

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231572

# 补偿不平衡负载的 HC-SVG 相间电压平衡控制与 直流电压取值分析

杜少通<sup>1,2</sup>, 何金泽<sup>1</sup>, 原亚雷<sup>3</sup>, 朱军<sup>1</sup>, 李威<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003; 2. 河南省煤矿装备智能检测与控制重点实验室, 河南 焦作 454003; 3. 国网智能电网研究院有限公司电力电子研究所, 北京 102209)

**摘要:** 针对由中点钳位型(neutral-point clamped, NPC)功率单元和 H 桥级联型(cascade H-bridge, CHB)功率单元构成的混合级联型静止无功发生器(hybrid cascade static var generator, HC-SVG)在补偿不平衡负载时产生的 CHB 功率单元相间电压失衡问题, 提出一种基于零序电压前馈的 CHB 功率单元相间电压平衡控制方法, 并对零序电压注入后 HC-SVG 直流侧电压取值进行分析。首先, 分析 CHB 功率单元承担基波电压分量与 HC-SVG 输出基波电压的关系。推导 HC-SVG 补偿不平衡负载时 CHB 功率单元相间电压平衡所需的零序电压, 建立零序电压前馈控制。其次, 基于零序电压与补偿电流的解析关系, 讨论补偿电流不平衡度与 HC-SVG 直流侧电压取值之间的约束关系。以 6 kV/3 Mvar 装置为算例, 进行直流侧电压的取值分析。并与星接 CHB-SVG 进行对比, 揭示补偿不平衡负载时 HC-SVG 所需直流电压低的特点。仿真验证了相间电压平衡控制与直流电压取值分析的有效性。

**关键词:** 混合级联; 静止无功发生器; 不平衡负载; 零序电压; 直流侧电压取值

## HC-SVG phase-to-phase voltage balance control and DC voltage value analysis to compensate for unbalanced loads

DU Shaotong<sup>1,2</sup>, HE Jinze<sup>1</sup>, YUAN Yalei<sup>3</sup>, ZHU Jun<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Henan Key Laboratory of Intelligent Detection and Control of Coal Mine Equipment, Jiaozuo 454003, China; 3. Power Electronics Research Institute, State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

**Abstract:** A hybrid cascade static var generator (HC-SVG) composed of neutral-point clamped (NPC) and cascade H-bridge (CHB) power units produces phase-to-phase voltage imbalance when compensating for unbalanced loads. To address this, a phase-to-phase voltage balance control method for the CHB power unit is established based on zero sequence voltage feedforward. The DC side voltage value of HC-SVG after zero sequence voltage injection is analyzed. First, the relationship between the fundamental voltage component of the CHB power unit and the output fundamental voltage of the HC-SVG is analyzed. The zero-sequence voltage required by the phase-to-phase voltage balance of the CHB power unit when the HC-SVG compensates for unbalanced loads is deduced and zero sequence voltage feedforward control is established. Secondly, the constraint relationship between the degree of compensation current imbalance and the HC-SVG DC side voltage is discussed based on the analytical relationship between zero sequence voltage and compensation current. Taking a 6 kV/3 Mvar device as an example, the value of the DC side voltage is analyzed and compared with the star CHB-SVG. It reveals the characteristics of low DC voltage required by the HC-SVG when compensating unbalanced loads. Simulation results show the effectiveness of clustered voltage balance control and DC side voltage value analysis.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52267018).

**Key words:** hybrid cascade; static var generator; unbalanced loads; zero sequence voltage; DC side voltage value

## 0 引言

三相不平衡负载产生的负序电流会增加变压器

及输电线路的功率损耗, 造成电网三相电压不平衡, 所以对负序电流的补偿尤为重要<sup>[1-3]</sup>。传统 H 桥级联型静止无功发生器(cascade H-bridge static var generator, CHB-SVG)广泛应用于补偿基波负序电流与正序无功电流, 其拓扑可接成星形和三角形两种

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52267018)

形式<sup>[4-6]</sup>。在电压等级相同的情况下, 角形 CHB-SVG 直流侧电容与开关器件承受的电压均为星接 CHB-SVG 的  $\sqrt{3}$  倍。因此在相同的器件耐压等级下, 角形 CHB-SVG 需使用更多的 H 桥模块, 从成本角度考虑, 星接 CHB-SVG 更有优势<sup>[7-9]</sup>。

星接 CHB-SVG 补偿不平衡负载时, 由于 H 桥模块相互独立, 补偿电流中的负序分量与电网电压相互作用产生三相不平衡功率, 导致相间直流电压不平衡, 影响装置的可靠运行<sup>[10-13]</sup>。目前, 星接 CHB-SVG 相间电压平衡控制常采用零序电压注入法<sup>[14-15]</sup>。但随着补偿电流不平衡度的增加, 在三相调制参考电压中注入基波零序电压会造成过调制, 进而降低装置对负序电流的补偿能力。为了降低装置直流侧电压的需求, 增大负序电流的补偿范围。文献[16]通过在基波零序电压上叠加三次谐波分量以提高装置直流侧电压的利用率。文献[17]将 H 桥级联型(cascade H-bridge, CHB)功率单元相间直流电压平衡所需的零序电压以方波形式注入, 与传统正弦零序电压相比可有效降低调制参考电压的幅值。上述方法虽均增大了负序电流的补偿范围, 但由于星接 CHB-SVG 的单相结构而面临的不平衡问题没有改变, 补偿负序电流时所产生的三相不平衡功率也并未减小, 因此装置对负序电流的补偿范围增大有限。

近年来, 混合级联型静止无功发生器(hybrid cascade static var generator, HC-SVG)逐渐成为级联型拓扑的研究热点。文献[18]采用 H 桥模块直流侧电压比为 1:1:1:3 的混合十三电平 SVG, 可有效减少 H 桥模块数, 并实现了 CHB 功率单元的功率平衡。文献[19]提出将 HC-SVG 中 H 桥模块直流侧电压比设定为 1:2:4:8, 可实现 CHB 功率单元功率的自平衡。采用不对称混合级联拓扑的研究聚焦于各功率单元电压的比值和功率的自平衡。而采用公共直流母线的功率单元与 CHB 功率单元混合级联是另一类典型拓扑。文献[20-23]采用高压两电平功率单元与低压 CHB 功率单元构成的 HC-SVG, 两电平功率单元采用方波调制, 开关频率为工频, 其所需的 H 桥模块数量与直流电容数量显著减少, 有效降低了装置的开关损耗, 但由于两电平功率单元采用开关器件串联的方式, 存在开关器件动态均压问题, 且方波调制在降低 H 桥模块数量方面有一定的局限性。文献[24]采用具有公共直流母线的中点钳位型(neutral-point clamped, NPC)功率单元与 CHB 功率单元构成的 HC-SVG, 依据目前硅器件的耐压水平, 可应用于 6 kV 电网, 且 NPC 功率单元不需要考虑器件的串联均压问题, 相较于两电平功率单

元与 CHB 功率单元构成的 HC-SVG, H 桥模块数减少 30%。文献[25]探讨了电网电压不平衡时 HC-SVG 的优势。文献[26]将 HC-SVG 开关器件的组合方式进行优化, 提出一种混合调制策略, 进一步降低装置的功率损耗。

综合现有文献分析, 星接 CHB-SVG 补偿负序电流的能力较弱, 而带有公共直流母线单元的 HC-SVG 中 H 桥模块数量减少, 因此 HC-SVG 在负序电流补偿方面具有更大的优势。HC-SVG 补偿负序电流时, CHB 功率单元也需要采取合适的控制策略维持相间直流电压的平衡; 同时, 定量分析直流侧电压的取值对装置的选型设计非常必要, 而现有文献针对 HC-SVG 补偿负序电流的研究较少。故本文拟采用公共直流母线的高压功率单元与低压 CHB 功率单元构成的 HC-SVG 补偿不平衡负载, 设计相间电压平衡控制并分析直流侧电压的取值。

本文将采用 NPC 功率单元与 CHB 功率单元构成的 HC-SVG<sup>[24]</sup>, 考虑三相负载不平衡, 建立 HC-SVG 相间电压平衡控制; 同时, 分析补偿电流不平衡度对 HC-SVG 与星接 CHB-SVG 直流侧电压取值的影响, 并通过 Matlab/Simulink 仿真平台验证控制方案与直流电压取值分析的有效性。

