

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200006

基于迁移支持向量机的舰船综合电力系统 继电保护方法研究

杨天琦¹, 王琦¹, 叶志浩²

(1. 武汉科技大学信息科学与工程学院, 湖北 武汉 430081; 2. 海军工程大学电气工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 随着舰船综合电力系统的发展, 系统配置、网络结构以及运行模式已经发生巨大改变, 导致传统舰船继电保护方法无法满足安全性需要。分析了舰船综合电力系统的故障特征信号, 提出了一种基于迁移支持向量机的智能继电保护方法。推导了所提出方法的数学模型, 并建立了相应的仿真模型。在 PSCAD/EMTDC 软件中, 构建舰船电力系统故障模型, 对方法进行了对比分析, 验证了其有效性。仿真结果表明: 基于迁移支持向量机的智能继电保护方法, 可以对舰船综合电力系统中复杂的故障进行判断, 全方位满足保护要求。

关键词: 舰船综合电力系统; 继电保护; 信号分析; 迁移支持向量机; 复杂故障诊断

Research on relay protection of ship integrated power system based on Transfer Support Vector Machine

YANG Tianqi¹, WANG Qi¹, YE Zhihao²

(1. School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;
2. School of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: With the development of ship integrated power system, the configuration, network structure and operation mode of it have been greatly changed. As a result, the traditional ship relay protection methods can not meet the needs of the system any longer. In this paper, the fault characteristic signals of ship integrated power system are analyzed. An intelligent relay protection method based on Transfer Support Vector Machine (TrSVM) is proposed. The mathematical model is derived and the simulation model is constructed in PSCAD/EMTDC software for comparative analysis to verify the proposed method. Finally, the results validate that the method in this paper is able to deal with the complex fault situation in the complex ship integrated power system and meet the relay protection.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377167).

Key words: ship integrated power system; relay protection; signal analysis; Transfer Support Vector Machines (TrSVM); complex fault diagnosis

0 引言

随着科技进步和社会生产力的快速发展, 高智能的大型化舰船成为各国的发展方向, 这类舰船对电力系统的可靠性要求更加突出^[1-3]。当前, 大型舰船的电力系统一般都采用区域配电系统, 电网被分成了相互独立的区域。保证各区域的紧密联系, 检查或者消除可能出现的故障, 维持电力的持续性供应是舰船综合电力系统的普遍要求^[4-5]。由于舰船综

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51377167)

合电力系统运行多变, 潮流分布复杂, 而且受船舶供电线路长度的影响, 故障点相邻保护处的监测电流差异较小^[6-7]。因此, 用传统继电保护方式作为保障电网稳定运行的第一道防线已不再完全适用^[8-10]。

舰船综合电力系统的新型继电保护方法成为了研究热点, 其中智能保护方法为重要的研究方向。文献[11]将双层迭代遗传算法和边际优化方法相结合, 针对舰船电力系统结构问题, 构建多目标、多约束的双层优化问题并进行求解, 实现电力系统结

构性能的提升。文献[12]以负荷供电量最大和开关动作次数最小为目标函数, 建立船舶直流区域配电系统的多目标故障恢复模型, 通过层次分析法和整数规划方法得到最优开关动作序列, 保证系统的供电连续性。文献[13]以神经网络方法构建智能电力保护网, 通过检测传输网络电流, 自适应地调整保护整定值, 实现不同过载情况的有效识别。这些聚焦舰船综合电力系统的研究, 以提高舰船电力系统的安全性为目的, 或采用建立故障恢复、优化模型的方法, 或采用机器学习方法, 建立智能保护电网, 实现系统的实时故障监测。支持向量机(Support Vector Machine, SVM)作为一种成熟的机器学习方法, 在面对小样本分类问题时具有很好辨识能力, 也被广泛应用于逆变器故障诊断中 [14-18]。

本文提出一种基于迁移支持向量机(Transfer SVM, TrSVM)的舰船综合电力系统智能继电保护的方法。通过分析典型舰船综合电力系统, 选择直流电流、配电网电压、交流单相直流分量等信号作为保护动作判据。然后采用信号时域分析方法对采集的电气特征进行处理, 并将其作为 SVM 的输入来识别系统当前的运行状态。最后基于 TrSVM 对多种工况下的电力系统运行数据进行整合建模, 实现所有工况下出现故障时的故障定位, 以及故障切除后的继续监控, 通过 PSCAD/EMTDC 仿真平台

验证了其可行性。

1 综合电力系统结构

典型舰船综合电力系统及其直流输、配电区域如图 1 所示。其中, 发电模块配置 2 台 21 MW 级大型燃气轮机多相整流发电机组 G_2 、 G_4 和 2 台 3.75 MW 级小型柴油机多相整流发电机组 G_1 、 G_3 ; 配电模块配置 2 套中压 4 kV 直流配电板; 变电模块配置 1 套直流供电的直流区域配电装置; 推进模块配置 2 台 24 MVA 级推进变频器 VCM_1 、 VCM_2 和 2 台 20 MW 级永磁电机或高温超导电机 M_1 、 M_2 [19-21]。其中, 直流区域配电系统的每个区域都由发动机组经 4 kV 直流母线上的一台 2 MW 级斩波器 CT_i 间接供电 [22-23], 实现中压直流到低压直流的转换。每个区域中配备 2 台 450 kW 级逆变器 VC_i , 完成低压交流的转变, 为非重要负载提供正常供电。

为了评价本文所提出的舰船综合电力系统的智能继电保护系统, 在图 1 所示的区域配电系统中设置六处故障位置与两种故障情况。分别为直流正负极间短路 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_5 , 交流三相相间短路 F_4 、 F_6 , 综合电力系统的具体故障位置如图 1 所示。

