

文章编号: 2095—0411 (2011) 02—0050—05

双机继电保护装置可靠性的影响因素^{*}

张小鸣, 赵国柱, 王秋阳

(常州大学 信息科学与工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 为了分析自检和人工检修等因素对双机继电保护装置可靠性的影响, 建立基于马尔科夫过程的主、备机双机切换状态转移空间模型。用状态空间法定量分析双机切换状态下, 自检周期、自检所花时间、人工检修周期等因素对主机处于工作状态下概率的影响。仿真试验表明: 当主机处于工作状态的概率一定时, 存在一个最佳自检周期和最佳人工检修周期。自检所花时间越短, 主机处于工作状态的概率越大。采用最佳自检和人工检修周期可以进一步提高双机继电保护装置的可靠性, 对设计具有高性能自检功能的继电保护装置具有科学指导意义。

关键词: 可靠性; 马尔科夫过程; 自检周期; 人工检修周期; 继电保护

中图分类号: TM 774

文献标识码: A

Researches on Optimum Self—Test and Routine Test Interval of Relay Protection Equipment

ZHANG Xiao—ming, ZHAO Guo—zhu, WANG Qiu—yang

(School of Information Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: For analyzing the influence of the self—checking period and routine test interval on the reliability of dual relay protection based on host and backup, a dual machine switching state space model based on Markov process is constructed. The author quantitatively analyzed the influence of the self—checking period, routine test interval, Self—check time and other factors on the reliability of host that was at work under the state of dual machine switching using state space method. Simulation test showed that when the reliability of host (namely failure rate) was given, there was a optimum self—checking period and the optimum routine test period. The shorter Self—check time, the higher the reliability of host at work. The selection of the optimum self—checking period and the optimum routine test period resulted in the optimum reliability of dual relay protection, which has important reference significance for the design of relay protection equipment with host and backup.

Key words: reliability; Markov model; self—checking interval; routine test interval; relay protection

对于微机继电保护装置来说, 通过自检能发现潜在的故障并报警, 其误动和拒动的可能性大大降低^[1]。此外, 随着微机的发展和各种控制器的出现, 保护装置自检系统的设计日益成熟, 自检的能

效也在日益提高。自检本身有着人工检修无法比拟的优点, 比如自检可以在设定的时间点自动地、周期性地运行, 能够检查继电保护装置里人工很难检查的元件或存储器的异常。因此, 确定继电保护装

^{*} 收稿日期: 2011—01—13

作者简介: 张小鸣 (1958—), 男, 安徽合肥人, 博士, 教授, 研究方向为继电保护系统可靠性、嵌入式系统。

置最佳自检周期、分析自检周期及自检时间与继电保护装置可靠性互相影响的因素对研究与设计高可靠性继电保护装置具有较大的理论意义与价值。

本文建立了由主继电器和备份继电器组成的继电保护装置可靠性分析模型, 清楚阐述了由微机自动控制的自检过程, 并着重分析自检周期、自检效率、检修周期对继电保护装置可靠性的影响, 以及如何设定最佳自检周期、检修周期。分析了影响最佳自检周期、检修周期的因素。

1 保护装置的状态空间模型

对于某一个继电保护装置, 就运行状况来说存在正常和故障两种状态, 两种状态以不确定的规律相互转移, 该状态转移过程称为随机过程。在一个随机过程中, 如果在某一个时刻由一种状态转移到另一种状态的转移概率只与现在处于什么状态有关, 而与这时刻之前所处的状态无关, 那么这种过程称为马尔科夫过程^[2]。电力系统继电保护装置的可靠性包含 2 个方面内容, 一是从二次系统的观点描述投入运行的继电保护装置在任何时刻处于工作状态的概率, 并定义为设备可靠性; 二是从一次系统的观点描述处于工作状态的继电保护装置能正确工作的概率, 并定义为功能可靠性^[3]。

