

# 防护直流换相失败的新型换流技术综述与展望

许超群<sup>1</sup>, 余占清<sup>2</sup>, 董昱<sup>1</sup>, 葛睿<sup>1</sup>, 屈鲁<sup>2</sup>, 赵彪<sup>2</sup>, 曾嵘<sup>2</sup>

(1. 国家电网国家电力调度控制中心, 北京市 西城区 100031;

2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084)

## Research Review and Prospect on New Commutation Technology to Prevent Direct Current Commutation Failure

XU Chaoqun<sup>1</sup>, YU Zhanqing<sup>2</sup>, DONG Yu<sup>1</sup>, GE Rui<sup>1</sup>, QU Lu<sup>2</sup>, ZHAO Biao<sup>2</sup>, ZENG Rong<sup>2</sup>

(1. National Power Dispatching and Control Center, State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

**ABSTRACT:** Commutation failure is an important factor affecting the safe and stable operation of the high voltage direct current (HVDC) multi-in-feed power grid. It is significant to improve the ability to prevent commutation failure in HVDC transmission systems. To mitigate commutation failure and reduce the negative impact of commutation failure in the system, this paper summarizes the research on new DC commutation technology for the prevention of HVDC commutation failure. Based on the physical mechanism of commutation failure, this paper summarizes and presents the commutation technologies from three levels: device characteristics improvement, commutation topology reform, and direct current control system optimization, and comprehensively analyzes the advantages and disadvantages of new commutation technology and other existing prevention technologies. Finally, based on the research review of results of commutation failure in recent years, the research and development of commutation technology in the future is pointed out to overcome the key technical problem affecting the safe and reliable operation of HVDC engineering projects.

**KEY WORDS:** high voltage direct current transmission; commutation failure; prevention; commutation technology; IGCT

**摘要:** 换相失败是影响高压直流多落点电网安全稳定运行的重要因素, 提升高压直流输电的换相失败防护能力意义重大。为聚焦换相失败防护问题, 抵御换相失败发生, 减小换相失败对系统的不良影响, 对高压直流输电换相失败防护的新型直流换流技术进行了总结归纳。基于换相失败物理机理, 从器件特性改良、换流拓扑改进、直流控制优化 3 个层面总结

分析换流技术研究, 并开展新型换流技术和其他现有防护技术的优劣势综合全面分析。最后, 综合近年来换相失败研究成果指明了未来换流技术研究的发展方向, 旨在攻克影响高压直流输电工程安全可靠运行的关键技术难题。

**关键词:** 高压直流输电; 换相失败; 防护; 换流技术; IGCT

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0440

## 0 引言

我国能源资源与能源需求呈逆向分布, 能源资源主要集中在华北、西北、西南地区, 负荷中心主要集中在东南沿海地区, 高压直流输电技术因具备距离远、容量大、损耗低的特点, 是实现我国“西电东送”战略的主要技术手段。其主要采用电网换相换流器(line-commutated converter, LCC)进行交直流变换, 依靠电网电压的作用进行自然换相, 本质是一种半控的电流源型换流器(current source converter, CSC)。目前我国已建设高压直流工程 30 余项, 总容量超 120 GW, 占“西电东送”容量 50% 以上, 在华东、华南形成了直流多落点的电网格局<sup>[1-3]</sup>。

然而, 直流输电技术在高速发展的同时出现了一些现阶段的技术难题。LCC 换流器采用的是半控型晶闸管器件, 无法主动关断直流电流, 存在换相失败的固有问题<sup>[4-6]</sup>。当交流电网电压扰动时, 易发生换相失败, 进而导致直流功率输送中断、过电压等问题。特别是在华东电网大量直流近距离馈入的情况下, 严重影响大电网的安全稳定性<sup>[7-9]</sup>。2011 年华东电网 3 个换流站因交流系统干扰发生了换相失败。2013 年华东电网交流 500kV 泗新线 B 相单瞬故障导致复奉、林枫、宜华、葛南直流同时发生换相失败, 这一事故导致逆变侧交流系统频率显著降低, 高压直流输电线路输送电力减少 4530MW。

**基金项目:** 国家自然科学基金联合基金集成项目(U216660001); 国家自然科学基金青年基金(52407211)。

Project Supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (U216660001); the Youth Fund of the National Natural Science Foundation of China (52407211).

2020年9月27日华东电网吴站1000kV母线故障,导致6回直流同时发生换相失败,期间直流功率跌落约23000MW。2023年9月10日华东电网1000kV泰吴线、吴塘线故障跳闸导致6回直流同时发生换相失败,损失功率达2446万kW,华东电网频率最低跌至49.81Hz。换相失败严重威胁大电网安全稳定运行。

为此,提升高压直流输电的换相失败防护能力意义重大。针对换相失败,国内外的众多学者从事和开展了大量的研究。

文献[8-10]对近年来我国直流输电发生的换相失败进行了梳理和统计,并总结了内部电气原因。文献[11-13]对换相失败的产生原因和影响因素进行了研究和梳理。文献[14-15]分析了首次和后续换相失败的机理、影响因素和判据等,归纳了后续换相失败的处理方式。文献[16-18]总结了多馈入直流的换相失败的机制、特性和影响因素,分析了多回直流换相失败的系统危害,指出未来在抑制措施方面值得深入探讨和研究。文献[19-20]总结了换相失败的抑制方法,从控制保护、无功补偿、拓扑改造3个方面进行了归纳,指出未来的研究方向为模型发展、预测方法等,但仍缺少从器件、装置、系统的不同层面的规范研究。在特高压直流工程中,导致换相失败发生的原因可以总结为器件、装置和系统的3个层面因素,而防护换相失败的新型换流技术也依据这3个层面因素进行了针对性的研究与发展。

然而,目前鲜有文献对用于换相失败防护的换流技术及其优劣势进行器件、装置和系统的规范科学归纳与总结。随着直流工程的日益增多,交直流混联电网规模的日益增大,新型换流技术势必在换相失败关键问题的攻克上起到至关重要的作用。为提升高压直流输电的换相失败防护能力,攻克影响高压直流输电工程安全可靠运行的关键技术难题,有必要对近期换相失败的研究成果进行总结梳理。

本文从以下几个方面归纳防护换相失败的新型换流技术:

1) 原理分析。从器件、装置与系统自下而上分析目前导致换相失败的换流技术原理,从器件、装置与系统的3个层面总结了影响换相是否成功的主因和诱因。

2) 新型换流技术分析。换流技术可以归纳总结为器件特性改良、换流拓扑改进与直流控制优化的3个层面,分别具有不同的换相失败防护特性。分析了各类新型换流技术在防护换相失败中的表

现行为和防护机理。

3) 新型换流技术比较。对不同防护换相失败的换流技术的防护能力、电学特性、额外损耗、实现难度与附加成本等方面进行了综合比较与评价。

4) 未来研究发展方向。指出了未来新型换流技术研究要攻克的关键问题与发展趋势,并提出了未来的发展方向是研究基于新型电力电子器件和新型拓扑结构的换流技术。

## 2 换相失败机理分析

换相失败是逆变器常见的故障<sup>[21-22]</sup>,在引起换相失败的可能原因中,逆变器交流侧故障占据了绝大多数成因。而研究换相失败,首先需要明晰换相原理。而换相原理可从器件、装置和系统的自下而上的3个层面、主因和诱因的角度加以总结分析,下面予以详细阐述。

### 2.1 器件层面主因:晶闸管具有本征恢复物理极限

换相失败的本质表征为发生了倒换相过程,对于基于半控型晶闸管器件的换流阀,桥臂中的晶闸管由于阳极电流的中断使其电荷的搬运停止,同时存储电荷由于复合而开始减少,直到体内电荷浓度降到与晶闸管本征掺杂浓度相当时,晶闸管才能重新恢复阻断能力,否则在恢复过程中若对晶闸管施加正向电压,则晶闸管将会重新正向导通,从而会使得原定退出的桥臂的电流重新上升,发生倒换相。晶闸管在关断时恢复阻断能力前所需的时间即其恢复时间。

利用简单的理想模型,可以估计恢复时间。假设整个晶闸管的载流子浓度是恒定的<sup>[23]</sup>。截止后载流子浓度的减小可以用连续方程计算:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n - n_0}{\tau} \quad (1)$$

