

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181107

# 大容量 STATCOM 对于受端直流换流站 运行与故障特性影响

邢超, 奚鑫泽, 李胜男, 刘明群, 何鑫

(云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217)

**摘要:**  $\pm 500$  kV 永富直流工程富宁换流站安装了3套百兆乏级的 STATCOM 装置, 以解决受端弱系统的动态无功不足问题。通过分析 STATCOM 在交流滤波器投入过程中的逆向控制及在交流瞬时故障恢复中的暂态支撑作用, 对 STATCOM 的控制策略和响应特性进行详细阐述。通过整理 STATCOM 设计研究和现场试验过程中的数据, 对 STATCOM 的特性进行验证, 同时结合富宁换流站“01.10”人工交流短路试验引起的 STATCOM 跳闸事件, 剖析 STATCOM 暂态闭锁和故障退出的原因。揭示了大容量 STATCOM 装置对受端直流换流站运行特性的影响。通过 STATCOM 的协调配合和暂态控制, 降低直流换相失败和扰动的风险, 同时提出了 STATCOM 的控制策略优化措施。通过对 STATCOM 在富宁换流站的响应特性研究, 证明富宁换流站3套 STATCOM 对直流系统的稳定运行提供了支撑作用。

**关键词:** 富宁换流站; STATCOM; 暂态闭锁; 换相失败; 协调控制

## Effect of large capacity STATCOM on operation and fault characteristics of receiving DC converter station

XING Chao, XI Xinze, LI Shengnan, LIU Mingqun, HE Xin

(Yunnan Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

**Abstract:** To cover the shortage of dynamic reactive power of the weak system in  $\pm 500$  kV Yong-Fu HVDC Project, three sets of 100 Mvar-level STATCOM devices installed at Funing Converter Station. In this paper, the control strategy and response characteristics of STATCOM are explained in detail by analyzing the reverse control of STATCOM during AC filter input and transient support in AC instantaneous fault recovery. The problems of the STATCOM transient blocking and exit are analyzed by STATCOM's characteristics which are verified by collating STATCOM design research and field test data, and the STATCOM trip event caused by the artificial alternating current short circuit test of "01.10" in Funing Converter Station. This paper reveals the operational characteristics of large-capacity STATCOM devices in DC converter stations. Through the coordination and transient control of STATCOM, the risks of DC commutation failures and disturbances are reduced, and STATCOM control strategy optimization measures are proposed. By studying the response characteristics of STATCOM in Funing Converter Station, it has been proved that three sets of STATCOM provide support for the stable operation of the DC system at Funing Converter Station.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51707026) and National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900200).

**Key words:** Funing Converter Station; STATCOM; temporal blocked; commutation failure; coordinated control

## 0 引言

$\pm 500$  kV 永仁-富宁直流输电工程是国内第一条省内直流输电工程。改变富宁换流站交流接线,

可实现功率全送广西、全送云南、分送云南广西三种方式<sup>[1]</sup>。富宁周边地区属于典型的弱交流系统, 有效短路比不足 2.5, 为了解决受端换流站动态无功不足的问题, 安装了3套额定容量为  $\pm 100$  Mvar 的 STATCOM 装置, 以提高直流工程运行的稳定性和可靠性<sup>[2-6]</sup>。STATCOM 通过两台降压变和 500 kV 交流系统连接, 在 STATCOM 暂态闭锁期间, 降压

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51707026); 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900200)

变高压侧易产生涌流,按常规变压器的稳态比率差动逻辑进行计算和判断,容易引起保护误动作<sup>[7-14]</sup>。STATCOM 通过富砚甲乙线与云南侧交流系统的联络示意图如图 1 所示。

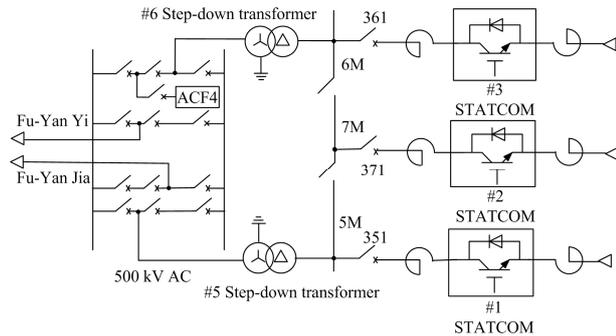


图 1 STATCOM 联络示意图

Fig. 1 Connection diagram of STATCOM

大容量 STATCOM 在富宁换流站的应用在国内属于首创,其主要作用有两点:

#### (1) 抑制滤波器小组投切过程中的电压波动

STATCOM 的无功控制和交流滤波器的投切控制相配合,在投切动作之前反方向调节交流母线电压目标值,可以有效降低交流滤波器投切过程对交流系统的冲击。

#### (2) 抑制暂态电压变化

STATCOM 调节连续灵活、响应速度快、运行范围宽,可以有效地改善接入点的电压稳定性<sup>[15-17]</sup>。因而通过 STATCOM 输出无功来迅速稳住电网电压可在一定程度上减小换相失败发生的几率<sup>[18-20]</sup>。

近几年有关学者对 STATCOM 的控制策略及响应特性进行了有价值的研究,主要集中在 STATCOM 的改进控制策略及同高压直流的协调控制方法等方面,而对 STATCOM 在实际工程中的应用效果的分析相对较少。

文献[21]介绍了应用于直流换流站的百兆乏级的 STATCOM 的控制策略,并提出其稳态控制策略和暂态响应策略,通过动态模拟实验验证其具备电压支撑和抑制电压波动的作用,从而为提高换流站直流输电的可靠性和安全性提供有力保障。文献[22]在基于 RTDS 实时仿真建模的基础上对 STATCOM 的控制策略进行了研究,并通过仿真试验验证了模型和策略的有效性。文献[23]提出了一种将星型级联 H 桥 STATCOM 中性点直接接地的抑制方案,该方案具备控制简单、能够补偿零序无功电流的优点,特别适用于抑制 HVDC 换相失败。以上研究只对 STATCOM 的拓扑结构和动态响应时间作为重

点研究对象进行了仿真和试验验证,但是对暂态特征的研究和描述不足,同时也缺乏与工程实际的对比分析。

本文通过分析 STATCOM 在交流滤波器投切过程中的逆向控制及在交流故障恢复中的暂态支撑作用,对 STATCOM 的控制策略和响应特性进行详细阐述。并对富宁换流站“01.10”人工交流短路试验过程中#3 STATCOM 跳闸事件进行分析,通过整理分析 STATCOM 设计研究和现场试验过程中的数据,揭示了 STATCOM 对富宁换流站运行和故障特性的影响。

## 1 交流滤波器小组投切过程的配合

STATCOM 在控制环节设置了预调节功能,通过反向调节交流母线电压目标值,达到降低滤波器投切过程中暂态电压大幅波动的目的。以在交流滤波器投入的过程为例进行分析,其在控制系统中的投入预调节曲线如图 2 所示:当 STATCOM 在  $t_1$  时刻接收到滤波器小组投入信号时,立即减小 STATCOM 无功输出,调节幅度记为  $\Delta Q$ ,在此预调节作用下使交流母线电压降低,从而平抑滤波器小组投入时刻的电压波动。其下调无功过程的时间  $\Delta t_1$  可手动设置。

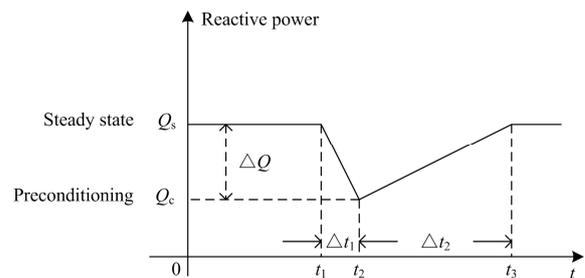


图 2 STATCOM 预调节示意图

Fig. 2 Pre-conditioning diagram of STATCOM

在 STATCOM 控制系统模拟预调节过程中,响应速度较快,一般低于 20 ms。在完成无功调节之后,STATCOM 的无功输出按照一定的斜率恢复至额定工况,其恢复时间  $\Delta t_2$  可以灵活设置。

### 1.1 ACF 投入时的分析

根据 STATCOM 的预调节特性,在富宁换流站实际投入滤波器小组之前,设置了预调节无功为 60 Mvar,实际投入过程中的 500 kV 侧电压波形和 STATCOM 35 kV 侧的电压波形图如图 3、图 4 所示。

