

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.01.007

电化学储能参与电网安全稳定控制的研究综述

Review of researches on grid security and stability control with the
participation of electrochemical energy storage

赵鑫, 钱本华, 王睿*, 柳虎, 翟硕, 赵梓亦

ZHAO Xin, QIAN Benhua, WANG Rui*, LIU Hu, ZHAI Shuo, ZHAO Ziyi

(东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110819)

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

摘要:为促进能源转型、优化能源结构,我国可再生能源在电力系统中的占比不断增加。但新能源机组发电具有随机性、波动性,其并网会给电网的安全稳定运行带来负面影响。电化学储能技术具有快速响应、灵活调节系统功率的特性,为电力系统的安全稳定运行提供了保障。介绍了储能技术的类型以及目前已落地的电化学储能工程项目;分别从频率稳定、静态电压稳定以及暂态电压稳定3个方面阐述了储能在电力系统稳定控制中的作用;对电动汽车换电站以及电动汽车参与电力系统调节进行了展望。储能将成为电力系统的关键组成部分。

关键词:可再生能源;储能技术;频率稳定;电压稳定;电动汽车;调频调峰

中图分类号:TK 02:TM 732

文献标志码:A

文章编号:2097-0706(2023)01-0058-09

Abstract: In order to promote energy transformation and optimize energy mix of China, the proportion of renewable energy in the energy mix has been increasing. However, the randomness and volatility of renewable energy generation brings negative impact on the safe and stable operation of power grid. Since electrochemical energy storage technology has the characteristics of rapid response and flexible power adjustment, it facilitates the safe and stable operation of power grid. Firstly, the types of energy storage technologies and completed electrochemical energy storage projects are summarized. After that, the role of energy storage in power system stability control is explained from three aspects: frequency stability, static voltage stability and transient voltage stability. Finally, the expectation on the participation of electric vehicle charging stations and electric vehicles in power system regulation is made. Energy storage technologies will be the key component of power systems.

Keywords: renewable energy; energy storage technology; frequency stability; voltage stability; electric vehicle; frequency regulation and peak shaving

0 引言

传统化石能源的不断开采和使用带来了许多全球性的问题,例如能源危机、环境污染、气候变暖、资源短缺等^[1]。气候变暖和能源危机将深刻影响人类社会的发展。因此,节能减排和可再生能源的使用成为了目前的研究重点^[2]。近年来,为实现能源结构的转型升级、低碳可持续发展,我国大力发展清洁能源产业,风电、水电、光伏等可再生能源得到了快速发展,新能源装机容量占比大幅提高;

然而,新能源机组发电具有波动性、间歇性,其并网给电网的安全稳定运行带来了负面影响,同时给电网的调频调峰带来巨大挑战,极大地限制了可再生能源的利用^[3]。目前将储能装置应用于电力系统是解决以上问题的有效手段^[4]。

本文首先介绍了常见储能技术的概况及其优缺点,以及目前已有的储能工程项目;然后,分别从频率稳定、静态电压稳定以及暂态电压稳定等3个方面,研究了电化学储能技术在电力系统稳定控制中的作用,并对研究成果进行了简要说明;最后,对未来电化学储能技术的发展及应用前景做出展望。

1 储能技术类型及应用现状

1.1 储能技术类型

储能技术是指利用一些介质或设备将能量存

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFA0702200);国家自然科学基金项目(U20A20190,62073065)

National Key R&D Program of China (2018YFA0702200); National Natural Science Foundation of China (U20A20190, 62073065)

储,并在需要的时候将能量再释放的技术。目前主要储能技术类型包括以下几种。

(1)抽水蓄能:以水作为储能介质,将电力系统负荷低谷期的电能转化为重力势能存储,在电力系统负荷高峰时将重力势能转化为电能^[5]。该技术具有高可靠性、高经济性、长运行周期、高容量的特点,常用于电力系统的调频控制和频率控制,但其受自然条件限制较大,且有投资规模大、投资周期长、转化效率低等缺点。

(2)飞轮储能:利用电动机带动飞轮高速旋转,将电能转化为飞轮动能。该技术具有能量密度高、运行寿命长、转换效率高优点,目前国内的相关技术研究仍不多^[6]。

(3)空气压缩储能:在电力系统负荷低谷时利用电能将空气压缩到高压设施中进行储能,并在需要时将压缩空气势能释放出来。该技术的优点在于项目资金投入少、运行成本低、安全性高,但缺点在于容易受自然环境的影响且比容量较低^[7]。

(4)超导磁储能:将电能转化为电磁能存储在由超导材料制造的线圈中^[8]。其优点在于响应速度快、维护方便、转换效率高、污染小,缺点在于超导材料价格昂贵,所需的相关设备也较多,投资较大。

(5)电化学储能:主要通过电池内部不同材料间的可逆电化学反应,实现能量的储存,常见的不同类型电池特点见表 1。文献[9]对电化学储能以及其他储能技术的技术特征和应用场景做出了总结。电化学储能因具有响应速度快、占用体积小、灵活性高等优点被广泛地应用于可再生能源电力系统的多个环节之中,打破了原有电力系统发、输、配、变、用同步的特性^[10-11]。

