http://www.kekaoxing.com

第 21 卷 第 6 期
2001 年 6 月

中 国 电 机 工 程 学 报
Proceedings of the CSEE

Vol. 21 No. 6 Jun. 2001
c 2001 Chin. Soc. for Elec. Eng.

文章编号:0258-8013 (2001) 06-0063-03

继电保护装置可靠性及其最佳检修周期的研究

李永丽, 李致中, 杨 维

(天津大学电力系,天津 300072)

STUDY OF RELIABILITY AND OPTIMAL ROUTINE TEST INTERVAL OF PROTECTIVE RELAYS

LI Yong-li, LI Zhi-zhong, YANG Wei

(Tianjin University, Tianjin 300072, China)

ABSTRACT: The study of reliability is to calculate the probabilities that the protective relays fail to operate or unwanted operate. A Markov Probability model has been established in this paper to evaluate the reliability of protective relays. Using the state space method, the state probabilities and reliability indices has been calculated and the optimum routine test interval of protective relays can be obtained. The difference in the optimum routine test intervals between traditional relays and Microprocessor-based relays has also been discussed. The theoretical foundation has been established to decide the optimum routine test interval for digital relays.

KEY WORDS: reliability; markov model; the optimal routine test interval; probability

摘要:针对继电保护装置可靠性(即其误动和拒动的概率)的研究,建立了评价继电保护装置可靠性的马尔科夫模型;运用状态空间法计算了继电保护装置的状态概率和可靠性指标;分析了自检周期对保护装置故障率的影响。研究了保护装置最佳检修周期的确定和带自检的微机保护装置和不带自检的传统保护装置在最佳检修周期上的差异;为确定保护装置的最佳检修周期提供了理论依据。

关键词:可靠性; 马尔科夫模型; 最佳检修周期; 概率

中图分类号: TM774　　**文献标识码**:A

1 引言

继电保护装置在电力系统中发挥着重要作用,其正常工作与否将对电力系统的运行造成重大影响,因此如何提高继电保护装置的可靠性也就成为人们日益关注的重要课题。

对继电保护装置进行可靠性分析的目标是找出影响其可靠性指标的因素及设计中的薄弱环节,并且为确定其定期维护及检修的最佳时间间隔提供一定的理论指导,尽量减小保护装置误动或拒动的风险。

对传统的继电保护装置来说,它不提供自检或状态监视的功能,因此需要严格执行定期检修,以发现保护装置潜在的缺陷或故障,减少误动或拒动的几率。在其元器件已选定的条件下,可靠性的提高在很大程度上依赖于最佳检修周期的确定。

对微机继电保护装置来说,由于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,故而其检修周期应与传统的保护装置有较大的差别。目前,国内外已有一些关于保护装置可靠性评估的文章,但它们对保护装置状态划分并不全面。

在进行可靠性分析时,常用的方法有概率法、马尔科夫模型法、故障树分析法等[1]。由于继电保护系统属于可修复系统,不适合于用概率法来求解,因此本文运用马尔科夫状态模型法,综合继电保护装置及被保护元件的各种运行状态,包括保护装置的自检、拒动和误动等,并以自检周期为自变量,分析自检周期对保护装置故障率的影响,为确定保护装置的最佳检修周期提供理论依据。

2 保护装置的状态空间模型

保护装置的故障类型主要有两种:误动和拒动。保护装置的误动和拒动可能是因为保护装置的硬件故障,也可能是人为因素造成。同时,微机保护装置自动检测技术的应用,也大大降低了保护装置误动和拒动的概率。所以,用于保护装置可靠性分析的状态空间模型应综合考虑所有的情况。

运用马尔科夫模型分析保护装置的可靠性时,应先建立保护装置和被保护元件状态模型,再利用状态空间法进行分析。其状态空间图见图 1。图中,

© 1995-2006 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

C 表示被保护元件;C 表示与 C 相邻的元件;P 表示保护装置;UP 表示 C 或 P 处于正常运行状态;DN 表示 C 或 P 处于故障状态;ISO 表示 C 因检修或故障而处于隔离状态,C 已从一次系统中断开;INS 表示对 P 进行定期检修的状态,REP 表示 P 处于维修状态。

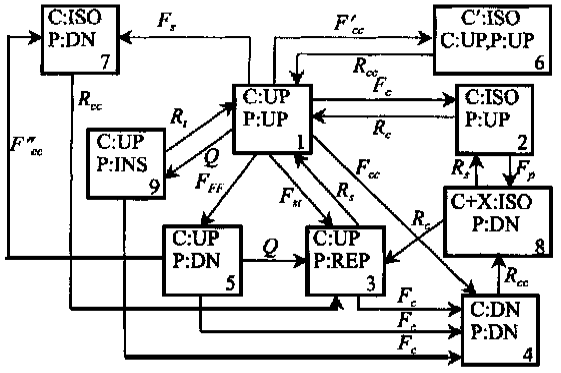

图 1 P 的状态空间模型

Fig. 1 State space model of a protective relay

对 P 的可靠性研究中,作以下假设:

