

# SVG配置容量对LCC换相失败抵御能力 仿真研究

李海烽<sup>1</sup>, 陈斌<sup>1</sup>, 陈晋<sup>1</sup>, 胡曦文<sup>1</sup>, 刘又宾<sup>2</sup>

(1. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 南京工程学院 电气工程学院, 江苏 南京 211167)

**摘要:** 基于电网换相换流器的高压直流输电(LCC-HVDC)是当下高压直流输电的重要技术形式。由于换流阀由半控型器件晶闸管构成, 逆变侧换流站换相失败故障成为影响LCC正常安全运行的关键问题。配置静态无功发生器(SVG)进行无功补偿能够有效提升换流站换相失败抵御能力。从机理上探讨了SVG无功补偿对LCC换相失败故障的影响, 并进行了仿真验证。首先, 建立LCC数学模型并分析换相失败现象的产生机理; 其次, 分析了SVG无功补偿对换相失败过程的影响; 最后, 在Simulink中搭建模型进行了仿真验证。

**关键词:** 基于电网换相换流器的高压直流输电; 换相失败; 无功补偿; 静态无功发生器

**中图分类号:** TM28    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd26121

## Simulation Study on the Ability of SVG Configuration Capacity to Resist LCC Commutation Failure

LI Haifeng<sup>1</sup>, CHEN Bin<sup>1</sup>, CHEN Jin<sup>1</sup>, HU Xiwen<sup>1</sup>, LIU Youbin<sup>2</sup>

(1. China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co., Ltd.,

Nanjing 211102, Jiangsu, China; 2. School of Electric Power Engineering,

Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, Jiangsu, China)

**Abstract:** Line commutated capacitor high-voltage direct current (LCC-HVDC) is an important technical form of high-voltage direct current transmission. Since the converter valve was composed of semi-controlled device thyristors, the commutation failure of the inverter-side converter station has become a key issue affecting the normal and safe operation of LCC. Configuring static var generator (SVG) for reactive power compensation can effectively improve the converter station's ability to resist commutation failure. The influence of SVG reactive power compensation was discussed on LCC commutation failure from a mechanism perspective, and simulation verification was conducted. First, the mathematical model of LCC was established and the mechanism of commutation failure was analyzed. Secondly, the influence of SVG reactive power compensation on the commutation failure process was analyzed. Finally, the model was built in Simulink for simulation verification.

**Key words:** line commutated capacitor high-voltage direct current (LCC-HVDC); commutation failure; reactive power compensation; static var generator (SVG)

我国能源生产与消费之间存在显著的地理空间间隔, 高压直流输电在远距离输电上具有成本低、容量大、便于调节等特点, 是实现能源配置的有效手段, 在“西电东送”和“全国联网”中发挥重要作用<sup>[1]</sup>。

LCC-HVDC是发展最早、技术最成熟的高压直流输电形式。在各种形式高压直流输电中,

LCC-HVDC具有承受输送电压等级最高、输送容量最大、易于分期建设等优点<sup>[2]</sup>。近年来, 工程中发现交流侧的故障易引起换流站换相失败, 对LCC-HVDC正常运行产生严重的影响。换相失败在直流侧会引起直流电流激增, 传输功率降低, 会对交流侧电网引起电压和频率振荡、谐波污染等问题, 严重时甚至导致电力安全事故, 是

**基金项目:** 江苏省基础研究计划(自然科学基金)项目(BK20210048);

中电工程科研项目“嵌入式交直关键技术研究”(DG2-D04-2023)

**作者简介:** 李海烽(1975—), 男, 硕士研究生, 教授级高级工程师, 主要研究方向为变电工程咨询设计, Email: lihaifeng@jspdi.com.cn

电力系统安全稳定运行的重要威胁<sup>[3-4]</sup>。换相失败在恢复阶段如果缺乏足够的无功补偿容量会引起交流侧电压二次跌落,进而导致连续换相失败等更严重电力系统故障<sup>[5-6]</sup>。文献[7]提出通过改善交流系统提供的无功功率容量,优化无功功率在暂态条件下的交互过程,降低连续换相失败影响。文献[8]利用大型调相机作为无功补偿设备在直流系统发生闭锁等严重故障期间改善系统电压,增强故障穿越能力。文献[9-10]在总结抑制换相失败规律的基础上,提供了预防换相失败控制措施与抑制方法,提供了研究基础。

SVG采用GTO,IGBT等先进的全控型电力电子器件,配合瞬时无功功率PWM算法等高效的调制手段,在母线电压跌落情况下,仍能提供充足的无功功率,起到稳压的效果。文献[11]利用SVG的优越的调压能力,与储能协同控制有效增强系统稳定性;文献[12]验证了SVG对换相失败抑制的有效性;文献[13]提出一种依据故障程度,在滑模与PI两种控制模式切换的控制策略,提高了系统稳定性,但存在滑模面积计算过程复杂与难度大等不足;文献[14]提出一种基于储能型SVG的控制策略,可有效提升故障后交流电压最小值,降低换相失败后由SVG导致的过电压影响。