一个可靠的电力系统, 不仅发生故障的概率很小, 而且能把事故迅速限制在最小范围内, 有效地防止连锁性灾难事故的发生^[4]。继电保护装置自检功能的出现, 不仅有效地减小了电力系统发生故障的概率, 更能够自动地检查出潜在的故障, 防止故障和连锁性灾难事故的发生。

要建立这一状态空间模型, 首先要明确继电保护装置各个状态的跳转过程。本文讨论的继电保护装置的自检过程如下: 被保护的元件 C (以下简称为 C) 由两个继电器之一实时保护, 他们分别是主继电器 p1 (以下简称 p1) 和备份的继电器 p2 (以下简称 p2)。在通常情况下 C 是由 p1 保护的, 但是 p1 是带有自检系统的继电保护装置, 会在设定的时间间隔内自检, 当继电器处于自检状态时, 失去对 C 的保护能力, 故 p1 自检前的瞬间, 迅速切换到由 p2 来保护 C, 当自检完成时, 再切换成由 p1 来保护 C。也就是说, C 在大部分时间里是由 p1 保护的, 只有在 p1 自检期间, 才由 p2 来保护 C^[5]。对该系统做可靠性研究中, 做以下假设^[6]: ①当定期人工检修时, 能够检查出系统的所有故障, 检修之后系统恢复到完好的水平, 修复所需要

的时间为常数; ②对 p1, p2 进行人工检修时, 不会导致新的故障; ③自检发现故障并修复, 修复过程中不会导致新的故障; ④p1 自检时, 能够顺利切换到 p2 来保护 C 的状态, 且自检完后能顺利切换到由 p1 保护 C 的状态, p1 自检时 p2 出现故障的概率为零。

由 p1, p2 建立的状态空间模型如图 1 所示。

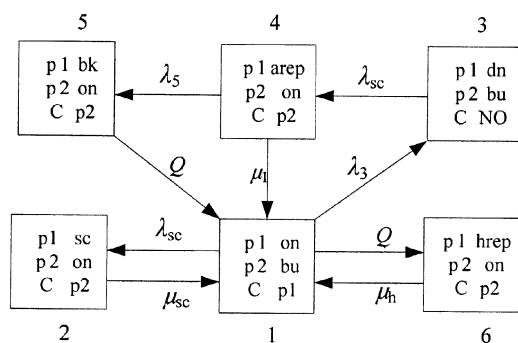


图 1 p1, p2 组成的继电保护装置状态空间模型

Fig. 1 State-space model of the protective relay composed by p1, p2

由图 1 可知, 由 p1, p2, C 组成的系统总共有六种状态。p1 on 表示 p1 在投入使用状态; C p2 表示 C 处于 p2 的保护之下; p1 sc 表示 p1 处于自检状态; p2 bu 表示 p2 处于备份状态; p1 dn 表示 p1 故障, 但未被发现; p2 on 表示 p2 由于 p1 检修而投入使用; p1 arep 表示自检发现 p1 故障并自动修复; C p1 表示 C 处于 p1 的保护之下; p1 bk 表示 p1 故障, 无法自动修复; p1 hrep 表示对 p1 人工检查或检修; C NO 表示 C 处于无保护状态; λ_{sc} 表示自检频率 (概率), 单位: 次/h; λ_3 表示 p1 故障的概率, 单位: 次/h; λ_5 表示故障不能自动修复的概率, 单位: 次/h; μ_1 表示自动修复所花时间, 单位: 次/h; μ_h 表示人工检修所花费的时间, 单位: 次/h; μ_{sc} 表示自检所花费的时间, 单位: 次/h; Q 表示人工检查的频率 (概率), 单位: 次/h。

状态 1 表示 C 处于 p1 的保护之下, p2 处于备份状态, 该系统在大部分时间里都处于该状态。当 p1 自检时, 系统进入状态 2。在该状态下, p1 因自检被自检程序隔离, p1 不再保护 C, 而是控制 p1 自检, p2 保护 C, 自检结束后, 切换逻辑电路又控制系统切换到由 p1 保护 C, p2 又进入备份待用状态, 即: 又回到了状态 1。若 p1 发生了故障但是尚未被发现, 系统则进入状态 3, 状态 3 是一个很危险的状态, 因为这个时候 p1 发生了故障, 由于 C 在正常运行, 不需要 p1 动作, 故故障没有

