

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.04.003

一种 10 kV 配电线路分布式串联补偿兼不停电融冰技术研究

孙先山¹, 盛跃峰¹, 赖旬阳¹, 陈烨², 饶崇林³, 施展⁴

(1. 国网浙江省电力有限公司德清县供电公司, 浙江 德清 313200; 2. 浙江华电器材检测研究院有限公司, 杭州 310000; 3. 杭州洁电科技有限公司, 杭州 310000; 4. 浙江大学, 杭州 310000)

摘要:本文提出了一种 10 kV 配电线路分布式串联补偿兼不停电融冰技术。该技术具有覆冰时对配电线路进行不停电融冰;正常气象情况下能够提高电压质量、降低线路损耗的功能。对该技术的电压提升功能和不停电融冰功能进行了深入分析研究,建立了 10 kV 配电线路分布式串联补偿工况下的潮流计算数学模型,并开发了相应的潮流计算程序。最后通过一个案例分别计算正常工况下分布式串联补偿和融冰工况下的线路电压分布,验证了本技术的可行性和有效性。

关键词:分布式串联补偿; 10 kV 配电线路; 不停电融冰

Research on Distributed Series Compensation and Live Deicing Technology for 10 kV Distribution Lines

SUN Xianshan¹, SHENG Yuefeng¹, LAI Xunyang¹, CHEN Ye², RAO Chonglin³, SHI Zhan⁴

(1. Deqing Power Grid Inc, Zhejiang Deqing, 313200, China; 2. Zhejiang Huadian Equipment Testing and Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 3. Hangzhou Jiedian Technology Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 4. Zhejiang University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: In this paper, a kind of distributed series compensation and live deicing technology for 10 kV distribution lines is proposed. The technology has the function of live deicing on the power distribution line in case of ice coating, which can improve voltage quality and reduce line loss under normal weather conditions. The voltage boosting and live deicing functions of this technology are analyzed and studied deeply. A mathematical model for power flow calculation of 10 kV distribution lines under distributed series compensation condition is set up, and a corresponding power flow calculation program is developed. Finally, a case is used to calculate distributed series compensation under normal operating conditions and line voltage distribution under deicing conditions, and both feasibility and effectiveness of the technology are verified.

Keywords: distributed series compensation; 10 kV distribution line; live deicing

0 引言

众所周知,电压偏差是衡量配电网供电质量的一项重要指标。随着经济的发展,我国配电网的负荷水平快速上升,但由于投资、环评等多种因素的影响,配电网的建设严重滞后,导致很多线路出现了低电压、损耗高等问题^[1-5]。同时,我国配电网络规模大、覆盖范围广,高寒冻雨地区的配电线路冬

季经常出现 5~10 cm 的严重覆冰,从而导致线路断线、杆塔崩塌的故障,严重影响了人民的生产生活,给国家也造成了巨大的经济损失。因此,提高 10 kV 配电线路沿线电压幅值、降低线路线损,并对覆冰严重的线路进行不停电融冰的技术是一项值得研究并有现实意义的工作。

针对 10 kV 配电线路的电压幅值低、损耗高的问题,文献[6-12]在理论上做了详尽的分析和仿真,

收稿日期:2023-05-15

基金项目:浙江电网电力有限公司科技项目(SGTYHT/20-JS-223)。

实例工程也取得了很好的效果,由此我们可以看出,集中式固定串联补偿是提高10 kV配电线路沿线电压幅值、降低线路损耗的有效方法。2008年大冰灾后,直流融冰技术迅速发展,输电线路的融冰问题得到了有效解决^[13-17],直流融冰装置在国家电网和南方电网公司的输电线路融冰中应用广泛^[18-23]。但由于配电网的特性,需要线路停电的直流融冰技术不适合此类线路的融冰,10 kV配电线路需要采用不停电交流融冰技术^[24-26]。

根据文献[27]的总结,适用于10 kV配电线路的不停电交流融冰技术主要有潮流调整法、无功电流法和零序电流法。

潮流调整法是电网公司调度部门通过改变电网结构、转入或转出负荷等手段,往待融冰线路输送更多功率,使线路中产生大电流以实现融冰。该方法调度复杂、操作麻烦,即使线路电流能达到融冰电流,线路压降也会导致部分节点电压严重偏离国标规定范围,导致用户设备无法正常工作。

