

计及新能源出力不确定性的电力系统恢复模型及快速求解方法

毛荀¹, 董王朝¹, 吕凯¹, 王桢¹, 赵鑫², 李堂明³, 林济铿³

(1. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 合肥 230601; 2. 安徽继远软件有限公司, 合肥 230093; 3. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 以黑启动及系统恢复方案为核心的电网应急预案是电力公司应对电网大面积停电最关键的措施之一, 由于模型的复杂性使得其有效建模及快速求解成为一个挑战性难题。针对该问题提出了计及新能源出力不确定性的系统恢复两阶段鲁棒优化模型及快速求解新方法。首先构建计及新能源出力不确定性及交流潮流约束的两阶段鲁棒优化完整模型; 然后提出潮流方程低非线性转换结合二阶锥松弛技术的方法, 将混合整数非线性优化模型转化为混合整数二阶锥优化模型; 最后采用列与约束生成算法求解。算例证实了所提模型及算法的有效性和先进性。

关键词: 黑启动及系统恢复; 两阶段鲁棒优化模型; 新能源出力不确定性; 潮流方程转换; 二阶锥松弛

Power System Restoration Modeling and Fast Solution Method Considering the Uncertainty of New Energy Output

MAO Xun¹, DONG Wangchao¹, LÜ Kai¹, WANG Zhen¹, ZHAO Xin², LI Tangming³, LIN Jikeng³

(1. State Grid Anhui Electric Power Corporation Electric Power Research Institute, Hefei 230601, China; 2. Anhui Ji Yuan Software Co., Ltd., Hefei 230093, China; 3. College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Since the power grid emergency plan with black start and system restoration scheme being the core, which is usually very complicate, is always the most critical measure for power companies to cope with the large-scale power grid outage, and thus its effective modeling and fast solving algorithm have been the challenging issue. To focus on the issue, this paper proposes a two-stage robust optimization model and a fast solving new method for system recovery considering the uncertainty of new energy power output (NEPO). Firstly, a two-stage robust optimization model that considers the uncertainty of NEPO and the constraints of AC power flow is constructed. Then, the low nonlinear transformation of power flow equation combined with second-order cone relaxation technique is proposed to transform the mixed integer nonlinear optimization model into the mixed integer second-order cone optimization model. Finally, the column and constraint generation algorithm is used to solve the problem. The effectiveness and advancement of the proposed model and algorithm are verified by a numerical example.

Key words: black start and system restoration; two-stage robust optimization model; uncertainty of new energy power output; power flow equation transformation; second-order cone relaxation

0 引言

随着新型电力系统建设的推进, 电网中新能源电场并网数量及出力占比越来越大^[1-2], 使得电网

运行及发展更加绿色和可持续的同时也使得电网发生各种故障乃至大面积停电的风险越来越大。近年来, 国内外发生了多起局部和大面积停电事故, 给居民的生活工作带来了重大影响。由于停电事故迄

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177107); 国网安徽省电力有限公司科技项目(521205230013)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51177107); the Science and Technology Project of State Grid Anhui Electric Power Corporation of China (521205230013).

今无法完全避免,黑启动和系统恢复预案是电网应对大面积停电的最有效策略之一,相应地,如何计及新能源实现电网的快速黑启动及系统恢复便成为备受关注的研究课题。

对于新型电力系统下系统恢复问题的不确定性建模及求解技术,根据所采用的优化技术分成两类:随机优化方法和鲁棒优化方法。

1)基于随机优化的系统恢复方法研究。文献[4]考虑恢复负荷的不确定性,使用蒙特卡罗模拟法生成场景树,构建考虑交流潮流约束和安全运行约束的两阶段随机优化系统恢复模型,并基于滚动优化框架实现模型求解。文献[5]利用拉丁超立方(Latin hypercube sampling, LHS)采样生成大量风电场景,利用整数L形算法求解系统恢复两阶段随机混合整数优化模型。文献[6]进一步考虑冷负荷启动约束,构建了两阶段负荷恢复随机优化模型,并采用PHA算法(progressive hedging algorithm)将模型分解,实现并行快速求解。文献[7]以最大化恢复负荷功率及风电机组出力之和为优化目标,建立了满足多场景的电力系统黑启动恢复模型,采用L-shaped算法求解。文献[8]考虑新能源发电和负荷的不确定性,构建混合整数二阶锥规划随机优化模型,并提出了简化的随机潮流约束,减少了二阶锥松弛约束的使用。文献[9]建立随机相关机会目标规划模型,采用离散粒子群算法和随机模拟技术组成的混合智能算法求解模型。文献[10]采用抽样平均近似处理机会约束问题,将随机优化模型转化为确定性恢复优化问题,并借助差分进化算法求解确定性优化问题。

2)基于鲁棒优化的系统恢复方法研究。文献[11-12]将非凸的交流潮流约束松弛,并建立了混合整数二阶锥规划模型。但二阶锥约束中仍存在电压和相角交叉项,还需利用泰勒展开并引入多阶变量实现线性化处理,额外增加了求解负担。文献[13-14]基于支路法潮流,将非凸的支路容量约束转换为二阶锥约束从而提高求解效率,但由于对节点相角松弛处理,求解完成后需从根节点推导出所有节点的相角值,导致建模精度不高且计算结果不能用于环网等场景。文献[15]构建了以近似误差最小为目标函数的线性化潮流模型,实现了精度较高的潮流方程线性化,但每次迭代均需要将潮流方程线性化引入的误差优化,计算效率偏低。文献[16]提出基于变量替换的潮流方程低非线性化策略,以

电压幅值平方和相角作为独立变量,将潮流传输项近似线性化,提高了线性化潮流方程的精度,采用交替迭代求解网损二次项,实现了模型的线性求解,但也因为迭代计算降低了求解速度。文献[17-18]以系统恢复负荷最大化为目标,构建两阶段鲁棒优化模型,采用分段线性逼近法将模型转化为线性模型,采用C&CG求解。文献[19]将系统划分为多个子系统,构建各子系统的系统恢复分布鲁棒优化模型,采用内-外嵌套上下迭代(inner-outer nested upper-lower, IOUL)算法求解,获得各子系统恢复模型。文献[20]建立min-max-min的三层鲁棒恢复模型,并深度优先搜索和广度优先搜索算法加快模型求解速度。文献[21-22]构建了基于预算不确定集的两阶段鲁棒优化系统恢复模型,并采用二值展开法对模型线性化转换,采用C&CG算法实现迭代求解。文献[23]构建了计及火电机组启动时间不确定性的机组恢复顺序鲁棒优化模型,通过交叉粒子群算法与求解器相结合实现求解。文献[24]构建基于Wasserstein距离的风电出力及负荷模糊集来描述源荷双侧的不确定性,建立两阶段分布鲁棒优化模型并利用对偶理论和big-M方法实现求解。文献[25]建立了计及区间形式不确定性约束建立系统决策者模型,并基于两阶段松弛法实现模型求解。

基于以上综述可以看出,随机优化方法需采取场景缩减策略而获得近似解,求解结果的质量及求解速度难以同时满足需求;而鲁棒优化方法模型相对于随机优化模型而言具有不需要用到不容易准确把握的不确定性变量概率信息,而只需不确定性变量的运行范围信息,及计算速度快的明显优点,但存在只能适应线性约束,且线性化转换技术直接影响计算性能及保守性偏大的缺点。

