

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191096

电网换相换流器和电压源换流器串联组成的 混合直流换流器控制和保护研究

卢东斌^{1,2}, 田杰¹, 李海英¹, 陈松林¹, 曹冬明¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 国网电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 211109)

摘要: 基于电网换相换流器和电压源换流器串联的混合直流换流器在克服交流故障时的换相失败和直流故障时的重启动具有优势。分析了该混合直流换流器运行方式、控制策略、电压源换流器保护原理、抵御换相失败原理和直流线路重启过程, 认为由该混合直流换流器组成的高压直流输电系统, 可克服传统直流和柔性直流输电的主要缺点。当逆变侧的交流系统发生故障时, 电压源换流器可提供电压支撑来抑制直流电流增加, 缓解电网换相换流器换相失败效应。当直流线路发生故障时, 逆变侧电网换相换流器可阻断电压源换流器产生的故障电流, 具备直流线路故障重启能力。另外, 电压源换流器还为电网换相换流器提供无功功率, 从而减少换流站无功设备配置。

关键词: 高压直流输电; 电网换相换流器; 电压源换流器; 混合直流换流器; 换相失败

Control and protection of series hybrid DC converters with a line-commutated converter and a voltage source converter

LU Dongbin^{1,2}, TIAN Jie¹, LI Haiying¹, CHEN Songlin¹, CAO Dongming¹

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 2. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211109, China)

Abstract: A hybrid DC converter with a series Line-Commutated Converter (LCC) and a Voltage Source Converter (VSC) has advantages in avoiding commutation failure and blocking the DC fault. In this paper, the operation mode, control strategies, protection principle of the VSC, effect of commutation failure and process of the DC line restart are presented. The hybrid HVDC system constituted by the hybrid DC converters, which overcomes some drawbacks of the LCC HVDC and the VSC HVDC, has more advantages for fault toleration. For AC system faults in the inverter, the VSC can supply the constant or higher voltage to suppress the increasing direct current and to lower the effect of commutation failure in the LCC. For DC grid faults, the LCC in the inverter can block the large reversing fault direct current caused by the VSC, with DC line fault restart capability. In addition, the VSC can supply a large amount of reactive power for the LCC, thus reducing the converter station reactive equipment configuration.

This work is supported by the Youth Science Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 51607042).

Key words: high-voltage direct current (HVDC); line-commutated converter (LCC); voltage source converter (VSC); hybrid DC converter; commutation failure

0 引言

工业应用的大部分直流输电系统采用晶闸管的电网换相换流器^[1-4]。在电网换相换流器中, 换相依赖于交流系统。在受端接入到弱交流系统中, 当发生交流系统故障时, 不能保证连续可靠的换相^[2]。

但是, 由于其具有大容量、低成本和低运行损耗的优点, 基于电网换相换流器的高压直流输电常用于远距离电力传输和电力系统互联^[5-7]。其换流器进行交流 and 直流功率的转换, 一般采用十二脉动方式, 其由两个六脉动桥串联组成。

随着电力电子器件的发展, 基于电压源换流器的柔性直流输电技术得到了越来越广泛的应用^[8-15]。柔性直流输电相比传统直流输电有一些优势, 如: 接入到无源网络或弱交流系统, 增加交流系统短路

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目资助 (51607042)

容量, 灵活控制无功功率, 交流故障时能够实现穿越等。目前工程应用比较成熟的换流器是采用基于半桥结构子模块构成的模块化多电平换流器(MMC)。但是, 该换流器在直流侧故障时不能重启直流系统。

混合直流输电在高压直流输电中是一个新的概念。文献[16-17]提出一种整流侧采用电网换相换流器, 逆变侧采用电压源换流器的混合直流输电系统, 该系统可稳定运行, 并且在短时间的交流电网故障后能重新恢复到稳态运行。文献[18]提出一种用于两个交流系统互联的由混合换流器组成的新的混合直流输电系统, 在稳定性方面和受端交流电压控制方面具有一定优势, 但是, 由于电网换相换流器的单向流通电流, 此换流器不能接入到无源电网和功率反向; 同时, 电压源换流器故障时无法退出甚至会损坏, 整个混合换流器都要停运, 这制约了该种混合换流器的工程应用。文献[19]在文献[18]拓扑结构基础上推导了稳态数学模型, 设计系统协调控制策略, 但是仍然不能解决文献[18]拓扑结构存在的问题。

文献[20]首次提出了一种具有旁通支路的电网换相换流器和电压源换流器串联组成的混合直流换流器, 运行方式更加灵活, 并且电压源换流器故障时能够安全退出, 使得该串联混合直流换流器具有了工程应用前景, 但是没有给出具体的旁通电路结构和保护策略。本文将从提升换流器的性能方面进一步优化该拓扑结构, 给出此混合直流换流器的运行原理、保护策略、控制策略和典型故障特征。该串联混合直流换流器构成的高压直流输电系统结合了传统直流输电和柔性直流输电的优点, 可减少换相失败发生概率, 部分实现交流故障穿越, 阻断直流侧故障, 接入弱交流系统。另外, 还可接入到无源电网和功率反向传输。

1 串联混合直流换流器拓扑结构

1.1 电网换相换流器和电压源换流器

电网换相换流器由六脉动或者十二脉动换流器组成。目前, 应用于直流输电的电网换相换流器采用晶闸管作为开关器件。电网换相换流器的优点是具有非常强的短路电流能力, 这是因为在电网换相换流器中晶闸管具有很强的过流能力, 同时有一个大的电感来抑制故障电流。电网换相换流器的晶闸管具有双向的电压阻断能力。由于晶闸管不能控制关断, 如果交流电压发生扰动, 将可能导致电网换相换流器不能正常换相, 从而发生换相失败。

电压源换流器不论电流极性和幅值, 都可维持

一个给定的直流电压。因此, 通过控制开关器件可实现对交流电压相位和幅值的控制, 换流器可工作在整流或逆变模式, 发出滞后或超前的无功功率。电压源换流器具有双向导通电流能力, 这允许在直流电压方向不变时, 电压源换流器通过控制直流电流方向来反向传输功率。

