

# 基于无功功率波动系数的无功功率考核方法

张英, 李晓明, 朱帅, 邵笔贵

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 针对现行的均权平均功率因数考核方法不能反映用户无功功率负荷特性, 不能对影响电能质量的用户加收改善电能质量的电费问题, 提出了一种基于波动系数的无功功率考核方法。该方法通过动态无功补偿装置或专用的无功检测设备, 记录无功功率的变化规律, 根据设定的无功功率允许波动范围, 将超出范围的不同时段无功功率波动陡度系数与幅度系数乘积的和定义为无功功率波动系数。采用与电费收费对应时段内无功功率波动系数与均权平均功率因数共同对用户的无功功率进行考核, 促使用户主动改善电能质量, 提高电能的使用效率。

**关键词:** 无功功率; 波动系数; 功率因数; 考核方法

**中图分类号:** TM714.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2004)24-0020-05

## 0 引言

随着社会的进步和国民经济的发展, 一方面影响电能质量问题的因素不断增多, 如以电力电子装置为代表的非线性负荷的使用, 各种大型用电设备的启停; 另一方面, 各种复杂精密的对电能质量敏感的用电设备的不断普及, 人们对电能质量的要求越来越高。而电能作为一种特殊的商品, 其质量的优劣不仅取决于电能的生产和传输环节, 同时还要受到用电设备的影响。近年来, 随着我国电网规模不断扩大和用电水平逐年提高, 大量干扰性负荷也不断接入电网, 它们对电能质量产生了不同程度的影响, 严重时还危及电网和其它用电设备的安全。

## 1 我国无功电源的结构

伴随着我国经济的快速发展, 对电能的需求越来越大, 2000年底全国装机容量达到3.19亿kW<sup>[1]</sup>。从无功功率宏观角度来看, 一个装机容量1000万kW的电力系统, 同时也可以认为是一个装置容量为1200~1500万kvar的无功功率系统在运行<sup>[2]</sup>, 由此可见电力系统对无功容量的需求是巨大的。根据20世纪后20年国内几个电网的统计资料, 我国无功电源的结构大致如表1所示。

表1 无功电源的结构

Tab. 1 Structure of reactive power source

无功电源	占有率(目前)/(%)	占有率(趋势)/(%)
发电厂	60~85	45~50
充电功率	5~10	5~10
补偿设备	15~20	18~22
用户补偿	10~15	24~29

因为无功功率在电网中传输不仅增加网络损耗, 同时还产生电压损耗, 所以必须努力实现无功就地平衡。近年来随着《功率因数调整电费办法》的实施, 用户对无功功率越来越重视, 在负荷端安装了大量无功补偿设备, 改变了整个无功电源的结构。由表1可知, 分布在用户端的无功补偿设备的容量将越来越大, 这对实现无功就地平衡起了巨大作用。但同时, 用户受经济状况、管理经验等原因的制约, 许多无功补偿设备与负荷补偿要求不符, 如某些需要动态补偿的场合却使用了静态补偿设备, 其滞后于补偿要求的投入、切除不但达不到良好的补偿效果, 有时甚至对电网造成额外的冲击。并且, 大量用户对于无功补偿设备只重装, 不重管的态度使得众多无功补偿设备的运行状况令人担忧。

## 2 均权平均功率因数考核的不足

由于无功功率的特殊性: 无功电源多、分布广; 传输无功不经济等, 造成对无功的考核是一个比较复杂的问题。目前我国和许多国家根据均权平均功率因数对无功进行考核: 用户功率因数高于某一规定值则减免一定比例电费, 如低于某一规定值则必须多缴一定比例电费。这种方法简单易行, 极大地促进了无功功率的就地平衡。但随着要求公平、公正、公开的电力市场的逐步建立以及用户对电能质量要求越来越高, 均权平均功率因数考核办法中的一些不足也渐渐显现出来。

功率因数考核办法采用均权平均功率因数的定义<sup>[3]</sup>:

$$\cos = \frac{W_P}{\sqrt{W_P^2 + W_Q^2}} \quad (1)$$

式中:  $W_P$  为考核时段内有功电量;  $W_Q$  为考核时段内无功电量。

式(1)的实质是定义某一规定时间(即考核时段)内功率因数的均权平均值。均权平均功率因数通过考核有功总量在有功与无功总量中占的比重,间接考核了一段时间内无功总量。但是它不能反映这段时间内无功功率负荷特性,即两个相同均权平均功率因数的用户,可能它们的无功功率负荷特性差异很大,而不同的无功功率负荷特性对电网造成的影响不同。

