



基于数字孪生的在运安控系统故障诊断方法

韩伟¹, 段文岩¹, 杜兴伟², 姚峰², 马伟东¹, 刘磊¹

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052; 2. 国网河南省电力公司
电力调度控制中心, 河南 郑州 450018)

摘要: 数字孪生技术旨在打破虚实界墙, 通过虚-实信息链接实现物理实体与虚拟空间的有机融合, 模拟出物理实体的实时状态。安全稳定控制系统(简称安控系统)作为保证电网安全稳定运行的第二道防线, 一旦发生故障将会给电网的运行造成严重危害。为此, 提出一种基于数字孪生的在运安控系统故障诊断方法。首先, 通过分析安控系统的一般运行策略和可能存在的故障环节, 提出安控系统的数字孪生体系; 其次, 建立基于海洋捕食者算法优化支持向量机的安控系统故障诊断模型; 最后, 利用安控系统的运行数据构建样本数据集, 验证了所提方法的有效性和正确性。

关键词: 安控系统; 数字孪生; 故障诊断; 支持向量机; 海洋捕食者算法

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202306047

0 引言

电力系统安全稳定控制系统(简称安控系统)承担第二道防线职责, 是保证电力系统安全稳定运行的重要设施^[1-2]。安控系统的运行环境复杂、元件类型多样, 极易发生各种类型的故障, 因此须准确判断故障原因, 及时采取检修措施排除故障, 从而保障电网安全。

目前安控系统故障诊断主要依靠人工分析通信报文进行判别, 其缺点是难以处理海量数据且缺乏有效方法分析故障特征, 从而无法实现高效、准确的故障诊断。文献[3]梳理了安控系统各环节可能存在的故障, 但未涉及故障诊断方法。文献[4]从保障稳控系统整体可靠性的角度出发, 归纳了可靠性的主要影响因素, 分析了各个主要环节的可靠性研究方向、研究方法和可靠性提升手段, 初步形成了大型稳控系统可靠性研究的总体框架, 为系统保护可靠性研究与实施提供了基础, 但并未给出相应可靠性指标。文献[5]提出多台测试仪在联网对时后, 利用录波回放技术实现安控系统的整体测试, 但受限于网络条件

未能收集安控装置的运行和动作信息, 无法实现安控系统的故障诊断。因此, 上述研究仅停留在安控系统的故障现象分析层面, 尚未提出有效的故障诊断方法。

数字孪生打破虚实界墙, 实现物理实体与虚拟空间的有机融合, 通过虚-实信息链接完成物理实体与虚拟空间的共同成长、进化和演变^[6-10], 为应对安控系统的故障诊断提供了关键技术手段支撑。文献[11]探究了电力数字孪生系统的实现框架及关键技术。文献[12]基于数字孪生体系, 提出了一种配电自动化终端设备的实时综合评价及故障预判方法。文献[13]将数字孪生技术应用于光伏发电功率超短期预测, 利用数字孪生体模型实现了高精度的实时功率预测。文献[14]基于数字孪生构建出适用于柔性直流电网的纵联保护, 具有较好的抗干扰性能。文献[15]利用变压器的电热特性构建出数字空间模型, 用于辨识变压器的匝间故障。文献[16]借鉴数字孪生的思想, 通过综合多尺度运行信息构建安控虚拟运行模型, 实现安控系统信息的校核及预警, 但并未研究安控系统的故障诊断技术。

基于此, 本文提出基于数字孪生的在运安控系统故障诊断方法。首先, 分析了安控系统的一般运行策略和故障类型; 随后, 提出了安控系统的数字孪生体系, 进而建立基于海洋捕食者算法

收稿日期: 2023-06-14; **修回日期:** 2023-10-12。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5100-202240012A-1-1-ZN)。

优化支持向量机 (marine predators algorithm- support vector machine, MPA-SVM) 的安控系统故障诊断模型; 最后, 通过提取安控系统的运行数据形成故障样本集, 验证了所提方法的有效性。

