

DOI: 10.7667/PSPC180400

一种抑制连续换相失败的非线性 VDCOL 控制策略

孟庆强¹, 刘泽洪², 洪乐荣³, 周小平³, 夏海涛³, 刘一峰³, 汪鑫³

(1. 国网湖南省电力有限公司, 湖南 长沙 410007; 2. 国家电网公司, 北京 100031;
3. 国家电能变换与控制工程技术研究中心(湖南大学), 湖南 长沙 410082)

摘要: 换相失败是高压直流输电系统(High Voltage Direct Current, HVDC)中常见的故障之一。为了降低连续换相失败发生的概率, 提出了一种基于非线性动态 VDCOL 低压限流控制器(Voltage Dependent Current Order Limiter, VDCOL)设计方案。针对常规 VDCOL 直流电流调节指令灵敏度较低的特点, 所设计的非线性动态 VDCOL 控制策略将系统故障严重程度同时考虑在内, 根据电压大小动态调节 VDCOL 控制器的控制曲线, 提高直流电流指令在系统故障期间的响应速度, 达到尽快限制直流电流来降低发生连续换相失败概率的目的。在 PSCAD/EMTDC 仿真环境中, 使用国际大电网会议(International Council on Large Electric Systems, CIGRE)标准模型对所提控制方法进行验证。仿真表明, 所提非线性动态 VDCOL 控制器在短路故障时可以抑制连续换相失败, 并且有利于快速恢复系统的直流电压和传输功率, 保证输电系统正常运行。

关键词: 高压直流输电; 连续换相失败; VDCOL; PSCAD/EMTDC 软件; CIGRE 标准模型

A suppression method based on nonlinear VDCOL to mitigate the continuous commutation failure

MENG Qingqiang¹, LIU Zehong², HONG Lerong³, ZHOU Xiaoping³, XIA Haitao³, LIU Yifeng³, WANG Xin³

(1. State Grid Hunan Electric Power Company Limited, Changsha 410007, China; 2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 3. National Electric Power Conversion and Control Engineering Technology Research Center (Hunan University), Changsha 410082, China)

Abstract: Commutation failure is one of the most common faults in High Voltage Direct Current (HVDC) transmission system. In order to reduce the probability of commutation failure, a suppression strategy for continuous commutation failure based on nonlinear VDCOL is proposed in this paper. Considering the low sensitivity of DC current command generated by conventional VDCOL, the proposed nonlinear dynamic VDCOL control strategy takes severity of the system failure into account and dynamically adjusts control curve of the VDCOL controller according to voltage level, which improves response speed of the DC current command and limits DC current to reduce the probability of continuous commutation failure. The proposed control method is tested by CIGRE model of HVDC in PSCAD/EMTDC. Simulations show that the proposed nonlinear dynamic VDCOL controller can suppress continuous commutation failure during short circuit fault, and it is beneficial to restore DC voltage and transmission power of the system and ensure the normal operation of HVDC transmission system.

This work is supported by the Project of State Grid Hunan Electric Power Company Limited (No. SGTYHT/17-JS-201), the Postdoctoral Innovative Talent Support Program of China (No. BX20180095) and China Postdoctoral Science Foundation (No. 2018M640747).

Key words: HVDC; continuous commutation failure; VDCOL; PSCAD/EMTDC software; CIGRE model

0 引言

传统的电网换相高压直流输电具有输送容量大, 功率快速可控等优势, 但其采用无自关断能力

的晶闸管作为换流元件, 受端交流侧故障时易导致系统发生换相失败进而造成直流闭锁^[1-3]。换相失败发生时, 直流电压下降、直流电流短时增大, 引起直流系统直流偏磁、继电保护装置误动、过电压, 连续的换相失败甚至可能引发阀组闭锁或极闭锁导致较大的功率冲击, 严重威胁电网的安全稳定运行^[4-8]。研究特高压直流输电换相失败抑制方法及换相失败后的恢复策略, 对特高压线路的安全稳定运

基金项目: 国网湖南省电力有限公司项目资助(SGTYHT/17-JS-201); 博士后创新人才支持计划(BX20180095); 中国博士后科学基金项目资助(2018M640747)

行有重要的意义^[4-6]。

很多学者就换相失败判据与检测方面开展了研究并已取得一定的成果。文献[9-10]讨论了多种换相失败识别方法；文献[11]推导了换相过程中剩余电荷的变化公式，给出了与换相过程时长相关的换相失败判据；文献[12]探索了一种基于快速数字信号处理器的电压正余弦分量检测方法。上述文献对于换相失败有一定预测作用并可为换相失败抑制技术提供基础，但未提出具体措施来抑制换相失败。

在换相失败抑制技术及故障恢复方面，可从拓扑结构和控制策略层面考虑。在拓扑层面，文献[13]研究了抵御直流连续换相失败的同步调相机配置，但增加了系统投资成本与运维成本，文献[14-15]通过引入全控模块提高了系统的换相失败免疫能力，但系统变得更加复杂，成本更高，不适用于大功率传输场合。在控制策略方面，文献[16]设计了一种自适应模糊 PI 控制器，并给出了不同故障程度下的最优控制模式。文献[17-18]提出了自适应模糊控制方法来确定提前触发角度，但未考虑到触发角提前带来的弊端，当触发角度提前过多时，容易导致直流电流增大，反而导致换相失败，其中文献[20-21]在分析提前触发控制所带来隐患的基础上，提出通过降低电流指令来预防换相失败，取得了一定的控制效果。