图1(a)、(b)分别是甲乙两个用户在相同的某段时间内无功功率负荷特性图(假设两个用户在这段时间内有功、无功需求总量相同,即有相同的均权平均功率因数)。

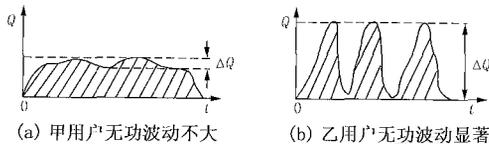


图1 无功功率负荷特性差异

Fig.1 Difference of load characteristics on reactive power

图2(a)为输电线路的等值模型,(b)为其向量图。

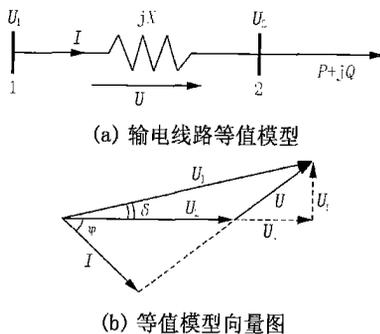


图2 输电线路等值模型及向量图

Fig.2 Equivalent model and vector diagram of transmission line

$U_1$ 、 $U_2$  分别为节点1、2处母线电压向量,  $U$  为线路压降向量,  $I$  为线路电流向量,  $jX$  为线路电抗(高压供电系统可忽略线路电阻),  $P+jQ$  为负荷的复功率,  $\delta$  为供电线路功率角,  $\varphi$  为负荷阻抗角,于是可得负荷波动与电压变化之间的关系式<sup>[4]</sup>

$$U_x = X I \sin = X \frac{Q}{U} \quad (2)$$

$$U_y = X I \cos = X \frac{P}{U} \quad (3)$$

由图2、式(2)和式(3)可知,电压变动量的幅值变化可近似地以  $U_x$  的大小来衡量,主要由无功功率变动量  $Q$  引起;电压变动量的相角变化可近似地以  $U_y$  的大小来衡量,主要由有功功率变动量  $P$  所导致。

由图1可知,虽然甲乙两个用户需求无功总量相同,但甲用户波动无功功率  $Q$  保持为较低的值且变化平稳,而乙用户波动无功功率  $Q$  较大且带有冲击性。又由图2及式(2)可知,甲用户平缓的无功功率需求使线路压降维持在一个较低且稳定的水平,有利于系统安全稳定运行,没有对同一母线上其它负荷造成不良影响。而乙用户冲击性无功功率造成线路压降急剧增大、减小,引起母线电压波动、闪变,甚至造成电压跌落,危害系统安全稳定运行,严重影响母线上其它负荷的电能质量,产生破坏性后果。

据统计,自动化程度高的工业用户一般每年要遭受10~50次与电能质量问题有关的干扰,其中因包括电压波动和闪变在内的动态电能质量问题造成的事故约占事故总数的83%<sup>[5]</sup>。用户无功功率负荷特性的不同,对电网造成的危害,对电能质量的影响程度也不同,因此必须对基于均权平均功率因数的无功功率考核办法加以完善。

### 3 基于无功功率波动系数的无功功率考核

#### 3.1 无功功率波动系数的定义

考核无功功率的波动性,主要是考核波动的陡度与幅度两个指标。因为在波动幅度( $q$ )一定时,经历的时间( $t$ )越短,即波形越陡,对电压影响越大。同理,当陡度一定时,波动幅度( $q$ )越大,对电压影响也越大。对于陡度可考虑用陡度系数  $k_i$  表征,对于幅度( $q$ ),可设定一系列( $q$ )取值范围, ( $q$ )处于不同范围时,对应幅值系数  $a_i$  不同的取值,如表2所示。

表2 幅值系数取值表

Tab.2 Span of amplitude coefficients	
$q$ 取值范围	幅值系数 $a_i$ 取值
0 $q < q_1$	0
$q_1$ $q < q_2$	$x_1$
$q_2$ $q < q_2$	$x_2$
...	...

