

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190493

谐波引起的高压直流输电连续换相失败抑制方法研究

张国辉¹, 景柳铭², 王宾², 刘萌¹, 董新洲²

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250000; 2. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京 100084)

摘要: 高压直流输电系统连续换相失败是引发交直流混联电网连锁故障的重要诱因。谐波造成的电压波形畸变导致换相面积减少, 是引发连续换相失败的重要因素。现有换相失败抑制方法研究主要是针对换相电压工频幅值下降, 缺乏对谐波影响的考虑。针对该问题, 分析了谐波对连续换相失败的影响机理, 计算了谐波对关断面积的影响因子, 提出了一种考虑谐波的关断角整定值定量计算方法。所提算法在换相失败期间提高关断角控制器的指令值, 提高后续阀组的关断裕度, 抑制连续换相失败的发生。最后通过电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 进行验证。算例仿真验证了所提方法的有效性。

关键词: 高压直流输电系统; 连续换相失败; 电压波形畸变; 谐波

Study on HVDC consecutive commutation failures mitigation method caused by harmonics

ZHANG Guohui¹, JING Liuming², WANG Bin², LIU Meng¹, DONG Xinzhou²

(1. State Grid Shandong Electric Power Company Electric Power Research Institute, Jinan 250000, China;

2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Beijing 100084, China)

Abstract: Consecutive commutation failure of HVDC transmission system is an important cause of cascading faults in AC/DC hybrid power system. The distortion of voltage waveform caused by harmonics leads to the reduction of commutation area, which is an important factor leading to the consecutive commutation failure. The existing methods of commutation failure mitigation are mainly aimed at the decrease of amplitude of fundamental frequency voltage and lack of consideration of harmonic effect. To solve this problem, this paper analyzes the influence mechanism of harmonics on the consecutive commutation failure, calculates the influence factors of harmonics on the extinction area, and proposes a quantitative calculation method of the extinction angle setting value considering harmonics. The proposed algorithm increases the setting value of the constant extinction angle controller during commutation failure and maintains a constant extinction area, thus restraining the occurrence of consecutive commutation failure. Finally, the simulation is carried out by electromagnetic transient simulation software PSCAD/EMTDC. The effectiveness of the proposed method is verified by the simulation.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company (No. 2017A-58) "Application and Project Demonstration of Global Energy Interconnection based "Source-Grid-Load" Coordinated Control Technology in Large Power Grid Safe and Stable Operation, National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600), and China Postdoctoral Science Foundation (No. 2017M620777).

Key words: HVDC; consecutive commutation failure; commutation voltage distortion; harmonic

0 引言

我国电网高压直流输电占比已达到 34%, 已形

成了明显的交直流混联大电网。连续换相失败有可能引发大范围潮流转移甚至连锁故障, 其有效抑制问题是目前交直流混联电网密切关注的技术难题^[1-4]。

基金项目: 国网山东省电力公司科技项目资助(2017A-58) “基于全球能源互联网的“源-网-荷”协调控制技术在大电网安全稳定运行中的应用及工程示范”; 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900600); 中国博士后科学基金项目资助(2017M620777)

换流阀发生换相失败的根本原因是晶闸管缺乏自关断能力, 需要交流电网提供足够时间的反向电压来使其关断。换相过程反向电压作用的时间包括电流在阀臂上转移的时间以及转移完成后晶闸管进行关断的时间。作用在换相支路上的换相电压在

时间上的积分,就是换相电压时间面积。该面积包括两部分,一部分为叠弧面积,主要用于为电感建立起磁链,另一部分为关断面积,这是晶闸管在电流过零后,在反向电压的作用下去游离,恢复阻断能力的过程。

在故障情况下,交流换相电压随着交流电网无功补偿设备的动作而变化,提前触发角受直流控制系统影响,直流电流由送受端直流电压的差值决定。连续换相失败的发生,是由于交流电压和提前触发角以及直流电流不断变化,导致换相面积和关断面积在时域上连续或者断续缺乏。

波形的畸变有可能引发关断面积减小。诱发波形畸变的原因既可能来自交流侧,也可能来自直流侧。交流侧故障易导致换流变压器励磁涌流饱和,产生大量谐波。同时高压直流输电运行过程中也产生谐波,需要较为频繁地投切交流滤波器组来滤除谐波,但当投切时机不当时也会导致投切暂态过程中的电压波形畸变较大^[5-11]。

而现有的换相失败控制措施是根据关断角实测和预测结果,提前发出触发脉冲或增大关断角控制器的指令值。但是提前触发量和关断角增加量都是基于经验值,缺乏定量计算方法。文献[12]提出了最小关断面积控制策略,但是关断角计算时仅考虑了基波电压幅值的下降,未考虑谐波和换相电压过零点偏移的影响。文献[13]则考虑了换相电压过零点偏移的影响,但是也未考虑谐波的作用。文献[14]提出了一种基于谐波电压时间面积的换相失败分析方法,能够定量分析谐波对于换相失败的影响,但是并未进行换相失败抑制方法的进一步研究。文献[15]采用了DFT算法对谐波分量进行提取,在预测型换相失败控制模块中加入谐波的作用,但是其并未定量计算谐波与提前触发角的关系。

