

电池储能系统并网控制策略及频率调节研究综述

文 曹¹, 肖 军², 涂平稳², 徐韵扬³

(1. 国网四川省电力公司特高压直流中心, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司自贡供电公司, 四川 自贡 643000; 3. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要:随着可再生能源在新型电力系统中的比例不断上升, 可再生能源的随机性与波动性以及因电力电子器件的大规模接入所造成的电力系统阻尼与惯性缺失, 都严重影响着电力系统的安全稳定。传统的调频机组因其启动时间长、频率响应慢等缺点, 已无法满足新型电力系统对频率调节的需求。因此, 具有频率支撑能力且响应速率快的电池储能系统受到了广泛关注。为了对电池储能系统参与调频辅助服务进行深入研究, 首先, 分析了现有电池储能系统的并网控制策略和所受限制; 然后, 浅析了电池储能系统辅助电力系统实现一次频率调节与二次频率调节的研究现状及改进方向。

关键词: 储能系统; V/F 控制策略; PQ 控制策略; 频率调节

中图分类号: TM 762 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2024)04-0071-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240411

Research Review on Grid-connected Control Strategies and Frequency Regulation of Battery Energy Storage System

WEN Cao¹, XIAO Jun², TU Pingwen², XU Yunyang³

(1. State Grid Sichuan UHV DC Center, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. State Grid Zigong Electric Power Supply Company, Zigong 643000, Sichuan, China; 3. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: With the increasing penetration level of renewable energy in new power systems, the stochastic nature of renewable energy significantly impacts the grid stability and reliability. Simultaneously, the extensive integration of power electronic devices has resulted in decreased damping and inertia within the power system. Due to the shortcomings, such as long starting time and low response rate, the traditional frequency regulation units have been incapable of meeting the frequency regulation needs of new power systems. Therefore, battery energy storage systems (BESS), with their frequency support capability and fast response rate, have drawn considerable attention. The participation of BESS in the auxiliary market has also emerged as a key focus of research. The grid-connected control strategy of BESS is firstly presented, and then the research status of BESS providing primary and secondary frequency regulation services in power systems are analyzed.

Key words: energy storage system; V/F control strategy; PQ control strategy; frequency regulation

0 引言

随着风电、光伏等高比例可再生能源的快速增长, 且电力系统逐渐向数字化、电力电子化转变, 使

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目“大规模分布式可再生能源发电并网规划与协同控制研究”(U21A20146)

得新型电力系统缺乏足够的惯性^[1], 影响着统的可靠性、安全性与可控性。同时因常规发电机组在新型电力系统的比例逐渐下降, 其调频能力与响应速率也逐渐降低, 且在电力系统因负载与发电机的频繁切换造成较大扰动的情况下, 传统的调频机组无法满足电力系统的调节需求, 因此只能通过减载或者在扰动较大的情况下关闭发电机, 以维持电力系

统的功率与频率稳定^[2]。为提升电力系统的频率调节能力,具有响应速率快、功率控制准确的电池储能系统(battery energy storage system, BESS)被广泛用于辅助电力市场调频服务,在电力系统的一次调频与二次调频中起着至关重要的作用^[3]。

可再生能源在新型电力系统的比例不断提高,使系统对 BESS 的频率支撑需求不断增强,要求 BESS 的控制策略由保障自身安全运行向参与电网调节转变。目前,BESS 的控制策略可分为跟网型控制策略与构网型控制策略^[4]。跟网型控制策略主要分为恒功率控制(PQ 控制)和恒压频比控制(V/F 控制),其频率通常由锁相环给定,具有一定的频率支撑能力,是现在应用最广泛的并网控制策略;但其存在响应速率慢、容错率低等问题,在新能源高渗透率下会加剧频率扰动而无法满系统对电网频率调节的需求。构网型控制策略主要分为下垂控制和虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制,可在稳定本地电压与频率的情况下,实时调整注入功率以实现对电网频率的主动支撑,并通过引入虚拟惯量使 BESS 具备同常规发电机组类似的惯性,解决了可再生能源高渗透率下系统缺乏频率支撑能力的问题。

