

230 kV 大容量车载移动变电站的设计及应用

袁秋洁, 王 勇, 江小兵, 朱 亭

(国电南瑞科技股份有限公司, 北京 102200)

摘要: 随着“一带一路”国家战略的持续推进, 高电压等级可移动车载的成套变电设施可帮助基础设施落后、自身工业产品自给率低的国家快速实现电网枢纽节点的从无到有, 对该国的电网发展起到立竿见影的效果, 尤其是在非洲一些电力系统极其不发达、基础设施极其落后的国家。介绍了 230 kV 车载移动变电站的方案设计原则、方案平面布置及关键技术问题解决方法。针对大容量高电压高海拔的变压器体积大、重量重的特点且存在运输困难的缺点, 提出了变压器和 HGIS 设备的优化设计方案; 针对路况复杂的运输条件, 为确保设备经长途跋涉后能完好抵达项目现场, 需对四个车体模块重新进行载重控制并分配载重, 重新校核车体的抗震能力; 针对车载移动变电站的防雷接地设计, 采用多种方式同时进行保护。

关键词: 230 kV; 车载移动变电站; 设计

Design of 230 kV large capacity mobile substation and its application

YUAN Qiujie, WANG Yong, JIANG Xiaobing, ZHU Ting

(NARI Technology Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: The complete set of high-voltage mobile on-board substation facilities can help countries with backward infrastructure and low self-sufficiency rate of their own industrial products to quickly realize the grid hub node from scratch, and achieve an immediate effect on the development of the country's power grid. Its advantages are self-evident, especially in some African countries with extremely underdeveloped power system. This paper introduces the design principle, layout and key technical problems of 230 kV mobile substation. In view of the characteristics of large capacity, high voltage and high altitude transformer, such as large volume, heavy weight and difficult transportation, the optimal design scheme of transformer and HGIS equipment is proposed; In view of the complex road conditions, in order to ensure that the equipment can arrive at the project site after a long journey, it is necessary to recontrol the weight of the four car body modules, redistribute the load, and recheck the anti-seismic capacity of the trailer's body. For the lightning protection and grounding design of vehicle mounted mobile substation, multiple methods are adopted to protect at the same time.

Key words: 230 kV; mobile substation; design

0 引言

移动变电站由于具有集成化程度高、体积小、占地少、选址灵活、投资小和见效快等优点, 在使用上具有便于运输、组合灵活和安装快捷等特

点^[1], 在短时增容、临时变电站建设、检修替代和灾害应急等方面有着广泛应用^[2]。

近年来, 移动变电站在国内的供电系统中得到了日益广泛的重视及应用, 各电力公司均在积极购置各种电压等级及容量的车载移动式变电

站,以提高电网的供电可靠性^[3]。由于受国内道路的限制,且电力系统内电力设施的特殊性,目前国内已投运的移动变电站有 35 kV、66 kV 和 110 kV 等多个电压等级,容量涵盖 5~40 MV·A^[4-9],暂无 230 kV、50 MV·A 以上容量等级。

在非洲的不发达国家地区,尤其是埃塞俄比亚,近年来得益于“一带一路”倡议的带动,整体工业发展迅速。但由于基础设施薄弱,电力系统的特殊性 & 电力需求的快速增长等矛盾的存在,导致该地区亟需引入高电压大容量的车载移动变电站来支持本国工业的发展。

移动变电站作为高电压等级可移动车载的成套变电设施,可帮助基础设施落后、自身工业产品自给率低的国家快速实现电网枢纽节点的从无到有,对该国的电网发展起到立竿见影的效果。本文以 230 kV 大容量高海拔的车载移动变电站设计为例,为大容量高电压的车载移动变电站的研制提供参考。

1 方案设计

该应用场景的车载移动变电站由于容量大(50 MV·A)、电压等级高(230 kV)、属于高海拔地区使用(按照海拔 2 500 m 特殊设计),且需经海运、陆运等长途运输,因此对车载移动变电站的集成化程度提出了更高的要求,另外当地属于频繁雷暴地区,对抗震及防雷接地的要求更为苛刻。在方案设计时面临以下设计难点。

