

面向新型电力系统的静态电压稳定评估方法研究

孙海斌, 傅国斌, 宋锐, 蔡生亮

(国网青海省电力公司电力科学研究院, 西宁 810001)

摘要: 随着新能源基地建设规模的不断扩大,新能源基地缺乏常规电源动态无功支撑,静态电压稳定性会进一步恶化,因此提出了一种 L 指标作为主指标, $L-Q$ 灵敏度指标为辅助指标的“一主一辅”的面向新型电力系统的静态电压稳定评估方法。该方法在已知系统网架结构和系统基础潮流的基础上,以 L 指标为目标判断系统电压稳定性,辅助指标反应系统无功补偿方案的优劣,在满足系统稳定性的基础上,确定最优无功补偿点作为决策方案。通过结合青海实际电网进行仿真验证,结果表明,当对灵敏度指标越大的节点补偿相同容量的无功补偿设备时,对系统静态稳定性的提升效果最好, L 指标下降程度最高。

关键词: 静态电压稳定; L 指标; $L-Q$ 灵敏度指标; 评估方法

Research on Static Voltage Stability Evaluation Method for New Power Systems

SUN Haibin, FU Guobin, SONG Rui, CAI Shengliang

(State Grid Qinghai Electric Power Company Electric Power Science Research Institute,
Xining 810001, China)

Abstract: With the continuous expansion of the construction scale of new energy bases, the lack of dynamic reactive power support from conventional power sources will further deteriorate the static voltage stability of new energy bases. Therefore, a kind of *one main and one auxiliary* oriented static voltage stability evaluation method for new power systems is proposed, with L index as the main index and $L-Q$ sensitivity index as the auxiliary index. This method, based on the known system grid structure and basic power flow, uses the L index as the objective to judge the voltage stability of the system, and auxiliary index to reflect the advantages and disadvantages of the reactive power compensation scheme. On the basis of meeting stability of system, the optimal reactive power compensation point is determined as the decision-making scheme. The results show through simulation verification based on the actual power grid in Qinghai that when compensating reactive power compensation equipment with the same capacity for nodes with higher sensitivity index, the improvement effect on the static stability of the system is the best, and the degree of decrease in the L index is highest.

Keywords: static voltage stability; L index; $L-Q$ sensitivity index; evaluation method

0 引言

电力系统静态电压稳定是保证电网稳定运行的关键问题之一。随着新能源建设规模不断扩大,电网运行环境复杂多变,系统发生电压失稳的风险逐渐增强^[1-2]。另外新能源基地缺乏常规电源动态无功支撑,电压稳定问题尤为突出^[3-4]。

传统评估电力系统静态电压稳定运行的方法

有连续潮流分析法,该方法通过逐步增加负荷,使潮流计算无法收敛来判断静稳极限点。但难以枚举所有负荷增长方向,使得计算结果具有局限性^[5-7]。迭代优化计算分析法将节点电压、支路潮流引入电压、有功及无功功率迭代优化算法,优点是算法简单,但当系统较为复杂时迭代计算时间较长,新能源出力发生变化时静态电压稳定约束经常无效,不能反映失稳风险^[8-9]。采用人工智能算法等判断静

态电压稳定性及其稳定裕度,优点是适应性面广,不足在于需要样本较多,控制难以实现^[10-12]。

L 指标作为评估电力系统静态电压稳定的指标,其与特征值分析法都是基于给定电网运行方式下,利用潮流方程进行电力系统静态电压稳定分析,应用较为广泛。该方法通过对负荷节点定义 L 指标,用以反映与新能源发电机组间联系的强弱。为 $L=1$ 时系统临界稳定; $L>1$ 时系统不稳定; $L<1$ 时系统稳定,但仅依靠 L 指标用于评估含新能源接入的电力系统静态电压稳定性过于单一,无法第一时间衡量薄弱节点在发生新能源波动时无功补偿装置动作对电网静态电压稳定性的影响^[13-15]。

