

# 一种改善直流系统恢复特性的低压限流环节优化方法\*

王锐铭, 李凤婷<sup>†</sup>

(新疆大学 可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 换相失败恢复策略中的低压限流环节参数大多选择折中值或经验值, 没有充分考虑无功功率的动态需求, 影响系统恢复中的控制性能. 文章建立了电流指令值与交流母线电压的关系式, 提出了基于交流母线电压求解电流指令的恢复策略, 采用静止同步补偿器(STATCOM)解决因恢复速率过快导致再次换相失败的问题, 改善系统恢复特性. 通过搭建仿真模型验证恢复策略可以改善系统的恢复特性, 有效避免后续换相失败等问题.

**关键词:** 换相失败; 低压限流环节; 静止同步补偿器; 交直流系统; 恢复特性

**DOI:** 10.13568/j.cnki.651094.651316.2020.03.03.0002

**中图分类号:** TM732 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2021)02-0235-07

**引文格式:** 王锐铭, 李凤婷. 一种改善直流系统恢复特性的低压限流环节优化方法[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2021, 38(2): 235-241+250.

**英文引文格式:** WANG R M, LI F T. An optimization method of VDCOL to improve the recovery characteristics of DC system[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2021, 38(2): 235-241+250.

## An Optimization Method of VDCOL to Improve the Recovery Characteristics of DC System

WANG Ruiming, LI Fengting

(Engineering Research Center for Renewable Energy Power Generation and Grid Technology,  
Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830047, China)

**Abstract:** Most of the parameters of the VDCOL in the commutation failure recovery strategy are chosen to be the compromise value or the empirical value, dynamic demand for reactive power is not fully considered, affect control performance in system recovery. The relationship between the current command value and the AC bus voltage is established by derivation, a recovery strategy based on AC bus voltage for current command is proposed, the STATCOM is used to solve the problem that the recommutation fails due to the fast recovery rate, improve system recovery characteristics. The simulation model is built to simulate the effectiveness of the verification recovery strategy in improving the recovery characteristics of the system and avoiding subsequent commutation failures.

**Key words:** commutation failure; VDCOL; STATCOM; AC-DC system; recovery characteristics

## 0 引言

在交直流输电系统中, 换相失败是最为常见的故障之一<sup>[1-3]</sup>. 若换相失败后不能自行恢复, 将导致连续换相失败, 进而造成直流闭锁, 在恢复过程中直流电流越大, 需要从交流系统吸收的无功越多, 在恢复过程中很有可能引起后续换相失败或电压稳定性问题, 影响直流输电系统的正常恢复. 因此, 采用适当的控制策略改善换相失败后的直流系统的恢复特性对避免连续换相失败尤为重要.

目前关于换相失败的研究已取得了一定的成果. 文献[4]提出了一种交直流输电系统的改进拓扑, 通过调整阀臂换相电压来减小换相失败的概率. 文献[5]提出了异常换相失败的概念, 依据低次谐波对换相失败的严重程度进行了分类. 文献[6]对含静止同步补偿器的交直流系统原有的控制方式进行改善, 提高对换相失败的抵抗能

\* 收稿日期: 2020-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51877185); 国家电网公司科技项目(SGXJJY00GHJS1800065).

作者简介: 王锐铭(1995-), 男, 硕士生, 从事交直流系统保护与控制的研究, E-mail: 448997352@qq.com.

<sup>†</sup> 通讯作者: 李凤婷(1965-), 女, 博士, 教授, 从事可再生能源并网技术与电力系统继电保护的研究, E-mail: 515502636@qq.com.

力. 文献[7]在原有的控制方式上, 提出了基于静止同步补偿器抑制换相失败的方案. 文献[8-12]基于直流系统的无功特性, 以减少无功功率为目标, 降低故障期间的无功消耗, 改善了故障后的恢复特性. 文献[13-15]提出了基于模糊逻辑的控制器, 但该控制方法运算较为复杂, 响应速度较慢, 实际工程中难以实施. 文献[16, 17]提出一种新的VCDOL控制结构, 结合DC-VDCOL与AC-VDCOL优点, 重新优化建立低压限流环节, 改善恢复性能. 文献[18, 19]基于传统PI控制器提出了预防换相失败的方法, 降低了换相失败的概率, 但是上述研究忽略了故障后可能导致二次换相失败的问题, 存在一定的局限性.

