高压直流输电系统连续换相失败研究综述

景柳铭[1,2],王 宾[1,2],董新洲[1,2],王海港[3],俞 斌[3],谢 民[3],陈 实[3]
(1. 清华大学 电机工程与应用电子技术系,北京 100084;2. 清华大学 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室,北京 100084;3. 国网安徽省电力有限公司,安徽 合肥 230061)

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,换相失败的本质原因是晶闸管没有自关断能力。因交流故障难以预测,首次换相失败难以避免,但首次换相失败演化为连续换相失败的过程受高压直流控制系统快速跳变和交流系统继电保护动作的影响。分析了高压直流连续换相失败的演化机理,介绍了判别连续换相失败的方法,归纳了连续换相失败的处理方式,并对其特点进行了分析。

关键词:高压直流输电;单端量保护;线路保护;电压反行波;线路边界;高阻接地故障
中图分类号:TM 721.1 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.201909047

0 引言

基于晶闸管的电网换相换流器(LCC)型高压直流输电具有电压等级高、传输容量大、经济性好等优点,承担着交直流混联大电网中点对点主要功率输送。但是正因为其输送功率大,换流站换流阀连续换相失败可能导致单极或双极闭锁,使得送端电网功率盈余和受端电网功率缺额,进而引发连锁机组脱网、甩负荷等,严重威胁着电网安全。

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,关断时需要电网提供一定时间、一定幅值的反向电压作用。当不满足上述反向电压作用时间和幅值时,即会导致换相失败发生。在换相电压反向(具有足够的去游离裕度)之前未能完成换相的故障称之为换相失败。若换流阀V_{T1}向换流阀V_{T3}的换相不成功,则换流阀V_{T1}将继续导通,而在下个周期的换流阀V_{T3}触发时截止,称之为单次换相失败;同一周期出现2次换相失败,如换流阀V_{T1}向换流阀V_{T3}的换相不成功,随之换流阀V_{T2}向换流阀V_{T4}的换相也不成功,则发生了双重换相失败,在下一个周期时,如果发生换相失败的换流阀V_{T3}仍未能正常导通,称之为换流阀的连续换相失败;同一换流阀在连续2个周期以上未能正常导通,则称之为2次连续换相失败;换流阀发生首次换相失败后,在下一个周期成功导通,但是因为不满足换相条件,在相邻的周期再次未能导通,则称之为2次不连续换相失败。

换流阀的连续换相失败导致直流电压下降,直流电流上升,直流输送功率短时中断。而在工程实际中,根据首次换相失败后高压直流的功率恢复特性,将200 ms以内的换相失败都统计为单次换相失败。在首次换相失败后,时隔200 ms再次发生换相失败,则称之为工程上的连续换相失败。当发生2次工程上的连续换相失败后,有可能导致高压直流闭锁。

换相过程中反向电压作用的幅值由受端交流电网决定。换流阀经由平波电抗器、换流变压器、交流滤波器组等连接受端交流线路,表现为经等效电感与表征系统电源的理想电压源相连接,正常运行时接受其施加的反向电压作用实现正常换相。一旦反向电压受到交流线路故障、滤波器组投切、远端电压跌落传播等因素的影响,则极易因为电压幅值的跌落而发生换相失败。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[1]。该面积包括两部分:一部分为叠弧面积,主要用于为等效电感建立起磁链[2];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[3]。换相过程受交流线电压和直流控制保护系统的提前触发量箝制,叠弧面积和关断面积的总量是一定的。当叠弧面积过大,使得关断面积小于所需最小关断面积时,就会造成晶闸管不能完全关断,从而引发换相失败。针对该问题,国内外相关学者分别从支撑交流电网故障快速检测、增强电源支撑能力、优化换流阀关断能力等角度开展了换相失败检测、抑制和恢复的研究。单次换相失败后高压直流恢复稳定运行的时间为200 ms,而现有的死区保护及失灵保护清除交流故障的时间为300 ms。在故障或扰动被清除之前,高压直流将会重复发生换相失败,也被称之为连续换相失败,对其进行分析不仅需要分析单次换相失败的源网阀耦合特

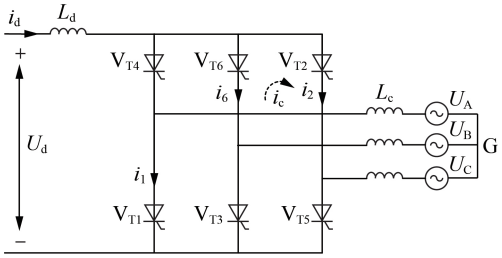
收稿日期:2019-06-03;**修回日期:**2019-08-15
基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0900600);中国博士后科学基金资助项目(2017M620777);国家电网公司总部科技项目(SGAH0000TKJS180005)
Project supported by the National Key R&D Program of China (2016YFB0900600), China Postdoctoral Science Foundation (2017M620777) and the Science and Technology Project of SGCC(SGAH0000TKJS180005)

