

配电终端性能动态测试及影响因素评估方法

颜 炯¹, 徐敬友¹, 胡志豪², 林湘宁², 李正天², 梁继涵²

(1. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430077;

2. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:随着小电流接地选线等各种不同原理的配网终端装置被广泛纳入配电自动化系统, 配电终端的动作性能测试与设备优选成为配电网建设的重要关注问题。长期以来, 包括选线装置在内, 一般配网终端的实际性能并不能接近实验室测试的理想效果, 因为入网测试阶段的方法是离线进行的, 无法对实际配电网中复杂的故障随机场景进行全面遍历及考核。由于缺乏全面的测试数据, 评价方式也相对单一化, 无法全面排查配网终端的潜在缺陷。为克服此类问题, 借助实时动态仿真系统(RTDS)建立真实配电网模型, 为装置提供全面丰富的故障场景; 并以小电流接地选线装置为例, 借助 RTDS 测试结果, 提出一种基于 Logistic 回归模型的装置动作性能影响因素评估方法, 对入网设备的全面检验及选择具有实际参考价值。

关键词:配网终端; 回归分析; RTDS; 小电流接地系统; 测试验证

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.05.025 中图分类号:TM773 文章编号:1673-9140(2020)05-0178-07

Research on the dynamic testing of distribution terminal and evaluation of impact factors

YAN Jiong¹, XU Jingyou¹, HU Zhihao², LING Xiangning², LI Zhengtian², LIANG Jihan²

(1. Economic and Technology Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the development of the Faulted Feeder Selection Device (FFSD) with the grounding current technology, lots of FFSDs with different principles have been used in the distribution automation system. Most researches focus on examining the actual performance of different FFSDs and then choosing the suitable ones. However, the actual operation performance of these FFSD is not satisfied in practice. On one hand, the test of on line performance is examined offline, so it is hard to find the overall stochastic fault scenarios of power distribution network. On the other hand a valid assessment methodology is absent without entire testing information, the potential drawbacks of distribution network terminal can not be predicted and removed. In order to solve these two problems, this paper firstly establishes a real distribution network model based on the PTDS, which provides various fault scenarios for the faulty

收稿日期:2018-12-12; 修回日期:2019-01-07

基金项目:国网湖北省电力公司科技项目(521538160010)

通信作者:徐敬友(1974-),男,工程师,主要从事电力系统运行分析和电网规划研究;E-mail:ccepri@163.com

line detection. In addition, by using the results of RTDS test from different faulty line detections, an integrated assessment method for the defect of FFSD based on Logistic regression model is put forward. Finally, the blind area of FFSD with different principles is introduced and assessed with the proposed method, which provides a significant reference values for the selection of accessing network equipment.

Key words: distribution terminal; logistic regression analysis; RTDS; small current neutral grounding system; test verification

随着智能配电系统的建设与改造,配电终端设备目前广泛应用于中国 6-66 kV 配网中,起着提高供电可靠性和供电质量、缩短事故处理时间、减少停电范围、提高配电系统运行的经济性、降低运行维护费用的重要作用^[1]。然而,配电终端的工程验收和后期运行维护所面临的压力也日益增大,为了及早发现配电终端存在的问题和缺陷,并有针对性地进行完善和改进,急需对配电终端的性能进行测试和验证,并且根据不同产品的性能、不同的应用场景进行设备优选,以提高终端设备的动作正确率和电网的运行可靠性。

目前基于不同原理的选线装置(以小电流接地选线装置为例)已被广泛地纳入各地配电自动化系统^[1],然而,根据各地配电网实际运行记录,现有的小电流接地选线装置的平均正确动作率并不令人满意,大量标称选线准确率极高的设备在实际应用时并不能达到相应的期望。主要原因可归纳以下。

首先,电网不允许反复模拟短路试验,动模试验则存在着操作复杂、故障场景单一、成本高昂的不足^[2-3]。考虑到测试的可实施性及经济性,针对配网终端的传统入网测试基本是依赖继电保护测试仪或简单的测试模拟屏^[4],无法精确模拟真实电网故障场景下的电流及电压暂态特性,很难发现被非线性等因素掩盖的问题,所得出结论的可信度较差。

