

山区农网中压线路直流融冰电流计算

针对福建省各地输电线路覆冰状况,介绍了概率统计方法、CRREL模型回归法和逐步回归法等福建冰区图绘制方法。通过融冰过程中的热平衡分析以及直流融冰模型,给出了输电线路直流融冰电流计算方法和具体的直流融冰方案。根据观察福建省主要冰区分布情况,以福建某一山区中压线路为例,结合基于移动储能装置的直流融冰系统,对该线路的直流融冰参数进行分析和计算,并讨论线路线径、线路长度、环境温度、风速和融冰厚度对直流融冰电流和融冰时间的影响。

黄桂兰^{1,2} 范元亮³ 林 韩⁴ 陈 彬³ 吴文宣⁴/1.福州大学电气工程与自动化学院 2.福建省电力有限公司技术中心 3.福建省电力有限公司电力科学研究院 4.福建省电力有限公司

0 引言

输电线路在冬季覆冰是电力系统的重大自然灾害之一。因覆冰引起的供电中断,甚至电网解列等事故,后果通常极为严重,修复工作难度大,花费时间长^[1]。在福建省的自然灾害中,线路覆冰灾害对电力系统造成的损害及后果是相对比较严重的。根据福建省的气候条件和地形特点,西北部地区时常出现覆冰灾害,虽然出现覆冰的范围较小,但也造成了相当严重的后果。目前,由于主网覆冰所带来的影响范围很广,程度较大,国内110 kV以上主网输电线路的融冰技术得到了深入研究。但是,对于35/10 kV电压等级的农网配电线路的融冰技术还存在明显的不足之处,并且该电压等级线路覆冰引起的线路故障会直接影响到居民的用电可靠性。因此,针对福建山区中压线路的覆冰情况,计算山区农网中压线路直流融冰过程中所需的融冰电流和融冰容量,为中压线路直流

融冰技术的具体应用提供依据。

1 直流融冰系统

所述中压线路直流融冰系统采用基于移动锂离子电池的储能装置,每套储能装置均包含有蓄电池组、双向变流器、直流变换器、监控系统、配电柜以及将这些设备组装在一起的集装箱体。该直流融冰系统可工作在并网充电模式及融冰模式,同时其可完成一套或多套储能装置并联运行完成融冰工作,每套系统的具体组成结构如图1所示。

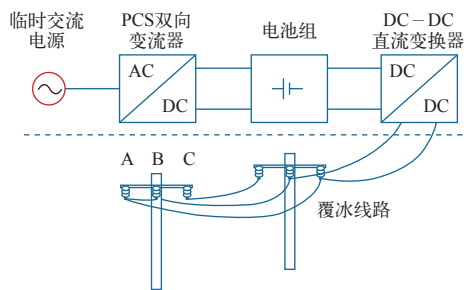


图1 移动储能直流融冰系统结构图

2 福建山区线路覆冰情况

福建省地理纬度虽然较低,但是南方的暖湿气流相对活跃,当冬季冷空气与南方暖湿气流在福建省上空交汇时,通常伴有一次降水过程。当冷暖气流势力都比较强时,锋区长时间维持在上空,导致出现持续的低温冻雨天气并形成冰冻灾害。尤其是福建西部和中部两座大山脉的海拔高度相对较高,也会出现较严重的线路覆冰灾害,如南平光泽、浦城和邵武等地,处于武夷山山脉段,存在大量山谷地貌,海拔相对较高,每年都有发生线路覆冰的情况。



黄桂兰/硕士研究生

关键词/Keywords

福建山区·
冰区图·
直流融冰·
融冰电流·

福建省冰区分布图一般按照30年、50年和100年重现期分别进行绘制。冰区绘制主要根据福建气象观测记录、气象灾害调查结果、数学统计方法、各地区实际情况和电网公司运行经验等。针对不同情况,不同重现期冰区划分方法有以下几种。