1 安控系统一般策略及典型故障

1.1 基于搜索策略表的安控系统

安控系统是由多个厂站的安全稳定装置基于通信网络组成的系统, 用以实现区域电力系统的稳定控制。根据安全稳定装置在系统中的作用, 形成典型结构为安控主站-子站-执行站的层级架构, 实现运行方式识别、故障类型判别、控制措施抉择、控制措施执行及数据通信等功能^[17-18]。其中, 做出安控策略是安控系统的重点。传统安控策略是基于区域电网的运行方式, 分析可能的故障特点, 形成多种安控决策表。发生新的故障后, 系统根据采集信息采用查表方式快速作出安控决策^[19]。基于策略表的安控系统如图 1 所示。

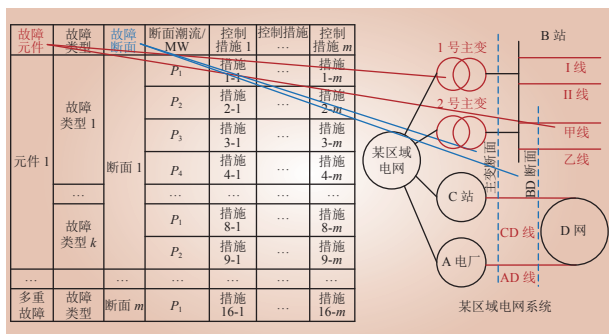


图 1 基于策略表的安控系统

Fig. 1 Security control system based on strategy table

1.2 安控系统典型故障

根据实际电网中的事故经验, 安控系统的故障可能发生在策略、通信、测量和定值 4 个环节^[20-21]。策略环节存在控制策略与实际运行方式不匹配的问题, 使得安控系统可能发生误动或拒动; 通信环节存在通道电缆接头松动、光纤通道故障、高频通道衰耗增大引起的通信异常问题, 将影响安控系统的信号传输, 严重时可能错过策略的最佳执行时间; 测量环节存在处理单元模块出错的问题, 可能造成故障误判导致安控装置误动; 定值环节存在定值越限、隔离开关逻辑节点和断路器逻辑节点判断错误等问题, 不合理的定值将直接造成安控系统误动。

2 基于数字孪生的安控系统体系及工作原理

2.1 安控系统的数字孪生体系结构

安全稳定控制系统数字孪生体系结构如图 2 所示。本文提出的安控系统数字孪生体系由物理实体、虚拟模型、虚拟控制执行与目标模型构建 4 部分组成。

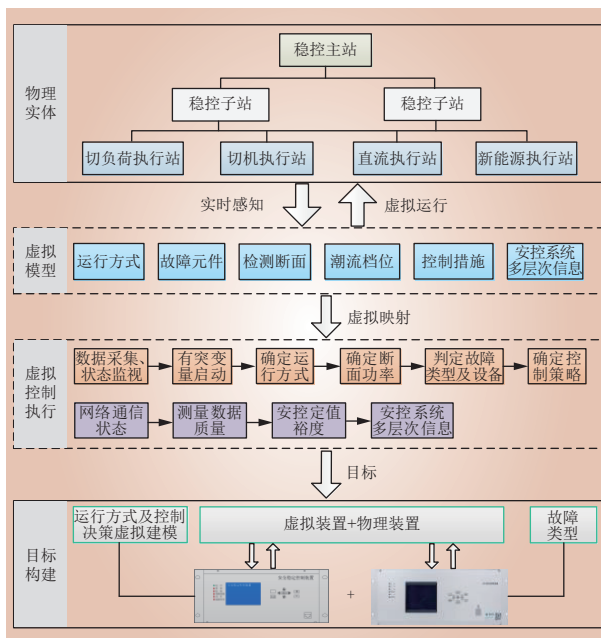


图 2 安控系统数字孪生体系

Fig. 2 The digital twin system of security control system

1) 物理实体。物理实体涵盖了安控系统的主要设备, 作为数字孪生体的信息源, 向其传递当前安控系统运行数据。物理实体具有设备繁杂、信息多维以及数据海量的特征, 在向虚拟模型传递信息的同时也可以接收数字孪生体反馈的虚拟运行结果。

