

保护系统可靠性与保护动作可靠性

张胜宝¹, 王钢², 丁茂生³, 李晓华²

(1 广东电网公司深圳供电局, 广东 深圳 518001; 2 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640;

3 宁夏电力调度中心, 宁夏 银川 750001)

摘要: 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。提出保护系统可靠性指标: 保护拒动失效率和保护误动失效率; 保护动作可靠性指标: 保护拒动频率和保护误动频率。建立数字保护系统软硬件失效率模型, 求解保护系统可靠性指标; 建立保护动作的状态空间模型, 求解保护动作可靠性指标。该方法适用于各种保护的可靠性综合测评和定量管理, 也是开展保护科学检修工作的基础。

关键词: 继电保护; 系统可靠性; 动作可靠性

中图分类号: TM77; TM732

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2006)15-0001-04

0 引言

由于我国现阶段电网结构较薄弱, 系统对故障的承受能力有限, 所以在电网故障时继电保护的可靠正确动作对系统安全稳定运行至关重要。数字继电保护装置因其灵活、可靠、经济等优点正逐步取代传统的保护装置而被广泛地应用于电力系统中并不断发展, 担负着保证电力系统安全、稳定运行的重任, 因此, 有必要对其可靠性进行系统地定量研究和分析。但长期以来电力系统可靠性的研究主要侧重于一次系统, 对保护等二次设备/系统应用可靠性理论定量分析的研究甚少。只有少数研究者做了一些尝试性的工作。文献[1]研究保护装置的电磁兼容问题, 探讨硬件设计中减少干扰, 增强可靠性的方法; 文献[2]探讨数字保护软件可靠性, 指出当前微机保护开发人员对软件可靠性认识的误区, 提出一种微机保护软件开发的标准流程。但这些研究都还处于定性研究阶段, 没有从可靠性理论的角度定量分析。文献[3]用软件可靠性影响因素加权法对线路保护装置的可靠性进行评估, 但文中没有综合数字保护装置软件和硬件两方面因素, 给出定量测评其可靠性的系统方法。由于数字继电保护可靠性涉及因素较多, 评估难度较大, 所以到目前为止还无成熟的指标和方法来定量评估其可靠性水平。

为此, 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。提出保护系统可靠性和保护动作可靠性指标及其定量评估方法。建立数字保护系统软硬件失效率模型, 求解保护系统可靠性指标: 保护拒动失效率、保护误动失效率。建立保护动作的状态空间模型, 求解保

护动作可靠性指标: 保护拒动频率和保护误动频率。

1 保护可靠性研究特点

继电保护是一种特殊的设备, 在全面、系统、定量研究和分析其可靠性水平时应考虑其以下特点:

1) 本文研究的对象不是单个保护装置, 而是指由保护交流输入回路、数字继电保护装置和操作输出回路三部分共同组成的系统。

2) 可靠性是保护系统的基本要求之一。保护可靠性水平和很多因素有关, 包括: 保护的原理、装置的硬件结构和工艺、软件流程和运行维护水平等。

3) 保护系统的主要功能是隔离故障设备, 增强系统的安全性, 所以可靠性指标的制定应反映电网安全性的要求。

4) 保护系统的失效状态可分为两种: 误动失效状态和拒动失效状态, 两种失效的后果不同, 因此在制定其可靠性指标时应分别考虑两种不同的失效情况。

5) 保护动作的情况与一次系统密切相关。保护自身的误动失效会引起保护误动, 但保护自身拒动失效只有和被保护对象故障同时发生时, 保护才拒动。所以可将保护的可靠性研究分为两个方面: 一方面分析保护系统的失效情况, 研究保护系统自身的可靠性水平, 这与一次系统没有关系, 本文称为保护系统可靠性; 另一方面, 要综合保护和一次设备的情况, 建立起一二次综合模型, 分析保护正确动作的情况, 本文称为保护动作可靠性。

2 保护可靠性指标

2.1 保护系统可靠性指标

可靠性的基本定义是: 设备在规定的条件下和

预定的时间内,完成特定功能的能力。本文基于保护系统的特点,定义保护误动失效率、保护拒动失效率两个保护系统可靠性指标。

可靠性研究中最基本的可靠性指标是失效率,它表示系统已经无故障的工作到时间 t 而在 t 后无限小的时间 dt 内失效的概率。本文定义保护拒动失效率和保护误动失效率,分别表示保护单元已经无故障的工作到时间 t 而在 t 后无限小的时间 dt 内发生拒动失效和误动失效的条件概率。定义如下:

$$p_j = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t} P[t < T_j \quad t + dt \mid T_j > t] \quad (1)$$

$$p_w = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t} P[t < T_w \quad t + dt \mid T_w > t] \quad (2)$$

