

# 特高压直流故障对新能源送端电网暂态过电压作用机理

路民辉<sup>1</sup>, 王维洲<sup>1</sup>, 韩旭杉<sup>1</sup>, 曾 赞<sup>2</sup>, 王佳浩<sup>2</sup>, 曹 钰<sup>2</sup>, 刘文颖<sup>2</sup>

<sup>1</sup>国网甘肃电力公司, 甘肃 兰州

<sup>2</sup>新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京

收稿日期: 2021年9月23日; 录用日期: 2021年10月8日; 发布日期: 2021年10月25日

## 摘 要

随着新能源接入电网规模的不断增加, 特高压直流外送成为其消纳的重要途径, 与此同时, 特高压直流故障造成新能源送端电网暂态过电压直接威胁新能源安全运行, 成为当前亟待解决的问题。为此, 本文以祁韶特高压直流送端电网为背景, 对特高压直流故障对新能源送端电网暂态过电压作用机理进行分析, 并提出针对暂态过电压的控制策略。首先建立新能源经直流外送等效模型, 其次对特高压直流故障对送端电网暂态过电压的作用机理进行分析, 基于此, 提出新能源送端电网暂态过电压控制策略。最后以祁韶特高压直流送端电网为背景仿真验证了控制策略的有效性。

## 关键词

特高压直流, 送端电网, 暂态过电压, 作用机理

# Mechanism of UHVDC Fault on Transient Overvoltage of New Energy Grid

Minhui Lu<sup>1</sup>, Weizhou Wang<sup>1</sup>, Xubin Han<sup>1</sup>, Yun Zeng<sup>2</sup>, Jiahao Wang<sup>2</sup>, Yu Cao<sup>2</sup>, Wenying Liu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Grid Corporation of Gansu Province, Lanzhou Gansu

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing

Received: Sep. 23<sup>rd</sup>, 2021; accepted: Oct. 8<sup>th</sup>, 2021; published: Oct. 25<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

With the continuous increase in the scale of new energy access to the power grid, UHVDC transmission becomes an important way to absorb it. Meanwhile, UHVDC faults causing transient over-

文章引用: 路民辉, 王维洲, 韩旭杉, 曾赞, 王佳浩, 曹钰, 刘文颖. 特高压直流故障对新能源送端电网暂态过电压作用机理[J]. 智能电网, 2021, 11(5): 373-382. DOI: 10.12677/sg.2021.115036

voltage in the power grid of new energy delivery directly threaten the safe operation of new energy, which has become an urgent problem to be solved at present. Therefore, based on the background of Qishao UHVDC power supply network, this paper analyzes the mechanism of UHVDC fault on the transient overvoltage of new energy power supply network, and puts forward the control strategy for the transient overvoltage. Firstly, the equivalent model of new energy through DC is established. Secondly, the mechanism of UHVDC fault on transient overvoltage of power grid is analyzed. Based on this, the control strategy of transient overvoltage of power grid of new energy is proposed. Finally, the effectiveness of the control strategy is verified by simulation of Qishao UHVDC power grid.

## Keywords

UHVDC, Transmitting Power Grid, Transient Overvoltage, Mechanism of Action

Copyright © 2021 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,为满足大规模新能源基地外送需求,我国已建成多回特高压直流外送通道,为新能源外送提供了良好条件。但由于直流送端的交流系统网架相对薄弱及部分常规电源发电容量被新能源替代,使送端电网动态无功电压支撑能力不足,暂态过电压对特高压直流送端电网安全运行带来极大风险。

直流换相失败、单双极闭锁、换流站近区交流故障等故障均会导致直流送端暂态过电压[1] [2],易造成新能源机组大规模脱网,直接限制了直流外送能力[3] [4] [5]。

由于直流稳态运行,送端整流站需要大量无功补偿来维持整流站运行,而这部分无功补偿往往难以实现直流故障期间无功的快速调节,造成大量无功盈余,继而造成暂态过电压[6] [7] [8]。但少有研究整流站与风电场两者间电压和无功的交互影响机理,且对于送端暂态过电压的分析也主要关注由交流短路故障引起的事故发展过程[9] [10] [11]。

