

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250261

基于 STATCOM 补偿换相电流的 SLCC 换相失败抑制方法

旷玮¹, 江琴¹, 徐瑞廷¹, 李保宏¹, 刘天琪¹, 郑俊超², 陶艳²

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要: 基于多源自适应换相换流器(multi-source self-adaption line commutated converter, SLCC)的直流输电系统在交流故障下利用静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)补偿无功功率抑制换相失败。然而在严重交流故障下即使达到补偿容量上限仍存在换相失败问题, 因此, 提出一种基于 STATCOM 补偿换相电流的抑制方法。首先, 分析 SLCC 直流输电系统拓扑结构和控制策略。其次, 通过分析 SLCC 换相过程发现 LCC 换相电流由交流电网和 STATCOM 共同提供。基于此提出通过控制 STATCOM 输出电流对 LCC 换相电流进行补偿从而加快换相过程, 减小换相重叠角以抑制换相失败。相较于基于无功功率补偿控制方法, 所提方法在同样 STATCOM 容量下换相失败抑制效果更优。最后, 基于 PSCAD 仿真平台搭建了 SLCC 直流输电系统模型。仿真结果表明, 所提方法能有效提升 SLCC 抵御换相失败的能力。

关键词: 多源自适应换相换流器; 换相失败; 静止同步补偿器; 谐波滤除; 换相电流

Method for suppressing commutation failure for SLCC based on STATCOM commutation current compensation

KUANG Wei¹, JIANG Qin¹, XU Ruiting¹, LI Baohong¹, LIU Tianqi¹, ZHENG Junchao², TAO Yan²

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: In a DC transmission system based on multi-source self-adaptive line commutated converters (SLCC), commutation failure can be suppressed by configuring STATCOM to compensate reactive power under AC faults. However, under severe AC faults, commutation failure may still occur even when the STATCOM reaches its maximum compensation capacity. To address this issue, a commutation failure suppression method based on STATCOM commutation current compensation is proposed. First, the topology and control strategy of the SLCC-based DC transmission system are analyzed. Second, by examining the SLCC commutation process, it is found that the LCC commutation current is jointly provided by the AC grid and the STATCOM. Based on this, it is proposed to compensate the LCC commutation current by controlling the STATCOM output current to accelerate the commutation process and reduce the commutation overlap angle, thereby suppressing commutation failure. Compared with reactive power compensation based methods, the proposed method achieves better commutation failure suppression under the same STATCOM capacity. Finally, a SLCC DC transmission system model is built on the PSCAD simulation platform. Simulation results show that the proposed method can effectively enhance the ability of SLCC to withstand commutation failures.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Sichuan Province (No. 2024NSFSC0865).

Key words: SLCC; commutation failure; STATCOM; harmonic filtering; commutation current

0 引言

高压直流输电技术具有输电距离长、传输容量大、损耗小、控制灵活方便等优点, 得到快速发展及广泛应用^[1-3]。基于电网换相换流器的高压直流

(line commutated converter based high voltage direct current, LCC-HVDC)采用半控型晶闸管作为开关器件, 无自主关断能力, 需要借助交流电网进行换相, 在交流故障引发电网电压跌落时, 易发生换相失败, 严重时甚至引发连续换相失败^[4-5]。为抑制换相失败, 安装无功补偿装置稳定交流电压是常用方式^[6]。由于 LCC 运行时也会吸收大量无功功率, 配备大量

基金项目: 四川省自然科学基金项目资助(2024NSFSC0865)

无功补偿设备增加了换流站占地面积和投资成本,在一定程度上制约其在电网中的发展^[7]。

目前,国内外学者在研究换相失败抑制方面取得丰富成果,主要集中在 3 个方面^[8-10]: 1) 对换流器件和拓扑进行改造,提出可控的强迫换相换流器新拓扑; 2) 增设无功补偿装置,提供额外的无功支撑交流母线电压; 3) 改进控制策略,有效提升关断角裕度。文献[11]分析了调相机与无功补偿器(static var compensator, SVC)的动态无功补偿响应特性,在此基础上提出一种调相机与 SVC 协调的换相失败抑制策略。文献[12-15]对比分析了同步调相机、SVC、静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)和新一代调相机的动态无功补偿装置差异,发现动态无功补偿装置通过补偿无功功率提升换相失败能力具有饱和性。STATCOM 模块化程度高,响应快,但是存在有功损耗,子模块电压不均衡会影响装置稳定性。新一代调相机机组轴系具有转动惯量,可提升电网抵御有功冲击的能力。文献[16]提出了综合故障检测方法,与储能型 STATCOM 有功无功协调控制策略,对不同故障工况下均能对电压提供更好的支撑效果,但对 STATCOM 输出功率有所要求。

近年来有专家学者提出多源自适应换相换流器(multi-source self-adaption line commutated converter, SLCC)^[17],不同于已有的 STATCOM 通过换流变并联在 LCC 并网交流母线处,SLCC 中的 STATCOM 直接并联在换流变与换流阀之间,可同时实现动态无功补偿和谐波滤除功能,节省了无功补偿装置和滤波器装置的占地面积。同时 STATCOM 控制灵活,无功调节响应快,能在交流故障时提供电压支撑,减少换相失败的发生。然而国内研究 SLCC 运行特性和控制策略的文献缺乏,对其换相过程和控制原理仍需深入研究。同时针对抑制 SLCC 换相失败方法的研究内容也十分有限,亟需开展相关研究促进 SLCC 直流输电系统的发展。

为此,本文首先分析了 SLCC 的拓扑结构和控制策略,研究了 STATCOM 通过无功功率控制、电压控制和有源滤波控制辅助 LCC 运行,实现无功补偿和谐波滤除功能。其次通过分析 SLCC 换相过程,发现 SLCC 换相电流由交流电网和 STATCOM 共同提供,基于此提出通过控制 STATCOM 补偿换相电流从而加快换相过程,减小换相重叠角以抑制换相失败。该方法降低了对 STATCOM 容量要求,具有更好的换相失败抑制效果。最后,基于 PSCAD 仿真平台搭建了 SLCC 直流输电系统模型,仿真结果表明所提方法能有效提升 SLCC 抵御换相失败的能力。

1 SLCC 直流输电系统拓扑结构及控制

1.1 SLCC 直流输电系统拓扑结构

SLCC 受端换流站拓扑结构如图 1 所示。其中: X_d 、 U_s 分别为交流系统等值电抗和交流电压; T_1 、 T_2 分别为额定容量和漏抗均相同的 Y- Δ 和 Y-Y 换流变压器; V_{T1} 、 V_{T2} 分别为 6 脉动换流阀; L_d 为平波电抗器; U_{cN} 为第 N 子模块电容电压。

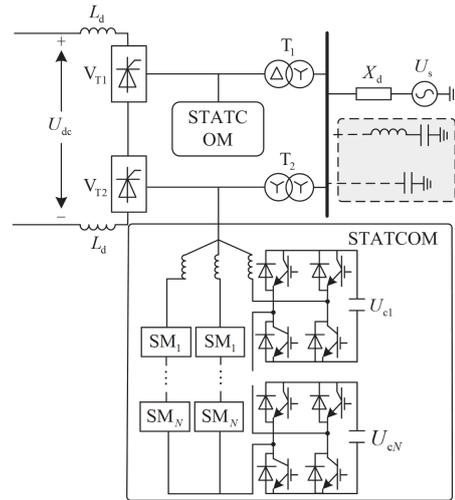


图 1 SLCC 受端换流站拓扑结构

Fig. 1 Topology of the SLCC converter station

与传统 LCC 受端换流站拓扑相比,SLCC 取消了交流母线上的无源滤波器和无功补偿装置,即图 1 中虚线框部分,改为分别在两个换流变压器和换流阀之间并联级联 H 桥型 STATCOM,来承担无功补偿和谐波滤除功能,滤除 6 脉动 LCC 在交流侧产生的 $6k \pm 1$ 次谐波电流。

级联 H 桥型 STATCOM 采用多个 H 桥子模块级联而成。每个 H 桥子模块是由电容器与 4 个 IGBT 开关管反向并联二极管构成,可通过增加子模块的数量来提升输出电压和功率。

