

DOI: 10.19666/j.rlfed.202406165

构网型储能支撑高比例新能源 并网稳定运行技术

李明, 亚夏尔·吐尔洪, 郑云平, 兰承龙
(国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

[摘要] 构网 (grid-forming, GFM) 型储能技术可构建起支撑大电网稳定运行的电压源, 是支撑高比例新能源并网稳定运行的一个有效手段。基于此, 分析了 GFM 型储能支撑高比例新能源并网稳定运行机理, 根据 GFM 型储能技术原理和特性, 对比分析了 5 种常用的提升电网稳定性技术。给出一种考虑多时变参数的 GFM 型储能系统模型搭建思路, 并提出 GFM 型储能技术支撑高比例新能源并网方案以及海量 GFM 型储能设备并网振荡产生机制分析方法。同时, 研究了基于信号注入的系统阻抗动态辨识技术, 进而提出海量 GFM 型储能设备并网系统阻抗重构技术路线。

[关键词] 构网型储能; 高比例新能源; 并网稳定; 并网振荡

[引用本文格式] 李明, 亚夏尔·吐尔洪, 郑云平, 等. 构网型储能支撑高比例新能源并网稳定运行技术[J]. 热力发电, 2025, 54(3): 59-68. LI Ming, YAXAR·Turgun, ZHENG Yunping, et al. Stable operation technology for high proportion of new energy connected to power grid supported by grid-forming energy storage[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(3): 59-68.

Stable operation technology for high proportion of new energy connected to power grid supported by grid-forming energy storage

LI Ming, YAXAR·Turgun, ZHENG Yunping, LAN Chenglong
(Electric Power Science and Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

Abstract: The technology of grid-forming energy storage can form a voltage source, which can support the stable operation of large power grids. The technology of grid-forming energy storage is an effective means to support the stable operation of high proportion of new energy connected to the grid. Based on this, the operation mechanism of grid-forming energy storage to support the stability of high proportion of new energy connected to the grid is analyzed. According to the principle and characteristics of grid-forming energy storage technology, five commonly used technologies to improve the stability of the grid are compared and. A model building idea of grid-forming energy storage system considering multi-time-varying parameters is proposed. Moreover, the scheme of grid-forming energy storage technology supporting high proportion of new energy grid-connected and the mechanism analysis of massive grid-forming energy storage equipment grid-connected oscillation is proposed. In addition, the system impedance dynamic identification technology based on signal injection is studied, and then the impedance reconstruction technical route of massive grid-forming energy storage equipment grid-connected system is proposed.

Key words: grid-forming energy storage; high proportion of new energy; grid-connected stability; grid-connected oscillation

随着“沙戈荒”地区第一批大型风光基地的大规模并网, “三北地区”成为 2023 年新能源增量的

收稿日期: 2024-06-04 网络首发日期: 2024-12-09

基金项目: 2024 年国网新疆公司科技项目 (SGXJDK00XXJS2400110)

Supported by: Technology project of State Grid Xinjiang Company in 2024 (SGXJDK00XXJS2400110)

第一作者简介: 李明 (1990), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为新型储能及构网储能并网运行与检测技术研究, hanfenliming07@163.com。

主要区域。并且,相比新能源的规划和建设,目前输电通道建设明显滞后,使“三北地区”新能源并网消纳限制问题频发。更重要的是,随着新能源并网率的提升,以传统同步电机为主的电力系统向含高比例新能源、高比例电力电子设备的“双高”电力系统转变,使电力系统惯量降低,逐渐呈现弱网趋势^[1-2],进而引发电网电压、频率波动甚至脱网等问题,新能源并网安全稳定运行问题日益突出。构网(grid-forming, GFM)型储能技术可构建起支撑高比例新能源并网稳定运行的电压源,可模仿同步发电机的运行特性,给电网提供必要的惯量支撑和电压支撑,同时减少超调和振荡等^[3],是解决“双高”电力系统稳定运行问题的一个有效途径。

“双高”电力系统中的源荷数、潮流分布、系统模型参数和系统惯性等指标都发生变化^[4],因此,有必要对“双高”电力系统的稳定运行机理进行研究,以保证电网可靠运行。储能变流器(power conversion system, PCS)是 GFM 型储能技术中的关键设备,PCS 存在稳态工作点是其稳定运行的前提,在此基础上,按照变流器受扰动的大小,其稳定性可以进一步分为小信号稳定和大信号稳定^[5]。基于此,分析了 GFM 型储能 PCS 在何种电网条件、何种扰动形式下更易失稳^[6]。目前对于 GFM 型储能 PCS 支撑并网稳定,其控制方法主要分为优化控制参数和附加新的控制方法两方面^[7-8]。通过调节 GFM 型储能 PCS 自身的控制参数来改善其阻抗特性也可以达到提升 GFM 型 PCS 接入电网的交互稳定性的目的。但是,由于并未加入新的控制方法,其参数调节仍然受到系统自身的限制,具有一定的局限性^[9]。另外,对于大规模储能系统,其 PCS 逐渐从集中式向组串式,但多机并联谐振以及各 PCS 模块间功率不平衡导致“环流”问题成为扩大并机规模的瓶颈^[10]。对此,有学者通过双环控制和解耦控制,实现了多机变流器系统效率的提升和系统受扰动时的暂态稳定性^[11]。

现有研究中,虽然已搭建 GFM 型 PCS 的动、稳态模型,但并未考虑储能系统的输出特性、约束条件等方面对 PCS 模型的影响^[12-15],难以体现实际工况下的 GFM 型储能支撑新能源并网的作用机理以及与电网的交互特性。另外,虽然针对 GFM 型 PCS 多机协同控制策略已有相关研究,但是现有研究策略均集中于孤岛微电网或是离网模式下^[16-19],

多台 GFM 型储能设备接入电网带来的无功环流,而并网振荡产生机理方面的研究尚未开展。总之,GFM 型储能支撑高比例新能源并网稳定运行过程中,仍存在一些科学问题亟待解决。

