

输变电

考虑多时间尺度下负荷波动特性的海缆优化选型研究

汪晶毅¹, 黄寅茂¹, 林睿¹, 陆莹¹, 刘思祺², 刘刚²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510799;
2. 华南理工大学 电力学院, 广州 510641)

摘要: 鉴于风电场出力的时变特性导致海缆负荷波动, 传统的基于最大出力的选型方法过于保守, 难以充分利用海缆的传输能力。为此, 提出一种新的海缆典型负荷取值方法, 基于风电功率预测数据构建海缆波动负荷数据集, 并运用最大包络线法和优化聚类法进行数据处理, 得到更贴近实际波动特性的海缆典型日负荷曲线, 进而结合负荷因子计算出用于选型的典型负荷值。对比分析不同选型方法下的经济效益, 结果表明, 新方法确定的海缆截面选型在保障线路可靠运行的同时, 显著提高了海缆资源利用率, 降低了海上风电场建设投资成本, 可为海上风电场海缆的经济化选型提供理论支持和实践指导。

关键词: 交流海缆; 波动负荷特性; 截面选型; 优化聚类法; 负荷因子

DOI: 10.19585/j.zjdl.202602011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Submarine cable optimization and sizing considering load fluctuation characteristics across multiple time-scales

WANG Jingyi¹, HUANG Yinmao¹, LIN Rui¹, LU Ying¹, LIU Siqi², LIU Gang²

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd.,
Guangzhou 510799, China;

2. School of Electrical Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Given that the time-varying characteristics of wind farm output lead to fluctuating loads on submarine cables, the conventional cable sizing method based on maximum power output is overly conservative and fails to fully utilize the cable's transmission capacity. To address this, a novel method for determining the representative load value for cable sizing is proposed. Based on wind power forecast data, a dataset of submarine cable fluctuating loads is constructed. Data processing is then performed using the maximum envelope method and an optimized clustering algorithm to derive a typical daily load curve that more accurately reflects the actual fluctuation characteristics. Subsequently, the representative load value for cable sizing is calculated by incorporating the load factor. A comparative analysis of the economic benefits under different sizing methods demonstrates that the proposed method, while ensuring reliable line operation, significantly improves the utilization efficiency of submarine cable resources and reduces the capital investment cost for offshore wind farms. This study provides theoretical support and practical guidance for the economical sizing of submarine cables in offshore wind farms.

Keywords: AC submarine cable; fluctuating load characteristics; cross-sectional sizing; optimized clustering method; load factor

0 引言

在“双碳”目标背景下, 海上风电等新能源技

术迅速发展。海缆作为海上风电场电能传输的“生命线”, 在海上风电场电能的汇集及远距离传输过程中具有重要作用^[1-4]。精确计算海缆载流量, 可在设计阶段准确选型海缆截面, 从而最大程度实现海缆资源的高效利用^[5-8]。

目前, 海缆载流量评估方法的研究已经比较成熟。热评估方法主要包括热路法和数值计算方法。热路法基于电热类比理论, 通过建立海缆的

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2024A151524007 7); 广东省电力设计研究院有限公司科技项目(CG-2023-K-030)

等效热路模型来计算海缆导体温度。广泛使用的 IEC 60287 标准对海缆载流量进行了保守计算^[9-10]。为优化计算精度,边晓燕等人提出了一种适用于埋设场景的海缆动态温度场解析模型,用于评估海缆短时允许载流量,并实现了热参数的优化计算^[11]。数值计算方法以有限元法为基础,通过对海缆及周围环境进行多物理场等效建模,计算海缆的温度分布^[12-13]。郝艳捧等建立了海缆埋设和铺设的电-热-流多物理场耦合仿真模型,研究了不同敷设方式下海缆载流量、海水温度和流速对海缆径向温度和电场分布的影响^[14]。游磊等建立了海缆J型管段的多物理场仿真模型,分析了J型管空气段长度与外界风速对其热点温度的影响^[15]。

为确保海缆系统能够满足风电场输送容量要求,目前的选型方法往往基于风电场出力最大值对应的海缆负荷来选择海缆截面^[16-17]。然而,风电场出力具有时变特性,导致海缆负荷波动较大。因此,基于恒定最大负荷确定的海缆截面选型结果较为保守^[18-19],难以充分挖掘海缆的输送能力。鉴于此,有必要提出一种更能反映风电场出力时变特性的海缆典型负荷确定方法,以指导新增海上风电场海缆的经济化选型,减少资源冗余,降低海上风电场建设成本^[20-25]。

本文针对在考虑海风全年波动特性前提下,如何确定海缆典型负荷作为海缆截面选型输入量的难题,提出了一种基于优化K-means算法的多时间尺度海缆典型负荷因子计算方法。利用海上风电场风功预测数据计算得到的海缆波动负荷数据集,分别采用最大包络线法和优化K-means算法获取海缆典型负荷曲线。基于获取的典型负荷曲线,进一步采用IEC方法计算海缆典型负荷因子,从而得到考虑海缆负荷波动特性的海缆负荷典型值。将典型值作为海缆热评估模型的输入参数,精准评估海底电缆温度分布,并以此为依据进行海缆优化截面选型。最后,对比分析了某风电场基于海缆最大负荷与典型负荷确定的海缆截面选型结果。