1) 当某处的观冰数据年代序列足够长,即大于等于30年时,可直接根据概率统计的方法确定不同重现期的覆冰厚度。概率分布模型采用极值I型分布^[2],计算公式为

$$b_T = \bar{b} - \frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0.57722 + \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right\} \sigma_{n-1} \quad (1)$$

其中

$$\bar{b} = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{N}$$

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum (b_i - \bar{b})^2}{n-1}}$$

式中, b_T 为重现期标准冰厚, mm; $\bar{b}$ 为冰厚平均值, mm; σ_{n-1} 为标准方差, mm; T 为规定的重现期, 通常取30年、50年和100年; b_i 为电力线标准冰厚, mm; N 为样本总数。

2) 当观冰数据的年代序列较短,但是具有较为详细的历史气象记录,可利用CRREL模型回归计算历史覆冰冰厚。拓展年代序列后可利用式(1)进行各站点不同重现期冰厚计算。CRREL模型公式^[3]为

$$R_{eq} = \frac{t}{\rho\pi} \left[(P\rho_0)^2 + (3.6VW)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中, R_{eq} 为等效覆冰厚度, mm; t 为冻雨过程的时间, h; P 为过程降水率, mm/h; ρ_0 为水的密度, 1 g/cm³; ρ 为雨淞的密度, 0.9 g/cm³; V 为风速, m/s; W 为液态水含量, g/m³, 根据经验公式得到, $W = 0.067P^{0.846}$ 。

3) 当观冰数据的年代序列较短,但是具有较为详细的与覆冰形成相关的气象因子和地理因子资料时,可利用逐步回归法建立导线覆冰厚度与气象因子的回归模型,并将确定的回归模型运用到本地区地面气象观测站的历史观测资料回算上,从而确定地面气象观测站所在位置的历史覆

冰冰厚序列^[4]。通过逐步回归法拓展年代序列后可利用式(1)进行各点不同重现期冰厚计算。

依据实测及模型拟合结果得到福建中南部山区和北部山区不同海拔高度下冰区分布情况如表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,福建北部山区覆冰情况较中南部地区严重。

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
15~20	900以上	800~1 000	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 直流融冰电流计算

目前,电网应用于线路融冰最常用的方法为热力学融冰^[5-6],其主要原理是将电能转化为热能来达到融冰的效果,因此必须对融冰过程中的热平衡问题进行分析。根据国内外对融冰过程的许多研究可知,融冰过程可分为以下两个阶段^[7]: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。当导线表面冰层厚度为零时,冰的自重将大于和导线表面接触的冰层的剪应力,冰筒将从导线上脱落。融冰具体过程如图2所示。

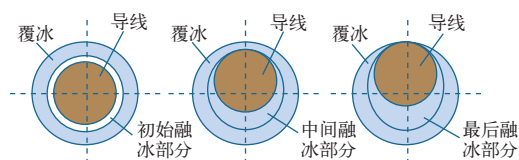


图2 融冰过程

假设在融冰过程中外界条件不发生改变,冰层内表面的温度始终为0℃,并考虑融冰时间较短,忽略新增的覆冰,但将融冰过程中的对流和辐射传热等动态因素都考虑在内,则其在融冰过程中的热平衡方程如式(3)所示。即在融冰过程中,融冰电流产生的焦耳热主要作用包含4个部分:冰溶解成水的相变潜热;冰层温度上升所需的热量;冰表面对流散热;冰表面的辐射散热^[8-9],即

$$I^2 R_T = P_F + P_i + P_C + P_R \quad (3)$$

式中, $I^2 R_T$ 为融冰电流产生的焦耳热; P_F 、 P_i 分别为冰溶解的相变潜热和冰层融化所需热量; P_C 、 P_R 分别为对流和辐射耗散的热量。

