

附加虚拟电容的动态非线性 VDCOL 控制器设计

朱红萍¹, 李毅¹, 周振烽², 朱泓知¹, 钱万明¹

(1. 湖南科技大学信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 国网湖南省电力有限公司
长沙供电分公司, 湖南 长沙 410000)

摘要: 为有效抑制高压直流输电系统在不同故障程度下的连续换相失败, 提出附加虚拟电容动态非线性低压限流控制器(The Voltage Dependent Current Order Limiter, VDCOL)设计方案。首先, 针对高压直流输电系统中常规 VDCOL 因直流电流指令调节不灵敏导致不能有效抑制重度故障程度下连续换相失败的问题, 设计动态非线性 VDCOL 控制器, 将常规 VDCOL 电压电流的线性关系设计成非线性, 克服了指令电流不能灵活调节的缺点。同时考虑到换相失败发生前后电压可变, 引入故障系数对电压进行了修改。其次, 为提高动态非线性 VDCOL 控制器对轻度和中度故障的反应灵敏度, 在动态非线性 VDCOL 的输入电压端设计附加虚拟电容模块, 抑制故障发生时输入电压下跌。最后, 通过 PSCAD/EMTDC 仿真对比分析, 结果表明所提方案在不同故障程度下能有效抑制连续换相失败, 缩短故障恢复时间。

关键词: 高压直流输电系统; 连续换相失败; VDCOL; 动态非线性; 虚拟电容

Design of a dynamic nonlinear VDCOL controller with additional virtual capacitance

ZHU Hongping¹, LI Yi¹, ZHOU Zhenyi², ZHU Hongzhi¹, QIAN Wanming¹

(1. School of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Changsha Power Supply Branch, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: To effectively restrain the continuous commutation failure of HVDC system under different fault degrees, a dynamic nonlinear voltage dependent current order limiter (VDCOL) controller design scheme with additional virtual capacitors is proposed. First, the conventional VDCOL cannot effectively restrain continuous commutation failure under severe fault because of the insensitive DC current command regulation in an HVDC system, so a dynamic nonlinear VDCOL controller is designed. The linear relationship between voltage and current of the conventional VDCOL is designed to be nonlinear, overcoming the shortcoming that the command current cannot be adjusted flexibly. Considering the variable voltage before and after commutation failure, the voltage is modified by introducing a fault coefficient. Secondly, to improve the sensitivity of the dynamic nonlinear VDCOL controller to mild and moderate faults, an additional virtual capacitor module is designed at the input voltage of the dynamic nonlinear VDCOL to restrain the drop of input voltage when faults occur. Finally, through PSCAD/EMTDC simulation and analysis, the results show that the proposed scheme can effectively restrain continuous commutation failure and shorten fault recovery time under different fault degrees.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61973109).

Key words: HVDC; continuous commutation failure; VDCOL; dynamic nonlinearity; virtual capacitor

0 引言

换相失败是高压直流输电系统中最常见的故障之一^[1-5]。若不能采取合理的抑制方法, 很容易引发系统连续换相失败, 进而对逆变站造成持续的影响

甚至导致连锁故障^[6-9]。低压限流环节可避免逆变器发生连续换相失败, 对换流阀以及整个系统起到保护作用^[9]。当直流电压降低至某整定值时, 常规 VDCOL 能通过调整系统直流电流的指令值, 增大逆变侧阀组的关断角以增加换相裕度, 从而抑制连续换相失败发生, 也能在系统故障清除后, 逐渐增加直流电流指令值, 来帮助直流输电系统快速恢

复^[10-11]。常规的 VDCOL 不能适应重度故障, 使逆变站交流电压和直流电流恢复困难, 起不到抑制连续换相失败的作用^[12]。文献[13-14], 提出改变系统直流电压上限值的方法, 能充分发挥直流电压的快速可控性, 提高系统的稳定水平, 通过高压直流输电系统的等效模型, 推导出直流输电系统电压上限值的表达式, 但没有考虑故障恢复过程中关断角的变化, 导致抑制换相失败的效果不理想。文献[15-16]通过优化常规 VDCOL 控制参数, 可以在一定程度上改善高压直流系统的故障恢复特性, 但在选择 VDCOL 控制参数时缺少相应表达式。文献[17]提出 AC/DC-VDCOL 控制方法有效抑制直流系统连续换相失败并提升其协调恢复速度。文献[18]提出了非线性 VDCOL 的控制策略, 提升了直流指令电流的灵敏度。文献[19-20]在引入模糊控制理论的基础上改变了 VDCOL 控制结构, 有效降低了逆变器对无功功率的需求量。文献[21]提出在多馈入高压直流输电系统的恢复过程中以无功需求峰值之和最小为目标函数的 VDCOL 参数设计方法。文献[22]提出获取补偿电压改变 VDCOL 斜率的控制方法。文献[23]附加了直流电流限制环节, 提出了限制型低压限流控制策略, 能快速配合电流偏差控制, 可预防换相失败的发生, 但采用的是常规 VDCOL 控制, 因此存在系统发生重度故障直流输送功率较难恢复的现象。文献[24]提出了一种空间-时间离散性影响的换相故障评估方法。文献[25]附加了虚拟电阻控制环节, 在换相失败后的恢复阶段, 限制了直流电流的快速增加, 能起到抑制连续换相失败的作用, 但故障期间直流电流具有谐波特征, 而虚拟电阻直接引入的具有谐波的直流电流, 可能导致控制不稳定。

