(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106295106 B
(45)授权公告日 2019.03.22

(21)申请号 201510305893.5

(22)申请日 2015.06.04

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 106295106 A

(43)申请公布日 2017.01.04

(73)专利权人 中国电力科学研究院
地址 210003 江苏省南京市鼓楼区南瑞路8号
专利权人 国家电网公司
国网河南省电力公司

(72)发明人 刘美茵 陈梅 黄晶生 丁杰 朱凌志 张军军 郑飞 秦筱迪

(74)专利代理机构 北京安博达知识产权代理有限公司 11271
代理人 徐国文

(51)Int.Cl.
G06Q 10/06(2012.01)
G06Q 50/06(2012.01)
H02J 3/18(2006.01)

(56)对比文件
CN 103124080 A,2013.05.29,
US 2012/0326511 A1,2012.12.27,
US 2013/0018516 A1,2013.01.17,
CN 103518169 A,2014.01.15,
Meiyin Liu.《Research on Reactive Power Coordinated Control Strategy of Grid-Connected Photovoltaic Power Station》.《CICED 2014》.2014,
张光明 等.《光伏并网发电系统的低电压穿越控制策略》.《电力系统保护与控制》.2014,第42卷(第11期),

审查员 申晓科

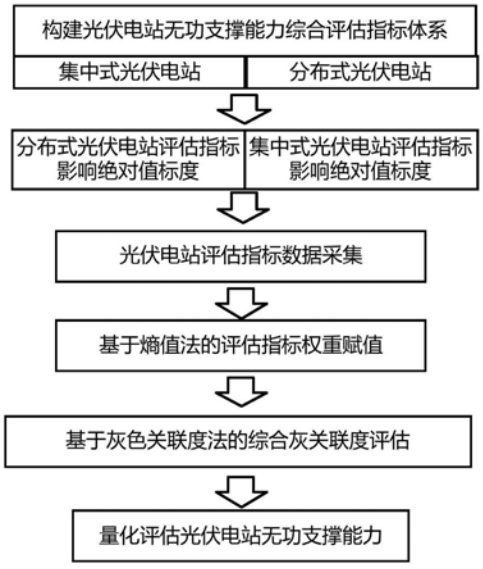
权利要求书3页 说明书10页 附图1页

(54)发明名称

一种光伏电站无功支撑能力评估方法

(57)摘要

本发明提供了一种光伏电站无功支撑能力评估方法,包括:步骤1、构建光伏电站的无功支撑能力综合评估指标体系;步骤2、采集对光伏电站进行评估需要的测试数据;步骤3、对综合评估指标体系的各评估指标进行权重赋值;步骤4、分析综合评估指标体系的综合灰色关联度;步骤5、构建综合灰色关联度的量化评分函数,依据量化评分函数评估光伏电站的无功支撑能力。与现有技术相比,本发明提供的一种光伏电站无功支撑能力评估方法,可以有效评估出各类光伏电站的无功支撑能力,解决当前光伏电站无功支撑能力评估指标体系不够全面,各评价指标权重股指选择依赖于主观性经验等问题,形成综合的光伏电站无功支撑能力评估体系和方法。



CN 106295106 B

1.一种光伏电站无功支撑能力评估方法,其特征在于,所述方法包括:

步骤1:构建光伏电站的无功支撑能力综合评估指标体系,包括集中式光伏电站综合评估指标体系或分布式光伏电站综合评估指标体系;

步骤2:采集对光伏电站进行评估需要的参数的测试数据;

基于光伏电站的标准数据、参考数据和所述测试数据构建数据样本$S=\{S_1,S_2,...,S_i,...,S_{m+q}\}$;所述数据样本S的第1行数据为标准数据组成的标准样本、第2至q行数据为参考数据组成的参考样本、第q+1至m+q行为测试数据组成的待评估样本;其中,$q>2$,m为测试数据的采样次数;

所述数据样本包括集中式光伏电站数据样本或分布式光伏电站数据样本;

所述标准数据为所述参数的标准值;所述参考数据为将光伏电站按照预置工况运行后,测量到的所述参数的实际值;

步骤3:依据数据样本S构建所述测试数据的评估指标样本$X=\{X_1,X_2,...,X_j,...,X_n\}$;其中,n为评估指标的个数,对所述综合评估指标体系的各评估指标进行权重赋值;

步骤4:分析所述综合评估指标体系的综合灰色关联度$\Phi_{i待评估}$;

步骤5:构建所述综合灰色关联度$\Phi_{i待评估}$的量化评分函数,依据所述量化评分函数评估光伏电站的无功支撑能力。

2.如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述步骤1中构建分布式光伏电站综合评估指标体系,包括确定分布式光伏电站综合评估指标体系的评估指标$X_{分布式}$;所述评估指标$X_{分布式}$包括接入方式指标x_1、接入点数量指标x_2、接入电压等级指标x_3和功率因数指标x_4中的至少一种指标;

构建集中式光伏电站综合评估指标体系,包括确定集中式光伏电站综合评估指标体系的评估指标$X_{集中式}$;所述评估指标$X_{集中式}$包括接入电压等级指标x_3、无功配置容量指标x_5和电网无功需求指标x_6中的至少一种指标。

3.如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述步骤3中对评估指标进行权重赋值,包括:

步骤31:计算评估指标的无纲量化比重p_{ij}为:

$$p_{ij}=\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}x_{ij}} \qquad (1)$$

其中,所述x_{ij}为数据样本S_i的评估指标X_j的测量值;

步骤32:计算评估指标X_j的信息熵值h_j,其计算公式为:

$$h_j=-\frac{\sum_{i=1}^{m}p_{ij}\log_2 p_{ij}}{\log_2 n} \qquad (2)$$

步骤33:计算评估指标X_j的变异程度系数$d_j=1-h_j$;

步骤34:计算评估指标X_j的权重w_j,其计算公式为:

$$w_j=\frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n}d_j} \qquad (3)$$

所述评估指标样本X的权重向量W＝(w1,w2,...,wj,...,wm)。

4.如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述步骤4中分析综合灰色关联度,包括:

步骤41:依据所述数据样本S建立评估指标样本X的无量纲化测量矩阵[Xij]为:

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ x_{31} & x_{32} & \cdots & x_{3n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{q1} & x_{q2} & \cdots & x_{qn} \\ x_{(q+1)1} & x_{(q+1)2} & \cdots & x_{(q+1)n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{(q+m)1} & x_{(q+m)2} & \cdots & x_{(q+m)n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,所述x(q+m)n为第q+m个数据样本的第n个评估指标的测量值,n为评估指标的个数;

步骤42:构建评估绝对差矩阵;

将所述无量纲化测量矩阵[Xij]中第1行数据与其余q+m-1行数据分别进行差值运算,得到所述评估绝对差矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \Delta_{21} & \Delta_{22} & \cdots & \Delta_{2n} \\ \Delta_{31} & \Delta_{32} & \cdots & \Delta_{3n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \Delta_{i1} & \Delta_{i2} & \cdots & \Delta_{ij} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \Delta_{(q+m)1} & \Delta_{(q+m)2} & \cdots & \Delta_{(q+m)n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

步骤43:计算所述标准样本与所述参考样本之间的灰色关联度ξi参考(j),其计算公式为:

$$\xi_{i参考}(j)=\frac{\min\limits_{\substack{2\le i\le q\\1\le j\le n}}\Delta_{ij}+\rho\max\limits_{\substack{2\le i\le q\\1\le j\le n}}\Delta_{ij}}{\delta_{ij}+\rho\max\limits_{\substack{2\le i\le q\\1\le j\le n}}\Delta_{ij}} \quad (6)$$

其中,Δij为所述无量纲化测量矩阵[Xij]中标准样本与参考样本之间的差值,2≤i≤m+q,1≤j≤n;ρ为分辨系数;

计算标准样本与所述待评估样本之间的灰色关联度ξi待评估(j),其计算公式为:

$$\xi_{i待评估}(j)=\frac{\min\limits_{\substack{(q+1)\le i\le(m+q)\\1\le j\le n}}\Delta_{ij}+\rho\max\limits_{\substack{(q+1)\le i\le(m+q)\\1\le j\le n}}\Delta_{ij}}{\delta_{ij}+\rho\max\limits_{\substack{(q+1)\le i\le(m+q)\\1\le j\le n}}\Delta_{ij}} \quad (7)$$

其中,Δij为所述无量纲化测量矩阵[Xij]中标准样本与待评估样本之间的差值,q+1≤i≤q+m,1≤j≤n;ρ为分辨系数;

步骤44:计算待评估样本与标准样本之间的综合灰色关联度Φi待评估,其计算公式为:

$$\Phi_{i待评估}=\sum_{j=1}^{n}w_j\xi_{i待评估}(j) \quad (8)$$

计算参考样本与标准样本之间的综合灰色关联度Φi参考,其计算公式为:

$$\Phi_{i参考}=\sum_{j=1}^{n}w_j\xi_{i参考}(j) \qquad (9)$$

其中，所述w_j为评估指标X_j的权重。

5.如权利要求1或4所述的方法，其特征在于，步骤5中构建综合灰色关联度$\Phi_{i待评估}$的量化评分函数，其表达式为：

$$\begin{cases} G_{q参考}\cdot\Phi_{i待评估}/\Phi_{q参考} & 0\le\Phi_{i待评估}<\Phi_{q参考} \\ G_{(q-1)参考}\cdot e^{(q-1)(\Phi_{i待评估}-\Phi_{(q-1)参考})/(\Phi_{(q-1)参考}-\Phi_{q参考})} & \Phi_{q参考}\le\Phi_{i待评估}<\Phi_{(q-1)参考} \\ (G_{(q-2)参考}-G_{(q-3)参考})\cdot(\Phi_{i待评估}-\Phi_{(q-3)参考})/(\Phi_{(q-2)参考}-\Phi_{(q-3)参考})+G_{(q-3)参考} & \Phi_{(q-2)参考}\le\Phi_{i待评估}<\Phi_{(q-3)参考} \\ (G_{(q-3)参考}-G_{(q-4)参考})\cdot(\Phi_{i待评估}-\Phi_{(q-4)参考})/(\Phi_{(q-3)参考}-\Phi_{(q-4)参考})+G_{(q-4)参考} & \Phi_{(q-3)参考}\le\Phi_{i待评估}<\Phi_{(q-4)参考} \\ \vdots & \\ (G_{(q-t)参考}-G_{(q-t-1)参考})\cdot(\Phi_{i待评估}-\Phi_{(q-t-1)参考})/(\Phi_{(q-t)参考}-\Phi_{(q-t-1)参考})+G_{(q-t-1)参考} & \Phi_{(q-t)参考}\le\Phi_{i待评估}<\Phi_{(q-t-1)参考} \\ \vdots & \\ (100-G_{2参考})\cdot(\Phi_{i待评估}-\Phi_{2参考})/(1-\Phi_{2参考})+G_{2参考} & \Phi_{2参考}\le\Phi_{i待评估}<1 \end{cases}$$

（10）

其中，t为整数，2≤t≤q-2。

6.如权利要求5所述的方法，其特征在于，依据所述量化评分函数计算每次采样测试数据的数据样本的综合灰色关联度得分$\Phi_{i待评估}$，然后计算m次采样的数据样本的综合灰色关联度得分$\Phi_{i待评估}$的加权平均值，依据所述加权平均值对光伏电站的无功支撑能力进行评价。

一种光伏电站无功支撑能力评估方法

技术领域

[0001] 本发明涉及光伏电站评估技术领域，具体涉及一种光伏电站无功支撑能力评估方法。

背景技术

[0002] 光伏发电具有随机性、波动性等特点，光伏发电的规模化并网将对电网安全稳定运行带来消极影响，因此，光伏电站需要在正常运行或者故障情况下，尽可能与传统电源功能一致，满足节点电压约束、线路容量约束和发电机容量约束等电网静态安全约束条件，有一定的静态和动态无功功率裕量。光伏电站具备无功功率连续平滑调节的能力，有电压控制措施和一定的故障穿越容量，具备无功功率调节及电压控制能力，保证电力系统调压功能，因此光伏电站的静态/动态无功支撑能力，是考核光伏电站的主要性能指标之一，针对光伏电站的无功控制能力、无功输出能力、动态无功响应能力均提出了技术要求，但针对光伏电站整体的无功支撑能力量化评估方法未有规范性技术要求。

