

交流潮流约束的输电线路 投切与机组组合协同优化*

沙强益, 王维庆

(可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心/新疆大学,
新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830047)

摘要: 输电线路投切是利用现有基础设施控制输电阻塞的有效方法之一。在含高比例可再生能源的输电网中, 建立了考虑交流潮流约束的机组组合与输电线路投切协同优化模型。文章以输电网发电成本和弃风光惩罚最小为目标函数, 采用机会约束处理风电、光伏出力不确定性, 针对 IEEE-RTS 24 节点系统建立了仿真算例; 以典型日负荷、风电和光伏预测出力数据为依据, 利用广义 Benders 分解法对模型进行求解, 结果表明: 该模型可有效提高可再生能源消纳比例、降低系统运行成本, 且节点电压安全得到保证, 可用于指导对安全性要求较高的机组组合, 具有一定的实用价值。

关键词: 交流潮流; 机组组合; 输电线路投切; 广义 Benders 分解

中图分类号: TM73 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2020) 06-0102-11

Co-optimization of transmission switching and unit commitment with AC power flow constraints

SHA Qiangyi, WANG Weiqing

(Engineering Research Center of Education Ministry for Renewable Energy Power Generation and
Grid-Control/Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: Transmission switching is one of the effective methods to control transmission congestion by using the existing infrastructure. In order to ensure the security of system node voltage while breaking some lines, a co-optimization model of unit commitment and transmission switching considering AC power flow constraints is proposed in the transmission network with high proportion of renewable energy. On the premise of ensuring security of the transmission network, it can improve the efficiency of the consumption proportion of renewable energy and reduce of system operation cost. In this paper, the transmission network generation cost and the minimum penalty for wind and photovoltaic power are taken as the objective functions, and the chance constraints are used to deal with the uncertainty of wind power and photovoltaic power. A simulation example is established for IEEE-RTS 24 node system. Based on the typical daily load, wind power and photovoltaic predicted power data, the generalized benders de-

* 收稿日期: 2020-01-03

基金项目: 国家自然科学基金 (51667020); 教育部创新团队项目 (IRT-16R63); 新疆自治区重点实验室开放课题 (2018D0400)

作者简介: 沙强益 (1974年生), 男; 研究方向: 电力系统优化、可再生能源并网技术; E-mail: shaqiangyi@163.com

通信作者: 王维庆 (1959年生), 男; 研究方向: 电力系统优化运行与控制、风电机组智能控制; E-mail: wwq59@xju.edu.cn

composition method is used to solve the model. The results show that this model can effectively improve the consumption ratio of renewable energy, reduce the operating cost of the system, and ensure the safety of the node voltage, which can be used to guide the unit commitment with high safety requirements, and has a certain engineering practical value.

Key words: AC power flow; unit commitment; transmission switching; generalized benders decomposition

近年来, 作为提高电力系统运行可控性的一种有效途径, 输电线路投切 (Transmission Switching, TS) 一直受到人们的关注。从传统的观点来看, 输电网拓扑结构在系统正常运行时被认为是静态不可调整的; 然而, 随着智能电网的快速发展, 输电网的运行势必更加灵活和开放, 可将输电线路视为可调度资源, 适时进行开断, 以更加灵活的网络拓扑参与电力系统的运行, 在控制输电网络阻塞的同时, 实现降低运行成本、提高经济效益的目标^[1]。

针对TS优化, 已有许多学者展开了专门的研究。文献[2]通过寻求最佳的网络拓扑结构以提升系统的输电能力和提高系统稳定性; 文献[3]研究了TS在降低短路电流方面的作用; 文献[4]为降低求解规模, 首先基于线性直流最优潮流模型, 采用启发式算法对输电网待优化线路进行排序以快速获得近似最优解, 并对比了交、直流潮流模型对优化结果的影响; 文献[5]提出了一个生成有效不等式和固定变量的割平面算法, 用以提高求解TS优化问题计算效率; 文献[6]提出了考虑N-1安全准则与电压安全的TS优化模型, 通过Benders分解法来求解确定最有效的TS方案, 任何违反电压安全和N-1安全准则的TS都将从候选线路列表中删除。上述文献^[2-6]分别从不同角度研究了TS优化带来的影响, 但是没有考虑可再生能源不确定因素对优化结果的影响。

文献[7]使用机会约束对大规模并网风电进行建模, 在UC方案已知的前提下, 以火电机组的发电成本最小为目标建立了TS优化模型, 实现了经济效益的最大化; 文献[8]针对多变的可再生能源发电和不确定负荷, 通过嵌入基于直流最优潮流的最优TS的点估计方法建模, 以更有效地应用输电网拓扑控制策略; 文献[9]基于次日负荷及风力预测波动数据, 以系统运行成本最小为目标, 提出了考虑N-1的TS优化模型, 并将其分解为经济调度主问题和N-1校验子问题; 为了工程实际应用, 同时提出了加速模型求解的方法。以

上研究^[2-9]均针对基于线路投切来优化电网拓扑结构进而解决线路过载、电压越限、系统阻塞等问题, 但其所提供的解决方案均假设机组组合 (Unit Commitment, UC) 方案为已知, 对于同时考虑多阶段UC和TS的混合整数优化问题, 其复杂度将大大增加。

文献[10]的研究表明TS可以为UC提供显著的经济效益, 但96总线系统的计算时间长达20 h, 虽然经过分解, 问题能够在合理的时间内得到解决, 但是由于所采用的分解方法只是一种分步求解策略, 当系统规模很大时, 计算时间仍然很长; 在文献[11]中, TS被认为是解决UC后消除线路拥塞和缓解功率失配的措施, 为了降低计算复杂度, 只有少数预先确定的线路可以切换, 所以这种方法不够灵活; 文献[12]通过提供更为严格的UC和TS约束条件以缩短模型求解时间, 使计算效率在一定程度上得到了提升; 文献[13]将输电网络的拓扑控制作为一种拥塞管理资源进行研究, 对机组组合和24 h传输切换进行了联合优化, 并评价了拓扑控制对欧洲电网的影响。尽管这些研究^[10-13]试图将UC与TS结合起来, 但均采用线性的直流潮流模型, 不考虑节点电压和无功功率, 可能导致不实用和不安全的运行策略。例如: 在直流潮流模型基础上得到的运行策略, 可能导致系统在一些关键的母线上存在欠压或过压的风险。因此, UC和TS协同优化模型采用真正反映电网运行物理规律的交流潮流模型, 是在不确定性条件下实现更好运行策略的关键一步。

针对上述研究现状, 本文基于对次日风电、光伏出力和负荷的预测, 建立了考虑交流潮流的UC与TS协同优化模型, 利用广义Benders分解法将该优化问题分解为主问题和交流潮流校验子问题, 主问题针对TS和UC同时进行优化, 子问题负责校验优化方案是否满足交流潮流约束, 主子问题交替迭代求解以确定次日的输电网络拓扑方案和机组调度策略, 并选择修改的IEEE-RTS 24节点系统进行仿真计算和分析。

