

DOI: 10.7667/PSPC170060

# 基于风电功率变化典型场景的风电场无功补偿优化配置

黄震希<sup>1,3</sup>, 张祥龙<sup>2</sup>, 刘燕华<sup>1</sup>, 张东英<sup>1</sup>, 刘颖<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 国网北京经济技术研究院, 北京 102209;  
3. 国网福州供电公司, 福建 福州 350009)

**摘要:** 针对集中式接入的风电场, 在升压变电站进行无功补偿优化配置。通过基于动态时间弯曲的层次聚类法分析风电功率整体变化特性, 获得典型场景及其概率, 并利用局部波动数值的概率分布来表征风电功率局部变化特性。在此基础上, 建立二层规划模型, 上层模型以年综合费用最小为目标函数, 下层模型针对风电场全年的风电功率进行动态无功优化, 达到兼顾经济性和运行可靠性的目的。采用遗传算法和原对偶内点法进行求解, 并通过某实际风电场的仿真算例, 验证所提出方法的可行性和有效性。

**关键词:** 风电场; 无功补偿; 聚类分析; 典型场景; 二层规划; 动态无功

## Optimal configuration of wind farm reactive power compensation based on wind power fluctuation typical scenarios

HUANG Zhenxi<sup>1,3</sup>, ZHANG Xianglong<sup>2</sup>, LIU Yanhua<sup>1</sup>, ZHANG Dongying<sup>1</sup>, LIU Ying<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;  
2. State Grid Beijing Economic Research Institute, Beijing 102209, China;  
3. State Grid Fuzhou Power Supply Company, Fuzhou 350009, China)

**Abstract:** As for the integrated wind farm, the optimal configuration of reactive power compensation in the boost substation is studied. The hierarchical clustering method based on dynamic time warping technology is used to describe the overall fluctuation characteristics of wind power, and representative scenarios and their probabilities can be obtained. Moreover, the local fluctuation value and its corresponding probability distribution can describe the local fluctuation characteristics of wind power. Considering economy and operation reliability of the wind farm, a bi-level planning model is built. The minimization of annual total cost is taken as the upper level planning objective function, and the dynamic reactive power optimization model of the wind power is proposed in the lower level planning model. The model is solved by the genetic algorithm and the primal-dual interior point method, and the simulation results of an actual wind farm validate the feasibility and effectiveness of the strategy.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Beijing Economic Research Institute (No. ZZKJ-2016-05).

**Key words:** wind farm; reactive power compensation; clustering analysis; typical scenarios; bi-level planning; dynamic reactive power

## 0 引言

目前, 风力发电是一种较为成熟的可再生能源技术。集中式接入的风电场并网会对电力系统的安全稳定运行造成影响<sup>[1-2]</sup>, 根据风电并网相关技术规范<sup>[3]</sup>的要求, 在正常运行情况下, 风电场需要具备有无功电压调节的能力, 保证并网点的电压稳定。

双馈型风电机组(DFIG)已取代鼠笼型风电机组

成为主流机型, 虽然其具有一定的无功调节能力, 但无功容量受变流器容量的限制, 无法满足风电场的全部无功需求<sup>[4-5]</sup>。所以风电场无功主要是在升压变电站进行集中补偿<sup>[6-8]</sup>, 补偿设备包括静态无功补偿电容器组和动态无功补偿装置 SVC 或 SVG。其中, 电容器组价格低廉, 使用方便, 但不具有连续调节的性能, 并且电容器全天的动作次数受到一定限制; 动态无功补偿装置可以实现快速跟踪电压波动, 连续、平缓地输出无功, 但价格较昂贵。因此在实际工程中, 通常综合采用这两类无功补偿装置对风电场进行无功补偿。如何合理规划电容器组和

基金项目: 国网北京经济技术研究院科技项目 (ZZKJ-2016-05) “多种能源的互补优化调度技术研究”

动态无功补偿装置的容量及其相应的容量配比,对于风电场在稳态下的正常运行以及风电场的动态无功支撑能力具有重要的作用。

目前风电场无功补偿配置普遍通过计算风电最大出力断面下的无功损耗来估算无功补偿容量的大小<sup>[9]</sup>,并按固定的比例分配离散无功补偿装置和动态无功补偿装置的配比容量;文献[10]根据风电机组满发状态下的无功需求量来确定所配电容器组的总容量,并以电容器单组容量作为动态无功补偿装置的容量。此类方法并未计及无功补偿装置的投资成本,而且也没有考虑风电功率的随机波动性对无功补偿配置的影响,配置结果较为粗糙。文献[11-12]基于概率场景分析法,综合考虑投资成本和运行指标,对无功补偿装置进行优化配置;文献[13]采用机会约束规划,建立无功补偿规划模型;文献[14]计及风功率分布规律,采用成本折中的方式,考虑弃风因素,建立优化决策模型。但以上文献都只是考虑单个时间断面下的风电出力情况,由于电容器组的动作次数受到限制,电容器组在实际中的投切运行方式与风电功率连续的波动特性有很大关系,并且电容器组的投切方式也会影响动态无功补偿装置的补偿效果,所以需要以连续的时间序列场景作为风电场无功规划场景。文献[15-16]采用二层规划模型,考虑了电容器的优化投切效益和投切次数限制,对间歇性分布式电源和电容器进行综合优化配置,但是文献中并未具体分析风电功率波动变化特性对无功补偿配置的影响。

综上所述,本文分别从风电功率整体变化特性和局部变化特性进行分析,构造风电场无功规划所需的典型场景;在此基础上,采用二层规划模型,对电容器单组容量、安装组数和动态无功补偿装置的安装容量进行优化配置,上层模型以年综合费用为目标函数,下层模型对每个典型场景进行日内动态无功优化,从而实现兼顾经济性和运行可靠性的目标,并采用遗传算法和原对偶内点法进行求解;通过某实际风电场的仿真算例,验证所提出方法的可行性和有效性。

## 1 风电功率波动的典型场景

### 1.1 风电功率整体变化特性

本文采用基于动态时间弯曲的层次聚类法,对风电功率在日内整体变化特性进行聚类分析,并对风电功率相似日进行有效归类,从各类中提取典型场景。将各个时段内风电功率采集点的平均值作为该时段的风电功率数值,从而获得日平均风电功率曲线,以此作为聚类对象进行聚类分析。