针对上述关断角增加量缺乏定量计算方法的问题,本文分析了谐波与换相失败关断角的关系,计算了谐波对关断面积的影响因子。定量地计算了电压波形畸变时关断角整定值增加量的大小。当检测到谐波含量增高时,增大关断角控制器的整定值,维持恒定的关断面积。所提算法通过电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC进行验证。在PSCAD/MTDC仿真环境中,使用CIGRE标准测试模型检验了所提的换相失败抑制方法。仿真结果表明,所提方法可以有效避免谐波引起的连续换相失败,确保高压直流输电系统的安全稳定运行。

1 谐波对关断面积的影响分析

图1(a)给出了逆变器从阀组 V_{T1} 、 V_{T6} 导通状态向阀组 V_{T1} 、 V_{T2} 导通状态的换相过程。简化电路图如图1(b)所示。图中 i_2 、 i_6 为流过晶闸管2和6的电流; L_c 为系统等效换相电抗; U_L 代表阀臂换相线电压 U_{BC} 的有效值。

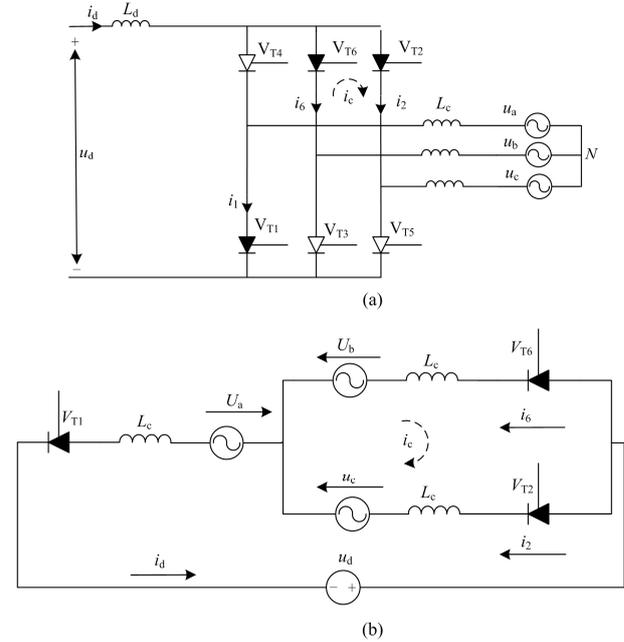


图1 换相过程等值电路图

Fig. 1 Equivalent diagram of commutation progress

如图1所示,换相支路B相和C相并联,两个支路的电压相等,满足以下关系:

$$L_c \frac{di_2}{dt} + U_C = L_c \frac{di_6}{dt} + U_B \quad (1)$$

可以化简为式(2)。

$$L_c \frac{di_2}{dt} - L_c \frac{di_6}{dt} = \sqrt{2}U_L \sin(\omega t) \quad (2)$$

在换相过程中,直流电流满足式(3)。

$$i_d(t) = i_2(t) + i_6(t) \quad (3)$$

换相过程的物理本质是能量从一个阀臂的电感转移到另外一个阀臂的电感的过程。为了建立起电感中存储的磁链和交流电压的定量关系,需要对式(3)左右进行积分。积分的上下限为换相过程的起始和结束时刻。

换相过程开始于触发延迟角 α ,结束于熄弧延迟角 δ ,电流转移过程对应的为换相重叠角 μ 。换相过程结束后,晶闸管恢复正向阻断能力的熄弧角

为 γ , β 为触发超前角。 α 、 δ 、 μ 、 γ 、 β 的相互关系为

$$\begin{cases} \alpha + \mu + \gamma = 180^\circ \\ \beta = 180^\circ - \alpha \\ \gamma = \beta - \mu \\ \delta = \alpha + \mu \end{cases} \quad (4)$$

相应的电角度和交流换相电压如图 2 所示。

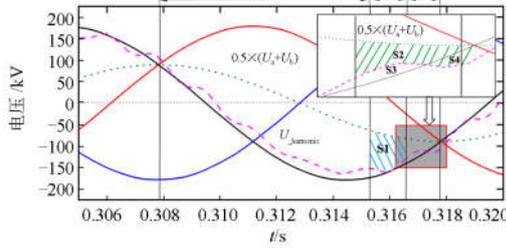


图 2 换流器换相电压波形图

Fig. 2 Converter commutation voltage waveform

对式(2)两边积分, 积分上下限分别为熄弧延迟角和触发延迟角

$$\int_{\pi-\beta}^{\pi-\gamma} (L_c \frac{di_2}{dt} - L_c \frac{di_6}{dt}) d\omega t = \int_{\pi-\beta}^{\pi-\gamma} \sqrt{2}U_L \sin(\omega t) d\omega t \quad (5)$$

换相电压因为交流故障而降低时, 可假定直流电流和触发角为常值, 换相过程所需的换相电压时间面积保持不变, 式(5)可变换为

$$S_1 = X_c I_d = \int_{\pi-\beta}^{\pi-\gamma} \sqrt{2}U_L \sin(\omega t) d\omega t \quad (6)$$