从实际的投入波形图可以看出,在滤波器投入的过程中,500 kV 母线电压和 STATCOM 侧的电压均保持稳定。

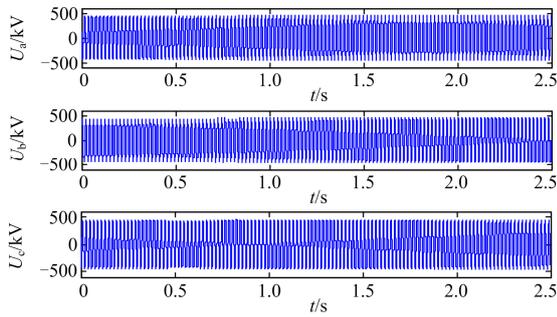


图 3 投入时刻的 500 kV 母线电压波形  
Fig. 3 Bus voltage waveform of 500 kV sides

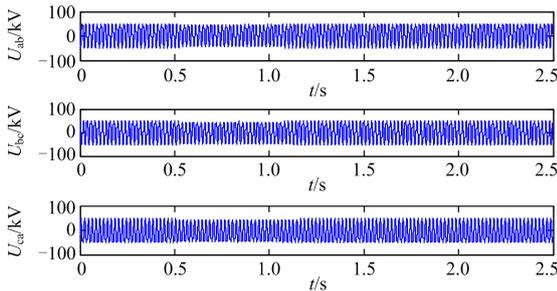


图 4 投入时刻的 35 kV 侧电压波形  
Fig. 4 Voltage waveform of 35 kV sides

图 5 为 STATCOM 的角内电流实际输出波形图,可以看出在接收到滤波器小组投入的命令之后, STATCOM 的无功输出增加,待滤波器小组投入成功后, STATCOM 的无功输出恢复到初始水平。图 6 为 STATCOM 的实际无功输出波形图,和图 5 中的角内电流输出值相对应, STATCOM 的初始输出功率为感性 20 Mvar,当滤波器小组投入时,无功输出调整到感性 80 Mvar,这时 STATCOM 能有效地对系统提供感性无功支撑,以降低系统电压,防止滤波器小组投入时引起的过电压。从滤波器投切信号产生到 STATCOM 功率参考值开始变化用时 2.6 ms,上升时间 20 ms,持续时间 500 ms,恢复时间不大于 1 s。

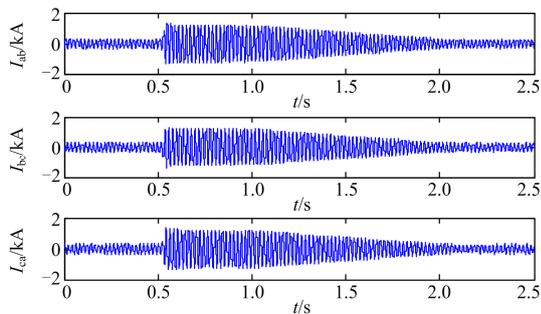


图 5 STATCOM 角内电流输出波形图  
Fig. 5 Output waveform of inner current of STATCOM

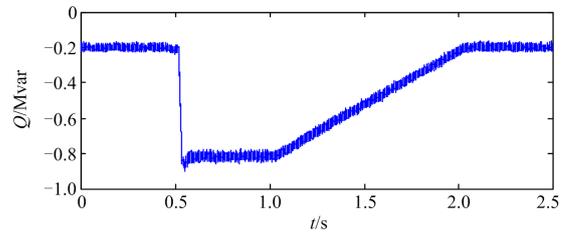


图 6 STATCOM 无功输出波形图  
Fig. 6 Output waveform of reactive power of STATCOM

### 1.2 ACF 退出时的分析

在富宁换流站实际退出滤波器小组之前,同样设置了预调节无功为 60 Mvar,实际退出过程中的 500 kV 侧电压波形和 35 kV 侧的电压波形如图 7、图 8 所示。从实际的波形图可以看出,在滤波器切除的过程中,系统侧母线电压和 STATCOM 侧的电压均保持稳定。

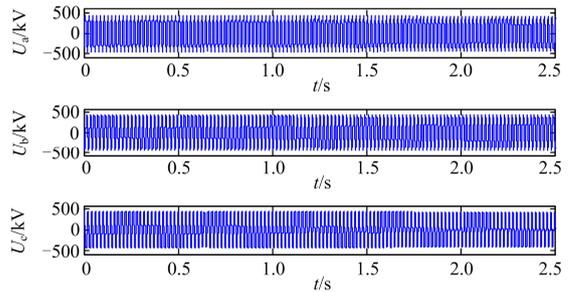


图 7 500 kV 侧母线电压波形  
Fig. 7 Bus voltage waveform of 500 kV sides

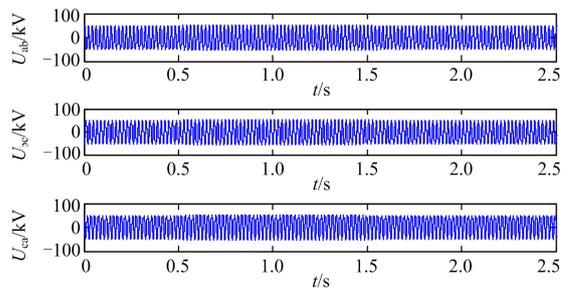


图 8 35 kV 侧电压波形  
Fig. 8 Voltage waveform of 35 kV sides

图 9 为 STATCOM 的角内电流输出波形图,在接收到滤波器小组切除的命令之后, STATCOM 的无功输出增加,由感性无功 20 Mvar 转变并增加到容性无功 40 Mvar,待滤波器小组切除成功后, STATCOM 的无功输出恢复到初始水平。

