

电力系统继电保护状态检修综述

陈进美

(江苏省电力公司检修分公司南京分部, 江苏 南京 210019)

摘 要: 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, 将有效地遏制系统状态的恶化, 起到保障电网安全可靠运行的作用。对于现场运行的继电保护装置而言, 检修是维护和提高装置可靠性的有效措施。相较于传统的定期检修, 状态检修以安全、可靠、经济为目的, 通过设备状态评价、风险评估、检修决策, 达到设备运行安全可靠、检修成本合理的一种检修策略。本文对继电保护状态检修的研究现状进行简要分析, 总结一系列成果并提出一些问题。

关键词: 状态检修; 可靠性评估; Markov 模型; 风险评估

0 引言

电力工业是支撑国民经济和社会发展的基础工业。现代电力系统已经在大容量、高电压、远距离方面取得重大发展。随着三峡电站、西电东送、南北互供和交直流互联等重大工程的实施, 我国已具有世界上最复杂的电力系统。发生复杂故障的可能性也日益增加。继电保护装置作为保障电网安全运行、防止灾难性事故的发生的第一道防线, 其可靠性与电网安全稳定运行息息相关。因此, 确保继电保护装置的可靠性是保障电网安全稳定运行的重要内容之一。

对于现场运行的继电保护装置而言, 检修是维护和提高装置可靠性的有效措施。传统的检修体制主要是实行计划检修, 一般采取定期检修的形式。检修课题、工程安排和检修周期均由管理部门根据相应的规程或经验确定, 设备运行到了规定的检修周期, 不管设备处于什么样的运行工况, 也不论设备供应商的差异、设计材质的优劣、工艺质量的好坏、运行方式的区分、有无影响安全运行的缺陷等, 都一律“到期必修”。从保证设备安全运行的角度而言, 计划检修似乎不会出现什么大的问题, 但从综合管理的角度来看却不尽合理, 主要表现在对于运行状况良好的设备并不能有效地提高设备运行效率而且会造成检修单位人力、物力的浪费; 超量检修增加了误碰、误接线、误整定的概率(大量误动事故案例显示 80% 为人为责任)甚至造成设备修坏。

定期检修体制所带来的弊端使人们意识到应当建立一种新的检修体制来平衡设备的可靠性与经济

运行之间的矛盾。因此, 一种以保护装置可靠性评估为基础的, 基于保护装置运行状态的“状态检修”技术孕育而生。所谓“状态检修”, 是以安全、可靠、经济为目的, 通过设备状态评价、风险评估、检修决策, 达到设备运行安全可靠、检修成本合理的一种检修策略。

“状态检修”实施的基础是状态评估, 即继电保护可靠性评估, 包含可靠性评价指标和可靠性评价模型两个方面的内容。通过对继电保护系统进行可靠性分析研究, 作为制定继电保护状态检修策略的依据, 在提高检修有效性的同时提高检修的经济性, 进一步提高电网安全稳定运行的水平。

1 继电保护可靠性评估

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的重点之一, 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”^[1], 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”^[2]的次数等因素, 因此不能全面地反映保护的可靠性。此外, 统计对象难以有效反映保护系统的可靠性水平。针对上述问题, 文[3]建议采用“平均无误动作时间”和“无不误动作概率”来评价保护可靠性。文[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、保护误动等。文[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,反映其可靠性背后影藏的经济价值,也是市场环境下继电保护可靠性研究的重点^[6],文[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[8]指出,可靠性指标的建立不但要考虑装置本身的功能,还要反应装置特定的工作环境和应用条件。因此,文章提出了两个评估保护装置可靠性的两个指标——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。

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,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,因此不能全面、真是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,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[9-11]均对继电保护装置的最佳检修周期问题进行了探讨。文[12]阐述了几点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[13-16]则研究保护故障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损失收益等。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。

上述工作对更深入地研究继电保护可靠性做出了重要贡献,但是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。另外,虽然已有文[17-19]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,大

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。

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方面,系统级与装置级采用的思路相同,主要有解析法和模拟法。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,目前应用最广泛的是蒙特卡洛(Monte Carlo)模拟法^[20-22],其特点是适应性强和算法及原理简单,但该方法估计量的方差系数随样本容量的增大按平方根的关系下降,使其直接应用于大型复杂系统可靠性评估有一定困难。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^[23],通过数值计算方法获得系统的各项指标,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。

