

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.202120

基于虚拟电阻的高压直流换相失败期间送端电网 暂态过电压抑制方法

肖超¹, 韩伟¹, 李琼林¹, 熊小伏², 冯志远³

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052; 2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术
国家重点实验室, 重庆 400044; 3. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对高压直流输电系统换相失败易引发送端电网暂态过电压的问题, 提出了一种基于虚拟电阻控制的送端电网暂态过电压抑制方法。分析了高压直流系统发生换相失败期间整流站交流侧的无功动态特性及其引发送端电网暂态过电压的机理。根据影响暂态过电压水平的关键直流控制变量分析并结合换相裕度边界条件, 设计了基于虚拟电阻的送端暂态过电压抑制控制器。控制器可根据送端电网暂态过电压水平动态调整整流站触发角, 实现送端电网的暂态过电压抑制目标。仿真算例表明, 所提控制方法通过虚拟电阻环节与常规定电流控制协调配合, 能有效抑制换相失败期间送端电网暂态过电压水平。

关键词: 高压直流; 换相失败; 送端电网; 暂态过电压; 虚拟电阻

A suppression method for overvoltage of a sending end grid caused by commutation failure based on virtual resistance

XIAO Chao¹, HAN Wei¹, LI Qionglin¹, XIONG Xiaofu², FENG Zhiyuan³

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China;
2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: There is a transient overvoltage problem at the sending end grid during a commutation failure in an HVDC transmission system. We therefore propose a transient overvoltage suppression method of the sending end grid based on virtual resistance control of the rectifier station. The reactive power dynamic characteristics at the AC side of the rectifier station during the commutation failure and the mechanism that contributes to the transient overvoltage of the sending end grid is analyzed. By analyzing the key DC control variables that affect the transient overvoltage and combining the commutation margin boundary conditions, a sending end grid transient overvoltage suppression controller based on virtual resistance is designed. The controller can dynamically adjust the trigger delay angle of the rectifier station according to the transient overvoltage level of the sending-end power grid to achieve the transient over-voltage suppression target. The simulation example shows that the proposed control method can effectively suppress the transient overvoltage of the sending end grid during commutation failure by coordinating the virtual resistance link with the conventional constant current control.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of the State Grid Corporation of China (No. 52170221000U).

Key words: HVDC; commutation failure; sending end grid; transient overvoltage; virtual resistance

0 引言

我国能源和负荷中心呈逆向分布的特点, 使得

电网换相换流器型高压直流输电(Line Commutated Converter based High Voltage Direct Current, LCC-HVDC)技术在大容量、远距离输电工程中得到了广泛的应用。换相失败是 LCC-HVDC 系统运行中的常见故障, 当受端交流电网电压受到扰动后, LCC 逆变站容易发生换相失败。在换相失败期间, 换流

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目资助
(52170221000U)

站与电网之间交换的无功功率也会大幅波动, 从而引发整流站近区电网的过电压现象^[1-3]。由于目前我国许多风机高电压穿越能力一般设置为 1.1 p.u. 无延迟脱网^[4], 换相失败期间送端电网的过电压有可能引起整流站近区风电机组大面积脱网, 实际电网运行中也多次暴露了风电机组对交流电网电压变化敏感的问题^[5-6]。因此, 降低特高压直流整流站近区过电压水平对于避免交直流混联电网连锁反应风险具有重要意义。

随着送端新能源比例的增大和直流系统传输容量的提升, 直流换相失败期间送端电网的暂态过电压问题已逐渐得到许多学者的关注, 目前的研究主要集中在换相失败期间送端无功特性和暂态过电压抑制策略两方面。在换相失败期间送端无功/电压特性研究方面: 文献[7-8]通过仿真和实际案例分析了特高压直流在扰动期间送端暂态过电压引起风电机组高压脱网问题。文献[9]分析了换相失败不同阶段换流站的无功特性, 得出了送端近区交流电压呈现“先降低后升高”的变化特性。文献[10]提出了直流换相失败期间送端换流母线过电压的快速计算方法, 可量化换相失败期间送端电网过电压水平。在换相失败期间送端暂态过电压抑制策略方面, 由于换相失败引起的送端过电压一般发生在换相失败后的几十毫秒内, 基于换流站交流滤波器投切的传统直流无功控制方法(一般延时 200 ms), 无法充分满足快速控制需求, 为此, 目前的研究主要从改进换流站控制策略或增加辅助设备角度开展。文献[11]研究了换相失败期间逆变站主动投旁通对并调节直流电流指令以抑制送端电网过电压的控制策略。基于逆变站主动投旁通对思想, 文献[12]提出了一种在逆变站直流侧出口增加直流斩波器的控制策略, 同样实现了抑制换相失败期间弱送端电网的暂态过电压。然而, 逆变侧主动投入旁通对在一定程度上将延缓直流电压恢复的时间, 影响直流传输功率快速恢复。文献[13]分析指出改进整流站定电流控制器的时间常数可以抑制送端近区暂态电压, 但参数选取不当可能会引发持续换相失败。文献[14-15]提出了在整流侧增加调相机来抑制送端系统暂态过电压的控制策略, 并分析了调相机的容量选取原则, 但该策略将大大增加了电网投资成本。