## 1 HC-SVG 拓扑与控制

### 1.1 HC-SVG 拓扑与调制

HC-SVG 的拓扑如图 1 所示<sup>[24]</sup>。图 1 中,  $L_y$  为电网等效阻抗;  $u_{sa}$ 、 $u_{sb}$ 、 $u_{sc}$  为电网三相电压;  $i_{sa}$ 、 $i_{sb}$ 、 $i_{sc}$  为电网三相电流;  $i_{fa}$ 、 $i_{fb}$ 、 $i_{fc}$  为负载侧三相电流;  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为 HC-SVG 三相补偿电流;  $L$  为滤波电抗器等效电感值;  $C$  为 CHB 功率单元中 H 桥模块直流侧电容值;  $u_{chj}$  ( $j = a, b, c$ ) 为 CHB 功率单元交流侧  $j$  相输出电压;  $u_{can}$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) 为 CHB 功率单元 A 相 H 桥模块  $n$  的直流侧电容电压;  $u_{dc}$  为 NPC 功率单元直流侧电压;  $u_{dc1}$ 、 $u_{dc2}$  分别为 NPC 功率单元两个直流侧电容电压;  $i_o$  为 NPC 功率单元流向中点的电流;  $u_{npca}$ 、 $u_{npcb}$ 、 $u_{npcc}$  为 NPC 功率单元交流侧三相输出电压;  $C_c$  为 NPC 功率单元直流侧电容值。

HC-SVG 中 NPC 功率单元选取高压器件, 采用最近电平逼近调制, CHB 功率单元选取低压器件, 采用载波移相调制。设 HC-SVG 各相调制参考电压  $u_j^*$  为

$$u_j^* = U_{mj} \sin(\omega t + \phi_j) \quad (1)$$

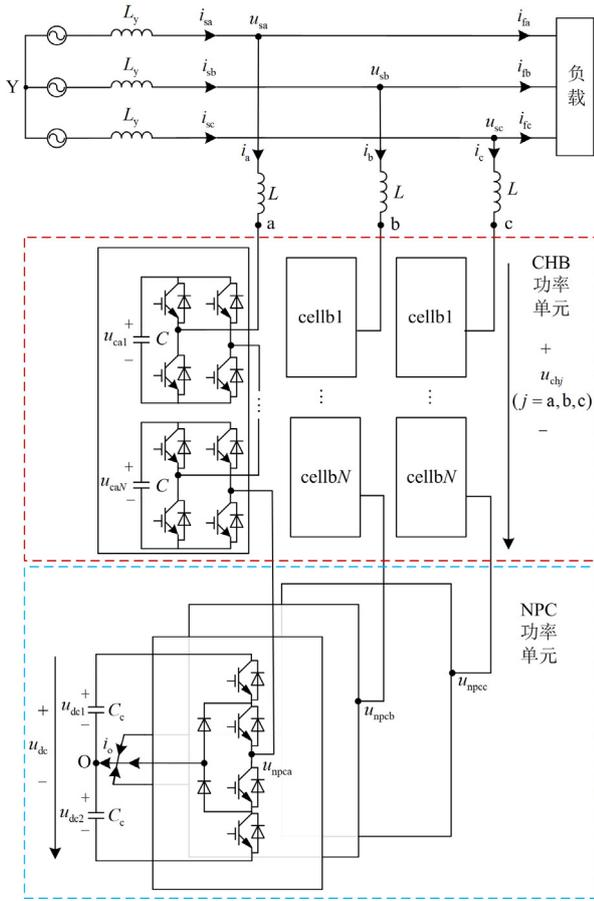


图 1 基于 NPC 和 H 桥的 HC-SVG 拓扑

Fig. 1 HC-SVG topology based on NPC and H-bridge

式中:  $U_{mj}$  为 HC-SVG 调制参考电压的幅值;  $\phi_j$  为调制参考电压的相角;  $\omega$  为电网的基波角频率;  $t$  为时间。

NPC 功率单元的开关函数  $S_{npcj}$  可表示为

$$S_{npcj} = \begin{cases} -1 & u_j^* \leq -\frac{u_{dc}}{4} \\ 0 & -\frac{u_{dc}}{4} < u_j^* < \frac{u_{dc}}{4} \\ 1 & u_j^* \geq \frac{u_{dc}}{4} \end{cases} \quad (2)$$

结合式(1)和式(2), CHB 功率单元调制参考电压  $u_{chj}^*$  可表示为

$$u_{chj}^* = u_j^* - S_{npcj} \times \frac{u_{dc}}{2} \quad (3)$$

以 A 相为例, 忽略 NPC 功率单元直流侧电容电压波动, 调制参考电压的相角  $\phi_a$  为  $0^\circ$ , 式(2)和式(3)可用图 2 表示。图 2 表示了 HC-SVG 中 A 相调制参考电压  $u_a^*$ 、NPC 功率单元 A 相输出电压  $u_{npca}$ 、

CHB 功率单元 A 相调制参考电压  $u_{cha}^*$  波形之间的关系。其中  $x$  为  $u_{npca}$  从 0 到  $u_{dc}/2$  时所对应的相角。

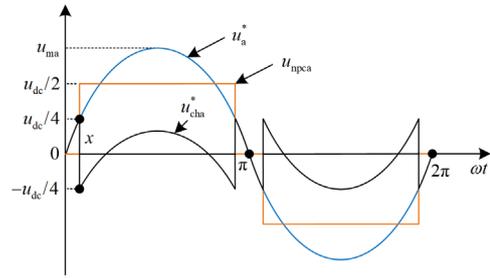


图 2 HC-SVG 各部分参考电压

Fig. 2 Reference voltage of each part of HC-SVG

## 1.2 HC-SVG 系统控制

图 3 为系统总控制框图。图中包含 HC-SVG 直流侧总电压控制、电流环控制、CHB 功率单元相间电压与相内电压平衡控制、NPC 功率单元直流侧电压控制、载波相移调制和最近电平逼近调制。

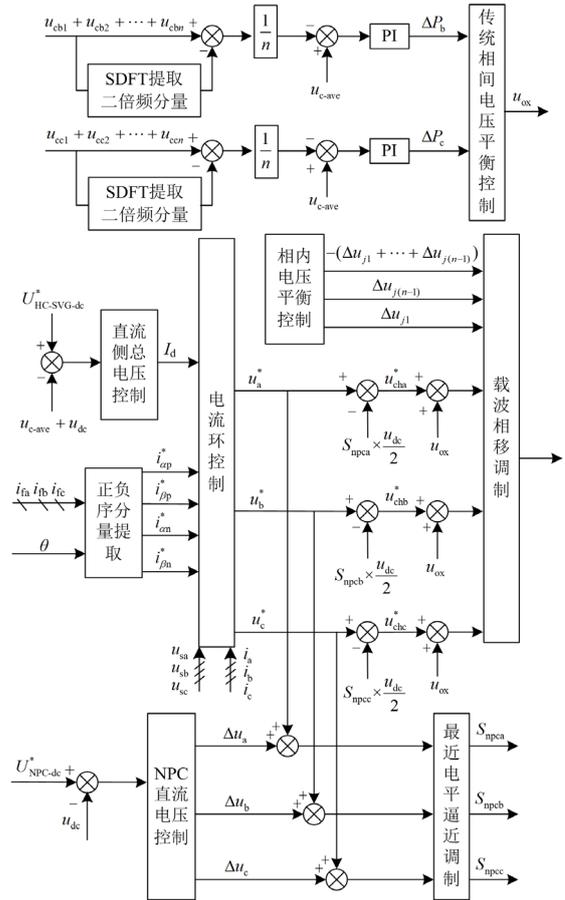


图 3 系统总控制框图

Fig. 3 Block diagram of the total control system

图 3 中:  $U_{HC-SVG-dc}^*$  为 HC-SVG 直流侧电压的指令值;  $U_{NPC-dc}^*$  为 NPC 功率单元直流侧电压的指令值;

$u_{c-ave}$  为 CHB 功率单元直流侧电压的平均值;  $I_d$  为 HC-SVG 直流侧总电压控制获得的有功电流幅值;  $\theta$  为电网电压通过锁相环得到的相角;  $i_{\alpha p}^*$ 、 $i_{\alpha n}^*$ 、 $i_{\beta p}^*$ 、 $i_{\beta n}^*$  分别为三相不平衡负载提取的正序无功电流分量与负序分量在  $\alpha$ 、 $\beta$  轴上的指令值;  $\Delta u_a$ 、 $\Delta u_b$ 、 $\Delta u_c$  分别为 NPC 功率单元直流电压控制叠加到三相调制参考电压上的电压增量;  $\Delta P_b$ 、 $\Delta P_c$  为满足 CHB 功率单元相间功率平衡所需的有功功率增量;  $u_{ox}$  为传统相间电压平衡控制所注入的零序电压;  $\Delta u_{jn}$  为 CHB 功率单元中  $j$  相 H 桥模块  $n$  的电压增量。