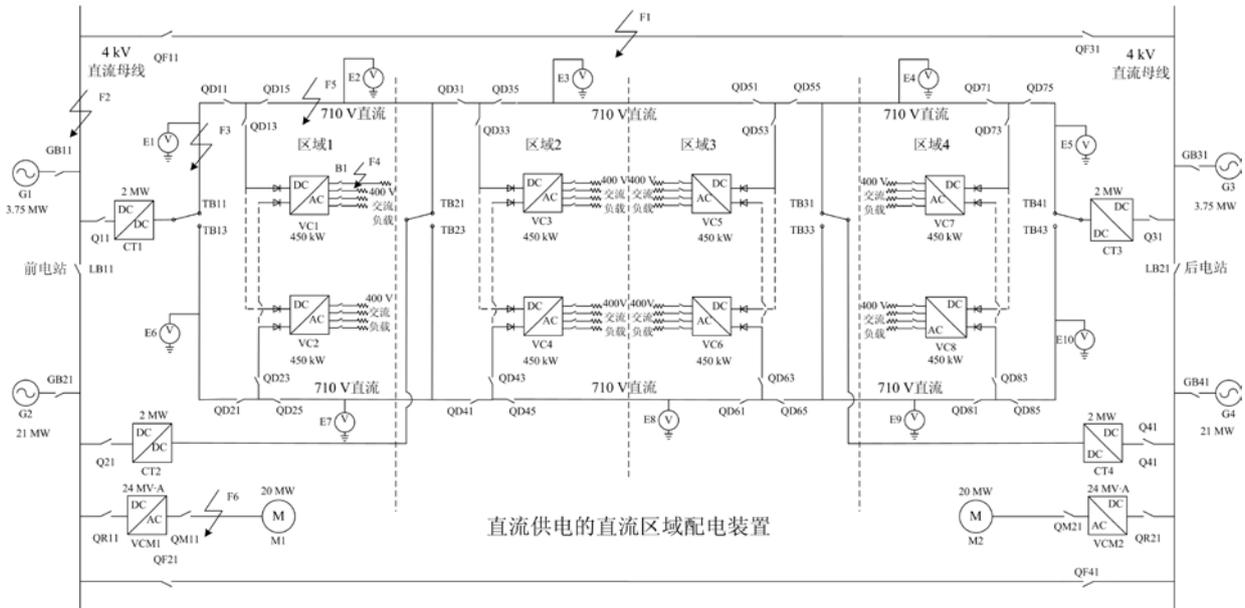


图 1 系统故障位置示意图

Fig. 1 Fault locations in the system

2 保护方法研究

2.1 故障特征信号处理

传统的舰船电力系统继电保护是将故障电流值作为判定依据, 并辅以时间延时来实现保护装置的开断。而电流是一种具有很大局限性的电气信号,

易受输电线路长短和支路多寡的影响,有可能造成母联端的后备保护误动^[24]。为了提高电气系统设备保护的选择性和可靠性,多种保护方式被引入。将电压降与电压微分作为动作判据的欠压微分保护可以作为直流电路的主保护,具有较高的灵敏性与可靠性^[25];根据采样频率对行波暂态量的影响,动态设置行波保护整定值,该方法作为直流输电线路的主保护,具有较好的选择性和灵敏性^[26]。这些方法在本质上是一样的,都是为了从电气系统中提取出具有明显差异且易得的故障特征,进而控制断路器的开断。扩展到智能控制领域可以归为模式识别或故障分类识别,因此智能继电保护的关键为选择合适的故障电气信号和有效的特征提取方法。

本文首先对舰船综合电力系统的易得电气信号进行数据建模与处理。分析常用的继电保护判据与信号处理方法,选择图1中各断路器处的电流信号、电压信号、电压微分信号等构造数据集 \mathbf{X} 。

$$\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_d\} \in \mathbf{R}^d \quad (1)$$

其中: d 代表采集各类信号的总数;样本 \mathbf{x}_i 又包含按时间排列的 s 时间段内采集的样本数据。

$$\mathbf{x}_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{is}\}^T \quad (2)$$

通过上述信号处理方式,可以提取出有利于保护系统识别的电气信号,方便智能继电保护系统对系统所处情况进行下一步辨识操作,以达到故障定位、通信对应断路器设备动作、保护非故障部分正常运行的目的。

2.2 基于迁移支持向量机的故障诊断

SVM是基于结构风险最小化原则,从众多的数据点中挑选出对优化计算过程帮助最大的较少数据点,以大大降低计算速度和数据需求量的有监督机器学习方法。对数据样本的需求较少,符合舰船电力系统中数据难以测得、数据量较少的情况。

本文所研究舰船综合电力系统的运行状态具有多种工况,各种工况不仅差异较大,且有标准工况与多个备用工况之分。仅用单一工况数据通过SVM建立诊断模型,显然是不合适的。如果使所有工况数据建模,又很难区分工况间的差异性,影响诊断正确率。因此,必须对各工况下的信息进行优先级的划分,从而确保所构建智能继电保护系统适用于所有舰船运行状况。TrSVM方法的提出,是为了解决原始数据不足,难以建立准确模型的问题。通过加入易得相似数据,辅助原数据训练,获得较为准确分类模型。

文章基于TrSVM思想,视舰船标准工况数据为原始数据 $T = \{(\mathbf{x}_i, y_i) | i = 1, 2, \dots, m\}$,备用工况数据