针对以上换相失败期间的送端暂态过压抑制策略存在的不足, 本文提出了一种基于虚拟电阻的暂态过电压抑制策略。首先, 分析了换相失败期间送端系统的无功电压特性, 针对影响整流站无功功率特性的关键参数, 设计了反映送端电网电压动态变化的虚拟电阻, 结合整流站原有定电流控制器,

提出了基于虚拟电阻的暂态过电压抑制策略, 在此基础上, 分析了虚拟电阻的参数选取原则和投切逻辑。最后, 在 PSCAD/EMTDC 中基于 CIGRE 高压直流标准测试模型对所提控制策略进行了仿真验证, 结果表明所提控制策略在不增加额外无功设备投资成本的基础上, 可有效利用直流控制系统抑制换相失败期间送端电网的暂态过电压水平。

1 换相失败期间整流站无功动态特性

图 1 为高压直流系统换流站与交流系统无功功率交换示意图。

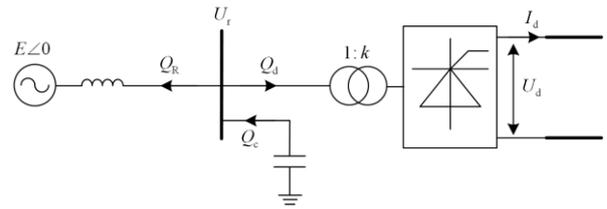


图 1 换流站与交流系统无功交换示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reactive power exchange between DC converter and AC system

图 1 中, Q_c 和 Q_d 分别为无功补偿设备提供和换流站消耗的无功功率, Q_R 为直流系统与交流系统交换的无功功率, U_d 和 I_d 分别为直流侧电压和直流电流, E 为交流系统等值电动势, U_r 为换流变压器网侧电压有效值, k 为换流变压器变比。

直流系统换流站的功率控制方程可表示为

$$\begin{cases} P_d = U_d I_d \\ Q_d = P_d \tan \varphi \\ \varphi = \arccos(U_d / U_{d0}) \\ U_d = N \left(\frac{1.35 U_r \cos \alpha_r}{k} - \frac{3}{\pi} X I_d \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_d 为整流侧直流有功功率; φ 为功率因数角; N 为换流站每极中 6 脉动换流器数; X 为换相电抗; α 表示整流站触发角; 空载直流电压 $U_{d0} = 1.35 k N U_r$ 。

根据式(1), 整流站消耗的无功功率可表示为

$$Q_d = \sqrt{\left[\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi k} \right)^2 - \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi k} \cos \alpha \right)^2 \right] N^2 U_r^2 I_d^2 + \frac{18\sqrt{2} X}{\pi^2 k} \cos \alpha N^2 U_r^2 I_d^3 - \left(\frac{3 N X I_d^2}{\pi} \right)^2} \quad (2)$$

直流系统与送端交流系统之间交换的无功功率为

$$Q_R = Q_c - Q_d = B_c U_r^2 - I_d \sqrt{\left(1.35 N U_r / k \right)^2 - U_d^2} \quad (3)$$

若 Q_R 大于零, 则直流系统向送端交流系统注入

一定的无功功率；反之，直流系统从送端交流系统吸收无功功率。

直流系统的换流站需要消耗大量无功功率(一般情况下，整流站和逆变站消耗的无功功率分别为传输功率水平的 30%~50%和 40%~60%)，因此，换流站需配置大量无功补偿设备以满足换流站无功需求^[16-17]。在稳态运行情况下，整流站内的无功补偿量 Q_c 与整流站消耗无功功率 Q_d 基本平衡，因此，直流系统与受端交流系统之间的无功交换量 Q_R 一般接近于零。

当发生换相失败后，由于直流侧电压和电流发生较大变化，整流侧的无功特性也随之发生较大变化，按照换相失败的发展过程可分为以下三个阶段^[18]。

1) 直流侧短路阶段。换相失败导致逆变侧直流短路，直流电流迅速增加，整流侧换流站无功消耗增大。而换流站内交流滤波器发出的无功功率并未出现太大变化，因此，直流系统从送端交流系统吸收大量无功功率。

2) 直流电流降低阶段。在整流侧电流控制环节，整流侧电流控制器和低压限流控制作用下，直流电流和整流站无功消耗均迅速下降，由于站内无功补偿仍维持在额定值，因此，整流站交流侧出现无功过剩现象，并导致整流站近区出现暂态过电压。