本文对三相短路故障、单相接地故障特性以及VDCOL的缺陷进行剖析, 建立交直流模型以及控制策略, 运用DIgSILENT研究了换相失败中两种故障下直流系统的恢复特性. 提出了基于交流母线电压求取电流指令的方法, 实现了改善交直流系统恢复特性的目标, 有效抑制后续的换相失败.

## 1 高压直流系统换相失败分析

### 1.1 三相短路故障

三相短路故障设置为逆变侧换流器近端故障如图1中1号点, 即故障发生在换流器交流母线处. 交流系统三相对称时, 逆变器熄弧角 $\gamma$ 可以表示为:

$$\gamma = \arccos \left( \frac{\sqrt{2}kI_d X_c}{U_L} + \cos \beta \right) \quad (1)$$

式(1)中:  $k$ 为换流变压器的变比,  $I_d$ 为直流电流,  $X_c$ 为换相电抗,  $U_L$ 为逆变侧换流母线电压有效值,  $\beta$ 为超前角.

对式(1)各变量微分可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial \gamma}{\partial k} = \frac{-1}{\sqrt{1-\cos^2 \gamma}} \cdot \frac{\sqrt{2}I_d X_c}{U_L} \\ \frac{\partial \gamma}{\partial I_d} = \frac{-1}{\sqrt{1-\cos^2 \gamma}} \cdot \frac{\sqrt{2}k X_c}{U_L} \\ \frac{\partial \gamma}{\partial X_c} = \frac{-1}{\sqrt{1-\cos^2 \gamma}} \cdot \frac{\sqrt{2}k I_d}{U_L} \\ \frac{\partial \gamma}{\partial U_L} = \frac{1}{\sqrt{1-\cos^2 \gamma}} \cdot \frac{\sqrt{2}k I_d X_c}{U_L^2} \\ \frac{\partial \gamma}{\partial \beta} = \frac{\sin \beta}{\sqrt{1-\cos^2 \gamma}} \end{cases} \quad (2)$$

熄弧角对直流电流 $I_d$ 、换流器变比 $k$ 和换相电抗 $X_c$ 的偏导数均为负值, 对交流电压 $U_L$ 和超前角 $\beta$ 的偏导数为正值, 可以得到直流电流 $I_d$ 、换流器变比 $k$ 和换相电抗 $X_c$ 的升高与交流电压 $U_L$ 和超前角 $\beta$ 的降低都会导致 $\gamma$ 减小, 从而引发换相失败.

### 1.2 单相接地故障

发生三相短路故障时, 三相电压对称下降且波形的相位不会发生改变, 但逆变侧出现单相接地故障如图1中2号点, 电压暂态过程的分析较三相短路故障更为复杂, 换流阀容易产生电流畸变, 同时换相电压过零点的改变, 还需考虑过零点漂移 $\phi$ 对熄弧角的影响.

交流系统三相不对称时, 逆变器熄弧角 $\gamma$ 表示为:

$$\gamma = \arccos \left( \frac{\sqrt{2}kI_d X_c}{U_L} + \cos \beta \right) - \phi \quad (3)$$

同时, 单相接地故障的压降可表示为:

$$V = 1 - \frac{I'_d}{I_d} \frac{(I_d/I_{dFL})X_{cpu}}{I_d/I_{dFL} X_{cpu} + \cos(\gamma_0 + \phi) - \cos \gamma} \quad (4)$$

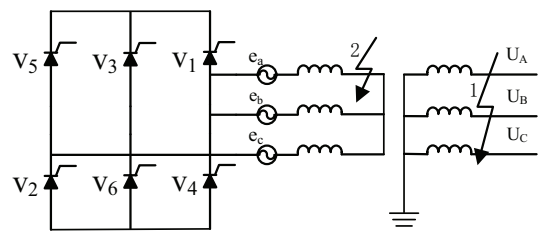


图 1 直流输电系统逆变器故障点示意图

Fig 1 Schematic diagram of HVDC inverter fault

造成换相电压零点的相位移动为:

$$\phi = \frac{\pi}{6} - \arctan\left(\frac{\sqrt{3}/2}{1/2 + 1/(1 - \Delta V)}\right) \quad (5)$$

### 1.3 VDCOL的缺陷

配置低压限流环节的换流器静态伏安特性曲线如图2所示, 在故障期间低压限流装置决定了直流电流的指令值, 从而影响直流线路中的直流电流. VDCOL中关键参数为电压阈值上下限、延迟时间常数、电流指令.