因此,本文提出计及新能源出力不确定性的系统恢复两阶段鲁棒优化模型及快速求解新方法。首先构建计及交流潮流约束的两阶段鲁棒优化模型;进而提出快速求解新策略,实现模型的快速准确求解。本文的创新点如下。

1)提出了以电压平方和相角为独立变量,把交流潮流方程约束转换为包含功率传输的线性项以及网损的二次项和的形式,实现了潮流方程的低非线性转换。

2)提出了基于锥松弛技术的低非线性潮流方程中的二次项二阶锥转换方法,从而实现系统恢复优

化模型的完全凸化,相对于直接二阶锥转换方法,大幅减少了计算规模,加快了计算速度。

1 电力系统恢复鲁棒优化模型

1.1 目标函数

本文构建了计及新能源出力不确定性的系统恢复两阶段鲁棒优化模型。第一阶段在期望场景下优化发电机启动顺序、母线和线路充电顺序、负荷恢复顺序及恢复量、机组出力大小等,使得期望场景下停电损失最小;第二阶段在新能源最恶劣波动场景下,通过重调度机组出力和已恢复负荷量大小使得系统负荷调整量最小。将系统恢复过程分成 N_T 个时段,每个时段的时间长度为 ΔT ,总恢复时间为 N_s ,黑启动机组及所在节点在0时刻恢复,相应的目标函数为:

$$\min_{\substack{u_{i,b}^s, u_{i,d}^s, u_{i,g}^s \\ u_{ij,l}^s, p_{i,g}^s, p_r^s, q_{i,g}^s}} \left\{ \sum_{s=0}^{N_T} \Delta T \left[\sum_{i=1}^{N_{BUS}} (1 - u_{i,d}^s) W_{i,d} p_{i,d}^s \right] + \max_{\substack{p_{i,g}^s, p_r^s, q_{i,g}^s}} \min_{\substack{p_{i,g}^s, p_r^s, q_{i,g}^s}} \sum_{s=0}^{N_T} \Delta T \left[\sum_{i=1}^{N_{BUS}} \hat{p}_{i,d}^s \right] \right\}, s \in \Omega_T \quad (1)$$

式中: $u_{i,b}^s$ 、 $u_{i,d}^s$ 和 $u_{i,g}^s$ 分别为第 i 个母线(节点)、第 i 个母线所接负荷和机组在时段 s 的状态,其值为1表示相应设备已恢复,反之未恢复; $u_{ij,l}^s$ 为连接节点(i, j)的线路 l 在时段 s 的恢复状态; $p_{i,g}^s$ 为期望场景下第 i 个母线所接常规机组有功出力大小; p_r^s 为期望场景下第 r 个母线所接新能源机组实际有功出力大小; $p_{i,d}^s$ 为节点 i 所接需恢复的负荷值, $W_{i,d}$ 为节点 i 的负荷权重系数,1类、2类、3类及4类负荷的 $W_{i,d}$ 分别为100、50、30及10,发电厂用负荷为1类负荷; $\hat{p}$ 为最恶劣场景下新能源机组可用出力; $(\hat{p}_{i,g}^s, \hat{q}_{i,g}^s, \hat{p}_r^s, \hat{p}_{i,d}^s)$ 分别为重调度阶段对常规机组和新能源机组出力以及节点已恢复负荷量的调整量; N_{BUS} 为总节点数量; Ω_N 为所有节点集合; Ω_T 为恢复时段集合。

1.2 约束条件

1) 常规火电机组出力及爬坡约束

火力发电机启动过程的机组出力特性如图1所示。当 $t_{0,i} \leq t < t_{1,i}$ 时,第 i 个母线所接常规机组厂用负荷已恢复,机组开始并网发电,但出力小于厂用负荷,母线电压保持恒定;当 $t_{1,i} \leq t < t_{2,i}$ 时,机组出力大于厂用负荷,但尚未达到最小稳定出力;当 $t = t_{2,i}$ 时,机组达到最小稳定出力,有功功率出力可沿着爬坡曲线灵活地调整。

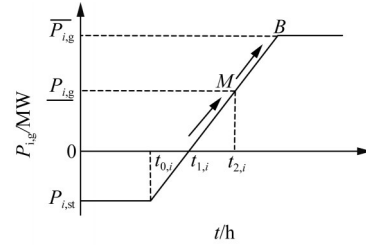


图1 机组启动过程的功率输出曲线

Fig. 1 Output curve of generator startup

相应地,机组出力及爬坡约束考虑如下约束:

$$p_{i,g}^s = 0, q_{i,g}^s = 0, \sum_{i=0}^s \Delta T \leq t_{0,i} \quad (2)$$

$$0 \leq p_{i,g}^s - p_{i,g}^{s-1} \leq u_{i,g}^s R_i \Delta T, t_{0,i} \leq \sum_{i=0}^s \Delta T \leq t_{2,i} \quad (3)$$

$$-u_{i,g}^s R_i \Delta T \leq p_{i,g}^s - p_{i,g}^{s-1} \leq u_{i,g}^s R_i \Delta T, \sum_{i=0}^s \Delta T \geq t_{2,i} \quad (4)$$

$$u_{i,g}^s \underline{p}_{i,g} \leq p_{i,g}^s \leq u_{i,g}^s \overline{p}_{i,g}, \sum_{i=0}^s \Delta T \geq t_{2,i} \quad (5)$$

$$u_{i,g}^s \underline{q}_{i,g} \leq q_{i,g}^s \leq u_{i,g}^s \overline{q}_{i,g}, \sum_{i=0}^s \Delta T \geq t_{0,i} \quad (6)$$

$$s \in \Omega_T, i \in \Omega_N$$

式中: $\overline{p}_{i,g}$ 和 $\underline{p}_{i,g}$ 、 $\overline{q}_{i,g}$ 和 $\underline{q}_{i,g}$ 分别为第 i 个母线所接常规机组有功出力上下限、无功出力上下限; R_i 为母线 i 所接常规机组(以下简称为机组 i)的爬坡率; $t_{0,i}$ 为第 i 个母线所接常规机组出力开始爬坡时间; $t_{2,i}$ 为第 i 个母线所接常规机组出力开始自调整时间; ΔT 为恢复时段间隔。式(2)表示常规机组 i 在并网前有功出力和无功出力均为0;式(3)表示常规机组 i 在并网之后和达到最小出力之前,机组的有功功率需满足单向爬坡约束;式(4)表示常规机组 i 有功功率达到最小出力后需满足的爬坡(或下降)约束;式(5)表示常规机组 i 有功功率达到最小出力后的有功功率上下限约束;式(6)表示常规机组 i 并网后的无功功率上下限约束。

2) 新能源机组出力约束

$$0 \leq p_r^s \leq u_{r,g}^s \hat{p}_r^s, s \in \Omega_T, r \in \Omega_N \quad (7)$$

式中: $u_{r,g}^s$ 为节点 r 接入的新能源厂站(以下简称新能源厂站 r)是否在时段恢复; $\hat{p}_r^s$ 为节点 r 接入的新能源厂站实际可用出力;式(7)表示第 r 个母线所接新能源机组(以下简称为新能源机组 r)在时段 s 出力的实际出力不超过实际可用出力。

3) 安全运行约束

$$u_{i,b}^s V_{i,\min} \leq V_i^s \leq u_{i,b}^s V_{i,\max} \quad (8)$$

$$\begin{cases} u_{ij,l}^s p_{l,\min} \leq p_{ij,l} \leq u_{ij,l}^s p_{l,\max} \\ s \in \Omega_T, i, j \in \Omega_N, l \in \Omega_L \end{cases} \quad (9)$$

