

基于 SVM 的无刷同步发电机故障检测研究

冯顺利¹, 饶美丽², 姜凌丽¹

(1. 河南交通职业技术学院 汽车学院, 河南 郑州 450005;
2. 郑州科技学院 电子与电气工程学院, 河南 郑州 450064)

摘要: 旋转整流器是无刷同步电机中的重要部件, 研究其故障检测方法对于提高发电机的整体运行水平十分必要。设计一种基于支持向量机(SVM)的无刷同步发电机旋转整流器故障检测方法, 针对正常状态、整流器单个二极管开路状态以及整流器单个二极管短路状态, 通过选取发电机三相端电压的多个特征频率, 利用 SVM 进行特征分类, 并借鉴 Wrapper 方法构造分类精度最高的频率特征子集, 通过试验对所提方法进行验证。结果表明: 由 50 Hz (f_2 特征) 和 150 Hz (f_6 特征) 构成的特征子集具有最高的分类精度, 可用于旋转整流器的故障检测。

关键词: 无刷同步电机; 故障诊断; 支持向量机; Wrapper 方法; 频率特征

中图分类号: TM341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2023)03-0203-03

Research on SVM-based Fault Detection for Brushless Synchronous Generators

FENG Shunli¹, RAO Meili², JIANG Lingli¹

(1. School of Automobile, Henan College of Transportation, Zhengzhou 450005, China; 2. School of Electronic and Electrical Engineering, Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou 450064, China)

Abstract: As rotating rectifier is an important part of brushless synchronous generator, research on its fault detection method is of necessity for improvement of the overall operation level of the generator. A fault detection method based on support vector machine is proposed for the rotating rectifier of a synchronous generator. Aimed at the normal state, the single diode open state and the single diode short-circuit state of the rectifier, multiple characteristic frequencies of the three-phase terminal voltage of the generator are selected and SVM is applied for feature classifications. The frequency feature subset with the highest classification accuracy is constructed by Wrapper-based method, and the proposed method is verified by experiments. The results show that the feature subset composed of 50 Hz (feature f_2) and 150 Hz (feature f_6) has the highest classification accuracy and can be used for fault detection of rotating rectifier.

Keywords: brushless synchronous generator; fault detection; support vector machine; Wrapper-based method; frequency feature

0 引言

无刷同步发电机大量应用于电厂发电, 其结构组成包括由主发电机、交流励磁机(为主发电机的磁场提供电力)和旋转整流器(用于校正励磁机的三相电压)。整流器的输出与发电机磁场相连, 其输入与三相交流励磁机相连, 励磁机电枢和整流器随主发电机磁场旋转。然而, 由于存在高速旋转, 故而当励磁系统发生故障时, 必须使用无刷同步电机的测量信号对励磁系统进行诊断。

对于电机的故障诊断, 通常可借助于测量噪声^[1]、振动^[2]、电压^[3]、电流^[4-5]等指标进行。文献[3]中指出, 当发电机整流器二极管发生故障时, 电压谐波值将会随故障类型的不同而存在差异。可见, 当电机发生故障时, 其输出电压会发生谐波失真, 且谐波值会随故障类型而变化。因此, 对输出电压的频率分析可实现无刷同步发电机励磁系统的状态监测。

当前, 利用无刷同步发电机输出端三相电压频率特征

的故障检测方法尚未得到深入研究^[6]。因此, 本文提出一种基于支持向量机的无刷同步发电机励磁系统故障检测方法, 其核心在于通过确定发电机三相端电压中最合适的频率分量(也称为“特征”)准确检测励磁系统故障。最后得出了研究结论。

1 电压特征频率提取与分类

本文所提方法的目的在于通过确定最佳的电压频率分量子集, 从而最大限度地提高分类精度。首先, 针对正常运转、整流器单个二极管开路(以下简称“单管开路”)、整流器单个二极管短路(以下简称“单管短路”)等 3 种状态, 采用快速傅里叶分析技术, 获取所有故障类和所有三相电压的 25 个频率分量, 利用支持向量机对这些特征进行分类, 并根据分类精度对各特征进行排序; 然后, 借鉴 Wrapper 方法选择最佳的特征子集, 并利用试验确定了可以检测单管开路和单管短路故障的最佳特征子集。

基金项目: 河南省教育厅自然科学基金项目(KJ201937875)

第一作者简介: 冯顺利(1974—), 男, 河南修武人, 副教授, 硕士, 研究方向为汽车检测技术。

对于每个故障类,采用式(1)将对应的三相电压频率特征合并为单一特征:

$$f_i = \sqrt[3]{f_{i-\varphi 1} f_{i-\varphi 2} f_{i-\varphi 3}} \quad (1)$$

式中: i 为特征序号; $f_{i-\varphi 1}$ 、 $f_{i-\varphi 2}$ 、 $f_{i-\varphi 3}$ 分别为特征序号所对应的三相电压频率。频率分量及其相应的特征参见表1,直流分量的特征用 f_0 表示。