式中: $n$ 为载流子浓度; $n_0$ 为平衡少数载流子浓度; $\tau$ 为少数载流子寿命。

此微分方程的解为

$$n(t) = n_1 e^{-\frac{t}{\tau}} + n_0 \quad (2)$$

式中: $n_1$ 为电流下降到零时的载流子浓度初值。

导通的晶闸管体内典型的载流子浓度为 $10^{16} \sim 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ,比其基区的掺杂浓度高3~4个数量级,因此其恢复时间约为10个载流子寿命周期,即400 $\mu\text{s}$ 左右。

图1为晶闸管关断恢复过程中电流电压波形<sup>[24]</sup>。图中 $i_A$ 为晶闸管的阳极电流, $u_{AK}$ 表示晶闸管的阳极电压, $u_R$ 表示晶闸管的恢复电压, $Q_{\pi}$ 表示晶闸管的恢复电荷。

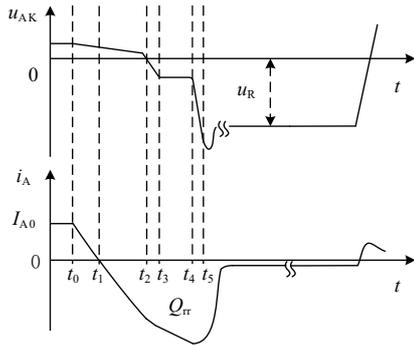


图 1 晶闸管关断过程电流电压波形

Fig. 1 Current and voltage waveform of thyristor turned-off process

晶闸管的芯片结构如图 2 所示。

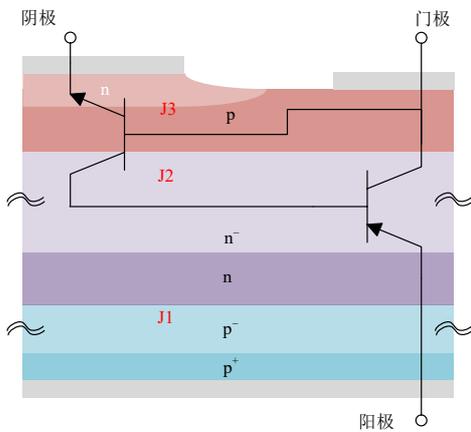


图 2 晶闸管的芯片结构

Fig. 2 Structure diagram of thyristor chip

结合晶闸管芯片结构，根据掺杂浓度、每层厚度，晶闸管阻断正向电压时，电压绝大部分由 J2 结耐受；晶闸管阻断反向电压时，电压绝大部分由 J1 结耐受。在 LCC 换流器中的晶闸管关断恢复过程详细描述如下。

1)  $t_0-t_1$ ，在关断的开始，晶闸管完全导通，当外加电压由正向变为反向时，由于外电路电感的存在，通过电感和晶闸管的电流以一个恒定的变化率衰减，而此时的在 LCC 换流器中产生的电流变化率  $di/dt$  往往很大， $t_0-t_1$  的时间间隔相较晶闸管相应区域的载流子寿命很小，由于一直处于导通状态，当电流过零时，晶闸管体内仍有高浓度的载流子。

2)  $t_1-t_2$ ，此时桥臂电流即通过晶闸管的电流已然反向，过剩载流子在晶闸管的基极中被扫除，载流子的扫除导致了晶闸管体内载流子浓度的大幅减小。

3)  $t_2-t_3$ ，在此阶段，晶闸管 J3 结的载流子先被扫空，J3 结开始承受电压。

4)  $t_3-t_4$ ，此时，晶闸管的阳极电压达到了 J3 结的击穿电压，然后 J3 结将表现如电压源特性，此电压根据晶闸管芯片结构和掺杂浓度往往为 20V 的幅值。

5)  $t_4-t_5$ ，此时晶闸管 J1 结的过剩载流子浓度降为零，J1 结也随之开始承受电压。

6)  $t_5$  之后，晶闸管的反向电流开始下降。原因有 2，此时无法再扫除载流子，且过剩载流子浓度开始下降，扩散至晶闸管 J2 结耗尽层边缘的载流子减少。

当反向电流完全衰减之后，晶闸管芯片的 J1 结和 J2 结扩展完成，晶闸管重新获得阻断正向及反向电压的能力。

晶闸管的本质恢复特性无法改变，且存在本质恢复物理极限，无法彻底避免换相失败，但目前已有通过改良晶闸管器件特性来防护换相失败的方法<sup>[25-26]</sup>，后文将详细介绍。

## 2.2 装置层面诱因：换流器关断角小于所需最小临界关断角

LCC 换流阀依赖交流系统运行，需要电网提供换相电压。LCC 的换相原理如图 3 所示，以一换相过程举例，图 3 中黑色的晶闸管为换流中的晶闸管，白色的晶闸管为关断状态<sup>[27-29]</sup>。

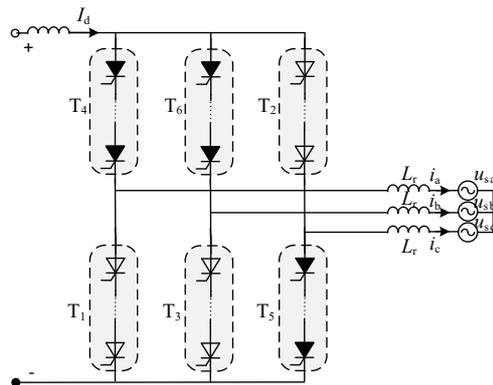


图 3 6 脉动换流器的换相原理(逆变器)

Fig. 3 Diagram of three-phase bridge converter on inverter side

线电压  $u_{ab}$  可以表达为

$$u_{ab} = U_{ab} \sin(\omega t + \alpha) \tag{3}$$

式中： $U_{ab}$  为线电压的幅值。当 LCC 上桥臂由 A 相向 B 相换相时，晶闸管桥臂  $T_4$ 、 $T_6$  均导通，则 AB 换相过程的方程可表示为

$$L_r \frac{di_b}{dt} - L_r \frac{di_a}{dt} = u_{ab} \tag{4}$$

可以得到，电流从 A 相换相至 B 相，满足电流变化的表达式<sup>[17]</sup>：

$$\begin{cases} i_a |_{\omega t = \alpha_{ab}} = I_d \\ i_a |_{\omega t = \alpha_{ab} + \mu_{ab}} = 0 \\ i_b |_{\omega t = \alpha_{ab}} = 0 \\ i_b |_{\omega t = \alpha_{ab} + \mu_{ab}} = I_d \end{cases} \tag{5}$$

以上,  $\alpha_{ab}$  为触发角,  $\mu_{ab}$  为换相角。

可以得到系统正常运行情况下的关断角为

$$\gamma_{ab} = \pi - (\alpha_{ab} + \mu_{ab}) \quad (6)$$

式中:  $\gamma_{ab}$  为正常情况下的关断角。以交流系统发生故障后的首次对应故障的换相过程为例, 考虑到此时换相角未受控改变(忽略直流控制系统的影响), 则此时能够完成换相的关断角为

$$\gamma'_{ab} = \pi - (\alpha_{ab} + \mu'_{ab}) \quad (7)$$

式中:  $\mu'_{ab}$  为变化的换相角。

由于故障条件下,  $\mu'_{ab}$  小于  $\mu_{ab}$ , 忽略电压过零点可能的超前的角度, 关断角  $\gamma'_{ab}$  为

$$\gamma'_{ab} = \pi - (\alpha_{ab} + \mu'_{ab}) < \gamma_{ab} \quad (8)$$

此时若关断角小于设定的最小值, 即  $\gamma'_{ab}$  小于  $\gamma_{min}$ , 则此时就会发生换相失败。

当交流系统发生故障, 交流侧电压降低时, 会引起  $\mu'_{ab}$  大。  $\mu'_{ab}$  的增大, 意味着关断角  $\gamma'_{ab}$  的减小。当  $\gamma'_{ab}$  小到一定程度时, 会发生换相失败。临界值是考虑到晶闸管自身关断恢复特性而确定的值。  $\gamma'_{ab}$  需要大到能够保证晶闸管在这段时间内完成恢复过程, 完成体内载流子的复合过程, 恢复阻断能力, 方才不会发生换相失败<sup>[30]</sup>。