1 海缆稳态热评估算法

高压交流海缆由内至外依次为阻水铜导体、导体屏蔽层、XLPE(交联聚乙烯)绝缘层、绝缘屏

蔽层、半导电阻水带、铝合金护套、PE(聚乙烯)护套、聚丙烯内护套、钢丝铠装以及聚丙烯外护套。在建立海缆稳态热路模型时,选取海缆内部金属结构及外护套表面作为温度节点,可得海缆本体稳态热路模型如图1所示^[26]。

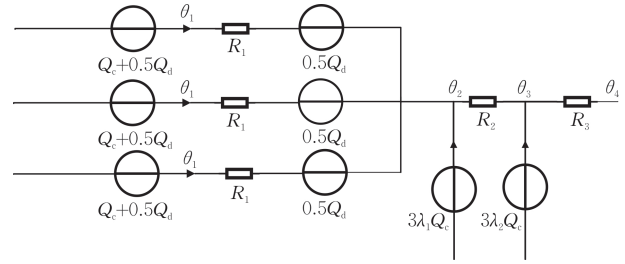


图1 三芯海缆本体稳态热路模型

Fig.1 Steady-state thermal circuit model for three-core submarine cable body

图1中: Q_c 为海缆单相导体产生的焦耳损耗; Q_d 为海缆单相绝缘产生的介质损耗; λ_1 为金属护套的损耗因数; λ_2 为铠装层的损耗因数; θ_1 为海缆导体温度; θ_2 为金属护套温度; θ_3 为铠装层温度; θ_4 为海缆外护套温度; R_1 为单相绝缘层热阻; R_2 为填充层以及内护套热阻; R_3 为外护套热阻。图1所示热路中各热源及热阻参数均可依据IEC 60287计算得到,其中 R_2 采用形状因子法计算^[27]。在建立海缆本体稳态热路模型后,海缆外界敷设环境可用一个环境热阻 R_4 来描述,且 R_4 可依据IEC 60287中提出的不同敷设条件下环境热阻计算方法得到^[28]。具体可分为直埋敷设、管道敷设和空气敷设三种典型敷设方式,分别由式(1)~(3)进行计算。

直埋敷设:

$$R_4 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left(\frac{2L}{D_e} + \sqrt{\frac{2L^2}{D_e^2} - 1} \right) \quad (1)$$

管道敷设:

$$\begin{cases} R_{4a} = \frac{\rho_T}{2\pi} \left(\ln \frac{D_n}{D_e} \right) \\ R_{4b} = \frac{\rho_c}{2\pi} \left(\ln \frac{D_w}{D_n} \right) \\ R_{4c} = \frac{\rho_T}{2\pi} \left\{ \ln \left[2 \frac{1}{D_w} + \sqrt{\left(2 \frac{1}{D_w} \right)^2 - 1} \right] \right\} \\ R_4 = T_{4a} + T_{4b} + T_{4c} \end{cases} \quad (2)$$

空气敷设:

$$\begin{cases} R_4 = \frac{1}{\pi D_c h (\Delta \theta_{s0})} \times 10^3 \\ h = \frac{Z}{(D_c \times 10^{-3})^\xi} + E \end{cases} \quad (3)$$

式中: ρ_T 为介质土壤热阻系数, 由于不同埋深的土壤成分不同, 故其热阻系数也不同; L 为海缆埋深; D_c 为海缆外径; D_n 为管道内径; D_w 为管道外径; Z 和 E 为自由空气中黑色表面电缆常数, 根据 IEC 标准, 本文中 Z 和 E 分别取值 0.21 和 3.94。

结合对海缆本体稳态热路模型的简化, 可得到海缆稳态热评估模型如图 2 所示, 其中 θ_0 为海缆外部环境温度。

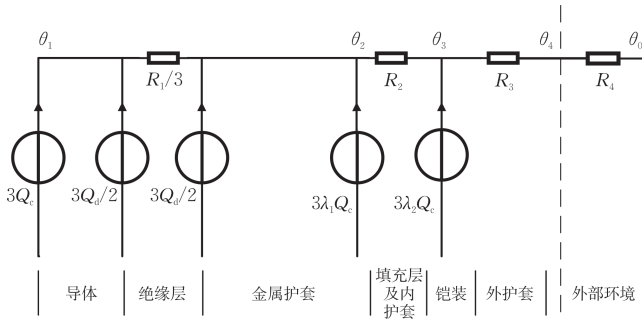


图 2 海缆稳态热评估模型

Fig.2 Steady-state thermal assessment model for submarine cables

基于热电类比理论, 对海缆稳态热评估模型中各温度节点列写热平衡方程, 如式(4)–(6)所示:

$$\theta_1 - \theta_2 = \frac{R_1}{3} \times (3Q_c + 3\frac{Q_d}{2}) \quad (4)$$

$$\theta_2 - \theta_3 = R_2 \times [3Q_d + 3(1 + \lambda_1)Q_c] \quad (5)$$

$$\theta_3 - \theta_0 = (R_3 + R_4) \times [3Q_d + 3(1 + \lambda_1 + \lambda_2)Q_c] \quad (6)$$

