



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 119093308 A

(43) 申请公布日 2024. 12. 06

(21) 申请号 202411155241.3

H02J 9/00 (2006.01)

(22) 申请日 2024.08.22

H02J 9/06 (2006.01)

(71) 申请人 福州市规划设计研究院集团有限公司

H02J 9/08 (2006.01)

H02J 7/35 (2006.01)

H02J 7/34 (2006.01)

地址 350108 福建省福州市闽侯县高新区
高新大道1号

(72) 发明人 王晓喜

(74) 专利代理机构 福州元创专利商标代理有限公司 35100

专利代理师 蔡学俊 薛金才

(51) Int. Cl.

H02J 1/00 (2006.01)

H02J 1/08 (2006.01)

H02J 1/10 (2006.01)

H02J 1/14 (2006.01)

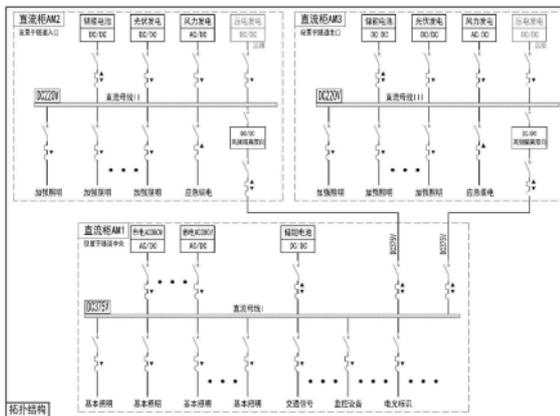
权利要求书5页 说明书18页 附图8页

(54) 发明名称

交通隧道混合能源直流微电网

(57) 摘要

本发明提出交通隧道混合能源直流微电网,包括多段直流母线、储能电池、分布式电源、应急移动电源、本地直流负荷;多段直流母线与储能电池连接,且多段直流母线包括设置于隧道中央的直流母线I、设置于隧道入口的直流母线II、以及设置于隧道出口的直流母线III;直流母线I通过单向AC/DC变换器接入市电电源,直流母线II和直流母线III接入分布式电源和应急移动电源,直流母线I分别通过双向DC/DC变换器与直流母线II、直流母线III联网。本发明可以大幅降低系统内存在的三次谐波,提高系统电能质量,铜耗材使用量明显降低,简化了系统的设备组成;开放式系统即插即用,为各种新能源发电的接入提供便利并尽可能多利用可再生能源发电电源,实现节能减排。



1. 交通隧道混合能源直流微电网,其特征在於:包括多段直流母线、储能电池、分布式电源、应急移动电源、本地直流负荷;所述多段直流母线与储能电池连接,且所述多段直流母线包括设置于隧道中央的直流母线I、设置于隧道入口的直流母线II、以及设置于隧道出口的直流母线III;所述直流母线I通过单向AC/DC变换器接入市电电源,所述直流母线II和直流母线III接入分布式电源和应急移动电源,所述直流母线I分别通过双向DC/DC变换器与直流母线II、直流母线III联网,以实现不同直流母线间的电能传输;所述本地直流负荷包括由直流母线I供电的隧道基本照明、设施电光标识、交通信号灯、监控设备用电和由流母线II、直流母线III供电的隧道加强照明。

2. 根据权利要求1所述的交通隧道混合能源直流微电网,其特征在於,所述直流母线I的数量根据直流母线I的供电半径以及隧道长度进行设置,以实现隧道内均布直流负荷的供电。

3. 根据权利要求1所述的交通隧道混合能源直流微电网,其特征在於,所述分布式电源包括光伏发电和风力发电,所述应急移动电源包括移动柴油发电。

4. 根据权利要求1所述的交通隧道混合能源直流微电网,其特征在於,所述直流微电网的运行控制采用三层分级模式:第一层控制采用下垂控制,通过多个参与直流母线电压控制的控制单元共同维持直流母线电压稳定;第二层控制由工控机实现直流母线电压二次调节、各控制单元功率分配、直流母线运行模式的切换;第三层控制由隧道控制中心内计算机实现不同直流母线之间的能量调度,通过制定直流微电网运行调度策略,实现对市电电源、分布式电源、储能电池、直流负荷的灵活调度来保证系统安全经济运行。

5. 根据权利要求4所述的交通隧道混合能源直流微电网,其特征在於,所述第一层控制中,所述参与直流母线电压控制的控制单元包括单向AC/DC变换器、双向DC/DC变换器、分布式电源控制器、储能单元控制器;所述下垂控制即控制变换器或控制器的电压和电流运行在一条下垂曲线上,所述下垂曲线表达式如下:

$$U_d = U_0 - k \times I$$

式中, U_d 为变换器或控制器的输出电压; U_0 为直流母线电压设定值; k 为下垂曲线系数; I 为变换器或控制器的输出电流。

6. 根据权利要求5所述的交通隧道混合能源直流微电网,其特征在於,所述第二层控制中,直流母线电压二次调节和各控制单元功率分配具体为:采用混合补偿方式,同时对下垂曲线的直流母线电压设定值 U_0 和系数 k 进行补偿,通过工控机总线通信的方式获取每个控制单元的信息,包括电压、电流和下垂曲线系数,利用平均电压补偿器、平均电流补偿器和曲线系数补偿器得到下垂曲线系数补偿量 Δk 和纵截距补偿量 ΔU ,再分别对下垂曲线进行平移和系数调整;其中,所述平均电压补偿器通过平移曲线消除各单元的输出直流电压偏差,所述平均电流补偿器和曲线系数补偿器通过调整下垂曲线的系数实现快速的负载分配;

所述直流母线运行模式的切换具体为:直流母线I、II、III分别设置三种运行模式,根据直流母线的输入电源及直流负载所存在差异进行直流母线运行模式的切换;其中直流母线的输入电源通过设置电压控制点 $U_H \setminus U_M \setminus U_L$ 和直流母线电压设定值 U_0 来决定,且输入电源的供电优先级为分布式电源>储能电池>市电。

7. 根据权利要求6所述的交通隧道混合能源直流微电网,其特征在於,所述直流母线I、

II、III分别设置三种运行模式具体为，

直流母线I运行模式：

运行模式一：直流母线II、III电能富余，直流母线I输入电源包括市电电源、储能电池以及分布式电源；直流母线I负载为隧道基本照明、设施电光标识、交通信号灯、监控设备用电； U_{DCI} 表示直流母线I电压值；

$U_{DCI} > U_H$ ：直流母线电压偏高，储能电池达到上限而不能继续进行充电，作为分布式电源的发电系统弃能运行，为维持电压稳定，发电系统均工作在恒压模式；

$U_H > U_{DCI} > U_M$ ：发电系统发出的功率大于直流负载消耗的功率且有盈余，储能电池工作在恒流充电模式；发电系统处于下垂控制，维持直流母线电压的稳定；

$U_M > U_{DCI} > U_L$ ：发电系统发出的功率不足以提供直流负载消耗的功率，为最大限度利用可再生能源，发电系统始终工作在最大功率跟踪模式，为维持母线电压的稳定，储能电池进行放电，工作在下垂控制状态；

$U_L > U_{DCI} > U_0$ ：发电系统发出功率和储能电池提供的功率之和小于交直流负载消耗的功率，发电系统工作在MPPT模式，储能电池进行放电，市电电源处于下垂控制状态，维持直流母线电压的稳定；

运行模式二：直流母线II、III电能不足，直流母线I输入电源包括市电电源、储能电池；直流母线I负载为隧道基本照明、设施电光标识、交通信号灯、监控设备用电以及直流母线II、III负载；

运行模式三：市电故障，直流母线I输入电源包括储能电池、分布式电源和应急移动电源；直流母线I负载为隧道基本照明中的应急照明、设施电光标识；

$U_{DCI} > U_H$ ：直流母线电压偏高，储能电池达到上限而不能继续进行充电，发电系统弃能运行，为维持电压稳定，发电系统均工作在恒压模式；

$U_H > U_{DCI} > U_M$ ：发电系统发出的功率大于直流负载消耗的功率且有盈余，储能电池工作在恒流充电模式，发电系统处于下垂控制，维持直流母线电压的稳定；

$U_M > U_{DCI} > U_L$ ：发电系统发出的功率不足以提供直流负载消耗的功率，为最大限度利用可再生能源，发电系统始终工作在最大功率跟踪模式，为维持母线电压的稳定，储能电池进行放电，工作在下垂控制状态；

$U_L > U_{DCI} > U_0$ ：发电系统发出功率和储能电池提供的功率之和小于直流负载消耗的功率，发电系统工作在MPPT模式，储能电池进行放电，直流母线II、III接入应急移动电源补充电能；

直流母线II/III运行模式：

运行模式一：白昼情况下，直流母线II/直流母线III输入电源包括分布式电源、储能电池以及市电电源；直流母线II/直流母线III负载为隧道加强照明； U_{DC} 表示直流母线II电压值或直流母线III电压值；

$U_{DC} > U_H$ ：直流母线电压偏高，储能电池达到上限而不能继续进行充电，发电系统弃能运行，为维持电压稳定，发电系统均工作在恒压模式；

$U_H > U_{DC} > U_M$ ：发电系统发出的功率大于直流负载消耗的功率且有盈余，储能电池工作在恒流充电模式，发电系统处于下垂控制，维持直流母线电压的稳定；

$U_M > U_{DC} > U_L$ ：发电系统发出的功率不足以提供直流负载消耗的功率，为最大限度利用可

再生能源,发电系统始终工作在最大功率跟踪模式,此时为维持母线电压的稳定,储能电池进行放电,工作在下垂控制状态;

$U_L > U_{DC} > U_0$:发电系统发出功率和储能电池提供的功率之和小于交直流负载消耗的功率,发电系统工作在MPPT模式,储能电池进行放电,市电电源处于下垂控制状态,维持直流母线电压的稳定;

运行模式二:白昼情况下,直流母线II/直流母线III输入电源包括分布式电源、储能电池;直流母线II/直流母线III负载为隧道加强照明及直流母线I负载;

$U_{DC} > U_H$:直流母线电压偏高,储能电池达到上限而不能继续进行充电,发电系统弃能运行,为维持电压稳定,发电系统均工作在恒压模式;

$U_H > U_{DC} > U_M$:发电系统发出的功率大于直流负载消耗的功率且有盈余,储能电池工作在恒流充电模式,发电系统处于下垂控制,维持直流母线电压的稳定;

$U_M > U_{DC} > U_L$:发电系统发出的功率不足以提供直流负载消耗的功率,为最大限度利用可再生能源,发电系统始终工作在最大功率跟踪模式,为维持母线电压的稳定,储能电池进行放电,工作在下垂控制状态;

运行模式三:夜间情况下,直流母线II/直流母线III输入电源包括分布式电源、储能电池;直流母线II/直流母线III负载为直流母线I负载;

$U_{DC} > U_H$:直流母线电压偏高,储能电池达到上限而不能继续进行充电,发电系统需弃能运行,为维持电压稳定,发电系统均工作在恒压模式;

$U_H > U_{DC} > U_M$:发电系统发出的功率大于直流负载消耗的功率且有盈余,储能电池工作在恒流充电模式,发电系统处于下垂控制,维持直流母线电压的稳定;

$U_M > U_{DC} > U_L$:发电系统发出的功率不足以提供直流负载消耗的功率,为最大限度利用可再生能源,发电系统始终工作在最大功率跟踪模式,为维持母线电压的稳定,储能电池进行放电,工作在下垂控制状态。

8. 根据权利要求7所述的交通隧道混合能源直流微电网,其特征在于,所述第三层控制中直流微电网运行调度策略包括两种调度方案,具体为:

调度方案一:

非紧急情况下,隧道基本照明输出功率调整范围为50%~100%,隧道加强照明输出功率调整范围为15%~100%,交通信号灯、电光标识、监控设备全天候全功率运行;根据经纬度设定夜间进入白昼时刻 T_1 和白昼进入夜间时刻 T_2 ,并根据 T_1 和 T_2 按照预设的时间间隔判断当前处于白昼时间或夜间时间;

若当前为白昼时间;则根据统计小时交通量和天气预测结果所处时段预测直流母线II/直流母线III用电量 Q_1 和分布式电源发电量 Q_2 ,若 Q_1 小于 Q_2 ,且直流母线II/直流母线III储能充足,则由直流母线II/直流母线III向直流母线I供电,直流母线I模式一运行,直流母线II/直流母线III模式二运行;若直流母线II/直流母线III储能不足或 Q_1 大于等于 Q_2 ,则由直流母线I向直流母线II/直流母线III供电,直流母线I模式二运行,直流母线II/直流母线III模式一运行;

若当前为夜间时间;则由直流母线II/直流母线III向直流母线I供电,直流母线I模式一运行,直流母线II/直流母线III模式三运行;

调度方案二:

紧急情况下,市电失电或交流系统故障,由分布式电源及应急移动电源进行供电,切除部分直流负荷,仅保留基本照明中的应急照明以及设施电光标识;预测直流母线I用电量 $Q'1$ 和分布式电源发电量 $Q'2$;根据经纬度设定夜间进入白昼时刻 T_1 和白昼进入夜间时刻 T_2 ,并根据 T_1 和 T_2 按照预设的时间间隔判断当前处于白昼时间或夜间时间;