### 2.3 系统层面诱因: 交直流系统电气量的不可控跌落

从系统层面, 换相失败往往是由于逆变侧交流系统故障导致。对于正常运行的高压直流输电系统, 有统计数据可得, 换相失败多由逆变侧交流系统故障导致<sup>[31-32]</sup>。为描述逆变侧交流系统故障程度, 多用发生故障后交流系统线电压表征。  $a(0 < a < 1)$  表示发生故障后交流系统线电压标么值, 也反映故障程度。

在直流系统正常运行情况下, 有下式成立<sup>[33]</sup>:

$$A_0 = \int_{\alpha_0}^{\alpha_0 + \mu_0} u_{LN}(\omega t) d(\omega t) = 2X_r I_{dN} \quad (9)$$

式中:  $I_{dN}$  和  $U_{LN}$  分别为直流电流和交流换相电压有效值的额定值, 其余参数含义与前文一致。假设在逆变侧交流系统发生故障后换相电压有效值降落为  $aU_{LN}$ , 直流电流上升至  $I'_d$ , 关断角变为  $\gamma'$ 。考虑此时换相角未受控改变(忽略直流控制系统的影响), 则在故障后换相期间有下式成立:

$$A_{f0} = \int_{\alpha_0}^{\alpha_0 + \mu'} au_{LN}(\omega t) d(\omega t) = 2X_r I'_d \quad (10)$$

将故障前后的关系式进行简化和联立比较, 可得下式:

$$a = \frac{I'_d [\cos \alpha_0 - \cos(\alpha_0 + \mu_0)]}{I_d [\cos \alpha_0 - \cos(\alpha_0 + \mu')]} \quad (11)$$

根据图 4, 可以得到  $\mu_{max}$ :

$$\mu_{max} = \pi - \alpha_0 - \gamma_{min} \quad (12)$$

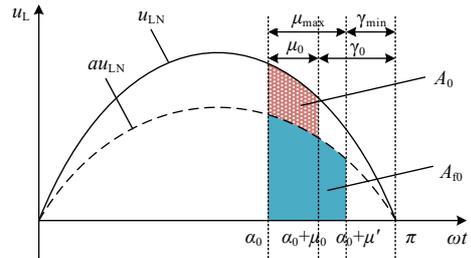


图 4 系统故障前后换相电压面积对比  
Fig. 4 Comparison diagram of commutation voltage area before and after fault

式(12)中, 对于任意的直流系统, 只要确定运行时的换相达到临界状态时关断角达到的最小值  $\gamma_{min}$ , 理想状况下的临界换相电压降落幅值也随之确定。通过比较换相电压降落幅值与临界值, 可以快速判断系统是否会发生换相失败。

理论分析和实际运行数据表明, 交流电压的不可控跌落是引起换相失败的首要原因<sup>[34-35]</sup>。

## 3 新型换流技术

现有的研究针对换相失败提出了很多新型防护技术。用来防护换相失败的新型换流技术根据其应用的层级, 可以分为器件特性改良、直流控制优化与换流拓扑改进层面的技术应用, 系统地总结了新型换流技术的发展与进步。

### 3.1 基于器件特性改良的换流技术

由 2.1 节已经分析得到, 由于晶闸管的本质恢复特性无法改变, 其具有本质恢复物理极限, 换相失败难以完全规避。然而, 为了减小换相失败发生的概率和可能, 仍有新型技术的研究通过优化晶闸管器件特性来抑制换相失败。

晶闸管的动态特性包括开通特性和关断恢复特性, 关断恢复特性直接影响是否发生换相失败, 具体体现在反向恢复电荷、恢复时间等参数, 控制优化晶闸管的反向恢复特性可以直接减小换流器最小关断角, 是提高防护换相失败能力的重要方法。而关断特性的调节主要通过调整晶闸管的基区载流子分布浓度和载流子寿命来进行优化。

优化晶闸管芯片内部载流子分布浓度通过改变传统晶闸管结构的基区的浓度分布, 加快反向电流的减小速度, 而反向恢复电荷即反向恢复电流在反向恢复时间内的积分, 因此优化结构可以减小恢复电荷<sup>[36-37]</sup>。

载流子的寿命主要依赖辐照技术来进行调整。而辐照技术包括电子辐照或质子辐照。质子辐照在芯片的局部形成复合中心, 电子辐照通过少子寿命(电子或空穴复合的平均时间)控制影响芯片内部的

载流子产生和复合机制。目前质子辐照应用较少，电子辐照应用较广泛。理论上，辐照剂量越高，载流子寿命越小，因此复合速度越快。由于少子是晶闸管恢复过程扫除的主要成分，因此辐照直接决定了晶闸管的恢复特性。

需要注意的是，辐照的间接作用在于，辐照剂量增大，也会导致晶闸管的通态压降随之增大。因此，在进行设计和应用时，需要对导通特性与恢复特性的关系进行折中处理，也往往需要根据应用需求、根据工程换流阀的设计要求作整体的性能优化与协调。

但需要注意的是，由于晶闸管存在本征恢复物理极限，恢复时间很难减小至零。若要继续减小恢复时间，则需要在辐照工艺等关键技术取得新的突破。综上，基于晶闸管器件特性改良的方法仍然无法彻底消除换相失败风险。

### 3.2 基于直流控制优化的换流技术

换相失败的本质是关断角过小，在系统检测到扰动时，如果能将触发角提前，增加换相裕度即能减小发生换相失败的概率。如文献[38-40]通过减小触发角来增大关断角，但该方法在故障期间增大了直流电流，并引起逆变站无功损耗的增加，有可能恶化直流故障穿越能力。

文献[41-45]采用低压限流控制(voltage dependent current limiting, VDCOL)限制交流系统故障期间的直流电流以降低换相失败发概率，尽管应用广泛，但由于不能有效反映故障后电流的动态变化特性，对故障电流的限制效果仍不够显著。

目前直流工程中抑制换相失败的方法主要是提前触发脉冲，即当换相电压存在潜在危险时采用提前触发的控制策略，根据连续实时监测的换流母线电压变化，计算出提前触发的时间，从而确保换相。在该方法的基础上，提出了工程上比较常用的换相失败预测控制算法(commutation failure prevention, CFPREV)，通过  $abc-\alpha\beta$  转换监测三相故障和零序电压判断单相故障，整定输出触发延迟角的变化值，实现提前触发，以达到降低换相失败发生几率的目的。

针对 CFPREV 的优化方法非常多，比如适当降低换相失败的启动值、增大换流母线单位电压跌落提前触发的角度、增加逆变站额定关断角的同时适当减小低压限流控制电压上升系数等常规的措施，均能有效地降低换相失败的发生概率。同时针对 CFPREV 过零点启动慢的问题，后续有学者和专家提出了用  $\sin-\cos$  分量检测判别交流故障以有效避

换相失败的改进方法。然而目前大部分的优化方案仅停留在理论及仿真的研究上，并未在工程中得到应用，因此可行性尚有待考证。

### 3.3 基于换流拓扑改进的换流技术

在装置层面，通过改进已有 LCC 换流器拓扑结构的新型换流技术，可以显著增大固有关断角裕度和补偿交流电压跌落值。具体可分为以下 3 类。

#### 3.3.1 LCC 改进拓扑增强换流技术

采用电容换相的换流器(capacitor commutated converter, CCC)可有效减少换相失败的发生几率<sup>[46-48]</sup>，可容许 15%~30%的换相压降而抑制换相失败的发生，原理如图 5 所示。它们往往都在换流器的交流侧串联换相电容，电容电压为  $u_c$ ，间接通过增大稳态下关断角来抑制换相失败。但 CCC 引入的电容器不仅增大了直流输电系统中的电流谐波，且换相失败后换相电容可能持续充电至过电压，导致换流器失去自恢复能力。利用有源换相电容器电容可变的特性可以克服这一点，学界内提出了若干种 LCC 的改进式拓扑<sup>[49-52]</sup>。改进式拓扑中含有的有源换相子模块采用了全控电力电子器件和二极管等的组合，进行换相电容电压的动态调控。

