2,n_1}^{MS})+G_{n_1,n_2}^{D*}(U_{t,n_1}^{D*}-U_{t,n_2}^{D*})-B_{n_1,n_2}^{D*}(\theta_{t,n_1}^D-\theta_{t,n_2}^D)\leq P_{t,n_1,n_2}^{Dline*}\leq M(1-u_{t,n_1,n_2}^{MS}-u_{t,n_2,n_1}^{MS})+G_{n_1,n_2}^{D*}(U_{t,n_1}^{D*}-U_{t,n_2}^{D*})-B_{n_1,n_2}^{D*}(\theta_{t,n_1}^D-\theta_{t,n_2}^D) \quad (25)$$

$$-M(u_{t,n_1,n_2}^{MS}+u_{t,n_2,n_1}^{MS})\leq P_{t,n_1,n_2}^{Dline*}\leq M(u_{t,n_1,n_2}^{MS}+u_{t,n_2,n_1}^{MS}) \quad (26)$$

$$-M(1-u_{t,n_1,n_2}^{MS}-u_{t,n_2,n_1}^{MS})-B_{n_1,n_2}^{D*}(U_{t,n_1}^{D*}-U_{t,n_2}^{D*})-G_{n_1,n_2}^{D*}(\theta_{t,n_1}^D-\theta_{t,n_2}^D)\leq Q_{t,n_1,n_2}^{Dline*}\leq M(1-u_{t,n_1,n_2}^{MS}-u_{t,n_2,n_1}^{MS})-B_{n_1,n_2}^{D*}(U_{t,n_1}^{D*}-U_{t,n_2}^{D*})-G_{n_1,n_2}^{D*}(\theta_{t,n_1}^D-\theta_{t,n_2}^D) \quad (27)$$

$$-M(u_{t,n_1,n_2}^{MS}+u_{t,n_2,n_1}^{MS})\leq Q_{t,n_1,n_2}^{Dline*}\leq M(u_{t,n_1,n_2}^{MS}+u_{t,n_2,n_1}^{MS}) \quad (28)$$

式中: $t=1, 2, \dots, T$; G_{n_1,n_2}^{D*} 、 B_{n_1,n_2}^{D*} 分别为节点 n_1 、 n_2 之间线路的电导、电纳; θ_{t,n_1}^D 、 θ_{t,n_2}^D 分别为 t 时节点 n_1 、 n_2 的电压相位; P_{t,n_1,n_2}^{Dline*} 、 Q_{t,n_1,n_2}^{Dline*} 分别为 t 时节点 n_1 、 n_2 之间线路的有功功率、无功功率。

2 模型求解方法

2.1 输配分立式优化

在分立优化过程中,首先配电网将输电网作为发电机,以式(18)为优化目标、式(20)~(28)为约束条件进行求解,得到配电网的运行方案,同时给出要从输电网购买的功率。进而,输电网将配电网作为固定负荷,负荷值即为配电网的购电功率,以式(1)为优化目标、式(3)~(17)为约束条件进行求解,得到输电网的运行方案。分立优化在传统电力系统中广泛应用,但在高比例新能源电力系统中,由于分立优化通常不允许功率倒送^[20],配电网多余的风电难以充分消纳,因此无法保证输配整体的经济运行。

2.2 输配集中式协同优化

集中优化将输配二者看作一个整体,以式(1)与式(18)之和为优化目标、式(3)~(17)、(20)~(28)为约束条件进行求解,一次性得到输配二者的运行方案。集中优化能充分协调输配整体的调控资源,实现输配整体的经济运行。然而,输配协同优化问题涉及输电网和配电网的多个调控中心,各主体间存在数据私密性,这导致集中优化难以实现。

2.3 输配分布式协同优化

2.3.1 分布式协同优化原理

为实现输配协同优化,同时避免大量数据传输造成的通信阻塞和数据泄密,可采用分布式优化方法进行求解。在分布式优化框架下,可将输配协同优化问题分解为输电网优化子问题和配电网优化子问题,输配子问题之间通过耦合变量进行信息交互,对2个子问题进行反复迭代求解直至收敛。其中,输配子问题分别由输配调控中心独立采用分布式优化技术进行求解,耦合变量信息依靠良好的双向通信网络进行交互。输配边界耦合变量可以选取边界

节点电压幅值、电压相角、有功功率、无功功率等,现有文献大多以有功功率为耦合变量^[2,7,12,20]对输配整体优化问题进行分解,虽然模型精度会稍微下降,但可以在输电网侧采用直流潮流约束,且数据传输量减少,这使得计算效率大幅提高。本文选取输配边界节点有功功率作为耦合变量,分解示意图如图1所示。

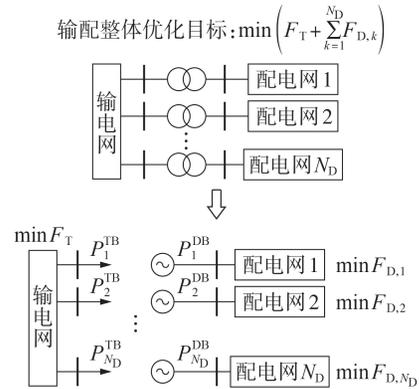


图1 输配协同优化问题分解示意图

Fig.1 Schematic diagram of decomposing transmission and distribution collaborative optimization problem

2.3.2 ATC

本文采用ATC求解输配协同优化问题。ATC是一种常用的多主体、多层次分布式优化算法,本质上属于最优化理论中的乘子法,其收敛性已得到严格证明^[21]。在ATC框架下,输配边界耦合变量需满足一致性约束,如式(29)所示。

$$P_{t,k}^{TB} = P_{t,k}^{DB} \quad t=1, 2, \dots, T; k=1, 2, \dots, N_D \quad (29)$$

考虑一致性约束后,输电网优化子模型由目标函数式(1)以及约束条件式(3)~(17)、(29)组成,配电网优化子模型由目标函数式(18)以及约束条件式(20)~(29)组成。显然,2个子模型中均含有对方区域的耦合变量,模型无法独立求解。本文利用ATC将一致性约束以罚函数形式松弛到子模型的目标函数中,如式(30)、(31)所示。

$$\min F_T^{ATC} = F_T + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_D} \left[\nu_{t,k} |P_{t,k}^{TB} - P_{t,k}^{DB}| + \omega_{t,k} (P_{t,k}^{TB} - P_{t,k}^{DB})^2 \right] \quad (30)$$

$$\min F_{D,k}^{ATC} = F_{D,k} + \sum_{t=1}^T \left[\nu_{t,k} |P_{t,k}^{TB} - P_{t,k}^{DB}| + \omega_{t,k} (P_{t,k}^{TB} - P_{t,k}^{DB})^2 \right] \quad (31)$$

式中: F_T^{ATC} 、 $F_{D,k}^{ATC}$ 分别为计及ATC惩罚项的输电网优化目标、输配边界节点 k 处配电网优化目标; $\nu_{t,k}$ 、 $\omega_{t,k}$ 分别为 t 时输电网与输配边界节点 k 处配电网之间耦合变量的一次ATC乘子、二次ATC乘子。式(30)中的 $P_{t,k}^{DB}$ 为 t 时输配边界节点 k 处配电网向输电网传输的耦合变量,为已知量,同理式(31)中的 $P_{t,k}^{TB}$ 也为已知耦合变量。

将输电网子模型中的目标函数式(1)替换为式(30),将配电网子模型中的目标函数式(18)替换为式(31),同时删去2个子模型中的一致性约束,可以实现二者的完全解耦。采用ATC迭代求解输配协同优化模型的步骤如下。

1)设置迭代标志 $x=0$,设置乘子初值 $\nu_{i,k}(x)|_{x=0}$ 和 $\omega_{i,k}(x)|_{x=0}$ 的取值范围通常为0.5~1.5。

2)给定输电网侧耦合变量初值 $P_{i,k}^{TB}(x)|_{x=0}$ 。

3)令 $x=x+1$,求解配电网子模型,优化目标为式(31),约束条件为式(20)~(28),求解得到配电网侧耦合变量 $P_{i,k}^{DB}(x)$ 。

4)求解输电网子模型,优化目标为式(30),约束条件为式(3)~(17),求解得到输电网侧耦合变量 $P_{i,k}^{TB}(x)$ 。

5)按式(32)判断输配整体优化目标是否收敛。若收敛,则转至步骤6);否则,按式(33)对所有耦合变量乘子进行更新,并转至步骤3)。

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{\tilde{F}_T(x) + \sum_{k=1}^{N_D} \tilde{F}_{D,k}(x) - \tilde{F}_T(x-1) - \sum_{k=1}^{N_D} \tilde{F}_{D,k}(x-1)}{\tilde{F}_T(x) + \sum_{k=1}^{N_D} \tilde{F}_{D,k}(x)} \right| \leq \varepsilon_1 \\ \tilde{F}_T = F_T - M \sum_{i=1}^T \sum_{n=1}^{N_{\text{node}}} P_{i,n}^{\text{Tcut}} \\ \tilde{F}_{D,k} = F_{D,k} - M \sum_{i=1}^T \sum_{n=1}^{N_{\text{node}}} P_{i,n}^{\text{Dcut}} \end{array} \right. \quad (32)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \nu_{i,k}(x+1) = \nu_{i,k}(x) + 2\omega_{i,k}^2(x) | P_{i,k}^{TB}(x) - P_{i,k}^{DB}(x) | \\ \omega_{i,k}(x+1) = \gamma \omega_{i,k}(x) \end{array} \right. \quad (33)$$

式中: \tilde{F}_T 、 $\tilde{F}_{D,k}$ 分别为除去切负荷惩罚项的输电网和输配边界节点 k 处配电网目标函数; ε_1 为优化目标收敛容差; N_{node} 为配电网节点数量; $P_{i,n}^{\text{Dcut}}$ 为 t 时配电网节点 n 的切负荷量; γ 为二次ATC乘子增长率,其取值范围通常为1.5~3.5。

