

大型舰船电网电能质量治理研究现状与技术挑战

魏隆, 高富东, 覃海波, 曹海龙
青岛航空技术学院, 山东 青岛 266041

摘 要 : 大型舰船电网的电能质量是舰船上各系统、设备稳定运行的核心要素之一, 稳定高品质的电能供给对舰船各系统的运行影响深刻。基于此, 本文对大型舰船电网电能质量的研究现状及技术挑战进行了总结与分析。首先, 对电能质量治理技术手段和管理措施进行了简要阐述; 其次, 考虑到新技术及舰船电网的应用场景, 对舰船电网电能质量带来的挑战进行了分类, 包括电能质量的有效检测、高效的能量管理系统以及新能源接入的新问题, 对以上问题的解决方法进行介绍; 然后, 根据现在研究热点总结了大型舰船电网电能质量治理未来的发展趋势; 最后, 对舰船电网电能质量的治理进行了展望。

关 键 词 : 舰船电网; 电能质量; 治理方法; 技术挑战

Research Status and Technical Challenges of Power Quality Management in Large Ship Power Grid

Wei Long, Gao Fudong, Qin Haibo, Cao Hailong
Qingdao Institute of Aeronautical Technology, Qingdao, Shandong 266041

Abstract : The power quality of the power grid of large ships is one of the core elements of the stable operation of the ship's systems and equipment, and the stable and high-quality power supply has a profound impact on the operation of the ship's systems. Based on this, this paper summarizes and analyzes the research status and technical challenges of power quality in the power grid of large ships. Firstly, the technical means and management measures of power quality management are briefly described. Secondly, considering the application scenarios of new technologies and ship power grid, the challenges brought by ship power grid power quality are classified, including effective detection of power quality, efficient energy management system and new energy access problems, and the solutions to the above problems are introduced. Then, according to the current research hotspots, the future development trend of power quality governance of large ship power grid is summarized. Finally, the governance of power quality in ship grid is prospected.

Keywords : ship power network; power quality; governance methods; technical challenge

引言

大型舰船电网是舰船系统中至关重要的组成部分, 它负责为舰船上的动力系统、甲板机械系统、导航设备、通信设备、生命支持系统等设备提供稳定、可靠的电力供应, 这些设备往往对电能质量要求极高。电能质量问题主要包括电压、频率、波形的稳定性以及谐波、无功功率等指标^[1,2]。大型舰船电网的电能质量问题由来已久, 由电能质量问题引起的事故也不断发生, 随着大量非线性负载、脉冲式负载设备在大型舰船的应用电能质量问题愈发严重, 不仅会导致舰船设备故障、事故发生, 对舰船和船员安全构成威胁, 还会影响设备的工作效率、增加能源消耗、降低设备寿命、增加维护成本^[3,4]。

对电能质量问题治理的研究不仅可以提高舰船的安全性、提高设备工作效率, 还可以推动电力电子技术和智能控制技术的发展, 提高舰船电网的管理水平。通过对电能质量治理方法的研究和总结, 可以为大型舰船电网的实际应用提供指导和参考。本文结合舰船电网电能质量治理现状和治理措施, 总结电能质量治理面临的挑战和发展趋势, 最后对未来研究重点进行展望。

一、电能质量治理的技术分析

在民用供配电网中, 电能质量问题也尤为突出, 传统治理措施集中在谐波治理和无功功率补偿方面; 由于舰船电网容量的有限性, 为应对符合的阶跃性突变, 舰船电能存储系统 (BESS) 技

术越显得重要。

(一) 典型电能质量治理方法的比较

电能质量治理的研究进展表明, 对于大型舰船电网而言, 谐波管理和无功补偿的策略仍是目前电能质量治理的关键领域, 尽管存在挑战, 但通过优化的设备配置和先进的控制策略, 可以显