2) 虚拟模型。虚拟模型由感知到的物理实体实时数据建模构成。在数字孪生体中构建一个与物理实体相同的虚拟模型, 包含运行方式感知、故障元件与故障类型, 检测故障断面、断面潮流与控制措施等安控模型相关功能, 并虚拟映射至虚拟控制执行模型。

3) 虚拟控制执行模型。虚拟控制执行模型为虚拟模型的功能映射, 能够模拟虚拟模型从物理实体实时感知的安控系统功能, 确定数字孪生体中的安控策略, 完成运行方式及控制决策的虚拟



建模。同时，通过采集安控系统通信状态、测量数据质量及定制裕度，构建安控系统多层次信息。

4) 目标模型构建。目标模型即为物理装置与虚拟装置的信息交互模型，通过运行方式与控制决策的虚拟建模，能够对安控系统进行校核。利用控制策略与安控系统多层次信息，实现对安控系统的故障诊断。

2.2 故障诊断工作原理

基于数字孪生的安控系统故障诊断工作原理如图 3 所示。其工作原理如下：利用通信技术对安控系统的实时数据进行采集，结合安控数据和安控策略库搜索出相应的控制措施。将处理后的系统数据与控制措施作为海洋捕食者算法优化支持向量机 (MPA-SVM) 故障诊断模型的输入量进行测试，得到 MPA-SVM 故障诊断的预判结果；同时将诊断结果反馈至历史数据库中，利用更新后的历史数据对故障诊断模型进行训练。最后，根据数字孪生体的输出结果生成控制指令，对安控系统进行提前检修，保证安控系统的正常运行。

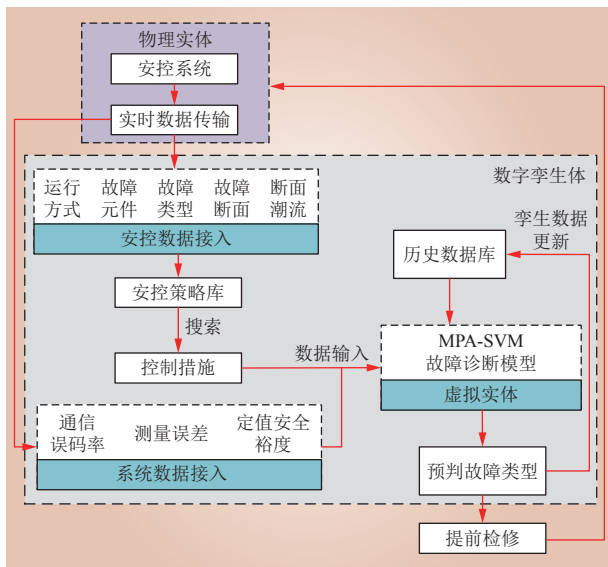


图 3 安控系统故障诊断的工作原理
Fig. 3 Working principle of fault diagnosis in safety control system

3 基于 MPA-SVM 的安控系统故障诊断模型

海洋捕食者优化算法 (MPA) 是基于适者生存理论提出的优化算法 [22]，捕食者根据猎物的位

置信息搜索猎物，其中顶级捕食者具有更高的觅食天赋。捕食者的捕食过程可分为 3 个阶段，而各阶段控制方程随捕食者和猎物之间的相对速度变化而改变，具体可以参考文献 [23]。

支持向量机 (SVM) 的基本思想是将输入的样本特征映射到高维特征空间中，通过在此高维特征空间中找出满足分类要求的最优分类超平面 [24-25]。由于 SVM 的分类性能与参数的确定密切相关，故本文利用 MPA 算法强大智能的搜索特性在一定搜索范围内进行寻优，再根据最优参数组合构建 SVM 模型，具体过程如下。

