

基于多分量融合的调度端小电流接地选线策略

许鹏, 汤俊, 杨湘, 胡雅琴, 周杨

(国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610041)

摘要:针对中性点不接地的配电系统站端接地选线方式投资大、维护成本高, 零序电流采样监测运行维护困难的问题, 提出一种基于多分量融合的调度端小电流接地选线方法。首先, 在现有调度自动化系统监测数据集中, 针对性分析了对接地故障较为敏感的单分量特征及其影响因素; 其次, 综合考虑实际运行可靠性和判断准确性, 提出了基于三角模融合的接地选线判据; 进而通过归一化计算各线路接地概率, 实现在调度端远程的故障线路准确选线; 最后, 通过在某电力公司实际部署基于所提方法的小电流接地选线功能模块进行实测验证。运行结果显示, 所提方法具有良好的选线成功率, 能够较好支撑调度端的远程故障定位, 具有较高的推广价值。

关键词:无功功率及电流变化量; 电力系统; 配电线路; 调度主站端接地选线; 中性点不接地接地系统

中图分类号: TM72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2021)03-0076-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20210314

Selection Scheme of Small Current Grounding Line at Dispatching Terminal Based on Multi-component Fusion

Xu Peng, Tang Jun, Yang Xiang, Hu Yaqin, Zhou Yang

(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: In view of the shortcomings of large investment, high maintenance cost and difficult monitoring of zero-sequence current sampling, a selection scheme for small current grounding line at dispatching terminal based on multi-component fusion is proposed, and a new criterion of grounding line selection is obtained through theoretical analysis. A small current grounding line selection module based on the criterion is deployed in a power company. The actual operation results show that the proposed line selection strategy is correct in theory and has a high success rate, which has a high popularization value.

Key words: reactive power and current variation; power system; distribution line; dispatching main station grounding line selection; neutral ungrounded grounding system

0 引言

中国 10~35 kV 配电网系统大多采用中性点非有效接地方式, 即不接地或经消弧线圈接地的小电流接地系统。对小电流接地系统故障统计发现, 单相接地故障的概率高达 80%^[1], 远远高于相间故障。同时, 接地故障的精准高效处理对于同沟道电缆起火和森林草原火灾等隐患的防范具有重要意义^[2]。

目前, 国内外对小电流接地选线理论研究较多, 主要可根据部署方式的不同分为厂站端分析和调度主站端分析两大类。目前厂站端分析计算所采用的

算法包括: 1) 基于零序电力为主的稳态故障信号分析, 如零序电流幅值比较法^[3]、零序电流方向保护法^[4-5]等; 2) 基于暂态故障信号分析, 如零序电流暂态量选线法^[6-13]、暂态相电流选线法^[14]、小波分析选线法^[15-20]等。基于厂站端数据的选线理论及装置开发已相对成熟, 成功率较高^[21], 但该方法在实际工程应用中, 存在装置部署成本高、建设工期长的显著问题, 实际的推广效果十分有限。调度端由于受到数据传输、存储和处理能力的影响, 其分析方法相对较少, 主要以远程采样的零序电流幅值变化作为判定依据^[22]。但就目前的实践环境而言, 零序电流特征的可靠性难以保证: 1) 零序电流需进行单独

采样,目前大部分地区的实际零序电流采样覆盖率不到50%,因而需在每个发电厂及变电站安装独立的选线装置并完善各支路的零序回路,投资及运行维护成本高;2)配电网线路正常运行时,零序电流几乎为0,无有效手段实时监测零序采样回路的正确性,从而经常出现零序采样CT故障或接线错误导致选线失败现象。

鉴于此,提出多分量融合的调度端小电流接地选线策略,基于馈线电流及无功功率的变化量,构建融合优化选线指标,以提升小电流接地故障定位及处理效率。该方法的数据基础为调度主站端的馈线电流及无功功率,属于实时校验的系统状态估计参量,具有良好的可靠性,同时通过融合指标的构建有效提升了选线的准确性,具有良好的实践应用价值。

1 接地故障单分量影响分析

1.1 电流分量变化机理

图1为典型的10 kV小电流接地系统接线图。当某线路A相接地后,A相电压为0,B、C相电压升高为线电压,由于有对地电容存在,该站所有出线B、C相对地电容电流 I_{cb} 、 I_{cc} 汇集到变压器绕组,流入A相接地点,故接地点电容电流 $\vec{I}_{c0a} = \vec{I}_{cb} + \vec{I}_{cc}$ 。

