Smart Grid 智能电网, 2021, 11(4), 313-321
Published Online August 2021 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/sg
https://doi.org/10.12677/sg.2021.114030

Hans汉斯

直流送端孤岛运行过电压研究分析综述

牛宇昆，文　俊，王　玥，陈　甜

华北电力大学电气与电子工程学院，北京
Email: 18810118853@163.com

收稿日期：2021年7月19日；录用日期：2021年8月3日；发布日期：2021年8月18日

摘　要

直流输电的发展与我国能源分布的特点促成了直流孤岛的形成。直流送端孤岛运行时，换流母线上暂时过电压问题表现得更为突出。本文针对直流送端孤岛运行的过电压问题，从直流输电系统侧与孤岛系统侧两方面进行分析。总结了部分可孤岛运行的直流工程，深入研究了孤岛运行、换流母线暂时过电压的分类、直流输电系统送端孤岛运行过电压产生机理及抑制措施并进行了对比，为后续直流送端孤岛运行的研究提供了参考。

关键词

直流输电系统，孤岛运行，暂时过电压，过电压抑制措施，无功功率

Research and Analysis of DC Sending End Overvoltage under Island Operation Mode

Yukun Niu, Jun Wen, Yue Wang, Tian Chen

College of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing
Email: 18810118853@163.com

Received: Jul. 19th, 2021; accepted: Aug. 3rd, 2021; published: Aug. 18th, 2021

Abstract

The development of HVDC and the characteristics of China's energy distribution contribute to the formation of DC island. When the DC sending end operates in island mode, the Transient Overvoltage on the converter bus is more prominent. In this paper, the over-voltage problem of island operation at DC sending end is analyzed from two aspects of DC transmission system side and island system side. This paper summarizes some DC projects that can operate in island, deeply studies

文章引用: 牛宇昆, 文俊, 王玥, 陈甜. 直流送端孤岛运行过电压研究分析综述[J]. 智能电网, 2021, 11(4): 313-321.
DOI: 10.12677/sg.2021.114030

the classification of island operation, converter bus temporary overvoltage, generation mechanism and suppression measures of DC transmission system sending end island operation overvoltage, which provides a reference for the follow-up research of DC transmission system sending end island operation.

Keywords

HVDC, Island Operation, Temporary Overvoltage, Overvoltage Suppression Measures, Reactive Power

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，直流输电在“西电东送”中承担着越来越重要角色[1] [2]。在我国直流输电发展与能源负荷实际分布的大背景以及各地电网实际运行情况下形成了直流孤岛系统。整流站与直流线路和大电网之间没有电气连接和功率交换[3]，这种运行方式称为直流孤岛运行方式。在国外，直流孤岛送出工程多为基于水电孤岛和电压源换相换流器的海上风电孤岛外送[4]；而在国内主要作为一回或多回直流输电的一种运行方式。高压直流输电系统送端孤岛运行可提高电网安全稳定水平、简化安稳控制策略以及降低直流故障对送端交流电网的冲击。但是也会带来电压、频率、稳定等诸多问题。

当前研究直流输电孤岛运行主要集中在直流故障是否会导致送端系统频率稳定、次同步振荡、过电压问题以及孤岛系统的启动问题[5]。其中孤岛运行过电压对应抑制的措施主要包括采取直流功率调制[6] [7] [8]、合理设计换流变断路器跳闸时间[9]与滤波器组投切的配合时间[8] [9] [10]、调节发电机励磁[11]等。送端孤岛运行时的交流系统比较弱，系统等值阻抗比较大，暂时过电压更为突出。送端孤岛运行过电压水平的控制是决定孤岛能否运行的关键因素[5]。

本文针对直流送端孤岛运行过电压问题，从直流送端孤岛运行定义出发，从直流输电系统侧与孤岛系统侧两方面分析介绍了送端孤岛运行方式及换流母线暂时过电压问题，从孤岛系统侧与直流输电系统侧分别分析了直流送端孤岛运行过电压的产生机理以及抑制措施。通过对当前直流送端孤岛过电压及其抑制措施的分析，为该问题进一步深入研究提供了参考。

2. 直流送端孤岛运行

当大电网交流系统与直流输电系统送端断开电气联系，仅剩若干电厂甚至发电机与直流送端相连并为其供电，这种运行方式称为直流送端孤岛运行[12]。直流送端孤岛运行时，失去了大电网稳健的支撑，因此故障对直流输电系统及孤岛系统造成的影响更加恶劣。