[0003] 目前，在光伏电站接入电网评估方面，国内外的研究主要集中在考虑分布式电源接入带来影响的评估，光伏电站接入对系统可靠性影响的评估，考虑市场环境的经济性评估以及考虑环境效益的电量成本的评估等。评估光伏电站对电网影响的主要途径有两种：从电源容量、能源价值、能源成本角度对电网的利益进行量化评估；从对电压、网损、环境等影响方面进行评估。

[0004] 综上所述，在光伏电站无功支撑能力影响与评估方面，国内外尚处于起步阶段，如何全面考虑分布式光伏电站和集中式光伏电站的差异，综合分析不同影响因素对无功支撑能力的影响，建立综合评估指标体系并实现权重赋值，进而量化评估出多种类型光伏电站的无功支撑能力，是亟需解决的关键科学问题和技术难题。

发明内容

[0005] 为了满足现有技术的需要，本发明提供了一种光伏电站无功支撑能力评估方法。

[0006] 本发明的技术方案为：

[0007] 所述方法包括：

[0008] 步骤1：构建光伏电站的无功支撑能力综合评估指标体系，包括集中式光伏电站综合评估指标体系和分布式光伏电站综合评估指标体系；

[0009] 步骤2：采集对光伏电站进行评估需要的参数的测试数据；

[0010] 基于光伏电站的标准数据、参考数据和所述测试数据构建数据样本$S=\{S_1, S_2,\ldots,S_i,\ldots,S_{m+q}\}$；所述数据样本S的第1行数据为标准数据组成的标准样本、第2至q行数据为参考数据组成的参考样本、第q+1至m+q行为测试数据组成的待评估样本，$q>2$，m为测试数据的采样次数；

[0011] 所述标准数据为所述参数的标准值；所述参考数据为将光伏电站按照预置工况运行后，测量到的所述参数的实际值；

[0012] 步骤3:依据数据样本S构建所述测试数据的评估指标样本X＝{X_1,X_2,...,X_j,...,X_n},n为评估指标的个数,对所述综合评估指标体系的各评估指标进行权重赋值;

[0013] 步骤4:分析所述综合评估指标体系的综合灰色关联度$\Phi_{i待评估}$;

[0014] 步骤5:构建所述综合灰色关联度$\Phi_{i待评估}$的量化评分函数,依据所述量化评分函数评估光伏电站的无功支撑能力。

[0015] 优选的,所述步骤1中构建分布式光伏电站综合评估指标体系,包括确定分布式光伏电站综合评估指标体系的评估指标$X_{分布式}$;所述评估指标$X_{分布式}$包括接入方式指标x_1、接入点数量指标x_2、接入电压等级指标x_3和功率因数指标x_4中的至少一种指标;

[0016] 构建集中式光伏电站综合评估指标体系,包括确定集中式光伏电站综合评估指标体系的评估指标$X_{集中式}$;所述评估指标$X_{集中式}$包括接入电压等级指标x_3、无功配置容量指标x_5和电网无功需求指标x_6中的至少一种指标;

[0017] 优选的,所述步骤3中对评估指标进行权重赋值,包括:

[0018] 步骤31:计算评估指标的无纲量化比重p_{ij}为:

[0019] $$p_{ij}=\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}x_{ij}} \qquad (1)$$

[0020] 其中,所述x_{ij}为数据样本S_i的评估指标X_j的测量值;

[0021] 步骤32:计算评估指标X_j的信息熵值h_j,其计算公式为:

[0022] $$h_j=-\frac{\sum_{i=1}^{m}p_{ij}\log_2 p_{ij}}{\log_2 n} \qquad (2)$$

[0023] 步骤33:计算评估指标X_j的变异程度系数$d_j=1-h_j$;

[0024] 步骤34:计算评估指标X_j的权重w_j,其计算公式为:

[0025] $$w_j=\frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n}d_j} \qquad (3)$$

[0026] 所述评估指标样本X的权重向量W＝(w_1,w_2,...,w_j,...,w_m);

[0027] 优选的,所述步骤4中分析综合灰色关联度,包括:

[0028] 步骤41:依据所述数据样本S建立评估指标样本X的无量纲化测量矩阵[X_{ij}]为:

[0029] $$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ x_{31} & x_{32} & \cdots & x_{3n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{q1} & x_{q2} & \cdots & x_{qn} \\ x_{(q+1)1} & x_{(q+1)2} & \cdots & x_{(q+1)n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{(q+m)1} & x_{(q+m)2} & \cdots & x_{(q+m)n} \end{bmatrix} \qquad (4)$$

[0030] 其中,所述$x_{(q+m)n}$为第q+m个数据样本的第n个评估指标的测量值,n为评估指标的

个数；

[0031] 步骤42：构建评估绝对差矩阵；

[0032] 将所述无量纲化测量矩阵[X_{ij}]中第1行数据与其余q+m-1行数据分别进行差值运算，得到所述评估绝对差矩阵为：

[0033]
$$\begin{bmatrix} \Delta_{21} & \Delta_{22} & \cdots & \Delta_{2n} \\ \Delta_{31} & \Delta_{32} & \cdots & \Delta_{3n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \Delta_{i1} & \Delta_{i2} & \cdots & \Delta_{ij} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \Delta_{(q+m)1} & \Delta_{(q+m)2} & \cdots & \Delta_{(q+m)n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0034] 步骤43：计算所述标准样本与所述参考样本之间的灰色关联度$\xi_{i参考}(j)$，其计算公式为：

