

基于改进矩阵加速状态枚举法的配电网供电可靠性提升策略

肖丽莎¹,程江洲^{1,2},鲍刚^{1,2},朱长东^{1,3},张博文¹,王潇¹

(1. 三峡大学 电气与新能源学院,湖北 宜昌 443002;

2. 湖北省微电网工程技术研究中心,湖北 宜昌 443002;

3. 国网宜昌供电公司,湖北 宜昌 443000)

摘要:随着分布式电源接入,配电网复杂程度日益提高,为提升分布式能源接入配电网时可靠性评估的计算效率及准确性,提出了一种基于改进矩阵加速状态枚举法的配电网供电可靠性提升策略。首先,基于线性规划模型,建立配电网供电可靠性评估指标,通过测试系统仿真分析,识别出配电网薄弱环节。然后,在薄弱环节接入分布式电源,有效提升配电网供电可靠性。最后,为解决传统状态枚举法在复杂配电网中计算效率低及动态适应性差的问题,提出了改进矩阵加速状态枚举法,对配电网矩阵进行降维处理,引入LSTM波动预测,减小传统配电网评估计算方差,提升计算准确性。通过对76节点、126节点、377节点、957节点配电网系统进行可靠性评估方法对比,有效验证改进算法的评估效率得到显著提升,在957节点的复杂配电网中,改进算法相较于蒙特卡洛法计算效率提升近94%。

关键词:状态枚举法;薄弱点识别;评估效率;计算方差;供电可靠性

中图分类号:TM761 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed26627

A Power Supply Reliability Improvement Strategy for Distribution Network Based on Improved Matrix Accelerated State Enumeration Method

XIAO Lisha¹, CHENG Jiangzhou^{1,2}, BAO Gang^{1,2}, ZHU Changdong^{1,3}, ZHANG Bowen¹, WANG Xiao¹

(1. College of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China;

2. Hubei Microgrid Engineering Technology Research Center, Yichang 443002, Hubei, China;

3. State Grid Yichang Power Supply Company, Yichang 443000, Hubei, China)

Abstract: With the increasing complexity of distribution grids due to the integration of distributed power sources, an improved matrix acceleration state enumeration method was proposed to enhance the computational efficiency and accuracy of reliability assessment when integrating distributed energy into distribution grids. First, a linear programming model was established to define reliability assessment indicators for distribution grids. Through system simulation analysis, the weak links in the distribution grid were identified. Then, distributed power sources were integrated into the weak links to effectively enhance the reliability of the distribution grid. Finally, to address the issues of low computational efficiency and poor dynamic adaptability of traditional state enumeration methods in complex distribution grids, an improved matrix-accelerated state enumeration method was proposed. The method reduced the dimensionality of the distribution grid matrix, incorporated LSTM wave prediction, reduced the computational variance of traditional distribution grid assessments, and improved computational accuracy. By comparing reliability assessment methods for distribution grid systems with 76 nodes, 126 nodes, 377 nodes, and 957 nodes, the improved algorithm's assessment efficiency was effectively validated as significantly enhanced. In the complex distribution grid with 957 nodes, the improved algorithm achieved nearly 94% increase in computational efficiency compared to the Monte Carlo method.

Key words: state enumeration method; identification of weak points; evaluate efficiency; calculate the variance; power supply reliability

基金项目:国家自然科学基金(62476153)

作者简介:肖丽莎(2000—),女,硕士研究生,主要研究方向为配电网供电可靠性评估,Email:1204549483@qq.com

近年来,随着供电侧分布式光伏接入^[1],以及负荷侧用电需求增大,配电网的复杂程度逐渐升高,给配电网稳定性带来一定冲击,配电网可靠性评估方法亟需进一步发展改进^[2],需要更先进的控制技术和协调策略来确保电力系统的稳定。配电网供电可靠性评估通常采用模拟法和解析法,其中蒙特卡洛模拟法通过随机生成系统状态来预测中断频率,适用于各种复杂和随机的系统^[3],能够处理不同的不确定因素,但计算量大,耗时长,且无法反映故障之间的逻辑关系。

考虑新能源接入电网后对配电网供电可靠性的影响,文献[4-6]分析了在微网孤岛运行的模式下,建立微网内电源-负荷节点的逻辑关系模型识别系统可靠性的薄弱环节,但是对提升配电网供电可靠性的方法研究尚有欠缺,需进一步考虑光储接入的波动性问题。文献[7]考虑了不同地区的地域差异,提出了一种基于 GRA-K-means++算法的配电网供电可靠性水平评价方法,来识别配电系统中导致供电可靠性偏低的因素,但是对该算法计算准确率讨论有一定不足。文献[8-11]考虑当新能源光伏接入时配电网电压越限和变压器反向过载问题,提出了一种双层优化模型,提高了配电网供电可靠性,但配置方案的适用性以及准确性需要进一步讨论。文献[12-16]考虑了电网中柔性开关与智能开关的配置方案,提升了配电网故障时自愈能力从而提高了配电网的供电可靠性,但是对典型场景考虑不全面,需进一步拓展应用场景。

总而言之,传统解析法适用于简单配电网系统,在复杂配电网系统中计算耗时较长,且无法适应分布式电源(distributed generation, DG)接入的波动性网络。蒙特卡洛法虽然能适用于复杂系统,模拟多种场景,但是在处理低概率事件时存在统计波动,面对复杂配电网时需要大量样本,计算耗时较长。本文通过线性规划模型^[17],提出了一种改进矩阵加速状态枚举法配电网可靠性评估算法,相较于传统的评估方法提高了评估模型在多节点复杂配电网中的计算效率。同时在高比例分布式电源接入场景中,降低了配电网可靠性评估的计算方差,提升了可靠性评估准确性。

1 可靠性指标建立

1.1 可靠性分析基本指标

可靠性指标采用的是传统的配电网可靠性

指标作为一级评价指标。采用系统平均故障频率指数 SAIFI、系统平均中断持续时间指数 SAIDI、平均系统可用性指数 ASAI 及预期未提供能量 EENS。定义负荷节点 s , 与节点 s 连接的所有馈线中, 上游支路会导致节点 s 因开关动作以及故障检修而停电。其他支路发生故障, 则会导致节点 s 因开关动作而停电。

