

DOI: 10.7667/PSPC160129

一种新的光伏并网评价体系

陈力¹, 胡钊², 卫敬宜², 卢成城², 石少伟², 王可²

(1. 中国电力科学研究院, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对光伏并网下母线的电压和频率波动提出了四项评价指标即影响系数、离散度、偏度和最大波动率。关于配电网的谐波含量提出了两项评价指标, 即谐波平均总畸变率和谐波总畸变率合格率。对配电网的网络损耗提出了系统网损的改善系数和网损率变化率两项评价指标, 然后应用变异系数法求解各项指标的权重, 并结合逼近理想解的排序方法(Technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS), 形成了一套完整的光伏并网评价体系。最后将所提评价体系应用于评估河南省某地区的光伏接入方案, 以选取其最优接入方式。

关键词: 并网光伏电站; 评价指标; 接入方式; 变异系数法; TOPSIS 法

A new evaluation system of grid-integrated PV generation

CHEN Li¹, HU Po², WEI Jingyi², LU Chengcheng², SHI Shaowei², WANG Ke²

(1. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: For an evaluation system of grid-integrated PV generation is proposed little in former reference, this paper establishes a comprehensive and reasonable evaluation system. Firstly, four indexes are defined to reflect the voltage and frequency fluctuation, namely influence coefficient, discrete degree, skewness coefficient and maximum volatility. Also, evaluation indexes which reflect the total harmonic distortion (THD) in distribution network are put forward, namely mean THD and pass rate. Another two indexes named improvement index of system loss and net loss change rate are proposed to reflect the change of net loss. Then, variation coefficient method is used to obtain the weight of every index. Combined with the technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) method, a new evaluation system of grid-integrated PV generation is established. Finally, the proposed evaluation system is applied to one area of Henan province so as to choose its optimal PV access mode.

Key words: grid-integrated PV generation; evaluation index; access mode; variation coefficient method; TOPSIS method

0 引言

目前, 配电网一般呈辐射状, 线路潮流方向单一。光伏电源接入配电网后, 配电网由传统的单端电源供电模式转变为多点供电, 馈线潮流的大小和方向均会发生显著改变^[1-3]。由于配电网线路参数往往是固定的, 因此光伏并网下馈线潮流的随机波动将直接影响配电网的电压、并网点(Point of common coupling, PCC)频率、并网点谐波和网损^[4-6]。但针对光伏电站并网影响进行评价的研究却很少。文献[7]采用细菌菌落优化算法对分布式电源位置和容量的优化配置等方面进行了研究; 文献[8]应用双层规划的方法对配电网线路结构、分布式电源位置和容量进行综合优化, 却并未针对分布式电源的接

入方式进行研究; 文献[9]仅对分布式发电并网对配电网网损的影响程度提出了两个衡量标准。现有大部分文献只是对分布式电源对配电网某一方面的影响提出了评价指标, 并没有建立同时反映电压波动、频率波动、谐波和网损的指标体系, 因而无法形成对不同情况下光伏的接入方式进行系统有效的评价体系。

本文针对光伏并网对配电网电压、频率、谐波和网损的影响, 分别提出了相应的评价指标, 并运用变异系数法和逼近理想解的排序方法(Technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)综合所有指标形成了一套合理有效的评价体系, 可以对不同并网光伏接入方式对系统的影响进行全面评估, 由此确定并网光伏的最优接入模式。

1 评价指标

1.1 电压和频率的评价指标

1) 影响系数

在光伏并网之前,系统各电气量通常都在标准范围内小幅波动,但光伏并网后各电气量的波动幅度会发生改变,因此,本文提出用影响系数(Influence Coefficient, IC)来表征光伏并网对系统影响的程度,即

$$IC = \frac{\sum_{i=1}^m |X_i - X'_i|}{\sum_{i=1}^m X'_i} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: m 为样本容量; X_i 为光伏并网后第*i*个样本的数值; X'_i 为光伏并网前第*i*个样本的数值。由式(1)可知,影响系数可以直接反映光伏并网对系统影响的大小,其数值越大,表明影响越大。如果采用样本的额定值 X_N 替代 X'_i ,则式(1)表征的是光伏并网后各电气量与额定值的偏离程度。

