

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240216

## 改进换相过程的 SLCC 拓扑及控制策略

丁瑞<sup>1</sup>, 邓雪凝<sup>1</sup>, 赵成勇<sup>1</sup>, 贾秀芳<sup>1</sup>, 申笑林<sup>2</sup>, 梁晨光<sup>2</sup>, 郭春义<sup>1</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;

2. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102211)

**摘要:** 基于电网换相换流器的高压直流输电系统(line commutated converter based high voltage direct current, LCC-HVDC)可以广泛应用于远距离大容量的电力输送, 但是其交流侧需要安装大量滤波设备和无功补偿装置, 占地面积大且投切不灵活, 制约了该方案的发展。针对该问题, 阀侧并联静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)的多源自适应换相换流器(self-adaption statcom and line commutation converter, SLCC)技术凭借其连续调节特性, 可以实现无功功率的动态补偿。分析了 SLCC 的工作原理和换相过程, 提出了一种兼顾无功补偿和谐波滤除的协调控制策略, 引入无功补偿、谐波补偿、触发角补偿等环节, 对无功功率和谐波电流进行动态跟踪处理。最后在 PSCAD/EMTDC 仿真平台中进行仿真验证。结果表明, 所提控制策略可以实现系统的动态无功补偿和谐波精准滤除, 加速了系统的换相过程, 有效降低了无功消耗和投资成本。

**关键词:** 高压直流输电; 换相过程; SLCC; STATCOM; 动态无功补偿

### SLCC topology and control strategy for an improved commutation process

DING Rui<sup>1</sup>, DENG Xuening<sup>1</sup>, ZHAO Chengyong<sup>1</sup>, JIA Xiufang<sup>1</sup>, SHEN Xiaolin<sup>2</sup>, LIANG Chengguang<sup>2</sup>, GUO Chunyi<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. State Grid Economic and Technological

Research Institute Co., Ltd., Beijing 102211, China)

**Abstract:** Line commutated converter-based high voltage direct current (LCC-HVDC) can be widely used in long-distance large-capacity power transmission, but its AC side requires the installation of a large amount of filtering equipment and reactive power compensation devices. This equipment occupies a large area and is not flexible, restricting the development of this scheme. To address this, self-adaption statcom and line commutation converter (SLCC) technology with a static synchronous compensator (STATCOM) in parallel on the valve side can achieve continuous regulation of reactive power by virtue of its continuous adjustment characteristics. This paper analyses the working principle and commutation process of SLCC, and proposes a coordinated control strategy that combines reactive power compensation and harmonic filtering, introducing reactive power, harmonic, and firing angle compensation and other links to dynamically track and process reactive power and harmonic current. Finally, simulation verification is carried out on the PSCAD/EMTDC platform. The results show that the proposed control strategy can achieve dynamic reactive power compensation and harmonic accurate filtering of the system, accelerate the commutation process, and effectively reduce reactive power consumption and investment cost.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Design and Research of SLCC DC System Adapting to New Energy Transmission" (No. 5200-202356128A-1-1-ZN).

**Key words:** HVDC transmission; commutation process; SLCC; STATCOM; dynamic reactive power compensation

## 0 引言

随着“双碳”目标的提出, 以风能和太阳能

代表的新能源将成为能源发展的主要方向<sup>[1-4]</sup>。基于我国能源与负荷不匹配的实际情况, 电网换相换流器型高压直流输电(line commutated converter based high voltage direct current, LCC-HVDC)系统凭借其远距离、大容量的输电能力, 在能源输送方面发挥着不可替代的作用<sup>[5-8]</sup>, 促进了我国新能源消纳和能源区域互联的发展。但是, LCC 采用半控型器件晶

**基金项目:** 国家电网公司科技项目资助“适应于新能源送出的 SLCC 直流系统设计研究”(5200-202356128A-1-1-ZN); 国家重点研发计划项目资助(2021YFB2400900)

闸管,无自主关断能力,需要依赖电网进行换相;且在电源出力波动情况下,断路器投切频繁将导致无功的突变,进而恶化交流电压质量,威胁系统的安全稳定运行<sup>[9-11]</sup>。同时,LCC中换相重叠角的存在导致其运行时将吸收大量无功功率,系统无功补偿和滤波装置的需求较大(约占换流站总面积的40%),大大增加了换流站的建设成本<sup>[12]</sup>。

国内外学者对换相过程和换流器技术进行了大量研究,换相主要分为电网换相、电容换相和器件换相<sup>[13-17]</sup>。电网换相采用半控型器件晶闸管,需要一定强度的外部电网为其提供换相电压。文献[18]提出了电容换相换流器拓扑,通过提供辅助电压的方式改善系统换相特性,但是串联电容会导致换流阀的绝缘水平提高,故障时过电压更加严重,且在发生换相失败时容易失去自恢复能力<sup>[19]</sup>。文献[20]针对电容换相换流器提出一种时域分段分析谐波电流的计算方法,可以同时高效计算特征谐波和非特征谐波。文献[21]基于电容换相换流器提出了吸收与并联电容换相换流器(absorption and shunt capacitance commutated converter, ASCCC),但是在参数设计不合理时系统容易出现谐振现象。文献[22]提出了改进型并联电容换相换流器(evolutional shunt capacitor commutated converter, ESCCC),后续还可以采用电容投切分组的形式满足不同功率点的无功要求,但是由于并联电容位于换流器阀侧,电容上承受的电压较高,难以应用于实际工程。