性，还需要分析其在一定时间尺度上的重复性。

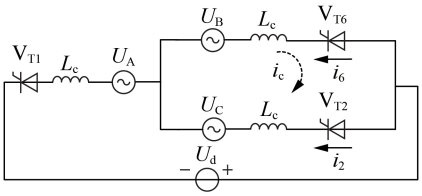
因此，本文从单次换相失败的机理分析入手，研究连续换相失败的机理，归纳造成连续换相失败的影响因素。并且分析了连续换相失败的抑制方法，对连续换相失败的处理方式进行了探讨。

1　连续换相失败机理分析

图 1(a)给出了逆变器从换流阀 V_{T1}、V_{T6} 导通状态向换流阀 V_{T1}、V_{T2} 导通状态的换相过程。其简化电路图如图 1(b)所示。图中，i_2、i_6 分别为流过换流阀 V_{T2} 与换流阀 V_{T6} 的电流；L_c 为系统等效换相电抗[4-5]。换流阀 V_{T3}、V_{T4} 与 V_{T5} 处于关断状态。



（a）6 脉动换流桥示意图



（b）换相过程简化电路图

图 1　换流器电路图

Fig.1　Circuit diagram of converter

如图 1 所示，换相支路 B 相和 C 相并联，2 个支路的电压相等，满足以下关系：

$$L_c\frac{di_2}{dt}+U_C=L_c\frac{di_6}{dt}+U_B \tag{1}$$

式(1)可以化简为：

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

其中，U_L 为阀臂换相线电压 U_{BC} 的有效值。在换相过程中，直流电流满足：

$$i_d(t)=i_2(t)+i_6(t) \tag{3}$$

1.1　叠弧面积的机理分析

换相过程开始于触发延迟角 α，结束于关断延迟角 δ，电流转移过程对应的为叠弧角 μ。换相过程结束后，晶闸管恢复正向阻断能力的关断角为 γ，β 为触发超前角。α、δ、μ、γ、β 之间的相互关系如图 2 所示。

在电角度从 α 到 δ 的换相过程内，流过换流阀 V_{T6} 的直流电流从 i_d 下降为 0，流过换流阀 V_{T2} 的直流电流上升为 i_d。电流在换相电压的作用下进行转

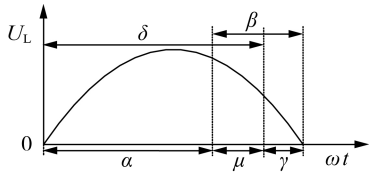


图 2　换相电压各角度关系图

Fig.2　Relationship of commutation voltage angles

移，在换相过程内对式(2)两边进行积分可得：

$$\int_{\frac{a}{\omega}}^{\frac{a+\mu}{\omega}}\left(L_c\frac{di_2}{dt}-L_c\frac{di_6}{dt}\right)dt=\int_{\frac{a}{\omega}}^{\frac{a+\mu}{\omega}}\sqrt{2}\,U_L\sin(\omega t)\,dt \tag{4}$$

假定直流电流不发生变化，式(4)左边可以变为式(5)，其为叠弧面积的需求量。

$$2S_{\mu-\text{need}}=\int_{\frac{a}{\omega}}^{\frac{a+\mu}{\omega}}\left[L_c\frac{di_2}{dt}-L_c\frac{d(i_d-i_2)}{dt}\right]dt=2L_ci_d \tag{5}$$

式(4)右边可以变为式(6)，其为叠弧面积的提供量。

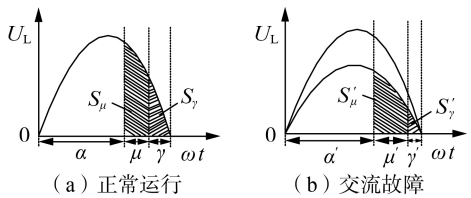
$$2S_{\mu-\text{pro}}=\int_{\frac{a}{\omega}}^{\frac{a+\mu}{\omega}}\sqrt{2}\,U_L\sin(\omega t)\,dt \tag{6}$$

换相过程的物理本质是电感中储存的能量从一个阀臂电感转移到另外一个阀臂电感的过程。叠弧面积的需求量的物理本质为换相电压在电感中建立起磁链的过程，而叠弧面积的提供量的物理本质为建立起磁链的换相电压累积量。

1.2　连续换相失败的机理分析

换流器换相电压波形图如图 3 所示。图中阴影面积 S_γ 即为关断面积，其可以用式(7)进行计算。根据晶闸管特性可知，当施加在其上的反向电压偏大时，去离子恢复时间减少，需要的关断时间缩短；当晶闸管受到的反向电压偏小时，去离子恢复时间增多，需要的关断时间延长。

$$S_\gamma=\int_{\frac{a+\mu}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}}\sqrt{2}\,U_L\sin(\omega t)\,dt \tag{7}$$



（a）正常运行　　（b）交流故障

图 3　换流器换相电压波形

Fig.3　Waveform of converter commutation voltage

关断面积和叠弧面积的总和如式(8)所示，其受制于换流器的提前触发角与交流电压。提前触发角由直流控制系统给予指令值，交流电压则由交流电源和交流故障以及电压控制设备(静止无功补偿器(SVC)、静止同步补偿器(STATCOM))等共同决定。

$$S_{(\mu+\gamma)}=\int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}}\sqrt{2}\,U_L\sin(\omega t)\,dt \tag{8}$$