针对小电流接地选线装置的算法及其改进原理,已有诸如利用功率方向的判别方法、基于谐波谱分析的判别方法、主动式信号注入原理、Half-wave 分析法以及若干基于小波理论的在线选线方法等,并逐步推广于工程应用。然而,受制于原理的单一性,上述方法单独或组合使用时依然存在一定的不足。文献^[5]分析了谐波判别法虽然原理简单、定位精确,但是检测时由于所使用的信号微弱,容易受到

其他干扰信号的影响;文献^[6]分析了信号注入法,虽然不容易受到谐波干扰,但是注入的信号由于能量有限,易受到线路上分布电容的影响,同时在遇到高阻接地时也无法顺利选出故障线路;文献^[7]分析功率方向法虽易受到线路上分布电容的影响,但并不适用于经消弧线圈接地的系统,且需要在各测量端安装定位系统,成本较高,因而采用单一选线原理的装置并不具有良好的选线性能。为了弥补选线装置在不同故障场景下适应能力的缺陷,新式的选线装置采用多种判据的复合选线原理。这样,虽然在一定程度上提高了选线性能,但也更加难以通过理论分析手段评估设备性能。事实上,配电网故障的随机性非常大,传统的测试方法由于样本不足,无法全面分析评估设备的性能。

为克服上述缺陷,该文利用数字仿真平台(real-time digital simulator, RTDS)搭建真实配电网模型,产生足够丰富的配电网各种工况下的运行场景,为包括选线装置在内的配电终端测试与数据分析提供良好的硬件基础;进一步将 RTDS 测试结果记为因变量,将不同故障工况记为自变量,构建 Logistic 回归分析模型,针对不同原理的配电终端分别分析影响其动作正确率的主要因素、次要因素和可忽略因素。该文以小电流接地选线装置为例,利用上述实时数字测试平台测试其在不同故障场景下的选线盲区,同时基于 Logistic 回归模型分析该设备动作性能的敏感因素,为用户提供透明的设备选型依据,有利于选线装置的完善。

1 闭环测试平台构建

基于 RTDS 的小电流接地系统仿真测试平台由 RTDS、多路电流/电压功率放大器以及选线装置组成,系统构成如图 1。

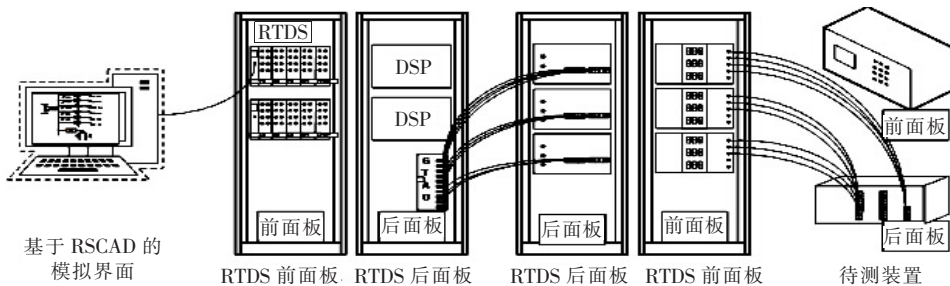


图 1 硬件平台连接

Figure 1 Hardware platform connection diagram

在上位机中搭建拥有多条馈线的辐射状配网模型,同时设置丰富的故障场景。RTDS 中包含多个 RACK 模块,每一个 RACK 模块都由大量的 DSP 板卡集成。编程人员可通过 RSCAD 平台对系统一次架构进行搭建、模拟及输出,并将模拟量通过 GTA0 输出板卡与待测设备所需要的母线三相电压,馈线的零序电流和母线零序电压输出给功率放大器。输出的母线三相电压以及母线零序电压连接至电压放大器,输出的馈线零序电流连接至电流放大器。放大器将 RTDS 输入的毫伏级模拟故障信号放大至实际故障水平,并将该信号输送给被测装置,至此完成测试平台的搭建。

为获取精确的闭环测试结果需要建立能够准确模拟真实故障环境的数字模型。在 RTDS 上位机 RSCAD 中搭建小电流接地系统的模型,该模型结构如图 2 所示。

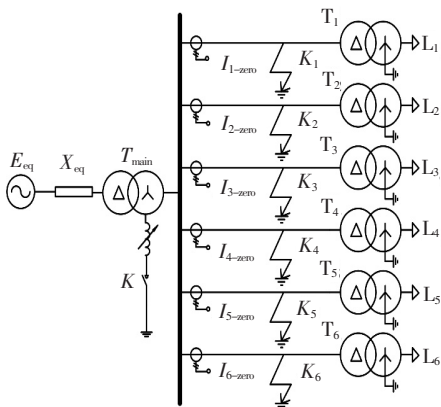


图 2 配电网建模

Figure 2 Distribution network modeling

配电网结构采用的是常见的单电源辐射拓扑结构。具体模型参数如下:

① 电源:系统中高压侧连接到 110 kV 的网络

中。在该模型中使用线电压为 110 kV 的电压源模拟;

② X_{eq} :配电网按弱电网计算^[8],短路容量为 3 000 MV · A;

③ 主变压器:理想变压器,采用三相双绕组结构。变比为 110/10.5 kV,在低压侧中性点接入消弧线圈;

④ 馈线:架设 6 条架空线路,长度分别为 14、12、12、20、10 和 5 km;

⑤ 配电变压器:设置为理想变压器,变比为 10.5/0.4 kV;

⑥ 负荷:考虑到电网中的非线性负载,在每条线路的负荷测加入含有谐波的电压源。

一般情况下,小电流接地系统单相故障的特征不明显,但是考虑到故障的随机性,一般存在如下几个显著影响故障分量特征的主要因素,包括故障类型、消谐度、过渡电阻及谐波比例等。在该文构建的测试平台中,为全面考核各种因素对配电终端的性能影响,计及上述因素的详细参数设置为^[9]

① 故障时刻:选取故障相的相位分别为 0°, 30°, 60° 和 90° 时触发单相接地故障;

② 故障性质:包括瞬时性故障、永久性故障和间歇性弧光接地算 3 种故障性质;

③ 故障电阻:包括金属性接地故障(0 欧姆)、低阻接地故障和高阻接地故障等 3 种故障电阻;

④ 谐波含量:谐波源的幅值设为国家标准的 100%、50% 和 0%;

⑤ 中性点接地方式:设置中性点不接地和中性点经消弧线圈接地,后者补偿度分别为 5%、8% 和 10%。

将上述单个故障场景因素随机组合,即可充分利用 RTDS 的强大仿真能力,形成丰富的故障场景,并用 RTDS 输出所有的故障场景组合,触发故障并记录装置动作结果。

2 Logistic 回归分析模型的建立

经典强中心算法中,雷云的运动可视为线性运动^[7,10],故在传统预测中多采用线性外推法来对雷云的位置进行跟踪预测。而在实际过程中,雷云的运动往往受多方面因素影响,如云层自身大小与厚度,风力风向与地形等,而此类因素又随时间与空间的不同差异明显,故雷云的运动呈现更复杂的非线性,简化为线性运动并不能足够精确描绘其运动规律,导致预测结果有较大误差。

近年来,随着智能算法的普及,针对非线性映射的问题有了更好更简洁的解决方式。其中,最小二乘支持向量机算法^[11-12](least squares support vector machine, LS-SVM)作为一种新颖的智能算法,将传统 SVM 中求解非二次问题转换为求解线性问题。针对不知雷云运动输入与输出数据明确函数关系的情况下,利用训练学习逼近预测的输出结果。

2.1 模型建立

该文将影响配电终端动作性能的影响因素分为连续量和分类变量^[10],而该研究的实质是解决离散型随机变量的回归问题,因此传统基于线性回归法的原理不再适用,需采用 Logistic 回归法^[11]。通过对大量数据中各故障条件(自变量)的回归系数进行分析,即可以该自变量为依据,计算选线装置判断失败或错误与该自变量的关联性,从而揭示各自变量在评估装置性能中的作用和强度。被测装置是由一系列的自变量构成的非线性函数,每个自变量代表着能够影响装置选线结果的影响因子,具体表达式为

$$p = \frac{\exp(\alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n)}{1 + \exp(\alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n)} \quad (1)$$

式中 因变量 p 为装置正确选线的概率; x_1, x_2, \dots, x_n 是自变量; $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 是 logistic 回归待定

