

DOI: 10.7667/PSPC170230

# 一种抑制 HVDC 换相失败的 STATCOM 补偿方案

王轩<sup>1,2</sup>, 魏宏<sup>1,2</sup>, 欧朱建<sup>3</sup>, 付永生<sup>1,2</sup>, 喻劲松<sup>1,2</sup>

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211000; 2. 中电普瑞科技有限公司, 北京 102200;  
3. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要:** 针对高压直流输电(High Voltage Direct Current, HVDC)系统中的换相失败问题, 提出一种 STATCOM 补偿方案。该方案将星型级联 H 桥 STATCOM 中性点直接接地, 并入 HVDC 系统逆变端, 从而具备三点优势: 保留星型级联 H 桥 STATCOM 经济性高的优点; 三相独立, 可视三个单相 STATCOM, 各相换流链独立控制, 克服了传统星型级联 H 桥 STATCOM 在电网电压不平衡情况下的控制问题; 利用 HVDC 所接入的交流电网的中性点接地的特点构成零序电流通路, 不仅可以补偿谐波、正序、负序无功电流, 也可以补偿零序无功电流, 补偿性能较传统拓扑更为优良。详细分析了该补偿方案在 HVDC 中的可行性, 并推导了电网电压不平衡情况下, 换流链电流指令中的零序电流量。给出了控制策略并通过 PSCAD/EMTDC 对所提补偿方案用于抑制 HVDC 换相失败的性能进行验证。

**关键词:** 高压直流输电; 换相失败; STATCOM; 中性点接地; 零序电流

## A STATCOM compensation scheme for suppressing commutation failure in HVDC system

WANG Xuan<sup>1,2</sup>, WEI Hong<sup>1,2</sup>, OU Zhujian<sup>3</sup>, FU Yongsheng<sup>1,2</sup>, YU Jinsong<sup>1,2</sup>

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., Nanjing 211000, China;  
2. China EPRI Science & Technology Co., Ltd., Beijing 102200, China;  
3. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** This paper proposes a STATCOM compensation scheme for suppressing commutation failure in HVDC. In this scheme, the neutral-point of CHB-STATCOM with star configuration which is connected to power grid is grounded. The scheme possesses three advantages. Firstly, it reserves high economy as CHB-STATCOM with star configuration. Secondly, three phases are independent of each other, which can be considered as three single-phase STATCOMs, leading to a simple and flexible control strategy and overcoming the control problem when CHB-STATCOM with star configuration operations under unbalance grid. Thirdly, it forms zero-sequence current channel by using of characteristic of HVDC, which is the neutral-point of the AC grid connected by HVDC is directly grounded, thus it can compensate not only harmonics, positive and negative-sequence reactive power, but also zero-sequence reactive power, resulting in excellent compensatory capacity. The feasibility of the proposed scheme in HVDC is analyzed in detail. Zero-sequence current is calculated in detail under unbalanced grid condition. The control strategy is given and the simulations based on PSCAD/EMTDC are carried out to illustrate the effectiveness to suppress communication failure in HVDC.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51541708).

**Key words:** HVDC; commutation failure; STATCOM; neutral-point grounding; zero-sequence current

## 0 引言

高压直流输电(High Voltage Direct Current, HVDC)以其在长距离大容量送电及电网互联方面的

优势在我国“西电东送, 全国联网”战略中发挥了重要作用<sup>[1]</sup>。换相失败是高压直流输电系统最常见的故障。换相失败会引起直流电压下降和直流电流短时增大; 连续换相失败容易引起直流系统降额运行, 甚至造成阀组闭锁或极闭锁<sup>[2-5]</sup>。此外, 在多馈入直流系统中换相失败问题将更为复杂, 单个直流系统的换相失败可能会引起其他直流系统的换相失

基金项目: 国家自然科学基金(51541708); 国家电网公司科技项目(52466F150008)

败连锁反应。在导致 HVDC 换相失败的诸多因素中，交流电网电压下降是最常见的因素之一，因而需采取相应措施稳定电网电压。在逆变站安装无功补偿装置是最常见的提高电压稳定性的方式。增加无功补偿装置相当于增大受端交流系统的有效短路比，减小系统的等值电抗，因而减小换相时间，增大关断余裕角，避免换相失败的发生。同步调相机既能发出无功，又能吸收无功，运行特性较并联电容器灵活。但由于其属于旋转机械，运行维护复杂，现在较少运用在逆变站。静止无功补偿装置 SVC 输出无功可调，损耗小、维护简单、可靠性高，在电网中获得了大量应用，但是 SVC 动态速度相对较慢。静止无功发生器 STATCOM 调节连续灵活、响应速度快、运行范围宽、装置体积小、易维护，可以有效地改善接入点的电压稳定性<sup>[6-8]</sup>。因而通过 STATCOM 输出无功来迅速稳住电网电压可在一定程度上减小换相失败发生的几率<sup>[9-10]</sup>。