电压源换流器一般由两电平换流器、多电平换流器或模块化多电平换流器(MMC)组成。两电平换流器利用一个电压去等效每一个开关周期的参考电压, 因此, 开关损耗和总谐波很大。多电平可利用几个独立的电容或电压源形成一个阶梯型的电压波形, 基于产生阶梯型输出电压的不同结构将多电平分为几种不同类型^[21-22]。其中, 中性点箝位多电平^[23]、飞跨电容式多电平^[24]应用最为广泛, 由于电路结构可靠性差, 控制也较为复杂, 很难应用于高压大容量场合。近几年, 模块化多电平得到了越来越多的工业应用, 通过连接小的子模块生成较大的系统, 简化了电路结构, 提高了换流器的可靠性。

单个子模块是 MMC 结构中一个基本单元, 可作为一个直流/直流或一个直流/交流换流器。基本的结构形式如下: 半桥换流单元^[25]、全桥换流单元^[26]、半桥和全桥混合换流单元。文献[25]第一次提出了半桥换流单元组成的模块化多电平结构。半桥换流单元采用的 IGBT 器件最少、成本最低和效率较高, 但不能阻断直流侧的故障电流。

1.2 串联混合直流换流器

本文提出了四种优化的串联混合直流换流器拓扑结构, 如图 1 所示。四种串联连接方式如下: 电网换相换流器的阴极连接电压源换流器的负极, 如图 1(a)所示; 电网换相换流器的阳极连接电压源换流器的正极, 如图 1(b)所示; 电网换相换流器的阴极连接电压源换流器的正极, 如图 1(c)所示; 电网换相换流器的阳极连接电压源换流器的负极, 如图 1(d)所示。除此之外: 旁通开关(BPS, S1), 旁通晶闸管阀组(BPT, T1), 旁通刀闸(BPI, S2)和隔离刀闸(DS, S3 和 S4)用来增加系统冗余性; 旁通晶闸管阀组(BPT, T1)用于保护电压源换流器在故障时安全退出; 直流断路器(DCCB, Q1)用于分断直流故障电流。图 1(a)和图 1(b)、图 1(c)和图 1(d)的主要区别是把电压源换流器还是电网换相换流器放在高端, 这可根据换流变压器和换流器的绝缘条件而定; 图 1(c)和图 1(d)中, 如果将电压源换流器放在高端, 还可有效防止电压源换流器直流母线接地故障。

而文献[18]所提出的用于逆变侧的混合换流器拓扑结构, 由于没有旁通晶闸管阀组(T1), 电压源换流器中有储能元件电容器, 当逆变侧交流系统发

生三相短路或电网换相换流器投旁通对等严重故障时，整流侧在短时间内不能接收到逆变侧信息，将继续输送功率对逆变侧进行充电，导致电压源换流器发生过压或过流，很容易造成电压源换流器损坏，使得所提混合换流器不具有工程应用价值。

障，逆变侧的电网换相换流器可阻断由电压源换流器产生的故障电流，具备直流线路故障重启能力。

2 串联混合直流换流器运行原理和模式

2.1 运行原理

图 1(a)和图 1(b)拓扑结构用于整流侧，图 1(c)和图 1(d)拓扑结构用于逆变侧。电网换相换流器系统包括电网换相换流器，旁通开关(BPS, S1)，旁通刀闸(BPI, S2)和两个隔离刀闸(DS, S3 和 S4)。电压源换流器系统包括电压源换流器，旁通晶闸管阀组(BPT, T1)，旁通刀闸(BPI, S2)和两个隔离刀闸(CNI, S3 和 S4)，用于整流侧时，还增加分断直流故障电流的直流断路器(DCCB, Q1)。

正常运行时，电网换相换流器和电压源换流器分别通过两个隔离刀闸接入到直流输电系统中。BPS、BPT 和 BPI 断开。当电网换相换流器有故障时，电网换相换流器通过移相控制两端电压为零，合上 BPS，合上 BPI，将电流转移到 BPS 和 BPI 通路，断开两个隔离刀闸，然后将电网换相换流器从直流输电系统中隔离。当故障消失后，电网换相换流器可通过两个隔离刀闸重新接到直流系统中，移相并建立电流，当直流电流完全转移到电网换相换流器后，分开 BPI 和 BPS，控制电网换相换流器触发角，提升电压到参考电压，直流输电系统恢复运行。

在传统高压直流输电中，逆变侧换流器只接入一个交流电网，当交流电网发生故障时，如单相接地，换相失败会发生。发生换相失败有两个原因，一是逆变侧交流电网不能提供正常换相电压，二是由于直流电流增加，换相裕度被减小。受端分层接入的特高压直流输电将逆变侧高、低端阀组分别接入两个交流系统，当一个交流电网发生故障，另一个交流电网正常时，直流电流增大，正常电网所连接的换流器通过增大熄弧角来避免换相失败^[27]，但直流电压下降，自身传送功率仍会受到较大影响。而在串联混合直流换流器组成的高压直流输电中，因为电压源换流器实现交流故障穿越，同时有电压源换流器的电压支撑来抑制直流电流，电网换相换流器的换相失败发生概率减小，直流传送功率波动变小。

在基于电压源换流器的高压直流输电中，其由两电平、多电平或由半桥换流单元组成的模块化多电平组成，不能抑制直流线路故障后的短路电流。当直流线路故障时，不能控制直流电压和电流为零来重启直流系统。而在整流侧采用图 1(a)和图 1(b)的混合直流换流器中，当直流线路发生故障时，直流断路器可阻断直流故障电流，由于直流断路器成