2) 离散度

显然,影响系数无法体现光伏并网后系统各电气量自身的波动情况。为此,本文采用标准差来表征光伏并网后系统各电气量的离散度(Discrete Degree, DD),如式(2)所示。

$$DD = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})^2} \quad (2)$$

式(2)中, \bar{X} 为光伏并网后样本的数学期望。由式(2)可知,离散度越大,表示光伏并网后,系统各电气量分布越分散,对系统稳定运行越不利;离散度越小,表示光伏并网后,系统各电气量分布越集中,对系统稳定运行越有利。

3) 偏度

离散度虽然反映了各电气量相对于其期望的波动幅度,但并不能反映其波动的偏斜方向,即偏向大于期望的方向波动还是偏向小于期望的方向波动,而在含光伏电站的实际电网规划和调度运行中,波动的偏斜方向却是一个非常重要的指标。为此,采用其三阶中心距与标准差三次方的比值来定义偏度(Skewness Coefficient, SC),即

$$SC = \frac{m \sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})^3}{(m-1)(m-2)\sigma^3} \quad (3)$$

式(3)中, σ 为光伏并网后样本的标准差。偏度是一个无量纲量,若 SC 接近0,则可认为分布是对称的,

表示光伏并网后引起系统电气量增大的情况与减小的情况相当;若 $SC < 0$,则称分布具有负偏离,此时数据位于均值左边的比位于右边的少;若 $SC > 0$,则称分布具有正偏离,此时数据位于均值右边的比位于左边的少。

4) 最大波动率

当天气等原因致使大容量光伏电站出力发生突变时,其引起电气量的波动可能会造成系统不稳定或发生故障。因此采用最大波动率(Maximum Volatility, MV)来度量光伏并网后引起电气量的最大波动情况,即

$$MV = \frac{\max |X_i - X_i'|}{X_N} \times 100\% \quad (4)$$

式(4)中, X_N 为样本的额定值。最大波动率可以有效地反映光伏随机突变对系统的影响,其值越大,表明系统突变越大,对系统稳定运行越不利;其值越小,表明突变越小,对系统稳定运行越有利。

1.2 谐波的评价指标

光伏并网期间,谐波总畸变率(THD)是时间的函数,记为 $THD(t)$ 。定义谐波含量与基波分量比值的平均值的百分数即谐波总畸变率的平均值为谐波平均总畸变率(Mean THD, MT),即

$$MT = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} THD(t) dt \quad (5)$$

式(5)中, t_1 、 t_2 分别为光伏电站的并网时刻和脱网时刻。

指标MT反映的是光伏并网期间谐波含量的平均值,并不能反映超过国标规定的谐波含量在时间上所占的比重,因此定义谐波合格率(Pass Rate, PR),即

$$PR = \frac{\int dt}{T} \quad (6)$$

$$\Omega = \{t \mid THD(t) < THD_{st}\} \quad (7)$$

式(6)中: T 表示光伏并网的时长; Ω 表示光伏并网期间电压谐波总畸变率不超出国标规定限值 THD_{st} 的时间集合。PR值实际反映的是光伏并网期间电压谐波总畸变率不超出国家规定限值的情况在时间上所占的比重。PR值越大,说明光伏并网期间出现电压谐波总畸变率超标的时间越短,反之,超标的时间较长。式(7)中的 THD_{st} 可以根据具体要求人为设定为某一特定值。

1.3 网损的评价指标

为了量化光伏并网对配电网网络损耗的影响,定义系统网损的改善系数(Improvement Index of

System Loss, IISL), 即

$$IISL = \frac{L_{nP} - L_{PV}}{W_{PV}} \times 100\% \quad (8)$$

式(8)中: L_{nP} 和 L_{PV} 分别为光伏并网前后系统的网损; W_{PV} 为光伏并网期间发出的总的有功功率。式(8)反映的是网损改变占光伏出力的比值, 若 $IISL < 0$, 则表示光伏电源的接入使配网的损耗增大, 起到负改善作用; 若 $IISL > 0$, 则表示光伏电源的接入使配网的损耗减少, 起到正改善作用; 若 $IISL = 0$, 则表示接入光伏后配网的损耗不变, 这时并没有起到改善作用。