当关断面积和叠弧面积的总和，即换相面积一定时，关断面积和叠弧面积的关系如式(9)所示。

$$S_\gamma = S_{(\mu+\gamma)} - S_{\mu-\text{need}} = \int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}} \sqrt{2}\, U_{\text{L}} \sin(\omega t)\, \mathrm{d}t - L_{\text{c}} i_{\text{d}} \tag{9}$$

由式(9)可见，直流控制系统的触发角指令值、交流换相电压、直流电流、换相电感都能影响关断面积的大小。叠弧面积需求量$L_{\text{c}}i_{\text{d}}$由交流电感和直流电流共同决定。叠弧面积需求量增加，需要延长换相过程，则换相电压时间面积向右扩展，关断面积减小，关断角也随之减小，有可能引发换相失败。

连续换相失败的发生必然是因为关断面积多次小于最小值。根据式(9)可以得到：

$$S_{k\gamma} = S_{k(\mu+\gamma)} - S_{k\mu-\text{need}} = \int_{\frac{\alpha_k}{\omega}+k\pi}^{\frac{\pi}{\omega}+k\pi} \sqrt{2}\, U_{\text{L}} \sin(\omega t)\, \mathrm{d}t - L_{k\text{c}} i_{k\text{d}} \tag{10}$$

其中，k为周期数。

当关断面积在连续2个周期以上小于最小值，则发生了2次连续换相失败。

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。换相电压、直流电流、关断角三者之间相互影响制约[6]。连续换相失败时电压波形如图4所示。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，造成了关断面积多次小于最小值。

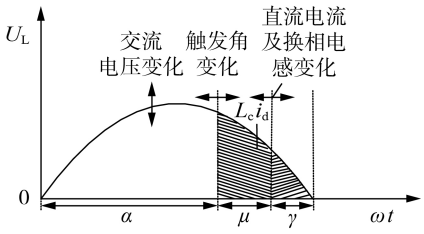


图4 连续换相失败时电压波形

Fig.4 Voltage waveform during consecutive commutation failure

连续换相失败时阀电流波形如图5所示。可见在0.3 s时换流阀V_{T2}到换流阀V_{T4}的换相不成功，发生了单次换相失败；在0.4 s时，换流阀V_{T2}导通了2个周期，发生了2次连续的换相失败；在0.5 s时，换流阀V_{T2}再次发生换相失败。在首次换相失败时隔200 ms以后，再次发生了交流故障，引发了工程上的连续换相失败。

实际工程中，将2个6脉动换流桥串联可以获得所要求的高直流电压。在某一换流桥上提供的三相电压与另一换流桥提供的三相电压之间移相30°。6脉动换流器发生的换相失败可能是由于触发系统产生故障，而12脉动换流器发生换相失败一般是由于交流侧异常。换流阀的误触发或触发脉冲丢失会导致其中1个6脉动换流桥的连续换相失败，交流系统干扰会导致2个6脉动换流桥的连续换相失败。

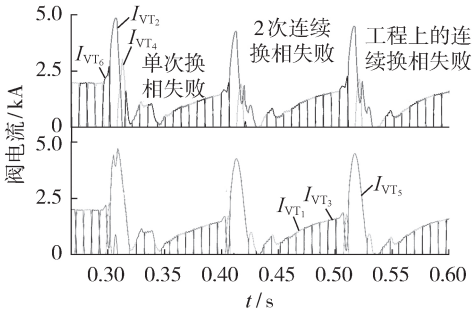


图5 连续换相失败时阀电流波形

Fig.5 Valve current waveform during consecutive commutation failure

2 连续换相失败的影响因素

交流系统发生单相故障造成的单次换相失败对系统的冲击性较小，而发生两相故障或者三相故障造成的相继换相失败则会对高压直流输电系统产生更大的冲击。发生首次换相失败后，直流控制系统会提前触发或增大关断角整定值，进而维持足够关断面积用于消除换相失败。与此同时，当直流系统电压下降到某一阈值时，低压限流环节(VDCOL)会产生作用，降低直流电流参考值，进而降低叠弧面积的需求量，以便尽快恢复正常换相。直流系统换相失败抑制模块和VDCOL会进行响应，直流控制模式不断地进行切换。而高压直流从首次换相失败恢复过程中会吸收大量的无功功率，进而引起交流电压降低，导致叠弧面积的提供量降低，有可能引发后续换相失败。

另外，控制系统有可能丢脉冲，使得换相失败发生。如果在200 ms内连续检测到换流器发生换相失败，为了避免因控制系统设备故障而造成直流停运，极控系统和阀基电子设备(VBE)会由值班系统切换到备用系统，这也使得200 ms以内发生的换相失败都计为单次换相失败[7]。直流控制器响应和交流保护动作时限如图6所示。

