

高功率密度发电机测试集优化方法研究

刘玉奇, 杨 诚, 彭 迪, 李 飞

(中国船舶工业综合技术经济研究院 船舶质量与可靠性研究中心, 北京 100081)

摘要: 针对高功率发电机开展测试性设计分析对提升其维修保障性水平具有重要意义; 通过对高功率密度发电机的故障模式开展分析, 得到发电机的典型故障模式, 针对各故障模式总结了发电机故障检测所需监测的物理参数; 然后, 通过构建多信号流模型和开展故障-测试相关性分析对发电机测点进行改进, 提出了基于故障-测试相关矩阵(D矩阵)的测试集优化方法; 该方法通过合理优化测点集可提升测点对故障模式的覆盖水平并减少冗余测点; 最后, 通过测试性预计对比了改进前后发电机的故障检测率和故障隔离率指标, 验证了提出的测点改进方法提升高功率密度发电机测试性水平的有效性, 为发电机的测试性改进设计提供技术支持。

关键词: 高功率密度; 发电机; 测试性分析; D矩阵; 故障检测率; 故障隔离率

Research on Test Set Optimization Method of High Power Density Generator

LIU Yuqi, YANG Cheng, PENG Di, LI Fei

(China Institute of Marine Technology and Economy, Beijing 100081, China)

Abstract: Research on testability design analysis of high-power generator is of great significance to improve its maintenance supportability level. By analyzing the fault modes of high power density generator, the typical fault modes of generator are obtained. For each fault mode, the physical parameters to be monitored for generator fault detection are summarized. Then, through the construction of multi signal flow model and fault test correlation analysis, the generator measurement points are improved, and a measurement point improvement method based on D matrix is proposed. By reasonably optimizing the measuring points, this method can improve the coverage level of the measuring points to the fault mode and reduce the redundant measuring points. Finally, through testability prediction, the indexes of fault detection rate and fault isolation rate of generator before and after improvement are compared. Finally, it is verified that the proposed measurement point improvement method can effectively improve the testability level of high-power density generator and provide technical support for testability design of generator.

Keywords: high power density; generator; testability analysis; D matrix; fault detection rate; fault isolation rate

0 引言

高功率密度发电机相比于传统发电机具有体积小、重量轻、环境适应性强、输出功率或力矩大等诸多优点, 在舰船综合电力系统、鱼雷动力系统等方面展现出巨大的应用前景^[1]。高功率密度发电机作为动力系统的重要组成部分, 其测试性水平直接影响着舰船装备的维修保障性能, 提升其测试性水平有助于提升装备全生命周期内的战备完好性和实战适用性。

测试性分析是根据系统的相关模型, 开展一系列

的测试性分析与计算, 获得系统的测试性指标(故障检测率、隔离率等)、冗余测试、模糊组等, 是实现检测并隔离内部故障的必要手段。可通过测试性水平预计为设计人员提供设计方案参考依据, 可分析的测试性参数包括故障检测覆盖率、故障隔离覆盖率、虚警率、最大/最小模糊组等, 通过提升故障检测率和隔离率, 有利于发电机故障检修, 缩短维修时间。

当前美英等国在永磁电机、燃气轮机等的测试性分析方面做了很多研究。我国针对高功率密度发电机

收稿日期: 2021-10-28; 修回日期: 2021-11-16。

作者简介: 刘玉奇(1986-), 男, 北京人, 博士, 工程师, 主要从事舰船装备可靠性、测试性方向的研究。

引用格式: 刘玉奇, 杨 诚, 彭 迪, 等. 高功率密度发电机测试集优化方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(1): 60-64, 113.

的测试性研究主要包括性能改进^[2-3]、故障诊断方法^[4]、发电机磁/热物理特性研究^[5]。并且,相比针对传统发电机的测试性建模分析^[6-8],基于多信号流图的故障诊断技术研究^[9-10]可在装备完成设计后建立可视化模型,利用列表表示测试能检测和隔离的故障,行表示故障能被检测到,从而得到故障与测试之间的关系,通过开展分析改进,避免设备实装后存在不可检测故障。还有学者基于测试性D矩阵研究了多个故障的诊断策略,缩短故障诊断所需时间。采用信息熵理论的D矩阵故障诊断方法,通过故障寻优可以取得更高的故障诊断效率。针对复杂系统可以将D矩阵进行层次化和模块化处理,然后采用故障一测试相关性故障合并算法得到整个系统的D矩阵,降低测试性建模的难度,提高可行性。