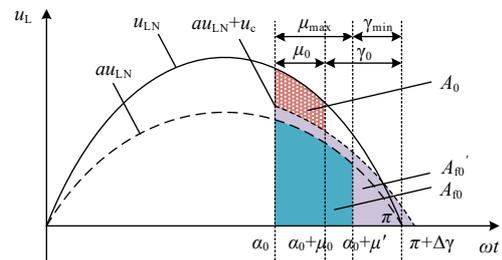


图 5 LCC 改进式拓扑换流原理

Fig. 5 Commutation principle of LCC modification topology

除了借助换相电容以外，还有借助断路器的思路，将换流器桥臂改造为直流断路器<sup>[53]</sup>。它具有较好的换相失败防护效果，但整体方案的经济性有待进一步提升。

#### 3.3.2 电压源型增强换流技术

将常规 LCC 高压直流输电系统的一端换流器全部或部分替换成柔性直流输电的电压源换流器，其独立输出交流电压不依赖交流电网，因此不存在换相失败的问题，也可以向无源系统送电。且其可以在较大范围内一直工作在单位功率因数下，不需要无功补偿，输出波形质量高、不需滤波设备。利用电压源换流器自身的特性可以构建混合型 HVDC 系统，并进一步提高混合型 HVDC 系统的整体防护换相失败的能力<sup>[54-55]</sup>，该混合方案技术上可行，南网昆柳龙直流工程采用了送端 LCC、受端

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的技术方案, 国网建苏直流工程采用了送端 LCC、受端高端 LCC、低端 MMC 的技术方案, 均实现了较好的换相失败消除效果。但是在未来实践中, 还需要进一步突破电压源换流器造价过高、可靠性有待提升的挑战。

### 3.3.3 全控电流源型增强换流技术

另一种全新的思路是将逆变换流器改为全控型电流源 CSC 型换流器。采用全控型双向承压的器件取代晶闸管形成 CSC 结构, 并采用脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)方法<sup>[56-58]</sup>。该结构需要对电气参数和调制参数进行详细设计, 扩大运行区域, 同时要考虑滤波因素。PWM-CSC 换流器从原理上需要采用高频率的 PWM 调制, 提供控制上下桥臂间的开关状态分配来等效出满足接入电网谐波要求的交流量。为减小频率, 提出了基于基波频率调制的 FFM-CSC(fundamental frequency modulation-current source converter, FFM-CSC)和改进型 FFM-CSC<sup>[59-60]</sup>。FFM-CSC 换流器的每个器件在一个周期内导通一次、120°电角度, 通过调制触发角来改变触发信号的生成, 将 300Hz 的调制频率减小到了基频 50Hz, 降低了成本和运行损耗。提出了独立控制策略和协同控制策略, 并扩展了 PQ 运行域。改进型 FFM-CSC 则实现了更大的运行范围。此技术方案为实现高压直流输电场景下的 CSC 换流器创造了有利条件。不过, 由于 FFM-CSC 换流器依旧采取了基频的主动关断策略, 对于全控电力电子器件, 还需要评估在各种工况下, 其驱动供电是否能满足需求。在特高压直流输电场景, 仍需要在在线取能和器件驱动配合方面开展相关研究、突破相关技术。

### 3.4 小结

综上所述, 基于器件特性改良、直流控制优化、换流拓扑改进的换流技术只能降低换相失败发生的概率, 并不能彻底根除换相失败故障。而采用改进电流源换流器的方式可以有效抑制换相失败, 但尚缺技术可行性和经济性。在此基础上, 最具可行性以及经济性的方式是将新型电力电子器件应用到 LCC 换流器中, 代替晶闸管, 仅在系统将要发生换相失败时主动关断电流, 强迫电流换流, 是一种最彻底、附带隐患最小的根除换相失败的方法。集成门极换流晶闸管(integrated gate commutated thyristor, IGCT)是一类全新的电力电子器件, 目前 IGCT 作为全控器件, 已经应用于直流断路器中, 实现了大电流的一次性关断, 因此, 将其加入 LCC

换流桥臂中, 替换晶闸管, 是一种可行的防护换相失败的方法, 将继承原有 LCC 的优点并能有效解决换相失败的问题, 能将 LCC 的性能提升到新高度, 符合对新一代特高压直流工程高利用率、高可靠性的要求。

## 4 新型换流技术方法综合分析

### 4.1 换相失败免疫能力

为评估防护换相失败的能力, 学界有用换相失败免疫因子(commutation failure immunity index, CFII)(记为  $F_{CFII}$ )来评估防护换相失败的能力<sup>[61]</sup>, 其计算公式如式(13):

$$F_{CFII} = \frac{U_1^2}{\omega L_{\min} P_{dc}} \times 100\% \quad (13)$$

式中:  $U_1$  为交流母线电压;  $P_{dc}$  为系统传输的有功功率;  $L_{\min}$  为系统刚好不发生换相失败时的交流故障临界接地电感值。CFII 越大, 即系统防护换相失败的能力越强。

为排除交流母线电压值、角频率值、有功功率值等对换相失败免疫能力评估的影响, 本文采用  $L_{\min}$  故障临界接地电感值进行定量评估上述换流技术方法的防护换相失败能力和效果。

在 PSCAD/EMTDC 中基于 CIGRE 标准测试模型进行研究模型搭建。为准确比较换相失败的防护能力, 以交流线电压从负到正的过零点为参考点, 以 1 ms 为步长, 将阀换相电压的半周期 10 等分(考虑到对称性仅分析半周期情况)地分别均匀设置, 记录不同故障时刻下的临界短路电感, 进而得到不同换流技术, 包括基于晶闸管的传统 LCC 换流和第 3.3.1 节总结的改进 LCC 拓扑增强换流技术<sup>[20,29,49]</sup>的临界电感曲线, 如图 6 所示。

可以得到, LCC 改进式拓扑包括增强型电容换相换流器(enhanced capacitor commutated converter,

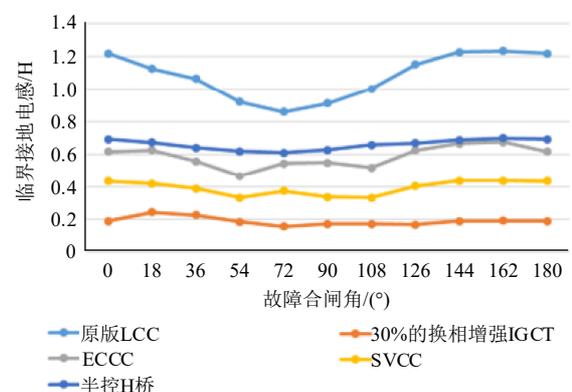


图6 LCC 改进式拓扑增强换流效果  
Fig. 6 Commutation enhanced effects of LCC modification topology

ECCC)、串联电压换相换流器(series voltage commutated converter, SVCC)和半控 H 桥的方式,可以较明显地提升换相失败的防护能力,但效果仍弱于采用换相增强 IGCT 的新型换流技术。采用换相增强 IGCT 的模式将在第 5 节做详细说明。

第 3.1 节采用的晶闸管特性优化的方法,能在一定程度上缓解换相失败,然而由于晶闸管本身的物理特性限制,其具有本征恢复极限,通过晶闸管优化的方法仍然无法将其恢复时间减小至 0。目前商业化的快速晶闸管最理想能将恢复时间减小至 100  $\mu\text{s}$ ,然而因受限工艺水平和条件,进一步减小恢复时间已非常困难。此外,由于其电压和电流等级仍旧较低,在高压直流中目前没有得到使用。此种方法能将换流器的关断角缩小,但关断角仍为正值。相较于第 3.3 节改进拓扑的方法能够将关断角逆转为负值,其对换相失败的免疫效果仍较小。

第 3.2 节总结的直流控制优化方法,同样能够通过预测技术在一定程度提前触发来防护换相失败。然而其本质仍然是,在系统检测到扰动时,将触发角提前,增加换相裕度即减小发生换相失败的概率。此类技术仍旧不能减小关断角,即关断角仍为正值。相较于第 3.3 节改进拓扑换流的技术将关断角逆转为负值,其能够协助免疫换相失败的工作域较为有限。其对比的临界电感曲线如图 7。此外,由于此类控制技术依赖于敏感、快速的检测和预测方法,在复杂工况下容易产生误检测和漏检测,导致其能够免疫换相失败的能力不稳定或不全面。在特高压直流工程实践中需要寻找稳定性、鲁棒性更强的先进技术。

