

# 配电网投资效益评价与决策模型研究及应用

刘胜利<sup>1</sup>, 曹阳<sup>2</sup>, 冯跃亮<sup>1</sup>, 潘白浪<sup>1</sup>, 高英<sup>1</sup>

(1. 国网浙江平湖市供电公司, 浙江 嘉兴 314200; 2. 国网浙江省电力公司, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 目前, 配电网评价体系往往偏重于规划成效、安全性、可靠性等某一方面的内容, 项目的可行性研究报告缺乏对项目的投资效益的论证, 在投资决策方面也往往仅根据历史数据进行简单的比例分配。针对上述问题, 从配电总体投资效益, 单体项目投资效益, 投资决策等方面全方位地建立了 35 kV 及以下配电网投资效益评价与决策模型。提出 19 项用于评价单体项目投资效益的新指标、计算指标得分的评分函数、计算配电网总体投资和单体项目投资效益得分的评价模型, 根据投资效益评价得分高低判断配电网总体投资效益优良和安排单体项目投资优先顺序。提出以电网规模和售电量为基础, 以年度单体项目投资效益评价得分高低为导向的年度投资决策模型。以某地区所辖供电公司 35 kV 及以下配电网及下年度项目为例, 验证了该模型科学实用性, 对建立以投资效益为导向的配电网评价与投资决策工作体系有重要意义。

**关键词:** 配电网; 投资效益评价; 投资决策; 模型

## Research and application of distribution grid investment effectiveness evaluation and decision-making model

LIU Shengli<sup>1</sup>, CAO Yang<sup>2</sup>, FENG Yueliang<sup>1</sup>, PAN Bailang<sup>1</sup>, GAO Ying<sup>1</sup>

(1. State Grid Zhejiang Pinghu Power Supply Company, Jiaxing 314200, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Currently, the distribution network evaluation system is often biased towards a particular aspect such as content planning effectiveness, safety, reliability, etc. The project's feasibility study is lack of the demonstration of a project's investment efficiency. And investment decisions are often only simply based on historical data. Facing with these problems, this paper concerns the aspects of the overall investment effectiveness, single project investment effectiveness, investment decisions and establishes the investment effectiveness evaluation and decision-making model of 35 kV or below. This model proposes 19 new indicators to evaluate the effectiveness of single project investment, and gives out the scoring function of calculating the index score. It also gives out evaluation model of calculating distribution network's scores of the overall investment and monomer investment's efficiency. According to the investment effectiveness evaluation scores, it determines the level of overall investment effectiveness and set priorities of single project investment. This paper also proposes annual investment decision model based on the grid scale and electricity sales and the score level of annual single project investment benefit. A 35 kV distribution network is taken as an example to test and verify the scientific usefulness of the model. It has great significance to the distribution network's evaluation and investment decisions.

**Key words:** distribution network; investment effectiveness evaluation; investment decisions; models

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)02-0119-07

## 0 引言

配电网发展建设规模大、不确定因素多、涉及面广, 是一项复杂艰巨的系统工程。近年来, 35 kV 及以下配电网建设与改造需求规模逐年增加, 而用于配电网项目的批复投资却偏少, 需要充分利用每一分投资, 使其产生效益最大化。传统的配电网项

目的可行性研究报告仅侧重于项目的必要性与可行性的论证, 缺乏对项目的投资效益的论证; 在投资决策方面也往往仅根据历史数据进行简单的按比例分配。目前有较多文献对配电网评价模型或体系进行研究, 文献[1]研究了配电网规划评价指标体系和综合评价模型, 文献[2-8]研究了电网安全性评估、经济性运行、协调性评估、可靠性评估等方面的问题,

