

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2025.1.181

中图分类号: TM868

文献标志码: A

基于遗传算法的高压直流供电系统管理 效率优化研究

吴 军¹, 母国辉¹, 刘文俊¹, 李梦琪²

(1. 国网浙江宁波市奉化区供电有限公司, 宁波 315500; 2. 东北电力大学经济管理学院, 吉林 132012)

摘要: 高压直流供电系统供电负荷易受到信号中断的影响而造成供电系统无法稳定运行, 为了有效提高供电系统管理效率, 提出 1 种基于遗传算法的高压直流供电系统管理效率优化方法。将管理效率优化转化为负荷分配问题, 采用效率优化的负荷分配控制策略合理地分配高压直流供电系统中的负载电流; 采用遗传算法对高压直流供电系统管理效率进行优化处理, 实现高压直流供电系统管理效率最优化。实验结果表明: 可以通过双电源独立运行来调节系统管理效率, 从而达到提高供电系统效率的目的; 所提方法运行时间可保持在 90~120 s, 优化时间短、效率高。

关键词: 高压直流; 供电系统; 管理效率; 遗传算法; 负荷分配

Research on Management Efficiency Optimization of HVDC Power Supply System Based on Genetic Algorithm

WU Jun¹, MU Guohui¹, LIU Wenjun¹, LI Mengqi²

(1. State Grid Zhejiang Ningbo Fenghua Power Supply Company, Ningbo 315500, China; 2. School of Economics and Management, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: The power supply load of a high voltage direct current (HVDC) power supply system is prone to be affected by signal interruption, which will result in the unstable operation of power supply system. To effectively improve the management efficiency of power supply system, an optimization method for the management efficiency of HVDC power supply system based on genetic algorithm is proposed. The optimization of management efficiency is transformed into the problem of load distribution, and a load distribution control strategy of efficiency optimization is adopted to reasonably distribute the load current in the HVDC power supply system. The genetic algorithm is used to optimize the management efficiency of the HVDC power supply system, so as to optimize its management efficiency. Experimental results show that the system management efficiency can be adjusted through the independent operation of dual power supplies, thereby improving the efficiency of power supply system. In addition, the running time of this method was maintained at 90–120 s, the optimization time was short, and the efficiency was high.

Keywords: High voltage direct current (HVDC); power supply system; management efficiency; genetic algorithm; load distribution

高压直流供电系统是整个城市轨道交通电力系统的动力来源, 也是安全运行的基础保障, 其由交流配电单元、整流模块、蓄电池、直流配电单元、电池管理单元、绝缘检测单元及监控模块组成。系

统在稳压工作的基础上, 能与蓄电池并联以浮充工作方式向数据中心供电。高压直流供电系统可有效避免输电材料浪费的现象, 减少损耗; 使用高压直流供电系统进行数据中心供电时, 可不受输电距离限制, 稳定性较好, 不易出现短路现象, 一般采用双极线路提高其运行的可靠性。但是, 高压直流电

源属于一级供电负荷,如果交通中断,将扰乱交通运输计划和车辆运行,对社会产生重大影响^[1-2]。为了提高高压直流供电系统的管理效率,可以通过优化供电方案和继电保护配置来适应供电系统的新要求。开发新的保护算法可以保证继电保护装置的可靠性和灵敏度,还可以进行牵引故障分析、快速维护和故障排除^[3-5]。

近年来,关于高压直流供电系统优化的相关研究较多,如黄梦华等^[6]研究的高压直流定无功功率交流故障恢复方法,分析了受端交流系统故障时直流系统固有的无功功率动态特性,探讨了交流系统与换流站在不同交流电压水平下的无功功率交换能力;杨博等^[7]针对柔性高压直流输电系统的交互式教-学优化算法,在原始教-学优化算法中引入多个班级来扩大搜索范围,通过深度交互学习实现精确搜索,交互式教-学优化算法能够合理衡量搜索范围和搜索精度。但上述方法的管理效率优势不显著,稳定性较差。为此,本文有效结合效率优化分配控制策略和遗传算法,共同实现高压直流供电系统管理效率优化,其创新之处在于采用效率优化分配控制策略,通过双电源独立运行来调节系统整体效率,旨在提高供电系统整体管理效率,并以高压直流供电系统在管理效率最优时的负荷分配情况为调节系数,为提升高压直流供电系统供电能力提供依据。