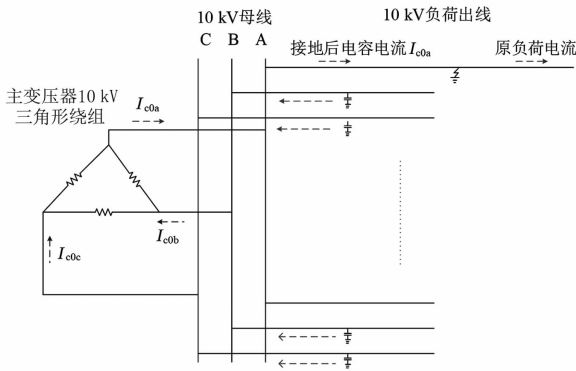


图1 小电流接地接线

设 I_{fh} 为负荷电流,以图1中电流方向为正向,B、C相对地电容电流 I_{cb} 、 I_{cc} 分别滞后于接地后B、C相对地电压 90° ,矢量相加后得到接地点电容电流 I_{c0a} ,其相位超前于原A相电压 90° ,如图2所示。10 kV负荷线路多属于电阻类负荷,功率因数角 θ 较小,故接地后的相电流 $\vec{I}_{ph} = \vec{I}_{fh} + \vec{I}_{c0a}$ 幅值将大于负荷电流 I_{fh} ,如图3所示。图中, I_{fh} 为故障前电流; I_{ph} 为故障后电流; I_{c0a} 为接地产生产电容电流。

对于非接地线路而言,由于A相电压为0,A相

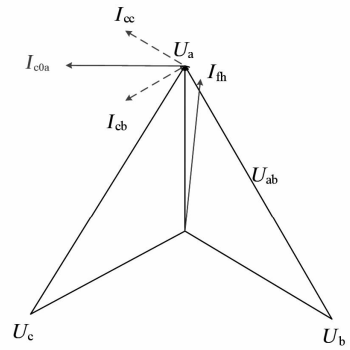


图2 接地后电流电压矢量图

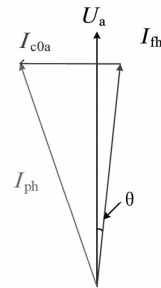


图3 接地前后电流变化矢量图

对地电容电流为0,因此,非接地线路A相电流变化很小。鉴于此,可以将线路接地前后的相电流变化量作为选线的判决指标之一。

值得注意的是,根据图3中向量关系可以看出,当电容电流 I_{c0a} 一定时,则接地线路相电流变化量为

$$|I_{ph}| - |I_{fh}| = \sqrt{(I_{fh} \cos \theta)^2 + (I_{c0a} - |I_{fh}| \sin \theta)^2} - |I_{fh}| \quad (1)$$

对式(1)求 $|I_{ph}|$ 的导数,得

$$\begin{aligned} & (|I_{ph}| - |I_{fh}|)' \\ &= \frac{(I_{fh} - I_{c0a} \sin \theta) - \sqrt{(I_{fh} - I_{c0a} \sin \theta)^2 + I_{c0a}^2 \cos^2 \theta}}{\sqrt{(I_{fh} \cos \theta)^2 + (I_{c0a} - |I_{fh}| \sin \theta)^2}} < 0 \end{aligned}$$

因此故障前负荷电流 I_{fh} 越大,接地线路相电流变化量将越小,即相电流变化越不明显。若仅将相电流变化量指标作为唯一判据,对于负载较大线路接地情况的判定存在一定的局限性。

1.2 无功功率分量变化机理

为避免线路本身原始电流差异性的影响,考虑引入负荷线路的无功功率变化量作为判据之一,其理论上的具体变化量推导计算如下。

目前,10 kV出线基本上都采用两表法测量瞬时功率为

$$\begin{aligned}
S_0 &= U_a I_a + U_c I_c + U_b I_b \\
&= U_a I_a + U_c I_c + U_b (-I_a - I_c) \\
&= (U_a - U_b) I_a + (U_c - U_b) I_c \\
&= U_{ab} I_a + U_{cb} I_c \quad (2)
\end{aligned}$$

