

基于负荷可行域和可靠性跟踪的 电力系统扩容规划及其求解算法

李 轩, 谢开贵, 邵常政, 胡 博

(重庆大学 输变电装备技术全国重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 电力系统可靠性评估计算复杂度高, 难以嵌入电力系统扩容规划模型中. 为了实现考虑可靠性的系统扩容规划, 提出一种基于负荷可行域和可靠性跟踪的电力系统扩容规划模型及其求解算法. 建立基于负荷可行域的近似距离模型, 将可靠性评估中的切负荷计算从优化问题求解转变为方程求解, 降低可靠性评估计算复杂度. 基于近似距离模型, 建立可靠性指标对设备容量的灵敏度模型, 实现针对设备容量的可靠性跟踪. 最后提出以可靠性提升为目标的电力系统扩容规划模型, 以及基于可靠性跟踪和贪心算法的优化求解算法. 结果表明: 近似距离模型能够有效降低可靠性评估的计算复杂度; 灵敏度模型能够正确反映设备容量变化对系统可靠性的影响; 扩容规划模型及求解算法能够达到最优的系统扩容规划结果.

关键词: 扩容规划; 可靠性跟踪; 负荷可行域; 近似距离模型; 贪心算法

中图分类号: TM715

文献标志码: A

Power System Expansion Planning Model and Solution Algorithm Based on Load Feasible Region and Reliability Tracking

LI Xuan, XIE Kaigui, SHAO Changzheng, HU Bo

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology,
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Power system reliability evaluation is a high-dimensional nonlinear problem, which is difficult to be nested into the power system expansion planning model. This paper proposes a power system expansion planning model and its solution algorithm based on load feasible region model and reliability tracking. First, it proposes an approximate distance model based on load feasible region, which transforms the optimization problem of load shedding calculation required into an equation solving. Based on this, it obtains the analytical expression of reliability sensitivity to components' capacity and the reliability tracking oriented to capacity. Then, it proposes a reliability-oriented capacity expansion planning model, and a solution algorithm based on reliability tracking and greedy algorithm. The results show that the approximate distance model can effectively reduce the computational complexity of reliability evaluation, while the sensitivity model can accurately reflect the influence of equipment capacity on system reliability, and the capacity expansion planning model and algorithm can achieve optimal system capacity expansion

收稿日期: 2024-02-06 修回日期: 2024-03-09 录用日期: 2024-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(52022016)资助项目

作者简介: 李 轩(1996—), 博士生, 从事电力系统可靠性评估相关研究.

通信作者: 谢开贵, 教授, 博士生导师; E-mail: kaiguixie@vip.163.com.

planning results.

Keywords: expansion planning; reliability tracking; load feasible region; approximate distance model; greedy algorithm

随着社会工业发展和疫情后经济回升,国内电力消费需求逐步提升,《2023—2024 年度全国电力供需形势分析预测报告》显示,2023 年全国全社会用电量 9.22 PW·h,预计 2024 年达到 9.8 PW·h.然而,在负荷稳步提高的过程中,电力供应却未能紧跟负荷增长的步伐.2022 年夏季用电高峰时期,全国多个省市的用电需求难以得到可靠供应,需通过发布有序用电政策,维持系统供需平衡.电力系统扩容规划是保证用电需求得到可靠供应的重要手段,需提出以可靠性提升为目标的电力系统扩容规划方法,使电力供应能力满足日益增长的电力消费需求.

现有电力系统扩容规划模型主要考虑各类源荷不确定性因素的影响,对电力系统进行优化规划,包括负荷不确定性^[1]、可再生能源不确定性^[2-3]、决策依赖不确定性^[4]和系统极端场景^[5]等.然而,考虑可靠性的规划模型相对较少.这主要是因为电力系统可靠性评估需要对指数增长的系统故障状态进行最优潮流计算,难以嵌入电力系统规划模型.考虑系统故障状态的鲁棒性可以减少系统故障状态数量^[6-8],但会导致可靠性结果过于保守.基于粒子群算法、遗传算法的扩容规划模型可以保证可靠性结果的精确性^[9-10],但迭代次数多,每次迭代过程中需要进行大量的可靠性评估,难以适用于大规模系统.

除了电力系统优化规划模型,以可靠性提升为目标的电力系统规划还可通过可靠性跟踪实现^[11-12].可靠性跟踪是将系统可靠性指标分摊给每一个设备,计算各个设备对系统可靠性指标的贡献,辨识系统可靠性薄弱环节.通过对薄弱环节进行改善,可以实现系统可靠性的提升.传统的基于比例分摊的可靠性跟踪方法^[13-14]将可靠性指标以设备元件的故障率为权重,分摊给各个设备元件.文献^[15]中为提高可靠性指标分摊的公平性,提出基于 Shapley 值的削负荷责任分摊方法.文献^[16]中采用动态潮流模型对基于 Shapley 值的可靠性跟踪模型进行改进,将该模型用于综合能源系统可靠性跟踪.文献^[17-19]中采用灵敏度方法分析设备故障率变化对可靠性指标的影响,实现可靠性跟踪.

然而,这些方法针对设备故障率的可靠性跟踪,其结果是设备故障率变化对系统可靠性影响的大

小.在面向系统扩容规划时,需针对设备容量进行可靠性跟踪,辨识设备容量变化对系统可靠性的影响.可靠性评估是一个关于设备容量的高维优化问题,无法解析表达.仅有的针对设备容量的可靠性跟踪方法通过引入拉格朗日乘子,求取可靠性指标对设备容量的灵敏度^[20-21].但该方法计算复杂度高,受边界条件影响大,当边界条件发生变化时需耗费大量时间重新求取灵敏度.

综上所述,电力系统可靠性评估无法对设备容量进行解析表达,导致难以实现针对设备容量的可靠性跟踪,进而难以采用可靠性跟踪方法实现考虑可靠性的系统扩容规划.为了解决以上问题,首先提出一种基于负荷可行域^[22]的近似距离模型,将切负荷计算从优化问题转变为方程问题,实现可靠性指标对设备容量的解析表达.在此基础上,求取可靠性指标对设备容量的偏导,建立可靠性指标对设备容量的灵敏度模型,实现针对设备容量的可靠性跟踪.最后提出以可靠性提升为目标的电力系统扩容规划模型,以及基于贪心算法和可靠性追踪的快速求解方法.

1 负荷可行域模型概述

电力系统可靠性评估是当系统设备发生故障时,评估电力系统无法满足供电的严重程度,即各系统故障状态下的切负荷量.常用的可靠性指标包括失负荷概率(loss of load probability, LOLP)和期望缺供电量(expected energy not supplied, EENS),表达式如下:

$$P_{\text{LOL}} = \sum_{s \in S} P_r(s) \quad (1)$$

$$E_{\text{ENS}} = T \sum_{s \in S} P_r(s) P_{\text{ls}}(s) \quad (2)$$

式中: S 是发生切负荷的系统故障状态集合; $P_r(s)$ 是系统故障状态 s 发生的概率; T 是可靠性评估周期; $P_{\text{ls}}(s)$ 是系统故障状态 s 的切负荷大小,一般采用直流最优潮流模型计算得到.