为辅助数据 $S = \{(\mathbf{x}_j, y_j) | j = m+1, m+2, \dots, m+n\}$,优先保证标准工况下故障的正确识别。其中, T 代表标准工况, S 为备用工况, m 和 n 为各自对应的样本数量, \mathbf{x}_k 为式(2)样本, y_k 代表该样本的故障类型或保护动作策略。同时,由于舰船多个备用工况之间也具有主次之分,则需要对 S 中不同工况样本数据设置权重系数 u_j 。其中 $0 < u_j < 1$, u_j 越大代表该样本所在工况为主备用, u_j 越小则为次备用。

综上,采用TrSVM方法,可以降低 S 中小 u_j 样本对模型的影响。根据所有工况数据所建舰船故障诊断模型,优先满足 T 中样本被正确辨识的实际需求。同时,保留 S 中样本被正确辨识的能力。下图为二维空间中,对 T 和 S 数据的线性分类问题,SVM与TrSVM方法的分类面建立情况对比。

图2中, L_1 为最终得到的分类线, L_2 、 L_3 分别为各类中经过距 L_1 最近数据样本,并平行于 L_1 的直线, \mathbf{w} 为 L_1 的法方向,有标注的数据点为 T 中数据。TrSVM方法通过对减少 S 中误分类数据的权重,使得分类面向增加 T 中正确分类的方向移动。

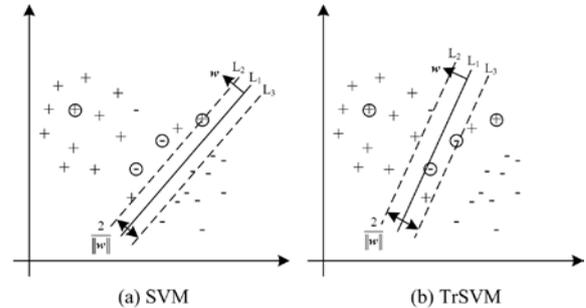


图2 二维空间二分类问题对比图

Fig. 2 Comparison of two-classification problem in two dimensional spaces

为了求解 L_1 ,根据线性判别式的一般形式 $f(\mathbf{x}) = \mathbf{w} \cdot \mathbf{x} + b$,对应的分类面表达式为

$$\mathbf{w} \cdot \mathbf{x} + b = 0 \quad (3)$$

将判别式进行归一化,保证所有样本都满足 $|f(\mathbf{x})| \geq 1$ 的同时,引入松弛因子 ε_k ,允许错分样本的存在,式(3)满足:

$$y_k [(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_k) + b] \geq 1 - \varepsilon_k \quad (4)$$

当 $0 < \varepsilon_k < 1$ 时, \mathbf{x}_k 被正确分类;当 $\varepsilon_k \geq 1$ 时, \mathbf{x}_k 被错分。为了得到最大分类间隔 $\frac{2}{\|\mathbf{w}\|}$,并对 S 中数据增加权重系数 u_j ,降低约束,允许错分情况的出现,得到在式(4)约束下的二次规划寻优问题。

$$\min \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^m \varepsilon_i + C \sum_{j=m+1}^{m+n} \mu_j \varepsilon_j$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} y_i ((\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i) + b) \geq 1 - \varepsilon_i, i = 1, \dots, m \\ y_j ((\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_j) + b) \geq -\varepsilon_j, j = m+1, \dots, m+n \\ \varepsilon_k \geq 0, k = 1, \dots, m+n \end{cases} \quad (5)$$

式中: $C \in R^+$, 作为惩罚因子; $u_j \in (0, 1)$, 用于设置对目标函数求解时的权重系数。同时, 在约束条件中, 降低了对 S 中数据的约束程度, 只要 S 中数据被正确分类即可, 不需要位于分类超平面间隔外部。为了求该最优化问题的解, 引入拉格朗日函数, 得到:

$$L(\mathbf{w}, b, \varepsilon, a, \beta) = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^m \varepsilon_i + C \sum_{j=m+1}^{m+n} \mu_j \varepsilon_j - \sum_{k=1}^{m+n} \beta_k \varepsilon_k - \sum_{i=1}^m a_i (y_i ((\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i) + b) - 1 + \varepsilon_i) - \sum_{j=m+1}^{m+n} a_j (y_j ((\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_j) + b) + \varepsilon_j) \quad (6)$$

将式(6)分别对 \mathbf{w} 、 b 、 ε_k 求偏导并置零可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \mathbf{w}} = 0 \rightarrow \mathbf{w} = \sum_{i=1}^{m+n} a_i y_i \mathbf{x}_i \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^{m+n} a_i y_i = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \varepsilon_i} = 0 \rightarrow a_i = C - \beta_i, i = 1, \dots, m \\ \frac{\partial L}{\partial \varepsilon_j} = 0 \rightarrow a_j = C \mu_j - \beta_j, j = m+1, \dots, m+n \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)所得偏导代入式(6), 并转换为原问题的对偶表达式:

$$\max \sum_{i=1}^m a_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{j=1}^{m+n} a_i \cdot a_j \cdot y_i \cdot y_j \langle \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j \rangle$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 0 \leq a_i \leq C, i = 1, \dots, m \\ \sum_{i=1}^{m+n} a_i y_i = 0 \\ 0 \leq a_j \leq C \mu_j, j = m+1, \dots, m+n \end{cases} \quad (8)$$

式(8)是为了简化求解而约去 β_k 后的表达式, 通过求解(8)的最优化问题得到 a_k 解后, 通过式(7)得到所建立的 TrSVM 决策函数。设 $\mathbf{a}^* = (a_1^*, a_2^*, \dots, a_{m+n}^*)^T$ 为式(8)的任一解, 则:

$$\mathbf{w}^* = \sum_{i=1}^{m+n} a_i^* y_i \mathbf{x}_i \quad (9)$$

$$b^* = y_j - \sum_{i=1}^{m+n} a_i^* y_i (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j) \quad (10)$$

