

交直流混联系统故障暂态过电压研究与仿真分析

李豹*, 赖超阳, 吕星东, 梁祎晨, 罗盼盼

中国矿业大学(北京)机械与电气工程学院, 北京

收稿日期: 2024年5月29日; 录用日期: 2024年6月18日; 发布日期: 2024年6月26日

摘要

针对交直流混联电路发生直流闭锁, 换相失败和交流故障时对送端交流电压产生什么影响的问题, 采用了pscap和pscad仿真的方法进行模拟, 发现在直流双极闭锁故障下, 送端交流电压不会下降, 而是呈现过电压; 在换相失败故障下, 送端交流系统电压非常迅速地先下降, 后恢复, 直至产生过电压, 最后恢复稳态; 在发生交流故障后, 送端交流电压先骤降, 后恢复至稳态。

关键词

交直流混联电路暂态电压, 直流闭锁, 直流换相失败后闭锁, 交流故障, 仿真与分析

Research and Simulation Analysis of Transient Overvoltage Caused by Faults in AC-DC Hybrid Systems

Bao Li*, Chaoyang Lai, Xingdong Lyu, Yichen Liang, Panpan Luo

School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing

Received: May 29th, 2024; accepted: Jun. 18th, 2024; published: Jun. 26th, 2024

Abstract

In order to solve the problem of the influence of DC blocking, commutation failure and AC failure on the AC voltage at the sending end in the AC-DC hybrid circuit, pscap and pscad simulation me-

*通讯作者。

文章引用: 李豹, 赖超阳, 吕星东, 梁祎晨, 罗盼盼. 交直流混联系统故障暂态过电压研究与仿真分析[J]. 智能电网, 2024, 14(1): 1-10. DOI: 10.12677/sg.2024.141001

thods are used to simulate the problem. It is found that under the DC bipolar blocking fault, the AC voltage at the sending end does not drop, but presents overvoltage. In the case of commutation failure, the voltage of the AC system at the sending end drops first, then recovers very quickly until overvoltage is generated, and finally returns to steady state. After an AC fault occurs, the AC voltage at the sending end first drops sharply and then returns to steady state.

Keywords

Transient Voltage of AC-DC Hybrid Circuit, DC Blocking, DC Commutation Fails to Block, AC Failure, Simulation and Analysis

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着特高压直流技术的发展,我国电网已呈现交直流混联特性,尤其在新能源大基地,新能源经过交直流线路外送。交流和直流侧发生故障均会引起送端电网的电压暂态过程,导致送端电压过低或过高,进而可能引起新能源机组的脱网,然而高负荷运输的成本便会不可避免的产生一些故障,这些故障会严重影响电压的稳定性,进而制约了新能源外送电网的外送能力。而因为直流引起的过电压和交流引起的过电压并不相同,有必要通过理论及仿真实验的方式来对比分析交直流故障下暂态过电压的差异性。

近年来,交直流混联系统故障下暂态方面的研究也取得了很大的进步。首先,在文献[1]里,我们探讨了直流闭锁如何触发交流母线过电压的机制。文献[2]中,王姝彦等人针对直流故障引发的送端新能源机端过电压问题进行机理分析。文献[3]中在整流侧的母线上安装了调相机,并根据调相机的暂态无功特性来设定它的容量,这样就减少了调相机的投入容量。接着,我们将调相机和整流器的无功调控技术融为一体,基于这个,我们提出了一种由多种直流和无功设备共同配合的暂态过电压控制方案。文献[4]中以两南电网的主要失稳属性为基础,探讨了如何实施高比例的直流输电网络的安全管理。根据文献[5]的研究结果,短路比、剩余无功容量等因素都对暂态过电压有着显著的作用。在文献[6]里,使用 PSASP 模拟软件来分析一个电力系统的暂态性质,以便在系统遭受干扰时识别出故障,例如短路问题,负荷切换问题等。观察发电机的功角、电流、功率和电压等参数在时间推移过程中是否保持在特定的波动区间。然而,在高电压情况下,文献[7]中得出高压直流输电系统的交流短路故障、直流闭锁、换相失败等因素会导致送端电网产生暂态过电压问题,影响系统的输电能力、使系统安全运行不稳定。文献[8]中得出稳定极限限制了特高压交流输电线路的输电能力,想提高其稳定极限需采用串联补偿,从而有效提高线路的系统的稳定性和输电能力。由于新能源在交直流领域的份额不断上升,研究[9]指出,当 HVDC 被广泛应用于大规模的新能源供应时,导致新能源大规模脱网的主要原因就是由于交直流系统的故障导致的输入端的短时间过电压升高,这将严重影响到电力系统的平稳和安全。文献[10]中制作了高比例新能源经直流送出系统的模型,并研究了电力系统暂态过电压的问题。实现了含高比例新能源的某某送端电网等值简化。文献[11]中得出电力系统中,当低电压过程结束后,系统产生无功盈余造成暂态过电压的原因是功率源的容性无功电流回撤存在延时。文献[12]中研究表明风机低电压的穿越特性使得风电场成为“无功源”。文献[13]中通过分析新能源发电的调节特性与出力特性,得出高比例可再生能源接入电力系统后对

