

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1755.TJ.20230508.1728.002.html>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 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.

储能型舰船消磁主电源系统 研究综述



扫码阅读全文

吴旭升, 何笠*

海军工程大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430033

摘要: 舰船的固定磁场主要通过消磁主电源输出的脉冲电流实现退磁, 其消磁效果将直接影响舰船的磁隐身水平。通过梳理不同类型储能型消磁主电源系统的组成结构, 综述其工作原理和优缺点, 展望了大型舰船储能型消磁主电源系统的技术发展趋势, 提出了锂电池储能式和高速电机储能式消磁主电源系统的拓扑结构, 总结了多消磁主电源的解耦补偿和消磁电流同步控制技术等关键技术问题, 可为大型舰船储能型消磁主电源系统的设计提供参考。

关键词: 舰船消磁; 消磁主电源; 锂电池储能; 高速储能电机

中图分类号: U665.18

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03007

A review of research on energy storage ship degaussing main power supply system

WU Xusheng, HE Li*

College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract: The fixed magnetic field of a ship is mainly degaussed by the pulse current output from the degaussing main power supply, and its degaussing effect will directly affect the magnetic stealth level of the ship. By sorting out the composition and structure of different types of energy storage degaussing main power supply systems, their working principles, advantages and disadvantages were reviewed, and the technical development trend of large ship energy storage degaussing main power supply systems was prospected. Topology structures for lithium battery energy storage degaussing main power supply system and high-speed motor energy storage degaussing main power supply system were proposed, and key technical issues were summarized such as the decoupling compensation and degaussing current synchronization control technology of multiple degaussing main power supplies. The research results can provide reference for the design of energy storage degaussing main power supply systems for large ships.

Key words: ship degaussing; degaussing main power supply; lithium battery energy storage; high-speed motor for energy storage

0 引言

因地球磁场和应力的作用, 舰船在航行过程中将逐渐被磁化而产生固定磁场, 该磁场将长期保持且不易消退。随着磁场探测技术的不断发展, 舰船上留存的磁场信号将会成为空中和水下磁场探测的目标, 导致其在战时易受到磁引信武器的打击, 这是威胁舰船航行和作战安全的重大隐患^[1],

因此, 定期消磁已成为舰船全寿命周期的一项常态工作。

对于舰船的固定磁场, 一般采用综合消磁法进行退磁处理, 即通过消磁主电源输出幅值逐渐衰减的一组交变脉冲电流, 在消磁线圈上产生交变磁场, 从而打乱舰船铁磁材料中磁畴的分布, 使其在宏观上不再显现磁性^[2-5]。消磁电流波形如图1所示^[6]。

收稿日期: 2022-07-19

修回日期: 2022-12-09

网络首发时间: 2023-05-10 09:15

作者简介: 吴旭升, 男, 1976年生, 博士, 教授。研究方向: 舰船电气技术。E-mail: 0910061003@nue.edu.cn

何笠, 男, 1991年生, 博士, 助理研究员。研究方向: 电力电子技术。E-mail: heli_421@163.com

*通信作者: 何笠

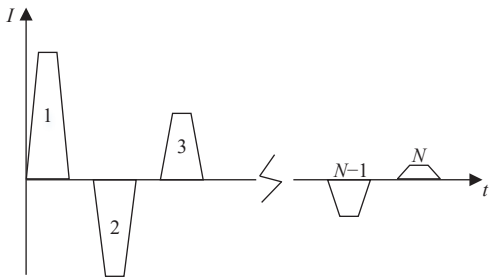


图 1 消磁电流波形
Fig. 1 Diagram of degaussing current waveform

性能良好的消磁主电源将直接影响消磁质量, 为了达到良好的消磁效果, 需对消磁主电源系统的输出电流动态性能和稳态幅值的大范围、精确调节能力提出较高的要求, 其通用性能指标为: 输出电流范围 50 ~ 6 000 A 连续可调, 输出电流上升或下降时间不大于 1 s, 电流超调量不大于 2%, 脉冲形式为正负交替且幅值依次衰减, 脉冲宽度 5 ~ 10 s, 脉冲间隔 15 ~ 20 s, 脉冲数量不少于 50 个^[7]。消磁主电源的输出峰值功率较高, 对于中大型舰船而言, 例如中型航母, 其峰值功率高达 30 000 kW 以上, 储能型消磁主电源系统对于确保全船供电可靠性发挥了重要的作用。

为厘清未来消磁主电源系统的发展趋势, 对装备研制提供指导参考, 本文拟分析梳理舰船储能型消磁主电源系统的拓扑结构, 总结不同系统结构的优势和短板, 并展望未来大型舰船储能型消磁主电源系统的技术发展方向。