将式(3)中的导热、对流和辐射传热等动态因素折算为等效热阻,可得到Q/GDW 716—2012《输电线路电流融冰技术导则》中所述的直流融冰电流计算公式,即

$$I_{\text{melt}} = \sqrt{\frac{10g_0db + \frac{0.045g_0D^2}{R_{T0} + R_{T1}} \left(R_{T1} + 0.22 \frac{R_{T0}}{\lg \frac{D}{d}} \right) \Delta t}{T_{\text{melt}} R_0} + \frac{\Delta t}{R_{T0} + R_{T1}}} \quad (4)$$

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

由式(3)可知,融冰时间越小,对融冰电流要求越大,进而会导致融冰装置的直流输出电压过高。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。定义最小融冰电流为:该融冰电流流过导线产生的焦耳热通过冰层传递至冰面,并全部通过辐射和对流散失到空气中,使冰层处于将要融化的临界状态,计算公式如式(5)所示;定义最大融冰电流为:加热导线使其导线

温度上升到90℃的融冰电流,其计算公式如式(6)、式(7)所示^[10-11]。

$$I_{\text{min}} = \sqrt{\frac{\Delta t}{R_0(R_{T0} + R_{T1})}} \quad (5)$$

当风速>2 m/s时

$$I_{\text{max}} = \sqrt{\left[7.24 \left(\frac{318 + 0.5t_2}{1000} \right) \sum i d + 0.7 \left(\frac{Vd}{2} \right)^{\frac{3}{4}} (90 - t_2) \right] / R_{90}} \quad (6)$$

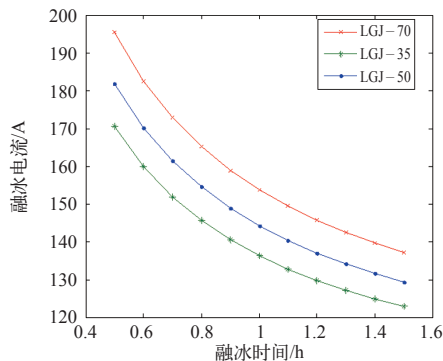
当风速≤2 m/s时

$$I_{\text{max}} = \sqrt{\left[0.0314d \left[2 \sum i (1 + 0.01t_2) + 5.1 \left(\frac{1}{d} \right)^{\frac{1}{4}} (90 - t_2)^{1.3} \right] \right] / R_{90}} \quad (7)$$

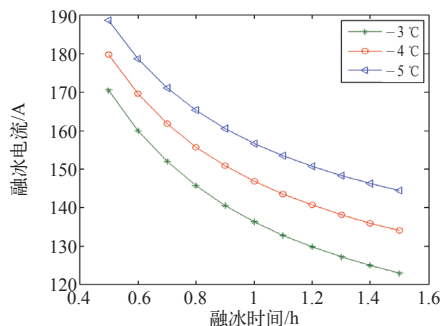
式中, I_{min} 为最小融冰电流,A; R_{90} 为90℃时导线的单位长度电阻,Ω/m; I_{max} 为最大融冰电流,A; t_2 为外界温度,℃; V 为风速,m/s; $\sum i$ 为辐射系数。

