

## 动态风险评价指标下的配电侧最优购电分配

柏小丽, 雷霞, 马一凯, 孔祥清

(西华大学电气信息学院, 四川 成都 610039)

**摘要:** 针对配电侧在场购电时, 很难处理好风险、收益及供电可靠性三个目标函数之间关系的问题, 提出衡量配电侧最优购电分配的评价指标。既考虑了对评价指标的主观及客观分析, 也考虑了购电时的决策影响和实时变化的动态风险。运用层次分析法、熵权法和贝叶斯方法给出购电分配的指标权重。评价指标下的收益和供电可靠性用升半梯形法作标准化处理, 风险则用降半梯形法标准化处理。所建立的模型能科学地处理配电侧购电风险、收益及供电可靠性三个目标函数之间相互影响且相互冲突的关系。

**关键词:** 配电侧; 层次分析法; 动态风险; 贝叶斯方法; 熵权法

### The optimal power allocation model for a distribution company considering evaluation index of dynamic risk

BAI Xiao-li, LEI Xia, MA Yi-kai, KONG Xiang-qing

(School of Electrical & Information, Xihua University, Chengdu 610039, China)

**Abstract:** This paper puts forward the indexes to estimate optimal electricity power allocation for a distribution company, because it is difficult to deal with the relationship among risk, income and power supply reliability when purchasing electricity power. The proposed model considers subjective and objective analysis for evaluation index, decision effect of power purchase, and real time dynamic risk. Index proportion of power allocation is given by AHP, entropy-weighting method, and Bayesian method. Income and power supply reliability under the proposed index are dealt with by Liker semi-trapezoidal, and risk by lower semi-trapezoidal. Thus the interaction and reciprocity relationship among risk, income and power supply reliability can be handled scientifically in distribution company.

**Key words:** distribution company; AHP; dynamic risk; Bayesian method; entropy-weighting method

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)05-0006-05

## 0 引言

随着电力市场改革的逐步推进及智能电网的提出, 原有垂直垄断经营的格局逐渐被打破, “发电、输电、配电”将按环节予以分离。这样, 配电侧变成了独立于发电企业的经济实体。从而配电公司作为终端用户的代表在电力市场购买电能, 然后销售给终端用户。但配电侧在购电时会面临很大的风险<sup>[1-2]</sup>, 特别是实时变化的动态风险。文献[3-10]以方差或者条件风险价值(CVAR)度量配电侧的购电风险, 主要建立了以配电公司的收益最大(或者购电成本最小)、风险最小为目标的最优购电模型, 但文中没有考虑配电公司的供电可靠性及配电公司面临的动态风险。文献[11-12]把配电公司利润最大

化为上层决策, 购电风险最小化作为下层决策, 且考虑配电侧的供电可靠性, 建立了二层规划模型, 以实现购售电的联合优化; 但文中只考虑了单一时段的静态风险。配电公司的购电策略是一个多阶段决策问题, 按不同阶段进行动态购电比一次性购电可更加有效地分散非系统风险。文献[13]建立了最小风险下的动态购电组合优化模型, 但文中对收益及可靠性没有细加分析。

从上面的文献可以看出, 配电公司的风险、收益及供电可靠性三者之间是相互影响且相互冲突的。一个目标性能的改善, 其代价往往是其他目标性能的恶化, 同时满足这三个指标的最优解是不存在的。基于此, 本文将配电公司的风险、收益及供电的可靠性作为评价配电侧在长期合同市场、短期合同市场及实时市场中购电分配是否最优的三个指标。运用层次分析法分析在时段 $t$ , 评价最优购电的三个指标的权重, 把这时的权重作为在时段 $t$ 评价最优购电分配的先验概率指标。考虑 $t$ 时段之前的

基金项目: 西华大学 2009 人才培养项目 (R0920906); 四川省科技厅科研项目 (2009JY0139); 西华大学研究生创新基金 (ycjj200934); 四川省电力电子重点学科项目 (SZD0503)

决策影响及实时动态风险, 运用熵权法, 求得在时段  $t$  前几个时段, 评价最优购电的三个指标的权重, 把这时的权重分配作为在时段  $t$  评价最优购电分配指标的条件概率指标。运用贝叶斯方法对先验概率进行动态修正, 得出实时风险且考虑决策影响时, 在  $t$  时段风险、收益及供电可靠性的权重即后验条件概率指标。通过这种方法得出的指标更能科学地评价配电侧的购电分配是否最优。