若当前为白昼时间;则由直流母线II/直流母线III向直流母线I供电,直流母线I模式三运行,直流母线II/直流母线III模式二运行;在此基础上判断是否满足条件: $Q'1$ 大于 $Q'2$ 且直流母线I电压 U_{DCI} 小于 U_L ,若满足条件则接入应急移动电源,否则返回;

若当前为夜间时间;则由直流母线II/直流母线III向直流母线I供电,直流母线I模式三运行,直流母线II/直流母线III模式三运行;在此基础上判断是否满足条件: $Q'1$ 大于 $Q'2$ 且 U_{DCI} 小于 U_L ,若满足条件则接入应急移动电源,否则返回。

9. 根据权利要求1所述的交通隧道混合能源直流微电网,其特征在于,所述直流微电网的电击防护设计包括:将400mA设定为低压直流系统预期可能出现的人体接触电流的上限;低压直流采用IT电源接地系统,实现30mA漏电保护和绝缘监测双重保护;直流母线电压的选择采用枚举比较方法,结合隧道实际长度以及负载功率,分别计算不同直流电压时的线路电缆截面积,选取最小截面积对应的直流电压为选定直流母线电压,所述不同直流电压包括DC375V、DC220V、DC110V,每一直流电压的线路电缆截面积计算具体为:

计算直流负载线路电流:

$$I_{js} = \frac{P_{e1} + P_{e2} + P_{e3} + \dots}{U}$$

其中, I_{js} 为直流负载线路计算电流, P_{e1} 、 P_{e2} 、 P_{e3} 为设定长度范围内的单台直流设备功率, U 为枚举法暂定的某一直流电压;

根据 $I_{js} \geq 1.1 \times I_N$ 确定微型断路器额定电流 I_N 值,并根据 $I_L \geq 1.1 \times I_N$ 确定电缆载流量 I_L 值;

计算截面积:

$$S'' \geq (P \times l) \div (5 \times \gamma \times U^2 \times 0.001 \times 5\%)$$

其中, P 为线路总功率, l 为线路等效供电距离; S'' 为电缆截面积计算值, γ 为50°C时电缆导体电导率;

根据电缆载流量 I_L 值确定对应的电缆截面积,记为电缆截面积查询值 S' ,将电缆截面积查询值 S' 与电缆截面积计算值 S'' 进行比较,并取大值作为待校验电缆截面积 S 进行灵敏度校验:

$$I_d = \frac{U \times S}{1.5 \times 2 \times \rho \times L \times k_T} \geq 1.3 \times 5 \times I_N$$

$$k_T = 1 + a \times (\theta - 20)$$

$$\text{灵敏度 } L_m = \frac{I_d}{1.3 \times 5 \times I_N}$$

其中, ρ 为20°C时电缆导体电阻率, L 为线路电缆长度, k_T 为电阻温度换算系数, a 为电阻温度系数, θ 为导线实际工作温度, I_d 为线路最远端单相短路电流;

判断灵敏度 L_m 是否大于等于1,若是,则将待校验电缆截面积 S 作为该直流电压的线路电缆截面积,否则选择更大一级电缆线芯标称截面后再次进行灵敏度校验。

10. 根据权利要求3所述的交通隧道混合能源直流微电网,其特征在于,风光储系统设备功率及容量的设计具体为:

获取交通隧道所在地年平均风速、有效风速年统计时长、太阳能辐射量、峰值日照年统计时长,直流负载年电耗 Q_n 、直流负载电耗日峰值 Q_{rF} 、直流负载电耗日谷值 Q_{rG} ;判断年平均风速是否大于3m/s以确定风能是否可用,判断日均辐射量是否大于 $3.3\text{kWh}/\text{m}^2$ 以确定太阳能是否可用,设置可用的分布式能源发电比例k,k初始值为30%,计算有效风速年统计时长与峰值日照年统计时长的比值A:B,

计算风力发电量分配值 $Q_a = Q_n \times k \times A / (A+B)$,根据风力发电机年平均发电量计算公式 $Q_{1n} = P_1 \times T_{1n} \times m$ 计算风力发电机额定风速的输出功率 P_1 ,其中, Q_{1n} 为风力发电机年发电量, T_{1n} 为有效风速年统计时长,m为考虑损耗的系数;再根据下列公式计算风力发电机的设备功率 P_e

$$P_1 = P_e \times (\text{高度校验过的风速段平均风速} / \text{额定风速})^3;$$

计算光伏发电量分配值 $Q_b = Q_n \times k \times B / (A+B)$,根据光伏发电机年平均发电量计算公式 $Q_{2n} = P_2 \times T_{2n} \times m$ 计算太阳能电池方阵额定功率 P_2 ,其中, Q_{2n} 为太阳能电池方阵年发电量, T_{2n} 为峰值日照年统计时长,m为考虑损耗的系数;

统计最大日发电量与最小日用电量的差值以及直流负载2h日峰值,取二者中较大值作为需要的储能电池容量 Q_{js} ,代入公式储能电池容量计算公式 $Q_c = Q_{js} / (m_c \times n_c)$ 计算储能电池容量 Q_c ,其中, m_c 为储能电池的效率, n_c 为储能电池的放电深度;

计算风、光、储总投资额以及年节约电能,并结合发电设备以及储能电池的使用年限,判断寿命半周期内是否收回成本,若是,则将前系数下计算出的风力发电机的设备功率 P_e 、太阳能电池方阵额定功率 P_2 和储能电池容量 Q_c 作为设计的风光储系统设备功率及容量,否则将系数k提升10%后重新计算风力发电机的设备功率 P_e 、太阳能电池方阵额定功率 P_2 和储能电池容量 Q_c 。

交通隧道混合能源直流微电网

技术领域

[0001] 本发明涉及微电网技术领域,尤其涉及交通隧道混合能源直流微电网。

背景技术

[0002] 交通隧道的低压用电负荷包括消防负荷和非消防负荷,其中非消防负荷的平均年总用电量约占隧道年总用电量的80%以上,包括照明、监控、交通信号、电光标识。隧道非消防直流负荷的低压配电通常是由隧道非消防双电源切换柜配出多个AC380V配电回路至隧道照明、交通信号、电光标识以及监控设备的分配电柜,再由分配电柜配出AC220V配电回路至负荷。由于隧道照明、交通信号、电光标识以及监控设备均为直流负荷,各设备均需在末端设置单相整流(AC/DC)设备。

[0003] 然而,由于采用上述低压交流供电,直流负荷均需配置AC/DC单相整流电路,导致三次谐波问题突出,且存在三相不平衡,电能质量问题突出;此外,受三次谐波影响,配电线路损耗较大(包含无功损耗及有功损耗);直流设备末端驱动电源包含单相整流滤波,存在约15%的功率损耗;同时,配电线路损耗较大,采用的铜芯电缆截面较大,铜耗材使用量高;并且交通隧道洞外存在丰富的可再生能源,包括风能、光伏、机械能等,而现有的低压交流系统无法满足多种新能源发电的便利接入。非消防负荷中的重要负荷(备用照明、电光标识、监控)按不同负荷类型需分别设置EPS或UPS作为应急电源,储能设备较多。

[0004] 鉴于此,本发明提出交通隧道混合能源直流微电网。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于提出交通隧道混合能源直流微电网,采用低压直流配电,集中设置三相全波整流,隧道非消防直流负载不再包含单相整流电路,大幅降低系统内存在的三次谐波,并消除三相不平衡,提高系统电能质量;并彻底消除线路及设备的无功损耗,且大幅降低三次谐波影响,配电线路的损耗大幅降低,单设备的功率损耗也显著降低;由于直流系统突出的输电能力,直流负载配电的铜芯电缆的截面可较现有技术降低约50%,铜耗材使用量明显降低;集中设置储能电池作为重要负荷的应急电源,简化了系统的设备组成;直流微电网为开放式系统,满足即插即用的功能,为各种新能源发电的接入提供便利。

[0006] 为实现上述目的,本发明的技术方案是:交通隧道混合能源直流微电网,包括多段直流母线、储能电池、分布式电源、应急移动电源、本地直流负荷;所述多段直流母线与储能电池连接,且所述多段直流母线包括设置于隧道中央的直流母线I、设置于隧道入口的直流母线II、以及设置于隧道出口的直流母线III;所述直流母线I通过单向AC/DC变换器接入市电电源,所述直流母线II和直流母线III接入分布式电源和应急移动电源,所述直流母线I分别通过双向DC/DC变换器与直流母线II、直流母线III联网,以实现不同直流母线间的电能传输;其中双向DC/DC变换器采用高频隔离双向DC/DC变换器。所述本地直流负荷包括由直流母线I供电的隧道基本照明、设施电光标识、交通信号灯、监控设备用电和由流母线II、直流母线III供电的隧道加强照明。

[0007] 优选的,所述直流母线I的数量根据直流母线I的供电半径以及隧道长度进行设置,以实现隧道内均布直流负荷的供电。

[0008] 优选的,所述分布式电源包括光伏发电和风力发电,所述应急移动电源包括移动柴油发电。

[0009] 优选的,所述直流微电网的运行控制采用三层分级模式:第一层控制采用下垂控制,通过多个参与直流母线电压控制的控制单元共同维持直流母线电压稳定;第二层控制由工控机实现直流母线电压二次调节、各控制单元功率分配、直流母线运行模式的切换;第三层控制由隧道控制中心内计算机实现不同直流母线之间的能量调度,通过制定直流微电网运行调度策略,实现对市电电源、分布式电源、储能电池、直流负荷的灵活调度来保证系统安全经济运行。

[0010] 优选的,所述第一层控制中,所述参与直流母线电压控制的控制单元包括单向AC/DC变换器、双向DC/DC变换器、分布式电源控制器、储能单元控制器;所述下垂控制即控制变换器或控制器的电压和电流运行在一条下垂曲线上,所述下垂曲线表达式如下:

$$[0011] \quad U_d = U_0 - k \times I$$

[0012] 式中, U_d 为变换器或控制器的输出电压; U_0 为直流母线电压设定值; k 为下垂曲线系数; I 为变换器或控制器的输出电流。

[0013] 优选的,所述第二层控制中,

[0014] 直流母线电压二次调节和各控制单元功率分配具体为:采用混合补偿方式,同时对下垂曲线的直流母线电压设定值 U_0 和系数 k 进行补偿,通过工控机总线通信的方式获取每个控制单元的信息,包括电压、电流和下垂曲线系数,利用平均电压补偿器、平均电流补偿器和曲线系数补偿器得到下垂曲线系数补偿量 Δk 和纵截距补偿量 ΔU ,再分别对下垂曲线进行平移和系数调整;其中,所述平均电压补偿器通过平移曲线消除各单元的输出直流电压偏差,所述平均电流补偿器和曲线系数补偿器通过调整下垂曲线的系数实现快速的负载分配;

[0015] 所述直流母线运行模式的切换具体为:直流母线I、II、III分别设置三种运行模式,根据直流母线的输入电源及直流负载所存在差异进行直流母线运行模式的切换;其中直流母线的输入电源通过设置电压控制点 $U_H \setminus U_M \setminus U_L$ 和直流母线电压设定值 U_0 来决定,且输入电源的供电优先级为分布式电源>储能电池>市电。

[0016] 优选的,所述直流母线I、II、III分别设置三种运行模式具体为,

[0017] 直流母线I运行模式:

[0018] 运行模式一:直流母线II、III电能富余,直流母线I输入电源包括市电电源、储能电池以及分布式电源;直流母线I负载为隧道基本照明、设施电光标识、交通信号灯、监控设备用电; U_{DCI} 表示直流母线I电压值;

[0019] $U_{DCI} > U_H$:直流母线电压偏高,储能电池达到上限而不能继续进行充电,作为分布式电源的发电系统弃能运行,为维持电压稳定,发电系统均工作在恒压模式;

[0020] $U_H > U_{DCI} > U_M$:发电系统发出的功率大于直流负载消耗的功率且有盈余,储能电池工作在恒流充电模式;发电系统处于下垂控制,维持直流母线电压的稳定;

[0021] $U_M > U_{DCI} > U_L$:发电系统发出的功率不足以提供直流负载消耗的功率,为最大限度利用可再生能源,发电系统始终工作在最大功率跟踪模式,为维持母线电压的稳定,储能电

池进行放电,工作在下垂控制状态;

[0022] $U_L > U_{DCI} > U_0$:发电系统发出功率和储能电池提供的功率之和小于交直流负载消耗的功率,发电系统工作在MPPT模式,储能电池进行放电,市电电源处于下垂控制状态,维持直流母线电压的稳定;

[0023] 运行模式二:直流母线II、III电能不足,直流母线I输入电源包括市电电源、储能电池;直流母线I负载为隧道基本照明、设施电光标识、交通信号灯、监控设备用电以及直流母线II、III负载;

[0024] 运行模式三:市电故障,直流母线I输入电源包括储能电池、分布式电源和应急移动电源;直流母线I负载为隧道基本照明中的应急照明、设施电光标识;

[0025] $U_{DCI} > U_H$:直流母线电压偏高,储能电池达到上限而不能继续进行充电,发电系统弃能运行,为维持电压稳定,发电系统均工作在恒压模式;

[0026] $U_H > U_{DCI} > U_M$:发电系统发出的功率大于直流负载消耗的功率且有盈余,储能电池工作在恒流充电模式,发电系统处于下垂控制,维持直流母线电压的稳定;

[0027] $U_M > U_{DCI} > U_L$:发电系统发出的功率不足以提供直流负载消耗的功率,为最大限度利用可再生能源,发电系统始终工作在最大功率跟踪模式,为维持母线电压的稳定,储能电池进行放电,工作在下垂控制状态;