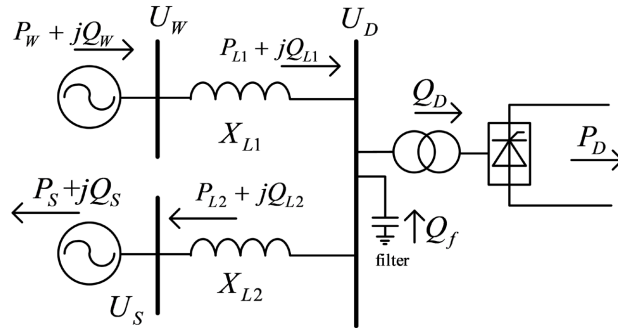
另一方面,为了确保直流故障时送端电网安全稳定运行,提升直流外送能力,扎鲁特-青州、酒泉-湖南、锡盟-泰州等在运特高压直流工程均在送、受端换流站配置了新一代调相机。调相机可以在瞬态、暂态和稳态全时间尺度提供无功补偿和电压支撑[12] [13] [14]。但调相机的都是在换流站集中安装,仅以换流站母线电压为控制目标,对送端风电场暂态电压的控制目的性不强。

因此,本文首先建立新能源经直流外送等效模型,对直流送端整流站、风电场的暂态电压交互影响机理进行理论研究;基于此,提出新能源送端电网暂态过电压控制策略,并以祁韶特高压直流送端电网为背景仿真验证了控制策略的有效性。

## 2. 新能源经直流外送等效模型

众所周知,引起直流送端暂态过电压的主要原因有直流换相失败、直流闭锁和换流站近区短路故障。为此,本文首先建立新能源直流外送送端等效模型[15],如图1所示。

图中, $U_w$ 为风电场接入母线电压; $U_D$ 为整流站交流母线电压; $P_w + jQ_w$ 为等效风电场输出功率; $P_S + jQ_S$ 为送入送端大系统的功率; $Q_f$ 为整流站滤波器补偿无功; $P_D$ 和 $Q_D$ 分别为直流消耗的有功功率和换流站所需无功功率;等效电抗 $X_{L1}$ 和 $X_{L2}$ 所在支路变压器和线路阻抗之和。



**Figure 1.** Equivalent model of new energy DC outgoing terminal  
**图 1.** 新能源直流外送送端等效模型

根据图中规定的潮流方向，可得由风电场到整流站方向有功和无功为：

$$\begin{cases} P_{L1} = P_W \\ Q_{L1} = Q_W - Q_{l1} \end{cases} \quad (1)$$

其中线路上的无功损耗为  $Q_{l1}$ ：

$$Q_{l1} = \frac{P_{L1}^2 + Q_{L1}^2}{U_D^2} X_{L1} \quad (2)$$

实际工程中，为减少换流站与系统间的无功交换，换流站所需无功补偿  $Q_D$  几乎全部由加装在换流站的滤波器和固定电容器补偿，使整流站与系统间几乎没有无功功率交换。因此可以近似的认为  $Q_D = Q_f$ 。整流站到系统方向有功和无功为：

$$\begin{cases} P_{L2} = P_{L1} - P_D \\ Q_{L2} = Q_W - Q_D - (Q_{l1} + Q_{l2}) + Q_f = Q_W - (Q_{l1} + Q_{l2}) \end{cases} \quad (3)$$

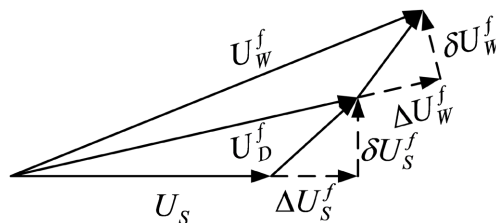
其中线路损耗无功  $Q_{l2}$  为：

$$Q_{l2} = \frac{P_{L2}^2 + Q_{L2}^2}{U_S^2} X_{L2} \quad (4)$$

发生故障后，潮流分布将发生变化如下：

$$\begin{cases} P_{L1}^f = P_{L1} + \Delta P_W^f \\ Q_{L1}^f = Q_{L1} + \Delta Q_W^f - \Delta Q_{l1}^f \\ P_{L2}^f = P_{L2} + \Delta P_W^f - \Delta P_D^f \\ Q_{L2}^f = Q_{L2} + \Delta Q_W^f + (Q_f - \Delta Q_D^f) - (\Delta Q_{l1}^f + \Delta Q_{l2}^f) \end{cases} \quad (5)$$