### 1) HC-SVG 直流侧总电压控制

图 3 中 HC-SVG 直流侧电压设定值  $U_{HC-SVG-dc}^*$  与实际值作比较, 经过比例积分(proportion integration, PI)调节器得到有功电流幅值  $I_d$ , 以补偿 HC-SVG 的功率损耗, 使直流侧总电压保持稳定。

### 2) CHB 功率单元直流电压平衡控制

相间直流电压平衡控制采用滑动傅里叶变换(sliding discrete Fourier transform, SDFT)提取 CHB 功率单元 B 相和 C 相直流侧电压, 然后与 CHB 功率单元直流侧电压的平均值  $u_{c-ave}$  作差, 通过 PI 调节器得到相间功率平衡的功率增量, 进而求取相间直流电压平衡所需的零序电压  $u_{ox}$  [27]。本文重点研究 HC-SVG 中 CHB 功率单元的相间电压平衡控制。

相内电压平衡控制采用子模块电容电压均衡策略, 维持相内直流电压平衡[27]。

### 3) NPC 功率单元直流电压控制

将 NPC 功率单元直流侧电压的设定值  $U_{NPC-dc}^*$  与实际值  $u_{dc}$  作比较, 通过 PI 调节器调整 NPC 功率单元吸收的有功功率, 进而维持 NPC 功率单元直流侧电压稳定[24]。

## 2 HC-SVG 相间电压平衡控制

HC-SVG 补偿三相不平衡负载时, NPC 功率单元存在公共直流母线, 故不需要考虑相间直流电压不平衡的问题, 但 CHB 功率单元需要考虑相间直流电压平衡, 然而图 3 中仅靠 PI 调节器维持 CHB 功率单元相间直流电压平衡, 其动态响应较慢。本节拟对 CHB 功率单元因负序电流产生的相间不平衡功率进行零序电压的前馈控制, 以提升 CHB 功率单元相间电压平衡控制的动态响应。

HC-SVG 三相吸收的平均功率由 NPC 功率单元和 CHB 功率单元共同分担, 为获得 CHB 功率单元相间电压平衡所需的零序电压, 需建立 CHB 功率单元调制输出基波电压与 HC-SVG 输出基波电压

的关系。定义 CHB 功率单元输出电压基波分量系数  $\xi_j$  为

$$\xi_j = \frac{U_{chb-j}}{U_{mj}} \quad (4)$$

式中,  $U_{chb-j}$  为 CHB 功率单元中  $j$  相输出电压基波分量的幅值。

基于图 2, 以 A 相为例, NPC 功率单元的输出电压可表示为

$$u_{npca}(t) = \begin{cases} \frac{u_{dc}}{2} & t \in \left( \frac{xT}{2\pi}, \frac{\pi T - xT}{2\pi} \right) \\ 0 & t \in \left[ 0, \frac{xT}{2\pi} \right] \cup \left[ \frac{\pi T - xT}{2\pi}, \frac{\pi T + xT}{2\pi} \right] \cup \left[ \frac{T^2 - xT}{2\pi}, T \right] \\ -\frac{u_{dc}}{2} & t \in \left( \frac{\pi T + xT}{2\pi}, \frac{T^2 - xT}{2\pi} \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $T$  为工频周期。

对式(5)进行傅里叶分析, 可得 NPC 功率单元 A 相输出基波电压的幅值  $U_{npca1}$  为

$$U_{npca1} = \begin{cases} 0 & U_{ma} < \frac{u_{dc}}{4} \\ \frac{2u_{dc} \cos x}{\pi} & U_{ma} \geq \frac{u_{dc}}{4} \end{cases} \quad (6)$$

角度  $x$  可表示为

$$x = \arcsin \left( \frac{u_{dc}}{4U_{ma}} \right) \quad (7)$$

综合式(4)、式(6)和式(7), 当  $U_{ma} \geq u_{dc}/4$  时, CHB 功率单元 A 相输出基波电压的幅值  $U_{chb-a}$  为

$$U_{chb-a} = U_{ma} - \frac{2u_{dc}}{\pi} \cos \left[ \arcsin \left( \frac{u_{dc}}{4U_{ma}} \right) \right] \quad (8)$$

结合式(4)和式(8), CHB 功率单元 A 相输出电压基波分量系数  $\xi_a$  可表示为

$$\xi_a = \begin{cases} 1 & U_{ma} < \frac{u_{dc}}{4} \\ \frac{U_{ma} - \frac{2u_{dc}}{\pi} \cos \left[ \arcsin \left( \frac{u_{dc}}{4U_{ma}} \right) \right]}{U_{ma}} & U_{ma} \geq \frac{u_{dc}}{4} \end{cases} \quad (9)$$

设电网的三相电压为

$$\begin{cases} u_{sa} = U_{sm} \cos(\omega t) \\ u_{sb} = U_{sm} \cos(\omega t - 120^\circ) \\ u_{sc} = U_{sm} \cos(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $U_{sm}$  为电网相电压幅值。

结合图 1, 忽略装置损耗, 由基尔霍夫电压定律可得 HC-SVG 调制参考电压为

$$u_j^* = u_{sj} - L \frac{di_j}{dt} \quad (11)$$

式中,  $i_j$  为 HC-SVG 中  $j$  相补偿电流。

记 HC-SVG 补偿电流不平衡度  $K_i$  为

$$K_i = \frac{I_-}{I_+} \quad (12)$$

式中:  $I_+$  为正序电流幅值;  $I_-$  为负序电流幅值。

不妨设 HC-SVG 各相补偿电流为

$$\begin{cases} i_a = I_+ \cos(\omega t + \gamma) + K_i I_+ \cos(\omega t + \varphi) \\ i_b = I_+ \cos(\omega t + \gamma - 120^\circ) + K_i I_+ \cos(\omega t + \varphi + 120^\circ) \\ i_c = I_+ \cos(\omega t + \gamma + 120^\circ) + K_i I_+ \cos(\omega t + \varphi - 120^\circ) \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\gamma$  为正序电流初相位;  $\varphi$  为负序电流初相位。

综合式(11)~式(13)可得 CHB 功率单元各相调制参考电压的基波分量  $u_{\text{chb}j}$  为

$$\begin{cases} u_{\text{chb-a}} = \xi_a U_{\text{sm}} \cos(\omega t) + \xi_a \omega L I_+ \cos(\omega t + \gamma - 90^\circ) + \xi_a \omega L K_i I_+ \cos(\omega t + \varphi - 90^\circ) \\ u_{\text{chb-b}} = \xi_b U_{\text{sm}} \cos(\omega t - 120^\circ) + \xi_b \omega L I_+ \cos(\omega t + \gamma - 210^\circ) + \xi_b \omega L K_i I_+ \cos(\omega t + \varphi + 30^\circ) \\ u_{\text{chb-c}} = \xi_c U_{\text{sm}} \cos(\omega t + 120^\circ) + \xi_c \omega L I_+ \cos(\omega t + \gamma + 30^\circ) + \xi_c \omega L K_i I_+ \cos(\omega t + \varphi - 210^\circ) \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $\xi_b$  和  $\xi_c$  分别为 CHB 功率单元输出电压 B 相与 C 相基波分量系数。

综合式(13)和式(14)可得 CHB 功率单元各相吸收的平均功率  $P_j$  为

$$\begin{cases} P_a = \xi_a (U_{\text{sm}} I_+ \cos \gamma + U_{\text{sm}} K_i I_+ \cos \varphi) \\ P_b = \xi_b (U_{\text{sm}} I_+ \cos \gamma + U_{\text{sm}} K_i I_+ \cos(\varphi - 120^\circ)) \\ P_c = \xi_c (U_{\text{sm}} I_+ \cos \gamma + U_{\text{sm}} K_i I_+ \cos(\varphi + 120^\circ)) \end{cases} \quad (15)$$

忽略 HC-SVG 的有功损耗, 则  $\gamma = \pm 90^\circ$ , 式(15)进一步化简为

$$\begin{cases} P_a = \xi_a U_{\text{sm}} K_i I_+ \cos \varphi \\ P_b = \xi_b U_{\text{sm}} K_i I_+ \cos(\varphi - 120^\circ) \\ P_c = \xi_c U_{\text{sm}} K_i I_+ \cos(\varphi + 120^\circ) \end{cases} \quad (16)$$

由式(16)可以看出, CHB 功率单元三相吸收不平衡功率由电网电压与 HC-SVG 补偿电流中的负序分量相互作用产生, 三相不平衡功率影响 CHB 功率单元相间功率的分配, 导致相间直流电压不平衡。

