储能XXXX

含跟-构网储能的新能源场站建模及稳定性提升策略

李 明[1,2]，郑宗明[1]，裴建楠[3]，段若楠[1]，邹 菲[4]
（[1]华北电力大学新能源学院，北京 102206；[2]国网新疆电力有限公司电力科学研究院，新疆乌鲁木齐 830092；[3]新疆工程学院控制工程学院，新疆 乌鲁木齐 830023；[4]国家能源用户侧储能创新研发中心，北京 100144）

摘 要：随着高比例新能源接入电网，新型电力系统呈现系统惯量低、支撑能力不足、局部电网强度弱化等特征。在此运行工况下，采用跟网型控制的新能源场站易出现弱电网交互失稳问题，构网型储能的接入成为提升新能源场站运行稳定性的关键路径。然而为进一步兼顾电网响应和稳定性需求，现有学者提出储能场站以跟网和构网型两种控制模式接入新能源场站中，形成“跟网型新能源+跟网型储能+构网型储能”结构，该结构是未来新能源场站的发展趋势，其建模及稳定性提升策略是目前研究重点。本文首先对新型电力系统结构及跟网和构网型两种控制模式进行介绍，并对跟构网混合控制场站结构进行梳理总结，按照规模分为独立新能源场站和场站集群；其次，对混合控制场站的建模方法及稳定性分析进行梳理总结，并进一步按照扰动程度，将混合控制场站的稳定性提升策略分为小扰动和大扰动两类进行梳理，介绍目前稳定性提升控制方法；最后对跟-构网混合控制模式进行总结展望，指出未来研究重点，为后续“新能源+储能”的混合控制模式研究提供参考，进一步推动新型电力系统的建设发展，保障其安全稳定运行。

关键词：新型电力系统；跟构网混合控制；储能场站；稳定性提升策略
doi：10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0584
中图分类号：TM 762　　文献标志码：A　　文章编号：2095-4239（XXXX）XX-1-13

A Review of the Hybrid Control Models of GFL-GFM construction and the stable operation strategy

LI Ming[1,2], ZHENG Zongming[1], PEI Jiannan[3], DUAN Ruonan[1], ZOU Fei[4]
([1]School of New Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206,China; [2]Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co.,Ltd, Urumqi 830092, Xinjiang, China; [3]School of Energy Engineering. Xinjiang Institute of Technology, Urumqi 830023, Xinjiang, China; [4]National User-Side Energy Storage Innovation Research and Development Center, Beijing 100144, China)

Abstract: With the high-proportion integration of new energy into power grids, the new-type power system exhibits characteristics such as low system inertia, insufficient dynamic support capability, and weakened grid strength in local areas. Under such operating conditions, new-energy power stations adopting grid-following control are prone to weak-grid interactive instability, and the integration of grid-forming energy storage serves as a critical approach to improving the operational stability of new-energy power stations. Nevertheless, to further satisfy both grid response and stability requirements, existing studies have proposed that

收稿日期：2026-07-06；修改稿日期：2026-10-14。
第一作者：李明（1990—），男，硕士，高级工程师，主要研究方向为新能源及储能并网运行与检测技术研究，E-mail：1639873715@qq.com；**通信作者：**郑宗明，新能源开发利用与节能环保，E-mail：ffykxy@163.com。
引用本文：李明, 郑宗明, 裴建楠, 等. 含跟-构网储能的新能源场站建模及稳定性提升策略[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-13.
Citation：LI Ming, ZHENG Zongming, PEI Jiannan, et al. A Review of the Hybrid Control Models of GFL-GFM construction and the stable operation strategy[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-13.

energy-storage power stations be connected to new-energy power stations with dual control modes of grid-following and grid-forming, forming a hybrid configuration of "grid-following new energy + grid-following energy storage + grid-forming energy storage." This configuration is regarded as an important development trend for future new-energy power stations, and its modeling and stability-improvement strategies represent key research focuses at present. This paper first introduces the architecture of the new-type power system as well as grid-following and grid-forming control schemes, and reviews the composition of hybrid grid-following/grid-forming controlled stations, which are categorized by scale into standalone new-energy stations and station clusters. Next, modeling approaches and stability analysis methods for such hybrid-control stations are summarized. Stability improvement strategies are further classified into small-disturbance-oriented and large-disturbance-oriented strategies according to disturbance severity, and existing stability control methods are elaborated. Finally, conclusions and prospects for grid-following/grid-forming hybrid control modes are presented, highlighting key research directions ahead. This work can serve as a reference for subsequent studies on grid-following/grid-forming hybrid control schemes for "new energy + energy storage" stations, facilitate the construction of new-type power systems, and guarantee their safe and stable operation.

Keywords: New power systems; GFL-GFM hybrid control; Energy storage station; Stability improvement strategy

1 引 言

随着新能源和电力电子设备的大量接入，新型电力系统正由“强电网”向“弱电网”趋势改变[1]。传统采用锁相环与电网同步的跟网型控制逐步出现次/超同步振荡、暂态失稳等问题[2]。构网型控制凭借其主动电压支撑、频率调节的自组网能力，可在弱电网下稳定运行[3-4]，但其在强电网下易出现低频振荡现象，且响应速度与跟网型控制相比较慢[5]。因此，为构建在更宽范围电网强度及时间尺度下，同时具备稳定支撑能力和快速功率响应能力的新能源场站，部分学者提出新能源场站混合控制模式[6]，即在新能源场站接入跟-构网混合控制储能场站。

风、光等可再生能源广泛采用跟网型控制模式接入电网。跟网型控制响应快速，成本较低[7]。目前有部分研究针对跟网型控制在弱电网下特性进行研究，揭示其弱网下出现次/超同步振荡机理：文献[8]构建dq域下跟网型单输入单输出（SISO）模型，通过对控制参数的解耦，实现对跟网型变流器稳定性进行分析判定。文献[9-10]指出跟网型变流器的振荡主要由锁相环等非线性环节造成，锁相环带宽过大会导致系统发生小干扰失稳，并通过阻抗特性分析发现，跟网型变流器呈现“负电阻+电容特性”，锁相环闭环特征使跟网型变流器在其带宽内出现负阻尼。文献[11-12]指出跟网型控制在弱网下的同步失稳机理为锁相环在弱网下呈现负阻尼特性，抵消其他控制提供的正阻尼特性。跟网型控制中锁相环与电网的交互影响是引发其在弱网下振荡的主要原因，为适应新型电力系统的发展，构网型控制被提出。

构网型控制与跟网型控制主要区别在于同步方式不同，构网型控制通过模拟同法发电机特性，由功率环生成并网电压和频率进而主动并网，避免了弱电网下跟网型控制因锁相环导致的次/超同步振荡问题，具有良好的稳定性。已有部分学者对构网型变流器稳定性进行研究：文献[10]指出构网型变流器呈现“正电阻+电感”特征，该特征主要来源于无功控制环和电压外环，在无功功率环和电压外环的联合作用下，构网型变流器表现为“正电阻”特性。文献[13]分析构网型变流器通过引入交流电压控制环节使其在弱电网下呈现“低阻抗幅值+电感”特性，进而削弱了跟网型变流器控制环节次/超同步频段的负阻尼特性，可提升新能源场站再弱网下的稳定性。但构网型控制也存在缺陷，其在强

网工况下，与电网交互作用明显，存在低频振荡现象，且在大扰动下易出现暂态失稳及过流现象，损坏电力电子器件[14]同时，与跟网型控制相比，构网型控制响应速度相对较慢，不能很好符合新型电力系统兼顾支撑能力和快速响应的要求。

