

引用格式:张学友,董翔宇,葛健,等.基于模拟退火算法的特高压直流 VDCOL 控制环节优化方法[J].电力科学与技术学报,2024,39(4):53-60.

Citation: ZHANG Xueyou, DONG Xiangyu, GE Jian, et al. Optimization for VDCOL of high-voltage DC transmission system based on simulated annealing algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 53-60.

基于模拟退火算法的特高压直流 VDCOL 控制环节优化方法

张学友¹, 董翔宇¹, 葛健¹, 阮巍¹, 魏南¹, 戴剑丰²

(1. 国网安徽省电力有限公司超高压分公司, 安徽 合肥 211525; 2. 南京邮电大学自动化学院人工智能学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 高压直流传输系统受端交流电网日趋复杂, 在逆变站所配置的传统低压限流单元 (voltage dependent current order limiter, VDCOL) 的控制特征已难以适应现代电力系统的调控方式, 为此, 提出基于模拟退火算法的特高压直流 VDCOL 控制环节优化方法。首先, 基于高压直流传输系统逆变站的稳态模型和常规 VDCOL 控制环节的响应特性, 分析逆变站与直流受端交流系统的功率交互特性, 推导直流电流指令值与逆变站无功消耗的关系; 其次, 设计高压直流传输系统典型故障集合, 提出基于模拟退火算法的 VDCOL 控制环节 $U-I$ 特性曲线多拐点参数的优化方案; 最后, 采用 MATLAB 与 PSCAD/EMTDC 联合仿真的方法得到所提改进的 VDCOL 控制环节 $U-I$ 特性曲线。通过与常规 VDCOL 控制环节的仿真对比分析可知, 所提方法更加符合系统暂态无功的实际需求, 可有效抑制直流连续换相失败的发生。

关键词: 高压直流; 低压限流; 无功交互; 模拟退火算法; 换相失败

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.04.006 中图分类号: TM723 文章编号: 1673-9140(2024)04-0053-08

Optimization for VDCOL of high-voltage DC transmission system based on simulated annealing algorithm

ZHANG Xueyou¹, DONG Xiangyu¹, GE Jian¹, RUAN Wei¹, WEI Nan¹, DAI Jianfeng²

(1. EHV Branch, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 211525, China; 2. College of Automation & College of Artificial Intelligence, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: As the AC grid at the receiving end of high-voltage direct current (HVDC) transmission systems becomes increasingly complex, the control characteristics of traditional voltage-dependent current order limiter (VDCOL) units configured at inverter stations have become difficult to adapt to the regulation of modern power systems. To address this issue, an optimization method for the VDCOL control segment of HVDC based on simulated annealing algorithm is proposed. Firstly, based on the steady-state model of the inverter station of the HVDC transmission system and the response characteristics of the conventional VDCOL control segment, the power interaction characteristics between the inverter station and the AC system at the receiving end are analyzed, and the relationship between the DC current command value and the reactive power consumption of the inverter station is derived. Secondly, a typical fault set for HVDC transmission systems is designed, and an optimization scheme for the multi-inflection point parameters of the $U-I$ characteristic curve of the VDCOL control segment based on simulated annealing algorithm is proposed. Finally, the improved $U-I$ characteristic curve of the VDCOL control segment is obtained using a joint simulation method combining MATLAB and PSCAD/EMTDC. Through comparative simulation analysis with the conventional VDCOL control segment, it can be seen that the proposed method better meets the actual demand for system transient reactive power and can effectively suppress the occurrence of continuous commutation failures in the HVDC transmission system.

Key words: HVDC; low voltage current limiting; reactive power interaction; simulated annealing algorithm; commutation failure

收稿日期: 2023-07-12; 修回日期: 2023-10-11

基金项目: 国家自然科学基金 (62173188)

通信作者: 戴剑丰 (1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事电力系统稳定分析、直流输电技术研究; E-mail: 514190638@qq.com

直流传输系统的建设为解决中国电力资源与负荷中心部分不平衡的突出问题发挥着重要作用,中国各电压等级的直流输电系统的研发与建设都取得了长足的进步^[1-3]。特别是基于晶闸管型的±800、±1 100 kV等高压直流传输系统为中国电力资源跨省配置提供了经济且可靠的保障^[4-5]。目前,基于晶闸管型高压直流传输系统的控制系统分为主、极和阀控制3层控制系统,该3类控制系统的控制响应时间依次加快^[6]。主控制层主要是将调度中心的功率调节指令转换为电流指令信号传递给极控制层,之后极控制层将电流信号作为输入通过一系列的控制环节得到可控制阀导通的触发角输出信号,由此可知极控制层在高压直流传输系统中起到了承上启下的关键作用^[7-9]。

