DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240179

双重化继电保护系统可靠性分析方法研究

王幸主[1]，文明浩[1]，李嘉琪[1]，陈永昕[2]

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学)，湖北 武汉 430074;
2. 国网湖北省电力公司电力科学研究院，湖北 武汉 430074)

摘要：忽略共因失效和隐性失效导致现有双重化保护系统可靠性研究得到的系统拒动频率与电网统计数据偏差较大。为此，提出了一种双重化继电保护系统可靠性评估方法。首先采用可靠性框图和状态空间相结合的方法建立双重化保护系统的可靠性模型，模型计及了双重化保护系统的共因失效、可修复性以及隐性失效等因素。然后提出适用于单个多状态二次设备和共因失效二次设备组的时序 Monte-Carlo 法，采用该方法求解可靠性模型获得双重化保护系统拒动概率和拒动频率。算例分析结果表明计及共因失效和隐性失效情况下得到的双重化保护系统拒动频率与电网统计数据较为相符，共因失效会显著减少保护系统双重化配置在可靠性方面带来的优势，提高二次设备的自检性能可以显著提高保护系统的可靠性。

关键词：继电保护系统；可靠性；共因失效；隐性失效；状态持续时间抽样

A reliability analysis method of dual-redundant relay protection systems

WANG Xingzhu[1], WEN Minghao[1], LI Jiaqi[1], CHEN Yongxin[2]

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 2. State Grid Hubei Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Existing study on the reliability of dual-redundant protection systems without accounting for common cause failures and hidden failures leads to a large deviation of fail-to-trip frequency from the power grid statistics. Thus, a method for assessing the reliability of a dual-redundant protection system is proposed. First, a reliability model of the protection system is developed using a combination of a reliability block diagram and state-space approach. This takes into account the common cause failures, repairability and hidden failures of the protection system. Then, a sequential Monte-Carlo method applicable to a single multi-state secondary equipment and common cause failure secondary equipment groups is proposed. This is used to analyze the reliability model to obtain the fail-to-trip probability and frequency of the protection system. The case analysis results show that the fail-to-trip frequency obtained by considering the common cause failure and hidden failure is more in line with the statistics, and that common cause failure significantly reduces the reliability benefits from the dual-redundant configuration of the protection system, while improving the self-checking performance of the secondary equipment can significantly improve the reliability of the protection system.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52277103).

Key words: relay protection systems; reliability; common cause failure; hidden failures; state-duration sampling

0 引言

为了提高继电保护系统的动作可靠性，我国 220 kV 及以上电压等级的电网继电保护普遍采用双重化配置[1]。以国家电网有限公司为例，截至 2015 年底，公司系统内 220 kV 及以上电压等级保护装置双重化率已经达到 100%[2]。现有对双重化继电保护系统的可靠性研究普遍认为两套保护不会同时失效或者失效相互独立[3-5]，得到的故障切除概率在 0.999 999 以上[4-5]。然而电网运行经验表明双重化配置的两套保护同时拒动仍时有发生，如：宁夏电网 330 kV 清水河变电站全停、甘肃电网永登变电站 330 kV 线路保护拒动、某牵引站 220 kV 线路保护拒动[2,6]。因此，有必要对双重化继电保护系统的可

基金项目：国家自然科学基金项目资助(52277103)

靠性开展进一步研究。

文献[3,7-8]采用基于 Markov 过程的状态空间法对双重化保护系统进行可靠性建模和分析，均计及了故障检修、定期检修、自检等因素对系统可靠性的影响。然而，当考虑更多影响保护系统可靠性的因素，以及待评估的保护系统中元件数目增加时，状态空间模型将变得非常复杂[9-10]。例如，文献[8]针对双重化保护系统建立的状态空间模型包含 49 个状态和 150 个状态转移，而文献[10]建立的单套保护系统的状态空间模型仅包含 10 个状态和 22 个状态转移，前者不仅需要获得大量的转移率参数，而且模型的求解效率也明显下降。因此，就双重化保护系统的可靠性建模而言，虽然状态空间法在描述元件和系统全寿命周期内的多个运行状态具有显著优势，但是存在模型过于复杂而导致模型不实用的问题。

为了避免状态空间法存在的上述问题，对于包含了同步时钟源、合并单元、智能终端、保护装置和交换机等多种二次设备的智能变电站继电保护系统，目前研究其可靠性的文献普遍采用简明、直观的可靠性框图法[5,11-13]。其中，文献[11]忽略了保护系统的可修复性，因此无法获得系统可用度或不可用度。而在实际的工程应用中，可修系统的可用度或不可用度及失效频率是更具有价值的可靠性指标[9]。文献[5,12-13]计及了保护系统的可修复性，但是认为保护系统仅具有“正常”和“修复”两个状态，忽略了“隐性失效”状态。继电保护系统的隐性失效指的是不能被自检出而通过电网故障时保护不正确动作或保护定检暴露出的系统缺陷[14]。由于电网大部分时间均处于正常运行状态，而保护定检周期一般为 2~3 年[15]，因此当保护系统发生隐性失效时，该失效可能会长期存在，造成保护的可用性显著下降。通过分析可靠性框图法的原理可知，导致文献[5,11-13]存在上述问题的根本原因在于，可靠性框图法假定元件及元件构成的系统仅具有“正常”和“修复”两种状态，这明显与继电保护可靠性特性不符。

此外，文献[3-5,7-8,11,13]针对双重化保护系统可靠性的研究也都忽略了共因失效这一因素的影响。所谓共因失效(common cause failure, CCF)是指由于某种共同原因造成的多个元件或系统的失效[16]。对于可靠性要求较高而冗余配置的系统而言，共因失效是系统可靠性评估中需要计及的重要因素，而忽略该因素将导致系统的可靠性评价结果过于乐观[9]。