(1) 高压模块灵活化与其实际绝缘距离的矛盾

避雷器、电压互感器及高压开关设备均设置在同一辆拖车上,称之为高压车模块。不仅要考虑三种设备的高度集成,还要保证设备间的安全距离,且满足道路运输的要求(埃塞俄比亚当地道路宽度要求 3.6 m 内)。

(2) 大容量、高电压变压器的车载优化设计
变压器为 50 MV·A、230 kV 的高海拔型

三卷变压器(230 kV/33 kV/15 kV),市场同类产品体积大,重量重,且在移动变电站的使用中重量是不可接受的^[10]。需对变压器进行更优化的车载集成设计,考虑从变压器油单独运输、变压器套管现场组装、变压器单车布置及变压器内部结构优化等几方面进行优化集成设计。

(3) 车体的抗震要求

埃塞俄比亚地处红海西南的东非高原上,境内以山地高原为主,素有“非洲屋脊”之称,多河流湖泊,亦有“东非水塔”之称^[11]。车载移动变电站需从中国境内运输至埃塞俄比亚,经过中国境内陆运、长达一个月之久的海运及吉布提港口至当地的山地陆运等不同的运输条件,还需考虑海运的颠簸、道路的限制等因素重新进行载重控制并分配载重,重新校核车体的抗震能力,要求设备整体经过运输过程到达项目应用现场后,设备功能状态保持完好,具备快速投入使用条件。

(4) 整站的防雷接地设计

埃塞俄比亚地区具有海拔较高、地形坡度大、季节分明(雨季和旱季)、雨季降雨量大、雷暴天气多及远离海港的特点^[12]。当地变电站址无现成可用的接地网,且土壤的接地电阻不能满足要求时,需要进行计算校核及防雷接地设计,以达到合格的防雷接地要求。

2 变电站的规模设计

从当地电网的需求应用场景出发,230 kV 车载移动变电站设计为终端站,电压等级 230 kV/33 kV/15 kV,采用 1 台 50 MV·A 三相三卷有载调压移动式变压器,230 kV 进线 1 回,主接线单母线。230 kV 侧采用直接接地系统;主变压器 230 kV 侧采用中性点成套设备,经接地变压器接地运行;33 kV、15 kV 侧为非直接接地系统,4~6 回。主接线如图 1 所示。