可靠性评估过程中,需要在大量系统故障状态下采用最优潮流模型计算系统切负荷,导致可靠性评估计算复杂度高,计算时间长.为了减少可靠性评估的计算时间,文献^[22]中提出用负荷可行域模型

代替最优潮流模型,降低切负荷计算复杂度.该模型对每个系统故障状态都构建了一个对应的负荷可行域:

$$\mathbf{A}\mathbf{L} \leq \boldsymbol{\beta}_T \mathbf{P}_{T,\max} + \boldsymbol{\beta}_G \mathbf{G}_{\max} \quad (3)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\mathbf{b} \odot \mathbf{A}_{m \times n} \mathbf{B}^{-1} & \mathbf{b} \odot \mathbf{A}_{m \times n} \mathbf{B}^{-1} & \mathbf{H}_{v \times n} & -\mathbf{E} \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\beta}_T = [\mathbf{E} \quad \mathbf{E} \quad \mathbf{H}_{v \times m} \quad \mathbf{0}]^T \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\beta}_G = \begin{bmatrix} \Theta(-\mathbf{b} \odot \mathbf{A}_{m \times n} \mathbf{B}^{-1}) & \Theta(\mathbf{b} \odot \mathbf{A}_{m \times n} \mathbf{B}^{-1}) & \mathbf{H}_{v \times n} & \mathbf{0} \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

式中: \mathbf{A} 、 $\boldsymbol{\beta}_T$ 和 $\boldsymbol{\beta}_G$ 是负荷可行域系数矩阵; \mathbf{G}_{\max} 、 \mathbf{L} 分别是每个节点上的机组容量、负荷所组成的向量; \mathbf{b} 、 $\mathbf{P}_{T,\max}$ 分别是每条输电线路的导纳、线路容量所组成的向量; $\mathbf{A}_{m \times n}$ 是 n 个节点与 m 条线路之间的有向邻接矩阵; \mathbf{B} 是不考虑线路电阻的节点导纳矩阵; $\mathbf{H}_{v \times n}$ 、 $\mathbf{H}_{v \times m}$ 是 $[0, 1]$ 组成的系数矩阵, v 代表了系统故障状态的孤岛和关键线路数量; \mathbf{E} 是单位矩阵; $\Theta(\cdot)$ 是一个算子,当输入向量 $\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_l]^T$ 时,输出 $\Theta(\mathbf{x}) = [\max\{x_1, 0\} \quad \max\{x_2, 0\} \quad \dots \quad \max\{x_l, 0\}]^T$.

在每个故障状态的可行域建立后,可以通过判断负荷与可行域之间的关系,进行状态分析和切负荷计算,进而实现基于负荷可行域模型的电力系统可靠性评估^[22].首先,可以判断各个系统故障状态下负荷和可行域之间的关系:如果负荷在可行域的内部,系统不会发生切负荷;反之则系统需要进行切负荷,如图 1 所示.图中: L_1 和 L_2 分别为负荷 1 和负荷 2.

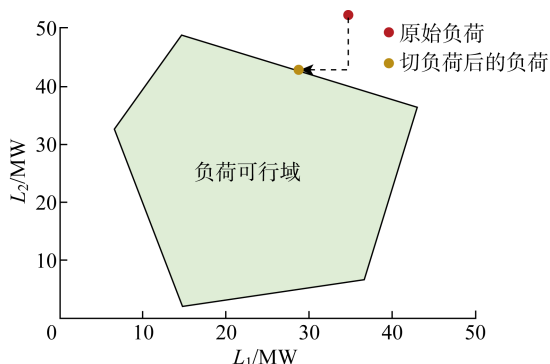


图 1 负荷处于负荷可行域外部示意图

Fig. 1 Load outside load feasible region

切负荷的大小可以通过计算从负荷到可行域边界的最小曼哈顿距离得到:

$$\min P_{is} = \mathbf{I}^T |\mathbf{L}_0 - \mathbf{L}_c| = \mathbf{I}^T (\mathbf{L}_0 - \mathbf{L}_c) \quad (7)$$

$$\text{s. t.} \quad \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{E} \end{bmatrix} \mathbf{L}_c \leq \begin{bmatrix} \boldsymbol{\beta}_T \mathbf{P}_{T,\max} + \boldsymbol{\beta}_G \mathbf{G}_{\max} \\ \mathbf{L}_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: \mathbf{L}_0 是原始负荷; \mathbf{L}_c 是切负荷后的可供给负荷; \mathbf{I} 是单位向量.在计算得到各个系统故障状态的切负荷后,将切负荷根据式(2)汇总,即可得到系统的可靠性指标 EENS.

与最优潮流模型相比,最小曼哈顿距离模型减少了决策变量数量和约束数量,从而减小了可靠性评估的计算复杂度.然而,最小曼哈顿距离模型依然是一个优化模型,未能实现可靠性指标对设备容量的解析表达,难以实现针对容量的可靠性跟踪.为此,本文提出一种采用近似距离的简化模型用于切负荷计算,将切负荷计算从优化问题转变为方程问题,实现可靠性指标对设备容量的解析表达,为针对设备容量的可靠性跟踪提供模型支撑.

2 近似距离模型

2.1 近似距离模型定义

近似距离的定义是从原始负荷到近似可供给负荷的曼哈顿距离,其中近似可供给负荷是原始负荷与坐标原点所在直线和可行域边界交点,如图 2 所示.

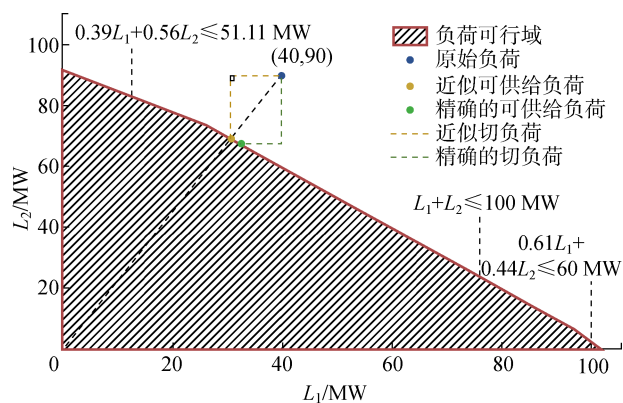


图 2 基于负荷可行域的近似距离模型和精确模型

Fig. 2 Approximate distance model and accurate model based on load feasible region

基于近似距离的定义,可知原始负荷、坐标原点和近似可供给负荷在同一直线上.对于同一直线上的点 a 、 b 、 c ,其坐标满足以下关系:

$$\frac{a_1 - c_1}{b_1 - c_1} = \frac{a_2 - c_2}{b_2 - c_2} = \dots = \frac{a_i - c_i}{b_i - c_i} = \dots = \frac{a_n - c_n}{b_n - c_n} \quad (9)$$

式中: a_i 、 b_i 、 c_i 分别为点 a 、 b 、 c 的第 i 维坐标.

