

## 用户友好电网规划模型与方法的研究

刘旭娜, 肖先勇, 汪颖, 李华强, 杨洪耕

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 在现代智能电网框架下, 对用户友好电网概念及其规划模型和方法展开研究。规划中除考虑建设成本、运营成本和用户停电损失外, 重点研究不同规划方案下不同用户因系统扰动引起的潜在损失评估方法, 并将该损失计入用户损失中, 以此为基础规划电网。实际中用户潜在损失与系统中扰动和设备电压耐受能力有关, 具有不确定性, 分别用最大熵和模糊法进行评估。对 Garver-6 节点系统仿真证明, 考虑用户潜在损失后的电网规划方案能保证综合成本最低。

**关键词:** 智能电网; 用户友好; 电网规划; 用户潜在损失; 不确定性

### The study of programming model and method of customer friendly power network

LIU Xu-na, XIAO Xian-yong, WANG Ying, LI Hua-qiang, YANG Hong-geng

(College of Electrical Engineering & Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Under the framework of the modern smart grid, the planning model and method of customer friendly power network is proposed. The planning involves construction costs, operating costs, and customer losses with focusing on the evaluation method for customer's potential cost under different planning schemes due to possible disturbance coming from different user systems and reckoning it in the customer losses. The practical customer's potential cost is related to the system disturbance and voltage tolerance of equipment, thus it has uncertainty. Based on maximum entropy principle and fuzzy analysis method, this paper analyses the compatibility between system disturbance and equipment. Finally, Garver-6 node system simulation results prove that the power network planning scheme which considers the customer potential loss can guarantee the best of comprehensive benefit.

**Key words:** smart grid; customer friendly; power network planning; customer potential cost; uncertainty

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0196-07

## 0 引言

随着智能电网这一构建设想的提出, 我国和欧美等国的能源安全 and 国家战略<sup>[1]</sup>纷纷将其列为发展重点。实施过程中, 需从系统规划、运行控制、管理决策等方面进行研究, 其中规划是关键<sup>[2]</sup>。智能电网的基本特性有: 自愈性、抗攻击性、优质供电、用户参与、选择性、可市场化和资产优化与高效性<sup>[3]</sup>。为此, 在系统规划中, 用户与系统之间的兼容性、友好性、用户满意度是重要内容, 规划指标除建设成本、运营成本和用户停电损失外, 可能引起的潜在损失也不可忽视。根据电力市场营销原理, 用户满意度由用户总价值与总成本确定, 是用户进行价值判断的测度, 是电力系统得以存在的根本<sup>[4]</sup>, 因此, 在电力系统规划中以用户满意度作为规划指标, 更符合用户的要求。

根据现代电网的基本特性和要求<sup>[3]</sup>, 电力系统

应是在保证安全、可靠、经济的同时, 对用户和环境更为友好, 由电力系统和用户共同构成的综合效益最优的整个系统, 本文将其定义为用户友好的电网。在规划时, 系统可能产生的危及用户利益和损害用户满意度的扰动是本文考虑的重要因素。根据 IEEE Standard 1346-1998<sup>[5]</sup>及文献[6]提出的设备电压耐受能力范围, 可粗略地对用户损失进行估计, 但由于系统扰动和用户耐受能力具有不确定性, 在规划用户友好电网时, 必须对不同的规划方案和各种不确定性因素进行深入研究, 以此定量评估用户潜在损失。

国内外研究表明, 主要由系统故障引起的电压暂降是最严重的电能质量问题<sup>[7-9]</sup>, 是用户抱怨最多、损失最大的扰动。用户敏感设备, 如: 计算机 (Personal Computers, PC)、调速驱动装置 (Adjustable Speed Drives, ASD)、可编程序逻辑控制器 (Programmable Logic Controllers, PLC) 和交