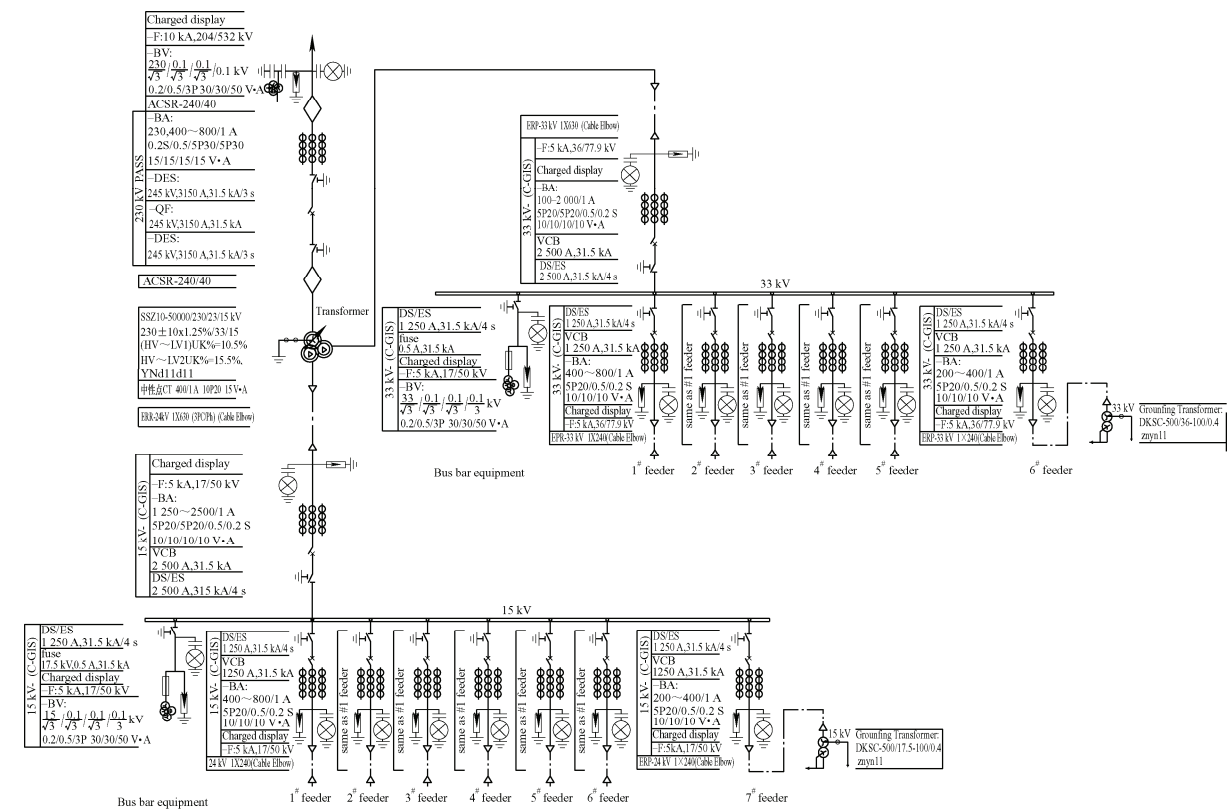


图 1 电气主接线图

Fig. 1 Main electrical wiring diagram

3 整站平面布置

230 kV/33 kV /15 kV 移动变电站包括四车三模块，其中有一辆 HGIS 设备和半挂车组成的高压车模块，一辆变压器车模块，两辆中压车模块，各车辆尺寸如表 1 所示。高压车模块与变压器车模块通过铝绞线进行连接，变压器的低压侧与 33 kV 中压车、15 kV 中压车之间通过高压电缆进行连接，整站运行示意图如图 2 所示。

表 1 车辆的尺寸

Tab. 1 Dimension table of trailers

模块名称	长/m×宽/m×高/m
高压车	11×3.6×5
变压器车	13×3.6×5
33 kV 中压车	15×3.6×4.5
15 kV 中压车	15×3.6×4.5

3.1 高压车模块

230 kV 电源进线为架空或电缆进线方式^[13];

高压开关车模块设备分别为进线避雷器、电压互感器、230 kV SF₆ 气体绝缘组合电器(HGIS)与 HGIS 控制端子箱。由于设备的使用环境是 2 500 m 以上的高海拔地区，电气设备间的安全电气距离和安全爬距均经过高海拔系数修正^[14]，利用式(1)计算后，高海拔修正系数取 1.18。

$$k_a = 1 / (1.1 - H \times 10^{-4}) \tag{1}$$

根据式(2)~式(6)可计算出设备的相间最小电气安全距离 D_U ^[15]为

$$D_U = 2.17 \left[e^{U_{90\%}/(1.080k_t)} - 1 \right] + s \tag{2}$$

式中， s 为中间电位导体长度； $U_{90\%}$ 为 90%统计耐受电压； k_t 为综合系数。

$$U_{90\%} = k_s U_{2\%} \tag{3}$$

$$U_{2\%} = \begin{cases} (\sqrt{2}/\sqrt{3})U_s k_{e2} & \text{相-地} \\ (\sqrt{2}/\sqrt{3})U_s k_{p2} & \text{相-相} \end{cases} \tag{4}$$