器件换相利用全控型器件(如IGBT、GTR)的自关断能力进行换相。基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流输电技术,可以独立控制系统的有功功率和无功功率,无需配备单独的无功补偿装置,输出电压电流谐波含量很低,能够为远距离的孤立负荷供电,但是存在谐振问题,而且受限于器件制造水平,损耗和成本较高,难以兼顾经济性和技术性的要求<sup>[23-25]</sup>。文献[26]研究了基于晶闸管的混合型多电平变换器,由半桥子模块和反并联晶闸管阀组成,具备直流故障阻断能力。文献[27-28]提出了一种具备可控关断能力的电网换相换流器,基于全控和半控混联的思路设计,提出了IGBT串联均衡的控制算法,研究相应的耦合控制策略,目前具备可控关断能力的电网换相换流器已经应用于实际工程。

多源自适应换相换流器(self-adaption statcom and line commutation converter, SLCC)在换流变压器和换流阀之间并联静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM),具备动态的无功补偿能

力,在电源出力波动或系统故障时可以稳定维持交流母线电压<sup>[29]</sup>。该方案具有广阔的工程应用前景,但是针对SLCC-HVDC系统换相特性的研究较少,仍有较大的研究空间。

本文在以上基础上分析了SLCC的拓扑结构和工作原理,建立了SLCC的数学模型,研究换相特性,最后提出适用于新型拓扑的闭环解耦单位功率因数控制策略,而本文控制策略的合理性和有效性也在PSCAD/EMTDC仿真平台中得到了验证。

## 1 SLCC多源自适应换相换流器

图1为12脉动SLCC拓扑结构示意图,其中级联H桥STATCOM并联在换流变压器和换流阀之间,换流阀采用的半导体开关器件均为晶闸管。12脉动SLCC由2个6脉动换流器在交流侧并联、直流侧串联。阀交流出口侧并联级联H桥STATCOM,其每相由 $N$ 个H桥子模块串联而成,通过增加级联子模块数来实现高压大功率输出。H桥子模块由一个四臂的换流桥和一个电容器构成,其中每个桥臂由自换相的IGBT开关和二极管反并联组成。

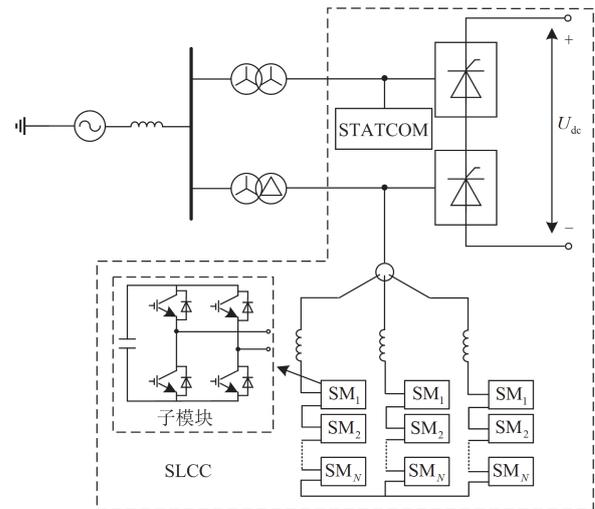


图1 12脉动SLCC拓扑结构

Fig. 1 Topology of 12-pulse SLCC

## 2 换相特性分析

### 2.1 换相过程模型建立

为简化分析,SLCC稳态电路如图2(a)所示。STATCOM具备电压源特性,因此可以将STATCOM等效为电压源,通过电抗连接至换流站的阀侧;将交流系统等效为电压源及等效电抗的串联结构,与STATCOM构成并联结构。图2(a)中: $X_{L1}$ 为换流变电抗及电源内抗之和; $X_{L2}$ 为STATCOM连接到阀

侧的电抗； $U_{L1}$  为换流变及电源内抗上的电压降； $U_{L2}$  为 STATCOM 连接的电抗电压降； $V_{pec}$  为并网点电压； $V_{grid}$  为电网电压值； $V_{statcom}$  为 STATCOM 等效的电压值。

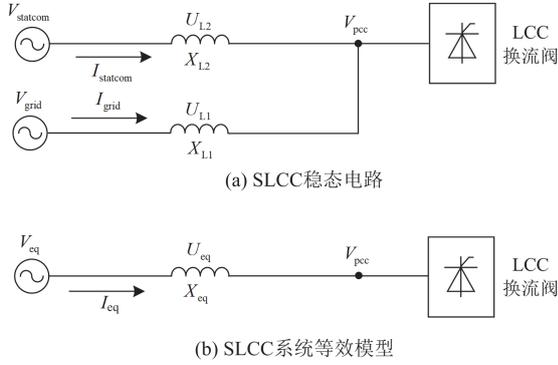


图 2 SLCC 等效模型

Fig. 2 SLCC equivalent model

对图 2(a)进行化简，可以得到如图 2(b)所示的等效模型，其中  $X_{eq}$  为等效阻抗， $V_{eq}$  为等效电源，表达式分别为

$$\begin{cases} X_{eq} = \frac{X_{L1} \times X_{L2}}{X_{L1} + X_{L2}} \\ \dot{V}_{eq} = \frac{\dot{V}_{grid} X_{L2} + \dot{V}_{statcom} X_{L1}}{X_{L1} + X_{L2}} \end{cases} \quad (1)$$

由于 SLCC 拓扑是在换流阀侧出口的地方并联 STATCOM，阀出口侧的电流在换相过程中不能突变，换相过程不会瞬间完成，因此在系统运行的过程中一定会有换相重叠角的存在，需要研究并联的 STATCOM 对换相重叠角产生的影响。SLCC-HVDC 系统中换相电路示意图如图 3 所示。

将系统如图 3 进行等效，高阀组中晶闸管  $V_{11}$  到  $V_{31}$  的换相过程等效示意图如图 4 所示，以下将针对此换相过程进行分析。

图 3 中： $e_a$ 、 $e_b$  和  $e_c$  表示系统三相瞬时相电压； $v_a$ 、 $v_b$  和  $v_c$  表示经过换流变压器之后的三相交流电压； $U_{dc}$  表示直流电压； $I_{dc}$  表示直流电流。

