

基于概率行为树的保护系统建模与可靠性定量评估

熊海军¹,朱永利¹,张琦²,王德文¹

(1. 华北电力大学 控制与计算机工程学院,河北 保定 071003;

2. 华北电力大学 科技学院,河北 保定 071003)

摘要: 依据数字继电保护系统的功能和特点,提出一种保护系统的行为树模型及其可靠性定量评估方法。给出硬件部件、软件行为、顺序和选择关系的可靠度模型。对现有行为树模型进行概率扩展后完成对保护系统的建模,给出行为可靠度计算公式以进行保护系统可靠性定量评估。算例仿真计算结果表明,所提方法可正确评估保护系统可靠性,进行薄弱环节识别。

关键词: 继电保护; 可靠性; 建模; 定量评估; 概率行为树

中图分类号: TM 771

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.01.024

0 引言

可靠性是指元件、产品、系统在一定时间内、在一定条件下无故障地执行指定功能的能力或可能性。继电保护系统的可靠性是电网安全运行的关键,对保护系统可靠性定量评估有助于发现系统的薄弱环节,为保护系统的设计和运行检修提供指导^[1-5]。因此,研究保护的可靠性评估方法具有重要现实意义。

学者对可靠性分析计算及其应用进行了大量研究,但由于保护系统可靠性评估涉及因素众多、建模难度大,工程领域至今尚无广泛使用的可靠性评估方法。现有的定量评估方法主要有基于状态的马尔科夫(Markov)方法^[6-9]和基于系统结构的GO法^[10-12]。Markov方法在处理复杂系统动态可靠性时存在状态划分和求解困难等不足;GO法基于系统静态结构,且元素较多不易使用、编程实现相对困难。上述2类方法进行可靠性分析时使用的是专用模型,与分析设计阶段的模型均不一致。

目前,在保持与系统需求分析和设计模型一致的基础上进行可靠性建模与评估方面尚缺乏相应的研究。行为树(BT(Behavior Trees))是一种能够用于系统行为建模的新方法,因其具有严格的形式语义、方便的图形语法及良好的层次特性而被越来越多的领域所使用。需求工程和游戏领域已使用行为树方法成功进行系统分析和设计阶段的建模,但未给出其可靠性建模方法^[13-18]。文献^[19-20]给出了行为树的相关定义并提出采用行为树进行智能电子

设备(IED)的交互过程建模与验证,但该方法未考虑系统中的失效行为及其概率,不适用于保护系统的可靠性评估。

行为树作为一种具有严格形式语义的形式化方法用于保护系统建模与可靠性分析计算具有以下几点优势:

a. 基于行为树的建模方法在建模过程中着眼于系统行为及其关系而忽略隐含在其中的系统状态,其建模思路符合系统设计实现的自然思维,可以复用系统分析和设计阶段所建模型,建模过程及生成的模型简单;

b. 由于行为树模型与形式化的通信顺序进程(CSP)模型具有对应关系,行为树模型可以很容易地转化为CSP模型后采用过程分析工具(PAT)进行各个行为的概率求取,采用模型工具进行求解,无需人工搜索行为路径并推导计算公式,直接在PAT中设定需要计算的目标即可由模型给出计算结果,大幅简化了计算复杂度,适合工程化应用。

本文采用行为树对保护系统进行建模和可靠性定量分析,主要做了以下几点工作:

a. 对硬件部件、软件行为、顺序和选择关系的可靠度模型进行定义,给出行为发生概率的计算公式;

b. 对原行为树模型进行扩展后完成了保护系统的建模,给出通过已知的基础行为条件概率计算后续行为概率的方法;

c. 针对具体算例,采用过程分析工具对所提方法进行可靠性计算、薄弱环节识别与冗余可靠性分析。

1 保护系统可靠性特点

影响保护系统可靠性的因素较多,主要包括环境、一次设备、保护设备及人为因素等。由于除保护设备本身外其他影响因素对保护系统可靠性的影

收稿日期:2015-05-12;修回日期:2015-12-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61074078);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014MS126);国家电网公司科技项目(GY17201200047)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61074078),Fundamental Research Funds for the Central Universities(2014MS126) and Science and Technology Project of China State Grid Corporation(GY17201200047)