1 基于遗传算法的高压直流供电系统管理效率优化

1.1 高压直流供电系统管理效率优化方法设计

高压直流供电系统是一种模块化设计的直流供电系统,蓄电池可以作为备用电源进行供电。在高压直流供电系统中,交流电源经过1次整流变换后到达负载侧的直流变换器,其供电方式结构简单,供电效率和可靠性均较高。几十年的实际应用证明,模块化设计的直流供电系统是安全、可靠、简单的供电系统。同时,供电系统还具有易于扩展和维护的特点,但其存在1个限制条件,即直流供

电系统是模块化的,因此需要将负载电流合理地分配给高压直流供电系统的供电模块,故提出效率优化分配的控制策略,以达到系统整体管理效率最优的目的。

首先,需对高压直流电源负荷进行分配,结合效率优化的高压直流电源负荷分配原理,进行效率优化分配的控制策略设计,效率优化的高压直流电源负荷分配原理如图1所示。

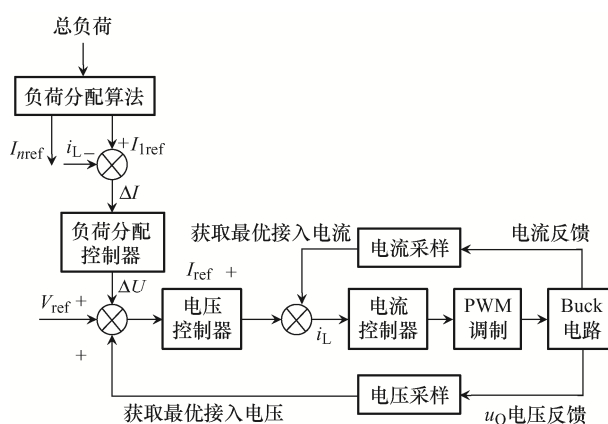


图1 效率优化的高压直流电源负荷分配原理

Fig. 1 Efficiency-optimized load distribution principle for HVDC power supply

基于图1的高压直流电源负荷分配原理,如果高压直流供电系统中有 n 个直流电源模块并联,那么供电系统管理效率最高时给定电流分别为 I_{1ref} 、 I_{2ref} 、 \dots 、 I_{nref} ,供电系统管理效率最高时给定电压为 V_{ref} ,最优接入电流为 i_L ,负荷分配控制器接收到电流的差值为 ΔI ,负荷分配控制器接收到电压的差值为 ΔU ,此时负荷分配控制器为均流控制器,其中外环给定信号可以用特定的负荷分配算法获取^[8-9]。

由 n 个电源模块并联构成高压直流供电系统,系统的整体管理效率 η 可表示为

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out1} + P_{out2} + \dots + P_{outn}}{P_{in1} + P_{in2} + \dots + P_{inn}} = \frac{P_{out1} + P_{out2} + \dots + P_{outn}}{P_{out1}/\eta_1 + P_{out2}/\eta_2 + \dots + P_{outn}/\eta_n} \quad (1)$$

式中: P_{out} 为系统的输出总功率; P_{in} 为系统的输入总功率; P_{outn} 为第 n 个电源模块的输出功率; P_{inn} 为第 n 个电源模块的输入功率; η_1 、 η_2 为第1个、

第 2 个电源模块的管理效率; η_n 为第 n 个电源模块的管理效率。输出电流的函数与直流电源的管理效率有关, 并联直流电源的总体管理效率可将式(1)简化为

$$\eta = f(I_{o1}, I_{o2}, \dots, I_{on}) \quad (2)$$

式中, I_{on} 为第 n 个电源模块的输出电流有效值。

1.2 基于遗传算法实现管理效率优化

在一定范围内, 电流在每个电源模块内均存在输出。其中, 电流输出下限为临界连续电流, 电流输出上限为额定电流, 电流上、下限的浮动范围不唯一, 全部电流输出值为负载总电流。为实现管理效率优化, 将问题简化为在约束条件基础上计算最优值, 因此本文采用遗传算法求解供电系统管理效率的优化问题, 进行效率优化的负荷分配。该算法本质是 1 种基于遗传变异和自然选择等生物学机制的全局概率搜索算法, 具有很高的健壮性、并行性和可扩展性。其基本思想简单, 具有良好的简单性和可操作性, 可用于全局逼近和优化^[10-12]。

