

±800 kV 特高压复龙换流站西门子大组件换流阀饱和电抗器缺陷分析与改造

唐世雄¹, 喻悦箫², 曹运龙¹, 张鹏¹, 黄宇¹, 赵冉¹, 刘隆晨²

(1. 国网四川省电力公司特高压直流中心, 四川 成都 610042;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要: ±800 kV 复龙换流站双极四阀组换流器采用西门子技术大组件换流阀, 其饱和电抗器结构复杂、可靠性低, 运行时冷却管路极易漏水, 多次导致阀组闭锁。文中在分析西门子阀电抗器典型缺陷的基础上, 结合特高压直流输电工程实际, 设计研制了一种西门子换流阀用新型一体式饱和电抗器, 并成功应用于复龙站换流阀电抗器改造。试验结果表明: 新型饱和电抗器采用的单线圈和单管路设计, 既保持了电抗器外部电气性能、冷却水流量特性、安装结构尺寸及重量等基本不变, 还显著提高了电抗器冷却水路的可靠性, 也降低了运行振动受力及噪声水平, 可满足特高压直流工程技术与应用需要; 对于提高换流阀设备本质安全、保障直流系统能量可用率具有重要的工程价值。

关键词: 直流输电; 换流阀; 饱和电抗器; 漏水; 缺陷改造

中图分类号: TM 72 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2022)03-0083-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220315

Defect Analysis and Modification of Saturable Reactor in Siemens Converter Valve of ±800 kV UHVDC Fulong Converter Station

TANG Shixiong¹, YU Yuexiao², CAO Yunlong¹, ZHANG Peng¹, HUANG Yu¹, ZHAO Ran¹, LIU Longchen²

(1. UHVDC Center of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610042, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The saturable reactor in Siemens converter valve of ±800 kV UHVDC Fulong converter station has complex structure and low reliability, and its water cooling pipeline is easy to leak during operation, which results in the block-locking of DC power system for many times. Based on the analysis of typical defects of saturable reactor in Siemens converter valve and combined with the practice of UHVDC transmission project, a new saturable reactor for Siemens converter valve is designed and developed, which has been successfully applied to the reactor modification of converter valve in Fulong converter station. The test results show that because single winding and single cooling pipeline is designed for the new saturable reactor, not only the external electrical performance, cooling water flow characteristics, structure size and weight of the reactor basically keep unchanged, but also the reliability of cooling water circuit of the reactor is significantly improved, and the operating vibration stress and noise level of the reactor are reduced, which can meet the technology needs of UHVDC transmission project. It has very important engineering application value for improving the intrinsic safety of converter valve equipment and ensuring the energy availability of DC power system.

Key words: HVDC transmission; converter valve; saturable reactor; water leakage; defect modification

0 引言

复奉直流为双极直流系统, 额定电压±800 kV,

基金项目: 国网四川省电力公司科技项目(521997220015)

最高运行电压为±809 kV, 额定电流为 4000 A。复龙换流站通常为整流运行, 单极为 2 个电压相等的 12 脉动换流器串联而成, 换流阀设备为西安西电电力整流器有限责任公司(以下简称西整公司)生产的采用西门子技术的 KGWF-4000/±800 型 ETT 换

流器。该站采用的西整公司西门子大组件换流阀在国内外直流输电工程中有着广泛应用,其安装于双极高、低端 4 个阀厅中。每个阀厅安装有 6 个双重阀(阀塔),阀塔采用悬吊式结构,每个双重阀(阀塔)由 2 个单阀组成,每个单阀包括 2 个阀组件,每个阀组件(阀层)包括 2 个阀模块,每个阀模块由 15 个晶闸管级、2 个饱和电抗器、1 个冲击电容组成^[1]。

复龙站双极四阀组换流阀共有饱和电抗器 384 只。换流阀中串联饱和电抗器,在阀刚触发导通或出现电流突变时限制了电流的变化速率,使阀免于不均匀导通产生局部过热而引起的破坏^[2-3]。当阀导通稳定,流过阀的电流很大时,电抗器饱和,呈现出低阻抗。在阀组件的电气连接中,电流、电压首先接入 2 个串联电抗器,后接入晶闸管级中,起到保护阀组件的作用。饱和电抗器不但能限制晶闸管刚开通时的 di/dt ,还可在晶闸管关断过程中限制 di/dt ,降低反向恢复电荷,抑制其反向过冲^[4]。另外,也可利用足够的阻尼来阻止电流过零时产生振荡涌流,保护晶闸管;在冲击电压下起辅助均压作用,使晶闸管免受电压损坏。

