

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.01.030

# 特高压直流输电工程逆变侧控制策略优化设计

李林, 吕彦北, 王永平, 付广旭, 卢东斌

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:**特高压直流输电在电网中的应用越来越广泛,送端电网与受端电网间采用多回直流相连,在一回直流故障时,通过提升其他直流实现功率紧急支援。在受端电网相对较弱的情况下,当需要大幅紧急提升直流功率时,如逆变侧采用传统修正的定熄弧角控制,会出现换相失败的情况。为此,分析了产生换相失败的原因及交流系统强度和提升量对换相失败的影响,并在现有逆变侧控制策略的基础上,提出一种预防换相失败的控制器,通过引入熄弧角测量值,实现熄弧角闭环控制,从而保证换相裕度,避免换相失败。在实时数字仿真系统(RTDS)中进行了试验验证,结果表明,所提策略可解决特高压直流大幅提升功率时的换相失败问题。

**关键词:**直流输电;弱交流系统;紧急提升;换相失败;定熄弧角控制

**中图分类号:**TM721.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2021)01-0208-07

## 0 引言

特高压直流输电具有输送功率大、启动和调速快、可控性强等优点,对有功功率输送和无功功率消耗均有灵活的调控能力,可用于快速改善交流系统的运行特性<sup>[1]</sup>。特高压直流输电在远距离输电、跨区电网互联中得到了广泛应用,已经成为电网中的一个重要组成部分,是影响电网安全稳定运行的一个重要因素<sup>[2]</sup>。

送端电网与受端电网间采用多回直流相连,在一回直流故障时,通过提升其他直流实现功率紧急支援。在受端电网相对较弱的情况下,当需要大幅提升直流功率时,若采用传统的逆变侧定熄弧角控制策略,会出现换相失败的情况,这是由于大幅提升直流需要消耗大量的无功,对交流系统来说是一个大的扰动。在交流系统出现大的扰动时,传统的逆变侧定熄弧角控制策略输出的触发角较发生扰动之前增大,从而使熄弧角实际值远小于熄弧角参考值,换相裕度减小,进而极易导致换流器发生换相失败<sup>[3-7]</sup>。文献[3]在发生大的暂态扰动时,采用自适应的增益调整,但是需要精确的物理模型。文献[4]在判断出现大的扰动时,采用改进的逆变侧最大触发延迟角控制策略,在某些大扰动情况下具有优势,但需要准确的扰动判据。

为避免发生换相失败,直流控制系统配置了预测换相失败控制功能。该功能主要用于防止由交流故障引起的换相失败,当交流系统出现大的扰动

时,交流电压的变化不一定能达到预测换相失败控制的启动定值,因此不能解决直流功率大幅提升时逆变侧发生换相失败的问题。

文中分析了直流功率大幅提升的执行过程、发生换相失败的原因及交流系统强度和提升量对换相失败的影响。之后,在现有工程应用的逆变侧修正定熄弧角控制器的基础上,提出一种预防换相失败的控制器,将熄弧角测量值引入控制器,实现闭环控制,进而保证换相裕度,避免发生换相失败。最后,在实时数字仿真系统(real time digital simulation system, RTDS)中验证了所提策略的有效性。

## 1 美丽山 II 期直流所接入的交流电网

以巴西美丽山 II 期直流为研究对象,如图 1 所示,巴西美丽山直流输电工程包含两回±800 kV 双极双落点直流。第一回(美丽山 I 回)北部起于欣古换流站,南部止于埃斯特雷多换流站,输电距离为 2 084 km,已于 2018 年建成。第二回(美丽山 II 回)北部起于欣古换流站,止于巴西东南部里约换流站,输电距离为 2 542 km,已于 2019 年建成。每回直流输送容量均为 4 000 MW,直流额定电流为均 2 500 A<sup>[8-14]</sup>。两回直流运行时,功率互相支援,在一回直流故障导致功率损失时,提升另一回直流。

与直流系统互连的交流系统有强弱之分,系统越强则越稳定。有效短路比  $K_{\text{ESCR}}$  是衡量交流系统强弱的重要指标,其计算如下:

$$K_{\text{ESCR}} = \frac{\text{交流系统短路容量} - \text{无功补偿}}{\text{直流系统额定功率}} \quad (1)$$

一般认为, $K_{\text{ESCR}} > 3$  时为强系统, $K_{\text{ESCR}} \in [2, 3]$  时为弱系统, $K_{\text{ESCR}} < 2$  时为极弱系统<sup>[15-16]</sup>。