为分析 SLCC 技术方案相较于常规 LCC 方案、LCC 在并网交流母线处并联 STATCOM(LCC + STATCOM)方案和模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)方案的经济性,基于表 1、表 2 参数,估算了常规 LCC、LCC + STATCOM、MMC 和 SLCC 技术方案的主设备造价和换流站建设占地面积情况,如表 3 所示。其中,由于 SLCC 方案中 STATCOM 直接与 LCC 并联安装于同一阀厅,与其他方案相比,阀厅面积更大,设备配置更复杂,绝缘要求更高,因此 SLCC 方案中换流阀造价比常规 LCC 方案稍高。

表 1 HVDC 系统参数

Table 1 Parameters of HVDC system

参数	数值
交流系统线电压有效值/kV	230
额定直流电压/kV	±200
额定直流功率/MW	1200
换流变压器额定容量/MVA	603
换流变压器漏抗/p.u.	0.18
平波电抗器/H	0.15
送端换流变变比	230 kV/173 kV
受端换流变变比	235.75 kV/145 kV
交流系统短路比	9.23

表 2 STATCOM 参数

Table 2 STATCOM parameters

参数	数值
单相桥臂子模块个数	72
子模块电容/mF	18
基波容量/MVA	300
连接电抗/mH	14
IGBT 额定电压/kV	4.5
IGBT 额定电流/kA	2

表 3 不同技术方案经济性分析

Table 3 Economic analysis of different technological solutions

	LCC	LCC + STATCOM	MMC	SLCC
换流变造价/万元	3000×8	3000×8	3000×8	3000×8
换流阀造价/万元	13 000	13 000	35 000	15 000
STATCOM 造价/万元	0	1500×2	0	6300×2
交流滤波器造价/万元	4800	3600	0	0
占地面积/m ²	150 000	150 000	140 000	50 000

由表 3 的数据可知, SLCC 技术方案造价相较于其他方案并无颠覆性增长, 而在占地面积方面相较于其他 LCC 方案具有显著优势。同时 SLCC 中 STATCOM 并联在换流变压器低压侧, 可以直接向 LCC 馈入补偿电流, 减小进入换流变压器的谐波电流, 换相失败抑制效果更好, 降低了变压器振动和噪声, 在实际工程建设中有更好的应用前景。

1.2 SLCC 功率控制策略

SLCC 有功功率仍由原 LCC 控制, 无功功率则由新增的 STATCOM 控制。LCC 的控制部分与传统 LCC-HVDC 一致, 仍然采用 CIGRE 模型的控制方案^[18], 整流侧采用定电流控制、逆变侧采用低压限流控制和定关断角控制^[19], 定关断角控制采用预测型控制, 响应速度更快^[20], 如图 2 所示。其中: I_{drec} 、 I_{dcinv} 分别为整流侧、逆变侧直流电流; I_{dcord} 为整流侧直流电流参考值; U_{dcinv} 为逆变侧直流电压; U_0 为

理想空载电压; α_{rec} 为整流侧触发角; γ_0 为关断角参考值; β_1 为逆变侧定电流控制超前触发角; β_2 为定关断角控制输出的超前触发角; u_x 为换流器相对感性压降; k_{p3} 为电流偏差控制的增益; β_{inv} 为逆变侧超前触发角; G_1-G_3 、 T_1-T_3 分别为 3 个一阶低通滤波环节的增益系数和时间常数。

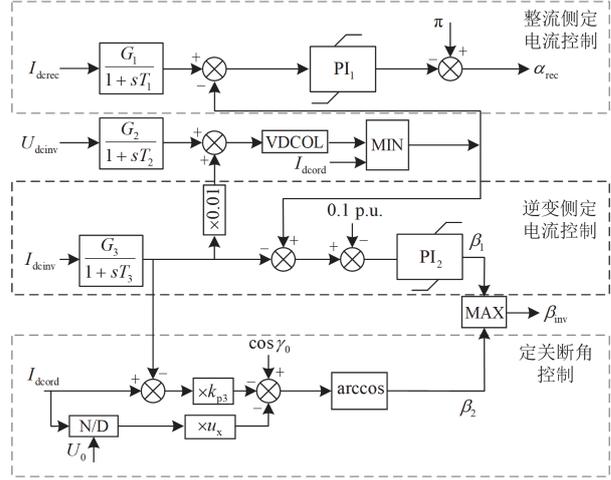


图 2 LCC 控制策略

Fig. 2 Control strategy of LCC

2 STATCOM 控制策略

STATCOM 控制采用经典的双环前馈解耦控制, 主要包括无功功率控制、电压控制、有源滤波控制^[21], 如图 3 所示。

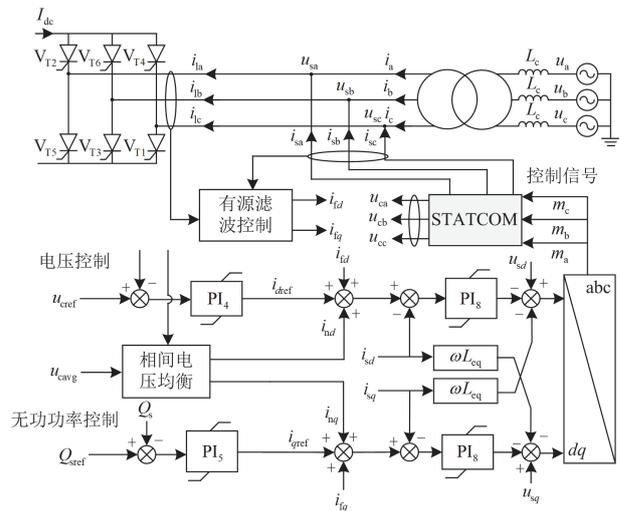


图 3 STATCOM 控制策略

Fig. 3 Control strategy of STATCOM

图 3 中: I_{dc} 为直流电流; i_{ia} 、 i_{ib} 和 i_{ic} 为 LCC 桥臂三相电流; u_{sa} 、 u_{sb} 和 u_{sc} 为 STATCOM 输出三相交流电压; i_{sa} 、 i_{sb} 和 i_{sc} 为输出三相交流电流; i_a 、

i_b 和 i_c 为换流变压器阀侧三相电流; u_a 、 u_b 和 u_c 为三相交流电压; L_c 为换流变等效电感; i_{id} 和 i_{iq} 分别为 dq 轴下有源滤波控制输出电流信号; u_{ca} 、 u_{cb} 和 u_{cc} 为 STATCOM 三相电容电压, u_{cavg} 、 u_{cref} 分别为三相电容电压平均值和参考值; i_{nd} 、 i_{nq} 分别为 dq 轴相间电压均衡控制输出信号; i_{dref} 、 i_{qref} 分别为 dq 轴参考电流; i_{sd} 、 i_{sq} 分别为 STATCOM 输出电流在 dq 轴分量; u_{sd} 、 u_{sq} 分别为 STATCOM 输出电压在 dq 轴分量; Q_s 、 Q_{sref} 分别表示 STATCOM 输出无功功率实测值和参考值; L_{eq} 为 STATCOM 等效电抗; m_a 、 m_b 、 m_c 为 STATCOM 三相控制信号。

2.1 无功功率和电压控制

SLCC 稳态等效电路如图 4 所示, 其中: Q 、 Q_s 和 Q_{ac} 分别为换流站消耗无功功率、STATCOM 输出无功功率和交流系统提供无功功率; i_{labc} 为换相电流; i_{abc} 、 u_{abc} 分别为换流变阀侧三相电流和电压; i_{sabc} 、 u_{sabc} 分别为 STATCOM 输出三相电流和电压。

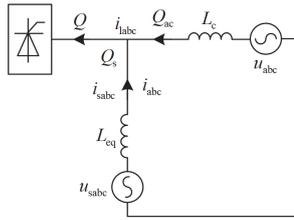


图 4 SLCC 稳态等效电路

Fig. 4 SLCC steady-state equivalent circuit

稳态工况下, STATCOM 提供换流站所需所有无功功率, 此时电路无功功率关系如式(1)所示。

$$\begin{cases} Q = Q_{ac} + Q_s \\ Q_{ac} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