图 10 为 STATCOM 的实际无功输出值,和图 9 中的角内电流输出值相对应,在滤波器切除时刻, STATCOM 能有效地对系统提供容性无功,以提升系统电压,防止滤波器小组切除时引起的欠电压。

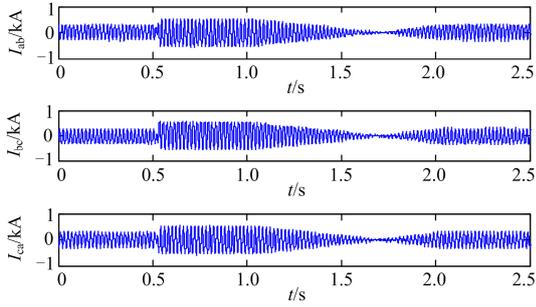


图 9 STATCOM 角内电流输出波形图

Fig. 9 Output waveform of inner current of STATCOM

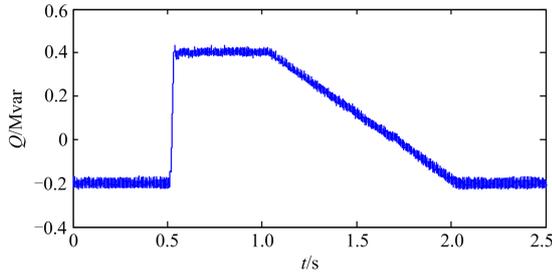


图 10 STATCOM 无功输出波形图

Fig. 10 Output waveform of reactive power of STATCOM

在换流站现场进行 STATCOM 与滤波器投切配合试验的过程中,系统运行平稳,无异常波动,无告警 SER,且 STATCOM 能够按照预定逻辑控制无功输出上下限幅,其响应符合试验预期。

## 2 STATCOM 暂态特性分析

在交流系统产生暂态故障过程时,STATCOM 需要为系统提供电压支撑。由于交流母线电压波动幅值较大,STATCOM 换流模块要承受暂时的过电压或欠电压。针对该问题,STATCOM 设计了过压和欠压闭锁逻辑,防止由于电压波动引起阀组模块的损坏。

在 STATCOM 的控制逻辑里加入了暂态电压控制功能,当 STATCOM 控制器检测到 500 kV 侧电压低于暂态电压下限阈值线电压 462 kV(0.88 p.u.)时(启动延时 1 ms),系统进入暂态控制,开放无功输出为最大值。

同时 STATCOM 也配置了低电压限流功能,当 500 kV 任意一相电压有效值低于 0.75 p.u.(线电压 393.7 kV,相电压 227.3 kV)时限制无功出力为 0.2 p.u.,三相有效值均大于 0.816 p.u.时,持续 30 ms 则恢复正常出力。该设计是为了防止当系统电压跌落时,保持无功输出的恒定而使电流的参考值增加,电流的实际输出值一旦超过了阀组模块可承受

的电流耐受水平,过流保护将会动作,从而引起 STATCOM 的跳闸。

另外 STATCOM 也具有电网故障暂时闭锁的功能。当任一相电压有效值低于 0.6 p.u.且持续 5 ms 时,STATCOM 允许暂时闭锁,当三相 500 kV 相电压有效值均大于 0.8 p.u.且持续 50 ms,允许再次解锁。