将式(9)和式(10)代入线性判别式 $f(\mathbf{x}) = \mathbf{w} \cdot \mathbf{x} + b$, 可以得到决策函数的最终表达式。

$$y(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{m+n} a_i y_i (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}) + b \quad (11)$$

式(11)是标准的线性 TrSVM 分类情况, 但是考虑采集电气信号种类、采集位置较多的情况, 多种信号之间并不是简单的线性关系。在面对非线性问题时, 需要将原始问题推广为非线性规划问题。通过引入核函数 $k(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ 进行 ϕ 变换, 将原始数据集 \mathbf{X} 从空间 R^n 引入到 Hilbert 空间: $\mathbf{X} = \phi(\mathbf{x})$, 代替内积计算, 简化计算量^[27-28]。

通过选择常用的核函数, 如多项式核函数: $k(\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j) = [(\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j) + 1]^q$, 其中 q 为多项式的阶数; 径向基核函数: $k(\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j) = \exp[-\|\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j\|^2 / \sigma^2]$; 双层感知机核函数: $k(\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j) = \tanh[v \cdot (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j) + \gamma]$ 等, 就可以满足大多数非线性映射的需求。为了提高决策准确性, 使所提出的保护方法更加契合舰船电力系统的运行状态, 加入核函数增加决策函数的非线性映射能力, 将式(11)变为

$$y(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{m+n} a_i y_i k(\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}) + b \quad (12)$$

该模型可以通过监测电气信号对舰船综合电力系统的运行情况进行判定, 实现故障定位以及通信相应的断路器动作, 最终切除故障, 保护系统正常运行。智能继电保护方法流程图如图3所示。

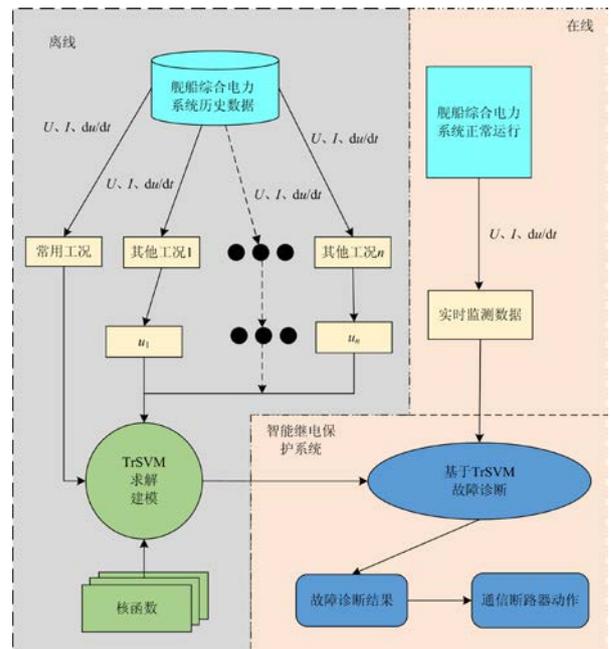


图3 基于 TrSVM 的智能继电保护方法流程图

Fig. 3 Flow chart of TrSVM based on intelligent relay protection method

3 方法验证

3.1 仿真建模

本文在 PSCAD/EMTDC 软件中搭建如图 1 的仿真模型, 其中, B_i 、 QD_i 、 TB_i 、 Q_i 为直流配电区开关, QF_i 、 LB_i 为母线开关, GB_i 、 QR_i 、 QM_i 为供电端及推进模块开关。F_i 为短路故障点位置, 对应的保护策略及其编码如表 1 所示。总仿真时长为 10 s, 故障时刻为第 5 s, 采样频率为 1 000 Hz。

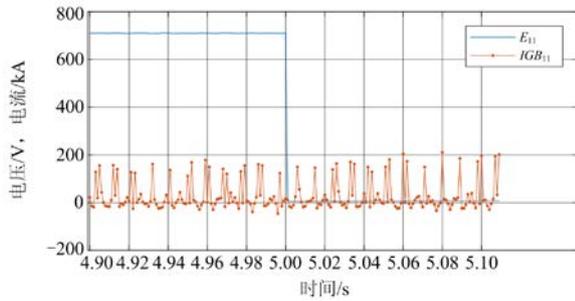
表 1 故障、保护策略编码

Table 1 Failure and protection strategy coding

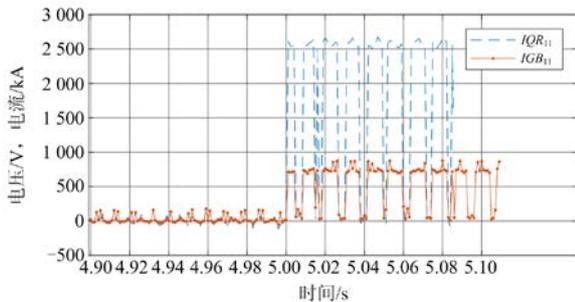
运行状态	故障类型	保护策略	动作情况
正常	—	0	—
F ₁	正负极短路	1	QF ₁ 、QF ₃ 断
F ₂	正负极短路	2	QF ₁ 、LB ₁ 、GB ₁ 断
F ₃	正负极短路	3	QD ₁ 断、TB ₁ 投切
F ₄	三相短路	4	B ₁ 断
F ₅	正负极短路	5	QD ₁ 、QD ₃ 断 TB ₁ 、TB ₂ 投切
F ₆	三相短路	6	QM ₁ 断