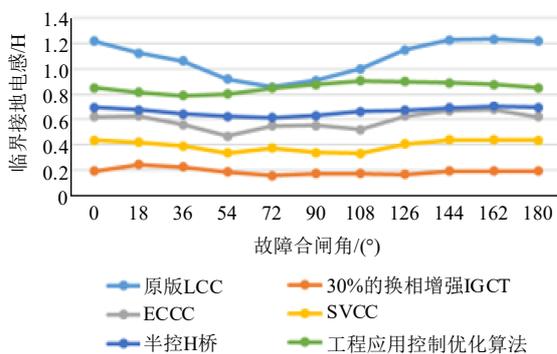


图 7 直流控制优化方法增强换流的效果

Fig. 7 Commutation enhanced effect of optimization of the control method for DC system

## 4.2 换流技术实现方法

目前运行的直流工程的控制保护系统中已经采取了一些换相失败预防方法。换相失败预测控制功能包括 3 个主要部分:一是基于零序电压检测法检测单相故障,二是基于交流电压  $\alpha/\beta$  变换检测三

相故障,第三是预测换相电压面积  $A_{min}$  是否大于最低限值。预测功能通过检测换相电压判断是否存在换相失败风险,一旦超出阈值则增大关断角,实现提前触发。上述方法虽然在直流工程中对控保系统的实现和改造简单,易于实现,但是在实操时,应该根据具体的条件和系统要求对控制参数进行优化。控制上预测判据的作用效果与故障时刻和系统功率大小有很大关系,故障时刻的不同会导致阀的触发裕度不同,裕度越大留给控制系统的反应时间也就越长,能够成功防护换相失败的效果也就越明显,在一些特殊的触发时刻,比如说  $90^\circ$  附近,此时留给阀的触发裕度极小,预测判据效果很有限,几乎无效;在功率水平的对比上,大功率下交流电网的扰动对系统冲击更大,直流电流的变化也越大,防护换相失败的效果不如小功率。因此,总结而言,现有的换相失败预测方法对预防换相失败有一定作用,但在实现和优化难度上仍存在一定的困难,同时这些方法未能覆盖所有可能导致换相失败的危险因素,其防护效果非常受限。需要探讨新型的不依赖预防的换流技术。

第 3.3.1 节总结的改进 LCC 拓扑增强换流技术在拓扑结构复杂,改造和实现难度很大,且除了拓扑结构硬件的实现上,其配套的控制系統也需要对原有成熟的 LCC-HVDC 控制保护系统<sup>[62-64]</sup>进行较大的改动,以完成其电容电压的充放电的平衡控制、电压监测、故障谐波和过压保护等。

第 3.3.2 节总结的电压源型换流技术在实现上已有大规模柔性直流输电工程作为实践,然而其与 LCC 换流阀串联使用时,仍需要额外探索可控避雷器、黑启动等方面的付出,且其本身电压源型柔直阀的初始造价和运行损耗远远大于同等容量的 LCC 换流阀。如若在工程上进行柔性化改造,将导致 LCC 高压直流输电失去其经济性优越、运行损耗低的优势。

第 3.3.3 节总结的电流源型换流技术能够充分规避换相失败故障的发生,然而还需要继续突破工程应用上需要解决的大规模器件串联均压、器件供能等关键技术。

为此,从技术实现难度的角度考虑,需要在现有换流技术的基础上,探讨新型的实现简易、控制简单、可靠性高和鲁棒性强的换流技术。

## 4.3 运行损耗

第 3.1 节采取的晶闸管特性优化技术能够从器件本质减小其恢复时间,从而可以减小换流器的固有关断角。因此,减小关断角的整定可以得到直流

输电更高的运行经济性和传输功率。目前,特高压直流工程中采用的优化的晶闸管的恢复时间多在400~500  $\mu\text{s}$ ,其相较于被广泛认知的晶闸管的恢复时间800  $\mu\text{s}$ ,可以减小固有断角300~400  $\mu\text{s}$ 。根据理论推导计算,可以进一步提高直流系统的传输功率。

第3.2节采取的在直流控制系统上的优化技术,由于其依赖于预测方法,仅在换相失败可能发生的情形介入,因此其对于换流阀运行损耗当无影响,如图8,基于CIGRE标准测试模型,晶闸管器件参数选用中车公司生产8.5kV等级晶闸管(型号KPE5500-85Y04)值。根据仿真和计算,常规LCC换流阀的运行损耗约为0.22%。

第3.3.1节中总结了LCC改进拓扑的技术,其中均采用加入额外模块的方法,这些额外模块将在换流器运行时带来额外的运行损耗。基于CIGRE标准测试模型研究模型搭建,根据仿真和计算,取典型拓扑ECCC和SVCC进行对比分析,其运行损耗 $P_{\text{loss}}$ 的比较如图8。其中30%IGCT和100%IGCT的模式将在第4节作详细的说明。IGCT器件参数选用ABB公司生产6.5kV等级IGCT(型号5SHZ11H6500)值。

第3.3.2节采用的电压源型柔性化的技术和第3.3.3节采用的全控电流源型的技术,由于将大量采用大功率全控型电力电子器件,且在运行时将频繁地进行开断,其通态损耗和开关损耗均非常显著。这将极大削弱LCC直流输电损耗低、距离长的优势。为此在表1中进行了阀体损耗的对比。

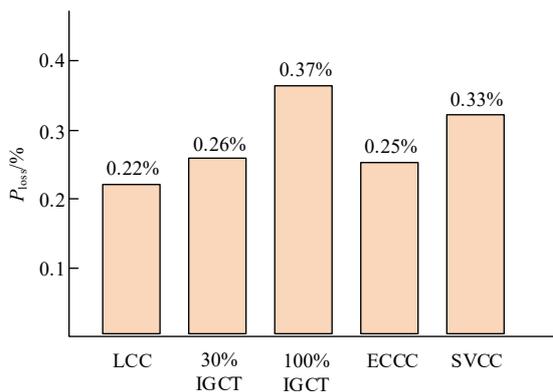


图8 运行损耗对比

Fig. 8 Operation loss comparison

表1 阀体运行损耗对比

Table 1 Converter valves' operation loss comparison

换流器	阀体运行损耗 $P_{\text{loss}}/\%$
LCC	0.22
电压源型换流器	0.94
电流源型换流器	0.84

#### 4.4 经济性成本

基于晶闸管器件特性优化的技术,在经济性成本的评估上,这将增加直流工程的电力电子器件支出,据评估,电力电子器件部分的成本将增加10%~20%。

基于直流工程控制保护系统的换相失败预防方法在经济性成本上具有优势,然而因为其防护效果有限,且在工程实践中效用欠佳,需要探讨新型的换流技术。

基于LCC改进拓扑的技术,将在原始的LCC换流器中加入或替换一定的全桥或半桥模块,这部分功率模块多包含大量的大功率电力电子器件和储能电容等元件,因此,也将增加改造的部分硬件成本,此部分成本近于柔性直流系统中的功率模块造价,且加入元件的利用率较低,性价比有待进一步提升。

基于电压源型换流和全控电流源型换流的技术,由于将大量应用大功率全控电力电子器件,配合大量直流储能电容等,其造价将高于现有的LCC换流阀,在经济性需要综合考量。

而采用部分的可控关断器件IGCT代替晶闸管,其只增加小部分的IGCT器件硬件成本,不增加其余辅助元件成本,简易而经济,易于实现。

#### 5 未来研究发展方向

综合近年来换相失败研究成果,及第4节中已经论述的已有换流技术的优缺点,但这些技术还存在换相失败免疫能力低、运行损耗高、实现难度大等问题,同时防护换相失败的换流技术的研究还应兼顾各方面经济性能要求。换相失败的防护方法仍需深入研究。而研究鲁棒性强、结构简易、灵活度高、经济性强的新型换流技术与方法,是下一阶段的研究重点。

而能够同时达到鲁棒性强、结构简易、灵活度高、经济性强的新型换流技术,需要从器件、装置和系统相结合的角度进行新型换流技术的研究与突破,针对此,提出基于新型IGCT器件的新型换相失败防护技术<sup>[65]</sup>。

