

移动式电池储能直流融冰装置的功率与容量的优化选取

提出基于移动式电池储能装置的配电网中压线路直流热力融冰措施,介绍了冰区分布计算方法,分析了直流热力融冰接入方式、装置主要设备成本以及电池储能系统放电深度对移动式电池储能直流融冰装置的功率和容量要求,可为移动式电池储能直流融冰装置的功率和容量的优化选取提供参考依据,并以福建地区为实例进行了移动式电池储能直流融冰装置的功率和容量优化选取计算。

范元亮^{1,5} 黄桂兰^{1,2,3} 陈 彬^{1,5} 吴文宣⁴ 江全元⁶/1.国网福建省电力有限公司电力科学研究院 2.福州大学电气工程与自动化学院 3.国网福建省电力有限公司技术中心 4.国网福建省电力有限公司 5.福建省高供电可靠性配电技术企业重点实验室 6.浙江大学电气工程学院

0 引言

冰雪灾害对电网、交通和农作物等都有着严重的危害。我国冰雪灾害分布广,2008年的罕见冰雪灾害给输变电设施带来大面积覆冰,电网结构遭到严重破坏,部分地区供电被迫中断,给国民经济带来了巨大损失^[1]。及时有效地对输配电覆冰线路进行除融冰是降低电网覆冰灾损的重要途径之一,鉴于主网影响面广,停电损失大,针对主网高压输电线路的热力融冰技术,近年来已开展广泛深入的研究,如南方电网公司在2008年研制了500 kV变电站60 MW级固定式直流融冰装置,国家电网公司研制的500 kV变电站120 MW级固定式直流融冰装置也在同年通过现场试验,随后国网江西省电力公司研制了4台5 MW级500 kV线路移动式直流融冰装置^[2-5]。由于配电网分布面广,线路众多、长度远不及主网

输电线路,而且配电网覆冰线路往往处于高山地区,跨越的地形条件复杂,配电网直流热力融冰难于取得大范围融冰的效果,针对配电网的融冰措施研究目前还相对不足,主配电网融冰相互配合,才能起到尽快复电的效果,开展配电网线路融冰措施研究具有现实意义。

现有输电线路热力融冰一般均考虑电源取自交流网络,现有部分适用于配电网中低压线路的融冰装置也考虑电源取自交流系统或临时交流电源^[6],尚未见适用于取自直流电源系统的中低压线路融冰装置。电池储能装置可用于不间断应急保供电、削峰填谷和提高台区供电能力等多种场合,随着电池储能技术的发展,特别是磷酸铁锂电池储能技术的发展,使得电池能量密度相对于传统铅酸蓄电池成倍提高,较大规模的电池储能系统与变流器系统可紧凑集成于移动车厢,实现灵活、机动,具备低噪声和无污染等特点,促进了基于电池储能的移动式储能装置的推广应用^[7]。在不间断应急保供电、削峰填谷和提高台区供电能力等功能的基础上,集成针对配电网中低压线路的直流热力融冰功能,当发生线路倒杆失去系统电源时,移动式电池储能装置可提供应急直流热力融冰功能,对于深入挖掘移动式电池储能装置的多样化应用功能以及提升装置的工程应用价值具有积极意义。

本文提出的移动式电池储能直流融冰装置将应急保供电、提高台区供电能力以及直流热力融冰等功能集成于一



范元亮/工程师

关键词/Keywords

储能装置 ·
直流融冰 ·
融冰功率 ·
融冰容量 ·
成本优化 ·

国网福建省电力有限公司科技研究项目(52130414005M)。

体, 储能系统采用磷酸铁锂电池作为储能介质, 由于直流热力融冰对装置的功率和容量的选取有较高要求, 优先考虑对配电网中压线路的直流热力融冰功能, 提出装置的功率和容量优化选取方法, 以福建地区为实例进行装置的功率和容量优化选取计算。

