

# 换相失败预测控制对特高压直流运行影响分析及改进

李程昊, 刘遵义, 石光, 张振安, 王骅

(国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南省 郑州市 450052)

## Analysis of Influence and Improvement of Commutation Failure Prevention for UHVDC Transmission Systems

LI Chenghao, LIU Zunyi, SHI Guang, ZHANG Zhen-an, WANG Hua

(Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, Henan Province, China)

**Abstract:** The simulation result of commutation failure in ultra-high voltage direct current (UHVDC) transmission systems after AC faults in the inverter side is sometimes not in accordance with actual operation. One of the reasons is that the simulation model does not take into account the commutation failure prevention control which is widely used in practical engineering. This paper analyzes the influence of commutation failure prevention control on the UHVDC operation in detail based on the description of two special events occurred in Tianzhong HVDC transmission system. The HVDC transmission model including commutation failure prevention control is used to replay these two events with accuracy. It is found that the frequent maloperation of commutation failure control and the fluctuation of DC power exist when inrush current occurs. An improved commutation failure prevention control strategy is proposed to avoid this phenomenon. Validity of the improved method is proved by simulation results.

**Keywords:** UHVDC; commutation failure; inrush current; fault analysis

**摘要:** 特高压直流输电系统在受端交流故障情况下的换相失败仿真结果有时会与实际运行情况有所差异, 其原因之一在于仿真模型没有计及实际工程中使用的换相失败预测控制。在阐述特高压天中直流工程发生的两起特殊事件的基础上, 详细分析了换相失败预测控制模型对特高压直流仿真结果的影响, 通过搭建包含换相失败预测控制的直流输电模型对这两起事件进行了准确的仿真反演, 发现换相失败预测控制在交流系统励磁涌流下会频繁动作, 造成直流功率波动, 并提出了能躲过励磁涌流的换相失败预测控制改进措施, 仿真验证了该改进措施的有效性。

**关键词:** 特高压直流; 换相失败; 励磁涌流; 事故分析

## 0 引言

中国正大力发展适用于远距离、大容量输电的特

高压直流输电技术, 随着多项特高压直流输电工程的投入运行, 多直流馈入的受端电网形成典型的“强直弱交”结构, 极易发生换相失败<sup>[1-3]</sup>。换相失败会造成直流电流、电压、功率的剧烈变化, 对交流系统产生巨大影响<sup>[4-6]</sup>。由于换流阀熄弧角过小是引起换相失败的根本原因<sup>[7-8]</sup>, 目前实际工程中采用两种换相失败响应策略: 一种是基于实测熄弧角的换相失败控制方法<sup>[9]</sup>; 另一种是换相失败预测控制 (commutation failure prevention, CFPREV)<sup>[10]</sup>。其中, 南方电网公司的高肇、楚穗等直流输电工程采用基于实测熄弧角的换相失败控制策略<sup>[11]</sup>, 而国家电网所辖的天中直流输电工程则采用了CFPREV技术。

目前在进行直流输电的仿真研究时, 很多时候并未考虑CFPREV的影响<sup>[12-17]</sup>。在仿真研究中发现: 未考虑CFPREV的情况下进行故障扫描得出的结果与实际不符, 因此, 有必要研究CFPREV对特高压运行特性的影响。文献[10]和文献[18]在进行特高压直流输电仿真时, 虽然考虑了CFPREV的作用, 但没有结合实际工程案例进行对比分析, 无法说明CFPREV对直流输电模型仿真准确程度的影响。此外, 实际工程案例显示, 除避免换相失败外, CFPREV还可动作于交流系统的励磁涌流, 进而使直流功率异常波动, 造成系统运行的恶化。由于许多文献在进行直流输电仿真时未计及CFPREV, 因此这一点在文献中也鲜有提及。

鉴于此, 本文对天中直流控制保护系统中的CFPREV功能模块进行了详细建模, 进而对天中直流输电系统中发生的两起特殊的CFPREV动作事件进行了准确的仿真反演, 并基于此研究了换相失败预测控制模型对特高压直流输电仿真结果的影响, 指出了河南电网可能引发天中直流换相失败的故障区域。此

外，结合实际工程案例对CFPREV在励磁涌流下的异常动作情况进行了分析，并提出了相应的解决措施，结合录波数据，利用仿真验证了所提措施的有效性。

### 1 CFPREV功能简介

CFPREV功能模块是特高压直流控保系统的核心技术之一，在交流故障或励磁涌流引起的动态过程中具有重要作用。CFPREV通过检测交流系统故障，并根据交流系统故障的严重程度，输出触发角偏移角度至换流器控制器，使逆变侧熄弧角增加，从而起到抑制换相失败的作用。

