DOI:10. 20033/j. 1003-7241. (2026)08-0175-05

基于关联规则的智能配网静态电压稳定裕度自动规划方法

王玉国, 端木彬, 刘　冉, 孔　培, 牛晓丹

(国网菏泽供电公司,山东 菏泽 274000)

摘　要:为解决常规静态电压稳定裕度自动规划方法效果不佳的问题,提出基于关联规则的智能配电网静态电压稳定裕度自动规划技术。通过结合配电网的潮流平衡状态,分析潮流方程的重根情况,计算出极限崩溃状态下的临界电压及对应的电压稳定裕度。利用关联规则挖掘技术,系统剖析静态电压稳定裕度与多种影响因素间的潜在关联,通过设定合理的支持度和置信度阈值,筛选出强关联规则,并评估其有效性。基于这些关联规则,构建目标规划函数,并采用线性规划求解器进行求解,输出最优规划解。实验结果表明,该技术能显著提升电压稳定裕度的规划灵敏度,相较于传统方法,具备更为理想的规划效果,有效增强了配电网的运行稳定性和安全性。本研究为智能配电网的自动化规划提供了新的理论支撑和技术手段,对促进电力系统的可持续发展具有重要意义。

关键词:关联规则;配电网;静态电压;稳定裕度;规划方法; 临界电压

中图分类号: TP273;TM762　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 1003-7241(2026)08-0175-05

Automatic planning method of static voltage stability margin for intelligent distribution network based on association rules

Wang Yuguo, Duan Mubin, Liu Ran, Kong Pei, Niu Xiaodan

(State Grid Heze Power Supply Company, Heze 274000, Shandong, China)

Abstract: In order to solve the problem of poor performance of conventional static voltage stability margin automatic planning methods, an intelligent distribution network static voltage stability margin automatic planning technology based on association rules is proposed. By combining the power flow balance state of the distribution network, analyzing the multiple roots of the power flow equation, the critical voltage and corresponding voltage stability margin under the ultimate collapse state are calculated. Using association rule mining techniques, the system analyzes the potential associations between static voltage stability margin and various influencing factors. By setting reasonable support and confidence thresholds, strong association rules are selected and their effectiveness is evaluated. Based on these association rulesthe objective programming function anda linear programming to solve it, outputting the optimal programming solution. The experimental results show that this technology can significantly improve the planning sensitivity of voltage stability margin. Compared with traditional methods, it has a more ideal planning effect and effectively enhances the operational stability and safety of the distribution network. This study provides new theoretical support and technical means for the automation planning of intelligent distribution networks, which is of great significance for promoting the sustainable development of the power system.

Keywords: association rules; distribution network; static voltage; stability margin; planning methods; critical voltage

静态电压稳定裕度作为评估配电网运行安全性的重要指标,其合理规划对于保障电力系统的稳定运行具有重要意义。然而,传统的配电网规划方法往往依赖于经验判断和人工计算,难以适应现代配电网的复杂性和动态性。因此,研究智能配电网静态电压稳定裕度自动规划技术,对于提高配电网的运行效率和安全性,促进电力系统的可持续发展具有迫切的现实需求和重要的理论价值。

近年来,国内外学者在电压稳定裕度预测以及规划领域取得了一系列研究成果。在自动规划技术方面,随着人工智能和大数据技术的发展,一些智能化的规划方法如遗传算法、神经网络、支持向量机等也被引入到稳定裕度规划与预测中。例如,文献[1]基于风电预测数据和概率分布函数,利用区间优化算法求解最优潮流,从而得到考虑风电不确定性的静态电压稳定裕度。然而,该方法仅考虑了风电的不确定性,未考虑其他因素如负荷变化、系统故障等对静态电压稳定裕度的影响,因此在实际应用中可能存在一定的局限性。文献[2]在线实时地评估系统的静态电压稳定裕度,并给出其概率分布,以便电网运营者能够及时了解系统的电压稳定状况,从而采取相应的措施保障电力系统的安全稳定运行。但是该方法对数据的要求