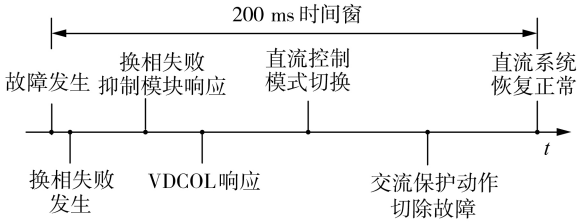


图6 交直流响应的时序图

Fig.6 Sequence diagram of AC and DC response

2.1　直流控制系统对连续换相失败的影响（α）

高压直流输电系统中逆变器的主要控制方法为采用定关断角控制器，该控制器可以控制逆变器的关断角为指定值，避免关断角过小造成换相失败。定关断角控制器的输出为触发延迟角α，最终又作用到了换流阀上，增加换相面积的总量，进而增大关断面积。目前主要使用的关断角控制为实测型控制和预测型控制2种技术路线。实测型关断角控制通过比较电压过零信号和电流过零信号得到关断角。当首次换相失败发生后，极控系统就会提前触发，减少换流器触发角，此时换相裕度得到了提升。预测型关断角控制能够在触发脉冲发出之前，根据系统的实际运行情况，计算得到关断角，从而进行控制，其响应速度较快[8-9]。首次换相失败发生后，换相失败抑制模块会快速减少触角指令值来增加换相面积的提供量。

2.2　限流策略对连续换相失败的影响（i_d）

目前高压直流输电系统应对直流电流过冲引起的连续换相失败的主要手段为采用VDCOL。当直流电压下降到某一阈值时，降低直流电流调节器的整定值，待直流电压恢复时，又能恢复电流整定值。限制直流电流能够减少叠弧面积的需求量，促进换相过程。这种自适应的特性使得其能够加强交流电压的稳定性，减少换流器无功需求，便于交流电压和功率的恢复[10-12]。

2.3　换相电压对连续换相失败的影响（U_L）

直流控制系统响应之后造成的无功功率波动，容易导致连续换相失败[13]。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（11）所示。

$$Q_c = P_d \tan\varphi \tag{11}$$

功率因数角可以由式（12）得到。

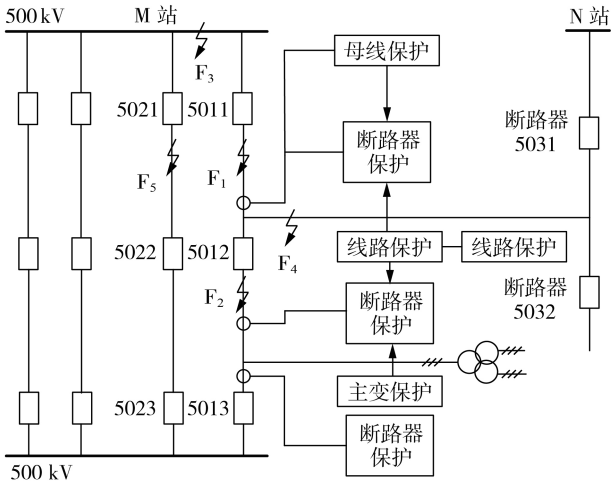
$$\cos\varphi = \frac{1}{2}\left(\cos\gamma_n + \cos(\gamma_n + \mu)\right) \tag{12}$$

其中，γ_n为额定状态时的关断角。由式（12）可知，当关断角增大时，功率因数角增加，无功消耗变大。有可能引起交流电压进一步下降，从而引发连续换相失败。

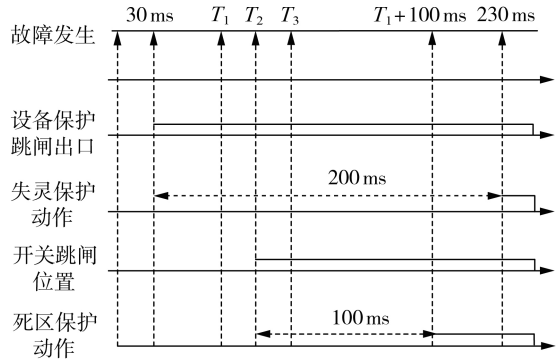
2.4　交流保护对连续换相失败的影响（L_c）

当交流系统发生故障后，继电保护装置会进行动作，进而切除故障，避免连续换相失败的发生。如果继电保护装置误动或者拒动，会造成等效换相电抗L_c的改变。根据式（5）可知，叠弧面积的需求量也随之增加，有可能会造成连续换相失败。当交流侧发生永久性接地故障后，交流保护动作。重合闸如果重合于故障上，会短时对高压直流再次造成冲击，容易再次造成换相失败，发生连续换相失败。

据华东电网计算，当交流故障引起直流换相失败时，单次换相失败的恢复时间大约为200 ms，这就要求交流系统切除故障的时间在200 ms以内。而现有的死区和失灵保护动作相邻断路器隔离故障时间在故障发生后300 ms。当高压直流从第一次换相失败恢复后，会再次受到交流故障的影响，发生连续换相失败[14]。典型的500 kV变电站3／2接线及死区保护和失灵保护的动作时限如图7所示。图中，T_1为分闸时刻；T_2为位置时刻；T_3为熄弧时刻。



（a）变电站接线图



（b）保护动作时限

图7　500 kV变电站接线图及保护动作时限

Fig.7　Wiring diagram and time coordination of 500 kV substation

3　连续换相失败的抑制方法

目前抑制换相失败控制策略包括：基于直流控制系统的策略，如提前触发控制，但是提前触发控制的作用有极限，当交流电压跌落严重时，就会失效；限制直流电流，但是限制直流电流对首次换相失败效果有限；配备额外的辅助设备，如无功补偿设备、电压源换流器、直流限流器等，但是这会增加硬件投资；对换流器的拓扑进行改造，如采用电容换相换流器以及利用可控子模块进行辅助换相等，但是这些技术仍待进一步的研究。