STATCOM 的控制目标为对换流站所需无功功率进行补偿。根据瞬时无功功率理论^[22], 将三相电压电流转换到 dq 轴坐标系中, 并选择 d 轴参考方向与电网电压矢量重合, 可得到有功功率和无功功率的瞬时表达式, 如式(2)所示。

$$\begin{cases} p = \frac{3}{2} u_d \cdot i_d \\ q = -\frac{3}{2} u_d \cdot i_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: p 、 q 分别为瞬时有功功率和无功功率; u_d 为电网电压 d 轴分量; i_d 、 i_q 分别为 dq 轴电流分量。

将 STATCOM 输出无功功率实测值 Q_s 与参考值 Q_{sref} 作差, 经过 PI 环节输出作为 q 轴电流控制信

号, 使 STATCOM 输出无功功率跟踪参考无功功率值, 保持交流系统传输无功功率为零。

在电压控制方面, 由于级联 H 桥 STATCOM 由于各相桥臂直流电压无直接联系, 会导致各相子模块电压不均衡, 影响 STATCOM 正常运行。为维持各项桥臂子模块间的电压均衡。文中采用基于负序电压的相间均衡控制算法, 其策略如图 5 所示。其中 m_1 — m_3 为控制过程中间信号, m_{na} 、 m_{nb} 和 m_{nc} 为相间电压均衡控制输出的三相控制信号。

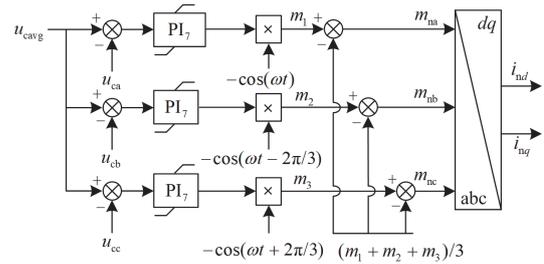


图 5 基于负序电压的相间均衡控制

Fig. 5 Phase-to-phase balancing control based on negative-sequence voltage

2.2 有源滤波控制

稳态运行时, 可将 LCC 换流阀等效为电流源, 则 SLCC 受端单相谐波补偿等效电路如图 6 所示, 其中: i_h 为 LCC 换流阀 h 次等效谐波电流; i_{th} 为交流侧等效 h 次谐波电流; i_{sh} 为 STATCOM 等效受控 h 次谐波电流; u_{sh} 为 STATCOM 输出 h 次谐波电压; z_{sh} 和 z_{th} 分别为 STATCOM 和换流变压器 h 次等效谐波阻抗。

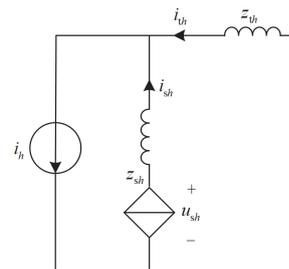


图 6 SLCC 受端单相谐波补偿等效电路

Fig. 6 Single-phase harmonic compensation equivalent circuit of SLCC inverter station

根据基尔霍夫定律, 可得式(3)。

$$\begin{cases} i_{sh} \cdot z_{sh} - i_{th} \cdot z_{th} = u_{sh} \\ i_h - i_{sh} = i_{th} \end{cases} \quad (3)$$

根据图 6 和式(3)可得到阀侧谐波电流和 STATCOM 输出谐波电流间复频域关系为

$$I_{sh}(s) = \frac{Z_{th}(s) + \frac{U_{sh}(s)}{I_{th}(s)}}{Z_{sh}(s) + Z_{th}(s) + \frac{U_{sh}(s)}{I_{th}(s)}} I_h(s) \quad (4)$$

式中： $I_h(s)$ 、 $I_{sh}(s)$ 、 $I_{th}(s)$ 、 $U_{sh}(s)$ 、 $Z_{sh}(s)$ 和 $Z_{th}(s)$ 分别表示图6中各电气量频域分量。

令 STATCOM 输出电压 $U_{sh}(s)$ 和交流侧等效谐波电流 $I_{th}(s)$ 之间的传递函数为 $G(s)$ ，代入式(4)中可得

$$I_{sh}(s) = \frac{Z_{th}(s) + G(s)}{Z_{sh}(s) + Z_{th}(s) + G(s)} I_h(s) \quad (5)$$

由式(5)可知，当传递函数 $G(s)$ 增益无穷大时，可实现 STATCOM 输出谐波电流等于 LCC 阀侧谐波电流，理想准比例谐振控制器在谐振频率处的增益可视为无穷大，其传递函数如式(6)所示。因此，本文采用准比例谐振控制器，首先利用锁相环获取换相电压正余弦信号相角，将换相电流经过 dq 坐标变换和低通滤波器后得到直流分量，将原电流与直流分量作差后得到谐波分量作为谐波滤除控制的参考电流，再将 STATCOM 输出电流与参考电流作差通过准比例谐振控制器^[23]，实现滤波功能。

$$G(s) = K_p + \frac{2K_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (h\omega_0)^2} \quad (6)$$

式中： K_p 、 K_r 分别为比例系数和积分系数； ω_c 为截止频率； ω_0 为基波频率。

采用多个并联的准比例谐振控制可实现抑制特定频次(5、7、11和13次等)的谐波电流，避免其流入电网，控制算法如图7所示^[24]。其中： i_{hd} 、 i_{hq} 分别为 dq 坐标轴下换相电流谐波分量。本文中算例仿真步长为 $10 \mu s$ ，控制器控制步长为 $20 \mu s$ 。

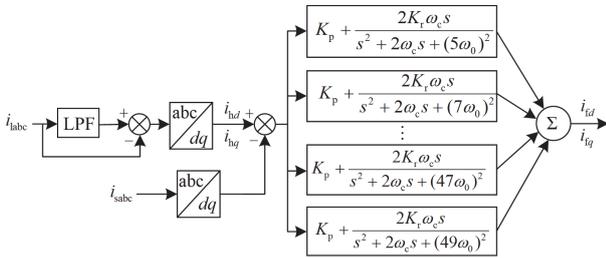


图7 有源滤波算法

Fig. 7 Active filtering algorithm

3 SLCC 换相失败抑制方法

3.1 基于无功功率补偿换相失败抑制方法

稳态运行时，STATCOM 通过无功功率控制提供换流站消耗的无功功率，保证 LCC 换流阀从交流系统吸收无功功率为零。在交流故障下，交流母线

电压下降，逆变站直流电压下降，直流电流上升，此时换流站消耗无功 Q 如式(7)所示。

$$Q = I_{dcinv} \sqrt{U_{d0inv}^2 - U_{dcinv}^2} \quad (7)$$

式中： U_{d0inv} 为逆变站空载直流电压。

由式(7)可知，在交流故障期间，逆变侧换流站消耗无功功率增大。此时 STATCOM 将需要补偿更多的无功功率来阻止交流母线进一步下跌，否则将会发生换相失败。因此，当检测到故障发生时^[25]，常规 STATCOM 暂态控制方法为将 STATCOM 由定无功功率控制转为定交流电压控制模式，如图8所示。STATCOM 暂态控制模式切换过程如图9所示。其中 u_{smms} 和 $u_{smmsref}$ 为 STATCOM 输出电压有效值和参考值。通过进一步补偿大量无功功率提升交流电压基频分量幅值以抑制换相失败。然而在严重交流故障下，即使当 STATCOM 补偿无功功率达到最大容量，交流电压也难以恢复至额定电压水平，换相重叠角最多也仅能恢复常规运行水平，而交流故障后 LCC 还存在功率波动，导致换相重叠角即使在常规水平下仍有发生换相失败的风险。