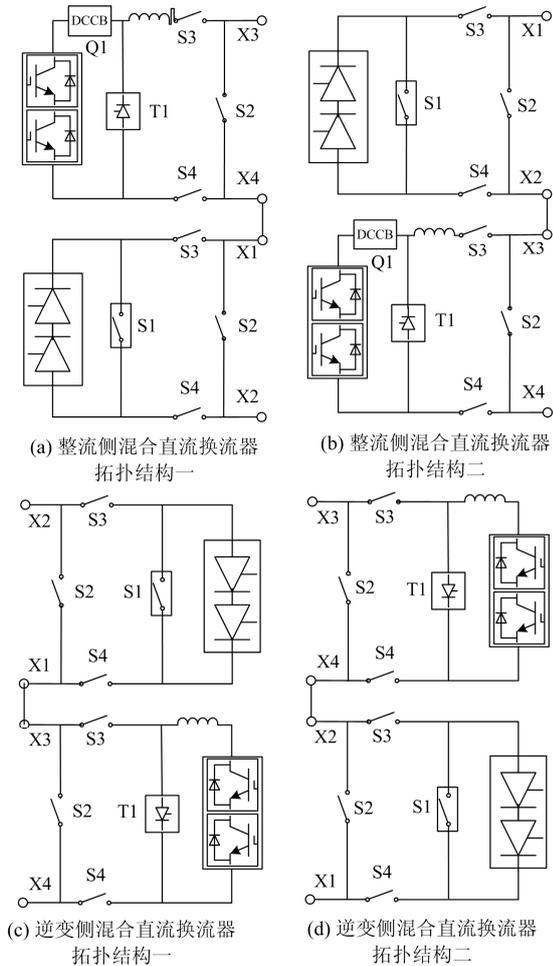


图 1 四种串联混合直流换流器

Fig. 1 Four series hybrid DC converters

本文所提出的适用于直流输电逆变侧的串联混合直流换流器，由基于晶闸管的电网换相换流器和基于半桥换流单元的电压源换流器串联连接组成，并增加旁通晶闸管阀组(T1)，在电压源换流器电压或电流超过限值时，通过旁通晶闸管阀组(T1)转移直流电流，从而有效保护电压源换流器。旁通晶闸管阀组(T1)也可用旁通开关代替，但旁通开关的合闸时间(40 ms)较长，合闸很大电流时寿命会变短。对于逆变侧的交流系统故障，电压源换流器自身实现故障穿越，同时可提供常压或更高的电压来抑制直流电流以降低电网换相换流器的换相失败效应，改善了传统直流的换相失败问题。对于直流线路故

本昂贵, 如果整流侧无新能源接入等特殊要求, 一般不推荐采用此种混合直流换流器结构; 在逆变侧采用图 1(c)和图 1(d)的混合直流换流器中, 当直流线路发生故障时, 电网换相换流器可阻断直流故障电流。

在正常解锁过程中, 逆变侧的电压源换流器先解锁建立一半直流电压, 电网换相换流器再解锁; 然后整流侧的电网换相换流器解锁, 调节角度使直流电压升高, 达到电网换相换流器导通电流的电压阈值后, 建立直流电流。在正常闭锁过程中, 整流侧的电网换相换流器移相闭锁; 然后逆变侧的电网换相换流器闭锁, 电压源换流器再闭锁。

2.2 运行模式

串联混合直流换流器有 4 种运行模式:

模式 1: 电网换相换流器和电压源换流器同时接入到直流系统交换有功和无功功率;

模式 2: 电网换相换流器接入到直流系统交换有功和无功功率, 电压源换流器旁通提供无功功率;

模式 3: 电网换相换流器接入到直流系统交换有功和无功功率, 电压源换流器旁通且闭锁;

模式 4: 电压源换流器接入到直流系统交换有功和无功功率, 电网换相换流器旁通且闭锁;

在模式 1 中, 电压源换流器为消耗大量无功功率的电网换相换流器提供无功功率。当接入到无源电网时, 电网换相换流器旁通, 电压源换流器先解锁, 然后电网换相换流器投入运行。

在模式 2 中, 电网换相换流器通过反向电压来反向传输功率, 电压源换流器为消耗大量无功功率的电网换相换流器提供无功功率。

在模式 3 中, 电网换相换流器的无功功率由交流滤波器提供, 运行模式类似于传统直流。

在模式 4 中, 电压源换流器通过反向电流来反向传输功率, 运行模式类似于柔性直流。

当串联的混合直流换流器运行在模式 1 和模式 2 时, 电压源换流器为消耗大量无功功率的电网换相换流器提供无功功率, 可减少无功设备。对于图 1(c)和图 1(d), 在模式 1 中, 逆变侧交流电网有故障, 电压源换流器可通过提供直流电压抑制直流电流增加来防止换相失败; 直流线路有故障, 电网换相换流器可阻断故障电流。

当串联的混合直流换流器运行在模式 4 时, 对于图 1(c)和图 1(d), 为了防止直流线路发生故障引起闭锁, 可采用电网换相换流器的三相桥式电路中的一相投旁通对(BPPO), 也可对电压源换流器串联直流断路器或二极管阀组。

2.3 电压源换流器保护原理

文献[18]早在 2006 年就提出了一种混合直流输电系统拓扑结构, 但是由于当时电压源换流器技术并不成熟, 以及所提出的混合直流输电系统不能保证所有故障工况下电压源换流器安全运行, 导致该种混合直流换流器只停留在研究阶段。因为电压源换流器中有储能元件电容器, 当逆变侧交流系统发生三相短路或电网换相换流器投旁通时, 导致换流器的输入能量大于其输出能力, 电压源换流器开始储能, 从而发生过压或过流, 很容易造成电压源换流器损坏, 使得该种混合直流输电系统不具有工程应用价值。

本文所提出的混合直流换流器拓扑结构在电压源换流器两端并联旁通晶闸管阀组, 可有效解决极端口故障下, 电压源换流器因被充电而发生过高或过流故障。具体步骤如下: 电压源换流器检测到子模块过压或过流故障, 闭锁电压源换流器, 跳开电压源换流器的交流进线开关, 触发旁通晶闸管阀组(图 1 中的 T1)导通, 电流将从电压源换流器转移到旁通晶闸管阀组, 由于旁通晶闸管阀组具有很强的过流能力, 可承受较大的故障短路电流; 将故障信息传送到整流站, 闭锁整流侧相应的换流器。闭合旁通刀闸(图 1 中的 S2), 将直流电流从旁通晶闸管阀组转移到旁通刀闸, 直至旁通晶闸管阀组电流过零关断。旁通晶闸管阀组还可串联一个开关, 辅助其关断。

旁通阀组投入时会造成很大冲击, 但仍在可控范围内。直流侧的冲击类似于传统直流的 Y 闭锁(投旁通对), 由于线路电感、平波电抗器的存在, 直流侧电流不会超过 2 倍额定电流, 相对较小。