## 1 层次分析法

层次分析法<sup>[14-15]</sup> (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是 20 世纪 70 年代由美国匹兹堡大学教授 T.L.Saaty 提出的一种多准则决策方法。它的基本原理是将一个复杂的评价系统, 按其内在的逻辑关系, 以及评价指标为代表构成一个有序的层次结构, 然后针对每一层的指标, 运用专家或管理人员的专业知识、经验、信息和价值观, 对同一层次或同一域的指标进行两两比较, 并按规定的标度值构造比较判别矩阵。该方法已经在很多不同领域问题中被采用<sup>[13-18]</sup>。

### 1.1 配电侧最优购电分配的AHP表

根据配电侧最优购电分配的内涵, 建立了评价最优购电分配指标的层次结构表, 如表 1 所示。

表 1 最优购电分配指标层次结构表

Tab.1 The AHP chart of optimal purchase power allocation

|     |        |          |          |        |
|-----|--------|----------|----------|--------|
| 第一层 | 最优购电分配 |          |          |        |
| 第二层 | 指标     | 风险       | 收益       | 供电的可靠性 |
|     |        | 长期合同市场风险 | 长期合同市场收益 | 供电状态   |
| 第三层 | 基本指标   | 短期合同市场风险 | 短期合同市场收益 | 停电状态   |
|     |        | 实时市场风险   | 实时市场收益   | 停电的概率  |

### 1.2 成对比较判断矩阵的构造

配电侧最优购电分配的 AHP 模型如表 1 所示, 其中每一层中的各因素可用上一层的一个因素作为比较准则来作相互比较。通常采用两两比较的准则, 当采用上一层某一因素作为比较准则时, 可用一个比较标准  $z_{ij}$  来表达本层次中第  $i$  个元素与第  $j$  个元素的相对重要性。 $z_{ij}$  的取值一般取正整数 1~9 及其倒数, 这样由  $z_{ij}$  构成的矩阵称为成对比较判断矩阵, 如式 (1) 所示。

$$z = (z_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$z_{ij}$  的取值规则即评价目标相对重要性判断尺

度如表 2 所示。

表2 评价目标相对重要性判断尺度

Tab.2 The relative important scale judgment of evaluation objective

|           |    |    |    |    |    |            |
|-----------|----|----|----|----|----|------------|
| 标度        | 1  | 3  | 5  | 7  | 9  | 2, 4, 6, 8 |
| 因素 $z_i$  | 同等 | 明显 | 相当 | 强烈 | 极端 | 介于相邻       |
| 相比于 $z_j$ | 重要 | 重要 | 重要 | 重要 | 重要 | 尺度之间       |

### 1.3 权重确定及一致性检验

对于每一个成对比较判断矩阵  $Z$ , 显然有其相对应的特征值  $\lambda$  及其相对应的特征向量  $P$ , 且满足等式 (2):

$$ZP = \lambda P \quad (2)$$

由式 (2) 可以求出矩阵  $Z$  的最大特征值  $\lambda_{\max}$  及相对应的特征向量  $P_m$ 。对  $P_m$  进行归一化处理, 得到的向量可近视为同一层中各因素的权重向量。为了避免对指标进行两两比较时极端重要性的出现, 需要对矩阵  $Z$  做一致性检验, 通过计算一致性比例  $CR$  的大小来完成一致性检验, 当  $CR < 0.1$  时, 说明一致性检验通过, 否则成对比较判断矩阵不合理, 需要重新建立, 直至满足一致性检验标准  $CR$ 。其计算表达式为:

$$CR = CI / RI \quad (3)$$

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (4)$$

其中:  $CI$  为一致性指标;  $n$  为比较判断矩阵  $Z$  的阶数;  $RI$  为随机一致性指标, 其取值如表 3 所示。

表3 随机一致性指标RI取值

Tab.3 The value of RI

|      |   |   |      |     |      |      |      |      |      |
|------|---|---|------|-----|------|------|------|------|------|
| $n$  | 1 | 2 | 3    | 4   | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
| $RI$ | 0 | 0 | 0.58 | 0.8 | 1.13 | 1.34 | 1.42 | 1.31 | 1.45 |