式中: V_i^s 、 $V_{i,\min}$ 、 $V_{i,\max}$ 分别为在时段 s 节点 i 的电压幅值、下限和上限; p_{ij}^s 、 $p_{l,\min}$ 、 $p_{l,\max}$ 分别为在时段 s 流经线路 l 的有功功率及其下限和上限; Ω_L 为线路集合。

4) 节点功率平衡约束

式(10)、(11)分别为各节点的有功功率、无功功率的平衡方程。

$$u_{i,g}^s p_{i,g}^s + u_{r,g}^s p_r^s = u_{i,d}^s p_{i,d}^s + \sum_{(i,j) \in \Omega_L} u_{ij,l}^s p_{ij,l}^{\text{loss},s} \quad (10)$$

$$u_{i,g}^s q_{i,g}^s = u_{i,d}^s q_{i,d}^s + \sum_{(i,j) \in \Omega_L} u_{ij,l}^s q_{ij,l}^{\text{loss},s} \quad (11)$$

$$\begin{cases} p_{ij,l}^s = u_{ij,l}^s (G_l (V_i^s)^2 - V_i^s V_j^s (G_l \cos \theta_{ij}^s + B_l \sin \theta_{ij}^s)) \\ q_{ij,l}^s = u_{ij,l}^s (-B_l (V_i^s)^2 + V_i^s V_j^s (G_l \sin \theta_{ij}^s - B_l \cos \theta_{ij}^s)) \\ p_{ji,l}^s = u_{ij,l}^s (G_l (V_j^s)^2 - V_i^s V_j^s (G_l \cos \theta_{ij}^s - B_l \sin \theta_{ij}^s)) \\ q_{ji,l}^s = u_{ij,l}^s (-B_l (V_j^s)^2 + V_i^s V_j^s (-G_l \sin \theta_{ij}^s - B_l \cos \theta_{ij}^s)) \\ p_{ij,l}^{\text{loss},s} = p_{ij,l}^s + p_{ji,l}^s \\ q_{ij,l}^{\text{loss},s} = q_{ij,l}^s + q_{ji,l}^s \\ s \in \Omega_T, i, j, r \in \Omega_N, l \in \Omega_L \end{cases} \quad (12)$$

式中: G_l 和 B_l 分别为线路 l 的电导和电纳值; $p_{ij,l}^{\text{loss},s}$ 和 $q_{ij,l}^{\text{loss},s}$ 分别为在时段 s 的线路 l 产生的有功和无功网损; $q_{i,g}^s$ 和 $q_{i,d}^s$ 分别为节点 i 所需恢复的无功机组出力和负荷量; V_i^s 和 V_j^s 分别为在时段 s 节点 i 和 j 的电压幅值大小; θ_{ij}^s 为时段 s 节点 i 、 j 的相角差。

5) 机组冷、热启动时限约束

常规机组 i 在脱网停机之后具有最大热启动时间 T_i^{ch} 限制, 若该类发电机在这段时间内没有被启动, 则必须经过至少时长 T_i^{ch} 之后才能重新启动^[26-27]。式(13)表示带热启动机组 i , 应在最大热启动时限内给予恢复。式(14)表示机组冷启动, 即机组在停机之后必须持续停机最小 T_i^{cl} 时间, 然后才能再次启动起来。若机组无冷、热启动时限限制, 将 T_i^{ch} 设为 1 000, T_i^{cl} 设为 0。

$$(T_i^{\text{ch}} - T_i^{\text{cl}}) \geq (1 - u_{i,g}^s) \sum_{j=0}^s \Delta T \quad (13)$$

$$\begin{aligned} u_{i,g}^{s+1} (T_i^{\text{cl}} - T_i^{\text{cl}}) &\leq u_{i,g}^{s+1} \sum_{i=0}^s \Delta T \\ s &\in \Omega_T, i \in \Omega_N \end{aligned} \quad (14)$$

6) 设备恢复状态约束

式(15)~(16)表示被启动机组、负荷仅在其所连接的母线通电后才能被启动; 式(17)表示如果线路在 s 时段被恢复, 则其所连接的母线中至少有一

条在时段 s 已被恢复; 式(18)~(19)表示当支路 l 的一个端节点 i (或 j) 在第 s 时段恢复时, 若支路 l 在第 s 时段恢复, 则支路 l 的另一节点 j (或 i) 也必须在第 s 时段恢复, 将线路末端节点与该线路同时恢复, 以此加快后续网络的恢复进程; 式(20)表示如果某条母线在 s 时段被恢复, 则连接该母线的线路中至少有一条在时段 s 被恢复; 式(21)~(24)表示母线、线路、负荷、发电机一旦被恢复, 将不会被切除。

$$u_{i,g}^s \leq u_{i,b}^s \forall i, i \in \Omega_N \quad (15)$$

$$u_{i,d}^s \leq u_{i,b}^s, i \in \Omega_N \quad (16)$$

$$0 \leq u_{ij,l}^s \leq u_{i,b}^s + u_{j,b}^s, i, j \in \Omega_N, l \in \Omega_L \quad (17)$$

$$u_{i,b}^s + u_{ij,l}^s \leq 1 + u_{j,b}^s, i, j \in \Omega_N, l \in \Omega_L \quad (18)$$

$$u_{j,b}^s + u_{ij,l}^s \leq 1 + u_{i,b}^s, i, j \in \Omega_N, l \in \Omega_L \quad (19)$$

$$0 \leq u_{i,b}^s \leq \sum_{(i,j) \in \Omega_L} u_{ij,l}^s, i, j \in \Omega_N, l \in \Omega_L \quad (20)$$

$$u_{i,b}^s \leq u_{i,b}^{s+1}, i \in \Omega_N \quad (21)$$

$$u_{ij,l}^s \leq u_{ij,l}^{s+1}, l \in \Omega_L \quad (22)$$

$$u_{i,d}^s \leq u_{i,d}^{s+1}, i \in \Omega_N \quad (23)$$

$$u_{i,g}^s \leq u_{i,g}^{s+1}, i \in \Omega_N \quad (24)$$

7) 线路允许的恢复时刻约束

为了提高计算效率, 本文引进每一时段允许最大可恢复层数 k , 防止因恢复层数过大, 相应搜索范围过大而导致计算过长; 因此线路 l 允许的最早恢复时刻需满足如下约束。

$$\sum_{s=1}^{N_T} (1 - u_{ij,l}^s) \geq \lceil \text{Min}(N_{\text{BS}-l})/k \rceil, s \in \Omega_T, l \in \Omega_L \quad (25)$$

式中: $N_{\text{BS}-l}$ 为从黑启动电源到线路 l 的所有每一可行路径所包括的节点数的集合; $\lceil \cdot \rceil$ 表示上取整运算; Min 表示最小值函数。

8) 不确定集约束

描述新能源出力不确定性的不确定集为:

$$U = \begin{cases} \tilde{p}_r^s \in \mathbb{R}^{N_w \times N_T}; \tilde{p}_r^s \in [\bar{w}_r^s - \delta_r^s, \bar{w}_r^s + \delta_r^s] \\ \sum_s \frac{|\tilde{p}_r^s - \bar{w}_r^s|}{\delta_r^s} \leq \Gamma \\ s \in \Omega_T, r \in \Omega_N \end{cases} \quad (26)$$

