

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230101

# 直流近区系统故障下的暂态电压特性分析及支撑策略研究

秦艳辉<sup>1,2</sup>, 尹纯亚<sup>3</sup>, 段青熙<sup>2</sup>, 马星<sup>2</sup>

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

**摘要:** 针对直流近区域交流系统故障与特高压直流交互作用下的暂态电压机理尚不明确的问题, 在深入分析交直流系统无功功率交互作用的基础上, 明确了影响暂态电压的主导因素。考虑故障持续时间及故障严重程度, 建立了换流母线暂态电压计算表达式, 揭示了不同故障严重程度及短路比下整流器无功功率消耗对暂态电压的影响机理。基于此, 推导建立了直流电流指令值计算表达式, 并提出了整流器控制优化策略, 实现了直流系统对暂态电压的主动支撑。最后, 基于 PSCAD 与 CIGRE HVDC 的仿真结果验证了理论分析的正确性与暂态电压支撑策略的有效性。

**关键词:** 高压直流输电; 暂态电压; 直流控制; 交互作用机理

## Research on transient voltage characteristics and support strategy under a fault occurred in the near-zone of HVDC sending system

QIN Yanhui<sup>1,2</sup>, YIN Chunya<sup>3</sup>, DUAN Qingxi<sup>2</sup>, MA Xing<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Urumqi 830011, China; 3. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

**Abstract:** In view of the unclear mechanism of transient voltage caused by a fault occurred in the near area of HVDC sending system with the interaction of AC and UHVDC, based on the in-depth analysis of the interaction of reactive power AC and DC systems, the dominant factors affecting transient voltage are identified. Considering the fault duration and severity, the expression for calculating the transient voltage of the commutation bus is established, revealing the mechanism of the influence of reactive power consumption of the rectifier on transient voltage under different fault severity and short-circuit ratio. Based on this, an expression for calculating the DC current command value is derived and established, and an optimization strategy for rectifier control is proposed to achieve active support of the DC system for transient voltage. Finally, the simulation results based on PSCAD and CIGRE HVDC have verified the correctness of the theoretical analysis and the effectiveness of the transient voltage support strategy.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2022D01C363).

**Key words:** HVDC; transient voltage; DC control; interaction mechanism

## 0 引言

我国已建成世界上规模最大、电压等级最高的交直流混联系统<sup>[1]</sup>, 大型新能源基地经特高压直流外送的输电格局已经形成<sup>[2]</sup>。在“双碳”目标及“新型电力系统”发展的驱动下<sup>[3-4]</sup>, 新能源并网比例及

特高压直流输电容量将会进一步增大, 交直流系统间的故障强耦合性持续加强<sup>[5]</sup>, 直流近区域故障下的暂态电压问题突出<sup>[6]</sup>, 高比例新能源送端系统面临的脱网风险大, 已成为制约新能源与特高压直流输电技术进一步发展的重要因素。

在暂态过电压及抑制措施方面: 文献[7-8]分析了直流故障对送端风电机组脱网及连锁脱网的影响机理; 文献[9]提出了一种适合实际模块结构的IGBT暂态电压全过程精确测量方法; 文献[10]提出了直流闭锁引起的换流母线暂态过电压计算方法,

**基金项目:** 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目资助(2022D01C363); 新疆维吾尔自治区教育厅项目资助(XJEDU2022P019)

明确了暂态过电压、短路比及闭锁容量之间的定量关系；文献[11-12]在文献[10]的基础上，分别从解析计算与谐振频率的角度提出了利用无功功率短路比与无功功率比衡量暂态过电压的方法；文献[13]提出了基于阻抗比的暂态过电压计算方法；文献[14]提出利用调相机与直流电流指令值优化抑制暂态过电压的控制方法；文献[15-16]详细分析了故障类型、故障持续时间对暂态过电压的影响机理，并从整流器与逆变器协同控制的角度，提出了抑制暂态过电压的策略；文献[17]采用优化直流控制参数，实现暂态过电压抑制；文献[18-24]从风机内部控制改造、优化及增设设备的角度，提出了提升风电机组高电压穿越能力的策略。

在送端交流系统故障方面<sup>[25-35]</sup>，文献[26-29]分析了送端交流系统故障及其恢复期间对逆变器换相失败的影响机理；文献[30]分析了送端交流系统故障后的暂态过电压影响因素；文献[32-33]分析了送端故障对直流功率、受端电压及稳定性的影响；文献[34]分阶段分析了混合直流送端系统故障对直流恢复速率的影响。

综上，现有的文献关于送端交流系统故障下考虑交直流交互作用下暂态电压特性的研究较少，在暂态电压主动支撑能力方面，未能充分挖掘直流控制的支撑能力。为此，本文首先分析交直流系统无功功率的交互作用机理，并计及故障持续时间及故障严重程度，建立交直流系统交互作用下的暂态电压计算表达式，阐明直流近区域故障下的暂态电压特性；其次，提出一种可支撑送端交流系统暂态电压的直流控制优化策略；最后，在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真模型对机理分析及支撑策略进行验证。

### 1 交直流系统无功功率交互作用机理分析

正常运行时的特高压直流送端系统结构图如图 1 所示<sup>[15]</sup>。

图 1 中：下标 N 表示正常运行时的变量； $P_{acr}$ 、 $Q_{acr}$  分别为交流系统馈入直流系统的有功功率与无功功率； $L_{eq}$  为送端交流系统等值电感； $C_r$ 、 $Q_{Cr}$  分别为整流站内交流滤波器与无功功率补偿装置的等值电容与无功功率； $U_{Lr}$  为整流侧换流母线电压（本文考虑正常运行时为额定电压）； $P_{dr}$ 、 $Q_{dr}$  分别为整流器传输的有功功率与消耗的无功功率。

