

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.08.027

新型电力系统在线稳控策略刷新速度评估方法研究

俞秋阳, 常宝立, 王新宝

(南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211102)

摘要: 为适应新型电力系统运行方式快速变化,需要对在线稳控策略刷新速度进行评估。以西北某省级电网为例,利用相关分析法研究了影响系统稳定性的关键特征量,统计分析了下典型方式下关键特征量的变化率,以此推算出新型电力系统稳定性最大变化速率,提出新型电力系统在线稳控系统设计方案,评估该方案各环节耗时,得出了在线稳控系统计算速度合理量化指标。

关键词: 新型电力系统; 稳定控制; 控制策略; 在线稳控; 策略刷新

Research on Evaluation Methods for Refresh Speed of Online Stability Control Strategies in New Type Power Systems

YU Qiuyang, CHANG Baoli, WANG Xinbao

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: To adapt to the rapid changes of operating modes of new type power system, it is necessary to evaluate the refresh speed of online stability control strategies. Taking a provincial power grid in northwest China as an example, the correlation analysis method is used to study the key characteristic quantities that affect the system stability. The rates of change of these key characteristic quantities under typical operating modes are statistically analyzed, based on which the maximum rate of change of stability in the new type power system is derived. A design scheme for the online stability control system of the new type power system is proposed, and the time consumption of each link in the scheme is evaluated, thereby obtaining a reasonable quantitative indicator for the calculation speed of the online stability control system.

Key words: new type power system; stability control; control strategy; online stability control; strategy refresh

0 引言

为建设新型电力系统,中国光伏、风电等新能源发电占比日益提升。新能源间歇性、波动性特征使得系统运行方式变化幅度与频度增大^[1-4],稳定特性改变的概率增加。

新型电力系统中,电源侧同步机主导地位逐步被逆变器取代,功角稳定性呈现弱化趋势,与逆变器控制策略相关的谐振稳定性更加突出,表现为次、超同步宽频振荡^[5-10]。电压稳定性和频率稳定性特征也发生变化^[11-13]。风电、光伏高、低电压穿越能力及无功控制策略使电压稳定分析复杂化。常规机组占比降低,风电、光伏、储能更多承担调频、调

峰角色,对系统频率支撑作用愈发明显,频率稳定影响因素呈多元化趋势^[14-18]。

新型电力系统稳定性与传统电力系统相比更具有时变性、随机性和不确定性,其范围与频度超越传统电力系统^[19]。

中国应对严重故障扰动后的安全稳定问题,主要依靠安全稳定控制系统,亦称之为第二道防线^[20-21]。当前稳控系统采用策略表技术求取控制措施。策略表由离线分析得出^[22-23]。离线分析基于大量运行方式样本,理想假设覆盖电力系统所有运行方式,但实际无法做到穷举。因此,诞生了基于当前方式快速求取策略表的在线稳控系统^[24-26],以解决离线稳控策略与实际运行方式失配、控制策略精细化两

收稿日期:2026-02-16; 修回日期:2026-05-14

基金项目:智能电网国家科技重大专项(2024ZD0801200)。

Project Supported by Smart Grid-national Science and Technology Major Project(2024ZD0801200).

大问题。在线稳控系统已有初步应用,运行周期一般为 15 min^[27-30]。

新型电力系统中,这种速度能否及时反应稳定性变化,目前缺乏相关定量标准。文中以具备新型电力系统特征的西北某省级电网真实数据为例,研究在线稳控计算速度要求,并分析当前技术条件下的可行性,推动在线稳控系统在新型电力系统中的合理应用,提升系统安全稳定水平。

1 稳定相关性分析

综合考虑电力系统多种稳定性,量化评估电力系统安全稳定裕度,一直是学术界研究的热点课题之一。文中聚焦新型电力系统运行方式因素对稳定性的影响及其变化速率,以此评估在线稳控计算速度。

以全系统总发电、总负荷、关键输电断面潮流等表征方式水平,较高的方式水平通常对应较低的稳定裕度^[31-32]。求取控制策略时,以关键因素为指标,划分数十个方式水平,逐一求取预想故障的稳控措施,再归纳形成策略表。