随着高压直流传输系统各环节技术的日趋成熟,极控制层的控制环节类型也得到极大的发展,目前,极控制层主要包括定最小触发角、定电流、定电压、低压限流、定熄弧角、最大触发角以及直流功率控制等^[10-14],其中低压限流单元(voltage dependent current order limiter, VDCOL)反馈逆变站侧交流系统状态,从而适时调整整流站电流指令。文献[15-16]阐述了高压直流传输系统VDCOL的基本原理,并分析了常规VDCOL的缺陷;文献[17]根据逆变侧受端交流系统故障后换流母线电压动态调整VDCOL的最小电流指令值;文献[18]将常规VDCOL线性静态恢复特性改进成了变斜率的静态恢复特性,通过模糊控制理论构建了模糊VDCOL;文献[19]提出一种提升直流暂态电压主动支撑能力的改进控制方案,基于sigmoid函数特性用以改进VDCOL曲线。上述研究针对VDCOL的本身模型进行深入而丰富研究,但是对于VDCOL在系统暂态过程中所输出的电流指令与逆变站受端交流系统的功率交互特性分析并不充分,且未综合考虑各故障类型及故障严重程度对VDCOL控制响应的影响。

综上所述,本文基于模拟退火优化算法提出一种考虑直流受端电网暂态特性的VDCOL优化方法。基于高压直流传输系统逆变站的稳态模型,论述逆变站与直流受端交流系统的有功和无功交互特性,同时根据常规VDCOL的响应特性,分析电流指令值与逆变站无功消耗的关系,设计高压直流传输系统典型故障集合,提出基于模拟退火算法的VDCOL的*U-I*特性曲线多拐点参数的优化方案。

在电磁暂态仿真平台上,通过与常规VDCOL的仿真对比分析可知,在系统暂态过程中,依据本文提出优化方案所得到的VDCOL所输出的直流电流指令值既避免了直流受端交流系统的有功缺额,又可以有效抑制直流连续换相失败。

1 直流受端功率交互特性分析

1.1 逆变站有功一无功交互特性

基于晶闸管型高压直流系统通过整流站和逆变站的交直流变换实现功率远距离、大容量的传送,整个高压直流传输系统通常由整流侧换流器、逆变侧换流器、换流变压器、并联电容器、交直流滤波器、平波电抗器以及直流传输线路所组成,本文以简化的单极高压直流传输系统作为研究分析对象,其相应的等效电路^[20-22]如图1所示。

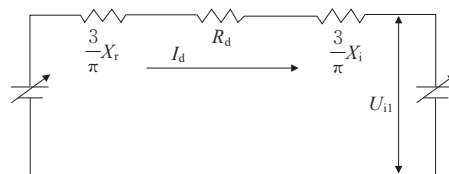


图1 HVDC系统等效电路

Figure 1 Equivalent circuit diagram of HVDC system

由图1可知,高压直流传输系统稳态过程中的逆变站功率交互特性表达式为

$$P_i = U_{i1} I_d \quad (1)$$

$$Q_i = P_i \tan \phi \quad (2)$$

其中,

$$\phi = \arccos(U_{i1}/U_{i0}) \quad (3)$$

$$U_{i0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} B T_i U_{ac} \quad (4)$$

$$U_{i1} = U_{i0} \cos \gamma - 3 B T_i I_d / \pi \quad (5)$$

式(1)~(5)中, P_i 为高压直流系统传输至逆变站的有功功率; U_{i1} 为逆变站直流电压; I_d 为直流电流; Q_i 为逆变站的无功功率消耗量; ϕ 为功率因数; U_{i0} 为理想直流空载电压; B 为六脉冲桥串接的个数; T_i 为逆变站换流的电压变比; U_{ac} 为换流母线电压值; γ 为逆变站晶闸管的熄弧角。

对式(1)~(5)进行求解,可得到高压直流传输系统的有功传输量以及逆变站所需的无功功率补偿量。

1.2 稳态无功特性

高压直流传输系统在理想情况下仅传输有功功率,在逆变侧与受端交流电网相连接,为了保证

逆变站顺利稳定运行,可配置电容器、STATCOM、SVC 以及交流滤波器等无功补偿装置^[23]。而在无功补偿装置提供无功补偿量不足时或系统暂态过程中,受端交流系统也将与逆变站产生无功功率交换,逆变站的无功交换分析如图 2 所示。