旁通晶闸管阀组的电压应力要大于电压源换流器的直流电压限值, 一般为电压源换流器额定电压的 1.5~2 倍。

3 串联混合直流换流器控制策略

3.1 电网换相换流器控制策略和电压源换流器控制策略

在基于电网换相的两端高压直流输电中, 整流侧和逆变侧换流器都配置电流控制器, 整流侧一般控制电流, 逆变侧控制电压, 这通过在逆变侧的电流控制器中引入电流裕度(ΔI)来实现。逆变侧换流器点火控制包括三个部分: 电流控制器、电压控制器和 γ 角控制器, 如图 2 所示。电流控制器的参考值为 I_0 减去实测直流电流 I_d 经 PI 调节器输出触发角; 电压控制器的参考值为 U_0 减去实测直流电压 U_d 经

PI 调节器输出触发角； γ 角控制器通过计算得到最大触发角 α_{MAX} 。三者关系如下：闭环电流调节器试图建立指令电流 I_o ，由于逆变侧指令电流 I_o 低于直流电流 I_d ，通过减小熄弧角去降低直流电流 I_d ，直至达到电流调节器的上限电压调节器输出的触发角 α_{VCA} ；逆变侧根据需要可工作在电压控制模式或最大触发角模式，如果工作在电压控制模式，最终的触发角就等于 α_{VCA} ，如果工作在最大触发角模式，则在电压调节器的参考电压增加直流偏置，使 α_{VCA} 达到上限值 γ 角控制器输出值 α_{max} 。 α_{max} 的计算公式如式(1)和式(2)所示^[27-28]，为了使得逆变侧直流电压和直流电流产生正斜率关系，引入 $K(I_o - I_d)$ 。

$$\beta = \arccos \left[\cos \gamma_o - 2 \cdot d_x \cdot \frac{I_o}{I_{dN}} \cdot \frac{U_{di0N}}{U_{di0}} - K(I_o - I_d) \right] \quad (1)$$

$$\alpha_{max} = 180^\circ - \beta \quad (2)$$

式中： β 为触发超前角； γ_o 为熄弧角参考值； d_x 为相对换相压降； I_o 为直流电流指令值； I_d 为直流电流实测值； I_{dN} 为额定直流电流； U_{di0N} 为额定空载直流母线电压； U_{di0} 为实际空载直流母线电压； K 为正斜率系数。

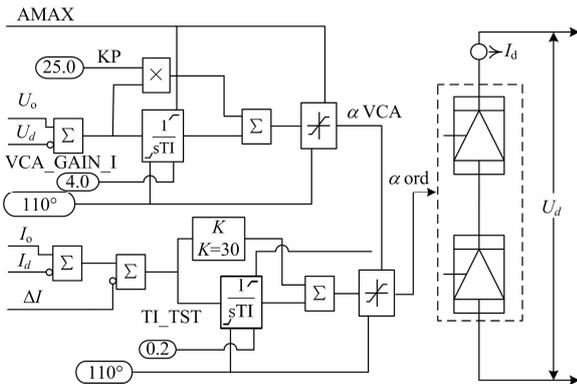


图 2 逆变侧电网换相换流器点火控制框图

Fig. 2 LCC firing control block diagram

在电压源换流器中，有功和无功采用独立控制。为了抑制负序电流，防止电力电子器件过电流，可以将负序电流的参考值设为零。只考虑正序电流，MMC 的整个控制结构如图 3 所示，包括外环控制器和内环电流控制器。内环电流调节器的作用是让 i_d 和 i_q 跟踪其参考值，而外环控制器则根据有功功率和无功功率以及直流电压等参考值，计算内环电流参考值。当采用定直流电压控制时，可以根据直流电压参考值经 PI 调节器得到正序 d 轴电流参考值。

外环控制器产生内环电流调节器参考值 i_d^* 和 i_q^* ，内环电流调节器最终输出电压参考值 u_d^* 和 u_q^* 。

在串联混合直流换流器中，电压源换流器包括几个并联的 MMC，其中一个 MMC 采用直流电压和无功功率控制，其他并联的 MMC 采用有功功率和无功功率控制。为了防止桥臂发生过流，对桥臂电流输出进行限制。

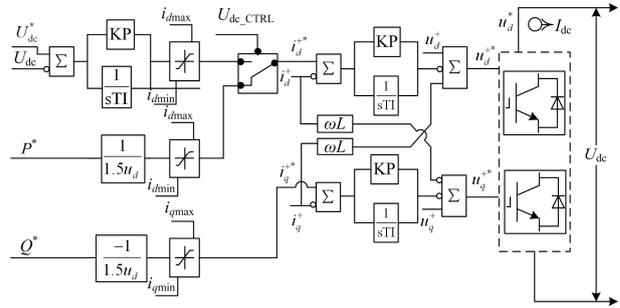


图 3 电压源换流器控制框图

Fig. 3 VSC control block diagram

3.2 混合直流换流器控制策略

对于图1(a)和图1(b)，正常运行时，采用电流控制或功率控制。电网换相换流器采用电流控制或功率控制，电流控制或功率控制的参考值采用运行人员指令；电压源换流器采用电压控制和无功功率控制，电压控制的参考值为整流侧直流电压的一半，无功功率控制的参考值采用运行人员指令或者由电网换相换流器消耗的无功功率给定。

对于图1(c)和图1(d)，正常运行时，采用电压控制。电网换相换流器采用 γ 角控制或电压控制，采用 γ 角控制时，由换流变压器分接头来控制直流电压，直流电压的指令值为整流侧额定直流电压减去线路压降后的一半直流电压；电压源换流器电压控制的参考值同电网换相换流器，无功功率控制的参考值采用运行人员指令或者由电网换相换流器消耗的无功功率给定。

4 仿真与试验结果

一种适合于远距离输电、受端为多馈入直流系统的高压直流输电系统主回路拓扑结构如图 4 所示。整流侧单极串联的两个阀组仍然采用电网换相换流器，逆变侧单极串联的两个阀组采用图 1(c)和图 1(d)的混合直流换流器。混合直流换流器由十二脉动的电网换相换流器和半桥单元组成的 MMC 组成。混合直流换流器控制策略通过应用于实际工程的某直流控保装置(型号: PCS9550)来实现，直流输电系统在 RTDS 中建模。考虑到混合直流换流器的稳态性能与传统直流相同，因此，本节只对混合直流换流器重要性能：混合直流换流器交流故障穿越能力和抑制直流故障电流性能进行验证。

