

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240652

# 正序分量合成零序电压与过调制补偿相结合的 HCSY-MG 功率平衡控制

王兴贵<sup>1</sup>, 李昱<sup>1</sup>, 李锦键<sup>1</sup>, 丁颖杰<sup>1</sup>, 薛晟<sup>1,2</sup>

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 在微源半桥变流器串联结构星型连接微电网(half-bridge converter series Y-connection microgrid, HCSY-MG)系统中, 由于环境因素(如风速、光照等)影响, 各风、光微源的输出功率存在显著差异, 导致系统三相输出功率不一致, 进而引发三相并网电流不对称, 严重影响系统的并网运行。为解决该问题, 提出了一种正序分量合成零序电压注入和过调制补偿相结合的控制方法。该方法利用与三相电网电压同相位的正序分量合成零序电压, 与传统方法相比, 简化了计算过程。然而, 零序电压注入的功率平衡能力有限, 当三相功率不平衡程度较大时, 系统容易发生调制。为此, 过调制补偿通过修改零序电压, 进一步扩大了系统的相间功率平衡范围, 从而确保在相间功率不平衡的情况下, 系统仍然能够正常运行, 且并网电流能够满足并网要求。最后, 通过仿真和实验验证了所提控制策略的正确性与可行性。

**关键词:** 串联微电网; 功率不平衡; 相间功率平衡范围; 零序电压; 过调制补偿

## Power balance control for HCSY-MG based on positive-sequence component synthesized zero-sequence voltage and overmodulation compensation

WANG Xinggui<sup>1</sup>, LI Yu<sup>1</sup>, LI Jinjian<sup>1</sup>, DING Yingjie<sup>1</sup>, XUE Sheng<sup>1,2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Key Laboratory of Gansu Advanced Control for Industrial Processes, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** In half-bridge converter series Y-connection microgrid (HCSY-MG) systems, environmental factors such as wind speed and solar irradiance cause significant variations in the output power of individual wind and solar micro-sources. This results in imbalanced three-phase output power, leading to asymmetry in grid-connected currents, which can severely affect the system's grid-connected operation. To address this issue, a control method combining positive-sequence component synthesized zero-sequence voltage injection with overmodulation compensation is proposed. This method synthesizes the zero-sequence voltage using a positive-sequence component that are in phase with the three-phase grid voltage, simplifying the calculation process compared to traditional methods. However, the power balancing capability of zero-sequence voltage injection is limited, and the system is prone to overmodulation when the degree of three-phase power imbalance is large. To mitigate this, overmodulation compensation is introduced by modifying the zero-sequence voltage, thereby expanding the system's inter-phase power balancing range. This ensures that the system can continue to operate normally under significant inter-phase power imbalance and that the grid-connected currents meet grid code requirements. Finally, simulations and experiments verify the correctness and feasibility of the proposed control strategy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51967011).

**Key words:** series microgrid; power imbalance; inter-phase power balance range; zero-sequence voltage; overmodulation compensation

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51967011); 甘肃省工业过程先进控制重点实验室开放基金项目资助(2022KX08)

## 0 引言

在当前全球环境问题日益突出的背景下, 传统能源(如煤炭和石油)对环境污染和气候变暖的负面影响迫使各国加速能源结构的转型<sup>[1-2]</sup>。风能和太阳能等可再生能源以其清洁、可持续的优点成为世界各国能源发展的战略目标。据国家能源局统计, 截至 2023 年 10 月底, 可再生能源装机容量已达到 14.04 亿 kW, 同比增长 20.8%, 约占全国发电总装机容量的 49.9%。其中, 风电 4.04 亿 kW、光伏发电 5.36 亿 kW。微电网作为新能源与电网之间能量传输的媒介, 在新能源并网中发挥着关键作用<sup>[3-4]</sup>。然而, 随着风、光伏发电规模的不断扩大, 传统微电网存在的环流、谐波污染等问题日益凸显<sup>[5-6]</sup>。为应对这一挑战, 同时充分发挥可再生能源优势, 学者们提出一种基于 H 桥微源逆变器的串联结构微电网(series micro power grids, SMPGs), 该系统具有谐波含量低、无环流等优点, 但仍存在微源投切对系统运行性能影响较大的问题<sup>[7]</sup>。文献[8]在 SMPGs 基础上提出一种微源半桥变流器串联结构星型连接微电网(half-bridge converter series Y-connection microgrid, HCSY-MG)。HCSY-MG 结构具有高度模块化、控制灵活、易扩展和良好的冗余性等优势, 其每个功率单元直流侧均由光伏或风力微源单独供电, 由此可以实现所有微源最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制。但 HCSY-MG 在实际运行中, 由于风、光微源易受天气、环境等因素影响, 各微源输出功率差异明显, 导致该系统出现相内功率不平衡及相间功率不平衡工况。当系统发生相间功率不平衡时, 三相并网电流也随之不平衡, 严重影响系统的正常运行<sup>[9-10]</sup>。

如何解决 HCSY-MG 系统三相功率不平衡问题, 目前尚未有相关文献对其专门研究。然而, 对于三相级联 H 桥逆变器系统的相应问题, 已有一些研究成果。常用的解决方法可分为 3 类: ①零序电压注入法。该方法通过向系统输出电压中注入零序电压, 使电压不平衡度与功率不平衡度保持一致, 从而实现三相并网电流的平衡。文献[11]提出基频零序电压注入法, 该方法物理意义明确, 但平衡能力相对较弱, 易过调制; 文献[12]提出加权最大-最小零序电压注入法, 通过动态调整零序电压大小, 降低输出电压峰值; 文献[13]提出一种基于“功率误差”的零序电压注入法, 根据每相功率与平均功率偏差调节零序电压。为提高功率平衡能力, 文献[14]提出了双三次谐波注入法, 通过在基频零序电压上叠加三次谐波, 进一步降低调制波幅值, 避免

过调制; 文献[15]提出了一种最优零序电压注入法, 在基频零序电压中尽可能注入高次谐波, 能够应对相间功率严重不平衡情况。②简化空间矢量脉宽调制法(space vector pulse width modulation, SVPWM)。文献[16-17]提出一种直流功率控制方法(power control method, PCM), 通过 SVPWM 直接修正各相的持续时间, 使三相并网电流平衡, 但其功率波动较大; 为解决该问题, 文献[18]进一步简化 SVPWM 调制方式和 PCM, 实现了直流功率的精准控制。③模型预测控制。文献[19-20]采用有限控制集模型预测控制, 将各相功率不平衡考虑到最优控制问题中, 以保证三相功率不平衡时并网电流的平衡; 文献[21]提出了一种双层模型预测控制, 进一步减少计算量, 但与零序电压注入法相比, 仍存在计算复杂、运算量大的问题。综上所述, 现已有多种方法用以解决三相级联 H 桥的相间功率不平衡问题, 但其在 HCSY-MG 系统中并不完全适用。

为解决 HCSY-MG 系统的相间功率不平衡问题, 本文首先分析了注入零序电压后系统的相间功率平衡范围。随后提出一种基于正序分量合成零序电压计算方法, 将零序电压叠加至三相调制波上, 重新分配三相功率。接着针对该零序电压存在的功率平衡能力不足、易过调制的问题, 采用过调制补偿进一步扩大了系统的相间功率平衡范围。最后, 通过仿真和实验验证了本文所提零序电压注入法的正确性和有效性。

## 1 HCSY-MG 并网系统结构及特性分析

HCSY-MG 并网系统拓扑如图 1 所示, 该系统每相均由  $N$  个发电模块(generation module, GM)串联构成, 通过星型连接构成三相变流环节; 接着经滤波器、静态开关等并入大电网, 本地负载群连接在交流母线上。