根据功率与电压的数量关系，故障后风电直流外送系统电压向量关系为：



**Figure 2.** Voltage vector diagram during failure  
**图 2.** 故障期间电压向量图

图2中 $\Delta U^f$ 为无功功率传输引起电压降落纵向分量， $\delta U^f$ 为有功传输引起的电压降落横向分量。根据图2，结合暂态输送功率和线路电抗可得整流站交流母线暂态电压 $U_D^f$ 计算式为：

$$\begin{cases} \Delta U_s^f = \frac{Q_{L2}^f X_{L2}}{U_s} \\ \delta U_s^f = \frac{P_{L2}^f X_{L2}}{U_s} \\ U_D^f = \sqrt{(U_s + \Delta U_s^f)^2 + (\delta U_s^f)^2} \end{cases} \quad (6)$$

风电场并网点暂态电压 $U_w^f$ 计算式为：

$$\begin{cases} \Delta U_D^f = \frac{Q_{L1}^f X_{L1}}{U_D^f} \\ \delta U_D^f = \frac{P_{L1}^f X_{L1}}{U_D^f} \\ U_w^f = \sqrt{(U_D^f + \Delta U_D^f)^2 + (\delta U_D^f)^2} \end{cases} \quad (7)$$

根据式(5)、(6)和(7)可得到故障期间影响整流站交流侧母线和风电场接入母线暂态电压的主要参数为故障前换流站无功补偿量 $Q_f$ ，故障前直流输送功率 $P_D$ 以及故障期间换流站无功吸收变化量 $\Delta Q_D^f$ 和故障期间风机有功变化量 $\Delta P_w^f$ 、无功出力变化量 $\Delta Q_w^f$ 有关。而直流发生换相失败故障、闭锁故障和换流站近区短路故障对直流送端暂态电压的冲击程度不同，因此下面对不同故障进行分别讨论。

### 3. 特高压直流故障对送端电网暂态过电压的作用机理

#### 3.1. 特高压直流换相失败/闭锁对送端电网暂态过电压作用机理

以甘肃祁韶直流工程为例，对上述三种引起送端暂态过电压的主要故障进行分析。仿真祁韶直流输送容量4000 MW时，发生换相失败、双极闭锁和整流站出口线路短路故障下，整流站交流母线和近区风电场风机接入母线分别如图3和图4所示：