由式(4)可知,线路线径、环境温度、风速和覆冰厚度均对融冰电流有影响。为研究融冰电流的规律,计算外界条件与直流融冰电流的关系,如图3所示。

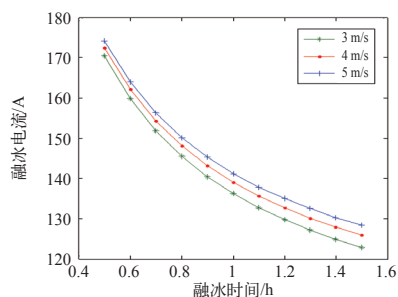
1) 融冰电流与线路线径关系。在风速为3 m/s、



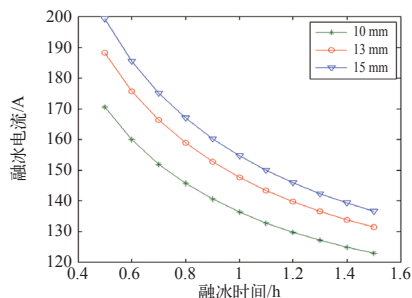
(a) 导线线径对融冰电流的影响



(b) 环境温度对融冰电流的影响



(c) 风速对融冰电流的影响



(d) 覆冰厚度对融冰电流的影响

图3 融冰电流与融冰时间的关系图

冰厚为10 mm以及环境温度为 -3°C 的条件下,线路线径对融冰电流的影响如图3a所示,线径越大,线路电阻越小,则所需的融冰电流越大。

2) 融冰电流与环境温度关系。由图3b可知,环境温度对于融冰电流的影响很大。在冰厚为10 mm、风速为3 m/s、导线型号为LGJ-35以及融冰时间相同的条件下,环境温度每下降 1°C ,线路融冰电流需要增加10 A以上。

3) 融冰电流与风速关系。由图3c可知,风速对于融冰电流的影响总体较缓,其影响程度随融冰时间增加而增大。风速越大,融冰电流越大。

4) 融冰电流与覆冰厚度关系。由图3d可知,覆冰厚度对于融冰电流的影响很大,对LGJ-35型导线的计算表明,环境温度为 -3°C ,风速为3 m/s时,覆冰厚度每增加3 mm,则融冰电流需增加15~20 A。

综上所述,线路线径、覆冰厚度及环境温度对融冰电流的选取影响较大。

4 实例分析

福建省南平地区地处崇山峻岭,大部分农网中压配电线路处于600 m以上的相对高海拔地区,

高差大,坡向、温度和湿度变化大等因素造成局部微气象区域,特别是每年12月份至次年1月份受冷空气南下影响,极易产生覆冰。根据南平光泽县止马镇覆冰情况的实地调研结果,选取止马镇双坑村的一段10 kV中压输电线路为例,线路处于福建北部武夷山脉段,海拔高度约为600 m,考虑30年一遇的重现期,由表1所示的冰区情况可知,该段线路的覆冰厚度为10 mm左右。因此以该段线路覆冰厚度为10 mm为例,计算其直流融冰电流及所需融冰容量,其他具体参数如表3所示。

表3 融冰线路参数

线路电压等级/kV	线路型号	线路长度/km	覆冰厚度/mm	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	风速/(m/s)
10	LGJ-35	4.4	10	-3	3

为了合理利用融冰系统的存储容量以及节省融冰时间,选用的直流融冰实现方法为:首先将融冰线路的三相末端短接,A、B两相的首端接入直流融冰电源,即“1-1”融冰方式;待A、B两相完成融冰后,再将A、B两相并联,融冰电源一端接入两相并联端,另一端接入C相首端,对C相进行融冰,即“1-2”融冰方式;两次操作后即可完成一段线路的融冰,具体接入示意图如图4所示。

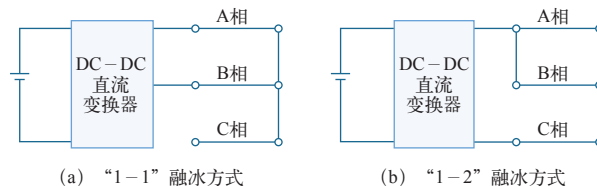


图4 融冰系统接入示意图

根据直流融冰方案,在融冰电流确定后,可确定上述两种融冰方式下的融冰电压分别为

$$U_{1-1} = 2r_0 I_{\text{melt}1} \quad (8)$$

$$U_{1-2} = 1.5r_0 I_{\text{melt}2} \quad (9)$$

式中, U_{1-1} 为“1-1”融冰方式下的直流融冰电压,V; U_{1-2} 为“1-2”融冰方式下的直流融冰电压,V; $I_{\text{melt}1}$ 、 $I_{\text{melt}2}$ 分别为两种融冰方式下的直流融冰电流,A; l 为融冰线路的长度,km; r_0 为输电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。