表 1 各类电池的特性对比

Table 1 Characteristics of various types batteries

电池类型	单体能量密度/ (W·h·kg ⁻¹)	单体功率密度/(W·kg ⁻¹)	能量转换效率/%	循环次数
铅酸电池	50	500	75	>500
锂电池	70~250	1 000	95	>5 000
钠酸电池	150	100	80	>2 500
全钒液体 电池	25	100	70	>10 000

2021 年全球新增储能装机 13 091.0 MW,其中电化学储能装机为 7 536.2 MW,占比为 57.6%,超过新增总量的一半(如图 1 所示)。因此,本文着眼于研究电化学储能在电力系统中应用。

1.2 应用现状

鉴于储能技术的重要性,各国均对该技术加大投入。美国、德国等发达国家在储能技术方面的研

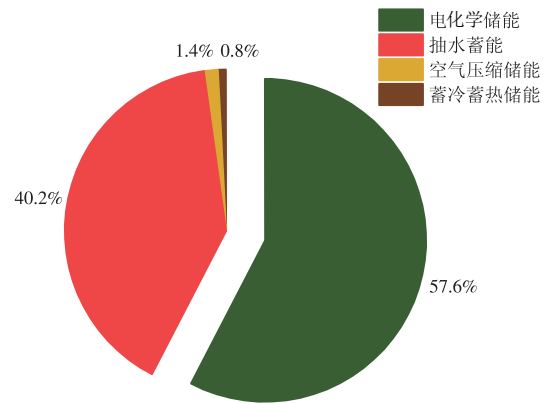


图 1 2021 年各类型储能新增量占比

Fig. 1 Proportions of new installed energy storage units in 2021

究起步较早,并早已有了落地的示范项目^[12]。近年来,澳大利亚、印度、意大利等国也相继出台了相关的支持政策,并且无论是政策出台数量还是政策覆盖区域均有所增长。

2012—2021 年全球新增电化学储能规模如图 2 所示。2021 年全球电化学储能项目的累计装机规模已超过 21.0 GW,年增长高达 7 536.2 MW,首次突破 7.0 GW;相较于 2020 年的装机规模,同比增长了 55.4%。图 2 中,2018—2021 年的新增装机规模合计为 16.9 GW,占比超过 10 年新增装机总数的 80.0%。预计 2025 年电化学储能的年装机量将增至 12.0 GW,累计装机容量将到达 40.0 GW,并且其中 90.0% 以上都将是锂电池。为顺利实现 2030 年前碳达峰目标,预计 2025 年后电化学储能装机容量将保持 12.0 GW/a 以上的增量。

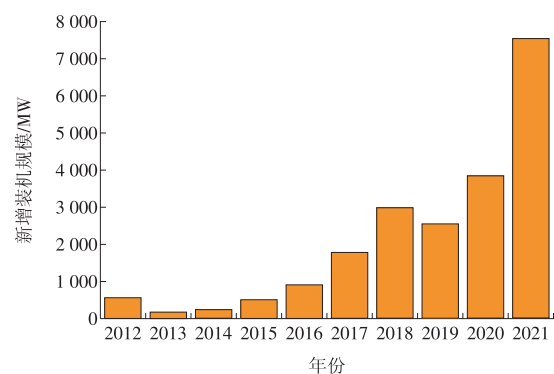


图 2 2012—2021 年全球年新增电化学储能规模

Fig. 2 New installed electrochemical energy storage capacities per year from 2012 to 2021

国内对储能技术的研究起步较晚,但由于政策支持,近几年得到了迅速的发展,也陆续有项目落地,如 2019 年 12 月并网投运的英吉沙光伏电站储能项目。国内外在电化学储能站的运行控制与应用方面已有了较多的实际工程项目,见表 2。储能系统在功率输出和能量储存方面具备优良特性,能有效解决新能源并网发电的波动性、间歇性与随机

性。2020 年 12 月国电投新昌电厂电源侧储能电站项目并网,该项目投产后可参与电网的调频调峰,能够显著改善江西电网对可再生能源的接纳能力。2022 年 11 月周口勇铭储能电站送电成功,该项目能

有效改善火电机组系统惯性大、启停困难造成的调节延迟及调节偏差、自动增益控制(AGC)补偿效果差以及风电出力波动大等问题,提升了河南电网新能源消纳水平。

表 2 国内外电化学储能项目

Table 2 Domestic and international electric energy storage projects

项目名称	储能规模		储能类型	应用类型
	功率/MW	容量(MW·h)		
新疆英吉沙电化学储能项目	3.0	6.0	磷酸铁锂电池	电源侧
新昌电厂电源侧储能电站项目	16.0	64.0	磷酸铁锂电池	电源侧
国电投狮子坪风电电化学储能项目	4.8	4.8	磷酸铁锂电池	电源侧
美国加州 Gateway 储能项目	250.0	250.0	锂电池	电网侧
澳大利亚南澳 Tesla 储能电站	100.0	129.0	锂电池	电网侧
河南周口勇铭储能电站	5.0	10.0	磷酸铁锂电池	电源侧
美国弗吉尼亚州 Beech Ridge 储能站	31.5	12.0	锂电池	电网侧
洛阳黄龙变电站电池储能示范工程	9.6	9.6	磷酸铁锂电池	电网侧