1 储能型消磁主电源的现状

储能型消磁主电源主要分为两大类型: 1) 旋转电机式消磁主电源, 通过控制发电机励磁来实现消磁电流的调节, 其采用飞轮储能方式; 2) 电能变换式消磁主电源, 通过控制大功率电力电子变换器来实现消磁电流的控制, 其采用超级电容储能方式。

1.1 旋转电机式消磁主电源

旋转电机式消磁主电源系统的电能供给单元为柴油发电机组, 其供电可靠性高且供电质量较好。根据发电机的不同性质, 旋转电机式消磁主电源可分为直流发电机式消磁主电源和同步发电机式消磁主电源 2 种类型。

1.1.1 直流发电机式消磁主电源

消磁主电源最早采用直流发电机供电的方案, 其励磁装置最早采用电机扩大机^[8-9], 随后才逐步升级为晶闸管整流励磁装置, 其主电源系统结构如图 2 所示。

由于消磁电流的首脉冲功率较高, 故电源需

配置飞轮储能装置以实现能量/功率匹配, 同时降低大电流输出对柴油机的冲击。为了调整消磁电流的幅值和方向, 可通过控制励磁予以实现, 其整流励磁装置(以电机扩大器为例)采用双闭环控制结构, 如图 3 所示, 内环用于调节励磁电流, 外环用于调节主电流, 从而提高了系统的控制精度和抗干扰能力。

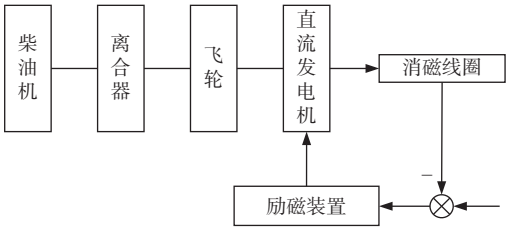


图 2 直流发电机式消磁主电源系统的结构图
Fig. 2 Structure diagram of degaussing main power supply system based on DC motor

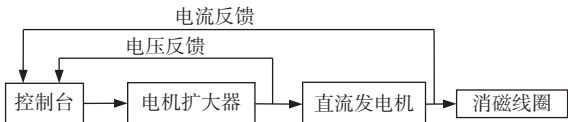


图 3 控制系统结构图
Fig. 3 Structure diagram of control system

直流发电机式消磁主电源的控制系统相对简单, 通过控制励磁电流的幅值和方向, 即可便捷实现消磁电流脉冲幅值、方向和上升/下降时间的控制并抑制电机剩磁对输出电流的影响。然而, 在直流发电机大功率输出工况下, 当直流电机的功率和转速乘积大于 $1.6 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{r/min}$ 时, 将因电机电抗电势增高而导致换向恶化^[10]; 其次, 采用碳刷引流的直流电机会导致碳粉污染, 故其在大功率消磁主电源领域的应用局限性日益突出。

1.1.2 同步发电机式消磁主电源

同步发电机的转速高、能量密度高, 可以显著降低发电机和飞轮的质量、体积。在相同功率等级下, 与直流发电机式消磁主电源系统相比, 同步发电机式消磁主电源的体积可以降低 10.9% ~ 36%, 重量可降低 27% ~ 47%^[11], 因此逐渐取代了直流发电机式消磁主电源系统^[11-13]。基于同步发电机的消磁主电源系统电路结构如图 4 所示。

同步发电机式消磁主电源具有以下特点: 1) 由于采用交流电机作为输出源, 一般需配置不控整流装置, 从而在最大程度利用器件通流能力的前提下, 同时增强系统的可靠性; 2) 电源系统需配置换向器来调节消磁电流的方向, 换相器的结构一般采用单向桥式电路, 通过控制固态开关的导通次序来改变输出电流的方向; 3) 为了防止输出大电流时同步电机的转速下降过大, 在系统中需

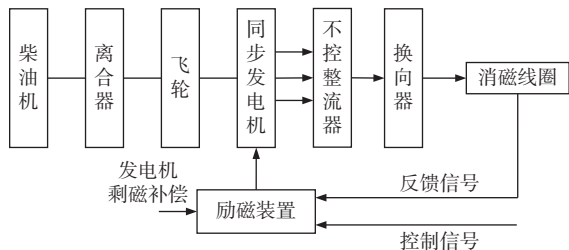


图4 同步发电机式消磁主电源系统的结构图

Fig. 4 Structure diagram of degaussing main power supply system based on synchronous generator

配置飞轮储能环节。在同步发电机的选型时,需注意并非所有的同步发电机都适用于消磁工况,为了满足消磁电流上升/下降时间的指标要求,叶志浩等^[11]研究了电源系统输出电流上升/下降时间的计算公式,揭示了动态时间与电机电气参数的关系,给出了电机选型的依据。

