



(21) 申请号 202410470212.X

(22) 申请日 2024.04.18

(71) 申请人 中国能源建设集团广东省电力设计
研究院有限公司

地址 510663 广东省广州市黄埔区广州科
学城天丰路1号

(72) 发明人 许一泽 林睿 陈滢 胡建军
董晋明 张振 李矩添 赵陆尧

(74) 专利代理机构 华进联合专利商标代理有限
公司 44224

专利代理师 樊倩

(51) Int. Cl.

G06F 30/20 (2020.01)

G06F 17/18 (2006.01)

G06F 119/04 (2020.01)

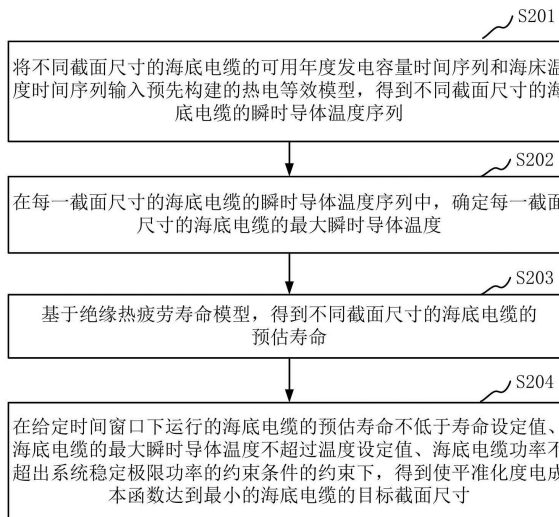
权利要求书2页 说明书12页 附图4页

(54) 发明名称

基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底
电缆截面选型优化方法

(57) 摘要

本申请涉及电缆输电技术领域,提供一种基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化方法。该方法包括:将年度发电容量时间序列和海床温度时间序列输入热电等效模型,得到不同截面尺寸的海底电缆的瞬时导体温度序列;在每一截面尺寸的海底电缆的瞬时导体温度序列中,确定对应的最大瞬时导体温度;基于绝缘热疲劳寿命模型,得到不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命;在给定时间窗口下运行的海底电缆的预估寿命不低于寿命设定值、最大瞬时导体温度不超过温度设定值、海底电缆功率不超过系统稳定极限功率的约束条件的约束下,得到使平准化度电成本函数达到最小的海底电缆的目标截面尺寸。采用本方法选取的海底电缆截面的发电成本较低。



1. 一种基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化方法,其特征在于,所述方法包括:

将不同截面尺寸的海底电缆的可用年度发电容量时间序列和海床温度时间序列输入预先构建的热电等效模型,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的瞬时导体温度序列;

在每一截面尺寸的海底电缆的瞬时导体温度序列中,确定所述每一截面尺寸的海底电缆的最大瞬时导体温度;

基于绝缘热疲劳寿命模型,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命;

在给定时间窗口下运行的海底电缆的预估寿命不低于寿命设定值、海底电缆的最大瞬时导体温度不超过温度设定值、海底电缆功率不超出系统稳定极限功率的约束条件的约束下,得到使平准化度电成本函数达到最小的海底电缆的目标截面尺寸。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在於,在基于绝缘热疲劳寿命模型,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命之前,所述方法还包括:

根据老化寿命模型和韦伯尔概率密度函数,得到概率寿命估计模型;

对所述概率寿命估计模型应用概率放大定律,得到所述绝缘热疲劳寿命模型。

3. 根据权利要求2所述的方法,其特征在於,所述对所述概率寿命估计模型应用概率放大定律,得到所述绝缘热疲劳寿命模型,包括:

根据海底电缆的截面尺寸和长度以及导体半径的比例,确定扩大系数;

根据所述扩大系数,对所述概率寿命估计模型应用概率放大定律,得到所述绝缘热疲劳寿命模型。

4. 根据权利要求1所述的方法,其特征在於,所述基于绝缘热疲劳寿命模型,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命,包括:

根据所述绝缘热疲劳寿命模型,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的概率失效寿命;

对所述不同截面尺寸的海底电缆的概率失效寿命沿设定时间段进行积分,得到各设定时间段对应的寿命损失分数;

根据所述各设定时间段对应的寿命损失分数,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命。

5. 根据权利要求4所述的方法,其特征在於,所述根据所述各设定时间段对应的寿命损失分数,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命,包括:

将每个设定时间段的寿命损失分数相加,得到分数相加结果;

当所述分数相加结果等于设定值时,将各个设定时间段相加,得到时间段相加结果;

根据所述时间段相加结果,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命。

6. 根据权利要求1所述的方法,其特征在於,所述在给定时间窗口下运行的海底电缆的预估寿命不低于寿命设定值、海底电缆的最大瞬时导体温度不超过温度设定值、海底电缆功率不超出系统稳定极限功率的约束条件的约束下,得到使平准化度电成本函数达到最小的海底电缆的目标截面尺寸,包括:

将所述不同截面尺寸的海底电缆的最大瞬时导体温度、预估寿命代入平准化度电成本函数,得到不同截面尺寸的海底电缆对应的平准化度电成本函数值;

剔除不满足约束条件的海底电缆对应的平准化度电成本函数值,得到剔除后的平准化度电成本函数值集合;

将所述平准化度电成本函数值集合中的最小值对应的海底电缆的截面尺寸作为目标截面尺寸。

7. 一种基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化装置,其特征在于,所述装置包括:

温度序列获取模块,用于将不同截面尺寸的海底电缆的可用年度发电容量时间序列和海床温度时间序列输入预先构建的热电等效模型,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的瞬时导体温度序列;

最大温度获取模块,用于在每一截面尺寸的海底电缆的瞬时导体温度序列中,确定所述每一截面尺寸的海底电缆的最大瞬时导体温度;

预估寿命获取模块,用于基于绝缘热疲劳寿命模型,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命;

目标截面尺寸获取模块,用于在给定时间窗口下运行的海底电缆的预估寿命不低于寿命设定值、最大瞬时导体温度不超过温度设定值、海底电缆功率不超出系统稳定极限功率的约束条件的约束下,得到使平准化度电成本函数达到最小的海底电缆的目标截面尺寸。

8. 一种计算机设备,包括存储器和处理器,所述存储器存储有计算机程序,其特征在在于,所述处理器执行所述计算机程序时实现权利要求1至6中任一项所述的方法的步骤。

9. 一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,其特征在在于,所述计算机程序被处理器执行时实现权利要求1至6中任一项所述的方法的步骤。

10. 一种计算机程序产品,包括计算机程序,其特征在在于,该计算机程序被处理器执行时实现权利要求1至6中任一项所述的方法的步骤。

基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化方法

技术领域

[0001] 本申请涉及电缆输电技术领域,特别是涉及一种基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化方法、装置、计算机设备、存储介质和计算机程序产品。

背景技术

[0002] 海上风电项目运营杠杆值较大,海底电缆是负责将生产的电力输送到岸上的电力系统组件,若发生单点故障将影响海上升压站的电量送出,对整个风电场的可靠性有显著影响。因此,有必要对海底电缆进行选型,以确保海底电缆能够适应具体项目需求和海底环境条件,保证电力传输的稳定性和可靠性。

[0003] 现有的海上风电项目的海底电缆截面选型方法一种方法是估算在不同时间范围内电缆温度超标的概率方法,另一种方法是从风速时间序列推导出等效循环负载曲线的方法。

[0004] 然而,现有的海上风电项目的海底电缆截面选型方法隐含的确定性、恒定额定功率运行假设过于保守,选取的海底电缆截面的发电成本较高。

发明内容

[0005] 基于此,有必要针对上述技术问题,提供一种基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化方法、装置、计算机设备、计算机可读存储介质和计算机程序产品。

