

DOI: 10.3969/j.issn.1006-4729.2016.01.009

层次分析法在继电保护系统可靠性研究中的应用

温 杰¹, 楚 瀛¹, 彭富强², 王海燕³, 王宗慧³

(1. 上海电力学院, 上海 200090; 2. 北京送变电公司, 北京 102401;
3. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

摘 要:针对电力系统可靠性研究工作主要集中于一次设备,而二次系统可靠性研究相对较少的现状,提出了一种定量计算继电保护系统静态可靠性的方法.首先根据继电保护系统的物理结构特点抽象出其网络模型;然后,分别计算节点和支路的可靠性;最后,根据系统的网络拓扑结构计算得到整个系统正常工作的概率.将算例结果与实际运行统计数据进行对比,验证了该方法的合理性.

关键词:继电保护系统;可靠性;网络模型;层次分析法

中图分类号:TM774;TM77

文献标志码:A

文章编号:1006-4729(2016)01-0035-06

Application of AHP in Reliability Research of Relay Protection System

WEN Jie¹, CHU Ying¹, PENG Fuqiang², WANG Haiyan³, WANG Zonghui³

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. Beijing Transmission and Distribution Company, Beijing 102401, China;
3. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: A technique to quantitatively calculate the reliability of relay protection system is proposed. The network model is used to calculate the normal working probability of relay protection system which takes communication links of the secondary system of the intelligent substation as its branch routine and the intelligent devices such as protection, network switches as its nodes. The reliability of branch and nodes can be calculated by analytic hierarchy process. Then the reliability of relay protection system can be calculated according to the network topology. The comparison between the results of the examples and the actual operation shows that the method is reasonable.

Key words: relay protection system; reliability; network model; analytic hierarchy process

可靠性是指元件、设备或系统在预定时间内特定条件下完成自身功能的能力^[1].早期电力系统可靠性研究集中于一次设备,而二次设备被近似认为完全正常工作无故障发生且性能保持良

好,但根据北美电力可靠性委员会对 17 年的电力系统故障统计发现,70% 以上的电力系统故障是由于二次设备的不可靠工作造成的^[2].继电保护系统作为二次系统中重要组成部分,其重要性不

收稿日期:2015-06-24

通讯作者简介:温杰(1985-),男,在读硕士,山西晋中人.主要研究方向为变电站继电保护装置在线监测.

E-mail:wenjie265@126.com.

言而喻,其可靠性研究相当重要.文献[3]使用故障树法分析变电站自动化系统的可靠性,但是在区分设备重要度时简单地划分了5个等级,且在分析通讯链路可靠性时没有考虑通讯报文的可信度.文献[4]使用物元法分析了光纤通道对继电保护业务的影响,从通讯链路的角度上评估了光纤通道上所承载业务量对继电保护系统可靠性的影响,然而继电保护系统的正常工作需要各个组成部分的协调工作,具有整体性和系统性,需要从系统的角度出发评估其可靠性.

本文构造了以变电站通讯链路为支路,以继电保护装置及其他智能设备为节点的变电站继电保护系统可靠性评估网络模型,其中综合考虑了传输报文的可信度,并使用层次分析法区分了不同类型智能设备的重要度.

1 综合自动化变电站继电保护系统

继电保护系统是变电站综合自动化实现的硬件基础,保护装置通过二次电缆采集一次设备的运行参数如电流、电压、位置信号,并通过将相关信息发送至通讯管理机,通讯管理机将所有信息汇总后转发至监控后台及各级调度系统.电力系统故障后,继电保护装置需要迅速动作隔离故障点,第一时间将故障信息发送至监控后台或调度提醒运行人员,继电保护装置同时接受上位机的遥控,完成对一次设备的远程控制.

为便于事故分析,全站智能设备需统一对时,传统综合自动化继电保护系统常采用报文对时这种软对时方法,通讯管理机或者监控后台获得GPS时钟后以报文的方式广播给其他智能设备.继电保护系统是一个实时分布式系统,各智能设备是整个系统的基础,通讯链路连接相关智能设备并为变电站后台及各级调度控制中心的数据交互提供通路.