文献[22-24]分析了低压限流控制策略(Voltage Dependent Current Order Limiter, VDCOL)的控制原理及其对 HVDC 系统的作用，它可以根据交直流电压的大小动态调整直流电流指令值，在一定程度上可预防换相失败的发生和改善系统的恢复特性，但当系统发生严重故障时，常规 VDCOL 控制方式下，因电流指令调节灵敏度不够高，导致逆变侧电压和直流输电功率较难恢复，进而造成系统连续换相失败。

针对以上问题，本文提出一种非线性动态 VDCOL 控制策略，将系统故障严重程度同时考虑在内，根据电压大小动态调节 VDCOL 控制器的控制曲线，提高直流电流指令在系统故障期间的响应速度，达到尽快限制直流电流来降低发生连续换相失败概率的目的。

该 VDCOL 控制器将常规 VDCOL 线性关系的静态特性改为曲线，提高了直流电流指令对直流电压变化的灵敏度。在 PSCAD/EMTDC 仿真环境中，使用 CIGRE 标准测试模型检验了所提控制方法。仿真表明，所提非线性动态 VDCOL 控制器可保证系统正常运行，且在短路故障时可以抑制连续换相失败，有利于恢复系统直流电压和传输功率的恢复。

1 传统高压直流输电换相失败分析

1.1 换相过程分析

在传统高压直流输电系统的逆变侧，由于交流电源电感的影响，相电流无法突变，因此，电流从其中某相向另一相换相需要一定的时间，称为换相时间。在换相过程刚结束时，若刚退出导通的阀在电压转向后一段时间内未能恢复阻断能力，则被换相的阀向原来预定退出导通的阀倒换相，发生换相失败^[1]。

逆变侧换相过程的交流电压波形如图 1 所示， U_d 表示逆变器直流侧电压； u_a 、 u_b 、 u_c 分别为交流侧三相电压瞬时值；①~⑥表示逆变器换流阀 VT1~VT6 的导通情况 α 、 β 、 μ 、 γ 分别为触发延迟角、触发超前角、换相角和关断角。其中， β 由系统控制层的控制器决定，与 α 、 γ 、 μ 的关系为

$$\beta = \pi - \alpha = \mu + \gamma \quad (1)$$

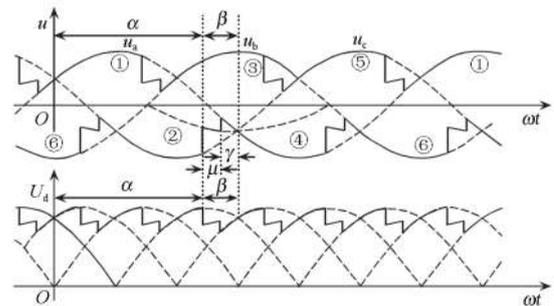


图 1 高压直流输电系统逆变侧电压波形图

Fig. 1 Voltage waveform in inverter side of HVDC system

在理想情况下，含有变压器的交流系统可等效为恒压恒频的理想电压源与无损电感串联，以换流阀 VT1 向 VT3 换流为例，直流输电系统逆变侧等效电路可表示为图 2。

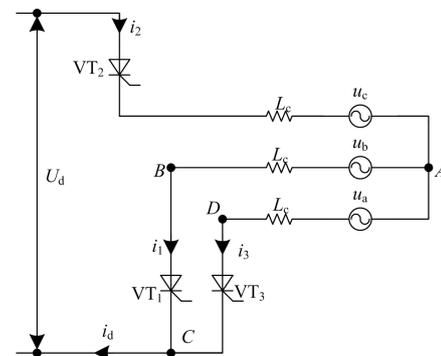


图 2 换相过程理想等效电路

Fig. 2 Ideal equivalent circuit during the process of commutation

在换相过程中有 3 个阀同时导通, 但是在两次换相之间则只有两个阀导通, 每次换相过程中, 加入阀中的电流从 0 增到 I_d , 退出阀中的电流从 I_d 减小到 0。对于环路 ABCDA, 由基尔霍夫电压定律可列方程式(2)。

$$u_b - L_c \frac{di_3}{dt} = u_a - L_c \frac{di_1}{dt} \quad (2)$$

对式(2)移项, 再对两边求取积分, 可得

$$\int_{\alpha}^{\alpha+\mu} (u_b - u_a) d\omega t = \omega L_c \int_{\alpha}^{\alpha+\mu} \left(\frac{di_3}{d\omega t} - \frac{di_1}{d\omega t} \right) d\omega t \quad (3)$$

式(3)中 α 、 μ 分别满足

$$i_3(\alpha) = 0, \quad i_3(\alpha+\mu) = I_d \quad (4)$$

理想情况下 $i_d = i_2 = i_3 + i_1$, 且在平波电抗器的作用下 i_d 可以视为定值 I_d , 所以式(4)可化简为

$$A = \frac{\sqrt{2}E_0}{2} (\cos \alpha + \cos \gamma) = 2\omega L_c I_d \quad (5)$$

