

中国电机工程学报
Proceedings of the CSEE
ISSN 0258-8013, CN 11-2107/TM

《中国电机工程学报》网络首发论文

题目: 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望
作者: 谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 赵伟, 徐鹏, 李浩志
DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220025
网络首发日期: 2022-04-26
引用格式: 谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 赵伟, 徐鹏, 李浩志. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J/OL]. 中国电机工程学报.
<https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.220025>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220025

新型电力系统中储能应用功能的综述与展望

谢小荣¹, 马宁嘉¹, 刘威¹, 赵伟², 徐鹏², 李浩志¹

(1. 电力系统及发电设备控制与仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市海淀区 100084;
2. 国家电网有限公司华北分部, 北京市西城区 100053)

Functions of Energy Storage in Renewable Energy Dominated Power Systems: Review and Prospect

XIE Xiao-rong¹, MA Ning-jia¹, LIU Wei¹, ZHAO Wei², XU Peng², LI Hao-zhi¹

(1. State Key Lab of Control & Simulation of Power Systems & Generation Equipment (Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China; 2. North China Branch of State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing, 100053, China)

ABSTRACT: New-type power system, characterized by high penetration of renewable energy and power electronic equipment, is undergoing rapid development. Its significantly changed dynamic behavior and operating characteristics are bringing serious concerns to the balance of power and energy in different time scales. Energy storage is of great potential to improve operating performance and to balance power and energy in broad time scales. This paper first reviews the challenges in achieving multi-time-scale balance of power and energy in a new-type power system. Next, the key technical features of different energy storage technologies were summarized and their potential applications were explored. Then, the status quo of research on energy storage's functions is investigated. Finally, a multi-objective coordinated control scheme is proposed to achieve prospective and comprehensive functions of energy storages. Hopefully, the scheme can balance power and energy well in different time scales, and make energy storage the key to addressing the various challenges faced by a new-type power system.

KEY WORDS: New-type power system; energy storage; power and energy balance; multi-time scale

摘要: 以高比例新能源和高比例电力电子(即“双高”)为特征的新型电力系统处在快速发展中,其动态行为和运行特性正发生深刻变化,在多时间尺度上的功率-能量平衡面临重大挑战;而储能可有效改善系统的动态特性、满足系统多时间尺度平衡需求。本文从分析新型电力系统多

时间尺度功率-能量平衡的主要挑战出发,归纳常见储能技术的关键技术特征,探讨储能在新电力系统中的应用潜力;梳理储能应用功能的研究现状,展望未来趋势,提出一种适用新型电力系统需求的储能多目标协同调控方法,可望实现多时间尺度上功率-能量的高效平衡,为利用储能技术应对新型电力系统的关键挑战提供支撑。

关键词: 新型电力系统; 储能; 功率-能量平衡; 多时间尺度

0 引言

电力系统是一个由源-网-荷多主体构成、且功率和能量在不同时间尺度上维持平衡的复杂系统。其短时间尺度(毫微秒到数十秒级)平衡决定了系统的动态特性和稳定性;中长时间尺度(分秒到年月级)平衡决定了系统的运行效率和经济性。随着 20 世纪后期以来电力电子变换和风、光等新能源发电技术的迅猛发展,以及我国近期“碳达峰、碳中和”战略的快速推动,电力系统已经并将持续发生深刻变化,逐步过渡到以高比例新能源和高比例电力电子装备(“双高”)为特征的新型电力系统阶段。系统运行特性正发生深刻变化,在多时间尺度上的功率和能量平衡亦面临新的挑战^[1]。

多样化储能技术可在不同时间尺度上控制功率和能量的输入、输出,有望改善电力系统的稳定性和运行特性。目前,技术较为成熟的抽水蓄能和压缩空气储能受到地理条件等因素的制约;

基金项目: 国家自然科学基金项目(51925701, 51737007)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (51925701, 51737007).

灵活、高效的电化学储能因成本较高、存在电气安全隐患问题以及与新能源融合相关的技术问题等尚未全面铺开应用；以氢为媒介的化学储能方兴未艾，氢能也被视为实现低碳社会发展目标的关键能源之一。储能在电力系统中的应用是长期的关注焦点之一，诸多文献对其技术现状和发展前景进行了广泛论述。如：文[2]分析了电力系统季节性储能的技术现状及其在建模、规划、控制和市场等方面亟需解决的问题；文[3]总结了不同类型储能技术的原理和架构，分析了多种储能技术的未来研究方向和在电力系统中的潜在应用领域；文[4]从市场规模、应用分布、技术分布和地域分布等方面对储能技术在电网中的应用现状和发展趋势进行了归纳。但总体而言，既有综述较少从改善双高/新型电力系统多尺度功率和能量平衡角度来论述储能应用功能的。随着我国进入“十四五”新阶段，在“双碳”战略、环保需求和能源安全等多重约束下，及电能存储自身及相关数字信息、控制传感等高新技术推动下，储能在新型电力系统中的应用规模必将急剧增加，应用功能亦会不断丰富。

基于上述情况，本文从一个新的角度对储能在新型电力系统中的应用功能进行综述和展望：首先分析新型电力系统面临的主要挑战和多时间尺度功率-能量平衡需求；然后对比分析常见储能方式的关键技术特征和应用潜力，梳理其在电力系统中应用功能研究现状；最后对储能在新型电力系统中的应用功能进行展望，提出了一种储能多目标协同调控方法，为利用储能技术高效化解新型电力系统的关键挑战提供支撑。

1 新型电力系统面临的主要挑战

随着新能源发电和电力电子设备在源-网-荷侧的占比提高，传统电力系统逐渐向新型电力系统转变，在此过程中系统组成和特性发生深刻变化，运行的稳定性和经济性面临重大挑战。表 1 对比了传统电力系统和新型电力系统在系统组成和主要挑战方面的区别，下面进行具体分析：

1.1 传统电力系统的功率-能量平衡

传统电力系统在源、网、荷侧的主要特点包括：1) 电源侧以方便存储的化石能源和水位能作为一次能源，采用机械旋转式同步发电机作为能

量转换装置；2) 电网侧采用基于电磁感应原理的变压器和机械式断路器来实现电能的变换与传输控制；3) 负荷主体为直接将电能转化为机械能的电动机和具有电阻（R）、电感（L）和电容（C）组合特性的无源（Passive）负载。