被发现,但是一旦 C 需要 p1 动作, p1 因故障而无法正确动作,将会发生误动或拒动。当系统处于状态 3 时,若 p1 的故障被自检发现且能够自动修复,则系统进入状态 4 进行,状态 4 修复完成则进入状态 1;若无法自动修复则进入状态 5,在该状态下, p1 只有通过人工检修方能回到状态 1。状态 6 是人工检修状态,继电保护装置定期的人工检修,使系统由状态 1 进入状态 6,检修完成后又回到状态 1。

从上述继电保护装置状态转移过程可以看出,状态 1 是正常工作状态,系统处于该状态的时间越长, C 处于未被保护状态的概率越低,继电保护装置的可靠性越高。在 2, 6, 4, 5 这 4 个状态里, C 处于 p2 的保护下,表面上看上去起到了对 C 的保护,但是,这种保护不符合继电保护装置设计的初衷,因为在这 4 个状态下 p2 无法完成自检等功能,所以 2, 6, 4, 5 这 4 个状态不是希望继电保护装置所处的状态。而在状态 1, p1 处于投入使用状态,且 p1 一旦需要自检,马上可以切换成 p2 投入使用状态,自检完毕后再切换回来。在这种状态下,继电保护装置是正常工作的,故继电保护装置处于状态 1 概率的高低决定了该继电保护装置可靠性的 高低。

2 最佳自检周期的设定

利用图 1 的状态空间模型,可以计算出继电保护装置处于状态 1 的概率^[7-10]。可得状态转移矩阵如下:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \lambda_{sc} & \lambda_3 & 0 & 0 & \Omega \\ \mu_{sc} & a_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & -\lambda_{sc} & 0 & 0 \\ \mu_1 & 0 & 0 & a_{44} & \lambda_5 & 0 \\ Q & 0 & 0 & 0 & a_{55} & 0 \\ \lambda_h & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} \end{bmatrix}$$

其中 $a_{11} = -\lambda_{sc} - \lambda_3 - Q$; $a_{22} = -\mu_{sc}$; $a_{33} = -\lambda_{sc}$; $a_{44} = -\mu_1 - \lambda_5$; $a_{55} = -Q$; $a_{66} = -\mu_h$ 。

继电保护装置处于模型中 6 个状态的 概率分别为 $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$ 。定义上述 6 个状态的驻留概率矩阵为:

$$P = [P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6]$$

联立 $PA = 0$ 和 $\sum_{i=1}^6 P_i = 1$, 可以求得 $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$ 。

3 计算结果分析

3.1 继电保护装置最佳自检周期的设定

以平均自检周期为自变量,系统处于状态 1 的概率 P_1 为因变量,使自检周期在 1 到 50h 变化,求出相应的 P_1 ,并将计算结果绘制成曲线如图 2 所示。

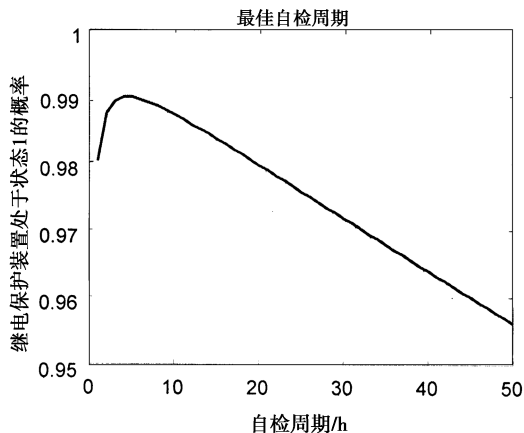


图 2 自检周期与系统处于状态 1 的概率的关系

Fig. 2 The relationship between self-checking interval and the system in state one's probability