1 优化模型

1.1 目标函数

以次日的系统运行成本 (包含火电机组燃料成本、启动成本、旋转备用成本和弃风、光惩罚成本等) 最小为优化目标, 描述如下:

$$\min f = \sum_{i=1}^G \sum_{t=1}^T (C_{i,t}^F + C_{i,t}^S + C_{i,t}^R) + \sum_{j=1}^W \sum_{t=1}^T C_{j,t}^W + \sum_{k=1}^V \sum_{t=1}^T C_{k,t}^V \quad (1)$$

式中, G 为火电机组数量; W 为风电场数量; V 为光伏电站数量; T 为调度周期, 默认为 24 h, 时间间隔 1 h; $C_{i,t}^F$ 为火电机组燃料成本; $C_{i,t}^S$ 为火电机组启动成本; $C_{i,t}^R$ 为旋转备用成本; $C_{j,t}^W$ 为弃风惩罚; $C_{k,t}^V$ 为弃光惩罚。

1.2 主要约束条件

模型主要考虑以下约束条件:

$$S_{i,t}^{\text{start}} - S_{i,t}^{\text{stop}} = S_{i,t}^{\text{on}} - S_{i,t-1}^{\text{on}}, \forall t \in T, i \in G \quad (2)$$

$$S_{i,t}^{\text{start}} + S_{i,t}^{\text{stop}} \leq 1, \forall t \in T, i \in G \quad (3)$$

$$\sum_{\Delta t=0}^{T_i^{\text{on}}-1} S_{i,t+\Delta t}^{\text{on}} \geq T_i^{\text{on}} (S_{i,t}^{\text{on}} - S_{i,t-1}^{\text{on}}), \quad \forall t \in T, i \in G \quad (4)$$

$$\sum_{\Delta t=0}^{T_i^{\text{off}}-1} (1 - S_{i,t+\Delta t}^{\text{on}}) \geq T_i^{\text{off}} (S_{i,t-1}^{\text{on}} - S_{i,t}^{\text{on}}), \quad \forall t \in T, i \in G \quad (5)$$

式中, $S_{i,t}^{\text{start}}$ 表示机组是否处于启动过程; $S_{i,t}^{\text{stop}}$ 表示机组是否处于停机过程; $S_{i,t}^{\text{on}}$ 为机组开、停状态, 1 表示开机, 0 表示关机; T_i^{on} 为最小运行时间; T_i^{off} 为最小停机时间; 式 (2) 通过开、关机状态确定机组是否处于启动或停机过程; 式 (3) 表示任意一台机组在某一时刻只能处于启动或停机一种状态; 式 (4) 和 (5) 为最小开、停机时间约束。

本文用 Ω 表征系统中风电和光伏功率预测误差之和, 并将 Ω 按参与因子分配至系统各自动发电控制 (automatic generation control, AGC) 机组。各 AGC 机组输出功率可表示为机会约束表达式 (6) - (10)。

$$\sum_{i=1}^G \alpha_{i,t} = 1, \alpha_{i,t} \geq 0, \quad \forall i \in G, t \in T \quad (6)$$

$$\Pr(P_{i,t} - \Omega_i \alpha_{i,t} \leq P_i^{\text{max}}) \leq 1 - \varepsilon_i, \quad \forall t \in T, i \in G \quad (7)$$

$$\Pr(P_{i,t} - \Omega_i \alpha_{i,t} \geq P_i^{\text{min}}) \leq 1 - \varepsilon_i, \quad \forall t \in T, i \in G \quad (8)$$

$$\Pr(\Omega_i \alpha_{i,t} \leq P_i^{\text{up}}) \leq 1 - \varepsilon_i, \quad \forall t \in T, i \in G \quad (9)$$

$$\Pr(\Omega_i \alpha_{i,t} \geq P_i^{\text{down}}) \leq 1 - \varepsilon_i, \quad \forall t \in T, i \in G \quad (10)$$

式中: $\alpha_{i,t}$ 为 AGC 机组的参与因子; $\Pr(\cdot)$ 为机会约束, 表示事件发生的概率; $P_{i,t}$ 为机组有功出力; P_i^{max} 为机组最大有功出力; $1 - \varepsilon_i$ 为机会约束成立的概率下限值, 即置信水平; P_i^{min} 为机组最小有功出力; P_i^{up} 为有功出力上升速率限制; P_i^{down} 为有功出力下降速率限制; 式 (6) 为 AGC 机组参与因子之和约束, 式 (7) 和 (8) 为 AGC 机组输出功率范围机会约束, 式 (9) 和 (10) 为 AGC 机组最大备用容量机会约束。

$$\Pr(-z_{(b,b'),t} P_{(b,b'),t}^{\text{max}}) \leq P_{(b,b'),t} \leq z_{(b,b'),t} P_{(b,b'),t}^{\text{max}} > 1 - \varepsilon_i, \quad \forall b, b' \in B, t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{b=1}^B [P_{b,t}^G + (P_{b,t}^W - P_{b,t}^{\text{SW}}) + (P_{b,t}^P - P_{b,t}^{\text{SP}}) - P_{b,t}^D + \sum_{(b,b') \in L_{(b)}} P_{(b,b'),t}] = 0, \quad \forall t \in T \quad (12)$$

$$X_{b,b'} (\theta_{b,t} - \theta_{b',t}) - P_{(b,b'),t} + (1 - z_{(b,b'),t}) M \geq 0, \quad \forall b, b' \in B, t \in T \quad (13)$$

$$X_{b,b'} (\theta_{b,t} - \theta_{b',t}) - P_{(b,b'),t} - (1 - z_{(b,b'),t}) M \leq 0, \quad \forall b, b' \in B, t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{(b,b') \in L} (1 - z_{(b,b'),t}) \leq H, \quad \forall b, b' \in B, t \in T \quad (15)$$

式中: $P_{(b,b'),t}$ 为线路有功功率; $P_{(b,b'),t}^{\text{max}}$ 为线路最大有功功率; $z_{(b,b'),t}$ 为线路是否断开标志; $P_{b,t}^G$ 为火电机组有功功率; $P_{b,t}^W$ 为风电输出功率; $P_{b,t}^V$ 为光伏输出功率; $P_{b,t}^D$ 为负载有功功率; $P_{b,t}^{\text{SW}}$ 为弃风功率; $P_{b,t}^{\text{SP}}$ 为弃光功率; $L_{(b)}$ 为接至节点 b 的线路集合; $X_{b,b'}$ 为对应于直流潮流线路 (b, b') 的导纳; $\theta_{b,t}$ 为节点 b 的电压相角。式 (11) 为支路潮流机会约束, 式 (12) 为系统有功功率平衡约束, 式 (13) (14) 为支路潮流约束, M 为一较大数值, 式 (15) 表示同一时刻 t 输电线路开断数量约束。