式中: N_w 为新能源场站数量; $\bar{w}_r^s$ 和 $\tilde{p}_r^s$ 分别为新能源机组 r 在时间段 s 内的可用出力预测值和实际值; δ_r^s 为新能源机组出力波动极限; Γ 为不确定预算, 通常取整数。

2 基于潮流方程转换与二阶锥松弛的模型凸化技术

2.1 潮流方程的转换

对于已恢复线路而言,相当于去掉(12)中的线路恢复状态变量 $u_{ij,l}^s$, 及阶段指针 s , 可得已恢复线路 l 的有功功率 $p_{ij,l}$ 和无功功率潮流 $q_{ij,l}$ 为:

$$p_{ij,l} = G_l(V_i)^2 - V_i V_j (G_l \cos \theta_{ij} + B_l \sin \theta_{ij}) \quad (27)$$

$$q_{ij,l} = -B_l(V_i)^2 + V_i V_j (G_l \sin \theta_{ij} - B_l \cos \theta_{ij}) \quad (28)$$

将正弦和余弦函数在 0 附近进行二阶泰勒展开, 得到:

$$p_{ij,l} = G_l V_i^2 - G_l V_i V_j + G_l V_i V_j \frac{\theta_{ij}^2}{2} - B_l V_i V_j \theta_{ij} \quad (29)$$

$$q_{ij,l} = -B_l V_i^2 + B_l V_i V_j - B_l V_i V_j \frac{\theta_{ij}^2}{2} - G_l V_i V_j \theta_{ij} \quad (30)$$

由于正常情况下节点电压 V_i, V_j 偏离 1 不大, 线路角度差也不大, 式(29)、(30)中的 $V_i V_j \theta_{ij} \approx \theta_{ij}$, $V_i V_j \theta_{ij} \approx \theta_{ij}$; 对于式(29)、(30)中的 $V_i V_j$ 独立项作如下变换。

$$\begin{aligned} V_i V_j &= \frac{V_i^2 + V_j^2}{2} - \frac{(V_i - V_j)^2}{2} \\ &\approx \frac{V_i^2 + V_j^2}{2} - \frac{1}{2} \left[(V_i - V_j) \frac{V_i + V_j}{2} \right]^2 \quad (31) \\ &= \frac{V_i^2 + V_j^2}{2} - \frac{(V_i^2 - V_j^2)^2}{8} \end{aligned}$$

把 $V_i V_j \theta_{ij} \approx \theta_{ij}$, $V_i V_j \theta_{ij}^2 \approx \theta_{ij}^2$ 及式(31)代入式(12), 可以得到:

$$\begin{cases} p_{ij,l}^s = u_{ij,l}^s \left[G_l \frac{(V_i^s)^2 - (V_j^s)^2}{2} - B_l \theta_{ij}^s + \frac{p_{ij,l}^{\text{loss},s}}{2} \right] \\ q_{ij,l}^s = u_{ij,l}^s \left[-B_l \frac{(V_i^s)^2 - (V_j^s)^2}{2} + G_l \theta_{ij}^s + \frac{q_{ij,l}^{\text{loss},s}}{2} \right] \end{cases} \quad (32)$$

$$\begin{cases} p_{ji,l}^s = u_{ji,l}^s \left[G_l \frac{(V_j^s)^2 - (V_i^s)^2}{2} + B_l \theta_{ij}^s + \frac{p_{ji,l}^{\text{loss},s}}{2} \right] \\ q_{ji,l}^s = u_{ji,l}^s \left[-B_l \frac{(V_j^s)^2 - (V_i^s)^2}{2} - G_l \theta_{ij}^s + \frac{q_{ji,l}^{\text{loss},s}}{2} \right] \end{cases}$$

$$\begin{cases} p_{ij,l}^{\text{loss},s} = p_{ij,l}^s + p_{ji,l}^s = G_l \left[(\theta_{ij}^s)^2 + \frac{((V_i^s)^2 - (V_j^s)^2)^2}{4} \right] \\ q_{ij,l}^{\text{loss},s} = q_{ij,l}^s + q_{ji,l}^s = -B_l \left[(\theta_{ij}^s)^2 + \frac{((V_i^s)^2 - (V_j^s)^2)^2}{4} \right] \end{cases} \quad (33)$$

相对于式(27)、(28), 潮流方程非线性程度得到降低。

2.2 基于二阶锥松弛的网损二次项凸化

本文采用二阶锥松弛技术对于式(33)中的二次项转换, 相应地把潮流约束转换为锥约束, 从而实现交流潮流约束的凸化。

引入辅助变量 O_{ij}^s 表示式(33)中二次项, 即:

$$O_{ij}^s = (\theta_{ij}^s)^2 + \frac{((V_i^s)^2 - (V_j^s)^2)^2}{4} \quad (34)$$

把式(34)中的 $(V_i^s)^2$ 、 $(V_j^s)^2$ 和 $\theta_{ij}^s ((i, j) \in \Omega_L)$ 视为变量, 引入中间变量: O_{ij}^s 和 z_{ij}^s , 将式(34)松弛为式(35)的形式。

$$\begin{cases} O_{ij}^s \geq (\theta_{ij}^s)^2 + \frac{(z_{ij}^s)^2}{4} \\ z_{ij}^s = (V_i^s)^2 - (V_j^s)^2 \end{cases} \quad (35)$$

式(35)为二次凸规划, 为了加快求解速度, 本文将二次凸规划转化为二阶锥规划问题, 得到如下标准二阶锥约束。

$$\left\| \begin{matrix} 2 \\ O_{ij}^s \\ 2\theta_{ij}^s \\ (V_i^s)^2 - (V_j^s)^2 \end{matrix} \right\|_2 \leq O_{ij}^s + 2 \quad (36)$$

相应地, 式(33)中的网损二次项可简化为:

$$\begin{cases} p_{ij,l}^{\text{loss},s} = G_l O_{ij}^s \\ q_{ij,l}^{\text{loss},s} = -B_l O_{ij}^s \end{cases} \quad (37)$$

式(8)节点电压安全约束转换为:

$$\begin{aligned} -u_{ij,l}^s (\max(V_{i,\max}^2, V_{j,\max}^2)) &\leq z_{ij}^s \leq \\ u_{ij,l}^s (\max(V_{i,\max}^2, V_{j,\max}^2)) &\end{aligned} \quad (38)$$

由于式(32)中含有 0—1 整数变量与连续变量相乘的双线性项, 继续采用 Big-M 法转换为线性约束, M 为一比较大的正数。

$$\begin{cases} (u_{ij,l}^s - 1)M \leq p_{ij,l}^s - \left[G_l \frac{z_{ij}^s}{2} - B_l \theta_{ij}^s + \frac{p_{ij,l}^{\text{loss},s}}{2} \right] \\ \leq (1 - u_{ij,l}^s)M \\ (u_{ij,l}^s - 1)M \leq q_{ij,l}^s - \left[-B_l \frac{z_{ij}^s}{2} + G_l \theta_{ij}^s + \frac{q_{ij,l}^{\text{loss},s}}{2} \right] \\ \leq (1 - u_{ij,l}^s)M \\ (u_{ij,l}^s - 1)M \leq p_{ji,l}^s - \left[G_l \frac{z_{ij}^s}{2} + B_l \theta_{ij}^s + \frac{p_{ji,l}^{\text{loss},s}}{2} \right] \\ \leq (1 - u_{ij,l}^s)M \\ (u_{ij,l}^s - 1)M \leq q_{ji,l}^s - \left[-B_l \frac{z_{ij}^s}{2} - G_l \theta_{ij}^s + \frac{q_{ji,l}^{\text{loss},s}}{2} \right] \\ \leq (1 - u_{ij,l}^s)M \\ s \in \Omega_T, i, j \in \Omega_N, l \in \Omega_L \end{cases} \quad (39)$$