3.2 多种工况应用分析

发生 F₃ 或 F₆ 故障时 $I_{GB_{11}}$ 、 $I_{QR_{11}}$ 以及 QD_{15} 与 QD_{31} 间直流电压 E_1 在故障时刻附近时的原始电气信号如图 4 所示。



(a) F₃



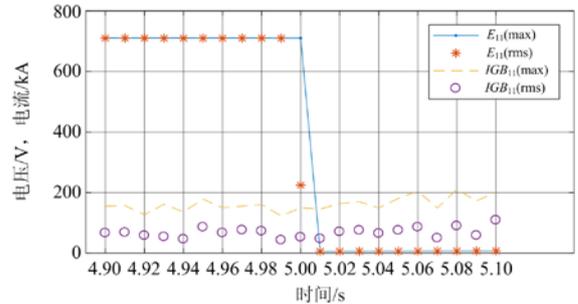
(b) F₅

图 4 全负荷运行故障时原始信号

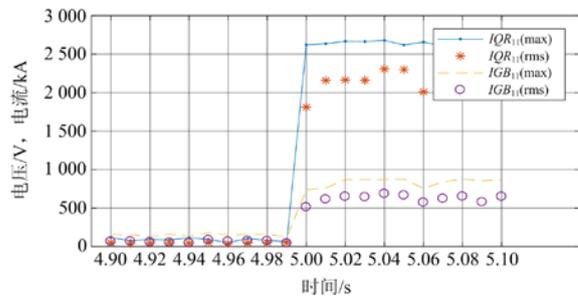
Fig. 4 Original signal at full load fault

由于直流供电系统中斩波电路的存在, 电路的关断、续流造成供电侧监测电流信号出现频繁的触零振荡。采用间隔采样的方式, 对每 0.01 s 所采集的 10 个样本点进行处理, 分析 4.9~5.1 s 时间段内的电气数据。比较时域内常用的 5 种统计数据, 均值(MV)、均方根值(RMS)、极大值(MAV)、峰峰值(PPV)、方差(VAR), 选择故障前后变化最明显的 MAV 和 RMS 作为最终电流时域特征。并加入电压的微分量, 构成包含各断路器处电流, E_1 — E_{10} , dE_1 — dE_{10} 的特征信号。舰船电力系统具有较强的对称性, 本文只采集分析舰船右舷或者左舷一侧的特征信号以简化工作量。

在全负荷运行条件下, 发生 F₃ 或 F₆ 故障时 I_{GB_1} 、 I_{QR_1} 以及 E_1 在故障时刻附近时的特征信号如图 5 所示。F₃ 故障对 GB_1 处电流影响小, I_{GB_1} 变化不明显, 而 E_1 迅速降低。F₆ 故障对 GB_1 和 QR_1 处电流都会造成影响, 但影响程度不同, I_{QR_1} 变化程度更高。



(a) F₃



(b) F₅

图 5 全负荷运行故障时时域特征信号

Fig. 5 Time domain characteristic signal at full load fault

根据前文所讨论的数据集 X 的建立方式, 为了对比所提出 TrSVM 方法的可行性, 将整个舰船综合电力系统划分为五种工作状态: all、one machine(om)、one generator(og)、no machine(nm)、only one generator(oog), 具体状态划分如表 2 所示。

表 2 工况划分

Table 2 Modes

工况代号	运行情况
all	4 台发动机运行并投入所有负载
om	all 情况下负载 M ₂ 断开
og	all 情况下发电机 G ₃ 断开
nm	all 情况下 G ₂ 、G ₄ 断开, M ₁ 、M ₂ 断开
oog	all 情况下 G ₂ 、G ₃ 、G ₄ 断开, M ₁ 、M ₂ 断开, 区域 2、3 不供电

其中, nm 工况下无 F₆故障, oog 工况下无 F₁、F₂、F₆故障, 这两种情况与其他三种的潮流分布有较大差异。

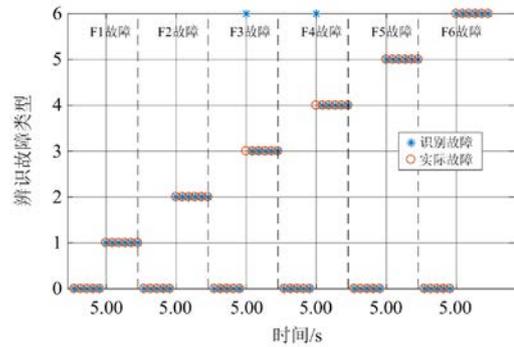
将 all、om、og 工况归为一类, nm 和 oog 工况归为一类, 设置三组对比试验, 使用标幺值数据进行训练建模, 选择线性核函数, 设置 C 为 20。分别采用 SVM、TrSVM 算法进行建模, 如表 3 所示。

表 3 不同模型对比

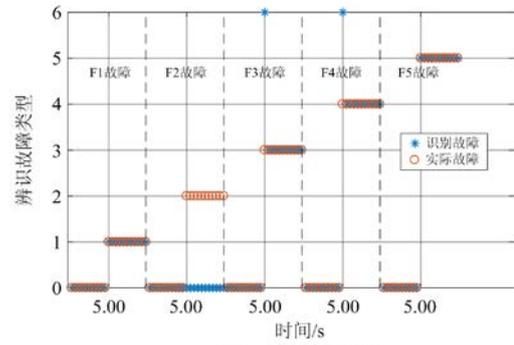
Table 3 Comparison of different models

模型名称	建模数据
Svm1	all 中正常运行状态和不同故障状态部分数据
Svm2	all 和 nm 中正常运行状态和不同故障状态部分数据
Trsvm1	在 Svm2 的数据集中, 设 all 为 T 域, nm 为 S 域, u 设置为 0.8 进行建模
Svm3	all、nm 和 oog 中正常运行和不同故障状态部分数据
Trsvm2	在 Svm3 的数据集中, 设 all 为 T 域, nm 和 oog 为 S 域, u ₁ 为 0.8, u ₂ 为 0.6

