

引用格式:肖石,吕应刚,唐浩,等.面向海上油田平台用能低碳化的风电海缆路由优化方法[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):184-193+202.

Citation: XIAO Shi, LYU Yinggang, TANG Hao, et al. Optimization method for wind power submarine cable routing for low-carbon energy consumption of offshore oilfield platforms[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 184-193+202.

# 面向海上油田平台用能低碳化的风电 海缆路由优化方法

肖石<sup>1</sup>, 吕应刚<sup>2</sup>, 唐浩<sup>3</sup>, 王皓<sup>1</sup>, 王文杰<sup>1</sup>, 陈春<sup>4</sup>

(1. 中海油能源发展股份有限公司清洁能源分公司, 天津 300451; 2. 中海油能源发展装备技术有限公司, 天津 300451;  
3. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300451; 4. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410114)

**摘要:**海上风电作为清洁、可再生能源,已成为海上油田平台低碳化的重要途径,但是不同风电海缆连接对海缆成本、油田平台低碳化影响较大。为此,综合考虑风电资源、低碳化成本等因素,提出一种面向海上油田平台用能低碳化的风电海缆路由优化方法。以最小化海缆建设成本、海缆运行损耗和油田平台碳排放成本为目标函数,建立海缆路由优化布局的 0-1 组合整数规划模型,将二次潮流等式约束进行二阶锥松弛,实现优化模型的精确求解。以实际的海上风电场为例进行仿真和对比分析,结果表明,所提方法能显著提高集电系统的经济性,选择出高低碳化程度的方案,具有较强的实用性和可行性。

**关键词:**海上油田平台;海缆路由;整数规划;经济性优化;低碳化

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.06.019 中图分类号: TM757 文章编号: 1673-9140(2024)06-0184-10

## Optimization method for wind power submarine cable routing for low-carbon energy consumption of offshore oilfield platforms

XIAO Shi<sup>1</sup>, LYU Yinggang<sup>2</sup>, TANG Hao<sup>3</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>, WANG Wenjie<sup>1</sup>, CHEN Chun<sup>4</sup>

(1. Clean Energy Branch of CNOOC Energy Development Co., Ltd., Tianjin 300451, China; 2. CNOOC Energy Development Equipment Technology Co., Ltd., Tianjin 300451, China; 3. Tianjin Branch of CNOOC (China) Co., Ltd., Tianjin 300451, China; 4. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** Offshore wind power, as a clean and renewable energy source, has become an important way to realize the low-carbon transformation of offshore oilfield platforms. However, different wind power submarine cable connections have a great impact on the cost of submarine cables and the low-carbon transformation of oilfield platforms. Therefore, factors such as wind power resources and low-carbon cost are comprehensively considered, and an optimization method for wind power submarine cable routing for low-carbon energy consumption of offshore oilfield platforms is proposed. With the objective function of minimizing submarine cable construction costs, submarine cable operation losses, and carbon emissions costs of oilfield platforms, a 0-1 combination integer programming model for submarine cable routing optimization layout is established. The second-order cone relaxation is applied to the quadratic power flow equation constraints, achieving an accurate solution of the optimization model. By taking an actual offshore wind farm as an example, the simulation and comparative analysis are carried out. The results show that the method proposed in this paper can significantly improve the economy of the power collection system, select a more low-carbon scheme, and show strong practicability and feasibility.

**Key words:** offshore oilfield platform; submarine cable routing; integer programming; economy optimization; low carbon

收稿日期: 2023-07-12; 修回日期: 2024-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(52007009)

通信作者: 肖石(1990—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事集中式海上风电机组组网及海缆路由规划等研究; E-mail: xiaoshi2@cnooc.com.cn

随着能源需求不断增加和环境问题日益严重,寻找替代传统能源的清洁能源已经成为当今一个重要任务。风能作为一种清洁、可再生的能源形式,具有巨大的潜力,被广泛应用。对于海上油田平台这样的特殊环境,利用风能实现能源低碳化已成为必然选择。然而,由于海上环境的复杂性以及油田平台的特殊需求,如何将风能有效地传输到海上油田平台成为一个具有挑战性的问题。传统的海缆路由设计方法往往无法满足海上油田平台对能源的需求。因此,需要开展研究来提出一种能够实现海上油田平台用能低碳化的风电海缆路由优化方法。

风电场集电海缆路由结构优化设计属于非线性、多目标、多维度的问题。文献[1]利用智能算法对集电系统拓扑结构进行优化,但此方法只考虑了海缆建设成本的限制,在实际工程中并不能得到最优的拓扑结构;针对这一问题,文献[2]在目标函数中考虑了全寿命海缆运行损耗成本;文献[3-4]进一步考虑了故障机会成本,同时把可靠性指标引入集电系统拓扑结构的优化中;文献[5]在上述优化集电系统的基础上,考虑了输电线路和升压站位置的优化;文献[6]运用遗传算法对海上风电场的集电系统拓扑结构进行优化设计,创新地将动态边权最小生成树算法融入遗传算法的种群生成阶段,并优化了算法的编码机制,从而显著提高了拓扑优化的搜索效率与收敛精度。文献[7]则通过优化蚁群算法的路径选择机制<sup>[8]</sup>及信息素更新机制,显著提升

了拓扑优化的搜索效率与精确度。但上述算法因为该规划问题的可行解空间大,容易陷入局部最优解中,难以得到更加精确的解;针对如何得出精确解,即全局最优解,文献[9-12]提出混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)模型, MILP模型是解决该类问题的基础模型,文献[13]研究构建了混合整数二次规划(mixed integer quadratic programming, MIQP)模型,该模型能更加精确地计算含线损的优化模型问题。

综上所述,海缆路由结构求解存在易得到局部最优解、未考虑海上油田平台的低碳化运行等问题。本文针对海上油田平台用能低碳化的需求,提出一种新的风电海缆路由优化方法,采用数学规划法,首先建立基于最小化海缆建设成本、海缆运行损耗和油田平台碳排放成本的多目标优化函数;然后通过二阶锥优化方法,将初始优化问题转化为具备凸性可行域的混合整数二阶锥规划问题以便求解;最后,以某实际海上风电场为例验证所提方法的优越性。

### 1 海上风电场与油田平台结构

接入风电场后,海上油田平台可用的供电方式一般分为4种:岸电+风电返送供电、岸电+风电不返送供电、原有机组+风电供电、原有机组+风电+储能供电。为了更好地体现油田平台的低碳化程度,本文考虑原有机组+风电供电的情况。

