

用户友好配电系统规划方法的研究

刘旭娜¹, 汪颖^{1,2}, 黄静¹

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要:在现代智能电网框架下,对用户友好配电网概念及其规划方法展开研究。针对配电系统拓扑结构改变时系统中扰动不确定性的问题,重点研究了不同规划方案下不同用户因设备故障引起的间接损失的评估方法,并将该损失计入用户损失中,以此为基础进行系统规划。实际中用户可能经受的间接损失与系统扰动和用户设备电压耐受能力的兼容性有关,分别用最大熵方法和模糊法评估系统扰动和用户设备对扰动耐受能力的不确定性。对RBT Bus2配电系统的仿真结果证明,考虑用户间接损失后规划的配电系统能保证综合成本最低。

关键词:智能电网;用户友好配电系统;间接损失;不确定性

Abstract: Under the framework of the modern smart grid, the concept and the planning method of customer friendly distribution systems are proposed. Due to the uncertain disturbance in the systems during the change of network topology of distribution system, the assessment of potential losses caused by customers' equipment failures under possible disturbance of different planning schemes is proposed. The planning method based on customer loss including indirect loss is correlated with the compatibility between system disturbance and voltage tolerant level of customer equipment. Based on maximum entropy principle and fuzzy method, the uncertainty between system disturbance and customer equipment is evaluated. The simulation results of RBT Bus2 distribution system show that the distribution system planned after considering the customer indirect loss can guarantee the lowest comprehensive cost.

Key words: smart grid; customer friendly distribution systems; indirect loss; uncertainty

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)04-0030-06

0 引言

智能电网已成为许多国家的能源安全和发展战略^[1-3]。作为一个愿景或一种技术路线,智能电网的实施须从规划设计、运行控制、管理决策等方面入手。由于配电系统直接面向用户,对用户与社会的满意程度有直接影响,是实现智能电网的关键之一^[3]。智能电网具有自愈性、抵御攻击、优质供电、用户参与和选择、市场化、资产优化与高效性等特征^[4],在其发展过程中,电网企业的经营理念已从生产导向型向用户与环境友好型转变,更关注用户、社会响应和对环境、经济的影响^[5]。供配电企业的经营理念通常为用户让渡价值最大化,具体表现为用户满意度最大化^[6],因此,在规划配网时,将其作为指标之一,既符合用户和电网经营理念要求,也是实现智能电网手段。但是,用户满意度受复杂不确定因素影响,通常仅能定性描述,规划时需将定性指标转换为直接和间接损失等定量指标,这是用户友好配电系

统规划的关键。

智能配电网要求供电安全、可靠、经济,同时对用户和环境更友好^[4],将这样的配电网定义为用户友好配电系统,并将配电系统的友好性指标转换为直接损失和间接损失,构成用户满意度指标,以评价配电系统对用户的友好性。在评价直接损失时与传统规划方法一样考虑停电引起的损失,考虑间接损失时主要考虑对用户影响最严重的电压暂降,这样虽有一定片面性,但足以验证方法的可行性和正确性。

根据IEEE Standard 1346-1998^[7]及文献[8]等给出的设备电压耐受能力,同时考虑涉及的不确定性,定量评估用户间接损失^[9-10]。在进行规划^[11]时,对各种可行方案和不确定性因素引起的间接经济损失、用户满意度等进行研究,重点考虑了用户侧使用最多的敏感设备^[12-13],如计算机(personal computers, PC)、调速驱动装置(adjustable speed drives, ASD)、可程序逻辑控制器(programmable logic controllers, PLC)和交流接触器(AC-contactor, ACC)等。这样同时考虑停电引起的直接损失和电压暂降等引起的间接

损失,能更合理地反映配电系统对用户的友好性。

传统配电系统规划考虑了可靠性指标,主要反映了直接损失。进一步考虑用户抱怨最多的系统中电压暂降的不确定性引起的间接损失,提出一种新的用户友好配电系统规划方法。根据文献[11]提出的配电系统电压暂降评估法,文献[14]提出的配电网重构法,以及文献[12]引入电压暂降后的可靠性分析方法,在研究间接损失的不确定性的基础上,提出确定间接损失的方法。对各种可行性的规划方案下电压暂降和用户设备电压耐受能力进行研究,定量计算间接损失,提出用户友好配电系统的规划模型和方法,以RBT Bus2配电系统为例,对提出的方法进行验证,证明方法的有效性和可能性。