西门子大组件换流阀配置的阳极饱和电抗器采用双线圈与电抗器阻尼电阻的配置结构,运行时需同时冷却线圈及二次电阻^[5-7]。该型电抗器的电气接线、机械结构和冷却水路均较为复杂,其中各类接头多达 20 余处,且整体呈现开放式结构,密封性较差。西门子阀电抗器存在多种设计缺陷,长时间运行各类隐患逐渐暴露,导致电抗器电气特性退化^[8-11],且其冷却回路易漏水、可靠性降低,影响了换流阀设备本质安全及直流输电工程稳定运行。

针对西门子阀电抗器在运行中出现的漏水、发热等重大缺陷隐患,下面基于复龙换流站近 10 年的运行数据,统计换流阀饱和电抗器典型缺陷,并分析成因、制定对策。参考 ABB 公司换流阀饱和电抗器的先进设计经验,设计并试制适用于复龙站西门子大组件换流阀的新型一体式饱和电抗器,开展新型电抗器伏秒特性试验及特高压工程应用。

1 饱和电抗器典型缺陷及分析

西门子大组件换流阀饱和电抗器外形如图 1 所示。该型电抗器的主要部件为铁芯和线圈,采用了“双线圈+电抗器阻尼电阻”的配置结构。将硅钢片

制成 U 形,两组硅钢片对接为环形,组成电抗器的铁芯,并在其连接处放置一层特制的纸板作为气隙。铁芯两侧各环绕 10 匝线圈。电抗器内部布置了二次电缆和细水管,其中二次电缆是电抗器内部的等电位线;细水管分为氟化乙烯丙烯共聚物 (fluorinated ethylene propylene, FEP) 软管和金属水管, FEP 软管用于电抗器散热,金属水管主要用作二次线圈的散热电阻^[12-13]。

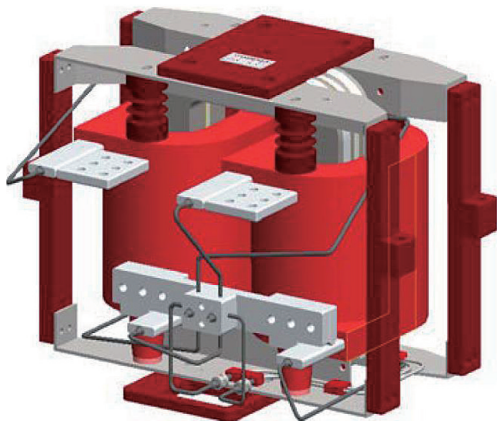


图 1 西门子阀电抗器外形

± 800 kV 复龙换流站投运至今,西门子大组件换流阀饱和电抗器出现了各类型缺陷及故障,包括二次电缆磨损、阻尼金属水管漏水、FEP 水管磨损、铁芯下沉、硅钢片散落等,详见图 2 所示。特别是近 5 年,复龙换流站先后有 7 台阀电抗器在运行过程中或静态水压试验时出现金属水管漏水故障,严重影响了复奉特高压直流工程的安全稳定运行。

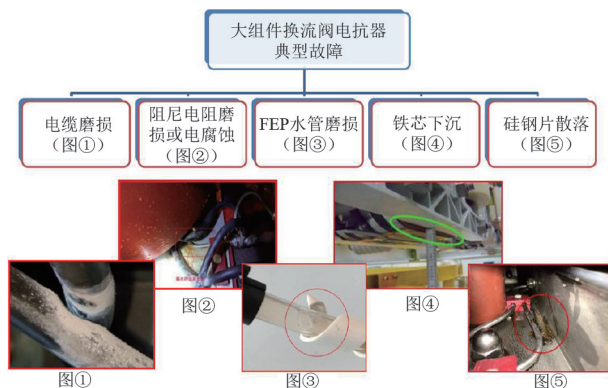


图 2 西门子阀电抗器典型缺陷

1.1 二次电缆与金属水管接触磨损及腐蚀

电抗器二次电缆与金属水管接触磨损如图 3 所示。电抗器内部二次电缆设计过长且电抗器内部空间有限,导致电抗器在运行一段时间之后,电缆与金属水管发生接触。在接触位置,二次电缆首先产生磨损,露出内部芯线。内部芯线暴露后,与阻尼电阻