1.2 可靠性指标建立

标准的可靠性指标建立依赖于配电网网络拓扑模型和负荷状况, 配电网的实际拓扑情况的运行状态复杂, 为了便于分析, 本文提出了以下实用性假设^[18-19]。

1) 将配电网中元件定义为三状态模型, 分别为正常运行状态、故障断电状态及故障检修状态。考虑单个支路故障发生持续性中断, 支路上故障通过故障频率 λ_{ij} 和停电持续时间 τ_{ij} 两个指标来表示。

2) 考虑配电网系统在常规运行状态下是辐射状的, 且与电源相连的每个支路之间都配备有断路器, 并且有自动重合闸装置。所有支路都配备有隔离开关, 保证在发生故障能及时隔离故障元件, 减少其他非故障元件的停电时间。

3) 当故障发生时上游断路器跳闸, 通过操作隔离开关和断路器进行网络重构。对故障元件进行及时隔离, 非故障元件持续供电, 故障元件修复后恢复供电。

根据上述的假设, 节点中断持续时间为以下两方面: 1) 非该元件故障时, 该元件仅因开关切换导致停电; 2) 该元件故障时, 中断持续时间为开关切换及故障修复的时间。

根据以上假设提出受开关动作影响的节点 s 的中断频率 N_s^{SW} , 受开关动作和故障修复影响的节点 s 的中断频率 N_s^{RP} , 因开关动作导致节点 s 停电时间 D_s^{SW} , 因开关动作和故障修复导致节点 s 的停电时间 D_s^{RP} 。计算公式如下:

$$N_s^{SW} = \sum_{(ij) \in rls \in \Psi_i^{SW}} \lambda_{ij} \quad \forall s \in \Psi^{LN} \quad (1)$$

$$N_s^{RP} = \sum_{(ij) \in rls \in \Psi_i^{RP}} \lambda_{ij} \quad \forall s \in \Psi^{LN} \quad (2)$$

$$D_s^{SW} = \sum_{(ij) \in rls \in \Psi_i^{SW}} \lambda_{ij} \tau_{ij}^{SW} \quad \forall s \in \Psi^{LN} \quad (3)$$

$$D_s^{RP} = \sum_{(ij) \in rls \in \Psi_i^{RP}} \lambda_{ij} \tau_{ij}^{RP} \quad \forall s \in \Psi^{LN} \quad (4)$$

式中: λ_{ij} 为分支故障频率; τ_{ij}^{RP} 为分支故障修复时间及开关切换中断时间之和; τ_{ij}^{SW} 为分支仅因开关

切换中断时间; Ψ^{LN} 为所有用户或节点的集合, 这里特指受停电影响的用户或节点集合。

系统总中断频率 N_s^T 即为系统断路器的跳闸频率 N_{ij}^{CB} 。受开关动作影响的节点 s 的中断频率 N_s^{SW} 可表示为总中断频率 N_s^T 与受开关动作和故障修复影响的节点 s 的中断频率 N_s^{RP} 之差。

仅因开关切换动作影响的停电时间 D_s^{SW} 为节点 s 连接的所有馈线中, 除上游支路外的支路发生故障, 导致节点 s 因开关动作而停电的时间。影响节点 s 的预期修复时间和开关中断持续时间 D_s^{RP} 为上游支路修复时间和开关中断时间总和。相应的可靠性指标表示及客户中断频率 CIF_s 及客户中断持续时间 CID_s 如下:

$$CIF_s = N_s^{RP} + N_s^{SW} \quad \forall s \in \Psi^{LN} \quad (5)$$

$$CID_s = D_s^{RP} + D_s^{SW} \quad \forall s \in \Psi^{LN} \quad (6)$$

$$SAIFI = \frac{\sum_{s \in \Psi^{LN}} N C_s (N_s^{RP} + N_s^{SW})}{\sum_{s \in \Psi^{LN}} N C_s} \quad (7)$$

$$SAIDI = \frac{\sum_{s \in \Psi^{LN}} N C_s (D_s^{RP} + D_s^{SW})}{\sum_{s \in \Psi^{LN}} N C_s} \quad (8)$$

$$ASAI = 1 - \frac{SAIDI}{8760} \quad (9)$$

$$EENS = \sum_{b \in B} \frac{\Delta_b}{8760} \sum_{s \in \Psi^{LN}} CID_s \mu_b L_s \quad (10)$$

式中: C_s 为节点 s 的未供应能量; N 为未供应能量的节点总数; Δ_b 为分支 b 的停电持续时间, h; μ_b 为分支 b 发生故障的频率; L_s 为用户 s 的负荷重要性或负荷系数, 用于调整或反映电能需求的优先级或敏感度。

2 线性规划模型优化计算

2.1 线性规划模型介绍

通过对配电网的潮流分析定义目标函数, 定义线性不等式作为计算式的约束范围, 并且限制决策变量的取值范围, 满足所有约束条件的集合可构成一个可行域。在这个可行域内寻找出满足函数不等式的值, 得到满足条件的最优解。

根据二值离散决策变量, 在配电网的可靠性评估中, 设定变量来模拟不同节点的供电中断情况、分支的故障情况, 以及这些故障的持续时间。根据这三者的相互影响关系来计算出配电网供电可靠性关键指标, 根据配电网的潮流约束, 将这些潮流变量的最优值等效为代数表达式。

根据电路拓扑图支路故障频率和停电持续时间来计算节点的中断频率和停电持续时间。通过简单的辐射网络来进行分析, 本例包括一个电源节点和7个负载节点, 电源提供3条馈线, 拓扑图如图1所示。

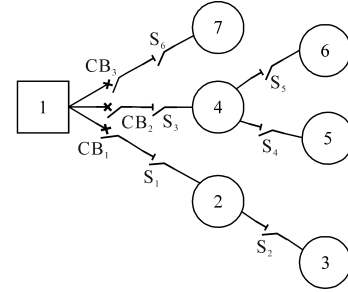


图1 网络拓扑图

Fig.1 Network topology

图1中分支故障频率 λ_{ij} 、分支故障修复时间及开关切换中断时间之和 τ_{ij}^{RP} 、分支仅因开关切换中断时间 τ_{ij}^{SW} 取值如表1所示。

表1 各支路故障率及中断持续时间

支路	1—2	1—4	1—7	2—3	4—5	4—6
$\lambda_{ij}/(\text{次} \cdot \text{a}^{-1})$	0.5	0.4	0.3	0.4	0.2	0.1
τ_{ij}^{RP}/h	1.0	1.5	2.0	2.0	3.0	4.0
τ_{ij}^{SW}/h	0.15	0.2	0.5	0.6	0.3	0.45