式中, A 为换相过程的换相电压时间面积, 理想情况下, 直流电流 I_d 和触发角 α 可视为常值, 进而逆变器换相过程所需换相电压时间面积 A 可视为不变。

1.2 受端交流系统故障引起的换相失败

交流母线电压幅值下降是最常见的引起换相失败的故障之一。如图 3 所示, 当受端交流母线发生三相接地故障, 换相电压降低, 假定所需换相电压时间面积 A 不变, 则原关断角 γ 跌落至 γ' , 当故障后关断角 γ' 小于其固有极限关断角 γ_0 时, 逆变器发生换相失败。

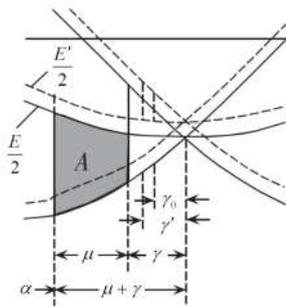


图 3 换相电压跌落对逆变器换相过程的影响

Fig. 3 Effect of commutation voltage drop on inverter commutation process

当整流侧与逆变侧的触发角 α 不变时, 系统稳定后整流侧直流电压幅值不变, 逆变侧直流电压伴随交流母线电压跌落而下降。当发生换相失败时, $\gamma' = 0$, 故障期间直流电流 I_d 将大幅增加, 如不采取适当抑制措施, 系统容易发生连续换相失败进而导致阀组闭锁。

传统线性 VDCOL 控制策略在一定程度上可以根据直流电压动态调节直流电流指令, 但因为调节灵敏度较低, 在发生换相失败后的响应较慢, 对连续换相失败的抑制能力较弱。因此, 有必要在系统发生换相失败时, 提高直流电流指令的调节灵敏度, 尽快限制直流电流, 减少所需换相时间, 防止再次发生换相失败。

2 传统高压直流输电 VDCOL 控制策略

2.1 传统线性 VDCOL 控制策略

传统高压直流输电逆变侧通常采用线性低压限流控制(VDCOL)。该控制策略在受端交流电压或直流侧电压下降至某整定值后开始降低直流电流指令, 通过整流侧定电流控制实现实际直流电流的降低, 从而促进系统换相过程, 一定程度上减少换相失败的概率, 降低逆变侧的无功消耗, 并使系统在故障维持降额稳定运行。

传统线性 VDCOL 控制策略的运行特性如图 4 所示(以 CIGRE 标准模型为例), 直流电压 U_{dc} 和直流电流指令 I_{ord} 的关系为

$$I_{ord} = \begin{cases} 1 \text{ p.u.}, & U_{dc} \geq 0.9 \text{ p.u.} \\ 0.55 \text{ p.u.} + \frac{1-0.55}{0.9-0.4} (U_{dc} - 0.4 \text{ p.u.}), & 0.4 \text{ p.u.} \leq U_{dc} < 0.9 \text{ p.u.} \\ 0.55 \text{ p.u.}, & U_{dc} < 0.4 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (6)$$

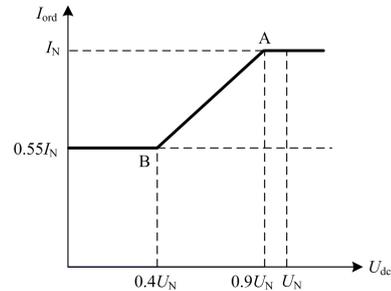


图 4 传统线性 VDCOL 控制策略

Fig. 4 Conventional linear VDCOL control strategy

当系统正常运行时, 直流电流指令 I_{ord} 为 1 p.u.; 当检测到直流侧实际运行电压 U_{dc} 低于 0.9 p.u. 时, VDCOL 模块开始根据直流电压 U_{dc} 实时调节直流电流指令 I_{ord} ; 当直流侧电压低于 0.4 p.u. 后, 直流电流指令维持 0.55 p.u. 以保证一定的功率输送。

该控制策略在一定程度上可以降低实际运行直流电压, 但因为电流指令的调节灵敏度不够高, 在受端交流系统故障期间可能会发生如图 5 所示的连续换相失败。因此有必要提高 VDCOL 控制器在系统故障期间的电流指令调节速度。

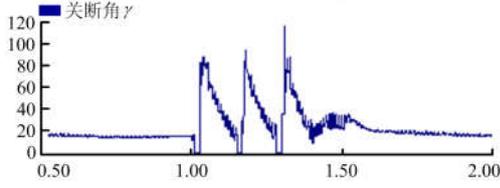


图 5 经电感(0.4 H)单相接地故障时系统的运行特性
Fig. 5 System operation performance under single phase fault with $L=0.4$ H

2.2 非线性动态 VDCOL 控制策略

传统线性 VDCOL 控制在系统面临较严重故障时难以抑制连续的换相失败，为了提高系统抵御连续换相失败的能力，且在正常情况下不影响系统传输的功率，本文设计了一种基于非线性动态 VDCOL 的连续换相失败抑制策略，其运行特性如图 6 所示。

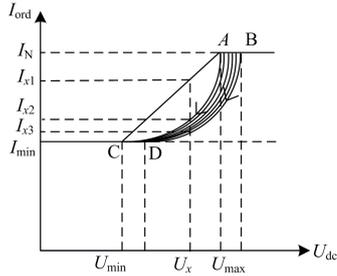


图 6 非线性 VDCOL 控制策略
Fig. 6 Nonlinear VDCOL control strategy

为提高直流指令电流在故障期间的响应速度，本文考虑用曲率更大的多次曲线(\widehat{AC} 或 \widehat{BD})替代原来的一次线性调节曲线(\overline{AC})。