3 混合整数二阶锥优化模型快速求解策略

3.1 基于列与约束生成算法的主-从问题模型

1) min-max-min 三层优化模型

经模型转换处理之后的系统恢复模型为 min-max-min 三层优化问题，以矩阵形式表示为：

$$\min_{x_s \in X} \sum_{s=0}^{N_T} C_x^T x_s + \max_{u \in U} \min_{y_s \in Y} \sum_{s=0}^{N_T} C_y^T y_s \quad (40)$$

$$\text{s.t.:} \begin{cases} Ax = a \\ Bx \leq b \\ Dy_s = d \\ Ey_s \leq e \\ Fx + Hy_s = f \\ Gx + Ly_s \leq h \end{cases}$$

式中： x 为第一阶段变量的矩阵形式； y_s 为第二阶段变量的矩阵形式； u 为不确定变量； U 为不确定集合； C_x^T 和 C_y^T 为第一阶段目标函数系数矩阵和第二阶段目标函数系数矩阵。

约束条件及系数矩阵分别说明如下：

1) $Ax = a$ 为只含有第一阶段变量 x 的等式约束， A 和 a 为上述等式约束的系数矩阵和常数列向量；

2) $Bx \leq b$ 为只含有第一阶段变量 x 的不等约束， B 和 b 为上述不等式约束的系数矩阵和常数列向量；

3) $Dy_s = d$ 为只含有第二阶段变量 y_s 的等式约束，以及重调度阶段下的网络损耗表达式， D 和 d 为其系数矩阵和常数列向量；

4) $Ey_s \leq e$ 为只含有第二阶段变量 y_s 的不等约束， E 和 e 为系数矩阵和常数列向量；

5) $Fx + Hy_s = f$ 为含有第一阶段变量 x 和第二阶段变量 y_s 的等式约束，对应于重调度阶段下的有功和无功功率平衡约束， F 、 H 和 f 为其对应系数矩阵和常数矩阵；

6) $Gx + Ly_s \leq h$ 为含有第一阶段变量 x 和第二阶段变量 y_s 的不等约束，包括重调度阶段下无功电源出力约束、新能源机组出力约束、线路传输功率表达式、电压上下限约束、常规机组出力调整量约束， G 、 L 和 h 为上述不等约束的对应系数矩阵和常数列向量。

上述模型为 min-max-min 优化问题，本文采用 C&CG 算法将该优化问题转换为主-从模型，通过主子问题交替迭代实现求解。

2) 主-从模型

将式(40)及相关约束组成的模型转换，得到主-从问题模型。

主问题模型 f_{MP} 为：

$$\text{MP: } f_{MP} = \min_{x \in X} C_x^T x + \alpha$$

$$\text{s.t.:} \begin{cases} a \geq \sum_{s=0}^{N_T} C_y^T y_s \\ Ax = a \\ Bx \leq b \\ Fx + Hy_s^m = f \\ Gx + Ly_s^m \leq h \\ \forall m \leq k \end{cases} \quad (41)$$

式中： α 为辅助变量，表示最恶劣场景下负荷调整量； y_s^m 为第 m 次迭代后子问题的解； k 为迭代数量。

主问题为在满足期望场景的约束及从子问题反馈来的叠加约束的前提下，使得期望场景下的系统停电损失和最恶劣场景下的负荷恢复调整量之和的最小为目标函数。该模型为 MILP 问题，调用求解器求解该问题，得到系统所有设备顺序及所有发电机和负荷的恢复量。

子问题模型为：

$$\text{SP: } \max_{u \in U} \min_{y_s \in Y} \sum_{s=0}^{N_T} C_y^T y_s$$

$$\text{s.t.:} \begin{cases} Dy_s = d \\ Ey_s \leq e \\ Fx^* + Hy_s = f \\ Gx^* + Ly_s \leq h \end{cases} \quad (42)$$

式中 x^* 为主问题的解。

子问题在给定主问题解的情况下，最小化最恶劣场景下的负荷调整量。外层优化变量为不确定变量 u ，外层问题寻求新能源机组最恶劣场景下的可用出力；内层优化变量为重调度变量 $(p_{i,g}^{\wedge}; q_{i,g}^{\wedge}; p_r^{\wedge}; p_{i,d}^{\wedge})$ ，内层问题在给定外层最恶劣场景下可用新能源出力情况下的已恢复负荷调整量最小。子问题为双层优化问题，经对偶转换修改为可解模型(MIP)，然后调用求解器求解。

3.2 整体求解流程

本文基于 C&CG 算法的具体求解流程如下。

1) 设置迭代下限为 $L_B = 0$ ，以及迭代上限为 $U_B = +\infty$ ，初始化迭代次数 $k = 1$ ，辅助变量 $\alpha = 0$ ；

2) 求解主问题 MP，得到期望场景及子问题返回的极端场景约束下的目标函数值 f_{MP}^* 及最优解 x^* ，

包括所有元件恢复顺序,机组各时段出力情况,及负荷各时段恢复情况等;更新迭代下限 $L_B = \max\{L_B, f_{MP}^*\}$;

3)将2)中得到的 $\mathbf{x}^*$ 代入到子问题中,即固定元件恢复顺序及给定的机组各时段出力情况与负荷各时段恢复情况,通过重调度对于主问题得到的负荷各时段恢复量调整,使得最恶劣场景下负荷调整量最小(即对于在第一阶段已恢复负荷的切除量最小)。求解子问题得到子问题目标函数值 f_{SP}^* 、最优解 $\mathbf{y}_s^*$,包括机组出力调整量和负荷调整量,以及最恶劣的新能源出力场景集 $\{u^*\}$;更新迭代上限 $U_B = \min\{U_B, C_x^T \mathbf{x}^* + f_{SP}^*\}$;

4)比较迭代下限和迭代上限,如果 $|U_B - L_B|/|L_B| \leq \varepsilon$,则停止迭代,否则更新 $\mathbf{y}_s^*$ 以及 $\{u^*\}$,为主问题新增一组变量 $\mathbf{y}_s^m$ 与对应约束,并转至步骤2)。

4 算例分析

4.1 算例系统简介

本文以改造后的 IEEE-39 节点系统作为算例,并与文献[28]所提出的系统恢复方法(以下简称文献[28]方法)及系统恢复确定性方法(即不考虑新能源出力波动性)对比,以证明本文所提出模型及算法的有效性和先进性。在此基础上,进行某实际电网的恢复,以验证本文模型及求解策略的实际可用性。本文所有算例的计算环境为:MATLAB R2018a, Gurobi 求解器, Windows10 操作系统, Intel(R) Core(TM) i5-10200H CPU @2.40 GHz 2.40 GHz, 16 GB 内存。本文算例系统的母线、线路恢复用时 ΔT 和总恢复时段 N_T 选取与文献[28-30]相同。表1给出了本文模型及算法的相关参数。

4.2 不同方法的计算结果对比

IEEE-39 节点系统包含 10 台机组, 46 条支路, 常规机组参数如附表1所示, 30号节点的发电机 G1 为黑启动机组。在节点 3、5、14、16、17 接入风电场, 各风电场的容量均为 100 MW, 风功率预测偏差取预测值的 0.5 倍, 不确定性预算参数 Γ 为 5。采用本文模型及算法求解修正后的 IEEE-39 节点, 所得到的恢复方案如图2所示, 各时段恢复情况用不同颜色区分。黑启动机组 G1 于时段1自启动, 并恢复风机 WT1、节点 1、3 的负荷; 在时段2, 恢复常