3) 直流电流恢复过程。直流功率逐渐恢复到故障前状态。此过程中，由于换流器无功消耗也逐渐增长到稳态条件下的无功消耗水平。换流站与交流系统无功交换逐渐平衡。

由此可见，换相失败期间整流站交流侧暂态过电压主要出现在直流电流降低阶段。根据式(1)、式(2)可知，通过优化整流站控制器在该阶段的直流电流指令或触发角指令均会影响整流站无功功率消耗，降低换相失败期间整流侧的暂态过电压水平。

2 整流站虚拟电阻控制策略设计

2.1 虚拟电阻控制原理

为了不增加额外无功补偿设备且不影响直流系统稳态运行特性，在整流站控制器中引入虚拟电阻的概念，将抑制送端暂态过电压而需要的调节量叠加至定电流控制器，进而降低换相失败对送端过压的影响程度。为实现快速检测送端电网暂态过电压，基于 $abc/\alpha\beta$ 变换得到送端电网的三相电压采样值 $u_{\alpha\beta}$ ，其计算公式如下^[19]。

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ 0 & 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$u_{\alpha\beta} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \quad (5)$$

通过比较 $u_{\alpha\beta}$ 与额定电压得到暂态过电压水平，引入式(6)中的虚拟电阻 R_v 可将直流电流调节量折算至控制系统，其控制原理如图 2 所示。

$$\Delta I_d = \Delta u_{\alpha\beta} / R_v \quad (6)$$

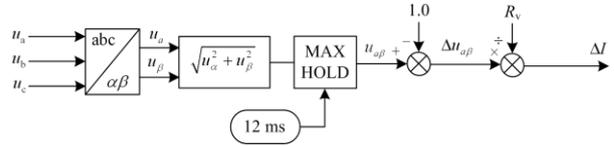


图 2 虚拟电阻控制环节

Fig. 2 Control unit of virtual resistance

式(6)中的虚拟电阻间接反映了换相失败期间送端电网的暂态过电压特性。通过虚拟电阻环节与常规定电流控制协调配合，可实现限制直流侧短路电流和整流侧暂态过电压的控制目的。虚拟电阻越小，直流电流指令值越大，越有利于限制整流侧暂态过电压水平，但同时也在一定程度上影响逆变站的换相裕度。因此，虚拟电阻的选取应综合考虑整流侧暂态过电压抑制目标及逆变站的换相裕度。

2.2 虚拟电阻控制参数选取约束

根据正常换相过程等效电路可得^[20]

$$u_{ab}(t) = L \frac{di_o(t)}{dt} - L \frac{di_c(t)}{dt} \quad (7)$$

式中： $u_{ab}(t)$ 为换流器换相电压； L 为每相的换相电感； i_o 和 i_c 分别为即将开通的阀和即将关断的阀上流通的电流， $i_o + i_c = i_d$ 。

在换相期间 $[\pi - \beta, \pi - \gamma]$ 内对式(7)两边进行定积分可得

$$\int_{\pi - \beta}^{\pi - \gamma} (\sqrt{2}U_{LL} \sin \omega t) d\omega t = \omega L [i_d(\pi - \gamma) + i_d(\pi - \beta)] \quad (8)$$

式中， U_{LL} 为逆变站换流变阀侧电压有效值。

根据式(8)，分别定义换相面积提供量 A_p 及需求量 A_n 为

$$A_p = \int_{\pi - \beta}^{\pi - \gamma} (\sqrt{2}U_{LL} \sin \omega t) d\omega t = \sqrt{2}U_{LL} (\cos \gamma - \cos \beta) \quad (9)$$

$$A_n = \omega L [i_d(\pi - \gamma) + i_d(\pi - \beta)] \quad (10)$$

为满足正常换相裕度要求，换相周期内的换相面积需求量应小于换相面积提供量，即 $A_n \leq A_p$ 。同时，为避免恢复过程中关断角过小，根据式(9)和式(10)可得，交流故障恢复过程中直流电流应始终满足：

$$I_d \leq \frac{\sqrt{2}U_{LL} (\cos \gamma_{lim} - \cos \beta)}{2\omega L} \quad (11)$$

式中， γ_{lim} 为临界关断角。

考虑当受端交流电网发生不对称故障时, 逆变器关断角也受换相电压过零点前移角度 ϕ 影响^[21-22]。以 a 相电压发生跌落为例, 直流电流的约束关系还应计及过零点前移角度影响。

$$I_d \leq \frac{\sqrt{2}U_{LL}(\cos(\gamma_{lim} + \phi) - \cos \beta)}{2\omega L} \quad (12)$$

式中, 相角偏移 $\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta U_a}{\sqrt{3}(2 - \Delta U_a)}\right)$, ΔU_a 为 a 相电压跌落幅值。当三相电压对称跌落时, 有 $\phi = 0$ 。

因此, 结合式(6)、式(11)和式(12)可以得到虚拟电阻的选取约束关系如式(13)所示。

$$R_v \geq \frac{2\omega L \Delta u_{\alpha\beta}}{\sqrt{2}U_{LL}(\cos(\gamma_{lim} + \phi) - \cos \beta) - 2\omega L I_d^*} \quad (13)$$