系数。对式(1)进行 Logit 变换,假设 x 为反应变量, p 为模型对应的概率,得到多元 logistic 回归模型为

$$\ln(p_i/1 - p_i) = \alpha + \sum_{k=1}^k \beta_k x_{ki} \quad (2)$$

式中 $p_i = P(y_i/x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki})$ 是在自变量 $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}$ 取给定值时正确选线的概率,其中 α 为截距, β 为斜率。上述研究中,首先应利用显著性水平排除该文分析关联性的若干因素,然后利用逐步回归的形式确定主要自变量,最后以这些自变量对应的回归系数为指标,考核选线装置失效场景与各自变量的关联度,包括正相关与负相关。

2.2 变量设置

可将闭环测试结果进行二分类,即因变量 Y 中包含正确选出故障线 1 与未正确选线 0 这 2 种可能出现的结果。各种因变量名词及赋值见表 1,其中, X_1 表示发生时刻, X_2 表示故障稳定程度, X_3 表示故障电阻, X_4 表示谐波源, X_5 表示中性点接地方式。

表 1 因素赋值

Table 1 Factor assignment table

变量	赋值
X_1	$0^\circ \rightarrow 1, 30^\circ \rightarrow 2, 60^\circ \rightarrow 3, 90^\circ \rightarrow 4$
X_2	瞬时性接地 $\rightarrow 1$, 永久性接地 $\rightarrow 2$, 弧光接地 $\rightarrow 3$
X_3	金属性接地故障 $\rightarrow 1$, 电阻接地故障 $\rightarrow 2$, 高阻接地故障 $\rightarrow 3$
X_4	谐波幅值 $0\% \rightarrow 1$, 谐波幅值 $50\% \rightarrow 2$, 谐波幅值 $100\% \rightarrow 3$
X_5	中性点不接地 $\rightarrow 1$, 消谐度 $5\% \rightarrow 2$, 消谐度 $8\% \rightarrow 3$, 消谐度 $10\% \rightarrow 4$

3 测试结果分析验证

目前,通过市场销售的选线装置种类繁多,其使用原理也互有差异。该文选取江西九江市级配网作为算例场景,采用 3 种最普遍的选线装置,将其编号为 A、B、C,并输入闭环测试验证系统;随后,在 logistic 回归模型中录入所有闭环测试结果和对应测试环境参数的因素值;最后,随机抽取 200 组测试结果进行分析,可得出导致设备不能准确选线的主要因素、次要因素以及可忽视因素。

1) A 类装置性能分析。

利用 Logistic 回归分析模型所导出的 A 装置输出结果如表 2 所示。

表 2 A 类设备分析结果

Table 2 Class A equipment analysis result

变量	系数 β	标准误差	Wald 统计量	自由度	显著度
常数	5.493	1.098	25.011	1	0.000
X_1	-0.084	0.369	0.52	1	0.820
X_2	-0.772	0.602	1.648	1	0.199
X_3	0.075	0.541	0.019	1	0.890
X_4	-3.850	0.788	23.895	1	0.000
X_5	0.292	0.379	0.592	1	0.442

对所得到的显著性结果进行分析,可提取若干平均水平明显大于 0.05 的显著度,分别为 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_5 ,说明该台设备的动作性能与这些变量关联程度相对较小,应该被剔除,因为上述变量在所建立的回归模型中属于无效变量。经上述方法处理后,最终的回归模型为

$$p = \frac{\exp(5.493 - 3.850x_6)}{1 + \exp(5.493 - 3.850x_6)} \quad (3)$$

式(3)表明,造成装置选线不准的主要原因是系统中含有的谐波源干扰,代表谐波源的自变量系数为负数,表明随着谐波幅值的增大,选线装置正确选线的概率越低。

根据设备 A 的产品说明书,暂态无功功率方向法是其采用的单一判据,通过检测点的暂态无功功率来判断故障区段。当检测点位于故障线路故障点到母线区段,暂态无功功率值为负;同理,检测点位于故障线路故障点至负荷区段,暂态无功功率为正。前置滤波器的性能将极大的制约选线正确率的提高,因为该方法的实现很大程度上取决暂态特征分量的有效提取^[12]。当系统中出现谐波干扰时,基于上述方法的设备 A 无法有效甄别故障分量与无效谐波分量,容易产生误判。随着谐波幅值的增大,滤波器截取频带范围内无效谐波分量所占比例越来越高,从而导致故障分量的暂态极性特征被掩盖,致使选线装置正确率下降。