上述研究工作通过对SVG采取不同的控制方法与策略抑制换相失败的发生或优化了换相失败恢复过程,但缺乏SVG配置容量对换相失败影响的定量分析。针对这一问题,在建立LCC-HVDC系统模型与分析换相失败的机理基础上,研究了SVG配置容量对换流站的影响,结合Simulink仿真模型,分析了不同容量下SVG对换相失败过程的抑制效果。

## 1 LCC-HVDC系统结构与数学模型

### 1.1 LCC-HVDC系统结构

LCC-HVDC的系统结构如图1所示。图1中, $P_{dr}$ 、 $Q_{dr}$ 分别为整流器从送端交流系统吸收的有功功率与无功功率; $P_{di}$ 为逆变器向受端交流系统输送的有功功率; $Q_{di}$ 为逆变器从受端交流系统吸收的无功功率; $V_r$ 、 $V_i$ 分别为送端与受端交流侧线电压有效值; $I_r$ 、 $I_i$ 分别为送端与受端交流线电流基波分量的有效值; $K_r$ 、 $K_i$ 分别为送端与受端换流变压器的电压变比; $X_{cr}$ 、 $X_{ci}$ 分别为等效换相电抗; $V_{dr}$ 、 $V_{di}$ 分别为整流器与逆变器的直流电压;

$R_{dc}$ 为直流线路电阻; $I_d$ 为直流电流。交流电经换流变压器变压至合适等级后由换流站(整流站)将交流电整流为直流电,通过直流输送线路,将电能输送到受端,再经换流站(逆变站)转换为交流电,最后再次变压传输至受端的交流系统。

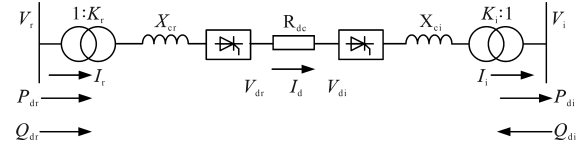


图1 LCC-HVDC系统结构简图

Fig.1 Schematic diagram of LCC-HVDC system structure

在LCC-HVDC各组成部分中最重要的是连接直流输电线路两端的换流站。换流站是LCC直流输电主要建设成本,换流站内设备众多、接线复杂、运维繁琐。换流站在工况正常运行下需要从交流侧吸收约占输送有功功率50%~60%的无功功率。送端与受端换流站本质上都是由如图2所示的由晶闸管器件组成的三相桥式全波电路。在三相全波桥式换流器等值电路中,用V1~V6表示每个换流阀,换流阀由每个以晶闸管为核心的换流阀组件串联而成。阀V1、阀V3、阀V5共阴极连接,阀V4、阀V6、阀V2共阳极连接。六个阀的导通顺序主要取决于具体阀所受的电压值大小决定。如c相电压最低时,V2导通,V6和V4截止;如a相电压最高时,V1导通,V3和V5处于阻断状态。晶闸管导通需要同时满足承受正向电压与门级触发电流,当触发延迟角 $\alpha$ 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间时,此时换流站处于整流工作状态;当触发延迟角在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 之间时,此时换流站处于逆变工作状态,常用触发超前角用 $\beta$ 表示。

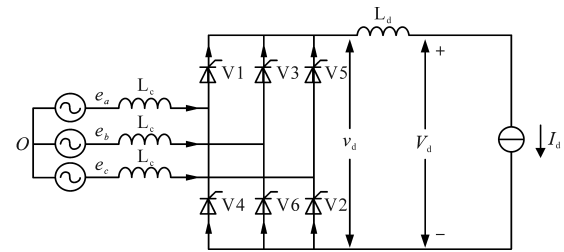


图2 三相全波桥式电路

Fig.2 Three phase full wave bridge circuit

由于篇幅限制,不再详细分析换流站每一相换流过程,直接给出换流站在LCC稳态模型中等值电路。在LCC稳态模型中整流器等值电路可用图3表示,用下标r和i区分整流侧换流站与逆变侧换流站。

图3中, $V_{d0}$ 为在直流侧电流恒定、交流侧电

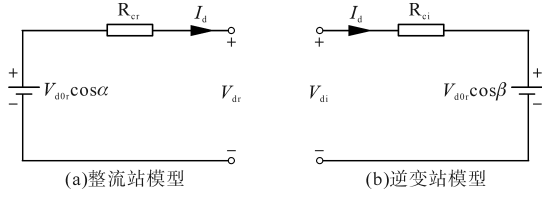


图3 换流站模型

Fig.3 Converter station model

压波形是三相对称工频的正弦波、理想变压器、无触发延迟( $\alpha = 0^\circ$ )且不考虑换相电感影响等理想条件下的直流电压; $R_{cr}$ 与 $R_{ci}$ 为等效换相电阻,用来解释因叠弧引起的电压降,不代表实际有功功率损耗。