鉴于此，本文采用状态空间、可靠性框图和时序 Monte-Carlo 相结合的方法对智能变电站双重化继电保护系统进行可靠性评估。首先采用状态空间法建立智能变电站单个二次设备包含“正常”、“隐性失效”、“修复”三个状态的可靠性模型和计及共因失效情况下二次设备组的可靠性模型，采用可靠性框图法建立智能变电站双重化线路保护系统的可靠性模型。然后采用时序 Monte-Carlo 法对可靠性模型进行求解，获得保护系统拒动概率和拒动频率。算例分析结果表明在忽略共因失效和隐性失效情况下，求得的双重化保护系统的拒动频率远小于电网实际统计数据，计及共因失效和隐性失效得到的拒动频率与统计数据相符合，验证了本文建立的双重化保护系统可靠性模型的合理性以及模型求解方法的有效性。

1　现有的双重化保护系统可靠性研究

在未明确被保护元件类型的情况下，文献[11]提出的全数字化双重保护系统的拓扑结构及其不拒动可靠性框图模型如图 1 所示。图 1 中，两套保护的失效彼此独立，保护系统及构成系统的元件具有“正常”和“修复”两个状态。TS、MU、EM、SW、PR 分别表示时钟源、合并单元、网络接口、交换机和保护装置。

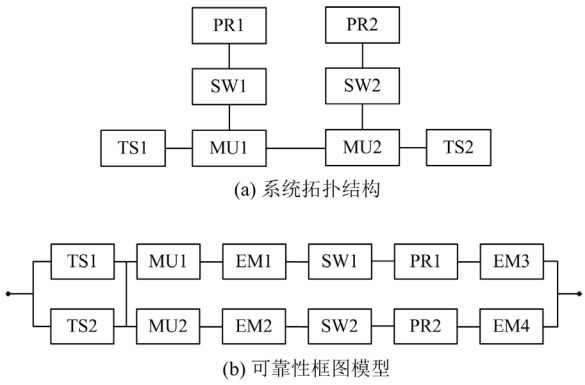

图 1　全数字化双重保护系统

Fig. 1 All-digital dual-redundant protection system

根据串、并联系统的可靠性分析[9]，图 1 所示双重化保护系统的拒动概率 P_J 为

$$P_J = 1-[1-(1-P_{TS1})(1-P_{TS2})][1-(1-P_1)(1-P_2)] \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} P_1 = P_{MU1}P_{EM1}P_{SW1}P_{PR1}P_{EM3} \\ P_2 = P_{MU2}P_{EM2}P_{SW2}P_{PR2}P_{EM4} \end{cases} \quad (2)$$

式中：P_{TS}、P_{MU}、P_{EM}、P_{SW}、P_{PR} 分别表示 TS、MU、EM、SW、PR 的正常概率；P_1、P_2 分别表示除 TS 外第 1 套保护和第 2 套保护的正常概率，同

一类型二次设备的可靠性参数相同。已知某一二次设备 X 失效率 λ_X 和修复率 μ_X，则该二次设备正常概率 P_X 为

$$P_X = \frac{\mu_X}{\lambda_X + \mu_X} \tag{3}$$

假设线路故障率为 λ_L，则双重化线路保护的拒动频率 F_J 为

$$F_J = P_J \times \lambda_L \tag{4}$$

根据文献[2]、2007—2016 年的《国家电网公司年鉴》和 2016 年的《国家电网公司继电保护设备分析评估报告》，可以得到智能变电站典型二次设备的失效率和修复率，如表 1 所示，国家电网有限公司系统内双重化线路保护系统拒动频率约为 1.68×10^{-5} 次/年，220 kV 及以上电压等级输电线路平均故障率约为 0.1328 次/(条·年)。

表 1 智能变电站二次设备可靠性参数

Table 1 Reliability parameters of secondary equipment in smart substations

二次设备类型	失效率λ/(次/(台·年))	修复率μ/(次/(台·年))
时钟源	0.0136	359.90
合并单元	0.0183	422.58
网络接口	0.0136	359.90
交换机	0.0026	359.90
保护装置	0.0131	500.00
智能终端	0.0091	339.53

将文献[11]和表 1 给出的二次设备可靠性参数代入式(1)—式(4)，表 2 给出了双重化保护系统拒动概率和频率。由表 2 可以看出，此时双重化线路保护系统拒动频率均远小于电网公司统计数据。需要说明的是，表 1 中的失效率参数包括误动失效和拒动失效两部分，本次计算中假设均为拒动失效。此外，文献[11]并没有给出二次设备修复率，因此计算过程中采用表 1 中的相应参数。

表 2 双重化线路保护可靠性评估结果

Table 2 Reliability results for dual-redundant line protection

参数来源	文献[11]	本文
拒动概率	5.75×10^{-8}	2.46×10^{-8}
拒动频率/(次/年)	7.63×10^{-9}	3.27×10^{-9}

针对双重化线路保护系统，文献[4-5]分别采用状态空间法和可靠性框图法求得的系统拒动概率最大值为 1×10^{-6} 和 5.39×10^{-8}，对应的拒动频率分别为 1.33×10^{-7} 次/年和 7.16×10^{-9} 次/年，同样远小于电网公司统计数据。综上，现有的双重化保护系统可靠性评估结果与电网统计数据相比偏差较大，评估结果过于乐观。