2.3 虚拟电阻控制逻辑设计

当直流系统稳态运行时, 虚拟电阻控制环节不应影响直流系统的稳态运行。当检测到整流侧出现

过电压时, 根据过电压幅值 $\Delta u_{\alpha\beta}$ 和虚拟电阻得到了直流电流附加调节量, 从而增大了定电流控制器电流偏差。考虑到定电流控制器 PI 环节的控制滞后作用, 定义归算因子 k_v 并将虚拟电阻归算至定电流控制器的输出端, 可以得到归算至定电流控制器输出端的虚拟电阻为 $R'_v = R_v / k_v$, 其值可根据具体直流仿真模型参数及换相裕度约束进行约定。综上所述, 本文设计的虚拟电阻控制框图如图 3 所示。

图 3 中的控制器基本控制原理为: 在电网稳态运行工况下, 由于整流侧电压为额定电压水平, $\Delta u_{\alpha\beta} = 0$, 虚拟电阻控制环节不会影响正常定电流控制器的控制效果。若交流电压 $u_{\alpha\beta}$ 超过滞回比较器启动门限值 ε_H 时, 虚拟电阻控制环节将自动投入; 通过虚拟电阻 R_v 和归算系数 k_v 可将送端暂态过电压水平实时地引入整流侧定电流控制器。当检测到整流侧交流电压小于设定退出门限值 ε_L 时, 虚拟电阻控制环节退出。

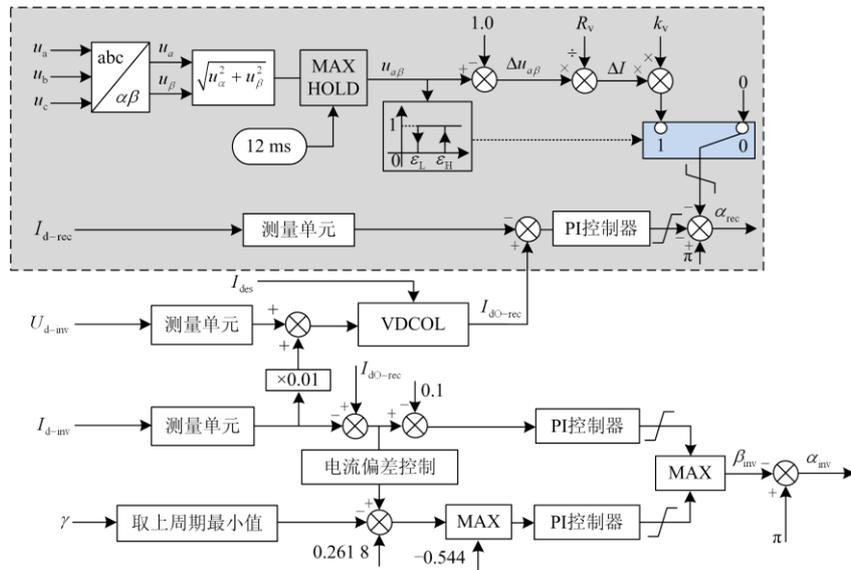


图 3 基于虚拟电阻的控制结构图

Fig. 3 Control structure diagram based on virtual resistance

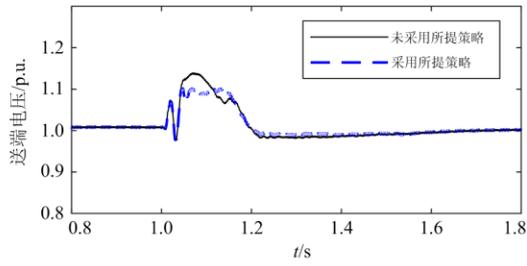
3 仿真实验与分析

为验证所提基于虚拟电阻的送端暂态过电压抑制策略的有效性, 在 PSCAD/EMTDC 中基于 CIGRE 高压直流标准测试模型进行仿真实验^[23-24]。仿真模型主要参数如下: 换流站采用 12 脉动换流器, 额定直流电压为 500 kV, 额定直流电流为 2 kA, 换流变压器高压侧交流母线额定电压 $U_i = 230$ kV, 换流变变比 $k = 0.909$, 极对数 $N = 2$, 变压器二次侧等值短路阻抗 $X = 13.32 \Omega$, 无功补偿装置等值容纳 $B_c = 0.01184$ S。虚拟电阻控制环节启动和退出的门限值分别取为 1.07 p.u. 和 1.02 p.u.。针对 CIGRE 高压直