金属水管之间存在电位差,因此产生放电导致金属水管遭受电腐蚀,长期运行后产生穿孔导致内冷水泄漏。当环境较潮湿时,二次电缆与金属水管接触部分会产生冷凝水,吸附灰尘发生电化学腐蚀。



图3 电缆和水管接触磨损缺陷

1.2 金属水管与环氧压板振动磨损

如图4所示,电抗器金属水管用一个环氧压板固定,两者间是刚性连接。换流阀正常开通关断时产生的电压跳变会导致电抗器出现高频振动,而环氧压板材质较硬,长期振动情况下支撑部位的阻尼电阻金属水管壁磨损严重,极易导致漏水。另外,换流阀长期运行后,水管压板表面积累了一些灰尘,产生了轻微的局部放电现象,对金属水管产生了电腐蚀。在两种因素的共同作用下,金属水管表面破损漏水。



图4 水管与压板振动磨损缺陷

1.3 FEP水管磨损与铁芯脱落散片

由于FEP水管较长,外部缠绕一圈包裹带,并用卡扣固定。由于换流阀运行振动,水管与水管、水管与卡扣、水管与包裹带之间都会产生机械磨损,导致水管漏水。饱和电抗器铁芯是垂直

布置,两侧结构件通过夹紧力将铁芯压紧。长期运行后,内部结构有所松动,夹紧力下降,结构件无法将铁芯压紧,导致铁芯出现下沉(向下位移)的现象,见图5所示。

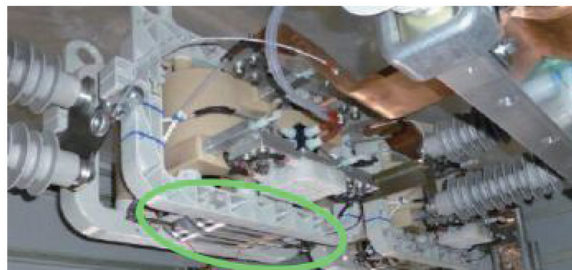


图5 铁芯下沉缺陷

饱和电抗器铁芯是开放的,长期运行后其表面积累灰尘,其内部容易发生局部放电,从而降低了铁芯硅钢片的绝缘强度。绝缘性能下降又会加剧局部放电,产生恶性循环,最后铁芯硅钢片间短路。在电热应力和机械振动的双重作用下,硅钢片出现散落。散落的硅钢片掉落至下层阀塔,导致下层阀塔放电甚至起火。另外,电抗器铁芯腐蚀加长期振动散片,还会造成阻尼电阻和边框搭接产生放电,长期作用下击穿金属水管引发渗漏。

2 新型饱和电抗器的结构设计和性能验证

2.1 新型饱和电抗器的结构及优势

基于上述分析,不难看出西门子阀阳极饱和电抗器的运行缺陷主要集中于铁芯和水管,而铁芯作为饱和电抗器的核心部件,在传统设计结构的基础上难以实现优化升级,隐患无法得到根治。因此,针对上述传统西门子换流阀电抗器的缺陷与隐患,参考ABB技术小组换流阀饱和电抗器的成熟设计和运行经验,设计了如图6所示的新型一体式结构的饱和电抗器,用于替换复龙站西门子大组件换流阀的电抗器。

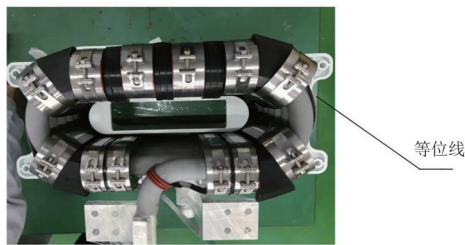
如图7所示,该型饱和电抗器采用中空的圆形铝管制成电抗器的线圈,运行时内冷水从铝管中流过,为线圈散热。铁芯采用分布式布局,固定在线圈上,并置于玻璃钢的绝缘外壳中,其间再用环氧树脂填充。环氧树脂既是固体绝缘材料,也可在铁芯和线圈之间起到缓冲作用。新型饱和电抗器不必配置二次电缆,彻底消除了二次电缆导致的多种缺陷。



图 6 新型饱和电抗器外观



(a) 铝制环形线圈



(b) 分布式布局铁芯

图 7 新型饱和电抗器内部结构

相比较于原有设计,新型饱和电抗器的优点如下:

1) 新型饱和电抗器保持外部电气性能、冷却水流量特性、安装结构尺寸及质量基本不变,其电气参数及接口与原电抗器保持一致,不需要改变换流阀设计。

2) 新型饱和电抗器优化了水路设计,水路采用单一路径通流形式,且整体封装于电抗器内部;相比老式电抗器,其冷却回路减少两路,且只有“一进一出”两个接头,水路接头数量由 12 个减少到 2 个。新设计减少了水管支路和接头数量,大幅消除水路接头渗漏水隐患,有效避免冷却回路暴露于空气中易受外部因素影响而漏水,显著提高了冷却水路的可靠性。

3) 新型饱和电抗器采用单线圈设计,不再需要配置电抗器二次阻尼电阻及其等电位连接电缆,彻底摒弃了薄壁金属水管用作二次阻尼电阻的设计,消除了薄壁金属水管漏水和二次电缆磨损等隐患。

4) 新型饱和电抗器采用全包裹式结构,线圈、

铁芯和外壳封装为一个整体,内部填充绝缘材料,在保证密闭性同时提高绝缘特性。通过优化结构设计^[14],降低了噪声和振动,避免原电抗器运行中出现的硅钢片脱落、漏水等问题。

2.2 新型饱和电抗器的试验验证

为了确保新型饱和电抗器满足西门子大组件换流阀的技术要求,需对饱和电抗器及其阀组件开展多项试验,其中:饱和电抗器的本体试验 13 项,包括伏秒特性试验、工频和冲击电压耐受试验、工频电感和直流电阻测量、热循环和热态冲击试验、线圈温升试验、故障电流耐受试验等;阀组件试验 4 项,分别为最大连续运行负载试验、最大暂态运行负载试验、故障电流试验、非周期触发试验。

直流输电换流阀用饱和电抗器的不饱和电感值及伏秒积是其运行关键电气参数,按照目前西门子换流阀设计报告中所提供的晶闸管参数及直流工程经验,要求阀电抗器的不饱和时间大于 $2 \mu\text{s}$,且电流上升率不高于 $350 \text{ A}/\mu\text{s}$,以避免晶闸管因 di/dt 过高而损坏,换流阀电气设计时还应考虑一定的晶闸管保护裕度。

饱和电抗器的伏秒特性试验是评估其保护特性的重要试验,要求在 58 kV 冲击电压下,电压电流波形无异常,伏秒积满足 $(155 \pm 5\%) \text{ V} \cdot \text{ms}$ 。西门子阀饱和电抗器和新型饱和电抗器的保护特性通过电流时间曲线表征,如图 8 所示。试验结果表明,新型电抗器特性满足晶闸管开通时电流上升率要求,且电气特性与原西门子电抗器保持一致。

同时,在特高压换流阀组件合成试验平台上对新型饱和电抗器和老式西门子阀电抗器开展了运行振动对比试验。

试验结果表明,新式饱和电抗器的振动受力及噪声水平全面优于老式西门子阀电抗器:

1) 振动加速度:新式电抗器振动强度约相当于老式电抗器振动 $30\% \sim 40\%$ 。

2) 振动噪声:新型饱和电抗器为 82.86 dB ,西门子阀电抗器为 87.02 dB 。

3 新型饱和电抗器的工程应用

在 $\pm 800 \text{ kV}$ 特高压复龙换流站的西门子大组件换流阀中换装上述新型饱和电抗器,在 2021 年度“迎峰度夏”间持续监测其运行状态,最大运行电流