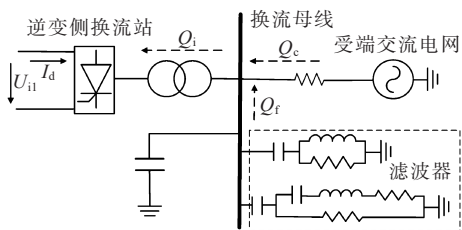


图 2 逆变站无功交互示意

Figure 2 Reactive power interaction of inverter station

图 2 中逆变站的无功功率需求量满足:

$$Q_i = Q_f + Q_c \quad (6)$$

式中, Q_f 为所配置无功补偿装置提供的无功补偿量; Q_c 为受端交流系统与逆变站之间的无功交换量。

目前,给逆变站提供 Q_i 的无功补偿装置通常为电容器和交流滤波器,该类无功补偿装置一般通过离散式的投切实现,呈明显的阶梯形式,因此,即使在稳态过程中也无法实时满足逆变站的无功需求, Q_c 难以为零,进而逆变站和受端交流系统一直存在功率交换。当 $Q_c > 0$ 时,受端交流系统向逆变站进行无功支撑;当 $Q_c < 0$ 时,逆变站向受端交流系统提供无功功率。

2 VDCOL 特性分析

2.1 基本原理

VDCOL 的基本控制思路是通过检测逆变站换流母线上的电压值实时调整向整流站发出的直流电流指令,动态调整高压直流传输系统的有功传输,实际工程中大都选择 U_{il} 作为被检测量^[24]。相应的 VDCOL 中 U_{il} 与直流电流指令 I_{order} 的关系特性如图 3 所示。

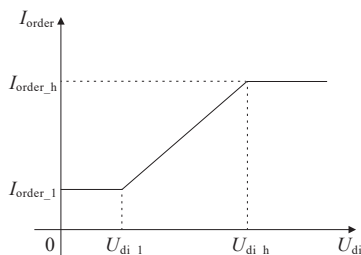


图 3 VDCOL 的 $U-I$ 特性曲线

Figure 3 $U-I$ characteristic curve of VDCOL

I_{order} 的关系表达式为

$$I_{order} = \begin{cases} I_{order,l}, & U_{il} \leq U_{il,l} \\ kU_{il} + b, & U_{il,l} < U_{il} < U_{il,h} \\ I_{order,h}, & U_{il,h} \geq U_{il} \end{cases} \quad (7)$$

其中,

$$\begin{cases} k = \frac{I_{order,h} - I_{order,l}}{U_{il,h} - U_{il,l}} \\ b = \frac{I_{order,h}U_{il,h} - I_{order,l}U_{il,l}}{U_{il,h} - U_{il,l}} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $I_{order,l}$ 、 $I_{order,h}$ 分别为直流电流指令下、上限; $U_{il,h}$ 为被检测直流电压上限阈值; $U_{il,l}$ 为低电压启动阈值; k 、 b 表征图 3 中中间线段的斜率和 y 轴截距。

从式 (7) 可知, I_{order} 不但与 U_{il} 有关,还与 VDCOL 的拐点参数 $I_{order,l}$ 、 $I_{order,h}$ 、 $U_{il,h}$ 、 $U_{il,l}$ 等有关,拐点参数一般分别设置为 0.55、1.00、0.40、0.90。因此,有必要优化 VDCOL 的拐点参数对高压直流传输系统运行的影响。

本文以 CIGRE 标准高压直流传输系统的 VDCOL 为例,其控制框图如图 4 所示,其中 T 为惯性环节的时间常数。VDCOL 控制原理如下。

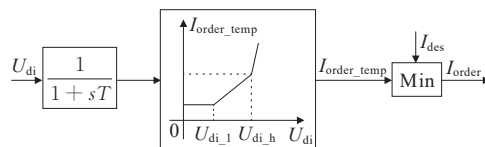


图 4 VDCOL 控制框图

Figure 4 Control block diagram of VDCOL

检测到 U_{il} 经一阶惯性环节后进入设置好的 $U-I$ 特性曲线,其输出结果 I_{order_temp} 与给定的电流值 I_{des} 比较,取最小值得到 I_{order} ,将该值传递至高压直流传输系统整流侧以改变直流电流 I_d 。根据式 (1)、(2) 可知,此时可动态调整高压直流系统传输至逆变站的有功功率 P_i 和逆变站的无功功率消耗量 Q_i 。

2.2 电流指令与无功消耗关系

根据式 (7)、(8) 得到 U_{il} 与 I_{order} 的关系表达式为

$$U_{il} = f(I_{order}) \quad (9)$$

在不考虑控制指令偏差等因素的理想情况下,直流电流 I_d 可视为逆变站下发的 I_{order} ,因此式 (9) 可改写成 $U_{il} = f(I_d)$ 。根据式 (4)、(5) 中的逆变站功率交互特性,并结合式 (9),理想直流空载电压 U_{i0} 的表达式为

$$U_{i0} = \frac{f(I_d) + CI_d}{\cos \gamma} \quad (10)$$

由于六脉冲桥串接的个数 B 和逆变站换流的电

压变比 T_i 为定值, 所以令 C 为常数, 其表达式为

$$C = 3BT_i/\pi \quad (11)$$

将式(9)~(11)代入式(2)~(5)后, 可以得到以熄弧角 γ 和直流电流 I_d 作为自变量的逆变站无功功率消耗量的函数表达式:

$$Q_i = I_d f(I_d) \tan \left[\arccos \left(\frac{\cos \gamma \cdot f(I_d)}{f(I_d) + CI_d} \right) \right] \quad (12)$$