频率是维持电力系统稳定的关键特性,为确保其稳定使电力系统的频率偏差最小化,储能辅助调频服务被广泛应用于系统调频服务^[5]。调频服务分为一次调频、二次调频和三次调频,其中对电力系统的安全性和稳定性起主要作用的是一次调频和二次调频。较之传统调频机组,BESS 具有响应快、灵活等特点,这使其能够在一次调频中快速地抵消电网中的不平衡功率^[6],同时所需调频容量少也使电网的调频能力得到了进一步的提升。在二次调频方面,自动发电控制(automatic generation control, AGC)系统通过协调各个可再生能源的发电量,使各区域之间的频率与交互电能接近其标称值。传统的 AGC 系统主要通过火电厂与水电站实现二次频率控制。然而,随着可再生能源在电力系统中的比例不断增加,系统的低惯性对 AGC 系统的频率调节能力提出了更高的要求,传统的调频机组因其启动时间长、频率响应缓慢已无法适应当下的二次调频需求^[7]。因此,响应快速的 BESS 被认为是改善新型电力系统频率调节服务的解决方案之一。基于此,BESS 辅助不同调频机组参与二次调频、BESS 结合

其他储能系统参与二次调频等方案则进一步提升了系统二次调频效率,为电网频率的稳定提供了有力支撑。

许多学者对并网逆变器的控制策略进行了大量研究并提出了解决方案^[8],使 BESS 可以通过变流器参与电力系统的电压和频率调节,平稳电网电能质量,降低传输损耗,从而提升新能源在电力系统中的比例。常用的储能变流器控制策略有 PQ 控制、V/F 控制、下垂控制以及 VSG 控制。下面首先分析了上述控制策略对 BESS 并网技术的贡献与存在的局限性,并总结了目前改进这些局限性的研究方案;其次,分析了当下新型电力系统一次调频的需求与传统调频机组在系统一次调频上的局限性,总结了 BESS 参与一次调频的控制方法,并浅析了目前 AGC 系统参与二次调频的局限性及 BESS 实现二次频率控制的研究现状。

1 电池储能系统并网控制策略

1.1 PQ 控制策略

目前对 PQ 控制策略的研究主要集中于分布式光伏、风力发电以及配套的储能逆变器的并网控制。如图 1 所示,PQ 控制策略的控制环节由功率外环与电流内环组成。功率外环对有功功率与无功功率单独进行解耦控制,P 控制器使其输出的有功频率在参考设定范围内维持稳定,Q 控制器使其输出的无功电压在参考设定范围内维持稳定,使得变流器在配电网中以所需要的电压和电流等级运行^[9]。

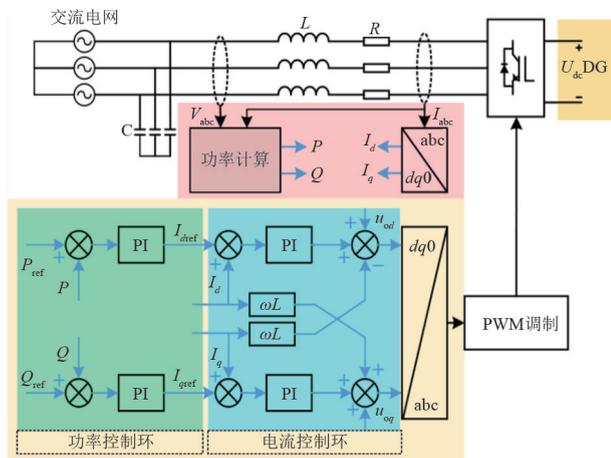


图 1 PQ 控制策略

然而,该控制策略不能使终端电压和频率维持稳定,不具备电网调频调压能力,存在响应速度慢、

稳定性差、协调性和容错性低以及输出电能存在谐波分量等问题,并且 PQ 控制策略运行于并网模式下需要得到电网电压和频率的支撑。因此,需要通过级联额外的分布式发电系统来调节微电网的终端电压和频率,从而维持电网的稳定运行。