表1 三相电压的特征频率分量表 单位:Hz

特征	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
频率值	25	50	75	100	125	150
特征	f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}	f_{12}
频率值	175	200	225	250	275	300
特征	f_{13}	f_{14}	f_{15}	f_{16}	f_{17}	f_{18}
频率值	325	350	375	400	425	450
特征	f_{19}	f_{20}	f_{21}	f_{22}	f_{23}	f_{24}
频率值	475	500	525	550	575	600

将25个频率分量应用于支持向量机进行分类,计算25个特征的分类精度。对于各个特征,其分类精度为正确分类的样本数除以样本总数。进一步根据得到的分类精度对25个特征进行排序,并将排序后的特征子集再一次应用于支持向量机。特征子集族中的第一个元素为单元素集合,仅包含分类精度最高的特征;第二个元素为双元素集合,包含分类精度排在前两位的特征;以此类推,可得到25个特征子集。最后,根据支持向量机的分类精度从所有子集中选取最佳子集。图1给出了上述过程的简要示意。

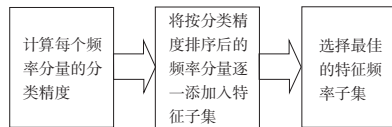
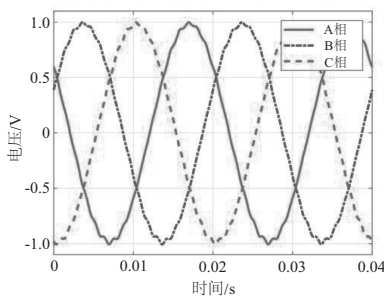
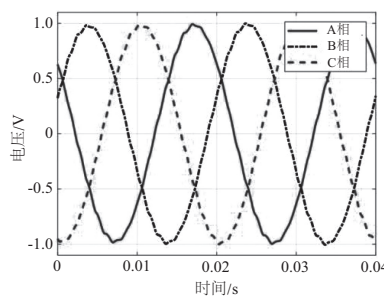


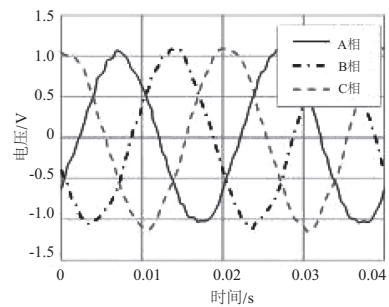
图1 所提方法的简要实施流程



(a) 正常状态三相电压



(b) 单管开路状态三相电压



(c) 单管短路状态三相电压

图3 3种运行状态的三相电压测量图

表2列出了每个频率分量的分类精度。经过试验和计算,对于直流分量,其分类精度为73.1%。因此,按照分类精度排序后的特征顺序为 $f_2, f_6, f_9, f_3, f_1, f_0, f_{11}, f_5, f_{21}$,

$f_{17}, f_{19}, f_{14}, f_{13}, f_{12}, f_8, f_4, f_{18}, f_7, f_{23}, f_{24}, f_{20}, f_{15}, f_{16}, f_{22}, f_{10}$ 。由于总谐波的总和应该是恒定的,所以主分量可能会因状态而异。

本文采用径向基函数(radial basis function) K 作为支持向量机的核函数:

$$K(x, x') = \exp\left(-\frac{\|x-x'\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

式中: x 和 x' 为样本点; σ 为自由参数。

进一步,采用10折交叉验证(10-fold cross validation)对支持向量机的性能进行评估,确保分类结果的可信性。

2 试验验证

为了验证所提出的方法,搭建相应的试验系统,其原理图如图2所示。试验装置包括1台感应电动机、1台无刷同步发电机、1个直流电源、1台驱动器、1台用以测量三相电压的示波器,以及1个改进的二极管整流桥,其中的开关从机器的转子中抽出并固定。

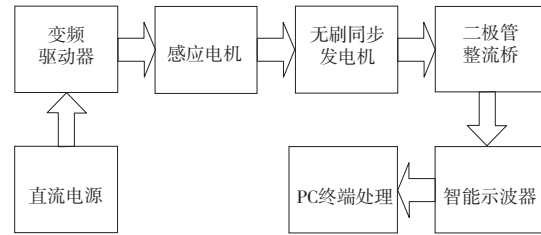


图2 试验系统原理图

针对3种运行状态,试验测量了52组三相电压,包括4个正常状态、24个单管开路故障状态和24个单管短路故障状态。这3种状态的三相电压如图3所示,将本文所提出的方法应用于测量结果,然后记录每个步骤的结果。