将式(4)–(6)叠加, 可计算出海缆稳态导体温度, 计算公式见式(7):

$$\theta_1 = \theta_0 + R_1(Q_c + \frac{Q_d}{2}) + 3R_2[Q_c(1 + \lambda_1) + Q_d] + 3(R_3 + R_4)[Q_c(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + Q_d] \quad (7)$$

由于海缆稳态导体温度解析算法的输入负荷参数需为恒定负荷, 而风电功率预测得到的是波动负荷数据, 因此需要将波动负荷等效为可用于海缆热评估计算的恒定负荷参数。本文采用 IEC 标准给出的负荷因子计算方法来实现这一转换,

具体公式如下。

$$M = \frac{1}{\sqrt{\mu \left[1 - \frac{\theta_R(6)}{\theta_R(\infty)} \right] + \sum_{i=0}^5 \frac{I_i^2}{I_{\max}^2} \left[\frac{\theta_R(i+1)}{\theta_R(\infty)} - \frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)} \right]}} \quad (8)$$

$$\mu = \frac{1}{24} \frac{\sum_{i=0}^{23} I_i^2}{I_{\max}^2} \quad (9)$$

式中: M 为负荷因子; I_i 为海缆日负荷曲线中第 i 个小时的海缆负荷数据; I_{\max} 为海缆日负荷曲线的峰值; $\theta_R(i)$ 为海缆施加 I_{\max} 电流 i 小时后的导体温升; $\theta_R(\infty)$ 为稳态下海缆导体最高允许温升; μ 为损耗因数。

本章提出的海缆稳态热路算法是进行海缆截面选型的核心手段, 其中, 模型的输入负荷值作为关键参数, 决定了选型结果的可靠性与经济性。因此, 需要选取能够反映海缆真实负荷特性的典型值作为模型输入参数。

2 海缆负荷典型值获取

获取具备波动特性的海缆负荷数据集是计算海缆负荷因子的基础。针对海缆波动负荷数据集, 采用数据处理方法获取具备代表性的海缆典型日波动负荷曲线, 从而实现海缆负荷因子的计算。本章基于风电功率预测数据计算海缆负荷数据集, 之后分别采用最大包络线法和优化聚类法得到不同时间尺度下的海缆典型日负荷曲线, 为海缆负荷因子的计算提供输入数据。需要说明的是, 上述提到的时间尺度可以选择一周、一个月、一年等。本文后续案例选择一个月作为时间尺度, 实际应用中可根据数据集的特点选择不同的时间尺度。

2.1 海缆波动负荷数据集获取

海缆沿线电流分布可通过图 3 所示的海缆长距离分布参数模型进行计算。由于本文分析的风电功率预测数据为首端功率数据, 且首端在无功补偿的影响下通常是海缆全线导体电流最大处, 因此选择首端电流作为分析对象。图 3 中, Z_L 为单位长度海缆的阻抗, Y 为单位长度海缆的导纳。

对建立的海缆长距离分布参数模型的首端列写电流方程, 如式(10)所示。

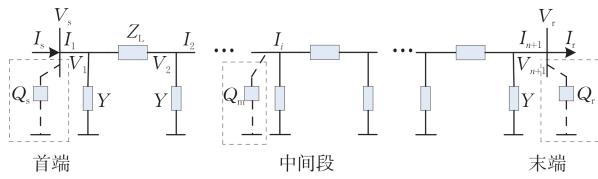


图3 海缆长距离分布参数模型

Fig.3 Long-distance distributed parameter model for submarine cables

$$I_s = \sqrt{\left(\frac{P}{\sqrt{3} V_s \cos \varphi}\right)^2 + \left(\frac{Q_s}{\sqrt{3} V_s}\right)^2} \quad (10)$$

式中： V_s 为首端母线上的电压值； I_s 为首端母线上的输入电流值； Q_s 为首端补偿的无功容量。利用式(10)即可获得海缆首端的波动负荷数据集。

2.2 最大包络线法

最大包络线法是选取数据集中对应时间尺度下的最大值作为该时刻的典型值来对数据进行评估，以保证数据具有足够的安全裕量。设 t_i 表示一天24 h中对应的时刻点，其中 $i=0, 1, \dots, 23$ 。利用式(10)建立不同时间尺度下的负荷数据集 $x_1(t_i), x_2(t_i), \dots, x_n(t_i)$ ，其中 n 为所取时间尺度包含的天数， $x_n(t_i)$ 表示第 n 天 t_i 时刻的负荷值。通过求取该时间尺度下每个时刻点海缆负荷的最大值作为该时刻海缆负荷的典型值，可由式(11)计算得到24 h的海缆典型日负荷曲线。

$$F(t_i) = \max \{x_1(t_i), x_2(t_i), \dots, x_n(t_i)\} \quad (11)$$

最大包络线法的算法原理较为简单，可操作性强，但是数据利用率较低，无法充分反映海缆真实的动态负荷运行情况。同时，取数据的最大值作为典型值易造成资源冗余，难以充分利用海缆传输裕量。