图1为天中直流工程CFPREV模块的控制原理图<sup>[19]</sup>，图中 $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ 分别表示交流系统三相电压，DIFF\_LEVEL和ABZ\_LEVEL分别表示不对称故障和对称故障检测的阈值，AMIN\_CFPREV表示CFPREV输出的触发角偏移角度。该触发角偏移角度将直接作用于特高压直流输电系统换流器控制层级，使触发角的指令值降低，进而提高熄弧角，降低换相失败概率。

该控制系统包含并行的两部分，上半部分将换流母线三相电压瞬时值的代数和 $3U_0$ 作为输入，表征电压畸变程度。

$$3U_0 = U_a + U_b + U_c \quad (1)$$

其中， $3U_0$ 代表换流母线三相电压瞬时值的代数和。当 $3U_0$ 超过阈值DIFF\_LEVEL时，代表检测到交流系统的不对称故障，并输出触发角偏移角度。

下半部分将换流母线三相电压变换至静止坐标系下的 $U_{\alpha\beta}$ ，表征电压的跌落幅度。

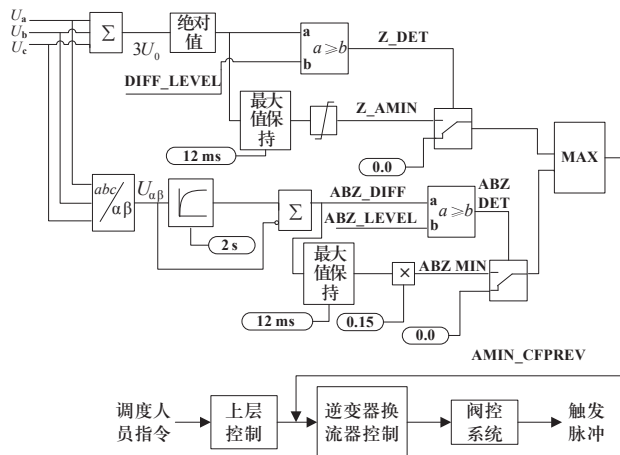


图1 CFPREV控制原理示意图  
Fig. 1 Block diagram of CFPREV

$$U_\alpha = \frac{2}{3}U_a - \frac{1}{3}(U_b + U_c) \quad (2)$$

$$U_\beta = \frac{\sqrt{3}}{3}(U_b - U_c) \quad (3)$$

$$U_{\alpha\beta} = \sqrt{U_\alpha^2 + U_\beta^2} \quad (4)$$

式中， $U_{\alpha\beta}$ 表示换流母线三相电压变换至静止坐标系下的值。当 $U_{\alpha\beta}$ 超过阈值ABZ\_LEVEL时输出相应的触发角偏移角度。

CFPREV通过主动调节逆变器触发角，增大换相裕度，从而实现避免换相失败的功能，但CFPREV调节能力有限，无法避免所有换相失败。

### 2 CFPREV对换相失败的影响分析

#### 2.1 菊城站220 kV线路单相故障事件

菊城变电站位于河南省开封市境内，与天中直流的逆变侧中州站通过三回交流线路直接相连。2016年3月17日17时54分44秒，菊城变220 kV南母东段发生B相接地故障。

故障发生时菊城220 kV侧双母线单联变运行，220 kV北母东段和南母东段经菊东220开关并列运行。南母东段运行元件为I菊杏线；北母东段运行元件为II菊杏线，菊222开关，主接线如图2所示。

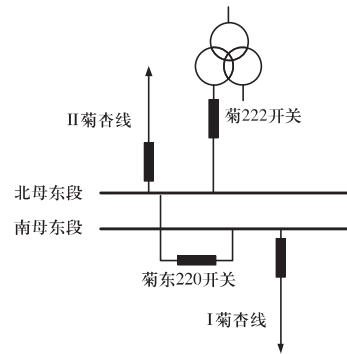


图2 故障前菊城站220 kV侧主接线示意图  
Fig. 2 Electrical primary system of 220 kV side of Jucheng station before fault

故障发生后，母线差动保护动作，I菊杏、菊东220断路器跳闸，220 kV南母东段失压，故障持续约50 ms后三相跳闸。菊城站短路故障引起中州换流站500 kV换流母线电压变化的录波曲线如图3所示。录波数据显示故障相电压最低跌落至255 kV（跌落17%）。根据天中直流的保护信息系统可知，故障结束后，系统很快恢复正常运行，天中直流并未发生换相失败。

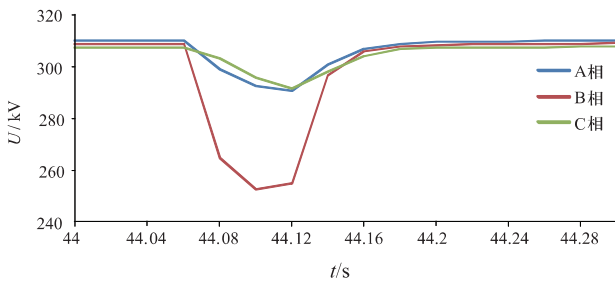


图3 中州站换流母线电压有效值录波图  
Fig. 3 Recorded voltage waveform in Zhongzhou station

### 2.2 事件过程分析

按照故障扫描结果，菊城变220 kV侧单相故障将引起中州换流站的换相失败。但在本次事故中，并未发生换相失败事故，与故障扫描结果不符。由于故障扫描没有计及天中直流的CFPREV，因此可以推断是由于CFPREV动作，减小触发角，增加换相裕度，从而避免了后续换相失败发生，下面通过仿真加以验证。