文献[9-11]研究了配电网综合评价体系、模型；而针对研究配电网投资效益评价与决策模型方面的文献较少，文献[12]针对 35 kV 和 110 kV 这两个电压等级配电网投资从项目效益和管理效益两个方面构建配电网投资效益评价指标和体系，但只能用于配电网投资效益的后评价且主要针对高压配电网；文献[13-15]对电网投资决策、经济性、外部效益等方面作了一定研究，但缺乏单体配网项目投资效益的评价。以上文献仅在某一方面对配电网评价模型作了相关研究，没有从配电总体投资效益，单体项目投资效益，投资资金分配等方面全方位地建立投资效益评价模型，本文针对上述问题，从安全性、可靠性、经济性等方面建立一个科学的、合理的、实用的、量化的 35 kV 及以下配电网投资效益评价与决策模型。该模型包括年度配电网总体投资效益评价模型，年度配电网单体项目评价模型，年度配电网投资决策模型。运用该模型对历史年配电网总体投资效益和单体项目进行后评价；对在建或拟建的年度配电网总体投资效益和单体项目投资效益进行预测，根据投资效益评价得分高低判断配电网总体投资效益优良和单体项目投资优先顺序；对年度配电网项目投资资金进行科学、合理的分配。

### 1 投资效益评价与决策模型构架

配电网投资效益评价与决策模型包括三部分内容：

(1) 投资效益评价指标体系。科学合理的指标体系是配电网投资效益评价的基础和评价目标的具体化实现。合理选取指标，保证指标体系的完整性与指标间的相互独立性，同时对每个指标进行详细定义并给出计算方法<sup>[9]</sup>。指标体系包括一级指标和二级指标，一级指标用于评价年度配电网总体投资效益，二级指标根据一级指标衍生而来，用于评价年度配电网单体项目投资效益。

(2) 投资效益评价模型。该模型包括年度配电网总体和单体项目投资效益评价模型。

(3) 投资决策模型。该模型用于对年度配电网项目投资资金进行科学、合理的分配。

### 2 投资效益评价指标体系

在构建指标体系时按照系统、科学和实用的原则选择考核指标，使其能够全面、准确、有效地反映配电网运行的主要状态和实际情况。

配电网规划是配电网年度投资建设计划的依据，为了实现投资效益的最大化，需要对配电网规划的科学合理性进行检验，因此对配电网规划成效

进行评价就成为了配电网投资效益评价的重要内容之一。此外，从供电公司经营管理的角度来讲，投资计划和投资效益也是重点关注的内容。本文构建评价指标体系根据上述内容，紧紧围绕配电网投资效益这一核心评价目标，多方面收集资料作为指标源，并梳理出相应的评价指标。参照层次分析方法建立初步的评价指标体系，通过配电网项目关联性分析、专家打分等方式构建出指标体系。最后选取得分较高的指标作为最终评价指标，共选取 21 个一级指标，19 个二级指标，如表 1 所示。

表 1 一级指标和二级指标

Table 1 First indicators and secondary indicators

目标层	一级指标		二级指标	
	名称	单位	名称	单位
规划成效	配电线路重载率	%	单位投资重载配电线路下降条数	条/万元
	配变重载率	%	单位投资重载配变下降台数	台/万元
	用户供电可靠率(RS-3)	%	供电可靠性提升率(RS-3)	%
	D类电压合格率	%	单位投资新增配网接入能力	个kVA/万元
	配电线路联络率	%	单位投资配电线路联络线路上升条数	条/万元
	配电线路分段合理率	%	单位投资分段合理线路上升条数	条/万元
	线路“N-1”通过率	%	单位投资“N-1”配电线路提升条数	条/万元
	配电线路绝缘化率	%	单位投资配电线路绝缘化提升公里数	km/万元
	节能型配变比例	%	单位投资节能型主变上升台数	台/万元
	配电线路供电半径合格率	%	单位投资供电半径合格线路条数	条/万元
投资计划	配网项目投资完成率	%		
	配网项目投资调整率	%		
	配网项目建成投产率	%	单位投资建成时间	月/万元
	配网项目预算完成率	%	项目资金使用率	%
	单位配变容量供电量	kWh/kVA	配电线路线损降低率	%
	单位线路供电量	kWh/km	配变损耗降低率	%
	新增单位配变容量增供电量	kWh/kVA	配变单位投资增供电量	万 kWh / 万元
	新增单位线路长度增供电量	kWh/km	配变单位投资增供负荷	万 kW/万元
	配网降损电量	kWh	线路单位投资增供电量	万 kWh / 万元
	配网单位投资增供电量	kWh / 万元	线路单位投资增供负荷	万 kW/万元
配网项目投入产出比率	%	项目投入产出比率	%	