## 2 熵权法

结合本文要解决的问题, 层次分析法有一个小的缺陷: 那就是 AHP 在两两比较重要性赋值时, 人为的主观因素要多一些。在遇到不确定性和模糊性因素较多的问题时, 很可能受到决策者主观判断的影响, 与实际情况偏差较大。而熵权法可以很好地客观衡量评价指标<sup>[19]</sup>, 避免主观确定方法带来的影响和干扰。

设第  $j$  项评价指标的信息熵:

$$e_j = -(\ln n)^{-1} \sum_{i=1}^n f_{ij} \cdot \ln f_{ij} \quad (5)$$

评价指标权重:

$$a_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{i=1}^m 1 - e_j} \quad (6)$$

其中:  $\sum_{j=1}^m a_j = 1$ ;  $\max e_j = 1$ ;  $f_{ij}$  为第  $j$  项指标下第  $i$  个被评价对象的指标比重。

### 3 贝叶斯方法

贝叶斯方法是计算概率的一种方法, 即认为一个事件会不会发生取决于该事件已经发生过的次数, 该理论分析方法是以前概率理论为基础, 通过对某一事件过去发生概率情况的考查, 大致可以推断出当前这一事件的发生概率。

在贝叶斯公式中, 有先验条件概率、条件概率和后验条件概率。先验概率指根据现实的资料或者主观上人们判断各事件发生的概率, 该类概率并没有经过实验证实; 条件概率是一个事件在另外一个事件已经发生条件下的发生概率; 后验概率指利用贝叶斯公式, 并通过调查等方式所得到的新的信息, 即它是对先验概率进行修改后所得到的接近于实际的概率。

由历史数据分析得到在时段  $t$ , 评价最优购电三个指标的概率  $p = \{p(x_i)\}$  被认为是先验条件概率指标; 时段  $t$  前几个时段实时风险下的三个指标概率  $p_{\alpha} = \{p(t| x_i)\}$  为条件概率。利用贝叶斯公式对先验条件概率指标进行动态修正, 求出在时段  $t$  实时动态风险下的三个指标的概率  $p_{xt} = \{p(x_i| t)\}$  即后验条件概率指标。动态修正后的评价指标概率为:

$$p(x_i| t) = \frac{p(x_i)p(t| x_i)}{\sum_{i=1}^m p(x_i)p(t| x_i)} \quad (7)$$

$p(x_i| t)$  构成修正后评价指标概率向量  $p_{xt}$ ,

$$p_{xt} = [p(x_1| t) \ p(x_2| t) \ \cdots \ p(x_m| t)] \text{ 且 } \sum_{i=1}^m p(x_i| t) = 1$$

## 4 算例分析

### 4.1 问题描述

#### 1) 配电公司的购电风险

本文采用常用的 CVaR 方法度量配电公司的购电风险。配电侧的购电风险为:

$$\hat{F}_{\alpha}(x_i, z_{\alpha}) \approx z_{\alpha} + \frac{1}{J(1-\alpha)} \times \sum_{j=1}^J [-x_i^T y_i^j - z_{\alpha}]^+$$

其中:  $i=1, 2, 3$ , 分别表示电力市场中的长期合同市场, 短期合同市场和实时市场;  $x_i$  为配电公司在电力市场中购电电量;  $y_i$  为购电电力市场中单位售购电电价差值;  $z_{\alpha}$  为损失函数在置信度水平为  $\alpha$

下的 VaR 值;  $\hat{F}_{\alpha}(x_i, z_{\alpha})$  为在置信度水平为  $\alpha$  下的 CVaR 值。

#### 2) 配电公司的售电收益

配电公司根据预测的用户用电量在长期合同市场和短期合同市场中购电。由于用户的实际用电量难以准确地确定, 当用户的实际用电量大于配电公司对用户的预测电量时, 配电公司需要在实时市场中购买这一部分电量的差值; 当用户的实际用电量小于配电公司对用户的预测电量时, 配电公司一般会将在合同市场中买来的多余电量转卖给其他的配电公司。

配电公司的售电收益为:

$$\pi = L_s^{cu} p - x_1 L_y^{cu} p_1 - x_2 L_y^{cu} p_2 - \varphi(L_s^{cu} - L_y^{cu}) p_3$$