海上风电场与海上油田平台的连接图如图1所

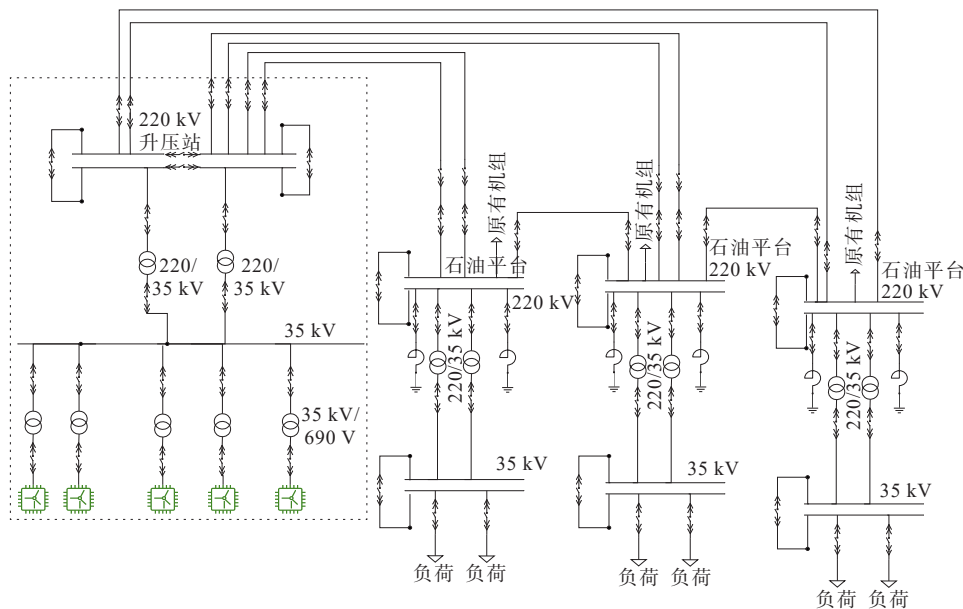


图1 海上风电场与海上油田平台的连接图

Figure 1 Connection between offshore wind farm and offshore oilfield platform

示。该连接结构包括油田平台、海上风电场、电缆系统、原有机组。油田平台位于海上的石油钻井平台,用于石油开采和加工,原有机组通常使用传统燃料供电。

图1中虚线框所标注的部分为海上风电场。海上风电场主要由4个部分组成:风力发电机组、集电系统、海上升压站以及输电系统。图2描绘了海上风电场集电系统的布局,包括风力发电机组、机端变压器、集电线路、海上升压站以及用于调节电网稳定的无功补偿装置。

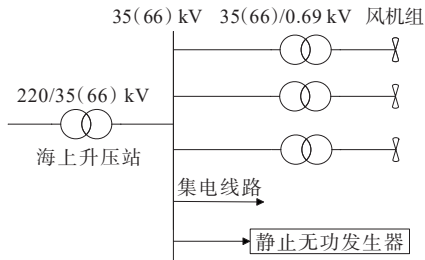


图2 海上风电场集电系统示意图

Figure 2 Power collection system of offshore wind farm

风电场内的集电线路,即从风机出口的0.69 kV电压升至35 kV的场内汇集线路。当前,风电场在实际运营中广泛采用链式、环式及星式3种拓扑结构。链式结构在海上风电场的集电系统拓扑设计中最常见。本文也针对链式结构进行拓扑优化。

图3为海上风电场链式拓扑结构。从图3中可以看出,每条馈线上集成多台风力发电机,彼此间通过串联的方式将产生的电能汇聚至升压站。其中每一串的海上风电机组数量由风力发电机的容量及电缆的最大额定容量和载流量确定。链式结构的优点为结构简单、经济性高、应用广泛;然而,这一设计也存在显著局限,特别是在电缆或开关发生故障时,会导致风电场输出的电能显著减少。

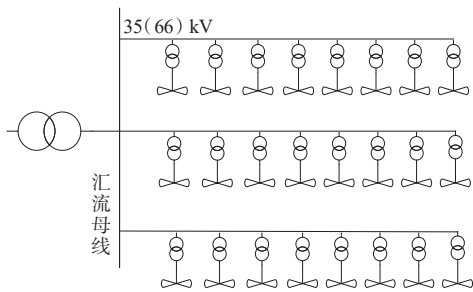


图3 海上风电场链式拓扑结构

Figure 3 Chain topology of offshore wind farm

## 2 优化规划的数学模型

优化风电场集电系统海缆路由布局需要考虑

以下2点:海缆建设和运行的经济性、油田平台的用能低碳化。本文针对海缆成本,通常将重心放在海缆建设成本和海缆运行损耗成本上,针对油田平台低碳化石,通常考虑该平台的碳排放成本。

### 2.1 目标函数

集电系统海缆的复杂结构使其建设成本受到拓扑结构、支路海缆长度和单价的影响,因此需要采用海缆布局优化模型以降低成本。本文采取电海缆布局优化模型如下。

1) 集电海缆建设成本  $C_{\text{M cable}}$

集电海缆建设成本  $C_{\text{M cable}}$  如下:

$$C_{\text{M cable}} = \sum_{k=1}^{N_1} \sum_{l=1}^{N_2} (L_{kl} \times P_{kl}) \quad (1)$$

式中,  $N_1$  为集电线路的回路数;  $N_2$  为第  $k$  条集电电路上连接的风机海缆数;  $L_{kl}$  为第  $k$  条集电线路中第  $l$  段海缆的长度;  $P_{kl}$  为第  $k$  回集电线路中第  $l$  段海缆建设的成本,该成本包括海缆成本、运输费用和施工费用。

2) 海缆运行损耗成本  $C_{\text{C loss}}$

海缆在承载风电场电力传输过程中,其运行中的功率损耗会受到电气网络拓扑结构变动的影。在电气网络确定之后,借助潮流计算能够评估海缆运行过程中的能量损耗。为了方便成本比较,需要将运行期内的年度损耗成本折算为建设期的现值。本文采取的运行损耗成本现值模型为

$$C_{\text{C loss}} = \sum_{l=1}^{8760} \sum_{k=1}^{N_1} \sum_{l=1}^{N_2} r_{kl} L_{kl} \times H \times p \times \frac{1 - (1 + r)^{-n}}{r} \quad (2)$$

式中,  $r_{kl}$  为第  $k$  回集电线路中第  $l$  段海缆的单位电阻;  $t$  为运行时间,本文对年内 8760 h 中每个小时进行潮流计算;  $H$  为风电场等效满容量年运行小时数;  $p$  为上网电价;  $r$  为资金折现率;  $n$  为风电场运行年限。

3) 油田平台运行碳排放成本  $C_{\text{C release}}$

海上油田平台低碳化的关键是减少使用高碳排放的传统能源,利用可再生能源进行发电。为了方便进行计算分析,本文同样将运行期内年运行损耗成本归算到建设期现值。油田平台运行低碳化成本模型为

$$C_{\text{C release}} = \left( \sum_{l=1}^{8760} P_{\text{use}} \times E \times C \right) \times H \quad (3)$$