由表1参数计算5节点的中断频率和中断持续时长。5节点因开关动作和故障检修的中断频率 N_5^{RP} 为支路1—4和支路4—5的中断频率的总和, 即 $N_5^{RP} = 0.6$ 次/a。5节点因开关动作和故障检修的中断持续时间为 $D_5^{RP} = 1.2$ h/a。当仅受开关动作影响时, 5节点中断频率为 $N_5^{SW} = 0.1$ 次/a。5节点的中断持续时间 $D_5^{SW} = 0.045$ h/a。由此计算得5节点的总中断频率为 $N_5^T = 0.7$ 次/a, 由逻辑分析计算得5节点的总中断持续时间为 $D_5^T = 1.245$ h/a。

2.2 潮流约束模型建立

分析某一个节点的最优潮流分布, 并根据计算约束式来计算该节点在相应负荷条件下的运行水平。根据潮流分布模拟在虚拟系统下的负荷运行情况, 假设某节点为唯一负荷点, 其他节点仅作为传输节点, 将该节点负荷设置为1(标么值), 同时忽略其余节点对系统的影响, 仅关注目标节点的潮流分布, 设置为0(标么值)。由此提出以下的潮流约束模型:

$$\text{Minimize} \sum_{\substack{\tilde{f}_{ijs} \\ \tilde{f}_{jis}}} (\tilde{f}_{ijs} + \tilde{f}_{jis}) \quad (i,j) \in r \quad (11)$$

约束模型服从以下条件:

1) 功率平衡条件:

$$\sum_{j \in \Psi_i} (\tilde{f}_{ijs} - \tilde{f}_{jis}) = \tilde{g}_{is}^{SS} - \tilde{L}_{is} \quad \forall i \in \Psi^N \quad (12)$$

其中

$$\tilde{L}_{is} = \begin{cases} 1 & \forall i \in \Psi^N | i = s \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

2) 支路相关变量限制:

$$0 \leq \tilde{f}_{ijs} \leq 1 \quad \forall i \in \Psi_i, \forall j \in \Psi^N \quad (14)$$

3) 发电站相关变量限制:

$$0 \leq \tilde{g}_{is}^{SS} \leq 1 \quad \forall i \in \Psi^{SS} \quad (15)$$

$\tilde{f}_{ijs}$ 与 $\tilde{f}_{jis}$ 为两个连续变量, 其中 $\tilde{f}_{ijs}$ 为节点 s 对应运行工况下虚拟系统连接 i, j 支路的潮流, 当潮流从 i 流向 j 时, $\tilde{f}_{ijs}$ 为 1, 否则为 0。 $\tilde{g}_{is}^{SS}$ 为连续变量, 代表节点 s 在虚拟系统对应的工况下发电站节点 i 的功率输入, 只能取 1 或 0。其中约束条件具有单位模数结构, 即单位模数矩阵是一个方阵, 基向量在基底中的系数为 1。矩阵其他元素为 0, 除了主对角线上的元素外, 单位模数矩阵的其他所有元素都是 0。参数 $\tilde{L}_{is}$ 为二进制参数, 当 $i = s$ 时, $\tilde{L}_{is}$ 取值为 1, 同时保障 $\tilde{f}_{ijs}, \tilde{f}_{jis}, \tilde{g}_{is}^{SS}$ 所取参数只能为 0 或 1。以上潮流约束模型排除了 $\tilde{f}_{ijs}$ 和 $\tilde{f}_{jis}$ 同时等于 1 的情况。

2.3 节点的中断频率与中断持续时间计算

根据以上建模分析, 供电可靠性指标 N_s^{SW} , N_s^{RP} , D_s^{SW} , D_s^{RP} 可采用变量 $\tilde{f}_{ijs}$ 和 $\tilde{f}_{jis}$ 表示, 增强节点之间的逻辑关系。

1) 当 $\tilde{f}_{ijs} = 1$ 或 $\tilde{f}_{jis} = 1$, 支路 ij 向节点 s 供电, 变量 $\tilde{f}_{ijs}$ 和 $\tilde{f}_{jis}$ 可以用来判断支路 ij 的故障是否会导致节点 s 修复和开关动作, 因此因故障修复和开关动作的中断频率如下:

$$N_s^{RP} = \sum_{(ij) \in r} (\tilde{f}_{ijs} + \tilde{f}_{jis}) \lambda_{ij} \quad (16)$$

2) 对于负荷节点, 总中断频率 N_s^T 与 N_s^{RP} 之差为因开关动作导致的中断频率 N_s^{SW} , 如下式所示:

$$N_s^{SW} = N_s^T - N_s^{RP} \quad (17)$$

且影响节点 s 的总中断频率 N_s^T 为 s 所处馈线中所有的支路的中断频率之和 N_{ij}^{CB} , 如下式所示:

$$N_s^T = \sum_{i \in \Psi^{N^s}} \sum_{j \in \Psi_i} N_{ij}^{CB} (\tilde{f}_{ijs} + \tilde{f}_{jis}) \quad (18)$$

且所有支路的中断频率即为断路器的中断频率, 即有如下表达式:

$$N_{ij}^{CB} = \sum_{s \in \Psi^{N^s}} [(\sum_{r \in \Psi_s} \tilde{f}_{rss} \lambda_{rs}) \tilde{f}_{ijs}] \quad (19)$$

3) 因故障修复和开关动作的中断持续时间

D_s^{RP} 为

$$D_s^{RP} = \sum_{(ij) \in r} (\tilde{f}_{ijs} + \tilde{f}_{jis}) \lambda_{ij} \tau_{ij}^{RP} \quad (20)$$

根据式(20)对 5 节点因故障修复时间和开关切换中断时间进行计算, 计算得到中断时间为 1.2 h/a, 与实测 5 节点因开关动作和故障检修的中断持续时间总和一致, 验证了线性规划模型的准确性。

4) 因开关动作而导致节点 s 中断持续时间 D_s^{SW} 为

$$D_s^{SW} = D_s^{T, SW} - \bar{D}_s^{SW} \quad (21)$$

其中

$$\bar{D}_s^{SW} = \sum_{(ij) \in r} (\tilde{f}_{ijs} + \tilde{f}_{jis}) \lambda_{ij} \tau_{ij}^{SW} \quad (22)$$