其中:  $L_s^{cu}$  为用户的实际用电电量;  $L_y^{cu}$  为配电公司的预测电量;  $L_s^{cu} - L_y^{cu}$  为配电公司在实时市场的购电电量;  $x_1$  为配电公司根据预测的电量在长期合同市场中的购电电量比例;  $x_2$  为短期合同市场购电量在预测电量中的比例;  $p_1$  为长期合同市场的购电电价;  $p_2$  为在短期市场的购电电价;  $p_3$  为实时市场的购电电价;  $p$  为配电公司的售电电价;

$L_s^{cu} - L_y^{cu} < 0$  时,  $\varphi = 1$ ,  $L_s^{cu} - L_y^{cu} > 0$  时,  $\varphi = -1$ 。

#### 3) 配电侧的供电可靠性

为了防止配电公司为追求经济效益而牺牲用户的利益, 保证用户的用电可靠性, 避免某些偶然因素对用户用电造成影响及配电侧过多追求自己的收益而忽略用户的利益, 从而需要配电公司与用户签有可靠性协议, 在不满足可靠性要求的时候, 对用户进行赔偿; 在满足可靠性要求时, 对配电公司进行奖励。其奖惩的表达式为:

$$\psi = \rho_{\xi} \Delta \xi L_s^{cu} \eta^{cu}, \quad \rho_{\xi} = \begin{cases} 1 & \Delta \xi > 0 \\ 0 & \Delta \xi = 0 \\ -1 & \Delta \xi \leq 0 \end{cases}$$

其中:  $\Delta \xi$  为实际可靠性与协议可靠性的差值;  $\eta^{cu}$  为可靠性补偿价格。当  $\Delta \xi < 0$  时, 对配电公司惩罚;  $\Delta \xi > 0$ , 对配电公司进行奖励;  $\Delta \xi = 0$  对配电公司不惩罚也不奖励。本文假设配电侧有足够的电量提供给用户, 因此, 只考虑对配电侧的奖励。

综上所述, 本文要研究的目标函数为:

$$f(1) = \min[\hat{F}_{\alpha}(x_i, z_{\alpha})] \quad (8)$$

$$f(2) = \max(\pi) \quad (9)$$

$$f(3) = \max(\psi) \quad (10)$$

## 4.2 指标权重的确定

### 4.2.1 基于层次分析法的指标权重确定

由历史的数据的分析, 专家可以根据评估的重点, 确定在时段  $t$  评价最优购电分配不同准则之间的相对重要程度。以第一层中最优购电分配为比较准则, 建立第二层即评价最优购电分配指标层和指标层构成的判断表, 如表 4 所示。I 表示配电侧的购电风险, II 表示配电侧的售电收益, III 表示配电侧的供电可靠性。

表 4 最优购电指标的比较

|     | I | II  | III |
|-----|---|-----|-----|
| I   | 1 | 1/3 | 1/5 |
| II  | 3 | 1   | 1/4 |
| III | 5 | 4   | 1   |

由表 4 得到最优购电分配指标的比较判断矩阵为:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/5 \\ 3 & 1 & 1/4 \\ 5 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

运用 Matlab 求出矩阵  $\mathbf{Z}$  的最大特征值为: 3.085 8, 相对应的特征向量为:  $\mathbf{p}_m = [0.140\ 3\ 0.314\ 3\ 0.938\ 9]$ 。从而计算出  $CI=0.042\ 9$ , 查表 3 得  $RI=0.58$ , 由此计算出  $CR=0.073\ 966 < 0.1$ 。对特征向量  $\mathbf{p}_m$  归一化后得到评价最优购电分配的指标的权重为:  $[0.100\ 7\ 0.225\ 5\ 0.673\ 7]$ 。

### 4.2.2 基于熵权法的评价指标权重确定

配电公司根据不同时间段的电力市场变化和用户用电需求, 按不同的时间间隔进行购电, 因而每一个时段的购电量、风险及风险下的决策都是在变化的。在时段  $t$  的实时风险下, 我们很难准确地分配最优购电的权重, 以此来评价时段  $t$  配电侧的购电分配是否最优。但我们可以考查在时段  $t$  前几个时段的风险变化、配电侧的购电分配决策心理, 从而来确定在动态风险下, 时段  $t$  评价配电公司最优购电分配的指标。