[0028] $U_L > U_{DCI} > U_0$:发电系统发出功率和储能电池提供的功率之和小于直流负载消耗的功率,发电系统工作在MPPT模式,储能电池进行放电,直流母线II、III接入应急移动电源补充电能;

[0029] 直流母线II/III运行模式:

[0030] 运行模式一:白昼情况下,直流母线II/直流母线III输入电源包括分布式电源、储能电池以及市电电源;直流母线II/直流母线III负载为隧道加强照明, U_{DC} 表示直流母线II电压值或直流母线III电压值;

[0031] $U_{DC} > U_H$:直流母线电压偏高,储能电池达到上限而不能继续进行充电,发电系统弃能运行,为维持电压稳定,发电系统均工作在恒压模式;

[0032] $U_H > U_{DC} > U_M$:发电系统发出的功率大于直流负载消耗的功率且有盈余,储能电池工作在恒流充电模式,发电系统处于下垂控制,维持直流母线电压的稳定;

[0033] $U_M > U_{DC} > U_L$:发电系统发出的功率不足以提供直流负载消耗的功率,为最大限度利用可再生能源,发电系统始终工作在最大功率跟踪模式,此时为维持母线电压的稳定,储能电池进行放电,工作在下垂控制状态;

[0034] $U_L > U_{DC} > U_0$:发电系统发出功率和储能电池提供的功率之和小于交直流负载消耗的功率,发电系统工作在MPPT模式,储能电池进行放电,市电电源处于下垂控制状态,维持直流母线电压的稳定;

[0035] 运行模式二:白昼情况下,直流母线II/直流母线III输入电源包括分布式电源、储能电池;直流母线II/直流母线III负载为隧道加强照明及直流母线I负载;

[0036] $U_{DC} > U_H$:直流母线电压偏高,储能电池达到上限而不能继续进行充电,发电系统弃能运行,为维持电压稳定,发电系统均工作在恒压模式;

[0037] $U_H > U_{DC} > U_M$:发电系统发出的功率大于直流负载消耗的功率且有盈余,储能电池工作在恒流充电模式,发电系统处于下垂控制,维持直流母线电压的稳定;

[0038] $U_M > U_{DC} > U_L$:发电系统发出的功率不足以提供直流负载消耗的功率,为最大限度利用可再生能源,发电系统始终工作在最大功率跟踪模式,为维持母线电压的稳定,储能电池进行放电,工作在下垂控制状态;

[0039] 运行模式三:夜间情况下,直流母线II/直流母线III输入电源包括分布式电源、储能电池;直流母线II/直流母线III负载为直流母线I负载;

[0040] $U_{DC} > U_H$:直流母线电压偏高,储能电池达到上限而不能继续进行充电,发电系统需弃能运行,为维持电压稳定,发电系统均工作在恒压模式;

[0041] $U_H > U_{DC} > U_M$:发电系统发出的功率大于直流负载消耗的功率且有盈余,储能电池工作在恒流充电模式,发电系统处于下垂控制,维持直流母线电压的稳定;

[0042] $U_M > U_{DC} > U_L$:发电系统发出的功率不足以提供直流负载消耗的功率,为最大限度利用可再生能源,发电系统始终工作在最大功率跟踪模式,为维持母线电压的稳定,储能电池进行放电,工作在下垂控制状态。

[0043] 优选的,所述第三层控制中直流微电网运行调度策略包括两种调度方案,具体为:

[0044] 调度方案一:

[0045] 非紧急情况下,隧道基本照明输出功率调整范围为50%~100%,隧道加强照明输出功率调整范围为15%~100%,交通信号灯、电光标识、监控设备全天候全功率运行;根据经纬度设定夜间进入白昼时刻 T_1 和白昼进入夜间时刻 T_2 ,并根据 T_1 和 T_2 按照预设的时间间隔判断当前处于白昼时间或夜间时间;

[0046] 若当前为白昼时间;则根据统计小时交通量和天气预测结果所处时段预测直流母线II/直流母线III用电量 Q_1 和分布式电源发电量 Q_2 ,若 Q_1 小于 Q_2 ,且直流母线II/直流母线III储能充足,则由直流母线II/直流母线III向直流母线I供电,直流母线I模式一运行,直流母线II/直流母线III模式二运行;若直流母线II/直流母线III储能不足或 Q_1 大于等于 Q_2 ,则由直流母线I向直流母线II/直流母线III供电,直流母线I模式二运行,直流母线II/直流母线III模式一运行;

[0047] 若当前为夜间时间;则由直流母线II/直流母线III向直流母线I供电,直流母线I模式一运行,直流母线II/直流母线III模式三运行;

[0048] 调度方案二:

[0049] 紧急情况下,市电失电或交流系统故障,由分布式电源及应急移动电源进行供电,切除部分直流负荷,仅保留基本照明中的应急照明以及设施电光标识;预测直流母线I用电量 $Q'1$ 和分布式电源发电量 $Q'2$;根据经纬度设定夜间进入白昼时刻 T_1 和白昼进入夜间时刻 T_2 ,并根据 T_1 和 T_2 按照预设的时间间隔判断当前处于白昼时间或夜间时间;

[0050] 若当前为白昼时间;则由直流母线II/直流母线III向直流母线I供电,直流母线I模式三运行,直流母线II/直流母线III模式二运行;在此基础上判断是否满足条件: $Q'1$ 大于 $Q'2$ 且直流母线I电压 U_{DCI} 小于 U_L ,若满足条件则接入应急移动电源,否则返回;

[0051] 若当前为夜间时间;则由直流母线II/直流母线III向直流母线I供电,直流母线I模式三运行,直流母线II/直流母线III模式三运行;在此基础上判断是否满足条件: $Q'1$ 大于 $Q'2$ 且 U_{DCI} 小于 U_L ,若满足条件则接入应急移动电源,否则返回。

[0052] 优选的,所述直流微电网的电击防护设计包括:将400mA设定为低压直流系统预期可能出现的人体接触电流的上限;低压直流采用IT电源接地系统,实现30mA漏电保护和绝

缘监测双重保护;直流母线电压的选择采用采用枚举比较方法,结合隧道实际长度以及负载功率,分别计算不同直流电压时的线路电缆截面积,选取最小截面积对应的直流电压为选定直流母线电压,所述不同直流电压包括DC375V、DC220V、DC110V,每一直流电压的线路电缆截面积计算具体为:

[0053] 计算直流负载线路电流:

$$[0054] \quad I_{js} = \frac{P_{e1} + P_{e2} + P_{e3} + \dots}{U}$$

[0055] 其中, I_{js} 为直流负载线路计算电流, P_{e1} 、 P_{e2} 、 P_{e3} 为设定长度范围内的单台直流设备功率,U为枚举法暂定的某一直流电压;

[0056] 根据 $I_{js} \geq 1.1 \times I_N$ 确定微型断路器额定电流 I_N 值,并根据 $I_L \geq 1.1 \times I_N$ 确定电缆载流量 I_L 值;

[0057] 计算截面积:

$$[0058] \quad S'' \geq (P \times 1) \div (5 \times \gamma \times U^2 \times 0.001 \times 5\%)$$

[0059] 其中,P为线路总功率,1为线路等效供电距离, S'' 为电缆截面积计算值, γ 为50°C时电缆导体电导率, U' 为标称电压;

[0060] 根据电缆载流量 I_L 值确定对应的电缆截面积,记为电缆截面积查询值 S' ,将电缆截面积查询值 S' 与电缆截面积计算值 S'' 进行比较,并取大值作为待校验电缆截面积S进行灵敏度校验:

$$[0061] \quad I_d = \frac{U \times S}{1.5 \times 2 \times \rho \times L \times k_T} \geq 1.3 \times 5 \times I_N$$

$$[0062] \quad k_T = 1 + a \times (\theta - 20)$$

$$[0063] \quad \text{灵敏度 } L_m = \frac{I_d}{1.3 \times 5 \times I_N}$$

[0064] 其中, ρ 为20°C时电缆导体电阻率,L为线路电缆长度, k_T 为电阻温度换算系数,a为电阻温度系数, θ 为导线实际工作温度, I_d 为线路最远端单相短路电流;

[0065] 判断灵敏度 L_m 是否大于等于1,若是,则将该待校验电缆截面积S作为该直流电压的线路电缆截面积,否则选择更大一级电缆线芯标称截面后再次进行灵敏度校验。

[0066] 优选的,风光储系统设备功率及容量的设计具体为:

[0067] 获取交通隧道所在地年平均风速、有效风速年统计时长、太阳能辐射量、峰值日照年统计时长,直流负载年电耗 Q_n 、直流负载电耗日峰值 Q_{rF} 、直流负载电耗日谷值 Q_{rG} ;判断年平均风速是否大于3m/s以确定风能是否可用,判断日均辐射量是否大于3.3kWh/m²以确定太阳能是否可用,设置可用的分布式能源发电比例k,k初始值为30%,计算有效风速年统计时长与峰值日照年统计时长的比值A:B,

[0068] 计算风力发电量分配值 $Q_a = Q_n \times k \times A / (A+B)$,根据风力发电机年平均发电量计算公式 $Q_{in} = P_1 \times T_{in} \times m$ 计算风力发电机额定风速的输出功率 P_1 ,其中, Q_{in} 为风力发电机年发电量, T_{in} 为有效风速年统计时长,m为考虑损耗的系数;再根据下列公式计算风力发电机的设备功率 P_e

$$[0069] \quad P_1 = P_e \times (\text{高度校验过的风速段平均风速} / \text{额定风速})^3;$$

[0070] 计算光伏发电量分配值 $Q_b = Q_n \times k \times B / (A+B)$,根据光伏发电机年平均发电量计算公式 $Q_{2n} = P_2 \times T_{2n} \times m$ 计算太阳能电池方阵额定功率 P_2 ,其中, Q_{2n} 太阳能电池方阵年发电量, T_{2n} 为峰值日照年统计时长, m 为考虑损耗的系数;

[0071] 统计最大日发电量与最小日用电量的差值以及直流负载2h日峰值,取二者中较大值作为需要的储能电池容量 Q_{js} ,代入公式储能电池容量计算公式 $Q_c = Q_{js} / (m_c \times n_c)$ 计算储能电池容量 Q_c ,其中, m_c 为储能电池的效率, n_c 为储能电池的放电深度;

[0072] 计算风、光、储总投资额以及年节约电能,并结合发电设备以及储能电池的使用年限,判断寿命半周期内是否收回成本,若是,则将前系数下计算出的风力发电机的设备功率 P_e 、太阳能电池方阵额定功率 P_2 和储能电池容量 Q_c 作为设计的风光储系统设备功率及容量,否则将系数 k 提升10%后重新计算风力发电机的设备功率 P_e 、太阳能电池方阵额定功率 P_2 和储能电池容量 Q_c 。

[0073] 相较于现有技术,本发明具有以下有益效果:

[0074] ①本申请的直流微电网采用低压直流配电,集中设置三相全波整流,隧道非消防直流负载不再包含单相整流电路,大幅降低系统内存在的三次谐波,并消除三相不平衡,提高系统电能质量。

[0075] ②本申请的直流微电网采用低压直流配电,彻底消除线路及设备的无功损耗,且大幅降低三次谐波影响,配电线路的损耗大幅降低;单设备的功率损耗也显著降低。

[0076] ③本申请的直流微电网采用低压直流配电系统,由于直流系统突出的输电能力,直流负载配电的铜芯电缆的截面可较现有技术降低约50%,铜耗材使用量明显降低,低碳效果明显。

[0077] ④本申请提案的直流微电网在直流综合柜AM1内集中设置储能电池作为重要负荷(备用照明、电光标识、监控)的应急电源,简化了系统的设备组成。

[0078] ⑤本申请提案的直流微电网为开放式系统,满足即插即用的功能,为各种新能源发电的接入提供便利。

[0079] ⑥本申请提案的直流微电网采用特殊的“入口-中央...中央-出口”手拉手分布式的拓扑结构。该结构直流综合柜深入负荷中心,便于隧道外可再生能源发电的接入,便于紧急电源(移动柴油发电机组)的接入。并通过高频隔离双向DC/DC设备实现系统电能的双向传输,为充分利用可再生能源发电提供硬件通道。

[0080] ⑦本申请提案的直流微电网采用分层控制结构及控制方法,实现系统即插即用的控制要求。第一层(设备级)控制采用下垂控制模式,系统中存在多个参与直流母线电压控制的单元;第二层(工控级)控制用于实现直流母线电压二次调节、各控制单元功率分配、系统运行模式的切换;第三层(中心级)控制用于实现不同直流母线之间的能量调度。在保证负荷正常运行的情况下,本申请可以尽可能多利用可再生能源发电电源,实现节能减排,并至少节约40%的能源。

[0081] ⑧本申请提案的直流微电网为实现以上分层控制功能以及加强对现场设备的监视管理,设置由三层架构(中央监控级、现场控制级、检测执行级)组成的集中管理、分散控制的集散型自动控制网络构架。

附图说明

- [0082] 图1为本发明直流微电网拓扑图；
- [0083] 图2为本发明直流微电网分层控制结构图；
- [0084] 图3为本发明第三层控制调度方案一流程图；
- [0085] 图4为本发明第三层控制调度方案二流程图；
- [0086] 图5为本发明直流母线电压的选择流程图；
- [0087] 图6为本发明隧道供配电系统图；
- [0088] 图7为本发明非消防双电源切换柜AT系统图；
- [0089] 图8为本发明直流综合柜AM1系统图；
- [0090] 图9为本发明直流综合柜AM2系统图；
- [0091] 图10为本发明一实施例中多年统计小时交通量示意图；
- [0092] 图11为本发明风、光、储系统工程设计流程图。

