

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106599

基于多目标遗传算法的舰船储能系统配置优化

杨文超 刘雄峰

(三峡大学 电气与新能源学院 宜昌 443000)

摘要: 针对舰船储能系统寿命损耗和经济成本相互制约的问题,提出了基于多目标遗传算法的舰船储能系统配置优化的方法。建立以寿命损耗、经济成本为目标函数的多目标优化模型,采用多目标遗传算法求出一组 Pareto 最优解集,并通过 TOPSIS 算法在 Pareto 最优解集中筛选出最优折中解。最后,利用 MATLAB 平台仿真功能强大、语言简单易用的特点,以双燃料发电机组电力推进舰船微电网系统为研究对象,设计仿真实例。结果表明,在舰船储能系统应用中,经过该算法优化后,经济成本增加了 0.97%,但寿命损耗减少了 8.7%,能够在控制经济成本几乎不变的情况下,有效地减少寿命损耗,兼顾了舰船储能系统的使用寿命和经济效益。验证了本文的优化配置方法行之有效,对实际生产应用中的储能系统配置优化具有重要参考价值。

关键词: 舰船;储能系统;多目标遗传算法;TOPSIS 算法

中图分类号: U665.12 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.40

Configuration optimization of ship energy storage system based on multi-objective genetic algorithm

Yang Wenchao Liu Xiongfeng

(College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443000, China)

Abstract: Aiming at the mutual restriction of life loss and economic cost of ship energy storage system, this paper proposes a method of ship energy storage system configuration optimization based on multi-objective genetic algorithm. A multi-objective optimization model with life loss and economic cost as the objective function is established. A multi-objective genetic algorithm is used to find a set of Pareto optimal solution sets, and the optimal compromise solution is selected from the Pareto optimal solution set through the TOPSIS algorithm. Finally, using the MATLAB platform's powerful simulation function and simple language features, the dual-fuel generator set electric propulsion ship micro-grid system is used as the research object, and a simulation example is designed. The results show that in the application of the ship energy storage system, after the optimization of the algorithm, the economic cost increased by 0.97%, but the life loss was reduced by 8.7%, which can effectively reduce the life loss while controlling the economic cost almost unchanged, Taking into account the service life and economic benefits of the ship's energy storage system. It is verified that the optimal configuration method in this paper is effective and has important reference value for the optimization of energy storage system configuration in actual production applications.

Keywords: ship; energy storage system; multi-objective genetic algorithm; TOPSIS algorithm

0 引言

随着能源的日益紧缺,全电力推进舰船已经渐渐成为海洋工程舰船发展的必然趋势^[1]。然而,传统的全电力推进舰船系统能耗大,且易受到负载扰动的影响,难以适应海洋中扰动频繁、工作时间长的作业要求^[2]。将储能系统(ESS)引入舰船领域^[3],被认为是在未来解决上述问题的一种可靠办法,但舰船储能系统存在投资和维护费用较高、

寿命较短等问题^[4],因此,对舰船储能系统配置进行优化具有重要的意义^[5-8]。

目前,已有一些学者对储能系统配置的优化进行研究。文献[9]利用了蓄电池和超级电容器优势互补的特征,提出储能运行的最优策略,在配置混合储能容量时,考虑到每种储能的年期望成本;文献[10]在储能容量优化规划中采用双层优化模型,外层优化模型负责求解微电网系统储能容量规划投资问题,内层模型主要考虑在运行过程中的储能

收稿日期:2021-04-20

寿命损耗问题;文献[11]在储能电源中配置了高性能的电池采样和主动均衡模块,以及充放电管理系统,可以有效地提高系统可靠性和使用寿命。大部分关于舰船储能系统配置优化的研究目标是基于成本、寿命中的一种,可归纳为单目标优化问题。

本文以双燃料发电机组电力推进舰船微电网系统为研究对象,以舰船储能系统的寿命损耗、经济成本为优化目标,通过多目标遗传算法^[12-14]求可行解。然后,采用 TOPSIS 算法^[15-17]筛选出最优折中解,为舰船 ESS 配置提供参考。

