



基于超级电容和锂电池的消磁电源能量回馈控制策略

李维波 彭康 张茂杰 彭智明 张浩

Degaussing power supply energy feedback control strategy for supercapacitors and lithium batteries

LI Weibo, PENG Kang, ZHANG Maojie, PENG Zhiming, ZHANG Hao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03118>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

舰船中压直流电力系统的混合储能管理策略仿真分析

Simulation analysis on hybrid energy storage management strategy in warship medium voltage DC power system

中国舰船研究. 2019, 14(2): 126-136, 143 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01198>

基于优化功率分配的光伏混合储能系统能量管理策略

Energy management strategy of photovoltaic hybrid energy storage system based on optimal power distribution

中国舰船研究. 2021, 16(2): 168-175 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01869>

基于实时小波变换的燃料电池混合动力船舶能量管理策略

Energy management strategies for fuel cell hybrid ships based on real-time wavelet transform

中国舰船研究. 2020, 15(2): 127-136 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01597>

基于混合储能的船舶电力系统功率波动平抑控制策略

Power fluctuation control strategy of ship power system based on hybrid energy storage system

中国舰船研究. 2021, 16(4): 190-198 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02006>

舰船综合电力系统的多混合储能协同控制方法

A coordinated control method of multi-hybrid energy storage in vessel integrated power system

中国舰船研究. 2020, 15(6): 12-21 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01668>

基于电力电子开关的智能化稳压电源补偿策略

Compensation strategy of intelligent regulated power supply based on power electronic converters

中国舰船研究. 2018, 13(S1): 175-181 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01276>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03118>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 李维波, 彭康, 张茂杰, 等. 基于超级电容和锂电池的消磁电源能量回馈控制策略[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(6): 247-256.

LI W B, PENG K, ZHANG M J, et al. Degaussing power supply energy feedback control strategy for supercapacitors and lithium batteries[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(6): 247-256.

基于超级电容和锂电池的消磁电源 能量回馈控制策略



扫码阅读全文

李维波*, 彭康, 张茂杰, 彭智明, 张浩

武汉理工大学 自动化学院, 湖北 武汉 430070

摘要: [目的] 为使消磁时消磁线圈上的能量能够回馈到消磁电源、提高能源利用率, 提出基于超级电容和锂电池混合供电的消磁电源控制策略。[方法] 通过研究消磁线圈强耦合工况下的电气特性, 引入超级电容和锂电池混合供电的消磁电源系统。将消磁线圈电流的变化分为上升、保持、下降(能量回馈)3个阶段, 在消磁线圈电流变化的不同阶段, 控制相应功率器件的开通和关断。借助 Matlab/Simulink 进行仿真, 分析仿真结果, 以验证基于超级电容和锂电池混合供电系统的能量回馈控制策略的可行性。[结果] 仿真结果表明, 流经各消磁线圈的总电流值可以快速上升至消磁额定电流值, 并稳定在额定值附近, 且超调量较小。[结论] 超级电容和锂电池混合供电的消磁电源系统能够将消磁线圈上的能量回馈至超级电容中, 减少整套消磁系统的能源损耗。

关键词: 舰船消磁; 消磁线圈; DC/DC 变换器; 超级电容; 能量回馈; 混合供电

中图分类号: U674.70; U665.18

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03118

Degaussing power supply energy feedback control strategy for supercapacitors and lithium batteries

LI Weibo*, PENG Kang, ZHANG Maojie, PENG Zhiming, ZHANG Hao

School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

Abstract: [Objectives] In order to make the energy in the degaussing coil feed back to the degaussing power supply and improve the energy utilization rate, a degaussing power supply control strategy is proposed with a hybrid supercapacitor and lithium battery power supply. [Methods] After studying the electrical characteristics of the degaussing coil under strong coupling conditions, the hybrid power supply system is introduced. The change of the degaussing coil current is divided into three stages: rising, holding and falling (energy feedback). In different stages of degaussing coil current change, the opening and closing of the corresponding switches are controlled. The simulation is carried out using Matlab/Simulink, and the simulation results are analyzed to verify the feasibility of the energy feedback control strategy based on the hybrid power supply system. [Results] The analysis and simulation results show that the total current flowing through each degaussing coil can quickly rise to and stabilize near the standard value, the overshoot is small and the energy supplied to the degaussing coil can also be fed back into the supercapacitor. [Conclusion] The proposed degaussing system with a hybrid power supply can feed back the energy in the degaussing coil to the supercapacitor, thereby reducing the energy loss of the whole degaussing system.

Key words: ship degaussing; degaussing coil; DC/DC converter; supercapacitor; energy feedback; hybrid power supply

0 引言

现代舰船是结构复杂的庞大铁磁体, 受地磁影响以及建造和航行过程中的磁场冲击和应力冲

击, 舰船周围空间会产生磁场, 是舰船受到磁性武器攻击的重要威胁源。安装消磁系统是舰船磁性防护最有效的手段。消磁系统主要由消磁控制设备、消磁电源以及消磁线圈组成。消磁电源根

收稿日期: 2022-10-11 修回日期: 2023-03-11 网络首发时间: 2023-04-26 16:53

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2020YFB1506802); 国家自然科学基金面上项目资助(51977164)

作者简介: 李维波, 男, 1973年生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 电力电子技术, 舰船能量管理。

E-mail: liweibo@whut.edu.cn

*通信作者: 李维波

据消磁控制设备,向消磁线圈输出高品质的消磁电流,从而抵消舰船自身的磁场^[1-3]。研究表明,当消磁线圈紧密摆放时,各消磁线圈之间会产生较大的互感,大幅增加消磁电流的调节时间^[4-7];并且在消磁电流保持阶段,消磁线圈上会储存较大的能量,当消磁电流处于下降阶段时,让消磁线圈上的能量全部通过电阻转变成热能而耗散势必会造成能源的浪费。因此,在多线圈、强耦合的工况下,确保流过线圈的电流依旧能快速地稳定在消磁额定电流附近,且消磁线圈上的能量能够快速回馈到消磁电源中,就显得非常重要。

目前有关消磁电源的文献较少,现采用的消磁电源主要有两种类型,即旋转电机式和静止式^[8]。传统消磁电源中的消磁电流脉冲都由供电电源提供。滕春阳^[9]提出了超级电容和电站共同形成脉冲放电电流的消磁电源形式,降低了系统对电站功率的要求,但没使消磁线圈电流脉冲下降沿的能量回馈到超级电容中,造成过多的能源损耗。严民雄等^[10]采用储能密度较大的电容—电感混合储能方式,通过拓扑设计,利用电力电子器件和续流回路来控制存储于电感中的能量,以满足特殊负载脉冲电流快速性的要求,但同样没考虑到负载上能量的回馈。目前,能量回馈主要有两种形式,分别是将能量回馈给电网或超级电容。马艳等^[11]提出了将变电站蓄电池组放出的能量通过变流器回馈至电网,避免造成能源浪费。薛小军^[12]采用超级电容作为储能装置,利用超级电容迅速地吸收和释放车辆制动再生能量,提高车辆能源的利用率。相较两种能量回馈方式,前者成本高,并且容易给电网注入谐波,污染电网环境。