图 4 中： $V_{eqa}$ 、 $V_{eqb}$  和  $V_{eqc}$  表示系统加上换流变压器和 STATCOM 等效后的三相交流电压； $X_{Leq}$  表示等效后的阻抗之和； $i_a$ 、 $i_b$  和  $i_c$  分别表示经过晶闸管  $V_{11}$ 、 $V_{31}$  和  $V_{21}$  的瞬时电流； $i_{sc1}$  和  $i_{sc2}$  分别表示换相前、后电路流过的电流。

换相前，晶闸管  $V_{31}$  关断，直流电流流过  $V_{11}$  和  $V_{21}$ ，此时  $v_a = U_{dc}$ ， $v_c = 0.5U_{dc}$ 。当  $V_{31}$  收到触发信

号并形成通路时， $v_a = v_b = U_{dc}$ ， $v_c = 0.5U_{dc}$ ，由于支路上存在阻抗，对电流有阻滞作用， $i_a$  和  $i_c$  不会突变，因此存在换相电流，而换相重叠角的大小与支路电感有关。

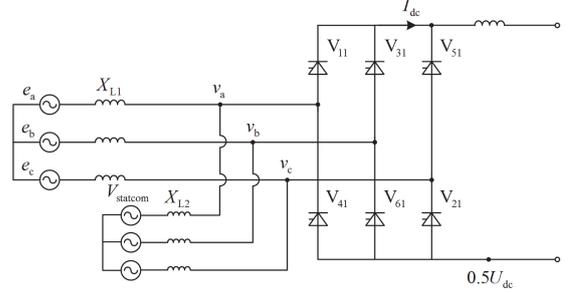


图 3 SLCC 从  $V_{11}$  到  $V_{31}$  的换相电路

Fig. 3 Commutation circuit of SLCC from  $V_{11}$  to  $V_{31}$

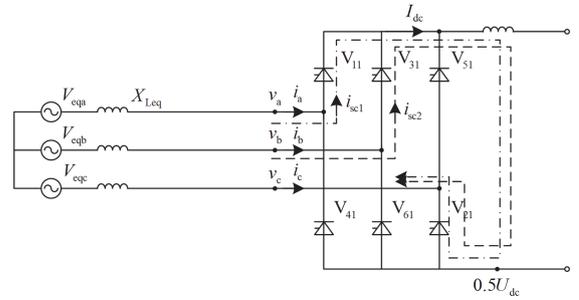


图 4 SLCC 从  $V_{11}$  到  $V_{31}$  的换相过程等效示意图

Fig. 4 Equivalent diagram of the commutation process from  $V_{11}$  to  $V_{31}$  of SLCC

## 2.2 换相过程分析

本部分研究了系统参数对换相重叠角大小的影响，有利于进行系统参数的设置。在换相过程中，三相交流电压  $V_{eqa}$ 、 $V_{eqb}$  和  $V_{eqc}$  分别为

$$\begin{cases} V_{eqa} = V_m \sin(\omega t + 30^\circ) \\ V_{eqb} = V_m \sin(\omega t - 90^\circ) \\ V_{eqc} = V_m \sin(\omega t + 150^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $V_m$  为经过换流变压器后的交流母线电压幅值； $\omega$  为交流系统角频率。

设换相电流为  $i_{sc}$ ，图 4 换相过程中各电流满足以下关系：

$$\begin{cases} I_{dc} - i_{sc} = i_a \\ i_c = -I_{dc} \\ i_b = i_{sc} \end{cases} \quad (3)$$

由基尔霍夫定律可得

$$X_{Leq} \frac{di_b}{dt} - X_{Leq} \frac{di_a}{dt} = V_{eqb} - V_{eqa} = V_{eqba} \quad (4)$$

式中,  $V_{eqba}$  为  $V_{eqb}$  和  $V_{eqa}$  之间的电压差。

将式(3)代入式(4), 考虑直流电流  $I_{dc}$  恒定不变, 将式(4)整理为

$$\frac{di_{sc}}{dt} = \frac{V_{eqba}}{2X_{Leq}} \quad (5)$$

设  $V_{eqba} = \sqrt{3}V_m \sin \omega t$ , 初始条件  $i_{sc}(\alpha) = 0$ ,  $\alpha$  为触发角。

则可求出换相电流为

$$i_{sc} = \frac{\sqrt{3}V_m}{2\omega X_{Leq}} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad (6)$$

换相结束时, 即  $\omega t = \alpha + \mu$  ( $\mu$  为换相角)时,

$i_{sc} = I_{dc}$ , 代入式(6)可得

$$\begin{cases} I_{sc} = \frac{\sqrt{3}V_m}{2\omega X_{Leq}} \\ \cos(\alpha + \mu) = \cos \alpha - \frac{I_{dc}}{I_{sc}} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $I_{sc}$  为换相电流幅值。因此, SLCC 系统中换相角  $\mu$  的计算公式可以用式(8)表示。

$$\mu = \arccos \left( \cos \alpha - \frac{2\omega X_{Leq} I_{dc}}{\sqrt{3}V_m} \right) - \alpha \quad (8)$$