式中: T_j 、 T_w 为保护发生拒动失效和发生误动失效的时间。

保护系统总的失效率可表示为:

$$p = p_j + p_w \quad (3)$$

2.2 保护动作可靠性指标

目前,我国电力系统对保护动作可靠性的研究主要是保护正确动作率 p_{ra} 和不正确动作率 p_{wa} 的统计和分析^[4-7],这两个指标分别定义为:

$$p_{ra} = (n_r / n_a) \times 100\% \quad (4)$$

$$p_{wa} = [(n_j + n_w) / n_a] \times 100\% \quad (5)$$

式中: n_r 为同类保护一定时间内正确动作次数; n_a 为同类保护一定时间内总的动作次数; n_j 为同类保护一定时间内拒动次数; n_w 为同类保护一定时间内误动次数。

保护正确动作率 and 不正确动作率两个指标具有简单、实用和统计方便的特点,可反映各电压等级保护的动作为可靠性水平,对保护的可靠性管理起到了重要作用。但这两个指标还存在一定的不合理性^[8,9],不能反映保护具有误动和拒动两种不同的失效模式,无法全面地测评保护的可靠性水平,以激发保护工作人员预防故障的积极性。为此本文定义了保护拒动频率和保护误动频率,分别表示保护系统在单位时间内发生拒动次数和误动次数的期望,两个指标定义为:

$$f_j = \frac{n_j}{\sum_{i=1}^{n_j} (T_{MTD_i} + T_{MTW_i})} \quad (6)$$

$$f_w = \frac{n_w}{\sum_{i=1}^{n_w} (T_{MTW_i} + T_{MTR_i})} \quad (7)$$

式中: T_{MTD} 和 T_{MTW} 为保护发生拒动和误动的的时间; T_{MTR} 和 T_{MTW} 为拒动和误动后的修复时间。

保护正确动作率是保护在运行中的数据统计,它是从一次系统运行的角度来表征保护和被保护设备运行的综合情况,其取值不但与保护本身的可靠性有关,也与一次系统的运行情况有关。

3 保护系统失效率求解

保护系统由保护交流输入回路、数字继电保护装置和输出操作回路三个部分组成。交流输入回路指电流互感器、电压互感器及其连接线路;数字保护装置是微控制器系统;输出操作回路是指装置出口分合闸回路。图 1 是两种典型的保护系统的配置逻辑框图,图 1(a)是单一保护配置,图 1(b)是双重化保护配置。

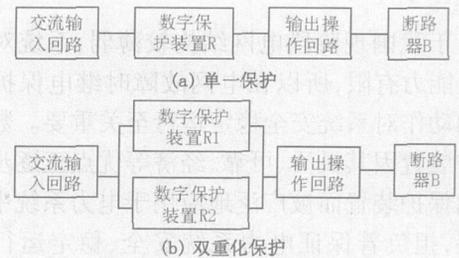


图 1 保护系统逻辑图

Fig 1 Logic diagram of protection system

分析单一保护工作过程,得单一保护系统广义拒动失效率和广义误动失效率为:

$$p_j = l_{ij} + l_{oj} + r_j + b_j \quad (8)$$

$$p_w = l_{iw} + m_w + k_w + b_w \quad (9)$$

式中: l_{ij} 为交流输入回路拒动失效率, l_{oj} 为输出操作回路拒动失效率, b_j 为断路器拒动失效率, l_{iw} 为交流输入回路误动失效率, k_w 为输出操作回路误动失效率, b_w 为断路器误动失效率。

双重化保护配置时,保护装置的误动为可靠性串联模型,保护装置的拒动为可靠性并联模型。分析保护的工作过程,得保护系统拒动和误动的故障树如图 2 所示。

保护系统广义拒动失效率和广义误动失效率为:

$$p_j = l_{ij} + l_{oj} + b_j + r_{j1} r_{j2} (r_{h_{j1}} + r_{h_{j2}}) \quad (10)$$

