

文章编号: 2095-2163(2023)04-0196-05

中图分类号: TM34

文献标志码: A

# 对舰保障配电方舱电动机储能动态匹配控制

李国龙, 古明江

(91640 部队, 广东 湛江 524064)

**摘要:** 为了提高舰艇装备保障中电力方舱运行的稳定性, 提出基于粒子群优化的对舰保障配电方舱电动机储能动态匹配控制方法。构建配电方舱电动机储能鲁棒性配置的约束指标模型, 考虑储能技术的运行特性, 结合稳态工况模拟和动态寻优参数方法实现对配电方舱电动机储能分配过程中的自适应寻优, 通过最佳储能系统分布和功率点因素匹配实现对电动机储能动态融合处理, 以相应的频率分界点配置因素为控制变量, 采用粒子群寻优方法实现对对舰保障配电方舱电动机储能分类的动态调度, 通过最小化分布式能源管理方法实现对配电方舱的发电功率最优化控制。实验结果表明, 采用该方法进行对舰保障配电方舱电动机储能动态匹配控制能力较好, 输出功率因素较高, 提高了发电配电效益度水平。

**关键词:** 舰艇; 装备保障; 配电方舱; 电动机; 储能匹配; 控制

## Dynamic matching control of motor energy storage in ship support distribution shelter

LI Guolong, GU Mingjiang

(91640 Troop of PLA, Zhanjiang Guangdong 524064, China)

**[Abstract]** In order to improve the stability of power shelter operation in warship equipment support, a dynamic matching control method of motor energy storage in ship support distribution shelter based on particle swarm optimization is proposed. Constrained index model of robust configuration of electric motor energy storage in power distribution shelter is constructed. Considering the operation characteristics of energy storage technology, the adaptive optimization of electric motor energy storage distribution in power distribution shelter is realized by combining steady-state working condition simulation and dynamic optimization parameter method. The dynamic integration of electric motor energy storage is realized by the method of optimal energy storage system distribution and power point factor matching, and the corresponding frequency cut-off point configuration factors are taken as control variables. Particle Swarm Optimization method is used to realize dynamic scheduling of electric motor energy storage classification in ship-supported power distribution shelter, and the generated power of power distribution shelter is realized by minimizing distributed energy management method. The experimental results show that the dynamic matching control ability of motor energy storage in ship support power distribution shelter is good, and the output power factor is high, which improves the level of power generation and distribution efficiency.

**[Key words]** warship; equipment support; power distribution shelter; motor; energy storage matching; control

## 0 引言

在对舰艇的武器装备军械保障中, 电源方舱配电稳定性是保障装备转级和调度的关键环节, 在对舰保障配电方舱控制中, 电动机受到负载波动和功率匹配不稳等因素的影响, 导致电动机储能匹配输出存在随机性和波动性, 需要构建优化的对舰保障配电方舱电动机储能动态匹配控制模型, 结合电力峰值的动态参数分析, 实现能源输出稳定性调节, 实

现电动机储能输出调节, 提高方舱电动机输出的恒稳性, 研究对舰保障配电方舱电动机储能动态匹配控制方法, 在促进军械武器装备保障的安全性和稳定性方面具有重要意义<sup>[1]</sup>。

对配电方舱电动机储能控制是建立在对分布式电源的储能以及负荷参数分析基础上, 结合混合储能系统 (Hybrid Energy Storage System, HESS) 的输出稳态性参数调节, 提高电机储能输出稳定性<sup>[2-3]</sup>, 文献[4]中提出基于非参数估计与模糊控制配置的