近似可供给负荷与原始负荷存在以下关系:

$$\frac{L_{c,1}}{L_{0,1}} = \frac{L_{c,2}}{L_{0,2}} = \dots = \frac{L_{c,i}}{L_{0,i}} = \dots = \frac{L_{c,n}}{L_{0,n}} \quad (10)$$

式中: $L_{c,i}$ 是第 i 个节点上的近似可供给负荷; $L_{0,i}$ 是第 i 个节点上的原始负荷. 通过引入中间变量 κ , 可供给负荷的坐标可以表示为

$$\mathbf{L}_c = \mathbf{L}_0 \kappa = [L_{0,1} \kappa \ L_{0,2} \kappa \ \cdots \ L_{0,i} \kappa \ \cdots \ L_{0,n} \kappa]^T \quad (11)$$

近似可供给负荷位于可行域的边界上, 因此其坐标至少满足下列方程之一:

$$\mathbf{A}_\tau \mathbf{L}_0 \kappa = \boldsymbol{\beta}_{T,\tau} \mathbf{P}_{T,\max} + \boldsymbol{\beta}_{G,\tau} \mathbf{G}_{\max}, \quad \tau = 1, 2, \dots, n_p \quad (12)$$

式中: \mathbf{A}_τ 、 $\boldsymbol{\beta}_{T,\tau}$ 和 $\boldsymbol{\beta}_{G,\tau}$ 是可行域的第 τ 个边界, 由矩阵 \mathbf{A} 、 $\boldsymbol{\beta}_T$ 和 $\boldsymbol{\beta}_G$ 的第 τ 行元素确定; n_p 是可行域边界的数量.

负荷可行域由一组边界构成, 因此通过式(12)所得到的近似可供给负荷并不是唯一的, 需计算离坐标原点最近的交点, 筛选出有效的近似可供给负荷点的中间变量:

$$\kappa_{\min} = \min_{\tau=1, 2, \dots, n_p} (\kappa \mid \mathbf{A}_\tau \mathbf{L}_0 \kappa = \boldsymbol{\beta}_{T,\tau} \mathbf{P}_{T,\max} + \boldsymbol{\beta}_{G,\tau} \mathbf{G}_{\max}, \kappa > 0) \quad (13)$$

得到近似可供给负荷后, 即可通过计算原始负荷与近似可供给负荷之间的曼哈顿距离, 求取当前系统故障状态的切负荷大小:

$$P_{\text{is}} = (1 - \kappa_{\min}) \mathbf{I}^T \mathbf{L}_0 \quad (14)$$

近似距离模型将多维的优化问题式(7)和(8)转化为一组线性方程问题式(12)~(14), 大幅减小了计算复杂度, 同时建立了切负荷与设备容量之间的线性映射关系, 实现了可靠性指标针对设备容量的解析表达.

2.2 近似距离模型修正

当某一节点上的负荷需要完全切除时, 上述近似距离模型具有极大的误差, 需要进行修正. 某些系统故障状态下, 输电线路故障会导致系统解列出现孤岛, 若孤岛没有电源供应, 则孤岛上的负荷将被完全切除. 从负荷可行域的视角看, 该系统故障状态存在以下可行域边界:

$$\sum_{i \in N_1} L_i \leq 0 \quad (15)$$

式中: N_1 是具有负荷但没有机组的孤岛节点集合.

在这些系统状态下, 用近似距离模型得到的 $\kappa_{\min} = 0$, 这表明应该切除系统中的所有负荷. 然而, 正确的做法是只切除 N_1 中的所有负荷, 对于其他节点需重新计算. 因此, 需要对近似距离模型进行修正, 将负荷可行域边界式(15)与孤岛 N_1 从负荷可行域中删除. 负荷可行域为

$$\begin{bmatrix} \Lambda_{1,1} & \Lambda_{1,2} & \cdots & \Lambda_{1,i-1} & \Lambda_{1,i} & \Lambda_{1,i+1} & \cdots \\ \Lambda_{2,1} & \Lambda_{2,2} & \cdots & \Lambda_{2,i-1} & \Lambda_{2,i} & \Lambda_{2,i+1} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Lambda_{j-1,1} & \Lambda_{j-1,2} & \cdots & \Lambda_{j-1,i-1} & \Lambda_{j-1,i} & \Lambda_{j-1,i+1} & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots \\ \Lambda_{j+1,1} & \Lambda_{j+1,2} & \cdots & \Lambda_{j+1,i-1} & \Lambda_{j+1,i} & \Lambda_{j+1,i+1} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_{i-1} \\ L_i \\ L_{i+1} \\ \vdots \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_{j-1} \\ 0 \\ \beta_{j+1} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (16)$$

被修正为

$$\begin{bmatrix} \Lambda_{1,1} & \Lambda_{1,2} & \cdots & \Lambda_{1,i-1} & \Lambda_{1,i+1} & \cdots \\ \Lambda_{2,1} & \Lambda_{2,2} & \cdots & \Lambda_{2,i-1} & \Lambda_{2,i+1} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Lambda_{j-1,1} & \Lambda_{j-1,2} & \cdots & \Lambda_{j-1,i-1} & \Lambda_{j-1,i+1} & \cdots \\ \Lambda_{j+1,1} & \Lambda_{j+1,2} & \cdots & \Lambda_{j+1,i-1} & \Lambda_{j+1,i+1} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_{i-1} \\ L_{i+1} \\ \vdots \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \beta_1 & \beta_2 & \vdots & \beta_{j-1} & \beta_{j+1} & \vdots \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

图 3 为一个简单的示意图, 假设负荷为 (2, 6, 3) MW 且可行域包含两个边界 $L_3 \leq 0$ 和 $L_1 + L_2 + 2L_3 \leq 10$ MW, 该情况下直接采用近似距离模型会将所有负荷全部切除. 因此, 对于具有孤岛的故障状态, 在采用近似距离模型之前, 应先对负荷和可行域进行修正. 以图 3 中的系统为例, 删去边界 $L_3 \leq 0$ 以及负荷与其他边界中与 L_3 有关参数. 修正后的负荷为 (2, 6) MW, 负荷可行域为 $L_1 + L_2 \leq 10$ MW, 如图 4 所示. 对原始负荷和可行域进行修正后, 对剩余负荷采用近似距离模型, 即可计算剩余节点上的切负荷大小.

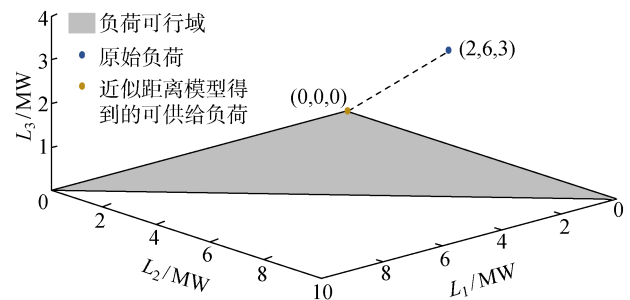


图 3 系统故障状态具有孤岛时的近似距离模型
Fig. 3 Approximate distance model in system fault conditions with islanding

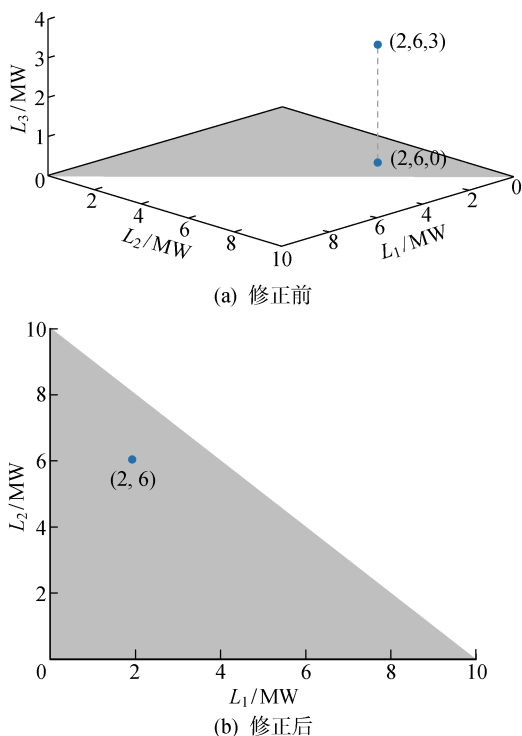


图 4 负荷与负荷可行域的修正

Fig. 4 Correction of load and load feasible region

3 针对设备容量的电力系统可靠性跟踪

本文提出近似距离模型,实现了可靠性指标针对设备容量的解析表达.在此基础上,可以求取可靠性指标对机组容量的灵敏度解析公式,实现针对设备容量的可靠性跟踪.