6)按式(34)判断耦合变量是否收敛。若所有耦合变量均收敛,则完成迭代,输出计算结果;否则,按式(33)对不满足式(34)的耦合变量乘子进行更新,并转至步骤3)。

$$2 \left| \frac{P_{i,k}^{TB}(x) - P_{i,k}^{DB}(x)}{P_{i,k}^{TB}(x) + P_{i,k}^{DB}(x)} \right| \leq \varepsilon_2 \quad t=1, 2, \dots, T \quad (34)$$

式中: ε_2 为耦合变量收敛容差。

3 算例分析

3.1 算例参数设置

本文在CPU型号为Intel Xeon Gold 2.70 GHz、内存为256 GB的计算机上进行算例测试,输配优化模型均通过MATLAB R2021b调用Yalmip进行求

解,求解器选用Gurobi 9.1。本文算例设置优化时间尺度为1个自然周,则 $T=168$ h, $D=7$ d。算例拓扑图如附录B图B1所示。负荷预测曲线如附录B图B2所示,各节点负荷比例如附录B表B1、B2所示,负荷备用系数取为5%。由于优化时间尺度较长,风电难以准确预测,因此本文采用基于历史数据的风电概率分布模型,认为一个季度内每天相同时刻具有相同的概率分布特性,具体方法可参考文献[22]。本文认为风速服从威布尔分布,各小时的形状参数和尺度参数如附录B表B3所示。风电场参数如附录B表B4所示。本文采用机会约束规划处理含有风速随机变量的模型表达式,具体推导过程如附录A第A2节所示,机会约束置信水平取为0.8。算例系统拓扑参数如附录B表B5、B6所示。输电网火电机组参数如附录B表B7所示,配电网CDG参数如附录B表B8所示。输配电价参数如附录B表B9所示。技改项目参数如附录B表B10所示。配电网节点电压上、下限分别取为1.1、0.9 p.u.,输配边界变压器容量上限取为300 MV·A,配电网联络支路投切成本取为200 \$ / 次。

3.2 机组组合与技改计划联合优化结果分析

为验证所提方法对求解机组组合与技改计划联合优化问题的有效性,设置 $\nu_{i,k}$ 、 $\omega_{i,k}$ 初值均为0.5, γ 取为1.5, $P_{i,k}^{TB}$ 初值取为0, ε_1 、 ε_2 分别取为0.01、0.001,并进行算例分析。机组启停状态如附录C图C1所示。技改计划如附录C图C2所示。联络支路投切状态如附录C图C3所示。输配电网弃风量及成本优化结果如表4所示,输配总成本为\$ 3 699 179.473。由于输电网及配电网的弃风成本已在附录A式(A10)中转化为置信水平下的单侧置信上限,因此表4中不展示弃风成本,而是采用置信水平下的弃风量代替,该弃风量是置信水平下最大可利用风电与风电调度出力的差值,其中最大可利用风电如附录A式(A38)所示。

表 4 输配电网弃风量及成本优化结果

Table 4 Wind curtailment and cost optimization results of transmission and distribution grids

输电网		配电网	
参数	取值	参数	取值
弃风量 / MW	0	弃风量 / MW	0
火电机组运行成本 / \$	3 170 491.487	CDG 运行成本 / \$	454 287.987
火电机组开机成本 / \$	10 600	购电成本 / \$	452 785.781
售电增益 / \$	452 785.782	施工成本 / \$	13 000
施工成本 / \$	50 000	切负荷成本 / \$	0
切负荷成本 / \$	0	联络支路投切成本 / \$	800
总成本 / \$	2 778 305.705	总成本 / \$	920 873.768

由图 C1 可知,机组组合结果在满足 1 周负荷需求的同时,具有大容量机组负担基荷、中小容量机组负担腰荷与峰荷的特征。结合图 B2 可知,周末负荷明显偏高,系统调用机组 G_2 来支撑周末峰荷,而在工作日,小容量机组 G_1 、 G_2 并没有投入使用,这体现出机组组合结果对负荷日历属性的适应性。结合表 4 可知,输配电网中弃风量均为 0,这说明机组组合结果能够满足风电消纳需求。由图 C2 可知,输电网技改计划均安排在工作日,这是为了避开周末负荷高峰以及避免支付周末高昂的附加施工费用。由图 C3 可知,配电网技改项目施工时联络支路能够及时投入运行,从而保证配电网拓扑呈辐射状,避免出现孤岛。结合表 4 可知,输配电网中切负荷成本均为 0,这说明本文联合优化模型能够兼顾机组组合与技改计划的优化需求,避免切负荷。

3.3 算法性能分析

3.3.1 收敛性分析

为分析本文算法的收敛性,对 3.1 节算例系统进行集中式优化,得到的优化结果如附录 C 表 C1 所示。此外,绘制 3.2 节算例中 $t=22$ h 时的输配边界耦合变量迭代曲线,如图 2 所示,输配成本迭代曲线如图 3 和图 4 所示。

对比分析表 4 和附录 C 表 C1 可知,采用 ATC 计算得出的输配总成本相对于集中式优化结果的偏差为 -0.1295% ,这说明 ATC 对于求解机组组合与技改计划联合优化问题具有较好的收敛性。出现负偏差

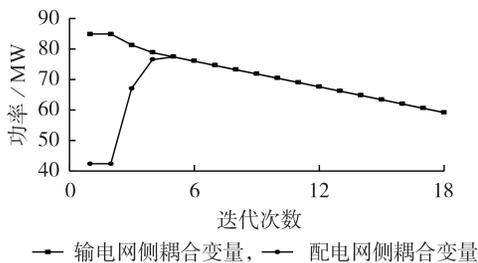


图 2 $t=22$ h 时的输配耦合变量迭代曲线

Fig.2 Iterative curves of coupling variables of transmission and distribution when t is 22 h

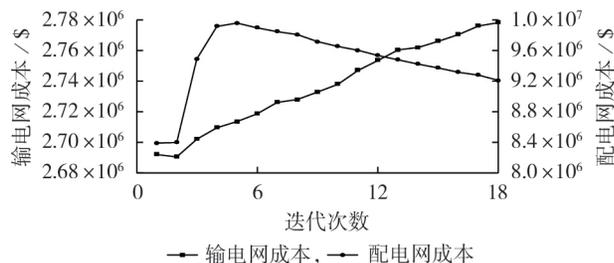


图 3 输电网成本及配电网成本迭代曲线

Fig.3 Iterative curves of transmission grid cost and distribution grid cost

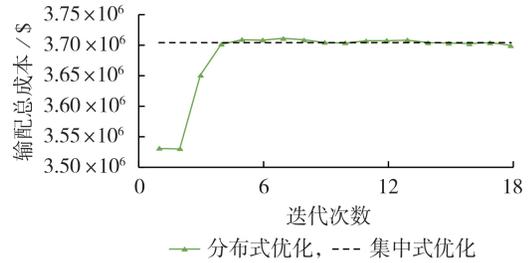


图 4 输配总成本迭代曲线

Fig.4 Iterative curves of total transmission and distribution cost

的原因是,ATC 将庞大的输配整体优化模型进行分解,避免一次性求解含大量 0-1 变量的整体模型,减小了计算规模,从而使分布式优化的结果优于集中式优化。

由图 2—4 可知,ATC 经过 18 次迭代后收敛。在迭代初期,输电网成本与配电网成本均较小,结合式(30)、(31)可知,迭代初期 ATC 乘子较小,耦合变量惩罚项对经济性目标的牵制作用较小,输配双方可以充分表达自身的经济利益诉求,此时输配双方成本均较低。随着迭代次数的增加,由式(33)可知,ATC 乘子逐渐增大,这使得输配双方在寻求自身经济性最优的同时不断提高对耦合变量一致性约束的兼顾程度,导致输配双方运行成本增大。最终,输配双方满足一致性约束,完成迭代。

3.3.2 ATC 乘子初值及增长率对算法性能的影响

设计算例 1—3,分别测试 $\nu_{i,k}$ 初值、 $\omega_{i,k}$ 初值及 γ 取值对算法性能的影响,各算例参数设置如附录 C 表 C2 所示。算例 1 的优化结果如表 5 所示,表中,输配总成本偏差是指该算例的输配总成本与附录 C 表 C1 中输配总成本的偏差。算例 2 和算例 3 的优化结果分别如附录 C 表 C3 和表 C4 所示。

表 5 算例 1 的优化结果

Table 5 Optimization results of Case 1

$\nu_{i,k}$ 初值	迭代次数	迭代时间 / s	输配总成本 / \$	输配总成本偏差 / %
0.50	18	3014.05	3699179.47	-0.1295
0.75	14	2327.87	3702239.66	-0.0469
1.00	16	2695.05	3703612.66	-0.0098
1.25	16	2659.27	3700354.59	-0.0978
1.50	13	2157.99	3702265.14	-0.0462

由表 5 和附录 C 表 C3 可知,随着一、二次 ATC 乘子初值逐渐增大,迭代次数及迭代时间呈下降趋势,输配总成本偏差变化不大。结合式(30)、(31)、(33)可知,ATC 乘子即耦合变量惩罚项权重,会随着迭代的进行而不断增大,使优化目标逐渐倾向于满足一致性约束,最终实现收敛。增大初始权重可以提高优化目标对一致性约束的初始重视度,从而缩短迭代进程。

由附录C表C4可知,随着二次ATC乘子增长率逐渐增大,迭代次数及迭代时间呈下降趋势,输配总成本偏差明显增大。结合式(30)、(31)、(33)可知, γ 在给定范围内增大相当于增大优化目标中耦合变量惩罚项权重的迭代步长,从而加快惩罚项权重的增长,减少迭代次数,但迭代步长过大容易导致耦合变量惩罚项权重“过调”,使优化结果过于向满足一致性约束的方向倾斜,导致经济性目标劣化。