### 3 指标权重

指标权重的设定是投资效益评价模型中的重要环节。赋权方法有主客观之分, 常见权重计算方法有德尔菲法、层次分析法、变异系数法、熵权法、人工神经网络等。

德尔菲法与层次分析法同属于主观赋权方法, 变异系数法、熵权法、人工神经网络等方法属于客观赋权方法。虽然客观方法能够最小限度地减少人为因素的干预, 但是无法获得统一的权重标准, 因此必须采用主观性的赋权方法。德尔菲法具有直观的特点, 宜实际操作, 与层次分析法相比较, 更适合电网企业投资效益指标的权重确定。本文采用德尔菲法来设定指标权重。最终确定标层的规划成效、投资计划和投资效益, 分别赋权值为 0.3、0.3 和 0.4。用于年度配电网总体投资效益评价的一级指标权重如表 2 所示, 用于年度配电网单体项目投资效益评价的二级指标权重值如表 3 所示。

表 2 一级指标权重

Table 2 First indicators level

目标层	一级指标	一级指标权重	在总体投资效益评价中的权重
规划成效 (0.3)	配电线路重载率	0.15	0.045
	配变重载率	0.15	0.045
	用户供电可靠率(RS-3)	0.1	0.03
	D 类电压合格率	0.05	0.015
	配电线路联络率	0.15	0.045
	配电线路分段合理率	0.05	0.015
	线路“N-1”通过率	0.15	0.045
	配电线路绝缘化率	0.1	0.03
	节能型配变比例	0.05	0.015
	配电线路供电半径合格率	0.05	0.015
投资计划 (0.3)	配网项目投资完成率	0.2	0.06
	配网项目投资调整率	0.2	0.06
	配网项目建成投产率	0.3	0.09
	配网项目预算完成率	0.3	0.09
投资效益 (0.4)	单位配变容量供电量	0.1	0.04
	单位线路供电量	0.1	0.04
	新增单位配变容量	0.15	0.06
	增供电量		
	新增单位线路长度	0.15	0.06
	增供电量		
	配网降损电量	0.1	0.04
	配网单位投资增供电量	0.2	0.08
配网项目投入产出比率	0.2	0.08	

表 3 二级指标权重

Table 3 Secondary indicators level

目标层	二级指标	二级指标权重	在单体项目投资效益评价中的权重
规划成效 (0.3)	单位投资重载配电路下降条数	0.15	0.045
	单位投资重载配变下降台数	0.15	0.045
	供电可靠性提升率(RS-3)	0.1	0.03
	单位投资新增配网接入能力	0.05	0.015
	单位投资配电线路联络线路上升条数	0.15	0.045
	单位投资分段合理线路上升条数	0.05	0.015
	单位投资“N-1”配电路提升条数	0.15	0.045
	单位投资配电线路绝缘化提升公里数	0.1	0.03
	单位投资节能型主变上升台数	0.05	0.015
	单位投资供电半径合格线路条数	0.05	0.015
投资计划 (0.3)	单位投资建成时间	0.5	0.15
	项目资金使用率	0.5	0.15
投资效益 (0.4)	配电线路线损降低率	0.1	0.04
	配变损耗降低率	0.1	0.04
	配变单位投资增供电量	0.2	0.08
	配变单位投资增供负荷	0.1	0.04
	线路单位投资增供电量	0.2	0.08
	线路单位投资增供负荷	0.1	0.04
	项目投入产出比率	0.2	0.08

### 4 指标评分函数

通过分数可以直观比较不同配电网的优劣, 简单地采用五分位法来进行衡量不够科学。指标评分函数的归一化方法有最大值法、差值法、模糊数学法等, 各种方法归一化计算结果一般不影响评价结论, 都满足要求, 本文综合采用以上方法。其基本步骤如下。