[0006] 第一方面,本申请提供了一种基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化方法,包括:

[0007] 将不同截面尺寸的海底电缆的可用年度发电容量时间序列和海床温度时间序列输入预先构建的热电等效模型,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的瞬时导体温度序列;

[0008] 在每一截面尺寸的海底电缆的瞬时导体温度序列中,确定所述每一截面尺寸的海底电缆的最大瞬时导体温度;

[0009] 基于绝缘热疲劳寿命模型,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命;

[0010] 在给定时间窗口下运行的海底电缆的预估寿命不低于寿命设定值、海底电缆的最大瞬时导体温度不超过温度设定值、海底电缆功率不超出系统稳定极限功率的约束条件的约束下,得到使平准化度电成本函数达到最小的海底电缆的目标截面尺寸。

[0011] 在其中一个实施例中,在基于绝缘热疲劳寿命模型,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命之前,所述方法还包括:

[0012] 根据老化寿命模型和韦伯尔概率密度函数,得到概率寿命估计模型;

[0013] 对所述概率寿命估计模型应用概率放大定律,得到所述绝缘热疲劳寿命模型。

[0014] 在其中一个实施例中,所述对所述概率寿命估计模型应用概率放大定律,得到所述绝缘热疲劳寿命模型,包括:

- [0015] 根据海底电缆的截面尺寸和长度以及导体半径的比例,确定扩大系数;
- [0016] 根据所述扩大系数,对所述概率寿命估计模型应用概率放大定律,得到所述绝缘热疲劳寿命模型。
- [0017] 在其中一个实施例中,所述根据基于绝缘热疲劳寿命模型,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命,包括:
- [0018] 根据所述绝缘热疲劳寿命模型,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的概率失效寿命;
- [0019] 对所述不同截面尺寸的海底电缆的概率失效寿命沿设定时间段进行积分,得到各设定时间段对应的寿命损失分数;
- [0020] 根据所述各设定时间段对应的寿命损失分数,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命。
- [0021] 在其中一个实施例中,所述根据所述各设定时间段对应的寿命损失分数,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命,包括:
- [0022] 将每个设定时间段的寿命损失分数相加,得到分数相加结果;
- [0023] 当所述分数相加结果等于设定值时,将各个设定时间段相加,得到时间段相加结果;
- [0024] 根据所述时间段相加结果,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命。
- [0025] 在其中一个实施例中,所述在给定时间窗口下运行的海底电缆的预估寿命不低于寿命设定值、最大瞬时导体温度不超过温度设定值、海底电缆功率不超出系统稳定极限功率的约束条件的约束下,得到使平准化度电成本函数达到最小的海底电缆的目标截面尺寸,包括:
- [0026] 将所述不同截面尺寸的海底电缆的最大瞬时导体温度、预估寿命代入平准化度电成本函数,得到不同截面尺寸的海底电缆对应的平准化度电成本函数值;
- [0027] 剔除不满足约束条件的海底电缆对应的平准化度电成本函数值,得到剔除后的平准化度电成本函数值集合;
- [0028] 将所述平准化度电成本函数值集合中的最小值对应的海底电缆的截面尺寸作为目标截面尺寸。
- [0029] 第二方面,本申请还提供了一种基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化装置,包括:
- [0030] 温度序列获取模块,用于将不同截面尺寸的海底电缆的可用年度发电容量时间序列和海床温度时间序列输入预先构建的热电等效模型,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的瞬时导体温度序列;
- [0031] 最大温度获取模块,用于在每一截面尺寸的海底电缆的瞬时导体温度序列中,确定所述每一截面尺寸的海底电缆的最大瞬时导体温度;
- [0032] 预估寿命获取模块,用于基于绝缘热疲劳寿命模型,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命;
- [0033] 目标截面尺寸获取模块,用于在给定时间窗口下运行的海底电缆的预估寿命不低于寿命设定值、海底电缆的最大瞬时导体温度不超过温度设定值、海底电缆功率不超出系统稳定极限功率的约束条件的约束下,得到使平准化度电成本函数达到最小的海底电缆的

目标截面尺寸。

[0034] 第三方面,本申请还提供了一种计算机设备。所述计算机设备包括存储器和处理器,所述存储器存储有计算机程序,所述处理器执行上述方法。

[0035] 第四方面,本申请还提供了一种计算机可读存储介质。所述计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行上述方法。

[0036] 第五方面,本申请还提供了一种计算机程序产品。所述计算机程序产品,包括计算机程序,该计算机程序被处理器执行上述方法。

[0037] 上述基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化方法、装置、计算机设备、存储介质和计算机程序产品,将不同截面尺寸的海底电缆的可用年度发电容量时间序列和海床温度时间序列输入预先构建的热电等效模型,得到不同截面尺寸的海底电缆的瞬时导体温度序列;在每一截面尺寸的海底电缆的瞬时导体温度序列中,确定每一截面尺寸的海底电缆的最大瞬时导体温度;基于绝缘热疲劳寿命模型,得到不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命;在给定时间窗口下运行的海底电缆的预估寿命不低于寿命设定值、海底电缆的最大瞬时导体温度不超过温度设定值、海底电缆功率不超出系统稳定极限功率的约束条件的约束下,得到使平准化度电成本函数达到最小的海底电缆的目标截面尺寸。本案在对海底电缆的截面尺寸进行选型时考虑了海底电缆的预估寿命、海底电缆的最大瞬时导体温度和海底电缆功率,在给定时间窗口下运行的海底电缆的预估寿命不低于寿命设定值、海底电缆的最大瞬时导体温度不超过温度设定值、海底电缆功率不超出系统稳定极限功率的约束条件的约束下基于平准化度电成本函数,得到平准化度电成本最小的海底电缆截面尺寸,选取的海底电缆截面的发电成本较低。

附图说明

[0038] 为了更清楚地说明本申请实施例或相关技术中的技术方案,下面将对实施例或相关技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本申请的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0039] 图1为一个实施例中基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化方法的应用环境图;

[0040] 图2为一个实施例中基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化方法的流程示意图;

[0041] 图3为考虑最糟糕情况下的风电场年内负载示意图;

[0042] 图4为不同截面尺寸的海底电缆的多年最高运行温度分布图;

[0043] 图5为不同截面尺寸的海底电缆的寿命分布图;

[0044] 图6为不同截面尺寸的海底电缆与其相应的平准化度电成本的关系图;

[0045] 图7为一个实施例中基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化装置的结构框图;

[0046] 图8为一个实施例中计算机设备的内部结构图。

具体实施方式

[0047] 为了使本申请的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,对本申请进行进一步详细说明。应当理解,此处描述的具体实施例仅仅用以解释本申请,并不用于限定本申请。

[0048] 在本申请中提及“实施例”意味着,结合实施例描述的特定特征、结构或特性可以包含在本申请的至少一个实施例中。在说明书中的各个位置出现该短语并不一定均是指相同的实施例,也不是与其它实施例互斥的独立的或备选的实施例。本领域技术人员显式地和隐式地理解的是,本申请所描述的实施例可以与其它实施例相结合。

[0049] 本申请实施例提供一种基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化方法,本实施例可以由计算机设备执行,如图1所示,计算机设备可以获取不同截面尺寸的海底电缆的可用年度发电容量时间序列和海床温度时间序列,将年度发电容量时间序列和海床温度时间序列输入预先构建的热电等效模型,得到不同截面尺寸的海底电缆的瞬时导体温度序列;在每一截面尺寸的海底电缆的瞬时导体温度序列中,确定每一截面尺寸的海底电缆的最大瞬时导体温度;基于绝缘热疲劳寿命模型,得到不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命;在给定时间窗口下运行的海底电缆的预估寿命不低于寿命设定值、海底电缆的最大瞬时导体温度不超过温度设定值、海底电缆功率不超出系统稳定极限功率的约束条件的约束下,得到使平准化度电成本函数达到最小的海底电缆的目标截面尺寸。可以理解的是,该计算机设备可以通过服务器实现,也可以通过终端实现,还可以通过终端和服务器的交互系统实现。本实施例中,该方法包括图2示出的步骤:

[0050] 步骤S201,将不同截面尺寸的海底电缆的可用年度发电容量时间序列和海床温度时间序列输入预先构建的热电等效模型,得到不同截面尺寸的海底电缆的瞬时导体温度序列。

[0051] 在步骤S201之前,可以定义主要的模拟参数,主要的模拟参数可以包括:a)海底电缆设计信息:海缆设计寿命,故障概率和设计长度;b)海底电缆备选型号以及c)海底电缆结构参数。还可以先收集相关项目数据集,项目数据集可以包括:海上风电场的安装容量、额定电压,以及系统额定频率,风电场功率因数和串并联补偿情况。

[0052] 另外还需要定义海底电缆的敷设条件,敷设条件包括:总长度,埋深和敷设间距。还需收集海床的土壤信息,具体包括:i)热阻,和j)比热。与海床相关的信息被假设为在海底电缆路径上是空间均匀的。

[0053] 可以选择自然年作为单位分析时间窗口,一方面是因为自然年是用于计算贴现现金流量的典型时间范围,也是资金计划中量化项目绩效的经济指标的常用周期,如净现值、平准化电力成本和内部收益率。另一方面是选择自然年这个时间窗口可以涵盖四季的气候条件和源荷特性,把对海底电缆最不利的运行情况包含在内。

[0054] 以自然年作为单位分析时间窗口,预测任一截面尺寸的海底电缆的未来可用年度发电容量,在每一年的不同时间段预测该时间点任一截面尺寸的海底电缆的发电容量数据,将一年内不同时间段的发电容量数据按时间集合,得到该年度的发电容量时间序列 P_n , $n \in \{1, \dots, N\}$,将多个自然年的发电容量数据按时间集合,得到任一截面尺寸的海底电缆的可用年度发电容量时间序列 $P = \{P_1, \dots, P_N\}$,其中N表示集合的大小。

[0055] 可以基于海底电缆所在地的气象数据创建了一个合成海床温度时间序列,以自然

年作为单位分析时间窗口,在每一年的不同时间段预测该时间点海底电缆所在地的海床温度数据,将一年内不同时间段的海床温度数据按时间集合,得到该年度的海床温度时间序列 $T_n, n \in \{1, \dots, N\}$,将多个自然年的海床温度数据按时间集合,得到海底电缆所在地的海床温度时间序列 $T = \{T_1, \dots, T_N\}$,其中 N 表示集合的大小。

[0056] 可以将年度发电容量时间序列 P_n (n 年度的发电容量时间序列)、海床温度时间序列 T_n (n 年度的海床温度时间序列)和海底电缆的截面尺寸组成一个三元组 (P_n, T_n, c) ,其中 c 是海底电缆截面尺寸类型。每个三元组可以基于热电等效模型计算得到峰值温度时间序列 θ_{nc} ,其中 θ_{nc} 是第 n 年对于海底电缆 c 在热点的瞬时峰值导体温度,例如 $\theta_{nc} = \{\theta_{nc_1}, \dots, \theta_{nc_i}\}$,其中 i 是 P_n 和 T_n 的元素数量。将计算得到的多个自然年的峰值温度时间序列按时间集合,得到海底电缆 c 的瞬时导体温度序列。

[0057] 步骤S202,在每一截面尺寸的海底电缆的瞬时导体温度序列中,确定每一截面尺寸的海底电缆的最大瞬时导体温度。

[0058] 对任一截面尺寸的海底电缆 c 的瞬时导体温度序列中,将瞬时导体温度序列的最大瞬时导体温度确定为该海底电缆 c 的最大瞬时导体温度 $\theta_{nc_{peak}}$,如式(1)所示。

$$[0059] \quad \theta_{nc_{peak}} = \max\{\theta_{nc}\} \quad (1)$$

[0060] 步骤S203,基于绝缘热疲劳寿命模型,得到不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命。

[0061] 可以根据绝缘热疲劳寿命模型,获取不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命。

[0062] 步骤S204,在给定时间窗口下运行的海底电缆的预估寿命不低于寿命设定值、海底电缆的最大瞬时导体温度不超过温度设定值、海底电缆功率不超出系统稳定极限功率的约束条件的约束下,得到使平准化度电成本函数达到最小的海底电缆的目标截面尺寸。

[0063] 设定 P_{gen} 、 P_{lim_c} 、 θ_{peak} 、 $Life_{des}$ 分别表示海上风电场安装容量(MW)、线路稳定输送功率极限(MW)、允许的最大瞬时导体温度(°C)、海底电缆设计寿命(年)的参数。此外,设定 Kp_{nc} 、 $\theta_{nc_{peak}}$ 、 $Life_{nc}$ 分别用于表示海底电缆 c 在给定时间窗口 n 中相对于IEC计算额定 P_{IEC_c} 的功率增加系数、电缆 c 的最大瞬时导体温度(°C)以及给定时间窗口 n 的电缆 c 的计算寿命(年)。

[0064] 在给定时间窗口下运行的海底电缆的预估寿命不低于寿命设定值的约束条件可以表示为式(2),海底电缆的最大瞬时导体温度不超过温度设定值的约束条件可以表示为式(3),海底电缆功率不超出系统稳定极限功率的约束条件可以表示为式(4)。

$$[0065] \quad Life_{nc} \geq Life_{des} \quad \forall c \in C_{set} \quad (2)$$

$$[0066] \quad \theta_{nc_{peak}} \leq \theta_{peak} \quad \forall c \in C_{set} \quad (3)$$

$$[0067] \quad P_{gen} \leq Kp_{nc} \cdot P_{IEC_c} \leq P_{lim_c} \quad \forall c \in C_{set} \quad (4)$$

[0068] 其中

$$[0069] \quad P_{lim_c} = \frac{|V_S||V_R|}{|X_c|} - P_{loss_c} \quad \forall c \in C_{set} \quad (5)$$

[0070] 其中 $|V_S||V_R|$ 是线电压, $|X_c|$ 是从海上发电端到陆上受电端的海底电缆阻抗,

P_{loss_c} 代表海底电缆 c 的本身有功损耗。

[0071] 平准化度电成本函数用于表示海底电缆的平准化度电成本(LCOE)指标,平准化度电成本将海底电缆基础设施生命周期内的成本和发电量按照折现率 r 折现后,可以计算得到由海底电缆引起的每单位电量发电成本,数学形式如公式(6)所示,其意义为选用海底电缆类型 c 时,运行第 n 年时海底电缆的平准化度电成本指标。 $Cost_c$ 是海底电缆基础设施生命周期内的成本(万元/km),不管海底电缆横截面如何,其敷设成本是由海底电缆路由决定的,因此敷设成本被忽略了,但海底电缆损耗成本被包含在平准化度电成本函数中。

$$[0072] \quad \min \left\{ \frac{l \cdot Cost_c \cdot r \cdot (1+r)^N}{((1+r)^N - 1) \cdot E_{nc}} \mid c \in C_{set} \right\} \quad (6)$$

[0073] l 表示电缆的总长度(km), r 是贴现率(假定为5%), N 是项目的寿命(假定为25年), E_{nc} 是运行第 n 年使用海底电缆类型 c 时考虑功率损耗的年度产能(MWh)。