为在三相负载不平衡工况下使得 CHB 功率单元相间功率平衡, 不妨设注入的零序电压  $u_o$  为

$$u_o = U_o \cos(\omega t + \varphi_o) \quad (17)$$

式中,  $U_o$  和  $\varphi_o$  分别为注入到 CHB 功率单元中的零序电压幅值与相角。

CHB 功率单元注入零序电压后, 零序电压与补偿电流作用产生的三相有功功率  $P_{j_o}$  可表示为

$$\begin{cases} P_{a_o} = U_o I_+ \cos(\varphi_o - 90^\circ) + U_o K_i I_+ \cos(\varphi_o - \varphi) \\ P_{b_o} = U_o I_+ \cos(\varphi_o + 30^\circ) + U_o K_i I_+ \cos(\varphi_o - \varphi - 120^\circ) \\ P_{c_o} = U_o I_+ \cos(\varphi_o - 210^\circ) + U_o K_i I_+ \cos(\varphi_o - \varphi + 120^\circ) \end{cases} \quad (18)$$

为维持 CHB 功率单元相间直流电压平衡, 注入的零序电压需满足:

$$\begin{cases} P_a + P_{a_o} = 0 \\ P_b + P_{b_o} = 0 \\ P_c + P_{c_o} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

零序电压与补偿电流作用产生的有功功率跟负序电流与电网电压作用产生的有功功率相互抵消, 从而实现 CHB 功率单元相间直流电压平衡, 由式(19)可求得零序电压的幅值与相角为

$$\begin{cases} U_o = \frac{U_{\text{sm}} K_i K_1}{\sin \varphi_o + K_i \cos(\varphi_o - \varphi)} \\ \varphi_o = \arctan \frac{K_1(1 - K_i \sin \varphi) + K_2 K_i \cos \varphi}{-K_1 K_i \cos \varphi - K_2(1 + K_i \sin \varphi)} \end{cases} \quad (20)$$

其中,

$$\begin{cases} K_1 = -\frac{1}{2}(\xi_b + \xi_c) \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2}(\xi_b - \xi_c) \sin \varphi \\ K_2 = \frac{1}{\sqrt{3}}(\xi_a - \xi_b) \cos \varphi + \xi_b \sin \varphi \end{cases} \quad (21)$$

图 4 为 CHB 功率单元相间直流电压平衡控制框图。通过式(20)和式(21)计算得到零序电压  $u_o$ , 将  $u_o$  与传统相间电压平衡控制中仅靠 PI 调节器所注入的零序电压  $u_{ox}$  相加, 作为维持 CHB 功率单元相间直流电压平衡所需的零序电压  $u_{oy}$ 。本文提出的控制方案通过对零序电压进行前馈控制, 以提升动态调节的响应速度。

### 3 HC-SVG 直流侧电压取值分析

HC-SVG 补偿负序电流时, CHB 功率单元需注入零序电压以维持相间直流电压平衡, 但零序电压的注入会造成某一相调制参考电压幅值增大, 为避免过调制, 则需要更高的直流侧电压。基于此, 本节将分析补偿电流不平衡度对 HC-SVG 直流侧电压取值的影响。

#### 3.1 HC-SVG 直流侧电压取值范围计算

NPC 功率单元直流侧电压取值依据文献[24], HC-SVG 输出额定补偿电流的幅值记为  $I_m$ , HC-SVG

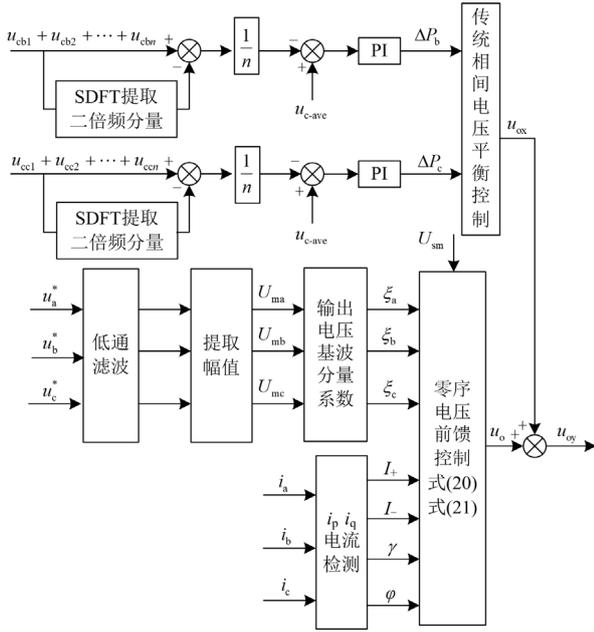


图4 相间直流电压平衡控制框图

Fig. 4 Balancing control block diagram of DC-voltage among phases

三相补偿电流幅值应均不大于其额定电流幅值  $I_m$ 。分析 HC-SVG 调制参考电压幅值与补偿电流不平衡度  $K_i$  的数学关系。

设定 HC-SVG 中 NPC 功率单元直流侧电压指令值  $U_{\text{NPC-dc}}^*$  [24] 为

$$U_{\text{NPC-dc}}^* = \frac{4}{3}(U_{\text{sm}} + \omega LI_m) \quad (22)$$

当不考虑三相负载不平衡时, 由图 2 可得 HC-SVG 中 CHB 功率单元直流电压指令值  $U_{\text{CHB-dc1}}^*$  应满足:

$$U_{\text{CHB-dc1}}^* \geq \frac{1}{3}(U_{\text{sm}} + \omega LI_m) \quad (23)$$

三相负载不平衡工况下, 当 HC-SVG 输出额定电流幅值一定时, 滤波电抗  $L$  两端的基波分量与电网电压相加的幅值仍不超过  $U_{\text{sm}} + \omega LI_m$ , 但考虑 HC-SVG 补偿电流中的负序分量与电网电压作用产生三相不平衡功率, 造成 CHB 功率单元相间直流电压不平衡, 需注入零序电压以维持相间直流电压平衡。在注入零序电压后对 HC-SVG 调制参考电压进行向量的取模运算, 此时 CHB 功率单元直流电压指令值  $U_{\text{CHB-dc2}}^*$  应满足:

$$U_{\text{CHB-dc2}}^* \geq \sqrt{U_{\text{CHB-dc1}}^*{}^2 + U_o^*{}^2 + 2U_{\text{CHB-dc1}}^* U_o^* \cos \varphi} \quad (24)$$

以器件所承受耐压相同为条件, 将 HC-SVG 与星接 CHB-SVG 两种拓扑直流侧电压的取值进行对

比, 此时 HC-SVG 直流电压指令值  $U_{\text{HC-SVG-dc}}^*$  表示为

$$U_{\text{HC-SVG-dc}}^* = \frac{1}{2}U_{\text{NPC-dc}}^* + U_{\text{CHB-dc2}}^* \quad (25)$$

结合式(22)、式(24)与式(25), 可得三相负载不平衡工况下 HC-SVG 直流电压指令值应满足:

$$U_{\text{HC-SVG-dc}}^* \geq \frac{2}{3}(U_{\text{sm}} + \omega LI_m) + \sqrt{U_{\text{CHB-dc1}}^*{}^2 + U_o^*{}^2 + 2U_{\text{CHB-dc1}}^* U_o^* \cos \varphi} \quad (26)$$

考虑 HC-SVG 在容性工况下需要的调制电压大于感性工况, HC-SVG 直流侧电压取值应以容性工况为基准, 故取  $\gamma = 90^\circ$ 。基于此, 分析 HC-SVG 直流侧电压的取值。

记 HC-SVG 补偿三相电流中幅值最大的电流  $I_{\text{max}}$  为

$$I_{\text{max}} = \max\{I_a, I_b, I_c\} \quad (27)$$

则 HC-SVG 补偿电流约束条件可表示为

$$I_{\text{max}} \leq I_m \quad (28)$$

HC-SVG 直流侧所需电压的计算分为 4 步。

步骤 1: HC-SVG 补偿电流满足式(28)的约束条件, 取  $I_{\text{max}} = I_m$ ; 同时, 将  $K_i$  与  $\varphi$  作为变量, 求取容性工况下三相补偿电流。

由式(13)可求得三相补偿电流的幅值为

$$\begin{cases} I_a = \sqrt{I_+^2 + (K_i I_+)^2 + 2K_i I_+^2 \sin \varphi} \\ I_b = \sqrt{I_+^2 + (K_i I_+)^2 + 2K_i I_+^2 \sin(\varphi - 120^\circ)} \\ I_c = \sqrt{I_+^2 + (K_i I_+)^2 + 2K_i I_+^2 \sin(\varphi + 120^\circ)} \end{cases} \quad (29)$$

综合式(27)一式(29)可得

$$I_{\text{max}} = \begin{cases} I_a & 30^\circ \leq \varphi < 150^\circ \\ I_b & 150^\circ \leq \varphi < 270^\circ \\ I_c & -90^\circ \leq \varphi < 30^\circ \end{cases} \quad (30)$$