继电保护系统的可靠性由智能设备的可靠性和通讯链路的可靠性共同决定,可用无向图 $G = (V, E)$ 来描述.图1为典型继电保护系统及其无向图.其中, V 表示继电保护系统中的节点, E 表示继电保护系统的通讯链路,记 V_i 为无向图 G 中的第 i 个节点, E_{ij} 为连接 i 和 j 两个节点的通讯链路.

现作如下假设:节点和支路只有正常和故障两种状态,且各节点支路运行状况彼此相互独立.

整个系统可靠性的求解问题可转化为:通过求解系统网络拓扑图中节点和支路的可靠性,再结合网络拓扑结构评估继电保护系统整体的可靠性.

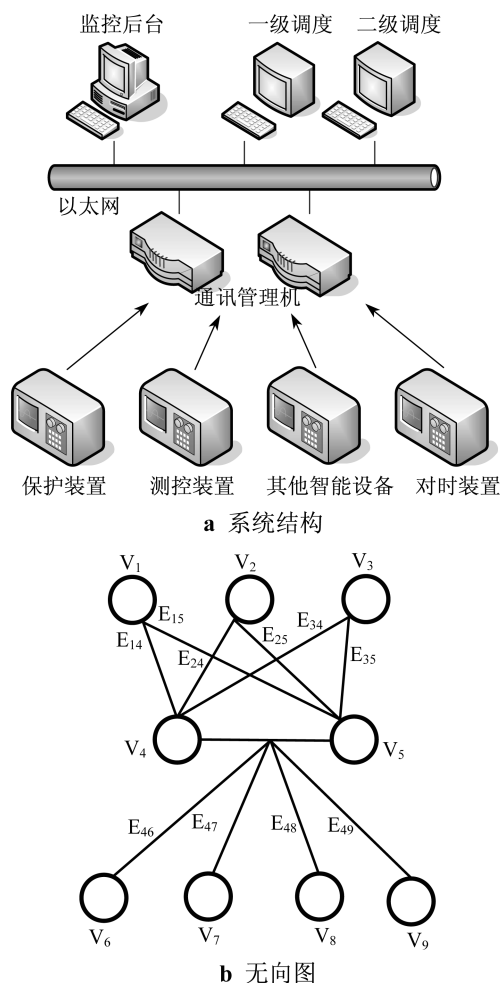


图1 典型继电保护系统及其无向图

2 继电保护系统可靠性

2.1 支路可靠性

20 世纪 60 年代美国工业界武器系统效能资讯委员会提出了评估武器系统效能评估法,该方法认为系统的整体效能不仅与系统的可用度有关,还与系统的可信度有关.继电保护系统通讯链路的可靠性与通讯链路的可用度及所传输数据的可信度有关.鉴于通讯网络与武器系统的可比性,通讯网络可靠性计算方法可借用武器系统效能评估的方法,即:

$$A_{ij} = P_{ij} D \quad (1)$$

式中: P_{ij} ——支路 E_{ij} 的通讯链路的可用度;

D ——通讯链路传输数据的可信度,即在通讯链路中所传输报文的可信度.

P_{ij} 的数值可用传统可靠性指标公式计算.

$$P = \frac{t_{\text{MTTF}}}{t_{\text{MTTR}} + t_{\text{MTTF}}} \tag{2}$$

式中: t_{MTTR} ——平均故障恢复时间;

t_{MTTF} ——平均正常工作时间.

D 的数值可通过报文误码率 B_r 计算,在静态计算时可将误码率视为常数.

$$D = 1 - B_r \tag{3}$$

2.2 节点可靠性

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP)是综合网络系统理论和多目标综合评价法的一种层次权重决策法.一个复杂决策问题可通过定性分析和定量计算相结合的方法分解为若干步,通过逐层计算最终求得初始目标.继电保护系统中各智能设备重要程度不相同,故障后造成的损失也不同,可采用层次分析法对其重要性进行区分.