收稿日期:2025-10-21;**录用日期**:2025-12-10

基金项目:山东省电力科技计划项目(2017A-88)

作者简介:王玉国(1973—),男,高级工程师,研究方向为新型电力系统。

引用本文:王玉国,端木彬,刘冉,等. 基于关联规则的智能配网静态电压稳定裕度自动规划方法[J]. 自动化技术与应用,2026,45(8):175-179. (Wang Yuguo,Duan Mubin,Liu Ran,et al. Automatic planning method of static voltage stability margin for intelligent distribution network based on association rules [J]. Techniques of Automation and Applications,2026,45(8):175-179.)

较高,计算复杂度较高。文献[3]以分布式光伏接入容量最大为优化目标,综合考虑静态电压稳定裕度、配电网线损率、电压幅值以及无功补偿装置等约束,建立配电网分布式光伏承载能力量化模型。但是该方法同样依赖大量电网参数和运行数据,若数据不足或质量不高,可能会影响评估结果的准确性。文献[4]基于地磁暴的统计数据和电网的仿真模型,通过计算地磁暴引起的电网电压变化量来评估电网的电压稳定性。但该方法未考虑系统故障、负荷变化等其他影响因素,因此在实际应用中可能需要进行综合评估。

本文旨在研究一种基于关联规则的智能配电网静态电压稳定裕度自动规划技术。该技术将关联规则挖掘方法应用于配电网的静态电压稳定裕度分析中,通过对配电网运行数据的深入挖掘和分析,发现电压稳定裕度与各种影响因素之间的潜在关联规则。在此基础上,结合智能优化算法和配电网规划理论,实现静态电压稳定裕度的有效规划[5]。

1 静态电压稳定裕度自动规划

1.1 静态电压稳定裕度指标选取

为了准确研究智能配电网的电压稳定性问题,本文随机选取一个负荷节点,并将其作为等值节点,构建出配电网潮流方程。通过对潮流平衡状态进行模拟分析,从而得到电压稳定裕度指标的解析结果。假设在智能配电网中,负荷节点为 i,该节点下的等值电势幅值为 E,等值相角为 δ_E,那么本文所构建出的关于智能配电网潮流方程表达式为[6]

$$\begin{cases} S_i\cos\varphi = \dfrac{U_i}{Z}[E\cos(\theta-(\delta_E-\delta_i))-U_i\cos\theta] \\ S_i\sin\varphi = \dfrac{U_i}{Z}[E\sin(\theta-(\delta_E-\delta_i))-U_i\sin\theta] \end{cases} \tag{1}$$

其中,Z 代表负荷节点对应的阻抗模值,θ 代表阻抗相角,S_i 代表负荷节点下电路装置本身的耗电负荷大小,φ 代表功率因数角,U_i 代表负荷节点下对应的等值电压大小[7]。通过对上述方程进行抵消处理,可以得到等值时刻下电压大小与耗电负荷之间的关系,进而求解出负荷节点的电压表达式为

$$U_i = \sqrt{\frac{Z\cdot S_i\cos(\theta-\varphi)^2}{2}} \tag{2}$$

考虑到潮流方程具备非线性的波动特点,因此当智能配电网的电压属于稳定状态时,式(1)存在两个解。这两个解中,一个是稳定的解(对应于系统正常运行状态),另一个是不稳定的解(对应于系统崩溃的边缘)。当系统处于稳定状态时,如果继续增加负荷或改变其他运行条件,稳定的解可能会逐渐接近不稳定的解,直到两个解重合[8]。因此在对电压稳定裕度指标进行选取时,需要关注配电网的极限崩溃状态,对此本文所构建出的节点 i 在配电网极限崩溃状态下的临界电压表达式为