$$p_w = m_{w1} + m_{w2} + b_w + l_{iw} + k_{ow} \quad (11)$$

式中: $r_{h_{j1}}$ 、 $r_{h_{j2}}$ 为两保护装置硬件失效平均修复时间。

这里需要说明的是保护系统的配置多种多样,图 2 只是两种典型的配置。但无论保护结构多么复

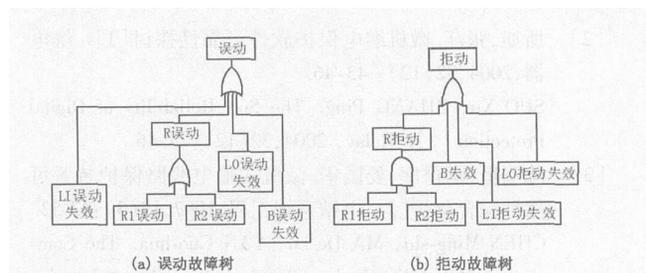


图 2 双重化保护系统故障树

Fig 2 Fault tree of double protection system

杂,都可用故障树的方法得到保护系统硬件拒动失效率、硬件误动失效率、广义拒动失效率和广义误动失效率。

数字保护软件有自检的功能,可自检出部分保护系统硬件的故障,保护真正拒动失效率和误动失效率为:

$$p_j = (1 - c) h_j + r_{sj} = (1 - sc) p_j \quad (12)$$

$$p_w = (1 - c) h_w + r_{sw} = (1 - sc) p_w \quad (13)$$

式中: c 为硬件失效自检成功的概率,本文称硬件自检概率; sc 为保护系统失效自检成功的概率,本文称为保护系统自检概率。

4 保护动作可靠性

4.1 保护动作可靠性模型

保护动作可靠性与两方面因素有关: 保护系统自身的可靠性水平; 被保护对象的故障情况。所以要预测保护动作的可靠性就需要在保护系统可靠性研究的基础上,建立保护系统和被保护对象的综合可靠性模型,即建立保护动作的马尔科夫状态空间模型。

分析保护的動作过程,得保护动作状态空间如图 3所示。图中 L为保护对象,S表示其正常工作,F表示其出现故障;P为保护系统,W表示其误动失效,J表示其拒动失效,NA表示其正确不动作,A表示其正确动作,CS表示其失效自检成功; μ_p 为保护系统平均修复率, λ_1 为被保护对象故障率, μ_1 为被保护对象平均修复率, μ_m 为定期检修率。状态 0表示被保护对象正常工作,保护正确不动作;状态 1表示被保护对象出现故障,保护正确动作;状态 2表示保护对象正常工作,保护处于拒动失效状态,但没有发生拒动;状态 3表示被保护对象正常,保护处于误动失效状态,且发生误动;状态 4表示被保护对象故障,保护拒动;状态 5是被保护对象正常,保护处于自检失效状态。

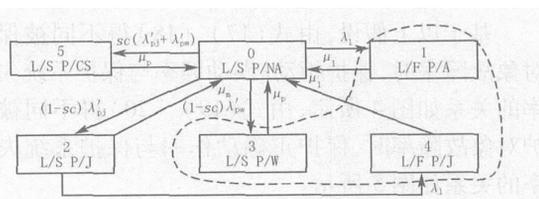


图 3 保护动作状态空间

Fig 3 State space of protection action

由保护动作状态空间图得系统的转移矩阵为:

$$T_2 = \begin{bmatrix} -(1 + p_w + p_j) & 1 & (1 - sc) p_j & (1 - sc) p_w & 0 & sc(p_j + p_w) \\ \mu_1 & -\mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_m & 0 & -(\mu_m + \lambda_1) & 0 & 1 & 0 \\ \mu_p & 0 & 0 & -\mu_p & 0 & 0 \\ \mu_1 & 0 & 0 & 0 & -\mu_1 & 0 \\ \mu_p & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_p \end{bmatrix}$$

由状态空间法得方程:

$$[p_0, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5] \cdot T_2 = 0 \quad (14)$$

$$p_0 + p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 = 1 \quad (15)$$

解状态方程得各状态的稳态概率:

$$P = [p_0, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5] \quad (16)$$

保护误动频率和保护拒动频率可表示为:

$$f_w = f_3 = p_3 \mu_p \quad (17)$$

$$f_j = f_4 = p_4 \mu_1 \quad (18)$$

根据式(4)、(5)得保护的正確动作率和不正确动作率可表示为:

$$p_{ra} = \frac{f_1}{f_1 + f_3 + f_4} = \frac{p_1 \mu_1}{p_1 \mu_1 + p_3 \mu_p + p_4 \mu_1} \quad (19)$$

$$p_{nra} = \frac{f_3 + f_4}{f_1 + f_3 + f_4} = \frac{p_3 \mu_p + p_4 \mu_1}{p_1 \mu_1 + p_3 \mu_p + p_4 \mu_1} \quad (20)$$