结合图1和图3,可得以下关系式:

$$\begin{cases} R_{cr} = \frac{3}{\pi} \omega L_{cr} = \frac{3}{\pi} X_{cr} \\ R_{ci} = \frac{3}{\pi} \omega L_{ci} = \frac{3}{\pi} X_{ci} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\omega$ 为电网电压角速度; $L_{cr}$ 、 $L_{ci}$ 分别为整流侧与逆变侧换相电感; $X_{cr}$ 、 $X_{ci}$ 分别为整流侧与逆变侧等效换相电抗。

$$\begin{cases} V_{d0r} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} K_r V_r \\ V_{d0i} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} K_i V_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: $V_{d0r}$ 、 $V_{d0i}$ 分别为整流器与逆变器不考虑换相电感的理想空载直流电压; $K_r$ 、 $K_i$ 分别为整流与逆变换流变压器变比; $V_r$ 、 $V_i$ 分别为整流与逆变侧交流线电压有效值。

$$\begin{cases} V_{dr} = V_{d0r} \cos \alpha - R_{cr} I_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} K_r V_r \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_{cr} I_d \\ V_{di} = V_{d0i} \cos \beta + R_{ci} I_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} K_i V_i \cos \beta + \frac{3}{\pi} X_{ci} I_d \end{cases} \quad (3)$$

式中: $V_{dr}$ 、 $V_{di}$ 分别为整流与逆变换流站端口直流电压; $I_d$ 为直流电流。

结合图1可得,LCC-HVDC 直流输电系统稳态方程为

$$\begin{cases} P_{dr} = V_{dr} I_d \\ P_{di} = V_{di} I_d \end{cases} \quad (4)$$

$$R_{dc} I_d = V_{dr} - V_{di} \quad (5)$$

式中: $R_{dc}$ 为LCC稳态运行下,忽略对地电容影响的直流线路等效电阻。

## 1.2 换相失败机理

晶闸管在关断后,需要一段时间恢复阻断能力,如果在恢复阻断能力前再次承受正压,即使

门极未受到正向电流触发,也会被导通,造成误导通。根据图4所示的换流电路,分析V1向V3换相过程。图中, $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\mu$ 与 $\gamma$ 分别为触发延迟角、越前触发角、换相角与熄弧角。如图4所示,有下式所示数学关系:

$$\begin{cases} \alpha + \beta = \pi \\ \beta - \mu = \gamma \end{cases} \quad (6)$$

$\mu$ 的物理意义是换相电流从V1向V3转移的时间, $\gamma$ 的物理意义是电流转移后留给V1恢复阻断能力的时间。当 $U_b > U_a$ , $\omega t = \alpha$ 时,门级受到正向脉冲,V1才会向V3换相,若越前触发角过小或者换相角过大都将导致熄弧角过小,当熄弧角小于器件本身要求的最小熄弧角 $\gamma_{min}$ 时,晶闸管将无法完全彻底关断,无法恢复阻断能力,将失去对晶闸管的控制。在下一次承受正向电压时,V1将自动导通,不再需要门级正向电流触发,V3的电流将反向流入V1,被称作倒换相,此时换相失败。下一个换相过程为V2到V4,由于V1误导通,此时造成换流电路V1与V4同时导通的结果,即直流侧短路。在上述分析中,可以看出造成换相失败的本质是熄弧角过小,晶闸管无法恢复阻断能力。

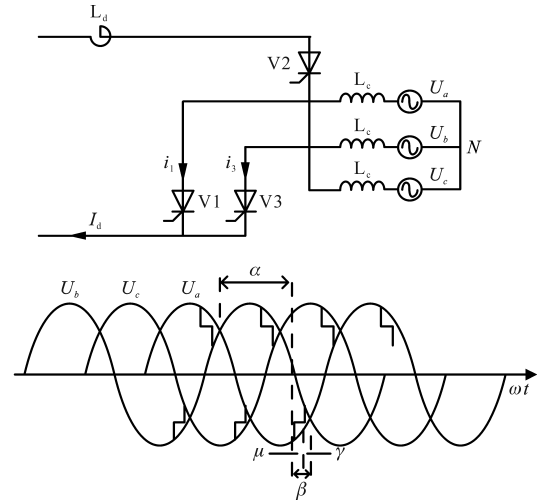


图4 换相过程示意图

Fig.4 Schematic diagram of commutation process

结合图4对熄弧角大小进行理论推导,设 $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ 为交流系统侧三相电压相电压的幅值。在V1向V3换相过程中,可被看作支路a与支路b并联,列写KVL可得:

$$U_b - L_c \frac{di_3}{dt} = U_a - L_c \frac{di_1}{dt} \quad (7)$$

式中: $i_1$ 、 $i_3$ 分别为支路a与支路b的瞬时电流; $L_c$ 为换相电感。

列写KCL可得:

$$i_d(t) = i_1(t) + i_3(t) \quad (8)$$

式中: $i_d$ 为直流侧直流电流的瞬时值。

考虑到平波电抗器的存在,可以认为 $i_d$ 为常数,结合换相前V3电流为0,换相后V3电流为直流电流 $I_d$ 的边界条件,可得:

$$\begin{cases} i_d(t) = I_d \\ i_3(\alpha) = 0 \\ i_3(\alpha + \mu) = I_d \end{cases} \quad (9)$$

