

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201163

# 不平衡电压下 IGBT 串联 STATCOM 稳定运行范围确定及应用

龙云波<sup>1</sup>, 张曦<sup>1</sup>, 徐永海<sup>1</sup>, 张持<sup>1</sup>, 徐少博<sup>1</sup>, 刘亚民<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;  
2. 国网河北省电力有限公司邯郸供电分公司, 河北 邯郸 056000)

**摘要:** 利用绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)串联技术, 可使压接型 IGBT 串联静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)采用结构简单的三相两/三电平拓扑便可直挂于高压配电系统。但是配电系统中电压不平衡会使 STATCOM 直流侧电容电压产生二倍频波动, 严重危及设备运行安全。利用能量守恒建立 STATCOM 直流电压二倍频波动的数学模型并进行简化, 进而分析直流电压波动与电压不平衡度、直流电容容值以及直流电压幅值之间的关系, 提出压接型 IGBT 串联 STATCOM 直流电压波动稳定运行范围确定方法, 实现不平衡电压下对装置运行稳定性的直观判断。最后, 通过仿真验证了所提方法的正确性和有效性。

**关键词:** 静止同步补偿器; IGBT 串联; 电压不平衡; 直流电压波动; 运行范围

## Determination and application of stable operation range of series-connected STATCOM with IGBT under unbalance voltage

LONG Yunbo<sup>1</sup>, ZHANG Xi<sup>1</sup>, XU Yonghai<sup>1</sup>, ZHANG Chi<sup>1</sup>, XU Shaobo<sup>1</sup>, LIU Yamin<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Handan Electric Power Supply Branch, State Grid Hebei Electric Power Supply Co., Ltd., Handan 056000, China)

**Abstract:** With presspack module of Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) connected in series, Static Synchronous Compensator (STATCOM) can be connected to high voltage distribution system directly by a three-phase two/three level converter topology. However, the DC capacitor voltage in STATCOM can be disturbed by unbalance voltage in distribution system and began to be fluctuated at 100 Hz, which would bring great danger to the operation of equipment. According to conservation of energy, the mathematical models of STATCOM DC voltage fluctuations is established and simplified, and the relationship between DC voltage fluctuations with unbalance factor, capacity of DC capacitor and DC voltage amplitude is analyzed. Then, to realize the intuitive judgment of the device operation stability under unbalanced voltage, the method to determine the stable operating range of the DC voltage fluctuation of IGBT series-connected STATCOM with IGBT presspack modules is purposed. Finally, the correctness and effectiveness of proposed method is verified by simulations.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5500-201913130A-0-0-00).

**Key words:** STATCOM; series-connected IGBT; voltage unbalance; DC voltage fluctuation; operation range

## 0 引言

静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)作为一种并联无功补偿的重要技术手段, 已广泛应用于现代电力系统<sup>[1]</sup>。目前, 由于受到

绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)耐压能力的限制, 应用于 10~35 kV 配电系统的 STATCOM 大多采用 H 桥级联拓扑接入系统, 其向更高电压等级应用的过程中需级联大量 H 桥模块以满足装置耐压的要求, 由此也导致电路结构和控制相对复杂, 从而限制了 STATCOM 的进一步推广。除了 H 桥级联拓扑, IGBT 串联拓扑也是 STATCOM 向更高电压等级应用的技术路线之一。近年来, 随

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助 (5500-201913130A-0-0-00)

着以 StakPak 模块为代表的压接型 IGBT 串联技术日渐成熟, 加之其失效后呈导通状态的工作特性, 使得 STATCOM 可以通过 IGBT 串联构成三相两/三电平换流器直挂于 10~35 kV 及以上配电系统, 从而降低设备成本, 简化电路结构和控制, 增强配电系统安全、经济运行的控制能力<sup>[2-4]</sup>。

当系统三相电压不平衡时, IGBT 串联 STATCOM 直流电容上会产生相应的二倍频电压波动<sup>[5-6]</sup>, 使装置直流电容承受的电压升高, 影响设备的安全运行。为解决上述问题, 通过控制策略加入相应的附加控制进行电压波动抑制是较为常规的方法, 并使得 STATCOM 在一定运行范围内得到了良好的抑制效果<sup>[7-11]</sup>, 但对于高压配电网中电气化铁路、钢铁冶炼等不平衡度较大的极端运行场景, 附加的波动抑制策略并不适用于所有的运行工况, STATCOM 的运行安全仍需要从主电路参数上确保。由于压接型 IGBT 串联 STATCOM 直流电容直接耐受直流母线的高压, 较大的直流电压波动可能导致直流电容绝缘性能下降, 甚至元件损坏。因此, 在电路参数选择后, 通过简便的计算方法, 直观地判断出当前关键元件的参数能否满足装置在极端工况下稳定运行的要求就显得极为重要。

为此, 本文通过分析系统电压不平衡对压接型 IGBT 串联 STATCOM 直流电压波动的作用机理, 建立相应的电压波动模型, 结合中高压应用场景可能出现的极端条件划定 STATCOM 的稳定运行边界, 作为装置能否稳定运行的判断依据, 进而实现装置在当前元件参数下能否承受住直流电压波动的直观判定。由于压接型 IGBT 串联 STATCOM 采用两/三电平换流器拓扑, 电压不平衡引起直流电压波动的作用机理可借鉴后者的分析方法。由功率守恒定则, 文献[12]得到两电平 STATCOM 在不平衡工况下的直流电压波动模型, 但忽略了联系电抗上因耦合产生的二倍频有功损耗, 文献[13]较文献[12]考虑上述功率损耗的影响并得到两电平换流器的电压波动模型, 可针对 STATCOM 的运行特性进行电压波动模型简化。在 STATCOM 的装置稳定运行极限分析方面, 文献[14]由并网电压不平衡度、补偿电流不平衡度与装置额定电压之间的定量关系, 推导出 H 桥级联 STATCOM 的补偿极限, 文献[15]较文献[14]用关键参数对补偿极限的影响进行了量化讨论, 但两者均以 H 桥级联 STATCOM 作为对象讨论装置的补偿极限, 与本文所需讨论运行边界有所区别, 但其极限划定方法值得借鉴。在衡量装置电容参数对直流电压稳定运行的影响方面, 文献[16-18]对直流电容参数与装置直流电压波动的关系