1 用户友好配电系统与规划指标

1.1 用户友好配电系统

传统配电系统规划目标^[15]主要有供电能力、线损、稳态供电质量等,这些指标大多立足于供电方,反映了供电企业生产导向型经营理念。智能电网的基本特征之一是用户参与,必然要求在规划和建设的过程中考虑用户和社会利益,建立用户友好配电系统。为了区别于传统配电系统,将用户友好配电系统定义为:用户友好配电系统是智能电网愿景在配电系统中的具体化和现实表现,是在建设成本、运营成本和用户损失最低的前提下,满足用户对供电容量、电量、可靠性、用电效率等的要求,考虑资源能源和环保要求,以用户满意度为目标的配电系统^[16]。

根据以上定义,配电系统和用户的满意度是用户友好配电系统的主要特征,用户满意度是关键。现有配电系统规划考虑了供电充足性,但对用户利益,如用户间接损失等考虑不够。用户消耗电力更关注是否能达到期望的效用,即达到其希望的满意度。用户的满意度受自身和电网的多重不确定性因素影响^[10],包括接线方式、回路数、线路型号、故障位置、故障类型、用电特性以及用户设备的电压耐受能力等。用户设备的电压耐受能力则根据IEEE标准^[7]设定。在配电网规划时,只有充分考虑用户设备的耐受能力与系统内可能发生的供电质量扰动之间的兼容性,才能实现用户友好配电系统。

1.2 用户友好配电系统规划指标

传统规划将建设成本、运营成本、用户停电损失

作为规划目标,满足系统的等式和不等式约束,满足系统和用户的可靠性指标要求。用户友好配电系统除满足以上要求外,用户满意度是重要指标之一。因此,在进行规划时,需全面考虑系统侧和用户侧成本,评估用户停电引起的直接损失和供电质量波动引起的间接损失。在诸多间接损失中,电压暂降引起的损失最严重,根据2000年的统计,美国每年因电压暂降引起的损失达260亿美元。电压暂降引起的间接损失具有影响因素多、随时间和空间变化的特点,需考虑可能的规划方案中,电压暂降的不确定性和用户设备响应的不确定性,以此定量确定用户满意度,并将其纳入规划指标。用户友好配电系统的规划指标体系如图1。图中间接损失的确定是关键,其他指标的确定与传统方法类似。

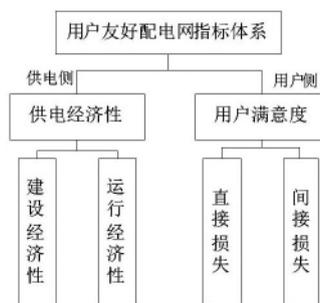


图1 用户友好配电系统规划指标体系

2 间接损失指标的确定

2.1 配电系统电压暂降的确定

配电系统电压暂降的严重程度与系统拓扑、运行方式、故障位置、故障类型、保护类型、保护定值及装置特性等有关^[10]。现有故障定位法^[17]、临界距离法^[18]等可用于确定给定用户设备和给定配网条件下的配电系统暂降域或不可接受的故障范围,但是,由于不同用户设备的电压耐受能力不同,即使在相同情况下导致间接损失也不同,因此在配电网规划时,需根据可行配电网规划方案 and 用户设备特性进行评估。

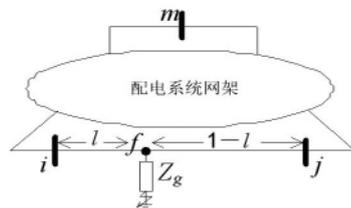


图2 配电系统结构

对任意系统,如图2,当任意线路*i-j*上任意位置*f*点发生三相短路时,任意用户设备接入点*m*处的

电压暂降幅值为

$$U_{r,m} = U_m^{pref} - [(1-l) \cdot Z_{mj} + l \cdot Z_{mj}] \cdot U_f^{pref} / [(1-l)^2 \cdot Z_{ii} + l^2 \cdot Z_{jj} + 2l(1-l) \cdot Z_{ij} + l \cdot (1-l) \cdot Z_{ij} + Z_g] \quad (1)$$