因此，为保障新型电力系统的安全稳定运行，部分学者提出在原基于跟网型控制的新能源场站中配备采用跟网型和构网型两类控制模式的储能设备，形成混合控制新能源场站结构，并围绕此结构展开研究探讨。其中，混合控制新能源场站的建模及稳定性判定方法、容量配比设置、振荡抑制等问题是目前研究热点。本文首先对新型电力系统及跟构网两种控制模式进行对比；其次，对跟构网混合控制建模方法进行梳理总结；最后，从混合系统稳定性提升角度，指出混合场站目前存在的问题，分别从小扰动和大扰动两方面对混合控制稳定性提升策略进行梳理总结。

2　新型电力系统结构及变流器控制模式

传统电力系统以火电机组为主要发电设备，主要由集中式的发电机、变压器、输电线路、配电网和负载组成，以大型火电机组为主要发电环节。新型电力系统在电源侧增加了太阳能、风能等大量新能源发电及储能设备，改变了传统电力系统的发电结构。由于新能源和电力电子设备的加入，新型电力系统更加注重变流器的优化控制，与传统电力系统对比如表1所示。

表1　传统电力系统与新型电力系统对比

Table 1　Comparison between the traditional power system and the new power system

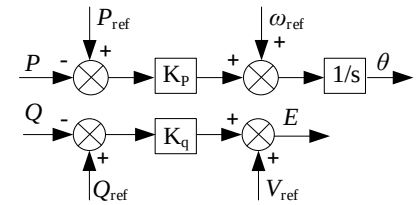
类别	传统电力系统	新型电力系统
能源结构	化石能源主导，集中式	可再生能源主导，分布式
控制模式	集中调度，源随荷动	协同控制，源荷互动
网络结构	集中式发电、长距离输电	分布式发电、多能互补、源网荷储协同
运行特性	高惯性、强阻尼、故障穿越能力强	低惯性、弱阻尼、并网稳定性差

传统电力系统中发电设备通过发电机进行能量转化，由原动机向同步发电机提供基础机械功率和能量，并通过释放转子动能提供阻尼和频率支撑。新能源及储能设备通过变流器并网，其并网特性取决于变流器的控制方式。目前新能源设备多采用跟网型控制（grid-following，GFL），通过锁相环使变流器输出功角跟随电网同步，缺乏自主支撑能力。这种结构在新能源渗透率较低的场景下尚可维持稳定运行，但在高比例新能源的新型电力系统中，传统控制模式的局限性日益凸显。为保障新型电力系统的安全稳定运行，构网型控制应运而生，其常见结构有：下垂控制、VSG控制、匹配控制、虚拟震荡控制四种[15]，如图1所示。以VSG控制为例，其物理本质为电力电子变流器的一种控制方式，通过控制回路对同步发电机转子特性和定子电气特性进行模拟，使变流器并网具备类似同步发电机的稳态调节特性。

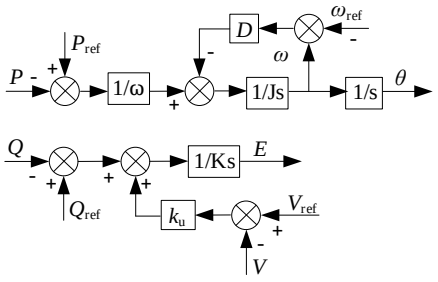
新型电力系统中，变流器直流侧发电电源根据运行特性可分为恒功率源（constant power source，CPS）和恒电压源（constant voltage source，CVS）两类[16-17]，构网型控制的有功给定值也对应有所区别，控制结构如图2所示。恒功率源保持输出功率恒定，典型设备为光伏、风机等新能源发电设备，其通常工作在最大功率点跟踪（MPPT）模式，向电网注入最大可用功率，此类新能源发电模式具备波动性，为保障并网电压稳定，构网型有功参考值由直流电压控制输出。而储能设备为恒电压源，其通过双向变流器维持母线电压稳定，并网时需根据电网运行状态提供恒定功率输出，对此，其有功参考为常数。

构网型和跟网型控制的主要区别在于同步方式不同，构网型控制通过有功功率环生成并网相角，实现与电网的主动同步。跟网型控制通过锁相环跟踪电网的相角[18]，属于跟随型并网方式。其同步方式结构对比如图3所示。其中V_{abc}和I_{abc}为并网点的电压和电流，P_{ref}为有功参考值，ω_{ref}为额定运行角频率，K_p为构网型下垂控制参数，L、C为滤波电感和滤波电容，R为网侧等效电阻，L_g为网侧等效电感。

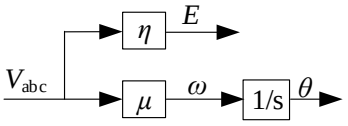
同步方式的不同导致二者功能在不同电网状态



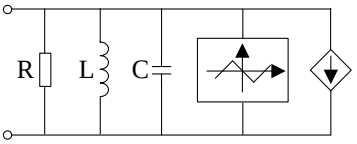
(a) 下垂控制



（b） VSG控制



（c） 匹配控制



（d） 虚拟震荡VOC

图1 构网型控制结构

Fig. 1 Grid-forming control structure

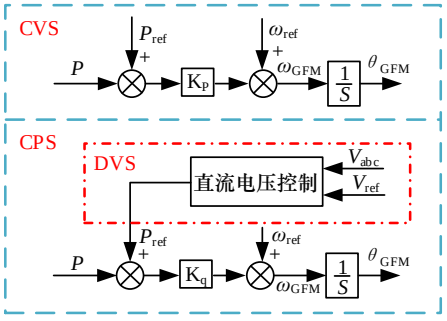


图2 构网型控制分类

Fig. 2 Classification of grid-forming control

下呈现互补特性。跟网型响应速度快，可快速响应电网需求，但不具备支撑能力；而构网型控制响应速度慢，但可对电网进行支撑，保障系统稳定运

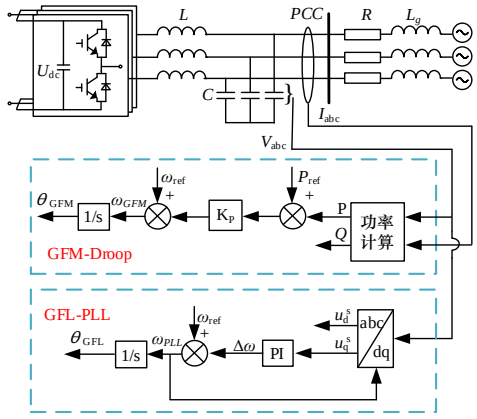


图3 跟网型和构网型同步方式对比

Fig. 3 Comparison of the synchronisation methods of GFL and GFM

行。同时，二者在不同电网状态下以及暂态性能也呈现互补特性，跟网型在强网下稳定性较强，构网型在弱网下稳定性较强；构网型在大扰动下易出现暂态过流问题，而跟网型虽无过流问题，但暂态稳定性较差，容易失稳。因此，在不同电网工况下，场站采用单一的控制模式难以满足稳定性和电网相应需求，需要储能以跟网型和构网型控制两种控制模式接入新能源场站中，形成混合控制模式，使新能源场站同时具备跟网和构网型控制的特性，提升新型电力系统的稳定性。

3 新能源场站结构及建模方法

3.1 混合控制结构

光伏、风电等新能源设备由于自身存在的随机性和波动性，不能很好响应电网支撑需求，且当新能源设备采用构网型控制时，会由于频繁的频率和电压调节对设备造成损害，减少使用寿命[19]。因此，目前新能源设备广泛采用跟网型控制模式并网。储能设备作为稳定电源，可提供并网辅助服务[20-22]，当其采用构网型控制模式并网时，可实现电网电压及频率调节、黑启动等功能[23]，保障系统的稳定运行；当储能采用跟网型控制模式时，可响应电网需求进行调峰调频。因此，“跟网型储能+构网型储能+跟网型新能源”的混合控制模式是未来新能源发展的主要趋势[24-26]。