根据以上分析,本文提出一种基于 L 指标、 $L-Q$ 灵敏度指标的“一主一辅”的评价方法。 L 指标用以评估含新能源接入的电力系统静态电压稳定, $L-Q$ 灵敏度指标衡量在不同节点配置等量无功补偿容量时对系统整体静态电压稳定性的提升效果^[16-18]。

1 静态电压稳定评估指标

1.1 L 指标

L 指标与静态潮流极限判据类似,反应节点潮流距离电压崩溃点距离。而 L 指标在计算区域网络时,仅需区域网架结构与电压、电流方程。用于量化系统静态稳定程度, L 指标能够清晰地表明单个节点与区域电力系统的稳定程度。应用 L 指标评估新能源电力系统稳定性,首先将电网节点分为:PQ 节点,所有 PQ 节点集合用 a_L 表示;PV 节点和平衡节点,PV 集合用 a_G 表示;对于大规模新能源接入的新型电力系统,将新能源接入节点设定为 PQ 节点,直接纳入 L 指标计算。对应的潮流方程公式为

$$\begin{bmatrix} I_G \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{GG} & Y_{GL} \\ Y_{LG} & Y_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_G \\ V_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: I_G 、 V_G 为电源节点电流、电压向量; I_L 、 V_L 为负荷节点电流、电压向量; Y_{GG} 、 Y_{LL} 、 Y_{LG} 、 Y_{GL} 为系统节点导纳矩阵。整理式(1)可得

$$\begin{bmatrix} V_L \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{LL} & -Z_{LL}Y_{LG} \\ Y_{GL}Z_{LL} & Y_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_G \end{bmatrix} \quad (2)$$

因此,网内负荷的参与因子可以表示为

$$F_{LG} = -Z_{LL}Y_{LG} \quad (3)$$

根据式(2)、式(3)可得

$$V_j = \sum_{i \in a_L} Z_{ji} I_i + \sum_{k \in a_G} F_{jk} V_{GK} \quad (4)$$

式中: V_j 表示第 j 个负荷节点电压向量; F_{jk} 为负荷参与因子的第 j 行,第 k 列; V_{GK} 为第 k 个电源节点

电压向量。定义局部电压稳定 L 指标为

$$L_j = \left| 1 - \frac{\sum_{i \in a_G} F_{jk} V_{GK}}{U_j} \right| \quad (5)$$

式中: L 指标的范围为 $R=\{L|0 \leq L \leq 1\}$, L 指标反应系统运行状态距电压稳定阈值之间的距离。

1.2 采用 $L-Q$ 灵敏度指标

采用 $L-Q$ 灵敏度指标衡量在不同节点配置无功补偿设备,对系统静态电压稳定性的提升效果,定义灵敏度指标 $L-Q$ 公式为

$$LQSI_j = \frac{L_0 - L(\Delta Q_j)}{\Delta Q_j} \quad (6)$$

式中: $LQSI_j$ 为节点 j 的灵敏度参考值; L_0 为 L 指标初始值; $L(\Delta Q_j)$ 为补偿等量无功补偿设备后的 L 指标值。节点 $LQSI$ 越大,说明在该节点配置无功补偿装置对电力系统静态电压稳定性的提升效果越好,优先选择灵敏度节点大的进行无功补偿。同时在系统补偿前时的 L 指标为定值,因此节点 $LQSI$ 越大,则代表在该节点补偿后的系统 L 指标越小,系统稳定性提升效果越明显。

2 新能源出力预测

2.1 风电 Weibull 分布的概率潮流

根据青海电网风电历史数据,采用 Weibull 分布模拟风力发电的功率输出特性,风速的概率密度函数可以表示为^[19-22]:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} \quad (7)$$

式中: $f(v)$ 为风速概率分布函数; k 为形状参数; c 为尺度参数; v 为风速^[15-17]。则风电输出功率和风速之间的关系可以表示为

$$P_w = \begin{cases} 0, & v \leq v_{ci} \\ k_1 v + k_2, & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_r, & v_r \leq v < v_{co} \\ 0, & v \geq v_{co} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $k_1 = P_r/(v_r - v_{ci})$; $k_2 = -k_1 v_{ci}$; P_r 为额定功率; v_r 为额定风速; v_{ci} 为切入风速; v_{co} 为切出风速。