当 A 相发生单相接地后,由于有接地电容电流的存在,A 相 CT 测量到的电流为接地后的相电流 $I_{ph} = I_a + I_{c0a}$,其中 I_{c0a} 为流过接地点的电容电流,此时两表法测得的功率为

$$\begin{aligned}
S_1 &= U_{ab} (I_a + I_{c0a}) + U_{cb} I_c \\
&= U_{ab} I_a + U_{cb} I_c + U_{ab} I_{c0a} \quad (3)
\end{aligned}$$

$$\Delta S = S_1 - S_0 = U_{ab} I_{c0a}$$

式中, $U_{ab} I_{c0a}$ 即为接地电容电流产生的功率,即接地前后功率的变化量。由图 2 可以看出, U_{ab} 滞后 I_{c0a} 60° ,即接地电容电流产生的无功功率为

$$\begin{aligned}
\Delta Q &= \Delta S \sin \theta \\
&= U_{ab} I_{c0a} \sin(-60^\circ) \\
&= -\frac{\sqrt{3}}{2} U_{ab} I_{c0a} \quad (4)
\end{aligned}$$

从式(4)可以看出: U_{ab} 为母线线电压,接地前后不发生变化,其值为 10 kV,因此,接地线路的无功功率变化量仅由接地点电流 I_{c0a} 决定,与负荷大小无关,接地点电流越大,无功功率变化越大。非接地线路的无功功率变化仅由本线路对地电容电流决定,其无功功率变化量将远小于接地线路。

2 基于三角模融合的 IQ 综合选线法

根据上述单分量影响分析结果,考虑单分量的偶然性和各分量的判定局限性,为综合评价各线路发生故障的概率特性,平衡电流变化量指标的线路负载影响局限性和无功功率变化量指标的幅值限定性,提出一种基于三角模融合的主站端 IQ 综合接地选线判定策略,其具体的实现过程如下:

1) 通过归一化处理,保证两项指标的可融合性,克服无功功率变化的幅值限定性。

$$\begin{aligned}
\lambda_i &= \frac{|\Delta I_i|}{\sum |\Delta I|} \\
\mu_i &= \frac{|\Delta Q_i|}{\sum |\Delta Q|} \quad (5)
\end{aligned}$$

式中: λ_i 为电流变化量指标; μ_i 为无功功率变化量指标; $|\Delta I_i|$ 为第 i 条线路的电流变化量; $|\Delta Q_i|$ 为

第 i 条线路的无功功率变化量; $\sum |\Delta I|$ 为所有出线电流变化量之和; $\sum |\Delta Q|$ 为所有出线无功功率变化量之和。

2) 构建三角模融合算子,对多分量进行融合分析,利用三角模算子的同向相加性和反向调和性,实现对各线路接地概率的综合评价计算。其具体计算式为

$$F(\lambda_i, \mu_i) = \frac{\lambda_i \cdot \mu_i}{1 - \lambda_i - \mu_i + 2 \times \lambda_i \cdot \mu_i} \quad (6)$$

式中, $F(\lambda_i, \mu_i)$ 为第 i 条线路的融合判据。

则每条线路最终的接地概率为

$$P_i = \frac{F(\lambda_i, \mu_i)}{\sum F(\lambda, \mu)} \times 100\% \quad (7)$$

式中: P_i 为第 i 条线路的接地概率; $\sum F(\lambda, \mu)$ 为所有线路的融合判据和。

3 实施案例

根据所提出的主站端接地选线判据,在某电力公司调度控制主站系统上成功部署 IQ 综合选线法。各变电站与调度端通信采用 IEC-104 规约,主站根据母线相电压变化来判断接地相,为保证数据的准确性,电流及无功功率采用接地前 20 s、接地后 30 s 的数据计算变化量。在过去 1 年中,该功能已累计完成数百次的故障选线决策,在受实际环境干扰和采集质量影响的情况下,选线准确率依然可达 90% 以上,这里以实际案例结果来分析 IQ 综合选线法的计算结果。

3.1 实例 1: 2018 年 11 月 23 日 11:33 成都天华站天寿路接地

天华站出现接地后,计算程序启动,于 11:33 给出计算结果,如表 1 所示。

表 1 天华站接地故障实测结果

线路	$\Delta I/A$	$\Delta Q/Mvar$	归一化 $\Delta I/A$	归一化 $\Delta Q/Mvar$	融合 判据	接地 概率/%
天寿路	27.2	0.31	0.76	0.54	0.79	78.8
天镇路	8.4	0.27	0.24	0.46	0.21	21.2