换相过程指流经换流器的电流从一个桥臂转向另一个桥臂。故换相过程后,V1将不再流通电流,即

$$\begin{cases} i_1(\alpha) = I_d \\ i_1(\alpha + \mu) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

对式(7)积分可得:

$$\int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\alpha+\mu}{\omega}} L_c \left( \frac{di_3}{dt} - \frac{di_1}{dt} \right) dt = \int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\alpha+\mu}{\omega}} \sqrt{2} U_L \sin(\omega t) dt \quad (11)$$

式中: $U_L$ 为交流侧线电压有效值。

结合式(8)换相过程中电流关系与式(9)、式(10)的边界条件,可得:

$$2L_c I_d = \int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\alpha+\mu}{\omega}} \sqrt{2} U_L \sin(\omega t) dt \quad (12)$$

结合式(6)的角度关系,由式(11)与式(12)可得:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sqrt{2} I_d X_c}{U_L} + \cos\beta\right) \quad (13)$$

其中

$$X_c = \omega L_c$$

式中: $X_c$ 为换相电抗。

可见熄弧角大小受到直流电流、交流侧线电压有效值、换相阻抗与越前触发角影响。当熄弧角由于某种原因,小于器件本身要求的最小熄弧角 $\gamma_{\min}$ 时,将会出现晶闸管无法及时关断的状况,导致换相失败。在直流输电系统中为保证电能输送功率,逆变侧交流中晶闸管关断时间较短,更容易发生换相失败故障。在正常运行中,熄弧角一般要求高于 $15^\circ$ ,临界值高于 $7.2^\circ$ 。

## 2 SVG抑制换相失败分析

### 2.1 接入SVG对换相失败的影响

当逆变侧交流系统发生故障时,会导致换流阀出口交流电压跌落,换相时间增长,同时直流侧电压下降、电流增加,进而换相失败。在故障

排除后,进入恢复阶段,随着传输功率与电压幅值恢复,换流站无功消耗量增加,若无功功率支撑不足,容易造成电压持续低于额定值,产生连续换相失败,导致系统无法恢复到正常运行状态。由此可见,充足的无功支撑对于提升换相失败抵御能力、增强系统故障恢复能力至关重要。

SVG可被看作幅值、相位均可控的交流电压源,具有快速响应电压变化的能力,从而及时提供无功支撑、维持系统电压。SVG可在几十毫秒内及时为换流站提供无功功率支撑,有助于在交流侧电网下降时迅速提供无功功率,防止电压进一步下降,增强对换相失败抑制能力。SVG可同时起到抑制换流阀内电流激增的作用,避免换流阀因电流激增导致的设备寿命缩短等问题,起到设备保护作用。另外,SVG能够缩短系统恢复时间,并且随着SVG配置容量的提升,系统恢复时间会有明显缩短。增大额定容量可有效提升抑制换相失败的能力。

### 2.2 SVG配置容量对换相失败抵御能力的影响

#### 2.2.1 SVG投入判据

换相角的大小与直流电流 $I_d$ 密切相关,换相角的大小直接影响到熄弧角 $\gamma$ 的大小,进而决定晶闸管有无充裕的时间恢复阻断能力。通过换相面积分析 $I_d$ 与换相角 $\mu$ 的关系。

设换相阀内电流从 $I_d$ 逐渐减少到0,其换相电流关于时间的面积 $A_{it}$ 通过计算可得:

$$\begin{aligned} A_{it} &= \int_{\alpha}^{\alpha+\mu} i_1 d(\omega t) \\ &= I_d \mu - \frac{U_L \mu}{\sqrt{2} X_c} \left[ \cos\alpha - \frac{\sin(\alpha + \mu)}{\mu} + \frac{\sin\alpha}{\mu} \right] \end{aligned} \quad (14)$$

在正常换相过程中, $U_L, X_c, \alpha$ 均为已知量。故由式(14)可知 $A_{it}, I_d, \mu$ 的关系。在换相过程中,由于电感的存在,电流变换较为平缓,可视为呈线性变化,故:

$$A_{it} = \frac{1}{2} \mu I_d \quad (15)$$

联立式(12)与式(13)即可得:

$$I_d = \frac{U_L}{\sqrt{2} X_c} \left[ \cos\alpha - \frac{\sin(\alpha + \mu)}{\mu} + \frac{\sin\alpha}{\mu} \right] \quad (16)$$

本文以CIGRE标准模型为例,选取 $\beta = 45^\circ, 55^\circ, 65^\circ$ ,分析直流电流 $I_d$ 与换相角 $\mu$ 的关系。在模型中,逆变侧参数为 $I_d = 2 \text{ kA}$ ,换流母线电压 $U_{ac} = 230 \text{ kV}$ ,换流变压器的变比 $k = 230/209.23$ ,换相电



抗  $X_r = 0.18$  (标么值)<sup>[15]</sup>。由式(16)可绘出直流电流  $I_d$  与不同触发超前角  $\beta$  和换相角  $\mu$  的关系曲线,如图 5 所示。