针对以上问题,本文从 GFM 型储能技术原理入手,对高比例新能源并网运行稳定性进行分析,研究 GFM 型储能对新能源机组并网稳定运行的影响规律,并提出考虑多时变参数的 GFM 型储能系统建模算法。在此基础上,针对海量 GFM 型储能设备并网振荡问题,分析海量 GFM 型储能设备并网振荡产生机制,提出 GFM 型储能设备并网系统阻抗动态辨识和阻抗重构策略。另外,列出部分国内外 GFM 型储能示范工程,并给出部分阿克陶 GFM 型储能电站性能测试结果,包括故障电压穿越能力测试、一次调频测试、阻尼特性测试。

1 GFM 型储能支撑高比例新能源并网稳定运行机理

1.1 GFM 型储能技术原理和特性

GFM 型储能技术是把同步机的转子运动方程、无功下垂控制等控制算法嵌入到 PCS 的控制系统中,通过采集的电压、电流计算 PCS 端口功率,利用控制算法生成电压幅值与相位参考值,使 PCS 端口具有与同步机类似的电压源外特性^[20]。GFM 型变流器控制技术原理如图 1 所示。

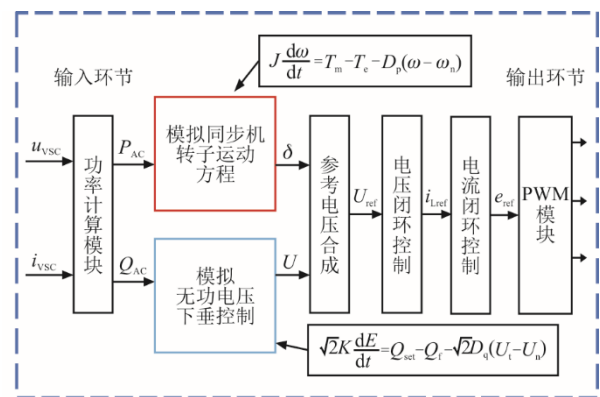


图 1 GFM 型变流器控制技术原理
Fig.1 Principle of GFM converter control technology

1.2 高比例新能源并网运行稳定性分析

大量新能源发电系统的并网控制方式采用电流源型的跟网(grid-following, GFL)型控制,其中借助锁相环(phase-locked loop, PLL)来获取电网电压信息,实现并网电流快速精确控制和功率稳

定输入,但其不具备惯量支撑特性,在系统阻尼弱、惯量低的弱电网下易失稳^[21]。GFM型控制通过模拟同步发电机运动特性,采用功率控制来实现同步,无需PLL提取电压及相位,具备对外部系统的相位角变化做出响应的能力,并可以根据需要为电网提供额外的有功及无功功率,保证电网在弱网模式下甚至孤岛模式下仍可以稳定运行^[22]。从控制的角度来看,GFL型变流器可以近似为并联高阻抗的受控电流源。采用GFL型控制可将输出电流的有功和无功分量保持在恒定值。因此,可依靠PLL实现快速同步功能来确定变流器并网点电压相角。换言之,如果变流器不能准确、快速地追踪外部电压,GFL型变流器就无法保持受控、稳定的输出^[23]。与GFL型变流器相比,GFM型PCS可以近似为具有串联低阻抗的电压源。GFM型控制可以保持内部电

压相位,且幅值和频率由每个变流器内部设定。

为了评估新能源发电系统的稳定性,对不同类型的并网型新能源发电系统进行建模分析。建立GFL型和GFM型并网逆变器控制系统如图2所示。由图2可见:由于受PLL和电网电压前馈控制等负阻尼作用的影响,GFL型并网逆变器在低频段呈现容性负阻尼特性,并且电网阻抗在低频段主要呈感性,当电网阻抗较大时,GFL型并网逆变器的输出阻抗与电网阻抗存在交互作用,容易引发谐振甚至不稳定,这不利于新能源发电的大规模接入。与GFL型并网逆变器不同,GFM型并网逆变器由于无需PLL等控制,其低频段阻抗基本呈感性,GFM型并网逆变器接入电网后,可减小电网阻抗,并且,由于电网阻抗在低频段也是感性的,因此二者交互不易引发不稳定,有利于新能源发电单元的的稳定并网运行。

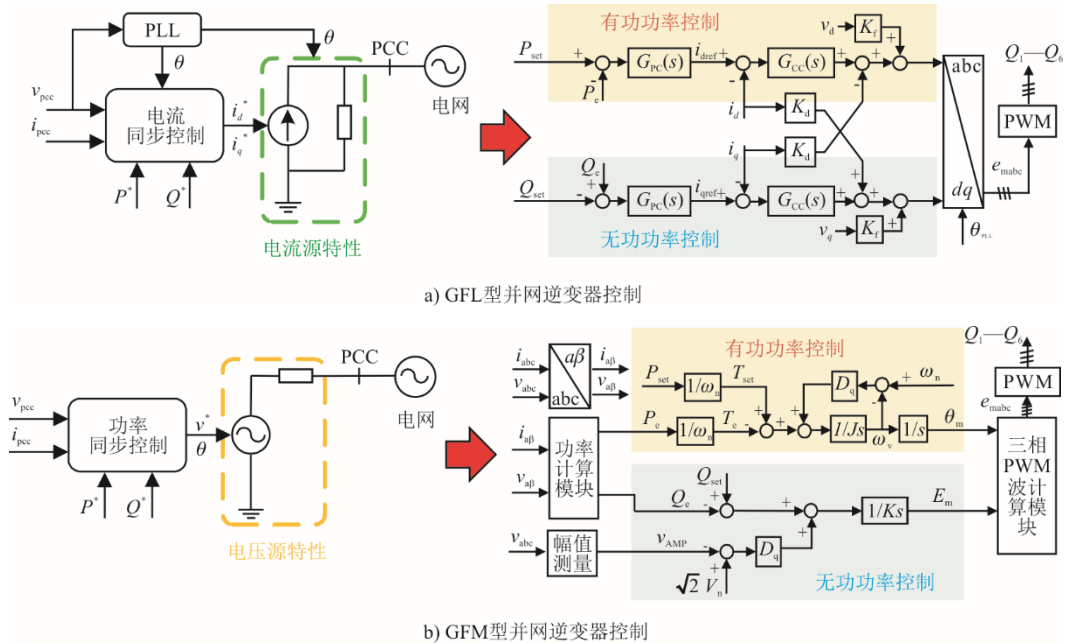


图2 GFL型和GFM型并网逆变器控制系统
Fig.2 Control system of GFL and GFM grid-connected inverters