由图 2 可知,自检周期从 0 到 4.9h 变化时,系统处于 P_1 状态的 概率也随之增加,大约在 4.9h 左右, P_1 达到最大值,随后开始减小。也就是说,控制微机对继电器 p1 大约 4.9h 自检一次,可使得系统处于 P_1 状态的 概率最大,系统的可靠性最高。相反,若自检周期过短,对 p1 自检的过于频繁,一方面会影响 p1 的正常工作,另一方面对提高系统可靠性不利;若自检周期过长,即自检的不够及时,系统的可靠性同样受到影响。

3.2 自检时间对自检周期的影响

继电保护装置的自检,是面向特定的错误进行的自检。定义自检的效率为自检的元件数和自检面向的错误之和与自检所花时间的比值。当自检的元件和自检面向的错误一定时,自检的效率是一个与时间成反比的量。

以平均自检周期为自变量,系统处于状态 1 的概率 P_1 为因变量,使自检周期在 1 到 25h 变化,自检所花 时间从 12s—2min 变化,求出相应的 P_1 ,并将计算结果绘制成曲线如图 3 所示。

由图 3 可以看出自检所花时间是影响最佳自检周期和系统处于 P_1 状态的 概率的重要因素。图中的 4 条曲线,从上到下,每次自检所花的时间分别是 12s, 30s, 60s, 120s。随着自检所花时间的增

加, 最佳自检周期在变大, 而系统处于 P_1 状态的概率有减小趋势。事实上, p_1, p_2 组成的继电保护装置状态空间模型中, C 将处于 p_2 的保护之下, 而 p_2 设计的初衷只是用于备份, 即: 仅当 p_1 自检时才启用, 当自检所花费的时间非常大时, 即 p_1 大部分时间在自检, 失去了对 C 的保护, 若 p_2 也发生故障, 则继电保护装置的可靠性会降低, 处于状态 1 的概率 P_1 会下降。相反, 当自检所花时间短, 这意味着检查同样多的元件和特定的错误, 花费的时间短, 自检效率就高, 可以减小自检周期, 以发现更多的故障并及时修复, 故可靠性高, 系统处于状态 1 的概率就大。

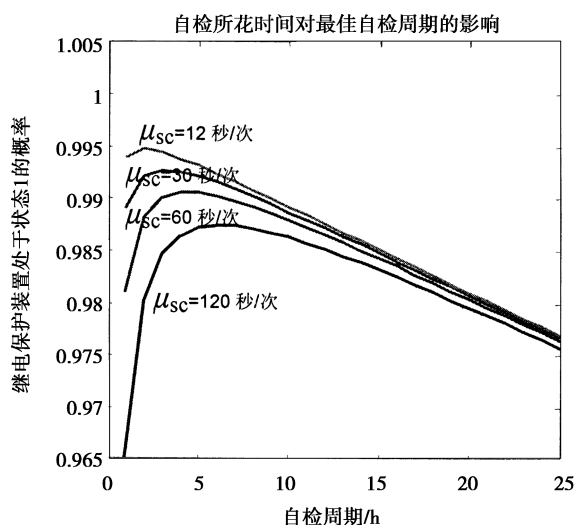


图3 自检所花时间对最佳自检周期的影响

Fig. 3 Self-checking time spent on the impact of the best self-checking interval

3.3 p_1 的故障率对自检周期的影响

由 p_1, p_2 组成的继电保护装置状态空间模型可知, 当 p_1 发生故障时, 系统进入状态 3。如果 p_1 发生故障的概率 λ_3 较小, 那么就没必要频繁地对 p_1 进行自检, 相反, 若 p_1 发生故障的概率 λ_3 大, 就需要对 p_1 进行频繁自检, 以保证保护装置的可靠性。本文详细讨论了这一过程。

以平均自检周期为自变量, 系统处于状态 1 的概率 P_1 为因变量, 使自检周期在 1 到 80h 变化, λ_3 在 $1/1\ 000\ 000$, $1/100\ 000$, $1/10\ 000$ 和 $1/1\ 000$ 这 4 个数量级变化, 求出相应的 P_1 , 并将计算结果绘制成曲线如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 当 p_1 的故障率 λ_3 由百万分之一变大到千分之一的时候, 最佳自检周期也在逐渐缩小, 系统处于 p_1 的概率也在减小。这说明,