2 双重化保护系统中的共因失效

电网运行经验表明，共同设计和制造上的缺陷、共同运行环境的变化、人员误操作以及地震和火灾等因素会导致电网中为提高可靠性而冗余配置的元件或系统发生共因失效[9,16]。通过对文献[2,6,17-19]披露的共计 396 起电力系统继电保护事故进行分析总结，本文发现 23 起双重化保护系统共因失效事故，其中误动事故 18 起，拒动事故 4 起，超整定延时动作 1 起。考虑到继电保护双重化配置的目的是为了提高保护系统不拒动的可靠性，除非特殊说明，否则后文涉及的保护可靠性均为不拒动可靠性，保护失效均为拒动失效。

通过对 4 起拒动事故的原因进行统计分析发现，这 4 起事故均与人为失误有关。根据相关技术规程对双重化继电保护系统配置和运行的要求，对该发现解释如下：

1) 国标《继电保护和安全自动装置技术规程》明确要求双重化继电保护系统中的两套保护应采用完全独立设计[1]，这避免了共用元件或辅助设备造成的双重化保护系统共因失效。

2)《国家电网有限公司十八项电网重大反事故措施》规定双重化配置的保护装置应采用不同生产厂家的产品，合并单元、智能终端则宜选用与对应保护装置同厂家的产品。这在很大程度上避免了共同设计或制造引起的家族性缺陷而导致的双重化保护系统共因失效[20]。

3) 考虑环境因素，一方面，继电保护装置及其相关设备在投运之前需要经过温度、湿度、电磁干扰等一系列的标准测试[21-22]。另一方面，继电保护装置及其相关设备投运后主要运行于各方面环境条件均适宜的保护小室、预制舱和智能控制柜中。因此，由共同运行环境导致双重化保护系统共因失效的概率极低。

4) 对于地震、火灾等因素，考虑到这些情况发生时设备失效的范围和程度较为复杂，并且也未见到相关事故报道，本文暂不考虑。

进一步对 4 起拒动事故中保护系统的失效部位和失效类型进行分析，发现其中 3 起失效部位集中于保护装置，具体为误操作装置压板，另外 1 起属于二次回路误接线。本文后续研究以智能变电站双重化继电保护系统为研究对象。智能变电站保护系统中各二次设备通过光纤和交换机实现连接，克服了常规变电站电缆二次回路接线复杂、抗干扰能力差等缺点。基于此，本文在后续分析中仅考虑两套

保护装置的共因失效。

3　双重化保护系统的可靠性建模

基于状态空间法和可靠性框图法各自的特点，本文采用将二者相结合的方法建立双重化继电保护系统可靠性模型。具体来说，利用状态空间法在描述元件多运行状态上的优势，建立单个二次设备和共因失效二次设备组的状态空间模型。可靠性框图法的优点在于简明、直观地反映元件之间的串、并联关系，适用于系统层的可靠性建模，因此采用可靠性框图法建立双重化保护系统的整体可靠性模型。

3.1 假设

为了建立双重化保护系统的可靠性模型，首先给出如下假设：

1) 各类型二次设备在各状态停留时间均服从指数分布；

2) 失效的二次设备在维修后恢复如初，即“修复如新”；

3) 定期检修可以发现各类型二次设备的隐性失效。

3.2 二次设备的三态可靠性模型

如前所述，除“正常”和“修复”两个状态外，构成保护系统的二次设备还存在“隐性失效”状态。

图 2 给出了三个状态之间的转移关系。图 2 中：UP、DU、M 分别表示二次设备 X 的“正常”、“隐性失效”和“修复”。具体来说，设备 X“正常”表示该设备能够可靠地执行预设的功能，具备在规定时间内和规定的条件下完成规定功能的能力。当正常运行的设备 X 发生“隐性失效”时，X 从“正常”状态 1 进入“隐性失效”状态 2。“隐性失效”表示设备 X 发生了失效，但是该失效未能被设备 X 自检出，只能通过针对设备 X 的检修发现。相应地，X 从状态 2 进入“修复”状态 3。“修复”表示针对设备 X 进行故障检修或定期检修。当正常运行设备 X 的定期检修周期到来或发生非隐性失效时，设备 X 直接从状态 1 进入状态 3，待维修完毕后回到状态 1。

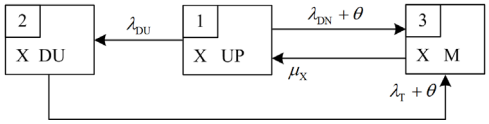

图 2 二次设备三个状态间的转移图

Fig. 2 Three-state transition diagram for secondary equipment

此外图 2 中：λ_{DU} 和 λ_{DN} 分别表示二次设备 X 的所有失效中隐性失效部分和非隐性失效部分的失效率，二者相加即为设备 X 的失效率，即 $\lambda_X=\lambda_{DU}+\lambda_{DN}$；$\theta$ 表示设备 X 的定检频率；λ_T 为被保护元件故障率。假设设备 X 的隐性失效比例系数为 η，则

$$\begin{cases}\lambda_{DU}=\eta\lambda_X\\ \lambda_{DN}=(1-\eta)\lambda_X\end{cases}\tag{5}$$

进一步可得与图 2 相应的转移密度矩阵 $\boldsymbol{A}^X$ 为

$$\boldsymbol{A}^X=\begin{bmatrix}-(\lambda_{DU}+\lambda_{DN}+\theta) & \lambda_{DU} & \lambda_{DN}+\theta\\ 0 & -(\lambda_T+\theta) & \lambda_T+\theta\\ \mu_X & 0 & -\mu_X\end{bmatrix}\tag{6}$$