整个系统的电压稳定和暂态稳的影响机理。文献[14]中提出了新能源送端电网暂态过电压控制策略，对基于高压直流闭锁故障的研究。在文献[15]里，有一种理论框架被引入，它可以减轻新能源输电线路在与大规模的风电和太阳能电池组合之后所遭遇的压力，从而减轻新能源输电线路的暂时过电压的问题。

2. 交直流混联系统暂态电压机理分析

2.1. 交流侧发生三相短路故障导致暂态过电压

根据现有的研究，我们可以得知，当交流侧出现三相短路时，换相电压会下降。通过下述公式，我们也可以得知，直流电压也会相应地下降。所以，当三相短路在交流端发生时，暂态过电压将不再过高。

$$\text{直流电压 } U = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} U_1 \cos \alpha - \frac{6}{\pi} XI$$

其中为换相电压、 α 为触发延迟角、 X 为换相电抗、 I 为直流电流。

2.2. 直流闭锁引起的暂态过电压

当特高压直流输电系统发生直流闭锁时，直流设备停止运行，导致直流系统中有功功率输送量及无功功率消耗量几乎为零。由于极控系统保持着运作状态，这就使得交流滤波器产生的所有无功功率都被输入到了交流系统中，进一步提升了送端的交流母线电压。因此，在直流闭锁出现故障时，暂态过电压可能会导致电压过高。

2.3. 换相失败引发的暂态过电压

整流器的无功功率吸收与触发角正相关。逆变器交流侧短路会导致直流线路冲击电流。触发角增大导致无功功率吸收增加，降低送端交流系统电压。在更换相位失败之后，直流电流和触发角度迅速下降，导致无功功率的吸收减少。整流站交流母线电压恢复，但无功功率增加导致过电压。直流系统换相失败会使送端母线电压在极短的时间内先降后升。

2.4. 动态无功源抑制过电压机理分析

动态无功源抑制过电压的核心在于其快速响应及双向调节的能力。

在电力系统中，过电压的发生具有突发性和不确定性。无功源必须具备快速响应的能力，才能在过电压产生时及时介入，调节系统的无功功率平衡，从而抑制过电压的幅值。这种快速响应的特性要求无功源具有高度的灵敏性和可靠性，能够在极短的时间内做出准确的判断和调节。

动态无功源还能够根据系统的实际情况，进行双向调节。当系统电压过低时，无功源能够发出无功功率，提高系统的无功功率水平，从而支撑电压；而当系统电压过高时，无功源则能够吸收无功功率，降低系统的无功功率水平，从而抑制过电压的产生。

3. 小系统暂态电压仿真分析

基于 PSCAD4.6.2 建立如图 1 所示的交直流混联小型系统建模，主要模块有 SVC，换流器 T1 和 T2，整流器，逆变器，变压器，风力发电厂，火力发电厂等。

在仿真模型中，火力发电和风力发电模块作为送端，经过两次交直流转换，通过 900 MW 的直流输电线路向另一侧输送电力。系统频率为 50 Hz，电压等级为 230 KV，交流部分功率为 475 MVA，直流部分为 900 MW。整个直流部分是基于电压源换流器的高压直流输电，即柔性直流输电。搭建好交直流混