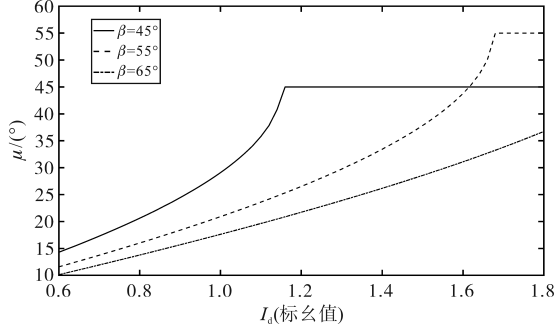


图 5 换相过程中阀直流电流和换相角关系曲线

Fig.5 Curves of  $I_d$  and  $\mu$  during commutation process

由图 5 可知,直流电流  $I_d$  与换相角  $\mu$  的关系呈正相关。当换相失败时,  $I_d$  激增,此时需要更长时间完成换流,即  $\mu$  增大,当达到最大值  $\mu_{\max}$  时,此时熄弧角达到最小值  $\gamma_{\min}$ ,此时处于换相失败临界状态,对应的  $A_{ic}$  即为换相失败判据。

### 2.2.2 SVG 增加换相裕度原理分析

SVG 可视为幅值、相位可被控制的交流电压源,接入电网后的等效电路如图 6 所示。图中,  $X$  为 SVG 与换流母线之间的联接电抗,  $R$  为 SVG 与换流母线间的等效电阻,  $u_s$  为换流母线电压,  $u_{\text{SVG}}$  为 SVG 输出电压。

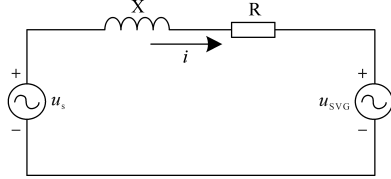


图 6 SVG 接入电网等效电路

Fig.6 Equivalent circuit of SVG connected to power grid

以  $U_s$  为参考系,且考虑到  $X \gg R$  可知:

$$\begin{cases} \dot{U}_s = U_s + j0 \\ \dot{U}_{\text{SVG}} = U_{\text{SVG}} \cos \delta + j U_{\text{SVG}} \sin \delta \\ \dot{I} = -\frac{U_{\text{SVG}} \sin \delta}{X} - j \frac{U_s - U_{\text{SVG}} \cos \delta}{X} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $U_s$  为 SVG 接入母线电压有效值;  $\delta$  为电网电压与 SVG 输出之间的相角差;  $U_{\text{SVG}}$  为 SVG 电压输出有效值。

可知 SVG 在投入使用后,对系统交换的功率为

$$\begin{aligned} S &= \dot{U}_s \dot{I}^* \\ &= -\frac{U_s U_{\text{SVG}} \sin \delta}{X} + j \frac{U_s (U_s - U_{\text{SVG}} \cos \delta)}{X} \end{aligned} \quad (18)$$

由于 SVG 主要输出无功,稳态时消耗有功功

率极小,故 SVG 的控制角很小,SVG 的有功功率和无功功率可以近似表达为

$$\begin{cases} P = -\frac{U_s U_{\text{SVG}}}{X} \delta \\ Q = \frac{U_s (U_s - U_{\text{SVG}})}{X} \end{cases} \quad (19)$$

图 7 为逆变器与交流侧无功交换示意图。图中,  $-Q_{\text{di}}$  为逆变器消耗的无功功率,  $Q_{\text{aci}}$  为受端交流系统为逆变器提供的无功功率,  $Q_{\text{SVG}}$  为 SVG 提供的无功功率。换相失败后,受端无功功率需求将发生剧烈波动,原有的交直流之间的无功功率平衡将被打破,存在无功功率不平衡量  $\Delta Q_{\text{di}}$ ,逆变侧交流母线电压在受到无功功率波动影响下,电压标么值  $U_{\text{Li,pu}}$  计算公式为<sup>[6]</sup>

$$U_{\text{Li,pu}} = \sqrt{\left(1 - \frac{\Delta Q_{\text{di}}}{S_{\text{ci}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_{\text{di}}}{S_{\text{ci}}}\right)^2} \quad (20)$$

式中:  $S_{\text{ci}}$  为交流系统短路容量;  $\Delta P_{\text{di}}$  为有功功率不平衡量。

忽略有功功率  $\Delta P_{\text{di}}$  对电压的影响可得:

$$U_{\text{Li,pu}} = 1 - \frac{\Delta Q_{\text{di}}}{S_{\text{ci}}} \quad (21)$$

其中

$$\Delta Q_{\text{di}} = Q_{\text{diN}} - Q_{\text{di}} = Q_{\text{SVG}} + Q_{\text{aciN}} - Q_{\text{di}} \quad (22)$$

式中:  $\Delta Q_{\text{di}}$  为逆变器在故障期间无功不平衡量;  $Q_{\text{diN}}$  为故障前正常无功消耗量;  $Q_{\text{di}}$  为逆变器换相失败后的无功消耗量;  $Q_{\text{aciN}}$  为正常运行下交流系统向逆变器输出的无功功率。