基于 PQ 控制存在的上述局限性,文献[10]通过对比粒子群优化算法、遗传算法与人工蜂群算法等优化算法,以提升 PQ 控制策略中的比例积分(proportional plus intergral, PI)控制器的增益。文献[11]提出了一种将光伏并网点的节点类型在 PQ 节点、QV 节点和 PV 节点之间依次转换的光储输出功率主动控制方法,提高了系统的功率控制能力。文献[12]提出了一种基于 PI 集成同步参考 dq 轴框架的 PQ 控制策略,因其多控制回路的优点进一步提升了 PQ 控制策略在动态负载变化时的性能。为解决系统并、离网切换后主电网频率无法作为 PQ 控制策略的频率给定问题,文献[13]提出了 PQ 控制和 V/F 控制平滑切换的协调控制策略,用以改善系统孤岛运行时的频率稳定性响应。文献[14]在多微电网中分布式发电机集群的背景下,提出了一种基于下垂控制策略与 PQ 控制策略的协调二次控制方案,既改善了初级下垂控制造成的稳态偏差问题,又优化了微电网的运行状态。

1.2 V/F 控制策略

2002 年, V/F 控制这一概念首次应用于孤岛运行模式的微电网分布式发电机^[15],实现频率与终端电压在给定参考范围内维持稳定。如图 2 所示, V/F 控制策略由 dq 参考框架内工作的两个级联控制环组成,外环负责电压控制,内环负责电流控制。

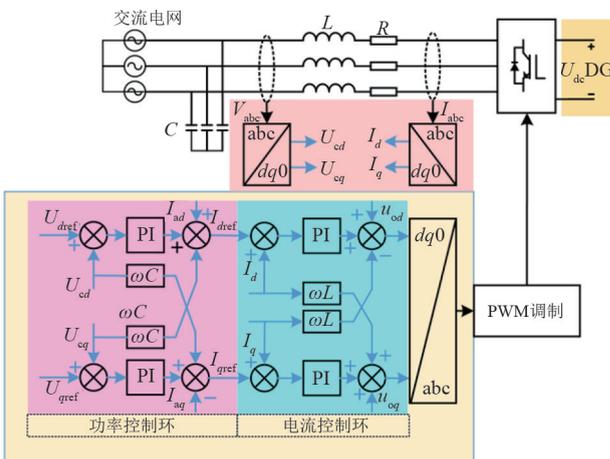


图 2 V/F 控制策略

幅值与电感电流经派克变换解耦转换为 dq 参考坐标系下的有功分量与无功分量。电压外环通过施加频率参考以实现电压的独立调节,而内环电流控制创建电流伺服系统实现动态自动加速运行,提升系统的动态响应能力,减小因非线性负载扰动造成输出端电压的谐波失真,从而提升了系统的动态性能与稳态精度。

考虑到传统的 V/F 控制在面对电网电压频率变化时控制灵活度不足,造成谐波失真、输出功率振荡等问题,文献[17]采用模糊逻辑控制器实现最小化计算功率与参考功率之间的误差,并提出一种改进的电网同步控制方法以缩短功率跟踪时间,缓解输出功率振荡与电流总谐波失真问题。针对传统 V/F 控制无法实现最大功率跟踪,影响系统电能转换效率的问题,文献[18]结合最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制,提出了基于 V/F 控制策略的储能并、离网协调控制方案,有效管理微电网与主电网间的能量交互,提升了系统电能转换效率。为解决 V/F 控制策略面对电网电压与负荷突变响应速度较慢的问题,文献[19]逐步改进粒子群优化算法以改进预测控制策略,在确保微电网电压和频率维持在稳态范围内的同时,实现功率控制参数的实时自整定,提升了系统的动态响应能力。