收稿日期:2020-08-02;修回日期:2020-08-25

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(SCJSJY00JCJS-1800115)

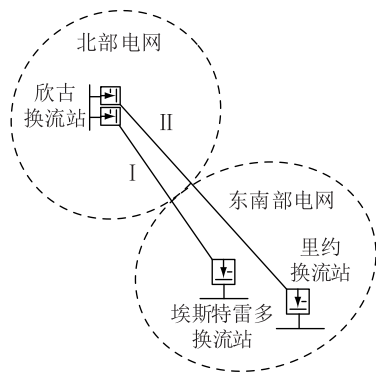


图1 美丽山II期直流所接入的交流电网  
Fig.1 AC power grid which Belo Monte II HVDC connect

巴西美丽山II期直流里约侧交流系统短路容量为  $17\ 834 \sim 54\ 559\ \text{MV} \cdot \text{A}$ ,无功补偿的容量为  $2\ 700\ \text{Mvar}$ ,根据式(1),可以计算出  $K_{\text{ESCR}}$  为  $3.7 \sim 12.9$ ,如考虑直流  $1.5\ \text{p.u.}$ ,过负荷能力,此时的  $K_{\text{ESCR}}$  为  $2.5 \sim 8.6$ 。因此,在交流系统最小运行方式下,存在相对较弱交流系统运行方式。

## 2 大幅提升直流时发生换相失败的问题及原因分析

### 2.1 问题描述

美丽山两回直流运行时,功率互相支援,在一回直流故障导致功率损失时,提升另一回直流。通过RTDS试验发现,采用欣古侧短路容量为  $42\ 166\ \text{MV} \cdot \text{A}$ ,里约侧短路容量为  $17\ 834\ \text{MV} \cdot \text{A}$ (最小短路容量)的戴维南等效系统,直流双极全压运行,功率  $2\ 600\ \text{MW}$ 。模拟收到稳控紧急提升量为  $3\ 400\ \text{MW}$ ,提升速率为  $840\ 000\ \text{MW}/\text{min}$ ,将直流提升至  $6\ 000\ \text{MW}$ ( $1.5\ \text{p.u.}$ ),里约侧出现换相失败。波形如图2所示。

### 2.2 导致换相失败的原因分析

当直流电流从一个阀换相到另一个阀时,最新导通的阀和即将退出导通的阀会同时导通较短的时间,这段时间即叠弧时间。因为晶闸管为半控元件,即将退出导通的阀必须承受一定的反向电压,使得载流子反向恢复后,才能安全关断。因此定义从叠弧结束到换相电压过零点的剩余的电压-时间区域为逆变侧的换相裕度,如图3所示。当换相裕度不足时,退出导通的阀不能关断,从而引起换相失败<sup>[17-20]</sup>。

图3中, $\alpha$ 为延时触发角; $\mu$ 为叠弧角; $\gamma$ 为熄弧角。由图3可知,熄弧角大小和交流电压幅值是决定换相裕度大小的主要因素。

功率提升过程如图4所示,逆变侧控制器的工

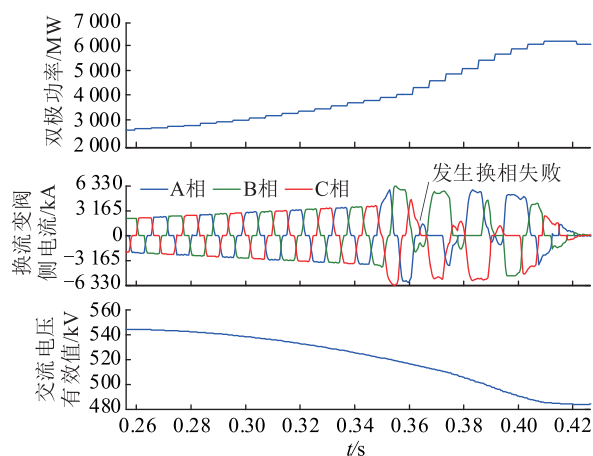


图2 最小短路容量下美丽山II期直流功率由  $2\ 600\ \text{MW}$  提升至  $6\ 000\ \text{MW}$  发生换相失败  
Fig.2 Commutation failure occurs when Belo Monte II HVDC runup from  $2\ 600\ \text{MW}$  to  $6\ 000\ \text{MW}$  under minimum short circuit capacity

