

DOI: 10.7667/PSPC151677

# 海上风电场集电系统拓扑结构优化研究

李芑达<sup>1</sup>, 李东东<sup>1,2,3</sup>

(1. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海绿色能源并网工程技术研究中心, 上海 200090;  
3. 上海高校高效电能应用工程研究中心, 上海 200090)

**摘要:** 为了优化海上风电场集电网络拓扑结构, 选取受拓扑结构影响较大的中压海底电缆一次投资成本和运行损耗成本作为优化模型。通过改进模糊聚类算法, 以集电系统电缆使用总长度最小为目标函数将风电场分区, 在以 Delaunay 三角剖分技术形成的网络上动态调整各边权值并反复迭代后得到总费用最小的树状优化拓扑。算例结果证明算法的有效性, 且传统的基于风机间距离的最小生成树算法优化结果得到进一步改善。

**关键词:** 改进生成树; 模糊聚类算法; 三角剖分; 拓扑结构优化; 海上风电场; 集电系统; 经济性

## Study on topology optimization of electrical collector system for offshore wind farm

LI Pengda<sup>1</sup>, LI Dongdong<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Shanghai Green Energy Grid-Integration Technology Engineering Research Center, Shanghai 200090, China; 3. Shanghai Higher Institution Engineering Research Center of High Efficiency Electricity Application, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** In order to optimize the topology of electrical collector system of offshore wind farm, the medium-voltage submarine cable cost, including investment cost and operating loss cost, which are both associated with the topology of collector system, is employed to establish the optimization model. FCM algorithm is improved to partition collector system, based on the minimum cable length. By adjusting the weights of each edge dynamically and iterating repeatedly on the Delaunay net generated on each subarea of collector system, the optimal tree topology with minimum total cost is obtained. Results of case study show that the optimization method is effective and the results of classical minimum spanning tree algorithm based on the distance between wind turbines are further improved.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507100).

**Key words:** improved spanning tree; fuzzy cluster algorithm; Delaunay triangulation; topology optimization; offshore wind farm; electrical collector system; economy

## 0 引言

目前, 海上风电由于其占用土地资源少、风能资源丰富且相对稳定等优点逐渐成为可再生能源的研究热点并进入规模化发展阶段<sup>[1-3]</sup>。集电系统作为海上风电场的主体部分, 包含的元件、设备极多。其总的建造成本占整个海上风电场的建造成本的15%~30%, 而其中中压海底电缆的成本比重高达5%<sup>[4]</sup>。鉴于此, 对海上风电场的集电系统进行优化设计以节省成本具有重要意义。

海上风电场集电系统优化是高维度、非线性、高时间复杂度的 NP 难题<sup>[5]</sup>, 遗传算法等启发式算法被广泛应用<sup>[5-9]</sup>, 但是这种随机优化算法计算量大且优化时间长。文献[8]使用免疫算法对遗传算法做了改进解决了集电系统拓扑寻优问题。此外, 基于图论的算法也被应用于解决集电网络和陆上配电网拓扑寻优问题<sup>[10-14]</sup>。文献[10]使用最小生成树形成集电系统的拓扑结构, 并在一定位置插入斯坦纳点 (Steiner point) 作为中间拼接点以减少电缆的使用长度, 降低了网络的一次投资成本, 但是并未考虑在实际工程中, 由于使用中间拼接点引入的海上台柱等支撑物而增加投资成本; 文献[4, 11]利用模糊 C 均值聚类算法对集电系统风机进行分区, 然后利用最小生成树形成网络拓扑, 这种分步式的优化算法

**基金项目:** 国家自然科学基金(51507100); 上海市“科技创新行动计划”(14DZ1200905); 上海市人才发展资金(201365), 上海市科学技术委员会(13DZ2251900)

可以明显降低问题的维度。但是, 这种分区方式没办法保证所有分区内连接风机的电缆总长度最短, 且文献[10-12]使用的最小生成树算法默认的目标是电缆使用长度最小, 并不是电缆的投资成本最低, 其结果仍可进一步被改善。