西北某省级电网新能源装机占比达 61%,新能源发电占比最高时段可达 69%。文中以该省级电网为研究对象,利用失稳故障数 F_n 及其对应的控制总量 P_c 作为表征稳定性的指标。考虑的相关因素有全网机组总出力 P_a 、全网新能源总出力 P_n 、全网风电总出力 P_w 、全网光伏总出力 P_s 共 4 种。研究这 4 个相关因素引起稳定性不可忽略变化的最小步长。该最小步长所需时间决定新型电力系统中在线稳控系统的最大计算周期。

选取足够样本,涵盖不同负荷水平运行方式,以及相近负荷水平下新能源出力占比差异较大方式。对每种方式下的 P_c 进行计算,形成 P_c 样本集,采集从小到大 8 档运行方式,每档分别寻找 5 种各类型发电出力比例不同的运行方式,共计 40 个样本。

对 P_c 、 P_a 、 P_n 、 P_w 、 P_s 5 个变量的相关性进行分析,形成相关系数矩阵

$$R = \begin{bmatrix} 1 & r_{P_c P_a} & r_{P_c P_n} & r_{P_c P_w} & r_{P_c P_s} \\ r_{P_a P_c} & 1 & r_{P_a P_n} & r_{P_a P_w} & r_{P_a P_s} \\ r_{P_n P_c} & r_{P_n P_a} & 1 & r_{P_n P_w} & r_{P_n P_s} \\ r_{P_w P_c} & r_{P_w P_a} & r_{P_w P_n} & 1 & r_{P_w P_s} \\ r_{P_s P_c} & r_{P_s P_a} & r_{P_s P_n} & r_{P_s P_w} & 1 \end{bmatrix}_{5 \times 5} \quad (1)$$

稳控总量 P_c 与全网机组总出力 P_a 相关系数的计算公式有

$$r_{P_c P_a} = \frac{\sum_{i=1}^m (P_{ci} - \bar{P}_c)(P_{ai} - \bar{P}_a)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (P_{ci} - \bar{P}_c)^2 \sum_{i=1}^m (P_{ai} - \bar{P}_a)^2}} \quad (2)$$

式(2)中: $i=1, \dots, m$ 为样本个数; $\bar{P}_c$ 、 $\bar{P}_a$ 分别为稳控总量、总出力样本均值。其余因素的相关系数计算与上式类似。

相关系数取值范围为 -1 至 +1, 为正说明正相关,数值越大相关性越高。将大于 0.7 的因素视为强相关,将介于 0.7 至 0.3 之间的因素视为一般相关。40 个样本得出 P_c 与 P_a 、 P_n 、 P_w 、 P_s 的相关系数见表 1。

表 1 相关系数计算结果

Table 1 Results of correlation coefficient

参数	$r_{P_c P_c}$	$r_{P_c P_a}$	$r_{P_c P_n}$	$r_{P_c P_w}$	$r_{P_c P_s}$
数值	1.000 0	0.987 2	0.997 4	0.991 2	0.695 7

稳控措施量 P_c 与 P_a 、 P_n 、 P_w 、 P_s 这 4 个因素均有较强相关关系。进一步使用 P_a 、 P_n 、 P_w 、 P_s 作为自变量,对 P_c 做多自变量一次线性回归,形成表达式

$$P_c = b_1 P_a + b_2 P_n + b_3 P_w + b_4 P_s \quad (3)$$

式(3)中, b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 为参数估计结果。式(3)描述了稳控措施量与 4 种自变量之间的线性关系。使用 40 个样本得出表达式

$$P_c = 0.027 6 P_a + 0.187 2 P_n + 0.241 7 P_w + 0.139 6 P_s \quad (4)$$

稳控措施总量向上变化 10% 视为稳定性向不利方向发生较明显改变。由于措施总量与相关自变量呈线性关系,因此文中研究以上 4 个相关因素向上变化 10% 的最快速率,用以评估在线稳控系统计算速度。

2 总出力和新能源出力变化分析

P_a 、 P_n 分别代表了总出力与新能源总出力,体现方式水平和发电成分占比。以西北某省级电网为例,分析枯水期典型日、丰水期典型日的 P_a 和 P_n 的爬坡速率。

2.1 枯水期典型日分析

枯水期典型日全天总出力 P_a 和新能源总出力 P_n 每 15 min 的出力变化曲线见图 1。总出力和新能源出力爬坡率见图 2。

总出力爬坡率存在多个局部不明显峰值,其中 6:00、8:45、10:15、15:00、19:00 爬坡率在 9.4% 15 min 至 12.7%/15 min 区间内。