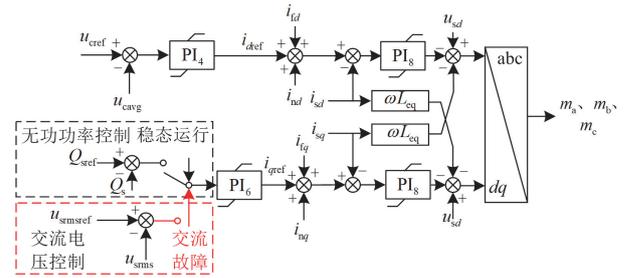


图8 STATCOM 抑制换相失败控制方法

Fig. 8 Suppression commutation failure control method of STATCOM

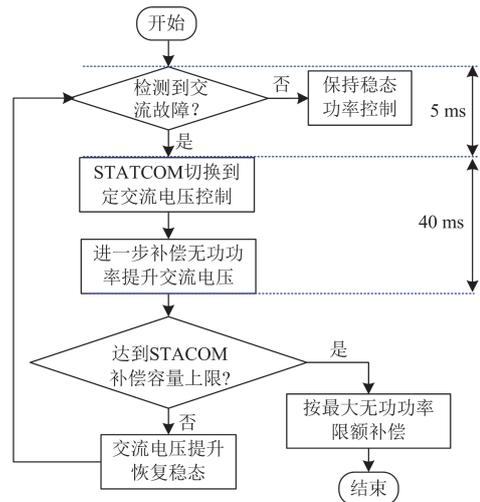


图9 STATCOM 暂态控制模式切换过程

Fig. 9 Transient control mode switching process of STATCOM

3.2 STATCOM 补偿换相电流机理分析

STATCOM 在 LCC 换相过程中, 通过产生一个与谐波电流幅值相等、相位相反的补偿电流, 实现谐波电流滤除功能, 因此可视为在换相支路上接入一个受控电流源。本节分析 STATCOM 经变压器接入方案和 SLCC 方案的换相过程差异, 如图 10 所示。

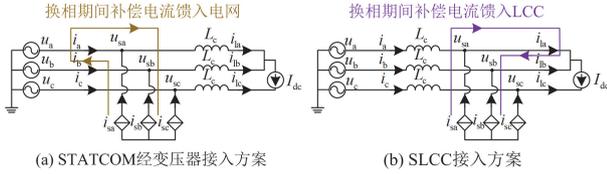


图 10 STATCOM 经变压器接入方案与 SLCC 方案换相过程对比

Fig. 10 Commutation process comparison of STATCOM connected through transformer and SLCC

由于 STATCOM 经变压器接入方案中, STATCOM 的补偿电流馈入电网, 对 LCC 换相过程无直接影响, 其换相过程机理与常规 LCC 换相一致, 各电气量计算公式保持相同, 此处不再给出。

SLCC 方案在换相过程中, 电路各电流满足式(8)所示关系。

$$\begin{cases} i_{1a} + i_{1b} = I_{dc} \\ i_a + i_{sa} = i_{1a} \\ i_b + i_{sb} = i_{1b} \end{cases} \quad (8)$$

根据 KVL 和 KCL 可列写电压电流方程如式(9)所示。

$$u_b - u_a = u_{ba} = L_c \frac{d(i_b - i_a)}{dt} \quad (9)$$

联立式(8)和式(9), 可得 b 相电流满足式(10)。

$$2L_c \frac{di_b}{dt} = u_{ba} + 2L_c \frac{di_{sb}}{dt} + L_c \frac{dI_{dc}}{dt} \quad (10)$$

考虑直流电流 I_{dc} 恒定不变, u_{ba} 为线电压, 令初始条件为 $i_b(\alpha) = 0$, $u_{ba} = \sqrt{2}u_1 \sin(\omega t)$, 对式(10)进行积分可得 b 相换相电流的表达式为

$$i_b = \frac{\sqrt{2}u_1}{2\omega L_c} (\cos \alpha - \cos(\omega t)) + i_{sb} \quad (11)$$

式中: α 为整流侧触发角; u_1 为线电压有效值。

当 $\omega t = \alpha + \mu$ 时换相完成, μ 为换相重叠角, 此时 $i_b = I_{dc}$ 代入式(11), 可求得换相重叠角为

$$\mu = \arccos \left(\cos \alpha - \frac{2\omega L_c (I_{dc} - i_{sb})}{\sqrt{2}u_1} \right) - \alpha \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可知, 相较于常规 LCC 而言, SLCC 换相电流除了来自交流电网外, STATCOM

仍能输出部分电流对换相电流进行补偿。

当 STATCOM 内环电流控制参考值中加入换流电流后, 交流故障导致交流电网提供换相电流降低时, STATCOM 则会跟踪换相电流对其进行补偿, 加快换相电流上升, 减小换相重叠角, 补偿过程如图 11 所示。

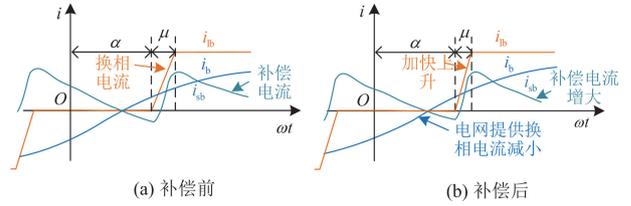


图 11 STATCOM 补偿前后 SLCC 换相期间电流波形
Fig. 11 Current waveform of SLCC during commutation process before and after STATCOM compensation

3.3 基于 STATCOM 补偿换相电流的换相失败抑制方法

由以上分析可知, 可通过在故障期间改变 STATCOM 补偿电流加快换相电流上升速度, 减小 SLCC 换相重叠角, 降低 SLCC 换相失败风险。

基于以上思路, 本文提出基于 STATCOM 补偿换相电流的 SLCC 换相失败抑制方法, 如图 12 所示。首先按图 7 中算法检测 SLCC 在 dq 轴下的换相电流谐波分量 i_{hd} 、 i_{hq} , 再乘以预设比例系数 k_m 后得到高频指令电流 i_{cmd} 和 i_{cmq} , 再与电压外环输出的基频电流叠加, 作为 STATCOM 电流内环控制的参考信号 i_{red} 和 i_{req} 。

$$\begin{cases} i_{red} = k_m \cdot i_{hd} + i_{dref} + i_{nd} \\ i_{req} = k_m \cdot i_{hq} + i_{qref} + i_{nq} \end{cases} \quad (13)$$

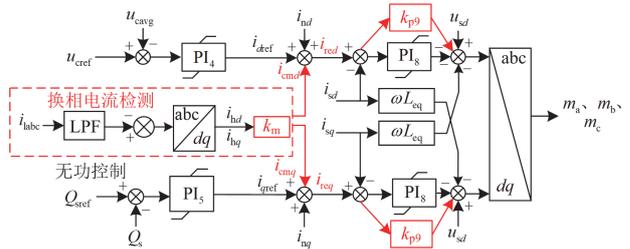


图 12 基于 STATCOM 补偿换相电流 SLCC 换相失败抑制方法

Fig. 12 SLCC commutation failure suppression method based on STATCOM compensation commutation current

同时为加快内环电流的响应速度, 在内环电流控制基础上加入额外的比例控制, 得到新的电压驱动信号 u_{d1} 和 u_{q1} , 如式(14)所示。

$$\begin{cases} u_{d1} = (k_{p8} + k_{p9})(i_{red} - i_{sd}) + k_{i8} \int (i_{red} - i_{sd}) dt \\ u_{q1} = (k_{p8} + k_{p9})(i_{req} - i_{sq}) + k_{i8} \int (i_{req} - i_{sq}) dt \end{cases} \quad (14)$$

式中： k_{p8} 和 k_{p9} 为比例系数； k_{i8} 为积分系数。

最后与换相电压作差得到 STATCOM 在 dq 轴下的调制信号 m_d 和 m_q 经过 dq - abc 变换得到三相坐标系下的调制信号控制 SVG 输出。

$$\begin{cases} m_d = u_{sd} - u_{d1} - \omega L_{cq} i_{sq} \\ m_q = u_{sq} - u_{q1} - \omega L_{cq} i_{sd} \end{cases} \quad (15)$$