设  $\mathbf{X}$  为配电侧最优购电分配的三个评价指标与时段  $t$  前四个时段的样本估算矩阵 (单位 \$), 则

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 43000 & 35000 & 3200 \\ 45000 & 36000 & 3700 \\ 50000 & 38000 & 4000 \\ 40000 & 29000 & 2500 \end{bmatrix} \quad (12)$$

经熵权法计算后, 在  $t$  时段之前的 4 个时段的评

价指标权重为:  $[0.142\ 0\ 0.213\ 0\ 0.645\ 0]$ 。

### 4.2.3 修正后的指标权重

经贝叶斯方法修正后, 得到考虑决策影响时, 在实时风险下时段  $t$  评价最优购电分配指标的权重为:  $[0.0288\ 0.0968\ 0.8744]$ 。

### 4.3 评价指标下的最优购电分配

配电公司的购电策略是一个多阶段决策问题, 按不同阶段进行动态购电比一次性购电可更加有效地分散非系统风险, 因此把一天分为若干个时段  $t$  ( $t=1, 2, 3, \dots, N$ )。本文假设电力市场的电价服从分段正态分布<sup>[20]</sup>, 在时段  $t$  长期合同市场购电电价的均值为 36 \$/MWh, 方差为 15 \$/MWh; 短期合同市场购电电价的均值为 38 \$/MWh, 方差为 16 \$/MWh; 实时市场购电电价均值为 40 \$/MWh, 方差为 18 \$/MWh; 预测电量为 7 000 MWh, 用户的实际用电量服从均值为 7 000 MWh, 方差为 1 000 MWh 的正态分布。售电电价为 42 \$/MWh,  $\eta^{cu}$  取 10 \$/MWh,  $\Delta\xi$  取 0.065。在  $\alpha=95\%$  (配电侧即不厌恶风险也不偏好风险) 时, 研究在满足最优购电评价指标下的配电侧购电量分配。

配电侧的风险、收益和可靠性都要根据配电公司的要求作标准化的处理。本文采用升半梯形和降半梯形作为标准化方法, 如图 1 所示。对于售电收益和可靠性用升半梯形作标准化处理, 其参数分别为:  $a_1=29\ 970$ ,  $a_2=70\ 000$  和  $a_1=1\ 000$ ,  $a_2=6\ 000$ ; 对风险采用降半梯形作标准化处理, 其参数为:  $a_1=34\ 544$ ,  $a_2=70\ 000$ 。

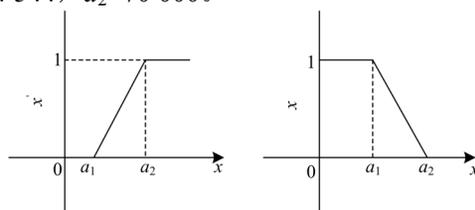


图 1 升半梯形及降半梯形

Fig.1 Liter semi-trapezoidal and lower semi-trapezoidal

经分析, 当配电侧在长期合同市场的购电电量为 5 340 MWh, 短期合同市场的购电电量为 1 660 MWh, 实时市场的购电电量为 230 MWh 时, 配电侧达到所要求指标下的最优电量分配。

## 5 结语

在配电侧的最小化风险、最大化收益、供电可靠性最好三者之间相互影响且相互冲突的基础上, 把配电侧的风险、收益及可靠性作为评价配电侧购电分配是否最优的三个指标。运用层次分析法、熵权法及贝叶斯方法来确定评价指标的权重, 通过这

种方法确定的指标权重,既考虑到了层次分析法对目标层的主观评价、熵权法对目标层的客观评价,也考虑到了时段 $t$ 之前的决策影响及动态风险,经修正后的指标更能准确地评价在时段 $t$ 配电侧的购电分配是否最优。在算例的分析中,采用升半梯形和降半梯形法,对配电侧的风险、收益及供电可靠性作标准化处理,从而得到要求指标下的最优购电电量分配。

电力工业改革的深入及世界范围内智能电网的提出,如何根据各个电网自身的特色,来分析电价在智能电网的大环境下,如何更科学、更实际地对配电侧的购电分配进行评估和分配,以实现电力资源更高效的利用,还需要进一步的研究。

参考文献

[1] 朱兆霞, 邹斌. 市场环境下配电公司的风险模型及负荷率的影响分析[J]. 继电器, 2007, 35(12): 56-60.  
ZHU Zhao-xia, ZOU Bin. The risk model of distribution utilities and analyzing the infection[J]. Relay, 2007, 35(12): 56-60.