根据以上存在的问题, 提出了附加虚拟电容控制的动态非线性 VDCOL 控制器设计方案。通过改变 VDCOL 控制结构, 将线性结构变为动态非线性结构来灵活调节直流电流指令值, 提升重度故障恢复特性, 但动态非线性 VDCOL 存在因延时过长而对轻中度故障反应不灵敏的现象, 进而附加虚拟电容模块改变动态非线性 VDCOL 输入电压, 弥补动态非线性 VDCOL 对轻中度故障不灵敏的不足, 同时抑制了故障期间动态非线性 VDCOL 输入电压迅速降低的现象。通过仿真验证, 该控制方法在不同故障程度下能有效抑制连续换相失败。

1 换相失败机理

伴随高压直流输电技术的发展, 直流输电技术日益完善^[26-29], 但换相失败依旧是逆变器最常见的故障。换相失败是指在两个桥臂换相结束时, 在反

向电压持续的一段时间内, 换相过程没有完成或者刚退出导通的阀没有恢复阻断能力^[30]。这情况发生时, 阀门电压向正向变化的过程中, 被换相的阀门将反向导通至被断开的阀门。以六脉动逆变器为例, 如图 1 所示。

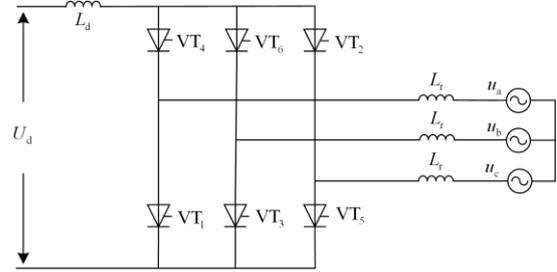


图 1 六脉动逆变器接线图

Fig. 1 Wiring diagram of 6 pulse inverter

换相回路满足式(1)。

$$L_r \frac{dk_i(t)}{dt} - L_r \frac{dg_i(t)}{dt} = \sqrt{2}U \sin(\omega t) \quad (1)$$

式中: L_r 为换相电感; U 为换相电压有效值; $k_i(t)$ 和 $g_i(t)$ 分别为将要开通和关断阀臂上流过的电流; ω 为交流系统的角频率。

对式(1)进行积分, 可以得到晶闸管换相面积 S 的表达式为

$$S = L_r I_d = \frac{1}{2} \int_{\pi-\beta}^{\pi-\beta+\mu} \sqrt{2}U \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (2)$$

$$\beta = \pi - \alpha = \mu + \gamma \quad (3)$$

式中: I_d 为直流电流; β 为超前触发角; μ 为换相角; α 为触发延迟角。

图 2 为当发生三相和单相接地故障时, 逆变侧换相电压跌落影响图。 γ' 为故障后的关断角, U' 为故障后的换相电压, φ 为换相电压过零点前移角。

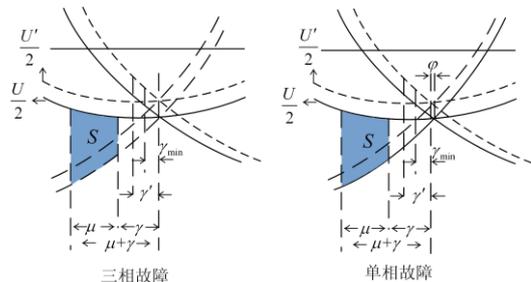


图 2 逆变侧换相电压跌落影响图

Fig. 2 Influence diagram of commutation voltage drop on inverter side

根据图 2、式(2)和式(3)可知, 假定换相面积 S 不变, 当触发延迟角 α 不变, 则 $\mu + \gamma$ 保持不变, 但在换相电压 U 降低到 U' 的过程中换相角 μ 会逐

步增大，且超前触发角 β 保持不变，则 γ 降低，直至 $\gamma < \gamma_{\min}$ ， γ_{\min} 为晶闸管恢复阻断能力所需最小关断角，当 $\gamma < \gamma_{\min}$ ，换流阀将发生换相失败^[22]。再根据式(2)、式(3)可知，故障发生时，关断角的减小，伴随着直流电流 I_d 快速增大，换相面积 S 增大，电流的快速增加是造成连续换相失败的主要因素^[31]，此时需对直流电流进行抑制，减小换相面积 S 。而大量研究发现，对于首次换相失败是难以避免的，而连续换相失败在一定程度上可避免，同时连续换相失败会给整个系统带来严重的危害，所以相比抑制首次换相失败，抑制连续换相失败对于高压直流输电具有深远意义。

直流电流的快速增大导致晶闸管换相面积 S 增大，从而关断角减小发生连续换相失败，针对连续换相失败，可直接对常规 VDCOL 控制结构或输入电压端进行设计。附加虚拟电容模块改变 VDCOL 的输入端电压值，其中 VDCOL 输入电压为逆变侧直流电压。故障期间，逆变侧换相电压跌落，直流电压伴随着换相电压的跌落而下降，而 VDCOL 通过对直流电压的调节去改变直流电流的指令值，改变输出直流电流，在此过程中，附加虚拟电容模块改变了 VDCOL 的输入电压值，在一定程度上抑制了直流电流的快速增大，减小了晶闸管换相面积 S ，增大了关断角，降低连续换相失败的发生概率。常规 VDCOL 呈线性恢复特性，存在不能灵活调节直流电流指令值的情况，因此对 VDCOL 也进行了设计。

2 高压直流输电 VDCOL 控制策略

2.1 常规线性 VDCOL 控制策略

直流输电系统控制系统通常被分为 3 个层次，其中包括主控制级、极控制和阀组控制级^[21]。当直流输电系统中逆变侧交流系统出现故障时，逆变侧极控制直接影响到故障恢复特性。以 CIGRE HVDC 标准模型为例^[31]，逆变侧控制结构如图 3 所示。