2.1. 直流送端孤岛分类

从直流输电系统本身与孤岛系统两方面按照不同的标准分类。

1) 直流输电系统方面

按照直流工程类型的不同，可分为基于电网换相换流器(LCC-HVDC)直流孤岛和基于电压源换相换流器(VSC-HVDC)直流孤岛[5]。

2) 孤岛系统方面

a) 按照不同发电厂类型，可以分为风电孤岛、火电孤岛、水电孤岛等；

b) 按照机组的接入组数不同，可以分为全厂孤岛和分厂孤岛[13]。其中全厂孤岛运行方式是指全部发电机组接入换流站；分厂孤岛运行方式是指仅有部分机组进入孤岛运行而其余机组接入交流电网。

2.2. 直流工程送端孤岛运行

实际电网运行时直流输电系统送端与主网架之间的交流联络线 N-2 或 N-3 情况下，送端网络被迫与主网失去电气联系而形成送端孤岛[14]。实际工程如云南－广东±800 kV 特高压直流输电工程在断开楚雄换流站与昆西北变电站之间的交流线路时，直流脱离云南电网，送端形成孤岛。其他直流工程可形成送端孤岛运行模式条件及直流脱离主网情况如表 1 所示。

Table 1. Project table for island operation of DC sending end
表 1. 直流工程送端孤岛运行表

直流工程	断开站点区间	脱离电网
云南－广东±800 kV	昆西北变电站－楚雄换流站	云南主网
贵州－广东±500 kV	安顺变电站－安顺换流站	贵州主网
复龙－奉贤±800 kV	复龙换流站－泸州变电站	川渝电网
宜宾－金华±800 kV	叙府变电站－泸州变电站	川渝电网
呼伦贝尔－辽宁±500 kV	呼伦贝尔变电站－伊敏变电站	东北电网
灵州－绍兴±800 kV	宁夏电网－白银、平凉变电站	西北主网

3. 过电压研究

3.1. 换流母线暂时过电压

持续时间在数个到数百个周波的过电压称为暂时过电压，出现在操作或故障发生后的数百毫秒内[9]。换流母线上产生的暂时过电压主要有三种：甩负荷过电压、清除故障与换流变投入时分别引起的饱和过电压。

1) 甩负荷过电压

基于网络强度，换流站无功负荷发生较大变化时电压也会不同程度变化。甩负荷过电压即由于换流母线在无功负荷突然消失时电压急剧升高产生的过电压。换流器停运是导致甩负荷过电压的一个重要原因。如果过电压幅值高于电网运行规定的暂时过电压限值，就必须采取相应抑制措施。规定电网母线侧最高暂时过电压为最高运行电压的 1.3 倍，线路侧 1.4 倍。

2) 清除故障引起的饱和过电压

故障发生于换流母线及其近区时，电压会降低至零。故障期间与故障前换流变磁通水平保持相同，而换流母线电压会在故障清除时恢复，某相换流变电压与剩磁通相位不匹配时会产生偏磁性饱和而导致过电压。

3) 换流变投入时引起的饱和过电压

在低次谐波频率下，装设于换流站的滤波器及容性无功补偿设备与系统感性阻抗可能发生谐振而产生较高的综合阻抗值，致使变压器饱和引起的励磁涌流在交流母线上产生较高的谐波电压。基波与谐波电压相叠加会在交流母线上形成长时间饱和过电压，其持续时间可达数秒[15]。

下文所提过电压及其抑制措施均针对直流送端换流母线上发生的甩负荷暂时过电压。

3.2. 直流送端孤岛运行过电压

交直流系统故障可能会在直流输电系统送端换流母线及近区产生过电压，送端孤岛运行时电网更为薄弱，会产生更加严重的安全稳定问题。直流输电系统突然发生换相失败、闭锁等故障后，其传输的有功功率会瞬降接近至零，且换流器在短时间内没有无功需求，直流过剩的无功功率会倒送至孤岛系统导致过电压现象[16]。

目前，换流站交流侧过电压研究的主要方面是直流输电系统在换流母线及近区产生的甩负荷过电压。分别从直流输电系统和送端孤岛系统两方面分别分析直流送端孤岛过电压的发生机理。

3.2.1. 直流输电系统方面过电压机理分析

送端孤岛运行时，直流输电系统输送功率由于线路闭锁、发电机减负荷等故障突然减少会导致产生过电压现象[9]。此时在换流母线上连接的过剩的滤波器切除前，换流母线可能承受过高的暂时过电压[17]。送端孤岛运行示意图如图 1 所示。