3.3.3 收敛容差对算法性能的影响

设计算例4和算例5,分别测试 ε_1 、 ε_2 取值对算法性能的影响,各算例参数设置如附录C表C5所示。算例4和算例5的优化结果分别如附录C表C6和表C7所示。

由表C6可知,随着优化目标收敛容差逐渐减小,迭代次数及迭代时间呈上升趋势,输配总成本偏差呈现先减小后增大的趋势。 ε_1 越小,对模型的收敛要求越苛刻,从而导致迭代时间增长。当 ε_1 较大时,模型收敛精度不足,此时减小 ε_1 可以使输配总成本偏差减小。当 ε_1 超过一定阈值(算例4中为0.01)并继续减小时,由于输配总成本在迭代过程中会持续波动(见图4),为满足式(32)中输配总成本前后2次迭代差值小于 ε_1 的要求,必然会增加迭代次数,从而使耦合变量惩罚项权重过量增长,使优化结果过于向满足一致性约束的方向倾斜,导致经济性目标劣化。

由表C7可知,随着耦合变量收敛容差逐渐减小,迭代次数及迭代时间呈现先上升后不变的趋势,输配总成本偏差呈现先减小后不变的趋势。 ε_2 较大时,通过减小 ε_2 可以提高模型精度,从而在迭代次数增加的同时减小输配总成本偏差。当 ε_2 超过一定阈值(算例5中为0.001)并继续减小时,迭代次数及输配总成本偏差保持不变,这说明在当前ATC参数设置下,在模型经过18次迭代后输电网侧与配电网侧的耦合变量差异已非常小。

3.3.4 输电网侧耦合变量初值对算法性能的影响

设计算例6,测试 $P_{i,k}^{tb}$ 初值对算法性能的影响。算例6包含8个场景 S_1 — S_8 ,场景 S_1 — S_7 的 $P_{i,k}^{tb}$ 初值在 $[0,100]$ 范围内随机生成,场景 S_8 的 $P_{i,k}^{tb}$ 初值保持为0,其余参数同3.2节。算例6的优化结果如附录C表C8所示。由表可知,场景 S_1 — S_8 的 $P_{i,k}^{tb}$ 初值向量与耦合变量最优解向量之间的距离不同,所需的迭代次数也不同。场景 S_1 — S_8 的输配总成本偏差十分接近,这说明ATC对 $P_{i,k}^{tb}$ 初值的选取不敏感。

3.4 输配分布式协同优化与分立式优化的对比分析

为体现本文方法相较于传统输配分立式优化方法在高比例新能源电力系统中的优势,设计算例7,共包含6个场景,以3.1节算例系统中的输配风电额

定功率为基准,第 $y(y=1,2,\dots,6)$ 个场景的输配风电额定功率与基准值的比值为 $0.2(y+3)$,其余参数同3.2节。对每个场景均进行分立式优化、集中式优化、分布式优化,优化所得弃风量曲线如图5所示,输配总成本偏差曲线如图6所示,此处的输配总成本偏差是指与集中式优化输配总成本的偏差。

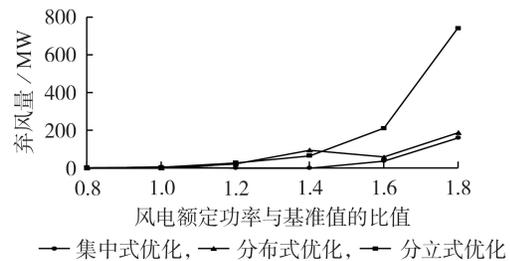


图5 算例7弃风量曲线

Fig.5 Wind curtailment curves of Case 7

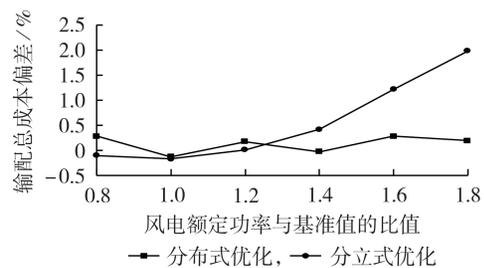


图6 算例7输配总成本偏差曲线

Fig.6 Deviation curves of total transmission and distribution cost for Case 7

由图5和图6可知,随着风电额定功率与基准值的比值的逐渐增大,采用分立式优化的弃风量和运行成本明显高于集中式优化和分布式优化,这说明分立式优化难以满足高比例新能源电力系统的经济运行需求。相比较而言,分布式优化的弃风量基本与集中式优化保持同步,且分布式优化的输配总成本偏差始终在0.5%以下,这说明本文方法在处理高比例新能源环境下的输配协同机组组合与技改计划联合优化问题时更具优势。

4 结论

本文在配电网CDG、新能源接入水平不断提高的背景下,针对传统技改计划优化编制方法经济性不足的问题,提出一种考虑输配协同的电网机组组合与技改计划联合优化模型,所得主要结论如下。

1)所提出的机组组合与技改计划联合优化模型,可以有效兼顾系统的负荷供电需求与技改施工需求,合理安排机组的启停计划及技改项目的施工计划,从而使系统的机组组合成本与技改施工成本最优。

2)采用ATC可以有效求解输配分布式协同优化问题。算例结果表明,该方法所求解的输配总

成本与集中式优化输配总成本的偏差最大不超过0.5%,最小会出现负偏差,说明该方法收敛性较好,并且可通过分解庞大的输配协同优化模型提高求解收敛性。

3)与输配分立优化算法相比,所提出的输配分布式协同优化算法在高比例新能源电力系统中表现出更强的适应性,能够更有效地协调输配双方的边界功率,大幅降低弃风量。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 兰鹏,沈晓东,吴刚,等. 基于交替方向乘子法的输-配-天然气系统分布式优化调度[J]. 电力系统自动化,2021,45(23):21-30.
LAN Peng, SHEN Xiaodong, WU Gang, et al. Distributed optimal scheduling for transmission-distribution-natural-gas system based on alternating direction method of multipliers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23):21-30.
- [2] 张旭,王洪涛. 高比例可再生能源电力系统的输配协同优化调度方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(3):67-75,115.
ZHANG Xu, WANG Hongtao. Optimal dispatch method of transmission and distribution coordination for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3):67-75, 115.
- [3] 林敏洪,侯祖锋,王超,等. 基于分布式内点法的输配协同优化调度[J]. 可再生能源,2020,38(9):1226-1232.
LIN Minhong, HOU Zufeng, WANG Chao, et al. Optimal dispatch for transmission distribution coordination system based on distributed interior point method[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(9):1226-1232.
- [4] SUN H B, GUO Q L, ZHANG B M, et al. Master-slave-splitting based distributed global power flow method for integrated transmission and distribution analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3):1484-1492.
- [5] LI Zhengshuo, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. A new LMP-sensitivity-based heterogeneous decomposition for transmission and distribution coordinated economic dispatch[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2):931-941.
- [6] 刘盾盾,柳璐,程浩忠,等. 基于广义主从分裂理论与配电网协同的输电网规划方法[J]. 中国电机工程学报,2021,41(17):5856-5866.
LIU Dundun, LIU Lu, CHENG Haozhong, et al. Transmission expansion planning coordinated with distribution networks based on generalized master-slave splitting theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17):5856-5866.
- [7] 徐小琴,王博,赵红生,等. 基于交替方向乘子法及最优潮流的输配电网协调规划方法[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(16):18-27.
XU Xiaoqin, WANG Bo, ZHAO Hongsheng, et al. Coordination planning method of a transmission and distribution network based on alternating direction method of multipliers and optimal power flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16):18-27.
- [8] 徐立敏,艾欣. 电力及天然气系统中的产消者能量-备用协同优化[J]. 现代电力,2022,39(1):45-61.
XU Limin, AI Xin. Energy-reserve co-optimization of prosumers in power and natural gas system[J]. Modern Electric Power, 2022, 39(1):45-61.
- [9] 赵晋泉,杨婷,姚建国,等. 电力现货市场下输配协同传输阻塞管理[J]. 电力系统自动化,2020,44(7):107-114.
ZHAO Jinquan, YANG Ting, YAO Jianguo, et al. Transmission congestion management based on transmission and distribution coordination in spot power market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7):107-114.
- [10] 叶畅,苗世洪,李超,等. 基于改进并行子空间算法的输配两级电网协同优化[J]. 电工技术学报,2018,33(23):5509-5522.
YE Chang, MIAO Shihong, LI Chao, et al. Coordination optimal scheduling strategy for transmission and distribution system based on improved CSSO algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(23):5509-5522.
- [11] KHANABADI M, FU Y, GONG L. A fully parallel stochastic multiarea power system operation considering large-scale wind power integration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1):138-147.
- [12] 刘佳,程浩忠,姚良忠,等. 混合输配电系统的分布式随机优化规划[J]. 电工技术学报,2019,34(10):1987-1998.
LIU Jia, CHENG Haozhong, YAO Liangzhong, et al. A distributed stochastic optimization method for planning transmission and distribution systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10):1987-1998.
- [13] 谢康胜,李华强,王俊翔,等. 考虑输配电网协同的源荷储资源统筹规划[J]. 电力建设,2021,42(9):41-52.
XIE Kangsheng, LI Huaqiang, WANG Junxiang, et al. Overall planning of source-load-storage resources considering coordination in transmission and distribution network[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(9):41-52.
- [14] 张强,赵晋泉,戴则梅,等. 基于目标级联分析的输配电网黑启动分布式协同优化方法[J]. 电力系统自动化,2021,45(3):111-120.
ZHANG Qiang, ZHAO Jinquan, DAI Zemei, et al. Distributed coordinated optimization method for black-start of transmission and distribution networks based on analytical target cascading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(3):111-120.
- [15] 许奕斌,章禹,何宇斌,等. 计及灵活性的检修-运行协同优化模型及算法[J]. 电力系统自动化,2018,42(11):32-40.
XU Yibin, ZHANG Yu, HE Yubin, et al. Collaborative optimization model and algorithm of maintenance and operation considering flexibility[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11):32-40.
- [16] 俞晨玺,孔维禄,俞柏红,等. 考虑需求响应的多目标机组检修调度优化[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(11):110-118.
YU Chenxi, KONG Weilu, YU Bohong, et al. Multi-objective optimization of generation maintenance scheduling considering demand response[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11):110-118.
- [17] WANG Y F, LI Z Y, SHAHIDEHPOUR M, et al. Stochastic co-optimization of midterm and short-term maintenance outage scheduling considering covariates in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6):4795-4805.
- [18] 王廷涛,苗世洪,张松岩,等. 基于状态评估的多类型储能系统检修优化策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(10):234-243.
WANG Tingtao, MIAO Shihong, ZHANG Songyan, et al. Maintenance optimization strategy of multi-type energy storage systems based on state evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10):234-243.
- [19] 向明旭,杨知方,余娟,等. 配电网线性潮流模型通式及误差分析[J]. 中国电机工程学报,2021,41(6):2053-2064.
XIANG Mingxu, YANG Zhifang, YU Juan, et al. Linear power flow model in distribution network: unified expression and er-