[0074] 虽然平准化度电成本函数和约束条件是通用的,但平准化度电成本函数和约束条件会根据输入数据集进行调整以适应特定的海上风电场,上述输入数据集包括:指定的海上风电场发电潜力即年度发电容量时间序列 P_n ,海床温度时间序列 T_n ,特定的土壤热性质,电气运行条件和电缆安装条件。在约束条件的约束下,可以保证使用目标截面尺寸的海底电缆进行发电的过程遵守了安全运行约束。

[0075] 上述基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化方法中,在对海底电缆的截面尺寸进行选型时考虑了海底电缆的预估寿命、海底电缆的最大瞬时导体温度和海底电缆功率,在给定时间窗口下运行的海底电缆的预估寿命不低于寿命设定值、海底电缆的最大瞬时导体温度不超过温度设定值、海底电缆功率不超出系统稳定极限功率的约束条件的约束下基于平准化度电成本函数,得到平准化度电成本最小的海底电缆截面尺寸,选取的海底电缆截面的发电成本较低。

[0076] 在其中一个实施例中,在基于绝缘热疲劳寿命模型,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命之前,本申请提供的方法还包括:根据老化寿命模型和韦伯尔概率密度函数,得到概率寿命估计模型;对概率寿命估计模型应用概率放大定律,得到绝缘热疲劳寿命模型绝缘热疲劳寿命模型。

[0077] 可以使用许多不同的模型来推断海底电缆绝缘材料长期老化寿命,例如祖尔科夫(Zurkov)模型、Crine模型和阿伦尼乌斯(Arrhenius)模型,每个模型都基于概率将失效时间与故障率相关联。所有这些模型呈现不同的分析表达式和参数值,但总体上,这些模型都能提供海底电缆绝缘寿命的类似结论。

[0078] 对于某些交联聚乙烯绝缘电力电缆(XLPE电缆),内聚乙烯基础原料产品没能与高压电缆料生产厂家的需求紧密结合,导致高压电缆料的质量未达到一定要求,可以对该类交联聚乙烯绝缘电力电缆绝缘材料热老化寿命进行评估,通过加速实验得出了适合该类高压电缆的老化寿命模型,如式(7)所示。

$$[0079] \quad life_c(\theta_{ncm}) = e^{\frac{8321.67}{\theta_{ncm}} - 13.66} \quad (7)$$

[0080] 其中 $life_c$ 为电缆 c 的绝缘寿命, θ_{ncm} 为第 n 年、电缆类型 c 在时间段 $1 < m < i$

的导体温度(K)。本老化寿命模型没有考虑电老化的影响。对于任一类型海底电缆,运行工况会保证在额定电压附近,并不像电缆负载会有较大波动,故可认为其电场强度 E 维持额定不变,电老化因素已涵盖在其设计寿命中,不再考虑其波动对寿命的影响。

[0081] 用于关联高压设备的失效时间与失效概率的最广泛接受的累积概率密度函数是韦伯尔概率密度函数,如式(8)中所示。

$$[0082] \quad P_f (life_{P_f}, \theta_{ncm}) = 1 - e^{-\left(\frac{life_{P_f}}{life_c(\theta_{ncm})}\right)^{\beta_c}} \quad (8)$$

[0083] 其中 $life_{P_f}$ 是在失效概率 P_f 下的寿命, $life_c(\theta_{ncm})$ 是概率密度函数的比例因子, $life_c(\theta_{ncm})$ 是 θ_{ncm} 的函数,而 β_c 是概率密度函数的形状参数。

[0084] 将老化寿命模型代入韦伯尔概率密度函数,可以得到概率寿命估计模型,概率寿命估计模型如式(9)所示。

$$[0085] \quad Life_{P_f} (\theta_{ncm}, P_f) = [-\ln (1 - P_f)]^{\frac{1}{\beta_c}} \cdot e^{\frac{8321.67}{\theta_{ncm}} - 13.66} \quad (9)$$

[0086] 概率寿命估计模型模拟了在一组运行条件 θ_{ncm} 和失效概率 P_f 下,电缆的概率失效寿命。但概率寿命估计模型仅适用于小段定长电缆试验的情况,为了将这一结果外推到实际长度的电缆,可以对概率寿命估计模型应用概率放大定律,如式(10)所示,将概率寿命估计模型式(9)代入公式(10),可以得到绝缘热疲劳寿命模型,绝缘热疲劳寿命模型如式(11)所示。

$$[0087] \quad Life_{P_{fl}} (\theta_{ncm}, P_{fl}) = Life_{P_f} (\theta_{ncm}, P_f) \cdot \left[\frac{\ln (1 - P_{fl})}{D \cdot \ln (1 - P_f)} \right]^{\frac{1}{\beta_c}} \quad (10)$$

[0088] 其中 P_{fl} 为电缆全长的故障概率, D 为扩大系数。

$$[0089] \quad Life_{P_{fl}} (\theta_{ncm}, P_{fl}) = \left[-\frac{\ln (1 - P_{fl})}{D} \right]^{\frac{1}{\beta_c}} \cdot e^{\frac{8321.67}{\theta_{ncm}} - 13.66} \quad (11)$$

[0090] 其中 β_c 值取2,其他参数可从海底电缆制造商获取。

[0091] 根据绝缘热疲劳寿命模型,可以得到不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命。

[0092] 本实施例中,根据老化寿命模型和韦伯尔概率密度函数,得到概率寿命估计模型;对概率寿命估计模型应用概率放大定律,得到绝缘热疲劳寿命模型;根据绝缘热疲劳寿命模型,得到不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命,解决海底海缆的寿命估计问题。

[0093] 在其中一个实施例中,对概率寿命估计模型应用概率放大定律,得到绝缘热疲劳寿命模型,具体步骤如下:根据海底电缆的截面尺寸和长度以及导体半径的比例,确定扩大系数;根据扩大系数,对概率寿命估计模型应用概率放大定律,得到绝缘热疲劳寿命模型。

[0094] 可以根据海底电缆的截面尺寸和长度以及导体半径的比例,确定扩大系数,如式(12)所示。

$$[0095] \quad D = \frac{l_D}{l_f} \cdot \left(\frac{r_D}{r_f} \right)^2 \quad (12)$$

[0096] 根据扩大系数,对概率寿命估计模型应用概率放大定律,得到绝缘热疲劳寿命模型。

[0097] 本实施例中,根据海底电缆的截面尺寸和长度以及导体半径的比例,确定扩大系数;根据扩大系数,对概率寿命估计模型应用概率放大定律,得到绝缘热疲劳寿命模型,适用于实际长度的海底电缆的寿命估计。

[0098] 在其中一个实施例中,根据绝缘热疲劳寿命模型,得到不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命,具体步骤如下:根据绝缘热疲劳寿命模型,得到不同截面尺寸的海底电缆的概率失效寿命;对不同截面尺寸的海底电缆的概率失效寿命沿设定时间段进行积分,得到各设定时间段对应的寿命损失分数;根据各设定时间段对应的寿命损失分数,得到不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命。

[0099] 根据绝缘热疲劳寿命模型,可以得到海底电缆 c 的概率失效寿命 $Life_{P_{fl}}(\theta_{ncm}, P_{fl})$, 设 dt 为在年度发电容量时间序列 P_n 中的设定时间段 m 内的一个无穷小的时间增量,将海底电缆 c 的概率失效寿命 $Life_{P_{fl}}(\theta_{ncm}, P_{fl})$ 沿设定时间段 m 进行积分,则可以得到设定时间段 m 的寿命损失分数,如式 (13) 所示。

$$[0100] \quad Loss_m = \int_m \frac{1}{Life_{P_{fl}}(\theta_{ncm}, P_{fl})} dt \quad (13)$$