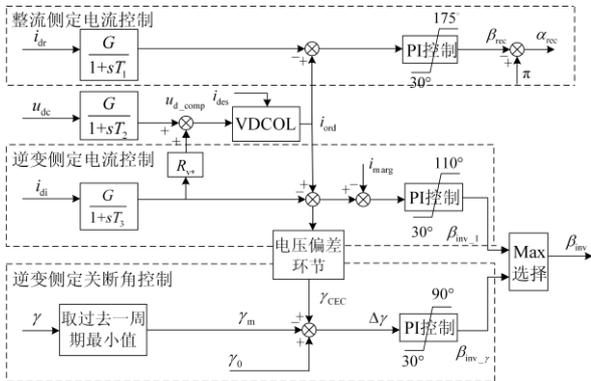


图 3 HVDC 系统极控制结构图

Fig. 3 Pole control structure diagram of HVDC system

图 3 中当直流侧电压下降时常规 VDCOL 控制策略能减小电流指令值，使直流系统在故障恢复过程中快速可控，避免逆变阀应力过大，减少了连续换相失败的概率。常规线性 VDCOL 控制策略的静态恢复特性由直流电压 U_{dc} 和直流电流指令 I_{ord} 确定，其中直流电压 U_{dc} 和直流电流指令 I_{ord} 的关系如式(4)所示。

$$I_{ord} = \begin{cases} 0.55 & U_{dc} < 0.4 \\ 0.9U_{dc} + 0.19 & 0.4 \leq U_{dc} \leq 0.9 \\ 1 & 0.9 < U_{dc} \end{cases} \quad (4)$$

系统正常运行时的直流电流指令 I_{ord} 为 1.0 p.u.；当直流侧的实际运行电压 U_d 低于 0.9 p.u. 时，VDCOL 根据直流电压 U_d 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.。该控制策略在一定程度上调节了直流电流的指令值，但采用的数学模型固定，导致各个电流指令区段的启动电压值是固定的，且常规 VDCOL 的恢复趋势中电压电流呈线性关系导致斜率固定，因此电流指令的调节灵敏度不高，同时没有考虑到换相失败发生前后电压可变的情况，如图 4 所示， $\Delta U_i (i=1,2,3,\dots)$ 为动态变化电压，进而电流指令值不能合理调节。

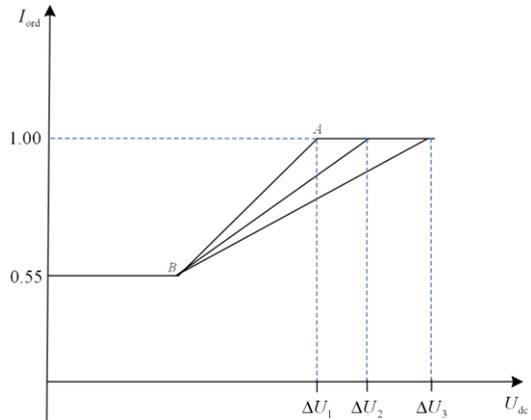


图 4 动态 VDCOL 运动特性

Fig. 4 Dynamic VDCOL motion characteristics

2.2 动态非线性 VDCOL 控制器设计

动态非线性 VDCOL 控制器设计的理论依据：当电压处于较低水平、系统提供的无功功率较少时，电流应该缓慢增长，减小换流站无功消耗，促进换相电压的恢复；当电压达到较高的水平时，此时系统能提供较多的无功功率，电流应以较快的速度增长，促进直流系统传输功率的恢复，使系统尽快恢复正常运行^[20]。动态非线性 VDCOL 控制器设计，根据理论依据考虑以下两点：a) 考虑到换相失败发

生前后电压可变的情况; b) 将电压电流线性相关趋势改变为非线性趋势。

1) 针对 a) 点考虑到换相失败发生前后电压可变的情况, 因此需要确定动态电压 ΔU_i 参数, 根据故障期间交流电压的变化, 引入故障系数 $q^{[18]}$, 如式(5)所示, 使得 ΔU_i 能根据故障情况进行动态调整, 如式(6)所示。

$$q = 1 - \frac{U_{ac}}{U_{acN}} \quad (5)$$

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

$$\Delta U_i = 0.9 + q \quad (6)$$

当系统正常运行时, $q = 0$, 不影响系统正常运行; 当发生故障时, 此时的 ΔU_i 随 q 值的变化而改变。

2) 如图 5 所示, 引入故障系数后, 对 VDCOL 控制结构进行设计, 针对 b) 点将电压电流线性趋势改变成非线性趋势。

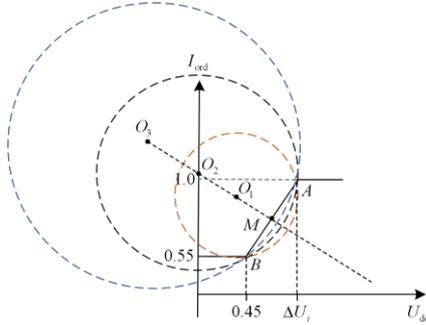


图 5 动态非线性 VDCOL 控制设计

Fig. 5 Dynamic nonlinear VDCOL control design

以下为具体设计步骤。

(1) 为方便计算, 确定 B 点(0.45, 0.55), 由式(5)、式(6)得到 ΔU_i , 则点 $A(\Delta U_i, 1)$ 可确定, 线段 AB 的斜率 K 可得到, $K = \frac{0.45}{\Delta U_i - 0.45}$; 因此线段 AB 的垂直平分线 l 的斜率 K_l 为

$$K_l = -\frac{\Delta U_i - 0.45}{0.45} \quad (7)$$

(2) 因为垂直平分线 l 经过线段 AB 的中点, 则根据点 $M(\frac{\Delta U_i + 0.45}{2}, 0.775)$, 可得此时直线 l 斜率 K_l 为

$$K_l = \frac{I_{ord} - 0.775}{U_{dc} - (0.45 + \Delta U_i) / 2} \quad (8)$$

取直线 l 与直线 I_{ord} 轴交于点 O_1 , 点 O_1 的坐标为(0, I_{ord}), 代入式(8), 可得点 O_1 的横坐标为

$$I_{ord} = \frac{\Delta U_i^2 - 0.45^2}{0.9} + 0.775 \quad (9)$$

则有圆心 O_1 坐标为(0, $\frac{\Delta U_i^2 - 0.45^2}{0.9} + 0.775$)