正常解锁时, 逆变侧电网换相换流器的旁通开关(S1)、电压源换流器的旁通晶闸管阀组(T1)和二者的旁通刀闸(S2)处于分开状态; 隔离刀闸(S3 和 S4)处于闭合状态, 电压源换流器充电并解锁, 建立一半直流电压, 然后逆变侧电网换相换流器解锁。整流侧收到逆变侧解锁信息后, 两个串联的电网换相换流器同时解锁, 调节角度使直流电压升高, 达到电网换相换流器导通电流的电压阈值后, 建立直流电流。

全阀组运行时, 即节 2.2 中所提模式 1, 电网换相换流器的旁通开关(S1)、电压源换流器的旁通晶闸管阀组(T1)和二者的旁通刀闸(S2)处于分开状态,

隔离刀闸(S3 和 S4)处于闭合状态。逆变侧电网换相换流器采用 γ 角控制, 通过换流变压器分接头来平衡两个串联换流器的电压; 电压源换流器采用电压控制。两个换流器的电压参考值为整流侧额定直流电压减去线路压降后的一半。整流侧电网换相换流器通过 α 角控制直流电流或直流功率。

如表 1 所示, 仿真用直流输电系统的额定双极功率为 8 000 MW, 额定直流电压为 ± 800 kV, 考虑到目前 IGBT 的容量, 电压源换流器采用三组半桥结构的 MMC 并联。本节中, 混合直流输电系统的试验结果将和基于电网换相换流器的传统直流输电系统进行比较。

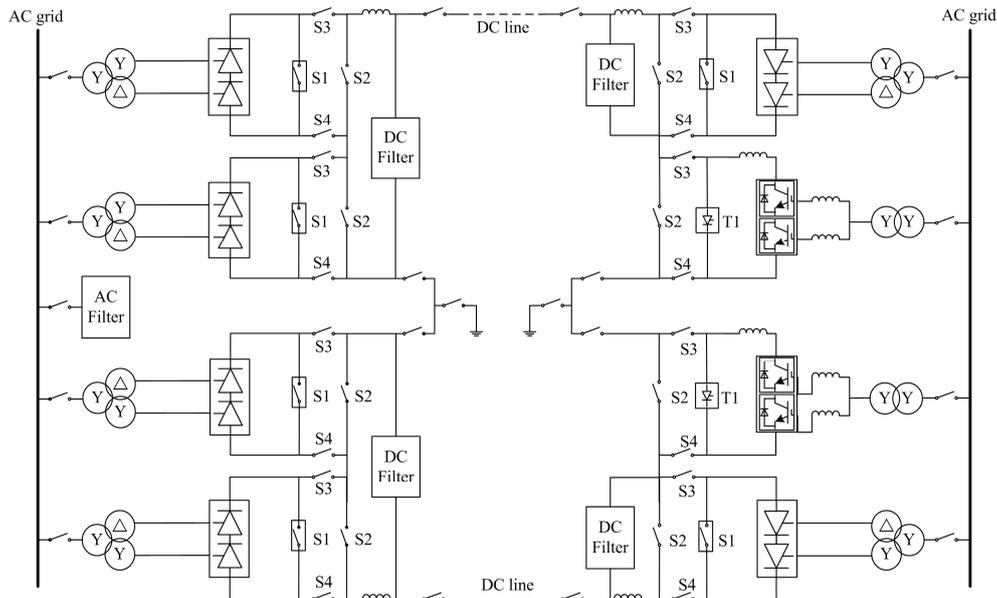


图 4 一种较优的采用混合直流换流器的特高压直流输电系统主回路拓扑结构

Fig. 4 An optimum main circuit topology of UHVDC system adopted hybrid DC converter

表 1 特高压直流输电系统参数

Table 1 Specifications of UHVDC

| 参数 | 数值 |
|---------------------|-----------|
| 额定功率/MW | 8 000 |
| 额定电压/kV | ± 800 |
| 额定电流/A | 5 000 |
| 逆变侧 LCC 额定空载直流电压/kV | 220.15 |
| 触发电角参考值/(°) | 15 |
| 熄弧角参考值/(°) | 17 |
| 逆变侧 LCC 相对感性压降 | 0.1 |
| 电压源阀组额定直流电压/kV | 400 |
| 电压源阀组桥臂额定电流/A | 2 333×3 |
| 旁通晶闸管阀组最大电压/kV | 600 |
| 旁通晶闸管阀组额定电流/A | 5000 |