新型电力系统中，跟-构网混合控制可按规模分为独立新能源场站和场站集群，独立场站混合控制模式为将原基于全跟网型控制的新能源设备部分

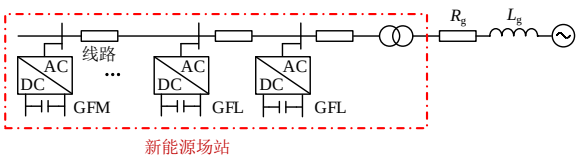


图4　新能源场站示意图

Fig. 4　Schematic diagram of the new energy station

改造成构网型控制，或在原场站中配备基于跟构网混合控制的储能设备，使其对外呈现“GFM+GFL”的特征，如图4所示。场站集群的混合控制模式指将多分散的新能源场站连接成一个整体，其中部分场站为对外呈现GFL特征，部分呈现GFM特征，如图5所示。

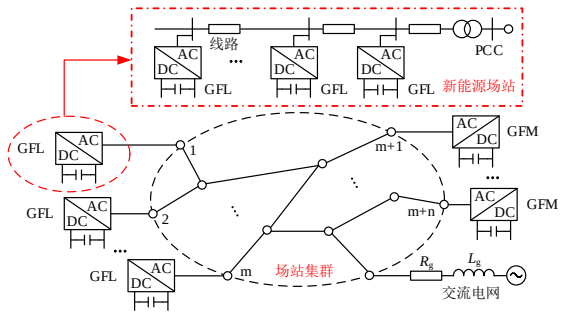


图5　新能源场站集群示意图

Fig. 5　Schematic diagram of new energy station clusters

不同规模的混合控制模式下，研究侧重点也有所区别。针对独立场站，如何对含有不同控制策略的场站进行建模，以及如何设定稳定性判据是研究基础，不同控制策略之间的耦合现象也不可忽略。场站集群更注重考虑新能源场站的容量配置规划对系统稳定性的影响，以及不同工况下场站间功率如何协同控制。但无论是独立场站还是场站集群，混合控制系统的稳定性影响因素、稳定性衡量指标、容量配比、协调控制方法及大扰动等工况下暂态稳定性问题是目前研究重点[27-28]。

3.2　跟构网混合场站建模

混合控制场站的稳定性分析主要聚焦于基于不同控制模式的新能源场站在并网时，场站内及场站集群间不同控制模式的耦合作用、输出功率分配对不同电网状态下的系统稳定性影响，以及场站在离网运行时，基于不同控制模式的新能源场站如何支撑孤岛微网的稳定运行。混合控制场站在并网时发生振荡，存在小扰动稳定性问题，最主要的原因为电力电子设备的运行状态与当前的电网强度不适配。目前虽已有大量文献对不同电网强度下单机并网设备的稳定性展开研究，但针对混合控制场站的稳定性研究目前还处于探索阶段。同时，单机模型的稳定性判据无法直接推广至多机混合系统[29-31]。

因此，如何建立不同控制结构下系统的小信号模型，及稳定性判据的选取、稳定性分析方法是目前混合控制系统稳定性的研究重点。新能源场站的建模方法主要有等值建模法、状态空间矩阵法、频域阻抗建模等，稳定性分析方法也针对时域和频域展开，时域分析法主要采用模态分析法，频域采用阻抗分析法。本节从建模方法的角度，对目前混合控制系统的稳定性分析研究现状进行梳理。

（1）状态空间法

文献[32]采用状态空间法建立孤岛微网全阶小信号模型，推导系统特征方程，采用特征值分析法及参与因子法对跟网和构网型变流器输出功率占比对孤岛微网的稳定性进行分析。但系统全阶状态空间模型状态变量较多，需要获得系统内全部参数，建模过程复杂，文献[33]采用主导特征模态对并网场站稳定性影响因素进行分析，首先分别建立跟网型和构网型控制并网状态空间模型，并通过计算混联系统的特征模态，对不同控制方法的参与因子进行分析，探讨不同电网强度下构网型变流器占比对混联系统稳定性的影响，但此方法对混合系统的稳定性分析存在局限性，无法进一步揭示内部控制参数字系统稳定性的影响。状态空间模型对系统的完整性依赖程度较高，混合控制系统组成复杂，因此时域状态空间建模方法并不能很好的适用于混联系统建模。文献[13]基于跟网和构网型变流器单机状态空间模型，计算出混合控制场站在并网点次同步频段的输出阻抗，进而分析系统在次同步频段特性。此方法虽然从频域角度分析不同控制环节对系统稳定性的影响，但局限于次同步频段。

（2）等值聚合法

部分文献采用阻抗网络聚合方法，建立混合控制系统小信号模型。文献[34]及文献[35]指出针对混合控制系统，可以对各类控制按数量进行倍乘模拟，进而对同类型控制进行多机等值建模,利用模块化的建模思维建立混联新能源场站小信号模型。基于此概念，文献[9][12]采用等效网络聚合的方法，建立新能源场站并网三端口阻抗模型，如图6

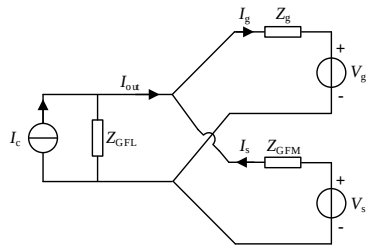


图6 新能源场站三端口等效模型

Fig. 6 Three-port equivalent model of new energy field station

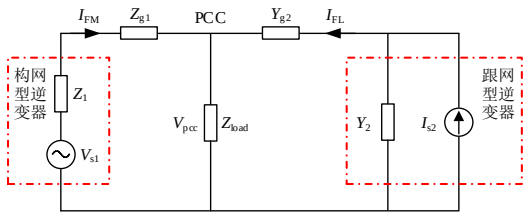


图7 微电网等效阻抗网络

Fig.7 Microgrid equivalent impedance network

所示。文献[9]基于单机设备的阻抗模型设定系统稳定性判据，采用Nyquist稳定性分析方法对系统稳定运行条件进行分析，基于Nyquist稳定性分析方法的稳定判据如式（1）和式（2）所示，当TF_1和TF_2同时满足极点位于左半平面时，即可判定系统稳定。文献[12]基于建立的三端口等效模型，给出跟构网并联的二阶等效阻抗，并采用等效阻抗变换方法将其转换为SISO系统，基于正网络阻尼判据判断系统的稳定性。文献[36]采用谐波线性化方法建立了单机序阻抗模型，基于单机模型，建立孤岛微电网等效阻抗网络模型，如图7所示。围绕阻抗网络模型，构建系统Nyquist稳定判据，探究跟网逆变器线路阻抗、输出电流等对系统稳态工作点的影响。

$$\begin{cases} TF_1 = I_{GFL} - \dfrac{V_{sys}}{Z_{GFL}} \\ TF_2 = \dfrac{1}{1 + Z_{sys}/Z_{GFL}} \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} V_{sys} = V_s + \dfrac{1}{1 + Z_g/Z_{GFM}}(V_g - V_s) \\ Z_{sys} = Z_{GFM}/Z_g \end{cases} \tag{2}$$

（3）阻抗分析法

上述文献建立的系统阻抗模型均以多机等值聚合方法，将同类型的变流器聚合为一台变流器，将混合控制系统等效为两台变流器并网结构。此方法未充分考虑系统中各变流器之间的相互影响，以及不同变流器之间的耦合作用，这将导致变流器阻抗模型不准确，进一步导致使用阻抗判据方法的判定不准确[37-38]。文献[39]建立混联系统的闭环动态特征方程，对多频段下的不同控制主导模态进行解耦，揭示多频段下系统主导振荡模态阻尼比与跟网/构网型支撑能力量化指标之间的关系，提出对混联系统支撑能力的量化评估指标。文献[11]采用节点导纳矩阵建模方法，考虑变流器之间的耦合作用，基于频域模态分析评估系统的失稳特性，揭示多控制环节带宽耦合作用下的交互失稳机理。针对孤岛微网系统，文献[31]基于端口阻抗和端口频域特性，考虑多机变流器之间的相互影响，推导并联系统相互作用回路，建立孤岛微电网小信号模型，利用盖尔圆定理对该系统的稳定性判据进行简化。