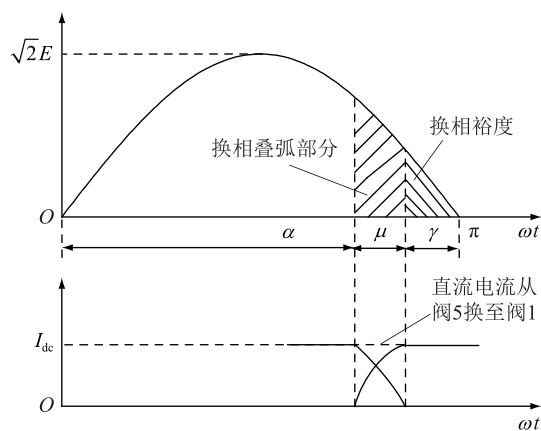


图3 换相裕度的定义

Fig.3 Definition of commutation margin

作分为3个阶段:(1)第一阶段,整流侧 $\alpha$ 大于 $5^\circ$ ,整流侧依靠调节 $\alpha$ 控制直流电流,此时,逆变侧定熄弧角控制器起作用;(2)第二阶段,整流侧 $\alpha$ 已调至最低 $5^\circ$ ,失去控制直流电流的能力,逆变侧定电流控制器起作用;(3)第三阶段,直流电流指令上升已完成,随着直流电流的上升,与电流指令的差小于电流裕度,逆变侧定熄弧角控制器起作用。

通过波形可以看出,在第三阶段时,直流电流指令不变,交流电压减小,直流电流上升,换相过程变长,而定熄弧角控制器输出基本不变( $132^\circ$ ),此时的叠弧角为 $35^\circ$ ,进而导致熄弧角减小至 $13^\circ$ ,交流电压相电压幅值由  $314\ \text{kV}$  下降至  $271\ \text{kV}$ 。根据上述换相裕度的介绍,熄弧角下降和交流电压大幅下降两方面的因素导致换相裕度大幅减小,退出导通的阀没有承受足够的反压,没有关断,从而导致换相失败。

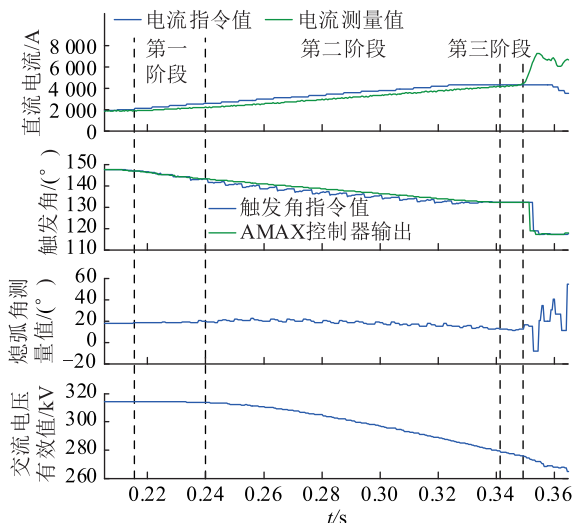


图4 大幅提升过程的3个阶段

Fig.4 Three phases in the process of large runup

同时可以看出,在整个功率提升的过程中,由于直流功率提升了3 400 MW,提升的幅度较大,无功消耗增加,导致交流电压下降了约68 kV。

### 2.3 交流系统强度的影响

欣古侧短路容量不变,仍为42 166 MV·A,里约侧短路容量由17 834 MV·A改为28 000 MV·A,进行同样的试验,无换相失败,波形如图5所示。

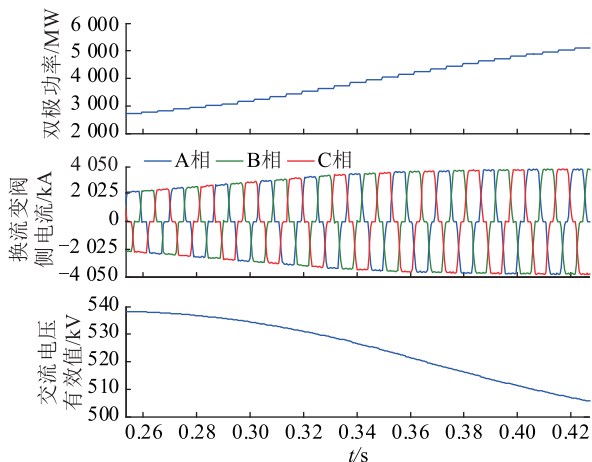


图5 美丽山II期直流功率由2 600 MW提升至6 000 MW(增大短路容量)