图 1 中整流侧交流系统与整流器间的无功功率关系如式(1)所示。

$$Q_{drN} = Q_{acrN} + Q_{CrN} \quad (1)$$

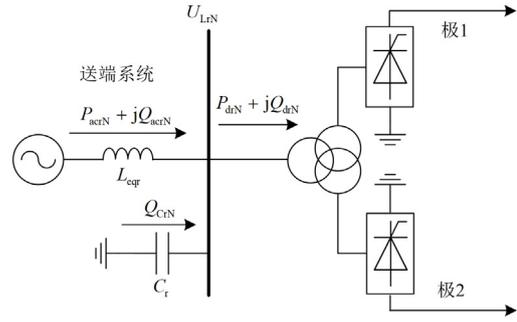


图 1 特高压直流送端系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of HVDC sending systems

送端交流系统发生短路故障的示意图如图 2 所示。

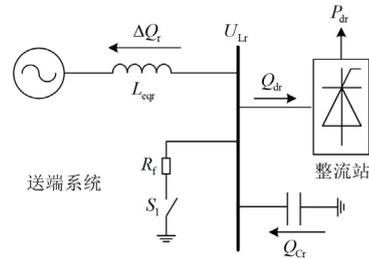


图 2 计及交流系统故障的送端系统示意图

Fig. 2 Structure diagram of the sending system considering AC system fault

图 2 中： $R_f$  为故障电阻，用来模拟不同的故障严重程度； $S_f$  为开关信号，用来模拟送端交流系统故障； $\Delta Q_r$  为故障期间馈入交流系统的无功功率，定义馈入交流系统为正方向，若  $\Delta Q_r > 0$  表示交流系统内无功盈余量为正，反之为负。

由图 2 可知，送端交流系统故障会引起换流母线处电压  $U_{Lr}$  跌落，设  $\Delta Q_r$  对  $U_{Lr}$  的影响为  $\Delta U_{LrQ}$ ，交流系统故障自身导致的换流母线电压为  $U_{Lrf}$ ，故障发生时刻为  $t_f$ ，故障持续时间为  $t_{dur}$ ，则在交流系统故障与特高压直流交互影响下的换流母线电压为  $U_{Lr}$  可表示为

$$U_{Lr} = \begin{cases} U_{LrN} + \Delta U_{LrQ}, & t \geq t_f + t_{dur} \\ U_{Lrf} + \Delta U_{LrQ}, & t < t_f + t_{dur} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知，在送端交流系统故障期间，换流母线电压  $U_{Lr}$  为  $U_{Lrf}$  与  $\Delta U_{LrQ}$  的叠加；在送端交流系统故障切除之后，对  $U_{Lr}$  的影响只有  $\Delta U_{LrQ}$ 。

图 2 中的  $\Delta Q_r$  可表示为

$$\Delta Q_r = Q_{acrN} - Q_{acr} \quad (3)$$

式(3)中的  $Q_{acr}$  可表示为

$$Q_{acr} = Q_{dr} - Q_{Cr} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)可得

$$\Delta Q_r = Q_{acrN} - Q_{dr} + Q_{Cr} \quad (5)$$

换流站内配置的无功补偿多为电容器组与交流滤波器, 其等效电容  $C_r$  的容抗  $Z_{Cr}$  可表示为

$$Z_{Cr} = \frac{1}{\omega C_r} \quad (6)$$

则  $C_r$  提供的无功功率  $Q_{Cr}$  可表示为

$$Q_{Cr} = U_{Lr} I_{Cr} = U_{Lr} \frac{U_{Lr}}{Z_{Cr}} = \omega C_r U_{Lr}^2 \quad (7)$$

式中:  $I_{Cr}$  为流过等效电容  $C_r$  的电流;  $\omega$  为送端交流系统角频率。

根据式(7)可得正常运行状态下的  $Q_{CrN}$  为

$$Q_{CrN} = \omega C_r U_{LrN}^2 \quad (8)$$

根据式(7)与式(8)可得  $Q_{Cr}$  为

$$Q_{Cr} = \left( \frac{U_{Lr}}{U_{LrN}} \right)^2 Q_{CrN} \quad (9)$$

特高压直流换流器在正常运行时会消耗大量的无功功率, 一般为所传输有功功率的 40%~60%<sup>[2]</sup>, 整流器消耗无功功率  $Q_{dr}$ <sup>[15]</sup> 可表示为

$$Q_{dr} = I_{dr} \sqrt{U_{dr0}^2 - U_{dr}^2} \quad (10)$$

式中:  $I_{dr}$  为整流侧直流电流;  $U_{dr0}$  与  $U_{dr}$  分别为整流器直流空载电压与直流电压。

则根据式(5)、式(9)与式(10)可得  $\Delta Q_r$  为

$$\Delta Q_r = Q_{acrN} + \left( \frac{U_{Lr}}{U_{LrN}} \right)^2 Q_{CrN} - Q_{dr} = Q_{acrN} + \left( \frac{U_{Lr}}{U_{LrN}} \right)^2 Q_{CrN} - I_{dr} \sqrt{U_{dr0}^2 - U_{dr}^2} \quad (11)$$

