

电磁发射用“锂电池-超级电容” 混合储能技术研究综述*

吴志程¹, 朱俊杰¹, 许金¹, 孙兴法¹, 常永昊²

(1. 海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033;

2. 海军装备部信息保障室, 北京 100000)

摘要: 随着电磁发射系统(EMLS)应用场景的多样化发展,单一储能器件无法同时满足不同种类载荷发射过程中高功率密度和高能量密度的储能需求。为此,分析了EMLS短时间歇式运行模式下的储能需求,介绍了EMLS储能技术的研究现状及现有缺陷。在此基础上,对“锂电池-超级电容”混合储能应用于EMLS所需要克服的储能器件选择、并联结构设计、容量配置和实时控制等关键技术进行了论述与总结,并对电磁发射混合储能技术的未来研究与发展方向提出了展望。

关键词: 电磁发射; 混合储能; 锂电池; 超级电容

中图分类号: TM 912; TM 53 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)03-0001-06

doi: 10.12177/emca.2020.213

Review of “Lithium Battery-Supercapacitor” Hybrid Energy Storage Technology for Electromagnetic Launch*

WU Zhicheng¹, ZHU Junjie¹, XU Jin¹, SUN Xingfa¹, CHANG Yonghao²

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System,

Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Information Support Office of Naval Equipment Department, Beijing 100000, China)

Abstract: With the diversified development of electromagnetic launch system (EMLS) application scenarios, a single energy storage device cannot simultaneously meet the high-power-density and high-energy-density energy storage requirements during the launch of different types of loads. The energy storage requirements of EMLS under short-term intermittent operation mode are analyzed, and the current research status and existing defects of EMLS energy storage technology are introduced. On this basis, the key technologies such as energy storage device selection, parallel structure design, capacity configuration, and real-time control that need to be overcome for the application of “lithium battery-supercapacitor” hybrid energy storage to EMLS are discussed and summarized. The future research and development direction of electromagnetic launch hybrid energy storage technology is provided.

Key words: electromagnetic launch; hybrid energy storage; lithium battery; supercapacitor

收稿日期: 2020-12-13; 收到修改稿日期: 2021-01-14

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51977218)

作者简介: 吴志程(1997—),男,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动。

朱俊杰(1984—),男,博士,副研究员,研究方向为电力电子与电力传动。(通信作者)

许金(1983—),男,博士,研究员,研究方向为直线电机设计及控制。

0 引言

电磁发射技术,作为全新概念的发射方式,已成为国内外的研究热点。与传统发射方式相比,电磁发射具有隐蔽性好、发射过程精确控制、载荷体形质量不受限和重复成本低等优势,有希望在多种应用场合中取代传统发射^[1]。

在军事领域和民用领域多样化发展的电磁发射技术对储能的需求也更加多样,文献[2]指出特定应用场合配置的储能系统功率密度和能量密度越来越高。目前,国内外学者对于电磁发射的储能技术做了较多研究,但均是单一储能的形式^[3-5]。在现有技术条件下,单一储能无法同时兼顾高能量密度和高功率密度需求,存在应用场景受限制、能源利用率低、经济效益差等缺陷,无法满足电磁发射系统(EMLS)载荷多样化的储能需求。

因此,文献[6-8]提出采用混合储能系统(HESS)控制不同特性的储能器件协调工作,优势互补,提高了储能系统的功率密度和能量密度,有效解决了不同载荷储能需求的多样化难题,提高了EMLS的可靠性、通用性和经济性。

1 EMLS 储能需求分析

如图1所示,EMLS由储能系统、电能变换设备、脉冲直线电机和控制系统4部分组成^[6]。

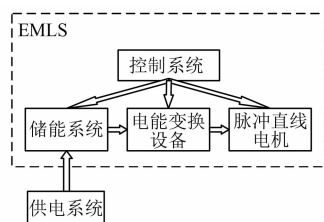


图1 EMLS组成

电磁发射技术的应用形式十分多样。根据工作原理的不同可分为:轨道式、线圈式、电机式^[9]。根据发射长度和末速度的不同可以分为:电磁弹射、电磁轨道发射、电磁推射^[10]。电磁发射过程中,不同的载荷在不同工作模式、技术分支和应用场合下对储能的功率/能量需求各异。图2为EMLS短时间歇式工作模式3种不同工况下的功率/能量需求对比。与单一储能相比,混合储能功率/能量需求指标的灵活配置上占据更大优势,