当前对VDCOL的研究不能充分的考虑换相失败后逆变侧的动态无功需求, 因此需要优化电流指令响应系统的动态需要, 减小换相失败的概率.

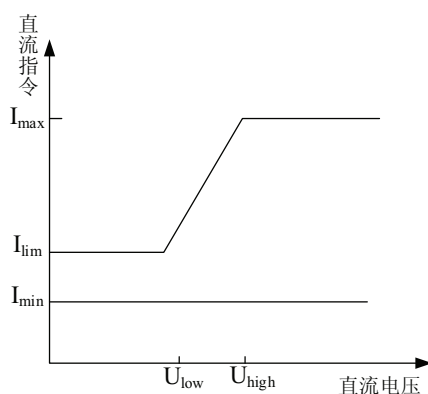


图 2 低压限流环节的特性曲线  
Fig 2 Characteristic curve of VDCOL

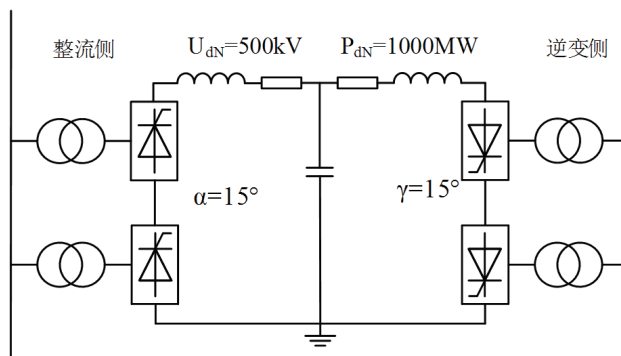


图 3 高压直流系统模型  
Fig 3 HVDC System Model

注: 图中电阻、电感、电容的单位分别为Ω、H、μF.

## 2 交直流模型的建立

### 2.1 交直流系统模型及模型参数

文中基于DIgSILENT搭建了适用于交直流系统仿真研究的数学模型, 如图3及表1所示. 包含了整流器、逆变器及其控制系统模型. 该系统在整流侧和逆变侧都有12脉冲晶闸管转换器. ±500 kV直流线路长度为500 km, 额定电流为2 kA.

表 1 HVDC模型数据  
Tab 1 HVDC Model Data

参数	逆变站
逆变侧交流电压	230 kV
额定直流电流	2 kA
系统频率	50 Hz
熄弧角最小值	15 deg
短路比	2.5

### 2.2 低压限流控制

当换流母线压降过大时, 直流控制系统会启动低压限流环节, 如图4所示. 根据其压降限制故障期间或故障恢复过程中直流电流的变化, 并且能减小系统对无功功率的需求. 设置低压限流的主要作用有:

(1) 交流系统发生故障后, 通过降低直流电流而减小换流器吸收的无功功率, 防止因无功功率过高而引起电压下降造成系统的不稳定.

(2) 故障结束在恢复过程中, 调节直流电流, 避免因恢复过快大量无功没有吸收使得二次换相失败.

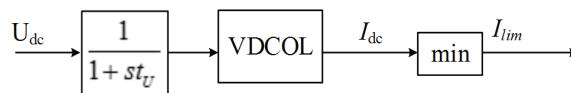


图 4 低压限流控制器  
Fig 4 VDCOL Controller

## 3 换相失败故障下恢复特性研究

HVDC系统发生换相失败后的恢复特性对整个直流系统的安全稳定运行具有重要的意义, 因此研究直流系统的恢复情况, 对改善换相失败后的恢复特性具有一定的指导意义.

### 3.1 三相短路故障引发换相失败恢复分析

三相短路故障开始时刻0 s, 故障持续时间0.1 s, 发生换相失败后的波形如图5所示.

