

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240499

非完备状态下电磁弹射系统弹射时序再恢复策略

魏繁荣¹, 徐昂¹, 琚兴宝²

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074;

2. 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064)

摘要: 战时, 航母上两部主力弹射储能系统可能遭受打击, 进而使其蓄电池组部分遭受损坏。依靠两者之间功率动态平衡建立的交替弹射时序可能发生紊乱。针对此问题, 提出了基于电磁弹射系统耦合的弹射时序再恢复控制策略。首先, 建立了包含蓄电池、超级电容器(super capacitor, SC)、直线电机(line motor, LM)及耦合装置的电磁弹射系统耦合模型。其次, 在分析弹射系统动态特性的基础上, 提出了充放电功率优化策略。即通过协调互联装置与储能控制, 在失衡的非完备状态初始条件下, 实现两侧系统在各自弹射周期内功率交替性动态平衡, 进而恢复正常的弹射时序。并针对动态充放电过程中的蓄电池单侧耗尽问题, 提出了基于荷电状态(state of charge, SOC)均衡的自适应下垂控制方法。最后利用 Matlab/Simulink 软件进行建模仿真, 验证了所提策略在实现交替弹射时序再恢复及避免蓄电池单侧耗尽方面的有效性和优越性。

关键词: 非完备状态; 交替弹射; 时序恢复; 荷电状态均衡

Ejection timing recovery strategy for an electromagnetic catapult system in an incomplete state

WEI Fanrong¹, XU Ang¹, JU Xingbao²

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 2. China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China)

Abstract: In wartime, the two main ejection energy storage systems on an aircraft carrier may be hit, and then the battery pack will be partially damaged. The timing of alternating ejections, established by the dynamic balance of power between the two, can be disrupted. To solve this problem, a related ejection timing re-recovery control strategy based on the coupling of the electromagnetic ejection system is proposed. First, a coupling model of the electromagnetic ejection system including a battery, a supercapacitor (SC), a line motor (LM) and a coupling device is established. Secondly, based on the analysis of the dynamic characteristics of the ejection system, an optimization strategy for charge-discharge power is proposed. That is, by coordinating the interconnection device and energy storage control, in the initial condition of the unbalanced incomplete state, the power alternating dynamic balance of the two systems in their respective ejection cycles is realized, and then the normal ejection timing is restored. To solve the problem of one-sided depletion of the battery in the process of dynamic charging and discharging, an adaptive droop control method based on state of charge (SOC) equilibrium is proposed. Finally, Matlab/Simulink software is used for modeling and simulation, and this verifies the effectiveness and superiority of the proposed strategy in realizing alternating ejection timing re-recovery and avoiding unilateral depletion of the battery.

This work is supported by the Project of State Administration of Science, Technology, and Industry for National Defence of China (No. JCKY2021206B001).

Key words: incomplete; alternate ejection; timing recovery; state of charge equilibrium

0 引言

电磁弹射成为现代检验航母先进性的一大指标,

与传统的蒸汽弹射相比, 其优势在于可以弹射不同类型的飞机^[1]。由于电磁弹射系统在弹射飞机时需要较多的能量, 每次弹射需要先由蓄电池向超级电容器充电, 时间较长^[2-3]。为提高弹射效率, 航母上的两部主力电磁弹射系统一般选择周期性交替弹射

基金项目: 国防科工局项目资助(JCKY2021206B001)

方式。此种弹射方式对时序性的要求较为严格，需要两部主力电磁弹射系统的充放电功率达到动态平衡。战斗时，战损的不确定性可能导致某一部弹射系统的蓄电池组部分由于导弹袭击而损坏，亦或与其相关的控制电路、变流器或电路板因导弹袭击产生的冲击波而受损。这将导致两侧系统充放电功率不平衡，进而引起交替弹射的时序发生冲突。为解决上述问题，需要对如何实现两组弹射系统的充放电功率重新平衡进行研究。

近年来，国内外学者针对提升电磁弹射系统的充放电方式及其稳定性进行了大量研究。文献[4]关于电磁弹射储能方面的研究主要聚焦于混合储能系统的优化控制，该文献实现了电磁弹射系统的连续发射，进而提高了单部弹射系统在完备状态下的弹射效率。文献[5]通过分析电磁弹射系统的大量运行数据，提出了一种能够提前预判故障发生时间及损毁设备的方法，为进一步提升弹射系统的稳定性奠定了基础。尽管以上论文在电磁弹射系统的弹射效率和稳定性方面均有所改进和研究，但均未提出设备损毁后的补救措施，因此其研究成果在复杂的战时场景下难以完全适用。

由于电磁弹射系统由蓄电池、超级电容器和直线电机等组件构成^[6]，可以将其视为一个小型的直流微网，因此可以借鉴陆地直流微网功率互供的思想，通过耦合互联的方式重新平衡两组系统的充放电功率。

在有关直流微网互供的研究中，文献[7]通过引入电压基准值及改变隔离型双向换流器(dual active bridge, DAB)的控制方式，实现了不同电压等级微网的互联。然而，该文献只考虑了两侧微网电压的平衡问题，未进一步探讨两侧微网中蓄电池的荷电状态平衡问题。当荷电状态较低的蓄电池提前退出时，可能会导致网络崩溃。文献[8]提出了一种 LLC 谐振 DAB 变换器，该变换器能够在全负载范围内实现软开关，从而在满足变换器电压增益要求的同时，使变换器的导通损耗降至最低。但是，由于能量是通过谐振腔以交流的形式进行传输的，因此其建模分析相对较为困难。文献[9]提出了一种多目标功率协同控制策略。然而，该策略将微网视为一个整体，对运行情况的考虑较为简单，未充分考虑微网中运行的设备对微网稳定性的影响。文献[10-11]提出了一种改进的互联变流器广义直流电压下垂控制方法，该方法能够在多种工作模式下为直流系统提供稳定的直流电压支撑。然而，这些文献未考虑由于