可以看出 IQ 综合选线法给出天寿路故障概率为 78.8%,天镇路接地故障概率为 21.2%,调度员根据 IQ 综合选线结果拉开 941 天寿路断路器,母线接地信号复归,证明确实是 941 天寿路发生接地,

与 IQ 综合选线法判断结果一致,其执行及状态反馈过程如图 4 所示。



图 4 天华站接地故障后执行及状态反馈过程

3.2 实例 2:2018 年 12 月 3 日 10:40 成都繁江站江城四路接地

繁江站出现接地后,计算程序启动,于 10:41 给出计算结果,如表 2 所示。

表 2 繁江站接地故障实测结果

线路	$\Delta I/A$	$\Delta Q/Mvar$	归一化 $\Delta I/A$	归一化 $\Delta Q/Mvar$	融合 判据	接地 概率/%
江城四路	9.6	0.29	0.27	0.51	0.28	80.5
江利二路	9.6	0.05	0.27	0.088	0.03	10.0
江水路	3.2	0.1	0.09	0.175	0.02	6.0
江安路	4.8	0.01	0.13	0.018	0.003	0.8
江流二路	1.6	0.03	0.04	0.053	0.003	0.8
江城二路	1.0	0.04	0.03	0.070	0.002	0.6
江竹路	2.4	0.02	0.07	0.035	0.003	0.8
江尚路	1.2	0.01	0.03	0.018	0.001	0.2
江菜路	2.4	0.01	0.07	0.018	0.001	0.4
江食路	0	0	0	0	0	0
江桥路	0	0.01	0	0.018	0	0
江金路	0	0	0	0	0	0
电容四路	0	0	0	0	0	0
电容三路	0	0	0	0	0	0

可以看出 IQ 综合选线法给出江城四路故障概率为 80.5%,远高于其他线路,故判断江城四路发生接地故障,调度员根据 IQ 综合选线结果拉开 910 江城四路断路器,母线接地信号复归,证明确实是 910 江城四路发生接地,与 IQ 综合选线法判断结果一致,其执行及状态反馈过程如图 5 所示。

3.3 实例 3:IQ 综合选线法与零序幅值选线法对比

2018 年 12 月 27 日 02:34 成都光辉站 905 光农路接地。光辉站接地故障实测结果如表 3 所示。从零序幅值选线法可以看出光农路零序电流最大,为



图 5 繁江站接地故障后执行及状态反馈过程

29.76 A,而该线路在 IQ 综合选线法排序中的接地概率计算为 94.61%,排序第一,可见两种方法虽然对于其他正常线路存在一定的排序差异,但对于接地线路的判断结果一致,也证明了所提方法判定的准确性。

而在实际拉开光农路断路器后,母线接地信号复归,证明确实是光农路发生接地,与判断结果一致,其执行及状态反馈过程如图 6。

表 3 光辉站接地故障实测结果

线路	归一化 $\Delta I/A$	归一化 $\Delta Q/Mvar$	融合 判据	接地 概率/%	I_0/A	I_0 排序
光农路	0.357	0.837	0.741	94.6	29.76	1
光和路	0.286	0.070	0.029	3.7	9.28	3
光友路	0.357	0.023	0.013	1.7	7.2	4
光安路	0	0.070	0	0	9.6	2
光园路	0	0	0	0	3.2	5