$$k_{p2} = 1.35k_{e2} + 0.45 \tag{5}$$

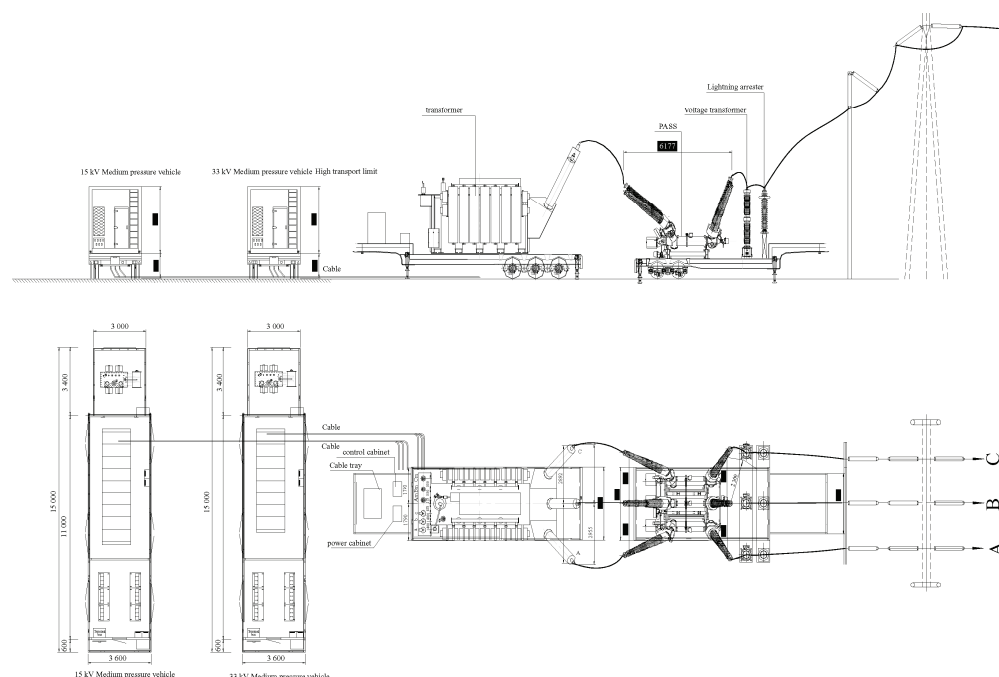


图2 电气平面布置图

Fig. 2 Electrical layout plan

式中, $U_{2\%}$ 为 2% 统计过电压; U_s 为最高运行电压; k_{e2} 为相地 2% 统计过电压倍数; k_{p2} 为相间 2% 统计过电压倍数; k_t 为综合系数, 依据 IEC 61472—2004 带电作业电压范围为 72.5~800 kV 最小接近距离计算方法中得出 k_t 计算方法为

$$k_t = k_s k_g k_a k_f k_i \quad (6)$$

式中, k_g 为间隙系数; k_a 为海拔修正系数; k_f 为标准偏差系数; k_i 为绝缘子串系数。

在本项目中, 海拔修正系数 k_a 经式(1)计算后取 $k_a=1.18$; 其他参数根据 IEC 标准选择: $k_s=1.1$; $k_g=1.45$; $k_f=0.936$; $k_i=1$; $k_e=3$; $s=0$; 最高运行电压 252 kV。相间最小电气安全距离通过计算得出 $D_U=1.533$ m。

最小安全距离 D 通过式(7)计算得出

$$D = D_U + D_E \quad (7)$$

式中, D_U 为最小电气安全距离; D_E 为人体活动范围, 取 0.2~1 m。

D_E 取 1 m, 求出 230 kV 的高压设备的相间距离需要达到 2.533 m 才能满足运行安全要求。

3.2 变压器车模块

变压器车模块包括主变压器、端子箱设备、主变压器与高低压侧连接软电缆以及承载车辆。主变压器 230 kV 侧通过铝绞线与 230 kV HGIS 设备连接, 主变压器的低压 33 kV、15 kV 侧通过 ERP 型乙丙橡胶柔性电缆与中压车模块实现连接。