#### 1) 动态时间弯曲

动态时间弯曲在比较前需要计算各个数据点

之间的距离,从而方便找寻最优弯曲路径。假设两个时间序列分别为  $X = [(t_1, x_1), (t_2, x_2), \dots, (t_n, x_n)]$ 、 $Y = [(t_1, y_1), (t_2, y_2), \dots, (t_n, y_m)]$ , 元素  $(t_i, x_i)$ 、 $(t_i, y_i)$  表示时刻  $t_i$  对应的数值  $x_i$ 、 $y_i$ 。时间序列中对象  $x_i (1 \leq i \leq n)$  和  $y_j (1 \leq j \leq m)$  的距离为

$$d(x_i, y_j) = (x_i - y_j)^2 \quad (1)$$

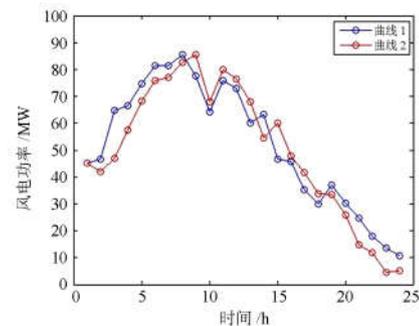
从而两个时间序列间可以形成一个  $m \times n$  的距离矩阵  $Dmatrix$  为

$$Dmatrix = \begin{pmatrix} d(x_1, y_m) & \dots & d(x_n, y_m) \\ \vdots & & \vdots \\ d(x_1, y_1) & \dots & d(x_n, y_1) \end{pmatrix} \quad (2)$$

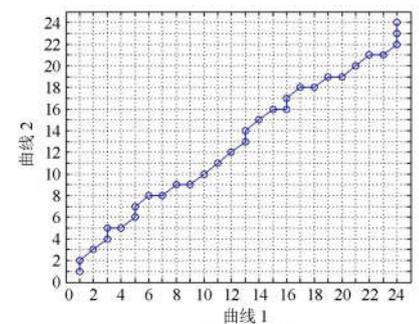
在获得距离矩阵后,需要寻找一条使两个时间序列间累积距离最小的路径,达到最佳匹配,该路径称为最优弯曲路径。将距离矩阵转化为网格形式,每个网格点代表距离矩阵中的元素。设弯曲路径为  $W$ ,  $W$  由  $K$  个路径线段组成,即  $W = (w_1, w_2, \dots, w_k, \dots, w_K)$ 。弯曲路径需要满足有界性、边界条件、连续性和单调性<sup>[17-18]</sup>。满足以上条件的弯曲路径相当多,其中最优弯曲路径满足式(3),可利用动态规划算法求解该问题。

$$DTW(X, Y) = \min \left( \sqrt{\sum_{k=1}^K w_k / K} \right) \quad (3)$$

选取两条日平均风电功率曲线,搜索最优弯曲路径如图1所示。



(a) 对比的两条曲线



(b) 最优弯曲路径

图1 对比曲线和最优弯曲路径

Fig. 1 Curves of comparison and optimal warping way

通过动态时间弯曲可对各条日平均风电功率曲线进行相似性度量, 将计算得到的各个  $DTW$  距离存入相似性度量矩阵  $S$  中方便聚类分析。设有  $N$  条日平均风电功率曲线, 则相似性度量矩阵为

$$S = \begin{pmatrix} DTW(1,1) & \dots & DTW(1,N) \\ \vdots & & \vdots \\ DTW(N,1) & \dots & DTW(N,N) \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中, 对角线元素  $DTW(i,i) = 0$ , 且  $S$  为对称阵, 在动态时间弯曲计算中相互比较的两条曲线只比较一次。

2) 层次聚类法

本文选择最小距离的凝聚层次聚类, 在聚类过程中以动态时间弯曲距离作为相似性度量工具。具体步骤如下:

(a) 将每一个数据对象作为独立的一个簇, 利用动态时间弯曲计算各个簇间的距离  $DTW(i, j)$ , 生成相似性度量矩阵  $S$ ;

(b) 将距离最近 ( $\min DTW(i, j)$ ) 的两个簇合并成一个新的簇;

(c) 重新计算新合并的簇与所有其他簇之间的距离, 选择新合并的簇与原有簇间距离最小的值作为两个簇间的相似性距离, 更新相似性度量矩阵  $S$ ;

(d) 重复(b)、(c), 直至所有簇最终合并为同一个簇或者达到某个终止条件为止。

利用上述方法对某风电场的日平均风电功率曲线进行层次聚类, 由于总的的数据量太大, 为了清晰表示树状图结构, 以 30 条日平均功率曲线的层次聚类法树状图为例, 如图 2 所示。可以看出, 聚类数可根据需要灵活地在树状图进行选择。

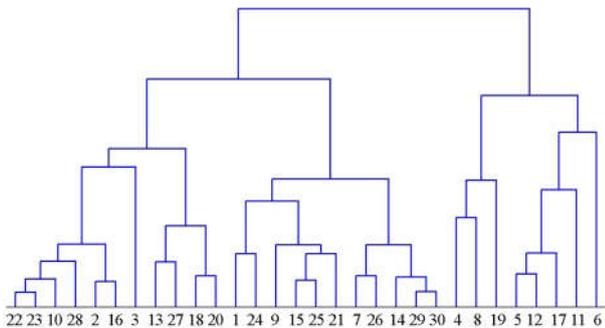


图 2 层次聚类法树状图(30 条)

Fig. 2 Tree diagram of hierarchical clustering method (30 curves)

以层次聚类法获得的某两个分类为例, 分别给出这两个分类在不同聚类数  $k$  下的聚类结果, 如图 3 和图 4 所示。可以看出, 同一类中的日平均风电功率曲线在整体变化趋势上具有一定相似性, 类 1

的日平均风电功率曲线的整体波动特性呈现凸状, 类 2 的日平均风电功率曲线的整体波动特性呈现凹状, 两类间的差异性较为明显。而且随着聚类数的增加, 同一类中的日平均风电功率曲线相似性越高。说明层次聚类法可有效地对日平均风电功率曲线进行区分归类, 使同一类中的曲线具有较高的相似性, 不同类之间的曲线具有较大的差异性, 并且可以通过控制聚类数对同一类中曲线的相似程度进行调节, 即可根据规划需求和计算时间成本选择合适的聚类数。