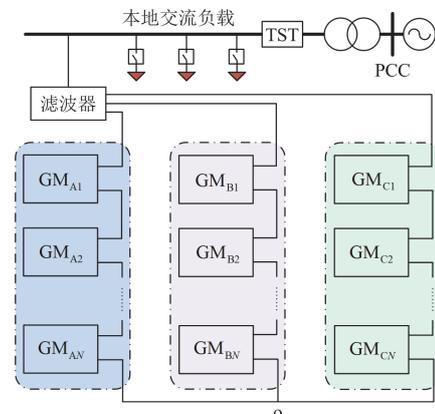


图 1 HCSY-MG 并网系统拓扑图

Fig. 1 Grid-connected topology diagram of the HCSY-MG

GM 结构如图 2 所示, GM 由光伏(风力)微源经 DC/DC 变换电路(AC/DC 整流电路)后并联储能 (energy storage devices, ES), 再接入半桥变流器 (half-bridge converter, HC)构成, 通过控制  $V_1$ 、 $V_2$  的通断可实现 GM 的投入和切除。考虑到半桥变流器的特性, 该系统单相输出电压均为正, 因此单相无法单独给负载供电, 故通过星型连接构成三相后接负载运行。

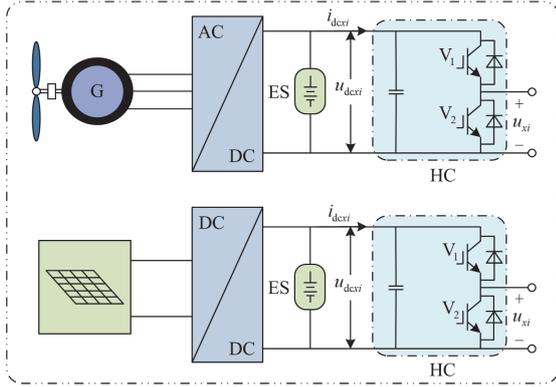


图 2 GM 拓扑结构图

Fig. 2 Structure diagram of GM topology

图 1 和图 2 中:  $N$  为系统每相的 GM 总个数;  $u_{dxc_i}$  ( $x = a, b, c; i = 1, 2, \dots, N$ ) 为系统  $x$  相第  $i$  个 GM 的直流侧电压;  $i_{dxc_i}$  为流入  $x$  相第  $i$  个 HC 的直流侧电流;  $u_{x_i}$  为  $x$  相第  $i$  个 GM 的输出电压。

由图 1 可知, HCSY-MG 并网系统的各相输出电压均由相内  $N$  个 GM 输出电压叠加而成。将各相输出电压等效为受控电压源, 可得 HCSY-MG 并网等效电路如图 3 所示。

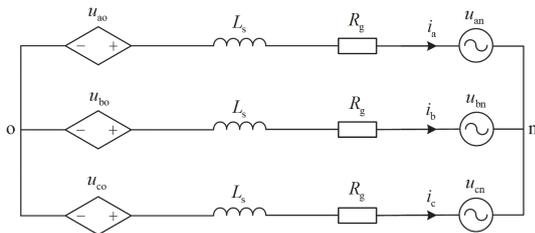


图 3 并网模式下 HCSY-MG 系统等效电路

Fig. 3 System equivalent circuit of HCSY-MG under grid-connected mode

图 3 中:  $u_{x_0}$  为系统的  $x$  相输出电压;  $i_x$  为系统的  $x$  相输出电流, 即并网电流;  $L_s$  为滤波电感;  $R_g$  为线路等效阻抗;  $u_{x_n}$  为  $x$  相电网电压; “o” 为 HCSY-MG 并网系统三相连接点; “n” 为电力系统中性点。

根据基尔霍夫定律, 可得系统各相输出电压回路方程为

$$\begin{cases} u_{a0} = u_{an} + u_L + u_R + u_{no} \\ u_{b0} = u_{bn} + u_L + u_R + u_{no} \\ u_{c0} = u_{cn} + u_L + u_R + u_{no} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_L$  为滤波电感  $L_s$  的电压;  $u_R$  为线路等效阻抗  $R_g$  的电压;  $u_{no}$  为 HCSY-MG 并网系统共模电压。

当三相电网电压对称时, 根据节点电压法可得  $u_{no}$  表达式为

$$u_{no} = \frac{u_{a0} + u_{b0} + u_{c0}}{3} \quad (2)$$

HCSY-MG 系统稳定运行时, 在载波移相调制 (carrier phase shifting SPWM, CPS-SPWM) 下, A 相输出电压  $u_{a0}$  为<sup>[22]</sup>

$$u_{a0} = \sum_{i=1}^N u_{a_i} \frac{u_{dca}}{2} + \frac{u_{dca}}{2} M \sin(\omega_0 t + \theta_a) + \sum_{m=N, 2N, \dots}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{2u_{dca}}{m\pi} J_n \left( \frac{Mm\pi}{2} \right) \sin \left( \frac{(m+n)\pi}{2} \right) \cos[m\omega_c t + n(\omega_0 t + \theta_a)] \quad (3)$$

式中:  $u_{dca}$  为系统 A 相等效直流母线电压,  $u_{dca} = u_{dca1} + u_{dca2} + \dots + u_{dcaN}$ ;  $M$  为调制比;  $\theta_a$  为 A 相调制波初始相位角;  $\omega_0$  为调制波角频率;  $\omega_c$  为三角载波角频率;  $m$  为载波次谐波,  $m = 1, 2, \dots$ ;  $n$  为基波次谐波,  $n = \pm 1, \pm 2, \dots$ ;  $J_n(\cdot)$  为  $n$  阶贝塞尔函数; 系统输出电压由直流分量及交流分量组成。

为确保 HCSY-MG 系统的输出电压稳定, GM 直流侧电压应稳定且相等。因此, 各 GM 直流侧电压  $u_{dxc_i}$  应在储能与闭环控制下维持不变, 因此, 令各相等效直流母线电压相等且均为  $u_{dc}$ , 则

$u_{dca} = u_{dcb} = u_{dcc} = u_{dc}$ , 则可得到

$$u_{no} = \frac{1}{3} \left( \frac{u_{dca}}{2} + \frac{u_{dcb}}{2} + \frac{u_{dcc}}{2} \right) = \frac{u_{dc}}{2} \quad (4)$$

式中:  $u_{no}$  为直流量, 不影响系统的电压电流相位。因此, 零序电压注入法可以用来解决 HCSY-MG 并网系统相间功率不平衡问题。

当三相功率不平衡时, HCSY-MG 系统的相量图如图 4(a)所示。由于系统输出电压保持不变, 而三相功率不一致, 会导致三相并网电流不平衡, 从而影响系统的安全稳定运行。为了维持三相并网电流的平衡, 将零序电压叠加至系统输出电压上, 零序电压与并网电流产生零序有功功率, 使三相有功功率重新分配, 最终达到三相并网电流再次平衡的目的。零序电压的注入只改变功率分配, 而不产生额外的有功功率。图 4(b)为注入零序电压后

HCSY-MG 系统的相量图, 由图可知, 零序电压注入可以解决 HCSY-MG 并网系统的相间功率不平衡问题。

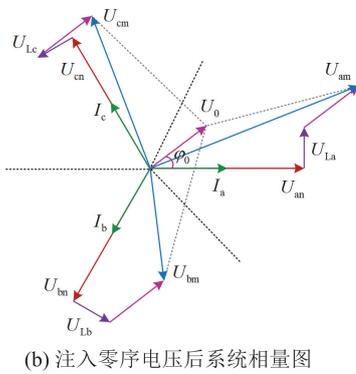
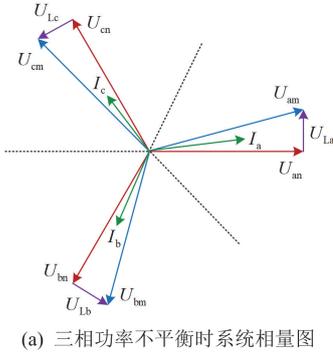


图 4 HCSY-MG 系统相量图

Fig. 4 Vector diagram of HCSY-MG system

图 4 中:  $U_{an}$ 、 $U_{bn}$ 、 $U_{cn}$  为三相电网电压分量;  $U_{La}$ 、 $U_{Lb}$ 、 $U_{Lc}$  为三相滤波电感上的电压分量;  $U_{am}$ 、 $U_{bm}$ 、 $U_{cm}$  为系统各相输出电压的交流电压分量;  $I_a$ 、 $I_b$ 、 $I_c$  为三相并网电流分量;  $\varphi_0$  为零序电压的初始相位。