### 2.3 CFPREV对换相失败的影响仿真

以菊城站220 kV母线故障录波为依据，分析CFPREV对换相失败的影响。

基于PSCAD/EMTDC建立如图4所示的直流系统。换流变、滤波器采用天中直流设备参数，直流控制系统采用基本模型及参数；逆变侧短路比设置为4，即河南交直流系统短路比典型值。

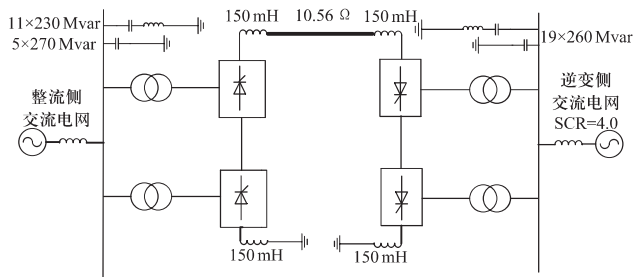
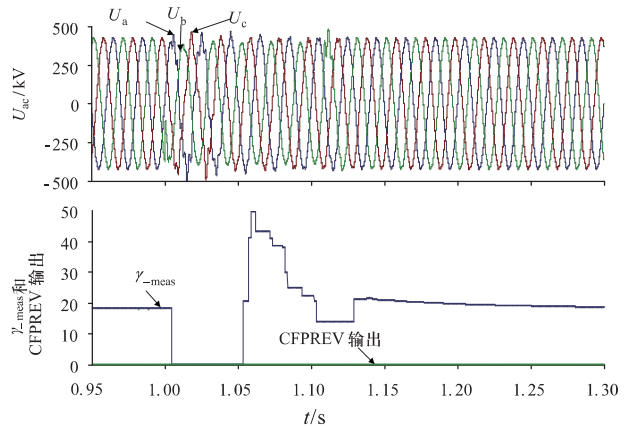
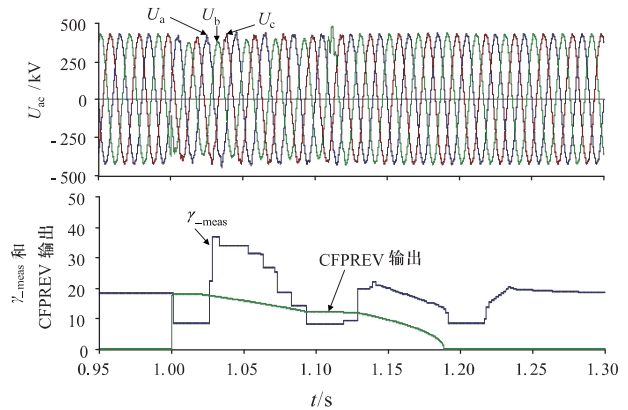


图4 仿真系统一次模型  
Fig. 4 The primary model of the simulation system

首先在天中直流模型逆变侧设置与中州换流站在菊城站故障后相同的电压跌落幅度（故障相跌落17%），直流控制系统中不包含图1所示CFPREV。分析仿真结果图5(a)可知，故障瞬间未发生换相失败，但后续换相过程发生换相失败。主要原因是自然换相点前移以及换相电压跌落，造成换相面积损失。



(a) 不加CFPREV



(b) 加CFPREV

图5 B相换流器电压和逆变器熄弧角（故障相跌落17%）  
Fig. 5 The voltage of converter and extinction angle in phase B

设置同样的换流母线电压跌幅，在直流控制系统中加入CFPREV控制。分析仿真结果图5(b)可知，通过CFPREV控制作用，熄弧角增加，未发生换相失败。主要原因为CFPREV增加换相裕度，补偿换相面积损失，与实际运行情况相符。

从以上两组仿真结果可知CFPREV在故障后能够迅速增加熄弧角，增大换相裕度，从而避免换相失败。

加大故障严重程度，使换流母线故障相电压跌落32%。分析仿真结果图6可知，此时发生了换相失败（CFPREV输出最大限制值23°）。主要原因为CFPREV增加换相裕度能力有限，无法补偿严重故障时换相面积损失。

通过以上分析可知，菊城变220 kV南母东段发生B相接地故障未引起中州换流站换相失败的原因在于CFPREV的作用。在河南交流电网不同地点发生短路会造成中州站换流母线电压不同的跌落幅度，若交流故障导致换流母线电压跌落过大，则CFPREV可能无法使其免于换相失败。通过仿真求得在不计及

