

计及新能源随机性的分布式调相机选址定容策略

胡其林¹, 郭政麟², 付强², 彭祺³, 王兴鹏¹, 石云天¹

(1. 甘孜兴川能源投资开发有限公司, 四川 康定 626099; 2. 国家电投集团西南能源研究院有限公司, 成都 610218;
3. 国家电投集团四川电力有限公司, 成都 610000)

摘要: 新能源汇集站配置分布式调相机是抑制并网节点暂态过电压的可行办法。传统的分布式调相机选址定容策略多基于新能源固定出力场景, 忽略了各节点风、光出力随机性, 难以保障策略的有效性与适应性。鉴于此, 基于置信区间对新能源最大并网功率进行估计, 并提出计及新能源随机性的新能源多场站短路比指标, 以量化评估电网各节点电压支撑强度, 据此制定调相机选址定容策略。仿真结果表明, 所提策略能够在实际新能源出力波动时准确搜索电压支撑能力较弱的节点, 相较传统策略更加有效抑制送端系统暂态过电压, 为大规模新能源并网运行提供技术支撑。

关键词: 新能源随机性; 分布式调相机; 选址定容; 新能源多场站短路比; 暂态过电压

中图分类号: TM614; TM615; TM342 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)01-0071-05

党的二十大报告强调, 坚定不移、积极稳妥地推进碳达峰、碳中和战略^[1]。为落实“双碳”目标, 构建清洁低碳、安全高效的新型能源体系, 并着力建设以新能源为主体新型电力系统是核心任务与关键路径所在^[2-6]。

未来, 送端系统新能源高占比是中国电力系统的主要特点。预计 2024 年全年新增发电装机规模与 2023 年基本相当, 其中并网风电和太阳能发电合计新增装机规模达到 3 亿 kg 左右, 风电和太阳能发电累计装机占比将首次超过 40%^[7]。然而新能源的出力具有波动性和随机性, 新能源发电装置的大规模并网给电网功率平衡带来了挑战^[8]。同时, 新能源渗透率的提高也削弱了系统整体强度, 使得系统暂态过电压问题日益突出^[9-11], 严重威胁了电网的安全稳定运行。

作为同步电机的一种, 调相机可以有效提升系统短路容量, 增强电网电压支撑强度, 提高电网发生扰动时的电压支撑能力。现有工程常在换流站及其近区配置集中式调相机, 但鉴于新能源场站与直流换流站母线之间的电气距离较远, 集中式调相机在抑制新能源场站的暂态过电压方面的效果有限, 因此在新新能源场站不同电压等级并网或汇集站母线配置分布式调相机成为一种更有效的策略^[12]。

现有研究针对分布式调相机的选址定容已有较为丰富的研究成果。常海军等^[13]、王泽森等^[14]分析

了调相机布点定容对系统稳定性的影响, 分别提出一种提升弱电网电压支撑的调相机优化配置方法, 有效提升了能源消纳空间。甘王伟等^[15]根据湖南电网的实际电压稳定需求, 提出了一种在湖南电网配置分布式调相机的最优方案, 提高了高压直流送电能力和湖南省整体供电能力。沈光进等^[16]考虑同步稳定约束, 提出了一种针对新能源基地中同步调相机优化选址的算法, 通过评估各节点受扰后的相位变化, 并结合调相机接入后系统的功角特性, 筛选出适合调相机接入的节点位置。刘铖等^[17]从频率角度分析了分布式调相机接入对系统惯量支撑能力的影响, 提出一种考虑频率稳定约束的分布式调相机选址定容方法, 能够有效提升系统频率支撑强度。

然而现有研究大多局限于新能源固定输出的情况, 未能充分考虑风电和光伏发电出力的不确定性, 这限制了所制定策略的有效性和实际应用中的适应性。特别是在严重故障扰动下, 可能无法有效抑制新能源场站并网点出现的暂态过电压问题, 进而引发新能源发电大面积脱网等严重后果。因此, 为解决暂态过电压问题, 保障风、光等新能源大规模接入, 亟须开展相关研究。

