

全数字化保护系统性能测试方案设计

(二) 性能参数与执行方案设计

杨丽^{1,2}, 赵建国¹, Peter A. Crossley^{1,2}, 陈大超²

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061;

2. School of E&EE, The University of Manchester, Manchester M60 1QD, U. K.)

摘要: 针对由法国阿海珐公司 MiCOM 系列保护 IED 组建的网格型 (Mesh) 接线变电站保护系统, 提出了独立参数和相对参数指标, 用于测试比较全数字化保护系统与常规硬接线保护系统的选择性、速动性、灵敏性和可靠性; 设计了兼容性和互操作性参数指标, 用于测试采用不同厂家的合并单元、以太网交换机和保护 IED 时系统的兼容性和互操作性。提出线路电流差动保护、距离保护的测试执行方案及兼容性和互操作性测试的组网方案, 完成时钟源 P594GPS 时间同步单元测试, 探讨了利用统计学工具量化分析该新型英国国家电网保护系统性能参数的解决方案。

关键词: IEC 61850; 数字化变电站; 电力系统; 继电保护; 性能测试

Design of performance testing schemes for all-digital protection systems part two performance indices and implementation methodology design

YANG Li^{1,2}, ZHAO Jian-guo¹, Peter A. Crossley^{1,2}, CHEN Da-chao²

(1. School of E&E, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. School of E&E, The University of Manchester, Manchester M60 1QD, U. K.)

Abstract: Based on a Mesh topology substation protection system using Areva T&D MiCOM series relays, a set of absolute and relative indices are proposed to evaluate and compare the selectivity, operating speed, sensitivity and reliability of all-digital protection system with the conventional hardwired system. Compatibility and interoperability indices are defined for investigating the compatibility and interoperability of systems using merging units, Ethernet switches and protective IEDs from different manufacturers. Implementation methodology for performance testing of the feeder current differential protective IED and distance protective IED is presented. Testing schemes for compatibility and interoperability indices evaluation are proposed and testing results of P594 GPS time synchronizing units are presented. The solutions to quantitatively evaluate the performance indices of the novel protection schemes in National Grid, U.K. using statistical tools are discussed.

Key words: IEC 61850; digital substation; power system; protective relay; performance testing

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)12-0097-05

0 引言

全数字化保护系统具有系统接线清晰化、数据采集数字化、系统结构紧凑化、信息交互网络化、信息应用集成化等一系列突出优点^[1-4]。其各项性能指标可否达到甚至超越常规硬接线保护系统, 成为推广该技术的关键所在。设计全数字化保护系统的性能测试方案, 建立各项性能的量化指标, 是该技术推广应用的基础。结合工程应用, 针对英国电网广泛采用的网格角 (Mesh Corner) 变电站, 曼彻斯特大学国家电网电力系统研究中心应用 Areva 公司 MiCOM 系列保护 IED, 设计了一套保护系统。针对常规保护系统性能参数的局限性, 提出了一系列适

用于该保护系统性能测试的参数, 综合考虑了保护系统的可靠性、选择性、速动性、故障定位准确性等独立参数, 并定义了相对参数验证系统各元件兼容性和互操作性等, 极大地方便了对全数字化保护系统的性能表现的量化统计分析, 为系统最优化打下基础。设计了输电线保护柜 (距离保护和差动保护) 及网格角母线保护柜的测试执行方案, 并完成对时钟源 P594 GPS 时间同步单元的测试, 可作为该技术推广应用的重要参考。

1 常规保护系统性能参数的不足

国内、外对常规保护系统的性能、测试已做了较多研究^[5-9], 文献[7]定义了一些重要的参数如稳定

性 (Security, 无误动), 可靠性 (dependability, 无拒动) 和可用性 (availability, 特定运行周期内的可用比例), 这些参数可以作为衡量保护系统性能的全局性指标, 却无法精确定位保护系统故障的元件。文献[9]从时域和频域角度, 提出了保护IED测试算法 (measuring algorithm) 和决策算法 (decision making algorithm) 性能参数测试, 并引入基于模糊集理论 (fuzzy set theory) 的多目标优先级排序算法 (multi-objective formal ranking) 处理所得参数, 得到最优的保护结构和设置。文献[10]则从正确动作 (correct operation), 错误动作 (incorrect operation) 和无结论 (no conclusion) 三个方面考察保护系统的性能^[11-13]。