式(2)中的  $\Delta U_{LrQ}$ <sup>[13]</sup> 可表示为

$$\Delta U_{LrQ} = \frac{\Delta Q_r}{S_{ac}} U_{LrN} \quad (12)$$

式中,  $S_{ac}$  为送端换流母线处的短路容量。

由式(2)、式(11)及式(12)可知, 在送端交流系统故障后, 故障严重程度、故障持续时间、换流器无功功率消耗、交流滤波器组发出无功功率、故障持续时间以及存在的动态耦合关系是影响送端交流系统暂态电压特性的关键因素。

## 2 交直流系统交互作用下的暂态电压特性

整流侧换流母线电压标幺值  $U_{Lr,pu}$  与  $U_{Lrf,pu}$  可表示为

$$\begin{cases} U_{Lr,pu} = U_{Lr} / U_{LrN} \\ U_{Lrf,pu} = U_{Lrf} / U_{LrN} \end{cases} \quad (13)$$

通常用短路比  $S_{CR}$  衡量交流系统强度, 如式(14)<sup>[10]</sup>所示。

$$S_{CR} = \frac{S_{ac}}{P_{drN}} \quad (14)$$

根据式(2)、式(11)一式(14), 可计算  $U_{Lr,pu}$  为

$$U_{Lr,pu} = \begin{cases} -\sqrt{\frac{Q_{dr} - S_{CR} P_{drN} - Q_{acrN} + \left( \frac{S_{CR} P_{drN}}{2Q_{CrN}} \right)^2}{Q_{CrN}}} + \frac{S_{CR} P_{drN}}{2Q_{CrN}}, & t \geq t_f + t_{dur} \\ -\sqrt{\frac{Q_{dr} - Q_{acrN} - S_{CR} P_{drN} + \left( \frac{S_{CR} P_{drN}}{2U_{Lrf,pu} Q_{CrN}} \right)^2}{Q_{CrN}}} + \frac{S_{CR} P_{drN}}{2U_{Lrf,pu} Q_{CrN}}, & t < t_f + t_{dur} \end{cases} \quad (15)$$

根据式(15), 当  $S_{CR} = 2.5$ 、 $P_{drN} = 1000$  MW、 $Q_{CrN} = 540$  Mvar、 $Q_{acrN} = 0$  时, 在送端交流系统故障持续时间内以及不同故障严重程度的换流母线暂态电压对比如图 3(a)所示。  $U_{Lrf,pu} = 0.2$ 、 $0.4$ 、 $0.6$ 、 $0.8$  时的  $U_{Lr,pu}$  与  $Q_{dr}$  的关系如图 3(b)所示。

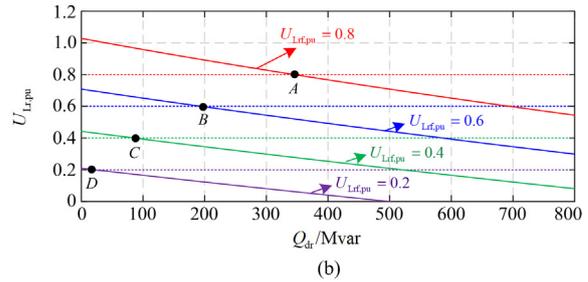
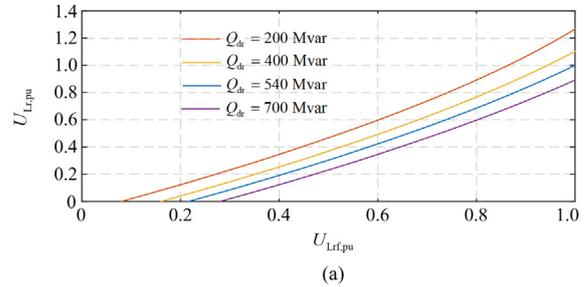


图 3 不同故障严重程度及整流器无功功率消耗对暂态电压的影响

Fig. 3 Transient voltage result with different fault severity and reactive power consumption of the rectifier

由图 3(a)可知, 在  $Q_{dr}$  不变的情况下,  $U_{Lr,pu}$  随着故障严重程度 ( $U_{Lrf,pu}$ ) 的降低呈现非线性降低的趋势, 在不同的  $U_{Lrf,pu}$  下,  $U_{Lr,pu}$  与  $Q_{dr}$  基本呈线性关

系。整流器无功功率变化是引起暂态电压波动的主要因素， $Q_{dr}$  增大会进一步降低交流系统电压，若直流近区域内的新能源低电压穿越能力不足，会导致新能源机组发生脱网事故。

由图 3(b)可以看出，当  $U_{Lr,pu} = U_{Lrf,pu}$  时，即图中实线与虚线的交点处(分别对应图中的 A、B、C 与 D 点)，此时  $\Delta Q_r = 0$ ，定义  $Q_{dr0}$  为整流器临界消耗无功功率，根据式(11)可得

$$Q_{dr0} = U_{Lrf,pu}^2 Q_{CrN} + Q_{acrN} \quad (16)$$

当  $Q_{dr} > Q_{dr0}$  时，整流器消耗无功功率会促使交流系统电压进一步跌落；当  $Q_{dr} < Q_{dr0}$  时，整流器消耗无功功率可对交流系统暂态电压起到支撑作用；当  $Q_{dr} = Q_{dr0}$  时，整流器消耗无功功率可对交流系统暂态电压起到支撑作用，不会对交流系统暂态电压产生影响。且随着  $U_{Lrf,pu}$  的降低，对暂态电压起支撑作用的整流器无功功率消耗调节范围将会变小。