针对上述问题,为了使消磁线圈上的能量可

以回馈给消磁电源,且在多线圈、强耦合的工况下满足消磁线圈电流调节时间少、超调量小的要求,本文将提出基于锂电池和超级电容混合供电的消磁电源系统。当消磁线圈电流处于上升阶段时,由锂电池和超级电容共同给消磁线圈供电;当消磁线圈电流处于保持阶段时,锂电池单独给消磁线圈供电;当消磁线圈电流处于下降阶段时,使消磁线圈中的能量回馈至超级电容中。该方案可实时检测超级电容和锂电池的荷电状态(state of charge, SOC),灵活控制超级电容和锂电池的充放电状态。借助 Matlab/Simulink 软件,针对多线圈强耦合工况下锂电池和超级电容对多套消磁线圈供电进行仿真,观察消磁线圈电流及超级电容荷电状态的变化,以验证所提出的基于锂电池和超级电容混合供电系统的能量回馈方式的可行性。

1 多线圈强耦合工况电气特性

当多套消磁线圈紧密地摆放在一起时,线圈之间的互感影响不能忽略。为方便研究,特设置5套线圈,每套线圈用1个电感和电阻代替,5套线圈强耦合工况时的电路示意图如图1所示。图中, $i_1 \sim i_5$ 分别为流经各线圈(线圈1~5)的电流; $L_1 \sim L_5$ 分别为各线圈的等效电感; $R_1 \sim R_5$ 分别为各线圈的等效电阻; $u_1 \sim u_5$ 分别为各线圈上的电压;线圈上的小黑点为各线圈的同名端。

分析图1可知,当线圈回路中有电流流过时,其他4套线圈上会感应出一个电动势,该电动势的大小与流经线圈的电流变化率和各线圈之间的互感大小有关。根据基尔霍夫定律(Kirchhoff laws),可列出线圈回路的电路方程:

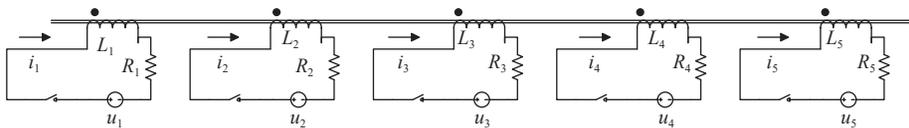


图1 5套线圈强耦合工况时的电路示意图

Fig. 1 The circuit with five coils strongly coupled to the operating conditions

$$U = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} \\ M_{12} & L_2 & M_{23} & M_{24} & M_{25} \\ M_{13} & M_{23} & L_3 & M_{34} & M_{35} \\ M_{14} & M_{24} & M_{34} & L_4 & M_{45} \\ M_{15} & M_{25} & M_{35} & M_{45} & L_5 \end{bmatrix} \times D_i + U_R \quad (1)$$

其中,

$$U = [u_1, u_2, u_3, u_4, u_5]^T$$

$$D_i = \left[\frac{di_1}{dt}, \frac{di_2}{dt}, \frac{di_3}{dt}, \frac{di_4}{dt}, \frac{di_5}{dt} \right]^T$$

$$U_R = [i_1 R_1, i_2 R_2, i_3 R_3, i_4 R_4, i_5 R_5]^T$$

式中: M_{ij} 为线圈*i*和线圈*j*之间的互感系数,其中, $i=1 \sim 5; j=1 \sim 5; di_k/dt$ 为各线圈电流的变化率, $k=1 \sim 5$ 。

当消磁线圈的规格参数和摆放位置确定下来时,线圈之间的互感和自感就不会发生改变。线圈的自互感矩阵就可以等效为一个5×5的常数矩阵*C*,所以式(1)可以简化为:

$$U = C \times D_i + U_R \quad (2)$$

式中, $C = [c_1, c_2, c_3, c_4, c_5]^T$ 。

分析式 (2) 得知, 对于已经确定好规格形状和摆放位置的消磁线圈绕组, 各线圈上的电压 u_k 与流经各线圈回路中的电流和电流的变化率有关。流经各线圈的电流 i_k 可以表示为:

$$i_k = \int_0^t \left(\frac{di_k}{dt} \right) dt = \int_0^t v_k dt \quad (3)$$

式中, v_k 表示流经线圈 k 的电流变化率, 也即 $v_k = di_k/dt$ 。

将式 (3) 代入式 (2) 中, 可得:

$$U = C \times [v_1, v_2, v_3, v_4, v_5]^T + \left[\int_0^t R_1 v_1 dt, \int_0^t R_2 v_2 dt, \int_0^t R_3 v_3 dt, \int_0^t R_4 v_4 dt, \int_0^t R_5 v_5 dt \right]^T \quad (4)$$

分析式 (4) 可知, 当消磁线圈的规格参数和摆放位置确定时, 其线圈上的电压仅受制于流经线圈电流的变化率。同样地, 也可以通过控制消磁线圈上的电压来控制流经线圈的电流变化率, 进而控制流经消磁线圈的电流幅值。

从工程实践得知, 流经消磁线圈的电流是脉冲电流串, 消磁电流波形如图 2 所示。流经消磁线圈的脉冲电流可分为电流上升、电流保持和电流下降(能量回馈)3 个阶段, 消磁电流的上升时间和下降时间尽量短, 并且消磁电流能够在上升到某定值时保持住一段时间^[9]。

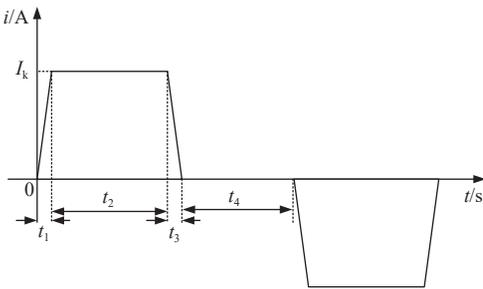


图 2 理想的消磁电流波形
Fig. 2 Ideal degaussing current waveform

图 2 中, $t_1 \sim t_3$ 分别为线圈消磁电流的上升时间、保持时间和下降时间, t_4 为下一个脉冲的间隔时间, I_k 为消磁电流额定值。为了确保 t_1 和 t_3 取值尽量小, 即消磁电流的上升速率和下降速率尽量大, 可根据式 (4) 反推出消磁线圈上的电压变化规律。

鉴于向量 U 中每个元素的变化规律均相同, 不失一般性, 可以第 1 个元素 u_1 为例进行分析, 即

$$u_1 = S_1 + S_2 \quad (5)$$

式中: S_1 为电感上的电压和其他线圈对其产生的感应电压这之和, 是单个元素, $S_1 = c_1 \times D_i$; S_2 为

等效电阻的端电压, $S_2 = \int_0^t R_1 v_1 dt$ 。

分析图 2 可知, 在 t_1 时间段内, 消磁线圈电流的上升斜率较高, 电流值上升至电流额定值 I_k ; 在 t_2 时间段内, 消磁线圈的电流变化率为 0; 在 t_3 时间段内, 消磁线圈的下降斜率较大, 并且电流值下降至 0。但实际中消磁电流的变化率不可能一直为一个恒定值, 将电流的变化率当成已知量, 设置电流变化率在 t_1 时间段内先大后小, 在 t_2 时间段内保持为 0, 在 t_3 时间段内先小后大, 各线圈电流变化率保持一致, 线圈 1 的电流变化率 v_1 如图 3 所示。依据图 3, 可得到 S_1, S_2 和 u_1 随时间变化的曲线, 如图 4 所示。