从以上储能项目的落地情况可以看出,国内外对电化学储能在新能源发电和运行控制中的作用十分重视。随着储能电池效率的提高、运行寿命的增加以及制造成本的不断下降,未来会有更多的电池储能项目建成投产。如何利用电化学储能提高电力系统稳定性将是未来国内外学者的研究重点。

2 电化学储能对系统稳定控制的作用

2.1 频率稳定

随着新能源容量的增加以及由此带来的高比例电力电子设备并网,使电力系统的惯性降低进而导致电网更容易出现频率波动。储能系统(Energy Storage System, ESS)通过控制电池的充放电以及功率大小,实现对电力系统的快速调节并对电力系统提供频率支撑。

储能系统在充放电能的过程中,通过使用虚拟同步机(Virtual Synchronous Generator, VSG)技术来模拟同步发电机正常运行时的工作特性,为系统惯量进行支撑^[13]。VSG 有 2 个特性:一是调频特性受调频下垂系数控制^[14-15];二是阻尼特性受转动惯量系数和阻尼系数的影响。目前,储能 VSG 技术的研究重点在控制策略的设计上,通过合理的策略改变下垂系数、惯性以及阻尼系数来提高频率响应特性^[16]。同时,在设计控制策略时,要注意惯性系数和下垂系数的配合^[13],系数的调整有时会使系统变得不稳定。文献[17]提出一种使用调频的控制策略,但该方法无需改变惯性系数。文献[18]选择让能量密度大的储能电池承担下垂特性输出功率,功率密度高的储能电池负责惯性特性的输出功率,解决了传统 VSG 单一形式储能时会出现的能量密度

与功率密度相矛盾的问题。

近年来电动汽车逐渐兴起,其自身所携带的电池也受到储能领域的关注^[19]。目前电力系统中配电侧的调频资源不足,导致系统调频难度大。大规模电动汽车所携带的电池为系统调频带来了大规模高灵活性调频资源。根据统计调查,私家汽车每日 96% 的时间均处于停驶状态,基于此研究人员提出了电动汽车向电网送电(V2G)技术,即将电动汽车的车载电池作为储能装置为电力系统提供服务^[20-21]。电动汽车与电力系统相连后将成为电网中分布广泛且容量庞大的分布式电化学储能装置。随着电动汽车的快速发展,有效利用电动汽车车载电池来进行电网的频率调节,发挥其优势为电力系统进行服务,将成为储能的一个重要研究方向。

早在 2002 年就有电动汽车参与电力系统调频的相关试验,AC propulsion 公司将一辆电动汽车与加州电网相连,并为电网提供调频服务^[22]。在后续对电动汽车参与电力系统运行的研究中,通过计算 V2G 业务的收入支出分析其商业模式,得出该服务可获得显著收益的结论。通过仿真验证了在德国用电动汽车辅助调频,每辆汽车可获得 30 欧元/月以上的收益^[23-24]。之后有研究人员提出了针对不同车辆进行的 V2G 可用容量评估方法^[25]。

研究者通过线性矩阵不等式对车辆的状态进行控制达到电网频率调整的目的^[26-27]。文献[28]研究了电动汽车在不同场景下参与电网一次调频的效果。文献[29-30]在考虑电动汽车实际充电需求的前提下,根据汽车接入点的频率偏差提供了分布式旋转备用。文献[31]通过判断不同储能方式的可用容量以及响应特性,提出一种协调控制电动汽

车和热泵参与电力系统调频的方法,在该方法下的电动汽车电池充电状态(State of Charge, SOC)将会保持在 $(85\pm 5)\%$ 的范围内。文献[19]考虑到不同电动汽车容量的不同,利用马尔科夫链理论构造了多状态切换下的电动汽车调频控制模型,所提的方法可以快速跟踪电网调频,且可调动功率的范围更宽。文献[32]采用同时提高电能收益和补偿车主电池性能损耗的方式,促进电动车参与调峰的积极性。文献[33]从维持电动汽车电池能量和补给电池能量两方面考虑,提出一种电动汽车参与电网调频的控制策略,但未考虑不同车主用车需求不同而导致的调频容量不同。文献[34]在满足电动汽车车主用车差异性的前提下,提出了电动汽车参与电网调频的控制策略,但只考虑了电动汽车车主个体的差异性,并没有对电动汽车电池容量在满足用户出行需求的前提下的合理分配。文献[35]考虑了不同类型电动汽车参与电网调度时可提供的容量不同,允许荷电状态达到可供调度状态的电动汽车参与电网调频,但是没有将其视作可控负荷参与系统调频。

2.2 静态电压稳定

2.2.1 电化学储能调压调频

电力系统中常用的静态电压稳定性分析的指标有阻抗模、灵敏度以及特征值等。可再生能源的不断接入可能会导致电压越限。传统的投切电容器、有载变压器等调压设备由于机械限制无法快速响应电压波动^[36]。电化学储能系统可以通过控制逆变器的有功出力和无功出力来改变电力系统的潮流分布,进而改善系统电压。与传统的调压设备相比,电化学储能调压具有较高的响应速度以及配置更灵活的等特点,尤其是在中低压配电网中的应用特别广泛。