当  $P_{dN} = 1000 \text{ MW}$ 、 $Q_{acrN} = 0$ 、 $U_{Lrf,pu} = 0.5$ 、 $Q_{CrN} = 540 \text{ Mvar}$  时，不同  $S_{CR}$  与  $Q_{dr}$  下对换流母线暂态电压  $U_{Lr,pu}$  的影响如图 4 所示。

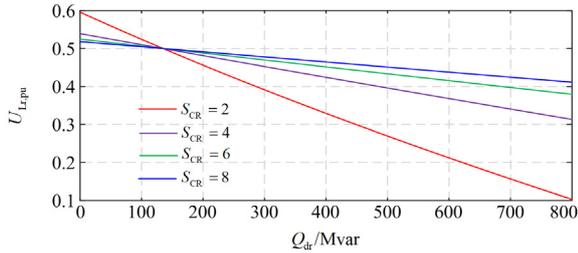


图 4 不同短路比及整流器无功功率消耗对暂态电压的影响  
Fig. 4 Transient voltage result with different  $S_{CR}$  and reactive power consumption of the rectifier

由图 4 可知，随着  $S_{CR}$  的增大，整流器无功功率消耗  $Q_{dr}$  对暂态电压的影响变小，在  $S_{CR}$  较低时，若发生严重故障，整流器无功功率消耗较小的变化都会对暂态电压产生较大的影响。

### 3 基于直流控制优化的暂态电压支撑策略

为衡量故障严重程度，在故障持续时间内根据式(15)可得

$$U_{Lrf,pu} = \frac{Q_{dr} + S_{CR} P_{dN} U_{Lr,pu} - Q_{acrN} - U_{Lr,pu}^2 Q_{CrN}}{S_{CR} P_{dN}} \quad (17)$$

整流侧直流空载电压  $U_{dr0}$ <sup>[15]</sup> 可表示为

$$U_{dr0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} n T_r U_{LrN} U_{Lr,pu} \quad (18)$$

式中： $T_r$  为整流侧换流变压器变比； $n$  为 6 脉动换

流器串联个数。

由前述分析可知，在严重故障(本文将  $U_{Lrf,pu} \leq 0.4$  定义为严重故障)下，整流器可调节范围较小，且导致暂态电压进一步跌落的风险较大，因此，本文考虑在严重故障下以不恶化暂态过电压为目标，即满足  $Q_{dr} = Q_{dr0}$ ，根据式(10)、式(16)~式(18)，可得在严重故障下的整流侧直流电流指令值  $I_{dref1}$  为

$$I_{dref1} = \frac{I_{dr}}{I_{dN}} = \frac{U_{Lrf,pu}^2 Q_{CrN} + Q_{acrN}}{I_{dN} \sqrt{\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} N U_{LrN} U_{Lrf,pu}\right)^2 - U_{dr}^2}} \quad (19)$$

当直流系统以式(19)所示的直流电流指令值  $I_{dref1}$  运行时，可保证在严重故障下整流器无功功率消耗不会进一步恶化暂态过电压。

在非严重故障( $U_{Lrf,pu} > 0.4$ )时，整流器无功功率消耗可调节范围随着  $U_{Lrf,pu}$  的增大而增大，为使整流器无功功率消耗对暂态电压起到支撑作用，需满足  $Q_{dr} < Q_{dr0}$ ，设暂态电压支撑目标为  $\Delta U_{supp}$ ，则根据式(15)可得整流器最大无功功率消耗  $Q_{dr,max}$ ，如式(20)所示。

$$Q_{dr,max} = (U_{Lrf,pu} + \Delta U_{supp})^2 Q_{CrN} - (U_{Lrf,pu} + \Delta U_{supp}) S_{CR} P_{dN} + Q_{acrN} + U_{Lrf,pu} S_{CR} P_{dN} \quad (20)$$

则在非严重故障下的整流侧直流电流指令值  $I_{dref2}$  为

$$I_{dref2} = \frac{Q_{dr,max}}{I_{dN} \sqrt{\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} N U_{LrN} (U_{Lrf,pu} + \Delta U_{supp})\right)^2 - U_{dr}^2}} \quad (21)$$

其中

$$\Delta U_{supp} = k U_{Lrf,pu} \quad (22)$$

式中， $k$  为暂态电压支撑系数，保证暂态电压支撑能力可随不同的故障严重程度而自适应变化。

为准确检测故障持续时间，根据式(15)，考虑  $Q_{dr}$  影响的换流母线电压  $U_{Lr,c}$  可计算为

$$U_{Lr,c} = -\sqrt{\frac{Q_{dr} - S_{CR} P_{dN} - Q_{acrN}}{Q_{CrN}} + \left(\frac{S_{CR} P_{dN}}{2Q_{CrN}}\right)^2} + \frac{S_{CR} P_{dN}}{2Q_{CrN}} \quad (23)$$

通过实时测量系统中的  $U_{Lr,pu}$ ，并与式(19)计算得到的  $U_{Lr,c}$  进行对比，当两者差值在一定误差范围内时，认为故障已经切除，并作为控制策略退出运行的依据。