无功电流法^[28]是希望在不影响配网用电设备正常运行的情况下,在线路末端投入并联电抗器,增加线路上的感性无功电流,使线路上发热增加实现融冰。同时,在线路首端投入并联电容器,补偿并联电抗器的无功。该方案虽然可以增加配网线路电流以实现融冰,但大容量感性负荷(容量太小的话,流过线路的电流太小,起不到融冰效果)的增加会导致线路压降骤增,供电电压严重偏低,用户负荷无法正常使用。

利用10 kV配电网发生单相接地故障后仍然

允许继续短时运行的特点,文献[29]提出一种适用于中性点不接地系统的零序电流融冰技术。装置由可调电抗器和接地变压器组成,与避雷线一起构成零序电流通路,融冰电流为负载电流和零序电流之和。但人为的单相接地对变配电设备、区域电网的稳定性、人畜的生命安全均有比较大的危害^[30-36],因此该方法并不是一种理想的配电线路融冰方式。

针对10 kV配电线路提升电压质量、降低损耗和不停电融冰的需求以及现有技术中存在的问题,本文提出了一种具有电压和无功优化功能的10 kV配电线路不停电融冰系统的技术方案,移动式可调无功源用来调节交流融冰电流,分布式串联电容器智能补偿装置用来补偿融冰时无功电流造成的线路沿线电压偏差。当不需要融冰时,移动式可调无功源和分布式串联电容器智能补偿装置既可单独运行,也可协调控制,有效提升了配电线路沿线电压幅值、降低线路损耗。

1 分布式串联补偿兼不停电融冰工作原理

分布式串联补偿兼不停电融冰系统如图1所示,该系统由若干个均匀分布在配电线路上的串联补偿装置、一个移动式可调无功源和一个智能综合协调控制器组成。不同的配电线路,串联补偿装置的容抗、额定电流和个数的配置也不相同。移动式可调无功源在10 kV配电线路上的接入点位置根据融冰和配电线路优化无功电压的需要来确定。

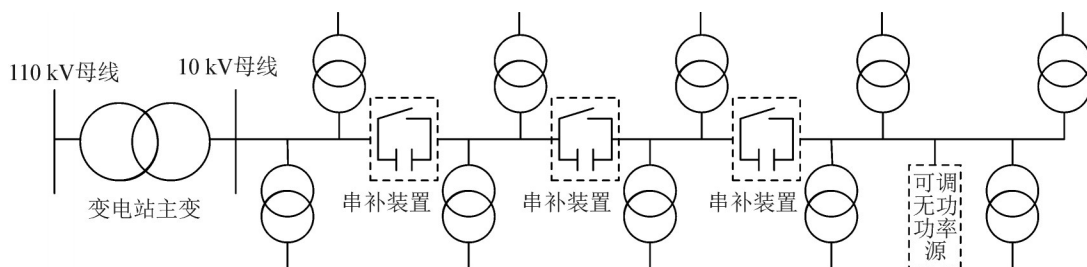


图1 分布式串联补偿兼不停电融冰系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of distributed series compensation and live deicing system

分布式串联电容器智能补偿装置见图2,固定安装在10 kV配电线路的某几个节点上,主要由旁路断路器、隔离开关、串联电容器、快速旁路保护单元、互感器和智能控制器组成。智能控制器实时采样互感器模拟信号、监测补偿装置的状态并发送至智能综合协调控制器,同时接收智能综合协调控制器的控制指令,并在紧急情况下自行对串联电容器进行旁路保护。

移动式可调无功源见图3,可根据优化电压无功的需要固定安装在10 kV配电线路的某个节点上,也可以根据融冰的需要临时并接在某段需要融冰线路的后端,主要由多组可投切并联电容器组组成。除了防止单组容量过大,投切时对电网造成冲击外,还可以根据不同线路融冰电流的大小进行灵活的投切。移动式可调无功源配置有互感器,实时采样互感器模拟信号,监测自身运行状态,并进行控制和保护。