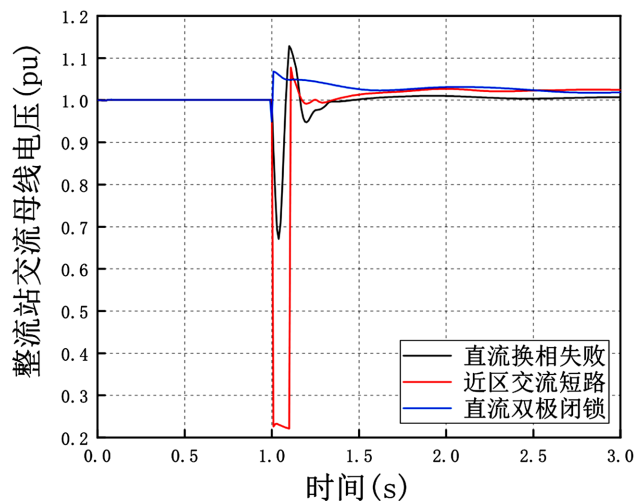


Figure 3. AC bus voltage of rectifier station  
图3. 整流站交流母线电压

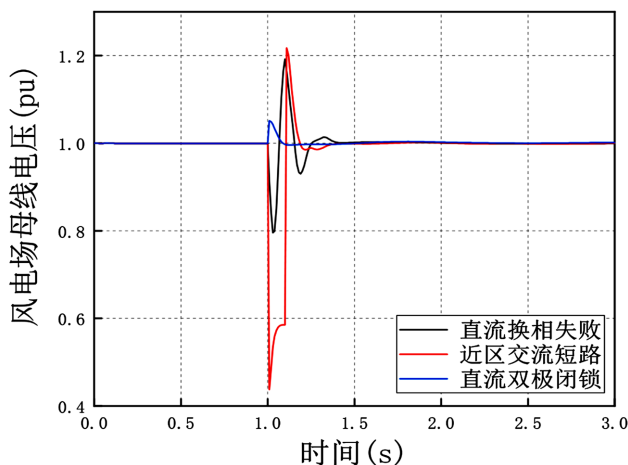


Figure 4. AC bus voltage of wind farm

图 4. 风电场交流母线电压

### 3.1.1. 直流换相失败

直流发生换相失败故障时,在换相失败故障初期,电压突变降低,为抑制电压的急剧降低,整流站增大无功量  $\Delta Q_D^f$ ,但仍不能有效抬高电压,导致送端电网整体电压降低,并造成送端近区风电场风机进入低压穿越。低压穿越期间,风机有功出力大幅减小,无功出力增加。

而随着直流电流迅速减小至零,由于整流站内滤波器和电容器来不及迅速切除,大量的无功盈余量  $Q_f$  涌入送端系统造成送端系统暂态电压抬升;另一方面,风机低压穿越期间发出大量无功,当送端系统暂态电压抬升时不能迅速调节无功,从而进一步助增了送端系统的暂态过电压。

因此换相失败故障期间,整流站的滤波器盈余无功和风电场风机低穿特性来不及调节的盈余无功是导致送端系统暂态压升的主要因素。

### 3.1.2. 直流闭锁

直流闭锁故障期间,换流器触发角直接置零,在滤波器切除前的短时间内,滤波器的大量无功盈余  $Q_f$  将引起送端整流站交流母线和风电场接入母线暂态压升。

在直流闭锁故障下,送端电压不会像换相失败故障一样先经历一个暂态压降的过程,送端风机也不会先进入低压穿越发出大量无功而助增送端暂态电压抬升。因此直流闭锁故障下送端暂态过电压一般低于换相失败造成的暂态过电压。

### 3.1.3. 整流站出口近区短路

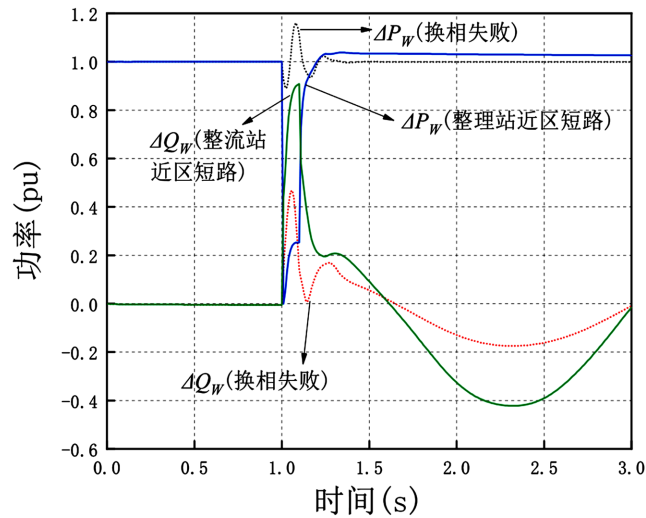
整流站近区发生短路故障时,将导致整流站及近区风电场电压产生严重的电压降落。且故障点距离整流站越近,整流站交流母线电压跌落越低。直流电压受交流母线电压影响而降低,当达到直流动作限值时,引起直流发生闭锁故障,滤波器大量无功盈余  $Q_f$  引起整流站交流母线及近区风电场暂态过电压。

## 3.2. 造成暂态过电压的主要因素

由上述分析可知,直流换相失败对直流送端电网近区暂态压升的影响最为严重,因此下面主要研究这直流换相失败下整流站交流母线和风电场母线的暂态过电压。

直流换相失败时,送端暂态电压都呈现先降低后升高的现象,在风机低压穿越期间增加的无功出力与整流站滤波器盈余的大量无功是引起送端电网暂态过电压的主要因素。

在风电场侧,当直流换相失败期时,风电场双馈风机有功、无功出力如图 5 所示:



**Figure 5.** Active and reactive power output of the doubly-fed fan at the feed end of the rectifier station  
**图 5.** 整流站送端双馈风机有功、无功出力