3.3 中压车模块

中压车模块由 33 kV 中压车和 15 kV 中压车子模块组成, 其中 33 kV 中压车模块由 33 kV 配电开关柜、二次控保及电源等设备、集装箱体(分两个隔室)及接地变压器等组成。15 kV 中压车模块由 15 kV 配电开关柜、二次控保及电源等设备、集装箱体(分两个隔室)及接地变压器等组成。33 kV/15 kV 开关柜采用单排布置, 对外通过电缆进出线, 接地变压器安装于舱体外, 通过电缆连接。33 kV/15 kV 控制保护装置就地安装于开关柜内, 配电开关柜集中布置在集装箱体中压开关隔室内。其他二次设备(直流屏、远动屏和通信屏)布置在集装箱体二次控制小室内。中压车集装箱体底部设有电缆半层, 用于一二次电缆连接走线空间。其实际运行图如图 3 所示。



图3 中压车模块实际运行图

Fig. 3 In actual operation of medium voltage vehicle module

3.4 二次设备布置

二次设备主要采用高低压侧集中组屏形式布置,主变压器 33 kV/15 kV 侧合并单元和智能终端采用合并单元智能终端合一装置, 33 kV/15 kV 其他二次测控设备采用就地安装形式。

4 关键技术问题及解决

4.1 高压开关模块紧凑设计

由于车载移动变电站的产品特点,设备需要高度集成在车体上,埃塞俄比亚道路通行要求车体的宽度须小于 3.6 m。由于属于高海拔地区应用,三相设备需同时布置在车板上,且希望车体的长度和宽度尽可能小。通过合理的优化布置,电压互感器、避雷器相间宽度须达到 2.915 m 才能满足 HGIS 设备的出线套管与避雷器出线端的相间最小安全距离的要求。该距离远超过车辆的运输宽度 3.6 m 的要求限制。

为了既可以在有限的车体长度宽度范围内布置 HGIS、避雷器和电压互感器,又能满足设备的最小安全距离,通过将避雷器、电压互感器全部采用可推拉式底座支架,在运输时可将三相设备的距离降至最低,到达现场后再拉伸至满足运行的相间距离;高压开关设备采用结构紧凑的 HGIS 开关,将原有安装在底座上的汇控柜从本体中分离,单独放置,同时降低 HGIS 开关的底座高度和加强强度的重新设计,HGIS 开关在运输时可以将 A、C 相套管通过转动轴转动,收齐并拢排列,到达现场后再展开至运行位置,如图 4 和图 5 所示。



图4 运行状态下的高压车模块

Fig. 4 High voltage vehicle module in running state

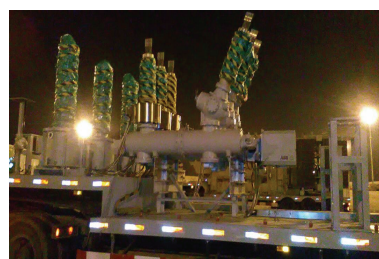


图5 运输状态下的高压车模块

Fig. 5 High voltage vehicle module in transportation state

4.2 大容量高电压变压器优化设计

常规的 230 kV 变压器的体积不宜车载运输,尤其套管间的宽度至少为最小安全距离的 2 倍,达 5.066 m 以上,重量约 130 t。远高于正常道路的运输重量限制。

为降低重量,减小体积,采用变压器油单独运输、变压器单车布置的方式,具体在结构上进行如下优化设计。

1) 将高压出线由传统的侧向出线更改为底部出线,套管采用“品”字形布置,高压套管升高座安装界面特殊设计,具体为:①A、C 相与 B 相中心线呈 45°角,目的为高压套管升高座满足运输要求,同时套管端部满足相间绝缘距离;②A、B、C 三相同时与水平面呈 45°角,采用倾斜探出式套管布置,既可以缩短变压器整体长度,又可以缩短与 HGIS 开关套管之间的距离,安全可靠并方便现场施工。

2) 采用特殊设计的平行散热片的散热系统,在同等的散热能力前提下,安装尺寸更小,进一步优化了变压器的整体尺寸,变压器的整体宽度为埃塞俄比亚道路许可的 3.6 m。