单次换相失败演化为连续换相失败受到了交流

电压、直流电流以及直流控制系统的共同影响。当检测到或者预测到换相失败发生时，可以采用增大叠弧面积提供量、降低叠弧面积需求量、增大关断面积提供量、附加全控型器件等方法来抑制换相失败。当叠弧面积提供量减少时，可以采用提前触发法增加电压时间波形的导通时间，也可以采用SVC、STATCOM等无功补偿设备增加电压时间波形的电压幅值，增大换相面积的提供量，从而避免换相过程未完成造成的换相失败。直流电流的上升会造成叠弧面积需求量上升，可通过VDCOL等限制直流电流，也可以增大关断角整定值来维持换相所需最小关断面积，进而避免因晶闸管未能关断引起的换相失败发生。

采用全控型器件的柔性直流输电系统能从根本上解决换相失败的问题，但是其造价较高，且电压等级和传输容量受限。连续换相失败的处理方式源于单次换相失败的处理方式，连续换相失败处理方式的最终目的应是避免高压直流发生闭锁。连续换相失败的处理方式可以在单次换相失败处理方式的基础上，构建时域上连续的，多种处理模式组合的，交直流混联电网场景下计及无功功率平衡和交流保护动作行为的，能够有效避免高压直流发生闭锁的改进抑制方法[15-16]。

3.1 基于触发角的抑制方法（α）

现有基于触发角控制的换相失败抑制方法主要是当检测到可能会引发换相失败的交流故障时，按照预设的规则减小逆变器延迟触发角，从而实现提前触发[17]。文献[18]提出的换相失败预防控制策略广泛应用在高压直流输电工程中，当故障检测分量超出其阈值时，启动提前触发控制，并将差值转换为触发角的提前量。有提前触发换流器时的电压波形如图8所示。可见提前触发能使预计关断的换流阀在换相过程中承受更大的反向电压时间面积，有利于换相。然而，提前触发也存在一些诸如增大电气应力、增大无功损耗等不利影响。

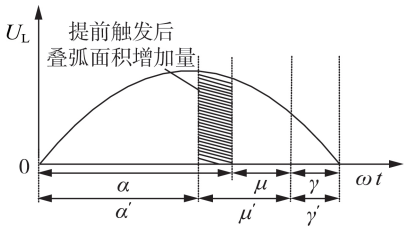


图8 有提前触发换流器时的电压波形

Fig.8 Voltage waveform with advancing firing converter

关断角过小，即预计关断的换流阀承受反向电压时间不足是引发换相失败的根本原因，而增大关断角额定值则直接促使高压直流输电系统避免了换相失败。但是增大关断角额定值会增大无功消耗，有可能引发后续换相失败。文献[19]提出在交流电压扰动情况下的最小关断面积控制策略。当交流电压扰动时，该控制策略可以使换流器保留合适的换相裕度，避免连续换相失败。

现有的触发角控制方式是基于单次换相失败的分析，对后续连续换相失败的考虑较少。在交直流混联电网的场景下，如何通过基于触发角的控制方式，避免高压直流在200 ms的时间尺度上发生连续换相失败，有待进一步的研究。基于触发角的控制方式，需进一步研究对无功的影响，避免因为提前触发造成吸收的无功增加，进而引发连续换相失败。

3.2 基于无功补偿的抑制方法（U_L）

无功补偿设备能够支撑交流母线电压幅值，增大换相电压时间面积，进而避免连续换相失败的发生。增加无功补偿换流器时的电压波形如图9所示。

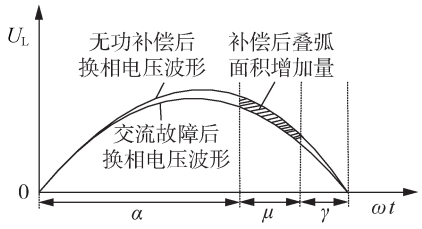


图9 增加无功补偿换流器时的电压波形

Fig.9 Voltage waveform with reactive power compensation

SVC[20]和STATCOM具有调节连续灵活、响应速度快、运行范围宽、装置体积较小、容易维护等特点[21]，无功补偿装置可以有效抑制交流电压振荡以及提高系统暂态电压稳定水平。将STATCOM接入直流系统可以稳定换流母线电压，在一定程度上降低基于电网换相换流器的高压直流输电（LCC-HVDC）的换相失败概率。但是无功补偿装置的动作机理与高压直流输电系统的耦合特性，都有待进一步的研究[22]。文献[23]提出一种考虑降低直流换相失败风险的无功补偿优化配置方法，可以根据电气距离确定无功补偿的薄弱区域，为决策人员提供决策依据，研究其无功补偿装置的优化配置，避免连续换相失败的发生。

3.3 基于限流的抑制方法（i_d）

限制直流电流可以在首次换相失败发生后，降低换相电压时间面积的需求量，进而促进换相过程，降低换流站无功消耗，避免后续换相失败的发生[24-25]。有限制直流电流换流器的电压波形如图10所示。限制直流电流的方法可以分为基于直流控制系统的方法以及基于外接限流设备的方法这2类。