## 2 相间功率平衡范围分析

文献[23]针对静止同步补偿器负载不平衡工况, 分析了注入负序电流后的系统安全稳定运行范围。文献[24]分析了多端口电力电子变压器的安全稳定运行范围, 提出一种功率转移方法以提升运行裕度。目前尚未有文献对 HCSY-MG 并网系统相间功率不平衡时的相间功率平衡范围进行研究。因此, 本文针对该问题, 分析注入零序电压后 HCSY-MG 并网系统的相间功率平衡范围。

当系统发生相间功率不平衡时, 注入零序电压后, 忽略输出电压中的高次谐波, 可得 HCSY-MG 系统输出电压与电流为

$$\begin{cases} u_{ao} = \frac{1}{2}u_{dc} + U_m \sin \omega_0 t + U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \\ u_{bo} = \frac{1}{2}u_{dc} + U_m \sin(\omega_0 t - \frac{2}{3}\pi) + U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \\ u_{co} = \frac{1}{2}u_{dc} + U_m \sin(\omega_0 t + \frac{2}{3}\pi) + U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} i_a = I_{am} \sin(\omega_0 t + \theta) \\ i_b = I_{bm} \sin(\omega_0 t - \frac{2}{3}\pi + \theta) \\ i_c = I_{cm} \sin(\omega_0 t + \frac{2}{3}\pi + \theta) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $U_m$  和  $U_0$  分别代表系统各相输出电压中的正序分量及零序分量幅值;  $u_{dc}$  为各相等效直流母线电压;  $\theta$  为功率因数角;  $I_{xm}$  为系统输出电流幅值, 假定注入零序电压后三相并网电流幅值相等且均为  $I_m$ , 则  $I_{am} = I_{bm} = I_{cm} = I_m$ 。

由式(3)可知, HCSY-MG 各相输出电压  $u_{xo}$  可等效为交流电压源与直流电压源的叠加。其中直流电压不影响平均功率, 令功率因数角  $\theta$  为  $0^\circ$ , 通过式(5)和式(6)可得 HCSY-MG 系统输出平均功率  $P_T$  为

$$P_T = P_a + P_b + P_c = \frac{3}{2}U_m I_m \quad (7)$$

式中:  $P_a$ 、 $P_b$ 、 $P_c$  分别为系统三相输出功率。

$$\begin{cases} P_a = \frac{1}{2}U_m I_m + \frac{1}{2}U_0 I_m \cos \varphi_0 \\ P_b = \frac{1}{2}U_m I_m + \frac{1}{2}U_0 I_m \cos(\varphi_0 + \frac{2}{3}\pi) \\ P_c = \frac{1}{2}U_m I_m + \frac{1}{2}U_0 I_m \cos(\varphi_0 - \frac{2}{3}\pi) \end{cases} \quad (8)$$

联立式(7)和式(8)可得零序电压  $u_0$  的幅值和相角余弦表达式, 如式(9)所示。

$$\begin{cases} U_0 = \frac{\sqrt{3}A_1}{3I_m} \\ \cos \varphi_0 = \frac{2\sqrt{3}P_a - \sqrt{3}U_m I_m}{A_1} \end{cases} \quad (9)$$

$$A_1 = \sqrt{16P_a^2 + 16P_b^2 + 16P_a P_b + 12U_m^2 I_m^2 - 24U_m I_m P_a - 24U_m I_m P_b} \quad (10)$$

由三角函数公式可得, 形如  $x \sin \alpha + y \sin \beta$  类型的表达式, 其幅值  $Z_m$  可表示为

$$Z_m = \sqrt{x^2 + y^2 + 2xy \cos(\alpha - \beta)} \quad (11)$$

联立式(5)、式(9)和式(11)可得 HCSY-MG 并网系统输出电压中的交流分量幅值  $U_{xm}$  为

$$\begin{cases} U_{am} = \frac{\sqrt{A_2 + 12U_m I_m P_a}}{\sqrt{3}I_m} \\ U_{bm} = \frac{\sqrt{A_2 + 12U_m I_m P_b}}{\sqrt{3}I_m} \\ U_{cm} = \frac{\sqrt{A_2 + 18U_m^2 I_m^2 - 12U_m I_m (P_a + P_b)}}{\sqrt{3}I_m} \end{cases} \quad (12)$$

$$A_2 = 9U_m^2 I_m^2 - 24U_m I_m (P_a + P_b) + 16(P_a^2 + P_b^2 + P_a P_b) \quad (13)$$

定义 HCSY-MG 系统三相功率不平衡度为  $\lambda_x$ ，其计算方式为

$$\lambda_a = \frac{3P_a}{P_T}, \lambda_b = \frac{3P_b}{P_T}, \lambda_c = \frac{3P_c}{P_T} \quad (14)$$

$\lambda_a$ 、 $\lambda_b$  和  $\lambda_c$  的关系为

$$\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c = 3 \quad (15)$$

由式(3)和式(5)可得注入零序电压前系统初始调制比  $M$  表达式为

$$M = \frac{2U_m}{u_{dc}} \quad (16)$$

再由式(12)可得系统注入零序电压后的系统调制比  $M_x$  表达式为

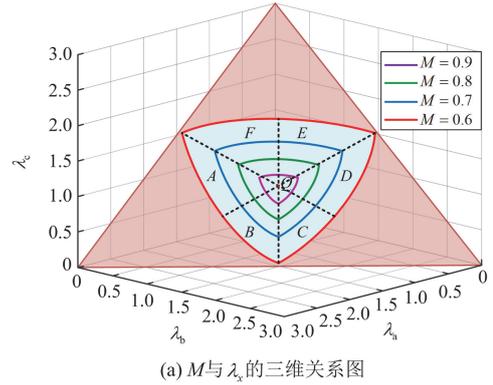
$$M_a = \frac{2U_{am}}{u_{dc}}, M_b = \frac{2U_{bm}}{u_{dc}}, M_c = \frac{2U_{cm}}{u_{dc}} \quad (17)$$

结合式(12)、式(14)、式(16)和式(17)可得

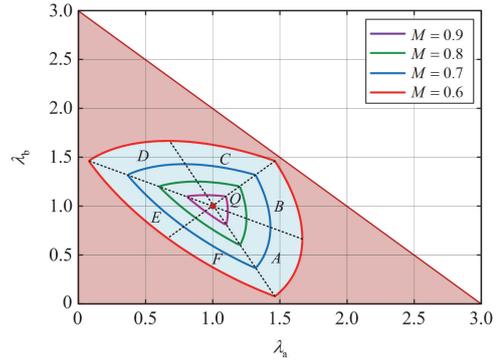
$$\begin{cases} M_a = \frac{\sqrt{3}M}{2} \sqrt{-4 - \frac{8}{3}\lambda_b + \frac{8}{3}\lambda_c + A_3} \\ M_b = \frac{\sqrt{3}M}{2} \sqrt{-4 - \frac{8}{3}\lambda_a + \frac{8}{3}\lambda_c + A_3} \\ M_c = \frac{\sqrt{3}M}{2} \sqrt{-12 + 8\lambda_c + A_3} \end{cases} \quad (18)$$

$$A_3 = \frac{16}{9}\lambda_a^2 + \frac{16}{9}\lambda_b^2 + \frac{16}{9}\lambda_a\lambda_b \quad (19)$$

为确保 HCSY-MG 并网系统的稳定运行，需要保证  $M_x$  值不得超过 1。以  $M_x \leq 1$  为约束条件，绘制关于  $\lambda_x$  的关系曲线如图 5 所示。图中红色区域代表 HCSY-MG 系统发生相间功率不平衡时所有可能存在的工况，蓝色区域为注入零序电压后的相间功率平衡范围。由图 5 可知，初始调制比  $M$  与相间功率平衡范围成反比。图中各区域分别代表不同的功率不平衡情况， $Q$  为三相功率平衡点；区域 A： $\lambda_a > \lambda_c > \lambda_b$ ；区域 B： $\lambda_a > \lambda_b > \lambda_c$ ；区域 C： $\lambda_b > \lambda_a > \lambda_c$ ；区域 D： $\lambda_b > \lambda_c > \lambda_a$ ；区域 E： $\lambda_c > \lambda_b > \lambda_a$ ；区域 F： $\lambda_c > \lambda_a > \lambda_b$ 。



