DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.6.220 **中图分类号**：TM46 **文献标志码**：A

不平衡电网下并网逆变系统平衡控制策略研究

屈艾文[1,2](中国电源学会会员)，韦道洲[1]，薛建华[1]
(1.福州大学电气工程与自动化学院，福州 350108；2.福建省新能源发电与电能变换重点实验室，福州 350108)

摘要：在不平衡电网下，并网逆变系统的并网电流与负载电压会出现不平衡的现象。为了实现不平衡电网下带线性对称负载的并网逆变系统的并网电流平衡或负载电压平衡，提出了一种基于负序补偿算法的平衡控制策略。在本地负载与公共耦合点PCC(point of common coupling)之间加入补偿阻抗装置的基础上，通过将不同平衡控制目标的正序环路输出与负序补偿环路输出相叠加生成逆变器输出电压参考值，控制逆变器侧电流的正序分量与负序分量，实现对不同目标的平衡控制。逆变器侧正、负序电流环参考值通过网侧电流环或本地负载识别算法得到。最后，通过仿真与实验验证了所提策略的可行性与有效性。

关键词：不平衡电网；并网逆变系统；并网电流平衡；负载电压平衡；负序补偿

Research on Balance Control Strategy for Grid-connected Inverter System Under Unbalanced Grid

QU Aiwen[1,2], *Member*, *CPSS*, WEI Daozhou[1], XUE Jianhua[1]
(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Fujian Key Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Under an unbalanced power grid, the grid-connected inverter system may experience an imbalance in grid-connected current or load voltage. To achieve a grid-connected current balance or a load voltage balance in the grid-connected inverter system under linear and symmetrical load, a balance control strategy based on a negative-sequence compensation algorithm is proposed. On the basis of adding a compensation impedance device between the local load and the point of common coupling (PCC), the positive- and negative-sequence components of current on the inverter side are controlled by the reference value of output voltage from the inverter, which is generated by superimposing the positive-sequence loop output with the negative-sequence compensation loop output with different balance control objectives, so as to achieve the balance control of these objectives. The reference values of the positive- and negative-sequence current loops on the inverter side are obtained using the grid-side current loop or the local load identification algorithm. Finally, the feasibility and the effectiveness of the proposed strategy were verified by simulation and experimental results.

Keywords: Unbalanced grid; grid-connected inverter system; grid-connected current balance; load voltage balance; negative-sequence compensation

电网不平衡会导致并网电流不平衡或负载电压不平衡，造成并网质量下降和敏感负荷性能降低等问题[1-7]。因此，实现不平衡电网下逆变系统并网电流与负载电压平衡控制具有重要的意义。

控制并网电流平衡的方法有多种[8-11]，文献[8-9]通过电压/电流正序分量和负序分量的独立控制实现并网电流平衡控制；文献[10-11]不进行电压/电

收稿日期：2024-05-25；**修回日期**：2024-07-16，2024-08-06；
录用日期：2024-09-02；**网络首发日期**：2024-09-10
基金项目：福建省自然科学基金资助项目(2020J01508)
This work is supported by Natural Science Foundation of Fujian Province under the grant 2020J01508

流正序分量和负序分量的独立控制，而是通过准比例谐振控制器和电网电压前馈控制平衡并网电流。文献[12]对以上 2 种方法进行综述和对比。文献[8-10]和文献[12]所提系统不带本地负载，文献[11]所提系统虽然带本地负载，但平衡控制目标是滤波电感后的入网电流，没有考虑本地负载后的并网电流。控制负载电压平衡的方法有很多种[13-15]，文献[13]通过滑模控制器补偿不平衡负载引起的负序电流分量，实现负载电压平衡；文献[14]根据各相电压的不平衡度计算各相电流参考值调节各相电流，实现负载电压补偿；文献[13-14]所提系统工作在平衡电网不平衡负载的工况条件下；文献[15]通过调节负序电流控制器中的权重系数控制每个逆变器注入的负序电流，消除交流电网中任意节点处的负载电压不平衡。然而，以上文献均只是针对并网电流平衡或负载电压平衡的单一目标的平衡控制。