如图 6 所示，当实际直流电压因系统故障下降至 U_x ，此时调节曲线 \widehat{BD} 、 \widehat{AC} 和 \overline{AC} 对应的直流电流指令值分别为 I_{x3} 、 I_{x2} 和 I_{x1} ，有

$$I_{x3} < I_{x2} < I_{x1} \quad (7)$$

因此，当受端交流系统故障导致直流电压下降时，采用该控制策略可以在同样的直流电压 U_{dc} 处获取更低的直流电流指令值 I_{ord} ，即提高了直流电流指令的调节速度，有利于快速限制直流电流并抑制连续换相失败。

同时，根据交流系统故障严重程度动态调节控制电压的上下限 U_{min} 和 U_{max} ，即控制曲线右移，可以进一步提高直流电流指令的调节速度，更快限制直流电流。图 6 中阴影区域即为系统故障时的运行区域。

2.3 非线性 VDCOL 控制器设计

该非线性 VDCOL 控制器的关键是曲线方程的

设计。该曲线应满足：1) 因故障导致直流电压 U_{dc} 处于较低水平时，实际运行直流电流能被迅速限制；2) 在系统处于恢复或者启动阶段，当直流电压 U_{dc} 较低时，直流电流缓慢增加，当直流电压 U_{dc} 接近额定值时，直流电流较快增加以恢复功率输送。

为方便设计，本文将该段曲线视为四分之一的圆弧，且将圆的半径设计为 $R=0.45I_N$ ，圆心坐标取为 (X_r, I_N) ，同时将电流指令最小值取为 $I_{min}=0.55I_N$ 。如图 7 所示，此时该圆正好与直线 $I_{ord}=0.55I_N$ 相切于点 $(X, 0.55I_N)$ ，令控制电压下限 $U_{min}=X_r$ ，则电压上限 $U_{max}=X_r+0.45U_N$ 。

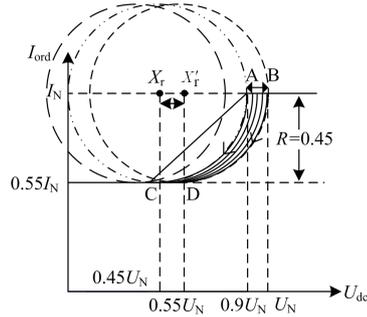


图 7 非线性动态 VDCOL 控制策略
Fig. 7 Nonlinear dynamic VDCOL control strategy

同时，为根据交流系统故障严重程度动态调节控制电压的上下限 U_{min} 和 U_{max} ，引入故障系数 k ，定义为

$$k = 1 - U_{ac} / U_{acN}, \quad 0 \leq k \leq 1 \quad (8)$$

式中： U_{ac} 表示受端交流系统相电压的实际有效值； U_{acN} 则表示其额定值。

圆心 X_r 的横坐标 U_{min} 可以表示为

$$U_{min} = (0.45 + 0.1k)U_N \quad (9)$$

则该圆的方程可表示为

$$[U_{dc} - (0.45 + 0.1k)]^2 + (I_{ord} - I_N)^2 = 0.45^2 \quad (10)$$

推导可得

$$I_{ord} = I_N - \sqrt{0.45^2 - [U_{dc} - (0.45 + 0.1k)]^2} \quad (11)$$

当系统正常运行时， $U_{ac}=U_{acN}$ ，则 $k=0$ ， U_{min} 和 U_{max} 取值为

$$\begin{cases} U_{min} = 0.45U_N \\ U_{max} = 0.9U_N \end{cases} \quad (12)$$

此时控制曲线对应图 7 所示的圆弧 \widehat{AC} 。

当极端情况下 $U_{ac}=0$ 时， $k=1$ ， U_{min} 和 U_{max} 取值为

$$\begin{cases} U_{min} = 0.55U_N \\ U_{max} = U_N \end{cases} \quad (13)$$

此时控制曲线对应图 7 所示的圆弧 \widehat{BD} 。

因此, 当发生不同程度交流系统故障时, k 在 0 到 1 之间变化, U_{\min} 在 $0.45U_N$ 到 $0.55U_N$ 之间变化, U_{\max} 在 $0.9U_N$ 到 U_N 之间变化。如图 7 阴影区域所示, 当系统交流故障程度越严重, VDCOL 模块的响应越灵敏, 直流电流指令 I_{ord} 能较快降低以防止换相失败; 当交流母线电压逐渐恢复时, 电流指令 I_{ord} 则控制曲线的左移而自然的增大, 从一定程度上可以加快系统的恢复速度。