[0101] 根据上述方法,可以得到各设定时间段对应的寿命损失分数。根据各设定时间段对应的寿命损失分数,可以得到不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命。

[0102] 本实施例中,对不同截面尺寸的海底电缆的概率失效寿命沿设定时间段进行积分,得到各设定时间段对应的寿命损失分数;根据各设定时间段对应的寿命损失分数,可以得到不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命。

[0103] 在其中一个实施例中,根据各设定时间段对应的寿命损失分数,得到不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命,具体步骤如下:将每个设定时间段的寿命损失分数相加,得到分数相加结果;当分数相加结果等于设定值时,将各个设定时间段相加,得到时间段相加结果;根据时间段相加结果,得到不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命。

[0104] 根据帕尔姆格伦-迈纳 (Palmgren-Miner) 累积损伤理论,将每个时间段的寿命损失分数相加,当结果等于一时,损伤累积到临界值,达到绝缘发生疲劳破坏的预估寿命。因此,可以将设定值设为1。

[0105] 对任一截面尺寸的海底电缆,将每个设定时间段的寿命损失分数相加,得到分数相加结果;当分数相加结果等于1时,将各个设定时间段相加,得到时间段相加结果,将时间段相加结果作为该截面尺寸的海底电缆的预估寿命。

[0106] 式 (14) 计算了海底电缆 c 的预估寿命 ($Life_{nc}$ 年),也可以称为故障周期数。

$$[0107] \quad Life_{nc} = \frac{1}{\sum_{m=1}^i Loss_m} \quad (14)$$

[0108] 本实施例中,根据每个设定时间段的寿命损失分数的分数相加结果,得到不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命。

[0109] 在其中一个实施例中,在给定时间窗口下运行的海底电缆的预估寿命不低于寿命设定值、最大瞬时导体温度不超过温度设定值、海底电缆功率不超出系统稳定极限功率的约束条件的约束下,得到使平准化度电成本函数达到最小的海底电缆的目标截面尺寸,具体步骤如下:将不同截面尺寸的海底电缆的最大瞬时导体温度、预估寿命代入平准化度电成本函数,得到不同截面尺寸的海底电缆的平准化度电成本函数值;剔除不满足约束条件的海底电缆对应的平准化度电成本函数值,得到剔除后的平准化度电成本函数值集合;将平准化度电成本函数值集合中的最小值对应的海底电缆的截面尺寸作为目标截面尺寸。

[0110] 基于约束条件的平准化度电成本函数是非线性的。然而,因为制造商提供的海底电缆类型数量有限,求解搜索空间相对较小,这允许使用简单的穷举优化方法来选择符合约束条件的海底电缆截面尺寸型号。

[0111] 本实施例中,使用简单的穷举优化方法得到不同截面尺寸的海底电缆的平准化度电成本函数值,根据约束条件确定目标截面尺寸。

[0112] 本申请可以以某海上风电项目作为案例研究对象。根据预可行性研究,该项目的总装机容量为600兆瓦,单台采5.5兆瓦的风力涡轮机,出口电缆的总长度为35公里,标称电压为220千伏,标称频率为50赫兹,且不包括补偿单元。

[0113] 关于海底电缆的输入数据由该海上风电项目提供,主要数据详见表1。由于缺乏海床温度时间序列(也可以称为海低温度时间序列)的数据,可以基于海底电缆所在地的气象数据创建了一个合成海床温度时间序列。该海床温度时间序列温度变化范围在16°C至25°C之间,并考虑到了季节性波动。

[0114] 表1 海上风电项目海底电缆敷设相关仿真数据

[0115]	土壤热阻	土壤 比热容	电缆埋深	海缆间距	设计寿 命	设计失效 概率	单位 设计长度
	1 km/w	2*106 J/m3	2 m	0.4 m	25 年	5 %	1 km

[0116] 可以对25年海上风电发电容量时间序列的模拟数据进行分析,并将选型结果与设计单位在评估海底电缆选型时的常用方法的选型结果进行比较。设计单位在评估海底电缆选型时的常用方法仅包括一个多参数的静态方程,用于计算在无限时间内传输的连续电流 I_t ,使导体温度恒定为90°C。然后选择一个 I_t 值等于或大于热点处总电流(包括电容电流)的较小电缆。采用这种方法的选型结果为1000平方毫米的海底电缆。

[0117] 在采用本申请提供的基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化方法选择海底电缆时,需要对发电容量时间序列数据进行预处理分析,找出有代表性的周期集。考虑到风电天然的季节周期性,选择按年(365天)的周期,来捕捉多风年份中最具代表性的多风日负载数据窗口;在时间顺序上通过计算整个多年数据集的RMS值来得出预处理电流,然后获得按年为周期计算的RMS值最大的年度。将上述过程应用于本研究后,最糟糕情况下的负载模式图如图3所示。这种阶梯式模式是相对于热点处的总电流进行标幺化的。

[0118] 使用图3中的模式,并考虑合成的海床温度时间序列,应用本申请提供的基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化方法,选型结果为630平方毫米的海底电缆,该630平方毫米的海底电缆的峰值温度 $\theta_{c_{peak}}$ 为 87.3°C 。当使用完整的时间数据集,所有由 (P_n, T_n, c) 定义的点的峰值温度 $\theta_{nc_{peak}}$ 在图4中给出。

[0119] 结果表明,除了500平方毫米的海底电缆外,所有海底电缆都满足约束条件(3),即不超过额定温度限制(用蓝色虚线标示)。基于海底电缆发热结果,选型结果为630平方毫米的海底电缆或800平方毫米的海底电缆。

[0120] 从寿命估计的角度,不同的瞬时温度剖面导致了不同的寿命估计,如图5所示。寿命估计以计算值与设计值的比率给出。如预期的那样,由于暴露在更为严峻的导体温度下,630平方毫米的海底电缆展示出超出优化模型界限的寿命比率。相比之下,800平方毫米的海底电缆满足了所有模拟年度周期的这一约束,同时满足所有其他约束。选定的800平方毫米海底电缆的 $Life_{nc}$ 的平均值和标准偏差分别是0.58和0.08。对于 $\theta_{nc_{peak}}$,这些值分别是 74.5°C 和0.88。这两个变量的标准偏差是可接受的,表明了对不同年度剖面的稳健性。

[0121] 不同海底电缆在 $Life_{nc}$ 上的集中度差异,可以基于以下事实来解释:较大的海底电缆具有较大的时间常数(动态响应较慢),因此由于功率变化导致的反应速度不如较小的海底电缆明显。尽管如此,从基于IEC标准的1000平方毫米的海底电缆优化成800平方毫米的海底电缆,直接导致了初始投资的减少,但也带来了总功率损失的增加。因此,综合计算平准化度电成本指标可以综合评估优化结果的有效性,评估结果如图6所示。结果显示平准化度电成本函数都随着较大海底电缆的使用而单调增加,故可以得出结论,海底电缆截面越小得到的平准化度电成本函数值越小。

[0122] 应该理解的是,虽然如上所述的各实施例所涉及的流程图中的各个步骤按照箭头的指示依次显示,但是这些步骤并不是必然按照箭头指示的顺序依次执行。除非本文中有明确的说明,这些步骤的执行并没有严格的顺序限制,这些步骤可以以其它的顺序执行。而且,如上所述的各实施例所涉及的流程图中的至少一部分步骤可以包括多个步骤或者多个阶段,这些步骤或者阶段并不必然是在同一时刻执行完成,而是可以在不同的时刻执行,这些步骤或者阶段的执行顺序也不必然是依次进行,而是可以与其它步骤或者其它步骤中的步骤或者阶段的至少一部分轮流或者交替地执行。