可满足电磁发射载荷多样化的储能需求,从而提高EMLS的通用性和灵活性。

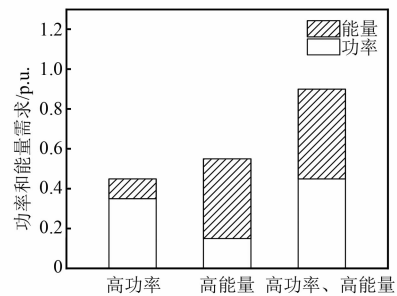


图2 EMLS功率/能量需求示意图

与电动汽车^[11]、微电网^[12]等应用场合不同,电磁发射的短时尖峰功率需求和短间隔连发需求要求储能系统必须供应大功率脉冲电能,存储足够多次连发的电量。

脉冲式、高压、大电流的工作特点对储能拓扑电力电子装置的灵活性、可靠性和响应速度提出了极高的要求^[6]。

在军事领域中,EMLS自身的重量与体积受严格限制,因此储能系统的轻便性和适装性至关重要。HESS兼具高功率密度特性和高能量密度特性,在满足电磁发射功率/能量需求的基础上,能够确保重量/体积最优。

同时,EMLS复杂多变的运行环境使储能系统必须适应差异明显的温度变化,而且具备高、低温正常放电的能力。

因此,EMLS的储能需求可总结为,能够供应大功率脉冲电能,存储足够多次连发的电量,具有极高的通用性、灵活性和安全性,确保重量与体积最优和适应温度范围广。

2 EMLS 储能技术研究现状

目前,国内外EMLS主要采用单一储能,包括蓄电池、超级电容、飞轮储能和超导磁储能等。

文献[3]采用锂电池作为基本储能单元,通过快速灵活串并转换的拓扑结构,使其满足电磁发射不同设备的电压、电流需求。但是锂电池储能无法在重量体积受限时提供EMLS所需脉冲电能的峰值功率,且环境温度适应性差,无法在低温环境下维持正常充放电的功能。

文献[13]采用较高能量密度的电容器作为

EMLS 中功率转换, 能量存储和电能压缩的设备, 但存在能量密度达不到 EMLS 要求、成本高、体积庞大等问题。

文献[14]采用飞轮储能提供能量脉冲对 EMLS 中的高压电容器充电。飞轮储能是目前性能最佳的储能技术, 能够同时兼顾高能量密度和高功率密度, 但是其技术设备十分复杂, 由储能电机和控制变频器等设备组成, 成本大, 且存在较大的损耗^[9], 因此飞轮储能常应用在对重量、体积要求十分苛刻的场合。

文献[15]指出超导磁储能技术有望成为 EMLS 的理想储能方式之一, 可实现减小电流需求、优化能源利用率、节省空间的目标^[16]。

对比第 1 节对 EMLS 储能需求的分析, 单一储能技术研究现状表明, 由于储能器件本身特性, 使其无法兼顾功率和能量密度, 存在应用场景受限、能源利用率低、经济效益差等缺陷, 无法有效解决 EMLS 载荷多样化的储能问题。

3 EMLS 混合储能关键技术

3.1 储能器件选择

HESS 作为电磁发射的关键组成部分, 起到了能量缓存与功率放大的作用, 避免了发射载荷直接向供电系统吸收过大的瞬时功率和能量, 造成电网剧烈波动。通过对各储能器件的定性和定量分析^[17-19], 综合考虑功率密度、能量密度、使用寿命、安全性和温度适应性等特性, 选择锂电池与超级电容作为 EMLS 的储能器件。锂电池与超级电容特性对比如表 1 所示。

表 1 锂电池与超级电容特性对比

储能器件	锂电池	超级电容
功率密度/(W·kg ⁻¹)	200~340	10 ² ~10 ⁴
能量密度/(W·h·kg ⁻¹)	100~200	0.1~15
功率成本/(元·kW ⁻¹)	8 400~28 000	1 000~2 000
能量成本/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	2 500~3 000	40 万~100 万
综合效率/%	65~95	85~98
使用寿命/a	5~15	>20
循环次数/次	1 000~4 000	100 万

由表 1 可知, 锂电池能量密度高, 存储容量大, 但使用寿命短, 功率密度低, 无法提供电磁发

射载荷所需的瞬时功率峰值。因此, 锂电池在 HESS 中可作为第一级储能, 长时间低功率吸收电网能量并存储, 为载荷和功率型储能器件提供安全稳定的大容量电能。

超级电容是一种新型储能器件, 功率密度高, 免维护, 使用寿命长, 适用温度范围广, 但是能量密度低于锂电池, 在 EMLS 中可作为第二级储能, 具有压缩电能和瞬时释放的功能^[13]。