使用数据集 X 中剩余数据分别对上述模型进行测试。图 6 是 Svm1 模型对部分工况下的数据进行识别的结果图。



(a) all 中剩余数据



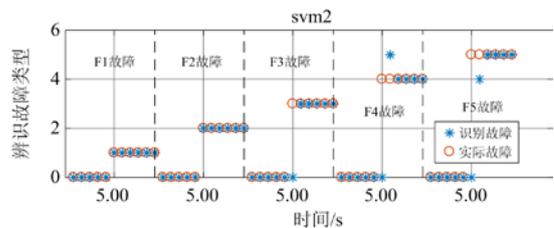
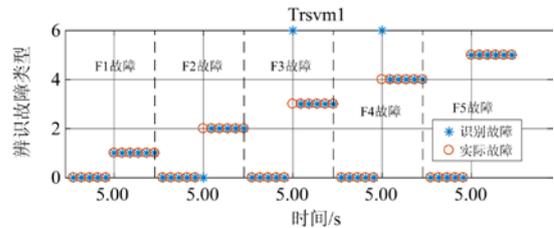
(b) nm 中所有数据

图 6 Svm1 模型识别数据结果

Fig. 6 Results of data identified by Svm1

总结: Svm1 只能满足与 all 相似工况下的故障识别, 尤其当工况间差异较大的情况, 会导致部分故障类型出现严重误判。

图 7 为使用 Trsvm1、Svm2 分别对 nm 中剩余数据和 oog 中所有数据进行识别的结果。



(a) nm 中剩余数据

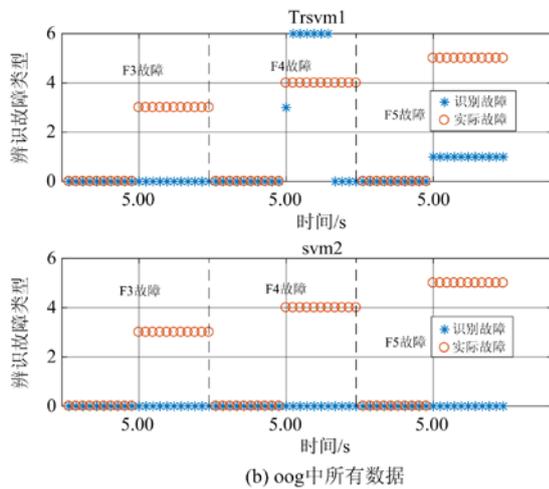


图 7 Trsvm1、Svm2 模型识别数据结果

Fig. 7 Results of data identified by Trsvm1 and Svm2

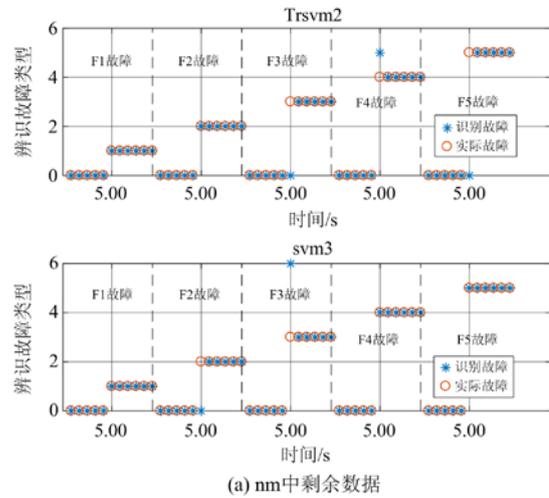
总结：加入 nm 中部分数据后，对 nm 的识别效果明显提升，但是 Svm2 在识别时对故障 F₁、F₃、F₄都出现了不同程度的辨识错误，且对辨识 F₂的提升不如 Trsvm1 明显。

图 8 为使用 Trsvm2、Svm3 分别对 nm、ogg 中剩余数据进行识别的结果。

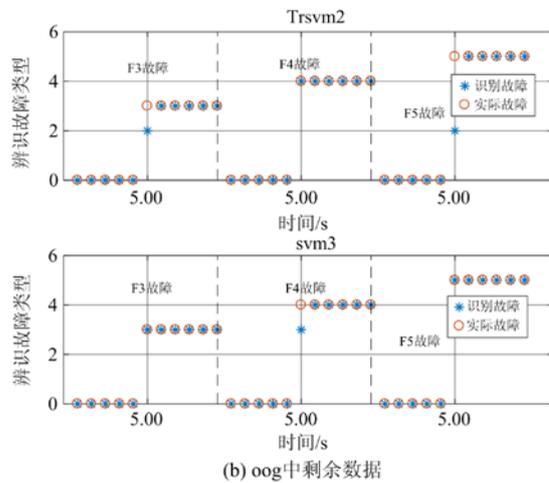
总结：在加入 oog 中部分数据后，对该工况下的辨识结果明显提升，同时由于训练数据集的增多，提升了对 nm 数据的辨识正确率。

表 4 为试验的总辨识结果，对比不同模型在不同工况下的辨识正确率，Trsvm2 在使用与 Svm3 同样训练集的情况下，对 oog 的辨识正确率要低于 Svm3，但保证了 all、om、nm 工况的辨识正确率没有降低，证明了所提方法的有效性。