CFPREV时，使天中直流发生换相失败的最小换流母线电压跌幅约为8.7%；计及CFPREV时，使其发生换相失败的最小电压跌幅约为28%。

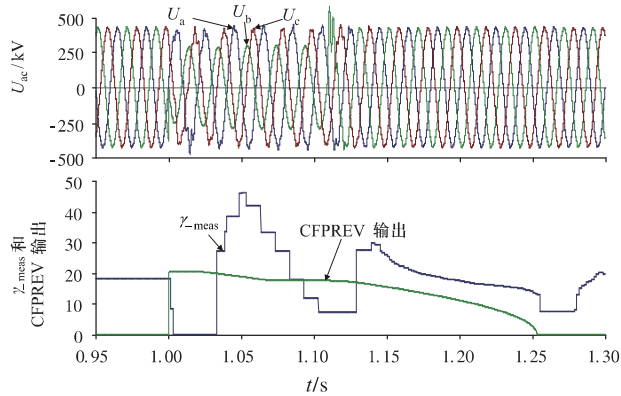


图 6 B相电压跌落32%时换流器电压和逆变器熄弧角 (加入CFPREV)

Fig. 6 The voltage of converter and extinction angle during the 32% voltage drop in phase B (with CFPREV)

在ADPSS机电-电磁暂态混合仿真平台上自定义搭建CFPREV模块，并加入原直流输电控制系统。利用新的特高压天中直流电磁暂态模型，使用机电-电磁混合仿真方法，对河南电网单相故障引起中州换流站换相失败的范围重新进行扫描，与不考虑CFPREV的扫描结果进行对比如图7所示。可以看出当不考虑CFPREV时，河南电网有47座500 kV变电站和136座220 kV变电站发生单相短路故障时，会引起天中直流换相失败；当考虑CFPREV时，仿真结果显示仅有10座500 kV变电站和2座220 kV变电站发生单相短路故障时，才会引起天中直流换相失败。当考虑CFPREV时，仿真结果更接近实际情况；因此若在进行故障扫描时未考虑CFPREV的作用，则所得的结论偏保守。在实际工程中，只需重点加强对会引起天中直流换相失败的12个厂站的故障预防，即可有效地避免天中直流换相失败。

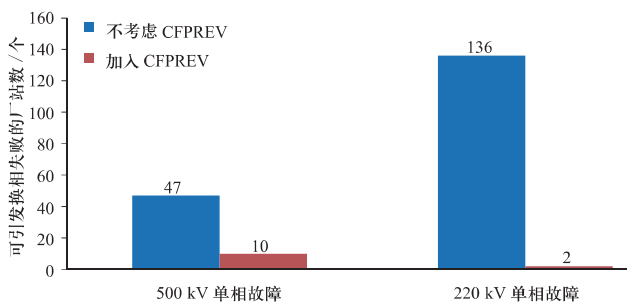


图 7 故障扫描结果对比

Fig. 7 Comparison of fault scanning results

### 3 励磁涌流下CFPREV对系统的影响分析

#### 3.1 天中直流功率异常波动事件

官渡变电站与中州换流站通过两回交流线路直接相连。2016年3月21日20:43:23，500 kV官渡站#1主变充电，B相励磁涌流有效值达到1136 A，持续15 s后衰减至10%。在励磁涌流的影响下，天中特高压直流功率发生波动，13秒后平息，期间有功功率峰谷最大差额达到650 MW。天中直流输送功率录波如图8所示。

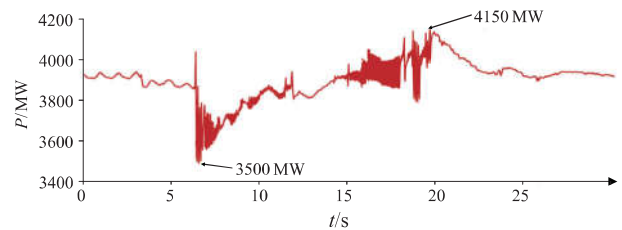


图 8 天中直流输送功率录波

Fig. 8 Recorded waveform of power transferred in Tianzhong HVDC

#### 3.2 事件过程分析

与文献[20]所述励磁涌流造成华东枫泾直流换相失败等事件不同，该次事故中天中直流功率波动持续时间长、具有周期性，且没有造成换相失败。为探究该故障发生的原因，下面结合录波数据对该事故进行分析。

励磁涌流期间，对中州换流站500 kV母线电压进行谐波分析，可得A、B、C相电压总畸变率分别为2.17%、4.24%、3.21%，其中B相畸变率最大。对B相电压进行谐波分析，得到其2~7次谐波分量如图9所示。可以看出，3、4、5、6次谐波畸变率较大，达到1.7~2.16%，2次谐波为0.387%。