式(8)中的  $V_m$  和  $X_{Leq}$  表达式为

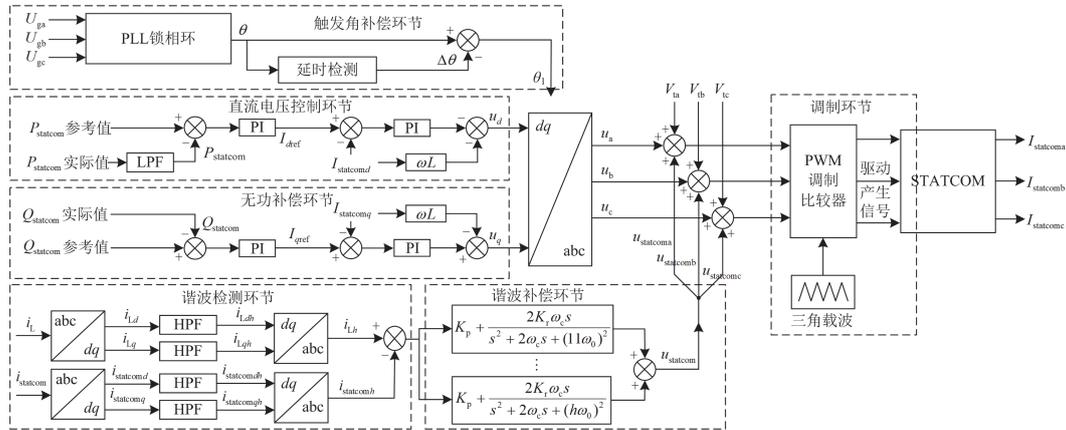


图 5 总体控制策略示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the overall control strategy

### 3.1 谐波检测和补偿控制策略

HPF 和 LPF 代表高通滤波器和低通滤波器。谐波电流检测环节采用基于瞬时无功率理论的  $d-q$  检测法。首先检测三相电网电流  $i_L$ , 经过采样频率为  $\omega_h$  的  $abc-dq$  旋转坐标系, 再进行滤波处理, 得到特定次谐波在  $h$  次旋转坐标系下的直流量  $i_{Ldh}$ , 变换矩阵如式(10)所示。

$$\begin{cases} V_m = \frac{E_g \times X_{statcom} + E_{statcom} \times X_g}{X_{statcom} + X_g} \\ X_{Leq} = \frac{X_{statcom} \times X_g}{X_{statcom} + X_g} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $E_g$  为电网侧电压有效值;  $E_{statcom}$  为 STATCOM 等效电压有效值;  $X_g$  表示换流变电抗及系统内抗之和;  $X_{statcom}$  表示 STATCOM 连接到换流阀侧的电抗。

由于 STATCOM 并联在换流阀和换流变压器之间, 因此  $E_{statcom} < V_m < E_g$ , 且  $X_g \gg X_{statcom}$ , 对换相电压的影响可以忽略不计。根据式(9)可知,  $X_{Leq} < X_{statcom}$ , 因此 SLCC 系统换相过程中的换相电抗减小。综上, 通过 STATCOM 和电源并联, 可以加快系统换相过程。

### 3 运行控制策略

针对 SLCC-HVDC 系统, 提出一种兼顾滤波和动态无功补偿的协同控制策略。SLCC-HVDC 系统的控制结构图如图 5 所示。该控制系统主要有 5 个环节: 无功补偿环节、谐波检测和谐波补偿环节、直流电压控制环节、调制环节、触发角补偿环节。

$$T_{abc-dq} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos 2\pi\omega_h t & \cos \left( 2\pi\omega_h t - \frac{2}{3}\pi \right) & \cos \left( 2\pi\omega_h t + \frac{2}{3}\pi \right) \\ -\sin 2\pi\omega_h t & -\sin \left( 2\pi\omega_h t - \frac{2}{3}\pi \right) & -\sin \left( 2\pi\omega_h t + \frac{2}{3}\pi \right) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中,  $\omega_h = hf$ ,  $\omega_h$  为  $h$  次谐波的频率,  $f$  为基波频率。

通过  $dq-abc$  坐标变换将  $h$  次谐波在  $h$  次旋转坐

标系下的直流分量反变换即可得到需要检测的三相  $h$  次谐波分量  $i_{Lh}$ 。

采用多个并联的准比例谐振控制器<sup>[30-31]</sup>, 可实现多次谐波电流控制, 例如针对性地滤除 11、13 次特征谐波, 使特征谐波在变压器高压侧相互抵消, 不流入电网, 其余次谐波含量基本为 0。其中反馈电流  $i_{\text{statcom}h}$  和指令电流  $i_{Lh}$  均为谐波分量。动态无功补偿环节通过调节  $d$  轴电压, 使 STATCOM 产生相应的基波电压来实现。

但是在实际控制过程中, 由于采样周期和控制环节的延迟, 会导致谐波补偿电流相位滞后实际测量的谐波电流, 无法达到精准补偿, 影响最终谐波抑制的效果, 因此在原有控制策略上, 增加了触发角补偿环节来补偿相位的滞后。

在 SLCC-HVDC 系统中, 由于所采用的是 12 脉动换流阀, 特征谐波次数为  $12k \pm 1$  次, 所以针对并联在阀侧的 STATCOM, 只需要考虑对 11、13 次谐波电流进行检测和补偿。

为简化分析, 以单相为例, SLCC 的等效电路如图 6 所示, 直流换流站等效为谐波电流源  $i_L$ ;  $Z_g$  为系统侧和变压器的等效阻抗之和;  $u_g$  为电网电压; STATCOM 等效为可控电压源  $u_{\text{statcom}}$ ;  $Z_{\text{statcom}}$  为换流变压器阀侧与 STATCOM 之间的等效阻抗;  $i_{\text{statcom}}$  为 STATCOM 输出电流, 变量加下标 1 和  $h$  分别表示该量的基波和  $h$  次谐波分量。