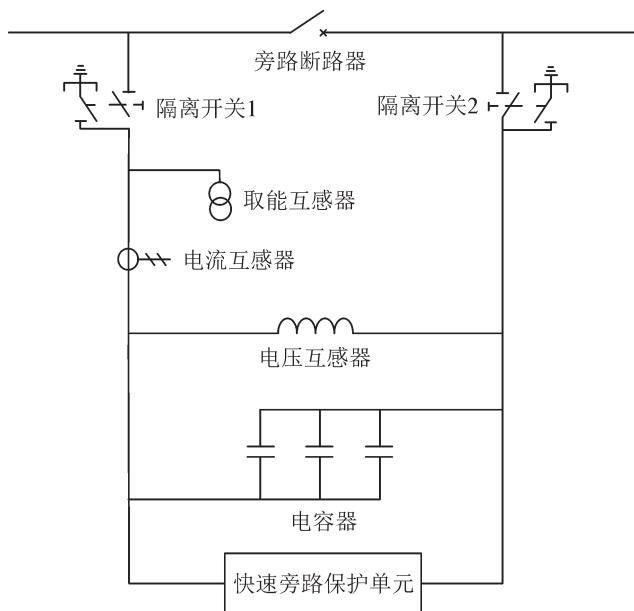


图2 分布式串联电容器智能补偿装置
Fig. 2 Intelligent compensation device for distributed series capacitors

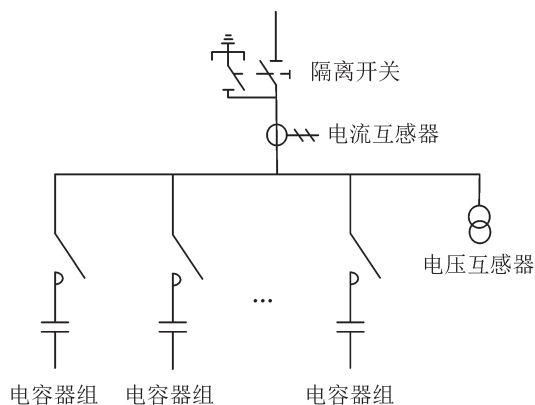


图3 移动式可调无功源
Fig. 3 Mobile adjustable reactive power source

智能综合协调控制器安装于移动式可调无功源内,除了控制调节移动式可调无功源外,还具有电压和无功优化协调控制功能。智能综合协调控制器可通过公用无线网或专用通讯网和分布式串联电容器智能补偿装置的智能控制器交互信息。当没有配置通讯通道或通讯中断时,移动式可调无功源和分布式串联电容器智能补偿装置根据各自采集的信息对 10 kV 配电线路实行不停电融冰以及电压和无功的优化控制。

融冰时,移动式可调无功源根据 10 kV 配电线路融冰电流的大小,投入对应组数的电容器。平时,如移动式可调无功源已安装在线路的某个节点上,则其智能综合协调控制器根据设定参数及配电线路的实时运行数据,如电压、无功功率等协调控制分布式串联电容器智能补偿装置和移动式可调

无功源的无功补偿容量,实现电压和无功的优化控制。如移动式可调无功源未安装,则分布式串联电容器智能补偿装置各自根据设定参数及实时数据进行投切,实现电压和无功的优化控制。

由此可见,分布式串联补偿兼不停电融冰系统不仅可以进行不停电融冰,平时还可以进行电压和无功的优化控制,具备融冰和提高供电电压质量、降低线路损耗的双重功能,设备利用率高,节能效果好,将进一步提升我国 10 kV 配电线路的供电可靠性和电压质量。

2 潮流计算数学模型及其求解算法

为了计算 10 kV 配电线路沿线各点的电压和功率,本节先确定潮流计算数学模型,然后采用前推回推送迭代计算进行求解。

2.1 潮流计算建模

有色金属导线每相单位长度的电阻公式为

$$R = \frac{\rho}{S} \quad (1)$$

式中: R 为导线单位长度的电阻, Ω/km ; ρ 为导线材料的电阻率, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$; S 为导线的额定截面积, mm^2 。

有色金属导线每相单位长度的电抗公式为

$$X = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r} + 0.0157 \quad (2)$$