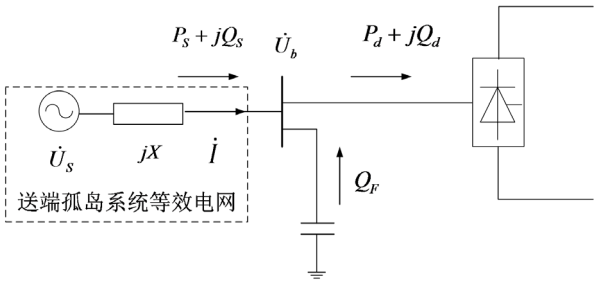

Figure 1. Schematic diagram of islanding operation
图 1. 送端孤岛运行示意图

送端整流器消耗无功 Q_d 与直流所传输的有功功率之间的关系[18]如下：

$$Q_d = P_d \tan\varphi \tag{1}$$

由上式可以看出当直流所传输的有功功率下降时，整流器所消耗的无功功率随之下降[19]。

故障前整流器所消耗的无功功率包括交流滤波器发出的无功功率 Q_F 以及与孤岛系统交换的无功功率 Q_S [20]，送端以孤岛系统向换流站提供无功为正方向，反之为负，孤岛系统与直流输电系统交换的无功功率满足下式：

$$Q_S = Q_d - Q_F \tag{2}$$

$$Q_F = B_c U_b^2 \tag{3}$$

式(3)中，B_c 为交流滤波器等值电纳；U_b 为送端换流母线电压。

直流输电系统故障及恢复过程中交流滤波器发出的无功功率和换流站吸收的无功功率存在一个暂态的变化过程，随之送端电网与直流输电系统交换的无功功率会大幅变化。由于故障直流输电系统传输功率迅速减小时，整流器所消耗的无功功率随之迅速减小，机械开关控制的滤波器组及无功补偿设备不能迅速断开，造成大量无功功率盈余，流向送端电网，使送端交流母线出现严重的过电压[21]。孤岛系统与直流输电系统交换的无功功率的变化对应换流母线及送端电网电压出现波动[22]。

影响甩负荷过电压大小和持续时间的因素有故障前换流站投入滤波器的容量、孤岛系统的短路容量、换流变饱和励磁特性、过电压的控制策略等[16]。

3.2.2. 送端孤岛系统方面过电压机理分析

在交流侧分析由于故障使直流输电系统输送功率突然减少，相当于发电机减负荷。图 1 中送端孤岛为单机系统时，发电机电势如式 4，发电机相量图如图 2 所示。

$$\dot{U}_S = \dot{U}_b + j\dot{I}X \tag{4}$$

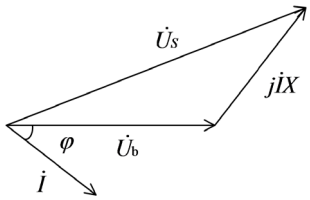

Figure 2. Generator phasor diagram
图 2. 发电机相量图

图 1 中，系统功率因数为 cosφ，电力系统负荷一般呈感性，当与发电机相连时，对发电机起去磁作用。交流系统发生故障甩负荷时，$P_d + jQ_d$ 消失，去磁反应随之消失。发电机惯性使得励磁绕组磁链不能突变，发电机电势在短时间内近似不变。甩负荷后电流 I 迅速减小近似为 0，系统等值电抗(包括变压器电抗及发电机等值电抗)所产生的压降迅速降低，因此交流母线电压迅速上升并接近发电机电势，即 $\dot{U}_b \approx \dot{U}_S$，产生严重的过电压[23]。

3.3. 直流孤岛运行过电压抑制措施

3.3.1. 直流输电系统侧抑制

在直流侧对暂时过电压进行抑制，目前的抑制策略有以下几类：

1) 直流控制相关策略

a) 增大关断角

直流输电系统处于恒定状态运行时关断角 γ 在 17˚~35˚。发生换相失败故障期间，直流电压降低直流电流增大。换流站所消耗的无功功率与关断角的大小正相关，随着关断角 γ 的增大换流站所消耗的无功功率随之增大[6]，从而抑制过电压的产生。但是当关断角调节太小时会造成换相困难[7]。