上述参数对于常规保护系统性能的考察非常有效, 对于全数字化保护系统, 稳定性、可靠性、可用性、动作时间、故障类型判别能力、故障定位准确性等参数仍是考察对象。对于遵循IEC 61850 9-2LE的全数字化保护, 其输入信号为标准化的IEC 618509-2LE以太网信息帧, 文献[9]中所提的对保护测试算法的考察已没有必要, 系统兼容性和互操作性测试则必须考虑^[14]。

2 全数字化保护系统性能参数设计

2.1 独立参数和相对参数

对输电线保护系统, 以B柜的常规保护IED测得的参数值作为基准值, 定义两组性能参数——独立参数和相对参数。独立参数通过分别测试A柜和B柜的IED获得, 相对参数则通过比较A柜全数字化保护系统和B柜常规保护系统的测试结果获得。对母线保护, 则验证其稳定性、可靠性、可用性、动作时间等参数。

图1为应用OMICRON测试仪和Emulator的线路保护 (Feeder Protection) 测试方案。仿真数据库 (Scenario Database, SD) 中的每组数据包 s (一组三相电压电流信号) 代表一次系统故障或扰动信号 (即事件Events), 由OMICRON 256 Plus测试仪或Emulator仿真产生, $SD = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n\}$ 。A柜和B柜的保护IED通过光纤通信, MiCOM S1 Studio软件用于保护参数设置。 O^E 为以太网开关的输出所对应的模拟信号, O^B 为OMICRON 256测试仪的输出, 作为基准参考量。 D_A 和 D_B 分别是A柜和B柜保护IED的跳闸信号。当输入任一仿真数据包 s 时, 保护 IED 的性能参数由 RPI^S (Relay Performance Indices)表示。

RPI^S 由两种方法来计算——跳闸信号判定和保护动作时间。对跳闸信号判定方法有:

$$RPI^S = |D_A - D_B| \quad (1)$$

其中:

$$D_A, D_B = \begin{cases} 1, \text{跳闸} \\ 0, \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

对保护动作时间方法有:

$$RPI^S = D_A - D_B \quad (3)$$

此时 D_A D_B 分别表示A柜保护IED和B柜保护IED的动作时间。保护IED的平均性能参数定义为:

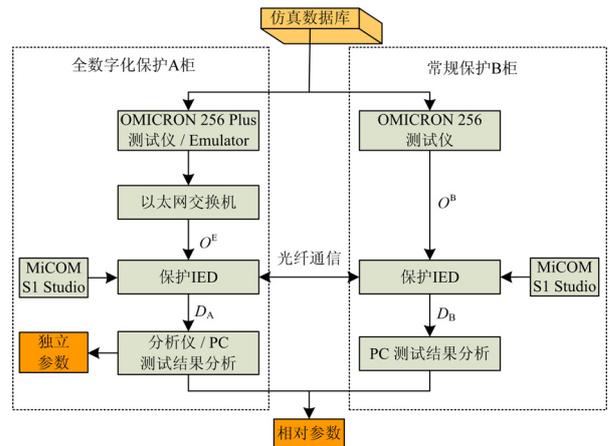


图 1 线路保护性能参数测试方案

Fig.1 Protection performance test scheme for feeder bay

$$RPI = \frac{1}{n} \sum_{S \in SD} RPI^S \quad (4)$$

其中: n 为仿真数据库中的数据包数量。平均动作时间 μ 定义为:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (5)$$

在概率统计中最常使用标准差 (standard deviation) 作为统计分布程度 (statistical dispersion) 上的测量, 保护IED动作时间的标准差 σ 为:

$$\sigma = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (D_i - \mu)^2} \quad (6)$$

对任意仿真数据包 s , 以太网交换机 (Ethernet Switch) 的性能参数由式(7)计算:

$$EPI^S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i^E - O_i^B)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i^B)^2}} \quad (7)$$

稳定性 (security) 定义为保护IED不会误动的特性, 可靠性 (dependability) 定义为保护IED在系统故障或异常情况下在其保护区域内正确动作的性能, 可由式 (8)、(9) 两式表达。

$$s = \frac{n_0}{n_{0t}} \quad (8)$$

$$d = \frac{n_1}{n_{1t}} \quad (9)$$

其中: n_{0t} 为保护IED不应该发出跳闸命令的事件总数; n_0 为保护IED在此 n_{0t} 事件中成功闭锁跳闸命令的事件总数; n_{1t} 为保护IED应该正确动作的事件总数; n_1 为保护IED在此 n_{1t} 事件中成功发出跳闸指令的事件数。稳定性和可靠性可整合为一个参数, 即选择性 (selectivity):

$$s = \frac{n_1 + n_0}{n} \quad (10)$$

其中: n 为仿真数据库中的事件总数。

故障定位偏差 F_{Lerr} 定义为保护计算值与实际故障位置的百分比偏差, 即:

$$F_{Lerr} = \frac{|\text{保护计算值} - \text{实际值}|}{\text{实际值}} \times 100\% \quad (11)$$