对式(12)中的熄弧角 γ 和直流电流 I_d 分别求偏导, 可得:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \gamma} = \frac{\sin \gamma \cdot I_d \cdot (CI_d + f(I_d))}{\cos^2 \gamma \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\cos \gamma \cdot f(I_d)}{CI_d + f(I_d)} \right)^2}} \quad (13)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial I_d} = \frac{CI_d \cdot (2CI_d + I_d f'(I_d) + 3f(I_d))}{\cos \gamma \cdot [f(I_d) + CI_d] \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\cos \gamma \cdot f(I_d)}{CI_d + f(I_d)} \right)^2}} + \frac{(1 - \cos^2 \gamma) \cdot f(I_d) \cdot (f(I_d) + I_d f'(I_d))}{\cos \gamma \cdot [f(I_d) + CI_d] \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\cos \gamma \cdot f(I_d)}{CI_d + f(I_d)} \right)^2}} \quad (14)$$

分析式(13)、(14)可知, γ 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 波动时, 逆变站的无功功率消耗量 Q_i 与 γ 成正比; 且根据式(7)、(8)可知, 在逆变站受端交流系统发生扰动后的暂态过程中, $f(I_d)$ 、 $f'(I_d)$ 、 I_d 始终大于 0, 因此式(13)中 $\partial Q_i / \partial I_d > 0$, 表明随着直流电流 I_d 的提升, 逆变站所需的无功功率也相应升高。暂态过程中可以调整 I_{order} , 从而适时减少逆变站的无功需求, 将无功功率转移至逆变站受端交流系统, 以保证其快速且稳定的故障恢复。这样可防止逆变站受端交流系统出现电压二次跌落, 从而有效避免直流连续换相失败以及闭锁现象的发生。

3 基于模拟退火算法的 VDCOL 优化方法

3.1 模拟退火优化算法

模拟退火优化算法最早由 Metropolis 等人提出, 其理论基础是对统计热力学中的高温固体退火过程的描述, 具体的物理表现是, 经过加热将固体熔化, 再逐渐冷却熔化并使之又再一次凝固成规整晶体的热力学过程。

针对传统的迭代优化算法易使完整的寻优过

程陷入局部最优解的不利特征, 模拟退火方法最为突出的特点就是基于 Metropolis 准则来进行最优解的搜寻, 即该算法将以在一定范围内产生的随机概率来判断是否能够接受比当前最优解更差的解, 这样所得到最优解将是收敛于全局最优, 有效避免了优化算法进入局部最优解。而从物理角度上来讲, 这样的寻优过程虽然会令整个模拟退火的冷却过程放缓, 但是却能保证系统达到最低的能量状态。模拟退火算法流程如图 5 所示。

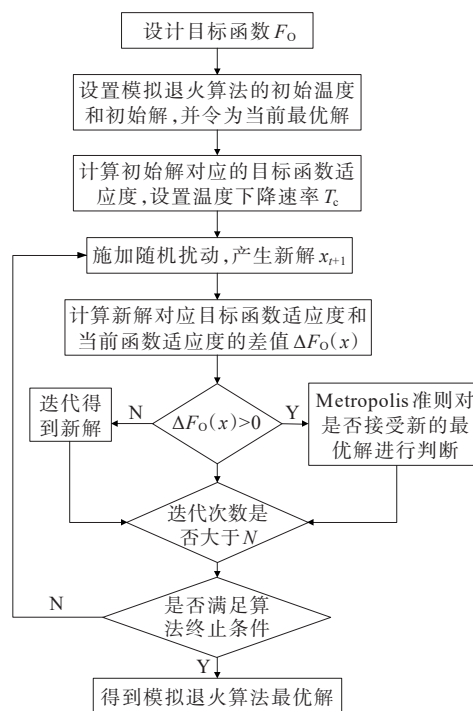


图 5 模拟退火算法流程

Figure 5 Flowchart of simulated annealing algorithm

1) 算法初始化。设计目标函数 F_0 , 并设置退火的初始温度和初始解, 同时令初始解为最优解, 即 $T_c = t_0, x = x_0, x^* = x_0$ 。

2) 计算初始值所对应目标函数的适应度 $F_0(x_0)$, 设置温度下降速率 $T_c = kT_c, k$ 为温度下降系数, T_c 为实时温度, 取值为 $0 \sim 1$ 。

