

基于直觉梯形模糊数的数字保护可靠性分析

郭艺, 吕飞鹏, 王刚

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 智能变电站继电保护系统在架构和原理上都发生了巨大改变, 如何客观正确地分析其可靠性尤为重要。对保护信息分类处理, 采用最小路集算法进行合理的拓扑分析, 然后运用直觉梯形模糊数对系统具有模糊不确定性的设备元件故障率进行分析计算, 得出模糊可靠性指标, 并通过编程的方式运用直觉梯形模糊数的信息不完全确定决策方法对最小路集线路进行可靠性分析, 找出系统的薄弱环节。事实证明, 该方法是一种具有实际意义的继电保护系统可靠性评估方法。

关键词: 数字保护; 最小路集; 直觉梯形模糊数; 可靠性

Reliability analysis of digital relay based on intuitionistic trapezoidal fuzzy numbers

GUO Yi, Lü Fei-peng, WANG Gang

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The structure and theory of relay protection system in smart substation have changed greatly. How to analyze the reliability of relay systems objectively and properly is an important problem. The information can be divided into three parts and the topology is analyzed rationally by minimal path sets algorithm, then the theory of intuitionistic trapezoidal fuzzy numbers is used to analyze and calculate the fuzzy and uncertain failure probabilities of devices. With the reliability indexes of relay protection system and the software of model, every minimal path can be analyzed by the decision-making method based on intuitionistic trapezoidal fuzzy numbers and the weakness of relay system is identified. This method proposed is proved correct and practical by the sample model.

Key words: digital protection; minimal path sets algorithm; intuitionistic trapezoidal fuzzy numbers; reliability

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)12-0065-06

0 引言

随着 IEC61850 标准的颁布、高速以太网交换技术的快速发展及非常规互感器技术的实用化, 智能变电站飞速发展成为了一种必然的趋势。IEC61850 旨在提高系统的开发性、通用性和可扩展性, 实现不同厂家不同设备之间的互操作性, 而信息模型与可靠性则是其实现的关键和基础^[1]。

智能变电站由于数字保护组网模式多种多样和数字保护元件复杂多样化, 且保护系统和功能元件可冗余配置, 使得数字化保护系统的实现方案越来越多^[2]。如何对各种方案进行客观准确的可靠性评估和选择是一个迫切需要解决的问题。

目前对继电保护系统的可靠性研究多集中在传统保护, 而对智能变电站的研究还相对较少。其研究方法不外乎两大类^[2]: 解析法和模拟法。现代电力系统绝大部分元件运行状态以及系统运行状态的

变化都具有不确定性。考虑其元件的制造水平复杂和影响质量因素很多, 它们的正常运行都服从一定的概率分布, 因此基于其随机性定量评估是客观有效的。但是电力系统不仅具有随机不确定性, 而且还涉及到许多模糊不确定问题。如各种设备故障、修复率运行周期等一些参数因统计资料的不足或误差, 以及对未来运行环境、条件的估计不足而具有模糊性^[3-4]。基于以上种种情况, 如果再仅利用常见的概率论得出可靠性评估方法给出一个概率值或者期望值是不恰当的, 这会使得将来的设计规划与现实情况有很大的出入, 由此确定的可靠性指标已经失去了其本应具有的指导性意义。而如果以一些模糊性的可靠性评价指标去代替十分明确的指标, 使规划的可靠性指标具有一定的裕度, 这将使应对一些不易估计的因素成为可能, 可靠性指标也将变得更加合理可靠^[5-7]。

综合利用随机不确定性与模糊不确定性, 把两

者有机地结合起来,是一种有效的研究可靠性的途径,本文提出了利用直觉梯形模糊数决策方法来评估可靠性。

1 智能变电站继电保护系统分析

1.1 继电保护系统结构

智能变电站的主要特点是利用数字化信息网络通信,因此其继电保护系统与传统变电站的有很大区别,一般来说,数字保护的电子元件由互感器、保护单元、断路器、合并单元、同步时钟源、传输介质、网络接口、交换机和智能终端组成^[8-9]。