本文针对受网络拓扑变化影响较严重的中压海底电缆成本, 使用包括一次投资成本和正常运行时的网络损耗成本在内的优化成本模型。考虑在集电系统中应用不同截面积的电缆以降低成本。通过基于目标函数的模糊聚类得到集电系统的分区结果后, 应用 Delaunay 三角剖分技术生成电缆的可能敷设路径并在其上反复迭代形成最终的优化拓扑结构。最后, 以一个 150 MW 容量的海上风电场算例证明算法的有效性。

## 1 海上风电场集电系统成本模型

本文对树形拓扑结构进行优化设计, 其成本模型考虑中压海底电缆的一次投资成本和系统运行过程中的功率损耗成本, 成本模型<sup>[7-9]</sup>可描述为

$$\text{Min. } C_{\text{total}} = \left[ \sum_{i=1}^{N_F} \sum_{j=1}^{N_{S_i}} (C_{\text{invest}} (1+r)^{T_m} + C_{\text{loss}} \frac{(1+r)^{T_n} - 1}{r(1+r)^{T_n}}) \right] \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} I_{j,\text{rated.max}} < I_{j,\text{rated.cable}} \\ \Delta V_{j,\text{rated.max}} < \Delta V_{j,\text{rated.cable}} \end{cases} \quad (2)$$

$$F_u \bigcap_{\substack{u \neq v \\ u, v=1 \dots N_F}} F_v = \emptyset \quad (3)$$

式中:  $C_{\text{total}}$  表示中压海底电缆的总费用;  $C_{\text{invest}}$  表示中压海底电缆的一次投资费用, 即电缆的造价及安装敷设成本;  $C_{\text{loss}}$  表示网络电能损耗成本;  $N_F$ 、 $N_{S_i}$  分别表示连接至风电场汇集点的馈线数目和第  $i$  条馈线包含的电缆段数;  $r$  表示年利率;  $T_m$ 、 $T_n$  分别表示风电场的建设周期和规划运行年限;  $I_{j,\text{rated.max}}$  表示集电系统额定状态下第  $j$  段电缆中流过的电流,  $I_{j,\text{rated.cable}}$  表示第  $j$  段电缆允许流过的最大额定电流;  $\Delta V_{j,\text{rated.max}}$  表示集电系统额定状态下第  $j$  段电缆的最大压降,  $\Delta V_{j,\text{rated.cable}}$  表示第  $j$  段电缆允许的最大压降。

约束条件(2)为额定运行状态电缆中流过电流及电压降不得超过电缆的允许值; 约束条件(3)为集电系统中馈线间电缆不得交叉。

## 2 优化算法

### 2.1 基于目标函数改进的模糊聚类算法

基于目标函数的模糊聚类算法, 是把聚类问题

转化为一个带约束的非线性规划问题, 通过优化得到数据集的模糊划分和聚类<sup>[15]</sup>。本文以海上风电场变电站坐标为坐标系原点, 风力发电机组的极坐标作为数据集, 集电系统内规划建设的馈线数量为聚类数, 以样本点到变电站与聚类中心的距离及优化后馈线使用电缆长度  $J_{\text{fcm}}$  最小为目标函数, 进行聚类计算。算法可以描述为

$$\text{Min. } J_{\text{fcm}}(\mathbf{U}, \mathbf{V}) = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \mu_{kn}^m (d_{kn}^2 + \lambda_T \cdot L_{Tkn}^2) \quad (4)$$

使

$$\sum_{k=1}^K \mu_{kn} = 1, \quad n=1, 2, \dots, N \quad (5)$$

$$\sum_{n=1}^N \mu_{kn} > 0, \quad k=1, 2, \dots, K \quad (6)$$

$$\mu_{kn} > 0, \quad k=1, 2, \dots, K, \quad n=1, 2, \dots, N \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{U}$  是模糊划分矩阵,  $\mu_{kn}$  是  $\mathbf{U}$  的元素, 表示第  $n$  个样本属于第  $k$  类的隶属度值;  $\mathbf{V}$  是由  $K$  个聚类中心构成的矩阵;  $m > 1$ , 是模糊系数;  $d_{kn} = R_n \cdot \sin \theta_{kn}$ , 表示样本点到变电站与聚类中心的距离;  $R_n$  表示样本点  $n$  的极径,  $\theta_{kn} = |\theta_n - \theta_k|$  表示样本点  $n$  与第  $k$  个聚类中心的极角的差值的绝对值;  $\lambda_T > 0$ , 是长度系数;  $L_{Tkn}$  表示样本点  $n$  与第  $k$  类的其他样本点形成最小树的长度。