换相失败后,  $Q_{\text{di}}$  故障恢复期间产生剧烈的变化,加剧  $\Delta Q_{\text{di}}$  的变化进而对电压母线  $U_{\text{Li,pu}}$  的变化产生不利的影响,恶化换相失败后故障恢复过程。SVG 作为快速反应无功补偿设备,可及时动态调整无功功率输出,减少  $\Delta Q_{\text{di}}$ 。随着  $\Delta Q_{\text{di}}$  减少,  $\Delta Q_{\text{di}}/S_{\text{ci}}$  整体也将减少,若 SVG 备用容量充足,可以减少至 0,进而对母线电压起到稳压效果。随着逆变侧电压升高,直流线路两端电压差将减少,进而抑制  $I_d$  增加,提升了换相失败裕度。

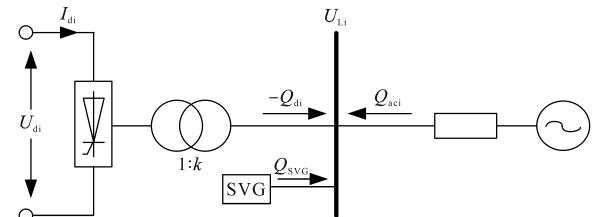


图 7 逆变器无功功率交换示意图

Fig.7 Schematic diagram of reactive power exchange of inverter

### 3 仿真验证与分析

#### 3.1 仿真系统介绍

在Simulink中搭建仿真结构如图1所示的单极LCC-HVDC模型,设置直流传功率为1 000 MW,整流侧电压等级为220 kV,50 Hz,逆变侧交流电压等级为220 kV,50 Hz;设置故障为单相接地故障,1 s发生,1.02 s故障切除。

逆变侧为12脉动换流器,由2组6脉动换流器串联而成。每个6脉动换流器的交流侧配备一组SVG,在本文的仿真算例中,两组SVG的无功出力完全对称。逆变侧换流变压器出口未配置交流滤波器。

#### 3.2 未配置SVG的故障仿真

图8为未配置SVG无功补偿,换相失败后换流阀出口电流波形图,从图8可以看出在未配置SVG无功补偿条件下,在单相接地故障期间,换流阀内电流增加、直流传功率下降、换流母线电压跌落并发生换相失败,1.02 s故障切除后,由于换流阀无功消耗量升高,且系统无法提供足够的无功支撑,导致换流阀母线电压持续跌落,发生连续换相失败,换流阀电流在连续失败期间持续升高,最大幅值约4.45(标么值),接地故障约0.052 s后直流闭锁,功率不再传输,导致严重的电力故障。

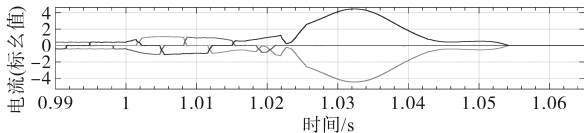


图8 未配置SVG无功补偿,换相失败后换流阀出口电流

Fig.8 SVG reactive power compensation not configured, after commutation failure, the outlet current of the converter valve

#### 3.3 不同配置容量SVG对换相失败的影响分析

##### 3.3.1 配置两组30 Mvar SVG的仿真结果

配置两组30 Mvar SVG的仿真结果如图9所示,发生单相接地故障后,由于SVG提供无功支撑,抬升了在故障期间的换流母线电压,因此使得在单相接地故障期间,未发生换相失败;但是当故障切除后,随着直流传容量的恢复,由于SVG提供的无功支撑不足,使得换流阀母线电压跌落到了换相失败临界点,因此发生连续换相失败,换流阀内最大幅值仍达到了4.33(标么值),并在故障后约0.057 s后发生直流闭锁。

##### 3.3.2 配置两组60 Mvar SVG的仿真结果

配置两组60 Mvar SVG的仿真结果如图10所

示。随着SVG容量增加,可以看到在1.023 s左右发生的换相过程得到了进一步改善,换相过程的信息弧角显著增大,换相失败即将消除,其余过程与30 Mvar SVG类似。

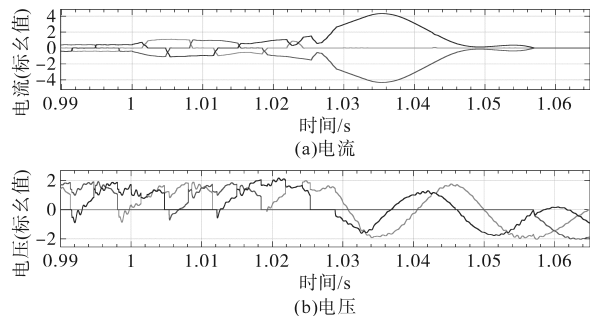


图9 配置30 Mvar SVG,换流阀电流与SVG电压波形图

Fig.9 Configure 30 Mvar SVG, waveform diagram of converter valve current and SVG voltage