2.2.1 构造层次分析模型

层次分析法将待解决问题分为目标层、准则层、方案层,要求层次结构是元素内部独立的递进层次结构,同一层之间的任意两元素之间不存在支配和从属关系且相互独立.典型层次分析模型如图2所示.

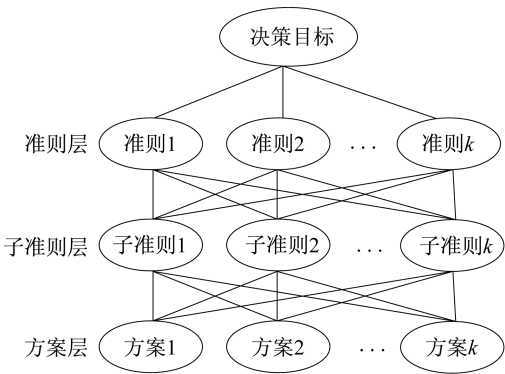


图2 典型层次分析模型

2.2.2 建立判断矩阵

根据模型建立判断矩阵 B ,矩阵中第 i 行 j 列元素为模型中第 i 个元素和第 j 个元素重要程度之比,结果用数字 1~9 表示,1 表示两者同等重要,9 表示前者比后者重要很多,判断矩阵是一个 n 阶方阵,如表1所示.

表1 判断矩阵标度方法及其含义

标 度	含 义
1	两个元素重要性相同
3	前一个因素比后一个略重要
5	前一个因素比后一个明显重要
7	前一个因素比后一个很重要
9	前一个因素比后一个非常重要
2,4,6,8	介于相邻的中值
倒数	后一个因素和前一个因素重要程度的比值

2.2.3 校验判断矩阵的一致性

在构造判断矩阵时,鉴于客观事物的复杂性和人们认识的多样性,不可能所有的判断都是完全一致的,尤其在因素多规模大的情况下更容易出现自相矛盾的判断.需要用随机一致性指标 k_{CR} 校验判断矩阵的一致性,步骤如下:

(1) 计算判断矩阵 B 的最大特征值 λ ;

(2) 根据公式 $k_{\text{CI}} = \frac{\lambda - n}{n - 1}$,求解 k_{CI} ;

(3) 结合矩阵阶数 n ,从表2中查找对应的平均随机一致性指标 k_{RI} ;

表2 平均随机一致性指标

n	k_{RI}	n	k_{RI}
1	0.00	6	1.24
2	0.00	7	1.32
3	0.58	8	1.41
4	0.90	9	1.45
5	1.12		

(4) 计算 $k_{\text{CR}}, k_{\text{CR}} = k_{\text{CI}}/k_{\text{RI}}$.

当 $k_{\text{CR}} < 0.1$ 时,即可认为判断矩阵满足一致性;否则,需要矫正判断矩阵并重新判断一致性,直至满足一致性要求.

2.2.4 求解权重

当判断矩阵一致性校验合格后,可采用特征向量求解权重,即求判断矩阵最大特征值及其所对应的特征向量.计算公式为 $BW = \lambda W$. 其中 λ 为判断矩阵 B 的最大特征根, W 为对应于 λ 的特征向量, W 向量中第 i 个分量即为第 i 个元素的重要度.

若已知节点 V_i 正常工作概率为 P_i ,该节点在整个系统中重要度为 α_i ,则该节点的可靠性计算公式为:

$$A_i = 1 - \alpha_i(1 - P_i) \tag{4}$$

其中节点正常工作的概率 P_i 计算公式同式(2).

节点可靠性计算流程如图 3 所示.

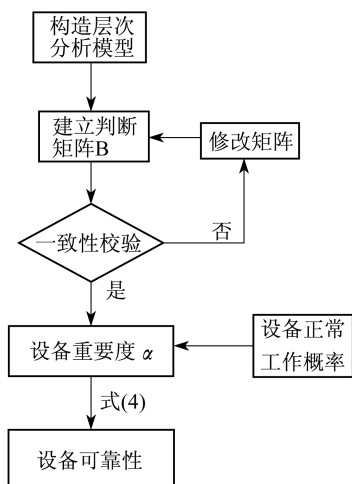


图3 节点可靠性流程

2.3 系统可靠性网络模型

继电保护系统网络结构拓扑包括总线型、星形、树形、环形等,分析系统可靠性时需要综合考虑系统的网络拓扑结构,常见的可靠性模型有以下3种.