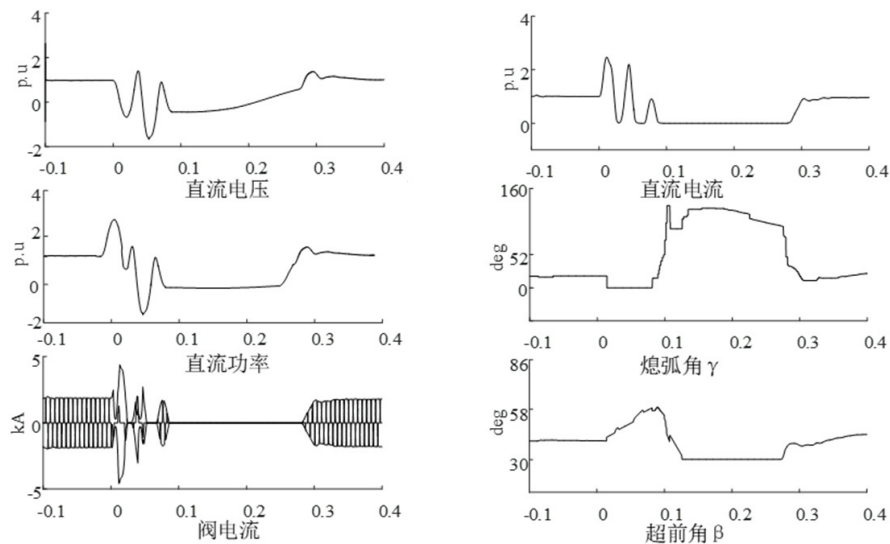


图 5 三相短路故障引发换相失败波形图

Fig 5 The three-phase short-circuit fault waveform of commutation failure caused

图5分别为直流电压、直流电流、直流功率、熄弧角 $\gamma$ 、阀电流、超前角 $\beta$ 换相失败波形图. 三相短路故障后, 此过程可分为以下几个阶段:

(1) 发生故障后, 三相短路故障引起逆变器侧端交流母线与直流线路电压明显降低, 直流电流升高的同时熄弧角减小;

(2) 在极短的时间内, 电压下降迅速, 在超前角还未来得及调整的情况下, 直流电流瞬间增大与此同时超前角增大, 从而使得熄弧角迅速减小到0, 此时阀电流为0, 直流系统发生换相失败;

(3) 熄弧角控制器迅速减小超前角, 增大熄弧角, 换相失败的过程结束;

(4) 故障切除后, 熄弧角减小, 直流电压电流增大, 350 ms左右恢复到稳态值.

在故障期间, 逆变器发生长时间的换相失败, 恢复时间较慢, 但在消除故障后, 其他元件也未停止运行, 且未发生后续的换相失败.

### 3.2 单相接地故障换相失败恢复特性研究

单相接地故障开始时刻0 s, 故障持续时间0.1 s, 设置为a相接地, 发生换相失败后的波形如图6所示.

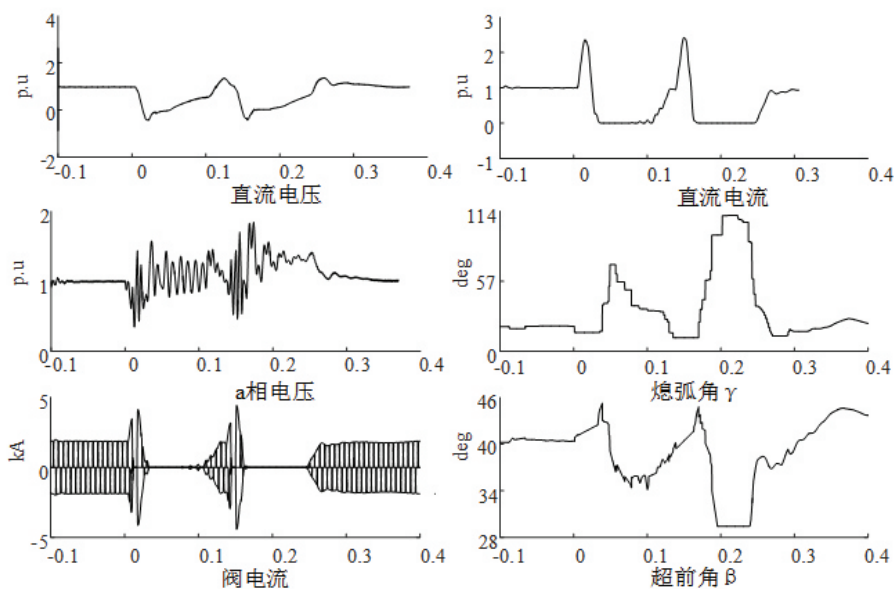


图 6 单相接地故障引发换相失败波形图

Fig 6 The single-phase grounding fault waveform of commutation failure caused

图6分别为直流电压、直流电流、直流功率、熄弧角 $\gamma$ 、阀电流、超前角 $\beta$ 换相失败波形图. 单相故障后, 此过程可分为以下几个阶段:

- (1) 发生故障后, 单相接地故障引起逆变侧近端交流母线电压以及直流电压降低, 直流电流升高, 熄弧角减小;
- (2) 在极短的时间内, 交流电压下降迅速且直流电压电流二次急速跌落, 对电网造成了二次冲击, 100 ms时发生了二次换相失败, 导致直流系统发生持续200 ms的故障;
- (3) 熄弧角控制器迅速减小超前角, 增大熄弧角, 换相失败的过程结束;
- (4) 故障切除后, 熄弧角减小, 直流电压电流增大, 350 ms左右恢复到稳态值.