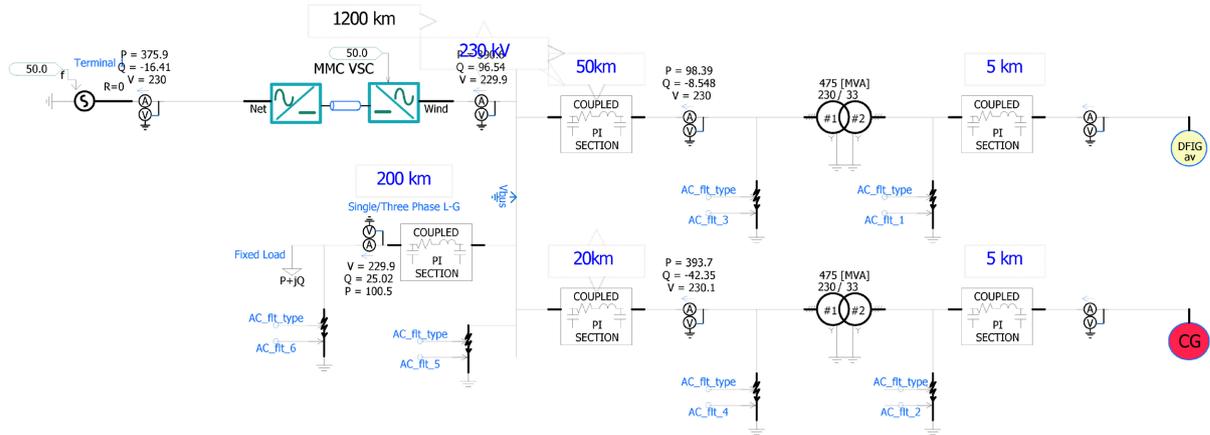


Figure 1. AC and DC hybrid small system

图 1. 交直流混联小型系统

联电路后，设置好运行时间，故障时间和故障发生时刻，在故障位置处设置相关电表，在交流线路上设置短路故障以造成交流故障，在逆变器处设置故障以造成换相失败故障，在直流线路设置短路故障以造成直流双极闭锁故障，分别测量并绘出数据。

3.1. 对直流闭锁、换相失败，交流故障下的电压波形进行仿真分析：

3.1.1. 直流闭锁

设置总仿真时间为 3 s，当系统发生直流闭锁故障时有如图 2 所示的电压波形图，横坐标是仿真时间，纵坐标是送端交流电压标幺值，其基准值为 230 KV。在 2 秒的时间点，系统出现了直流闭锁问题。在直流闭锁发生时，直流设备停止运行。由于直流功率下降，其所需的无功也随之减少，导致换流母线出现无功过剩，从而使得直流系统开始向交流系统输送无功。由于极控系统不会在闭锁信号发出后立刻切除交流滤波器，交流滤波器产生的无功功率全部注入交流系统，从而抬升了送端交流母线电压。因此，直流闭锁故障发生时，不会导致电压跌落，而是产生过电压。产生的过电压先逐渐增加，直至在 2.002 s 时，过电压达到最大，此时送端交流电压与额定电压比值为 1.02，过电压最大值为 234.6 KV，而后逐渐下降，最终恢复稳态。