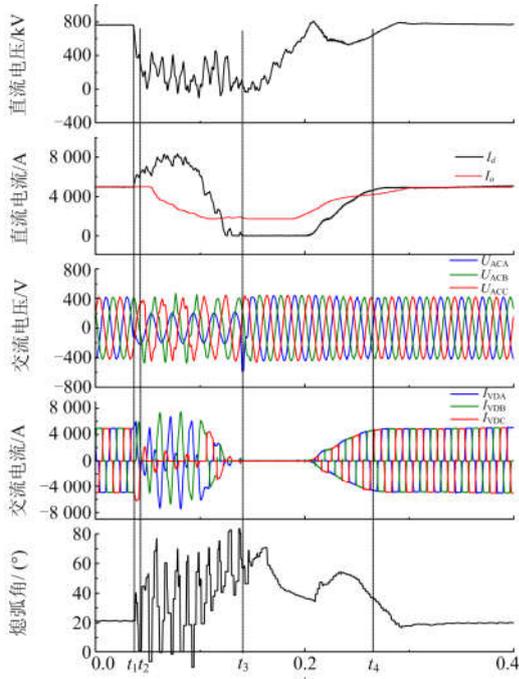
4.1 交流单相接地故障

在传统直流中, 当逆变侧交流电网有故障, 如

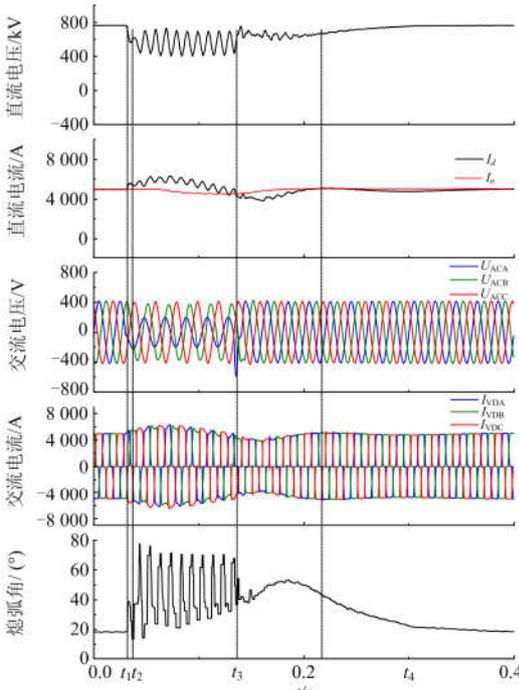
单相接地, 电网换相换流器由于电压波形扰动和增加的直流电流将不能正常换相, 500 kV 交流电网发生 5 Ω 单相接地故障后如图 5(a)所示。 t_1 时, 单相接地故障发生, A 相电压变小, 逆变侧的直流电压迅速下降, 直流电流开始增大, 叠弧角增加, 换相裕度减小。 t_2 时, 熄弧角减小到小于最小值(7°)发生换相失败。 t_3 时, 单相接地故障消失, 恢复正常运行。 t_4 时, 直流功率恢复。在故障期间, 最大直流电流达到 8 337.7 A (1.67 p.u.)。

在混合直流中, 当逆变侧交流电网有故障, 如单相接地, 电网换相换流器电压波形发生一定扰动, 但是直流电流增大幅度变小, 本试验中仍能正常换相, 500 kV 交流电网发生 5 Ω 单相接地故障后如图 5(b)所示。 t_1 时, 单相接地故障发生, A 相电压变小, 逆变侧的直流电压缓慢下降, 直流电流开始增大,

叠弧角没有增加太大。 t_2 时, 没有发生换相失败。 t_3 时, 单相接地故障消失, 恢复正常运行。 t_4 时, 直流功率恢复。在故障期间, 最大直流电流只有 6 320.2 A (1.26 p.u.), 低于传统直流的 8 337.7 A (1.67 p.u.)。



(a) 传统直流



(b) 混合直流

图 5 1.0 p.u. 5 Ω 单相接地故障电网换相换流器试验结果
Fig. 5 Test results of LCC in 1.0 p.u. for a 5 Ω grounding fault in the 500 kV AC grid

上述发生 5 Ω 单相接地故障后, 将直流电压和直流电流的时域波形重新呈现为 U_d-I_d 特征曲线, 如图 6 所示。最初传统直流和混合直流都在正常运行点(Normal Operating Point)运行, 当发生 5 Ω 单相接地故障后, 传统直流输电系统逆变侧串联的两个电网换相换流器都发生了换相失败, 直流电压和直流电流严重偏离正常运行点, 在 U_d-I_d 特征曲线上甚至出现了零电流和负电压, 功率传输中断, 瞬时扰动很大; 而混合直流输电系统逆变侧的电网换相换流器没有发生换相失败, 且电压源换流器在单相接地故障时实现了故障穿越, 继续输送功率, 直流电压和直流电流偏离正常运行点幅度较小。

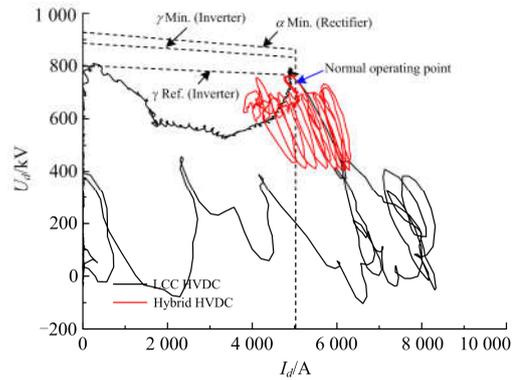


图 6 1.0 p.u. 5 Ω 单相接地故障试验直流电压和电流
Fig. 6 U_d/I_d characteristic in 1.0 p.u. for a 5 Ω ground fault in the 500 kV AC grid

传统直流和混合直流在故障期间传输的直流功率如图 7 所示。传统直流输电系统的输送功率产生了较大振荡, 并且输送功率中断; 而混合直流输电系统的输送功率振荡较小, 电网换相换流器没有发生换相失败, 电压源换流器实现了故障穿越并且利用自身的过负荷能力从而输送了更多功率, 整个混合直流换流器保证了大部分直流功率继续输送。

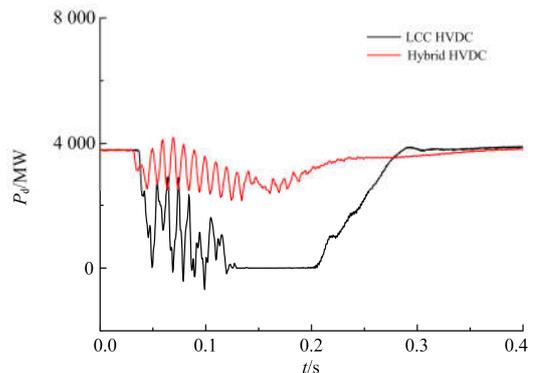


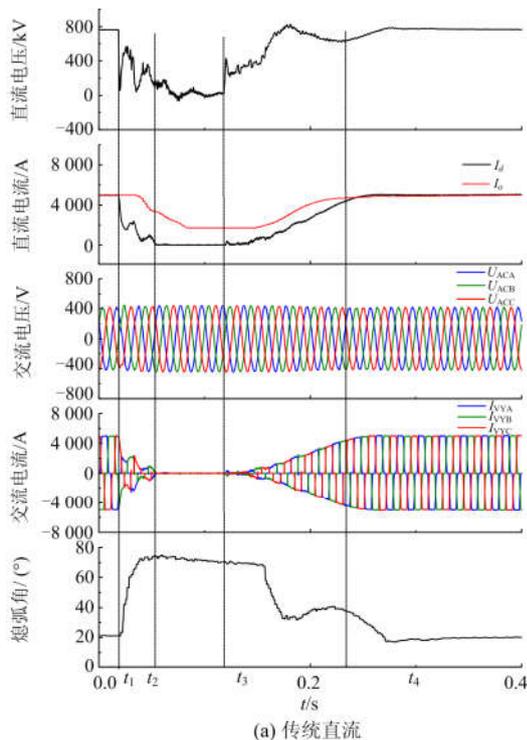
图 7 1.0 p.u. 5 Ω 单相接地故障试验直流功率
Fig. 7 DC power in 1.0 p.u. for a 5 Ω ground fault in the 500 kV AC grid