基于直流控制系统的限流方法比较典型的应用为VDCOL，其作用原理为当直流电压或交流电压跌

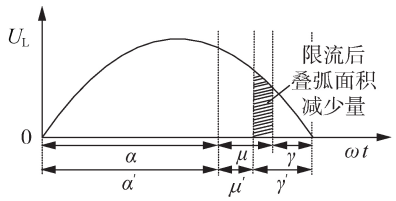


图 10　有限制直流电流换流器的电压波形

Fig.10　Voltage waveform with DC current limitation converter

落到预设值后触发低压限流指令，进而避免连续换相失败，促使高压直流输电系统尽快恢复。基于外接限流设备如超导限流器的方法，在首次换相失败发生后，能有效限制直流电流的上升速率和上升幅值，可在一定程度上降低LCC-HVDC后续换相失败的可能性。文献[26]以VDCOL参数和交流母线电压为自变量，以直流换流站无功交换量为因变量，对VDCOL各参数范围的设置进行了解析。其能够尽量减少换流站从交流电网吸收的无功功率，改善换流站恢复特性，避免连续换相失败的发生。

3.4　基于全控型器件的抑制方法（γ）

换相失败的物理本质是晶闸管缺乏自关断能力，而采用可以自关断的全控型器件如绝缘栅双极晶体管（IGBT）可以从根本上避免换相失败的问题[27-28]。基于全控型器件的换流器如电压源换流器具有灵活可控的优点，完全避免换相失败的问题。但是采用全控型器件的高压直流输电系统建设成本较高，另外电压等级和传输容量受限。因此，在一个相当长的时期内，LCC-HVDC在远距离、大容量输电中的地位仍然无法被取代。可以采用折中型方案，送端整流侧采用基于LCC的换流站，受端逆变侧采用基于电压源换流器的换流站。构建混合直流输电系统，避免换相失败的问题[29-30]。文献[31]在换流阀和换流变之间串联了基于IGBT器件构成的全桥模块，其能够根据系统的运行工况动态调节子模块的输出电压，促进换相过程的顺利完成，提高换流阀的换相失败抵御能力。

3.5　基于交流保护优化的抑制方法（L_c）

现有换相失败的研究对交流保护造成的后续换相失败考虑较少。交流故障发生后，按照现有直流控制系统逻辑，容易引发直流闭锁。而交流保护对故障进行切除后，直流系统尚不能恢复正常运行。交流保护中，方向元件、重合闸、死区保护与失灵保护都有可能使得高压直流从首次换相失败演化为连续换相失败[32-34]。文献[35]分析了换相失败后直流系统对差动保护的影响。分析结果表明高压直流换相失败可能会造成区内故障时制动量大于动作量，引发保护的拒动。而通过仅基于幅值的判据能很好地识别区内故障，通过与传统的差动保护判据相配合，可以避免差动保护据动。从而可以清除故障，避免连续换相失败的发生。

4　结论

本文从单次换相失败的机理分析入手，分析单次换相失败的发生原因，其本质原因是关断面积不足。研究了造成连续换相失败的影响因素，连续换相失败具有不同于单次换相失败的新特性。连续换相失败的根本原因是换相条件在时域上连续或者断续失效，连续换相失败的诱因是高压直流控制系统的响应。并且分析了连续换相失败的抑制方法，对连续换相失败的处理方式进行探讨。采用连续换相失败抑制方法的根本目的是避免高压直流闭锁。处理连续换相失败需要构建时域上连续的、多种方法组合的抑制策略。本文的研究对于保证交直流混联电网安全稳定运行具有重要的意义。

参考文献：

[1] 刘济豪，郭春义，刘文静，等. 基于改进换相面积的直流输电换相失败判别方法[J]. 华北电力大学学报，2014，41(1)：15-21.
LIU Jihao，GUO Chunyi，LIU Wenjing，et al. Commutation failure detective method based on improved commutation area in HVDC[J]. Journal of North China Electric Power University，2014，41(1)：15-21.

[2] 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.

[3] 刘磊，林圣，何正友. 基于虚拟换相面积缺乏量的HVDC系统连续换相失败抑制策略[J]. 中国电机工程学报，2018，38(18)：5361-5368.
LIU Lei，LIN Sheng，HE Zhengyou. A novel method based on virtual commutation area insufficient to mitigate the continuous commutation failure for HVDC[J]. Proceedings of the CSEE，2018，38(18)：5361-5368.

[4] THIO C V，DAVIES J B，KENT K L. Commutation failures in HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery，1996，11(2)：946-957.

[5] 李伟，肖湘宁，郭琦. 直流换相失败期间阀换相过程微观分析方法[J]. 电力自动化设备，2017，37(3)：115-119.
LI Wei，XIAO Xiangning，GUO Qi. Micro-analysis of valve commutation process during DC commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment，2017，37(3)：115-119.

[6] 李春华，黄莹，李岩，等. 一种基于最大短路电流限制的高压直流输电连续换相失败抑制方法[J]. 南方电网技术，2018，12(5)：20-26.
LI Chunhua，HUANG Ying，LI Yan，et al. A suppressing method to mitigate the continuous commutation failure of HVDC power transmission based on limit of maximum short circuit current[J]. Southern Power System Technology，2018，12(5)：20-26.

