

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191469

# 基于三相同时刻采样值算法的 HVDC 换相失败预测改进

李晓华, 张陈泽宇, 蔡旺延, 谭展鹏, 陈镇生, 蔡泽祥

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 换相失败问题是制约基于电网换相换流器的高压直流(LCC-HVDC)输电系统安全运行的重要约束。从事前预防的角度出发, 目前实际工程中主要采用了换相失败预测控制(CFPREV)技术。根据现场录波, 分析了现有预测控制存在故障检测速度不足的问题, 认为提高故障检测算法灵敏度是预测控制提升的关键。在此基础上, 分析对比了基于三相同时刻采样值的电压有效值算法与现有检测算法的优劣, 并采用该算法对现有换相失败预测控制功能进行改进。仿真结果表明, 在单相接地或两相短路接地故障中, 基于三相同时刻采样值的电压有效值检测算法的故障检测速度比现有算法更快, 采用改进型预测控制能够有效减少换相失败发生的几率。

**关键词:** 换相失败; 换相失败预测控制; 故障检测; 三相同时刻采样值算法

## Improvement of HVDC CFPREV based on a three phase simultaneity sampling values algorithm

LI Xiaohua, ZHANG Chenzeyu, CAI Wangyan, TAN Zhanpeng, CHEN Zhensheng, CAI Zexiang  
(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Commutation failure is an important factor restricting the safe operation of a line-commutated converter-based high voltage direct current (LCC-HVDC) transmission system. From the perspective of prevention, up to now practical projects mainly adopt the commutation failure prevention control (CFPREV). According to the field fault records, the problem of insufficient fault detection speed in the existing predictive control is analyzed, and improving the sensitivity of the fault detection algorithm is the key to the improvement of predictive control. This paper compares the advantages and disadvantages of the voltage RMS algorithm based on the three phase simultaneity sampling values and the current fault detection algorithms, and improves the current CFPREV by the voltage RMS algorithm. The simulation results show that in the single phase grounding fault or two phase grounding fault, the fault detection speed of the voltage RMS detection algorithm is faster than the current algorithms, and the improved CFPREV can also effectively reduce the probability of commutation failure.

This work is supported by State Grid Smart Grid Joint Fund Project (No. U1766213) and National Natural Science Foundation of China (No. 51677073).

**Key words:** commutation failure; CFPREV; fault detection; three phase simultaneity sampling values algorithm

## 0 引言

基于电网电压换相的高压直流输电系统对换相电压的波动十分敏感, 使得换相失败成为高压直流对交流故障的常态响应<sup>[1]</sup>。换相失败会引起直流电气量剧烈变化、交流保护误动等不良后果<sup>[2]</sup>。多条直流同时换相失败时, 功率大规模损失, 严重影响电网安全稳定运行<sup>[3-4]</sup>。因此, 减少换相失败发生的

几率具有重要的现实意义<sup>[5-6]</sup>。

交流电网故障时, 换相电压幅值下降、过零点前移, 换相电压时间面积小于临界换相面积, 导致晶闸管的电压阻断能力恢复得不充分, 进而引发换相失败的发生<sup>[7]</sup>。从事前预防的角度出发, 目前实际工程中主要采用了换相失败预测控制技术<sup>[8-9]</sup>。即通过电压跌落检测算法检测交流故障, 改变触发角角度, 实现提前触发, 以增加换相裕度, 在一定程度上可以避免换相失败的发生<sup>[10-11]</sup>, 故该技术得到了较广泛的应用。

目前, 国内外对换相失败预防问题的研究主要

**基金项目:** 国家电网智能电网联合基金项目资助 (U1766213); 国家自然科学基金项目资助 (51677073)

集中于换相失败预测控制技术与改进, 大致可分为两类。一是对故障后交流电压、直流电流检测的改进。针对交流系统单相接地短路故障时, 电压过零点附近零序电压检测法存在灵敏度不足的问题, 文献[12]提出了基于正余弦分量的检测算法。文献[13]提出了一种基于交流电压、电流 Clark 变换计算其功率分量的检测算法, 在一定程度上提升了故障检测速度。考虑故障后直流电流增加对换相的影响, 对直流电流进行预测, 降低换相失败发生的几率<sup>[14-16]</sup>。二是控制策略的优化。通过优化阈值和控制参数, 可提升现有预测控制的效果<sup>[17-19]</sup>。考虑预测控制在直流分层接入方式下的局限性, 文献[20]提出了改进控制策略, 文献[21]提出了高低端换流器的协调优化措施。

