

# 高压直流输电送端电网暂态过电压机理 与抑制策略综述

林 圣<sup>1</sup>, 兰菲燕<sup>1</sup>, 刘 健<sup>1</sup>, 李小鹏<sup>2</sup>

(1.西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756; 2.国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘 要:**高压直流输电系统的换相失败、直流闭锁、近区交流短路故障等会导致送端电网暂态过电压, 制约输电能力、威胁系统安全稳定运行。为此, 首先梳理换相失败、直流闭锁、近区交流故障 3 种典型故障下直流送端电网暂态过电压产生机理的异同, 明确暂态过电压的主要影响因素; 其次, 总结现有暂态过电压的抑制策略及其优缺点; 最后, 针对现有研究尚存的不足, 指出剖析不同新能源送出场景的暂态过电压机理、揭示暂态过电压多影响因素耦合规律、构建多时空尺度暂态过电压协同抑制体系等 3 个方面是未来高压直流输电送端电网暂态过电压研究的重点。

**关 键 词:**暂态过电压; 新能源; 高压直流; 抑制策略

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.06.001 中图分类号: TM863 文章编号: 1673-9140(2022)06-0003-14

## Overview of transient overvoltage mechanism and suppression strategies of high voltage direct current transmission grid

LIN Sheng<sup>1</sup>, LAN Feiyan<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>1</sup>, LI Xiaopeng<sup>2</sup>

(1.School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 2.Electric Power Research Institute, State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Commutation failure, DC blocking and near AC short-circuit fault of HVDC transmission system would lead to transient overvoltage of sending-end power grid, restrict transmission capacity and threaten safe and stable operation of system. For this reason, this paper firstly gives the similarities and differences of the transient overvoltage generation mechanism of DC sending-end power grid under three typical fault conditions of commutation failure, DC blocking and near-field AC fault are analyzed systematically, and the main influencing factors of transient overvoltage are clarified. Secondly, the existing transient overvoltage suppression strategies and their advantages and disadvantages are summarized. Finally, in view of the shortcomings of the existing research, it is analyzed that the three aspects of analyzing the transient overvoltage mechanism of different new energy transmission scenarios, revealing the coupling law of multiple influencing factors of transient overvoltage, and constructing a multi-temporal and spatial scale transient overvoltage collaborative suppression system are the focus of future research on transient overvoltage of HVDC sending-end power grid.

收稿日期: 2022-10-01; 修回日期: 2022-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(51977183)

通信作者: 林 圣(1983—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事交直流混联电网保护与控制、牵引供电系统故障预测与健康管理和城市轨道交通杂散电流分析与抑制研究; E-mail: slin@swjtu.edu.cn

**Key words:** transient overvoltage; new energy; HVDC; suppression strategy

为解决中国能源与负荷呈逆向分布的问题,国家电网和南方电网均大力发展高压直流输电技术。随着“碳达峰—碳中和”正式成为国家战略,跨区输送新能源的力度将进一步加大,高压直流输电已成为实现新能源外送消纳的必由之路<sup>[1-3]</sup>。当高压直流输电系统发生换相失败、闭锁或送端近区交流短路故障后,整流站盈余的无功馈入交流系统,将引起送端交流电网暂态过电压问题<sup>[4-5]</sup>。例如,2013年7月,复奉特高压直流双极发生换相失败,整流站换流母线电压急剧升高并发生畸变,导致过电压保护动作闭锁了复龙站2个低端换流器<sup>[6]</sup>。同时,对于风电直流送出系统,送端交流电网的暂态压升还有可能传递到近区新能源场站,引起近区风电场机端电压上升,诱发新能源机组脱网,严重时甚至导致整个系统崩溃,极大威胁电网安全稳定运行<sup>[7-8]</sup>。例如,2011年4月,张北换流站近区发生BC相间短路故障,引起送端电网暂态过电压最高达1.19 p.u.,造成了17台风电机组脱网<sup>[9]</sup>。

目前,已有大量文献围绕高压直流输电送端电网暂态过电压的产生机理<sup>[6,10-14]</sup>及抑制策略<sup>[15-20]</sup>开

展了广泛研究。在产生机理方面,主要是对故障后直流系统和近区新能源机组响应特性进行了分析与梳理。在抑制策略方面,现有研究主要分为2类,一是在直流侧加装无功补偿设备、优化直流控制策略等;二是优化交流侧新能源机组故障穿越特性。然而,不同故障引起的送端电网暂态过电压产生机理、呈现特征有何区别,暂态过电压产生机理、影响因素的差异性是否会影响抑制策略的效果或适用性,现有暂态过电压抑制策略应该如何细分以及各有什么优缺点,这些问题目前尚未进行很好地梳理归纳。因而,有必要梳理明确不同故障下暂态过电压产生机理并对比分析其异同;同时,系统归纳现有抑制策略并剖析其优缺点,为提出新的抑制策略提供参考。

鉴于此,本文系统梳理不同故障下高压直流输电送端电网暂态过电压产生机理的异同,明确暂态过电压的影响因素;归纳总结暂态过电压的抑制措施及其优缺点。最后,针对现有研究尚存的不足,提出亟须解决的关键问题,并为今后的研究工作提出相应的研究思路。高压直流输电送端电网暂态过电压场景如图1所示。

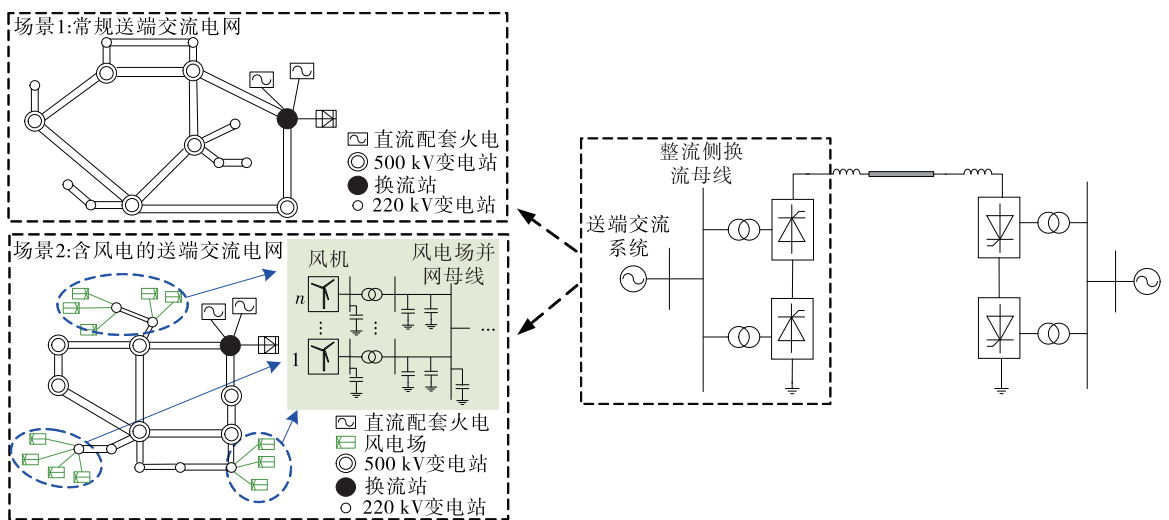


图1 高压直流输电送端电网暂态过电压场景

Figure 1 Schematic diagram of transient overvoltage scene diagram of high voltage direct current transmission sending power grid