在电网经济性评估中, 网损率(Loss Ratio, LR)是一个重要的指标, 为此, 提出了网损率变化率指标(Net Loss Change Rate, NLCR), 即

$$NLCR = \frac{LR_{nP} - LR_{PV}}{LR_{nP}} \times 100\% \quad (9)$$

式(9)中, LR_{nP} 和 LR_{PV} 分别为光伏并网前后电网的网损率。

2 评价方法

2.1 变异系数法

变异系数法^[10]是一种依据各评价指标所包含的信息量的多少来确定指标权重的客观赋权法, 可以排除主观因素的影响, 有效利用指标数据。

1) 指标矩阵的构建

设有 m 个评价方案 n 项指标 (n 为所有指标的个数之和) 构成的指标矩阵为 $\mathbf{P} = (p_{ij})_{m \times n}$, $i=1, 2, \dots, m$, $j=1, 2, \dots, n$, 则

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ p_{m1} & \cdots & p_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

2) 指标矩阵的同趋化

对指标矩阵进行同趋化处理, 即使得所有指标是越小越好或越大越好。本文对指标的同趋化处理选取前者, 但是对于不符合越小越好情况的指标, 例如谐波合格率指标等, 进行取倒数处理, 即

$$p_{ij}^* = \begin{cases} p_{ij}, & p_{ij} \text{ 符合情况} \\ \frac{1}{p_{ij}}, & p_{ij} \text{ 不符合情况} \end{cases} \quad (11)$$

从而得到同趋化指标矩阵 $\mathbf{P}^* = (p_{ij}^*)_{m \times n}$ 。

3) 同趋化矩阵的规范化

按照式(12)对式(11)中的元素进行规范化处理, 即

$$y_{ij} = p_{ij}^* / (\sum_{i=1}^m (p_{ij}^*)^2)^{1/2} \quad (12)$$

便可得到规范化指标矩阵 $\mathbf{Y} = (y_{ij})_{m \times n}$ 。

4) 指标权重的计算

针对式(12)处理后的规范化矩阵 \mathbf{Y} , 分别采用式(13)和式(14)计算均值和标准差, 即

$$\bar{y}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_{ij} \quad j=1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_j)^2} \quad j=1, 2, \dots, n \quad (14)$$

利用均值和标准差计算变异系数, 即

$$V_j = s_j / \bar{y}_j \quad (15)$$

利用变异系数便可计算各指标的权重, 即

$$\begin{cases} \omega_j = V_j / \sum_{j=1}^m V_j \\ \sum_{j=1}^m \omega_j = 1 \end{cases} \quad (16)$$

ω_j 体现了各指标的信息量, 其值越大表示该指标对综合决策的作用越大, 直观有效地反映了各指标间的差异程度。

2.2 TOPSIS 法

利用TOPSIS法, 可以得到每个方案与正理想方案的相对贴近度, 并以此比较方案的优劣程度, 最终提供决策依据^[11-13]。采用TOPSIS法综合评价光伏并网对系统影响的步骤如下所述。

1) 决策矩阵的计算

将规范化矩阵 \mathbf{Y} 各列向量与其对应的指标权重 ω_j 相乘得到决策矩阵 \mathbf{Z} , 即

$$\mathbf{Z} = (z_{ij})_{m \times n} = (y_{ij} \omega_j)_{m \times n} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (17)$$

2) 正、负理想解的确定

由于本文对指标矩阵进行了同趋化处理, 因此采用决策矩阵各列向量的最小值构成正理想解, 最大值构成负理想解, 即

$$\mathbf{Z}^+ = (\min_{1 \leq i \leq m} z_{ij}) = (z_1^+, z_2^+, \dots, z_n^+) \quad (18)$$

$$\mathbf{Z}^- = (\max_{1 \leq i \leq m} z_{ij}) = (z_1^-, z_2^-, \dots, z_n^-) \quad (19)$$