流接触器 (AC-Contactor, ACC) 等对电压暂降十分敏感, 单个元件的故障可能造成整条生产线产品报废。而系统扰动造成的用户损失不仅有停电损失, 有时暂降损失更严重, 这种损失表现为潜在损失。因此, 同时考虑停电损失和潜在损失对于提高系统的用户满意度具有重要意义。

用户潜在损失评估是保证用户满意度的关键。文献[10]考虑到某区域电压暂降的影响最低的电网重构方法; 文献[7]从可靠性指标的角度对电压暂降的影响进行了研究。这些分析对于进一步研究用户友好电网具有重要意义, 但对存在的诸多不确定性因素的影响的研究还不够, 尚需考虑不同影响因素的特点和属性, 找到更符合实际的用户潜在损失的评估方法。

基于上述分析, 本文对不同电网规划方案下系统电压暂降和用户设备电压耐受能力的不确定性评估方法进行了研究, 定量确定用户潜在损失, 以此损失为规划目标之一, 对用户友好电力系统的规划模型和方法进行了研究, 以 Garver-6 节点系统为例, 对提出的用户潜在损失评估和系统规划方法进行验证, 证明方法的有效性和可行性。

## 1 用户友好电网及规划思路

### 1.1 用户友好电网

传统电网规划考虑了建设成本、运营成本、用户停电损失和可靠性指标, 大多仅进行“N-1”或“N-2”过负荷后校验, 对系统中的用户满意度和潜在损失等的认识还远远不够<sup>[11]</sup>。文献[12]将可靠性指标转化为经济性指标作为系统规划目标, 考虑了供电双方利益, 初步指出了电力系统应具有用户友好性的要求。

用户友好电网定义为: 是智能电网在整个电力系统的具体化和现实化的表现, 是在建设成本、运营成本和用户损失成本最低的前提下, 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, 以用户根本利益和用户满意度为出发点和归宿点的电力系统。在该系统中, 资源友好、环境友好和用户友好, 系统与用户双方均满意是重点, 用户满意度是关键。

现有电力系统规划重点考虑了供电方的经济性, 在可靠性上则以供电方有电送、用户有电用为主要目标, 但对用户的根本利益, 如系统中潜在故障等造成的损失考虑不够。用户使用电力除了要求数量上充足外, 更关注其质量是否能达到期望的使用价值, 即达到其希望的满意度。用户因系统扰动引起的潜在损失受多重不确定性因素影响, 包括接

线方式、回路数、线路型号、线路故障位置、故障类型等, 同时与用户设备的电压耐受能力有关。根据 IEEE 推荐标准<sup>[5]</sup>, 设备电压耐受能力可作为一种度量, 但需考虑其与系统扰动之间的兼容性问题。在进行系统规划时首先需对这些不确定因素造成的潜在影响进行准确评估。

### 1.2 用户友好电网规划要求

传统电力系统规划将系统建设成本、运营成本、用户停电损失作为目标, 满足系统等式约束和不等式约束, 以及可靠性指标等约束条件; 而用户友好电力系统除需满足以上要求和约束外, 更突出系统中用户满意度。因此其规划要求是: 全面考虑系统侧和用户侧各类成本, 准确评估用户可能经受的停电损失和潜在损失, 明确系统规划所需达到的目标; 根据供电充足性原则和系统基本安全要求确定可能的电网规划方案; 对各种可能方案内系统可能产生的电压暂降等扰动和可能的用户敏感设备的电压耐受能力, 评估用户潜在损失; 建立包括建设成本、运行成本和用户综合损失在内的电网规划模型; 对不同规划方案进行比较, 从中确定最优方案。

## 2 用户潜在损失评估

### 2.1 系统扰动不确定性评估

系统中故障产生的电压暂降是导致用户潜在损失的主要因素, 其严重程度与系统拓扑、运行方式及故障位置、故障类型、保护类型、保护定值及装置特性等有关<sup>[13]</sup>。不同用户设备的电压耐受能力的不确定范围不同, 不同情况下可能造成的潜在损失也不同, 因此, 在进行规划时需对各规划方案下系统扰动特性进行评估。

