

继电保护可靠性研究综述

戴志辉, 王增平

(华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 研究继电保护可靠性对于研究新的保护原理与配置方案、为保护系统设计及运行提供参考依据具有重要意义。对国内外继电保护可靠性指标和评估模型方面的研究进展进行了综述。通过比较不同的继电保护可靠性评价指标及评估方法,总结了仍然存在的不足。根据目前的研究成果简要分析了全数字化继电保护系统、广域保护等新技术、新原理给继电保护可靠性研究带来的新问题。

关键词: 继电保护; 可靠性; 马尔柯夫过程; 全数字化保护系统; 广域保护

Overview of research on protection reliability

DAI Zhi-hui, WANG Zeng-ping

(School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The study of protection reliability makes a significant contribution to researching on new protection principles and configuration and providing reference for system design and operation. This paper reviews research on evaluating indicator and modeling of protection reliability, sums up deficiencies that still exist. Based on present research findings, new issues and challenges of protection reliability arising along with new technology and protection principium such as all-digital protective systems and wide-area protection are analyzed to supply a reference for further research.

Key words: protective relaying; reliability; Markov process; all-digital protective systems; wide area protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(161)15-0161-07

0 引言

可靠性是指元件、设备或系统在预定时间内,规定的条件下完成规定功能的能力^[1]。继电保护是保障电网安全的第一道防线,其快速、可靠的动作,将有效遏制系统状态恶化,起到保障电网安全可靠运行的作用;反之,可能加速系统崩溃过程,导致大面积、长时间的停电。北美电力可靠性委员会(NERC)对17年的事故数据进行统计研究,发现63%的电力系统事故和继电保护不正确动作有关^[2]。在复杂大电网环境下,研究继电保护系统的可靠性,审视传统继电保护存在的问题、研究新的保护原理与配置方案已成为保障电网安全的重要内容。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,涉及构成元件失效数据的统计和处理,系统可靠性的定性、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。随着数字化电力系统及继电

保护系统、WAMS及广域保护系统的蓬勃发展和逐步应用,保护可靠性研究也面临着新的问题。

本文从继电保护可靠性评价指标及建模方面入手,对继电保护可靠性研究进行综述,分析了广泛使用的几种指标求解算法的优缺点,总结了目前继电保护可靠性评估中普遍存在的问题。最后,对全数字化继电保护及广域保护系统带给保护可靠性研究的新问题作了简要分析,为进一步研究继电保护保护系统可靠性提供参考。

1 继电保护可靠性评估体系

无论是研究继电保护的长期平均可靠性水平,还是从运行角度预测短期内的实时风险,都需要对其可能出现的各种状态从可能性(概率)和后果(严重程度)两方面进行量化评估。迄今对继电保护可靠性评估体系的研究主要以继电保护系统或继电保护装置为研究对象,综合考虑其正确动作、误动与拒动、经济效益等,运用状态空间法、概率法或其他方法建立可靠性模型,并依据模型进行定性或定

量的分析评估。其中，继电保护系统根据不同的可靠性评估模型，包含继电保护装置、通讯通道，相关的一次设备如电流、电压互感器、断路器、自动重合闸装置，甚至一次系统的运行状况。

1.1 继电保护可靠性指标

作为可靠性评估体系中的基本因素，保护可靠性指标是研究重点之一，文献普遍依据保护系统工作的特点，以拒动和误动为主线，从设备可靠性、功能可靠性和系统完好度等方面进行指标确定。