与普通的电磁互感器相比,数字保护采用的电子式电流/电压互感器具有抗干扰强,频带响应宽,综合成本低,且计算精度高和保护性能强等优点。

智能断路器以微处理器为核心,综合应用各种现代技术,实现智能化控制,具有反应速度快,自诊断能力强等特点。

同步时钟源从外部时钟源获取时间信息,并通过 TimeSync 报文校准请求同步的合并单元、保护单元和智能终端的内部时钟。

以太网交换机连接单个网络节点时,节点与交换机之间采取全双工通信方式,网络可被划分成多个网段以提高网络通信可靠性。

一般来说,传输介质和网络接口是系统的重要组成部分,传输介质一般以光纤为主,现阶段可靠性相对较高,因此我们可以忽略仅网络接口对系统可靠性的影响。

为使后文叙述方便,保护系统各模块用下述英文缩写来表示:MI(Mutual Inductor)为互感器,PR(Protection)为保护单元,BR(Breaker)为断路器,MU (Merging Unit) 为合并单元,TS(Time Synchronization Source) 为同步时钟源,EM (Ethernet Media)网络接口,SW(Switch)为交换机,IT(Intelligent Terminal)为智能终端。

本文以某智能变电站某数字保护系统方案为例,其结构如图 1 所示。该系统对时网络为星型网络,MI1 为电流互感器,MI2 为电压互感器,合并单元、保护单元、网络端口和智能终端均采用冗余配置,交换机网络采用独立双网,GOOSE 网络采用直线连接形式。

1.2 可靠性分析

智能变电站继电保护系统信息通常可分为三类:同步对时信息 TS(Time Synchronization)、报文采样信号 SV(Sample Value)和断路器控制及其状态信息传输报文 GOOSE(Generic Object Oriented Substation Event)^[10]。

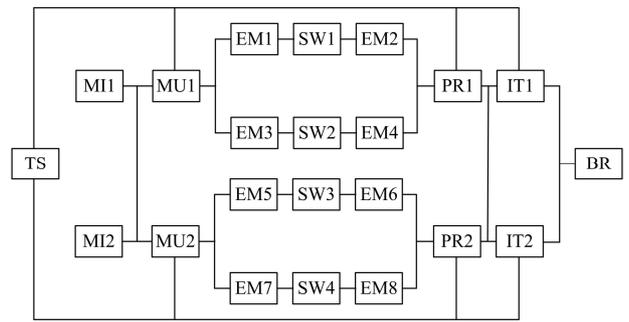


图 1 继电保护系统图

Fig. 1 Diagram of relay protection system

从图 1 中可以看出整个系统是由很多条线路并联而成,利用最小路集^[11](Minimal Path Sets)方法可以计算系统的可靠性。对于本系统而言,同步对时信息是相对于合并单元、保护单元和智能终端而言,因此可以将对时信号的可靠性计算加入设备本身。而 GOOSE 报文传输和 SV 报文传输的计算需要找出系统的所有最小路集。串联关系可使用公式(1)。

$$R_p = \prod_{i=1}^n R_i \quad (1)$$

并联关系可使用公式(2)。

$$R_p = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (2)$$

式中: R_p 为系统可靠性; R_i 为元件可靠性; n 为元件数量。

需要注意的是,以上所有公式的计算均不能直接代入可靠性概率,必须按照布尔代数运算规则进行简化合并运算,同项相乘合并为一项,得到最终的可靠性表达式才可以代入数值计算。如本系统结构图可知:

利用最小路集得出 GOOSE 报文的最小路集为

$$\begin{cases} L_{goose1}: PR1 - IT1 - BR; \\ L_{goose2}: PR1 - IT2 - BR; \\ L_{goose3}: PR2 - IT1 - BR; \\ L_{goose4}: PR2 - IT2 - BR; \end{cases}$$

SV 报文的最小路集为

$$\begin{cases} L_{sv1}: MI1 - MU1 - EM1 - SW1 - EM2 - PR1; \\ L_{sv2}: MI1 - MU1 - EM3 - SW2 - EM4 - PR1; \\ L_{sv3}: MI1 - MU2 - EM5 - SW3 - EM6 - PR2; \\ L_{sv4}: MI1 - MU2 - EM7 - SW4 - EM8 - PR2; \\ L_{sv5}: MI2 - MU1 - EM1 - SW1 - EM2 - PR1; \\ L_{sv6}: MI2 - MU1 - EM3 - SW2 - EM4 - PR1; \\ L_{sv7}: MI2 - MU2 - EM5 - SW3 - EM6 - PR2; \\ L_{sv8}: MI2 - MU2 - EM7 - SW4 - EM8 - PR2; \end{cases}$$