(3) 该特性圆过 B 点, 则可得到圆半径平方根 R^2 , 如式(10)所示。

$$R^2 = (-0.225 - \frac{\Delta U_i^2 - 0.45^2}{0.9})^2 + 0.2025 \quad (10)$$

根据圆的特性方程, 得到该圆的表达式如式(11)所示。

$$I_{ord} = -\sqrt{(-0.225 - \frac{\Delta U_i^2 - 0.45^2}{0.9})^2 + 0.2025 - U_{dc}^2} + 0.775 + \frac{\Delta U_i^2 - 0.45^2}{0.9} \quad (11)$$

则动态非线性 VDCOL 控制运行特性如式(12)所示。

$$I_{ord} = \begin{cases} 0.55, & U_{dc} < 0.45 \\ -\sqrt{(-0.225 - \frac{\Delta U_i^2 - 0.45^2}{0.9})^2 + 0.2025 - U_{dc}^2} + 0.775 + \frac{\Delta U_i^2 - 0.45^2}{0.9}, & 0.45 \leq U_{dc} \leq \Delta U_i \\ 1, & U_{dc} > \Delta U_i \end{cases} \quad (12)$$

综合 1)、2) 两点所设计的动态非线性 VDCOL 控制框图如图 6 所示。

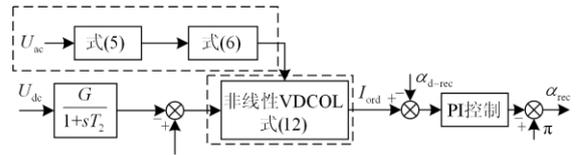


图 6 动态非线性 VDCOL 控制策略

Fig. 6 Dynamic nonlinear VDCOL control strategy

该控制策略有效克服了指令电流值不能灵活调节和换相失败发生前后电压不可变的缺点。

3 虚拟电容改变动态非线性 VDCOL 输入电压的控制方法

前文所设计的动态非线性 VDCOL 采用固定的函数模型, 可能因延时较长对轻度和中度故障存在反应不灵敏现象, 附加虚拟电容模块能在一定程度上抑制连续换相失败, 且弥补了动态非线性 VDCOL 可能存在的缺点, 对动态非线性 VDCOL 输入电压的下跌起到了抑制作用的同时, 提升了动

态非线性 VDCOL 的灵敏度。在故障恢复时，能缩短故障恢复时间。无故障发生时，不会对系统产生影响。虚拟电容控制策略如图 7 所示。

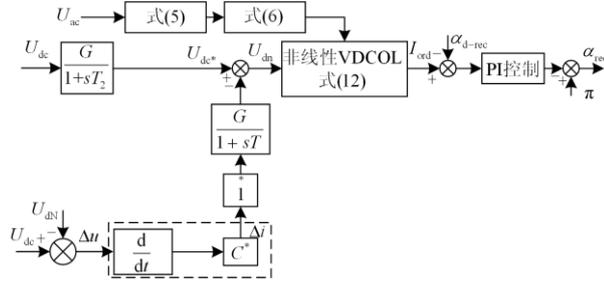


图 7 虚拟电容控制策略

Fig. 7 Virtual capacitor control strategy

虚拟电容模块改变动态非线性 VDCOL 的输入电压，如式(13)、式(14)所示。

$$\Delta i = C^* \frac{du}{dt} \quad (13)$$

$$U_{dn} = U_{dc*} + \Delta i R \quad (14)$$

式(13)中， C^* 为虚拟电容值。根据式(13)、式(14)和图 7 可知，当交流系统稳定运行时，逆变侧直流电压将保持额定电压值，此时 $U_{dc} = U_{dn}$ ，经过虚拟电容的电流 $\Delta i = 0$ 即可得 $U_{dc*} = U_{dn}$ ，系统正常运行时，该控制方法不会干扰系统正常运行。当发生故障时， U_{dc} 快速降低， U_{dn} 保持不变， Δu 呈迅速下降，则过虚拟电容所产生的电流 $\Delta i < 0$ ，即得 $U_{dn} > U_{dc*}$ ，对动态非线性 VDCOL 输入电压的下跌起到了抑制作用，当针对轻度故障时，根据公式可知

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}kX_c I_d}{U_{dn}} + \cos\beta\right) \quad (15)$$

式中： I_d 为直流电流； U_{dn} 为实测直流电压。当故障发生时， I_d 的增加导致 I_d 和 U_{dn} 的比值过大， γ 值过小，造成换相失败及连续换相失败，虚拟电容模块快速提升了动态非线性 VDCOL 输入电压值，能在 I_d 增大的基础上一定程度地增大了 U_{dn} ，使其 I_d 和 U_{dn} 的比值不会过大，抑制了 γ 的降低，改善了动态非线性 VDCOL 轻度故障不灵敏的现象；同时在重度故障时，虚拟电容模块所提供的补偿电压值达到最大值， I_d 的快速增加导致 I_d 和 U_{dn} 比值过大，此时配合动态非线性 VDCOL 控制，动态电压 ΔU 右移，如图 8 所示，在此过程中因补偿了电压值，促使直流电压快速恢复，提升了动态非线性 VDCOL 响应速度，有效减缓了电流的快速增加，抑制了 γ 的降低。