同步发电机式消磁主电源系统同样采用双闭环PID控制,其中外环为电源输出电流环。由于参考电流为一系列的脉冲信号,易导致输出电流振荡,为此采用了微分先行式PID控制策略;此外,一组消磁电流脉冲的幅值是逐渐衰减的,最小脉冲约为50 A,且脉冲间隙需保证输出电流为0 A,鉴于大功率同步电机剩磁的影响,还需在励磁控制中进行合理的剩磁补偿。

旋转电机式消磁主电源系统采用了飞轮储能技术,一方面满足了消磁脉冲电流的能量需求,另一方面减小了电源系统在突加/突卸负载时对发电机组的冲击作用,提升了系统的适用性。然而,也正是由于这种结构形式,导致旋转电机式消磁主电源系统难以开展小型化设计,当需要多套电源系统进行联合消磁时,此类主电源系统对现场空间和运维人员的要求较高,所以不适用于中小型消磁站。

1.2 电能变换式消磁主电源

在小功率消磁主电源系统中,一般采用市电直接供电式电能变换消磁主电源^[14](图5),该电源系统具有体积小、噪音小、维护简单和操作方便等优点。

图5所示的消磁主电源从市电取电,经相控整流器之后,再由换向器输出。相控整流器采用并联型12相脉波整流器,通过相控调压的方式来调整输出电压,进而调整消磁电流的幅值;这种形式的整流装置可以有效降低直流侧的纹波系数和谐波含量,从而减小纹波对最小消磁电流的影响,并提高直流侧的电能质量。相较于控制电机而言,通过控制整流器来调节消磁电流可以降低系统控制的难度,并提升输出电流的控制精确度。

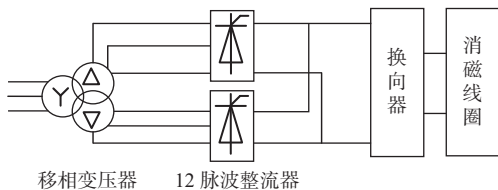


图5 十二相波整流式消磁主电源的结构图

Fig. 5 Structure diagram of twelve pulse rectifier degaussing main power supply

然而,这种结构的消磁电源对输入侧的容量依赖性较强,尤其是当电源直接由电网供电时,如果输出首脉冲功率的需求较大,则易对电网造成较大冲击,因此,这种无储能环节的消磁主电源仅适用于中小型舰船。

为了减小对供电电网容量的需求依赖性,可以合理引入储能装置,设计如图6所示的混合供电式消磁主电源系统,其由储能式电源单元和直供式电源单元两个部分组成。与储能式电源单元相比,直供式在结构上省略了储能环节,直接由电网供电,其他结构与储能式电源单元相同。以储能式电源单元为例,其在工作间隙可以通过可控整流装置进行充电。在消磁工况下,储能装置输出直流电经DC/AC-AC/DC交变换之后,所输出的直流电流由换向器输出至消磁线圈。储能式电源单元采用了超级电容作为储能元件,基于超级电容瞬时输出功率高的特性,可以显著降低电源系统瞬态大功率输出对供电系统的功率要求。在工作间隙,超级电容通过前端三相全控整流电路进行充电,实现电网电压与充电电压的匹配;在消磁输出时,通过控制高频逆变器来调整储能电源单元的输出电流幅值。由于该系统采用了高频逆变装置,故可有效降低隔离变压器的重量体积,有利于开展电源的小型化设计。

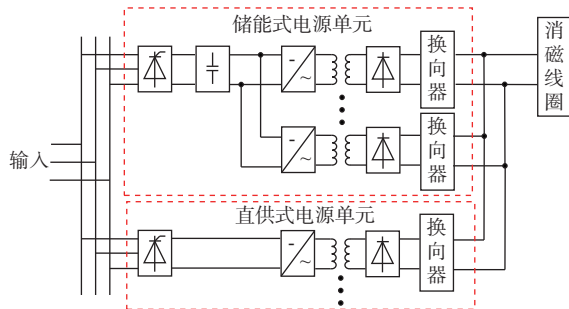


图6 混合供电式消磁主电源系统的结构图

Fig. 6 Structure diagram of degaussing main power supply system with hybrid power supply

混合供电式消磁主电源采用分级工作方式:大电流工况下(电流 $I \geq 4\,000\text{ A}$),所有单元全部投入工作;中等电流工况下(电流 $I \geq 1\,000\text{ A}$),所有直供式电源单元投入工作;小电流工况下(电流 $I < 1\,000\text{ A}$),仅单个直供式电源单元工作。通过

控制储能式电源单元和直供式电源单元的逆变器模块即可调节输出电流的大小,其控制原理如图 7 所示。消磁主电源逆变器采用三环控制结构,任意时刻只有 1 个控制环起主导作用;对逆变环节

采用电流环的单闭环控制策略,以确保输出电流的动态过程和稳态过程满足性能指标要求;限流环 I 和限压环起保护作用,即防止过流和过压,其主要保护措施是封锁 IGBT 的触发脉冲。