双馈风机低压穿越无功出力为:

$$\Delta Q_w = 1.5(0.9 - U_w^f) Q_{wN} \quad (8)$$

式中:  $Q_{wN}$  分别为风电场无功出力。由此可见, 当机端母线电压  $U_w^f$  越低, 低压穿越期间风机无功出力  $\Delta Q_w$  越大。

整流站方面, 故障前整流站的滤波器无功补偿容量  $Q_f$  由直流输送功率决定。工程上对整流站稳态运行期间的无功补偿需求如下:

$$Q_f = \lambda_D P_D \quad (9)$$

式中  $\lambda_D$  为整流站无功需求占直流输送容量比值, 典型值为 0.4~0.5。

由此可知故障期间整流站无功盈余  $Q_f$  由故障前直流输送功率大小决定, 整流站根据  $Q_f$  需求确定所投入的滤波器组。直流输送功率越大,  $Q_f$  越大。

在新能源直流外送的工况下, 当直流发生换相失败时, 造成风电场母线暂态压升的主要因素是风电场及近区无功补偿, 其次是整流站盈余无功的影响; 而对于整流站交流母线, 影响其暂态过电压主要因素是自身盈余的无功。

#### 4. 新能源直流送端电网暂态过电压控制策略

基于前述特高压直流故障对送端电网暂态过电压的作用机理, 提出对整流站调相机和风电场 SVC 进行分布式控制策略。

##### 4.1. 整流站调相机控制策略

考虑我国特高压直流整流站都装有大容量调相机, 可优先考虑采用调相机稳态时维持一定的迟相运行发出无功以替代整流站部分超出最小滤波器原则的滤波器, 使得故障前的无功盈余  $Q_f$  中部分无功动态可调, 可有效降低整流站的暂态过电压。

因此, 设定整流站调相机稳态时无功外环控制环节的无功定值参数  $Q_{ref}$  为:

$$Q_{ref} = Q_f - \sum_{i=1}^N n_i Q_{fi} \quad (11)$$

其中,  $Q_{ni}$  为整流站第  $i$  型单组滤波器提供的无功补偿,  $n_i$  为  $i$  型滤波器的投入组数,  $N$  为总共投入的不同滤波器型号数。其中  $Q_{ni}$  是滤波器的额定无功出力,  $N$  为滤波器的组数;  $N$  以整流站所需最大滤波器组数取值, 以此保证稳态期间调相机在维持站内无功平衡需求下, 尽可能为直流线路发生换相失败时为控制整流站暂态压降及压升留出最大可调节无功裕度。

调相机内环电压控制环节电压为整流站交流母线额定电压。整流站内调相机参与的无功协调控制策略如图 6 所示:

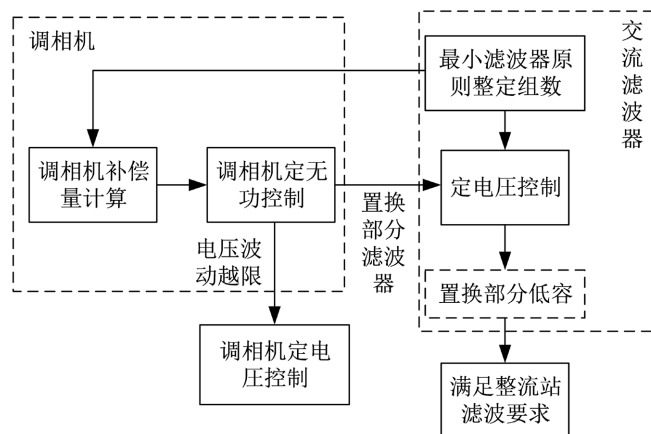


Figure 6. Reactive power coordination control strategy with the camera in rectifier station

图 6. 整流站内调相机参与的无功协调控制策略

为了实现在直流换相失败情况下调相机快速调节动态无功的目的, 当直流整流站交流母线电压大幅度波动时(交流母线电压超过  $1.05U_N$  或低于  $0.95U_N$  时), 调相机按照定电压控制, 无功限制环节定值为最大无功出力, 以保证调相机无功动态响应的快速性; 当交流母线电压恢复至允许范围(交流母线电压恢复至  $1.05U_N$  以下或  $0.95U_N$  以上时), 调相机恢复至定无功控制, 即按照公式(11)进行控制。