3) 随机产生一个扰动量叠加在当前最优解 x 上, 记为 x_{t+1} , 并计算相应目标函数的适应度 $F_0(x_{t+1})$, 比较该适应度与当前最优解, 表达式为

$$\Delta F_0(x) = F_0(x_{t+1}) - F_0(x_t) \quad (15)$$

4) 基于 Metropolis 准则对是否接受新的最优解进行判断。Metropolis 准则的表达式为

$$P = \begin{cases} 1, & \Delta F_0(x) < 0 \\ \exp\left(-\frac{\Delta F_0(x)}{kT}\right), & \Delta F_0(x) \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

若步骤 3)中计算所得 $\Delta F_o(x) < 0$,则可迭代 x_{t+1} 作为当前最优解 x^* ;若 $\Delta F_o(x) > 0$,则 $\exp(-\Delta F_o(x)/kT_e)$ 的概率迭代 x_{t+1} 作为当前最优解 x^* 。

5) 当前温度下重复产生随机扰动 N 次,同时执行 N 次步骤 3)、4)。

6) 判断是否满足算法的终止条件,若不满足则需要转至步骤 2)重新进行最优解迭代运算,若满足则可结束算法,并输出所需最优解 x^* 。

3.2 优化方案设计

为了准确而全面地反应出高压直流传输系统受端交流电网故障对 VDCOL 控制环节的影响,在 VDCOL 控制环节优化过程中,需要设置典型故障集合,结合实际工程中导致高压直流传输系统面临换相失败风险的故障统计可知,引起逆变器直流换相失败的因素主要包括换流母线电压跌落、交流系统强度、受端个负荷类型以及交流系统和逆变器所提供的无功支撑能力等。

基于典型故障集合的可设计得到对应的模拟退火优化算法的目标函数,其表达式为

$$\min F_o = \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{i=1}^{N_i} f_{j,i} \quad (17)$$

其中,

$$f_{j,i} = \int_{t_0}^{t_0+T_i} |U_L(t) - U_N| dt \quad (18)$$

式中, $f_{j,i}$ 为当前解在第 j 类型故障下第 i 个故障计算得到的适应度; $j=1, 2, \dots, N_j, N_j$ 代表故障类型总数; $i=1, 2, \dots, N_i, N_i$ 代表同一类型故障下的不同故障状态; U_L 为高压直流传输系统逆变器换流母线电压实际值; U_N 为高压直流传输系统逆变器换流母线电压额定值; t_0 为受端电网故障切除时间; T_i 为故障切除后的恢复时间。

换相失败的本质是换流阀在换相过程中的熄弧角小于其本身的固有极限熄弧角,但是在实际工程应用中,换流阀的熄弧角难以快速精准地测量并反馈至控制中心,所以在高压直流传输系统实际工程中,各类型的故障所引起的直流换相失败都由换流母线电压跌落程度所判断。因此,在本文所提逆变器 VDCOL 控制环节优化设计过程中,将不同的换流母线电压跌落程度作为目标故障集合。

在完成典型故障集合和目标函数设计后,需要考虑设置模拟退火优化算法的优化的对数和对应初始化解。本文以传统单一线性的 VDCOL 控制环节的 $U-I$ 特性曲线为基础,根据所提优化对数

均分单一线性的 $U-I$ 特性曲线作为其初始解。优化解中电压和电流值呈一一对应关系,令优化解个数为 $2N$,表达结果为 $\{(U_{o1}, I_{o1}); (U_{o2}, I_{o2}); \dots; (U_{oN}, I_{oN})\}$ 。假设优化解对数为 5 对,则模拟退火优化算法的初始解为

$$x_0 = \left\{ \begin{array}{l} (0.40, 0.55); (0.53, 0.66); (0.65, 0.78); \\ (0.78, 0.89); (0.90, 1.00) \end{array} \right\} \quad (19)$$

结合文 3.1,对 VDCOL 控制环节的优化参数进行迭代求解,直至满足目标函数所设定好的收敛条件。综上,所提高压直流传输系统中 VDCOL 控制环节优化方法主要分为 4 个步骤:①设置典型的影响高压直流传输系统运行的故障集合;②设计优化算法相应的目标函数;③基于常规单一线性 VDCOL 控制环节 $U-I$ 特性曲线,初始化模拟退火优化算法的最优解个数和算法的初始解;④通过所述模拟退火优化算的求解步骤得到最优解,并最终形成优化后的 VDCOL 控制环节。优化方案的具体流程如图 6 所示。