- ror analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2053-2064.
- [20] 左剑, 汤吉鸿, 钟伟, 等. 考虑输配交互的含风电电力系统多目标动态随机模糊最优潮流[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(1): 50-60.
ZUO Jian, TANG Jihong, ZHONG Wei, et al. Multi-objective dynamic random fuzzy optimal power flow of wind integrated power system considering the interaction of transmission-distribution system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 50-60.
- [21] 李鹏, 陈博, 王子轩, 等. 计及网络安全约束和多能协同交互的多园区综合能源系统分散协调调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 15-25.
LI Peng, CHEN Bo, WANG Zixuan, et al. Decentralized coordinated dispatch of multi-community integrated energy system considering network security constraints and multi-energy collaborative interaction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 15-25.
- [22] 周明, 夏澍, 李琰, 等. 含风电的电力系统月度机组组合和检修计划联合优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1586-

1595.

ZHOU Ming, XIA Shu, LI Yan, et al. A joint optimization approach on monthly unit commitment and maintenance scheduling for wind power integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1586-1595.

作者简介:



蔡 杰

蔡 杰(1985—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为电力系统优化规划与运行技术(**E-mail**: dtscj@163.com);

王廷涛(1997—), 男, 硕士研究生, 通信作者, 主要研究方向为电力系统优化规划与运行技术(**E-mail**: hustwtt@hust.edu.cn);

苗世洪(1963—), 男, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为电力系统保护与控制、压缩空气储能系统等(**E-mail**: shmiao@hust.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

Joint optimization model of power grid unit commitment and technical transformation plan considering transmission and distribution coordination

CAI Jie¹, WANG Tingtao², XU Xiaoqin¹, XIONG Wei¹, GUO Ting¹, MIAO Shihong², LIAO Shuang¹

(1. Economic and Technological Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430011, China;

2. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory, State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The joint optimization of power grid unit commitment and technical transformation plan considering transmission and distribution coordination is of great significance to improve the overall renewable energy consumption rate of transmission and distribution and ensure the medium- and short-term reliable and economic operation of the system. The joint optimization models of unit commitment and technical transformation plan of transmission network and distribution network are constructed respectively. Aiming at the problem of large randomness of renewable energy in medium- and short-term optimization, the opportunity constrained programming is adopted to transform the constraints into deterministic ones. The feasibility of discrete optimization, centralized collaborative optimization and distributed collaborative optimization of transmission and distribution is analyzed, and the distributed collaborative optimization algorithm based on objective cascaded analysis method is used to realize the transmission and distribution decoupling and parallel calculation of the model after comprehensive comparison. Case analysis shows that the proposed model can reasonably arrange the unit start-up and shutdown states of transmission and distribution grids and the construction plan of technical transformation project, and the effectiveness of target cascaded analysis method in solving the transmission and distribution collaborative optimization problem is verified.

Key words: transmission and distribution coordination; unit commitment; technical transformation plan; ATC; chance constrained programming

附录 A

A1 风电场出力概率分布函数

一个季度内每天相同小时的风速具有相同的概率分布特性。假设各个小时的风速均服从威布尔分布，则风速概率分布函数和概率密度函数分别为：

$$F_V(x) = \Pr(v \leq x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^k} \quad (\text{A1})$$

$$f_V(x) = \frac{k}{c} \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^k} \quad (\text{A2})$$

式中： v 为任意小时的风速（单位为 m/s），此处省略了时间下标 t ，后同； k 、 c 分别为威布尔分布的形状参数、尺度参数。

风电场出力 P_W （单位为 MW）与风速 v 的近似函数关系为：

$$P_W = \begin{cases} 0 & v < v_{ci}, v \geq v_{co} \\ P_{Wr} \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_{Wr} & v_r \leq v < v_{co} \end{cases} \quad (\text{A3})$$

式中： v_{ci} 、 v_{co} 、 v_r 分别为风电场切入风速、切出风速、额定风速； P_{Wr} 为风电场额定出力。

由式 (A3) 可知， P_W 为混合随机变量，设其概率分布函数为 $F_W(y)$ ，下面分情况讨论其表达式。

1) $y < 0$ 时， $F_W(y)$ 表达式为：

$$F_W(y) = \Pr(P_W \leq y) = 0 \quad (\text{A4})$$

2) $y \geq P_{Wr}$ 时， $F_W(y)$ 表达式为：

$$F_W(y) = \Pr(P_W \leq y) = 1 \quad (\text{A5})$$

3) $y = 0$ 时， $F_W(y)$ 表达式为：

$$F_W(y) = \Pr(P_W \leq 0) = \Pr(P_W = 0) = \Pr(v < v_{ci}) + \Pr(v \geq v_{co}) = 1 - e^{-\left(\frac{v_{ci}}{c}\right)^k} + e^{-\left(\frac{v_{co}}{c}\right)^k} \quad (\text{A6})$$

4) $0 < y < P_{Wr}$ 时， $F_W(y)$ 表达式为：

$$F_W(y) = \Pr(P_W \leq y) = \Pr(v < v_{ci}) + \Pr(v \geq v_{co}) + \Pr\left(v_{ci} < v \leq \frac{v_r - v_{ci}}{P_{Wr}} y + v_{ci}\right) = 1 - e^{-\left(\frac{v_r - v_{ci}}{c P_{Wr}} y + \frac{v_{ci}}{c}\right)^k} + e^{-\left(\frac{v_{co}}{c}\right)^k} \quad (\text{A7})$$

将式 (A4) — (A7) 合并为：

$$F_W(y) = \Pr(P_W \leq y) = \begin{cases} 0 & y < 0 \\ 1 - e^{-\left(\frac{v_r - v_{ci}}{c P_{Wr}} y + \frac{v_{ci}}{c}\right)^k} + e^{-\left(\frac{v_{co}}{c}\right)^k} & 0 \leq y < P_{Wr} \\ 1 & y \geq P_{Wr} \end{cases} \quad (\text{A8})$$

A2 式 (2) 中输电网弃风成本的处理方法

式 (2) 中， P_t^{TWF} 、 P_t^{TW} 分别为输电网在 t 时的风电预测及实际出力。 P_t^{TWF} 为随机变量，其概率分布函数如式 (A8) 所示，各个小时的分布函数参数不同。 P_t^{TW} 为决策变量。将 t 时的输电网弃风成本重写为：

$$C_W^T = C_{TWF} (P_{TWF} - P_{TW}) \quad (\text{A9})$$

式中： C_W^T 为 t 时的输电网弃风成本； P_{TWF} 、 P_{TW} 分别为 t 时输电网的风电预测及实际出力。

在随机环境下，若决策者希望最小化输电网弃风成本，则：

$$\begin{cases} \min \bar{C}_W^T \\ \text{s.t. } \Pr(C_W^T \leq \bar{C}_W^T) = \Pr[C_{TWF} (P_{TWF} - P_{TW}) \leq \bar{C}_W^T] \geq \vartheta \end{cases} \quad (\text{A10})$$

式中： ϑ 为置信水平； \bar{C}_W^T 为 C_W^T 在置信水平为 ϑ 时所取的单侧置信上限。

将式 (A8) 代入式 (A10)，并分情况讨论。

$$1) \frac{\bar{C}_W^T}{C_{TWF}} + P_{TW} < 0$$

$\Pr[C_{TWF} (P_{TWF} - P_{TW}) \leq \bar{C}_W^T] = 0$ ，该情况不满足式 (A10)。

$$2) 0 \leq \frac{\bar{C}_W^T}{C_{TWF}} + P_{TW} < P_{Wr}$$

该情况下，式 (A10) 中的约束条件可写为：

$$\Pr[C_{TWF} (P_{TWF} - P_{TW}) \leq \bar{C}_W^T] = \Pr\left(P_{TWF} \leq \frac{\bar{C}_W^T}{C_{TWF}} + P_{TW}\right) \geq \vartheta$$

↓

$$\frac{\bar{C}_W^T}{C_{TWF}} + P_{TW} \geq \frac{c P_{Wr}}{v_r - v_{ci}} \left[-\ln \left(1 - \vartheta + e^{-\left(\frac{v_{co}}{c}\right)^k} \right) \right]^{\frac{1}{k}} - \frac{v_{ci} P_{Wr}}{v_r - v_{ci}} \quad (\text{A11})$$

$$3) \frac{\bar{C}_W^T}{C_{TWF}} + P_{TW} \geq P_{Wr}$$

该情况下， $\Pr\left(P_{TWF} \leq \frac{\bar{C}_W^T}{C_{TWF}} + P_{TW}\right) = 1 \geq \vartheta$ 恒成立。