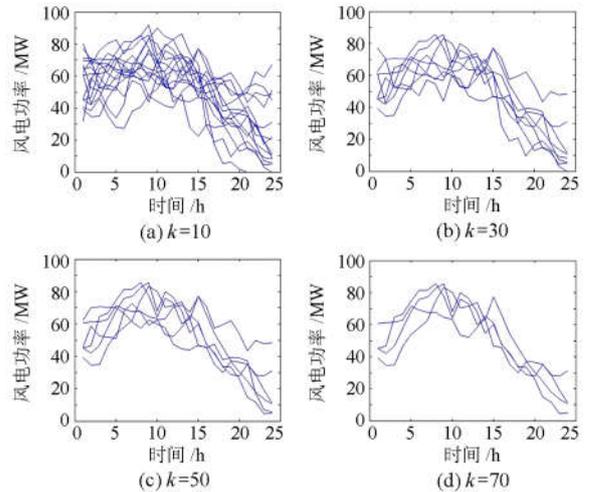


图 3 类 1 在不同聚类数下的聚类结果

Fig. 3 Results of different clustering numbers in class 1

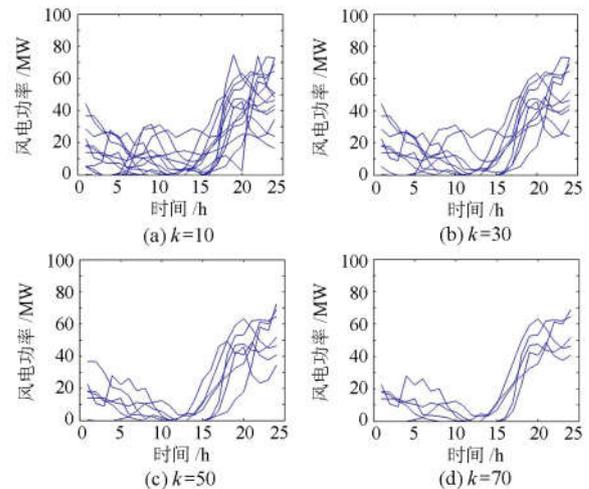


图 4 类 2 在不同聚类数下的聚类结果

Fig. 4 Results of different clustering numbers in class 2

当完成聚类后, 需要从各类中提取典型场景及其概率。首先, 选取在同一类中与该类的其他曲线距离最近的一条曲线作为该类的聚类中心。通过该

类曲线的平均值获取典型场景, 计算方法为: 以聚类中心曲线作为基础, 对于聚类中心曲线上各个时刻的数据点, 计算该类中的所有曲线与该时刻在动态时间弯曲中相匹配的数据点的平均值作为该类典型场景在该时刻的数值。该类中的曲线数目与总曲线数的比值作为该类典型场景的概率值。

## 1.2 风电功率局部变化特性

基于动态时间弯曲的层次聚类法可以较好地归纳表征风电功率的整体变化趋势以及大范围的波动特性。但是, 风电场无功优化配置中涉及动态无功补偿装置, 并且风电功率时刻在波动变化, 所以规划场景在已获得典型场景的基础上, 还需要考虑风电功率在各个规划时段内的局部波动特性, 这类局部的波动较难找到规律, 并且变化幅度不定, 很难以确切的公式计算描述。所以通过统计波动数值大小的概率分布来表征局部波动性。

本文定义局部波动数值  $\Delta P$ , 表达式为

$$\Delta P_i = P_{wi} - \bar{P}_{i,t} \quad (5)$$

式中:  $\Delta P_i$  为第  $i$  个采集点的局部波动数值;  $P_{wi}$  为第  $i$  个采集点的实测风电数据;  $\bar{P}_{i,t}$  为第  $i$  个采集点所属时段的风电功率平均值, 其中  $i$  属于第  $t$  个时间段。

通过对历史风电功率数据进行统计分析, 可得到局部波动数值的概率分布函数为

$$\varphi(\Delta P) = \frac{N(\Delta P)}{N_a} \times 100\% \quad (6)$$

式中:  $\varphi(\Delta P)$  为局部波动数值  $\Delta P$  在统计数据中出现的概率;  $N(\Delta P)$  为  $\Delta P \in [\Delta P - \frac{1}{2}\varepsilon, \Delta P + \frac{1}{2}\varepsilon]$  的个数,  $\varepsilon$  为统计数据间隔;  $N_a$  为统计数据总数。

若已知某个时段的风电功率平均值, 则利用局部波动数值的概率分布就可以得到在该时段内, 风电功率在各种波动情况下的数值及其概率。通过统计获得某风电场的局部波动数值的概率分布如图 5

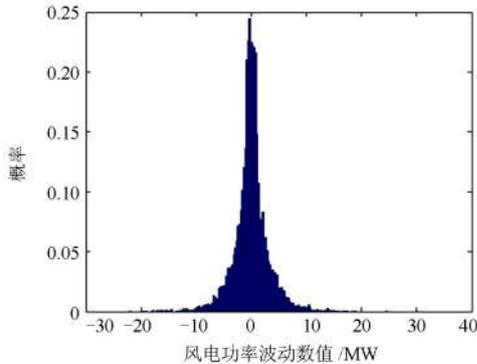


图 5 局部波动数值概率分布

Fig. 5 Probability distribution of local fluctuation value

所示。可以看出, 该风电场的局部波动数值分布范围在  $-22.0823 \sim 30.1650$  MW, 其中主要集中在  $-10 \sim 10$  MW 区间段。

## 2 风电场无功二层规划模型

在对风电场无功补偿设备进行配置时, 需要考虑其经济成本, 同时还需要考虑在各个场景下, 风电场对无功电压的运行要求。由于 SVG 具有较好的补偿能力和调节性能, 使用也越来越广泛, 因此本文使用 SVG 作为动态无功补偿装置。

本文采用二层规划模型, 在上层模型中以年综合费用最小为目标, 确定无功补偿设备的容量配置, 下层模型在此基础上对每个场景进行一天内的动态无功优化, 对无功补偿容量进行校核, 并将优化结果返回上层, 所以计算过程中上、下层相互制约, 通过反复迭代最终得到最优解。