需要指出的是，表 4 中的识别准确率并不等同于保护动作准确率。为了避免误动，保护动作应当设置时延。从图 8 可以看出，在 5 s 后的识别状态都是正常识别，可以延时响应保护策略动作，避免了误动情况的发生。因此，各故障点的两类故障完全可以被有效切断，满足继电保护的可靠性要求。



(a) nm 中剩余数据



(b) oog 中剩余数据

图 8 Trsvm2、Svm3 模型识别数据结果

Fig. 8 Results of data identified by Trsvm2 and Svm3

表 4 各模型故障识别准确率

Table 4 Accuracy of fault identification of models

模型名称	all/%	om/%	og/%	nm/%	ogg/%
Svm1	96.97	98.41	96.82	87.62	47.62
Svm2	92.42	96.82	95.24	90.91	47.62
Trsvm1	96.97	98.41	96.82	94.54	47.62
Svm3	90.91	94.44	95.24	96.36	96.94
Trsvm2	96.97	98.41	95.24	94.54	93.94

与现有的电压、电流组合保护方式相比，所提方法无需匹配各处保护整定与时延，具备较高的泛化性。同时，也避免了传统舰船电力系统一刀切式保护，造成大面积断电的情况。故而，基于 TrSVM 的舰船继电保护方法，可以在提高备用工况保护能力的同时，较好地保证标准工况保护能力。

为了验证 TrSVM 在故障切除后的辨识能力，设置 all 工况下第 5 s 发生 F₆故障，第 5.15 s 时对应断路器动作；设置 nm 工况下第 5 s 发生 F₁故障，

第 5.15 s 时对应断路器动作; 设置 oog 工况下第 5 s 发生 F₃故障, 第 5.15 s 时对应断路器动作。图 9 为使用模型 Trsvm2 对上述三种情况进行故障辨识的结果。

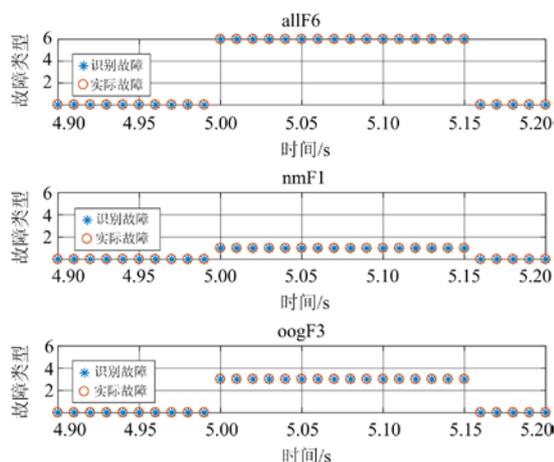


图 9 多工况故障切除后保护恢复能力

Fig. 9 Protection recovers capability after fault removal at different operating conditions

总结: 通过采用多数准则的判定方式, 能够有效地避免故障时刻的突变影响, 而且在断路器动作故障被切除后, 智能继电保护系统仍能正常工作。

4 结论

文章根据典型舰船综合电力系统模型, 分析了在多种运行状态出现常见故障的故障特性, 发现传统的继电保护方式不能够合理地切断故障, 会造成非故障区域大面积断电。智能继电保护方法中的 SVM 方法虽然适用于小样本的舰船综合电力系统, 但由于舰船综合电力系统存在多工况的特点, 会降低标准工况下的保护可靠性。TrSVM 可以使用多个工况下的数据进行融合建模, 更加符合不同工况数据差异较大的特点。文中方法按照工况使用多寡情况设置不同的权重参数以及分类约束, 使建立的模型受使用频率较低工况数据的影响较小, 保证标准工况的故障监测正确率。本文所提出的基于 TrSVM 的舰船智能继电保护方法, 能够很好地监测舰船在不同的运行状态下的各类故障, 保证非故障区域的正常供电。

参考文献

[1] 陈锋, 曹洪涛, 刘洋. 国外舰艇综合电力系统研究综述[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(9): 1-5.
CHEN Feng, CAO Hongtao, LIU Yang. Summary of overseas warship's integrated power system[J]. Ship

Science and Technology, 2017, 39(9): 1-5.
[2] 蒋燕君, 张彦魁, 许森. 考虑静态电压稳定的舰船电网多目标故障恢复决策[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 117-123.
JIANG Yanjun, ZHANG Yankui, XU Sen. Multiobjective service restoration decision of shipboard power networks considering static voltage stability[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 117-123.
[3] GUPTA A, DOOLLA S, CHATTERJEE K. Hybrid AC-DC microgrid: systematic evaluation of control strategies[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3830-3843.
[4] 张兰勇, 孟坤, 刘胜. 基于改进双粒子群算法的舰船电力系统网络故障重构[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 96-102.
ZHANG Lanyong, MENG Kun, LIU Sheng. Reconstruction of ship power system network fault based on improved two particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 96-102.
[5] MITRA P, VENAYAGAMOORTHY G K. An adaptive control strategy for DSTATCOM applications in an electric ship power system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(1): 95-104.
[6] 叶志浩, 肖晗, 王刚. 舰船电力系统短路保护性能量化评估方法[J]. 电机与控制学报, 2015, 134(12): 5-10.
YE Zhihao, XIAO Han, WANG Gang. Quantizing assessment of shipboard power system short circuit protection performance[J]. Electric Machines and Control, 2015, 134(12): 5-10.
[7] HEBNER R E, URIARTE F M, KWASISSKI A, et al. Technical cross-fertilization between terrestrial micro grids and ship power systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(2): 161-179.
[8] 肖繁, 张哲, 赖清华. 双馈型电源短路电流统一解析方法及特性分析研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(14): 3319-3331.
XIAO Fan, ZHANG Zhe, LAI Qinghua. Study on unified analysis method and characteristics in fault currents of doubly-fed induction generators[J]. Transactions of China Electro technical Society, 2018, 33(14): 3319-3331.
[9] LACHUGIN V F, PLATONOV P S. Using traveling-wave processes in the development of relay protection for overhead lines (OHL)[J]. Power Technology and Engineering, 2017, 50(5): 549-555.