本研究针对高功率密度发电机多信号流模型测点改进问题,首先给出了测试性改进的优化流程。同时,也对高功率发电机开展了测试性建模分析,给出了其典型故障模式,列举了两种常见故障事件下的典型故障模式。与此同时,为提升故障模式的检测率和隔离率,给出了基于D矩阵优化的测点改进方法,包括故障检测用测点的优化和故障隔离用测点的优化方法。最后,通过开展测试性建模预计和测试性分析,验证了测点改进方法对测试性指标提升的有效性。

1 系统结构及测试性优化流程

高功率密度永磁发电机以十二相整流高速永磁同步发电机为例,其结构包括轴承、端盖、定子铁芯、定子绕组、多相整流模块、冷却器、基座、转子铁芯、永磁体、风扇、测速传感器、测温传感器等。该发电机永磁体固定在转子上,采用高强度、高耐温粘合灌注为一体,定子上固定绕组,转子绕组切割磁感线使得定子绕组产生交流感应电动势。

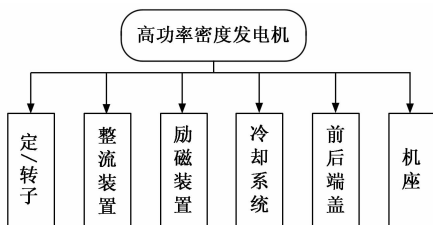


图1 高功率密度发电机系统主要组成框图

发电机的测试性设计需要针对各故障模式选择测点。测点选择的优劣直接影响设备的测试性水平,如故障检测率和故障隔离率。针对测试集的优化可减少

冗余测点,提升故障模式的覆盖率。结合高功率密度发电机结构及运行特点,分析系统的故障特征和失效规律。在基于故障模式分析结果基础上,通过配置模块、测点、测试、冗余节点、开关节点等模型要素实现对发电机测试性模型的建模。利用量化的测试性分析方法,预估测试性设计指标,生成分析结果。模块节点设计考虑基本属性、端口、故障影响及危害度、机内测试、维修等因素。连线关系的设计考虑电气、机械、逻辑的传递关系,通过连线连接模块,不仅可以实现系统信息的流向、故障的传递还能保证功能可以沿着连接线进行传递。

测试性优化的流程主要包括三部分内容:故障模式分析、测试性设计分析改进和测试性仿真验证。测试性故障模式分析可以通过针对各部件薄弱环节的详细分析得到潜在的故障模式,为后续的测点设计和优化提供依据。测试性设计分析改进是一个测试集优化的过程,通过建模得到故障模式与测试的关系矩阵,针对该关系矩阵加以优化,基于减少测试时间、降低测试成本和测试难度的原则,通过改进测点的设置改善测设备的测试性水平。测试性仿真验证与分析通过测试性预计仿真试验得到测试性指标水平,验证测试集改进的效果,进一步分析为后续的测试性改进提供依据。

2 高功率密度发电机故障模式分析

发电机设计时通过测点设计可提高发电机的故障检测率和隔离率,方便故障定位与维修。为使测点设计覆盖更多的故障模式,提高发电机故障检测率,首先对潜在的故障模式开展分析。根据发电机功能特性可将发电机典型的顶层故障事件划分为两类:发电机故障性停机和发电机输出电能品质下降。

2.1 发电机停机故障模式

首先,针对发电机停机故障事件,通过调研、故障模式收集等方式得到了导致发电机不能输出电能的故障模式,主要包括定子绕组短路故障、定子绕组断路故障、转子绕组短路故障、转子绕组断路故障、励磁装置失磁、整流装置失效、励磁装置过励保护等。由于这些故障模式中任一故障发生均能导致发电机不能工作,因此也是开展发电机测试性设计分析时需要重点关注的故障模式。

2.2 发电机输出电能品质下降故障模式

导致发电机输出电能品质下降的故障模式主要包

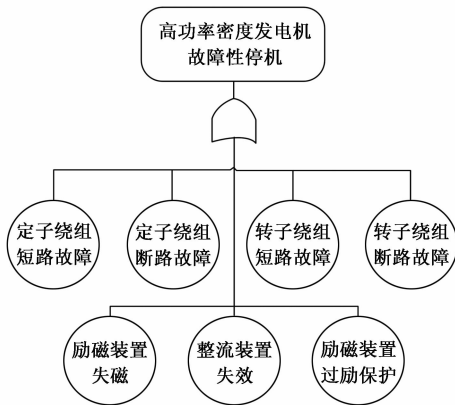


图 2 发电机停机故障模式分析

括定子系统故障、转子系统故障、励磁装置故障、整流装置故障和冷却系统故障。其中定子系统故障包括绕组绝缘故障、匝间短路、绕组多相开路、绕组接头故障等；转子系统故障包括转子匝间短路、各种机械故障、异常接地等；励磁系统故障包括起励失败、灭磁失效、励磁不稳定、过励保护等；整流装置故障包括短路故障、断路故障、过热故障等，冷却系统故障包括温度失常、系统漏水等。