1.3 下垂控制策略

储能变流器下垂控制不依赖高带宽通信,通过模拟传统同步发电机的下垂特性,可实现自主调频调压,具有良好的鲁棒性,因此可工作在孤岛、并网两种运行模式下,且因其不涉及控制环路转变,便于实现并、离网平滑切换。变流器下垂控制的有功-频率和无功-幅值下垂特性如图 3 所示。根据图 3 所示下垂特性曲线可得到如图 4 所示的变流器下垂控制策略。下垂控制外环模拟有功-频率和无功-电压进行输出功率调节,提升系统应对负荷突变和支撑电网的能力。内部电压电流环调节和监测交流

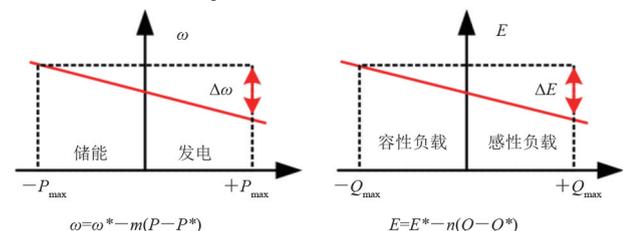


图 3 下垂特性曲线

在文献[16]所提出的控制策略中,交流侧电压

侧电压与电感电流,在提升系统动态响应能力的同时维持电网的稳定。

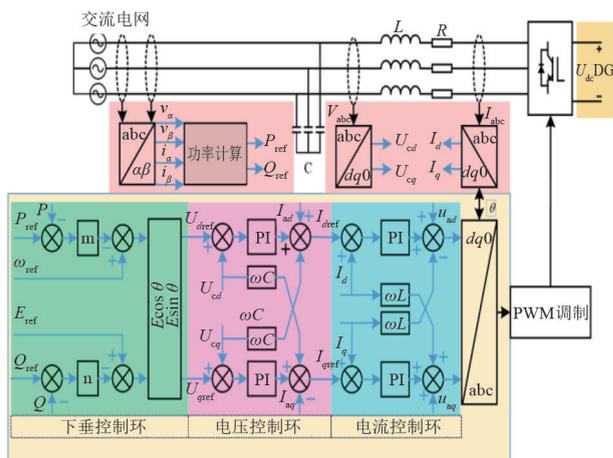


图 4 下垂控制策略

现有研究主要针对下垂控制的稳定控制响应速率、抑制控制相关振荡以及提升抗谐波干扰能力等进行研究。文献[20]提出了一种广义下垂控制策略实现有功功率的灵活控制,可满足系统并网和孤岛模式下的动态特性差异需求,且能在系统处于孤岛运行模式下提供虚拟惯性和阻尼特性,抑制基准功率变化时有功功率的振荡,缩短有功功率的稳定时间。文献[21]提出了一个新型辅助控制器来抑制高下垂增益引起的系统振荡问题,可增强分布式电源与电网间的无功功率共享和系统的稳定性。文献[22]提出了基于调节标称电压的改进 Q-V 下垂控制和基于共识的协同下垂控制,进一步精确了无功功率共享的效率。文献[23]对比分析了作用于变流器不同位置的单回路和多回路的下垂控制方法,通过调节角频率和电压幅值生成不同的耦合电抗,明确两种不同控制策略在不同的响应速率和稳定效率下的使用场景。为进一步实现高效的能源供应,文献[24]通过逐步改进分布式电源的自适应下垂控制策略,进一步缩减系统功率损耗,实现精确的功率共享,提升系统抗干扰能力,改善系统电池的健康情况。

1.4 虚拟同步机控制策略

由图 3 所示的储能变流器下垂特性可知,变流器通过模拟同步发电机的一次调频特性减小电网电压频率和有效值的稳态偏差。但是下垂控制没有模拟同步发电机的转动惯量,无法为储能变流器提供足够的惯量支撑来抑制电网频率的快速波动^[25]。由此,VSG 技术应运而生,通过模拟同步发电机的