在研究继电保护可靠性的起步阶段，我国普遍使用“正确动作率”即一定期限内被统计继电保护装置的正确动作次数与总动作次数之比来描述继电保护的可靠性，这为提高我国继电保护水平起过很大的指导作用，但其没有考虑诸如区外故障正确不动作的次数等因素，因此不能全面地反映保护的可靠性，比如当被保护对象的故障频率很低，或者在一段统计时间内并未发生区内故障时，按传统的计算正确动作率的方法得出的结果必然很低，而实际上保护装置可能经过了若干次区外故障而未误动，这一事实不能被该统计方法所反映。此外，统计对象的数量对统计数据的影响在该指标中无法体现，难以有效反映保护系统的可靠性水平。针对上述问题，文献[3]建议采用“平均无误动作时间”和“无误动作工作概率”来评价保护可靠性。文献[4]基于继电保护的工作特点，将其可靠性分为保护系统可靠性和保护动作可靠性两个方面，保护系统可靠性主要用来衡量保护系统自身可靠性水平，主要指标为保护拒动失效率、保护误动失效率；保护动作可靠性则综合了保护和一次设备的情况，主要指标为保护拒动频率、保护误动频率等。文献[5]从继电保护的特点出发，提出了一些新的统计评价方法与指标，同时指出被保护设备的事故频率之间可能存在的较大差别。此外，如何将保护的可靠性与经济效益结合起来，反映其可靠性背后隐藏的经济价值，也是市场环境下继电保护可靠性研究的重点^[6]，如文献[7]将保护可靠性与经济效益结合起来考虑，定义了保护装置的失效率指标，即保护所有的不正确动作所造成的电力系统和用户的经济损失与每次都正确动作所避免的经济损失之比，认为这种指标可以更准确地反映电网的安全可靠性。文献[8]指出，可靠性指标的建立不但要考虑装置本身的功能，还要反映装置特定的工作环境和应用条件。依据失效率的基本定义形式，定义了保护误动失效率 λ_w 和拒动失效率 λ_j ，表示保护装置已经无故障的工作到时间 t ，而在 t 后无限小的时间 Δt 内拒动和误动的条件概率：

$$\lambda_j(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P[t < T_j \leq t + \Delta t | T_j > t] \quad (1)$$

$$\lambda_w(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P[t < T_w \leq t + \Delta t | T_w > t] \quad (2)$$

其中： T_j 、 T_w 分别为系统首次拒动和首次误动失效时间。在此基础上，文章提出了两个评估保护装置可靠性的指标——保护可用度和保护可用经济系数，通过保护装置失效造成的经济损失，将保护装置与一次系统联系在了一起。文章将保护可靠性经济系数 E 这个新的指标定义为：

$$E = 1 / (p_s e_j p_j + e_w p_w) \quad (3)$$

其中： e_j 、 e_w 为系统一次拒动和误动所造成经济损失的期望值； p_j 、 p_w 为保护装置处于拒动和误动状态的稳态概率； p_s 为被保护对象处于故障状态的稳态概率。

国外最初在一些输电系统可靠性研究模型中已初步考虑了保护系统的影响^[9]，但多数是借修正被保护元件的故障率来反映保护系统故障的影响，因而不能全面、真实地反映保护系统可靠性及其对输电系统的影响。60年代以来多个国家的大停电事故为电力系统可靠性研究的发展提供了契机，可靠性评估的理论方法和工程应用技术开始成熟，鉴于继电保护及安全控制装置对系统可靠性的重要影响及装置本身可靠性问题的复杂性，保护系统可靠性逐渐被作为子系统单独进行分析，如文献[10-12]均对继电保护装置的最佳检修周期问题进行了探讨。文献[13]阐述了继电保护装置故障率与预防测试实验周期的关系，用概率方法确定优化预防测试实验周期。文献[14-17]则研究保护故障和保护配置对系统可靠性影响并分析系统的薄弱环节。文献普遍采用的指标还是失效率、可用度、保护系统故障造成的期望收益损失等。这些研究成果为继电保护可靠性评估的研究探索提供了有益的思路和方法，但由于主要是沿用一次设备可靠性的分析思想，加之继电保护拒动和误动机理的复杂性，其保护可靠性评估指标的定义并不统一和明确。

上述工作对更为深入地研究继电保护可靠性做出了重要贡献，但由于评价指标缺乏统一的选取标准，在一定程度上给保护可靠性建模和评估工作增加了难度。另一方面，电网中的继电保护以一个完整的系统存在，分析继电保护拒动和误动事件及其后果应该考虑大多数装置在动作上有配合关系，一个保护装置的拒动或误动，往往会引起其他保护装置的动作，而可靠性指标例如拒动率、误动率、正确动作率、不正确动作率、故障频率、可用度、平均失效时间、平均失效前时间等反映的是继电保护装置长期平均可靠水平，难以有效地反映电网因为继电保护运行中可靠性变化所面临的实际风险。

此外, 虽然已有文献^[18-19]对近年来的保护动作情况做了详细的统计分析, 但是, 保护可靠性评估所需要的一些基础数据仍然缺乏, 因此, 多数文献在分析过程中对可靠性评估所需要的基础数据做了假设。