其中, S_1 为换相面积, 当换相面积小于额定值时, 会导致换相过程未能完成而发生换相失败。图 2 中阴影面积 S_2 表示关断面积。

$$S_2 = \int_{\pi-\gamma}^{\pi} \sqrt{2}U \sin(\omega t) d(\omega t) = \sqrt{2}U(1 - \cos \gamma) \quad (7)$$

当关断面积小于额定值时, 加载在晶闸管上的反向电压时间较短, 载流子负荷开关无法完全恢复正向阻断能力, 晶闸管无法完全关断, 从而引发换相失败。而换相电压幅值降低、换相电压过零点偏移、谐波造成波形畸变时, 都会引起关断面积减少。最小关断面积控制策略的目标是控制逆变器关断面积等于最小关断面积。由式(7)可得额定关断面积为

$$A_{\min} = \sqrt{2}U_N(1 - \cos \gamma_{\min 0}) \quad (8)$$

式中: U_N 为额定换相电压有效值; $\gamma_{\min 0}$ 为额定换相电压下最小关断面积所对应的关断角。最小关断面积控制策略的目标为控制关断面积为恒定值, 则有

$$\sqrt{2}U(1 - \cos \gamma_{\text{ref}}) = \sqrt{2}U_N(1 - \cos \gamma_{\min 0}) \quad (9)$$

化简可以得到关断角的参考值为

$$\gamma_{\text{ref}} = \arccos\left(1 - \frac{1 - \cos \gamma_{\min 0}}{U/U_N}\right) \quad (10)$$

当发生不对称故障, 换相电压发生过零点偏移后, 关断面积可以表示为

$$\sqrt{2}U_N(1 - \cos \gamma_{\min 0}) = \sqrt{2}U(1 - \cos(\gamma_{\text{ref}} - \Delta\phi)) \quad (11)$$

化简可以得到关断角的参考值为

$$\gamma_{\text{ref}} = \arccos\left(1 - \frac{1 - \cos \gamma_{\min 0}}{U/U_N}\right) + \Delta\phi \quad (12)$$

考虑到谐波的作用, 可以得到线电压为

$$U_{ab} = \sqrt{2}U \sin(\omega t) + \sum_{n=2}^N \sqrt{2}U_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (13)$$

谐波相对应的关断面积为

$$A_n = \int_{\pi-\gamma}^{\pi} \sqrt{2}U_n \sin(n\omega t + \phi_n) d\omega t \quad (14)$$

化简可得式(15):

$$A_n = \frac{\sqrt{2}U_n}{n} [\cos(n\pi - n\gamma + \phi_n) - \cos(n\pi + \phi_n)] \quad (15)$$

由式(15)可知, 谐波次数、谐波电压幅值都会影响到关断面积, 进而有可能造成换相失败。而如果计及所有 n 次谐波对关断面积的影响, 可以得到式(16)。

$$A_{\text{sum}} = A_1 + \sum_{n=2}^N A_n \quad (16)$$

式中: A_1 为基波电压所对应的关断面积; $\sum_{n=2}^N A_n$ 是所有 N 次谐波所对应的关断面积总和; A_{sum} 是基波和谐波所对应的关断面积总和。为了维持高压直流不发生换相失败, 则其总和 A_{sum} 应等于所需最小关断面积 A_{\min} 。

$$\sqrt{2}U_N(1 - \cos \gamma_{\min 0}) = \sqrt{2}U(1 - \cos \gamma_1) + \sum_{n=2}^N A_n \quad (17)$$

而由式(17)直接得到关断角 γ 的定量计算值较为困难。故采取了近似计算的方法来衡量谐波对关断角影响的程度。考虑 n 次谐波对于关断角的最大可能影响程度, 即谐波作用导致关断面积降为 0 时, 则可以把式(15)代入式(8):

$$\begin{aligned} \sqrt{2}U_N(1 - \cos \gamma_{\min 0}) &= \\ \frac{\sqrt{2}U_n}{n} [\cos(n\pi - n\gamma + \phi_n) - \cos(n\pi + \phi_n)] & \end{aligned} \quad (18)$$

化简可以得到:

$$\begin{aligned} \gamma_n &= \pi + \frac{\phi_n}{n} - \\ \frac{1}{n} \arccos \left[n \cdot \frac{U_N}{U} (1 - \cos \gamma_{\min 0}) + \cos(n\pi + \phi_n) \right] & \end{aligned} \quad (19)$$

当谐波造成关断面积减小时, 需要增大关断角来维持恒定的关断面积。式(19)为谐波对造成关断面积减小时, 为了维持恒定的关断面积, 关断角的增加量。

2 基于定关断面积的换相失败抑制方法

高压直流输电系统中, 定关断角控制器的策略目标是控制逆变器的关断角为额定值, 一般设置为最小关断角 18° 左右。而定关断面积的控制策略为控制关断角整定值的大小, 使得关断面积为最小关断面积。在将式(19)引入式(12), 则可得

$$\gamma_{ref} = \arccos\left(1 - \frac{1 - \cos \gamma_{min0}}{U/U_N}\right) + \Delta\varphi + \gamma_{ref_n} \quad (20)$$

