

继电保护装置状态检修的可靠性研究

孙思培, 徐习东*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为研究状态检修下继电保护系统的可靠性,在继电保护系统可靠性的研究中引入了状态评估,建立了继电保护系统在状态检修模式下的马尔科夫模型;运用状态空间法计算了继电保护装置各状态的概率和可靠性指标,研究了状态检修下保护系统可用度以及最优检修周期的变化;对比定期检修模式,分析了状态检修对保护可靠性的影响;分析了不同的状态评估效率对保护可用度的影响。研究结果表明,状态检修可以延长电力系统继电保护的检修周期并提高保护的可用度,为继电保护系统状态检修工作的开展提供了理论依据。

关键词: 继电保护;状态检修;马尔科夫模型;可靠性

中图分类号: TM588

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)04-0450-04

Reliability study on condition-based maintenance of protective relays

SUN Si-pei, XV Xi-dong

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to study the reliability of protection system under condition-based maintenance, the condition assessment of protection system was introduced, and a Markov probability model was established. The state space method was used to calculate the states probabilities and reliability. Compared with routine maintenance, the influence of condition-based maintenance on unavailability of relay and the optimum routine test interval was analyzed. The influence of assessment rate and assessment interval on unavailability of relay was analyzed. The research results show that condition-based maintenance can extend maintenance cycle and increase availability of protection system.

Key words: protective relay; condition-based maintenance; Markov model; reliability

0 引言

为了保障电力系统安全可靠运行,继电保护系统必须具有很高的可靠性。预防性检修是提高保护系统可靠性的有效方法。通过定期检修,可以检查出故障或隐患,检修周期越短,越能够及时查出故障或隐患,但频繁的检修会降低保护的可用性,同时检修成本也会增加。文献[1-2]使用状态空间法建立了保护系统的马尔科夫模型,分析了检修周期对保护异常失效率的影响,以“可用度最大”为目标求解最优检修周期。在此基础上,文献[3-4]考虑了微机保护的自检率对最优检修周期的影响。文献[5]建立了双重化保护的

马尔科夫模型。文献[6]结合超高压电网继电保护系统实际配置情况,建立了状态空间模型。文献[7]提出了保护年均经济损失,以保护年均经济损失最小为目标求解最优检修周期。上述文献通过建立继电保护系统的马尔科夫模型,对定期检修下的保护可靠性进行了研究,并求解了最优检修周期。

随着检修技术的发展,状态检修成为提高保护可靠性的新的途径^[8-9]。状态检修工作的基础是状态监测,通过在线监测以及巡视、巡检得到的运行信息进行评估得到设备的实时状态,根据设备状态选择相应的检修策略。与传统的定期检修相比,状态检修下保护系统的可靠性有何变化,状态检修下如何确定保护系

收稿日期:2011-09-28

作者简介:孙思培(1987-),男,河南漯河人,主要从事电力系统继电保护方面的研究。E-mail:sunsipei@gmail.com

通信联系人:徐习东,男,副教授。E-mail:xxd@zju.edu.cn

统的检修周期,是需要研究的新问题。

本研究应用状态空间法,建立保护系统在状态检修模式下的马尔科夫模型,对比传统的定期检修模式,分析状态检修对保护系统可靠性的影响以及状态检修下最优检修周期的变化。

1 继电保护系统的状态检修

状态检修以设备当前的运行状况为依据,通过状态监测方法得到设备的运行信息,通过状态评估得到设备的运行状态。因此状态监测以及状态评估是实现状态检修的基础。

继电保护系统包含大量微电子元件、高集成电路,与一次设备相比,状态监测相对较难实现。微机保护具有一定的自检功能,可以发现一些集成电路器件的特定故障及一些交流回路的断线故障,但难以发现器件劣化及回路接触不良等问题。通过红外监视可以发现一些回路的接触不良,通过绝缘监视也可以发现可能存在的绝缘下降。随着状态监测技术的发展,能够进行状态评估的运行信息会越来越多。有鉴于此,本研究引入状态评估效率*c*,用来表示状态评估反映当前设备实际状态的有效程度。

当前保护系统的状态检修主要是根据设备的运行状态来确定检修时间以及检修内容。本研究将保护系统的运行状态分为良好状态、异常状态、严重状态。其中良好状态可以延长检修周期,异常状态适时安排检修,严重状态尽快安排检修。保护系统在状态之间的转移与装置老化造成的性能下降及部件故障有关,其转移时间可认为近似服从指数分布。

2 单一保护装置的状态空间模型

本研究运用状态空间法,以单一保护装置为例进行分析,在建立状态空间模型时有如下假设:

- (1) 保护装置在良好状态、异常状态、严重状态下均能正常工作,但3种状态下保护的故障率不同,良好状态故障率最低,严重状态故障率最高。
- (2) 检修时能够发现所有故障且不引入新故障,检修后保护处于良好状态。
- (3) 检修时保护需退出运行,停电检修。
- (4) 状态监测和状态评估不影响保护运行。
- (5) 保护在各状态间的转移时间服从指数分布。

本研究在以上假设基础上建立单一保护的状态空间模型,如图1所示。

图1中:状态1、状态2和状态3表示C和P正常运行,能够完成系统要求的功能,但P所处状态不同,其故障率不同。状态1中P为良好状态,状态2中P为异

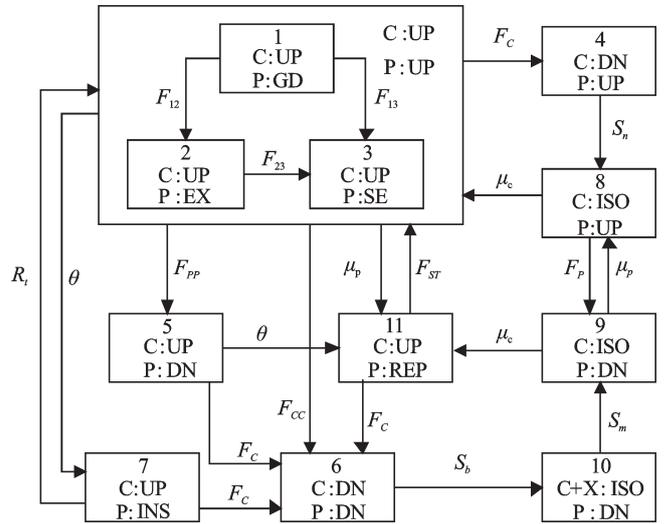


图1 单一保护的状态空间模型

C—被保护的一次设备;P—保护装置;UP—C或P处于正常运行状态;DN—C或P处于故障状态;GD—P处于良好状态;EX—P处于异常状态;SE—P处于严重状态;ISO—C处于隔离状态;INS—P处于检修状态;REP—P处于故障后的维修状态。

常状态,状态3中P为严重状态。此时若C发生故障,则进入状态4,P正常跳闸隔离C,进入状态8。状态8中C得到维修后,恢复到状态1。

状态7表示对P进行检修。如果系统处于状态1,则通过定期检修进入状态7;如果系统处于状态2和状态3,进行状态评估发现后进入状态7,若状态评估未能发现,则通过定期检修进入状态7。

P发生故障后,如果保护通过自检发现故障,则进入状态11,对保护进行维修后,恢复到状态1。若自检未能发现故障,则进入状态5,此时保护处于故障状态,不能完成系统要求的功能。此时如果状态评估或定期检修发现故障,则进入状态11进行维修。如果未能发现故障,同时C发生故障,则进入状态6,此时P不能够正确动作,故障范围进一步扩大,从状态6进入状态10。状态10对后备保护采用手动合闸,进入状态9。状态1在C和P同时发生故障的情况下进入状态6,状态7和状态11由于P故障或者退出运行,当C发生故障时,等同于C和P同时发生故障。

3 采用状态空间法的保护可靠性计算

图1中的状态空间模型可以计算保护可用度,其中各状态转移概率的定义及单位如下:

- F_p 为保护装置故障率,为装置平均无故障时间倒数,次/h;
- s 为保护装置的自检概率;
- F_{ST} 为保护装置能够自检出的故障次数, $F_{ST} = s \times F_p$, 次/h;

F_{PP} 为保护装置不能自检出的故障次数, $F_{PP} = (1-s) \times F_P$, 次/h;

F_C 为被保护的一次设备的故障率, 次/h;

F_{CC} 为保护装置和被保护的一次设备同时发生故障的概率, 次/h;

μ_P 为保护装置的维修率, 即为装置维修时间的倒数, 次/h;

μ_C 为被保护的一次设备的维修率, 即为被保护元件维修时间的倒数, 次/h;

R_i 为保护装置进行检修的效率, 即为检修时间的倒数, 次/h;

S_n 为主保护正常跳闸情况下故障切除时间的倒数, 次/h;

S_b 为后备保护动作情况下, 故障切除时间的倒数, 次/h;

S_m 为手动操作重合闸隔离故障的效率, 次/h;

c 为状态评估效率, 即状态评估反映设备实际状态的概率;