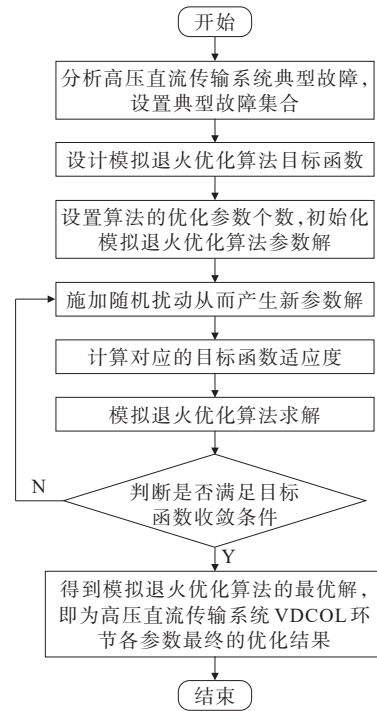


图 6 所提优化方法流程

Figure 6 Flowchart of proposed optimization method

4 算例分析

4.1 算例介绍

国际大电网会议 (conference international des grands reseaux electriques, CIGRE) 直流联络线研究

委员会于上世纪90年代所提出的直流输电标准测试系统是业内公认的高压直流传输系统控制研究的标准系统,该模型采用500 kV单极系统进行额定容量1 000 MW的直流传输,整流站和逆变站都为12脉波的换流器,其基本结构如图7所示,本算例基于该模型在电磁暂态仿真平台PSCAD/EMTDC上开展VDCOL控制环节的优化研究。

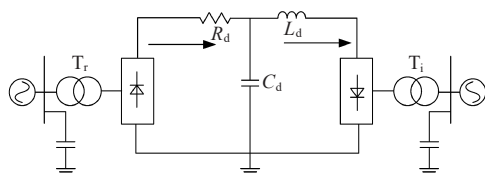


图7 直流标准测试模型基本结构

Figure 7 Basic structure of HVDC standard model

基于文3.2所述,需设计典型母线电压跌落故障集合,一般来说,HVDC系统逆变站换流母线电压跌落至稳态的90%及以下时,可判断系统发生换相失败。因此,本文设置三相短路接地单相单路接地故障,其中三相接地电阻值为 $0.1a_1$ 、 $10a_1$, $a_1 \in \{1, 2, \dots, 10\}$,有20种故障状态;单相接地点电阻值为 $\{0.1a_2 | a_2 = 1, 2, \dots, 10\}$ 和 $\{10a_3 | a_3 = 1, 2, \dots, 15\}$,共25种状态。整个故障集合中共包含45种故障状态,反映了不同故障类型所导致的换流母线电压跌落程度。

为实现模拟退火算法高效用于VDCOL的优化过程中,本文采用PSCAD与MATLAB联合仿真的方法,对高压直流传输系统的暂态电气量信息进行采集和处理,其基本思想是,在PSCAD的本体模型中,将所设计好的故障集合中每个故障的暂态过程数据通过接口程序传输至MATLAB中,MATLAB调用模拟退火优化算法对常规VDCOL的 U - I 特性曲线进行分段优化,并将优化结果反馈至PSCAD中的VDCOL,重复上述迭代过程,直至满足算法所对应的目标函数。与文3.2中所设置的初始解相同,若优化解对数为5对,则经过模拟退火算法优化后的VDCOL各拐点参数如表1所示。

表1 优化后VDCOL的拐点参数

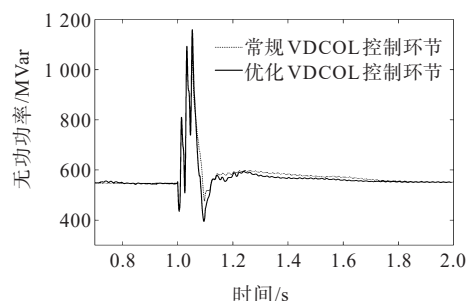
Table 1 Inflection point parameter of optimized VDCOL

编号	U_d	I_{order}	编号	U_d	I_{order}
1	0.33	0.39	4	0.75	0.75
2	0.50	0.51	5	0.89	0.98
3	0.60	0.59			

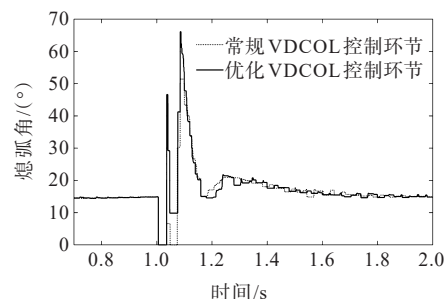
4.2 仿真分析

为了验证本文所提出的基于模拟退火算法的VDCOL的 U - I 特性曲线多拐点参数的优化方案的高效性,基于PSCAD仿真平台上的标准直流测试系统,通过设置典型故障对比分析常规VDCOL和本文优化所得VDCOL在系统暂态过程中的响应特性。