1 系统设计

移动式电池储能直流融冰装置主要由电池储能系统、双向变流器、直流变换器、后台监控和开关组合构成, 以上设备均集成至移动车箱, 一台或多台移动式储能装置并联运行完成融冰工作, 装置的系统结构如图1所示。移动式电池储能直流融冰装置的电池储能系统由一序列并联运行的磷酸铁锂电池柜与电池管理系统组成, 电池柜由厂家成型的磷酸铁锂电池箱串并联而成, 双向变流器和直流变换器分别为交流充电和直流融冰接口。通过监控系统界面监视移动式电池储能直流融冰装置的运行数据, 设定双向变流器的工作模式和直流热力融冰的工作电流。当多台移动式电池储能直流融冰装置并联运行进行直流热力融冰时, 监控系统可根据装置的荷电状态按比例进行均流并将指令下发至直流变换器。双向变流器和直流变换器可同时处于工作状态, 直流变换器还具备向直流负荷供电的功能。

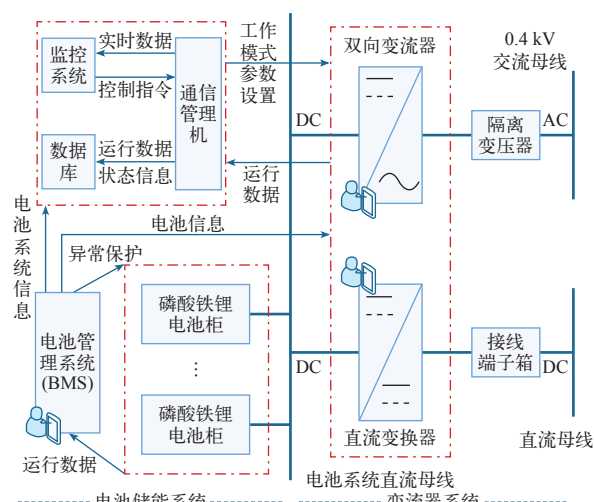


图1 移动式电池储能直流融冰装置系统结构图

双向变流器采用单级拓扑, 直流侧连接至电

池储能系统母线, 交流侧可连接至负荷或台区配电变压器低压侧, 可为电池储能系统提供恒流、恒压充电功能。在应急保供电模式, 双向变流器工作于 V/f 模式; 在并网提高台区供电能力模式, 双向变流器工作于功率调度模式。直流变换器的输入端也连接至电池储能系统母线, 输出端连接至中低压覆冰线路, 具备降压和升压工作模式, 适应融冰电压范围宽的要求。电池管理系统可对电池储能系统的充放电电流、直流侧电压和工作温度等运行数据进行监视, 实现电池健康状态 and 系统荷电状态的估计以及异常保护。

2 冰区分布计算

覆冰厚度是影响直流热力融冰电流选取的主要边界条件, 在开展装置的功率和容量优化选取前必须掌握应用地区的覆冰情况。冰区分布计算通常根据气象局观测数据、电线结冰观测站观测数据, 进行标准冰厚换算, 计算重现期, 根据海拔高度修正覆冰厚度, 还可根据运行经验和局部地形数据进行适当修正, 冰区的统计分析的具体步骤如下^[8-10]。

1) 计算标准冰厚。为了使冰区划分规范统一化, 需将不同密度、不同形状的覆冰厚度统一换算为密度为 0.9 g/cm^3 的均匀裹覆在导线周围的标准覆冰厚度, 其计算公式为

$$b_0 = \sqrt{\frac{G}{0.9\pi L} + r^2} - r \quad (1)$$

式中, b_0 为标准冰厚, mm; G 为冰重, g; L 为覆冰体长度, m; r 为导线半径, mm。

2) 标准冰厚的高度、线径修正。覆冰大小与风速、空气含水量关系密切。不同高度的风速、含水量有差别。在近地空气层风速随高度增加, 风速愈大, 导线捕获的水滴、水晶就愈多, 覆冰就愈大。我国线路设计规范要求覆冰厚度应归算至10 m高处, 高度修正系数如式(2)所示。线径修正系数应根据实测资料分析确定, 无实测资料地区的按式(3)所示修正系数进行线径修正, 即

$$K_h = \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^\alpha \quad (2)$$

$$K_{\phi} = 1 - 0.14 \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right) \quad (3)$$