## 1 直流送端暂态过电压产生机理

高压直流输电换流过程消耗的无功功率值为传

输的有功功率值的40%~60%,故换流站安装有大量交流滤波器组进行无功的就地补偿<sup>[21-22]</sup>。高压直流输电系统整流站无功交换如图2所示, $Q_{dr}$ 为整流站消耗的无功, $Q_{ac}$ 为送端电网输出的无功, $Q_{cr}$ 为

整流站交流滤波器发出的无功。

当高压直流输电系统正常运行时, 送端交流与整流站保持无功平衡<sup>[23]</sup>, 满足:

$$Q_{dr} = Q_{ac} + Q_{cr} \quad (1)$$

其中, 整流站消耗的无功<sup>[17]</sup>可表示为

$$Q_{dr} = P_d \frac{\sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + \mu) + 2\mu}{\cos 2\alpha - \cos 2(\alpha + \mu)} \quad (2)$$

式中  $P_d$  为直流输电系统输送的有功功率;  $\alpha$ 、 $\mu$  分别为整流站的触发角、换相重叠角。

滤波器发出的无功<sup>[16]</sup>可表示为

$$Q_{cr} = U_{Lr}^2 Q_{crN} \quad (3)$$

式中  $U_{Lr}$  为整流侧交流母线电压;  $Q_{crN}$  为交流滤波器单相无功补偿容量。

正常运行时整流站消耗的无功功率主要由交流滤波器提供, 送端交流与直流的无功交换量  $Q_{ac}$  可近似为 0<sup>[17,24]</sup>。

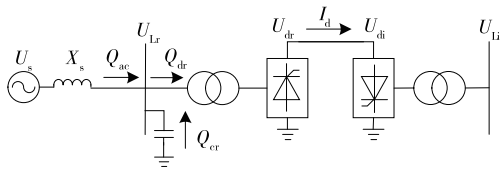


图 2 高压直流输电系统整流站无功交换

Figure 2 Schematic diagram of reactive power exchange in rectifier station of HVDC transmission system

当系统发生换相失败、直流闭锁或近区交流短路故障时, 受制于不同故障条件下高压直流输电系统控制响应特性、电气量演变规律的差异, 不同故障工况下高压直流输电送端电网暂态过电压的产生机理、形态特征不尽相同。为明确不同故障导致的暂态过电压的产生机理, 给抑制措施提出奠定基础, 本文从暂态过电压的致因因素出发, 将暂态过电压问题分成 3 类。

### 1.1 换相失败引起暂态过电压机理

为了厘清换相失败引起暂态过电压的机理, 现有研究均是暂态过电压的产生过程分阶段进行分析, 目前典型的划分方式为直流侧短路、直流电流降低以及直流电流逐渐恢复这 3 个阶段, 具体如下<sup>[25-26]</sup>。

1) 直流侧短路阶段。换相失败导致逆变侧形成旁通, 直流侧短路, 直流电流迅速增加, 导致整流器无功消耗迅速增大, 将从送端交流系统吸收大量无

功, 从而造成送端交流电网电压降低。

2) 直流电流降低阶段。在低压限流控制环节 (voltage dependent current order limiter, VDCOL) 的作用下, 整流侧触发角迅速增大, 直流电流迅速减小, 甚至下降到零。此时, 整流器消耗的无功将迅速减小, 但整流站交流滤波器仍在运行, 导致整流站无功过剩, 向送端交流系统馈入大量无功, 送端交流电网出现暂态过电压。

3) 直流电流逐渐恢复阶段。在直流控制系统作用下, 整流侧触发角逐渐减小, 直流功率逐渐恢复至故障前功率, 整流器消耗的无功也逐渐增长至故障前的水平, 整流站与送端交流系统无功交换逐渐平衡。

近年来, 随着新能源并网规模的不断增加, 对于风电直流送出系统, 送端电网暂态过电压的产生还与送端交流侧风电机组的暂态行为密切相关。具体来说可以分为以下两类。

① 风机具备低电压穿越能力。在直流侧短路阶段, 送端电网电压降低使得风机机端电压低于低穿越阈值时 (典型值为 0.9 p.u.), 风机将进入低电压穿越过程。此时, 风电机组工作于以无功功率优先的控制模式, 并将根据并网点电压跌落幅度, 在最大允许电流范围内尽量向系统注入无功功率, 以支撑并网点电压。然而, 囿于风机低电压穿越控制无功输出延时, 风电机组将相当于一个无功源, 向送端交流电网馈入无功, 该部分无功将与在直流电流降低阶段滤波器馈入的盈余无功叠加, 导致送端交流电网暂态电压进一步升高<sup>[27-29]</sup>。

② 风机不具备低电压穿越能力。不具备低电压穿越能力的风机在直流侧短路阶段, 机端电压低于阈值时将发生脱网; 风机脱网后外送功率将减小, 但新能源场站内无功补偿装置因不具备自投切功能而将继续挂网运行, 使得送端交流电网出现无功功率盈余, 此部分无功与直流电流降低阶段滤波器馈入的盈余无功叠加而抬高电压。随着送端交流电网电压不断抬升, 当风机机端暂态电压超过风机保护控制的阈值, 会造成风电机组高压脱网; 与低压脱网类似, 高压脱网后新能源场站内继续挂网运行的无功补偿装置可能会进一步抬高送端交流电网暂态过电压, 从而引起大规模的脱网事故, 威胁系统安全稳定运行<sup>[30]</sup>。

## 1.2 直流闭锁引起的暂态过电压机理

不同于换相失败,直流闭锁引起的暂态过电压具有短时跃升的特点,其机理分析目前主要从换流站无功交互演变规律和交流电源暂态特性变化两方面展开。

一方面,当交直流系统发生较为严重的故障时,保护系统将向换流站发出紧急停机命令,同时发出跳换流变压器进线开关的指令,随后整流站进行快速移相,触发角迅速增大,使整流站处于逆变状态,以关断直流电流<sup>[31]</sup>。根据式(2)可知,闭锁后由于整流侧触发角的移相过程非常迅速,直流有功功率迅速减小,整流站消耗的无功功率也迅速降低。由于交流滤波器及电容器组投切策略速动性不足,切除延时超过 100 ms<sup>[17]</sup>,将造成大量盈余无功馈入送端交流系统,引起整流站换流母线处产生严重的暂态过电压<sup>[32]</sup>;加之滤波器发出的无功功率与电压的平方成正比,换流母线电压的升高又使得滤波器发出更多的无功功率,从而进一步加剧暂态过电压<sup>[33]</sup>。

另一方面,由于直流闭锁后直流电流迅速减小至 0,该过程对于送端交流电网而言类似于甩负荷。当交流电网甩负荷时,经过发电机等值电抗和变压器电抗所产生的电压降迅速降低,但由于发电机惯性,励磁绕组产生的磁链不能在短时间内突变,故发电机电势将保持故障前状态,使得整流母线电压在短时间内迅速升高至发电机电势。可见,交流系统甩负荷特性引起的暂态压升将与前述滤波器速动性不足造成的暂态压升相叠加,形成严重的暂态过电压<sup>[17]</sup>。