2.2 兼容性和互操作性参数

应用 IEC 61850 标准的重要优势之一是实现 IED 的兼容性 (compatibility) 和互操作性 (interoperability)。在全数字化保护系统中, 兼容性指当共用 IEC 61850 通信标准时, 两个或多个保护 IED 能正确执行其既定功能的性能; 互操作性指不同生产厂家的 IED 可进行双向数据交换, 并能正确使用信息协同操作的能力。为了保证 IED 的兼容性和互操作性, 需要对其进行一致性测试和性能测试。一致性测试属于“证书”测试, 目的是测试 IED 是否符合特定标准。IEC 61850-10 中专门定义了一致性测试方法。性能测试则属于应用测试, 目的是测试 IED 是否满足运行性能要求。一致性测试一般由授权机构完成, 而性能测试则由用户组织实施。

与常规保护系统相比, 全数字化保护系统中的一致性测试和应用测试的联系更为紧密。一致性测试是应用测试的基础, 产品只有通过一致性测试才具备构成应用系统以执行应用测试的条件。由于 IEC 61850 标准的复杂性、其性能在网络异常时的未知性以及保护、监控系统对实时性的严格要求等原因, 很可能出现单独产品已通过一致性测试, 将其构成应用系统时却不能通过应用测试的情况。通过一致性测试只是通过应用测试的充分而非必要条

件^[2]。图2所示为上述两类测试的关系。

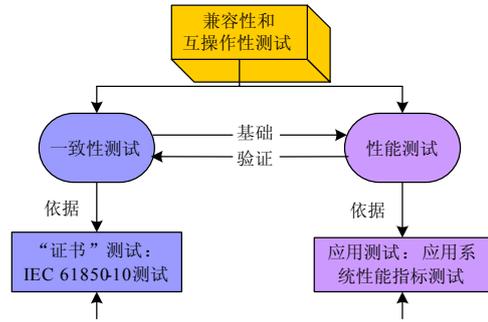


图 2 一致性测试和性能测试的关系

Fig.2 Relationship between conformance testing and performance testing

本项目应用线路保护全数字化A柜 (系统A) 和网格角全数字化母线保护柜 (系统B), 进行兼容性和互操作性测试。图3所示为针对上述A、B系统的兼容性和互操作性的测试方案。

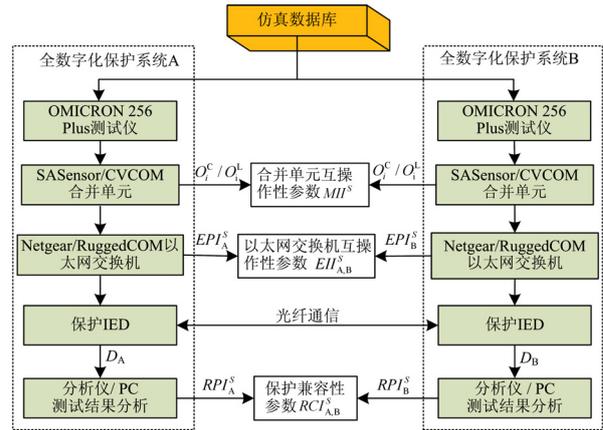


图 3 兼容性和互操作性测试方案

Fig.3 Test scheme for compatibility and interoperability indices evaluation

合并单元互操作性参数测试通过分别在A、B系统中应用Areva CVCOM合并单元和Locamation SASensor合并单元实现, 以太网交换机则分别由Netgear和RuggedCOM提供。在任一仿真数据包 s 作为输入信号时, $MII^S, EII^S_{A,B}$ 分别为合并单元和以太网交换机的互操作性参数, $RCI^S_{A,B}$ 为保护IED的兼容性参数, EPI^S, RPI^S 定义见2.1, MII^S 由式 (12) 定义:

$$MII^S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i^C - O_i^L)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i^C)^2}} \quad (12)$$