据此, 本文从提升交直流混联电网电压支撑强度角度出发, 首先基于置信区间对新能源最大并网功率进行估计。接着提出计及新能源随机性的新

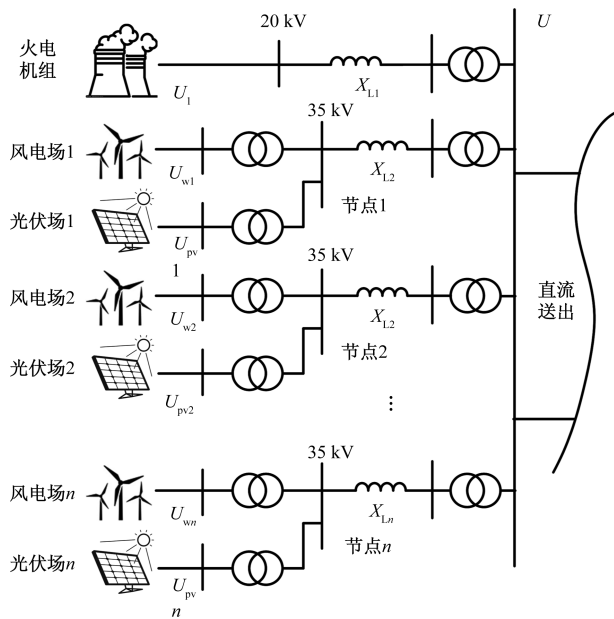
收稿日期: 2024-07-29

作者简介: 胡其林(1991—), 男, 四川沐川人, 工程师, 研究方向为电气工程及其自动化; 通信作者郭政麟(1990—), 男, 青海西宁人, 硕士, 工程师, 研究方向为电气工程及其自动化; 付强(1991—), 男, 四川乐山人, 中级经济师, 研究方向为能源双碳经济; 彭祺(1995—), 女, 重庆人, 硕士, 研究方向为应用金融; 王兴鹏(1992—), 男, 甘肃张掖人, 中级工程师, 研究方向为工程管理; 石云天(1999—), 男, 四川成都人, 助理工程师, 研究方向为工程及其自动化。

能源多场站短路比(multiple renewable energy stations short circuit ratio, MRSCR)指标,以量化评估电网电压支撑强度,基于该指标制定了计及新能源随机性的分布式调相机选址定容策略。可以通过接入容量较少的分布式调相机,显著提升风、光等新能源接入后的电网电压支撑强度,降低扰动后的送端暂态过电压水平。最后,在 PSCAD/EMTDC中仿真验证了所提控制策略的有效性。

1 高比例新能源送端系统问题分析

典型高比例新能源接入的直流送端系统如图 1 所示。整个系统由 3 部分组成,分别是直流输电、火电机组所在支路,以及由风电场与光伏场站组成的多条新能源支路。当送端火电支撑弱、交流系统强度低时,系统面临直流故障后暂态过电压越限的问题,导致风电机组故障穿越失败脱网,严重威胁送端系统安全稳定性。



U_1 为火电机组直流母线电压; $U_{w,x}(x=1,2,\dots,n)$ 为各风电场的并网母线电压; $U_{p,v,x}(x=1,2,\dots,n)$ 为各光伏场站的并网母线电压; $X_{L,x}(x=1,2,\dots,n)$ 为各节点支路的线路阻抗

图 1 直流近区拓扑结构

2 传统新能源多场站短路比指标

2.1 传统电网电压支撑强度评价指标

孙华东等^[18]提出了计及新能源之间相互影响的新能源多场站短路比可用于表征电网电压支撑强度。该指标反映了各新能源汇集点电压支撑强度的相对大小,推荐的临界短路比为 2~2.5。

对于图 1 所示系统来说,任意新能源接入节点 $p(p \leq n)$ 的新能源多场站短路比(记为 $MRSCR_p$)可

表示为

$$MRSCR_p = \frac{U_{Np}^2}{P_{rep} |Z_{eqpp}| + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n |Z_{eqpq}| P_{req}} = \frac{U_{Np}^2}{\sum_{q=1}^n |Z_{eqpq}| P_{req}} \quad (1)$$

式中: U_{Np} 为节点 p 的额定电压; P_{re} 为节点注入有功功率标么值; Z_{eqpp} 为指节点 p 的自阻抗值; Z_{eqpq} 为指节点 p 与节点 q 的互阻抗值。

由式(1)可知,传统 MRSCR 指标通常在各节点注入功率一定情况下得出结果。实际上,新能源并网功率由于风速、光照强度变化等因素影响,具有很强的随机性,当代入式(1)的新能源并网功率过小时,MRSCR 指标对应增大,此时所得结果将过于理想,难以有效抑制送端系统暂态过电压;同时,如果选择代入所有节点风电与光伏最大并网功率(装机容量),结果将过于保守,在该方案下成本较高。因此,如何选取合适的各节点注入功率,实现分布式调相机优化配置,是需要进一步研究的问题。