$$U_{vr,i} = \frac{E}{\sqrt{2[1+\cos(\theta-\varphi)^2]}} \tag{3}$$

其中,r 表示配电网运行于极限崩溃状态。

结合上述求解出的临界电压,可以对电压裕度指标进行解析,指标表达式为

$$K_{U,i} = \frac{U_{vr,i}-U_i}{U_i}\times 100\% \tag{4}$$

其中,$K_{U,i}$ 代表解析后的电压稳定裕度指标值。

通过上述步骤即可完成对配电网静态电压稳定裕度指标的有效选取,通过结合配电网的潮流平衡状态,对潮流方程的重根情况进行分析,从而得到极限崩溃状态下的临界电压,进而计算出该状态下的电压稳定裕度[9]。

1.2 电压稳定裕度关联规则挖掘

在得到电压稳定裕度指标后,本文通过对静态电压稳定裕度与各种因素之间的潜在关联规则进行挖掘,为后续的规划算法提供帮助。首先收集配电网的历史运行数据,包括电压、电流、功率、负荷、可再生能源渗透率等。然后从预处理后的数据中提取与静态电压稳定裕度相关的特征。具体特征包括负荷水平、短路比、线路阻抗、可再生能源渗透率等[10]。从特征集中挖掘出与静态电压稳定裕度相关的关联规则。设定合适的支持度和置信度阈值,以筛选出强关联规则。支持度以及置信度的具体计算公式为

$$\begin{cases} S_{\text{upport}}(A\to B) = \dfrac{c_{\text{ount}}(A\cup B)}{N} \\ C_{\text{onfidence}}(A\to B) = \dfrac{c_{\text{ount}}(A\cup B)}{c_{\text{ount}}(A)} \end{cases} \tag{5}$$

其中,$c_{\text{ount}}(A\cup B)$ 表示同时包含特征 A 和特征 B 的数据样本数,N 表示总的数据样本数,$c_{\text{ount}}(A)$ 代表包含特征 A 的数据样本数。对挖掘得到的关联规则进行评估,筛选出对静态电压稳定裕度影响较大的规则[11]。对此,本文使用提升度(Lift)这一度量指标来评估规则的有效性。提升度表示在规则的前提条件下,结果发生的概率与无条件下结果发生的概率之比。提升度大于 1 表示规则有效,且值越大表示规则越有效。其具体计算公式为

$$L_{\text{ift}}(A\to B) = \frac{C_{\text{onfidence}}(A\to B)}{S_{\text{upport}}(B)} \tag{6}$$

其中,$S_{\text{upport}}(B)$ 代表特征 B 的支持度。根据评估结果,对规则进行优化,具体涉及相似规则的合并以及无效规则的提出。最后将输出结果进行整合,即可得到关于电压稳定裕度的关联规则。

1.3 静态电压稳定裕度自动规划

从挖掘出的关联规则中筛选出与电压稳定裕度最为相关的规则。这些规则可能涉及负荷分配、可再生能源接入、线路阻抗等多个方面[12]。接下来,根据规则的支持度、置信度以及提升度等指标,对筛选出的规则进行优先级排序,确保在规划过程中优先考虑影响最大的规则。明确规划的目标是提高配电网的电压稳定裕度。本文设定一个具体的电压稳定裕度阈值 K_{sum} 作为规划的目标值。