电网中设备的退出和接入导致的下垂系数的变化，这种变化可能会影响储能单元暂态均流的精度。

综上所述，微网中某个设备的故障对于整个微网的影响较小，相比之下，电磁弹射系统中由于设备数量较少且功率较大，一旦发生故障，往往会对整个弹射系统造成显著影响。此外，微网中的能量通常被视为无限大，而电磁弹射系统中蓄电池的储能则有限。为尽可能提高弹射系统中储能的利用率，防止单侧蓄电池提前耗尽，不能简单地将弹射系统视为微网并直接进行互联，还需要对互联后蓄电池的荷电状态进行平衡。针对上述问题，可以从相关微网蓄电池的控制方式中获得启发。文献[12]提出在并网运行期间蓄电池充当缓冲单元，抑制直流母线上的电压波动，并保证微网内的设备能够稳定运行。文献[13]通过自适应地调整下垂控制器中的虚拟电阻，实现各储能单元之间的能量平衡，但需要使用集中监控控制，并且系统中存在单点故障问题。文献[14-15]提出一种下垂系数与荷电状态相关的自适应下垂控制方法，使各储能输出功率按荷电状态进行等比例分配，从而实现荷电状态均衡。文献[16]提出一种功率分配和功率平衡自适应分级协调控制策略，先利用功率分配级确定储能系统的主导储能单元，进而通过功率平衡级控制，实现荷电状态均衡。文献[17-18]提出了基于 SOC 的下垂控制，使下垂系数与其 SOC 相关，进而达到通过控制输出电流平衡各储能单元的 SOC 的目的。文献[19]提出了一种下垂系数与 SOC 的 n 次幂成反比的自适应下垂控制，但下垂系数是针对特定负荷功率设定的，当负荷功率发生变化时，SOC 的均衡效果变差。文献[20]在文献[19]基础上进行了改进，在选取参数时考虑了由于下垂控制导致的母线电压降落的阈值，以保证系统电压的稳定性。文献[21]提出了一种自适应时间常数的分频控制策略，能够提高储能利用率，但未考虑配电网的运行方式对系统的影响，可能会导致系统不稳定。文献[22]提出一种基于线路电阻观测值的改进下垂控制策略，实现各变换器的输出功率按其线路电阻观测值进行分配，但其线路电阻估计精度较低，可能导致输出功率分配不准确，使部分储能提前耗尽。文献[23]提出一种基于麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)的自适应下垂控制策略，解决了功率分配精度与母线电压偏差的固有矛盾，但其无法应对电网中功率的快速变化。

上述研究虽在蓄电池荷电状态平衡的基础上进行了一定的探索，但其研究一般仅限于单个电网，

未考虑互联系统中设备的具体运行状态, 具有一定的局限性, 容易造成电网中设备脱网, 进而导致电网运行状况恶化。

综上所述, 为解决交替性弹射过程中的功率动态平衡及其平衡过程中耦合互联弹射系统中单侧储能提前耗尽的问题。本文首先建立了新的电磁弹射系统耦合模型, 可以在一方蓄电池受损的情况下, 通过 DAB 平衡两者之间的充放电功率, 使其恢复正常的弹射时序。其次, 为保证时序性的快速恢复, 提出了相应的控制策略配合方案。而后, 为保证耦合后系统中的蓄电池能量能够同步耗尽, 得到尽可能多的弹射次数, 提出了新的 SOC 下垂控制策略。最后, 针对上述方案在 Matlab/Simulink 上进行建模仿真, 验证了本文策略的可行性。该策略实现了交替性弹射功率的动态再平衡, 电磁弹射系统的时序得到恢复, 且所提下垂控制方式极大地提高了两部系统非完备状态下的总弹射次数。

1 电磁弹射系统模型非完备状态失衡分析

1.1 含混合储能与耦合通道的电磁弹射系统模型

假设一部电磁弹射储能系统由两组蓄电池和一组超级电容器构成, 电磁弹射系统耦合模型如图 1 所示, DAB 左右两侧分别为单组电磁弹射系统图。单侧系统一个周期内设备运行顺序为: 首先, 蓄电池依据其荷电状态进行下垂控制, 向超级电容器进行恒流充电; 而后, 超级电容器通过恒压控制, 与蓄电池一同为电机提供电力, 电机拉动无人机进行弹射起飞。

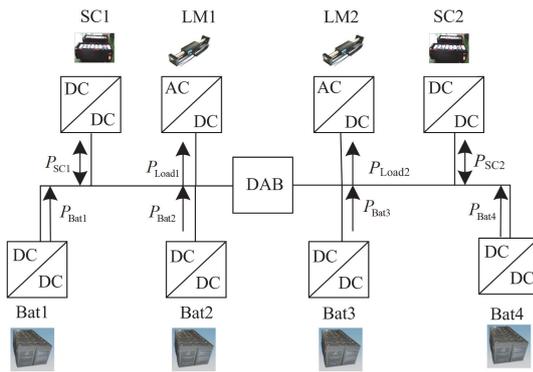


图 1 电磁弹射耦合系统

Fig. 1 Electromagnetic catapult coupling system

图 1 中: P_{Bat_i} 为 i 号蓄电池组发出的功率, $i=1, 2, 3, 4$; P_{Load1} 、 P_{Load2} 分别为 1、2 号直线电机功率; P_{Sc1} 、 P_{Sc2} 分别为 1、2 号超级电容器的充放电功率。

1.2 完备状态下的周期性交替弹射功率平衡分析

假设弹射一次的周期为 T , 其表达式为

$$T = t_c + t_d + t_r \quad (1)$$

式中: t_c 表示蓄电池为超级电容器的充电时间; t_d 为蓄电池和超级电容器的共同放电时间, 即弹射无人机的时间; t_r 为弹射完成后动子拉回时间以及下次弹射的准备时间。

超级电容器单次弹射需要的能量为 E_{SC} , 其表达式为

$$E_{SC} = \int P_{SC} dt_c \quad (2)$$

式中, P_{SC} 表示超级电容器充电时的功率。

电容器弹射时的荷电状态为 β_{SC} , 变化量为 $\Delta\beta_{SC}$, 其表达式为

$$\Delta\beta_{SC} = \beta_{SC-max} - \beta_{SC-min} \quad (3)$$

$$\beta_{SC} = \beta_{SC-min} + \frac{\int P_{SC} dt_c}{U_{SC} C_e} \quad (4)$$

式中: β_{SC-max} 为电容器弹射时的荷电状态最大值, β_{SC-min} 为电容器弹射时的荷电状态最小值; U_{SC} 为超级电容器电压; C_e 为电容器容量。

根据式(3)、式(4)可得

$$\Delta\beta_{SC} = \frac{\int P_{SC} dt_c}{U_{SC} C_e} \quad (5)$$

当恒流充电时, P_{SC} 为定值, 故可得单次弹射充电时间 t_c 为

$$t_c = \frac{E_{SC}}{P_{SC}} \quad (6)$$

根据式(2)一式(4)可以得出超级电容器荷电状态变化和充电时间的关系为

$$\Delta\beta_{SC} = \frac{P_{SC} t_c}{U_{SC} C_e} \quad (7)$$

假设直线电机的功率为恒功率, 放电时间 t_d 为

$$t_d = \frac{E_{SC}}{P_{Load}} \quad (8)$$

式中, P_{SC} 、 P_{Load} 分别为超级电容器充电功率和电动机额定运行功率, 均为定值。因此, 可以将超级电容器的荷电状态变化作为检测电磁弹射系统运行状态的指标。在单个电磁弹射系统进行周期性弹射时, 超级电容器的荷电状态变化量和时间的关系如图 2 所示。