2.2 分布式调相机接入对 MRSCR 影响

假设分布式调相机阻抗为 z_{io} ,其中下标 i 表示接入第 i 个节点, o 表示欧姆,在其接入后,根据电力系统分析可知,相当于在电网中新增了对地并联的链支 z_{io} ,将对阻抗矩阵造成影响,具体如下:

$$\mathbf{Z}' = \mathbf{Z} - \frac{\mathbf{Z}_i^T \mathbf{Z}_i}{Z_{eqii} + z_{io}} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{Z}_i = [Z_{eq1i} \ \dots \ Z_{eqii} \ \dots \ Z_{eqni}]$ 为原阻抗矩阵 \mathbf{Z} 的第 i 行。如果对该矩阵进行拆分,则 \mathbf{Z}_i^T 中的每一项都可由式(3)表示:

$$Z'_{eqpq} = Z_{eqpq} - \frac{Z_{eqip} Z_{eqiq}}{Z_{eqii} + z_{io}} \quad (3)$$

式(3)表明,分布式调相机接入后将会减小原本系统阻抗矩阵元素值,结合式(1)可知,此时系统各节点短路比将会增大,系统电压支撑能力得到提升。

将式(3)回代到式(1)可得调相机接入后对新能源多场站短路比的影响为

$$MRSCR_p^* = \frac{U_p^2}{\sum_{q=1}^n P_q |Z_{qp}| - \left| \frac{Z_{pi}}{Z_{ii} + z_{io}} \right| \sum_{q=1}^n P_q |Z_{qi}|} \quad (4)$$

3 计及新能源出力随机性的分布式调相机选址定容策略

3.1 基于置信区间的新能源最大并网功率估计

一个概率样本的置信区间是对这个样本的某个

总体参数的区间估计。置信区间展现的是这个参数的真实值有一定概率落在测量结果的周围的程度,其给出的是被测量参数的测量值的可信程度。置信区间是在预先确定好的显著性水平下计算出来的,显著性水平通常称为 α ,一般取 α 为0.05,在此条件下算出的置信区间被称为95%置信区间。

由第2节分析可知,为了防止MRSCR计算结果过于激进或者保守,需要找到各节点新能源实际较大概率出现的并网功率峰值 P_{\max} 。为了估算节点 p 的功率峰值 $P_{\max,p}$,首先对该节点接入的风电以及光伏进行主导性分析,定义指标 D 为该节点功率波动主导指标,由于风、光都与1 d内气象相关,即与1 d内不同时间相关,因此以1 h为间隔,在各节点典型风光出力曲线上,取1 d内24 h不同时刻功率变化率绝对值求和,得到风电与光伏的指标 D 为

$$\begin{cases} D_{wp} = \sum_{t=1}^{24} \left| \frac{dP_w(t)}{dt} \right| \\ D_{pvp} = \sum_{t=1}^{24} \left| \frac{dP_{pv}(t)}{dt} \right| \end{cases} \quad (5)$$

式中: D_{wp} 为节点 p 接入的风电; D_{pvp} 为节点 p 接入的光伏; P_w 、 P_{pv} 分别为在该节点接入的风电、光伏新能源装机容量; t 为时间。

指标 D 更大者代表其主导了该节点功率波动事件,因此,先分析该新能源的95%置信区间,在此基础上得到对应的1 d内离散或连续时间区间,在此区间内再分析另一种新能源的95%置信区间。由于另一种新能源变化情况相对较小,因此能够很好得到两种新能源的实际95%置信区间,分别取两个置信区间内最大值点进行求和,便能够估算节点 p 的 $P_{\max,p}$,这样做的好处是由于节点 p 光伏和风电的最大出力一般不在同一时刻出现,因此直接相加相当于预留了一定裕度,便于后续分布式调相机选址定容分析。

3.2 计及新能源随机性的新能源多场站短路比指标(MRSCR')

针对现有MRSCR指标未考虑新能源出力随机性,可能导致结果偏差的问题,本节提出了计及新能源随机性的新能源多场站短路比指标,记为MRSCR'。根据3.1节分析结果,假设此时节点 p 功率计算结果为 P_{\max} ,将其代入MRSCR表达式,则可以得到计及新能源随机性的新能源多场站短路比指标:

$$\text{MRSCR}'_p = \frac{U_{Np}^2}{\sum_{q=1}^n |Z_{eqpq}| P_{\max}} \quad (6)$$