由于故障的发生具有随机性<sup>[22]</sup>, 某些故障合闸角情况下, 预测控制检测到交流故障时, 换相失败已经发生或控制系统已不能及时改变相应角度, 所以预测控制也未能完全杜绝换相失败的发生<sup>[23-24]</sup>。因此交流故障检测是预测控制的基础, 加快故障信息的检测速度, 减小固有延时, 可以为后续控制提供更大的调节空间<sup>[25]</sup>。

在交直流互联电网中, 换流母线电压变化是交流故障最为直观有效的特征, 也是故障判别依据<sup>[26-28]</sup>。提高电压检测算法的灵敏度是提升预测控制效果的关键。而目前文献对电压检测算法的改进和研究尚不深入。

本文首先分析了现有的换相失败预测控制故障检测算法, 根据实际录波指出了算法存在的问题, 进一步分析了提升预测控制功能的关键。在此基础上, 分析对比了基于同一时刻三相采样值的电压有效值算法与现有检测算法的优劣, 并采用该算法改进现有的预测控制功能。最后, 通过某±500 kV 实际高压直流输电工程的详细 EMTDC 模型验证了改进型预测控制的有效性。

## 1 换相失败预测故障检测技术分析

### 1.1 故障检测算法分析

换相失败预测控制技术的基础是交流故障检测。目前, 学术工程界中, 较为成熟的故障检测算法有交流电压的零序分量检测法和  $\alpha\beta$  分量检测法。

交流系统发生单相接地短路或两相短路接地故障时, 换流母线电压出现零序分量, 发生相间短路或三相短路故障时则没有零序分量。故零序分量检测法仅适用于单相接地短路或两相短路接地故障, 电压零序分量计算公式为

$$u_0(t) = u_a + u_b + u_c \quad (1)$$

$\alpha\beta$  分量检测法可以检测各种类型的故障。换流母线电压经 Clark 变换后, 计算旋转矢量的幅值  $u_{\alpha\beta}$ , 即  $\alpha\beta$  分量, 具体计算如式(2)和式(3)所示。

$$\begin{cases} u_\alpha(t) = \frac{2}{3}u_a - \frac{1}{3}(u_b + u_c) \\ u_\beta(t) = \frac{\sqrt{3}}{3}(u_b - u_c) \end{cases} \quad (2)$$

$$u_{\alpha\beta}(t) = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3), 整理得

$$u_{\alpha\beta}(t) = \sqrt{2 \cdot [(u_a - u_b)^2 + (u_b - u_c)^2 + (u_c - u_a)^2] / 9} \quad (4)$$

由式(4)可知, 无论发生何种故障,  $\alpha\beta$  分量仅由交流电压的正序分量和负序分量计算而得, 不含零序分量。因此  $\alpha\beta$  分量必须与零序分量故障检测算法相互配合, 才能有效覆盖接地与不接地的各类型故障。

### 1.2 现存问题分析

现有换相失败预测控制技术存在故障检测速度不足的问题。部分故障情况下零序分量较低, 有可能导致故障判别无效或判别用时长, 进而影响了预测控制的启动。 $\alpha\beta$  分量本质上是三相电压的平均效果, 其故障分量反映的是三相电压故障分量的综合结果, 在轻微故障情况下, 同样存在故障判别缓慢的问题。

如图 1 某直流的实际故障录波, 故障后换相失败预测控制未能及时预测换相失败的发生, 触发角没能提前做出任何调整, 直到换相失败发生后控制系统才开始改变触发角。该事故录波表明, 有些情况下预测控制可能滞后于故障一个工频周期动作, 即现有检测算法下预测功能存在失效的风险。