著提高舰船电网的电能质量，保障舰船电网的安全和效率运行。

（二）舰船电能存储系统技术

舰船电网的电能存储系统是当前解决大型舰船电网电能质量的研究热点之一，研究表明，BESS能够提供短期和长期的辅助服务，如电压控制、频率调节和黑启动，对于缓解分布式电网中的电能质量问题至关重要，文献在这方面均有研究^[5-9]。

文献[5]对基于DC变换器的船舶微电网储能系统进行优化研究，文中在硬件方面提出一种新型DC-DC变换器装置主电路图，设计新型铅酸蓄电池，对超级电容器进行改良设计；在系统控制软件方面利用超级电容器对发电盈余约束进行调整，并且在船舶的启动加速阶段、恶劣海况下、平稳期采取不同的功率分配方法。通过仿真分析，证明所提理论提高了微电网储能系统的直流母线电压输出。文献[6]提到DC/DC变换器在电能变换中的作用，并提出在船舶微电网储能系统中的应用设想，实现风能太阳能等清洁能源、车载储能单元和舰船微电网的协调运行，满足船舶的用电需求。文献[7]提出一种基于电力电子变压器的舰船中压直流系统储能装置，以应对电力电子器件引起的谐波电流、系统功率冲击和系统供电的可持续性问题。文献[8]提出一种基于混合储能的船舶电力系统模型，以解决船舶航行时因复杂海况造成的电力推进系统直流母线电压波动问题。针对船舶微电网中暂态电压与频率的波动问题，文献[9]提出一种适用于超级电容储能系统的全功率补偿技术。该全功率补偿技术可对有功功率和无功功率进行独立控制，利用超级电容储能系统提供无功功率补偿可以提高电压的稳定性，提升功率因数，提高动态和静态特性；有功功率补偿技术根据系统状态（负载阶跃变化或稳定状态）控制超级电容储能系统和主汽轮机组的介入程度，保证对各种工况的精确精测和响应。仿真证明该全功率补偿技术通过补偿船舶微电网中的功率不平衡性，来提高电网的可靠性和安全性。

二、电能质量治理措施

对于电能质量的治理，除了运用有源滤波器、功率补偿器件等治理技术手段之外，还需要从治理措施上进行研究，尤其像舰船电网这种空间布局有限的情景，需要在设计之初对电气设备进行合理规划，在运行过程中也要实时监控以保证更好的电能质量。

（一）静态措施

电能质量治理的静态措施体现在舰船电网系统的设计之初，从电网系统的架构上为治理电能质量进行积极改进，主要有以下两种措施：（1）设计之初，研究增加冗余线路、使用高质量的电气设备和材料以及设计更有效的电网布局来优化电网的设计以提高电能质量；（2）优化设备布局和参数设置，分析变压器、发电机和电容器等不同设备在电网中的最佳布局，以及如何设置设备参数以最大化电能质量。

（二）动态措施

电能质量治理的动态措施体现在舰船电网的运行过程，在电网运行的全过程中对电能质量进行监控和治理，主要有以下措

施：（1）实时电能质量监测与控制系统能够实现持续跟踪电网的电能质量状态，并在发现问题时立即采取措施；（2）自适应滤波器的应用可以根据舰船电网运行工况动态调整以消除谐波和其他电能质量问题。（3）电力电子设备的应用已经成为电能质量治理的研究热点，多元电力电子器件有助于调控资源综合利用、更加高效的电能质量治理，以经济性最优方式提供高品质电力^[10]。

（三）管理与策略措施

电能质量的管理与策略措施体现在管理体系和动态响应方面，从政策、标准和策略等方面为电能质量提供保障，主要有以下措施：（1）电能质量管理体系：建立一个全面的电能质量管理体系，包括政策、规程、标准和监管机制，以确保电能质量符合既定要求；（2）故障预防和响应策略：制定预防措施和快速响应机制，以减少电能质量问题的发生和影响，包括定期维护、预测性分析和紧急响应计划。