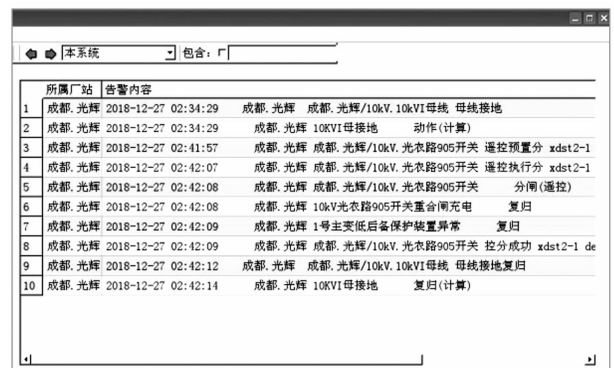


图 6 光辉站接地故障后执行及状态反馈过程

4 技术适应性分析

除常规的中性点不接地或小电阻接地系统外,所提方法对于经大过渡电阻接地和经消弧线圈接地的系统亦具有一定的指导意义。

对于经大过渡电阻接地的情况,由于接地电阻

的增大,故障后的特征量均会相应受到一定程度的削弱,故障量特征会体现得较不明显。所提方法中,通过多分量融合过程中的算子归一化处理,一定程度上放大了高阻接地情况下的故障量特征,提升了算法对于大过渡电阻接地系统的适应性。极端情况下,若经高阻接地后故障量值已低于采集精度,则存在方法局限性,需依靠现场更加精密的采集设备实现甄别。

对于经消弧线圈接地的情况,由于消弧线圈补偿的作用影响,可能导致故障相的相关特征量与常规情况产生较大差异,甚至出现过补偿情况。针对这一场景,所提方法的适应性体现为相对变化量的判定。接地发生后,第一次线路判定中可能会存在因补偿量影响而导致的判定失误,但此时若拉开任何一条线路,接地线路故障特征的相对变化量会呈现出显著的差异性,即可准确判定接地线路,其原理与基于零序电流判定的方法一致^[22]。相对而言,这一方法的局限性在于第一次线路判定过程中往往可能发生误判,存在一定的“试拉”风险。针对这一问题,后续将针对经消弧线圈接地系统的线路识别开展基于历史数据学习的选路方法,提升第一次选路环节的正确率。

5 结 语

上面提出了一种基于无功功率及电流变化量融合的调度端小电流接地选线策略,相对于常规的选线方案,所提出的选线策略具有以下显著优势:

1) 基于调度主站端无功功率及电流采集量开展,具备状态估计实时校验的基础数据采样准确性支撑,且相对于常规选线方法,无需新增采样监测设备,投资及维护成本低,具备良好的可推广性;

2) 以多分量的三角模融合算法实现了对电流变化量和无功功率变化量指标的综合判定,在保留各指标有效特征的同时,抑制其局限性,综合提升判定可靠性及准确性;

3) 通过在某电力公司调度端实际部署 IQ 综合选线法小电流接地选线模块,通过长期检验证明了其理论正确性和实践有效性,大大缩短了单相接地

故障处理时间,提高了单相接地故障的处理速度和准确性。

参考文献

- [1] Hanninen E, Lehtone M. Characteristics of Earth Faults in Electrical Distribution Networks with High Impedance Earthing [J]. *Electric Power System Research*, 1998(44):155-161.
- [2] 唐轶. 选择性漏电保护[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1995.
- [3] 王新超, 张玉海. 零序电流比例增量法在小电流接地故障选线中的应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(20):125-130.
- [4] Baldwin T, Renovich F. Fault Locating in Ungrounded and high-resistance Grounded Systems [J]. *IEEE Transactions on Industry Application*, 2001, 37(4):1152-1159.
- [5] 张树文, 李文毅, 米增强, 等. 小电流接地系统单相接地保护原理和技术综述[J]. *电力情报*, 1994(2):1-4.
- [6] 曾祥君, 尹项根, 于永源, 等. 基于注入变频信号法的经消弧线圈接地系统控制与保护新方法[J]. *中国电机工程学报*, 2000, 20(1):29-32.
- [7] 董新洲, 毕见广. 配电线路暂态行波的分析和接地选线研究[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(4):1-6.
- [8] 牟龙华. 零序电流有功分量方向接地选线保护原理[J]. *电网技术*, 1999, 23(9):60-62.
- [9] 唐轶, 陈奎, 陈庆, 等. 导纳互差之绝对值和的极大值法小电流接地选线研究[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(6):49-54.
- [10] 张艳霞, 陈超英, 赵杰辉, 等. 配电网单相接地故障选线的一种新方法[J]. *电网技术*, 2002, 26(10):21-24.
- [11] 苗友忠, 孙雅明, 杨华. 中性点不接地配电系统馈线单相接地故障的暂态电流保护新原理[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(2):28-32.
- [12] 鲁改凤, 化雨, 金小兵, 等. 小电流接地系统单相接地故障选线方法探究[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(12):44-49.
- [13] 贾清泉, 杨奇逊, 杨以涵. 基于故障测度概念与证据理论的配电网单相接地故障多判据融合[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(12):6-11.
- [14] 孙波, 张承慧, 孙同景, 等. 基于暂态相电流的小电流接地故障定位研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(18):69-74.
- [15] 张淑清, 马跃, 李盼, 等. 基于改进的广义谐波小波包

分解和混沌振子的小电流接地系统故障选线[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 13-20.