[2] 雷霞, 刘俊勇, 党晓强. 配电市场购售电优化模型研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (2) : 136-145.  
LEI Xia, LIU Jun-yong, DANG Xiao-qiang. Review of optimal models of purchase and sale in distribution electricity market[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38 (2) : 136-145.

[3] Woo C K, Karimov R I, Horowitz I. Managing electricity procurement cost and risk by a local distribution company[J]. Energy Policy, 2004, 32 (5) : 635-645.

[4] Liu Y, Guan X H. Purchase allocation and demand bidding in electric power markets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (1) : 106-112.

[5] Woo C K, Horowitz I, Olsson A, et al. Efficient frontiers for electricity procurement by an LDC with multiple purchase options[J]. Omega, 2006, 34 (1) : 70-80.

[6] 谢品杰, 谭忠富, 王绵斌, 等. 基于CVAR的供电公司现货市场购电优化决策模型[J]. 电工技术学报, 2009, 24 (4) : 186-192.  
XIE Pin-jie, TAN Zhong-fu, WANG Mian-bin, et al. Spot market optimal decision-making model of purchase electricity for power-supplying company based on CVAR model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24 (4) : 186-192.

[7] 郭金, 江伟, 谭忠富. 风险条件下供电公司最优购电问题研究[J]. 电网技术, 2004, 28 (11) : 18-22.  
GUO Jin, JIANG Wei, TAN Zhong-fu. Research on optimized power purchasing of power suppliers under risk condition[J]. Power System Technology, 2004, 28 (11) : 18-22.

[8] 王金凤, 李渝曾, 张少华. 期权交易对供电公司购电组合的影响[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 30-33.  
WANG Jin-feng, LI Yu-zeng, ZHANG Shao-hua. Effects of options trade on purchasing portfolio for load serving entities[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (3) : 30-33.

[9] 张钦, 王锡凡, 王秀丽, 等. 需求侧实时电价下用户购电风险决策[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (13) : 16-20.  
ZHANG Qin, WANG Xi-fan, WANG Xiu-li, et al. Customers electricity purchasing risk decision integrating demand side real-time pricing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (13) : 16-20.

[10] DAHL GREN R, LIU C C, LAWARRREE J. Risk assessment in energy trading[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (3) : 503-511.

[11] 雷霞, 刘俊勇, 杨可, 等. 基于2层规划并计及风险的配电网最优购售电模型[J]. 电力自动化设备, 2008, 28 (12) : 64-67.  
LEI Xia, LIU Jun-yong, YANG Ke, et al. Optimal purchase and sale models of distribution network based on bilevel programming and risk consideration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28 (12) : 64-67.

[12] 雷霞, 刘俊勇, 都亮, 等. 基于随机机会约束规划的最优电价决策[J]. 电工技术学报, 2008, 23 (12) : 173-177.  
LEI Xia, LIU Jun-yong, DU Liang, et al. Optimal price determination based on stochastic chance-constrained programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23 (12) : 173-177.

[13] 王绵斌, 谭忠富, 关勇, 等. 基于分形条件风险价值的供电公司动态购电组合模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (16) : 50-54.  
WANG Mian-bin, TAN Zhong-fu, GUAN Yong, et al. Dynamical power purchasing model for power supply company based on fractal conditional value at risk[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (16) : 50-54.

[14] Saaty T L. The analytic hierarchy process[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1980.

[15] 冯义, 李洪东, 田廓, 等. 基于熵权和层次分析法的电力客户风险评估及其规避[J]. 继电器, 2007, 35(24): 66-70, 73.  
FENG Yi, LI Hong-dong, TIAN Kuo, et al. Risk evaluation and avoidance of electric customers based on entropy weight and AHP[J]. Relay, 2007, 35(24): 66-70, 73.

Protection and Control, 2010, 38(1): 145-151.

