

继电保护可靠性数据收集系统设计

戴志辉, 王增平, 焦彦军

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北省保定市 071003)

摘要: 针对目前保护系统可靠性评估过程中由于缺乏基础数据积累而影响了评估效果的问题, 从保护可靠性特点入手, 探讨了保护可靠性数据收集系统的架构, 分析了数据采集来源、统计模型及有效性校验方法, 设计了数据保存的基本格式。旨在通过可靠性数据采集和整合, 满足后续的计算和分析需要。最后, 引入 3F 技术, 探讨了故障模式影响分析(FMEA)、故障树分析(FTA)与故障报告、分析与纠正措施系统(FRACAS)在保护可靠性分析中的综合应用。

关键词: 继电保护; 可靠性; 数据采集系统

0 引言

目前, 继电保护可靠性研究主要针对保护可靠性评估指标及计算模型方面展开, 涉及可靠性定性、定量评估, 运行维护及可靠性与经济性的协调等方面, 旨在找出保护系统的薄弱环节, 寻找最佳的设计、运行方案及检修周期等^[1-7]。但由于保护系统可靠性涉及的因素多, 评估难度较大, 成熟通用的保护系统可靠性定量分析方法仍在探索中。

继电保护可靠性研究的另一个重要方面是收集可靠性基础数据, 让用户在没有数据源知识的前提下, 能以透明、一致和统一的方式利用数据源中的数据。这对后续的保护可靠性评估、开发、运行维护具有积极的指导意义, 也为目前纷繁复杂的保护可靠性模型提供一个佐证。因为保护系统可靠性分析结果的有效性不仅取决于所用模型与实际情况的符合程度, 还取决于模型中各参数的准确程度。后者需要足够大的样本空间作为保证, 目前故障信息等系统虽然在电力系统中应用广泛, 但还没有进行深层次的数据挖掘, 保护可靠性评估中各种参数很难准确全面获得, 评估过程中假设过多, 进而影响了评估效果, 更难以提供有效的改善措施。寻求一种能进行基础数据积累、可靠性评估、措施应用的体系已经引起了广大保护工作者的注意, 但如何建立这样的体系尚鲜见讨论。

本文从继电保护可靠性的特点入手, 探讨了保护可靠性数据收集系统的结构, 分析了数据采集来源和形式, 设计了数据保存的基本格式。旨在为保护系统可靠性基础数据的采集和整合提供参考, 进一步满足后续的计算和分析需要。并将 3F(即故障

模式影响分析(FMEA)、故障树分析(FTA)、故障报告、分析与纠正措施系统(FRACAS))技术引入到保护可靠性分析中, 对 FMEA、FTA 与 FRACAS 的综合应用进行讨论。

1 继电保护失效分类

对继电保护失效进行科学分类, 是进行保护系统可靠性数据收集、可靠性评估及风险分析的基础, 是确定收集数据类型、数据源等因素的依据。

目前常用的可靠性指标验证方法有 2 种: 一种是通过可靠性鉴定试验、验证试验来验证; 另一种是可靠性评估。本质上, 这 2 种可靠性指标验证方法都是利用样本数据对母体指标进行推断, 不同之处在于: 前者是按母体指标设计一个试验方案, 并按此方案进行试验, 最后由试验结果来判定是否满足母体指标; 后者是根据收集到的有关数据和信息对母体指标作出估计, 从而得出对于母体指标的符合程度。本文重点考虑后者, 即系统可靠性评估中的数据收集。

根据继电保护系统的主要失效模式, 将继电保护失效分为 3 类:

1) 继电保护装置软、硬件失效及相关二次系统发生回路故障、断路器机构故障等因素导致的保护系统失效, 称为继电保护系统的第 I 类失效。

2) 主要由电网运行方式、保护定值等保护运行环境参数导致的保护系统失效, 称为继电保护系统的第 II 类失效。

3) 人为因素影响及其他。人为因素如误操作、误接线、误整定等, 在保护误动原因统计中占有较大比例, 是影响保护可靠性的一个重要而复杂的因素。其他如环境、天气等因素亦需考虑。

2 保护可靠性数据收集系统结构

可靠性信息是指在各项可靠性工作及活动中所产生的描述产品可靠性水平及状况的各种数据,它们可以是数字、图表、符号、文字和曲线等。根据可靠性信息来源的多样性,为便于对信息的整理和充分利用,建立如图 1 所示的三维信息分类模型。