表1 基本参数

Tab. 1 Basic parameters setting

参数	数值
恢复层数 k	2
频率偏移 $\Delta f_{\max}/\text{Hz}$	0.5
电压上限 $V_{\max}/\text{p. u.}$	1.1
电压下限 $V_{\min}/\text{p. u.}$	0.9
传输功率 $p_{l,\max}/\text{MW}$	200
恢复时段 N_T	8
时段间隔 $\Delta T/\text{min}$	20
迭代阈值 ε	0.001

规机组 G8、G10 的厂用负荷, 恢复节点 28 的负荷; 在时段3, 恢复常规机组 G2 和 G4、风机 WT2 和 WT3, 恢复节点 9、15 的负荷。最终在时段8恢复节点 21 所接负荷, 完成整个系统恢复供电。

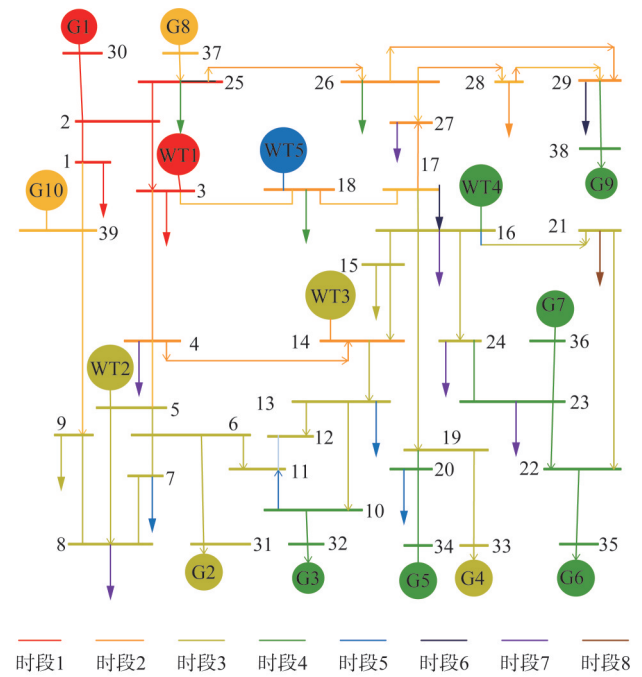


图2 本文方法得到的 IEEE-39 节点系统恢复方案

Fig. 2 System restoration scheme of the IEEE-39 bus system calculated by the proposed

本文方法、文献[28]方法及确定性方法分别求解改造后的 IEEE-39 节点系统恢复方案, 结果列于表2—4中。由表2和表3可以看出, 本文方案的负荷恢复量在各时段大于文献[28]的方案, 但小于确定性恢复方案; 本文方案新能源机组出力小于确定性恢复方案和文献[28]的方案。由表4可以看出, 确定性恢复方案的停电损失最小, 系统恢复的最

快; 本文恢复方案的停电损失和求解用时小于文献[28]的方案。具体原因解释如下。

确定性恢复没有考虑新能源可用出力的波动性, 使得该恢复方案的鲁棒性较差, 当风电场出力出现较大波动时, 该方案无法实现所有负荷的全部恢复。本文方案及文献[28]方案考虑了风电场可用出力的波动性, 即使风电场可用出力发生波动, 均能保证所有负荷的恢复。文献[28]的模型采用近似线性化交流潮流约束, 即假定系统处于额定运行点, 节点电压标幺值偏离 1 不大, 线路角度差在 10° 左右, 使得模型为线性模型, 避免了非线性转换处理, 但因系统恢复过程负荷相对较小, 节点电压偏高而离额定运行点较远, 使得基于该模型所得到的系统恢复方案解相对比较粗糙, 对应的停电损失大于本文方法; 并且由于所采用的潮流约束是近似的, 除了线路有功及无功功率约束之外, 还添加了线路角度差约束, 以及为了保证所恢复网络的连通性, 还包括了比较繁琐的网络连通约束, 使得该模型较本文模型更为庞大而使得求解时间更长, 而求解时间较本文方法长近 1/5。本文模型直接考虑交流潮流约束及线路功率约束而无需线路角度差约束, 因采用元件恢复顺序约束保证网络的连通性而无需网络连通约束, 并采用高效的模型转换方法-低非线性转换+锥变换而得到较为准确的线性模型, 使得所得到的解既符合实际情况又是最优解, 且因模型规模相对小而使得计算时间相对于文献[28]方法而言快了近 1/5。表 4 的结果表明, 本文方法方案的停电损失及恢复时间, 均明显小于文献[28]方法, 相对于确定性方法, 本文方法具有较大的鲁棒性。从而充分证明了本文模型及算法的有效性和先进性。

4.3 实际电网恢复方案

本文进一步采用某省实际电网算例验证本文方法的实际可行性。该实际电网有 204 个厂站, 21 台发电机、85 个负荷和 216 条线路, 电压等级包括 230 kV、525 kV 和 1 050 kV; 风电场 3 座, 太阳能电场 3 座。总恢复时段 N_T 选为 15, 恢复时段间隔 ΔT 为 20 min, 式 (26) 中的不确定集中的参数 Γ 为 5。利用本文模型及算法计算了该实际系统, 限于篇幅, 给出了时段 1—5、时段 10—15 的恢复方案, 表 5 给出了相应时段的机组和负荷的恢复情况。由于涉及保密协议, 所有变电站名字, 均用代号表

表 2 由不同方法得到的 IEEE-39 节点系统负荷恢复量对比

Tab. 2 Comparison of load recovery scheme in IEEE-39 bus system calculated by different methods

时段	负荷恢复量/MW		
	本文方案	文献[28]方案	确定性方案
1	114	65	23
2	192	202	64
3	350	397	200
4	570	605	730
5	810	796	1 510
6	1 079	1 005	1 510
7	1 359	1 290	1 510
8	1 510	1 510	1 510

表 3 由不同方法得到的 IEEE-39 节点系统恢复过程中的新能源出力对比

Tab. 3 Comparison of new energy output scheme of the system recovery in IEEE-39 bus system calculated by different methods

时段	负荷恢复量/MW		
	本文方案	文献[28]方案	确定性方案
1	35	0	74
2	51	178	407
3	109	282	482
4	174	360	482
5	184	380	482
6	271	441	482
7	307	441	482
8	334	441	482

表 4 由不同方法得到的 IEEE-39 节点系统恢复方案停电损失对比

Tab. 4 Comparison of load losses of system recovery schemes in IEEE-39 bus system calculated by different methods

方案	停电损失/MW	求解时长/s
本文方案	6 100	205
文献[28]方案	6 210	254
确定性方案	5 027	100

示。MSK2 站点所接发电机作为黑启动机组, 经过 15 个时段的恢复, 实现了所有发电机、负荷及线路的恢复。

图 3 给出实际系统各阶段加权后的负荷量恢复大小。可以看出在前 9 个时段, 系统是优先恢复电厂的厂用负荷, 并使得机组快速达到最小出力, 在这过程恢复了部分重要负荷; 到了第 9 个时段之后, 因机组及部分重要负荷已恢复, 系统开始快速