LOLP 和 EENS 指标都是关于设备故障率的连续函数,均可对设备故障率求导.然而,这一结论并不适用于针对设备容量的可靠性跟踪.假设一个单节点系统具有 30 MW 负荷和两台容量为 20 MW、故障概率为 0.1 的机组.任意一台机组发生故障,都会导致系统切负荷,此时系统 LOLP 为 $0.1 \times 0.1 + 0.9 \times 0.1 \times 2 = 0.19$.令其中一台机组容量增加;在增加到 30 MW 之前,LOLP 不发生变化;当容量增加至 30 MW,系统 LOLP 突变为 $0.1 \times 0.1 + 0.9 \times 0.1 = 0.1$.

综上,设备容量存在部分阈值,当设备容量小于该阈值时,某些系统故障状态需要切负荷;反之则这些系统故障状态无需切负荷.这导致 LOLP 是一个关于设备容量的阶跃函数,其不可导,无法建立灵敏度模型.因此,本文所提针对设备容量的可靠性跟踪方法只能围绕 EENS 指标进行.

根据式(2),EENS 对节点 i 上机组容量的灵敏

度可以表示为

$$\frac{\partial E_{\text{ENS}}}{\partial G_{\text{max},i}} = \frac{\partial T \sum_{s \in S} P_{\text{ls}}(s) P_r(s)}{\partial G_{\text{max},i}} = T \sum_{s \in S} \frac{\partial P_{\text{ls}}(s)}{\partial G_{\text{max},i}} P_r(s) \quad (18)$$

式中: $G_{\text{max},i}$ 为节点 i 上的总机组容量,是向量 \mathbf{G}_{max} 的第 i 个元素.

不考虑设备容量和设备故障率的相关性,因此仅考虑 $\partial P_{\text{ls}}(s)/\partial G_{\text{max},i}$,而不考虑 $\partial P_r(s)/\partial G_{\text{max},i}$.传统的切负荷计算基于最优潮流模型进行,本质是一个优化问题,难以求取导数 $\partial P_{\text{ls}}(s)/\partial G_{\text{max},i}$.本文提出的近似距离模型建立了切负荷和容量之间的线性映射关系,结合式(12)~(14),可以得到 E_{ENS} 相对于节点 i 总机组容量的灵敏度:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{\text{ENS}}}{\partial G_{\text{max},i}} &= T \sum_{s \in S} \frac{\partial P_{\text{ls}}(s)}{\partial G_{\text{max},i}} P_r(s) = \\ &T \sum_{s \in S} \frac{\partial (1 - \kappa_{\min}(s)) \mathbf{I}^T \mathbf{L}_0 P_r(s)}{\partial G_{\text{max},i}} = \\ &T \sum_{s \in S} \frac{\partial \left(1 - \frac{\beta_{\text{T,av}}(s) \mathbf{P}_{\text{T,max}} + \beta_{\text{G,av}}(s) \mathbf{G}_{\text{max}}}{\mathbf{\Lambda}_{\text{av}}(s) \mathbf{L}_0} \right) \mathbf{I}^T \mathbf{L}_0}{\partial G_{\text{max},i}} \times \\ &P_r(s) = \\ &T \sum_{s \in S} \frac{\partial \left(-\frac{\mathbf{I}^T \mathbf{L}_0}{\mathbf{\Lambda}_{\text{av}}(s) \mathbf{L}_0} \beta_{\text{G,av},i}(s) G_{\text{max},i} \right)}{\partial G_{\text{max},i}} P_r(s) = \\ &T \sum_{s \in S} \left(-\frac{\mathbf{I}^T \mathbf{L}_0}{\mathbf{\Lambda}_{\text{av}}(s) \mathbf{L}_0} \beta_{\text{G,av},i}(s) P_r(s) \right) \quad (19) \end{aligned}$$

式中: $\mathbf{\Lambda}_{\text{av}}(s)$ 、 $\beta_{\text{T,av}}(s)$ 和 $\beta_{\text{G,av}}(s)$ 代表了状态 s 的有效可行域边界; $\beta_{\text{G,av},i}(s)$ 是行向量 $\beta_{\text{G,av}}(s)$ 的第 i 个元素.

有效可行域边界是满足 $\kappa_{\min}(s)$ 的可行域边界,即

$$\mathbf{\Lambda}_{\text{av}}(s) \mathbf{L}_0 \kappa_{\min}(s) = \beta_{\text{T,av}}(s) \mathbf{P}_{\text{T,max}} + \beta_{\text{G,av}}(s) \mathbf{G}_{\text{max}} \quad (20)$$

式(19)表示 EENS 对于各节点总机组容量的灵敏度,然而对于同一节点上的不同机组,需要考虑其故障率和修复率的影响.为了计算每一台机组容量的灵敏度,应考虑到系统故障状态下的机组状态,则节点 i 上机组 k 的灵敏度:

$$\frac{\partial E_{\text{ENS}}}{\partial G_{\text{cap},k}} = T \sum_{s \in S} \left(-\frac{\mathbf{I}^T \mathbf{L}_0}{\mathbf{\Lambda}_{\text{av}}(s) \mathbf{L}_0} \beta_{\text{G,av},i}(s) I_{\text{G},k}(s) P_r(s) \right) \quad (21)$$

式中: $G_{\text{cap},k}$ 为机组 k 的容量; $I_{\text{G},k}(s)$ 表示机组 k 在系统故障状态 s 下的工作状态,为 1 表示机组 k 在系统故障状态 s 下正常工作,为 0 则表示机组 k 在系统故障状态 s 下故障失效.

式(21)得到了 EENS 对机组容量的灵敏度,将系统可靠性指标以灵敏度为权重分摊到各个设备,计算各个设备对系统可靠性的贡献,即可得到针对设备容量的可靠性跟踪结果.将设备根据可靠性跟踪结果从大到小进行排序,排在序列靠前的机组,其容量变化对电力系统可靠性影响较大.在扩容规划过程中,可优先考虑扩容这些对系统可靠性影响较大的机组,以最大幅度提升系统可靠性.

同理,可以通过推导 EENS 对输电线路容量的灵敏度,实现针对输电线路容量的可靠性跟踪:

$$\frac{\partial E_{\text{ENS}}}{\partial P_{T,\max,j}} = T \sum_{s \in S} \left(-\frac{\mathbf{I}^T \mathbf{L}_0}{\mathbf{A}_{\text{av}}(s) \mathbf{L}_0} \beta_{T,\text{av},j}(s) I_{T,j}(s) P_r(s) \right) \quad (22)$$

式中: $P_{T,\max,j}$ 是输电线路 j 的容量,是向量 $\mathbf{P}_{T,\max}$ 的第 j 个元素; $\beta_{T,\text{av},i}(s)$ 是行向量 $\beta_{T,\text{av}}(s)$ 的第 i 个元素; $I_{T,j}(s)$ 表示线路 j 在系统故障状态 s 下的工作状态,为 1 表示线路 j 在系统故障状态 s 下正常工作,为 0 则表示线路 j 在系统故障状态 s 下故障失效.