根据式(17)~式(23)，提出一种支撑送端交流系统暂态电压的直流优化控制策略，如图 5 所示。

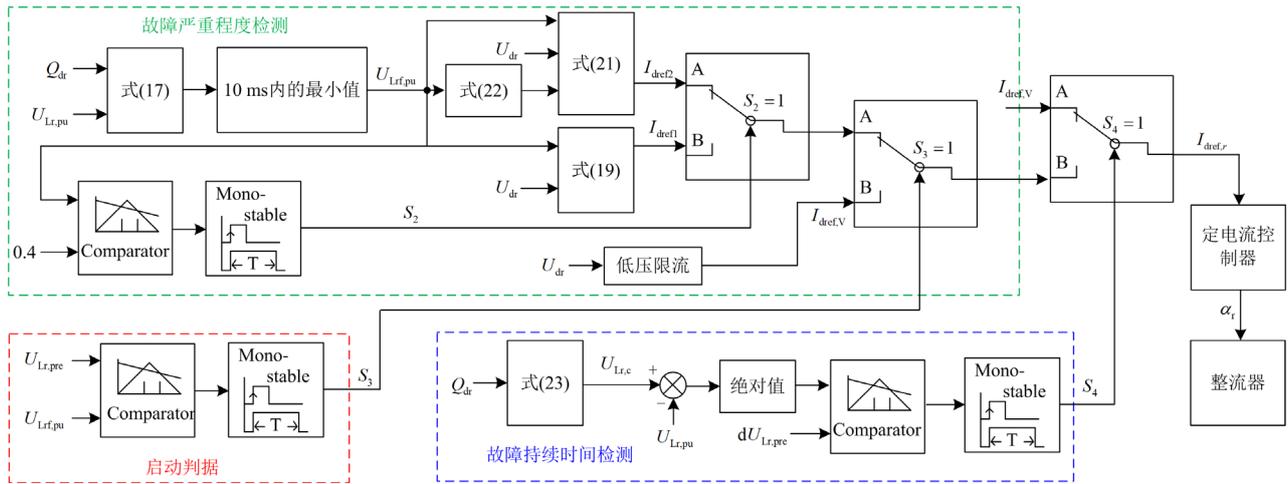


图5 支撑送端交流系统暂态电压的整流器控制框图

Fig. 5 Control block diagram of rectifier which supports transient voltage with a fault occurred at the rectifier AC system

图5中： $I_{\text{dref},r(r=1,2)}$ 为整流侧定电流控制器的直流电流指令值； $I_{\text{dref},V}$ 为低压限流控制器输出的直流电流指令值； $\alpha_r$ 为整流器触发角； $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 为控制器启动信号。

如图5所示,所提控制策略包含3个主要模块,分别为故障严重程度检测模块、启动判据及故障持续时间检测模块。

故障严重程度检测模型是通过实时测量 $Q_{\text{dr}}$ 与 $U_{\text{Lr},\text{pu}}$ ,并根据式(17)计算出 $U_{\text{Lrf},\text{pu}}$ ,将10ms内的最小值作为 $U_{\text{Lrf},\text{pu}}$ ,实现对故障严重程度的识别。

启动判据是通过比较预先设定值 $U_{\text{Lr},\text{pre}}$ 与计算得到的 $U_{\text{Lrf},\text{pu}}$ 的大小来判断是否启动所提控制策略,可通过更改 $U_{\text{Lr},\text{pre}}$ 的值来确定在不同故障严重程度下启动。

故障持续时间检测模块是通过比较不考虑送端交流系统故障时计算得到的 $U_{\text{Lr},c}$ 与实时测量得到的 $U_{\text{Lrf},\text{pu}}$ 的差值的绝对值,在小于预先设定的误差值 $dU_{\text{Lr},\text{pre}}$ 时,比较器会输出0,所提控制策略将会退出运行。

在以上3个模块的协同下,当检测到不同的故障严重程度时,会将式(19)与式(21)计算得到的直流电流指令值作为定电流控制器的输入,实现对暂态电压的主动支撑。

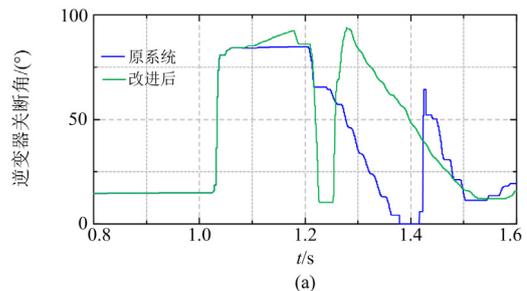
#### 4 仿真分析

基于PSCAD电磁暂态仿真软件与CIGRE HVDC模型<sup>[36]</sup>,建立如图5所示的控制策略, $U_{\text{Lrf},\text{pu}}$

设置为0.8 p.u., $dU_{\text{Lr},\text{pre}}$ 设置为0.1 p.u.,故障持续时间均为0.2 s, $k=0.1$ ,在整流侧换流母线处设置三相短路故障,故障电阻 $R_f$ 分别为5、10、40  $\Omega$ ,仿真结果如图6—图8所示。

如图6—图8所示,由在送端换流母线处发生三相短路故障( $R_f=5\ \Omega$ 、 $10\ \Omega$ 、 $40\ \Omega$ )时的关断角仿真结果(图6(a)、图7(a)、图8(a))可以看出,原系统的逆变器关断角在故障消失后的恢复阶段短时降低至0,逆变器发生了换相失败,但采用本文提出的控制策略在故障及恢复期间逆变器关断角仍可以维持在一个较高的值,有效地降低了换相失败风险。从换流母线电压的仿真结果可以看出,原系统故障期间的换流母线暂态电压要低于 $U_{\text{Lrf},\text{pu}}$ ,在交直流系统相互作用下会进一步恶化暂态电压,与本文第3节分析结果相符。

通过对比图6—图8不同故障电阻(故障严重程度)下的仿真结果,可以看出本文所提控制策略均能够有效支撑暂态电压,有效地防止故障期间的暂态电压进一步跌落;在故障消失后的恢复阶段,改进后的系统比原系统更快恢复。且随着故障电阻的增大,对暂态电压的支撑效果越好,故障后的恢复效