此种方案在逆变侧换流器的每个桥臂内用一定比例的IGCT替代晶闸管,构成IGCT和晶闸管的混合型桥臂,拓扑结构如图9所示。其中,IGCT为采用新型逆阻型IGCT器件(reverse blocking IGCT, RB-IGCT),即具有双向承压能力和主动关断电流能力。机理为在正常运行时,IGCT外部特性与晶闸管相同,使用部分逆阻IGCT的双向承压

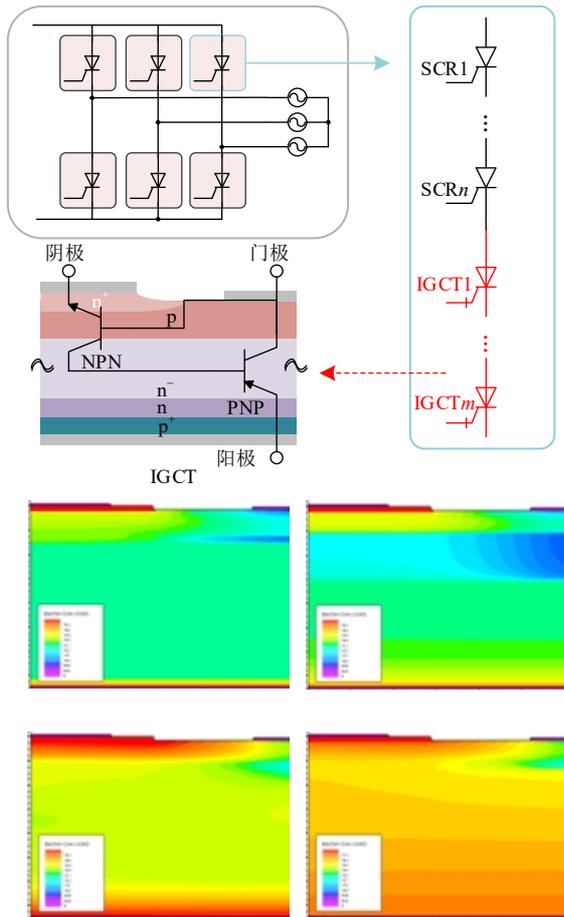


图9 基于IGCT的新型换流技术

Fig. 9 New commutation technology based on IGCT

能力为剩余晶闸管争取更多的恢复时间；当倒换相即换相失败已然发生时，利用IGCT器件的主动关断能力，使得电流在被换相桥臂和换相桥臂之间强迫换相，充分克服可能的换相失败。在晶闸管和IGCT构成的混合换流器中，IGCT的配置比例将较大影响换流器整体抵御换相失败能力。IGCT的配置比例越高，换流器抵御换相失败能力越强，但也会随之带来硬件成本的增加。因此，需要在技术性能和经济性能之间进行统筹分析，选取合适的IGCT配置比例。

### 5.1 器件层面：新型逆阻IGCT器件突破恢复物理极限

目前国内外柔性直流输电换流阀均采用IGBT进行设计。但IGBT的均压设计目前仍存在瓶颈，无法大量串联，其耐受负压的能力也有限制。因此在应用中往往需要反并联二极管。而且IGBT是压控型器件，容易受电磁干扰影响；且通态压降高，导通损耗较大。

IGCT是一类起源于晶闸管的门极换流晶闸管器件，相较于IGBT，新型大功率IGCT具有导通压降低、可靠性高、经济造价低、鲁棒性稳定性高

的显著优势，因而近年来，在高压直流的模块化多电平换流器、直流断路器、直流变压器、直流耗能装置等得到了广泛且扎实的应用<sup>[65-68]</sup>。

尽管如此，目前已有的商业化IGCT器件主要为非对称即单向耐压型，这暂时无法满足直流系统运行的要求，需要针对适应直流系统防护换相失败的运行需求，量身定制新型的IGCT全控开关器件，尤其是新型逆阻IGCT器件。

逆阻IGCT通过特殊的纵向结构设计和终端结构设计，来实现双向高阻断耐压，并满足导通压降、开通损耗、关断损耗以及最大关断电流能力的参数设计要求。通过芯片有限元仿真可以初步验证，合理参数下芯片可以实现双向耐压，并具有一定关断能力，为逆阻器件的开发提供了合理的理论保障，其有限元仿真中的载流子分布如图9所示，其可以有益的实现晶闸管器件原有的恢复物理极限的突破，大幅减小所需的恢复时间至零。

### 5.2 装置层面：增大换流器固有关断角的裕度

交流系统正常时，换流器桥臂内的逆阻IGCT运行方式和晶闸管保持一致，在逆阻IGCT的门极驱动单元内设计电流过零检测模块，当通过器件其电流过零，使得逆阻IGCT关断，表现为晶闸管模式。一旦交流系统发生故障，晶闸管将不具有其最小的恢复时间。此时当电压从负向到正向过零之后，逆阻IGCT将承担这部分正向电压，此时晶闸管上将不会被加上电压，从而可以进行零电压条件下的载流子自然复合恢复过程。从而此时，晶闸管将不再因为在恢复期间的正向电压而被迫导通，从而换流器的关断角也客观地被增大了，突破了原有固有换流器最小关断角的限制。

### 5.3 系统层面：防护交直流系统不可控参量变化

根据新型换流技术的防护换相失败机理，逆阻IGCT在承受正向电压的阶段增大了对应相的换相电压，以防护换相失败的发生。

而当逆变侧的交直流系统发生电压等参量的不可控跌落，逆变侧换流阀各桥臂之间无法自然完成电流的换流过程。其根本原因在于晶闸管是半控型器件，无法进行主动关断。而新型换流技术采用了具有主动关断能力的IGCT型器件，其在交流系统电压发生严重的跌落时，对于被换相桥臂的IGCT将执行主动强制关断，迫使电流从被换相桥臂向换相桥臂转移，从而建立起电压，为交流系统的电压不可控跌落提供更多的电压支撑，进而跨越交流严重故障。

近期，清华大学自主研发了一款六英寸8kV的

RB-IGCT 器件, 通态电流水平达到了 3kA 以上, 单次最大可重复关断电流达到了 5.5kA。在合成实验平台上, 开展了不同电流等级(3000、3500、4000A)的 3 工频周期连续关断实验, 最高实现了连续 3 工频周期关断 4000A, 实验波形如图 10 所示。基于首次换相失败和后续换相失败的分析, 结合目前大多数交流线路重合闸逻辑, 考虑到系统检测到故障 60ms 后闭锁闸的控保设计, 在 IGCT 换流阀中, 主动关断换流桥臂电流的同时促进了电流向被换流桥臂转移的过程。

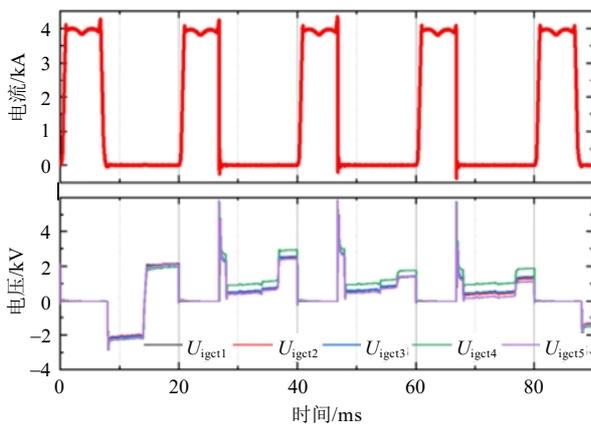


图 10 3 工频周期连续关断实验波形

Fig. 10 Three-cycle continuous turn-off experiment waveform

为进一步明晰新型换流技术在电网中的运行特性和故障防护形态, 需要结合大电网的不同运行方式、结构因素、故障特性等进行综合分析, 与换相评估, 进一步地, 融合交直流混联电网耦合特性, 开展防护换相失败过程的安全和稳定分析。