将上述 3 种情况整合为：

$$\frac{\bar{C}_W^T}{C_{TWF}} + P_{TW} \geq \min \left\{ P_{Wr}, \max \left\{ 0, \frac{cP_{Wr}}{v_r - v_{ci}} \times \left[-\ln \left(1 - \mathcal{G} + e^{-\frac{v_{co}^k}{c^k}} \right) \right]^{\frac{1}{k}} - \frac{v_{ci} P_{Wr}}{v_r - v_{ci}} \right\} \right\} \quad (A12)$$

A3 输电网优化模型中系统备用约束的处理方法
 t 时的系统备用约束确定性表达式为:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_G} (P_i^G - u_i^G P_i^{Gmin}) \geq \kappa_1 P_L + \kappa_2 (P_{TWF} + P_{DWF}) \\ \sum_{i=1}^{N_G} (u_i^G P_i^{Gmax} - P_i^G) \geq \kappa_1 P_L + \kappa_2 (P_{TWF} + P_{DWF}) \end{cases} \quad (A13)$$

式中: P_i^G 为 t 时火电机组 i 的出力; u_i^G 为 t 时火电机组 i 的启停状态, 开机时其值为 1, 反之为 0; P_i^{Gmin} 、 P_i^{Gmax} 分别为火电机组 i 的最小技术出力、额定出力; N_G 为火电机组数量; P_L 为 t 时全系统负荷预测值; P_{DWF} 为 t 时配电网风电预测出力, 与 P_{TWF} 同为随机变量; κ_1 、 κ_2 分别为负荷、风电的备用系数。

下面以正备用为例展示将式 (A13) 转化为机会约束形式的过程, 即:

$$\Pr \left\{ P_{TWF} + P_{DWF} \leq \frac{1}{\kappa_2} \left[\sum_{i=1}^{N_G} (u_i^G P_i^{Gmax} - P_i^G) - \kappa_1 P_L \right] \right\} \geq \mathcal{G} \quad (A14)$$

假设输电网、配电网风电场之间地理位置相距较远, 可认为 P_{TWF} 与 P_{DWF} 之间相互独立。二者的概率分布函数分别为 $F_{WT}(y_T)$ 、 $F_{WD}(y_D)$, 均满足式 (A8)。则二者的联合概率分布为:

$$\begin{aligned} F_W(y_T, y_D) &= F_{WT}(y_T) F_{WD}(y_D) = \\ \Pr(P_{TWF} \leq y_T, P_{DWF} \leq y_D) &= \Pr(P_{TWF} \leq y_T) \Pr(P_{DWF} \leq y_D) \end{aligned} \quad (A15)$$

若需使式 (A14) 成立, 则只需使式 (A16) 成立即可。

$$\begin{cases} P_{TWF} \leq \frac{1}{2\kappa_2} \left[\sum_{i=1}^{N_G} (u_i^G P_i^{Gmax} - P_i^G) - \kappa_1 P_L \right] + \zeta, \\ P_{DWF} \leq \frac{1}{2\kappa_2} \left[\sum_{i=1}^{N_G} (u_i^G P_i^{Gmax} - P_i^G) - \kappa_1 P_L \right] - \zeta \end{cases} \geq \mathcal{G} \quad (A16)$$

式中: ζ 为辅助变量。将式 (A16) 代入式 (A15), 令 $\varpi = \frac{1}{2\kappa_2} \left[\sum_{i=1}^{N_G} (u_i^G P_i^{Gmax} - P_i^G) - \kappa_1 P_L \right]$, 如式 (A17) 所示。

$$\Pr(P_{TWF} \leq \varpi + \zeta) \Pr(P_{DWF} \leq \varpi - \zeta) \geq \mathcal{G} \quad (A17)$$

下面分情况讨论式 (A17) 的转化方法。

1) $\varpi + \zeta < 0, \forall \varpi - \zeta \in \mathbf{R}$

$\Pr(P_{TWF} \leq \varpi + \zeta) = 0$, 该情况不满足式 (A17)。

2) $\varpi - \zeta < 0, \forall \varpi + \zeta \in \mathbf{R}$

$\Pr(P_{DWF} \leq \varpi - \zeta) = 0$, 该情况不满足式 (A17)。

3) $\varpi + \zeta \geq P_{Wr}^T, \forall \varpi - \zeta \in \mathbf{R}$

式中: P_{Wr}^T 为输电网风电场额定出力。式 (A17) 可进一步写为:

$$\begin{aligned} \Pr(P_{TWF} \leq \varpi + \zeta) \Pr(P_{DWF} \leq \varpi - \zeta) &= \\ \Pr(P_{DWF} \leq \varpi - \zeta) &\geq \mathcal{G} \end{aligned} \quad (A18)$$

式 (A18) 的确定性转化方法与附录 A.2 节相同, 在此不再赘述。

4) $\varpi - \zeta \geq P_{Wr}^D, \forall \varpi + \zeta \in \mathbf{R}$

式中: P_{Wr}^D 为配电网风电场额定出力。式 (A17) 可进一步写为:

$$\begin{aligned} \Pr(P_{TWF} \leq \varpi + \zeta) \Pr(P_{DWF} \leq \varpi - \zeta) &= \\ \Pr(P_{TWF} \leq \varpi + \zeta) &\geq \mathcal{G} \end{aligned} \quad (A19)$$

式 (A19) 的确定性转化方法与附录 A.2 节相同, 在此不再赘述。

5) $0 \leq \varpi + \zeta < P_{Wr}^T, 0 \leq \varpi - \zeta < P_{Wr}^D$

该情况下, 若式 (A20) 不能满足, 则该情况不满足式 (A17)。

$$\begin{cases} \lambda_T \lambda_D \geq \mathcal{G} \\ \lambda_T = 1 - e^{-\left(\frac{v_r^T - v_{ci}^T}{c_T}\right)^{k_T}} + e^{-\left(\frac{v_{co}^T}{c_T}\right)^{k_T}} \\ \lambda_D = 1 - e^{-\left(\frac{v_r^D - v_{ci}^D}{c_D}\right)^{k_D}} + e^{-\left(\frac{v_{co}^D}{c_D}\right)^{k_D}} \end{cases} \quad (A20)$$

若满足式 (A20), 则式 (A17) 可进一步写为:

$$\begin{cases} \left\{ 1 - e^{-\left[\frac{v_r^T - v_{ci}^T}{c_T P_{Wr}^T} (\varpi + \zeta) + \frac{v_{co}^T}{c_T}\right]^{k_T}} + e^{-\left(\frac{v_{co}^T}{c_T}\right)^{k_T}} \right\} \times \\ \left\{ 1 - e^{-\left[\frac{v_r^D - v_{ci}^D}{c_D P_{Wr}^D} (\varpi - \zeta) + \frac{v_{co}^D}{c_D}\right]^{k_D}} + e^{-\left(\frac{v_{co}^D}{c_D}\right)^{k_D}} \right\} \geq \mathcal{G} \end{cases} \quad (A21)$$

式中: 上标及下标 “T”、“D” 分别表示输电网、配电网, 后同。

若要使式 (A21) 成立, 则只需使式 (A22) 成立即可。

$$\begin{cases} \ln \left\{ 1 - e^{-\left[\frac{v_r^T - v_{ci}^T}{c_T P_{Wr}^T} (\varpi + \zeta) + \frac{v_{co}^T}{c_T}\right]^{k_T}} + e^{-\left(\frac{v_{co}^T}{c_T}\right)^{k_T}} \right\} \geq \frac{1}{2} \ln \mathcal{G} + \sigma \\ \ln \left\{ 1 - e^{-\left[\frac{v_r^D - v_{ci}^D}{c_D P_{Wr}^D} (\varpi - \zeta) + \frac{v_{co}^D}{c_D}\right]^{k_D}} + e^{-\left(\frac{v_{co}^D}{c_D}\right)^{k_D}} \right\} \geq \frac{1}{2} \ln \mathcal{G} - \sigma \end{cases} \quad (A22)$$

式中: σ 为辅助变量。

由于式 (A22) 不等号左侧对数函数为单增上凸

函数，因此当该函数曲线上的多段弦组成的分段函数满足不等式时，式 (A22) 一定成立。考虑分段方式为均匀 4 分段，如式 (A23) — (A30) 所示。

$$4 \frac{\ln F_{WT} \left(\frac{P_{Wr}^T}{4} \right) - \ln F_{WT} (0)}{P_{Wr}^T} \times \quad (A23)$$

$$(\varpi + \zeta) + \ln F_{WT} (0) \geq \frac{1}{2} \ln \vartheta + \sigma$$

$$4 \frac{\ln F_{WT} \left(\frac{P_{Wr}^T}{2} \right) - \ln F_{WT} \left(\frac{P_{Wr}^T}{4} \right)}{P_{Wr}^T} \times \quad (A24)$$

$$\left[(\varpi + \zeta) - \frac{P_{Wr}^T}{4} \right] + \ln F_{WT} \left(\frac{P_{Wr}^T}{4} \right) \geq \frac{1}{2} \ln \vartheta + \sigma$$

$$4 \frac{\ln F_{WT} \left(\frac{3P_{Wr}^T}{4} \right) - \ln F_{WT} \left(\frac{P_{Wr}^T}{2} \right)}{P_{Wr}^T} \times \quad (A25)$$

$$\left[(\varpi + \zeta) - \frac{P_{Wr}^T}{2} \right] + \ln F_{WT} \left(\frac{P_{Wr}^T}{2} \right) \geq \frac{1}{2} \ln \vartheta + \sigma$$