混合控制系统的准确建模是系统稳定性分析及控制的基础，目前学者从不同角度提出混合系统建模方法[40-41]，为直观对比上述提到的三种建模方法技术特性，明确不同场景下的最优建模方案，本文结合现有的研究成果，从建模复杂度、参数依赖性、适用场景、核心优势、局限性四个方面进行对比，具体如表2所示。

表2 三种建模方法特性对比

Table 2 Comparison of the features of three modeling methods

建模方法	建模复杂度	参数依赖性	适用场景	核心优势	局限性
状态空间法	高，需构建全阶模型，状态变量数量多	极高，需获取系统全部参数	适用于简单孤岛微网、单机或少机混合控制小规模场站	可精准分析系统特征模态、量化单一参数对稳定性的影响机理	适配复杂混联系统能力差，无法有效揭示多控制参数耦合影响
控制模式	低，基于模块化思路对同类型设备聚合等值	较低，仅需集群等效参数	适用于大规模新能源场站集群、并网型混合控制场站	建模效率高、计算量小，适配大规模场站集群建模，工程落地门槛低	忽略变流器间交互耦合作用，模型理想化程度高，精细化分析能力不足
网络结构	中等，无需全阶建模，基于端口阻抗特性建模	中等，对内部冗余参数依赖性低	适用于复杂混联场站、多机集群并网/孤岛微网系统	稳定性判定精度高，可量化场站支撑能力	复杂多机系统下稳定性判据推导难度大，理论分析复杂度高于等值聚合法，工程落地成本偏高

根据上述对比分析发现，现阶段各类建模方法均存在固有短板：状态空间法适配复杂混联系统能力不足，等值聚合法精度受限，阻抗分析法存在理论推导复杂、工程落地难度较高的问题，各类模型的通用性、精准度以及复杂工况下的实际工程适用性仍有待进一步考察验证与优化改进。未来可针对多场景适配、精度与效率平衡、多机耦合精准刻画等方向，优化混合控制场站建模体系，为后续稳定性提升策略研究与工程应用提供精准的模型支撑。

4　混合控制场站稳定优化控制

混合控制场站中不同控制策略间的交互作用、非线性过程、暂态特性等[42]，使系统运行过程十分复杂，混合控制场站的并网条件、容量配比、以及控制参数都会对场站运行稳定性带来较大的影响[13]。如何进一步对混合控制场站的稳定性进行优化，提升其在不同工况下的稳定性，是目前混联系统一大研究重点，本章分别从小扰动稳定性和大扰动稳定性提升策略两方面对目前研究现状进行梳理。

4.1　小扰动稳定性提升策略

在新能源场站中配备构网型控制设备虽可以改善的次/超同步振荡现象，但当外部条件发生改变以及随着并联设备增多导致交互现象明显增强时，仍易出现振荡现象，存在小扰动稳定性问题。对此，部分学者从混联系统控制结构优化、控制参数整定、跟-构网协调配置三方面对小扰动稳定性优化提升方法展开研究。

（1）控制结构优化

电力电子系统的小扰动同步稳定性主要受宽频控制动态影响，体现在跟网型设备的PLL和构网型设备的功率同步环中[11]。部分文献从振荡抑制机理角度，分别对构网型和跟网型控制结构进行改进。文献[9]对构网型控制抑制跟网型控制宽频振荡机理作用进行分析，揭示构网型控制抑制振荡是通过改变电网在次、超同步及高频段的阻抗特性，但其仅在弱网条件下进行分析，未进一步分析宽范围电网强度的情况。文献[43]分析新能源场站的阻抗特性受构网型储能和新能源机组的共同影响，提出储能主导率评判方法。分析得出构网型控制的主导频段有限，因此混联场站依然存在振荡风险。针对构网型控制弱主导频段下出现的振荡问题，提出一种自主阻抗适配控制，实现了在不同工况下通过构网型控制的自主阻抗调节，维持系统稳定性。文献[36]提出一种自适应虚拟阻抗设计方法，通过对跟网型控制结构进行改进，为系统提供阻尼补偿，进而提高跟网型控制系统阻尼，提升系统稳定性，控制结构如图8所示。其中，红框部分为附加的虚拟阻抗环节，R_v为虚拟阻抗，u_{dref}和u_{qref}为跟网型控制输出d轴、q轴电压参考值，i_{dref}和i_{qref}为跟网型控制输出d轴、q轴电流参考值e_x^*为改进控制输出调制电压。

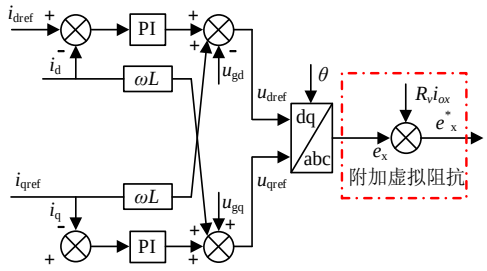


图8　跟网型逆变器改进控制框图

Fig. 8　Improved control block diagram for grid inverters

（2）　控制参数整定

上述文献通过控制结构的改进，提升混合控制场站小扰动稳定性。现有研究表明混合控制场站控制参数及不同控制环节的交互作用对场站稳定性会产生影响，因此部分学者通过对混合控制场站的控制参数进行调节[44]，以改善系统振荡特性。文献[45]通过提出一种跟网型控制器设计方法，通过降低闭环特征根对电压环等不确定参数的灵敏度，降低控制环参数的交互作用，解决参数交互影响带来的振荡问题。但控制环的参数调节范围有限，对振荡的抑制能力存在一定限度。通过调节参数提升稳定性的控制方法目前研究主要针对单变流器并网，考虑混合控制整体小扰动稳定性的参数优化研究目前正处于起步探索阶段。

（3）跟-构网协调配置

在新能源场站中，构网型控制配置的容量会改变场站整体的等效阻抗，进而影响系统的小扰动稳定性。因此，跟-构网混合控制系统中，构网型储能和跟网型新能源容量比例如何合理配置需要进一步探讨[20]。目前国内外已出台相关政策，对新能源场站配备的构网型储能占比的下限进行限制[42]。但

还需进一步考虑面对多种工况下，新能源场站的灵活性及经济型[46-48]。文献[9]和文献[49]对构网型储能容量影响进行定性分析，分析表明电流型控制逆变器的输出阻抗变化更容易影响PCC点电压，电压型控制逆变器的输出阻抗的增加有助于提高系统稳定性，并随着接入容量的增大，电网等效阻抗减少，改变在次、超同步频段及高频段的阻抗特性，降低新能源场站的振荡风险。基于定性分析，部分学者提出容量配置原则及优化方法，文献[39]协调多频段下混合控制系统各振荡模态阻尼比，提出一种面向系统小干扰稳定性提升的跟网/构网型协调优化配置方法。文献[24]提出在新能源场站中配备跟/构网切换模块，确定切换单元配置的最优比例。并将运行短路比作为判据，对切换边界进行整定，提出一种新能源场站优化配置方法。此控制方法具有灵活性，可应对外部条件变化对电网强度的影响。文献[50]对混合控制系统的稳定性进行定量分析，揭示变流器参数及不同控制模式的容量配备对混合系统稳定性的影响，以“混合系统支撑量”为评判系统稳定性指标，得出系统稳定条件下构网型变流器的临界容量占比。

（4）构网型储能规划

有研究表明除容量占比外，构网型控制在混合控制场站中放置位置也影响系统小扰动稳定性。文献[51]基于矩阵扰动理论，明确构网型控制接入场站位置在一定程度上影响电网强度，接入的位置不同，影响程度大小也不同。其通过的最小特征值的加权和“Kron-reduced Laplacian”矩阵的方法，以提升稳定性为目标，探究了构网型储能配置最优位置。