1.2 继电保护可靠性评估模型及求解

在保护可靠性评估建模及指标求解方面, 系统级与装置级采用的思路相似, 主要有解析法、模拟法。解析法主要根据系统的结构、系统和元件的功能以及两者之间的逻辑关系, 建立可靠性概率模型^[20], 通过递推或迭代等过程精确求解此模型, 从而计算出系统的可靠性指标。其优点是物理概念清晰, 模型精度高, 但缺点是其计算量随系统规模的增大而急剧增大; 模拟法是通过概率分布采样来进行状态的选择和估计, 是利用统计学的方法得到可靠性指标, 包括蒙特卡罗模拟法、非指数分布法等。模拟法比较直观, 但它具有明显的统计性质, 且计算时间和计算精度紧密相关。

目前保护可靠性评估中广泛采用的还是解析法, 如 Markov 模型法^[21]、故障树法^[22]等。故障树法是以系统故障模式为出发点, 以瞬间照相的方式进行演绎推理, 故障树的形式与实际系统的一致性不易确定, 通常需要先求出最小割集, 然后通过最小割集的概率计算得出系统顶事件的概率。针对故障树法的不足, 文献[23]引入成功流方法 (Goal Oriented, GO), 探讨了 GO 法在继电保护可靠性评估中的应用, GO 法分析问题的过程如图 1 所示。与传统解析法相比, GO 法是以系统结构图为出发点, 能够具体反映系统和部件之间的功能关系及逻辑关系, 侧重于系统的模拟和仿真, 因此它比较适用于系统结构清晰, 元部件关系明确, 特别是有具体物流的系统分析。



图 1 GO 法分析过程

Fig.1 Analytic process of GO method

可修复系统总是处于正常工作和停工维修状态的交替之中。工程中最常用的是服从指数分布的可

修复系统, 这样的系统可用 Markov 过程来描述, 称为 Markov 型可修系统^[24], 继电保护系统便隶属其中。国内外多数文献正是从这个角度出发, 普遍采用了 Markov 状态空间理论进行继电保护系统可靠性建模及指标求解, 只是在依据系统的结构、系统和元件的功能以及两者之间的逻辑关系进行建模过程中, 选取的角度不同, 如从保护软硬件失效概率模型^[25]、基于保护配置的概率模型等。其中, 文献[11]、[26-27]基于配置方案进行了相关研究, 文献[28-29]认为虽然不同厂家的保护装置在硬件和软件结构上有着很大差别, 但切除故障的功能均可认为是由主保护或后备保护完成的, 反映了保护装置对故障在原理和信号处理上所具有的本质区别。因此文献建立了不依赖于保护装置具体结构而按照保护系统切除故障的作用机理、计及主保护和后备保护作用的概率模型和状态空间模型, 利用历史数据对 500 kV 母线保护和 500 kV 线路保护的可靠性进行了分析。通过实例计算, 文献认为保护系统的硬件越来越可靠, 采用自检、双重化等措施后几乎可不考虑故障瞬间硬件失效的问题, 而影响可靠性的主要因素集中在保护的动作用原理、系统模型和参数的准确性等方面。文献[30]建立了继电保护装置的状态空间模型, 但该模型未考虑装置自检对可靠性的影响。文献[31]将装置自检也考虑进来, 建立了新的继电保护装置状态空间模型, 通过对传统继电保护装置与数字继电保护装置的比较, 认为自检功能大大提高了继电保护装置的可用度, 并能带来客观的经济效益, 但文章未就经济费用进行具体的分析, 也未能将误动的影响考虑进来。文献[32]对保护的运行状态进行了重新划分, 考虑了自检、误动、拒动等各种情况, 在检修时保护装置必须停运、对保护装置检修过程中不导致新的故障等假设下, 建立了 9 状态空间模型, 在此基础上对继电保护装置可靠性及其最佳检修周期进行了研究, 文献[12]亦进行了类似工作。

综合分析以上文献, 本文对基于 Markov 状态模型的保护系统可靠性特征量计算方法及不足归纳如下:

1) 定义保护系统的状态, 要保证所定义的状态足以区分系统的各个不同状况, 并根据系统的实际运行情况画出状态转移空间图。问题是, 在采用状态枚举法得到整个系统随时间的状态变化过程中, 当组成系统的元件有 G 个且为双状态时, 系统的全部状态就有 $2G$ 个, 当系统规模较小或考虑的因素不多时, 应用状态枚举法的准确公式可以比较直观地求得系统的各种可能状态以及相应的概率指标。