由于缺少可靠性验证试验因此没有可信的部件故障率数据，只能结合过去历史故障率数据或经验的大概量级的故障率数据。通过数据收集得到了发电机的故障模式及故障率如表 1 所示。

表 1 高功率密度发电机部分故障模式及故障率

序号	故障模式	故障率
1	定子绕组短路故障	1×10^{-4}
2	定子绕组断路故障	1×10^{-5}
3	转子绕组短路故障	1×10^{-5}
4	转子绕组断路故障	1×10^{-4}
5	励磁装置失磁	1×10^{-5}
6	整流装置失效	1×10^{-5}
7	励磁装置过流保护	1×10^{-4}
8	绕组绝缘故障	1×10^{-5}
9	匝间短路	1×10^{-4}
10	绕组多相开路	1×10^{-5}
11	绕组接头故障	1×10^{-4}
12	灭磁失效	1×10^{-6}
13	励磁不稳定	1×10^{-4}
14	过励保护	1×10^{-4}

3 测试性设计改进

3.1 高功率密度发电机故障检测参数

首先，故障检测用测点改进需检测的物理量主要

包括电压、电流、绝缘阻值、温度、振动等。高功率密度发电机相比传统电机结构上采用一体化设计降低机械结构故障，但采用新型的绝缘材料降低发电机体积和重量，因此绝缘电阻阻值测量对于发电机性能至关重要。其次，由于发电机功率密度大因此散热性能对设备的可靠性影响较大，因此检测各关键部件的热参数对于检测高功率密度发电机的故障具有更加重要的作用。

详细的故障检测参数信息见表 2。

表 2 高功率密度发电机故障检测参数

序号	单元/部件	检测参数
1	定子绕组	相间电压/电流,绝缘电阻,匝间电流/电压,温度
2	转子绕组	匝间电压/电流,温度,振动,绝缘电阻
3	整流器	电压,电流,温度
4	励磁装置	电压,电流,温度
5	机座	温度,振动
6	前/后端盖	温度,振动
7	冷却系统	温度
8	发电机整机	电压,电流

3.2 发电机测试性模型

根据发电机组成、故障模式分析结果和初步确定的测试信息可构建出发电机的多信号流测试性模型。多信号流图测试性建模方法利用分层有向图表示被测对象的组成单元、测试以及被测对象性能特征之间的相关关系^[19-21]。D 矩阵模型作为相关性模型的表达方式，是以“0”“1”构成的测试—故障相关性矩阵，其中“0”表示测试与故障不相关，“1”表示测试与故障相关。构建的相关性矩阵是对设备进行测试性分析的基础。可在构建的相应测试性模型基础上，识别模型图中各节点之间的连接关系，得到故障—测试相关矩阵。针对完全故障和功能性故障，基于多信号流模型的结构，从根节点遍历形成相关性矩阵。

3.3 简化 D 矩阵

简化 D 矩阵可以减少工作量，识别冗余测试点和故障隔离的模糊组，因此在建立了 D 矩阵模型之后，应首先进行简化。

1) 首先，比较 D 矩阵的各列，如果存在某两列的元素相等，则该两列所表示的测试点互为冗余测试点，应合理的删除其中一个测试点，可依据成本和易实现性进行筛选；

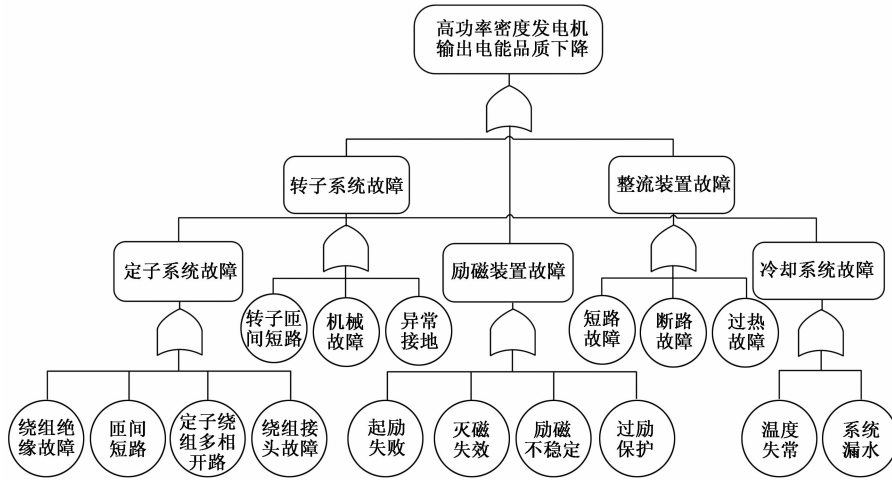


图 3 输出电能品质下降故障模式

2) 然后, 比较 D 矩阵的各行, 如果存在两行的元素相等, 则代表该两行检测的故障难以区分, 可将两行元素当作一个故障隔离模糊组, 在 D 矩阵中对其进行合并处理。