2.3 优化K均值聚类法

针对最大包络线法数据利用率低的问题，本节提出了优化K均值聚类法。该方法可充分利用样本数据，减小噪声影响，使海缆负荷更具典型性。K均值聚类算法是一种广泛使用的聚类算法，其基本思路是：在样本中随机选取K个初始聚类中心，计算各样本与各个初始聚类中心的距离，将每个样本分配给距离它最近的聚类中心，然后再将各聚类中样本的平均值作为新的聚类中心并重新计算各样本与聚类中心的距离，直至聚类中心不再改变^[29]。

通过分析原始聚类法的聚类原理可以看出，这种方法受初始值影响很大。选取不同的初始聚类中心，其聚类的结果也不相同，容易造成结果的不确定性。此外，聚类数K需要提前确定，对于特征并不明显的数据集，难以准确确定聚类数。因此，需要对K均值聚类法进行改进，以提高聚类准确性。可以从优化聚类中心以及确定聚类数这两个方面对聚类算法进行优化。

1) 聚类数优化方法

在对应的海缆负荷数据集中，按照如下公式求解得到不同聚类数下的聚合系数 J 。将 n 个样本划分到 k 个类中($k \leq n-1$)，即至少有一类中有两个元素，用 C_i 表示第 i 个类($i=1, 2, \dots, n$)，且该类中心记为 u_i ，那么第 i 个类的聚合系数为：

$$\sum_{i \in C_i} |x_i - u_i|^2 \quad (12)$$

$$u_i = \frac{1}{|C_i|} \sum_{x \in C_i} x \quad (13)$$

则所有类的总聚合系数为：

$$J = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} |x_i - u_i|^2 \quad (14)$$

式中： J 为聚合系数； C_i 为第 i 个随机聚类集； x_i 为 C_i 中的样本数据； u_i 为第 i 个随机聚类集的聚类中心； k_i 为第 i 个随机聚类数。

根据每个随机聚类数对应的聚合系数，生成聚类数与聚合系数对应的肘部图。通过分析不同聚类数下聚合系数的变化，可以利用肘部法则找到最佳聚类数。当聚类数增加时，聚合系数会逐渐增大；但当聚类数到达某个点后，聚合系数的增长速度会显著减缓。这个点通常被认为是最佳聚类数，即通过结果曲线斜率的明显变化位置来确定对应的聚类数。根据计算所得的肘部图，以曲线斜率明显变化位置所对应的聚类数确定优化后的K值。

2) 初始聚类中心优化方法

随机选取数据集中一个数据点作为初始聚类中心，并计算其余数据点与该初始聚类中心的距离，选取距离最大的点作为新的聚类中心。重复以上操作，直至选出K个初始聚类中心，从而完成初始聚类中心的优化选取。

对于数据对象到聚类中心的距离，本文采用欧氏距离，其定义如式(15)所示。

$$dis(x_i, C_k) = \sqrt{(x_i - C_k)^2} \quad (15)$$

通过上述确定的聚类数 K 和优化的初始聚类中心, 对模型输入数据集进行 K -means 聚类计算。通过求出样本点和聚类中心的欧氏距离的最小值, 将样本中的每一个点分配到一个簇中, 当最小误差平方和 E_s 取得最小值时, 停止迭代。最小误差平方和 E_s 的定义如式(16)所示。

$$E_s = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} (x - u_i)^2 \quad (16)$$

所提出的优化聚类法, 其具体实施流程如图 4 所示。首先, 通过式(11)一(14)计算不同聚类数下的聚合系数, 结合肘部图确定最佳聚类数 K 。随机选取样本中的一个数据点作为初始聚类中心, 通过式(15)计算其余各数据点到初始聚类中心的距离, 选取距离最大的数据点作为新的初始聚类中心。重复上述方法, 直至选出 K 个初始聚类中心。对样本数据集进行聚类计算, 通过式(16)计算最小误差平方和 E_s , 当其取最小值时停止聚类计算, 并输出聚类结果。从聚类结果中选取电流平方和大的曲线作为典型负荷曲线。最后, 结合式(8)、式(9)计算海缆典型日负荷。

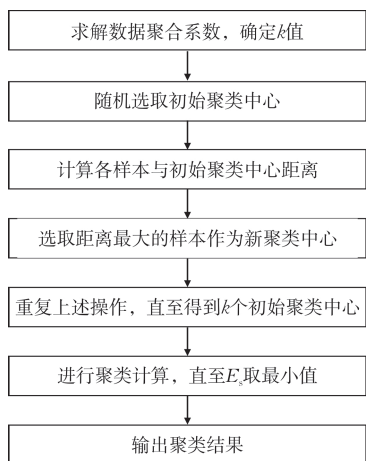


图 4 优化聚类法流程

Fig.4 Flowchart of optimized clustering method

3 海缆典型负荷算例分析

通过对风电场近 10 年的负荷数据进行分析, 发现冬季负荷值通常较高, 而夏季环境温度高。因此, 本文选用 6 月与 12 月作为案例进行分析。针对广东沿海某风电场 6 月及 12 月的风电功率预测数据, 分别采用最大包络线法和优化聚类法对

