



超级电容储能技术参与源网荷储系统优化控制研究

徐玮韡, 孙益辉

(国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

摘 要: 全球能源转型进程加快, 高比例可再生能源并网导致的电力系统波动问题不断加剧。源网荷储系统成为保证电力系统稳定运行的关键。超级电容储能技术凭借自身充放电速率、循环寿命等优势, 在电力系统控制中具有重要作用, 是源网荷储系统优化控制的重要支撑。本文综述了超级电容储能技术与源网荷储系统的优化控制策略, 首先重点梳理了国内外超级电容储能技术的研究发展进程, 然后阐述了源网荷储系统结构划分, 最后深入分析超级电容储能技术在源网荷储系统运行中, 功率平衡调节、系统频率调节和源荷协同优化方面的作用, 为超级电容储能技术在源网荷储一体化控制升级提供参考。

关键词: 超级电容; 储能; 电力系统; 源网荷储; 一体化

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0430

中图分类号: TM 732

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 06-2281-03

Research on the optimization and control of source grid load storage system with the participation of supercapacitors energy storage technology

XU Weiwei, SUN Yihui

(Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, Zhejiang, China)

Abstract: The global energy transition process is accelerating, and the problem of power system fluctuations caused by the high proportion of renewable energy connected to the grid is constantly intensifying. The source grid load storage system has become the key to ensuring the stable operation of the power system. Super capacitor energy storage technology plays an important role in power system control due to its advantages such as charging and discharging rate and cycle life, and is an important support for optimizing the control of source grid load storage systems. This study summarizes the optimization control strategies of supercapacitor energy storage technology and source grid load storage systems. Firstly, the research and development process of supercapacitor energy storage technology at home and abroad is summarized. Then, the structural division of source grid load storage systems is elaborated. Finally, the role of supercapacitor energy storage technology in power balance regulation, system frequency regulation, and source load collaborative optimization in

收稿日期: 2026-05-18; 修改稿日期: 2026-06-16。

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目资助 (B311DS240014)。

第一作者: 徐玮韡 (1983—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为配电自动化及配电管理系统, E-mail: duq1b9@sina.com; 通信作者: 孙益辉, 高级工程师, 研究方向为嵌入式系统及其在电力系统中的应用, E-mail: ppd140@sina.com。

引用本文: 徐玮韡, 孙益辉. 超级电容储能技术参与源网荷储系统优化控制研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(6): 2281-2283.

Citation: XU Weiwei, SUN Yihui. Research on the optimization and control of source grid load storage system with the participation of supercapacitors energy storage technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(6): 2281-2283.

the operation of source grid load storage systems is analyzed in depth, providing reference for the upgrade of supercapacitor energy storage technology in integrated control of source grid load storage.

Keywords: supercapacitor; energy storage; power system; source network load storage; integrated

风电、光伏等可再生能源在电力系统中的应用日益广泛,但是其波动性导致的电力系统功率失衡等问题会影响电力系统的安全运行。源网荷储一体化模式的出现,在一定程度上解决了上述问题,成为保障现代电力系统安全稳定运行的核心举措。储能设备作为源网荷储系统电力调节重要的一环,其性能优劣会直接影响系统控制。超级电容储能技术区别于传统储能技术,具有更快的充放电响应速度,可以快速平抑电压波动,精准调节电力系统频率,对源网荷储系统的控制优化具有重要作用。

1 超级电容储能技术发展进程

1.1 国内超级电容储能技术发展

20世纪90年代,我国已经开始了超级电容储能技术的研究分析,经过30多年的发展,国内超级电容技术从核心材料的制备应用,到产业链技术工程方面的研究,均已经达到国际先进水平,部分领域甚至已经实现技术领跑。目前,国内能源企业与相关科研机构,正着眼于储能密度提升、成本控制等方向,并取得了一定成果。在核心材料开发领域,国内已经开发并完善了高比表面积活性炭、石墨烯基复合电极材料的制备技术。例如,中国科学院大连化学物理研究所研制的石墨烯基复合电极材料,可以将电容能量密度提高到80~120 Wh/kg,综合能效提升超过40%,同时循环寿命可以达到50万次以上,足以满足电力储能场景需求^[1]。而大连交通大学开发的离子液体电解质技术,可以有效缓解传统电解质工作温度限制问题,适用于高海拔、严寒等极端天气^[2]。

在工程化应用方面,国内已经先后开发了多个超级电容储能项目。2025年,国家新型能源创新中心,在广东省顺德研究基地,创立了新的并网项目。该项目采用“超级电容+150 MW/300 MWh磷酸铁锂”的混合技术路线,是我国首个百兆瓦级“超级电容+锂电”混合储能商业化、规模化实证项目,为超级电容在源网荷储系统中的应用提供了宝

贵的工程经验。

1.2 国外超级电容储能技术发展

国外超级电容储能技术相关研究起步较早,欧美等发达国家和地区凭借技术优势在超级电容核心材料、单体制造、系统集成等方面长期处于领先地位。

美国Maxwell实验团队聚焦于高功率长寿命场景,不断升级超级电容技术材料。其产品广泛应用于风电变桨、轨道交通领域。美国能源部(DOE)持续自主开发相关技术,目前相关实验团队已经构建了能量密度150 Wh/kg的实验室原型,为规模化应用奠定基础。欧美等国家更注重超级电容材料的创新和系统集成,德国Skeleton公司凭借专利曲面石墨烯技术,可以提高超级电容设备能量总量60%,同时满足百万次的循环寿命要求。2024年,德国莱比锡建成了全球最大的超级电容工厂,并在2025年正式启用,年产能超过1200万颗电芯。