式中,  $P_{\text{use}}$  为传统能源的输出功率;  $E$  为单位能源产生的二氧化碳排放量;  $C$  为每单位二氧化碳排放所

需要的费用。

海上风电场集电系统拓扑优化模型为

$$\min(C_{\text{M cable}} + C_{\text{Loss}} + C_{\text{Crelease}}) \quad (4)$$

## 2.2 约束条件

### 2.2.1 海缆选择约束

在工程实践中,集电系统中海底电缆为中压电缆且长度有限,故其选型需严格依据长期允许载流量进行筛选。本文在选择海底电缆时需满足下列约束。

1) 在集电系统拓扑结构中,确保变电站进线电缆的传输总功率不会超过该电缆的功率上限至关重要,该值根据中压海底电缆的具体型号而定:

$$P_{\text{CA}} \leq P_{\text{CA, max}} \quad (5)$$

式中,  $P_{\text{CA}}$  为集电系统馈线中变电站进线海缆传输的总功率;  $P_{\text{CA, max}}$  为海缆传输功率上限。

2) 海缆线上连接的每台风机输出的最大电流应小于该海缆的连续允许载流量:

$$KI_{\text{NI}} \geq I_{\text{max}, i} \quad (6)$$

式中,  $K$  为海缆的载流量修正系数;  $I_{\text{NI}}$  为海缆的额定载流量;  $I_{\text{max}, i}$  为风机输出的最大电流。

3) 海缆截面的设计需确保电压降不超过5%,在三相电力系统中,电缆截面的选取应遵循如下规则:

$$S \geq \frac{\sqrt{3} I \rho l_h}{U \Delta u \%} \quad (7)$$

式中,  $S$  为电缆的截面面积,  $\text{mm}^2$ ;  $I$  为负荷电流,  $\text{A}$ ;  $\rho$  为电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ , 铜芯电缆电阻率为  $0.0206 \Omega \cdot \text{m}$ ;  $l_h$  为海缆的长度;  $U$  为额定线电压;  $\Delta u \%$  为允许电压降百分比, 通常设定为5%。

4) 当发生短路时,海缆的截面必须满足热稳定性的要求:

$$S \geq \frac{I_{\infty} \sqrt{t}}{C} \quad (8)$$

式中,  $I_{\infty}$  为稳态短路电流,  $\text{A}$ ;  $t$  为短路电流作用时间,  $\text{s}$ ;  $C$  为热稳定系数。

5) 在集电系统中, 升压站的电缆数量, 即馈线的数量, 有最大限值要求, 一般  $N_{\text{number}} \leq 8$ 。

### 2.2.2 潮流约束

在计算海缆线路有功功率损耗时, 需要进行潮流计算来确定电网各节点电压和相角, 以及海缆线路中电流的大小和相位。在潮流计算中, 需要考虑多重约束, 以确保计算结果的合理性和可行性, 添加约束如下。

1) 电压电流安全约束。

配电网重构要求在任何情况下保证各个节点电压和支路电流都在系统可承受的范围内波动。节点电压和支路电流的约束如下:

$$\underline{V}_i \leq V_i \leq \overline{V}_i \quad (9)$$

$$I_l \leq \overline{I}_l \quad (10)$$

式(9)、(10)中,  $V_i$  为节点  $i$  的电压;  $\overline{V}_i$ 、 $\underline{V}_i$  分别为节点电压上限和下限;  $I_l$  为支路  $l$  的电流;  $\overline{I}_l$  为节点电流上限。

2) 支路容量约束。

海缆线路会承载特定传输容量, 实际传输电量超出其承载范围, 会导致电线过热现象显著加剧, 进而引发线路损耗上升与输电线损伤。线路容量可用视在功率  $\overline{s}_{ij}$  的平方限值进行描述:

$$P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \leq \overline{s}_{ij}^2 \quad (11)$$

式中,  $P_{ij}$ 、 $Q_{ij}$  分别为线路  $ij$  传输的有功和无功功率。

3) 有功、无功注入功率约束。

有功、无功注入功率约束如下:

$$\sum_{k:(jk) \in \Omega_i} P_{jk} = P_{ij} - r_{ij} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_i^2} - P_j^L \quad (12)$$

$$\sum_{k:(jk) \in \Omega_i} Q_{jk} = Q_{ij} - x_{ij} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_i^2} - Q_j^L \quad (13)$$

$$V_i^2 - V_j^2 = 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_i^2} \quad (14)$$

式(12)~(14)中,  $\Omega_i$  为风机间连接海缆的集合;  $P_{jk}$ 、 $Q_{jk}$  分别为节点  $j$  注入的有功功率和无功功率;  $P_j^L$ 、 $Q_j^L$  分别为计及分布式电源出力时节点  $j$  净流出的有功功率和无功功率;  $x_{ij}$  为线路  $ij$  的电抗值。

本文考虑存在孤立节点的情况。孤立节点指本身没有净流出或净注入功率的节点, 即式(12)、(13)中的  $P_j^L$  和  $Q_j^L$  均为0。为了防止这样的孤立节点存在, 将式(12)、(13)改进为

$$\sum_{m:(jm) \in \Omega_i} P_{jm} = P_{ij} - r_{ij} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_i^2} - P_j^L, |P_j^L| \geq \delta \quad (15)$$

$$\sum_{m:(jm) \in \Omega_i} Q_{jm} = Q_{ij} - x_{ij} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_i^2} - Q_j^L, |Q_j^L| \geq \delta \quad (16)$$

式(15)、(16)中,  $\delta$  为一个很小的正数。

若支路  $ij$  处于断开状态, 由式(12)~(14)可得  $V_i^2 - V_j^2 = 0$ , 即不相连支路两端的电压幅值相等,



这显然是不合理的。故引入big-M方法,将式(14)变化成如下形式:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{ij} = (1 - z_{ij}) \cdot M \\ V_i^2 - V_j^2 \leq m_{ij} + 2(r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) - \\ \quad (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_i^2} \\ V_i^2 - V_j^2 \geq -m_{ij} + 2(r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) - \\ \quad (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_i^2} \end{array} \right. \quad (17)$$

式中, $M$ 为一个很大的正数; $m_{ij}$ 为中间变量。

### 2.2.3 油田平台功率约束

为了确保油田平台能够满足其所需要的电力负荷,通常该平台的供电功率要大于负荷功率,让其具备一定的冗余和安全性。约束可以表示为

$$P_{\text{wind}} + P_{\text{other}} \geq P_{\text{load}} \quad (18)$$

$$Q_{\text{wind}} + Q_{\text{other}} \geq Q_{\text{load}} \quad (19)$$

式(18)、(19)中, $P_{\text{wind}}$ 、 $Q_{\text{wind}}$ 、 $P_{\text{other}}$ 、 $Q_{\text{other}}$ 、 $P_{\text{load}}$ 、 $Q_{\text{load}}$ 分别为风机、传统能源、负荷的有功和无功功率输出。

### 2.2.4 海缆交叉约束

本文明确了集电系统拓扑连线规则,禁止出现交叉现象。拓扑约束可以表示为

$$\sum_{t_1 \in \Omega_1} y_{i,j,t_1} + \sum_{t_2 \in \Omega_2} y_{a,f,t_2} \leq 1, \forall (i,j,a,f) \in X \quad (20)$$