3.3 共因失效二次设备的可靠性模型

对于由多个独立元件构成的系统，当不考虑任何约束条件和特殊情况时，系统的状态空间可以由元件的状态空间生成，具体生成规则[23]如下：

1) 系统的状态数等于元件状态数的乘积；

2) 相邻两个系统状态之间仅有一个元件的状态发生变化，且这两个系统状态之间的转移率即为该元件的状态转移率。

根据上述规则以及图 2 和前述假设，共因失效的两保护装置 P_A、P_B 组成的共因失效子系统的状态空间模型如图 3 所示，对应的转移密度矩阵为 $\boldsymbol{A}^{PP}$。图 3 中：λ_{DU_1} 和 λ_{DN_1} 分别表示保护装置独立隐性失效率和独立非隐性失效率；λ_{DU_C} 和 λ_{DN_C} 分别表示保护装置的共因隐性失效率和共因非隐性失效率；μ_P 和 μ_C 分别表示保护装置的独立失效修复率和共因失效修复率；θ_P 表示保护装置的定检频率。

对图 3 中不满足上述生成规则 2)的系统状态转移的说明如下。

1) 状态 1→状态 5：处于状态 1 正常运行的两装置发生共因隐性失效，两保护装置均进入隐性失效状态，也即状态 5。

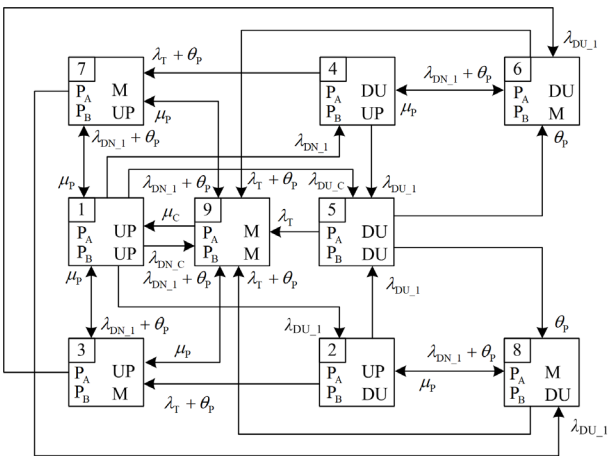

图 3 共因失效两保护装置的状态转移图

Fig. 3 State transition diagram of a subsystem composed of two protective relays with common cause failure

2) 状态 1→状态 9：处于状态 1 正常运行的两装置发生共因非隐性失效，两保护装置均进入修复状态，也即状态 9。

3) 状态 5→状态 9：处于状态 5 的两保护装置在被保护元件发生故障时两保护装置的隐性失效暴露，均进入修复状态。

4) 状态 9→状态 1：处于状态 9 的两保护装置在修复完成后均回到正常运行状态，即状态 1，修复率为 μ_C。假设只有一组维修工，则

$$\mu_C = \frac{\mu_P}{2} \tag{7}$$

上述失效率和修复率参数均大于 0。

假设已知保护装置总失效率为 λ_P，拒动失效占总失效率的 50%。采用 β 因子模型描述两保护装置间的共因失效[24]，则保护装置的独立失效率 λ_{P_1} 和共因失效率 λ_{P_C} 如式(8)所示。

$$\begin{cases} \lambda_{P_1} = (1-\beta)\times 50\%\lambda_P \\ \lambda_{P_C} = \beta \times 50\%\lambda_P \end{cases} \tag{8}$$

式中，β 表示共因失效率在保护装置失效率中的比例。进一步，令保护装置的独立隐性失效比例系数和共因隐性失效比例系数分别为 η_I 和 η_C，则

$$\begin{cases} \lambda_{DU_1} = \eta_I \times \lambda_{P_1} \\ \lambda_{DN_1} = (1-\eta_I)\times \lambda_{P_1} \\ \lambda_{DU_C} = \eta_C \times \lambda_{P_C} \\ \lambda_{DN_C} = (1-\eta_C)\times \lambda_{P_C} \end{cases} \tag{9}$$

3.4 双重化保护系统的可靠性模型

根据《智能变电站继电保护技术规范》[25]，智能变电站单套 220 kV 线路保护的技术实施方案如图 4 所示，图中以 A 套保护为例。B 套线路保护与 A 套线路保护技术实施方案相同，区别仅在于 B 套保护由另一组相应的二次设备构成。

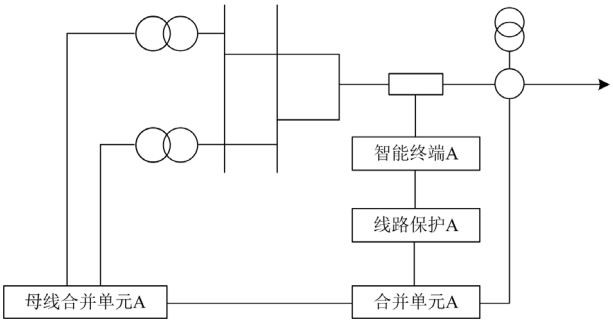

图 4 单套 220 kV 线路保护技术实施方案

Fig. 4 Technical implementation program for single set 220 kV line protection

采用可靠性框图法建立智能变电站 220 kV 线路保护系统的可靠性模型，如图 5 所示。图 5 中，构成单套线路保护系统的各二次设备间是串联，两套保护系统之间则构成并联，对应的状态函数分别如式(10)和式(11)所示。

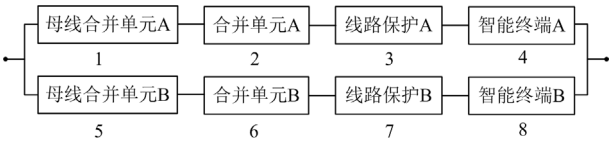

图 5 220 kV 线路双重化保护系统可靠性框图

Fig. 5 Reliability block diagram of dual-redundant 220 kV line protection

$$\Phi_A(x_A) = \begin{cases} 1, \ (x_1=1)\cap(x_2=1)\cap(x_3=1)\cap(x_4=1) \\ 3, \ (x_1=3)\cup(x_2=3)\cup(x_3=3)\cup(x_4=3) \\ 2, \ \text{其他情况} \end{cases}$$

$$\Phi_B(x_B) = \begin{cases} 1, (x_5=1)\cap(x_6=1)\cap(x_7=1)\cap(x_8=1) \\ 3, (x_5=3)\cup(x_6=3)\cup(x_7=3)\cup(x_8=3) \\ 2, \text{其他情况} \end{cases} \tag{10}$$

$$\Phi_D(x_D) = \begin{cases} 1, (\Phi_A=1)\cup(\Phi_B=1) \\ 3, (\Phi_A=3)\cap(\Phi_B=3) \\ 2, \text{其他情况} \end{cases} \tag{11}$$