表中  $x_1$ 、 $x_2$ 、..随着  $q$  值的增大,其值也呈增

大趋势。

定义无功功率波动系数  $K$  为所有幅值系数  $a_i$  与相应的陡度系数  $k_i$  乘积的和。

$$\text{即} \quad K = \sum_{i=1}^n i k_i \quad (4)$$

### 3.2 无功功率波动系数的计算

对于某负荷在无功需求总量一定的情况下,理论上来说,瞬时无功功率  $q(t)$  保持恒定,反映在无功负荷曲线上为一水平直线是最理想的。但在实际情况下,瞬时无功功率  $q(t)$  不可能,也没有必要保持恒定,而是允许在一定范围内波动(因为电压有一定的允许波动范围)。基于这种思想并考虑到电力系统无功功率无时不在波动的实际状况,可采取在  $q$  轴上设定一系列观测值  $0, q_1, q_2 \dots q_n$ , 形成  $0 \sim q_1, q_1 \sim q_2 \dots q_{n-1} \sim q_n$   $n$  个区间段( $n$  个区间段可等长,也可根据实际情况不等长)的方法,对  $k_i$  与  $a_i$  的计算进行简化,如图 3 所示。

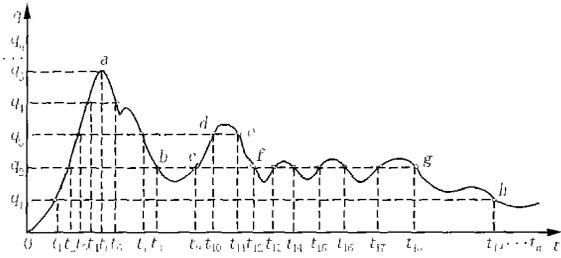


图 3 某负荷无功功率负荷曲线

Fig. 3 Load curve of some reactive power

图 3 中,  $0 \sim t_{19}$  时间段内无功功率波动陡度系数  $k_i$  与幅值系数  $a_i$  可以分成  $oa$ 、 $ab$ 、 $bc$ 、 $cd$ 、 $de$ 、 $ef$ 、 $fg$ 、 $gh$  等 8 段求取。分段的原则是:用检测装置实时检测无功功率  $q(t)$  的值,当检测到  $q(t)$  达到设定的观测值时记录下相应的时刻以及当时的无功功率值,例如  $t_0$  与  $q_{t_0}$  (为计时起点时刻设为 0 值,  $q_{t_0}$  为与之对应的无功功率),  $t_1$  与  $q_{t_1} \dots t_j$  与  $q_{t_j}$ ,  $t_{j+1}$  与  $q_{t_{j+1}} \dots t_n$  与  $q_{t_n}$ 。无功功率后一记录值  $q_{t_{j+1}}$  始终与前一记录值  $q_{t_j}$  进行比较,将  $q_{t_{j+1}}$  与  $q_{t_j}$  的比较结果保持为恒定趋势(恒大于,恒等于,恒小于)的一段作为求取  $k_i$  与  $a_i$  的分段。

每一段的陡度系数  $k_i$  按下式计算:

$$k_i = \frac{|q_{\max} - q_{\min}|}{|t_{\max} - t_{\min}|} \quad (5)$$

式中:  $q_{\max}$ 、 $q_{\min}$  为每一段记录下的最大、最小无功功率值,  $t_{\max}$ 、 $t_{\min}$  为分别与  $q_{\max}$ 、 $q_{\min}$  对应的时刻。

幅值系数  $a_i$  根据  $q = |q_{\max} - q_{\min}|$  在表 2 中所处的区间取相应的值。

根据上述方法,图 3 中  $k_i$  与  $a_i$  的计算举例如下:

$$1) \quad k_1 = \frac{|q_{t_5} - q_{t_0}|}{|t_5 - t_0|} = \frac{q_{t_5}}{t_5} = \frac{q_5}{t_5}, \quad a_1 \text{ 根据 } q = |q_{t_5} - q_{t_0}| = q_5 \text{ 的值在表 3 中取值;}$$

$$2) \quad k_2 = \frac{|q_{t_5} - q_{t_8}|}{|t_5 - t_8|} = \frac{q_5 - q_2}{t_5 - t_8}, \quad a_2 \text{ 根据 } q = |q_{t_5} - q_{t_8}| = |q_5 - q_2| \text{ 的值在表 3 中取值;}$$

$$3) \quad k_3 = \frac{|q_{t_9} - q_{t_8}|}{|t_9 - t_8|} = \frac{q_2 - q_2}{t_9 - t_8} = 0, \quad a_3 \text{ 根据 } q = |q_{t_9} - q_{t_8}| = |q_2 - q_2|, \text{ 取 0 值;}$$

...