SLCC 补偿换相电流流程图如图 13 所示。由于换相过程相较于整个工频周期时间很短，换相电流有效值较小，补偿换相电流仅占用 STATCOM 少量输出电流容量。额外投入的比例环节，让电流控制器的响应速度更快，短时间内提供更多的换相电流。相较于基于无功功率补偿的常规方法，该方法能直接增加 SLCC 换相电流，使得故障过程中换相重叠角减小，交流故障下的换相失败风险降低。

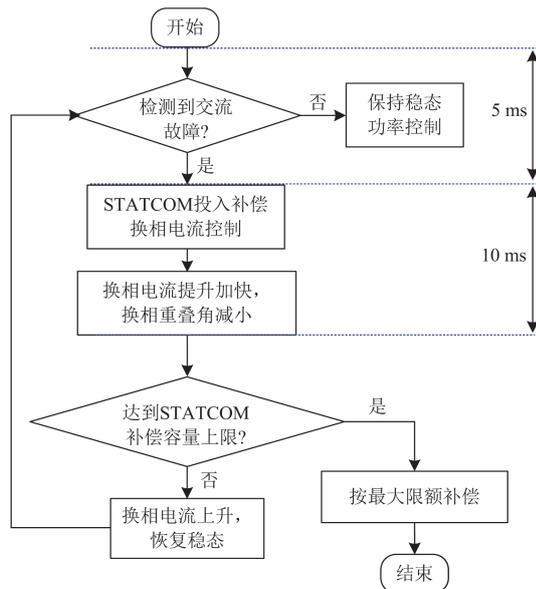


图 13 SLCC 补偿换相电流流程图

Fig. 13 Flow chart of SLCC compensation commutation current

4 仿真验证

4.1 仿真模型参数

为验证所提基于 STATCOM 补偿换相电流的 SLCC 换相失败抑制策略的有效性，在 CIGRE 模型基础上，搭建了“嵌入式”SLCC 直流输电系统仿真模型，拓扑结构如图 14 所示^[26]，其中， Z_{dcfil} 为直流滤波器等值阻抗， R_G 为逆变站直流母线接地电阻，ACF 为交流滤波器。送、受端系统连接在一起。

其中 LCC 控制方案仍然采用 CIGRE 模型的控制方案，其直流系统参数、STATCOM 参数分别如表 1、表 2 所示，控制参数如表 4 所示。

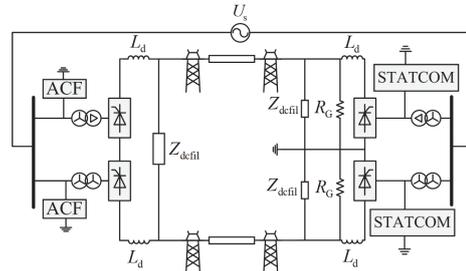


图 14 嵌入式 SLCC 直流输电系统拓扑

Fig. 14 Topology of embedded SLCC DC transmission system

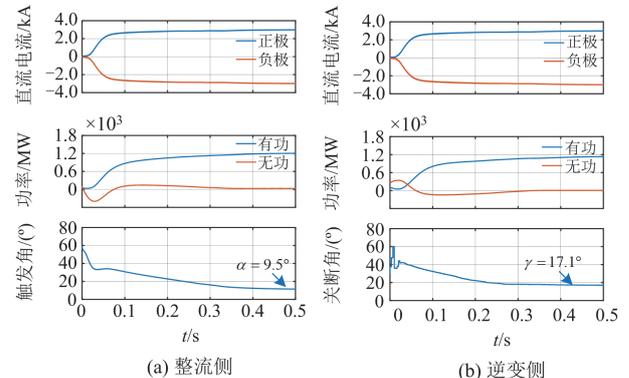
表 4 控制系统参数

Table 4 Parameters of control system

参数	数值
整流侧定电流 PI 控制	$k_{p1} = 0.6, k_{i1} = 15$
逆变侧定电流 PI 控制	$k_{p2} = 0.33, k_{i2} = 9.36$
定关断角控制电流偏差增益	$k_{p3} = 0.15$
关断角参考值	$\gamma_0 = 17^\circ$
换流器相对感性压降	$u_x = 0.047$
STATCOM 电容电压 PI 控制	$k_{p4} = 2, k_{i4} = 200$
STATCOM 无功功率 PI 控制	$k_{p5} = 2, k_{i5} = 200$
STATCOM 交流电压 PI 控制	$k_{p6} = 2, k_{i6} = 200$
STATCOM 电压均衡 PI 控制	$k_{p7} = 20, k_{i7} = 2000$
STATCOM 内环电流 PI 控制	$k_{p8} = 2, k_{i8} = 100$
补偿换相电流控制	$k_{p9} = 10, k_{i9} = 0.2$

4.2 稳态响应特性

稳态工况下，SLCC-HVDC 各电气量如图 15 所示。由图 15 可知，稳态运行时，SLCC 直流电流为 3 kA，整流侧触发角为 9.5° ，逆变侧关断角为 17.1° ，传输有功功率为 1200 MW，交流电网向换流站传输无功功率为 0。STATCOM 承担换流站所需的全部无功功率 230 Mvar，能够实现对换流站无功功率的完全补偿。



(a) 整流侧

(b) 逆变侧

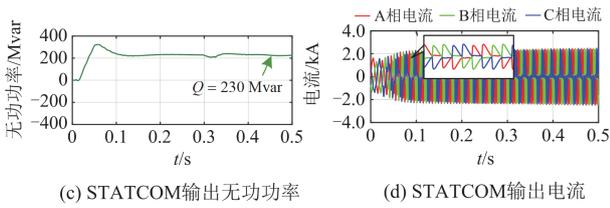


图 15 稳态时 SLCC-HVDC 各电气量波形
Fig. 15 Waveforms of SLCC-HVDC in steady state

对比 LCC 与 SLCC 换相过程, 两者阀侧电流波形如图 16 所示。

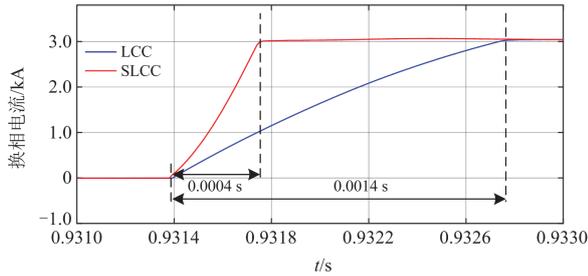


图 16 LCC 与 SLCC 换相过程阀电流波形
Fig. 16 Valve current waveforms of LCC and SLCC during commutation in steady state

由图 16 可知, 相较于 LCC 而言, 由于 STATCOM 能为 SLCC 提供部分换相电流, 换相电流上升更快。常规 LCC 换相时间为 0.0014 s, 相重叠角为 25.2°, SLCC 换相时间为 0.0004 s, 换相重叠角为 7.2°。因此, 稳态运行时 SLCC 换相重叠角更小, 关断角裕度更大。

对比 STATCOM 补偿换相电流前、后的仿真波形, 如图 17 所示。由图 17 可知, 当交流电网提供的换相电流减小时, STATCOM 能够提供更高幅值的补偿电流, 使换相电流继续保持快速上升。

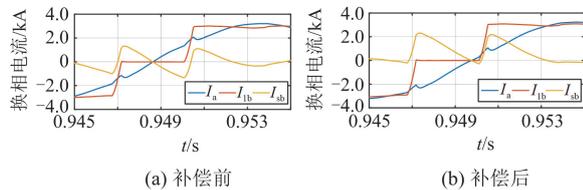


图 17 对比 STATCOM 补偿电流前后换相电流波形
Fig. 17 Waveform comparison of commutation current before and after STATCOM compensation

对 SLCC 的交流侧电压电流进行谐波分析, 其波形及频谱分别如图 18、图 19 所示。由图 19 可知 SLCC 网侧电压谐波主要为 $6k \pm 1$ 次(11 次、13 次等)特征谐波, 网侧电压的各次谐波中 13 次谐波含量最高, 为 1.42%, 网侧电流的各次谐波中 5 次谐波含