在短时间尺度上，功率平衡的挑战主要体现在：考虑负荷的快速和不确定性时变（如夏天空调负荷急剧升降）和电网的大、小扰动（如短路故障），各同步发电机能适时并彼此协调地控制功率输出，维持系统整体和各个部件输入、输出功率的平衡，使得各旋转机组同步运行、系统工作电压和频率在允许的范围之内，即达到经典的功角稳定性、电压稳定性和频率稳定性。大型同步发电机在电力系统的应用已有超百年历史，其自同步电压源特性、较大机械惯性以及成熟的励磁调节和调速调频性能，使之能很好地响应电网动态过程，实现功率的即时平衡，从而保证系统的安全稳定性。

在中长时间尺度上，功率-能量平衡的挑战主要体现在：考虑负荷日内和季节性的峰谷变化，合理计划和调度各类机组的启停和出力，以获得最佳的资源配置效益。传统煤电、水电和核电因其一次能源具有易存储性和可调控性，借助于成熟的能量管理系统（包括自动发电/电压控制和经济调度等功能）可实现中长时间尺度的功率-能量平衡，达到电力资源大范围高效配置的目的。

表 1 传统电力系统和新型电力系统对比分析
Table.1 Comparative analysis between traditional power systems and new-type power systems

			传统电力系统	新型电力系统
系统组成	电源侧	一次能源	不可再生、高碳的化石能源、水位能等，可控、可蓄。	可再生/绿色低碳的风能、太阳能等；随机/波动性强。
		能量转换装置	机械旋转式同步电机	电力电子转换器
	电网侧		主要采用变压器和机械式断路器实现电能的变换与传输控制。	大量采用电力电子变换器实现电能的变压变频与传输控制。
	负荷侧		以电动机和无源负载为主体。	加入大量具备电子式有源前端的负荷。
主要挑战	短时间尺度		经典的功角稳定性、电压稳定性和频率稳定性。	影响经典稳定性的同时，还引发一系列的新型稳定性问题。
	中长时间尺度		负荷波动，合理计划和调度各类机组启停和出力，以获得最佳的资源配置效益。	源、荷波动，电网灵活性资源减少，源-荷之间功率和能量平衡难度上升、经济性劣化。

1.2 新型电力系统功率-能量平衡的挑战

具有“双高”特性的新型电力系统在源-网-负荷侧的主要特点包括：1) 电源侧以随机性、波动性强且不可控的风能和太阳能作为主要一次能源，采用电力电子变换器作为能量转化和并网装置；2) 电网侧大量采用电力电子变换器实现对电能的变压、变频和传输控制；3) 负荷侧越来越多地采用电力电子式有源前端（Active Front End, AFE）来实现电能的高效和可控转换与使用。

与传统电力系统不同，新型电力系统以新能源机组和电力电子设备为主体，具有电力电子控制主导、多时间尺度（宽频带）动态、低惯性和弱抗扰性等特征，更兼一次能源（风速、光照）的强随机性和高波动性，给电力系统多时间尺度的功率-能量平衡带来新的挑战^[1]。

在短时间尺度上，“双高”特性不仅会影响经典稳定性的各个侧面，还会“重塑”系统整体动态行为，引发新型稳定性问题。大量新能源机组的接入会改变电网结构和潮流分布，给以机电动态为特征的小扰动/暂态功角稳定性、电压稳定性和频率稳定性带来重大影响，而影响的大小和利弊则受制于渗透率（Penetration）、机组类型（Type）、地理位置（Location）、接入电网强度（Strength）、运行工况（Operation）及控制策略与参数（Control）（简称 PTLSOC）。新的稳定性问题既有工频动态主导的大、小扰动机电（Electro-mechanical）型稳定性问题，如新能源机组或变流器的“类机电”低频振荡、大扰动同步稳定性、故障后暂态过/低电压，更有因电力电子多时间尺度控制导致非工频动态引发的宽频带电磁型（Electromagnetic）稳定性问题，如引发广泛关注的次/超同步振荡和中高频谐振等。

在中长时间尺度上，“双高”特性带来的主要挑战是：具有强随机性、波动性的风电和光伏等新能源占比日益增长，使得电网的可调性和灵活性下降，导致源-荷之间功率和能量平衡的难度上升、经济性劣化。在传统电力系统中，源侧无论是火电、水电和核电，其电力和电量可以在很大容量和很宽时间范围内高效调节，以满足虽随机但可预测的负荷变化。而在新型电力系统中，风、光等一次能源是随机和不可控的，并因季节

和日夜变化而波动极大，更兼一些特殊气象因素（如“日全食”）可造成出力在短时间内急剧变化。新能源和负荷之间的非匹配性和双侧随机性，加上灵活性资源比重越来越低，通过传统调度来实现电网可靠高效运行的难度急剧增加。

综上所述，随着电力系统中高比例新能源和电力电子设备的接入，短时间尺度的稳定性和中长时间尺度的运行可靠性构成重大挑战，亟需寻找能在较宽时间尺度调节功率和能量的技术和设备，以保障新型电力系统运行的稳定性和经济性。

2 储能应用于新型电力系统的关键技术特征和潜力分析

根据能量转换性质，面向电力系统的储能技术可以分为狭义储能和广义储能^[2,5]，其中狭义储能是指将电能转化为其他形式的能量进行长期存储，必要时再将能量转化为电能使用的储能方式；广义储能是指仅将电能转化为其他形式的能量存储，之后不转化为电能而利用的储能方式。可见，狭义储能设备可以在不同时间尺度上实现电能的输入和输出调控，可有效改善系统的运行特性、满足新型电力系统的功率和能量平衡需求。因此，下面讨论的储能技术均为狭义储能。

从已有的储能技术来看，电力系统中的狭义储能按存储能量的方式可以主要分为：机械储能、电化学储能、化学储能和电磁储能。表 2 归纳了五种类型中常见的储能方式及其关键技术特征，从新型电力系统多时间尺度功率-能量平衡需求角度来看，重点关注的技术特征/参数包括：1) 功率和容量：储能设备的额定输入/输出功率和额定容量范围，代表储能的应用规模；2) 响应时间：储能设备从响应充放电指令开始到充放电功率首次达到额定功率的时间^[6]；3) 全容量放电持续时间：储能设备在充满电的情况下，以额定功率放电的持续时间；4) 能量循环效率：储能设备输出的能量相对于前一次充电过程中输入能量的比值，即放电量与充电量之比^[6]。图 1 显示了各种储能的响应时间与功率和能量的关系。