4.2 保护动作可靠性分析

为分析保护动作可靠性指标与保护系统失效率及被保护线路故障率的变化关系,本节做如下假设:

1) 保护的广义失效率为广义拒动失效率和广义误动失效率的和,表示为 $p = p_w + p_j$ 。

2) 取保护自检概率 $sc = 80\%$, 定期检修率 $\mu_m = 2.0/a^{-1}$, 保护故障修复率 $\mu_p = 1/8/h^{-1}$ 。

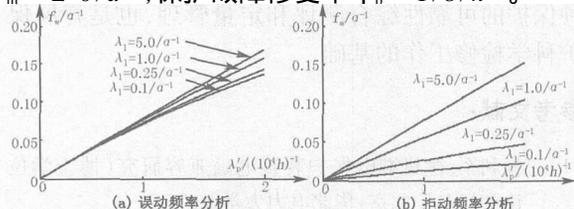


图 4 保护动作频率 保护广义失效率关系

Fig 4 Failure action frequency rate compared with protection general failure rate

基于以上假设,由式(17)、(18)得不同被保护对象故障率时,保护拒动、误动频率与保护系统失效率的关系如图4所示;由式(19)、(20)得不同被保护对象故障率时,保护正确动作率与保护系统失效率的关系如图5所示。

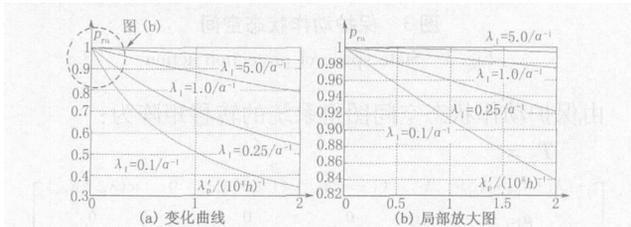


图5 保护正确动作率-保护广义失效率关系

Fig 5 Right action rate compared with protection general failure rate

由图中结果可得:

1) 保护误动频率随保护系统失效率增加而增加,随被保护对象故障率的增大变化很小。

2) 保护拒动频率随保护系统失效率增加而增加,随被保护对象故障率的增大也增大。

3) 保护系统失效率一定时,保护正确动作率随被保护对象的故障率的增大而增大。这也说明统计保护正确动作率来衡量保护特性的不合理性,因为保护正确动作率的提高,并不一定说明保护系统本身可靠性的增加,也有可能是被保护对象可靠性发生变化。

4) 被保护对象故障率一定时,保护正确动作率随保护系统失效率的增加而减小。

5 结论

根据数字保护的工作特点,提出了定量评估保护系统可靠性的指标:保护拒动失效率、保护误动失效率、保护可用度,评估保护动作可靠性的指标:保护拒动频率和保护误动频率。建立了数字保护系统软件、硬件失效率模型、保护系统状态空间模型和保护动作状态空间模型求解以上指标。该方法适用于各种保护的可靠性综合测评和定量管理,也是开展保护科学检修工作的基础。

参考文献:

[1] 程利军. 微机继电保护装置电磁兼容研究(博士学位论文)[D]. 北京:华北电力大学, 2001.
CHENG Li-jun The EMC Study of Digital Protection, Doctoral Dissertation [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2001.

[2] 所旭,张萍. 微机继电保护软件可靠性探讨[J]. 继电器, 2004, 32(12): 43-46.
SUO Xu, ZHANG Ping The Soft Reliability of Digital Protection [J]. Relay, 2004, 32(12): 43-46.

[3] 陈明世,马德库,晏国华. 微机式输电线路保护装置可靠性综合分析[J]. 电站系统工程, 1997, 13(3): 47-52.
CHEN Ming-shi, MA De-ku, YAN Guo-hua The Competitive Reliability Study of Transm it Line [J]. Substation System Engineering, 1997, 13(3): 47-52.

[4] 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 Ye-huai, et al Statistic and Analysis of Protective Relaying and Automation Devices of Power System in China, 2003 [J]. Power System Technology, 2004, 28(20): 48-53.

[5] 周玉兰,王俊永,舒治淮,等. 2002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, 2003, 27(9): 55-59.
ZHOU Yu-lan, WANG Jun-yong, SHU Ye-huai, et al Statistic and Analysis of Protective Relays and Automation Devices of Power System in China, 2002 [J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 55-59.