假设两部电磁弹射系统交替弹射间隔为 t_i , 两者超级电容器的荷电状态变化情况如图 3 所示。

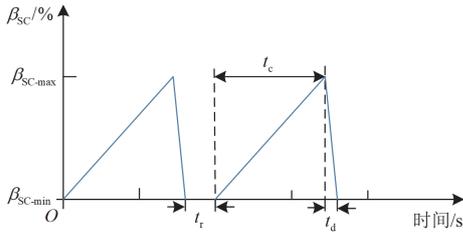


图2 超级电容器荷电状态变化

Fig. 2 Changes in the SOC of supercapacitors

从图3中可以看出, SC1与SC2的荷电状态先增加到最大值而后降低, 由此可知SC1与SC2在荷电状态到达顶点时电磁弹射系统开始进行弹射。因此SC1所在系统第 n 次发射时的发射时间点 t_{1-lau} 为

$$t_{1-lau} = t_c + nT \quad (9)$$

SC2所在系统的发射时间点 t_{2-lau} 为

$$t_{2-lau} = t_c + nT + t_i \quad (10)$$

图3的阴影部分为电磁弹射系统发射前后的准备时间, 阴影之间的间隔为容错时间。一般认为两部系统交替弹射时其阴影面积不能重叠, 否则可能导致弹射时序紊乱, 造成弹射冲突。

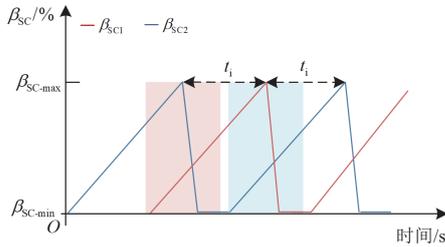


图3 交替弹射超级电容器荷电状态变化图

Fig. 3 Alternate ejection supercapacitor SOC variation

1.3 非完备状态下的交替弹射功率失衡场景分析

航母在作战时往往会因遭受打击而使船上设备处于较为恶劣的运行环境, 在这种情况下其中一部电磁弹射储能系统的蓄电池可能部分发生损坏, 其充放电功率将下降, 进而导致两部弹射系统之间的充放电功率失去平衡。此时, 故障侧电容器的充电时间变长, 弹射时间点延后, 两系统交替弹射间隔缩短, 交替弹射准备时间交叠, 最终导致弹射冲突。

为解决上述问题, 可假设 t_b 时刻图1左侧系统两组蓄电池中的Bat1发生故障。无耦合装置连接左右两侧系统时, 故障侧系统出现功率缺额, 且电压未跌出极限值, 此时超级电容器的充电时间变长, 准备时间延后。由于此次弹射时间大于故障前弹射周期, 小于故障后弹射周期, 称此次弹射为过渡周

期, 故障电磁弹射系统过渡周期充电时间 $t_{1-c-int}$ 为

$$t_{1-c-int} = t_b - nT + t_{1-int} \quad (11)$$

式中: $t_b - nT$ 为本次弹射周期中超级电容器故障前的充电时间; t_{1-int} 为过渡周期中故障发生后电容器充电时间, 表示为

$$t_{1-int} = \frac{E_{SC} - P_{SC1-int}(t_b - nT)}{P'_{SC1-int}} \quad (12)$$

式中, $P_{SC1-int}$ 、 $P'_{SC1-int}$ 分别为故障发生前、后超级电容器所吸收功率。

根据式(1)与式(11)可知, 过渡周期的弹射时间 T_{int} 为

$$T_{int} = t_{1-c-int} + t_d + t_r \quad (13)$$

此时两个电磁弹射系统无DAB相连, 是相互独立的系统, 未发生损坏的电磁弹射系统的周期仍为 T 。

已知故障发生时间点为 t_b , 过渡周期中故障发生后电容器充电时间为 t_{1-int} , 则过渡周期的发射时间点 $t_{1-lau-int}$ 为

$$t_{1-lau-int} = t_b + t_{1-int} \quad (14)$$

未发生损坏的弹射系统发射时间点为 t_{2-lau} , 为避免发射冲突, 交替弹射间隔应满足式(15)。

$$|t_{1-lau-int} - t_{2-lau}| \geq t_i - 1 \quad (15)$$

此时两组电磁弹射系统的弹射周期情况如图4所示。由图4可知, 当SC1在 t_b 时刻发生故障后, 故障侧电容器充放电时间延长, 交替弹射的时序性发生了紊乱, 两系统的弹射准备时间产生了图4所示的交叠阴影, 交替弹射发生冲突。

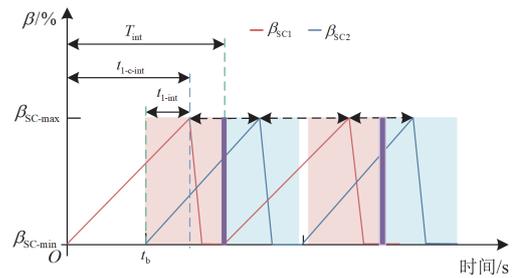


图4 交替弹射间隔紊乱图

Fig. 4 Alternate ejection cycle conflict diagram

2 时序性充放电功率平衡恢复策略

2.1 恢复时序性对动态功率平衡的需求分析

耦合互联系统在故障发生后, 两侧功率可通过互联装置进行功率传输, 进而再次得到均衡, 均衡后 β_{SCi} 变化如图5所示。

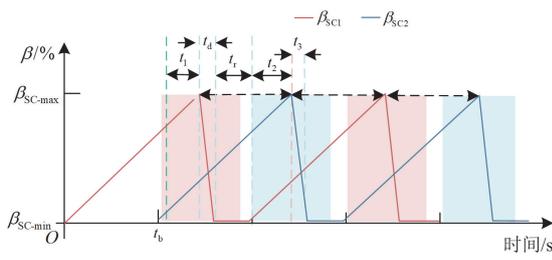


图5 交替弹射周期恢复图

Fig. 5 Alternate ejection cycle recovery diagram

通过图5中的荷电状态可知,此时每个时间段内的功率流动达到了平衡,各个时间段内的功率分配及平衡情况如式(16)~式(21)所示。

t_1 时间段内:

$$P_{SC1-t_1} = P_{Bat2} + P_{DAB} \quad (16)$$

$$P_{SC2-t_1} = P_{Bat3} + P_{Bat4} - P_{DAB} \quad (17)$$

式中: P_{SC1-t_1} 为 t_1 时间段内 SC1 的充电功率; P_{SC2-t_1} 为 t_1 时间段内 SC2 的充电功率; P_{DAB} 为 DAB 的流通功率。

t_d 时间段内:

$$P_{SC2-t_d} = P_{Bat3} + P_{Bat4} - P_{DAB} \quad (18)$$

式中, P_{SC2-t_d} 为 t_d 时间段内 SC2 的充电功率。

t_1 时间段内: SC1 不充电也不放电, SC2 充电。

t_2 时间段内:

$$P_{SC1-t_2} = P_{Bat2} + P_{DAB} \quad (19)$$

$$P_{SC2-t_2} = P_{Bat3} + P_{Bat4} - P_{DAB} \quad (20)$$

式中, P_{SC1-t_2} 、 P_{SC2-t_2} 分别为 t_2 时间段内 SC1、SC2 的充电功率。

t_3 时间段内: SC1 充电, SC2 放电。

$$P_{SC1-t_3} = P_{Bat2} + P_{DAB} \quad (21)$$

式中, P_{SC1-t_3} 为 t_3 时间段内 SC1 的充电功率。

当 t_1 、 t_d 、 t_r 、 t_2 、 t_3 时间段内 SC1 和 SC2 的充电功率等于 P_{SC} 时,两系统间的弹射间隔恢复正常,交替弹射冲突消失。