受断路器影响的中断持续时间为

$$D_{ij}^{CB, SW} = \sum_{s \in \Psi^{N^s}} [(\sum_{r \in \Psi_s} \tilde{f}_{rss} \lambda_{rs} \tau_{rs}^{SW}) \tilde{f}_{ijs}] \quad (23)$$

由上述停电时长计算 5 节点因开关动作停电时长 D_s^{SW} 为 0.14 h/a。当对 5 节点进行供电时, $\tilde{f}_{145} = 1$, 计算得到中断持续时长为 0.185 h/a, 则计算仅有开关切换中断持续时间为 0.045 h/a。

2.4 通过接入分布式电源提高供电可靠性

通过上述可靠性评估模型对配电网的薄弱环节进行识别, 针对元件的中断概率与中断持续时间, 枚举故障场景, 得到可能元件组合, 识别出薄弱环节, 通过分布式电源接入提高配电网供电可靠性。

考虑分支线保护、隔离开关、分段断路器的影响, 根据分布式电源的供电情况进行改进, 计算负荷点 i 的可靠性指标同时需要考虑主馈线 DG 的二重故障, 其中故障频率 λ_i 、平均故障中断时间 γ_i , 年平均停电时间 Y_i 的计算模型^[20]如下:

$$\lambda_i = \sum_{k=1}^{N_D} \lambda_{Dk} \lambda_{S,k} (\gamma_D + \gamma_{S,k}) \quad (24)$$

$$\gamma_i = \sum_{k=1}^{N_D} \frac{\gamma_D \gamma_{S,k}}{\gamma_D + \gamma_{S,k}} \quad (25)$$

$$Y_i = \lambda_i \gamma_i \quad (26)$$

式中: λ_D, γ_D 分别为 DG 的故障频率和故障平均停电持续时长; $\lambda_{S,k}, \gamma_{S,k}$ 分别为 k 段馈线的故障频率和故障平均停电持续时间; N_D 为位于 DG 及负荷点连接的主馈线数量。

3 改进矩阵加速状态枚举法

在配电网可靠性评估中, 状态枚举法的计算复杂度随系统规模呈指数级增长, 通过引入矩阵

运算,可以显著优化状态生成、分析及可靠性指标计算过程,降低配电网可靠性评估计算的复杂度,提升可靠性评估计算效率。

3.1 算法原理

状态枚举法是一种通过列举所有可能的系统状态来评估配电网供电可靠性的方法。将状态之间的转移关系建模为矩阵形式,假设状态数为 n ,构造一个 $n \times n$ 的转移矩阵 M ,其中 $M[i][j]$ 表示从状态 i 转移到状态 j 的规则。

通过矩阵幂运算多步状态转移,当经过 k 步转移后的状态等价于计算 M^k ,利用二分法将矩阵幂计算的时间复杂度从 $O(k)$ 降为 $O(\log k)$,降低配电网矩阵复杂度。通过构建配电网有向状态图,计算有向图中从起点到终点经过 k 条路径数。首先构造邻接矩阵 A ,其中 $A[i][j] = 1$ 表示存在边 $i \rightarrow j$,然后计算 A^k ,结果矩阵中即为从 i 到 j 经过 k 步的路径数,最后通过快速幂进一步降低时间复杂度。但是当配电网节点较多规模较大时,状态枚举法组合爆炸,而且对大规模系统内存有一定限制,对大规模配电网无法高效快速地运行处理。

3.2 算法改进

当配电网节点增加时,传统的状态枚举法在大规模电网的计算中效率较低,且当配电网模型引入分布式电源时,动态适应性差,无法实时动态更新。因此提出一种改进算法,将原始的配电网大规模矩阵分解为子矩阵,分布式处理结果后合并,对矩阵进行降维处理,大幅度提升计算效率。并在接入分布式电源时,结合LSTM预测出新能源的出力,动态更新分布式电源出力概率矩阵,提升计算准确性。

1)将配电网抽象为图结构,节点表示母线、开关、负荷点等,边表示线路和变压器。构造矩阵表示,邻接矩阵 A 来表示元件的连接关系,关联矩阵 B 来表示负荷点与元件之间的依赖关系,即 $B[i][j] = 1$ 表示元件 j 故障会导致负荷点 i 停电,状态向量 s 为二进制向量,表示元件 j 故障。

2)利用组合生成多阶状态故障(k 个元件同时故障)的状态矩阵 S ,每行代表一个故障组合,利用二进制矩阵高效生成组合,对高维状态矩阵采用系数存储格式,仅保留非零元素。通过矩阵乘法 $C = B \cdot S^T$,可计算所有故障状态下的停电范围, $C[i][j] = 1$ 即表示在状态 k 下,元件 j 故障导致负荷点 i 停电。通过组合形成的多状态故障矩

阵以及原始数据结构形成的矩阵拓扑,形成元件受累矩阵。

3)在CPU上利用CUDA加速矩阵乘法,大幅度提高计算效率。利用采样法结合矩阵运算,优先计算高概率或者高影响状态,通过布尔矩阵过滤不可能导致停电的状态,将非关键元件进行隔离。将大规模状态矩阵进行分块、降维处理,分解为分布式子矩阵,枚举系统组合状态,并逐块加载到内存中计算,避免内存溢出。

4)在配电网接入分布式电源时,对新增的故障状态进行增量矩阵运算,进而避免重复计算,提高计算效率。结合LSTM更新矩阵组合状态,拟合分布式电源接入的波动性,提高计算准确率。

5)验证状态枚举是否全覆盖。元件数为 m ,由于在上述假设中,配电网运行状态有 n 种,因此总状态数为 nm 。为了验证模型是否完全覆盖所有假设状态,对生成的实际状态矩阵去除重复行并验证数量是否为 nm ,进一步从理论状态中随机抽取样本,检查是否存在于实际矩阵中,当矩阵未全覆盖时,对矩阵进行更新。

