

分散式新能源并网稳定性问题分析与控制方法

李 勇^{1,2}, 常樊睿^{1,2}, 彭衍建³, 王绍阳^{1,2}, 张曦壬^{1,2}, 曹一家^{1,3}

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082; 2. 输变电新技术教育部工程研究中心(湖南大学), 长沙 410082; 3. 电网防灾减灾全国重点实验室(长沙理工大学), 长沙 410114)

摘 要: 发展新能源是构建新型能源体系、助力中国实现“双碳”目标的重要战略举措。中国中部、东部和南部地区因其地形特征多采用分散式的新能源开发模式。但分散式新能源通常处于网架结构薄弱地区, 工业负荷接入周边, 加之其自身显著的电力电子特性, 并网后会给电力系统带来复杂的稳定控制难题。为此, 针对分散式新能源并网稳定性问题的机理分析与控制方法进行综述, 从多时间尺度的角度归纳了谐波、电压、暂态同步以及频率等方面不同类型的稳定性问题, 并总结了我国新能源并网的相关标准; 进一步分析了复杂并网稳定性问题的产生原因, 阐述并比较了各类稳定性控制方法的原理、优缺点等; 最后结合新型储能与人工智能算法的发展趋势, 对该领域未来研究方向进行了总结与展望。

关键词: 分散式新能源; 谐波; 高/低电压穿越; 暂态同步失稳; 频率越限; 电压抬升

Analysis and Control Methods of Stability Problems for Decentralized Renewable Generations Integrated into Grid

LI Yong^{1,2}, CHANG Fanrui^{1,2}, PENG Yanjian³, WANG Shaoyang^{1,2}, ZHANG Xiren^{1,2}, CAO Yijia^{1,2}

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Engineering Research Center of Power Transmission and Transformation Technology, Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction to Power Grid, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Developing renewable generations is an important strategic measure for building a new energy system and helping China achieve the goal of “double-carbon”. The decentralized mode of renewable generation has been widely adopted in China’s central, eastern and southern regions due to its topographical characteristics. However, decentralized renewable generation is usually located in the area of weak grid structure with industrial load access. Due to its power electronic characteristics, complex stability control problems may arise after access to the grid. In this paper, we review the mechanism analysis and control methods of stability problems of decentralized renewable generations integrated into the grid. We conclude different types of stability problems in terms of harmonics, voltage, transient synchronization and frequency from the perspective of multiple time scales. Then the relevant standards of renewable energy integration to the grid in China are summarized. The reasons for complex grid-integrated stability problems are further analyzed. The principles, strengths, weaknesses and disadvantages of various stability control methods are elaborated and compared. Finally, we summarize the status quo of researches and put forward the prospects in the future research direction of this field by combining the development trend of new energy storage and artificial intelligence algorithms.

Key words: decentralized renewable generations; harmonics; high/low voltage ride-through; transient synchronous instability; frequency overrun; voltage rise

0 引言

为响应全球能源安全和绿色低碳转型的需求, 我

国力争在 2030 年、2060 年分别实现“碳达峰”、“碳中和”的目标。以风电、光伏为代表的新能源具有低碳清洁化、可再生能力强的特点, 大力发展新能源对我国构建新型电力系统, 助力“双碳”目标的实现具有重要战略意义^[1-3]。截至 2023 年 12 月底, 我国风电装机容量约 4.4 亿 kW, 同比增长 20.7%, 光伏发电装机容量约 6.1 亿 kW, 同比增长 55.2%, 新能源发电总装机占全国发电总装机的 51.9%, 在全球新能源发电

基金资助项目: 国家自然科学基金(52207093); 湖南省重点研发计划(2023GK2007); 湖南省科技创新计划(2023RC1038); 湖南省自然科学基金(2023JJ40150)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (52207093), Key R&D Program of Hunan Province (2023GK2007), Science and Technology Innovation Program of Hunan Province (2023RC1038), Natural Science Foundation of Hunan Province (2023JJ40150).

总装机的占比已接近 40%^[4]。

不同于“三北”地区，我国中部、东部和南部地区地形复杂，多为山地和丘陵，大面积集中式开发新能源的优势不明显，更适宜于采用分散式模式开发新能源资源^[5]。我国也相继颁布了一系列政策支持发展分散式新能源。例如，国家发改委会和能源局于 2022 年 3 月联合印发的《“十四五”现代能源体系规划》明确指出：“积极推进东部和中部等地区分散式风电和分布式光伏建设；加大能源就近开发利用力度，优先就地就近开发利用，加快负荷中心及周边地区分散式风电建设”^[6]。2023 年 1 月，国家能源局进一步就《新型电力系统发展蓝皮书(征求意见稿)》公开提出：“推动分散式新能源就地开发利用，促进新能源多领域跨界融合发展”^[7]。截至 2023 年 12 月底，全国分布式光伏累计装机容量 254.44 GW，占光伏装机总量的 41.79%^[8]，同时《中国县域绿色低碳能源转型发展报告》指出，我国农村地区能源资源丰富，分散式风电技术可开发潜力达 250 GW^[9]。

然而，分散式新能源所处地区网架结构薄弱，高能耗工业负荷接入周边，使得并网侧面临高/低电压穿越、多类型谐波叠加等问题^[10-12]；相较于传统同步发电机(synchronous generator, SG)直接并网，风机(wind turbine generator, WTG)、光伏(photovoltaic, PV)等新能源机组因其自身特性需通过电力电子变流器接入电网，而缺乏 SG 所具备的旋转惯量，导致电网呈现低惯量、弱阻尼特征，在电网出现扰动时易发生频率越限、暂态同步失稳等现象；而新能源本身也具有显著的间歇性与波动性，致使分散式新能源并网后出现复杂的稳定控制难题，使其非正常脱网概率高，从而制约了其安全高效并网能力^[13-15]。近年发生的大规模电网停电事故表明，分散式新能源相较于 SG 更容易发生脱网事故，尤其在网架结构薄弱地段，如 2016 年澳洲“9·28”大停电事故发生地为南澳大利亚州，此处风电场地理位置分散，联络线有限^[16]。2019 年英国电网发生的“8·9”大停电事故报告指出，故障发生后霍恩风电场电压、无功出力出现振荡现象，有功出力降至最低，且多次发生分散式能源叠加脱网现象，导致系统电源功率大幅缺额，电网频率持续跌落^[17-18]。因此，研究分散式新能源并网稳定性机理分析与控制方法对于因地制宜调用新能源资源，推动各具特色的源网荷储一体化，乃至未来 100%新能源新型电

力系统的构建具有重要意义^[19-21]。

基于已有文献的相关研究内容，本文对分散式新能源并网的复杂稳定性问题进行综述。首先，将现有的稳定性问题进行归类，并总结中国新能源并网的标准；然后，针对复杂并网稳定性问题进行机理分析，阐述各类问题的产生原因与对应控制方法；最后，总结现有的研究内容并对未来稳定性控制的研究方向进行展望。

1 并网稳定性问题归类

1.1 复杂稳定性问题

图 1 所示为某典型分散式新能源并网系统的地理接线图，该并网系统主要包括 110 kV 与上级 220 kV、500 kV 变电站，配置有 10 座风电场、5 座光伏电站、火电厂以及小水电等发电资源。相较于新能源大规模集中式并网，风电场与光伏电站一般分散于远离负荷中心、网架结构较为薄弱的电网末端位置^[22]，就近通过升压变压器接入 110 kV 变电站，再经过 2 次升压后最终汇入主网。由图 1 可知，分散式新能源并网系统具有以下特性：

1) 新能源场站一般仅接入电压等级不高于 110 kV 的中低压配电网。

2) 各场站选用小装机容量多点接入电网，一般不高于 50 MW。

3) 接入电网后需满足电压等级、接入容量、电能质量等技术要求，不能影响其他节点以及电网的正常运行^[23]。

分散式新能源场站在向外部电网提供功率支撑时，需通过大量非线性电力电子变流器接入线路，为实现最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)功能以提升新能源利用效率，目前多采用跟网型(grid-following, GFL)控制作为变流器的控制模式，但其会导致新能源机组与电网频率解耦，从而无法进行惯量支撑，在发生扰动时易造成系统频率越限与机组同步失稳。且分散式新能源机组多位于薄弱网架末端，电网电压抬升以及并网点(point of common coupling, PCC)电压波动问题严重，而新能源机组对 PCC 处电压变化十分敏感，可能会进一步抬升其内部电压，同时各机组的网侧变流器相互交互，会引发大量谐波电流，从而极大地影响了分散式新能源并网的稳定运行能力。随着新能源渗透率与电力电子装置占比的不断提高，上述复杂稳定性问题愈发严重^[24-26]。

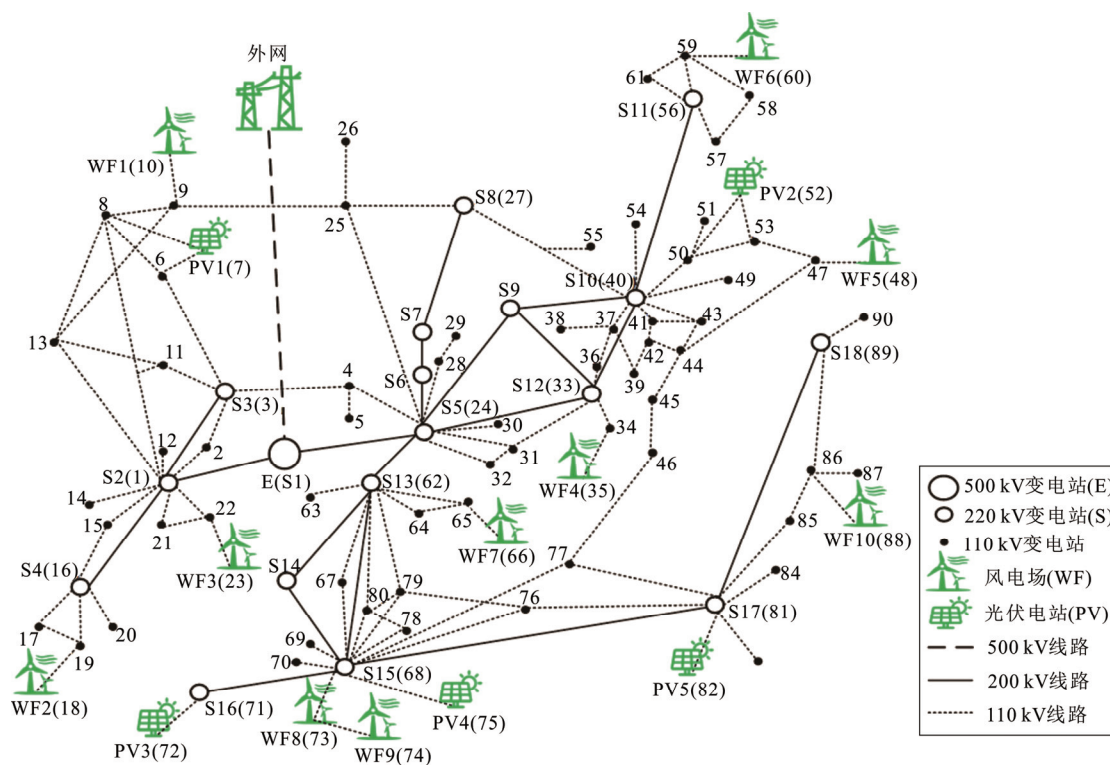


Fig.1 Geographical wiring diagram of a typical decentralized renewable generations grid-integrated system