**作者简介:** 李国龙(1992-), 男, 学士, 主要研究方向: 电气自动化、海军军械装备供电保障; 古明江(1978-), 男, 学士, 高级技师, 主要研究方向: 电气自动化、海军军用电力系统故障诊断及检修。

收稿日期: 2022-08-18

哈尔滨工业大学主办 ◆ 科技创新与应用

电动机储能配置方法, 计及储能运行寿命损耗, 实现电机输出稳态调节, 但该方法的扰动性不好, 储能配置的动态匹配能力不强。文献[5]中针对并网和孤岛之间切换造成的波动, 以分布式能源的发电功率为输出目标函数, 实现储能动态调节和配置, 但该方法存在电机输出各个部分的出力不确定性等问题, 抗负载波动能力不强。针对传统方法存在的弊端, 本文提出基于粒子群优化的对舰保障配电方舱电动机储能动态匹配控制方法。首先, 构建配电方舱电动机储能鲁棒性配置的约束指标模型, 然后采用粒子群寻优方法实现对对舰保障配电方舱电动机储能分类的动态调度, 通过最小化分布式能源管理方法实现对配电方舱的发电功率最优化控制。最后, 通过仿真测试实现对舰保障配电方舱电动机储能动态控制分析, 得出有效性结论。

## 1 配电方舱电动机储能约束参数和特征分析

### 1.1 配电方舱电动机储能约束参数

为了实现舰艇装备保障中电力方舱电动机储能动态匹配和优化控制, 构建配电方舱电动机储能鲁棒性配置的约束指标模型, 考虑储能技术和分散式电动机控制技术, 分析可控负荷参数分析和输电配动态参数分析, 构建储能配置优化模型, 根据电负荷的自适应匹配结果<sup>[6]</sup>, 实现储能配置, 总体结构如图 1 所示。

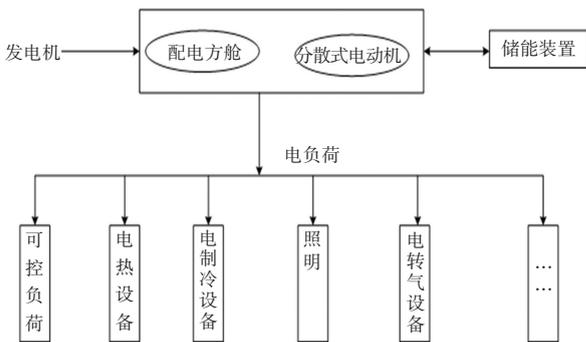


图 1 控制模型总体结构

Fig. 1 The overall structure of the control model

根据图 1 中的结构模型, 通过电网节点功率平衡分析, 并基于注入电动机节点电流和节点电压矢量特征分析, 构建导纳矩阵, 进行对舰保障配电方舱电动机储能配置的自适应学习<sup>[7]</sup>, 建立配电方舱电动机储能参数分析模型, 得到配电节点的功率平衡方程为:

$$\min F = R^2 + A \sum_i \xi_i$$

$$\text{s.t.: } \|\phi(x_i) - o\|^2 \leq R^2 + \xi_i \text{ and } \xi_i \geq 0, i = 1, 2, \dots \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \max \sum_i \alpha_i K(x_i, x_i) - \sum_i \sum_j \alpha_i \alpha_j K(x_i, x_j) \\ \text{s.t.: } \sum_i \alpha_i = 1 \text{ and } 0 \leq \alpha_i \leq A, i = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (2)$$

式(1)、式(2)表示对舰保障配电方舱电动机储能配置评价的约束指标参量集, 为一个标准的正态分布函数,  $\omega$  为逆变电源节点的功率稳态方程, 建立配电方程输出微电网的有功功率平衡方程分解, 结合储能系统 SOC 的模糊分配概念集, 通过稳态误差补偿和反馈调节, 得到电动机储能配置的模糊特征分布集, 同时得到对舰保障配电方舱电动机储能配置的更新规则和约束指标描述分别见下式:

$$\lambda = \frac{1}{1 + \alpha \left( \frac{\partial S}{\partial t} \right)^2}$$

$$\hat{k}_\mu(t+1) = \hat{k}_\mu(t) + Q(t+1) \times \left[ \frac{\partial \hat{F}_\mu / Mg}{\partial t} - \frac{\partial S}{\partial t} \hat{k}_\mu(t) \right] \quad (3)$$

其中,

$$Q(t+1) = P(t+1) \frac{\partial S}{\partial t}$$

$$P(t+1) = \frac{1}{\lambda} \left[ P(t) - \frac{P^2(t) \left( \frac{\partial S}{\partial t} \right)^2}{\lambda + P(t) \left( \frac{\partial S}{\partial t} \right)^2} \right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{r}{v_c} \frac{\partial \omega_w}{\partial t} \quad (5)$$