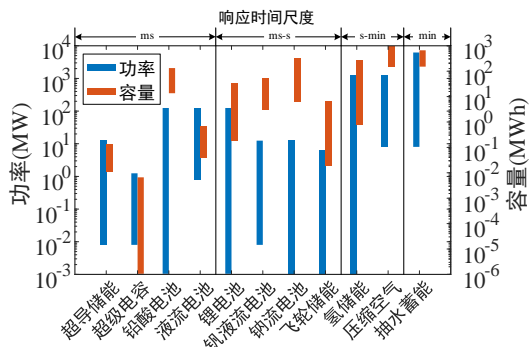


图 1 各类储能的功率、容量和响应时间
Fig.1 Power, capacity and response time of different energy storages

以超级电容和超导电磁储能为代表的电磁储能技术具有响应速度快、功率密度高、能量循环效率高等优点，但存在的主要问题是容量较小、放电持续时间短、成本高等。飞轮储能和电化学储能的响应速度较快，其中飞轮储能具备功率密度高、能量循环效率高等优点，但是其能量密度较低；电化学储能的优势在于其功率和容量可以根据应用需求灵活配置，且不受外界条件的影响和限制。抽水蓄能和压缩空气储能是目前可大规模存储和长时间放电且技术较为成熟的两项储能技术^[14]，但两者都在一定程度上受到地理、地质等条件的制约。氢能作为一种清洁高效、生产灵活的能源，可以有效推动电网、交通网和热网等多种能源网络的“互联”，提升综合能源利用率

^[15]；但是作为储能设备以电能-氢能-电能的转换方式与电网耦合，尚存在循环效率低、经济性差等问题，有待技术持续进步并取得重大突破。可见，不同储能的技术特征差异较大，单一的储能技术难以具备快速充放、大容量存储、持续充放、可靠性高、成本低等全面的条件。不同储能技术在电力系统中的应用也有所不同：响应速度快、功率密度高的功率型储能技术（如电磁储能、部分电化学储能）适用于参与系统短时间尺度的调节，譬如提供虚拟惯量、快速调频、抑制电网低频振荡、改善短期电压稳定性等；容量大、放电持续时间长的能量型储能技术（如抽水蓄能、压缩空气储能）适用于系统中长时间尺度的调节，譬如参与系统调频、削峰填谷、系统备用等。因此，为了满足新型电力系统对大规模、多时间尺度功率-能量平衡的全面需求，应综合运用多种储能技术方以有效实现新型电力系统中功率-能量的多时间尺度平衡，获得最佳的技术经济效益。

3 储能在电力系统应用功能的现状分析

随着新能源和电力电子设备的渗透率快速提高，电力系统对多时间尺度的灵活性需求不断增加。同时，储能技术也在快速发展中，不仅出现了诸如超级铅酸电池、金属空气电池、超临界压缩空气储能等新型高性能储能技术，而且电化学储能的成本也在逐年下降。在需求增长和技术进

表 2 储能的分类与关键技术特征

Table.2 Classification and technical characteristics of different energy storages

储能类型		功率(MW)	容量(MWh)	响应时间	全容量放电持续时间	能量循环效率(%)
机械储能	抽水蓄能	$10\sim5\times10^3$ ^[3,7]	200~500 ^[3]	min ^[3,8]	1~24h ^[3,9]	70~85 ^[8,10]
	飞轮储能	$10^{-3}\sim5$ ^[7,10]	0.025~5 ^[3,11]	ms~s ^[7-8]	15s~15min ^[3,9]	70~95 ^[8,10]
	压缩空气	$10\sim10^3$ ^[10]	200~1000 ^[3]	s~min ^[7-8]	1~24h ^[3,9]	41~75 ^[3,10]
电化学储能	锂电池	$10^{-3}\sim10^2$ ^[3,7]	0.25~25 ^[3]	ms~s ^[3,8]	min~1h ^[3]	85~95 ^[3]
	铅酸电池	$10^{-3}\sim10^2$ ^[10,12]	18~100 ^[3]	ms ^[3,8]	s~5h ^[3]	63~90 ^[3,8]
	钒液流电池	$10^{-2}\sim10$ ^[3,7]	4~40 ^[3]	ms~s ^[3,7]	s~10h ^[12]	60~75 ^[3]
	液流电池	$1\sim10^2$ ^[10]	0.05~0.5 ^[3]	ms ^[3]	8~10h ^[3]	60~85 ^[3,8]
	钠硫电池	$10^{-3}\sim10$ ^[7]	8~245 ^[3]	ms~s ^[3,8]	1~8h ^[3]	75~90 ^[3]
化学储能	氢储能	$10^{-3}\sim10^3$ ^[7,10]	1~200 ^[3]	ms~sec ^[7]	s~24h ^[3]	30~50 ^[3]
电磁储能	超导储能	$10^{-2}\sim10$ ^[3,7]	0.015~0.1 ^[3]	1~5ms ^[3,8]	ms~s ^[3,12]	80~95 ^[13]
	超级电容	$10^{-2}\sim1$ ^[10]	$10^{-6}\sim0.005$ ^[3]	1~20ms ^[3,8]	1ms~1min ^[9,12]	85~95 ^[3]

步的双重推动下，储能技术在电力系统中的应用发展迅速^[16]。截止 2021 年 9 月底，全球已投运储能项目累计装机规模达 193.2GW，同比增长 3.8%（我国对应为 36GW 和 8.8%）^[17]。储能提供的功能也更加多样化，结合已有的应用工程及示范项目，表 3 按照功率类型和时间尺度归纳了各类储能在电力系统中的功能应用情况。

3.1 各类储能的应用规模

据中国能源研究会储能专委会统计^[17]：截止 2021 年 9 月底，全球抽水蓄能累积装机达 172.5GW，在所有储能中占 89.3%；电化学储能累积装机规模以 16.3GW 位居第二，占 8.5%；其他储能装机规模较小，共占 2.1%。在各类电化学储能中，锂电池累计装机规模最大，占 92.8%；钠硫电池和铅酸电池分别占 3.1%和 3.0%。在过去 20 年中，抽水蓄能的规模占比持续降低，而电化学电池的装机规模呈现出爆发式增长，占比持续升高，在储能应用的发展中逐渐占据重要地位^[18]。

据国际可再生能源机构（International Renewable Energy Agency, IRENA）预测，随着电化学储能和其他形式的机械储能等装机规模持续增加，抽水蓄能的占比将在 2030 年下降到 45%~51%^[18]。推动该趋势的主要因素包括：1）新型电力系统的需求多样化：由于响应速度较慢、受地理条件约束等问题，抽水蓄能难以满足新型电力系统对功率-能量平衡的多样化需求^[18]；2）电化学储能成本降低：以往电化学储能因其高昂的成本而主要应用在离网市场、交通运输等方面，但近年来电化学储能的成本持续降低，其中占比最大的锂离子电池的价格在 2010 年至 2020 年间下跌 89%^[19]。随着成本的进一步下降，电化学储能未来将会提供更多的电网应用服务。