(1) 当定期检修或因故障停运后检修时,能够检测出 P 的故障;

(2) 检修时 P 必须停运;

(3) 对 P 检修过程中不导致新的故障;

(4) 检修之后 P 能恢复到完好水平。

状态 1 表示 C 和 P 均处于正常运行状态。当 C 发生故障后,若 P 正确动作并将 C 隔离,则进入状态 2。

状态 2 是指 C 发生故障,但 P 正确动作使 C 隔离。C 经过检修后恢复正常,则又回到工作状态 1。

状态 4 是指 P 和 C 均发生故障的情况。若 P 先发生了故障但没有被发现,在以后的某一时刻 C 恰好也出现了故障,这样就导致两者都不可用。由于 P 不能正确动作,使得故障范围进一步扩大,于是进入状态 8。在该状态下,由远后备保护动作来隔离 C。而该后备保护动作时,显然将导致更大范围的电力系统设备退出运行,这在图中用 C + X:ISO 来表示。其中 X 表示由于后备保护动作而额外切除的设备。另外,在状态 2,当 C 被隔离时,如果 P 恰好也发生故障,则进入状态 8。

状态 5 是一种复合状态,包括 2 种可能的情况:①由于保护的整定错误,使其工作在一种有隐患的情况下,当发生区外故障时,整定错误使得 P 误动作,断路器跳闸,从而进入状态 7;②P 发生了故障而自检未检出,直到对 P 进行定期检修时才发现该故障,于是进入状态 3。

状态 3 是 C 正常工作而 P 处于维修的状态。另外,在状态 1,对于有自检的 P 来说,当其发生故障时,很可能通过自检而被发现,其可能性的大小可用自检概率来衡量,并发出警报,从而进入状态 3 进行维修。

状态 7 是指 P 误动而使本无故障的 C 隔离的情况。P 误动作进入状态 3 进行检修。

状态 9 是在 C 正常运行时,对 P 进行定期检修的一种状态,这也是确保 P 长期正常工作的一种重要手段。至于检修周期的确定,则与所列的几个状态有一定的关系。

状态 6 是一种特殊情况。到目前为止,P 的正确动作率仍是用 P 的正确动作次数与总动作次数之比来衡量。实际上这种评价方法并不能完全反映保护的实际工作情况。在区外或反方向发生故障时,如果 P 起动但未误动,也是对保护选择性的考验,应属于 P 的正确动作。所以,状态 6 是指 C 区外或反方向故障而 P 有选择性的正确反应,并且未跳闸的情况。

对 P 可靠性的评价,采用 P 失效率 $RelUN$ (Relay Unavailability)指标表示。P 失效率实际上指保护不可用的概率,是图中所示状态 3、4、5、7、8、9 的概率之和。该指标考虑了 P 由于各种因素导致的误动和拒动情况,反映了其可靠性程度的高低。

3 用于 P 可靠性指标计算的状态空间法

利用图 1 的状态空间模型,可以计算 P 失效率,图中的转移概率定义如下:

F_P 为 P 硬件故障率,次/h;

S_T 为自检效果系数,即通过自检能发现 P 故障的概率,默认为 90 %;

F_{ST} 为通过自检检出的 P 故障次数($F_P \times S_T$),次/h;

F_{FF} 为 P 发生故障而未被自检发现的次数 $F_P \times [1 - S_T]$,次/h;

F_C 为 C 的故障率,次/h;

F_{CC} 为 P 故障时,C 发生故障的概率,次/h;

F'_{CC} 为区外或反向故障 P 启动而未误动的发生率,次/h;

F''_{CC} 为由于整定错误而导致区外故障时 P 误动的发生率,次/h;

© 1995-2006 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

http://www.kekaoxing.com

F_S 为 C 正常运行状态下 P 误动的概率,次/ h

R_C 为修复 C 所需的时间,为将时间统一,次/ h;

R_t 为对 P 进行定期检修所花时间,次/ h;

R_s 为修复 P 所需的时间,次/ h;

R_{CC}为 P 启动至整组复归的时间,次/ h;