$$4 \frac{\ln \lambda_r - \ln F_{WT} \left(\frac{3P_{Wr}^T}{4} \right)}{P_{Wr}^T} \times \quad (A26)$$

$$\left[(\varpi + \zeta) - \frac{3P_{Wr}^T}{4} \right] + \ln F_{WT} \left(\frac{3P_{Wr}^T}{4} \right) \geq \frac{1}{2} \ln \vartheta + \sigma$$

$$4 \frac{\ln F_{WD} \left(\frac{P_{Wr}^D}{4} \right) - \ln F_{WD} (0)}{P_{Wr}^D} \times \quad (A27)$$

$$(\varpi - \zeta) + \ln F_{WD} (0) \geq \frac{1}{2} \ln \vartheta - \sigma$$

$$4 \frac{\ln F_{WD} \left(\frac{P_{Wr}^D}{2} \right) - \ln F_{WD} \left(\frac{P_{Wr}^D}{4} \right)}{P_{Wr}^D} \times \quad (A28)$$

$$\left[(\varpi - \zeta) - \frac{P_{Wr}^D}{4} \right] + \ln F_{WD} \left(\frac{P_{Wr}^D}{4} \right) \geq \frac{1}{2} \ln \vartheta - \sigma$$

$$4 \frac{\ln F_{WD} \left(\frac{3P_{Wr}^D}{4} \right) - \ln F_{WD} \left(\frac{P_{Wr}^D}{2} \right)}{P_{Wr}^D} \times \quad (A29)$$

$$\left[(\varpi - \zeta) - \frac{P_{Wr}^D}{2} \right] + \ln F_{WD} \left(\frac{P_{Wr}^D}{2} \right) \geq \frac{1}{2} \ln \vartheta - \sigma$$

$$4 \frac{\ln \lambda_D - \ln F_{WD} \left(\frac{3P_{Wr}^D}{4} \right)}{P_{Wr}^D} \times \quad (A30)$$

$$\left[(\varpi - \zeta) - \frac{3P_{Wr}^D}{4} \right] + \ln F_{WD} \left(\frac{3P_{Wr}^D}{4} \right) \geq \frac{1}{2} \ln \vartheta - \sigma$$

将上述 5 种情况整合为：

$$\begin{cases} u_{s1}, u_{s2} \in \{0, 1\} \\ u_{s1} + u_{s2} \leq 1 \end{cases} \quad (A31)$$

$$\begin{cases} \varpi + \zeta \geq P_{Wr}^T - M(1 - u_{s1}) \\ \varpi - \zeta \geq \min \left\{ P_{Wr}^D, \max \left\{ 0, \frac{c_D P_{Wr}^D}{v_r^D - v_{ci}^D} \times \right. \right. \\ \left. \left. \left\{ -\ln \left[1 - \vartheta + e^{-(v_{co}^D/c_D)^{k_D}} \right] \right\}^{\frac{1}{k_D}} - \right. \right. \\ \left. \left. \left. \frac{v_{ci}^D P_{Wr}^D}{v_r^D - v_{ci}^D} \right\} \right\} - M(1 - u_{s1}) \end{cases} \quad (A32)$$

$$\begin{cases} \varpi - \zeta \geq P_{Wr}^D - M(1 - u_{s2}) \\ \varpi + \zeta \geq \min \left\{ P_{Wr}^T, \max \left\{ 0, \frac{c_T P_{Wr}^T}{v_r^T - v_{ci}^T} \times \right. \right. \\ \left. \left. \left\{ -\ln \left[1 - \vartheta + e^{-(v_{co}^T/c_T)^{k_T}} \right] \right\}^{\frac{1}{k_T}} - \right. \right. \\ \left. \left. \left. \frac{v_{ci}^T P_{Wr}^T}{v_r^T - v_{ci}^T} \right\} \right\} - M(1 - u_{s2}) \end{cases} \quad (A33)$$

$$\begin{cases} -M(u_{s1} + u_{s2} + 1 - u_{\lambda_r \lambda_D}) \leq \varpi + \zeta < \\ P_{Wr}^T + M(u_{s1} + u_{s2} + 1 - u_{\lambda_r \lambda_D}) \\ -M(u_{s1} + u_{s2} + 1 - u_{\lambda_r \lambda_D}) \leq \varpi - \zeta < \\ P_{Wr}^D + M(u_{s1} + u_{s2} + 1 - u_{\lambda_r \lambda_D}) \\ \ln \left\{ 1 - e^{-\left[\frac{v_r^T - v_{ci}^T}{c_T P_{Wr}^T} (\varpi + \zeta) + \frac{v_{ci}^T}{c_T} \right]^{k_T}} + e^{-\left(\frac{v_{co}^T}{c_T} \right)^{k_T}} \right\} \geq \\ \frac{1}{2} \ln \vartheta + \sigma - M(u_{s1} + u_{s2} + 1 - u_{\lambda_r \lambda_D}) \\ \ln \left\{ 1 - e^{-\left[\frac{v_r^D - v_{ci}^D}{c_D P_{Wr}^D} (\varpi - \zeta) + \frac{v_{ci}^D}{c_D} \right]^{k_D}} + e^{-\left(\frac{v_{co}^D}{c_D} \right)^{k_D}} \right\} \geq \\ \frac{1}{2} \ln \vartheta - \sigma - M(u_{s1} + u_{s2} + 1 - u_{\lambda_r \lambda_D}) \end{cases} \quad (A34)$$

式中： u_{s1} 、 u_{s2} 为 0-1 辅助变量； $u_{\lambda_r \lambda_D}$ 为式 (A20) 的 0-1 指示参量，当满足式 (A20) 时，其值为 1，反之为 0。式 (A32) 对应本节第 3 种情况，式 (A33) 对应本节第 4 种情况，式 (A34) 对应本节第 5 种情况。式 (A34) 的线性化方法详见式 (A23) — (A30)。

A4 输电网优化模型中风电出力约束处理方法

t 时的风电出力约束确定性表达式为：

$$0 \leq P_{Tw} \leq P_{Twf} \quad (A35)$$

式中： P_{Tw} 、 P_{Twf} 分别为 t 时输电网风电实际出力、预测出力，前者为决策变量，后者为随机变量。

将式 (A35) 转化为机会约束形式:

$$\Pr(P_{Tw} \leq P_{Twf}) \geq \mathcal{G} \Rightarrow 1 - \Pr(P_{Twf} < P_{Tw}) \geq \mathcal{G} \quad (\text{A36})$$

将式 (A8) 代入式 (A36), 并分情况讨论。

1) $P_{Tw} = 0$

该情况下, $\Pr(P_{Twf} < P_{Tw}) = 0 \leq 1 - \mathcal{G}$ 恒成立。

2) $0 < P_{Tw} \leq P_{Wr}$

该情况下, 式 (A36) 可写为:

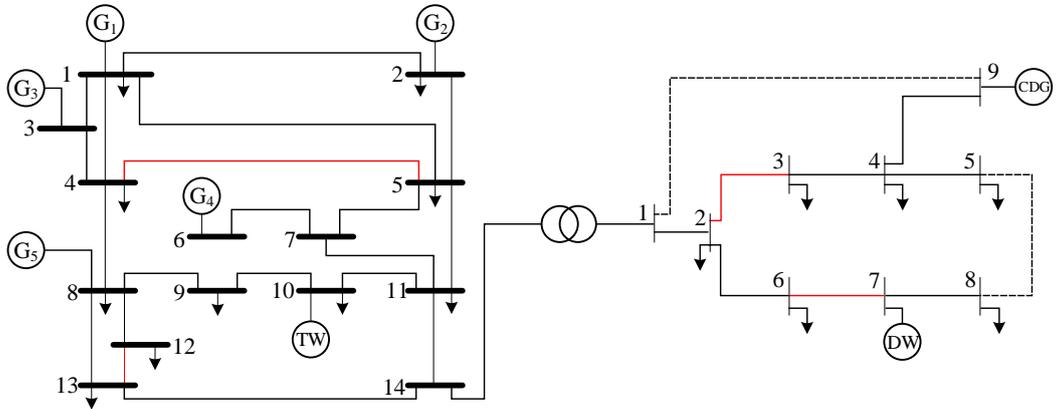
$$P_{Tw} \leq \frac{cP_{Wr}}{v_r - v_{ci}} \left[-\ln \left(\mathcal{G} + e^{-\frac{v_{co}^k}{c^k}} \right) \right]^{\frac{1}{k}} - \frac{v_{ci} P_{Wr}}{v_r - v_{ci}} \quad (\text{A37})$$

将上述情况整合为:

$$0 \leq P_{Tw} \leq \min \left\{ P_{Wr}, \max \left\{ 0, \frac{cP_{Wr}}{v_r - v_{ci}} \times \left[-\ln \left(\mathcal{G} + e^{-\frac{v_{co}^k}{c^k}} \right) \right]^{\frac{1}{k}} - \frac{v_{ci} P_{Wr}}{v_r - v_{ci}} \right\} \right\} \quad (\text{A38})$$