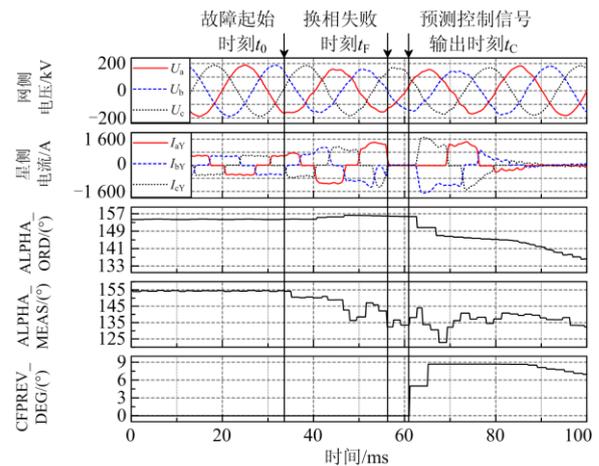


图 1 极控系统故障录波

Fig. 1 Fault wave recording of pole control system

此外，不同故障合闸角下，现有检测算法的灵敏度存在时间离散性问题。电压过零点附近发生单相接地故障时，故障分量小，导致零序分量检测法的故障检测速度较慢。在现有算法基础上增加 sin-cos 分量检测法，可以提升预测控制的灵敏度<sup>[12]</sup>。但该检测法使用了微分计算，在工程实际中，微分步长较难确定，设置得不合理容易带来谐波问题，且故障后角频率  $\omega$  为非恒定量，这使得该方法在工程中实现较困难。

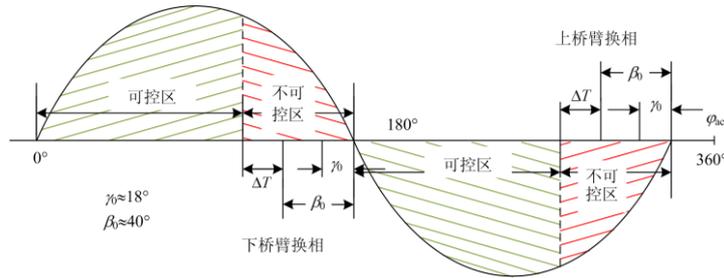


图 2 换相失败可控区域示意图

Fig. 2 Area avoiding commutation failure by adjustment of control system

图 2 中， $\beta_0$  和  $\gamma_0$  分别为正常运行时越前触发电角和熄弧角，二者的角度在交流故障发生前已经确定。 $\Delta T$  为考虑控制系统响应延时和所需调节角度的时长。若想增大可控区域，减小发生换相失败的几率，只能着眼于缩小  $\Delta T$ 。其中，预测控制的调节角度与故障严重程度相关，是一个随机量。控制系统的响应延时包含故障检测算法的判别延时、控制信号的输出延时和控制信号的作用延时。控制信号的输出延时和作用延时，时长短，可减少空间小。因此，构造一种能够快速有效检测各类故障，避免故障合闸角对检测灵敏度影响的故障检测方法，是提升换相失败预测功能的关键。

## 2 基于三相同时刻采样值算法的换相失败预测控制改进研究

### 2.1 基于三相同时刻采样值的电压有效值算法

利用三相电压在同一时刻的三个采样值可计算三相电压的有效值<sup>[29]</sup>，如式(5)所示。

$$\begin{cases} u_{abc1}^2(t) = 2(u_a^2 - u_b u_c) / 3 & \text{①} \\ u_{abc2}^2(t) = 2(u_b^2 - u_c u_a) / 3 & \text{②} \\ u_{abc3}^2(t) = 2(u_c^2 - u_a u_b) / 3 & \text{③} \\ u_{abc4}^2(t) = [u_{abc1}^2(t) + u_{abc2}^2(t) + u_{abc3}^2(t)] / 3 = \\ \quad [(u_a - u_b)^2 + (u_b - u_c)^2 + (u_c - u_a)^2] / 9 & \text{④} \end{cases} \quad (5)$$

式中：下标 abc 表示利用三相同时刻采样值算法进行

### 1.3 检测快速性需求分析

在一个周波内，交流故障的发生具有随机性。对高压直流的某次换相过程而言，若故障发生时刻与换相触发时刻的时间间隔较大，则给预测控制留有充足的调控时间，进而可以避免此次故障发生时伴随的直流换相失败。所有满足这种情况的故障时刻集合所在的区域称之为可控区，与之对应的是不可控区，如图 2 所示。

计算；下标 1、2、3、4 分别为利用三相同时刻采样值算法所求的三个独立相电压及其综合电压的有效值。

正常运行时，式(5)中各式的计算结果为稳态电压有效值。显然，式④所求结果与式(4)的结果成正比例，即  $u_{\alpha\beta} = \sqrt{2}u_{abc4}$ ，两者本质上是等效的。这也说明了  $\alpha\beta$  分量实际是三相电压有效值的平均结果。