由式(29)和式(30)可求得  $K_i$ 、 $\varphi$ 、 $I_{\text{max}}$  与  $I_+$  之间的关系为

$$I_+ = \begin{cases} \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{1 + K_i^2 + 2K_i \sin \varphi}} & 30^\circ \leq \varphi < 150^\circ \\ \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{1 + K_i^2 + 2K_i \sin(\varphi - 120^\circ)}} & 150^\circ \leq \varphi < 270^\circ \\ \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{1 + K_i^2 + 2K_i \sin(\varphi + 120^\circ)}} & -90^\circ \leq \varphi < 30^\circ \end{cases} \quad (31)$$

根据式(31), 取  $I_{\text{max}} = I_m$ , 将  $K_i$  和  $\varphi$  作为变量可求得  $I_+$ , 结合式(13)可得三相补偿电流。

步骤 2: 求取容性工况下 HC-SVG 三相调制参考电压幅值。

基于步骤 1 求取的三相补偿电流, 结合式(11)可得 HC-SVG 三相调制参考电压为

$$\begin{cases} u_a^* = U_{sm} \cos(\omega t) + \omega LI_+ \cos(\omega t) + \\ \quad \omega LK_i I_+ \cos(\omega t + \varphi - 90^\circ) \\ u_b^* = U_{sm} \cos(\omega t - 120^\circ) + \omega LI_+ \cos(\omega t - 120^\circ) + \\ \quad \omega LK_i I_+ \cos(\omega t + \varphi + 30^\circ) \\ u_c^* = U_{sm} \cos(\omega t + 120^\circ) + \omega LI_+ \cos(\omega t + 120^\circ) + \\ \quad \omega LK_i I_+ \cos(\omega t + \varphi - 210^\circ) \end{cases} \quad (32)$$

由式(32)求得 HC-SVG 三相调制参考电压幅值为

$$\begin{cases} U_{ma} = \sqrt{X^2 + Y^2 + 2XY \cos(\varphi - 90^\circ)} \\ U_{mb} = \sqrt{X^2 + Y^2 + 2XY \cos(\varphi - 210^\circ)} \\ U_{mc} = \sqrt{X^2 + Y^2 + 2XY \cos(\varphi + 30^\circ)} \end{cases} \quad (33)$$

其中,

$$\begin{cases} X = U_{sm} + \omega LI_+ \\ Y = \omega LK_i I_+ \end{cases} \quad (34)$$

步骤 3: 基于调制参考电压幅值, 结合式(9)求取 CHB 功率单元三相输出电压基波分量系数。

步骤 4: 基于 CHB 功率单元基波分量系数和已知量, 由式(20)和式(21)可求得三相负载不平衡工况下 CHB 功率单元维持相间直流电压平衡所注入的零序电压幅值与相角。通过式(26)可求得 HC-SVG 直流侧电压取值范围。

### 3.2 算例求解

通过算例对 HC-SVG 直流侧电压指令值进行计算, 并与星接 CHB-SVG 进行对比, 算例基本参数如表 1 所示。

表 1 算例参数

参数	数值
电网线电压有效值/kV	6
补偿容量/Mvar	3
额定补偿电流峰值/A	408
滤波电抗器等效电感值/mH	3.05

#### 1) HC-SVG 直流侧电压范围计算

由式(22)可得 NPC 功率单元直流侧电压为 7053 V。基于 3.1 节的分析, 考虑式(29)中 HC-SVG 各相最大补偿电流对直流侧电压取值的影响具有对称性, 不妨以 C 相补偿电流最大为例。当  $\varphi$  的取值为  $[-90^\circ, 30^\circ]$ ,  $K_i$  的取值为  $[0, 0.6]$  时, HC-SVG 所需直流侧电压的最小值  $U_{HC-SVG-dc.min}^*$  如图 5 所示。

#### 2) 星接 CHB-SVG 直流侧电压范围计算

在三相负载不平衡工况下, 当 HC-SVG 中 NPC 功率单元直流侧电压取 0, 同时, 令式(14)中  $\xi_a$ 、 $\xi_b$ 、

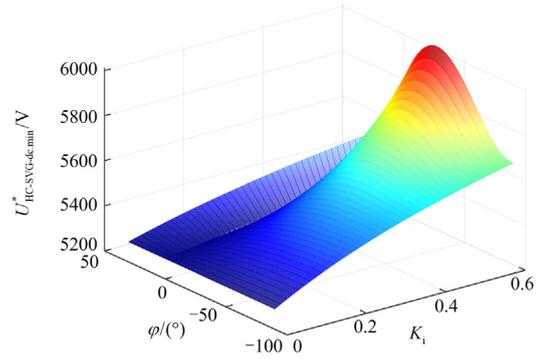


图 5 HC-SVG 直流侧电压最小值与  $K_i$  和  $\varphi$  的关系

Fig. 5 Relationship between the minimum DC voltage of HC-SVG and  $K_i$  and  $\varphi$

$\xi_c$  均等于 1, 取  $\gamma = 90^\circ$ , 并结合式(20)和式(21), 可得星接 CHB-SVG 调制参考电压  $u_{chb-j}^*$  为

$$\begin{cases} u_{chb-a}^* = U_{sm} \cos(\omega t) + \omega LI_+ \cos(\omega t) + \\ \quad \omega LK_i I_+ \cos(\omega t + \varphi - 90^\circ) + U_o \cos(\omega t + \varphi_o) \\ u_{chb-b}^* = U_{sm} \cos(\omega t - 120^\circ) + \omega LI_+ \cos(\omega t - 120^\circ) + \\ \quad \omega LK_i I_+ \cos(\omega t + \varphi + 30^\circ) + U_o \cos(\omega t + \varphi_o) \\ u_{chb-c}^* = U_{sm} \cos(\omega t + 120^\circ) + \omega LI_+ \cos(\omega t + 120^\circ) + \\ \quad \omega LK_i I_+ \cos(\omega t + \varphi - 210^\circ) + U_o \cos(\omega t + \varphi_o) \end{cases} \quad (35)$$

仍以三相补偿电流幅值小于额定电流幅值  $I_m$  为约束条件, 此时, 星接 CHB-SVG 三相补偿电流在滤波电抗  $L$  上产生的压降必然小于  $\omega LI_m$ , 因此星接 CHB-SVG 直流侧电压取值  $U_{CHB-SVG-dc}^*$  满足:

$$U_{CHB-SVG-dc}^* \geq \sqrt{Z^2 + U_o^2 + 2ZU_o \cos \varphi_o} \quad (36)$$

其中,

$$\begin{cases} U_o = \frac{-U_{sm} K_i \cos \varphi}{\sin \varphi_o + K_i \cos(\varphi_o - \varphi)} \\ \varphi_o = \arctan \frac{2K_i \sin \varphi \cos \varphi - \cos \varphi}{K_i \cos \varphi^2 - K_i \sin \varphi^2 - \sin \varphi} \\ Z = U_{sm} + \omega LI_m \end{cases} \quad (37)$$

仍以 C 相补偿电流达到额定电流幅值为例, 当  $\varphi$  的取值为  $[-90^\circ, 30^\circ]$ ,  $K_i$  的取值为  $[0, 0.6]$  时, 采用数值计算方法可得星接 CHB-SVG 直流侧电压最小值  $U_{CHB-SVG-dc.min}^*$  与  $K_i$ 、 $\varphi$  的关系, 如图 6 所示。

由图 5 和图 6 可以看出: 随着  $K_i$  的增大, HC-SVG 与星接 CHB-SVG 直流侧电压指令值逐渐增大; 同时, 当  $\varphi$  为  $-30^\circ$  时直流侧电压指令值最大。当  $\varphi$  为  $-30^\circ$  时,  $U_{HC-SVG-dc.min}^*$ 、 $U_{CHB-SVG-dc.min}^*$  与  $K_i$  之间的关系如表 2 所示。

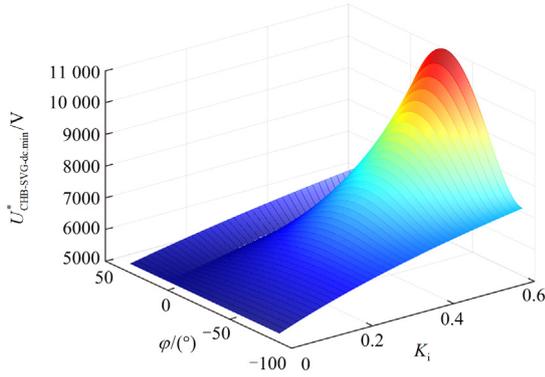


图6 星接 CHB-SVG 直流侧电压最小值与  $K_i$  和  $\varphi$  的关系  
Fig. 6 Relationship between the minimum DC voltage of star CHB-SVG and  $K_i$  and  $\varphi$