式(20)为定关断角控制器的整定值。在式(20)中, 电压幅值 U 、换相电压过零点偏移 $\Delta\varphi$ 以及谐波对关断角的影响项 γ_{ref_n} 是未知量。计算 γ_{ref_n} 只需要谐波次数、谐波电压幅值以及谐波相角。换相电压过零点偏移可用式(21)进行计算。

$$\Delta\varphi = \arctan \frac{\Delta U}{\sqrt{3}(2 - \Delta U)} \quad (21)$$

高压直流系统快速变化时, 注入谐波主要分布在 $90\sim 350$ Hz。因此选取高压直流影响较大的低次谐波进行计算。12脉动换流器则选取2次谐波、3次谐波、4次谐波进行计算。以高压直流运行过程中的二次谐波为例, 根据式(19), 可以得到:

$$\gamma_2 = \pi + \frac{\varphi_2}{2} - \frac{1}{2} \arccos \left[2 \cdot \frac{U_N}{U_2} (1 - \cos \gamma_{min0}) + \cos(\varphi_2) \right] \quad (22)$$

如果考虑所有 N 次谐波的影响, 则有以下公式:

$$\gamma_{sum} = \gamma_1 + \sum_{n=2}^N \gamma_n \quad (23)$$

式(23)近似计算了谐波对于关断角的影响, 其意义为所有 N 次谐波对于关断角的最大可能影响程度。

首次换相失败后, 直流控制系统响应造成的无功波动是导致后续换相失败发生进而引发连续换相失败的重要诱因。根据高压直流输电准稳态模型可知, 其无功功率 Q_c 与各电气角之间的关系如式(24)所示。

$$Q_c = P_d \tan \varphi \quad (24)$$

而功率因数角可以由式(25)得到。

$$\cos \varphi = \frac{1}{2} (\cos \gamma_n + \cos(\gamma_n + \mu)) \quad (25)$$

由式(25)可知, 当关断角增大的时候, 功率因数角增加, 无功消耗变大, 可以限制增大关断角的时间来减少无功消耗。图3为所提算法的流程图。采集换流母线三相电压的采样值, 计算得到零序电压和Clarke变换后的三相电压幅值。当零序电压高于阈值或者三相电压低于阈值之后, 启动换相失败控制模块。首先计算最大相角偏移量, 同时谐波分量计算模块启动, 计算谐波含量, 根据最大相角偏移量、谐波含量、电压幅值下降程度计算关断角参考值。由于电流控制器和定关断角控制器使用取小策略, 当定关断角控制器的输出触发角大于电流控制器的输出触发角时, 增大关断角控制器的整定值。可以追踪电流控制器的输出, 避免输出突变, 确保关断角控制器触发脉冲作用于高压直流阀组上, 能够控制直流输电系统, 避免连续换相失败的发生^[16]。

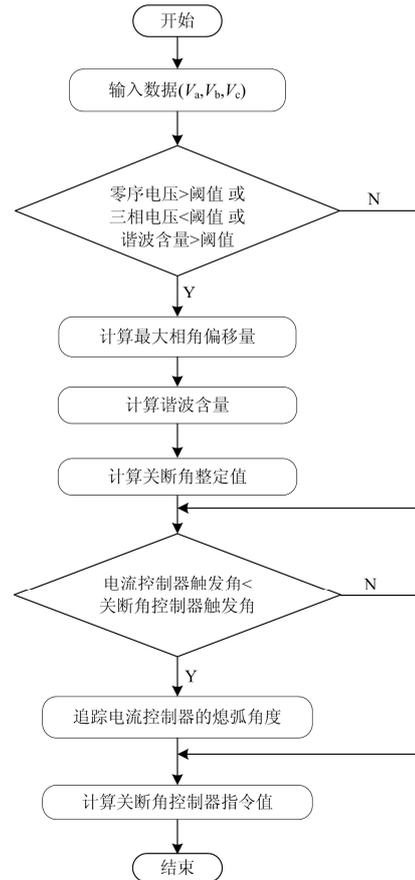


图3 所提算法流程图

Fig. 3 Flowchart diagram of proposed method

将所提算法应用于换相失败控制模块, 其拓扑结构如图4所示。零序分量用于检测不对称故障, α - β 变换后的模值用于检测三相故障。当检测到交流系统有故障发生时, 启动换相失败控制模块, 增大关断角^[17-19]。