由于综合电压是三个独立相电压的平均结果，交流故障发生后，各量满足以下关系式。

$$u_{abc\_min}(t) \leq u_{abc4}(t) \quad (6)$$

式中， $u_{abc\_min}(t) = \min\{u_{abc1}(t), u_{abc2}(t), u_{abc3}(t)\}$ 。

故障后，三个独立相电压有效值的最小值一定不超过三相综合电压。换言之，三个独立相电压最小值的跌落速度快于三相综合电压的跌落速度。因此，利用三个独立相电压构造判别依据，能够比  $\alpha\beta$  分量检测法更快检测出交流故障。

无论系统是否故障，三相电压均可用正序、负序和零序电压表示。

$$\begin{cases} u_a(t) = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t + \varphi_2) + \\ \quad \sqrt{2}U_0 \sin(\omega t + \varphi_0) \\ u_b(t) = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t + \varphi_1 - 120^\circ) + \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t + \\ \quad \varphi_2 + 120^\circ) + \sqrt{2}U_0 \sin(\omega t + \varphi_0) \\ u_c(t) = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t + \varphi_1 + 120^\circ) + \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t + \\ \quad \varphi_2 - 120^\circ) + \sqrt{2}U_0 \sin(\omega t + \varphi_0) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $U$ 、 $\omega$ 、 $\varphi$  分别为电压峰值、角频率和初相角; 下标 1、2 和 0 分别表示正序、负序和零序。

将式(7)代入式(5), 整理得式(8)。

$$\left\{ \begin{aligned} u_{abc1}^2(t) &= U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2 \cos(2\omega t + \varphi_1 + \varphi_2) + \\ &\quad 2U_1U_0[\cos(\varphi_1 - \varphi_0) - \cos(2\omega t + \varphi_1 + \varphi_0)] + \\ &\quad 2U_2U_0[\cos(\varphi_2 - \varphi_0) - \cos(2\omega t + \varphi_2 + \varphi_0)] \\ u_{abc2}^2(t) &= U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2 \cos(2\omega t + \varphi_1 + \varphi_2) + \\ &\quad 2U_1U_0[\cos(\varphi_1 - \varphi_0 - 120^\circ) - \cos(2\omega t + \varphi_1 + \\ &\quad \varphi_0 - 120^\circ)] + 2U_2U_0[\cos(\varphi_2 - \varphi_0 + 120^\circ) - \\ &\quad \cos(2\omega t + \varphi_2 + \varphi_0 + 120^\circ)] \\ u_{abc3}^2(t) &= U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2 \cos(2\omega t + \varphi_1 + \varphi_2) + \\ &\quad 2U_1U_0[\cos(\varphi_1 - \varphi_0 + 120^\circ) - \cos(2\omega t + \varphi_1 + \\ &\quad \varphi_0 + 120^\circ)] + 2U_2U_0[\cos(\varphi_2 - \varphi_0 - 120^\circ) - \\ &\quad \cos(2\omega t + \varphi_2 + \varphi_0 - 120^\circ)] \\ u_{abc4}^2(t) &= U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2 \cos(2\omega t + \varphi_1 + \varphi_2) \end{aligned} \right. \quad (8)$$

三相同时刻采样值算法所求的三个独立相电压均包含负序分量和零序分量, 保证了故障检测的快速性。当零序分量较低时, 负序分量依然可以起作用, 反之亦然, 这在一定程度上弥补了零序分量较轻微时零序检测法灵敏度不足的问题。

发生相间短路或三相短路时, 无零序分量, 由式(8)可得  $u_{abc1}(t) = u_{abc2}(t) = u_{abc3}(t) = u_{abc4}(t)$ 。

故障后, 三个独立相电压与综合电压相等。因此, 发生单相接地短路或两相短路接地故障时, 该算法的故障检测速度比现有算法更快, 而发生相间短路或三相短路故障时, 其检测速度与  $\alpha\beta$  分量检测法相同。

### 2.2 判据构成

采用基于三相同时刻采样值的电压有效值算法时, 为了消除正常运行时系统电压波动对启动灵敏度的影响, 判据采用的特征量应选用滤除正常稳态分量的故障分量, 可设置判据为