进行了分析, 文献[19]分析了系统故障所带来的不平衡电压下直流电容参数与直流电压波动以及对装置运行的影响, 但上述工作主要为直流电容参数设计服务, 并没有对不平衡电压下影响装置自身的因素进行全面考虑, 且所讨论的 H 桥级联拓扑因直流电容串联于各 H 桥子模块中, 桥臂电流通路流经直流电容后引起 H 桥子模块直流电容电压波动。而 IGBT 串联 STATCOM 所采用的拓扑直流电容位于换流器直流侧, 并联于换流器的三相桥臂, 对直流电容电压波动的作用方式不同, 需采用不同的电路模型进行分析, 故无法将针对 H 桥级联拓扑的分析结论直接用于 IGBT 串联 STATCOM 的稳定运行分析。

本文分析了不平衡工况下两电平 IGBT 串联 STATCOM 直流电压波动模型, 并根据 STATCOM 的运行特性结合单位电容常数的概念对其直流电压波动模型进行简化。基于简化模型, 讨论了直流电压波动与电压不平衡度、直流电容容值以及直流电压幅值之间的关系, 进而得到了针对直流电压波动的稳定运行范围。最后通过基于 PSCAD 的数字仿真实验对上述结论进行了验证。

## 1 不平衡电压对 STATCOM 直流侧电压影响

### 1.1 主电路模型

三相两电平 IGBT 串联 STATCOM 系统结构框图如图 1 所示, 图中  $V_{dc}$  为 STATCOM 直流侧电压,  $C_{eq}$  为直流侧等效电容,  $L$  为联系电抗,  $e_{abc}$ 、 $u_{abc}$ 、 $i_{abc}$ 、 $S_{abc}$  分别为 A、B、C 三相系统交流电压、STATCOM 输出电压、STATCOM 注入电流和 IGBT 串联等效开关阀。考虑到 IGBT 串联 STATCOM 开关阀内 IGBT 器件动作一致, 故将串联阀组等效成单个开关模型, 并假设其开关损耗可忽略不计。

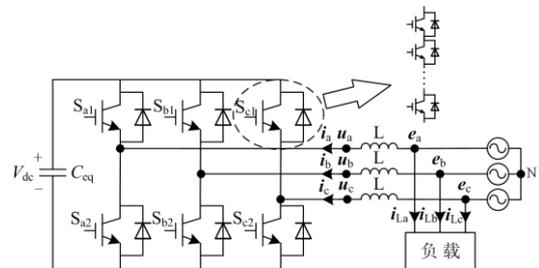


图 1 IGBT 串联 STATCOM 系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of series-connected IGBTs in STATCOM system

考虑到在 10~35 kV 配电系统多为中性点不接地系统, 故不考虑零序分量的影响。由对称分量法, 可得

$$f_{abc}(t) = f_{abc}^+(t) + f_{abc}^-(t) \quad (1)$$

由此, 定义正负序  $dq$  变换关系如式(2)所示。

$$\begin{cases} f_{dq}^+(t) = T(\omega t) f_{abc}^+(t) \\ f_{dq}^-(t) = T(-\omega t) f_{abc}^-(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中,

$$T(\omega t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - 2\pi/3) & -\sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据三相功率定义, 系统发出的有功功率  $P_S$  可表示为

$$P_S = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (4)$$

对于三相无耦合的联系电抗  $L$ , 其存储的能量可用  $W_L$  表示。对  $W_L$  求导可得到联系电抗  $L$  上的有功功率损耗  $P_L$ , 即

$$P_L = \frac{dW_L}{dt} = \frac{1}{2} L \frac{d(i_a^2 + i_b^2 + i_c^2)}{dt} \quad (5)$$

根据功率守恒, IGBT 串联 STATCOM 吸收的有功功率  $P$  为系统发出的有功功率  $P_S$  与联系电抗  $L$  上的有功功率损耗  $P_L$  之和, 即  $P = P_S + P_L$ 。其中  $P$ 、 $P_S$  和  $P_L$  都为瞬时值。文献[14]通过广义平均值模型和波动分析, 得出 STATCOM 直流电压的波动仅与  $P$  上功率波动有关的结论。由此, 电压波动幅值  $V_{dc}$  表示为

$$V_{dc} = \frac{\sqrt{P_d^2 + P_q^2}}{2C_{eq} \omega V_{ref}} \quad (6)$$

式中:  $V_{ref}$  为直流参考电压;  $P_d$  和  $P_q$  为有功功率在  $d$ 、 $q$  轴的二倍频波动分量的幅值, 两者在不平衡工况下为稳态值且不为 0。 $P_d$  和  $P_q$  可表示为

$$P_d = \frac{3}{2} [e_d^+ i_d^- + e_d^- i_d^+ + e_q^+ i_q^- + e_q^- i_q^+ + 2L\omega(i_d^+ \cdot i_q^- - i_q^+ \cdot i_d^-)] \quad (7)$$

$$P_q = \frac{3}{2} [e_d^+ i_q^- - e_d^- i_q^+ + e_q^+ i_d^- - e_q^- i_d^+ - 2L\omega(i_d^+ \cdot i_d^- + i_q^+ \cdot i_q^-)] \quad (8)$$