海缆波动负荷数据集进行处理, 获取可用于指导海缆截面选型的负荷典型值。

3.1 数据处理

收集海上风电场 6 月和 12 月的风电功率预测数据, 结合无功补偿策略及对应的海缆长距离分布参数模型, 利用式(10)计算得到海缆首端电流数据, 如图 5 所示。图 5 分别展示了 6 月(30 天)和 12 月(31 天)的海缆日负荷曲线, 即构成了 6 月和 12 月的日负荷曲线数据集, 也就是以月为时间尺度的海缆日负荷曲线数据集。

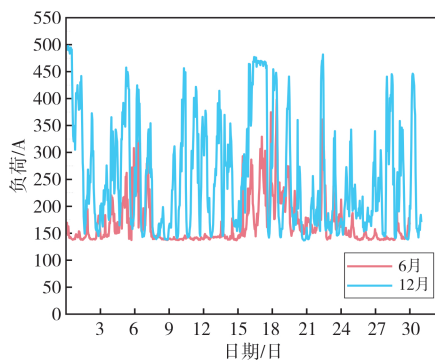


图 5 某风电场海缆首端波动负荷数据集

Fig.5 Fluctuating load dataset at the sending end of a wind farm submarine cable

3.2 最大包络线法

在上述所得到的海缆波动负荷数据集中, 选取对应月份中各时刻的最大值作为该月海缆负荷的典型值。求得一天 24 h 中各个时刻的最大值, 并按照时间顺序绘制曲线, 即为所得的 6 月及 12 月海缆典型日负荷曲线, 如图 6 所示。由图 6 可知, 通过最大包络线法选取的 6 月典型负荷具有一定的波动性, 而 12 月负荷数值较高且波动性不大。

3.3 优化聚类法

以 12 月为例, 基于本文提出的优化聚类法处理海缆波动负荷数据集。通过确定优化聚类数并选取初始聚类中心得到聚类结果, 进而求得对应的典型日负荷曲线。求取所得样本中不同聚类数下的聚合系数, 并生成肘部图。选择曲线斜率第一次显著变缓对应的聚类数作为优化的聚类数, 所得样本肘部图如图 7(a) 所示。

由图 7(a) 可知, 当聚类数为 2 时, 聚合系数不再发生明显变化。因此, 为保证聚类结果具有

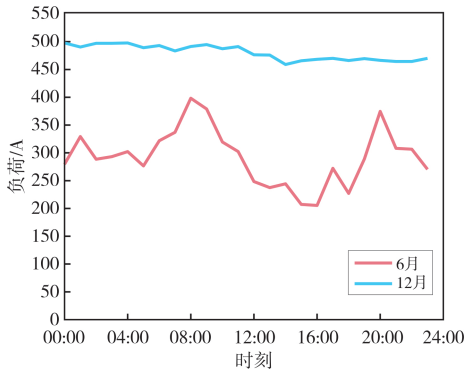


图6 基于最大包络线法的海缆典型日负荷曲线

Fig.6 Typical daily load curve of submarine cable based on maximum envelope method

显著性，聚类数应取2。按照本文提出的优化方法选取初始聚类中心，对于12月样本数据，其初始聚类中心选取如图7(b)所示。再对所得样本进行聚类分析，得到12月聚类结果，如图7(c)所示。

根据聚类结果，综合考虑负荷的波动性以及必要的裕度，选取12月聚类结果中电流平方和大的曲线作为海缆典型日负荷曲线。对6月的功率数据采用同样的处理方式，得到6月与12月海缆典型日负荷曲线，如图8所示。

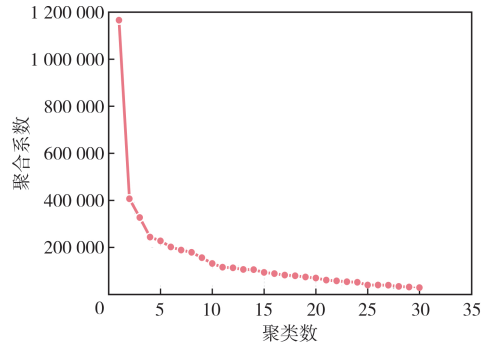
3.4 典型负荷取值对比

针对基于不同数据处理方法得到的海缆典型日负荷曲线，采用式(8)计算得到的海缆典型负荷因子如表1所示。进一步结合海缆最大负荷计算对应的海缆负荷典型值，结果如表2所示。结合表1和表2可以看出，基于恒定海缆最大负荷值及最大包络线法获得的海缆典型负荷值均较为保守，而基于优化聚类法获得的海缆典型负荷值更有利于海缆的经济化选型。

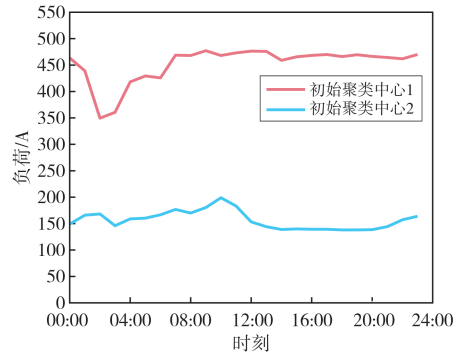
4 考虑负荷波动特性的海缆优化选型

为了分析本文提出的海缆典型负荷确定方法对提升海缆资源利用率的效益，对比基于不同海缆典型负荷值确定的海缆选型结果。首先，利用海缆稳态热评估算法获取不同截面下海缆各敷设区段的载流能力；然后，结合不同数据处理方式下得到的海缆负荷典型值选取合适的海缆截面。