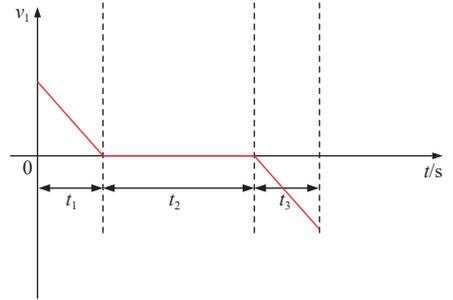


图 3 电流变化率随时间的变化曲线
Fig. 3 Variation of current change rate with time

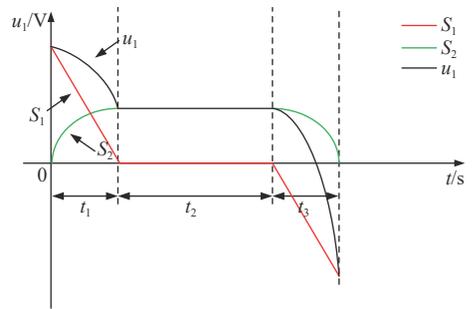


图 4 S_1, S_2, u_1 随时间的变化曲线
Fig. 4 Variation of S_1, S_2, u_1 with time

图 4 中, u_1 随时间变化的曲线为 S_1 和 S_2 随时间变化的曲线叠加而成。对比分析图 3 和图 4 得知, 给消磁线圈一个较大的初始电压, 并使电压值逐渐消减, 可以使消磁线圈的电流在短时间内快速上升至电流额定值, 并稳定在额定值附近。

2 消磁电源电路拓扑

为了使消磁线圈电流在上升阶段时加在消磁线圈上的电压足够大, 需在消磁电流的上升阶段内让超级电容和锂电池共同给消磁线圈负载供电, 在保持阶段时让锂电池单独给消磁线圈供电, 在下降阶段时让消磁线圈中的能量回流至超级电容中, 实现能量回馈。超级电容给线圈提供反压, 使线圈电流可以快速下降至 0。所设计的消磁电源拓扑如图 5 所示。

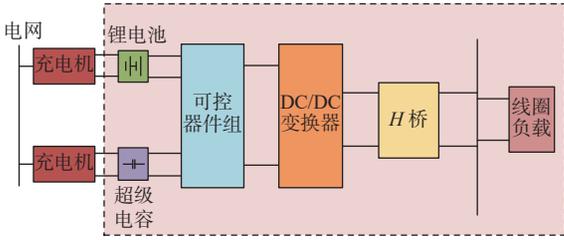


图 5 基于锂电池与超级电容的消磁电源拓扑图

Fig. 5 Structure diagram of degaussing power supply system based on lithium battery and supercapacitor

图 5 中充电机与电网相连,通过检测锂电池和超级电容的 SOC 来判断是否给锂电池和超级电容充电。当检测到锂电池和超级电容的 SOC 值低于预警值时,该电源停止工作,电网通过充电机给锂电池和超级电容充电。为重点阐释耦合工况下锂电池和超级电容这种混合供电方式对多线圈的电流调节以及能量回馈的影响,略去电网给锂电池和超级电容充电部分。为便于分析,假设该消磁电源开始工作时,锂电池和超级电容的 SOC 值处于正常工作区。可控器件组由可控开关器件组成,当消磁电流处于上升阶段和保持阶段时,锂电池和超级电容通过可控器件来实现锂电池和超级电容的接入与切出。当消磁电流处于下降阶段时,消磁线圈上的能量可通过可控器件实现线圈能量的回馈,H 桥用于消磁线圈电流的换向。

3 消磁电源模式

设计的消磁电源拓扑如图 6 所示,以单线圈工况为例进行分析。图中, U_{Li} 为锂电池电源, U_{Sc} 为超级电容两端的电压, S1~S6 为 6 个绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT), C_f 为输入稳压支撑电容, L_f 为 buck 电感, D1 和 D2 为续流二极管, TL1~TL5 为 5 个晶闸管, R_d 为能量释放电阻。

现将图 6 所示拓扑电路中各功率器件的功能简述为: S1 控制锂电池 U_{Li} 的接入与接出; S2 控制 buck 电路的占空比,调节负载线圈上的电压大小; S3 和 TL5 控制消磁线圈电流下降阶段时,能量释放回路的接入; S4 控制超级电容 SC 的接入与接出; S5 和 S6 受超级电容的 SOC 控制,用于选择消磁线圈上的能量是回馈给超级电容还是通过释放电阻 R_d 转化为热能消耗掉; TL1~TL4 控制消磁线圈的电流方向。

3.1 总体控制策略

如图 2 所示,将消磁电流的上升、保持和下降阶段合并,称为一个完整的消磁电流脉冲周期,即第 1 个电流脉冲结束后,经过一段时间

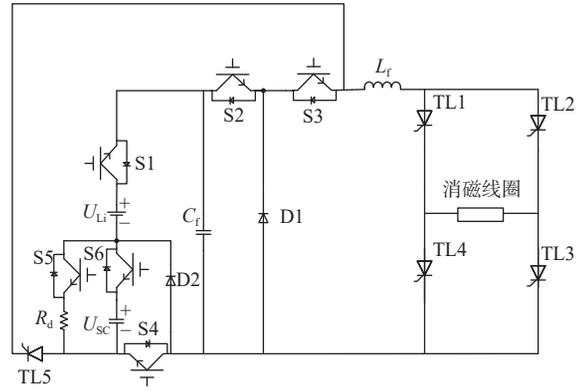


图 6 锂电池和超级电容混合供电主拓扑图

Fig. 6 Main circuit diagram of hybrid power supply system based on lithium battery and supercapacitor

隔,通过 H 桥换向,又产生一个反向的消磁电流脉冲,如此循环,产生正反交替的消磁电流脉冲。随着消磁电流的变化,控制相应开关管通断。整个消磁过程,随着消磁电流的变化,各开关管波形和超级电容荷电状态 C_{SOC} 变化如图 7 所示。图中, I_f 为判断是否从电路中切除超级电容的电流信号值, C_{SOC_max} 为超级电容的充电死区阈值,设定当 $C_{SOC_max} < C_{SOC}$ 时,超级电容不能充电,只能放电。