自从我国学者彭方正于 1995 年提出级联 H 桥多电平变换器以来<sup>[11]</sup>，该拓扑在 STATCOM 领域得到广泛的应用<sup>[11-19]</sup>。截至目前，基于级联 H 桥多电平变换器提出的 STATCOM 拓扑主要分为三类：(1) 星型级联 H 桥 STATCOM<sup>[11-14]</sup>(SSBC-STATCOM)；(2) 角型级联 H 桥 STATCOM<sup>[15-17]</sup>(SDBC-STATCOM)；(3) MMC 型级联 H 桥 STATCOM<sup>[18-19]</sup>(MMC-STATCOM)。从经济性、补偿性能、非正常工作下的适应能力及控制策略的复杂程度等方面而言，这三类拓扑各有其优缺点<sup>[12]</sup>。星型结构 STATCOM 各相换流链承受的压降为电网相电压，而角型和 MMC 型结构 STATCOM 各换流链承受的压降为电网线电压，因而星型 STATCOM 具有最高的经济性，应用也最为广泛<sup>[12-13]</sup>。然而，由于星型 STATCOM 中性点悬空，当电网电压不平衡时，其控制较为复杂<sup>[12-14]</sup>。通过在中性点处叠加零序电压，该拓扑三相换流链之间可以进行有功交换，进而实现三相换流链的有功平衡<sup>[12]</sup>。然而因为叠加的零序电压裕量有限，所以该拓扑一般不用于补偿负序电流。在电网电压不平衡情况下，由于角型 STATCOM 存在零序电流，MMC 型 STATCOM 存在环流，通过这两个电流量可以进行三相换流链间的有功交换，因而角型和 MMC 型 STATCOM 的控制要比星型 STATCOM 简单，并可补偿负序电流<sup>[12,16-19]</sup>。然而由于经济性问题，这两个拓扑在实际应用中不如星型结构的拓扑广泛。

上述三类拓扑存在一个共同的不足：不存在零序电流通道，因而不能补偿零序电流。若 STATCOM 输出电流中包含零序电流，会提高装置补偿的速度，

这对补偿速度有较高要求的场合(如抑制 HVDC 换相失败)有重要的影响。

本文针对 HVDC 中的换相失败问题，利用 HVDC 系统所接入的交流电网中性点直接接地的特点，提出将星型级联 H 桥 STATCOM 中性点直接接地的抑制方案(GSSBC-STATCOM 方案)。该方案具备经济性高、控制简单、能够补偿零序无功电流的优点，特别适用于抑制 HVDC 换相失败。该方案的不足在于三相换流链完全独立，不能进行有功交换，因而不能补偿不平衡负载。

## 1 GSSBC-STATCOM 的可行性分析

### 1.1 GSSBC-STATCOM 各项特性

本文提出的 GSSBC-STATCOM 方案如图 1 所示。该方案是在传统 SSBC-STATCOM 拓扑的基础上将中性点直接接地而成。中性点接地后三相换流链之间完全独立。

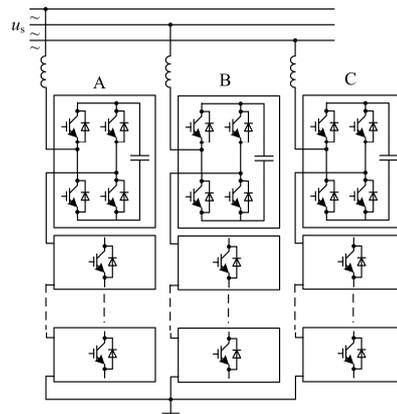


图 1 GSSBC-STATCOM 结构图

Fig. 1 Structure of GSSBC-STATCOM

该方案具备以下 3 个优点。

1) 经济性高：GSSBC-STATCOM 换流链耐压为电网相电压，保留了 SSBC-STATCOM 经济性高的优点；

2) 控制简单：由于 GSSBC-STATCOM 中性点直接接地，三相换流链完全独立，可以看作三个单相 STATCOM，很好地解决了 SSBC-STATCOM 在电网电压不对称情况下的控制问题；

3) 补偿特性好：利用 HVDC 接入的交流电网中性点接地的特点，通过将 GSSBC-STATCOM 中性点直接接地，构成零序电流通道，使该拓扑不仅可以输出谐波、正序和负序无功电流，也可输出零序无功电流。当 HVDC 交流电压三相不对称时，为稳定电网电压，STATCOM 三相换流链输出无功电流存在三序成分。由于 GSSBC-STATCOM 具备输出