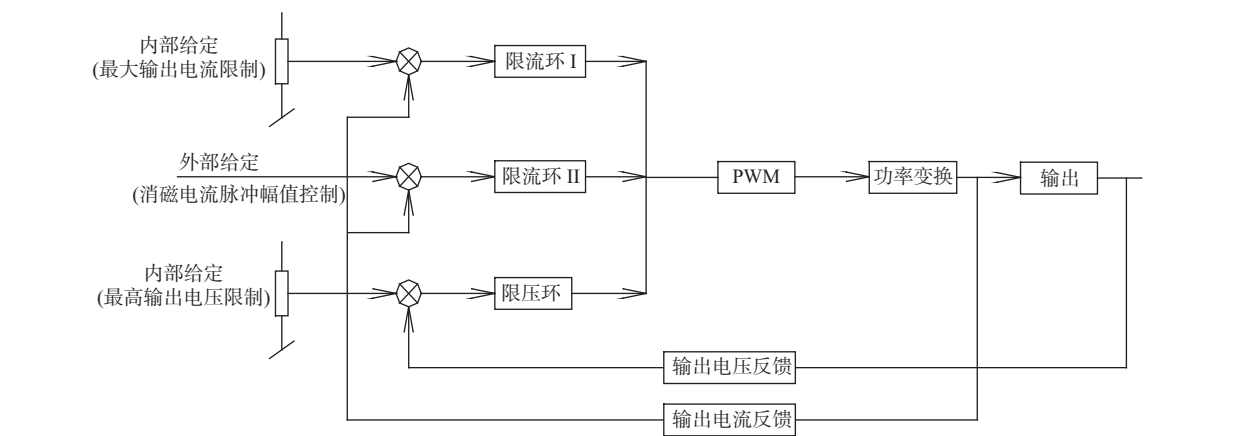


图 7 消磁主电源逆变器的控制原理图

Fig. 7 Control schematic diagram of degaussing main power inverter

采用混合供电式消磁主电源系统来提供脉冲电流的优点为: 1) 可降低对电网的功率需求, 从而减轻系统重量, 以实现轻量化、小型化设计; 2) 当应用于中大型舰船时, 可将多套电源并联以快速扩容使用, 从而降低供电系统的造价和维护费用; 3) 混合供电式消磁主电源采用模块化设计, 其差异性模块较少且大多为免维护模块, 从而提高了系统的可靠性和维修性。然而, 与采用飞轮储能的旋转电机式消磁主电源系统相比, 这种形式的消磁主电源采用了超级电容储能, 其使用寿命较短且环境适应性略差。

2 消磁主电源系统的发展趋势和关键技术

2.1 新型储能技术的应用及其关键技术

目前, 消磁主电源系统的主要应用对象为中小型舰船, 由于大型舰船的吨位大、磁场量值大, 故其对消磁主电源的输出功率和能量均提出了较高要求, 因此, 需在消磁电源系统中配置新型储能装置^[15]。储能型消磁主电源系统是未来的发展趋势, 通过合理地配置储能系统, 可以降低电源对供电

系统的容量和功率需求, 从而最大程度地满足各型舰船的消磁需求, 以提升装备适应性。

2.1.1 锂电池储能式消磁主电源系统

锂电池作为一种电化学储能介质, 因其具有较高的功率密度和能量密度, 正逐步在轨道交通^[16-18]、微电网^[19-20]和电磁发射^[21-23]等诸多领域中崭露头角。图 8 所示为锂电池储能式消磁主电源系统的结构图。

目前, 大功率储能用锂电池主要包括钴酸锂电池、磷酸铁锂电池、锰酸锂电池和三元锂电池, 其中磷酸铁锂电池的功率密度和能量密度均衡、转换效率高、寿命长、安全性和稳定性好, 适用于消磁主电源。为了安全高效地应用锂电池储能技术, 在设计锂电池储能系统时需解决以下 3 个关键技术问题:

1) 锂电池储能系统的大倍率放电特性。

为解决消磁主电源系统输出功率需求和储能装置体积/重量限制之间的矛盾, 可以采用高倍率磷酸铁锂电池。相较于传统的低倍率电池, 高倍率磷酸铁锂电池的倍率性能差异很大^[24]。倍率容量特性将直接影响电池荷电状态的估算精度, 因此需开展倍率容量特性研究, 通过分析多倍率动态

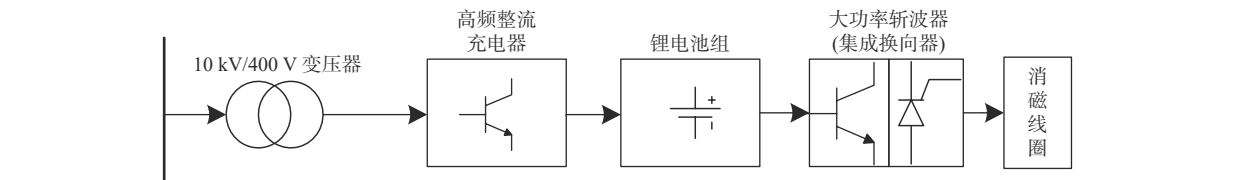


图 8 锂电池储能式消磁主电源系统的结构图

Fig. 8 Structure diagram of degaussing main power supply based on lithium battery energy storage