## 1.3 送端近区交流故障引起的暂态过电压机理

送端近区交流故障是指在整流站近区发生的短路故障。与换相失败类似,近区交流故障引起的暂态电压同样呈现“先低后高”的特点。主要区别在于,当送端近区发生交流故障,特别是三相短路故障时,因故障点与整流站换流母线的电气距离较近,故障点电压的迅速降低将使整流站换流母线电压显著低于换相失败引起的整流站换流母线电压跌落。

对于近区交流故障引起暂态过电压的机理,目前主要是根据直流系统动态响应<sup>[27]</sup>进行分析:当整流站近区发生交流短路故障后,整流站近区电压迅

速降低,直流电流迅速减小;而当清除短路故障后,直流电流因受限于低压限流环节的工作特性而不能迅速恢复,此时滤波器发出的大量盈余无功功率可能会造成整流站及近区暂态过电压<sup>[27]</sup>。

此外,对于风电直流送出系统,类似于换相失败引起的暂态过电压,近区交流故障引起的换流母线电压跌落将使得周围大量风电机组进入低压穿越状态或脱网,导致盈余的无功馈入送端交流电网,从而引起整流母线暂态压升<sup>[30]</sup>。但与换相失败不同的是,若近区交流短路引起整流母线电压跌落幅度过大,甚至使得风机侧母线电压低于阈值(典型值为 0.2 p.u.),此时尽管低电压穿越期间风机机端电压很低,但风机出力受限于电压过低而无法增发,风机无功出力反而很小,对暂态过电压的影响轻微<sup>[27]</sup>。

## 1.4 暂态过电压的影响因素

厘清各因素对暂态过电压的影响机制,有助于为暂态过电压抑制策略的提出提供理论依据。因此,基于前述暂态过电压产生过程的分析,对现有研究中暂态过电压影响因素进行梳理,具体包括送端交流系统强度、直流运行工况、风电场类型这 3 个方面。

### 1) 送端交流系统强度。

目前广泛采用短路比  $S_{CR}$  来衡量送端交流系统强度<sup>[33]</sup>:

$$S_{CR} = \frac{S_c}{P_{dN}} \quad (4)$$

式中  $P_{dN}$  为直流系统额定输送功率; $S_c$  为整流侧换流母线短路容量<sup>[34]</sup>,可表示为

$$S_c = \frac{3U_s^2}{X_s} \quad (5)$$

式中  $X_s$ 、 $U_s$  分别为送端交流系统等值电抗、电势。

根据交直流短路容量及稳态传输功率对送端交流系统等值,考虑暂态过程中换流站剩余无功容量及其补偿容量随电压升高的特性,可推导出整流母线的暂态电压<sup>[11,34-35]</sup>:

$$U_{Lr} = \frac{U_{Lr0}^2 U_s - U_{Lr0} U_s \sqrt{U_{Lr0}^2 - 4Q_{bcp} X_s}}{2Q_{bcp} X_s} \quad (6)$$

式中  $U_{Lr0}$  为稳态时整流母线电压; $Q_{bcp}$  为整流站盈余的无功。

结合式(4)~(6),可推导出整流母线电压与短



路比的关系为

$$U_{Lr} = \frac{U_s - U_s \sqrt{1 - \frac{12Q_{bcp}}{P_{dN} S_{CR}}}}{\frac{6Q_{bcp}}{P_{dN} S_{CR}}} \quad (7)$$

以整流站双极闭锁时  $Q_{bcp}/P_{dN}=0.17$  为例<sup>[11]</sup>, 取  $U_s=1$  p.u., 得到送端整流母线电压与短路比关系如图 3 所示。由式(7)和图 3 可知, 暂态电压与系统强度呈负相关关系, 系统越强, 暂态电压幅值越低; 同时, 根据式(4)~(7)可知, 系统短路容量、无功剩余量、直流传输功率以及送端交流系统等值电抗、电势等均将影响暂态过电压的幅值水平。直流传输功率越大, 短路比越小, 故障后换流母线处无功盈余也越大, 引起的暂态电压越高。

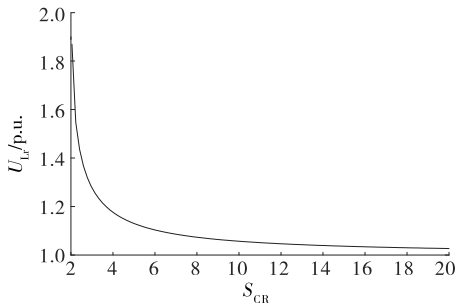


图 3 SCR 与暂态电压关系

Figure 3 Relationship between SCR and transient voltage

文献[17]指出越强的交流系统受到扰动后的过电压程度越低。文献[25, 35-37]则对比了不同系统输送功率情况下的暂态过电压幅值大小, 指出直流传输功率与暂态过电压呈正相关关系。

## 2) 直流运行工况。

当直流运行于无功损耗大幅增加的非典型工况(金属—大地模式互相转换、直流降压运行等)时, 投入的交流滤波器组明显增加。在此种工况下, 直流如果发生故障, 则交流滤波器组投切速动性不足将会引起高于常规工况的送端电网暂态过电压问题。2014年1月, 某直流在进行单极金属回线转大地回线过程中, 因直流内部故障保护动作闭锁, 送端换流母线暂态过电压最高升至1.26 p.u.<sup>[38]</sup>。

## 3) 风电场类型。

对于风电直流送出系统, 风电机组的类型、故障穿越能力、汇集方式等均会对送端交流电网暂态过电压, 特别是机端电压和风电场并网母线电压产生

一定的影响。

① 风电机组类型。与双馈风电机组相比, 永磁直驱同步风电机组的暂态过电压问题更为严重。原因在于双馈风机部分通过旋转电机与电网相连, 而直驱风机为全电力电子元件并网, 能够更加直接、快速地感受系统的扰动<sup>[39]</sup>。文献[40]以±500 kV 雁回直流为对象, 通过仿真对比发现, 同一直流传输功率下直驱型风电机组端暂态电压升比双馈型机端暂态电压升高 0.05~0.10 p.u.。

② 风电机组故障穿越能力。具有低电压穿越功能的机组, 其低电压穿越区风电系统的无功输出越大, 恢复区有功恢复速率越慢, 送端交流电网暂态电压升高<sup>[28]</sup>。对于具有高电压穿越功能的风电机组, 在高电压穿越期间能够吸收无功, 风机机端暂态过电压幅值相比于不具备高电压穿越功能的风机显著降低<sup>[25]</sup>。

③ 风电汇集方式。新能源集中汇集时的并网点和整流侧换流母线处暂态过电压高于分散汇集时的暂态过电压<sup>[13]</sup>。文献[41]通过搭建仿真模型, 对比分析了新能源集中汇集与分散汇集时暂态过电压的情况, 结果表明, 集中汇集比分散汇集时的暂态过电压约高 0.05 p.u.。

## 1.5 小结

对比分析了换相失败、直流闭锁及近区交流故障 3 种典型工况下送端电网暂态过电压的产生机理, 并梳理了暂态过电压影响因素。不同于直流闭锁故障引起的暂态过电压短时跃升, 换相失败与近区交流故障所引起的暂态过电压均具有“先低后高”的特点, 因此, 在风电直流送出系统中, 暂态电压幅值还与风机低电压穿越策略或低电压穿越脱网密切相关。暂态过电压的影响因素众多, 可分为送端交流系统强度、直流运行工况以及风电场类型 3 类, 但目前对于暂态过电压影响因素的研究较为零散, 有待厘清各个影响因素之间的耦合规律。同时, 对于风电直流送出系统中风电场对暂态过电压幅值影响的研究还较为定性, 多为将风电场简化为单个风机进行研究, 缺乏对风电场内部的具体分析。对以上暂态过电压机理及影响因素分析总结如图 4 所示。