[0035]
$$\xi_{i参考}(j)=\frac{\min\limits_{\substack{2\le i\le q\\1\le j\le n}}\Delta_{ij}+\rho\max\limits_{\substack{2\le i\le q\\1\le j\le n}}\Delta_{ij}}{\delta_{ij}+\rho\max\limits_{\substack{2\le i\le q\\1\le j\le n}}\Delta_{ij}} \quad (6)$$

[0036] 其中，Δ_{ij}为所述无量纲化测量矩阵[X_{ij}]中标准样本与参考样本之间的差值，$2\le i\le m+q$，$1\le j\le n$；ρ为分辨系数；

[0037] 计算标准样本与所述待评估样本之间的灰色关联度$\xi_{i待评估}(j)$，其计算公式为：

[0038]
$$\xi_{i待评估}(j)=\frac{\min\limits_{\substack{(q+1)\le i\le(m+q)\\1\le j\le n}}\Delta_{ij}+\rho\max\limits_{\substack{(q+1)\le i\le(m+q)\\1\le j\le n}}\Delta_{ij}}{\delta_{ij}+\rho\max\limits_{\substack{(q+1)\le i\le(m+q)\\1\le j\le n}}\Delta_{ij}} \quad (7)$$

[0039] 其中，Δ_{ij}为所述无量纲化测量矩阵[X_{ij}]中标准样本与待评估样本之间的差值，$q+1\le i\le q+m$，$1\le j\le n$；ρ为分辨系数；

[0040] 步骤44：计算待评估样本与标准样本之间的综合灰色关联度$\Phi_{i待评估}$，其计算公式为：

[0041]
$$\Phi_{i待评估}=\sum_{j=1}^{n}w_j\xi_{i待评估}(j) \quad (8)$$

[0042] 计算参考样本与标准样本之间的综合灰色关联度$\Phi_{i参考}$，其计算公式为：

[0043]
$$\Phi_{i参考}=\sum_{j=1}^{n}w_j\xi_{i参考}(j) \quad (9)$$

[0044] 其中，所述w_j为评估指标X_j的权重；

[0045] 优选的，步骤5中构建综合灰色关联度$\Phi_{i待评估}$的量化评分函数，其表达式为：

[0046]

$$\begin{cases} G_{q参考}\cdot\Phi_{i待评估}/\Phi_{q参考} & 0\le\Phi_{i待评估}<\Phi_{q参考} \\ G_{(q-1)参考}\cdot e^{(q-1)(\Phi_{i待评估}-\Phi_{(q-1)参考})/(\Phi_{(q-1)参考}-\Phi_{q参考})} & \Phi_{q参考}\le\Phi_{i待评估}<\Phi_{(q-1)参考} \\ (G_{(q-2)参考}-G_{(q-3)参考})\cdot(\Phi_{i待评估}-\Phi_{(q-3)参考})/(\Phi_{(q-2)参考}-\Phi_{(q-3)参考})+G_{(q-3)参考} & \Phi_{(q-2)参考}\le\Phi_{i待评估}<\Phi_{(q-3)参考} \\ (G_{(q-3)参考}-G_{(q-4)参考})\cdot(\Phi_{i待评估}-\Phi_{(q-4)参考})/(\Phi_{(q-3)参考}-\Phi_{(q-4)参考})+G_{(q-4)参考} & \Phi_{(q-3)参考}\le\Phi_{i待评估}<\Phi_{(q-4)参考} \\ \vdots & \\ (G_{(q-t)参考}-G_{(q-t-1)参考})\cdot(\Phi_{i待评估}-\Phi_{(q-t-1)参考})/(\Phi_{(q-t)参考}-\Phi_{(q-t-1)参考})+G_{(q-t-1)参考} & \Phi_{(q-t)参考}\le\Phi_{i待评估}<\Phi_{(q-t-1)参考} \\ \vdots & \\ (100-G_{2参考})\cdot(\Phi_{i待评估}-\Phi_{2参考})/(1-\Phi_{2参考})+G_{2参考} & \Phi_{2参考}\le\Phi_{i待评估}<1 \end{cases} \quad (10)$$

[0047] 其中，t为整数，2≤t≤q-2；

[0048] 优选的，依据所述量化评分函数计算每次采样测试数据的数据样本的综合灰色关联度得分$\Phi_{i待评估}$，然后计算m次采样的数据样本的综合灰色关联度得分$\Phi_{i待评估}$的加权平均值，依据所述加权平均值对光伏电站的无功支撑能力进行评价。

[0049] 与最接近的现有技术相比，本发明的优异效果是：

[0050] 1、本发明提供的一种光伏电站无功支撑能力评估方法，在明确不同类型光伏电站关键评估指标的同时，构建出反映不同光伏电站特性的综合评估指标体系和权重赋值方法，并提出综合量化评估方法从而对各类光伏电站的无功支撑能力进行量化评估；

[0051] 2、本发明提供的一种光伏电站无功支撑能力评估方法，可以有效评估出各类光伏电站的无功支撑能力，解决当前光伏电站无功支撑能力评估指标体系不够全面，各评价指标权重股指选择依赖于主观性经验等问题，形成综合的光伏电站无功支撑能力评估体系和方法；

[0052] 3、本发明提供的一种光伏电站无功支撑能力评估方法，能够辅助电压决策者评判光伏电站的无功支撑能力，从而制定出更为合理的无功配置方案，为解决光伏电站无功支撑能力不足问题提供技术支持，避免光伏电站无功支撑能力评估指标恶化，从而提升光伏电站和区域电网运行的整体安全可靠性。

附图说明

[0053] 下面结合附图对本发明进一步说明。

[0054] 图1：本发明实施例中一种光伏电站无功支撑能力评估方法流程图。

具体实施方式

[0055] 下面详细描述本发明的实施例，所述实施例的示例在附图中示出，其中自始至终相同或类似的标号表示相同或类似的元件或具有相同或类似功能的元件。下面通过参考附图描述的实施例是示例性的，旨在用于解释本发明，而不能理解为对本发明的限制。