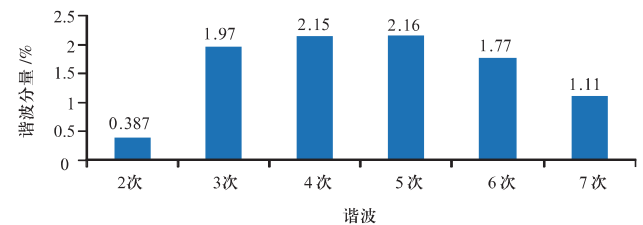


图 9 中州站B相电压谐波分量

Fig. 9 The harmonic component of phase B voltage in Zhongzhou station

换流母线电压的谐波分量对CFPREV的控制量输出产生了很大的影响。在励磁涌流期间，中州站换流母线A、B、C三相电压和 $3U_0$ 及触发角录波如图10所示。可以看出，中州站换流母线的谐波使CFPREV

中的 $3U_0$ 发生周期性波动,波动周期为20 ms,波动范围为 $-0.15 \text{ pu} \sim 0.1 \text{ pu}$ 。 $3U_0$ 的波动引起CFPREV的输出周期性变化,这导致逆变侧触发角的变化在 $5 \sim 8^\circ$ 范围内波动,进而引起天中直流功率出现异常波动。

由以上分析可知,天中直流功率异常波动的原因是官渡站主变充电产生的励磁涌流使CFPREV中 $3U_0$ 周期性超过阈值,导致CFPREV输出频繁变化,进而引起逆变侧触发角波动,使直流功率发生异常变化。

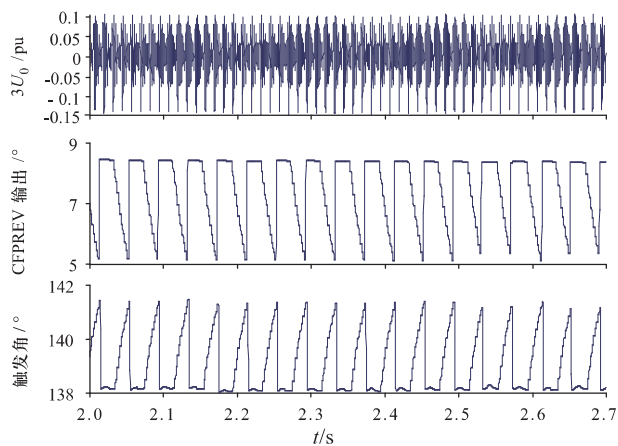


图 10 中州站录波曲线

Fig. 10 The recorded waveform in Zhongzhou station

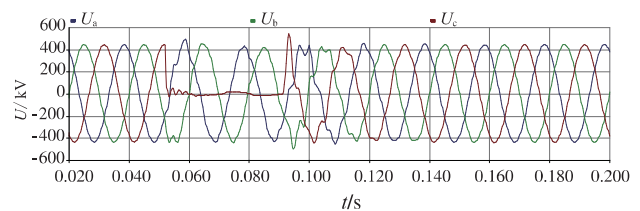
### 3.3 考虑励磁涌流的CFPREV改进

在励磁涌流期间,图10所示的中州站换流母线电压 $3U_0$ 分量的基波及2~7次谐波幅值如表1所示。

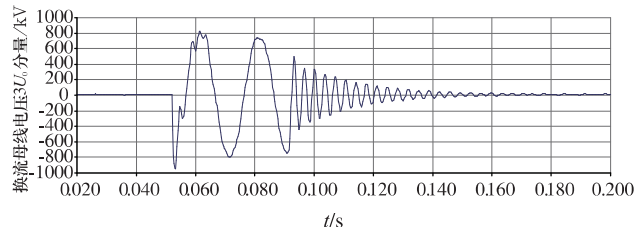
表 1 励磁涌流期间中州站 $3U_0$ 分量基波及2~7次谐波幅值  
Table 1 The amplitude of base wave and 2~7 harmonic in  $3U_0$  during rush current influence

次数	$U/\text{kV}$
基波	4.12
2次	6.36
3次	16.80
4次	15.66
5次	40.53
6次	27.19
7次	8.69

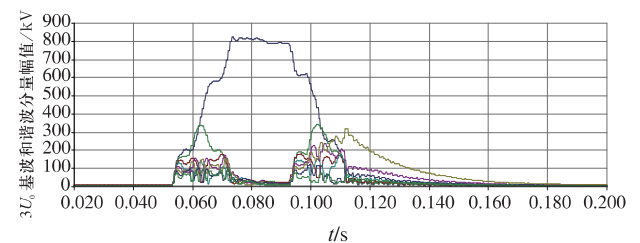
为了对比分析励磁涌流和短路故障情况下 $3U_0$ 的谐波特性,图11与表2列出以2013年10月26日中州换流站调试期间,500 kV线路人工单相接地试验的录波数据。