选择消磁线圈电流的第 1 次脉冲过程进行分析,为了方便,将电流上升、保持和下降 3 个阶段的对应模式分别开展研究,即

- 1) 消磁电流上升模式;
- 2) 消磁电流保持模式;
- 3) 消磁电流下降(即能量回馈)模式。

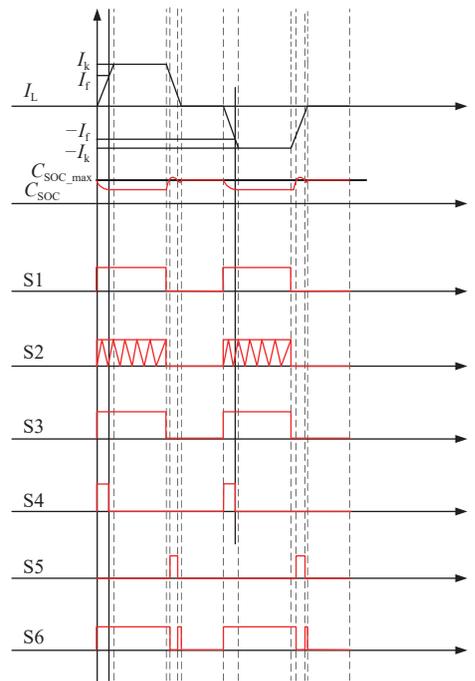
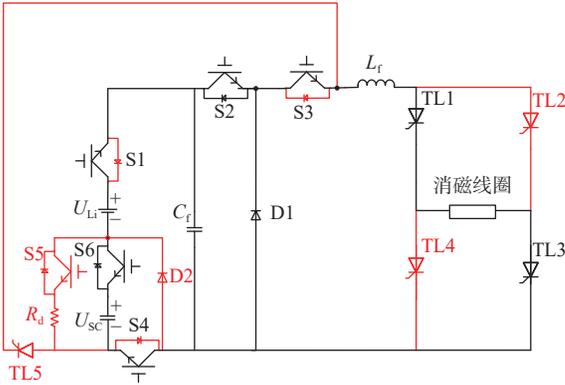


图 7 各开关管波形和超级电容 SOC 变化示意图

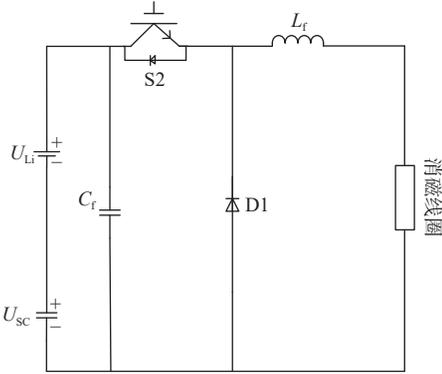
Fig. 7 Variation of the waveform of switch tubes and the SOC of supercapacitors

3.2 消磁电流上升模式

当消磁电流处于上升阶段时,为了使线圈电流能够快速上升至电流额定值 I_k 。此时需给消磁线圈负载一个较大的电压,该电压由超级电容 SC 和锂电池电源 U_{Li} 共同提供。然后,通过 buck 变换器给消磁线圈供电。续流二极管 D2 由于超级电容 SC 施加反压,处于截止状态。消磁电流上升模式的电流通路及等效电路如图 8 所示,红色线表示隐去电路。



(a) 消磁电流上升模式电流通路



(b) 等效电路

图 8 消磁电流上升模式的电流通路及等效电路

Fig. 8 Degaussing current rising mode and its equivalent circuit

消磁电流处于上升阶段时,锂电池和超级电容通过 buck 电路给消磁线圈供电,通过 PWM 控制功率器件 S2(选全控型器件充当,如 MOS 管或者 IGBT,视具体功率情况而定)的开通和关断来调节消磁线圈上的电压大小,控制框图如图 9 所示。图中, i_{l_ref} 为消磁指令电流,其值与 I_k 相同, i_l 为流经消磁线圈的电流, D_buck 为 PWM 控制下的占空比。

给功率器件 S2 设置一个较大的初始占空比,使消磁电流处于上升阶段时,消磁线圈上的电压变化与图 4 中 u_1 随时间变化的规律相同。

3.3 消磁电流保持模式

消磁电流保持阶段需通过功率器件 S4 将超

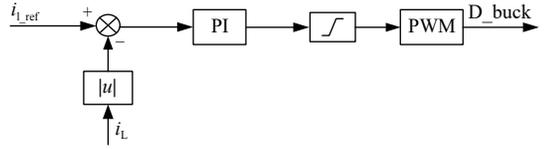
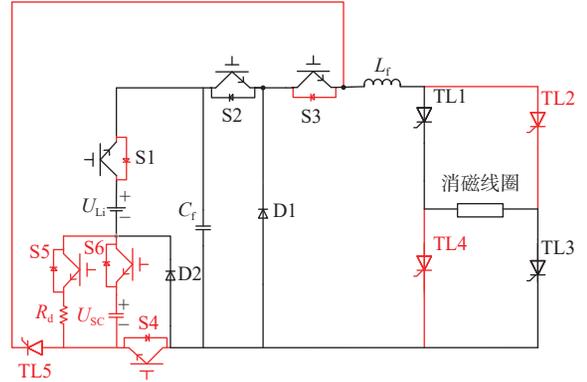


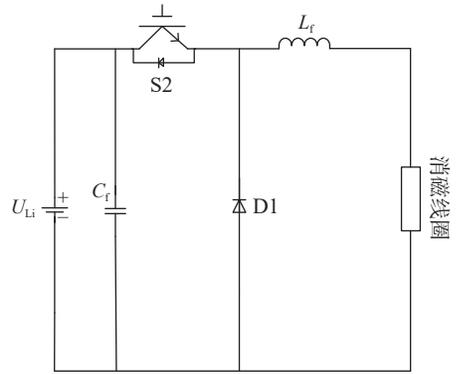
图 9 buck 模式控制框图

Fig. 9 Block diagram of buck mode control

级电容从电路中去掉,此时续流二极管 D2 导通,整个电路由锂电池单独供电,该模式下的电流通路及等效电路如图 10 所示,红色线表示隐去电路。



(a) 消磁电流保持模式电流通路



(b) 等效电路

图 10 消磁电流保持模式的电流通路及等效电路

Fig. 10 The path of degaussing current and its equivalent circuit in the holding mode

功率器件 S4 的开通和关断受消磁电流的大小控制,其控制框图如图 11 所示。图中, D_{S4} 为功率器件 S4 的控制信号, i_l 为消磁电流, I_f 为预设保持消磁电流。

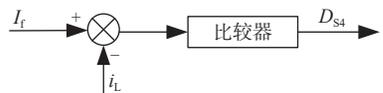


图 11 功率器件 S4 控制框图

Fig. 11 Control block diagram of power device S4

当消磁电流处于保持阶段时,消磁电流 i_l 会在消磁额定电流 I_k 附近上下浮动,为了防止超级电容在电流保持过程中频繁地接入电路,给功率器件造成过大的电流,以致器件损坏,应在消磁电流达到 I_k 之前就断开超级电容 SC。但同时为了兼顾线圈电流上升的速度,可以在检测到消磁

电流达到 $0.9I_k$ 时, 控制 S4 关断, 将超级电容从电路中切除, 将切除超级电容时的消磁电流定义为预保持消磁电流 I_{r0} 。当 i_L 与 I_r 的差值小于 0 时, D_{S4} 输出 1, 控制 S4 开通; 差值大于 0 时, D_{S4} 输出 0, 控制 S4 关断。