由此可以得到目标规划函数表达式为

$$F = \max K_{U,i}, K_{U,i} \leqslant K_{\text{sum}} \tag{7}$$

通过对上述函数进行求解,即可实现关于配电网电压稳定裕度的自动规划,具体规划流程如下图所示。

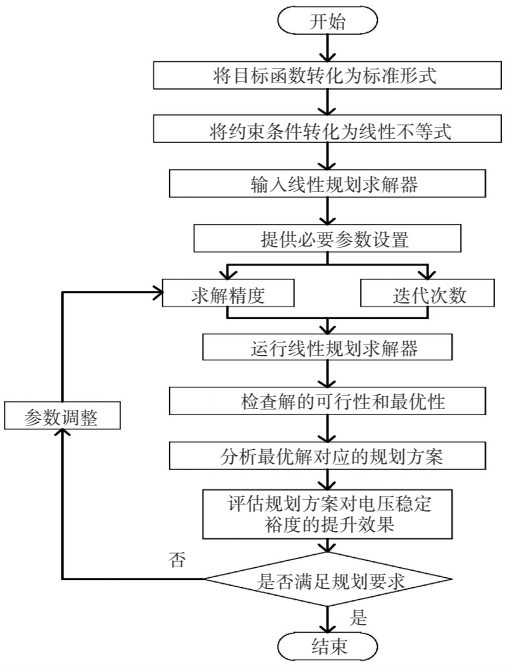


图 1　智能配电网静态电压稳定裕度自动规划流程

Fig. 1　Automatic planning process for static voltage stability margin of intelligent distribution network

通过上述流程图可以看出,本文结合线性规划算法,对目标函数进行求解,通过对决策变量进行定义,并将目标函数输入到线性规划求解器中,从而输出最优解[13]。线性规划求解器的部分实现代码如下图所示。

```
function linear _programring solrerl (c, A, b)
  //C 是目标函数的系数向量
  //A 是约束条件的系数矩阵
  //b 是约束条件的右侧值向量
  // 初始化
  x = vector of zero// 决策变量向量
  z = - inf// 初始化最优值为负无穷
  //迭代直到找到最优解或确定无解
  while( not converged)
    //选择一个进入基变量(通常是最小比率检验)
    entering_vzriable=select_enterirg_variable (A,b,x)
    //如果没有进入基变量,说明当前解是最优的或问题无解
    if ( entering_variable is None)
      break
    //选择一个离开基变量(通常是最小成本检验)
    leaving_variable=select_leaving_variable (A, b, x, entering_variable)
    //如果没有离开基变量,说明当前解是最优的或问题无解
    if ( leaving_variable is None)
      braak
    //更新解
  x = pivot_operation(A, b, x, entering_variable, leaving_variable)
    //计算新的目标函数值
  z_new = c × x
    //如果新的目标函数值更好,则更新最优解
    if (z_new > z)
      z = z_new
  //返回最优解和最优值
return x,z
```

图 2　线性规划求解器的部分实现代码

Fig. 2　Partial implementation code of linear programming solver

通过分析最优解对应的规划方案,包括负荷分配、线路阻抗调整,并评估规划方案对电压稳定裕度的提升效果。如果不满足要求或存在改进空间,可以对目标函数或约束条件进行调整,并重新进行求解,最终输出符合要求的规划结果[14]。

通过上述步骤即可完成对智能配电网静态电压稳定裕度的自动规划,通过构建线性规划求解器,对规划函数进行求解,从而输出最优规划方案[15]。将本节内容与上述提到的静态电压稳定裕度指标选取以及关联规则挖掘等相关内容进行结合,至此,基于关联规则的智能配电网静态电压稳定裕度自动规划方法设计完成。

2　实验论证

为了证明本文提出的基于关联规则的智能配电网静态电压稳定裕度自动规划方法的实际规划效果优于常规的静态电压稳定裕度自动规划方法,在理论部分的设计完成后,构建实验环节,对本文方法的实际规划效果进行分析。

2.1　实验说明

为验证本文提出的基于关联规则的智能配电网静态电压稳定裕度自动规划方法在实际规划效果方面的优越性,本次实验选取了两组常规的静态电压稳定裕度自动规划方法作为对比对象,分别为基于边缘计算的静态电压稳定裕度自动规划方法,以及基于梯度提升的静态电压稳定裕度自动规划方法。通过构建实验平台,采用三种检测方法对同一组配电网模型进行仿真模拟规划,对比不同方法的实际规划效果。