Q 为定期检修周期,次/ h。

利用马尔科夫模型来求解各状态的概率。由文[1]可知,保护系统驻留在某一状态的概率可通过马尔科夫状态转移概率矩阵解出。定义该矩阵为

$$A=\begin{bmatrix} -a_{11} & F_C & F_{ST} & F_{CC} & F_{FF} & F'_{CC} & F_S & 0 & Q \\ R_C & -a_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_P & 0 \\ R_S & 0 & -a_{33} & F_C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -a_{44} & 0 & 0 & 0 & R_{cc} & 0 \\ 0 & 0 & Q & F_C & -a_{55} & 0 & F''_{CC} & 0 & 0 \\ R_{CC} & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{cc} & 0 & 0 & 0 & -a_{77} & 0 & 0 \\ 0 & R_s & R_C & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{88} & 0 \\ R_t & 0 & 0 & F_C & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{99} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中　$a_{11}=F_C+F_{ST}+F_{CC}+F_{FF}+F'_{CC}+F_S+Q$;

$a_{22}=R_C+F_P$; $a_{33}=R_S+F_C$; $a_{44}+R_{cc}$; $a_{55}=Q+F_C+F''_{CC}$; $a_{66}=R_{CC}$; $a_{77}=R_{cc}$; $a_{88}=R_C+R_s$; $a_{99}=R_t+F_C$

再定义 9 个状态的驻留概率矩阵为

$$P=[P_1\ P_2\ P_3\ P_4\ P_5\ P_6\ P_7\ P_8\ P_9] \quad (2)$$

$$P\times A=0 \quad (3)$$

又因为

$$\sum_{i=1}^{9}P_i=1 \quad (4)$$

联立求解以上 2 式,便可得到 P_1, P_2, …, P_9,以及 P 的失效率,即

$$RelUN=P_3+P_4+P_5+P_6+P_7+P_8+P_9 \quad (5)$$

4　计算结果及分析

在计算中我们以平均检修周期 Q 为自变量,P 失效率 $RelUN$ 为因变量,使检修周期在 1～60000 h 的范围内变化,求出相应的 $RelUN$,并将计算结果绘成曲线[2～4]如图 2 所示。由图 2 可知,检修周期从 0～1000 h 变化时,P 失效率也随之降低,大约在 1050 h 左右达到最小值,而此后有增加的趋势。也就是说,大约每隔 1050 h 进行一次检修,可使 P 失效率的值降至最低。相反,若检修周期太短,对 P 的检修过于频繁,一方面要影响 P 的正常运行,另一方面对提高 C 运行的可靠性不利。

图 3 显示了自检对 P 失效率的影响。对无自检的传统的保护装置,设 $ST=0$,而对有自检的微机继电保护装置,设 $ST=90\%$。容易看出,对无自检的 P,其最佳检修周期在 500～600 h 之间,并且其 $RelUN$ 值随检修周期的加大而迅速增加,大约是带自检的微机 P 的 10 倍。由此我们可以看出,微机继电 P 相对于传统的无自检的 P 在可靠性方面有很大的提高。另外,由于微机 P 在线自检功能的存在,也使其定期维护检修的时间比传统保护增长。

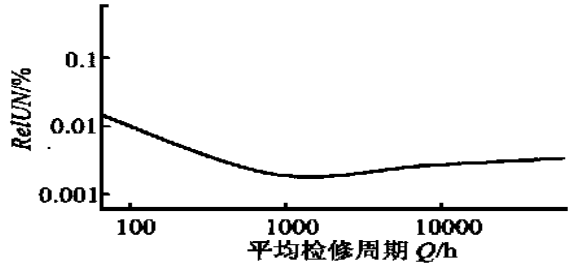

图 2　检修周期对 RelUN 的影响

Fig. 2　Influence of routine test intervals to RelUN

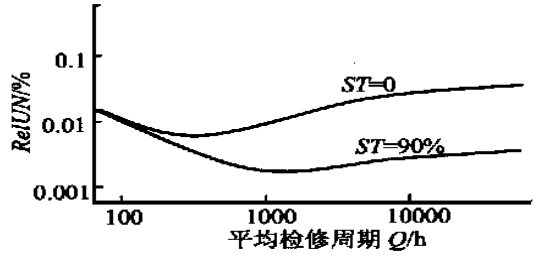

图 3　自检对 RelUN的影响

Fig. 3　Influence of self-testing to RelUN

5　结论

对于有自检的微机继电P来说,可以通过自检

(下转第 71 页 continued on page 71)

© 1995-2006 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd.　All rights reserved.

精度较高的测距结果。

5 结论

基于小电流接地系统线路单相接地故障特征分析,本文提出了采用故障后暂态电气量来实现高精度故障点定位。

由于现有的多维小波神经网络不适合于对故障后暂态电气量进行分析,藉此本文推广了小波神经网络的概念,提出了一类适合于信号时间序列分析的时间序列小波神经网络模型。

根据电力系统故障暂态信号的特征,对提出的时间序列小波神经网络采用了自适应尺度、位置调节,建立了能实现故障测距的小波神经网络模型,给出了训练算法。然后将其应用于小电流接地系统馈线单相接地故障测距中,仿真结果表明,完全能够满足实际的需要。

参考文献:

[1] 束洪春, 许承斌, 徐贤敏(Shu Hongchun, Xu Chengbin, Xu Xianmin). 10 kV 或 6 kV 直配线路单相接地故障测距的新算法(New algorithm for single-line-to-ground fault location on 10 kV or 6 kV direct distribution line)[J]. 中国电机工程学报(Proceeds of the CSEE), 1995, 15(5):423-428.