根据该指标,即可分析1 d内新能源功率波动情况

下全局电压支撑能力最弱的节点。

3.3 分布式调相机选址定容策略

首先根据各节点典型风光出力曲线,根据3.1节分析主导各节点功率波动的新能源类型,并得到各节点 P_{\max} ;接着将功率计算结果代入式(6),在计及新能源随机性分析得出MRSCR'指标最低点 i 后,选择在该节点接入第1台分布式调相机,此时系统阻抗矩阵变化,因此全局MRSCR'指标随之变化。继续对全局各节点指标MRSCR'进行扫描,并按顺序配置分布式调相机,直到短路比最低节点符合要求。具体流程如图2所示。

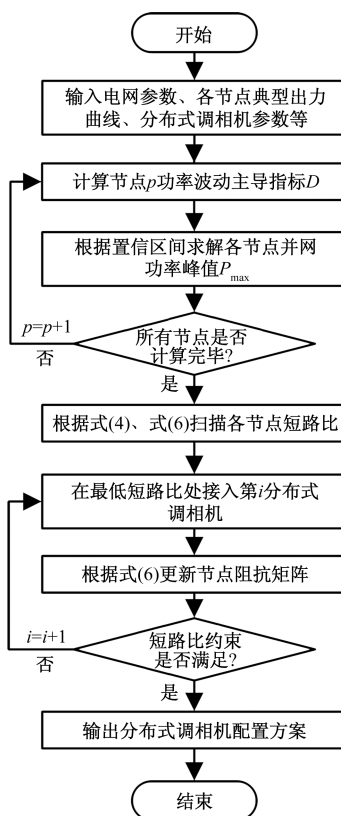


图2 分布式调相机选址定容流程

考虑到调相机通常是固定容量整数台接入,因此相当于进一步预留了一定裕度,所得配置结果能较好应对因新能源出力波动导致的传统方案效果不佳的问题。

4 算例分析

在PSCAD/EMTDC中搭建图1所示直流送端系统,火电装机容量2 500 MW,风电场群和光伏场群装机总容量2 500 MW,直流额定功率5 000 MW,额定电压 ± 800 kV。

在图1中取 $n=3$,即当送端有3条新能源支路时,各支路1 d内风光典型并网功率如图3所示,其

中每 0.2 s 代表实际中 1 h。n=3 时算例的西北某电网结构,通过将主网等值,送端系统新能源可以认为是在 3 个节点汇集后经直流送出。算例中设置 3 条支路风电与光伏装机容量分别为:场站 1,风电装机容量 500 MW,光伏装机容量 300 MW;场站 2,风电装机容量 600 MW,光伏装机容量 400 MW;场站 3,风电装机容量 700 MW,光伏装机容量 500 MW。

图 3 中深灰、浅灰、黑色曲线为各节点 1 d 内风电、光伏出力以及支路总功率典型变化趋势,通过分析各节点功率波动主导指标,可计算得 3 个节点新能源出力置信区间见表 1。

将得到的 P_{max} 代入式(6)进行计算,可得各节点 MRSCR 指标,节点 1~3 分别为 1.360 1、1.364 8 以及 1.361 0,设置最低短路比要求为 2.5。目前工程中常用的分布式调相机为 50 Mvar,以该容量为例根据图 2 所示流程进行迭代循环配置调相机,第 1 次