量最高, 为 0.038%, 变压器阀侧电压谐波中 25 次谐波含量最高, 为 7.44%, 阀侧电流谐波中 5 次谐波含量最高, 为 0.06%, 因此, SLCC 采用 STATCOM 代替无源滤波器, 可滤除流进换流变压器的电流, 仅有少量的谐波电流能够流入换流变压器。

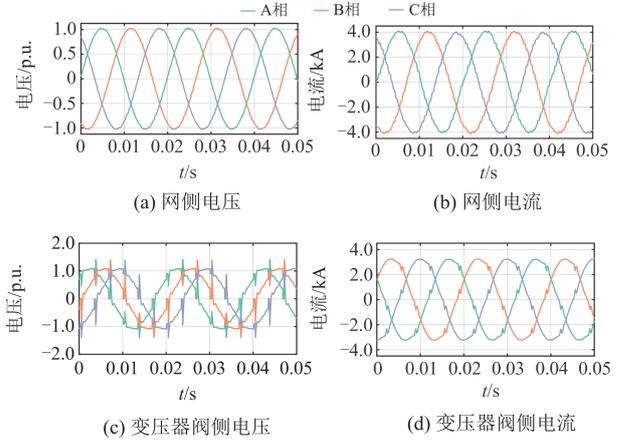


图 18 SLCC 额定运行交流侧电压、电流波形
Fig. 18 Voltage and current waveform in AC side of SLCC rated operation

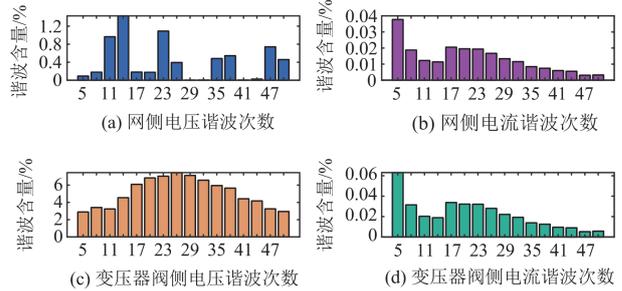


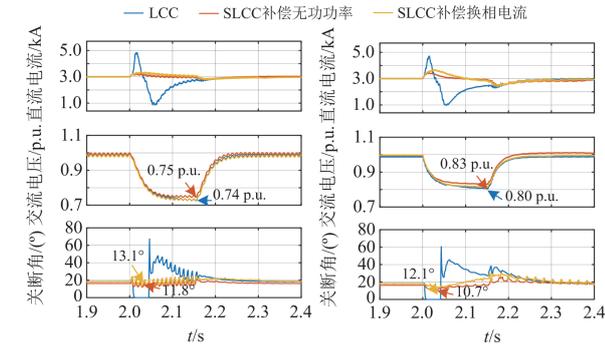
图 19 SLCC 额定运行交流侧电压、电流频谱图
Fig. 19 Voltage and current spectrum diagram in AC side of SLCC rated operation

4.3 换相失败抑制特性

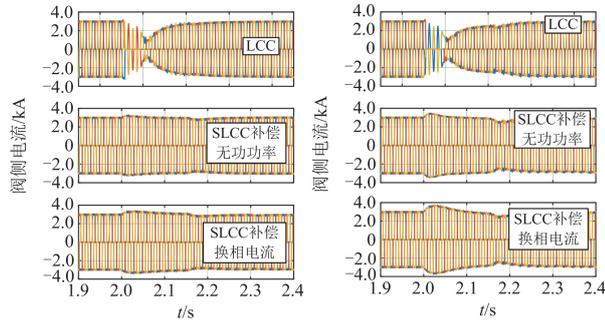
为对比常规 LCC 策略、SLCC 定交流电压策略(即图中 SLCC 补偿无功功率)和本文所提补偿换相电流策略抑制换相失败效果, 基于电磁暂态仿真模型在受端交流系统 2 s 时设置经 0.02 H 电感的单相接地故障和经 0.03 H 电感的三相接地故障, 持续 150 ms, 仿真结果如图 20 所示。

由图 20 可知, 在经 0.02 H 电感单相接地故障下, LCC 交流电压下降至 0.74 p.u., 直流电流出现较大波动, 阀侧电流出现短路, 发生换相失败。而 SLCC 在补偿无功功率和补偿换相电流两种策略下均成功抵御换相失败。同样地, 在经 0.03 H 电感三相接地故障下, LCC 交流电压下降至 0.8 p.u., 发生换相失败, SLCC 成功抵御换相失败。因此, SLCC

相较于 LCC 有更强抵御换相失败的能力。



(a) 0.02 H 电感单相接地 (b) 0.03 H 电感三相接地



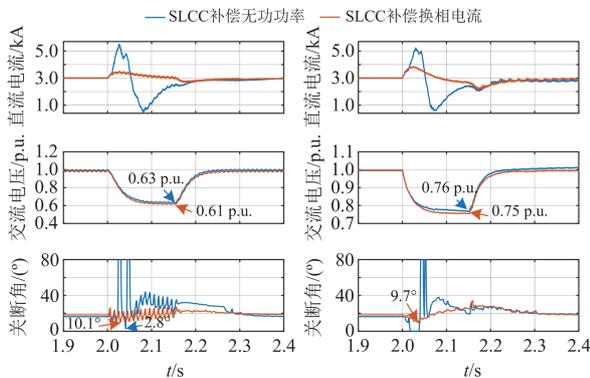
(c) 0.02 H 电感单相接地阀侧电流 (d) 0.03 H 电感三相接地阀侧电流

图 20 交流侧电感接地故障仿真对比

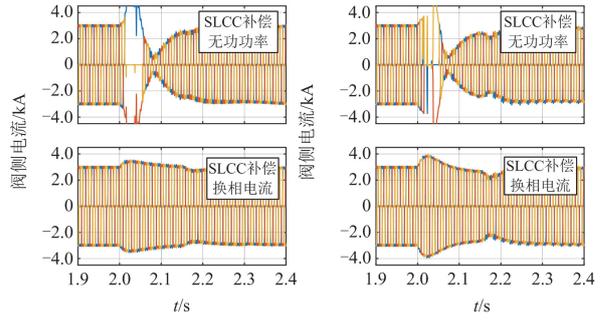
Fig. 20 Simulation comparison of inductive ground fault on AC side

为进一步对比 SLCC 定交流电压策略和本文所提补偿换相电流策略对抑制换相失败的效果，在受端交流系统 2 s 时设置经 0.01 H 电感的单相接地故障和经 0.02 H 电感的三相接地故障，持续 150 ms，仿真结果如图 21、图 22 所示。

由图 21 和图 22 可知，SLCC 通过 STATCOM 补偿无功功率的控制方法在经 0.01 H 电感单相接地故障下，STATCOM 输出电流有效值上升至限幅值 3.7 kA，此时仍然发生了换相失败。而本文所提控制方法在单相接地故障下，STATCOM 输出电流有



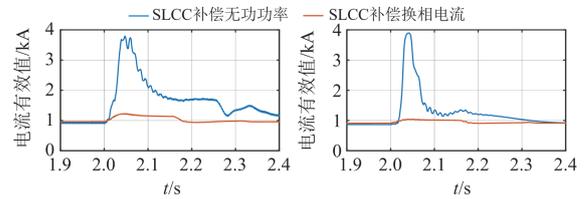
(a) 0.01 H 电感单相接地 (b) 0.02 H 电感三相接地



(c) 0.01 H 电感单相接地阀侧电流 (d) 0.02 H 电感三相接地阀侧电流

图 21 SLCC 不同控制方法下交流侧电感接地故障仿真

Fig. 21 Comparison of AC side inductance grounding fault simulation using different control methods in SLCC