## 4.2. 风电场 SVC 控制策略

按照风电场并网要求, 我国风电场均接有一定容量的 SVC, 在风电经直流外送情况下, 当直流发生换相失败时, 直流整流侧暂态电压传导至风电场接入母线, 造成风电场母线电压  $U_w^f$  暂态压降, 风电场 SVC 要在保证风机不至于低压脱网的情况下, 减少无功增量, 从而降低后期的暂态压升。

## 5. 实例仿真验证

### 5.1. 仿真背景

为验证本文提出的新能源直流送端电网暂态过电压分布式控制策略, 以甘肃祁韶特高压直流工程为例进行仿真验证。祁韶直流额定电压  $\pm 800$  kV, 额直流定输送容量 8000 MW; 直流送端主要有敦煌、桥湾风电场经 330 kV 节点接入 750 kV 高压主网架, 再经由祁连换流站送出。目前祁韶整流站已加装两台 300 Mvar 调相机。祁韶直流送端风电场拓扑关系如图 7 所示。

本文基于祁韶直流输送功率 7000 MW, 祁连整流站装有 2 台 300 MVar 新型调相机, 敦煌 330 kV 和布隆吉 330 kV 两风电场接入母线分别装有容量为 60 MVar 的 SVC 为背景, 对所提出的整流站调相机和风电场 SVC 分布式控制策略进行仿真验证。其中整流站调相机采取 4.1 节稳态定无功控制参与整流站无功平衡, 当祁韶直流发生换相失败时, 整流站调相机采取 4.1 节定电压控制以及风电场接入的 SVC 采取 4.2 节控制策略。

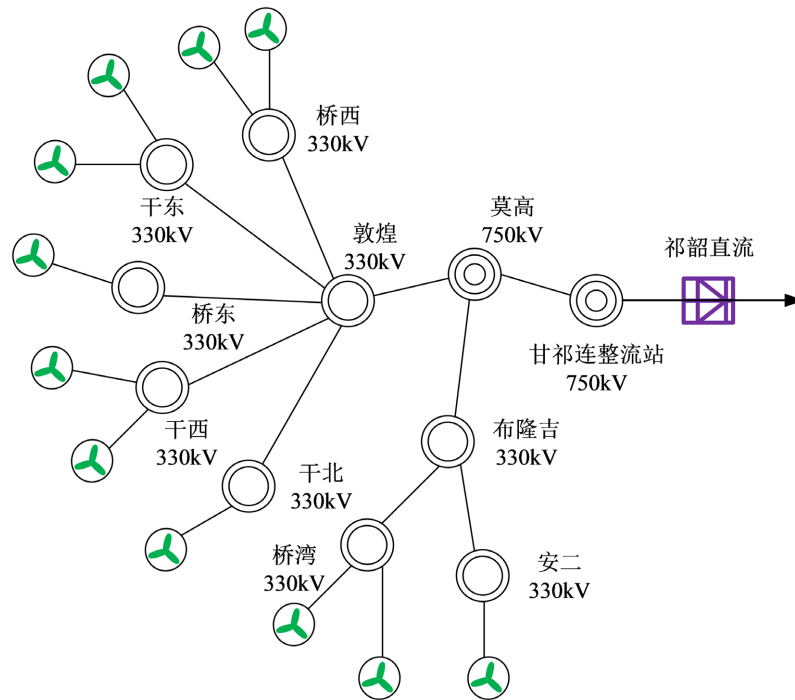


Figure 7. Topological diagram of Qishao DC wind power plant  
图 7. 祁韶直流送端风电场拓扑关系图

为验证控制策略有效性，分别设置 2 个对比策略，具体为：1) 本文方案；2) 整流站加装 4 台 300 Mvar 的新型调相机，风电场未接入 SVC。

### 5.2. 暂态电压分布式控制策略仿真验证

选取整流站交流母线和与整流站电气距离最近的桥湾风电场(距整流站线路电抗/p.u.: 0.134)、干北风电场母线(距整流站线路电抗/p.u.: 0.239)为观察对象，其中仿真观察祁韶直流于 0.2 秒时发生换相失败故障下上述不同方案以及不采取任何方案下的暂态电压变化过程。仿真结果如图 8~10:

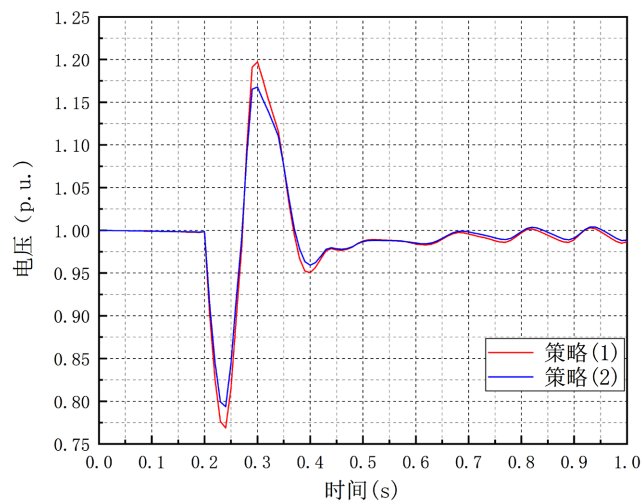
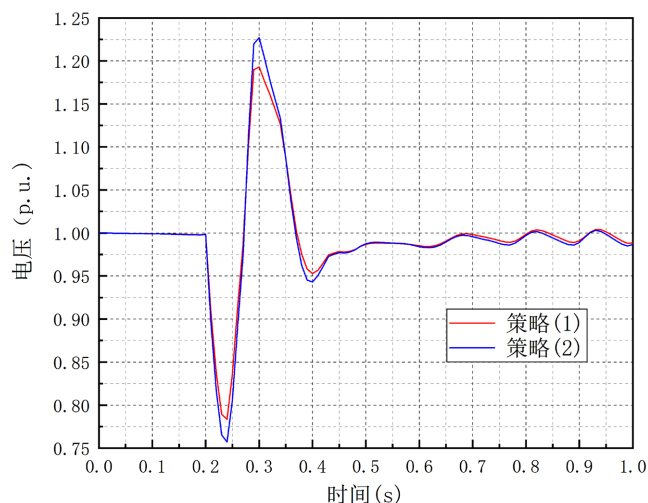
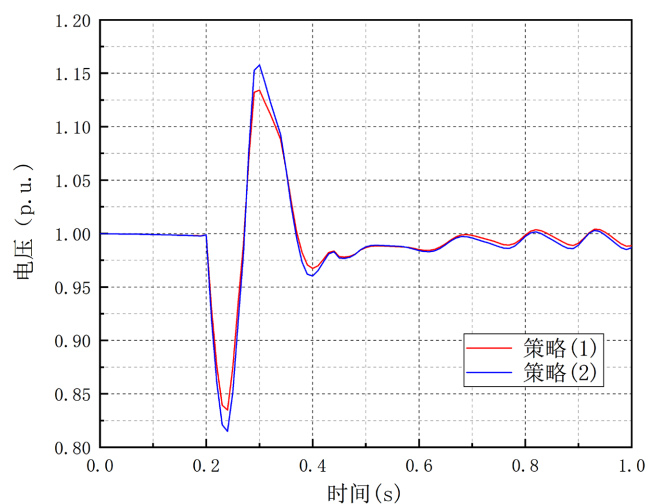


Figure 8. AC bus voltage of commutation failure rectifier station under different control strategies  
图 8. 不同控制策略下换相失败整流站交流母线电压





**Figure 9.** Bus voltage of Qiaowan wind power plant due to failure of commutation with different control strategies  
**图 9.** 不同控制策略换相失败桥湾风电场母线电压



**Figure 10.** Commutation failure of different control strategies dry busbar voltage in north wind power plant  
**图 10.** 不同控制策略换相失败干北风电场母线电压

由图 8~10 暂态电压曲线可以看出, 当祁韶特高压直流发生换相失败时, 控制策略(2)由于装有 4 台 300 MVar 调相机, 具有较大的无功调节裕度, 对整流站交流母线暂态压升的控制效果较控制策略(1)即论文提出的分布式控制策略更好, 但对于风电场接入母线压升控制效果较差, 由此可见, 集中式控制策略虽然在直流整流侧增加了 2 台调相, 也不能有效降低风电场由于暂态压升; 而本文提出的分布式控制策略, 既能降低祁韶直流整流侧交流母线暂态压升, 更能有效降低风电场接入母线暂态压升, 从而降低由于暂态压升造成的风电场脱网风险。