在保持近区直流功率恒定的情况下，交流电网的电压升高时，文献[8]提出了一种增加近区健全直流输电系统逆变侧关断角的策略来抑制过电压。根据直流输电系统的准稳态模型可以得知，当直流输电系统的一极发生故障时，输送功率大幅较少。通过控制使健全极输送的功率维持恒定，并且将逆变侧关断角 γ 增大，健全极消耗的无功功率将在短时内大幅提升，从而对送端弱交流电网过电压产生良好的抑制效果[10]。

b) QPC

在直流输电系统运行中，如果必须运行在单极最小功率方式下，系统的无功条件又达到设计中考虑的最恶劣情况，则可以通过增加换流器触发角的方式，强迫换流器多吸收无功，从而达到换流站无功平衡的目的。此称为换流器无功功率控制 QPC [11]。

当采取 QPC 控制时，必须同时通过 PI 调节器来保持触发角角度在一定范围内，即受 α_{max}、和 α_{min} 的限制。其好处是可保持直流电压尽可能高、直流电流和功率损耗尽可能小的同时角度不至于太大。

当换流器运行在大触发角时，直流输电系统的设备承受的压力增大、额外损耗增加、谐波分量大，因此不希望换流器长期在大触发角下运行。在实际工程中，通常采用投切滤波器组和 QPC 控制相结合的方法，以达到良好的调节效果。

c) 调节低压限流环节参数

直流输电系统的整流侧与逆变侧通常装设低压限流环节 VDCOL，它在系统故障导致直流电压降低时对主控制输出的直流电流进行限幅[9]。通过优化整流/逆变侧 VDCOL 的参数(如启动/退出电压、最大/最小电流指令)，增大/减小直流电流指令限值，以改变孤岛系统与直流输电系统间的无功功率交换[24]，达到限制过电压的目的。

直流双极保护闭锁时，先降直流电流定值后快速移相的保护闭锁逻辑可大幅降低暂时过电压水平；直流双极紧急停运(ESOF)时，适当减缓移相速度能在一定程度上抑制暂时过电压水平[7]。此外，还有在换流站进行无功功率控制等[21]附加直流控制策略。

利用直流输电系统自身控制调节能力来调节电网稳定具有快速、安全、经济的特点。但是当直流输电系统退出运行时，与直流输电系统控制有关的过电压抑制策略将无法起作用。

2) 无功补偿设备

a) 调相机

调相机接在直流输电系统送端用于提供短路容量，抑制过电压升幅[25]。调相机的实质是空载运行的同步电机，主要用于改善功率因数，调节系统无功功率[26]。调相机通过改变励磁电流的大小来改变运行状态，过励时向系统发出感性无功来抬高电压，欠励时吸收感性无功以降低电压，一直处于投运状态。在换流母线上接入调相机来平衡故障时滤波器所发出过剩的无功来抑制暂时过电压。调相机的无功输出受系统电压影响小，并具有短时的强励能力， 高/低压穿越能力强[27]。但其调节速度慢，需要 1~2 秒达到峰值，对暂时过电压抑制效果不明显。并且运维费用和损耗费用高，经济性较差，配套设备繁多且维护不方便。

b) 静态无功补偿装置

静态无功补偿装置可在直流送端孤岛运行时，提高电压稳定水平，抑制暂时过电压[12]。在保持原有定电压输出的基础上，SVC 收到滤波器投切的信号后立即增加或减小 TCR 的触发角，这样就能直接预判滤波器投切产生的电压波动，从而快速做出相应，改变系统无功。单极闭锁时为避免母线电压过高就会切除滤波器，如果在此时启动 SVC 协调动作就会增加无功出力，进一步升高换流母线电压。此外，SVC 的无功特性受系统电压水平影响大，并且会产生一定量的谐波[28]。

静态无功补偿装置可与滤波器组协调控制，即在收到滤波器投切信号后保持原有定电压输出并调节 TCR 触发角来预判滤波器投切引起的电压波动，做出快速响应[29]。该方法只适用于小范围电压波动，对过电压则会带来相反的效果。SVC 与 STATCOM 受系统电压影响较大，SVC 占地面积大，但静态投资、运维损耗费用较低。

c) 投切策略

弱交流系统下换流站滤波器组在投切瞬间对交流母线造成的无功冲击以及带来的电压扰动问题不可忽视[8] [9] [10]。不考虑波形等其他因素条件下，减少稳态时滤波器组投入可以从源头抑制暂时过电压。但是直流输送功率与所投滤波器容量密切相关，为保证直流输电的安全稳定运行就必须配备与直流容量相匹配的滤波器组来避免谐波不稳定。