现有的跟-构网变流器配置方法，大多数未考虑系统的经济性，同时前提通常假设变流器运行工况一致、出力相同，未将场站内运行工况的多变性和差异性纳入配比优化的考虑中，同时未将储能设备的运行指标、经济性及使用寿命考虑在内。

小扰动失稳核心源于控制带宽失配、阻抗频段不匹配、多机控制耦合振荡，通过控制改善局部阻尼、配比以及布局优化重构系统阻抗，可有效抑制弱网下场站振荡问题。目前采用的优化方法从内而外依次为设备层优化：结构改进、参数整定，场站层优化：跟构网容量协调，集群层布局优化：储能接入位置优化，各层面分别针对性解决小扰动稳定性问题，形成互补的优化体系，但目前技术仍存在明显的局限，主要表现为多数控制优化方法工况适配性单一，缺乏多工况兼容一体化设计。未来小扰动稳定性提升策略应逐步实现从单一设备阻尼优化，向多主体协同联合优化发展，从单一稳定目标向稳定性、经济性兼顾的多目标协同优化方向演进。

4.2 大扰动稳定性提升策略

上一节指出构网型变流器容量占比及接入位置影响系统小扰动稳定性，除此之外，混合控制场站中构网型和跟网型变流器功率的输出调整对系统在大扰动下的稳定性也具备提升作用。

（1）暂态功率协调控制

文献[52]建立包含构网型储能的新能源场站简化电路拓扑，拓扑图如图9所示，基于简化的场站拓扑图建立了大扰动下跟-构网混合控制场站的暂态模型，推导出的系统传递函数，如式(3)所示。其中$P^*_{GFM_k}$为场站中第k台构网型储能变流器实际输出有功功率，P_{ref_k}为第k台构网型储能变流器有功参考值，u^*_{PCCq}为PCC点q轴电压参考值。基于建立的暂态模型对场站暂态稳定性进行分析，分析结果表明，为保持场站稳定性，在发生加速型失稳时，构网型储能需要降低有功功率，发生减速型失稳时，需要增大有功功率的输出。并提出一种构网型储能自适应暂态支撑方法，此控制策略可根据电网工况，自适应调整输出功率。文献[53]建立了混合储能场站的暂态稳定交互数学模型，主要分析了跟、构网型变换器对于彼此静态工作点的影响，并通过分析得到增大跟网型变换器端电流可以增强构网型变换器暂态稳定性的结论。文献[42]提出，在大扰动工况下，混合控制场站失稳的原因主要是构网型控制功角动态变化慢，跟网型控制功角动态变化快，进而之间出现“频率牵引效应”。基于构建的大扰动下混合控制场站的暂态模型，发现增大储能容量能够提升频率牵引的可能性，提升系统稳定性。

$$\begin{cases}\delta_{GFL}=\dfrac{1}{s}\cdot\left(k_p+k_i\cdot\dfrac{1}{s}\right)\cdot u^*_{PCCq}\\ \delta_{GFM_k}=\dfrac{1}{s}\cdot\dfrac{1}{D_{pk}+J_{pk}\cdot s}\cdot\left(P_{ref_k}-P^*_{GFM_k}\right)\end{cases}\tag{3}$$

（2）控制参数设计

针对大扰动下单机变流器并网的暂态机理及其控制方法目前已有大量研究[54]，但混合场站中如何

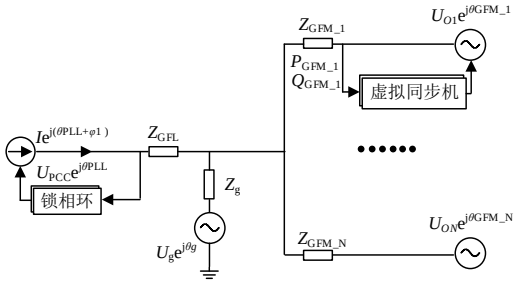


图9　含构网型储能的新能源场站简化电路拓扑

Fig. 9　Simplified circuit topology of new energy stations with grid-based energy storage

通过不同控制策略间的协同控制及参数设计方法提升系统在大扰动下的稳定性目前仍在探索。文献[55]建立了大扰动下混合控制场站的暂态数学模型，采用空间矢量图示法和相平面法分析不同控制参数对暂态稳定性的影响规律，据此给出混合控制场站中不同控制方法的设计原则。文献[56]提出一种自适应虚拟阻抗控制策略，在跟网型设备中应用类似于构网型控制的倒下垂控制，实现在混合控制场站中不同控制分配比例下的无功功率均分。文献[57]在构网型控制环中引入反馈环节，在大扰动下调整阻尼和惯性系数，以提升大扰动下的稳定性。

（3）集中控制

上述文献是从变流器层面进行暂态控制，有部分研究从场站系统层级展开协同控制方法研究[58]，如图10所示。文献[59]提出一种共享储能协同控制策略，该控制策略考虑了构网型储能自主频率支撑特性和跟网型控制受控调节特性。通过储能EMS的控制，可以实现在大扰动工况下，构网型通过毫秒级响应对频率和电压进行支撑。扰动的频率偏差、电池荷电状态等信息传输到EMS控制器，EMS进一步调控跟网型储能参与后期辅助调频阶段，实现了多时间尺度的协调控制。

目前大扰动稳定性控制方法主要可归纳为暂态功率协调控制、控制参数自适应设计、系统集中协同控制三个层面，构建了从底层变流器暂态特性优化、中层控制参数适配调整到顶层场站多主体协同支撑的完整技术层级。大扰动稳定性控制核心目标为实现故障工况下的快速功率重构与功角动态匹配，有效解决跟、构网变流器动态响应特性差异引发的频率牵引、暂态功角失稳等关键问题，保障故障扰动下场站的暂态安全运行。然而，根据目前研究分析表明，当前大扰动稳定控制研究仍存在明显

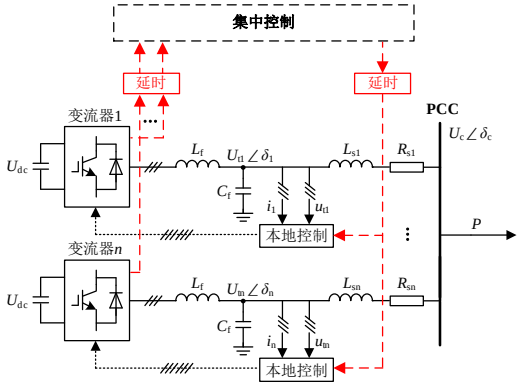


图10　系统层级协同控制

Fig. 10　Collaborative control at the system level

局限，现有控制策略大多针对特定故障场景定制设计，工况适配通用性不足，研究多集中于单一场站的设备层级控制，面向多场站集群的跨主体、多维度协同暂态控制体系仍较为欠缺。

5　结　论

新型电力系统的安全稳定运行离不开构网型控制的支撑和调节能力，在新能源场站中配备构网型设备形成跟-构网混合控制场站是目前新型电力系统发展的主流趋势。现阶段研究已从混合控制模式的建模分析、稳定性评判指标、变流器之间的协调配置、在不同工况下的运行控制方式等几方面进行展开，本文对混合控制场站稳定性提升策略进行梳理总结，从以下几点对混合控制模式的未来发展进行展望：

（1）工况自适应的动态配比与精准适配配置研究。现有研究多采用固定构网容量配比与恒定运行工况假设，仅适用于单一稳态场景，难以适配电网强度、新能源出力及运行工况动态切换特征。后续需突破传统静态配置思路，建立电网强度-场站工况-稳定裕度动态耦合适配机制，针对独立场站、场站集群、孤岛微网差异化拓扑特性，实现构网设备容量、接入位置与控制参数的动态协同优化，兼顾系统大小扰动稳定性、运行经济性与设备寿命，实现多目标协同最优配置。