2.2　实验对象

本实验模拟了一个中等规模的配电网,以研究不同规划策略对电压稳定裕度的影响。系统包含多种类型的节点(如负荷节点、发电节点、变电站等),以及多种类型的线路(如架空线、电缆等)。负荷节点共 100 个,分布在系统的各个区域。每个负荷节点的负荷需求根据当地的用电习惯和用电水平进行设定,包括居民用电、商业用电和工业用电等。系统包含 5 个主要节点,每个节点均配置有电压和电流监测设备,以实时监控电网状态。变压器容量为 20~60 MVA 不等,根据节点负荷需求进行选择。采用 110 kV/10 kV 和 35 kV/10 kV 两种电压等级。

该配电网仿真系统采用 MATLAB/Simulink 作为主要的仿真软件,利用其强大的数学建模和仿真能力,对配电网的运行状态进行模拟和分析。同时,结合自定义的脚本和函数,实现对系统参数的灵活配置和修改。由此得到的配电网部分仿真结构如图 3 所示。

为提高实验结果的可靠性,本次实验对不同节点在功率极限状态下的电压幅值进行了规定,以此检测出不同方法的规划效果,具体规划情况如表 1 所示。

采用本文方法进行模拟规划时,需要对本文方法的参数进行配置,对此本文所提出的具体参数配置情况如表 2 所示。

通过采用三种方法进行模拟规划,待实验完成后,对不同规划方法下的电压稳定裕度进行记录,从而对比不同方法的实际规划效果。

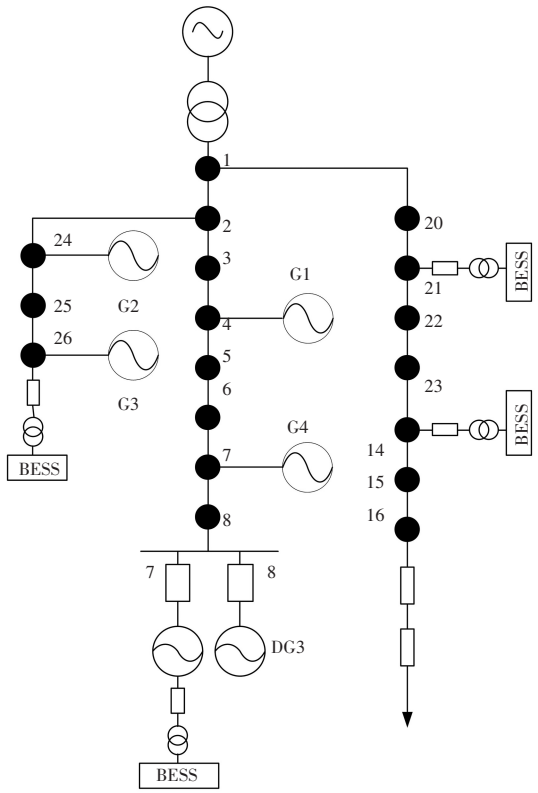


图 3 配电网仿真结构

Fig. 3 Simulation structure of distribution network

表 1 负荷节点功率极限状态下的电压幅值规划结果

Tab. 1 Voltage amplitude planning results under load node power limit state

节点编号	电压幅值/kV	电压下限/kV
01	0.97	0.95
02	0.96	0.90
03	0.91	0.91
04	0.93	0.96
05	0.95	0.92
06	0.96	0.90
07	1.06	0.89
08	0.91	0.88
09	0.95	0.89
10	0.93	0.86