Fig.5 Belo Monte II HVDC runup from 2 600 MW to 6 000 MW( increase short circuit capacity)

通过图5可见,随着直流功率上升,换流器消耗无功增加,逆变侧交流电压降低,由于系统强度增加,交流电压下降的幅度减小,下降了约45 kV。对比2.2节的第三阶段,由于此时交流电压变化较小,直流电流相对稳定,没有发生换相失败。

在大幅提升直流时,交流电压降低的程度与交流系统强弱有关,交流系统越弱,逆变侧交流电压降幅越大,越不稳定,越容易导致换相失败。

### 2.4 提升量的影响

采用欣古侧短路容量为42 166 MV·A,里约侧短路容量为17 834 MV·A,减小提升量,功率由2 600 MW提升4 000 MW,进行提升试验,无换相失败,波形如图6所示。

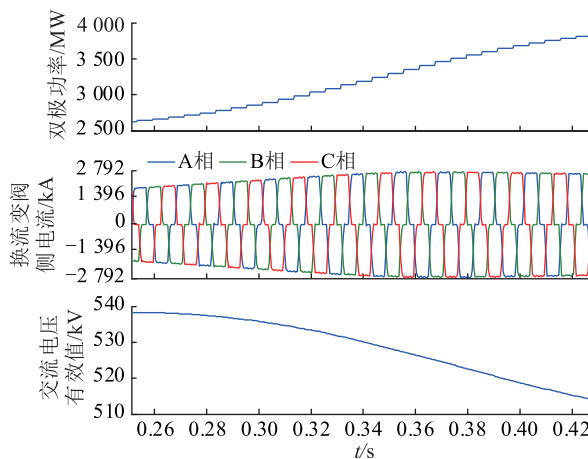


图6 美丽山II期直流功率由2 600 MW提升至4 000 MW(减小提升量)

Fig.6 Belo Monte II HVDC runup from 2 600 MW to 4 000 MW( reduce the runup capacity)

由图6可知,减小直流功率提升量,换流器消耗无功减小,交流电压下降幅度减小,下降约26 kV。对比2.2节的第三阶段,由于此时交流电压变化较小,直流电流相对稳定,没有发生换相失败。

综上,在相对较弱的交流系统下,大幅的紧急提升直流,无功消耗大幅增加,导致交流电压大幅跌落是导致换相失败的主要原因。解决该问题的措施有:

(1) 通过在电网中增加无功补偿设备,稳定交流系统电压,进而避免在大幅提升直流时发生换相失败。

(2) 根据实际电网的运行方式,当交流电网为弱交流系统方式运行时,限制直流功率提升量的上限,确保提升量在安全的范围内,避免大幅提升直流功率。

(3) 在不增加电网设备投资的条件下,从熄弧角控制的角度来说,针对大幅提升直流的情况,进一步优化逆变侧定熄弧角控制策略。由于定熄弧角控制采用的是开环定熄弧角控制,其控制没有引入熄弧角测量值,在某些情况下不能将熄弧角控制在设定值,从而增加了发生换相失败的风险。

## 3 逆变侧控制策略及优化设计

### 3.1 现有的逆变侧控制策略

在高压直流输电工程里,逆变侧配置了定电流

控制器、定电压控制器、修正的定熄弧角控制器,采用限幅的方式在3个控制器之间进行协调配合。定熄弧角控制器的输出作为定电压控制器的最大值限幅,定电压控制器的输出在逆变运行时作为电流调节器的最大值限幅,在整流运行时作为最小值限幅。在两端电流调节器同时工作时,为了避免引起调节不稳定,逆变侧电流调节器的定值一般比整流侧小0.1 p.u.,这就是电流裕度<sup>[21-22]</sup>。在正常运行工况下,逆变侧修正的定熄弧角控制器起作用。

采用定熄弧角控制时,逆变侧的换流器具有负阻抗特性,直流电压随直流电流升高而减小,随直流电流降低而增大。当逆变侧的交流电网为弱系统时,将会带来稳定性问题。修正的定熄弧角控制器根据式(2)和式(3)计算其输出的 $\alpha$ 指令 $\alpha_{\max}$ ,在暂态情况下,修正的定熄弧角控制器具有正斜率特性,有利于提高直流输电系统的稳定性。

$$\beta = \arccos \left[ \cos \gamma_0 - 2d_x \frac{I_o}{I_{dN}} \frac{U_{di0N}}{U_{di0}} - K(I_o - I_d) \right] \quad (2)$$

$$\alpha_{\max} = 180^\circ - \beta \quad (3)$$

式中: $\gamma_0$ 为熄弧角参考值; $d_x$ 为换相电抗; $I_o$ 为直流电流指令值; $I_d$ 为直流电流实测值; $I_{dN}$ 为额定直流电流; $U_{di0N}$ 为额定空载直流母线电压; $U_{di0}$ 为实际空载直流母线电压; $K$ 为正斜率系数。