其中: O_i^C 和 O_i^L 分别为Areva CVCOM合并单元和

Locamation SASensor合并单元的输出信号。

$$EII_{A,B}^S = |EPI_A^S - EPI_B^S| \quad (13)$$

以太网交换机的平均互操作性参数由式 (14) 计算:

$$EII_{A,B} = \frac{1}{n} \sum_{S \in SD} |EPI_A^S - EPI_B^S| \quad (14)$$

其中, n 为仿真数据包的总个数。同理, 保护IED在任一仿真数据包 s 下的兼容性参数为:

$$RCI_{A,B}^S = |RPI_A^S - RPI_B^S| \quad (15)$$

保护IED的平均兼容性参数为:

$$RCI_{A,B} = \frac{1}{n} \sum_{S \in SD} |RPI_A^S - RPI_B^S| \quad (16)$$

由以上定义可知, MII^S 、 EII^S 、 RCI^S 的值越小, 测试对象的兼容性和互操作性越好。

3 测试执行方案

3.1 独立参数和相对参数测试执行方案

应用OMICRON 256 Plus 保护测试仪和Emulator可以仿真多种电力系统故障信号, 对保护系统进行测试。对线路第一套电流差动主保护而言, 要求其在区内故障时快速切除故障, 对区外故障则保持跳闸信号闭锁。重点考察四种故障类型: 单相接地短路 (AG)、两相短路 (BC)、两相接地短路 (BCG) 和三相短路 (ABC); 故障位置为-10% (反方向区外故障), 20%, 50%, 70%, 90% 和 110% (正方向区外故障); 根据故障类型, 采用不同的故障电阻和故障初始角进行测试, 表1列出了针对P545电流差动保护的测试执行方案。

表1 P545电流差动保护测试执行方案

Tab.1 Test scheme for P545 current differential protection

故障类型	故障位置 /%	故障电阻 / Ω	故障初始角 / ($^\circ$)
AG	-10,20,50,70,90,110	0,5,10	0,30,60,90
BC	-10,20,50,70,90,110	0,5,10	0,30,60,90
BCG	-10,20,50,70,90,110	0,5,10	0,30,60,90
ABC	-10,20,50,70,90,110	0	0,30,60,90

对线路第二套主保护距离保护, 重点考察其保护 I 段 (Sub-cycle trip) 和 II 段的动作情况。参考第一套主保护, 测试上述四种故障类型下, 距离保护对各种故障位置、故障电阻和故障初始角的动作情况, 表2列出了P545距离保护的测试执行方案。

表2 P545距离保护测试执行方案

Tab.2 Test scheme for P545 sub-cycle distance protection

故障类型	故障位置/%	故障电阻/ Ω	故障初始角/($^\circ$)
AG	20,50,70,90	0,5,10,20,30	0,30,60,90
BC	20,50,70,90	0,5,10	0,30,60,90
BCG	20,50,70,90	0,5,10,20,30	0,30,60,90
ABC	20,50,70,90	0	0,30,60,90

为获得足够的统计样本空间, 每组仿真数据包重复输入系统10次。对P545电流差动保护共有240个仿真数据包 (2 400 次测试), 对P545距离保护共有224个仿真数据包 (2 240 次测试)。

3.2 兼容性和互操作性参数测试执行方案

对兼容性和互操作性参数测试而言, 合并单元 (M, Areva CVCOM和Locamation SASensor)、以太网交换机 (E, Netgear和RuggedCOM)、保护IED (R, P545和P746) 各有至少两组设备来组建完整的保护系统 (P), 表3列出了在此情况下所有可能的保护系统组网方案。

表3 兼容性和互操作性测试组网方案

Tab.3 Test cases for compatibility and interoperability indices evaluation

M	M ₁	M ₁	M ₁	M ₁	M ₂	M ₂	M ₂	M ₂
E	E ₁	E ₁	E ₂	E ₂	E ₁	E ₁	E ₂	E ₂
R	R ₁	R ₂						
P	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈

表3中所有的组网测试方案可归纳为三种类型:

1) 若目的为考察两组合并单元与保护IED的兼容性及合并单元的互操作性, 则应比较以下四组保护系统的各相应参数: P_1 和 P_5 , P_2 和 P_6 , P_3 和 P_7 , P_4 和 P_8 。

2) 若目的为考察保护IED的兼容性, 则应比较以下四组保护系统的各相应参数: P_1 和 P_2 , P_3 和 P_4 , P_5 和 P_6 , P_7 和 P_8 。