传统用于调频的水电、火电机组均具有各自的限制与不足^[37],而电化学储能设备具有极快的响应速度,而更快的响应速度会使得频率控制更加高效和精准;同时,相比于传统调频机组,电化学储能调频需要更少的调控容量^[38]。电力系统中常用的调频指标为有频率变化率、频率最低点和静态频率偏差^[39-41]。文献[42]对比了电池储能系统与传统参与调频的火电机组,25.0 MW 的储能设备的调频效果相当于 83.3 MW 的火电机组,由此推算,电化学储能的调频效率约是火电机组的 3.3 倍。另外,文献[43-44]分析了储能设备对火电机组的调频效果,结果表明储能调频的效果为火电机组的 6~25 倍。

2.2.2 优化控制算法

随着储能项目的陆续落地,配电侧的可控设备数量将大幅增加,传统的集中式电力系统电压优化控制在计算成本和计算时间上面临巨大的考验^[45]。分散式电压控制为该问题提供了解决的方向:其基本思路是先将整个电力系统网络划分为几个集群,并让集群内的各个节点相互强耦合而与其他集群中的节点松散耦合;另外,在每个集群中都设有一个本地的控制器,可以采集集群内所有设备的信息并控制该区内的电压。这种控制方法不但可以实现每个集群内部的最优化,还可以实现最优在不同集群间的灵活协调。这种控制方法适用于运行条件复杂的大规模配电系统^[46]。有学者通过建立基于电气距离划分的储能集群,根据先集群后节点以及越限严重的集群优先这 2 条基本原则,提出了一种分布式储能集群调压控制策略^[47]。文献[46]提出了一种新的集群划分指标,并使用考虑电动汽车接入工况下多时间尺度网络动态聚类算法,结合模型预测算法(Model Predictive Control, MPC)对集群内的区域电压进行优化。文献[48]考虑到储能具有四象限运行的特性,利用 PV 曲线对储能容量以及配置地点对静态电压稳定的影响,提出利用节点静态电压稳定裕度和系统风电并网容量值来确定储能配置地点以及容量。

在解决静态电压稳定问题时,分布式储能的调压策略需要与传统的调压策略相结合,还要与逆变器电压控制策略相协调^[49]。在采用分散式电压控制时,集群的划分指标需要考虑对应电网的网络拓扑结构、电压灵敏度以及系统的调节能力,并由此来确定调压的关键节点。

2.3 暂态电压稳定

由于电力系统中并网逆变器的无功支撑有限,会出现当系统故障时,系统动态无功支撑能力不足的情况,进而使系统暂态电压稳定性面临巨大挑战。当配电网发生故障时,节点电压大幅度跌落,可能导致系统中的风机、光伏脱网。电力系统中常用的暂态电压稳定性分析指标有电压跌落幅度、极限切除时间以及电压恢复情况等^[50]。电化学储能站作为一种优质的调压资源,可以有效辅助电网快速调压并提供动态无功支撑,显著提高电网电压的调节能力和运行的灵活性^[51-52]。目前已建成并具有电压调节能力的电化学储能项目有美国加州 250.0 MW 的 Gateway 储能项目。在电压恢复过程中,无功补偿装置的滞后性会导致电压快速上升,进而会导致风电、光伏等新能源机组因暂态过电压而脱网。而分布式电化学储能可对上述问题进行

一定程度的改善并提高新能源并网发电系统的高电压、低电压穿越能力。文献[53]通过研究暂态电压稳定机理建立了暂态过程中电压稳定裕度评估量化模型,进而得出一种用于提升暂态电压稳定性的光-储联合协调控制策略,提高了系统的暂态电压稳定性。文献[54]提出了一种基于混合储能相互协调的暂态过电压稳定控制的策略,通过使用超级电容器来优先响应电压的暂态波动,实现快速吸收直流侧的不平衡功率。蓄电池在无功补偿状态工作时可以抑制母线电压波动,提升了新能源机组的高电压穿越能力。

当系统受到大的扰动时,电压在调整过程中可能会因为系统的负阻尼特性而出现长时间的振荡。基于此,有研究者提出利用储能系统提升系统阻尼的方法来消减电压的振荡。文献[55]通过在储能控制环节引入虚拟电阻来对系统阻尼进行调整,进而达到抑制系统暂态电压振荡的效果,提高了系统的稳定性^[53]。

相比于静态电压稳定控制,暂态电压稳定控制更为复杂。目前对于新型电力系统配电网暂态电压特性机理层面的研究还较少。并且暂态电压的稳定与其控制方法有极大的关系,而传统的控制方法,例如比例积分(PI)控制具有一定的局限性:该方法的鲁棒性较差,易受到不确定因素的干扰,当系统阻尼不足时可能会发生电压振荡。目前,新的控制方法(如双闭环的滑模控制、模型预测等)将是未来一段时间内研究的重点方向。另外,将储能与各个类型调压设备进行协调配合,也是提升电压稳定性的有效手段。文献[56]提出计及风电不确定性问题对无功电压优化,对连续无功补偿设备出力计划。文献[57]提出了光伏高渗透的配电网有功功率/无功功率协调控制方法,通过长短时间尺度上滚动优化求解有功/无功出力。文献[58]中增加了实时反馈矫正环节,通过对各个可调控设备进行反馈矫正,减少投切次数,降低损耗,提高协调优化的精度。