(a) 中州站500 kV母线电压



(b) 中州站500 kV母线电压 $3U_0$ 分量



(c) 中州站 $3U_0$ 分量基波和2~7次谐波幅值曲线

图 11 人工单相接地试验期间中州站录波曲线

Fig. 11 The recorded waveform of Zhongzhou station during single phase short circuit experiment

表 2 短路试验期间中州站 $3U_0$ 分量基波及2~7次谐波幅值  
Table 2 The amplitude of base wave and 2~7 harmonic in  $3U_0$  during single phase short circuit experiment

次数	$U/\text{kV}$
基波	785.8
2次	14.73
3次	19.72
4次	6.39
5次	10.96
6次	10.69
7次	11.45

从上文录波数据对比可以看出,交流侧不对称故障时换流站 $3U_0$ 中的主导成分是两个零序电压的叠加,即基波(零序)分量很大,数值等于三相零序分量代数和乘以1.732,谐波成分较低;而励磁涌流扰动时情况恰好相反, $3U_0$ 中几乎不包含基波零序分量,即基波成分极低,谐波成分含量较高。

为分辨出不对称故障和励磁涌流,以避免励磁涌流情况下CFPREV的频繁周期性动作,考虑利用故障

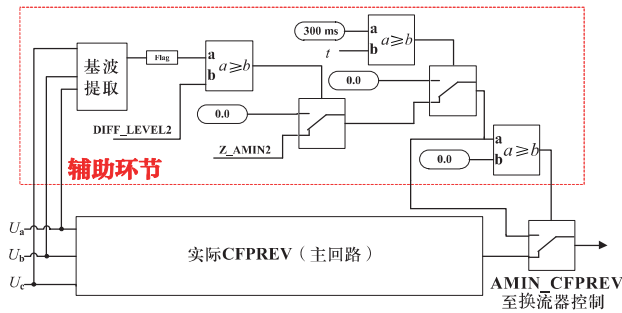


图 12 考虑励磁涌流的CFPREV改进

Fig. 12 The improved CFPREV considering inrush current

期间CFPREV输入变量 $3U_0$ 中基波分量作为分辨励磁涌流扰动与不对称故障的判据，设计如图12所示的改进CFPREV。

该改进的CFPREV在实际工程中使用的CFPREV（此处称为CFPREV主回路）基础上增加了一个辅助环节。辅助环节由基波分量提取环节、比较环节以及选择环节组成。辅助环节中，DIFF\_LEVEL2为基波分量阈值，有名值取为10 kV。Z\_AMIN2为辅助环节动作量， $t$ 为当前时刻与CFPREV主回路启动时刻的时间间隔。考虑到基波提取需要经历一定的时间，故CFPREV主回路启动300 ms后，将基波提取模块输出的flag值由0置为1，将辅助环节的输入判断有效。

若CFPREV主回路启动，且300 ms后 $3U_0$ 基波分量大于阈值DIFF\_LEVEL2，则判断CFPREV动作原因为交流系统故障，辅助环节输出为0；若CFPREV主回路启动，而300 ms后， $3U_0$ 基波分量小于阈值DIFF\_LEVEL2，则判断CFPREV动作原因为励磁涌流扰动，辅助回路启动，将Z\_AMIN2作为CFPREV的实际输出AMIN\_CFPREV。故而在励磁涌流发生300 ms之后，CFPREV的输出为辅助回路的输出，是一个恒定值，因此CFPREV不会频繁动作。

### 3.4 CFPREV改进策略仿真验证

在PSCAD/EMTDC电磁仿真平台上搭建图4所示直流输电系统，控制系统为图1所示实际工程中使用的CFPREV。设置逆变侧换流母线电压为官渡站#1主变充电时中州站母线电压录波波形，得到CFPREV输出波形、触发角变化及直流传输功率如图13(a)所示。

可以看出，逆变侧CFPREV的输出周期性振荡，逆变侧触发角也发生相应波动，与实际录波图吻合。

采用相同测试系统，在CFPREV中加入图12所示

的辅助回路，得到CFPREV输出以及逆变侧触发角波形如图13(b)所示。

从仿真图中可以看出，若加入辅助回路，励磁涌流开始后300 ms内，换流站母线 $3U_0$ 周期性地超过阈值，CFPREV主回路正常启动，反复调节逆变侧触发角，而此时辅助回路还未启动，因此CFPREV的输出为主回路的输出；300 ms后，辅助回路判断CFPREV动作原因为励磁涌流，输出CFPREV辅助回路动作值，由于辅助回路输出量为恒定值，因此避免了励磁涌流扰动期间逆变站触发角的频繁调节，进而防止了直流功率的波动。