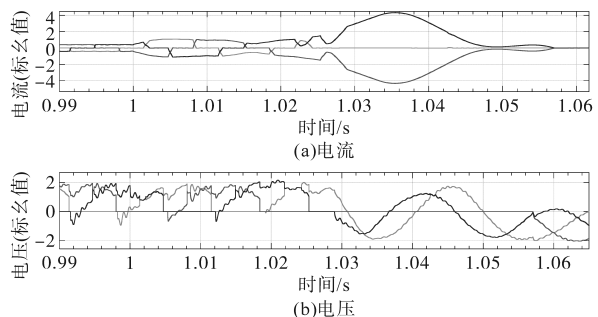


图10 配置60 Mvar SVG后,换流阀电流与SVG电压波形图

Fig.10 After configuring 60 Mvar SVG, waveform diagram of converter valve current and SVG voltage

##### 3.3.3 配置两组90 Mvar SVG的仿真结果

当SVG容量为90 Mvar时,仿真结果如图11所示。在单相接地故障发生期间,未发生换相失败,单相故障切除后,在直流传功率恢复期间,SVG补充的无功能够提供足够支撑,满足换流器的无功消耗需求,保证了逆变侧换流阀母线电压维持在正常范围内,因此没有再次发生换相失败,在整个故障期间,换流阀电流峰值被限制在1.1(标么值)以内,实现了故障穿越,保证了系统的安全稳定运行。

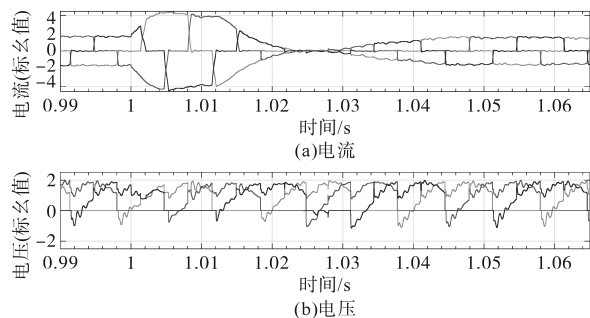


图11 配置90 Mvar SVG后,换流阀电流与SVG电压波形图

Fig.11 After configuring 90 Mvar SVG, waveform diagram of converter valve current and SVG voltage

### 3.3.4 配置两组 120 Mvar SVG 仿真结果

当 SVG 容量为 120 Mvar 时,仿真结果图如图 12 所示。系统运行过程与 SVG 容量为 90 Mvar 时类似,未发生换相失败,且安全裕度得到进一步提升。

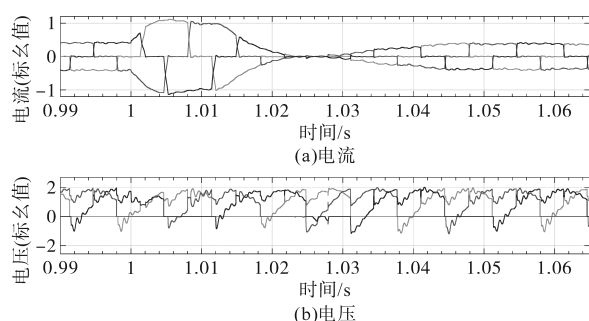


图 12 配置 120 Mvar SVG 后,换流阀电流与 SVG 电压波形图

Fig.12 After configuring 120 Mvar SVG, waveform diagram of converter valve current and SVG voltage

配置不同容量 SVG 的换相失败对比情况如表 1 所示。换流阀母线电压与是否发生换相失败存在紧密联系,而换流阀母线电压能否维持与系统的无功支撑能力,也就是 SVG 的容量配置直接相关。在交流侧单相故障期间,由于直流传输容量下降,换流阀无功消耗减少,进行适当的无功补偿即可防止换相失败的发生。故障切除后,在直流传输功率恢复的过程中,换流阀无功消耗增加,需要更加充足的无功支撑才能彻底阻止连续换相失败的发生。

表 1 换流阀在不同容量 SVG 配置下,单相故障后对比情况

Tab.1 Comparison of converter values under different SVG configurations after single-phase fault

配置容量/Mvar	换流阀电流最大幅值(标么值)	是否发生连续换相失败	单相接地故障期间是否发生换相失败
2×0	4.450 4	是	是
2×30	4.330 2	是	否
2×60	4.330 5	是	否
2×90	1.110 2	否	否
2×120	1.116 5	否	否

配置 SVG 进行无功补偿是防止 LCC 换相失败的重要方式,对于 LCC 系统所需配置的精准 SVG 容量,受到系统参数、控制方式、传输功率、故障类型、短路点距离等诸多因素的复杂影响,在实际系统中,SVG 的配置容量需满足各类故障的情形需求,且留有一定裕度,是一个非常复杂的问题。

本文针对逆变侧交流线路的单相接地故障仿真结果显示,SVG 补偿额定传输容量的 20% 左

右时,能够使系统抵御单相接地故障情形下的连续换相失败,避免直流闭锁。

## 4 结论

配置 SVG 能够有效提升 LCC 的换相失败抵御能力,本文对 LCC 的换相失败产生机理、SVG 接入后提升换相失败抵御能力的机理进行了研究探讨,并对单相接地故障下不同 SVG 补偿容量下的换相失败进行了仿真分析,仿真结果显示,不同容量配置下的 SVG 均可起到一定的缓解故障危害的效果,在 SVG 无功补偿容量足够的情况下,可有效抑制换流阀内电流突变,并加快故障恢复时间,避免直流闭锁。关于 SVG 配置的精准容量定量计算,由于涉及因素较多,需要开展进一步深化研究。