$$P_{b,t}^G + P_{b,t}^W + P_{b,t}^V - P_{b,t}^D = \sum_{b'=b} V_{b,t} V_{b',t} (M_{bb'} \cos \theta_{bb',t} + N_{bb'} \sin \theta_{bb',t}), \quad \forall t \in T, \forall b, b' \in B \quad (16)$$

$$Q_{b,t}^G + Q_{b,t}^W + Q_{b,t}^V - Q_{b,t}^D = \sum_{b' \in b} V_{b,t} V_{b',t} (M_{bb'} \sin \theta_{bb',t} - N_{bb'} \cos \theta_{bb',t}), \quad \forall t \in T, \forall b, b' \in B \quad (17)$$

$$V_b^{\min} \leq V_{b,t} \leq V_b^{\max}, \quad \forall b \in B, t \in T \quad (18)$$

$$Q_i^{\min} \leq Q_{i,t} \leq Q_i^{\max}, \quad \forall i \in G, t \in T \quad (19)$$

$$(P_{(b,b'),t})^2 + (Q_{(b,b'),t})^2 \leq (Y_{(b,b'),t})^2, \quad \forall t \in T, \forall b, b' \in B \quad (20)$$

式(16) - (20)为交流潮流约束。式中: $Q_{b,t}^G$ 为火电机组无功功率; $Q_{b,t}^W$ 为风电无功功率; $Q_{b,t}^V$ 为光伏无功功率; $Q_{b,t}^D$ 为负载无功功率; $V_{b,t}$ 为节点电压幅值; $M_{bb'}$ 为节点导纳矩阵实部; $N_{bb'}$ 为节点导纳矩阵虚部; V_b^{\max} 为节点电压幅值上限; V_b^{\min} 为节点电压幅值下限; $Q_{i,t}$ 为火电机组无功出力; Q_i^{\max} 为火电机组无功功率上限; Q_i^{\min} 为火电机组无功功率上下限; $Q_{(b,b'),t}$ 为线路无功功率; $Y_{(b,b'),t}$ 为线路视在功率。

2 模型求解

2.1 广义 Benders 分解算法

第1节建立的模型是一个非凸混合整数非线性规划问题,属于NP难问题。其整数变量、机会约束式(7) - (11)的非凸性及交流潮流约束的强非线性导致模型寻优困难,用商业求解器求解效率很低,故考虑结构简单、收敛性较好的广义 Benders 分解法^[14]作为求解模型的算法,机会约束参照文献[17]中凸化处理并进行变换求解。文中将模型分解为如下的主问题和子问题,式(21)为主问题,式(22)为交流校验子问题,为简便起见约束条件均用公式编号代替。

$$\begin{cases} \text{obj. 式(1)} \\ \text{s.t. 式(2)-(15)} \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} \text{obj. min } \sum_{b=1}^B (\Delta P_{b,t}^+ + \Delta P_{b,t}^- + \Delta Q_{b,t}^+ + \Delta Q_{b,t}^-) \\ \text{s.t.} \\ P_b(\bullet) = P_{b,t}^G + P_{b,t}^W + P_{b,t}^V - P_{b,t}^D + \Delta P_{b,t}^+ - \Delta P_{b,t}^- \\ Q_b(\bullet) = Q_{b,t}^G + Q_{b,t}^W + Q_{b,t}^V - Q_{b,t}^D + \Delta Q_{b,t}^+ - \Delta Q_{b,t}^- \\ P_{i,t} = P_{i,t}^{(k)} \\ S_{i,t} = S_{i,t}^{o(k)} \\ \text{式(18),(19),(20)} \\ \Delta P_{b,t}^+ \geq 0, \Delta P_{b,t}^- \geq 0, \Delta Q_{b,t}^+ \geq 0, \Delta Q_{b,t}^- \geq 0 \end{cases} \quad (22)$$

式中: $P_b(\bullet)$ 和 $Q_b(\bullet)$ 为交流潮流方程的简写形式;

$P_{i,t}^{(k)}$ 和 $S_{i,t}^{o(k)}$ 为主问题第 K 次迭代的解; $\Delta P_{b,t}^+$ 、 $\Delta P_{b,t}^-$ 、 $\Delta Q_{b,t}^+$ 、 $\Delta Q_{b,t}^-$ 为节点 b 引入的有功和无功松弛变量; 由于主问题仅考虑直流潮流,并未考虑无功及节点电压等约束,不能确保无功功率平衡及节点电压在限值范围内,故需将主问题求解结果带入交流校验子问题(22)中进行校验。为加快原问题的计算效率,式(22)也按时段进一步分解为 T 个规模更小、可独立求解的子问题。当时段 t 的目标函数值小于 10^{-4} ,则认为主问题的解满足 t 时段的交流潮流约束,反之则认为不满足。对于不满足交流潮流约束的子问题,需将越限信息以 Benders 割的形式(23)反馈给主问题,以便对相应时段主问题的解进行修正。

$$\begin{aligned} & \sum_{b=1}^B (\Delta P_{b,t}^+ + \Delta P_{b,t}^- + \Delta Q_{b,t}^+ + \Delta Q_{b,t}^-)^{(k)} \\ & + \sum_{i=1}^G \lambda_{i,t}^{1\text{Fea}} (P_{i,t} - P_{i,t}^{(k)}) \\ & + \sum_{i=1}^G \lambda_{i,t}^{2\text{Fea}} (S_{i,t}^o - S_{i,t}^{o(k)}) \leq 0 \end{aligned} \quad (23)$$

式中, $\lambda_{i,t}^{1\text{Fea}}$ 、 $\lambda_{i,t}^{2\text{Fea}}$ 分别为式(22)中带有 k 标记的等式约束的拉格朗日乘子^[16]。

2.2 算法流程

本文模型求解的程序流程图见图1,主要算法步骤如下:

1) 初始化算法参数;

2) 求解主问题(21),得到基于直流潮流的次日 24 hUC 和 TS 优化方案及风电光伏实际有功出力等;

3) 将步骤2得到的优化结果代入子问题式(22)中,按调度时间间隔对子问题进行交流潮流校验,按式(23)产生 Benders 可行割;

4) 判断调度周期内所有时段交流潮流是否均满足预设阈值,如有时段不满足,则加入 Benders 可行割集至主问题并重新进行迭代求解,否则程序结束并输出优化结果。

3 算例及分析

3.1 算例选择

选取发输电可靠性测试系统 IEEE RTS-24 系统进行测试,此系统装机总容量 3 405 MW,因本文不涉及水火联调,故系统中 6 台水电机组更换为相同容量的火电机组。为避免 TS 优化时出现孤立节点,新增一条参数与原线路相同的输电线路 7-8。将原系统中容量为 500 MW 的输电线路分别调整为 250 MW。在母线 3、13、16 上分别接入额定容量