根据逆变侧修正的定熄弧角控制原理以及式(2)和式(3),可以看出,当直流电流指令 $I_o$ 变化时, $\beta$ 的计算值变化,进而 $\alpha$ 指令 $\alpha_{\max}$ 发生变化。当直流电流指令 $I_o$ 不变时,如 $I_d$ 增大, $\beta$ 将减小, $\alpha_{\max}$ 输出增大,将导致换相裕度减小,从而增加发生换相失败的风险。

### 3.2 逆变侧控制策略优化设计

现有的逆变侧定熄弧角控制策略采用的是开环定熄弧角控制,在稳态和暂态扰动小的情况下,可保证直流输电系统的稳定运行。

当逆变侧出现大的扰动导致交流系统电压降低时,交流电压减小,直流电流上升,换相过程变长,直流电流指令不变,根据定熄弧角控制器的控制原理,其输出基本不变,进而导致熄弧角减小,直至出现换相失败。此时,如果能将熄弧角测量值引入定熄弧角控制,当熄弧角测量值减小时,调整定熄弧角控制器的输出,增加换相裕度,即可避免换相失败。

基于此,文中在现有修正的定熄弧角控制器的基础上,提出一种预防换相失败的控制器,引入熄弧角测量值( $\gamma_m$ ),控制器输出叠加到现有修改中的

定关断角控制器中采用的关断角参考值上,实现定熄弧角闭环控制功能。

预防换相失败的控制器逻辑示意如图7所示,其输入为逆变侧熄弧角设定值( $\gamma_{ref}$ )与经过滤波环节的熄弧角测量值( $\gamma_{mf}$ )的差值;之后经过比例环节和积分环节后,求和,再经过限幅环节,得到熄弧角调节量。

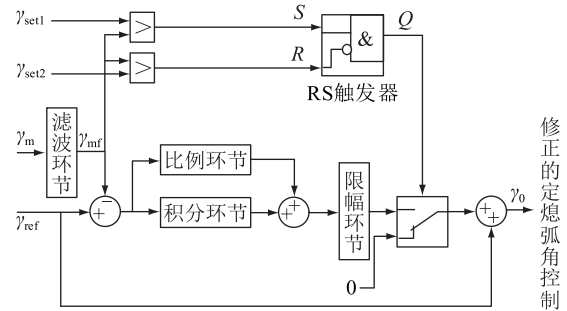


图7 预防换相失败控制器逻辑示意

Fig.7 Controller logic schematic diagram for preventing commutation failure

当经过滤波环节的熄弧角测量值小于设定值1( $\gamma_{set1}$ )时,将熄弧角调节量叠加到逆变侧熄弧角参考值( $\gamma_0$ )上,作为定熄弧角控制器的输入。当经过滤波环节的熄弧角测量值大于设定值2( $\gamma_{set2}$ )时,熄弧角调节量不再叠加到逆变侧熄弧角参考值( $\gamma_0$ )上,同时将积分环节的输出清零。

### 3.3 控制器参数选择

预防换相失败控制器参数整定,首先根据以往工程的经验,确定一套初始参数,在美丽山直流II期工程的RTDS仿真系统中模拟功率大幅提升的试验,根据控制器的响应情况进行控制器参数调整,最终确定一套最优的参数。经过仿真试验研究,最终选择相关参数如表1所示。

表1 预防换相失败控制器参数  
Table 1 Parameters of controller to prevent commutation failure

参数	数值
熄弧角滤波时间常数/ms	20
设定值1( $\gamma_{set1}$ )/(°)	17
设定值2( $\gamma_{set2}$ )/(°)	20
比例系数	1
积分时间常数/ms	6
熄弧角调节量限幅/(°)	10

## 4 RTDS 试验验证

### 4.1 针对紧急提升的验证

增加预防换相失败控制器后,采用欣古侧短路

容量为 42 166 MV·A, 里约侧短路容量为 17 834 MV·A, 功率由 2 600 MW 紧急提升至 6 000 MW, 无换相失败, 波形如图 8 所示。功率在紧急提升过程中, 功率上升平稳, 预防换相失败控制器输出平滑, 补偿后的熄弧角不再随电流增大逐渐下降, 只在参考值 17° 附近小幅变化。