新能源爬坡率存在两个明显峰值,2:00 时爬坡率达到 56.89%/15 min,8:45 爬坡率达到 54.02%/15 min。

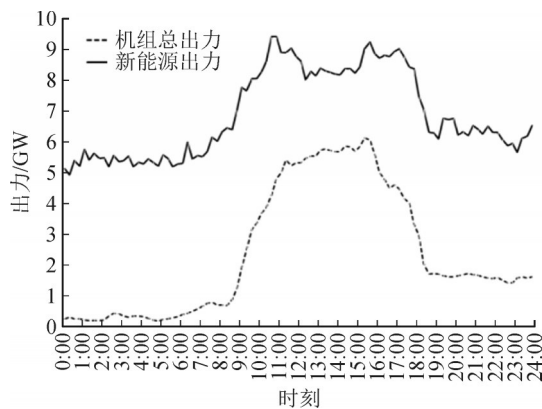


图1 枯水期机组总出力和新能源出力

Fig. 1 Total unit output and renewable energy output in dry season

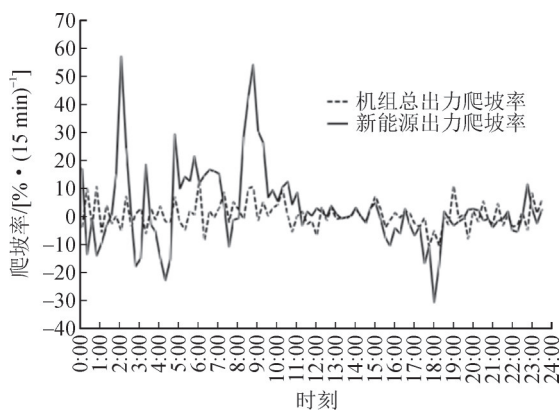


图2 枯水期总出力和新能源出力爬坡率

Fig. 2 Ramp rate of unit total output and renewable energy output in dry season

2.2 丰水期典型日分析

丰水期典型日的总出力 P_a 和新能源总出力 P_n /15 min的出力变化曲线见图3。



图3 丰水期总出力和新能源出力

Fig. 3 Total unit output and renewable energy output in wet season

总出力和新能源出力爬坡率见图4。总出力爬坡率存在多个较接近的峰值,其中5:45、16:30、20:45,爬坡率峰值分别为8.48%/15 min、15.73%/15 min、11.07%/15 min。

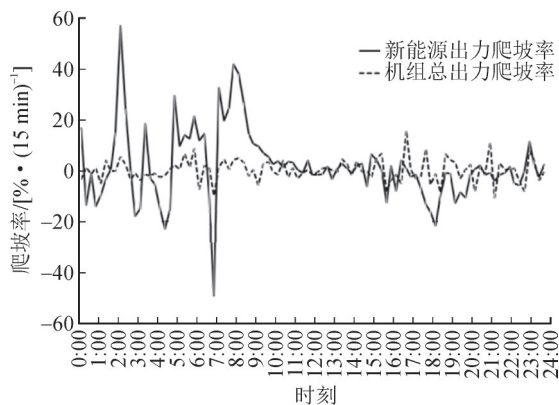


图4 丰水期机组总出力和新能源出力爬坡率

Fig. 4 Ramp rate of unit total output and renewable energy output in wet season

新能源爬坡率具有两类较明显峰值,一类是凌晨风电快速爬坡时段,2:00和6:00附近爬坡率分别为56.89%/15 min、29.21%/15 min;另一类是早晨光伏快速爬坡时段,出现在8:00附近,爬坡率达41.72%/15 min。

综上所述枯水期和丰水期典型日 P_a 和 P_n 爬坡率最大值为56.89%/15 min。

3 风电和光伏出力变化速率分析

单独考虑风电 P_w 和光伏 P_s 日最大爬坡率。枯水期新能源占比较大,以枯水期典型日为研究对象,绘制风电、光伏出力曲线见图5。

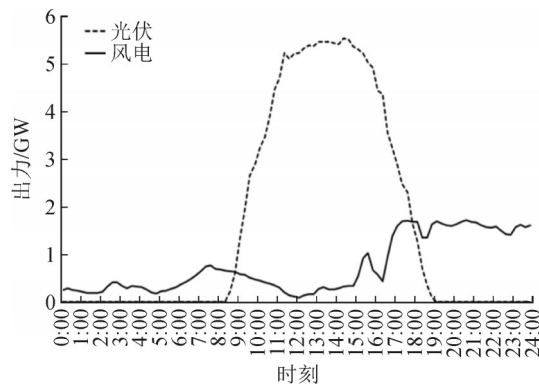


图5 风电、光伏出力曲线

Fig. 5 Wind and photovoltaic power output curve

风电、光伏小出力时的数值变化导致出现爬坡率极大值。但小出力情况下,出力提升并不会对稳定性产生很大冲击。因此需要确定一个出力门槛值,仅考虑出力大于门槛值时的爬坡率。计算风电、光伏在总出力中的占比见图6。