1 舰船储能系统配置优化模型

舰船储能系统配置优化以 ESS 的寿命损耗、经济成本为目标函数,以 ESS 的电荷状态(SOC)、电池健康状态、舰船电力系统功率平衡等为约束条件,构造多目标优化数学模型。

1.1 目标函数

1)ESS 寿命损耗目标。锂电池的寿命损耗受放电深度、充放电电流、温度等诸多因素影响,为了简化模型,本文仅考虑放电深度对 ESS 寿命损耗的影响。根据实验得到放电深度与循环次数对应的关系如表 1 所示,可见放电深度越深,循环次数越少。

表 1 循环次数与放电深度的关系

放电深度	循环次数	放电深度	循环次数
0.1	3 800	0.6	900
0.2	2 850	0.7	750
0.3	2 050	0.8	650
0.4	1 300	0.9	600
0.5	1 050	1.0	550

利用 ESS 一天中总的输出功率与其额定容量 Q_{es} 的比值来表示 ESS 一天的充放电次数:

$$C = \frac{\int P_{es} dt}{Q_{es}} \quad (1)$$

以 ESS 一天内的充放电次数 C 与其总的循环次数 N 的比值来衡量储能系统的寿命损耗,由此得到 ESS 寿命损耗目标函数为:

$$f_1 = C/N \quad (2)$$

2)ESS 经济成本目标。ESS 经济成本包括初始投资成本、年运行维护成本和废弃处置成本。ESS 经济成本目标函数为:

$$f_2 = c_1 + c_2 + c_3 \quad (3)$$

式中: c_1 为初始投资成本, c_2 为年运行维护成本, c_3 为废弃处置成本,并与 ESS 的额定功率 P_{es} 、额定容量 Q_{es} 和回收系数 γ 有关。

$$\begin{cases} c_1 = k_p P_{es} + k_q Q_{es} \\ c_2 = k_{om} Q_{es} \\ c_3 = \gamma c_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: k_p 为 ESS 峰值功率相关成本系数, k_q 为 ESS 容量相关成本系数, k_{om} 为单位容量的年运行维护系数。其中,废弃处置成本与回收系数和初始投资成本有关,为负数。

1.2 约束条件

1)ESS 电荷状态(SOC)约束。储能系统的 SOC 过高或者过低都会增大电池的能量损耗,从而缩短使用寿命,增加维护成本。因此,ESS 正常运行时,SOC 需要处在电荷状态上限 SOC_{max} 与电荷状态下限 SOC_{min} 之间。ESS 电荷状态(SOC)约束方程为:

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (5)$$

2)ESS 电池健康状态约束。ESS 运行一段时间之后,性能参数会有所减弱,电池容量不再是额定容量,故用电池运行一段时间后电池充满电后的容量 Q_f 与额定容量 Q_{es} 的比值来表示电池健康状态。ESS 正常工作时,电池健康状态应该大于 80% 小于 100%,否则需要更换。因此,ESS 电池健康状态约束方程为:

$$80\% \leq \frac{Q_f}{Q_{es}} \times 100\% \leq 100\% \quad (6)$$

3)功率平衡约束。在舰船航行的任何时刻,其电力系统输出功率与消耗功率必须保持平衡。功率平衡约束为:

$$P_g + P_b = P_l \quad (7)$$

式中: P_g 表示发电机某一时刻输出功率; P_b 表示 ESS 某一时刻输出功率,此处,ESS 处于放电状态时, P_b 为正,处于充电状态时, P_b 为负; P_l 表示舰船上所有负荷所消耗的功率。

1.3 ESS 配置多目标优化数学模型

基于上述对舰船储能系统的分析,确定目标函数与约束条件,建立舰船 ESS 多目标优化的数学模型,如下所示:

$$f = \begin{cases} \min f_1 = C/N \\ \min f_2 = c_1 + c_2 + c_3 \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \\ 80\% \leq \frac{Q_f}{Q_{es}} \times 100\% \leq 100\% \\ P_g + P_b = P_l \end{cases} \quad (9)$$