两种融冰方式下的直流融冰系统所需的功率分别根据式(10)、式(11)进行计算。

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

$$P_{1-2} = 1.5I_{\text{melt}2}^2 r_0 l \quad (11)$$

式中, P_{1-1} 为“1-1”融冰方式下所需的融冰功率, kW; P_{1-2} 为“1-2”融冰方式下所需的融冰功率, kW。

4.1 考虑两种融冰方式下的融冰时间一样

在这种情况下, 通入的直流融冰电流也一样, 则其对应直流融冰电能量为

$$E = (P_{1-1} + P_{1-2})T_{\text{melt}} = 3.5I_{\text{melt}}^2 r_0 l T_{\text{melt}}$$

$$= 3.5I \left[10g_0 db + \frac{0.045g_0 D^2}{R_{T0} + R_{T1}} \left(R_{T1} + 0.22 \frac{R_{T0}}{\lg \frac{D}{d}} \right) \Delta t + \frac{T_{\text{melt}} \Delta t}{R_{T0} + R_{T1}} \right] \quad (12)$$

式中, E 为融冰系统所需电能量, kW·h; T_{melt} 为对应融冰时间, h。

以表3中已知的融冰线路参数及环境条件为例, 计算融冰过程中的电流、电压和功率等参数, 结果如表4所示。由于两种融冰方式下的融冰电流和融冰时间一样, 为了满足融冰电压和功率的要求, 融冰设备直流输出电压和功率设计应以“1-1”融冰方式下的值为参考标准。因此, 表4所得出的融冰电压和融冰功率均为“1-1”融冰方式下的计算值。

表4 融冰计算参数

最大/最小 融冰电流/A	融冰电流/A	单次融冰 时长/h	功率/kW/ 容量/kW·h	融冰直流 电压/V
266.81/89.95	170.5	0.5	195.6/171.2	1 147.6
	151.9	0.7	155.3/190.2	1 022.5
	140.5	0.9	132.9/209.3	945.8
	132.7	1.1	118.6/228.4	893.7
	127.1	1.3	108.8/247.4	855.7
	122.8	1.5	101.5/266.5	826.7

假设用一套125 kW/500 kW·h的储能装置对该段线路进行除冰, 考虑电池储能系统放电深度为55%, 系统放电效率为90%, 则该系统实际可用容量为

$$E = 500 \text{ kW} \cdot \text{h} \times 0.9 \times 0.55 = 247.5 \text{ kW} \cdot \text{h} \quad (13)$$

在上述条件下, 为了使系统的功率和容量均能满足线路融冰要求, 单次融冰的时间可根据图5进行确定, 即单次融冰时间在1.003~1.305 h范围内时, 及两次融冰时间在2.006~2.610 h范围内时, 系统能满足该段覆冰为10 mm的线路除冰的要求。

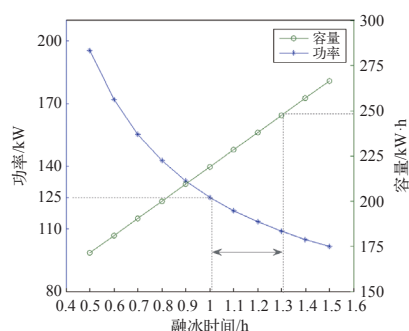


图5 融冰时间的选择

不同温度下的融冰功率、容量与融冰时间的关系图如图6所示。

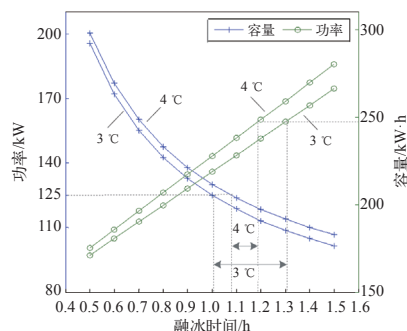


图6 融冰时间的选择（不同环境温度）

由图6可知, 为了使上述系统的功率和容量均能满足融冰要求, 温度越高, 融冰时间的选择范围越小。

4.2 考虑两种融冰方式下融冰时间不一样

由式(4)、式(12)可知, 融冰时间越小, 融冰电流越大, 则融冰所需的电能量越小。又由式(10)、式(11)可知, 在相同的系统功率下, 第2种融冰方式所需的融冰电流较第1种融冰方式大, 则其所消耗的电能量较小。