6)当状态全覆盖时,进行可靠性分析得到系统可靠性相关指标。其流程图如图2所示。

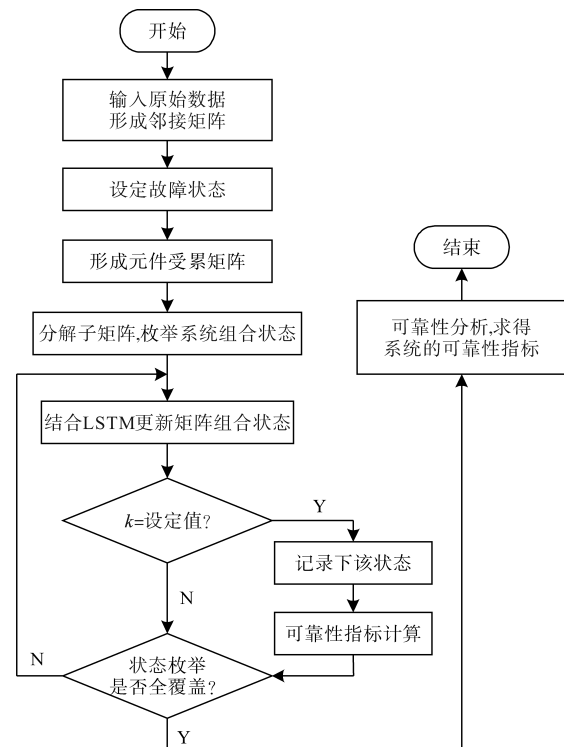


图2 改进算法流程图

Fig.2 Flowchart of the improved algorithm

分别计算系统可靠性评估指标矩阵表达式如下式所示:

$$SAIFI = \frac{I^T \cdot (U \cdot F)}{N} \quad (27)$$

$$SAIDI = \frac{I^T \cdot [U \cdot (F \odot T)]}{N} \quad (28)$$

$$ASAI = \left\{ 1 - \frac{I^T \cdot [U \cdot (F \odot T)]}{N \times T_{\text{total}}} \right\} \times 100\% \quad (29)$$

$$EENS = P^T \cdot [T \odot (U^T \cdot L_{\text{user}})] \quad (30)$$

式中: U 为用户-元件关联矩阵; P 为元件故障率向量; N 为用户总数; F 为元件的故障频率矩阵; T 为元件故障平均修复时间; T_{total} 为运行总时长; L_{user} 为用户负荷向量。

4 算例分析

4.1 IEEE-RBTS 母线6测试系统参数设置

本文以 IEEE-RBTS 母线6为测试系统,母线电压为 10 kV,该配电系统包含 30 条线路、23 个负荷段。所有支路都配备有隔离开关,保证能快速切除故障,减少非故障支路停电时间,与发电站相连的每个支路之间都配备有断路器,测试系统拓扑结构如图3所示。该测试系统节点故障参数设置如图4、图5所示。

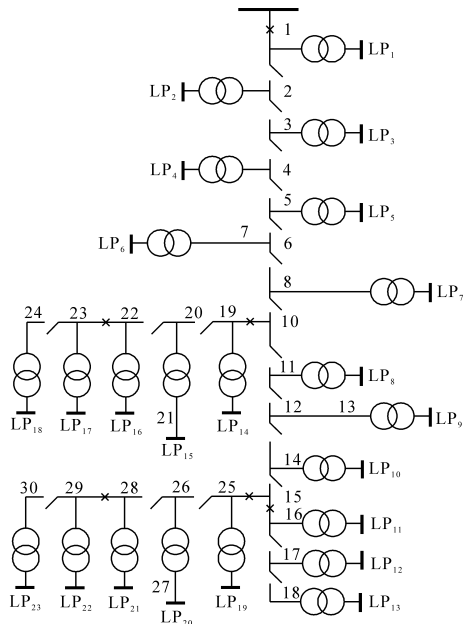


图3 IEEE-RBTS 母线6测试系统拓扑图

Fig 3 IEEE-RBTS bus 6 test system topology diagram

基于上述测试系统设置如下评估场景进行仿真验证:

1)无分布式储能接入时,配电网供电可靠性指标计算。2)分布式储能接入配电网时,系统可

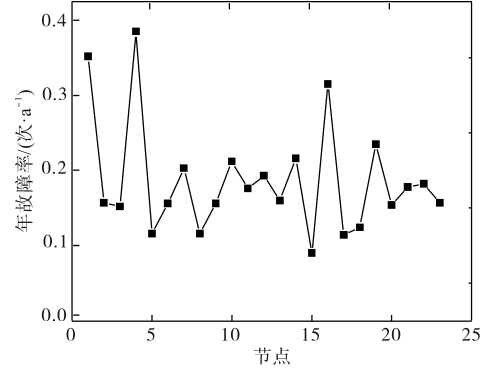


图4 节点故障率

Fig.4 Node failure rate

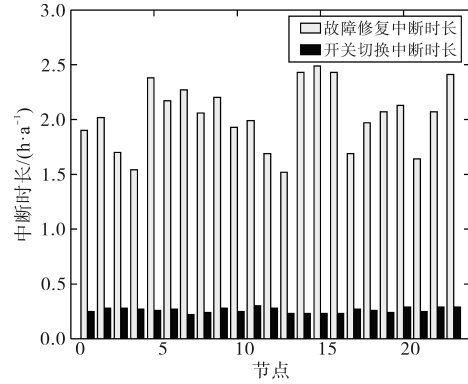


图5 节点中断时间

Fig.5 Node interruption time

可靠性计算评估。3)多节点复杂配电网系统下,配电网可靠性仿真计算。

4.2 IEEE-RBTS 母线6测试系统可靠性评估

对上述 IEEE-RBTS 母线6测试系统通过上述模型在软件 Matlab 中进行仿真,并通过 CPLEX 计算求解,分别讨论当该节点同时受到开关切换以及维修中断影响时,及当负荷节点仅受开关切换的中断影响时,负荷节点的年停电时间与年停电频率如图6、图7所示。