4 考虑可靠性的电力系统扩容规划及其优化求解算法

4.1 以可靠性提升为目标的电力系统扩容规划

建立以可靠性提升为目标的电力系统扩容规划模型,通过增装机组或线路、扩大可再生能源场站规模提升系统可靠性.该模型是一个高维混合整数线性优化模型,其目标函数为最小化系统 EENS.决策变量包括系统各节点增装各机组数、各节点间增装线路容量、可再生能源场站增装容量.

模型的目标函数为最小化系统 EENS:

$$\min E_{\text{ENS}} = T \sum_{s \in S} P_{\text{ls}}(s) P_r(s) \quad (23)$$

以可靠性提升为目标的电力系统扩容规划模型,其约束应包含扩容容量约束和系统可靠性计算约束,主要组成如下.

(1) 扩容成本约束.电力系统扩容规划过程中应考虑增装机组、增装线路、扩大可再生能源场站规模的成本,总成本应不大于预算成本,表示为

$$\mathbf{I}^T \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{\text{inv},G} \mathbf{C}_{\text{inv},G} \\ \mathbf{U}_{\text{inv},T} \mathbf{C}_{\text{inv},T} \\ \mathbf{U}_{\text{inv},\text{Re}} \mathbf{C}_{\text{inv},\text{Re}} \end{bmatrix} \leq C_{\text{bud}} \quad (24)$$

式中: $\mathbf{U}_{\text{inv},G}$ 为表征各节点增装各机组数的矩阵; $\mathbf{U}_{\text{inv},T}$ 为表征各节点间增装各类线路数量的矩阵; $\mathbf{U}_{\text{inv},\text{Re}}$ 为表征各节点增装可再生能源场站的矩阵; $\mathbf{C}_{\text{inv},G}$ 、 $\mathbf{C}_{\text{inv},T}$ 、 $\mathbf{C}_{\text{inv},\text{Re}}$ 为可选增装机组、线路的成本及可再生能源场站的单位容量成本; C_{bud} 为扩容规划的

投资预算.

(2) 可再生能源容量约束.在可再生能源场站扩容过程中,可再生能源的容量不能超过可再生能源场站所在地区的可再生能源资源所能供给的最大容量,表示为

$$\mathbf{U}_{\text{inv},\text{Re}} \leq \mathbf{U}_{\text{inv},\text{Re},\max} \quad (25)$$

式中: $\mathbf{U}_{\text{inv},\text{Re},\max}$ 为各节点增装可再生能源场站容量限制,一般由当地可再生能源资源决定.

(3) 扩容后机组、线路容量.计算扩容后的系统机组容量和线路容量,为后续可靠性约束提供基础,表示为

$$\mathbf{P}_{T,\max,\text{inv}} = \mathbf{P}_{T,\max} + \mathbf{U}_{\text{inv},T} \mathbf{G}_{\text{inv},T} \quad (26)$$

$$\mathbf{G}_{\max,\text{inv}} = \mathbf{G}_{\max} + \mathbf{U}_{\text{inv},G} \mathbf{G}_{\text{inv},G} + \mathbf{U}_{\text{inv},\text{Re}} \quad (27)$$

式中: $\mathbf{G}_{\max,\text{inv}}$ 是扩容后的节点机组容量; $\mathbf{P}_{T,\max,\text{inv}}$ 是扩容后的输电线路额定容量; $\mathbf{G}_{\text{inv},G}$ 、 $\mathbf{G}_{\text{inv},T}$ 分别为可选增装机组、线路的容量.

(4) 可靠性约束.系统扩容规划过程中,需评估扩容方案的可靠性,因此需要在约束中加入可靠性评估.采用近似距离模型建立可靠性约束,首先建立考虑扩容容量的负荷可行域,再采用近似距离模型计算扩容方案的系统可靠性:

$$\mathbf{A}_{\text{inv}}(s) \mathbf{L} \leq \beta_{\text{inv},T}(s) \mathbf{P}_{T,\max,\text{inv}} + \beta_{\text{inv},G}(s) \mathbf{G}_{\max,\text{inv}} \quad (28)$$

$$\kappa_{\min}(s) = \min_{\tau=1,2,\dots,n_p} (\kappa \mid \mathbf{A}_{\text{inv},\tau}(s) \mathbf{L}_0 \kappa = \beta_{\text{inv},T,\tau}(s) \mathbf{P}_{T,\max,\text{inv}} + \beta_{\text{inv},G,\tau}(s) \mathbf{G}_{\max,\text{inv}}, \kappa > 0) \quad (29)$$

$$P_{\text{ls}}(s) = (1 - \kappa_{\min}(s)) \mathbf{I}^T \mathbf{L}_0 \quad (30)$$

式中: $\mathbf{A}_{\text{inv}}(s)$ 、 $\beta_{\text{inv},T}(s)$ 和 $\beta_{\text{inv},G}(s)$ 是扩容后系统状态 s 下的负荷可行域系数矩阵; $\mathbf{A}_{\text{inv},\tau}(s)$ 、 $\beta_{\text{inv},T,\tau}(s)$ 和 $\beta_{\text{inv},G,\tau}(s)$ 代表扩容后系统状态 s 下的负荷可行域的第 τ 个边界.

4.2 基于可靠性跟踪和贪心算法的优化求解算法

以可靠性提升为目标的电力系统扩容规划计算复杂度极高,主要有两方面原因:混合整数线性优化模型本身收敛慢甚至难以收敛;考虑可靠性的电力系统扩容规划包含大量系统故障状态的可靠性约束,使该优化问题进一步复杂化.可靠性评估包含的系统故障状态数量极多,一般包含数万甚至数百万个系统故障状态,导致难以采用传统的混合整数线性优化算法如 Benders 分解算法等求解.因此,针对考虑可靠性的电力系统扩容规划,采用启发式算法求解局部最优解是普遍解法.然而,粒子群算法^[9]、遗传算法^[10]在每次迭代过程中需要进行大量的可靠性评估,导致这些方法的计算时间极长.

本文基于设备容量可靠性跟踪结果,采用贪心算法求解所提的扩容规划问题.贪心算法求解的主要思路为:对可靠性跟踪结果最大的设备进行增装

扩容,并更新可靠性跟踪结果;不断对扩容方案和可靠性跟踪结果更新迭代,直至成本达到预算限制,实现扩容规划问题求解.与粒子群算法和遗传算法相比,贪心算法每次迭代仅需一次可靠性评估,大幅度节省了计算时间.基于贪心算法和可靠性跟踪的扩容规划求解完整流程可参考附录 A 中图 A1.

5 算例分析

讨论所提近似距离模型、可靠性跟踪模型和扩容规划模型及其求解算法的可行性.在算例 1 中,分别采用比林顿测试系统^[23](Roy Billinton test system, RBTS)、可靠性测试系统 1979 年版^[24](RTS-79)和可靠性测试系统 1996 年版^[25](RTS-96),在 3 个测试系统中验证了近似距离模型的精度和效率.算例 2 讨论了所提容量灵敏度模型的准确性,验证了所提针对设备容量的可靠性跟踪模型的有效性.算例 3 在此基础上验证了以可靠性提升为目标的扩容规划模型及其求解算法的有效性.算例 4 使用国内某省级电力系统验证了所提模型的可扩展性.