### 2.1 上层规划模型

在上层模型中, 以年综合费用为目标函数。年综合费用包括两个部分: 一个是投资成本年费用, 即 SVG 和电容器组折算到每年的投资费用; 另一个是运行等效成本年费用, 是指在各个风电功率场景下, 无功补偿装置的优化投运值对风电场的运行优化指标带来影响, 本文将这部分因素转化为等价的成本费用。本层的优化变量为 SVG 安装额定容量、电容器单组额定容量以及并联组数。具体表达式为

$$\min F_{up} = C_{inv} + C_{on} \quad (7)$$

$$C_{inv} = A(r, l)C_{SVG}S_{SVG} + A(r, m)(C_c k_c n_c + C_b n_c) \quad (8)$$

$$C_{on} = 365\mu \sum_{s=1}^{N_s} p_s F_{down}^s \quad (9)$$

式中:  $F_{up}$  为上层目标函数;  $C_{inv}$  为无功补偿设备投资成本年费用;  $C_{on}$  为运行等效成本年费用;  $A(r, l)$ 、 $A(r, m)$  分别为 SVG 和电容器组的现值系数,  $r$  为折现率,  $l$  为 SVG 的使用寿命,  $m$  为电容器的使用寿命;  $C_{SVG}$  为 SVG 的单位容量投资成本;  $S_{SVG}$  为 SVG 容量;  $C_c$  为电容器组的单位容量投资成本;  $C_b$  为电容器组每增加一个分组的价格;  $s$  为场景数,  $N_s$  为场景总数;  $\mu$  为将运行优化指标转化成经济成本的衡量系数;  $p_s$  为场景  $s$  的概率;  $F_{down}^s$  为下层返回的目标函数, 具体公式见 2.2 节。

### 2.2 下层规划模型

在上层模型给定 SVG 容量范围和电容器单组容量以及分组数的基础上, 下层模型需要选取合适的风电功率场景进行日内无功优化。由于风电场内无功调节设备在控制调节的时间尺度上存在差异,

所以在进行场景分析时, 需要考虑风电功率整体波动特性以及局部波动特性, 并且利用无功调节设备协调配合进行无功电压调节。结合第 1 节所构造的无功规划场景, 在下层规划模型中分两阶段进行分析: 第 1 阶段以聚类分析获得的风电功率典型场景为基础, 综合优化离散无功设备和动态无功设备在各个规划时段的投运值; 第 2 阶段在第 1 阶段的基础上, 利用局部波动数值及其概率分布描述风电功率局部波动性, 优化 SVG 在各个规划时段内各种风电功率局部波动情况下的无功补偿量。

### 1) 第 1 阶段

该阶段以聚类分析得到的风电功率典型场景作为基础, 对电容器组、有载调压变压器和 SVG 在各个规划时段内的投运值进行优化。其表达式为

$$\min F_{\text{down1}}^s = \sum_{t=1}^{24} (\alpha \Delta Q_{\text{PCC}}^{t,s} + \beta \Delta Q_{\text{SVG}}^{t,s}) \quad (10)$$

$$\Delta Q_{\text{PCC}}^{t,s} = (Q_{\text{PCC}}^{t,s})^2 \quad (11)$$

$$\Delta Q_{\text{SVG}}^{t,s} = \frac{(Q_{\text{SVG}}^{t,s} - Q_{\text{ref}})^2}{S_{\text{SVG}}} \quad (12)$$

式中:  $F_{\text{down1}}^s$  为下层模型在场景  $s$  下第 1 阶段的目标函数; 所有上角标含有  $t, s$  的变量代表在第  $s$  个场景下、第  $t$  个小时时段内的数值;  $\Delta Q_{\text{PCC}}^{t,s}$ 、 $\Delta Q_{\text{SVG}}^{t,s}$  分别为 PCC 点无功考核指标和动态无功裕度指标,  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为相应的权重系数;  $Q_{\text{PCC}}^{t,s}$  为 PCC 点无功交换数值;  $Q_{\text{SVG}}^{t,s}$  为 SVG 无功输出量;  $Q_{\text{ref}}$  为保证动态无功裕度所设的无功输出参考值。

### 2) 第 2 阶段

在风电场无功优化模型中, 第 2 阶段在第 1 阶段获得离散无功设备优化值的基础上, 利用 SVG 对各个规划时段内由于局部波动造成风电出力变化的情况进行无功补偿。表达式为

$$\min F_{\text{down2}}^s = \sum_{t=1}^{24} E_t(Q_C^{t,s}, T^{t,s}) \quad (13)$$

$$E_t(Q_C^{t,s}, T^{t,s}) = \sum_{i=1}^{N_{\text{dir}}} p_i \Delta Q_{\text{PCC}i}^{t,s} \quad (14)$$

式中:  $F_{\text{down2}}^s$  为下层模型在  $s$  场景下第 2 阶段的目标函数;  $E_t(Q_C^{t,s}, T^{t,s})$  表示在第 1 阶段优化得到第  $t$  个小时时段内电容器组无功投运值  $Q_C^{t,s}$  和变压器投运档位值  $T^{t,s}$  的基础上, 第 2 阶段目标函数在该时段优化的期望值;  $N_{\text{dir}}$  为局部波动数值的个数;  $p_i$  为第  $i$  个局部波动数值所对应的概率,  $\Delta Q_{\text{PCC}i}^{t,s}$  为该局部波动数值所对应的风电功率下的 PCC 点无功考核指标。

两个阶段的约束条件为

$$P_i - U_i \sum_{j=1}^{N_{\text{bus}}} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad i \in N_{\text{bus}} \quad (15)$$

$$Q_i - U_i \sum_{j=1}^{N_{\text{bus}}} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad i \in N_{\text{bus}} \quad (16)$$

$$U_{\text{PCC}}^{\min} \leq U_{\text{PCC}} \leq U_{\text{PCC}}^{\max} \quad (17)$$

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad i \in N_{\text{ins}} \quad (18)$$

$$\cos \varphi^{\min} \leq \cos \varphi_{\text{PCC}} \leq \cos \varphi^{\max} \quad (19)$$

$$|Q_{\text{SVG}}| \leq S_{\text{SVG}} \quad (20)$$

其中第 1 阶段增加如下约束条件:

$$0 \leq Q_C^{t,s} \leq k_c n_c \quad (21)$$

$$T^{\min} \leq T^{t,s} \leq T^{\max} \quad (22)$$

$$\sum_{t=0}^{23} |Q_C^{t+1,s} \oplus Q_C^{t,s}| \leq N_c \quad (23)$$

$$\sum_{t=0}^{23} |T^{t+1,s} \oplus T^{t,s}| \leq N_T \quad (24)$$

式中:  $P_i$ 、 $Q_i$  分别为节点  $i$  处注入的有功功率和无功功率;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  分别为导纳矩阵的实部和虚部;  $\theta_{ij}$  为节点  $i$  和节点  $j$  的相角差;  $U_i$  为节点  $i$  处的电压值;  $N_{\text{bus}}$  为节点总数;  $U_{\text{PCC}}$  为 PCC 点处的电压值;  $U_{\text{PCC}}^{\min}$ 、 $U_{\text{PCC}}^{\max}$  为 PCC 点处可允许电压最小值和最大值;  $U_i^{\min}$ 、 $U_i^{\max}$  为节点  $i$  可允许电压最小值和最大值;  $N_{\text{ins}}$  为除 PCC 点外风电场内节点数;  $\cos \varphi_{\text{PCC}}$  为 PCC 点处的功率因数;  $\cos \varphi^{\min}$ 、 $\cos \varphi^{\max}$  为 PCC 点处可允许功率因数最小值和最大值;  $T^{\min}$ 、 $T^{\max}$  分别为有载调压变压器可调节范围最小值以及最大值;  $N_c$ 、 $N_T$  分别为日内电容器组和有载调压变压器最大允许动作次数。