式中, $y_{i,j,t_1}$ 、 $y_{a,f,t_2}$ 分别表示节点*i,j*之间是否存在电缆*t*连接,节点*a,f*之间是否存在电缆*t*连接,值为1表示存在; $X$ 为交叉集合,可通过枚举算法<sup>[14]</sup>得到。

### 2.2.5 辐射状约束

本文针对链式结构进行拓扑优化,即在线路中不具有环状拓扑设计<sup>[15]</sup>,可以表示为

$$\beta_{ij} + \beta_{ji} = x_{ij}, \forall ij \in \Omega_1 \quad (21)$$

$$\sum \beta_{ij} = y_i, \forall i \in \Omega_n, \forall i \notin \Omega_s \quad (22)$$

$$\beta_{ij} = 0, \forall j \in \Omega(s) \quad (23)$$

$$\beta_{ij}, \beta_{ji} \in \{0, 1\}, \forall ij \in \Omega_1 \quad (24)$$

式(21)~(24)中, $\beta_{ij}$ 、 $\beta_{ji}$ 、 $y_i$ 为二进制变量; $\Omega_n$ 为节点的集合; $\Omega_s$ 为升压站节点的集合; $\Omega(s)$ 为连接升压站节点的节点集合。当节点*j*是节点*i*的父节点( $\beta_{ij}=1$ )或节点*i*是节点*j*的父节点( $\beta_{ji}=1$ )时,才会通电( $x_{ij}=1$ );当节点*i*通电,二进制变量*y<sub>i</sub>*值为1,否则为0。

## 3 模型求解方法

### 3.1 优化模型的二阶锥松弛

首先将集电系统拓扑优化问题转化成类似网

络重构问题,然后用数学规划的形式对该问题进行描述,但类似网络重构问题的数学模型属于非线性非凸规划,理论上是一个NP难问题,并且缺乏有效的求解方法,因此,本文利用二阶锥凸松弛方法,将原优化模型转化为具有凸可行域的形式以便求解。

支路潮流的欧姆定律约束、功率约束、节点功率平衡约束如下。

欧姆定律约束:

$$V_i - V_j = Z_{ij} I_{ij} \quad (25)$$

功率约束:

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (26)$$

节点功率平衡约束:

$$\sum_{l:j \rightarrow l} S_{jl} - \sum_{l:i \rightarrow j} (S_{ij} - Z_{ij} |I_{ij}|^2) = S_j \quad (27)$$

式(25)~(27)中, $I_{ij}$ 为节点*i*流向节点*j*的功率;上标\*表示共轭; $Z_{ij}$ 为节点*i*和节点*j*间的阻抗; $S_j$ 为节点*j*的注入功率; $S_{ij}$ 为节点*i*流向节点*j*的功率。

节点电压、电流、功率约束如式(25)~(27)所示。对潮流模型进行相角松弛,即忽略电压电流的相角,令

$$l_{ij} = |I_{ij}|^2 \quad (28)$$

$$v_i = |V_i|^2 \quad (29)$$

式(28)、(29)中, $l_{ij}$ 为支路*ij*电流幅值的平方; $v_i$ 为节点*i*电压幅值的平方。

得出新的节点功率平衡约束如下:

$$\sum_{k:(jk) \in \Omega} P_{jk} = P_{ij} - r_{ij} l_{ij} - P_j^L, |P_j^L| \geq \delta \quad (30)$$

$$\sum_{k:(jk) \in \Omega} Q_{jk} = Q_{ij} - x_{ij} l_{ij} - Q_j^L, |Q_j^L| \geq \delta \quad (31)$$

欧姆定律约束化为

$$v_j = v_i - 2(r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) l_{ij} \quad (32)$$

功率方程化为

$$l_{ij} = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{v_i} \quad (33)$$

将 $S_{ij} = V_i I_{ij}^*$ 代入 $V_i - V_j = Z_{ij} I_{ij}$ 可得:

$$V_j = V_i - Z_{ij} \frac{S_{ij}^*}{V_i^*} \quad (34)$$

上述两端分别乘以自己的共轭可得:

$$v_j = V_j V_j^* = (V_i - Z_{ij} \frac{S_{ij}^*}{V_i^*})(V_i^* - Z_{ij}^* \frac{S_{ij}}{V_i}) =$$

$$V_i V_i^* - (Z_{ij}^* S_{ij} + Z_{ij} S_{ij}^*) + Z_{ij} Z_{ij}^* \frac{S_{ij} S_{ij}^*}{V_i V_i^*} =$$

$$v_i - 2\text{Re}(Z_{ij}^* S_{ij}) + |Z_{ij}|^2 l_{ij} =$$

$$v_i - 2(r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) l_{ij} \quad (35)$$

对  $l_{ij} = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{v_i}$  进行二阶锥松弛:

$$l_{ij} \geq \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{v_i} \quad (36)$$

即

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ l_{ij} - v_i \end{array} \right\|_2 \leq l_{ij} + v_i \quad (37)$$

将文2中有功、无功注入功率约束式(15)、(16)借助二阶锥松弛方法可表示为式(37),完成了对潮流方程的二阶锥松弛,文献[16]证明了目标函数为凸函数或单调递增时,该方法严格准确。

二阶锥松弛处理后,海上风电场集电系统拓扑优化的MISOCP模型如下。

1) 目标函数:

$$\text{Obj. min} \left( \sum_{Z_{ij}} \sum_{i=1}^{8760} \sum_{k=1}^{N_i} \sum_{l=1}^{N_i} r_{kl} L_{kl} \times H \times \rho \times \frac{1 - (1+r)^{-n}}{r} + \sum_{i=1}^{NMI} \sum_{j=1}^{NTI} (L_{ij} \times P_{Mj}) + \left( \sum_{i=1}^{8760} P_{\text{use}} \times E \times C \right) \times H \right) \quad (38)$$

2) 约束条件:

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{V}_i^2 \leq U_i \leq \overline{V}_i^2 \\ l_{ij} \leq z_{ij} \overline{I}_{ij}^2 \\ \left\| \begin{array}{c} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ l_{ij} - v_i \end{array} \right\|_2 \leq l_{ij} + v_i \\ \sum_{k:(jk) \in \Omega_i} P_{jk} = P_{ij} - r_{ij} l_{ij} - P_j^L, |P_j^L| \geq \delta \\ \sum_{k:(jk) \in \Omega_i} Q_{jk} = Q_{ij} - x_{ij} l_{ij} - Q_j^L, |Q_j^L| \geq \delta \\ m_{ij} = (1 - z_{ij}) \cdot M \\ U_i - U_j \leq m_{ij} + 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) l_{ij} \\ U_i - U_j \geq -m_{ij} + 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) l_{ij} \\ P_{\text{wind}} + P_{\text{other}} \geq P_{\text{load}} \\ Q_{\text{wind}} + Q_{\text{other}} \geq Q_{\text{load}} \\ \sum_{t_i \in \Omega_i} y_{i,j,t_i} + \sum_{t_i \in \Omega_i} y_{a,f,t_i} \leq 1, \forall (i,j,a,f) \in X \\ \beta_{ij} + \beta_{ji} = x_{ij}, \forall ij \in \Omega_s \\ \sum \beta_{ij} = y_i, \forall i \in \Omega_n, \forall i \notin \Omega_s \\ \beta_{ij} = 0, \forall j \in \Omega(s) \\ \beta_{ij}, \beta_{ji} \in \{0, 1\}, \forall ij \in \Omega_i \end{array} \right. \quad (39)$$