(a)  $M$  与  $\lambda_x$  的三维关系图



(b)  $M$  与  $\lambda_a$ 、 $\lambda_b$  关系图

图 5 注入零序电压后的系统相间功率平衡范围

Fig. 5 System phase-to-phase power balance range after injection of zero-sequence voltage

为了进一步量化零序电压的平衡能力，绘制不同  $M$  下的相间功率平衡范围如图 6 所示， $E_{BF}$  为注入零序电压后的相间功率平衡范围占据所有工况的系数。由图 6 可知，当初始调制比  $M$  为 1 时， $E_{BF}$  为 0%。此时，即使发生轻微的相间功率不平衡，系统也会过调制。当  $M = 0.8$  时， $E_{BF}$  为 5.3%，此时零序电压注入仅能保证系统 5.3% 的工况处于线性调制范围。

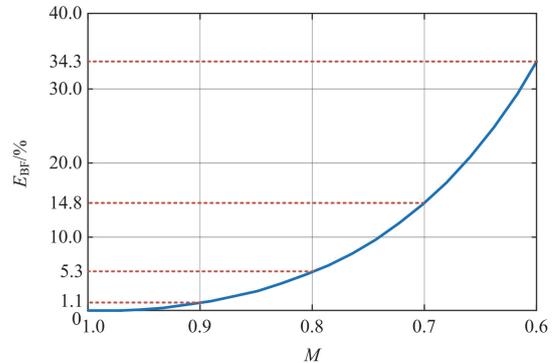


图 6 不同  $M$  下的相间功率平衡范围

Fig. 6 Interphase power balance range at different  $M$

### 3 正序分量合成零序电压与过调制补偿

#### 3.1 正序分量合成零序电压法

结合式(9)和式(10), 可得传统零序电压  $u_0$  计算公式为

$$u_0 = U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = \frac{\sqrt{3}A_1}{3I_m} \sin \left[ \omega_0 t + \arccos \left( \frac{2\sqrt{3}P_a - \sqrt{3}U_m I_m}{A_1} \right) \right] \quad (20)$$

其中包含反三角函数求解、开平方根等复杂运算过程。因此, 本文研究一种利用正序分量合成的零序电压注入(positive sequence component synthesized zero-sequence voltage injection, PSCSZSVI)方法, 仅需三相功率不平衡度及三相电网电压信息即可求得零序电压。PSCSZSVI 原理如图 7 所示。

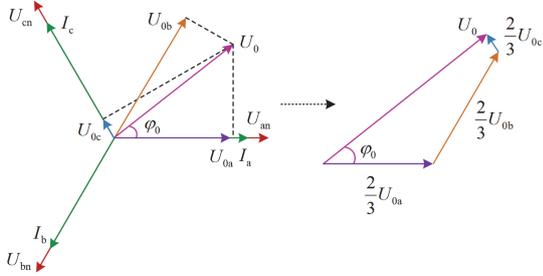


图 7 PSCSZSVI 原理图

Fig. 7 Schematic diagram of PSCSZSVI

零序电压  $u_0$  可以由  $u_{0a}$ 、 $u_{0b}$ 、 $u_{0c}$  三个正序分量合成, 计算方法为

$$u_0 = \frac{2}{3}(u_{0a} + u_{0b} + u_{0c}) \quad (21)$$

化简式(8)可得

$$\begin{cases} \frac{1}{2}U_0 I_m \cos \varphi_0 = P_a - \frac{P_T}{3} \\ \frac{1}{2}U_0 I_m \cos(\varphi_0 + \frac{2}{3}\pi) = P_b - \frac{P_T}{3} \\ \frac{1}{2}U_0 I_m \cos(\varphi_0 - \frac{2}{3}\pi) = P_c - \frac{P_T}{3} \end{cases} \quad (22)$$

结合式(21)与式(22)可得

$$\begin{cases} \frac{1}{2}U_{0a} I_m = P_a - \frac{P_T}{3} \\ \frac{1}{2}U_{0b} I_m = P_b - \frac{P_T}{3} \\ \frac{1}{2}U_{0c} I_m = P_c - \frac{P_T}{3} \end{cases} \quad (23)$$

可得  $u_{0a}$ 、 $u_{0b}$ 、 $u_{0c}$  的幅值为

$$\begin{cases} U_{0a} = \frac{2}{I_m} (P_a - \frac{P_T}{3}) \\ U_{0b} = \frac{2}{I_m} (P_b - \frac{P_T}{3}) \\ U_{0c} = \frac{2}{I_m} (P_c - \frac{P_T}{3}) \end{cases} \quad (24)$$

当系统处于单位功率因数运行时, 由图 7 可知,  $u_{0a}$ 、 $u_{0b}$ 、 $u_{0c}$  与电网电压  $u_{an}$ 、 $u_{bn}$ 、 $u_{cn}$  同相位, 故无需额外计算其相位, 结合式(7)和式(24)可得

$$\begin{cases} u_{0a} = U_{0a} \frac{u_{an}}{U_{an}} = \frac{2}{I_m} (P_a - \frac{P_T}{3}) \frac{u_{an}}{U_{an}} \\ u_{0b} = U_{0b} \frac{u_{bn}}{U_{bn}} = \frac{2}{I_m} (P_b - \frac{P_T}{3}) \frac{u_{bn}}{U_{bn}} \\ u_{0c} = U_{0c} \frac{u_{cn}}{U_{cn}} = \frac{2}{I_m} (P_c - \frac{P_T}{3}) \frac{u_{cn}}{U_{cn}} \end{cases} \quad (25)$$

最终可得出零序电压  $u_0$  表达式为

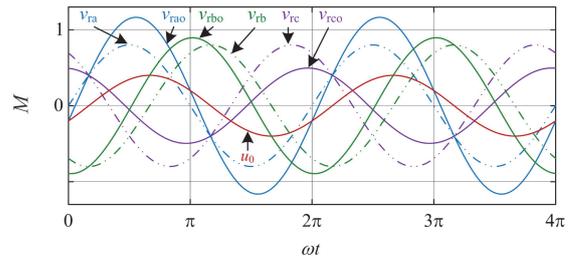
$$u_0 = \frac{2}{3}(u_{0a} + u_{0b} + u_{0c}) = u_{an} \left( \frac{2\lambda_a - 2}{3} \right) + u_{bn} \left( \frac{2\lambda_b - 2}{3} \right) + u_{cn} \left( \frac{2\lambda_c - 2}{3} \right) \quad (26)$$

相比传统零序电压计算方法, 所提 PSCSZSVI 方法物理意义明确、原理清晰且计算简单。

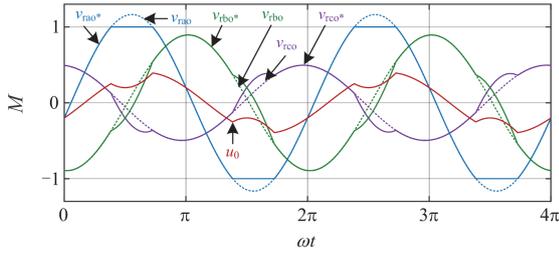
#### 3.2 过调制补偿

注入零序电压会导致 HCSY-MG 系统每相输出电压幅值上升。当三相功率不平衡度相对较小时, 零序电压注入后系统每相输出电压幅值不超过等效直流母线电压  $u_{dc}$  (保证  $M_x \leq 1$ ), 从而实现三相并网电流的再平衡。随着三相功率不平衡度的增大, 由于  $u_{dc}$  幅值有限, 当注入零序电压使系统各相输出电压幅值超过  $u_{dc}$  幅值时(即  $M_x > 1$ ), 系统过调制, 三相并网电流畸变。

通过图 5 可知, 零序电压注入方法的平衡能力较弱。为了进一步扩大系统相间功率平衡范围, 本文提出一种过调制补偿控制, 如图 8 所示。该控制避免了系统在注入零序电压后发生过调制, 进一步优化了零序电压注入法在应对功率不平衡时的性能, 使其能够适用于更加恶劣的工况。