上述优化是一个关于自变量  $(\mathbf{U}, \mathbf{V})$  约束优化问题, 利用极值点的 KT 必要条件可以得到聚类中心极角的迭代方程:

$$\theta_k = \frac{1}{2} \arctan \frac{\sum_{n=1}^N \mu_{kn}^2 \cdot r_n^2 \cdot \sin 2\theta_n}{\sum_{n=1}^N \mu_{kn}^2 \cdot r_n^2 \cdot \cos 2\theta_n}, \quad k=1, 2, \dots, K \quad (8)$$

考虑到目标函数的约束条件为式(5), 由拉格朗日条件极值法可得到拉格朗日函数:

$$L(\mu_{kn}, \lambda) = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \mu_{kn}^m (d_{kn}^2 + \lambda_T \cdot L_{Tkn}^2) + \lambda \left( \sum_{k=1}^K \mu_{kn} - 1 \right) \quad (9)$$

$L$  对  $\mu_{kn}$  求导得:

$$\frac{\partial L}{\partial \mu_{kn}} = [m(\mu_{kn})^{m-1} (d_{kn}^2 + \lambda_T L_{Tkn}^2) - \lambda] = 0 \quad (10)$$

得:

$$\mu_{kn} = \left[ \frac{\lambda}{m(d_{kn}^2 + \lambda_T L_{Tkn}^2)} \right]^{\frac{1}{m-1}} \quad (11)$$

将式(11)代入(5)得到隶属度的迭代方程:

$$\mu_{kn} = \left( \frac{\sum_{l=1}^K d_{ln}^2 + \lambda_T \cdot L_{Tln}^2}{d_{kn}^2 + \lambda_T \cdot L_{Tkn}^2} \right)^{\frac{1}{m-1}} \quad (12)$$

$k=1, 2, \dots, K; n=1, 2, \dots, N$

算法的具体步骤如下:

步骤 1: 设定聚类个数  $K(1 < K < N)$  和模糊指数  $m(1 < m < +\infty)$ ; 初始化隶属度矩阵  $U^{(0)}$ ; 设置收敛的精度  $\varepsilon > 0$ ; 设置迭代次数  $p=0$  次;

步骤 2: 用式(8)和式(11)计算  $U^{(p+1)}$  和  $V^{(p+1)}$ ;

步骤 3: 重复步骤 2, 直到满足如下终止条件。

$$\|V^{(p)} - V^{(p-1)}\| \leq \varepsilon, p \geq 1$$

## 2.2 基于 Delaunay 三角网的改进生成树算法

Delaunay 三角剖分是计算几何的主要内容, 它

被广泛地应用在与计算几何信息相关的许多领域, 是数据预处理的一种重要手段<sup>[16-18]</sup>。改进生成树算法以在模糊聚类算法所得集电系统分区上形成 Delaunay 三角网络为基础, 将其作为电缆敷设的可行路径, 在网络上进行反复迭代形成最终拓扑结构。

本优化设计方法流程如图 1 所示。算法分为标准最小生成树和动态调整边权两个模块。

标准最小生成树模块根据风机间距离在第  $k$  个分区形成最小生成树, 然后依据此拓扑计算网络潮流, 选择电缆参数, 得到每条边的成本(权值)和总成本(权值), 将这两部分数值作为初值输入到动态调整边权模块中进行迭代调整边权, 直至集电系统中所有分区的拓扑结构均不再变化时输出风电场集电系统拓扑结构和总成本。