[7] 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，2014，42(21)：124-131.
WANG Haijun，HUANG Yilong，ZHOU Quan. Analysis of com-

mutation failure response strategies and prediction control technology in HVDC[J]. Power System Protection and Control,2014,42(21):124-131.

[8] MIRSAEID S,DONG Xinzhou,DIMITRIOS T. A predictive control strategy for mitigation of commutation failure in LCC-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2018,34(1):160-172.

[9] 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):1-7.
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):1-7.

[10] 郭春义,李春华,刘羽超,等. 一种抑制传统直流输电连续换相失败的虚拟电阻电流限制控制方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(18):4930-4937.
GUO Chunyi,LI Chunhua,LIU Yuchao,et al. A DC current limitation control method based on virtual-resistance to mitigate the continuous commutation failure for conventional HVDC[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(18):4930-4937.

[11] 陆翌,童凯,宁琳如,等. 基于虚拟电感的双馈入直流输电系统连续换相失败的抑制方法[J]. 电网技术,2017,41(5):1503-1509.
LU Yi,TONG Kai,NING Linru,et al. A method mitigating continuous commutation failure for double-infeed HVDC system based on virtual inductor[J]. Power System Technology,2017,41(5):1503-1509.

[12] 李瑞鹏,李永丽,陈晓龙. 一种抑制直流输电连续换相失败的控制方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(17):5029-5042.
LI Ruipeng,LI Yongli,CHEN Xiaolong. A control method for suppressing the continuous commutation failure of HVDC transmission[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(17):5029-5042.

[13] 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.

[14] 洪峰,梁文武,吴小忠. 特高压直流受端系统500 kV变电站死区及失灵保护配置研究[J]. 湖南电力,2017,37(6):75-78.
HONG Feng,LIANG Wenwu,WU Xiaozhong. Research on dead zone and failure protection of 500 kV substation in HVDC receiving system[J]. Hunan Electric Power,2017,37(6):75-78.

[15] 刘畅,李程昊,姚伟,等. 基于整流侧触发角紧急控制的换相失败预防策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):10-18.
LIU Chang,LI Chenghao,YAO Wei,et al. Rectifier trigger angle emergency control strategy for preventing commutation failures[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(1):10-18.

[16] 杨鹏,吴娅妮,马士聪,等. ±1 100 kV特高压直流输电工程直流线路故障重启动过程非故障极换相失败研究[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):14-18.
YANG Peng,WU Yani,MA Shicong,et al. Analysis of commutation failure of healthy pole during restart of faulty line for ±1 100 kV UHVDC project[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(4):14-18.

[17] 李程昊,刘畅,张振安. 计及换相失败预测控制和故障合闸角的HVDC换相失败分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(3):56-63.
LI Chenghao,LIU Chang,ZHANG Zhen'an,et al. Analysis of commutation failure in HVDC power transmission system considering prediction control of commutation failure and initial fault angle[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(3):56-63.

[18] ZHANG Lidong,DOFNAS L. A novel method to mitigate commutation failures in HVDC systems[C]//International Conference on Power System Technology Proceedings. Kunming,China:IEEE,2002:51-56.

[19] 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.

[20] 郭利娜,刘天琪,李兴源. 抑制多馈入直流输电系统后续换相失败措施研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):95-99.
GUO Lina,LIU Tianqi,LI Xingyuan. Measures inhibiting follow-up commutation failures in multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):95-99.

[21] 郑宽,沈沉,刘锋. 降低多回HVDC同时换相失败风险的交直流混联受端系统STATCOM配置方案[J]. 电网技术,2018,42(2):564-570.
ZHENG Kuan,SHEN Chen,LIU Feng. Configuration scheme of STATCOM for mitigating simultaneous commutation failure risk of multi-infeed HVDC links[J]. Power System Technology,2018,42(2):564-570.

[22] 郭春义,赵剑,刘炜,等. 抑制高压直流输电系统换相失败方法综述[J]. 中国电机工程学报,2018,38(增刊1):1-10.
GUO Chunyi,ZHAO Jian,LIU Wei,et al. A review of methods to mitigate the commutation failure for LCC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(Supplement 1):1-10.

[23] 周仕豪,唐飞,刘涤尘,等. 考虑降低多馈入直流换相失败风险的动态无功补偿配置方法[J]. 高电压技术,2018,44(10):3258-3265.
ZHOU Shihao,TANG Fei,LIU Dichen,et al. Dynamic reactive power compensation configuration method for reducing the risk of commutation failure in multi-infeed DC system[J]. High Voltage Engineering,2018,44(10):3258-3265.

[24] 付颖,罗隆福,童泽,等. 直流输电控制器低压限流环节的研究[J]. 高电压技术,2008,34(6):1110-1114.
FU Ying,LUO Longfu,TONG Ze,et al. Study on voltage dependent current order limiter of HVDC transmission system's controller[J]. High Voltage Engineering,2008,34(6):1110-1114.

[25] 刘磊,王渝红,李兴源,等. 基于模糊控制的变斜率VDCOL控制器设计[J]. 电网技术,2015,39(7):1814-1818.
LIU Lei,WANG Yuhong,LI Xingyuan,et al. Design of variable slope VDCOL controller based on fuzzy control[J]. Power System Technology,2015,39(7):1814-1818.