其中可用 $i(i=1,2,\cdots,8)$ 表示相应二次设备在模型中的编号，$x_i=1$、2、3 分别表示二次设备 i“正常”、“隐性失效”和“修复”；$x_A=(x_1,x_2,x_3,x_4)$，$x_B=(x_5,x_6,x_7,x_8)$，$x_D=(x_A,x_B)$；$\Phi_A(x_A)$、$\Phi_B(x_B)$、$\Phi_D(x_D)$ 分别表示 A 套线路保护、B 套线路保护、双重化线路保护的状态函数，为 1、2、3 分别表示线路保护“正常”、“隐性失效”和“修复”。

根据文献[25]给出的变压器保护和母线保护技术实施方案，智能变电站双重化变压器保护和母线保护可进行上述类似建模和分析，此处不再赘述。

4 基于时序 Monte-Carlo 法的模型求解

Monte-Carlo 法具有对问题维数不敏感的显著优点[26]，本文采用时序 Monte-Carlo 法求解图 2、图 3 及图 5 所示的可靠性模型，获得双重化线路保护系统的失效概率和拒动频率。求解过程中通过抽样得到构成系统的各二次设备状态持续时间序列是时序 Monte-Carlo 法的关键。根据二次设备是否存在共因失效，把设备分为非共因失效设备和共因失效设备，下面将在 4.1、4.2 节分别详述这两类设备的状态持续时间抽样方法。

4.1 非共因失效设备的状态持续时间抽样

对于任意非共因失效设备 X，首先根据图 2 所示的状态空间模型和式(6)得到设备 X 的转移密度矩阵 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{X}}$。状态空间法的基础是连续时间 Markov 链(continuous time Markov chains, CTMC)。若已知 CTMC 的转移密度矩阵为 $\boldsymbol{A}$，则根据 CTMC 的性质可得[27]以下两个结论。

1) 若已知 t_0 时刻 CTMC 转移至状态 j，那么 CTMC 在状态 j 的持续时间 D_j 服从指数分布，并且指数分布的参数就是状态 j 在 $\boldsymbol{A}$ 中相应行的对角元素 A_{jj}，即

$$P(D_j \leqslant \Delta t) = 1 - \mathrm{e}^{A_{jj}\Delta t} \tag{12}$$

式中，Δt 表示时间段。

2) 若已知 t_0 时刻 CTMC 处于状态 j，且下一时刻 CTMC 将发生状态转移，那么在下一时刻 CTMC 转移至状态 k 的概率等于 A_{jk}/A_{jj}，即

$$\lim_{\Delta t \to 0} P\left[Y(t_0+\Delta t)=k \mid Y(t_0)=j\right] = \frac{A_{jk}}{-A_{jj}} \tag{13}$$

式中：$Y(t_0)=j$ 表示 t_0 时刻 CTMC 处于状态 j；A_{jk} 表示 $\boldsymbol{A}$ 中第 j 行、第 k 列的元素。

基于此，设置最大仿真时间为 $T_{\max}$，则获得非共因失效设备 X 的状态持续时间序列，其步骤如下所述。

(1) 令仿真时间 $t_{\mathrm{sim}}=0$，假设在 $t_{\mathrm{sim}}=0$ 时设备 X 处于正常运行状态，令 $x(0)=1$。

(2) 记录当前仿真时刻 t_{sim} 设备 X 的状态为 p，即 $x(t_{\mathrm{sim}})=p$。根据上述 CTMC 的性质 1)，由式(14)确定设备 X 在当前状态 p 的持续时间 D_p 为

$$D_p = \frac{1}{A_{pp}^{\mathrm{X}}} \ln V_1 \tag{14}$$

式中：A_{pp}^{X} 是矩阵 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{X}}$ 第 p 行的对角元素；V_1 是[0,1]上均匀分布的随机数。更新并记录仿真时间 $t_{\mathrm{sim}} = t_{\mathrm{sim}} + D_p$。

(3) 当 $t_{\mathrm{sim}} \leqslant T_{\max}$ 时，执行步骤(4)，否则抽样结束，得到设备 X 的状态持续时间序列。

(4) 根据上述 CTMC 性质 2)，当满足式(15)时确定下一时刻设备 X 转移至状态 $q(q \neq p)$。令 $p=q$，执行步骤(2)。

$$\frac{\sum_{s=1, s\neq p}^{q-1} A_{ps}^{\mathrm{X}}}{-A_{pp}^{\mathrm{X}}} < V_2 \leqslant \frac{\sum_{s=1, s\neq p}^{q} A_{ps}^{\mathrm{X}}}{-A_{pp}^{\mathrm{X}}} \tag{15}$$

式中：A_{ps}^{X} 是矩阵 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{X}}$ 中第 p 行、第 s 列的元素；V_2 是[0,1]上均匀分布的随机数。

对构成双重化保护系统的所有非共因失效二次设备执行上述步骤(1)—(4)，即可得到这些设备的状态持续时间序列。需要说明的是，对于具有更多状态的二次设备，只要可以建立其类似图 2 所示的状态转移图，上述步骤仍是适用的。