2.2 动态平衡中耦合互联装置功率控制策略

本文所采用的 DAB 变流器结构如图6所示。

图6中, DAB 两端电压分别为 U_{dc1} 和 U_{dc2} 。当其中一侧的弹射系统出现功率缺额时其电压就会下降,两端电压出现电压差。根据电压差采用传统移相控制方式将非故障侧能量通过 DAB 传输到故障侧,弥补其功率缺额,恢复两部系统的动态功率平衡,进而恢复交替弹射的时序性。 P_{DAB} 为非故障侧通过 DAB 向故障侧传输的功率。

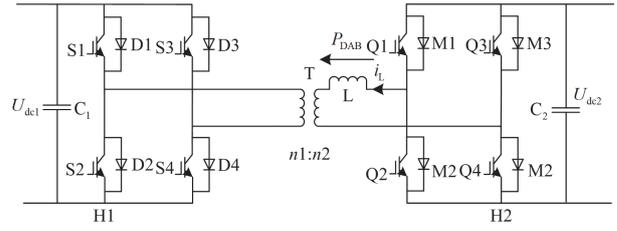


图6 DAB 结构图

Fig. 6 DAB structure diagram

DAB 控制方式如图7所示,本文采用传统双重移相控制,分为内移相和外移相。内移相为双端移相控制,外移相为双端电压一致性控制。通过外移相得到两侧系统在交替弹射过程中的动态功率之差,即故障侧的功率缺额。通过内移相得到高频方波,实现非故障侧向故障侧的功率流动。

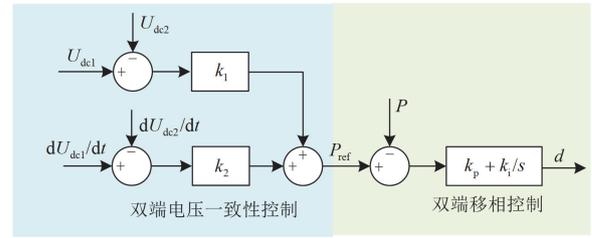


图7 DAB 控制框图

Fig. 7 Control block diagram of DAB

双端电压一致性控制输出的参考功率 P_{ref} 为

$$P_{ref} = (U_{dc1} - U_{dc2}) \cdot k_1 + \left(\frac{dU_{dc1}}{dt} - \frac{dU_{dc2}}{dt} \right) \cdot k_2 \quad (22)$$

式中: P_{ref} 为输入的功率参考值,通过两边电压差及电压变化率之差可以计算出故障侧与非故障侧之间的功率之差; k_1 、 k_2 为转换系数; U_{dc1} 和 U_{dc2} 为 DAB 两边端口电压。

双端移相控制输出的占空比 d 为

$$d = (P_{ref} - P_{DAB}) \cdot \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \quad (23)$$

式中, k_p 、 k_i 表示电流环 PI 控制参数。

2.3 动态平衡中储能功率及 SOC 均衡控制策略

为防止互联后单侧储能系统提前耗尽,需要对电磁弹射互联系统中蓄电池组的荷电状态进行自适应均衡。假设蓄电池下垂控制方式中的下垂系数为 $R_i(\beta_{Bati})$,则每个转换器的输出功率与之呈反比,其中 β_{Bati} 为蓄电池的荷电状态大小。具有较高 SOC 的蓄电池将会提供更多功率,反之则提供较少的功率,最终所有蓄电池荷电状态达到一致,实现蓄电池能量同步耗尽,避免单侧储能提前耗尽,减少储能能量浪费,能得到最多的弹射次数。在具有多个

模块的并联转换器系统中，下垂控制公式为

$$U_{dc_i} = U_{dc-ref}^* - R_i(\beta_{Bat_i})P_{Bat_i} + \Delta u \quad (24)$$

$$\Delta u = (U_{dc-ref}^* - U_{dc_i})G(s) \quad (25)$$

式中： U_{dc-ref}^* 为直流电压参考值； U_{dc_i} 为直流电压值； β_{Bat_i} 为 i 号蓄电池剩余的荷电状态； Δu 为消除电压偏差加入的电压补偿量； $G(s)$ 为 PI 控制环节。

蓄电池剩余的荷电状态为

$$\beta_{Bat_i} = \beta_{Bat_i-0} - \frac{\int P_{Bat_i} dt}{U_{Bat_i} C_e} \quad (26)$$

式中： β_{Bat_i-0} 为互联开关打开时 i 号蓄电池组的荷电状态； U_{Bat_i} 为蓄电池电压。

为防止蓄电池过流，蓄电池的功率表示为

$$P_{Bat_i} = \min \left\{ \frac{R_i(\beta_{Bat_i})P_{Load}}{\sum_{j=1}^4 R_j(\beta_{Bat_j})}, P_{Bat-max} \right\} \quad (27)$$

下垂系数为

$$R_i(\beta_{Bat_i}) = \frac{r_0}{e^{\frac{(\beta_{Bat_i})^w}{m}}} \quad (28)$$

式中： r_0 为初始下垂系数； m 为均衡精度； w 为加速系数，其影响下垂系数的取值。基于 SOC 的下垂控制如图 8 所示。

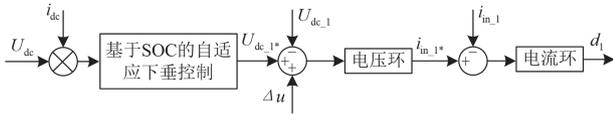


图 8 基于 SOC 的自适应下垂控制图

Fig. 8 SOC-based adaptive droop control chart

假设未对蓄电池进行荷电状态均衡控制，每组蓄电池输出的功率相等，与蓄电池组的数量成反比。当 Bat1 发生损坏时，剩余 3 组蓄电池，且每组蓄电池单次弹射过程中所消耗的荷电状态为 $\Delta\beta/3$ ，则此时电磁弹射系统的弹射次数由荷电状态最低的蓄电池决定，其弹射次数 n_m 表示为

$$n_m = \frac{\min\{\beta_{Bat2}, \beta_{Bat3}, \beta_{Bat4}\}}{\Delta\beta/3} \quad (29)$$