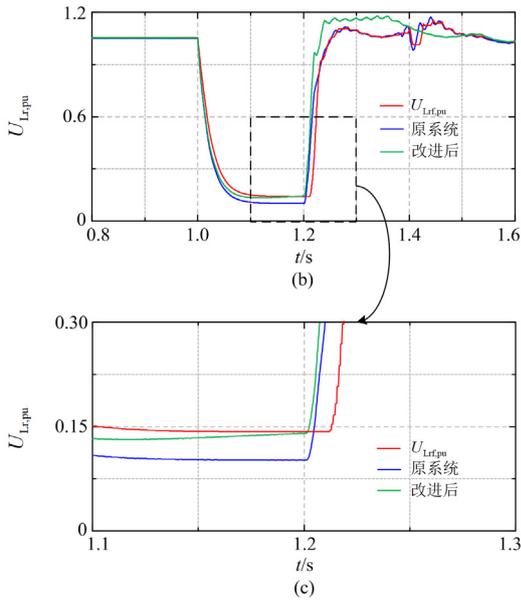


图 6 送端系统三相短路故障下的仿真结果( $R_f = 5 \Omega$ )  
 Fig. 6 Simulation results with the three-phase to ground fault at the rectifier sider ( $R_f = 5 \Omega$ )

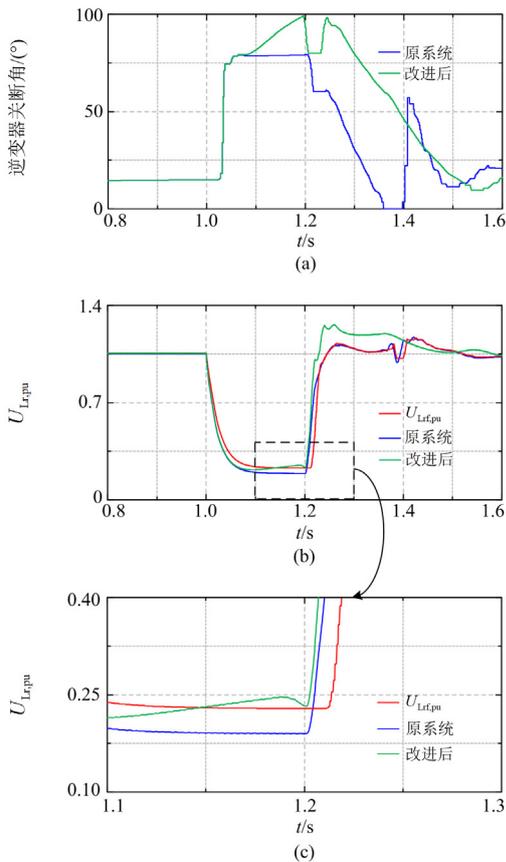


图 7 送端系统三相短路故障下的仿真结果( $R_f = 10 \Omega$ )  
 Fig. 7 Simulation results with the three-phase to ground fault at the rectifier sider ( $R_f = 10 \Omega$ )

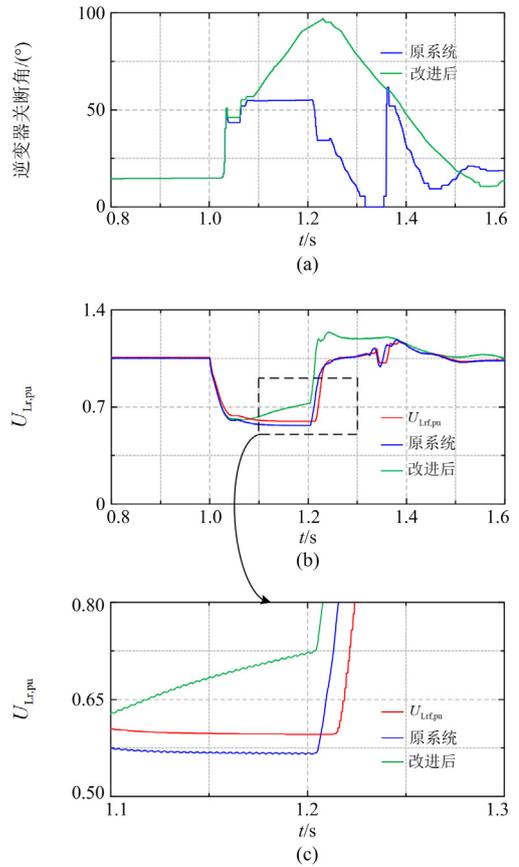


图 8 送端系统三相短路故障下的仿真结果( $R_f = 40 \Omega$ )  
 Fig. 8 Simulation results with the three-phase to ground fault at the rectifier sider ( $R_f = 40 \Omega$ )

果也越好。仿真结果说明了本文所提控制策略能够适应不同故障严重程度，同时也验证所提控制策略的有效性。

### 5 结论

本文在计及故障持续时间及故障严重程度的基础上，建立了交直流系统交互作用下的暂态电压计算表达式，揭示了直流近区域故障下暂态电压机理，并提出了一种可支撑暂态电压的直流控制优化策略。所得结论如下：

- 1) 直流送端交流系统故障后，在交直流系统的交互作用下，故障严重程度、整流器无功功率消耗、故障持续时间、故障严重程度及短路比是影响暂态电压特性的关键因素；
- 2) 在特高压直流控制特性及动态响应特性的影响下，存在恶化送端交流系统故障后的暂态电压的风险；
- 3) 所提直流控制优化策略，不仅能够有效支撑交流系统暂态电压，而且可以有效防止故障期间的