动态和静态机电特性,解决储能变流器的低惯量和欠阻尼的问题,使储能变流器具备惯性响应特性、阻尼和调频能力^[26]。

现如今有功-无功控制策略因其结构简单,被广泛应用于 VSG 控制技术中,可实现多台虚拟电机并联运行下根据容量实行有功功率的合理分配。且因 VSG 具有独立的有功和无功控制能力,可将控制策略分为有功-频率稳定控制和无功-电压稳定控制两大类。控制策略如图 5 所示,由有功-频率环和无功-电压环构成。

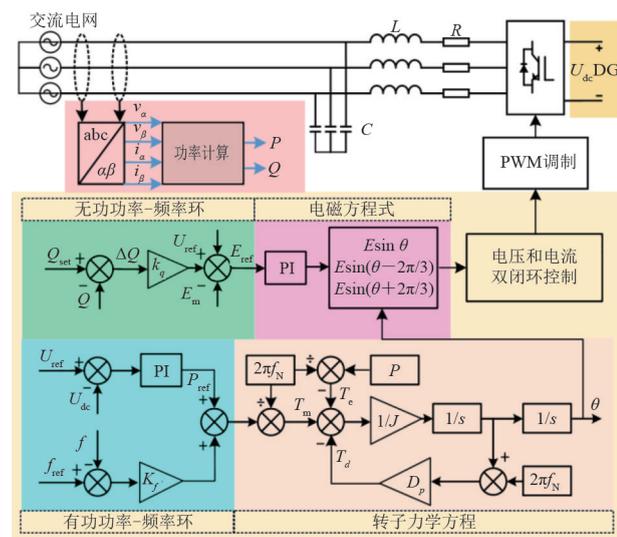


图 5 VSG 控制策略

有功-频率环的虚拟调速器通过有功-频率环节维持频率的稳定,由机械转矩方程模拟同步发电机调速过程,通过惯量 J 和阻尼 D 提升系统抗干扰能力以应对源-荷功率变化,为电网提供频率支撑。然而,惯量支撑的引入容易造成系统的功率振荡^[27],为此文献[28]将深度策略梯度算法、自适应神经网络、模糊逻辑算法、模型预测控制同虚拟惯量与角频率的非线性关系相结合,自适应调整惯量与阻尼系数,从而增强了系统电压和频率的动态特性,快速抑制功率振荡。文献[29]为缓解系统处于扰动状态下暂态稳定缺失的问题,采用模式自适应功率角控制、暂态角稳定控制避免了系统的同步损失问题,提升了系统的暂态稳定性。

无功-电压环的虚拟励磁控制器通过无功-电压环对发电机的励磁绕组和励磁电流进行调整,实现输出电压的调控;但是在系统并网运行模式下,无功控制环节无法支撑系统所需的无功功率。文献[30]通过改进无功功率控制器实现电力系统

对无功功率的优化调度。文献[31]通过逐步改进基于自适应虚拟阻抗的控制方法,根据瞬时无功功率与其基准频率之间的误差自适应地调节虚拟电感,改善变流器输出端阻抗低的问题,提升了分布式电源间的无功功率和谐波功率共享精度。

然而,VSG因其高阻抗比和非零功率角而造成的功率耦合问题(即有功回路与无功回路的相互作用)可能导致输出功率误差、系统动态响应能力变弱甚至无响应,严重制约了系统的电力输送能力和电网支撑能力。为此,文献[32]对传统的VSG有功回路与无功回路的功率解耦策略进行分析,提出一种改进的功率解耦控制策略,解决了传统解耦技术不适用于中低压微电网的问题,实现了变流器功率控制回路的动态解耦。文献[33]为深入研究虚拟电感对功率解耦的影响,提出了一种小信号模型以得到虚拟电感的最优解耦值,实现了有功无功环节的最优解耦。文献[25]则提出一种基于 q 轴压降的功率解耦控制策略,在减少计算量的同时进一步减小了回路之间的功率耦合。