针对电力系统的稳定性问题, IEEE 于 2004 年从功角、电压与频率 3 个角度发布了最为经典的电力系统稳定性定义与分类, 并按照扰动大小与时间尺度对 3 个分支进行了再分类^[27]。2020 年基于电力系统新能源渗透率日益提高的背景, IEEE 与 Cigre 联合发布了“含高渗透率电力电子接口设备电力系统的动态行为特征与稳定性定义”的技术报告, 将电力系统稳定性在原有基础上扩展了变流器驱动稳定性与谐振稳定性 2 个分支^[1,28]。本文针对实际工况中分散式新能源并网带来的谐波、高/低电压穿越、暂态同步失稳、频率越限以及电压抬升等问题, 从实际工程角度出发, 基于 IEEE 电力系统稳定性定义中按照时间尺度分类的思想^[29], 对复杂稳定性问题进行总结归类。图 2 所示为基于时间尺度的复杂稳定性问题分类, 分散式新能源机组中包含多组并联的变流器单元, 其固有的非线性特征使得变流器成为潜在的谐波电流源或电压源, 5 次、7 次、11 次和 13 次谐波是分散式新能源机组注入谐波的主要成分^[30], 主要发生于毫秒级。电压稳定性包含故障发生时新能源机组的电压穿越能力及无功支撑能力决定的电压稳定裕度, 前者处于毫秒级至秒级, 后者所处时间尺度较长, 在 10 min 左右。暂态同步

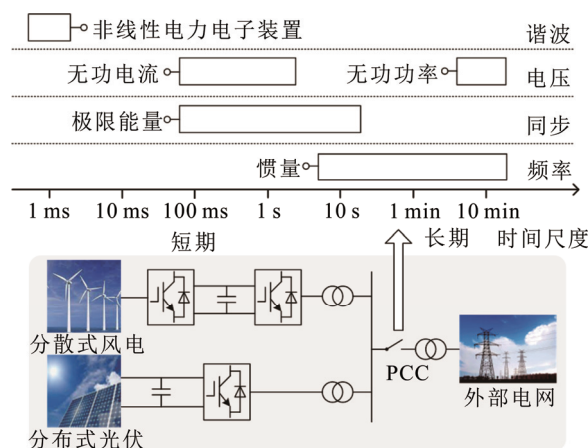


Fig.2 Classification of complex stability problems based on time scales

稳定性指新能源机组在电网故障等大扰动下与电网同步的能力,其稳定裕度取决于故障后新能源机组的极限能量,多处于 100 ms~10 s 时间段^[29]。频率响应分为惯性响应、一次调频与二次调频响应的多阶段过程,所处时间尺度变化范围较长,在 10 s~10 min 之间。其中,惯性响应、一次调频过程与分散式新能源机组密切相关,通常持续数十秒;二次调频通过自动控制系统调节各发电机输出功率,通

常持续数十分钟^[31-34]。

1.2 我国新能源并网稳定性的要求

分散式新能源机组替代 SG 大规模接入电网后,会带来复杂的稳定性问题。为保证电力系统的安全稳定运行,我国发布了相关的电网导则,明确规定了新能源并网的稳定控制要求,根据所属的时间尺度展示如表 1 所示。

根据我国颁布的国家标准 GB/T 19963—2011《风电场接入电力系统技术规定》、GB/T 19964—2012《光伏发电站接入电力系统技术规定》、GB/T 19963.1—2021《风电场接入电力系统技术规定第 1

部分:陆上风电》以及 GB/T 41512—2022《分散式风力发电机组》可知,对于谐波问题,各新能源场站向电网注入的谐波电流允许值应按照新能源场站装机容量与公共连接点上具有谐波源的发/供电设备总容量之比进行分配,且奇偶次谐波畸变程度均需满足相应限值。对于电压穿越问题,标准明确指出发生低电压穿越时,新能源场站 PCC 电压跌至 20%额定电压时须保证不脱网连续运行 625 ms,且在发生跌落后 2 s 内能够恢复到额定电压的 90%时,新能源场站内的机组能够保证不脱网连续运行。有关高电压穿越的相关标准一直存在空白,直到 2021 年才提出规定:PCC

表 1 中国电网导则对新能源并网稳定性的要求

Table 1 Requirements of grid codes for renewable generations integration in China

稳定性问题	运行规定	控制要求	分散式新能源特定要求
谐波	2 次至 8 次偶次谐波电流畸变值小于 1.0%;	新能源场站向电网注入的谐波电流允许值按照新能源场站装机容量与公共连接点上具有谐波源的发/供电设备总容量之比进行分配	对于在 110 kV 与 35 kV 电压等级处接入的分散式新能源机组,均需满足上述要求
	3 次至 9 次奇次谐波电流畸变值小于 4.0%;		
低电压穿越	10 次至 32 次偶次谐波电流畸变值小于 0.5%;	当电网发生三相短路故障引起 PCC 电压跌落时,新能源机组应向电力系统注入动态无功电流,最大输出能力不低于额定电流的 1.05 倍,响应时间不大于 75 ms,自电压恢复至额定电压 80%以上起,在 40 ms 内退出无功电流增量;当电网发生不对称短路故障引起 PCC 电压跌落时,新能源机组应向电网注入正序动态无功电流并吸收负序动态无功电流,最大输出能力不低于额定电流的 1.05 倍	通过 10 kV 电压等级直接接入公共电网,通过 3kV 电压等级并网的分散式新能源需具备上述低电压穿越能力
	11 次至 15 次奇次谐波电流畸变值小于 2.0%;		
	17 次至 21 次奇次谐波电流畸变值小于 1.5%;		
	23 次至 33 次奇次谐波电流畸变值小于 0.6%		
高电压穿越	PCC 电压跌至 20%额定电压时能够保证不脱网连续运行 625 ms;	PCC 三相电压同时升高时,新能源机组应从电力系统吸收动态无功电流,最大输出能力不低于额定电流的 1.05 倍,响应时间不大于 40 ms,自电压恢复至额定电压 110%以下起,在 40 ms 内退出无功电流增量	暂未形成明确标准规定
	PCC 电压在发生跌落后 2 s 内能够恢复到额定电压的 90%时,新能源场站内的机组能够保证不脱网连续运行		
频率稳定	PCC 电压升高至 130%额定电压时能够保证不脱网连续运行 500 ms;	具备参与电力系统惯量响应、调频、调峰和备用的能力;当新能源场站有功功率在其总额定出力的 20%以上时,所有机组应能够实现有功功率的连续平滑调节,并参与系统有功功率控制	分散式风电 PCC 频率在 47.5~50.2 Hz 范围之内时,分散式风电场能正常运行
	PCC 电压在发生升高后 10 s 内能够恢复到额定电压的 110%时,新能源场站内的机组能够保证不脱网连续运行		
电压稳定	$f \leq 48$ Hz,由风电场允许最低运行频率确定;	新能源场站应配置无功电压控制系统,根据电网调度部门指令自动调节发出(或吸收)的无功功率,实现对 PCC 电压的控制,其调节速度和控制精度应能满足电网电压调节的要求;当公共电网电压处于正常范围内时,新能源场站应当能够控制 PCC 电压在额定电压的 97%~107%范围内;新能源机组变电站的主变压器应采用有载调压变压器,具有通过调整变电站主变压器分接头控制场内电压的能力	分散式 WTG 应具备无功功率调节能力,具备恒功率因数、恒无功功率和恒电压 3 种控制模式,并能够接受远程控制指令。如机组的无功能力满足当地电网要求,分散式风电场内可不配置无功补偿设备
	48 Hz $<f < 49.5$ Hz,单次至少运行 30 min;		
	49.5 Hz $\leq f \leq 50.2$ Hz,连续运行;		
	50.2 Hz $<f < 51$ Hz.单次至少运行 5 min;		
	$f \geq 51$ Hz,由风电场运行最高允许频率确定;		
	光伏电站频率偏差值在 ± 0.5 Hz 内		

电压升高至 130%额定电压时能够保证不脱网连续运行 500 ms; PCC 电压在发生升高后 10 s 内能够恢复到额定电压的 110%时, 新能源场站内的机组能够保证不脱网连续运行。

为提升新能源并网后系统的频率支撑能力, 各机组需具备一定惯量响应、调频、调峰和备用的能力, 且当输出有功功率在其额定出力的 20%以上时, 均应实现有功功率的连续平滑调节与控制。分散式风力发电机组应具备当地和远程有功功率控制能力。为降低 PCC 电压的波动, 新能源机组变电站的主变压器应采用有载调压变压器, 具有通过调整变电站主变压器分接头控制场内电压的能力; 同时, 新能源场站应配置自动无功电压控制系统, 根据电网调度部门指令协调控制机组、无功补偿装置以及变电站的主变压器分接头位置调节发出(或吸收)的无功功率, 其控制响应时间需低于 30 s, 电压控制误差与无功功率控制误差绝对值分别不超过 0.5% 与 5%。对于分散式 WTG, 要求必须具备无功功率调节能力, 以及恒功率因数、恒无功功率和恒电压 3 种控制模式, 当电网电压处于正常范围内时, 应当能够控制 PCC 电压保持在额定电压的 97%~107% 范围内^[35-39]。而目前关于暂态同步稳定方面的控制要求仍待补充。

2 复杂并网稳定性问题产生机理分析

图 3 所示为典型分散式新能源场站并网系统拓扑。假设该系统共有 N 回馈线, 每回馈线上接有 n 台 WTG 或 PV, 各发电机组均经电压源型换流器 (voltage source converter, VSC) 与变压器接入馈线后统一汇集到升压站的低压侧, 再经升压站通过输送线路并入外部电网。图 3 中, R_L+jX_L 与 R_T+jX_T 分别为输送线路与升压变压器归算到低压侧的阻抗; R_1+jX_1 为新能源机组配套箱式变压器归算到高压侧的阻抗; 对于新能源机组间的线路阻抗, 为便于分析, 假设任意 2 个相邻机组间的集电线路距离相等且阻抗为 R_1+jX_1 , 充电导纳为 B_1 ^[23]。本章基于图 3 所示的系统拓扑对并网稳定性问题的产生机理进行分析。

2.1 谐波

由图 3 可知, 分散式新能源中无论是 WTG 或 PV, 都需通过 VSC 并入电网, 其中包含多组并联 VSC 单元等大量电力电子装置。由于电力电子装置存在非线性特征, 因此多组并联的 VSC 都有可能

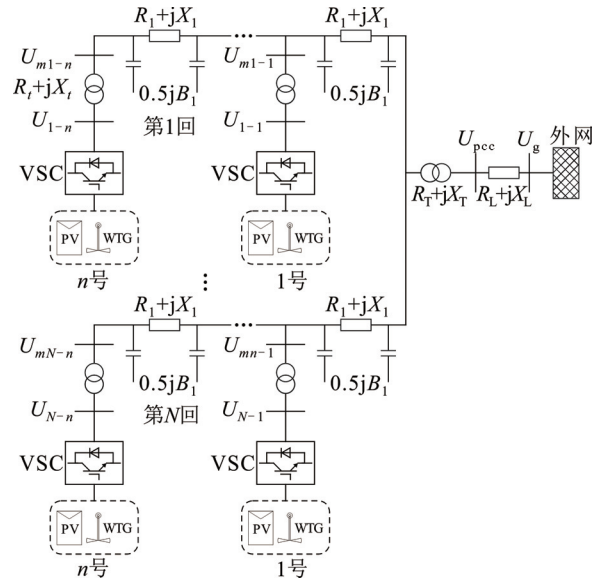


图 3 典型分散式新能源场站并网系统拓扑

Fig. 3 Typical decentralized renewable generations grid-integrated system topology