零序无功电流的能力, 使得在相同时间内, GSSBC-STATCOM 比其余拓扑输出更多的无功功率, 补偿效果更好。

## 1.2 电网故障工况下 GSSBC-STATCOM 耐压水平

### 1) 电网发生单相接地故障

图 2(a)为 GSSBC-STATCOM 接入中性点不接地电网, 图 3(a)为 GSSBC-STATCOM 接入中性点直接接地电网。对于 GSSBC-STATCOM 来说, 当系统正常运行时, 无论电网中性点是否接地, 其换流链上的电压均为电网相电压。然而, 在电网中性点不接地的情况下, 若发生 c 相接地故障, 则加在 c 相换流链上的电压为零, 而加在 a 相和 b 相换流链上的电压升高为电网线电压, 如图 2(b)所示。此时若要使用该方案, 需增大设备的绝缘投资, 降低 STATCOM 的经济性。所以在交流电网中性点不接地的低压场合, GSSBC-STATCOM 并不适用。当 STATCOM 接在中性点直接接地的电网情况下, 若发生单相接地短路故障, 加在 c 相换流链上电压为零, 而加在 a 相和 b 相换流链上的电压仍为电网相电压, 不会增大设备的绝缘压力。

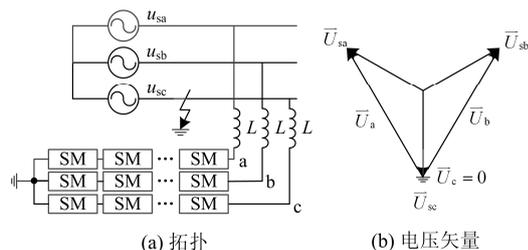


图 2 GSSBC 并入中性点不接地电网(单相接地故障)

Fig. 2 Neutral-point ungrounded power grid connected by a GSSBC-STATCOM (single phase-to-ground fault)

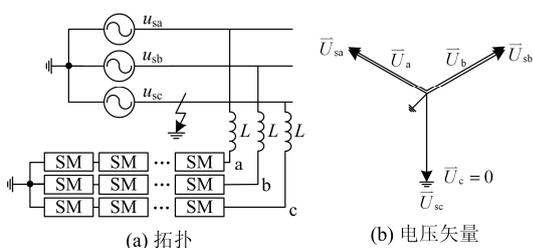


图 3 GSSBC 并入中性点直接接地电网(单相接地故障)

Fig. 3 Neutral-point directly grounded power grid connected by a GSSBC-STATCOM (single phase-to-ground fault)

### 2) 电网发生两相短路故障

如图 4(b)所示, 当 b 相和 c 相电网发生两相短路故障时, 加在 GSSBC-STATCOM 任意一相换流链上的电压均为电网相电压。由此可见, 电网两相短路并不影响 GSSBC-STATCOM 各相换流链所承

受的电压。电网发生三相短路故障时与两相短路故障时相同。电网故障情况下, GSSBC-STATCOM 换流链的耐压水平和可行性分析结果如表 1 所示。通过分析可知, 当考虑 STATCOM 换流链的耐压水平和经济性时, GSSBC-STATCOM 的适用范围为中性点接地的交流电网。

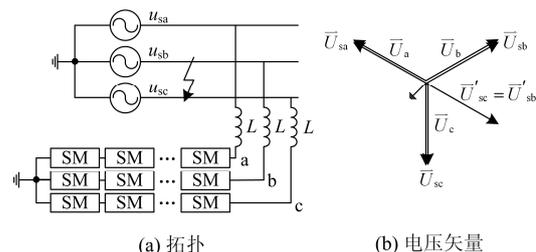


图 4 GSSBC 并入中性点接地电网(两相短路故障)

Fig. 4 Neutral-point directly grounded power grid connected by a GSSBC-STATCOM (two-phase short circuit fault)

表 1 电网故障时 GSSBC-STATCOM 换流链的耐压水平

Table 1 Maximum voltage drop on GSSBC-STATCOM under various grid faults

故障类型	中性点不接地	中性点接地
单相接地故障	$u_{\max} = \sqrt{3}U_{sx}$	$u_{\max} = U_{sx}$
两相短路故障	$u_{\max} = U_{sx}$	$u_{\max} = U_{sx}$
三相短路故障	$u_{\max} = U_{sx}$	$u_{\max} = U_{sx}$
—	不可行	可行

## 1.3 HVDC 接入的交流电网接地设计

在电力系统中, 当交流电网电压等级在 110 kV 及以上的场所时, 由于主要考虑绝缘水平方面的因素, 均采用中性点直接接地方式; 当电压等级在 110 kV 以下时, 出于供电可靠性等方面的考虑, 一般采用不接地或经消弧线圈接地的方式<sup>[18]</sup>。高压直流输电系统为高压大功率系统, 一般输电系统接入的交流电网电压等级在 110 kV 及以上<sup>[19]</sup>。按照我国标准, 此时交流电网中性点必须直接接地。因而在将 GSSBC-STATCOM 用于 HVDC 是可行的, 且各项性能均为优良。

## 2 电网故障情况下 STATCOM 换流链中的零序电流分析

为便于分析, 设定故障情况下电网电压相位对称, 幅值不等(如发生单相接地故障), 如式(1)所示。

$$\begin{cases} u_{sa} = U_{sa} \cos(\omega t) \\ u_{sb} = U_{sb} \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ u_{sc} = U_{sc} \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_{sx}$  ( $x = a, b, c$ ) 为三相电网电压;  $U_{sx}$  ( $x = a, b, c$ )