图3为建立新能源多类型并网系统结构。由图3可见,通过研究GFM型储能对于新能源场站输出阻抗的主导频率,可分析接入海量不同类型新能源发电机组后电网阻尼的变化情况,并结合电网强度指标分析不同条件下系统的稳定性特征,提出有效的评价系统稳定性的方法,完成对影响系统稳定性的关键指标的提取和特性分析,揭示高比例新能源并网条件下,电网不同强度时的系统稳定性模型。

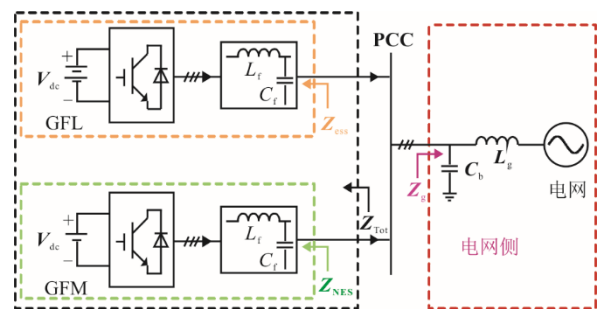


图3 新能源多类型并网系统结构
Fig.3 Structural diagram of multi-type grid-connected system of new energy

1.3 提升电网稳定性技术特性对比

面对“双高”电力系统中出现的电网稳定问题，GFM 型储能技术具有电压源外特性，使其可以用在系统强度弱、物理惯性低的电网中，提升电网的稳定性^[24]。相较于 GFL 型 PCS、同步发电机、同步调相机、电网支撑型 SVG，GFM 型储能技术有一定的优势，具体提升电网稳定性技术特性对比见表 1^[25-29]。由表 1 可知，相较于 GFL 型 PCS，GFM 型储能技术可以提供惯量响应与振荡抑制，具备更好的频率支撑能力。并且，通过功率同步控制机制，将 PCS 塑造造成电压源外特性，可在不依赖外界交流系统的情况下，自行构建交流侧电压幅值与相位，

具备更好的电压支撑能力。GFL 型仅根据频率变化率生成有功功率，与 GFM 型通过控制功角生成方式存在本质区别。总之，GFM 型 PCS 在电网调频、调压能力、惯量和阻尼支撑能力等方面有一定优势。另外，GFM 型储能技术可实现有功快速控制和黑启动，而同步发电机难以实现快速功率控制，同步调相机无法实现黑启动。GFM 型储能由于其性能与常规机组相似，可以取代现有的调相机和常规储能，大量应用可缓解电网暂态电压问题、频率问题等，能增加电网对新能源接纳能力，增强电网的承载能力，同时可以减少初期投资及运行损耗费用。

表 1 提升电网稳定性技术特性对比
Tab.1 Comparison of technical characteristics of the technologies which can improve power grid stability

类型作用	同步内电势	惯量支撑	阻尼控制	有功瞬时分担	有功快速控制	无功瞬时响应(短路容量)	一次调频	二次调频与调峰	动态无功响应	稳态无功控制	黑启动	适应电网强度	同步运行能力
GFM 型 PCS	是	是(灵活)	是(灵活)	是	是	是(灵活)	是(灵活)	是(灵活)	是	是	是	强/弱	功率同步
GFL 型 PCS	否	否	是	否	是	否	是	是	是	是	否	强电网	电压同步
同步发电机	是	是(高)	是	是	否	是(高)	是(有限)	是	是	是	是	强/弱	功率同步
同步调相机	是	是(偏小)	有限	是		是(高)	否	是	是	是	否	强/弱	功率同步
电网支撑型 SVG	是	否	是	是		是	否		是	是		强/弱	功率同步

1.4 考虑多时变参数的 GFM 型储能系统建模研究

目前，对 GFM 型储能支撑新能源并网稳定性作用机理缺乏系统性深入研究，尤其是计及储能自身荷电状态(state of charge, SOC)、内部阻抗等约束的 GFM 型储能参数优化、控制策略等方面^[30]。因此，本文研究搭建考虑多时变参数的 GFM 型储能系统模型，其中考虑储能本体 SOC、系统参数、储能 PCS 电流和功率约束。具体建模步骤为：首先，通过小扰动线性化对主电路与控制策略进行线性化，根据并网等效阻抗定义式，建立 GFM 型 PCS 等效输出阻抗模型。通过有功功率控制和无功功率控制使 PCS 系统模拟同步发电机的运行特性，实现 GFM 特性。并且考虑 GFM 型 PCS 有功功率与无功功率之间的耦合问题，建立 GFM 型 PCS 小信号模型。同时，为方便分析 GFM 型储能系统功率输出特性，建立考虑无功耦合的有功闭环输出模型和考虑有功耦合的无功闭环输出模型。提取系统的关键时变参数，分析各时变参数对 GFM 型储能系统的

数学模型的贡献度，建立与时变参数相关的 GFM 型储能系统的数学模型。另外，建立系统的传递函数，形成系统稳定性判据，得到参数与系统稳定性的定量影响。考虑多时变参数的 GFM 型储能系统建模流程如图 4 所示。

与传统同步发电机不同，GFM 型储能系统具有有功环和无功环对应的虚拟惯量和虚拟阻尼系数，在调节上不受外在物理条件的限制，可根据系统自身需要进行相应的调节，使系统的控制参数满足系统安全稳定运行的要求^[31]。GFM 型储能系统中普遍采用了电力电子变流器，过载能力较差，对电流和电压耐受水平更加敏感。同时，当发生电网频率扰动时，GFM 型储能有功输出存在稳态误差，稳态误差与阻尼系数有关，阻尼系数越大稳态误差也越大^[32]。因此 GFM 型储能系统常采用自适应参数调节策略，控制系统的阻尼与转动惯量参数根据输出功率以及输出频率的变化率自适应变化，这使得系统模型参数随工况发生了变化。