其中,  $\lambda$  表示逆变器直流侧和交流侧功率因素;  $\hat{F}_\mu$  为配电系统达到稳定状态后的进化目标函数;  $\omega_w$  为储能优化布局策略因素。根据平抑分布式能源参数调节, 建立电动机储能动态分配模型<sup>[8]</sup>。

### 1.2 电动机储能动态融合特征分析

通过最佳储能系统分布和功率点因素匹配方法实现对电动机储能动态融合处理, 并将电动机储能动态参数传输到用电的低谷时段<sup>[9]</sup>, 得到线上功率波动幅值, 进一步得到电动机储能分配的参数融合调度延迟表示为:

$$\tau_{ij} = \frac{k_{ij}}{m} + K(x_i, x_j) \quad (6)$$

其中,  $k_{ij}$  为工频交流参数;  $m$  为嵌入维数;  $K(x_i, x_j)$  为模糊核函数。基于微电网逆变器的下垂控制的方法, 得到系统储能动态分配响应后  $t$  时段

的用电负荷,最优配置模型化迭代函数为:

$$v_{id}^t = v_{id}^{t-1} + (x_{id}^t - x_{id}^*) \cdot f_i \quad (7)$$

其中,  $v_{id}^t$  和  $v_{id}^{t-1}$  分别表示配电方舱电动机储能的放电上限在  $t-1$  和  $t$  时刻的最优特征解;  $f_i$  表示配电方舱电动机储能配置的频率因素;  $i$  表示配电控制的节点,通过调节逆变器输出有功功率,得到无功功率的下垂特征分布表示如下:

$$v_{i,d}^{k+1} = \omega \cdot v_{i,d}^k + c_1 \cdot rand() \cdot (c_3 \cdot rand() \cdot pbest_{i,d}^k - x_{i,d}^k) + c_2 \cdot rand() \cdot (c_4 \cdot rand() \cdot gbest_{i,d}^k - x_{i,d}^k) \quad (8)$$

其中,  $c_3 \cdot rand()$  和  $c_4 \cdot rand()$  称为恒压恒频控制的粒子群寻优随机分布算子,其表达式为:

$$c_3 \cdot rand() = \begin{cases} 1 & e_p > e_{op} \\ c_3 \cdot rand() & e_p \leq e_{op} \end{cases} \quad (9)$$

$$c_4 \cdot rand() = \begin{cases} 1 & e_g > e_{og} \\ c_4 \cdot rand() & e_g \leq e_{og} \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $c_3$  和  $c_4$  称为配电方舱电动机储能规划的空间信息增益;  $c_3$  表示粒子群动态寻优的配置参数;  $c_4$  表示粒子群配电方舱电动机储能的空间搜索范围;  $e_p$  表示电网侧的端电压;  $e_g$  表示种群主体之间的偏差;  $e_{op}$  表示配电参数分配的零阶偏差,  $e_{og}$  表示同一区域内电机之间的相互偏差的阈值。根据上述分析,通过最佳储能系统分布和功率点因素匹配实现对电动机储能动态融合处理,以相应的频率分界点配置因素为控制变量,实现储能参数融合<sup>[10]</sup>。

## 2 配电方舱电动机储能动态匹配控制优化

### 2.1 最佳储能系统分布融合的粒子群寻优

基于粒子群寻优调度的方法,构建配电方舱电动机储能负荷需求的消纳模型,得到动态消纳控制函数为:

$$N_{eff} \approx 1 / \sum_{i=1}^N (\tilde{w}_k^i)^2 \quad (11)$$

采用多目标 Pareto 映射方法进行对舰保障配电方舱电动机储能配置,基于粒子群算法,得到寻优粒子个体分布集为:  $\{W_{final}\} = \{\{W_H\}, \{W_C\}, \{W_O\}\}$ , 找到目标点的种群位置,得到配电方舱电动机储能配置的模糊约束状态参数估计为:

$$\hat{x}_k = \sum_{i=1}^N w_k^i x_k^i \quad (12)$$

在粒子群寻优的运行初期内,计算得到对舰保障配电方舱电动机储能配置的  $i$  个粒子群个体在  $k+1$  时刻位置,配电方舱电动机储能容量参数调度的迭代式为:

$$x_i(k+1) = x_i(k) + s \left( \frac{x_j(k) - x_i(k)}{\|x_j(k) - x_i(k)\|} \right) \quad (13)$$