3.2 储能的实际应用功能

由表 3 中储能的功率类型和应用时间尺度可见，目前储能在电网中的应用主要集中在工频有功调节，尤其是在快速调频、削峰填谷以及新能

表 3 储能在电力系统中的应用功能现状

Table.3 The status quo of energy storages' functions in power systems

应用功能			机械储能			电化学储能					化学能储能	电磁储能	
			抽水蓄能	飞轮储能	压缩空气	锂电池	铅酸电池	钒液流电池	液流电池	钠硫电池	氢储能	超导储能	超级电容
工频有功调节	短时间尺度	快速调频	[20]	[21,22]	[23]	[4,24]	[21,22]	[21]	[21,25]	[25]		[26]	[27]
		抑制低频振荡		[28]								[29,30]	
		自动发电控制 AGC	[31]		[32]	[33,34]		[21]		[25,35]			
		平滑新能源出力波动		[36]		[24,37]	[22,38]	[39]	[4,24]	[24,40]	[41]	[42]	[22]
		新能源出力计划跟踪				[35,37]	[35]	[37]	[35]				
	中长时间尺度	新能源出力爬坡控制				[35]	[4,35]			[35]			
		缓解输配电设备阻塞	[43]		[32,43]	[44]					[43]		
		微网黑启动	[40,45]		[26,32]		[9,46]		[25,35]				
		削峰填谷	[20]	[13]	[13,35]	[4,24]	[4,13]	[13,37]	[13,35]	[35,40]			
		参与市场调节	[47]			[48]							
		热备用	[49]	[3,50]	[13]	[51]	[13,35]		[40]	[46,50]		[35]	
		冷备用	[20]			[35]		[13,35]		[40]			
		延缓输配电扩容升级	[43,50]		[32],[43]		[35]			[35,51]	[43]		
	工频无功调节	过电压抑制										[35]	[37]
		短期电压稳定		[37]								[13,35]	[37]
		自动电压控制 AVC		[13,22]		[34,41]	[35]	[35]		[35,48]			
非工频调节	短时间尺度	谐波谐振抑制										[46]	[22]
		次/超同步振荡抑制										[13,35]	[37]
		电能质量控制		[13,35]	[32]	[35,48]	[13,22]	[13,35]	[35]	[40]		[13,35]	[37]

注：表中浅底色表示已有实际工程应用，深底色表示目前还处于理论阶段或示范初期。

源并网运行等方面的实际应用工程较多。据统计^[18], 85%以上的抽水蓄能用于削峰填谷, 近 50%的电化学储能用于调频。而在工频无功和非工频调节方面, 储能目前主要用于短时间尺度调控功能, 在中长时间尺度的应用(如静态无功置换、中长期电压调节)较少。

从储能在电网中的应用分布来看: 1) 发电侧功能主要包括: 快速调频、抑制低频振荡、自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)、平滑新能源出力波动、新能源出力计划跟踪、新能源出力爬坡控制、微网黑启动、提供冷、热备用等; 2) 输配电网侧功能主要包括: 优化新能源并网、延缓输配电线路阻塞、延缓设备升级、优化潮流分布等; 3) 负荷侧功能主要包括: 改善电能质量、提供分布式能源供应、参与市场调节、电动汽车接入等。

对比储能应用中的各项功能可见, 尽管电化学储能装机规模远不及抽水蓄能, 但其提供的功能更加多样化; 电磁储能(包括超导储能和超级电容)由于在响应速度方面表现突出, 目前主要应用于短时间尺度的工频无功调节和非工频调节; 氢储能由于循环效率尚低, 目前在电网中的应用处于起步阶段。

3.3 (理论) 研究中的储能应用功能

表 3 中主要列举了实际储能工程中的一些应用功能, 而国内外研究中还提出了不少理论上可实现、但在实践尚没有实施或推广的应用功能, 譬如: 1) 通过功率、能量的调节, 提高配电设施利用效率^[7], 优化资源配置; 2) 提高风电机组的低电压穿越能力^[10]; 3) 给微电网提供快速功率支撑, 实现微网并、离网运行模式的灵活切换^[7]; 4) 推动光伏发电自用的发展^[3]; 5) 提高分布式能源汇聚效应, 实现电动汽车与电网双向互动^[50]等。

4 面向新型电力系统的储能应用功能展望

从储能在电力系统中的应用功能现状来看, 现有储能的应用以能量型为主, 功能主要包括电网辅助服务、提高新能源并网发电平稳性、系统备用等方面, 而在短时间尺度的稳定控制方面(如惯性支撑)和长时间尺度的无功控制方面(如中长期电压调节)少有实际应用。而且, 既有储能项目的应用功能较为单一, 核心目标大多

局限在 1~2 种, 少有综合多种应用功能的储能系统。虽然某些示范工程采用多类型储能技术以提供若干功能, 但也缺乏自上而下的总体设计和多功能的综合协调^[7]。

针对新型电力系统面临的多时间尺度功率-能量平衡挑战, 有必要在一定区域内集成多种储能技术, 通过协调管理和优化控制, 实现储能应用功能的多目标集成, 满足系统多时间尺度平衡需求, 提升系统稳定性和经济性。图 2 展示了一种面向新型电力系统的储能多目标协同调控概念模型^[52], 它包括系统级控制和储能装置级控制两个层次。

系统级控制主要包括三方面的功能: 1) 态势感知, 获取电网的功率-能量平衡需求和各储能设备的工况, 为实现协同控制提供信息; 2) 协同控制, 按所需功率-能量类型(有功/无功)、频率范围(工频/非工频)以及时间尺度等优化分配多储能装置的就地控制目标, 以实现系统整体调控的最佳提升; 3) 综合评价: 结合态势感知和协同控制反馈信息对协同控制的稳定性、经济性、灵活性和支撑能力进行综合评价, 进而自适应调整协同控制优化问题的模型和参数。