表 2 本算法的参数配置

Tab. 2 Parameter configuration of the algorithm proposed

参数	配置
等值相角 δ_E	0.15
功率因数角 φ	10
耗电负荷初始值 S_i	1 500
电压稳定裕度阈值 K_{sum}	0.56

2.3 规划效果对比

采用本文方法所得到的不同规划结果如图 4 所示。

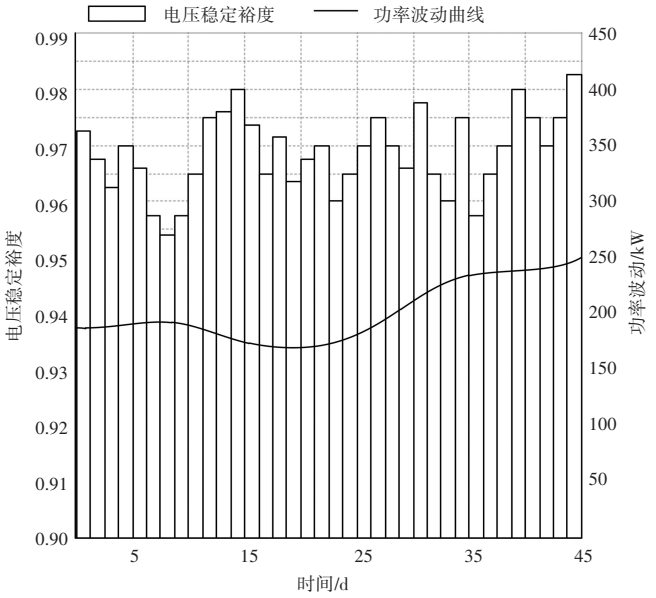


图 4 本方法电压稳定裕度规划结果

Fig. 4 Voltage stability margin planning resultsproposed

通过上述实验结果可以看出,在本文方法的规划方案下,配电网静态电压的稳定裕度较高,同时波动幅度较小,配电网的功率波动较为稳定。提高实验结果的可靠性,本次实验以不同规划方法下得到的电压稳定裕度灵敏度作为对比指标,用于衡量不同方法的实际规划效果。对此,本文调取了不同规划方案下的配电网 P-V 仿真曲线,电压稳定裕度越接近于 0,代表方法的灵敏度越高,具体实验结果如图 5 所示。

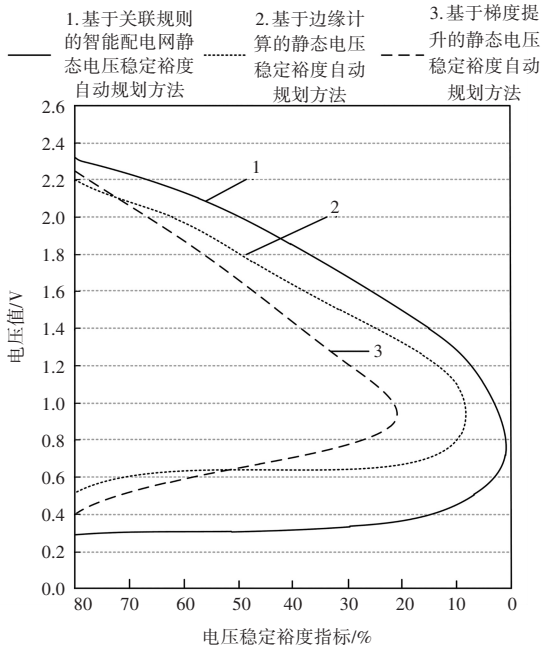


图 5 不同规划方法下的电压稳定裕度灵敏度对比结果

Fig. 5 Comparison results of voltage stability margin sensitivity under different planning methods

通过上述实验结果可以看出,针对相同的配电网模型

仿真规划时,不同方法的规划效果也有所不同。通过对比 P-V 仿真曲线可以明显看出,本文提出的规划方案下,电压稳定裕度更接近于 0,由此可以证明本文方法在灵敏度上优于常规的规划方法。

3 结论

本研究以基于关联规则的智能配电网静态电压稳定裕度自动规划技术为核心,深入探讨了关联规则挖掘在配电网规划中的应用,并提出了一种创新的自动规划方法。通过对配电网运行数据的深度分析和知识发现,本文成功构建了一个能够自动计算和优化静态电压稳定裕度的规划方法,为智能配电网的规划和运营提供了新的理论支撑和技术手段。