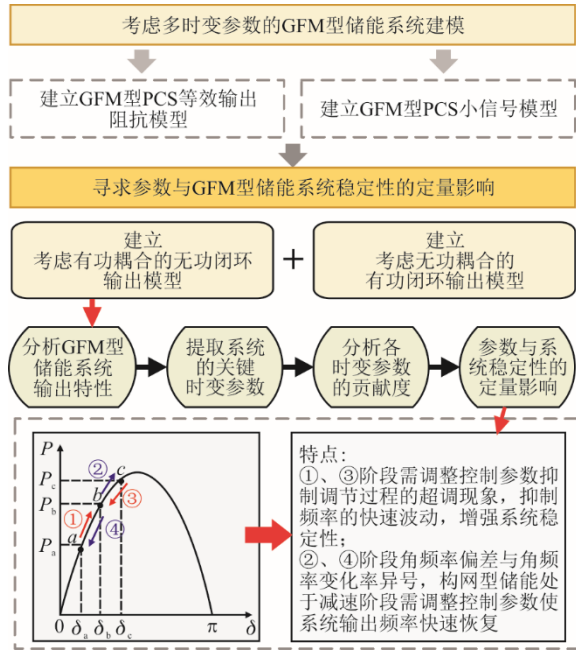


图 4 考虑多时变参数的 GFM 型储能系统建模流程
 Fig.4 The modeling flow chart of grid-forming energy storage system considering multiple time-varying parameters

2 海量 GFM 型储能设备并网振荡抑制

2.1 海量 GFM 型储能设备并网振荡产生机制

在实际工程应用中,一般采用多个 GFM 型 PCS 经输电线路在 PCC 点并入电网的拓扑结构。考虑电网阻抗的影响,搭建多台 GFM 型 PCS 并联并网等效电路如图 5 所示。根据图 5 分析不同线路阻抗、输出阻抗、控制参数对多 GFM 型储能并网系统关键振荡模态的影响规律,进而研究同步频率谐振的产生机理及其对 GFM 型储能并网系统稳定性的负面影响。

借助多台 PCS 并联并网系统的等效电路,依托控制单一变量的思想,研究不同参数变化对海量 GFM 型储能并网振荡特性的影响规律,揭示线路电抗、电网电抗、虚拟惯量和阻尼系数对系统振荡的影响规律。

2.2 GFM 型储能设备并网系统阻抗动态辨识技术

GFM 型储能系统并网运行时,通常根据接收的功率指令去控制输出电压的幅值和功角,达到调节储能电站出力的目的。在实际运行时,由于系统阻抗存在差异,这导致 GFM 型储能设备接入电网不同位置时,其运行特性不同,并可能出现并网功率振荡等问题,威胁系统安全^[33-35]。因此本文研究并网系统阻抗的动态辨识技术,可根据辨识得到系统阻抗,调整 GFM 型储能设备运行策略,达到抑制

系统振荡的目的。本文所提并网系统动态阻抗辨识技术方案中,在电压指令中增加特定的激励分量,使储能系统的出力包含额外的系统阻抗信息。另外,通过采集和提取信号,获得系统阻抗,为优化 GFM 型储能系统的性能提供条件,最终形成基于信号注入的系统阻抗动态辨识技术。GFM 型储能设备并网阻抗动态辨识运行策略如图 6 所示。

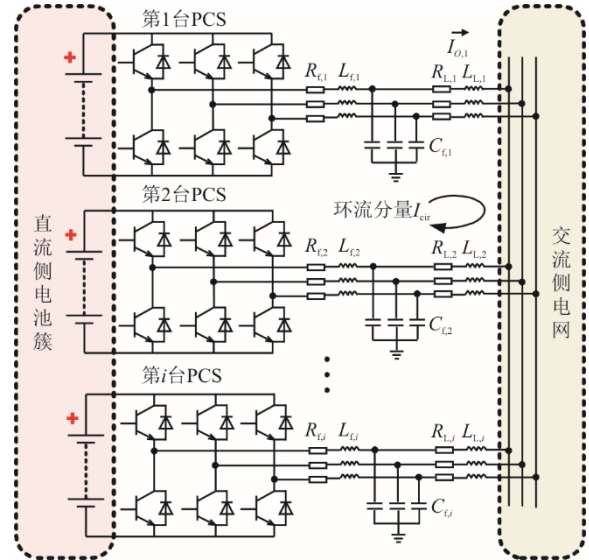


图 5 多台 PCS 并联并网等效电路
 Fig.5 Equivalent circuit of multiple energy storage converters connected to the grid in parallel

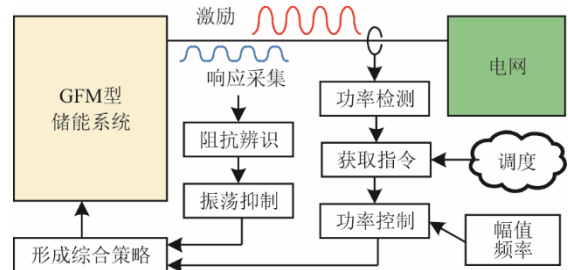


图 6 GFM 型储能设备并网阻抗动态辨识运行策略
 Fig.6 Operation strategy of dynamic identification of grid-connected impedance of GFM energy storage equipment

2.3 海量 GFM 型储能设备并网系统阻抗重构策略

为抑制系统并网振荡,本文提出研究海量 GFM 型储能设备并网系统阻抗重构策略。现有并网振荡抑制策略是通过无源阻尼和有源阻尼的方式对系统进行阻抗重构^[36-37]。但无源阻尼直接在电路中加入电阻,电阻上会产生大量的损耗。因此,借助加入有源阻尼进行虚拟阻抗控制方法,可以在不产生附加损耗的情况下增加系统阻尼,同时,引入电压前馈控制进一步提高系统稳定裕度,实现系统并网振荡抑制。