枯水期典型日光伏午间出力占比峰值可达66%,风电机组晚间出力占比峰值可达28%,按照大于总出力10%设置门槛值,绘制风电、光伏出力大于门槛值时的爬坡率见图7。

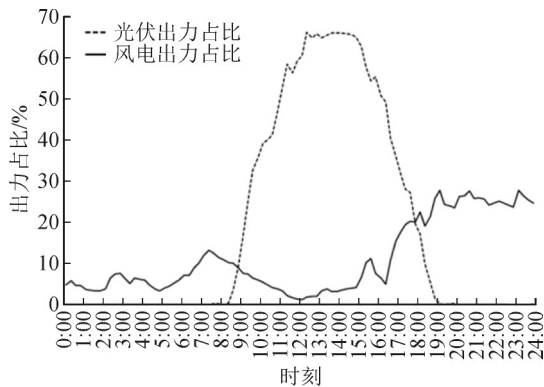


图6 风电、光伏在总出力中的占比

Fig. 6 Proportion of wind and photovoltaic power in total output

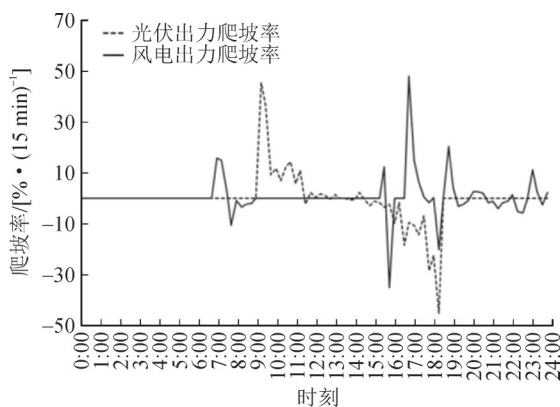


图7 风电、光伏出力爬坡率

Fig. 7 Ramp rate of wind and photovoltaic power

光伏爬坡率9:00达到峰值,为45.5%/15 min,18:00衰减最快,达到-45.2%/15 min;风电的最大爬坡率出现在16:30,达到48.3%每15 min。

综上所述,光伏在总出力占比大于10%时的最大爬坡率为45.5%/15 min;风电在总出力占比大于10%时的最大爬坡率为48.3%/15 min。

4 在线稳控系统方案设计

对某一稳控系统而言,目标电力系统存在3种运行域。实际出现的各种运行方式,简称“在线运行域”;求取离线稳控策略时所考虑的运行方式,简称“离线策略求解域”;满足电力系统安全稳定导则中N-1原则的所有运行方式,简称“可运行域”

在线运行域小于等于可运行域,最大时等于可运行域。离线策略求解域亦小于等于可运行域,理想状态下等于可运行域,并包含在线运行域。实际情况是,离线策略求解域更接近于可运行域,但并不完全包含在线运行域。离线策略针对的是离线策略求解域,在线分析生成的稳控策略则针对在线

运行域中当前运行点。以上关系见图8。

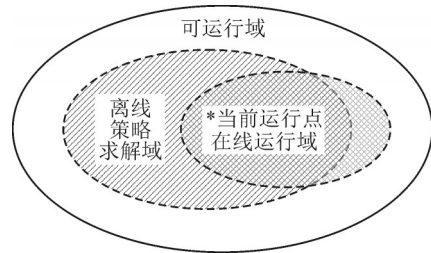


图8 运行域之间的关系

Fig. 8 Relationship among operation domains

新能源的间歇性和波动性使得新型电力系统呈现出稳定特性变化幅度大、频度快的特征。传统稳控系统使用的离线策略出现与系统运行方式失配的概率将大为增加,需要利用在线分析快速跟踪方式的复杂变化。