式中： $\min\{\beta_{Bat2}, \beta_{Bat3}, \beta_{Bat4}\}$ 为系统各蓄电池组荷电状态的最小值； $\Delta\beta$ 为单次弹射蓄电池所提供的总能量。

蓄电池进行下垂控制之后，当 Bat1 发生故障时，剩余 3 组蓄电池的荷电状态均衡后的弹射总次数 n_y 为

$$n_y = \frac{\sum_{i=2}^4 \beta_{Bat_i}}{\Delta\beta} \quad (30)$$

通过式(29)、式(30)可得蓄电池下垂控制后提高的弹射次数。

3 仿真分析

3.1 仿真环境

为验证本文所提策略对于平衡功率、防止发生弹射冲突以及避免单侧储能提前退出有效性，在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建了母线电压为 340 V 的电磁弹射耦合系统模型。模型的相关参数设置如表 1 所示。

表 1 系统仿真参数

参数	数值	参数	数值
下垂	r_0	$n1:n2$	1:1
系数	w	C/mF	5
	C_{sc}/F	DAB	$L/\mu H$
	U_{sc}/V		k_p
超级	串联数		k_i
电容	并联数		Q_{bat}/Ah
	I_{sc}/A	蓄电池	U_{bat}/V
	P_{sc}/kW		并联数
			5

各蓄电池的初始荷电状态如表 2 所示。

表 2 各蓄电池组初始荷电状态

Table 2 Initial SOC of each battery pack

指标	荷电状态/%
β_{Bat1}	82
β_{Bat2}	85
β_{Bat3}	85
β_{Bat4}	80

3.2 耦合系统功率平衡的有效性验证

两侧功率的动态平衡是避免弹射冲突的前提，因此为验证耦合系统实现功率动态平衡的有效性，分别在有耦合装置和无耦合装置的情况下建立蓄电池发生故障后的电磁弹射系统模型。通过对比两种情况下的系统功率缺额以及电压波动情况，证明耦合装置能够在两侧系统发生故障、出现功率缺额后，通过耦合装置进行功率补给，进而实现两侧功率的动态平衡。

在电磁弹射系统未经过 DAB 耦合的情况下，Bat1 在 10 s 时发生损坏，Bat2、Bat3 与 Bat4 未发生损坏。图 9 和图 10 为两侧系统中的失衡功率对比。

如图 9 所示, 10 s 之前 Bat1 与 Bat2 通过下垂控制输出的功率之和 $P_{\text{Bat1}} + P_{\text{Bat2}}$ 为 7344 W, 即为系统的输入功率, 此时, 系统无功率缺额。Bat1 在 10 s 发生故障断开, 此时 Bat1 输出功率由于受到最大输出功率的限制, 输出功率 P_{Bat1} 为 7200 W, 此时系统中的功率缺额 ΔP_1 为 144 W。图 10 为无耦合装置时非故障侧电磁弹射系统的相关功率曲线。由图 10 可知, 系统在 10 s 时开启, Bat3 与 Bat4 通过下垂控制输出功率之和 $P_{\text{Bat3}} + P_{\text{Bat4}}$ 为 7344 W, 与正常情况下系统所需功率相同, 此时, 系统功率缺额 ΔP_2 为 0。通过对比可知, Bat1 损坏后系统出现了功率缺额, 两侧系统的功率出现了失衡。此种情况会导致电磁弹射出现冲突。

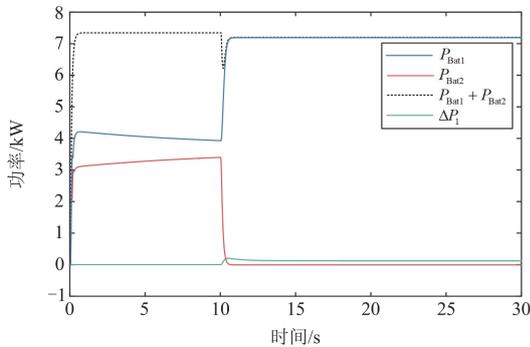


图 9 非耦合系统故障侧系统功率图

Fig. 9 System power diagram on the fault side of an uncoupled system

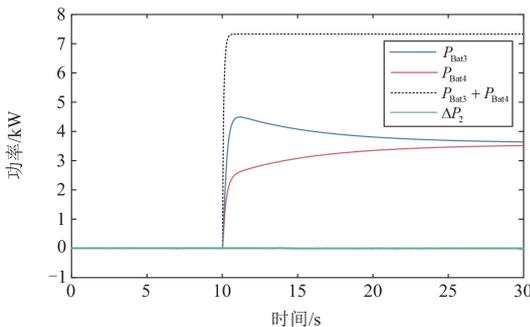


图 10 非耦合系统非故障侧系统功率图

Fig. 10 Power diagram of the non-fault side of the uncoupled system

作为对比, 电磁弹射系统经过 DAB 耦合后, 蓄电池出现故障后会通过耦合装置弥补故障侧功率缺额, 进而使两侧系统的功率恢复平衡。经仿真可得耦合后两系统的功率对比如图 11、图 12 所示。