对任意规划系统, 如图 1, 根据现有资料可得不同型号线路的可靠性参数。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  $m$  处的暂降幅值为:

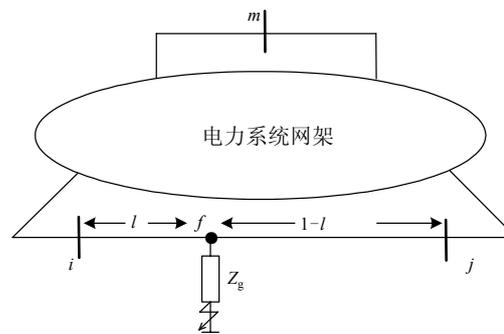


图 1 电力系统结构

Fig.1 Structure of power system network

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

式中： $U_{r,m}$  为节点  $m$  暂降时的剩余电压； $U_m^{\text{pref}}$ 、 $U_f^{\text{pref}}$  为故障前  $m$ 、 $f$  点的电压； $l$  为线路归一化长度； $Z_{ii}$ 、 $Z_{jj}$  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，可用文献[14]提出的对称分量法分析，不再赘述。

系统故障具有随机性，根据线路  $i$ - $j$  不同位置故障引起的  $m$  点暂降幅值分布，用最大熵方法<sup>[15]</sup>可确定线路故障引起  $m$  点的电压暂降强度的概率密度函数：

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

式中： $\lambda_i$  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[15]，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，根据拟规划方案可分别确定。

### 2.2 用户设备电压耐受能力不确定性评估

用户设备的电压耐受能力受设备类型、使用场所、寿命、运行条件、负载水平等影响，有极强的不确定性，不确定区域如图2。针对不同用户设备，如果仅用确定的暂降（如幅值为50%<sup>[16]</sup>）频次来估计用户损失有失真伪，此时需考虑用户设备受影响的不确定性。

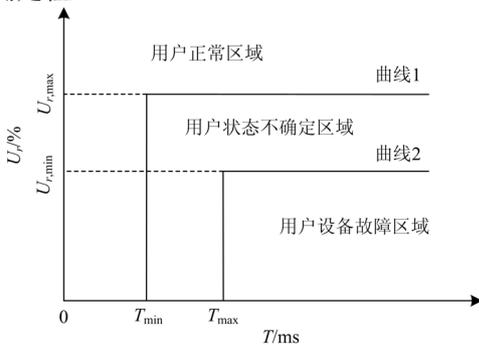


图2 用户故障不确定性区域

Fig.2 Uncertain region of failure for consumer

用户设备在系统扰动时可能处于正常、故障、正常与故障之间的过渡状态等多种运行状态，造成的损失也随之差异较大，对拟规划系统的拓扑结构，根据上节原理可确定用户接入点暂降强度概率密度函数  $f(s)$ ，结合用户设备故障状态隶属函数  $\mu_A$ <sup>[17]</sup>，可评估用户设备的故障概率。

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

式中， $s$  为电压暂降强度指标（可描述暂降幅值、暂降持续时间或其综合指标，本文仅考虑暂降幅值）<sup>[8]</sup>。

用户设备故障概率  $P(A)$  反映了线路  $i$ - $j$  上任意点故障可能导致的  $m$  点用户设备故障概率。在  $m$  点接入的  $k$  类用户经受的年潜在故障次数为：

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

式中： $k$  为各节点所连接用户类型； $x_{mk1}$ 、 $x_{mk2}$  表示  $m$  点处  $k$  类用户的设备电压耐受幅值的最小值、最大值； $L_{ij}$  和  $\lambda_{ij}$  分别为线路  $i$ - $j$  的长度和故障率。

### 2.3 用户潜在损失评估模型

现有电力系统规划对用户电压暂降损失涉及较少，最多考虑了用户设备停运、系统重启、产品报废等情况<sup>[16]</sup>。在电力技术经济评价中，有时用户潜在损失更严重。