因死区效应、变流器调制比或电网电压不平衡分量等原因向电网输送大量叠加的谐波电流。同时, 若新能源场站中的无源器件之间、无源器件与 VSC 乃至多组 VSC 之间出现阻抗匹配现象, 则多频次的谐波中的某次谐波都可能因与新能源场站的谐振点接近, 而导致串联/并联谐振或谐波不稳定现象的产生, 进而严重放大某频次的谐波电流并超出规定限值^[40-44]。文献[45]对实际风电场进行了相关测试, 在此基础上采用概率密度函数的方法研究了不同频次谐波电流的分布特征与概率。文献[46]研究了富含 VSC 电力系统中的谐波产生机理, 认为 VSC 间的阻抗匹配会产生与系统谐振频率相符的谐振谐波。文献[47]考虑到谐波谐振影响范围与对谐波放大程度的不同, 提出了定量谐波谐振评估技术, 通过不确定性下的灵敏度分析来揭示不同新能源场站谐波谐振的影响区域和相应的放大严重程度。文献[48]首次发现分布式光伏场站存在的高次谐波谐振问题, 并实测出 23 次谐波电压高达 2.77 kV, 最终导致 PV 机组脱网。

2.2 高/低电压穿越

在分散式新能源并网系统中, 各机组通常所处网架结构薄弱地段且远离负荷中心, 短路比较低, 该区域的电网呈现一定的弱电网特征^[49-50], 连接电缆通电、负载投切、电容器充放电等扰动以及单相接地故障等各类型故障都可能导致母线电压发生波动。尤其是 WTG, 由于其定子侧 VSC 直接经变压

器与电网母线连接的结构,其对 PCC 处母线电压的波动更加敏感。若并网电压发生扰动,则由于暂态直流磁通分量,WTG 中的绕组会产生相应的过电流或过电压,对机组和 VSC 造成较高的机械和电气应力,从而严重影响机组的正常运行。当发生特别极端的电压跌落/骤升情况时,风电机组甚至可能与电网解列直接脱网^[51-54]。

因此,以 WTG 为代表的新能源机组必须具备相应的高/低电压穿越能力,针对 PCC 电压波动,按照图 4 所示的高/低电压穿越曲线快速启动受控压降,且在故障事件消除后,风电机组的电压应尽快恢复到合理范围^[55]。文献[56]以广泛应用于新能源系统中的双馈风力发电机(doubly fed induction generator, DFIG)作为研究对象,针对 DFIG 特有的双向背靠背 VSC 并网拓扑,分析了其故障穿越特性,指出故障发生后 DFIG 的定子侧电压会迅速升高,转子变流器过调,双 VSC 中的电流和电压均会发生波形失真。文献[57]研究了电网电压骤升对永磁同步发电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)并网的影响机理,指出 PMSG 在高电压穿越期间必须保持其直流母线电压的稳定,进而提出了基于变流器动态无功控制的高电压穿越控制策略。

2.3 暂态同步失稳

对于分散式新能源并网中的单台机组,其 GFL 同步控制下的示意图如图 5 所示。GFL 控制环在检测并网点三相电压 u_{abc} 后输出角度 θ 至电流控制环,而电流控制环再根据 θ , 电流参考值 i_{dref} 、 i_{qref} , 并网点三相电路电压 u_{abc} 、电流 i_{abc} 生成脉宽调制信号输送至 VSC。当 θ 与并网点电压矢量的角度一致时,即可实现分散式新能源机组与电网的同步。但当电网发生故障等大扰动后,电压故障电压骤变,将导致上述角度无法保持一致,进而出现暂态同步失稳的现象^[13]。文献[58]指出电网故障电压幅值、线路阻抗与新能源机组的输出电流是能否维持同步的决定因素。由于分散式新能源机组多位于网架结构薄弱的电网末端,其弱电网特征导致的严重电压跌落极易致使暂态同步失稳现象发生。同时,对于机组的动态同步过程,可采用等面积定则或相平面法来判定其是否处于稳定状态^[59-60]。

而在分散式新能源并网系统中,各台新能源机组存在动态交互作用,文献[61]以数学方程的形式展示了系统中各台机组 θ 与并网点电压矢量的相角

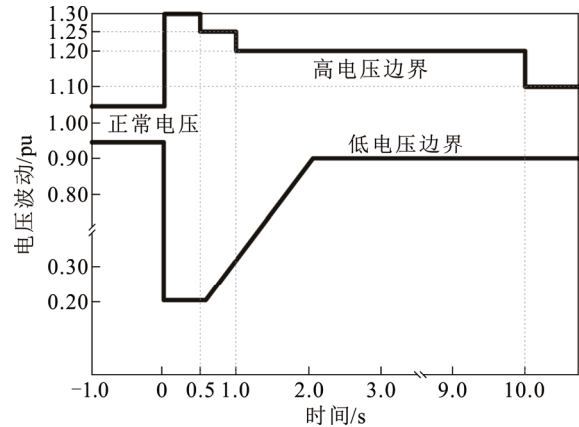


图 4 高/低电压穿越曲线

Fig.4 High/low voltage ride through curves

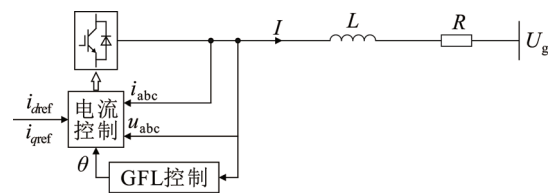


图 5 GFL 同步控制示意图

Fig.5 Schematic diagram of GFL synchronization control

差,指出表达式中的交互项可能会导致电网故障发生后多台新能源机组的级联失稳,进而恶化并网系统的暂态同步稳定性。文献[13]研究了分散式新能源并网系统的多机并联特征,指出距离 PCC 电气距离较远的新能源机组与电网连接较弱,稳定性更差,在故障发生后更易发生暂态同步失稳。

2.4 频率越限

分散式新能源并网后系统的等效惯量表征了其频率稳定水平。如图 3 所示,若系统中的新能源机组不参与电力系统惯量响应,则此时系统的惯量水平 H 仅取决于电网中 SG 的容量,表达式^[62]为:

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n H_{Gi} S_{Gi}}{\sum_{i=1}^n S_{Gi} + \sum_{j=1}^m S_{Rj}} \quad (1)$$

式中: H_{Gi} 与 S_{Gi} 分别为第 i 台 SG 的惯性时间常数与额定容量; S_{Rj} 为第 j 台新能源机组的额定容量; n 、 m 分别为 SG 和新能源机组的台数。图 6 展示了假设 SG 惯性时间常数为 10 s 时的系统惯量。由式(1)和图 6 可知,随着分散式新能源机组占比的不断增加,系统的等效惯量逐渐降低。若新能源机组将 SG 全部取代且不提供惯量支撑,则系统惯量的来源将基本消失且惯量水平将降至极低状态^[63],从而

导致在发生负荷阶跃或电力线路故障等有功扰动时, 电力系统出现有功失衡现象, 进而对系统的频率稳定水平造成极大的危害。系统的摇摆方程可反映频率的变化过程^[64-66], 如式(2)所示。

$$2H \frac{df(t)}{f_N dt} = P_m(t) - P_e(t) - D\Delta f(t) \quad (2)$$

式中: $f(t)$ 为 t 时刻的系统频率; f_N 为系统额定频率; $P_m(t)$ 与 $P_e(t)$ 分别表示总机械功率与总电磁功率; D 为系统等效阻尼效应; $\Delta f(t)$ 为扰动下系统频率偏差。由式(2)可知, 系统有功扰动发生的初始时刻惯性支撑尚未启动, 频率偏差为零, 此时系统频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)最大, 可表示为:

$$R_{\text{RoCoF,max}} = \frac{\Delta P_{e,0} f_N}{2H} \quad (3)$$

式中: $\Delta P_{e,0}(t)$ 为初始时刻系统有功功率差额。由式(3)可知, 系统的最大频率变化率与其惯量水平成反比, 当惯量水平逐渐下降时, 系统的频率跌落速度会愈发增加, 进而导致频率跌落甚至超过最低阈值, 引发系统连锁故障。系统频率变化的最低点可通过解析式(2)与 SG 的频率响应模型获取, 其中频率偏差的时域表达式为:

$$\Delta f(t) = -\frac{R\Delta P_e}{DR+1} (1 + \alpha e^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_d t + \varphi)) \quad (4)$$

其中:

$$\begin{cases} \alpha = \sqrt{\frac{1 - 2T\xi\omega_n + T^2\omega_n^2}{1 - \xi^2}} \\ \varphi = \arctan\left(\frac{\omega_d T}{1 - \xi\omega_n T}\right) - \arctan\left(\frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{-\xi}\right) \\ \omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \\ \xi = \frac{2HR + (DR + F)T}{2(DR + 1)} \omega_n \\ \omega_n = \sqrt{\frac{DR + 1}{2HRT}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: R 为系统调差系数; T 为 SG 的机组再热间常数; F 为 SG 的高压缸做功比。

若频率偏差变化率为零时系统的频率跌落至最低点, 则扰动发生后频率最大偏差与频率跌落至最低点的时间分别为:

$$\begin{cases} \Delta f_{\max} = \frac{R\Delta P_e}{DR+1} \left(1 + \sqrt{1 - \xi^2} \alpha e^{-\xi\omega_n t_{\text{nadir}}}\right) \\ t_{\text{nadir}} = \frac{1}{\omega_d} \arctan\left(\frac{\omega_d T}{\xi\omega_n T - 1}\right) \end{cases} \quad (6)$$

由式(5)与式(6)可知, 系统的频率最大偏差与系

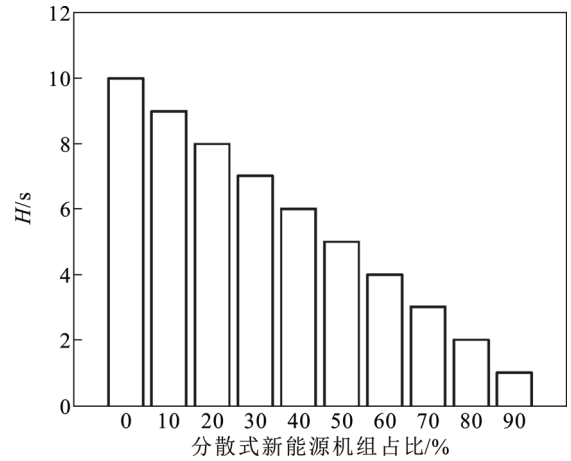


图6 不同分散式新能源占比下的 H

Fig.6 H under different shares of decentralized renewable generations

统惯量水平在一定程度上成反比。随着系统惯量水平的下降, 系统频率跌落的最大偏差不断增加, 且跌落值最低点所需的时间更少, 将严重降低系统维持频率稳定的能力^[63-67]。