目前,保护系统可靠性评估中广泛采用的还是解析法,如网络法、故障树分析法和 Markov 状态空间法。网络法是一种较早使用的计算系统可靠性的方法,依据系统可靠性框图,按逻辑串并联关系进行分解来分析系统的可靠性能。文[24]基于6种不同的全数字化保护系统结构的可靠性框图(RBD),对6种全数字化保护系统配置的可靠性,在不考虑修复作用的前提下作了定量分析,并进行元件重要度分析,发现系统的薄弱环节。文[25]对全数字式保护系统的典型配置方式构建可靠性框图,依据可靠性框图从考虑和不考虑检修对保护的影响两方面对保护系统可靠性进行定量分析,结果表明是否考虑检修对保护系统可靠性影响很大。可靠性框图分析虽然算法简单明确,但是这种算法是面向结构而且只考虑硬件失效的分析方法,为了弥补 RBD 分析方法的不足,提出了一种面向事件的故障树分析法(FTA),FTA 的优点在于它不仅考虑硬件失效,而且还允许发生软件、人为错误,操作和维修错误,环境对系统的影响等任何一种不期望发生的事件。文[26,27]利用面向事件的故障树分析法对保护系统的可靠性进行评估。文[28]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,与传统方法相比,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。

继电保护（装置）系统作为可修复系统，它的修复作用使得对可修复系统的可靠性分析研究要比不可修复系统复杂得多。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 型可修复系统^[29]。国内外多数文献正是从这个角度出发，普遍采用 Markov 状态空间理论进行继电保护可靠性建模及指标求解，只是在依据系统的结构、系统的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，如从保护系统失效概率模型、基于保护配置的概率模型等。其中，文[11]、[30-31]基于配置方案进行了相关研究，文[32-33]人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的差别，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再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配置具体结构而按照保护系统切除故障的作用机理的概率模型和状态空间模型。在保护系统建模对象的划分上，文[34,35,8]分别以超高压保护系统、直流控制保护系统、数字化保护系统为对象构建 Markov 状态空间模型并进行分析。Markov 状态空间的划分是保护系统功能与状态的直观反映，状态空间的不断细化，标志着 Markov 状态空间分析法应用于继电保护可靠性评估的不断发展。文[36]最早提出保护装置潜在失效（Hidden Failure）这个概念，文[37]基于潜在失效这个概念，对保护装置的修复和检修周期作了初步研究，这些成果为后来 Markov 状态空间分析法在保护系统可靠性分析的应用奠定了基础，文[38]建立了保护系统最初的 5 状态的 Markov 状态空间模型，该模型虽然只考虑了单一保护配置、被保护元件故障与保护系统故障的关系和保护系统的检修三个因素，但该模型为后来研究 Markov 状态空间分析法在继电保护中的应用，开启了一扇大门。在 5 态 Markov 模型的基础上，文[39]构建了更为详细的 8 态 Markov 模型并分析了在不同的维修率、失效率情况下，检修周期对保护系统可用率的影响，8 态 Markov 模型考虑了后备保护的影响，使保护系统的状态空间得到进一步完善。随着微机式继电保护的发展和应用，保护装置的自检功能，作为微机保护提高可靠性的有力工具，势必要考虑到保护系统的可靠性中去。鉴于此，文[10]构建了计及保护装置自检的 9 态的 Markov 模

型，并利用该模型针对不同故障率、自检效率情况下，最优检修周期和保护系统可用率的关系进行了定量分析。为了进一步探讨保护装置自检和保护系统检修时的复杂情况，文[40]详细考虑了自检和定检时保护系统可能出现的状态，构建了 17 态的 Markov 模型并进行类似的定量分析。保护双重化配置，是保护系统提高可靠性最有效的方式，文[11]构建了计及保护双重化配置的 32 状态 Markov 模型，并进行定量分析。为了更加详细地描述保护系统的状态空间，文[41,42]将保护系统定位在包含 CT、PT、保护装置、电源、跳闸线圈和断路器的二次设备组合，针对输电线路的过流保护系统构建了迄今最全面的 65 状态的 Markov 模型，并分析了二次设备不同的最优检修周期，提出一种针对不同二次设备采用不同的最优检修周期的检修策略。

上述研究，极大地深化了继电保护可靠性评估应当定位在系统，而不是保护装置这一概念，Markov 状态空间分析法已成为目前研究保护可靠性最有力的工具。然而，上述研究均是以保护系统稳态可用度或不可用度为目标函数（评价指标），来确定保护装置的最优检修周期。针对目前 Markov 状态空间分析法应用于继电保护可靠性评估中，缺乏相应的评价指标问题，文[6]建立了单一保护工作的 Markov 状态空间模型，提出以保护年均经济损失为最小目标求解最优检修间隔时间。针对长久以来被普遍使用的稳态可用度这一指标，文[43]研究了瞬时可用度应用于保护系统的可靠性评估，提出瞬时状态概率和平均不可用率的算法，有利于含继电保护、柔性输电、直流输电等快速修复设备电力系统的短期运行风险量化评估。

3 结论

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

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，有时候甚至失效。

保护系统可靠性分析结果的准确性一方面取决于所用的模型与实际情况的符合程度，另一方面取决于模型中个参数的准确程度。前者要求保护系统的失效服从指数分布的假设，这一假设与实际情况