式中:  $e_d^+$ 、 $e_q^+$ 、 $e_d^-$ 、 $e_q^-$  分别为三相系统电压  $e_{abc}$  经式(1)和式(2)变换后得到的正序  $d$ 、 $q$  轴分量和负序  $d$ 、 $q$  轴分量; 同理,  $i_d^+$ 、 $i_q^+$ 、 $i_d^-$ 、 $i_q^-$  分别为三相 STATCOM 注入电流的正序  $d$ 、 $q$  轴分量和负序  $d$ 、 $q$  轴分量。

## 1.2 IGBT 串联 STATCOM 直流电压波动模型

引用国标《GB/T 15543-2008 电能质量三相电压不平衡》对不平衡度的定义, 电压不平衡度  $\lambda_U$  和电流不平衡度  $\lambda_I$  分别为电压、电流负序基波分量与

正序基波分量的均方根值百分比<sup>[20-21]</sup>。

由此, 三相不平衡系统的交流电压  $e_{abc}$  和三相 STATCOM 注入电流  $i_{abc}$  可用电压不平衡度  $\lambda_U$  和电流不平衡度  $\lambda_I$  表示为

$$\begin{cases} e_a = E_{pm} \cos(\omega t + \varphi^+) + \lambda_U E_{pm} \cos(\omega t + \varphi^-) \\ e_b = E_{pm} \cos(\omega t + \varphi^+ - 2\pi/3) + \lambda_U E_{pm} \cos(\omega t + \varphi^- + 2\pi/3) \\ e_c = E_{pm} \cos(\omega t + \varphi^+ + 2\pi/3) + \lambda_U E_{pm} \cos(\omega t + \varphi^- - 2\pi/3) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} i_a = I_{pm} \cos(\omega t + \delta^+) + \lambda_I I_{pm} \cos(\omega t + \delta^-) \\ i_b = I_{pm} \cos(\omega t + \delta^+ - 2\pi/3) + \lambda_I I_{pm} \cos(\omega t + \delta^- + 2\pi/3) \\ i_c = I_{pm} \cos(\omega t + \delta^+ + 2\pi/3) + \lambda_I I_{pm} \cos(\omega t + \delta^- - 2\pi/3) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $E_{pm}$  为系统正序电压幅值;  $I_{pm}$  为输出正序电流幅值;  $\varphi^+$ 、 $\varphi^-$  为系统正序和负序电压的相位;  $\delta^+$ 、 $\delta^-$  为输出正序和负序电流的相位。

在 IGBT 串联 STATCOM 稳态运行时, 根据正序基波电流与电压相位关系, 可得

$$\begin{cases} \sin(\delta^+) = \sin\left(\varphi^+ \mp \frac{\pi}{2}\right) = \mp \cos(\varphi^+) \\ \cos(\delta^+) = \cos\left(\varphi^+ \mp \frac{\pi}{2}\right) = \pm \sin(\varphi^+) \end{cases} \quad (11)$$

式中, “+”、“-” 分别表示系统向 STATCOM 输送感性、容性无功功率。将式(11)代入式(9)、式(10)得

$$\begin{bmatrix} e_d^+ \\ e_d^- \\ e_q^+ \\ e_q^- \end{bmatrix} = E_{pm} \begin{bmatrix} \cos(\varphi^+) \\ \lambda_U \cos(\varphi^-) \\ \sin(\varphi^+) \\ -\lambda_U \sin(\varphi^-) \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_d^+ \\ i_d^- \\ i_q^+ \\ i_q^- \end{bmatrix} = I_{pm} \begin{bmatrix} \pm \sin(\varphi^+) \\ \lambda_I \cos(\delta^-) \\ \mp \cos(\varphi^+) \\ -\lambda_I \sin(\delta^-) \end{bmatrix} \quad (12)$$

将式(12)代入式(6)一式(8)得

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{(E_{pm} I_{pm} A \pm 2L\omega I_{pm}^2 C)^2 + (E_{pm} I_{pm} B \mp 2L\omega I_{pm}^2 D)^2}}{4C_{eq} \omega V_{ref}} \quad (13)$$

其中,

$$\begin{cases} A = -\lambda_I \cos(\varphi^+ - \delta^-) \pm \lambda_U \sin(\varphi^+ + \varphi^-) \\ B = -\lambda_I \sin(\varphi^+ + \delta^-) \pm \lambda_U \cos(\varphi^+ - \varphi^-) \\ C = \lambda_I \cos(\varphi^+ - \delta^-) \\ D = \lambda_I \sin(\varphi^+ + \varphi^-) \end{cases}$$

## 2 IGBT 串联 STATCOM 直流电压波动分析

2.1 IGBT 串联 STATCOM 直流电压波动模型简化  
为简化分析, 将不平衡电压与不平衡电流对 STATCOM 的影响分别考虑, 本文假设 IGBT 串联

STATCOM 输出的负序电流已通过正负序双环控制进行抑制, 即  $\lambda_1 = 0$ , 仅只考虑不平衡电压对 IGBT 串联 STATCOM 直流电压波动幅值  $V_{dc}^-$  的影响, 由此可将式(13)化简为

$$V_{dc}^- = \frac{3E_{pm} I_{pm} \lambda_U}{4C_{eq} \omega V_{ref}} \quad (14)$$

为了直观地体现电压不平衡度与直流电压波动的关系, 并将不同电压等级、不同容量的 STATCOM 直流电容的储能能力统一到相同评估体系中, 论文引用日本学者 Akagi 提出的单位电容常数 (Unit Capacitance Constant, UCC) 的概念<sup>[22]</sup>, 通过单位电容常数  $H$  (单位为 J/VA 或 s) 将换流器的直流电容、直流电压和额定功率联系起来, 表征直流电容储能能力, 即

$$H = \frac{C_{eq} V_{ref}^2}{2Q} \quad (15)$$

式中,  $Q$  为 IGBT 串联 STATCOM 额定无功输出容量。将式(15)代入式(14), 直流电压波动幅值  $V_{dc}^-$  可化简为

$$V_{dc}^- = \frac{3E_{pm} I_{pm} \lambda_U V_{ref}}{8HQ} \quad (16)$$

为了体现直流电压波动幅值  $V_{dc}^-$  对不同设备容量  $Q$  和直流参考电压  $V_{ref}$  影响的大小, 根据无功功率的定义,  $Q$  可表示为

$$Q = \frac{3}{2} (e_d^+ i_q^+ - e_q^+ i_d^+) = \frac{3}{2} E_{pm} I_{pm} \sqrt{1 + \lambda_U^2} \quad (17)$$