2 梯形模糊可靠性计算

2.1 直觉梯形模糊数定义及其运算

随着科学技术的不断发展, 模糊数学的研究趋于精细化, 对系统的判别和推理的精确性要求越来越高, 为了更可靠更准确地分析客观现象, 不可能只使用确定性数学模型和一些必然的关系, 因此基于模糊数学的各式各样的分析方法应运而生。现代电力系统数字保护元件的故障具有模糊随机性, 使得电网的运行也具有模糊随机性。针对以上情况, 本文对保护可靠性的研究使用直觉梯形模糊数^[12] (Intuitionistic Trapezoidal Fuzzy Numbers, 简称 ITFN) 来描述模型和计算。

对于继电保护系统而言, 以系统元件可靠度为例, 对多个同类元件的统计资料分析可以知道, 其值通常不是一个准确值, 而会在一个区间内, 其概率值可能在 p_1 到 p_4 之间, 最可能是在 p_2 与 p_3 之间 ($p_1 < p_2 < p_3 < p_4$)。而且也无法确定是否所有元件均能符合这一概率指标, 因此以 μ 表示可靠性在指定范围的隶属度, 以 ν 表示非隶属度, 以 $1-\mu-\nu$ 表示模糊隶属度。

定义 2.1^[12] 记 $A = (a, b, c, d; \mu, \nu)$, $0 < \mu < 1$, $0 < \nu < 1$, $\nu + \mu \leq 1$, $0 < a < b < c < d < 1$, 称 A 为梯形模糊数, 其隶属函数可以表示为

$$\mu_A = \begin{cases} \mu \frac{(x-a)}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \mu, & b \leq x \leq c \\ \mu \frac{(x-d)}{c-d}, & c \leq x \leq d \end{cases} \quad (3)$$

非隶属函数为

$$\nu_A = \begin{cases} \frac{b-x+\nu(x-a)}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \nu, & b \leq x \leq c \\ \frac{x-c+\nu(d-x)}{d-c}, & c \leq x \leq d \end{cases} \quad (4)$$

定义 2.2^[13] 设 $A_1 = (a_1, b_1, c_1, d_1; \mu_1, \nu_1)$ 和 $A_2 = (a_2, b_2, c_2, d_2; \mu_2, \nu_2)$ 为两个直觉梯形模糊数, 则:

$$A_1 + A_2 = (a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2, d_1 + d_2; \min(\mu_1, \mu_2), \max(\nu_1, \nu_2)); \quad (5)$$

$$A_1 - A_2 = (a_1 - a_2, b_1 - b_2, c_1 - c_2, d_1 - d_2; \min(\mu_1, \mu_2), \max(\nu_1, \nu_2)); \quad (6)$$

$$A_1 \cdot A_2 = (a_1 \cdot a_2, b_1 \cdot b_2, c_1 \cdot c_2, d_1 \cdot d_2; \min(\mu_1, \mu_2), \max(\nu_1, \nu_2)); \quad (7)$$

$$k \cdot A_1 = (a_1 \cdot k, b_1 \cdot k, c_1 \cdot k, d_1 \cdot k; 1 - (1 - \mu_1)^k, \nu_1^k); \quad (8)$$

定义 2.3^[14] 设 $A_1 = (a_1, b_1, c_1, d_1; \mu_1, \nu_1)$ 和 $A_2 = (a_2, b_2, c_2, d_2; \mu_2, \nu_2)$ 为两个直觉梯形模糊数, 则两模糊数之间的 Hamming 距离为

$$l(A_1, A_2) = \frac{1}{8} (|(1 + \mu_1 - \nu_1)a_1 - (1 + \mu_2 - \nu_2)a_2| + |(1 + \mu_1 - \nu_1)b_1 - (1 + \mu_2 - \nu_2)b_2| + |(1 + \mu_1 - \nu_1)c_1 - (1 + \mu_2 - \nu_2)c_2| + |(1 + \mu_1 - \nu_1)d_1 - (1 + \mu_2 - \nu_2)d_2|) \quad (9)$$