遗传算法设计如下:

1) 染色体编码

为了优化系统管理效率, 遗传算法的性能和程序运行将影响编码方案的选择。初始总体中的个体由传输周期 T_n 和浮点码表示^[13], 解码的精度取决于代码的总位数。一维染色体编码如图 2 所示。

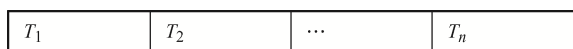


图 2 一维染色体编码

Fig. 2 One-dimensional chromosome coding

2) 群体初始化

通过随机初始化, 以染色体为代表标识, 利用初始化方法, 生成初始群体染色体, 其可以表示为传递连接时间的代码, 初始化方法也可同时满足约束条件。群体大小是影响遗传算法最终性能的主要因素, 作为初始种群的个体, 通过初始化函数 initializega 实现群体初始化。

3) 选择操作

利用选择操作方法从上述种群中选择优秀个

体, 并淘汰下一代样本, 选择标准多来源于个体适应度。根据目标函数 $f(Ni)$ 的计算, 按照个体适应度所占比例高度 $f(Ni)/\sum f(Ni)$ ($\sum f(Ni)$ 为适应度的总和), 挑选进入下一代的样本, 并计算出不同个体被选择的概率。

4) 交叉变异

新的子代是对群体中父代个体进行随机配对交叉后产生的, 随机配对交叉有 2 种交叉方式, 其中一种为节点交叉, 是将节点和数据信息进行相互交叉; 另一种为随机单点交叉, 是将选定节点的信息全部交换, 配对随机设定^[14]。在交叉过程中对交叉进行变异处理, 使变异数据可以用于反映局部节点的问题和不足, 使群体数据多样性得到加强, 交叉变异可以针对单独节点进行变异, 按位进行操作, 为此采用 nonUnifMutate 函数进行 x 数变异操作, 采用对浮点数非常有效的 arithXover 函数进行交叉操作^[15]。依据上述内容, 得出的遗传算法流程如图 3 所示。

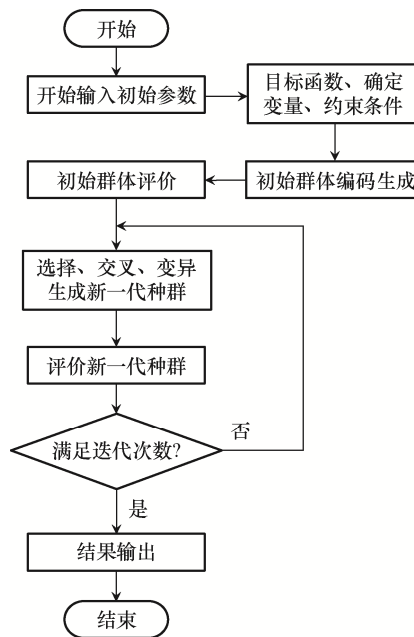


图 3 遗传算法流程

Fig. 3 Flow chart of genetic algorithm

再将遗传算法应用到管理效率优化过程中, 由于系统管理效率是 1 个有关 $I_{o1}, I_{o2}, \dots, I_{on}$ 的多元多次函数, 求解系统管理效率最大解的问题可以转化为效率优化的负荷分配^[16]问题, 可表示为

$$\begin{aligned} \max \eta &= \max f(I_{o1}, I_{o2}, \dots, I_{on}) = \\ & \max \frac{\sum_{i=1}^n I_{oi}}{\sum_{i=1}^n \frac{I_{oi}}{\eta_i(I_{oi})}} = \max \frac{I_{load}}{\sum_{i=1}^n \frac{I_{oi}}{\eta_i(I_{oi})}} \end{aligned} \quad (3)$$