表2 频率特征及其分类精度 单位:%

特征	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
分类精度	76.9	96.2	76.9	65.4	69.2	92.3
特征	f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}	f_{12}
对应频率	63.5	65.4	76.9	40.4	69.2	65.4
特征	f_{13}	f_{14}	f_{15}	f_{16}	f_{17}	f_{18}
对应频率	65.4	65.4	55.8	53.8	67.3	63.5
特征	f_{19}	f_{20}	f_{21}	f_{22}	f_{23}	f_{24}
对应频率	65.4	59.6	67.3	51.9	61.5	59.6

对于分类精度排在前两位的特征,即 f_2 和 f_6 ,其分类误差矩阵分别如图4和图5所示。可以看出,对于来自二极管开路和短路故障类的数据, f_2 和 f_6 的分类精度均为100%。然而,当采用 f_2 特征时,有50%的正常状态数据被错分为开路故障;当采用 f_6 特征时,则有100%的正常状态数据被错分为开路故障。

	正常状态	开路状态	短路状态
正常状态	50.0%	50.0%	0.0%
开路状态	0.0%	100.0%	0.0%
短路状态	0.0%	0.0%	100.0%

图4 f_2 特征的分类误差矩阵

	正常状态	开路状态	短路状态
正常状态	0.0%	100%	0.0%
开路状态	0.0%	100%	0.0%
短路状态	0.0%	0.0%	100%

图5 f_6 特征的分类误差矩阵

接下来,依据前述方法,构造了特征分量的子集族,子集族的第一个集合仅包含排序后最优特征 f_2 ,并将其他排序后的特征逐个添加到该子集中形成新的特征分量集合。图6显示了每个子集的分类精度。可以看出,由 f_2 和 f_6 组成的子集的分类性能最佳,精度为98.1%。在将其他特征添加到该子集之后,根据子集中已排序特征的数量进行分类精度的过程将下降,直到该子集包含12个特征。包含14个或更多特征的特征子集的分类性能相近。由图4—图6可见,包含 f_2 和 f_6 子集的分类误差矩阵中只有一个正常类样本被误分类为开路故障。因此,这两种频率可作为无刷同步发电机整流桥故障精确检测的良好判据。

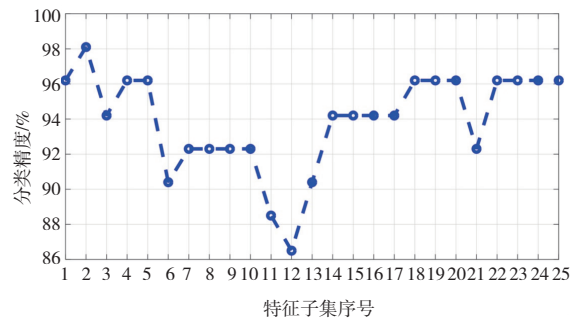


图6 特征子集分类精度

3 结语

为准确检测无刷同步发电机旋转整流器故障,本文采用一种基于Wrapper特征选择和SVM特征分类的方法确定电机三相电压频率分量的最佳子集。使用这种方法,首先计算25个选定频率分量中每一个的分类精度,并根据其结果精度对这些分量进行排序。然后,构造了25个特征子集,使得第一个子集由排序后最佳特征组成,其他子集通过将排序后的特征按优先顺序逐个相加而形成。接下来,对这25个子集的分类精度进行了计算,并与机器3种状态分类的实验结果进行了比较,发现含有 f_2 和 f_6 的特征子集分类精度最高,为98.1%。因此,本文所提方法可识别合适的频率分子集,通过这些频率分量可以准确地检测旋转整流器的运行状态。与文献中提出的其他特征选择方法相比,该方法速度更快,易于实现。同时,后续也可以采用遗传算法等优化技术对分类结果进一步优化。

参考文献:

- [1] 梁国荣,谷爱昱,沈训欢. 基于噪声源估计的电机故障诊断研究[J]. 防爆电机,2013,48(4):32-35,39.
- [2] 郝少鹏,张雨果,胡俊,等. 电机振动信号的模糊聚类分析与故障诊断[J]. 科技与创新,2019(9):134-136.
- [3] RAHNAMA M, VAHEDI A, ALIKHANI A M, et al. A novel diode open circuit fault detection in three phase rectifier based on k-means method[C]//2018 IEEE International Conference on Industrial Technology. Lyon, France: IEEE, :600-605.
- [4] 姜新通,刘钊铭,陈言,等. 基于参数估计算法的异步电机定子电流故障诊断[J]. 电气自动化,2019,41(5):10-12,48.
- [5] 卞皓. 基于定子电流的无刷直流电机轴承故障诊断研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.
- [6] WU Y C, CAI B C, MA Q Q. An online diagnostic method for rotary diode open-circuit faults in brushless exciters[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2018,33(4):1677-1685.

收稿日期:2021-11-24