但是,当系统规模较大、须考虑的因素较多时,状态空间可能变得很大,如一个需考虑 20 个因素的系统会有 2^{20} 以上个状态,即使在计算机上处理,也非常复杂,这也是制约其应用于工程实际的主要因素。

2) 根据系统状态转移图建立形如式 (4) 的可靠性分析用状态转移矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} -q_1 & q_{12} & \cdots & q_{1n} \\ q_{21} & -q_2 & \cdots & q_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ q_{n1} & q_{n2} & \cdots & -q_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: $q_{ij} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_{ij}(\Delta t)}{\Delta t}, i \neq j$; $q_i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\sum_{j \neq i} p_{ij}(\Delta t)}{\Delta t} = \sum_{j \neq i} q_{ij}$ 为转移密度; $p_{ij}(\Delta t) = P[X(t+\Delta t) = j | X(t) = i]$; $p_{ii}(\Delta t) = P[X(t+\Delta t) = i | X(t) = i]$ 表示状态转移概率。

3) 建立并求解式 (5) 所示的线性代数方程组计算出系统各状态的稳态概率。

$$\begin{cases} PA = 0 \\ \sum p_i = 1 \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$P(\Delta t) = \begin{bmatrix} p_{11}(\Delta t) & p_{12}(\Delta t) & \cdots & p_{1n}(\Delta t) \\ p_{21}(\Delta t) & p_{22}(\Delta t) & \cdots & p_{2n}(\Delta t) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ p_{n1}(\Delta t) & p_{n2}(\Delta t) & \cdots & p_{nn}(\Delta t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

1.3 存在的问题

目前,继电保护可靠性的研究已经取得了一系列成果,但还存在一些问题,主要表现在以下 3 个方面:

1) 保护可靠性评估指标和相应模型各有侧重,利用解析法的计算量受系统规模影响较大,不易处理相关事件和模拟实际校正策略。对于需要考虑因素较多时解析法变得很复杂,有时甚至失效,使得目前提出的方法中可直接应用于实际工程的寥寥无几。

2) 保护系统可靠性分析结果的准确性一方面取决于所用模型与实际情况的符合程度,另一方面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。目前保护故障信息处理系统虽然在电力系统中得到了很多应用,但其高级统计分析功能还没有得到很好的挖掘,使得保护可靠性评估中各种参数很难准确获得。由于实际基础数据

的缺乏,保护长期可靠性评估效果深受影响。

3) 多数文献采用的诸如正确动作率、误动率和拒动率等指标均是从保护动作失效后果统计的层面来反映继电保护整体的长期可靠性,类似于考虑继电保护系统的“充裕度”。而目前对于继电保护系统短期的动态可靠性即“安全度”考虑不够。

2 继电保护可靠性研究的新进展

在传统保护可靠性模型需要继续完善的同时,全数字化保护、广域保护的理论及应用研究已然在电力系统中展开,可靠性研究作为其中重要的一个方面仍然不容忽视。传统保护可靠性模型是否能够直接在全数字化保护系统、广域保护等新技术、新理论模式下直接应用值得进一步探索。

2.1 全数字化保护系统可靠性

IEC61850 标准的颁布、高速以太网交换技术的发展及非常规互感器技术的实用化使保护系统乃至电力系统逐步向全数字化方向发展。在全数字化保护系统中,非常规互感器的数字信号输出通过合并单元^[33]以多播方式发布到过程总线^[34],保护等智能电子装置从过程总线获取采样和控制信息。全数字化保护系统在具有一系列突出优点的同时^[35],其可靠性问题受到普遍关注。与常规保护系统相比,全数字化保护系统在系统结构、构成元件及工作模式等方面都存在很大差异。建立全数字化保护系统的可靠性模型,对于系统的设计和运行具有重要意义。在传统保护系统中,更注重对保护系统总体可靠性的研究。而对于全数字化保护系统,由于其包含更多的电子装置,总体可靠性指标已不足以全面刻画系统的可靠性,文献[36]分别从系统与元件两个层面,对全数字化保护系统的可靠性进行了研究。在系统层面,利用可靠性框图、邻接矩阵和最小路集技术建立了全数字化保护系统的可靠性模型,分析了不同冗余技术对系统可靠性的影响;在元件层面,将元件重要度分析引入到保护系统中,利用概率重要度和关键重要度建立了全数字化保护系统的元件重要度评价指标,并给出了这两个重要度的选择原则。但总体上,该方面的研究文献还较少见到。