表2 SVG 直流侧电压指令值

Table 2 SVG DC side voltage command value

$K_i$	$U_{HC-SVG-dc.min}^*/V$	$U_{CHB-SVG-dc.min}^*/V$
0.1	5340	5579
0.2	5408	5997
0.3	5491	6593
0.4	5602	7472
0.5	5762	8826
0.6	6012	10 990

由表2可知,在三相负载不平衡工况下,星接 CHB-SVG 直流侧电压需求远高于 HC-SVG。

### 3.3 HC-SVG 与星接 CHB-SVG 的算例对比

基于本节算例,分两种情况对 HC-SVG 与星接 CHB-SVG 负序电流补偿能力进行对比分析。

1) 依据平衡负载条件设计直流电压取值,比较 HC-SVG 与星接 CHB-SVG 补偿负序电流的能力

当不考虑三相负载不平衡时,SVG 只考虑补偿正序无功分量。此时 SVG 注入的零序电压幅值为0,以表1所示参数为例,基于式(26)和式(36),可得 SVG 直流侧电压指令值  $U_{SVG-dc}^*$  需满足:

$$U_{SVG-dc}^* \geq U_{sm} + \omega L I_m = U_m \quad (38)$$

在不考虑裕量的情况下,SVG 输出相电压幅值为

$$U_m = U_{sm} \times (1 + 0.15) = 5.63 \text{ kV} \quad (39)$$

取 HC-SVG 与星接 CHB-SVG 直流电压侧指令值均为 5.63 kV,由图5与图6可知,此时 HC-SVG 的  $K_i$  最大为 0.42,星接 CHB-SVG 的  $K_i$  最大为 0.1。显然,即便 SVG 设计时只考虑补偿正序无功分量,HC-SVG 仍具有更强的负序电流补偿能力。

2) 依据不平衡负载条件设计直流电压取值,比较 HC-SVG 与星接 CHB-SVG 直流电压的需求

当三相负载不平衡时,SVG 需补偿负载侧三相

电流中的基波负序分量,以  $K_i$  取 0.4、 $\varphi$  取  $-30^\circ$ 、C 相补偿电流幅值达到额定电流幅值为例,由图5和图6可得  $U_{HC-SVG-dc.min}^*$  为 5602 V,  $U_{CHB-SVG-dc.min}^*$  为 7472 V。算例表明,补偿电流不平衡度相等的情况下,HC-SVG 相较于星接 CHB-SVG,可采用较低的直流侧电压补偿不平衡负载。

## 4 仿真实验

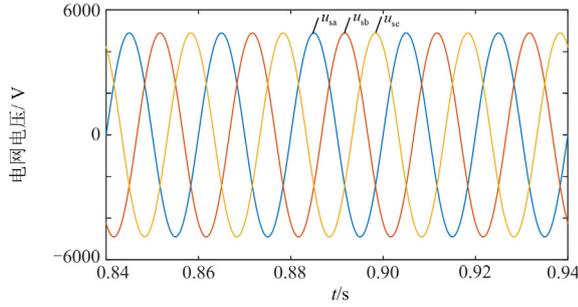
本节采用 Matlab/Simulink 建立 HC-SVG 的仿真模型进行仿真分析,具体参数如表1所示。依据式(26)可得 HC-SVG 直流侧电压为 5602 V,依据式(22)可得 NPC 功率单元直流侧电压取值为 7053 V,依据式(24)可得 CHB 直流侧电压为 2130 V,在 CHB 功率单元的仿真模型中,每相由3个H桥模块组成,则每个H桥模块指令值为 710 V。

为验证相间电压平衡控制的有效性,HC-SVG 在 0.85 s 前只考虑补偿正序无功电流,0.85 s 时输出负序电流,此时  $K_i$  为 0.4,  $\varphi$  为  $-30^\circ$ ;同时,为验证容性工况下直流侧电压取值分析的正确性,取  $\gamma = 90^\circ$ ,  $I_c = I_m$ ,结合式(31)可得,  $I_+$  为 291.4 A,  $I_-$  为 116.56 A,三相补偿电流的幅值分别为 254.03 A、254.03 A、408 A。

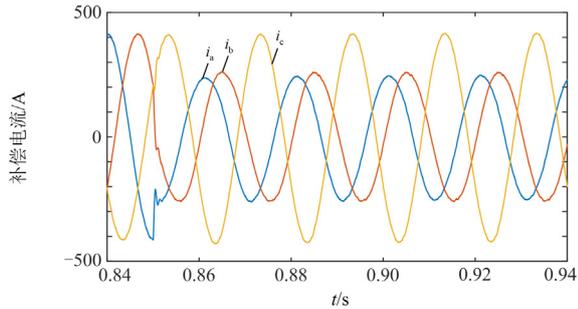
图7为 HC-SVG 仿真波形,图7(a)为三相电网电压波形,图7(b)为 HC-SVG 三相补偿电流波形,仿真分析中三相补偿电流的幅值分别为 256.5 A、260.3 A、419.6 A,仿真值与理论计算的误差分别为 0.9%、2.4%、2.8%。考虑 HC-SVG 的仿真模型中,通过直流侧并联电阻以模拟有功损耗,C 相基波电流最大值略大于补偿电流额定值 408 A,图7(c)为零序电压的前馈控制下 CHB 功率单元相间直流侧电压波形,0.85 s 注入负序电流后,CHB 功率单元中各 H 桥模块直流电压均能迅速稳定于指令值 710 V。附录 A 中图 A1 为不带零序电压前馈控制的 HC-SVG 仿真波形,仿真条件与图7相同,由图 A1(d)可知,由于传统相间电压平衡控制受 PI 调节器带宽的约束,HC-SVG 补偿负序电流时相间电压平衡响应速度慢。

图7(d)为 NPC 功率单元直流侧电压波形,图7(e)为依据式(20)和式(21)计算所得零序电压前馈控制下的电压波形  $u_o$  与系统实际注入的零序电压波形中的基波分量  $u_{oy}$ ,二者一致性较好,验证了在三相负载不平衡工况下零序电压前馈控制的有效性。图7(f)为 HC-SVG 注入零序电压后三相调制参考电压波形,其相电压峰值的最大值为 5509 V,理论计算值为 5602 V,误差为 1.74%,附录 A 中图 A2 为

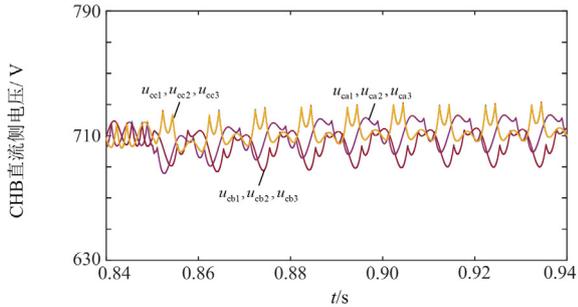
星接 CHB-SVG 仿真波形, 仿真条件同图 7, 图 A2(d) 为星接 CHB-SVG 注入零序电压后三相调制参考电压波形, 其相电压峰值的最大值为 7368 V, 理论计算值为 7472 V, 误差为 1.39%, 同时, 令  $K_i$  的取值为  $[0, 0.6]$ , 通过仿真可求得 HC-SVG 与星接 CHB-SVG 调制参考电压的实际值, 如表 3 所示。由表 3 可知, 随着  $K_i$  的增大, SVG 直流电压取值



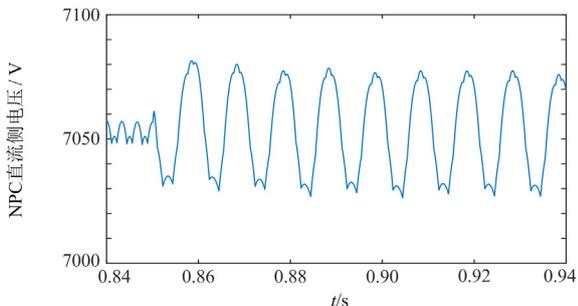
(a) 三相电网电压波形



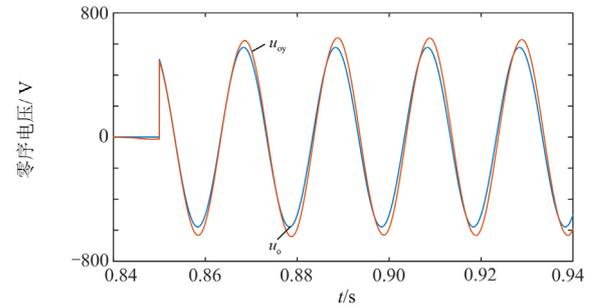
(b) 三相补偿电流波形



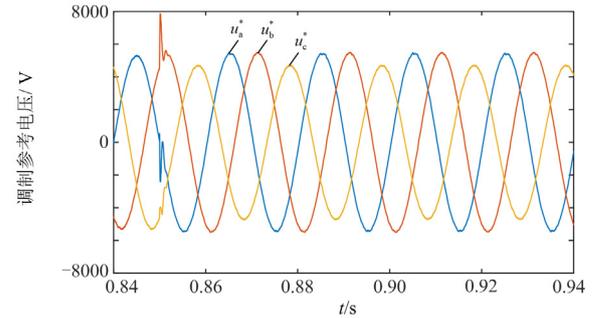
(c) 零序电压前馈控制下CHB功率单元直流侧电压波形



(d) NPC功率单元直流侧电压



(e) 零序电压波形



(f) 注入零序电压后HC-SVG三相调制参考电压波形

图 7 HC-SVG 仿真波形图

Fig. 7 HC-SVG simulation waveform diagram

逐渐增大, 当  $K_i$  取 0.6 时, 星接 CHB-SVG 直流侧电压的取值为 HC-SVG 的 1.84 倍, 且理论计算值与实际值最大误差不超过 1.68%, 验证了理论分析的正确性。表明 HC-SVG 相较于星接 CHB-SVG 可采用较低的直流侧电压对负序电流进行补偿。