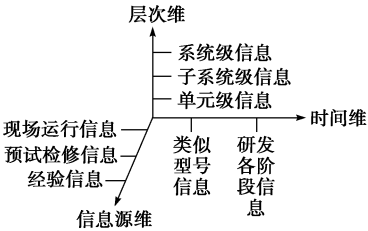


图 1 可靠性信息分类
Fig. 1 Reliability information classification

依据本文对继电保护失效的分类及三维信息模型,数据主要包括各级各类保护元件、装置、二次设备及其所构成系统的运行、停运、检修状态的原始记录,用于对设备、装置、系统性能及其对电力系统影响的分析和评估。这些数据应为可靠性评估提供足够的基础信息,至少应满足真实性、准确性、连续性、完整性。

保护可靠性数据收集系统结构如图 2 所示。

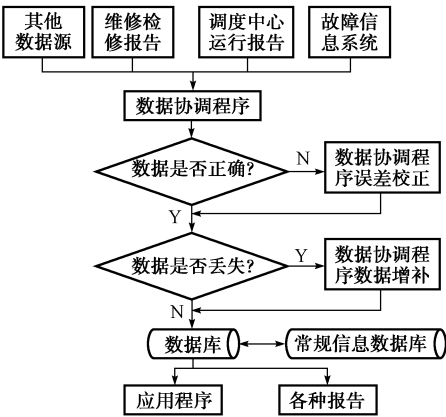


图 2 保护可靠性数据收集系统结构
Fig. 2 Protection reliability data collection system structure

3 保护可靠性数据收集系统功能

3.1 数据采集源及统计模型

保护失效数据主要源于故障信息系统、维修检修报告、调度中心运行报告及其他数据源。调度中心运行数据、其他数据源主要提供系统结构和运行参数,以及经简单处理得到保护失效对电力系统影响的数据,如停电持续时间、恢复生产时间及停电损失等。故障信息系统、维修检修报告主要提供保护

系统相关数据,基本类型包括:保护装置和系统的失效率、失效模式、故障类型和原因分析、修复方式、修复时间等。数据库可满足可靠性参数初步分析计算要求,维修检修中的经验反馈可以通过简化、整合,一方面应用到继电保护系统可靠性分析领域,作为保护可靠性监测、分析和改进设计的依据,避免失效的发生,另一方面可作为保护发生失效时有针对性的纠正措施。

可以记录或者经过简单运算后可以记录的典型数据包括:

- 1) 装置的铭牌参数、运行参数、故障和停运记录。
- 2) 定期检修周期 P 及相关数据。单位时间内定期检修的次数,即定期检修的故障率 $\lambda_P = 1/P$ 。定期检修的维修率 μ_P 按如下方法计算:利用从保护装置投入运行开始至当前时刻,该保护装置各次定期维修所花费的时间总和及总维修次数,可得平均修复时间 t_{MTTR_P} ,则 $\mu_P = 1/t_{MTTR_P}$ 。
- 3) 自检发现的保护装置故障率 $\lambda_S = n_S/T$,其中 n_S 为保护装置投运至当前时刻故障且被自检检出的次数, T 为保护装置运行时间累积。未被自检检出的保护装置故障率 $\lambda_u = n_u/T$,其中 n_u 为保护装置投运至当前时刻故障但未被自检检出的次数。自检检出的保护装置故障维修率 $\mu_S = 1/t_{MTTR_S}$ 。其中 t_{MTTR_S} 为保护装置投运至当前时刻,由各次自检检出故障后维修所花费的总时间及总维修次数求得的平均修复时间。
- 4) 软件版本信息、软件故障及维护情况。
- 5) 重大停电事故的原始记录。

3.2 原始数据协调整合及有效性校验

收集数据一般是从保护装置投运开始,直至其退役、报废。由于保护系统的可靠性问题,其相关产品可能进行适时改进,因此要对相同装置改进前后的数据区分处理。另一方面,不同的变电站有多台保护装置运行,每个运行位置又可能对应着多台先后在该位置服役的同类装置。数据库内若无独立的装置编号将可能产生错误的统计结果。因此,有必要针对不同的分析目的,区分不同的状况,对保护装置进行分批次的独立编号。另外,如果时间概念不明确也会对可靠性评估造成影响,如有的采用日历时间作为收集数据的基础,有的采用执行时间,有的采用时钟时间。为便于管理和应用,应统一采用日历时间。

数据质量是数据收集中要考虑的又一重要因素,有效识别和校正伪数据是可靠性数据生成系统

的重要前提。数据采集库应具有对数据记录进行合理性检验、数据协调、增补和校正的基本功能。例如:在数据进入数据库前,按一定的准则排除漏记和重复记录;利用贝叶斯公式或其他方式获得新的附加信息,对先验概率进行修正得到后验概率信息;等等。