基于上述多台 GFM 型储能并联并网系统的阻抗模型,分析其阻抗特性,依据不同频段的负阻尼特性,将系统全频段划分为低、中、高 3 个频段。分别分析 3 个频段阻尼特性的主导因素,根据每个频段的特性,设计相应的系统阻抗重构策略。同时,由于多 GFM 型控制器存在频带重叠效应,对不同频段阻抗重构会影响其他频段的阻抗特性,因此,需设计对于各个频段的阻抗重构的顺序。针对各个频段采用控制参数改进和虚拟阻尼控制相结合的阻抗重构方法,通过加入虚拟阻抗控制器,改善该频段感性负阻尼。通过合理设置阻尼系数改善频段负阻尼特性,合理选取有源阻尼截止频率调节有源阻尼工作频带,避免影响其他频段阻抗特性。依次对低频段、中频段和高频段进行阻抗重塑,实现对 GFM 型储能设备负阻尼特性的改善。研究重构控制参数取值方法,并对基于阻抗重构的多 GFM 型储能系统振荡抑制策略进行仿真和实验验证,从而实现多 GFM 型储能并网系统的振荡抑制。海量 GFM 型储能设备并网系统阻抗重构策略如图 7 所示。

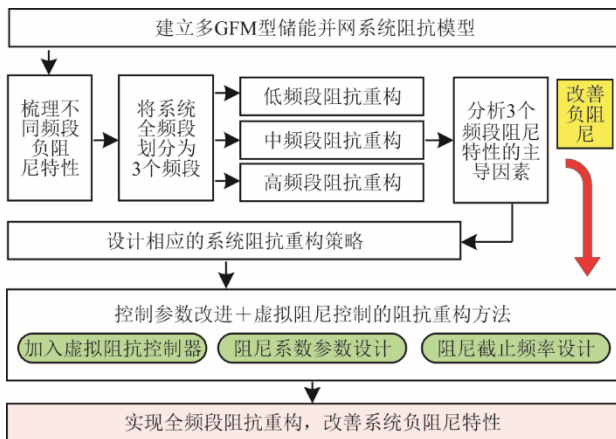


图 7 海量 GFM 型储能设备并网阻抗重构策略
Fig.7 The grid-connected impedance reconstruction of massive grid-forming energy storage equipment

3 GFM 型储能技术工程示范及其性能测试

GFM 型储能技术在国内外已有多座示范工程相继投入,部分示范工程见表 2。国内各地区根据实际需要,开展 GFM 型储能电站主动支撑能力的验证。其中,新疆公司对阿克陶 GFM 型储能电站进行性能测试,其储能系统容量为 5 MW/10 MWh,由 4 个 1.25 MW/2.50 MWh 储能单元组成,每个储能单元由 2 组 1.25 MWh 电池堆分别经 2 台 625 kW 的 PCS 逆变成交流电(630 V),2 台 PCS 交流侧并

联接入升压变的低压绕组,每台升压变的变比为 37 kV/0.63 kV,容量 3 150 kVA,PCS 均采用构网型控制。测试内容涵盖故障电压穿越能力测试、一次调频测试、阻尼特性测试等,部分测试结果如下。

3.1 故障电压穿越能力测试

设置低电压穿越至 $0.50U_n$ 、 $0.25U_n$ 时,测试结果如图 8、图 9 所示;低电压穿越至 $0.25U_n$ 时,跟网型和构网型支撑电压波形对比如图 10 所示。图 8—图 10 中: U_{AB} 为 AB 线电压, I_A 为 A 相电流, P 为有功功率, Q 为无功功率, I_q 为无功电流。可看出,在低电压穿越测试期间,相比跟网型储能系统,构网型储能系统可支撑电网稳定运行未脱网,且在电压跌落期间最大可提供 2.9 倍的无功电流,支撑电压恢复。

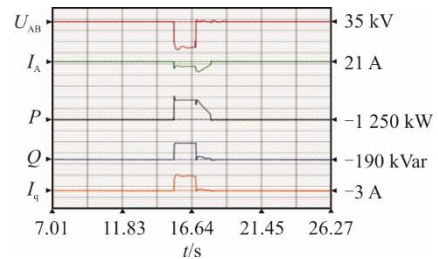


图 8 三相对称电压跌落至 $0.50U_n$ 时波形
Fig.8 The waveforms when three-phase symmetrical voltage falls to $0.50U_n$

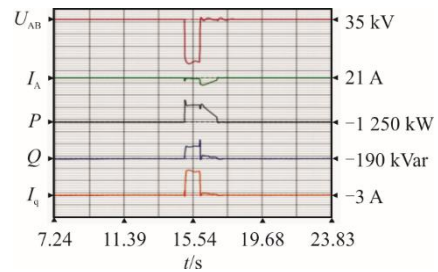


图 9 三相对称电压跌落至 $0.25U_n$ 时波形
Fig.9 The waveforms when three-phase symmetrical voltage falling to $0.25U_n$

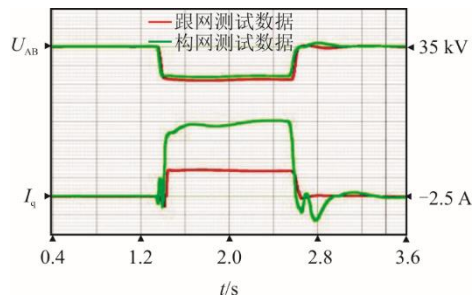


图 10 三相对称电压跌落至 $0.25U_n$ 时储能支撑电压波形对比
Fig.10 Compared with grid-following and grid-forming energy storage support voltage wave form of three-phase symmetrical voltage falling to $0.25U_n$

表2 国内外部分 GFM 型储能示范工程
Tab.2 Some GFM energy storage demonstration projects at home and abroad