下层模型最终的目标函数为

$$\min F_{\text{down}}^s = F_{\text{down1}}^s + F_{\text{down2}}^s \quad (25)$$

## 3 求解算法

### 3.1 上层模型

在上层模型中, 求解的变量涉及电容器组和有载调压变压器这类离散型变量以及 SVG 这类连续型变量, 属于混合整数问题, 所以可使用遗传算法进行求解。染色体结构为

$$X = [S_{\text{SVG}} \quad k_c \quad n_c] \quad (26)$$

式中:  $S_{\text{SVG}}$ 、 $k_c$  采用实数编码;  $n_c$  采用整数编码。

### 3.2 下层模型

#### 1) 第 1 阶段

下层模型的第 1 阶段中, 优化的变量包括各个

典型场景下的离散型变量(电容器组、有载调压变压器)和连续型变量(SVG), 属于混合整数非线性规划问题, 并且由于约束条件中包含动作次数限制, 属于存在时空耦合特性的动态无功优化问题。所以选择遗传算法进行求解, 并通过编码方式进行解耦处理。

设置染色体结构为

$$X = [Q_{SVG}^1 \cdots Q_{SVG}^{24} \mid n_c^1 \cdots n_c^{N_c} \mid t_c^1 \cdots t_c^{N_c} \mid T^1 \cdots T^{N_T} \mid t_T^1 \cdots t_T^{N_T}] \quad (27)$$

式中:  $Q_{SVG}^i$  为第  $i$  个时段的 SVG 投运值, 采用实数编码;  $n_c^i$  为电容器组在第  $i$  次投切的组数,  $t_c^i$  为与之相应的投切时段,  $n_c^i$  与  $t_c^i$  一一对应, 采用整数编码; 同理, 有载调压变压器的编码方式与之一样。

### 2) 第 2 阶段

在第 1 阶段获得离散无功设备优化调节量的基础上, 第 2 阶段优化求解在各种风电功率概率波动下的 SVG 投运值和运行考核指标的期望值。由于该阶段只涉及连续型变量, 并且不含有时空耦合问题, 相较于第 1 阶段模型较为简单, 所以采用原对偶内点法进行求解。

### 3.3 算法步骤

算法的具体步骤如下所述。

步骤 1: 输入风电场网络数据和风电功率历史数据。对平均风电功率曲线进行聚类分析, 获得典型场景及其相应的概率; 并且统计局部波动数值的概率分布。

步骤 2: 对上层变量进行遗传编码, 生成上层模型的初始种群。

步骤 3: 针对上层初始种群的每个个体, 进行下层模型第 1 阶段优化: 在每个典型场景下进行动态无功优化, 获得各个规划时段 SVG、电容器组和变压器的优化投运值。

步骤 4: 将第 1 阶段得到的离散无功设备优化结果传递给第 2 阶段, 进行下一阶段优化: 根据局部波动数值的概率分布, 对各个概率波动情况下 SVG 的投运值进行优化。

步骤 5: 综合两个阶段的目标函数, 将下层模型的目标函数值返回上层, 计算上层目标函数值。对上层种群进行遗传操作, 包括选择、交叉、变异, 获得新种群。

步骤 6: 判断是否达到最大迭代次数, 若达到, 则退出计算并输出结果; 否则, 令迭代次数  $iter = iter + 1$ , 转至步骤 3。

算法流程图如图 6 所示。

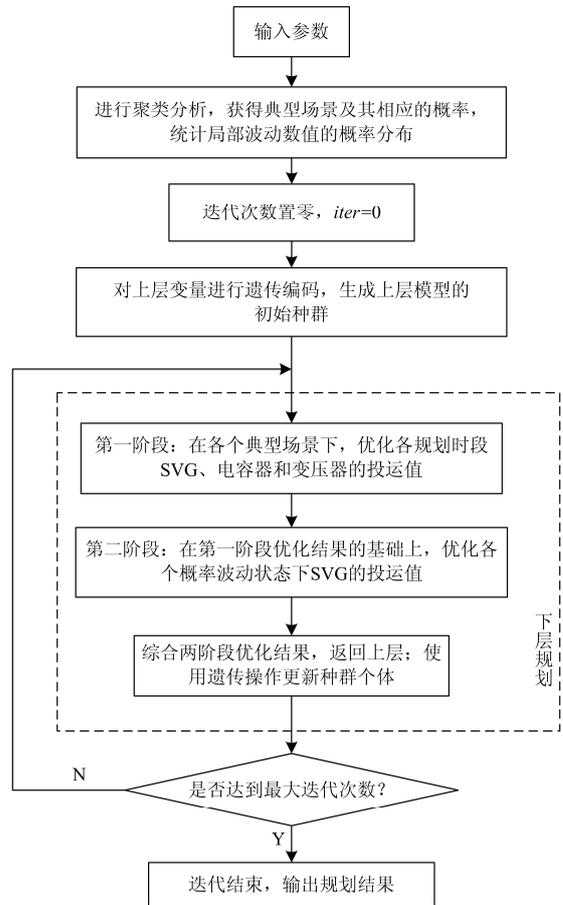


图 6 算法流程图

Fig. 6 Algorithm flow chart

## 4 算例分析

### 4.1 算例参数

以某实际风电场作为研究算例, 电气结构图如图 7 所示。该风电场由 66 台单机容量为 1.5 MW 的双馈型风电机组构成, 每台风机均按恒功率因数模式运行,  $\cos \varphi_{Gi} = 1$ ; 66 台风机分为 6 组, 每组各