4.2 共因失效设备的状态持续时间抽样

首先把保护系统中存在共因失效关系的二次设备分组，分组后不同组之间的设备不存在共因失效，每组视为一个共因失效子系统。对于任一共因失效设备组，获得该组内各二次设备状态持续时间序列的思路为：通过系统状态持续时间抽样得到由该组内二次设备构成的共因失效子系统的状态持续时间序列，并根据子系统的状态与组内设备状态的对应关系得到设备状态持续时间序列。

以共因失效的两套保护装置 $\mathrm{P_A}$、$\mathrm{P_B}$ 组成的共因失效子系统 S_{C} 为例，根据图 3 所示的状态转移图及其转移密度矩阵 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{PP}}$，当把 4.1 节步骤(1)—(4)中的二次设备 X 和转移密度矩阵 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{X}}$ 分别替换成子系统 S_{C} 及其转移密度矩阵 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{PP}}$ 时，上述步骤对于获得子系统 S_{C} 的状态也是适用的。在得到子系统 S_{C} 的状态持续时间序列后，根据表 3 即可得到 $\mathrm{P_A}$、$\mathrm{P_B}$ 的状态持续时间序列。

表 3 S_{C} 状态与 $\mathrm{P_A}$ 和 $\mathrm{P_B}$ 状态的对应关系

Table 3 Correspondence between the state of S_{C} and the state of $\mathrm{P_A}$ and $\mathrm{P_B}$

S_{C}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\mathrm{P_A}$	1	1	1	2	2	2	3	3	3
$\mathrm{P_B}$	1	2	3	1	2	3	1	2	3

不难理解，对于由更多共因失效设备组成的子系统，只要可以建立其类似图 3 所示的状态转移图，上述步骤仍然是适用的。

4.3 整体流程

综合 4.1、4.2 节中的分析，设最大仿真时间 $T_{\max}$ 的增大步长为 $\Delta T_{\max}$，利用时序 Monte-Carlo 法求解双重化线路保护可靠性模型，其整体流程如下所述。

Step1：最大仿真时间为 $T_{\max}$，令仿真时间 $t_{\mathrm{sim}}=0$，假设在 $t_{\mathrm{sim}}=0$ 时所有元件均处于正常状态。

Step2：根据 4.1 节和 4.2 节所述的状态持续时间抽样方法得到双重化保护系统中所有二次设备的状态持续时间序列。

Step3：根据式(10)、式(11)得到双重化保护系统的状态持续时间序列。

Step4：根据式(16)计算双重化保护系统的失效

概率 P_f。

$$P_f = \frac{\sum_{n=1}^{N_d} D_n(\Phi = 2)}{T_{max}} \tag{16}$$

式中：$D_n(\Phi = 2)$ 表示保护系统在第 n 次隐性失效状态的持续时间；N_d 表示在仿真时间 $[0, T_{max}]$ 内保护系统处于隐性失效状态的次数。

Step5：计算失效概率 P_f 的方差系数 α [28]，当式(17)所示的收敛判据满足时输出 P_f 的最终值，并根据式(4)得到拒动频率 F_J，仿真结束。否则，更新最大仿真时间 $T_{max} = T_{max} + \Delta T_{max}$，执行 Step1。

$$\alpha \leqslant \alpha_0 \tag{17}$$

式中，α_0 表示方差系数收敛标准。

5　算例

5.1　可靠性参数

假设同一类型二次设备的失效率相同，其中拒动失效占总失效率参数的 50%，合并单元、智能终端的隐性失效比例系数 η 和保护装置独立隐性失效比例系数 η_1 相同。η 和 η_1 取决于各设备自检的有效性，自检功能越完善，η 和 η_1 越小。二次设备自检有效系数的取值范围为 0.8~0.999[8,29]，相应的 η 和 η_1 取值范围为 0.001~0.2。基于对双重化保护装置共因失效事故原因的分析，并且考虑到自检主要针对装置硬件损坏以及双重化保护装置设计和运行的独立性要求，则装置共因隐性失效比例系数 η_C 的取值范围为 0.5~0.99。此外，对于可编程电子系统，GB/T 20438.6 在考虑了环境控制、人为失误、系统架构等多种因素的情况下推荐共因失效因子 β 的取值范围为 0.5%~5%[30]。各类型二次设备的总失效率参数和修复率参数如表 1 所示，定检周期均为 2 年。

设置最大仿真时间 T_{max} 的初始值和增大步长 ΔT_{max} 均为 10^8 h，方差系数收敛标准为 0.05。

5.2　配置方式对保护系统可靠性的影响

首先考察不同配置方式对继电保护系统可靠性的影响，取 $\beta = 0\%$、$\eta = \eta_1 = 0.01$，结果如表 4 所示。根据表 4 可以得到，双重化配置下的线路保护系统的失效概率和拒动频率仅为单重配置下的 1.45%，因此保护的双重化配置极大地提高了继电保护系统的可靠性。

5.3　共因失效对双重化保护系统可靠性的影响

当 $\eta = \eta_1 = 0.01$、$\eta_C = 0.08$ 时，考察共因失效对双重化保护系统可靠性的影响。计及不考虑共因失效的情况，取 $\beta = 0\%$、0.5%、1%、2%、5%，结果如表 5 所示。根据表 5 可以得出，一方面，与双重化线路保护系统拒动频率统计数据(1.68×10^{-5} 次/年)相比，当 $\beta = 0\%$，即不考虑共因失效时得到的双重化线路保护拒动频率仅为统计数据的 52.4%，当 $\beta = 0.5\%$、1%、2%、5%时得到的拒动频率分别为统计数据的 72.0%、89.3%、122.0%、236.9%，最小偏差为 10.7%。显然，考虑共因失效时得到的拒动频率与统计结果较为相符。因此，共因失效是双重化保护系统可靠性评估中需要计及的重要因素。