(a) 采用PSCSZSVI前后三相调制波及零序电压



(b) PSCSZSVI + 过调制补偿前后三相调制波及零序电压

图 8 过调制补偿原理图

Fig. 8 Schematic diagram of over-modulation compensation

图 8 中： $v_{ra}$ 、 $v_{rb}$ 、 $v_{rc}$  为系统相间功率平衡(即未加入零序电压)时的三相调制波； $v_{rao}$ 、 $v_{rbo}$ 、 $v_{rco}$  为系统发生相间功率不平衡时采用 PSCSZSVI 控制时的三相调制波； $u_0$  为零序电压。从图 8(a)中可以看到， $v_{rao}$  的幅值已经超过 1，系统发生过调制。而为了避免系统过调制，将过调制的调制波中幅值超过  $\pm 1$  的部分叠加至未超调的调制波中。从图 8(b)中可以看到， $v_{rao}$  超过 1 的部分被叠加在  $v_{rbo}$ 、 $v_{rco}$  中， $v_{rao}^*$ 、 $v_{rbo}^*$ 、 $v_{rco}^*$  为修改后的三相调制波， $u_0^*$  为修改后的零序电压，通过该控制可以避免系统过调制。

过调制补偿将零序电压  $u_0^*$  叠加至各调制波中，使各调制波幅值均不超过 1。当  $M = 0.8$  时，采用过调制补偿前后系统相间功率平衡范围，如图 9 所示。图中蓝色区域为采用过调制补偿控制的相间功率平衡范围，绿色为未采用过调制补偿控制的相间功率平衡范围。从图中可知，采用过调制补偿后相间功率平衡范围从 5.3% 上升至 22.9%，进一步扩大了零序电压的相间功率平衡能力。

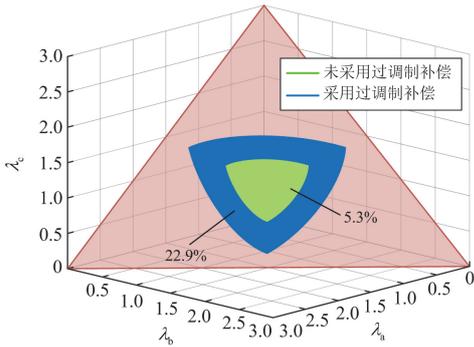


图 9 采用过调制补偿前后系统相间功率平衡范围

Fig. 9 Range of phase power balance in the system before and after overmodulation compensation

但由于零序电压发生改变，会导致 HCSY-MG 系统的“o”偏移至“o<sub>1</sub>”处，如图 10 所示。修改后的零序电压  $u_0^*$  无法像初始零序电压  $u_0$  一样重新分配三相功率使并网电流再平衡。因此，需要加入

补偿控制使偏移的“o<sub>1</sub>”重新返回至“o”处，以保证三相并网电流平衡。

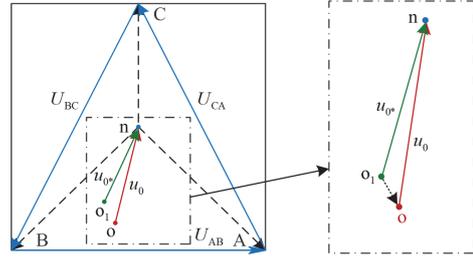


图 10 “o”点偏移示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the offset of “o”

为了使“o<sub>1</sub>”重新返回至“o”处，首先通过  $v_{rao}^*$ 、 $v_{rbo}^*$ 、 $v_{rco}^*$  获得零序电压  $u_0^*$ ，然后经过截止频率为 100 Hz 的低通滤波器滤除  $u_0^*$  的高频分量。接着， $u_0^*$  与  $u_0$  经二阶广义积分器(second order generalized integrator, SOGI)分别生成正交信号  $u_{0d}^*$ 、 $u_{0q}^*$  和  $u_{0d}$ 、 $u_{0q}$ ，将其作差后经过 PI 生成的零序电压信号  $u_{0cz}$  送入  $v_{ra}$ 、 $v_{rb}$ 、 $v_{rc}$  中生成  $v_{rao}$ 、 $v_{rbo}$ 、 $v_{rco}$ ，从而使“o<sub>1</sub>”重新返回至“o”处。HCSY-MG 并网系统控制分为前级控制和后级控制，前级控制主要实现微源的最大功率点跟踪，而后级控制如图 11 所示，主要包括功率外环、电流内环、零序电压生成及“o”偏移补偿控制 4 部分。

微源输出功率不一致还会导致 HCSY-MG 系统出现相内各 GM 输出功率不一致情况，为了让每一个 GM 都能达到最大功率输出，也需要对相内各 GM 根据其功率大小分配不同的调制波。图 12 为相内 GM 调制波分配示意图。图 12 中： $P_{avx}$  为 x 相的平均功率； $\alpha_{xi}$  为分配系数。

定义相内功率不平衡度  $h_{xi}$  为

$$h_{xi} = \frac{3P_{xi}}{P_T} \quad (27)$$

则相内功率不平衡度  $h_{xi}$  与三相功率不平衡度  $\lambda_x$  之间的关系为

$$h_{x1} + \dots + h_{xi} + \dots + h_{xN} = \lambda_x \quad (28)$$

## 4 仿真验证

为验证零序电压注入及过调制补偿的正确性，本文在 Matlab/Simulink 仿真环境中搭建了 HCSY-MG 并网系统仿真模型。设置 GM 直流侧电压为 195 V，开关频率为 10 kHz，电网相电压有效值为 220 V，电网频率为 50 Hz，系统的风、光微源参数如表 1 所示，控制参数如表 2 所示。

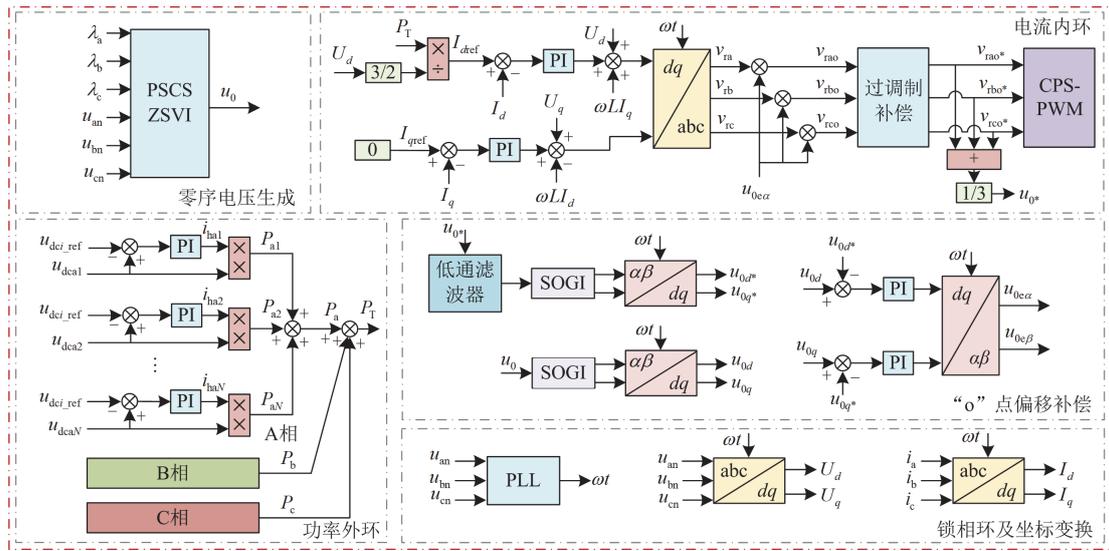


图 11 HCSY-MG 并网系统后级控制框图

Fig. 11 Block diagram of back stage control of HCSY-MG

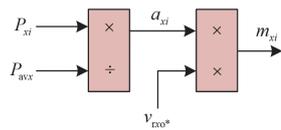


图 12 相内 GM 调制波分配示意图

Fig. 12 Schematic diagram of in-phase GM modulated wave distribution

表 1 微源参数

Table 1 Micro source parameters

PV 参数	数值	风机参数	数值
最大功率/W	2000	额定机械功率/W	2200
最大功率点电压/V	29.3	额定风速 /( $m \cdot s^{-1}$ )	10
最大功率点电流/A	7.58	额定风速下最大功率/W	2000
开路电压/V	36.6	额定容量/VA	1600
短路电流/A	7.97	额定转速/p.u.	0.8