为相应的幅值； $\omega$  为角频率。

此时，由于各相电网电压幅值不等，为稳定电网电压，要求 STATCOM 各相换流链输出的无功电流幅值也不等，相位均超前于电压  $90^\circ$ ，如式(2)所示。

$$\begin{cases} i_a = I_a \cos(\omega t + \pi/2) \\ i_b = I_b \cos(\omega t - 2\pi/3 + \pi/2) \\ i_c = I_c \cos(\omega t + 2\pi/3 + \pi/2) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $i_x (x = a, b, c)$  为各相换流链输出的无功电流； $I_x (x = a, b, c)$  为相应的幅值。

由于零序电流仅由三相换流链电流中的不对称成分生成，为此，需虚拟出电流中的对称成分和不对称成分。其中对称成分的幅值为

$$I_{ave} = (I_a + I_b + I_c)/3 \quad (3)$$

则三相电流中的对称成分为

$$\begin{cases} i_{as} = I_{ave} \cos(\omega t + 3\pi/6) \\ i_{bs} = I_{ave} \cos(\omega t - \pi/6) \\ i_{cs} = I_{ave} \cos(\omega t + 7\pi/6) \end{cases} \quad (4)$$

不对称成分为

$$\begin{cases} i_{au} = (I_a - I_{ave}) \cos(\omega t + 3\pi/6) \\ i_{bu} = (I_b - I_{ave}) \cos(\omega t - \pi/6) \\ i_{cu} = (I_c - I_{ave}) \cos(\omega t + 7\pi/6) \end{cases} \quad (5)$$

三相输出电流、电流中的对称成分和不对称成分的矢量图如图5所示。取出不对称成分，可以得到图6。由于零序电流仅由不对称成分构成，且为不对称成分之和，即

$$i_0 = i_a + i_b + i_c = (i_{as} + i_{bs} + i_{cs}) + (i_{au} + i_{bu} + i_{cu}) = i_{au} + i_{bu} + i_{cu} \quad (6)$$

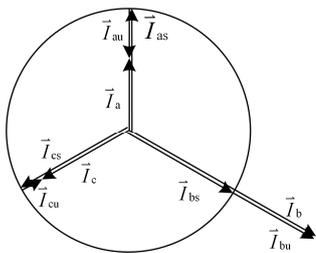


图5 输出电流、对称成分和不对称成分的矢量图  
Fig. 5 Vectors of output current, symmetrical and a symmetrical current

故可在矢量图中对三相不对称矢量求和，从而求得零序电流矢量，如图6所示。图6中，矢量  $\vec{i}_{auq}$  和  $\vec{i}_{cuq}$  分别为  $\vec{i}_{au}$  和  $\vec{i}_{cu}$  中垂直于  $\vec{i}_{bu}$  的分量，两者之和为  $\vec{i}_{uq}$ 。 $\vec{i}_{aud}$  和  $\vec{i}_{cud}$  分别为  $\vec{i}_{au}$  和  $\vec{i}_{cu}$  中平行于  $\vec{i}_{bu}$  的分量，而且满足  $\vec{i}_{ud} = \vec{i}_{aud} + \vec{i}_{cud} + \vec{i}_{bu}$ 。因此可求得零序电流矢量的幅值和相位分别为

$$I_0 = \sqrt{I_{ud}^2 + I_{uq}^2} = \sqrt{(I_{au}/2 + I_{bu} + I_{cu}/2)^2 + (\sqrt{3}I_{au}/2 - \sqrt{3}I_{cu}/2)^2} \quad (7)$$

$$\varphi = (\omega t - \pi/6) + \arctan(-I_{auq}/I_{aud}) \quad (8)$$

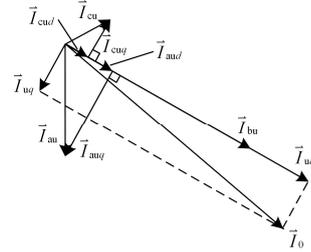


图6 零序电流合成矢量图

Fig. 6 Vector of zero-sequence current

根据式(7)绘出零序电流幅值与 STATCOM 三相电流幅值的关系曲线，如图7所示。其中，设定  $I_b=1.0$ ， $I_a$  的取值为  $0 \sim 0.5$ ， $I_c$  取值为  $0 \sim 0.5$ ，且各坐标系为以  $I_b$  为基准值的标么值。由图7可见，随着电流不对称程度增大，零序电流的幅值增大。

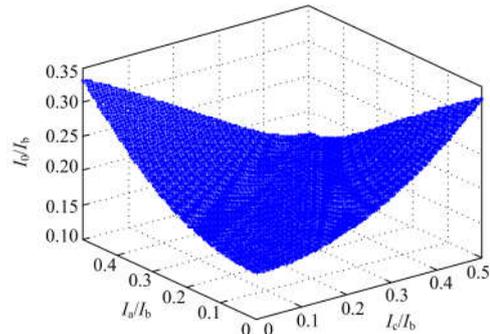


图7 零序电流与 STATCOM 三相电流幅值关系曲线  
Fig. 7 Relationship between zero-sequence current and three-phase current of the STATCOM