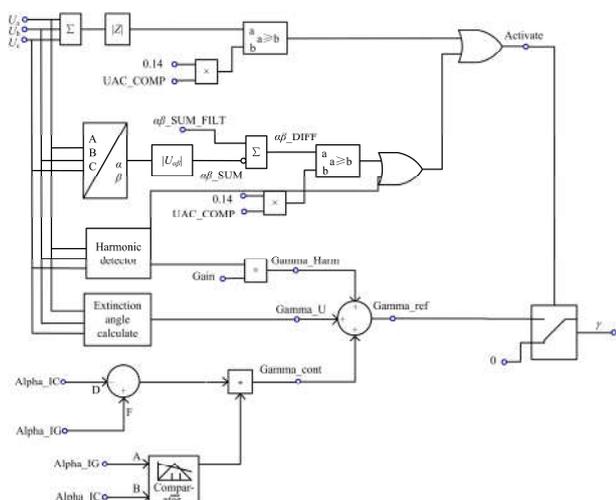
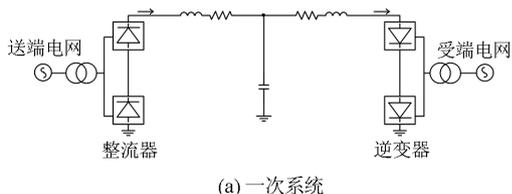


图 4 换相失败控制模块

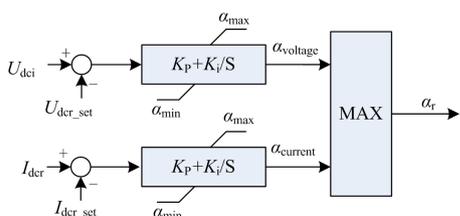
Fig. 4 Commutation failure control block

3 算例仿真

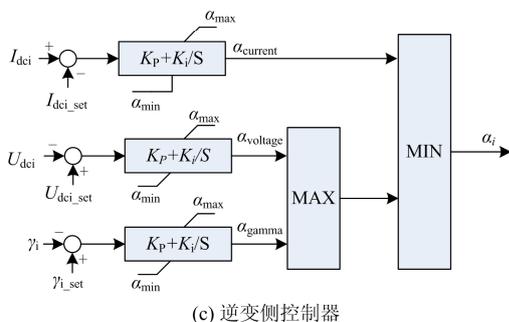
为了验证所提算法的有效性, 基于 CIGRE benchmark 模型搭建了测试模型, 如图 5 所示。测试模型进行了控制系统的修改, 测试模型整流侧配备定电流控制器和定电压控制器, 逆变侧配备定关断角控制器和定电流控制、定电压控制器^[20-22]。当



(a) 一次系统



(b) 整流侧控制器



(c) 逆变侧控制器

图 5 仿真模型示意图

Fig. 5 Diagram of simulation models

系统发生故障时, 控制系统中含有低压限流环节 (Voltage Dependent Current Order Limit, VDCOL)可以让系统恢复^[23-29]。

对所建立直流电压控制模块进行了仿真, 分别是 0.9 p.u.、0.95 p.u.、1.0 p.u.三种状态, 仿真结果如图 6 所示。直流电压电流速度较快, 能较快达到指令电压值。

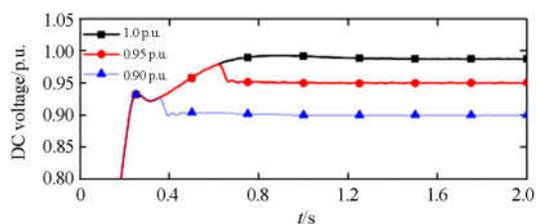


图 6 直流电压仿真结果

Fig. 6 DC voltage simulation results

逆变侧交流母线含有三组滤波器, 分别滤除 11 次谐波、13 次谐波及提供无功补偿。滤波器模型如图 7 所示。

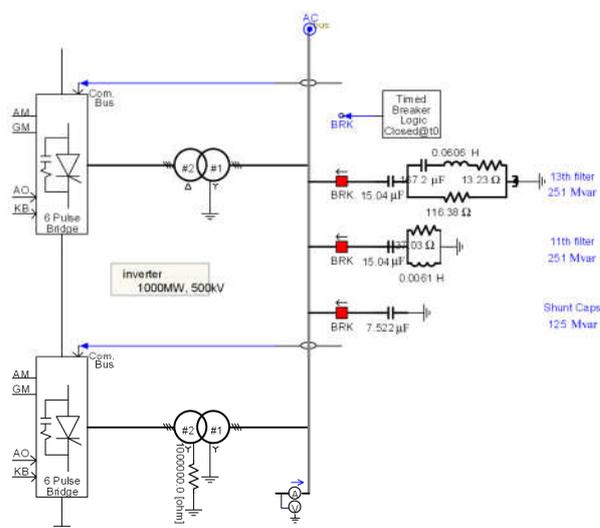


图 7 逆变器滤波器组

Fig. 7 Filter banks at inverter station

仿真时, 在 1.0 s 时切除 13 次谐波滤波器, 逆变侧交流母线电压波形如图 8 所示。在滤波器切除后, 出现了明显的电压波形畸变。在滤波器切除时刻和切除后 150 ms 均发生了较为明显的波形畸变。

滤波器投切过程中, 高压直流输电线路出现了连续换相失败现象。滤波器切除过程中, 出现了第一次换相失败, 200 ms 左右发生了第二次换相失败。对应的直流电流和关断角波形图如图 9 所示。直流电流在发生换相失败的时候迅速上升, 而后下降, 并缓慢恢复。关断角下降为零, 换相失败发生。