三、面临的技术挑战

大型舰船电网电能质量治理面临的技术挑战主要有电能质量检测、开发高效的能量管理系统以及整合可再生能源带来的问题等。

（一）电能质量的有效检测

文献[11]设计一种DSP+ARM双核系统的电能质量检测装置，集成DSP和ARM的优势，具有高性价比、检测准确等特点，在其他领域也有很高的可移植性应用价值；文献[12]设计了一种以DSP器件为核心，集成嵌入式Linux系统，以小波变换分析理论作为支撑的电能质量在线检测装置，对于各种电能质量问题给出检测方法；文献[13]针对分布式发电设计了一种基于ATT7022E和STM32F103ZE芯片的分布式发电电能质量在线监测装置，在采集基础的电能质量参数外，有利于解决谐波频率扩大、低电压穿越、电压暂降频次提高等新电能质量问题，具有传输性能好、实时性高、采集容量大、造价低、便于携带、可多点多位测量的优点。

为提高噪声环境下暂态扰动检测的准确性，文献[14]提出一种扰动检测算法，解决了传统检测方法在参数设置方面的缺陷、对过零时刻扰动和抗噪性方面均有较好效果、算法移植性较强且操作友好；考虑到同步向量测量数据和使用电能质量测量装置对谐波状态估计的不足，文献[15]基于非同步谐波监测数据，提出鲁棒动态谐波状态估计方法，不仅能够反映出统计周期内系统谐波运行状态的不确定性，且有效降低了区间谐波状态估计量的保守性。文献[16]以安装代价、可观测性和定位为目标函数，设计了一种改进启发式搜索算法，为解决电能质量监控数量及安装位置提供了一种新的方法。

以上文章分别在检测装置、检测算法以及人工智能算法的应用等方面对电能质量检测进行了相关研究，另外部分专家学者对于利用AI来预测和识别电能质量问题、提高故障诊断的准确性和效率的研究也在进行中。

（二）高效的能量管理系统

高效的能量管理系统能够确保电力供应的稳定性和效率、能

够进行预测诊断故障并且提高能源管理的灵活性和可靠性，也是研究热点之一。从PMS系统、舰船智能电网技术、舰船微电网技术等方面对电能质量治理进行了研究，这些系统相互协作，形成了一个复杂的能量管理生态，旨在提高舰船电网的能源效率和可靠性，确保电能质量。为了应对挑战，未来的发展趋势可能包括增强系统的智能化、自动化程度，以及更多地利用可再生能源和储能技术。

（三）应对新能源接入的新问题

海洋上含有丰富的可再生能源（如太阳能和风能），但是整合可再生能源到大型舰船电网中给电能质量的治理带来多项挑战，主要是由于可再生能源的间歇性和可变性引起。能量存储系统（ESS，如电池储能系统）对于平衡可再生能源的不稳定供应至关重要，它们可以发挥蓄水池的作用，存储过剩的能量并在需求高峰期释放从而减少由于可再生能源产出波动引起的电能质量问题。文献[17]中介绍的在滚装船上应用的太阳能光伏系统应用了锂离子蓄电池组作为储能系统，带有储能系统的舰船，其负荷工况不再受限于光伏系统的工作状态，并且储能系统为电能质量治理提供了隔离墙的作用；根据文献[18]介绍舰船储能技术主要有蓄电池储能、超级电容器储能、超导磁储能、飞轮储能等等，并且新型材料的应用也推动了飞轮储能、蓄电池储能的发展。以上不仅能提升电能质量和整个电网的运行安全性，还能提高能源的使用效率和可持续性。

四、发展趋势

随着新技术新材料的发展，舰船电网电能质量治理的研究越

来越趋向于以下方面。

（1）利用新型材料和技术研发的智能传感器可以提供更精准和实时的电网监测数据，这些数据对于实时诊断电能质量问题、预测电网性能和制定优化策略至关重要；

（2）使用新一代半导体材料（如碳化硅 SiC、氮化镓 GaN）研发的电力电子设备可以在更高的温度、电压和电流下工作，提高了能量转换的效率和可靠性。这些设备能更有效地控制和管理电能流动，降低能量损失；