2 电池储能系统调频控制技术

传统火电调频机组通过吸收电网频率的偏差信号,改变机组的实际负荷进行一次调频,以达到稳定频率的目的^[34]。但是可再生能源大规模并网造成输出功率的随机性和波动性,传统电力系统的惯性常数逐渐减小,使传统调频机组的调频容量与响应速度难以应对新型电力系统的调频要求^[35]。因此,安全快速的电池储能系统辅助电网实现一次调频成为当下的研究热点。当系统的负荷需求变化引起电网频率振荡时,电池储能系统通过吸收电网频率的偏差信号,根据电网的有功变化量与频率变化量的下垂特性曲线,调节功率变化量对电网频率进行补偿,以实现储能系统的一次调频。

2.1 储能系统一次调频控制

一次调频控制的性能与BESS的控制策略息息相关,其控制方法主要集中于下垂控制与VSG控制,以提供充足的虚拟惯量降低电网稳态频率的偏差。文献[36]提出了一种基于VSG的虚拟惯量频率控制策略,在高比例可再生能源接入期间实现了系统频率稳定。文献[37]提出了一种基于超导磁储能技术的VSG控制策略,快速模拟系统所需的惯

性功率,实现了混合电网在不同扰动情况下的频率稳定。在上述文献的基础上,文献[38]根据电动汽车中的剩余储存能量模拟电网的惯量,提出了一种新的合成惯量控制系统以提升低惯量系统的频率稳定性,并降低系统对BESS调频容量的需求。文献[39]通过研究电池聚合器、双共识分布式频率控制以及共享BESS运营框架,实现多个BESS参与辅助服务市场提供一次调频控制服务,最大限度地提升了BESS的调频优势。

2.2 储能系统二次调频控制

随着大规模可再生能源和电网负荷的快速增长,电力系统所面临的电网频率波动范围也随之急剧增大。仅通过一次调频很难满足电网频率恢复的需求,因此需要通过二次调频控制来协调负荷需求和可再生能源发电功率的平衡,为电网频率提供有效支撑。

针对BESS的功率与荷电状态对系统二次调频性能的限制问题,文献[40]提出了一种具有调节响应精度裕度的AGC控制策略,通过降低系统的不合规率来提升系统的动态响应能力,同时设置全过程的荷电状态控制,防止电池极端充放电,抑制BESS的快速衰减。文献[41]通过研究荷电状态恢复机制进一步提升了BESS的调频能力。文献[42]提出的分布式控制策略可使BESS能够在调频模式与充电模式之间进行平滑切换,但是该控制策略无法满足系统荷电状态恢复时间的需求。基于此,文献[43]提出了协调多个BESS电压调节的基于来回通信的分布式控制策略,以及平衡系统功率的分布式一致性AGC调频算法,有效提升了BESS的使用寿命与综合运行效率。文献[44]将BESS与风电系统合并以提升系统AGC性能。文献[45]将BESS整合至高光伏渗透率的电网中以提升系统二次调频性能与经济性。文献[46]采用全状态反馈控制策略设计了最优控制器,使BESS辅助水电系统满足系统AGC的需求。

3 结论

上面针对高比例可再生能源并入电力系统所带来的频率稳定问题展开分析,主要探讨了BESS的并网控制策略、传统调频机组在系统频率调节中的限制性,以及BESS参与一次和二次频率调节的研究现状。

随着高比例可再生能源的接入以及电力电子设备的广泛应用,传统电力系统中基于同步电机的稳定运行机制面临被打破的局面,而以构网型变流器为基础的新型电力系统稳定运行机制将成为未来的研究热点。因此,研究趋势之一是探讨构网变流器与其他可再生能源之间的交互耦合问题,特别关注多台变流器并联输出对电力系统频率稳定性的影响,着力解决电能质量与功率分配能力的挑战。同时,进一步加强对电池储能系统 AGC 控制策略的研究,考虑多种场景和时间尺度下的最优调度策略,以提升系统的稳定性、可靠性和经济性。