(a) 0.01 H 电感单相接地 (b) 0.02 H 电感三相接地

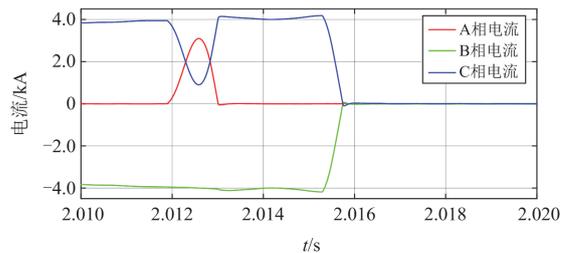
图 22 不同控制方法接地故障 STATCOM 输出电流

Fig. 22 STATCOM output current of grounding fault with different control methods

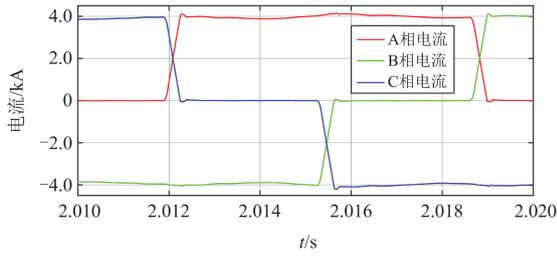
效值仅增加到 1.2 kA，未发生换相失败。类似地，在三相接地故障下，本文所提方法 STATCOM 输出值并未达到限幅值，仍能抵御换相失败。因此，仿真结果表明，本文所提方法能够有效增强 SLCC 的换相失败抑制能力，同时也降低了 STATCOM 功率容量需求。

为分析控制环节延时对本文方法的影响，在经 0.01 H 电感三相接地故障工况下，对比未投入额外比例增益和投入额外比例增益的情况，仿真结果如图 23 所示。

由图 23 仿真结果可知，补偿换相电流期间未投入额外比例增益时 STATCOM 的 dq 轴电流未能跟踪上指令电流，LCC 换相电流上升速度慢，发生换相失败。投入额外比例增益后，STATCOM 的 dq 轴电流能够跟踪指令电流并对换相电流进行补偿，



(a) 未投入额外比例增益



(b) 投入额外比例增益

图 23 投入额外比例增益前后换相电流波形

Fig. 23 Waveform of commutation current before and after adding additional proportional gain

LCC 换相电流迅速上升未发生换相失败。

进一步分析 LCC、SLCC 补偿无功功率和 SLCC 补偿换相电流 3 种方案抵御换相失败的情况, 分别在送端和受端换流站设置不同大小电感的单相接地和三相接地故障, 仿真结果分别如表 5—表 8 所示。

根据表 5—表 8 数据可知, 在送端单相接地故障下, LCC 和 SLCC 均成功抵御换相失败。在送端三相接地故障下, 当接地电感小于 0.01 H 时, 两者均发生换相失败。在受端单相接地和三相接地故障

表 5 送端单相接地故障换相失败情况对比

Table 5 Comparison of single-phase grounding fault commutation failure situations on rectifier side

方案	接地电感/H	0.03	0.02	0.015	0.01	0.005	
LCC	$u/p.u.$	0.77	0.70	0.63	0.53	0.41	
	$\gamma/(^\circ)$	17.2	16.8	16.61	16.10	15.21	
	换相失败	否	否	否	否	否	
SLCC	$u/p.u.$	0.74	0.65	0.62	0.51	0.35	
	补偿无功 功率	$\gamma/(^\circ)$	15.67	15.12	14.77	13.85	13.32
	换相失败	否	否	否	否	否	
SLCC	$u/p.u.$	0.75	0.64	0.61	0.51	0.35	
	补偿换相 电流	$\gamma/(^\circ)$	15.77	15.73	15.56	15.12	14.31
	换相失败	否	否	否	否	否	

表 6 送端三相接地故障换相失败情况对比

Table 6 Comparison of three-phase grounding fault commutation failure situations on rectifier side

方案	接地电感/H	0.03	0.02	0.015	0.01	0.005	
LCC	$u/p.u.$	0.84	0.78	0.72	0.64	0.51	
	$\gamma/(^\circ)$	15.1	13.3	11.1	7.6	3.98	
	换相失败	否	否	否	是	是	
SLCC	$u/p.u.$	0.79	0.72	0.66	0.56	0.41	
	补偿无功 功率	$\gamma/(^\circ)$	13.01	12.95	12.93	12.75	12.61
	换相失败	否	否	否	是	是	
SLCC	$u/p.u.$	0.79	0.77	0.66	0.58	0.40	
	补偿换相 电流	$\gamma/(^\circ)$	13.8	10.49	13.37	13.15	13.42
	换相失败	否	否	否	是	是	

表 7 受端单相接地故障换相失败情况对比

Table 7 Comparison of single-phase grounding fault commutation failure situations on inverter side

方案	接地电感/H	0.05	0.04	0.02	0.01	0.005	
LCC	$u/p.u.$	0.86	0.85	0.74	0.62	0.51	
	$\gamma/(^\circ)$	9.2	0	0	0	0	
	换相失败	否	是	是	是	是	
SLCC	$u/p.u.$	0.87	0.85	0.75	0.63	0.53	
	补偿无功 功率	$\gamma/(^\circ)$	13.85	13.61	11.8	0	0
	换相失败	否	否	否	是	是	
SLCC	$u/p.u.$	0.87	0.85	0.74	0.61	0.52	
	补偿换相 电流	$\gamma/(^\circ)$	14.35	14.0	11.37	10.74	7.49
	换相失败	否	否	否	否	否	

表 8 受端三相接地故障换相失败情况对比

Table 8 Comparison of three-phase grounding fault commutation failure situations on inverter side

方案	接地电感/H	0.05	0.04	0.02	0.01	0.005
LCC	$u/p.u.$	0.88	0.87	0.77	0.64	0.48
	$\gamma/(^\circ)$	12.69	0	0	0	0
	换相失败	否	是	是	是	是
SLCC 补偿 无功功率	$u/p.u.$	0.87	0.84	0.76	0.62	0.51
	$\gamma/(^\circ)$	13.85	13.32	0	0	0
	换相失败	否	否	是	是	是
SLCC 补偿 换相电流	$u/p.u.$	0.89	0.87	0.75	0.64	0.51
	$\gamma/(^\circ)$	13.77	12.79	10.49	9.46	0
	换相失败	否	否	否	否	是

下, SLCC 比 LCC 具有更强的抵御换相失败的能力。当受端发生接地电感小于等于 0.01 H 的单相接地故障和接地电感小于等于 0.02 H 的三相接地故障时, SLCC 补偿无功功率控制方法由于 STATCOM 补偿的无功功率达到容量限制, 无法抵御换相失败。而本文所提控制方法在经 0.01 H 电感的单相和三相接地故障下均未发生换相失败, 且 STATCOM 输出无功功率未达最大容量, 提升了 SLCC 受端换流站抵御换相失败的能力。

5 结论

本文对 SLCC 拓扑结构和换相过程进行分析, 介绍了基本控制策略, 并在此提出了一种基于 STATCOM 补偿换相电流的 SLCC 换相失败抑制策略, 通过仿真分析可知, 本文所提策略能够有效提升受端换流站抵御换相失败的能力, 主要结论如下。

1) SLCC 换相电流由交流电网和 STATCOM 输出电流共同提供, STATCOM 能对换相电流补偿加快换相过程。与 LCC 相比, SLCC 换相时间约为 0.0004 s, 减小了 0.01 s, 换相重叠角更小。

2) 稳态运行时, SLCC 通过 STATCOM 控制同时实现无功补偿和谐波滤除功能, 减小换流站无功补偿和滤波设备的投资成本。

3) 相较于 LCC, SLCC 能利用 STATCOM 补偿无功功率提升交流电压抑制换相失败。然而受限于 STATCOM 补偿容量, 在严重交流故障下仍会发生换相失败。

4) 提出一种基于 STATCOM 补偿换流的换相失败抑制控制方法, 控制 STATCOM 输出电流对 LCC 换相电流进行补偿, 相较于 STATCOM 常规补偿无功功率策略, 该方法能直接增大 LCC 换相电流, 加快换相过程, 同时降低 STATCOM 容量限制, 在交流故障下的换相失败风险进一步降低。