2.5 电压抬升

当规模化新能源机组分散式接入电网时, 大都需通过高压输电网远距离传输, 其不可忽视的集电线路充电电容产生的线路充电功率以及新能源本身特性带来的有功出力波动, 会严重影响系统的无功平衡。加之新能源分散式并网模式改变了系统原有的辐射状网络架构, 系统潮流分布方向、大小复杂多样, 反向潮流大幅增加, 从而使得新能源机组并网点电压发生电压抬升甚至失稳的风险加大, 易导致新能源机组并网 VSC 退出运行, 严重影响了系统的电压稳定水平^[68-69]。

由图 4 可知, 当反向潮流出现时, 新能源机组的并网点电压与其端电压 U_T 、电网电压 U_g 密切相关。风电场并网点电压与电网电压的关系表达式为:

$$U_{\text{pcc}} = U_g + \frac{\left(\sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^n P_{ab}\right) R_G + \left(\sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^n Q_{ab} + \Delta Q_{\text{line}}\right) X_G}{U_{gN}} + \frac{j \left(\sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^n P_{ab}\right) X_G - \left(\sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^n Q_{ab} + \Delta Q_{\text{line}}\right) R_G}{U_{gN}} \quad (7)$$

式中: U_{pcc} 为分散式新能源场站并网点电压; U_g 与 U_{gN} 分别为电网电压与额定电压; P_{ab} 、 Q_{ab} 分别为第 a 回馈线第 b 台新能源机组的有功、无功出力; ΔQ_{line} 为传输线路阻抗的消耗的无功功率。由于新

能源场站并网点与电网节点之间的相位差较小, 因此忽略相位对电压降落带来的影响, 式(7)可简化为:

$$U_{pcc} = U_g + \frac{\left(\sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^n P_{ab} \right) R_G + \left(\sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^n Q_{ab} + \Delta Q_{line} \right) X_G}{U_{gN}} \quad (8)$$

新能源机组有功与无功功率的相量关系可表示为:

$$\tan \phi = \frac{P_{ab}}{Q_{ab}} \quad (9)$$

式中: ϕ 为该机组的功率因数。将式(9)代入式(8)并对无功功率求导可得, 新能源机组 PCC 处电压的变化率为:

$$\frac{dU_{pcc}}{d \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^n Q_{ab}} = \frac{R_G \tan \phi + X_G}{U_{gN}} \quad (10)$$

由式(10)可知, 新能源机组并网点电压由 PCC 处有功/无功功率、并网点额定电压、送出线路阻抗、送出线路消耗的无功功率及新能源机组的功率因数决定。随着新能源机组有功不断提高, 当其功率因数为正时, 无功出力也会升高, 并网点电压抬升问题愈发严重。由于所处地理位置分散, 各 WTG 与 PV 的风速与光照强度不同, 因此有功输出存在差异, 进而导致各机组并网点电压抬升情况不同。

新能源机组端电压与并网点电压的关系可由并网变压器变比进行依次递推, 升压变压器高/低压侧电压的关系表达式为:

$$k_T U_T = U_{pcc} + \frac{\left(\sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^n P_{ab} \right) R_T + \left(\sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^n Q_{ab} + \sum_{a=1}^N \sum_{c=1}^n Q_{ac} \right) X_T}{U_{gN}} \quad (11)$$

式中: k_T 为升压变压器变比; Q_{Bac} 为第 a 回馈线第 c 段集电线路的充电功率。而相邻新能源机组箱变高压侧的电压落差为:

$$\Delta U_{ny} = U_{ny(i+1)} - U_{nyi} = \frac{\left(\sum_{b=i+1}^n P_{jb} \right) R_1 + \left(\sum_{b=i+1}^n Q_{jb} + \sum_{c=i+1}^n Q_{Bjc} \right) X_1}{U_{TN}} \quad (12)$$

式中: U_{nyi} 表示第 j 回馈线第 i 台新能源机组的组箱变高压侧电压; U_{TN} 为风电机组箱变高压侧额定电压。假设所有新能源机组处于恒功率因数为 1 的状态, 结合式(11)与式(12)可得相邻新能源机组的端电压差为:

$$\Delta U_j = U_{j(i+1)} - U_{ji} = \frac{\left(\sum_{b=i+1}^n P_{jb} \right) R_1 + \left(\sum_{b=i+1}^n Q_{jb} + \sum_{c=i+1}^n Q_{Bjc} \right) X_1}{k_T U_{TN}} \quad (13)$$

通过式(13)可知, 由于各新能源机组所处空间位置的差异以及与 PCC 的电气距离不同, 越靠近线

路末端的新能源机组, 其机端电压抬升越严重, 当电压抬升至规定阈值时, 新能源机组将退出运行, 进而会加剧并网点电压不稳定的程度^[23]。文献[70]研究了光伏电源并网的情况, 提出系统反向潮流的现象会随着光伏输出功率的上升而加剧, 从而导致并网点电压上升甚至越限的情况。文献[71]基于 DFIG 的 P - Q 特性曲线, 指出 DFIG 风电场有功出力的随机波动会严重影响其并网无功调节能力, 导致支撑并网点电压稳定能力减弱。

3 稳定性问题控制架构与方法

3.1 谐波治理

当前针对分散式新能源并网产生的谐波问题, 主要采取的谐波治理方法按照是否有可控源参与通常分为无源滤波、有源滤波以及相结合的混合有源滤波等几大类。

3.1.1 无源滤波

无源滤波方法主要通过在新能源机组经 VSC 并网点接入无源滤波器装置实现。无源滤波装置一般由滤波电抗器、滤波电容器以及电阻等滤波元件组合而成, 可按照其滤波特性分为调谐滤波器及高通滤波器等类型。其中, 调谐滤波器的主要工作原理为通过在特定阻抗频率下呈现出低阻抗特性, 使得大部分谐波电流能流入该并联低阻抗通路, 从而滤除并网点线路中的谐波分量^[72-75]。图 7 所示为典型 LC 调谐滤波器的拓扑。高通滤波器可在较宽的频率范围内呈现低阻抗特性, 但其阻抗最低值仍大于调谐滤波器, 因此仅适用于对高频谐波进行治理。相较之下, 调谐滤波器滤波效果最为突出, 且适用于新能源机组并网的低电压等级场景, 其装置构造简单并能迅速响应, 但出现系统阻抗较低以及串并联谐振的情况时, 调谐滤波器可能失谐并且无法保证谐波治理效果^[76-78]。

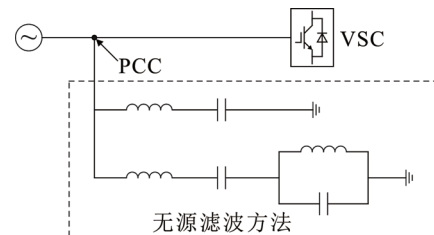


图 7 典型 LC 调谐滤波器的拓扑

Fig.7 Typical LC tuned filter topology

3.1.2 有源滤波

随着电力电子器件的迭代发展, 有源滤波方法也广泛应用于分散式新能源并网时所需要的谐波治理。图 8 所示为典型的有源滤波治理方法拓扑, 有源滤波方法通过获取特定次谐波电流分量, 通过相应控制策略使有源滤波器产生与该谐波分量相反的电流, 与并网线路上的特定次谐波电流分量进行相互抵消, 以达到理想的滤波效果。由于有源滤波器可作为高阻抗电流源释放特定电流, 因此适用于谐波治理、无功补偿以及负序抑制等多种需求, 但仍存在响应速度不足、补偿容量受限等问题^[79-81]。

3.1.3 混合有源滤波

为弥补无源与有源滤波方法各自的缺陷, 衍生出一类将无源与有源滤波方法相结合的混合有源滤波方法。其原理为将无源滤波装置与有源滤波装置进行串联, 前者通常容量较大且承担主要的滤波任务, 后者负责对滤波的整体效果进行提升。图 9 所示为典型的混合有源滤波器拓扑, 其控制增益可等效为增大系统部分的谐波阻抗, 使得系统谐波被隔离且分散式新能源机组产生的谐波电流只能流入滤波器部分, 从而有效实现谐波的治理^[82-84]。为进一步提升混合有源滤波器的性能, 文献[85]将系统电流与负载电流谐波分量进行前馈控制, 在降低滤波器直流电压的同时提升整体滤波效果。文献[77]根据模态分析与谐波模态共振分析的方法, 设计了滤波器最佳连接位置, 提高了风电场整体的滤波效率。

3.2 高/低电压穿越

分散式新能源机组需通过 VSC 并入电网, 由于 VSC 本身具有一定的故障穿越能力, 因此在轻微故障发生后可通过相应控制策略实现新能源机组的故障穿越。但当发生较为严重的故障时, 其自身的故障穿越能力已不足以支撑, 必须增加硬件保护设备来保障故障期间的新能源机组运行能力^[51]。

3.2.1 VSC 控制

VSC 控制策略主要通过灭磁控制技术、虚拟阻抗以及前馈补偿等方法来抑制新能源机组定子磁链自由分量和负序分量, 以此控制定、转子绕组出现的过电流、VSC 直流母线处的多余能量和功率输出, 从而提升新能源机组的故障穿越能力^[86-88]。此类方法的优点是无须增加附带的硬件保护设备, 在保障故障下新能源机组的高/低压穿越能力的同时, 可大大降低运维成本。文献[89]为简化控制设计的复杂程度, 提出了自灭磁控制策略, 降低了转子电

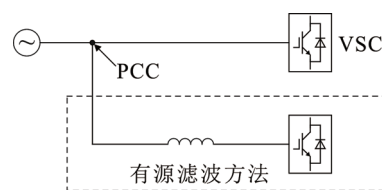


图 8 典型的有源滤波治理方法拓扑

Fig.8 Typical active filter control method topology

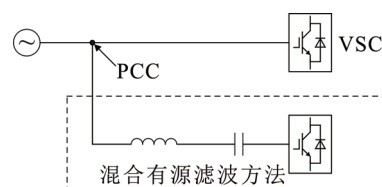


图 9 典型的混合有源滤波器拓扑

Fig.9 Typical hybrid active filter topology

流的冲击程度; 文献[90]基于附加虚拟电阻改进了灭磁控制策略, 充分发挥 VSC 故障穿越的能力, 有效抑制了故障期间转子过电流的大小。文献[91]通过对反向电流的追踪快速实现暂态磁链的抑制, 且具有不需要对定、转子绕组磁链观测的特点。

3.2.2 附加装置控制

通过在新能源机组并网时增加 Crowbar、Chopper 保护电路、静止无功补偿器等无功补偿装置, 以及配置近年来发展迅猛且具有无功输出能力的储能装置(energy storage system, ESS), 可在系统电压发生跌落或者骤升时, 屏蔽机组侧 VSC 中的冲击性电流, 从而提升转子侧 VSC 的安全裕度, 保证故障发生期间分散式新能源机组的安全性^[92-93]。当 VSC 的母线电压下降到允许值以下时, 附件装置会退出运行状态, 由 VSC 重新控制机组的运行, 并同时降低有功功率和无功功率的补偿, 进而向电网注入无功电流来支撑电网电压的恢复。一旦电网电压恢复到故障前状态, VSC 就会控制机组退出无功补偿模式, 停止向电网注入无功电流, 恢复到故障发生前的正常运行状态^[94]。文献[95]将 Crowbar、Chopper 保护电路相结合, 通过协同控制分别利用 Crowbar 保护抑制转子回路过流、利用 Chopper 电路稳定直流母线电压, 实现了新能源机组的高低电压穿越。文献[96]结合 Crowbar 保护电路与串联动态电阻共同降低 VSC 的电压波动, 进而降低了 DFIG 中的过电流。文献[97]控制动态电压恢复器补偿故障线路电压, 进而允许 DFIG 在故障期间维持正常运行状态。文献[98]提出了网侧 VSC、转子侧