实际中，用户可分为居民、商业、工业等类型。根据美国、加拿大统计数据<sup>[18]</sup>，工业用户对恢复时间尤为敏感，其他用户的敏感特性则基本相同，这与工业用户生产线的大量流水线作业相符。单次电压暂降引起用户潜在损失的大小反应了用户对系统故障以及用户满意程度的不同期望。一般，设备故障必然造成用户生产工作的中断，故取平均每次短时中断损失作为用户的单次潜在损失<sup>[16]</sup>，如表1。

表1 用户单次故障损失

Tab. 1 Single failure cost of consumers

用户类型	居民	商业	小型工业	大型工业
损失 / \$	1	210	1 200	11 027

节点  $m$  处  $k$  类用户的年潜在损失：

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

在此基础上可进一步确定出规划系统在某方案下整个系统中所有用户潜在损失：

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

式中： $m$ 、 $M$  分别为规划系统的节点号和总可感知的负荷点集合； $C_k$  为第  $k$  类用户单次故障损失。

### 2.4 用户潜在损失评估过程

基于以上分析，评估某电力系统规划方案下的用户潜在损失的一般过程为：

(1) 根据被规划系统在某规划方案下的网络拓扑结构、各支路参数，以及各类用户设备的电压耐受能力，用最大熵原理<sup>[15]</sup>和模糊随机方法<sup>[17]</sup>求得各类用户的潜在故障概率。

(2) 根据统计得到的各线路类型的可靠性参

数,结合式(4)得到各个用户设备接入点上各类用户的潜在故障次数。

(3) 由各类用户设备单次故障的经济损失和得到的潜在故障次数,计算电力系统不同规划方案下用户潜在损失,从而确定系统规划目标函数的最小值,由此选定最佳电网规划方案。

### 3 用户友好电网规划

#### 3.1 规划模型

为阐明原理,以现有系统中新建馈线为规划变量;以电压暂降引起的用户潜在损失和系统电量不足损失之和作为年用户损失;以年用户损失、建设投资年费用、年运行费用之和作为系统规划综合费用;以综合费用最小为规划目标。电网的规划模型为:

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

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

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

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

式中:  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  分别为建设投资等年值费用、年运行费用(包括年网损费用和年折旧维护费)、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。

目标函数中各部分的表达式为:

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

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。

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

式中:  $T$  为年损耗小时数;  $C_{\text{loss}}$  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。

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

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

#### 3.2 规划计算流程

根据以上规划要求和模型,用户友好电力系统

的规划流程如图3。

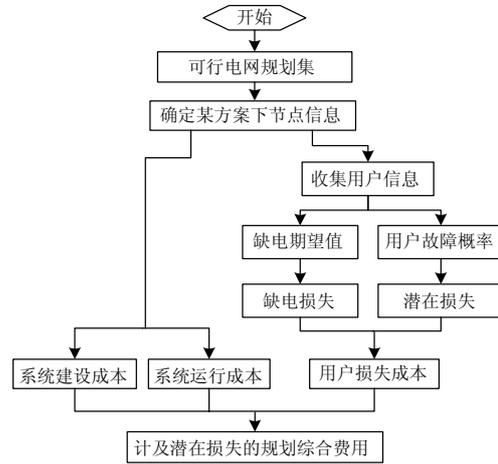


图3 电力系统规划计算流程图

Fig.3 Flow chart of calculation for power system planning

### 4 算例分析

Garver-6 节点系统是国内外系统规划中广泛采用的实验电网。在未来的规划年中,系统每两个节点之间都可以架设新线,规划方案中每次可改变的架空线路的最大走廊数为4回。线路具体参数及网络结构如表2和图4。