具体实施方式

[0093] 下面结合附图,对本发明的技术方案进行具体说明。

[0094] 如图1,本发明提出交通隧道混合能源直流微电网,包括多段直流母线、储能电池、分布式电源、应急移动电源、直流本地负荷;所述多段直流母线与储能电池连接,且所述多段直流母线包括设置于隧道中央的直流母线I、设置于隧道入口的直流母线II、以及设置于隧道出口的直流母线III;所述直流母线I通过单向AC/DC变换器接入市电电源,所述直流母线II和直流母线III均经不同变换器接入分布式电源和应急移动电源,所述直流母线I分别通过双向DC/DC变换器与直流母线II、直流母线III联网,以实现不同直流母线间的电能传输;其中双向DC/DC变换器采用高频隔离双向DC/DC变换器。所述直流本地负荷包括由直流母线I供电的隧道基本照明、设施电光标识、交通信号灯、监控设备用电和由流母线II、直流母线III供电的隧道加强照明。

[0095] 所述直流母线I的数量根据直流母线的供电半径以及隧道长度进行设置,以实现隧道内均布直流负荷的供电。例如,每个中央直流母线的供电半径小于1公里,大于2公里的交通隧道,设置于中央的直流母线需至少设置2处。

[0096] 所述分布式电源包括光伏发电和风力发电;利用光伏发电作为系统能源之一可以有效提高系统运行的经济性,通过控制DC-DC变换器中的功率开关管的通断来调节DC-DC变换器的输入电压;采用永磁直驱式风力发电机系统作为风能利用设备,结构简单,发电效率高,由于风力发电机的输出功率受风速大小及风向的影响,接入直流母线时需先稳定输出,通过AC-DC变换器将低压交流电变换为所需直流电压。

[0097] 直流微电网中,接入的分布式电源的输出功率具有不稳定性;为维持隧道重要负荷的正常供电,直流微电网与交流大电网连接:AC380V交流电经AC-DC单向整流模块变为稳定的直流电接入直流母线;此外,储能电池(锂电池)可在光伏、风力能量充裕时消纳多余能量,光伏、风力能量不充裕时补充不足能量,从而平衡系统能量,稳定母线电压。所述应急移动电源包括移动柴油发电。

[0098] 基本计算公式:

[0099] ①风力发电机发电量计算公式

[0100] $Q_{1n} = P_1 \times T_{1n} \times m$ (年发电); 式中, Q_{1n} 表示风力发电机年发电量, kWh; T_{1n} 表示根据风频计算得出的平均风速的年统计风时长, h; P_1 表示根据功率特性曲线, 各风速段风速的平均值折算到风力发电机额定风速的输出功率, kW; 每个风速段平均风速 < 额定风速时, $P_1 = P_e \times (\text{高度校验过的风速段平均风速} / \text{额定风速})^3$; 每个风速段平均风速 \geq 额定风速时, $P_1 = P_e$; m 表示考虑损耗的系数, 取 0.85;

[0101] 风速高度修正公式: $V_i = V_x \times (h_i / h_x)^a$; 式中, V_i 表示待修正高度 h_i 处的风速, m/s; V_x 表示高度 $h_x = 10$ m 处的风速, m/s; a 表示由大气稳定性和地表粗糙度决定的指数; 海岛、海岸、湖岸、沙漠等情况取 0.12; 空旷田野乡村、城市郊区等情况取 0.16; 房屋密集的城市市区等情况取 0.2。

[0102] ② 太阳能电池方阵发电量计算公式

[0103] $Q_{2n} = P_m \times T_{2n} \times m$ (年发电); 式中, Q_{2n} 表示太阳能电池方阵年发电量, kWh; T_{2n} 表示太阳能峰值日照时数年统计值, h; P_m 表示太阳能电池方阵额定 (峰值) 功率, kW; m 表示考虑损耗的系数, 取 0.9。

[0104] ③ 储能电池容量计算公式

[0105] $Q_c = Q_{js} / (m \times n)$; 式中, Q_c 表示储能电池容量, kWh; Q_{js} 表示计算需要的储能电池容量, kWh; m 表示储能电池的效率, 取 0.95; n 表示储能电池的放电深度, 取 1.0。

[0106] 如图 2, 所述直流微电网的运行控制采用三层分级模式: 第一层控制采用下垂控制, 通过多个参与直流母线电压控制的控制单元共同维持直流母线电压稳定; 第二层控制由工控机实现直流母线电压二次调节、各控制单元功率分配、直流母线运行模式的切换; 第三层控制由隧道控制中心内计算机实现不同直流母线之间的能量调度, 通过制定直流微电网运行调度策略, 实现对市电电源、分布式电源、储能电池、直流负荷的灵活调度, 尽可能多利用可再生能源发电并保证系统安全经济运行。

[0107] 所述第一层控制中, 所述参与直流母线电压控制的控制单元包括单向 AC/DC 变换器、双向 DC/DC 变换器、分布式电源控制器、储能单元控制器; 所述下垂控制即控制变换器或控制器的电压和电流运行在一条下垂曲线上, 所述下垂曲线表达式如下:

[0108] $U_d = U_0 - k \times I$

[0109] 式中, U_d 为变换器或控制器的输出电压; U_0 为直流母线电压设定值; k 为下垂曲线系数; I 为变换器或控制器的输出电流。

[0110] 本申请提案的直流微电网系统是一个多源、多负荷系统, 单一采用下垂控制存在局限性, 因此有必要设置直流母线电压二次调节。

[0111] 所述第二层控制中, 直流母线电压二次调节和各控制单元功率分配具体为: 采用混合补偿方式, 同时对下垂曲线的直流母线电压设定值 U_0 (纵截距) 和系数 k 进行补偿, 通过工控机总线通信的方式获取每个单元的电压、电流 ($U_{1 \sim n}$ 、 $I_{1 \sim n}$) 和下垂曲线系数 ($k_{1 \sim n}$) 等信息, 再利用平均电压补偿器、平均电流补偿器和曲线系数补偿器得到下垂曲线系数补偿量 Δk 和纵截距补偿量 ΔU , 再分别对下垂曲线进行平移和系数调整; 其中, 所述平均电压补偿器通过平移曲线消除各单元的输出直流电压偏差, 所述平均电流补偿器和曲线系数补偿器通过调整下垂曲线的系数实现快速的负载分配;

[0112] 直流母线 I、II、III 分别设置三种运行模式:

[0113] 一、直流母线 I 运行模式

[0114] ①运行模式一(直流母线II、III电能富余)直流母线I功率输入单元包括市电AC/DC单元、储能电池单元以及母联双向DC/DC单元(潮流方向:直流母线II、III至直流母线I);直流母线负载为基本照明、交通信号、监控设备、电光标识。

[0115] $U_{DCI} > U_H$:直流母线电压偏高,储能电池达到上限而不能继续进行充电,可再生能源(光伏、风力)发电系统需弃能运行,为维持电压稳定,发电系统均工作在恒压模式。

[0116] $U_H > U_{DCI} > U_M$:可再生能源发电系统发出的功率大于直流负载消耗的功率且有盈余,储能电池工作在恒流充电模式,可再生能源发电系统处于下垂控制,维持直流母线电压的稳定。

[0117] $U_M > U_{DCI} > U_L$:可再生能源发电系统发出的功率不足以提供直流负载消耗的功率,为最大限度利用可再生能源,发电系统始终工作在最大功率跟踪模式,此时为了维持母线电压的稳定,储能电池进行放电,工作在下垂控制状态。

[0118] $U_L > U_{DCI} > U_0$:可再生能源光伏发出功率和储能电池提供的功率之和小于交直流负载消耗的功率,可再生能源发电系统工作在MPPT模式,储能电池进行放电,市电AC/DC模块工作在下垂控制状态,维持直流母线电压的稳定。

[0119] U_0 为直流母线电压设定值; $U_H \setminus U_M \setminus U_L$ 为设定电压控制点,参考取值: U_{DCI} 为直流母线I电压值;

[0120] $U_L = (1+1\%) \times U_0$; $U_M = (1+1\%) \times U_L$; $U_H = (1+1\%) \times U_M$ 。

[0121] ②运行模式二(直流母线II、III电能不足)直流母线I功率输入单元包括市电AC/DC单元、储能电池;直流母线负载为基本照明、交通信号、监控设备、电光标识以及AW2(3)的直流母线负载(潮流方向:直流母线I至直流母线II、III)。

[0122] ③运行模式三(紧急情况:市电故障)直流母线I功率输入单元储能电池单元以及母联双向DC/DC单元(潮流方向:直流母线II、III至直流母线I);直流母线负载为基本照明(应急照明)、电光标识。

[0123] $U_{DCI} > U_H$:直流母线电压偏高,储能电池达到上限而不能继续进行充电,可再生能源(光伏、风力)发电系统需弃能运行,为维持电压稳定,发电系统均工作在恒压模式。

[0124] $U_H > U_{DCI} > U_M$:可再生能源发电系统发出的功率大于直流负载消耗的功率且有盈余,储能电池工作在恒流充电模式,可再生能源发电系统处于下垂控制,维持直流母线电压的稳定。

[0125] $U_M > U_{DCI} > U_L$:可再生能源发电系统发出的功率不足以提供直流负载消耗的功率,为最大限度利用可再生能源,发电系统始终工作在最大功率跟踪模式,此时为了维持母线电压的稳定,储能电池进行放电,工作在下垂控制状态。

[0126] $U_L > U_{DCI} > U_0$:可再生能源光伏发出功率和储能电池提供的功率之和小于交直流负载消耗的功率,可再生能源发电系统工作在MPPT模式,储能电池进行放电,直流母线II、III考虑接入移动柴油发电机补充电能。

[0127] 二、直流母线II(III)运行模式(U_{DC} 为直流母线II电压值或直流母线III电压值)

[0128] 保证供电系统稳定,尽可能利用可再生能源发电,实现系统安全经济运行。可再生能源发电、储能和市电设定不同的供电优先级,实现不同的潮流控制策略。供电优先级:可再生能源发电>储能>市电。

[0129] ①运行模式一(白昼):直流母线功率输入单元包括风力发电单元、光伏发电单元、

储能电池单元以及双向DC/DC单元(引自直流母线I);直流母线负载为加强照明负荷。。

[0130] 根据直流母线电压大小,分为4个工作模式, U_0 、 U_L 、 U_M 、 U_H 分别为每种工作模式对应的母线电压值。

[0131] $U_{DC} > U_H$:直流母线电压偏高,储能电池达到上限而不能继续进行充电,可再生能源(光伏、风力)发电系统需弃能运行,为维持电压稳定,发电系统均工作在恒压模式。

[0132] $U_H > U_{DC} > U_M$:可再生能源发电系统发出的功率大于直流负载消耗的功率且有盈余,储能电池工作在恒流充电模式,可再生能源发电系统处于下垂控制,维持直流母线电压的稳定。

[0133] $U_M > U_{DC} > U_L$:可再生能源发电系统发出的功率不足以提供直流负载消耗的功率,为最大限度利用可再生能源,发电系统始终工作在最大功率跟踪模式,此时为了维持母线电压的稳定,储能电池进行放电,工作在下垂控制状态。

[0134] $U_L > U_{DC} > U_0$:可再生能源光伏发出功率和储能电池提供的功率之和小于交直流负载消耗的功率,可再生能源发电系统工作在MPPT模式,储能电池进行放电,市电双向DC/DC模块工作在下垂控制状态,维持直流母线电压的稳定。

[0135] ②运行模式二(白昼):直流母线功率输入单元包括风力发电单元、光伏发电单元、储能电池单元;直流母线负载为加强照明负荷及直流母线I。

[0136] $U_{DC} > U_H$:直流母线电压偏高,储能电池达到上限而不能继续进行充电,可再生能源(光伏、风力)发电系统需弃能运行,为维持电压稳定,发电系统均工作在恒压模式。

[0137] $U_H > U_{DC} > U_M$:可再生能源发电系统发出的功率大于直流负载消耗的功率且有盈余,储能电池工作在恒流充电模式,可再生能源发电系统处于下垂控制,维持直流母线电压的稳定。

[0138] $U_M > U_{DC} > U_L$:可再生能源发电系统发出的功率不足以提供直流负载消耗的功率,为最大限度利用可再生能源,发电系统始终工作在最大功率跟踪模式,此时为了维持母线电压的稳定,储能电池进行放电,工作在下垂控制状态。

[0139] ③运行模式三(夜间):直流母线功率输入单元包括风力发电单元、储能电池单元;直流母线负载为直流母线I。

[0140] $U_{DC} > U_H$:直流母线电压偏高,储能电池达到上限而不能继续进行充电,可再生能源(光伏、风力)发电系统需弃能运行,为维持电压稳定,发电系统均工作在恒压模式。

[0141] $U_H > U_{DC} > U_M$:可再生能源发电系统发出的功率大于直流负载消耗的功率且有盈余,储能电池工作在恒流充电模式,可再生能源发电系统处于下垂控制,维持直流母线电压的稳定。