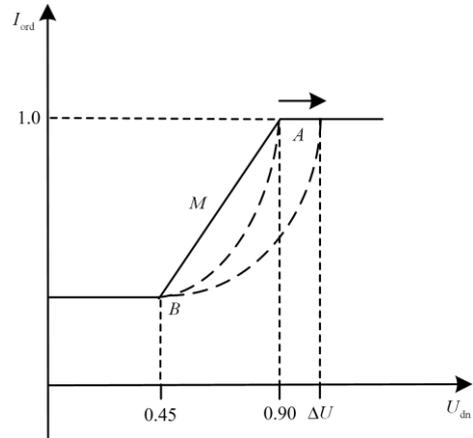


图 8 重度故障发生时 ΔU 的变化

Fig. 8 Change of ΔU in case of severe fault

在故障恢复阶段， U_{dc} 开始回升， U_{dn} 保持不变，则 Δu 上升，对迅速增大的动态非线性 VDCOL 输入电压进行了有效的抑制，抑制了直流电流的过快增加，在此过程中提升了动态非线性 VDCOL 的灵敏度，可以对电流进行合理的调节。本文研究虚拟电容的大小对 VDCOL 输入电压的影响，因此设置电阻标么值为固定值 $R = 1.0$ p.u.，通过仿真实验后，确定该控制方法中虚拟电容标么值。

4 仿真分析与验证

4.1 仿真模型及控制方法

本文对 CIGRE 标准模型进行测试^[32]如图 9 所示，结合本文所提控制策略，充分验证该策略的有效性。其中，系统主要参数如表 1 和表 2 所示。

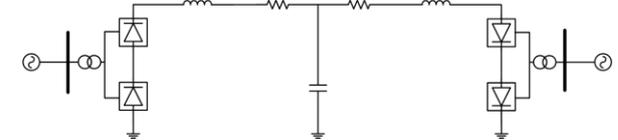


图 9 高压直流输电系统简化模型

Fig. 9 Simplified model of HVDC system

表 1 高压直流输电系统参数

Table 1 HVDC system parameters

系统额定参数	整流侧
无功补偿容量	626 Mvar
交流系统参数	382.87 kV, 47.6 \angle 84° Ω , SCR=2.5
单个换流变	603.87 MVA, $X_T=0.18$ p.u., 345/213.5 kV
系统额定参数	逆变侧
无功补偿容量	626 Mvar
交流系统参数	215.05 kV, 21.2 \angle 75° Ω , SCR=2.5
单个换流变	591.79 MVA, $X_T=0.18$ p.u., 230/209.2 kV

表 2 高压直流输电直流侧元器件参数
Table 2 Parameters of DC side components of HVDC transmission

参数	值
直流侧电阻/ Ω	2.5
直流侧电感/H	0.6

根据 CIGRE 基准模型, 在逆变侧交流母线处设置了不同类型的故障。通过以下三种控制方法, 对虚拟电容参数值进行确定, 随后对单相接地故障和三相接地故障系统的运行特性进行仿真分析。

控制方法 I: 采用常规 VDCOL 控制策略。

控制方法 II: 采用动态非线性 VDCOL 控制策略。

控制方法 III: 在控制方法 I 基础上采用附加虚拟电容的动态非线性 VDCOL 控制方法。

4.2 虚拟电容参数确定

在逆变侧交流母线处设置三相接地故障, 经不同电感接地, 故障发生在 1.0 s 处, 故障持续时间为 0.5 s。通过控制变量法取一阶惯量时间常数 T 为 0.02 s, 通过控制变量法对控制方法 III 在取不同的电容参数值时的效果图, 从而确定参数, 以下参数为标幺值。表 3 为不同虚拟电容取值下的故障恢复特性。

表 3 不同虚拟电容取值下的系统故障特性

Table 3 System failure characteristic based on different virtual capacitance value

$C^*/\text{p.u.}$	换相失败次数	故障恢复时间/s
0.40	1	0.22
0.45	1	0.20
0.50	1	0.17
0.55	1	0.21

由表 3 可知, 在三相接地故障中, 当虚拟电容参数值为 0.5 p.u. 时, 故障恢复时间最短, 因此取虚拟电容 $C^* = 0.5 \text{ p.u.}$ 更加合理。

同时对比控制方法 II 与控制方法 III, 当发生三相接地故障且接地电感为 0.8 H 时, 故障持续时间 0.5 s, 如图 10 所示, 在轻度故障时, 控制方法 II 抑制连续换相失败的作用不理想。

当附加虚拟电容模块后, 弥补了控制方法 II 的不足, 证明虚拟电容模块的有效性。

4.3 单相接地故障下系统的运行特性

将单相接地故障设置在逆变侧交流母线处。故障发生时间设置在 1.0 s 处, 持续时间为 0.5 s, 经 0.2 H 电感接地。当故障发生时, 对比控制方法 I、控制方法 II 和控制方法 III 的仿真结果, 如图 11 所示。