[0056] 现有技术中光伏电站的评估方法无法对其无功支撑能力进行评估研究，在评估指标体系中涉及到的权重选择问题，一般都是按经验数据给出，具有一定的主观性，对于光伏电站无功支撑能力评估研究存在评估指标体系不够全面，各评价指标权重选择依赖于主观性经验的问题，因此本发明针对现有技术的不足，提供一种可综合评估多种类型光伏电站

(分布式/集中式)无功支撑能力的方法,充分考虑分布式和集中式光伏电站影响因素的差异,从接入方式指标、接入点数量指标、接入电压等级指标、以及功率因数指标方面分析其对分布式光伏电站的影响;而从接入电压等级指标、无功配置容量指标、功率因数指标、以及电网无功需求指标方面分析其对集中式光伏电站无功支撑能力的影响,分别设定出不同的综合评估指标体系,权重赋值方法,以及综合灰色关联度评分函数,从而对多种类型光伏电站的无功支撑能力进行量化评估。

[0057] 如图1所示的一种光伏电站无功支撑能力评估方法的实施例,其具体步骤包括:

[0058] 一、构建光伏电站的无功支撑能力综合评估指标体系,包括集中式光伏电站综合评估指标体系和分布式光伏电站综合评估指标体系,综合考虑接入方式、接入点数量、接入电压等级、功率因数调节范围等对分布式光伏电站无功支撑能力的影响,依据各关键因素的影响规律,建立所述综合评估指标体系,以及综合考虑接入电压等级、无功配置和电网无功需求对集中式光伏电站的影响,依据各关键因素的影响规律建立综合评估指标体系。具体为:

[0059] (一)构建分布式光伏电站综合评估指标体系。

[0060] 1、确定分布式光伏电站综合评估指标体系的评估指标$X_{分布式}$;

[0061] 评估指标$X_{分布式}$包括接入方式指标x_1、接入点数量指标x_2、接入电压等级指标x_3和功率因数指标x_4中的至少一种指标。

[0062] 2、依据评估指标$X_{分布式}$建立分布式光伏电站的评估标准样本X_{s1};

[0063] 本实施例中评估标准样本X_{s1}中接入方式指标x_1为Z型接入方式,接入点数量指标x_2为1个,接入电压等级指标x_3为380V,功率因数指标x_4为关口功率因数。

[0064] (二)构建集中式光伏电站综合评估指标体系,包括:

[0065] 1、确定集中式光伏电站综合评估指标体系的评估指标$X_{集中式}$;

[0066] 评估指标$X_{集中式}$包括接入电压等级指标x_3、无功配置容量指标x_5和电网无功需求指标x_6中的至少一种指标。

[0067] 2、依据评估指标$X_{集中式}$建立集中式光伏电站的评估标准样本X_{s2}。

[0068] 本实施例中评估标准样本X_{s2}的电压等级指标x_3为10kV,无功配置容量指标x_5为标准无功容量配置,电网无功需求指标x_6为无。

[0069] 二、采集对光伏电站进行评估需要的测试数据,基于光伏电站的标准数据、参考数据和测试数据构建数据样本$S=\{S_1,S_2,\ldots,S_i,\ldots,S_{m+q}\}$,其中,

[0070] 数据样本S的第1行数据为标准数据组成的标准样本、第2至q行数据为参考数据组成的参考样本、第q+1至m+q行为测试数据组成的待评估样本,$q>2$,m为测试数据的采样次数;标准数据为所述参数的标准值;参考数据为将光伏电站按照预置工况运行后,测量到的所述参数的实际值。

[0071] 本实施例中采集光伏电站测试数据的步骤为:

[0072] ①:从步骤一中构建的光伏电站综合评估指标体系选取需要进行评估的评估指标;

[0073] ②:依据实际测试和评估需求检测待评估光伏电站的并网点,采集选取的评估指标需要的测试数据;

[0074] ③:将采集到的测试数据存储到数据库中。

[0075] 三、依据数据样本S构建测试数据的评估指标样本$X=\{X_1,X_2,...,X_j,...,X_n\}$，n为评估指标的个数，对综合评估指标体系的各评估指标进行权重赋值，本实施例中采用熵值法分析确定各评估指标的客观权重，包括：

[0076] 1、计算评估指标的无纲量化比重p_{ij}为：

[0077] $$p_{ij}=\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}x_{ij}} \qquad (1)$$

[0078] 其中，x_{ij}为数据样本S_i的评估指标X_j的测量值。

[0079] 2、计算评估指标X_j的信息熵值h_j，其计算公式为：

[0080] $$h_j=-\frac{\sum_{i=1}^{m}p_{ij}\log_2 p_{ij}}{\log_2 n} \qquad (2)$$

[0081] 其中，当$p_{ij}=0$时，由于$\log_2 0$无意义，取$p_{ij}\log_2 p_{ij}=0$，如此，则有$0\leqslant h_j\leqslant 1$。

[0082] 3、计算评估指标X_j的变异程度系数$d_j=1-h_j$。

[0083] 4、计算评估指标X_j的权重w_j，其计算公式为：

[0084] $$w_j=\frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n}d_j} \qquad (3)$$

[0085] 评估指标样本X的权重向量$W=(w_1,w_2,...,w_j,...,w_m)$。

[0086] 四、分析综合评估指标体系的综合灰色关联度$\Phi_{i待评估}$，包括：

[0087] 1、依据数据样本S建立评估指标样本$X=\{X_1,X_2,...,X_j,...,X_n\}$的无量纲化测量矩阵$[X_{ij}]$为：

[0088] $$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ x_{31} & x_{32} & \cdots & x_{3n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{q1} & x_{q2} & \cdots & x_{qn} \\ x_{(q+1)1} & x_{(q+1)2} & \cdots & x_{(q+1)n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{(q+m)1} & x_{(q+m)2} & \cdots & x_{(q+m)n} \end{bmatrix} \qquad (4)$$

[0089] 其中，$x_{(q+m)n}$为第q+m个数据样本的第n个评估指标的测量值，其中：

[0090] $(x_{11}\ x_{12}\ \ldots\ x_{1n})$为标准样本；$\begin{pmatrix} x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ x_{31} & x_{32} & \cdots & x_{3n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{q1} & x_{q2} & \cdots & x_{qn} \end{pmatrix}$为参考样本；