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta u_{abc1}(t) &= u_{abc1\_2T}(t) - u_{abc1}(t) \\ \Delta u_{abc2}(t) &= u_{abc2\_2T}(t) - u_{abc2}(t) \\ \Delta u_{abc3}(t) &= u_{abc3\_2T}(t) - u_{abc3}(t) \\ \Delta u_{abc\_max}(t) &= \max_{i=1}^3 \{ \Delta u_{abc_i}(t) \} \\ \Delta u_{abc\_max}(t) &\geq U_{set} \end{aligned} \right. \quad (9)$$

式中,  $u_{abc1\_2T}(t)$ 、 $u_{abc2\_2T}(t)$ 、 $u_{abc3\_2T}(t)$  分别为  $u_{abc1}(t)$ 、 $u_{abc2}(t)$ 、 $u_{abc3}(t)$  在 2 周波 40 ms 前的值。

用本文算法替代原有的预测控制故障检测算法, 原有控制的其他部分保持不变, 得到改进型换

相失败预测控制逻辑图如图 3 所示。

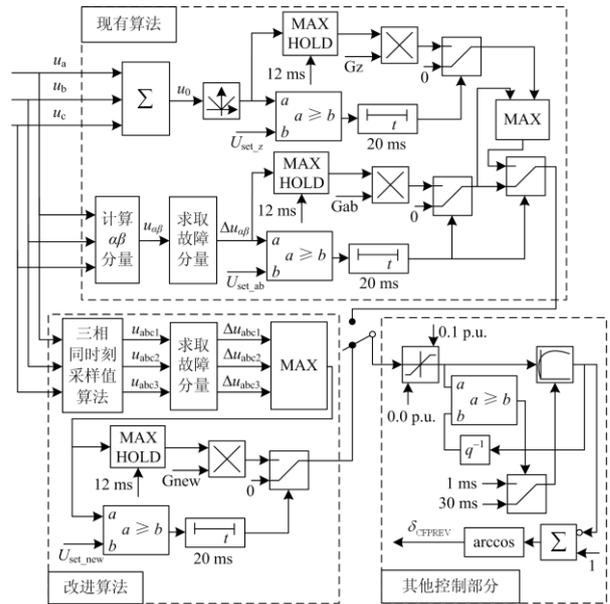


图 3 CFPREV 与改进型 CFPREV 逻辑图

Fig. 3 Logic diagram of CFPREV and improved CFPREV

### 3 仿真分析

仿真模型采用某  $\pm 500$  kV 高压直流输电工程的详细 EMTDC 模型, 直流传输功率为 3 200 MW, 控制系统采用 ABB 技术, 逆变侧接等值阻抗与等值电源模拟交流电网, 仿真模型示意图如图 4 所示。图中,  $i$  为换流母线,  $U_s$ 、 $Z_s$  分别为等值电源和等值系统阻抗,  $L_f$  为故障过渡电抗。为了不失一般性, 设置短路比为 4, 即中等强度系统。正常运行时, 换流母线 A 相稳态电压为  $307.3 \angle 13.17^\circ$  kV。

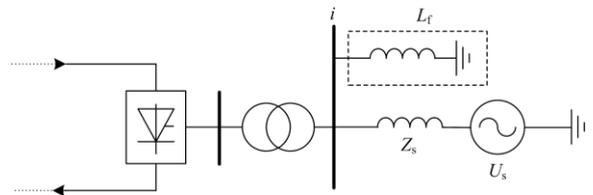


图 4 仿真模型示意图

Fig. 4 Simulation model

#### 3.1 逆变侧换流母线单相接地故障

在逆变侧换流母线处, 设置不同故障起始时刻, A 相经不同过渡电抗发生接地短路故障(不同过渡电抗值模拟了不同电气距离的故障), 故障持续时间为 0.1 s。故障起始时刻以 20.010 s 为参考点, 每隔 1 ms 做一组仿真。故障电抗的取值为 0~0.65 H。图 5 为现有预测控制与改进型预测控制的信号输出速度对比。