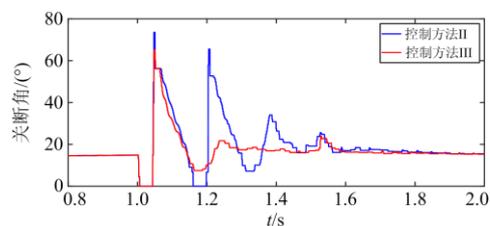
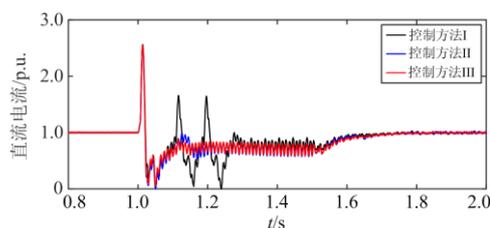
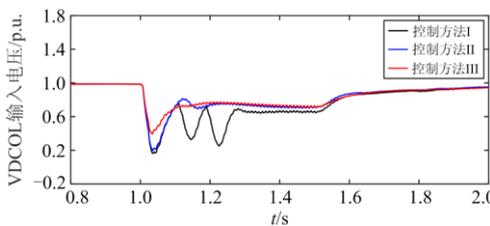


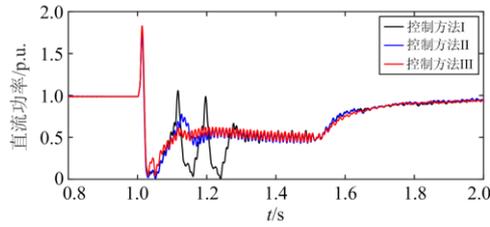
图 10 三相故障下 $L_f=0.8 \text{ H}$ 时关断角效果图
Fig. 10 Effect diagram of extinction angle under three phase fault with $L_f=0.8 \text{ H}$



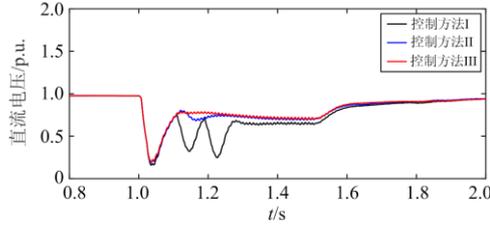
(a) 直流电流



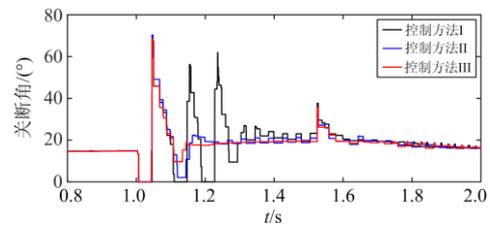
(b) 输入电压



(c) 直流功率



(d) 直流电压



(e) 关断角

图 11 单相故障下 $L_f=0.2 \text{ H}$ 时系统的运行特性
Fig. 11 System operation performance under single phase fault with $L_f=0.2 \text{ H}$

由图 11 可见,当系统发生单相故障时,控制方法 I、控制方法 II 和控制方法 III 的关断角在 1.0 s 后迅速降至 0°,此时发生第一次换相失败。此外,第一次故障排除后,在控制方式 I 的作用下,关断角减小到临界关断角处,继而发生连续换相失败。因此控制方法 I 不能抑制连续换相失败,会给整个系统带来持续的功率冲击,造成电流电压剧烈波动,对系统的稳定性构成极大的威胁。控制方法 II 比控制方法 I 更能降低直流电流电压和直流功率在故障过程中的振荡,能起到抑制连续换相失败的作用,但与控制方法 III 相比,控制方法 III 的整体抑制效果明显。由图 11(a)、图 11(d)可知,直流电流与直流电压故障恢复阶段稳定性更好,且缩短了故障的恢复时间。由图 11(b)可知,控制方法 III 抑制了故障发生时 VDCOL 输入电压的大幅度降低,故障发生时对比控制方法 I,电压值整体提高近 0.24 p.u.。且由图 11(c)、11(e)可见,当故障发生后 1.05~1.2 s 期间直流功率的稳定性要优于其他两种控制方法,同时在第一次换相失败后,关断角快速恢复到稳态值,能有效抑制连续换相失败,提高系统运行的稳定性。本文提出的控制方法 III 具有较高的适应性。

4.4 三相短路接地故障下系统的运行特性

将三相接地故障设置在逆变侧交流母线处,故障发生时间设置在 1.0 s 处,持续时间为 0.5 s,经接地电感 0.4 H,控制方法 I、控制方法 II 和控制方法 III 的对比结果,如图 12 所示。

由图 12(a)可知,控制方法 III 中直流电流故障恢复时间比控制方法 I 缩短了 0.17 s,且直流电流稳定性优于控制方法 II;图 12(b)可见,故障发生时,控制方法 III 有效抑制了 VDCOL 输入电压的大幅度降低,相对控制方式 I,电压值提升了近 0.24 p.u.。由

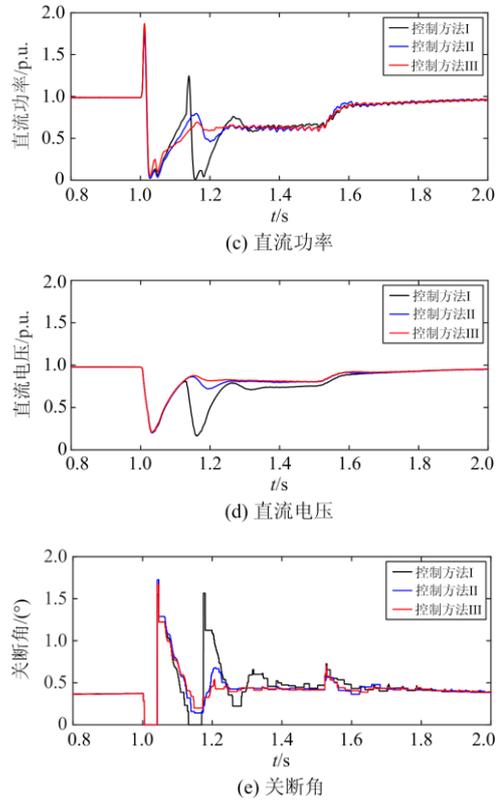
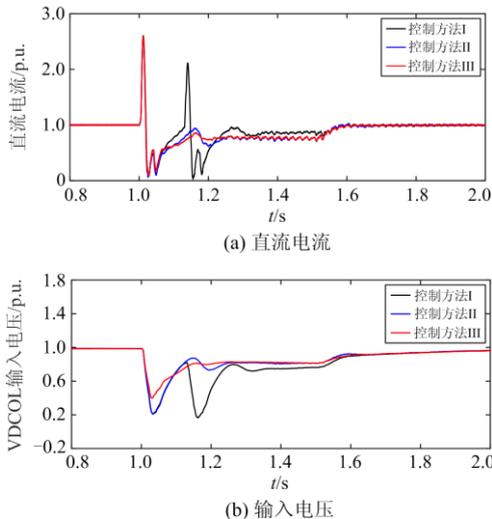