1) 确定各指标的隶属度函数类型。隶属度函数可以是线性的, 也可以是非线性的, 视指标数据的分布情况来拟合。因为单位电网投资额与其投资效果评分关系可用多种函数表示, 为得到两个变量间的最优函数, 可使用线性(Linear)、二次函数(Quadratic)、三次函数(Cubic)、对数函数(Logarithmic)、指数函数(Exponential)、S 函数、幂

函数(Power)等函数形式对其之间的关系进行拟合。这些函数的拟合程度都较高,其中以三次函数的拟合程度最高。二次函数与三次函数的拟合程度相近,随着配电网建设发展的深入,很多指标值的改进将会越来越困难,或者每一点的改进所需要的投入将更多,因此评价判断应能体现出这一特点(线性函数不能体现这一特点),同时为计算方便并考虑实际曲线的可能趋势,最终采用二次函数作为该电网现阶段电量需求与电网投资总额的关系函数。即:

$y = ax^2 + bx + c$ , 其中,  $x$ 代表指标值,  $y$ 代表分数,  $a$ 、 $b$ 分别为二次、一次项系数,  $c$ 为随机误差项。

2) 确定各评分函数的二次函数曲线。先设定各指最大值对应的评分为100分,标准值对应的评分为70分,最小值对应的评分为0分。再研究出各指标的最大值、标准值、最小值。由以上三个坐标点即可确定评分函数的二次函数曲线。

一级指标在目前电网公司规划、同业对标工作中应用较为成熟,本文运用德尔菲法确定各一级指标的最大值、标准值、最小值,如配电线路重载率其最大值、标准值、最小值分别为20、11、0。

由于二级指标为本文首次提出,无成熟的应用经验,本文采用矩阵可分析法得出各个指标的最大值、标准值、最小值。矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $x_{ij}$  为第*i*个对象的第*j*个指标的数值。

按式(1)计算历史年配电网总体投资和单体项目投资效益评价指标数值,剔除不合理数据后,按数值大小把数据分成若干组,统计数据落入各组的频数,根据频数确定指标的标准值、最大值、最小值。由以上三个坐标点确定各评分函数的二次函数曲线。由于篇幅有限,本文只列出部分一、二级指标评分函数,如表4和表5所示。

### 5 投资效益评价模型

根据表4和表5给出的评分函数可以计算出评价对象的指标得分,然后根据层次分析法向上计算得到年度配电网总体投资效益得分和单体项目投资效益评价得分。投资效益评价模型公式为

$$Y = \sum_{j=1}^n Y_j W_j \quad (2)$$

式中:  $Y_j$  为某一级或二级指标的评分;  $W_j$  为该指标权重。

表4 部分一级指标评分函数

Table 4 Part of first index score function

目标层	一级指标	评分函数: $y = ax^2 + bx + c$		
		$a$	$b$	$c$
规划	配电线路重载率	-0.250 0	0.050 0	100.00
成效	线路“N-1”通过率	0.007 18	0.282 0	0.00
投资计划	配网项目建成投产率	0.006 2	0.380 0	0.00
投资	新增单位线路长度	-0.010 0	2.900 0	-230.00
投资效益	增供电量配网项目投入产出比率	-0.001 85	1.310 0	-12.96

表5 部分二级函数指标评分函数

Table 5 Part of secondary index score function

目标层	二级指标	评分函数: $y = ax^2 + bx + c$		
		$a$	$b$	$c$
规划	单位投资重载配电线路下降条数	$-8.9 \times 10^5$	$2.2 \times 10^4$	0
成效	单位投资“N-1”配电网线路提升条数	$-7.0 \times 10^5$	$1.9 \times 10^3$	0
投资计划	单位投资建成时间	$-5.2 \times 10^4$	$5.4 \times 10^3$	0
投资	线路单位投资增供电量	$-2.1 \times 10^1$	$1.1 \times 10^2$	0
投资效益	项目投入产出比率	2.9	-0.1	0