因此, 可采用“锂电池-超级电容”混合储能作为电磁发射的储能系统, 锂电池作为第一级储能器件, 超级电容作为第二级储能器件, 两者协调工作, 优势互补, 从而充分发挥 HESS 的性能, 满足 EMLS 载荷多样化的功率/能量需求, 重量与体积限制和环境温度适应性要求。

3.2 混合储能并联结构设计

现有的“锂电池-超级电容”混合储能拓扑结构可分为双 DC/DC 变换器并联^[20]、单 DC/DC 变换器并联^[21]和直接并联^[22]3 种, 如图 3 所示。

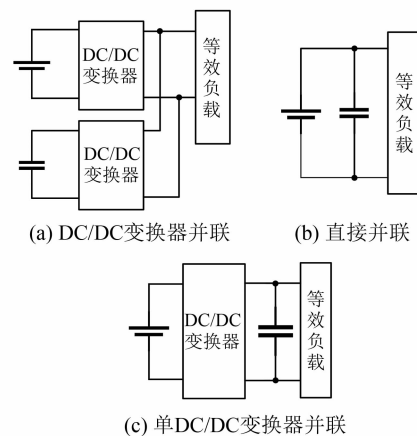


图 3 “锂电池-超级电容”混合储能拓扑结构

在电动汽车^[11]、微电网^[12]和舰船电力系统^[9]等应用场合中, HESS 输出持续波动电能, 采用双或单 DC/DC 变换器并联的拓扑结构, 可调节各储能器件的充放电电量, 控制储能器件的输入输出, 稳定直流母线电压, 延长储能器件寿命, 提高系统性能^[23]。而在 EMLS 中, 混合储能释放短时尖峰功率、短间隔连续发射的脉冲电能, 且功率与能量等级远大于其他应用场合, 锂电池与超级电容若采用 DC/DC 变换器并联会导致以下问题:

(1) 拓扑结构复杂, 短时间歇式工作模式下控制难度大;

(2) 脉冲式、高压、大电流的工况下, DC/DC 变换器成本高, 安全性低;

(3) 开关器件斩波控制时, 电压、电流波动大, DC/DC 变换器响应速度慢。

由图 3(b) 可以看出, 锂电池与超级电容直接并联拓扑不存在上述问题, 且其结构简单, 成本低, 系统效率高, 响应速度快, 适合 EMLS 短时尖峰功率、短间隔连续发射的工作模式^[22]。文献 [24] 对比了锂电池与超级电容直接并联的拓扑在恒定功率工况下和脉冲功率工况下的性能表现, 结果表明直接并联拓扑更加适合脉冲功率工况。

HESS 直接并联的等效电路模型如图 4 所示。

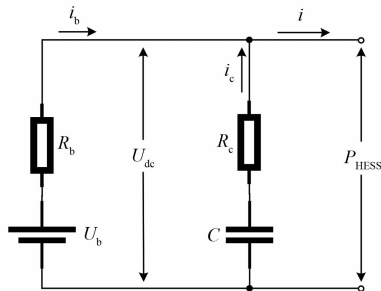


图 4 HESS 直接并联的等效电路模型

尽管直接并联结构的众多优势和特性使其更加适合 EMLS 混合储能, 但是当 HESS 瞬时输出大功率脉冲电能时, 直流母线电压 U_{dc} 会瞬间跌落, 从而导致锂电池存在大倍率放电的风险, 损害其使用寿命。由图 4 中各个变量之间的关系可以得出, HESS 输出功率的瞬态过程中, 直流母线电压 U_{dc} 不能突变, 通过锂电池组斩波控制, 调整锂电池组的电压 U_b , 即可控制锂电池输出电流 i_b 的大小和输出功率。

因此, 通过锂电池组的斩波控制, 不仅可以限制锂电池放电电流不超过最大放电倍率, 还能实现锂电池与超级电容功率的合理分配, 是 EMLS 应用混合储能的关键技术之一。

3.3 混合储能容量配置方法

目前储能技术应用十分广泛, 但储能器件的成本依旧十分昂贵, 在实际应用中, 通常会优先考虑成本要素。混合储能的容量配置过大会导致总成本增加, 容量配置过小则会导致储能器件过充过放, 影响其使用寿命^[25]。因此, 必须对 HESS