3.4 消磁电流下降模式

当消磁电流处于下降阶段时, 通过功率器件 S1 将锂电池 U_{Li} 从电路中断开, 并且使功率器件 S3 关断以及晶闸管 TL5 导通, 使得消磁线圈中的能量能回馈至超级电容中。消磁电流下降阶段前, 消磁电流维持在 I_k , 则消磁线圈中存储的能量表达式为

$$W_L = \frac{1}{2} L I_k^2 \quad (6)$$

式中: W_L 为消磁线圈和 buck 电感中存储的能量; L 为消磁线圈的自感值和 buck 电感的总和。在线圈能量回馈过程中, 消磁线圈中能量的一部分被电阻消耗掉, 一部分回馈给超级电容, 即

$$\begin{cases} W_L = W_{SC} + W_R \\ W_{SC} = \frac{1}{2} C \Delta U^2 \\ W_R = \int_{T_1}^{T_2} i_L^2 R dt \end{cases} \quad (7)$$

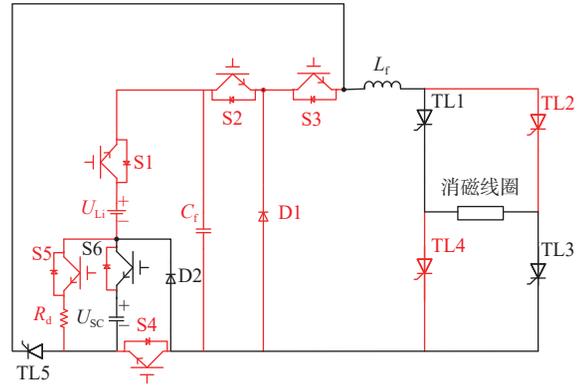
式中: W_{SC} 为超级电容吸收的能量; W_R 为线圈电阻所消耗的能量; C 为超级电容的容值; ΔU 为超级电容吸收消磁线圈释放的能量后所提升的电压差值; T_1 为消磁电流开始下降的时刻; T_2 为消磁电流下降到 0 的时刻; R 为消磁线圈的等效电阻。

由于消磁线圈电流下降的时间很短, 所以线圈电阻上消耗的能量相较于超级电容吸收的能量很小, 可认为线圈上的能量基本都被超级电容吸收, 即

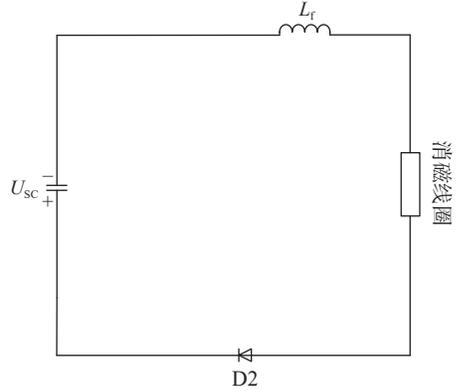
$$W_L = \frac{1}{2} C \Delta U^2 \quad (8)$$

分析消磁线圈上升阶段和保持阶段可知, 线圈上的能量由锂电池和超级电容一起提供, 如果将能量全部回馈给超级电容, 会导致每次消磁电流脉冲周期内, 超级电容所吸收的能量会比释放的能量多, 可能导致超级电容过充。所以需要监控超级电容的荷电状态 C_{SOC} 。根据超级电容的荷电状态, 可以将消磁能量回馈的过程分为 2 个阶段:

1) 当 $C_{SOC} < C_{SOC_max}$ 时, 消磁线圈上的能量通过续流二极管 D2 和功率器件 S6 回馈至超级电容中, 并且此时超级电容给消磁线圈提供反压, 使其电流下降速度加快。此模式的电流通路及等效电路 I 如图 12 所示, 红色线表示隐去电路。



(a) 消磁电流下降模式电流通路 I



(b) 等效电路 I

图 12 消磁电流下降模式的电流通路及等效电路 I

Fig. 12 Degaussing current falling mode and its equivalent circuit I

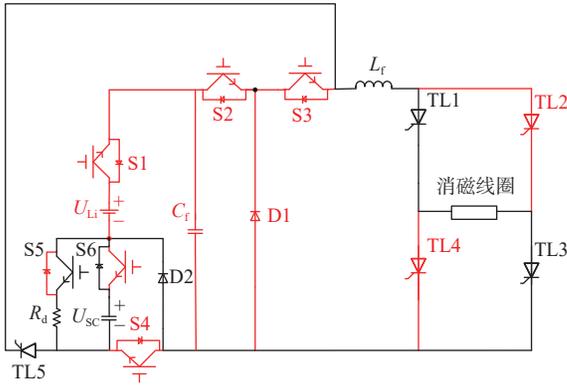
2) 当 $C_{SOC} > C_{SOC_max}$ 时, 消磁线圈上的能量通过续流二极管 D2 到功率器件 S5, 然后通过释放电阻 R_d 将线圈上的能量转化成热能消耗, 并且超级电容 SC 也会通过 S6 上的二极管 D3, 然后流经电阻 R_d 进行放电。当 $C_{SOC} < C_{SOC_max}$ 时, 又返回至消磁能量回馈过程的阶段 1, 如此循环, 直到线圈上的能量释放完毕。此模式的电流通路及等效电路 II 如图 13 所示, 红色线表示隐去电路。

消磁电流下降模式控制框图如图 14 所示。

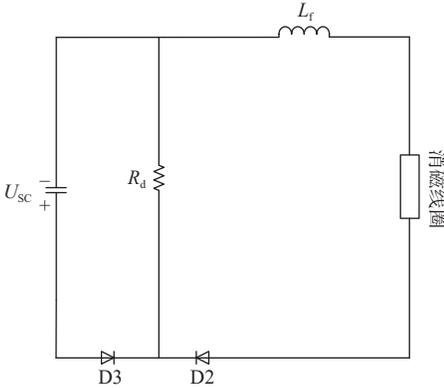
当 C_{SOC} 与 C_{SOC_max} 的差值小于 0 时, 比较器 1 工作, 功率器件 S5 关断、S6 开通, 超级电容吸收消磁线圈上的能量。差值大于 0 时, 比较器 2 工作, 功率器件 S5 开通、S6 关断, 消磁线圈上的能量通过功率电阻释放出去。

3.5 多线圈强耦合模式

采用多套相同的电源电路分别给多套消磁线圈供电, 以减小单个电源电路的超级电容和锂电池的功率需求。并且, 将消磁电源输出端相互并联, 防止当个别电源出现故障时, 故障电源回路上的消磁线圈无法正常进行消磁。本文以 5 套消磁电源相互并联为例进行分析, 消磁电路拓扑图如图 15 所示, 单个消磁电路拓扑图如上文图 6 所示。