5.1 近似距离模型

分别在 RBTS、RTS-79 和 RTS-96 共 3 个测试系统中,采用各系统峰值负荷场景进行可靠性评估,验证所提出的近似距离模型的精度和效率.除了评估对象的不同,可靠性评估时间还受到蒙特卡罗模拟收敛精度的影响.因此,针对 3 个测试系统,蒙特卡罗模拟的收敛精度分别设为 0.01、0.01、0.03.采用 3 种方法进行对比:① 基于最优潮流模型的可靠性评估;② 基于负荷可行域模型的可靠性评估;③ 基于近似距离模型的可靠性评估.可靠性评估结果如表 1 所示.其中,3 个测试系统的蒙特卡罗模拟样本量分别为 1.01×10^6 、 1.09×10^5 、 7.6×10^4 ,符合文献^[26]中的估计,保证了可靠性评估结果的准确性.

结果表明,所提近似距离模型具有较高的精度:LOLP 没有误差,EENS 误差在 1%~3%.近似距离模型没有改变系统故障状态是否切负荷的判断原则,仅改变了系统切负荷大小的计算方法,因此 LOLP 没有误差而仅 EENS 存在误差.在保证精度的基础上,近似距离模型大幅度缩短了可靠性评估计算时间,所耗费的评估时间仅为负荷可行域模型评估时间的 28%~62%,小于最优潮流模型评估时间的 10%.算例表明,近似距离模型在负荷可行域模型的基础上,将切负荷计算从多维优化问题转变为了方程问题,在保证一定精度的同时有效降低切负荷计算的计算复杂度.

表 1 最优潮流模型、负荷可行域模型与近似距离模型在 3 个测试系统中的性能比较

Tab. 1 Computational complexity of LFR, OPF, and approximate distance method

测试系统	方法	LOLP/%	EENS/ (GW·h ⁻¹)	评估 时间/s
RBTS	最优潮流模型	0.98	1.06	733
	负荷可行域模型	0.98	1.06	151
	近似距离模型	0.98	1.09	71
RTS-79	最优潮流模型	8.48	127	690
	负荷可行域模型	8.48	127	64
	近似距离模型	8.48	129	18
RTS-96	最优潮流模型	1.38	24.8	1 116
	负荷可行域模型	1.38	24.8	24
	近似距离模型	1.38	25.2	15

5.2 可靠性跟踪模型

5.2.1 容量灵敏度模型准确性 测试 RTS-96 中 EENS 的机组容量灵敏度模型,通过与最优潮流模型和近似距离模型的可靠性结果对比,验证所提灵敏度模型的准确性.在峰值负荷场景下,先计算得到可靠性指标和对应的灵敏度矩阵.以第 23 台机组为例,其容量灵敏度大小为 -67.364 4.分别基于最优潮流模型和近似距离模型的结果,采用灵敏度模型计算第 23 台机组容量增大 5 MW 后的系统 EENS,结果如表 2 所示.灵敏度矩阵由近似距离模型推导得到,因此基于近似距离模型结果采用灵敏度模型得到的 EENS 与近似距离模型直接求得的结果完全相同,而基于最优潮流模型得到的结果存在细微误差.

表 2 灵敏度模型的可靠性评估结果对比

Tab. 2 Reliability evaluation with sensitivity method

基准方法	方法	EENS/(GW·h ⁻¹)	误差/%
最优潮流模型	最优潮流模型	24.5	—
	灵敏度模型	24.4	-0.8
近似距离模型	近似距离模型	24.7	—
	灵敏度模型	24.7	0

5.2.2 机组容量可靠性跟踪 采用所提灵敏度模型求取 EENS 对所有机组容量的灵敏度之后,将系统可靠性指标以灵敏度为权重分摊到各个设备,即可得到针对机组容量的可靠性跟踪结果.峰值负荷下 RBTS 的可靠性跟踪结果如表 3 所示.

同一节点上相同机组的灵敏度近似相等,这是因为同一节点上容量、可靠性参数相同的两台机组,

表 3 峰值负荷下 RBTS 机组容量可靠性跟踪结果

Tab. 3 Reliability tracking results under peak load in RBTS

序号	容量/ MW	所在节点	灵敏度	可靠性跟踪结果/ (MW · h ⁻¹)
1	40	1	-39.31	65.94
2	10	1	-70.74	118.67
3	20	1	-54.50	91.42
4	40	1	-39.22	65.79
5	5	2	-72.61	121.81
6	5	2	-72.64	121.86
7	20	2	-62.90	105.52
8	20	2	-62.71	105.19
9	20	2	-62.94	105.58
10	20	2	-63.16	105.95
11	40	2	-49.03	82.25

在可靠性评估过程中是相互等效的,而两台相同机组的容量灵敏度的细微误差是由蒙特卡罗模拟本身随机性导致的。

为了进一步测试可靠性跟踪模型在较大系统中的表现,进行峰值负荷下 RTS-96 的机组容量可靠性跟踪。同时,近似距离模型极大缩短了电力系统可靠性评估所需的计算时间,故还可以实现考虑一年 8 760 h 全场景的可靠性跟踪。表 4 所示为可靠性跟踪结果最大和最小的 5 台机组,其中包括考虑峰值负荷和考虑全场景的可靠性跟踪。可以看出,考虑全场景的可靠性跟踪结果与仅考虑峰值负荷的可靠性跟踪结果,无论从数值差距还是机组排序的角度,

表 4 RTS-96 机组容量可靠性跟踪结果

Tab. 4 Reliability tracking results in RTS-96

排序	考虑峰值负荷		考虑全场景	
	机组	可靠性跟踪结果/ (MW · h ⁻¹)	机组	可靠性跟踪结果/ (MW · h ⁻¹)
1	94	273.84	60	284.63
2	62	271.83	90	281.45
3	92	271.57	91	281.28
4	60	271.43	93	281.15
5	61	271.43	94	281.14
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
95	24	149.01	56	97.80
96	57	147.82	22	97.71
97	89	147.37	55	97.12
98	56	146.88	88	97.06
99	90	144.73	23	96.51

都具有一定的区别。这说明不同的负荷场景下,可靠性跟踪的结果不同,若仅考虑峰值负荷进行可靠性优化,可能无法达到最优的规划方案。

5.2.3 输电线路容量可靠性跟踪 采用所提灵敏度模型求取 EENS 对所有输电线路容量的灵敏度之后,即可得到针对输电线路容量的可靠性跟踪结果。针对峰值负荷下的 RBTS 进行线路容量可靠性跟踪,结果如表 5 所示。与机组容量可靠性跟踪不同,不同线路的容量可靠性跟踪结果差异较大,主要是由输电线路在系统拓扑中的位置和功能所决定的。

表 5 峰值负荷下 RBTS 线路容量可靠性跟踪结果

Tab. 5 Reliability tracking results for transmission lines under peak load in RBTS

序号	起始 节点	终止 节点	灵敏度	可靠性跟踪结果/ (MW · h ⁻¹)
1	1	2	-3.03 × 10 ⁻²	0.051
2	1	3	-3.54 × 10 ⁻²	0.059
3	1	3	-3.54 × 10 ⁻²	0.059
4	2	4	-1.38	2.305
5	2	4	-1.38	2.305
6	3	4	0	0
7	3	5	0	0
8	4	5	0	0
9	5	6	0	0