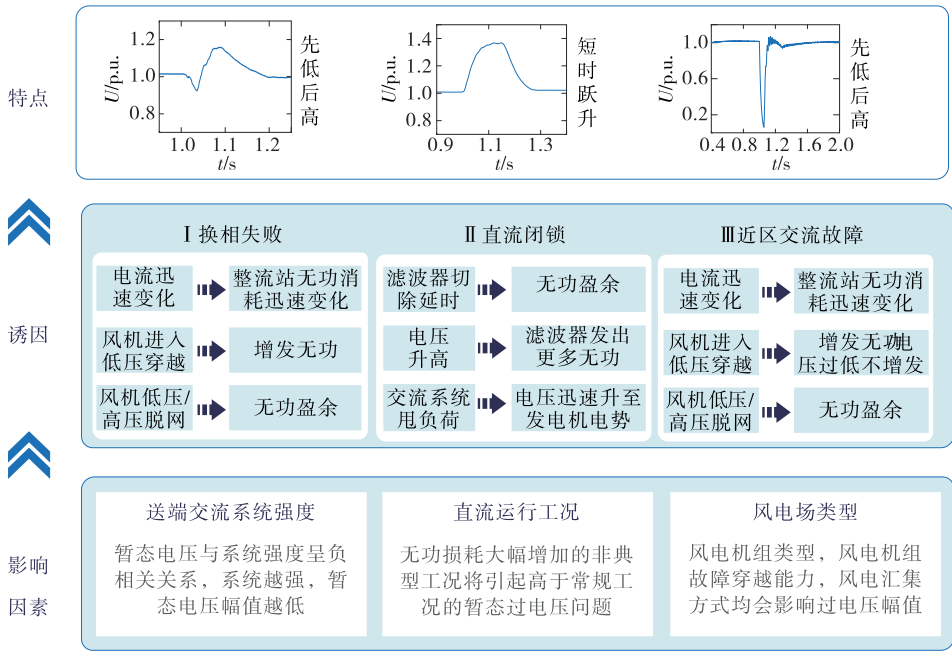


图4 暂态过电压产生机理分析

Figure 4 Analyzing schematic of transient overvoltage generation mechanism

## 2 暂态过电压的抑制措施

暂态过电压产生机理与影响因素为抑制策略的提出提供了理论依据,从而可以有针对性地设计暂态过电压抑制策略。为了梳理现有暂态过电压抑制策略及其优缺点,本文将暂态过电压的抑制策略分为以下4类。

### 2.1 优化直流控制

在暂态过电压产生过程中,直流控制直接影响了换流站的无功损耗,因此,根据换流站的无功消耗需求对其进行优化,可有效抑制暂态过电压。基于优化直流控制的暂态过电压抑制措施如图5所示。

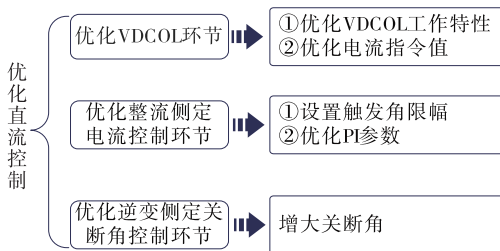


图5 基于优化直流控制的暂态过电压抑制措施

Figure 5 Transient overvoltage suppression strategies based on optimized DC control

#### 1) 优化 VDCOL 环节。

①优化 VDCOL 的工作特性。通过对 VDCOL 环节的参数进行优化,如:减小电压上限  $U_{dhigh}$ 、减小电压下限  $U_{dlow}$ 、增大最小限流电流  $I_{dmin}$ 、增大测量时间常数  $T_{ud}$ ,以及左移工作特性曲线等,如图6所示,其本质都是加快直流电流的恢复速度,使换流站消耗更多的无功,减小馈入交流系统的无功盈余,从而达到抑制过电压的目的<sup>[16,26,42-43]</sup>。

②优化电流指令值。由于电流的变化将影响整流站消耗的无功,从而影响交流母线的电压水平。因此,有文献以无功平衡为目标条件,求解电流指令值,以达到暂态过电压抑制要求,如:文献[32,44]以无功平衡为目标条件,推导出直流输电系统消耗无功与直流电流的关系,从而得到故障期间电流指令值,通过仿真表明此策略可将送端交流母线暂态过电压抑制到 1.013 p.u.以下。

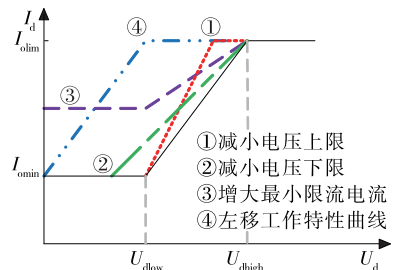


图6 优化 VDCOL 工作特性曲线

Figure 6 Optimization the VDCOL working characteristic curve

2)优化整流侧定电流控制环节。

①优化 PI 参数。对定电流控制的 PI 参数进行调节,能够改变电流控制器的调节速度,从而影响暂态过电压。文献[45]通过比例积分系数的调整,发现在一定范围内,增大积分时间常数、减小比例系数可以降低控制器的调节速度,从而抑制暂态过电压。文献[15]采用自适应和声搜索算法对 PI 参数进行优化,仿真结果表明,优化后能够有效地将整流侧交流母线电压抑制到 1.086 p.u.以下。优化定电流控制环节的 PI 参数虽然对过电压的抑制有一定的效果,但比例积分系数的改变容易影响系统的动态和稳态性能,因此在进行优化时需进行取舍。

②设置整流器触发角限幅。对触发角设置限幅能够防止直流电流过零,从而减小整流站盈余的无功,通常与其他抑制措施配合使用。如:文献[46]在整流侧定电流控制中对触发角设置限幅为 80°。

3)优化逆变侧定关断角控制环节。

在换相失败恢复的过程中,直流电流迅速减小,通过优化逆变侧关断角的算法可以调整逆变侧的直流电压,改变逆变侧和整流侧的压差从而调节直流电流,达到无功调节的目的。如:文献[47]将整流站吸收的无功对关断角进行求导,发现随着关断角的增加,整流站消耗的无功随之增加。因此,提出了一种根据控制目标增大关断角的算法,以增大整流站吸收的无功,抑制过电压。

综上,优化直流控制本质上是优化直流电流恢复速度,因加快直流电流恢复可使整流站消耗更多的无功,缓解交流母线的无功盈余压力。而直流电流与逆变器换相过程密切相关,故障后受端母线电压相对较低,加快直流电流恢复将增加逆变器换流阀换相需求,增大换相失败发生概率[48]。

2.2 加装动态无功补偿设备

动态无功补偿设备具有快速响应系统无功变化的能力,由于无功不平衡是暂态过电压的主要成因,而整流侧滤波器无功补偿缓慢,且无功补偿设备的投入可等效提高交流系统短路比,因此,在送端加装快速响应的无功补偿设备也是抑制暂态过电压的一种重要方法[49-52]。目前,关于利用无功补偿设备来抑制暂态过电压的研究主要集中在无功补偿设备的安装地点和最优补偿容量上。