2.2 光伏 Beta 分布的概率潮流

光伏的 Beta 分布概率密度函数表示为

$$f(P_V) = \frac{\Gamma(a+\beta)}{\Gamma(a)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P_V}{P_{V,\max}} \right)^{a-1} \times \left(1 - \frac{P_V}{P_{V,\max}} \right)^{\beta-1} \quad (9)$$

式中: P_V 为光伏出力; Γ 为 Gamma 函数; $P_{V,\max}$ 为光伏出力最大值; a, β 为 Beta 分布的尺度参数和形状参数^[22-25]。

3 算例分析

利用 Weibull 分布和 Beta 分布分别模拟的青海地区风电出力以及光伏出力的 24 h 曲线见图 1。

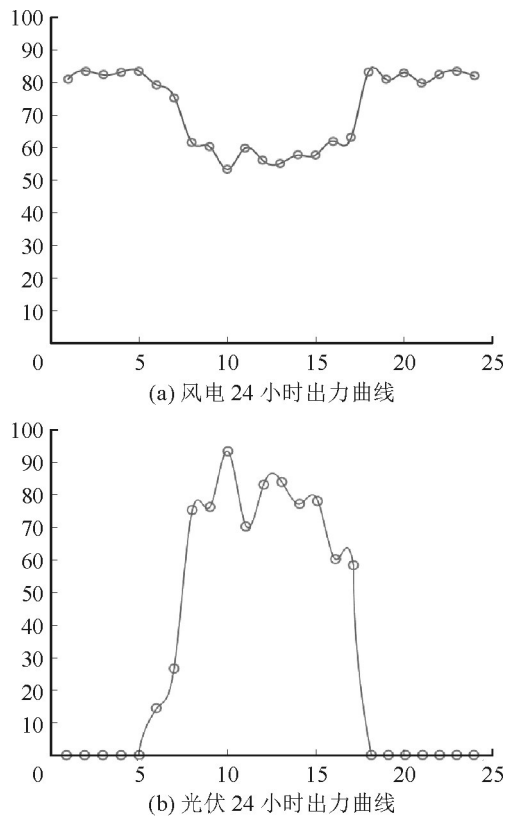


图1 新能源24小时出力曲线
Fig. 1 Output curve of new energy output power in 24-hour

以青海青南近区新能源汇集送端系统为例，其区域网架结构见图 2。验证本文提出的新型电力系统静态电压稳定评估方法，选定青南地区部分新能源接入的网架结构如图 2(a)所示，新能源电网电压、装机数据根据青海电网运行方式计算结果设定，部分参数见表 1。

表1 青南地区部分新能源接入系统参数
Table 1 Parameters of some new energy access systems in Qingnan region