将式(17)代入式(14)一式(16), IGBT 串联 STATCOM 直流电压波动率  $V_{dc}^- \%$  如式(18)所示, 表示直流电压波动峰值占直流电压的比例。

$$V_{dc}^- \% = \frac{2V_{dc}^-}{V_{ref}} \times 100 = \frac{50}{\omega H \sqrt{1 + \lambda_U^2}} \quad (18)$$

## 2.2 电压不平衡度对直流电压波动影响分析

根据式(17), 在单位电容常数  $H$  确定的前提下, 直流电压波动率  $V_{dc}^- \%$  与电压不平衡度  $\lambda_U$  呈幂函数关系, 其变化规律如图 2 所示。

由图 2 可知, 随着系统电压不平衡度的增加, IGBT 串联 STATCOM 的直流电压波动率上升, 这也就意味着直流电压的波动幅值在升高。此外, 单位电容常数  $H$  的取值不同, 电压不平衡度  $\lambda_U$  与直流电压波动率  $V_{dc}^- \%$  呈不同斜率变化。 $H$  的取值越小, 表示 STATCOM 的直流电容储能能力越弱, 对应的变化曲线斜率越高, 不平衡电压对 STATCOM 直流电容的影响越大。

若 IGBT 串联 STATCOM 在国标要求系统电压

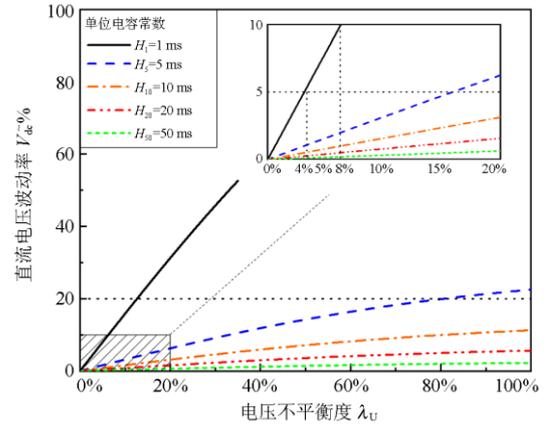


图 2 直流电压波动率与电压不平衡度的关系

Fig. 2 Relationship between DC voltage fluctuation rate and voltage unbalance factor

不平衡度  $\lambda_U$  短时不超过 4% 的条件下运行, 当  $H$  的取值大于 1 ms 便可将直流电压波动率  $V_{dc}^- \%$  控制在 5% 之内, 但此情况下直流电压波动率  $V_{dc}^- \%$  的斜率过大。若系统电压不平衡度  $\lambda_U$  上升至 8% 以上时, 直流电压波动率  $V_{dc}^- \%$  将超过 10%。由文献[23]对电气化铁路电能质量实测结果可知, 华北三马坊变 110 kV 母线和山西义井变的电压不平衡度  $\lambda_U$  最大值分别为 14.36% 和 14.41%。近似取电压不平衡度  $\lambda_U$  为 15% 作为 IGBT 串联 STATCOM 电压不平衡工况极限, 在此情况下 STATCOM 将难以在将近 20% 的直流电压波动率  $V_{dc}^- \%$  下稳定运行。而当  $H$  的取值为 5 ms 时, 在电压不平衡度  $\lambda_U$  小于 15% 的条件下, IGBT 串联 STATCOM 的直流电压波动率  $V_{dc}^- \%$  均小于 5%。

综合考虑, 要使 STATCOM 在系统电压不平衡度极端 (不平衡度为 15%) 条件下稳定运行, 直流电压波动率  $V_{dc}^- \%$  需保持在 5% 以下。为满足 STATCOM 稳定运行的需求, 考虑到电容实际容值可能的偏差,  $H$  的取值应不小于 5 ms。

## 2.3 直流电容取值影响分析

单位电容常数  $H$  的引入, 可以较为直观地体现电压不平衡度  $\lambda_U$  和直流电压波动率  $V_{dc}^- \%$  的关联情况, 但单位电容常数  $H$  由直流参考电压  $V_{ref}$ 、额定容量  $Q$  和直流电容容值  $C_{eq}$  共同决定。为更好地体现直流电压波动与直流电容容值的关系, 设直流电容容抗  $X_C$  为

$$X_C = K_C X_B = K_C \frac{U_N^2}{Q_N} \quad (19)$$

式中： $X_B$  为 STATCOM 基准电抗； $K_C$  为容抗系数，表示直流电容容抗与基准电抗的比值，其值通常小于 1。由式(19)可将直流电容容值  $C_{eq}$  表示为

$$C_{eq} = \frac{Q_N}{\omega K_C U_N^2} = \frac{Q_N}{\omega K_C \left( \frac{V_{ref}}{\sqrt{2}M} \right)^2} = \frac{2M^2 Q_N}{\omega K_C V_{ref}^2} \quad (20)$$