将约束条件代入式(3), 可以得到求解效率最大值问题的表达式, 即

$$\begin{cases} \max f(I_{o1}, I_{o2}, \dots, I_{on}) = \max \frac{I_{load}}{\sum_{i=1}^n \frac{I_{oi}}{\eta_i(I_{oi})}} \\ I_{\min i} \leq I_{oi} \leq I_{\max i} \\ \sum_{i=1}^n I_{oi} = I_{load} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $I_{\min i}$ 为第 i 个并联电源模块的最小电流值^[17]; $I_{\max i}$ 为第 i 个并联电源模块的额定输出电流有效值; I_{load} 为并联直流供电系统负载电流有效值; $i=1, 2, \dots, n$ 。

将式(4)代入式(3), 可得

$$\begin{cases} \max f(I_{o1}, I_{o2}, \dots, I_{on}) = \\ \max \frac{I_{load}}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{I_{oi}}{\eta_i(I_{oi})} + \frac{I_{load} - \sum_{i=1}^{n-1} I_{oi}}{\eta_n(I_{load} - \sum_{i=1}^{n-1} I_{oi})}} \\ I_{\min i} \leq I_{oi} \leq I_{\max i} \quad i=1, 2, \dots, n-1 \\ I_{\min i} \leq I_{load} - \sum_{i=1}^{n-1} I_{oi} \leq I_{\max n} \end{cases} \quad (5)$$

为了简化管理效率最优的负荷分配问题, 管理效率优化结果达到 $\nabla f(I_{o1}, I_{o2}, \dots, I_{o(n-1)}) = 0$ 时, 需要解决 $n-1$ 元函数求极值的问题^[18]。获取 $n-1$ 元函数极值的必要条件和充分条件, 即利用梯度法求得多元函数极大值, 以极大值的取值范围为约束条件, 以解决传统遗传算法容易陷入局部最优的情况, 求解过程为

$$\begin{cases} f'_{I_{o1}}(I_{o1}, I_{o2}, \dots, I_{o(n-1)}) = 0 \\ f'_{I_{o2}}(I_{o1}, I_{o2}, \dots, I_{o(n-1)}) = 0 \\ f'_{I_{o(n-1)}}(I_{o1}, I_{o2}, \dots, I_{o(n-1)}) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

方程的求解式中包含 $n-1$ 个偏微分。系统总管理效率函数的 $n-1$ 个微偏分, 是指 $n-1$ 个电源模块

输出电流的微偏分, 表达式为 $f'_{I_{oi}} = \partial \eta / \partial I_{oi}$ 。至此, 以式(6)为依据, 完成了高压直流供电系统管理效率优化的问题。

2 实验与分析

为验证本文方法的应用效果, 搭建高压直流供电系统实验平台进行系统调试。该高压直流供电系统包含三相隔离变压器、上位机、隔离放大电路、中央处理单元及 2 个电源模块, 每个电源模块上串联 1 个小电阻。经断路器后, 其中 2 个电源模块输入并建立 2 段母线, 每个分路输出各自从 2 路母线经分路断路器和隔离保护二极管后再汇合输出, 以此获取高压直流供电系统调试结果, 如图 4 所示。