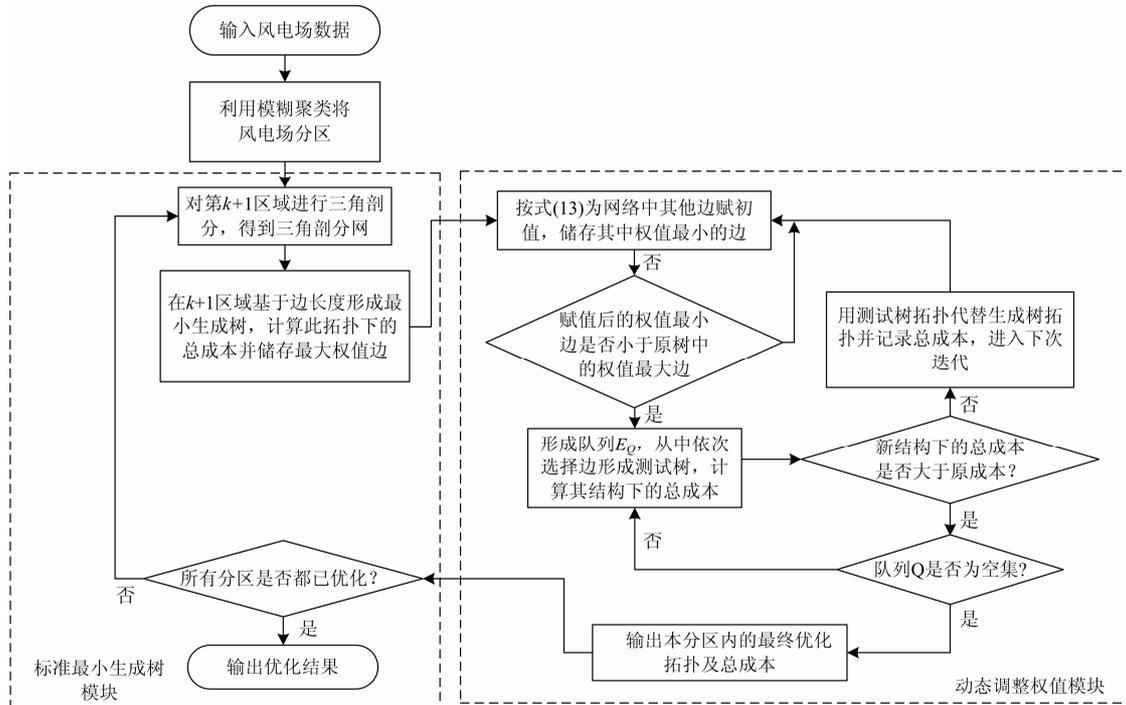


图 1 优化算法流程图

Fig. 1 Flow chart of optimization method

作为改进生成树算法的核心, 动态调整边权模块主要分为以下步骤。

第 1 步: 接收标准最小生成树模块的输出数据作为初值。

第 2 步: 按式(13)为所有三角剖分网络中不属于最小生成树的边赋值, 选出其中权值最小的边  $e_{DT(k)_{min}}$ , 设其权值为  $c'_{DT(k)_{min}}$ 。

$C'_{DT(k)} = [(1-w) \cdot C(\alpha_{min}) + w \cdot C(\alpha_{max})] \cdot l'_{DT(k)}$  (13)  
式中:  $w$  是一个 0 到 1 的随机数;  $C(\alpha_{min})$  是所提供

的电缆中截面最小的电缆单价;  $C(\alpha_{max})$  是所提供的电缆中截面最大的电缆单价;  $l'_{DT(k)}$  是被初始化权值电缆的长度。

第 3 步: 若  $c'_{DT(k)_{min}}$  小于最小生成树中权值大的边, 设其权值为  $c_{T(k)_{max}}$ , 则挑选出三角剖分网络中不属于最小生成树的所有小于  $c_{T(k)_{max}}$  的边从小到大排列形成集合  $E_Q$ ; 否则, 重新赋值。

第 4 步: 按顺序取出集合  $E_Q$  中的边添加到原最小生成树中, 删除形成环路中属于原树中权值最

大的边形成测试树  $T_{\text{test}(k)}$ 。计算新树的潮流、成本, 设新树的总成本为  $C_{T_{\text{test}(k)}}$ 。

第 5 步: 若新树的总成本小于原树, 则清空集合  $E_Q$ , 用新树代替原树, 进入下次迭代; 否则, 删除刚刚添加的边, 并检查集合  $E_Q$  是否为空集。若为空集, 则跳回第 2 步; 否则, 跳回第 4 步。