为了验证 STATCOM 的暂态特性,在富宁换流站进行了交流线路瞬时接地故障试验,实际故障波形如图 11—图 13 所示。

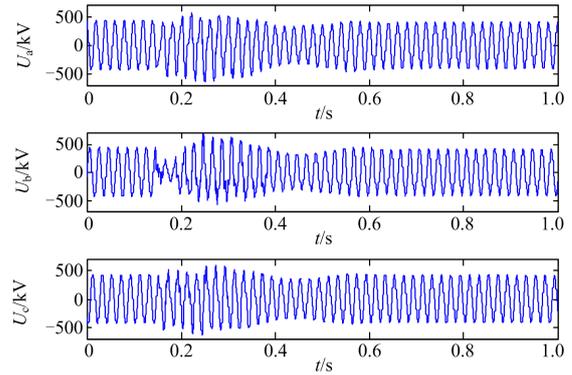


图 11 500 kV 侧母线电压波形

Fig. 11 Voltage waveform of 500 kV sides

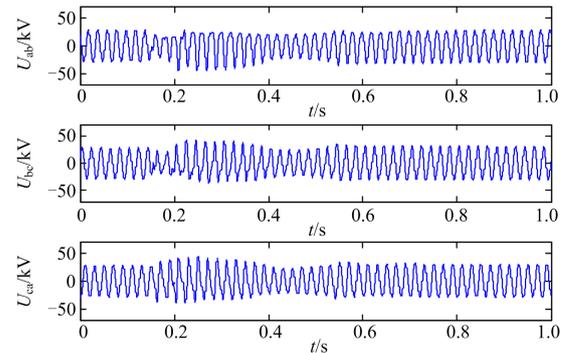


图 12 35 kV 侧电压波形

Fig. 12 Voltage waveform of 35 kV sides

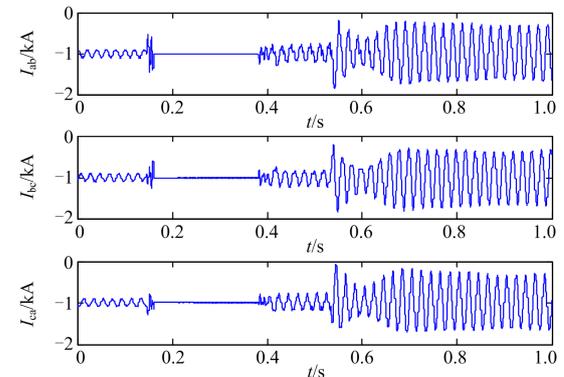


图 13 角内电流输出波形图

Fig. 13 Output waveform of inner current

由图 11—图 13 可以看出, 当 500 kV B 相电压低于 0.6 p.u. 时, STATCOM 暂时闭锁, 角内电流输出为 0; 当三相 500 kV 相电压有效值均大于 0.8 p.u. 并持续 50 ms 时, STATCOM 重新解锁。500 kV 侧电压低于暂态电压下限阈值线电压 462 kV 时, 系统进入暂态控制, 开放无功输出为最大值。

图 14 为 STATCOM 无功输出波形图, 可以看出, 当 STATCOM 进入闭锁状态时, 无功输出由 -20 Mvar 转为 0 Mvar, 重新解锁后, 无功输出调整至 100 Mvar。图 15 为 STATCOM 动作时序图, 可以看出, STATCOM 的动作时序符合以上分析过程。

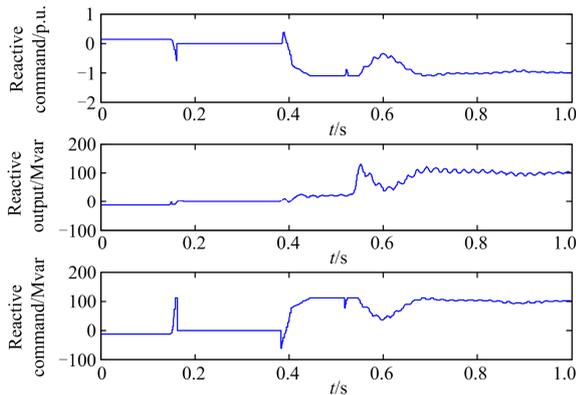


图 14 STATCOM 无功输出波形图

Fig. 14 Output waveform of reactive power of STATCOM

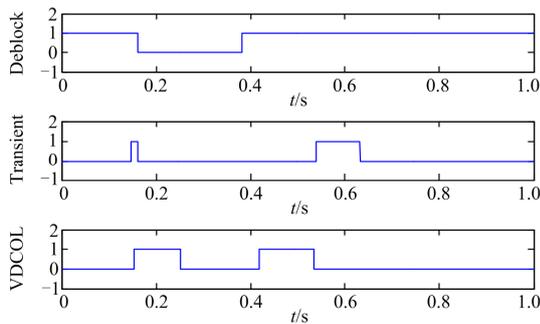


图 15 STATCOM 动作时序图

Fig. 15 Action timing sequence of STATCOM

### 3 交流故障情况下 STATCOM 暂态特性分析

2017 年 1 月 10 日 14 点 59 分 19 秒, 富宁换流站进行富砚甲线 B 相人工交流短路试验, 试验前, 三套 STATCOM 装置各输出 60 Mvar 感性无功, 控制模式为全送云南模式。

由于降压变属于普通站用变压器, 并没有根据低压侧负载的特性配置专门的保护, 短路过程中 #3 STATCOM 瞬时闭锁导致 #6 降压变低压侧电流变为 0, 而高压侧电流未能瞬时降为 0, 并在其后 7

个毫秒导致 B 相差流超过启动定值, 75 ms 后导致 #6 降压变主二保护 B 相比率差动保护动作。#6 降压变跳闸后 #3 STATCOM 由于欠频动作故障停机。

图 16 和图 17 分别为系统高低压侧电压波形。分析可知: 500 kV 侧 B 相电网电压最先降低, 在 2 ms 内相电压有效值低于 0.75 p.u. 时, #3 STATCOM 的无功输出指令开始逼近 -0.2 p.u., 但并不能在短时间内准确达到 0.2 p.u.。