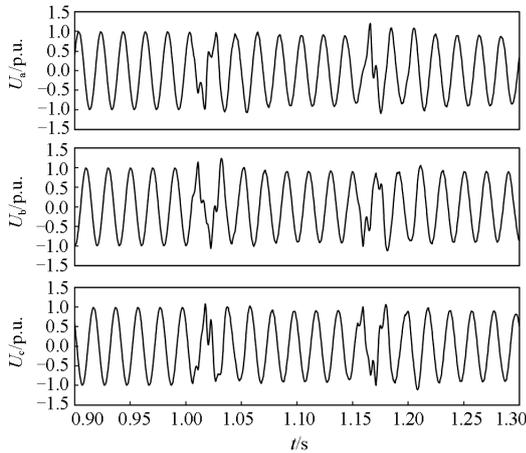
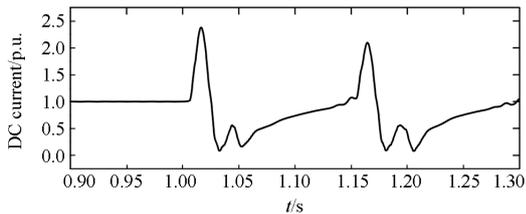
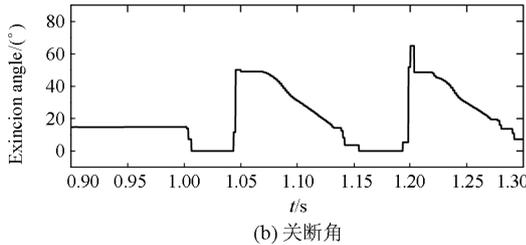


图 8 逆变侧交流母线电压
Fig. 8 HVDC inverter AC bus voltage



(a) 直流电流



(b) 关断角

图 9 高压直流响应
Fig. 9 HVDC system response

换流阀的电流如图 10 所示,可以看出高压直流输电系统发生了两次换相失败。

对换流母线电压进行傅里叶分解,得到各次谐波的幅值,如图 11 所示。由图可见,滤波器投切造成了大量的谐波,基波电压幅值下降,谐波电压幅值上升,引发了首次换相失败。

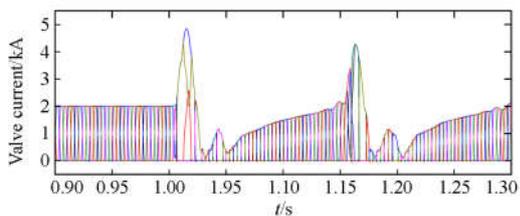


图 10 换相失败时阀电流
Fig. 10 Valve current during commutation failure

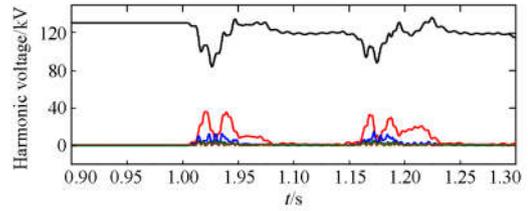


图 11 基波及各次谐波幅值

Fig. 11 Fundamental voltage and harmonic voltage magnitude

换相电压的谐波总畸变率(Total Harmonics Distortion, THD)如图 12 所示,可见发生了 2 次换相失败时,谐波畸变率上升,可以判断是谐波导致的第一次换相失败。而第二次换相失败期间,谐波总畸变率也上升较大。

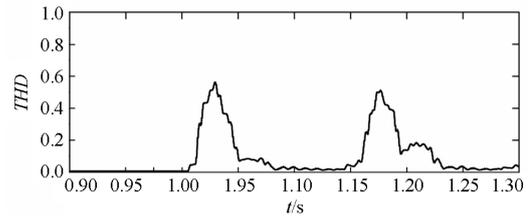


图 12 换相电压谐波总畸变率

Fig. 12 Commutation voltage total harmonics distortion

对第 2 次、第 11 次、第 13 次谐波幅值进行提取,如图 13 所示。可见在首次换相失败后,2 次谐波幅值迅速上升,可以判断为直流电流上升导致了换流变压器的饱和,进而造成大量谐波导致了第二次换相失败。

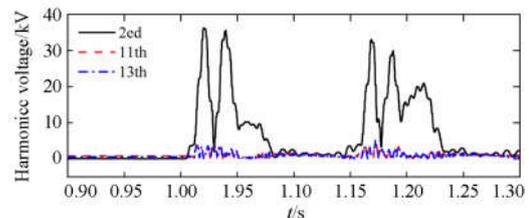


图 13 第 2 次、11 次、13 次谐波幅值

Fig. 13 2nd and 11th, 13th harmonic voltage magnitude

为了抑制谐波引起的连续换相失败,对本文提出的算法在 PSCAD/EMTDC 中建模,在滤波器组投切时进行关断角控制器整定值动态计算,关断角整定值的增加量由式(18)进行定量计算。仿真结果如图 14 所示,可见当滤波器组切除时,关断角整定值迅速增大,提高后续阀组的关断裕度。随后为了追踪定电流控制器,关断角整定值继续增大,最后趋于平稳。谐波含量升高时,关断角整定值迅速增加。