GSSBC-STATCOM 由于可以输出零序电流，当用于稳定接入点电压以抑制 HVDC 换相失败时，可以更快地输出无功功率，减小交流电网压降，因而其抑制换相失败的性能要优于已有的三种拓扑。

### 3 控制策略

本文采用双闭环控制实现 GSSBC-STATCOM 的控制。其中，电压环为外环，采用层次化控制；电流环为内环。整体控制框图如图8所示。由于三相换流链完全独立，控制方案灵活简单，主要包含：

- 1) 换流链电容电压均值控制。
- 2) 换流链内子模块电容电压微调控制。
- 3) 换流链电流控制。

控制策略的详细内容可参考文献[22], 此处不作详细叙述。

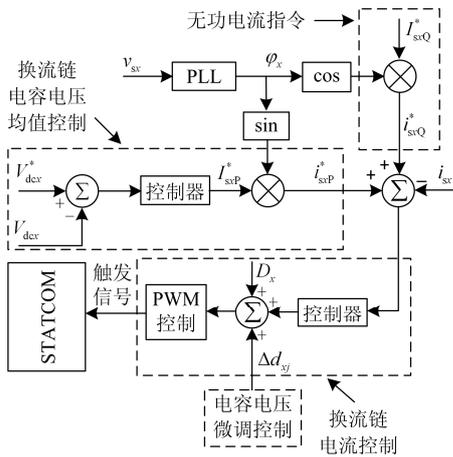


图 8 综合控制策略

Fig. 8 Comprehensive control strategy

#### 4 仿真分析

本文通过 PSCAD/EMTDC 软件搭建三组仿真验证了 GSSBC-STATCOM 用于抑制 HVDC 系统换相失败及换相失败连锁反应的能力。仿真中 HVDC 系统是基于国际大电网标准直流测试系统 CIGRE 标准测试模型建立的单端及双端系统, 参数如表 2 所示<sup>[10,23]</sup>。在仿真 1 中, 分别将 SDBC-STATCOM 和 GSSBC-STATCOM 接入单馈入 HVDC 的逆变端, 如图 9 所示。在仿真 2 和仿真 3 中, 均将 GSSBC-STATCOM 接入双馈入 HVDC, 如图 10 所示。

表 2 系统参数

Table 2 System parameters

	HVDC	
	HVDC1	HVDC2
容量	1000 MW	1000 MW
SCR	2.5(逆变端)	3.5(逆变端)
直流母线电压	500 kV	
交流母线电压	230 kV	
联络线	80 km, $Z_{12}=5.392+j32.345 \Omega$	
STATCOM		
额定容量	100 Mvar	
子模块数	20	
子模块电容电压额定值	3.2 kV	
子模块电容值	16 mF	
桥臂串联电感	8.823 mH	
变压器变比	230/60	

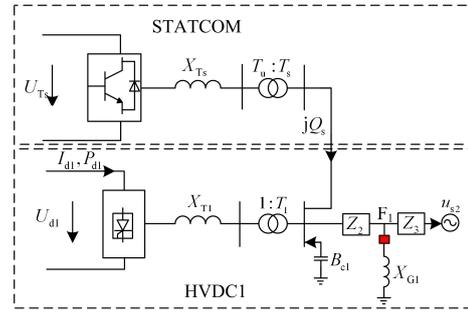


图 9 单馈入 HVDC 仿真系统

Fig. 9 Simulation system of single-iefed HVDC

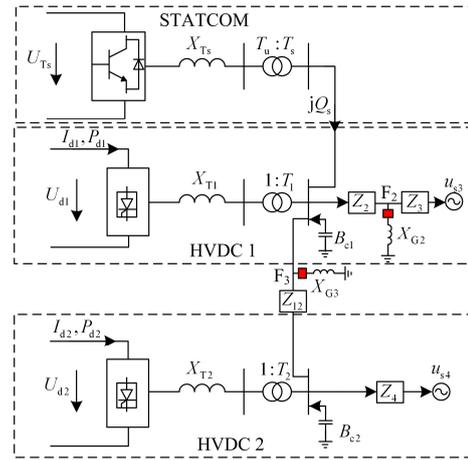
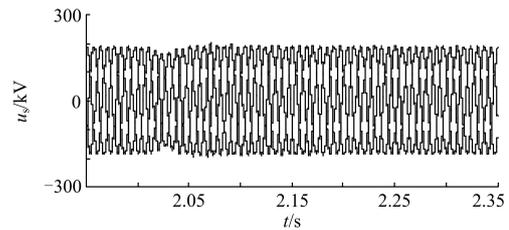
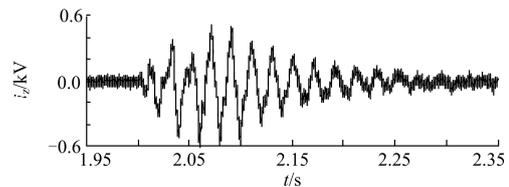