响难以准确评估,保护系统可靠性的定量评估多以保护设备部件的可靠性计算为出发点。就保护设备而言,其可靠性存在如下特点:

a. 保护系统可靠性受其硬件部件(如电源、CPU和网络接口等)及软件可靠性影响,部件的可靠性与其本身的质量、环境、部件成熟度及运行时间等因素相关;

b. 保护设备之间及部件之间通过协作完成系统功能,其间存在一定的逻辑关系,不同的逻辑关系对整体可靠性的影响也会有所不同。

2 行为及其关系的可靠度模型

2.1 行为的可靠度模型

保护设备硬件部件及软件常常是构成系统功能的基础部件,本文将其视为系统的基础行为。目前常用的硬件元件及其模块的可靠性模型主要是美国军用标准中发布的电子设备可靠性预计模型,模型给出了电子元件及由其构成的硬件模块的失效概率模型。文献[6]给出了其中元件及模块的失效模型。

软件系统的可靠性与硬件模块的可靠性有较大区别,软件系统的可靠性与其漏洞被发现和修补的次数相关,随着时间的推移其可靠性可由于其漏洞修复而逐步增加,常采用 Logarithmic exponential 模型^[6]表示保护软件的可靠性。

本文将元件及软件的功能视为系统基础行为,其可靠性可由文献所述失效率导出。由于文献所述均为恒定失效率模型,基础行为的可靠度与其失效率间存在式(1)所示关系:

$$F_i(t) = p_i(t) = e^{-\lambda_i t} \quad (1)$$

其中, $F_i(t)$ 为 $0 \sim t$ 时间段内行为 i 的可靠度; $p_i(t)$ 为 $0 \sim t$ 时段内行为 i 发生的概率; λ_i 为行为 i 的失效率。

2.2 行为交互关系的可靠度模型

为方便后续描述,下面首先给出概率行为树的形式化定义。

定义 1 概率行为树 T 可以用一个四元组表示: $T = \langle C^T, N, r, p \rangle$ 。其中, C^T 为控制子树集合, $C^T = \{L^T, Q^T\}$, L^T 为选择子树集合, $L_i \in L^T, L_i = \langle C_{L_i}^T, N_{L_i}, r_{L_i}, p_{L_i} \rangle$ 为一选择子树, Q^T 为顺序控制子树, $Q_i \in Q^T, Q_i = \langle C_{Q_i}^T, N_{Q_i}, r_{Q_i}, p_{Q_i} \rangle$ 为一顺序控制子树; N 为叶子节点集合, $N = \{O, C_d\}$, $O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ 为原子行为节点集合, $C_d = \{c_1, c_2, \dots, c_p\}$ 为条件集合; r 为行为树的根节点, $r \in T$; $p = \{p_L, p_Q\}$ 为不同类型的节点到父节点启动后其子节点发生概率的映射函数集合。

系统的多个行为之间的交互关系可用控制子树(分为选择子树和顺序子树 2 种类型)描述。

2.2.1 选择子树

保护系统中,电源模块的“电源工作”这一抽象行为可分为“供电”和“停电”2 个原子行为,2 种行为只能任选其一,此类关系可称为选择关系,可用行为树选择子树表示。

若 $L = \langle C_L^T, N_L, r_L, p_L \rangle$ 为一选择子树,其子节点可以为 C_L^T 和 N_L 类型。若其所有子节点采用集合 $\{B_1, B_2, \dots, B_n\}$ 来表示,在父节点执行的情况下执行某子节点行为的条件概率形成集合 $p_L = \{p(B_1/r_L), p(B_2/r_L), \dots, p(B_n/r_L)\}$,则有式(2)所示关系。

$$\sum_{i=1}^n p(B_i/r_L) = 1 \quad (2)$$

式(2)表明所有子节点行为构成其父节点这一抽象行为的划分。

2.2.2 顺序子树

保护设备的硬件行为包括:传感器变换、输入、CPU 加工、输出等,这些行为顺序发生,前一行为结束后顺序执行后续行为,行为间的这种关系称为顺序关系。对顺序关系下的子节点而言,后继行为的执行前提是其前驱行为的成功执行。

为简化描述,本文将“传感器变换 AI”等基础行为为进一步细分为“AI 正常”和“AI 异常”2 个原子行为,它们满足选择关系。根据式(2)可知“传感器变换 AI”的 2 个子节点的概率和为 1,即节点“传感器变换 AI”启动的前提下完成执行的概率为 1。因此,在这种结构下顺序关系的第 1 个子行为启动后各个后继基础行为启动的概率为 1。