### 3.2 优化设计步骤和流程

将原优化模型转化为具有凸可行域后,可以利用CPLEX工具箱进行求解得到精确解。以图4展示的模拟海缆初始拓扑示意图为例。图4中5台风机通过链式连接经中压海缆接入升压站,实线为海缆初始连接,虚线可看成分段开关,通过控制分段开关的闭合改变海缆的拓扑结构。

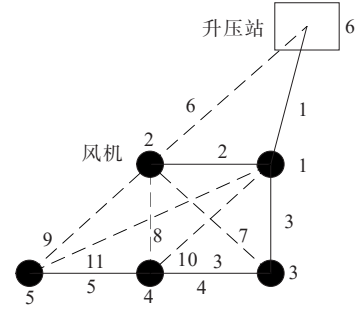


图4 模拟海缆初始拓扑示意图

Figure 4 Initial topology of simulated submarine cables

在MATLAB中运用CPLEX工具箱求解海上风电场集电系统最优拓扑结构。具体求解步骤如下。

1) 根据图4确定风机容量、风机节点负荷、海缆线路的阻抗、风机节点个数、支路数、可通断海缆数,建立海上风电的海缆路由结构中的流入节点支路矩阵  $H_{\text{upstream}}$  和流出节点支路矩阵  $H_{\text{downstream}}$ 。如图4所示,假设支路1的潮流流向由节点6流向节点1,可得  $H_{\text{upstream}}(1,1)=1, H_{\text{downstream}}(6,1)=1$ 。以此类推,求出流入节点支路矩阵  $H_{\text{upstream}}$  和流出节点支路矩阵  $H_{\text{downstream}}$ 。

2) 建立CPLEX求解器的输入变量:海缆线路电压幅值平方矩阵  $V$ 、海缆线路电流幅值平方矩阵  $L$ 、海缆线路间的有功功率矩阵  $P$ 、海缆线路间的无功功率矩阵  $Q$ 、风机输出的有功功率矩阵  $P_g$ 、风机输出的无功功率矩阵  $Q_g$ 、海缆网络结构矩阵  $Z_{ij}$ 。

3) 初始化网络结构矩阵  $Z_{ij}$ 。  $Z_{ij}$  为  $n_i \times 1$  矩阵,  $n_i$  表示支路数,矩阵元素为0表示该条支路断开,为1表示该条支路闭合。图4的网络结构矩阵  $Z_{ij}$  在1~5列的元素为1,其余列元素为0。

4) 建立目标函数,添加约束条件。包括网络重构约束、交叉约束、风机数量约束、潮流约束(节点功率约束、二阶锥约束)、节点电压约束、支路功率约束等。

5) 根据上述CPLEX求解器的输入、目标函数、

约束条件的搭建求解得最优目标函数值以及相应的最优网络结构 $Z_{ij}$ ,输出结果表示为风电场所有海缆线路断开闭合的0-1组合。

6) 根据仿真结果控制相应海缆线路的断开。海上风电集电系统拓扑优化流程如图5所示。

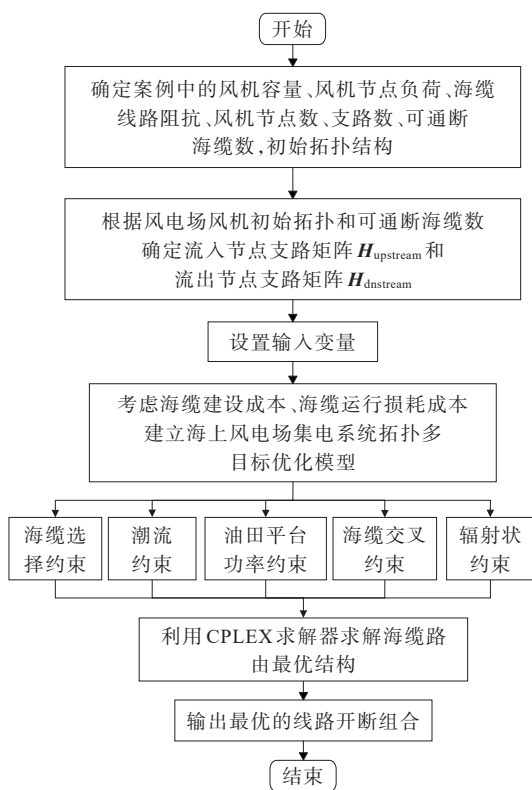


图5 海上风电集电系统拓扑优化流程

Figure 5 Topology optimization process for power collection system of offshore wind farm

## 4 算例仿真与分析

选取某海上油田平台进行案例分析,风电场与油田平台如图6所示。油田平台装有负荷400 MW,风场装有风机34台6.45 MW风机,总装机容量220 MW,采用66 kV汇集,220 kV送出。假设油田平台之前使用煤炭发电,单位煤炭产生的二氧化碳排放量为1 000 g/kW,碳排放权价格为20元/t。现引入风电供电,风电场运行年限为20 a,等效年运行2 100 h,上网电价0.85元/(kW·h),资金折现率0.05。

### 4.1 相关参数

集电系统相关设备的参数如表1~4所示。

优化前,依据短路热稳定性准则,首先进行情景分析以确定中压海缆的最小直径。在链式拓扑中,若某一条链路的电缆发生故障,故障电流有2个来源,一个是故障链路上的风力发电机到短路点的短路电流,另一个是其他线路上的发电机流向故障处的故障电流。因此,故障点的短路电流应选取2个短路电流中的较大值。通常情况下,大电网端提供的短路电流较为突出,其计算步骤如下。

假设在220 kV侧发生短路时,电流峰值设为25 kA,升压变压器的短路阻抗为14%,基准电压 $U_B=66$  kV,经计算,大电网提供的短路电流为31.151 A。基于对风电机组效应的整合分析,考虑场景:短路发生在海缆的末端时,海缆连接的风机数量最多。在该场景下计算出大电网端提供的短路电流为37.521 kA。

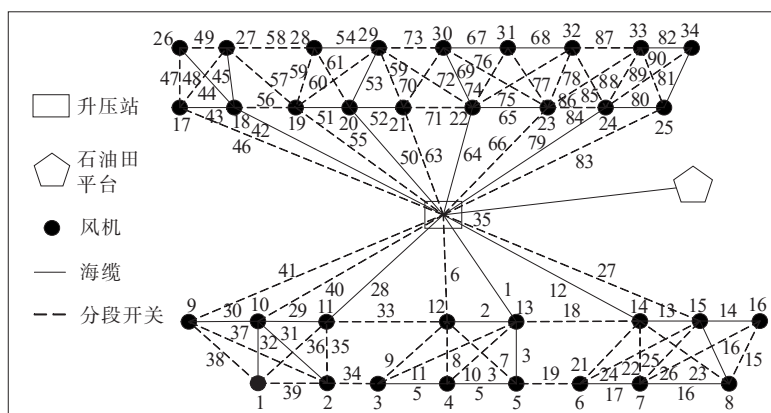


图6 实际海上风电场集电系统初始拓扑结构

Figure 6 Initial topology structure of power collection system of actual offshore wind farm