其中:  $\|x\|$  表示  $x$  的欧拉函数。计算电动机储能容量分布的一阶统计特征量,通过建立容量鲁棒性配置的参数调节模型,得到动态调节函数为:

$$r_d^i(k+1) = \min\{r_s, \max\{0, r_d^i(k) + \beta(n_i - |N_i(k)|)\}\} \quad (14)$$

综上分析,构建对舰保障配电方舱电动机储能容量分布模型,结合动态寻优控制实现配电方舱的电动机储能分配<sup>[11]</sup>。

### 2.2 配电方舱电动机储能分配

采用粒子群寻优方法实现对舰保障配电方舱电动机储能分类的动态调度,通过最小化分布式能源管理方法实现对配电方舱的发电功率最优化控制<sup>[12]</sup>,得到电源方舱的电动机储能优化配置的目标状态函数为:

$$x_F^i = \frac{1}{N} \left\{ \sum_{i=1}^m x_H^i + \sum_{i=1}^{N-m-a} x_O^i + \sum_{i=1}^a x_C^i \right\} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{m+a} x_H^i + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-m-a} x_O^i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{m+a} x_H^i + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-m-a} x_S^i (1 - Kd_i^{\max}) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-m-a} Kd_i^{\max} x_L^i \quad (15)$$

在电网侧的端电压可以看作保持不变的情况下,将电力方舱的输出电能配置模型看成一个互联系统,得到电机之间状态特征分布个体为  $(X_1(0), X_2(0), \dots, X_N(0))$ , 电网等效电机的动态控制变量主要考虑各组逆变器的无功输出,表示为:

$$V_{t+1,i} = \underbrace{\omega \times V_{t,i}}_{(\text{momentum})} + \underbrace{C_1 \times rand() \times (p_{t,i} - X_{t,i})}_{(\text{Cognitive Component})} + \underbrace{C_2 \times rand() \times (p_{gt} - X_{t,i})}_{(\text{Social Component})} \quad (16)$$

其中,  $X_{t+1,i} = X_{t,i} + V_{t+1,i} \circ$  建立配置系统的后台监视线程模型,初始化配电方舱电动机储能配送和配置的线程参数,设置为  $\tau_s = \tau_c + \tau_{CSA}$ , 采用功率增益调度,得到模糊权值:

$$\tilde{w}_k^i = \tilde{w}_{k-1}^i \frac{p(z_k / \tilde{x}_k^i) p(\tilde{x}_k^i / x_{k-1}^i)}{q(\tilde{x}_k^i / x_{k-1}^i)} \quad (17)$$

基于可控负荷系统响应,得到配电方舱电动机储能优化配置的估计先验概率  $p(x_0)$ , 在混合粒子群  $\{x_0^i, i=1, 2, \dots, N\}$  中进行电动机储能优化配置和参数优选控制,初始化自适应权值为  $1/N$ , 根据参数寻优结果建立一个优化调度模型,实现配电方舱电动机储能分配和优化调度。

### 3 实验测试

为了验证本文方法在实现对舰保障配电方舱电动机储能动态匹配中的应用性能,进行实验测试,给出配电方舱电动机的等效电路如图 2 所示。

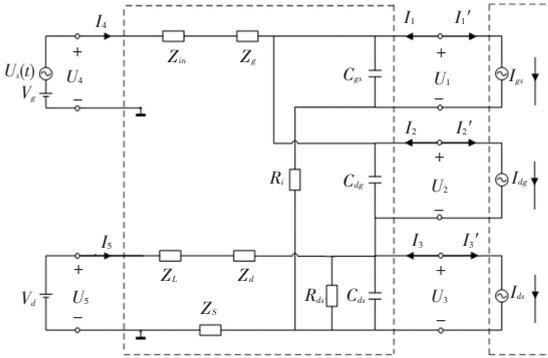


图 2 配电方舱电动机的等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of power distribution shelter motor