VSC 与超级电容 ESS 在电网电压骤降时的协调控制策略,并在实际工程中进行了应用和验证。

3.3 暂态同步致稳

对于分散式新能源并网系统中的 GFL 控制下的单台机组,一般可通过注入电流控制、控制参数灵活调节和变结构控制 3 个方面提升其暂态同步能力^[99]。其中,注入电流控制主要通过控制故障后新能源机组的输出电流来实现,以减小暂态同步失稳的可能。但此类方法对动态环节中的改善作用有限,相较之下,灵活调节控制参数可更为有效地改善其动态特性,从而减少电网电压相位跳跃时的频率超调。但这类方法难以解决严重故障下电网电压大幅跌落时的暂态同步失稳问题,因此可通过改变 GFL 的控制结构以进一步提升同步能力^[13,59]。同时,已有较多文献提出以虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)控制为代表的构网型(grid-forming, GFM)控制,该控制可以改善 GFL 控制下分散式新能源机组在弱电网下暂态稳定裕度不足的问题。GFM 控制下机组的有功功率和无功功率参考值不断变化,可在弱电网下自主建立参考电压和频率,使其具备与 SG 类似的运行特性,该思路对分散式新能源并网暂态同步稳定能力的提升具有重要意义^[100]。

由于分散式新能源并网系统中各机组暂态稳定裕度不同,因此需进一步考虑各机组间的动态性能,以减少各机组间的动态交互,进而提升分散式新能源并网整体的暂态同步稳定性。文献[101]以线路末端机组为参考,提出电网同步稳定水平指标以评估各机组稳定工作点与失稳边界之间的距离,为分散式新能源暂态同步致稳提供了参考。文献[102]研究了分散式风电场电流和等值功角的耦合效应,提出一种用于分散式风电的暂态稳定性评估方法,以确定影响系统暂态不稳定的主要风电场,最小化暂态不稳定电流,从而确保系统中的分散式风电场均处于暂态同步稳定状态。文献[103]发现多个机组的交互作用对并网系统平衡点状态和暂态同步过程的影响机理,提出一种最小化暂态不稳定风险的有功功率分配方法,以提升系统的暂态稳定水平。

3.4 频率稳定支撑

新能源机组按照调频原理的不同,其参与频率稳定支撑的控制方式主要包括转子动能控制和功率备用控制^[104-105]。其中,转子动能控制通过在系统频率越限时释放新能源机组转子中的动能进行惯性支撑,以实现系统频率的调节,主要分为虚拟惯

性控制以及 VSG 控制,如图 10 所示^[106-107]。此时,新能源机组仍然保持在 MPPT 模式,无须减少机组的功率输出,但由于缺少功率备用,因此转子动能控制的支撑时间和容量有限。功率备用控制可使新能源机组保持一定的备用功率用于长期的频率支撑,具体可以分为超速减载备用与变桨减载备用^[108-109]。减载功率备用通常选用超速减载控制实现,使得 MPPT 曲线偏移产生一定的功率差值用于频率调节,变桨减载控制不需要调整机组的 MPPT 曲线,而是从机组本体机械控制的角度降低其桨距角,从而实现功率减载留出支撑系统频率的有功备用^[110]。但此类功率备用控制方法通过新能源机组从最优功率处偏移,极大地影响了新能源的消纳水平。除此之外,在分散式新能源场站中配置的 ESS 也可类比转子动能控制输出有功参与频率支撑^[111]。

但分散式新能源机组所处地理位置分散,各机组有功/无功输出能力存在差异,尤其对于 WTG,由于尾流效应的影响,上游处 WTG 在经过风轮被吸收部分能量后,将对处于下游区域的 WTG 形成尾流干涉,进而对风速造成影响。为此, Jensen 尾流模型、Floris 尾流模型等相继被提出,以刻画分散式新能源场站内各 WTG 的风速耦合^[112-113]。尾流效应的存在进一步加剧了分散式 WTG 出力水平的差异,各新能源机组进行频率支撑的水平与其出力情况密切相关,传统大规模集中式频率控制不仅计算效率低,可靠性和灵活性差,而且无法及时考虑各新能源机组的实际出力水平,易导致频率支撑中能量过度释放进而出现停机的问題,因此不适用于分散式新能源并网的频率控制。

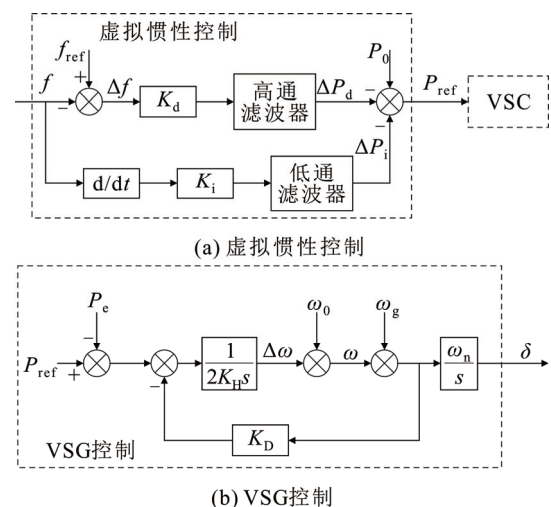


图 10 转子动能控制框图

Fig. 10 Block diagram of rotor kinetic energy control

为此,陆续有学者提出基于分散式与分布式控制的频率支撑方法,其控制框图如图 11 所示^[114]。

如图 11(a)所示,分散式控制又称为本地控制,仅需收集每台新能源机组的状态信息来进行控制指令下发。文献[115]考虑尾流效应对 WTG 惯量响应的影响,结合尾流效应模型提出了分散式频率协调控制策略。文献[116]考虑到 WTG 频率支撑时的疲劳损耗,提出一种风电场分散式频率响应策略,有效兼顾了频率支撑效果与降低 WTG 疲劳损伤。分散式控制无需与集中控制器进行信息交互,降低了通信成本,但其无法考虑各新能源机组的相互影响,难以保证全局最优。相较之下,如图 11(b)所示,分布式控制可通过本地通信网络实现分散式新能源场站内每个机组的数据信息交互,进而实现各新能源机组的最优控制。文献[117]充分考虑各 WTG 的转子支撑水平,结合模型预测控制与交替方向乘法,实现了频率支撑时各 WTG 出力的最优控制。文献[118]引入一致性算法,提出考虑 WTG 状态的一致性分布式协调控制,实现了频率支撑功率的最优分配。分布式控制具有信息共享、最优控制的优点,但面对大数据量的分散式新能源机组调控时,容易出现计算速度较慢且无法迭代求解的问题。为减小分布式控制时的数据计算量,分散式新能源集群调控的概念逐渐被提出并得到发展,其主要通过考虑各机组在地理和电气上的空间分布特征以及互补特性,以类型和位置聚集为主要因素进行分组,从而实现“以群代点”的频率调控目标。

3.5 电压稳定调节

针对新能源并网无功电压稳定调节问题,按照其控制原理同样可分为 VSC 控制与附加装置控制。其中, VSC 控制主要按照无功-电压下垂控制曲线,根据新能源机组 PCC 处的电压大小控制 VSC 输出相应的无功功率进行补偿,以维持电压在限定范围之内^[69]。电压控制装置主要包括有载调压变压器、并联电容电抗器、静止无功补偿器等,其中有载调压变压器可通过改变分接头的挡位来调节一、二次侧的电压变比,从而稳定二次侧的电压波动^[119]。并联电容电抗器、静止无功补偿器等无功补偿装置输出电压调节无功功率,也可有效缓解新能源并网产生的电压波动^[120-121]。此类电压控制装置设备虽具有较大的补偿容量,但存在响应速度慢、电压调节可持续能力弱的问题。

与分散式新能源并网频率稳定支撑控制方法

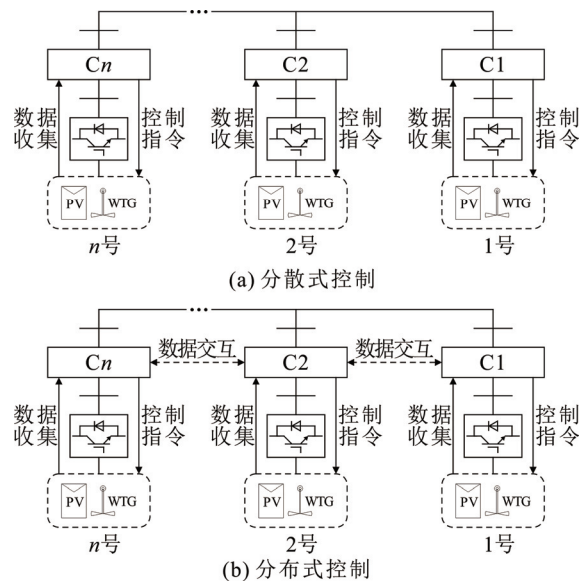


图 11 分散式与分布式控制框图

Fig.11 Block diagram of decentralized and distributed control

类似,由于分散式新能源机组的分布特性,图 11 所示的分散式与分布式等灵活控制方法在电压调节方面也得到了广泛应用。文献[122]提出一种结合模型预测控制与下垂控制的分散式 WTG 电压本地控制方法,实现了各 WTG 的快速无功输出并及时调节了电压波动。文献[123]揭示了分散式新能源机组间电压交互影响的规律,通过分布式电压控制实现各节点电压抬升的统一调节。对于不同地区工况复杂多样的分散式新能源机组,尤其是呈现高密度并网趋势的分布式 PV,亟须进行无功调控资源的整合,以充分发挥各分散式新能源机组的无功电压支撑能力。文献[124]总结了分散式新能源集群并网电压调控技术,其示意图如图 12 所示,主要原理为:根据聚合成的分散式新能源各集群展现的无功电压调节外特性,以及不同集群间的无功互补特性,进行无功功率的最优控制。文献[125]引入数字孪生方法,从 PV 一致性表征、孪生模型重建、功率推演预测 3 个方面实现了分布式 PV 的群调控。

4 研究展望

针对分散式新能源并网带来的谐波、高/低电压穿越、暂态同步失稳、频率越限以及电压抬升等复杂稳定性问题,国内外学者已在相关稳定控制方法上取得了一定进展,但仍有较多方面需进一步完善。针对现有研究成果的特点与不足,本文针对以下研究内容提出几点建议:

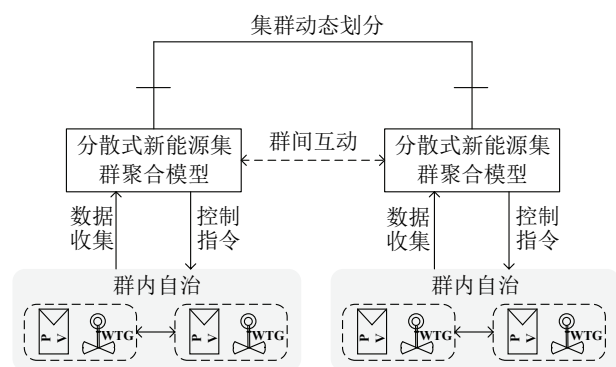


图 12 分散式新能源集群调控示意图

Fig.12 Block diagram of decentralized renewable generation clusters control

1) 分散式新能源机组与 ESS 的协同控制。随着新型储能技术的不断发展, ESS 具有能量快速储存与释放的特点, 能够高效满足系统有功/无功支撑的需求, 在治理复杂稳定性问题方面具有广泛的运用前景。但现有文献较多集中在新能源场站内配置 ESS 以平抑功率波动及进行短期频率支撑, 在谐波治理与高/低电压穿越等问题上的控制方法尚待挖掘。且需充分发挥各分散式新能源机组与 ESS 的实际出力水平, 研究相关协同控制方法以寻求其与稳定控制效果之间的平衡, 进而保证参与稳定控制时各机组与 ESS 的正常运行水平。

2) 基于人工智能算法的分布式控制。分布式控制在解决分散式新能源并网稳定性问题方面得到了广泛的运用。但分散式新能源装机容量的进一步提升加剧了运行分布式控制解决频率/电压稳定问题时的数据计算量, 且时间延迟或通信故障等通信问题都会影响实际工程中的实时控制, 难以保证良好的治理效果。利用数据驱动的人工智能方法可对分散式新能源以及系统负荷变化进行短期预测, 超前获取频率/电压波动工况以进行调控。同时可进一步研究人工智能算法在分布式控制求解时的应用前景, 以提升求解速度实现稳定性问题的快速调控。

3) 复杂稳定问题多时间尺度综合治理。目前文献大多通过挖掘新能源机组自身的控制潜力, 或结合外部装置解决单一稳定性问题, 难以实现多时间尺度复杂稳定性问题的综合治理。且随着分散式新能源机组渗透率的提升, 系统暂态同步、频率、电压等方面的稳定性问题耦合更加紧密, 单一问题极易引发其他稳定性问题相继发生。不同类型的

ESS 具有各自的特点, 能够满足不同时间尺度的能量存储和释放需求。如何合理设计 ESS 逆变器阻抗参数, 配置满足多目标调控需求容量的 ESS, 以及实现多时间尺度下复杂稳定性问题的综合控制需进一步研究。

5 结论

本文针对分散式新能源并网复杂稳定性控制进行综述, 根据多时间尺度分析了包括谐波、电压、暂态同步以及频率 4 个层面稳定性问题的产生机理, 讨论了针对不同层面稳定性问题的控制方法, 分析了相应控制方法的原理和优缺点。随后结合新型储能的发展趋势, 针对现有控制方法存在的问题从分散式新能源机组与 ESS 的协同控制、基于人工智能算法的分布式控制以及复杂稳定问题多时间尺度综合治理 3 个方面进行展望, 从而进一步提升分散式新能源并网稳定控制能力, 保障未来分散式新能源渗透率的不断提升。

参考文献 References

- [1] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-474.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-474.
- [2] 姚伟, 熊永新, 姚雅涵, 等. 海上风电柔直并网系统调频控制综述[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3397-3413.
YAO Wei, XIONG Yongxin, YAO Yahan, et al. Review of voltage source converter-based high voltage direct current integrated offshore wind farm on providing frequency support control[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3397-3413.
- [3] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2818.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818.
- [4] 国家能源局. 国家能源局发布 2023 年全国电力工业统计数据[EB/OL]. (2024-01-26)[2024-12-26]. https://www.nea.gov.cn/2024-01/26/c_1310762246.htm.
National Energy Administration. NEA releases national power industry statistics for 2023[EB/OL]. (2024-01-26)[2024-12-26]. https://www.nea.gov.cn/2024-01/26/c_1310762246.htm.
- [5] PENG Y J, LI Y, LEE K Y, et al. Coordinated control strategy of PMSG and cascaded H-Bridge STATCOM in dispersed wind farm for suppressing unbalanced grid voltage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(1): 349-359.
- [6] 国家能源局. “十四五”现代能源体系规划[EB/OL]. [2024-12-26]. http://www.nea.gov.cn/1310524241_16479412513081n.pdf.
National Energy Administration. “14th Five-Year Plan” modern energy system planning[EB/OL]. [2024-12-26]. http://www.nea.gov.cn/1310524241_16479412513081n.pdf.
- [7] 国家能源局综合司. 国家能源局综合司关于公开征求《新型电力系统发展蓝皮书(征求意见稿)》意见的通知[EB/OL]. (2023-01-06)

- [2024-12-26]. https://www.nea.gov.cn/2023-01/06/c_1310688702.htm. National Energy Administration. Notice of the comprehensive department of the National Energy Administration on the public solicitation of opinions on the blue book on the development of new electric power systems (draft for comment)[EB/OL]. (2023-01-06)[2024-12-26]. https://www.nea.gov.cn/2023-01/06/c_1310688702.htm.
- [8] 国家能源局. 2023 年光伏发电建设情况[EB/OL]. (2024-02-28)[2024-12-26]. http://www.nea.gov.cn/2024-02/28/c_1310765696.htm. National Energy Administration. Construction of photovoltaic power generation in 2023[EB/OL]. (2024-02-28)[2024-12-26]. http://www.nea.gov.cn/2024-02/28/c_1310765696.htm.
- [9] 国家电力投资集团有限公司. 中国县域绿色低碳能源转型发展报告 [EB/OL]. [2024-12-26]. <https://www.siemens-energy.com/cn/zh/home/company/sustainability/china-county-low-carbon-energy-development-report.html>. State Power Investment Corporation Limited. China county green and low-carbon energy development report[EB/OL]. [2024-12-26]. <https://www.siemens-energy.com/cn/zh/home/company/sustainability/china-county-low-carbon-energy-development-report.html>.
- [10] 何晋伟, 孟维奇, 蒋 玮, 等. 新能源配电网电能质量典型问题分析及应对策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2983-2994. HE Jinwei, MENG Weiqi, JIANG Wei, et al. Power quality problems in renewable energy power distribution systems: analysis and solutions[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2983-2994.
- [11] 孙媛媛, 许庆桑, 马 钊, 等. 数字化背景下新型电力系统谐波溯源关键技术[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(6): 154-169. SUN Yuanyuan, XU Qingshen, MA Zhao, et al. Key technologies for harmonic source tracing in new power system in background of digitalization[J]. Automation of Electrical Power Systems, 2024, 48(6): 154-169.
- [12] 王子辉, 贾燕冰, 李彦晨, 等. 计及电能质量影响的主动配电网光储容量优化[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 607-620. WANG Zihui, JIA Yanbing, LI Yanchen, et al. Optimal capacity configuration of photovoltaic and energy storage system in active distribution network considering influence of power quality[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 607-620.
- [13] 耿 华, 何长军, 刘浴霜, 等. 新能源电力系统的暂态同步稳定研究综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3367-3383. GENG Hua, HE Changjun, LIU Yushuang, et al. Overview on transient synchronization stability of renewable-rich power systems[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3367-3383.
- [14] 汪梦军, 郭剑波, 马士聪, 等. 新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1672-1693. WANG Mengjun, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Review of transient frequency stability analysis and frequency regulation control methods for renewable power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1672-1693.
- [15] 袁志昌, 郭佩乾, 刘国伟, 等. 新能源经柔性直流接入电网的控制与保护综述[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1473-1488. YUAN Zhichang, GUO Peiqian, LIU Guowei, et al. Review on control and protection for renewable energy integration through VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1473-1488.
- [16] 曾 辉, 孙 峰, 李 铁, 等. 澳大利亚“9-28”大停电事故分析及对中国启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 1-6. ZENG Hui, SUN Feng, LI Tie, et al. Analysis of “9-28” blackout in South Australia and its enlightenment to China[J]. Automation of Electrical Power Systems, 2017, 41(13): 1-6.
- [17] 方勇杰. 英国“8-9”停电事故对频率稳定控制技术的启示[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 1-5. FANG Yongjie. Reflections on frequency stability control technology based on the blackout event of 9 August 2019 in UK[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 1-5.
- [18] 孙华东, 许 涛, 郭 强, 等. 英国“8-9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183-6191. SUN Huadong, XU Tao, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6191.
- [19] 马宁嘉, 谢小荣, 孙谊娟, 等. 新能源电力系统频率时空分布特性分析[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 406-413. MA Ningjia, XIE Xiaorong, SUN Yiqian, et al. Analysis of frequency space-time distribution characteristics of power systems with renewables[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 406-413.
- [20] 郑玉平, 吕鹏飞, 李 斌, 等. 新型电力系统继电保护面临的问题与解决思路[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 3-15. ZHENG Yuping, LÜ Pengfei, LI Bin, et al. Problems faced by relay protection in new power system and their solution ideas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 3-15.
- [21] 李更丰, 孙少华, 别朝红, 等. 面向新型电力系统弹性提升的储能优化配置与灵活调度研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4084-4095. LI Gengfeng, SUN Shaohua, BIE Zhaozhong, et al. Review on optimal configuration and flexible scheduling research of energy storage for resilience improvement of new power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4084-4095.
- [22] 祖文静. 山地风电场无功电压控制能力综合评估方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020. ZU Wenjing. Research on comprehensive evaluation method for the reactive power and voltage control capability of mountain wind farms[D]. Changsha, China: Hunan University, 2020.
- [23] 彭衍建. 山地风电场电能质量控制及主动支撑电网方法与应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021. PENG Yanjian. Study on method and application of power quality control of mountain wind farm and its active support for power grid[D]. Changsha, China: Hunan University, 2021.
- [24] 丁 明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14. DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [25] 韩泽雷, 鞠 平, 秦 川, 等. 面向新型电力系统的频率安全研究综述与展望[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 112-124. HAN Zelei, JU Ping, QIN Chuan, et al. Review and prospect of research on frequency security of new power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 112-124.
- [26] 蔡 旭, 秦 垚, 王 晗, 等. 风电机组的自同步电压源控制研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2478-2490. CAI Xu, QIN Yao, WANG Han, et al. Review of self-synchronous voltage source control for wind turbine generator[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2478-2490.
- [27] KUNDUR P, PASERBA J, AJJARAPU V, et al. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1387-1401.
- [28] HATZIARGYRIOU N, MILANOVIĆ J V, RAHMANN C, et al. Stability definitions and characterization of dynamic behavior in systems with high penetration of power electronic interfaced technologies[R]. Piscataway, USA: IEEE, 2020.
- [29] GU Y J, GREEN T C. Power system stability with a high penetration of inverter-based resources[J]. Proceedings of the IEEE, 2023, 111(7): 832-853.