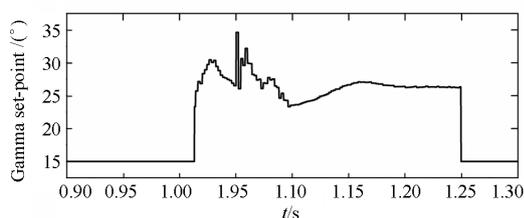


图 14 换相失败控制模块输出

Fig. 14 Commutation failure control block output

应用了所提算法后, 直流系统的响应如图 15 所示。对比图 9 的仿真结果可见, 直流电流的过冲较小, 恢复更加平稳。而关断角在交流滤波器切除时下降为零, 发生了第一次换相失败, 而后关断角迅速增大并保持为较大的值, 保证了换相裕度, 从而有效避免了第二次换相失败。

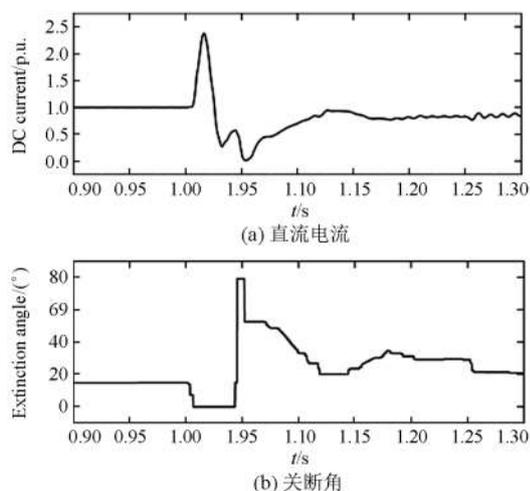


图 15 高压直流响应

Fig. 15 HVDC system response

直流控制系统的输出触发角如图 16 所示。换相失败发生后, 逆变侧控制系统从定关断角控制器切换为定电流控制器。所提算法追踪电流控制器的输出, 作用于关断角整定值, 高压直流控制系统又从定电流控制器切换为定关断角控制器, 确保换相失败控制模块起主导作用。

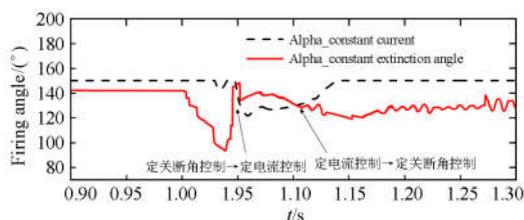


图 16 高压直流控制模式切换

Fig. 16 HVDC control mode switch

但是, 需要说明的是: 滤波器的投切时间会对电压波形畸变程度产生影响, 合闸时间在电压过零点附近时, 电压波形畸变较小, 可以取得较好的合闸效果。当投切时机不当时, 电压波形畸变较大。而逆变侧定关断角控制器仍按照设定值来维持恒定的关断角, 但是波形畸变造成的关断面积减小, 仍然会导致换相失败发生。当连续两次换相失败发生, 就会导致高压直流发生闭锁。因此, 解决该问题, 不仅可以从本文所提出的抑制连续换相失败的换流站控制来解决, 也可以从投切滤波器的时间对换相失败的影响以及导致直流闭锁的情况等角度来分析, 该部分内容将在随后开展进一步研究。

4 结论

本文针对电压波形畸变引发连续换相失败问题, 提出了一种考虑谐波的连续换相失败抑制方法。对谐波引起的关断面积减小进行分析, 计算了谐波对关断面积的影响因子。定量地计算了电压波形畸变时关断角整定值增加量的大小。通过仿真验证了所提方法能够在电压波形畸变时增大关断角整定值, 进而维持恒定的关断面积, 避免高压直流连续换相失败的发生。所提控制方法可以确保高压直流输电系统的安全稳定运行。

参考文献

- [1] TU Jingzhe, ZHANG Jian, BU Guangquan, et al. Analysis of the sending-side system instability caused by multiple HVDC commutation failure[J]. CSEE Journal of Power & Energy Systems, 2015, 1(4): 37-44.
- [2] 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.
- [3] 库晓斐, 蔡泽祥, 徐敏. 高压直流输电系统交流滤波器故障与保护分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 150-155.
KU Xiaofei, CAI Zexiang, XU Min. Fault and protection analysis of AC filter for HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 150-155.
- [4] 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.
- [5] LI Y, LUO L, REHTANZ C, et al. Harmonic transfer characteristics of a new HVDC system based on an inductive filtering method[J]. IEEE Transactions on Power