### 3 案例分析

#### 3.1 风电场描述

为了验证本文所提出模型和算法的有效性, 本文采用某海上风电场早期电气系统设计方案进行比较分析。案例风电场装设 50 台 3 MW 风力发电机组, 总装机容量为 150 MW。风电场规划建设时间 5 年, 运行时间 25 年, 年利用小时数为 2 524 h, 年利率 0.04, 并网电价 0.85 元/kWh, 集电系统中风机组通过电压等级为 35 kV 的 XLPE 中压海底电缆相连。其早期设计方案(以下称方案一)如图 2 所示。

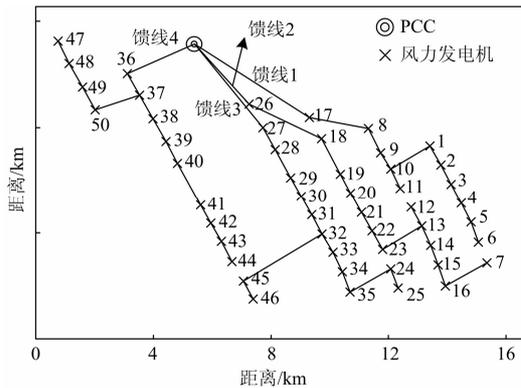


图 2 案例风电场早期设计方案

Fig. 2 Original design of the studied wind farm

#### 3.2 优化设计结果及分析

根据上节所述基于目标函数的模糊聚类算法先对案例风电场重新分区。为方便比较结果, 本文亦将目标风电场分成 4 个区域。每个区域的风机组由 1 条馈线连接至 PCC。模糊聚类的目标函数保证电缆总的使用长度最短, 以此为基础对集电系统的风机重新分区后按文献最小生成树算法[3, 9, 10]形成拓扑方案(以下称方案二)如图 3 所示。

方案一和方案二中各馈线的风机分配数量及所使用电缆总长度列于表 1 中。

由表 1 可以看出, 以电缆使用总长度最小为目标函数的模糊聚类算法重新分配集电系统 4 条馈线上的风机数量。相比方案一的分配情况, 经模糊聚类分区后的方案显得更加均衡。以此为基础形成的最小生成树拓扑较原方案拓扑的电缆使用总长度降

低了 1 553 m。

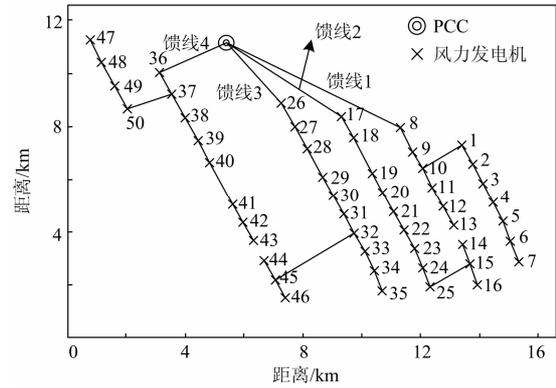


图 3 最小生成树算法优化拓扑

Fig. 3 Optimal topology result obtained by MST algorithm

表 1 方案一和方案二中各馈线的风机分配数量及所使用电缆总长度

Table 1 Number of turbines connected with each line and the total length of cable in plan 1 and plan 2

	馈线 1	馈线 2	馈线 3	馈线 4	电缆总长度/m
方案一	11 台	13 台	13 台	13 台	50 747
方案二	13 台	12 台	13 台	12 台	49 194

在经模糊聚类得到的集电系统风机分区方案的前提下, 使用上节所述的基于 Delaunay 三角网的改进生成树算法形成最终的优化拓扑方案(以下称方案三), 如图 4 所示。