放电条件下的电池容量特性,以此建立放电倍率与荷电状态之间的关系,从而提升在多放电倍率下荷电状态的估算精度。

2) 锂电池储能系统的热失控监测技术。

工程上常用的电池组温度监测方法是基于电池管理系统内的温度检测功能,采用数量有限的热电偶开展温度监测。然而,这种监测方式既不能合理反应电池内部的温度,还易在使用过程中受到电磁干扰,所以监测能力不足。采用潜入式光纤光栅传感器可以有效解决上述问题,集成温度和形变的光纤传感器可以布置在电池组内部,用以测量电池组内部参数,并且光纤传感器具有抗干扰能力强、稳定性好、免疫温度漂移、布置灵活等优点,适用于消磁工况的锂电池储能系统,其配合电池管理系统即可有效监测和预警热失控。

3) 脉冲大功率工况下的储能电池荷电状态估计技术。

准确估算锂电池组的荷电状态是电池管理系统最重要的任务之一,然而,现有的荷电状态估计技术大多适用于小倍率恒定放电工况。在脉冲大功率工况下,电池模型参数的波动较大,常规的单一荷电状态估计算法的准确度较低^[25]。目前,较为可行的方法是以单个锂电池组等效模型为基础,以实时采集的电池组电压和电流参数为输入对系统模型进行参数辨识,同时结合单体电池的电压和内阻参数进行修正,从而得到准确的单体电池状态估算值^[21]。

2.1.2 高速储能电机式消磁主电源系统

新型高速储能电机通过对飞轮和电机转子进行集成化设计,将能量存储在高速旋转的飞轮转子中,具有输出功率高、容量大、运行温度范围广、充放电循环次数多和无环境污染等特点,尤其是其使用寿命较长,故适用于储能型消磁主电源系统。储能电机系统具备瞬时或短时的脉冲式放电特征,其允许的充电时间远大于放电时间,具备典型的“慢充快放”特点。高速储能电机式消磁主电源系统结构如图9所示。

高速储能电机系统需解决如下3个关键技术问题:

1) 大功率高速电机优化设计。

飞轮储能的容量与飞轮质量及转速直接相关,故需对飞轮本体的材料和结构强度开展优化设计:首先,基于结构优化算法,以低成本和低质量为目标,以寿命和储能总量为约束条件,开展金属材料飞轮和金属-复合材料飞轮的优化工作,以实现金属材料的极限应用;其次,针对飞轮电机在高转速、高频率、周期暂态条件下的特殊运行

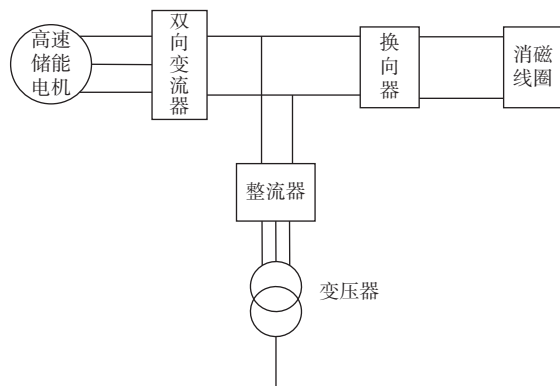


图9 高速储能电机式消磁主电源结构图

Fig. 9 Structure diagram of high-speed energy storage motor de-gaussing main power supply

需求,开展低损耗、高功率密度、高速永磁电机的设计方法研究,分析其在不同负载及待机工况下的电磁损耗分布规律,从而在本体设计上采取有效抑制措施,以实现高速永磁电机与飞轮、轴承的集成化设计。

2) 双向变流器动态建模与高效运行控制。

飞轮储能系统双向功率变换器与一体化高速电动/发电机密切相关,因此必须统筹考虑,通过优化变流器本体拓扑结构与控制算法,从而实现飞轮储能系统的高效机电能量变换。针对数兆瓦级飞轮储能双向变流器在周期暂态工作条件下的特殊运行需求,研究飞轮储能双向变流器在整流、逆变运行模式下的高效控制方法以及2种运行模式的高效切换策略,以优化动态切换性能,进而实现整个飞轮储能系统的高效机电能量转化。