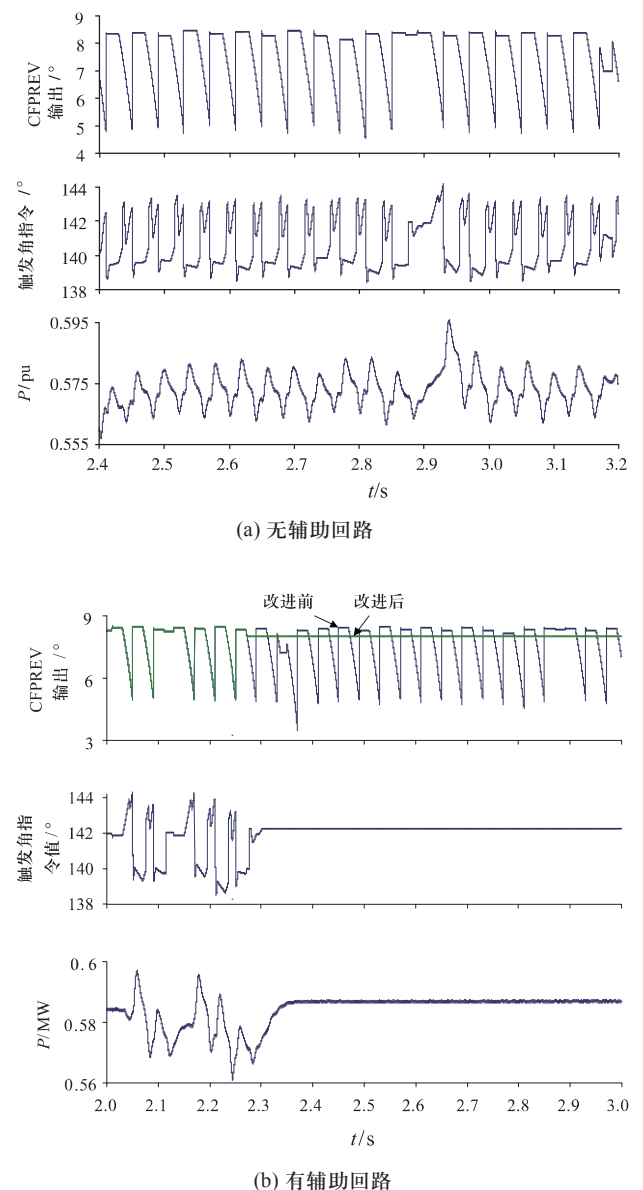


图 13 CFPREV输出、逆变站触发角及功率

Fig. 13 The output of CFPREV and the firing angle and power transferred in the inverter side

## 4 结论

本文利用实际工程录波数据,在仿真反演特高压天中直流两次CFPREV动作事件的基础上,详细分析研究了交流故障和励磁涌流过程中CFPREV的动作过程及其对直流输电系统的影响;提出了基于特征谐波分离的辅助判据,在不影响换相失败预测控制功能的前提下,能够有效避免励磁涌流造成CFPREV误动。通过实际录波数据与仿真结果对比,验证了本文对CFPREV建模的准确性;采用计及CFPREV作用的ADPSS机电-电磁暂态混合仿真,重新扫描了实际大电网可能引起中州换流站换相失败的故障范围,相关结论能够为电网的调度运维提供有效参考。