式中, $U_{r,m}$ 为节点 m 的剩余电压(电压暂降幅值); U_m^{pref} 、 U_f^{pref} 为故障前 m 、 f 点的电压; l 为故障线路 $i-j$ 的归一化长度; Z_{ii} 、 Z_{jj} 为节点 i 、 j 的自阻抗; Z_{mi} 、 Z_{mj} 、 Z_{ij} 分别为节点 m 、 i 、 j 的互阻抗; z_{ij} 为线路 $i-j$ 的阻抗; Z_g 为故障阻抗。当线路 $i-j$ 发生非对称故障时, 可用对称分量法分析^[19] 不再赘述。

输电系统的故障也可能引起用户设备损失, 但配电系统故障引起的暂降对用户设备的影响更频繁也更严重, 同时, 配电系统内大型感应电机的起停等也可能引起电压暂降, 但严重程度不如系统故障, 可在制定供电方案时考虑。配电系统的故障具有较强的随机性, 根据线路 $i-j$ 上不同故障点引起的用户设备接入点 m 处的电压暂降幅值分布, 用最大熵方法^[20] 确定故障引起的 m 点电压暂降严重性, 其概率密度函数如式(2)。

$$f(s) = \exp(\lambda_0 + \lambda_1 s + \sum_{n=2}^N \lambda_n (s - E_1)^n) \quad (2)$$

式中, λ_i 为第 i 阶矩约束条件对应的拉格朗日算子; $i = 2, 3, \dots, N$ 。根据文献[20]取 $N=5$ 。

式(2)中, 变量取值由电压暂降幅值分布决定, 结合式(1), 计算时采用的 Z_{ii} 、 Z_{jj} 、 Z_{mi} 、 Z_{mj} 、 Z_{ij} 均为系统阻抗矩阵对应参数, 与拓扑有关, 可根据规划方案确定。

2.2 电压暂降引起的用户设备故障次数

用户设备电压耐受能力的不确定性受设备类型、安装位置、使用寿命、运行条件、负载水平等影响, 可用图3所示不确定区域描述。对于不同设备, 仅用给定特征的电压暂降(如幅值为50%的电压暂降^[21])来估计用户损失具有片面性, 因此, 需对电压暂降引起的损失的不确定性进行全面评估。

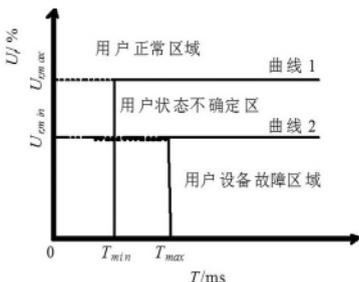


图3 用户故障不确定性区域

发生电压暂降时, 用户设备可能处于正常、故障、

正常与故障之间的过渡状态等多种状态。电压暂降发生在故障区域内时引起的损失与停电引起的直接损失的评估方法相同, 当暂降发生在图3的不确定区域时, 需同时考虑系统电压暂降的随机性和设备运行状态的模糊性。系统电压暂降严重性的概率密度函数 $f(s)$ 如式(2), 用户设备运行状态的模糊性可用隶属函数 μ_A 刻画^[10], 此时用户设备的故障概率为

$$P(A) = P(s > x) = \int_0^{+\infty} \mu_A(s) f(s) ds \quad (3)$$

式中, s 为电压暂降严重性指标, 根据文献[13], 可描述电压暂降幅值、持续时间和综合指标, 这里为说明方法仅考虑暂降幅值。

用户设备故障概率 $P(A)$ 反映了线路 $i-j$ 任意点故障可能导致的 m 点用户设备的故障概率。在 m 点接入的 k 类用户设备因电压暂降引起的年故障次数为

$$PFN_{mk(x_{mk1}-x_{mk2})} = P(A) \cdot L_{ij} \cdot \lambda_{ij} \quad (4)$$

式中, k 为用户设备类型; x_{mk1} 、 x_{mk2} 表示 m 点处 k 类用户设备电压幅值耐受能力最小、最大值; L_{ij} 和 λ_{ij} 为线路 $i-j$ 长度和故障率。