因此, 在满足功率要求的条件下, 第2种融冰方式下的融冰时间可以选得较第1种小, 此时融冰所消耗的总电能量比两种融冰方式下融冰时间一

样的情况小。

5 结束语

通过介绍福建省冰区图绘制方法,分析福建山区农村配电网线路的基本覆冰状况。应用基于移动储能装置的直流融冰方法解决线路覆冰问题,介绍基于移动储能装置的直流融冰模型和融冰电流的计算方法,分析不同参数对线路融冰电流的影响。最后,根据对福建省光泽县的实际调研结果,选取该地山区的一段10 kV输电线路为例,计算该段覆冰线路实际融冰过程中所需的直流融冰电流和电能量。融冰装置在该调研地的示范应用问题将在后续研究中讨论。

参考文献

- [1] 姚致清,刘涛,张爱玲,等.直流融冰技术的研究及应用[J].电力系统保护与控制,2010,38(21):57-62.
- [2] 陆佳政,张红先,彭继文,等.基于概率I型分布模型的湖南地区电网覆冰重现期计算[J].高电压技术,2012,38(2):464-468.
- [3] Kathleen F, Neal L, Ronald T. Extreme ice thicknesses from freezing rain [R]. New Hampshire: American Lifelines Alliance, 2004.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [11] 姚致清,刘涛,张爱玲,等.直流融冰技术的研究及应用[J].电力系统保护与控制,2010,38(21):57-62.
- [12] 陆佳政,张红先,彭继文,等.基于概率I型分布模型的湖南地区电网覆冰重现期计算[J].高电压技术,2012,38(2):464-468.
- [13] Kathleen F, Neal L, Ronald T. Extreme ice thicknesses from freezing rain [R]. New Hampshire: American Lifelines Alliance, 2004.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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:2015-06-19) **EA**

(上接第55页)

- [11] 金鹏,艾欣,许佳佳.基于序列运算理论的孤立微电网经济运行模型[J].中国电机工程学报,2012,32(25):52-59.
- [12] 叶承晋,黄民翔,王焱,等.基于离散概率模型的风光互补供电系统优化配置[J].电力系统自动化,2013,37(6):48-54.
- [13] 陈洁,杨秀,朱兰,等.不同运行调度模式下微网经济运行对比分析[J].电力自动化设备,2013,33(8):106-113.
- [14] 李牧青,宋依群,严正,等.电动汽车代理商的博弈竞争模型和算法研究[J].电网技术,2014,38(6):1512-1517.
- [15] 牛利勇,时玮,姜久春,等.纯电动汽车用磷酸铁锂电池的模型参数分析[J].汽车工程,2013,35(2):127-132.

35(2):127-132.

- [16] 时玮.动力锂离子电池组寿命影响因素及测试方法研究[D].北京:北京交通大学,2014.
- [17] 高飞,杨凯,惠东,等.储能用磷酸铁锂电池循环寿命的能量分析[J].中国电机工程学报,2013,33(5):41-45.
- [18] 李智鹏.磷酸铁锂电池荷电状态估算方法研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [19] 熊信银.遗传算法及其在电力系统中的应用[M].武汉:华中科技大学出版社,2004.
- [20] 高元海,王淳.无重访遗传算法及其在输电网络规划中的应用[J].中国电机工程学报,2013,33(4):110-117.

(收稿日期:2015-07-06) **EA**