1)安装地点的选择。

在换流站及近区变电站高压侧,无论调相机集

中还是分散接入,虽然可以抑制整流母线的暂态过电压,但并不能有效抑制各新能源并网点过电压,且设备成本较高。然而,在新能源汇集站低压侧分散接入小型化调相机,不仅能够全面解决送端系统的暂态过电压问题还能够进一步节约成本[41]。文献[53]对比了不同电压等级侧的调相机集中接入和分散接入的配置方案,发现在各新能源汇集站内,低压侧分层分散配置同步调相机的抑制效果明显优于将调相机接入高压侧。

2)补偿容量的优化。

已有不少文献以电压水平、无功平衡及设备成本为控制目标计算所需的无功补偿容量,如文献[15]以补偿前后交流等值电压源电压保持不变为边界条件,推导出的补偿容量由补偿前后过电压幅值决定,仿真结果发现,同步调相机的加入明显抑制了暂态过电压幅值的大小。文献[53]以调相机降低直流近区新能源暂态过电压风险及调相机动态无功补偿成本最低为优化目标,以调相机安装容量为变量,采用 PSO 智能优化算法得到最优无功配置容量。

2.3 优化风电控制

对于风电直流送出系统,风电场站控制对暂态电压的影响不容忽视。新能源电站无功补偿设备容量一般按照电站装机容量的 20%~30%配置,同时,国标要求风电机组功率因数在超前 0.95 至滞后 0.95 的范围内动态可调[54]。因而,可充分发挥新能源机组自身的无功输出能力,以抑制暂态电压。基于优化风电控制的暂态过电压抑制措施如图 7 所示。

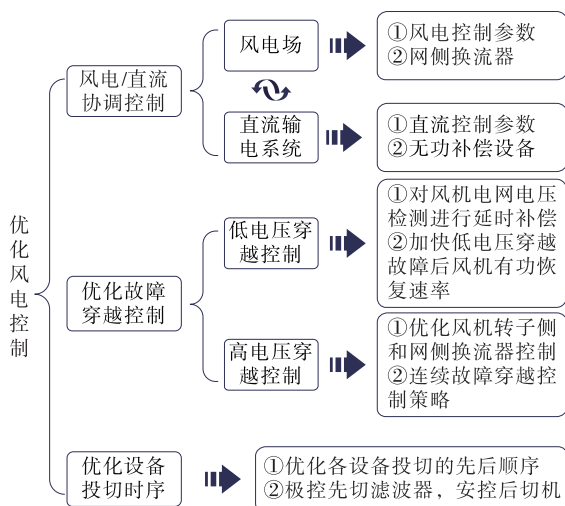


图 7 基于优化风电控制的暂态过电压抑制措施

Figure 7 Transient overvoltage suppression measures based on optimized wind power control



### 1) 风电/直流协调控制。

风电机组具备一定的无功调节能力,优化风电机组暂态期间的控制策略,能够使风电机组从直流系统吸收无功从而缓解送端交流电网暂态过电压。然而,故障期间风电机组受过电压程度、机组运行工况等因素的影响,能够向系统提供的动态无功容量将有限。因此,通过与直流控制系统、已有无功补偿装置的协调优化,能够弥补风电机组动态无功补偿容量有限的不足,同时充分发挥直流控制系统对整流站无功消耗的控制能力,以最小的代价实现暂态过电压的抑制。文献[31]结合典型风电机组功率可控运行区域及直流换流站短时过载能力,在故障期间控制风电场以吸收部分无功,有效抑制了过电压。文献[55]以直流送端系统暂态过电压峰值最小为优化目标,采用改进粒子群优化算法协调优化直流和风电控制参数,将暂态过电压峰值降低到1.1 p.u.以下。文献[56-58]提出了无功补偿装置自适应投切策略与风电机组网侧变换器优化相协调的抑制策略,可将风机机端电压抑制到1.1 p.u.以下。

### 2) 优化风电机组故障穿越控制。

在优化风机低电压穿越控制方面,通常以减小低电压穿越后风电系统向交流母线输送的无功为目标。由于风电机组低电压穿越控制输出的无功有一定的延时,这部分无功将与换流站盈余的无功叠加,从而引起交流母线暂态电压进一步升高。对此,文献[59]提出了一种二阶差分控制策略来补偿风电场的功率指令延迟,能够减小过电压幅值0.33 p.u.。

此外,在风电机组低电压穿越控制期间,有功恢复的速率在一定程度上影响了系统的无功缺额,进而影响暂态电压水平,有功恢复越慢,电压越高。文献[28,39]针对风机低电压穿越过程中有功大幅下降导致无功盈余的问题,提出在低电压穿越暂态过程中尽量保持最大的有功功率,低电压穿越后加快风机的有功恢复速率,以缓解暂态过电压。

在优化风机高电压穿越控制方面,提高风电机组的高电压穿越能力,能够减小风电机组高压脱网的风险,避免风机脱网后新能源场站内继续挂网运行的无功补偿装置进一步抬升送端电网电压。高电压穿越能力的优化以充分发挥风电机组自身的无功支撑能力、故障期间为系统提供必要的无功支撑为

目的,主要通过优化风机转子侧及网侧换流器控制来实现。如:文献[60]提出在双馈风机转子侧和网侧分别附加转子电流抑制和外环电网电压控制措施,充分发挥风电机组自身的动态无功支撑能力,有效提高双馈风力发电机组的高电压穿越能力,保障风机在故障下不脱网运行;文献[61]基于现有高电压穿越控制策略多研究电压阶跃上升,而对于电压“先降后升”连续变化的场景鲜有研究的情况,提出一种改进的连续故障穿越控制策略,适用于故障期间电网电压连续变化的场景。

### 3) 优化设备投切时序。

在暂态过电压持续过程中,存在交流滤波器、电容器及风电机组等设备的投切各控制模块的动作,但由于各设备、模块时间尺度不同,不同的控制时序对暂态过电压的影响效果迥异。因而有不少文献通过优化各个环节的控制时序以缓解暂态过电压,如:文献[23]从双馈风电机组的网侧变流器约束条件出发,根据不同模块及设备动作响应时间,优化风机定子侧功率与直流母线电压控制动作、公共点动态无功补偿设备投入及换流站内滤波器切除的先后顺序,仿真结果表明,所提抑制策略能够将送端交流母线暂态过电压抑制到1.05 p.u.以下。文献[62]比较了故障过程中紧急切除火电机组、风电机组、风电与火电协调切除和风电、火电、电容器协调切机策略下系统电压稳定的效果,结果表明,风电、火电与电容器协调切除策略可在切机量最低的情况下保证暂态过电压的抑制效果;文献[63]通过协调动作时序实现极控先切滤波器,安控后切机,以避免安控早于极控切除而引起“二次压升”现象。

## 2.4 其他方法

由于暂态过电压的幅值与系统强度、直流传输功率、无功剩余量以及风电汇集方式等有关,因此,加强系统强度、合理规划直流传输功率等改善系统参数的方式也可在一定程度上抑制暂态过电压。文献[13]提出在建设新能源场站时应合理规划风电接入方式,尽量避免风电汇集线直接接入换流站,并在风电汇集地区配置一定容量的常规机组或动态无功补偿装置,提高风电汇集地区电压钳制能力。文献[64]认为在系统运行时应增发发电机稳态无功出力容量,提升内电势运行水平,利用机组无功输出维持