图 10 双馈入 HVDC 仿真系统

Fig. 10 Simulation system of dual-iefed HVDC



(a) 故障时逆变端电网电压



(b) GSSBC-STATCOM 输出的零序电流

图 11 故障时逆变端电网电压及 STATCOM 输出的零序电流

Fig. 11 Grid voltage of the inverter and the zero-sequence current of the STATCOM under fault condition

#### 4.1 仿真 1

针对单馈入 HVDC 进行仿真。假设逆变侧电网在 2.0 s 时发生单相接地故障(图 9 F<sub>1</sub>)，导致电压跌

落(如图 11(a)所示), 并发生换相失败(如图 12 分图所示), 2.1 s 时故障消除。通过在 HVDC 逆变侧接入 STATCOM, 在电网故障瞬间发出无功功率, 稳定接入点电压, 从一定程度上抑制换相失败。本仿真分别将 SDBC-STATCOM 和 GSSBC-STATCOM 接入输电系统逆变侧, 比较相同电压跌落情况下, 不接 STATCOM、接 SDBC-STATCOM 和接 GSSBC-STATCOM 时抑制 HVDC 换相失败的性能, 表明输出零序对抑制换相失败的影响。

由图 12 可知, (1) 当交流系统发生故障时, 接入 SDBC-STATCOM 会减小交流电网的电压降程度;

(2) 由于 GSSBC-STATCOM 可以输出零序电流, 交流电网电压降程度比接入 SDBC-STATCOM 更小, 表明输出零序对稳定电网电压的作用; (3) 系统电压跌落时, 不接 STATCOM 所对应的关断角为 1.96°, 接入 SDBC-STATCOM 所对应的关断角为 3.87°, 接入 GSSBC-STATCOM 所对应的关断角为 4.25°, 表明接入 STATCOM 对直流输电系统换相失败的抑制作用, 而且由于 GSSBC-STATCOM 可以输出零序电流(如图 11(b)所示), 因而可以更快地输出无功, 抑制换相失败的效果更好。