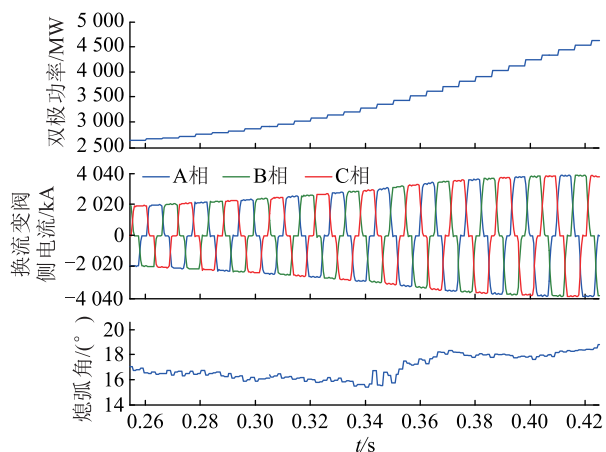


图8 控制策略优化后美丽山 II 期直流功率由 2 600 MW 提升至 6 000 MW

Fig.8 Belo Monte II HVDC runup from 2 600 MW to 6 000 MW after the control strategy is optimized

#### 4.2 对交直流暂态故障的影响验证

为了验证采用文中方法对暂态故障下直流控制响应的影响, 开展了以下交直流暂态故障试验, 试验工况及结果分析如下。

(1) 直流双极全压运行, 功率 4 000 MW, 模拟整流侧单相接地故障, 故障持续 100 ms, 试验波形如图 9(a) 所示。可以看出, 在整流侧接地故障过程中, 逆变侧的熄弧角测量值一直大于 17°, 不满足预防换相失败控制器的启动条件, 预防换相失败控制器输出为 0, 因此, 在整流侧单相接地故障时, 文中设计的预防换相失败控制器对控制系统的响应没有影响。

(2) 直流双极全压运行, 功率 4 000 MW, 模拟逆变侧单相接地故障, 故障持续 100 ms, 试验波形如图 9(b) 所示。可以看出, 在逆变侧接地故障过程中, 逆变侧的熄弧角测量值波动较大, 由于预防换相失败控制器的输入采用经过滤波环节的熄弧角测量值, 因此, 其输出在 5° 左右平稳变化。逆变侧接地故障时, 根据交流电压原理预防换相失败的功能也会动作, 其输出在 24° 左右, 大于预防换相失败控制器的输出。由于控制系统是将二者的输出取大后作为最终的熄弧角增加量, 因此, 在此过程中, 仍是根据交流电压原理预防换相失败的功能起作用, 在逆变侧单相接地故障时, 文中设计的预防换

相失败控制器对控制系统的响应没有影响。

(3) 直流双极全压运行, 功率 4 000 MW, 模拟极 2 直流线路接地故障, 故障持续 100 ms, 试验波形如图 9(c) 所示。可以看出, 在直流线路接地故障过程中, 逆变侧的熄弧角测量值一直大于 17°, 不满足预防换相失败控制器的启动条件, 预防换相失败控制器输出为 0。因此, 在直流线路接地故障时, 文中设计的预防换相失败控制器对控制系统的响应没有影响。