若 $Q = \langle C_Q^T, N_Q, r_Q, p_Q \rangle$ 为一顺序控制子树,其子节点可以为 C_Q^T 和 N_Q 类型,若其所有子节点采用集合 $\{B_1, B_2, \dots, B_n\}$ 来表示, $p_Q = \{p(B_1/r_Q), p(B_2/r_Q), \dots, p(B_n/r_Q)\}$ 表示在父节点执行的条件下子各节点执行的条件概率集合,则有式(3)所示关系。

$$p(B_i/r_Q) = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

需要说明的是在特定情况下,顺序关系中若前面某个子行为正常是后续行为启动的条件,则它们间形成守护关系,行为树可完成该关系的建模,但其建模方法应与上述方法有所区别。本文所述模型不涉及守护关系,因此未给出其建模方法。

3 保护系统的行为树模型

3.1 行为树的概率扩展

采用行为树进行系统建模时,常用其图形表示法。现有行为树图形表示法不能描述上述条件概率,本文将概率引入原行为树中,用于修饰父节点与子节点的连接,其结构如图 1 所示。

图 1 中, P_1, P_2, \dots, P_N 分别为行为树执行到“选择 L ”的前提下,执行行为 L_1, L_2, \dots, L_N 的条件概率,

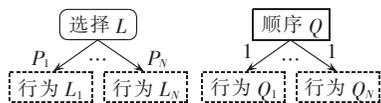


图 1 BT 的概率修饰

Fig.1 Probabilistic definition of behavior trees

右图概率的定义与左图相似;虚线框中的行为表示抽象行为,其实际类型可以是叶子节点、选择和顺序控制子树等。

行为树从根节点开始运行,若所建模型能通过可达性验证,则行为树可运行至任意节点。若从根节点运行至行为 B_N 的运行路径为: $r \rightarrow B_1 \rightarrow B_2 \rightarrow \dots \rightarrow B_N$,则行为 B_N 在 r 启动情况下的发生概率为:

$$p(B_N|r) = \prod_{i=1}^N p(B_i|B_{i'}) \quad (4)$$

其中, $p(B_i|B_{i'})$ 为 B_i 的父节点 $B_{i'}$ 执行的前提下执行 B_i 的条件概率。

3.2 保护系统可靠性的行为树建模

采用行为树通过分层建模的方法能够逐步构建系统的完整模型。建模过程可采用自顶向下或自底向上的方法,本例中采用自顶向下的方法,即先对系统的抽象行为进行建模后逐步求精并最终完成保护系统的建模。

3.2.1 保护系统概要建模

可将“保护系统 SYS”这一根行为分为“供电运行 R ”和“停电拒动 d ”2 个子行为,行为间构成选择关系,它们的发生概率分别为 $p(R|SYS)$ 和 $p(d|SYS)$ 。通常可假定行为树根节点“保护系统 SYS”启动的概率为 1。 R 和 d 的启动概率与电源的可靠性相关,若电源的可靠性为 $F_d(t)$,则 $p(R|SYS) = F_d(t)$, $p(d|SYS) = 1 - F_d(t)$ 。保护系统概要建模用概率行为树图形表示如图 2 所示。

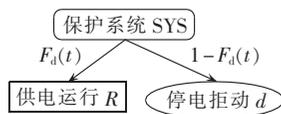


图 2 保护系统的概要 BT 模型

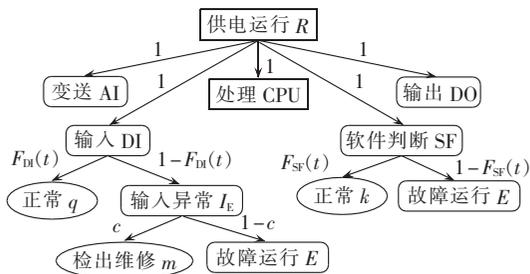
Fig.2 Brief behavior tree model of relay protection system

图 2 中,“停电拒动 d ”为原子行为,不可继续展开;“供电运行 R ”为顺序子树,需要进一步展开。

3.2.2 保护系统详细建模

“供电运行 R ”行为由“变送 AI”、“输入 DI”、“处理 CPU”、“软件判断 SF”及“输出 DO”等行为顺序构成,其行为关系及其可靠性的描述如图 3(a) 所示。

图 3(b)为图 3(a)中“故障运行 E ”的细化展开。图中, $F_{DI}(t)$ 、 $F_{SF}(t)$ 为相关部件的可靠度; c 为故障



(a) “供电运行 R ”行为描述



(b) “故障运行 E ”的细化展开

图 3 保护系统的详细 BT 模型

Fig.3 Detailed behavior tree model of relay protection system

的自检检出率; p 为系统故障运行的前提下发生“误动 w ”的概率。“变送 AI”、“处理 CPU”和“输出 DO”均为硬件部件的行为,其展开过程与“输入 DI”相似,本文不再一一展开。由于“软件判断 SF”故障自检无法检出,其展开与“输入信号 DI”有所区别。