RBTS 单线图如图 5 所示。以 9 号线路为例,该线路容量为 71 MW,所承担的功能是以单回线路供给 6 号节点上 20 MW 的负荷。若 9 号线路未发生故障,其容量的微小变化无法对 6 号节点上的 20 MW

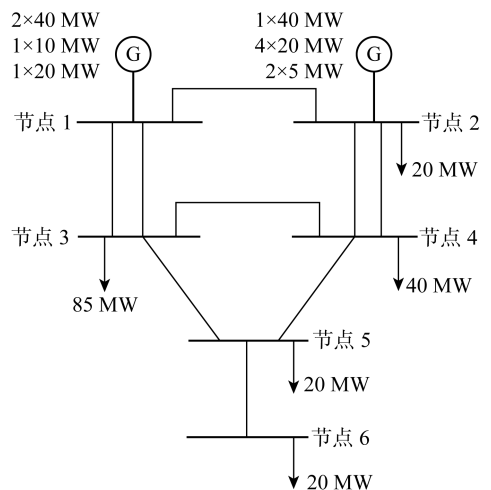


图 5 RBTS 单线图

Fig. 5 Line diagram of RBTS

负荷产生影响;若 9 号线路发生故障,则无论其他线路和机组状态如何,6 号节点的所有负荷都需要被切除.因此,9 号线路的容量改变,并不会对系统的可靠性有所影响,求得的 EENS 对 9 号线路容量灵敏度为 0.

此外,对比表 3 和表 5 可以看出,机组容量灵敏度远高于输电线路容量灵敏度.在以可靠性提升为目标的电力系统扩容规划过程中,一般优先考虑增装机组容量,而增装输电线路的情况较少.

5.3 以可靠性提升为目标的电力系统扩容规划

为了验证以可靠性提升为目标的扩容规划模型及基于贪心算法的优化求解算法的可行性,采取峰值负荷下 RTS-96 进行扩容规划.假定待选机组参数如表 6 所示,扩容规划的预算金额为 10 亿元.运行所提扩容规划模型及求解算法,求解过程中每次迭代的扩容方案如表 7 所示.节点 22、46 和 70 上的机组容量对系统可靠性影响较大,在 6 次迭代过程中,主要为这 3 个节点增装机组.最终结果是在节点 22、46 和 70 各增装一台 50 MW 机组.

表 6 扩容规划待选机组
Tab. 6 Generations to be selected

机组	机组容量/MW	不可用率	投资成本/亿元
1	20	0.099	1.5
2	50	0.095	3.0
3	100	0.040	5.0

表 7 扩容规划模型求解迭代过程

Tab. 7 Solving process of expansion planning model

迭代次数	机组安装节点			系统 EENS/ (MW·h ⁻¹)	已用成本/ 亿元
	机组 1	机组 2	机组 3		
0	—	—	—	24 972	0
1	22	—	—	21 808	1.5
2	22、46	—	—	20 950	3.0
3	22、46、70	—	—	18 396	4.5
4	46、70	22	—	16 094	6.0
5	70	22、46	—	13 614	7.5
6	—	22、46、70	—	11 619	9.0

为了进一步验证所提模型的有效性,将所得到的扩容方案与其他几种安装 3 台 50 MW 机组的扩容方案进行对比.所对比的扩容方案为采取粒子群算法生成的达到局部最优的扩容方案,对比结果如图 6 所示.可以看出,采用所提模型得到的扩容规划方案,其系统 EENS 指标最低,证明了所提针对设备容量可靠性跟踪模型的准确性,验证了所提扩容

规划模型及其求解算法的可行性.值得注意的是,所提针对设备容量的可靠性跟踪模型基于的是系统 EENS 对设备容量的灵敏度模型,因此采用该模型进行扩容规划过程中,仅可以保证 EENS 达到最低,但无法保证 LOLP 达到最低.

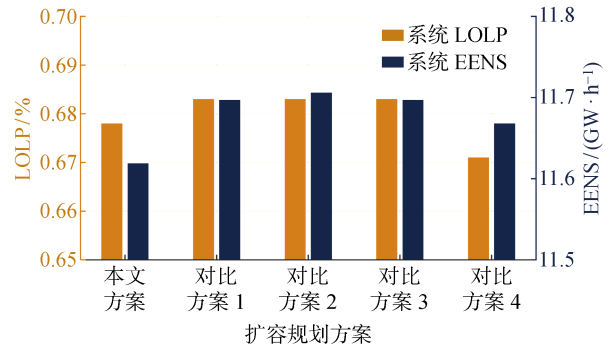


图 6 不同扩容方案的可靠性对比

Fig. 6 Reliability comparison of different capacity expansion decisions

进一步地,采用考虑系统全年 8 760 h 全场景的可靠性跟踪结果进行扩容规划,全场景的迭代过程与考虑峰值负荷相同,均为在节点 22、46 和 70 各增装一台 50 MW 机组.将扩容规划方案与粒子群算法得到的几种方案进行对比,结果如图 7 所示.所提模型和算法得到的扩容规划方案可以达到最低的 EENS,证明了考虑全场景可靠性跟踪的可行性.同时,考虑全场景的扩容规划方案与考虑峰值负荷的结果相同,进一步说明了节点 22、46 和 70 上的机组容量对系统可靠性影响大.

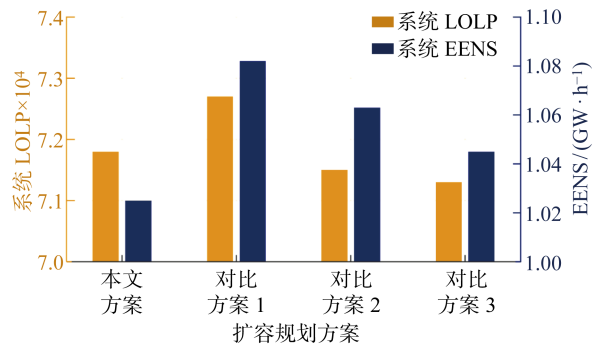


图 7 考虑全场景的不同扩容方案可靠性对比

Fig. 7 Reliability comparison of different capacity expansion decisions considering all scenarios

5.4 实际系统算例

为了测试近似距离模型和灵敏度模型在大规模电力系统中的可扩展性,以某省级电力系统为例进行可靠性评估.该系统包含 220 台发电机、1 393 台母线和 2 033 条输电线路;系统峰值负荷为 38.76

GW,总装机容量为 64.471 GW.设定蒙特卡罗模拟的收敛精度为 0.03,最终模拟了 3.3×10^6 个样本得到可靠性评估结果,如表 8 所示.值得注意的是,近似距离模型可以正常求取 LOLP 和 EENS,但是灵敏度模型仅能求取系统 EENS,无法求取系统 LOLP.

表 8 某省级电网可靠性评估结果

Tab. 8 Reliability evaluation of provincial system

模型	LOLP/%	EENS/ (GW · h ⁻¹)	可靠性评估 时间/s
最优潮流模型	0.331	1.187	5 112
近似距离模型	0.335	1.203	620
灵敏度模型	—	1.203	<1

可以看出,近似距离模型的评估时间仅为最优潮流模型的 12%,但依然具有较高的精度,且灵敏度模型的表现也和 RTS-96 测试系统中一致.该算例表明,近似距离模型和可靠性跟踪模型可以应用于大规模系统,具有良好的可扩展性.