序号	项目名称	储能功/MW	投运时间	功能作用
1	湖北荆门新港 50 MW/100 MWh 储能电站一期	50	2022.12	提升区域电网的稳定性
2	新疆阿克陶县龙源奥依塔克光伏储能电站 5 MW/10 MWh 构网型储能系统	5	2023.03	自同步控制、一次调频、转动惯量及短路容量支撑、提供快速动态无功补偿
3	龙源电力江苏盱眙 10 MW/20 MWh 构网型示范储能电站	10	2023.05	配套风电场,提升新能源多场站短路比、改善阻尼特性,优化新能源场站输出特性功率
4	华能山东莱芜电厂 100 MW/200MWh 分散控制构网型独立储能电站	100	2023.06	可平抑新能源发电波动,提升电网调节能力
5	内蒙古额济纳 25 MW/25 MWh 构网型储能电站	25	2023.11	提高供电可靠性,实现高比例新能源接入
6	国投西藏那曲市尼玛县塘鲁 50 MW 光伏配套 10 MW/40MWh 储能项目	10	2023.12	辅助牧光互补,增加新能源消纳
7	西藏索县 10 MW/40 MWh 光储电站项目	10	2024.01	辅助光伏接入,提供惯量支撑,支撑区域电网稳定
8	广西北海涠洲岛 5 MW/10 MWh 储能电站	5	2024.02	提供惯性支撑、辅助电网稳定运行
9	青海格尔本鲁能 50 MW/100 MWh 构网型储能电站	50	建设中	辅助光伏并网,提升电网稳定性
10	青海海南州贡玛 50 MW/200 MWh 储能电站	50	建设中	增强电网强度,提升新能源外送能力
11	宁夏电力采煤沉陷区复合光伏项目配套储能一期 100 MW/200 MW·h 储能电站	100	建设中	辅助光伏并网,提升电网稳定性
12	宁夏电力宁东复合光伏基地项目配套储能电站二期工程 100 MW/200 MW·h	100	2024.04	提升特高压直流送端新能源电力系统短路容量,改善系统转动惯量,实现对电网的同步电压支撑
13	澳大利亚约克半岛 Dalrymple 30 MW/8 MW·h 电池储能系统	30	2019.05	孤岛运行、快速频率响应、电网支持、频率控制辅助服务、能源交易
14	澳大利亚 Hornsdale Power Reserve 150 MW/194 MW·h 电池储能系统	150	2020.08	惯量支持、无功补偿、快速频率响应等
15	澳大利亚 Wallgrove 50 MW/75 MW·h 电池储能系统	50	2021.01	提供惯性支撑、频率响应、维持电网稳定性、增加输电线路容量
16	澳大利亚 Torrens 岛 250 MW/250 MW·h 构网型储能项目	250	2023.08	提高系统响应速度、提供惯性支撑、辅助电网稳定运行、增加偏远地区电网系统强度

3.2 一次调频测试

在不同频率阶跃工况下,构网型储能系统一次调频测试结果如图 11、图 12 所示。在不同调频系数下,构网型储能系统一次调频能力对比如图 13 所示,其中频率变化为 50.00~50.52 Hz,死区 0.50 Hz,频率变化率 1.00 Hz/s,惯性时间常数 $T_f=3$,阻尼系数为 0.02。可看出,在频率变化过程中,构网控制下储能单元能主动进行频率支撑。同时将储能单元有功调频系数 K_f 由 38.5 减小为 20.0,储能参与一次调频有功功率减小,一次调频能力与有功调频系数成正比。

3.3 阻尼特性测试

设定频率变化为 50.00→49.50 Hz 时有功功率响应波形图 14 所示,惯性时间常数 $T_f=12$, $K_f=0$ 。可看出,在一定范围内阻尼系数越大,有功功率振荡幅值与周期越小,越能够快速稳定。构网型储能表现出类似同步机的阻尼控制能力,可有效抑制有功振荡,提升运行动态稳定性。

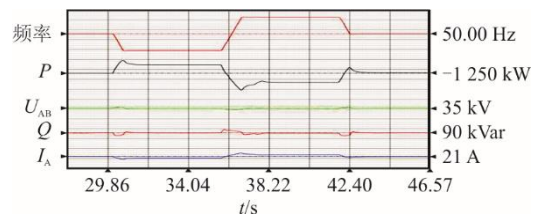


图 11 50.0→49.5→50.5→50.0 Hz 频率阶跃工况下一次调频测试波形

Fig.11 Primary frequency modulation test waveforms under 50.0→49.5→50.5→50.0 Hz frequency step disturbance condition

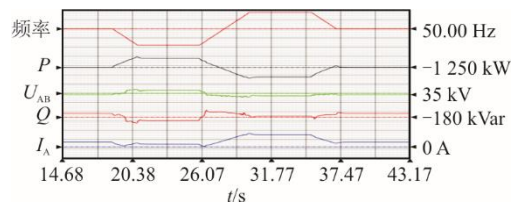


图 12 50.0→48.0→52.0→50.0 Hz 频率阶跃工况下一次调频测试波形

Fig.12 Primary frequency modulation test waveforms under 50.0→48.0→52.0→50.0 Hz frequency step disturbance condition

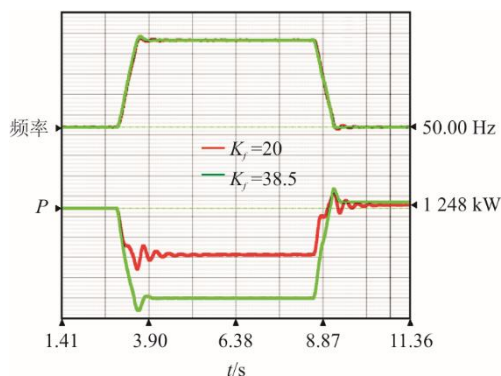


图 13 不同调频系数下构网型储能一次调频能力对比
Fig.13 The primary frequency modulation capacity of grid-forming energy storage with different frequency modulation coefficients