### 参考文献

- [1] 辛业春,刘奇,王拓,等.抑制 LCC-HVDC 后续换相失败的改进型电流偏差控制策略[J].电力建设,2024,45(3):97-106.  
XIN Yechun, LIU Qi, WANG Tuo, et al. An improved current deviation control strategy for suppressing subsequent commutation failures in LCC-HVDC[J]. Electric Power Construction, 2024,45(3):97-106.
- [2] 汤涌,郭强,周勤勇,等.特高压同步电网安全性论证[J].电网技术,2016,40(1):97-104.  
TANG Yong, GUO Qiang, ZHOU Qinyong, et al. Security evaluation for UHV synchronized power grid[J]. Power System Technology, 2016,40(1):97-104.
- [3] 吴萍,林伟芳,孙华东,等.多馈入直流输电系统换相失败机制及特性[J].电网技术,2012,36(5):269-274.  
WU Ping, LIN Weifang, SUN Huadong, et al. Research and electromechanical transient simulation on mechanism of commutation failure in multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2012,36(5):269-274.
- [4] HE J, TANG Y, ZHANG J, et al. Fast calculation of power oscillation peak value on AC tie-line after HVDC commutation failure[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015,30(4):2194-2195.
- [5] 周博昊,李凤婷,尹纯亚.高压直流输电系统后续换相失败风险评估及抑制方法[J].电力系统自动化,2021,45(5):143-151.  
ZHOU Bohao, LI Fengting, YIN Chunyu. Risk evaluation and suppression methods for subsequent commutation failure in HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021,45(5):143-151.
- [6] 樊庆东,尹纯亚,李凤婷,等.考虑无功功率影响的后续换相失败抑制策略[J].智慧电力,2023,51(11):98-105.  
FAN Qingdong, YIN Chunyu, LI Fengting, et al. Suppression

- strategy for subsequent commutation failure considering reactive power[J]. Smart Power, 2023, 51(11): 98-105.
- [7] 汤奕,郑晨一,王玉,等. 考虑交直流无功交互特性的换相失败预测控制优化方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 50-57.
- TANG Yi, ZHENG Chenyi, WANG Yu, et al. Optimization method for commutation failure prevention control considering AC/DC reactive power interaction characteristics[J]. Power System Automation, 2020, 44(21): 50-57.
- [8] 王奇,董新胜,何山. 抑制高压直流故障引起风电场暂态过电压控制策略[J]. 电气传动, 2024, 54(10): 76-82, 96.
- WANG Qi, DONG Xinsheng, HE Shan. Control strategy for suppressing transient overvoltage in wind farms caused by high voltage DC faults[J]. Electric Drive, 2024, 54(10): 76-82, 96.
- [9] 任震,欧开健,荆勇. 直流输电系统换相失败的研究(二)——避免换相失败的措施[J]. 电力自动化设备, 2003(6): 6-9.
- REN Zhen, OU Kaijian, JING Yong. Research on commutation failure in HVDC transmission system part 2: measures against to avoid commutation failure[J]. Power Automation Equipment, 2003(6): 6-9.
- [10] WANG P, WANG Y, JIANG N, et al. A comprehensive improved coordinated control strategy for a STATCOM integrated HVDC system with enhanced steady/transient state behaviors [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 121: 106091.
- [11] 赵晶晶,陈凌汉. 孤岛微电网下储能与SVG的电压频率协调控制策略[J]. 电气传动, 2023, 53(5): 49-55.
- ZHAO Jingjing, CHEN Linghan. Voltage-frequency coordinated control strategy of energy storage and SVG under islanded microgrid[J]. Electric Drive, 2023, 53(5): 49-55.
- [12] 高本锋,毛亚鹏. 链式STATCOM对HVDC换相失败的影响分析[J]. 电测与仪表, 2018, 55(10): 68-75.
- GAO Benfeng, MAO Yapeng. A research of the effect of chain STATCOM on HVDC commutation failure[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(10): 68-75.
- [13] 李东东,安胜辉,高毅. 应用于LCC-HVDC受端STATCOM的PI与滑模切换控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(5): 56-64.
- LI Dongdong, AN Shenghui, GAO Yi. PI and sliding mode switching control strategy of STATCOM for LCC-HVDC receiving end[J]. Journal of Power Systems and Automation, 2023, 35(5): 56-64.
- [14] 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.
- [15] 李思思,白仕雄,丁志林,等. 基于换相电流时间面积的换相失败判别方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(2): 98-102.
- LI Sisi, BAI Shixiong, DING Zhilin, et al. Current-time area method for the identification of commutation failure[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(2): 98-102.

收稿日期:2024-08-20

修改稿日期:2024-10-24