θ_{ins} 为保护由运行状态到定期检修的转移概率, $\theta_{ins} = 1/Q$, 次/h; Q 为保护装置定期检修周期, h;

θ_c 为保护由运行状态到状态检修的转移概率, $\theta_c = c/T$, 次/h; T 为保护装置状态评估周期, h;

θ 为保护由运行状态到检修状态的转移概率, $\theta = \theta_{ins} + \theta_c$, 次/h;

F_{12} 为保护由良好状态到异常状态的概率, 次/h; F_{13} 为保护由良好状态到严重状态的概率, 次/h; F_{23} 为保护由异常状态到严重状态的概率, 次/h。

保护系统驻留某一状态的概率可由状态转移矩阵解得, 由图1可得状态转移矩阵 A 为:

$$A = \begin{bmatrix} -a_1 & F_{12} & F_{13} & F_C & F_{PP1} & F_{CC} & \theta_{ins} & 0 & 0 & 0 & F_{ST1} \\ 0 & -a_2 & F_{23} & F_C & F_{PP2} & F_{CC} & \theta & 0 & 0 & 0 & F_{ST2} \\ 0 & 0 & -a_3 & F_C & F_{PP3} & F_{CC} & \theta & 0 & 0 & 0 & F_{ST3} \\ 0 & 0 & 0 & -a_4 & 0 & 0 & 0 & S_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -a_5 & F_C & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_6 & 0 & 0 & 0 & S_b & 0 \\ R_i & 0 & 0 & 0 & 0 & F_C & -a_7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_8 & F_P & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_P & -a_9 & 0 & \mu_C \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_m & -a_{10} & 0 \\ \mu_P & 0 & 0 & 0 & 0 & F_C & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{11} \end{bmatrix} \quad (1)$$

矩阵每行元素和为0, 即 $\sum_{j=1}^{11} a_{ij} = 0, i = 1, 2, \dots, 11$ 。

本研究定义各状态的稳态概率矩阵为:

$$P = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4 \ p_5 \ p_6 \ p_7 \ p_8 \ p_9 \ p_{10} \ p_{11}]$$

由状态空间法可得:

$$\begin{cases} P \times A = 0 \\ \sum_{i=1}^{11} p_i = 1 \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可以解得各状态的稳态概率。

保护系统的不可用度为:

$$RelUN = p_5 + p_6 + p_7 + p_8 + p_9 + p_{10} + p_{11} \quad (3)$$

4 算例分析

本研究以实际线路单一保护系统为例, 采用文献[5]中的相关数据, 以检修周期 Q 为自变量, 保护不可用度 $RelUN$ 为因变量, 考察 Q 在 $1\text{h} \sim 10^6\text{h}$ 内变化时, 检修周期与保护不可用度之间的关系。

(1) 定期检修下保护装置的可用度分析。状态评估效率 $c=0$ 时, 保护装置实际上处于定期检修。本研究分别取保护自检率 s 为 $0, 0.5, 0.9$, 考察3种情况下的保护不可用度与检修周期的关系。结果如图2所示。

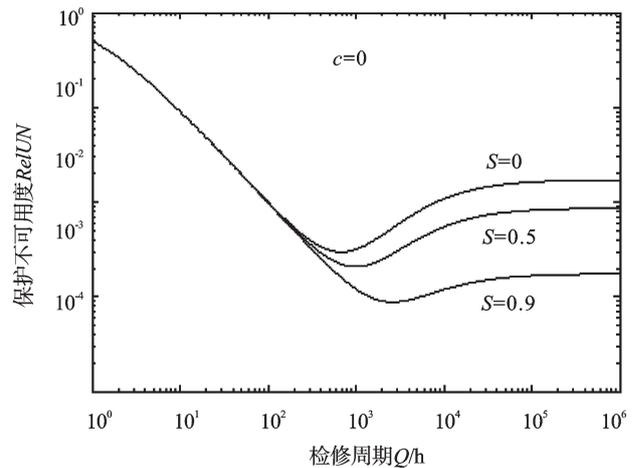


图2 定期检修下自检对保护不可用度的影响

从图2中可以看到, 当保护装置自检概率 $s=0$ 时, 保护不可用度随检修周期的增长而逐渐降低, 在 800h 附近取得最小值 0.3% , 即最优检修周期为 800h , 此后保护不可用度随检修周期的增长而逐渐升高; 当保护装置自检概率 $s=0.5$ 时, 最优检修周期约为 1000h , 保护不可用度最小值为 0.2% ; 当保护装置自检概率 $s=0.9$ 时, 最优检修周期约为 4000h , 保护不可用度最小值为 0.087% 。