## 6 投资决策模型

投资决策方面,地市级或省级供电公司给所辖县级供电企业分配投资资金时,以往通常仅根据历史数据进行简单的比例分配,或仅仅根据售电量的大小进行分配,这种投资决策方式容易形成“马太效应”,电网薄弱的县级供电企业容易由于电网建设投资长期不足电网越来越薄弱。本文建立以电网规模和售电量为基础,以下年度单体项目投资效益评价得分高低为导向的,下年度投资资金分配比例计算模型。公式为

$$T = \left( \frac{L_i}{\sum_{i=1}^n L_i} + \frac{S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \right) A + \frac{E_i}{\sum_{i=1}^n E_i} B + \frac{\bar{Y}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{Y}_i} C \quad (3)$$

式中:  $L_i$  和  $S_i$  为各县级供电公司上年度35 kV及以下公用线路长度和变电容量;  $A$  为权重,取值为0.15;  $E_i$  为各县级供电公司上年度售电量;  $B$  为权重,取值为0.3;  $\bar{Y}_i$  为各县级供电公司年度各配网单体项目投资效益评价平均得分;  $C$  为权重,取值为0.4。

按式(3)计算出各县级供电公司下年度配电网资金分配比例,从而决定投资分配金额。

## 7 算列

以国网浙江平湖市供电公司配电网项目为算列,应用本文模型对2013年度配电网总体投资效益进行评价,得分为67.59分,略低于评分标准值(评分标准值为70分),说明2013年配电网总体投资效益没有达到标准值,从各指标评分来看(由于篇幅有限各指标的评分不一列出),主要是因为配变重载率等11个指标的评分低于70分。对2014各单体项目投资效益评价得分如表6,表6中各单体项目顺序为按评价得分高低排列,即为各单体项目投资优先顺序,可根据此优先顺序排定项目年度实施优先顺序,也可为年底申报增减投资项目提供依据。按式(3)计

算出国网浙江嘉兴供电公司所辖县级供电公司2014年度配电网资金分配比例及投资分配金额如表7。表7中第8行为根据各县公司售电量的大小,2014年实际批复的投资,这种投资决策方式没有考虑电网规模和项目的投资效益,售电量小的县级供电企业容易由于电网建设投资长期不足电网越来越薄弱。表7中最后一行为按本文的投资决策模型优化后的2014年各县公司投资,可知在电网规模一定的情况,售电量小,但单体项目投资效益评价得分高的县级供电企业分配的投资较原来有所提升。这不仅有利于加强电网薄弱的县级供电企业电网建设,而且使得地市级或省级供电公司效益最大化。

表6 2014年各单体项目投资效益评价得分

Table 6 Each single project's investment effectiveness evaluation scores in 2014

序号	项目名称	概算/万元	评价得分
1	10 kV 仓新线新建工程	204.75	95.1
2	10 kV 周广线新建工程	398.34	87.9
3	10 kV 大旗 215 线改造工程	96.36	87.8
4	塘桥变 10 kV 东方线新建工程	100.91	83.5
5	塘桥变 10 kV 塘汇线新建工程	128.37	82.7
6	塘桥变 10 kV 文涛线新建工程	57.65	80.9
7	2014 年老旧配变改造工程	708.9	80.2
8	10 kV 周兴线新建工程	471.81	79.1
9	2014 年超重载配变改造工程	1 814.94	78.9
10	塘桥变 10 kV 塘曹线新建工程	106.81	78.1
11	塘桥变 10 kV 乍王线新建工程	196.98	77.8
12	塘桥变 10 kV 钱家线新建工程	219.46	77.4
13	曹桥变 10 kV 九场线新建工程	424.36	75.7
14	10 kV 华丰 253 线改造工程	136.83	73.3
15	塘桥变 10 kV 齐心线新建工程	343.19	72.9
16	2014 年平湖西片农网线路改造工程	1 560.51	70.9
17	塘桥变 10 kV 塘海线新建工程	361.33	70.7
18	2014 年平湖东片农网线路改造工程	1 744.16	70.5
19	10 kV 博兴 813 线负荷分流工程	486.24	66.7
20	塘桥变 10 kV 塘平线新建工程	330.09	65.9
21	曹桥变 10 kV 曹胜线新建工程	838.87	65.2
22	塘桥变 10 kV 稼书线新建工程	479.3	63.3
23	塘桥变 10 kV 小港线新建工程	752.46	62.6
24	曹桥变 10 kV 曹新线新建工程	1 125.69	61.8
25	塘桥变 10 kV 塘胜线新建工程	590.32	61.7
26	塘桥变 10 kV 塘桥线新建工程	1 047.13	61.5
27	平湖市老城镇配网改造工程	902.46	60.2
28	10 kV 当湖配电站改造工程	301.98	59.9
29	曹桥变 10 kV 池海线新建工程	1 332.05	59.7
30	塘桥变 10 kV 明珠线新建工程	1 069.27	59.3
31	曹桥变扩建 10 kV 出线电缆配套工程	1 028.57	57.6
	平均得分		71.9