给出电机输出的频率为 50 Hz, 输出电压为 380 V 和 220 V 双源电压, 负载参数为  $P = 10 \text{ MW}$ , 模数为 120, 粒子群循环油的模糊匹配参数为  $c_{limi} = 3$ , 储能控制的迭代步长为  $c_{2fin} = 5.4$ , 三相平衡储能分布的检测阈值为  $\mu_{max} = 0.67$ , 最小检测阈值为  $\mu_{min} = 0.23$ , 其它关键参数设定见表 1。

表 1 参数设定

Tab. 1 Parameters setting

参数	数值
通带增益 G0	21.322
阻尼系数	136.743
中心角频率	54.255
联络线零序阻抗	620
直流母线电压参考值/V	246

根据上述参数设定, 得到配电方舱电动机 4 个通道的输出稳态电压如图 3 所示。

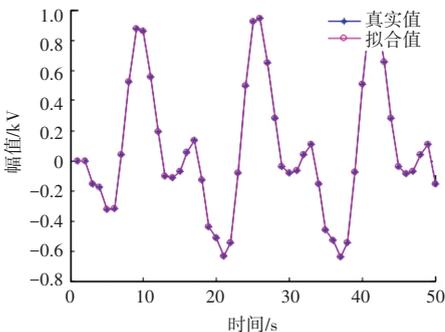


图 3 输出稳态电压

Fig. 3 Output steady-state voltage

动机储能动态匹配控制, 输出稳态性较好, 测试电动机储能匹配的收敛曲线, 如图 4 所示。

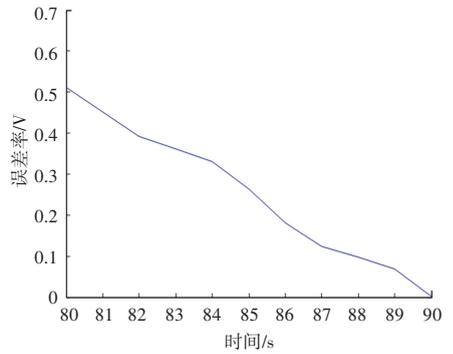


图 4 电动机储能匹配的收敛性测试

Fig. 4 Convergence test of motor energy storage matching

分析图 4 得知, 随着供电时间的增长, 电动机储能调度匹配的收敛值逐渐达到最优, 测试不同方法进行储能控制, 得到输出功率因素对比结果见表 2, 发电配电效益度水平对比结果如图 5 所示。对比得知, 本文方法对对舰保障配电方舱电动机储能动态匹配控制的输出功率因素较高, 储能效益度水平得到有效提升。

表 2 输出功率因素对比

Tab. 2 Comparison of output power factors

测试次数	本文方法	文献[4]	文献[6]
10	0.789	0.580	0.515
20	0.928	0.514	0.575
30	0.844	0.602	0.578
40	0.850	0.618	0.518
50	0.906	0.544	0.519
60	0.950	0.639	0.505
70	0.888	0.671	0.575
80	0.833	0.665	0.511
90	0.980	0.512	0.494
100	0.973	0.627	0.535

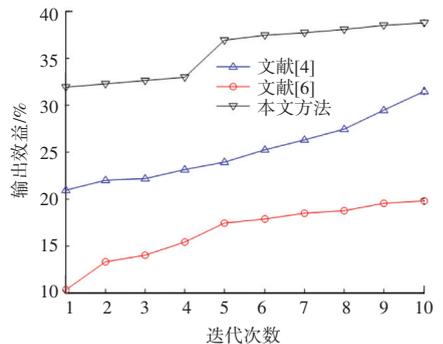


图 5 储能效益度水平

Fig. 5 Energy storage efficiency level

分析图 3 得知, 采用本文方法进行配电方舱电

(下转封三)