图 2 以发展最快的电化学储能装置为例说明装置级控制。电池及其管理系统(Battery and Battery Management System, BBMS)通过由 PWM 控制的功率变换器(Power Conversion System, PCS)和滤波电路接入电网。装置级控制的核心为 PCS 调控, 典型结构包括功率外环控制和电流内环控制。其中功率外环控制按照功率和频率的类型分为工频有功控制、工频无功控制和非工频控制三个部分: 1) 工频有功控制统筹惯性支撑、快速调频、AGC 等功能, 用于支撑系统多时间尺度的功率-能量需求, 提升频率稳定性和功率平稳性; 2) 工频无功控制兼顾过电压抑制、短期电压稳定、自动电压控制(Automatic Voltage Control, AVC)等功能, 用于不同时间尺度的电压-无功调节, 提升系统的电压稳定性和电压质量; 3) 非工频控制兼具次/超同步振荡抑制、(间)谐波/谐振抑制、电能质量控制等功能, 用于平抑工频以外的宽频带电磁动态, 防范系统出现各种非工频振荡并提升电能质量^[1]。三部分功能对应的控制环节根据系统级综合协调控制指令进行优化配置和

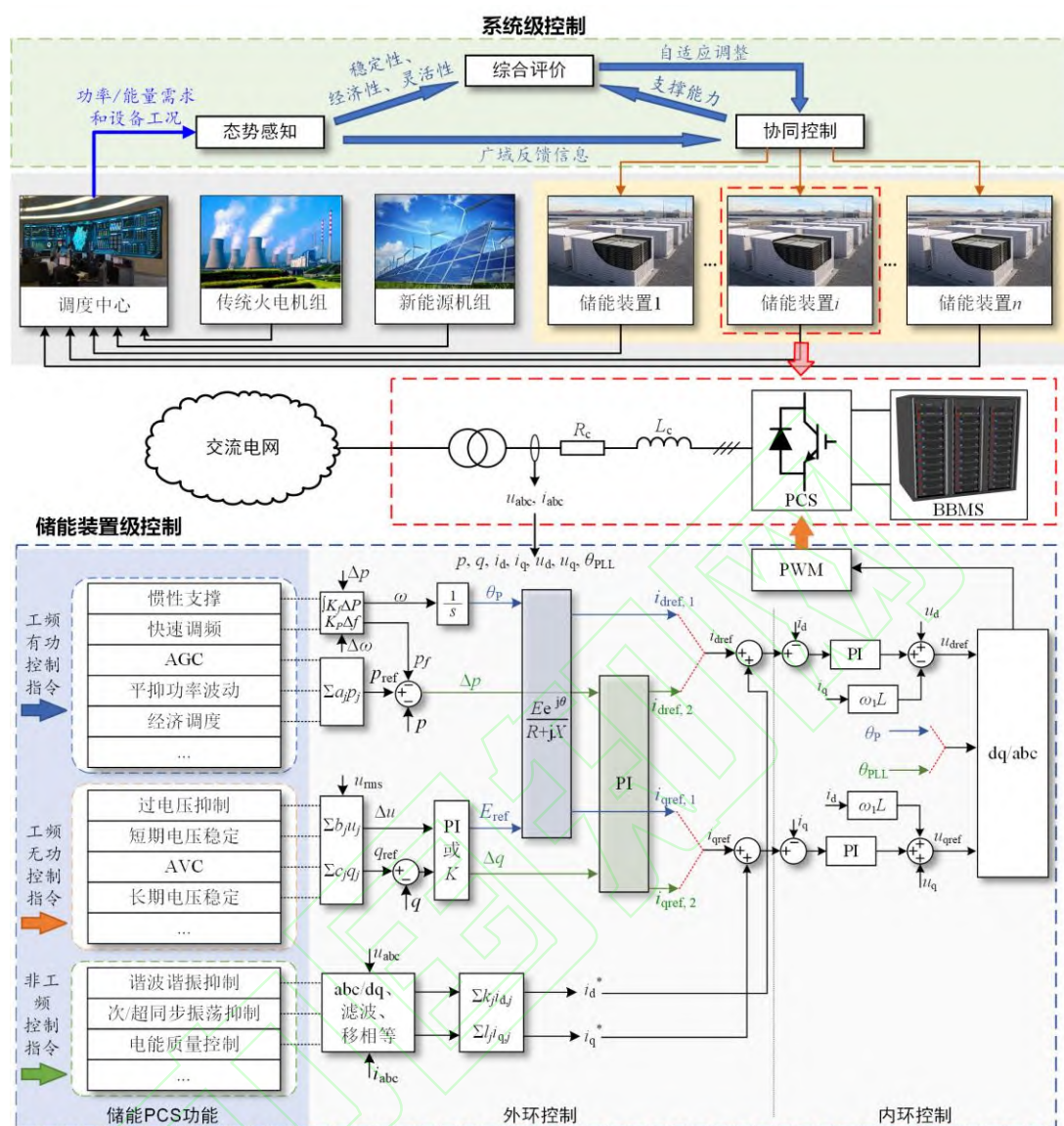


图 2 面向新型电力系统的储能多目标协同调控概念模型

Fig.2 The conceptual model for multi-purpose coordinated control of energy storage in new-type power systems

在线调节，分别生成有功、无功和非工频参考值，进而加权合成外环控制总输出。内环控制根据外环控制输出，生成变流器的电压参考值，进而通过 PWM 脉冲调控变流器状态，实现预期控制目标。PCS 控制可结合实际条件（如电网强度、功能需求等）选择跟网型（grid-following）或构网型（grid-forming）控制策略。

5 结论

具有“双高”特性的新型电力系统在短时间尺度上功率平衡特性将影响经典稳定性,并引发诸如宽频振荡等新型稳定性问题;在中长时间尺度上的功率-能量平衡将对系统运行调度和大范围

资源配置带来重大挑战。多样化储能技术可在不同时间尺度上调控功率-能量,有望改善系统稳定性和运行特性。但目前储能在极短时间的稳定控制和长时间的无功控制方面应用较少,且在工程应用中储能的功能较为单一,少有兼顾多时间尺度需求对储能进行全维度调控的。为了应对新型电力系统的多时间尺度平衡需求,本文展望了一种储能多目标协同调控方法,通过实时感知系统运行态势,协调工频/非工频、数毫秒至数日级功率-能量控制,实现储能的多目标稳定控制和优化调度功能,进而全方位支撑新型电力系统的安全高效、清洁低碳运行。