6 结语

提出一种基于负荷可行域和可靠性跟踪的电力系统扩容规划模型,实现以可靠性提升为目标的电力系统扩容规划.首先,提出基于负荷可行域的近似距离模型,将切负荷计算从优化问题转变为方程问题,实现了可靠性指标对设备容量的解析表达.在此基础上,建立 EENS 对设备容量的灵敏度模型,实现了针对设备容量的电力系统可靠性跟踪.最后,提出以可靠性提升为目标的电力系统扩容规划模型及基于贪心算法和可靠性跟踪的优化求解算法.算例表明,所提近似距离模型大幅度降低了可靠性评估的计算复杂度,为针对设备容量的可靠性跟踪提供理论支撑.算例验证了基于近似距离模型的可靠性跟踪模型的准确性,以及所提扩容规划模型及求解算法的可行性.该方法具有良好的可扩展性,适用于大规模电力系统.

附录见本刊网络版(xuebao.sjtu.edu.cn/CN/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.048)

参考文献:

[1] BARINGO L, BARINGO A. A stochastic adaptive robust optimization approach for the generation and transmission expansion planning[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(1): 792-802.

[2] VERÁSTEGUI F, LORCA Á, OLIVARES D, et

al. An adaptive robust optimization model for power systems planning with operational uncertainty[C]// *IEEE Power & Energy Society General Meeting*. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2020: 9281912.

- [3] YIN S F, WANG J H. Generation and transmission expansion planning towards a 100% renewable future [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(4): 3274-3285.
- [4] YIN W Q, FENG S L, HOU Y H. Stochastic wind farm expansion planning with decision-dependent uncertainty under spatial smoothing effect [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(3): 2845-2857.
- [5] BAYANI R, MANSHADI S D. Resilient expansion planning of electricity grid under prolonged wildfire risk[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2023, 14(5): 3719-3731.
- [6] MÍNGUEZ R, VAN ACKOOIJ W, GARCÍA-BERTRAND R. Constraint generation for risk averse two-stage stochastic programs[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 288(1): 194-206.
- [7] GARCÍA-CEREZO Á, GARCÍA-BERTRAND R, BARINGO L. Computational performance enhancement strategies for risk-averse two-stage stochastic generation and transmission network expansion planning[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(1): 273-286.
- [8] 王纬纶. 考虑可靠性与灵活性的输电网规划研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- WANG Weilun. Study on transmission network planning considering reliability and flexibility[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [9] 张家浩. 基于改进粒子群算法的输电网规划方案研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.
- ZHANG Jiahao. Research on transmission network planning scheme based on improved particle swarm optimization [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022.
- [10] 徐岩, 张建浩. 计及故障不确定性的多阶段多目标电源扩展规划[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(12): 443-451.
- XU Yan, ZHANG Jianhao. Multi-stage multi-objective power expansion planning with fault uncertainty [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(12): 443-451.
- [11] 纪静, 谢开贵, 曹侃, 等. 广东电网薄弱环节辨识及可靠性改善分析[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(13): 98-102.
- JI Jing, XIE Kaigui, CAO Kan, et al. Weak part identification and reliability improvement analysis of

- Guangdong power grid[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2011, 35(13): 98-102.
- [12] 郑颖, 谢开贵, 李洪兵, 等. 基于可靠性跟踪的薄弱环节辨识方法在省级电网可靠性改善中的应用研究[J]. **电测与仪表**, 2015, 52(6): 118-123.
ZHENG Ying, XIE Kaigui, LI Hongbing, *et al.* Application of the weak part identification based on reliability tracking method to reliability improvement of provincial power network[J]. **Electrical Measurement & Instrumentation**, 2015, 52(6): 118-123.
- [13] XIE K G, BILLINTON R. Tracing the unreliability and recognizing the major unreliability contribution of network components[J]. **Reliability Engineering & System Safety**, 2009, 94(5): 927-931.
- [14] 胡博, 谢开贵, 黎小林, 等. HVDC输电系统可靠性跟踪方法[J]. **中国电机工程学报**, 2010, 30(10): 29-35.
HU Bo, XIE Kaigui, LI Xiaolin, *et al.* Techniques of tracing the unreliability contributions of HVDC transmission system components[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2010, 30(10): 29-35.
- [15] 胡博, 周家浩, 王蕾报, 等. 考虑削负荷责任分摊的电力系统可靠性跟踪方法[J]. **电力系统自动化**, 2020, 44(23): 64-71.
HU Bo, ZHOU Jiahao, WANG Leibao, *et al.* Reliability tracking method of power system considering responsibility allocation of load shedding[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2019, 44(23): 64-71.
- [16] CAO M S, SHAO C Z, HU B, *et al.* Reliability tracing of the integrated energy system using the improved Shapley value [J]. **Energy**, 2022, 260: 124997.
- [17] 黎小林, 曹侃, 谢开贵, 等. 基于最小二乘法的高压直流输电系统可靠性灵敏度分析[J]. **电力系统自动化**, 2009, 33(18): 12-16.
LI Xiaolin, CAO Kan, XIE Kaigui, *et al.* Sensitivity analysis of HVDC transmission system reliability using the least square method [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2009, 33(18): 12-16.
- [18] 李生虎, 于丽萍, 马燕如, 等. 电网可靠性对可控串联补偿部件参数的灵敏度分解算法[J]. **电力系统自动化**, 2016, 40(20): 20-25.
LI Shenghu, YU Liping, MA Yanru, *et al.* Sensitivity decomposition algorithm of power system reliability oriented to parameters of TCSC components[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2016, 40(20): 20-25.
- [19] 任震, 梁振升, 黄雯莹. 交直流混合输电系统可靠性指标的灵敏度分析[J]. **电力系统自动化**, 2004, 28(14): 33-36.
REN Zhen, LIANG Zhensheng, HUANG Wenying. Sensitivity analysis of AC/DC hybrid transmission system reliability indices[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2004, 28(14): 33-36.
- [20] 赵渊. 大电力系统可靠性评估的灵敏度分析及其校正措施模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
ZHAO Yuan. Sensitivity analysis of reliability evaluation of large power system and research on its correction measures model[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.
- [21] 谢楚. 基于设备灵敏度分析的输电网可靠性优化[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
XIE Chu. Reliability optimization of transmission network based on equipment sensitivity analysis[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [22] LI X, XIE K G, SHAO C Z, *et al.* A region-based approach for the operational reliability evaluation of power systems with renewable energy integration[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2024, 39(2): 3389-3400.
- [23] BILLINTON R, KUMAR S, CHOWDHURY N, *et al.* A reliability test system for educational purposes—basic data[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1989, 4(3): 1238-1244.
- [24] Probability Methods Subcommittee. IEEE reliability test system[J]. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1979, PAS-98(6): 2047-2054.
- [25] GRIGG C, WONG P, ALBRECHT P, *et al.* The IEEE Reliability Test System—1996. A report prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1999, 14(3): 1010-1020.
- [26] 赵渊, 周家启, 刘志宏. 大电网可靠性的序贯和非序贯蒙特卡洛仿真的收敛性分析及比较[J]. **电工技术学报**, 2009, 24(11): 127-133.
ZHAO Yuan, ZHOU Jiaqi, LIU Zhihong. Convergence analysis and comparison of sequential and non-sequential Monte-Carlo simulation for bulk power system reliability assessment[J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**, 2009, 24(11): 127-133.

(本文编辑:孙伟)