式中: X 为导线单位长度的电抗, Ω/km ; D_m 为几何均距, mm 或 cm ; r 为导线半径, mm 或 cm , 其单位与 D_m 相同。

在电力系统稳态分析中的电力线路数学模型就是以电阻、电抗、电纳、电导表示的等值电路,见图 4。

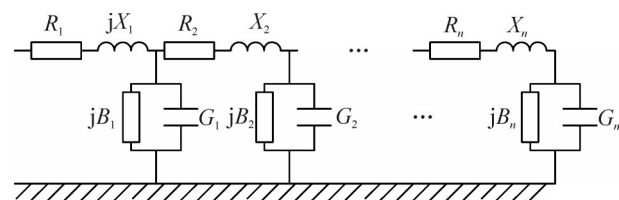


图4 电力线路单相等值电路
Fig. 4 Single-phase equivalent circuit of power line

根据文献[32]的定义,配电线路相邻 2 个节点之间的距离肯定小于 100 km,满足短线路的定义,可不考虑线路的分布参数特性,只用集中参数来表示即可。另外,10 kV 电压等级不高,线路的电纳、电导影响很小,可忽略不计。从而,10 kV 配电线路的数学模型可简化为以电阻、电抗表示的等值电路,如图 5 所示。再按公式(1)、(2)求得单位长度导线的电阻、电抗,就可以得出潮流计算的数学模型。

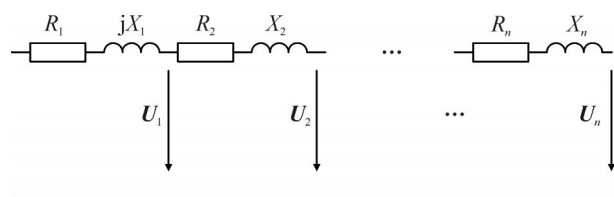


图5 10 kV 配电线路单相等值电路
Fig. 5 Single-phase equivalent circuit of 10 kV distribution line

2.2 潮流计算迭代算法

假设每条10 kV 配电线路的首端电压为 U_s ,共有 N 个节点, U_i 为节点 i 电压, $Sl_i = Pl_i + jQl_i$ 为节点 i 负载功率, $Z_i = R_i + jX_i$ 为节点 i 和 $i-1$ 之间的线路阻抗($1 \leq i \leq N$),则线路潮流计算等效电路见图6。

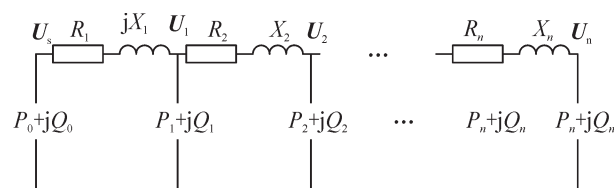


图6 潮流计算等效电路
Fig. 6 Equivalent circuit for power flow calculation

配电线路前推回推潮流计算迭代算法的具体步骤如下:

1) 给定线路首端电压 U_s ,并假定所有节点电压初始值为 $U_i^{(0)}$ (一般设幅值为额定电压,相角为0);

2) 从线路末端开始,逐步前推,计算各节点功率为

$$S_i^{(0)} = Sl_i + Sl_{i+1} + \left(\frac{Sl_{i+1}}{U_{i+1}^{(0)}} \right)^2 Z_{i+1}, \quad 0 \leq i \leq N-1 \quad (3)$$

3) 从线路首端开始,逐段回推,计算各节点电压为

$$U_{i+1}^{(0)} = U_i^{(0)} - \frac{S_{i+1}^{(0)}}{U_{i+1}^{(0)}} Z_i, \quad 0 \leq i \leq N-1 \quad (4)$$

4) 求线路各节点的电压差

$$\Delta U_i^{(0)} = U_i^{(0)} - U_i^{(1)}, \quad 0 \leq i \leq N \quad (5)$$

5) 利用事先给定的收敛标准 ε 判断线路沿线各节点电压是否收敛

$$|\Delta U_i^{(0)}| \leq \varepsilon, \quad 0 \leq i \leq N \quad (6)$$

6) 如不满足收敛标准,将各节点电压计算值 $U_i^{(0)}$ 作为新的节点电压初始值,自第二步开始进入下一次迭代计算。

3 案例仿真计算

3.1 案例线路介绍

线路电压等级为10 kV,线路长度20 km,线路

型号为LGJ-150,每千米电阻为 0.21Ω ,电抗为 0.401Ω ,线路末端负载功率为2 MVA,负载功率因数0.9。假设线路首端电压为10.3 kV,则线路正常运行时沿线电压分布见图7。由图可见,线路末端电压降至8.45 kV,严重低于国标要求,线路有功损耗达到233 kW。