2.2 基于直觉梯形模糊数的系统可靠性评估方法

1) 运用最小路集方法可知系统图 1 的拓扑分析, 然后通过式(1)和式(2)对系统中的状态变量进行运算。应注意上述运算均为布尔运算, 同项相乘应划为一项。

2) 将直觉梯形模糊数代入上述所得到的布尔代数式, 利用定义 2.2 所示重载公式进行计算得出数字保护系统直觉可靠性参数。

3) 利用上述所得参数, 将数据代入定义 2.1 得出系统可靠性数据。

2.3 基于直觉梯形模糊数的信息不完全确定决策方法

智能变电站继电保护系统通信线路要确保可靠, 因此要对每一条通信线路进行评估, 及时对易出故障的线路进行维护, 本文以如下方法对通信线路进行评估。

1) 原始决策信息由于没有统一的度量标准, 难以对决策属性进行评估, 因此需要先对决策信息矩阵进行归一化处理, 以减少度量标准带来的误差影响。继电保护系统需要考虑线路的效益, 即可靠性越高越好, 因此根据文献[15]可知其处理方法为

$$p_i = \left(\frac{a_i}{\max_j \{d_j\}}, \frac{b_i}{\max_j \{d_j\}}, \frac{c_i}{\max_j \{d_j\}}, \frac{d_i}{\max_j \{d_j\}}; \mu_i, \nu_i \right) \quad (10)$$

其中, $A_i(a_i, b_i, c_i, d_i; \mu_i, \nu_i)$ 为 n 个直觉梯形模糊数, $i=1, 2, \dots, n$, $\max_j \{d_j\}$ 为所有直觉梯形模糊数中 d_j 的最大值。 $j=1, 2, \dots, n$, p_i 为经归一化处理的直觉梯形模糊数 A_i 。

2) 对所有线路的数据进行加权处理, 即 $Q(A_j) \cdot A_j$, 得到 A'_j 。权系数的选取方法有很多种^[16], 这里选取模糊语义“大多数”准则, 记:

$$Q(A_j) = \left(\frac{\sum_{i=1}^j \mu_i}{n} \right)^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{j-1} \mu_i}{n} \right)^2 \quad (11)$$

式中： $Q(A_j)$ 为模糊数 A_j 的权重系数； A_j 为线路的梯形模糊数； μ_i 为 A_i 的隶属度，取 $\mu_0=0$ ； n 为所有的需要比较的模糊数数量， $j=1,2,\dots,n$ 。

3) 对于理想型线路应该满足各项可靠性指标均为最高，因此我们定义：

$$s = (\max(a'_i), \max(b'_i), \max(c'_i), \max(d'_i); 1, 0) \quad (12)$$

式中： $i=1,2,\dots,n$ ， n 为模糊数的个数； a'_i 、 b'_i 、 c'_i 、 d'_i 均为相应模糊数概率； s 即为理想型，其隶属度为 1，非隶属度为 0。利用公式(9)计算模糊数 A'_i ($i=1,2,\dots,n$) 的 Hamming 距离 $l(A'_i, s)$ 。

4) 对各条线路的 Hamming 距离进行排序，距离越近则得出线路可靠性越高，即 $l(A'_i, s)$ 越小， A'_i 所对应的线路可靠性越高。

3 软件实现及实例分析

智能变电站继电保护设施不仅极其庞大，而且十分复杂，因此仅仅依靠手工计算是不现实的，为此我们借助 VC6.0 编程实现，软件主要实现对可靠性计算的算法。

本文以某 220 kV 智能变电站一套继电保护方案为例，其系统方案用图形表示如图 1 所示，各类元件的可靠性信息参照设备厂商提供，并参照智能变电站相应运行数据得出。参数列表如表 1 所示。

利用以上参数和方法可以得出本文所示的继电保护系统可靠性在 0.987 817 到 0.989 539 之间，而最可能在 0.988 27 到 0.988 908 之间，其隶属度为 0.8，非隶属度为 0.15，因此可得隶属度函数为

$$\mu_A = \begin{cases} \frac{x-0.987817}{0.0000566}, & 0.987817 \leq x \leq 0.98827 \\ 0.8, & 0.98827 \leq x \leq 0.988908 \\ \frac{0.989539-x}{0.0000787}, & 0.988909 \leq x \leq 0.989539 \end{cases}$$

非隶属度函数为

$$\nu_A = \begin{cases} \frac{0.840097-0.85x}{0.0000453}, & 0.987817 \leq x \leq 0.98827 \\ 0.15, & 0.98827 \leq x \leq 0.988909 \\ \frac{0.85x-0.840478}{0.000063}, & 0.988909 \leq x \leq 0.989539 \end{cases}$$