图 18 为 STATCOM 角内电流输出波形图。由图 18 可知, 当低压限流开始时, 角内电流的输出值开始

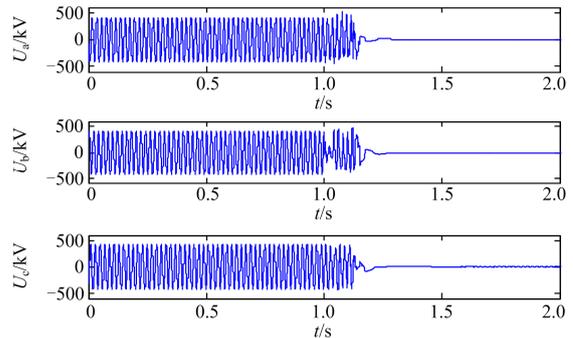


图 16 500 kV 侧母线电压波形

Fig. 16 Voltage waveform of 500 kV sides

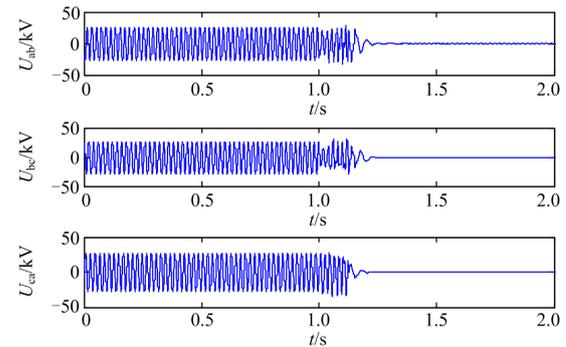


图 17 35 kV 侧电压波形

Fig. 17 Voltage waveform of 35 kV sides

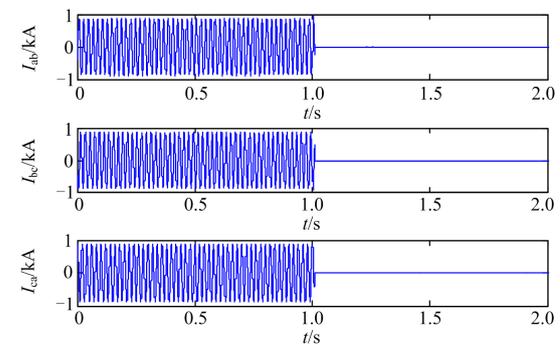


图 18 STATCOM 角内电流输出波形图

Fig. 18 Output waveform of STATCOM angle inner current

减小,相应的无功输出指令值也开始减小至-0.2 p.u.。当 500 kV B 相电压持续降低至 181.9 kV (0.6 p.u.)且超过 5 ms 后,STATCOM 控制系统报“电网故障闭锁动作”,图 19 为无功指令图,也表明 STATCOM 的无功输出正确跟随了控制器的无功指令。

图 20 为 STATCOM 动作时序图,也可以看出 STATCOM 的解闭锁动作时序满足以上分析过程。

图 21 为差流波形。分析可知,#6 降压变在低压侧电流消失后,高压侧电压有一定畸变,同时装置三相均产生了差流,差流最大值分别为  $0.94I_e$ 、 $1.27I_e$ 、 $0.69I_e$ ,其中高压侧  $I_e$  值为 0.105 A。三相差流均超过装置启动值( $0.4I_e$ ),引起降压变保护跳闸动作。