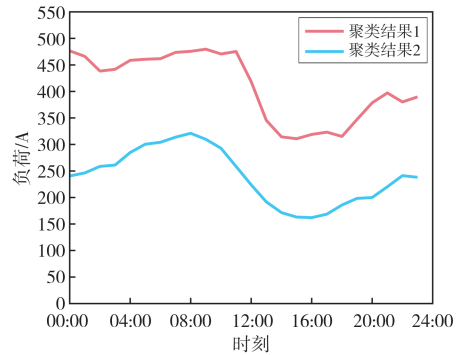
计算边界条件如表3所示，其中6月和12月的典型环境温度分别设定为30℃和15℃。进一步结合式(7)所示的海缆稳态导体温度解析算法以及交



(a) 聚类法肘部图



(b) 初始聚类中心选取结果



(c) 聚类法计算结果

图7 优化聚类法聚类中心与结果

Fig.7 Cluster centers and results from optimized clustering method

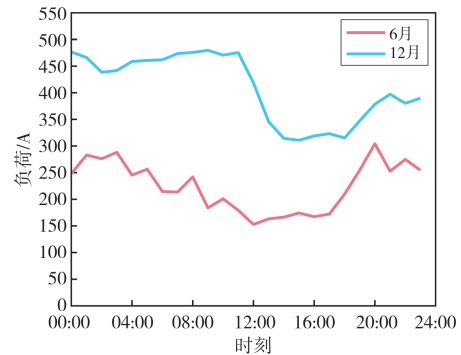


图8 基于优化聚类法的海缆典型日负荷曲线

Fig.8 Typical daily load curve of submarine cable based on optimized clustering method

表 1 不同数据处理方式下的负荷因子

Table 1 Load factors under different data processing methods

数据处理方式	6月	12月
恒定海缆最大负荷	1.00	1.00
最大包络线法	0.73	0.93
优化聚类法	0.72	0.84

表 2 不同数据处理方式下的负荷典型值

Table 2 Typical load values under different data processing methods

数据处理方式	6月	12月
恒定海缆最大负荷	546 A	546 A
最大包络线法	400 A	508 A
优化聚类法	393 A	459 A

流海缆导体温度限制值, 获取不同截面海缆在不同敷设区段的载流能力, 计算结果如表 4 所示。

表 3 计算边界条件

Table 3 Calculated boundary conditions

敷设区段	环境温度/°C	土壤热阻率/(m·K·W ⁻¹)	管内/外径/mm
海床直埋段	15/30	0.71	—
滩涂段	15/30	0.91	—
定向钻段	15/30	1.43	732/744
电缆沟段	15/30	1.43	—
J型管段	15/30	—	488/508

基于表 2 中给出的海缆负荷典型取值及表 4 中给出的不同截面海缆载流能力, 可确定满足不同海缆负荷典型取值的海缆截面选型结果, 如表 5 所示。由表 5 可知, 在考虑海缆送出负荷波动特性的前提下, 其等效送出负荷均有不同程度的下降。采用负荷典型值后, 海缆截面选型可降低一至两档。例如, 对于海缆送出系统, 6月最大负荷 546 A 需要选择 3×1 000 mm² 截面海缆才能满足传输要求, 而对于 6 月的两种负荷典型值 400 A 和 393 A,

选择 3×630 mm² 海缆即可满足要求。对于 12 月, 虽然环境温度较低, 可以选择更小的截面, 但考虑到与 6 月的选型相匹配, 最终选型以 6 月为准。同时, 为了充分考虑工程应用中的安全性问题, 本文的研究在应用时, 不仅以优化聚类法的结果为标准, 还可以参考最大包络线法的结果, 并结合风电场的实际情况进行综合优化截面选型。优化的截面选型可使新建海上风电送出海缆投资成本下降 100~200 万元/km, 实现资源的有效配置, 并充分发掘海缆的传输能力裕量。

表 5 海缆截面选型结果

Table 5 Submarine cable cross-section selection results

负荷种类及电流值		截面/mm ²
6月负荷最大值	546 A	3×1 000
	400 A	3×630
6月负荷典型值	393 A	3×630
	546 A	3×630
12月负荷最大值	546 A	3×630
12月负荷典型值	508 A	3×500
	459 A	3×400

5 结语

本文基于风电功率预测数据建立了海缆波动负荷数据集, 将利用最大包络线法和优化聚类法处理负荷数据集得到的海缆负荷典型值作为风电场海缆截面选型的依据, 并分析了不同负荷选取方式下的经济效益, 得到以下结果:

1) 本文提出了一种充分考虑风电场出力时变特性的海缆典型负荷取值方法。该方法基于风电功率预测数据计算得到海缆波动负荷数据集, 利用最大包络线法和优化 K 均值聚类算法进行数据处理分析, 得到对应的海缆典型日波动负荷曲线, 最后结合负荷因子计算方法得到用于指导海缆截

表 4 各敷设区段海缆载流能力计算结果

Table 4 Calculated current-carrying capacity of submarine cable in different laying sections

敷设区段	3×1 000 mm ² 海缆		3×800 mm ² 海缆		3×630 mm ² 海缆		3×500 mm ² 海缆		3×400 mm ² 海缆	
	15 °C	30 °C	15 °C	30 °C	15 °C	30 °C	15 °C	30 °C	15 °C	30 °C
海床直埋段	742	689	728	661	688	609	631	563	588	523
滩涂段	730	653	702	624	656	576	603	538	562	502
定向钻段	703	635	672	606	639	561	589	523	549	493
电缆沟段	696	621	668	593	628	549	577	516	538	479
J型管段	637	571	609	544	574	506	534	478	496	446

A

面选型的负荷典型值。

2) 相比于风电场最大出力对应的负荷取值以及最大包络线法确定的典型负荷取值, 基于优化聚类法得到的典型负荷取值更能体现样本数据的波动特性, 在数据量较大的情况下可以很好地反映海缆负荷的真实情况。

3) 基于典型负荷取值方法确定的海缆截面选型结果, 更有利于提高海缆资源利用率, 降低海上风电场建设投资成本。例如, 对于海缆送出系统, 最大负荷 546 A 需要选择 $3 \times 1\,000\text{ mm}^2$ 截面海缆才能满足传输要求, 而对于 6 月负荷典型值 400 A 和 393 A, 选择 $3 \times 630\text{ mm}^2$ 海缆即可满足要求。由此可见, 负荷典型值计算方法的提出对送出海缆系统的优化截面选型具有重要的指导意义。

参考文献

- [1] BENDAOU F, BENDERBAL H H. A modified k-means algorithm for network selection in heterogeneous wireless environment [C]//2023 International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). October 25-27, 2023, Marseille, France: IEEE, 2023: 1-4.
- [2] QIN Y J, FAN W, CHEN D Y, et al. Research on active power control strategy for offshore wind power based on multiple time scales [C]//2024 3rd International Conference on Energy, Power and Electrical Technology (ICEPET). May 17-19, 2024, Chengdu, China: IEEE, 2024: 1679-1683.
- [3] 朱长东, 嵇洪港, 智李, 等. 电力电缆温升特性研究及载流量计算[J]. 电力与能源, 2024, 45(2): 197-202.
ZHU Changdong, ZHUO Honggang, ZHI Li, et al. Temperature rise characteristics of power cable and its current carrying capacity calculation [J]. Power & Energy, 2024, 45(2): 197-202.
- [4] 刘世丹, 李一泉, 俞伟国, 等. 海上风电交流电缆空载谐振事故分析及应对方案[J]. 浙江电力, 2024, 43(11): 65-73.
LIU Shidan, LI Yiquan, YU Weiguo, et al. Analysis of a resonance accident from the no-load closing of AC cable in an offshore wind farm and corresponding countermeasures [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(11): 65-73.
- [5] LI Y W. Research and prospect of offshore wind power [J]. Advanced Materials Research, 2014, 1049/1050: 743-746.
- [6] WEI Q, WU B, XU D, et al. Overview of offshore wind farm configurations [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 93(1): 012009.
- [7] 范明明. 长距离三芯高压海底电缆的无功补偿和载流量计算研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [8] 叶婧, 蔡俊文, 张磊, 等. 考虑海缆实际载流量的海上风电集电系统拓扑优化[J]. 中国电力, 2024, 57(7): 173-181.
YE Jing, CAI Junwen, ZHANG Lei, et al. Topology optimization of offshore wind power collection system considering actual carrying capacity of submarine cables [J]. Electric Power, 2024, 57(7): 173-181.
- [9] WANG L C, WEI J, WANG X D, et al. The development and prospect of offshore wind power technology in the world [C]//2009 World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference. September 24-26, 2009, Nanjing, China: IEEE, 2009: 1-4.
- [10] ZHANG L, BAI X Z, CHEN Y J, et al. Research on power market user credit evaluation based on K-means clustering and contour coefficient [C]//2020 3rd International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering (RCAE). November 5-8, 2020, Chongqing, China: IEEE, 2020: 64-68.
- [11] 边晓燕, 湛云峰, 周歧斌, 等. 基于热路解析模型的海底电缆动态温度场计算与短时允许载流量评估[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 793-802.
BIAN Xiaoyan, CHEN Yunfeng, ZHOU Qibin, et al. Dynamic temperature field calculation and short-time allowable ampacity evaluation of submarine cable based on thermal analytical model [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 793-802.
- [12] 刘刚, 雷鸣, 阮班义, 等. 考虑轴向传热的单芯电缆线芯温度实时计算模型研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1877-1883.
LIU Gang, LEI Ming, RUAN Banyi, et al. Model research of real-time calculation for single-core cable temperature considering axial heat transfer [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 1877-1883.
- [13] 孙璐, 乐彦杰, 阮天余, 等. 陆海段不等径海缆匹配方案与载流能力提升研究[J]. 浙江电力, 2022, 41(8): 80-86.
SUN Lu, LE Yanjie, RUAN Tianyu, et al. Research on improvement of current carrying capacity of submarine cable based on unequal diameter matching of land and sea sections [J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(8): 80-86.
- [14] 郝艳捧, 陈云, 阳林, 等. 高压直流海底电缆电-热-流多物理场耦合仿真[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3534-3542.
HAO Yanpeng, CHEN Yun, YANG Lin, et al. Coupled simulation on electro-thermal-fluid multiple physical fields of HVDC submarine cable [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3534-3542.
- [15] 游磊. 海上风电场送出海缆载流量瓶颈区段与提升方法