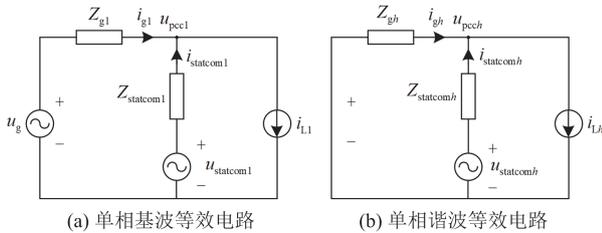


图 6 SLCC 单相等效电路

Fig. 6 Single-phase equivalent circuit of SLCC

根据基尔霍夫定律, 由图 6 可得相量形式关系式为

$$\begin{cases} -\dot{U}_g + Z_{gh}\dot{i}_{gh} - Z_{\text{statcom}h}\dot{i}_{\text{statcom}h} + \dot{U}_{\text{statcom}h} = 0 \\ \dot{i}_{gh} = \dot{i}_{Lh} - \dot{i}_{\text{statcom}h} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\dot{U}_g$ 、 $\dot{i}_{gh}$ 、 $\dot{U}_{\text{statcom}h}$ 、 $\dot{i}_{\text{statcom}h}$ 、 $\dot{i}_{Lh}$  分别是  $u_g$ 、 $i_{gh}$ 、 $u_{\text{statcom}h}$ 、 $i_{\text{statcom}h}$ 、 $i_{Lh}$  的相量形式。

设 STATCOM 输出电压和阀侧负载电流与 STATCOM 输出电流差值之间的传递函数为  $G(s)$ , 结合式(11)和图 5 可得复频域表达式为

$$I_{\text{statcom}h}(s) = \frac{Z_{gh} + G(s)}{Z_{gh} + Z_{\text{statcom}h} + G(s)} I_{Lh}(s) \quad (12)$$

式中,  $I_{\text{statcom}h}(s)$ 、 $I_{Lh}(s)$  分别是  $i_{\text{statcom}h}$ 、 $i_{Lh}$  的频域表达式。

由式(12)可知, 当  $G(s)$  足够大, 即可使  $i_{\text{statcom}h}$  近似等于  $i_{Lh}$ , 从而使 STATCOM 起到补偿换流站谐波电流的作用。

考虑电网频率波动对谐振控制器的影响, 为了提高控制系统稳定性, 电流控制器采用准比例(quasi proportional resonance, QPR)控制<sup>[30,32]</sup>, 其传递函数为

$$G(s) = K_p + \frac{2K_r\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (h\omega_0)^2} \quad (13)$$

式中:  $K_p$  为比例系数;  $K_r$  为积分系数;  $\omega_0$  为基波角频率;  $\omega_c$  为截止频率。

电流参考值和测量后经过调制生成的电流相减后经过多个并联的准并联控制器叠加, 从而实现 11、13 次谐波电流的准确滤除。

### 3.2 无功自补偿控制策略

LCC-HVDC 系统的整流侧采用定直流电流控制, 将实际电流与电流参考值作差, 经过控制环节生成触发角, 控制直流输电系统的稳态运行电流, 同时控制系统直流线路上传输的有功功率。

STATCOM 的有功和无功控制原理为通过控制 STATCOM 的输出电压  $u_d$ 、 $u_q$  来控制基波有功和无功电流, 即在 STATCOM 的调制波电压上叠加一个  $d$ 、 $q$  轴基波电压分量, 从而控制 STATCOM 输入或输出的无功功率, 并维持其输出的有功功率为 0。

利用电压同步系统(voltage synchronization system, VSS)将电网电压  $U_g$  提取到以跟踪相位  $\theta$  为基准的  $dq$  坐标系下, 并针对实际仿真中存在的相位延迟进行  $\Delta\theta$  的补偿, 生成最终  $dq$  变换的参考相位  $\theta_1$ 。STATCOM 控制采用  $dq$  轴电压电流双环控制策略, 将控制量转换到  $dq$  坐标系下。

有功控制环节构成控制结构的  $d$  轴部分, 目标是维持直流侧电容电压的稳定, 如果直流侧电压有较大的波动, 会严重影响振荡抑制效果并降低 STATCOM 的运行稳定性。无功控制环节构成  $q$  轴部分, 输出需要的无功功率以维持 pcc 点处电压的稳定。将检测到的有功功率和无功功率的参考值  $P_{\text{statcom}}$  和  $Q_{\text{statcom}}$  与实际值相比较, 作差并经过 PI 环节生成  $dq$  轴电流参考值  $I_{dref}$  和  $I_{qref}$ , 再通过电流内环控制, 输出  $u_d$  和  $u_q$ , 作为基波的电压分量, 与谐波补偿环节产生的  $u_{\text{statcom}}$  和换流器阀侧电压  $V_l$  叠加, 将叠加电压之和输入 PWM 调制比较器中, 用

于产生驱动信号, 通过控制 STATCOM 每个模块中器件的开断输出无功补偿和谐波滤除的电流  $I_{\text{statcom}}$ 。

#### 4 仿真验证

为了验证所提 SLCC 自适应换相换流器参数设计和控制策略的可行性, 本文在 PSCAD/EMTDC 中搭建了仿真模型, 系统参数如表 1 所示。系统额定直流电流为 2 kA, 额定直流电压为 500 kV, 传输有功功率 1000 MW。

表 1 SLCC-HVDC 系统参数

Table 1 System parameters of SLCC-HVDC

参数	数值
交流母线电压/kV	525
额定直流电压/kV	500
额定直流电流/kA	2
换流变压器变比	525/175
换流变压器漏抗/p.u.	0.18
换流变压器容量/MVA	603
STATCOM 子模块数量	92
STATCOM 串联电感/mH	10
STATCOM 直流侧电容/ $\mu\text{F}$	8000

##### 4.1 滤波效果

加入 STATCOM 前的 LCC-HVDC 网侧三相交流电流波形图如图 7 所示。加入 STATCOM 后的 SLCC 模型的网侧三相交流电流波形图如图 8 所示。