和增幅输出能力,从而增强电网暂态无功输出能力,提高交流电网暂态电压稳定水平。

## 2.5 小结

将现有研究中所提的暂态过电压抑制措施分为优化直流控制、加装动态无功补偿设备、优化风电控制及其他方法 4 类,对其进行了梳理。其中,优化直流控制因其主要针对直流电流的控制进行改进,而直流闭锁时直流电流已降为 0,故通常不适用于直流闭锁,且控制不当容易产生连续换相失败;加装动态无功补偿装置从无功的角度对暂态电压进行缓解,适用故障广泛,但加装设备必然导致成本抬升;优化风电控制利用新能源场站自身的无功特性对系统进行支撑,但由于新能源故障穿越能力改造成本较高,且新能源场站无功支撑能力有限,具有一定的局限性;其他方法从系统层面进行改进,不需要额外增加设备,但无功支撑能力有限。对上述 4 类抑制措施进行总结,如表 1 所示。

表 1 暂态过电压抑制措施对比

Table 1 Comparison of transient overvoltage suppression measures

抑制措施	优点	缺点	参考文献
优化直流控制	不需要额外增加设备	控制不当易产生连续换相失败;不适用于直流闭锁故障	[15-16,26,32,42-47]
加装无功补偿设备	反应灵敏、补偿容量灵活、功能多样、适用故障广泛	抬高成本;控制不当易产生反调问题	[15,41,49-53]
优化风电控制	利用新能源场站自身的无功特性进行支撑	新能源机组改造成本较高;无功支撑能力有限	[10,23,28,31,39,54-63]
其他方法	不需要额外增加设备	无功支撑能力有限	[13,64]

## 3 亟待解决的问题与研究重点

随着新能源并网容量的不断增加,暂态过电压问题越来越突出,不仅限制了直流输送能力,严重时甚至可能造成系统崩溃。为此,很多学者就高压直流送出系统暂态过电压问题开展研究,但还不够完善,存在以下问题。

1) 基于新能源经直流送出简化场景的暂态过电

压机理分析存在主观性。一方面,中国新能源送出场景多样,不同场站新能源类型、组合方式、渗透比例等各不相同,从而具有不同的输出特性。现有对于新能源经高压直流送出送端暂态过电压问题的研究多集中于风电,对于实际工程中已有的光伏、水电、风光、风光水以及风光火等送出情况研究极少。另一方面,新能源场站内结构复杂。以风电场为例,一个风电场通常有上百台风机,而大规模风电场多为分期建成,不同期投建的风机机型不同,输出特性、故障穿越能力也不尽相同。然而,现有研究通常将风电场简化为一个整体,在汇集处采用一个大容量风机进行等值,忽略了风电场内部复杂性,不能真实地反映故障过程中风电机组的输出特性对暂态过电压的影响。

2) 基于单一/部分影响因素的暂态过电压机理分析存在局限性。在暂态过电压持续过程中,直流电流、送端换流母线电压、整流站消耗的无功功率等电气量剧烈变化。电气量的剧烈变化引起直流输电系统中相应控制环节启动以维持电网稳定,同时控制环节对电气量的调节结果又反馈作用于控制环节,因此,电气量之间、电气量与控制量之间交互作用且强耦合。例如:在换相失败过程中,直流电流的激增使得整流侧电流控制环节通过调整整流侧触发角,以降低整流侧直流电压来抑制电流的迅速增长,直流电流的调节结果又输入电流控制环节进行进一步的调节;同时,直流电流的变化直接影响了整流站消耗的无功从而影响了送端交流母线暂态过电压幅值。在此控制过程中,直流电流、送端交流母线电压、整流侧触发角以及电流控制环节中的各控制量均相互作用、交互影响。然而,现有对于暂态过电压影响因素的研究较为零散,多停留于对单个因素的影响进行独立分析。

3) 基于单目标优化的暂态过电压抑制策略存在片面性。目前,研究多以过电压抑制为目标,而忽视了系统控制的过度优化可能会带来其他后果。如:通过优化 VDCOL 环节等方法,加快直流电流的恢复速度来提高整流站消耗的无功功率,而忽略了直流电流变化量与关断角大小密切相关,当电流变化量比临界的换相失败电流变化量大时,即引发连续换相失败,造成更严重的故障。再如:在优化定电流控制的 PI 参数时,改变了电流控制器的调节速度来

抑制暂态过电压而忽略了PI参数变化对系统动态和稳态性能的影响。因而,现有部分研究在实现暂态过电压抑制时也给系统稳定带来了新的问题。

针对上述高压直流输电送端电网暂态过电压研究中存在的问题,本文总结了以下可能的突破思路,以期为相关研究提供借鉴和参考。

①剖析不同新能源典型送出场景暂态过电压机理。综合考虑不同新能源组合类型、新能源渗透比例、站内新能源机组构成等因素,分析不同实际工程新能源送出场景特点,获取典型场景簇,剖析与比较不同新能源典型送出场景暂态过电压机理异同。

②揭示暂态过电压多影响因素耦合机理。在不同故障类型、故障时刻、故障严重程度等故障条件下,分析高压直流输电系统的交流系统强度、直流传输功率、风电机组故障穿越控制等因素对送端暂态过电压影响程度的量化方法。在此基础上,分析故障后不同时间范围内的关键作用因素,揭示不同影响因素的耦合规律,进而研究多暂态过电压影响因素在强耦合关联下的实用性解耦方法。

③构建多时空尺度的暂态过电压协同抑制体系。时间上关注故障发展演变时序,空间上聚焦多类设备协同抑制。以换相失败引起的暂态过电压为例,建立故障初期换相失败预防、故障发展换相失败抑制以及换相失败后暂态过电压抑制三阶段综合抑制体系;同时,综合考虑新能源机组输出特性、直流控制系统响应特性、动态无功补偿设备成本以及抑制效果等,提出多设备协调抑制的暂态过电压策略。

## 4 结语

当高压直流输电系统发生换相失败、直流闭锁或近区交流短路等故障后,送端暂态过电压问题严重。本文从引起暂态过电压的不同类型故障出发,在直流闭锁、换相失败和近区交流故障下,梳理了暂态过电压的产生机理及特点,总结了暂态过电压的影响因素。对于暂态过电压的抑制策略,本文将现有的抑制策略从优化直流控制、加装动态无功补偿设备、优化风电控制及其他方法4个方面进行了分类梳理。最后,分析了现有研究中尚存在的问题,并探讨了高压直流输电送端暂态过电压问题的后续研究重点。