参考文献

- [1] 李娟, 朱龙臻, 俎立峰, 等. 一种抑制后续换相失败的电流偏差控制参数整定方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(4): 235-244.
LI Juan, ZHU Longzhen, ZU Lifeng, et al. A current deviation control parameter tuning method to suppress subsequent commutation failure[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(4): 235-244.
- [2] 刘洪波, 阎禹同, 王曦, 等. 多馈入交直流混联系统小干扰稳定研究综述[J]. 发电技术, 2023, 44(4): 565-575.
LIU Hongbo, YAN Yutong, WANG Xi, et al. A review of small signal stability studies of multi-infeed AC-DC hybrid system[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 565-575.
- [3] 王凯伦, 宋强, 赵彪, 等. 基于虚拟调速控制的大型孤岛新能源基地 LCC 直流送出方案[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(8): 54-65.
WANG Kailun, SONG Qiang, ZHAO Biao, et al. LCC-HVDC transmission scheme for large-scale islanded renewable energy bases based on virtual governor control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(8): 54-65.
- [4] 朱博, 徐攀腾, 崔远卓, 等. 连接无源网络的 LCC-FHMMC 混合直流输电系统送端交流故障穿越控制策略[J]. 高压电器, 2024, 60(3): 151-160.
ZHU Bo, XU Panteng, CUI Yuanzhuo, et al. AC fault ride-through control strategy for LCC-FHMMC hybrid HVDC system with passive network[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 151-160.
- [5] 刘凯, 王永平, 王俊生, 等. 基于 IGCT 抑制换相失败的关键控制策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(15): 160-168.
LIU Kai, WANG Yongping, WANG Junsheng, et al. Key control strategy for suppressing commutation failure based on integrated gate commutated thyristor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(15): 160-168.
- [6] 肖洋, 李志强, 程林, 等. 西北电网集中式调相机 AVC 综合协调控制策略[J]. 发电技术, 2023, 44(2): 270-279.
XIAO Yang, LI Zhiqiang, CHENG Lin, et al. AVC comprehensive coordinated control strategy of centralized condenser in northwest power grid[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(2): 270-279.
- [7] SU Changsheng, YIN Chunya, LI Fengting, et al. A novel recovery strategy to suppress subsequent commutation failure in an LCC-based HVDC[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(1): 38-51.
- [8] GUO Yaxun, TAN Zhanpeng, LI Xiaohua, et al. A hierarchical identification method of commutation failure risk areas in multi-infeed LCC-HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 2093-2105.
- [9] 王玉麟, 李晓华, 李昊, 等. 一种抑制连续换相失败的定关断角加速控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 56-66.
WANG Yulin, LI Xiaohua, LI Hao, et al. A constant extinction angle acceleration control method for suppressing continuous commutation failure[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 56-66.
- [10] 刘海洋, 孙天甲, 杜绍鑫, 等. 新型可控换相换流阀特征建模与短路特性[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(10): 76-83.
LIU Haiyang, SUN Tianjia, DU Zhaoxin, et al. The characteristic modeling and short-circuit characteristics of the novel controllable line commutation valve[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(10): 76-83.
- [11] 章民昊, 刘建锋, 周健, 等. 同步调相机抑制连续换相失败的效果分析[J]. 上海电力大学学报, 2025, 41(1): 13-20.
ZHANG Minhao, LIU Jianfeng, ZHOU Jian, et al. Analysis on the effect of synchronous condenser for continuous commutations failure mitigation[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2025, 41(1): 13-20.
- [12] 朱丽萍, 刘文颖, 邵冲, 等. 基于调相机与 SVC 协调的抑制高压直流送端风机脱网的控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 107-115.
ZHU Liping, LIU Wenyong, SHAO Chong, et al. Control strategy of suppressing wind turbine tripping based on coordination between synchronous condenser and SVC in sending-end network of HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 107-115.
- [13] 周芳, 卿梦琪, 唐飞, 等. 动态无功补偿装置抑制直流换相失败能力影响因素研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(3): 77-83.

- ZHOU Fang, QING Mengqi, TANG Fei, et al. Analysis on factors affecting ability of dynamic reactive power compensation device to eliminate DC commutation failure[J]. *Smart Power*, 2019, 47(3): 77-83.
- [14] 金一丁, 于钊, 李明节, 等. 新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J]. *电网技术*, 2018, 42(7): 2095-2102.
- JIN Yiding, YU Zhao, LI Mingjie, et al. Comparison of new generation synchronous condenser and power electronic reactive-power compensation devices in application in UHV DC/AC grid[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(7): 2095-2102.
- [15] 张一驰, 李志强, 王喆, 等. 基于频域、时域分析的新一代调相机与 STATCOM 对比及适用场景研究[J]. *发电技术*, 2021, 42(1): 69-77.
- ZHANG Yichi, LI Zhiqiang, WANG Zhe, et al. Comparison and applicability of new generation synchronous condenser and STATCOM based on characteristic analysis in frequency and time domains[J]. *Power Generation Technology*, 2021, 42(1): 69-77.
- [16] 吴娜, 赵成勇, 许建中. 储能型 STATCOM 的优化电压支撑控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(1): 145-155.
- WU Na, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong. Optimized voltage support control strategy for energy storage STATCOM[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(1): 145-155.
- [17] 丁瑞, 邓雪凝, 赵成勇, 等. 改进换相过程的 SLCC 拓扑及控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(23): 86-94.
- DING Rui, DENG Xuening, ZHAO Chengyong, et al. SLCC topology and control strategy for an improved commutation process[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(23): 86-94.
- [18] 赵晔君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [19] 李宽, 黄强, 吕学宾, 等. 抑制高压直流系统后续换相失败的定关断角控制改进方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(6): 109-119.
- LI Kuan, HUANG Qiang, LÜ Xuebin, et al. Enhanced extinction angle control for subsequent commutation failure mitigation in HVDC systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(6): 109-119.
- [20] 汪娟娟, 王子民, 禰小聪, 等. 预测型定熄弧角控制及其改进策略[J]. *电网技术*, 2018, 42(12): 3985-3991.
- WANG Juanjuan, WANG Zimin, XUAN Xiacong, et al. Extinction angle control based on predictive calculation and its improvement[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(12): 3985-3991.
- [21] 葛程科. 级联 H 桥 SVG 控制策略研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2022.
- GE Chengke. Research on control strategy of cascaded H-Bridge SVG[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2022.
- [22] PENG F, LAI J. Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1996, 45(1): 293-297.
- [23] 刘晓悦, 马浩珂. 基于混合有源滤波器的准比例谐振控制策略[J]. *计算机仿真*, 2024, 41(1): 123-128.
- LIU Xiaoyue, MA Haoke. Quasi proportional resonance control strategy based on hybrid active filters[J]. *Computer Simulation*, 2024, 41(1): 123-128.
- [24] 王之伟, 黄俊辉, 程亮, 等. “嵌入式”直流技术在省级输电电网中的规划及应用[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(6): 65-74.
- WANG Zhiwei, HUANG Junhui, CHENG Liang, et al. Planning and application of embedded DC transmission technology in provincial transmission power grid[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(6): 65-74.
- [25] 陈明泉. 闽粤联网工程有源滤波器设计方案及其二次控保系统研究[J]. *电气技术*, 2022, 23(8): 95-102.
- CHEN Mingquan. Research on active power filter design scheme and secondary control-protection system of the Fujian-Guangdong interconnection project[J]. *Electrical Engineering*, 2022, 23(8): 95-102.
- [26] 郑睿娜, 汪娟娟, 文兆新, 等. 基于交流故障快速检测的高压直流换相失败抑制方法[J]. *电网技术*, 2022, 46(3): 851-859.
- ZHENG Ruina, WANG Juanjuan, WEN Zhaoxin, et al. A method based on fast fault detection of inverter-side AC system to suppress the commutation failure in HVDC system[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(3): 851-859.

收稿日期: 2025-03-18; 修回日期: 2025-08-08

作者简介:

旷玮(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail:kuangw@scu.edu.cn

江琴(1994—), 女, 通信作者, 博士, 副研究员, 研究方向为电力系统稳定与控制。E-mail:eejqin@scu.edu.cn

(编辑 张颖)