[0123] 基于同样的发明构思,本申请实施例还提供了一种用于实现上述所涉及的基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化方法的基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化装置。该装置所提供的解决问题的实现方案与上述方法中所记载的实现方案相似,故下面所提供的的一个或多个基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化装置实施例中的具体限定可以参见上文中对于基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化方法的限定,在此不再赘述。

[0124] 在一个示例性的实施例中,如图7所示,提供了一种基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化装置,其中:

[0125] 温度序列获取模块701,用于将不同截面尺寸的海底电缆的可用年度发电容量时间序列和海床温度时间序列输入预先构建的热电等效模型,得到不同截面尺寸的海底电缆的瞬时导体温度序列;

[0126] 最大温度获取模块702,用于在每一截面尺寸的海底电缆的瞬时导体温度序列中,确定所述每一截面尺寸的海底电缆的最大瞬时导体温度;

[0127] 预估寿命获取模块703,用于基于绝缘热疲劳寿命模型,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命;

[0128] 目标截面尺寸获取模块704,用于在给定时间窗口下运行的海底电缆的预估寿命不低于寿命设定值、最大瞬时导体温度不超过温度设定值、海底电缆功率不超出系统稳定极限功率的约束条件的约束下,得到使平准化度电成本函数达到最小的海底电缆的目标截面尺寸。

[0129] 在其中一个实施例中,预估寿命获取模块703,还用于:根据老化寿命模型和韦伯尔概率密度函数,得到概率寿命估计模型;对所述概率寿命估计模型应用概率放大定律,得到所述绝缘热疲劳寿命模型。

[0130] 在其中一个实施例中,预估寿命获取模块703,还用于:根据海底电缆的截面尺寸和长度以及导体半径的比例,确定扩大系数;根据所述扩大系数,对所述概率寿命估计模型应用概率放大定律,得到所述绝缘热疲劳寿命模型。

[0131] 在其中一个实施例中,预估寿命获取模块703,还用于:根据所述绝缘热疲劳寿命模型,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的概率失效寿命;对所述不同截面尺寸的海底电缆的概率失效寿命沿设定时间段进行积分,得到各设定时间段对应的寿命损失分数;根据所述各设定时间段对应的寿命损失分数,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命。

[0132] 在其中一个实施例中,预估寿命获取模块703,还用于:将每个设定时间段的寿命损失分数相加,得到分数相加结果;当所述分数相加结果等于设定值时,将各个设定时间段相加,得到时间段相加结果;根据所述时间段相加结果,得到所述不同截面尺寸的海底电缆的预估寿命。

[0133] 在其中一个实施例中,目标截面尺寸获取模块704,还用于:将所述不同截面尺寸的海底电缆的最大瞬时导体温度、预估寿命代入平准化度电成本函数,得到不同截面尺寸的海底电缆的平准化度电成本函数值;剔除不满足约束条件的海底电缆对应的平准化度电成本函数值,得到剔除后的平准化度电成本函数值集合;将所述平准化度电成本函数值集合中的最小值对应的海底电缆的截面尺寸作为目标截面尺寸。

[0134] 上述基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化装置中的各个模块可全部或部分通过软件、硬件及其组合来实现。上述各模块可以以硬件形式内嵌于或独立于计算机设备中的处理器中,也可以以软件形式存储于计算机设备中的存储器中,以便于处理器调用执行以上各个模块对应的操作。

[0135] 在一个示例性的实施例中,提供了一种计算机设备,该计算机设备可以是服务器,其内部结构图可以如图8所示。该计算机设备包括处理器、存储器、输入/输出接口(Input/Output,简称I/O)和通信接口。其中,处理器、存储器和输入/输出接口通过系统总线连接,通信接口通过输入/输出接口连接到系统总线。其中,该计算机设备的处理器用于提供计算和控制能力。该计算机设备的存储器包括非易失性存储介质和内存。该非易失性存储介质存储有操作系统、计算机程序和数据库。该内存为非易失性存储介质中的操作系统和计算机程序的运行提供环境。该计算机设备的数据库用于存储基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化方法的数据。该计算机设备的输入/输出接口用于处

理器与外部设备之间交换信息。该计算机设备的通信接口用于与外部的终端通过网络连接通信。该计算机程序被处理器执行时以实现一种基于绝缘热疲劳寿命建模的海上风电海底电缆截面选型优化方法。

[0136] 本领域技术人员可以理解,图8中示出的结构,仅仅是与本申请方案相关的部分结构的框图,并不构成对本申请方案所应用于其上的计算机设备的限定,具体的计算机设备可以包括比图中所示更多或更少的部件,或者组合某些部件,或者具有不同的部件布置。

[0137] 在一个实施例中,还提供了一种计算机设备,包括存储器和处理器,存储器中存储有计算机程序,该处理器执行计算机程序时实现上述各方法实施例中的步骤。

[0138] 在一个实施例中,提供了一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,该计算机程序被处理器执行时实现上述各方法实施例中的步骤。

[0139] 在一个实施例中,提供了一种计算机程序产品,包括计算机程序,该计算机程序被处理器执行时实现上述各方法实施例中的步骤。

[0140] 需要说明的是,本申请所涉及的用户信息(包括但不限于用户设备信息、用户个人信息等)和数据(包括但不限于用于分析的数据、存储的数据、展示的数据等),均为经用户授权或者经过各方充分授权的信息和数据,且相关数据的收集、使用和处理需要符合相关规定。

[0141] 本领域普通技术人员可以理解实现上述实施例方法中的全部或部分流程,是可以通过计算机程序来指令相关的硬件来完成,所述的计算机程序可存储于一非易失性计算机可读存储介质中,该计算机程序在执行时,可包括如上述各方法的实施例的流程。其中,本申请所提供的各实施例中所使用的对存储器、数据库或其它介质的任何引用,均可包括非易失性和易失性存储器中的至少一种。非易失性存储器可包括只读存储器(Read-Only Memory, ROM)、磁带、软盘、闪存、光存储器、高密度嵌入式非易失性存储器、阻变存储器(ReRAM)、磁变存储器(Magnetoresistive Random Access Memory, MRAM)、铁电存储器(Ferroelectric Random Access Memory, FRAM)、相变存储器(Phase Change Memory, PCM)、石墨烯存储器等。易失性存储器可包括随机存取存储器(Random Access Memory, RAM)或外部高速缓冲存储器等。作为说明而非局限,RAM可以是多种形式,比如静态随机存取存储器(Static Random Access Memory, SRAM)或动态随机存取存储器(Dynamic Random Access Memory, DRAM)等。本申请所提供的各实施例中所涉及的数据库可包括关系型数据库和非关系型数据库中至少一种。非关系型数据库可包括基于区块链的分布式数据库等,不限于此。本申请所提供的各实施例中所涉及的处理器可为通用处理器、中央处理器、图形处理器、数字信号处理器、可编程逻辑器、基于量子计算的数据处理逻辑器等,不限于此。

[0142] 以上实施例的各技术特征可以进行任意的组合,为使描述简洁,未对上述实施例中的各个技术特征所有可能的组合都进行描述,然而,只要这些技术特征的组合不存在矛盾,都应当认为是本说明书记载的范围。

[0143] 以上所述实施例仅表达了本申请的几种实施方式,其描述较为具体和详细,但不能因此而理解为对本申请专利范围的限制。应当指出的是,对于本领域的普通技术人员来说,在不脱离本申请构思的前提下,还可以做出若干变形和改进,这些都属于本申请的保护范围。因此,本申请的保护范围应以所附权利要求为准。