完全故障相关性矩阵 D_G 表示故障源与测试点的位置可达性。求取以故障源和测点为节点的可达性矩阵, 然后以可达性矩阵故障源对应的行, 测点对应的列组成新的矩阵即为所求的完全故障相关性矩阵。可达性矩阵的求取采用邻接矩阵的方法。假设有向图 G 有 n 个节点 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 则 n 阶方阵 $A_G = (a_{ij})$ 可看作 G 的邻接矩阵。当 v_i 与 v_j 邻接时, $a_{ij} = 1$; 当 v_i 与 v_j 不邻接或 $i = j$ 时, $a_{ij} = 0$ 。

若建模的模块存在阻断信号集, 则对相关矩阵进行修整。针对阻断信号相关性矩阵 D_F 首先构造故障源列表 SC 和测试集合, 阻断信号集合。然后判断故障源 $SC(i)$, 其中 i 取值 $0 \leq i \leq N$, 取 $i = 0$, 若有阻断信号集元素存在则使邻接矩阵 A 中故障源对应的列置为 0, 下一步, 定义 j 取值范围 $0 \leq j \leq M$, 取 $j = 0$, k 取值范围 $0 \leq k \leq N$, 取 $k = 0$, 当阻断信号相关性矩阵 $D_F(k, j) = 1$ 时, 则 D_G 对应的邻接矩阵 A_G 相应 a_{ij} 赋值 0。然后根据可达性矩阵求和方法计算得到矩阵 D_b 。

3.4 基于 D 矩阵的故障检测点优化

将简化后的 D 矩阵表示为 $D = [d_{ij}]_{m \times n}$ 则考虑可靠性参数的第 j 个测试点的故障检测权值 (表示提供检测有用信息多少的相对度量) W_{FDj} 可用下式计算:

$$W_{FDj} = \sum_{i=1}^m \alpha_i d_{ij} \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

$$\alpha_i = \lambda_i / \sum_{i=1}^m \lambda_i \quad (2)$$

式中, W_{FDj} 为第 j 个测点的故障检测权值; α_i 表示第 i 个部件发生故障的频数比; d_{ij} 表示被测单元 D 矩阵模型中的第 i 行第 j 列元素; λ_i 表示第 i 个部件的故障率; m 表示待分析的相关矩阵行数。

假设简化后的 D 矩阵模型为 $D = [d_{ij}]_{m \times n}$, 则第 j 个测试点的故障检测权值 (表示提供检测有用信息多少的相对度量) W_{FDj} 可用下式计算:

$$W_{FDj} = \sum_{i=1}^m d_{ij} \quad (3)$$

计算出测试点的 W_{FD} 后, 选用其中 W_{FD} 取值最大的作为第一个测试点, 则对应的列矩阵可表示为:

$$T_j = [d_{1j}, d_{2j}, \dots, d_{mj}]^T \quad (4)$$

用 T_j 将矩阵 D 划分为两个子矩阵:

$$D_p^0 = [d]_{\alpha \times j} \quad (5)$$

$$D_p^1 = [d]_{(m-\alpha) \times j} \quad (6)$$

式中, D_p^0 表示 T_j 中取值为 0 的元素所对应的行构成的子矩阵; D_p^1 为 T_j 中取值为 1 的元素所对应的行构成的子矩阵; α 为 T_{ij} 中取值为 0 的元素个数; p 表示所选择的测试点的序号。

选出第一个测试点, $p = 1$ 。如果 D_p^0 的行数不等于零 ($\alpha \neq 0$), 则对 D_p^0 重新计算 W_{FD} 的值, 筛选出 W_{FD} 最大值作为第二个检测用测试点, 并再次用其对应的列矩阵分割。重复上述过程, 直到选用检测用测试点对应的列矩阵中不再有为 0 的元素为止。存在取值为 0 的元素, 则表示其对应的被测部件的故障未能被检测出。不存在取值为 0 的元素, 则代表着所有部件的故障均可被检测出, 则故障检测用测试点的优化