（2）多扰动兼容的一体化协同控制体系构建。当前混合控制策略存在明显工况割裂问题，小扰动稳态抑振与大扰动暂态支撑控制相互独立，多层级控制缺乏联动。未来需打破大小扰动分立研究范式，构建稳态小扰动阻尼自适应调控、故障大扰动

功率快速重构的一体化控制架构，打通设备、场站、系统调度多层级协同通道，有效解决多控制带宽耦合、多设备交互失稳问题，实现混合场站全工况稳定运行管控。

（3）计及储能全运行状态的精细化耦合控制研究。现有协调控制研究多简化储能运行特性，仅粗略考虑SOC约束，忽略充放电切换特性、电池损耗等实际边界，理论策略工程适配性较差。后续需将储能动态运行状态与全生命周期约束深度融入混合控制逻辑，量化储能工况对系统振荡模态、阻抗特性及暂态支撑能力的影响，构建适配储能实际运行特性的精细化协调控制策略，提升控制方案的工程落地性与工况适配性。

参 考 文 献

[1] 常永康,李明,张兴,等.跟/构网异构新能源场站分层协同稳定控制策略[J/OL].电力系统自动化,1-18[2026-08-08].
Chang Yongkang, Li Ming, Zhang Xing, et al. Hierarchical Cooperative Stability Control Strategy for Heterogeneous Renewable Energy Power Stations with Grid-following and Grid-forming Converters[J/OL].Automation of Electric Power Systems, 1-18[2026-08-08].

[2] 李建林,卢冠铭,游洪灏,等.基于改进LADRC的构网型储能调频控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2024,52(15):142-154.
Li Jianlin, Lu Guanming, You Honghao, et al. Frequency regulation control strategy for grid-forming energy storage based on improved LADRC[J]. Power System Protection and Control, 2024,52(15):142-154.

[3] 陈嘉悦,乔星宇,张建伟,等.基于模糊控制的跟/构网型储能混联系统的协调控制策略[J/OL].高电压技术,1-16[2026-08-08].
Chen Jiayue, Qiao Xingyu, Zhang Jianwei, et al. Fuzzy Control-Based Coordinated Control of Hybrid Grid-Following/Forming Energy Storage Systems [J/OL]. High Voltage Engineering, 1-16 [2026-08-08].

[4] 赵清华,李明,李晓龙,等.构网型与跟网型储能在弱电网中的暂态响应特性及并网性能研究[J].高压电器,2025,61(11):22-33+44.
Zhao Qinghua, Li Ming, Li Xiaolong, et al. Study on Transient Response Characteristics and Grid-connection Performance ofGrid-forming and Grid-following Energy Storage in Weak Grids [J]. High Voltage Apparatus, 1-16[2026-08-08].

[5] 周月红,张科峻,员召峰,等.跟/构网型新能源混合微网系统协调优化控制[J].电力电子技术,2025,59(9):81-87.
Zhou Yuehong, Zhangkejun, Yuan Shaofeng, et al. Coordinated Optimization Control of Grid-following/forming New Energy HybridMicrogrid System[[J]. Power Electronics,2025,59(9):81-87.

[6] 杨胜,吴超,王勇,等.基于阻尼能量可视化的跟/构网混合系统暂态稳定分析和优化[J/OL].电力系统自动化,1-14[2026-08-08].
Yang Sheng, Wu Chao, Wangyong, et al. Transient Stability Analysis and Optimization of Grid-following/Grid-forming Hybrid Systems Based on Damping Energy Visualization[J]. Automation of Electric Power Systems,1-14[2026-08-08].

[7] 孙正龙,郝舒宇,李明达,等.含构网型双馈风电的电力系统低频振荡能量结构分析方法[J/OL].电工技术学报,1-16[2024-12-29].
Sun Zhenglong, Hao Shuyu, Li Mingda, et al. Low Frequency Oscillation Analysis Method for Grid-Forming Doubly-Fed Wind Power Systems Based on Energy Structures[J/OL]. TRANSACTIONS OF CHINA ELECTROTECHNICAL SOCIETY, 1-16[2024-12-29].

[8] 高家元,黄帅,姜飞,等.弱电网下基于比例权重的控制环参数自适应调整并网逆变器稳定性提升方法[J/OL].电工技术学报,1-15[2024-12-24].
Gao Jiashuai, Huang Shuai, Jiang Fei, et al. Stability Improvement Method of Grid-Connected Inverter Based on Proportional Weight Control Loop Parameters Adaptive Adjustment under Weak Grid[J/OL]. TRANSACTIONS OF CHINA ELECTROTECHNICAL SOCIETY, 1-15[2024-12-24].

[9] 雷雨,李光辉,王伟胜,等.跟网型和构网型新能源并网控制阻抗对比与振荡机理分析[J/OL].中国电机工程学报,1-15[2024-12-20].
Lei Yu, Li Guanghui, Wang Weisheng, et al. Comparison of Impedance Characteristics and Oscillation Mechanism for Grid Following and Grid forming Renewable Energy[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-15[2024-12-20].

[10] 刘朋印,谢小荣,李原,等.构网型控制改善跟网型变流器次/超同步振荡稳定性的机理和特性分析[J].电网技术,2024,48(03):990-997.
Liu Pengyin, Xie Xiaorong, Li Yuan, et al. Mechanism and Characteristics of Grid-forming Control for Improving Sub/Super Synchronous Oscillation Stability of Grid-following-based Grid-connected Converter[J]. Power System Technology, 2024, 48(03): 990-997.

[11] 宗皓翔,张琛,鲍颜红,等.跟网型与构网型并网变换器系统的频域建模与同步视角交互稳定机理[J/OL].上海交通大学学报,1-22[2024-12-19].
Zong Haoxiang, Zhang Chen, Bao Yanhong, et al. Frequency-domain Modeling and Synchronization Perspective Interaction Mechanism of GFL-GFM Converter System[J/OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1-22[2024-12-19].

[12] 郭小龙,杨桂兴,张彦军,等.构网型储能与跟网型光伏混联发电系统阻抗建模与小扰动稳定机理分析[J/OL].电气工程学报,1-10[2024-12-20].
Guo Xiaolong, Yang Guixing, Zhang Yanjun, et al. Impedance Modeling and Small-signal Stability Mechanism Analysis of Grid-forming Energy Storage and Grid-following PV Hybrid Power Generation System[J/OL]. JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING, 1-10[2024-12-20].

[13] 张斌,张学广,徐殿国.构网型与跟网型变流器混联并网系统配比关键影响因素分析[J/OL].电力系统自动化,1-21[2024-12-20].
Zhang Bin, Zhang Xueguang, Xu Dianguo. Analysis on Key Influence Factors of Ratio of Grid-forming and Grid-following Converters in Hybrid Grid connected System[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 1-21[2024-12-20].

[14] L. Harnefors, J. Kukkola, M. Routimo, M. Hinkkanen and X. Wang, "A Universal Controller for Grid-Connected Voltage-Source Converters," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 9, no. 5, pp. 5761-5770, Oct. 2021.

[15] 李建林,丁子洋,游洪灏,等.构网型储能支撑新型电力系统稳定运行研究[J].高压电器,2023,59(07):1-11.
Li Jianlin, Ding Ziyang, You Honghao, et al. Research on Stable Operation of New Power System Supported by Grid-forming Energy Storage System[J]. High Voltage Apparatus, 2023,59(07): 1-11.

[16] 邱晓燕,林号缙,周毅,等.基于混合同步控制的构网型逆变器并网系统小扰动稳定性分析[J].电力自动化设备,2023,43(09):172-178+185.
Qiu Xiaoyan, Lin Haojin, Zhou Yi, et al. Study on small-signal stability of grid-connected grid-forming inverter system based on hybrid-synchronous control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023,43(09):172-178+185.