不同特性的储能器件进行容量配置优化, 确定成本、体积、重量和功能实现等多目标优化函数, 然后综合考虑使用寿命、储能器件 SOC、充放电功率和电网功率平衡等约束条件, 最后通过合适的寻优算法进行求解, 得出最优容量配置方案^[26]。

根据 EMLS 采用的锂电池与超级电容直接并联结构, 采取储能器件容量拓展方式, 如图 5 所示。

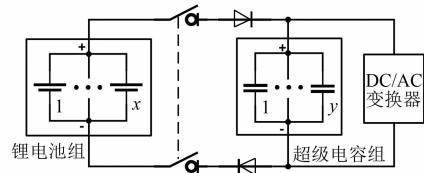


图 5 容量配置示意图

图 5 中, 超级电容与锂电池组之间设有防反二极管, 防止超级电容对锂电池进行能量反灌, 损伤锂电池寿命。在任意 EMLS 应用场合下, 根据负载需求确定直流母线电压等级后, 必须通过调整超级电容组的并联数 y 和锂电池组的并联数 x 拓展系统容量, 从而实现“锂电池-超级电容”HESS 在满足不同功率/能量需求的同时, 使系统总体积、总重量和总成本等优化目标在所有方案中达到最优, 进而提高 HESS 在不同应用场合下的适装性、通用性和经济性。

常用的容量配置优化算法有迭代法、智能优化算法等。迭代法算法简单但运算量大, 容易陷入局部收敛; 智能优化算法鲁棒性较强, 易于实现, 精确度高, 但求解复杂。目前, 较为常用的是智能优化算法, 有量子遗传算法^[25]、改进粒子群算法^[27]、人工蜂群算法^[28]等。对于不同的应用场景需选择不同的优化算法, 从而合理配置系统容量, 充分发挥系统性能。

3.4 混合储能实时控制策略

在 EMLS 短时间歇式工作模式下, 混合使用锂电池与超级电容储能, 充分发挥锂电池能量密度大和超级电容功率密度大的特点, 保护储能器件安全充放电, 必须研究合理的 HESS 实时控制策略, 实时控制各储能器件的能量流动, 其核心问题即功率和能量的分配问题^[29]。

混合储能常用的功率分配控制方法有滤波技术^[11]、基于规则的控制算法^[30]、模糊逻辑控制方

法^[31]和动态规划算法^[32]。

文献[7]提出采用模糊控制的能量管理策略有效提高储能系统的功率密度,缩短连续弹射间隔内的充放电时长,提高了连续弹射的速率。

基于 EMLS 短时脉冲功率、短间隔连续发射的运行工况,必须制定合理的控制策略,选择相应的控制算法,缩短发射间隙,提高系统安全稳定的运行能力和瞬时工况下的响应速度。

4 结 语

本文分析了 EMLS 短时间歇式运行模式下的储能需求,介绍了 EMLS 储能技术的研究现状及现有缺陷。在此基础上,对“锂电池-超级电容”混合储能应用于 EMLS 所需要攻克的储能器件选择、并联结构设计、容量配置和实时控制等关键技术进行了论述。如何将混合储能关键技术与电磁发射短时尖峰功率需求、短间隔连发需求相结合,制定适用于电磁发射应用场合的 HESS 研究方案,是未来制定技术方案的难点。

EMLS 用混合储能技术的研究展望如下:

(1) EMLS 应用场景、作业流程的不同以及多样化负载需求,使得系统呈现运行状态时变性强、储能瞬时输出功率差异大等多样化态势。因此,可开展“锂电池-超级电容”HESS 的功率分配建模分析,以及基于储能器件模型的安全性分析和寿命评估。

(2) HESS 的控制方式不当将影响锂电池使用寿命,甚至严重影响系统的安全稳定运行。因此,可结合超级电容与锂电池的最佳充放电特性曲线,研究多时间尺度下基于能量损耗与使用寿命最优的“锂电池-超级电容”HESS 优化控制策略。

HESS 的应用可有效解决电磁发射多样化载荷的储能问题,提高电磁发射的通用性、安全性和经济性,对电磁发射技术应用多样化、装备轻量化、系统可靠性和提高能源利用率具有重大意义。

【参 考 文 献】

[1] 郭冀岭,孙海亮,陆浩然,等.垂直电磁发射系统及其控制技术[J].宇航总体技术,2020,4(1): 15.
[2] 吴海峰,鲁军勇,马伟明,等.大功率混合储能装置

控制策略研究[J].西安交通大学学报,2015,49(2): 93.