2.4 基于非线性 VDCOL 的系统控制结构框图

系统的整体控制框图如图 8 所示。整流站采用定电流控制, 逆变侧采用定关断角控制。

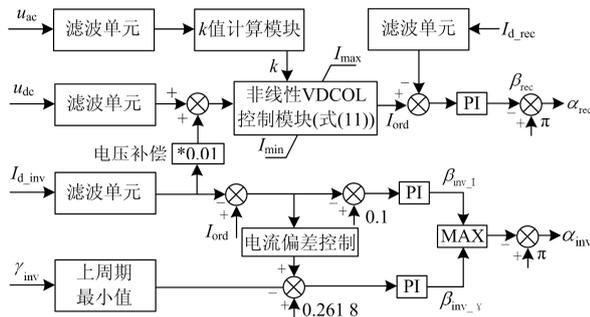


图 8 基于非线性 VDCOL 的系统控制结构框图

Fig. 8 Detailed block diagram of nonlinear VDCOL-based controller

所定义故障严重程度指数 k 由 k 值计算模块给出, 测量的直流侧电压 U_{dc} 经过所提非线性 VDCOL 控制模块得到相应直流电流参考指令 I_{ord} , 该指令值与整流侧的实际直流电流之差送入 PI 控制器后得到整流站阀组相应的触发超前角 β_{rec} 和触发延迟角 α_{rec} 。同时, 逆变侧电流偏差控制配合定关断角控制得出逆变站阀组相应超前触发角 β_{inv} 和触发延迟角 α_{inv} 。整流侧和逆变侧均是通过控制触发超前角进而获得触发延迟角度, 并用于阀组触发。

3 仿真结果分析

为了验证前文所提控制方法对传统直流输电连续换相失败抑制的有效性, 在 PSCAD/EMTDC 中使用图 9 所示 CIGRE 标准模型进行测试, 系统主要参数如表 1 所示。

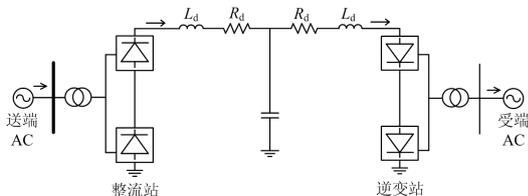


图 9 传统高压直流输电系统简化模型

Fig. 9 Simplified model of LCC-HVDC system

表 1 HVDC 系统主要参数

Table 1 Main parameters of HVDC system

系统额定参数	
整流侧	
无功补偿容量	626 Mvar
交流系统	382.87 kV, $47.655 \angle 84^\circ \Omega$, $SCR=2.5$
单个换流变	603.7 MV·A, $X_1=0.18$ p.u., 345/213.5 kV
直流侧	
直流侧电阻 R_d	2.5 Ω
直流侧电感 L_d	0.6 H
逆变侧	
无功补偿容量	626 Mvar
交流系统	215.05 kV, $21.2 \angle 75^\circ \Omega$, $SCR=2.5$
单个换流变	591.79 MV·A, $X_1=0.18$ p.u., 230/209.2 kV

作为对照, 下文将根据以下两种控制策略在不同交流系统故障工况下进行仿真验证。

方案 I: CIGRE 标准测试模型中原有控制策略;

方案 II: 在原有控制策略的基础上, 采用本文所提非线性 VDCOL 控制策略替代原有的线性 VDCOL 控制模块。

如图 10 所示, 在 PSCAD/EMTDC 中, 利用时间模拟直流电压 U_{dc} 的标幺值, 得到原有 VDCOL 模块的模拟静态运行特性曲线和不同 k 值下的非线性 VDCOL 控制策略的运行曲线, 可见随着故障系数 k 的增加, 电流指令响应会更灵敏。

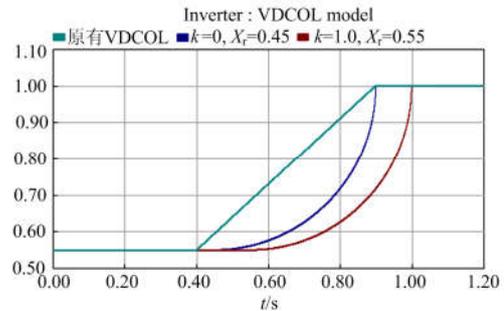


图 10 传统 VDCOL 和非线性动态 VDCOL 静态特性

Fig. 10 Static characteristic of conventional VDCOL and nonlinear VDCOL control

下文在逆变侧交流母线处设置单相、三相感性接地故障来模拟不同交流系统工况, 通过比较正常工况下和不同故障工况下分别采用方案 I 和方案 II 时 HVDC 系统中各个电气量的变化情况, 分析所提控制策略的有效性。