在线稳控系统针对系统当前运行方式,开展稳定性分析并形成稳控策略。在线分析生成的策略不依赖于大量的电网运行方式作为求解样本,仅针对电网当前运行方式,通过快速更新稳控装置中的策略表来不断跟踪和适应电网稳定特性的变化。离线稳控策略在尽可能大的运行域上求解稳控策略,而在线分析则尽可能快地跟踪系统运行点并更新对之有效的策略,在线稳控策略有效性取决于更新速度能否跟上系统方式变化。

新型电力系统环境下在线稳控系统的计算速度比传统电网更为苛刻。在线刷新策略主要由以下6个环节组成:①状态估计环节;②数据生成环节;③潮流计算环节;④稳定分析环节;⑤策略生成环节;⑥策略下发环节。其典型架构由在线分析主站和稳控系统构成,见图9。

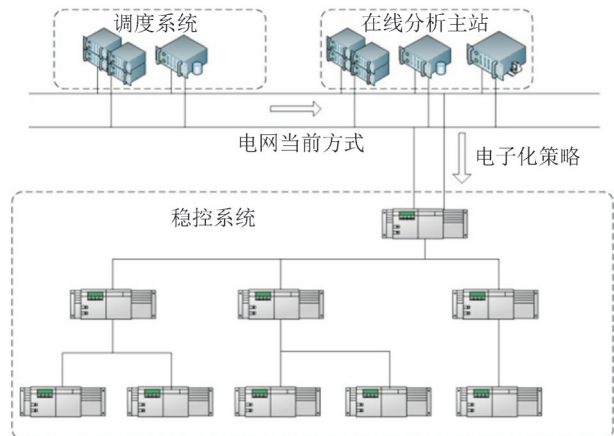


图9 在线稳控系统结构图

Fig. 9 Structure diagram of online stability control system

在线分析主站基于现有在线预决策系统、综合防御系统、能量管理系统中的动态安全评估模块升级而来^[33-34],其主要功能为周期式或触发式对电网

当前运行方式进行预想故障稳定性分析,求解有效控制措施,形成电子化策略表,并发送到稳控系统。在线分析主站的策略计算周期在技术允许范围内应尽可能短。除周期式计算外,当系统方式发生状态突变时具备触发式计算功能。

稳控系统接收在线分析主站发来的电子化策略表,下装至策略定值区,由稳控装置解释执行。因为在线策略直接给出当前系统运行点对应的稳控措施,所以无需经过查表匹配,这与传统稳控系统存在较大差异。在线稳控系统需实现以下两种关键技术:

1)在线稳控策略自动形成技术。即根据当前系统运行方式,计算预想故障在线策略,形成电子化策略表。目前在线预决策、综合防御等系统已能够求解在线策略,但暂未形成电子化策略表,其在线策略的合理性未得到实践检验,需要进一步评估与验证。

2)电子化稳控策略解释执行技术。在线稳控系统实现稳控策略的方式与现有稳控系统存在较大差异。电子化策略表由在线分析主站发送至稳控系统后,无需转换成稳控装置可执行程序,而是由稳控装置的策略解释器解释执行,适应了在线稳控系统高频度的策略刷新要求。

基于以上设计方案,进一步评估在线分析速度的量化指标。

5 在线稳控计算速度评估

根据文中研究结果,新型电力系统典型日 P_n 、 P_w 、 P_s 各类型出力爬坡率最大值为56.89%/15 min。据此推算稳定性变化10%所需最短时间为158 s。工程实践中可认为新型电力系统环境中在线稳控系统最长计算周期不应超过150 s。