用以上数据描述数字保护可靠性，使可靠性指标在一定范围内，数字保护系统规划者在设计系统

时，可以留下相应的裕度空间以估计某些特殊因素的发生。

表 1 保护系统元件可靠性直觉模糊数
Table 1 ITFN of components in relay system

元件	可靠性					
	a	b	c	d	μ	ν
TS	0.9985	0.9986	0.9988	0.9990	0.9	0.1
M11	0.9989	0.9991	0.9994	0.9997	0.85	0.1
M12	0.9990	0.9992	0.9993	0.9995	0.87	0.1
MU1	0.9957	0.9959	0.9960	0.9962	0.80	0.15
MU2	0.9958	0.9959	0.9961	0.9963	0.82	0.13
EM1	0.9992	0.9993	0.9994	0.9996	0.91	0.05
EM2	0.9991	0.9992	0.9995	0.9998	0.9	0.1
EM3	0.9993	0.9994	0.9995	0.9997	0.92	0.08
EM4	0.9992	0.9994	0.9996	0.9998	0.92	0.05
EM5	0.9994	0.9995	0.9996	0.9997	0.91	0.08
EM6	0.9992	0.9993	0.9995	0.9996	0.90	0.1
EM7	0.9993	0.9994	0.9996	0.9997	0.90	0.08
EM8	0.9992	0.9993	0.9994	0.9995	0.93	0.07
SW1	0.9685	0.9693	0.9699	0.9705	0.80	0.1
SW2	0.9690	0.9695	0.9700	0.9705	0.82	0.15
SW3	0.9695	0.9698	0.9700	0.9703	0.84	0.1
SW4	0.9689	0.9694	0.9698	0.9702	0.85	0.15
PR1	0.9984	0.9988	0.9989	0.9990	0.8	0.12
PR2	0.9986	0.9987	0.9988	0.9989	0.82	0.15
IT1	0.9965	0.9968	0.9970	0.9972	0.92	0.08
IT2	0.9968	0.9970	0.9971	0.9972	0.93	0.05
BR	0.9894	0.9896	0.9897	0.9898	0.82	0.14

GOOSE 报文传输可靠性直觉模糊数列表如表 2 所示。

表 2 GOOSE 网可靠性直觉模糊数
Table 2 ITFN of GOOSE net

GOOSE	可靠性直觉模糊数
GOOSE1	(0.958659,0.960509,0.962162,0.964011;0.8,0.14)
GOOSE2	(0.959346,0.960995,0.962454,0.964108;0.8,0.14)
GOOSE3	(0.960226,0.961196,0.962454,0.963717;0.82,0.15)
GOOSE4	(0.959535,0.960704,0.96216,0.963521;0.82,0.15)

SV 报文传输可靠性直觉模糊数列表如表 3 所示。

将上述数据按照直觉梯形模糊数的信息不完全确定决策方法计算可得：GOOSE 报文信息传输线路可靠性中：GOOSE3>GOOSE2> GOOSE4>GOOSE1, SV 报文信息传输线路的可靠性中：SV3>SV7> SV2> SV8> SV6> SV1> SV5> SV4。

表 3 SV 网可靠性直觉模糊数

Table 3 ITFN of SV net

SV	可靠性直觉模糊数
SV1	(0.958659,0.960509,0.962162,0.964011;0.8,0.14)
SV2	(0.959346,0.960995,0.962454,0.964108;0.8,0.14)
SV3	(0.960226,0.961196,0.962454,0.963717;0.82,0.15)
SV4	(0.959535,0.960704,0.96216,0.963521;0.82,0.15)
SV5	(0.958755,0.960605,0.962066,0.963818;0.8,0.14)
SV6	(0.959442,0.961092,0.962358,0.963915;0.8,0.14)
SV7	(0.960322,0.961293,0.962358,0.963524;0.82,0.15)
SV8	(0.959632,0.9608,0.962063,0.963328;0.82,0.15)