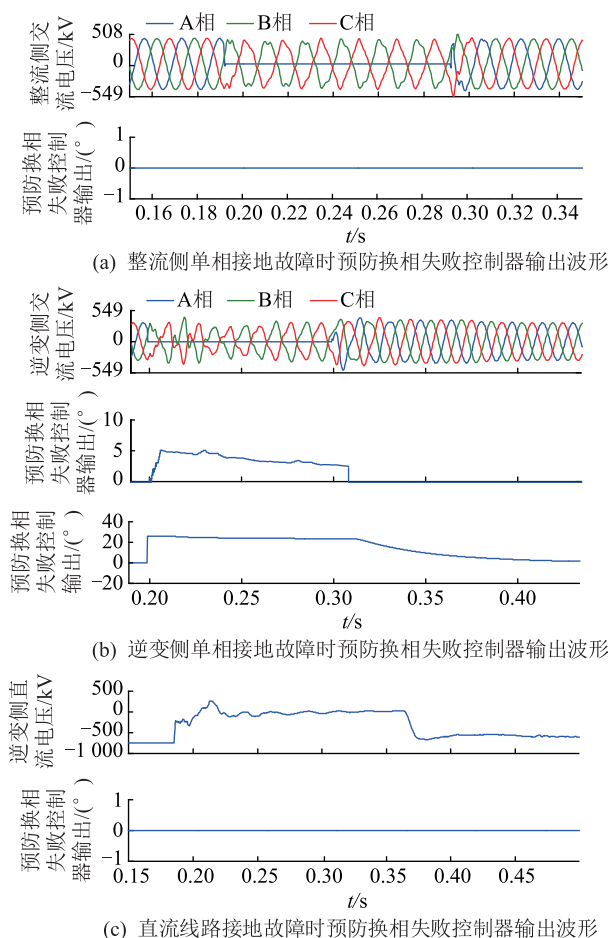


图9 控制策略优化后暂态故障验证试验

Fig.9 Transient fault verification test after the control strategy is optimized

#### 5 结语

文中对弱受端的高压直流输电工程在大幅提升直流功率时, 逆变侧会出现换相失败的问题展开了研究, 解决该问题的措施主要有: 增加无功补偿设备、限制提升量和优化控制策略。通过对现有逆变侧控制策略的分析, 提出一种改进策略, 通过详细的 RTDS 仿真试验表明, 采用文中所提策略, 无需增加电网投资和对提升量限制, 即可解决大幅提升直流功率时的逆变侧换相失败问题, 具有工程应用的价值。

此外,导致逆变侧出现换相失败的原因有多种,比如阀误触发、两极线路间的互感等。关于该策略对于其他原因导致的逆变侧换相失败的抑制效果,有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京:中国电力出版社, 2013.  
LIU Zhenya. UHV AC/DC power grid[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2013.
- [2] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京:中国电力出版社, 2015.  
LIU Zhenya. Global energy Internet[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2015.
- [3] JOHN R, MANSOUR S. Gain scheduling adaptive control strategies for HVDC systems to accommodate large disturbances[J]. IEEE Transactions on Power System, 1994, 9(1): 366-372.
- [4] 卢东斌, 王永平, 王振曦, 等. 分层接入不同交流电网的特高压直流输电逆变侧最大触发角控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1808-1815.  
LU Dongbin, WANG Yongping, WANG Zhenxi, et al. Inverter maximum alpha control in UHVDC transmission with hierarchical connection mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1808-1815.
- [5] 邵瑶, 汤涌. 采用多馈入交互作用因子判断高压直流系统换相失败的方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 108-114.  
SHAO Yao, TANG Yong. A commutation failure detection method of HVDC systems based on multi infeed interaction factor[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 108-114.
- [6] 周前, 张潮, 张宁, 等. 2018年多直流馈入江苏规划电网连锁换相失败分析[J]. 电力工程技术, 2018, 37(1): 51-57.  
ZHOU Qian, ZHANG Chao, ZHANG Ning, et al. Analysis on commutation failures in multi-infeed HVDC system in planning power grid of Jiangsu in 2018[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1): 51-57.
- [7] 吴萍, 林伟芳, 孙华东, 等. 多馈入直流输电系统换相失败机制及特性[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 269-274.  
WU Ping, LIN Weifang, SUN Huadong, et al. Research and electromechanical transient simulation on mechanism of commutation failure in multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 269-274.
- [8] 李林, 吕彦北, 龚飞, 等. 美丽山特高压直流 II 期工程交流系统故障恢复特性研究[J]. 电气技术, 2020, 21(7): 57-63.  
LI Lin, LYU Yanbei, GONG Fei, et al. Research on recovery characteristics of AC system fault for Belo Monte II UHVDC[J]. Electric Engineering, 2020, 21(7): 57-63.
- [9] 李林, 吕彦北, 龚飞, 等. 美丽山特高压直流 II 期工程附加控制功能设计[J]. 电气技术, 2020, 21(6): 56-62.  
LI Lin, LYU Yanbei, GONG Fei, et al. Design of additional control function for Belo Monte II UHVDC[J]. Electric Engineering, 2020, 21(6): 56-62.
- [10] 刘云. 我国特高压直流输电技术的巴西本地化工程实施方案[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3224-3230.  
LIU Yun. Preliminary study on project localization in Brazil utilizing Chinese UHVDC technologies[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3224-3230.
- [11] 黄清, 单葆国. 巴西未来 10 年输电扩展计划及投资机会分析[J]. 能源技术经济, 2011, 23(5): 5-9.  
HUANG Qing, SHAN Baoguo. Brazil's ten-year electricity transmission expansion plan and market potential for investment[J]. Energy Technology and Economics, 2011, 23(5): 5-9.
- [12] 李林. 美丽山特高压直流 II 期工程双极线间的互感影响及控制策略优化研究[C]//全球能源互联网与大学创新发展论坛. 济南, 2018: 245-250.  
LI Lin. Study on effect on mutual inductance between DC transmission lines in Belo Mountain UHVDC phase II and control strategy improvement[C]//Global Energy Internet and University Innovation Development Forum. Ji'nan, 2018: 245-250.
- [13] 周静. 巴西美丽山二期特高压直流工程系统设计[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3102-3109.  
ZHOU Jing. System design of Belo Mountain UHVDC phase II transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3102-3109.
- [14] 程改红, 殷威扬. 巴西美丽山特高压直流输电系统设计特点[J]. 中国电力, 2015, 48(7): 22-26.  
CHEN Gaihong, YIN Weiyang. Design of Belo Monte UHVDC transmission project in Brazil[J]. Electric Power, 2015, 48(7): 22-26.
- [15] 李林, 赵文强, 夏尚学, 等. 弱送端的高压直流输电系统与稳控系统的功率回降策略与接口设计[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(2): 7-10.  
LI Lin, ZHAO Wenqiang, XIA Shangxue, et al. Design of run-back strategy and interface between SSC and HVDC system with weak system at sending end[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(2): 7-10.
- [16] 刘振亚, 秦晓辉, 赵良, 等. 特高压直流分层接入方式在多馈入直流电网的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 1-7.  
LIU Zhenya, QIN Xiaohui, ZHAO Liang, et al. Study on the application of UHVDC hierarchical connection mode to multi-infeed HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 1-7.
- [17] 李兆伟, 吴雪莲, 曹路, 等. 抑制直流连续换相失败的调相机紧急控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 42(22): 91-97.  
LI Zhaowei, WU Xuelian, CAO Lu, et al. Emergency control of synchronous condenser to suppress DC continuous commutation failure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 42(22): 91-97.
- [18] 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. Research on the control strategy for suppressing overvoltage of sending grid dur-