暂态电压进一步跌落, 促进在故障消失后的电压更快恢复, 也可有效抑制送端系统故障恢复期间引起的逆变器换相失败;

4) 所提出的直流电流优化策略, 仅考虑了在交流系统故障下对暂态电压的主动支撑, 后期将进一步分析送端系统引起逆变器换相失败的机理以及换相失败引起的交流暂态过电压, 并从直流控制优化角度提出兼顾多种支撑效果的控制策略;

5) 由于所提控制策略是通过降低故障期间直流电流的方式实现, 势必会影响到直流功率的传输, 且所提控制策略的优势主要在于提升暂态电压支撑能力, 因此更适用于新能源脱网风险较大的送端系统。

### 参考文献

- [1] 胡加伟, 王彤, 王增平. 直流闭锁后系统暂态稳定紧急协同控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 43-52.  
HU Jiawei, WANG Tong, WANG Zengping. Collaborative emergency control strategy of system transient stability after DC blocking[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 43-52.
- [2] 尹纯亚, 李凤婷, 王丹东, 等. 风电高渗透率交直流外送系统直流闭锁稳控方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 95-102.  
YIN Chunya, LI Fengting, WANG Dandong, et al. Research on stability control scheme for AC/DC hybrid transmission system with wind power high permeability under DC blocking[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 95-102.
- [3] 彭静, 王军, 亓富军, 等. “双碳”目标下配电网多阶段扩展规划[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 153-161.  
PENG Jing, WANG Jun, QI Fujun, et al. Multi-stage expansion planning of a distribution network with double-carbon policy[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 153-161.
- [4] 孙秦峰, 李凤婷, 王森, 等. 提升风电场有功调节能力的风储系统多时间尺度运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 21-31.  
SUN Qinfeng, LI Fengting, WANG Sen, et al. Multi-timescale operation strategy of a wind storage system to enhance the active regulation capacity of wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 21-31.
- [5] NIU Shuanbao, ZHANG Zhe, KE Xianbo, et al. Impact of renewable energy penetration rate on power system transient voltage stability[J]. Energy Reports, 2022, 8(S1): 1-10.
- [6] LAGHRIDAT H, ESSADKI A, NASSER T. Coordinated control by ADRC strategy for a wind farm based on SCIG considering low voltage ride-through capability[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(1): 82-99.
- [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] 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.
- [9] 王宁燕, 许军, 丁登伟, 等. 柔性直流输电工程中 MMC 模块内 IGBT 运行时暂态电压精确测量方法研究[J]. 高压电器, 2021, 57(9): 26-33.  
WANG Ningyan, XU Jun, DING Dengwei, et al. Research on accurate measurement method of transient voltage of operated IGBT in MMC module in flexible HVDC transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(9): 26-33.
- [10] 王峰, 刘天琪, 丁媛媛, 等. 直流闭锁引起的暂态过电压计算方法及其影响因素分析[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3059-3065.  
WANG Feng, LIU Tianqi, DING Yuanyuan, et al. Calculation method and influencing factors of transient overvoltage[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3059-3065.
- [11] 辛超山, 尹纯亚, 李凤婷, 等. 特高压直流完全闭锁后的暂态压升计算方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(1): 184-190.  
XIN Chaoshan, YIN Chunya, LI Fengting, et al. Calculation method of transient voltage rise after UHVDC complete blocking[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(1): 184-190.
- [12] 尹纯亚, 李凤婷, 周识远, 等. 基于无功功率短路比的直流闭锁暂态过电压计算方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 150-154.  
YIN Chunya, LI Fengting, ZHOU Shiyuan, et al. Calculation method of transient overvoltage due to DC blocking based on short circuit ratio of reactive power[J].

Automation of electric power systems, 2019, 43(10): 150-154.

[13] 李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 1-8.  
LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Transient overvoltage calculation method of HVDC sending-end system under DC bipolar blocking[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 1-8.

[14] 赵学明, 李永丽, 孙广宇, 等. 换相失败对含风电场的交直流混联系统送端过电压的影响[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3666-3673.  
ZHAO Xueming, LI Yongli, SUN Guangyu, et al. Effect of commutation failure on the overvoltage on rectifier station in AC/DC hybrid power system with wind farms[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3666-3673.

[15] YIN Chunya, LI Fengting. Reactive power control strategy for inhibiting transient overvoltage caused by commutation failure[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4764-4777.

[16] YIN Chunya, LI Fengting. Analytical expression on transient overvoltage peak value of converter bus caused by DC faults[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2741-2744.

[17] 冀肖彤. 抑制 HVDC 送端交流暂态过电压的控制系统优化[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 721-728.  
JI Xiaotong. Optimization of HVDC control system for mitigating AC transient overvoltage on rectifier station[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 721-728.

[18] 刘其辉, 董楚然, 吴勇, 等. 直流换相失败下双馈风电机组特性描述及暂态过电压抑制[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 29-38.  
LIU Qihui, DONG Churan, WU Yong, et al. Characteristic description and transient overvoltage suppression of doubly-fed wind turbines with LCC-HVDC commutation failure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 29-38.

[19] 王德胜, 颜湘武, 刘辉, 等. 基于动态无功支撑的全功率变流风电机组高电压穿越改进控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 957-968.  
WANG Desheng, YAN Xiangwu, LIU Hui, et al. High voltage ride through improved control of full power converter wind turbines based on dynamic reactive power support[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 957-968.