直流输电系统常采用延时投切策略来解决过电压问题。云广直流保护系统在收到闭锁信号后立即速跳大组滤波器，并延时切换流变[9]。金中直流送端孤岛运行时，发生双极 ESOF 后通过快速(100 ms 内)切除交流滤波器降低暂时过电压水平。

3) 换流变饱和特性

在直流输电系统双极闭锁后可不立即切除换流变，可利用换流变的饱和特性来限制过电压[30]。由于甩负荷引起的暂时过电压在送端孤岛方式下的弱送端交流系统表现更为突出[16]。本质上，该过电压问题由无功盈余引起。而换流变在过电压的作用下使其铁心饱和，励磁电感减小从而导致励磁电流增大，进而消耗的无功功率增多[31]，对过电压起一定的抑制作用。

利用换流变的饱和特性抑制过电压对直流输电系统紧急闭锁情况可行并在云广直流工程中得到了应用，但对直流输电系统 ESOF 则不太可行[9]。ESOF 故障大多由阀厅内设备故障以及换流变故障引起，为了保护这些设备的安全，无法采用延迟切除换流变来限制过电压水平。

3.3.2. 孤岛系统侧抑制

1) 发电机励磁调节

现有直流送端孤岛过电压控制主要集中在换流站侧，没有充分发挥发电机的电压控制能力[32]。可以通过发电机调整孤岛送端电压。

通过发电机调压是电力系统最基本的调压方式。通过控制励磁调节器的励磁电流，励磁电压来实现，即调整励磁控制器的整定值。发电机的无功出力与机端电压成正相关关系。通过改变励磁电流，励磁电压的调节方式可以实现发电机从迟相运行到进相运行的转变[11]。文献[7]提出在直流输电系统发出 ESOF 命令的同时向机组发送降励磁电压参考值命令，加快发电机内电势下降速率，则能在一定程度上降低换流变切除后的暂时过电压峰值。

在实际运行中，发电机减励磁措施对过电压的抑制效果受通信延时和励磁系统响应速度影响很大，仿真效果能否应用于工程还需检验[7]。

3.3.3. 过电压抑制措施的对比分析

对上文研究的直流孤岛运行过电压抑制措施从响应速度、抑制效果及主要缺点等方面进行对比分析，如表 2 所示。

Table 2. Comparison of overvoltage suppression measures of DC sending end during island operation
表 2. 直流送端孤岛运行过电压抑制措施对比

抑制措施	具体方法	调节速度	过电压抑制效果	主要缺点
直流控制相关策略	增大关断角	快(ms 级)	良好	太小造成换相困难
	QPC	快(ms 级)	一般，通常滤波器组投切相结合	直流设备承受压力增大、额外损耗增加、经济性较差，配套设备繁多且维护不方便
	调节 VDCOL 参数	快(ms 级)	良好	
无功补偿设备	调相机	慢(s 级)	不明显	投入运行速度慢
	静态无功补偿装置	较快(ms 级)	只适用于小范围电压波动	无功特性受系统电压水平影响大
	投切策略	慢(s 级)	不明显	机械开关动作慢
换流变饱和特性	/	较慢(s 级)	一般，直流 ESOF 不适用	对换流变的配合要求高、损耗大
发电机励磁调节	/	快(ms 级)	一般，工程应用还需检验	受通信延时和励磁系统响应速度影响很大

对直流孤岛运行过电压的各种抑制措施对比分析可知，利用控制系统提出相关附加策略速度最快，并有着良好的效果，但是也有各自无法避免的缺陷。部分抑制措施有自己的适用条件，脱离适用范围则无法发挥抑制效果。

4. 结语

本文从直流送端孤岛运行的定义出发，从直流输电系统侧和孤岛系统侧展开对换流母线暂时过电压的研究。对直流送端孤岛运行的分类与换流母线暂时过电压的种类进行研究，重点从两个方面分别研究了直流送端孤岛运行换流母线暂时过电压的产生机理与抑制措施，并对各种抑制措施进行了对比，为以后直流送端孤岛运行过电压问题的研究提供了参考。

参考文献

[1] 杨明臻，林涛，齐清，郭紫昱，张彦琪，陈益超. 直流换相失败整体免疫能力评估方法与应用[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 13-20+28.

[2] 李飞，郑志宇，张昭丞，艾芊，蔡翀，李雅倩. 考虑电压暂降影响的交直流配网优选[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3): 120-126.