[17] 吕思卓,郑超,姜静雅.基于功率指令切换的双级式构网型光伏故障穿越控制策略[J].电网技术,2024,48(03):1281-1291.
Lv Sizhuo, Zheng Chao, Jiang Jingya. Fault Ride-through Control Strategy for Double-stage Grid-forming Photovoltaic Based on Power Order Switching[J]. Power System Technology, 2024, 48 (03):1281-1291.

[18] L. Harnefors, M. Schweizer, J. Kukkola, M. Routimo, M. Hinkkanen and X. Wang, "Generic PLL-Based Grid-Forming Control," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 2, pp. 1201-1204, Feb. 2022.

[19] 李建林,姜晓霞,金翼,等."构网型储能系统关键技术及工程化应用"专题特约主编寄语[J].热力发电,2024,53(08):3-4.
Li Jianlin, Jiang Xiaoxia, Jin Yi, et al. "Key technology and engineering application of grid-forming energy storage system" Message from the Thematic Contributing Editor[J]. Thermal Power Generation,2024,53(08):3-4.

[20] 李亚楼,赵飞,樊雪君.构网型储能及其应用综述[J/OL].发电技术,1-13[2024-12-20].
Li Yalou, Zhao Fei, Fan Xuejun. Power Generation Technology[J/OL]. Power Generation Technology, 1-13[2024-12-20].

[21] 高帆,包道日娜,赵明智,等.多场景规划下混合储能对风光耦合出力波动的平抑方法[J/OL].电工技术学报,1-13[2025-01-02].
Gao Fan, Bao daorina, Zhao Mingzhi, et al. Smoothing Method of Wind-solar Coupled Output Fluctuations by Hybrid Energy Storage under Multi-scenario Planning[J/OL]. ALHIOS IVOINHOILOHLOIT9 VNIHO HO SNOILOVSNVHL, 1-13[2025-01-02].

[22] 张祥宇,邵孜建,付媛.风储并网发电系统的虚拟多段协同调速与频率安全支撑技术[J/OL].电工技术学报,1-17[2025-01-02].
Zhang Xiangyu, Shao Zijian, Fu Yuan. Virtual Multi-stage Coordinated Speed Regulation and Frequency Safety Support Technology of Wind-storage Grid-Connected Power Generation System[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1-17[2025-01-02].

[23] 李建林,康靖悦,辛迪熙,等.新型电力系统下构网需求储能的双层优化选址方法研究[J].热力发电,2024,53(08):20-29.
Li Jianlin, Kang Jingyue, Xin Dixi, et al. Research on double-layer optimization site selection method for energy storage with grid-forming demand in new power system[J]. THERMAL POWER GENERATION, 2024,53(08):20-29.

[24] 梁军,李传玥.并网换流器控制模式发展及弱电网稳定研究[J].电网技术,2022,46(10):3703-3712.
Liang Jun, Li Chaunyue. Recent Development of Grid-connected Inverters and Weak-grid Stabilization[J]. Power System Technology, 2022,46(10):3703-3712.

[25] 刘朋印,刘辉,吴林林,等.满足全运行域振荡约束的跟网-构网组合控制及优化配置[J].电力系统自动化,2024,48(12):139-146.
Liu Pengyin, Liu Hui, Wu Linlin, et al. Grid-following and Grid-forming Combined Control and Optimization Configuration to Satisfy Oscillatory Constraints Across Whole Operating Region [J]. Automation of Electric Power Systems,2024,48(12):139-146.

[26] 郭佳俊,徐志,翟保豫,等.构网型新能源-储能联合并网系统LVRT控制策略研究[J].电气传动,2024,54(07):58-65+72.
Guo Jiajun, Xu Zhi, Zhai Baoyu, et al. Research on LVRT Control Strategy of Combined Grid-connected System with New Energy-Energy Storage Based on Grid-forming Converters[J]. ELECTRIC DRIVE, 2024,54(07):58-65+72.

[27] 李明,常永康,毛永涛,等.高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网型稳定控制技术综述与展望[J].高电压技术,2024,50(11):4773-4788.
Li Ming, Chang Yongkang, Mao Yongtao, et al. Review and Prospect of Stability Control Techniques for Grid-following/Grid-forming Converters in High-penetration Renewable Energy Generation[J]. High Voltage Engineering, 2024,50(11):4773-4788.

[28] L. Huang, H. Xin, Z. Wang, L. Zhang, K. Wu and J. Hu, "Transient Stability Analysis and Control Design of Droop-Controlled Voltage Source Converters Considering Current Limitation," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 1, pp. 578-591, Jan. 2019.

[29] H. Deng, Y. Qi, J. Fang, Y. Tang and V. Debusschere, "A Robust Low-Voltage-Ride-Through Strategy for Grid-Forming Converters Based on Reactive Power Synchronization, " in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 38, no. 1, pp. 346-357, Jan. 2023.

[30] 王龙悦,胡鹏飞,于彦雪,等.基于混合同步控制的构网型变流器不对称故障下的暂态稳定分析[J/OL].电力系统自动化,1-15[2024-12-24].
Wang Longyue, Hu Pengfei, Yu Yanxue, et al. Transient Stability Analysis under Asymmetric Faults in Grid -Forming Converters with Hybrid Synchronization Control[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 1-15[2024-12-24].

[31] 尚佳宇,虞家骏,刘增,等.构网型与跟网型逆变器并联系统精确频域建模及简化稳定判据[J/OL].电力系统自动化,1-23[2024-12-20].
Shang Jiayu, Yu Jiajun, Liu zeng, et al. Grid-following Inverter System Accurate Frequency-domain Modeling and Simplified Stability Criterion for Parallel Grid-forming and Grid-following

Inverter System[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 1-23[2024-12-20].

[32] 李翼翔,田震,唐英杰,等.考虑构网型与跟网型逆变器交互的孤岛微电网小信号稳定性分析[J].电力自动化设备,2022,42(08):11-18.
Li Yixiang, Tian Zhen, Tang Yingjie, et al. Small-signal stability analysis of island microgrid considering interaction between grid-forming converter and grid-following converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022,42(08):11-18.

[33] 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(08):3282-3294.
Wang Dongze, Sun Haishun, Huang Biyue, 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(08):3282-3294.

[34] 周于清,姚伟,宗启航,等.基于运行短路比的新能源场站中跟/构网可切换单元的最优配置方法[J].电网技术,2024,48(03):1091-1104.
Zhou Yuqing, Yao wei, Zong Qihang, et al. Optimal Configuration of Grid-following/Grid-forming Switchable Units in New Energy Stations Based on Operating Short-circuit Ratio[J]. Power System Technology, 2024,48(03):1091-1104.

[35] 罗澍忻,韩应生,余浩,等.构网型控制在提升高比例新能源并网系统振荡稳定性中的应用[J].南方电网技术,2023,17(05):39-48.
Luo Shuxin, Han Yingsheng, Yu Hao, et al. Application of Grid-forming Control in Improving Oscillation Stability of Power System with High-proportion Renewable Energy Grid Integration [J]. Southern Power System Technology,2023,17(05):39-48.

[36] 胡宇飞,田震,查晓明,等.构网型与跟网型变流器主导孤岛微网阻抗稳定性分析及提升策略[J].电力系统自动化,2022,46(24):121-131.
Hu Yufei, Tian Zhen, Cha Xiaoming, et al. Impedance Stability Analysis and Promotion Strategy of Islanded Microgrid Dominated by Grid-connected and Grid-following Converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(24):121-131.

[37] 薛世伟.多时间尺度电压波动抑制的构/跟网型无功资源配置研究[D].燕山大学,2022.
Xue Shiwei. RESEARCHI ON REACTIVE POWER RESOURCEAL LOCATION OF GRID FORMING/FOLLOW INGPREVENTING MULTI-TIMESCALE VOLTAGE FLUCTUATION[D]. Yanshan University, 2022.