参考文献

- [1] 谢小荣,贺静波,毛航银,李浩志. “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): 461-475.
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): 461-475. (in Chinese).
- [2] 姜海洋,杜尔顺,朱桂萍,黄俊辉,钱敏慧,张宁. 面向高比例可再生能源电力系统的季节性储能综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 194-207.
Jiang Haiyang, Du Ershun, Zhu Guiping, et al. Review and Prospect of Seasonal Energy Storage for Power System with High Proportion of Renewable Energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 194-207. (in Chinese).
- [3] Nadeem F, Hussain S M S, Tiwari P K, et al. Comparative review of energy storage systems, their roles, and impacts on future power systems[J]. IEEE Access, 2018, 7: 4555-4585.
- [4] 孙玉树,杨敏,师长立,贾东强,裴玮,孙丽敬. 储能的应用现状和发展趋势分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 80-89.
Sun Yushu, Yang Min, Shi Changli, et al. Analysis of Application Status and Development Trend of Energy Storage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 80-89. (in Chinese).
- [5] 李建林,田立亭,来小康. 能源互联网背景下的电力储能技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 15-25.
Li Jianlin, Tian Liting, Lai Xiaokang. Prospects of Power Storage Technology in case of Energy Internet[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 15-25. (in Chinese).
- [6] DB31/T 1146.1-2019, 智能电网储能系统性能测试技术规范[S].
- [7] 李建林,马会萌,惠东. 储能技术融合分布式可再生能源的现状与发展趋势[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 1-10+20.
Li Jianlin, Ma Huimeng, Hui Dong. Present Development Condition and Trends of Energy Storage Technology in the Integration of Distributed Renewable Energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 1-10+20. (in Chinese).
- [8] 刘畅,卓建坤,赵东明,李水清,陈景硕,王金星,姚强. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 1-18+369.
Liu Chang, Zhuo Jiankun, Zhao Dongming, et al. A Review on the Utilization of Energy Storage System for the Flexible and Safe Operation of Renewable Energy Microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1-18+369. (in Chinese).
- [9] 程时杰,李刚,孙海顺,文劲宇. 储能技术在电气工程领域中的应用与展望[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(2): 1-8.
Cheng Shijie, Li Gang, Sun Haishun, et al. Application and Prospect of Energy Storage in Electrical Engineering[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(2): 1-8. (in Chinese).
- [10] H. Zhu et al., "Energy storage in high renewable penetration power systems: Technologies, applications, supporting policies and suggestions," in CSEE Journal of Power and Energy Systems, doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.00090.
- [11] Meng L, Zafar J, Khadem S K, et al. Fast frequency response from energy storage systems—A review of grid standards, projects and technical Issues[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 11(2): 1566-1581.
- [12] 陈伟,石晶,任丽,唐跃进,石延辉. 微网中的多元复合储能技术[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 112-115.
Chen Wei, Shi Jing, Ren Li, et al. Multi-element composite energy storage technology in microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 112-115. (in Chinese).
- [13] 张文亮,丘明,来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008(7): 1-9.
Zhang Wenliang, Qiu Ming, Lai Xiaokang. Application of Energy Storage Technologies in Power Grids[J]. Power System Technology, 2008(7): 1-9. (in Chinese).
- [14] Ruud Kempener, Gustavo de Vivero. Renewables and Electricity Storage, A Technology Roadmap for REmap 2030[EB/OL]. International Renewable Energy Agency (IRENA): June 2015, <https://www.irena.org/publications/2015/Jun/Renewables-and-Electricity-Storage>.
- [15] 曹军文,郑云,张文强,于波. 能源互联网推动下的氢能发展[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(4): 302-311.
Cao Junwen, Zheng Yun, Zhang Wenqiang, et al. Hydrogen energy development driven by the Energy Internet[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(4): 302-311.
- [16] R. H. Byrne, T. A. Nguyen, D. A. Copp, B. R. Chalamala and I. Gyuk, "Energy Management and Optimization Methods for Grid Energy Storage Systems," in IEEE Access, vol. 6, pp. 13231-13260, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2741578.
- [17] 中国能源研究会储能专委会. 储能产业研究白皮书 2021 年三季度数据[R].
- [18] Adnan Z. Amin. Electricity Storage and Renewables:

- Costs and Markets to 2030[EB/OL]. International Renewable Energy Agency (IRENA): October 2017, <https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets>.
- [19] Veronika Henze. Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020[EB/OL]. Bloomberg NEF: December 16, 2020, <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh>.
- [20] 骆妮, 李建林. 储能技术在电力系统中的研究进展[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(2): 71-79.
Luo Ni, Li Jianlin. Research Progress of Energy Storage Technology in Power System[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(2): 71-79. (in Chinese).
- [21] 李欣然, 黄际元, 陈远扬, 刘卫健. 大规模储能电源参与电网调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 145-153.
Li Xinran, Huang Jiyuan, Chen Yuanyang, et al. Review on large-scale involvement of energy storage in power grid fast frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 145-153. (in Chinese).
- [22] 罗星, 王吉红, 马钊. 储能技术综述及其在智能电网中的应用展望[J]. 智能电网, 2014, 2(1): 7-12.
Luo Xin, Wang Jihong, Ma Zhao. Overview of Energy Storage Technologies and Their Application Prospects in Smart Grid[J]. Smart Grid, 2014, 2(1): 7-12. (in Chinese).
- [23] 梅生伟, 薛小代, 陈来军. 压缩空气储能技术及其应用探讨[J]. 南方电网技术, 2016, 10(3): 11-15+31+3.
Mei Shenwei, Xue Xiaodai, Chen Laijun. Discussion on Compressed Air Energy Storage Technology and Its Application[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3): 11-15+31+3. (in Chinese).
- [24] X. Li and S. Wang, "A review on energy management, operation control and application methods for grid battery energy storage systems," in CSEE Journal of Power and Energy Systems, doi: 10.17775/CSEEJPES.2019.00160.
- [25] 叶季蕾, 薛金花, 王伟, 吴福保, 杨波. 储能技术在电力系统中的应用现状与前景[J]. 中国电力, 2014, 47(3): 1-5.
Ye Jilei, Xue Jinghua, Wang Wei, et al. Application of Energy Storage Technology and Its Prospect in Power System[J]. Electric Power, 2014, 47(3): 1-5. (in Chinese).
- [26] 王承民, 孙伟卿, 衣涛, 颜志敏, 张焰. 智能电网中储能技术应用规划及其效益评估方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 33-41+21.
Wang Chengmin, Sun Weiqing, Yi Tao, et al. Review on Energy Storage Application Planning and Benefit Evaluation Methods in Smart Grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 33-41+21. (in Chinese).
- [27] 张宝锋, 童博, 冯仰敏, 刘庆元, 赵勇. 电化学储能在新能源发电侧的应用分析[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 13-18.
Zhang Baofeng, Tong Bo, Feng Yangmin, et al. Application analysis of electrochemical energy storage technology in new energy power generation side[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 13-18. (in Chinese).
- [28] 史林军, 陈中, 王海风, 等. 应用飞轮储能系统阻尼电力系统低频振荡[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(8): 29-33.
Shi Linjun, Chen Zhong, Wang Haifeng, et al. Damping of power system low-frequency oscillations with FESS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(8): 29-33. (in Chinese).
- [29] Wang L, Chen S S, Lee W J, et al. Dynamic stability enhancement and power flow control of a hybrid wind and marine-current farm using SMES[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(3): 626-639.
- [30] Ali M H, Murata T, Tamura J. Transient stability enhancement by fuzzy logic-controlled SMES considering coordination with optimal reclosing of circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 45(3): 1045-1051.
- [31] 梁亮, 李普明, 刘嘉宁, 占才亮, 李博. 抽水蓄能电站自主调频控制策略研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3288-3295.
Liang Liang, Li Puming, Liu JiaNing, et al. Study on the Control Strategy of Pumped Storage Power Station for Frequency Regulation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3288-3295. (in Chinese).
- [32] 郭祚刚, 马溪原, 雷金勇, 袁智勇. 压缩空气储能示范进展及商业应用场景综述[J]. 南方能源建设, 2019, 6(3): 17-26.
Guo Zuogang, Ma Xiyuan, Lei Jingyong, et al. Review on Demonstration Progress and Commercial Application Scenarios of Compressed Air Energy Storage System[J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(3): 17-26. (in Chinese).
- [33] 孙冰莹, 杨水丽, 刘宗歧, 李婷婷. 国内外兆瓦级储能调频示范应用现状分析与启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 8-16+38.
Sun Bingying, Yang Shuili, Li Zongqi, et al. Analysis on Present Application of Megawatt-scale Energy Storage in Frequency Regulation and Its Enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 8-16+38. (in Chinese).
- [34] 李建林, 武亦文, 王楠, 熊俊杰, 马速良. 吉瓦级电化学储能电站研究综述及展望[J/OL]. 电力系统自动化: 1-15 [2021-06-13].
Li Jianlin, Wu Yiweng, Wang Nan, et al. Review and