2.3.1 串联型网络模型

在串联系统的多个元件中,若其中一个发生故障,则整个系统发生故障,其可靠性等于各个元件可靠性之积.

$$A_1 = \prod_{i=1}^n A_i \quad (5)$$

式中: A_i ——第 i 元件的可靠性;

n ——元件个数.

2.3.2 并联型网络模型

并联系统中,只有所有元件均发生故障,整个系统才故障,故障率等于单个元件故障率之积.

$$A_2 = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - A_i) \quad (6)$$

2.3.3 k/n 型网络模型

系统由 n 个元件共同组成,只有 k 个及以上元件正常工作,系统才能正常工作,采用冗余配置的交换机、通讯管理机常用此模型.

$$A_3 = \sum_{i=k}^n \left[\begin{matrix} n \\ i \end{matrix} \right] p^i (1 - A_i)^{n-i} \quad (7)$$

系统整体的可靠性是各个节点、各条支路正常工作概率的函数.

3 算例分析

本文以浙江省德清县庾村 35 kV 变电站(以下简称“庾村变”)为例,庾村变 35 kV 为刀闸进线,10 kV 侧采用单母分段接线,配有两台 35 kV/10 kV 变压器,35 kV 侧有两条进线,每条 10 kV 母线各带 4 条 10 kV 出线、1 套电容器及 1 台站用变压器,系统一次接线图如图 4 所示.

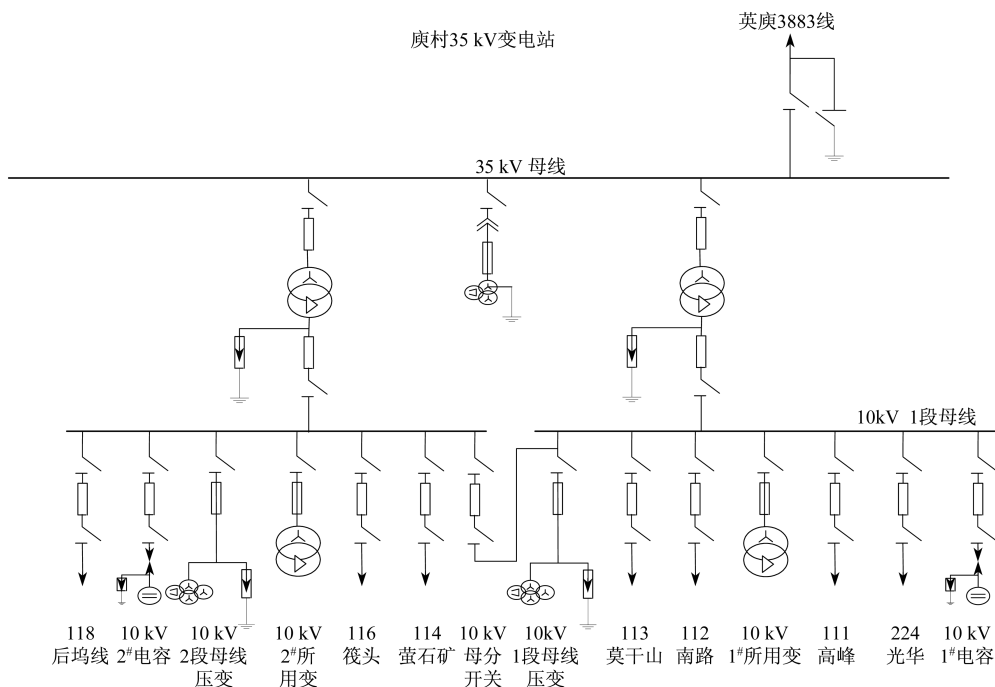
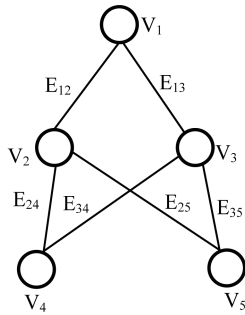