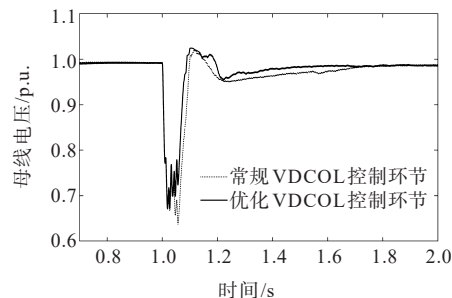
设置逆变站换流母线在第1秒时发生短路接地故障,接地电阻为 20Ω ,在第1.05秒时故障清除。此时逆变站吸收的无功功率、换流阀的熄弧角及换流母线电压的暂态变化如图8所示。



(a) 逆变站消耗无功



(b) 换流阀熄弧角



(c) 换流母线电压

图8 2种控制方式仿真对比

Figure 8 Comparison results of two control modes

根据图8(a)中逆变站吸收无功功率特性以及图8(c)中的换流母线电压跌落状态可知,在暂态过程恢复过程中,采用优化后的VDCOL比常规VDCOL控制方式的逆变站无功吸收更少,无功功率峰值由1 186 MVar降低至1 064 MVar。因此,采

用本文优化后VDCOL的 $U-I$ 特性曲线,逆变站的无功吸收受端交流系统的无功功率在暂态过程中有所降低,可有效降低逆变站换流母线的二次跌落的幅值,如图8(c)中红色曲线所示,相应地,逆变站直流连续换相失败得到了有效抑制,如图8(b)所示。

5 结语

本文以高压直流传输系统VDCOL控制环节作为研究对象,针对因逆变站受端交流系统电压跌落而引起换相失败的问题,提出了基于模拟退火算法的特高压直流低压限流控制环节优化方法,通过仿真算例对比分析,得到如下结论:

1) 基于高压直流传输系统逆变站暂态过程无功交互分析,得到了VDCOL直流电流输出指令与逆变站暂态过程无功消耗的关系表达式,通过调节直流电流指令可减小逆变站对受端交流系统的无功需求;

2) 为动态调整逆变站的无功需求以抑制直流连续换相失败,本文提出基于模拟退火算法的VDCOL的 $U-I$ 特性曲线多拐点参数的优化方案,使VDCOL更加符合系统的功率交互需求,同时兼顾了高压直流传输系统有功功率的高效传输。

参考文献:

- [1] 毛峰,桂前进,王磊,等.风火打捆交直流外送系统区域间输电能力评估[J].中国电力,2019,52(1):69-75.
MAO Feng, GUI Qianjin, WANG Lei, et al. Assessment on the total transfer capability of AC/DC system for integrated wind-thermal power[J]. Electric Power, 2019, 52(1):69-75.
- [2] 张哲,杨晓平,封磊,等.面向中压直流配电网的直流变压器设计与优化[J].高压电器,2022,58(11):248-254.
ZHANG Zhe, YANG Xiaoping, FENG Lei, et al. Design and optimization of DC transformer for medium-voltage DC distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(11):248-254.
- [3] 韩昆仑,刘书豪,代宇,等.一种基于边界特性的特高压直流输电线路单端量保护方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(2):75-83.
HAN Kunlun, LIU Shuhao, DAI Yu, et al. A single-terminal protection method for HVDC transmission lines based on boundary characteristics[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(2):75-83.
- [4] 贺元康,刘瑞丰,陈天恩,等.全清洁能源特高压青豫直流初期打捆外送模式[J].中国电力,2021,54(7):83-92.
HE Yuankang, LIU Ruifeng, CHEN Tian'en, et al. Exploration of bundled transaction model for all clean energy transmission of Qing-Yu UHV DC project[J]. Electric Power, 2021, 54(7):83-92.
- [5] 姜彦涛,马元社,李强,等.高海拔环境下高压直流输电换流阀系统中晶闸管的可靠性寿命模型研究[J].高压电器,2022,58(10):33-39.
LOU Yantao, MA Yuanshe, LI Qiang, et al. Research on reliability life model of thyristor in HVDC converter valve system at high altitude environment[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10):33-39.
- [6] 肖超.高压直流输电系统换相失败连锁反应的阻断方法研究[D].重庆:重庆大学,2019.
XIAO Chao. Research on interruption method for commutation failure caused cascading reaction of high voltage DC transmission system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [7] LIU B, CHEN Z, YANG S, et al. Research on methods of measuring extinction angle and measures to suppress repetitive commutation failures through equivalent DC input resistance[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2021, 133:107326.
- [8] 吕承,邵能灵,郑晓冬,等.基于边界电流的柔性直流线路保护新方案[J].电力科学与技术学报,2020,35(1):115-121.
LÜ Cheng, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. New protection scheme for flexible DC line based on boundary current[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1):115-121.
- [9] 高飘,郑晓冬,晁晨栩,等.基于控制特征量响应的多端柔性直流输电线路保护[J].电力系统自动化,2022,46(5):122-136.
GAO Piao, ZHENG Xiaodong, CHAO Chenshi, et al. Protection for multi-terminal flexible DC transmission lines based on response of control characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(5):122-136.
- [10] 汤奕,郑晨一,楼伯良,等.抑制连续换相失败的直流功率控制策略[J].电网技术,2019,43(10):3514-3521.
TANG Yi, ZHENG Chenyi, LOU Boliang, et al. Research on DC power control strategy for mitigating continuous commutation failure[J]. Power System Technology, 2019, 43(10):3514-3521.
- [11] 袁博,王颖,邵华,等.抑制特高压直流系统连续换相失败的非线性动态电流偏差控制[J].中国电力,2021,54(8):75-82.
YUAN Bo, WANG Ying, SHAO Hua, et al. A nonlinear dynamic current deviation control method for suppressing continuous commutation failures in UHVDC systems[J]. Electric Power, 2021, 54(8):75-82.
- [12] OUYANG J, PANG M, ZHANG Z, et al. Prediction method of successive commutation failure for multi-infeed high voltage direct current systems under fault of