式中, K_h 为高度修正系数; Z 取10 m; Z_0 为实测或调查覆冰导线悬挂高度, m; α 为指数, 与风速、含水量与捕获系数有关, 无实测资料时, α 可取值0.22; K_{ϕ} 为线径修正系数; ϕ 为设计导线直径, mm, $\phi \leq 40$ mm; ϕ_0 为实测或调查覆冰的导线直径, mm。

3) 不同重现期标准冰厚计算。福建省冰区分布一般按照30年、50年和100年重现期分别进行统计。根据各地实际情况, 可采用覆冰数据法、CRREL模型法、气象参量回归法和局地地形—气象影响覆冰等级模型法等方法确定不同重现期的覆冰厚度。

4) 覆冰厚度随海拔变化的修正。由于覆冰厚度随海拔高度增加而增加, 电线积冰在云层以下高度内, 其凝结量随高度呈指数变化规律, 因此利用几个不同海拔高度气象站的不同重现期标准冰厚值, 拟合出冰厚随海拔高度变化的指数公式, 即

$$R_h = \beta e^{ah} \quad (4)$$

式中, R_h 为某一海拔高度 h 上的冰厚; a 、 β 为待定参数。

根据上述冰区分布统计划分方法得到福建省中南部和北部山区不同海拔高度下的冰区分布情况分别如表1、表2所示。从表1、表2中可以看出, 福建省覆冰厚度随海拔高度变化比较明显, 北部山区覆冰情况较中南部地区严重。福建省通过中压网架延伸的供电区域的海拔高度大都在1 000 m以下。根据2008年福建省输电网覆冰情况分析来看, 中压线路较为极端覆冰厚度主要集中在10 mm左右, 大致为福建省中南部和北部海拔500~900 m山区, 50年一遇。

表1 福建北部山区冰区分布情况 (26°30'以北)

冰厚值/mm	海拔高度/m		
	30年一遇	50年一遇	100年一遇
0~5	400以下	300以下	200以下
5~10	400~600	300~500	200~400
10~15	600~900	500~800	400~700

(续)

冰厚值/mm	海拔高度/m		
	30年一遇	50年一遇	100年一遇
15~20	900以上	800~1000	700~900
20~30	—	1 000以上	900以上

表2 福建中南部山脉冰区分布情况 (26°30'以南)

冰厚值/mm	海拔高度/m		
	30年一遇	50年一遇	100年一遇
0~5	500以下	400以下	300以下
5~10	500~700	400~600	300~500
10~15	700~1 000	600~900	500~800
15~20	1 000以上	900以上	800~1 000
20~30	—	—	1 000以上

3 功率与容量优化选取

3.1 直流热力融冰电流计算

直流热力融冰过程大致可分为两个阶段^[11]: 第一阶段是在圆柱体由冰完全包裹的情况下融冰。在第二阶段, 圆柱体上表面把冰筒剪破使冰脱落。当冰层上表面顶点与导线上表面顶点接触, 冰的自重大于导线表面接触的冰层的剪应力, 覆冰从导线上脱落, 融冰过程如图2所示。