表 2 控制参数

Table 2 Control parameters

参数	数值
功率外环 PI( $k_{p1}$ 、 $k_{i1}$ )	(5、40)
电流内环 PI( $k_{p2}$ 、 $k_{i2}$ )	(80、700)
“o”点偏移补偿 PI( $k_{p3}$ 、 $k_{i3}$ )	(3、20)
低通滤波器截止频率/Hz	100

设置系统初始调制比  $M = 0.8$ , 每相由 4 个 GM 构成, 包含 2 个风力微源(GM<sub>1</sub>、GM<sub>3</sub>)和 2 个光伏微源(GM<sub>2</sub>、GM<sub>4</sub>), 每个光伏微源均为  $3 \times 3$  阵列。初始光照强度为  $1000 \text{ W/m}^2$ , 初始平均风速为  $10 \text{ m/s}$ , 环境温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。此时, 各微源输出功率均为  $P_{xi} = 2 \text{ kW}$ , 仿真分为 3 个阶段。

阶段一[0,0.3] s:  $\lambda_a = \lambda_b = \lambda_c = 1$ ,  $h_{xi} = 0.25$ 。环境条件不变, 系统各微源输出功率一致。此时  $P_a = P_b = P_c = 8 \text{ kW}$ , 系统工作于 Q 点。

阶段二(0.3,0.6] s:  $\lambda_a = 1.22(h_{a1} = 0.305)$ ,  $\lambda_b = 1.04(h_{b1} = 0.29$ 、 $h_{b2} = 0.28$ 、 $h_{b3} = 0.26$ 、 $h_{b4} = 0.23)$ ,  $\lambda_c = 0.74(h_{c1} = 0.23$ 、 $h_{c2} = 0.2$ 、 $h_{c3} = 0.17$ 、 $h_{c4} = 0.14)$ 。各相输出功率出现差异, 系统发生相间相内功率不平衡。三相功率为  $P_a = 8 \text{ kW}$ 、 $P_b = 6.8 \text{ kW}$ 、 $P_c = 4.8 \text{ kW}$ 。

阶段三(0.6,0.9] s:  $\lambda_a = 1.36(h_{a1} = 0.34)$ ,  $\lambda_b = 0.96(h_{b1} = h_{b2} = 0.26$ 、 $h_{b3} = 0.24$ 、 $h_{b4} = 0.21)$ ,  $\lambda_c = 0.68(h_{c1} = 0.22$ 、 $h_{c2} = 0.21$ 、 $h_{c3} = 0.14$ 、 $h_{c4} = 0.12)$ 。三相输出功率严重不平衡。三相功率为  $P_a = 8 \text{ kW}$ 、 $P_b = 5.6 \text{ kW}$ 、 $P_c = 4 \text{ kW}$ 。

图 13 为系统在不同阶段的三相功率不平衡度。在阶段一, 系统工作于 Q 点, 无需额外控制。

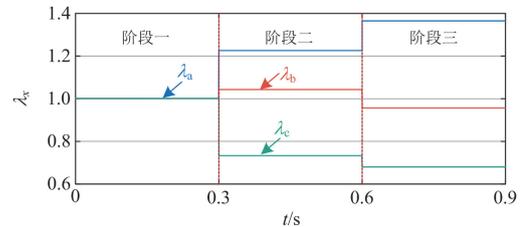


图 13 不同阶段三相功率不平衡度

Fig. 13 Three-phase power imbalance at different stages

图 14 为不同阶段的三相并网电流波形图。阶段二和阶段三, 系统发生相间功率不平衡。其中阶段

二电流不平衡度为 10.23%，阶段三电流不平衡度为 15.89%。电流不平衡度随着功率不平衡度的增加而增大，电流质量也随之恶化。

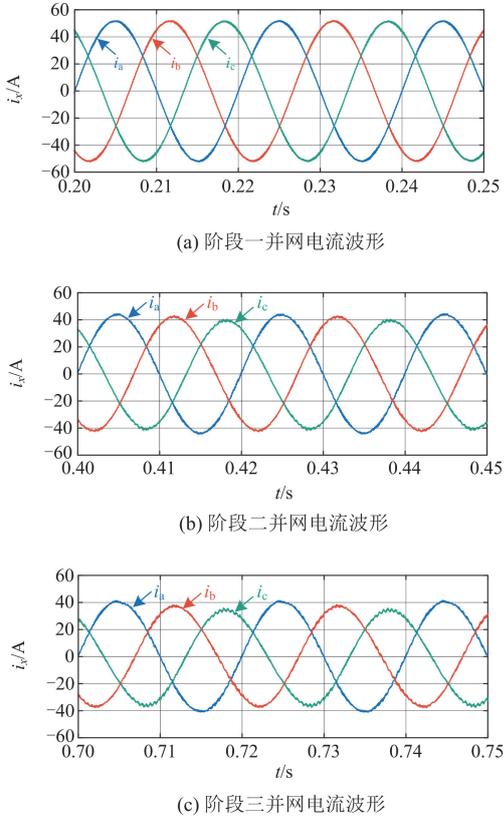


图 14 未加控制时并网电流波形图

Fig. 14 Waveform of current without control

图 15 为加入控制后的仿真波形。图 15(a)为阶段二采用 PSCS ZSVI 的并网电流( $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ )、系统

各相的输出电压( $u_{ao}$ 、 $u_{bo}$ 、 $u_{co}$ )、归一化的调制波( $v_{rao}$ 、 $v_{rbo}$ 、 $v_{rco}$ )及零序电压 $u_0$ 。结合图 14(b)对比分析可知，采用 PSCS ZSVI 后系统输出电压发生变化，A 相输出电压大于 B、C 两相，从而重新分配三相功率，使三相电流平衡。此时系统未过调制，零序电压注入保证了系统相间功率不平衡时的稳定运行。

图 15(b)为阶段三采用 PSCS ZSVI 仿真波形。此时由于三相功率不平衡度过大，在注入零序电压后 $v_{rao}$ 幅值超过 1，系统发生过调制。 $i_a$ 的谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)为 6.17%，超过了并网标准的 5%，并网电流质量较差，系统强制离网。此时，PSCS ZSVI 已无法保证系统的稳定运行。

为避免系统过调制，引入过调制补偿控制，图 15(c)为加入补偿控制后的波形。在补偿控制作用下，零序电压 $u_0$ 被修改为 $u_0^*$ ，调制波 $v_{rao}$ 、 $v_{rbo}$ 、 $v_{rco}$ 也被修改为 $v_{rao}^*$ 、 $v_{rbo}^*$ 、 $v_{rco}^*$ 。 $v_{rao}^*$ 幅值被限制为 1，解决了过调制问题。此时， $i_a$ 的 THD 由 6.17%下降至 3.35%，并网电流质量得到改善。

表 3 为不同阶段的电流不平衡度及其 THD。在阶段二，零序电压注入后电流不平衡度降低，由 10.23%降低至 0.33%。而在阶段三，由于三相功率严重不平衡，系统过调制，导致并网电流质量严重下降，其中 $i_a$ 的 THD 超过并网标准 5%。故零序电压无法应对功率严重不平衡情况。

过调制补偿不仅保持了三相并网电流平衡，防止系统发生过调制，同时使电流保持了较低的 THD。阶段三中 $u_0$ 、 $u_0^*$ 及注入调制波 $v_{rx}$ 中的零序电压信号 $u_{0e\alpha}$ 波形如图 16 所示。