- 1) 初始化 SVM 模型和 MPA 算法的参数后，设置 MPA 算法的最大迭代次数 M 、种群规模 n 、效应系数、常量等。
- 2) 初始化猎物的位置，令当前迭代次数 $I_{\text{iter}}=0$ ，并构建精英矩阵。
- 3) 以捕食者和猎物的位置作为算法的寻优参数，并定义适应度函数 f 为 K 折交叉验证的平均分类准确率，即

$$f = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \left(\frac{T_i}{N_i} \times 100\% \right) \quad (1)$$

式中： N_i 、 T_i 分别为第 i 个验证集中的样本个数和被正确分类的样本个数； K 为迭代次数。

- 4) 以适应度函数的最大值作为目标函数，以位置参数的取值范围作为约束条件，对目标函数进行求解。

- 5) 利用 MPA 算法的迭代机制不断更新捕食者和猎物的位置，直至满足适应度的要求，从而得到目标函数的最优解，并将其作为 SVM 模型的最优参数输入。

故障特征量的选取要能够反映安控系统的运行状况，并在安控系统中被实时采集。由安控系统典型故障分析可知，故障类型可分为控制策略不匹配、通信异常、采样异常和定值越限 4 种。根据工程经验，本文采用逻辑值 y 来表征控制策略与电网实际运行方式是否匹配的特征量，当 $y=0$ 时，表示控制策略匹配，反之，则不匹配。

采用通信误码率 W 作为通信是否异常的特征量。通信正常时误码率应小于 10^{-8} ，否则将会造成通信环节故障。

采用各相模拟数据的方差 S 作为采样数据是

否异常的特征量。测量回路存在故障时，安控装置的测量数据将会出现异常，所对应的方差 S 明显偏大。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (2)$$

式中： x_i 为第 i 个采样数据； \bar{x} 为采样均值； N 为方差计算点数。

选取当前运行的整定值与预先设定的基准值进行比对，将安全裕度 Z 作为定值是否越限的特征量，其可表示为当前定值与预设基准值之比。

本文将控制策略是将 y 、 W 、 S 、 Z 作为诊断模型的故障特征量，由此构建的故障样本集可以充分表征安控系统中各类故障的特征信息，有利于提高 MPA-SVM 故障诊断模型的分类精度。基于 MPA-SVM 的安控系统故障诊断模型如图 4 所示。

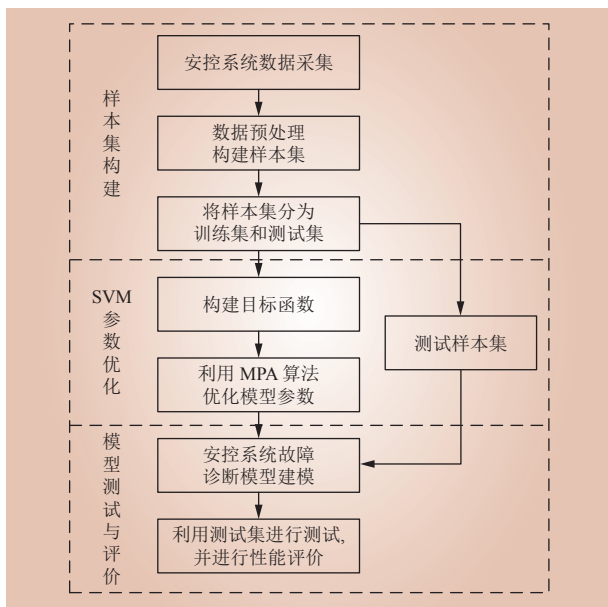


图 4 基于 MPA-SVM 的安控系统故障诊断模型
Fig. 4 Fault diagnosis model of safety control system based on MPA-SVM

4 算例分析

本文将安控系统实际运行的监测数据进行提取，经过预处理后构建故障样本集，并根据实际运行经验、历史数据库及运行标准对各个样本进行故障类型的对应。本文模型将安控系统的故障类型分为正常（无故障）、控制策略不匹配、通信异常、采样异常和定值越限 5 类，类别标签分