3) 高真空条件下的系统热管理和高效冷却技术。

在热源控制层面,飞轮装置的转子线速度高、待机时间长,需通过高性能分子泵与密封技术,实现转子腔体内的高真空度环境,从而显著降低待机风磨损耗;需开展转子腔体流场数值的仿真分析,研究转速、真空度等因素对风磨损耗的影响规律。在热量耗散层面,需研究并改善永磁体与轴系、护套的接触、预紧方式,以降低界面接触热阻,从而提升充放能量过程中的永磁体传导效率。此外,还需设计转子散热技术方案,研究新型转子轴孔内喷油冷却方案,同时考虑冷却流体的挥发、密封、腐蚀等问题,以及高黏度冷却流体随转子转动过程中的发热和动能损失问题。

2.2 多消磁主电源联合消磁及其关键技术

对于中小型舰船,一般采用传统的单一消磁绕组进行舰体消磁;对于大型舰船,多套消磁主电源系统联合消磁则是一种切实可行的消磁方案^[26],如图10所示。

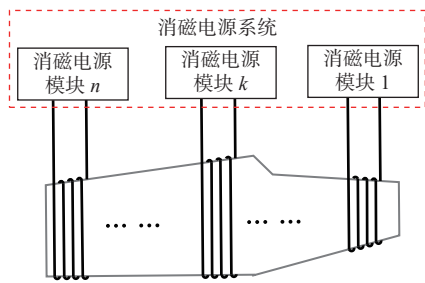


图 10 多消磁主电源联合消磁示意图
Fig. 10 Schematic diagram of combined demagnetization with multiple degaussing main power supply

在联合消磁方案中,对于不同的舰船不同区域,其缠绕的消磁线圈匝数和横截面积也有所不同,而不同线圈的等效阻抗值差异较大,特别是电感值;此外,由于不同区域消磁线圈的间距较短,且在舰体铁磁材料的影响作用下,线圈之间将因强耦合而产生较大的互感,从而影响输出电流的动静态性能,因此,在联合消磁方案中亟须解决如下关键技术问题:

1) 消磁主电源脉冲电流解耦补偿技术。

以联合消磁技术的多消磁主电源系统为研究对象,在考虑舰体铁磁材料影响的基础上,建立系统的动态耦合模型,计算和分析模型的耦合度、耦合影响因素及其对消磁电流动静态性能指标的影响,从而设计脉冲电流解耦补偿器,最终实现消磁线圈之间的解耦。

对系统进行耦合性分析时,首先,由于该系统是一个多输入-多输出、强耦合的系统,故需对系统进行合理地简化和降阶处理;其次,针对降阶之后的系统模型,需采用相对增益理论对其动静态耦合性进行分析;最后,设计解耦补偿器时,可以采用对角解耦法来实现系统解耦。

2) 多套消磁主电源系统的输出电流同步控制技术。

通过分析解耦后各个消磁主电源的电流脉冲输出特性,结合消磁电流性能指标要求,即可建立多套消磁主电源脉冲群的同步模型。通过分析影响电流同步的因素,进而设计消磁主电源系统的协同控制策略,即可最终实现多套消磁主电源脉冲群的同步。

在设计电流协同控制策略时,可以基于图论原理将每套消磁主电源等效为一个考虑各类延时的加权有向拓扑模型,并引入多智能体协同控制技术。为了实现输出电流的同步,可以通过多智能体通讯网络图来设计系统的一致性误差矩阵,并通过合理整定 PI 控制器参数来消除一致性误差。为了提升消磁电源系统输出电流的性能指标,还可以采用其他非线性控制策略,例如滑模控制等。

3 结 论

本文总结了不同类型储能型消磁主电源系统的组成结构、工作原理及其优缺点,展望了未来储能型消磁电源系统的发展趋势,得到如下结论:

1) 储能型消磁主电源系统主要分为旋转电机式和电能变换式这 2 种类型,随着电力电子电源技术的发展,以电力电子变换器为基础的电能变换式消磁电源具备更明显的性能优势。

2) 为了适应未来大型舰船的消磁勤务要求,并考虑电网容量和输出功率需求,可以采用锂电池储能式消磁主电源系统和高速电机储能式消磁主电源系统作为未来储能型消磁电源的建设方案。

3) 多消磁主电源联合消磁是未来大型舰船消磁勤务行之有效的方案,但需解决多消磁主电源的解耦补偿和消磁电流同步控制问题。

参考文献:

[1] 朱世才, 牟兰, 刘志军, 等. 国外舰船磁场特性研究及舰船防护技术综述 [J]. 舰船科学技术, 2014, 36(9): 1-6.
ZHU S C, MU L, LIU Z J, et al. A survey of foreign warship magnetic field characteristic research and warship protection techniques[J]. Ship Science and Technology, 2014, 36(9): 1-6 (in Chinese).

[2] 林春生, 龚沈光. 舰船物理场 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2007: 25-48.
LIN C S, GONG S G. Physical field of ship[M]. Beijing: Weapon Industrial Press, 2007: 25-48 (in Chinese).