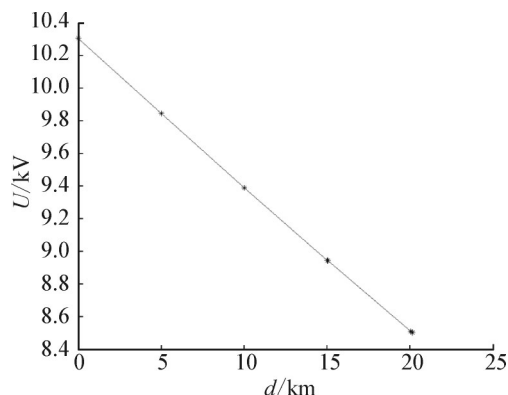


图7 线路正常运行时沿线电压分布
Fig. 7 Voltage distribution along the line during normal operation

3.2 集中式串联补偿仿真

假设在离线路首端10 km处插入一个集中式串补,容抗为 7.6Ω ,则线路沿线电压分布见图8。由图可见,线路末端电压高于9.45 kV,符合国标要求,线路有功损耗减少到189 kW。按年最大负荷利用小时为3 500 h计算,串补投入后功率损耗由233 kW减少到189 kW,每年可降低线损15.4万kWh。

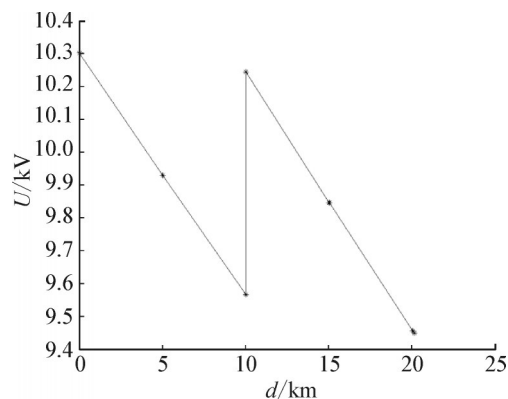


图8 集中式串补投入时,线路沿线电压分布
Fig. 8 Voltage distribution along the line during switching of the centralized series compensation

3.3 分布式串联补偿仿真

假设在离线路首端5 km、10 km、15 km、20 km(负荷前端)处均插入一个分布式串补,容抗为 1.9Ω ,则线路沿线电压分布见图9。由图可见,线路末端电压高于9.45 kV,符合国标要求,线路有功损耗减少

到 189 kW。按年最大负荷利用小时为 3 500 h 计算,串补投入后功率损耗由 233 kW 减少到 189 kW,每年可降低线损 15.4 万 kWh。

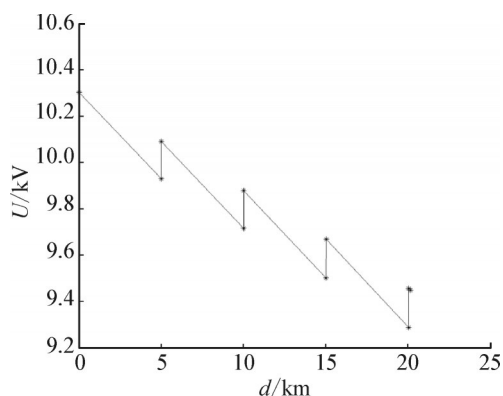


图9 分布式串补均投入时,线路沿线电压分布
Fig. 9 Voltage distribution along the line during switching of the distributed series compensation

3.4 不停电融冰集中式串联补偿仿真

假设在离线路首端 10 km 处插入一个集中式串补,容抗为 7.6Ω ;同时,为了使线路电流达到融冰电流 481.1 A ^[33](以下同),在线路末端接入移动式可调无功源,并使无功功率源输出 6 Mvar 容性无功,则线路沿线电压分布见图 10。由图可见,线路沿线电压最高 11.7 kV,最低 8.0 kV,严重超出了国标的要求范围。