$k_4$  与  $a_4$ ,  $k_5$  与  $a_5$ ,  $k_6$  与  $a_6$ ,  $k_7$  与  $a_7$ ,  $k_8$  与  $a_8$  同理可得。

因此,  $0 \sim t_{19}$  时间段内某负荷无功功率波动系数  $K = \sum_{i=1}^8 a_i k_i$ 。

通过上面的计算,可以发现点 ( $q = q_{t_5}$ 、 $t = t_5$ )、 $b$  ( $q = q_{t_8}$ 、 $t = t_8$ ) ...  $h$  ( $q = q_{t_{19}}$ 、 $t = t_{19}$ ) 等 8 个点是一些重要的数据点,是分段的转折点,在这里称之为分段点。

通常为将曲线进行线性化,采用的是按曲线的极值点进行分段线性化的方法,即曲线上相邻的极大值与极小值之间的曲线段用一直线段代替。而由图 3 以及上面的计算可知,本文为求取陡度系数  $k_i$  采用的将曲线线性化的方法与通常方法不同,是将曲线在大范围内进行分段线性化(而不是根据极值点分段线性化),与采用通常线性化方法相比,采用这种方法求取陡度系数  $k_i$  一方面减少了数据处理量,另一方面所得的陡度系数  $k_i$  更能比较准确地反映无功功率波动的大趋势,并且符合电力系统允许无功功率在一定范围内波动的实际状况。如图 3 曲线  $bc$ 、 $de$ 、 $fg$  段所示,当无功功率波动较小,在允许范围之内(可通过  $0, q_1, q_2 \dots q_n$  的设定来确定允许波动范围)时,陡度系数  $k_i$  与幅值系数  $a_i$  皆为 0,即  $a_i k_i$  的乘积为 0,不对波动系数  $K$  产生任何影响。

另外,为防止  $t = |t_{\max} - t_{\min}|$  过小,导致  $k_i$  过大,淹没了波动幅值系数  $a_i$ ,可设定  $t$  的下限值  $t_{\min}$ ,当  $t < t_{\min}$  而  $q = |q_{\max} - q_{\min}| > 0$  时,令  $k_i = k_{\text{设定值}}$ 。 $k_{\text{设定值}}$  的值需依据实际突变的无功功率对母线电压造成的危害程度确定。波动系数  $K$  也适用于负荷向系统倒送无功的情况。

### 3.3 计及无功功率波动的无功功率考核办法

由上述可知,波动系数  $K$  实质是无功功率负荷

曲线分段线性化后综合考虑功率波动的陡度与幅度的结果。其中  $k_i$  反映了分段曲线波动的陡度,  $a_i$  体现了波动的幅度, 将  $a_i$  与  $k_i$  相乘后进行累加所得的波动系数  $K$  在一定程度上体现了无功功率负荷特性的总体波动性。所以根据  $K$  值考核无功功率波动对电网产生的不良影响的大小是合理而且科学的。因此提出一种基于无功功率波动系数的无功功率考核办法。即在原有依据均权平均功率因数收费的基础上, 根据对用户实测的  $K$  值, 对照电力部门设定的无功功率波动系数  $K$  值表, 进一步调整电费, 加收的电费用以补偿用户对电压质量产生的不良影响。收费办法如表 3 所示。

表 3 计及无功波动的收费办法

Tab.3 Means of charge considering reactive power fluctuation

$K$ 值范围	收费办法
$0 < K < K_1$	不另收费
$K_1 < K < K_2$	加收原电费 $y_1\%$
$K_2 < K < K_3$	加收原电费 $y_2\%$
...	...