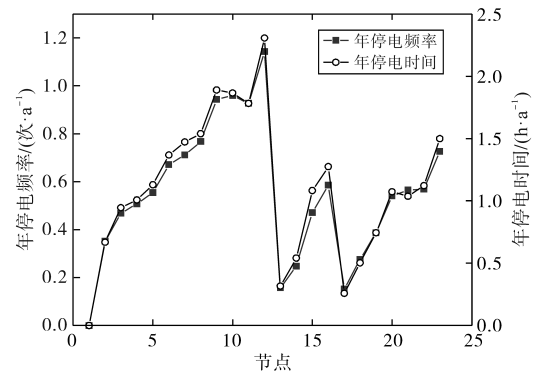


图6 开关切换及维修的中断频率和中断持续时间

Fig.6 Interrupt frequency and duration of switch switching and maintenance

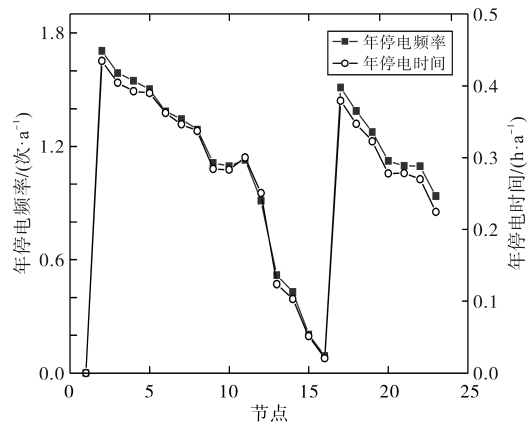


图7 开关切换的年中断频率和中断持续时间

Fig.7 Annual interruption frequency and interruption duration of switch switching

由仿真结果来看,当主线路发生故障时,隔离开关因检修断开会影响分支上的负荷节点,因此分支上负荷节点受到开关切换影响较大。由于在该仿真系统中,所有节点都在特定的供电区域,因此所有节点都会受到一定的因素影响,节点故障率和节点中断时间有相同的趋势。因此可以通过故障率或者中断持续时间的发展趋势来大致预测另一指标的发展趋势,推测故障节点之间的逻辑关系。

根据上述的中断时间以及中断频率可计算出测试系统的可靠性指标如表2所示。

表2 可靠性指标计算数值

Tab.2 Calculated values of reliability indicators	
可靠性指标	数值
SAIFI	1.814 6次/(a·户)
SAIDI	10.312 h/(a·户)
ASAI	99.982 5%
EENS	56.506 6 MW/(a·户)

4.3 含分布式电源可靠性评估

由各节点的中断频率以及中断持续时间可识别出该测试网络薄弱区域,对薄弱区域按照整体进行规划、集群划分,进一步分析当分布式电源接入配电网时,对配电网供电可靠性的影响。对仿真系统 IEEE-RBTS 母线 6 测试系统馈线 15 以及 21 节点处加入两个额定功率分别为 0.75 MW 和 1 MW 的 DG,其他节点的参考参数不变,如图8所示。对测试系统进行可靠性评估。

系统可靠性评估结果如图9所示。由图9可知,通过分布式电源的接入,配电网供电可靠性大幅度提升。在配电网发生故障时,DG可以与周围的负荷点形成孤岛,周围的负荷点恢复供电,提高配电系统的供电可靠性。

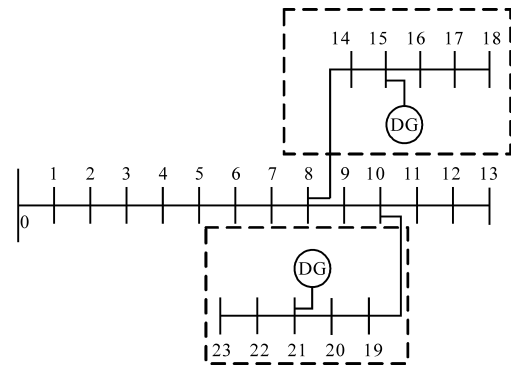


图8 分布式电源接入点示意图

Fig.8 Schematic diagram of distributed power access points

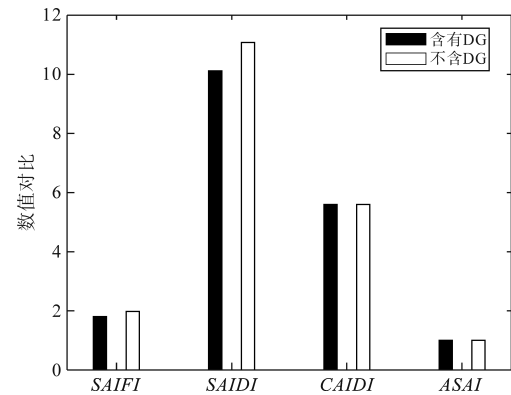


图9 系统可靠性评估结果

Fig.9 System reliability evaluation results

年平均停运时间评估结果与年平均停运次数评估结果如图10和图11所示。

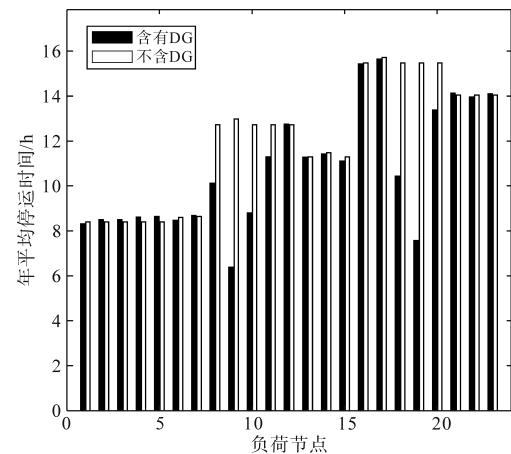


图10 年平均停运时间评估结果

Fig.10 Annual mean outage time evaluation results

由图10分析,由于配电网网络接入 DG 后,DG 作为多电源点改变了故障电流的流向和幅值,导致部分保护装置误判,故障隔离时间增长,因此部分节点如节点2、节点3、节点4、节点5、节点21的年平均停运时间略微增大,对用户用电体验影响较小。但是 DG 的接入能有效缩短其他分支节点年平均停运时间,提升整体的用户用电体验。

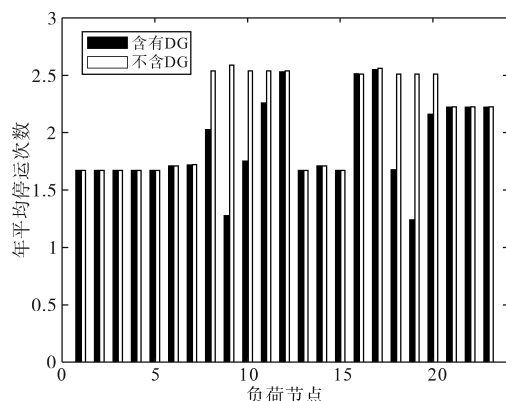


图11 年平均停运次数评估结果

Fig.11 Results of average annual outage assessment

验感。

由图10及图11仿真结果分析可得在分支馈线较多的节点接入分布式电源可降低关键负荷节点平均停电时间以及平均停运次数,提高配电网供电可靠性。分布式电源作为一种补充电源,能够在主电网发生故障时提供备用电源,减少停电次数和停电时间。