发电机名	新能源类型	装机容量/MW
青华扬 G ₁	风电	100
青沙二 G ₁	风电	100
青黄河共和 G ₁₋₇	光伏	100

基于 Matlab 仿真平台，建立青南近区新能源汇集电网选定区域网架结构等效模型，将选定区域网架结构等效为 21 个节点的简化网络拓扑见图 2(b)。

基于青南近区新能源汇集电网选定区域网架结构等效模型，建立对应的静态电压稳定评估模

型，计算青南近区部分新能源电网等效网络的 L - Q 灵敏度指标，计算得到的 L - Q 灵敏度指标计算结果见图 3。

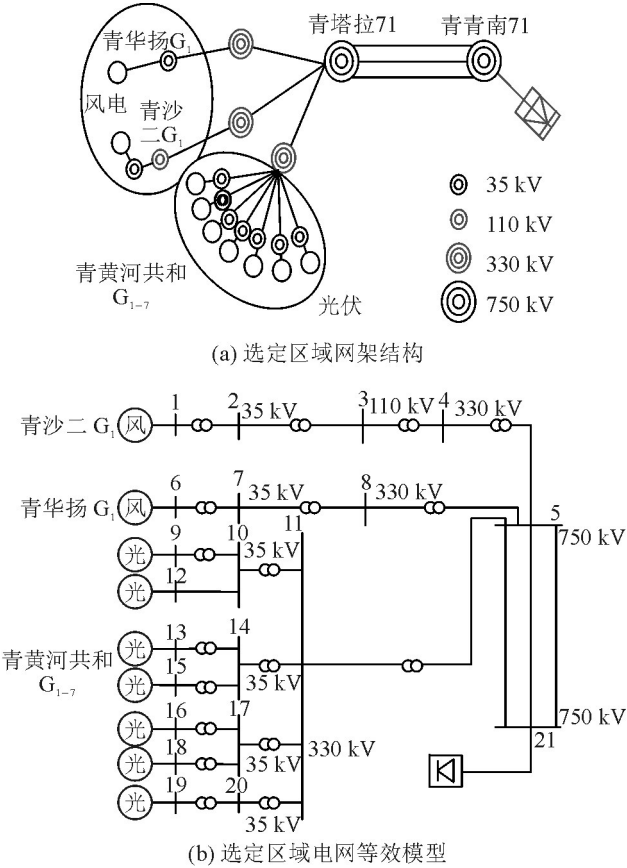


图2 青南近区新能源汇集电网选定区域网架结构
Fig. 2 The selected regional grid structure of new energy gathering grid in the vicinity of Qingnan

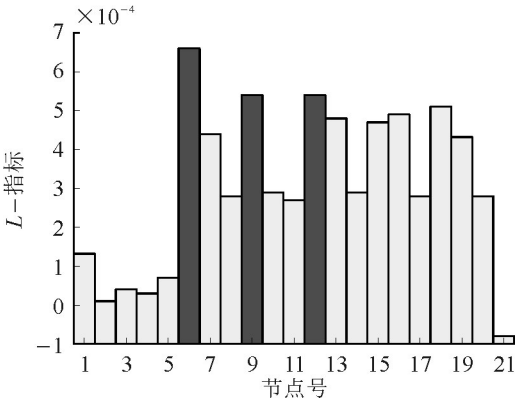


图3 L - Q 灵敏度指标计算结果
Fig. 3 Calculation results of L - Q sensitivity index

由计算结果可知节点 6、9、12 节点的灵敏度指标最大，分别为 0.000 652、0.000 548、0.000 550，当分别在 6、9、12 节点处补偿容量为 60 Mvar 的无功补偿装置时，补偿前后 6、9、12 节点负荷增长系数分别从 0.006 2 左右增长至 0.009 8、0.009 1、0.008 9，节点 6、9、12 静态电压稳定极限点均有所提升，提升效果见图 4。