[6] 周玉兰,王俊永,王玉玲,等. 2001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, 2002, 26(9): 58-63.
ZHOU Yu-lan, WANG Jun-yong, WANG Yu-ling, et al Statistic and Analysis of Protective Relaying and Automation Devices of Power System in China, 2001 [J]. Power System Technology, 2002, 26(9): 58-63.

[7] 周玉兰,许勇,王俊永,等. 2000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, 2001, 25(8): 63-66.
ZHOU Yu-lan, XU Yong, WANG Jun-yong, et al Statistic and Analysis of Protective Relaying and Automation Devices of Power System in China, 2000 [J]. Power System Technology, 2001, 25(8): 63-66.

[8] 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.
CHEN De-shu Study on Evaluation of Protective Relay Operation [J]. Power System Technology, 2000, 24(3): 1-2.

[9] 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): 18-23.
HE Jia-li, GUO Zheng, YANG Xiao-jun, et al Reliability Dynamic Performance Simulation of Protective Relays [J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 18-23.

(下转第9页 continued on page 9)

参考文献:

- [1] 毕天姝,于艳莉,黄少锋,等.超高压线路差动保护电容电流的精确补偿方法[J].电力系统自动化,2005,29(15):30-34.
BI Tian-shu, YU Yan-li, HUANG Shao-feng, et al Novel Accurate Compensation Method of Capacitance Current of UHV Transmission Line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 30-34.
- [2] 樊占锋,李瑞生,张红霞,等.特高压输电线路保护的方案研究——纵联差动保护[J].继电器,2005,33(19):5-9.
FAN Zhan-feng, LI Rui-sheng, ZHANG Hong-xia, et al Research on UHV Transmission Line Protection——Pilot Differential Protection[J]. Relay, 2005, 33(19): 5-9.
- [3] 常宝波,段玉倩,贺家李,等.一种用于零、负序电流纵

差保护的实用选相元件[J].电力系统自动化,2005,29(20):76-80.

CHANG Bao-bo, DUAN Yu-qian, HE Jia-li, et al An Applied Fault Type Selection Method for Line Zero or Negative Sequence Current Differential Protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 76-80.

收稿日期: 2006-03-22; 修回日期: 2006-04-20

作者简介:

常宝波(1971-),男,硕士,工程师,研究方向为高压继电保护产品开发;E-mail: changbaobo@dongfang-china.com

刘力军(1968-),女,硕士,讲师,研究方向为电子技术;

韩 韞(1961-),女,硕士,高级工程师,研究方向为继电保护及工程设计。

A method for compensating capacitance current influence on line current differential protection

CHANG Bao-bo¹, LI Li-jun², HAN Yun¹, XU Guang-teng¹

(1. Yantai Dongfang Electronics Information Industry Co., Ltd, Yantai 264000, China;

2. School of Information Technology, Hebei University of Economy & Business, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: Based on the analysis about the influence of the distributed capacitance current of EHV transmission line on differential current protection, a protection scheme is proposed. The setting value of segregated phase current differential protection is setted 2 times than capacitance current of line while normal operating, negative or zero differential protection setting value are setted 1.5 times than capacitance current. When line charging power, all differential current setting values increase double with some time delay it can avoid the influence of transient capacitance current on all differential protection.

Key words: line current differential protection; capacitance current; transmission line

(上接第4页 continued from page 4)

收稿日期: 2006-02-14; 修回日期: 2006-03-20

作者简介:

张胜宝(1972-),男,硕士,现从事继电保护运行维护与管理工作;

王 钢(1966-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统继电保护及自动化、电力电子;

丁茂生(1977-),男,博士,目前从事电力系统运行管理工作。E-mail: dingmaosheng@nxepc.com.cn

Protection system reliability and protection operation reliability

ZHANG Sheng-bao¹, WANG Gang², DING Mao-sheng³, LI Xiao-hua²

(1. Shenzhen Power Supply Bureau, Shenzhen 518001, China;

2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. Ningxia Electric Power Dispatching Center, Yinchuan 750001, China)

Abstract: Based on the character of relay protection, the protection reliability is divided into protection system reliability and protection operation reliability. The protection system reliability index is protection mis-operation failure rate and protection mal-operation failure rate and the protection operation reliability index is protection mis-operation frequency and protection mal-operation frequency respectively. The hardware and software model is set up to calculate the protection system reliability. The Markov models are established to calculate the protection operation reliability indices. The research is applicable for protections comprehensive assessment and quantitative management.

Key words: relay protection; system reliability; operation reliability