参考文献

[1] Yang Y, Lin S, Wang Q, et al. Optimization of static voltage stability margin considering uncertainties of wind power generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(6): 4525-4540.
[2] 齐金山,姚良忠,廖思阳,等. 高比例新能源电力系统静态电压稳定裕度在线概率评估[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(5):47-57.
[3] 邓美玲,陈永进,白振毅. 基于静态电压稳定裕度的配电网分布式光伏承载能力量化方法[J]. 上海交通大学学报, 2026, 60(4): 550-562.
[4] 王辉. 基于径向基函数的配电网不平衡线损预测方法[J]. 电子设计工程,2024,32(4):121-124, 134.
[5] 徐式蕴,周玢玥,彭龙,等. 评估新能源多场站送出系统静态电压稳定的裕度比指标研究[J]. 电网技术,2023,47(10):4026-4035.
[6] 胡常胜,摆志俊,张章,等. 计及静态电压稳定裕度的电制氢容量和布点规划研究[J]. 中国电力,2025,58(5):91-101.
[7] 陈超,郭艳东,龚利武,等. 基于人机语音交互的配电网智慧调度助手设计[J]. 自动化技术与应用,2026,45(5):102-105.
[8] 赵宇,李文博,郝俊. 含电动汽车充电及可再生能源发电的配电网协同运行优化模型[J]. 自动化技术与应用,2025,44(8):62-66, 125.
[9] 史法顺,吴俊勇,吴昊衍,等. 基于深度学习的电力系统暂态功角与暂态电压稳定裕度一体化评估[J]. 电网技术,2023,47(2):731-740.
[10] 汤迎春,晏光辉,张雅婷,等. 基于约束投票极限学习机的在线静态电压稳定评估[J]. 现代电力,2022,39(5):521-528.
[11] 季佳伸,吴俊勇,王彦博,等. 基于深度残差网络的电力系统暂态电压稳定评估[J]. 电网技术,2022,46(7):2500-2511.
[12] 王有军. 基于凝聚型层次聚类的新能源接入配电网控制方法[J]. 自动化技术与应用,2026,45(2):45-49.
[13] 李庆波,赵昂,田寿涛,等. 结合 GRN 和 TGTransformer 的配电网分层分区电力电量平衡方法[J]. 自动化技术与应用,2025,44(8):156-160.
[14] 李汐,高阳,马斌,等. 基于 PEF-PinSVM 的含可再生能源并网电力系统电压暂态稳定裕度评估[J]. 太阳能学报,2024,45(8):240-248.
[15] 张旭,郝治国,李宇骏,等. 基于电气转矩法的 VSC-HVDC 系统直流电压振荡稳定性评估[J]. 电网技术,2024,48(10):4306-4316.

(上接第 96 页)

[9] Cui Z, Gu L, Sun X, et al. Aleth-nerf: Illumination adaptive nerf with concealing field assumption[C]//Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence: AAAI, 2024, 38(2): 1435-1444.
[10] Xie Z, Yang X, Yang Y, et al. S3IM: Stochastic structural similarity and its unreasonable effectiveness for neural fields[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). Paris, France: IEEE, 2023: 18024-18034.
[11] Ito S, Miura K, Ito K, et al. Depth map estimation from multi-view images with NeRF-based refinement[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2023: 2955-2959.
[12] Xu Q, Xu Z, Wang Z, et al. NeRF in the dark: High dynamic range view synthesis from low-light images[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). Tel Aviv, Israel: Springer, 2022: 213-229.
[13] Li X, Zhang Y, Wang Z. Structural similarity index (SSIM) revisited: A data-driven approach[J]. Expert Systems with Applications, 2022, 189: 116087.
[14] Muhammed L A N. Analysis of image quality assessment methods and metrics: A comprehensive review[J]. Journal of Al-Qadisiyah for Computer Science and Mathematics, 2023, 15(3): 195-207.
[15] Park H, Park S. Improving monocular depth estimation with learned perceptual image patch similarity-based image reconstruction and left-right difference image constraints[J]. Electronics, 2023, 12(17): 3730.