针对加入 STATCOM 之前的 LCC-HVDC 模型, 电网电流(以 a 相为例)的总谐波畸变率为 7.82%。加

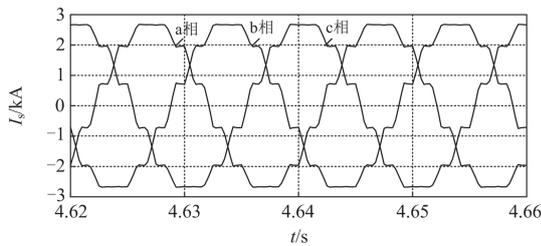


图 7 加入 STATCOM 前的网侧三相交流电流

Fig. 7 Grid-side three-phase AC current before adding STATCOM

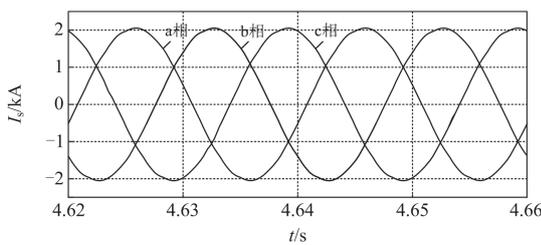


图 8 加入 STATCOM 后的网侧三相交流电流

Fig. 8 Grid-side three-phase AC current after adding STATCOM

入 STATCOM 之后, STATCOM 针对 12 脉动换流器的 11、13 次谐波进行了补偿, 电网电流(以 a 相为例)的总谐波畸变率下降至 0.86%。电流中 11 次谐波含有率从 6.37%下降至 0.5%, 13 次谐波含有率从 4.5%下降至 0.34%。

##### 4.2 无功补偿效果

传统 LCC-HVDC 系统中需要在交流母线侧安装无功补偿装置对系统进行一定的无功补偿。在 SLCC-HVDC 系统的稳态情况下, 直流线路上传输的有功功率为 1000 MW, 系统侧向换流站侧提供的无功功率基本为 0, 未并联滤波和无功补偿装置, 换流站消耗无功功率全部由并联的 STATCOM 提供, 交流侧传输的无功功率如图 9 所示, 可见 SLCC 系统中的 STATCOM 具备补偿系统无功消耗的能力。

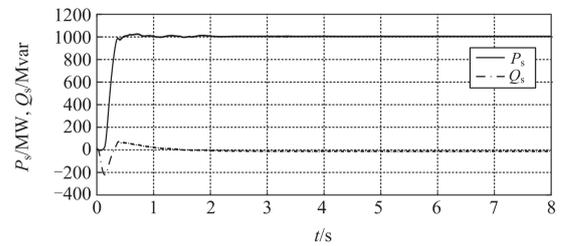
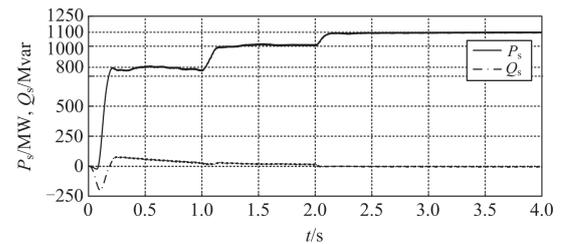


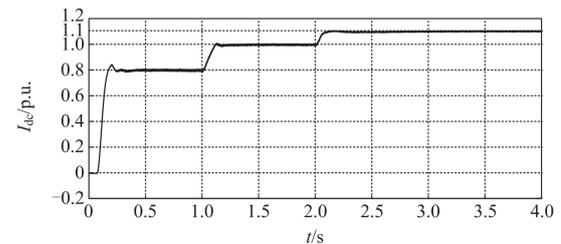
图 9 交流侧传输的有功功率和无功功率

Fig. 9 Active/reactive power transferred on the AC side

SLCC 系统模型的交流侧有功功率和无功率波形图如图 10 所示, 1 s 之前, 有功功率维持在 800 MW, 1 s 时, 有功功率跃升至 1000 MW, 2 s 时, 有功功率跃升至 1100 MW。



(a) 交流侧有功功率和无功功率波形图



(b) 直流电流波形图

图 10 功率阶跃状态下核心波形图

Fig. 10 Core waveforms in power step state

系统的直流电流由 0.8 p.u.变化到 1 p.u.再到 1.1 p.u.,如图 10 所示,交流侧无功功率在短暂变化后基本保持为 0,STATCOM 能够快速跟踪系统无功变化,具备一定的动态无功补偿能力。

#### 4.3 换相过程变化分析

并联 STATCOM 前后的 LCC-HVDC 系统的换相过程阀电流波形如图 11 所示。

阀电流 1 是未并联 STATCOM 的 LCC-HVDC 系统中换相时的桥臂电流,阀电流 2 是 SLCC 模型系统换相中的桥臂电流。将两个模型的阀电流置于同一个时间坐标轴,在时间尺度上,阀电流 1 和 2 的换相过程相差了 0.0005 s,换算成角度是  $9^\circ$ ,LCC-HVDC 模型的换相重叠角为  $27^\circ$ ,SLCC 模型的换相重叠角下降至  $18^\circ$ 。由此可见,在采用 SLCC 换流技术之后,系统在换相中的等效电抗减小,换相时间缩短,系统的无功消耗降低。