- [10] SHEN S, WANG H, JIANG K. Regional area protection scheme for modern distribution system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5416-5426.
- [11] 梅丹, 王公宝, 叶志浩. 基于变阶遗传算法的舰船电力系统结构性能双层优化[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5763-5771.
- MEI Dan, WANG Gongbao, YE Zhihao. Two-layer optimization method of vessel power system structure performance based on variable-order genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5763-5771.
- [12] 毕大强, 张芳, 曾祥君. 船舶直流区域配电网的故障恢复研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 60-65.
- BI Daqiang, ZHANG Fang, ZENG Xiangjun. Research on fault restoration of shipboard DC zone distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 60-65.
- [13] 马媛媛, 田新英. 基于 PSCAD/EMTDC 的舰船电力系统智能保护仿真研究[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(14): 80-82.
- MA Yuanyuan, TIAN Xinying. Simulation research on intelligent protection of ship power system based on PSCAD/EMTDC[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(14): 80-82.
- [14] 吴建章, 沙浩源, 张宸宇. 基于 PSO-SVM 的直流配电网电能质量扰动辨识[J]. 电力工程技术, 2019, 38(4): 18-25.
- WU Jianzhang, SHA Haoyuan, ZHANG Chenyu. Identification of power quality disturbance in DC distribution network based on PSO-SVM[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(4): 18-25.
- [15] 张波, 肖坚红, 梁晓伟. SVM 在中压配网停电事件补全中的应用研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(3): 34-40.
- ZHANG Bo, XIAO Jianhong, LIANG Xiaowei. Power outage event completion method based on SVM for MV distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(3): 34-40.
- [16] PAUL S, MAGDON-ISMAIL M, DRINEAS P. Feature selection for linear SVM with provable guarantees[J]. Pattern Recognition, 2016, 60(8): 205-214.
- [17] WANG T, QI J, XU H. Fault diagnosis method based on FFT-RPCA-SVM for cascaded-multilevel inverter[J]. Isa Transactions, 2016, 60(2): 156-163.
- [18] LI Y, ZHANG W, QING X. A rolling bearing fault diagnosis strategy based on improved multistage permutation entropy and least squares SVM[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(6): 2711-2722.
- [19] 肖晗, 叶志浩, 马凡. 舰船直流区域配电系统安全运行边界计算与分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 202-208.
- XIAO Han, YE Zhihao, MA Fan. Calculation and analysis of the safe operation boundary of shipboard DC zonal electric distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 202-208.
- [20] 肖晗, 叶志浩, 纪锋. 考虑电动机启动的舰船直流区域配电系统最大供电能力计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5228-5237.
- XIAO Han, YE Zhihao, JI Feng. Analysis and calculation of total supply capability of vessel DC zonal electric distribution system during motor start-up[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5228-5237.
- [21] 肖晗, 叶志浩, 纪锋. 考虑电动机启动的舰船直流区域配电系统预防控制方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 413-422.
- XIAO Han, YE Zhihao, JI Feng. Preventive control method of vessel DC zonal electric distribution system during motor start-up[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 413-422.
- [22] 马春英, 李学武. 一种高效率混合型全桥 DC/DC 转换器的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 143-151.
- MA Chunying, LI Xuewu. Design of a high efficiency hybrid full bridge DC/DC converter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 143-151.
- [23] 乔文转, 张少如, 张蒙蒙. 一种非对称交错并联高增益 DC-DC 变换器[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 151-158.

- QIAO Wenzhuan, ZHANG Shaoru, ZHANG Mengmeng. An asymmetric cross-parallel high step-up DC-DC converter[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 151-158.
- [24] FAN W, LIAO Y. Wide area measurements based fault detection and location method for transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 53-64. DOI: 10.1186/s41601-019-0121-9.
- [25] 周全, 武霁阳, 李海锋. 高压直流线路区内外故障判别新方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(12): 132-139. ZHOU Quan, WU Jiyang, LI Haifeng. In-/out-zone fault identification for HVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 132-139.
- [26] 舒兵成, 李海锋, 武霁阳. 采样频率对直流线路行波保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 91-95. SHU Bingcheng, LI Haifeng, WU Jiyang. Influence of sampling frequency on traveling wave protection of DC line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 91-95.
- [27] LI S, FANG H, LIU X. Parameter optimization of support vector regression based on sine cosine algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2017, 91(1): 63-77.
- [28] SUN S, FU J, ZHU F. A compound structure for wind speed forecasting using MKLSSVM with feature selection and parameter optimization[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 20(18): 1-21.

收稿日期: 2020-01-03; 修回日期: 2020-03-16

作者简介:

杨天琦(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为机电设备故障诊断; E-mail: 598629241@qq.com

王琦(1982—), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电网智能保护理论、储能系统建模; E-mail: wangqi0403043@wust.edu.cn

叶志浩(1975—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与安全运行。E-mail: yxyx928@126.com

(编辑 葛艳娜)