- 研究[D].广州:华南理工大学,2018.
- YOU Lei. Study on bottleneck sections and improvement methods of ampacity of export submarine cable in offshore wind farms [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [16] JIANG H B, LEI Z C, YUAN C, et al. Operating ampacity and calculation method for AC submarine cables considering sheath circulation [C]//2023 10th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEAA). November 3-5, 2023, Nanjing, China: IEEE, 2024:612-616.
- [17] MARDIANA R. Parameters affecting the ampacity of HVDC submarine power cables [C]//2011 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS). November 15-17, 2011, Sharjah, United Arab Emirates: IEEE, 2012:1-6.
- [18] CHEN N, LUO D L, LI L J, et al. Simulation and experimental research on ampacity of submarine cables [C]//2021 International Conference on Advanced Electrical Equipment and Reliable Operation (AEERO). October 15-17, 2021, Beijing, China: IEEE, 2022:1-7.
- [19] 姚俊伟,何奇,张宇,等.考虑风电出力不确定性的微电网两阶段鲁棒优化调度模型[J].浙江电力,2024,43(11):106-115.
- YAO Junwei, HE Qi, ZHANG Yu, et al. A two-stage robust optimal scheduling model for microgrids accounting for the uncertainties in wind turbine output [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(11):106-115.
- [20] 马春玉.风机电缆群载流量优化研究[D].石家庄:河北科技大学,2023.
- MA Chunyu. Optimisation of the load capacity of wind turbine cable groups [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2023.
- [21] ZHANG Y Y, CHEN X M, ZHANG H, et al. Analysis on the temperature field and the ampacity of XLPE submarine HV cable based on electro-thermal-flow multiphysics coupling simulation[J]. Polymers, 2020, 12(4):952.
- [22] WU Q, LIU S, LV Y, et al. Simulation study on steady-state ampacity of ± 400 kV DC submarine cable under different laying environments [C]//22nd International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2021). November 21-26, 2021, Hybrid Conference, Xi'an, China. London: IET, 2022:60-65.
- [23] 袁畅,王森,孙永辉,等.基于混合特征双重衍生和误差修正的风电功率超短期预测[J].电力系统自动化,2024,48(5):68-76.
- YUAN Chang, WANG Sen, SUN Yonghui, et al. Ultra-short-term forecasting of wind power based on dual derivation of hybrid features and error correction [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(5):68-76.
- [24] 韩丽,于晓娇,喻洪波,等.基于波动趋势分段的风电功率区间预测[J].电力系统自动化,2023,47(18):206-215.
- HAN Li, YU Xiaojiao, YU Hongbo, et al. Wind power interval prediction based on fluctuation trend segmentation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18):206-215.
- [25] 严佳丽,任必兴,陈思媛,等.考虑热带气旋下坡致因的风电功率爬坡直接预测[J].高压电器,2025,61(5):179-188.
- YAN Jiali, REN Bixing, CHEN Siyuan, et al. Direct prediction of wind power ramp considering the cause of tropical cyclone ramping downhill [J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(5):179-188.
- [26] 吴倩,张涛,冉华军,等.送电区段内典型敷设方式下海缆载流量模型分析[J].绝缘材料,2023,56(12):111-121.
- WU Qian, ZHANG Tao, RAN Huajun, et al. Analysis on ampacity model of submarine cable under typical laying mode in transmission section [J]. Insulating Materials, 2023, 56(12):111-121.
- [27] 胡倩楠.计算10 kV三芯电缆导体温度的热路模型及应用研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- HU Qiannan. Study on thermal circuit model of 10 kV three core cable conductor temperature calculation and its engineering application [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [28] 王鹏.10 kV三芯电缆及附件线芯温度计算与实验研究[D].广州:华南理工大学,2016.
- WANG Peng. Temperature calculation and experimental study of 10 kV three-core cable and accessories [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [29] YAN J T, HUANG L L, YING F X, et al. Topology adjustment and optimal flow power based power control for offshore wind power [C]//2021 11th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES). December 18-20, 2021, Shanghai, China: IEEE, 2022:696-700.
-
- 收稿日期:2025-06-23;修回日期:2025-09-02
- 作者简介:
- 汪晶毅(1981),男,博士,正高级工程师,从事电网输电技术研究与应用工作。
- 刘刚(1969),男,博士,教授,研究方向为电力设备故障分析。(通信作者)
- (本文编辑:方明霞)