[0142] $U_M > U_{DC} > U_L$:可再生能源发电系统发出的功率不足以提供直流负载消耗的功率,为最大限度利用可再生能源,发电系统始终工作在最大功率跟踪模式,此时为了维持母线电压的稳定,储能电池进行放电,工作在下垂控制状态。

[0143] 所述第三层控制中直流微电网运行调度策略包括两种调度方案,具体为:

[0144] 调度方案一:

[0145] 隧道基本照明输出功率调整范围为50%~100%,隧道加强照明输出功率调整范围为15%~100%,交通信号灯、电光标识、监控设备全天候全功率运行;调度方案一流程如图3。

[0146] 根据经纬度设定夜间进入白昼时刻 T_1 和白昼进入夜间时刻 T_2 ,并根据 T_1 和 T_2 按照预设的时间间隔判断当前处于白昼时间或夜间时间;

[0147] 若当前为白昼时间;则根据统计小时交通量和天气预测结果所处时段预测直流母线II/直流母线III用电量 Q_1 和分布式电源发电量 Q_2 ,若 Q_1 小于 Q_2 ,且直流母线II/直流母线III储能充足,则由直流母线II/直流母线III向直流母线I供电,直流母线I模式一运行,直流母线II/直流母线III模式二运行;若直流母线II/直流母线III储能不足或 Q_1 大于等于 Q_2 ,则由直流母线I向直流母线II/直流母线III供电,直流母线I模式二运行,直流母线II/直流母线III模式一运行;

[0148] 若当前为夜间时间;则由直流母线II/直流母线III向直流母线I供电,直流母线I模式一运行,直流母线II/直流母线III模式三运行;

[0149] 调度方案二(紧急情况):

[0150] 两路10KV市电同时失电或交流系统故障,系统供电完全依靠可再生能源发电及移动柴油发电机组,紧急情况下切除部分直流负荷,仅保留重要负荷:基本照明中的应急照明以及电光标识;调度方案二流程如图4。

[0151] 预测直流母线I用电量 Q'_1 和分布式电源发电量 Q'_2 ;根据经纬度设定夜间进入白昼时刻 T_1 和白昼进入夜间时刻 T_2 ,并根据 T_1 和 T_2 按照预设的时间间隔判断当前处于白昼时间或夜间时间;

[0152] 若当前为白昼时间;则由直流母线II/直流母线III向直流母线I供电,直流母线I模式三运行,直流母线II/直流母线III模式二运行;在此基础上判断是否满足条件: Q'_1 大于 Q'_2 且直流母线I电压 U_{DCI} 小于 U_L ,若满足条件则接入应急移动电源,否则返回;

[0153] 若当前为夜间时间;则由直流母线II/直流母线III向直流母线I供电,直流母线I模式三运行,直流母线II/直流母线III模式三运行;在此基础上判断是否满足条件: Q'_1 大于 Q'_2 且 U_{DCI} 小于 U_L ,若满足条件则接入应急移动电源,否则返回。

[0154] 所述直流微电网的电击防护设计包括:将400mA设定为低压直流系统预期可能出现的人体接触电流的上限;低压直流采用单极接线,具体的采用IT电源接地系统,实现30mA漏电保护和绝缘监测双重保护,低压直流IT系统(DC375V及以下)的电击防护性能高于现有技术的低压交流TN-S系统。

[0155] 直流母线电压可选择为DC375V、DC220V、D110V,采用枚举比较方法,结合隧道实际长度以及负载功率,分别计算不同直流电压时的线路电缆截面积,选取最小截面积对应的直流电压为选定直流母线电压,设计流程如图5,每一直流电压的线路电缆截面积计算具体为:

[0156] 计算直流负载线路电流:

$$[0157] \quad I_{js} = \frac{P_{e1} + P_{e2} + P_{e3} + \dots}{U}$$

[0158] 其中, I_{js} 为直流负载线路计算电流, P_{e1} 、 P_{e2} 、 P_{e3} 为设定长度范围内的单台直流设备功率, U 为枚举法暂定的某一直流电压;

[0159] 根据 $I_{js} \geq 1.1 \times I_N$ 确定微型断路器额定电流 I_N 值,并根据 $I_L \geq 1.1 \times I_N$ 确定电缆载流量 I_L 值;

[0160] 计算截面积:

[0161] $S'' \geq (P \times l) \div (5 \times \gamma \times U^2 \times 0.001 \times 5\%)$

[0162] 其中,P为线路总功率,l为线路等效供电距离,S''为电缆截面积计算值, γ 为50°C时电缆导体电导率,U'为标称电压;

[0163] 根据电缆载流量 I_L 值确定对应的电缆截面积,记为电缆截面积查询值S';其中 I_L 为电缆手册中规定的某芯数、某截面积电缆对应的额定载流量;根据 I_L 查手册即可得到对应的电缆截面积;将电缆截面积查询值S'与电缆截面积计算值S''进行比较,并取大值作为待校验电缆截面积S进行灵敏度校验:

$$[0164] \quad I_d = \frac{U \times S}{1.5 \times 2 \times \rho \times L \times k_T} \geq 1.3 \times 5 \times I_N$$

$$[0165] \quad k_T = 1 + a \times (\theta - 20)$$

$$[0166] \quad \text{灵敏度 } L_m = \frac{I_d}{1.3 \times 5 \times I_N}$$

[0167] 其中, ρ 为20°C时电缆导体电阻率,L为线路电缆长度, k_T 为电阻温度换算系数,a为电阻温度系数, θ 为导线实际工作温度, I_d 为线路最远端单相短路电流;

[0168] 判断灵敏度 L_m 是否大于等于1,若是则将该待校验电缆截面积S作为该直流电压的线路电缆截面积,否则选择更大一级电缆线芯标称截面后再次进行灵敏度校验。

[0169] 比较三种电压条件下电缆的截面积,选择截面积最小值对应的直流传输电压为选定的直流母线电压。

[0170] 直流电弧故障保护及绝缘监测定位;本申请采用分立式检测分断装置,于直流配电柜直流出线回路分别设置AFD和AFI;于监控柜内设置直流电弧故障检测分断控制器;该控制器通过RS232与工控机通讯,故障电弧电流信息、发生时间、故障回路编号、AFI分断信号等信息通过工业以太环网上传至中心存储;此外于直流配电柜直流出线回路分别设置绝缘检测终端;于监控柜内设置绝缘检测控制器;该控制器通过RS232与工控机通讯,故障绝缘信息、位置等信息通过工业以太环网上传至中心存储。

[0171] 以下提供一直流微电网主要设备工程设计。

[0172] 一、设备总体布置图

[0173] 本申请提案分散设置多个直流综合柜AM1~AM3(直流母线I~III):AM1设置于隧道中央,双侧供电至负荷(基本照明、电光标识、交通信号、监控设备),进线电源引自三相交流系统;AM2设置于隧道入口,单侧供电至负荷(加强照明),供电电源包括直流母线I、可再生能源发电、移动柴油发电机组),设置于入口便于可再生能源发电单元、移动柴油发电机组接入以及深入负荷中心(加强照明均位于隧道出入口);AM3设置于隧道出口,供电情况同AM2。通过设置DC/DC高频隔离双向变换器(设置于AM2,AM3)实现不同电压等级直流母线间的电能双向输送。于隧道中央AM1侧设置非消防双电源切换柜AT,AT内设置双电源切换及智能高频直流模块,由AT配出直流电源至AM1。AT、AM1~AM3设置于隧道内配电间。于隧道洞外设置风力发电、光伏发电及储能设备。

[0174] 直流综合柜AM1~3内分别设置工控计算机,用于实现直流系统二次控制、功率分配以及相关设备的监控。控制中心计算机通过工业以太网交换机、光纤与隧道内分区工控计算机通讯,组成千兆以太网。

[0175] 二、压直流配电系统

[0176] 1. 配电系统图

[0177] 如图6-9所示的低压直流配电系统,其中,直流综合柜AM3配电系统图同直流综合柜AM2,图中:

[0178] ①AC380V双电源自动切换装置:用于两路AC380V市电电源自动切换。

[0179] ②交流三极塑壳断路器:用于提供三相交流配电回路的过载、短路、过压、欠压保护。

[0180] ③直流两极微型漏电(30mA)断路器:用于直流配电回路的过载、短路、过压、欠压保护。30mA漏电用于直接接触的附加保护。

[0181] ④直流两极接触器:用于负载直流配电回路的投入与切出。

[0182] ⑤绝缘监测终端:用于直流母线、直流配电回路的绝缘监测。

[0183] ⑥直流电弧故障检测分断终端:电弧检测器(AFD)用于直流侧电弧检测并发出故障报警信号的装置。电弧分断器(AFI)接收电弧检测信号,采取隔离、短路或开关等方式实现灭弧功能的装置。

[0184] ⑦交流母排:铜母排。⑧接地母排:铜母排。⑨直流母排:铜母排。

[0185] 2. 主要成套设备

[0186] 2.1. 智能高频直流模块

[0187] 本申请提案采用多台智能高频直流模块并联,作为低压直流母线I的供电电源。采用的直流模块为智能高频成套设备,占用空间小,支持热插拔,高防护等级,适用于隧道工作场景。主要技术要求:

[0188] 2.2. 高频隔离双向DC/DC模块

[0189] 本申请提案采用高频隔离双向DC/DC模块作为低压直流母线I与直流母线II、III之间的组网设备,实现电能的双向传输。隔离式双向DCDC变换器通过变压器实现输入和输出之间的电气隔离,安全性高。考虑到高电压传输线路能耗较低,该模块设置于电压水平较低的直流母线II、III所在的直流柜AW2、AW3,线路传输电压为直流母线I电压。双向DC/DC模块同时用于储能电池的充电与放电。采用的双向DC/DC模块为智能高频成套设备,占用空间小,支持热插拔,高防护等级,适用于隧道工作场景。

[0190] 2.3. 直流母线

[0191] 本申请提案直流母线采用阻燃绝缘铜母线,铜母线正、负极母线间距离应不小于60mm。根据直流母线可接入的最大功率值及母线电压计算最大母线电流,直流母线的额定电流应大于计算最大母线电流并考虑适当余量(约10%)。根据直流母线的额定电流选择相应规格的直流母线,例如TM-40x4、50x5、80x8等等。直流母线采用热缩套管或其他电击防护措施,并应在醒目位置设置警告标志。

[0192] 最大直流母线电流计算公式: $I_{js} = \frac{P_{e1} + P_{e2} + P_{e3} + \dots}{U}$, I_{js} 为最大直流母线电流, A;

P_{e1} 、 P_{e2} 、 P_{e3} :对于直流母线I,为市电接入直流模块的最大输出功率,对于直流母线II、III,为市电接入双向DC/DC直流模块的最大输出功率;U为设计直流母线电压,V。

[0193] 2.4. 储能电池

[0194] 本申请提案直流柜AW1设置储能电池,作为隧道紧急备用电源(应急照明、电光标志以及监控设备供电)。电池持续供电时间30min。

[0195] 2.5. 低压直流配电电缆截面设计

[0196] ①AM1柜进线电缆1~4

[0197] 该电缆由AT柜引至AM1柜,电缆长度小于3米,采用ZB1YJV电缆,位于配电间内采用电缆沿墙明敷设,不同回路电缆间距大于1倍外径,环境温度取值需根据项目所在地气温实际情况。电缆截面积(载流量):根据敷设方式及环境条件选择电缆长期允许载流量,并根据短路电流校验热稳定。

[0198] 计算公式: $I_c \leq I_N \leq I_z$, I_c 为最大工作电流,A; I_N 为直流漏电断路器长延时整定电流,A; I_z 为导体允许持续载流量,A。

[0199] 计算公式: $S \geq \frac{I}{k} \times \sqrt{t}$, S 为电缆截面积,mm²; I 为最大短路电流,A; k 为系数; t 为保护电器(直流漏电断路器)自动切断电流的动作时间,s

[0200] ②AM1柜进线电缆5~6(或AM2~3柜进线电缆1)

[0201] 该电缆由AM2~3柜引至AM1柜,电缆长度约为隧道总长度的一半,较长,采用ZB1YJV电缆,沿隧道两侧电缆沟支架敷设,不同回路电缆间距大于1倍外径,环境温度取值需根据项目所在地气温实际情况。电缆截面积(载流量):根据敷设方式及环境条件选择电缆长期允许载流量,并根据短路电流校验热稳定;另外,线路较长,需根据线路压降要求(<5%)校验电缆截面,需校验线路末端短路保护灵敏度。

[0202] 根据敷设方式及环境条件选择电缆长期允许载流量以及短路热稳定校验计算方法同①。

[0203] ③AM1柜出线电缆1~10(或AM2~3柜出线电缆1~2)

[0204] 该电缆由AM1~3柜引出至LED隧道灯,电缆长度较长,采用ZB1YJV电缆,沿隧道顶棚两侧电缆桥架敷设,不同回路电缆间距大于1倍外径,环境温度取值需根据项目所在地气温实际情况。电缆截面积(载流量):根据敷设方式及环境条件选择电缆长期允许载流量;另外,线路较长,需根据线路压降要求(<5%)校验电缆截面,需校验线路末端短路保护灵敏度。

[0205] 根据敷设方式及环境条件选择电缆长期允许载流量计算方法同①。

[0206] 另外,AM1柜出线电缆1~4(或AM2~3柜出线电缆1~2)均采用5芯等截面电缆(两个直流回路,L+,L-,L+,L-,共PE),相同供电距离情况下,采用的铜芯电缆截面远低于现有技术(AC380V);线路损耗大幅降低,节能效果明显;大幅降低铜材的使用,降低碳排放效果明显。其余输出回路均采用3芯等截面电缆。