- Prospect of Gigawatt-level Electrochemical Energy Storage Power Station[J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-15 [2021-06-13]. (in Chinese).
- [35] 许守平,李相俊,惠东.大规模储能系统发展现状及示范应用综述[J].电网与清洁能源,2013,29(8):94-100+108.
- Xu Shouping, Li Xiangjun, Hui Dong. A Survey of the Development and Demonstration Application of Large-Scale Energy Storage[J]. Power System and Clean Energy, 2013,29(8):94-100+108. (in Chinese).
- [36] Arani A A K, Karami H, Gharehpetian G B, et al. Review of Flywheel Energy Storage Systems structures and applications in power systems and microgrids[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2017,69: 9-18.
- [37] 李建林,袁晓冬,郁正纲,葛乐.利用储能系统提升电网电能质量研究综述[J].电力系统自动化,2019,43(8):15-24.
- Li Jianling, Yuan Xiaodong, Yu Zhenggang, et al. Comments on Power Quality Enhancement Research for Power Grid by Energy Storage System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019,43(8):15-24. (in Chinese).
- [38] 汪海蛟,江全元.应用于平抑风电功率波动的储能系统控制与配置综述[J].电力系统自动化,2014,38(19):126-135.
- Wang Haijiao, Jiang Quanyuan. An Overview of Control and Configuration of Energy Storage System Used for Wind Power Fluctuation Mitigation[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(19):126-135. (in Chinese).
- [39] Y. Sun, Z. Zhao, M. Yang, D. Jia, W. Pei and B. Xu, "Overview of energy storage in renewable energy power fluctuation mitigation," in CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 6, no. 1, pp. 160-173, March 2020, doi: 10.17775/CSEEJPES.2019.01950.
- [40] 胡泽春,丁华杰,宋永华,张放.能源互联网背景下储能应用的研究现状与展望[J].电力建设,2016,37(8):8-17.
- Hu Zechun, Ding Huajie, Song Yonghua, et al. Research Status and Prospect of Energy Storage Application under Energy Internet Background[J]. Electric Power Construction, 2016,37(8):8-17. (in Chinese).
- [41] 荆平,徐桂芝,赵波,杨岑玉,王乐,金翼,肖宇.面向全球能源互联网的大容量储能技术[J].智能电网,2015,3(6):486-492.
- Jing Ping, Xu Guizhi, Zhao Bo, et al. Large-scale Energy Storage Technology for Global Energy Internet[J]. Smart Grid,2015,3(6):486-492. (in Chinese).
- [42] 王志斌,汪毅,宋昭昭.浅谈变电站中储能装置的应用与发展[J].电源技术,2012,36(9):1414-1417.
- Wang Zhibing, Wang Yi, Sun Zhaozhao, et al. Application and development of energy storage devices for substation[J]. Power Sources, ,2012,36(9):1414-1417. (in Chinese).
- [43] 苏小林,李丹丹,阎晓霞,谭逸雪.储能技术在电力系统中的应用分析[J].电力建设,2016,37(8):24-32.
- Su Xiaolin, Li Dandan, Yan Xiaoxia, et al. Application Analysis of Energy Storage Technology in Power System[J]. Electric Power Construction,2016,37(8):24-32. (in Chinese).
- [44] 田浩毅,迟峰,齐晓曼,时珊珊,方陈.储能技术发展及在城市电网的应用展望[J].电力与能源,2018,39(6):867-871.
- Tian Haoyi, Chi Feng, Qi Xiaoman, et al. Development of Energy Storage Technology and Application Prospects in Urban Power Grid[J]. Power and Energy, 2018,39(6):867-871. (in Chinese).
- [45] 艾欣,董春发.储能技术在新能源电力系统中的研究综述[J].现代电力,2015,32(5):1-9.
- Ai Xin, Dong Chunfa. Review on the Application of Energy Storage Technology in Power System with Renewable Energy Sources[J]. Modern Electric Power, 2015,32(5):1-9. (in Chinese).
- [46] 刘世林,文劲宇,孙海顺,程时杰.风电并网中的储能技术研究进展[J].电力系统保护与控制,2013,41(23):145-153.
- Liu Shilin, Wen Jingyu, Sun Haishun, et al. Progress on applications of energy storage technology in wind power integrated to the grid[J]. Power System Protection and Control, 2013,41(23):145-153. (in Chinese).
- [47] 马实一,李建成,段聪,吴骏,徐彤,陈皓菲,潘文霞,严慧敏.基于电力市场背景的风-光-抽水蓄能联合优化运行[J].智慧电力,2019,47(8):43-49.
- Ma Shiyi, Li Jianchen, Duan Cong, et al. Joint Operation Optimization of Wind-Photovoltaic-Pumped Hydro Storage Based on Electricity Market[J]. New Energy, 2019,47(8):43-49. (in Chinese).
- [48] 李相俊,王上行,惠东.电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J].电网技术,2017,41(10):3315-3325.
- Li Xiangjun, Wang Shangxing, Hui Dong. Summary and Prospect of Operation Control and Application Method for Battery Energy Storage Systems[J]. Power System Technology, 2017,41(10):3315-3325. (in Chinese).
- [49] 国家电网公司"电网新技术前景研究"项目咨询组,王松岑,来小康,程时杰.大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析[J].电力系统自动化,2013,37(1):3-8+30.
- Consulting Group of State Grid Corporation of China to Prospects of New Technologies in Power Systems. An Analysis of Prospects for Application of Large-scale EnergyStorage Technologyin Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013,37(1):3-8+30. (in Chinese).