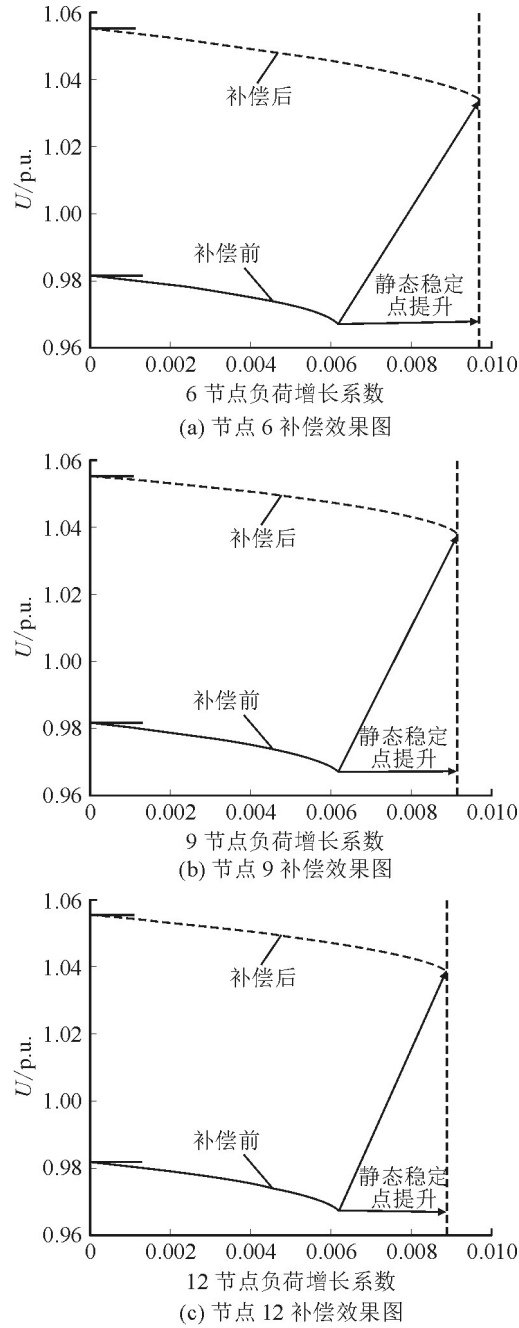


图4 补偿前后系统静态稳定性提升效果
Fig. 4 Improvement effect of static stability of system before and after compensation

以补偿前后网内1、2、5、6、9、12、13、15节点为例进行分析,对比补偿前后 L 指标的变化情况见图5。

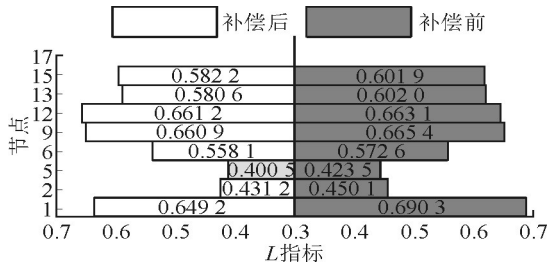


图5 补偿前后 L 指标
Fig. 5 L index before and after compensation

根据仿真结果可知,对 L - Q 灵敏度指标最大的节点6、9、12补偿一定容量的无功补偿装置时,网内各节点 L 指标均有所下降,系统稳定性进一步得到提升。

当对网内 L - Q 灵敏度指标相对较大的节点13、16、18补偿相同容量的无功补偿装置90 Mvar时,同样以网内1、2、5、6、9、12、13、15节点为例进行对比分析,经计算补偿前后的 L 指标对比情况见图6。

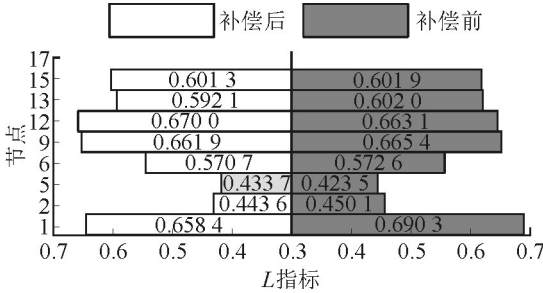


图6 补偿前后 L 指标
Fig. 6 L index before and after compensation

计算结果表明:对 L - Q 灵敏度指标相对较大的节点13、16、18补偿相同容量的无功补偿装置时,除5节点 L 指标有所上升,稳定性变差之外,其它节点 L 指标值均有一定程度降低,系统稳定性有所提升。因此,对网内经 L - Q 灵敏度指标计算得到的薄弱节点6、9、12节点补偿一定容量的无功补偿装置后,网内其它节点 L 指标下降程度最高,说明在该节点配置无功补偿装置对系统静态电压稳定性的提升效果最好。

4 结语

本文利用基于 L 指标判别含新能源电力系统静态稳定性的基础上,结合 L - Q 灵敏度指标作为辅助指标分析系统各个节点在不同灵敏度条件下的静态电压稳定程度,结合青海电网实际对各个节点补充相同容量的无功补偿设备时对系统静态电压稳定程度提升效果进行分析。结果表明,对 $LQSI$ 越大的节点补偿相同容量的无功补偿设备时,对系统静态稳定性的提升效果最好, L 指标下降程度越高。

参考文献

[1] YANG Haosen, SHI Xin, QIU R C, et al. Monitoring data factorization of high renewable energy penetrated grids for probabilistic static voltage stability assessment[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(2): 1273-1286.