表5 基于本文方法得到的实际系统机组和负荷恢复方案
Tab.5 Restoration scheme of units and loads of actual power system calculated by the proposed method

时段	恢复机组	恢复负荷
1	MSK2	MSK2
2		
3		MQY MPQ
4	MEJ	MCS MGQ
5	MJY	MFG
11	MZP MMD MHS	MYR MDS MFB MKS MHP MBG MXH MY Y MSD
12	MLK MXD	MSS MME MLK MBH MGQ MGQ LGS MJT MJY MHQ ,PM MQC MTF MDX MHA MPS MGW MHJ
13	MHS MSZ MSY	MWB MBL MCT MQS MTQ MXP MLL MGL MMQ MHX MQS MXC MLZ MML MXW MJY MQT MXW
14		MXD MCP MLM MLZ MSY MSB MWL MDQ MGQ MYL MYH MHF MDS MQT
15		MQY MHS MHT MLQ MNM MPK MSJ MWD MAD MJK MSB MXQ MLP MHM MTB MYX MTC

地负荷,直至实现负荷的全部恢复。

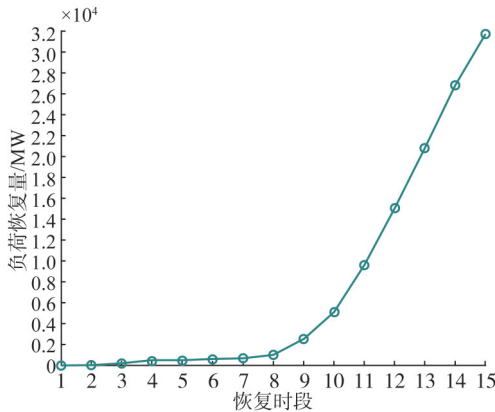


图3 恢复方案中实际系统负荷恢复情况

Fig.3 Load restoration of the system recovery scheme of actual power system

图4给出实际系统各阶段新能源机组净出力大小。可以看出在前9个时段,系统中新能源机组并网数目及净出力较少,主要是新能源机组总体装机容量较小,以及前9个时段主要是恢复火电机组,其需要让火电机组快速达到最小出力;到了第9个时段之后,开始恢复负荷,此时新能源机组恢复数量及净出力快速提升,相应加快了系统负荷的恢复

速度,从而加快了系统的总体恢复进程。

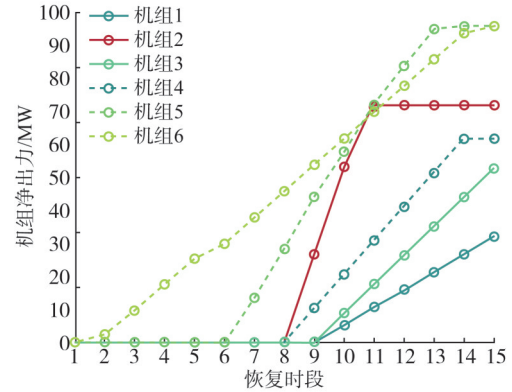


图4 实际系统恢复方案中新能源机组净出力情况

Fig.4 All the new energy net outputs of system recovery scheme of actual power system

4.4 求解误差分析

1)模型转换误差分析

本文针对交流潮流方程采用基于泰勒展开以及变量替换的方法,将其转换为低非线性方程,为了便于分析变换的准确性,定义如下表达式以描述电压相角交叉项替换误差如式(43)所示。

$$\begin{cases} e_1 = \left| V_i^s V_j^s \cos \theta_{ij}^s - \left(V_i^s V_j^s - \frac{(\theta_{ij}^s)^2}{2} \right) \right| \\ e_2 = \left| V_i^s V_j^s \sin \theta_{ij}^s - \theta_{ij}^s \right| \end{cases} \quad (43)$$

式中: e_1 为电压-相角余弦值交叉项 $V_i^s V_j^s \cos \theta_{ij}^s$ 转换后的误差; e_2 为电压-相角正弦值交叉项 $V_i^s V_j^s \sin \theta_{ij}^s$ 转换后的误差。

对于IEEE-118节点系统,在系统恢复完成之后,计算所有支路的近似线性化误差如图5所示。可以发现,将电压和相角变量替换后的误差分别小于 10^{-16} 和 10^{-8} 数量级,充分说明本文所提出的线性化处理,所引入的误差非常小,完全可以忽略不计。

为了说明方便,引入如下表达式描述二阶锥松弛量误差如式(44)所示。

$$e_3 = \left| O_{ij}^s - (\theta_{ij}^s)^2 + \frac{((V_i^s)^2 - (V_j^s)^2)^2}{4} \right| \quad (44)$$

式中 e_3 为网损二次项 $(\theta_{ij}^s)^2 + \frac{((V_i^s)^2 - (V_j^s)^2)^2}{4}$ 利用二阶锥松弛转换后的误差。

对于IEEE-118节点系统,在系统恢复完成之后,各个节点的 e_3 如图6所示。可以发现松弛误差

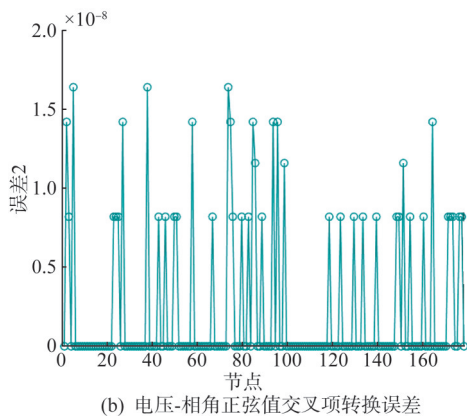
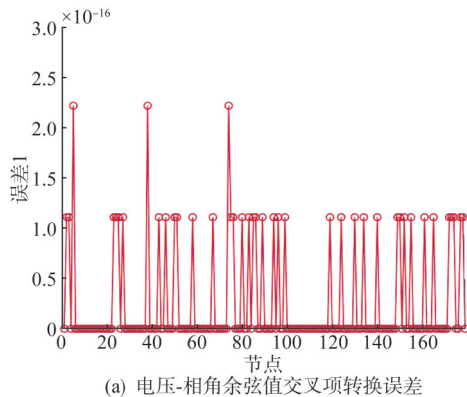


图 5 潮流方程转换误差

Fig. 6 Power flow equation conversion errors

小于 10^{-12} 量级, 说明具有很高的逼近精度, 误差完全可以忽略不计。

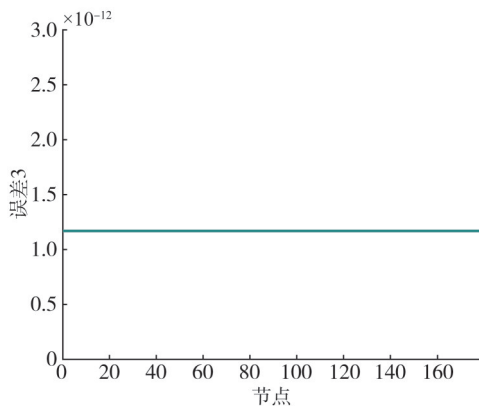


Fig. 7 Second order cone relaxation errors

5 结论

本文建立了计及新能源出力不确定性的系统恢复两阶段鲁棒优化模型及求解算法, 实现了计及新能源出力波动性的系统快速恢复。本文模型及算法

具有如下特点: 1) 模型完善, 包括了几乎所有约束条件, 使得本文模型接近于工程实际需求; 2) 为了实现模型的快速求解, 提出了潮流方程低非线性+锥变换的快速求解策略, 相对于直接锥变换方法, 大幅提升了求解速度。算例证实了本文模型及算法的有效性和先进性。由于本文模型完善及与实际需求模型非常接近, 且求解方法快速有效, 本文方法有望应用于实际工程系统中。