- [30] LIANG S, HU Q H, LEE W J. A survey of harmonic emissions of a commercially operated wind farm[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2012, 48(3): 1115-1123.
- [31] STRUNZ K, ALMUNEM K, WULKOW C, et al. Enabling 100% renewable power systems through power electronic grid-forming converter and control: system integration for security, stability, and application to Europe[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2023, 111(7): 891-915.
- [32] AL-SHETWI A Q, HANNAN M A, JERN K P, et al. Grid-connected renewable energy sources: review of the recent integration requirements and control methods[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 253: 119831.
- [33] BLAABJERG F, YANG Y H, KIM K A, et al. Power electronics technology for large-scale renewable energy generation[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2023, 111(4): 335-355.
- [34] 杜步阳, 邵德军, 朱建行, 等. 电压源型变流器并网系统多时间尺度间相互作用[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(20): 5547-5559.
DU Buyang, SHAO Dejun, ZHU Jianhang, et al. The interaction between multiple timescales of the grid-tied voltage source converter[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(20): 5547-5559.
- [35] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical rule for connecting wind farm to power system: GB/T 19963—2011[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2012.
- [36] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system: GB/T 19964—2012[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2013.
- [37] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定 第1部分: 陆上风电: GB/T 19963.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration of Market Supervision and Administration of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical specification for connecting wind farm to power system-part 1: on shore wind power: GB/T 19963.1—2021[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2021.
- [38] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 分散式风力发电机组: GB/T 41512—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
State Administration of Market Supervision and Administration of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Distributed wind energy generation systems: GB/T 41512—2022[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2022.
- [39] 国家电网公司. 风电场接入电网技术规定: Q/GDW 1392—2015[S]. 北京: 国家电网公司, 2016.
State Grid Corporation of China. Technical rule for connecting wind farm into power grid: Q/GDW 1392—2015[S]. Beijing, China: State Grid Corporation of China, 2016.
- [40] 陈智勇, 黄旭程, 杨 苓, 等. 分布式电站宽频域谐振机理分析及阻抗协调构造方法[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(1): 141-154.
CHEN Zhiyong, HUANG Xucheng, YANG Ling, et al. Investigation on resonance mechanism in wide frequency domain for distributed power plant and its coordinated impedance shaping method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(1): 141-154.
- [41] HU H T, SHI Q X, HE Z Y, et al. Potential harmonic resonance impacts of PV inverter filters on distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015, 6(1): 151-161.
- [42] 许德志, 汪 飞, 毛华龙, 等. 多并网逆变器与电网的谐波交互建模与分析[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(12): 64-71.
XU Dezhi, WANG Fei, MAO Hualong, et al. Modeling and analysis of harmonic interaction between multiple grid-connected inverters and the utility grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(12): 64-71.
- [43] SHUAI Z K, LI Y, WU W M, et al. Divided DQ small-signal model: a new perspective for the stability analysis of three-phase grid-tied inverters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(8): 6493-6504.
- [44] 朱晓娟, 胡海涛, 陶海东, 等. 光伏并网系统的谐波不稳定产生机理及影响规律[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(10): 33-41.
ZHU Xiaojuan, HU Haitao, TAO Haidong, et al. The mechanism and influence of harmonic instability for photovoltaic grid-connected system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(10): 33-41.
- [45] ARGÜELLO A, TORQUATO R, FREITAS W, et al. A graphical method to assess component overload due to harmonic resonances in wind parks[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, 36(3): 1819-1828.
- [46] SONG Y P, WANG X F, BLAABJERG F. High-frequency resonance damping of DFIG-based wind power system under weak network[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(3): 1927-1940.
- [47] CHEN Z Y, HUANG X C, LUO A, et al. Wideband harmonic resonance characteristics and coordinated damping method for distributed generation power plants[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(10): 7753-7764.
- [48] WANG S Y, LI Y, ZHANG M M, et al. Harmonic resonance suppression with inductive power filtering method: case study of large-scale photovoltaic plant in China[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(5): 6444-6454.
- [49] 袁智勇, 雷金勇, 周长城, 等. 考虑配网网络结构的分散式风电最大准入容量研究[J]. *南方电网技术*, 2020, 14(9): 73-79.
YUAN Zhiyong, LEI Jinyong, ZHOU Changcheng, et al. Research on maximum allowable capacity of dispersed wind farm in distribution network considering network structure[J]. *Southern Power System Technology*, 2020, 14(9): 73-79.
- [50] 练依倩, 袁智勇, 雷金勇, 等. 分散式风电接入在不同场景下对配电网的影响[J]. *中国电力*, 2020, 53(4): 49-58.
LIAN Yiqing, YUAN Zhiyong, LEI Jinyong, et al. Impact of dispersed wind farm integration on distributed network in different scenarios[J]. *Electric Power*, 2020, 53(4): 49-58.
- [51] 颜湘武, 王德胜, 隗小雪, 等. 风电机组故障穿越与频率调节风储联合控制策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(17): 5911-5922.
YAN Xiangwu, WANG Desheng, WEI Xiaoxue, et al. Research on the wind power-storage joint control based on fault ride-through and frequency regulation of wind turbine[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(17): 5911-5922.
- [52] ARANI M F M, MOHAMED Y A R I. Assessment and enhancement of a full-scale PMSG-based wind power generator performance under faults[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2016, 31(2): 728-739.
- [53] YAN L F, CHEN X, ZHOU X, et al. Perturbation compensation-based non-linear adaptive control of ESS-DVR for the LVRT capability improvement of wind farms[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2018, 12(13): 1500-1507.

- [54] 王永强, 喻俊志, 冯静安, 等. 永磁直驱风电机组低/高电压穿越研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 34-42.
WANG Yongqiang, YU Junzhi, FENG Jing'an, et al. Research on low/high voltage ride through of permanent magnet synchronous wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 34-42.
- [55] WEI J, CAO Y J, WU Q W, et al. Coordinated droop control and adaptive model predictive control for enhancing HVRT and post-event recovery of large-scale wind farm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(3): 1549-1560.
- [56] 甄永赞, 苏宁赛, 李美林. 适用于高/低电压穿越的双馈风机协同控制策略及其稳定技术研究[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 39-48.
ZHEN Yongzan, SU Ningsai, LI Meilin. Research on doubly-fed induction generators synergetic control strategy and stability technology for high/low voltage ride through[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 39-48.
- [57] 王德胜, 颜湘武, 贾焦心, 等. 永磁直驱风机基于虚拟同步技术的高、低电压连续故障穿越策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2164-2174.
WANG Desheng, YAN Xiangwu, JIA Jiaoxin, et al. High/low voltage continuous fault ride through strategy of PMSGs based on virtual synchronization technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2164-2174.
- [58] PEI J X, YAO J, LIU R K, et al. Characteristic analysis and risk assessment for voltage-frequency coupled transient instability of large-scale grid-connected renewable energy plants during LVRT[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5515-5530.
- [59] WANG X F, TAUL M G, WU H, et al. Grid-synchronization stability of converter-based resources-an overview[J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2020, 1: 115-134.
- [60] GENG H, LIU L, LI R Q. Synchronization and reactive current support of PMSG-based wind farm during severe grid fault[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(4): 1596-1604.
- [61] HE X Q, GENG H. PLL synchronization stability of grid-connected multiconverter systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(1): 830-842.
- [62] 张武其, 文云峰, 迟方德, 等. 电力系统惯量评估研究框架与展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 6842-6855.
ZHANG Wuqi, WEN Yunfeng, CHI Fangde, et al. Research framework and prospect on power system inertia estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 6842-6855.
- [63] 叶 林, 王凯丰, 赖业宁, 等. 低惯量下电力系统频率特性分析及电池储能调频控制策略综述[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 446-462.
YE Lin, WANG Kaifeng, LAI Yening, et al. Review of frequency characteristics analysis and battery energy storage frequency regulation control strategies in power system under low inertia level[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 446-462.
- [64] 张武其, 文云峰, 何 焯, 等. 电力系统中长期惯量水平趋势评估及应用[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(10): 54-65.
ZHANG Wuqi, WEN Yunfeng, HE Ye, et al. Estimation of medium-and long-term inertia level tendency for power system and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(10): 54-65.
- [65] 李东东, 张佳乐, 徐 波, 等. 考虑频率分布特性的新能源电力系统等效惯量评估[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2913-2921.
LI Dongdong, ZHANG Jiale, XU Bo, et al. Equivalent inertia assessment in renewable power system considering frequency distribution properties[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2913-2921.
- [66] CAI G W, WANG B, YANG D Y, et al. Inertia estimation based on observed electromechanical oscillation response for power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4291-4299.
- [67] 唐玉烽, 杨 苹, 杨 义. 考虑频率二次跌落的风电机组频率响应控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 166-174.
TANG Yufeng, YANG Ping, YANG Yi. Frequency response control strategy of wind turbines considering frequency secondary drop[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 166-174.
- [68] 沈阳武, 梁利清, 张 斌, 等. 基于改进灵敏度算法的风电场分层协调优化控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(9): 28-33, 41.
SHEN Yangwu, LIANG Liqing, ZHANG Bin, et al. Hierarchical control strategy for wind farm based on improved sensitivity algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2020, 32(9): 28-33, 41.
- [69] 刘嘉彦, 李 勇, 曹一家, 等. 考虑光伏利用效率的中低压配电网电压抬升抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 171-177.
LIU Jiayan, LI Yong, CAO Yijia, et al. Suppression method of voltage rise in medium and low distribution networks considering utilization efficiency of photovoltaic power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 171-177.
- [70] BOKHARI A, RAZA A, DIAZ-AGUILÓ M, et al. Combined effect of CVR and DG penetration in the voltage profile of low-voltage secondary distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 286-293.
- [71] 王成福, 梁 军, 张 利, 等. 基于静止同步补偿器的风电场无功电压控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 23-28.
WANG Chengfu, LIANG Jun, ZHANG Li, et al. Reactive power and voltage control strategy for wind farm based on STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 23-28.
- [72] DAS J C. Passive filters-potentialities and limitations[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(1): 232-241.
- [73] HU H T, HE Z Y, GAO S B. Passive filter design for China high-speed railway with considering harmonic resonance and characteristic harmonics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 505-514.
- [74] LIU Q Y, LI Y. An inductive filtering-based parallel operating transformer with shared filter for power quality improvement of wind farm[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 9281-9290.
- [75] LI X, XU W, DING T Y. Damped high passive filter - a new filtering scheme for multipulse rectifier systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 117-124.
- [76] 吴星翰, 许双婷, 王 杨, 等. 阻尼高通滤波器及其在高压直流系统中的应用[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 4072-4081.
WU Xinghan, XU Shuangting, WANG Yang, et al. Research on damped high pass filter and its application in HVDC systems[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 4072-4081.
- [77] HASAN K N B M, RAUMA K, LUNA A, et al. Harmonic compensation analysis in offshore wind power plants using hybrid filters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(3): 2050-2060.
- [78] BLASCO-GIMENEZ R, APARICIO N, ANO-VILLALBA S, et al. LCC-HVDC connection of offshore wind farms with reduced filter banks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(6): 2372-2380.
- [79] AKAGI H. Active harmonic filters[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(12): 2128-2141.
- [80] 李战鹰, 任 震, 杨泽明. 有源滤波装置及其应用研究综述[J]. 电网技术, 2004, 28(22): 40-43.
LI Zhanying, REN Zhen, YANG Zeming. Survey on active power filter devices and their application study[J]. Power System Technology, 2004, 28(22): 40-43.
- [81] CHEN Y, FEI J T. Dynamic sliding mode control of active power filter with integral switching gain[J]. IEEE Access, 2019, 7: 21635-21644.
- [82] HAMADI A, RAHMANI S, AL-HADDAD K. Digital control of a shunt hybrid power filter adopting a nonlinear control approach[J].

- IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(4): 2092-2104.
- [83] GONZATTI R B, FERREIRA S C, DA SILVA C H, et al. Smart impedance: a new way to look at hybrid filters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 837-846.
- [84] WANG L, LAM C S, WONG M C. Minimizing inverter capacity design and comparative performance evaluation of SVC-coupling hybrid active power filters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(2): 1227-1242.
- [85] TANGTHEERAJARONWONG W, HATADA T, WADA K, et al. Design and performance of a transformerless shunt hybrid filter integrated into a three-phase diode rectifier[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(5): 1882-1889.
- [86] QIAO W, VENAYAGAMOORTHY G K, HARLEY R G. Real-time implementation of a STATCOM on a wind farm equipped with doubly fed induction generators[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(1): 98-107.
- [87] 代林旺, 秦世耀, 王瑞明, 等. 直驱永磁同步风电机组高电压穿越技术与试验[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 147-153.
DAI Linwang, QIN Shiyao, WANG Ruiming, et al. Research and experiment on high voltage ride through for direct-drive PMSG-based wind turbines[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 147-153.
- [88] 孙丽玲, 王艳娟. 电网电压不对称骤升时双馈风力发电机定子磁链暂态全过程及控制策略研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(7): 2160-2166.
SUN Liling, WANG Yanjuan. Study on transient whole-process and control strategy of stator flux in doubly-fed induction generator with asymmetric voltage swell[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2160-2166.
- [89] XIANG D W, RAN L, TAVNER P J, et al. Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 652-662.
- [90] HU S, LIN X C, KANG Y, et al. An improved low-voltage ride-through control strategy of doubly fed induction generator during grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12): 3653-3665.
- [91] LIANG J Q, QIAO W, HARLEY R G. Feed-forward transient current control for low-voltage ride-through enhancement of DFIG wind turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(3): 836-843.
- [92] 任永峰, 胡宏彬, 薛宇, 等. 基于卸荷电路和无功优先控制的永磁同步风力发电机组低电压穿越研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 11-18.
REN Yongfeng, HU Hongbin, XUE Yu, et al. Low voltage ride-through capability improvement of PMSG based on chopper circuit and reactive priority control[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 11-18.
- [93] YUNUS A M S, MASOUM M A S, ABU-SIADA A. Application of SMES to enhance the dynamic performance of DFIG during voltage sag and swell[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22(4): 5702009.
- [94] MOHSENI M, MASOUM M A S, ISLAM S M. Low and high voltage ride-through of DFIG wind turbines using hybrid current controlled converters[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(7): 1456-1465.
- [95] 曹鹏飞, 邹博, 吴林林, 等. 综合 Crowbar 和 Chopper 保护的双馈风机低电压穿越仿真研究[J]. 华北电力技术, 2017(2): 49-54.
CAO Pengfei, ZOU Bo, WU Linlin, et al. Research of low voltage ride-through techniques for DFIG based on Crowbar and Chopper[J]. North China Electric Power, 2017(2): 49-54.
- [96] YANG J, FLETCHER J E, REILLY J O. A series-dynamic-resistor-based converter protection scheme for doubly-fed induction generator during various fault conditions[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2): 422-432.
- [97] WESSELS C, GEBHARDT F, FUCHS F W. Fault ride-through of a DFIG wind turbine using a dynamic voltage restorer during symmetrical and asymmetrical grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 807-815.
- [98] 王鹏, 王晗, 张健文, 等. 超级电容储能系统在风电系统低电压穿越中的设计及应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1528-1537.
WANG Peng, WANG Han, ZHANG Jianwen, et al. Design and application of supercapacitor energy storage system used in low voltage ride through of wind power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1528-1537.
- [99] 张宇, 蔡旭, 张琛, 等. 并网变换器的暂态同步稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1687-1701.
ZHANG Yu, CAI Xu, ZHANG Chen, et al. Transient synchronization stability analysis of voltage source converters: a review[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1687-1701.
- [100] 王东泽, 孙海顺, 黄碧月, 等. 基于虚拟同步控制的电压源型直驱风电机组并网稳定性分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3282-3294.
WANG Dongze, SUN Haishun, HUANG Biye, et al. Analysis of grid-connected stability of voltage-source-type PMSG-based wind turbine based on virtual synchronous control[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3282-3294.
- [101] HE X Q, GENG H. PLL synchronization stability of grid-connected multiconverter systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(1): 830-842.
- [102] CHEN S Y, YAO J, LIU Y, et al. Coupling mechanism analysis and transient stability assessment for multiparalleled wind farms during LVRT[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(4): 2132-2145.
- [103] WANG J L, ZHANG X, LI M. Transient stability analysis and improvement of multiparalleled virtual synchronous generators grid-connected system[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024, 12(4): 4094-4105.
- [104] 刘洪波, 彭晓宇, 张崇, 等. 风电参与电力系统调频控制策略综述[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 81-92.
LIU Hongbo, PENG Xiaoyu, ZHANG Chong, et al. Overview of wind power participating in frequency regulation control strategy for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 81-92.
- [105] CHANG F R, LI Y, PENG Y J, et al. Coordinated inertial control method of doubly fed induction generators and battery energy storage system for short-term frequency support[C]//Proceedings of 2023 6th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering. Guangzhou, China: IEEE, 2023: 1192-1197.
- [106] MORREN J, DE HAAN S W H, KLING W L, et al. Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 433-434.
- [107] 高凯, 肖凡, 葛平娟, 等. 计及电流限幅环节影响的虚拟同步发电机暂态稳定区间分析[J/OL]. 电网技术, 2023: 1-12 [2024-12-07]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0365>.
GAO Kai, XIAO Fan, GE Pingjuan, et al. Transient stability interval analysis of a virtual synchronized generator considering fault current limitation[J/OL]. Power System Technology, 2023: 1-12 [2024-12-07]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0365>.
- [108] 王小军, 段生强, 陈文魁, 等. 双馈风电场新型功率协调控制策略研究[J]. 湖南电力, 2022, 42(1): 89-93.
WANG Xiaojun, DUAN Shengqiang, CHEN Wenkui, et al. Research on new power coordinated control strategy for doubly fed wind turbine[J]. Hunan Electric Power, 2022, 42(1): 89-93.

- [109] YANG P H, HE B, WANG B, et al. Coordinated control of rotor kinetic energy and pitch angle for large-scale doubly fed induction generators participating in system primary frequency regulation[J]. IET Renewable Power Generation, 2021, 15(8): 1836-1847.
- [110] RASHID A, YING D. Fuzzy inference based approach for pitch angle control of variable speed variable pitch wind turbine[C]//Proceedings of 2020 Asia Energy and Electrical Engineering Symposium. Chengdu, China: IEEE, 2020: 1051-1056.
- [111] 吴启帆, 宋新立, 张静冉, 等. 电池储能参与电网一次调频的自适应综合控制策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3829-3836.
WU Qifan, SONG Xinli, ZHANG Jingran, et al. Study on self-adaptation comprehensive strategy of battery energy storage in primary frequency regulation of power grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3829-3836.
- [112] 李佳蓉, 林 今, 陈凯旋, 等. 考虑尾流效应的分布式海上风电制氢集群容量优化配置[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(11): 9-17.
LI Jiarong, LIN Jin, CHEN Kaixuan, et al. Optimal capacity configuration of distributed offshore wind power-to-hydrogen cluster considering wake effect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(11): 9-17.
- [113] 钟吴君, 李培强, 涂春鸣. 基于尾流关联的动态超图风电功率超短期预测方法[J/OL]. 中国电机工程学报, 2024: 1-18[2024-11-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20240528.0953.003.html>.
ZHONG Wujun, LI Peiqiang, TU Chunming. Dynamic hypergraph wind power ultra short term prediction method based on wake correlation[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024: 1-18[2024-11-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20240528.0953.003.html>.
- [114] KAMAL F, CHOWDHURY B. Model predictive control and optimization of networked microgrids[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 138: 107804.
- [115] AHMADYAR A S, VERBIĆ G. Coordinated operation strategy of wind farms for frequency control by exploring wake interaction[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(1): 230-238.
- [116] 杨伟峰, 文云峰, 李 立, 等. 考虑疲劳载荷的风电场分散式频率响应策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 55-62.
YANG Weifeng, WEN Yunfeng, LI Li, et al. Decentralized frequency response strategy for wind farm considering fatigue load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 55-62.
- [117] BAO W Y, WU Q W, DING L, et al. A hierarchical inertial control scheme for multiple wind farms with BESSs based on ADMM[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(2): 751-760.
- [118] 姚雅涵, 熊永新, 姚 伟, 等. 面向电网频率快速支撑的风电场自适应分布式协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 561-572.
YAO Yahan, XIONG Yongxin, YAO Wei, et al. Adaptive distributed cooperative control of wind farms for grid frequency fast support[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 561-572.
- [119] RAGHAVENDRA P, GAONKAR D N. Online voltage estimation and control for smart distribution networks[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(1): 40-46.
- [120] 李圣清, 文颜烯, 郑 剑, 等. 储能型双馈风电机组与 SVG 的无功电压联动控制策略[J]. 湖南电力, 2022, 42(3): 43-48.
LI Shengqing, WEN Yanxi, ZHENG Jian, et al. Linkage control strategy of energy-storage dual-feed wind unit and SVG reactive voltage[J]. Hunan Electric Power, 2022, 42(3): 43-48.
- [121] DASH P K, SHARAF A M, HILL E F. An adaptive stabilizer for thyristor controlled static VAR compensators for power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(2): 403-410.
- [122] LI P, JI J, JI H R, et al. MPC-based local voltage control strategy of DGs in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2911-2921.
- [123] ZHOU Q, SHAHIDEHPOUR M, YAN M Y, et al. Distributed secondary control for islanded microgrids with mobile emergency resources[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 1389-1399.
- [124] 张琳娟, 张 平, 卢 丹, 等. 基于“云-群-端”架构分布式光伏群调控策略研究[J/OL]. 电测与仪表, 2023: 1-13[2024-07-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20230207.1129.002.html>.
ZHANG Linjuan, ZHANG Ping, LU Dan, et al. Research on group control strategy of distributed photovoltaic based on “cloud-group-end” architecture[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023: 1-13[2024-07-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20230207.1129.002.html>.
- [125] 蔡瑞天, 姚丽娟, 武 昕. 面向分布式光伏群调控的数字孪生方法[J]. 电网技术, 2025, 49(2): 593-603.
CAI Ruitian, YAO Lijuan, WU Xin. A digital twin approach for distributed photovoltaic group regulation and group control[J]. Power System Technology, 2025, 49(2): 593-603.



LI Yong
Ph.D., Professor



CHANG Fanrui
Ph.D. candidate



PENG Yanjian
Ph.D.
Corresponding author

李 勇

1982—, 男, 博士, 教授, 博导
主要从事能源/电力系统优化运行与控制、电能变换系统与装备方面的研究工作
E-mail: yongli@hnu.edu.cn

常樊睿

1999—, 男, 博士生
主要从事新能源并网稳定性控制方面的研究工作
E-mail: frchang1999@foxmail.com

彭衍建(通信作者)

1988—, 男, 博士, 讲师
主要从事新能源并网稳定性控制方面的研究工作
E-mail: yjpeng@csust.edu.cn

收稿日期 2023-12-19 修回日期 2025-03-01 编辑 何秋萍