流程结束。在优化检测用测点过程中,可能出现 W_{FD} 最大值对应多个测试点的情况,此时可基于测试成本和是否易检测的原则选择测点。

若需要增加测试点还需进行测试性类型分析,即论证该测试点的测试类型,如设计为 BIT 测试、外部测试设备测试、人工测试等,通过各类型测试的可行性分析,确定测试点最终设计方案。

3.5 基于 D 矩阵的故障隔离测点优化

分别计算各测试点的故障隔离权值,然后对隔离权值进行比较,从而筛选出测试点。

$$W_{F_{ij}} = \sum_{k=1}^Z \left\{ \left(\sum_{i=1}^m \alpha_i d_{ij} \right)_k \left[\sum_{i=1}^m \alpha_i (1 - d_{ij}) \right]_k \right\} \quad (7)$$

式中, $W_{F_{ij}}$ 表示第 j 个测试点的隔离权值; Z 表示矩阵数。

选取权值 $W_{F_{ij}}$ 最大的测试点作为第一个故障隔离测试点,用 T_j 把矩阵 D 分解为两个子矩阵:

$$D_p^0 = [d]_{\alpha \times j} \quad (8)$$

$$D_p^1 = [d]_{(m-\alpha) \times j} \quad (9)$$

式中, D_p^0 表示 T_j 中取值为 0 的元素所对应的行构成的子矩阵; D_p^1 表示 T_j 中取值为 1 的元素所对应的行构成的子矩阵; α 表示 T_j 中取值为 0 的元素个数; p 表示所选择测点的序号。

分别计算两个子矩阵的故障隔离权值并相加,比较所有测试点的权值,选择最大的权值对应的测试点作为第 2 个故障隔离测试点。依次类推,直至找到所有的故障隔离测试点。

故障隔离用测点若需增加测点同样需进行测试性类型分析,论证新增测试点的测试类型,开展各类型测试的可行性分析,从而确定测试点的设计方案。

4 测试性仿真验证与分析

为验证以上测点改进方法对提升测试性指标的效果,开展测试性指标预计,得到了测点改进前后发电机故障检测率和故障隔离率。

由表 3 和 4 仿真结果可知,优化后故障检测率和故障隔离率均有提升,证明 D 矩阵所表达的测点与故障模式的关系能够准确反映故障与测点之间的传递关系。其次,通过改进 D 矩阵优化测点的方法可以有效改善对故障模式的覆盖率以及去除冗余测点。假设系统的某故障从模型的某节点出发,经过一个路径返回该节点则存在一个故障环路,从而导致模糊组的

存在。因此优化测点后得到故障检测率和隔离率水平均有一定提升。

表 3 测点改进前的测试性指标

测试性水平	故障检测率/%	故障隔离率/%
考虑故障率	79.64	48.27
不考虑故障率	69.83	40.51

表 4 测点改进后的测试性指标

测试性水平	故障检测率/%	故障隔离率/%
考虑故障率	89.61	57.34
不考虑故障率	87.42	45.92

由测试性指标预计结果可知,基于 D 矩阵的测点集优化方法可以有效改善测试性水平,通过测试性预计仿真得到的故障检测率和故障隔离率验证了方法的可行性,可有效改善高功率密度发电机的故障检测率和隔离率水平。

5 结束语

通过故障模式分析总结了高功率密度发电机测试性设计过程中的潜在故障模式,为测试性设计改进提供基本输入。进一步针对发电机的测点给出了基于 D 矩阵的测点改进方案,包括故障检测测点改进方法和故障隔离测点改进方法。并通过测试性建模预计对比了测点改进前后的故障检测率和故障隔离率指标,仿真结果验证了测点改进方案对提升测试性水平的有效性,为高功率密度发电机的测试性优化设计提供了有效方案。

参考文献:

- [1] 马伟明,王东,程思为,等. 高性能电机系统的共性基础科学问题与技术发展前沿 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36 (8): 2025-2035.
- [2] 肖利,葛发华,刘通. 高速高功率密度发电机的改进设计与实现 [J]. 微电机, 2015, 48 (7): 18-21, 25.
- [3] 张宙,张鹏,曹卫,等. 燃气轮机直驱 MW 级高功率密度永磁发电机的研究 [J]. 上海大中型电机, 2016 (4): 1-4, 21.
- [4] 周继功. 船舶发电机电路故障分类和诊断 [J]. 舰船科学技术, 2019, 41 (4): 91-93.
- [5] 杜翔宇,胡萌,胡嘉磊,等. 船用高功率密度永磁发电机损耗及温度场计算 [J]. 现代电子技术, 2015, 38 (4): 8-12.

(下转第 113 页)