式中， $M$  为电压比率系数，表示 STATCOM 直流电压与交流系统额定电压峰值的比值，其值通常大于 1 小于 2。将式(20)代入式(15)，并将整理结果代入式(18)，可将直流电压波动率  $V_{dc}^{\sim}\%$  简化为

$$V_{dc}^{\sim}\% = \frac{50K_C}{M^2 \sqrt{1 + \lambda_U^{-2}}} \quad (21)$$

根据式(21)，在系统电压不平衡度极端(不平衡度等于 15%)条件下，直流电压波动率  $V_{dc}^{\sim}\%$ 、电压比例系数  $M$  和容抗系数  $K_C$  三者之间的关系如图 3 所示。当容抗系数  $K_C$  确定的前提下，STATCOM 直流电压波动率  $V_{dc}^{\sim}\%$  随着电压比例系数  $M$  的增大而降低，即当 STATCOM 直流电压的升高，直流电容所存储的电量增加，平抑直流电压波动的能力增强。此外，直流电压波动率  $V_{dc}^{\sim}\%$  变化曲线随着容抗系数  $K_C$  取值减小而整体向下平移，即随着直流电容容值的增加，IGBT 串联 STATCOM 整体的直流电压波动幅值均在减小。

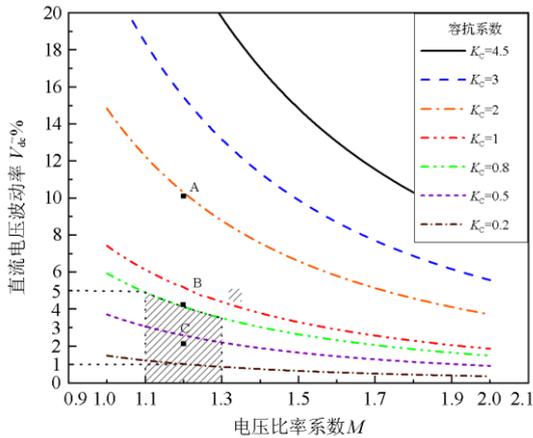


图 3 直流电压波动率与电压比率系数的关系 ( $\lambda_U = 15\%$ )

Fig. 3 Relationship between DC voltage fluctuation rate and voltage ratio coefficient ( $\lambda_U = 15\%$ )

日本学者 Akagi 认为一般换流器直流电容容值对应的单位电容常数  $H$  取值范围在 1~20 ms 之间<sup>[22]</sup>，折合后的容抗系数  $K_C$  在 0.2~4.5 之间。另根据文献<sup>[24]</sup>所述三相换流器的电容容值选取方法，考虑抑制直流电压波动 5% 的条件，计算得到电容容值所对应的容抗系数  $K_C$  也在 4.5 附近。由此，考虑在图

3 中直流电压波动率与电压比率系数变化曲线的关系容抗系数取值范围在 0.2~4.5 之间。

根据工程经验，多数换流器的直流电压均按照正常运行时调制比大约为 0.85 进行设计，即电压比例系数  $M$  为 1.2。根据图 3，在系统电压不平衡度为 15% 的条件下，若容抗系数  $K_C$  取值大于 0.8 时，IGBT 串联 STATCOM 的直流电压波动率接近 5%，将对其稳定运行产生影响；而当容抗系数  $K_C$  小于 0.2 时，IGBT 串联 STATCOM 的直流电压波动率可降至 1% 以下。

### 3 直流电压波动稳定运行范围确定及应用

#### 3.1 运行环境不平衡度分析

配电系统由于受到用电设备特性或者供电居民用电习惯的影响，时常因三相供电负荷不均、配电线路故障运行等情况导致系统电压不平衡。虽然国标《电能质量 三相电压不平衡: GB/T 15543-2008》对电力系统公共连接点电压不平衡度限值进行了规定，即电网正常运行时负序电压不超过 2%、短时不得超过 4%<sup>[15]</sup>。然而，在实际系统中许多应用场景的电压不平衡度均接近或远超国家标准的限制，这给 IGBT 串联 STATCOM 在上述应用场景的稳定运行带来了挑战，其中 10~35kV 配电系统典型场景下电压不平衡度极限如表 1 所示。

表 1 配电系统典型场景下电压不平衡度统计

Table 1 Statistics of voltage unbalance in typical scenarios of distribution system

应用场景	电压不平衡度/%
农村配电网 <sup>[25]</sup>	3
煤矿配电网 <sup>[26]</sup>	3.6
电弧炉 <sup>[27]</sup>	4.4
电气化铁路 <sup>[23]</sup>	14.41

另外，根据国标《电力电子电容器: GB/T 17702-2013》，对于持续运行的 STATCOM 装置，当电容器的最高允许电压超过其额定电压的 1.1 倍时会影响装置的使用寿命<sup>[28]</sup>。传统电容选择方法以装置在平衡工况下正常运行的直流电压为基准，确定电容的额定电压。当中高压系统极端电压不平衡时，直流电压波动会提高电容运行电压峰值。因此，为维持 IGBT 串联 STATCOM 的稳定运行，并考虑一定裕度，应限定装置直流电压波动率  $V_{dc}^{\sim}\%$  在 5% 范围内。

#### 3.2 针对直流电压波动的稳定运行范围确定

根据 IGBT 串联 STATCOM 的运行环境，确定其运行环境可能出现的电压不平衡度  $\lambda_U$  后，可根据 STATCOM 参数估算得到其在图 3 中的运行状态点，

通过判断该状态点是否在针对直流电压波动而划定的稳定运行范围之内, 便可直观地验证当前电容参数是否能够满足 IGBT 串联 STATCOM 在预设运行环境下稳定运行的要求。

根据图 3, 针对直流电压波动而划定的稳定运行范围的边界条件, 可由以下方法确定:

1) 由于 IGBT 串联 STATCOM 直流工作电压大多根据其输出额定交流电压峰值时调制比为 0.85 的工作点进行设计, 折算后可知此时直流电压和输出交流电压峰值的电压比率系数  $M$  大约为 1.18, 考虑到直流电压选取时的近似和取舍, 故在图 3 表示的稳定运行范围左右边界可分别由电压比率系数  $M$  为 1.1 和 1.3 时的两条直线确定, 其边界取值可根据 STATCOM 设计时所取的电压调制比进行调整。