图4 庾村 35 kV 变电站主接线

庾村变全站智能设备采用 GPS 报文对时,测控保护装置采用北京四方生产的测控保护一体化装置,通讯管理机配备主备双套由湖州泰伦电力自动化工程有限公司提供,变电站当地监控后台系统采用研华工控机使用北京四方提供的 CSC2000 监控软件. 通讯管理机与继电保护装置之间采用单网 lon 网通讯,通讯管理机与变电站后台之间采用单网网络通讯,继电保护系统的网络拓扑图如图 5 所示.



注: V₁—监控后台; V₂, V₃—通讯管理机; V₄—继电保护测控装置; V₅—对时装置; E₁₂, E₁₃—网络通讯; E₂₄, E₂₅, E₃₄, E₃₅—lon 网通讯.

图 5 庾村 35 kV 变电站继电保护系统网络拓扑结构

3.1 节点可靠性计算

继电保护系统中的智能设备根据功能不同可划分为保护测控装置、通讯管理机、对时装置及监控后台 4 大类,需要区分这 4 类设备的重要度.

建立判断矩阵 B 并校验其一致性,利用特征值法计算各个判断矩阵中行元素的重要度. 电力系统中发生故障后需要继电保护装置迅速准确地隔离故障点,保护测控装置故障后将导致整个继电保护系统的崩溃,是整个系统中最重要元件;通讯管理机连接保护装置和监控后台,起着承上启下的作用,其发生故障后,将导致监控后台和各级调度无法实时获取一次设备的运行数据,虽不影响继电保护装置对电力系统故障点的隔离,但会导致运行人员对一次设备的失控,其重要性仅次于继电保护装置;GPS 对时装置对电力系统故障的记录和故障后的分析起着决定性作用,其重要性仅次于继电保护装置;监控后台是变电站运行操作人员查看操作一次设备的终端,庾村变属于无人值守变电站,监控后台重要性略低. 通过上

述分析后建立如下判断矩阵 B,其中第 1 行为保护测控装置,第 2 行为通讯管理机,第 3 行为对时装置,第 4 行为监控后台.

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 & 6 \\ \frac{1}{3} & 1 & 2 & 4 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & 1 & 2 \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

最大特征值为:

$$\lambda = 4.0458$$

$$k_{CI} = \frac{\lambda - n}{n - 1} = 0.01527$$

$$k_{CR} = \frac{k_{CI}}{k_{RI}} = 0.017 < 0.1$$

满足一致性要求. 最大特征值对应的特征向量 $W = [0.8892, 0.3885, 0.2125, 0.1154]$.

根据智能设备生厂商和电力部门提供的设备使用寿命,并假定变电站智能设备的 t_{MTTR} 为 24 h,计算得到设备的不可用度,参数汇总如表 3 所示.

表 3 智能设备可靠性参数

设备名称	使用寿命/a	重要度	不可用度/ $\times 10^{-6}$
测控保护装置	150	0.8892	16.240
通讯管理机	150	0.3885	7.094
对时装置	150	0.2125	3.880
监控后台	60	0.1154	5.269

3.2 支路可靠性计算

继电保护系统的通信链路为屏蔽双绞线产品,使用寿命为 500 a,假定 t_{MTTR} 为 24 h,根据式 (2) 可算得通讯支路的可靠性为 0.999995. 假设 lon 网通讯误码率为 1×10^{-9} ,根据式 (2) 和式 (3) 可算得通讯支路正常工作的概率为 0.9999945.

3.3 系统可靠性计算

根据庾村变的网络拓扑结构可以看出,通讯管理机采用双套配置后应使用 k/n 模型计算. 其中 $k=1, n=2$,其可靠性计算公式应为 $A = P^2 + C_2^1 P(1-P)$,其余设备按照串联模型可以计算得到. 整个变电站继电保护系统的可用度 $P = 99.996\%$,与该变电站提供的统计数据相吻合.