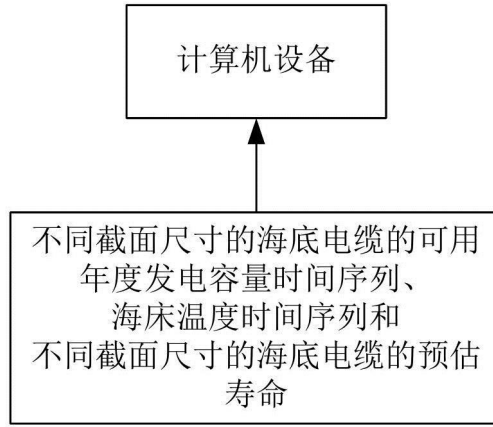


图1

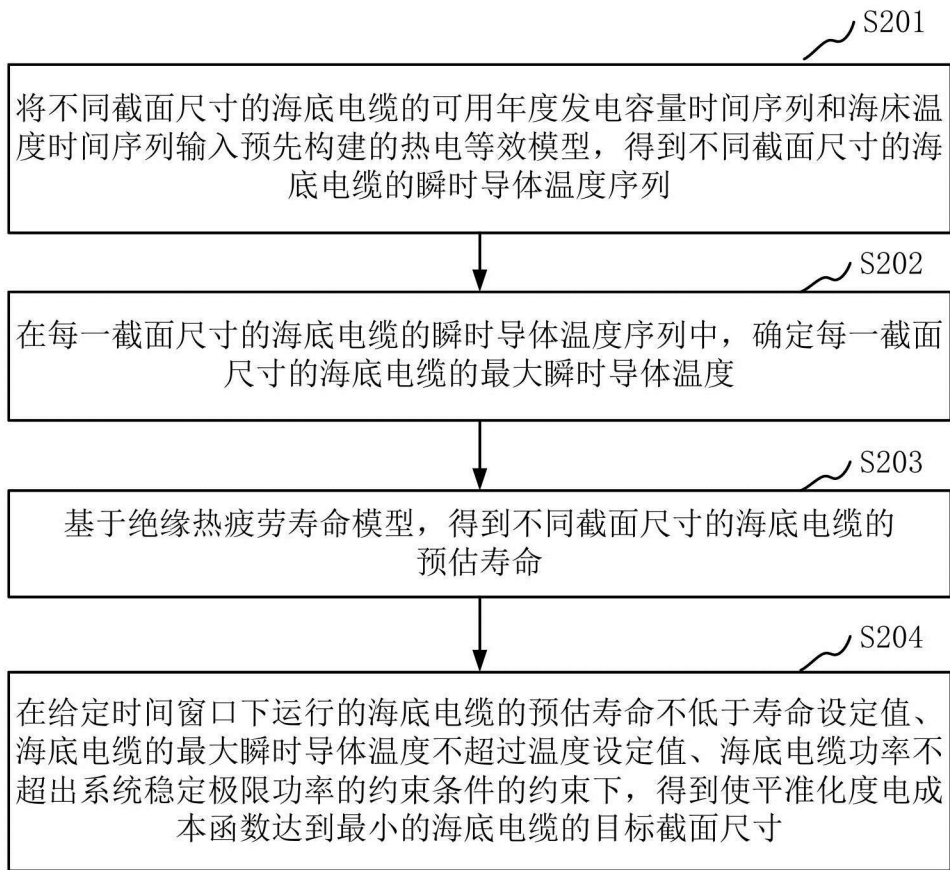


图2

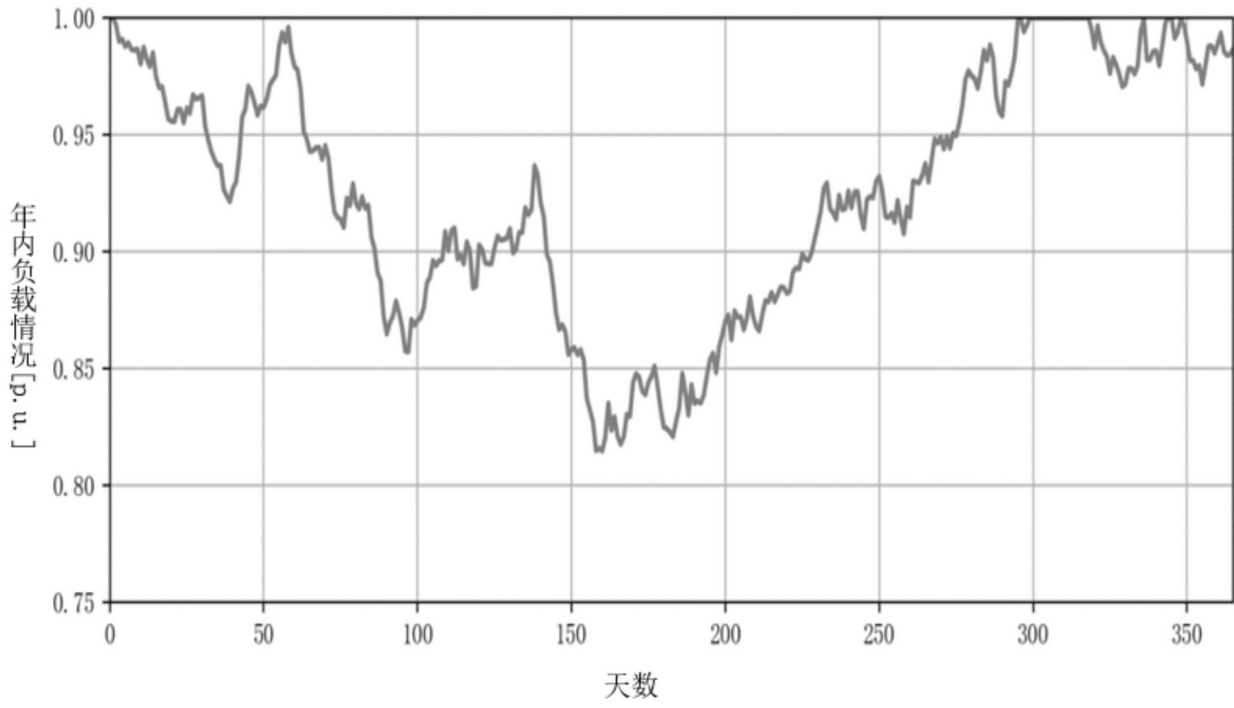


图3

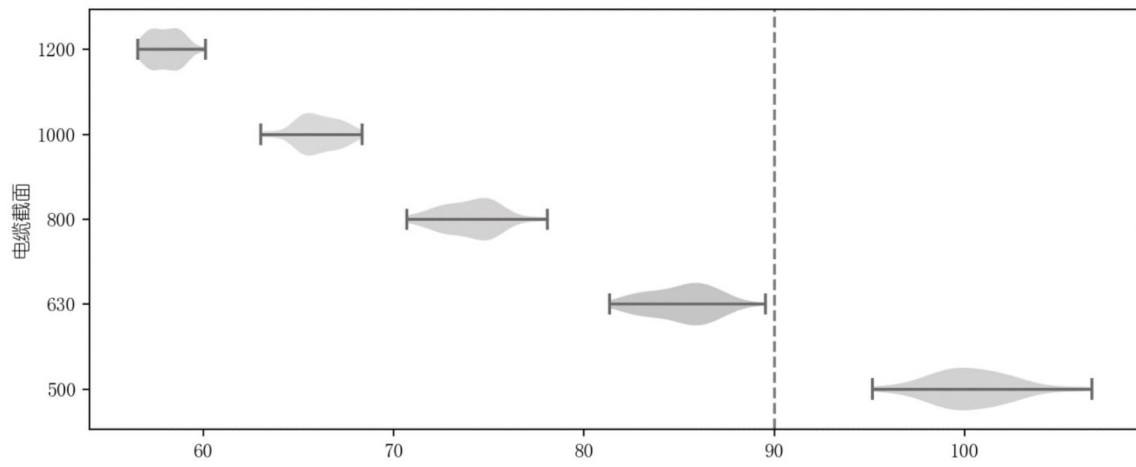


图4