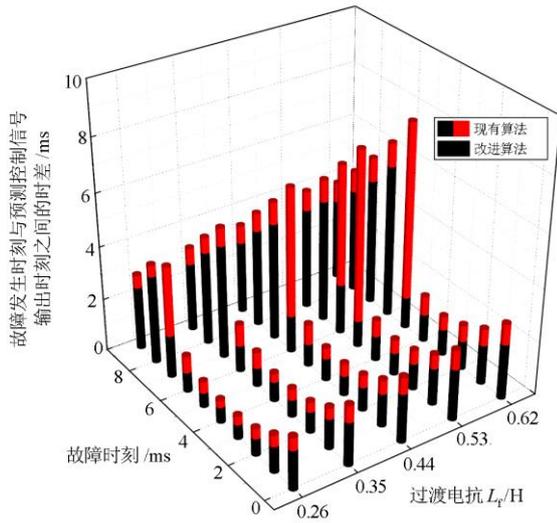


图 5 单相接地短路时预测控制信号输出速度比较  
Fig. 5 Comparison of output speed of control signal under single phase grounding fault

图 5 中，黑色圆柱代表改进算法的信号输出速度，黑色与红色圆柱之和代表现有算法的信号输出速度。可以看出，在不同过渡电抗和不同故障时刻下，系统发生单相接地短路故障时，改进后换相失败预测控制的信号输出速度均快于现有的控制。

各故障时刻下换相失败情况的仿真结果如图 6 所示。可以看出，改进型换相失败预测控制可以有效减小直流发生换相失败的几率，但在部分故障时刻，换相失败情况没有改善。由 1.3 节分析可知，提高故障检测算法的判别延时，在一定程度上可以减小预测控制的固有延时，增大可控区域。但故障发生在不可控区域时，控制系统已不能及时调控足量角度或控制信号在触发脉冲之后输出，此时仍无法避免换相失败的发生。

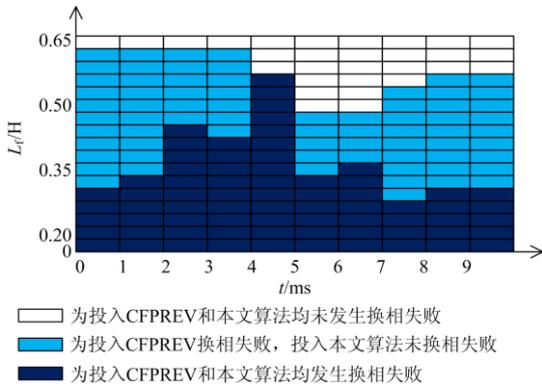


图 6 单相接地短路时本文算法对换相失败的改善

Fig. 6 Improvement of commutation failure during single phase grounding by the proposed algorithm

### 3.2 逆变侧换流母线两相短路接地故障

两相短路接地故障仿真测试的做法同单相接地短路一致。故障电抗的取值为 0~0.95 H。图 7 为现有预测控制与改进型预测控制的信号输出速度对比。

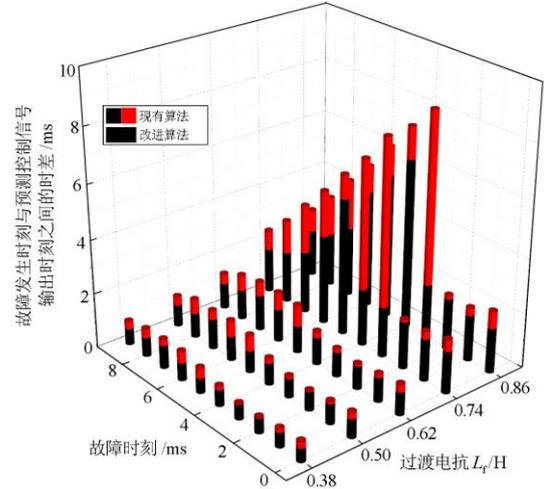


图 7 两相短路接地时控制信号输出速度比较

Fig. 7 Comparison of output speed of control signal under two-phase grounding fault

图 7 中，黑色圆柱代表改进算法，黑色与红色圆柱之和代表现有算法。可以看出，在不同过渡电抗和不同故障时刻下，系统发生两相短路接地故障时，改进型换相失败预测控制信号的输出速度比现有控制更快。

各故障时刻换相失败情况的仿真结果如图 8 所示。可知，两相接地短路故障中，改进型换相失败预测控制在一定程度上避免了换相失败的发生。与单相接地短路故障的情况相似，位于不可控区域的故障情况，换相失败仍会发生。