2 舰船储能系统配置多目标遗传优化

舰船储能系统配置优化的目标为:寿命损耗与经济成本达到最小。这两个目标函数相互制约,例如,寿命损耗较小时,经济成本会有所增加,两个目标无法同时取到最优解。针对这样的多目标优化问题,传统的方法是将多目标转化成单目标进行优化,有一定的局限性,而非支配排序遗传算法对于解决多目标优化问题很有效,最终可以得到各个目标函数的折中最优解。

舰船储能系统配置多目标遗传优化算法的具体步骤如下。

1)确定目标函数和问题的解空间,随机产生初始化群体,且初始值在整个解空间中均匀采样,以加快收敛速度。

2)进行非支配排序和拥挤距离计算。

两个个体 p 和 q ,若 p 至少有一个目标比 q 好,且 p 的所有目标均不比 q 差,则称 p 支配 q ,且 p 的序值比 q 低。若存在一个体不被其他个体支配,则该个体为非支配解,即 Pareto 解。遍历种群中的每一个个体,对其进行非支配排序,将个体分层,每个个体的适应度即为该个体的非支配水平,并通过计算同一序值下个体的拥挤距离保留种群的多样性。

3)个体之间进行选择、交叉和变异操作,形成下一代群体。

采用蒙特卡罗法进行选择操作,利用比例于各个个体适应度的概率来决定其子代的遗留下来的可能性。如果某个个体的适应度为 f_{iFi} ,则其被选取的概率为:

$$P_i = f_{iFi} / \sum_{i=1}^M f_{iFi} \quad (10)$$

显然,适应度较大的个体优先被选择。如果两个个体适应度相同,那么就选择拥挤距离较大的个体,以保留种群的多样性。

交叉操作可以使遗传算法具有全局搜索能力,变异操作可以提高种群的多样性,从而防止非成熟收敛。

4)引入精英策略,扩展采样空间。

将子代种群与父代种群合并,对其进行非支配排序并计算拥挤距离,对种群进行修剪,使得子代与父代竞争,得到新的种群,保留优良基因,提高进化的精度。

5)判断是否满足迭代次数,若满足,则输出 Pareto 最优解,若不满足,则返回步骤 3),直到满足条件为止。

算法流程如图 1 所示。

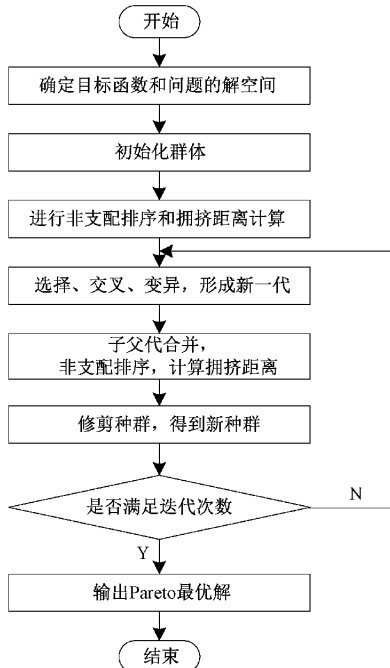


图 1 多目标遗传优化算法流程

3 TOPSIS 法进行多属性决策

多目标遗传算法最终得到的是一组 Pareto 最优解,本文采用 TOPSIS 理想解法从中筛选出最优折中解。TOPSIS 法通过计算各个可行解与正理想解和负理想解之间的距离,得到各个可行解的相对贴近度,相对贴近度越高,则该可行解越接近正理想解,目标越优。TOPSIS 法的具体步骤如下。

1)由于本文寿命损耗目标和经济成本目标之间量纲不同,故采用 z -score 方法对数据进行量纲化。

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \mu}{\delta} \quad (11)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个可行解的第 j 个目标值, μ 为第 j 个目标的均值, δ 为第 j 个目标的标准差, r_{ij} 为 x_{ij} 量纲化处理后的值。