2.2 广域保护可靠性

广域保护一经提出便受到广泛关注,国内外学者提出了多种广域或区域保护理论。目前广域保护算法的研究主要分为 3 类^[37]: 基于电网中多个保护元件的判断结果、依靠专家系统集中决策的广域后备保护算法;基于广域电流差动的广域继电保护算法;基于纵联比较原理的广域继电保护算法。广域继电保护系统的基本结构也可分为 3 类: 区域调度

中心集中式广域继电保护系统; 变电站集中式广域继电保护系统; 分散式广域继电保护系统。

由于目前广域保护及装置尚处于探索、研发阶段^[38-41], 故鲜见讨论其可靠性的文献。广域保护的可靠性研究主要面临以下几方面的新问题: 1) 广域保护本身较之传统保护, 在保护原理、实现方式、作用域等方面都有了较大变化, 影响其可靠性的因素和环节增加, 而这些因素可能彼此并不独立, 这一特征可能使得不少无此前提的模型或方法在应用过程中受到制约。因此, 确定广域保护系统及其装置的可靠性指标、数学模型都还有待研究。2) 作为广域保护的重要支撑技术的广域测量系统(WAMS)的可靠性、其时滞等因素对保护系统可靠性的影响值得思考。3) 当保护装置或保护系统及相关的通讯设备采用备用冗余设计时, 该系统成为一个单元件或多元件备用系统, 多元件备用系统的可靠性研究^[42]也值得关注。

3 结论

在复杂大电网环境下, 继电保护系统的可靠性研究已日益显得重要。本文在对国内外继电保护可靠性指标和评估模型方面的研究进展进行综述的基础上, 总结了现有保护可靠性评价指标及评估模型存在的不足, 主要表现在指标的确立和选取依据、可靠性评估所需要的基础数据的统计、评估方法、保护系统动态可靠性研究等都还有待完善。特别在广域保护、全数字化保护等新原理、新技术模式下, 由于继电保护装置及相关一次设备构成复杂化, 保护可靠性研究需要涉及的因素多、评估难度大, 如何有效分析保护系统的可靠性, 需要进一步深入研究。

参考文献

- [1] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
 - [2] CIGRE Report. An international survey of the present status and the perspective of long-term dynamics in power systems[R]. CIGRE Task Force, 1995.
 - [3] 尹项根, 陈德树. 主设备保护运行情况评价方法的讨论[J]. 电力自动化设备, 1996, 60 (4): 17-19.
 - [4] 洪梅, 丁明, 戴仁赦. 保护系统的概率模型及其对组合系统可靠性的影响[J]. 电网技术, 1997, 21 (8): 44-48.
- HONG Mei, DING Ming, DAI Ren-she. The probabilistic modeling of protection system and its effect on composite system reliability[J]. Power System Technology, 1997, 21 (8): 44-48.
- [5] 陈德树. 继电保护运行状况评价方法的探讨[J]. 电网技术, 2000, 24 (3): 1-2, 65.

- CHEN De-shu. Study on evaluation of protective relay operation[J]. Power System Technology, 2000, 24 (3): 1-2, 65.
- [6] 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[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (25): 44-47.
- DING Mao-sheng, WANG Gang, HE Wen. The optimum routine maintenance interval of protection based on reliability economic analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (25): 44-47.
- [7] 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.
- [8] 王钢, 丁茂生, 李晓华, 等. 数字继电保护装置可靠性研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (7): 47-52.
- WANG Gang, DING Mao-sheng, LI Xiao-hua, et al. Reliability analysis of digital protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (7): 47-52.
- [9] Bilintor R, Tatla J. Composite generation and transmission system adequacy evaluation including protection system failure modes[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1983, 102 (6): 1823-1830.
 - [10] Anderson P. An improved reliability model for redundant protective system-Markov models[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12 (2): 573-578.
 - [11] Anderson P, Agarwal S. An improved model for protective-system reliability[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1992, 41 (3): 422-426.
 - [12] Kumm J, Hou D. Predicting the optimum routine test interval for protective relays[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10 (2): 659-665.
 - [13] Kangvansaichol K, Pittayapat P, Eua-Arpor B. Optimal routine test intervals for pilot protection schemes using probabilistic methods[C]. //Seventh International Conference on Developments in Power System Protection(IEE). 2001: 254-257.
 - [14] Yu Xingbin, Singh C. A practical approach for integrated power system vulnerability analysis with protection failures[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19 (4): 1811-1820.
 - [15] Tan J C, Crossley P A, Hall I, et al. Intelligent wide area back-up protection and its role in enhancing transmission network reliability[C]. // Seventh International Conference on Developments in Power System Protection (IEE). 2001: 446-449.
 - [16] Wang H, Thorp J S. Optimal locations for protection system enhancement: a simulation of cascading