表 3 SVG 直流侧电压仿真值

Table 3 SVG DC side voltage simulation value

$K_i$	HC-SVG 实际值/V	CHB-SVG 实际值/V	HC-SVG 误差/%	CHB-SVG 误差/%	CHB-SVG/ HC-SVG
0.1	5301	5543	0.71	0.64	1.04
0.2	5329	5949	1.46	0.8	1.11
0.3	5398	6497	1.68	1.45	1.2
0.4	5509	7368	1.66	1.39	1.33
0.5	5668	8719	1.63	1.21	1.53
0.6	5923	10 890	1.48	0.99	1.84

## 5 结论

本文将 HC-SVG 用于三相不平衡负载补偿, 基于 HC-SVG 的工作原理, 建立了 HC-SVG 中 CHB 功率单元相间电压平衡的零序电压前馈控制, 以 6 kV/3 Mvar 为例, 分析补偿电流不平衡度对 HC-SVG 直流侧电压取值的影响, 并通过仿真对控制策略与直流电压的取值进行验证, 得到以下结论:

1) 在三相负载不平衡工况下, 建立的零序电压

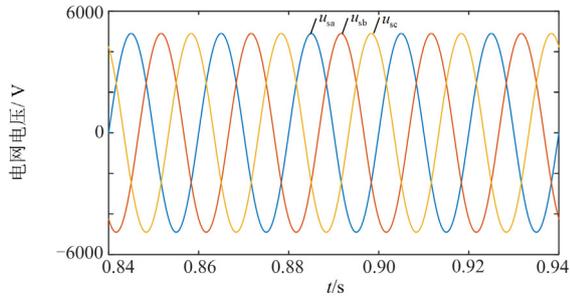
前馈控制可使 CHB 功率单元相间直流电压实现快速平衡。

2) 本文建立 HC-SVG 直流电压取值的分析方法, 理论计算值与仿真结果的误差低于 2%, 表明该分析方法的正确性。

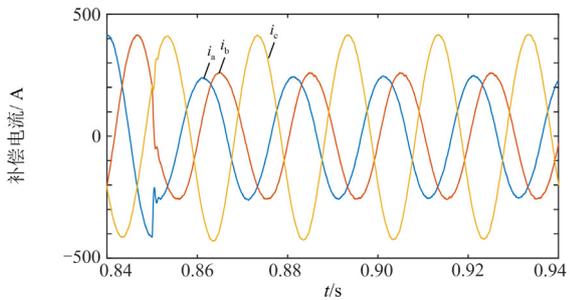
3) 针对两种情况开展算例分析。当直流侧电压为电网额定电压幅值的 1.15 倍时, HC-SVG 负序电流补偿范围约为星接 CHB-SVG 的 4 倍。当补偿电流不平衡度为 0.4 时, HC-SVG 直流侧电压取值为星接 CHB-SVG 的 0.75 倍。算例分析证明 HC-SVG 具有更强的负序电流补偿能力, 当补偿电流不平衡度增大时, HC-SVG 直流侧电压需求低于星接 CHB-SVG。

本文所得结论可为三相负载不平衡工况下 HC-SVG 的工程应用提供理论参考。

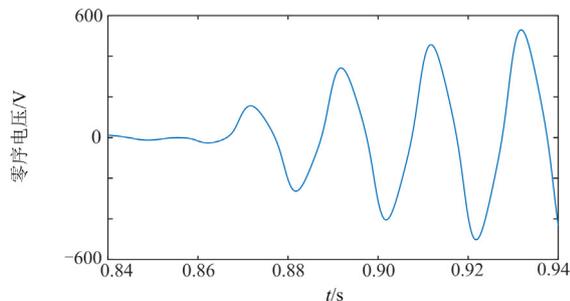
附录 A



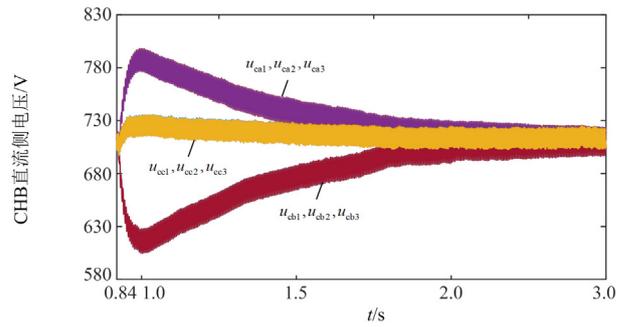
(a) 三相电网电压波形



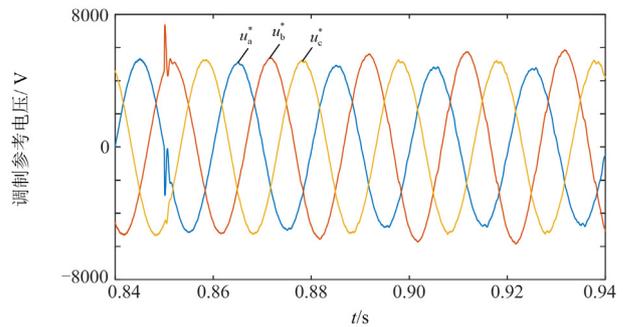
(b) 三相补偿电流波形



(c) 零序电压波形

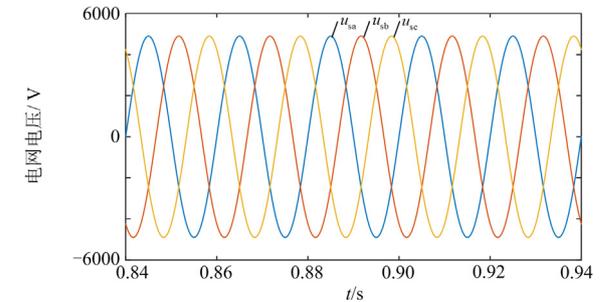


(d) CHB功率单元直流侧电压波形

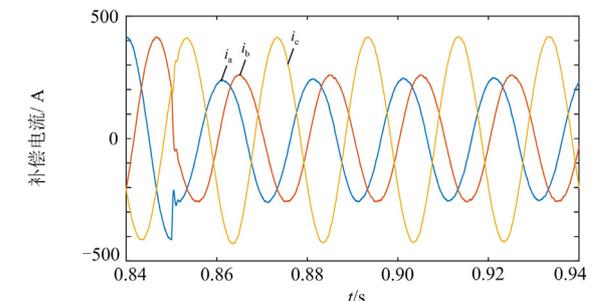


(e) HC-SVG三相调制参考电压波形

图 A1 相间电压平衡比例积分控制下 HC-SVG 仿真波形  
Fig. A1 Phase-to-phase voltage balance control simulation waveform diagram under proportional integral control of HC-SVG