从图 11 可以看出, 10 s 时 Bat1 发生了故障, 随着 DAB 的开通, 由 DAB 向故障侧传输了一定的

功率。根据荷电状态下下垂控制对 Bat2 的输出功率进行了重新分配, 其输出功率在 10 s 时下降, 而后在 30 s 时上升到 4588 W。

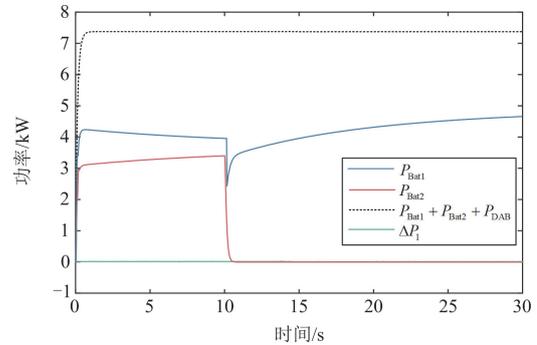


图 11 耦合系统故障侧系统功率图

Fig. 11 Fault side system power diagram of the coupling system

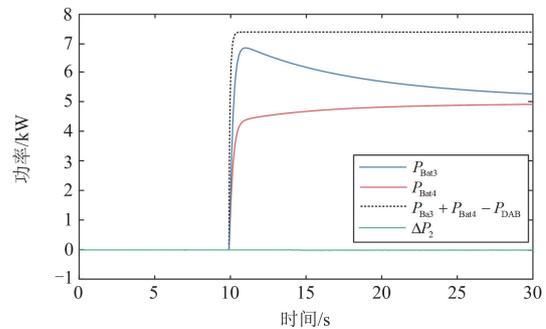


图 12 耦合系统非故障侧系统功率图

Fig. 12 Power diagram of the non-fault side of the coupling system

由图 12 可知, 10 s 时 Bat3 与 Bat4 输出的功率之和 $P_{\text{Bat3}} + P_{\text{Bat4}}$ 远大于其系统所需功率, 达到了 11 000 W, 多余的功率通过 DAB 传输到故障侧。非故障侧剩余功率 $P_{\text{Bat3}} + P_{\text{Bat4}} - P_{\text{DAB}}$ 为 7344 W, 系统无功率缺额。非故障侧蓄电池放电功率曲线与故障恢复侧蓄电池放电功率曲线相同。因此通过耦合系统中蓄电池损坏的仿真分析, 验证了耦合系统可以实现两侧系统功率动态再平衡。

综上, 通过仿真对比耦合及非耦合系统中 Bat1 在 10 s 损坏后, 两部系统功率对比图及 DAB 流通功率图, 验证了耦合系统实现功率动态平衡的有效性。

3.3 交替弹射时序性重建仿真验证

蓄电池发生故障后, 功率失衡会导致电磁弹射系统的交替弹射时序发生紊乱, 进而引发弹射冲突。因此, 为验证耦合系统具有避免弹射冲突的能力, 分别在有耦合装置和无耦合装置的情况下对蓄电池发生故障后的电磁弹射周期进行仿真。电磁弹射系统故障

发生前后的电容器荷电状态变化情况及弹射冲突发生时电容器荷电状态变化情况分别如图 13 和图 14 所示。

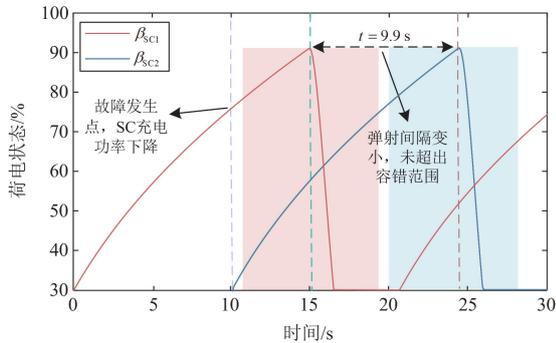


图 13 故障发生前后电容器荷电状态图

Fig. 13 Capacitor SOC diagram before and after a fault occurs

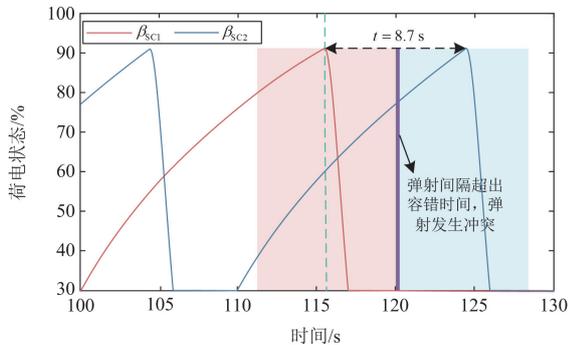


图 14 弹射冲突发生时电容器荷电状态图

Fig. 14 Diagram of the SOC of a capacitor at the time of an ejection collision

图 13 为系统未进行耦合的情况下, Bat1 在 10 s 时发生故障断开后系统出现功率缺额, SC1 的充电速度变慢。由图 13 可知, 放电时间点与 SC2 的放电时间点间隔变短, 弹射间隔由 10 s 变为 9.9 s, 过渡周期间隔比正常间隔缩短了 0.1 s。假设交替弹射的容错性为 1 s, 即弹射间隔小于 9 s 时发生交替弹射冲突。此时过渡周期的交替弹射准备时间未发生交叠, 未发生交替弹射冲突。

如图 14 所示, 在 100~130 s 之间, 两部电磁弹射之间的弹射间隔缩短为 8.7 s, 交替弹射时间超出容错时间, 弹射发生冲突。冲突时间为 0.3 s, 显示为图中紫色区域。此时, 故障侧的飞机起飞后其气流将导致非故障侧飞机起飞失败。

采用本文耦合系统将系统通过 DAB 进行耦合后, 可实现 Bat1 发生故障后的时序再恢复, 且避免了弹射冲突的发生, 仿真结果如图 15 和图 16 所示。

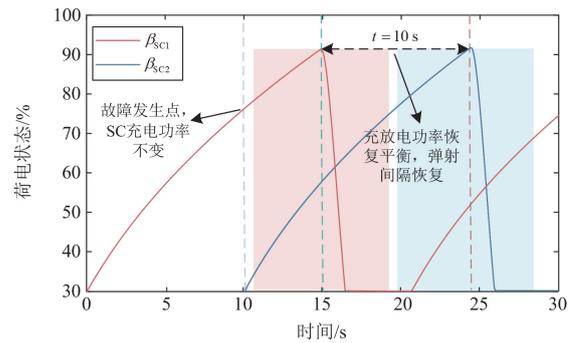


图 15 故障修复前后电容器荷电状态图

Fig. 15 Capacitor state of charge diagram before and after fault repair

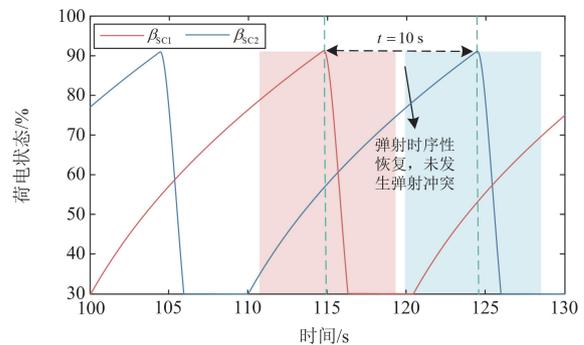


图 16 弹射冲突消除后电容器荷电状态图

Fig. 16 Diagram of the SOC of a capacitor after the ejection collision is eliminated

图 15 为 10 s 发生故障后电容器的荷电状态变化曲线。由图 15 可知, 由于两侧系统通过 DAB 进行功率的流通, 故障侧系统的功率缺额得到了弥补, 两侧系统的功率恢复动态平衡。故障侧与非故障侧交替弹射间隔也恢复为 10 s, 交替弹射时序性恢复正常。

交替弹射消除情况如图 16 所示。由图 16 可知, 由于故障侧功率缺额得到弥补, 两侧系统充放电功率恢复了平衡, 弹射时序性恢复正常。故在 100~130 s 之间, 交替弹射冲突消除, 无弹射冲突发生。