2) 以稳定运行范围满足直流电压波动率小于 5% 条件为例, 结合前期确定电压不平衡度  $\lambda_U$ , 通过式(21)得到左边界和变化曲线在电压波动率为 5% 时的交汇点, 从而得到满足条件的容抗系数  $K_C$ , 进而得到该容抗系数  $K_C$  条件下直流电压波动率  $V_{dc}^{\sim}\%$  随电压比率系数  $M$  的变化曲线, 作为稳定运行范围的上界曲线。

3) 由图 3 曲线的横坐标, 以及根据上面所述稳定运行范围边界确定方法到的左、右和上边界曲线, 便可得到在所确定的电压不平衡度  $\lambda_U$  条件下, 满足直流电压波动率  $V_{dc}^{\sim}\%$  限制的稳定运行范围。

IGBT 串联 STATCOM 的电容参数根据式(21)进行折算, 并得到其在图 3 所示的运行点, 若该运行点落入到预先设定的稳定运行封闭区域(图 3 中阴影部分)内时, 表明 IGBT 串联 STATCOM 的主电路参数能够满足其运行环境下对直流电压波动的要求; 若该运行点落在区域之外, 则表明电容参数不能满足要求, 直流电容参数需重新设计。

#### 4 仿真实验

为对本文系统电压不平衡度条件下直流电压波动情况分析, 并验证本文所提出的直流电压波动的稳定运行范围和电容容值确定方法, 本节通过 PSCAD 仿真软件搭建 STATCOM 模型进行验证。其中, IGBT 串联 STATCOM 的仿真参数见表 2。

图 4 为 IGBT 串联 STATCOM 在不同电压不平衡度  $\lambda_U$  下的直流电压仿真波形。仿真根据文献[23]所述电容容值选择方法, 并以正常运行时直流电压波动率小于 5% 为边界, 计算得到 STATCOM 的电容容值  $C_{eq}$  为 0.085 mF。将系统电压不平衡度  $\lambda_U$  分别设置为 5%、10% 和 15%, 对应的仿真结果见表 3。

表 2 IGBT 串联 STATCOM 仿真参数

Table 2 Series-connected IGBTs in STATCOM simulation parameters

参数	符号	数值
系统频率/Hz	$f$	50
系统电压/kV	$U_N$	10
角频率/(rad/s)	$\omega$	314
装置额定容量/Mvar	$S$	$\pm 12$
装置联系电抗/mH	$L$	2.65
装置直流电压/kV	$V_{dc}$	16.6
开关频率/Hz	$f_c$	5 000

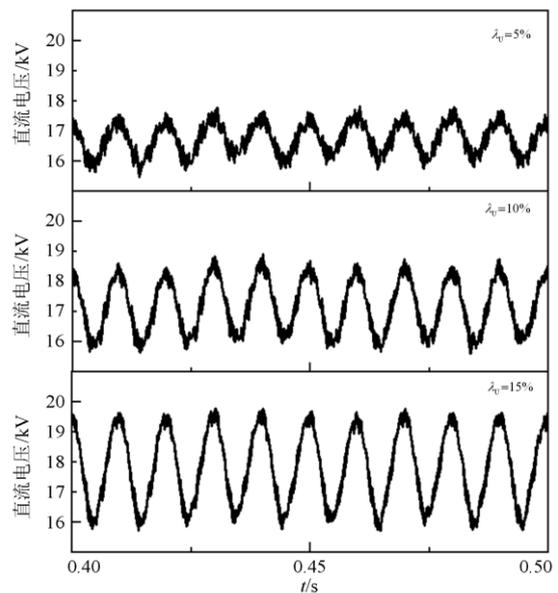


图 4 STATCOM 直流电压波动仿真结果 ( $C_{eq} = 0.085$ )

Fig. 4 Results of STATCOM DC voltage fluctuation simulation ( $C_{eq} = 0.085$ )

表 3 直流电压波动计算与仿真结果

Table 3 Results of DC voltage fluctuation calculation and simulation

$\lambda_U$	计算结果		仿真结果	
	直流电压波动 幅值/kV	$V_{dc}^{\sim}\%$	直流电压波动 幅值/kV	$V_{dc}^{\sim}\%$
5%	1.315	8.138	1.294	7.788
10%	2.692	16.216	2.392	14.397
15%	4.013	24.175	3.374	20.308

此外, 图 4 的仿真结果也表明, 随着电压不平衡度增加, STATCOM 直流电压的波动也在加剧。当电压不平衡度达到 15% 时, STATCOM 的直流电压波动率甚至超过了 10%。由此可见, 利用传统电容

容值选择方法选择电容参数, IGBT 串联 STATCOM 难以在极端不平衡工况下稳定运行。

图 5 为系统电压不平衡度 15% 条件下, IGBT 串联 STATCOM 直流电容取不同容值时的直流电压波动仿真波形。

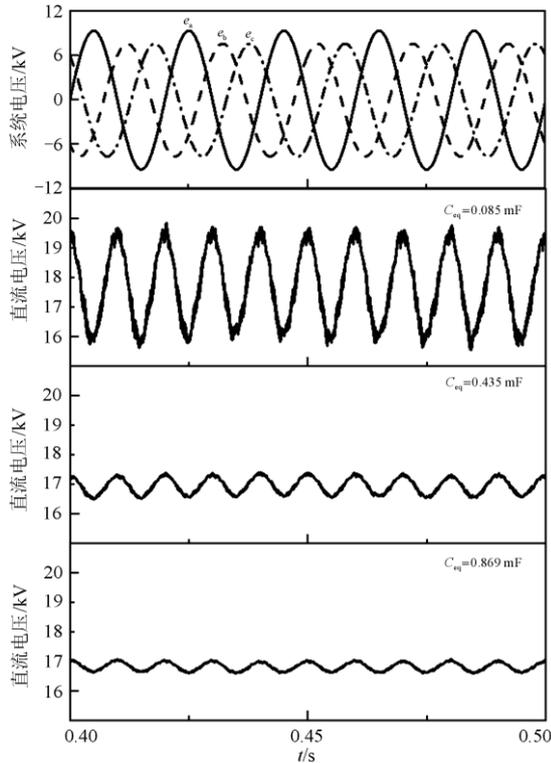


图 5 系统电压和 STATCOM 直流电压波动仿真结果 ( $\lambda_U = 15\%$ )