需要说明的是,上述行为树模型并非保护系统通用模型,仅代表一般系统结构。若某保护系统结构不同于此,则其行为树模型也需要作相应调整。

4 行为树模型的可靠性问题求解

4.1 可靠性问题求解

经过上述方法建模后,可根据式(4)思路计算到达行为树任意节点的概率。

“停电拒动 d ”行为的发生概率为:

$$p_d(t) = 1 - F_d(t) \quad (5)$$

“误动 w ”和“带电拒动 j ”行为在保护系统中出现多次, AI、DI、CPU、软件和 DO 的行为子树下都有这一行为,其发生概率的计算公式分别为:

$$p_w(t) = F_d(t) \left[\sum_{i=1}^4 (1 - F_i(t))(1 - c)p + (1 - F_{SF}(t)) \right] p \quad (6)$$

$$p_j(t) = F_d(t) \left[\sum_{i=1}^4 (1 - F_i(t))(1 - c)(1 - p) + (1 - F_{SF}(t)) \right] \times (1 - p) \quad (7)$$

其中, i 取 1、2、3、4 时, $F_i(t)$ 分别为 AI、DI、CPU 和 DO 硬件的可靠度。

本文将系统的整体可靠度定义为不发生以上 3 种行为的概率,其计算公式如下。

$$p_{SYS}(t) = 1 - p_d(t) - p_w(t) - p_j(t) \quad (8)$$

将式(5)–(7)代入式(8)展开后,如式(9)所示。

$$p_{SYS}(t) = p_d(t) \left[F_{SF}(t) + 4c + \sum_{i=1}^4 F_i(t) - 4 - c \sum_{i=1}^4 F_i(t) \right] \quad (9)$$

至此,根据上述公式可以计算出系统的可靠度。但复杂行为树可靠性模型中人工路径搜索及概率计

算复杂,为了进一步提高算法的工程实用性,本文将行为树模型转为 CSP 后采用 PAT 进行求解。

4.2 行为树模型到 PAT 描述的映射

由于现阶段尚缺乏直接对行为树进行验证计算的方法和工具,本文将其映射到 CSP 这一经典模型,以便采用 PAT 对模型进行求解。行为树模型与 CSP 模型元素间的映射关系可以参考文献[20]。经过文献所述转化步骤后,行为树模型可完全转化为满足 PAT 语法格式的 CSP 模型。

图 2 所示行为树模型转化为 PAT 所定义的语句如式(10)所示。

$$\text{SYS} = \text{pcase} \{ F_d(t) : R \\ 1 - F_d(t) : d \rightarrow \text{Skip} \}; \quad (10)$$

其中, R 为行为子树,需要进一步展开, R 展开后如式(11)所示。

$$R = \text{AI}; \text{DI}; \text{CPU}; \text{SF}; \text{DO}; \quad (11)$$

式(11)中的行为均是抽象行为,都需要进一步展开。本文仅以“输入 DI”为例进行说明,该行为被完整展开后如式(12) — (14)所示。

$$\text{DI} = \text{pcase} \{ F_{\text{DI}}(t) : q \rightarrow \text{Skip} \\ 1 - F_{\text{DI}}(t) : I_E \}; \quad (12)$$

$$I_E = \text{pcase} \{ c : m \rightarrow \text{Skip} \\ 1 - c : E \}; \quad (13)$$

$$E = \text{pcase} \{ p : w \rightarrow \text{Skip} \\ 1 - p : j \rightarrow \text{Skip} \}; \quad (14)$$

AI、CPU 和 DO 与 DI 的展开过程相似, SF 则少了故障检出环节,经过上述方法可将行为树模型转化为完整的 PAT 语法的 CSP 模型。

4.3 基于 PAT 的可靠性问题求解

完成模型转化后,系统模型已经能够在 PAT 下仿真运行,但要实现特定计算目标,需用 PAT 提供的断言(assert)进行目标问题描述。

由于断言中不便描述某行为是否发生,本文将 PAT 中的变量来记录某行为是否发生,因此需对上述模型进行简单修改。例如在 PAT 中定义变量 w (初始值设置为 0)用于记录“误动 w ”行为是否发生,则需要在 w 行为发生时修改变量 w 的值为 1,即将上述 PAT 描述中的 w 更改为 $w \{ww=1\}$ 即可。计算“误动 w ”的发生概率,需要定义如下断言:

```
#define predicate ww=1;
#assert SYS reaches predicate with pmax;
```