（3）智能电网技术的应用使得电能质量管理体系能够高度集成和自动化，提高了能量使用的效率和可靠性。通过实时监控和分析电网的运行状况，智能电网可以自动调整负载和发电，优化电能使用，并预防潜在的电能质量问题；

（4）高效的能量管理系统促进了可再生能源资源的更有效管理和整合，如风能和太阳能。通过智能调度和管理，可以最大化这些能源的利用，同时保持电能质量的稳定。

五、总结

大型舰船电网电能质量问题的治理关系到舰船的安全性、经济性及设备寿命，是大型舰船电网关键技术之一。本文针对大型舰船电网电能质量治理进行了介绍，主要包括电能质量治理的技术分析、电能质量治理措施、电能质量治理的挑战及发展趋势。

参考文献

[1] 寿海明, 冀路明, 回志澎, 等. 船舶电力系统的电能质量问题[J]. 船电技术, 2006, 26(6): 19-21.
[2] 宋艳琼. 电力推进船舶电能质量改善方案研究[J]. 广州航海学院学报, 2016, 24(2): 7-10.
[3] 丁长健, 王乐, 程武, 等. 电力推进船舶的电能质量探讨[J]. 机电设备, 2018(2): 31-35.
[4] 陈忠, 彭竞梨, 王建平, 等. 电力推进船舶交流电网模拟与仿真[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(3): 164-172.
[5] 程倩. 基于DC变换器的船舶微电网储能系统优化研究[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(11A): 79-81.
[6] 贾卫华, 莫小勇, 郭家富, 等. DC/DC变换器在船舶微电网储能系统的应用[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(10A): 70-72.
[7] 莫染, 李红波, 陈涛, 等. 基于电力电子变压器的舰船中压直流系统储能装置[J]. 大功率变流技术, 2017(4): 41-44.
[8] 兰海, 赫彬, 程鹏, 等. 基于混合储能的船舶电力推进系统模糊PI控制策略[J]. 船舶工程, 2019, 41(1): 58-62, 98.
[9] 刘俊杰, 龙昊天, 邓康宁, 等. 超级电容储能系统在船舶微电网中的全功率补偿技术[J]. 浙江电力, 2019, 38(5): 36-42.
[10] 刘文龙, 吕志鹏, 刘海涛, 等. 电力电子化配电台区形态发展以及运行控制技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(13): 4899-4921.
[11] 佟为明, 佟春天, 陈培友, 等. 基于DSP+ARM双核系统的电能质量检测装置设计[J]. 电测与仪表, 2019, 56(18): 99-106.
[12] 苏晓东. 基于嵌入式Linux的电能质量在线检测研究[J]. 电测与仪表, 2009, 46(523): 32-37.
[13] 张倩, 张延迟, 李鹏飞, 等. 分布式发电电能质量在线监测装置设计[J]. 分布式能源, 2019, 4(2): 67-72.
[14] 王燕, 李群湛, 周福林, 等. 一种暂态电能质量扰动检测的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7121-7132.
[15] 林洪洲, 邵振国, 陈飞雄, 等. 采用区间型非同步监测数据的鲁棒动态谐波状态估计[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1701-1708.
[16] 龙善. 基于改进启发式搜索算法的智能电网电能质量监控[J]. 研究与设计, 2022, 38(6): 161-163.
[17] 孙王伟, 严新平, 袁成清, 等. 离网型太阳能光伏系统在内河滚装船上的应用[J]. 船舶工程, 2016, 38(6): 22-26.
[18] 郑晓, 余帆, 等. 舰船大容量电能储存技术现状与展望[J]. 船电技术, 2022, 42(10): 169-172.