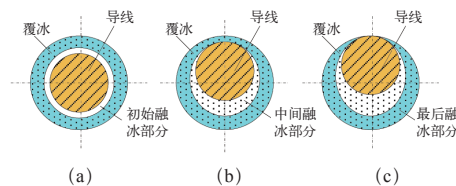


图2 导线融冰过程

直流热力融冰过程中电流产生的焦耳热主要作用于: 冰溶解成水的相变潜热, 冰层温度上升所需的热以及冰层表面的对流和辐射散热^[12-13], 根据该热平衡关系, 可将对应的导热、对流及辐射散热等动态因素折算成等效热阻, 采用国网Q/GDW 716—2012《输电线路电流融冰技术导则》的直流融冰电流计算公式, 即

$$I_{\text{melt}} = \sqrt{\frac{10g_0db + \frac{0.045g_0D^2}{R_{T0} + R_{T1}} \left(R_{T1} + 0.22 \frac{R_{T0}}{\lg \frac{D}{d}} \right) \Delta t}{\frac{T_{\text{melt}}}{R_0} + \frac{\Delta t}{R_{T0} + R_{T1}}}} \quad (5)$$

式中, I_{melt} 为融冰电流, A; R_0 为0 ℃时导线的单位长度电阻, Ω/m ; Δt 为导体温度与外界温度之差, ℃; R_{T0} 为等效冰层传导热阻, 与导热系数有关; D 为导体覆冰后的外径, cm; d 为导线直径, cm; R_{T1} 为对流及辐射等效热阻, 与风速有关; b 为冰层厚度; g_0 为冰的比重, 一般按雨淞取0.9, T_{melt} 为融冰时间。

由式(5)可知, 在同样的边界条件下, 融冰完成时间取的越小, 导线融冰电流要求越大, 但融冰耗费的能量越小, 因此每次融冰功率应取装置功率的最大值。同时, 导线融冰电流应在最小融冰电流和最大融冰电流之间选取, 这也是融冰电流的选取范围。定义最小融冰电流为: 其产生的焦耳热全部通过冰层的对流辐射传递到空气中, 计算公式如式(6)所示; 定义最大融冰电流为: 加热导线使其温度上升到90 ℃的融冰电流, 其计算公式如式(7)所示^[14-16], 即

$$I_{\min} = \sqrt{\frac{\Delta t}{R_0(R_{T0} + R_{T1})}} \quad (6)$$

$$I_{\max} = \sqrt{\left[7.24 \left(\frac{318 + 0.5t_2}{1000} \right) \sum id + 0.7 \left(\frac{Vd}{2} \right)^{\frac{3}{4}} (90 - t_2) \right] / R_{90}} \quad (7)$$

式中, $I_{\min}$ 为最小融冰电流; $I_{\max}$ 为最大融冰电流; t_2 为外界温度; V 为风速, 其值大于2 m/s; $\sum i$ 为辐射系数。

3.2 功率与容量优化

(1) 从融冰接入方式角度考虑

配电网中压线路的直流热力融冰可采用如图3所示的三种接入方式, 在接线端子箱完成直流变换器输出端的换相和线路短接, 图3a操作较为复杂, 图3b次之, 图3c相对简单。对于“1-1(融冰电源一进一回接入)”, 1-2(融冰电源一进两回接入)”, “1-2, 1-2, 1-2”方式, 由于两相线路并联均流, 通过并联线路每路电流接近临界电流, 对并联覆冰线路基本起不到融冰效果。在边界条件不变的情形下, 忽略融冰过程中导线阻抗的变化, 选取每次融冰功率为装置的额定功率。

$$\begin{cases} E_{1-1,1-2} = P_r(T_{1-1} + T_{1-2}) \\ E_{1-1,1-1} = 2P_r T_{1-1,1-1} \\ E_{1-2,1-2,1-2} = 3P_r T_{1-2,1-2,1-2} \\ 2r_0 I_{1-1}^2 = 1.5r_0 I_{1-2}^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $E_{1-1,1-2}$ 为“1-1, 1-2”方式融冰所耗费的电量, kW·h; $E_{1-1,1-1}$ 为“1-1, 1-1”方式融冰所耗费的电量, kW·h; $E_{1-2,1-2,1-2}$ 为“1-2, 1-2, 1-2”方式融冰所耗费的电量, kW·h; P_r 为融冰直流变换器的额定功率, kW; I_{1-1} 为一进一回融冰电流, A; I_{1-2} 为一进两回融冰电流, A; l 为线路融冰长度, km; r_0 为线路的单位长度电阻, Ω/m , 此处不考虑融冰过程中温度变化对其的影响。