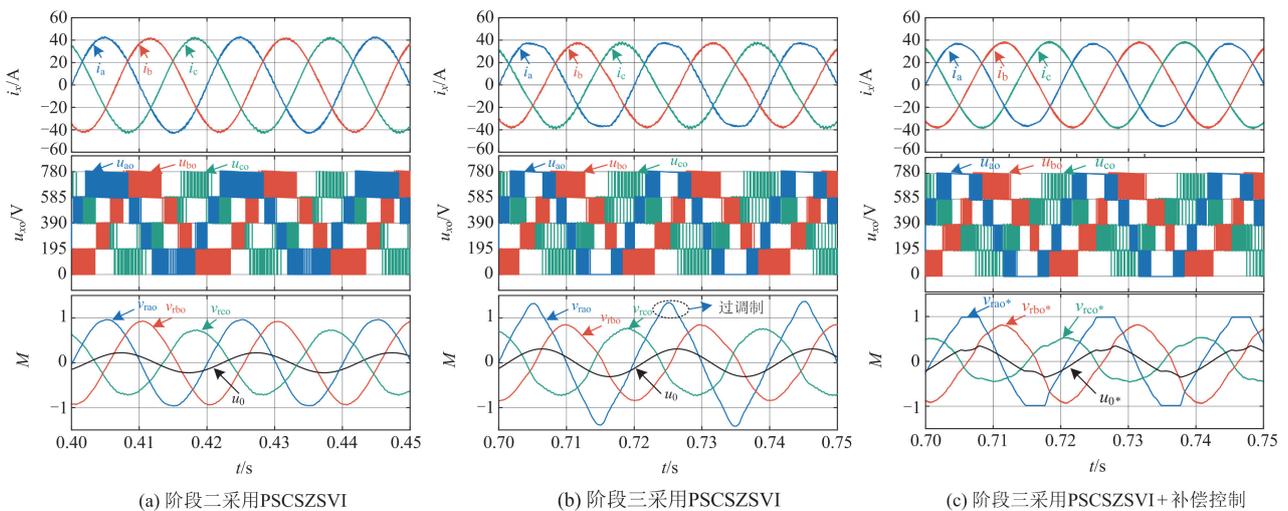


图 15 加入控制后系统仿真波形

Fig. 15 Simulated waveform of the system after adding control

表 3 并网电流及其 THD

Table 3 Grid-connected current and its THD

方法	阶段	电流不平衡度/%	三相电流 THD/%		
			$i_a$	$i_b$	$i_c$
未加控制	阶段一	0.21	1.51	1.54	1.54
	阶段二	10.23	2.13	2.12	2.16
	阶段三	15.89	2.82	2.62	2.25
PSCS2SVI	阶段二	0.33	2.23	2.31	2.18
	阶段三	1.52	6.17	4.55	3.45
PSCS2SVI + 补偿控制	阶段三	0.47	3.35	2.91	2.89

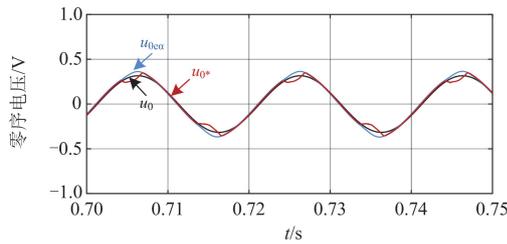


图 16 不同零序电压波形

Fig. 16 Waveforms of different zero sequence voltage

## 5 实验验证

为验证所提控制策略的正确性与可行性, 搭建了如图 17 所示的 HCSY-MG 并网系统实验平台。该平台每相由 4 个 GM 串联构成, 与仿真保持一致。其中, 风、光微源由可调开关电源进行模拟, 实验样机通过调压器和变压器与 380 V 大电网相连接, 实验参数如表 4 所示。

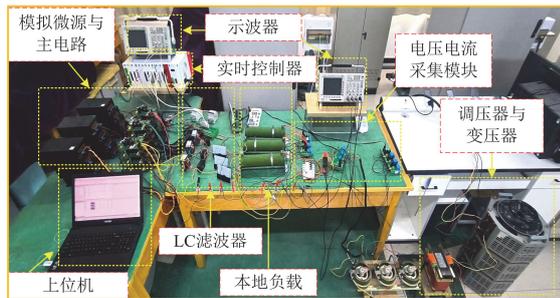


图 17 HCSY-MG 并网系统实验平台

Fig. 17 Experimental platform of HCSY-MG grid-connected system

表 4 实验参数

Table 4 Experimental parameters

参数	数值	参数	数值
开关电源最大电压/V	80	电网相电压幅值/V	90
滤波电感/mH	0.5	电网频率/Hz	50
滤波电容/ $\mu$ F	10	开关频率/kHz	10
最大输出功率/W	400	死区时间/ $\mu$ s	0.6

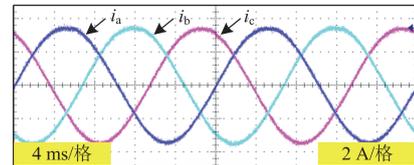
设置系统初始调制比  $M = 0.8$ , 实验分为 3 种工况。

工况一:  $\lambda_a = \lambda_b = \lambda_c = 1$ ,  $h_{xi} = 0.25$ 。系统处于相间功率平衡状态。此时,  $P_a = P_b = P_c = 150$  W。

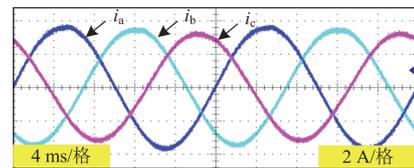
工况二:  $\lambda_a = 1.14 (h_{a1} = 0.285)$ ,  $\lambda_b = 0.99 (h_{b1} = 0.27, h_{b2} = 0.25, h_{b3} = 0.24, h_{b4} = 0.23)$ ,  $\lambda_c = 0.87 (h_{c1} = 0.24, h_{c2} = 0.22, h_{c3} = 0.21, h_{c4} = 0.2)$ 。系统轻微相间相内功率不平衡。此时,  $P_a = 171$  W ( $P_{a1} = 43$  W),  $P_b = 148$  W ( $P_{b1} = 40$  W、 $P_{b2} = 38$  W、 $P_{b3} = 36$  W、 $P_{b4} = 34$  W),  $P_c = 131$  W ( $P_{c1} = 36$  W、 $P_{c2} = 33$  W、 $P_{c3} = 32$  W、 $P_{c4} = 30$  W); 系统工作于图 5 中的区域 B。

工况三:  $\lambda_a = 1.29 (h_{a1} = 0.32)$ ,  $\lambda_b = 0.98 (h_{b1} = 0.27, h_{b2} = 0.26, h_{b3} = 0.23, h_{b4} = 0.22)$ ,  $\lambda_c = 0.73 (h_{c1} = 0.2, h_{c2} = 0.18, h_{c3} = h_{c4} = 0.17)$ 。系统发生严重相间相内功率不平衡。此时,  $P_a = 171$  W ( $P_{a1} = 43$  W),  $P_b = 130$  W ( $P_{b1} = 36$  W、 $P_{b2} = 34$  W、 $P_{b3} = 31$  W、 $P_{b4} = 29$  W),  $P_c = 96$  W ( $P_{c1} = 27$  W、 $P_{c2} = 24$  W、 $P_{c3} = 23$  W、 $P_{c4} = 22$  W)。系统仍工作于图 5 中的区域 B。

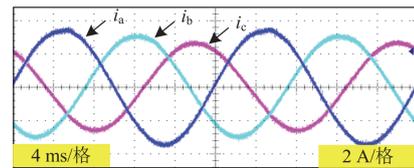
图 18 为 HCSY-MG 系统未加相间功率平衡控制时的并网电流实验波形, 可以看到, 工况一由于未发生相间功率不平衡情况, 此时三相并网电流平衡; 工况二发生轻微相间功率不平衡, 此时三相并网电



(a) 工况一



(b) 工况二



(c) 工况三

图 18 未加控制时并网电流实验波形图

Fig. 18 Experimental waveform of grid-connected current when no control is added

流不平衡度为 12.4%；工况三发生严重三相功率不平衡，三相电流不平衡度为 22.5%。

图 19 为加入控制后的系统并网电流、各相输出电压、归一化后的调制波及零序电压  $u_0$  的实验波形。图 19(a)为工况二采用 PSCS ZSVI 时的实验波形。结合图 18(b)可以看到，注入零序电压后三相电

流重新平衡；图 19(b)为工况三采用 PSCS ZSVI 时的实验波形。此时，系统过调制，且 A 相并网电流 THD 为 6.28%，超过了并网标准的 5%，系统无法并网运行；图 19(c)为工况三采用 PSCS ZSVI 结合过调制补偿时的实验波形，在补偿控制作用下，调制波幅值被限制为 1，解决了系统过调制问题。且 A 相电流的 THD 由 6.28%下降至 2.74%，满足并网条件。