图 12 三相故障下 $L_f=0.4$ H 时系统的运行特性

Fig. 12 System operation performance under three phase fault with $L_f=0.4$ H

图 12(c)、图 12(e)可知,控制方法 III 直流功率的恢复时间最短,且关断角在第一次发生换相失败后,快速恢复稳定,恢复速度优于控制方法 II,且抑制了连续换相失败。

本文对处在不同故障严重程度下的系统分别进行仿真,观察发生换相失败的次数,以此来验证本文控制策略对连续换相失败的抑制效果。根据文献[33]所提出的方法,不同故障严重程度用故障水平 F_L 来表示,具体计算方法如式(16)所示。

$$F_L = \frac{U^2}{\omega L_f P} \times 100\% \quad (16)$$

式中: ω 为交流系统角频率; P 为直流输电系统额定功率; L_f 为系统接地电感值; U 为逆变侧交流母线电压有效值。将 F_L 值设置在 10%~50%之间变化,通过对本文控制策略进行仿真,观察系统换相失败发生次数,结果如表 4 所示。

通过表 4 可知,控制方法 II 能有效抑制重度故障时高压直流输电系统连续换相失败,本文所提出控制方法 III 能有效抑制不同故障程度下的连续换相失败,更具优越性。

表 4 三种控制方法下发生换相失败的次数

故障水平 $F_L/\%$	methods					
	控制方法 I		控制方法 II		控制方法 III	
	单相 故障	三相 故障	单相 故障	三相 故障	单相 故障	三相 故障
10	0	0	0	0	0	0
15	0	1	0	1	0	1
20	2	1	1	2	0	1
25	2	2	2	2	1	1
30	2	2	3	2	1	1
35	2	2	3	2	1	1
40	2	2	3	1	1	1
45	2	2	2	1	1	1
50	3	3	1	1	1	1

5 结论

本文通过对换相机理以及常规 VDCOL 控制策略进行分析, 对常规 VDCOL 进行设计, 提出附加虚拟电容控制的动态非线性 VDCOL 控制器方案。通过在 PSCAD 上进行了大量仿真分析得出以下结论。

1) 动态非线性 VDCOL 相比于常规 VDCOL, 对重度故障抑制效果更加明显。在附加虚拟电容后, 抑制了故障期间动态非线性 VDCOL 输入电压的降低, 且有效弥补了动态非线性 VDCOL 在轻中度故障中的不足。

2) 所提附加虚拟电容的动态非线性 VDCOL 控制方法, 有效降低了高压直流输电系统在不同故障程度下发生连续换相失败的可能, 缩短了故障恢复时间, 提高了系统的稳定性, 具有一定的优越性。

参考文献

- [1] 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, 49(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, 49(1): 17-23.
- [2] 张国辉, 景柳铭, 王宾, 等. 谐波引起的高压直流输电连续换相失败抑制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 33-41.
ZHANG Guohui, JING Liuming, WANG Bin, et al. Study on HVDC consecutive commutation failures mitigation method caused by harmonics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 33-41.
- [3] 李旭旻, 顾丹珍, 杨秀, 等. Statcom 对多馈入直流输电系统换相失败恢复过程的影响[J]. 电测与仪表,

2020, 57(13): 55-60.

- LI Xumin, GU Danzhen, YANG Xiu, et al. Effect of statcom on recovery process of commutation failure in multi-infeed HVDC system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13): 55-60.
- [4] 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.
- [5] 程艳, 张健, 管冀, 等. HVDC 换相失败时受端电网的电压与频率联合控制策略[J]. 高压电器, 2020, 56(4): 241-245.
CHENG Yan, ZHANG Jian, GUAN Ti, et al. Coordinated control strategy of voltage and frequency support at receiving end of HVDC system under commutation failure[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 241-245.
- [6] BHUVANESWARI G, MAHANTA B C. Analysis of converter transformer failure in HVDC systems and possible solutions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2): 814-821.
- [7] XUE Ying, ZHANG Xiaoping, YANG Conghuang. Commutation failure elimination of LCC HVDC systems using thyristor-based controllable capacitors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1448-1458.
- [8] 芮虎, 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.
- [9] 林圣, 刘健, 刘磊, 等. 基于控制保护的高压直流输电系统换相失败抑制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6045-6059.
LIN Sheng, LIU Jian, LIU Lei, et al. A review of commutation failure suppression methods for HVDC systems based on control protection measures[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6045-6059.
- [10] 杨欢欢, 朱林, 蔡泽祥, 等. 直流控制对直流系统无功动态特性的影响分析[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2631-2637.
YANG Huanhuan, ZHU Lin, CAI Zexiang, et al. Influence of HVDC control on HVDC reactive power dynamic characteristic[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2631-2637.