当 p_1 的故障率很大时, 自检的必要性也会增大; 相反, 若 p_1 的故障率很小时, 最佳的自检周期也会变得很大, 而且 p_1 的故障率越小, 系统处于状态 1 的概率 P_1 越大, 系统的可靠性越高。

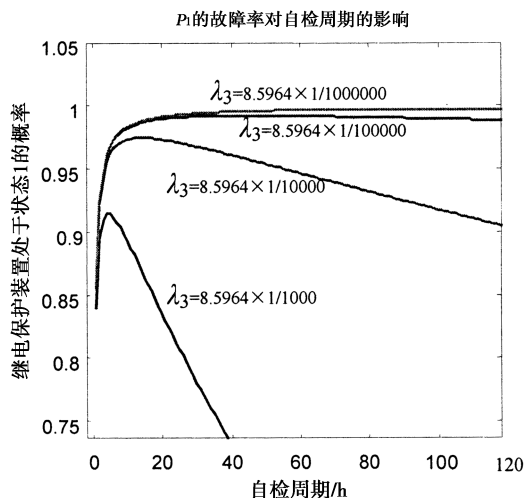


图4 p_1 的故障率对继电保护装置自检周期的影响

Fig. 4 p_1 failure rate on relay protection system self-checking interval

由此可见, 在继电保护中, 主继电器故障的概率对自检周期的设定有重要影响, 选择故障率低的继电器来保护被保护元件, 可以设定较大的自检周期, 也可以提高系统的可靠性。

3.4 最佳检修周期的确定

无论如何设计继电保护装置, 无论采用多么可靠的继电器及继电保护元件, 都无法代替定期的人工检修。人工检修可以检查出微机无法检查出的故障, 并完全修复或更换。然而, 人工检修不是越频繁越好, 一方面影响保护装置的正常运行, 另一方面对提高 C 运行的可靠性不利。相反, 如果人工检修的间隔过程, 不能及时发现自检程序无法修复的故障或不能及时更换需要更换的元件或整个继电器, 这也会大大降低继电保护装置的可靠性。图 5 是引用文献 [6] 中的数据绘制的最佳检修周期与系统可靠性的关系图, 得到最佳检修周期大约在 7 600h, 结果与文献 [6] 一致。

4 双机继电保护应用实例

如图 6 所示, 在任何时刻主、备继电器之一保护被保护元件。由双机切换与同步控制电路根据自检系统的反馈信息来控制究竟是主还是备继电器保护被保护元件。通常情况下, 被保护元件处于主继电器的保护之下, 自检系统在自检周期到来时, 先对备继电器进行自检, 若自检发现备继电器完好,

则对主继电器进行自检；同时，切换电路控制备继电器保护被保护元件。待主继电器自检结束且自检系统未发现主继电器故障或故障能自动修复时，再切换为由主继电器保护被保护元件。