4 结 语

继电保护系统是电力系统中最重要的重要组成部分,本文采用网络模型法评估了传统继电保护系统的静态可靠性,使用层次分析法对不同种类智能设备在继电保护系统中的重要程度进行了区分;计算通讯可靠性的过程中结合了通讯报文的可靠性,使计算结果更为精确;结合保护系统的网络拓扑结构对整个保护系统可靠性进行评估.最后,通过文中算例进行验证,证明该诊断方法正确有效.

参考文献:

- [1] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京:清华大学出版社,2003:56-78.
- [2] 戴志辉,王增平. 继电保护可靠性研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(15):161-167.
- [3] 雷宇,李涛. 变电站综合自动化系统可靠性的定量评估[J]. 电力科学与工程,2009,25(6):37-40.
- [4] 耿方方,高强,崔绍飞. 基于物元模型的继电保护业务可靠性评估[J]. 电力科学与工程,2009,25(3):28-32.

(编辑 白林雪)

(上接第 11 页)

流流动状态. 在强烈湍流流动作用下,在第一喷淋层,气相沿塔体高度方向的分布已基本均匀. 烟气依次通过 3 个喷淋层到达出口截面,沿塔体高度方向向上,气相分布更为均匀. 从整体上看,加入喷淋后,烟气进口处以及脱硫塔中部的旋涡基本消失,沿左侧塔壁的回流也基本消失,取而代之的是进口处上方的一个较小尺度的逆时针旋涡,此旋涡是由于进口段突扩导致的. 塔内离散相流场模拟效果如图 7 所示. 塔内分 3 层喷淋,液滴覆盖了整个塔体空间,保证了较高的覆盖率,并且对烟气的流动也有益处.

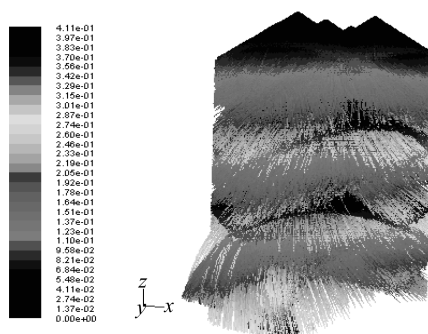


图 7 离散相流场模拟效果

3 结 论

(1) 系统原有脱硫塔内烟气速度整体较高,并且分布非常不均匀,大部分烟气贴壁流动,针对

该问题采取增高塔体、增大塔径,并选用宽阔的矩形烟气进口,使烟气以较低速度分散地进入脱硫塔,烟气在塔内具有合适的速度及充分的接触时间.

(2) 对系统塔体进行优化后的模拟结果表明,倾斜入口减轻了烟气贴壁和入口后的塔体底部旋涡,故脱硫塔入口烟道倾斜一定角度是有益的.

(3) 脱硫塔内喷淋层分 3 层布置,既能兼顾高层布置较长的气液接触时间,又能保证较少的烟气贴壁量,并且能使液膜覆盖更密实,加之局部区域内强烈的掺混作用与湍流脉动,增进了塔内的气液传质过程.

参考文献:

- [1] 李荫堂,李安平,王双,等. 烟气脱硫喷淋塔气体旋流实验研究[J]. 环境技术,2005(1):25-28.
- [2] 王青宁,韩维亮,蒋金龙,等. 脱除硫化氢的凹凸棒石基纳米氧化锌脱硫剂的实验研究[J]. 石油学报,2012,28(5):757-763.
- [3] KIKKAWA Hirofumi. New wet FGD process using granular limestone[J]. Ind. Eng. Chem. Res.,2002,41(12):3 028-3 036.
- [4] 杨忠国,荀海川,都基圣. 基于 CFD 的活性炭烟气脱硫数值模拟[J]. 河南科技大学学报,2011,32(2):21-24.

(编辑 白林雪)