#### 5.4 小结

总结来看, 从器件-装置-系统的多重层面分析, 此新型换流技术具有如下几个显著的特点和优势。

1) 恢复特性优化设计: 利用逆阻 IGCT 能够为晶闸管争取出额外的恢复时间, 从而优化设计恢复特性。

2) 开关器件具有双向阻断能力: 为解决换相失败问题, 需要替换上的开关器件具有双向阻断能力, 因此逆阻 IGCT 是必要且唯一的。

3) 新型换流技术保有 LCC 高压直流运行的优势: 新型逆阻型 IGCT 器件其封装和工艺均源于同类的晶闸管, 也移植了晶闸管的鲁棒性稳定性高、导通损耗低的优势, 进而采用逆阻 IGCT 和晶闸管的混合换流器仍将继承 LCC-HVDC 的运行损耗低、经济成本低的显著优势。最优条件下, 在超/特高压直流输电场景, 可以实现 RB-IGCT 与晶闸管的一对一替代。清华大学研制的六英寸 8kV RB-IGCT

器件, 通态电流 3kA 以上, 为超/特高压直流输电提供了有益条件。

## 6 结论

本文对防护高压直流输电换相失败的新型换流技术的研究进行了梳理, 总结出了以下结论与观点:

1) 从器件、装置与系统自下而上分析了目前导致换相失败的换流技术原理, 从器件、装置与系统的 3 个层面总结了换相成功与换相失败的主因和诱因。

2) 将防护换相失败的换流技术归纳总结为器件特性改良、换流拓扑改进与直流控制优化的 3 个层面, 分别分析了各类换流技术在防护换相失败中的表现行为和防护机理。

3) 对不同防护换相失败的换流技术的防护能力、电学特性、额外损耗、实现难度与附加成本等方面进行了综合比较与评价。

4) 指出了未来新型换流技术研究要攻克的关键问题与发展趋势, 并提出了未来的一个发展方向是研究基于新型电力电子器件和新型拓扑结构的新换流技术。

## 参考文献

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 梁旭明, 张平, 常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.  
LIANG Xuming, ZHANG Ping, CHANG Yong. Recent advances in high-voltage direct-current power transmission and its developing potential[J]. Power system technology, 2012, 36(4): 1-9(in Chinese).
- [3] 赵学明, 李永丽, 孙广宇, 等. 换相失败对含风电场的交直流混联系统送端过电压的影响[J]. 高压技术, 2019, 45(11): 3666-3673.  
ZHAO Xueming, LI Yongli, SUN Guangyu, et al. Effect of commutation failure on the overvoltage on rectifier station in AC/DC hybrid power system with wind farms[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3666-3673(in Chinese).
- [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] 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.
- [6] 邵瑶, 汤涌. 多馈入交直流混合电力系统研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 24-30.  
SHAO Yao, TANG Yong. Research survey on multi-infeed AC/DC hybrid power systems[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 24-30(in Chinese).
- [7] 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).

- [8] 阮思焯, 徐凯, 刘丹, 等. 直流输电系统换相失败统计分析分析及抵御措施建议[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 13-17, 34.  
RUAN Siye, XU Kai, LIU Dan, et al. Statistical analysis and suggestions on resistance measures for commutation failures of HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 13-17, 34(in Chinese).
- [9] ZHOU Xiaoxin. Simultaneous commutation failures and forced blocking of multi-in-feed HVDC in East China power grid[C]// Proceedings of CIGRE Large Disturbances Workshop. Paris, 2014: 21-32.
- [10] 王少辉, 唐飞, 向农. 华东电网多直流同时换相失败仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 16-21.  
WANG Shaohui, TANG Fei, XIANG Nong. Commutation failure simulation analysis of east China power grid multiple HVDC lines[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 16-21(in Chinese).
- [11] 汤奕, 郑晨一. 高压直流输电系统换相失败影响因素研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 499-513.  
TANG Yi, ZHENG Chenyi. Review on Influencing Factors of commutation failure in HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 499-513(in Chinese).
- [12] 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(in Chinese).
- [13] 曾亮. 高压直流输电连续换相失败发生机理分析及抑制方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [14] 宋海根. 高压直流输电系统连续换相失败抑制方法及保护影响研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
- [15] 景柳铭, 王宾, 董新洲, 等. 高压直流输电系统连续换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 116-123.  
JING Liuming, WANG Bin, DONG Xinzhou, et al. Review of consecutive commutation failure research for HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 116-123(in Chinese).
- [16] 王嘉铭, 余浩, 陈武晖. 多馈入直流输电系统换相失败研究综述[J]. 发电技术, 2020, 41(4): 335-345.  
WANG Jiaming, YU Hao, CHEN Wuhui. Research on commutation failure in multi-infeed HVDC transmission system[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(4): 335-345(in Chinese).
- [17] 林凌霄, 张尧, 钟庆, 等. 多馈入直流输电系统中换相失败研究综述[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 40-46.  
LIN Lingxue, ZHANG Yao, ZHONG Qing, et al. A survey on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 40-46(in Chinese).
- [18] 王玲, 文俊, 崔康生, 等. 多馈入直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(8): 56-65.  
WANG Ling, WEN Jun, CUI Kangsheng, et al. Research survey of commutation failure in MIDC transmission systems[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(8): 56-65(in Chinese).
- [19] 宋金钊, 李永丽, 曾亮, 等. 高压直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 2-13.  
SONG Jinzhao, LI Yongli, ZENG Liang, et al. Review on commutation failure of HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 2-13(in Chinese).
- [20] 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(S1): 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(S1): 1-10(in Chinese).
- [21] ZHANG Lidong, DOFNAS L. A novel method to mitigate commutation failures in HVDC systems[C]// Proceedings of International Conference on Power System Technology. Kunming, China: IEEE, 2022: 51-56.
- [22] WEI Peng, LIU Jiankun, ZHOU Qian, et al. Research on commutation failure of Jinsu DC transmission project caused by a complex AC fault[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(16): 775-778.
- [23] DONGYE Zhonghao, QI Lei, CUI Xiang, et al. A new approach to model reverse recovery process of a thyristor for HVDC circuit breaker testing[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(2): 1591-1601.
- [24] YUE Ke, LI Shaobin, KONG Dezhi, et al. Experimental study on reverse recovery characteristics of high power thyristors in HVDC converter valve[C]// Proceedings of 2016 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2016: 360-363.
- [25] 岳珂, 孙玮, 刘隆晨, 等. 载流子寿命与高压晶闸管反向恢复特性的关系[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 3944-3949.  
YUE Ke, SUN Wei, LIU Longchen, et al. Correlations between carrier lifetime and reverse recovery characteristics of high power thyristors[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 3944-3949(in Chinese).
- [26] LINDER S. 功率半导体—器件与应用[M]. 肖曦, 李虹, 译. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [27] SONG Jinzhao, LI Yongli, ZHANG Jingqiu, et al. Influence of transition resistance and fault moment on DC system commutation process caused by two-phase fault of AC system[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(16): 1306-1312.
- [28] 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): 1437-1446.
- [29] 侯灵犀, 魏应冬, 张树卿, 等. 抑制高压直流换相失败的串联电压换相变流器及控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6481-6490.  
HOU Lingxi, WEI Yingdong, ZHANG Shuqing, et al. Series voltage commutated converter to suppress HVDC commutation failure and its control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6481-6490(in Chinese).
- [30] 陈红军. 高压直流输电系统故障及控制策略[J]. 华中电力, 2001(5): 5-8, 22.  
CHEN Hongjun. HVDC transmission system faults and its control tactics[J]. Central China Electric Power, 2001, 14(5): 5-8, 22(in Chinese).
- [31] KRISTMUNDSSON G M, CARROLL D P. The effect of AC system frequency spectrum on commutation failure in HVDC inverters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(2): 1121-1128.
- [32] 李新年. 特高压直流输电系统换相失败及其预防措施研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [33] HOU Lingxi, ZHANG Shuqing, WEI Yingdong, et al. A dynamic series voltage compensator for the mitigation of LCC-HVDC commutation failure[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(6): 3977-3987.