单相接地故障这种不对称故障, 会使在阀上的电压产生严重畸变, 若压降过大还会导致连续的换相失败而无法恢复, 且交直流系统强度较弱提供不了足够的无功, 威胁系统的安全稳定运行.

在实际的弱交流系统中, 长时间的恢复会导致二次换相失败, 不利于直流系统的安全稳定运行. 所以, 需要通过优化VDCOL中参数的选择来减小换流阀换相失败概率, 同时改善换相失败后系统的恢复特性.

## 4 换相失败恢复特性优化

### 4.1 电流指令最大值的选取

为了优化VDCOL中的电流指令, 利用高压直流准稳态公式, 得到三相短路故障与单相接地故障中电压与电流之间的约束关系.

高压直流准稳态公式为

$$\begin{cases} U_d = \frac{6\sqrt{3}}{\pi} k U_{ac} \cos \gamma - \frac{6}{\pi} X I_d \\ U_d = \frac{6\sqrt{3}}{\pi} k U_{ac} \cos \beta + \frac{6}{\pi} X I_d \end{cases} \quad (8)$$

通过公式(8)可解得直流指令值的计算公式

$$I_d = \frac{0.7kU_{ac}(\cos \gamma - \cos \beta)}{X} \quad (9)$$

式(9)中:  $X$ 与 $k$ 均为常量, 由此可得到电流指令值与熄弧角呈正相关性, 与超前角呈负相关性. 本节以HVDC模型为算例, 将关断角 $\gamma=15^\circ$ 以及超前角 $\beta$ 代入公式(9), 此时可求解出三相短路故障和单相接地故障两种工况下直流指令的最大值.

#### 4.1.1 三相短路故障

在三相短路故障下, 关断角 $\gamma=15^\circ$ , 换相角取最大值 $25^\circ$ , 根据 $\beta=\alpha+\mu$ , 超前角 $\beta=40^\circ$ . 将超前角与熄弧角代入公式(9)可得到直流指令最大值与 $U_{ac}$ 的函数表达式为

$$I_{d\max 1} = 1.030 \ 9 U_{ac} \quad (10)$$

#### 4.1.2 单相接地故障

当系统发生单相接地故障时, 换相电压过零点产生相位移. 以a相接地故障为例, 如图7所示, 由于线电压 $V_a$ 的下降, 此时触发角 $\alpha'=\alpha+\phi$ , 超前角 $\beta'=\beta-\phi$ , 熄弧角 $\gamma'=\gamma-\phi$ . 因此在求解单相接地故障时, 需要确定偏移角 $\phi$ 的取值区间.

在Y-Y和Y-D两种接线方式下, 通过式(7)计算出偏移量 $\phi$ 后得到超前角 $\beta$ 和熄弧角 $\gamma$ 代入式(9)可得到单相接地故障下直流指令最大值与 $U_{ac}$ 的函数表达式

$$I_{d\max 2} = 1.394 \ 2 U_{ac} \quad (11)$$

### 4.2 并联静止同步补偿器

为了解决因恢复过快而产生的无功盈余问题, 在电网受端交流母线上并联一个静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM), 如图8所示, 主要参数见表2.

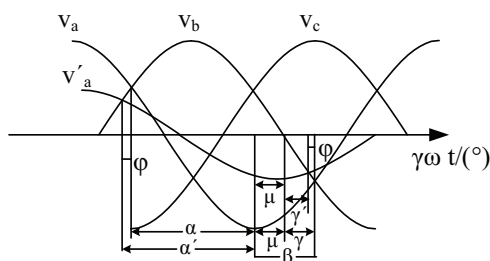


图7 单相接地故障下的角度参数  
Fig 7 The angle of single-phase grounding fault parameters under

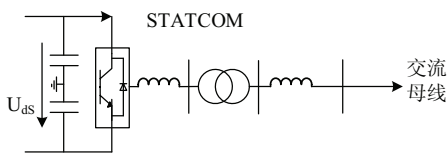


图 8 典型的STATCOM模型  
Fig 8 Typical model of STATCOM

表 2 STATCOM模型数据  
Tab 2 STATCOM model data

参数	STATCOM
容量	300 Mvar
交流母线电压	230 kV
频率	50 Hz

### 4.3 改进后换相失败仿真分析

在电网受端交流母线并联STATCOM且优化电流指令值,一方面能优化功率的恢复特性;另一面能够解决因恢复过快产生大量无功盈余的问题.