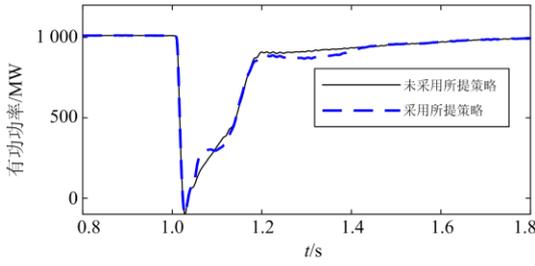
流标准测试仿真模型, 选取虚拟电阻 R'_v 为 0.38。为验证所提控制方法的控制效果, 选取 CIGRE 高压直流输电标准测试模型中的常规控制方法作为基本算例, 与本文所提控制方法进行仿真对比。

3.1 受端对称故障下的控制效果

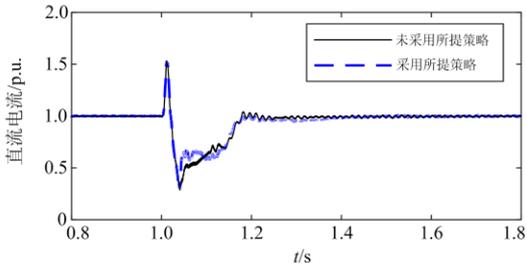
逆变器交流母线在 1.0 s 时设置对称电感型短路故障, 故障持续时间 0.1 s, 过渡电感 $L_f = 0.1$ H。三相短路故障下送端交流电压有效值、直流传输功率、直流电流、整流站触发角和逆变器关断角仿真结果如图 4 所示。



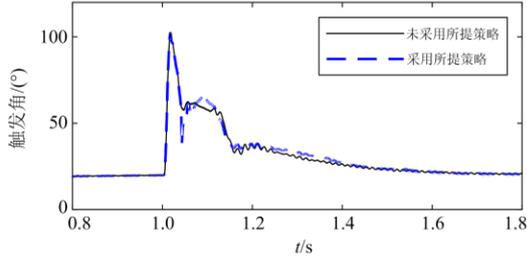
(a) 送端交流电压有效值



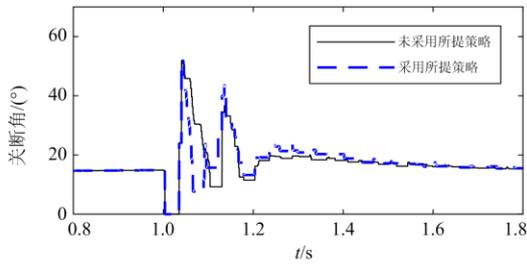
(b) 直流传输功率



(c) 直流电流



(d) 整流站触发角



(e) 逆变站关断角

图4 三相短路故障下的控制效果

Fig. 4 Control effect under three phase grid fault

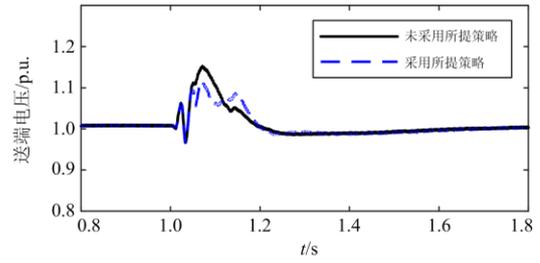
由图4可知,当受端电网发生交流故障后,本文所提控制策略应用前后整流侧暂态过电压幅值分

别为1.14 p.u.和1.09 p.u.,通过优化暂态期间直流电流和触发角变化过程,暂态过电压水平可有效限制在1.1 p.u.以内,送端暂态过电压均在故障清除后的0.1 s后达到额定电压。由图4(b)和图4(e)可知,两种控制方法作用下直流系统均只发生了1次换相失败,整流传输功率暂降水平和恢复时间基本相同,所提控制策略并不影响直流暂态功率水平和故障恢复过程。

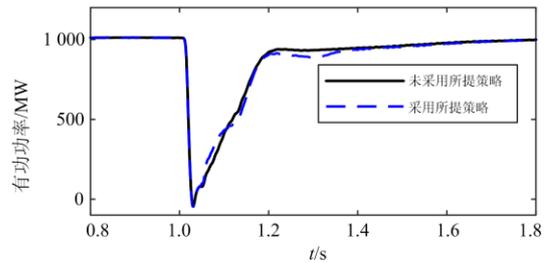
3.2 受端不对称故障下的控制效果

同理,1.0 s时,在逆变侧交流母线设置单相电感型短路故障,故障持续时间0.1 s,过渡电感 $L_f=0.1$ H。不对称故障下送端交流电压有效值、直流传输功率、直流电流、整流站触发角和逆变站关断角仿真结果如图5所示。