别使用 1、2、3、4、5 表示。将故障样本集按照比例 3 : 1，随机分为训练集和测试集，类别标签以及训练样本、测试样本的分布如表 1 所示。

表 1 训练及测试样本分布
Table 1 Distribution of training and test samples

故障类型	类型标签	训练样本数	测试样本数
正常	1	32	10
控制策略不匹配	2	46	15
通信异常	3	36	10
采样异常	4	33	10
定值越限	5	36	12

本文根据安控系统历史统计数据，共提取得到 240 个样本，部分典型的故障样本及类别标签如表 2 所示。由表 2 可知，当安控系统发生故障时，部分特征量与正常状态下的特征量将存在明显的偏差，反映了所选取的故障特征量的有效性。

表 2 样本数据
Table 2 Sample data

样本号	逻辑值	误码率/ 10^{-8}	方差/%	安全裕度	故障类型
1	0	0.173	3.23	1.012	1
2	0	0.325	1.52	1.006	1
3	1	0.216	2.18	0.992	2
4	1	0.154	1.75	1.027	2
5	0	1.523	2.61	1.135	3
6	0	0.245	6.94	1.037	4
7	0	0.312	3.17	1.722	5

基于 MPA-SVM 的安控系统故障诊断模型的各个参数设置如下：种群规模 $n=100$ ，最大迭代次数 $M=100$ ，交叉验证数 $K=5$ ，效应系数为 0.2，常量 $P=0.5$ 。采用 Matlab 软件对模型进行运算，SVM 参数优化的运算结果如图 5 所示。

由图 5 可知，本文所使用的 MPA 优化算法在进化至第 5 代时，最优个体参数的适应度就达到了 96%，其对应的最优参数组合 C 和 g 分别为：2.7136 和 1.2472。因此，MPA 算法对 SVM 模型参数的寻优速度快、性能突出。

基于 MPA-SVM 的测试样本诊断结果如图 6 所示。测试集样本有 57 个测试集，诊断正确的结果有 56 个样本，总体正确率可达 98.24%，达到了较好的分类效果。诊断结果中出现 1 例将定值越限