年平均停运时间与年平均停运次数都会影响配电网供电可靠性以及用户的用电体验感,因此需要对这两个指标进行综合考虑。对这两个指标进行标准化处理,从而消除单位和量级的差异,考虑两个指标具有相同的重要度,设定权重为0.5和0.5。通过计算综合方差的大小来验证本文提出评估方法的准确性。对比本文提出算法与蒙特卡洛法及状态枚举法计算方差大小,对比结果如图12所示。

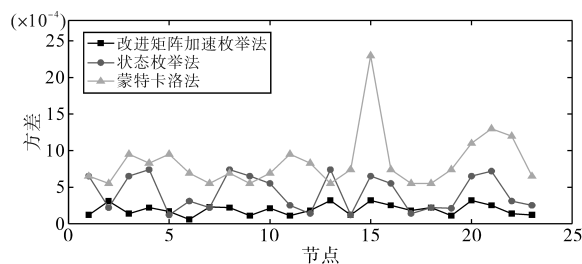


图12 计算方差对比

Fig.12 Calculating variance comparison

由图12可看出,由于蒙特卡洛法对故障场景拟合不全,对突发性故障预测效果较差,因此蒙特卡洛法计算方差较大。本文所提出的改进矩阵加速枚举法方差可忽略不计,提高了在多种故障场景下对可靠性评估的准确性。

4.4 计算效率对比

同时,仿真计算得到该23节点系统的客户频率(CIF_s)及客户中断持续时间(CID_s)结果如图13

所示。当用户在同一支路时,用户因故障检修或开关切换而中断的频率相同,某一支路上有节点发生故障时,该支路上节点用户都会受到影响,且该支路用户侧的中断频率取中断频率最高的节点的中断频率。

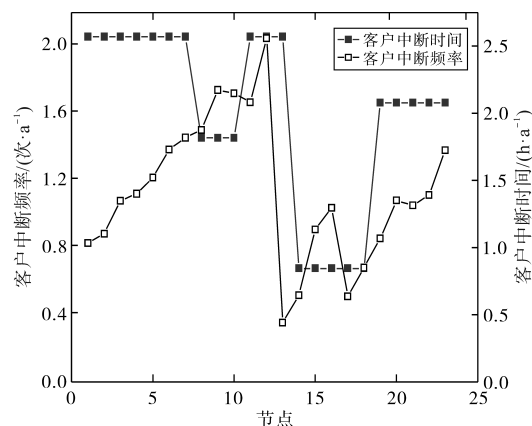


图13 用户侧参数指标

Fig.13 User-side parameter indicators

因此为了提升用户的用电体验,降低用户侧的停电频率,需要对电网停电频率较高的节点进行监测,降低该节点的中断频率,从而提升该支路的供电可靠性。用户侧越接近配电网末端,故障检修或开关切换中断的持续时间越长。

为了进一步验证该方法相较于传统的蒙特卡洛法的优越性,将继续在76节点、126节点、377节点、957节点等不同节点数量的配电网系统进行仿真计算验证,计算时长如表3所示,改进算法在处理复杂配电网系统时计算速度大幅度提升,如在957节点仿真计算中,基于传统蒙特卡洛法仿真需要10 458.23 s,而基于本文所提出的改进矩阵加速枚举法的时间仅需657.49 s,计算效率提升近94%。

表3 仿真时长对比表

Tab.3 Comparison table of simulation duration

节点数量	状态枚举法/s	蒙特卡洛法/s	改进矩阵加速枚举法/s
23	9.49	10.02	9.38
76	36.97	41.97	22.96
126	75.92	102.35	35.17
377	479.14	925.42	124.85
957	3 008.96	10 458.23	657.49

5 结论

本文计及分布式光伏接入的配电网可靠性评估,提出了基于改进矩阵加速状态枚举法的配电网供电可靠性提升策略,相关结论如下:

1)通过线性规划模型进行节点供电可靠性指标计算,识别配电网薄弱环节,算例表明在薄弱环节接入分布式电源能有效提升配电网供电可靠性。

2)通过改进矩阵加速状态枚举法,进一步降低状态枚举法的计算方差,改进算法方差可忽略不计,提升了供电可靠性指标计算的准确性。

3)通过改进矩阵加速状态枚举法,提升了在复杂配电网中的计算效率,相较于蒙特卡洛法在957节点的复杂配电网中可靠性评估计算效率提升近94%。

参考文献

- [1] 周琨,肖远兵,颜华敏,等.考虑可再生能源发电时空相关性的微电网群源储容量配置[J].电气传动,2025,55(1):41-49.
ZHOU Jun, XIAO Yuanbing, YAN Huamin, et al. Allocation of microgrid group source-storage capacity considering the spatio-temporal correlation of renewable energy generation[J]. Electric Drive, 2025, 55(1): 41-49.
- [2] 蔡新雷,王钦,陈业夫,等.考虑需求侧响应风光储工业园区经济调度与实时控制[J].电气传动,2025,55(2):59-68.
CAI Xinlei, WANG Qin, CHEN Yefu, et al. Economic dispatch and real-time control of wind-solar-storage industrial park considering demand-side response[J]. Electric Drive, 2025, 55(2): 59-68.
- [3] 郭辰辰,闫大鹏,王涛.考虑多信息因素干扰及DG接入的配电网可靠性评估[J].电工电能新技术,2023,42(3):55-65.
GUO Xiangchen, YAN Dapeng, WANG Tao. Reliability assessment of distribution network considering multi-information factor interference and DG access[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(3): 55-65.
- [4] 高立艾,霍利民,黄丽华,等.基于贝叶斯网络时序模拟的含微网配电网系统可靠性评估[J].中国电机工程学报,2019,39(7):2033-2041.
GAO Liai, HUO Limin, HUANG Lihua, et al. Reliability evaluation of distribution systems with microgrids based on Bayesian network time-series simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7): 2033-2041.
- [5] 刘志宏,邵振通,丛鹏,等.基于节点可靠性重要度评估的配网侧储能鲁棒规划方法[J].电网与清洁能源,2023,39(2):33-39,45.
LIU Zhihong, SHAO Zhentong, CONG Peng, et al. A robust planning method for distribution-level energy storage based on nodal reliability importance assessment[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(2): 33-39, 45.
- [6] 朱良管,曾平良,刘恺诚,等.一种考虑孤岛运行和可再生能源出力不确定性的有源配电网供电可靠性分析方法[J].电测与仪表,2023,60(12):117-125.
ZHU Lianguan, ZENG Pingliang, LIU Kaicheng, et al. A power supply reliability analysis method for active distribution network considering islanding operations and renewable energy output uncertainties[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(12): 117-125.
- [7] 程军照,徐敏,冯磊,等.基于GRA-K-means++算法的配电网供电可靠性水平评价[J].南方电网技术,2023,17(8):113-122.
CHENG Junzhao, XU Min, FENG Lei, et al. Evaluation of distribution network power supply reliability level based on GRA-K-means++ algorithm[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(8): 113-122.
- [8] 李顺昕,赵轩,赵一男,等.基于“源-荷”不确定性的配电网用电负荷分布式协同控制[J].电气传动,2024,54(12):54-60.
LI Shunxin, ZHAO Xuan, ZHAO Yinan, et al. Distributed collaborative control of electricity load in distribution network based on "source-load" uncertainty[J]. Electric Drive, 2024, 54(12): 54-60.
- [9] 赵宇,李谦,张云晓,等.含分布式能源配电网中考虑供电可靠性的混合储能优化配置[J].智慧电力,2024,52(8):25-32,49.
ZHAO Yu, LI Qian, ZHANG Yunxiao, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage considering power supply reliability in distribution network with distributed energy[J]. Smart Power, 2024, 52(8): 25-32, 49.
- [10] WANG Weijun, LI Chen, HE Yan, et al. Enhancement of household photovoltaic consumption potential in village microgrid considering electric vehicles scheduling and energy storage system configuration[J]. Energy, 2024, 311: 133330.
- [11] 门茂琛,赵睿,张金帅,等.基于改进模拟退火-粒子群的配电网分布式光伏承载力评估[J].浙江大学学报(工学版),2024,58(6):1255-1265.
MEN Maochen, ZHAO Rui, ZHANG Jinshuai, et al. Evaluation of distributed photovoltaic hosting capacity of distribution networks based on improved simulated annealing-particle swarm optimization[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2024, 58(6): 1255-1265.
- [12] 赵金龙,秦博宇,刘佳玲,等.柔性直流电网直流侧极间短路电流初始阶段的量化评估指标[J].电工电能新技术,2024,43(5):84-94.
ZHAO Jinlong, QIN Boyu, LIU Jialing, et al. Quantitative evaluation indices of DC pole-to-pole short-circuit current in MMC-HVDC power grid[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2024, 43(5): 84-94.
- [13] 马智刚,卫志农,陈胜,等.基于柔性多状态开关的交直流配电网有功-无功优化调度[J].电力系统自动化,2023,47(6):48-58.
MA Zhigang, WEI Zhinong, CHEN Sheng, et al. Active-reactive power optimal dispatch of AC/DC distribution network based on soft open point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 48-58.

- [14] LI Zihao, WU Wenchuan, TAI Xue, et al. A reliability-constrained expansion planning model for mesh distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 948-960.
- [15] LI Zihao, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Analytical reliability assessment method for complex distribution networks considering post-fault network reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 1457-1467.
- [16] 蒋玮, 王铭华, 陈锦铭, 等. 基于Neo4j图数据库的配电网供电可靠性计算[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 104-111.
- JIANG Wei, WANG Minghua, CHEN Jinming, et al. Calculation of power supply reliability for distribution network based on Neo4j graph database[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 104-111.
- [17] LI Junhui, KONG Huichao, WANG Wenzhong, et al. A novel reliability assessment method for distribution networks based on linear programming considering distribution automation and distributed generation[J]. IET Renewable Power Generation, 2023, 18(3): 529-544.
- [18] GREGORIO M D, JAVIER C, JOSE M A. Reliability assessment for distribution optimization models: a non-simulation-based linear programming approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3048-3059.
- [19] GREGORIO M D, JAVIER C, JOSE M A. Distribution network expansion planning with an explicit formulation for reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2583-2596.
- [20] 熊小平, 杨露, 李宁, 等. 基于仿射最小路法的含分布式电源配电网可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 43-50.
- XIONG Xiaoping, YANG Lu, LI Ning, et al. Reliability analysis of distribution network with distributed generation based on affine minimum path method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 43-50.

收稿日期:2025-05-15

修改稿日期:2025-07-17

(上接第80页)

233.

- [13] NISHIKAWA H, SASOU H, KURIHARA R, et al. High fuel utilization operation of pure hydrogen fuel cells[J]. Int J Hydrogen Energ, 2008, 33(21): 6262-6269.
- [14] 赵金国, 郭恒. 氢燃料电池氢气利用率提升策略研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(8): 510-516.
- ZHAO Jinguo, GUO Heng. Research on hydrogen utilization rate enhancement strategy of hydrogen fuel cell[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(8): 510-516.
- [15] 刘鑫桐, 刘永峰, 裴普成, 等. 进气相对湿度对PEMFC能量效率的影响特性分析[J]. 可再生能源, 2022, 40(7): 853-859.
- LIU Xintong, LIU Yongfeng, PEI Pucheng, et al. Analysis of the characteristics for the inlet relative humidity effects on energy efficiency of PEMFC[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(7): 853-859.
- [16] 翟俊香, 何广利, 熊亚林. 燃料电池系统氢气利用率的试验研究[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 684-687.
- ZHAI Junxiang, HE Guangli, XIONG Yalin. Experimental study on hydrogen utilization of proton exchange membrane fuel cell system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(3): 684-687.
- [17] 王茹, 沈永超, 卫东, 等. 基于直流内阻和交流阻抗特性的PEMFC水管理状态分析[J]. 化工学报, 2020, 71(7): 3247-3257.
- WANG Ru, SHEN Yongchao, WEI Dong, et al. Analysis of PEMFC water management status based on DC internal resistance and AC impedance characteristics[J]. CIESC Journal, 2020, 71(7): 3247-3257.

收稿日期:2025-05-12

修改稿日期:2025-07-10