[7] 王同勋, 薛禹胜, Choi S S. 动态电压恢复器研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (9) : 101-107.  
WANG Tong-xun, XUE Yu-sheng, Choi S S. Review of dynamic voltage restorer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (9) :101-107.

[8] 王德发, 丁洪发. 基于不对称级联型多电平逆变器的动态电压恢复器研究[J]. 继电器, 2007, 35(13): 49-52.  
WANG De-fa, DING Hong-fa. Simulation of dynamic voltage restorer based on asymmetry cascade multilevel inverter[J]. Relay, 2007, 35(13): 49-52.

[9] Jauch T, Kara A, Rahmani M, et al. Power quality ensured by dynamic voltage correction[J]. ABB Review, 1998, 4: 25-36.

[10] Choi S S, Li B H, Vilathgamuwa D M. Dynamic voltage restoration with minimum energy injection[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15 (1) : 51-57.

[11] Li B H, Choi S S, Vilathgamuwa D M. A new control strategy for energy-saving dynamic voltage restoration[C]. //Proceeding of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle,USA, 2000, 2: 167-181.

[12] 冯小明, 杨仁刚. 动态电压恢复器电压补偿策略的研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (6) : 68-72.

FENG Xiao-ming, YANG Ren-gang. Analysis of voltage compensation strategies for dynamic voltage restorer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (6) : 68-72.

[13] Vilathgamuwa D M, Perera A A D R, Choi S S. Voltage sag compensation with energy optimized dynamic voltage restorer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18 (3) : 928-936.

[14] Nielsen J G, Blaabjerg F. A detailed comparison of system topologies for dynamic voltage restorers[J]. IEEE Transaction on Industry Application, 2005, 41 (5) : 1272-1280.

收稿日期: 2010-03-25; 修回日期: 2010-05-21

作者简介:

党存禄 (1964-), 男, 教授, 本科, 主要研究方向为电气传动、谐波抑制与无功补偿、电压跌落补偿; E-mail: dcl\_1964@163.com

严 鋈 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电压跌落补偿;

张晓英 (1973-), 女, 副教授, 硕士, 主要研究方向为电力系统自动化。

(上接第 5 页 continued from page 5)

LIU Yu-ming. Distribution network fault diagnosis and rapid power restoration algorithms[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.

[18] Lee K Y, Park Y M, Ortiz J L. A united approach to optimal real and reactive power dispatch[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1985, 104 (5) : 1147-1153.

[19] Debapriya Das. A fuzzy multiobjective approach for network reconfiguration of distribution systems[J]. IEEE

Trans on Power Delivery, 2006, 21 (1): 202-209.

收稿日期: 2010-03-23; 修回日期: 2010-05-19

作者简介:

李 伟 (1968-), 男, 教授, 在读博士, 研究方向为电力经济分析、技术经济评价理论与应用;

张振刚 (1977-), 男, 经济师, 硕士, 研究方向为电力经济分析、技术经济评价理论与应用。E-mail: zhangzhengangwf@126.com

(上接第 10 页 continued from page 10)

[16] Lee Y, Kozar K A. Investigating the effect of website quality on business success: an analytic hierarchy process approach[J]. Decision Support Systems, 2006, 42 (3) : 1383-1401.

[17] Ngai E W T. Evaluation of knowledge management tools using AHP[J]. Expert Systems with applications, 2005, 29 (4) : 889-899.

[18] Bertolini M, Braglia M. Application of the AHP methodology in making a proposal for a public work contract[J]. International Journal of Project Management, 2006, 24 (5) : 422-430.

[19] Odum H T. Systems ecology: an introduction[M]. New York: John Wiley & Sons, 1982.

[20] 刘西陲, 沈炯, 李益国. 系统边际电价概率分布检验

及模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (4) : 72-77.

LIU Xi-chui, SHEN Jiong, LI Yi-guo. Study on probability distribution and model of system marginal price[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (4) : 72-77.

收稿日期: 2010-03-23; 修回日期: 2010-05-15

作者简介:

柏小丽 (1985-), 女, 硕士研究生, 主要从事电力市场的研究; E-mail: bxueer2003@eyou.com

雷 霞 (1973-), 女, 博士, 硕士生导师, 主要从事配电自动化和电力市场的研究。E-mail: snow\_lei246@sina.com