2) B 类装置性能分析。

利用 Logistic 回归分析模型所导出的 B 装置输出结果如表 3 所示。

表 3 B 类设备分析结果

Table 3 Class B equipment analysis result

变量	系数 β	标准误差	Wald 统计量	自由度	显著度
常数	4.708	0.964	23.838	1	0.000
X_1	-0.065	0.292	0.050	1	0.824
X_2	-0.351	0.473	0.551	1	0.458
X_3	-1.071	0.330	10.513	1	0.001
X_4	-2.712	0.599	20.500	1	0.000
X_5	0.384	0.465	0.684	1	0.408

对所得到的显著性结果进行分析,可提取若干平均水平明显大于 0.05 的显著度,分别为中性点接地方式、故障发生时刻、故障持续时间和故障稳定程度,说明该台设备的动作性能与这些变量关联程度相对较小,应该被剔除,因为上述变量在所建立的回归模型中属于无效变量。经上述方法处理后,最终的回归模型为

$$p = \frac{\exp(4.336 - 1.071x_4 - 2.712x_5)}{1 + \exp(4.336 - 1.071x_4 - 2.712x_5)} \quad (4)$$

通过式(4)可知,配网馈线包含的谐波源是导致 B 装置不能准确选择故障线路的首要因素,而高阻接地的现象同样会导致装置无法准确选线。通过式(4)还可以看出与接地电阻相关的自变量系数小于 0,这表示设备的准确选线概率随着接地电阻的增大而减小。

通过查询 B 装置的设备技术规范可知,B 装置的判据主要是主动式信号注入法以及各次谐波综合法的复合判据。主动式信号注入法是通过电压互感器(voltage transformer, VT)向配电网输入某种频率的信号而无需故障自身的微小信号,追踪输入信号来正确完成接地故障选线问题。但该类方法存在信号注入综合阻抗与接地电阻同步增大的问题,导致注入信号不够明显,造成装置选线存在一定干扰,可能产生误选或拒选。而由于谐波污染会对各次谐波综合法的使用造成影响,如果间谐波中存在谐波能量的泄漏量,可能导致该装置无法正确选线。所以,接地大电阻和系统谐波污染是利用该复合判据装置的选线盲区。

3) C 类装置性能分析。

利用 Logistic 回归分析模型所导出的 C 装置输出结果如表 4 所示。

表 4 C 类设备分析结果

Table 4 Class C equipment analysis result

变量	系数 β	标准误差	Wald 统计量	自由度	显著度
常数	5.773	1.184	23.790	1	0.000
X_1	-0.202	0.334	0.364	1	0.546
X_2	-2.744	0.665	17.024	1	0.000
X_3	-0.272	0.349	0.609	1	0.435
X_4	-0.286	0.539	0.281	1	0.596
X_5	-2.922	0.621	22.154	1	0.000

对所得到的显著性结果进行分析,可提取若干平均水平明显大于 0.05 的显著度,分别为故障电阻、谐波源、故障发生时刻和故障持续时间,说明该台设备的动作性能与这些变量关联度相对较小,应该被剔除,因为上述变量在所建立的回归模型中属于无效变量。经上述方法处理后,最终的回归模型为

$$p = \frac{\exp(5.773 - 2.744x_3 - 2.922x_6)}{1 + \exp(5.773 - 2.744x_3 - 2.922x_6)} \quad (5)$$

式(5)表明设备 C 在中性点经消弧线圈接地的配电网中选线准确率降低,同时故障性质为电弧故障时也是导致装置不能正确选出故障线路的重要原因。

通过查阅该类型设备的技术规范,可知其判据主要为零序电流幅值判据,即将母线联结的各条出线上的零序电流进行综合对比,进而判断是母线故障还是线路故障。由于消弧线圈在中性点不接地系统中的应用会破坏零序电流的分布,这样就会使得应用此种方法的设备不再可靠。

另外,通过分析可知,电弧故障也是影响正确选线的重要因素,因为电弧故障的不稳定性会使得依赖于稳态零序电流的零序电流幅值法受到较大影响,所以,一旦消弧线圈投入,不论消弧度如何,该装置的适用性必将大大降低。

4 结语

该文依靠 RTDS 构建了一种基于精确配电网

模型所构成的仿真测试平台,最大程度还原了故障场景,为获得准确的配电终端动作结果数据奠定了硬件基础;进一步在大量测试结果数据分析方面,通过 Logistic 线性回归分析方法,以小电流接地选线装置为例,查明了装置选线不准的主要因素、次要因素和可忽略因素。利用该方法能较好地评估包括小电流接地选线装置在内的配网终端的适应性与准确度。