3) 欧氏距离的计算

用二阶范数计算代表所有方案的决策矩阵中各行向量与正、负理想解的欧式距离, 即

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^+)^2} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (20)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^-)^2} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (21)$$

4) 相对贴近度的计算

所有方案与正理想方案的相对贴近度 C_i 为

$$C_i = d_i^- / (d_i^+ + d_i^-) \quad i=1, 2, \dots, m \quad (22)$$

5) 相对贴近度的排名

对 C_i 进行排名, C_i 越大其对应的方案越优, 排名越靠前, 由此得出方案的优劣次序。 C_i 越接近1, 表示该方案越接近正理想方案。

3 算例应用

以河南省某地区待建的光伏电站作为研究对象, 在PSCAD中进行建模仿真, 求出本文所提评价体系中的指标, 然后由变异系数法计算各指标的权重, 并应用TOPSIS法进行评价排序。

3.1 仿真结果

该地区共有 110 kV 变电站 1 座, 主变 2 台, 总容量 63 MVA。10 kV 出线间隔共 16 个, 10 kV 线路 23 条。并网光伏电站总容量为 8 MW, 共有 3 种待选并网方案, 如图 1 所示: (1) 采用单个 8 MW 单元经过升压变后专线接入 110 kV 变电站的一次侧; (2) 采用 4 个 2 MW 单元通过专线分别接入 4 条 110 kV 变电站的二次侧出线间隔; (3) 采用 4 个 2 MW 单元分别接入 4 条 10 kV 线路用户侧母线。以本文所提的评价体系中的指标和方法对这 3 种方案的优劣进行对比。

在PSCAD中搭建模型, 仿真结果如图2所示。

3.2 指标的计算

从图2可以看出, 除了电压谐波总畸变率在光伏波动较大时会超过国标的规定限值, 电压和频率均符合国标要求, 因此需要利用本文所提出的评价体系来进一步研究这三种方案的优劣。根据仿真数据, 计算各指标, 结果如表1~表4所示。

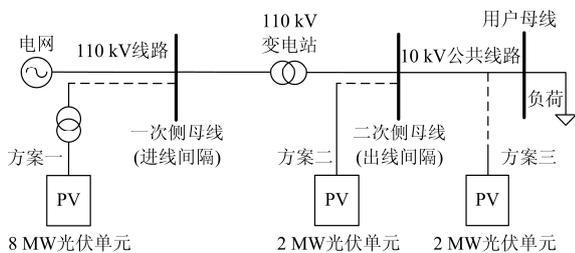
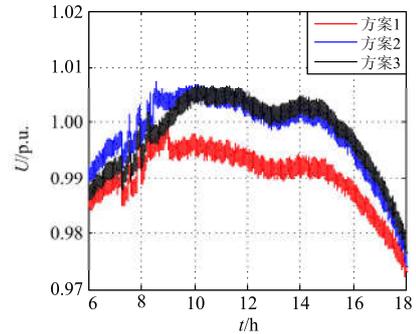
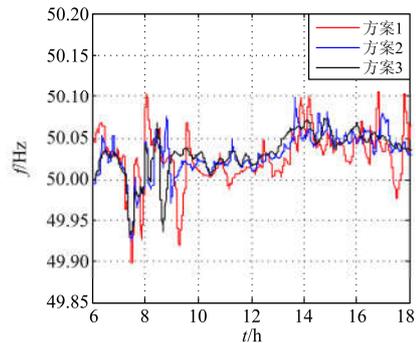


图 1 三种方案的接入方式

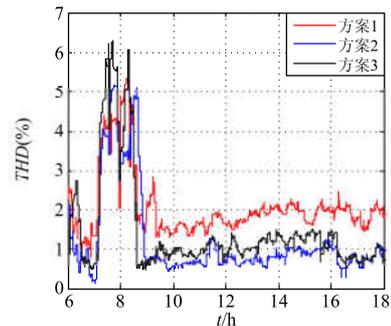
Fig. 1 Access mode of three schemes



(a) 10 kV 母线电压



(b) 并网点频率



(c) 并网点谐波含量

图 2 三种方案的仿真结果

Fig. 2 Simulation results of three schemes

表 1 三种方案下 10 kV 母线电压的指标结果

Table 1 Voltage index of 10 kV buses under three schemes

方案	电压指标			
	IC	DD	SC	MV
1	0.42%	0.067 4	-1.180 9	1.69%
2	1.01%	0.088 6	-1.313 5	1.63%
3	0.92%	0.085 4	-1.003 5	1.55%