工况 1: 系统正常运行, 控制系统分别采取方案 I 和 II 时 HVDC 系统的部分电气量如图 11 所示。

通过对比可以发现系统各个电气量基本相同, 表明在系统正常运行时控制效果基本类似, 但采用

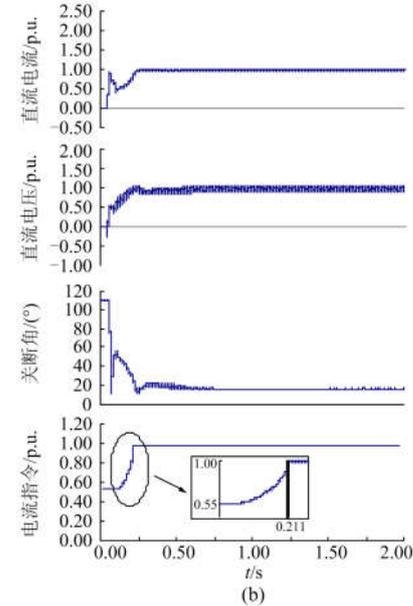
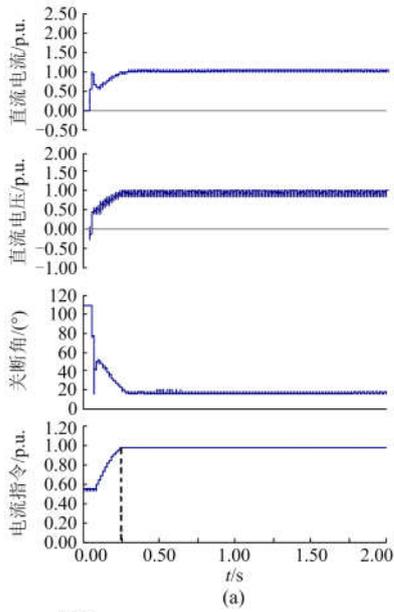


图 11 正常工作下系统的运行特性
Fig. 11 System operation performance under normal working condition

非线性 VDCOL 控制策略的电流响应速度较快，能较快达到额定电流值。通过对比可以发现系统各个电气量基本相同，表明在系统正常运行时控制效果基本类似，但采用非线性 VDCOL 控制策略的电流响应速度较快，能较快达到额定电流值。

工况 2: 在交流母线处设置单相接地短路故障，接地电感设为 1 H，表征故障点与交流母线较远，故障较轻。将故障起始时间设置在 $t=1$ s 处，故障持续时间为 0.5 s。两种控制方法的部分物理量波形如图 12 所示。

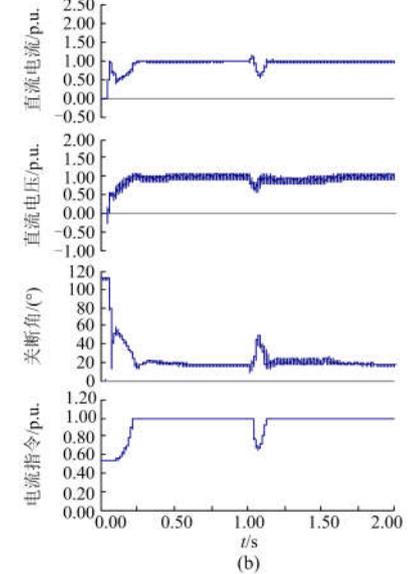
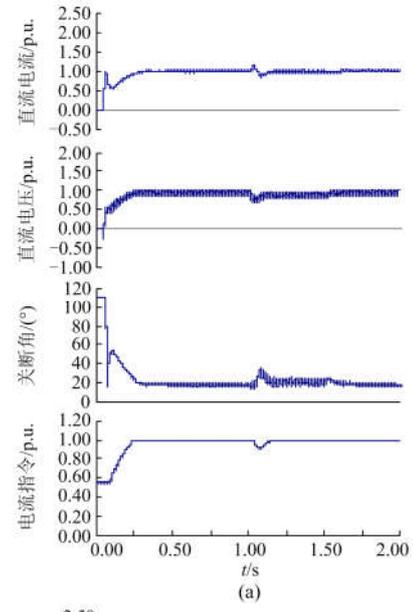


图 12 单相故障下 $L=1$ H 时系统的运行特性
Fig. 12 System operation performance under single phase fault with $L=1$ H

由图 12(a)可见，采用原有控制策略时，由于故障发生点距离较远、故障较轻，因此 HVDC 系统逆变侧并未发生换相失败，故障切除后恢复正常运行。

当改用方案 II 时，HVDC 系统逆变侧亦未发生换相失败，通过对比系统各个电气量，可发生两种方案控制效果基本类似，但采用方案 II 时，系统直流电流指令值 I_{ord} 下降较多，关断角增加量较大，即对故障的响应较为灵敏。通过大量仿真分析发现，对于较轻的交流系统故障，采用方案 I 和方案 II，HVDC 系统逆变侧均不会发生换相失败，两者的故障恢复能力相当，但方案 II 因直流电流指令的响应

较为灵敏, 在换相失败免疫力方面的表现会较佳。

工况 3: 在交流母线处设置单相接地短路故障, 接地电感设为 0.4 H , 表征故障较严重。将故障起始时间设置在 $t=1\text{ s}$ 处, 故障持续时间为 0.5 s 。两种控制方法的部分物理量波形如图 13 所示。

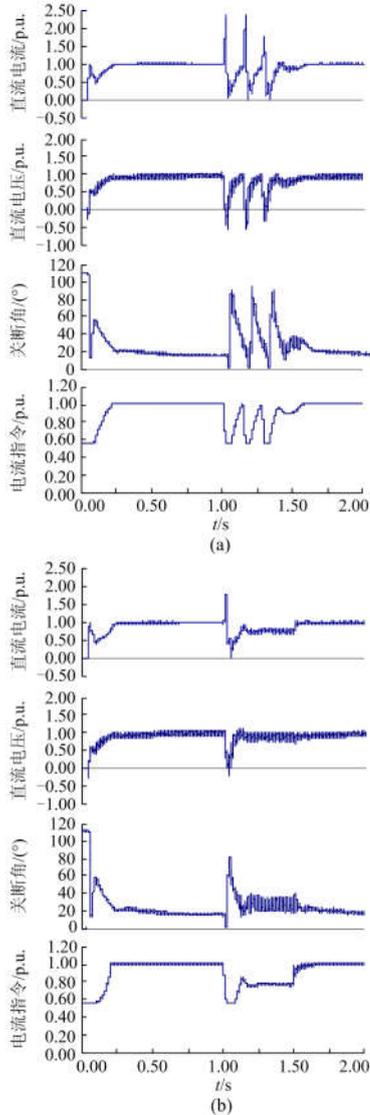


图 13 单相故障下 $L=0.4\text{ H}$ 时系统的运行特性

Fig. 13 System operation performance under single phase fault with $L=0.4\text{ H}$