#### 4.3.1 三相短路故障

从图9(b)中可以看出,三相短路故障引起的换相失败在改进后的对直流电流进行了调节,降低了换相失败过程中直流电流、直流电压的最大值,在200 ms内直流系统就能够恢复.在并联STAMCOM后,恢复性能与改进前相比有相当大的好转,并能有效预防二次换相失败.

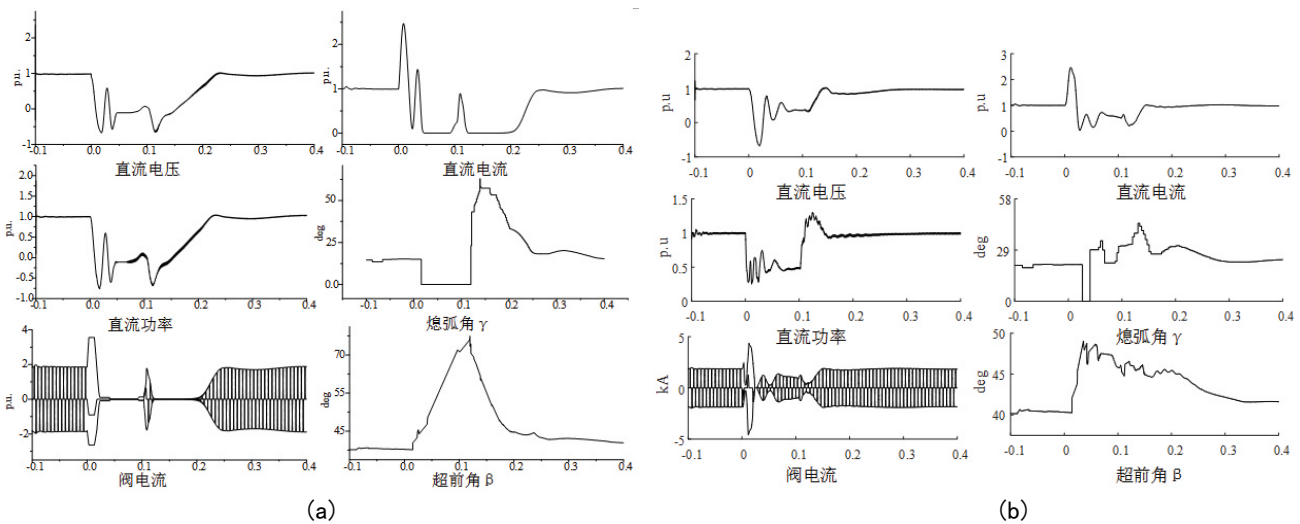


图 9 改进后三相短路故障引发换相失败波形图

Fig 9 The improved three-phase short circuit fault cause commutation failure of waveform