ing commutation failure[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(3): 60-66.

[19] 张伟晨,熊永新,李程昊,等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.

ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.

[20] 张国辉,景柳铭,王宾,等. 谐波引起的高压直流输电连续换相失败抑制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 33-41.

ZHANG Guohui, JING Liuming, WANG Bin, et al. Study on HVDC consecutive commutation failures mitigation method caused by harmonics [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 33-41.

[21] 李林,赵文强,王永平,等. 无站间通信下的高压直流输电系统逆变侧频率控制研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 131-135.

LI Lin, ZHAO Wenqiang, WANG Yongping, et al. Research on frequency control of HVDC inverter side without telecommunication between stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 131-135.

[22] 张庆武,陈乐,鲁江,等. 直流输电控制策略对换相失败影响的比较研究[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(7): 53-57.

ZHANG Qingwu, CHEN Le, LU Jiang, et al. Comparative study on the influence of HVDC control strategy on commutation failure[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(7): 53-57.

作者简介:



李林

李林(1980),男,硕士,高级工程师,从事特高压直流输电控制保护系统研发工作(E-mail: lilin2@nrec.com);

吕彦北(1993),男,硕士,工程师,从事特高压直流输电控制保护系统研发工作;

王永平(1978),男,硕士,研究员级高级工程师,从事特高压直流输电控制保护系统研发工作。

### Optimal design of inverter side control strategy for UHVDC

LI Lin, LYU Yanbei, WANG Yongping, FU Guangxu, LU Dongbin  
(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** UHVDC is more and more widely used in power grid, and multi-HVDC is adopted to connect the sending and receiving power grids. When one HVDC fault occurs, emergency power support is realized by runup other HVDC. In the case of weak receiving power grid, when one HVDC needs runup greatly, commutation failure will occur if the traditional extinguishing angle control strategy is adopted on the inverting side. Therefore, the causes of commutation failure and the influence of AC system strength and runup amount are analyzed. Then, an improved extinguishing angle control strategy on the inverter side is proposed, which introduce extinction angle measure value into the controller and realize closed-loop control, so as to ensure commutation margin and avoid commutation failure. Then experimental verification is carried out on RTDS simulation system, and test results show that the proposed strategy can solve the commutation failure problem when runup HVDC with weak receiving end greatly.

**Keywords:** ultra high-voltage direct current(UHVDC); weak AC system; emergency runup; commutation failure; constant gamma control

(编辑 钱悦)