表2 Garver-6 节点系统的线路参数

Tab.2 Parameters of transmission lines in Garver-6 bus system

支路 编号	两端 节点	待选回 数	长度 /km	电阻 /pu	电抗 /pu	容量 /MW
1	1-2	2	40	0.10	0.40	100
2	1-3	3	38	0.09	0.38	100
3	1-4	2	60	0.15	0.60	80
4	1-5	2	20	0.05	0.20	100
5	1-6	3	68	0.17	0.68	70
6	2-3	2	20	0.05	0.20	100
7	2-4	2	40	0.10	0.40	100
8	2-5	3	31	0.08	0.31	100
9	2-6	4	30	0.08	0.30	100
10	3-4	3	59	0.15	0.59	82
11	3-5	3	20	0.05	0.20	100
12	3-6	3	48	0.12	0.48	100
13	4-5	3	63	0.16	0.63	75
14	4-6	3	30	0.08	0.30	100
15	5-6	3	61	0.15	0.61	78

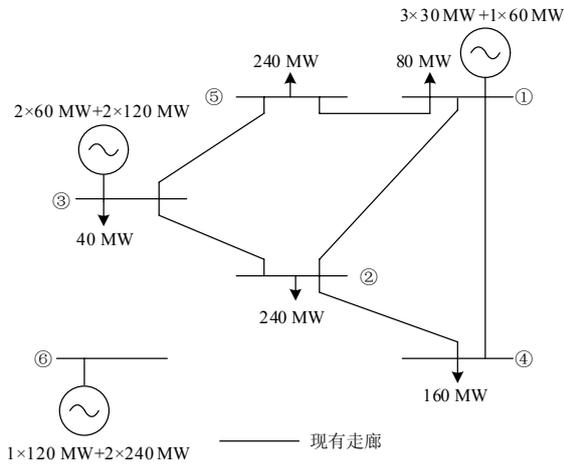


图 4 Garver-6 节点系统网络路径图

Fig.4 Network connection diagram of Garver-6 bus system

利用本文方法对待规划系统进行经济损失评

表 4 支路 1-2 暂降幅值的概率密度函数对节点 4 上用户造成的潜在故障

Tab.4 Potential failure of consumers at node 4 caused by probability density function of sag magnitude in line 1-2

系数	$\lambda_0$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	居民用户故障概率	商业用户故障概率	工业用户故障概率
方案一	2.350 6	-0.841 5	-208.532 2	124.680 0	1 345.990 0	-1 710.733 4	0.043 5	0.468 8	0.363 9
方案二	2.292 4	-0.729 9	-200.964 1	112.964 8	1 287.831 8	-1 615.302 0	0.043 1	0.458 6	0.360 1

注：表中仅给出了系统发生三相故障的情况。

表 5 支路 3-5 暂降幅值的概率密度函数对节点 2 上用户造成的潜在故障

Tab.5 Potential failure of consumers at node 2 caused by probability density function of sag magnitude in line 3-5

系数	$\lambda_0$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	居民用户故障概率	商业用户故障概率	工业用户故障概率
方案一	2.074 7	0.909 4	-328.808 5	-104.914 0	4 242.231 2	-5 621.449 2	0.001 2	0.006 7	0.114 2
方案二	1.882 6	1.731 9	-320.008 6	-145.828 7	3 730.390 6	-4 549.563 2	0.004 4	0.009 1	0.107 1

结合各个节点下的用户信息，如表 6 所示，按照第四节中的用户经济损失评估方法，更能直观地体现出不同用户对电网规划方案的满意程度。根据 SEMIF47 标准，选取 PC、ASD、PLC 分别代表住

表 6 系统用户信息

Tab.6 Userinfo of power system

用户类型	节点一	节点二	节点三	节点四	节点五
住宅用户	12 500	27 500	13 500	26 700	200
商业用户	635	525	200	620	30
小型工业	20	250	5	90	10
大型工业	5	100	0	40	1