[0091] $\begin{pmatrix} x_{(q+1)1} & x_{(q+1)2} & \cdots & x_{(q+1)n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{(q+m)1} & x_{(q+m)2} & \cdots & x_{(q+m)n} \end{pmatrix}$ 为待评估样本。

[0092] 2、构建评估绝对差矩阵，具体为：

[0093] 将无量纲化测量矩阵[X_{ij}]中的第1行数据与其余q+m-1行数据分别进行差值运算，得到评估绝对差矩阵为：

[0094] $$\begin{bmatrix} \Delta_{21} & \Delta_{22} & \cdots & \Delta_{2n} \\ \Delta_{31} & \Delta_{32} & \cdots & \Delta_{3n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \Delta_{i1} & \Delta_{i2} & \cdots & \Delta_{ij} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \Delta_{(q+m)1} & \Delta_{(q+m)2} & \cdots & \Delta_{(q+m)n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0095] 其中，

[0096] $\begin{pmatrix} \Delta_{21} & \Delta_{22} & \cdots & \Delta_{2n} \\ \Delta_{31} & \Delta_{32} & \cdots & \Delta_{3n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \Delta_{q1} & \Delta_{q2} & \cdots & \Delta_{qn} \end{pmatrix}$ 为标准样本与参考样本各对应项的差值；

[0097] $\begin{pmatrix} \Delta_{(q+1)1} & \Delta_{(q+1)2} & \cdots & \Delta_{(q+1)n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \Delta_{(q+m)1} & \Delta_{(q+m)2} & \cdots & \Delta_{(q+m)n} \end{pmatrix}$ 为标准样本与待评估样本各对应项的差值。

[0098] 本实施例中评估绝对差矩阵中差值Δ_{ij}的具体方法为：

[0099] (1)分析分布式光伏电站的评估指标评估绝对差矩阵，包括：

[0100] ①：接入方式指标x_1的影响绝对差标度Δ_{i1}，其计算公式为：

[0101] $$\Delta_{i1}=\frac{L_1+\Delta L}{L_1}\Delta_{11} \quad (6)$$

[0102] 其中，L_1为分布式光伏电站内部负荷的负荷量，$L_1=\frac{U_1}{I_1}$；U_1为分布式光伏电站的电压测量值，I_1为分布式光伏电站内部负荷处的电流测量值；ΔL为负荷量L_1的增大值；Δ_{11}为评估标准样本X_{s1}中接入方式指标的影响标度，当i＝1时，ΔL＝0。

[0103] 即，本实施例中分析测量到的光伏电站接入方式，T型或Z型，与评估标准样本X_{s1}中的Z型接入方式的影响绝对差标度。

[0104] ②：接入点数量指标x_2的影响绝对差标度Δ_{i2}，其计算公式为：

[0105] $$\Delta_{i2}=\frac{1}{k}\Delta_{12} \quad (7)$$

[0106] 其中，k为接入点个数，Δ_{12}为评估标准样本X_{s1}中接入点数量指标的影响标度，当i＝1时，k＝1。

[0107] ③：接入电压等级指标x_3的影响绝对差标度Δ_{i3}，其计算公式为：

[0108] $$\Delta_{i3}=\frac{U_{3r}}{U_{3s}}\Delta_{13} \quad (8)$$

[0109] 其中，U_{3r}为接入电压的测量值，U_{3s}为接入电压的标准值，Δ_{13}为评估标准样本X_{s1}中接入电压等级指标的影响标度。

[0110] ④：功率因数指标x_4的影响绝对差标度Δ_{i4}，其计算公式为：

[0111] $$\Delta_{i4}=\frac{\sin\varphi_{测量值1}}{\sin\varphi_{关口}}\Delta_{14} \quad (9)$$

[0112] 其中，$\sin\varphi_{测量值1}$为测量到的分布式光伏电站功率因数对应功角的正弦量，$\cos\varphi_{测量值}=\frac{P_r}{\sqrt{P_r^2+Q_r^2}}$，$P_r$为有功功率测量值，$Q_r$为无功功率测量值，$\sin\varphi_{关口}$为分布式光伏电站运行在关口功率因数时对应功角的正弦量；Δ_{14}为评估标准样本X_{s1}中功率因数指标的影响标度。

[0113] (2)分析集中式光伏电站的评估指标评估绝对差矩阵，包括：

[0114] ①：接入电压等级指标x_3的影响绝对差标度$\Delta_{i3集中式}$，其计算公式为：

[0115] $$\Delta_{i3集中式}=\frac{U_{3r集中式}}{U_{3s集中式}}\Delta_{13集中式} \quad (10)$$

[0116] 其中，$U_{3r集中式}$为接入电压的测量值，$U_{3s集中式}$为接入电压的标准值，$\Delta_{13集中式}$为评估标准样本X_{s2}中接入电压等级指标的影响标度。

[0117] ②：无功配置容量指标x_5的影响绝对差标度Δ_{i5}，其计算公式为：

[0118] $$\Delta_{i5}=\frac{S_{qs}+\Delta S_{qr}}{S_{qs}}\Delta_{15} \quad (11)$$

[0119] 其中，S_{qs}为标准无功容量，ΔS_{qr}为无功容量实际测量值的增量，Δ_{15}为评估标准样本X_{s2}中无功配置容量指标的影响标度.