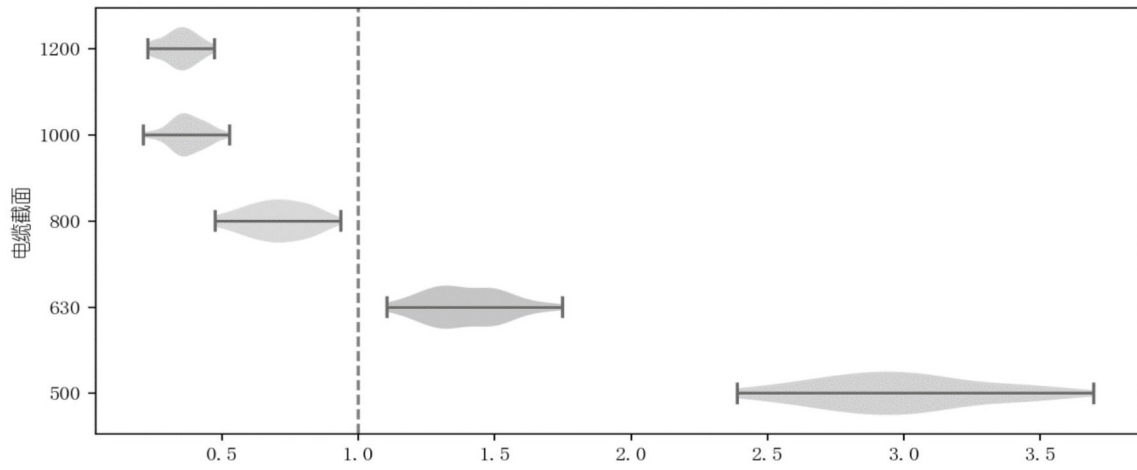


图5

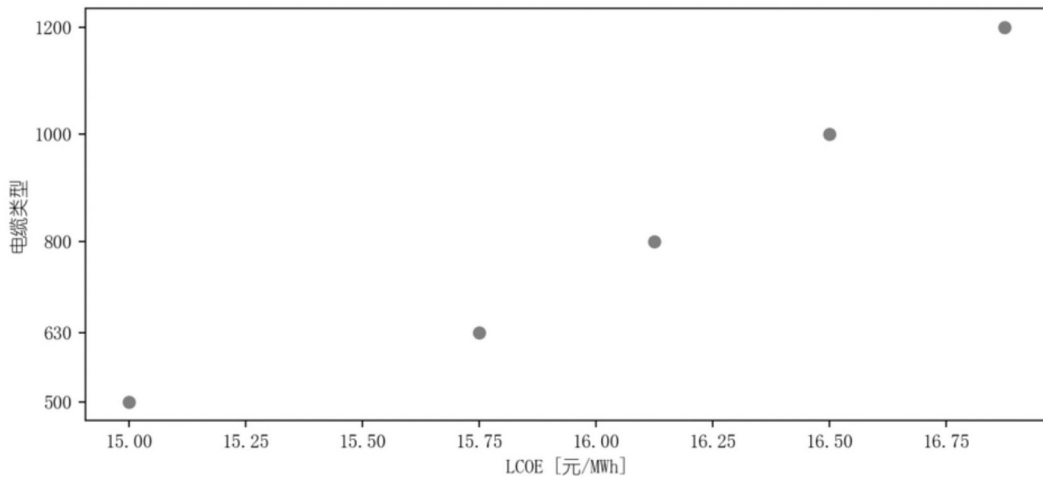


图6

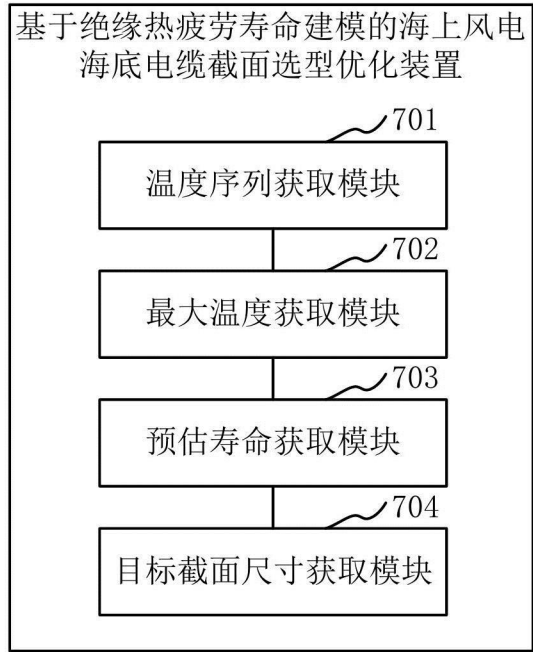


图7

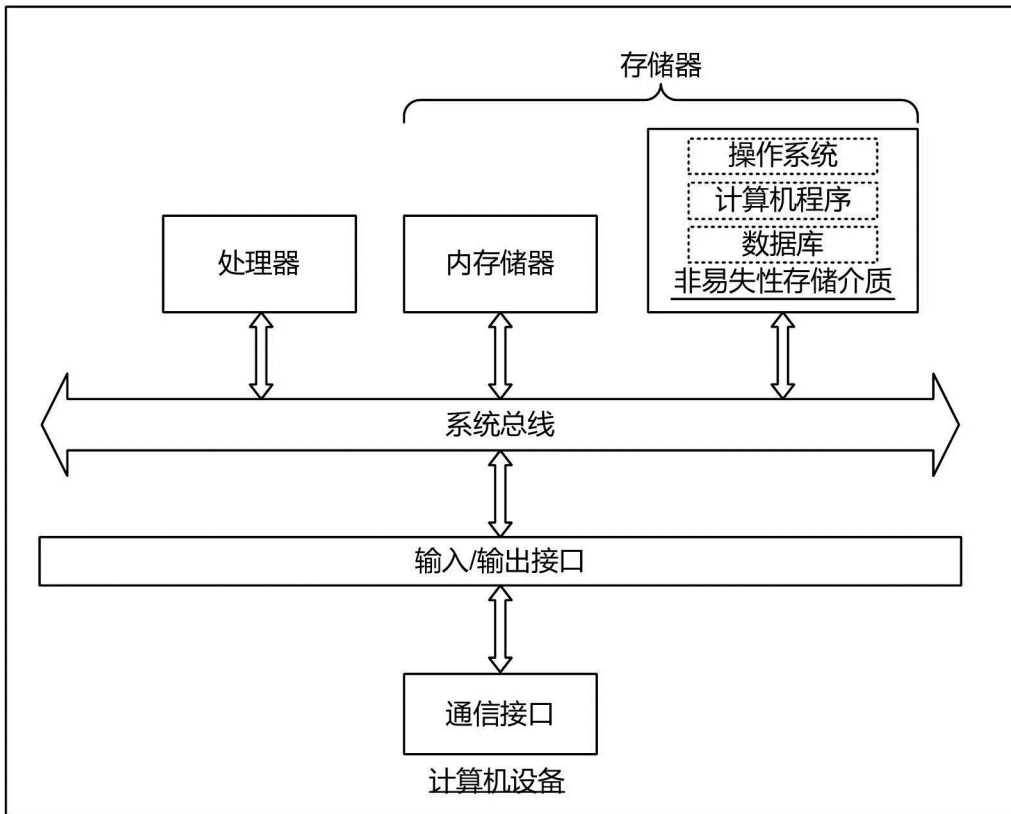


图8