式 (A38) 最右侧表达式为置信水平 \mathcal{G} 下的最大可利用风电。

附录 B



注：左侧为输网，右侧为配网；TW为输网风电，DW为配网风电；红线为技改对象；虚线为联络支路。

图 B1 输配系统拓扑结构

Fig.B1 Topology of transmission and distribution grid

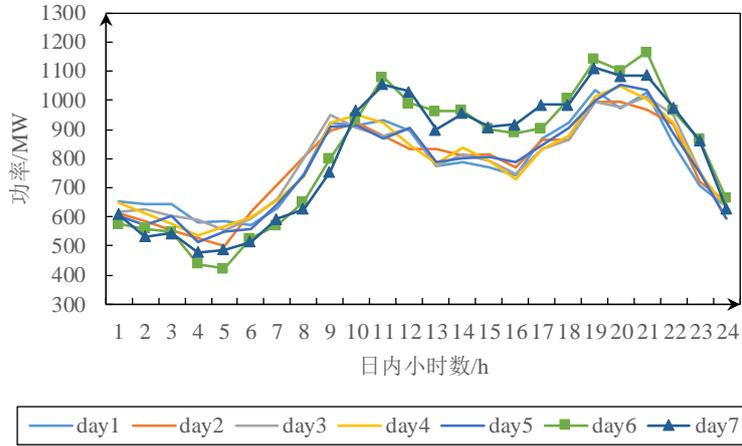


图 B2 负荷预测曲线

Fig.B2 Forecasting curves of load

表 B1 输电网节点负荷比例

Table B1 Load proportion of nodes in transmission grid

输电网节点	有功负荷比例/%	输电网节点	有功负荷比例/%
1	10.0	9	7.3
2	9.0	10	9.0
4	8.5	11	7.8
5	8.4	12	5.6
8	7.7	13	6.7

表 B2 配电网节点负荷比例

Table B2 Load proportion of nodes in distribution grid

配电网节点	有功负荷比例/%	功率因数
2	2.4	0.946
3	3.6	0.877
4	4.5	0.946
5	4.3	0.951
6	2.2	0.917
8	3.0	0.951

表 B3 风速概率分布参数

Table B3 Probability distribution parameters of wind speed

日内小时数/h	输电网		配电网	
	形状参数	尺度参数	形状参数	尺度参数
1	2.385	20.434	2.326	18.512
2	2.269	20.200	2.092	18.304
3	2.381	19.773	1.986	19.329
4	2.110	19.203	2.393	18.767
5	1.935	20.140	2.181	18.231
6	2.270	19.526	1.863	19.036
7	1.970	20.450	1.930	19.149
8	1.909	19.048	2.019	18.183
9	1.996	20.649	2.017	19.918
10	1.969	19.511	1.979	18.597
11	2.222	19.079	2.288	18.558
12	1.972	19.869	2.031	19.224
13	2.367	20.360	2.230	19.632
14	2.390	20.523	2.068	19.132
15	2.242	20.281	2.269	18.560
16	2.384	19.066	1.986	18.729
17	2.144	20.617	1.818	18.786
18	2.246	19.827	2.078	18.662
19	2.231	19.869	2.181	18.731
20	2.414	20.235	1.836	18.047
21	2.378	19.105	1.937	19.962
22	2.183	19.577	1.862	18.128
23	2.116	20.905	1.939	19.344
24	2.353	19.091	1.975	19.700

表 B4 风电场参数

Table B4 Parameters of wind farm

风电场参数	输电网	配电网
切入风速/(m s^{-1})	5	5
额定风速/(m s^{-1})	20	20
切出风速/(m s^{-1})	40	40
额定功率/MW	400	150
备用系数/%	20	20
弃风成本系数/[\$ \cdot (\text{MW h})^{-1}]	200	200
功率因数	0.95	0.95

表 B5 输电网拓扑参数

Table B5 Transmission grid topology parameters

输电线路	首节点	末节点	电抗	功率上限/MW
1	1	2	0.102 6	300
2	1	3	0.083 9	300
3	1	4	0.099 1	300
4	1	5	0.110 9	300
5	2	5	0.103 2	300
6	3	4	0.102 0	300
7	4	5	0.124 2	300
8	4	8	0.138 9	300
9	5	7	0.146 1	300
10	5	11	0.119 0	300
11	6	7	0.120 8	300
12	7	11	0.110 2	300
13	8	9	0.092 6	300
14	8	12	0.089 9	300
15	8	13	0.099 9	300
16	9	10	0.116 6	300
17	10	11	0.123 4	300
18	11	14	0.135 1	300
19	12	13	0.105 4	300
20	13	14	0.146 9	300

注：电抗为标么值。

表 B6 配电网拓扑参数

Table B6 Distribution grid topology parameters

配电网线路	首节点	末节点	电阻	电抗	功率上限/MW
1	1	2	0.008 8	0.029 9	200
2	1	9	0.016 2	0.054 9	200
3	2	3	0.006 5	0.022 0	200
4	2	6	0.017 1	0.057 8	200
5	3	4	0.013 5	0.045 8	200
6	4	5	0.012 3	0.041 5	200
7	4	9	0.019 1	0.064 7	200
8	5	8	0.007 5	0.025 5	200
9	6	7	0.017 3	0.058 6	200
10	7	8	0.014 4	0.048 9	200

注：电阻、电抗为标么值。

表 B7 火电机组参数

Table B7 Parameters of thermal power unit

参数类型	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅
额定出力/MW	200	250	300	300	350
最小技术出力/MW	40	50	60	60	70
开机成本/(\$ 次 ⁻¹)	600	700	1100	1200	1500
最小启停机时间/h	2	3	4	4	5
爬坡率/(MW min ⁻¹)	10.5	10	8.9	8.4	6.6
购电成本系数 a/[\$ (MW h) ⁻¹]	55.47	44.33	36.91	37.05	31.42
购电成本系数 b/(\$ h ⁻¹)	104.04	115.95	123.09	123.33	129.00

表 B8 CDG 参数

Table B8 CDG parameters

参数类型	CDG
额定出力/MW	100
最小技术出力/MW	20
无功上限/Mvar	75
无功下限/Mvar	0
购电成本系数 a/[\$ (MW h) ⁻¹]	31.51
购电成本系数 b/(\$ h ⁻¹)	74.20

表 B9 电价参数

Table B9 Electricity price parameters

日内小时数/h	输配边界节点电价/[\$ (MW h) ⁻¹]	输电网失负荷成本/[\$ (MW h) ⁻¹]	配电网失负荷成本/[\$ (MW h) ⁻¹]
1—8	57.0	57.0	77.0
9—16、23、24	68.4	68.4	92.0
17—22	79.8	79.8	108.0

表 B10 技改项目参数

Table B10 Parameters of technical transformation project

技改项目	资产归属	首节点	末节点	技改内容	工作日施工费/(\$ d ⁻¹)	节假日施工费/(\$ d ⁻¹)	工期/d
1	输电网	4	5	断路器保护改造	5 000	7 500	4
2	输电网	12	13	加装双摆防舞器	6 000	9 000	5
3	配电网	2	3	绝缘子、刀闸更换	3 000	4 500	3
4	配电网	6	7	绝缘子更换	2 000	3 000	2

附录 C

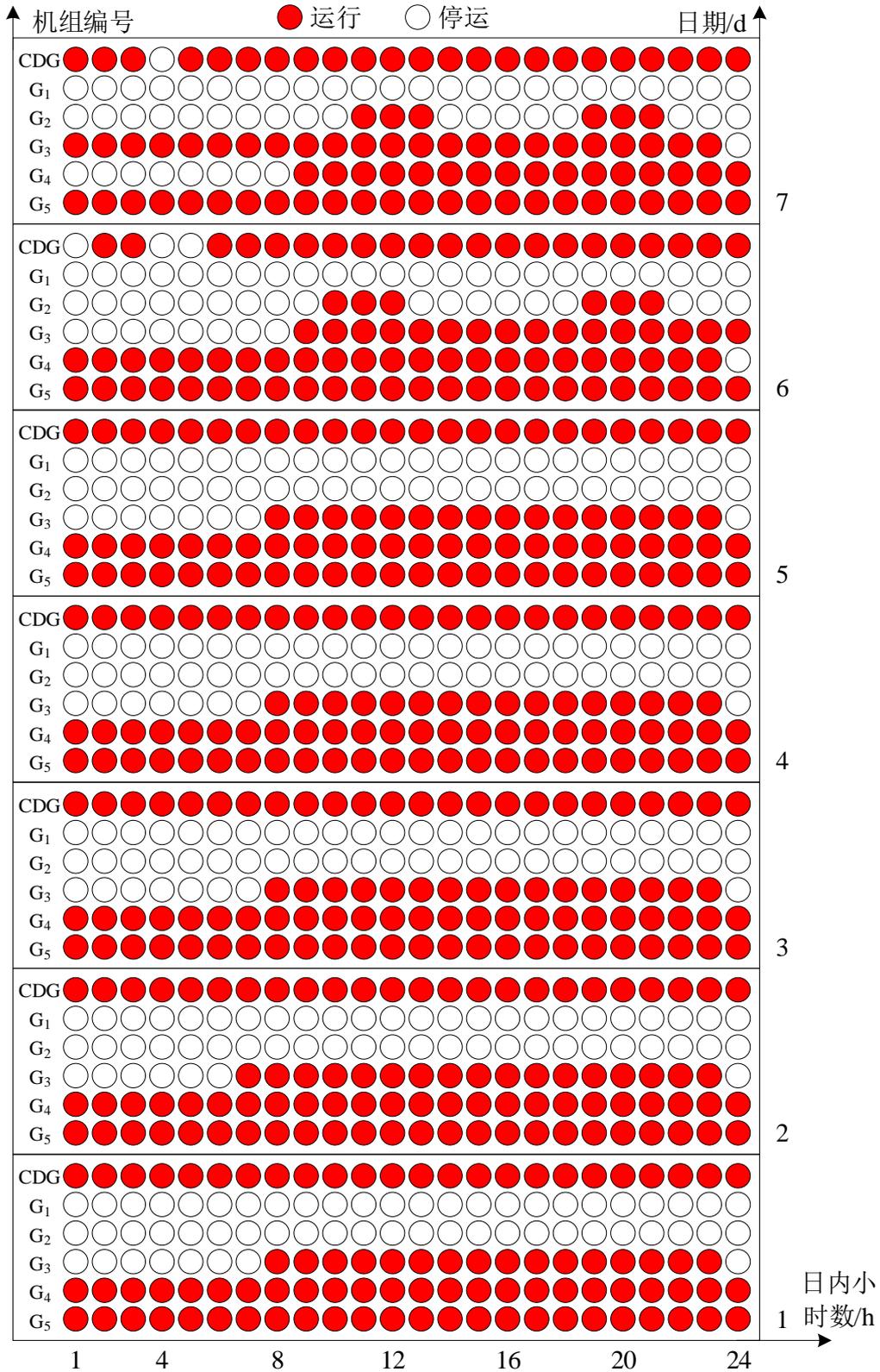
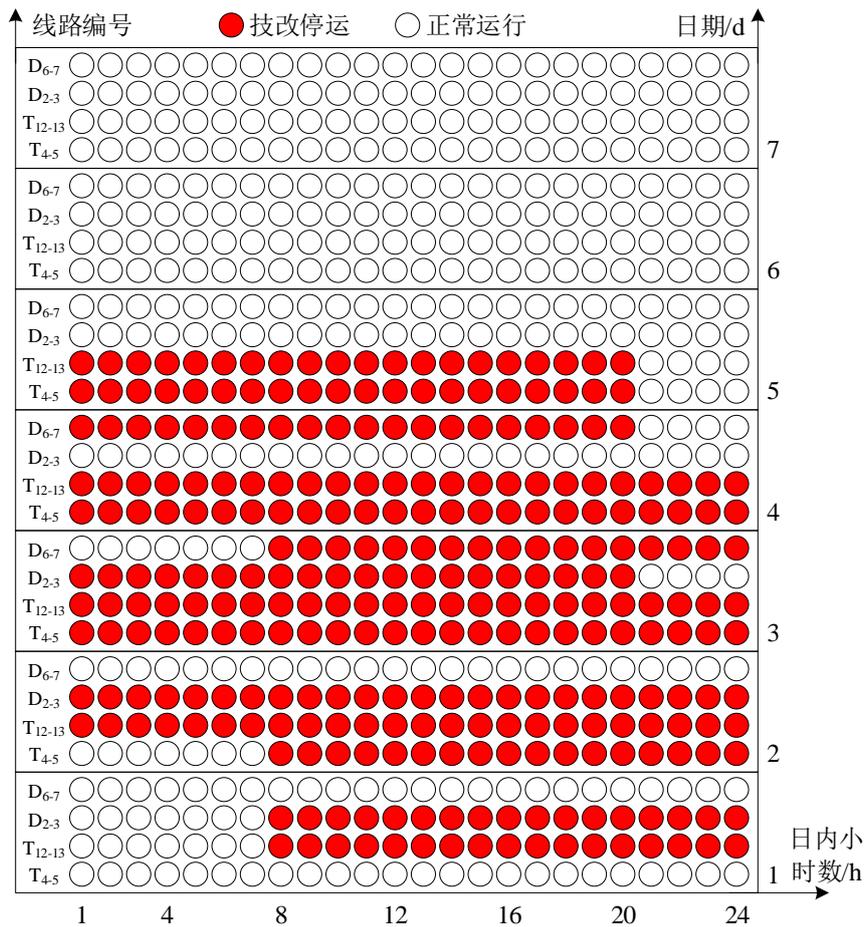