[3] 王亮，盖振宇，蒋维勇，史宇欣，孟庆萌. ±800kV 雁淮特高压直流系统送端孤岛运行闭锁策略[J]. 电力建设, 2020, 41(8): 40-47.

[4] ABB Ltd. (2010) The World’s Most Remote Offshore Wind Farm BorWin1 HVDC Light Offshore Wind Farm Link. ABB Ltd., Zurich.

[5] 范园园. 孤岛高压直流送出频率特性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2013.

[6] 张啸虎，曹国云，陈陈. 高压直流系统低功率运行时的无功控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 118-122.

[7] 周煜智. 直流孤岛送电系统的运行特性与改善措施研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2017.

[8] 滕予非，汤涌，张鹏，庞广恒，严磊. 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.

[9] 李伟，肖湘宁，郭琦. 抑制云广特高压直流孤岛运行甩负荷过电压的控制逻辑优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1373-1378.

[10] 张如强. 直流故障问题引起的近区交流电网过电压控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2018.

[11] 李建胜，宋志国，汪道勇. 政平换流站的无功功率控制[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 25-28.

[12] 李泽燃，樊艳芳，常喜强. SVC 与 STATCOM 改善直流孤岛外送特性研究[J]. 高压电器, 2017, 53(7): 67-72.

[13] 吴长洪. 小湾电厂孤岛运行相关技术问题探讨[J]. 水电站机电技术, 2016, 39(10): 27-29+40.

[14] 肖湘宁，李伟，罗超，郭琦. 特高压直流孤岛运行特性与稳定控制研究综述[J]. 电工技术学报，2017，32(10): 1-11.

[15] 贾磊，蔡汉生，吴小辰，金小明，赵勇，陈喜鹏. 云广±800kV 直流工程孤岛运行过电压水平研究[J]. 南方电网技术, 2011, 5(4): 24-28.

[16] 顾雨嘉，曾雪洋，田蓓. 宁夏电网多直流送端暂态过电压机电-电磁混合仿真研究[J]. 宁夏电力, 2019(1): 1-4+15.

[17] 李亚男，马为民，殷威扬，刘宝宏，樊纪超. 向家坝-上海特高压直流系统孤岛运行方式[J]. 高电压技术，2010, 36(1): 185-189.

[18] 刘琳，雷霄，孔祥平，林少伯，孙栩，谢国平. 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.

[19] 肖鸣，傅闯，梁志飞. 高压直流低负荷无功优化功能运行分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 91-95.

[20] 汪娟娟，梁泽勇，李子林，李瑶佳，傅闯，黄立滨. 高压直流输电系统低功率运行的无功控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 154-158.

[21] 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.

[22] 邱伟，钟杰峰，伍文城. ±800kV 云广直流换流站无功补偿与配置方案[J]. 电网技术, 2010, 34(6): 93-97.

[23] 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.

[24] 屠竞哲，张健，曾兵，刘明松，易俊，卜广全. 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.

[25] 岳涵, 邵广惠, 夏德明, 孙铭泽, 刘洋, 王克非. 考虑过电压抑制的特高压直流弱送端系统无功控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(15): 172-179.

[26] 蔡晖, 张文嘉, 万振东, 祁万春, 谢珍建, 黄俊辉, 赵欣. 苏州南部电网的电压稳定问题及无功补偿策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(1): 110-116.

[27] 许国瑞, 范士雄, 罗超龙, 韩巍. 用于直流换流站动态无功补偿的调相机与 SVC 运行特性对比[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2019, 46(1): 47-53.

[28] 邓鸿强, 王渝红, 李兴源, 贺兴容, 熊茜, 戴寒光, 何琰. 高压直流换流站无功消耗及站内补偿装置配置综述[J]. 华东电力, 2012, 40(3): 382-387.

[29] 熊红德, 钟庆, 杨煜, 许达. 特高压直流输电换流站 SVC 与滤波器投切协调控制仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 144-148.

[30] 胡铭, 蔡汉生, 田杰, 高鹏, 金小明, 吴小辰, 陈松林. 云广直流孤岛运行过电压控制措施研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1905-1909.

[31] 陈亦平. 直流孤岛运行特性和安全稳定控制措施的研究[D]: [博士学位论文]. 广东: 华南理工大学, 2014.

[32] 陈亦平, 陈磊, 叶骏, 侯君, 张尧, 杨仲超. 云广直流孤岛运行“5·26”双极闭锁原因分析及改进措施[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8): 129-135.