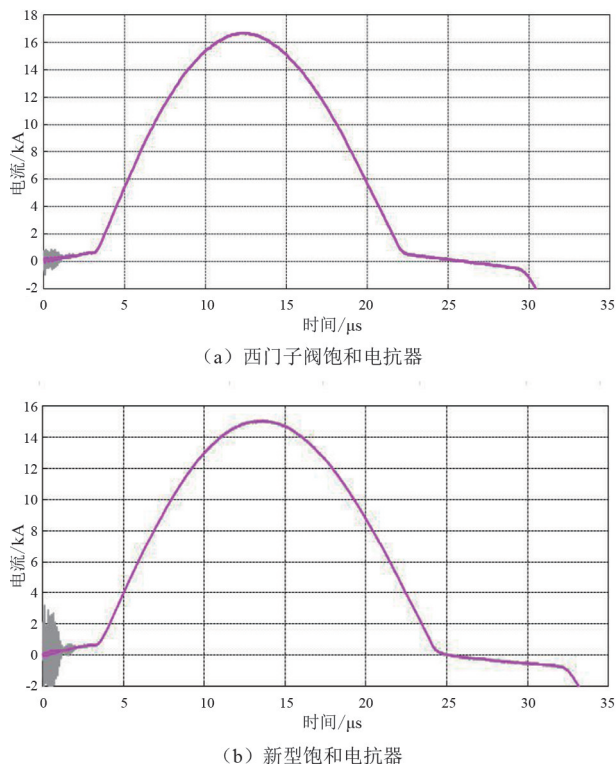


图8 饱和电抗器电流时间曲线

为4000 A,输送功率为6400 MW。红外测温结果如图9所示,发现新型饱和电抗器运行温度在40~55℃正常范围,最高温度为52.5℃,略低于原饱和电抗器的最高运行温度53.4℃。经运行巡视、红外测温和紫外放电检测,确认所有换装的饱和电抗器均运行良好,未出现放电现象,换流阀整体及其元部件均工作正常,符合工程技术与应用要求。



图9 新型饱和电抗器运行红外图谱

4 结论

上面基于复龙换流站西门子大组件换流阀技术

特点与运行故障统计,分析了换流阀饱和电抗器的典型缺陷及其成因,研制了一种可替换老式西门子阀电抗器的新型一体式饱和电抗器,并成功用于复龙站换流阀电抗器改造,得到了以下结论:

1) 西门子阀电抗器采用双线圈与阻尼电阻的配置,导致电气接线、机械结构和冷却水路复杂,且整体呈开放式结构、密封性差易漏水。长时间运行,该型阀电抗器多次出现了二次电缆与金属水管接触磨损及腐蚀、金属水管与环氧压板振动磨损、FEP水管磨损与铁芯脱落散片等多种缺陷。

2) 新型饱和电抗器采用单线圈和单管路设计,既保持了电抗器的外部电气性能、冷却水流量特性、安装结构尺寸及重量等基本不变,还显著提高了电抗器冷却水路的可靠性,也降低了运行振动受力及噪声水平,可满足西门子特高压换流阀设备的应用要求。

参考文献

- [1] 赵晚君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 王华锋, 林志光, 张海峰, 等. ±800 kV 特高压直流工程换流阀故障分析与优化设计方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 67-73.
- [3] 刘隆晨, 张星海, 李亚伟, 等. 特高压直流输电换流阀用晶闸管反向恢复特性研究与分析[J]. 四川电力技术, 2017, 40(1): 51-54.
- [4] 陈鹏, 孙宝奎, 纪锋. ±1100 kV 特高压直流换流阀饱和电抗器样机的失效模式与加速寿命试验方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(8): 2612-2617.
- [5] 米彦, 邓胜初, 桂路, 等. ±1100 kV 特高压直流换流阀用饱和电抗器的铁损及温度分布仿真[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3359-3367.
- [6] 纪锋, 曹均正, 陈鹏, 等. HVDC 整流侧阀饱和电抗器铁损仿真研究[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2680-2684.
- [7] 张长庚, 王家俊, 李永建, 等. 特高压换流阀阳极饱和电抗器动态铁芯损耗模拟[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 2158-2168.
- [8] 陈鹏, 曹均正, 魏晓光, 等. 高压直流换流阀用饱和电抗器的暂态电路仿真模型[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 288-293.
- [9] 纪锋, 曹均正, 陈鹏, 等. 高压直流输电系统逆变侧阀饱和电抗器电气应力研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2579-2585.
- [10] 高雪恒, 唐志国, 仲崇山, 等. 高压直流换流阀饱和电抗

器脉冲电流应力仿真研究[J].高压电器,2018,54(6):113-119.

- [11] 张雷,王康,杨晓平,等.一种改进型换流阀饱和电抗器电流应力分析[J].电力电子技术,2020,54(8):22-25.
- [12] 张雷,刘宁,董妍波,等.特高压直流换流阀电抗器端子发热问题研究[J].高压电器,2016,52(7):50-54.
- [13] 刘磊,汪得利,黄华,等. ± 1100 kV/5455 A 特高压直流换流阀饱和电抗器散热设计与研究[J].高压电器,2020,56(7):23-28.