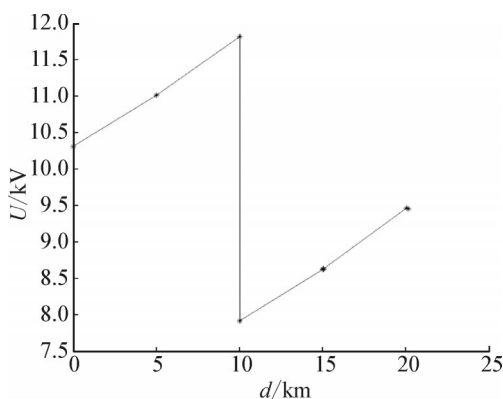


图10 集中式串补融冰时,线路沿线电压分布
Fig. 10 Voltage distribution along the line during centralized series compensation and deicing

3.5 不停电融冰分布式串联补偿仿真

假设在离线路首端 5 km、10 km、15 km、20 km (负荷前端)处均插入一个分布式串补,容抗为 1.9Ω ;同时,为了使线路电流达到融冰电流,在线路末端接入移动式可调无功源,并使无功功率源输出 6 Mvar 容性无功,则线路沿线电压分布见图 11。由图可见,线路沿线电压最高 11 kV,最低 9.45 kV,基本符合国标要求。

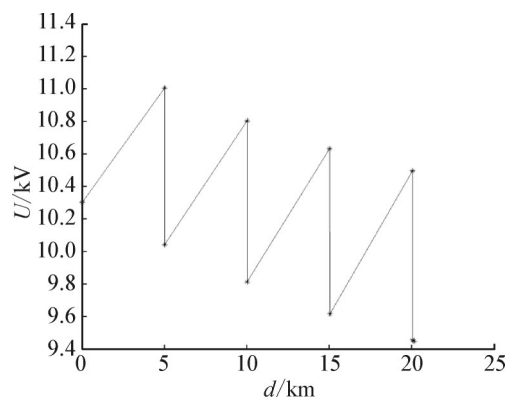


图11 分布式串补融冰时,线路沿线电压分布
Fig. 11 Voltage distribution along the line during distributed series compensation and deicing

4 结语

针对 10 kV 配电线路提升电压质量、降低线路损耗和不停电融冰的需求以及现有技术中存在的问题,提出了一种具有电压和无功优化的 10 kV 配电线路不停电融冰系统的技术方案。该方案采用分布式串联电容器智能补偿装置来解决融冰无功电流造成的电压偏差问题;平时,装置根据设定参数及配电线路的实时运行数据实现电压和无功的优化控制。Matlab 仿真结果证明了这种方案的有效性,为我国配网线路提升电压质量、降低线路损耗和不停电融冰的实现提供了有益的理论探索。同时,由于分布式串联电容器智能补偿装置单套容抗小,可以根据额定电流做成系列产品,然后根据需求的容抗和最大负荷电流(或融冰电流)来配置对应的数量即可,而不必像集中式串联电容器补偿那样需要针对每一条配电线路进行差异化设计,这为配网串补产品的标准化设计和生产提供了有益的思路。

参考文献

- [1] 曾薇,周羽生,黄欣超,等. 考虑冰层下移的输电线路高频融冰温升影响因素分析[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 98-105.
ZENG Wei, ZHOU Yusheng, HUANG Xinchao, et al. Influencing factors analysis of high frequency ice melting temperature rise for transmission lines considering ice moving down[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 98-105.
- [2] 禹晋云,陈鹤,辛业春,等. LCC-MMC 混合型直流融冰装置拓扑结构及控制方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(2): 1-9.
YU Jinyun, CHEN He, XIN Yechun, et al. A study on topology and control method of the LCC-MMC hybrid DC ice-melting device[J]. Power System and Clean Energy, 2023,