表 7 2014 年配电网投资分配比例及金额

Table 7 Proportions and amounts of distribution network's investment allocation in 2014

名称	嘉善	平湖	桐乡	海宁	海盐
2013 年 35 kV 公用主变容量/万 kVA	15.25	3.2	9.6	25.3	13.6
2013 年 35 kV 公用线路长度/km	42.896	21.54	42.79	108.385	113.89
2013 年 10(20)kV 公用配变容量/万 kVA	93.713	82.33	130.5	97.12	72.686 5
2013 年 10(20)kV 公用线路长度/km	1 788.715	1 688.5	3 209.87	2 987.22	1 873.4
2013 年 0.4 kV 公用低压线路长度/km	2 600.473	2 954	4 585	3 642	2 935.338
2013 年售电量/亿 kWh	38.82	20.37	52.76	63.82	24.57
2014 年配网单体项目投资效益评价平均得分	71.01	71.9	70.55	70.53	71.01
2014 年实际批复的投资/万元	9 999.00	6 100.00	12 549.00	15 295.00	6 247.80
2014 年配网投资按式(3)分配的比例/%	19.15	15.96	23.83	24.42	16.65
2014 年投资按决策模型优化后分配的投资/万元	9 610.42	8 010.42	11 960.27	12 255.76	8 354.32

### 8 结语

本文从配电总体投资效益,单体项目投资效益,投资决策等方面全方位地建立了 35 kV 及以下配电网投资效益评价模型;提出“单位投资重载配电网线路下降条数”、“单位投资建成时间”、“线路单位投资增供电量”、“项目投入产出比率”等 19 项用于评价单体项目投资效益的新指标;提出计算指标得分的评分函数和计算配电网总体投资和单体项目投资的得分公式,根据投资效益评价得分高低判断配电网总体投资效益优良和安排单体项目投资优先顺序;提出以电网规模和售电量为基础,以年度单体项目投资效益评价得分高低为导向的县级供电公司年度投资资金分配比例计算方法。实例验证,该模型科学实用,对建立以投资效益为导向的配电网评价与投资决策工作体系有重要意义。

### 参考文献

[1] 羌丁建, 寿挺, 朱铁铭, 等. 高压配电网规划评价指标体系与综合评价模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 52-57.  
 QIANG Dingjian, SHOU Ting, ZHU Tieming, et al. An evaluation index system and comprehensive evaluation model on high-voltage distribution network planning[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 52-57.

[2] 刘若溪, 张建华, 吴迪. 基于风险理论的配电网静态安全性评估指标研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 89-95.  
 LIU Ruoxi, ZHANG Jianhua, WU Di. Research on static security index of distribution network based on risk theory[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 89-95.

[3] 马丽叶, 卢志刚, 常磊, 等. 基于灰色关联度的输电网经济运行指标体系研究[J]. 电力系统保护与控制,

2011, 39(12): 22-26.  
 MA Liye, LU Zhigang, CHANG Lei, et al. Study of index system of economic operation of grid based on gray correlation degree[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 22-26.

[4] 李金超, 牛东晓, 李金颖, 等. 基于 GRA 与 PCA 的电网发展协调性评估研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 49-53.  
 LI Jinchao, NIU Dongxiao, LI Jinying, et al. Evaluation of the power grid development coordination based on the GRA and PCA method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 49-53.