2.3 电压暂降引起的用户间接损失评估

现有配网规划很少考虑电压暂降损失, 在电力技术经济评价中^[22], 有时间接损失更严重^[21]。这是因为其包括了设备维修、员工补贴、购置辅助设备(如不间断电源)或修改生产工序等一系列的消费。

实际中, 用户可分为居民、商业、政府机关、工业等类。根据北欧调查数据显示^[21], 工业用户对供电恢复时间更敏感, 其他用户的敏感特性基本相同, 这与工业生产大量流水线作业相符。因此, 工业用户以瞬时中断(200 ms), 而其他用户则以短时中断作为单次电压暂降引起的间接损失。

表1为某供电公司调查统计得出的用户中断成本^[23], 表示用户因电压暂降发生故障后为恢复1 kW正常用电年峰值而导致的间接经济损失。

表1 用户单次故障损失

用户类型	居民	商业	政府	小型工业	大型工业
损失/(\$ /kW)	0.98	1.88	2.50	0.271	0.312

节点 m 处 k 类用户的年间接损失为

$$C_{p,m} = PFN_{mk} \cdot C_k \quad (5)$$

对于配电系统的可行规划方案, 全系统内用户因电压暂降引起的损失为

$$C_{potential} = \sum_{m \in M} C_{p,m} \quad (6)$$

式中, m 、 M 为可行方案内节点号和负荷接入点集合;

C_k 为第 k 类用户单次故障损失。

3 电压暂降引起的间接损失评估过程

基于以上分析,评估给定配电系统规划方案间接损失的一般过程如下。

① 根据给定规划方案下的网络拓扑结构、各支路参数,以及各类用户设备电压耐受能力,用式(2)和式(3)计算各类设备的故障概率。

② 根据历史统计和经验所得系统元件可靠性参数,用式(4)计算各用户设备接入点各类用户的年故障次数。

③ 由各类用户设备单次故障损失并计及年故障次数,计算不同系统规划方案下用户电压暂降损失,确定配电系统规划的目标函数,由此判定最优配电系统方案,得到期望的用户友好配电系统。

4 用户友好配电系统规划

4.1 规划模型

为说明原理,以系统扩建线路为规划变量,用电压暂降引起的用户损失和系统电量不足损失作为年用户损失,以年用户损失、建设投资年费用、年运行费作为系统规划综合费用,以综合费用最小为规划目标,规划模型如下。

$$\min Z = f_1 + f_2 + f_3 \quad (7)$$

$$s. t. \quad U_h \in u_h \quad (8)$$

$$F(x_h) \leq 0 \quad (9)$$

$$G(x_h, y_h) \leq 0 \quad (10)$$

式中 f_1 、 f_2 、 f_3 为建设投资等年值费用、年运行费用(包括年网损费和年折旧维护费)、用户综合损失费用(包括缺电损失和潜在损失); u_h 为第 h 年建设计划(U_h 为系统建设可行方案集); x_h 为系统结构优化变量; y_h 为系统运行优化变量。

式(8)、(9)为系统结构优化约束,如线路回路数、线路路径、线型等;式(10)为系统运行优化约束,包括线路潮流、发电厂出力和机组出力、负荷水平以及系统稳定性等约束。

目标函数中各分量的表达式如下。

$$f_1 = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \sum_{l \in L} c_l l_l \quad (11)$$