- 39(2):1-9.
- [3] 刘博闻,邹国平,魏兴昌,等.用于过电压检测的电流互感器高频等效电路建模方法[J].高压电器,2023,59(3):156-162.
- LIU Bowen, ZOU Guoping, WEI Xingchang, et al. Modeling method of high-frequency equivalent circuit of current transformer for overvoltage detection[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(3):156-162.
- [4] 朱瑞金,董亚丽,唐波.基于改进深度森林的暂态电压稳定快速评估[J].电网与清洁能源,2022,38(6):24-30.
- ZHU Ruijin, DONG Yali, TANG Bo. Fast assessment of transient voltage stability based on improved deep forest[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(6):24-30.
- [5] 陈爽,方翰,石一辉,等.城市变压器中性点地电流特性分析与抑制策略[J].变压器,2022,59(11):28-34.
- CHEN Shuang, FANG Han, SHI Yihui, et al. Characteristic analysis of ground current in urban transformer and suppression strategies[J]. Transformer, 2022, 59(11):28-34.
- [6] 梁一桥,吕佳铭.10 kV配网智能串联补偿装置研制及其工程应用[J].电网技术,2014,38(S2):220-225.
- LIANG Yiqiao, LYU Jiaming. Development and engineering application of intelligent series compensation device for 10 kV distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(S2):220-225.
- [7] 卓谷颖,江道灼,梁一桥,等.改善配网电压质量的固定串补技术研究[J].电力系统保护与控制,2013,41(8):61-67.
- ZHUO Guying, JIANG Daozhuo, LIANG Yiqiao, et al. A research of D-FSC for improving voltage quality in distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8):61-67.
- [8] 王笑棠,王曜飞,宋亚夫,等.串补解决10 kV配电线路高压与低压问题的研究[J].电力电容器与无功补偿,2015,36(2):33-37.
- WANG Xiaotang, WANG Yaofei, SONG Yafu, et al. Research on series capacitor compensation technique solving 10 kV distribution line high-voltage and low-voltage problems[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(2):33-37.
- [9] 赵文忠,王东平.串联无功补偿技术在配网中的应用分析[J].低压电器,2010(5):37-39.
- ZHAO Wenzhong, WANG Dongping. Application analysis of series reactive power compensation in distribution network[J]. Lower Voltage Apparatus, 2010(5):37-39.
- [10] ROBERT ARTHURBARR. Series compensation of distribution and subtransmission lines[D]. Department of ECE, University of Wollongong, 1997.
- [11] S. A. MISKE. Considerations for the application of series capacitors to radial power distribution circuits[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2):306-318.
- [12] M. V. LAT, D. KUNDU, G. BONADIE. Overvoltage protection scheme for series capacitor banks on high voltage distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(3):1459-1465.
- [13] 冯宇宁,蔡志远,苑经纬,等.三维电场覆冰绝缘子PD等离子体仿真研究[J].东北电力技术,2021,42(9):1-5.
- FENG Yuning, CAI Zhiyuan, YUAN Jingwei, et al. Plasma simulation for partial discharge occurs on ice-coated insulators considering three-dimensional dielectric field[J]. Northeast Electric Power Technology, 2021, 42(9):1-5.
- [14] 张小力,周文武,赵丹,等.中冰区输电线路悬垂塔地线不平衡张力取值研究[J].电网与清洁能源,2023,39(1):37-42.
- ZHANG Xiaoli, ZHOU Wenwu, ZHAO Dan, et al. Discussion on the unbalanced tension of transmission line suspension tower ground wire in medium icing area[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1):37-42.
- [15] 潘浩,黄增浩,邓展豪,等.紧凑型线路脱冰跳闸故障数值模拟分析[J].电网与清洁能源,2023,39(9):74-80.
- PAN Hao, HUANG Zenghao, DENG Zhanhao, et al. Numerical simulation analysis of deicing trip faults of compact transmission lines[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(9):74-80.
- [16] 张林,殷啸秋.计及双向互动的大用户用电负荷智能化控制研究[J].电器与能效管理技术,2022(2):21-26.
- ZHANG Lin, YIN Xiaoqi. Research on intelligent control of large users' electricity load considering two-way interaction[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(2):21-26.
- [17] 陈金猛,汪贝,孙萌,等.配电变压器供应商绿色发展能力评估方法的研究[J].变压器,2022,59(11):42-46.
- CHEN Jinmeng, WANG Bei, SUN Meng, et al. Study on evaluation method for green development capability of distribution transformer suppliers[J]. Transformer, 2022, 59(11):42-46.
- [18] 许树楷,黎小林,饶宏,等.南方电网500kW直流融冰装置样机的研制和试验[J].南方电网技术,2008,2(4):32-36.
- XU Shukai, LI Xiaolin, RAO Hong, et al. Development and test of 500 kW DC de-icer in China Southern Power Grid[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(4):32-36.
- [19] 申屠刚,程极盛,江道灼,等.500 kV直流融冰兼动态无功补偿系统研发与工程试点[J].电力系统自动化,2009,33(3):75-80.
- SHEN Tugang, CHENG Jisheng, JIANG Daozhuo, et al. Research and pilot project of DC deicer-SVC system for 500 kV transmission lines[J]. Automation of Electric Power