- [14] 陶敏,姚舒,董妍波,等.特高压换流阀用饱和电抗器的振动研究与优化方案[J].高压电器,2019,55(12):200-204.

作者简介:

唐世雄(1990),男,工程师,主要从事特高压直流换流站运维技术工作;

喻悦箫(1993),女,硕士,主要从事柔性直流输电及电力电子技术研究。

(收稿日期:2021-11-09)

(上接第 56 页)

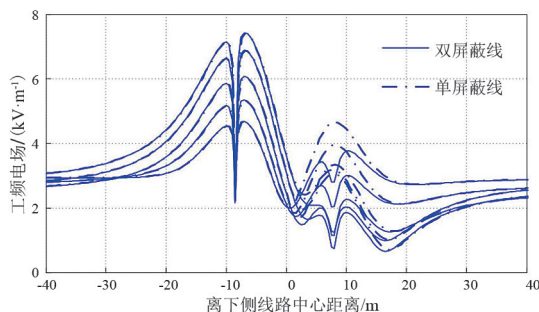


图 8 架设屏蔽线后线路下方不同横断面 E 值

架设屏蔽线后交叉线路下方 E 值如图 9 所示。

可以看出,CPSO 寻优位置基本在畸变的马鞍面电场峰值附近,架设单屏蔽线可以将加权场强均值从 3.91 kV/m 降至 3.29 kV/m,而架设双屏蔽线降可至 2.85 kV/m,场强峰值位置处降低较明显,屏蔽效果良好。

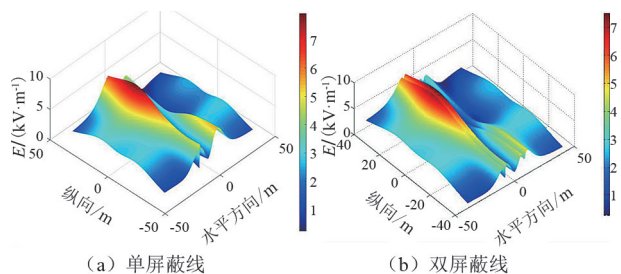


图 9 架设屏蔽线后交叉线路下方 E 值

4 结论

上面采用有限元法,通过一系列仿真实验,在构造的区域目标函数基础上,研究线路相序布置和交叉角对空间电磁环境的影响,并给出可用于工程的相序排列方式及交叉角建议:为简化设计难度,在满足设计要求时,上层双回路宜采用逆相序布置,交叉

角可适当减小,以降低空间电磁污染。

采用架设屏蔽线的方式改善地面电磁环境,并引入混沌变参数粒子群算法,对屏蔽线架设位置进行目标寻优,寻优过程中,动态减小混沌控制参数值,使算法在迭代过程中逐步减弱混沌运动,进而在保留混沌粒子群优化算法优点的基础上,又增添了粒子群体的多样性,实现快速跳出局部最优点,寻找全局最优解。通过 CPSO 算法对屏蔽线架设位置寻优,实现区域电磁环境屏蔽效果最优。

参考文献

- [1] 环境保护部.电磁环境控制限值:GB 8702—2014[S].北京:中国环境科学出版社,2014.
- [2] 宋福根,林韩,兰生.特高压输电线路交叉跨越区域工频电场分布计算[J].电气技术,2016(1):6-10.
- [3] 虎涛涛,单要楠.一种混沌变参数粒子群优化算法[J].自动化仪表,2017,38(3):37-40.
- [4] 肖冬萍,姜克儒,张占龙,等.工频电磁环境条件约束下的超/特高压输电线路结构布局寻优方法[J].中国电机工程学报,2015,35(9):2333-2341.
- [5] 倪正光,杨仕友,钱秀英.工程电磁场数值计算[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [6] 陈楠,文习山,刘波,等.高压输电导线三维工频电磁场计算与测量[J].电网技术,2011,35(3):159-164.
- [7] 倪琳,段超,贾春兰.差分进化混合粒子群算法求解项目调度问题[J].计算机应用研究,2011,28(4):1286-1289.

作者简介:

马明智(1987),男,硕士,工程师,主要研究方向为输电线路电气设计与电力系统电磁计算;

杨昌杰(1993),男,助理工程师,主要研究方向为输电线路电气设计。

(收稿日期:2021-10-13)