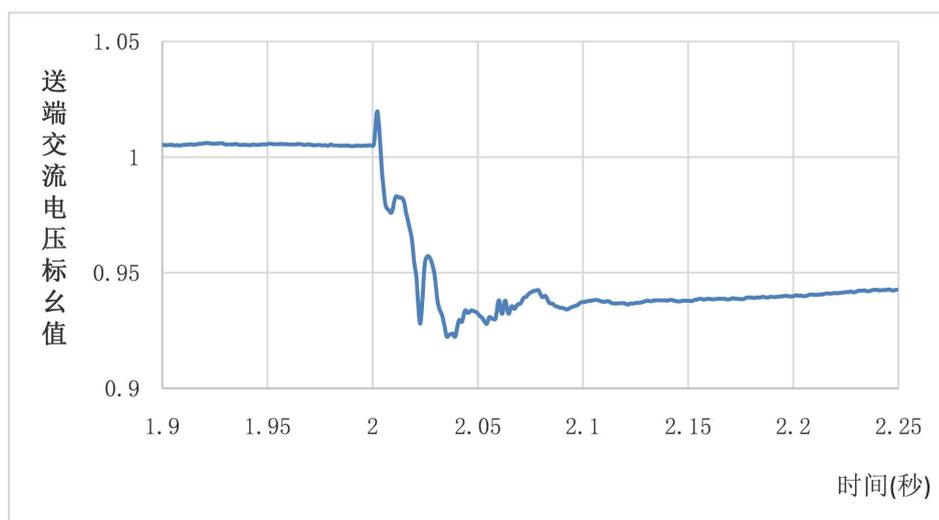


Figure 2. The AC voltage at the sending end under DC latching

图 2. 直流闭锁下的送端交流电压

3.1.2. 换相失败

系统发生换相失败故障时有如图 3 所示电压波形图，横坐标是仿真时间，纵坐标是送端交流电压标幺值，其基准值为 230 KV。当逆变器交流侧发生短路时，直流线路电流会迅速增加，整流器无功功率消耗也会随之增多，从而时送端交流电压下降，有功功率迅速降低，在换相失败故障消失后，在控制系统的作用下，直流线路电流逐渐恢复到初始水平，整流器吸收的无功功率减少，送端交流电压逐渐上升，但由于整流器、交流滤波器等设备输出的无功功率增加，导致换流器送端交流母线处出现了无功冗余，最终使得送端交流母线处产生过电压，过电压在 2.209 s 时达到最大，此时送端交流电压与额定电压比值为 1.23，过电压最大值为 282.9 KV，而后逐渐下降，最后逐渐恢复正常。在交流系统中，换流器被视作一种无功负载。当直流关闭时，换流器所吸取的无功值等同于 0，这个数值在换相失效的情况下会更少。然而，当直流关闭，由交流滤波器产生的无功会完全反馈到交流系统，这导致的无功剩余一般会超过换相失效的问题。