表1 风机参数

Table 1 Fan parameters

额定电压/V	额定容量/MW	额定功率因数
1 140	6.45	-0.95~0.95

表2 风电场内变压器主要电气参数

Table 2 Main electrical parameters of transformers in wind farms

升压变额定容量/(kV·A)	电压组合/kV	阻抗百分比/%	连接组别
14 300	69±2×2.5%/1.14	9	Dyn11

表 3 风电场升压变的型号及其主要电气参数

Table 3 Types and main electrical parameters of step-up transformers in wind farm

型号	额定容量/ (MV·A)	额定电压/ kV	连接组别	阻抗百 分比/%
SZ18- 300000/220	300/300/2	230±8× 1.12%/66/10	YN/yn0/ d11	14/24/9

表 4 66 kV 海底电缆参数

Table 4 Parameters of 66 kV submarine cable

电缆截面	额定载 流量/A	海底环 境载流 量/A	连接风 机数	电阻/ (Ω· km <sup>-1</sup> )	电容/ (uf· km <sup>-1</sup> )	价格/ (元· m <sup>-1</sup> )
3×95 mm <sup>2</sup>	281	305	1,2	0.246	0.120	1 180
3×185 mm <sup>2</sup>	392	425	3	0.127	0.144	1 630
3×300 mm <sup>2</sup>	541	604	4	0.078	0.167	2 200
3×500 mm <sup>2</sup>	685	702	5	0.046	0.175	3 000
3×800 mm <sup>2</sup>	767	811	6	0.027	0.186	4 100

进一步计算风机提供的短路电流,取基准容量  $S_B=100 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,结合表 2 中的相关参数,经计算得出单台风机提供的短路电流为 490.5 A。

以 66 kV 交联聚乙烯铜芯绝缘海底电缆为例,假设在正常运行条件下的温度限值为 90 °C。发生短路情况的最高温度为 230 °C,短路电流作用时间设定为 750 ms,热稳定系数选取为 135。基于上述参数,为确保电缆的安全运行与性能,海底电缆的最小截面应选择为 202 mm<sup>2</sup>。根据式(4)~(7)进行判断,实际满足运行的海缆型号为 3×300 mm<sup>2</sup>、3×500 mm<sup>2</sup>和 3×800 mm<sup>2</sup>这 3 种海缆。

### 4.2 仿真结果

风电场风机、升压站的初始拓扑位置如图 6 所示,虚线为分段开关。同时,本文人为地减少一些分段开关的数量,比如减少节点 1 与节点 12、13 连接类型不实际的情况,缩减可行的解空间,更快、更准确地求出集电系统最优拓扑结构。

优化过程考虑了电气设备型号、馈线数量等几个影响集电系统经济性的关键因素。根据海缆型号的选择和馈线条数约束,最后得到了以链式拓扑结构为基础结构的分为 6、7、8 条馈线的 3 种海上风电集电系统最优拓扑结构,具体如图 7~9 所示,海缆建设成本分析如表 5 所示。

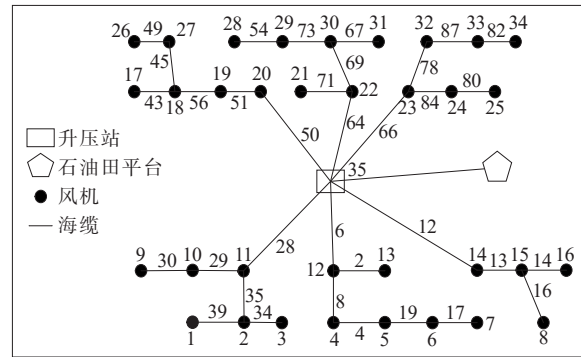


图 7 风电场 6 条馈线拓扑结构图

Figure 7 Topology of six feeder lines in wind farm

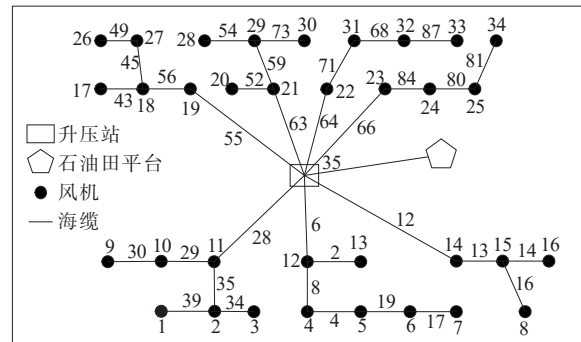


图 8 风电场 7 条馈线拓扑结构图

Figure 8 Topology of seven feeder lines in wind farm

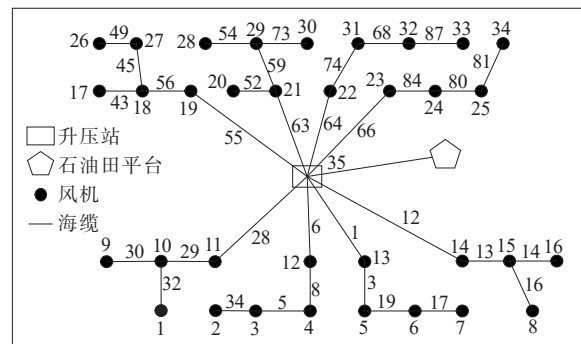


图 9 风电场 8 条馈线拓扑结构图

Figure 9 Topology of eight feeder lines in wind farm

表 5 海缆成本分析

Table 5 Cost analysis of submarine cables

馈线	电缆 总长/ km	海缆建 设成本/ 万元	海缆运行 损耗成 本/万元	油田平台运 行碳排放 成本/万元	总成 本/ 万元
初始	24.33	7 241.06	4 311.07	4 489.73	16 041.86
6	21.18	8 113.39	3 521.73	4 243.47	16 278.59
7	21.94	6 693.24	4 193.04	4 344.93	15 231.21
8	22.779	5 505.54	4 998.06	4 524.42	15 028.02

由表 5 分析可知,与初始拓扑结构相比,采用本文的优化方法得出来的 7 条馈线最优拓扑在电缆总



长、海缆建设成本、海缆运行损耗成本和碳排放成本等方面都明显降低。海缆总长减少2.39 km,海缆建设成本减少约548万元,海缆运行损耗成本减少约118万元,油田平台运行碳排放成本减少约145万元。