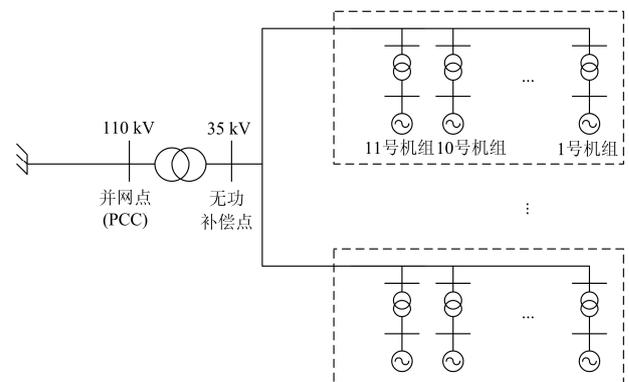


图 7 风电场结构图

Fig. 7 Structure diagram of wind farm

11 台风机; 每台风机出口处配有一台  $36.75 \pm 2 \times 2.5\%/0.69$  kV 的箱式变压器, 风机通过箱式变压器升压至 35 kV, 经汇集系统统一接至升压变电站 35 kV 低压侧; 升压变电站配有一台 120 MVA 的  $115 \pm 8 \times 1.25\%/36.75$  kV 有载调压变压器; 风电场通过一条 50 km 的送电线路连接至等值外网, 送电线路采用 LGJ-240。以外网等值点作为平衡节点, 电压为 1.0 p.u.。

通过 1.1 节的聚类分析可由该风电场日平均风电功率曲线聚类获得典型场景及其概率, 聚类数定为 30; 表征风电功率局部波动特性的局部波动数值概率分布已在 1.2 节给出。该风电场所配置无功补偿装置的基本参数如表 1 所示。

表 1 无功补偿装置参数表

Table 1 Parameter table of reactive power compensation

参数	电容器	SVG
单位容量价格/(万元/Mvar)	6	25
分组成本/(万元/组)	2	\
使用寿命/年	25	20
折现率/%	5	5

所设置的参数如下: 经济衡量系数  $\mu=50$ , 权重系数  $\alpha=0.8$ 、 $\beta=0.2$ , SVG 无功输出参考值  $Q_{ref}=0$ ; 在《风电场接入电力系统技术规定》中规定, 风电场在运行调度中, 并网点电压波动需控制在  $-3\% \sim +7\%$ , 功率因数控制在  $-0.98 \sim +0.98$ , 考虑规划中电压和功率因数的稳定裕度, 本文将 PCC 点电压允许的波动范围设为  $[U_{PCC}^{\min}, U_{PCC}^{\max}] = [0.99, 1.03]$ , PCC 点功率因数允许范围设为  $[\cos \varphi^{\min}, \cos \varphi^{\max}] = [-0.99, 0.99]$ , 风电场内允许电压波动范围为  $[U_i^{\min}, U_i^{\max}] = [0.98, 1.04]$ ; 电容器组和有载调压变压器日内最大允许的動作次数均为 4 次。

#### 4.2 算例结果

采用本文提出的方法对风电场进行无功补偿配置。另外, 以固定比例的配置方式<sup>[10]</sup>作为对比方案: 以风电机组满发状态下的无功需求量作为电容器组安装总容量, 动态无功补偿装置容量大小与电容器单组容量相等, 取为装机容量的 4%。表 2 给出了两种方案下的配置结果, 其对应的相关计算结果如表 3 所示。

表 2 两种方案下的配置结果

Table 2 Configuration results of different plans

方案	电容器单组容量/	电容器并联	SVG 容量/
	Mvar	组数	Mvar
本文方案	4.102	4	5.129
对比方案	4.0	5	4.0

表 3 配置方案相关结果

Table 3 Relevant configuration results of plans

方案	年综合费用/元	投资成本 年费用/ 元	运行等效成 本年费用/ 元	第 1 阶段运 行等效成本 年费用/元	第 2 阶段 运行等效 成本本年费 用/元
本文方案	276 924.10	178 418.35	98 505.75	91 717.20	6788.55
对比方案	303 104.48	172 480.85	130 623.63	113 301.84	17 321.79

从表 2 可以看出, 本文方案配置的电容器组单组容量为 4.102 Mvar, 组数为 4 组, 相较于对比方案, 单组容量增加了 0.102 Mvar, 并联组数减少 1 组; 在电容器组总容量上, 本文方案为 16.408 Mvar, 对比方案为 20 Mvar, 本文方案有所减少; 本文方案配置的 SVG 容量为 5.129 Mvar, 对比方案增加了 1.129 Mvar。表 3 罗列了两种方案的各项指标结果, 本文方案投资成本年费用为 178 418.35 元, 对比方案增加了 5937.5 元; 但是在运行等效成本年费用上, 本文方案优于对比方案, 其中在第 1 阶段的运行等效成本年费用上, 本文方案对比方案减少 21 584.64 元, 在第 2 阶段的运行等效成本年费用上, 本文方案对比方案减少 10 533.24 元, 最终运行等效成本年费用本文方案对比方案减少 32 117.88 元。所以在年综合费用上, 本文方案为 276 924.10 元, 对比方案为 303 104.48 元。

分析以上结果: (1) 由于对比方案以风电场最大有功出力下的无功需求量作为电容器组的总容量, 并且选取电容器单组容量作为 SVG 容量, 所以电容器组和 SVG 的配置相独立, 并未考虑两者在实际运行中相互协调配合以及满足实际运行需求的问题。本文方案分析了风电功率波动对无功补偿装置配置的影响, 考虑在连续时间序列场景下电容器组与 SVG 的协调配合进行无功电压调节的问题, 从实际运行需求角度对无功补偿的容量进行优化, 电容器组和 SVG 的容量配置相互影响, 并且加入经济性成本因素, 在运行稳定性和经济性上达到最优。(2) 由于电容器组的動作次数受限, 无功调节能力有限, 过小的电容器单组容量和过多的并联组数不仅无法改善风电场无功电压质量, 而且增加了成本。所以需要 SVG 来弥补电容器组的不足, 并且本文方案还考虑到风电功率的局部波动问题, 所以在 SVG 的配

置容量上有所增加, 保证风电场具有足够的动态无功调节能力。(3) 在投资成本年费用上, 本文方案相较于对比方案有所增加, 这是由于 SVG 的投入增大且成本较高, 而在下层规划模型两个阶段中, 本文以 PCC 点交换无功功率作为运行考核指标, 本文方案在运行等效成本年费用上均优于对比方案, 说明本文方案所配置的结果更符合风电场实际运行的无功需求, 在运行中保证风电场有相对充足的无功调节容量。