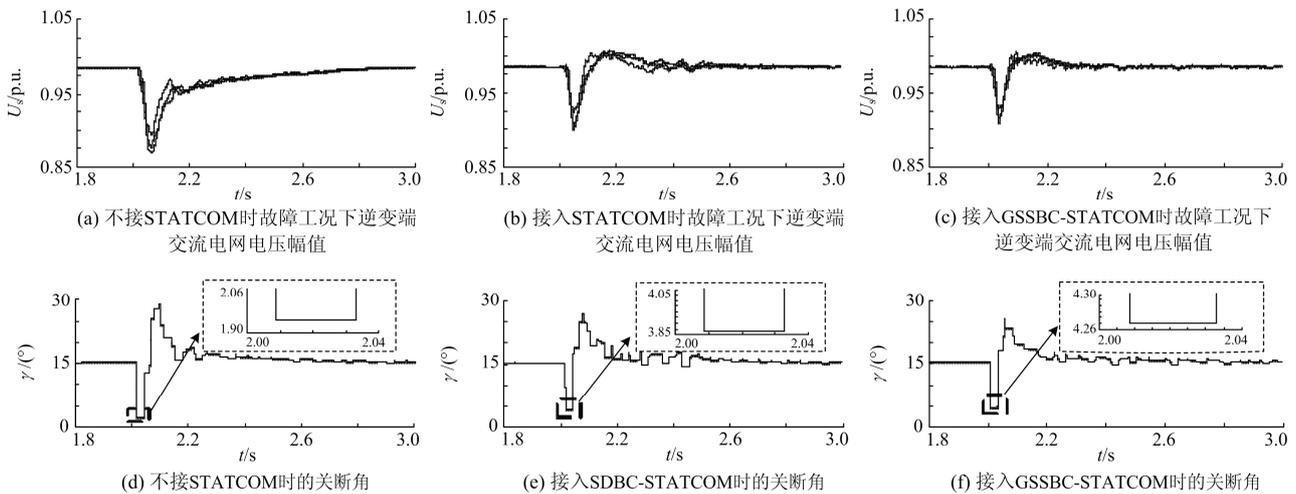


图12 仿真1波形

Fig. 12 Simulation results of case one

### 4.2 仿真 2

仿真 2 中, 设定 1.5 s 时在支路 1 逆变侧的交流线路上发生单相接地故障(图 10 F<sub>2</sub> 处), 1.6 s 消除。不接入和接入 GSSBC-STATCOM 的情况下, 换相关断角和直流系统输送的功率如图 13 所示。由图 13 可知, 不接 STATCOM 时, 支路 1 和支路 2 的换相关断角在故障情况下均降为 0°, 两条支路均发生换相失败; 而接入 GSSBC-STATCOM 后, 支路 1 的换相关断角为 0°, 支路 2 约为 10°, 支路 2 的换相失败被抑制。不接 STATCOM 时, 两条支路输送的功率均下降到 0.2 MW, 而接入 GSSBC-STATCOM 后, 支路 2 输送的功率几乎不受影响, 支路 1 输送的功率较不接 STATCOM 时有所提高。该仿真表明接入 GSSBC-STATCOM 对抑制换相失败及连锁反应的作用。需要说明的是: 仿真中为了造成换相失败的连锁反应, 加在支路 1 的故障必须很严重, 在该情况下, GSSBC-STATCOM 未能抑制支路 1 的换相失败, 但提高了其在故障时输送的功率。

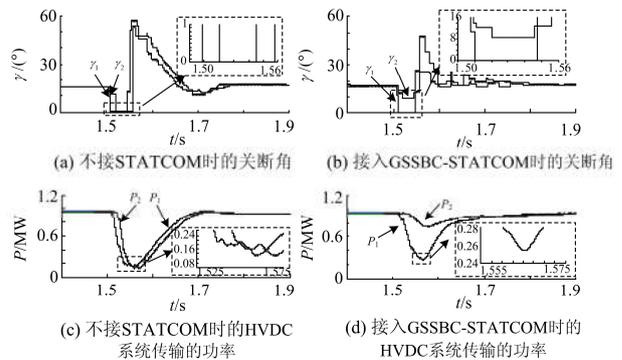


图13 仿真2波形

Fig. 13 Simulation results of case two

### 4.3 仿真 3

仿真3中, 设定1.5 s时在两条线路的联络线上发生单相接地故障(图10 F<sub>3</sub>), 1.6 s时消除。不接和接入GSSBC-STATCOM的情况下, 换相关断角和直流系统输送的功率如图14所示。由图14可知, 不接

STATCOM时, 支路1和支路2的换相关断角在故障情况下均降为 $0^\circ$ , 两条支路均发生换相失败; 而接入GSSBC-STATCOM后, 支路1的换相关断角约为 $11^\circ$ , 支路2约为 $15^\circ$ , 两条支路的换相失败均被抑制。不接STATCOM时, 两条直流支路输送的功率均下降到约为 $0.2\text{ MW}$ , 而接入GSSBC-STATCOM后, 两条支路输送的功率几乎不受影响。该仿真表明接入GSSBC-STATCOM对抑制换相失败及连锁反应的作用。

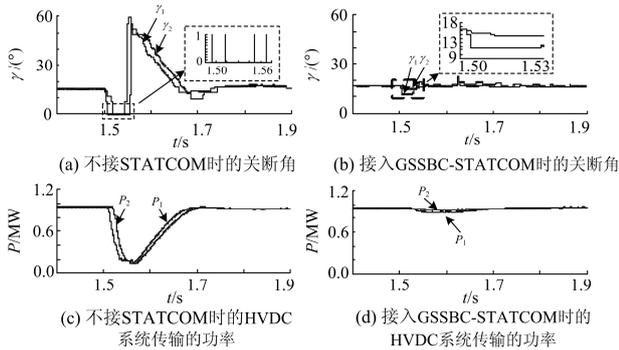


图14 仿真3波形

Fig. 14 Simulation results of case three

## 5 结论

本文针对HVDC中的换相失败问题提出了一种STATCOM补偿方案。该方案将星型级联H桥STATCOM中性点直接接地, 具备下述优点: 1) 保留了星型级联H桥STATCOM经济性高的优点; 2) 三相换流链完全独立, 控制简单灵活, 解决了星型级联H桥STATCOM在电网电压不平衡时的控制问题; 3) 利用HVDC接入的交流电网中性点直接接地的特点构成零序电流通路, 可以输出零序无功电流。本文详细分析了该补偿方案在各项特性上的优点以及在HVDC中的可行性; 详细推导了电网电压不平衡情况下, 换流链电流指令中的零序电流分量; 给出了控制策略并在PSCAD/EMTDC中搭建了三组仿真。仿真结果表明, 本文提出的方案由于可以输出零序电流, 在抑制HVDC换相失败的性能上优于已有的三种拓扑。

## 参考文献

[1] 张文亮, 汤涌, 曾南超. 多端高压直流输电技术及应用前景[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 1-6.  
ZHANG Wenliang, TANG Yong, ZENG Nanchao. Multi-terminal HVDC transmission technologies and its application prospects in China[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 1-6.

[2] 王钢, 李志铿, 黄敏, 等. HVDC输电系统换相失败的故障合闸角影响机理[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 49-54, 102.  
WANG Gang, LI Zhikeng, HUANG Min, et al. Influence of initial fault voltage angle on commutation failure identification in a HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 49-54, 102.