式中 i 为投资折现率; n 为施工年限; c_l 为线路 l 单位

长度造价; l_l 为支路 l 新增回路数; L 为系统支路集合。

$$f_2 = T \sum_{l \in L} C_{loss} r_l P_l^2 + C_d \quad (12)$$

式中 T 为年损耗小时数; C_{loss} 为单位功率损耗年运行费用; r_l 、 P_l 分别为支路 l 的电阻及有功潮流; C_d 为年折旧费。

$$f_3 = EENS \cdot CIC + C_{potential} \quad (13)$$

式中 $EENS$ 为年电量不足期望; CIC 为单位电量停电损失; $C_{potential}$ 为不确定性故障引起的用户年潜在损失。

4.2 规划流程

根据以上规划目标和模型,用户友好配电系统的规划流程如图4。

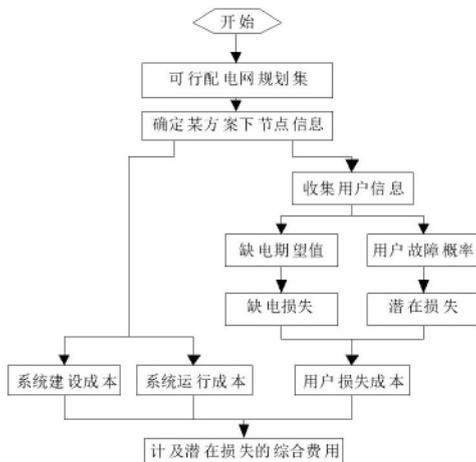


图4 配电网规划流程

5 算例分析

算例取自 IEEE-RBTS 的 BUS2 配电系统的一条主馈线^[24]。该系统为 11 kV 的配电网,网络结构如图5图中,方框为 33/11 kV 变电站,虚线为可扩展线路,LP1~LP7 为负荷节点,其他均为分支节点。

利用本方法对待规划系统进行损失评估,并与未考虑间接损失的评估结果比较,证明考虑用户满意度的重要性和必要性。

方案1和方案2分别为考虑和不考虑间接损失的规划结果(实线表示选中线路,虚线未选),相应网络结构见图6。

在不同方案下,各条支路在负荷节点处的电压暂降幅值的概率密度函数系数的变化趋势如表2和表3,表征了系统电压暂降严重程度,结合各节点不同用户设备的电压耐受能力,得用户设备故障概率。

结合用户设备信息^[24],用第3节提出的方法评估经济损失,根据 SEMIF47 标准,用 PC、ASD、PLC 分

表2 不同方案下支路6-8扰动的概率密度函数对负荷节点LP5上用户造成的故障

系数	E_1	λ_0	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	居民用户 故障概率	商业用户 故障概率	工业用户 故障概率
方案1	0.439 5	2.876 9	-5.643 0	25.275 3	84.784 6	-576.085 4	537.378 4	0.406 3	0.604 5	0.557 7
方案2	0.482 9	3.041 4	-5.234 1	33.521 7	95.143 7	-901.592 7	916.957 5	0.502 8	0.779 8	0.650 3

注:表中仅给出了系统发生三相故障的情况。

表3 方案1支路2-4和支路6-LP5扰动的概率密度函数对负荷节点LP4上用户造成的故障

系数	E_1	λ_0	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	居民用户 故障概率	商业用户 故障概率	工业用户 故障概率
支路2-4	0.326 4	1.083 0	-2.578 4	-2.406 2	29.086 0	38.237 4	-185.704 6	0.302 8	0.411 8	0.386 9
支路6-LP5	0.038 4	3.230 4	-25.158 9	-7.508 9	0.608 8	-14.221 6	11.004 6	3.3E-06	8.6E-05	0.002 2