Fig. 5 Results of STATCOM system voltage and DC voltage fluctuation simulation ( $\lambda_U = 15\%$ )

其中, STATCOM 的三个直流电容容值的选取原则分别为: 常规直流电容参数选择方法得到的电容容值 0.085 mF、单位电容常数  $H$  取 5 ms 和 10 ms 时所对应的电容容值 0.435 mF 和 0.869 mF。图 5 中电容容值为 0.085 mF, 即所对应容抗系数  $K_C$  为 4.5 时, 直流电压波动幅值大约为 3.374 kV; 而电容容值为 0.435 mF 和 0.869 mF, 即对应容抗系数  $K_C$  分别为 0.88 和 0.44 时, 直流电压波动幅值分别降低至 0.690 kV 和 0.374 kV, 直流电压波动率均控制在 5% 之内。

图 5 的仿真结果表明, 容抗系数  $K_C$  的增加可使直流电压波动幅值减小。利用本文所提出的直流电容容值确定方法, 在应用环境电压不平衡度确定的前提下, IGBT 串联 STATCOM 的直流电压波动得到有效抑制。此外, 由于图 3 中针对直流电压波动稳定运行范围下确定的电容参数与图 5 的仿真运行

的电容参数相同, 可用图 5 的仿真结果验证稳定运行范围划定的正确性。此外, 图 5 中三个电容容值 0.085 mF、0.435 mF 和 0.869 mF 的仿真参数, 经过折算后的工作点分别落在图 3 中的 A、B 和 C 点, 其中 A 点落在稳定区域之外, 表示直流电压波动幅值过大, STATCOM 难以稳定运行; B 点落在稳定区域的上边界, 表示 STATCOM 运行于直流电压波动影响稳定运行的临界状态; C 点落在稳定区域内的阴影中, 表示 STATCOM 能够稳定运行。结合图 5, 可以说明本文所提出的针对直流电压波动的稳定运行范围可以正确、直观地衡量不平衡电压对 IGBT 串联 STATCOM 稳定运行的影响。

## 5 结语

本文以 IGBT 串联技术构成的两电平 STATCOM 为研究背景, 通过对不平衡电压下 STATCOM 直流电压波动情况进行建模、分析和仿真, 得到以下结论:

- 1) 不平衡电压将引起 IGBT 串联 STATCOM 直流电压的波动。在极端不平衡电压工况下, 传统电容设计方法选择的直流电容难以维持 STATCOM 安全与稳定。
- 2) 在确定的运行场景下, IGBT 串联 STATCOM 的直流电压波动情况能够由分析、化简得到的直流电压波动简化模型准确描述。
- 3) 本文所提出的直流电压波动的稳定运行范围可以正确、直观地衡量不平衡电压对 IGBT 串联 STATCOM 稳定运行的影响。

## 参考文献

- [1] 杨源, 阳熹, 谭江平, 等. 海上风电场无功配置优化方案[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 195-201.  
YANG Yuan, YANG Xi, TAN Jiangping, et al. Optimization of reactive power configuration for offshore wind farms[J]. Electric Power, 2020, 53(11): 195-201.
- [2] ABB. StakPak IGBT module[EB/OL]. [2020-09-21]. <https://new.abb.com/products>.
- [3] 刘国友, 窦泽春, 罗海辉, 等. 压接型 IGBT 均流设计[J]. 中国电力, 2019, 52(9): 20-29.  
LIU Guoyou, DOU Zechun, LUO Haihui, et al. Current-sharing design of press-pack IGBT[J]. Electric Power, 2019, 52(9): 20-29.
- [4] 刘卫东, 李奇南, 王轩, 等. 大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 55-71.  
LIU Weidong, LI Qinan, WANG Xuan, et al. Application status and prospect of VSC-HVDC technology for large-scale offshore wind farms[J]. Electric Power, 2020,