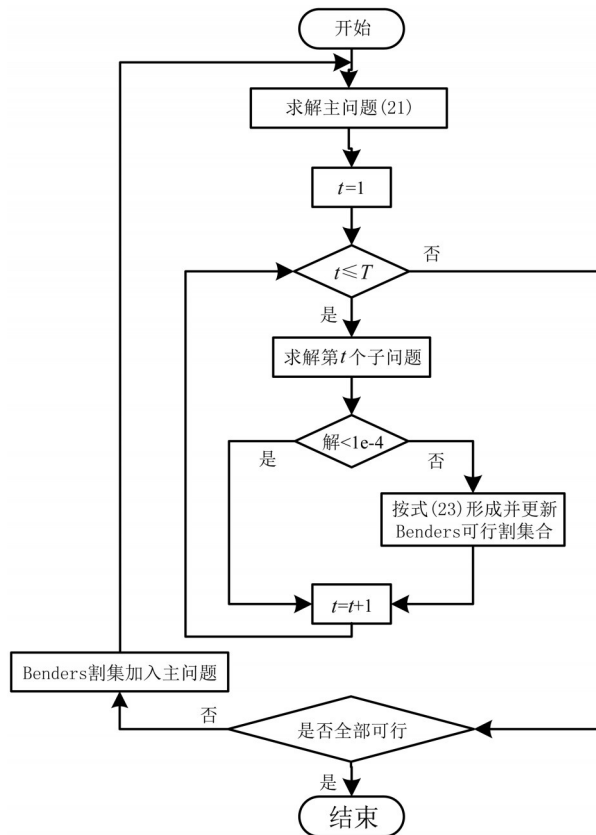


图1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the proposed algorithm

为 260 MW 的风电场, 在母线 8、18、23 上分别接入额定容量为 400 MW 的光伏电站。弃风电和光伏惩罚成本 40 \$/MW·h。核电机组按 G 模式“15—1—7—1”和最大 50% 的深度参与电网调峰运行^[17]。机会约束置信水平 $1 - \varepsilon_i$ 和 $1 - \varepsilon_i$ 相等, 取 0.95。软件开发工具选择 Juno for JuliaPro, 优化求解器选择 CPLEX, 所有计算在一台 Intel Core i5 2.9GHz 的计算机上完成。

3.2 优化结果对比分析

3.2.1 开停机对比分析 为了更全面地反映 TS 对优化结果的影响, 考虑按允许断开线路数量为总线路数量的 5% 考虑, 设置了以下三种情形并进行计算比较, 情形 1 为最大允许断开线路数量为 0 (即 TS 不参与 UC 优化, 视为优化前); 情形 2 为最大允许断开线路数量为 1; 情形 3 为最大允许断开线路数量为 2 (情形 2 和情形 3 表示 TS 协同 UC 优化, 视为优化后)。整个调度周期 24 h 内, 优化前后常规发电机组开停机结果如图 2~4 所示。

从图中可见, 其中两台核电机组 22、23 和 5 台火电机组 9、14、20、21 和 30 在所有时段开机以提供基荷外, 其它火电机组根据负荷及风电光伏出力的变化而开停。其中情形 1 总开机小时数

366, 情形 2 总开机小时数 351, 较优化前降低 4.1%, 情形 3 总开机小时数 345, 较优化前降低 5.7%。开停机变化主要体现在 3#、4# 机组, 情形 2 时分别减少 7 h 和 5 h, 情形 3 时分别减少 5 h 和 4 h, 说明在考虑 TS 协同 UC 优化后, 参与启停调峰的一些容量较小的火电机组数量有效减少。

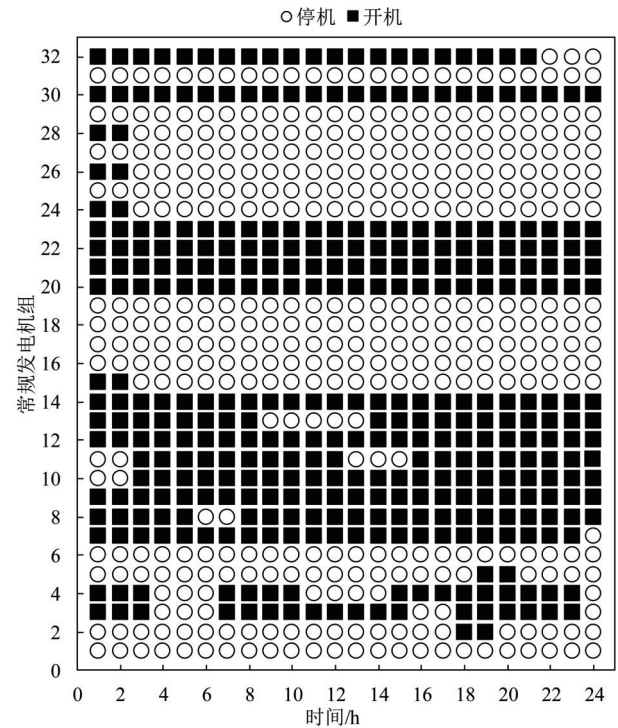


图2 情形1机组开/停状态

Fig. 2 Unit on/off status of the case 1

整个调度周期 24 h 内, 情形 2 和 3 下 TS 优化结果如图 5~6 所示, 从图中可见, 情形 1 断开线路涉及 9-11、11-14、15-16、16-19、21-22 这 5 条线路, 情形 2 断开线路主要涉及 1-3、1-5、3-9、9-11、10-11、11-14、15-16、16-19 这 8 条线路。

3.2.2 经济指标对比分析 目标值、燃料成本等经济指标变化情况如表 1 所示, 为对比交流潮流对输电网络结构优化的影响, 表中同时给出了仅考虑直流潮流的 UC 和 TS 协同优化结果。从表 1 中可以看出, 情形 1 (优化前) 即不允许断开线路时, 系统次日目标值 (运行成本) 为 946 886.8 \$, 情形 2 时 (优化后) UC 和 TS 结果见图 3 和图 5。在此基础上优化得到系统次日目标值为 918 570.7 \$, 较情形 1 下降 2.99%, 情形 2 弃风光功率较情形 1 减少 70.2%。情形 3 (优化后) 时 UC 和 TS 结果见图 4 和图 6。在此基础上优化得到系统次日目标值为 915 165.7 \$, 较情形 1 下降 3.35%, 情形 3 弃风光功率较情形 1 减少 80.1%。