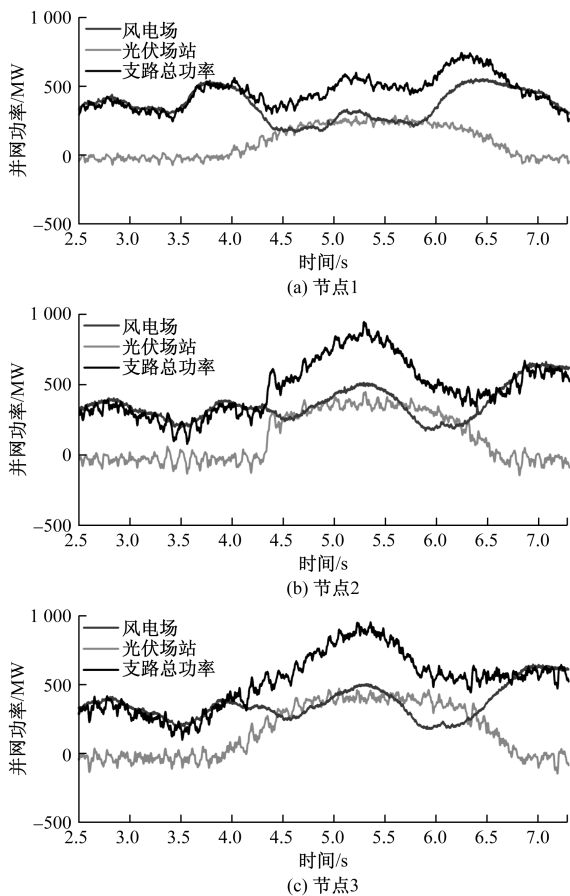


图 3 各节点 1 d 内风、光典型并网功率

表 1 各节点新能源出力 95%置信区间

| 节点 | 光伏功率/MW | 风电功率/MW | P_{max} /MW |
|----|---------------|---------------|---------------|
| 1 | 38.80~42.50 | 266.12~270.92 | 313.42 |
| 2 | 114.10~121.09 | 363.83~368.76 | 489.85 |
| 3 | 62.70~68.92 | 294.45~298.96 | 367.88 |

在节点 1 接入 1 台 50 Mvar 分布式调相机后,节点 1~3 指标变为 1.798、1.806 以及 1.799。此时节点 1 仍为指标最低点,因此在节点 1 继续配置 1 台分布式调相机。继续迭代循环计算,最终结果为在节点 1 配备 6 台 50 Mvar 分布式调相机。

当不考虑新能源随机性时,代入各节点 06:00 时的数据进行计算,此时得到的配置结果为:仅在节点 4 配置 1 台分布式调相机。在已经搭建的送端系统中进行直流闭锁后过电压分析。为了说明本策略的合理性,选取新能源出力较大时段进行模拟,设置直流闭锁故障发生于 3 s,持续 0.2 s,各节点电压仿真结果如图 4 所示。

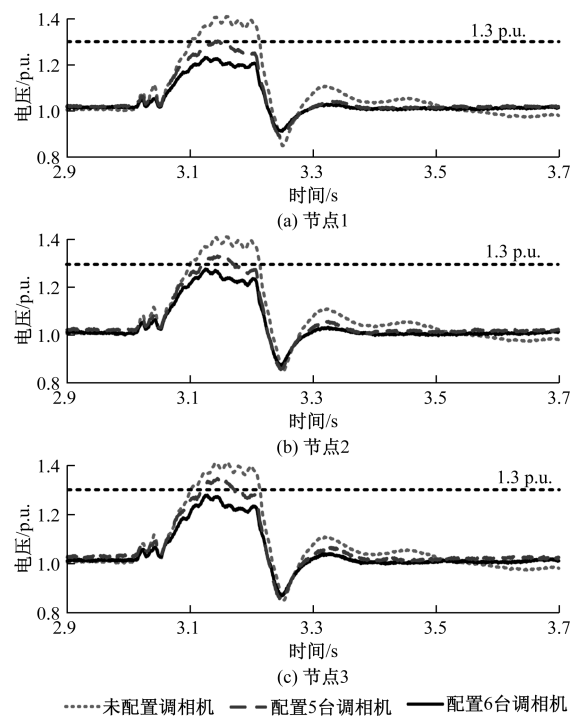


图 4 各节点 35 kV 过电压情况

由结果可知,本文方法计及了新能源出力随机性,能够更好抑制暂态过电压峰值。

5 结论

本文提出了一种计及新能源随机性的分布式调相机选址定容策略,通过置信区间实现了对电网各节点新能源出力的合理估计,提出了计及新能源随机性的新能源多场站短路比指标,解决了传统新能源多场站短路比指标计算中因为新能源出力波动导致不准确的问题。本文方法能够快速估计 MRSCR 指标中节点注入功率参数,实现准确判别弱电压能力支撑能力节点。配置方法以及结果能够为实际工程分布式调相机选址定容提供参考,保证电力系统安全稳定运行。