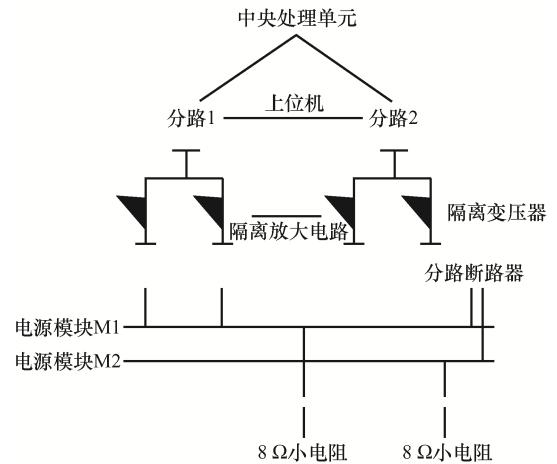


图 4 高压直流供电系统简式结构

Fig. 4 Simplified structure of HVDC power supply system

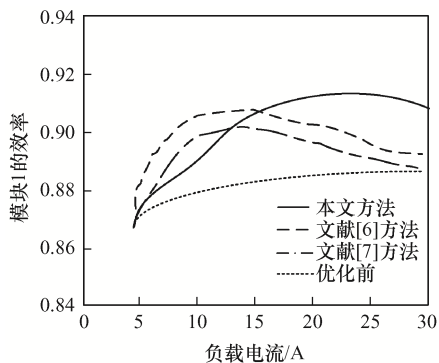
图 4 中, 双电源运行调节系统在双电源切换过程中经过 2 个电源模块接收 2 路直流输入, 既可以随时同时接入, 也可以经过多路分路馈出, 是 1 个有效地解决充、放电回路干扰的应用系统。为验证本文方法的管理效率优化效果, 令系统中 2 个电源模块单独运行一段时间, 进行多次实验后统计 2 个电源模块在负载不同电流情况下的效率, 统计结果如表 1 所示。

选取文献[6]高压直流定无功功率交流故障恢复方法和文献[7]针对柔性高压直流输电系统的交互式教-学优化方法, 与本文方法进行对比分析。以表 1

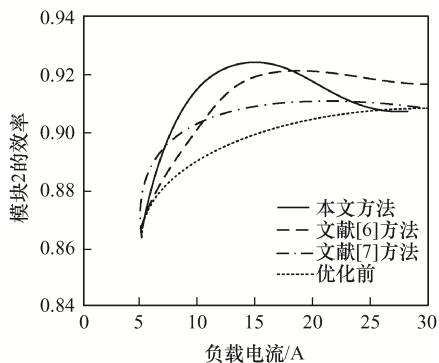
表 1 2 个电源模块的负载电流与效率的对应关系
Tab. 1 Relationship between load current and efficiency for two power modules

| 负载电流/A | 电源模块 1 效率比值 | 电源模块 2 效率比值 |
|--------|-------------|-------------|
| 5 | 0.85 | 0.84 |
| 10 | 0.87 | 0.88 |
| 15 | 0.89 | 0.90 |
| 20 | 0.89 | 0.88 |
| 25 | 0.88 | 0.88 |
| 30 | 0.87 | 0.89 |

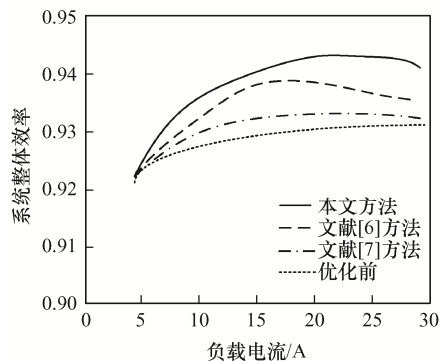
为基础, 生成优化前的效率曲线, 应用 3 种方法分别对该系统进行管理效率优化, 优化后的电源模块 1、电源模块 2 及系统的整体效率优化结果如图 5 所示。可以看出: 与优化前的效率曲线相比, 3 种方法优化后系统电源模块 1、电源模块 2 及系统整体效率曲线均呈现一定程度的上升, 但上升程度存在差异。如图 5(a)所示, 在负载电流较小时, 本文方法优化后电源模块 1 的效率低于文献[6]、文献[7]方法优化后的效率; 但当负载电流变大时, 本文方法优化后电源模块 1 的效率高于文献[6]、文



(a) 电源模块 1 优化后效率



(b) 电源模块 2 优化后效率



(c) 系统整体优化后的效率

图 5 3 种方法优化后的效率对比

Fig. 5 Comparison of efficiency among three methods after optimization

献[7]方法。如图 5(b)所示, 与电源模块 1 相反, 在负载电流较小时, 本文方法优化后电源模块 2 的效率高于文献[6]、文献[7]方法优化后的电源模块 2 的效率; 在负载电流变大时, 本文方法优化后电源模块 2 的效率比文献[6]、文献[7]方法低。分析图 5(c)可知, 本文方法优化后的系统整体效率上升尤其显著, 原因在于本文方法并不是简单地改变其中 1 个电源的运行效率, 而是采用效率优化分配控制策略, 通过双电源独立运行效率来调节系统整体效率, 从而达到了提高供电系统效率的目的。