通过耦合及非耦合系统中 Bat1 在 10 s 损坏后的交替弹射时序图, 验证了耦合系统能够对电磁弹射系统的时序性进行再恢复, 避免发生弹射冲突。

3.4 耦合系统下垂控制有效性验证

耦合互联系统通过下垂控制使得所有蓄电池荷电状态达到一致, 进而使各蓄电池的电量同时耗尽, 避免单侧储能系统提前退出系统。本文所提下垂控制有效性验证如图 17—图 19 所示。

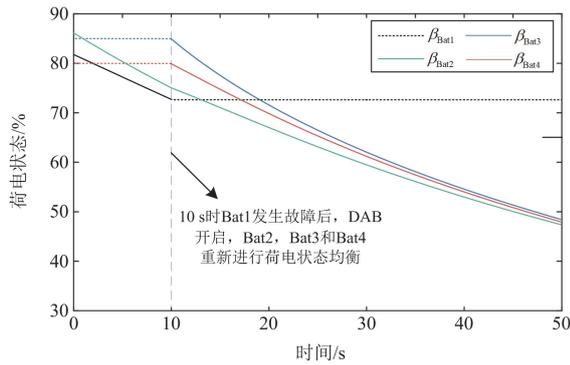


图 17 蓄电池荷电状态均衡图

Fig. 17 Equilibrium diagram of the SOC of battery

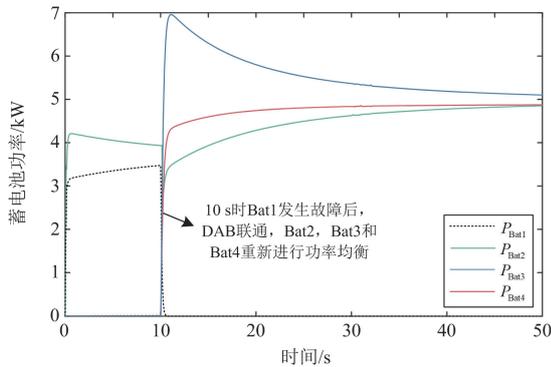


图 18 蓄电池输出功率均衡图

Fig. 18 Balance diagram of battery output power

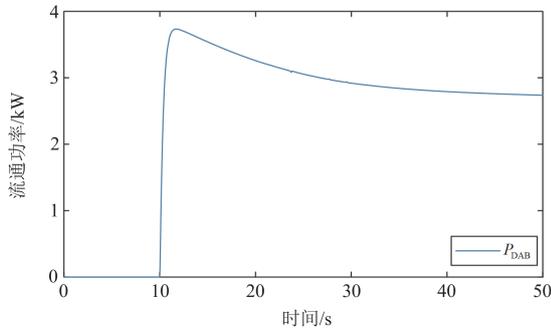


图 19 DAB 流通功率图

Fig. 19 Diagram of DAB circulating power

图 17 为 10 s 时耦合系统中 Bat1 发生故障时各蓄电池荷电状态变化曲线, DAB 开通, 为防止低荷电状态蓄电池提前退出系统, 造成系统崩溃, 10 s 后 Bat2、Bat3 和 Bat4 之间重新进行荷电状态均衡, 由图 17 可知, 经过 50 s 后 3 组蓄电池的荷电状态达到一致。图 18 为 3 组蓄电池在荷电状态平衡过程中功率输出变化曲线。由图 18 可得, 10 s 之前 Bat1 与 Bat2 通过下垂控制输出功率。10 s 时 Bat1 损坏, 其输出功率降为 0, Bat2、Bat3 和 Bat4 为耦合系统

提供功率, 并根据下垂系数重新进行功率分配输出。50 s 时 3 组蓄电池的功率趋于一致。由此验证了本文所提下垂控制策略可以实现蓄电池荷电状态的一致, 且避免了单侧系统提前耗尽的情况发生。

图 19 为耦合系统中 Bat1 在 10 s 发生故障断开后, 非故障侧通过 DAB 向故障侧传输的功率大小。随着两侧系统中蓄电池荷电状态均衡, 非故障侧所分配的输出功率减小, 通过 DAB 传输到故障侧的功率下降, 传输功率在 10 s 时达到最大, 在 50 s 降低为 2.73 kW。

进行荷电状态均衡后, 可以尽量保证 3 组蓄电池荷电状态同时耗尽, 使蓄电池的能量利用率得到最大化, 进而提高弹射次数。为验证以上结论, 设置在 4 组不同荷电状态均衡度的情况下, 对每一组荷电状态均衡前后的弹射次数进行仿真验证。4 种情况下各蓄电池的荷电状态如表 3 所示。

表 3 蓄电池荷电状态不同均衡度表

Table 3 Equilibrium table of different SOC of batteries

荷电状态	情况 1	情况 2	情况 3	情况 4
$\beta_{Bat2}/\%$	85	85	85	85
$\beta_{Bat3}/\%$	85	85	85	85
$\beta_{Bat4}/\%$	85	75	65	55

4 组不同荷电状态情况下, 荷电状态均衡前后两侧弹射系统总弹射次数及各侧弹射次数如图 20 所示。图 20 详细展示了荷电状态均衡与否两种情况下, 两弹射系统的弹射总次数及各弹射系统的具体弹射次数。由图 20 可得, 随着情况 1—情况 4 蓄电池荷电状态不均衡度越来越大, 蓄电池均衡前后两系统的弹射次数差由 0 次增加到 6 次。由此可知, 蓄电池荷电状态不均衡度越大, 下垂控制对其进行均衡前后总弹射次数差距越明显。除此之外, 从图

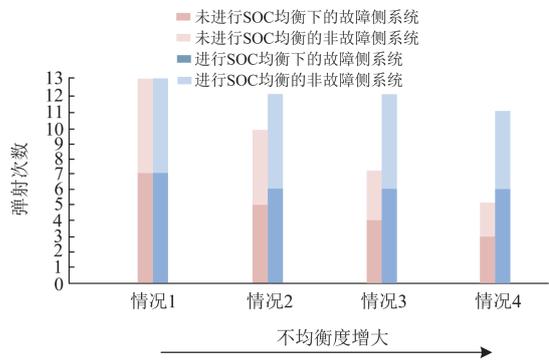


图 20 荷电状态均衡与否在不同荷电状态差距下弹射次数对比图

Fig. 20 Comparison of the number of ejections between the balance of the SOC and the difference in different SOC

20 可得, 荷电状态均衡后不仅弹射总次数有所增加, 各侧系统弹射次数也均得到了提升。由此体现出荷电状态均衡对于提高电磁弹射次数的重要性。

4 结论

本文针对电磁弹射储能系统中, 一侧蓄电池发生故障导致交替弹射动态功率出现失衡, 进而引发时序紊乱, 造成弹射冲突的问题, 提出了电磁弹射耦合模型的相关控制策略, 相关控制策略和贡献如下。