[0207] ④AM2~3柜进线电缆2~5

[0208] 该电缆由隧道外设备引至AM2~3柜,电缆长度较长,采用ZB1YJV电缆,沿隧道外电缆沟支架敷设,不同回路电缆间距大于1倍外径,环境温度取值需根据项目所在地气温实际情况。电缆截面积(载流量):根据敷设方式及环境条件选择电缆长期允许载流量,并根据短路电流校验热稳定;另外,线路较长,需根据线路压降要求(<5%)校验电缆截面,需校验线路末端短路保护灵敏度。

[0209] 根据敷设方式及环境条件选择电缆长期允许载流量以及短路热稳定校验计算方法同①。

[0210] 三、压直流配电系统

[0211] 本申请提案设置一套由中央监控级、现场控制级以及检测执行级三层架构组成的集中管理、分散控制的集散型自动控制网络构架。

[0212] ①中央监控级

[0213] 位于控制中心(隧道外配套建筑)。设置3套中央监控计算机作为中央监控SCADA客户机(其中2套作为操作员站;1套作为工程师站,并兼做备用操作员站),对直流微电网的运营流程进行监控操作。设置1套历史数据服务器,对历史数据进行压缩、存储和管理。中央监控级上位组态软件还带有WEB发布组件,可实现SCADA系统的远程管理和信息化发布。

[0214] ②现场控制级

[0215] 由隧道内直流综合柜AM1~3内工控计算机、触摸屏及工业以太网交换机组成,主要负责各设备自控和数据采集。

[0216] ③检测执行级

[0217] 由各成套控制系统构成,包括直流电弧故障保护控制器、绝缘监测控制器、智能仪表、高频隔离双向DC/DC、储能电池控制器、光伏发电控制器、风力发电控制器。各成套控制系统通过MODBUS总线接入监控系统。

[0218] ④通讯网络

[0219] 采用1000M光纤快速工业以太网,组成环形冗余结构。在现场控制级,现场控制站和成套设备控制系统之间采用MODBUS总线通讯方式。

[0220] 隧道外控制中心内设置监控计算机及通讯柜(含千兆工业以太网交换机、网络综合通讯器、UPS、防浪涌等设备);隧道配电间内设置通讯分柜(含千兆工业以太网交换机、工控机、防浪涌等设备)。控制中心计算机通过工业以太网交换机、光纤与隧道内分区工控机通讯,组成千兆以太网。采用基于交换机技术的光纤环网拓扑结构,取代传统的点对点的集散型结构。环状网络单方向传输,适合光纤应用,传输速率高,实时性高;存在旁路,某个结点发生故障可以自动旁路,不会引起停机,可靠性高。

[0221] 四、风、光、储系统工程设计

[0222] 风力发电机采用全永磁悬浮水平轴风力发电机,要求发电机的启动风速小于1.5m/s,切入风速不大于2.5m/s。太阳能电池组件采用高透光率低铁钢化玻璃,透光率大于91.3%,采用优质单晶硅电池片。采用高效磷酸铁锂电池作为储能电池。

[0223] 下面提供一案例说明风、光设备功率及储能电池容量工程设计方法:

[0224] 案例所在地气象资料:多年平均风速为4.9m/s(10m高度),全年风速大于3m/s(即可用于风力发电机发电的风速)的统计风时长为5783h,日平均15.84h,属于风力资源可利用区。日均辐射量3.33kWh/m²,平均峰值日照4.5h,年统计时长1642h,太阳能资源一般,风力资源更丰富。

[0225] 基本照明日调光系数:根据隧道交通量的变化而调整LED光输出(调功率),通常依据隧道小时交通量多年统计均值,设定若干调光档次。不同隧道根据所在地的统计小时交通量值来确定平均日调光系数。加强照明日调光系数:根据交通量调光同基本照明;另外需根据隧道洞口亮度(主要由天气情况决定)的变化而调整LED光输出(调功率),高洞口亮度对应LED高光通量输出,低洞口亮度对应LED低光通量输出,设定若干调光档次。不同隧道根据所在地的多年统计小时交通量、多年统计洞口亮度值来确定平均日调光系数。

[0226] 国家标准GB/T 33589-2017《微电网接入电力系统技术规定》中规定分布式发电年

发电量不宜低于微电网总用电量的30%。风力发电机与太阳能电池板的总功率应结合项目所在地的气象数据(风速及可利用风速(>3m/s)年统计时长、光照强度及可利用光照时长)、隧道直流微电网统计年平均用电量统筹考虑,保证分布式发电年发电量大于直流微电网统计年用电量的30%。风力资源丰富的地区应以风力发电为主,光伏发电为辅;太阳能资源丰富地区应以光伏发电为主,风力发电为辅。光伏发电仅白昼运行,风力发电白昼、夜间均可运行。

[0227] 以上案例中,隧道单洞年电耗为186703kWh,风能、太阳能资源丰富,配置的光伏与风力发电设备的发电量应大于双洞年电耗的30%: $2 \times 186703 \times 30\% = 112022 \text{kWh}$ 。案例项目所在地年统计风时长5783h(风速>3m/s),统计年峰值日照时长1642h。以时长暂估风力与光伏发电量的配比:5783:1642 \approx 7:2。

[0228] 根据前文公式①,风力发电机年平均发电量:

$$[0229] \quad Q_{1n} = P_1 \times T_{1n} \times m = P_1 \times 5783 \times 0.9 = 112022 \times 7/9 = 87128 \text{kWh};$$

[0230] 风力发电机装机总功率:

[0231] $P_1 = 87128 / (5783 \times 0.9) = 16.7 \text{kW}$,年平均风速为4.9m/s(10m高度),风力发电机的额定风速<10m/s,安装高度20米,经公式①的高度、风速折算,选取的风力发电机的设备功率 $P_e = 30 \text{kW}$,该功率为隧道两个方向洞外风力发电机的设备功率和,工程应用时可采用单台大功率设备或多台小功率设备的组合。

[0232] 光伏发电年平均发电量:

$$[0233] \quad Q_{2n} = P_2 \times T_{2n} \times m = P_2 \times 1642 \times 0.9 = 112002 \times 2/9 = 24889 \text{kWh};$$

[0234] 光伏太阳能电池板装机总功率:

$$[0235] \quad P_2 = 24889 / (1642 \times 0.9) = 16.8 \text{kW}, \text{取标称值 } P_2 = 18 \text{kW}.$$

[0236] 3. 储能电池的容量

[0237] 隧道均配备稳定可靠的市电电源,风力发电及光伏发电作为节能降耗设备,是市电电源的补充,蓄电池容量配置不考虑可再生能源停止发电及市电电源缺失后的系统独立运行。

[0238] 储能电池的容量配置考虑以下两方面的边界条件:

[0239] ①国家标准GB/T 33589-2017《微电网接入电力系统技术规定》中规定微电网独立运行模式下,向负荷持续规定时间不宜低于2小时。

[0240] 如图10,根据多年统计小时交通量,由于夜间隧道直流负载中的加强照明处于关闭状态,因此最大直流负荷考虑出现在白昼交通量大且洞外亮度最高的时段。原因:交通量大,LED的调光系数就高,LED的输出功率就高;洞外亮度高,加强照明LED的调光系数就高,ED的输出功率就高。根据以上交通量数据,白昼大交通量出现时段:7~12时间;案例位于北半球北回归线以北地区,全年日照最强发生在当年夏至日的午间。

[0241] 全年最大的持续2h高负荷出现在当年夏至日10:00~12:00,电耗日峰值如表1:

[0242] 表1.

耗能项目	计算指标				
	数量（台）	功率（w）	调光系数	运行小时（h）	电耗（kWh）
基本照明	180	90	1	2	32.40
应急照明	60	90	1	2	10.80
入口侧 加强照明	96	175	1	2	33.60
出口侧 加强照明	48	175	1	2	16.80
系统能耗（电缆、机柜等）					5.00
电光标识（全日）	60	15	1	2	1.80
监控设备（全日）	40	10	1	2	0.80
合计能耗（kWh/日）					101.20

[0244] 根据公式③,储能电池容量配置为:

[0245] $101.2\text{kWh}/(0.95 \times 1) \approx 106.5\text{kWh}$,取值110kWh。

[0246] ②储能电池容量应考虑新能源发电不浪费的原则,即应满足多余的新能源发电电能的存储(不考虑余电上网)。电池容量应大于最大日发电量与最小日用电量的差值。本案例以风力发电为主,最大日发电量与最小日用电量的差值发生在连续阴雨时期,且该时期平均风速显著高于全年平均风速,光伏发电基本为零;洞口亮度最低,加强照明调光系数低至0.1。最小日电耗如表2:

[0247] 表2

耗能项目	计算指标				
	数量（台）	功率（w）	平均日调光系数	日运行小时（h）	日电耗（kWh）
基本照明（3/4日 白昼及前半夜）	180	90	0.7	18	204.12
基本照明（1/4日 后半夜）	60	90	0.3	6	9.72
应急照明（全日）	60	90	0.7	24	90.72
入口侧 加强照明（1/2日 白昼）	96	175	0.1	12	20.16
出口侧 加强照明（1/2日 白昼）	48	175	0.1	12	10.08
系统能耗（电缆、机柜等）					55.00
电光标识（全日）	60	15	1	24	21.60
监控设备（全日）	40	10	1	24	9.60
合计能耗（kWh/日）					421.00

[0249] 如风力及光伏发电量取值双洞年电耗的90%,根据前文公式①,风力发电机的设备功率为 $P_e = 90\text{kW}$,连续阴雨时期风力发电机日发电量:

[0250] $Q_{lr} = P_1 \times T_{lr} \times m = 90 \times (6.6/10) \times 20 \times 0.9 = 1069\text{kWh}$; (6.6为按高度折算后的阴雨期间的风速)

[0251] 根据公式③,储能电池容量配置为: $(1069 - 421 \times 2) \text{kWh} / 0.95 \approx 240\text{kWh}$ 。

[0252] 综合考虑以上两个边界条件,储能电池容量配置按条件②考虑,取值240kWh(该值为隧道两个洞外设备的总和,每个洞口分配120kWh)。

[0253] 如风光发电配置比例较低(如前文的30%),则最大日发电量与最小日用电量的差值可能小于直流负载2h日峰值,此时应按条件①配置储能电池容量。

[0254] 4.经济效益估算

[0255] 光伏与风力发电设备功率的配置需考虑经济指标,根据目前光伏及风力发电行业的统计数据,光伏、风力发电的投资额约为人民币0.8万元/kW;锂电池投资额约为人民币0.1万元/kWh;光伏及风力发电的有效使用年限约为25年;锂电池有效使用年限约为5年;风、光、储的设备配置宜考虑在使用年限半周期内通过节约电能收回成本,其余半周期设备年限为节能收益期。

[0256] ①风光发电量占总用电量的30%时,采用的风力发电机设备功率 $P_e = 30\text{kW}$,采用的光伏设备的峰值功率 $P_2 = 18\text{kW}$,锂电池容量 $C = 110\text{kWh}$ 。总投资额: $(30+18) \times 0.8 + 110 \times$

$0.1 \times (25/5) = 93.4$ 万元。每年节约电能约120000kWh,折合人民币约6万元。约需16年收回成本。

[0257] ②风光发电量占总用电量的40%时,采用的风力发电机设备功率 $P_e = 40$ kW,采用的光伏设备的峰值功率 $P_2 = 24$ kW,锂电池容量 $C = 110$ kWh。总投资额: $(40+24) \times 0.8 + 110 \times 0.1 \times (25/5) = 106.2$ 万元。每年节约电能约160000kWh,折合人民币约8万元。约需14年收回成本。

[0258] ③风光发电量占总用电量的50%时,采用的风力发电机设备功率 $P_e = 50$ kW,采用的光伏设备的峰值功率 $P_2 = 30$ kW,锂电池容量 $C = 110$ kWh。总投资额: $(50+30) \times 0.8 + 110 \times 0.1 \times (25/5) = 119$ 万元。每年节约电能约200000kWh,折合人民币约10万元。约需12年收回成本。