- [50] 寇凌峰,张颖,季宇,吴鸣,熊雄,胡转娣,孟锦鹏,向月.分布式储能的典型应用场景及运营模式分析[J].电力系统保护与控制,2020,48(4):177-187.

Kou Lingfeng, Zhang Ying, Ji Yu, et al. Typical application scenario and operation mode analysis of distributed energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2020,48(4):177-187. (in Chinese).

- [51] 丁明,陈忠,苏建徽,陈中,吴建锋,朱承治.可再生能源发电中的电池储能系统综述[J].电力系统自动化,2013,37(1):19-25+102.

Ding Ming, Chen Zhong, Su Jianhui, et al. An Overview of Battery Energy Storage System for Renewable Energy Generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013,37(1):19-25+102. (in Chinese).

- [52] 谢小荣,马宁嘉,刘威.电力系统中储能的多目标协同控制方法及装置[P]. 北京市: CN202111501022.2, 2021-12-09.



谢小荣

作者简介:

*通信作者: 谢小荣, 男, 教授, 研究方向包括电力系统稳定分析与控制、柔性输配电系统等, xiexr@tsinghua.edu.cn;

马宁嘉, 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析与控制, mnj21@mails.tsinghua.edu.cn;

刘威, 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析与控制, liuw17@mails.tsinghua.edu.cn;

赵伟, 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化, 电网规划设计, cnweizhao@163.com;

徐鹏, 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统规划设计, xupeng_ncepu@126.com;

李浩志, 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析与控制, lih19@mails.tsinghua.edu.cn。

Functions of Energy Storage in Renewable Energy Dominated Power Systems: Review and Prospect

XIE Xiao-rong^{1*}, MA Ning-jia¹, LIU Wei¹, ZHAO Wei², XU Peng², LI Hao-zhi¹

(1. Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University; 2. North China Branch of State Grid Corporation of China)

KEY WORDS: new-type power system; energy storage; power and energy balance; multi-time scale

The new-type power system, characterized by high penetration of renewable energy and power electronic equipment, is undergoing rapid development. Its significantly changed dynamic behavior and operating characteristics are bringing serious concerns to the balance of power and energy in different time scales. Energy storage is of great potential to improve operating performance and to balance power and energy in broad time scales. In this paper, the functions of energy storage in new-type power systems are reviewed and prospected.

Comparing with the traditional power system, the new-type power system has serious challenges in the operational stability in short time scales as well as reliability in long time scales. There is an urgent demand to propose technologies and equipment that can regulate power and energy in a wide time scale to ensure the stability and efficiency of new-type power systems.

However, it is difficult for a single energy storage technology to meet the conditions of rapid charging and discharging, large-capacity storage, continuous charging and discharging, high reliability, and low cost. Therefore,

it is proposed to comprehensively utilize the functions of multiple energy storage technologies to meet the multi-time-scale balance of power and energy in new-type power systems. From the perspective of engineering application, current energy storages are rarely used in the control of very short-term stability and long-term reactive power. And functions of energy storages in engineering applications are relatively single, which are rare to take into account the needs of multi-time-scale balance.

In this paper, a conceptual model is proposed for multi-purpose coordinated control of energy storage in new-type power systems, as shown in Fig.1(Fig.2 in the main text). The scheme realizes the multi-objective stability control and optimal scheduling functions of energy storages by situational awareness, coordinating line /non-line frequency power, and power-energy control varying from several milliseconds to several days. Hopefully, the scheme can balance power and energy well in different time scales, and make energy storage the key to addressing various challenges of new-type power systems.

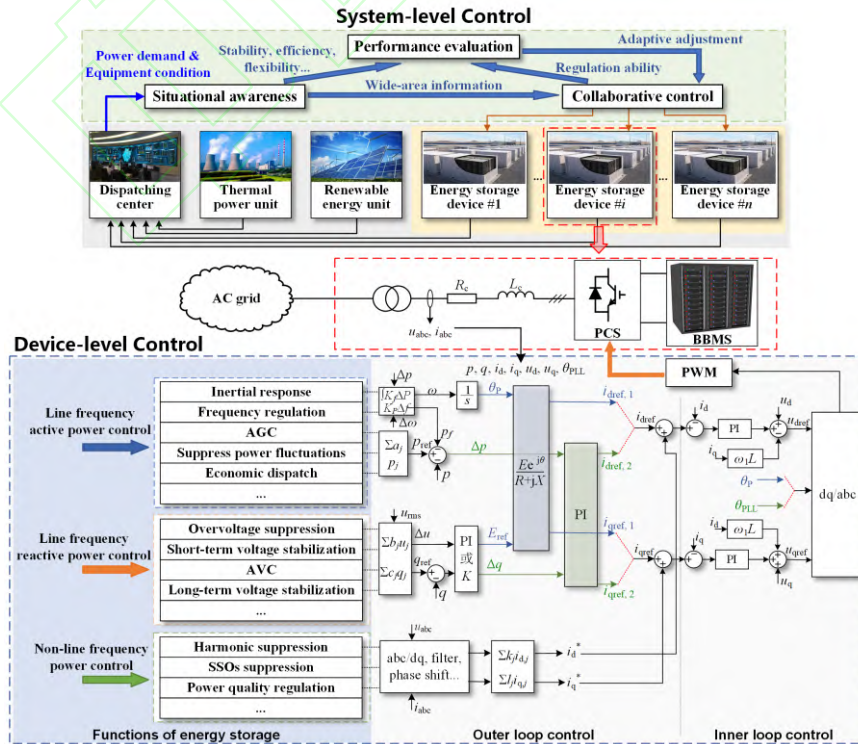


Fig. 1 The conceptual model for multi-purpose coordinated control of energy storage in new-type power systems