2 超级电容储能技术在源网荷储系统控制中的作用

2.1 源网荷储系统结构

源网荷储系统具有多个主体结构,主要包括电源侧、电网侧、负荷侧和储能侧。电源侧是系统能量的供给单位,负责传统化石能源与新兴可再生能源电源的整合。高比例的可再生能源应用是源网荷储系统的特征之一,传统化石能源主要负责承担基荷供电与调峰调频任务,保证系统能量稳定。电网侧是系统能量的传输与分配枢纽,主要负责将电源侧产生的电能输送到负荷侧,实现能量的交互调度。其主体结构包括输电线路、配电网、变电设备与调度控制中心等。电网侧的核心职责就是保证电能高效传输与合理分配,同时应对功率波动,保证电压稳定。负荷侧是系统能量的消耗端,包括工业、商业、城镇居民、公共事业的电力负荷。近年来,随着智能家居和电动汽车的普及,负荷侧的可调度要求不断提升,需要不断通过需求响应机制进

行系统优化控制,实现资源灵活调节。储能侧是系统能量的调节缓冲环节,储能设备可以存储多余电能,在负荷高峰或者电源出现极端情况时,保证电能充足,实现能量供需平衡,也是源网荷储系统优化控制的核心支撑^[3]。

2.2 超级电容在源网荷储系统控制中的应用

(1) 功率平衡调节。功率平衡是源网荷储系统稳定运行的基础,可再生能源并网导致的能源波动和负荷端需求的随机性变化,都可能导致系统功率平衡异常,从而引发电压波动问题。超级电容储能技术具有毫秒级的充放电响应速度以及较高的功率密度,可以快速吸收和释放电能、平抑电网功率波动,尤其对于短时高功率波动具有较好的平抑效果。在电源侧,超级电容储能系统可以与风电、光伏等可再生能源系统同步应用,直接平抑其电力波动。以山西中电金谷偏关混合储能独立调频电站为例,该电站于2025年9月一期并网应用,是国内单体规模最大,首个百兆瓦级超级电容混合储能电站,属于典型的电源侧超级电容和可再生能源同步应用场景。电源侧直接接入当地风电光伏发电集群,有效解决了传统风光发电“电力不稳、并网难”的问题。而在负荷侧,超级电容储能系统,可以有效应对冲击负荷的影响。尤其是工业生产大型设备启停带来的负荷功率骤变,超级电容可以快速释放电能,填补功率缺口,缓解冲击影响。

(2) 系统频率调节。频率是电力系统运行的核心考量指标之一,可再生能源造成的负荷变化,可能会导致源网荷储系统频率偏离额定数值。超级电容储能技术可以快速响应频率变化,实时参与系统调节,保证频率的稳定性。

一般情况下频率调节会进一步划分为一次调频和二次调频。超级电容主要参与一次调频工作,即当系统频率出现小幅波动时,超级电容依靠快速响应机制,通过充放电调节功率,让频率快速恢复到安全数值。相比较传统火电一次调频,超级电容储能系统不需要消耗化石能源,响应速度更快,调节精度更高,极大提升了系统调频性能。

在实际应用中,超级电容储能系统还可以实时监测系统频率,实现调频自动化。在火电调频中,超级电容自身的兼容性使其可以与传统火电机组同时工作,分别负责短时和长时频率波动调节,提高调频效率和灵活性。此外,超级电容还可以作用于

虚拟电厂频率调节,提高虚拟电厂的电力灵活性,更好融入源网荷储系统。

(3) 源荷协同优化。源荷协同优化是源网荷储系统升级目标之一,旨在通过整合电源侧、负荷侧等资源,实现电力能量的高效应用和配置优化。超级电容储能技术作为连接电源侧和电荷侧的核心纽带,可以有效实现电力能量的缓冲和资源协调调度,提高协同优化效果。

在源荷协同调度工作中,超级电容可以根据电源电力需求和实际负荷情况,及时调整充放电状态,实现能量的最优匹配。例如,在光伏电力应用高峰、负荷较低时,吸收多余的电能,反之在光伏出力低谷期,高效释放电能,同时和柔性负荷协同,满足需求端的响应机制,提高优化效果。而在微电网场景下,超级电容也是源荷协同优化工作的重要技术保证,能够快速平抑功率波动,维持电网平稳。

3 结 语

超级电容储能技术凭借自身功率密度高,循环寿命长等优势,已经成为源网荷储系统优化控制的核心。未来,随着相关技术的不断升级,国内超级电容储能技术将朝着高能量、低成本、智能化、协同化发展。随着应用市场的不断拓展,其与源网荷储系统的融合也会不断深入,而通过核心技术研发强化、系统集成优化以及标准体系的完善,超级电容储能技术势必会在新型电力系统的建设中发挥更大作用。

参 考 文 献

- [1] 王梦雅,李世友,东红,等. 石墨烯基复合材料在超级电容器中的应用[J]. 现代化工, 2021, 41(S1): 54-57.
WANG M Y, LI S Y, DONG H, et al. Application of graphene matrix composites in supercapacitors[J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(S1): 54-57.
- [2] 邱金辉. 铝离子电池正极材料及离子液体电解质的研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2025.
QIU J H. Research on cathode materials and ionic liquid electrolytes for aluminum-ion batteries[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2025.
- [3] 王菲菲,张沈习,宋毅,等. 考虑多主体混合博弈的配电网源网荷储协同规划[J]. 南方电网技术, 2025(4): 78-92.
WANG F F, ZHANG S X, SONG Y, et al. Collaborative planning method for distribution network source-network-load-storage considering multi-agent mixed game theory[J]. Southern Power System Technology, 2025(4): 78-92.