[0120] ③：电网无功需求指标x_6的影响绝对差标度Δ_{i6}，其计算公式为：

[0121] $$\Delta_{i6}=\frac{\sin\varphi_{需求值}}{\sin\varphi_{测量值2}}\Delta_{16} \quad (12)$$

[0122] 其中，$\sin\varphi_{需求值}$为集中式光伏电站功率因数运行在无功容量需求值时对应功角的正弦量，$\cos\varphi_{需求值}=\frac{P_{r集中式}}{\sqrt{P_{r集中式}{}^2+(Q_{r集中式}+\Delta Q_{集中式})^2}}$；

[0123] $\sin\varphi_{测量值2}$为测量到的集中式光伏电站功率因数对应功角的正弦量，$\cos\varphi_{测量值2}=\frac{P_{r集中式}}{\sqrt{P_{r集中式}{}^2+Q_{r集中式}{}^2}}$；

[0124] $P_{r集中式}$为有功功率测量值，$Q_{r集中式}$为无功功率测量值，$\Delta Q_{集中式}$为无功需求量，Δ_{16}为评估标准样本X_{s2}中电网无功需求指标的影响标度。

[0125] 3、计算参考样本与标准样本之间的灰色关联度$\xi_{i参考}(j)$，其计算公式为：

[0126] $$\xi_{i参考}(j)=\frac{\min\limits_{\substack{2\le i\le q\\1\le j\le n}}\Delta_{ij}+\rho\max\limits_{\substack{2\le i\le q\\1\le j\le n}}\Delta_{ij}}{\delta_{ij}+\rho\max\limits_{\substack{2\le i\le q\\1\le j\le n}}\Delta_{ij}} \quad (13)$$

[0127] $\xi_{i参考}(j)$表示第i个参考样本的第j个评估指标与标准样本的第j个评估指标的关联程度,其值越大表明被评估的参考样本越接近标准样本,当选取n个评估指标对参考样本进行评估时,每个参考样本可以计算出n个灰色关联度;

[0128] 其中,Δ_{ij}为无量纲化测量矩阵$[X_{ij}]$中标准样本与参考样本之间的差值,$2\le i\le m+q$,$1\le j\le n$;ρ为分辨系数,ρ=0.5。

[0129] 计算待评估样本与标准样本之间的灰色关联度$\xi_{i待评估}(j)$,其计算公式为:

[0130] $$\xi_{i待评估}(j)=\frac{\min\limits_{\substack{(q+1)\le i\le(m+q)\\1\le j\le n}}\Delta_{ij}+\rho\max\limits_{\substack{(q+1)\le i\le(m+q)\\1\le j\le n}}\Delta_{ij}}{\delta_{ij}+\rho\max\limits_{\substack{(q+1)\le i\le(m+q)\\1\le j\le n}}\Delta_{ij}} \quad (14)$$

[0131] $\xi_{i待评估}(j)$表示第i个待评估样本的第j个评估指标与标准样本的第j个评估指标的关联程度,其值越大表明待评估样本越接近标准样本,当选取n个评估指标对待评估样本进行评估时,每个待评估样本可以计算出n个灰色关联度。

[0132] 其中,Δ_{ij}为所述无量纲化测量矩阵$[X_{ij}]$中标准样本与待评估样本之间的差值,$q+1\le i\le q+m$,$1\le j\le n$;ρ为分辨系数,ρ=0.5。

[0133] 4、计算待评估样本与标准样本之间的综合灰色关联度$\Phi_{i待评估}$,其计算公式为:

[0134] $$\Phi_{i待评估}=\sum_{j=1}^{n}w_j\xi_{i待评估}(j) \quad (15)$$

[0135] 综合灰色关联度$\Phi_{i待评估}$表示数据样本S中待评估样本S_i($q+1\le i\le q+m$)与标准样本的综合关联程度,其值大小能够反映该待评估样本与标准样本之间的接近程度,$\Phi_{i待评估}\in[0,1]$,$\Phi_{i待评估}$值越大,表示该待评估样本越接近标准样本,$\Phi_{i待评估}$值越小,表示该待评估样本越偏离标准样本。

[0136] 计算参考样本与标准样本之间的综合灰色关联度$\Phi_{i参考}$,其计算公式为:

[0137] $$\Phi_{i参考}=\sum_{j=1}^{n}w_j\xi_{i参考}(j) \quad (16)$$

[0138] 综合灰色关联度$\Phi_{i参考}$表示数据样本S中参考样本S_i($2\le i\le q$)与标准样本的综合关联程度,其值大小能够反映该参考样本与标准样本之间的接近程度,$\Phi_{i参考}\in[0,1]$,$\Phi_{i参考}$值越大,表示该参考样本越接近标准样本,$\Phi_{i参考}$值越小,表示该参考样本越偏离标准样本。

[0139] 其中,式(15)和式(16中)w_j为评估指标X_j的权重,ρ为分辨系数,一般取值为[0,1],本实施例中ρ=0.5。

[0140] 五、构建综合灰色关联度$\Phi_{i待评估}$的量化评分函数,依据量化评分函数评估光伏电站的无功支撑能力,其表达式为:

[0141]

$$\begin{cases} G_{q参考}\cdot\Phi_{i待评估}/\Phi_{q参考} & 0\le\Phi_{i待评估}<\Phi_{q参考} \\ G_{(q-1)参考}\cdot e^{(q-1)(\Phi_{i待评估}-\Phi_{(q-1)参考})/(\Phi_{(q-1)参考}-\Phi_{q参考})} & \Phi_{q参考}\le\Phi_{i待评估}<\Phi_{(q-1)参考} \\ (G_{(q-2)参考}-G_{(q-3)参考})\cdot(\Phi_{i待评估}-\Phi_{(q-3)参考})/(\Phi_{(q-2)参考}-\Phi_{(q-3)参考})+G_{(q-3)参考} & \Phi_{(q-2)参考}\le\Phi_{i待评估}<\Phi_{(q-3)参考} \\ (G_{(q-3)参考}-G_{(q-4)参考})\cdot(\Phi_{i待评估}-\Phi_{(q-4)参考})/(\Phi_{(q-3)参考}-\Phi_{(q-4)参考})+G_{(q-4)参考} & \Phi_{(q-3)参考}\le\Phi_{i待评估}<\Phi_{(q-4)参考} \\ \vdots & \\ (G_{(q-t)参考}-G_{(q-t-1)参考})\cdot(\Phi_{i待评估}-\Phi_{(q-t-1)参考})/(\Phi_{(q-t)参考}-\Phi_{(q-t-1)参考})+G_{(q-t-1)参考} & \Phi_{(q-t)参考}\le\Phi_{i待评估}<\Phi_{(q-t-1)参考} \\ \vdots & \\ (100-G_{2参考})\cdot(\Phi_{i待评估}-\Phi_{2参考})/(1-\Phi_{2参考})+G_{2参考} & \Phi_{2参考}\le\Phi_{i待评估}<1 \end{cases}$$