其中,第 1 个断言为设定目标;第 2 个断言为验证目标的可达性及其可达概率,经 PAT 验证可输出其可达性及其概率; p_{max} 表示达到设定目标的最大概率值。

5 算例

目前,能用于验证算法有效性的实际案例样本

还很缺乏,本文使用文献[6]的部分数据进行算例分析。各个参数的取值如表 1 所示。表 1 中, t 为从设备投运开始的小时数。从表中可以看出,在没有发生维修更换的情况下,硬件及软件部件的可靠度随时间增长逐步下降。

表 1 参数取值
Table 1 Parameters

参数	失效率 λ/h	可靠度
电源	1.14×10^{-5}	$e^{-\lambda t}$
AI	2.2562×10^{-5}	$e^{-\lambda_{\text{AI}} t}$
DI	2.2562×10^{-5}	$e^{-\lambda_{\text{DI}} t}$
CPU	3.6738×10^{-5}	$e^{-\lambda_{\text{CPU}} t}$
SF	7.5044×10^{-6}	$e^{-\lambda_{\text{SF}} t}$
DO	7.544×10^{-6}	$e^{-\lambda_{\text{DO}} t}$
检出率 c	—	0.9
误动比率	—	0.5

选取部分时间取值计算各参数的可靠度,结果表 2 所示。由于本文中模块的可靠性与元件参数及使用时长等因素相关,维修更换部分元件甚至整体部件换新,使得维修部件的可靠性发生变化。设备维修后需要修改部件的失效率及部件的使用时长,然后计算得到新的部件可靠性,再计算系统的整体可靠性。

表 2 部件可靠度随时间的变化关系
Table 2 Relationship between component reliability and duration

参数	可靠度						
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
电源	0.999	0.989	0.977	0.955	0.934	0.913	0.892
CPU	0.996	0.964	0.929	0.863	0.802	0.745	0.693
AI/DI	0.998	0.978	0.956	0.914	0.873	0.835	0.798
DO	0.999	0.992	0.985	0.970	0.956	0.941	0.927
软件	0.999	0.993	0.985	0.970	0.956	0.942	0.928
检出率	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900

注:①—⑦分别表示 t 为 100、1000、2000、4000、6000、8000、10000 h。

5.1 系统可靠性及薄弱环节分析

所建模型按表 2 中的数据进行仿真计算,可算出误动概率、拒动概率(分为带电拒动和停电拒动)及系统可靠度,结果如图 4 所示。

从结果可以看出,系统可靠度随时间增长逐渐

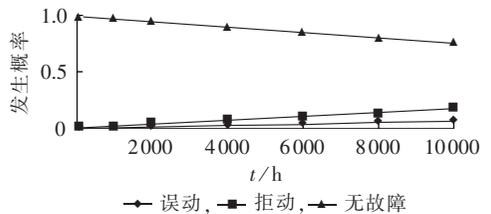


图 4 误动概率、拒动概率及系统可靠度
Fig.4 Variation of misoperation probability, refuse-to-operation probability and system reliability along with duration

降低,误动和拒动发生的概率逐渐增加;实例系统在 10000 h 的可靠度仅为 0.761。

为了进一步分析各参数对系统可靠度的影响,分别将表 2 中不同时刻下各部件的可靠度单独降低 10% 后,仿真计算系统可靠度结果如表 3 所示。

表 3 系统可靠度随参数下降的变化关系
Table 3 Relationship between system reliability and duration for 10% reliability deduction of different components

t/h	可靠度						
	原值	电源降 10%	CPU 降 10%	AI(DI) 降 10%	DO 降 10%	软件降 10%	检出率 降 10%
100	0.997	0.898	0.987	0.987	0.986	0.898	0.996
1000	0.973	0.875	0.963	0.963	0.963	0.875	0.965
2000	0.946	0.852	0.937	0.937	0.936	0.851	0.931
4000	0.895	0.806	0.887	0.887	0.886	0.804	0.867
6000	0.848	0.763	0.841	0.840	0.839	0.761	0.808
8000	0.803	0.723	0.797	0.796	0.795	0.720	0.754
10000	0.761	0.685	0.755	0.755	0.754	0.682	0.703