参考文献

- [1] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.
- [2] 杨才明,高慧敏,祈炜雯,等.抑制电网大功率波动的分布式储能装置功率支持策略研究[J].浙江电力,2019,38(5):11-17.
- [3] 杨永辉,谢丽蓉,包洪印,等.储能调频控制参数自适应优化与退出机制设计[J].太阳能学报,2024,45(4):338-346.
- [4] 陈凌宇,刘敏,孙桐,等.基于电池储能的单级式构网型不间断供电系统[J].电力电子技术,2022,56(5):1-4.
- [5] 刘鑫屏,刘磊.基于调频信号自适应分解的电池储能辅助二次调频控制策略[J].动力工程学报,2024,44(4):590-598.
- [6] 李俊涛,贾科,董学正,等.网侧故障下光伏直流并网系统不平衡功率快速平抑方法[J].电工技术学报,2024,39(5):1340-1351.
- [7] 何胜明,丁仁山,黄闻韬,等.水储联合调频系统模型及控制策略研究[J].水力发电,2024,50(4):66-74.
- [8] 唐欣,李珍,唐凯璇,等.弱电网下提高并网变流器稳定性的导纳重塑方法[J/OL].中国电机工程学报:1-15 [2024-06-13].<https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231251>.
- [9] 叶高翔,杨洁,程波,等.分布式光伏并网逆变器 PQ 控制系统的设计[J].集成电路应用,2023,40(3):370-371.
- [10] NEMPU P B, SABHAHIT J N. Stochastic algorithms for controller optimization of grid tied hybrid AC/DC Microgrid with Multiple Renewable Sources[J]. Advances in Electrical & Computer Engineering,2019,19(2):53-60.
- [11] 翟建伟,张勇军,刘斯亮,等.基于 PQ-QV-PV 节点的光储输出功率主动控制方法[J].电力系统保护与控制,2018,46(10):1-9.
- [12] 傅强,李今宋,王加澍,等.一种基于 PQ 协调控制的并网光伏调压方法[J].自动化技术与应用,2021,40(12):94-98.
- [13] LIANG B M, KANG L, HE J Z, et al. Coordination control of hybrid AC/DC microgrid[J]. The Journal of Engineering, 2019(16):3264-3269.
- [14] 叶晨,崔双喜,王维庆.一种适用于低压微网的改进下垂控制策略[J].电力电容器与无功补偿,2018,39(6):163-167.
- [15] GAO D W. Basic concepts and control architecture of microgrids[J]. Energy Storage for Sustainable Microgrid, 2015:1-34.
- [16] LI F H, LI R S, ZHOU F Q. Composition and classification of the microgrid[J]. Microgrid Technology and Engineering Application, 2016:11-27.
- [17] 刘景霞,王硕秋.微电网并网平滑切换控制策略研究[J].电工技术,2023(2):29-31.
- [18] ADHIKARI S, LI F X. Coordinated V-f and P-Q Control of solar photovoltaic generators with MPPT and battery storage in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2014,5(3):1270-1281.
- [19] 刘国旗,卢倩楠.不平衡电压下光伏逆变器直接功率控制仿真[J].计算机仿真,2024,41(4):92-96.
- [20] 赵恩盛,韩杨,周思宇,等.微电网惯量与阻尼模拟技术综述及展望[J].中国电机工程学报,2022,42(4):1413-1428.
- [21] KHALEDIAN A, GOLKAR M A. A new power sharing control method for an autonomous microgrid with regard to the system stability[J]. Automatika, 2018, 59(1):87-93.
- [22] 李鑫,王奔.基于自适应虚拟阻抗的微网下垂控制策略[J].电力科学与工程,2017,33(5):40-45.
- [23] JOHNSTON L, DIAZ-GONZALEZ F, GOMIS-BELLMUNT O, et al. Methodology for the economic optimisation of energy storage systems for frequency support in wind power plants[J]. Applied Energy, 2015,137:660-669.
- [24] YAO F J, ZHAO J B, LI X J, et al. RBF neural network based virtual synchronous generator control with improved frequency stability[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(6):4014-4024.
- [25] WEN T L, ZHU D H, ZOU X D, et al. Power coupling mechanism analysis and improved decoupling control for virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3):3028-3041.