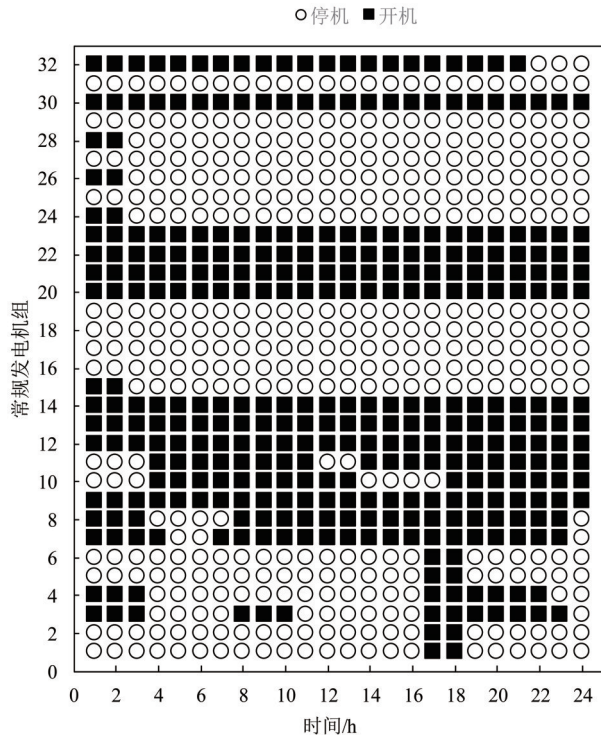


图3 情形2机组开/停状态

Fig. 3 Unit on/off status of the case 2

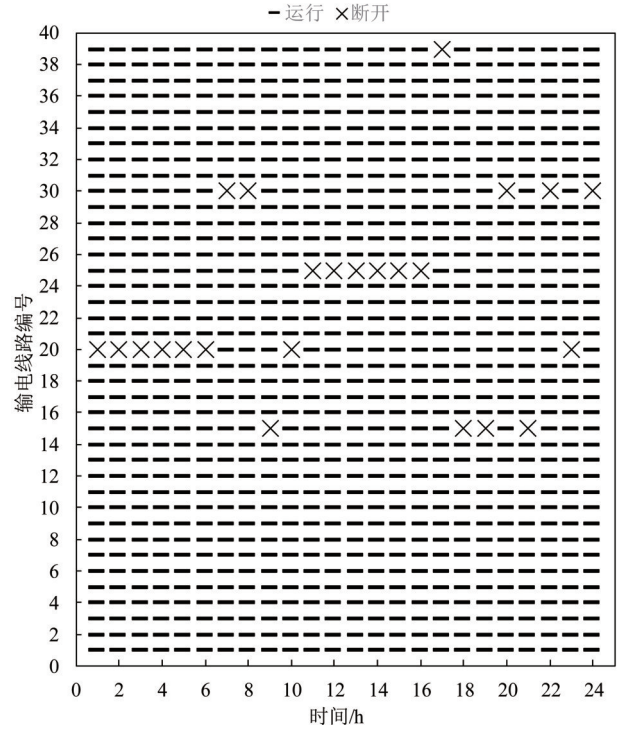


图5 情形2线路投/切状态

Fig. 5 Line on/off status of the case 2

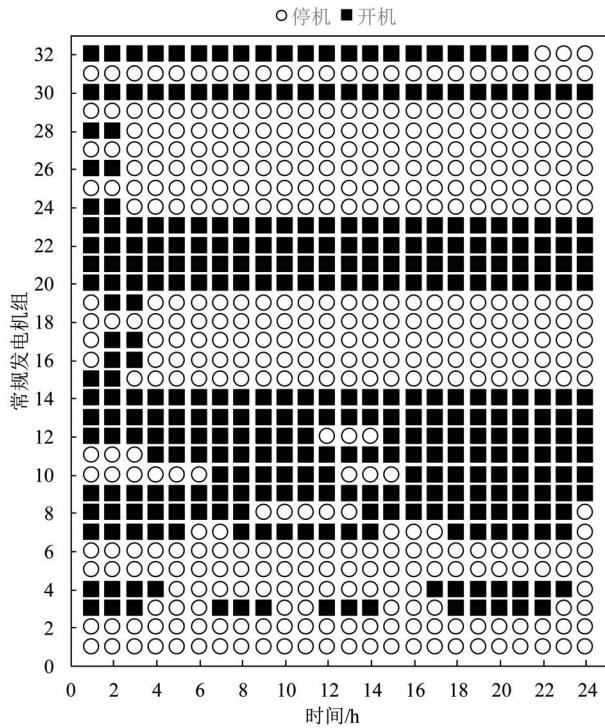


图4 情形3机组开/停状态

Fig. 4 Unit on/off status of the case 3

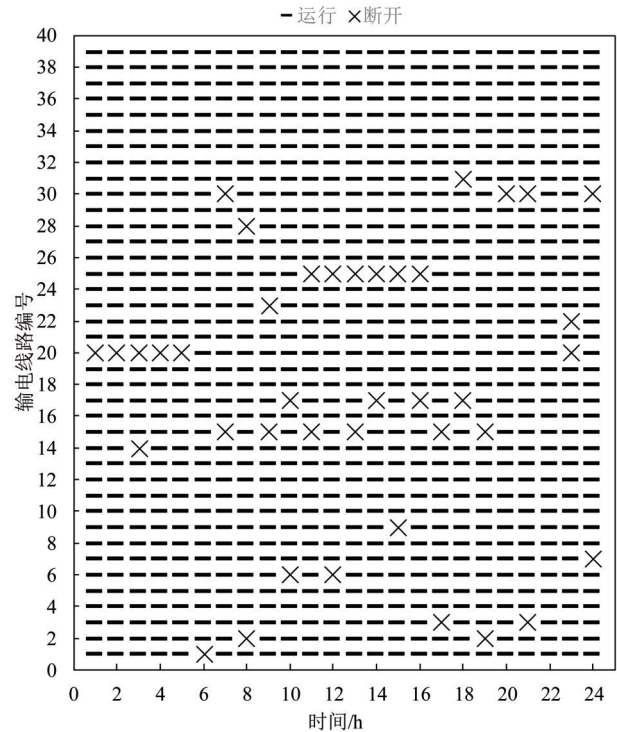


图6 情形3线路投/切状态

Fig. 6 Line on/off status of the case 3

图7给出了整个调度周期24 h内每小时目标值优化前后对比情况, 图8是整个调度周期24 h内每小时风电光伏消纳及弃风光功率优化前后对比情况, 由图中可见, 考虑TS优化后, 弃风功率于1、

2、3、4时, 弃光功率于12、13、14、15、16时明显下降, 整个调度周期内情形2风电光伏消纳比例较优化前上升4.7%, 情形3风电消纳比例较优化前上升5.4%。风电光伏消纳比例的提高, 一方面

表 1 UC与TS协同优化结果
Table 1 Object value of different cases

断线数量	优化方法	弃风/光/(MW·h)	燃料成本/\$	目标值/\$	目标值下降/%
0		530.1	842 477.6	946 886.8	—
1	本文	157.9	829 052.5	918 570.7	2.99
2	方法	105.4	827 639.4	915 165.7	3.35
0	考虑	400.2	837 735.2	937 115.5	—
1	直流	140.3	823 631.9	912 260.9	2.65
2	潮流	102.1	823 506.2	910 663.1	2.82