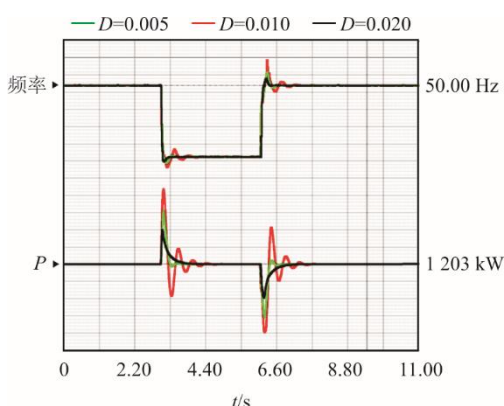


图 14 频率跌落 0.5 Hz 时有功功率响应波形
Fig.14 The active power response waveforms when frequency drops by 0.5 Hz

4 结 论

本文围绕 GFM 型储能支撑高比例新能源并网稳定运行中存在问题展开研究，具体总结如下。

1) 首先，研究 GFM 型储能支撑高比例新能源并网稳定运行机理。GFM 型储能技术使 PCS 近似为具有低串联阻抗的电压源。基于此，对不同类型的并网型新能源发电系统进行建模分析，可知 GFM 型控制采用功率控制来实现同步，无需 PLL 提取电压及相位，其具备对外部系统的相位角变化做出响应的能力，并根据需要为电网提供额外的有功及无功功率。并且，GFM 型并网逆变器接入电网后，可减小电网阻抗，同时由于电网阻抗在低频段也是感性的，因此二者交互不易引发不稳定，有利于新能源发电单元的的稳定并网运行。

2) 对若干种提升电网稳定性技术特性进行对比，可知相较于 GFL 型 PCS、同步发电机、同步调相机、电网支撑型 SVG，GFM 型储能技术在支撑电网调频、调压能力、惯量和阻尼支撑能力等方面

有一定的优势。同时考虑储能本体 SOC、系统参数、储能 PCS 电流和功率约束，研究考虑多时变参数的 GFM 型储能系统模型建立方法。

3) 其次，提出海量 GFM 型储能设备并网振荡产生机制分析方法。基于分析阻抗模型特性，提出可以采用控制单一变量的思想研究不同参数变化对海量 GFM 型储能并网振荡特性的影响及变化规律，揭示线路电抗、电网电抗、虚拟惯量和阻尼系数对系统振荡的影响规律，形成海量 GFM 型储能设备并网振荡产生机制分析路线。

4) 在电压指令中增加特定的激励分量，并采集和提取信号，以获得系统阻抗，最终形成基于信号注入的 GFM 型储能设备并网系统阻抗动态辨识技术。基于此，提出海量 GFM 型储能设备并网系统阻抗重构策略技术路线。包括借助加入有源阻尼进行虚拟阻抗控制，同时，引入电压前馈控制进一步提高系统稳定裕度，实现系统并网振荡抑制。

5) 列举 GFM 型储能技术在国内外 16 项示范工程，并给出部分阿克陶 GFM 型储能电站并网性能测试结果图，包括故障电压穿越能力测试、一次调频测试、阻尼特性测试。验证了构网型储能技术对电网稳定运行的主动支撑能力。

[参 考 文 献]

- [1] 康重庆, 杜尔顺, 郭鸿业, 等. 新型电力系统的六要素分析[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1741-1750.
KANG Chongqing, DU Ershun, GUO Hongye, et al. Primary exploration of six essential factors in new power system[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1741-1750.
- [2] 刘永奇, 陈龙翔, 韩小琪. 能源转型下我国新能源替代的关键问题分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 515-523.
LIU Yongqi, CHEN Longxiang, HAN Xiaoqi. The key problem analysis on the alternative new energy under the energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 515-523.
- [3] 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(7): 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(7): 1-11.
- [4] 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.
- [5] LI M, ZHANG X, GUO Z, et al. Impedance adaptive dual-mode control of grid-connected inverters with large fluctuation of SCR and its stability analysis based on

- D-partition method[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(12): 14420-14435.
- [6] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(6): 2339-2359. ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of Grid-forming voltage source converters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(6): 2339-2359.
- [7] 郭春义, 吕乃航, 张加卿. 提高 LCC-HVDC 在弱交流系统下的稳定性和动态性能的控制参数优化方法[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(7): 1751-1764. GUO Chunyi, LYU Naihang, ZHANG Jiaqing. Optimization of control parameters to enhance stability and dynamic performance of LCC-HVDC under weak AC condition[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(7): 1751-1764.
- [8] 黄通, 陈新, 张东辉, 等. 考虑电压前馈控制的 MMC-HVDC 并网稳定性分析及其阻抗控制优化方法[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(23): 8987-8999. HUANG Tong, CHEN Xin, ZHANG Donghui, et al. MMC-HVDC integrated system stability analysis and impedance optimization method with consideration of voltage feed-forward control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(23): 8987-8999.
- [9] 刘永慧, 王跃, 彭阳, 等. 提升组网型变流器并网交互稳定性的控制参数整定方法[J]. *电网技术*, 2023, 47(1): 16-27. LIU Yonghui, WANG Yue, PENG Yang, et al. Parameter tuning for improving interaction stability of grid-forming converter and power grid[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(1): 16-27.
- [10] 刘硕, 开山金, 熊俊杰, 等. 考虑线路及网侧阻抗的多台储能变流器稳定性影响分析[J]. *热力发电*, 2021, 50(8): 172-180. LIU Shuo, KAI Shanjin, XIONG Junjie, et al. Stability analysis for multiple energy storage converters considering line and grid-side impedance[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(8): 172-180.
- [11] 白进哲. 储能变流器多机运行功率分配策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2023: 1. BAI Jinzhe. Research on power distribution strategy of energy storage converters in Multi-Machine operation[D]. Jinan: Shandong University, 2023: 1.
- [12] 王奕宁, 向往, 张浩博, 等. 构网型直驱风力发电机组比例优化配置分析[J/OL]. *电网技术*, 1-13[2024-06-09]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1950>. WANG Yining, XIANG Wang, ZHANG Haobo, et al. Analysis of optimal proportion configuration of grid forming direct drive wind turbine[J/OL]. *Power System Technology*, 1-13[2024-06-09]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1950>.
- [13] TIAN Z, LI X, ZHA X, et al. Transient synchronization stability of an islanded AC microgrid considering interactions between grid-forming and grid-following converters[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2023, 12: 123.
- [14] 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[2024-06-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1289.TM.20230907.1747.006.html>. 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[2024-06-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1289.TM.20230907.1747.006.html>.
- [15] SONG G H, CAO B, CHANG L C. Review of grid-forming inverters in support of power system operation[J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2022, 8(1): 1-15.
- [16] 伍双喜, 王晰, 刘洋, 等. 基于构网型储能的风电场-弱电网次同步振荡抑制方法[J]. *电力建设*, 2024, 45(4): 147-155. WU Shuangxi, WANG Xi, LIU Yang, et al. Subsynchronous damping control of grid-forming BESS in wind farms connected to a weak AC grid[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(4): 147-155.
- [17] ZHOU Z, PUGLIESE S, LANGWASSE M, et al. Subsynchronous damping by battery storage system in grid forming control mode[C]//*Proceedings of 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. Detroit, MI, USA: IEEE, 2022.
- [18] 王承祥, 杜海江, 王爽, 等. 单侧并联储能变流器并网谐振机理分析及抑制方法[J]. *高电压技术*, 2024, 50(6): 2490-2501. WANG Chengxiang, DU Haijiang, WANG Shuang, et al. Grid-connected resonance mechanism analysis and suppression method of unilateral parallel energy storage converter[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(6): 2490-2501.
- [19] ZHANG H B, XIANG W, LIN W X, et al. Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: control strategy, stability, application, and challenges[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2021, 9(6): 1239-1256.
- [20] 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.
- [21] 葛豪宇, 杨明, 方聪, 等. 弱电网下计及并网逆变器耦合效应的新型锁相环设计方法及其稳定性分析[J/OL]. *电网技术*, 1-12[2024-06-09]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2154>. GE Haoyu, YANG Ming, FANG Cong, et al. A novel phase-locked loop design method and stability analysis considering the coupling effect of grid connected inverters in weak current networks[J/OL]. *Power System Technology*, 1-12[2024-06-09]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2154>.
- [22] 许诤翊, 刘威, 刘树, 等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. *电网技术*, 2022, 46(9): 3586-3594. XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology[J]. *Power System Technology*, 2021, 46(9): 3586-3594.
- [23] 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.