是否相符,尚不明确;后者需要有足够大的样本空间作为保证,目前保护可靠性评估中各种参数很难准确获得,导致评估中很多参数需要假设,由于实际基础数据的缺乏,保护长期可靠平行评估效果深受影响。

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考性即“安全度”考虑不够。

参考文献:

- [1] 郭永基. 电力系统可靠性原理和应用[M]. 北京:清华大学出版社,1987.
- [2] 曾克娥. 电力系统继电保护装置运行可靠性指标探讨[J]. 电网技术, 2004, 28(14).
- [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的影响[J]. 电网技术, 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.
- [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周期[J]. 中国电机工程学报, 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.
- [8] 王钢, 丁茂生, 李晓华. 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.
- [9] Anderson P, Agarwal S. An improved model for protective-system[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1992, 41(3): 422-426.
- [10] Kumm J, Hou D. Predict the optimum routine test interval for protective relays[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(2): 659-665.
- [11] Anderson P. An improved reliability model for redundant protective system-Markov models[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(2): 573-578.
- [12] Kangvansaichol K, Pittayapat P, Eua-Arpor B. Optimal Routine test intervals for pilot protection schemes using probabilistic methods[C]. //Seven International Conference on Developments in Power System Protection(IEE). 2001: 254-257.
- [13] Bloemhof GA, Leitloff V. Simulation protection systems: effects on voltage dips and reliability, a case study[C]. //Seven International Conference on Developments in Power System Protection(IEE). 2001: 258-261.
- [14] 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]. //Seven International Conference on Developments in Power System Protection(IEE). 2001: 446-449.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 周玉兰, 王玉玲, 赵曼勇. 2003 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, 2004, 28(20): 48-53.
- [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.
- [19] T, Johannesson, F, Roos, S, Lindahl. Reliability of protection systems-operational experience 1976-2002. // 8th International Conference on Developments in Power System Protection(IEE). 2004.
- [20] 别朝红, 王锡凡. 蒙特卡洛法在评估电力系统可靠性中的应用[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(6):68-75.
- [21] 赵渊, 沈智健, 周念成. 周家启, 刘志宏. 大电网可靠性蒙特卡洛仿真的概率不确定行分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28):61-67.
- [22] 黄殿勋, 张文, 郭萍, 等. 发输电系统可靠性评估的蒙特卡洛改进算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21):180-183.
- [23] 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.
- [24] 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..
- [25] Kai Jiang, Chanan Singh. Reliability modeling of all-digital protection system including impact of repair[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 579-587.
- [26] E.O.Schaweitzer, III, P. M.Anderson, et al. Reliability analysis of transmission protection using fault tree methods[C]. //Proceedings of the 24th Annual Western

- Protective Relay Conference. 1997: 1-17.
- [27] Zhihui Dai, Zengping Wang. Protection dynamic reliability analysis system based on 3RF technique[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011.
- [28] 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.
- [29] Billinton R, Allen R. Reliability evaluation of engineering systems: concept and techniques[M]. Second edition. New York: Plenum Press, 1992.
- [30] Johnson G F. Reliability considerations of multifunction protection[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(6):1688-1700.
- [31] 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.
- [32] 王树春. 双重化继电保护系统可靠性分析数学模型[J]. 继电器, 2005, 33(18):6-10.
- [33] 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.
- [34] 张雪松, 王超, 程晓东. 基于马尔可夫状态空间法的超高压电网继电保护可靠性分析模型[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 94-99.
- [35] 刘耀, 王明新. 高压直流输电系统保护装置冗余配置的可靠性分析[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 51-55.
- [36] J. D. Grimes, On determining the reliability of protective relay systems[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1970, Aug: 82-85.
- [37] S. C. Chay, M. Mazumdar. Determination of test intervals in certain repairable standby protective systems[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1975, Aug: 201-205.
- [38] C. Singh, A. D. Patton. Protection system reliability modeling: unreadiness probability and mean duration of undetected faults[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1980, Oct: 339-340.
- [39] P. M. Anderson, S. K. Agarwal. An improved model for protective-system reliability[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1992, 42(3): 339-340.
- [40] R. Billinton, M. Fotuhi-Firuzabad, T. S. Sidhu. Determination of optimum routine test and self-checking intervals in protective relaying using a reliability model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 17(3): 663-669.
- [41] A. Abbarin, M. Fotuhi-Firuzabad. Evaluation of redundancy and effect of protective components on protection system reliability[C]. //5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Dec 2007, Bursa, TURKEY, ELECO2007.
- [42] A. Abbarin, M. Fotuhi-Firuzabad. A novel routing test schedule for protective system using an extended component-based reliability model [C]. //International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO2009.
- [43] 李生虎, 王京景, 刘正楷. 基于瞬时状态概率的保护系统短期可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25):50-55.

作者简介:

陈进美 (1987—), 男, 福建莆田人, 从事变电运行工作,
E-mail: chenjinmei@outlook.com。