表 3 中, 当  $0 < K < K_1$  时, 无功功率的波动对母线电压没有产生不良影响或影响很小可忽略, 所以不再附加收费。 $y_1\%$ 、 $y_2\%$  对应于供电部门加收的原电费的百分数, 该值由供电部门与物价局共同确定。

### 3.4 基于无功功率波动系数的无功功率考核办法的优点

1) 在原有均权平均功率因数的基础上, 附加考核了无功功率的波动, 按照对电网的危害程度附加惩罚性收费, 在市场环境下体现了公平的原则。

2) 利用经济杠杆促使用户加强对容量越来越大的用户端无功补偿设备的管理, 使无功补偿设备性能与负荷要求相符合, 达到良好的补偿效果, 履行用户对电能质量的提高应尽的义务和责任。

3) 有利于进一步改善电能质量, 确保系统安全稳定运行。

## 4 应用举例

图 4 为一电弧炉无功补偿前后的无功功率波形图<sup>[6]</sup>。

设定的观测值分别为  $0$ 、 $q_1 = 16$  Mvar、 $q_2 = 32$  Mvar、 $q_3 = 48$  Mvar、 $q_4 = 64$  Mvar、 $q_5 = 80$  Mvar。现分别计算电弧炉无功补偿前后的无功功率波动系数, 根据前面叙述对于补偿前的无功功率, 记录装置记录下  $t_0$  和  $q_{t_0}$ 、 $t_1$  和  $q_{t_1}$ 、 $t_2$  和  $q_{t_2}$  .. 等一系列数值, 由于数据量太大, 下面仅将分段点的  $q$  值与  $t$  值列于

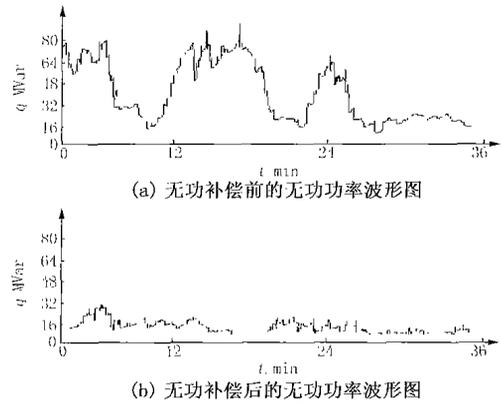


图 4 电弧炉无功功率波形图

Fig. 4 Curves of reactive power on arc furnace

表 4 (设分段点为  $a$ 、 $b$ 、 $c$  .., 相应的值为  $t_a$  和  $q_{t_a}$ 、 $t_b$  和  $q_{t_b}$ 、 $t_c$  和  $q_{t_c}$  .. 等, 为简化计算时间  $t$  取整数)。

同理, 将补偿后分段点的值列于表 5 (设分段点为  $a$ 、 $b$ 、 $c$  ..)。

表 4 无功补偿前分段点数值表

Tab.4 Span of turning point without reactive power compensation

$t_0$	$t_a$	$t_b$	$t_c$	$t_d$	$t_e$	$t_f$	$t_g$	$t_h$	$t_i$	$t_j$	$t_k$
0	4	5	9	10	16	18	20	24	25	27	28
$q_{t_0}$	$q_{t_a}$	$q_{t_b}$	$q_{t_c}$	$q_{t_d}$	$q_{t_e}$	$q_{t_f}$	$q_{t_g}$	$q_{t_h}$	$q_{t_i}$	$q_{t_j}$	$q_{t_k}$
48	48	16	16	48	48	64	16	16	48	48	16

表 5 无功补偿后分段点数值表

Tab.5 Span of turning point under reactive power compensation

$t_0$	$t_a$	$t_b$	$t_c$	$t_d$	$t_e$
0	1	10	14	18	19
$q_{t_0}$	$q_{t_a}$	$q_{t_b}$	$q_{t_c}$	$q_{t_d}$	$q_{t_e}$
0	16	16	0	0	16

无功功率  $q$  的单位为 Mvar; 时间  $t$  的单位为 min。

设  $q = 0$  对应的幅值系数为 0;  $q = 16$  Mvar 对应的幅值系数为 0.01;  $q = 32$  Mvar 对应的幅值系数为 0.02;  $q = 48$  Mvar 对应的幅值系数为 0.04。