- [11] 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.
- [12] 文俊, 李嘉琪, 王玲, 等. MIDC 输电系统后续换相失败的抑制措施研究[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(4): 79-88.
WEN Jun, LI Jiaqi, WANG Ling, et al. Study on suppression measures of subsequent commutation failure in MIDC transmission systems[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(4): 79-88.
- [13] 宁晗, 方苇, 付玉婷, 等. 变斜率控制的 VDCOL 仿真研究[J]. 电工技术, 2018(19): 23-24.
NING Han, FANG Wei, FU Yuting, et al. Simulation study on variable slope control of VDCOL[J]. Electric Engineering, 2018(19): 23-24.
- [14] 李瑞鹏, 李永丽, 陈晓龙. 一种抑制直流输电连续换相失败的控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5029-5042.
LI Ruipeng, LI Yongli, CHEN Xiaolong. A control method for suppressing the continuous commutation failure of HVDC transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5029-5042.
- [15] 徐鸣, 武志刚, 苏东东, 等. 联于不同强度交流电力系统的 VDCOL 参数优化[J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28(2): 63-74.
XU Ming, WU Zhigang, SU Dongdong, et al. Parameters optimization of VDCOL connected to AC power systems with different strength[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28 (2): 63-74.
- [16] 李新年, 陈树勇, 庞广恒, 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 system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 134-140.
- [17] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.
ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.
- [18] 孟庆强, 刘泽洪, 洪乐荣, 等. 一种抑制连续换相失败的非线性 VDCOL 控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 119-127.
MENG Qingqiang, LIU Zehong, HONG Lerong, et al. A suppression method based on nonlinear VDCOL to mitigate the continuous commutation failure[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 119-127.
- [19] YANG Dachun, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Study of an adaptive fuzzy VDCOL control strategy for coordinated recovery of multi-feed-in HVDC system[C] // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), March 28-31, 2010, Chengdu, China: 1-4.
- [20] 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.
- [21] ZHOU Baorong, DU Zhaobin, LUO Donghao, et al. VDCOL parameters design of multi-infeed HVDC based on a simplified model of DC P-Q coupling recovery [C] // IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference(APPEEC), December 7-10, 2014, Hong Kong, China: 1-5.
- [22] HE Dongshan, WEN Jun, GENG Xiaohong, et al. Study on HVDC commutation failure and voltage compensated variable slope VDCOL control[C] // IEEE Conference on Energy Internet and Energy Syst. Integration (EI2), October 20-22, 2018, Beijing, China: 1-6.
- [23] 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[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3163-3172.
LIU Xiyang, WANG Zengping, ZHENG Bowen, et al. Mechanism analysis and mitigation measures for continuous commutation failure during the restoration of LCC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3163-3172.
- [24] YANG Huanhuan, CAI Zexiang, LI Xiaohua, et al. Assessment of commutation failure in HVDC systems considering spatial-temporal discreteness of AC system faults[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(2): 1055-1065.
- [25] 郭春义, 李春华, 刘羽超, 等. 一种抑制传统直流输电连续换相失败的虚拟电阻电流限制控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4930-4937.
GUO Chunyi, LI Chunhua, LIU Yuchao, et al. A DC current limitation control method based on virtual-resistance

- to mitigate the continuous commutation failure for conventional HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4930-4937.
- [26] 荣飞, 徐彦, 周保荣, 等. 柔性直流输电电压序列选择的研究[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 203-211.
RONG Fei, XU Yan, ZHOU Baorong, et al. Research on voltage sequence selection of flexible DC transmission[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 203-211.
- [27] 韩伟, 孟沛斌, 刘超, 等. 高压直流输电系统接入下的交流系统不对称故障下序网等值及短路电流算法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(23): 38-46.
HAN Wei, MENG Peiyu, LIU Chao, et al. Sequence network equivalence and short-circuit current algorithms for asymmetric faults of AC systems with HVDC connection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(23): 38-46.
- [28] 姜雨泽, 刘士强, 谢连科, 等. 山东电网高压直流输电线路电磁环境测量分析[J]. 电测与仪表, 2021, 58(10): 125-132.
JIANG Yuze, LIU Shiqiang, XIE Lianke, et al. Electromagnetic environment measurement and analysis of HVDC transmission lines in Shandong power grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(10): 125-132.
- [29] 刘建林, 罗德荣, 尹章涛. 基于 MMC 变流器柔性直流输电系统调制方法与损耗研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2018, 33(2): 47-53.
LIU Jianlin, LUO Derong, YIN Zhangtao. The research of modulation schemes and loss of converter based on MMC flexible DC transmission system[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2018, 33(2): 47-53.
- [30] 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.
- [31] 谢惠藩, 张尧, 夏成军, 等. 交直流互联电网直流功率调制相关问题[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 43-50.
XIE Huifan, ZHANG Yao, XIA Chengjun, et al. Issues related to DC power modulation in AC/DC hybrid system[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 43-50.
- [32] SZECHTMAN M, WESS T, THIO C V. A benchmark model for HVDC system studies[C] // International Conference on AC and DC Power Transmission, September 17-20, 1991, London, UK: 374-378.
- [33] GUO Chunyi, ZHANG Yi, GOLE Ani, et al. Analysis of dual-infeed HVDC with LCC-HVDC and VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1529-1537.

收稿日期: 2021-04-12; 修回日期: 2021-09-29

作者简介:

朱红萍(1970—), 女, 博士, 教授, 研究方向为直流输电系统新理论、电能质量分析控制研究等; E-mail: 168hpzh@163.com

李毅(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为直流输电系统稳定性分析、电力系统控制研究; E-mail: 1085322552@qq.com

周振怿(1994—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统稳定性分析、电力电子技术研究。E-mail: 664660359@qq.com

(编辑 许威)