[3] ZOLOTAREVSKII Y M, BULYGIN F V, PONOMAREV A N, et al. Methods of measuring the low-frequency electric and magnetic fields of ships[J]. Measurement Techniques, 2005, 48(11): 1140-1144.

[4] 王志飞. 舰船消磁系统综述 [J]. 舰电技术, 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).

[5] 郭成勋, 周炜昶, 杨波. 通过式消磁实验中减小船模剩余纵向固定磁性的研究 [J]. 海军工程大学学报, 2020, 32(4): 13-17.
GUO C B, ZHOU W C, YANG B. Study of reducing ship models' residual longitudinal permanent magnetic field in overrun deperming experiment[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2020, 32(4): 13-17 (in Chinese).

[6] BAYNES T M, RUSSELL G J, BAILEY A. Comparison of stepwise demagnetization techniques[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(4): 1753-1758.

[7] 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).
- [8] 郭小程, 张国友, 苏广东, 等. 直流脉冲发电机控制系统的优化设计与仿真[J]. 船电技术, 2008, 28(6): 324–327.
- GUO X C, ZHANG G Y, SU G D, et al. Optimization design and simulation of DC pulse dynamo control system[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2008, 28(6): 324–327 (in Chinese).
- [9] 李志新, 张国友. 脉冲直流发电机的积分分离数字PID控制技术研究[J]. 船电技术, 2016, 36(5): 46–50.
- LI Z X, ZHANG G Y. Research on integral separation digital PID control technology of pulse DC dynamo for deperming[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2016, 36(5): 46–50 (in Chinese).
- [10] 柯常国, 喻超, 于海宁. 整流同步发电机用作消磁电源的可行性探讨[J]. 船电技术, 2006, 26(增刊1): 12–16.
- KE C G, YU C, YU H N. Discussion on the feasibility of rectifier synchronous generator used as degaussing power supply[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2006, 26(Suppl 1): 12–16 (in Chinese).
- [11] 叶志浩, 张晓锋, 于飞. 交流整流系统用大功率脉冲电源的分析[J]. 中小型电机, 2003, 30(6): 34–36.
- YE Z H, ZHANG X F, YU F. Analysis of AC generator-rectifier system for high-power pulse power source[J]. Electric Machines & Control Application, 2003, 30(6): 34–36 (in Chinese).
- [12] 李志新, 张国友. 基于同步发电机不控整流的消磁脉冲电源励磁控制系统研究[J]. 船电技术, 2013, 33(8): 23–25.
- LI Z X, ZHANG G Y. Research on the excitation control system of degaussing pulse power source based on synchronous generator-uncontrolled rectifier[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2013, 33(8): 23–25 (in Chinese).
- [13] 叶志浩, 蒋心怡, 张晓锋. 励磁突变对无刷励磁同步发电机整流系统负载电流的影响[J]. 海军工程大学学报, 2000(2): 13–18.
- YE Z H, JIANG X Y, ZHANG X F. The influence of sudden change in magnetizing current on the load current of brushless synchronous generator rectifier system[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2000(2): 13–18 (in Chinese).
- [14] 刘瑞林. 12脉波整流舰船消磁电源的分析与实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- LIU R L. The analysis and realization of a 12 pulse commutated power supply for the ship-degaussing device[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008 (in Chinese).
- [15] 聂冬, 朱运裕. 现代储能技术在舰船消磁系统中的应用研究[J]. 船电技术, 2013, 33(2): 40–42.
- NIE D, ZHU Y Y. Application of energy storage to ship degaussing system[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2013, 33(2): 40–42 (in Chinese).
- [16] 胡婧娴, 林仕立, 宋文吉, 等. 城市轨道交通储能系统及其应用进展[J]. 储能科学与技术, 2014, 3(2): 106–116.
- HU J X, LIN S L, SONG W J, et al. Energy storage for urban rail transportation[J]. Energy Storage Science and Technology, 2014, 3(2): 106–116 (in Chinese).
- [17] 林仕立, 宋文吉, 冯自平, 等. 地铁混合储能系统及其功率动态分配控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(12): 2829–2835.
- LIN S L, SONG W J, FENG Z P, et al. Hybrid energy storage system of metro and its control method on power dynamic allocation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(12): 2829–2835 (in Chinese).
- [18] 韦绍远, 姜久春, 张维戈, 等. 有轨电车载混合储能系统效率优化控制[J]. 电源学报, 2017, 15(2): 77–84.
- WEI S Y, JIANG J C, ZHANG W G, et al. Optimization control for efficiency of on-board hybrid energy storage system in tramway[J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(2): 77–84 (in Chinese).
- [19] 张宋杰, 秦文萍, 任春光, 等. 双极性直流微电网混合储能系统协调控制策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2761–2768.
- ZHANG S J, QIN W P, REN C G, et al. Control strategy for hybrid energy storage system in bipolar-type DC micro-grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2761–2768 (in Chinese).
- [20] 王若谷, 戴立森, 梁芷睿, 等. 基于不同种类储能电池的微电网综合储能系统性能对比[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(1): 166–171, 179.
- WANG R G, DAI L S, LIANG Z R, et al. Performance comparison of microgrid integrated energy storage system based on different kinds of batteries[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(1): 166–171, 179 (in Chinese).
- [21] 龙鑫林, 鲁军勇, 魏静波, 等. 锂电池储能能在电磁发射中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(4): 66–72.
- LONG X L, LU J Y, WEI J B, et al. Application on lithium batteries for electromagnetic launch[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(4): 66–72 (in Chinese).
- [22] 张振宇, 汪光森, 聂世雄, 等. 脉冲大倍率放电条件下磷酸铁锂电池荷电状态估计[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1769–1779.
- ZHANG Z Y, WANG G S, NIE S X, et al. State of charge estimation of LiFePO₄ battery under the condition of high rate pulsed discharge[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8): 1769–1779 (in Chinese).
- [23] 龙鑫林, 严康为, 鲁军勇, 等. 电磁发射电池组杂散电感