- [34] WANG Ling, WEN Jun, QIAO Guangyao, et al. Study on the influence factors of commutation failure in MIDC systems[C]// International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015). Beijing, China: IEEE, 2015: 1-5.
- [35] XIA Chengjun, SUO Minggui, XI Liang. Analysis on commutation failure caused by AC faults in multi-infeed HVDC systems[C]// Proceedings of 2012 Power Engineering and Automation Conference. Wuhan, China: IEEE, 2012: 1-4.
- [36] 丁荣军, 刘国友.  $\pm 1100\text{kV}$  特高压直流输电用 6 英寸晶闸管及其设计优化[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5180-5187.  
DING Rongjun, LIU Guoyou. Optimization design of 6-inch Thyristor for  $\pm 1100\text{kV}$  UHVDC transmission application[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5180-5187(in Chinese).
- [37] 高山城, 罗艳红, 张婷婷, 等. 特高压晶闸管 p-层穿透和 p+层发射极结构设计[J]. 半导体技术, 2014, 39(10): 752-757.  
GAO Shancheng, LUO Yanhong, ZHANG Tingting, et al. Design of p-layer punch-through and p+emitter structure for Ultra High voltage thyristor[J]. Semiconductor Technology, 2014, 39(10): 752-757(in Chinese).
- [38] 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.
- [39] SUN Y Z, PENG LING, MA FENG, 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.
- [40] 栾向远. 高压直流输电系统预测换流器换相失败的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- [41] BUNCH R, KOSTEREV D. Design and implementation of AC voltage dependent current order limiter at pacific HVDC intertie[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 293-299.
- [42] 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(in Chinese).
- [43] 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(in Chinese).
- [44] FARUQUE M O, ZHANG Yuyan, DINAHAHI V. Detailed modeling of CIGRE HVDC benchmark system using PSCAD/EMTDC and PSB/SIMULINK[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 378-387.
- [45] 李永光. 基于直流控制系统的换相失败抑制措施研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [46] 任震, 何畅炜, 高明振. HVDC 系统电容换相换流器特性分析(I): 机理与特性[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 55-58.  
REN Zhen, HE Changwei, GAO Mingzhen. Characteristic analysis of capacitor commutated converter in HVDC system (I): mechanism characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 55-58(in Chinese).
- [47] XUE Ying, ZHANG Xiaoping, YANG Conghua. Series capacitor compensated AC Filterless flexible LCC HVDC with enhanced power transfer under unbalanced faults[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3069-3080.
- [48] XUE Ying, ZHANG Xiaoping. Reactive power and AC voltage control of LCC HVDC system with controllable capacitors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 753-764.
- [49] 李春华, 孙宝奎, 赵成勇, 等. 半控型 H 桥子模块提高 HVDC 换相失败免疫力的机理[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2419-2427.  
LI Chunhua, SUN Baokui, ZHAO Chengyong, et al. Mechanism of semi-controlled H-bridge sub-module to improve commutation failure immunity of HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2419-2427(in Chinese).
- [50] 李春华. 提高直流输电换相失败免疫力的新型拓扑和控制方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [51] 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.
- [52] GUO Chunyi, LI Chunhua, ZHAO Chengyong, et al. An evolutionary 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.
- [53] 高冲, 贺之渊, 杨俊, 等. 新型可控电网换相换流器拓扑及其控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1940-1949.  
GAO Chong, HE Zhiyuan, YANG Jun, et al. A novel controllable line commutated converter topology and control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1940-1949(in Chinese).
- [54] 郭春义, 刘文静, 赵成勇. 电压源电流源混合型高压直流输电控制方法研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(11): 1281-1288.  
GUO Chunyi, LIU Wenjing, ZHAO Chengyong. Research on the control method for voltage-current source hybrid-HVDC system[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(11): 2771-2777(in Chinese).
- [55] 赵成勇, 郭春义, 刘文静. 混合直流输电[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [56] 李子欣, 徐飞, 赵成勇, 等. 面向高压直流输电的电流源型主动换相换流器研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 1053-1068.  
LI Zixin, XU Fei, ZHAO Chengyong, et al. Research review of current-source type actively commutated converter for high voltage direct current transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 1053-1068(in Chinese).
- [57] 夏冰, 李耀华, 李子欣, 等. 基于 PWM-CSC 的混合直流输电系统功率控制策略研究[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(7): 17-24.  
XIA Bing, LI Yaohua, LI Zixin, et al. Research on control method of PWM-CSC based hybrid HVDC transmission system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(7): 17-24(in Chinese).
- [58] 栾轲栋, 李耀华, 李子欣, 等. 适用于高压直流输电的主动换相换流器特定谐波消除脉宽调制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3970-3979.  
LUAN Kedong, LI Yaohua, LI Zixin, et al. Research on selective harmonic elimination pulse width modulation strategy of actively commutated converter for HVDC applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3970-3979(in Chinese).
- [59] ZHAO Chengyong, XIA Jiahang, GUO Chunyi, et al. An improved

- control strategy for current source converter-based HVDC using fundamental frequency modulation[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 133: 107265.
- [60] 赵成勇, 冯定腾, 熊小玲, 等. 基于改进基频调制电流源换流器的高压直流输电系统[J/OL]. *中国电机工程学报*, 2023: 1-14[2024-04-01]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230879>. ZHAO Chengyong, FENG Dingteng, XIONG Xiaoling, et al. Enhanced fundamental frequency modulation based current source converter for HVDC transmission[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 2023: 1-14. [https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230879\(in Chinese\)](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230879(in%20Chinese)).
- [61] REEVE J, BARON J A, HANLEY G A. A technical assessment of artificial commutation of HVDC converters with series capacitors[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1968, PAS-87(10): 1830-1840.
- [62] 刘俊涛, 汪娟娟, 叶运铭, 等. 不同锁相环对 LCC-HVDC 控制回路稳定性的影响[J]. *电网技术*, 2024, 48(3): 1202-1213. LIU Juntao, WANG Juanjuan, YE Yunming, et al. Influence of Different PLLs on Stability of LCC-HVDC Control Loop[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(3): 1202-1213(in Chinese).
- [63] 夏海涛, 周小平, 陈斌超, 等. 抑制高压直流输电系统换相失败的可控串联电阻[J]. *电网技术*, 2023, 47(6): 2539-2548. XIA Haitao, ZHOU Xiaoping, CHEN Binchao, et al. Controllable Series Resistor for Commutation Failure Mitigation in LCC-HVDC System[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(6): 2539-2548(in Chinese).
- [64] 宋智强, 黄耀辉, 赵化时, 等. 含 LCC-MMC 串/并联混合直流的交直流系统潮流计算方法[J]. *电网技术*, 2023, 47(7): 2860-2868. SONG Zhiqiang, HUANG Yaohui, ZHAO Huashi, et al. Power Flow Calculation of AC/DC System With LCC-MMC Series/Parallel Hybrid HVDC[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(7): 2860-2868(in Chinese).
- [65] XU Chaoqun, YU Zhanqing, ZHAO Biao, et al. A novel hybrid line commutated converter based on IGCT to mitigate commutation failure for high-power HVDC application[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(5): 4931-4936.
- [66] 杨悦民, 许超群, 刘宇畅, 等. 基于 IGCT 复合模块直串集中电阻的 400 kV 直流耗能装置原理与研制[J]. *高电压技术*, 2022, 48(4): 1510-1517. YANG Yuemin, XU Chaoqun, LIU Yuchang, et al. Principle and development of 400 kV DC energy dissipation device based on IGCT composite module directly connected to concentrated resistance[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(4): 1510-1517(in Chinese).
- [67] 赵彪, 魏天予, 许超群, 等. 基于 IGCT 的高压大容量模块化多电平变换器[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(2): 562-570. ZHAO Biao, WEI Tianyu, XU Chaoqun, et al. High-voltage and high-power modular multilevel converter based on integrated gate commutated thyristor[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(2): 562-570(in Chinese).
- [68] XU Chaoqun, ZHAO Biao, CHEN Zhengyu, et al. A novel converter-breaker integrated voltage source converter based on high-surge IGCT and fault self-clearing strategy for DC grid[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(12): 12668-12672.



许超群

在线出版日期: 2025-02-05。

收稿日期: 2024-03-19。

作者简介:

许超群(1996), 男, 博士, 研究方向为高压直流输电关键装备及系统优化调控运行, E-mail: xuchaoqun@sgcc.com.cn;

余占清(1981), 男, 通信作者, 副教授, 博士生导师, 研究方向为直流电网及直流输电技术与关键装备等, E-mail: yzq@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 马晓华)