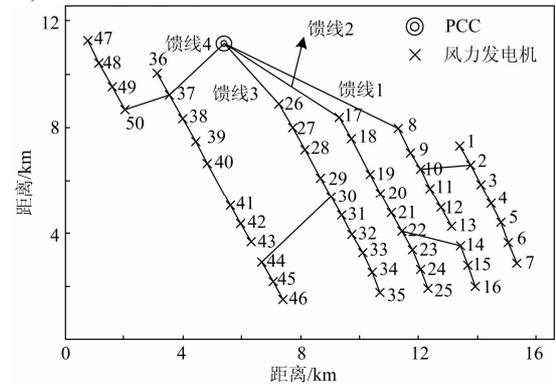


图 4 改进生成树算法所得优化拓扑

Fig. 4 Optimal topology result obtained by improved spanning tree algorithm

由图 4 可以看出, 方案三的树状结构较方案一有很大变化。这是模糊聚类改变了集电系统风机的分区和改进生成树算法共同作用的结果。

方案一、方案二和方案三的经济性成本汇总于表 2。

由表 2 可以看出, 三种方案中, 本文所提出的

优化算法所对应的集电系统相关成本最低，较案例风电场的早期设计方案节省了 682.3 万元。

表 2 三种方案的经济性成本结果

Table 2 Economic cost of the three plans

	电缆总长度/m	一次投资成本/万元	运行损耗成本/万元	总成本/万元
方案一	50 747	11 053.8	5 455.1	16 508.9
方案二	49 194	11 120.4	5 198	16 318.4
方案三	49 896	10 937.4	4 889.2	15 826.6

最小生成树算法得到方案，一方面，由于经过本文的模糊聚类算法对案例风电场中的风机重新分区，使电缆使用总长度降低并改变了系统的潮流分布，最终导致总投资成本的降低；但是，另一方面，由于这种拓扑方案缺少如改进生成树算法对边权的动态调整，因此仅仅保证了电缆的使用总长度为三种方案中的最优值，总成本却是次优值。

### 3.3 拓扑中调整边对系统成本的影响分析

下面以图 3 与图 4 中馈线 1 中树枝的变化说明拓扑结构变化对边权及系统成本的影响。

两种拓扑结构下馈线 1 中边及其权值变化情况列于表 3。

表 3 方案二与方案三馈线 1 中边及其权值的变化情况

Table 3 Change of edges and its weight of line 1 of plan 2 and plan 3

拓扑结构	边	边长/m	电缆截面/ mm <sup>2</sup>	成本/万元
最小生成树	10-1	1 297.3	150	412.1
	1-2	629.8	95	195
改进生成树	10-2	1 433.9	150	455.5
	1-2	629.8	50	67.9

由表 3 可以看出，由于改进生成树算法中对边及其权值的迭代调整，最小生成树拓扑中边 10-1 调整为边 10-2。

一方面，边的调整导致电缆长度增加了 136.6 m，而流过边 10-1 与边 10-2 中的潮流并未发生变化，这使馈线 1 的成本增加了 43.4 万元；

另一方面，这种拓扑的改变使馈线 1 中边 1-2 的潮流发生变化，图 3 中额定状态下流过边 1-2 的潮流为  $6I_N$ ，而图 4 中边 1-2 的潮流只有  $I_N$ ，这影响了边 1-2 的电缆型号的选择，这使馈线 1 的成本降低了 127.1 万元。

在两方面共同作用下，馈线 1 的总成本得到了降低。同理，拓扑中馈线 2、馈线 3、馈线 4 也有类似的边的调整，电缆使用长度的少量增加，使总成本在一定程度上得到优化。

## 4 结论

本文研究了海上风电场集电系统树形拓扑结构的经济性优化设计问题，提出了相应的优化算法。优化算法通过改进模糊聚类，以集电系统电缆使用总长度最小为目标函数将风电场分区，保证所有分区使用电缆总长度最小；然后在以 Delaunay 三角网络作为电缆可能敷设路径上反复迭代，以生成最终优化拓扑结构。算例结果表明本文所提出的算法是有效的，且较传统欧几里德最小生成树算法所得结果有很大改善。