- 提取方法[J]. [国防科技大学学报](#), 2021, 43(4): 44–52.
- LONG X L, YAN K W, LU J Y, et al. Stray inductance extraction method for battery pack in electromagnetic launch[J]. [Journal of National University of Defense Technology](#), 2021, 43(4): 44–52 (in Chinese).
- [24] 严康为, 龙鑫林, 鲁军勇, 等. 高倍率磷酸铁锂电池简化机理模型与放电特性分析[J]. [电工技术学报](#), 2022, 37(3): 599–609.
- YAN K W, LONG X L, LU J Y, et al. Simplified mechanism modeling and discharge characteristic analysis of high C-rate LiFePO_4 battery[J]. [Transactions of China Electrotechnical Society](#), 2022, 37(3): 599–609 (in Chinese).
- [25] 明彤彤, 赵晶, 王晓磊, 等. 基于改进 LSTM 的脉冲大倍率工况下锂电池 SOC 估计[J]. [电力系统保护与控制](#), 2021, 49(8): 144–150.
- MING T T, ZHAO J, WANG X L, et al. SOC estimation of a lithium battery under high pulse rate condition based on improved LSTM[J]. [Power System Protection and Control](#), 2021, 49(8): 144–150 (in Chinese).
- [26] 王孟莲, 杨俊飞, 刘擎. 基于多条消磁船的联合消磁同步控制改造方案[J]. [船电技术](#), 2006, 26(增刊1): 48–50.
- WANG M L, YANG J F, LIU B. Improvement scheme of joint degaussing synchronous control based on multiple degaussing ships[J]. [Marine Electric & Electronic Engineering](#), 2006, 26(Suppl 1): 48–50 (in Chinese).

相关论文

- [1] 宋武健, 王国玲, 罗成汉, 等. 船舶氢储直流电力推进系统控制器转速环带宽设计方法 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(1): 260–268. doi: [10.19693/j.issn.1673-3185.02558](https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02558)
- [2] 方斯顿, 王鸿东, 张军军. 船舶大容量储能系统应用研究综述 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(6): 22–35. doi: [10.19693/j.issn.1673-3185.02363](https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02363)
- [3] 胡东亮, 袁裕鹏, 瞿小豪, 等. 基于鲸鱼优化算法的燃料电池/锂电池混合动力船舶能效优化分析 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(6): 155–166. doi: [10.19693/j.issn.1673-3185.02396](https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02396)
- [4] 齐坤, 朱志宇. 基于混合储能的船舶电力系统功率波动平抑控制策略 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(4): 190–198. doi: [10.19693/j.issn.1673-3185.02006](https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02006)
- [5] 陈辉, 李维波, 孙万峰, 等. 基于优化功率分配的光伏混合储能系统能量管理策略 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(2): 168–175. doi: [10.19693/j.issn.1673-3185.01869](https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01869)
- [6] 李灏, 张彦, 付立军, 等. 舰船综合电力系统的多混合储能协同控制方法 [J]. 中国舰船研究, 2020, 15(6): 12–21. doi: [10.19693/j.issn.1673-3185.01668](https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01668)
- [7] 庞水, 杨楚平, 刘如磊, 等. 船舶微电网锂电池储能系统容量配置多目标优化方法 [J]. 中国舰船研究, 2020, 15(6): 22–28. doi: [10.19693/j.issn.1673-3185.01769](https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01769)
- [8] 郭焱, 于士振, 郭将驰, 等. 舰船中压直流电力系统的混合储能管理策略仿真分析 [J]. 中国舰船研究, 2019, 14(2): 126–136, 143. doi: [10.19693/j.issn.1673-3185.01198](https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01198)