参考文献

- [1] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜, 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗: 在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[EB/OL]. (2022-10-25)[2024-07-09]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-10/25/content_5721685.htm.
- [2] 周孝信, 赵强, 张玉琼, 等. 双碳目标下我国能源电力系统发展趋势分析: 绿电替代与绿氢替代[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-15 [2024-07-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20240719.0835.008.html>.
- [3] 江一航, 赵书强, 王慧, 等. 计及风电、调相机支撑特性的频率安全约束分布鲁棒机组组合调度方法[J/OL]. 电工技术学报, 1-15 [2024-07-07]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.232164>.
- [4] 任大伟, 肖晋宇, 侯金鸣, 等. 双碳目标下我国新型电力系统的构建与演变研究[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3831-3839.
- [5] 向开端, 王辉, 彭婷婷, 等. 含混合储能的风光储系统容量优化配置[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(31): 13415-13422.
- [6] 李政, 李伟起, 张忠伟, 等. “双碳”目标下我国电力系统灵活性资源发展策略研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(4): 108-120.
- [7] 中国电力企业联合会. 2024年上半年全国电力供需形势分析预测报告[EB/OL]. (2024-07-24)[2024-08-09]. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-335294>.
- [8] 朱姝林, 王海云, 常喜强, 等. 考虑新能源场站动态减载调频的电力系统调度研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(8): 3295-3305.
- [9] 省天骄, 李积泰, 权慧娟, 等. 适应高比例新能源直流外送输电能力提升的分布式调相机配置方法研究[J]. 青海电力, 2023, 42(2): 1-7.
- [10] 于思奇, 孙大卫, 吴林林, 等. 新能源汇集系统短路故障清除后的暂态过电压机理[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 179-185.
- [11] 刘铖, 杨慧, 王旭, 等. 基于支路模式势能的含高比例DFIG电网低频振荡特性分析[J]. 东北电力大学学报, 2020, 40(3): 41-49.
- [12] 索之闻, 刘建琴, 蒋维勇, 等. 大规模新能源直流外送系统调相机配置研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 124-129.
- [13] 常海军, 霍超, 刘福锁, 等. 提高弱送端电网暂态电压稳定水平的调相机优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 90-95.
- [14] 王泽森, 刘苗, 李海波, 等. 提升弱电网新能源集群送出能力的调相机优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(7): 30-36, 44.
- [15] 甘王伟, 陈道君, 崔挺, 等. 分布式调相机在特高压交直流混联电网的配置研究[J]. 湖南电力, 2022, 42(3): 35-42, 72.
- [16] 沈广进, 郭俊辉, 常俊晓, 等. 同步约束下新能源基地调相机优化选址算法[J]. 计算机仿真, 2024, 41(5): 94-101.
- [17] 刘铖, 胥冬洋, 武诚, 等. 考虑频率稳定约束的分布式调相机选址定容策略[J]. 电力建设, 2023, 44(12): 106-114.
- [18] 孙华东, 徐式蕴, 许涛, 等. 新能源多场站短路比定义及指标[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 497-506.
- [19] 周莹坤, 孙华东, 徐式蕴, 等. 提升电网电压支撑强度的调相机优化配置方法[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3848-3856.

Location and Capacity Determination Strategy of Synchronous Condensers Considering Renewable Power Uncertainty

HU Qilin¹, GUO Zhenglin², FU Qiang², PENG Zhen³, WANG Xingpeng¹, SHI Yuntian¹

(1. Ganzi Xingchuan Energy Investment and Development Co., Kangding 626099, Sichuan, China;

2. State Power Investment Corporation Southwest Energy Research Institute, Chengdu 610218, China;

3. State Power Investment Corporation Sichuan Electric Power Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: Configuring distributed synchronous condensers in renewable energy collector stations is a viable approach to mitigating transient overvoltage at grid connection points. Traditional distributed synchronous condenser's location and capacity selection strategies are mostly based on fixed output scenarios of renewable energy, ignoring the randomness of wind and solar power output at each node, making it difficult to ensure the effectiveness and adaptability of the strategy. In view of this, the maximum grid connected power of renewable energy based on confidence intervals was estimated. A multiple renewable energy stations short circuit ratio index that takes into account the randomness of renewable energy is proposed to quantitatively evaluate the voltage support strength of each node in the power grid. Based on this, a distributed synchronous condensers location and capacity determination strategy is formulated. Simulation results demonstrate that the proposed strategy can accurately identify nodes with weaker voltage support capabilities under actual fluctuations of renewable energy outputs. Compared to conventional strategies, it proves more effective in suppressing transient overvoltage in the sending-end system, offering technical support for large-scale renewable energy integration into power grids.

Keywords: renewable energy stochasticity; distributed synchronous condensers; site selection and capacity determination; multiple renewable energy stations short circuit ratio; transient overvoltage