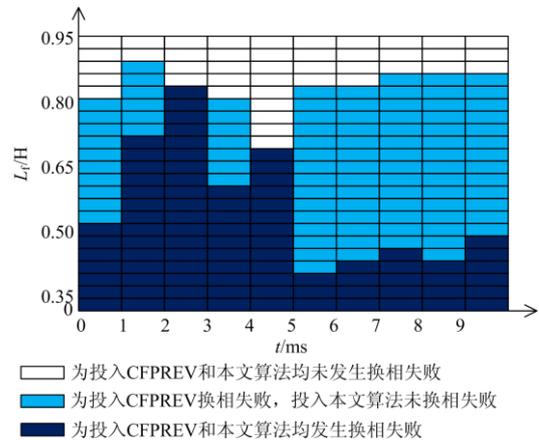


图 8 两相短路接地时本文算法对换相失败的改善

Fig. 8 Improvement of commutation failure during two-phase grounding by the proposed algorithm

## 4 结论

提升换相失败预测控制故障检测算法的灵敏度是改善预测控制功能的基础和关键。本文基于三相同时刻采样值的电压有效值算法, 提出了改进型换相失败预测控制。结果表明, 在单相接地或两相短路接地故障中, 基于三相同时刻采样值的电压有效值算法比现有故障检测算法的检测灵敏度更高, 改进后的预测控制能有效降低换相失败的风险。

## 参考文献

- [1] ZHU Yanan, ZHANG Shuqing, LIU Dong, et al. Prevention and mitigation of high-voltage direct current commutation failures: a review and future directions[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(24): 5449-5456.
- [2] 孟庆强, 刘泽洪, 洪乐荣, 等. 一种抑制连续换相失败的非线性 VDCOL 控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 119-127.  
MENG Qingqiang, LIU Zehong, HONG Lerong, et al. A suppression method based on nonlinear VDCOL to mitigate the continuous commutation failure[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 119-127.
- [3] YIN Xianggen, ZHANG Zhe, LI Zhenxing, et al. The research and the development of the wide area relaying protection based on fault element identification[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 95-107. DOI: 10.1186/s41601-016-0023-z.
- [4] 唐晓骏, 张正卫, 韩民晓, 等. 适应多直流馈入受端电网的柔性直流配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 57-64.  
TANG Xiaojun, ZHANG Zhengwei, HAN Minxiao, et al. VSC-HVDC configuration method suitable for multi-DC feeding receiving power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 57-64.
- [5] 王超, 李兴源, 冯明, 等. 抑制多馈入直流输电系统相继换相失败的协调恢复控制策略[J]. 电测与仪表, 2016, 53(13): 19-24.  
WANG Chao, LI Xingyuan, FENG Ming, et al. Coordinated recovery strategy for inhibiting continuous commutation failures in multi-infeed HVDC transmission system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(13): 19-24.
- [6] 董明瑞, 顾丹珍, 杨秀, 等. 高压直流输电系统换相失败抑制方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(19): 26-30, 36.  
DONG Mingrui, GU Danzhen, YANG Xiu, et al. Commutation failure suppression method for HVDC transmission system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(19): 26-30, 36.
- [7] WANG Feng, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Decreasing the frequency of HVDC commutation failures caused by harmonics[J]. IET Power Electronics, 2017, 10(2): 215-221.
- [8] LIU Lei, LIN Sheng, LIAO Kai, et al. Extinction angle predictive control strategy for commutation failure mitigation in HVDC systems considering voltage distortion[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(22): 5171-5179.
- [9] 袁阳, 卫志农, 雷霄, 等. 直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 140-147.  
YUAN Yang, WEI Zhinong, LEI Xiao, et al. Survey of commutation failures in DC transmission systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 140-147.
- [10] ZHANG L, DOFNAS L. A novel method to mitigate commutation failures in HVDC systems[C] // Proceedings International Conference on Power System Technology, October 13-17, 2002, Kunming, China.
- [11] YAO Wei, LIU Chang, FANG Jiakun, et al. Probabilistic analysis of commutation failure in LCC-HVDC system considering the CFPREV and the initial fault voltage angle[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2): 715-724.
- [12] 陈树勇, 李新年, 余军, 等. 基于正余弦分量检测的高压直流换相失败预防方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 1-6.  
CHEN Shuyong, LI Xinnian, YU Jun, et al. A method based on the sin-cos components detection mitigates commutation failure in HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 1-6.
- [13] GUO C, LIU Y, ZHAO C, et al. Power component fault detection method and improved current order limiter control for commutation failure mitigation in HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1585-1593.
- [14] WEI Zhinong, YUAN Yang, LEI Xiao, et al. Direct-current predictive control strategy for inhibiting commutation failure in HVDC converter[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2409-2417.
- [15] 高楷, 孙国强, 卫志农, 等. 基于直流电流模糊预测控制的换相失败预防策略[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2498-2504.  
GAO Kai, SUN Guoqiang, WEI Zhinong, et al. A DC current fuzzy predictive control based strategy to decrease probability of commutation failure[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2498-2504.