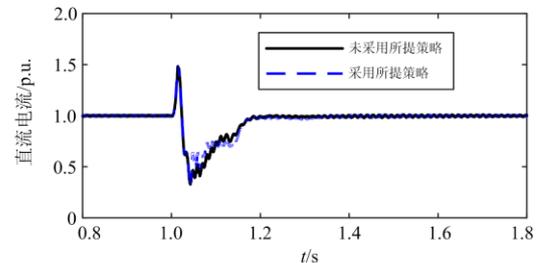
由图5可知,当受端电网发生单相短路故障后,本文所提控制策略应用前后整流侧暂态过电压幅值分别为1.15 p.u.和1.09 p.u.,送端暂态过电压均在故障清除后的0.1 s后达到额定电压。由图5(b)和图5(e)可知,两种控制方法作用下直流系统均只发生了1次换相失败,整流传输功率暂降水平和恢复时间基本相同,所提控制策略并不影响直流暂态功率水平和故障恢复过程。



(a) 送端交流电压有效值



(b) 直流传输功率



(c) 直流电流

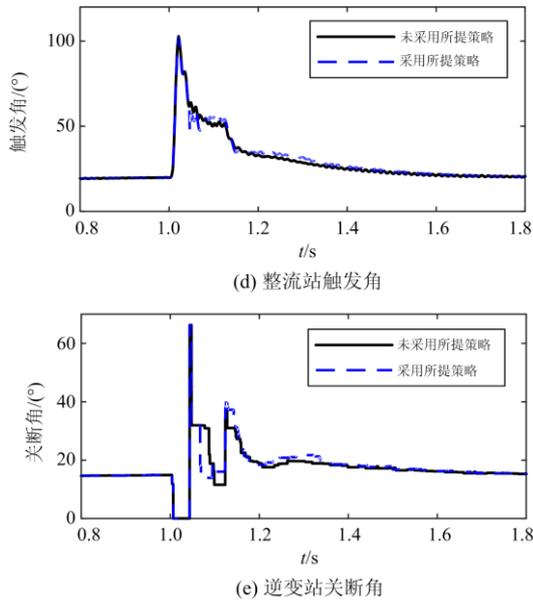


图5 不对称故障下的控制效果

Fig. 5 Control effect under unsymmetrical grid fault

3.3 不同虚拟电阻参数下的控制效果

为了验证不同虚拟电阻参数下送端暂态过电压的抑制效果, 分别改变虚拟电阻值 0.18、0.28、0.38 和 0.48 进行仿真验证。图 6 为不同虚拟电阻值下受端电网发生对称故障后的暂态过电压抑制效果。由图 6 可知, 不同大小的虚拟电阻参数均对送端暂态过电压有一定的抑制效果, 随着虚拟电阻的增大, 暂态过电压水平呈现先减小后增大的趋势, 由此可见, 虚拟电阻的选取对于暂态过电压控制效果影响较大。

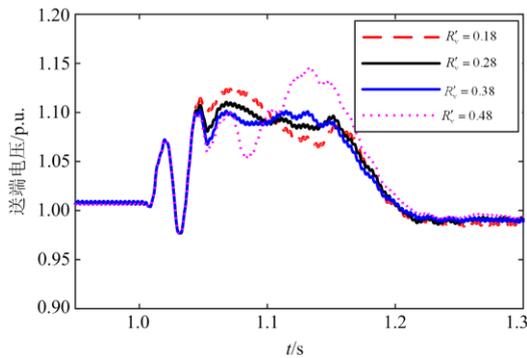


图6 不同虚拟电阻值下的暂态过电压抑制效果

Fig. 6 Suppression effect of transient overvoltage under different virtual resistance values

3.4 不同电网故障严重程度下的抑制效果

为了验证不同故障严重程度下所提控制方法的控制效果, 逆变侧交流母线在 1.0 s 时设置对称电感型短路故障, 过渡电感 L_f 分别调整为 0.5 H 和 0.05 H, 故障持续时间 0.1 s。图 7(a)和图 7(b)分别

为过渡电感为 0.5 H 和 0.05 H 所提控制策略的控制效果对比。

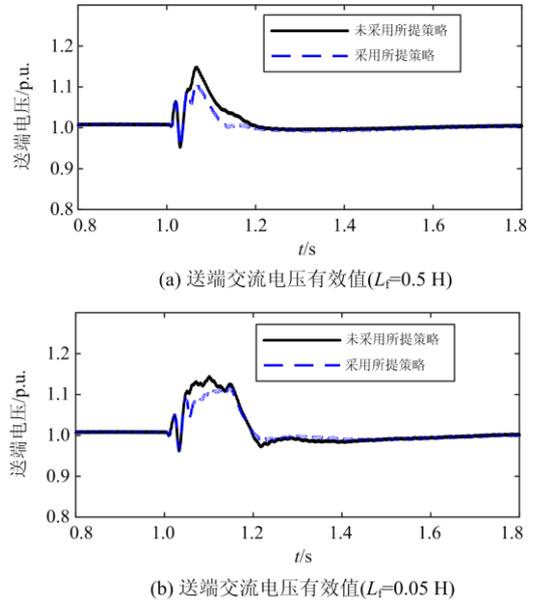


图7 不同故障严重程度下的暂态过电压抑制效果

Fig. 7 Suppression effect of transient overvoltage under different grid fault severity