(a) 三相电网电压波形



(b) 三相补偿电流波形

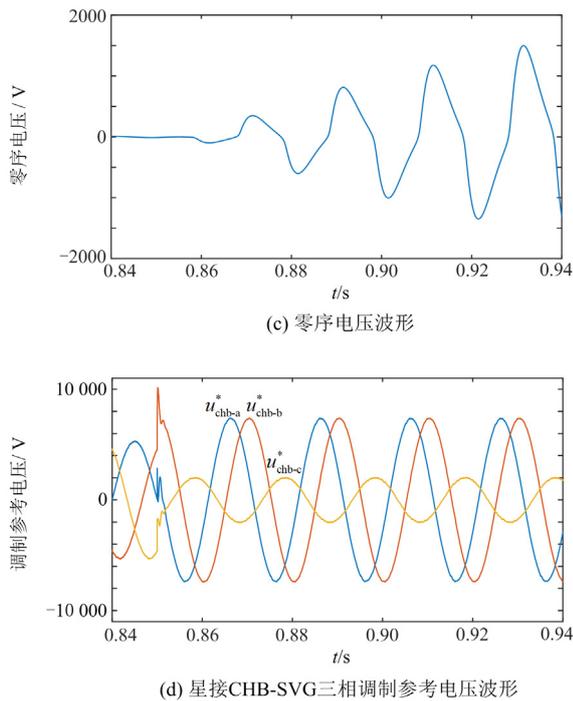


图 A2 相间电压平衡比例积分控制下 CHB-SVG 仿真波形

Fig. A2 Phase-to-phase voltage balance control simulation waveform diagram under proportional integral control of star CHB-SVG

### 参考文献

- [1] 张建辉, 许莹莹, 李云丰. 交流电网不平衡下铁路功率调节器负序电流完全补偿策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3144-3154.  
ZHANG Jianhui, XU Yingying, LI Yunfeng. Completed compensation strategy research of railway power conditioner for negative-sequence current under unbalanced AC power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3144-3154.
- [2] 罗忠游, 赵普志, 段玉, 等. 电气化铁路接入风电汇集地区电网的负序优化补偿策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 124-134.  
LUO Zhongyou, ZHAO Puzhi, DUAN Yu, et al. A negative sequence optimization compensation strategy for an electrified railway connected to wind power integration areas[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 124-134.
- [3] 李丹丹, 张爱军, 袁辉, 等. 弱电网下负序控制对变流器并网系统稳定性影响分析[J]. 电力建设, 2021, 42(3): 61-71.  
LI Dandan, ZHANG Aijun, YUAN Hui, et al. The impact of negative-sequence control on the stability of grid-connected converter in weak grids[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(3): 61-71.
- [4] LIU Qingxiang, RODRIGUEZ E, FARIVAR G, et al. Discontinuous modulation of a cascaded H-bridge low-capacitance STATCOM[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(3): 2790-2800.
- [5] 倪翰文, 李庚, 鲍刚, 等. 基于能量平衡的模块化多电平变换器调制方法[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(7): 9-15.  
NI Hanwen, LI Geng, BAO Gang, et al. A modulation method of modular multilevel converter based on energy balance[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(7): 9-15.
- [6] 何志兴, 罗安, 马伏军, 等. 角形级联 SVG 不平衡补偿的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3878-3888.  
HE Zhixing, LUO An, MA Fujun, et al. Control method for delta-connected cascaded SVG under unbalanced condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3878-3888.
- [7] 毛俞杰, 孙海顺, 韩应生, 等. 采用 STATCOM 抑制多机系统次同步振荡的理论及仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 23-32.  
MAO Yujie, SUN Haishun, HAN Yingsheng, et al. Theory and simulation of STATCOM for damping subsynchronous oscillation of a multi-machine system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6): 23-32.
- [8] 蒋蔚, 刘碧, 曹梦华, 等. 单相级联多电平 H 桥整流器有限集模型预测电流控制[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(11): 36-43.  
JIANG Wei, LIU Bi, CAO Menghua, et al. Finite-control-set model predictive current control scheme for single phase cascaded multilevel H bridge rectifiers[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(11): 36-43.
- [9] 刘威, 季振东, 孙毅超, 等. 基于双频功率回路的星形级联 H 桥 STATCOM 不平衡补偿研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(9): 3527-3538.  
LIU Wei, JI Zhendong, SUN Yichao, et al. Research on unbalance current compensation of star-connected cascaded H-bridge STATCOM based on dual-frequency power loop[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(9): 3527-3538.
- [10] 陶海军, 张晨杰, 赵蒙恩, 等. 级联 H 桥整流器谐波分析及混合控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 24-33.  
TAO Haijun, ZHANG Chenjie, ZHAO Mengen, et al. Harmonic analysis and hybrid control of a cascaded H-bridge rectifier[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 24-33.
- [11] 冯宇鹏, 王先为, 吴金龙, 等. 基于负序电流前馈的星型链式 STATCOM 链间均压策略[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1502-1508.  
FENG Yupeng, WANG Xianwei, WU Jinlong, et al. Clustered DC voltage balancing control of star-connected cascaded STATCOM based on negative current feed-forward control[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1502-1508.

- [12] 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.
- [13] 邢超, 车延博, 李胜男, 等. STATCOM 相间直流电压平衡控制研究[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(12): 9-16.  
XING Chao, CHE Yanbo, LI Shengnan, et al. Analysis on DC voltage balance control between three phases for STATCOM[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(12): 9-16.
- [14] LU Daorong, ZHU Jianxin, WANG Jiangfeng, et al. A simple zero-sequence-voltage-based cluster voltage balancing control and the negative sequence current compensation region identification for star-connected cascaded H-Bridge STATCOM[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(10): 8376-8387.
- [15] CHEN C, WU Heng, LEE T, et al. Zero-sequence voltage injection for DC capacitor voltage balancing control of the star-connected cascaded H-bridge PWM converter under unbalanced grid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6): 4584-4594.
- [16] YU Yifan, KONSTANTINOU G, HREDZAK B, et al. Power balance of cascaded H-bridge multilevel converters for large-scale photovoltaic integration[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 292-303.
- [17] 陆道荣, 魏缪宇, 于宇, 等. 一种基于方波注入的星形级联静止同步补偿器的负序电流补偿策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(6): 1482-1492.  
LU Daorong, WEI Miuyu, YU Yu, et al. Zero-sequence-voltage injection based on square-wave to balance cluster voltages for star-connected cascaded STATCOM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(6): 1482-1492.
- [18] 胡文华, 喻正言, 邢瑞新, 等. 混合十三电平逆变器的倍频调制及功率均衡方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4968-4976.  
HU Wenhua, YU Zhengyan, XING Ruixin, et al. Double frequency modulation and power balance method for hybrid 13-level inverter[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4968-4976.
- [19] VASU R, CHATTOPADHYAY S K, CHAKRABORTY C. Asymmetric cascaded H-bridge multilevel inverter with single DC source per phase[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5398-5409.
- [20] HU Pengfei, GUERRERO J M, HE Zhengxu. Design and analysis of a transformerless STATCOM based on hybrid cascaded multilevel converter[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 104: 694-704.
- [21] 杜翼, 江道灼, 林志勇, 等. 新型混合级联多电平换流器型静止同步补偿器的设计[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3146-3152.  
DU Yi, JIANG Daozhuo, LIN Zhiyong, et al. Research and design of a novel hybrid cascaded multilevel converter based STATCOM[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3146-3152.
- [22] KOYAMA Y, NAKAZAWA Y, MOCHIKAWA H, et al. A transformerless 6.6-kV STATCOM based on a hybrid cascade multilevel converter using SiC devices[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 7411-7423.
- [23] SU Yuchen, CHENG Potai. Development of a hybrid cascaded converter based STATCOM with reduced switching losses and improved fault ride through capability[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(3): 3087-3096.
- [24] 杜少通, 刘杰, 周娟, 等. 一种基于 NPC 和 H 桥混合级联的 6 kV 静止无功发生器[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 5012-5020.  
DU Shaotong, LIU Jie, ZHOU Juan, et al. A 6 kV hybrid cascade static var generator using NPC and H-bridge[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 5012-5020.
- [25] 刘杰. NPC 和 CHB 混合级联的 STATCOM 控制策略研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2024.  
LIU Jie. Research on hybrid cascade STATCOM control strategy of NPC and CHB[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2024.
- [26] 任鹏, 涂春鸣, 侯玉超, 等. 基于 Si 和 SiC 器件的混合型级联多电平变换器及其调控优化方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(18): 5017-5028.  
REN Peng, TU Chunming, HOU Yuchao, et al. Research on a hybrid cascaded multilevel converter based on Si and SiC device and its control optimization method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(18): 5017-5028.
- [27] 杜少通, 谭兴国, 周娟. 减小电容容值的 H 桥级联型 STATCOM 电容取值分析与直流电压控制[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 275-284.  
DU Shaotong, TAN Xingguo, ZHOU Juan. Capacitor value selection analysis and DC voltage control for cascaded H-bridge STATCOM with reduced capacitance value[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 275-284.

收稿日期: 2023-12-12; 修回日期: 2024-04-28

作者简介:

杜少通(1985—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为多电平变流器控制和电能质量控制; E-mail: gdj4321@163.com

何金泽(1998—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为无功补偿技术; E-mail: 31860069@qq.com

原亚雷(1990—), 男, 博士, 研究方向为多电平变换器和电能质量治理。E-mail: yuanyalei@cumt.edu.cn

(编辑 许威)