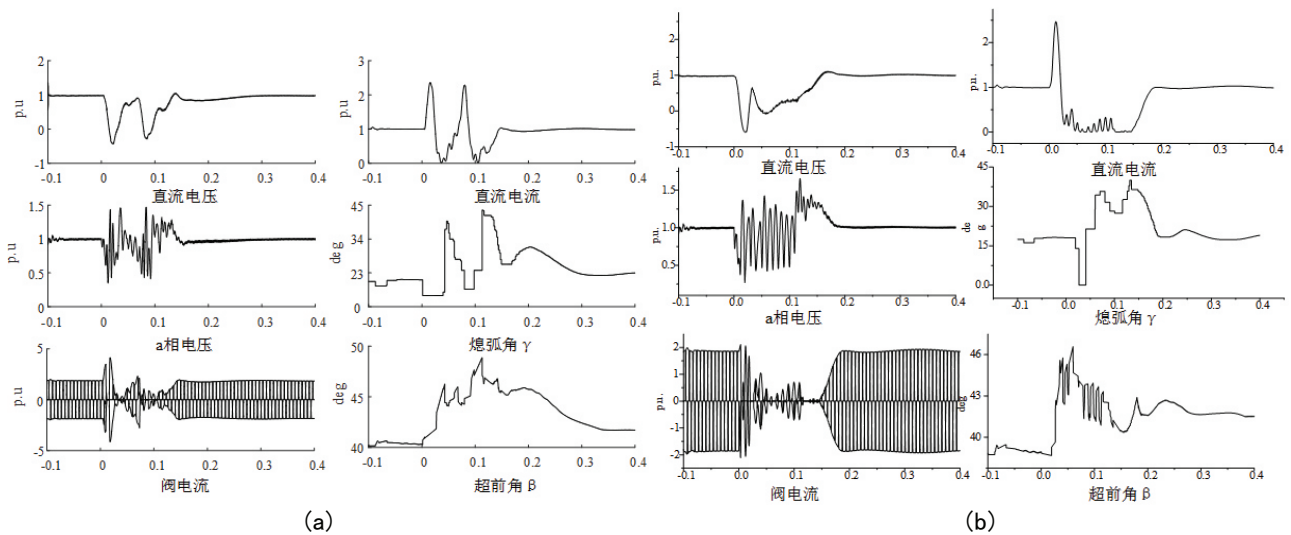


图 10 改进后单相接地故障引发换相失败波形图

Fig 10 The improved single-phase grounding fault cause commutation failure waveform

#### 4.3.2 单相接地故障

由图9,图10可知,单相接地故障较三相短路故障更为严重.单相接地故障两次电压跌落发生二次换相失

败,都会对电网造成巨大的冲击,但时间极短,没有因换相失败而进一步造成直流闭锁.同时由图10(b)可知,并联STATCOM后,在150 ms左右系统就已恢复正常,恢复特性有明显的改善.

## 5 结论

文中采用双极六脉冲HVDC模型,对交流故障特性进行仿真分析,分别给出了三相故障以及单相故障波形图,得出以下结论:

(1) 在实际的高压直流输电工程中,低压限流环节参数会影响换相失败后的恢复过程.

(2) 不对称故障后,阀侧线电压变化幅值较大,单相故障较容易发生换相失败且危害更大.

(3) 通过对两种故障条件下的仿真,优化低压限流控制装置中电流指令值,并且采用静止同步补偿器能改善换相失败后的系统恢复特性,功率恢复同时也能补偿无功,避免再次换相失败.

## 参考文献:

- [1] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.  
XU Z. Behavior analysis of AC-DC power system[M]. Beijing: China Machine Press, 2005. (in chinese)
- [2] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京: 科学出版社, 2010, 58-63.  
LI X Y. Operation HVDC transmission system[M]. Beijing: Science Press, 2010, 58-63. (in chinese)
- [3] 倪晓军, 赵成勇, 许韦华, 等. 降低直流输电换相失败概率的改进拓扑及其控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 811-820.  
NI X J, ZHAO C Y, XU W H, et al. An improved topology to decrease the commutation failure in LCC-HVDC and Its control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 811-820. (in chinese)
- [4] 赵彤, 吕明超, 娄杰, 等. 多馈入高压直流输电系统的异常换相失败研究[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 705-711.  
ZHAO T, LYU M C, LOU J, et al. Analysis on potential anomalous commutation failure in multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 705-711. (in chinese)
- [5] 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 C Q, LI D, LIU Y C, et al. Control method for HVDC system with STATCOM[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2440-2448. (in chinese)
- [6] 杨欢欢, 朱林, 蔡泽祥, 等. 直流控制对直流系统无功动态特性的影响分析[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2631-2637.  
YANG H H, ZHU L, CAI Z X, et al. Influence of HVDC control on HVDC reactive power dynamic characteristic[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2631-2637. (in chinese)
- [7] 王贺楠, 郑超, 任杰, 等. 直流逆变站动态无功轨迹及优化措施[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1254-1259.  
WANG H N, ZHENG C, REN J, et al. Dynamic reactive power trajectory of HVDC inverter station and its optimization measures[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1254-1259. (in chinese)
- [8] 郑超, 盛灿辉, 林俊杰, 等. 特高压直流输电系统动态响应受端交流电网故障恢复特性的影响[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 555-561.  
ZHENG C, SHENG C H, LIN J J, et al. Influence of UHVDC transmission system dynamic response on AC receiving end's failure recovery characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 555-561. (in chinese)
- [9] 郑超, 汤涌, 马世英, 等. 直流整流站动态无功特性解析及优化措施[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4886-4896.  
ZHENG C, TANG Y, MA S Y, et al. Study on the dynamic reactive power characteristic of HVDC rectifier stations and optimization measures[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4886-4896. (in chinese)
- [10] 李瑶佳, 汪娟娟, 李子林, 等. 考虑高压直流输电系统无功特性的低压限流参数设置[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 16-23.  
LI Y J, WANG J J, LI Z L, et al. VDCOL parameters setting influenced by reactive power characteristics of HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 16-23. (in chinese)
- [11] SUN Y Z, PENG L, MA F, et al. Design a fuzzy controller to minimize the effect of HVDC commutation failure on power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(1): 100-107.
- [12] 孙国强, 高楷, 卫志农, 等. 抑制HVDC系统换相失败的自适应PI控制方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 39-46.  
SUN G Q, GAO K, WEI Z N, et al. Adaptive PI control method to restrain commutation failure in HVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 39-46. (in chinese)