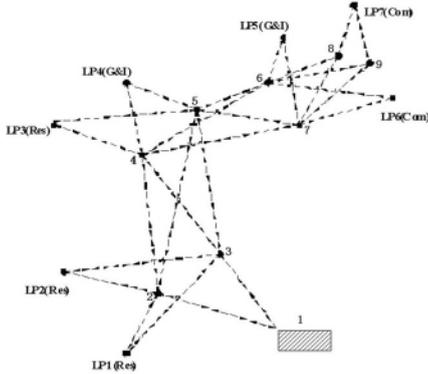


图5 RBT Bus2 配电系统馈线图

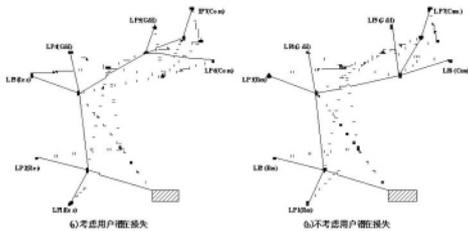


图6 优化网络结构图

别代表居民、政府和商业、工业用户的典型设备,并假设各用户与设备相互独立。由图5及用户信息可知,各负荷节点的类型各不相同,住宅用户所需容量较少,单次故障对其的影响最小,但其分布数量却最为庞大。从总体上看住宅用户的间接损失也是个不小的数目。相对而言,工业用户则更为集中,对单次故障概率也更为敏感。因此可以发现,如何合理地选择用户接入点是用户友好配电网接下来需要考虑的问题。

由表2、表3可知:

(1) 对于不同规划方案,拓扑结构影响会负荷节点的故障概率密度,导致不同的用户故障概率。以表2中结果为例,同一用户因暂降引起的故障概率相差15%以上,说明不同用户的满意度不同。

(2) 对于辐射型配电网,系统暂降严重性有单调性,如表3。负荷点处的严重暂降多起源于系统上游以及周边节点,下游节点的影响可忽略,因此,用户满

意度与用户接入点的位置有关,说明合理的拓扑结构是规划用户友好配电系统的关键指标。

(3) 对于不同类型的用户,其设备电压耐受能力不同,同一节点处不同用户对同一电压暂降的兼容性不相同,这表明,在进行配网规划时,因充分考虑可能接入的用户设备的类型和特性。

结合系统元件的可靠性参数^[24],两种不同方案下的费用计算结果如表4。

表4 RBT Bus2 配电系统馈线规划结果

规划结果	方案1	方案2	
线路投资年费用/万元	4.861 5	4.861 5	
年运行费用	年网损费用	1.594 6	1.595 7
/万元	年维护费	0.546 3	0.546 3
年用户损失	直接损失	8.768 9	8.684 8
/万元	间接损失	39.926 7	42.571 6
年综合费用合计/万元	48.696 6	51.256 4	

注:表中费用未包括变电站投资

对于方案1和方案2,两者均能满足负荷点的用电需求,只在馈线构建上略有不同,扩建线路的投资费用基本相同。但两方案的间接损失分别为39.92万元和42.5716万元,是该系统规划中不可忽略的部分。同时,计入用户间接损失后,所得到的优化方案结果是不同的。虽然方案1的网损、投资及折旧维护这三者的费用之和较方案2的费用高,但该网络减少了用户故障次数,降低了用户损失。可见,该规划结果更有针对性,间接损失大的用户将能够获得更高的电能质量,提高了全系统中用户满意度。

6 结 论

(1) 以上提出了实际中可行的、正确的用户友好配电网的仿真模型。通过间接损失指标搭建了配电网结构与用户间更为直接的联系,将智能电网的用户互动特性真正地体现到工程运用中,迈出了用户友好

智能配电网的第一步。

(2) 考虑了配电系统中各类用户经济损失的不确定性,通过选择具备用户设备耐受能力与系统扰动最佳兼容性的规划方案,能直观地反映出用户对系统的满意度。该配电网规划方法适用于任何规模的辐射网和环网。

(3) 国内外大量地投诉都与配电系统网架结构不合理而导致的用户经济损失有关。仿真结果也表明了考虑用户满意度的必要性。如何进一步找到合理的补偿装置以及用户的最佳接入点,提高系统抗灾性,是值得更深入研究的重要课题。

参考文献

[1] Steve Collier. Ten Steps to a Smarter Grid [C]. 2009 IEEE Rural Electric Power Conference(REPC 09) ,Fort Collins , Colorado ,USA 2009 : B2 - B2 -7.

[2] Noreen Parks. Energy Efficiency and the Smart Grid [J]. Environmental Science & Technology ,2009 ,43(9) : 2999 - 3000.