(a) 消磁电流下降模式电流通路 II



(b) 等效电路 II

图 13 消磁电流下降模式的电流通路及等效电路 II

Fig. 13 Degaussing current falling mode and its equivalent circuit II

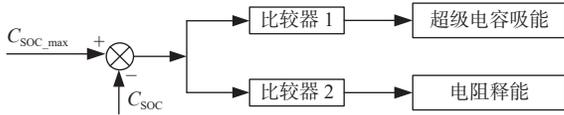


图 14 消磁电流下降模式控制框图

Fig. 14 Control block diagram of degaussing current falling mode

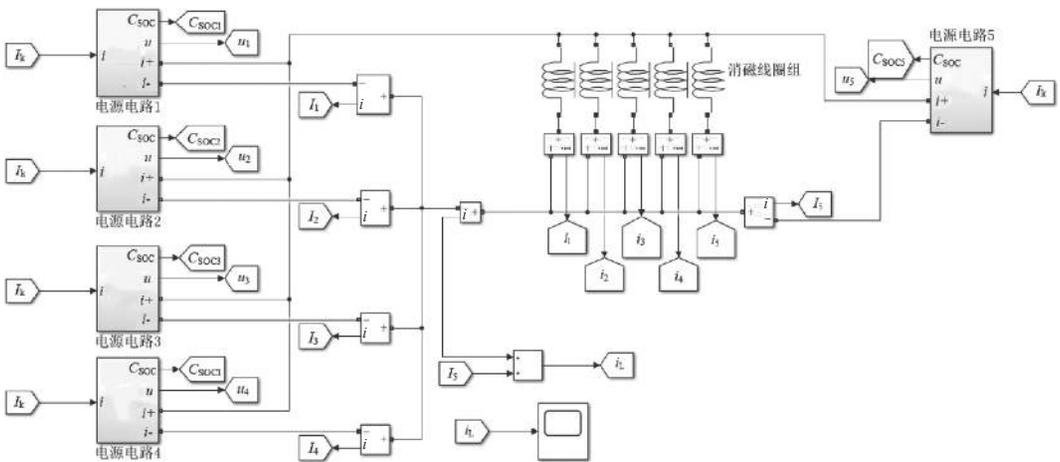


图 16 超级电容和锂电池混合的消磁电源仿真模型

Fig. 16 Simulation model of degaussing power supply with supercapacitor and lithium battery

选取的锂电池和超级电容仿真参数,如表 1 所示。将消磁线圈的自感和互感的取值汇于表 2,且用 $L_i (i=1\sim 5)$ 表示 5 套线圈自感值,表 2 中行与列相交的值为两线圈之间的互感值。

本节设置消磁电流额定电流 I_k 为 500 A, 预

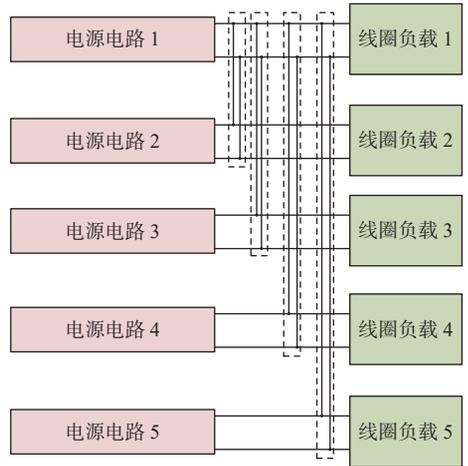


图 15 多线圈消磁电路拓扑

Fig. 15 Multi-coil degaussing circuit

图 15 中每个电源电路和线圈负载的拓扑结构都相同,多线圈一起进行消磁工作时,也可以分为消磁电流的上升、保持和下降阶段。各个阶段的等效电路图和单线圈工况下的一致。

4 多线圈强耦合典型工况仿真

为了验证所提出的超级电容和锂电池混合供电的消磁电源能量回馈控制策略的可行性,采用 Matlab/Simulink 仿真软件搭建超级电容和锂电池混合的消磁电源仿真模型,如图 16 所示。采样时间 t_s 为 $6.667 \mu s$,仿真时间设为 16 s。主要由 5 套相同的超级电容和锂电池混合组成的消磁电源电路和 5 套互感线圈组成。每套线圈的自感量和电阻值都相同。

保持消磁电流为 $0.9I_k$, C_{SOC_max} 设置为超级电容初始工作的 C_{SOC} 值。对比分析正常工况和故障工况下消磁电流的变化曲线以及超级电容的荷电状态变化曲线,以及分析验证锂电池和超级电容混合消磁电源的可行性。

表1 锂电池和超级电容参数

组成部分	参数	数值	组成部分	参数	数值
锂电池	额定电压/V	100	超级电容	额定电压/V	600
	额定容量/Ah	40		额定电容/F	3
	初始电荷状态/%	60		初始电压/V	400

表2 消磁线圈参数列表

	L_1/H	L_2/H	L_3/H	L_4/H	L_5/H
L_1/H	0.300	0.196	0.120	0.080	0.060
L_2/H	0.196	0.300	0.196	0.120	0.080
L_3/H	0.120	0.196	0.300	0.196	0.120
L_4/H	0.080	0.120	0.196	0.300	0.196
L_5/H	0.060	0.080	0.120	0.196	0.300

4.1 正常工况仿真

5套消磁线圈电源电路都能正常工作,其消磁电流波形如图17所示,各消磁电源的超级电容 C_{SOC} 变化波形如图18所示,图中 $C_{SOC1} \sim C_{SOC5}$ 分别代表各线圈电源电路中超级电容的荷电状态(无量纲)。释放电阻 R_d 吸收的功率波形如图19所示,图中 $P_1 \sim P_5$ 分别代表各线圈回路中释放电阻所消耗的功率。

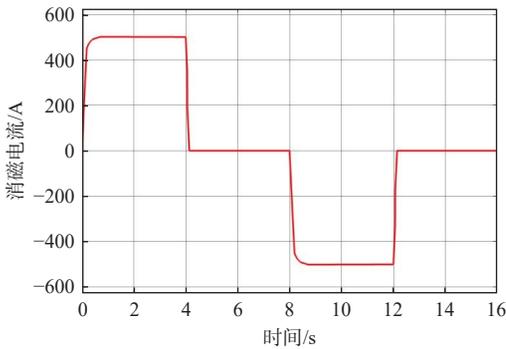


图17 正常工况消磁电流波形

Fig. 17 The waveform of demagnetization current under normal operating conditions

对比分析图17~图19,得知:

1)消磁电流上升至500 A,所需的时间约为0.6 s,超调量为0.006。消磁电流下降到0 A,所需的时间约为0.1 s。消磁电流的调节时间短,且超调量小。

2)超级电容能有效地吸收消磁线圈上的能量,实现能量循环。但消磁线圈上的能量过多,所以多出来的能量需要通过电阻释放出去。

4.2 故障工况仿真

5套消磁线圈工作时,有线圈因故障停止工作,即消磁线圈并联数量因故障而发生变化。本

节设置1 s时将线圈1切除,9 s时将线圈2和线圈3切除,其他参数不变。消磁电流波形如图20所示。

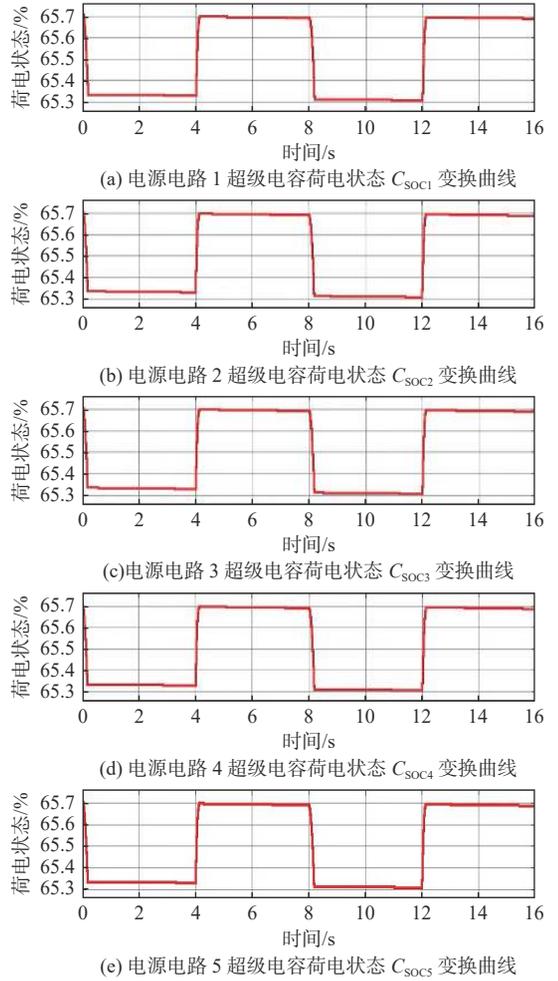
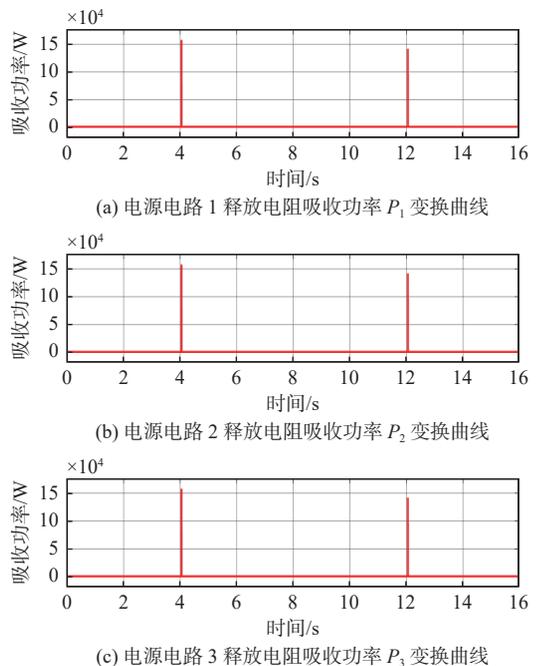
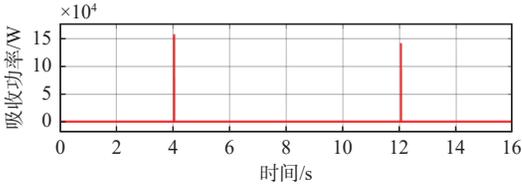


图18 正常工况超级电容 C_{SOC} 波形

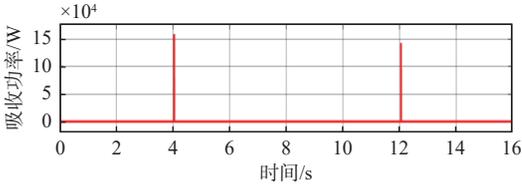
Fig. 18 The waveform of supercapacitor C_{SOC} under normal operating conditions



(c) 电源电路3 释放电阻吸收功率 P_3 变换曲线



(d) 电源电路 4 释放电阻吸收功率 P_4 变换曲线



(e) 电源电路 5 释放电阻吸收功率 P_5 变换曲线

图 19 正常工况释放电阻吸收功率波形

Fig. 19 The waveform of absorption power by bleed resistor under normal operating conditions

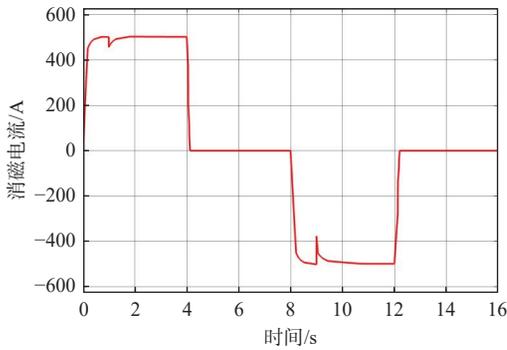


图 20 故障工况消磁电流波形

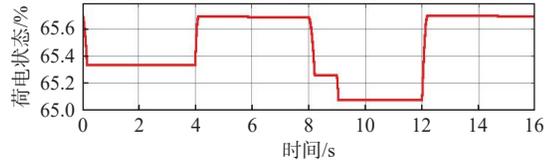
Fig. 20 The waveform of degaussing current under fault conditions

各消磁电源的超级电容 C_{SOC} 变化波形如图 21 所示。

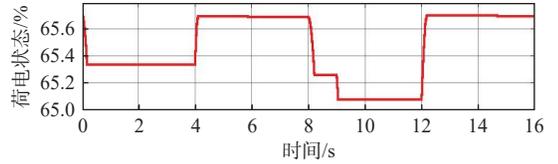
释放电阻 R_d 吸收的功率波形如图 22 所示, 图中 $P_1 \sim P_5$ 分别代表各线圈回路中释放电阻所消耗的功率。

对比分析图 20~图 22 得知:

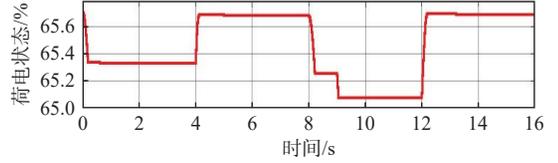
1) 在 1 s 时, 线圈 1 出现故障, 消磁电流从 500 A 降至 456 A, 此时还是锂电池单独供电, 恢复时间为 0.6 s。在 9 s 时, 线圈 2 和线圈 3 出现故障, 消磁电流从 500 A 降至 376 A, 此时锂电池和超级电容共同供电, 消磁电流恢复至预保持消磁电流的时间为 0.05 s, 恢复至 500 A 的时间为 0.8 s。



(c) 电源电路 3 超级电容荷电状态 C_{SOC3} 变换曲线



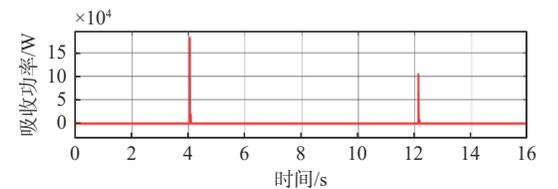
(d) 电源电路 4 超级电容荷电状态 C_{SOC4} 变换曲线



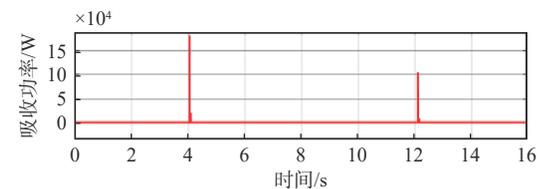
(e) 电源电路 5 超级电容荷电状态 C_{SOC5} 变换曲线

图 21 故障工况超级电容 C_{SOC} 波形

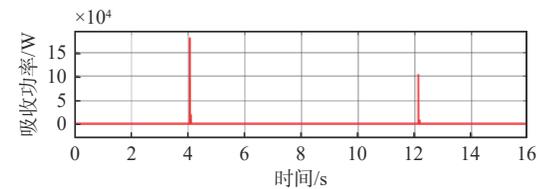
Fig. 21 The waveform of supercapacitor C_{SOC} under fault conditions