由此可见, 通过自检可以提高保护装置的可靠性, 自检概率越高, 保护装置的可靠性也越高, 同时最优检修周期也越长。

(2) 状态检修下保护装置的可用度分析。本研究取保护自检率 $s=0.5$, 状态评估周期 $T=1$ 周, 分别取状态评估效率 c 为 $0, 0.2, 0.5$, 考察保护不可用度与检修周期的关系。结果如图3所示。

从图3中可以看到, 状态评估效率 $c=0$ 时, 检修方

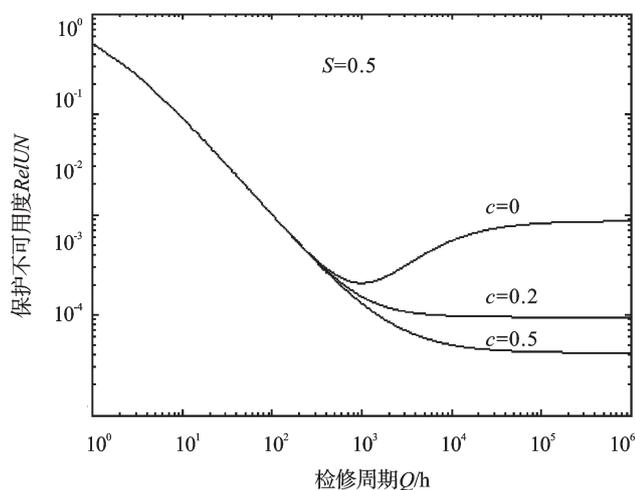


图3 不同评估效率对保护不可用度的影响

式为定期检修,保护不可用度随检修周期的增长先减小后增大,最优检修周期约为1 000 h,此时保护不可用度为0.2%;当状态评估效率 $c=0.2$ 时,保护不可用度随检修周期的增长而下降,此时检修周期增长不会降低保护的可用度,且保护不可用度最小值有所下降,约为0.09%;当状态评估效率 $c=0.5$ 时,检修周期越长,保护不可用度越低,保护不可用度最小值下降至0.04%。

由此可见,状态检修可以延长保护装置的最优检修周期,同时可以提高保护装置的可用度,状态评估效率越高,保护装置可用度越高。状态检修可以有效提高保护的可靠性。

由图2和图3可以看出,定期检修下保护装置的可用度在最优检修周期处取得最大值,检修周期过长或过短,保护装置的可用度都不能达到最大;高自检率的保护装置具有较长的最优检修周期。

本研究对保护装置进行状态检修后,通过状态评估可以及时发现保护装置的异常状态,因此,状态检修下保护装置的检修周期可以大大延长,同时保护装置具有更高的可用度,过频的检修只会降低保护装置的可用度;状态评估的效率越高,对装置异常状态发现的概率越大,因此在较高的评估效率下保护装置具有更好的可靠性。

5 结束语

状态空间法是对继电保护系统进行可靠性分析的

有效方法,本研究运用状态空间法,建立了保护装置在状态检修下的马尔科夫模型。分析结果表明,通过保护装置的自检功能可以排除装置的部分故障,提高保护的可靠性,对于自检不能发现的问题,可以通过状态评估来发现其中的部分故障。通过状态评估和状态检修,可以延长保护的检修周期并提高保护的可用度。

考虑到当前情况下状态评估不一定能发现继电保护装置的所有隐患,因此实行一定周期的定期检修仍是必要的。当状态评估效率较高时,检修周期的增长不再会降低保护装置的可用度,此时可以不再进行定期检修,从而实现状态检修的目标。

参考文献(References):

- [1] ANDERSON P M, AGARWAL S K, ASSOCIATES PM, et al. An improved model for protective system reliability [J]. **IEEE Transactions on Reliability**, 1992, 41(3):422-426.
- [2] ANDERSON P M. An improved reliability model for redundant protective system—Markov models [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1997, 12(2):573-578.
- [3] KUMN J J, WEBER M S, HOU D. Predicting the optimum routine test interval for protective relays [J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1995, 10(2):659-665.
- [4] 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.
- [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):6-10, 14.
- [6] 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系统可靠性分析模型[J]. 电网技术, 2008, 32(13):94-99.
- [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[J]. 中国电机工程学报, 2007, 25(9):44-48.
- [8] 许 婧,王 晶,高 峰,等. 电力设备状态检修技术研究综述[J]. 电网技术, 2000, 8(8):48-52.
- [9] 高 翔. 继电保护状态检修应用技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2008.
- [10] 曹晋华,程 侃. 可靠性数学引论[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.

[编辑:李 辉]