从结果可以看出,各参数可靠度在不同时间降低 10% 后,均引起系统可靠度的下降。电源及软件的影响较大,检出率 c 次之,其他参数的影响相对较小。为了更清楚地分析各环节的重要度随时间的变化关系,将表 3 的计算结果进行变换后,可靠度下降比例如图 5 所示。

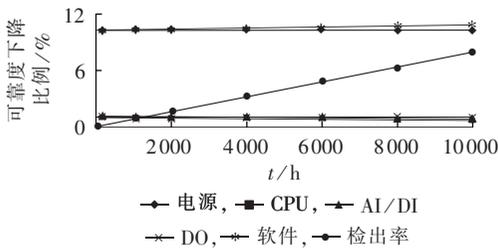


图 5 部件可靠度降低后的系统可靠度

Fig.5 Variation of system reliability deduction along with duration for 10% reliability deduction of different components

从图 5 可以看出,在给定的参数情况下 CPU 等硬件部件引起的可靠度下降比例较小,且随时间增长呈缓慢下降趋势;电源和软件引起可靠性的下降比例较大且呈缓慢上升趋势;检出率在 1000 h 以内影响最小(小于 0.8%),随后其影响逐步超过 CPU 等硬件影响,10000 h 时增至 7.7%。

CPU 等硬件对可靠度下降比例的影响较小的主要原因是其故障有自检后修复机会,而模型中电源及软件故障没有。检出率对可靠性的影响随时间变化较大的主要原因是在运行初期各个部件的可靠度本身较高,故障检出率对整体系统可靠的影响相对较小;而后随时间增长部件可靠度逐步下降,故障检出率的影响则逐渐增加。由此可见,该方法能够计算出不同时期的系统薄弱环节及系统可靠度,

能为保护系统的运行检修提供指导。

就实例模型而言,其薄弱环节主要体现为电源和软件,检出率随时间增长也逐步成为系统薄弱环节。软件和检出率分别对应于功能程序和自检程序,均可通过漏洞修补逐步提升其可靠度。而硬件部件则常通过冗余方式实现可靠度的提升。

5.2 冗余可靠性分析

系统中的关键部件常常采用冗余结构以提高系统可靠性。算例中电源属系统薄弱环节,下面增加一个同型号电源模块为热备用电源后对系统可靠性进行分析。电源热备用冗余结构可以用行为树中的选择结构表达,如图 6 所示。

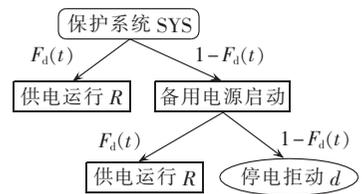


图 6 双电源系统 BT 模型

Fig.6 Behavior tree model of dual power-supply system

电源采用热备用结构后,对原有系统模型做简单修改,将式(10)更改为式(15)、(16)即可。

$$\text{SYS} = \text{pcase} \{ F_d(t) : R \quad 1 - F_d(t) : S_2 \}; \quad (15)$$

$$S_2 = \text{pcase} \{ F_d(t) : R \quad 1 - F_d(t) : d \rightarrow \text{Skip} \}; \quad (16)$$

采用表 2 所示参数及双电源模型进行系统可靠度计算,结果如图 7 所示。

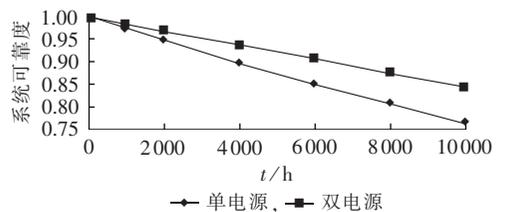


图 7 冗余结构系统可靠度

Fig.7 Deduction of system reliability along with duration for single and dual power-supply systems

从结果可以看出,采用双电源结构后系统可靠度明显提升,随时间增长系统可靠度逐渐下降,但下降速率明显降低。由此可见,硬件部件类薄弱环节采用冗余结构后可显著提升系统可靠性。

双电源情况下,每个电源可靠度单独降低 10% 后,引起的系统可靠度下降比例与单电源的对比如图 8 所示。

从图 8 结果可以看出,对原薄弱环节电源部分采用双电源冗余结构后,其单一电源的可靠度下降

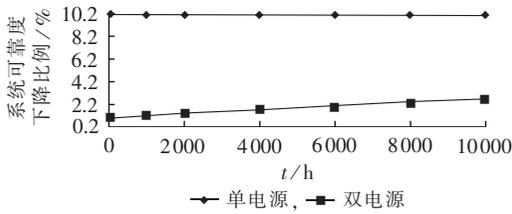


图 8 冗余结构系统可靠度下降比例

Fig.8 Variation of system reliability deduction along with duration for single and dual power-supply systems