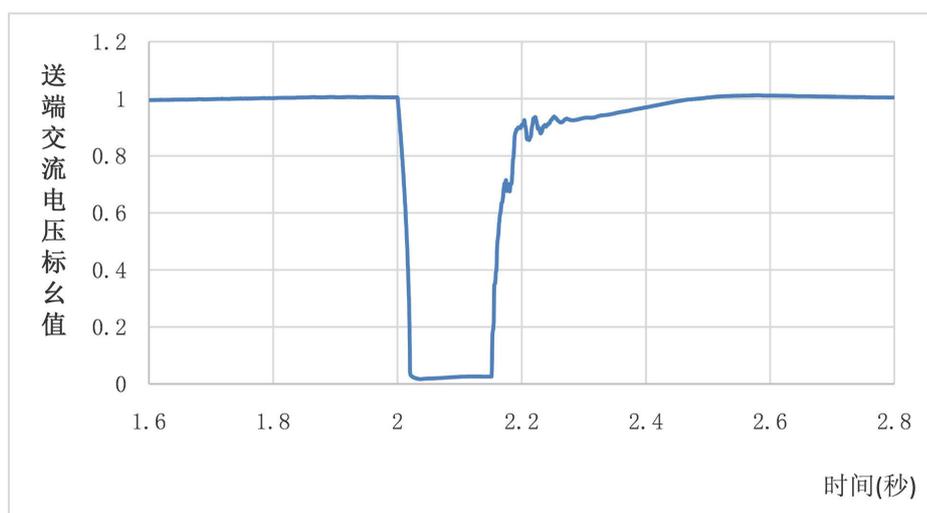


Figure 3. Bus voltage under commutation failure

图 3. 换相失败下的母线电压

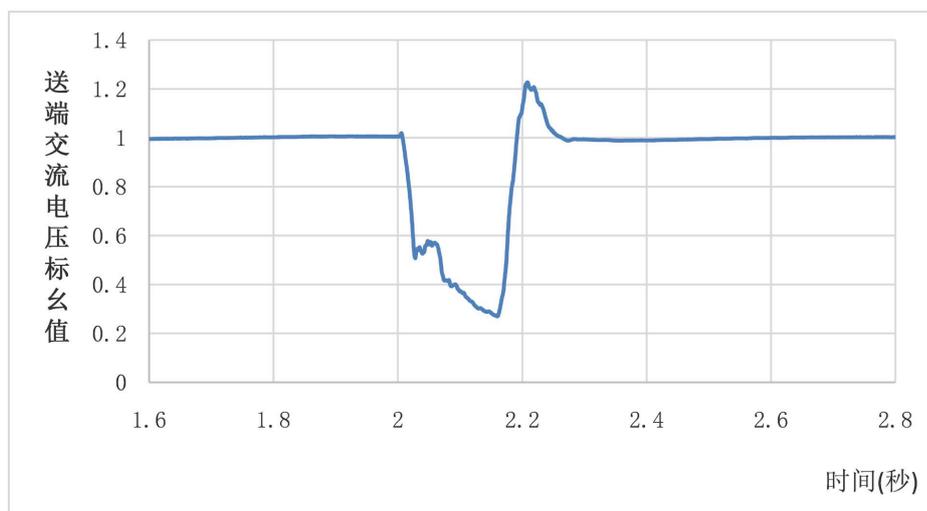


Figure 4. Bus voltage under AC fault

图 4. 交流故障下的母线电压

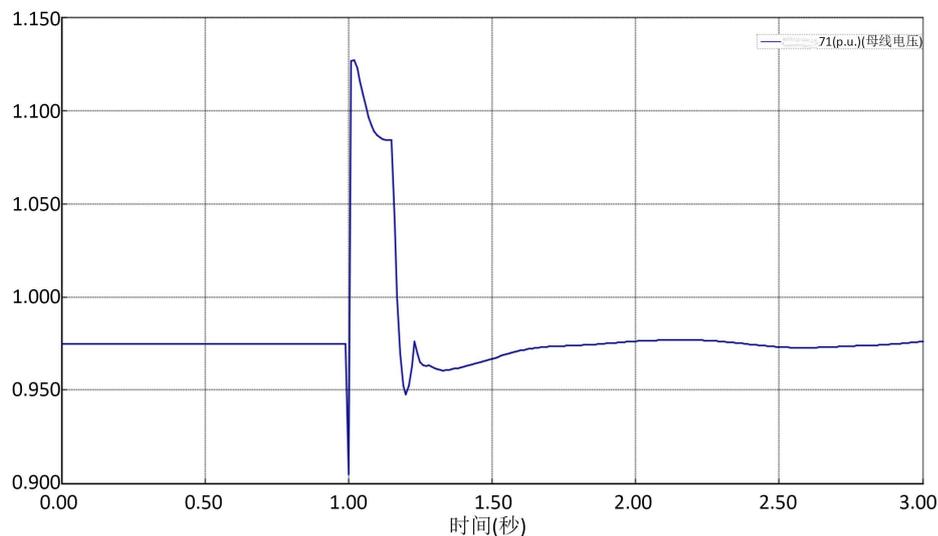


Figure 6. Bus voltage under DC latching
图 6. 直流闭锁下的母线电压

迅速增加，整流器无功功率消耗也会随之增多，从而时送端交流电压下降，有功功率迅速降低，在换相失败故障消失后，在控制系统的作用下，直流线路电流逐渐恢复到初始水平，整流器吸收的无功功率减少，送端交流电压逐渐上升，但由于整流器、交流滤波器等设备输出的无功功率增加，导致换流器送端交流母线处出现了无功冗余，最终使得送端交流母线处产生过电压，最后逐渐恢复正常。换流器对于交流系统而言是一类无功负荷，直流闭锁时换流器吸收的无功为 0，低于换相失败时吸收的无功，直流闭锁时交流滤波器产生的无功全部倒送交流系统，造成的无功盈余通常高于换相失败故障。如图，在 0.2 s 左右时发生换相失败故障时，电压在一瞬间跌落到 0.55 V 左右，然后快速上升至 1.21 V 达到过电压最大值，随后逐渐跌落至 0.95 V 后上下波动，然后再经历 2 次这样的周期后，此后便在 0.95 V 上下波动。