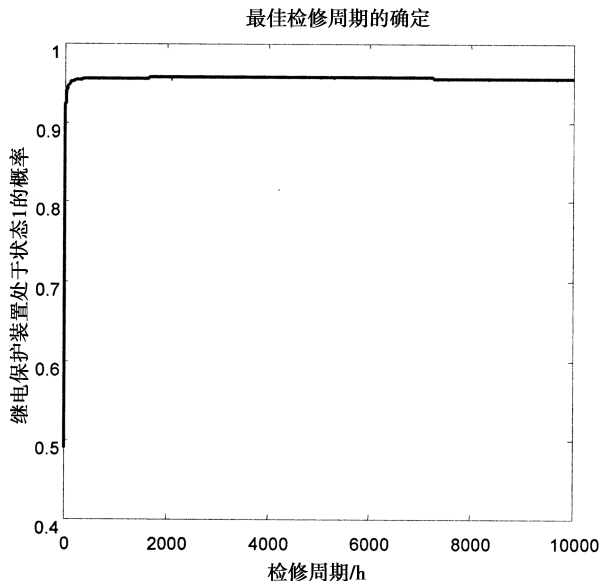


图 5 最佳人工检修周期的确定

Fig. 5 Determination of the best artificial maintenance cycle

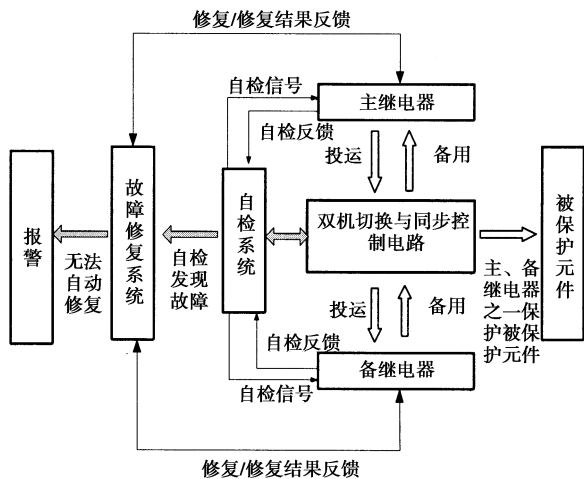


图 6 双机继电器保护模型

Fig. 6 Dual relay protection model

无论是主继电器还是备继电器，若在自检过程中发现故障，则系统启动事先设定好的修复程序对故障进行自动修复，若不能自动修复，系统发出报警信号，通知工作人员进行及时的维修。

根据本文仿真得出的结论，设定自检所花时间为 12s，主继电器的故障率为 1/100 000，此时的最佳自检周期大约为 48h，最佳的检修周期大约为 7 600h。也就是说，自检周期设定为 48h，人工检修周期设定为 7 600h 时，能获得最高的系统可靠

性。

5 结 论

继电保护装置的正常工作与否关系到电力系统能否正常工作的重要装置，而人工检查容易造成继电保护装置人为误动和故障且成本较高。自检能发现故障并自动修复某些故障。自检和人工检修一样，不是越频繁越好，也不是越稀疏越好，通过合理地设定自检周期，不仅可以提高继电保护装置在无人干预情况下持续运行的能力，而且可以使继电保护装置长时间处于高可靠性运行状态。本文通过建立基于主保护、后备保护的继电保护装置可靠性模型和 MATLAB 仿真计算可知，最佳自检周期是一个与继电保护装置故障率、自检所花时间（自检效率）有关的确定量，选用高可靠性继电保护装置、缩短自检时间、提高自检效率，能使继电保护装置可靠性大大提高。因此，研制自检效率高、自检功能完备、故障率低的继电保护装置对电力系统的正常运转是十分重要的。

参考文献：

- [1] 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．
- [2] 孙新利，陆长捷．工程可靠性教程 [M]．北京：国防工业出版社，2005．
- [3] 孙福寿，汪雄海．十一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．
- [4] 别朝红，王锡凡．复杂电力系统一类连锁反应事故可靠性评估模型和算法 [J]．电力系统自动化，2001，25（20）：30—34．
- [5] 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—14．
- [6] 郑圣，赵舫．故障信息处理系统中继电保护装置的可靠性研究 [J]．继电器，2005，33（11）：37—39．
- [7] Roy Billinton, Fotuhi—Firuzabad M, Sidhu T S. Determination of the optimum routine test and self—checking intervals in protective relaying using a reliability model [J]．IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, 2002, 17（3）：663—669．
- [8] 施国洪，贡文伟，王致刚．可重组制造系统降级运作的可靠性分析 [J]．国安全科学学报，2007，17（7）：5—8．
- [9] 温富国，雷振锋，李旭，等．关于双母线电压切换功能微机化的设计思路探讨 [J]．电力系统保护与控制，2009，37（18）：105—108．
- [10] 满梦华，原亮，丁国良，等．嵌入式高可靠性异构双机冗余系统的设计 [J]．计算机应用，2009，29（8）：2 143—2 145．