- outages[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16 (4): 528-533.
- [17] Bloemhof G A, Leitloff V. Simulating protection systems: effects on voltage dips and reliability, a case study[C]. // Seventh International Conference on Developments in Power System Protection(IEE). 2001: 258-261.
- [18] 周玉兰, 王玉玲, 赵曼勇. 2004 年全国电网继电保护与安全自动装置运行情况[J]. 电网技术, 2005, 29 (16): 42-48.
ZHOU Yu-lan, WANG Yu-ling, ZHAO Man-yong. Situation of protective relaying and automation devices of power systems in China in 2004[J]. Power System Technology, 2005, 29 (16): 42-48.
- [19] 周玉兰, 詹荣荣, 舒治淮, 等. 2003 年全国电网继电保护与安全自动装置运行情况与分析[J]. 电网技术, 2004, 28 (20): 48-53.
ZHOU Yu-lan, ZHAN Rong-rong, SHU Zhi-huai, et al. Statistic and analysis of operation situation of protective relays and automation devices of power systems in China in 2003[J]. Power System Technology, 2004, 28 (20): 48-53.
- [20] 张沛. 基于概率的可靠性评估方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (4): 92-96.
ZHANG Pei. Reliability assessment method based on probability theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (4): 92-96.
- [21] 孙福寿, 汪雄海. 一种分析继电保护系统可靠性的算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (16): 32-35, 76.
SUN Fu-shou, WANG Xiong-hai. A new method for reliability analysis of protection in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (16): 32-35, 76.
- [22] Castro L R, Crossley P A. Reliability evaluation of substation control system[J]. IEE Pro-Gener, Trans and Distrib, 1999, 146 (6): 626-632.
- [23] 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[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (24): 52-56, 85.
WANG Chao, GAO Peng, XU Zheng, et al. Application of GO methodology in reliability assessment of protective relays[J]. Automation of Power Electric Systems, 2007, 31 (24): 52-56, 85.
- [24] Billinton R, Allan R. Reliability evaluation of engineering systems: concepts and techniques[M]. Second edition. New York: Plenum Press, 1992.
- [25] 陈少华, 马碧燕, 雷宇, 等. 综合定量计算继电保护系统可靠性[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (15): 111-115.
CHEN Shao-hua, MA Bi-yan, LEI Yu, et al. Intergrative and quantitative calculation of reliability for relay protection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (15): 111-115.
- [26] Johnson G F. Reliability considerations of multifunction protection[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2002, 38 (6): 1688-1700.
- [27] Haarlal, Pukkinen U, Koskinen M, et al. A method for analyzing the reliability of a transmission grid[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2008, 93(2): 277-287.
- [28] 王树春. 双重化继电保护系统可靠性分析的数学模型[J]. 继电器, 2005, 33 (18): 6-10, 14.
WANG Shu-chun. Markov model for reliability analysis of dual-redundant relays[J]. Relay, 2005, 33 (18): 6-10, 14.
- [29] 熊小伏, 欧阳前方, 周家启, 等. 继电保护系统正确切除故障的概率模型[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (7): 12-15.
XIONG Xiao-fu, OUYANG Qian-fang, ZHOU Jia-qi, et al. Probabilistic model for the relay protection system's correct failure removal[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (7): 12-15.
- [30] Anderson P. An improved reliability model for redundant protective system-Markov models[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12 (2): 573-578.
- [31] Kumm J, Hou D. Predicting the optimum routine test interval for protective relays[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10 (2): 659-665.
- [32] 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[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (6): 63-65, 71.
LI Yong-li, LI Zhi-zhong, YANG Wei. Study of reliability and optimal routine test interval of protective relays[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (6): 63-65, 71.
- [33] 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 IEC 61850 standard[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (11): 57-61.
- [34] IEC 61850 communication networks and systems in substation-part 9-2: specific communication service mapping (SCSM)-sampled analogue values over ISO 8802-3[S].
- [35] 高翔, 张沛超. 数字化变电站主要技术特征和关键技术[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.
- [36] 张沛超, 高翔. 全数字化保护系统的可靠性及元件重