- [26] 和萍,李钊,李从善,等.基于虚拟同步机技术的储能机电暂态特性建模[J].电力系统保护与控制,2022,50(7):11-22.
- [27] 王祺,郭杰帅,代林旺,等.计及集群构网差异性的并网系统振荡机理[J/OL].中国电机工程学报:1-18[2024-06-13].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20240426.1020.006.html>.
- [28] LI Y S, GAO W H, HUANG S, et al. Data-driven optimal control strategy for virtual synchronous generator via deep reinforcement learning approach [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(4): 919-929.
- [29] WU H, WANG X F. A mode-adaptive power-angle control method for transient stability enhancement of virtual synchronous generators [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1034-1049.
- [30] 冯豆,李自愿,杨光辉,等.基于一致性算法的微电网无功功率自动优化控制方法[J].制造业自动化,2022,44(9):159-162.
- [31] LIANG X D, ANDALIB-BIN-KARIM C, LI W X, et al. Adaptive virtual impedance-based reactive power sharing in virtual synchronous generator controlled microgrids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(1): 46-60.
- [32] 杜建鹏,赵晋斌,曾志伟,等.基于虚拟功角功率控制的VSG增强功率解耦策略[J/OL].中国电机工程学报:1-14[2024-06-13].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20231026.1107.008.html>.
- [33] 胡志帅,任永峰,孟庆天,等.双馈虚拟同步机快速励磁控制和功角补偿策略[J].太阳能学报,2024,45(1):134-142.
- [34] 张燕平,吴子豪,师鹏,等.火电机组一次调频及试验[J].电气技术,2018,19(4):116-119.
- [35] ZHUO Z Y, ZHANG N, XIE X R, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9):171-191.
- [36] 王自力,陈燕东,李雪萍,等.孤岛微电网多虚拟同步发电机频率无差协调控制策略[J].电力系统保护与控制,2024,52(7):12-23.
- [37] MAGDY G, BAKEER A, NOUR M, et al. A new virtual synchronous generator design based on the SMES system for frequency stability of low-inertia power grids [J]. Energies, 2020, 13(21):5641.
- [38] 王建中,焦振华,叶伟强,等.考虑隐私保护的含电动汽车电网频率安全调度[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(8):143-151.
- [39] ZHU D W, ZHANG Y J A. Optimal coordinated control of multiple battery energy storage systems for primary frequency regulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1):555-565.
- [40] DOENGES K, EGIDO I, SIGRIST L, et al. Improving AGC performance in power systems with regulation response accuracy margins using battery energy storage system (BESS) [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4):2816-2825.
- [41] 王杨,杨俊丰,赵焱,等.基于储能SOC和风光功率裕度调节的风光储联合调频策略[J].电网与清洁能源,2024,40(4):150-158.
- [42] ZHAO T Q, PARISIO A, MILANOVI C J V. Distributed control of battery energy storage systems for improved frequency regulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5):3729-3738.
- [43] YU P, WAN C, SONG Y H, et al. Distributed control of multi-energy storage systems for voltage regulation in distribution networks: A back-and-forth communication framework [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3):1964-1977.
- [44] CHAKRABORTY T, WATSON D, RODGERS M. Automatic generation control using an energy storage system in a wind park [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1):198-205.
- [45] ZHANG F, FU A H, DING L, et al. MPC based control strategy for battery energy storage station in a grid with high photovoltaic power penetration [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 115:105448.
- [46] 翁毅选,邓长虹,黄文涛,等.基于最优动态闭环控制的水火电互联大电网自动发电控制策略[J].电力自动化设备,2013,33(3):66-71.

作者简介:

文 曹(1970),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统规划运行、分布式电源及储能并网运行及控制、直流输电技术;

肖 军(1983),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统规划运行、分布式电源及储能并网运行及控制;

涂平稳(1985),男,硕士,高级工程师,研究方向为配电网规划、电力市场及电力系统节能减排等;

徐韵扬(1994),女,博士,高级工程师,研究方向为新能源及储能系统控制策略。

(收稿日期:2024-06-14)