- [3] 龙鑫林,鲁军勇,魏静波,等.锂电池储能在电磁发射中的应用[J].国防科技大学学报,2019,41(4): 66.
[4] TYLER N S. Design, analysis and construction of a high voltage capacitor charging supply [R]. Monterey, CA: Naval Postgraduate School, 2008.
[5] MAYS T A. Low voltage electrolytic capacitor pulse forming inductive network for electric weapons [R]. Monterey, CA: Naval Postgraduate School, 2006.
[6] 马伟明,肖飞,聂世雄.电磁发射系统中电力电子技术的应用与发展[J].电工技术学报,2016,31(19): 1.
[7] 王湘,吴峻.连发型电磁弹射器混合储能系统及其能源管理策略[J].电工技术学报,2020,35(19): 4076.
[8] ZHOU R, LU J, WANG G, et al. Thermal management of hybrid energy storage for electromagnetic launch [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(7): 1459.
[9] 腾腾,谭大力,王擎宇,等.舰用电磁发射技术研究综述[J].舰船科学技术,2020,42(13): 7.
[10] 马伟明,鲁军勇.电磁发射技术[J].国防科技大学学报,2016,38(6): 1.
[11] SANTUCCI A, SORNIOTTI A, LEKAKOU C. Power split strategies for hybrid energy storage systems for vehicular applications [J]. Journal of Power Sources, 2014, 258: 395.
[12] 蒋玮,周赣,王晓东,等.一种适用于微电网混合储能系统的功率分配策略[J].电力自动化设备,2015,35(4): 38.
[13] MACDOUGALL F W, YANG X H, ENNIS J B, et al. High energy density capacitors for EML applications [C] // 2004 12th Symposium on Electromagnetic Launch Technology, 2004.
[14] SWETT D W, BLANCHE J G. Flywheel charging module for energy storage used in electromagnetic aircraft launch system [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(1): 525.
[15] 蔺志强,陈桂明,许令亮,等.电磁发射技术在导弹武器系统中的应用研究[J].飞航导弹,2020(7): 67.
[16] BADEL A, TIXADOR P, AMIET M, et al. SMES to supply an electromagnetic launcher [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22

- (3): 5700204.
- [17] 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.
- [18] 周林,黄勇,郭珂,等. 微电网储能技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(7): 147.
- [19] 孙玉伟,胡克容,严新平,等. 新能源船舶混合储能系统关键技术问题综述[J]. 中国造船,2018,59(1): 226.
- [20] WEE K W, CHOI S S, VILATHGAMUWA D M. Design of a least-cost battery-supercapacitor energy storage system for realizing dispatchable wind power [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2013, 4(3): 786.
- [21] GAO L, DOUGAL R A, LIU S. Power enhancement of an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2005, 20(1): 236.
- [22] DOUGAL R A, LIU S, WHITE R E. Power and life extension of battery-ultracapacitor hybrids [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies,2002,25(1): 120.
- [23] 聂开俊,龚希宾,朱泉. 超级电容与锂离子电池混合储能技术的发展[J]. 蓄电池,2019,56(3): 101.
- [24] CERICOLA D, RUCH P W, KOTZ R, et al. Simulation of a supercapacitor/Li-ion battery hybrid for pulsed applications[J]. Journal of Power Sources, 2010,195(9): 2731.
- [25] HAN J, ZHANG J, YAN L. Capacity configuration of the hybrid energy storage system based on improved quantum genetic algorithm [C] // International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015),2015.
- [26] 李彦哲,郭小嘉,董海鹰,等. 风/光/储微电网混合储能系统容量优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报,2020,32(6): 123.
- [27] 郭玲娟,魏斌,韩肖清,等. 基于集合经验模式分解的交直流混合微电网混合储能容量优化配置[J]. 高电压技术,2020,46(2): 527.
- [28] GAO W, LIU S, HUANG L. A global best artificial bee colony algorithm for global optimization [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2012,236(11): 2741.
- [29] 丁明,林根德,陈自年,等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报,2012,32(7): 1.
- [30] GARCIA P, FERNANDEZ L M, GARCIA C A, et al. Energy management system of fuel-cell-battery hybrid tramway [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2010,57(12): 4013.
- [31] LEE H, SUL S. Fuzzy-logic-based torque control strategy for parallel-type hybrid electric vehicle [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,1998,45(4): 625.
- [32] LIN C C, PENG H, GRIZZLE J W, et al. Power management strategy for a parallel hybrid electric truck [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2003,11(6): 839.

[期刊简介]

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于1959年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月10日出版,国内外公开发行,邮发

代号4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,在全国科技期刊界拥有广泛的知名度,是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。