- 要度分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 77-82.
ZHANG Pei-chao, GAO Xiang. Analysis of reliability and component importance for all-digital protective systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 77-82.
- [37] 杨增力, 石东源, 段献忠. 基于方向比较原理的广域继电保护系统[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 87-93.
YANG Zeng-li, SHI Dong-yuan, DUAN Xian-zhong. Wide-area protection system based on direction comparison principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 87-93.
- [38] Tan J C, Crossley P A, Kirschen D, et al. An expert system for the backup protection of transmission network[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(2): 508-514.
- [39] 吴科成, 林湘宁, 鲁文军, 等. 分层式电网区域保护系统的原理和实现[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(3): 72-78.
WU Ke-cheng, LIN Xiang-ning, LU Wen-jun, et al. Principle and realization of the hierarchical region protective system for power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3): 72-78.
- [40] Giovanini R, Hopkinson K, Coury D V, et al. A primary and backup cooperative protection system based on wide area agents[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1222-1230.
- [41] Adamia K M G, Apostolov A P, Begovic M M. Wide area protection: technology and infrastructures[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 601-609.
- [42] 陆志峰, 阳少华, 等. 多元件备用系统可靠性计算研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 52-55, 61.
LU Zhi-feng, YANG Shao-hua, et al. Study on reliability computation for system with multi-component in reserve[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 52-55, 61.

收稿日期: 2009-09-09; 修回日期: 2009-09-29

作者简介:

戴志辉(1980-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为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, 主要从事电力系统保护与控制研究。

(上接第 150 页 continued from page 150)

按速断定值整定, 带方向时可按过流定值整定。当采用过流定值时, 须投入方向元件, 方向元件指向电动机为正方向。建议 PT 断线后退出方向元件(如果选择 PT 断线退保护, 则意味着电动机回路故障不发闭锁信号, 级联保护将会误动, 造成整个母线失电), 此时当母线短路时会误闭锁, 可由限时速断保护切除故障。

参考文献

- [1] 熊干儒. 6 kV 厂用母线故障的分析[J]. 华东电力, 1989, 3: 51-52.
- [2] 李沛业. 火力发电厂中低压母线快速保护的应用[J]. 云南电力技术, 2004, 32(3): 47-48
- [3] 贺晓华. 330 MW 发电机组共箱母线故障的分析及对策[J]. 宁夏电力, 2008(3): 31-36.
HE Xiao-hua. Analysis and countermeasures of common box bus-bar fault of 300 MW power generating unit[J]. Ningxia Electric Power, 2008(3): 31-36.
- [4] 关雨之. 200 MW 机组厂用高压母线短路故障原因及防范措施[J]. 华北电力技术, 1987, 27: 42-43.
- [5] 孟恒信. 发电厂厂用 6 kV 母线装设快速保护的探讨[J]. 电网技术, 1998, 22(3): 75-76.
MENG Heng-xin. A consideration of equipping 6 kV bus of station service power consumption with fast protective relaying[J]. Power System Technology, 1998, 22(3): 75-76.
- [6] 樊建军, 张景玉, 李硕. 电弧光保护在中低压开关柜和母线保护中的应用[J]. 内蒙古电力技术, 2006, 28(2): 53-55.
FAN Jian-jun, ZHANG Jing-yu, LI Shuo. Intermediate and low voltage switch cabinet and bus bar protections[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2006, 28(2): 53-55.
- [7] 程颖. 低压母线快速保护实施方案讨论[C].//云南电力技术论坛论文集. 2007.
- [8] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [9] 黄其励, 高元楷, 王世桢, 等. 电力工程师手册 [M]. 电气卷. 北京: 中国电力出版社, 2002.

收稿日期: 2009-09-10; 修回日期: 2009-12-09

作者简介:

董杰(1962-), 男, 硕士, 工程师, 从事继电保护设计开发工作; E-mail: dongjie@sf-auto.com

黄生睿(1965-), 男, 本科, 教高, 长期从事火力发电厂电气设计工作;

刘全(1965-), 男, 硕士, 高工, 长期从事继电保护及自动装置的开发、应用工作。