- [16] 周博昊, 李凤婷, 宋新甫, 等. 基于直流电流变化量的换相失败预测判别与控制系统优化[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3497-3503.  
ZHOU Bohao, LI Fengting, SONG Xinfu, et al. Commutation failure prediction and control system optimization based on DC current variation[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3497-3503.
- [17] 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.
- [18] 王玉, 侯玉强, 刘福锁, 等. 考虑多直流协调恢复的换相失败预测控制启动值优化方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 85-90, 158.  
WANG Yu, HOU Yuqiang, LIU Fusuo, et al. Optimization method for startup threshold of commutation failure prediction control considering coordinated recovery of multi-infeed HVDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 85-90, 158.
- [19] 屠竞哲, 张健, 曾兵, 等. 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.  
TU Jingzhe, ZHANG Jian, ZENG Bing, et al. HVDC transient reactive power characteristics and impact of control system parameters during commutation failure and recovery[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2131-2139.
- [20] CAO Hong, WANG Xingguo, DU Dingxiang, et al. An improved extinction angle control strategy to mitigate continuous commutation failure for HVDC system with hierarchical connection[C] // 2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference, September 7-9, 2019, Beijing, China.
- [21] TAN Yangchen, YAO Wei, SHU Zhan, et al. Coordination control of commutation failure preventions for UHVDC hierarchical connection to AC grid[C] // 2018 International Conference on Power System Technology, November 6-8, 2018, Guangzhou, China.
- [22] 李江涛, 顾悦, 任子媛, 等. 交流不对称故障类型对 HVDC 换相失败的影响研究[J]. 高压电器, 2018, 54(7): 131-137.  
LI Jiangtao, GU Yue, REN Ziyuan, et al. Influence of AC system asymmetric fault on the HVDC system commutation failure[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7): 131-137.
- [23] MIRSAEIDI S, DONG X. An enhanced strategy to inhibit commutation failure in line-commutated converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(1): 340-349.
- [24] 冀肖彤. 抑制 HVDC 送端交流暂态过电压的控制系统优化[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 721-728.  
JI Xiaotong. Optimization of HVDC control system for mitigating AC transient overvoltage on rectifier station[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 721-728.
- [25] YAO Wei, LIU Chang, FANG Jiakun, et al. Probabilistic analysis of commutation failure in LCC-HVDC system considering the CFPREV and the initial fault voltage angle[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2): 715-724.
- [26] WANG Qi, ZHANG Chaoming, WU Xingquan, et al. Commutation failure prediction method considering commutation voltage distortion and DC current variation[J]. IEEE Access, 2019, 7: 96531-96539.
- [27] SHAO Yao, TANG Yong. Fast evaluation of commutation failure risk in multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 646-653.
- [28] 陈佳浩, 王琦, 朱鑫要, 等. 谐波电压造成直流输电换相失败风险评估[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 196-202.  
CHEN Jiahao, WANG Qi, ZHU Xinyao, et al. Risk assessment of commutation failure for HVDC transmission due to harmonic voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 196-202.
- [29] 李晓华, 尹项根, 陈德树. 三相同时刻采样值电流差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(31): 64-70.  
LI Xiaohua, YIN Xianggen, CHEN Deshu. Novel differential protection based on three phase simultaneity sampling values[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(31): 64-70.

收稿日期: 2019-11-25; 修回日期: 2020-01-18

作者简介:

李晓华(1975—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统故障分析与继电保护、直流输电控制与保护; E-mail: eplxh@scut.edu.cn

张陈泽宇(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电故障分析及控制。E-mail: chzyzhang@qq.com

(编辑 许威)