在线稳控系统6大组成环节中,状态估计、数据生成、潮流计算环节目前均有较为明确的耗时指标。

策略下发环节主要耗时为各层级的通讯时间和稳控装置装载新策略的时间,目前国内最复杂的5层级稳控系统其策略下发环节耗时不超过20 s。

除去以上耗时,留给稳定分析环节和策略生成环节的时间约为100 s。

综上,新型电力系统在线稳控系统最完整流程的耗时需求见图10。

状态估计、数据生成、潮流计算环节的耗时均基于当前可实现技术条件。稳定性分析、策略生成以及策略下发耗时是根据上文对新型电力系统中

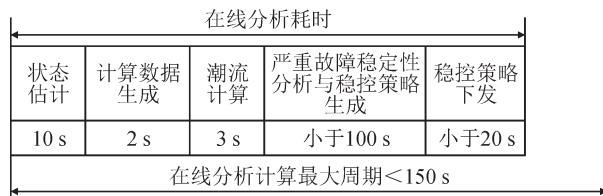


图10 在线分析各环节耗时评估

Fig. 10 Evaluation of time consuming for every part of online analysis

在线分析计算周期不大于150 s的研究结论而给出的耗时上限。

6 结语

文中以具备新型电力系统特征的西北某省级电网为例,研究了稳控措施总量与总发电、新能源发电、风电出力、光伏出力之间的相关性。统计分析了典型日总发电、新能源发电、风电出力、光伏出力4个变量的最大变化率。依据最大变化率,推算出新型电力系统中稳定性发生显著改变的最短间隔为150 s。因此在线稳控系统的周期耗时不超过150 s,才能跟上新型电力系统的稳定性变化速度。文中进一步评估了当前技术条件下,在线稳控系统各环节耗时,并提出了量化指标。

文中研究方法仅考虑了稳控措施总量与相关因素的线性关系,但在极端方式下,这种相关更具非线性,因此稳定性变化可能更为迅速,虽然文中在最终给出在线分析耗时指标时一定程度做了保守处理,缩短了时间,但能否克服这种非线性带来加速变化,需要开展更深入的研究。

参考文献:

- [1] 胡健雄,汤奕,李峰,等. 电力系统中数据—物理融合模型的并联模式性能分析[J]. 电力系统自动化,2022,46(1):15-24.
Hu Jianxiong, Tang Yi, Li Feng, et al. Performance analysis on parallel mode of data-physical fusion model in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(1): 15-24.
- [2] 辛保安,郭铭群,王绍武,等. 适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J]. 电力系统自动化,2021,45(22):1-8.
Xin Baoan, Guo Mingqun, Wang Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8.
- [3] 何方,张琦立,魏书荣,等. 考虑并网灵活性的大规模海上风电场集群接入系统规划研究[J]. 智慧电力,2024,52(9):33-40.
He Fang, Zhang Qili, Wei Shurong, et al. Planning of large-scale offshore wind farm cluster access system considering grid-connected flexibility[J]. Smart Power, 2024, 52(9): 33-40.
- [4] 史训涛,孙健,肖小兵,等. 计及柔性负荷资源的分布式智能