图 C1 机组启停状态分布图

Fig.C1 Distribution diagram of unit startup and shutdown status



注：T₄₋₅表示输电网节点4与节点5之间的线路，D₂₋₃表示配电网节点2与节点3之间的线路，其余同理。

图 C2 技改计划分布图

Fig.C2 Distribution diagram of technical transformation plan

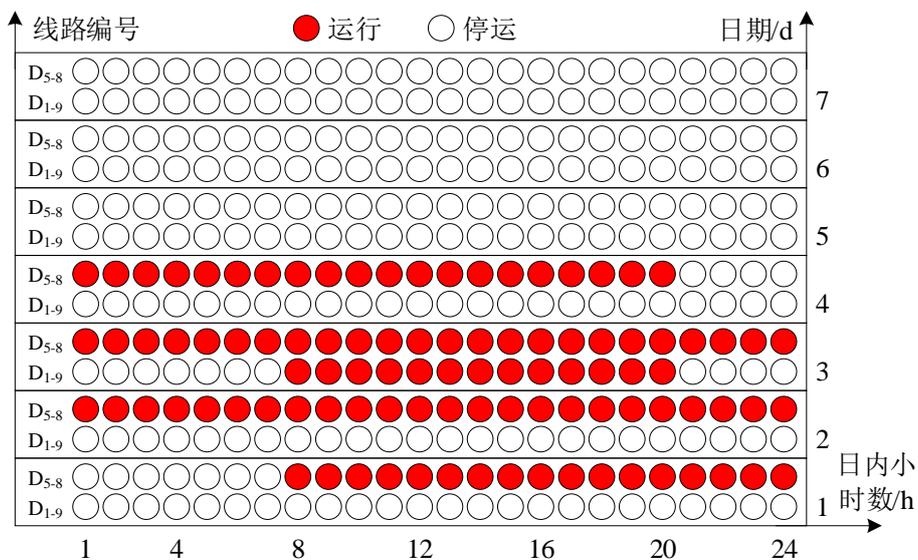


图 C3 联络支路投切状态分布图

Fig.C3 Distribution diagram of connecting branch switching state

表 C1 输配电网弃风量及成本优化结果（集中式优化）

Table C1 Wind curtailment and cost optimization results of transmission and distribution grids(centralized optimization)

输电网		配电网	
弃风量/MW	6.424	弃风量/MW	0
火电机组运行成本/\$	3 225 445.176	CDG 运行成本/\$	403 032.238
火电机组开机成本/\$	11 700	购电成本/\$	531 425.232
售电增益/\$	531 425.232	施工成本/\$	13 000
施工成本/\$	50 000	切负荷成本/\$	0
切负荷成本/\$	0	联络支路投切成本/\$	800
总成本/\$	2 755 719.943	总成本/\$	948 257.470
输配总成本/\$		3 703 977.413	

表 C2 算例 1—3 参数设置

Table C2 Parameter setting of Case 1 to 3

算例	$v_{i,k}$ 初值	$\omega_{j,k}$ 初值	γ	ε_1	ε_2	$\bar{P}_{i,k}^{TB}$ 初值
1	0.25(y+1)	0.5	1.5	0.01	0.001	0
2	0.5	0.25(y+1)	1.5	0.01	0.001	0
3	0.5	0.5	1+0.5y	0.01	0.001	0

注：y = 1, 2, ..., 5, 则每组算例内包含 5 个算例，后同。

表 C3 算例 2 的优化结果

Table C3 Optimization results of Case 2

$\omega_{j,k}$ 初值	迭代次数	迭代时间/s	输配总成本/\$	输配总成本偏差/%
0.5	18	3 014.05	3 699 179.47	-0.129 5
0.75	12	1 960.70	3 699 489.06	-0.121 2
1	12	2 005.75	3 697 477.22	-0.175 5
1.25	9	1 513.87	3 702 784.95	-0.032 2
1.5	10	1 710.87	3 701 087.35	-0.078 0

注：输配总成本偏差是指与表 C1 输配总成本的偏差，后同。

表 C4 算例 3 的优化结果

Table C4 Optimization results of Case 3

γ	迭代次数	迭代时间/s	输配总成本/\$	输配总成本偏差/%
1.5	18	3 014.05	3 699 179.47	-0.129 5
2	9	1 487.99	3 716 916.43	0.349 3
2.5	8	1 322.72	3 712 681.05	0.235 0
3	9	1 497.05	3 721 371.51	0.469 6
3.5	7	1 164.21	3 715 103.88	0.300 4

表 C5 算例 4 和算例 5 参数设置

Table C5 Parameter setting of Case 4 and 5

算例	$v_{i,k}$ 初值	$\omega_{i,k}$ 初值	γ	$-\lg \varepsilon_1$	$-\lg \varepsilon_2$	$\bar{p}_{i,k}^{1B}$ 初值
4	0.5	0.5	1.5	y	3	0
5	0.5	0.5	1.5	2	y	0

表 C6 算例 4 的优化结果

Table C6 Optimization results of Case 4

$-\lg \varepsilon_1$	迭代次数	迭代时间/s	输配总成本/\$	输配总成本偏差/%
1	18	2 974.00	3 705 058.77	0.029 2
2	18	3 014.05	3 699 179.47	-0.129 5
3	14	2 386.34	3 704 460.73	0.013 0
4	16	2 695.84	3 707 730.01	0.101 3
5	34	5 685.44	3 713 921.73	0.268 5

表 C7 算例 5 的优化结果

Table C7 Optimization results of Case 5

$-\lg \varepsilon_2$	迭代次数	迭代时间/s	输配总成本/\$	输配总成本偏差/%
1	9	1 533.41	3 704 428.71	0.012 2
2	16	2 697.42	3 700 614.16	-0.090 8
3	18	3 014.05	3 699 179.47	-0.129 5
4	18	3 057.23	3 699 179.47	-0.129 5
5	18	2 970.18	3 699 179.47	-0.129 5

表 C8 算例 6 的优化结果

Table C8 Optimization results of Case 6

抽样组别	迭代次数	迭代时间/s	输配总成本/\$	输配总成本偏差/%
S ₁	18	3 022.20	3 703 998.47	0.000 6
S ₂	12	1 999.73	3 708 258.48	0.115 6
S ₃	14	2 312.77	3 704 595.92	0.016 7
S ₄	14	2 350.52	3 708 398.25	0.119 4
S ₅	21	3 489.64	3 700 721.99	-0.087 9
S ₆	14	2 301.27	3 706 059.81	0.056 2
S ₇	13	2 135.00	3 706 142.41	0.058 5
S ₈	18	3 014.05	3 699 179.47	-0.129 5