考虑在较为极端覆冰条件下移动式电池储能直流融冰装置具备满足C类供电区域针对中压线路的融冰能力, 选取表1、表2中福建省中南部和北部海拔500~900 m冰区50年一遇的10 mm覆冰厚度, 单次融冰线路长度为4 km, 线路型号为LGJ-120, 环境温度为-4 ℃, 风速为5 m/s。以此为边界条件, 计算融冰电流以及图3所示三种融冰方式下所需融冰功率和容量。由图4可知, 当每次接入选取融冰功率为装置的额定功率对线路进行融冰, 并且额定功率大于146.59 kW时, “1-1, 1-2”方式下融冰所消耗的总电量最小。

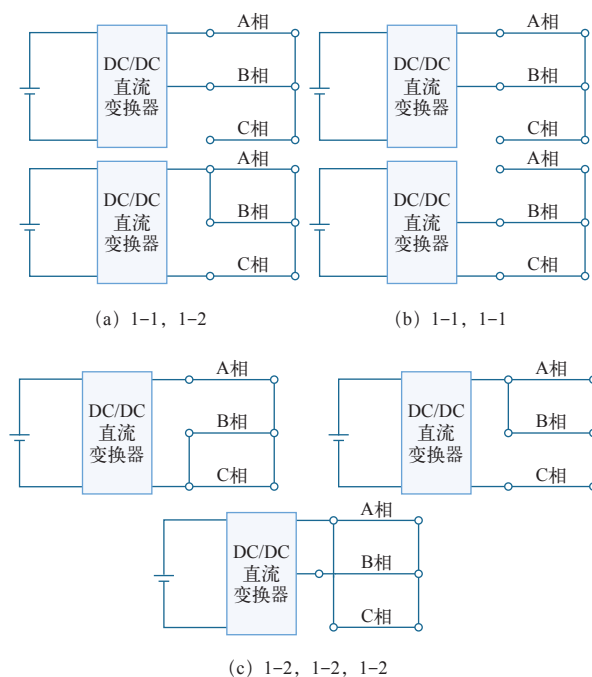


图3 直流融冰接入方式

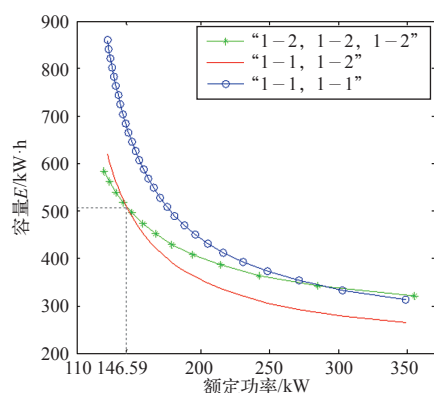


图4 不同融冰方式下功率与融冰容量的关系图

由图5可知,当融冰功率小于146.59 kW时,“1-1”方式下融冰所消耗的融冰时间大于2.31 h,“1-2”方式下融冰所消耗的融冰时间需大于1.16 h,即“1-1, 1-2”融冰方式下融冰总时间大于3.47 h,“1-2, 1-2, 1-2”融冰方式下的融冰总时间大于3.48 h,两者均大大超过了《输电线路电流融冰技术导则》中对于融冰时间的规定,并且耗费电量过大。因此,为了在规定的时间内对输电线路进行有效除冰,并且使融冰过程中消耗的总电量最小,采用“1-1(融冰电源一进一回接入), 1-2(融冰电源一进两回接入)”的直流融冰接入方式。