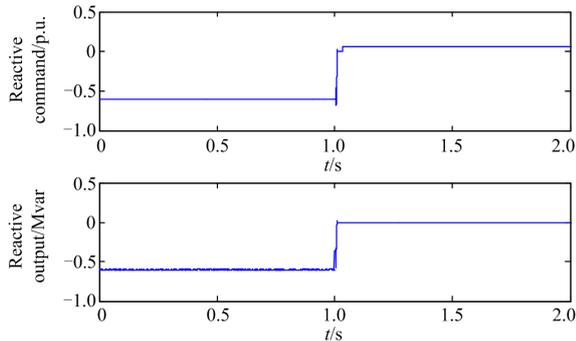


图 19 无功指令图

Fig. 19 Reactive command waveform

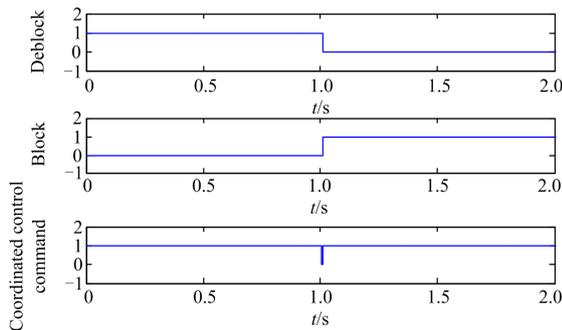


图 20 STATCOM 动作时序图

Fig. 20 Action timing sequence of STATCOM

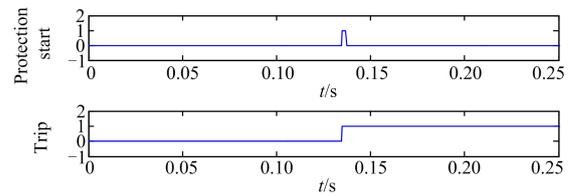
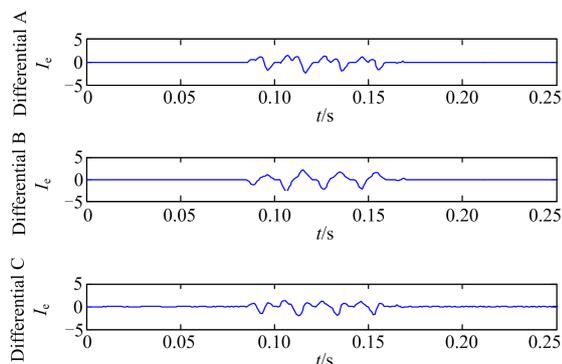


图 21 差流波形

Fig. 21 Waveform of differential current

由以上分析可知,#6 降压变在#3 STATCOM 暂时闭锁期间的正常运行,是保证#3 STATCOM 再次重新解锁的前提条件。如果#6 降压变跳闸,#3 STATCOM 也就无法再次投入正常工作,直流系统的安全稳定运行也将受到影响。

#### 4 结论

本文通过分析 STATCOM 在交流滤波器投入过程中的逆向控制及在交流瞬时故障恢复中的暂态支撑作用,对 STATCOM 的控制策略和响应特性进行详细阐述。证明了 STATCOM 对受端换流站交流滤波器的投切和故障恢复产生了积极的促进作用,保证了直流系统的安全稳定运行。

为避免以后出现“01.10”类型的故障,建议在降压变的比率差动保护逻辑中加入 STATCOM 的运行状态量,在比率差动保护逻辑中加入一定的延时或者在短时内退出比率差动保护,待系统电压条件满足 STATCOM 重新投入的条件时,STATCOM 重新解锁并向系统提供无功支撑,以促进系统电压的快速恢复。通过以上研究,有利于熟练掌握 STATCOM 在直流换流站的应用技术,并对直流输电工程中 STATCOM 和降压变进行更优的选型和策略配置提供一定的借鉴作用。

#### 参考文献

- [1] 刘毅力,贾轩涛,戴国安,等. 永仁-富宁直流工程三种功率输送方式自动转换顺序控制及影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 139-146.  
LIU Yili, JIA Xuantao, DAI Guoan, et al. Analysis of auto-sequence control and influence of three power transmission modes in Yongren-Funing HVDC Project[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 139-146.
- [2] 张东辉,洪潮,周保荣,等. 云南电网与南方电网主网异步联网系统方案研究[J]. 南方电网技术, 2014, 8(6): 1-3.  
ZHANG Donghui, HONG Chao, ZHOU Baorong, et al. Asynchronous interconnection system scheme for Yunnan