3 结论与展望

3.1 小结与建议

(1)电化学储能技术是未来能源结构转变和电力生产消费方式变革的重要支撑,在国内外发展迅速。电化学储能技术可以解决可再生能源发电的间歇性和随机波动性问题,有效缓解高峰负荷供电的需求,提高现有电网设备的利用率和电网运行效率;还可以应对电网的突发性故障,提高电能质量,满足经济社会发展对优质、安全、可靠供电的要求。

(2)目前,电化学储能参与电网调频的主要问题基本得到了解决,但仍需在保证储能响应频率偏差快速性的同时保证储能运行的安全性、经济型。尤其是对于V2G技术而言,主动抑制电池老化具有重大的研究价值。

(3)对电压稳定而言,分布式储能调压策略的优化是关键。一方面,集中式控制方法计算效率低、控制不灵活,难以适应海量分布式储能调度要求。建议采用分散式控制策略协调各分布式储能。另一方面,建议整理不同区域的电气特性,制定合理的集群划分指标,将区域划分为不同的集群,并合理选择储能配置地点和容量。

(4)对暂态电压稳定而言,分布式储能能够在短时吸收大量暂态能量,提高新能源机组的并网能力以及微电网的暂态稳定性。但这也给分布式储能控制提出了更高的要求,控制策略不当、系统阻尼不足可能会引发电压振荡。建议利用储能对系统阻尼进行适当调整,并进一步改进储能系统的暂态电压稳定控制策略;建议储能系统与并网逆变器协调提升系统的动态无功支撑能力。

3.2 展望

在可再生能源日渐成为未来能源消费主力的同时,配电侧安全稳定问题逐渐显现,主要表现在:系统惯量不足且频率特性复杂,导致系统调频难度增加;节点电压因潮流逆流出现电压越限;另外,暂态电压的稳定性较差容易导致新能源脱网、电压振荡等问题。

暂态稳定控制可通过概率稳定评估实现电源投退、负荷投退、故障等大扰动时动态调控频率和电压,这是未来研究提高暂态稳定性的一个重要思路,但目前该方法在微电网中的实际应用很少。如何在具体环境下有效使用暂态稳定控制值得继续研究。另外,随着电动汽车的不断增加,随之到来的谷峰差可能继续增大,关于电动汽车的集群管理以及最近兴起的电动汽车换电站的集群管理将变得非常重要,协调控制具有移动特性的电动汽车必然需要有强大的集控系统。随着大量电动汽车入网,需要物联网平台以及云计算技术结合多层次、多终端、大数据、云处理等手段来解决海量数据的处理问题,以求实现全局最优。在满足使用者所需电量要求的同时,减轻电网的负担,并适当参与电力系统的调频、调峰等任务。最后,现阶段配电侧分布式储能应用场景仍存在局限性且考虑目标单一,加强多元分布式储能在多场景、多目标下应用也是未来的发展趋势。

参考文献:

- [1] LIU J Y, ZHANG Y J. Has carbon emissions trading system promoted non-fossil energy development in China [J]. *Applied Energy*, 2021, 302: 117613.
- [2] LISERRE M, SAUTER T, HUNG J Y. Future energy systems: Integrating renewable energy sources into the smart power grid through industrial electronics [J]. *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, 2010, 4(1): 18-37.
- [3] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(1): 1-9.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(1): 1-9.
- [4] 钟庆昌, 托马斯·霍尔尼克. 新能源接入智能电网的逆变控制关键技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [5] 何林轩, 李文艳. 飞轮储能辅助火电机组一次调频过程仿真分析[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1679-1686.
HE Linxuan, LI Wenyan. Simulation of the primary frequency modulation process of thermal power units with the auxiliary of flywheel energy storage [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(5): 1679-1686.
- [6] 和婧. 抽水蓄能与电化学储能联合参与电网负荷频率控制技术研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
HE Jing. Study on load frequency control of the power grid with PPS and electrochemical energy storage [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.
- [7] 刘倩. 基于超级电容与水力机组结合的快速调频策略研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
LIU Qian. Research on fast frequency regulation strategy based on the combination of supercapacitor and hydraulic unit [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [8] 李盼, 杨晨, 陈雯, 等. 压缩空气储能系统动态特性及其调节系统[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(7): 2295-2305, 2408.
LI Pan, YANG Chen, CHEN Wen, et al. Dynamic characteristics of compressed air energy storage system and the regulation system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(7): 2295-2305, 2408.
- [9] ARANI A A K, GHAREHPETIAN G B, ABEDI M. Review on energy storage systems control methods in microgrids [J]. *International Journal of Electrical Power*, 2019, 107: 745-757.
- [10] MEXIS I, TODESCHINI G. Battery energy storage systems in the United Kingdom: A review of current state-of-the-art and future applications [J]. *Energies*, 2020, 13(14): 3616.
- [11] FRATE G F, FERRARI L, DESIDERI U. Energy storage for grid-scale applications: Technology review and economic feasibility analysis [J]. *Renewable Energy*, 2020, 163: 1754-1772.
- [12] HINA F A, PALANISAMY K. Battery energy storage applications in wind integrated systems—A review [C]// 2014 International Conference on Smart Electric Grid. Guntur, 2014: 1-8.
- [13] ZHANG B, YAN X, LI D, et al. Stable operation and small-signal analysis of multiple parallel dg inverters based on a virtual synchronous generator scheme [J]. *Energies*, 2018, 11(1): 203.
- [14] 张波, 张晓磊, 贾焦心, 等. 基于惯量支撑和一次调频需求的VSG储能单元配置方法[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(23): 202-209.
ZHANG Bo, ZHANG Xiaolei, JIA Jiaoxin, et al. Configuration method for energy storage unit of virtual synchronous generator based on requirements of inertia support and primary frequency regulation [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(23): 202-209.
- [15] 陶亮, 程军照, 王文玺, 等. 虚拟同步发电机参数设计及优化方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(12): 128-135.
TAO Liang, CHENG Junzhao, WANG Wenxi, et al. Methods of parameter design and optimization in virtual synchronous generator technology [J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(12): 128-135.
- [16] LI D, ZHU Q, LIN S, et al. A Self-adaptive inertia and damping combination control of VSG to support frequency stability [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(1): 397-398.
- [17] 赵伟, 李雄, 乔仁飞, 等. 基于混合储能的孤岛微网VSG控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(12): 33-40.
ZHAO Wei, LI Xiong, QIAO Renfei, et al. VSG control strategy of an isolated microgrid based on hybrid energy storage [J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(12): 33-40.
- [18] 李吉祥, 赵晋斌, 李芬, 等. 导入静态转子和虚拟调节阀的虚拟同步电机控制策略[J]. *电网技术*, 2018, 42(6): 1922-1928.
LI Jixiang, ZHAO Jinbin, LI Fen, et al. Control Strategy of virtual synchronous generator by performing static rotor and virtual regulating valve [J]. *Power System Technology*, 2018, 42(6): 1922-1928.
- [19] 董锴, 蔡新雷, 崔艳林, 等. 基于马尔科夫链的电动汽车聚合建模及多模式调频控制策略[J]. *电网技术*, 2022, 46(2): 622-631.
DONG Kai, CAI Xinlei, CUI Yanlin, et al. Aggregation modeling based on Markov chain and multi-mode control strategies of aggregated electric vehicles for frequency regulation [J]. *Power System Technology*, 2022, 46(2): 622-631.
- [20] KEMPTON W, TOMIC J. Vehicle-to-grid power

- implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy[J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 144(1): 280-294.
- [21] 刘晓飞, 张千帆, 崔淑梅. 电动汽车 V2G 技术综述[J]. *电工技术学报*, 2012, 27(2): 121-127.
LIU Xiaofei, ZHANG Qianfan, CUI Shumei. Review of electric vehicle V2G technology[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(2): 121-127.
- [22] BROOKS A N. Vehicle-to-grid demonstration project: Grid regulation ancillary service with a battery electric vehicle [R]. AC Propulsion, 2002.
- [23] KEMPTON W, TOMIC J. Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue [J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 144(1): 268-279.
- [24] TOMIC J, KEMPTON W. Using fleets of electric-drive vehicles for grid support [J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 168(2): 459-468.
- [25] 翁国庆, 张有兵, 戚军, 等. 多类型电动汽车电池集群参与微网储能的 V2G 可用容量评估[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(8): 36-45.
WENG Guoqing, ZHANG Youbing, QI Jun, et al. Evaluation for V2G available capacity of battery groups of electric vehicles as energy storage elements in microgrid [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(8): 36-45.
- [26] 张立岩, 赵俊华, 文福拴, 等. 基于线性矩阵不等式的电动汽车网络化鲁棒控制[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(20): 54-62, 70.
ZHANG Liyan, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Networked robust control of electric vehicles based on linear matrix inequalities [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(20): 54-62, 70.
- [27] 刘静, 史梦鸽, 胡永锋. 含电池储能系统的智能楼宇多阶段能量管理策略[J]. *综合智慧能源*, 2022, 44(3): 29-37.
LIU Jing, SHI Mengge, HU Yongfeng. Multi-stage energy management strategy for smart buildings with BESS [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2022, 44(3): 29-37.
- [28] MU Y F, WU J Z, EKANAYAKE J, et al. Primary frequency response from electric vehicles in the Great Britain power system [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 4(2): 1142-1150.
- [29] OTA Y, TANIGUCHI H, NAKAJIMA T, et al. Autonomous distributed V2G (vehicle-to-grid) satisfying scheduled charging [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(1): 559-564.
- [30] LIU H, HU Z, SONG Y, et al. Decentralized vehicle-to-grid control for primary frequency regulation considering charging demands [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3): 3480-3489.
- [31] 赵冬梅, 任耀宇, 程雪婷. 低压配电网分布式光伏接纳能力分析[J]. *现代电力*, 2021, 38(4): 392-403.
ZHAO Dongmei, REN Yaoyu, CHENG Xueting. Analysis of distributed photovoltaic acceptance capacity in low-voltage distribution network [J]. *Modern Electric Power*, 2021, 38(4): 392-403.
- [32] 张琨, 葛少云, 刘洪, 等. 智能配电系统环境下的电动汽车调频竞标模型[J]. *电网技术*, 2016, 40(9): 2588-2595.
ZHANG Kun, GE Shaoyun, LIU Hong, et al. A bidding model for electric vehicles to provide regulation services based on intelligent distribution system [J]. *Power System Technology*, 2016, 40(9): 2588-2595.
- [33] 刘辉, 魏岩岩, 汪旒, 等. 电动汽车入网一次调频控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(23): 90-95.
LIU Hui, WEI Yanyan, WANG Ni, et al. V2G control for EVs participating in primary frequency regulation [J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(23): 90-95.
- [34] 孙杰, 赵国瑾, 刘顺桂, 等. 基于改进时间延迟环节的集群电动汽车参与电网调频的动态特性研究[J]. *电网技术*, 2019, 43(2): 470-479.
SUN Jie, ZHAO Guojin, LIU Shungui, et al. Research on dynamic characteristics of electric vehicles participating in frequency regulation of power system based on improved time delay [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(2): 470-479.
- [35] 张谦, 李晨, 周林, 等. 计及电动汽车实时可控能量动态变化的负荷频率控制[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(8): 234-241.
ZHANG Qian, LI Chen, ZHOU Lin, et al. Load frequency control considering dynamic change of real-time controllable EV energy [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(8): 234-241.
- [36] CHENG L, CHANG Y, HUANG R. Mitigating voltage problem in distribution system with distributed solar generation using electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015, 6(4): 1475-1484.
- [37] 朱峰, 李端超, 汪德星, 等. 电力系统调频与自动发电控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [38] Energy storage—A cheaper, faster, & cleaner alternative to conventional frequency regulation [R]. California: California Energy Storage Alliance, 2011.
- [39] 常烨骅, 李卫东, 巴宇, 等. 基于运行安全的频率控制性能评价新方法[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(6): 1218-1229.
CHANG Yekui, LI Weidong, BA Yu, et al. A new method for frequency control performance assessment on operation security [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(6): 1218-1229.
- [40] KNAP V, CHAUDHARY S, STROE D I, et al. Sizing of an