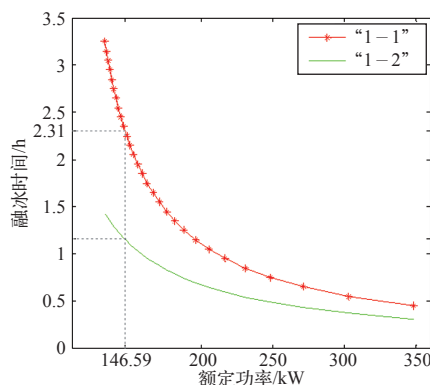


图5 不同融冰方式下融冰时间与融冰功率的关系图

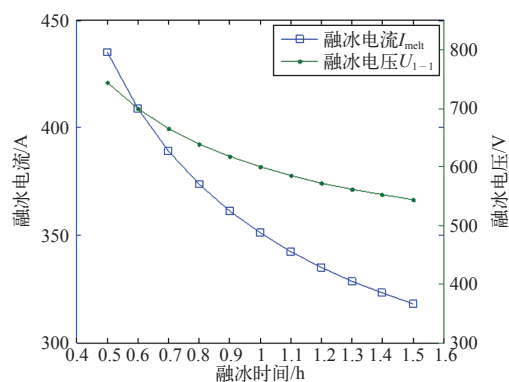
为了满足融冰电压和功率的要求,直流热力融冰装置的输出电压和功率设计应以“1-1(融冰电源一进一回接入)”融冰方式下的值为参考标准,融冰电压和融冰功率为

$$U_{1-1} = 2r_0 I_{1-1} \quad (9)$$

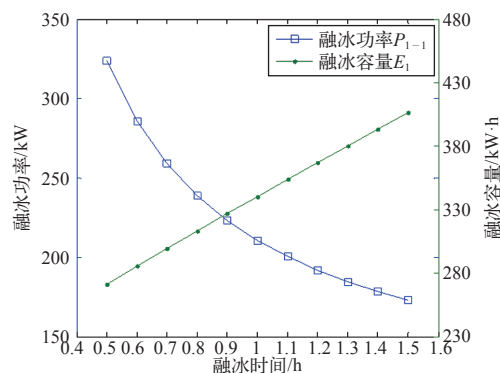
$$P_{1-1} = 2I_{1-1}^2 r_0 l \quad (10)$$

式中, U_{1-1} 为“1-1(融冰电源一进一回接入)”融冰电源接入方式下的直流融冰电压, V; P_{1-1} 为“1-1(融冰电源一进一回接入)”融冰电源接入方式下所需的融冰功率, kW。

根据上述选定的线路参数、环境条件以及融冰接入方式,计算得到移动式电池储能直流融冰装置的融冰电流、融冰电压、融冰功率及融冰容量与融冰时间的关系图如图6所示。



(a) 融冰电流、电压与融冰时间关系图



(b) 融冰功率、容量与融冰时间关系图

图6 融冰参数关系图

(2) 从装置系统成本角度考虑

直流融冰装置的功率、储能系统容量随融冰时间的变化趋势相反,存在一个融冰功率和容量的优化值使总成本最小。移动式电池储能直流融冰装置的监控系统和集装箱体等的成本相对固定,影响系统成本的主要因素为储能系统、双向变流器和直流变换器的成本。为了合理利用资源,需要优化选取功率和容量,使装置的成本最低化,同时功率和容量的选取还要受制于边界条件下的直流融冰需求。考虑影响成本的主要因素为储能系统、双向变流器和直流变换器的造价,