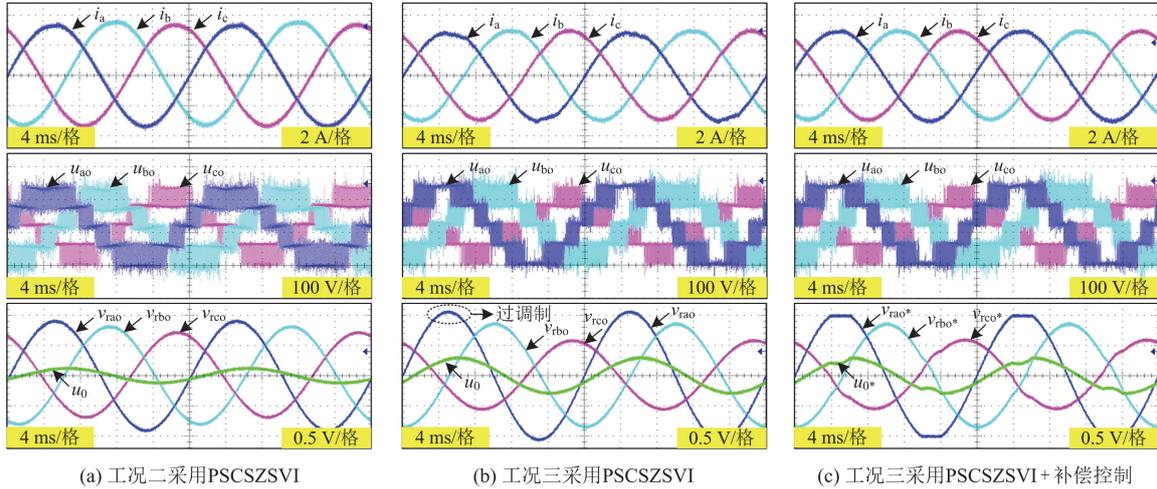


图 19 加入控制后系统实验波形

Fig. 19 Experimental waveform of the system after adding control

结合理论分析、仿真及实验可得，本文所提 PSCS ZSVI 结合过调制补偿的控制方法可以有效解决 HCSY-MG 系统三相功率不一致所导致的三相并网电流不平衡及 THD 偏大的问题。

## 6 结论

本文针对 HCSY-MG 并网系统三相功率不一致导致的并网电流不平衡问题，提出了一种基于正序分量合成的零序电压和过调制补偿相结合的控制方法。该方法相较于传统零序电压方法计算简单、原理清晰，且过调制补偿可进一步扩大系统的相间功率平衡范围，有效解决了并网电流不平衡及质量差的问题，保证了该系统在相间功率不平衡时的安全稳定运行。

## 参考文献

- [1] 齐金山, 姚良忠, 廖思阳, 等. 高比例新能源电力系统静态电压稳定裕度在线概率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 47-57.  
QI Jinshan, YAO Liangzhong, LIAO Siyang, et al. Online probabilistic assessment of static voltage stability margin for power systems with a high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 47-57.
- [2] 罗莎莎, 郭经韬, 蔡颖倩, 等. 面向碳中和的广东省电

- 源结构转型分析[J]. 南方能源建设, 2024, 11(4): 102-110.  
LUO Shasha, GUO Jingtao, CAI Yingqian, et al. Analysis on power supply structure transformation towards carbon neutrality in Guangdong[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(4): 102-110.
- [3] 耿新, 马文恒, 武琼, 等. 新能源大规模并网环境下变电站防孤岛技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 161-171.  
GENG Xin, MA Wenheng, WU Qiong, et al. Islanding prevention technology for substations in the context of large-scale grid connection of new energy[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 161-171.
- [4] 王祺, 张泽轲, 郭杰帅, 等. 新型电力系统主动构网机理与技术路径[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 504-517.  
WANG Qi, ZHANG Zeke, GUO Jieshuai, et al. Mechanism and technical path of active grid-forming of new type power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 504-517.
- [5] 李响, 武海潮, 王文雪, 等. 基于电网承载能力的新能源并网适应性评估[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(增刊 1): 107-113.  
LI Xiang, WU Haichao, WANG Wenxue, et al. Adaptability assessment of new energy connected to the power grid based on the carrying capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(S1): 107-113.
- [6] 何晋伟, 孟维奇, 蒋玮, 等. 新能源配电网电能质量典型问题分析及应对策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2983-2994.

- HE Jinwei, MENG Weiqi, JIANG Wei, et al. Power quality problems in renewable energy power distribution systems: analysis and solutions[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2983-2994.
- [7] 王兴贵, 杨维满. 一种微源逆变器串联连接型微网特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 129-135.  
WANG Xinggu, YANG Weiman. Study on the characteristics of a series connected microgrid with microsource inverters[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 129-135.
- [8] WANG Xinggu, DING Yingjie, LI Jinjian, et al. Characteristics analysis of micro-source half-bridge converter series Y-connection based microgrid systems[J]. Journal of Power Electronics, 2023, 23(10): 1483-1495.
- [9] 高雪寒, 高源, 赵健, 等. 基于数据潮流模型的高比例光伏配电网三相不平衡优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 77-87.  
GAO Xuehan, GAO Yuan, ZHAO Jian, et al. Three-phase unbalanced optimization of a distribution network with a high proportion of distributed photovoltaic energy based on a data-driven power flow model[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 77-87.
- [10] WANG Xinggu, LI Jinjian, GUO Qun, et al. Parameter design of half-bridge converter series Y-connection microgrid grid-connected filter based on improved PSO-LSSVM[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2023: 1-13.
- [11] RATH I C, PATRO S K, SHUKLA A. Parallel hybrid converter based STATCOM and capacitor voltage control technique[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(5): 5597-5612.
- [12] ADRIEN B, GHANES M, MAURICE F, et al. A new PWM control based on an optimized zero sequence component injection: application in a two-level inverter[C]// 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 13-16, 2021, Toronto, Canada: 1-6.
- [13] WANG Fusheng, YANG Le, MAO Wang, et al. Power balance control scheme of cascaded H-bridge multilevel inverter for grid-connection photovoltaic systems[C]// 8th IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, May 22-26, 2016, Hefei, China: 1539-1545.
- [14] 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.
- [15] FARZAMKIA S, KHOSHKBAR-SADIGH A, KHOSHLESSAN M, et al. Multiple zero-sequence harmonic injection method using optimized coefficients[C]// 2020 Clemson University Power Systems Conference, March 10-13, 2020, Clemson, USA: 1-5.
- [16] YE Zongbin, JIANG Linlin, ZHANG Zhiguo, et al. A novel DC-power control method for cascaded H-bridge multilevel inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 6874-6884.
- [17] YE Zongbin, XU Yiming, WU Xiang, et al. A simplified PWM strategy for a neutral-point-clamped (NPC) three-level converter with unbalanced DC links[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(4): 3227-3238.
- [18] YE Zongbin, ZHENG Qisheng, PEI Hanjun, et al. New inter-and inner-phase power control method for cascaded H-bridge based on simplified PWM strategy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 8607-8623.
- [19] AGUILERA R P, ACUNA P, YU Yifan, et al. Predictive control of cascaded H-bridge converters under unbalanced power generation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(1): 4-13.
- [20] CUZMAR R H, PEREDA J, AGUILERA R P, et al. Phase-shifted model predictive control to achieve power balance of CHB converters for large-scale photovoltaic integration[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(10): 9619-9629.
- [21] XIAO Qian, JIA Hongjie, TANG Yi, et al. Dual-layer modulated model predictive control scheme for the cascaded H-bridge converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(10): 9751-9763.
- [22] 王兴贵, 薛晟, 李晓英. 模块化多电平变流器半桥串联结构微电网输出特性分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2130-2140.  
WANG Xinggu, XUE Sheng, LI Xiaoying. Analysis of output characteristics of a microgrid based on modular multilevel converter half-bridge series structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2130-2140.
- [23] 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.
- [24] 李骏驰, 吴俊勇, 熊飞, 等. 多端口电力电子变压器的安全稳定运行区域分析与控制[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(20): 129-138.  
LI Junchi, WU Junyong, XIONG Fei, et al. Analysis and control of safe and stable operation region for multi-port power electronic transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(20): 129-138.

收稿日期: 2024-05-29; 修回日期: 2024-08-07

作者简介:

王兴贵(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源发电控制技术、运动控制系统、电力变换及其控制等; E-mail: wangxg8201@163.com

李昱(1998—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电与电力变换。E-mail: liyu6968266@163.com

(编辑 魏小丽)