3) 变压器内部进行优化设计,采用减小相间

主通道距离和绕组对带电体间的距离等措施,在保证设计安全系数的前提下,最大限度地保证设备的紧凑性,在传统的变压器设计中以多用铁、少用铜及追求成本最低化为目的,本次设计增加导线用量,同时减少铁心用量,在电气计算过程中以整个器身重量最轻为目的,通过设计优化最终降低变压器重量。

4.3 车辆抗震设计

通过移动变电站运输过程中的结构动力学分析,功率谱密度表明:运输过程中的振动能量大部分集中在有限的频带内^[16]。为确保设备经长途跋涉后能完好抵达项目现场,需对四个车体模块重新进行体重控制和分配载重,并重新校核车体的抗震能力。依据相关的标准^[17],主要从以下方面进行优化设计:

- 1) 车体上的所有设备在整站设计阶段及制造生产前明确抗震设防参数。
- 2) 设备尽量采用同一支撑架(板),并与车体钢构件形成可靠连接,避免无支撑架安装。
- 3) 变压器、高压开关设备和避雷器等设计与布置应设法降低高度和重心位置,并尽量减轻车辆承载重量。
- 4) 变压器、高压开关、中压及保护小室等设置可靠基础的连接螺栓,配套相应的防震、防脱装置。
- 5) 为减少电气设备端子的拉力,设备间的电气连接线和接地引下线采用软导线或电缆,设备的支架、基础和架构等形成整体空间框架体系。
- 6) 针对采用气体绝缘的高压设备,加强法兰密封措施,增强法兰抗震能力,在结构允许条件下,尽量使用双道密封,且尽量减少法兰数量。

4.4 防雷接地设计

接地系统旨在将接触、跨步和金属对金属的接触电压限制在可接受的水平,以确保人员安全和设备安全运行^[18]。变电站内部的接地系统包括雷电保护接地、变电站工作接地以及保护接地三个部分。其中防雷保护接地是为了将雷电流向大地进行泄放而设置的接地结构^[19]。

车载移动变电站的防雷措施分为两大类:屏

蔽电磁波和利用一些连接方式将雷电波导入接地网。具体措施为:

1) 构建避雷针,通过设计规范^[20]计算确定选购的避雷针高度及避雷针的保护范围。由于车载移动变电站的高度限制在5 m以内,避雷针高度选择20 m高的规格(一般有20 m、25 m、30 m和35 m的规格选型),变电站的对角线设置两根避雷针。根据式(8)、式(9)计算出两针间保护范围上部边缘最低点高度 $h_0(\text{m})$ 并求出 h_x ,即

$$h_0 = h - D / (7P) \quad (8)$$

$$h_x = h - h_0 \quad (9)$$

式中, h 为避雷针的高度,m; D 为两避雷针间的距离,m; P 为高度影响系数, $h \leq 30 \text{ m}$, $P=1$; $30 \text{ m} < h \leq 120 \text{ m}$, $P=5.5/\sqrt{h}$; $h > 120 \text{ m}$, $P=0.5$; h_x 为被保护物的高度,m。

再根据 h_x 的数值从式(10)、式(11)中选择合适的计算公式,计算出两线间端部保护最小宽度 $b_x > 0$ 即能完全保护到整个变电站。

当 $h_x \geq h/2$ 时, b_x 应按下列方法确定

$$b_x = 0.47(h_0 - h_x)P \quad (10)$$

当 $h_x < h/2$ 时, b_x 应按下列方法确定

$$b_x = (h_0 - 1.53h_x)P \quad (11)$$

2) 在移动变电站的进线侧设置三相避雷器,大幅降低入侵的雷电波。

3) 每个车体模块设置接地排,构建车体接地网并通过接地线将防雷接闪装置所接收到的雷电波引入大地。

4) 变电站设备内部设置浪涌抑制器,降低雷击造成电气设备中的电子元件损坏的概率。

4.5 移动变电站运行情况

该230 kV/33 kV/15 kV、50 MV·A的车载移动变电站为2016年我司执行的海外融资项目,业主方为埃塞俄比亚电力公司(Ethiopian Electric Power Corporation)。该项目于2017年10月在Woldiya地区投入运行,目前运行良好。