- [16] 刘柱揆,曹敏,董涛. 基于波形相似度的小电流接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 89-95.
- [17] 张海平,何正友,张钧. 基于量子神经网络和证据融合的小电流接地选线方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 171-178.
- [18] 邱进,田野,李冠华,等. 基于现场实录波形的小电流接地故障暂态选线研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 180-187.
- [19] 陈少华,尹胜兰,莫哲. 基于免疫 RBF 网络改进小波分析的小电流接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 46-50.
- [20] 陈博博,屈卫锋,杨宏宇,等. 小电流接地系统单相接

地综合电弧模型与选线方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 1-7.

- [21] 张建东,冯小明,吴国平,等. 基于 TDFT 非同步采样谐波测量的小电流接地故障信号处理方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 117-124.
- [22] 朱涛. 基于 SCADA 系统的小电流接地故障选线方法研究. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 141-147.

作者简介:

许 鹏(1990),男,硕士研究生,工程师,研究方向为电力系统及其自动化;

汤 俊(1978),男,硕士研究生,高级工程师,研究方向为电力系统及其自动化;

杨 湘(1990),男,硕士研究生,工程师,研究方向为电力系统及其自动化.

(收稿日期:2021-01-12)

(上接第 37 页)

UPS 总计算负荷为

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2} = 8.72 \text{ kVA} \quad (9)$$

负荷综合功率因数为

$$\cos \varphi_{av} = \frac{P_c}{S_c} = \frac{8}{8.72} = 0.92 \text{ (感性)} \quad (10)$$

UPS 最终计算容量为

$$S = K_k \frac{S_c}{K_r K_d} = 17.2 \text{ kVA} \quad (11)$$

式中: K_r 为功率校正系数,根据负荷综合功率因数 0.92 和参考文献[7]附表 C.2-1 取 0.87; K_k 为可靠系数,取 1.25; K_d 为海拔降容系数,按站址海拔高度 4100 m 和参考文献[7]附表 C.2-2 可取 0.73。

根据 UPS 计算容量,该变电站单套 UPS 额定容量可选择为 20 kVA。

4 结 语

对于高海拔地区的变电站,在站用蓄电池组容量选择计算时,宜结合变电站站址情况考虑蓄电池放电过程中蓄电池室可能出现的极端低温,所述变电站极端低温按 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 选取,并据此提高了温度修正系数和蓄电池计算容量;在直流充电装置额定电流计算时,宜按 GB/T 32593—2016 相关要求进行高海拔降容修正,即工作海拔超出 1000 m,每超出 100 m 充电装置额定电流应按降低 1.5% 使用;在 UPS 容

量选择计算时,应按 DL/T 5491—2014 附表 C.2-2 选择对应的海拔降容系数来修正计算容量。

参考文献

- [1] 傅定文,庄勇,滕小华. 高海拔地区光伏电源系统中蓄电池的应用研讨[C]// 第八届全国光伏会议暨中日光伏论坛,2004.
- [2] 国家能源局. 电力工程直流电源系统设计技术规程: DL/T 5044—2014[S]. 北京:中国计划出版社,2014.
- [3] 全国铅酸蓄电池标准化技术委员会. 固定型阀控式铅酸蓄电池 第 1 部分:技术条件:GB/T 19638.1—2014[S],2014.
- [4] 王海燕,孙德兴,张斌. 节能建筑启停供热后房间温度变化分析[J]. 低温建筑技术,2006(2): 99-102.
- [5] 赵守贵,潘峰,陈浩,等. 高海拔地区变电站直流电源装置容量修正研究[J]. 华东科技(综合), 2019(3): 278-279.
- [6] 全国牵引电气设备与系统标准化技术委员会. 轨道交通 地面装置变电所用电力电子变流器:GB/T 32593—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
- [7] 国家能源局. 电力工程交流不间断电源系统设计技术规程:DL/T 5491—2014[S]. 北京:中国计划出版社,2014.

作者简介:

龙 军(1978),男,大学本科,高级工程师,主要从事电气二次设计工作。

(收稿日期:2020-12-04)