3) 若目的为考察以太网交换机的互操作性 (或保护系统在不同的过程总线数据流传输能力下的性能), 则应比较四组保护系统的各相应参数: P_1 和 P_3 , P_2 和 P_4 , P_5 和 P_7 , P_6 和 P_8 。

根据定义, 各保护组网方案的兼容性和互操作性参数均为相对参数, 它们本身即可作为保护系统各元件兼容性和互操作性优劣的直观指标。

3.3 P594时间同步单元测试

由于大部分保护功能都依赖于采样信号中时间

标签的准确性, 对P594时间同步单元的可靠性进行了专门测试。五个GPS天线间的间距小于规定的1 m, 将任两组天线连接至P594单元并完成正确的初始化设置后, 两台P594单元在24 h之内检测到的卫星数均不少于6个, 信号强度均在99%以上, P594与GPS同步后的秒脉冲光纤输出误差小于 ± 100 ns, 5个天线间基本没有相互干扰, 时间同步信号的可靠性完全可以满足保护动作的要求。

4 结论

本文从国外先进工程应用出发, 基于与国际知名保护制造商 Areva 合作设计的保护系统, 从统计学角度, 提出了一系列适用于该系统性能测试的独立参数和相对参数指标, 针对不同保护配置设计总结测试执行方案, 并通过测试确保时间同步信号的可靠性。通过综合考虑保护系统整体性能和单个元件性能测试, 同时验证系统各元件兼容性和互操作性, 为量化统计分析全数字化保护系统的性能提供了直观、高效和有力的工具。

参考文献

- [1] IEC 61850 communication networks and systems in substation-part 9-2: specific communication service mapping (SCSM)-sampled analogue values over ISO 8802-3[S].
- [2] 高翔, 张沛超. 数字化变电站主要技术特征和关键[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 67-71.
GAO Xiang, ZHANG Pei-chao. The main features and key technologies of digital substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 67-71.
- [3] 张沛超, 高翔. 数字化变电站系统结构[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 73-77.
ZHANG Pei-chao, GAO Xiang. System architecture of digital substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 73-77.
- [4] 殷志良, 刘万顺, 杨奇逊, 等. 一种遵循 IEC 61850 标准的合并单元同步的实现新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 57-61.
YIN Zhi-liang, LIU Wan-shun, YANG Qi-xun, et al. New method for implementing the synchronization of merging unit according to the IEC61850 standard[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 57-61.
- [5] 贺家李, 郭征, 杨晓军, 等. 继电保护的可靠性与动态性能仿真[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 18-22.
HE Jia-li, GUO Zheng, YANG Xiao-jun, et al. Reliability and dynamic performance simulation of protective relays[J]. Power System Technology, 2004, 28(9):

18-22.

- [6] Kezunovic M, Popovic T. Assessing application features of protective relays and systems through automated testing using fault transients[C].//Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. 2002.1742-1767.
- [7] IEEE PSRC Working Group DS. Proposed statistical performance measures for microprocessor-based transmission-line protective relays, explanations of the statistics[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002: 134-143.
- [8] Kezunovic M, Popovic T, Sevcik D, et al. Transient testing of protection relays: results, methodology and tools[J]. International Conference on Power Systems Transients (IPST), 2003.
- [9] Kezunovic M, Kasztenny B. Design optimization and performance evaluation of the relay algorithms, relays and protective systems using advanced testing tools[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(4): 1129-1135.
- [10] Blackburn J L. Protective relaying: principles and applications[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998.
- [11] Zimmertmann H J. Fuzzy sets, decision making and expert systems[M]. Kluwer Academic Press, 1987.
- [12] Schweitzer III O E, Kumm J J. Statistical comparison and evaluation of pilot protection schemes[C].//Proc of the 23rd Western Protective Relay Conference. Spokane: 1996. 15-17.
- [13] Kezunovic M, Cain J T, Perunicic B, et al. Digital protective relaying algorithm sensitivity study and evaluation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(3): 912-922.
- [14] ZHANG Pei-chao, Levi Portillo, Mladen Kezunovic. Compatibility and interoperability evaluation for all-digital protection system through automatic application test[C].//IEEE PES General Meeting. Montreal(Canada):2006.

收稿日期: 2009-04-09; 修回日期: 2009-04-28

作者简介:

杨丽(1985-), 女, 博士研究生, 研究方向为数字化变电站继电保护技术; E-mail: li.yang-3@hotmail.com

赵建国(1955-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护和FACTS装置在电力系统中的应用技术; E-mail: jgzhaosdu.edu.cn

Peter A. Crossley(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护和可再生能源技术。