可得系统功率及容量的优化方程如式(11)所示,直流融冰电流是其约束条件,即

$$\begin{cases} F = P_r f_{PCS} + P_r f_{DC/DC} + f_b \max\left(\frac{P_r}{p_1}, \frac{C_1}{c_1}\right) \\ P_r = P_{1-1} = 2I_{1-1}^2 r_0 l \\ E_1 = 2I_{1-1}^2 r_0 l T_{1-1} + 1.5I_{1-2}^2 r_0 l T_{1-2} \\ I_{\min} < I_{1-1}, I_{1-2} < I_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中, F 为直流融冰装置的主要设备系统总成本,万元/kW; f_{PCS} 为单位功率的PCS价格,万元/kW; $f_{DC/DC}$ 为单位功率的DC/DC直流变换器价格,万元/kW; f_b 为单个电池箱的价格,万元/个; p_1 为单个电池箱的功率, kW; c_1 为单个电池箱的容量, kW·h。

同样,考虑在较为极端覆冰条件下移动式电池储能直流融冰装置具备满足C类供电区域针对中压线路的融冰能力,选取覆冰厚度为10 mm,单次融冰线路长度为4 km,线路型号为LGJ-120,环境温度为-4℃,风速为5 m/s。以此为边界条件,计算融冰装置所需的功率和容量,其余参数如表3所示。

表3 装置主要设备成本参数

直流变换器价格 (万元/kW)	磷酸铁锂电池箱 价格/(万元/个)	电池箱额定功率/kW、 容量/kW·h	PCS价格 (万元/kW)
0.3	2	3.456、7.603	0.3

通过计算,得到主要设备的总成本与额定功率的关系如图7所示。由图7可知,系统总成本存在一个最小值。根据式(11),可计算得到装置的主要成本对应融冰参数如表4所示。在“1-1(融冰电源一进一回接入),1-2(融冰电源一进两回接入)”方式下,“1-1”融冰时间为1.43 h、

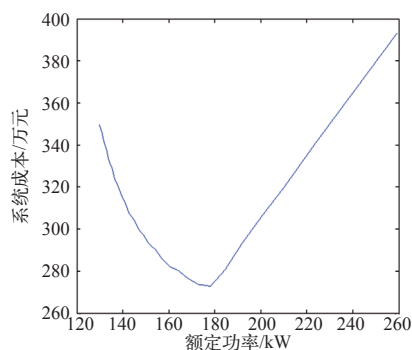


图7 主要设备的总成本与额定功率关系图

“1-2”融冰时间为0.819 h、“1-1”方式下融冰电压为549.40 V、直流融冰系统的额定功率为176.67 kW、容量为397.32 kW·h时,此时主要设备的总成本为最低。

表4 装置主要设备的总成本

额定电压 /V	“1-1”融冰 时间/h	“1-2”融冰 时间/h	功率/kW、 容量/kW·h	总成本 /万元
551.14	1.41	0.810	177.79、394.72	272.67
550.27	1.42	0.815	177.22、396.02	272.33
549.40	1.43	0.819	176.67、397.32	272.00
548.55	1.44	0.823	176.12、398.62	273.67
547.71	1.45	0.828	175.58、399.92	273.35

(3) 从电池储能系统角度考虑

电池储能系统放电过深会损伤电池,降低系统使用寿命,初步考虑在上述边界条件下,储能系统完成中低压三相线路融冰,SOC还有20%的预留量,系统效率为90%,对应上述容量为397.32 kW·h时,储能系统的容量为576.6 kW·h。磷酸铁锂电池箱内含3并12串的单体电池,单体电池的额定电压、容量和电压下限分别为3.2 V、66 A·h和2.5 V,单体电池的最大放电电流为180 A。

选取72个电池箱,每18个电池箱串联置于电池柜,将4个电池柜并联至图1所示的电池柜直流母线,母线电压下限为540 V,对应融冰功率为176.67 kW的单体电池的放电电流为27.3 A,单体放电电流不会越限。此时,储能系统的容量为547.4 kW·h。在上述条件下,移动式电池储能直流融冰装置完成中低压三相线路融冰,电池系统SOC剩余19%,不会引起放电过深,满足优化设计要求。在单次融冰线路长度为4 km、线路型号为LGJ-120、环境温度为-4℃及风速为5 m/s的边界条件下,移动式电池储能直流融冰装置可满足福建省中南部和北部海拔500~900 m冰区50年一遇的覆冰需求。