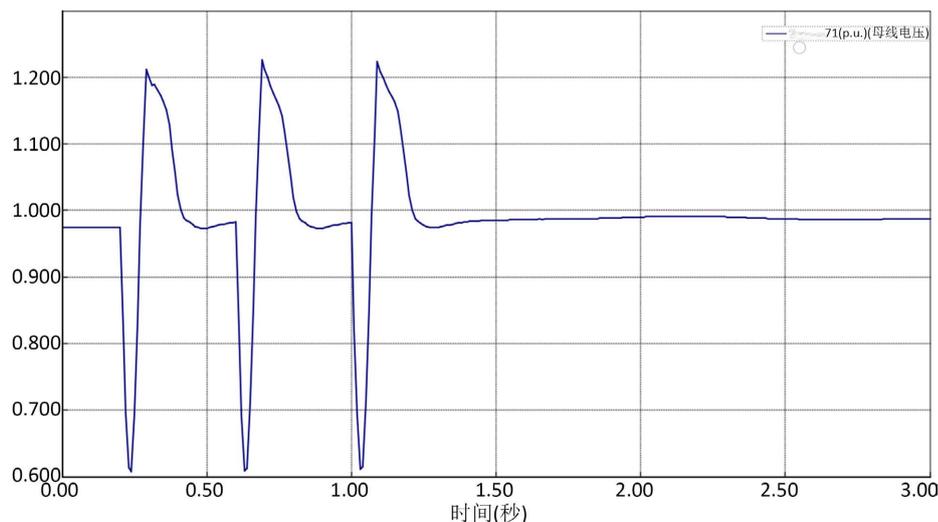


Figure 7. Bus voltage under commutation failure
图 7. 换相失败下的母线电压

4.1.3. 交流故障

当系统发生交流故障时有如图 8 所示的电压波形图。在第 1 s 发生交流故障后，无功功率增加，有功

功率迅速减少, 送端交流母线电压迅速下降, 在 SVC 等控制系统的作用下, 电压逐渐上升并恢复至稳定状态。如图, 在 1 s 时发生交流三相短路故障时, 电压在一瞬间跌落到 0.8 V 左右, 在接下来的 2 s 左右的时间中在 0.85 V 上下波动, 再在一瞬间上升至 1.07 V 达到过电压的最大值, 随后逐渐跌落至 0.95 V 后上下波动。

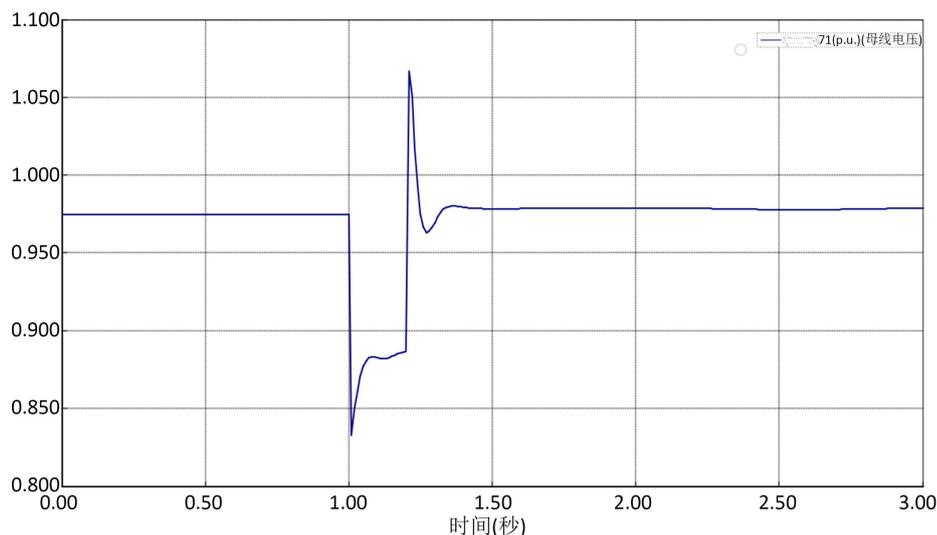


Figure 8. Bus voltage under AC fault
图 8. 交流故障下的母线电压

4.2. 调相机作用下的电压波形仿真分析

4.2.1. 直流闭锁

如图 9, 灰线为无调相机作用下的电压波形, 蓝线为有调相机作用下的电压波形, 由图可清晰知道蓝线也就是有调相机作用下的电压波形更接近 1 V, 更好地抑制了过电压。