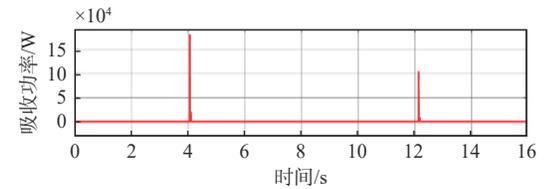
(a) 电源电路 1 释放电阻吸收功率 P_1 变换曲线



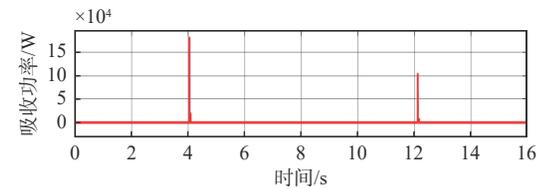
(b) 电源电路 2 释放电阻吸收功率 P_2 变换曲线



(c) 电源电路 3 释放电阻吸收功率 P_3 变换曲线



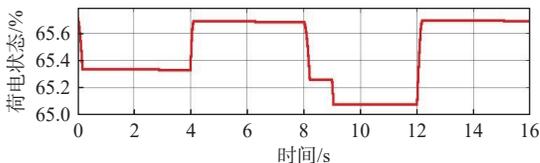
(d) 电源电路 4 释放电阻吸收功率 P_4 变换曲线



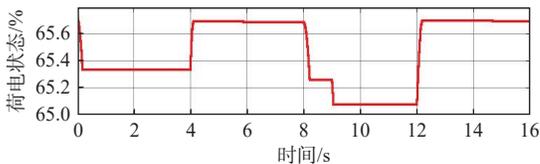
(e) 电源电路 5 释放电阻吸收功率 P_5 变换曲线

图 22 故障工况释放电阻吸收功率波形

Fig. 22 The waveform of absorption power by bleed resistor under fault conditions



(a) 电源电路 1 超级电容荷电状态 C_{SOC1} 变换曲线



(b) 电源电路 2 超级电容荷电状态 C_{SOC2} 变换曲线

2) 在 9 s 时, 消磁电流骤降至预保持消磁电流以下, 超级电容接入电路, 为消磁线圈提供能量, 供消磁电流快速恢复, 此时超级电容起到故障调节的作用。由于超级电容多释放了能量, 因此在负脉冲阶段内通过释放电阻消耗的能量减少。

5 结论

本文提出了基于超级电容和锂电池混合供电进行消磁的电源方案, 当消磁电流处于上升阶段时, 超级电容和锂电池串联, 消磁线圈两端电压增大, 加速其电流上升的过程; 当消磁电流处于保持阶段时, 锂电池单独供电; 当消磁电流处于下降阶段时, 消磁线圈上的能量回馈至超级电容中, 实现能量循环, 以避免能量浪费。所提方案解决了消磁电流下降过程中消磁线圈上的能量都通过功率电阻转化为热能而浪费的问题。借助仿真验证可得, 在正常工况下, 消磁电流的调节时间少、超调量小, 且超级电容能根据自身的荷电状态, 有效地吸收消磁线圈反馈回的能量; 在故障工况下, 超级电容还可起到加强系统故障调节功能的作用, 当消磁线圈出现故障时, 消磁电流突然下降至预保持电流以下, 超级电容会提供能量, 使消磁电流快速恢复至预保持消磁电流。

参考文献:

- [1] 王志飞. 舰船消磁系统综述 [J]. 船电技术, 2020, 40(9): 4-7.
WANG Z F. Overview on the ship degaussing system [J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2020, 40(9): 4-7 (in Chinese).
- [2] 吴旭升, 何笠. 储能型舰船消磁主电源系统研究综述 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(5): 216-223.
WU X S, HE L. A review of research on energy storage ship degaussing main power supply system[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(5): 216-223 (in Chinese).
- [3] 彭娥, 邹圣楠, 李诗铸, 等. 自然空化下潜艇感应电磁信号的演化 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(4): 140-15.
PENG E, ZOU S N, LI S Z, et al. Evolutions of induced electromagnetic signatures of submarine under natural cavitation[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(4): 140-15 (in Chinese).
- [4] 徐杰. 基于多绕组耦合特性的消磁电源输出特性研究 [J]. 舰船电子工程, 2019, 39(1): 157-159.
XU J. Degauss power supply output characteristic research based on multiple winding coupling characteristic [J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(1): 157-159 (in Chinese).
- [5] RAJU S, WU R X, CHAN M S, et al. Modeling of mutual coupling between planar inductors in wireless power applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(1): 481-490.
- [6] 吴德会, 何天府, 王晓红, 等. 感应电能传输中矩形螺线线圈互感耦合的解析建模与分析 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(3): 680-688.
WU D H, HE T F, WANG X H, et al. Analytical modeling and analysis of mutual inductance coupling of rectangular spiral coils in inductive power transfer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(3): 680-688 (in Chinese).
- [7] 赵文春, 欧阳剑锋, 刘胜道, 等. 舰船上方拱顶磁场等效面磁荷推算 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(6): 182-186.
ZHAO W C, OUYAN J F, LIU S D, et al. Calculation of vaulted magnetic field above ship using equivalent surface magnetic charge[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(6): 182-186 (in Chinese).
- [8] 何乃明. 模块化组化消磁电源研究 [J]. 船电技术, 2006, 26(S1): 4-11.
HE N M. Research on modular combined degaussing power supply[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2006, 26(S1): 4-11 (in Chinese).
- [9] 滕春阳. 高可靠性储能消磁模块组合电源研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
TENG C Y. Research on high reliability power supply constituted of storage degaussing modules[D]. Nanjing: Southeast University, 2015 (in Chinese).
- [10] 严民雄, 陈瑞, 王伟, 等. 舰船特殊负载的电流型脉冲电源的设计与验证 [J]. 中国舰船研究, 2019, 14(6): 30-36,66.
YAN M X, CHEN R, WANG W, et al. Design and verification of a current-pulsed power supply for special loads[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(6): 30-36,66 (in Chinese).
- [11] 马艳, 吴航, 周亚, 等. 能量回馈型变电站蓄电池组活化系统 [J]. 电器与能效管理技术, 2022(5): 88-92.
MA Y, WU H, ZHOU Y, et al. Energy feedback activation system of transformer substation battery pack[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(5): 88-92 (in Chinese).
- [12] 薛小军. 基于超级电容的车辆制动能量回收系统的仿真研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
XUE X J. Simulation research on vehicle braking energy recovery system based on supercapacitor[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005 (in Chinese).