10% 对整体系统的可靠度的影响明显减小,系统薄弱环节也因此发生变化。可见,该方法能为保护系统的设计提供指导。

6 结论

本文给出了保护系统行为的条件概率、交互关系的可靠度的定义,完成了保护系统的概率行为树建模,并给出了行为及系统的可靠度计算方法。采用过程分析工具对所建模型进行了仿真运行,并对系统可靠度随时间的变化、薄弱环节及冗余结构进行了分析。

a. 模型真实反映了保护系统中硬件部件、软件行为及抽象行为间的关系,有助于防止扁平化建模对可靠度计算带来的影响。

b. 给出了顺序和选择 2 种关系的定义及其可靠性计算方法,采用图形化方法完成了保护系统可靠性的完整建模,建模思路清晰、过程简单。

c. 计算了系统可靠度随时间的变化关系;探讨了各行为对系统可靠度的影响,发现了系统中的薄弱环节及其随时间的变化趋势。

d. 采用选择关系完成了冗余结构的建模与分析,实验表明模型具有较强的描述能力,对于不同厂家,不同硬件结构只需调整行为树模型即可。本文方法能为保护系统运行检修和设计提供指导,但还要针对保护可靠性基础数据进行大量细致系统的积累、分析和挖掘,才能使该模型更好地服务于工程实际。

参考文献:

[1] IEC. Communication networks and systems in substations part 5:communication requirements for functions and device models: IEC61850-5[S]. Geneva,Switzerland:IEC,2003.

[2] 李锋,谢俊,兰金波,等. 智能变电站继电保护配置的展望与探讨[J]. 电力自动化设备,2012,32(2):122-126.

LI Feng,XIE Jun,LAN Jinbo,et al. Prospect and discussion of relay system configuration for intelligent substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(2):122-126.

[3] 张春合,陆征军,李九虎,等. 数字化变电站的保护配置方案和应用[J]. 电力自动化设备,2011,31(6):122-125.

ZHANG Chunhe,LU Zhengjun,LI Jiuhu,et al. Protection confi-

guration scheme and application in digital substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(6):122-125.

[4] 戴志辉,李芷筠,焦彦军,等. 基于 BP 神经网络的小样本失效数据下继电保护可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):129-134.

DAI Zhihui,LI Zhijun,JIAO Yanjun,et al. Reliability assessment based on BP neural network for relay protection system with a few failure data samples[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(11):129-134.

[5] 徐志超,李晓明,杨玲君,等. 数字化变电站系统可靠性评估与分析[J]. 电力系统自动化,2012,36(5):67-71.

XU Zhichao,LI Xiaoming,YANG Lingjun,et al. Reliability assessment and analysis on digital substation system[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(5):67-71.

[6] 王刚,丁茂生,李晓华,等. 数字继电保护装置可靠性研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7):47-52.

WANG Gang,DING Maosheng,LI Xiaohua,et al. Reliability analysis of digital protection[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(7):47-52.

[7] 戴志辉,王增平,焦彦军. 基于动态故障树与蒙特卡罗仿真的保护系统动态可靠性评估[J]. 中国电机工程学报,2011,31(19):105-113.

DAI Zhihui,WANG Zengping,JIAO Yanjun. Dynamic reliability assessment of protection system based on dynamic fault tree and Monte Carlo simulation[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(19):105-113.

[8] 戴志辉,王增平,焦彦军,等. 阶段式保护原理性失效风险的概率评估方法[J]. 电工技术学报,2012,27(6):175-182.

DAI Zhihui,WANG Zengping,JIAO Yanjun,et al. Probabilistic assessment method for failure risk of stepped protection philosophy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(6):175-182.

[9] 郭创新,俞斌,郭嘉,等. 基于 IEC61850 的变电站自动化系统安全风险评估[J]. 中国电机工程学报,2014,34(4):685-694.

GUO Chuangxin,YU Bin,GUO Jia,et al. Security risk assessment of the IEC61850-based substation automation system[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(4):685-694.

[10] 徐荆州,李扬. 基于 GO 法的复杂配电系统可靠性评估[J]. 电工技术学报,2007,22(1):149-153.