- energy storage system for grid inertial response and primary frequency reserve[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3447-3456.
- [41] 邓霞, 孙威, 肖海伟. 储能电池参与一次调频的综合控制方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1157-1165.
DENG Xia, SUN Wei, XIAO Haiwei. Integrated control strategy of battery energy storage system in primary frequency regulation[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1157-1165.
- [42] 杨水丽, 李建林, 李蓓, 等. 电池储能系统参与电网调频的优势分析[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(2): 43-47.
YANG Shuili, LI Jianlin, LI Bei, et al. Advantages of battery energy storage system for frequency regulation[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(2): 43-47.
- [43] 刘闯, 孙同, 蔡国伟, 等. 基于同步机三阶模型的电池储能电站主动支撑控制及其一次调频贡献力分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4854-4866.
LIU Chuang, SUN Tong, CAI Guowei, et al. Third-order synchronous machine model based active support control of battery storage power plant and its contribution analysis for primary frequency response[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4854-4866.
- [44] 李欣然, 黎淑娟, 黄际元, 等. 储能电池参与电网二次调频的高效性评估[J]. 太阳能学报, 2019, 40(9): 2608-2615.
LI Xinran, LI Shujuan, HUANG Jiyuan, et al. Efficiency analysis of energy storage battery participating in secondary frequency regulation[J]. Acta Energetica Sinica, 2019, 40(9): 2608-2615.
- [45] 陈逸琿, 林令淇, 田鑫, 等. 三级式风电AVC协调控制策略[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(4): 20-27.
CHEN Yihui, LIN Lingqi, TIAN Xin, et al. Three-level wind power AVC coordinated control strategy [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(4): 20-27.
- [46] WANG L, DUBEY A, GEBREMEDHIN A H, et al. MPC-based decentralized voltage control in power distribution systems with EV and PV coordination [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 2908-2919.
- [47] 李翠萍, 东哲民, 李军徽, 等. 配电网分布式储能集群调压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 133-141.
LI Cuiping, DONG Zhemin, LI Junhui, et al. Control strategy of voltage regulation for distributed energy storage cluster in distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 133-141.
- [48] SHAH R, MITHULANANTHAN N, LEE K Y. Large-scale PV plant with a robust controller considering power oscillation damping [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(1): 106-116.
- [49] 王睿, 孙秋野, 张化光. 信息能源系统的信-物融合稳定性分析[J]. 自动化学报, 2022, 11(23): 1-10.
- WANG Rui, SUN Qiuye, ZHANG Huaguang. Stability analysis of cyber-physical fusion in cyber-energy systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2022, 11(23): 1-10.
- [50] 侯建兰, 马冰, 刘育权, 等. 电网暂态电压稳定的主要影响因素量化分析[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(6): 28-34.
HOU Jianlan, MA Bing, LIU Yuquan, et al. Quantitative analysis of main factors influencing transient voltage stability of power grid [J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(6): 28-34.
- [51] 欧阳曾恺. 风储联合系统运行特性与控制策略研究[D]. 上海: 东华大学, 2015.
OUYANG Zengkai. Research on performance characteristics and control strategy of wind-storage hybrid system[D]. Shanghai: Donghua University, 2015.
- [52] 彭占磊, 杨之乐, 杨文强, 等. 电化学储能参与电力系统规划运行方法综述[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(6): 37-44.
PENG Zhanlei, YANG Zhile, YANG Wenqiang, et al. Review on planning and operation methods for power system with participation of electrochemical energy storage systems [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(6): 37-44.
- [53] 鲍建, 杨沛豪, 何昭辉, 等. 新能源混合储能提高高电压穿越能力研究[J]. 热力发电, 2021, 50(8): 79-86.
BAO Jian, YANG Peihao, HE Zhaozhui, et al. Research on improving high voltage ride through capability of new energy hybrid energy storage system [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 79-86.
- [54] 常晓勇. 功率型储能系统在直流微电网运行控制中的关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
CHANG Xiaoyong. Research on key technologies of power-type energy storage systems in DC micro-grid operation and control[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [55] NI F, GUO Y, LI C. Superconducting Magnetic energy storage for seamless mode switching in a DC microgrid[C]// 2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD). Tianjin, China: IEEE, 2020.
- [56] 夏鹏, 刘文颖, 朱丹丹, 等. 基于模型预测控制的多时间尺度无功电压优化控制方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 36(3): 64-70.
XIA Peng, LIU Wenying, ZHU Dandan, et al. Multi-time scale optimal control method of reactive power and voltage based on model predictive control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 36(3): 64-70.
- [57] 张颖, 季宇, 唐云峰. 基于MPC含分布式光伏配电网有功功率-无功功率协调控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 146-152.
ZHANG Ying, JI Yu, TANG Yunfeng. Coordinated