对比图 4、图 5 和图 7 中不同故障严重程度下的暂态过电压抑制效果可知: 所提控制方法在不同故障场景下均能有效抑制送端暂态过电压水平。

3.5 不同整流侧短路比下的抑制效果

短路比(Short Circuit Ratio, SCR)可以用于评估直流换流站相联交流系统的电网强度, 其表达式为^[25-26]

$$SCR = \frac{S_{ac}}{P_{dN}} = \frac{U_N^2}{P_{dN}} \cdot \frac{1}{Z_s} \quad (14)$$

式中: S_{ac} 为交流系统短路容量; P_{dN} 为换流站传输直流功率; U_N 为换流变压器网侧额定电压有效值; Z_s 为交流系统等值阻抗。

为进一步评估所提控制方法对不同送端系统强度下的暂态过电压抑制效果, 保持逆变侧交流系统强度不变, 整流侧短路比分别设置为 2.5、2.2、1.9 和 1.6, 不同短路比下送端暂态过电压抑制效果的仿真统计结果如表 1 所示。

表1 不同短路比对应的暂态过电压抑制效果

Table 1 Suppression effect of transient overvoltage under different SCR

SCR	送端暂态过电压/p.u.	
	未采用所提策略	采用所提策略
2.5	1.14	1.09
2.2	1.20	1.08
1.9	1.21	1.09
1.6	1.22	1.09

由表 1 可以看出：随着送端系统不同短路比的减小，送端电网暂态过电压幅值逐渐增大，所提控制方法均能有效降低送端电网暂态过电压水平。

4 结论

针对高压直流系统换相失败期间易引发送端电网暂态过电压的问题，本文提出了一种基于虚拟电阻的暂态过电压抑制策略，通过理论和仿真分析得到如下结论。

1) 所提控制策略通过将送端暂态过电压因素引入整流站定电流控制器，可实现动态调节整流站触发角以抑制整流侧无功不平衡的问题。

2) 所提控制策略可直接通过修改直流控保系统进行实施，易于实际工程实现，无需增加额外无功调节设备投资成本。

3) 虚拟电阻控制环节不影响直流系统稳态运行及故障恢复特性，通过仿真算例验证了所提策略可有效抑制换相失败期间送端电网的暂态过电压水平，降低直流换相失败引发送端系统连锁反应的风险。

参考文献

[1] ZHANG Tian, YAO Jun, SUN Peng, et al. Improved continuous fault ride through control strategy of DFIG-based wind turbine during commutation failure in the LCC-HVDC transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 459-473.

[2] 郑超. 直流逆变端扰动对整流端影响机制及应对措施[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1817-1827.

ZHENG Chao. Study on the mechanism and countermeasures of the influence of disturbance at inverter side on the rectifier side[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1817-1827.

[3] NIAN Heng, JIN Xiao. Modeling and analysis of transient reactive power characteristics of DFIG considering crowbar circuit under ultra HVDC commutation failure[J]. Energies, 2021, 14(10).

[4] ZHENG Zixuan, REN Jie, XIAO Xianyong, et al. Response mechanism of DFIG to transient voltage disturbance under commutation failure of LCC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(6): 2972-2979.

[5] 中国国家标准委员会. 风电场接入电力系统技术规定 GB/T 19963—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.

Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical rule for connecting wind farm to power system: GB/T 19963—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.

[6] NIU Tao, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Robust voltage control strategy for hybrid AC/DC sending-side systems to prevent cascading trip failures[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1319-1329.

[7] 贺静波, 庄伟, 许涛, 等. 暂态过电压引起风电机组连锁脱网风险分析及对策[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1839-1844.

HE Jingbo, ZHUANG Wei, XU Tao, et al. Study on cascading tripping risk of wind turbines caused by transient overvoltage and its countermeasures[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1839-1844.

[8] LI Xinnian, LIU Yao, LI Tao, et al. Study on the impact of commutation failure on AC voltage of rectifier-side in UHVDC[C] // 2014 International Conference on Power System Technology (POWERCON), October 20-22, 2014, Chengdu, China.

[9] 屠竞哲, 张健, 曾兵, 等. 直流换相失败及恢复过程暂态无功特性及控制参数影响[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2131-2139.

TU Jingzhe, ZHANG Jian, ZENG Bing, et al. HVDC transient reactive power characteristics and impact of control system parameters during commutation failure and recovery[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2131-2139.

[10] 曹生顺, 张文朝, 王蒙, 等. 大容量直流发生功率大扰动时送端风机暂态过电压快速分析方法研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3300-3306.

CAO Shengshun, ZHANG Wenchao, WANG Meng, et al. Study on fast analysis method transient fundamental frequency overvoltage of wind turbine generators in sending system when serious power disturbances occur in large-capacity UHVDC[J]. High Voltage Engineering, 43(10): 3300-3306.