降低常规发电机组的出力，进而降低燃料成本；光惩罚成本。另一方面，弃风光功率的降低，有效减少了弃风

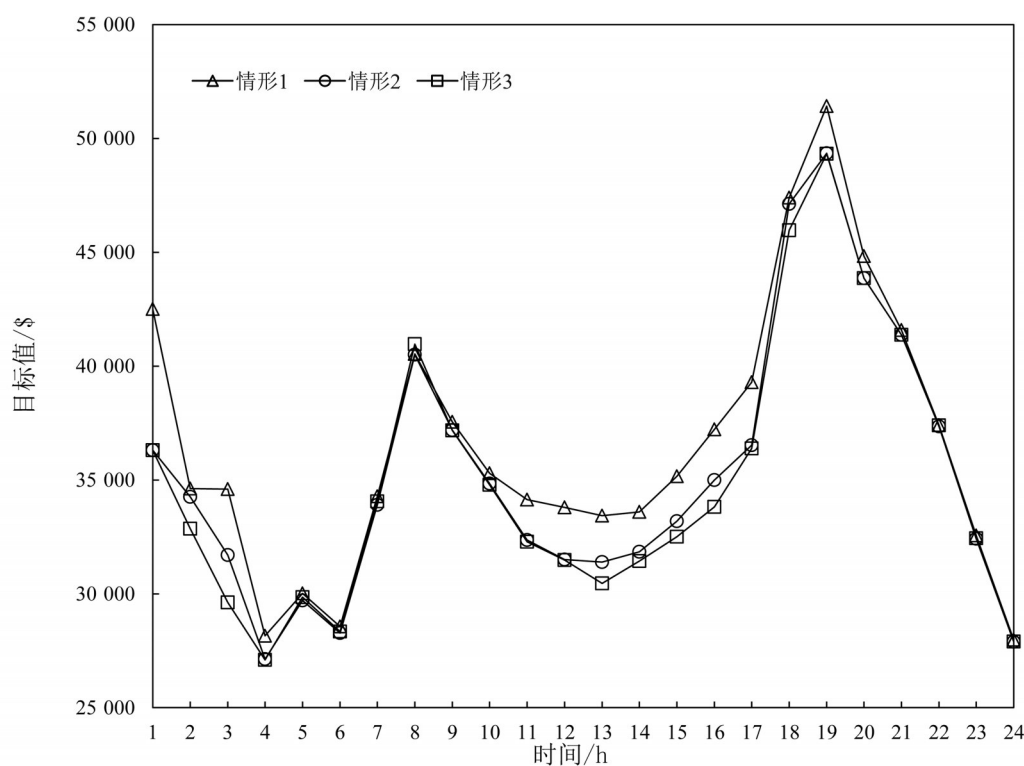


图 7 优化前后每小时目标值

Fig. 7 Target value per hour before and after optimization

表 2 给出了三种情形下整个调度周期 24 h 出力变化超过 20% 的机组出力及变化情况，其中出力均为标么值。可见在按照图 5 和图 6 所示方案断开输电线路之后，边际成本较高的机组 2、4、15、24、26 和 28 的出力均有较大水平降低，成本较低的机组 13 的出力有明显提高。

从上述分析可见，在满足系统潮流约束的前提下，输电网拓扑结构的改变导致系统潮流分布变化，一方面增加了风电光伏消纳比例，另外在提高发电成本低机组出力的同时降低成本高机组

的出力。但通过表 1 可见，情形 3 与情形 2 相比，次日运行成本下降非常小，仅下降了 0.37%，这表明不断增加允许断开输电线路数量对降低系统运行成本效果不明显。

3.3 交流潮流对优化结果影响

3.3.1 负载率均衡度 考虑到负载率只能反映电网中某一条输电线路的运行状态，不能反映电网的整体负荷水平。故本文根据标准差定义，采用全部输电线路负载率均衡度进行对比分析 [15]。为研究交流潮流对负载率均衡度影响，选

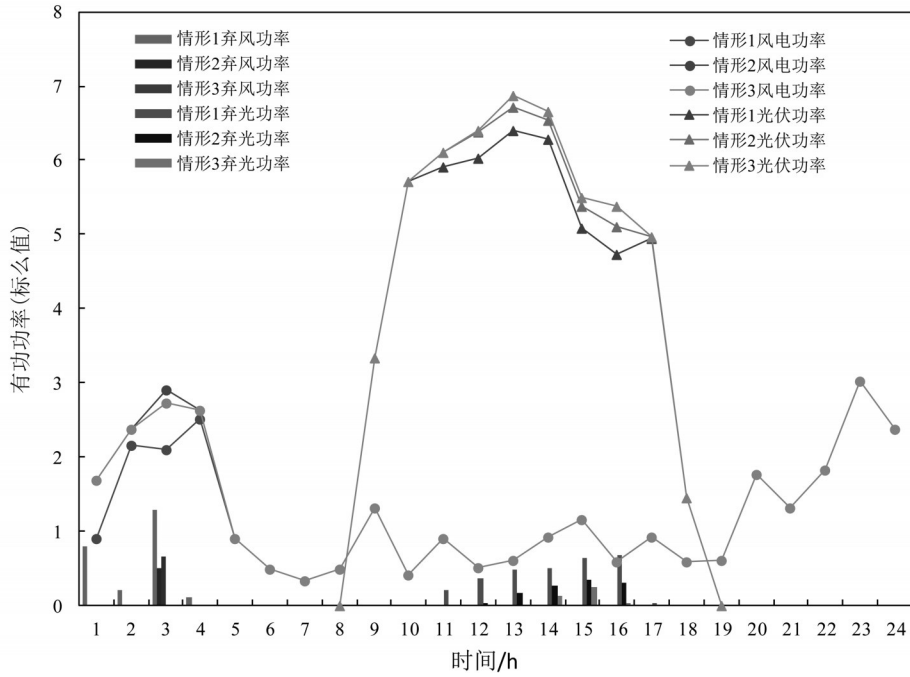


图8 优化前后每小时风光消纳及弃风光功率

Fig. 8 Hourly wind/photovoltaic power absorption and abandonment before and after optimization

表2 出力变化较大机组情况

Table 2 Output results of generators with great output changes

发电机	情形1出力/ (MW·h)	情形2出力/ (MW·h)	情形2变化/%	情形3出力/ (MW·h)	情形3变化/%	边际成本/ ($\$/(\text{MW}\cdot\text{h})^{-1}$)
2	40	27	-31.7	0	—	52.0
4	1 043	637	-38.9	749	-28.2	23.2
13	2 936	4 009	36.5	4 085	39.1	20.7
15	20.7	10.8	-47.8	10.8	-47.8	65.3
24	71	52	-27.1	52	-27.1	46.5
26	71	52	-27.1	52	-27.1	46.4
28	74	52	-29.4	52	-29.4	45.9

择情形2分别基于直流潮流和交流潮流对模型进行求解并计算负载率均衡度,如图9所示。从图中可以看出,在整个调度周期内,基于交流潮流时各时段负载率均衡度均小于基于直流潮流时的值,有利于输电网的安全运行,间接提高了输电网运行的安全性。