[2] RAHMAN S, SAHA S, ISLAM S N, et al. Analysis of power grid voltage stability with high penetration of solar PV systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,

- 2021,57(3): 2245-2257.
- [3] 李敬. 风电高渗透率电网动态无功储备评估与优化[D]. 沈阳:沈阳工程学院,2018.
- [4] 步雨洛,吴俊勇,史法顺,等. 考虑新能源的暂态功角与电压稳定一体化评估[J/OL]. 中国电力, 1-13[2025-03-21]. <https://kns.cnki.net/kns8s/defaultresult/index?crossids>. BU Yuluo, WU Junyong, SHI Fashun, et al. Integrated evaluation of transient power angle and voltage stability considering new energy [J/OL]. China Electric Power, 1-13[2025-03-21]. <https://kns.cnki.net/kns8s/defaultresult/index?crossids>.
- [5] 吕建华. 电力系统潮流计算方法研究[J]. 电子世界, 2020(22): 30-31.
- LYU Jianhua. Research on power system flow calculation method[J]. Electronics World, 2020(22): 30-31.
- [6] 康帅伟. 交直流微电网的潮流控制及潮流计算[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2023.
- [7] 姚玉斌,朱发国,陈学允. 考虑功频静特性的连续潮流法静态电压稳定分析[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(15): 37-39.
- YAO Yubin, ZHU Faguo, CHEN Xueyun. Static voltage stability analysis by continuation power flow method considering static power frequency characteristic[J]. Automation of Electric Power System, 1999, 23(15): 37-39.
- [8] 顾承红,艾芊. 考虑电压稳定约束的最优潮流[J]. 电网技术, 2006, 30(16): 29-34.
- GU Chenghong, AI Qian. Optimal power flow considering voltage stability constraints[J]. Power System Technology, 2006, 30(16): 29-34.
- [9] 吴倩红,韩蓓,李国杰,等. 极高光伏渗透率下基于潮流雅可比矩阵和卷积神经网络的静态电压稳定在线预测[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4058-4067.
- WU Qianhong, HAN Bei, LI Guojie, et al. Power flow jacobian matrix based static voltage stability forecast by CNN considering extremely high PV penetration[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4058-4067.
- [10] 李京,刘道伟,安军,等. 基于强化学习理论的静态电压稳定裕度评估[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5136-5147.
- LI Jing, LIU Daowei, AN Jun, et al. Static voltage stability margin assessment based on reinforcement learning theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5136-5147.
- [11] 高晗,蔡国伟,杨德友,等. 基于累积贡献率和可解释人工智能的静态电压稳定裕度估计特征量筛选方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(4): 168-176.
- GAO Han, CAI Guowei, YANG Deyou, et al. Feature selection approach based on FCC-eAI in static voltage stability margin estimation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(4): 168-176.
- [12] 李建宜. 面向分布式能源高密度渗透的电力系统电压稳定裕度AI计算方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2022.
- [13] 李生虎,夏伟健,叶剑桥,等. 静态电压稳定分析中 L 指标与特征值换算关系及 L 阈值确定方法[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3828-3835.
- LI Shenghu, XIA Weijian, YE Jianqiao, et al. Exchange relation with eigenvalues and threshold determination of L index for power system static voltage stability analysis[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3828-3835.
- [14] 陶文娟,钟俊,黄宏光. 电力系统无功补偿点的选取及优化方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(3): 116-121.
- TAO Wenjuan, ZHONG Jun, HUANG Hongguang. Selecting and optimization method of reactive power compensation node in power system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(3): 116-121.
- [15] 姜涛,李国庆,贾宏杰,等. 电压稳定在线监控的简化 L 指标及其灵敏度分析方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 13-18.
- JIANG Tao, LI Guoqing, JIA Hongjie, et al. Simplified L index and its sensitivity analysis method for on-line monitoring of voltage stability control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 13-18.
- [16] 侯龙宇. 电力系统电压稳定 L 指标分析及其改进评价方法[D]. 长沙:湖南大学,2018.
- [17] 连胜,蔺红. 含风电场的电力系统静态电压稳定性研究[J]. 现代电子技术, 2022, 45(11): 182-186.
- LIAN Sheng, LIN Hong. Research on static voltage stability of power system containing wind power farm[J]. Modern Electronics Technique, 2022, 45(11): 182-186.
- [18] 贾宏杰,孙晓彦,张沛. 基于 L 指标的电压稳定约束下的最优潮流[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(1): 34-38, 111.
- JIA Hongjie, SUN Xiaoyan, ZHANG Pei. Optimal power flow with voltage stability constraint based on L index[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(1): 34-38, 111.
- [19] 林立栋. 基于概率统计方法的风电机组异常数据识别方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2023.
- [20] 董雷,程卫东,杨以涵. 含风电场的电力系统概率潮流计算[J]. 电网技术, 2009, 33(16): 87-91.
- DONG Lei, CHENG Weidong, YANG Yihan. Probabilistic load flow calculation for power grid containing wind farms[J]. Power System Technology, 2009, 33(16): 87-91.
- [21] 陈芷欣. 考虑风电不确定性的概率盒潮流模型及算法研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2021.
- [22] 史可鉴,代子阔,徐妍,等. 基于改进半不变量法的概率潮流特性分析[J]. 控制工程, 2024, 31(11): 1937-1946.
- SHI Kejian, DAI Zikuo, XU Yan, et al. Probabilistic power flow characteristics based on improved semi invariant method[J]. Control Engineering of China, 2024, 31(11):