XU Jingzhou,LI Yang. Reliability assessment of complex distribution system using GO method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2007,22(1):149-153.

[11] 沈祖培,黄祥瑞. GO 法原理及应用:一种系统可靠性分析方法[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

[12] 王超,高鹏,徐政,等. GO 法在继电保护可靠性评估中的初步应用[J]. 电力系统自动化,2007,31(24):52-56.

WANG Chao,GAO Peng,XU Zheng,et al. Application of GO methodology in reliability assessment of protective relays[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(24):52-56.

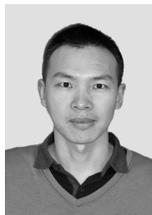
[13] WINTER K. Formalising behaviour trees with CSP[J]. Integrated Formal Methods,2004,2999:148-167.

[14] COLVIN R J,HAYES I J. A semantics for behavior trees using CSP with specification commands[J]. Journal Science of Computer Programming,2011,76(10):891-914.

[15] WANG Zhiliang,YIN Xia,JING Chuanming. A formal method to real-time protocol interoperability testing[J]. Science in China Series F:Information Sciences,2008(51):1723-1744.

- [16] SUN J, LIU Y, DONG J S, et al. Verifying stateful timed CSP using implicit clocks and zone abstraction[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Formal Engineering Methods: Formal Methods and Software Engineering. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2009:581-600.
- [17] SWIGART J. Omni-Bot: building flexible AI for enemy territory and multiplayer action games[EB/OL]. (2010-10-22)[2013-07-12]. <http://aigamedev.com/plus/interview/omnibot-enemy-territory>.
- [18] LINDSAY P A, WINTER K, YATAPANAGE N. Safety assessment using behavior trees and model checking[C]//2010 8th IEEE International Conference on Software Engineering and Formal Methods (SEFM). [S.l.]: IEEE, 2010:181-190.
- [19] 熊海军, 朱永利, 张凡, 等. 基于行为树的 IEC61850 智能电子设备互操作性描述与验证[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(24):66-71. XIONG Haijun, ZHU Yongli, ZHANG Fan, et al. Formal specification and verification of IEC61850 IED interoperability based on behavior tree[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(24):66-71.
- [20] 熊海军, 王晓辉, 朱永利, 等. IEC61850 智能电子设备交互实时性建模与验证[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19):90-95. XIONG Haijun, WANG Xiaohui, ZHU Yongli, et al. A specification and verification method of real-time interoperability for IEC61850 IED[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19):90-95.

作者简介:



熊海军

熊海军(1980—), 男, 湖北荆州人, 讲师, 博士, 主要研究方向为网络协议工程、变电站自动化系统(E-mail: xionghaijun@163.com);

朱永利(1963—), 男, 河北冀州人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为变电站自动化系统、智能信息处理(E-mail: yonglipw@126.com);

张琦(1980—), 女, 河北肃宁人, 讲师, 硕士, 主要研究方向为网络协议工程(E-mail: superland_163@163.com)。

Protection system modeling based on probabilistic behavior trees and quantitative evaluation of its reliability

XIONG Haijun¹, ZHU Yongli¹, ZHANG Qi², WANG Dewen¹

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. School of Science and Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: According to the functions and characteristics of digital relay protection system, the model of its behavior trees and the quantitative evaluation of its reliability are proposed. The reliability models are given for its hardware components, software behavior, sequence relation and selection relation. The existing behavior tree model is probabilistically extended, based on which the relay protection system is modeled. The calculative formula of behavior reliability is given, based on which the protection system reliability is quantitatively evaluated. The simulative results of case study show that, the proposed method can correctly evaluate the reliability of relay protection system and identify its weak parts.

Key words: relay protection; reliability; model buildings; quantitative evaluation; probabilistic behavior trees

(上接第 161 页 continued from page 161)

Grounding grid corrosion diagnosis with offset test point

LÜ Chao, LIU Liqiang, HU Kaixuan, WANG Jiao, SUN Qian

(Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010080, China)

Abstract: Two levels of test point offset are simulated in PSCAD for the fully-measurable branch and their fault diagnosis results are compared to analyze the influence of test point offset on the corrosion diagnosis of grounding grid, based on which, a reducing method is proposed for different levels of test point offset. According to the proposed method, the mathematical model of non-linear fault diagnosis and the hybrid particle swarm algorithm are improved. The simulative results show that the improved grounding grid corrosion diagnosis algorithm is correct and effective in the condition of offset test point.

Key words: grounding grid; corrosion; diagnosis; offset test point; failure analysis