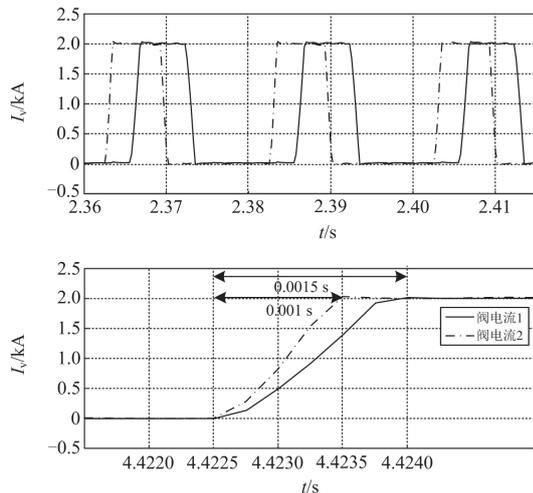


图 11 换相过程阀电流波形图

Fig. 11 Waveform of valve current during commutation

#### 4.4 经济性分析

传统直流输电中需要在交流网侧配备大量的无功补偿和滤波装置,并联的 STATCOM 兼具无功补偿和谐波滤除的效果,如果直接将大容量 STATCOM 并联在交流母线侧,以 525 kV 系统为例,工程中 STATCOM 级联子模块额定电压取 2.25 kV,考虑 15% 的裕度,单相需要级联 274 个子模块。若将 STATCOM 配置在换流阀和换流变压器之间,连接在变压器的低压侧,单相只需要级联 92 个子模块,减少了成本和占地面积。对于特高压系统,STATCOM 通过升压变压器连接到系统的交流高压侧,该方案需要增加体积庞大的耦合变压器,同时变压器绝缘水平和电气应力都较高,变压器的运行和维护成本

较高。

与此同时,随着目前特高压直流工程的广泛建设,系统交流电压等级也随之提升,在目前的设备容量制造水平下,传统直流无功补偿容量占传输功率的 40%~60%,考虑运行损耗等问题,网侧的无功补偿和滤波装置占据总成本的比例也不断上升,而 SLCC-HVDC 系统不需要在交流侧添加无功补偿和滤波设备,因此可以大幅度节约这方面的成本。同时,在换流站的阀侧并联 STATCOM,将直流输电系统的换相过程缩短了三分之一,有效降低了换流站整体的无功消耗。SLCC 方案总体来说较为经济可靠。

## 5 结论

SLCC 具有动态无功补偿和滤波的优势,能够有效解决 LCC-HVDC 中存在的需要在交流侧配置大量无功补偿和滤波装置的问题。根据本文提出的 SLCC 系统的控制策略,并且在 PSCAD/EMTDC 平台进行仿真分析验证,可以得出以下结论:

1) 本文研究的 SLCC 系统经过合理的参数设计,系统的换相时间较传统 LCC-HVDC 模型减少了三分之一,降低了系统在换相过程中的无功消耗。

2) 采用的控制策略使得 STATCOM 可以实现滤波的功能,跟踪需要检测的谐波次数,并针对特定次谐波进行补偿,提高了系统的滤波效果。

3) 采用的控制策略利用 STATCOM 的无功调节能力稳定送端交流母线电压,交流侧无需额外的无功补偿装置,提高了系统的经济性。

## 参考文献

- [1] 耿新, 马文恒, 武琼, 等. 新能源大规模并网环境下变电站防孤岛技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 161-171.  
GENG Xin, MA Wenheng, WU Qiong, et al. Islanding prevention technology for substations in the context of large-scale grid connection of new energy[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 161-171.
- [2] 程静, 苏乐, 岳雷. 双馈风电并网系统的宽频振荡机理分析与抑制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 1-13.  
CHENG Jing, SU Le, YUE Lei. Mechanism analysis and suppression of broadband oscillation in a DFIG wind power grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 1-13.
- [3] 苏步芸, 王诗超. 新型电力系统背景下新能源送出合理消纳率研究[J]. 南方能源建设, 2023, 10(6): 43-50.  
SU Buyun, WANG Shichao. Research on reasonable consumption rate of new energy transmission under the new power system[J]. Southern Energy Construction,