[0259] 综上,对于该案例,风光发电量占总用电量的50%时,可实现在风、光、储设备使用年限半周期内通过节约电能收回成本,具有较好的经济效益。

[0260] 风、光、储系统工程设计流程如图10。

[0261] 以上是本发明的较佳实施例,凡依本发明技术方案所作的改变,所产生的功能作用未超出本发明技术方案的范围时,均属于本发明的保护范围。

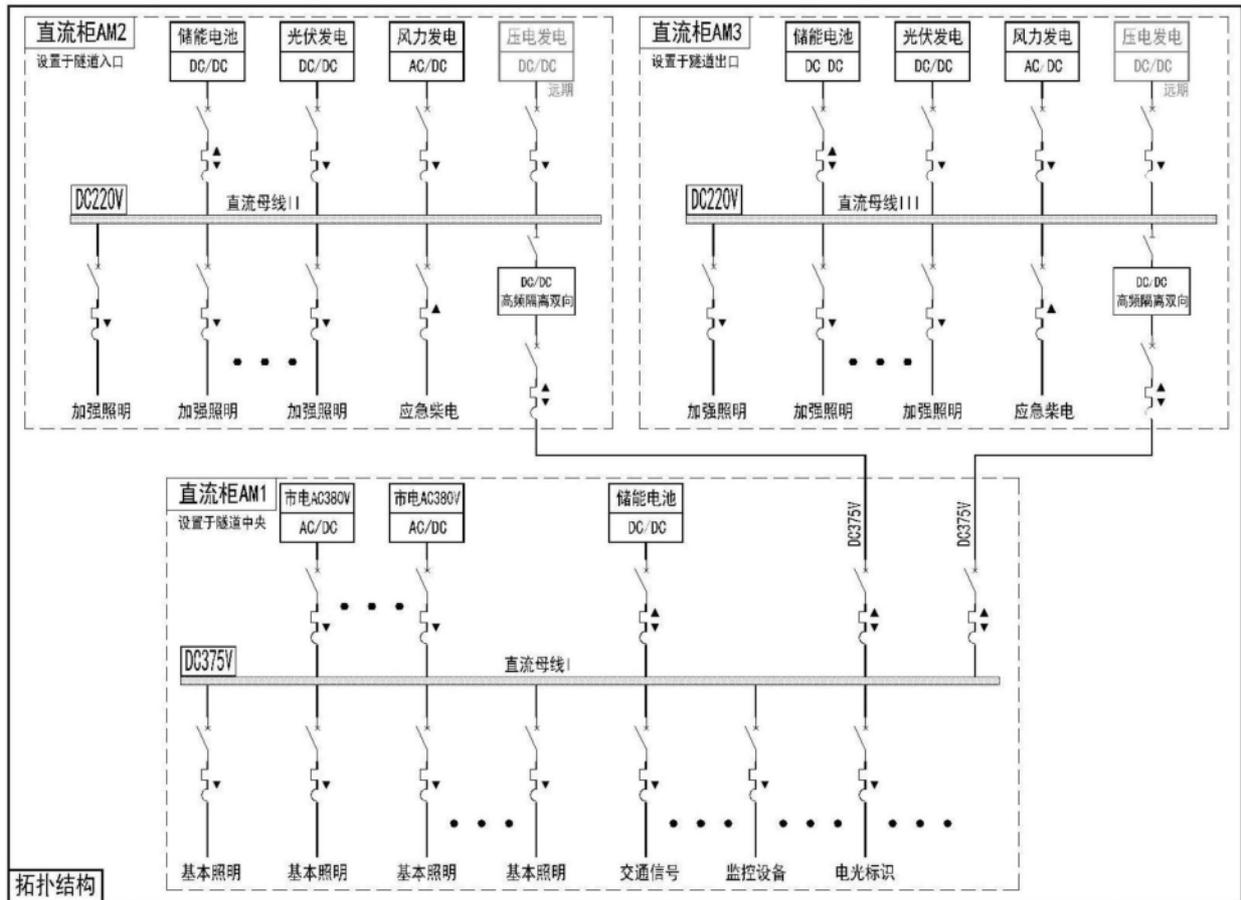


图1

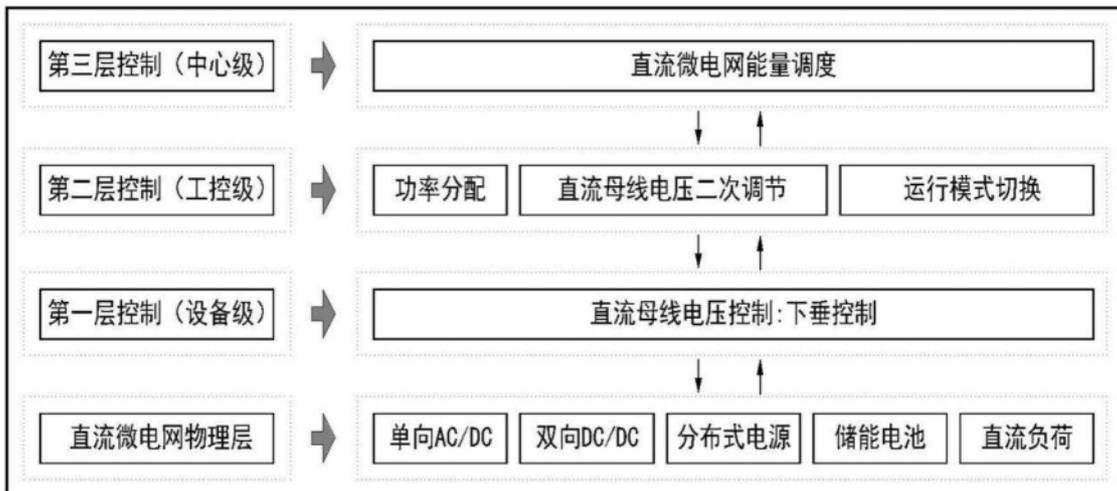


图2

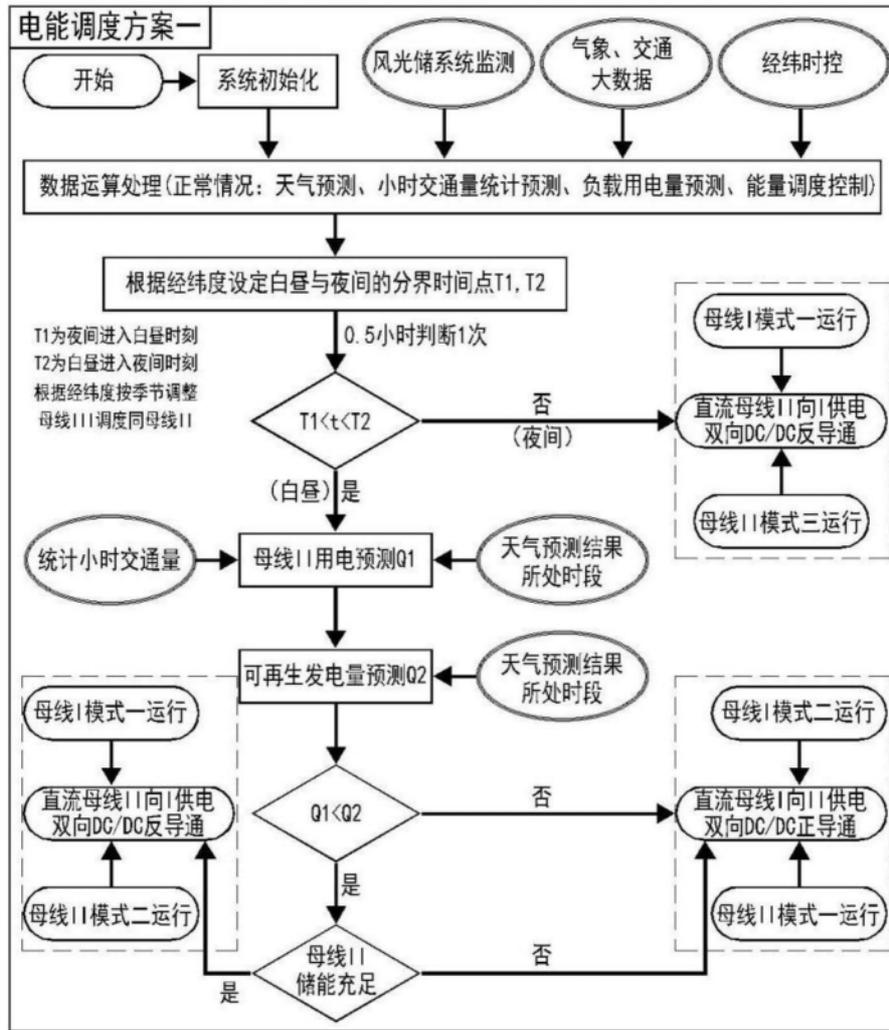


图3