- Power Grid and the Main Grid of China Southern Power Grid[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(6): 1-3.
- [3] 李勇, 程汉湘, 方伟明, 等. 无功补偿装置在电力系统的应用综述[J]. 广东电力, 2016, 29(6): 87-92.  
LI Yong, CHENG Hanxiang, FANG Weiming, et al. Review on application of reactive power compensation device in power systems[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(6): 87-92.
- [4] 饶宏, 陈俊, 许树楷, 等. 输电系统用 STATCOM 多电平主回路方案选择[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(23): 83-87.  
RAO Hong, CHEN Jun, XU Shukai, et al. Selection of multilevel main circuit schemes of STATCOM for transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(23): 83-87.
- [5] 束洪春, 孙世云. 单相重合时序对特高压交直流系统暂态电压稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 32-37.  
SHU Hongchun, SUN Shiyun. Influence of single-phase reclosure sequence on transient voltage stability of ultra-high voltage AC/DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 32-37.
- [6] 丁冠军, 汤广福, 丁明, 等. 新型多电平电压源换流器模块的拓扑机制与调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(36): 1-8.  
DING Guanjun, TANG Guangfu, DING Ming, et al. Topology mechanism and modulation scheme of a new multilevel voltage source converter modular[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(36): 1-8.
- [7] 赵萍. 一起差动保护误动实例分析及对策探讨[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 104-107.  
ZHAO Ping. Analysis and countermeasures on a case of mal-operation of transformer differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 104-107.
- [8] 刘强, 蔡泽祥, 刘为雄, 等. 交直流互联电网暂态功率倒向及对继电保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 34-38.  
LIU Qiang, CAI Zexiang, LIU Weixiong, et al. Transient power converse in AC/DC interconnected power grid and its influence on protective relaying[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 34-38.
- [9] 郑涛, 曹志辉. 基于模糊逻辑的变压器励磁涌流二次谐波闭锁方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 39(2): 62-65.  
ZHENG Tao, CAO Zhihui. Scheme for second harmonic block of magnetizing inrush current in transformers based on fuzzy logic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 39(2): 62-65.
- [10] 辛拓, 王延纬, 孙吉波. STATCOM 动态无功储备及其影响因素分析[J]. 广东电力, 2016, 29(6): 56-60.  
XIN Tuo, WANG Yanwei, SUN Jibo. Analysis on STATCOM dynamic reactive power reservation and its influencing factors[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(6): 56-60.
- [11] 周晓华, 张银, 刘胜永, 等. 静止无功补偿器新型自适应动态规划电压控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 77-84.  
ZHOU Xiaohua, ZHANG Yin, LIU Shengyong, et al. Voltage control of static Var compensator based on novel adaptive dynamic programming[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 77-84.
- [12] 曾果, 李兴源, 段毅. 基于内模控制理论的 HVDC IMC-PID 控制器设计[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 162-167.  
ZENG Guo, LI Xingyuan, DUAN Yi. Design of IMC-PID controller based on internal model control theory for HVDC control system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 162-167.
- [13] 梅红明, 刘建政. 角接链式 STATCOM 的环流控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(36): 6398-6406.  
MEI Hongming, LIU Jianzheng. Circulating current control of the delta-connected cascaded STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(36): 6398-6406.
- [14] 李探, 赵成勇, 王朝亮, 等. 用于电网黑启动的 MMC-HVDC 系统换流站启动策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 117-122.  
LI Tan, ZHAO Chengyong, WANG Chaoliang, et al. Startup scheme for converter station of MMC-HVDC using in grid black start[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 117-122.
- [15] 姚志垒, 肖岚, 陈良亮. 三相 SVPWM 并网逆变器的改进解耦控制方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 99-103.  
YAO Zhilei, XIAO Lan, CHEN Liangliang. An improved decoupling control method for three-phase grid-connected inverters with SVPWM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 99-103.
- [16] 谢伟, 崔勇, 冯煜尧, 等. 上海电网 220 kV 统一潮流控制装置示范工程应用效果分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 136-142.  
XIE Wei, CUI Yong, FENG Yuyao, et al. Analysis of

- application effect of 220 kV UPFC demonstration project in Shanghai Grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 136-142.
- [17] 宋强, 刘文华, 李笑倩, 等. 模块化多电平换流器稳态运行特性的解析分析[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 198-204.  
SONG Qiang, LIU Wenhua, LI Xiaoqian, et al. An analytical method for analysis on steady-state operating characteristics of modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 198-204.
- [18] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过流分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 31(1): 1-7.  
WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Analysis of sub module over current caused by DC pole to pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 31(1): 1-7.
- [19] 赵成勇, 李丹, 刘羽超, 等. 含有 STATCOM 的高压直流输电系统控制方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2440-2448.  
ZHAO Chengyong, LI Dan, LIU Yuchao, et al. Control method for HVDC system with STATCOM[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2440-2448.
- [20] 李广凯, 江政昕, 赵昕, 等. 电压源换流器高压直流输电的特点与前景[J]. 南方电网技术, 2011, 5(5): 13-17.  
LI Guangkai, JIANG Zhengxin, ZHAO Xin, et al. The characteristics and prospect of VSC-HVDC power transmission[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(5): 13-17.
- [21] 吴小丹, 王翀, 朱信舜, 等. 应用于直流换流站的百兆乏 STATCOM 控制策略[J]. 电力电子技术, 2016, 50(4): 48-50.  
WU Xiaodan, WANG Chong, ZHU Xinshun, et al. Control strategy of STATCOM for DC transmission system[J]. Power Electronics, 2016, 50(4): 48-50.
- [22] 胡云, 郭琦, 张建设, 等. 大容量链式 STATCOM 实时仿真建模与策略研究[J]. 电力电子技术, 2018, 52(4): 75-79.  
HU Yun, GUO Qi, ZHANG Jianshe, et al. Real time simulation modeling and strategy research on large capacity cascaded STATCOM[J]. Power Electronics, 2018, 52(4): 75-79.
- [23] 王轩, 魏宏, 欧朱建, 等. 一种抑制 HVDC 换相失败的 STATCOM 补偿方案[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 135-141.  
WANG Xuan, WEI Hong, OU Zhujian, et al. A STATCOM compensation scheme for suppressing commutation failure in HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 135-141.

收稿日期: 2018-08-28; 修回日期: 2018-10-15

作者简介:

邢超(1986—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为直流输电控制保护与试验技术。E-mail: 497336360@qq.com

奚鑫泽(1988—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为新能源并网技术; E-mail: cs\_xxz@163.com

李胜男(1972—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为直流输电控制保护与试验技术。E-mail: 2450564588@qq.com

(编辑 魏小丽)