## 参考文献:

- [1] 李德鑫,宗崇林,黄大为,等.大规模风电汇聚外送的区域送端电力系统两级优化调度[J].电力系统保护与控制,2021,49(11):35-44.  
LI Dexin,ZONG Chonglin,HUANG Dawei, et al. Two-level optimal dispatching of regional sending-end power system for large-scale clustering wind power transmission[J].Power System Protection and Control,2021,49(11):35-44.
- [2] 王骅,李相俊,李文启,等.分布式储能系统对特高压直流闭锁后的紧急功率支撑方法研究[J].供用电,2021,38(6):14-20.  
WANG Hua,LI Xiangjun,LI Wenqi, et al. Research on emergency power support method of distributed energy storage system after UHVDC blockage[J].Distribution & Utilization,2021,38(6):14-20.
- [3] 刘耀,赵小令,吴佳玮,等.高压直流海缆工程应用现状及展望[J].高压电器,2022,58(2):1-8.  
LIU Yao,ZHAO Xiaoling,WU Jiawei, et al. Application status and prospect of HVDC submarine cable projects [J].High Voltage Apparatus,2022,58(2):1-8.
- [4] 于强,孙华东,仲悟之,等.扎鲁特—青州特高压直流输电工程投运后东北电网的稳定特性及控制措施研究[J].电网技术,2018,42(7):2023-2029.  
YU Qiang,SUN Huadong,ZHONG Wuzhi, et al. Stability characteristics and control measures of northeast power grid integrated with Zhalute-Qingzhou UHVDC transmission project[J]. Power System Technology, 2018,42(7):2023-2029.
- [5] 孙华东,张振宇,林伟芳,等.2011年西北电网风机脱网事故分析及启示[J].电网技术,2012,36(10):76-80.  
SUN Huadong,ZHANG Zhenyu,LIN Weifang, et al. Analysis on serious wind turbine generators tripping accident in northwest China power grid in 2011 and its lessons[J].Power System Technology,2012,36(10):76-80.
- [6] 孙家豪.高压直流换相失败对送端电网电压的影响研究[D].天津:河北工业大学,2020.
- [7] 沈政委,孙华东,仲悟之,等.基于关键事件的高比例新能源电力系统故障连锁演化规律分析[J/OL].电力系统自动化:1-15[2022-09-19].https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20220918.1101.004.html.  
SHENG Zhengwei,SUN Huadong,ZHONG Wuzhi et al.Key event based analysis on evolution law of cascading failures in power system with high proportion of renewable energy[J/OL].Automation of Electric Power Systems,1-15[2022-09-19].https://kns.cnki.net/kcms/

detail/32.1180.TP.20220918.1101.004.html.

- [8] 年珩,金萧,李光辉.特高压直流换相失败对送端电网风机暂态无功特性的影响分析[J].中国电机工程学报,2020,40(13):4111-4122.  
NIAN Heng, JIN Xiao, LI Guanghui. Influence of UHVDC commutation failure on the transient reactive power characteristics of wind turbines in sending terminal grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(13): 4111-4122.
- [9] 周红婷.无功控制策略对风电汇集地区电压稳定性影响研究[D].北京:华北电力大学,2016.
- [10] 赵晋泉,朱尧靓,潘尔生,等.适用于大规模新能源接入直流送端电网的暂态压升严重性指标研究[J].南方电网技术,2020,14(12):1-9.  
ZHAO Jinquan, ZHU Yaoliang, PAN Ersheng, et al. Study on transient voltage rise severity index for the high renewable power-penetrated UHVDC sending-end power grid[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(12): 1-9.
- [11] 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 caused by HVDC block[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3059-3065.
- [12] WESSELS C, FUCHS F W. High voltage ride through with FACTS for DFIG based wind turbines[C]//13th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'09, Barcelona, Spain, 2009.
- [13] 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.
- [14] CHUNYA Y, LI F T. Reactive power control strategy for inhibiting transient overvoltage caused by commutation failure[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4764-4777.
- [15] 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, WANG 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.
- [16] 高闰国,匡洪海,周宇健,等.直流配电网电压控制策略研究综述[J].供用电,2020,37(8):54-59+75.  
GAO Runguo, KUANG Honghai, ZHOU Yujian, et al. An overview of research on voltage control strategies of DC distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(8): 54-59+75.
- [17] 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.
- [18] LIANG W, SHEN C, SUN H D, et al. Overvoltage mechanism and suppression method for LCC-HVDC rectifier station caused by sending end AC faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37: 1-4.
- [19] 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.
- [20] 张寒.高比例新能源经直流送出系统的建模及暂态过电压问题研究[D].北京:华北电力大学,2021.
- [21] 李昂洋,晁璞璞,徐式蕴,等.风电经特高压直流送出系统的暂态过电压问题研究综述[J].电力自动化设备,2022,42(3):26-35.  
LI Boyang, CHAO Pupu, XU Shiyun, et al. Review on transient overvoltage issues of wind power transmission system via UHVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(3): 26-35.
- [22] 杜维柱,罗亚洲,李蕴红,等.风电汇集系统无功盈余导致暂态过电压问题的研究综述[J].中国电机工程学报,2022,42(9):3224-3239.  
DU Weizhu, LUO Yazhou, LI Yunhong, et al. Reviews of transient overvoltage problem cause by extra reactive power in large scale wind power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3224-3239.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 任冲, 柯贤波, 樊国伟, 等. 大规模风电直流送出系统过电压抑制措施及控制方案优化研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 163-174.
- REN Chong, KE Xianbo, FAN Guowei, et al. Transient voltage stabilization and control optimization for large-scale wind power UHVDC transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 163-174.
- [26] 冀肖彤. 抑制 HVDC 送端交流暂态过电压的控制策略优化[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.
- [27] 屠竞哲, 张健, 刘明松, 等. 考虑风机动态特性的大扰动暂态过电压机理分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 197-205.
- TU Jingzhe, ZHANG Jian, LIU Mingsong, et al. Mechanism analysis of transient overvoltage with large disturbance considering dynamic characteristics of wind generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 197-205.
- [28] 贾俊川, 金一丁, 赵兵, 等. 风机低电压穿越控制对系统暂态过电压的影响及优化[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 526-533.
- JIA Junchuan, JIN Yiding, ZHAO Bing, et al. Impact analysis and performance optimization of LVRT control of wind turbine on transient overvoltage of power system[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 526-533.
- [29] 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 Engineer-
- ing, 2017, 43(10): 3300-3306.
- [30] 叶希, 鲁宗相, 乔颖, 等. 大规模风电机组连锁脱网事故机理初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 11-17.
- YE Xi, LU Zongxiang, QIAO Yin, et al. A primary analysis on mechanism of large scale cascading trip-off wind turbine generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 11-17.
- [31] 骆悦, 姚骏, 张田, 等. 大规模风电直流外送系统单极闭锁场景下送端系统协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(19): 4108-4118.
- LUO Yue, YAO Jun, ZHANG Tian, et al. Coordinated control strategy of large-scale wind power generation sending system under mono-polar block fault[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(19): 4108-4118.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 孙家豪, 王笑雪, 李光辉, 等. 换相失败引起送端电网过电压的定量计算及影响因素[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(12): 62-68.
- SUN Jiahao, WANG Xiaoxue, LI Guanghui, et al. Quantitative calculation and influencing factors of overvoltage of sending-side system caused by commutation failure[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(12): 62-68.
- [35] CAO Z H, LI X, YAO R H, et al. Calculation method of transient overvoltage of sending-side grid caused by commutation failure[C]// IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Beijing, China, 2019.
- [36] 尹纯亚, 李凤婷, 陈伟伟, 等. 单极闭锁引起直流健全极换相失败分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 114-119+132.
- YIN Chunya, LI Fengting, CHEN Weiwei, et al. Com-