由图 13(a)可见, 采用方案 I 时, 由于故障较严重, 系统出现连续换相失败, HVDC 系统逆变侧的关断角 γ 连续 3 次跌落至 0, 直流电流在前两次换相失败期间均超过了 2 p.u. , 直流侧电压波动幅度也较大, 系统只在故障切除后恢复正常运行。

由图 12(b)可见, 当方案 II 时, 虽然换相开始时刻距离交流系统故障的时间很短, 导致第一次换相失败难以避免, 但在此之后, HVDC 系统逆变侧

并未发生连续换相失败。所采用的直流电流指令调节灵敏度更高, 能够根据直流电压的变化更快地限制直流电流(由图 12(b)可见直流电流在换相失败期间冲击电流的最大值低于 2 p.u.), 避免了阀组过大的冲击。同时, 在恢复阶段使电流指令值维持在较低水平以避免换相失败的再次发生, 而在故障切除后又较快恢复满额正常运行。

工况 4: 在受端系统交流母线处设置三相接地短路故障, 接地电感的大小设置为 0.4 H 。将故障起始时间设置在 $t=1\text{ s}$ 处, 故障持续时间为 0.5 s 。控制策略分别采取方案 I 和 II 时系统部分物理量的波形如图 14 所示。经分析可知, 所提非线性 VDCOL

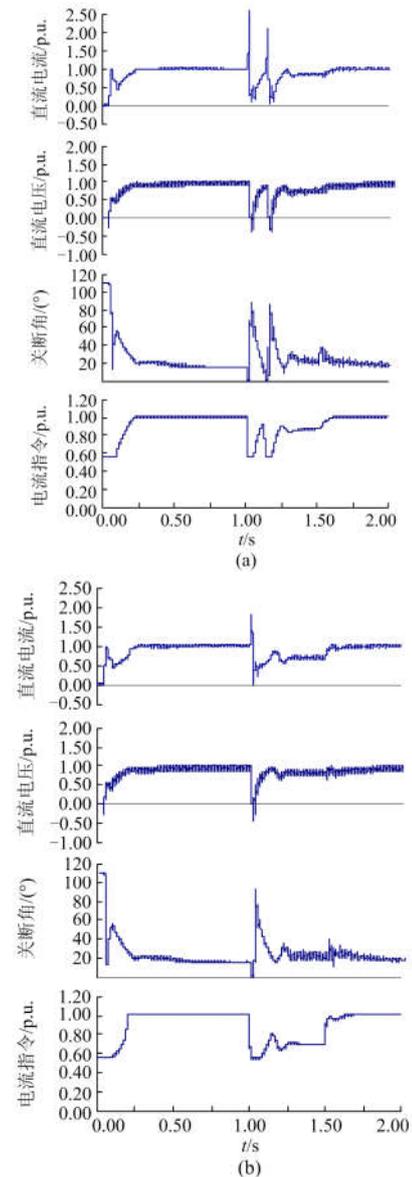


图 14 三相故障下 $L=0.4\text{ H}$ 时系统的运行特性

Fig. 14 System operation performance under three phase fault with $L=0.4\text{ H}$

控制在此故障情况下同样可起到与工况 3 类似的连续换相失败抑制作用。

4 结论

本文针对高压直流输电系统中的连续换相失败现象,提出了一种基于非线性动态 VDCOL 的连续换相失败抑制策略。通过理论分析和仿真验证,得到了以下结论:

1) 通过提高直流指令电流的调节灵敏度,所提非线性动态 VDCOL 控制能更好地限制直流电流的增加,降低了阀组冲击。

2) 仿真表明该控制策略在一定程度上可以减少传统高压直流输电系统连续换相失败的发生概率,有利于系统的电压和传输功率的恢复。

3) 所提控制方法仅针对控制系统的 VDCOL 模块,可以较好兼容其他优化控制策略,且无需额外的辅助器件的电路,成本较低,易于实现。

参考文献

[1] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 58-63.

[2] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2011.

[3] 吕虎, 李晨坤, 崔挺, 等. 酒泉—湖南特高压直流对湖南电网稳控策略的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 114-119.
GUO Hu, LI Chenkun, CUI Ting, et al. Influence of the UHVDC project from Jiuquan to Hunan on stability control strategies in Hunan power grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 114-119.

[4] 李新年, 易俊, 李柏青, 等. 直流输电系统换相失败仿真分析及运行情况统计[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 266-271.
LI Xinnian, YI Jun, LI Baiqing, et al. Simulation analysis and operation statistics of commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 266-271.