## 参考文献

- [1] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.  
Li Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids [J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991(in Chinese).
- [2] 刘振亚, 张启平. 国家电网发展模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 1-10.  
Liu Zhenya, Zhang Qiping. Study on the development mode of national power grid of China [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 1-10(in Chinese).
- [3] 姚良忠, 吴婧, 王志冰, 等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6007-6020.  
Yao Liangzhong, Wu Jing, Wang Zhibing, et al. Pattern analysis of future HVDC grid development [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6007-6020(in Chinese).
- [4] 王黎欣, 方勇杰, 徐海波, 等. 相继换相失败对基于相位角的失步解列判据的影响机理[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 71-77.  
Wang Lixin, Fang Yongjie, Xu Haibo, et al. Mechanism analysis of successive commutation failures influence on out-of-step splitting criterion based on phase angle [J]. Automation of Electric Power System, 2016, 40(9): 71-77(in Chinese).
- [5] 汪隆君, 王钢, 李海锋, 等. 交流系统故障诱发多直流馈入系统换相失败风险评估[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(3): 9-14.  
Wang Longjun, Wang Gang, Li Haifeng, et al. Risk evaluation of commutation failure in multi-infeed HVDC systems under AC system fault conditions [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(3): 9-14(in Chinese).
- [6] 余晓鹏, 张雪敏, 钟雨芯, 等. 交直流系统连锁故障模型及停电风险分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 33-39.  
Yu Xiaopeng, Zhang Xuemin, Zhong Yuxin, et al. Cascading failure model of AC-DC system and blackout risk analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 33-39(in Chinese).
- [7] 王钢, 李志铿, 黄敏, 等. HVDC输电系统换相失败的故障合闸角影响机理[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 49-54.  
Wang Gang, Li Zhikeng, Huang Min, et al. Influence of initial fault voltage angle on commutation failure identification in a HVDC system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 49-55(in Chinese).
- [8] 王峰, 刘天琪, 李兴源, 等. 考虑直流电流上升及交流电压下降速度的换相失败分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 111-117.  
Wang Feng, Liu Tianqi, Li Xingyuan, et al. Commutation failure analysis considering DC current rise and AC voltage drop speed [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 111-117(in Chinese).
- [9] 王学之, 周全, 国建宝. 南方电网直流换相失败机理及判别方法[J]. 南方电网技术, 2013, 7(6): 44-47.  
Wang Xuezhi, Zhou Quan, Guo Jianbao. The mechanism and discrimination method of HVDC commutation failure in China southern power grid [J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(6): 44-47(in Chinese).
- [10] 郑超, 周静敏, 李惠玲, 等. 换相失败预测控制对电压稳定性影响及优化措施[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 179-183.  
Zheng Chao, Zhou Jingmin, Li Huiling, et al. Impact of commutation failure prediction control on voltage stability and its optimization measures [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 179-183(in Chinese).
- [11] 王海军, 黄义隆, 周全. 高压直流输电换相失败响应策略与预测控制技术路线分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014(21): 124-131.  
Wang Haijun, Huang Yilong, Zhou Quan. Analysis of commutation failure response strategies and prediction control technology in HVDC [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 124-131(in Chinese).
- [12] 徐敬友, 谭海燕, 孙海顺, 等. 考虑直流电流变化及交流故障发生时刻影响的HVDC换相失败分析方法[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1261-1267.  
Xu Jingyou, Tan Haiyan, Sun Haishun, et al. Research on method to analyze commutation failure in HVDC power transmission system considering the impact of DC current variation and occurrence moment of AC fault [J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1261-1267(in Chinese).
- [13] 王晶, 梁志峰, 江木, 等. 多馈入直流同时换相失败案例分析及仿真计算[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 141-146.  
Wang Jing, Liang Zhifeng, Jiang Mu, et al. Case analysis and simulation of commutation failure in multi-infeed HVDC transmission systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 141-146(in Chinese).
- [14] 李新年, 易俊, 李柏青, 等. 直流输电系统换相失败仿真分析及运行情况统计[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 266-271.  
Li Xinnian, Yi Jun, Li Baiqing, et al. Simulation analysis and operation statistics of commutation failure in HVDC transmission system [J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 266-271(in Chinese).

- [15] 夏成军, 杨仲超, 周保荣, 等. 考虑负荷模型的多回直流同时换相失败分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 76-81. Xia Chengjun, Yang Zhongchao, Zhou Baorong, et al. Analysis of commutation failure in multi-infeed HVDC system under different load models [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 76-81(in Chinese).
- [16] 王峰, 刘天琪, 周胜军, 等. 谐波对HVDC系统换相失败的影响机理及定量分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4888-4894. Wang Feng, Liu Tianqi, Zhou Shengjun, et al. Mechanism and quantitative analysis method for HVDC commutation failure resulting from harmonics [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4888-4894(in Chinese).
- [17] 吕思卓, 文俊, 温家良, 等. 高压直流三极输电系统的建模与仿真[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8):119-124. Lyu Sizhuo, Wen Jun, Wen Jialiang, et al. Modeling and simulation for tri-pole HVDC transmission system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(8): 119-124(in Chinese).
- [18] 李新年, 陈树勇, 庞广恒, 等. 华东多直流馈入系统换相失败预防和自动恢复能力的优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 134-140. Li Xinnian, Chen Shuyong, Pang Guangheng, et al. Optimization of commutation failure prevention and automatic recovery for east China multi-infeed high-voltage direct current system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 134-140(in Chinese).
- [19] Zhang Lidong, Dofnas L. A novel method to mitigate commutation failures in HVDC systems [C]. International Conference on Power System Technology, Kunming, China 2002: 51-56.
- [20] 梁志峰. 500 kV林枫直流输电系统双极闭锁案例分析[J]. 现代电力, 2015, 32(3): 81-87. Liang Zhifeng. Case study on bipolar blocking of 500 kV Linfeng HVDC transmission system[J]. Modern Electric Power, 2015, 32(3): 81-87(in Chinese).

收稿日期: 2017-12-22; 修回日期: 2018-01-26。

#### 作者简介:



李程昊

李程昊 (1988), 通信作者, 男, 博士, 主要研究直流输电建模与控制技术, E-mail: lichenghao\_cn@foxmail.com。

刘遵义 (1963), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事电力系统稳定运行与控制、节能技术、电能质量等方面的研究工作, E-mail: liuzunyi@ha.sgcc.com.cn。

石光 (1971), 男, 教授级高工, 主要从事电力系统继电保护与控制等方面的研究工作, E-mail: shiguang@ha.sgcc.com.cn。

(责任编辑 李锡)