- Electronics, 2012, 27(5): 2273-2283.
- [6] 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.
- [7] LIANG C, XU J, LUO L, et al. Harmonic elimination using parallel delta connected filtering windings for converter transformers in HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2): 933-941.
- [8] 董曼玲, 谢施君, 贺恒鑫, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 逆变器自定义定关断角控制的实现[J]. 南方电网技术, 2009, 3(1): 36-40.
DONG Manling, XIE Shijun, HE Hengxin, et al. Realization of self-defined control module for constant extinction angle control in PSCAD/EMTDC[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(1): 36-40.
- [9] 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.
- [10] 邵瑶, 汤涌. 一种快速评估多馈入直流系统换相失败风险的方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3429-3436.
SHAO Yao, TANG Yong. A fast assessment method for evaluating commutation failure risk of multi-infeed HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3429-3436.
- [11] 王增平, 刘席洋, 李林泽, 等. 多馈入直流输电系统换相失败边界条件[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 12-19.
WANG Zengping, LIU Xiyang, LI Linze, et al. Boundary conditions of commutation failure in multi-infeed HVDC systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 12-19.
- [12] 彭忠, 李少华, 李泰, 等. 高压直流输电系统抑制换相失败的最小关断面积控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 75-80.
PENG Zhong, LI Shaohua, LI Tai, et al. A minimum extinction area control strategy to suppress commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 75-80.
- [13] 李春华, 黄莹, 李明, 等. 一种抑制高压直流输电换相失败的优化控制策略[J]. 南方电网技术, 2017, 11(6): 1-6.
LI Chunhua, HUANG Ying, LI Ming, et al. An optimal control strategy to mitigate commutation failure of HVDC[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(6): 1-6.
- [14] 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.
- [15] LI Xinnian, LI Fengqi, CHEN Shuyong, et al. An improved commutation prediction algorithm to mitigate commutation failure in high voltage direct current[J]. Energies, 2017, 10(10): 1481.
- [16] SON H I, KIM H M. An algorithm for effective mitigation of commutation failure in high voltage direct current systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1-1.
- [17] GUO Chunyi, LIU Yuchao, ZHAO Chengyong, 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.
- [18] MIRSAEIDI S, DONG X, TZELEPIS D, et al. A predictive control strategy for mitigation of commutation failure in LCC-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 160-172.
- [19] WEI Z, 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.
- [20] KWON D, KIM Y J, MOON S I. Modeling and analysis of an LCC HVDC system using DC voltage control to improve transient response and short-term power transfer capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(4): 1922-1933.
- [21] ZOU Guibin, HUANG Qiang, SONG Shenglan, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-017-0047-z.
- [22] 张国辉, 李志中, 王宾, 等. 基于 Adaboost 的高压直流线路连续换相失败预警方法[J]. 电力系统保护与控制,

- 2019, 47(19): 69-77.
- ZHANG Guohui, LI Zhizhong, WANG Bin, et al. Early warning method of HVDC line continuous commutation failure based on Adaboost algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 69-77.
- [23] LI Y, LUO L, REHTANZ C, et al. Realization of reactive power compensation near the LCC-HVDC converter bridges by means of an inductive filtering method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(9): 3908-3923.
- [24] XUE Ying, ZHANG Xiaoping, YANG Conghuan. AC filterless flexible LCC HVDC with reduced voltage rating of controllable capacitors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5507-5518.
- [25] 饶宇飞, 张鹏辉, 李程昊, 等. 励磁涌流对高压直流输电系统换相失败的影响机理及评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 54-61.
- RAO Yufei, ZHANG Penghui, LI Chenghao, et al. Mechanism and evaluating method for HVDC commutation failure caused by inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 54-61.
- [26] 朱益华, 郭琦, 李威, 等. 含柔性直流输电系统的电网安全稳定特性和控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(12): 20-26.
- ZHU Yihua, GUO Qi, LI Wei, et al. Research on security and stability characteristics and control strategy of power grid with VSC-HVDC[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(12): 20-26.
- [27] 刘连光, 潘尧, 王泽忠. 特高压换流变压器支撑件的直流偏磁损耗计算[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(3): 5-10.
- LIU Lianguang, PAN Yao, WANG Zezhong. Eddy current loss calculation of supporting parts of UHV converter transformer under DC bias[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(3): 1-6.
- [28] 潘捷, 郑惠萍, 张红丽, 等. ± 800 kV 雁淮特高压直流送端电网安全稳定特性及控制策略[J]. 中国电力, 2018, 51(4): 7-14.
- PAN Jie, ZHENG Huiping, ZHANG Hongli, et al. Security stability analysis and control strategy of sending-end power grid of ± 800 kV Yanhuai UHVDC[J]. Electric Power, 2018, 51(4): 7-14.
- [29] 袁森, 陈得治, 陈涛, 等. 多特高压直流参与受端“强直弱交”电网安全防线的协调控制技术[J]. 中国电力, 2018, 51(10): 72-79.
- YUAN Sen, CHEN Dezhi, CHEN Tao, et al. Coordinated control of Multi-HVDC participating in three defense line at the receiving end of the power system with strong DC and weak AC[J]. Electric Power, 2018, 51(10): 72-79.

收稿日期: 2019-05-05; 修回日期: 2019-12-11

作者简介:

张 国 辉 (1977—), 男, 硕士, 主要从事电力系统继电保护的相关管理和技术工作;

景 柳 铭 (1990—), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: liuming_mark@126.com

王 宾 (1978—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为电力系统继电保护、智能变电站站域信息共享技术、暂态电能质量分析等。E-mail: binw_ee@mail.tsinghua.edu.cn

(编辑 葛艳娜)