通常情况下,现有的测试方法主要基于继电保护测试仪等对装置的静态性能、动作性能等进行验证。与之相比,基于 RTDS 平台能够涵盖丰富的故障场景、海量的故障数据,因此基于该文所搭建的 RTDS 平台,能够实现严格准确的配电终端性能测试及缺陷挖掘,并有针对性地分析其造成装置动作结果不正确的具体原因,可为设备制造厂家提供改进意见,同时为电网用户设备选型提供相关技术依据。

参考文献:

- [1] 曾祥君,刘玉玲,喻焜.改进的配电网对地参数谐振测量方法[J].电力科学与技术学报,2020,35(3):3-11.
ZENG Xiangjun, LIU Yuling, YU Kun. An improved resonance measurement method of grounded parameters for distribution networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020,35(3):3-11.
- [2] 杨国生,桂强,张烈,等.双通道线路纵联保护应用情况分析及其评价指标[J].中国电力,2018,51(6):77-82.
YANG Guosheng, GUI Qiang, ZHANG Lie, et al. Application analysis and evaluation index research of dual channel line protection[J]. Electric Power, 2018, 51(6):77-82.
- [3] 滕昊.带阻尼电阻的谐振接地系统电容电流精确测量方法[J].电力科学与技术学报,2017,32(1):97-102.
TENG Hao. Accurate measurement method of capacitive current in resonant grounding system with damping resistance[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017,32(1):97-102.
- [4] 潘永刚.小电流接地选线模拟实验系统的研制[D].北京:华北电力大学,2003.

- [5] 薛永端,高旭,苏永智,等.小电流接地故障谐波分析及其对谐波选线的影响[J].电力系统自动化,2011,35(6):60-64.
XUE Yongrui,GAO Xu,SU Yongzhi,et al. Analysis of harmonic in non-solidly earthed network and its influences on harmonic-based earth fault protection [J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(6):60-64.
- [6] 潘贞存,张慧芬,张帆,等.信号注入式接地选线定位保护的分析和改进[J].电力系统自动化,2007,31(4):71-75.
PAN Zhencun, ZHANG Huifen, ZHANG Fan, et al. Analysis and modification of signal injection based fault line selection protection [J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(4):71-75.
- [7] 林幼川.基于零序暂态功率方向的消弧线圈接地系统故障选线装置的研究[D].重庆:重庆大学,2004.
- [8] 于力,许爱东,郭晓斌,等.基于RTDS的有源配电网暂态实时仿真与分析[J].电力系统及其自动化学报,2015,27(4):18-25.
YU Li, XU Aidong, GUO Xiaodong, et al. Real-time transient simulation and analysis of active distribution network based on RTDS[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2015,27(4):18-25.
- [9] 张新慧,潘贞存,徐丙垠,等.基于暂态零序电流的小电流接地故障选线仿真[J].电力系统保护与控制,2008,36(3):5-9.
ZHANG Xinhui, PAN Zhencun, XU Bingyin, et al. Faulty feeder selection simulation based on transient zero-sequence current[J]. Power System Protection and Control,2008,36(3):5-9.
- [10] 刘晨,张鹏,宋盼,等.2型糖尿病病因的非条件 Logistic 回归分析[J].湖北医药学院学报,2013,32(6):495-498.
LIU Chen, ZHANG Peng, SONG Pan, et al. Unconditional logistic regression analysis of the causes of type 2 diabetes[J]. Journal of Hubei University of Medicine,2013,32(6):495-498.
- [11] 王佳霖,于群,曹娜,等.考虑节点静态电压稳定性的电网元胞自动机故障演化模型[J].智慧电力,2020,48(5):60-66+91.
WANG Jialin, YU Qun, CAO Na, et al. Cellular automata evolution model of power failure considering grid node static voltage stability [J]. Smart Power,2020,48(5):60-66+91.
- [12] 韩宏志,唐振浩.基于CEEMDAN与回声状态网络的风速预测方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(12):90-96.
HAN Hongzhi, TANG Zhenhao. Wind speed prediction method based on CEEMDAN and echo state network [J]. Power System Protection and Control,2020,48(12):90-96.