同时,在链式拓扑结构中,馈线数越多,其敷设的电缆总长越长,由于海缆型号单价的不同,其海缆建设成本会更低;但随着馈线数量增加,海缆运行损耗成本会不断增加。如8条馈线相对于6条馈线的拓扑结构,海缆建设成本降低约2 608万元,海缆运行损耗成本增加约1 476万元,总成本减少约1 251万元;同时,随着馈线数的增加,油田平台碳排放量成本也在不断升高,相比于8条馈线,6条馈线情况下碳排放成本降低约281万元。

为了更加清晰地描述不同海缆路由结构对油田低碳化的影响,表6计算出不同情况下的风电利用情况,引入风电利用率指标(风力发电占平台全年用电量的百分比)。可以发现,随着馈线数量的增加,绿电电能替代率会不断减小。

表6 不同馈线优化下风电利用率

Table 6 Wind power utilization rate under different feeder line optimizations

馈线数量	风电利用率/%
初始	23.13
6	27.34
7	25.61
8	22.53

由上述分析可知,如果要考虑海缆建设的整体经济性,8条馈线效果最好;但如果考虑油田平台低碳化程度,则6条馈线效果最好。

### 4.3 方法对比

为了验证该优化方法在海上风电海缆路由规划上求解的优越性,以文献[6]中的海上风电场为算例进行仿真,该风电场布置73台6.45 MW风机,采用69 kV汇集,220 kV送出,将文本方法与文献[6]中的模拟退火算法和最小生成树结合的局部优化法(即只考虑海缆路由拓扑优化)进行比较。海上风电场工程优化方法海缆布局、局部优化方法海缆布局、二阶锥凸优化海缆布局分别如图10~12所示。

各方法海缆长度如表7所示,海缆建设成本、运行损耗成本如表8所示。从图10~12、表7中可以发现,局部优化法得出的结果相比于工程优化降低了 $3\times 300\text{ mm}^2$ 海缆的长度,增加了 $3\times 500\text{ mm}^2$ 海

缆的长度。但 $3\times 500\text{ mm}^2$ 海缆相比 $3\times 300\text{ mm}^2$ 海缆成本会更高,优化的结果不一定是最优的。采用本文所提出的二阶锥优化方法所得出来的海缆结构保证了在距离较短时优先采用 $3\times 500\text{ mm}^2$ 型号海缆,在距离较远时优先采用 $3\times 300\text{ mm}^2$ 型号海缆,进而保证了经济性达到最优。表8展示了不同方法的成本,结果表明,相比于局部优化方法<sup>[7]</sup>,二阶锥凸优化的结果在海缆建设成本上减少了410.44万元,降低了1.3%;海缆运行成本减少了167.11万元,降低了1.74%。

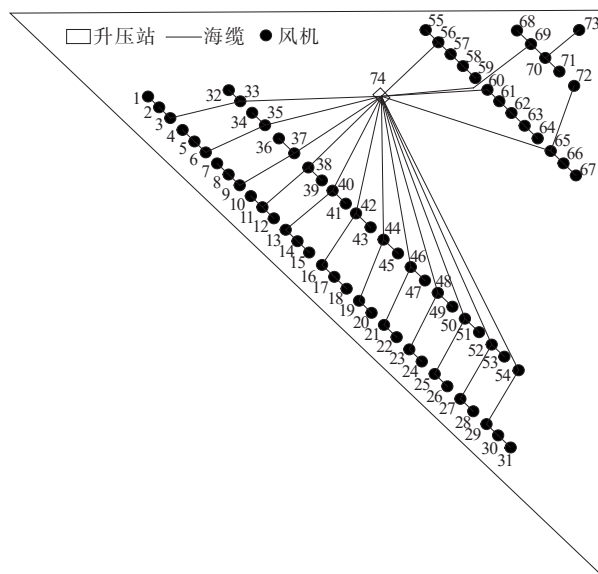


图10 工程优化方法海缆布局

Figure 10 Submarine cable layout by engineering optimization method

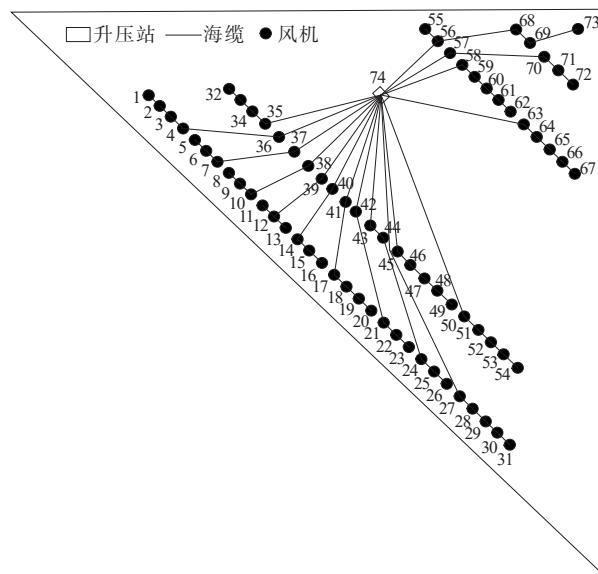


图11 局部优化方法海缆布局

Figure 11 Submarine cable layout by local optimization method

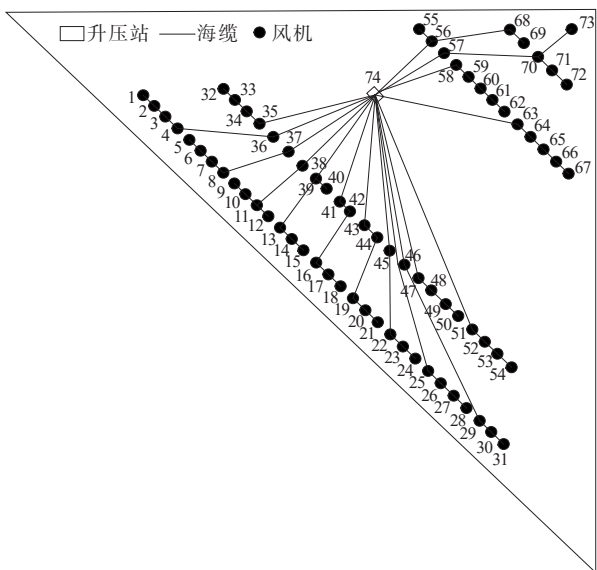


图 12 二阶锥凸优化海缆布局

Figure 12 Submarine cable layout by second-order cone convex optimization

表 7 各方法海缆建设长度

Table 7 Construction length of submarine cables by various methods

方法	3×300 mm <sup>2</sup>	3×500 mm <sup>2</sup>	3×300 mm <sup>2</sup>	3×500 mm <sup>2</sup>
	海缆长度/ km	海缆长度/ km	海缆成本/ 万元	海缆成本/ 万元
工程优化	67.291	59.602	14 804.02	17 880.6
局部优化法	46.945	70.635	10 327.90	21 190.5
二阶锥凸优化	57.678	61.392	12 689.16	18 418.8