另一方面，当 $\beta = 0.5\%$、1%、2%、5%时，双重化线路保护系统的失效概率和拒动频率是 $\beta = 0\%$ 时的 1.38 倍、1.70 倍、2.33 倍、4.52 倍。因此，当计及保护装置间的共因失效时，双重化保护系统的可靠性会显著下降，并且共因失效率越大，保护系统可靠性的下降幅度越大。

表 4　不同配置方式下线路保护系统可靠性指标

Table 4 Reliability indexes of line protection system under different configurations

配置方式	P_f	F_J/(次/年)
单重	4.58×10^{-3}	6.08×10^{-4}
双重	6.63×10^{-5}	8.80×10^{-6}

表 5　共因失效对双重化保护可靠性的影响

Table 5 Impact of common cause failure on the reliability of dual-redundant protection

β/%	P_f	F_J/(次/年)
0	6.63×10^{-5}	8.80×10^{-6}
0.5	9.13×10^{-5}	1.21×10^{-5}
1	1.13×10^{-4}	1.50×10^{-5}
2	1.55×10^{-4}	2.05×10^{-5}
5	3.00×10^{-4}	3.98×10^{-5}

5.4　隐性失效对双重化保护系统可靠性的影响

当 $\beta = 1\%$ 时，考察隐性失效对双重化保护系统可靠性的影响，$\eta = \eta_1 = 0.001$、0.05、0.1、0.15、0.2 且 $\eta_C = 0.8$ 时的结果如表 6 所示，$\eta = \eta_1 = 0.1$、$\eta_C = 0.5$、0.6、0.8、0.9、0.99 时的结果如表 7 所示。

表 6　$\eta(\eta_1)$ 对双重化保护可靠性的影响

Table 6 Impact of $\eta(\eta_1)$ on the reliability of dual-redundant protection

$\eta(\eta_1)$	P_f	F_J/(次/年)
0.001	4.83×10^{-5}	6.42×10^{-6}
0.05	7.66×10^{-5}	1.02×10^{-5}
0.1	1.13×10^{-4}	1.50×10^{-5}
0.15	1.64×10^{-4}	2.18×10^{-5}
0.2	2.18×10^{-4}	2.90×10^{-5}

表 7 η_C 对双重化保护可靠性的影响

Table 7 Impact of η_C on the reliability of dual-redundant protection

η_C	P_f	F_J/(次/年)
0.5	9.55×10^{-5}	1.27×10^{-5}
0.6	9.74×10^{-5}	1.29×10^{-5}
0.8	1.13×10^{-4}	1.50×10^{-5}
0.9	1.15×10^{-4}	1.53×10^{-5}
0.99	1.25×10^{-4}	1.66×10^{-5}

根据表 6 可得，当 $\eta=\eta_1=0.05$、0.1、0.15、0.2 时，双重化线路保护系统的失效概率和拒动频率是 $\eta=\eta_1=0.001$ 时的 1.59 倍、2.34 倍、3.40 倍、4.52 倍；根据表 7 可得，当 $\eta_C=0.6$、0.8、0.9、0.99 时，双重化线路保护系统的失效概率和拒动频率是 $\eta_C=0.5$ 时的 1.02 倍、1.18 倍、1.20 倍、1.31 倍。因此，随着隐性失效比例系数的增大，即保护二次设备的隐性失效率变大，双重化保护系统的失效概率和拒动频率显著变大。换言之，提高合并单元、保护装置、智能终端等二次设备的自检性能可以显著提高保护系统的可靠性。

6　结论

本文对双重化继电保护系统的可靠性进行研究，主要结论如下：

1) 忽略共因失效和隐性失效导致现有的双重化保护系统可靠性研究结果与电网统计数据偏差较大，评估结果过于乐观。

2) 采用可靠性框图和状态空间相结合的方法建立计及共因失效和隐性失效情况下双重化继电保护系统的可靠性模型。其中，可靠性框图法适用于保护系统的整体建模，状态空间法适用于构建保护系统的二次设备可靠性模型。

3) 提出了获取单个多状态二次设备和共因失效二次设备状态持续时间序列的时序 Monte-Carlo 法，采用该方法求解双重化保护系统可靠性模型可以方便地计及保护二次设备的多个状态，并得到双重化保护系统的拒动概率和拒动频率。

4) 算例分析结果表明本文得到的双重化保护系统拒动频率与电网统计数据较为相符，验证了模型的合理性和求解方法的有效性。此外，结果还表明共因失效会显著减少保护系统双重化配置在可靠性方面的优势，而提高合并单元、保护装置、智能终端等二次设备的自检性能可以显著提高保护系统的可靠性。

5) 根据电网继电保护事故案例分析和继电保护相关技术规程指出，人为失误是导致双重化保护系统共因失效的主要原因，且失效部位主要集中于保护装置。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家标准化委员会. GB/T 14285—2006 继电保护和安全自动装置技术规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical code for relaying protection and security automatic equipment: GB/T 14285—2006[S]. Beijing: China Standard Press, 2006.

[2] 国家电力调度控制中心. 国家电网继电保护十年发展综述(2007—2016)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.

[3] 章家欢, 李伟, 王昕, 等. 计及核心元器件的双重化继电保护装置 Markov 模型及影响因素分析[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4560-4569.
ZHANG Jiahuan, LI Wei, WANG Xin, et al. Markov model of dual relay protection devices and its influencing factors considering core components[J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4560-4569.

[4] 郑风雷, 吴杰康, 黄强, 等. 双重化继电保护系统可靠性的五状态空间模型与评估方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 26-31.
ZHENG Fenglei, WU Jiekang, HUANG Qiang, et al. Five-state space model and assessment method for reliability of dual-redundant relay protection systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 26-31.