表 2 三种方案下并网点频率的指标结果

Table 2 Frequency index of PCC under three schemes

方案	频率指标			
	IC	DD	SC	MV
1	0.069%	0.0309	-0.881 1	0.21%
2	0.069%	0.0258	-0.769 3	0.20%
3	0.074%	0.0255	-1.224 5	0.15%

表3 三种方案下并网点谐波的指标结果

Table 3 THD index of PCC under three schemes

方案	谐波指标	
	MT	PR
1	2.0548	90.33%
2	1.2966	97.96%
3	1.4803	95.16%

表4 三种方案下网损指标的计算结果

Table 4 Net loss index calculation results under three schemes

方案	网损指标	
	IISL	NLCR
1	-1.24%	-1.61%
2	-2.85%	-3.93%
3	-3.59%	-4.74%

表5 规范化矩阵数据

Table 5 Data of standardization matrix

方案	电压指标				频率指标				谐波指标		网损	
	IC	DD	SC	MV	IC	DD	SC	MV	MT	PR	IISL	NLCR
1	0.2939	0.4804	0.5813	0.6007	0.5634	0.6485	0.5203	0.6432	0.7222	0.6029	0.2611	0.2530
2	0.7066	0.6315	0.6466	0.5794	0.5634	0.5414	0.4543	0.6126	0.4557	0.5559	0.6002	0.6175
3	0.6437	0.6087	0.494	0.5509	0.6042	0.5351	0.7231	0.4594	0.5203	0.5723	0.7560	0.7448

表6 参数计算结果

Table 6 Calculation results of parameters

指标名称	\bar{y}_j	s_j	V_j	ω_j	
电压指标	IC	0.5481	0.2224	0.4057	0.1606
	DD	0.5735	0.0815	0.1420	0.0562
	SC	0.5740	0.0766	0.1334	0.0528
	MV	0.5770	0.0250	0.0433	0.0171
频率指标	IC	0.5770	0.0236	0.0408	0.0162
	DD	0.5750	0.0637	0.1108	0.0439
	SC	0.5659	0.1401	0.2475	0.0980
	MV	0.5717	0.0985	0.1722	0.0682
谐波指标	MT	0.5661	0.1390	0.2456	0.0972
	PR	0.5770	0.0239	0.0413	0.0164
网损指标	IISL	0.5391	0.2530	0.4694	0.1858
	NLCR	0.5384	0.2553	0.4741	0.1877

表7 评价结果

Table 7 Evaluation result

方案	C_i	排名
1	0.8299	1
2	0.3147	2
3	0.1580	3

由表7可知: 方案1与正理想方案的相对贴近度最大, 方案1明显优于方案2和方案3。而且, 由表4可知, 三种并网方案后的结果都是使得系统网损增

3.3 TOPSIS 法进行综合评价

3.3.1 建立规范化矩阵

合并3.2中的所有指标数据形成指标矩阵, 并对其同趋化和规范化处理, 得到规范化指标矩阵数据如表5所示。

3.3.2 求解指标权重

利用变异系数法计算各指标的权重, 参数计算结果如表6所示。

3.3.3 计算相对贴近度

根据式(18)、(19)分别计算正、负理想解, 然后采用式(20)、(21)计算代表所有方案的决策矩阵中各行向量到正、负理想解的欧氏距离, 最后根据式(22)计算相对贴近度并对其进行排名, 结果如表7所示。