估，并与未考虑用户潜在损失的评估结果做比较，说明规划中考虑用户满意度的重要性和必要性。

方案一和方案二分别为考虑和不考虑用户友好计及潜在损失的规划结果。具体接线方式如表 3 所示。

在不同方案下，各条支路在敏感负荷接入点电压暂降幅值的概率密度函数系数的变化趋势如表 4, 5，它表征了系统扰动的强度，结合用户敏感设备耐受能力，可得到不同种类用户故障概率。

表 3 电网规划方案

Tab.3 Power network planning scheme

支路编号	1	3	4	6	7	9	11	12	14	15
方案一	1	1	1	1	1	4	3	1	3	0
方案二	1	1	1	1	1	4	3	0	3	1

注：未建设支路未标出。

宅、商业、工业用户中典型的敏感设备，且各用户及各设备间相互独立。

由表 4、5 可知：

1) 随着规划方案的不同，网络拓扑结构影响系统中各线路对用户点的故障概率密度函数，从而改变了用户可能发生故障的可能性。

2) 不同方案下，故障率即使发生细微变化，对整个系统中成千上万用户而言也足以造成巨大的经济损失。而终端用户的满意度的直接体现则是自身的经济效益，它同时也是社会发展的保障。因此，在规划初期找到符合需要的最低潜在故障率的拓扑结构至关重要。

3) 当敏感负荷点的用户不同,即设备的耐受能力出现差异时,连接在同一节点上不同用户对系统产生扰动的兼容性不尽相同,说明了区别用户类型的必要性。

结合线路可靠性等计算参数<sup>[19]</sup>,上述两种不同方案的用户损失如图5,各类费用计算结果如表7。

方案一与方案二相比,两者的缺电损失几乎相同,但潜在损失则大不一样。比较还可得出,潜在损失对系统内用户造成的危害更加深重。而用户对电网的满意度体现的关键则是网络拓扑在经济上的影响,将潜在损失考虑到用户损失,甚至电网规划的目标函数中是用户满意度的客观体现。

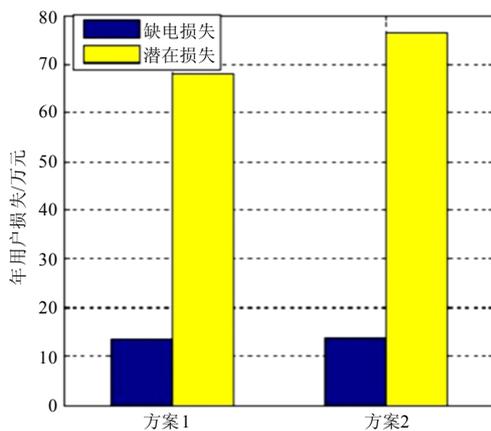


图5 系统年用户损失

Fig.5 Annual cost of customers in the system

表7 Garver-6 节点系统的规划结果

Tab.7 Power network planning results of the Garver-6 bus system

规划结果		方案一	方案二
线路投资年费用 / 万元		1 958.93	2 044.92
年运行费用 / 万元	年网损费用	3 079.53	2 987.44
	年维护费	97.946 5	102.246
不计用户损失年费用 / 万元		5 136.406 5	5 134.606
年用户损失 / 万元	缺电损失	13.545	13.657
	潜在损失	68.071 7	76.606 5
系统潜在故障次数	住宅用户	34.254 2	36.520
	商业用户	56.403 6	58.922
	大、小型工业	48.510 6	51.011
年综合费用合计 / 万元		5 218.023 2	5 224.869 5

在不考虑用户损失时,方案二在馈线的建设、运行费用上更为经济,因此成为首选规划方案。然而考虑用户损失后,特别是用户潜在损失,方案一中各类用户的潜在故障次数均随之减小,从而使得