2)决策者根据舰船实际条件与需求,确定目标权重。

3)确定正理想解 S^+ (各目标均达到最优的解)和负理想解 S^- (各目标均达到最劣的解)。

4)计算各可行解到正理想解的距离 d_i^+ 和到负理想解的距离 d_i^- ,进而计算得到各个可行解的相对贴近度,并对其进行排序。相对贴近度越高,则可行解距离正理想解的距离越近,距离正理想解最近的解,即为最优折中解。

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^2 (S_j^+ - r_{ij})^2} \quad (12)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^2 (S_j^- - r_{ij})^2} \quad (13)$$

$$c_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (14)$$

式中: S_j^+ 为第 j 个目标的最优解, S_j^- 为第 j 个目标的最劣解, c_i 为第 i 个可行解的相对贴近度。

4 仿真分析与对比

4.1 实例对象及其参数

本文以某电力舰船微电网进行实例仿真分析。在该舰船微电网中,有 1 台 Wartsila 20DF 双燃料发电原动机,2 台 Wartsila 9L34DF 双燃料发电原动机。发电机组的额定功率为 3 800 kW 以及 2 600 kW。舰船在航行期间,发电原动机工作于燃气模式,且不考虑发电原动机工作于燃油模式。舰船在航行时,发电机工作在燃油模式。

锂电池相关参数如表 2 所示。

表 2 锂电池基本参数

参数	数值
峰值功率相关成本系数/元	2 800
容量相关成本系数/元	660
单位容量年运行维护系数/元	0.05
荷电上限/%	85
荷电下限/%	20

4.2 仿真分析

使用 MATLAB 来实现电力推进储能系统的多目标优化算法。算法参数设置:目标函数个数 $i=2$;自变量个数 $j=2$;交叉算子 $CR=0.3$;变异算子 $F=0.5$;权重向量的个数 $N=30$;最大进化数 $M=1000$ 。

在 MATLAB 中进行计算,得到图中的 Pareto 前沿。采用 TOPSIS 法从最优解中筛选出折中最优解。由图 2 可知,储能系统的经济成本越低,对锂电池寿命损耗程度越大。A 点的寿命损耗和经济成本均为最低,为正理想解;B 点的寿命损耗和经济成本均为最高,为负理想解;C 点则为最佳折中解。

从表 3 可知,采用多目标遗传算法能够有效地权衡和折中舰船储能系统寿命损耗和经济成本。通过优化 ESS 的额定功率和额定容量,舰船储能系统的经济成本较实测经济成本增加了 0.97%,但寿命损耗减少了 8.7%,有效地延长了储能系统的使用寿命。可见,该舰船储能系统优化

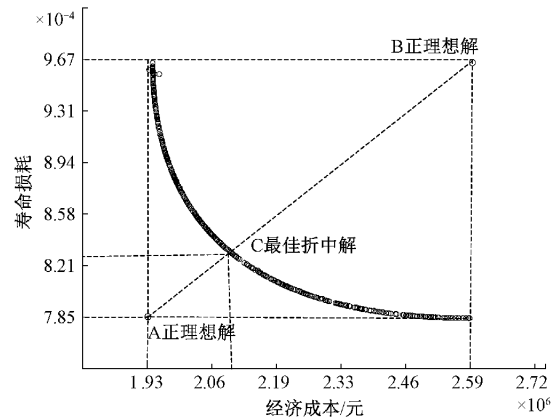


图 2 Pareto 前沿图

算法具有明显的优势,在优化储能系统配置时,能够有效地减少寿命损耗,同时控制经济成本,兼顾了舰船储能系统的使用寿命和经济效益。

表 3 舰船储能系统多目标优化结果

指标	最小寿命损耗方案	最小经济成本方案	优化值	实测值
额定功率/kW	235	220	230	223
额定容量/(kW·h)	1 875.9	1 500.3	1 739.2	1 577.4
寿命损耗	7.85×10^{-4}	9.67×10^{-4}	8.25×10^{-4}	9.04×10^{-4}
经济成本/元	2.59×10^6	1.93×10^6	2.09×10^6	2.07×10^6