- 电网安全域建模[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(20): 69-82.
- Shi Xuntao, Sun Jian, Xiao Xiaobing, et al. Modeling of distributed smart grid security region considering flexible load resources[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(20): 69-82.
- [5] 陈志同, 徐晋, 李国杰, 等. 基于变分模态分解和压缩感知的电力系统宽频振荡监测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 63-74.
- Chen Zhitong, Xu Jin, Li Guojie, et al. Monitoring method of power system wide-band oscillation based on variational mode decomposition and compressive sensing[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 63-74.
- [6] 赵伟哲, 崔成, 严干贵, 等. 用于次同步振荡分析的直驱风电场等值模型[J]. 智慧电力, 2022, 50(2): 22-28.
- Zhao Weizhe, Cui Cheng, Yan Gangui, et al. Equivalent model of D-PMSG-based wind farm for subsynchronous oscillation analysis[J]. Smart Power, 2022, 50(2): 22-28.
- [7] 向玮华, 班连庚, 周佩朋. 基于机器学习可解释代理模型的风电次同步振荡在线预测及优化控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 67-75.
- Xiang Weihua, Ban Liangeng, Zhou Peipeng. Online prediction and optimal control method for subsynchronous oscillation of wind power based on an interpretable surrogate model for machine learning[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 67-75.
- [8] 姚尚衡, 傅晨玲, 曾金灿, 等. 智能电网技术创新对电力行业绿色转型的非线性影响[J]. 智慧电力, 2024, 52(2): 1-7.
- Yao Shangheng, Fu Chenling, Zeng Jincan, et al. Nonlinear impact of smart grid technology innovation on green transformation of power industry[J]. Smart Power, 2024, 52(2): 1-7.
- [9] 张智, 徐永海, 张世聪, 等. 直流配电网电能质量指标研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 172-187.
- Zhang Zhi, Xu Yonghai, Zhang Shicong, et al. Review of power quality indices of a DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 172-187.
- [10] 李从善, 甄子凯, 和萍, 等. 风电与多端柔性直流输电系统自适应变频协调控制策略研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(1): 65-7392.
- Li Congshan, Zhen Zikai, He Ping, et al. Research on adaptive frequency division coordinated control strategy for wind power and multi terminal flexible HVDC transmission system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 65-7392.
- [11] 李晨, 张昊, 周济, 等. 考虑频率电压空间分布特性的电网实时减载及负荷恢复策略[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 162-171.
- Li Chen, Zhang Hao, Zhou Ji, et al. Load shedding and load recovery strategy considering spatial distribution characteristics of frequency and voltage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 162-171.
- [12] 刘其辉, 洪晨威, 逢思敏, 等. 基于弹性系数的双馈风电机组控制参数对次同步振荡作用分析及调整方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(14): 3528-3541.
- Liu Qihui, Hong Chenwei, Pang Simin, et al. Analysis and adjustment method of doubly - fed fan control parameters on subsynchronous oscillation based on impedance elastic sensitivity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(14): 3528-3541.
- [13] 乔志杰, 马临超. 适用于电力系统稳定性提升的大规模储能控制策略研究[J]. 高压电器, 2022, 58(12): 75-84.
- Qiao Zhijie, Ma Linchao. Research on large-scale energy storage control strategy for power system stability improvement[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(12): 75-84.
- [14] 刘书池, 刘颂凯, 张磊, 等. 考虑样本不平衡的电力系统鲁棒暂态稳定评估[J]. 智慧电力, 2022, 50(7): 16-22.
- Liu Shuchi, Liu Songkai, Zhang Lei, et al. Robust transient stability assessment of power system considering sample imbalance[J]. Smart Power, 2022, 50(7): 16-22.
- [15] 陈继开, 王润灏, 初壮, 等. 风电直流外送系统的故障恢复分析与控制优化策略[J]. 智慧电力, 2025, 53(5): 82-89.
- Chen Jikai, Wang Runhao, Chu Zhuang, et al. Fault recovery analysis and control optimization strategy for wind power DC transmission systems[J]. Smart Power, 2025, 53(5): 82-89.
- [16] 李康, 黄萌, 查晓明, 等. 高压直流输电系统可靠性分析方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 174-187.
- Li Kang, Huang Meng, Zha Xiaoming, et al. An overview of reliability analysis methods for an HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 174-187.
- [17] 韩估, 邓钰婷, 耿子越, 等. 大规模风电场协调控制架构及算法综述[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(1): 1-18.
- Han Ji, Deng Yuting, Geng Ziyue, et al. Review of coordinated control architectures and algorithms for large-scale wind farms[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 1-18.
- [18] 王亮, 刘亚南, 柳强, 等. 基于自启动系统的海上风电并网技术[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(2): 134-140.
- Wang Liang, Liu Yanan, Liu Qiang, et al. Grid - connected technology of offshore wind power based on self-starting system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(2): 134-140.
- [19] 苏大威, 徐伟, 张琦兵, 等. 基于阻抗分析法的风储并网系统谐波稳定性分析[J]. 智慧电力, 2022, 50(6): 64-71.
- Su Dawei, Xu Wei, Zhang Qibing, et al. Harmonic stability analysis of wind - storage grid - connected system based on impedance analysis method[J]. Smart Power, 2022, 50(6): 64-71.
- [20] 王长江, 姜涛, 陈厚合, 等. 基于相位校正李雅普诺夫指数的电力系统暂态电压稳定评估[J]. 电工技术学报, 2021, 36(15): 3221-3236.
- Wang Changjiang, Jiang Tao, Chen Houhe, et al. Transient voltage stability assessment of power systems based on phase correction maximum lyapunov exponent[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(15): 3221-3236.
- [21] 杨大业, 项祖涛, 马世英, 等. 新能源接入系统暂态过电压产生机理及主要影响因素[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(3): 127-134.
- Yang Daye, Xiang Zutao, Ma Shiyang, et al. Mechanism and main influencing factors of transient over-voltage in new energy access system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,