为验证本文方法的管理效率优化效果, 统计 3 种方法的优化时间, 结果如图 6 所示, 可知: 随着数据规模的增加, 3 种方法的优化时间随之增加, 但不同数据规模下本文方法的优化时间始终处于最低值。在数据规模为 2 000 MB 时, 本文方法的优化运行时间仅约为 110 s, 原因在于本文方法采

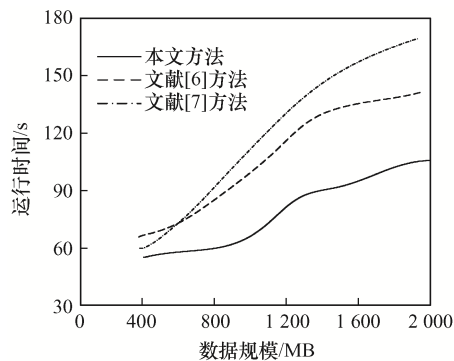


图 6 3 种方法优化的运行时间

Fig. 6 Running time of three methods for optimization

用遗传算法求解供电系统管理效率的优化问题,利用梯度法求得多元函数极大值。实验结果表明,优化后的系统整体效率上升尤其显著,且优化运行时间保持在 90~120 s,优化运行时间较短。

3 结语

针对现有方法的管理效率优势不显著、稳定性较差等问题,本文提出了 1 种基于遗传算法的高压直流供电系统管理效率优化方法,基于效率优化的高压直流电源负荷分配原理进行基于效率优化分配的控制策略设计,用梯度法求得多元函数极大值,以此为依据完成高压直流供电系统管理效率优化。实验结果表明,本文所提优化方法可以提升高压直流供电系统的整体效率,节省优化时间。

本次研究尚未考虑混合多馈入高压直流系统的最大效率控制方法,无法实时确定效率参考值的问题,这将是后续研究的方向。

参考文献:

- [1] 陈辉. 并行程控技术在城市轨道交通供电系统中的运用[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(S2): 22-24.
Chen Hui. Application of parallel programmable control technology in urban rail transit power supply system [J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(S2): 22-24. (in Chinese)
- [2] 娄栋乾. 城市轨道交通线网运营施工调度管理系统的建设与实践[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(S2): 55-57, 72.
Lou Dongqian. Construction of the dispatching management system for rail transit network operation and practice [J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(S2): 55-57, 72. (in Chinese)
- [3] 赵文强, 高得力, 马云龙, 等. 基于混合式 MMC 的混合高压直流输电系统启动策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 62-70.
Zhao Wenqiang, Gao Deli, Ma Yunlong, et al. Startup strategy of hybrid HVDC transmission system based on hybrid MMC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 62-70. (in Chinese)
- [4] 杨泽鑫, 肖健梅, 王锡准, 等. 基于差分进化算法的船舶能量管理系统优化策略[J]. 中国舰船研究, 2018(4): 134-141.
Yang Zexin, Xiao Jianmei, Wang Xihuai, et al. Optimization strategy of ship energy management system based on differential evolution algorithm [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018(4): 134-141. (in Chinese)
- [5] 行鹏, 胡宇, 陈明涛, 等. 高压直流输电用电力电子装置的短路电流试验系统研究[J]. 高压电器, 2018, 54(9): 221-225.
Xing Peng, Hu Yu, Chen Mingtao, et al. Research on short-circuit current test system of power electronic devices for HVDC power transmission [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(9): 221-225. (in Chinese)
- [6] 黄梦华, 汪娟娟, 李瑶佳, 等. 高压直流定无功功率交流故障恢复方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 143-148.
Huang Menghua, Wang Juanjuan, Li Yaojia, et al. Constant reactive power control during AC fault recovery for HVDC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 143-148. (in Chinese)
- [7] 杨博, 束洪春, 张瑞颖, 等. 针对柔性高压直流输电系统的交互式教-学优化算法[J]. 控制与决策, 2019, 34(2): 325-334.
Yang Bo, Shu Hongchun, Zhang Ruiying, et al. Interactive teaching-learning optimization for VSC-HVDC systems [J]. Control and Decision, 2019, 34(2): 325-334. (in Chinese)
- [8] 胡鹏, 肖宝弟. 城市轨道交通车辆基地运营管理系统的研究[J]. 铁道运输与经济, 2019, 41(10): 114-118.
Hu Peng, Xiao Baodi. A study on the operation management system for urban rail rolling stock depot [J]. Railway Transport and Economy, 2019, 41(10): 114-118. (in Chinese)
- [9] 钟异莹, 陈坚, 邵毅明, 等. 基于DEA的轨道交通与常规公交换乘效率测评模型[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(5): 1446-1449.
Zhong Yiyang, Chen Jian, Shao Yiming, et al. Evaluation model of transfer efficiency between urban rail transit and bus transit based on DEA [J]. Application Research of Computers, 2018, 35(5): 1446-1449. (in Chinese)
- [10] 刘昌盛, 谢云云, 周前, 等. 高压直流输电参与的电网恢复路径优化方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2579-2588.