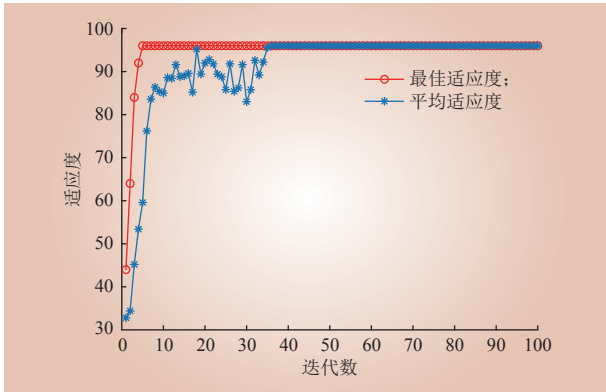


图 5 MPA 优化 SVM 参数的适应度曲线

Fig. 5 The fitness curve for MPA optimizing SVM parameters

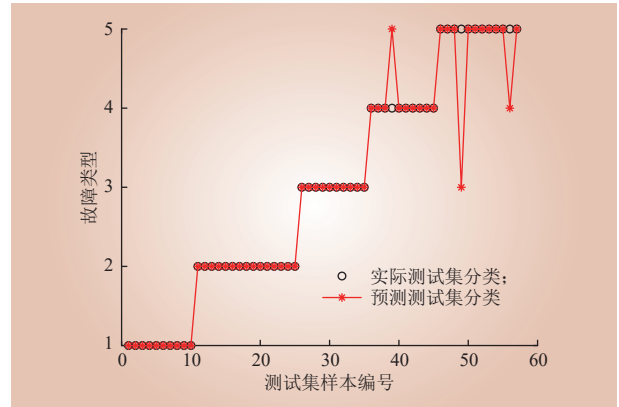


图 7 PSO-SVM 测试样本诊断结果

Fig. 7 Diagnostic results of PSO-SVM test samples

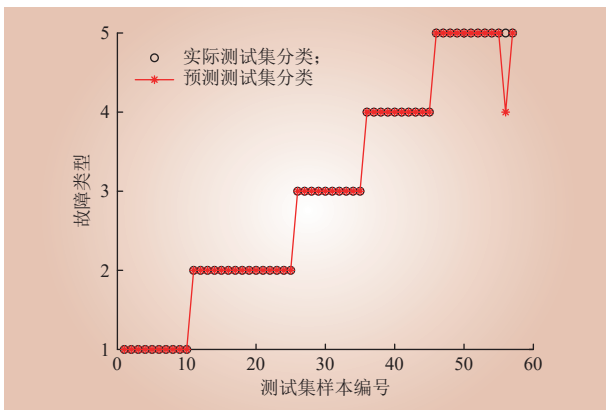


图 6 MPA-SVM 测试样本诊断结果

Fig. 6 Diagnostic results of MPA-SVM test samples

表 3 不同模型的分类准确率

Table 3 Classification accuracy of different models

故障诊断模型	准确率/%					综合
	类型1	类型2	类型3	类型4	类型5	
PSO-SVM	100	100	100	90	88.33	94.74
ABC-SVM	100	100	100	90	75.00	92.98
SSA-SVM	100	100	100	100	88.33	96.49
MPA-SVM	100	100	100	100	91.67	98.24

SVM、ABC-SVM 和 SSA-SVM 模型的分类准确率分别为 94.74%、92.98% 和 96.49%，而采用 MPA-SVM 模型的准确率达到 98.24%，与另外 3 种模型相比，准确率分别提高了 3.5%、5.26% 和 1.75%。因此，基于 MPA-SVM 的故障诊断模型的正确率更高，验证了本文提出的优化模型对于安控系统故障诊断的有效性。

5 结论

为更好地完成安控系统故障诊断，本文提出了基于数字孪生的在运安控系统故障诊断方法，其主要结论如下。

1) 本文利用数字孪生的交互模拟功能，将安控系统、孪生数据与诊断模型连接成一个整体，随着孪生数据的不断更新，故障诊断模型的训练效果将进一步提高，对故障类型的判断更加准确。

2) 相比于其他算法优化的支持向量机，MPA-SVM 模型的诊断性能更突出，其准确率达到 98.24%，表明本文方法能够高精度地诊断安控系统中存在的故障，大幅提高了运维检修的工作效率，具有一定的工程实践意义。

误诊为采样异常，其原因是样本中的测量数据方差和定值安全裕度与正常相比偏差过小。同时，诊断模型对控制策略不匹配、通信异常以及采样异常的判别效果更好，诊断正确率均达到了 100%。

为了验证基于 MPA-SVM 的安控系统故障诊断模型的优越性，采用基于粒子群算法优化支持向量机 (PSO-SVM) 的模型进行对比验证。数据选取文中相同的数据集，基于 PSO-SVM 模型的运行效果，如图 7 所示。其故障诊断正确率为 94.74%。

为了验证基于 MPA-SVM 的安控系统故障诊断模型的准确性，本文对相同的样本数据集又分别利用人工蜂群算法优化支持向量机 (ABC-SVM) 和麻雀搜索算法优化支持向量机 (SSA-SVM) 模型进行准确率的对比验证，各模型的综合准确率如表 3 所示。由表 3 可知，相对于其余 3 种算法，MPA-SVM 的诊断准确率明显提升，尤其体现在定值越限的故障类型诊断。其中，PSO-

参考文献:

- [1] 赖业宁, 封科, 于同伟, 等. 基于 DHT 和区块链技术的电网安全稳定控制终端分布式认证 [J]. 中国电力, 2022, 55(4): 44–53.
LAI Yening, FENG Ke, YU Tongwei, *et al.* Distributed authentication of power grid safety and stability control terminals based on DHT and blockchain[J]. *Electric Power*, 2022, 55(4): 44–53.
- [2] 朱涛, 谢一工, 钟少军, 等. 模糊层次分析法在电网操作方案选择过程中的应用 [J]. 中国电力, 2022, 55(8): 121–128.
ZHU Tao, XIE Yigong, ZHONG Shaojun, *et al.* Application of fuzzy analytic hierarchy process in selection of power grid operation schemes[J]. *Electric Power*, 2022, 55(8): 121–128.
- [3] 赵丽莉, 李雪明, 倪明, 等. 继电保护与安全稳定控制系统隐性故障研究综述及展望 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(22): 128–135.
ZHAO Lili, LI Xueming, NI Ming, *et al.* Review and prospect of research on hidden failures of protection system and security and stability control system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(22): 128–135.
- [4] 罗剑波, 董希建, 崔晓丹, 等. 关于大型安全稳定控制系统可靠性研究的探讨 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 65–72.
LUO Jianbo, DONG Xijian, CUI Xiaodan, *et al.* Discussion on reliability of large scale security and stability control system[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(8): 65–72.
- [5] 李兴建, 夏彦辉, 陈松林, 等. 分布式稳定控制仿真测试系统的研制及应用 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 163–168.
LI Xingjian, XIA Yanhui, CHEN Songlin, *et al.* Development and application of distributed simulation & test system for stability control system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(5): 163–168.
- [6] ZHOU M K, YAN J F, FENG D H. Digital twin framework and its application to power grid online analysis[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2019, 5(3): 391–398.
- [7] SONG X Y, JIANG T, SCHLEGEL S, *et al.* Parameter tuning for dynamic digital twins in inverter-dominated distribution grid[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2020, 14(5): 811–821.
- [8] TAO F, ZHANG H, LIU A, *et al.* Digital twin in industry: state-of-the-art[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(4): 2405–2415.
- [9] JAIN P, POON J, SINGH J P, *et al.* A digital twin approach for fault diagnosis in distributed photovoltaic systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(1): 940–956.
- [10] QI Q L, TAO F. Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 3585–3593.
- [11] 贺兴, 艾芊, 朱天怡, 等. 数字孪生在电力系统应用中的机遇和挑战 [J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2009–2019.
HE Xing, AI Qian, ZHU Tianyi, *et al.* Opportunities and challenges of the digital twin in power system applications[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(6): 2009–2019.
- [12] 刘皓璐, 邵建伟, 王雪, 等. 基于数字孪生的配电自动化终端设备状态评价与故障预判 [J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1605–1613.
LIU Haolu, SHAO Jianwei, WANG Xue, *et al.* State evaluation and fault prediction of distribution automation terminal equipment based on digital twins[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(4): 1605–1613.
- [13] 孙荣富, 王隆扬, 王玉林, 等. 基于数字孪生的光伏发电功率超短期预测 [J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1258–1264.
SUN Rongfu, WANG Longyang, WANG Yulin, *et al.* Ultra-short-term prediction of photovoltaic power generation based on digital twins[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(4): 1258–1264.
- [14] 李猛, 聂铭, 和敬涵, 等. 基于数字孪生的柔性直流电网纵联保护原理 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1773–1782.
LI Meng, NIE Ming, HE Jinghan, *et al.* Pilot protection of flexible DC grid based on digital twin[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(5): 1773–1782.
- [15] 张立静, 盛戈崑, 侯慧娟, 等. 基于电热特性融合分析的油浸式变压器匝间短路故障辨识方法 [J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2473–2482.
ZHANG Lijing, SHENG Gehao, HOU Huijuan, *et al.* Detection method of interturn short-circuit faults in oil-immersed transformers based on fusion analysis of electrothermal characteristic[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(7): 2473–2482.
- [16] 周毅, 周良才, 沈颖平. 基于数字孪生的华东电网安控系统虚拟建模及实现 [J]. 电器与能效管理技术, 2021(6): 47–51.
ZHOU Yi, ZHOU Liangcai, SHEN Yingping. Modeling and implementation of East China power grid security and stability control system based on digital twin[J]. *Low Voltage Apparatus*, 2021(6): 47–51.
- [17] 刘一民, 颜云松, 许高阳, 等. 基于 UML 活动图的安全稳定控制装置策略代码自动实现方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 154–161.
LIU Yimin, YAN Yunsong, XU Gaoyang, *et al.* A method of automatic realization of security and stability control strategy code