[5] 王同文, 谢民, 孙月琴, 等. 智能变电站继电保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 58-66.
WANG Tongwen, XIE Min, SUN Yueqin, et al. Analysis of reliability for relay protection systems in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 58-66.

[6] 国网浙江省电力有限公司. 电网继电保护隐患排查案例分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2022.

[7] 郑涛, 王方, 金乃正. 双重化继电保护系统确定最佳检修周期新方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10): 67-70.
ZHENG Tao, WANG Fang, JIN Naizheng. A novel algorithm of determining the optimal routine test interval of the dual-redundant relay protection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10): 67-70.

[8] 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.
ZHANG Xuesong, WANG Chao, CHENG Xiaodong. Reliability analysis model for protective relaying system of UHV power network based on Markov state space method[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 94-99.

[9] 程林, 何剑. 电力系统可靠性原理和应用[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2014.

[10] WANG X, CHEN Y, WEN M, et al. A novel Markov model for protective relay reliability[J]. IEEE Transactions

on Power Delivery, 2023, 38(3): 2110-2118.

[11] 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.
ZHANG Peichao, GAO Xiang. Analysis of reliability and component importance for all-digital protective systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 77-82.

[12] 郭升, 童晓阳, 王洪彬. 计及设备老化与计划检修的智能变电站保护系统可靠性评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 97-104.
GUO Sheng, TONG Xiaoyang, WANG Hongbin. Intelligent substation protection system reliability assessment method considering the aging of equipment and planned maintenance[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 97-104.

[13] 张尚然, 汤亚芳, 袁旭峰. 基于系统结构的智能变电站继电保护可靠性分析[J/OL]. 电测与仪表: 1-8[2023-09-20]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20221122.1301.004.html.
ZHANG Shangran, TANG Yafang, YUAN Xufeng. Reliability analysis of relay protection in intelligent substation based on system structure[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-8[2023-09-20]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20221122.1301.004.html.

[14] 薛安成, 罗麟, 景琦, 等. 基于 Markov 模型的高压输电线继电保护装置风险评估[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1995-2000.
XUE Ancheng, LUO Lin, JING Qi, et al. Research on Markov model based risk assessment of protective relaying for high voltage transmission line[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1995-2000.

[15] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.继电保护和安全自动装置检验规程: DL/T 995—2006[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

[16] 金星, 洪延姬, 杜红梅. 共因失效系统的可靠性分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

[17] 西安热工研究院有限公司. 发电厂继电保护事故案例分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2021.

[18] 李玮. 电力系统继电保护事故案例与分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

[19] 宋述勇, 李朋华, 薛升. 关于继电保护反事故措施的几点思考[J]. 山西电力, 2011(1): 4-7.
SONG Shuyong, LI Penghua, XUE Sheng. Anti-fault measures on relay protection[J]. Shanxi Electric Power, 2011(1): 4-7.

[20] 国家电网有限公司. 国家电网有限公司十八项电网重大反事故措施[M]. 修订版. 北京: 中国电力出版社, 2018.

[21] 金龙, 周泽昕, 詹荣荣, 等. 继电保护设备元器件温度仿真分析与寿命评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 159-168.
JIN Long, ZHOU Zexin, ZHAN Rongrong, et al. Temperature simulation analysis and life evaluation for components of relay protection equipment[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 159-168.

[22] 丁晓兵, 陈朝晖, 周兆庆, 等. 继电保护装置单粒子效应的测试方法与失效率研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 167-171.
DING Xiaobing, CHEN Zhaohui, ZHOU Zhaoqing, et al. Test method and failure rate of the single-particle effect of a relay protection device[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 167-171.

[23] CHANAN S, PANIDA J, JOYDEEP M. Electric power grid reliability evaluation[M]. Hoboken, New Jersey, USA: IEEE Press, 2019.

[24] POURALI M. Incorporating common cause failures in mission-critical facilities reliability analysis[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(4): 2883-2890.

[25] 国家电网公司. 智能变电站继电保护技术规范: Q/GDW 441—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
State Grid Corporation of China. Technical specifications of protection for smart substation: Q/GDW 441—2010[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.

[26] 马燕峰, 骆泽榕, 赵书强, 等. 基于改进蒙特卡洛混合抽样的含风光电力系统风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 75-83.
MA Yanfeng, LUO Zerong, ZHAO Shuqiang, et al. Risk assessment of a power system containing wind power and photovoltaic based on improved Monte Carlo mixed sampling[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 75-83.

[27] 陆大金, 张颢. 随机过程及其应用[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2012.

[28] 章煜. 基于蒙特卡洛模拟法的可靠性评估研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2020.
ZHANG Yu. Reliability evaluation on Monte Carlo simulation[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2020.

[29] 李铁成, 刘清泉, 任江波, 等. 基于动态优化马尔可夫链的线路继电保护装置状态预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 97-106.
LI Tiecheng, LIU Qingquan, REN Jiangbo, et al. State prediction method of line relay protection device based on the Markov chain with dynamic optimization[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 97-106.

[30] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电气/电子/可编程电子安全相关系统的功能安全 第 6 部分: GB/T 20438.2 和 GB/T 20438.3 的应用指南: GB/T 20438.6—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.

收稿日期：2024-02-19；　　修回日期：2024-04-25

作者简介：

王幸主(1994—)，男，博士研究生，研究方向为电力系统继电保护及其可靠性和评价；E-mail: 2280507587@qq.com

文明浩(1973—)，男，通信作者，博士，教授，研究方向为电力系统继电保护与控制。E-mail: swenmh@hust.edu.cn

(编辑　姜新丽)