[26] 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 Yaojia,WANG Juanjuan,LI Zilin,et al. VDCOL parameters setting influenced by reactive power characteristics of HVDC system[J]. Power System Protection and Control,2017,45(16):16-23.

[27] NI Xiaojun,ZHAO Chengyong,GUO Chunyi,et al. Enhanced line commutated converter with embedded fully controlled sub-modules to mitigate commutation failures in high voltage direct current systems[J]. IET Power Electronics,2016,9(2):198-206.

[28] GUO Chunyi,LI Chunhua,ZHAO Chengyong,et al. An evolutional line commutated converter integrated with thyristor based full-bridge module to mitigate the commutation failure[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2017,32(2):967-976.

[29] 吴亚楠,安婷,庞辉,等. LCC/VSC混合直流电网模型研究

[J]. 中国电机工程学报，2016，36(8)：2077-2083.
WU Yanan，AN Ting，PANG Hui，et al. Study on hybrid line commutated converter / voltage source converter DC grid test model[J]. Proceedings of the CSEE，2016，36(8)：2077-2083.

[30] 吴杰，韩啸，刘梦丹. LCC-VSC混合直流输电系统分析及仿真验证[J]. 智能电网，2015，3(12)：1136-1142.
WU Jie，Han Xiao，LIU Mengdan. Analysis and simulation of LCC-VSC hybrid HVDC transmission system[J]. Smart Grid，2015，3(12)：1136-1142.

[31] XUE Ying，ZHANG Xiaoping，YANG Conghua，et al. Elimination of commutation failures of LCC HVDC system with controllable capacitors[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2016，31(4)：3289-3299.

[32] 邵震，王炳炎. 直流输电换相失败对交流侧继电保护的影响[J]. 高电压技术，2006，32(9)：42-45.
SHAO Zhen，WANG Bingyan. Analysis on influence of HVDC commutation failure on AC relay protection[J]. High Voltage Engineering，2006，32(9)：42-45.

[33] 刘俊磊，王钢，李海锋，等. HVDC系统换相失败对交流电网继电保护影响的机理分析[J]. 中国电机工程学报，2013，33(19)：111-118.
LIU Junlei，WANG Gang，LI Haifeng，et al. Mechanism analysis of HVDC commutation failure influence on AC power network relay protection[J]. Proceedings of the CSEE，2013，33(19)：111-118.

[34] 雷虹云，于占勋，赵强，等. 高压直流输电换相失败对交流线路保护的影响(二)直流换相失败瞬态特征分析及对交流线路保护的影响[J]. 电力系统保护与控制，2011，39(24)：65-71.
LEI Hongyun，YU Zhanxun，ZHAO Qiang，et al. Study on influence of HVDC commutation failure on AC line protection part two：analysis of fault transient response characteristics and influence of HVDC commutation failure on AC line protections[J]. Power System Protection and Control，2011，39(24)：65-71.

[35] 申洪明，黄少锋，费彬. HVDC换相失败暂态特性及其对差动保护的影响分析和对策[J]. 电力自动化设备，2015，35(4)：109-114.
SHEN Hongming，HUANG Shaofeng，FEI Bin. Transient characteristic of HVDC system during commutation failure，its effect on differential protection and countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment，2015，35(4)：109-114.

作者简介：

景柳铭

景柳铭(1990—)，男，河南平顶山人，博士后，主要研究方向为电力系统保护与控制(**E-mail**：liuming_mark@126.com)；

王　宾(1978—)，男，山东烟台人，副研究员，博士，通信作者，主要研究方向为电力系统继电保护、高阻故障检测及测距技术等(**E-mail**：binw_ee@mail.tsinghua.edu.cn)；

董新洲(1963—)，男，陕西周至人，教授，博士研究生导师，博士，主要研究方向为电力系统继电保护、行波测距、行波选线等。

Review of consecutive commutation failure research for HVDC transmission system

JING Liuming[1,2]，WANG Bin[1,2]，DONG Xinzhou[1,2]，WANG Haigang[3]，YU Bin[3]，XIE Min[3]，CHEN Shi[3]

(1. Department of Electrical Engineering，Tsinghua University，Beijing 100084，China；
2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments，Tsinghua Univeristy，Beijing 100084，China；
3. State Grid Anhui Electric Power Company，Hefei 230061，China)

Abstract：The cascading fault caused by consecutive commutation failures of HVDC system is a serious problem in AC / DC hybrid power grid，and the lack of self-turn-off ability for thyristors is the essential reason causes commutation failure. AC fault is difficult to predict and the initial commutation failure is inevitable，while both the rapid hop of HVDC control system and relay protection action of AC system affect the initial commutation failure evolving into consecutive commutation failure. The evolution mechanism of HVDC consecutive commutation failure is analyzed，the method to distinguish the consecutive commutation failure is demonstrated，the mitigation methods of consecutive commutation failure are summarized，and the characteristics of above methods are analyzed.

Key words：HVDC power transmission；single-terminal protection；line protection；voltage backward traveling wave；line boundary；high-impedance grounding fault