为保证统计数据的有效性,还需要一定的“量”的积累,数据采集的频度、时间在满足性能分析要求的同时,还要尽量减少给被监控对象带来负担和对相关资源的消耗。由于采集方式和采集指标的多样性,很难有一种采集策略满足所有需求,结合保护可靠性数据采集的特点,本文先从以下 2 方面定性考虑“量”的确定:一是系统本身的可靠性特点;二是收集数据的时长、范围要合理。以保护系统失效率为例,对于保护系统而言,其固有失效率较低,若收集累计时间过短、涉及范围过窄均可能导致零失效数据。

对于“量”的定量确定方法为:

1)从客观先验概率角度出发,利用历史资料计算确定。以失效率为例,统计中可能存在有失效的数据、零失效数据,若统计中只选取有失效的数据,会使失效率的平均值偏高而无法真实反映系统状况。故可先用有失效数的数值进行初步分析,得到平均失效前时间 t_{MTTF} 、平均故障间隔时间 t_{MTBF} 等。然后确定哪些零失效数的数据有足够的统计小时可用于估计失效率,即如果每组零失效数据的统计小时数大于有失效数据的 t_{MTTF} ,就可假定该组数据有足够的统计小时数,反之则认为其为没有足够的统计时间所产生的失效,应予剔除。

2)从主观先验概率角度出发,以历史统计数据为基本参考值,结合当前运行环境和运行方式,给出关于失效率大致可能取值范围的专家意见,作为有效性验证的参考之一。

3.3 数据库基本结构设计

根据 3.2 节分析,对应于不同的分析目的和状况,本文将数据采集库分为常规信息子库和数据记录子库。其中:常规信息子库主要记录在数据采集中不产生较大变动的信息,如各表中代码的具体含义和保护系统相关设备的工程信息;数据记录子库是数据采集库的主体,包括装置运行状态变化表和失效记录表。其中,装置运行状态变化表如表 1 所示,主要记录装置正常运行状态的改变,如启停、投运、备用开始时间、运行时间、检修等情况。

设备失效记录表如表 2 所示,主要记录装置失效的相关信息,可为装置维护和改造提供参考。

表 1 设备运行状态变化表
Table 1 Table for equipment state change

字段名	字段类型	字段长度/bit	字段描述
Record_No.	整数	*	记录号
Equip_ID	整数	*	装置指针编号
State_ChangeTime	日期/时间	*	状态变化时间
State_Code	字符	1	状态代码
Analog_Result	数字	*	模拟量变化结果
Data_SouceCode	字符	1	数据来源代码
Commission_Time	日期/时间	*	设备投运时间

注: * 表示字段长度不确定。

表 2 设备失效记录表
Table 2 Table for equipment failure

字段名	字段类型	字段长度/bit	字段描述
Record_No.	整数	*	记录号
Equip_ID	整数	*	装置指针编号
Fault_StartTime	日期/时间	*	故障起始时间
Fail_ModeCode	字符	2	失效模式代码
Fail_CauseCode	字符	2	失效原因代码
Repair_EndTime	日期/时间	*	维修结束时间
Data_SouceCode	字符	1	数据来源代码

注: * 表示字段长度不确定。

3.4 数据库功能

3.4.1 装置状态查询

数据采集库基本功能之一是查询装置的当前状态。在尽可能缩短数据更新周期的情况下,这些设备状态记录对可靠性分析有着重要意义。

3.4.2 子样数据提供

有效的信息和数据是进行可靠性、维修性分析的基础,是决策的依据,数据采集库最主要的功能是为可靠性参数估计提供子样数据^[8-9]。以典型的采用冗余设计、双重化配置的保护系统为例,根据设备失效记录表和设备运行状态变化表的数据,可得到装置平均故障间隔时间 t_{MTBF} 、设备运行时间 T_r 和备用时间 T_s ,三者满足 $t_{MTBF} = T_r + T_s$ 。可按如下步骤进行装置情况查询:首先从常规信息子库中检索出符合条件的独立 ID 清单,再根据清单逐个从设备失效记录表中提取故障记录并按时间排序,在该时序前加入设备投入运行的时间,两个相邻记录的时间差即为 t_{MTBF} 。最后,从设备运行状态变化表中提取这段时间内设备运行状态变化的记录,即得 T_r, T_s 可计算得到。

此外,可靠性数据具有动态性质的特点,数据量随时间增加,一个或一组设备的平均失效频率和修复时间都将逐年改变。可靠性数据库应当具有不断更新数据和计算结果的功能,还应灵活地提供各种格式的报告。