- 53(7): 55-71.
- [5] 袁义生, 陈旭, 毛凯翔. 基于纹波电压前馈的级联 H 桥整流器输出电压平衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 9-17.  
YUAN Yisheng, CHEN Xu, MAO Kaixiang. Output voltage balance strategy based on ripple voltage feedforward for cascaded H-bridge rectifier[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 9-17.
- [6] 潘汉广, 王军, 宋勇辉. 多电平变换器补偿不平衡负载的应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 136-142.  
PAN Hanguang, WANG Jun, SONG Yonghui. Analysis of multilevel converters in compensating unbalanced load[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 136-142.
- [7] 毛彦辉, 夏明超, 李晓亮, 等. 负载不平衡下 D-STATCOM 控制策略的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 132-139.  
MAO Yanhui, XIA Mingchao, LI Xiaoliang, et al. Simulation study of the control strategy of D-STATCOM in compensating unbalance load[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 132-139.
- [8] 林永朋, 陶顺, 肖湘宁. 电压不平衡条件下并网逆变器的直流电压控制[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1643-1649.  
LIN Yongpeng, TAO Shun, XIAO Xiangning. DC voltage control of grid-connected inverters under imbalanced voltage[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1643-1649.
- [9] 邢超, 奚鑫泽, 李胜男, 等. 大容量 STATCOM 对于受端直流换流站运行与故障特性影响[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 78-85.  
XING Chao, XI Xinze, LI Shengnan, et al. Effect of large capacity STATCOM on operation and fault characteristics of receiving DC converter station[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 78-85.
- [10] 杜田雨, 付子义, 任磊. 不平衡电网下逆变器功率波动/电流质量协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 141-150.  
DU Tianyu, FU Ziyi, REN Lei. Coordinate control of power fluctuation and current quality for inverter[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 141-150.
- [11] 宋平岗, 杨声弟, 郑雅芝, 等. 负载不平衡电力电子变压器直流电压平衡控制策略[J]. 高压电器, 2019, 55(9): 50-56.  
SONG Pinggang, YANG Shengdi, ZHENG Yazhi, et al. DC voltage balance control strategy for load unbalanced power electronic transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(9): 50-56.
- [12] 李旷, 刘进军, 王兆安, 等. 静止无功发生器在电压不平衡下的工作特性及其对不平衡电压的补偿[J]. 电工技术学报, 2006, 21(8): 69-74.  
LI Kuang, LIU Jinjun, WANG Zhaoan, et al. Operation and control of static var generator for voltage unbalance mitigation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(8): 69-74.
- [13] YAZDANI A, IRAVANI R. A unified dynamic model and control for the voltage-sourced converter under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1620-1629.
- [14] 罗锐, 何英杰, 刘云峰. 星接串联 H 桥多电平静止无功发生器不平衡补偿分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 861-869.  
LUO Rui, HE Yingjie, LIU Yunfeng. Analysis on the unbalanced compensation of star connection cascaded H-bridge multilevel static var generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 861-869.
- [15] 谭树龙, 杨耕, 耿华. 不平衡工况下链式 STATCOM 的运行极限分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 44-49.  
TAN Shulong, YANG Geng, GENG Hua. Analysis of operating limit for cascaded STATCOM in unbalanced condition[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 44-49.
- [16] 魏文辉, 刘文华, 倪镭, 等. 链式 STATCOM 直流侧电容稳态分析及参数设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4): 28-31.  
WEI Wenhui, LIU Wenhua, NI Lei, et al. Steady state mathematical model and DC capacitor parameter design of  $\pm 50$  Mvar STATCOM with chain-circuit topology. [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(4): 28-31.
- [17] 张新闻, 同向前. 配网静止同步补偿器直流电容的优化选择[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(4): 21-25.  
ZHANG Xinwen, TONG Xiangqian. Optimal selection for DC capacitor in distribution STATCOM[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(4): 21-25.
- [18] 杨峰, 徐习东, 裘愉涛. 交流电压不对称下柔性直流配网换流站功率传输极限研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 86-93.  
YANG Feng, XU Xidong, QIU Yutao. Research on transmission power limit of flexible DC distribution converters under unbalanced AC voltages[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 86-93.
- [19] KHOSHOOEI A, MOGHANI J S, MILIMONFARED J,

- et al. Control of D-STATCOM during unbalanced grid faults based on DC voltage oscillations and peak current limitations[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2018, 54(2): 1680-1690.
- [20] 武汉国测科技股份有限公司, 中国电力科学研究院, 中机生产力促进中心, 等. 电能质量三相电压不平衡: GB/T 15543—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [21] 吴俊, 诸军, 沈海平, 等. 配电网三相不平衡度近似计算方法简析[J]. 高压电器, 2019, 55(12): 211-214.  
WU Jun, ZHU Jun, SHEN Haiping, et al. Analysis of the Three-phase voltage unbalance computing formula used for distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(12): 211-214.
- [22] AKAGI H, FUGITA H, YONETANI S, et al. A 6.6 kV transformerless STATCOM based on a five-level diode clamped PWM converter: System design and experimentation of a 200 V 10 kVA laboratory model[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2008, 44(2): 672-680.
- [23] 周胜军, 于坤山, 冯满盈, 等. 电气化铁路供电电能质量测试主要结果分析[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 54-57.  
ZHOU Shengjun, YU Kunshan, FENG Manying, et al. Analysis on main results of power quality test of power supply for electrified railway[J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 54-57.
- [24] 裴雪军, 陈材, 康勇. 三相电压源逆变器直流侧支撑电容的电压脉动分析与设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 29(3): 254-259.  
PEI Xuejun, CHEN Cai, KANG Yong. Analysis of voltage ripple and design for DC-link capacitor in three-phase voltage source inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 29(3): 254-259.
- [25] 汪浩川, 黄云辉. 配电网电压不平衡下级联型 DSTATCOM 控制方法研究[J]. 通信电源技术, 2019, 36(9): 5-13.  
WANG Haochuan, HUANG Yunhui. Research on cascade DSTATCOM control method in distribution network with unbalanced voltage[J]. Telecom Power Technology, 2019, 36(9): 5-13.
- [26] 夏正龙, 史丽萍, 杨晓冬, 等. 一种改进的电网电压不平衡环境下链式 STATCOM 控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1310-1316.  
XIA Zhenglong, SHI Liping, YANG Xiaodong, et al. An improved control strategy for cascaded STATCOM under supply voltage imbalance[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1310-1316.
- [27] 石山, 刘树, 梅红明, 等. STATCOM 在电弧炉电能质量治理上的应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(6): 63-68.  
SHI Shan, LIU Shu, MEI Hongming, et al. Application of STATCOM in power quality control of electric arc furnace[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(6): 63-68.
- [28] 西安高压电器研究院有限责任公司. 电力电子电容器: GB/T 17702—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

收稿日期: 2020-09-21; 修回日期: 2020-12-09

作者简介:

龙云波(1980—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电能质量分析与控制; E-mail: arrow307@163.com

张曦(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用; E-mail: tzzx5656@163.com

徐永海(1966—), 男, 博士生导师, 教授, 研究方向为电能质量分析与控制、电力电子变压器和新能源电网。E-mail: yonghaixu@263.net

(编辑 张爱琴)