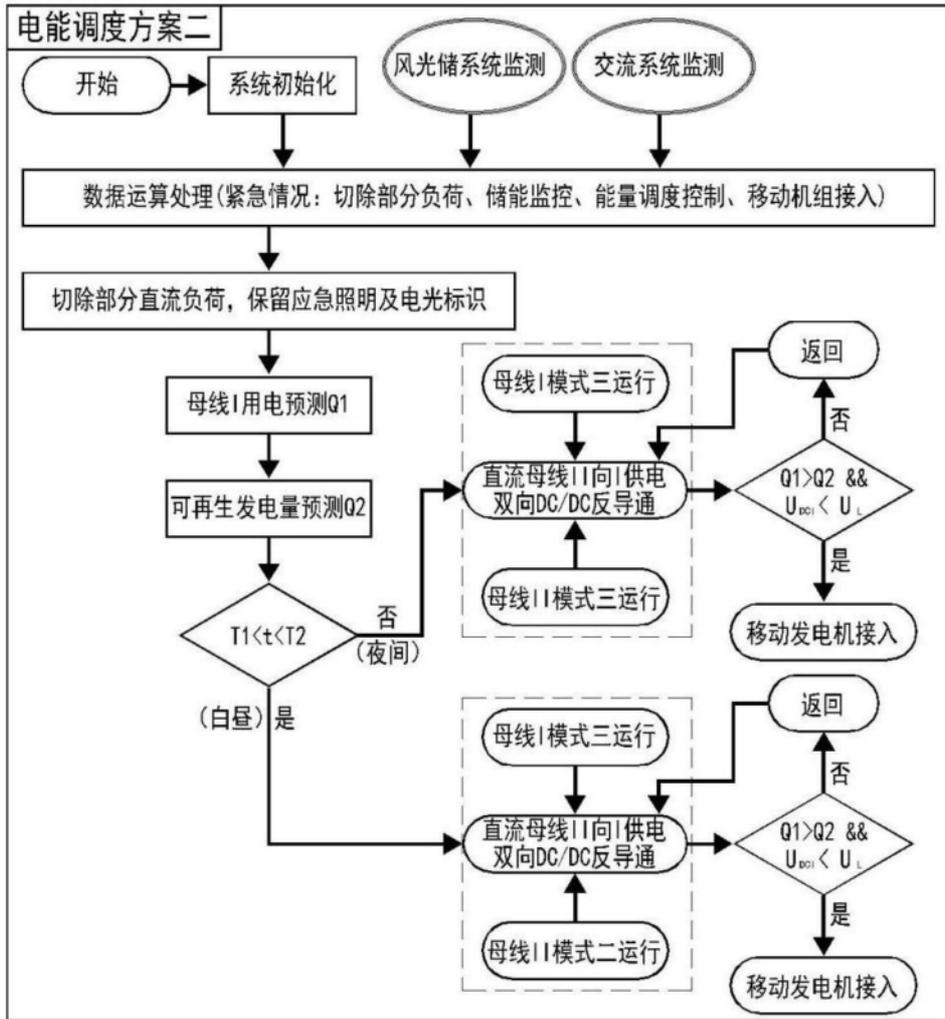


图4

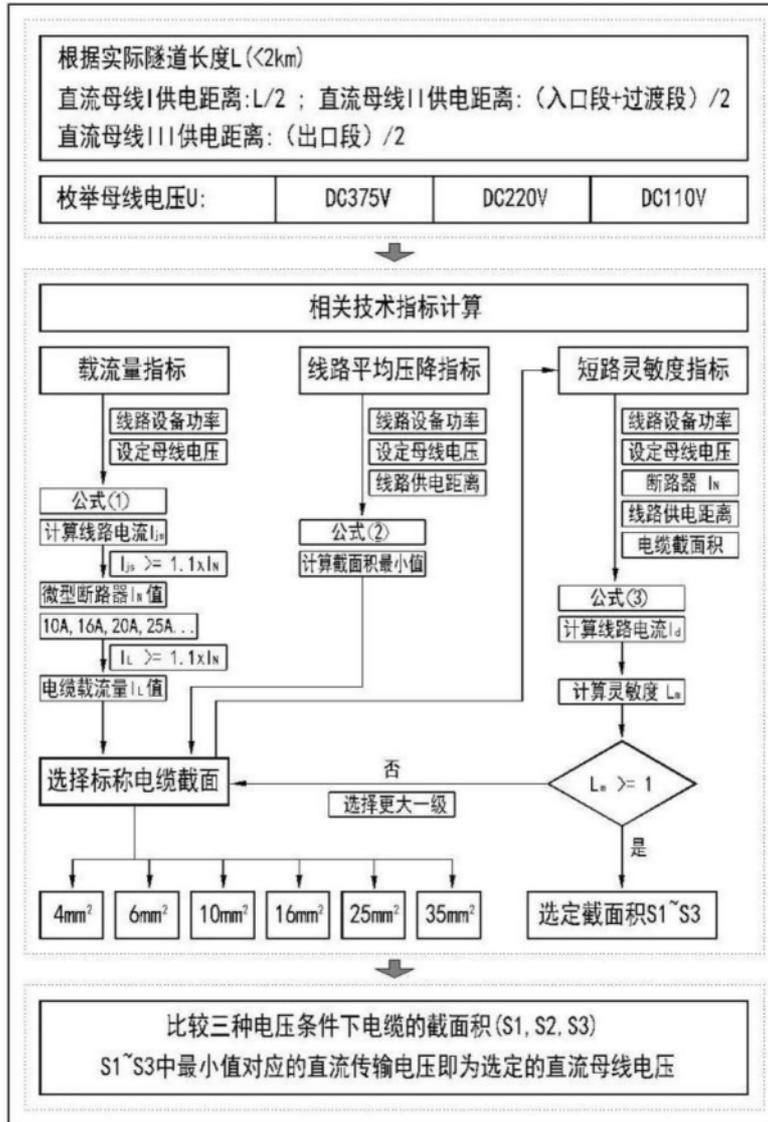


图5

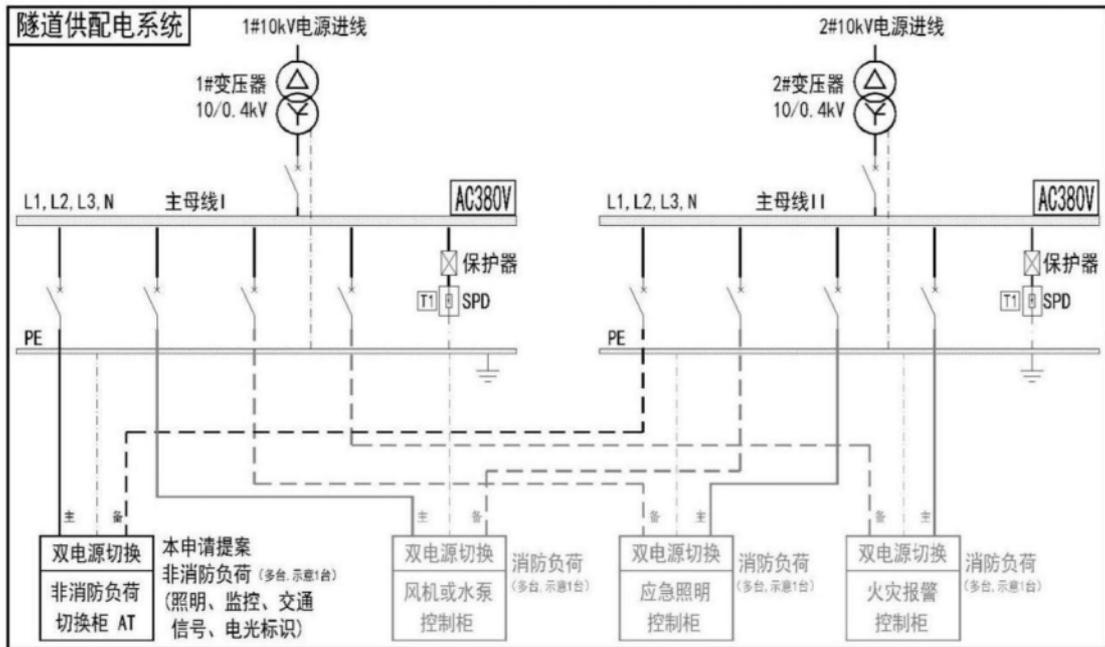


图6

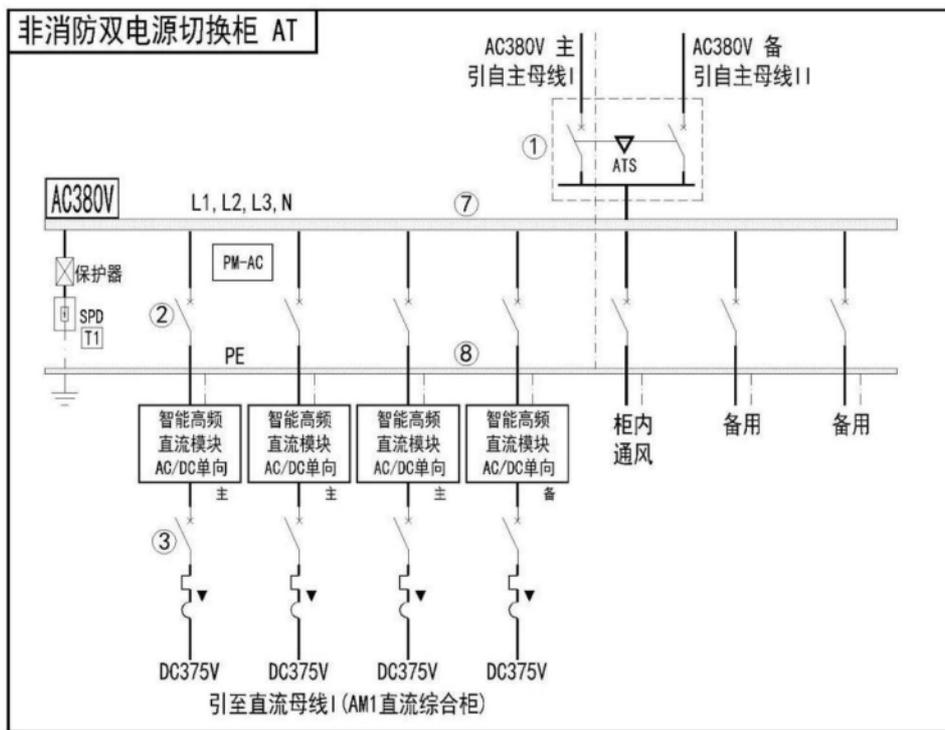


图7

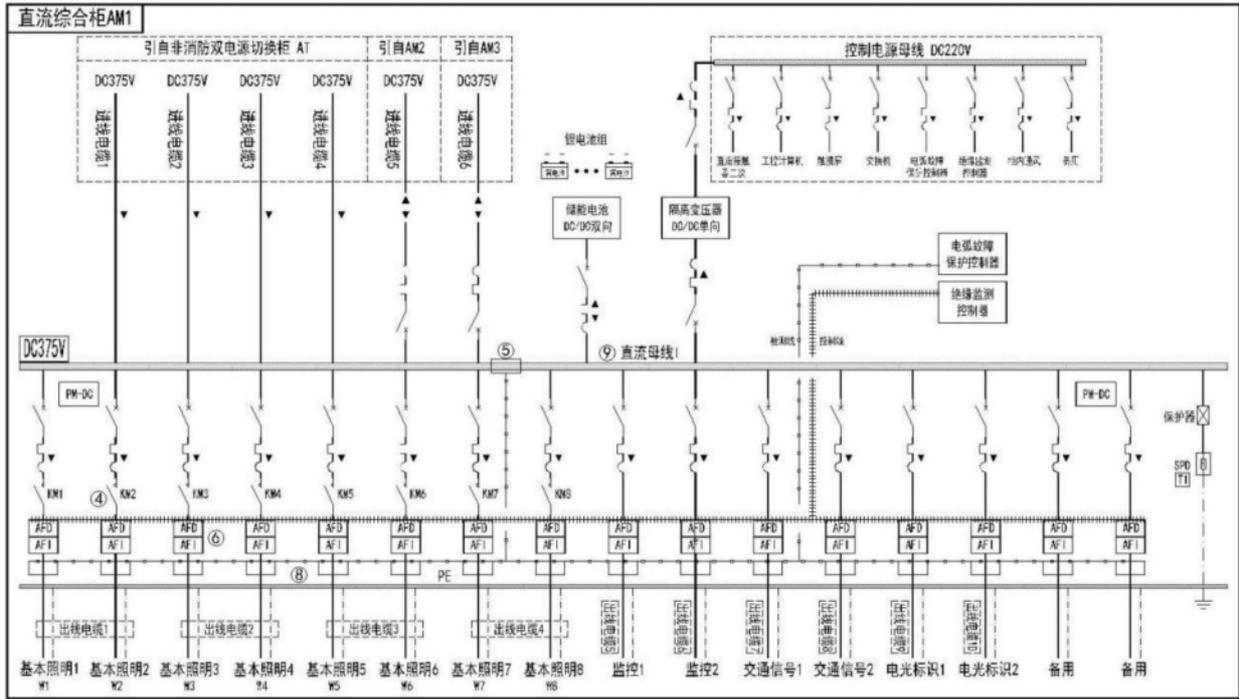


图8

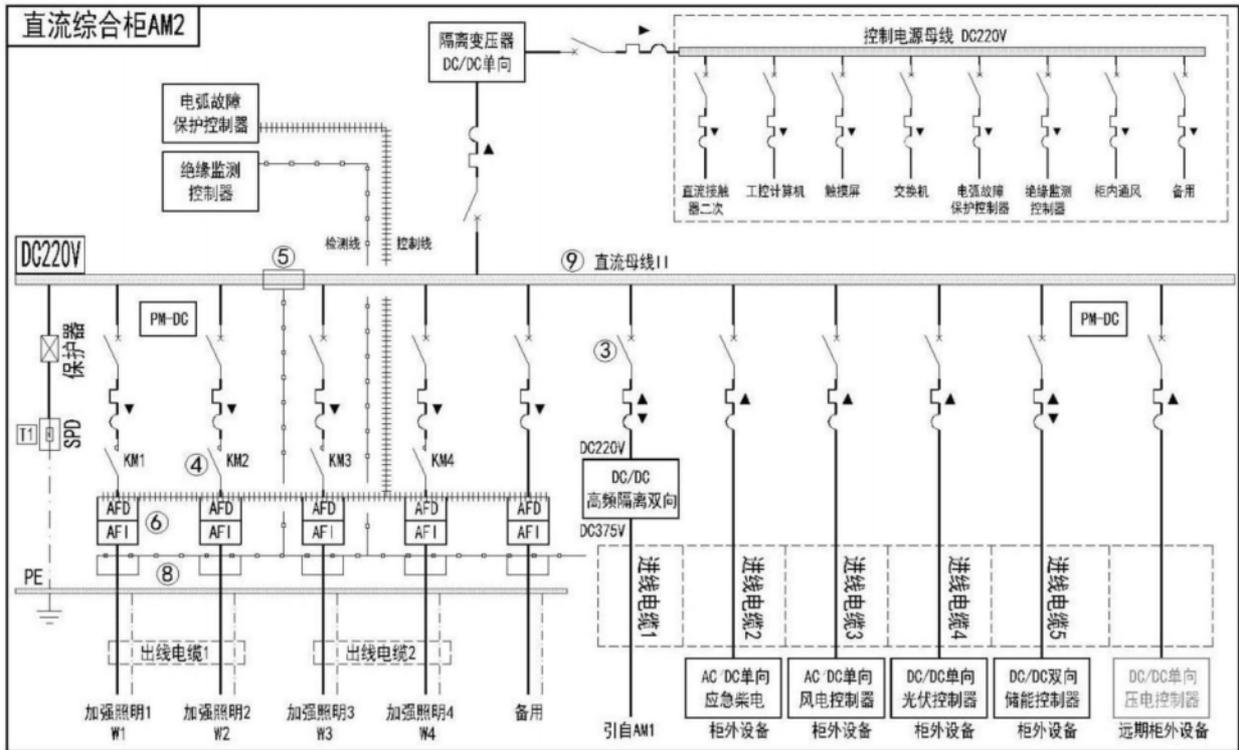


图9



图10

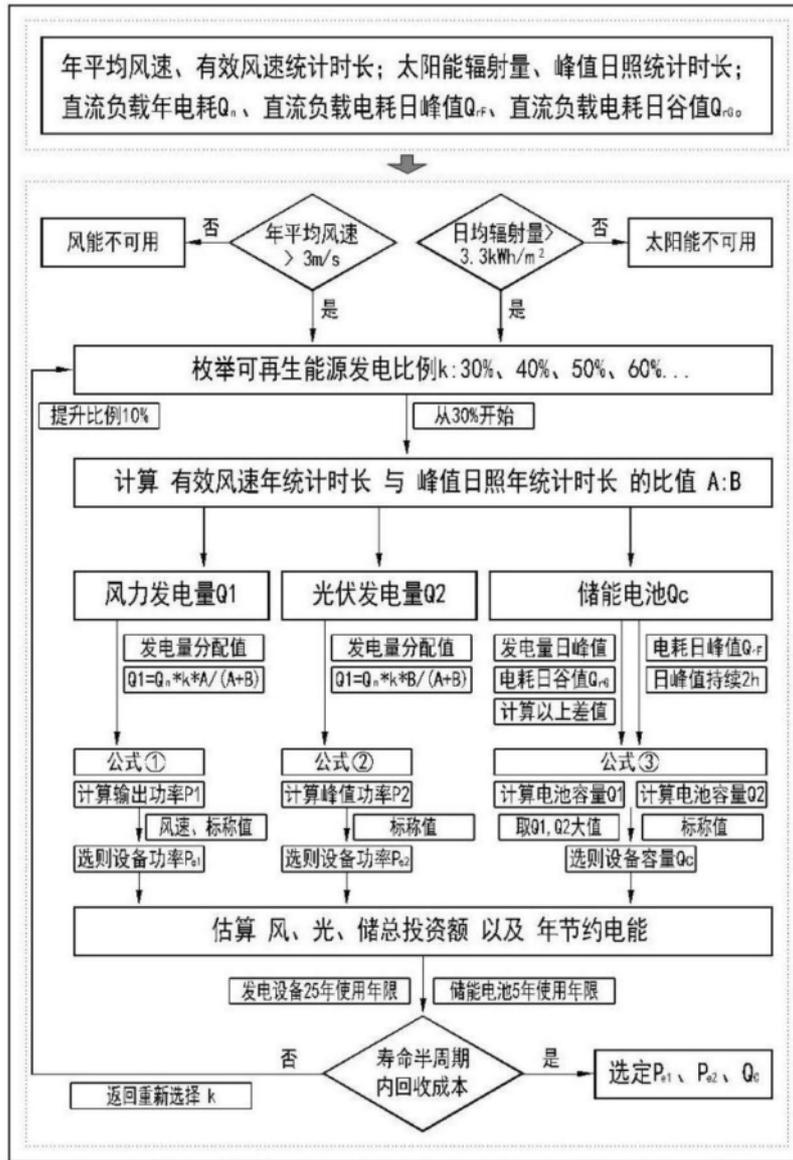


图11