年用户损失及系统年综合费用降低,用户设备对系统扰动显示出更优的兼容能力。这时规划出的电网方案,不但在综合费用上是最经济的,在用户心目中同样是满意度最高的。

## 5 结论

(1) 本文利用电网规划中拓扑结构的变化,求取了不同规划系统中各用户发生潜在事故的概率,适用于任何规模大小的电网发生对称故障和不对称故障时用户故障的判断。

(2) 考虑了同一系统下不同用户经济损失的差别和联系,更好地反映出不同用户对电网电能质量需求的满意度。在实际中,用户友好的电网使得系统侧和用户侧更好地融为一体。

(3) 国内外大量的投诉都与电网的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潜在损失的必要性。如何进一步找到合理的补偿装置,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(USA): 2009: B2 - B2-7.
- [2] Bob Saint. Rural distribution system planning using smart grid technologies[C]. //2009 IEEE Rural Electric Power Conference (REPC '09). Fort Collins(USA): 2009: U57-U64.
- [3] 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]. USA: Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, 2007.
- [4] 肖先勇. 电力市场营销原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.  
XIAO Xian-yong. Principle of electric power marketing[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] XIAO Xiang-ning, TAO Shun, BI Tian-shu, et al. Study on distribution reliability considering voltage sags and acceptable indices[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22 (2) : 1003-1008.
- [8] Shen Cheng-Chieh, Lu Chan-Nan. A voltage sag index considering compatibility between equipment and supply[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(2) : 996-1002.
- [9] 高效, 彭建春. 供电方支付给用户的电压凹陷补偿[J]. 继电器, 2005, 33 (13) : 60-63.  
GAO Xiao , PENG Jian-chun. Voltage sags ' compensation to customers from power providers[J]. Relay, 2005, 33 (13) : 60-63.
- [10] 王宾, 潘贞存, 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.  
WANG Bin, PAN Zhen-cun, XU Bing-yin. Analysis of voltage sags in distribution system[J]. Power System Technology, 2004, 28 (2) : 56-59.
- [11] 程浩忠. 电力系统规划[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.  
CHENG Hao-zhong. Power system planning[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [12] 朱旭凯, 刘文颖, 杨以涵. 综合考虑可靠性因素的电网规划新方法[J]. 电网技术, 2004, 28 (21) : 51-54.  
ZHU Xu-kai, LIU Wen-ying, YANG Yi-han. A new power network planning method by comprehensively considering system reliability factors[J]. Power System Technology, 2004, 28 (21) : 51-54.
- [13] Myo T A, Milanovic J V. Stochastic prediction of voltage sag by considering probability of the failure of the protection system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21 (1) : 322-329.
- [14] 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.
- [15] 肖先勇, 马超, 李勇. 线路故障引起电压凹陷的频次最大熵评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (1) : 87-93.  
XIAO Xian-yong, MA Chao, LI Yong. Voltage sag occurrence frequency assessment caused by line faults using the maximum entropy method[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (1) : 87-93.
- [16] Heine P, Pohjanheimo P, Lehtonen M, et al. A method for estimating the frequency and cost of voltage sags[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17 (2) : 290-296.
- [17] 陈武, 苟剑, 肖先勇. 敏感设备电压凹陷敏感度的随机-模糊评估方法[J]. 电网技术, 2009, 33 (6) : 39-43.  
CHEN Wu , GOU Jian , XIAO Xian-yong. A stochastic-fuzzy assessment method for voltage sag sensitivity of sensitive equipment[J]. Power System Technology, 2009, 33 (6) : 39-43.
- [18] Sullivan M J, Vardell T , Johnson M. Power interruption costs to industrial and commercial consumers of electricity[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1997, 33 (6) : 1448-1458.
- [19] 左飞. 计及可靠性价值的配电网规划及其算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.  
ZUO Fei. The study of distribution system planning considering reliability worth and its algorithm[D]. Chongqing: Chongqing University, 2003.

收稿日期: 2009-11-10; 修回日期: 2010-01-27

作者简介:

刘旭娜(1986-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电能质量控制技术与绿色智能电网; E-mail: liuxuna86@126.com

肖先勇(1968-), 男, 副教授, 硕士生导师, 从事电能质量及其控制技术、绿色友好智能电网等方面的教学和研究工作。