参考文献

- [1] 新华社. 习近平主持召开中央财经委员会第九次会议[R/OL]. 北京: 新华社, 2021[2021-3-15].
- [2] 国家能源局. 国家能源局2022年一季度网上新闻发布会文字实录[EB/OL]. 北京: 国家能源局, 2022[2022-01-28].
- [3] 樊丽娟, 黄河, 梅勇, 等. 适应新型电力系统发展的电力电源并网安全管理模式研究[J]. 南方电网技术, 2025, 19(12): 55-62.
FAN Lijuan, HUANG He, MEI Yong, et al. Research on grid integration safety management mode of power electronics-based resources for new power systems [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(12): 55-62.
- [4] YAO S, WANG P, LIU X, et al. Rolling optimization of mobile energy storage fleets for resilient service restoration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1030-1043.
- [5] GOLSHANI A, SUN W, ZHOU Q, et al. Incorporating wind energy in power system restoration planning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 16-28.
- [6] LI Y, SUN W, YIN W, et al. Restoration strategy for active distribution systems considering endogenous uncertainty in cold load pickup[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 2690-2702.
- [7] 韩返竹, 陈志铭, 丁涛, 等. 计及风电不确定性的电力系统黑启动恢复模型[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3289-3304.
HAN Ouzhu, CHEN Zhiming, DING Tao, et al. Power system black-start restoration model considering wind power uncertainties [J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3289-3304.
- [8] 梁远升, 徐真理, 李海峰, 等. 基于随机响应面法的配电网故障恢复全时段不确定性优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(23): 9200-9213.
LIANG Yuansheng, XU Zhenli, LI Haifeng, et al. A full period stochastic optimization method for fault recovery indistribution networks based on stochastic response surface method[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(23): 9200-9213.
- [9] 梁海平, 程子玮, 孙海新, 等. 计及风电预测误差不确定性的风电参与网架重构优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 151-158, 184.
LIANG Haiping, CHENG Ziwei, SUN Haixin, et al. Optimization of power network reconstruction with wind farm considering uncertainty of wind power prediction error [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 151-158, 184.
- [10] 张永熙. 极端气象灾害下考虑不确定断线故障的电力系统随机优化调度[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2011.

- [11] GARIFI K, JOHNSON E S, ARGUELLO B, et al. Transmission grid resiliency investment optimization model with SOCP recovery planning [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(1): 26–37.
- [12] SEKHAVATMANESH H, RODRIGUES J, MOREIRA C. L., et al. Optimal load restoration in active distribution networks complying with starting transients of induction motors [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 3957–3969.
- [13] YANG J, GUO Y, GUO C, et al. A robust active distribution network defensive strategy against cyber-attack considering multi-uncertainties [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(8): 1238–1252.
- [14] GUO Y, LIAO K, YANG J, et al. Service restoration for resilient distribution system with coordination of battery swapping stations and distributed generations [J]. IET Renewable Power Generation, 2023, 17(4): 814–828.
- [15] FAN Z, YANG Z, YU J, et al. Minimize linearization error of power flow model based on optimal selection of variable space [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 1130–1140.
- [16] YANG Z, ZHONG H, XIA Q, et al. Solving OPF using linear approximations: fundamental analysis and numerical demonstration. [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(17): 4115–4125.
- [17] WU H, XIE Y, XU Y, et al. Robust coordination of repair and dispatch resources for post-disaster service restoration of the distribution system [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022(136): 107611.
- [18] XU J, WU Z, WU Q, et al. A robust restoration decision-making strategy for unbalanced distribution networks considering the uncertainty of photovoltaic generators [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022(141): 108202.
- [19] ZHAO J, WANG H, HOU Y, et al. Robust distributed coordination of parallel restored subsystems in wind power penetrated transmission system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3213–3223.
- [20] 熊子轩. 基于风光的主动配电网鲁棒优化故障恢复策略研究 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2023.
- [21] WU H, XIE Y, LI H, et al. Robust load restoration optimization of power system considering the spatial-temporal correlation of wind power [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023(147): 108855.
- [22] ZHAO H, LU Z, HE L, et al. Two-stage multi-fault emergency rush repair and restoration robust strategy in distribution networks [J]. Electric Power Systems Research, 2020(184): 106335.
- [23] 焦洁, 刘艳. 基于鲁棒优化的网架重构机组恢复顺序优化 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(11): 77–86.
JIAO Jie, LIU Yan. Optimization of units' restoration sequence during network reconfiguration process based on robust optimization [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(11): 77–86.
- [24] 艾洪宇, 王洪涛. 多直流馈入受端系统负荷恢复分布鲁棒优化 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 24–33.
- AI Hongyu, WANG Hongtao. Distributionally robust optimization of load recovery for a multi-infeed HVDC receiving end system [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 24–33.
- [25] 刘家权, 刘坤, 周金涛, 等. 基于鲁棒优化的电-气互联型主动配电网故障恢复方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 66–74.
LIU Jiaquan, LIU Shen, ZHOU Jintao, et al. Fault recovery method of an integrated electricity and natural-gas active distribution network based on robust optimization [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 66–74.
- [26] 张旭, 么莉, 陈晨, 等. 交直流混合配电网网络重构与无功优化协同的两阶段鲁棒优化模型 [J]. 电网技术, 2022, 46(3): 1149–1162.
ZHANG Xu, YAO Li, CHEN Chen, et al. A novel two-stage robust model for co-optimization of reconfiguration and reactive power in AC/DC hybrid distribution network [J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 1149–1162.
- [27] 鲁玲, 苑涛, 杨波, 等. 计及烟效率和多重不确定性的区域综合能源系统双层优化 [J]. 中国电力, 2025, 58(1): 128–140.
LU Ling, YUAN Tao, YANG Bo, et al. Two-layer optimization of regional integrated energy system considering exergy efficiency and multiple uncertainties [J]. Electric Power, 2025, 58(1): 128–140.
- [28] 顾雪平, 白岩松, 李少岩, 等. 考虑风电不确定性的电力系统恢复全过程两阶段鲁棒优化方法 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(21): 5462–5477.
GU Xueping, BAI Yansong, LI Shaoyan, et al. Process power system restoration considering wind power uncertainty [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(21): 5462–5477.
- [29] 曾顺奇, 文福拴, 薛禹胜, 等. 计及操作时间不确定性的电力系统网架重构策略优化 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 16–21.
ZENG Shunqi, WEN Fushuan, XIE Yusheng, et al. Optimization of network reconfiguration strategy for power systems considering operating time uncertainty [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 16–21.
- [30] 刘伟佳, 林振智, 文福拴, 等. 计及重要负荷优先恢复的局部电力系统恢复策略 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 31–37.
LIU Weijia, LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, et al. A restoration strategy for a local power system considering critical load pickup [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 31–37.

收稿日期: 2024-03-15; 网络首发日期: 2024-08-01

作者简介:

毛荀(1989), 男, 高级工程师, 硕士, 从事电网运行特性分析;

董王朝(1993), 男, 高级工程师, 博士, 从事电网运行特性分析;

赵鑫(1989), 男, 工程师, 硕士, 从事电力信息系统设计研发与项目管理, m15198589752@163.com。