[5] 刘书铭, 李琼林, 陈栋新, 等. 中高压配电网非线性用户的电能质量特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 150-155.  
 LIU Shuming, LI Qionglin, CHEN Dongxin, et al. Study of power quality characteristics of nonlinear electric user in medium-high voltage distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 150-155.

[6] 李晓辉, 徐晶, 李达, 等. 基于层次分析的配电网可靠性评估指标体系[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(3): 69-74.  
 LI Xiaohui, XU Jing, LI Da, et al. Index system of reliability evaluation for distribution network based on analytic hierarchy process[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21(3): 69-74.

[7] 王成山, 王赛一, 葛少云, 等. 中压配电网不同接线模式经济性和可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(24): 34-39.  
 WANG Chengshan, WANG Saiyi, GE Shaoyun, et al. Economy and reliability analysis of different connection modes in MV distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24): 34-39.

[8] 张功林, 林韩, 温步瀛, 等. 中压配网主干线可靠性与经济性评估[J]. 华东电力, 2009, 37(8): 1355-1360.

- ZHANG Gonglin, LIN Han, WEN Buying, et al. Evaluation of the reliability and economy of the main lines of middle voltage power distributing network[J]. East China Electric Power, 2009, 37(8): 1355-1360.
- [9] 韩震焘, 黄志伟, 葛少云, 等. 城市配电网综合评价体系[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 95-99.
- HAN Zhentao, HUANG Zhiwei, GE Shaoyun, et al. A comprehensive evaluation system of urban distribution network[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 95-99.
- [10] 肖峻, 崔艳妍, 王建民, 等. 配电网规划的综合评价指标体系与方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(15): 36-40.
- XIAO Jun, CUI Yanyan, WANG Jianmin, et al. A hierarchical performance assessment method on the distribution network planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(15): 36-40.
- [11] 王琬, 刘宗岐, 曾博, 等. 大都市电网综合指标体系与评价模型[J]. 现代电力, 2011, 28(4): 24-28.
- WANG Wan, LIU Zongqi, ZENG Bo, et al. Comprehensive index system and evaluation model of power grid for metropolitan cities[J]. Modern Electric Power, 2011, 28(4): 24-28.
- [12] 李娟, 李晓辉, 刘树勇, 等. 基于理想解法和灰色关联度的配电网投资效益评价[J]. 华东电力, 2012, 40(1): 13-17.
- LI Juan, LI Xiaohui, LIU Shuyong, et al. Investment benefit evaluation for distribution network based on TOPSIS and grey correlation degree[J]. East China Electric Power, 2012, 40(1): 13-17.
- [13] 田廓, 张怡, 王尔康, 等. 电网建设项目投资决策评价研究[J]. 华东电力, 2009, 37(10): 1623-1626.
- TIAN Kuo, ZHANG Yi, WANG Erkang, et al. Evaluation of investment portfolio for grid projects[J]. East China Electric Power, 2009, 37(10): 1623-1626.
- [14] 闫庆友, 颀超. 基于实物期权的电网项目投资决策经济性评价[J]. 水电能源科学, 2010, 28(10): 145-147.
- YAN Qingyou, XIE Chao. Study on economic evaluation for grid investment based on real option method[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(10): 145-147.
- [15] 董军, 蒋雪. 计及外部效益的城市配电网项目评价研究[J]. 华北电力大学学报, 2010, 37(5): 62-67.
- DONG Jun, JIANG Xue. Comprehensive assessment of urban distribution network expansion considering externality[J]. Journal of North China Electric Power University, 2010, 37(5): 62-67.

---

收稿日期: 2014-04-09; 修回日期: 2014-10-29

作者简介:

刘胜利(1981-), 男, 通信作者, 本科, 工程师, 技师, 研究方向为电力系统规划设计、电网项目投资分析; E-mail: 329229873@qq.com

曹 阳(1968-), 男, 研究方向为电网规划设计及电网项目投资分析;

冯跃亮(1977-), 男, 从事电网发展建设管理工作。