- Liu Changsheng, Xie Yunyun, Zhou Qian, et al. Optimization of restoration path for blackout grid with the aid of high-voltage direct current transmission [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2579-2588. (in Chinese)
- [11] 梅永振, 王海云, 李阳, 等. 4种多馈入高压直流输电子系统的仿真分析[J]. 高压电器, 2018, 54(10): 204-210.
- Mei Yongzhen, Wang Haiyun, Li Yang, et al. Simulation analysis of four kinds of multi-infeed HVDC subsystems [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 204-210. (in Chinese)
- [12] 柏晨, 王念春, 卓青. 绿色数据中心的供电运行控制和能量管理[J]. 电源学报, 2021, 19(1): 107-114.
- Bai Chen, Wang Nianchun, Zhuo Qing. Power supply operation control and energy management in green data center [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(1): 107-114. (in Chinese)
- [13] 王艺璇, 张鑫, 穆清, 等. 特高压直流分层接入系统换相失败预防控制参数优化[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 329-336.
- Wang Yixuan, Zhang Xin, Mu Qing, et al. Parameter optimization of commutation failure prevention and control of UHVDC hierarchical connection to AC grid system [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 329-336. (in Chinese)
- [14] 龙思慧, 丁勇. 城市轨道交通车站节假日售票组织优化模型研究[J]. 铁道运输与经济, 2019, 41(1): 116-120.
- Long Sihui, Ding Yong. An optimization model of subway station ticketing during holidays [J]. Railway Transport and Economy, 2019, 41(1): 116-120. (in Chinese)
- [15] 马颖涛. 动车组牵引与辅助供电的综合直流系统[J]. 电源学报, 2021, 19(4): 112-117.
- Ma Yingtao. Integrated DC system of traction and auxiliary power supply for electrical multiple units [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(4): 112-117. (in Chinese)
- [16] 张卓然, 李进才, 韩建斌, 等. 多电飞机大功率高压直流起动发电机系统研究与实现[J]. 航空学报, 2020, 41(2): 319-330.
- Zhang Zhuoran, Li Jincan, Han Jianbin, et al. Research and implementation of high-power high-voltage DC brushless starter generator system for more-electric-aircraft [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(2): 319-330. (in Chinese)
- [17] 李海锋, 张坤, 王钢, 等. 并联型多端混合高压直流线路故障区域判别方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 119-125, 179.
- Li Haifeng, Zhang Kun, Wang Gang, et al. Fault area discrimination method for parallel multi-terminal hybrid HVDC line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 119-125, 179. (in Chinese)
- [18] 余昕越, 袁志昌, 田宝焯, 等. 混合双馈入高压直流系统最大传输功率控制方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 109-116.
- Yu Xinyue, Yuan Zhichang, Tian Baoye, et al. Control method of maximum transmission power for hybrid dual-infeed HVDC system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 109-116. (in Chinese)



吴军

作者简介:

吴军(1970—), 男, 通信作者, 本科, 高级政工师。研究方向: 电网规划与运行管理。E-mail: wujun19701228@163.com。

母国辉(1988—), 男, 硕士, 工程师。研究方向: 电网规划与运行管理。E-mail: 33727466@qq.com。

刘文俊(1978—)男, 本科, 工程师。研究方向: 电网规划与企业经营管理。E-mail: wenjunliu@163.com。

李梦琪(1997—), 男, 硕士研究生。研究方向: 电力市场、电力系统规划与运行。E-mail: 1079420681@qq.com。