## 参考文献

- [1] 李俊峰, 蔡丰波, 乔黎明, 等. 2014 中国风电发展报告 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [2] 黄玲玲, 曹家麟, 符杨. 海上风电场电气系统现状分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 147-154. HUANG Lingling, CAO Jialin, FU Yang. Review of electrical systems for offshore wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 147-154.
- [3] 郑伟, 何世恩, 智勇, 等. 大型风电基地的发展特点探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 57-61. ZHENG Wei, HE Shien, ZHI Yong, et al. Probe into the development characteristics of large-scale wind power base[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 57-61.
- [4] HUANG L L, CHEN N, ZHANG H Y, et al. Optimization of large-scale offshore wind farm electrical collection systems based on improved FCM[C] // Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN 2012), International Conference, Hangzhou, China, 2012: 1-6.
- [5] GONZALEZ-LONGATT F M. Optimal offshore wind farms' collector design based on the multiple travelling salesman problem and genetic algorithm[C] // IEEE PowerTech (POWERTECH), Grenoble, 2013: 1-6.
- [6] 黄玲玲, 符杨, 郭晓明. 大型海上风电场电气接线方案优化研究[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 77-81. HUANG Lingling, FU Yang, GUO Xiaoming. Research on optimization of electrical connection scheme for a large offshore wind Farm[J]. Power System Technology, 2008, 32(8): 77-81.
- [7] LI D D, HE C, SHU H Y. Optimization of electric distribution system of large offshore wind farm with improved genetic algorithm[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, Pittsburgh, PA, 2008: 1-6.
- [8] LI D D, HE C, FU Y. Optimization of internal electric connection system of large offshore wind farm with hybrid genetic and immune algorithm[C] // IEEE Electric

- Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Nanjing, 2008: 1-6.
- [9] ZHAO M, CHEN Z, BLAABJERG F. Optimization of electrical system for offshore wind farms via genetic algorithm[J]. *Renewable Power Generation*, 2009, 3(2): 205-216.
- [10] DUTTA S, OVERBYE T J. Optimal wind farm collector system topology design considering total trenching length[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2012, 3(3): 339-348.
- [11] 陈宁. 大型海上风电场集电系统优化研究[D]. 上海: 上海电力学院, 2011.  
CHEN Ning. Large-scale offshore wind farm electrical collection systems optimization[D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2011.
- [12] 范明天, 张祖平, 岳宗斌, 译. 配电网络规划与设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [13] 闫丽梅, 刘广成, 张艳, 等. 基于改进最小生成树算法的油田电网网架优化研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(24): 117-122.  
YAN Limei, LIU Guangcheng, ZHANG Yan, et al. Research on frame optimization of oil-field power grid based on improved minimum spanning tree algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(24): 117-122.
- [14] 杨文宇, 刘健, 余健明, 等. 基于改进prim算法的配电网络优化规划方法[J]. *电工技术学报*, 2005, 20(3): 75-79.  
YANG Wenyu, LIU Jian, YU Jianming, et al. Distribution network optimal planning based on an improved prim algorithm[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2005, 20(3): 75-79.
- [15] 高新波. 模糊聚类分析及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [16] ROY P, MANDAL J K. A Delaunay triangulation preprocessing based fuzzy-encroachment graph clustering for large scale GIS data[C] // *IEEE Electronic System Design (ISED)*, Kolkata, 2012: 300-305.
- [17] 关洪浩, 唐巍. 基于 Voronoi 图的变电站选址方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(20): 196-200.  
GUAN Honghao, TANG Wei. Substation location method based on Voronoi diagram[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(20): 196-200.
- [18] 唐小波, 刘笠, 张娟. 基于自适应权重 Voronoi 图的配电网供电分区方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(19): 83-88.  
TANG Xiaobo, LIU Li, ZHANG Juan. Method of power distribution network partition based on adaptive weighted Voronoi diagram[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(19): 83-88.

---

收稿日期: 2015-09-19; 修回日期: 2015-11-20

作者简介:

李芑达(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为海上风电场集电系统优化设计; E-mail: 1019329536@qq.com

李东东(1976-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析、风力发电技术及海上风电优化设计。E-mail: upwgrp@163.com

(编辑 葛艳娜)