- Systems, 2009, 33(23):75-80.
- [20]郭捷,江道灼,李海翔.可控整流器型直流融冰兼SVC装置在SVC模式下控制域解析[J].电力系统保护与控制, 2010,38(14):93-97.
- GUO Jie, JIANG Daozhuo, LI Haixiang. Control domain analysis of controlled rectifier type SVC/DC-deicer on SVC mode[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14):93-97.
- [21]马晓红,赵立进,李巍,等.直流融冰技术在贵州电网的应用[J].南方电网技术,2009,3(5):107-110.
- MA Xiaohong, ZHAO Lijin, LI Wei, et al. Application of DC based de-icing technology in Guizhou power grid[J]. Southern Power System Technology, 2009,3(5):107-110.
- [22]梅红明,刘建政.新型模块化多电平直流融冰装置[J].电力系统自动化,2013,37(16):96-102.
- MEI Hongming, LIU Jianzheng. A novel DC ice-melting equipment based on modular multilevel cascade converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16):96-102.
- [23]赵庆明.基于混合子模块的新型模块化多电平直流融冰装置[J].南方电网技术,2015,9(11):36-41.
- ZHAO Qingming. A novel DC ice-melting device based on MMC with hybrid sub-module [J]. Southern Power System Technology, 2015,9(11):36-41.
- [24]浙江大学城市学院.一种10 kV配电线路不停电交流融冰兼电压和无功优化系统及方法:202010604236.1 [P]. 2020.
- [25]梁家诚.一种具有电压和无功优化的10 kV配电线路不停电融冰系统:202010264435.2 [P]. 2020.
- [26]浙大城市学院.10 kV配电线路不停电交流融冰兼电压和无功优化系统:20201230024.3 [P]. 2020.
- [27]徐嘉欣,谢雄,李达义,等.配电网融冰技术综述[J].通信电源技术, 2022, 39(15):26-30.
- XU Jiaxin, XIE Xiong, LI Dayi, et al. Overview of ice melting technology in distribution networks[J]. Telecom Power Technology, 2022, 39(15):26-30.
- [28]李晓明,杨帆,舒欣,等.输电线可控线损防覆冰无功优化控制方法[J].电力系统自动化, 2009, 33(24):4-7.
- [29]杨芳,唐小亮,周亚兵,等.基于不接地配电网的零序电流在线融冰技术[J].广东电力, 2021, 34(4):108-114.
- YANG Fang, TANG Xiaoliang, ZHOU Yabing, et al. On-line ice melting technology for zero-sequence current based on ungrounded power distribution network[J]. Guangdong electric power, 2021, 34(4):108-114
- [30]田洪岩.10 kV配电线路单相接地故障[J].农村电气化, 2007(7):2.
- [31]王林海.10 kV配电线路单相接地故障分析及处理方法[J].甘肃科技, 2010(17):3.
- [32]陈珩.电力系统稳态分析 第3版[M].中国电力出版社, 2007.
- [33]固定式直流融冰装置通用技术条件:DL/T 1218—2013 [S]. 2013.
- General specification for fixed DC de-ice: DL/T 1218—2013[S]. 2013.
- 作者简介:**
- 孙先山(1982—),男,高级工程师,从事配电网运维检修管理工作。
- 盛跃峰(1979—),男,高级工程师,从事配网调度管理工作。
- 赖旬阳(1987—),男,工程师,从事配网调度工作。
- 陈烨(1981—),男,工程师,从事电力工器具检测研究工作。
- 饶崇林(1976—),男,工程师,从事电力电子技术在电力系统中的应用研究工作。
- 施展(2002—),男,助理工程师,研究方向为电力系统规划、电力系统仿真分析。