3.3.2 在线机组最大容量 为研究交流潮流对在线机组最大容量 (online generation capacity, OGC) 的影响,选择情形2分别基于直流潮流和交流潮流对模型进行求解并计算 OGC,如图10所示。从图中可见,在整个调度周期内,基于交流潮流时各时段 OGC 均大于等于基于直流潮流时的值,说明考虑交流潮流时调用了更大容量的机组或是增加

了开机数量,OGC的增加使得输电网调节能力更强,更加有利于应对一些突发事件。

3.3.3 开停机及节点电压 为研究交流潮流对机组开停机及节点电压影响,选定情形3,主问题第一次求解后的机组组合结果如图11所示。然后校验交流潮流子问题是否满足,结果显示第11、13、15、16时段母线1、2、4、5、6共计出现19次节点电压越限,所有电压越限均为节点电压小于最低限值,如图12所示,最低电压0.89(标么值)发生在13时母线2。分析认为,节点电压过低通常是因为无功供给不足,这说明需要在这些交流潮流不可行的时段增加开机数量,以增加无功的供给。迭代结束后得到的机组组合结果如图4所示。

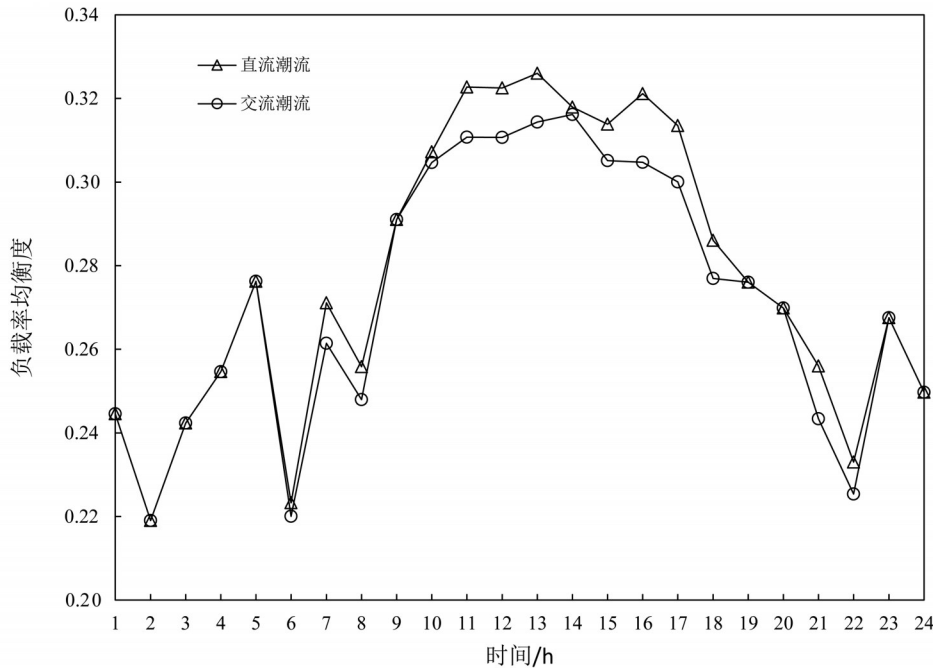


图9 负载率均衡度对比

Fig. 9 Comparison of load rate balance degree

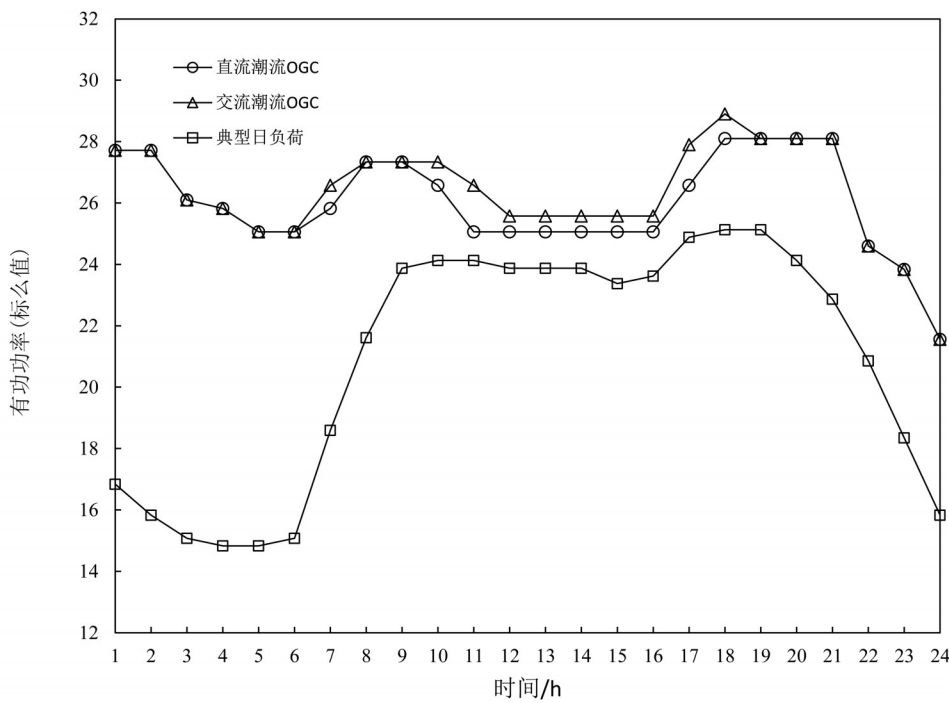


图10 在线机组最大容量对比

Fig. 10 Comparison of online generation capacity

对比图 11 和图 4 可以发现，主要变化在 11 时增开 7# 机组；12 时开 3#、7# 的同时停 12# 机组；13 时开 3#、7# 的同时停 10# 和 12# 机组；14 时开 3#、7#、8# 的同时停 10# 和 12# 机组；15 时开 8# 停 10# 机组；16 时开 8# 机组；2 时和 3 时开 16#、17#、19# 机组。由于增开的这些机组补充了无功，使得

越限节点的电压回到了限值范围内。由此可见，考虑交流潮流约束的 UC，能够在制定机组启停和线路断开计划时就综合考虑无功及节点电压对系统发电能力和线路潮流的影响，通过预先协调调整机组的启停状态和出力达到确保节点电压安全的目的。

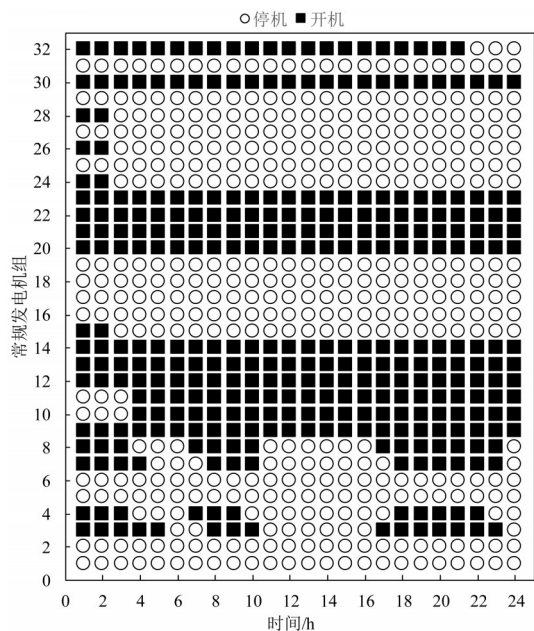


图11 情形3第一次迭代UC结果

Fig. 11 First unit commitment result of case 3

4 结 语

对含风电和光伏接入的输电网, 本文基于对次日负荷及风光出力的预测, 建立了考虑交流潮流约束的UC与TS协同优化模型, 通过对算例的仿真计算及分析, 得到如下结论:

1) 与不考虑TS的UC模型相比, 本文提出的UC和TS的协同优化模型可以通过断开部分线路以增加风电光伏消纳比例, 降低系统运行成本;

2) 基于交流潮流的UC和TS优化模型, 虽然弃风光功率和系统运行成本略高于基于直流潮流的优化模型, 但是在在线机组最大容量、负载率均衡度和系统节点电压等安全指标均得到明显提高, 提升了输电网运行的安全性。输电线路投切优化对系统的影响体现在多方面, 未来的研究将考虑断开线路时对系统正常状态及事故状态下安全性和可靠性的影响, 并考虑N-1安全约束等因素。

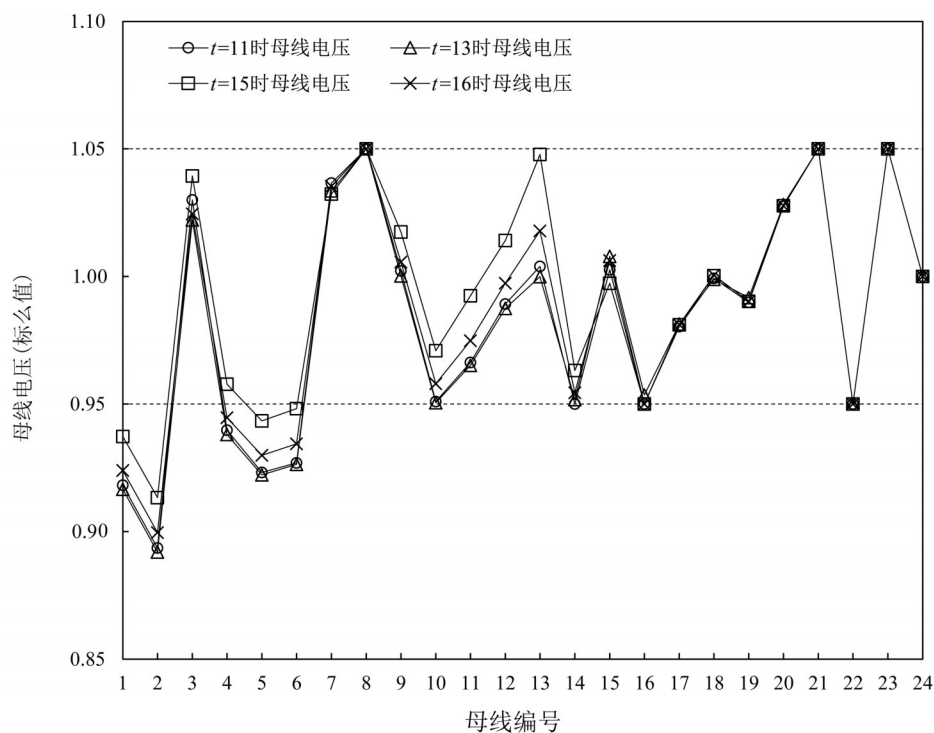


图12 情形3第一次迭代节点电压

Fig. 12 First iteration node voltage of case 3

参考文献:

[1] 杨知方, 钟海旺, 夏清, 等. 输电网结构优化问题研究综述和展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 426-434.
YANG Z F, ZHONG H W, XIA Q, et al. Review and

prospect of transmission topology optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 426-434.
[2] WANG L, CHIANG H D. Toward online bus-bar splitting for increasing load margins to static stability limit

- [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3715-3725.
- [3] YANG Z, ZHONG H, XIA Q, et al. Optimal transmission switching with short-circuit current limitation constraints [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1278-1288.
- [4] SOROUSH M, FULLER J D. Accuracies of optimal transmission switching heuristics based on DCOPF and ACOPF [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 924-932.
- [5] OSTROWSKI J, WANG J, LIU C. Transmission switching with connectivity ensuring constraints [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 2621-2627.
- [6] KHANABADI M, GHASMI H, DOOSTIZADEH M. Optimal transmission switching considering voltage security and N-1 contingency analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 542-550.
- [7] QIU F, WANG J. Chance-constrained transmission switching with guaranteed wind power utilization [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1270-1278.
- [8] DEHGHANIAN P, KEZUNOVIC M. Probabilistic decision making for the bulk power system optimal topology control [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(4): 2071-2081.
- [9] 赵博石, 胡泽春, 宋永华. 考虑 N-1 安全约束的含可再生能源输电网络结构鲁棒优化 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 16-24.
ZHAO B S, HU Z C, SONG Y H. Robust optimization of transmission topology with renewable energy sources considering N-1 security constraint [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 16-24.
- [10] HEDMAN KW, FERRIS M C, O'NEILL R P, et al. Cooptimization of generation unit commitment and transmission switching with n-1 reliability [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2010, 25(2): 1052 - 1063.
- [11] KHODAEI A, SHAHIDEHPOUR M. Transmission switching in security-constrained unit commitment [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2010, 25(4): 1937-1945.
- [12] BRUNO S, DI LULLO M, FELICI G, et al. Tight unit commitment models with optimal transmission switching: connecting the dots with perturbed objective function [J]. IEEE Complexity Engineering, 2014, 18(6): 1-8.
- [13] HAN J, PAVASILIOU A. The impacts of transmission topology control on the European electricity network [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 496-507.
- [14] 郑海艳, 简金宝, 全然, 等. 基于改进的 Benders 分解与透视割平面的机组组合算法 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 133-138.
ZHENG H Y, JIAN J B, QUAN R, et al. Unit commitment algorithm based on improved Benders decomposition and perspective cut [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 133-138.
- [15] 沙强益, 王维庆. 基于机会约束的考虑 N-1 安全约束的储能优化配置方法 [J]. 工程科学与技术, 2019, 51(4): 147-156.
SHA Q Y, WANG W Q. Optimal allocation of energy storage considering N-1 security constraints based on chance constraints [J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(4): 147-156.
- [16] 汪超群, 韦化, 吴思缘. 计及潮流约束的水火电力系统机组组合问题的分解-协调算法 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3148-3161.
WANG C Q, WEI H, WU S Y. A de-composition coordination algorithm applied to hydro-thermal unit commitment problems with power flow constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3148-3161.
- [17] 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 J, LIU D C, LEI Q S, 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.

(责任编辑 王海蓉)