表 8 各方法海缆建设成本、海缆运行损耗成本

Table 8 Construction cost and operation loss of submarine cable by each method

方法	海缆建设成本/ 万元	海缆运行损耗 成本/万元	总成本/ 万元
工程优化	32 684.62	9 231.14	41 915.76
局部优化法	31 518.40	9 628.69	41 147.09
二阶锥凸优化	31 107.96	9 461.58	40 569.54

通过上述对比可知,在相同的场景应用下,本文采用的二阶锥凸优化算法的搜索精确度更高,证明了本文算法的优越性。

## 5 结语

本文研究了面向油田平台低碳化的风电海缆路由规划问题,考虑海缆建设成本、海缆运行损耗成本、油田平台碳排放成本,建立了多目标优化模型。通过二阶锥凸松弛方法将模型进行凸优化处理,最后利用 MATLAB 中的 CPLEX 求解器进行最

优拓扑结构的求解。通过凸优化算法对实际海上风电场集电系统进行优化布局,并根据不同情况下的成本结果进行综合分析,为油田平台低碳化的风电场集电系统海缆路由的规划提供方法参考。

## 参考文献:

[1] 符杨,吴靖,魏书荣.大型海上风电场集电系统拓扑结构优化与规划[J].电网技术,2013,37(9):2553-2558.  
FU Yang, WU Jing, WEI Shurong. Topology optimization and planning of power collection system for large-scale offshore wind farm[J]. Power System Technology, 2013, 37(9):2553-2558.

[2] 李芑达,李东东.海上风电场集电系统拓扑结构优化研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(18):102-107.  
LI Pengda, LI Dongdong. Study on topology optimization of electrical collector system for offshore wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18):102-107.

[3] 杨之俊.基于粒子群算法的风电场集电系统优化设计[J].电测与仪表,2016,53(19):113-118.  
YANG Zhijun. Optimal design of power collection system for wind farm based on PSO algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(19): 113-118.

[4] 宋明阳,瞿晟珉,秦少茜,等.基于故障风险水平的海上风电场机会维护策略[J].电力工程技术,2023,42(6): 117-129.  
SONG Mingyang, QU Shengmin, QIN Shaoxi, et al. Offshore wind farm opportunity maintenance strategy based on failure risk level[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6):117-129.

[5] 王辉,付凌云,孙世民.海上风电场海缆布局优化设计方法[J].高压电器,2022,58(1):46-52.  
WANG Hui, FU Lingyun, SUN Shimin. Optimization design method for submarine cable layout of offshore wind farm[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(1):46-52.

[6] 汪惟源,乔颖,窦飞,等.基于改进遗传算法的海上风电场集电系统拓扑优化[J].中国电力,2019,52(1):63-68.  
WANG Weiyuan, QIAO Ying, DOU Fei, et al. Optimization of offshore wind farm collector systems based on improved genetic algorithm[J]. Electric Power, 2019, 52(1):63-68.

[7] 汤亮亮,任华,乔颖,等.基于改进蚁群算法的海上风电场集电系统拓扑优化[J].可再生能源,2018,36(12): 1826-1832.  
TANG Liangliang, REN Hua, QIAO Ying, et al. Topology optimization on transmission system of the offshore wind farm cluster[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36 (12):1826-1832.

- PMSGs and DFIGs[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2021,17(7):4532-4544.
- [23] ZHENG L M, JIA K, BI T S, et al. Cosine similarity based line protection for large-scale wind farms[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(7): 5990-5999.
- [24] 侯俊杰, 樊艳芳, 晁勤, 等. 基于时域全量故障模型相关性判别的集群风电送出线路纵联保护[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 89-96.  
HOU Junjie, FAN Yanfang, CHAO Qin, et al. Cluster wind power outgoing line pilot protection scheme based on time-domain full-frequency fault model correlation identification[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 89-96.
- [25] 宋国兵, 王晨清, 唐吉斯, 等. 适用于风电接入系统的时域模型识别纵联保护新原理[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3580-3585.  
SONG Guobing, WANG Chenqing, TANG Jisi, et al. Novel pilot protection based on time-domain model identification for wind power integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3580-3585.
- [26] 毕天姝, 李彦宾, 贾科, 等. 基于暂态电流波形相关性的新能源场站送出线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2012-2019+2216.  
BI Tianshu, LI Yanbin, JIA Ke, et al. Transient current waveform similarity based pilot protection for transmission lines connected to renewable energy power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2012-2019+2216.
- [27] 贾科, 郑黎明, 毕天姝, 等. 基于余弦相似度的风电场站送出线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6263-6275.  
JIA Ke, ZHENG Liming, BI Tianshu, et al. Pilot protection based on cosine similarity for transmission line connected to wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6263-6275.
- [28] 周家培, 赵成勇, 李承昱, 等. 采用电流突变量夹角余弦的直流电网线路纵联保护方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 165-171.  
ZHOU Jiawei, ZHAO Chengyong, LI Chengyu, et al. Pilot protection method for DC lines based on included angle cosine of fault current component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 165-171.
- [29] 王聪博, 贾科, 毕天姝, 等. 基于暂态电流波形相似度识别的柔性直流配电线路保护[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3823-3832.  
WANG Congbo, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Protection for flexible DC distribution system based on transient current waveform similarity identification[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3823-3832.
- [30] 陈龙翔, 沈瑜. 风电场集电电压序列经济性优选研究[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1008-1013.  
CHEN Longxiang, SHEN Yu. Studies on economic optimization of voltage class series of collector system for wind farms[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1008-1013.
- (上接第 193 页 Continued from page 193)
- [8] STEVEN A, HERTONO G F, HANDARI B D. Implementation of clustered ant colony optimization in solving fixed destination multiple depot multiple traveling salesman problem[C]//2017 1st International Conference on Informatics and Computational Sciences (ICICoS). Semarang, Indonesia. IEEE, 2017: 137-140.
- [9] WĘDZIK A, SIEWIERSKI T, SZYPOWSKI M. A new method for simultaneous optimizing of wind farm's network layout and cable cross-sections by MILP optimization[J]. Applied Energy, 2016, 182: 525-538.
- [10] CERVEIRA A, DE SOUSA A, SOLTEIRO PIRES E J, et al. Optimal cable design of wind farms: the infrastructure and losses cost minimization case[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4319-4329.
- [11] PÉREZ-RÚA J A, STOLPE M, CUTULULIS N A. Integrated global optimization model for electrical cables in offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1965-1974.
- [12] PÉREZ-RÚA J A, STOLPE M, DAS K, et al. Global optimization of offshore wind farm collection systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 2256-2267.
- [13] BANZO M, RAMOS A. Stochastic optimization model for electric power system planning of offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1338-1348.
- [14] JIN R S, HOU P, YANG G Y, et al. Cable routing optimization for offshore wind power plants via wind scenarios considering power loss cost model[J]. Applied Energy, 2019, 254: 113719.
- [15] LI Y, XIAO J X, CHEN C, et al. Service restoration model with mixed-integer second-order cone programming for distribution network with distributed generations[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4138-4150.
- [16] LOW S H. Convex relaxation of optimal power flow: part I: formulations and equivalence[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2014, 1(1): 15-27.