[20] 周昌平, 汪震, 甘德强, 等. 双馈风机并网系统高电压穿越控制策略稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(20): 7415-7426.  
ZHOU Changping, WANG Zhen, GAN Deqiang, et al. Stability analysis of high voltage ride through control strategy for DFIG integrated system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(20): 7415-7426.

[21] 肖超, 韩伟, 李琼林, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 122-129.  
XIAO Chao, HAN Wei, LI Qionglin, et al. A suppression method for overvoltage of a sending end grid caused by commutation failure based on virtual resistance[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 122-129.

[22] 张起瑞, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 抑制直流单极闭锁引起大规模风电机组脱网的直流控制策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3528-3537.  
ZHANG Qirui, LI Fengting, YIN Chunya, et al. DC control strategy for suppressing large-scale WTG tripping caused by mono-polar block fault[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3528-3537.

[23] 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.

[24] 韩平平, 张海天, 丁明, 等. 大规模高压直流输电系统闭锁故障下送端风电场高电压穿越的控制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1086-1095.  
HAN Pingping, ZHANG Haitian, DING Ming, et al. A coordinated HVRT strategy of large-scale wind power transmitted with HVDC system[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1086-1095.

[25] 汪洋, 任振宇, 朱旭东, 等. LCC-FHMMC 换流阀出口交流单相接地故障特性分析及保护方案设计[J]. 高压电器, 2022, 58(7): 18-27.  
WANG Yang, REN Zhenyu, ZHU Xudong, et al. Characteristic analysis and protection scheme design of AC single phase grounding fault for LCC-FHMMC converter valve exit[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 18-27.

[26] LIN S, LEI Y Q, LIU J, et al. Analysis and prevention of commutation failure caused by HVDC rectifier AC faults[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2022, 16(7): 1416-1424.

[27] 马星, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 整流侧换流母线电压恢复导致逆变器换相失败的机理分析[J]. 电力工程技术, 2021, 40(4): 83-88.  
MA Xing, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Mechanism

- analysis of inverter commutation failure caused by voltage recovery of commutation bus at rectifier side[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(4): 83-88.
- [28] 马星, 李凤婷, 尹纯亚. 整流侧换流母线电压恢复对逆变器换相的影响[J]. *电网技术*, 2020, 44(8): 2950-2960.  
MA Xing, LI Fengting, YIN Chunya. Impact of voltage restoration of commutation bus on rectifier side on commutation of inverters[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(8): 2950-2960.
- [29] 林圣, 雷雨晴, 刘健, 等. HVDC 送端系统故障引发受端换相失败分析[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(5): 1669-1680.  
LIN Sheng, LEI Yuqing, LIU Jian, et al. Analysis of receiving-side commutation failure mechanism caused by HVDC sending-side system fault[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(5): 1669-1680.
- [30] 刘晓琳, 曹泽宇, 高丙团, 等. HVDC 送端交流系统故障暂态过电压评估指标[J]. *电力建设*, 2023, 44(1): 64-72.  
LIU Xiaolin, CAO Zeyu, GAO Bingtuan, et al. Evaluation index of transient overvoltage during fault at HVDC sending-end AC system[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(1): 64-72.
- [31] 任萱, 王宾, 俞斌, 等. LCC-HVDC 逆变侧换流站近区交流线路高阻接地故障保护[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(23): 162-169.  
REN Xuan, WANG Bin, YU Bin, et al. High resistance grounding fault protection of AC line near converter station at inverter side of LCC-HVDC[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(23): 162-169.
- [32] 孙天甲, 刘海洋. 大规模交直流混联电网送端交流故障对受端电网的影响[J]. *浙江电力*, 2022, 41(7): 18-24.  
SUN Tianjia, LIU Haiyang. Influence of AC fault at sending end on receiving-end networks of large-scale AC/DC hybrid power grid[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2022, 41(7): 18-24.
- [33] 屠竞哲, 张健, 吴萍, 等. 多送出直流系统送端故障引发稳定破坏机理分析[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(20): 146-151.  
TU Jingzhe, ZHANG Jian, WU Ping, et al. Mechanism analysis on instability caused by sending-side contingencies of multiple HVDC sending systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(20): 146-151.
- [34] 连攀杰, 刘文焯, 李霞, 等. 混联直流输电系统送端三相短路故障分析及优化控制[J]. *电网技术*, 2021, 45(10): 3877-3884.  
LIAN Panjie, LIU Wenzhuo, LI Xia, et al. Analysis and optimal control of three-phase short circuit faults at sending end of hybrid-HVDC[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(10): 3877-3884.
- [35] 王卫, 宫成, 曹文远, 等. 交直流配电网交流侧非对称故障情况下直流侧电压波动特性分析与控制[J]. *电力建设*, 2021, 42(11): 90-99.  
WANG Wei, GONG Cheng, CAO Wenyuan, et al. Analysis and control of DC side voltage fluctuation characteristics under unbalanced fault of AC side in AC/DC distribution network[J]. *Electric Power Construction*, 2021, 42(11): 90-99.
- [36] YIN Chunya, LI Fengting. A novel evaluation method for the risk of simultaneous commutation failure in multi-infeed HVDC-systems that considers DC current rise[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 131.

收稿日期: 2023-02-02; 修回日期: 2023-05-13

作者简介:

秦艳辉(1983—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为新型电力系统运行控制;

尹纯亚(1994—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为交直流混联电网运行与控制。E-mail: xjdxycy@xju.edu.cn

(编辑 姜新丽)