4 基于 3F 技术的数据收集与分析流程

4.1 3F 技术概述

3F 技术^[10-11]是指应用广泛而有效的 3 项安全性分析和可靠性保障技术,包括 FMEA、FTA、FRACAS。它已被广泛应用于大型复杂系统的研制生产过程。本文将 3F 技术进行简化、整合,引入到继电保护系统可靠性分析领域,作为保护可靠性监测、分析和改进设计的工具,从生产、运行各环节出发,力求通过分析避免失效的发生,而一旦保护发生失效,要能及时给出有针对性的纠正措施,并对基础数据进行有效积累,防止故障再发生。

4.2 继电保护 FRACAS

FRACAS 是一个信息系统,输入故障报告,输出纠正措施,并通过一套规范化的管理程序,保证保护的失效信息能及时准确地收集,为评估和改善保护的可靠性提供科学依据。如图 3 所示,FRACAS 为一闭环式保护失效报告系统,由一系列模块组成。涉及保护开发及运行维护阶段的各项工作,对管理机构的职责、活动程序、内容以及必要的资料做出全面计划,并纳入继电保护的可靠性计划之中。在相

同的投入下有利于可靠性增长,而在相同的可靠性要求下可以节约时间、降低成本。

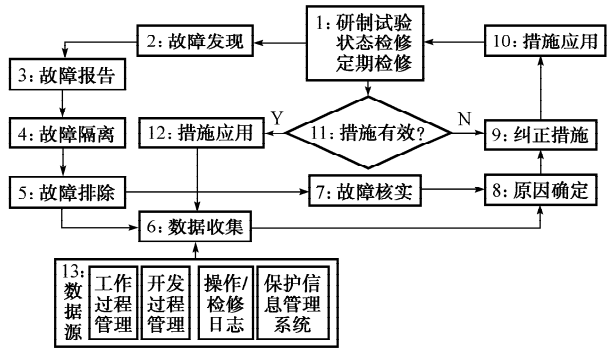


图 3 保护失效报告、分析与纠正措施系统
Fig. 3 FRACAS of protection system

4.3 FRACAS 与 FMEA、FTA 的综合应用

在建立保护 FRACAS 过程中,可以考虑将 3F 有机结合,在减少各自工作量的同时提高分析效率。FMEA 是一种自下而上的失效分析方法,能清楚地表述保护系统的失效及其影响、纠正措施等。本文对微机保护装置的硬件部分建立 FMEA,见表 3。

表 3 微机保护装置硬件 FMEA
Table 3 FMEA of digital protection hardware

代码	功能标示	功能	失效模式	失效原因	失效影响		失效检测方式	补偿措施
					局部影响	最终影响		
1	PSU	提供工作电源	失电/不稳定	电路设计环境/干扰	保护拒动	保护拒动	冗余/对比	监测电路容错配置
2	AI	模拟量输入	采样/转换错误	器件损坏/干扰	测量误差	保护拒动/误动	自检,状态检修,定期检修	容错措施冗余配置
3	DI	开关量输入	引入错误数字信息	器件失效干扰	开入系统失效	保护拒动/误动	自检,状态检修,定期检修	抗干扰措施自检/闭锁
4	DO	开关量输出	输出错误数字信息	器件失效干扰	开入系统失效	保护拒动/误动	自检,状态检修,定期检修	抗干扰措施自检/闭锁
5	CPU	保护决策/录波	元器件故障	绝缘/干扰,器件损坏,软件缺陷	漏判误判	保护拒动/误动	自检,状态检修,定期检修	容错配置/自检
6	MEM	定值/结果存取	存取异常	器件/接口失效	存取错误	保护拒动/误动	自检,状态检修,定期检修	自检/抗干扰措施

在分析过程中,可以利用 FMEA 的分析结果建立 FTA,利用故障树分析对可能引发保护失效的模块进行快速定位并根据 FMEA 确定纠正措施,从而使 FRACAS 工作快捷有效。FTA 的顶事件就是系统所不期望的故障,可作为 FRACAS 的输入;FTA 中得到的最小割集代表着相应的故障模式,这些故障模式为故障分析起到缩小范围的作用,使 FRACAS 的工作达到事半功倍的效果。同时,分析结果可以提供丰富的基础数据积累。整个工作流程如图 4 所示。