- based on a UML activity diagram[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(5): 154–161.
- [18] 贺晓, 李怀强, 任龙飞, 等. 稳控切机回路存在的问题及优化措施研究 [J]. *智慧电力*, 2022, 50(9): 104–109.
HE Xiao, LI Huaqiang, REN Longfei, *et al.* Study on the problems existing in the circuit of stable controlled cutting machine and its optimization measures[J]. *Smart Power*, 2022, 50(9): 104–109.
- [19] 王子凌, 周金辉, 苏毅方, 等. 电网设备试验数据数模统一化自动采集校验系统设计 [J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(11): 130–138.
WANG Ziling, ZHOU Jinhui, SU Yifang, *et al.* Design of an automatic collection and verification system for digital and analog unified test data of power grid equipment[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(11): 130–138.
- [20] 蒋航, 熊俊, 陈愚, 等. 基于 Markov 状态空间法的稳控系统隐性故障建模方法 [J]. *电工电能新技术*, 2023, 42(2): 39–47.
JIANG Hang, XIONG Jun, CHEN Yu, *et al.* Modeling method for hidden faults of stability control system based on Markov state space method[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2023, 42(2): 39–47.
- [21] 郭琦, 朱益华, 常东旭, 等. 电网安全稳定控制系统远程试验方法及工程应用 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(1): 152–159.
GUO Qi, ZHU Yihua, CHANG Dongxu, *et al.* Remote test method for security and stability control system of power grid and its engineering application[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(1): 152–159.
- [22] FARAMARZI A, HEIDARINEJAD M, MIRJALILI S, *et al.* Marine predators algorithm: a nature-inspired metaheuristic[J]. *Expert Systems With Applications*, 2020, 152: 113377.
- [23] CHEN X, QI X L, WANG Z Y, *et al.* Fault diagnosis of rolling bearing using marine predators algorithm-based support vector machine and topology learning and out-of-sample embedding[J]. *Measurement*, 2021, 176: 109116–109133.
- [24] TUERXUN W, XU C, GUO H Y, *et al.* Fault diagnosis of wind turbines based on a support vector machine optimized by the sparrow search algorithm[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 69307–69315.
- [25] YUAN X F, LIU Z A, MIAO Z M, *et al.* Fault diagnosis of analog circuits based on IH-PSO optimized support vector machine[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 137945–137958.

作者简介:

韩伟 (1975—), 男, 高级工程师 (教授级), 从事电力系统继电保护与控制技术研究, E-mail: hanwei1975103@163.com.

(责任编辑 杨彪)

Fault Diagnosis Method for Operational Security Control System Based on Digital Twins

HAN Wei¹, DUAN Wenyan¹, DU Xingwei², YAO Feng², MA Weidong¹, LIU Lei¹

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China; 2. Electric Power Dispatching Control Center of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450018, China)

Abstract: The digital twin technology aims to break through the boundary between virtual and real, achieve organic integration of physical entities and virtual space through virtual real information links, and simulate the real-time state of physical entities. The security and stability control system (security control system) is the second line of defense to ensure the safe and stable operation of the power grid. If it refuses to act or malfunction due to a fault, it will cause serious harm to the operation of the power grid. Therefore, this paper proposes a fault diagnosis method for operational security control system based on digital twins. By analyzing the general operation strategies and possible failure links of the security control system, the digital twin system of the security control system is proposed. And a fault diagnosis model for security control system based on MPA-SVM is established. Finally, the validity and correctness of the proposed method is verified by using the operational data of the security control system to construct the sample datasets.

This work is supported by Science and Technology Project of SGCC (No.5100-202240012A-1-1-ZN).

Keywords: security control system; digital twin; fault diagnosis; support vector machine; marine predator algorithm