[38] 盛李龙,许津铭,李威,等.弱电网下跟/构网型变流器并联系统的阻抗频率耦合及稳定性分析[J/OL].电力系统自动化,1-14[2024-12-20].
Sheng Lilong, Xu Jinming, Li Wei, et al. Impedance Frequency Coupling and Stability Analysis of Parallel System of Grid-following and Grid-forming Converters in Weak Grid[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 1-14[2024-12-20].

[39] 余光正,胡越,刘晨曦,等.含跟网/构网型混联多馈入系统协调优化配置方法研究[J/OL].中国电机工程学报,1-15[2024-12-19].
Yu Guangzheng, Hu Yue, Liu Chenxi, et al. Research on the Coordinated Optimization Configuration Method for Hybrid Multi-infeed Systems with Grid-Following or Grid-Forming[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-15[2024-12-19].

[40] Z. Guo, X. Zhang, M. Li, J. Wang, X. Fu and F. Han, "Stability Analysis and Capacity Distribution of Multi-paralleled Current-Controlled Inverters and Voltage-Controlled VSGs Grid-Connected System," 2021 IEEE 12th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Chicago, IL, USA, 2021, pp. 1-8.

[41] 白晨曦,何汰航,李夏岩,等.基于稳定流形法的构网型逆变器暂态稳定性分析[J].高电压技术,2024,50(08):3705-3714.
Bai Chenxi, He Taihang, Li Xiayan, et al. Analysis of the Transient Stability of the Grid-forming Inverters Based on Stable Manifold Method[J]. High Voltage Engineering, 2024,50(08):3705-3714.

[42] 张宇,张琛,鲍颜红,等.电网短路故障下风电场内跟-构网电源瞬时频率交互影响机理[J/OL].上海交通大学学报,1-22[2024-12-20].
ZhangYu, ZhangChen, Bao Yanhong, et al. Transient Frequency Interaction Between Grid-Following and Grid-Forming Sources in Windfarm Under Severe Grid Fault[J/OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1-22[2024-12-20].

[43] 吴家杰,陈新,张东辉,等.构网型储能变换器在新能源接入场景下并网稳定性分析及提升策略[J].中国电机工程学报,2024,44(23):9341-9354.
Wu Jiajie, Chen Xin, Zhang Donghui, et al. Grid-connected Stability Analysis and Improvement Strategy for Grid-forming Energy-Storage System in New Energy Access Scene[J]. Proceedings of the CSEE, 2024,44(23):9341-9354.

[44] 伍文华,陈燕东,周乐明,等.虚拟同步发电机接入弱电网的序阻抗建模与稳定性分析[J].中国电机工程学报,2019,39(06):1560-1571+1853.
Wu Wenhua, Chen Yandong, Zhou Leming, et al. Sequence impedance Modeling and Stability Analysis for Virtual Synchronous Generator Connected to the Weak Grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019,39(06):1560-1571+1853.

[45] 孙鹏.不同同步方式新能源并网系统小干扰稳定性分析及其控制技术研究[D].重庆大学,2022.
Sun Peng. Small Signal Stability Analysis and Control Technology of Renewable Energy Grid-connected System With Different Synchronous Modes[D]. Chongqing University, 2022.

[46] F. Zhao et al., "Control Interaction Modeling and Analysis of Grid-Forming Battery Energy Storage System for Offshore Wind Power Plant," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 37, no. 1, pp. 497-507, Jan. 2022.

[47] S. D. Tavakoli et al., "Grid-Forming Services From Hydrogen Electrolyzers," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 14, no. 4, pp. 2205-2219, Oct. 2023.

[48] HE X Q, GENG H. Transient stability of power systems integrated with inverter-based generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(1): 553–556.

[49] 庆宏阳.储能系统逆变器并网谐波抑制与多模式平滑稳定运行研究[D].燕山大学,2023.
Qing Hongyang. RESEARCH ON GRID-CONNECTED HARMONICSUPPRESSION AND MULTIMODE SMOOTH ANDSTABLE OPERATION OF ENERGY STORAGESYSTEM INVERTERS[D]. Yanshan University, 2023.

[50] 王冠淇,裴玮,熊佳旺,等.跟网型和构网型变流器混合系统稳定性分析方法[J/OL].中国电机工程学报,1-16[2024-12-20].

WANG Guanqi, Pei Wei, Xiong Jiawang, et al. Stability Analysis Method for Hybrid Systems of Grid-Following and Grid-Forming inverters[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-16[2024-12-20].

[51] C. Yang, L. Huang, H. Xin and P. Ju, "Placing Grid-Forming Converters to Enhance Small Signal Stability of PLL-Integrated Power Systems," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 36, no. 4, pp. 3563-3573, July 2021.

[52] 徐晨航,邹志翔,陈武,等.面向暂态稳定性提升的构网型储能系统自适应控制方法[J].电网技术,2024,48(11):4658-4668.
Xu Chenhang, Zou Zhihang, Chen Wu, e al. Grid-Forming Based Energy Storage System Adaptive Control for Transient Stability Enhancement[J]. Power System Technology, 2024, 48(11): 4658-4668.

[53] M. Li, X. Quan, Z. Wu, W. Li, L. Zhu and Q. Hu, "Modeling and Transient Stability Analysis of Mixed-GFM-GFL-Based Power System," 2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), Nanjing, China, 2021, pp. 2755-2759.

[54] 任先成,李尚志,李英彪,等.有和无电流环控制构网型VSC暂态建模与特性对比分析[J/OL].上海交通大学学报,1-27[2024-12-20].
Ren Xiancheng, Li Shangzhi, Li Yingbiao, et al. Transient Modeling and Characteristic Comparative Analysis of Grid-Forming VSC with and without Current Control[J/OL]. Journal of Shanghai Jiao tong University, 1-27[2024-12-20].

[55] 黄森,姚骏,钟勤敏,等.含跟网和构网型新能源发电单元的混联电力系统暂态同步稳定分析[J].中国电机工程学报,2024,44(21):8378-8392.
Huang Sen, Yao Jun, Zhong Qinmin, et al. Transient Synchronization Stability Analysis of Hybrid Power System With Grid-Following and Grid-Forming Renewable Energy Generation Units[J]. Proceedings of the CSEE, 2024,44(21):8378-8392.

[56] 邱晓燕,闫幸,周毅,等.基于自适应虚拟阻抗的构网型与跟网型逆变器主导微网系统无功功率均分控制策略[J].电力建设,2024,45(01):22-32.
Qiu Xiaoyan, Yan Xing, Zhou Yi, et al. Reactive Power Sharing Control Strategy for Microgrids Dominated by Grid Forming and Grid -Following Inverters Based on Adaptive Virtual Impedance [J]. Electric Power Construction, 2024,45(01):22-32.

[57] GENG H, LIU L, LI R. 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.

[58] 黄萌,舒思睿,李锡林,等.面向同步稳定性的电力电子并网变流器分析与控制研究综述[J].电工技术学报,2024,39(19):5978-5994.
Huang meng, Shu Sirun, Li Xilin, et al. A Review of Synchronization-Stability-Oriented Analysis and Control of Power Electronic Grid-Connected Converters[J]. TRANSACTIONS OF CHINA ELECTROTECHNICAL SOCIETY, 2024, 39(19): 5978-5994.

[59] 巩宇,周子欣,黄贤淼,等.考虑构网型变流器自主支撑特性的共享储能协同控制策略[J/OL].华北电力大学学报(自然科学版),1-12[2024-12-20].
Gong Yu, Zhou Zixin, Huang Xianmiao, et al. Shared Energy Storage Cooperative Control Strategy Considering Autonomous Support Characteristics of Grid-forming Converters[J/OL]. Journal of North China Electric Power University, 1-12[2024-12-20].