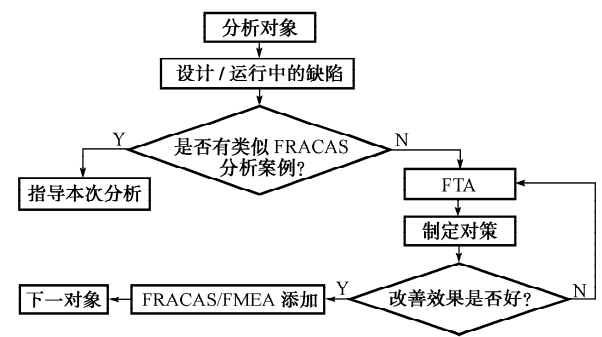


图 4 3F 综合应用流程
Fig. 4 Synthetic application flow of 3F technique

5 结语

本文在对保护失效分类、可靠性信息分类的基础上,探讨了保护可靠性数据收集系统的架构、数据采集来源与形式以及数据保存的基本格式,并对FMEA、FTA与FRACAS在继电保护可靠性评估中的综合应用进行了讨论。对后续的保护可靠性评估、保护系统开发及运行维护具有积极意义,也为目前纷繁复杂的保护可靠性模型提供一个佐证。

参考文献

- [1] ANDERSON P. An improved reliability model for redundant protective system—Markov models. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2): 573-578.
- [2] KUMM J, HOU D. Predicting the optimum routine test interval for protective relays. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(2): 659-665.
- [3] KANGVANSACHOL K, PITTAYAPAT P, EUA-ARPN B. Optimal routine test intervals for pilot protection schemes using probabilistic methods// Proceedings of IEE Seventh International Conference on Developments in Power System Protection, April 9-12, 2001: 254-257.
- [4] 孙福寿,汪雄海.一种分析继电保护系统可靠性的算法.电力系统自动化,2006,30(16):32-35.
SUN Fushou, WANG Xionghai. A new method for reliability analysis of protection in power systems. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(16): 32-35.
- [5] 王超,高鹏,徐政,等.GO法在继电保护可靠性评估中的初步应用.电力系统自动化,2007,31(24):52-56.
WANG Chao, GAO Peng, XU Zheng, et al. Application of GO methodology in reliability assessment of protective relays. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 52-56.
- [6] 李永丽,李致中,杨维.继电保护装置可靠性及其最佳检修周期的研究.中国电机工程学报,2001,21(6):63-65.

LI Yongli, LI Zhizhong, YANG Wei. Study of reliability and optimal routine test interval of protective relays. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(6): 63-65.

- [7] 丁茂生,王钢,贺文.基于可靠性经济分析的继电保护最优检修间隔时间.中国电机工程学报,2007,27(25):44-47.
DING Maosheng, WANG Gang, HE Wen. The optimum routine maintenance interval of protection based on reliability economic analysis. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(25): 44-47.
- [8] 贺国芳,许海宝.可靠性数据的收集与分析.北京:国防工业出版社,1995.
- [9] 陈豫龙,何旭洪,赵炳全.核电厂设备可靠性数据采集库的设计.原子能科学技术,2002,36(1):80-84.
CHEN Yulong, HE Xuhong, ZHAO Bingquan. Design of equipment reliability data collection base in nuclear power plant. Atomic Energy Science and Technology, 2002, 36(1): 80-84.
- [10] 郭健彬,曾声奎,陈云霞.基于PDM的FRACAS平台研究.计算机工程,2008,34(4):254-256.
GUO Jianbin, ZENG Shengkui, CHEN Yunxia. Research on PDM-based FRACAS platform. Computer Engineering, 2008, 34(4): 254-256.
- [11] 刘敬军,孙权,周经伦.产品质量闭环管理系统研究.微计算机信息,2006,22(18):140-142.
LIU Jingjun, SUN Quan, ZHOU Jinglun. Research of product quality close loop management system. Control & Automation, 2006, 22(18): 140-142.

戴志辉(1980—),男,通信作者,博士研究生,讲师,主要研究方向:电力系统保护与控制。E-mail: daihuadian@163.com

王增平(1964—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统保护与控制。

焦彦军(1963—),男,教授,主要研究方向:电力系统保护与控制。

Design of Relay Reliability Data Acquisition System

DAI Zhihui, WANG Zengping, JIAO Yanjun

(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: To help solve the inaccuracy of current protection system reliability assessment due to lack of basic data, this paper proceeds from the characteristic of protection system reliability analysis. The framework of the protection reliability data acquisition system is discussed, the sources and form of data collection is analyzed and the basic table format for data saving is designed to satisfy data collection and integration as well as the subsequent calculation and analysis. Finally, the 3F technology is introduced into protection reliability assessment and a discussion is made on the integrated application of failure mode effect analysis (FMEA), fault tree analysis (FTA) and failure reporting as well as the analysis and corrective active system (FRACAS).

Key words: protective relaying; reliability; data acquisition system