根据以上数据以及公式 (4)、(5) 可计算出电弧炉在无功补偿前的无功波动系数为 3.6, 而无功补偿后的无功波动系数为 0.36。由此可见波动系数能从数值上反映图 4 所体现的二者在波动性上的巨大差异, 为电力部门对一些影响电网电压质量的波动性负荷进行惩罚性收费提供了依据, 并且证明了无功补偿的重要性, 利用经济杠杆促使用户合理地进行无功补偿。

## 5 结束语

虽然国家有关部门制定了《电能质量 电压允许波动和闪变》等一系列电能质量标准,规定了用电设备对电能质量各方面造成的不良影响的允许值,但在现实状况中由于缺乏有效的制约措施,并不能很好地督促电力用户在使用电能的同时,最大限度地减少对电网安全稳定运行的危害和对电能质量的污染。在市场经济条件下,应该合理地运用经济杠杆,督促电力用户履行相应的义务与责任。计及无功功率波动的无功功率考核方法不仅完善了原有的无功功率考核办法,并且对考核电能质量其它参数也有一定的借鉴意义。

### 参考文献:

- [1] 赵希正(ZHAO Xi-zheng). 中国电力负荷特性分析与预测(The Analysis and Forecast on the Characteristics of Chinese Power Load) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 2001.
- [2] 陆安定(LU An-ding). 发电厂变电所及电力系统的无功功率(The Reactive Power of Power Plant and Transformer Station and Electric Power System) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing:China Electric Power Press), 2003.

- [3] 水利电力部,国家物价局(The Ministry of Hydraulic and Electric Power, The Bureau of National Price). 功率因数调整电费办法(The Means of Adjust Electric Rate on the Basis of Power Factor) [Z].
- [4] 孙树勤(SUN Shu-qin). 电压波动与闪变(Voltage Fluctuation and Flicker) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 1998.
- [5] Taylor G A, Burden A B. Wide Area Power Quality decision Processes and Options for Sensitive Users [J]. CIREQ97, 1997:2-5.
- [6] 刘维民,周登红,王建红(LIU Wei-min, ZHOU Deng-hong, WANG Jian-hong). 国产-45 Mvar ~ +50 Mvar 静止型动态无功补偿装置及其应用(The Use of Native -45Mvar ~ +50Mvar SVC) [J]. 电力电容器(Power Capacitor), 1999, (1):16-23.

收稿日期: 2004-04-27; 修回日期: 2004-08-18

### 作者简介:

张英(1978-),男,硕士研究生,研究方向为无功功率补偿;E-mail: zhangyingmailbox@163.com

李晓明(1955-),男,教授,主要从事电力系统运行与控制的教学与研究;

朱帅(1977-),男,硕士研究生,研究方向为无功功率补偿。

## An assessing means of reactive power based on reactive power fluctuation coefficients

ZHANG Ying, LI Xiaoming, ZHU Shuai, SHAO Bingui

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The paper analyses the defect of the assessing means by which the reactive power is estimated by average power factor. The concept of reactive power fluctuation coefficient is proposed. On the basis of the concept, a new assessing means of reactive power is proposed. The new assessing means can not only offset the defect, but also can urge electric power consumers to improve the quality of electric power.

**Key words:** reactive power; fluctuation coefficient; power factor; assessing means

(上接第5页 continued from page 5)

## Real options model of operating capital value of generator for spinning reserve and short-term risk assessment ( )

MA Xin<sup>1,2</sup>, LIU Yong<sup>1</sup>, HOU Zhi-jian<sup>1</sup>, JIANG Chuan-wen<sup>1</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Guangdong Branch, National Developing Bank, Guangzhou 510620, China)

**Abstract:** In electricity market, electricity price, reserve price and fuel price are more uncertain than those in the regulated conditions. On the basis of the real options model of operating capital value of generator for spinning reserve that is constructed at previous part, the solution of model is given. The effect on the operating capital value of generator that affected by technology limits of units is studied through examples. VaR concept is introduced to assess a quantitative short-term risk of the generator operating capital value, which is a new idea and method to evaluate the operating capital value of generator in electricity market.

**Key words:** operating capital value; real options; risk assessment