1) 针对 DAB 的控制方式提出一种新的双重移相控制策略。通过双重移相控制功率的流通方向及大小, 弥补故障侧的不平衡功率, 实现两部系统间的充放电功率再平衡, 从而实现交替弹射时序恢复。

2) 针对耦合互联系统中的蓄电池提出的改进型 SOC 均衡策略, 避免了一侧系统提前退出系统, 且保证了时序再恢复后系统的弹射次数最大化。

3) 在 Matlab/Simulink 软件中搭建电磁弹射耦合系统仿真模型, 通过仿真对所提方法进行验证。仿真结果表明所提控制策略对于实现功率平衡及避免单侧系统提前退出系统, 进而提高弹射次数的有效性。

本文中流经 DAB 的传输功率较小未超出其可流通功率的最大值, 当故障侧系统所需功率较大且超出 DAB 的最大流通功率时, 两侧系统的功率无法达到动态平衡, 即无法进行交替弹射。为避免弹射冲突且得到最短弹射时间, 此时可以采取对流经 DAB 的功率进行优化, 以流通功率最大值及弹射时间不冲突为约束条件, 总弹射时间最短为目标函数展开研究。

参考文献

- [1] 马伟明, 鲁军勇. 电磁发射技术的研究现状与挑战[J]. 电工技术学报, 2023, 38(15): 3943-3959.
MA Weiming, LU Junyong. Research progress and challenges of electromagnetic launch technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 3943-3959.
- [2] TONG W, LI C, SONG Z, et al. Preliminary design of pulse inductor applied for 100-kA quench protection system[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(6): 1754-1761.
- [3] 马伟明. 关于电工学科前沿技术发展的若干思考[J]. 电工技术学报, 2021, 36(22): 4627-4636.
MA Weiming. Thoughts on the development of frontier technology in electrical engineering[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(22): 4627-4636.
- [4] 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): 4076-4084.
WANG Xiang, WU Jun. Hybrid energy storage system of continuous-type electromagnetic catapult and its energy management strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(19): 4076-4084.
- [5] LU J, TALNG Y, ZENG D, et al. Fault prediction of electromagnetic launch system based on knowledge prediction time series[J]. IEEE Transactions on Industrial electronics, 2021, 57(2): 1830-1839.
- [6] ZHAI X, LIU H, PENG Z. Research on armature thrust inductance gradient of the electromagnetic rail launcher[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2022, 50(3): 754-760.
- [7] 林其友, 袁瑶, 陈亮亮, 等. 柔性互联直流微网群一致性协调控制[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(23): 9907-9915.
LIN Qiyu, YUAN Yao, CHEN Liangliang, et al. Consensus-based coordinated control of direct current microgrid clusters[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(23): 9907-9915.
- [8] 胡海兵, 王万宝, 孙文进, 等. LLC 谐振变换器效率优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 48-56.
HU Haibing, WANG Wanbao, SUN Wenjin, et al. Optimal efficiency design of LLC resonant converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 48-56.
- [9] 杨天国, 何鹏, 张浩, 等. 多变流器互联交直流微网集群一致性功率协同控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(4): 120-132.
YANG Tianguo, HE Peng, ZHANG Hao, et al. Consensus-based power coordinated control of AC/DC microgrid cluster with multiple interconnected converters[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2024, 36(4): 120-132.
- [10] ROUZBEHI K, MIRANAIAAN A, CANDELA J I, et al. A generalized voltage droop strategy for control of multiterminal DC grids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 51(1): 607-618.
- [11] ROUZBEHI K, MIRANIAN A, LUNA A, et al. DC voltage control and power sharing in multiterminal DC grids based on optimal DC power flow and voltage-droop strategy[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4): 1171-1180.
- [12] HUANG W, ABUQAHOUQ J. Energy sharing control scheme for state-of-charge balancing of distributed battery energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 2764-2776.
- [13] DRAGIČEVIĆ T, GUERRERO J M, VASQUEZ J C, et al. Supervisory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability[J]. IEEE

- Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 695-706.
- [14] LU X, SUN K, GUERRERO J M, et al. State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in DC microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(6): 2804-2815.
- [15] LU X, SUN K, GUERRERO J M, et al. Double-quadrant state-of-charge-based droop control method for distributed energy storage systems in autonomous DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 147-157.
- [16] 米阳, 纪宏澎, 何星璐, 等. 多储能独立直流微电网自适应分级协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1980-1989.
- MI Yang, JI Hongpeng, HE Xingtang, et al. Adaptive hierarchical coordinated control of multi-energy storage in isolated DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1980-1989.
- [17] LU X, SUN K, GUERRERO J M, et al. State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in dc microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61(6): 2804-2815.
- [18] WU Q, SUN X, WANG Y, et al. A state-of-charge balance method for distributed energy storage units in microgrid[C]// IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 26-30, 2017, Tampa, FL, USA: 1346-1350.
- [19] LU X, SUN K, GUERRERO J M, et al. Double-quadrant state-of-charge-based droop control method for distributed energy storage systems in autonomous DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 6(1): 147-157.
- [20] MARZEBALI M H, MAZIDI M, MOHITI M. An adaptive droop-based control strategy for fuel cell-battery hybrid energy storage system to support primary frequency in stand-alone microgrids[J]. Energy Storage 2020, 27: 101127.
- [21] 马文忠, 王立博, 王玉生, 等. 考虑 SOC 的混合储能功率分配与自适应虚拟惯性控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5): 83-93.
- MA Wenzhong, WANG Libo, WANG Yusheng, et al. Hybrid energy storage power distribution and adaptive virtual inertia control considering SOC[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(5): 83-93.
- [22] 宁显华, 潘欢, 李峰, 等. 基于线路电阻观测值的直流微电网改进下垂控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(11): 42-51.
- NING Xianhua, PAN Huan, LI Feng, et al. An improved droop control strategy for a DC microgrid based on line resistance observations[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(11): 42-51.
- [23] 武海涛, 庞春林, 张宁宁. 兼顾提升功率分配精度与抑制电压偏差的自适应下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 109-120.
- WU Haitao, PANG Chunlin, ZHANG Ningning. Adaptive sag control with improved power distribution accuracy and voltage deviation suppression[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 109-120.

收稿日期: 2024-04-24; 修回日期: 2024-06-29

作者简介:

魏繁荣(1991—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统优化调度、电力系统信息物理安全; E-mail: 610300307@qq.com

徐昂(1999—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为电力系统优化调度、网络重构; E-mail: 951745630@qq.com

据兴宝(1976—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为舰船电气研究与设计。E-mail: juxingbao712@sina.com.cn

(编辑 许威)