- weak receiving-end grid[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2021,133:1073-13.
- [13] 汤奕,郑晨一. 高压直流输电系统换相失败影响因素研究综述[J]. 中国电机工程学报,2019,39(2):499-513+647. TANG Yi,ZHENG Chenyi. Review of factors affecting commutation failure of HVDC transmission system[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(2):499-513+647.
- [14] 汪娟娟,郑睿娜,傅闯,等. 基于逆变站动态无功控制的后续换相失败抑制方法[J]. 电工技术学报,2023,38(17):4672-4682. WANG Juanjuan,ZHENG Ruina,FU Chuang, et al. A method based on constant reactive power control of inverter to suppress the subsequent commutation failure in HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2023,38(17):4672-4682.
- [15] 黄梦华,汪娟娟. 低压限流环节优化控制策略综述[J]. 广东电力,2018,31(10):10-19. HUANG Menghua,WANG Juanjuan. Review on optimization control strategy for voltage dependent current order limiter[J]. Guangdong Electric Power, 2018,31(10):10-19.
- [16] 周忠健. 高压直流输电系统连续换相失败抑制策略研究[D]. 广州:广东工业大学,2022. ZHOU Zhongjian. Research on suppression strategy of continuous commutation failure in HVDC transmission [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.
- [17] 朱红萍,李毅,周振烽,等. 附加虚拟电容的动态非线性 VDCOL 控制器设计[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(2):134-143. ZHU Hongping,LI Yi,ZHOU Zhenyi, et al. Design of dynamic nonlinear VDCOL controller with virtual capacitance[J]. Power System Protection and Control, 2022,50(2):134-143.
- [18] 刘磊,王渝红,李兴源,等. 基于模糊控制的变斜率 VDCOL 控制器设计[J]. 电网技术,2015,39(7):1814-1818. LIU Lei,WANG Yuhong,LI Xingyuan, et al. Design of variable slope VDCOL controller based on fuzzy control [J]. Power System Technology,2015,39(7):1814-1818.
- [19] 吕哲,葛怀畅,郭庆来,等. 面向受端电网暂态电压稳定的高压直流系统主动控制研究[J]. 中国电机工程学报,2022,42(22):8041-8053. LÜ Zhe,GE Huaichang,GUO Qinglai, et al. Research on active control of HVDC system for transient voltage stability of receiving end grid[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(22):8041-8053.
- [20] 刘席洋,王增平,郑博文,等. LCC-HVDC 故障恢复型连续换相失败机理分析与抑制措施研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(10):3163-3172. LIU Xiyang,WANG Zengping,ZHENG Bowen, et al. Analysis and suppression measures of failure mechanism of continuous commutation for LCC-HVDC fault recovery[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(10):3163-3172.
- [21] 陈仕龙,荣俊香,毕贵红,等. 整流侧控制方式对特高压直流输电系统换相失败影响研究[J]. 中国电力,2015,48(7):1-7. CHEN Shilong,RONG Junxiang,BI Guihong, et al. Study of the effect of rectifier side control modes on UHVDC commutation failure[J]. Electric Power,2015,48(7):1-7.
- [22] 陈铁,蔡东阁,何思敏,等. 基于数据驱动的直流输电后续换相失败预判的研究[J]. 智慧电力,2022,50(8):68-74. CHEN Tie,CAI Dongge,HE Simin, et al. Prediction of subsequent commutation failure of HVDC transmission based on data-driven[J]. Smart Power,2022,50(8):68-74.
- [23] LIU L,LIN S,LIAO K, et al. Extinction angle predictive control strategy for commutation failure mitigation in HVDC systems considering voltage distortion[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(22): 5171-5179.
- [24] BUNCH R,KOSTEREV D, Design and implementation of AC voltage dependent current order limiter at pacific HVDC intertie[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1):293-299.