4 结束语

提出了移动式电池储能直流融冰装置的功率与容量的优化选取方法,分析了直流热力融冰接入方式、装置主要设备成本以及电池储能系统

放电深度对移动式电池储能直流融冰装置的功率和容量的优化选取要求。介绍了冰区分布的计算方法,以福建省山区为实例进行了冰区分布计算,福建省山区覆冰厚度随海拔高度变化比较明显,北部地区覆冰情况较中南部地区严重。为了在导则规定的时间内对配电网中压线路进行有效融冰,并且使融冰过程中消耗的总电量最小,直流热力融冰应采用“一进一回接入,一进两回接入”的接入方式;随融冰时长增加,基于移动式电池储能装置的直流热力融冰装置的功率、电池储能系统容量的变化趋势相反,存在一个功率和容量的优化值使系统主要设备的总成本最小。直流热力融冰电流值是影响移动式电池储能直流融冰装置的功率和容量选取的关键因素,根据边界条件和融冰时长要求,建立直流热力融冰控制方程,较为精确地计算直流热力融冰电流将是下一步研究的重点。

参考文献

- [1] 常浩,石岩,殷威扬,等.交直流线路融冰技术研究[J].电网技术,2008,32(5):1-6.
- [2] 饶宏,傅闯,朱功辉,等.南方电网直流融冰技术的研究与应用[J].南方电网技术,2008,2(5):7-12.
- [3] 张旭航,祝瑞金,周孔均,等.移动融冰装置在RTDS的仿真试验研究[J].华东电力,2008,36(10):48-51.
- [4] 杨加伦,朱宽军,刘彬,等.输电线路冰区分布图绘制关键技术[J].电力建设,2013,34(9):10-15.
- [5] 范瑞祥,孙旻,贺之渊,等.江西电网移动式直流融冰装置设计及其系统试验[J].电力系统自动化,2009,33(15):67-70.
- [6] 谭艳军,陆佳政,方针,等.基于调压整流的配网线路直流融冰方法及其装置研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(10):126-129.
- [7] Fan Y, Lin Y, Chen B, et al. Development of movable LiFePO₄ battery electric storage system to enhance rural power supply capability [C]. 2014 International Conference on Power System Technology, Chengdu, China, 2014: 3286-3295.
- [8] 杨加伦,朱宽军,刘彬,等.电网冰区分级方法研究[J].电力建设,2014,35(1):19-23.
- [9] 吴素良,范建勋,宋丽莉,等.陕西省冰区划分[J].电网技术,2010,34(4):152-157.
- [10] 蒋兴良,范松海,胡建林,等.输电线路直流短路融冰的临界电流分析[J].中国电机工程学报,2010,30(1):111-116.
- [11] 张文朝,韩奕,徐友平,等.电网过电流融冰运行方式可行性研究[J].电网技术,2009,33(20):54-58.
- [12] Vargas J V C, Bejan A, Dobrovicescu A. The melting of an ice shell on a heated horizontal cylinder [C]. Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer, 1994: 702-708.
- [13] 王大兴.电流融冰过程中导线表面温度特性及其影响因素的研究[D].重庆:重庆大学,2010.
- [14] 顾小松,王汉清,刘和云.覆冰导线融冰计算模型[J].中南大学学报:自然科学版,2010,14(5):2011-2016.
- [15] 中国南方电网公司.电网防冰融冰技术及应用[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [16] 刘泽洪.直流输电线路覆冰与防治[M].北京:中国电力出版社,2012.

(收稿日期:2016-01-15) **EA**

.....

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告