5 结 论

为满足舰船储能系统的寿命损耗控制需求和经济成本控制需求,本文以寿命损耗、经济成本为目标函数,建立舰船储能系统配置的多目标优化模型,采用多目标遗传算法求解,得到一组 Pareto 最优解集,随后用 TOPSIS 法从 Pareto 最优解集中筛选出最优折中解。结果表明,采用该算法优化后,在控制经济成本几乎不变的情况下,寿命损耗减少了 8.7%,兼顾了舰船储能系统的使用寿命和经济效益,为舰船储能系统配置提供参考。

参考文献

- [1] 段春艳,冯泽君.全电力推进船舶光伏并网发电系统建模仿真[J].舰船科学技术,2019,41(10):73-75.
- [2] 陈晨,王锡淮,冯昊,等.锂电池/超级电容器在电力推进船舶中的应用[J].船舶工程,2016,38(S2):186-190.
- [3] 王振,雷刚.燃料电池和锂电池在船用领域的对比分析[J].船电技术,2021,41(2):18-20,26.
- [4] 庞水.电推船储能容量配置与能量管理策略优化设计[D].大连:大连海事大学,2020.
- [5] 巫春玲,程琰清,刘智轩,等.一种改进的储能锂电池主动均衡拓扑研究[J].电子测量技术,2021,44(3):32-37.
- [6] 郭向伟,刘震,耿佳豪,等.基于 LC 储能的串联电池组

主动均衡方法研究[J].仪器仪表学报,2020,41(9):242-251.

- [7] 韩乐.车载混合储能动力系统功率最优分配策略研究[J].国外电子测量技术,2020,39(10):94-98.
- [8] 于会群,钟永,张浩,等.微电网混合储能系统控制策略研究[J].电子测量与仪器学报,2015,29(5):730-738.
- [9] 陈厚合,杜欢欢,张儒峰,等.考虑风电不确定性的混合储能容量优化配置及运行策略研究[J].电力自动化设备,2018,38(8):174-182,188.
- [10] 张悦,刘文泽.考虑功率波动及储能寿命的微电网储能容量优化配置[J/OL].电测与仪表,2020:1-17[2021-05-06].
- [11] 任先文,力军,龚胜刚,等.大功率锂离子电池储能电源系统的研制与应用[J].强激光与粒子束,2021,33(3):151-157.
- [12] 毛婕,宋英明,张泽寰,等.基于非支配排序遗传算法的核动力堆中子- γ 混合射线屏蔽智能优化[J].原子能科学技术,2021,55(5):892-900.
- [13] 邹裕吉,宋豫川,王馨坤,等.多目标自适应聚类遗传算法求解无路径冲突的 AGV 与加工设备集成调度问题[J/OL].中国机械工程,2021:1-14[2021-05-06].
- [14] 吴贤国,杨赛,王成龙,等.基于 RF-NSGA-II 的建筑能耗多目标优化[J].土木工程与管理学报,2021,38(2):1-8.

- [15] 郭建豪,刘鑫屏.基于改进 TOPSIS 法的过热汽温控制系统综合性能评价[J/OL].华北电力大学学报(自然科学版),2021;1-9[2021-05-06].
- [16] 金璐,何伟,闫华光,等.基于改进 TOPSIS 的乡镇综合能源系统效益综合评价方法[J/OL].电测与仪表,2021;1-9[2021-05-06].
- [17] 尹芳,兰思仁.基于专家赋权 TOPSIS 法的会奖旅游城市竞争力对比研究[J/OL].数学的实践与认识,2021;

1-11[2021-05-06].

作者简介

杨文超,本科生,主要研究方向为储能系统优化和电池均衡管理。

E-mail:911121523@qq.com

刘雄峰,本科生,主要研究方向为自动化控制和储能电池优化。

E-mail:3482869277@qq.com