[5] 邵瑶, 汤涌, 郭小江, 等. 2015 年特高压规划电网华北和华东地区多馈入直流输电系统的换相失败分析[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 9-15.
SHAO Yao, TANG Yong, GUO Xiaojiang, et al. Analysis on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems in north China and east China power grids planned for UHV power grids in 2015[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 9-15.

[6] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械

工业出版社, 2005: 40-42.

[7] 姜梦, 熊浩清, 邓晓璐, 等. 特高压直流闭锁后华东电网频率稳定特性研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(5): 58-64.
JIANG Meng, XIONG Haoqing, DENG Xiaolu, et al. Study on power characteristics of UHVDC under abnormal operation[J]. Smart Power, 2018, 46(5): 58-64.

[8] 张天, 龚雁峰. 特高压交直流电网输电技术及运行特性综述[J]. 智慧电力, 2018, 46(2): 87-92.
ZHANG Tian, GONG Yanfeng. Research on transmission technologies and operational performance of UHV AC/DC power grid in China[J]. Smart Power, 2018, 46(5): 87-92.

[9] 王晶. 高压直流输电典型故障控制保护策略的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.

[10] 肖浩, 朱佳, 李银红, 等. 多馈入直流系统换相失败免疫水平快速确定方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2711-2717.
XIAO Hao, ZHU Jia, LI Yinhong, et al. Study on rapid determination method of commutation failure immunity levels for multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2711-2717.

[11] ZOU G, ZHENG J C, CHEN X X. Study on commutation failure in an HVDC inverter[C] // Proceeding of International Conference on Power System Technology, August 18-21, 1998, Beijing, China: 503-506.

[12] 陈树勇, 李新年, 余军, 等. 基于正余弦分量检测的高压直流换相失败预防方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 1-6.
CHEN Shuyong, LI Xinnian, YU Jun, et al. A method based on the sin-cos components detection mitigates commutation failure in HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 1-6.

[13] 刘建勋, 陆榛, 付俊波, 等. 抵御直流连续换相失败的同步调相机配置研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(12): 22-27.
LIU Jianxun, LU Zhen, FU Junbo, et al. Research on synchronous condenser configuration for resisting continuous commutation failure in HVDC[J]. Smart Power, 2017, 45(12): 22-27.

[14] 倪晓军, 赵成勇, 许韦华, 等. 降低直流输电换相失败概率的改进拓扑及其控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 811-820.
NI Xiaojun, ZHAO Chengyong, XU Weihua, et al. An improved topology to decrease the commutation failure in LCC-HVDC and its control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 811-820.

- [15] GUO C, LI C, ZHAO C, et al. An evolutional line-commutated converter integrated with thyristor-based full-bridge module to mitigate the commutation failure[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(2): 967-976.
- [16] 孙国强, 高楷, 卫志农, 等. 抑制 HVDC 系统换相失败的自适应 PI 控制方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 39-46.
SUN Guoqiang, GAO Kai, WEI Zhinong, et al. Adaptive PI control method to restrain commutation failure in HVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 39-46.
- [17] BAUMAN J, KAZERANI M. Commutation failure reduction in HVDC system using adaptive fuzzy logic controller[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1995-2002.
- [18] SUN Y Z, PENG L, MA F, et al. Design a fuzzy controller to minimize the effect of HVDC commutation failure on power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(1): 100-107.
- [19] 李新年, 陈树勇, 庞光恒, 等. 华东多直流馈入系统换相失败预防和自动恢复能力的优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 134-140.
LI Xinnian, CHEN Shuyong, PANG Guangheng, et al. Optimization of commutation failure prevention and automatic recovery for east China multi-infeed high-voltage direct current system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 39(6): 134-140.
- [20] 刘羽超, 郭春义, 许韦华, 等. 一种降低直流输电换相失败概率的控制方法[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 76-82.
LIU Yuchao, GUO Chunyi, XU Weihua, et al. A control method to reduce commutation failure probability in HVDC power transmission[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 76-82.
- [21] 袁阳, 卫志农, 王华伟, 等. 基于直流电流预测控制的换相失败预防方法[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 565-570.
YUAN Yang, WEI Zhinong, WANG Huawei, et al. A DC current predictive control based method to decrease probability of commutation failure[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 565-570.
- [22] GUO Chunyi, ZHANG Yi. GOLE A M. Analysis of dual-infeed HVDC with LCC-HVDC and VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1529-1537.
- [23] 李瑶佳, 汪娟娟, 李子林, 等. 考虑高压直流输电系统无功特性的低压限流参数设置[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 16-23.
LI Yaojia, WANG Juanjuan, LI Zilin, et al. VDCOL parameters setting influenced by reactive power characteristics of HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 16-23.
- [24] 彭忠, 李少华, 李泰, 等. 高压直流输电系统抑制换相失败的最小关断面积控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 75-80.
PENG Zhong, LI Shaohua, LI Tai, et al. A minimum extinction area control strategy to suppress commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 75-80.

收稿日期: 2018-04-11; 修回日期: 2018-05-23

作者简介:

孟庆强(1966—), 男, 高级工程师, 从事特高压交流工程建设管理工作;

刘泽洪(1961—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事特高压直流输电技术研究工作;

洪乐荣(1993—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为特高压直流输电运行与控制。E-mail: hlr0908@163.com

(编辑 周金梅)