[11] 刘琳, 雷霄, 孔祥平, 等. 抑制换相失败期间送端电网过电压的控制策略研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(3): 60-66.

LIU Lin, LEI Xiao, KONG Xiangping, et al. The control strategy for suppressing overvoltage of sending grid during commutation failure[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(3): 60-66.

[12] 刘博, 郭春义, 赵成勇. 直流斩波器对抑制换相失败引发的弱送端电网暂态过电压的研究[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3578-3586.

LIU Bo, GUO Chunyi, ZHAO Chengyong. Research on DC chopper in suppressing transient overvoltage of weak sending terminal caused by commutation failure[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3578-3586.

- [13] 屠竞哲, 张健, 刘明松, 等. 风火打捆直流外送系统直流故障引发风机脱网的问题研究[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3333-3338.
TU Jingzhe, ZHANG Jian, LIU Mingsong, et al. Study on wind turbine generators tripping caused by HVDC contingencies of wind-thermal-bundled HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3333-3338.
- [14] 王雅婷, 张一驰, 周勤勇, 等. 新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 22-28.
WANG Yating, ZHANG Yichi, ZHOU Qinyong, et al. Study on application of new generation large capacity synchronous condenser in power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 22-28.
- [15] 乔丽, 王航, 谢剑, 等. 同步调相机对分层接入特高压直流输电系统的暂态过电压抑制作用研究[J]. 中国电力, 2020, 53(3): 43-51.
QIAO Li, WANG Hang, XIE Jian, et al. Suppressing effect of synchronous condenser on transient overvoltage of UHVDC system under hierarchical connection mode[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 43-51.
- [16] 林安妮, 黄永章, 林伟芳, 等. 不同动态无功补偿装置对直流系统故障引发送端暂态过电压的抑制效果对比[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4): 116-122.
LIN Anni, HUANG Yongzhang, LIN Weifang, et al. Comparison of suppression effect of different dynamic reactive power compensation devices for transient overvoltage caused by HVDC system faults[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 116-122.
- [17] 王鑫, 杨明玉, 吕佳宁. 应对多馈入直流换相失败的综合防御研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(12): 57-63.
WANG Xin, YANG Mingyu, LÜ Jianing. Comprehensive defense against multi-infeed DC commutation failure[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(12): 57-63.
- [18] 冀肖彤. 抑制 HVDC 送端交流暂态过电压的控制系統优化[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 45-52.
JI Xiaotong. Optimization of HVDC control system for mitigating ac transient overvoltage on rectifier station[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 45-52.
- [19] 王思超, 文俊, 贺冬珊, 等. 受端分层 UHVDC 换相失败控制和恢复策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 172-179.
WANG Sichao, WEN Jun, HE Dongshan, et al. Commutation failure control and recovery strategy of UHVDC with hierarchical connection mode[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 172-179.
- [20] MIRSAEIDI S, DONG Xinzhou, SAID D M. A fault current limiting approach for commutation failure prevention in LCC-HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(5): 2018-2027.
- [21] 王璐, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 考虑直流电流变化的 HVDC 系统不对称故障换相失败分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 1(1): 17-23.
WANG Lu, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Analysis of asymmetric fault commutation failure in an HVDC system with DC current variation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 1(1): 17-23.
- [22] SON H I, KIM H M. An algorithm for effective mitigation of commutation failure in high voltage direct current systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1437-1446.
- [23] 刘颖, 戴栋, 汪娟娟, 等. 基于逆变侧定电压控制的 HVDC 系统稳态和暂态响应特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 1-8.
LIU Ying, DAI Dong, WANG Juanjuan, et al. Transient and steady responses in HVDC system based on constant voltage control at inverter side[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 1-8.
- [24] 陈佳浩, 王琦, 朱鑫要, 等. 谐波电压造成直流输电换相失败风险评估[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 196-202.
CHEN Jiahao, WANG Qi, ZHU Xinyao, et al. Risk assessment of commutation failure for HVDC transmission due to harmonic voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 196-202.
- [25] 边宏宇, 徐友平, 邵德军, 等. 直流馈入受端电网“空心化”形势下的稳定特性分析及解决措施[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 164-170.
BIAN Hongyu, XU Youping, SHAO Dejun, et al. Analysis of stability characteristics and solutions with the hollowing of a DC feed power grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 164-170.
- [26] ZHANG Feng, XIN Huanhai, WU Di, et al. Assessing strength of multi-infeed LCC-HVDC systems using generalized short-circuit ratio[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 467-480.

收稿日期: 2021-05-24; 修回日期: 2021-09-01

作者简介:

肖超(1988—), 男, 通信作者, 博士, 研究方向为高压直流输电系统保护与控制; E-mail: sngeet@163.com

韩伟(1975—), 男, 本科, 教授级高工, 研究方向为继电保护和直流控保技术。E-mail: haiwei@ha.sgcc.com.cn

(编辑 许威)