如以上所述数据可知, GOOSE3 和 SV3 通路具有较高的可靠性, 而 GOOSE1 和 SV4 在遇到某些不利情况下更容易发生故障, 在考虑实际情况可行下, 可以实行冗余装置来提高系统的可靠性, 或者加强该条线路的监管。系统可靠性在一个范围之内, 有一定的裕度可使系统的可靠性描述更加客观真实, 对于一些突发情况的处理将更加到位。针对系统最小路的可靠性分析, 可以准确地把握到系统的薄弱环节, 不仅有利于预防问题的发生, 还有利于发生故障时问题的及时解决。

4 结束语

直觉梯形模糊数可靠性评估方法可以很好地处理智能变电站继电保护系统的许多模糊的不确定、随机出现的因素, 整个计算过程也不算复杂, 计算时间增加不多, 由以上计算所得的各项系统可靠性数据, 工作人员可以客观地了解到某一规划方案的可靠性水平, 这样可以为系统规划提供科学合理的决策依据, 因此可以用于实际的工程中。

参考文献

- [1] ZHANG Pei-chao, PORTILLO L, KEZUNOVIC M. Compatibility and interoperability evaluation for all-digital protection system through automatic application test[C] // IEEE PES General Meeting, Montreal, Canada, 2006.
- [2] 王超, 王慧芳, 张驰, 等. 数字化变电站继电保护系统的可靠性建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 8-13.
- WANG Chao, WANG Hui-fang, ZHANG Chi, et al. Study of reliability modeling for relay protection system

in digital substations[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 8-13.

- [3] 魏震波, 刘俊勇, 朱国俊, 等. 基于可靠性加权拓扑模型下的电网脆弱性评估模型[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 131-137.
- WEI Zhen-bo, LIU Jun-yong, ZHU Guo-jun, et al. Vulnerability evaluation model to power grid based on reliability-parameter-weighted topological model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 131-137.
- [4] 杨毅, 韦钢, 周冰, 等. 基于模糊期望值模型的配电网网架规划[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 200-206.
- YANG Yi, WEI Gang, ZHOU Bing, et al. Distribution network planning based on fuzzy expected value model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 200-206.
- [5] 张焰. 电网规划中的模糊可靠性评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(11): 77-80.
- ZHANG Yan. The evaluation method of fuzzy reliability in electric power network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(11): 77-80.
- [6] 肖飞, 吕飞鹏. 基于区间理论的数字化保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 142-146.
- XIAO Fei, Lü Fei-peng. Reliability analysis of digital protection system based on interval theory[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 142-146.
- [7] 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.
- DAI Zhi-hui, WANG Zeng-ping. Overview of research on protection reliability[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 161-167.
- [8] 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, 23(1): 77-82.
- ZHANG Pei-chao, GAO Xiang. Analysis of reliability and component importance for all-digital protective systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 77-82.
- [9] 朱林, 陈金富, 段献忠. 数字化变电站冗余体系结构

- 的改进及其可靠性和经济性评估[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 147-151.
- ZHU Lin, CHEN Jin-fu, DUAN Xian-zhong. Improvement of redundant architecture in digital substation and its reliability & economic assessment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 147-151.
- [10] 高翔. 数字化变电站应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [11] 金碧辉. 系统可靠性工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [12] 许叶军. 基于不同类型偏好信息的多属性决策方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2009.
- [13] ABBASBANDY S, HAJJARI T. A new approach for ranking of trapezoidal fuzzy numbers[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2009, 57: 413-419.
- [14] 王坚强, 聂荣荣. 基于直觉梯形模糊信息的多准则群决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(8): 1747-1753.
- WANG Jian-qiang, NIE Rong-rong. Multi-criteria group decision-making method based on intuitionistic trapezoidal fuzzy information[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2012, 32(8): 1747-1753.
- [15] 王坚强, 张忠. 基于直觉梯形模糊数的信息不完全确定的多准则决策方法[J]. 控制与决策, 2009, 24(2): 226-230.
- WANG Jian-qiang, ZHANG Zhong. Multi criteria decision-making method with incomplete certain information based on intuitionistic fuzzy number[J]. Control and Decision, 2009, 24(2): 226-230.
- [16] YAGER R R. Quantifier guided aggregation using OWA operators[J]. Internal Journal of Intelligent Systems, 1996, 11(1): 49-73.
-
- 收稿日期: 2013-09-05; 修回日期: 2013-12-03
- 作者简介:
- 郭 艺 (1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: iyoug@163.com
- 吕飞鹏 (1968-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统继电保护和故障信息处理智能系统;
- 王 刚 (1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能电网, 电力系统分析及控制。