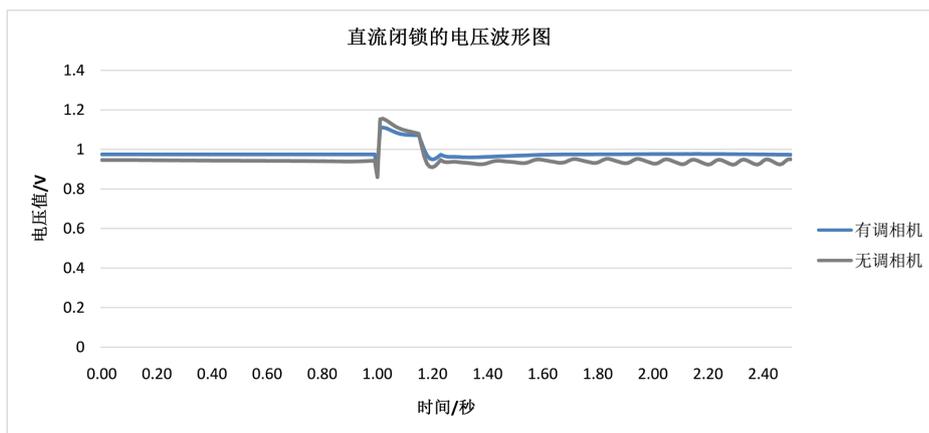


Figure 9. Comparison under DC latching
图 9. 直流闭锁下的比较

4.2.2. 换相失败

如图 10, 蓝线为无调相机作用下的电压波形, 灰线为有调相机作用下的电压波形, 由图可清晰知道灰线也就是有调相机作用下的电压波形更接近 1 V, 更好地抑制了过电压。