1937-1946.

[23]吕航,吴琼,王浩婷,等.考虑不确定性的电热耦合多能微网系统概率潮流计算[J].上海电力大学学报,2023,39(2):167-174.

LYU Hang, WU Qiong, WANG Haoting, et al. Probabilistic tide calculation of electro-thermal coupled multi-energy micro-grid system considering uncertainty[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2023, 39(2): 167-174.

[24]王旭,闫世杰,张新宇,等.基于半不变量法概率潮流的光伏配电网风险评估[J].东北电力技术,2022,43(10):1-5.

WANG Xu, YAN Shijie, ZHANG Xinyu, et al. Risk assessment of photovoltaic distribution network based on probabi-

listic power flow with cumulant method[J]. Northeast Electric Power Technology, 2022, 43(10): 1-5.

[25]盛旭.光伏出力与负荷相关性的农村配电网概率潮流计算[D].大庆:东北石油大学,2021.

作者简介:

孙海斌(1994—),男,工程师,主要从事新能源仿真建模工作。E-mail:1601427954@qq.com。

傅国斌(1992—),男,工程师,主要从事电网运行控制工作。

宋锐(1979—),男,高级,主要从事电力系统分析工作。

蔡生亮(1996—),男,工程师,主要从事新能源涉网特性研究工作。

《电力电容器与无功补偿》2025 年 2 期广告单位

1 山东哈大电气有限公司	封面	12 桂林明富金属股份有限公司	前插 8
2 深圳市紫宸激光设备有限公司	封二	13 西安金叶电力科技有限公司	前插 9
3 上海思源电力电容器有限公司	封三	14 陕西泰普瑞电工技术有限公司	前插 10
4 西安高压电器研究院股份有限公司(业务)	封底	15 杭州精诚电力设备有限公司	前插 11
5 东莞市东和电子制程有限公司	前插 1	16 陕西凯瑞宏星电器有限公司	前插 12
6 新程(辽宁)电力电容器科技有限公司	前插 2	17 西安高压电器研究院股份有限公司(认证中心)	
7 赛晶科技集团有限公司	前插 3		前插 13
8 日新电机(无锡)有限公司	前插 4	18 辽宁芯峻电气有限公司	前插 14
9 深圳市三和电力科技有限公司	前插 5	19 3月12日植树节	前插 15
10 山东海源泰和电气有限公司	前插 6	20 西安唯实输配电技术有限公司	前插 16
11 温州市凯泰特种电器有限公司	前插 7		