- mutation failure risk analysis of sound pole caused by dc monopole blocking[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 114-119+132.
- [37] 杨楠, 崔伟, 王智伟, 等. 含风电特高压直流系统单极接地故障暂态特性研究[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 142-149+157.  
YANG Nan, CUI Wei, WANG Zhiwei, et al. Research on transient characteristics of monopolar grounding fault for wind power integrated UHVDC [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 142-149+157.
- [38] 贺静波, 万磊, 霍超, 等. 高压直流输电非典型工况下过电压异常风险分析[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3459-3463.  
HE Jingbo, WAN Lei, HUO Chao, et al. Abnormal over-voltage risk analysis of HVDC transmission on atypical conditions[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3459-3463.
- [39] 王熙纯, 刘纯, 林伟芳, 等. 风机故障穿越特性对大规模风电直流外送系统暂态过电压的影响及参数优化[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4612-4621.  
WANG Xichun, LIU Chun, LIN Weifang, et al. Influence of wind turbine fault ride-through characteristics on transient overvoltage of large-scale wind power DC transmission systems and parameter optimization[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4612-4621.
- [40] 王小昂, 南晓强, 张谦. 雁淮直流过渡阶段送端低电压及暂态过电压问题研究[J]. 山西电力, 2020(1): 7-10.  
WANG Xiaoang, NAN Xiaoqiang, ZHANG Qian, et al. Research on low voltage problem and transient overvoltage of Yanhuai UHVDC sending end at transition stage[J]. Shanxi Electric Power, 2020(1): 7-10.
- [41] 索之闻, 刘建琴, 蒋维勇, 等. 大规模新能源直流外送系统调相机配置研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 124-129.  
SUO Zhiwen, LIU Jianqin, JIANG Weiyong, et al. Research on synchronous condenser configuration of large-scale renewable energy DC transmission system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 124-129.
- [42] 马为民, 蒲莹, 宫勋. 适应高比例新能源电源外送的特高压直流控制器[J/OL]. 电网技术: 1-7 [2022-09-16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20220915.1303.002.html>.  
MA Weimin, PU Ying, GONG Xun. UHVDC current controller for high proportional new energy transmission[J/OL]. Power System Technology, 1-7 [2022-09-16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20220915.1303.002.html>.
- [43] XUE A C, YUE L, ZHANG J H, et al. A new quantitative analysis method for overvoltage in sending end electric power system with UHVDC[J]. IEEE Access, 2020, 8: 145898-145908.
- [44] 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.
- [45] 崔洁豪. 交直流电网暂态电压特性评估和控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- [46] 张朝峰, 张伟晨, 饶宇飞, 等. 一种抑制多馈入特高压直流换相失败的投旁通控制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(6): 56-65.  
ZHANG Chaofeng, ZHANG Weichen, RAO Yufei, et al. A bypass pair control strategy for commutation failure mitigation in multi-infeed DC system[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(6): 56-65.
- [47] 滕予非, 汤涌, 张鹏, 等. 基于直流输电无功控制的多直流馈出电网交流系统过电压最优抑制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 3846-3853.  
TENG Yufei, TANG Yong, ZHANG Peng, et al. An optimum strategy for suppressing AC overvoltage in systems with multiple HVDC links based on HVDC reactive power control[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3846-3853.
- [48] 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.
- [49] ZHENG Z X, REN J, XIAO X Y, 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.
- [50] 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.
- [51] 张玉健. 交直流混联系统过电压机理分析与抑制措施[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
- [52] ZHANG S, QIN X H, ZHU B W, et al. An ESS-based approach for mitigation of REGs temporary overvoltage caused by UHVDC commutation failure [C]// *IEEE Sustainable Power and Energy Conference; Energy Transition and Energy Internet (ISPEC)*, Chengdu, China, 2020.
- [53] 赵梦阳. 抑制直流扰动下风电场暂态过电压的调相机配置方法研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2021.
- [54] 马进, 赵大伟, 钱敏慧, 等. 大规模新能源接入弱同步支撑直流送端电网的运行控制技术综述[J]. *电网技术*, 2017, 41(10): 3112-3120.
- MA Jin, ZHAO Dawei, QIAN Minhui, et al. Reviews of control technologies of large-scale renewable energy connected to weakly-synchronized sending-end DC power grid[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(10): 3112-3120.
- [55] 陈厚合, 鲁华威, 王长江, 等. 抑制直流送端系统暂态过电压的直流和风电控制参数协调优化[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(10): 46-55.
- CHEN Houhe, LU Huawei, WANG Changjiang, et al. Coordinated optimization of HVDC and wind power control parameters for mitigating transient overvoltage on HVDC sending-side system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(10): 46-55.
- [56] 杨硕, 王伟胜, 刘纯, 等. 风电汇集系统暂态电压安全分析及其控制策略[J]. *高电压技术*, 2017, 43(6): 2080-2087.
- YANG Shuo, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Dynamic voltage security analysis and control strategy for wind power centralized system[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(6): 2080-2087.
- [57] 吕清洁, 徐政, 李晖, 等. 动态无功补偿对风电场暂态电压的影响及控制策略[J]. *电力建设*, 2015, 36(8): 122-129.
- LÜ Qingjie, XU Zheng, LI Hui, et al. Effects of dynamic reactive power compensation on wind farm transient voltage and its control strategy research[J]. *Electric Power Construction*, 2015, 36(8): 122-129.
- [58] 王伟, 徐殿国, 王琦, 等. 大规模并网风电场的无功电压紧急控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(22): 8-14.
- WANG Wei, XU Dianguo, WANG Qi, et al. Reactive voltage emergency control strategy for large-scale wind farm integration[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(22): 8-14.
- [59] JIN X, NIAN H. Overvoltage suppression strategy for sending AC grid with high penetration of wind power in the LCC-HVdc system under commutation failure [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(9): 10265-10277.
- [60] 邹乐, 吴学光, 寇龙泽, 等. 电网电压对称骤升下双馈风力发电系统的改进控制策略研究[J]. *电网技术*, 2020, 44(4): 1360-1367.
- ZOU Le, WU Xueguang, KOU Longze, et al. Improved control strategy for a double-fed generation system under grid voltage symmetric swell[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(4): 1360-1367.
- [61] ZHANG T, YAO J, SUN P, 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.
- [62] 丁明, 张炎, 韩平平, 等. 大规模风火电送端系统直流闭锁紧急控制策略研究[J]. *太阳能学报*, 2019, 40(7): 1928-1937.
- DING Ming, ZHANG Yan, HAN Pingping, et al. Research of urgent control strategy under HVDC block for wind-thermal-bundled sending end system[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2019, 40(7): 1928-1937.
- [63] 罗煦之, 张健, 贺静波, 等. 计及暂态过电压约束的直流闭锁安控与极控协调控制研究[J]. *电网技术*, 2015, 39(9): 2526-2531.
- LUO Xuzhi, ZHANG Jian, HE Jingbo, et al. Coordinated control research of stability control system and pole control system under DC system block considering transient overvoltage[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(9): 2526-2531.
- [64] 郑超, 汤涌, 马世英, 等. 网源稳态调压对暂态无功支撑能力的影响研究[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(1): 115-122.
- ZHENG Chao, TANG Yong, MA Shiyong, et al. Study on the influence of steady-state voltage regulation schemes on transient reactive power supporting capability[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(1): 115-122.