为了进一步验证方案的合理性, 选取风电场各季度的典型出力日曲线, 并且从风电功率历史数据中随机抽取若干条实际出力曲线组成测试库, 对两种方案进行验证测试, 测试库曲线总数取为 50 条。在各条出力曲线下运行时, 风电场无功补偿装置的控制策略为: 首先在各实际出力曲线所对应的平均风电功率曲线下, 综合优化离散无功设备和动态无功补偿装置在日内各个小时时段内的投运值, 目标函数与下层模型第 1 阶段一致; 在此基础上利用动态无功补偿装置实时跟踪调节 PCC 点无功交换数值。统计在各条出力曲线下运行的 PCC 点无功交换数值的绝对值即 PCC 点无功偏差量作为最终的考核指标, 统计两种方案在测试库中运行的结果如表 4 所示。可以看出, 以本文方案配置的无功补偿装置在各条实际出力曲线下运行时, PCC 点无功偏差量总和小于对比方案, 其中最大的偏差量为 0.562 Mvar, 而对比方案达到 1.996 Mvar, 说明本文方案更符合风电场的实际运行需求, 在调节效果上更加优异。

表 4 实际出力曲线下的运行结果

Table 4 Operation results under actual wind power curves

方案	PCC 点无功偏差量总和/Mvar	PCC 点无功偏差量最大值/Mvar
本文方案	3.023	0.562
对比方案	19.334	1.996

选取其中一条实际出力曲线如图 8 所示。在该实际出力曲线下两种方案的无功调节设备优化运行结果如图 9 所示。在该实际出力曲线下, 两种方案的 PCC 点无功交换数值如图 10 所示。可以看出, 本文方案相较于对比方案在运行中 PCC 点无功交换数值更小, 在风电功率波动变化较大的情况下, 本文方案具有更好的无功调节效果。

在进行无功规划时, 所选取的场景需要尽可能接近原始实际数据, 使规划结果更加精确。由第 1.1 节中的聚类分析可知, 随着聚类数的增加, 同类中的场景相似性越高, 不同类之间场景的差异性越大,

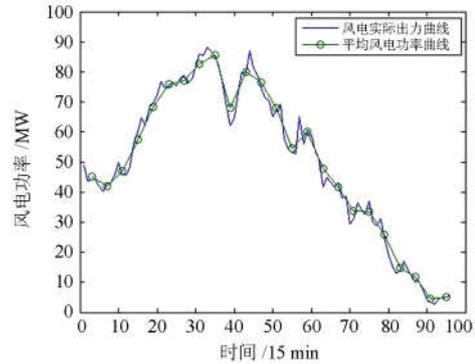


图 8 实际出力曲线及其平均风电功率曲线

Fig. 8 Actual wind power curve and average wind power curve

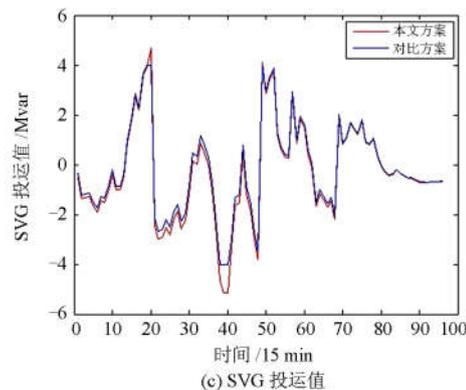
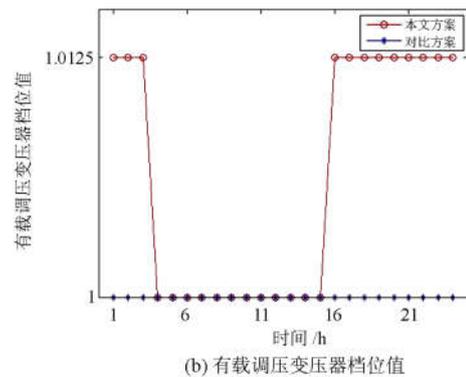
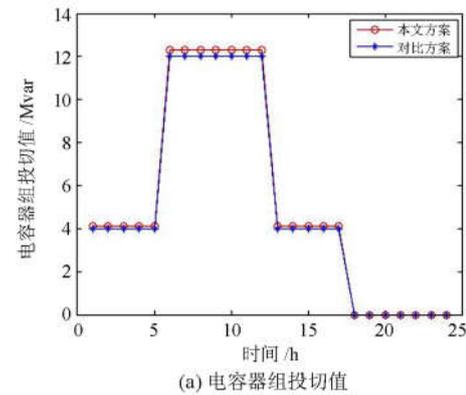


图 9 无功调节设备的运行结果

Fig. 9 Operation results of reactive power devices

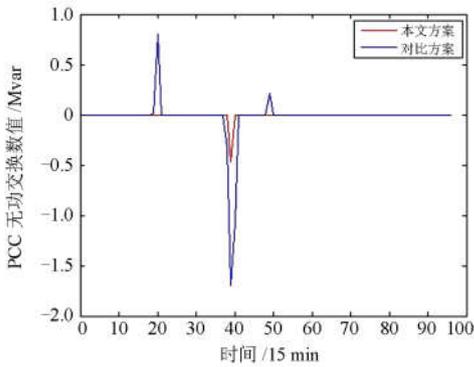


图 10 PCC 点无功交换数值

Fig. 10 Reactive power changing value in PCC

这样所得到的结果越能接近原始实际数据的情况。但是, 聚类数的增加必然会导致计算时间的增加。选取不同的场景聚类数, 分析场景聚类数对规划结果的影响, 结果如表 5 所示。可以看出, 当聚类数较小时, 规划结果的差异性较大, 这是由于所选取的场景数较少, 同类场景的差异性较大, 无法涵盖风电功率波动特性, 一定程度造成失真。当聚类数达到一定程度时, 规划结果趋于稳定。综合来看, 将聚类数定为 30~40, 可以较好地兼顾结果的准确性和计算时间成本。

表 5 不同聚类数下的规划结果

Table 5 Planning results of different clustering numbers

场景聚类数	电容器单组容量/Mvar	电容器并联组数	SVG 容量/Mvar	计算时间
10	3.459	5	4.856	42 min
20	4.218	4	4.998	1 h 1 min
30	4.102	4	5.129	1 h 32 min
40	4.097	4	5.195	2 h 5 min
50	4.085	4	5.181	2 h 48 min
60	4.086	4	5.185	3 h 35 min

为了分析离散无功设备(电容器组、有载调压变压器)的动作次数限制对规划结果的影响, 表 6 中列举了在不同的动作次数限制情况下所对应的规划结果。

表 6 不同动作次数限制下的规划结果

Table 6 Planning results of different operation numbers

动作次数	电容器单组容量/Mvar	电容器并联组数	SVG 容量/Mvar
4	4.102	4	5.129
6	3.425	5	4.562
8	2.861	6	3.998
10	2.336	7	3.524
12	2.319	7	3.489