control of active and reactive power for distribution network with distributed photovoltaic based on model predictive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41 (21): 146-152.

[58]任佳依,顾伟,王勇,等.基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度有功无功协调调度[J].中国电机工程学报,2018,38(5):1397-1407.

REN Jiayi, GU Wei, WANG Yong, et al. Multi-time scale active and reactive power coordinated optimal dispatch in active distribution network based on model predictive control [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1397-1407.

(本文责编:陆华)

收稿日期:2022-11-24;修回日期:2023-01-10

上网日期:2023-01-25;附录网址:www.ienergy.cn

“人工智能与数字驱动的新能源电力系统优化运行与控制”专刊征稿启事

建设以新能源为主体的新型电力系统,既是清洁能源电力转型的必然要求,也是实现“双碳”目标的重要途径。清洁能源电力系统中的源网荷储资源丰富,调控潜力巨大;同时,新一代信息通信技术、人工智能技术和数字化技术的迅猛发展,对清洁能源电力系统各环节的建模和形态演变、规划、优化与控制、调度、市场机制与交易策略等都带来重大技术提升和转变。

为此,《综合智慧能源》特推出“人工智能与数字驱动的新能源电力系统优化运行与控制”专刊,邀请天津大学王丹副教授、东北大学周博文副教授、中国科学院深圳先进技术研究院杨之乐副研究员、安徽大学雷杨讲师、卢森堡科学与技术研究院曹军研究员、国网重庆市电力公司张施令高级工程师担任特约主编,共同探讨“双碳”目标及“人工智能与数字驱动”背景下清洁能源电力系统的最新研究进展、理论成果、技术应用及相关标准,促进新一代清洁能源电力系统研究的深入和技术的进步,为我国能源系统的协调发展提供有益的借鉴与启示,欢迎业内同仁踊跃投稿!

一、征稿范围(包括但不限于)

- (1)基于大数据的新能源电力系统源网荷储运行特性。
- (2)基于数字驱动的新能源电力系统海量资源聚合建模。
- (3)清洁能源电力系统源网荷储形态演变与规划技术。
- (4)清洁能源电力系统源网荷储优化控制。
- (5)清洁能源电力系统源网荷储运行的市场机制。
- (6)清洁能源电力系统源网荷储数字孪生技术。
- (7)基于人工智能的新能源电力系统源网荷储调度。
- (8)清洁能源电力系统源网荷储运行控制技术应用与标准化。

二、时间进度

专刊拟于2023年3月31日截稿,择期优先出版。

三、征稿要求

- (1)专刊只收录未公开发表的论文,拒绝一稿多投。作者对论文内容的真实性和客观性负责。
- (2)按照《综合智慧能源》论文格式要求使用 Word 软件排版,请登录《综合智慧能源》在线采编系统(www.hdpower.net 或 www.ienergy.cn)下载中心下载论文模板。
- (3)请保留论文图片、曲线和表格原始文件,并在投稿时按规定提交。
- (4)论文作者应遵守相关学术不端规定。

四、投稿方式

- (1)在线投稿(推荐):登录在线采编系统(www.hdpower.net 或 www.ienergy.cn)完成在线全文投稿,欢迎投稿时推荐审稿人。
- (2)邮箱投稿:wangdantjuee@tju.edu.cn(王教授);hdjs-chd@vip.163.com(编辑部)。
- (3)咨询联系:刘芳 0371-58501060,13838002988;杨满成 010-63918755,13801175292。

作者简介:

赵鑫(1996),男,在读硕士研究生,从事电力系统稳定性分析的研究,1127100562@qq.com;

钱本华(1999),男,在读硕士研究生,从事新型电力系统静态稳定性分析研究,2714550698@qq.com;

王睿*(1993),男,讲师,博士,从事能源互联网中分布式电源的协同优化及其电磁时间尺度稳定性分析等研究,wangrui@ise.neu.edu.cn;

柳虎(1999),男,在读硕士研究生,从事大功率电力电子变换器的研究,1011450086@qq.com;

翟硕(2001),男,在读硕士研究生,从事电力电子变换器在电力系统中的应用研究,18104258983@qq.com;

赵梓亦(2003),女,从事电动汽车的能量互济控制策略研究,2254623754@qq.com。

*为通信作者。