由上文分析可知, 混合直流换流器与传统直流换流器相比, 故障时电压源换流器可提供电压支撑来抑制直流电流增加, 减少了换相过程所需要的时间, 减小了叠弧角, 换相裕度增加, 一定程度上缓解了电网换相换流器换相失败效应。同时, 电压源换流器也会提供一定的无功支撑, 但是对抑制换相失败起的作用有限。混合直流换流器中的电压源换流器不存在换相失败问题, 具有交流故障穿越能力, 故障时还可利用自身的过负荷能力继续传送更多功率。

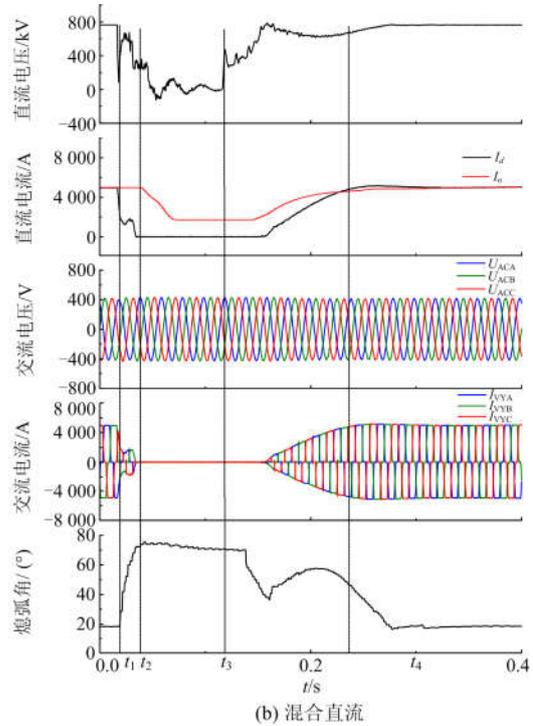
4.2 直线路故障

在传统直流中, 当直线路发生故障时, 电网换相换流器能够实现故障后重启, 直线路发生金属性接地故障如图 8(a)所示。 t_1 时, 直线路发生故障, 整流侧电网换相换流器换相移相, 直流电压开始下降; t_2 时, 直流电流降为 0; t_3 时, 直线路故障消失, 整流侧电网换相换流器通过减小角度, 控制电流增大进行重启; t_4 时, 直流功率恢复。

当混合直流输电系统中直线路发生故障时, 电网换相换流器能够阻断故障直流电流, 直线路发生金属性接地故障如图 8(b)所示。 t_1 时, 直线路发生故障, 整流侧电网换相换流器移相, 直流电压开始下降。 t_2 时, 直流电流降为 0, 电流降为 0 的速度快于传统直流输电系统; t_3 时, 直线路故障消失, 整流侧电网换相换流器通过减小角度, 控制电流增大, 混合直流输电系统开始重启; t_4 时,



(a) 传统直流



(b) 混合直流

图 8 1.0 p.u.直线路金属性接地故障电网换相换流器试验结果

Fig. 8 Test results of LCC in 1.0 p.u. for a metallic grounding fault in the DC line

直流功率恢复。由此可见, 该混合直流输电系统在直线路发生故障后的性能与传统直流相同, 直线路电压升高都依赖于整流侧电网换相换流器 OLT 充电, 直到电压达到逆变侧 LCC 导通电压阈值, 实现故障重启。

逆变侧直流故障阻断的原理是晶闸管不能反向导通电流, 只要反向电压不超过电网换相换流器的击穿电压, 就可实现阻断反向电流。整流侧混合直流换流器拓扑结构如果不加装直流断路器, 不具备故障重启能力, 而逆变侧如果不加装直流断路器, 仍具备故障重启能力。如果在逆变侧采用 LCC 阻断直流故障, 故障阻断过程中, VSC 为电压源, 在故障期间, 仍然为自身直流电压, LCC 承受 VSC 施加的反向直流电压。正常情况下, 如果 LCC 与 VSC 的额定电压相同, 则故障期间, LCC 承受的是 VSC 反向电压, 不会给 LCC 或 VSC 带来额外的过压问题。

对于半桥结构的模块化多电平换流器组成的柔性直流输电系统, 如果直流侧发生故障, 只能依靠跳交流进线开关来闭锁柔性直流输电系统, 没有线路故障重启能力。

5 结论

串联混合直流换流器由电网换相换流器和电压源换流器串联组成, 并且采用旁通晶闸管阀组来保护电压源换流器, 在电压源换流器电压或电流超过限值时, 通过旁通晶闸管阀组转移电流, 从而有效保护电压源换流器; 电压源换流器的电压支持能力可抑制逆变侧交流故障时的直流故障电流, 一定程度上缓解了换相失败效应; 即便发生换相失败, 电压源换流器的故障穿越能力和过负荷能力也一定程度上缓解了逆变侧故障时的功率损失; 电网换相换流器的单向导通电流能力阻断了电压源换流器的直流线路故障电流, 与传统直流相似, 具有直流故障重启能力。

该种混合直流换流器采用工业应用成熟的电网换相换流器和半桥结构的模块化多电平换流器结构组成, 避免了采用昂贵的直流断路器和效率较低、控制复杂的全桥结构的模块化多电平换流器, 并且能够实现更高电压等级的直流功率传输, 具有很好的工程应用前景。