- 2023, 10(6): 43-50.
- [4] 李宁, 齐尚敏, 刘海洋, 等. 基于机组出力特征解析的风光储联合规划[J]. 热力发电, 2022, 51(8): 91-98.  
LI Ning, QI Shangmin, LIU Haiyang, et al. Wind power-photovoltaic-energy storage joint planning based on unit output characteristic analysis[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(8): 91-98.
- [5] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [6] 唐西胜, 李伟, 沈晓东. 面向新型电力系统的储能规划方法研究进展及展望[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(9): 178-191.  
TANG Xisheng, LI Wei, SHEN Xiaodong. Research progress and prospect of energy storage planning method for new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(9): 178-191.
- [7] 罗美玲, 郑涛, 潘志远, 等. 基于选相投旁通对的 LCC-HVDC 系统逆变侧换流变故障性涌流主动抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 158-164.  
LUO Meiling, ZHENG Tao, PAN Zhiyuan, et al. Faulty-phase bypass-pair-based mitigation strategy for fault-induced inrush currents in LCC-HVDC inverter-side converter transformers[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 158-164.
- [8] 李佳, 夏勇军, 姚伟, 等. 渝鄂背靠背柔直和龙政直流的附加频率协调控制[J]. 南方电网技术, 2023, 17(5): 134-144.  
LI Jia, XIA Yongjun, YAO Wei, et al. Additional frequency coordinated control for Chongqing-Hubei back to back VSC-HVDC and Longquan-Zhengping LCC-HVDC[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(5): 134-144.
- [9] HONG Zeqi, EBRAHIMI S, XU Yin, et al. Average-value modeling of line-commutated inverter systems with commutation failure[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(4): 2805-2817.
- [10] 韩璐, 尹纯亚, 戴晨, 等. 高比例新能源送端系统暂态电压运行风险分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 23-34.  
HAN Lu, YIN Chunya, DAI Chen, et al. Transient voltage operational risk of a high-proportion new energy sending system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 23-34.
- [11] 高本锋, 王刚, 刘毅, 等. LCC-HVDC 送端电网等值方案研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(15): 3250-3263, 3271.  
GAO Benfeng, WANG Gang, LIU Yi, et al. Study on equivalence method of AC system in sending-end of LCC-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(15): 3250-3263, 3271.
- [12] 韩民晓, 文俊, 徐永海. 高压直流输电原理与运行[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [13] VOBECKY J. On the commutation of thyristors for high-voltage direct current transmission (HVDC)[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2024, 71(1): 715-719.
- [14] 海正刚, 郭春义, 展瑞琦, 等. 兼具换相电压补偿和直流电流抑制能力的电网换相换流器拓扑[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(3): 147-155.  
HAI Zhenggang, GUO Chunyi, ZHAN Ruiqi, et al. Topology of line commutated converter with capability of commutation voltage compensation and DC current suppression[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 147-155.
- [15] 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): 1053-1069.  
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): 1053-1069.
- [16] 李永琪, 陈代忠, 王顺亮, 等. 基于简化开关函数的电网换相换流器直流侧简化阻抗建模方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(5): 73-79.  
LI Yongqi, CHEN Daizhong, WANG Shunliang, et al. Modeling method for DC side simplified impedance of line commutated converter based on simplified switching function[J]. Smart Power, 2023, 51(5): 73-79.
- [17] 高凯, 屈海涛, 任茂鑫, 等. 基于可控电压源的高压直流输电换相失败抑制技术[J]. 高压电器, 2023, 59(1): 49-57.  
GAO Kai, QU Haitao, REN Maoxin, et al. Commutation failure suppression technology for HVDC transmission based on controlled voltage source[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(1): 49-57.
- [18] 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.
- [19] GOMES S, MARTINS N, JONSSON T, et al. Modeling capacitor commutated converters in power system stability studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(2): 371-377.
- [20] YAN Ming, ZHANG Zheren, XU Zheng. A time-domain piecewise analytical AC harmonic current calculation method suitable for capacitor commutated converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(2): 785-796.
- [21] 张志文, 雷诗婕, 翟承达, 等. 高压直流输电系统吸收与并联电容换相换流器特性分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊 2): 684-691.  
ZHANG Zhiwen, LEI Shijie, ZHAI Chengda, et al. The

- characteristic analysis of HVDC system with absorption and shunt capacitance commutated converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S2): 684-691.
- [22] 夏嘉航, 王晨欣, 展瑞琦, 等. 考虑谐振特性和无功特性的改进型并联电容换相换流器[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(2): 155-162.  
XIA Jiahang, WANG Chenxin, ZHAN Ruiqi, et al. Evolutional shunt capacitor commutated converter considering characteristics of resonance and reactive power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(2): 155-162.
- [23] 于吉, 尹项根, 赖锦木, 等. 电网不对称故障下 MMC 自适应相功率均衡控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 1-12.  
YU Ji, YIN Xianggen, LAI Jinmu, et al. Adaptive leg-balancing control strategy of an MMC in an asymmetric AC grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 1-12.
- [24] 饶宏, 周月宾, 李巍巍, 等. 柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 1-11.  
RAO Hong, ZHOU Yuebin, LI Weiwei, et al. Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 1-11.
- [25] 唐欣, 黄晟, 潘一彬, 等. 直流故障下基于交流侧馈能的 MMC 换流站主动限流策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 56-64.  
TANG Xin, HUANG Sheng, PAN Yibin, et al. Active current limiting strategy of an MMC converter station based on AC side energy feedback under a DC fault[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 56-64.
- [26] ABDELAZIZ Y N, AHMED K H, WILLIAMS B W. New hybrid thyristor-based multilevel converter with DC fault blocking capability, for HVDC applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(1): 911-923.
- [27] 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): 1940-1950.  
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): 1940-1950.
- [28] 连攀杰, 庞博涵, 刘文焯, 等. 新型可控电网换相换流器故障特性及控制优化研究[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-12[2024-04-18]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.232010>.
- LIAN Panjie, PANG Bohan, LIU Wenzhuo, et al. Research on fault characteristics and control optimization of novel controllable line commutated converter[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-12[2024-04-18]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.232010>.
- [29] 马为民, 王玲, 李明, 等. 新型电力系统中的特高压直流输电 SLCC 换流技术[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4941-4948.  
MA Weimin, WANG Ling, LI Ming, et al. SLCC converter technology of UHVDC transmission in new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4941-4948.
- [30] 李双健, 杜夏冰, 贾秀芳, 等. 一种应用于 LCC 高压直流输电的级联 H 桥混合型有源滤波器[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1409-1416.  
LI Shuangjian, DU Xiabing, JIA Xiufang, et al. A cascaded H-bridge hybrid active power filter applied to LCC-HVDC[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1409-1416.
- [31] 黄俊滔, 杨苓. 基于粒子群算法的光储微电网谐波电流抑制参数寻优策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(7): 44-50.  
HUANG Juntao, YANG Ling. Parameter group optimization strategy to suppress harmonic current of PV-storage microgrid based on PSO algorithm[J]. Smart Power, 2023, 51(7): 44-50.
- [32] 张凯, 谢源, 刘浩, 等. 基于准比例谐振双闭环控制的电网模拟器逆变侧设计[J]. 电测与仪表, 2022, 59(12): 137-143.  
ZHANG Kai, XIE Yuan, LIU Hao, et al. Design of inverter side of power grid simulator based on quasi-proportional resonant double closed-loop control[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(12): 137-143.

收稿日期: 2024-02-27; 修回日期: 2024-05-23

作者简介:

丁瑞(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电; E-mail: dingr00@163.com

邓雪凝(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电; E-mail: 1147968218@qq.com

赵成勇(1964—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为直流输电。E-mail: chengyongzhao2@163.com

(编辑 周金梅)