- [24] 秦世耀, 齐琛, 李少林, 等. 电压源型构网风电机组研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1314-1334.
QIN Shiyao, QI Chen, LI Shaolin, et al. Review of the voltage-source grid forming wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1314-1334.
- [25] 张兴, 李旭, 田杰, 等. 构网型储能与调相机的暂态过电压抑制能力对比研究[J]. 浙江电力, 2024, 43(2): 88-95.
ZHANG Xing, LI Xu, TIAN Jie, et al. Comparison of transient overvoltage suppression capability of grid-forming converter and synchronous condenser[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(2): 88-95.
- [26] 荆锴, 田帅, 李方正, 等. 储能变流器的自适应虚拟直流电机控制[J]. 电力电子技术, 2023, 57(10): 101-104.
JING Kai, TIAN Shuai, LI Fangzheng, et al. Adaptive virtual DC motor control for energy storage converter[J]. Power Electronical Technology, 2023, 57(10): 101-104.
- [27] KULKARNI O V, DOOLLA S, FERNANDES B G. Simple controller configuration for decentralized parallel operation of inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(2): 1356-1369.
- [28] DENG Y, TAO Y, CHEN G, et al. Enhanced power flow control for grid-connected droop-controlled inverters with improved stability[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 5919-5929.
- [29] LIU B, WU T, LIU Z, et al. A small-ac-signal injection-based decentralized secondary frequency control for droop-controlled islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 11634-11651.
- [30] 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(3): 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(3): 990-997.
- [31] 杨雅倩. 虚拟同步发电机并网系统稳定性分析及提升方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2022: 1.
YANG Yaqian. Research on stability analysis and improvement method of virtual synchronous generator grid-connected system[D]. Changsha: Hunan University, 2022: 1.
- [32] 赵炳洋, 赵波, 胡娟, 等. 考虑 VSG 构网储能暂态与稳态优化的自适应策略[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 39-47.
ZHAO Bingyang, ZHAO Bo, HU Juan, et al. Adaptive strategy considering transient and steady-state optimization of VSG grid-forming energy storage[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 39-47.
- [33] 武永强, 郭凯, 王宇强, 等. 构网型储能系统并网测试要求及测试实例分析[J]. 内蒙古电力技术, 2024, 42(2): 8-16.
WU Yongqiang, GUO Kai, WANG Yuqiang, et al. Testing requirements and case analysis of grid-forming energy storage system[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2024, 42(2): 8-16.
- [34] 刘硕, 李佳远, 马速良, 等. 弱电网下多源构网型变流器协同控制方法[J]. 热力发电, 2024, 53(8): 85-93.
LIU Shuo, LI Jiayuan, MA Suliang, et al. Cooperative control method of multi-source grid-forming converters in weak electrical grids[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(8): 85-93.
- [35] 秦本双, 徐永海. 多虚拟同步机并网系统功频振荡模态分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(19): 6570-6581.
QIN Benshuang, XU Yonghai. Modal analysis of multi-virtual synchronous machine grid-connected power-frequency oscillation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(19): 6570-6581.
- [36] 贾科, 陈金锋, 钮厚敏, 等. 光伏并网系统的谐振抑制策略及无源阻尼选取方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(15): 109-114.
JIA Ke, CHEN Jinfeng, NIU Houmin, et al. Resonance suppression strategy and passive damping resistance selection method for photovoltaic grid-connected system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(15): 109-114.
- [37] 李智, 李长喜, 陈创庭, 等. 电流控制型储能变流器控制稳定性分析与谐波谐振抑制技术研究[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(7): 21-28.
LI Zhi, LI Changxi, CHEN Chuangting, et al. Control stability analysis and research on harmonic resonance suppression technology of current-control type energy storage converter[J]. Motor and Control Application, 2023, 50(7): 21-28.

(责任编辑 杜亚勤)