加, 但是方案1的并网方式下系统网损增加最小, 从网损所对应的经济价值来考虑, 也是方案1最优。

4 结论

本文针对光伏并网对配电网电压波动、频率波动、谐波含量和网损变化的影响提出了相应的评价指标并运用变异系数法和TOPSIS法综合文中指标形成了一套完整合理的评价体系, 可以用来评估不同光伏接入方式对区域电网的影响情况。应用变异系数法求解指标权重, 可以充分利用各种指标数据的信息, 采用客观权重的TOPSIS法能对各方案进行合理有效的评价。实例表面, 本文提出的评价体系能够为光伏并网方式的优选提供科学的参考。

参考文献

- [1] 胡晓松, 张殷, 谢光彬, 等. 含 PV 节点的配电网合环潮流算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 8-13. HU Xiaosong, ZHANG Yin, XIE Guangbin, et al. A loop closing power flow calculation algorithm of distribution network with PV nodes[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 8-13.
- [2] BIALASIEWICZ J T. Renewable energy systems with photovoltaic power generators: operation and modeling[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(7): 2752-2758.

- [3] PAATERO J V, LUND P D. Effects of large-scale photovoltaic power integration on electricity distribution networks[J]. *Renewable Energy*, 2007, 32: 216-234.
- [4] 黄冬冬, 吴在军, 窦晓波, 等. 光伏规模化并网的电能质量复合控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(3): 107-112.
HUANG Dongdong, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. A power quality control strategy based on large-scale grid-connected photovoltaic power generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(3): 107-112.
- [5] 崔红芬, 汪春, 叶季蕾, 等. 多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(10): 91-97.
CUI Hongfen, WANG Chun, YE Jilei, et al. Research of interaction of distributed PV system with multiple access points and distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(10): 91-97.
- [6] JOHN S. The issue of harmonic injection from utility integrated photovoltaic systems: part I the harmonic source[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1998, 3(3): 507-510.
- [7] 陈海东. 基于细菌菌落优化算法分布式电源优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(21): 106-111.
CHEN Haidong. Optimal power flow of distribution network with distributed generation based on bacterial colony optimization[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(21): 106-111.
- [8] 张彼德, 何頔, 张强, 等. 含分布式电源的配电网双层扩展规划[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(2): 80-85.
ZHANG Bide, HE Di, ZHANG Qiang, et al. Double distribution network expansion planning including distributed power[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(2): 80-85.
- [9] 张勇军, 翟伟芳, 林建熙. 分布式发电并网的网损影响评价指标研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(13): 134-137.
ZHANG Yongjun, ZHAI Weifang, LIN Jianxi. Study on power loss evaluation index of the DG's accessing to the network[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(13): 134-137.
- [10] 孙凯, 鞠晓峰, 李煜华. 基于变异系数法的企业孵化器运行绩效评价[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2007, 12(3): 165-167, 172.
SUN Kai, JU Xiaofeng, LI Yuhua. Performance evaluation of enterprise incubators based on variation coefficient method[J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2007, 12(3): 165-167, 172.
- [11] 肖淳, 邵东国, 杨丰顺. 基于改进 TOPSIS 法的流域初始水权分配模型[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2012, 45(3): 329-334.
XIAO Chun, SHAO Dongguo, YANG Fengshun. A model of initial water rights allocation in watershed based on improved TOPSIS method[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2012, 45(3): 329-334.
- [12] 李磊, 金菊良, 朱永楠. TOPSIS 方法应用中若干问题的探讨[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(3): 51-54.
LI Lei, JIN Juliang, ZHU Yongnan. Discussion on some problems of application of TOPSIS method[J]. *Water Resources and Power*, 2012, 30(3): 51-54.
- [13] JAHANSHALOO G R, HOSSEINZADEH LOTFI F, IZADIKHA M. An algorithmic method to extend TOPSIS for decision-making problems with interval data[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2006, 175(2): 1375-1384.

收稿日期: 2016-01-22; 修回日期: 2016-04-25
作者简介:

陈力(1990-), 男, 通信作者, 硕士, 主要研究方向为光伏发电与并网技术; E-mail: chenlil@epri.sgcc.com.cn

胡钊(1956-), 男, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为分布式发电与并网技术等; E-mail: phu1126@126.com

卫敬宜(1991-), 女, 硕士, 主要研究方向为光伏发电与并网技术。E-mail: 1012064601@qq.com

(编辑 姜新丽)