- 2022,43(3):127-134.
- [22] 朱介北,邱威,孙宁,等.基于序贯蒙特卡洛法的安全稳定控制系统架构可靠性分析[J].电力系统自动化,2021,45(15):21-27.
Zhu Jiebei, Qiu Wei, Sun Ning, et al. Reliability analysis of security and stability control system architecture based on sequential Monte Carlo method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(15):21-27.
- [23] 邓慧琼,陈心耘,吴俊媛,等.兼顾电压稳定和连锁故障触发的电网预防策略研究[J].智慧电力,2022,50(1):1-6.
Deng Huiqiong, Chen Xinyun, Wu Junyuan, et al. Prevention strategy of power grid considering voltage stability and cascading outage triggering[J]. Smart Power, 2022, 50(1):1-6.
- [24] 宋煜浩,魏犇,黄少伟,等.风储联合电站实时自调度的高效深度确定性策略梯度算法[J].电工技术学报,2022,37(23):5987-5999.
Song Yuhao, Wei Wei, Huang Shaowei, et al. Efficient deep deterministic policy gradient algorithm for real-time self-dispatch of wind-storage power plant[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(23):5987-5999.
- [25] 张建新,吴峰,黄磊,等.考虑设备运行状态的频率和电压紧急调控在线预决策[J].电力工程技术,2021,40(2):101-106.
Zhang Jianxin, Wu Feng, Huang Lei, et al. An online pre-decision method for frequency and voltage emergency regulation considering running condition of equipment[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2021, 40(2):101-106.
- [26] 王彤,邢其鹏,李鸿恩,等.计及虚拟惯量控制的DFIG等效惯量在线评估与响应特性分析[J].电力系统保护与控制,2022,50(11):52-60.
Wang Tong, Xing Qipeng, Li Hongen, et al. Online evaluation and response characteristics analysis of equivalent inertia of a doubly-fed induction generator incorporating virtual inertia control[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11):52-60.
- [27] 彭鑫,刘俊,刘嘉诚,等.图像化数据驱动的电力系统暂态稳定性在线评估方法[J].智慧电力,2022,50(11):17-24.
Peng Xin, Liu Jun, Liu Jiacheng, et al. Graphical data-driven online assessment of power system transient stability[J]. Smart Power, 2022, 50(11):17-24.
- [28] 汤奕,崔晗,党杰.基于继承思想的时变性电力系统暂态稳定预测[J].中国电机工程学报,2021,41(15):5107-5118.
Tang Yi, Cui Han, Dang Jie. Transient stability prediction of time-varying power systems based on inheritance[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15):5107-5118.
- [29] 盛四清,俞可,张文朝,等.大规模风电并网对送端系统功角稳定的影响研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(6):82-90.
Sheng Siqing, Yu Ke, Zhang Wenchao, et al. Influence of large-scale wind power grid connection on the power angle stability of the sending end system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6):82-90.
- [30] 洪扬,惠思思,宋莹.风电直流外送系统风机高压脱网的风险评估[J].高压电器,2022,58(9):102-111.
Hong Yang, Hui Sisi, Song Ying. Risk assessment of wind turbine high voltage trip-off in wind power DC delivery system[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9):102-111.
- [31] 付超,邱建,李诗阳,等.昆柳龙多端直流稳定控制策略设计及系统构建[J].南方电网技术,2022,16(1):33-40.
Fu Chao, Qiu Jian, Li Shiyang, et al. Stability control strategy and system design for kunliulong multi-terminal HVDC transmission[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(1):33-40.
- [32] 马燕峰,杨小款,王子建,等.基于风险价值的大规模风电并网电力系统运行风险评估[J].电网技术,2021,45(3):849-854.
Ma Yanfeng, Yang Xiaokuan, Wang Zijian, et al. Operation risk assessment for power system with large-scale wind power integration based on value at risk[J]. Power System Technology, 2021, 45(3):849-854.
- [33] 赵化时,李胜,林子杰,等.电力系统低模型耦合智能状态估计[J].电力科学与技术学报,2022,37(2):116-128.
Zhao Huashi, Li Sheng, Lin Zijie, et al. Smart power system state estimation with low model coupling[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2):116-128.
- [34] 杨金海,武家辉,王海云,等.不同渗透率下多种新能源电力系统动态安全域分析[J].电力建设,2022,43(4):58-68.
Yang Jinhai, Wu Jiahui, Wang Haiyun, et al. Dynamic security region analysis of power system under different penetration rate of new energy[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(4):58-68.
- 俞秋阳(1980—),男,硕士,正高级工程师,主要研究方向为电力系统稳定性分析(通信作者)(E-mail:yuqy@nrec.com)。
- 常宝立(1981—),男,硕士,正高级工程师,主要研究方向为电力系统分析软件开发与应用。
- 王新宝(1979—),男,硕士,正高级工程师,主要研究方向为电力系统规划与运行。