参考文献

- [1] CASAZZA J A, LOEHR G C. The evolution of electric power transmission under deregulation: selected readings[M]. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2000.
- [2] BAUMAN J, KAZERANI M. Commutation failure reduction in HVDC systems using adaptive fuzzy logic controller[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1995-2002.
- [3] 吴萍, 林伟芳, 孙华东, 等. 多馈入直流输电系统换相失败机制及特性[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 269-274.
WU Ping, LIN Weifang, SUN Huadong, et al. Research and electromechanical transient simulation on mechanism of commutation failure in multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 269-274.
- [4] 王少辉, 唐飞, 向农. 华东电网多直流同时换相失败仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 16-21.
WANG Shaohui, TANG Fei, XIANG Nong. Commutation failure simulation analysis of East China power grid multiple HVDC lines[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 16-21.
- [5] PADIYAR K R. HVDC power transmission systems: technology and system interactions[M]. New York, NY, USA: Wiley, 1990.
- [6] 曾南超. 高压直流输电在我国电网发展中的作用[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 11-12.
- ZENG Nanchao. Role of HVDC transmission in the power system development in China[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 11-12.
- [7] XUE Y, ZHANG X, YANG C. Commutation failure elimination of LCC HVDC systems using thyristor-based controllable capacitors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1448-1458.
- [8] ASPLUND G, ERIKSSON K, SVENSSON K. DC transmission based on voltage source converters[C] // CIGRE SC14 Colloquium, 1997, South Africa: 1-7.
- [9] ANDERSEN B, BARKER C. A new era in HVDC?[J]. IEE Review, 2000, 46(2): 33-39.
- [10] TIRTASHI M R S, SAMUELSSON O, SVENSSON J. Impedance matching for VSC-HVDC and energy storage damping controllers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1016-1017.
- [11] 李亚男, 蒋维勇, 余世峰, 等. 舟山多端柔性直流输电工程系统设计[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2490-2496.
LI Yanan, JIANG Weiyong, YU Shifeng, et al. System design of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2490-2496.
- [12] 孙黎, 胡峰, 穆钢. 基于改进控制策略的 MMC-HVDC 运行特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 10-16.
SUN Li, HU Feng, MU Gang. Investigation of MMC-HVDC operation performance based on improved control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 10-16.
- [13] 唐晓骏, 张正卫, 韩民晓, 等. 适应多直流馈入受端电网的柔性直流配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 57-64.
TANG Xiaojun, ZHANG Zhengwei, HAN Minxiao, et al. VSC-HVDC configuration method suitable for multi-DC feeding receiving power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 57-64.
- [14] 萧展辉, 蔡微, 黄剑文, 等. MMC 型多端柔性直流配电系统协同控制与故障电流抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 103-110.
XIAO Zhanhui, CAI Wei, HAN Jianwen, et al. Coordinate control scheme for modular multilevel converter based multi-terminal DC distribution power systems and circuit suppression during faults[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 103-110.
- [15] LI B, HE J, LI Y, et al. A review of the protection for the multi-terminal VSC-HVDC grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 239-249.

- DOI: 10.1186/s41601-019-0136-2.
- [16] IWATA Y, TANAKA S, SAKAMOTO K, et al. Simulation study of a hybrid HVDC system composed of a self-commutated converter and a line-commutated converter[C] // Sixth International Conference on AC and DC Power Transmission, April 29-May 3, 1996, London, UK: 381-386.
- [17] LI G, LI G, LIANG H, et al. Research on hybrid HVDC[C] // 2004 International Conference on Power System Technology, November 21-24, 2004, Singapore, Singapore: 1607-1612.
- [18] QAHRAMAN B, GOLE A M, FERNANDO I T. Hybrid HVDC converters and their impact on power system dynamic performance[C] // 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 18-22, 2006, Montreal, Que, Canada: 147-152.
- [19] 郭春义, 赵成勇, 彭茂兰, 等. 一种具有直流故障穿越能力的混合直流输电系统[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4345-4352.
- GUO Chunyi, ZHAO Chengyong, GUO Maolan, et al. A hybrid HVDC system with DC fault ride-through capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4345-4352.
- [20] LU D, TIAN J, LI H, et al. Series hybrid DC converters with a current source converter and a voltage source converter[C] // Proc CIGRE B4, 2015.
- [21] PENG F. A generalized multilevel inverter topology with self voltage balancing[J]. IEEE Transactions on Industrial Application, 2001, 37(2): 611-618.
- [22] NAMI A, ZARE F. Multilevel converters in renewable energy systems[M]. Cooperstown, NY, USA: In-Tech, 2010.
- [23] NABAE A, TAKAHASHI I, AKAGI H. A new neutral-point-clamp PWM inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Application, 1981, 17(5): 518-523.
- [24] MEYNARD T A, FOCH H. Multi-level conversion: high voltage choppers and voltage-source inverters[C] // PESC'92 Record. 23rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 29-July 3, 1992, Toledo, Spain: 397-403.
- [25] MARQUARDT R, LESNICAR A, HILDINGER J. Modulares stromrikerkonzept für netzkupplungsanwendung bei hohen spannungen[C] // The ETG-Fachtagung, 2002, Bad Nauheim, Germany: 1-7.
- [26] 邱欣, 夏向阳, 蔡洁, 等. 全桥型 MMC-HVDC 直流故障自清除控制保护策略研究[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(4): 88-94.
- QIU Xin, XIA Xiangyang, CAI Jie, et al. Full bridge-type MMC-HVDC with DC fault clearing protection strategies[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(4): 88-94.
- [27] 卢东斌, 王永平, 王振曦, 等. 分层接入方式的特高压直流输电逆变侧最大触发延迟角控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1808-1816.
- LU Dongbin, WANG Yongping, WANG Zhenxi, et al. Inverter maximum alpha control in UHVDC transmission with hierarchical connection mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1808-1816.
- [28] MUTHUSAMY A. Selection of dynamic performance control parameters for classic HVDC in PSS/E[D]. New Zealand: Chalmers University of Technology, 2010.

收稿日期: 2019-09-07; 修回日期: 2019-12-05

作者简介:

卢东斌(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为高压直流输电控制、电动汽车电驱动系统控制; E-mail: ludongbin@nrec.com

田杰(1969—), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为柔性直流输电、高压直流输电控制;

李海英(1972—), 男, 研究员级高级工程师, 研究方向为高压直流输电保护。

(编辑 葛艳娜)