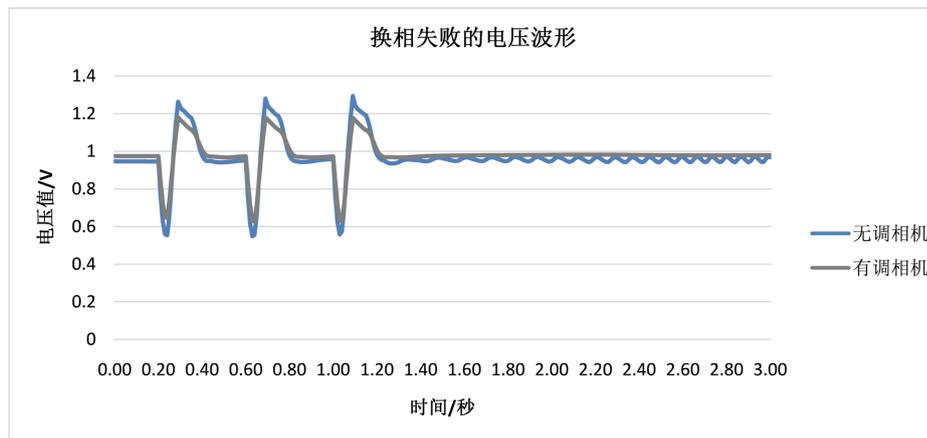


Figure 10. Comparison under commutation failure

图 10. 换相失败下的比较

4.2.3. 交流故障

如图 11，灰线为无调相机作用下的电压波形，蓝线为有调相机作用下的电压波形，由图可清晰知道蓝线也就是有调相机作用下的电压波形更接近 1 V，更好地抑制了过电压。

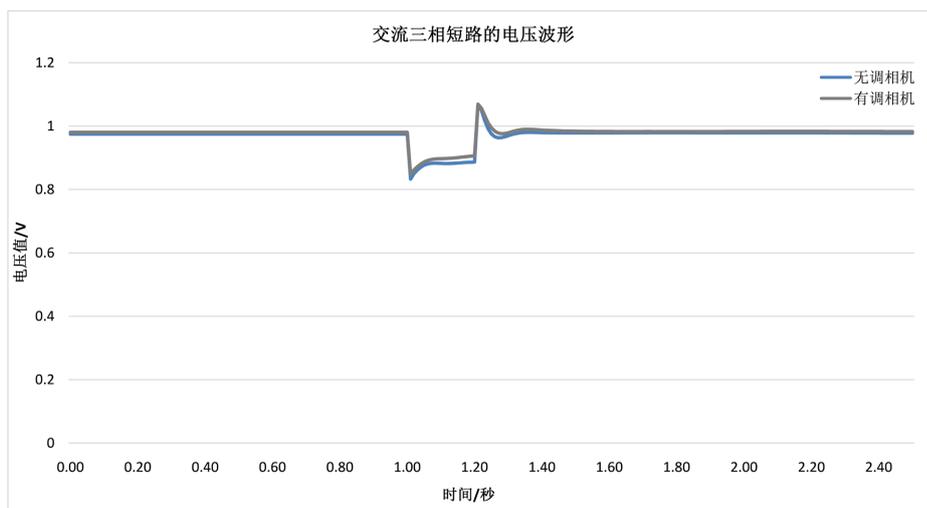


Figure 11. Comparison under AC failure

图 11. 交流故障下的比较

5. 结语

本文针对交直流混联电路，明确了直流闭锁、换相失败和交流故障对暂态电压产生影响的机理。在直流双极闭锁故障的情况下，直流系统的交流滤波器成为产生过电压的主要原因。发生换相失败故障后，整流器交流滤波器等设备输出的无功功率及新能源低电压穿越期间的功率控制特性共同导致送端交流母线处出现过电压。本研究为交直流混联小型系统故障的模拟与分析提供了新思路，具有一定理论意义。未来我们将进一步深度探索学习交直流混联小型系统的故障分析，以期对相关领域做出更大贡献。

基金项目

中央高校基本科研业务费专项资金；中国矿业大学(北京)大学生创新训练项目(202304024)。

参考文献

- [1] 焦在滨, 金吉良, 行武, 等. 交直流混联电网自适应交流过电压保护方案的研究[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2541-2547.
- [2] 王姝彦, 徐式蕴, 孙华东, 等. 高比例电力电子电力系统过电压(三): 直流故障下新能源暂时工频过电压机理[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(8): 2990-3002. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222403>
- [3] 张起瑞, 辛超山, 李凤婷, 等. 多直流协调的新能源送端地区暂态过电压抑制策略[J]. 电力工程技术, 2023(1): 98-106.
- [4] 王歆. 高比例直流外送电网异步联网的稳定特性分析与控制[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国电力科学研究院, 2018.
- [5] 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.
- [6] 徐佳琪, 吕晖. 基于 PSASP 的 36 节点电力系统暂态稳定分析[J]. 电子制作, 2021(17): 39-42.
- [7] 林圣, 兰菲燕, 刘健, 李小鹏. 高压直流输电送端电网暂态过电压机理与抑制策略综述[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 3-16.
- [8] 欧阳瑞, 周元清, 王颖, 周春明. 特高压交流线路串并联补偿暂态过电压的研究[J]. 电测与仪表, 2008, 45(8): 11-14, 20.
- [9] 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.
- [10] 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]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [11] 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): 3224-3238.
- [12] 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.
- [13] 吕哲, 葛怀畅, 郭庆来, 等. 面向受端电网暂态电压稳定的高压直流系统主动控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22): 8041-8053.
- [14] 朱丽萍. 基于高压直流闭锁故障的新能源送端电网暂态过电压控制策略[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [15] 摆世彬, 田志浩, 刘刚, 张文朝. 考虑功角稳定与暂态过电压的新能源送端电网储能系统优化配置模型[J]. 可再生能源, 2023(7): 971-977.