(下转第 250 页)

- [4] NARASIMHAN J, YU Z, RAJURKAR K P. Tool wear compensation and path generation in Micro and Macro EDM[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2005, 7(1): 75-82.
- [5] 黄河. 基于内冲液旋转电极的电火花铣削机床与关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.  
HUANG H. Research on Ed-milling machine tool and key technologies based on rotational electrode and inner jetted dielectrica[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [6] 李剑忠, 栾纪杰, 虞慧岚, 等. 微细电火花三维加工中电极损耗补偿新方法[J]. 大连理工大学学报, 2011, 51(4): 525-528.  
LI J Z, LUAN J Z, YU H L, et al. A new method of electrode wear compensation in 3D micro-EDM[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011, 51(4): 525-528. (in Chinese)
- [7] ZHANG L A, DU J Y, ZHUANG X S, et al. Geometric prediction of conic tool in Micro-EDM milling with fix-length compensation using simulation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015(89): 86-94.
- [8] PEI J Y, ZHUANG X S, ZHANG L, et al. A model of tool wear in electrical discharge machining process based on electromagnetic theory[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018(124): 22-32.
- [9] 高睿恒, 张发旺, 顾琳, 等. 水中电火花放电能量分配系数研究[J]. 电加工与模具, 2014(2): 1-4+9.  
GAO R H, ZHANG F W, GU L, et al. Research on energy distribution coefficient of electro-discharge in water[J]. Electrical Processing and Mold, 2014(2): 1-4+9. (in Chinese)
- [10] 董颖怀. 一种微型涡轮发动机的关键结构及其制造技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.  
DONG Y H. A study of key structures and fabrication technology of a Micro turbine engine[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [11] 王博. 数控短电弧铣削加工工具电极损耗规律研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017.  
WANG B. Study of NC short arc milling tool wear law[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2017. (in Chinese)

责任编辑: 赵新科

(上接第 241 页)

- [13] 胡松伶, 王渝红, 李兴源. 有利于多馈入系统恢复的自适应变结构VDCOL控制[J]. 高压电器, 2016(5): 90-95.  
HU S L, WANG Y H, LI X Y. Adaptive variable structure VDCOL control strategy for coordinated recovery of MIDC system[J]. High Voltage Apparatus, 2016(5): 90-95. (in chinese)
- [14] 毛晓明, 张妍. 交流故障后MIDC系统交错协调恢复研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 571-578.  
MAO X M, ZHANG Y. Research on coordinated staggered recovery of MIDC systems after AC faults[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 571-578. (in chinese)
- [15] 李新年, 陈树勇, 庞光恒, 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 X N, CHEN S Y, PANG G H, 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)
- [16] 袁阳, 卫志农, 王华伟, 等. 基于直流电流预测控制的换相失败预防方法[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 565-570.  
YUAN Y, WEI Z D, WANG H W, et al. A DC current predictive control based method to decrease probability of commutation failure[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 565-570. (in chinese)
- [17] WEI Z N, YUAN Y, LEI X, 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.
- [18] 尹纯亚, 李凤婷, 张增强, 等. 直流闭锁引发多馈出直流系统换相失败分析[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2019, 36(2): 138-145.  
YIN C Y, LI F T, ZHANG Z Q, et al. Commutation failure analysis of multi-outfeed HVDC system caused by DC blocking[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition), 2019, 36(2): 138-145. (in chinese)
- [19] 牟文涛, 李凤婷. 电网不对称故障时双馈风电机组的运行特性仿真分析[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2015, 32(3): 273-278.  
MU W T, LI F T. Simulation analysis of DFIG operation characteristics during asymmetrical grid fault[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition), 2015, 32(3): 273-278. (in chinese)

责任编辑: 赵新科