5 结束语

移动变电站具有结构紧凑、机动性强、组装

快捷和投运方便等优点,适用范围广,能产生巨大的经济效益和社会效益^[21]。随着“一带一路”战略的持续推进,车载移动变电站将更广泛地应用于不发达地区的发展。本文以2016年执行埃塞俄比亚电力公司(EEP)的230 kV/33 kV/15 kV、50 MV·A的车载移动变电站项目为背景,详细介绍了高海拔高电压大容量的车载移动变电站的设计案例,并通过工程运行验证为后续的移动变电站项目提供参考。特别是在满足设计限制的前提下,高压开关模块的紧凑设计中采用了可推拉式底座支架;变压器模块的优化设计中采用了降低套管底座、优化出线套管角度、使用平行散热系统及提高铜导电件的使用等方式,并在整站中通过降低设备的高度和重心、加强法兰强度及采用软导线或电缆等方式充分考虑车辆的防震性能等措施,为具体的移动变电站设计提供可行的思路。**EA**

参考文献

- [1] 蔡晶,冉旺,韩丹,等.大功率车载式移动变电站设计应用系统研究[J].广东电力,2020,33(1): 86-92.
- [2] 狄谦,邵丽丽,王勇,等.110 kV 车载移动式变电站设计[C].中国电机工程学会高电压专业委员会2015年学术年会集,2015: 1-6.
- [3] 欧书成,宋祉明,李智玲,等.移动变电站对提高供电可靠性的作用分析[J].内蒙古电力技术,2019(2): 1-5.
- [4] 韩丹.车载式移动变电站的设计与研究[J].科技创新与应用,2019(14): 88-90.
- [5] 梁晴,李克强.车载移动变电站设计[J].电子技术与软件工程,2019(7): 219.
- [6] 汤振鹏,刘泽庭,胡中,等.移动变电站技术进展综述[J].电网技术,2019(9): 3415-3425.
- [7] 黎俊杰.110 kV 车载移动变电站设计及实际应用研究[J].机电信息,2019(11): 27-28.
- [8] 包红旗.大型车载移动变电站[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [9] 周林,吴明朝,廖彬强,等.移动式变电站技术在智能电网建设中的应用[J].电网与清洁能源,2016,32(9): 29-32, 38.
- [10] LOPEZ-ROLDAN J, DEVRIENDT C, ENNS J, et al. How to achieve a rapid deployment of mobile substations and to guarantee its integrity during transport[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008(23): 196-202.
- [11] 刘海林.埃塞俄比亚电力市场规划研究[J].水电与新能源,2016(12): 65-67.
- [12] 邵思城.如何在非洲丘陵地区建设卫星城[J].国际工程与劳务,2016(4): 41-43.
- [13] 聂瑞.移动变电站的配置应用及接入方案[J].信息记录材料,2017(12): 25-26.
- [14] 黎斌.SF₆高压电器设计[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [15] 李璟,常阿飞.电气安全净距计算方法的对比分析[J].华电技术,2013(35): 26-31.
- [16] Christof Devriendt, Patrick Guillaumea, Jose Lopez-Roldanb. Structural dynamics of a mobile substation during transport[J]. Engineering Structures, 2007, 29(12): 3377-3389.
- [17] 高压开关设备和控制设备的抗震要求: GB / T 13540—2009 [S].
- [18] IEEE Guide for safety in the installation of mobile substation equipment: IEEE Std 1268—2005[S].
- [19] 唐海英.浅析变电站防雷接地设计[J].城市建设理论,2018(19): 8.
- [20] 水利电力部西北电力设计院.电力工程电力设计手册电气一次部分[M].北京:中国电力出版社,1989.
- [21] 宋祉明,张伟,徐肃,等.110 kV 车载移动变电站的设计和运维[J].电工技术,2018(7): 87-89.

作者简介:



袁秋洁

袁秋洁(1985—),女,硕士,工程师,从事车载移动变电站、预装式变电站的研发工作。

(收稿日期:2020-10-10)