由图 9、图 10 暂态电压曲线可以看出, 当祁韶直流换相失败时, 由于桥湾风电场较干北风电场距祁韶直流电气距离近, 桥湾风电场接入母线暂态压升高于干北风电场母线暂态压升, 因此, 对于风电场暂态过电压控制应更注重距祁韶直流电气距离较近的风电场。

上述仿真计算结果可以得出, 本文提出的新能源直流送端电网暂态过电压分布式控制策略可有效控制由特高压直流故障引起的新能源送端电网暂态过电压, 从而显著降低风电场脱网的风险。

## 6. 结论

针对当前特高压直流故障造成新能源送端电网暂态过电压问题, 本文研究了直流换相失败/闭锁造成新能源送端电网暂态过电压的作用机理, 并提出了相应的控制策略, 得出如下结论:

- 1) 直流换相失败对直流送端电网近区风电场暂态压升的影响最为严重。
- 2) 直流换相失败时, 送端暂态电压呈现先降低后升高的现象, 期间风机低压穿越增加的无功出力与整流站滤波器盈余的大量无功是引起送端电网暂态过电压的主要因素。
- 3) 对整流站调相机和风电场 SVC 进行分布式控制可有效抑制直流故障引起的暂态过电压, 仿真计算验证了控制策略的有效性。

## 基金项目

资助项目: 国网甘肃省电力公司科技项目(SGGSKY00WYJS2100068)。

## 参考文献

- [1] 常海军, 霍超, 刘福锁, 柯贤波, 侯玉强, 牛拴保, 等. 提高弱送端电网暂态电压稳定水平的调相机优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制. 2019, 47(6): 90-95.
- [2] 汤奕, 郑晨一, 楼伯良, 华文, 王龙飞. 抑制连续换相失败的直流功率控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3514-3522.
- [3] 屠竞哲, 张健, 刘明松, 易俊, 贺庆, 罗煦之, 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.
- [4] 索之闻, 刘建琴, 蒋维勇, 李志强, 杨林. 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.
- [5] 韩平平, 陈凌琦, 胡迪, 张炎. 直流闭锁暂态过电压对风电外送影响及其抑制措施[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 99-105.
- [6] 殷威扬, 杨志栋. 特高压直流工程无功平衡和补偿策略[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 50-54.
- [7] 张爱玲, 姚致清, 涂仁川, 关红兵. 云广特高压直流输电工程站控系统的设计缺陷及改进分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 117-123.
- [8] Aamir, A., Qiao, L., Guo, C., Ur Rehman, A. and Yang, Z. (2019) Impact of Synchronous Condenser on the Dynamic Behavior of LCC-Based UHVDC System Hierarchically Connected to AC System. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 5, 190-198. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2018.00420>
- [9] 叶希, 鲁宗相, 乔颖, 李兢, 王丰, 罗伟. 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.
- [10] 何世恩, 董新洲. 大规模风电机组脱网原因分析及对策[J]. 电力系统保护与控制. 2012, 40(1): 131-137, 144.
- [11] 李丹, 贾琳, 许晓菲, 王蓓, 王宁, 谢旭. 风电机组脱网原因及对策分析[J]. 电力系统自动化. 2011, 35(22): 41-44.
- [12] 吴跨宇, 房乐, 卢岑岑, 沈轶君. 大型调相机励磁与无功电压协调控制策略探讨[J]. 浙江电力. 2018, 37(2): 36-41.
- [13] Ma, Y., Ruan, L., Xiao, Y., Zhou, L., Wang, J. and Tao, Q. (2019) Modelling and Analysis of the UHVDC Transmission Receiving System Considering 300 Mvar Novel Synchronous Condenser. *The Journal of Engineering*, 2019, 955-960. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8866>
- [14] Wang, Q., Li, T., Tang, X., Liu, F. and Lei, J. (2019) Study on the Site Selection for Synchronous Condenser Responding to Commutation Failures of Multi-Infeed HVDC System. *The Journal of Engineering*, 2019, 1413-1418. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8807>
- [15] 屠竞哲, 张健, 刘明松, 潘艳, 习工伟, 易俊. 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): 197-208.