[0142] （17）

[0143] 依据量化评分函数计算每个数据样本S中待评估样本S_i(q+1≤i≤q+m)的综合灰色关联度得分，然后计算m个待评估本的综合灰色关联度得分的加权平均值，依据加权平均值对光伏电站的无功支撑能力进行评价。

[0144] 本实施例中依据量化评分函数评估光伏电站的无功支撑能力的过程为：

[0145] 1、设定综合灰色关联度$\Phi_{i待评估}$的性质为：

[0146] ①：当$\Phi_{i待评估}$=0时，其评估得分为0；

[0147] ②：当$\Phi_{i待评估}$=1时，其评估得分为100分。

[0148] 2、依据式(16)计算参考样本与标准样本之间的综合灰色关联度$\Phi_{i参考}$，本实施例中设定q=5，则参考样本的综合灰色关联度为$\Phi_{2参考}$、$\Phi_{3参考}$、$\Phi_{4参考}$、$\Phi_{5参考}$，设置每个参考样本的综合灰色关联度对应的评分结果依次为：

[0149] ($\Phi_{2参考}$,$G_{2参考}$)、($\Phi_{2参考}$,$G_{2参考}$)、($\Phi_{3参考}$,$G_{3参考}$)、($\Phi_{4参考}$,$G_{4参考}$)、($\Phi_{5参考}$,$G_{5参考}$)。

[0150] 3、构建综合灰色关联度的量化评分函数为：

[0151]

$$\begin{cases} G_{5参考}\cdot\Phi_{i待评估}/\Phi_{5参考} & 0\le\Phi_{i待评估}<\Phi_{5参考} \\ G_{4参考}\cdot e^{4(\Phi_{i待评估}-\Phi_{4参考})/(\Phi_{4参考}-\Phi_{5参考})} & \Phi_{5参考}\le\Phi_{i待评估}<\Phi_{4参考} \\ (G_{3参考}-G_{4参考})\cdot(\Phi_{i待评估}-\Phi_{4参考})/(\Phi_{3参考}-\Phi_{4参考})+G_{4参考} & \Phi_{4参考}\le\Phi_{i待评估}<\Phi_{3参考} \\ (G_{2参考}-G_{3参考})\cdot(\Phi_{i待评估}-\Phi_{3参考})/(\Phi_{2参考}-\Phi_{3参考})+G_{3参考} & \Phi_{3参考}\le\Phi_{i待评估}<\Phi_{2参考} \\ (100-G_{2参考})\cdot(\Phi_{i待评估}-\Phi_{2参考})/(1-\Phi_{2参考})+G_{2参考} & \Phi_{2参考}\le\Phi_{i待评估}<1 \end{cases} \quad (18)$$

[0152] 4、计算待评估样本与标准样本之间的综合灰色关联度$\Phi_{i待评估}$，本实施例中设定m=30，则待评估样本的综合灰色关联度为$\Phi_{1待评估}$～$\Phi_{30待评估}$，将$\Phi_{1待评估}$～$\Phi_{30待评估}$分别代入式(18)，对30次的计算结果进行加权平均值计算，得到最终的光伏电站无功能力得分，从而对其进行无功支撑能力等级的判断。

[0153] 最后应当说明的是：所描述的实施例仅是本申请一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本申请中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本申请保护的范围。

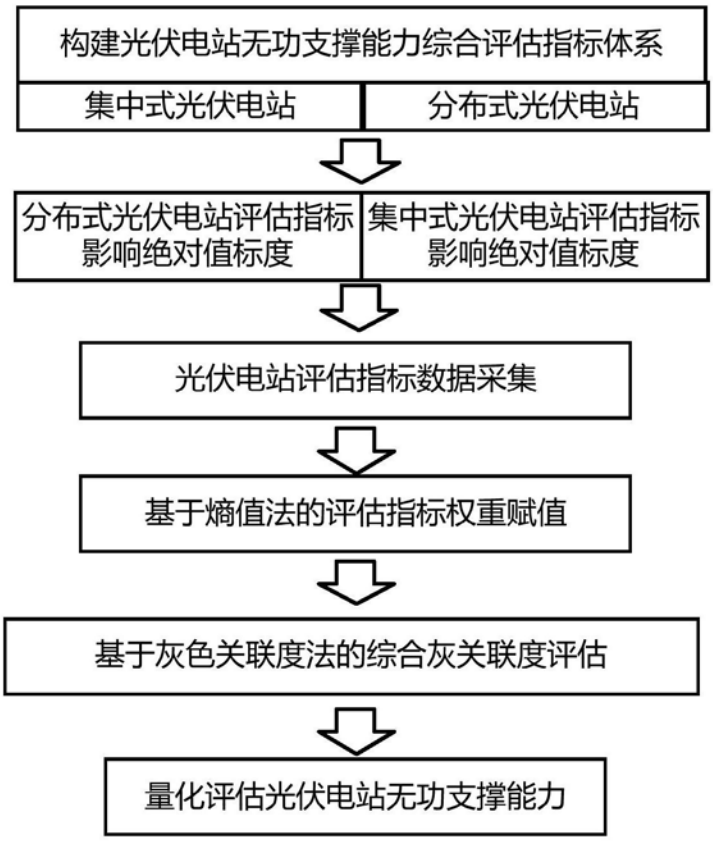

构建光伏电站无功支撑能力综合评估指标体系
集中式光伏电站
分布式光伏电站
分布式光伏电站评估指标影响绝对值标度
集中式光伏电站评估指标影响绝对值标度
光伏电站评估指标数据采集
基于熵值法的评估指标权重赋值
基于灰色关联度法的综合灰关联度评估
量化评估光伏电站无功支撑能力

图1