可以看出, 当增加离散无功设备的动作次数时, 电容器单组容量有所减少, 并联组数相应增加,

而 SVG 的容量呈下降趋势。这是由于当离散无功设备动作次数增加时, 相应地, 其无功调节能力也有所增强, 更细致的电容器分组可以更好地适应风电功率的波动变化, 进一步缓解 SVG 的调节压力。而当动作次数限制达到一定程度时, 规划结果变化不大, 这是因为本文考虑了风电功率局部波动特性, 所以在规划中可以保证 SVG 配置有充足的动态无功调节容量, 而电容器组的配置结果也受到经济性成本的限制, 趋于稳定。

所以不同的动作次数限制会对无功补偿装置的配置规划带来一定程度的影响, 本文方案可以较好地适应各种动作次数限制要求的情况, 具有较高的灵活适应性, 规划人员在进行无功配置时可以根据实际需求选择合适的限制条件。

## 5 结论

本文根据风电场的风电功率整体波动特性和局部波动特性, 构造风电场无功规划典型场景, 并建立二层规划模型对无功补偿装置进行优化配置。通过仿真结果可以看出, 采用二层规划模型可以有效地根据风电场实际运行中的需求对无功补偿装置的容量以及配比进行优化配置, 实现兼顾经济性和运行稳定性的目的, 并且, 规划人员可根据实际运行需求选择合适的聚类数和离散设备动作限制次数, 进行合理的无功优化配置。

## 参考文献

- [1] 迟永宁, 刘燕华, 王伟胜, 等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 77-81.  
CHI Yongning, LIU Yanhua, WANG Weisheng, et al. Study on impact of wind power integration on power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 77-81.
- [2] LI Zhi, YE Lin, ZHAO Yongning, et al. Short-term wind power prediction based on extreme learning machine with error correction[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 9-16. DOI: 10.1186/s41601-016-0016-y.
- [3] 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.  
Standard on connecting wind farms to power system: GB/T 19963—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [4] 黄弘扬, 王波, 黄晓明, 等. 基于双馈风电机组的分布式动态无功支撑系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 140-147.  
HUANG Hongyang, WANG Bo, HUANG Xiaoming, et al. Distributed dynamic reactive power support system based on doubly fed induction generator[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 140-147.

- [5] 闫鹏强, 王增平, 陈振新. 考虑拓扑影响的风电场无功优化策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 76-82.  
YAN Pengqiang, WANG Zengping, CHEN Zhenxin. Reactive power optimization for wind farm considering impact of topology[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 76-82.
- [6] 杨硕, 王伟胜, 刘纯, 等. 双馈风电场无功电压协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 1-6.  
YANG Shuo, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Coordinative control strategy for reactive power and voltage of wind farms with doubly-fed induction generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 1-6.
- [7] 杨硕, 王伟胜, 刘纯, 等. 计及风电功率波动影响的风电场集群无功电压协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4761-4769.  
YANG Shuo, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Coordinative strategy for reactive power and voltage control of wind farms cluster considering wind power fluctuation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4761-4769.
- [8] 李自明, 姚秀萍, 王海云, 等. 计及风电场静态电压稳定性的 VMP 系统无功电压控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 77-83.  
LI Ziming, YAO Xiuping, WANG Haiyun, et al. Study on reactive power and voltage control strategy of VMP system considering static voltage stability of wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 77-83.
- [9] 朱洪波, 宋颖巍, 刘岩, 等. 风电场无功补偿计算方法与容量配置的研究[J]. 现代电力, 2011, 28(6): 73-76.  
ZHU Hongbo, SONG Yingwei, LIU Yan, et al. Research on calculation method of reactive power compensation and capacity configuration for wind farm[J]. Modern Electric Power, 2011, 28(6): 73-76.
- [10] 张永武, 孙爱民, 张源超, 等. 风电场无功补偿容量配置及优化运行[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(6): 150-156.  
ZHANG Yongwu, SUN Aimin, ZHANG Yuanchao, et al. Reactive power compensation capacity configuration and optimal operation in wind farm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(6): 150-156.
- [11] 刘沛津, 谷立臣. 含风电场的电力系统无功规划优化[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 175-180.  
LIU Peijin, GU Lichen. Optimization of reactive power planning for power system containing wind farms[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 175-180.
- [12] 刘文霞, 蒋洪源, 刘军. 提高风电并网运行经济性的电网 SVC 选配方法[J]. 现代电力, 2012, 29(6): 1-6.  
LIU Wenxia, JIANG Hongyuan, LIU Jun. A SVC devices configuration method of power grid for improving the economic operation of wind integrated power system[J]. Modern Electric Power, 2012, 29(6): 1-6.
- [13] 江岳文, 陈冲, 温步瀛. 随机模拟粒子群算法在风电场无功补偿中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 47-52.  
JIANG Yuewen, CHEN Chong, WEN Buying. Application of stochastic simulation's particle swarm algorithm in the compensation of reactive power for wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 47-52.
- [14] 王成福, 梁军, 张利, 等. 考虑风功率分布规律的风电场无功补偿容量优化决策[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 119-124.  
WANG Chengfu, LIANG Jun, ZHANG Li, et al. Optimization decision method of wind farm reactive power compensation capacity considering wind power distribution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 119-124.
- [15] 郭金明, 李欣然, 邓威, 等. 基于 2 层规划的间歇性分布式电源及无功补偿综合优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 25-33.  
GUO Jinming, LI Xinran, DENG Wei, et al. Comprehensive optimal allocation of intermittent distributed generation and reactive power compensation based on bi-level planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 25-33.
- [16] 张璐, 唐巍, 丛鹏伟, 等. 基于机会约束规划和二层规划的配电网广义电源优化配置[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 50-58.  
ZHANG Lu, TANG Wei, CONG Pengwei, et al. Optimal configuration of generalized power sources in distribution network based on chance constrained programming and bi-level programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 50-58.
- [17] 杨靖. 基于动态时间弯曲的时间序列相似性搜索技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.  
YANG Jing. Research of similarity search based on dynamic time warping in time series data mining[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [18] 夏斐. 基于动态规划和 DTW 匹配的时间序列索引方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.  
XIA Fei. A research on the indexing method of time series based on dynamic planning and DTW warping path[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.

收稿日期: 2017-01-11; 修回日期: 2017-03-16

作者简介:

黄震希(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电并网技术; E-mail: 1551963803@qq.com

张祥龙(1983—), 男, 博士, 研究方向为智能电网评价与设计;

刘燕华(1975—), 女, 讲师, 研究方向为新能源发电并网技术。E-mail: lyh@ncepu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)