[3] 夏成军, 杨仲超, 周保荣, 等. 考虑负荷模型的多回直流同时换相失败分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 76-81.  
XIA Chengjun, YANG Zhongchao, ZHOU Baorong, et al. Analysis of commutation failure in multi-infeed HVDC system under different load models[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 76-81.

[4] 彭忠, 李少华, 李泰. 高压直流输电系统抑制换相失败的最小关断面积控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 75-80.  
PENG Zhong, LI Shaohua, LI Tai. A minimum extinction area control strategy to suppress commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 75-80.

[5] 许朋见, 黄金海, 许静静, 等. 宾金特高压直流换相失败保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 140-146.  
XU Pengjian, HUANG Jinhai, XU Jingjing, et al. Study of Bin-Jin UHVDC project commutation failures protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 140-146.

[6] 吴文辉, 刘会金. 静止同步补偿器(STATCOM)技术的研究现状与发展[J]. 华东交通大学学报, 2005, 22(2): 89-94.  
WU Wenhui, LIU Huijin. Research status and development of static synchronous compensator[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2005, 22(2): 89-94.

[7] 李勇, 程汉湘, 方伟明, 等. 无功补偿装置在电力系统的应用综述[J]. 广东电力, 2016, 29(6): 87-92.  
LI Yong, CHENG Hanxiang, FANG Weiming, et al. Review on application of reactive power compensation device in power systems[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(6): 87-92.

[8] 辛拓, 王延纬, 孙吉波. STATCOM动态无功储备及其影响因素分析[J]. 广东电力, 2016, 29(6): 56-60, 108.  
XIN Tuo, WANG Yanwei, SUN Jibo. Analysis on STATCOM dynamic reactive power reservation and its influencing factors[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(6): 56-60, 108.

[9] 张红丽, 刘福锁, 李威. 动态无功补偿装置提高多馈入直流恢复的布点方法[J]. 电力系统自动化, 2016,

- 40(5): 133-138.  
ZHANG Hongli, LIU Fusuo, LI Wei. Site selection for dynamic reactive power compensation and improvement of recovery from commutation failures in multi-infeed HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 133-138.
- [10] 赵成勇, 李丹, 刘羽超, 等. 含有STATCOM的高压直流输电系统控制方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2440-2448.  
ZHAO Chengyong, LI Dan, LIU Yuchao, et al. Control method for HVDC system with STATCOM[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2440-2448.
- [11] PENG F Z, LAI J, MCKEEVER J, et al. A multilevel voltage-source inverter with separate DC sources for static var generation[C] // Conf Rec IEEE-IAS Annu Meeting, 1995.
- [12] AKAGI H. Classification, terminology, and application of the modular multilevel cascade converter (MMCC)[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3119-3130.
- [13] SONG Qiang, LIU Wenhua. Control of a cascade STATCOM with star configuration under unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(1): 45-58.
- [14] SHI Youjie, LIU Bangyin, SHI Yanjun, et al. Individual phase current control based on optimal zero-sequence current separation for a star-connected cascade STATCOM under unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(3): 2099-2110.
- [15] PENG Fangzheng, WANG Jin. A universal STATCOM with delta-connected cascade multilevel inverter[C] // Proc 2004 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conf.
- [16] HAGIWARA M, MAEDA R, AKAGI H. Negative-sequence reactive-power control by a PWM STATCOM based on a modular multilevel cascade converter (MMCC-SDBC)[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(2): 720-729.
- [17] DU Sixing, LIU Jinjun, LIN Jiliang, et al. A novel DC voltage control method for STATCOM based on hybrid multilevel H-bridge converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 101-111.
- [18] HAGIWARA M, MAEDA R, AKAGI H. Negative-sequence reactive-power control by the modular multilevel cascade converter based on double-star chopper-cells (MMCC-DSCC)[C] // 2010.
- [19] DU Sixing, LIU Jinjun. A study on DC voltage control for chopper-cell-based modular multilevel converters in D-STATCOM application[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2030-2038.
- [20] 中国电力企业联合会. 交流电气装置的接地设计规范: GB/T 50065—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.  
China Electricity Council. Code for design of AC electrical installations earthing: GB/T 50065—2011[S]. Beijing: China Planning Press, 2011.
- [21] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [22] 王广柱, 孙常鹏, 刘汝峰, 等. 基于桥臂电流控制的模块化多电平变换器综合控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 458-464.  
WANG Guangzhu, SUN Changpeng, LIU Rufeng, et al. Modular multilevel converter control strategy based on arm current control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 458-464.
- [23] SZECHTMAN M, WESS T, THIO C V. A benchmark model for HVDC system studies[C] // International Conference on AC and DC Power Transmission, London, UK, 1991: 374-378.

收稿日期: 2017-02-21; 修回日期: 2017-07-01

作者简介:

王 轩(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统和电力电子技术的研究与开发; E-mail: wangxuan\_power@126.com

魏 宏(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力工程设计等; E-mail: weihong\_555@126.com

欧朱建(1989—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为多电平变换器。E-mail: zj\_ou89@163.com

(编辑 姜新丽)