[2] Zhang Qingchao, Zhang Yao, Song Wennan, *et al*. Transmission line fault location for single-phase-to-earth fault on non-direct-ground neutral system[J]. IEEE Trans on Power Deliver 1997, 12(4):1086-1090.

[3] Inoue N, Tsunekage T, Sakai S. On-line fault location system for 66 kV underground cables with fast O/E and fast A/D technique[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(1):579-584.

[4] 贾文超, 王妍哲(Jia Wenchao, Wnag Yanzhe). 基于验证法的树形配电线路单相接地故障测距算法的研究(Study on algorithm for single single line-to ground fault location in radical distribution network by voltage verification method)[J]. 电网技术(Power System Technology), 1999, 23(7): 43-45.

[5] Zhang Q, Benveniste A. Wavelet networks[J]. IEEE, Trans Neural Networks, 1992, 3(11): 889-898.

[6] Hong J. Identification of stable systems by wavelet transform and artificial neural networks[D]. Univ. Pittsburgh, 1992.

[7] Pati Y C, Krishnaprasad P S. Analysis and synthesis of feedforward neural networks using discrete affine wavelet transformations[J]. IEEE Trans Neural Networks, 1993, 4(1):73-85.

[8] Oinis Chaari, Patrick Bastard, Michel Meunier. Prony's method: an efficient tool for the analysis of earth fault currents in petersen-coil-protected networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(3):1234-1241.

[9] 张哲, 陈德树(Zhang Zhe, Chen Deshu). 卡尔曼滤波算法与富氏算法的比较(Analysis and comparison of kalman filter and fourier algorithm)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power System), 1990, 14(4): 8-16.

[10] Zhang Q. Using wavelet network in nonparametric estimation[J]. IEEE Trans on neural networks, 1997, 8(2): 227-236.

[11] Oinis Chaari, Michel, Francoise. Wavelets: A new tool for the resonant grounded power distribution systems relaying[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3): 1301-1308.

收稿日期:2000-06-26; **改回日期**:2000-11-18。

作者简介:

张兆宁(1964-),男,副教授,博士后,研究方向为神经网络、小波分析的理论及其在电力系统中的应用;

毛　鹏(1973-),男,博士,从事电力系统故障测距的研究;

郁惟镛(1940-),男,教授,博士生导师,从事人工智能在电力系统中的应用研究。

(责任编辑　喻银凤)

(上接第 65 页 continued from page 65)

的方式检出装置的潜在故障,避免保护的误动和系统发生故障时保护的拒动。自检的存在还可增大定期检修的间隔。对无自检的 P,则有必要严格执行定期检修,且此周期比有自检 P 的检修周期要短得多。因此,研制带有完备自检功能的 P 是十分必要的。

参考文献:

[1] 郭永基(Quo Yongji). 电力系统可靠性原理和应用(上,下)(Reliability principle and application of power system)[M]. 北京: 清华大学出版社(Beijing: Hsinghua University Press), 1986.

[2] Kumm J J, Weber M S, Schweiter E O. Predicting the optimum routine test interval for protective relays[M]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(2):659-664.

[3] Anderson P M, Aggarwal S K. An improved model for protective-system reliability[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 41(3):422-426.

[4] Augusto F Brandao, Eduardo Ceser Senger. Reliability of digital relays with self-checking methods[J]. Electric Power and Automation Engineering, 1993, 15(2):59-63.

[5] 陈德树(Chen Deshu). 继电保护运行状况评价方法的探讨(Study on evaluation of protective relay operation)[J]. 电网技术(Power Sysetm Technology), 2000, 24(3):1-2.

[6] 李奎, 陆俭国(Li Qui, Lu Jianguo). 保护类继电器的可靠性指标及其验证试验理论分析(Reliability measure and test theory analysis of relays)[J]. 电工技术学报(Journal of Electrical Technology), 1997, 6:50-54.

[7] 洪梅, 等(Hong Mei, *et al*). 保护系统的概率模型及其对组合系统可靠性的影响(Probability model and its influence on reliability for protection system)[J]. 电网技术(Power System Technology), 1997, 21(8):44-48.

收稿日期:2000-07-13; **改回日期**:2001-02-07。

作者简介:

李永丽,女,副教授,博士;

李致中,硕士。

(责任编辑　喻银凤)

© 1995-2006 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.