[3] Bob Saint. Rural Distribution System Planning using Smart Grid Technologies [C]. 2009 IEEE Rural Electric Power Conference(REPC 09) ,Fort Collins ,Colorado ,USA 2009: U57 - U64.

[4] The National Energy Technology Laboratory for the U. S. Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability. A Systems View of the Modern Grid [R]. Office of Electricity Delivery and Energy Reliability , USA 2007.

[5] Clark W. Gellings ,P. E. The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response [M]. New York: Fairmont Press 2009.

[6] 肖先勇. 电力市场营销原理 [M]. 北京: 中国电力出版社 2005: 16 - 22.

[7] The institute of electrical and Electronics Engineers , Inc. IEEE Standard 1346 - 1998 ,IEEE Recommend Practice Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment [S]. New York ,NY 10017 - 2394 ,1998.

[8] Gupta C P ,Milanovic J V. Probabilistic Methods for Counting Equipment Trips Due to Voltage Sags [C]. 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems ,Stockholm ,Sweden 2006.

[9] 肖先勇 杨洪耕 陈武 等. 敏感设备电压暂降敏感度的模糊随机评估[J]. 中国电机工程学报 2009 ,29(34) :

[10] 肖先勇 陈武 杨洪耕. 敏感设备电压暂降故障水平的多不确定性评估 [J]. 中国电机工程学报 ,2010 ,30(10) : 36 - 42

[11] 肖先勇 陈卫东 杨洪耕 等. 以用户满意度区间数为测度的电压暂降频次评估 [J]. 中国电机工程学报 2010 ,30(16) : 104 - 110.

[12] 陶顺 肖湘宁 刘晓鹃. 电压暂降对配电系统可靠性影响及其评估指标的研究 [J]. 中国电机工程学报 2005 ,25(11) : 63 - 69.

[13] Cheng - Chieh Shen ,Chan - Nan Lu. A Voltage Sag Index Considering Compatibility Between Equipment and Supply [J]. IEEE Trans on Power Delivery 2007 22(2) : 996 - 1002.

[14] 王宾 潘彦存 徐丙垠. 配电系统电压跌落问题的分析 [J]. 电网技术 2004 28(2) : 56 - 59.

[15] 范明天 张祖平 岳宗斌. 配电网规划与设计 [M]. 北京: 中国电力出版社 ,1999: 47 - 55.

[16] 肖先勇. 电能质量及其控制技术(讲义) [M]. 成都: 智能电网四川省重点实验室 2009: 10 - 11.

[17] M. T. Aung J. V. Milanovic. Stochastic Prediction of Voltage Sags by Considering the Probability of the Failure of the Protection System [J]. IEEE Trans on Power Delivery , 2006 21(1) : 322 - 329.

[18] M. H. J. Bollen ,Fast Assessment Methods for Voltage Sags in Distribution System [J]. IEEE Trans on Industry Applications ,1996 32(6) : 1480 - 1487.

[19] Juarez E E ,Hernandez A. An Analytical Approach for Stochastic Assessment of Balanced and Unbalanced Voltage Sags in Large Systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery 2006 21(3) : 1493 - 1500.

[20] 肖先勇, 马超, 李勇. 线路故障引起电压暂降的频次最大熵评估 [J]. 中国电机工程学报 ,2009 ,29(1) : 87 - 93.

[21] Heine P Pohjanheimo P Lehtonen M ,Lakervi E. A Method for Estimating the Frequency and Cost of Voltage Sags [J]. IEEE Trans on Power systems 2002 17(2) : 290 - 296.

[22] 肖先勇. 电力技术经济分析原理 [M]. 北京: 中国电力出版社 2010.

[23] Tollefson G ,Billinton R ,Wacker G et al. A Canadian Customer Survey to Assess Power System Reliability Worth [J]. IEEE Trans on Power Systems ,1994 9(1) : 443 - 450.

[24] S Jonnavithula R. Billinton. Minimum Cost Analysis of Feeder Routing in Distribution System Planning [J]. IEEE Trans on Power Delivery ,1996 11(4) : 1935 - 1940.