为了实现不平衡电网下带线性对称负载的并网逆变系统的并网电流平衡和负载电压平衡的多个目标平衡控制，本文提出了一种基于负序补偿算法的平衡控制策略，在本地负载与公共耦合点 PCC (point of common coupling)之间加入补偿阻抗装置的基础上，通过将不同平衡控制目标的正序环路输出与负序补偿环路输出相叠加生成逆变器输出电压参考值，分别控制逆变器侧电流正、负序分量，实现对不同目标的平衡控制。在并网电流平衡控制时，通过网侧电流环得到正序逆变器侧的电流环参考值，通过本地负载识别得到负序逆变器侧的电流环参考值；在负载电压平衡控制时，通过本地负载识别得到正、负序逆变器侧的电流环参考值。最后，搭建带线性对称负载的光伏并网逆变系统，通过仿真与实验验证了所提方案的可行性与有效性。

1　系统工作原理

并网逆变器采用储能型准 Z 源逆变器，电路拓扑如图 1 所示。图中：u_{ga}、u_{gb}、u_{gc} 为电网电压；u_{pv} 为光伏输入源；U_B 为储能电池电压；L_1、L_2 为储能电感；C_1、C_2 为储能电容；u_{pn} 为直流母线电压；L_{f1}、L_{f2} 为滤波电感；C_f 为滤波电容；Z_{load} 为本地负载；补偿阻抗装置由补偿阻抗、缓冲阻抗与开关 S 组成；Z_g 为电网阻抗。准 Z 源逆变器的工作原理见文献[16]，本文不再详细叙述。逆变器输出的功率一部分给负载提供功率，一部分向电网提供并网功率。图 2 为并网逆变系统控制策略，在平衡电网下，补偿阻抗装置的 S 闭合，选择开关 3 导通，控制环路采用网侧电流外环逆变器侧电流内环的双环控制。在不平衡电网下进行不同目标的平衡控制时，控制环路采用正序环路与负序环路分别控制。以并网电流平衡为控制目标时，选择开关 4 和 1 导通， S 闭合，由网侧电流环得到正序逆变器侧的电流环参考值，由本地负载识别的相关参数计算得到负序逆变器侧的电流环参考值；以负载电压平衡为控制目标时，选择开关 4 和 2 导通，S 断开，由本地负载识别的相关参数计算得到正、负序逆变器侧的电流环参考值。通过 PCC 电压不平衡度 G_{unv} 判断电网的平衡情况，G_{unv} 可表示为

$$G_{\mathrm{unv}}=\sqrt{\frac{u_{\mathrm{PCC}d,\mathrm{n}}^2+u_{\mathrm{PCC}q,\mathrm{n}}^2}{u_{\mathrm{PCC}d,\mathrm{p}}^2+u_{\mathrm{PCC}q,\mathrm{p}}^2}} \tag{1}$$

式中：$u_{\mathrm{PCC}d,\mathrm{p}}$、$u_{\mathrm{PCC}q,\mathrm{p}}$ 为 PCC 电压正序 dq 轴直流分量；$u_{\mathrm{PCC}d,\mathrm{n}}$、$u_{\mathrm{PCC}q,\mathrm{n}}$ 为 PCC 电压负序 dq 轴直流分量。

图 2 中：R_{load}、X_{load} 与 θ_{load} 为本地负载识别算法得到的负载的电阻、电抗与功率因数角；$i_{d,\mathrm{p}}$、$i_{q,\mathrm{p}}$ 为逆变器侧电流 dq 轴正序直流分量；$i_{d,\mathrm{n}}$、$i_{q,\mathrm{n}}$ 为逆变器侧电流 dq 轴负序直流分量；$i_{\mathrm{g}d,\mathrm{ref}}$、$i_{\mathrm{g}q,\mathrm{ref}}$ 为网侧电流环参考值 dq 轴分量；$u_{\mathrm{loadp},d\mathrm{ref}}$、$u_{\mathrm{loadp},q\mathrm{ref}}$ 与 $u_{\mathrm{loadn},d\mathrm{ref}}$、$u_{\mathrm{loadn},q\mathrm{ref}}$ 分别为负载电压平衡控制时设定的负载电压期望值 dq 轴正序分量与负序分量。通过含三阶广义积分器 TOGI (third-order generalized integrator)[17]的锁相环得到频率 ω_g 与相角 θ_g，用于 dq 轴解耦和坐标变换。

在平衡电网下，图 2 中所提的平衡电网下控制环路如图 3 所示。通过网侧电流外环逆变器侧电流内环得到输出电压 u_{iod}、u_{ioq}，再加上由本地负载识别得到的起有源阻尼作用的滤波电容电流 i_{Cd}、i_{Cq}

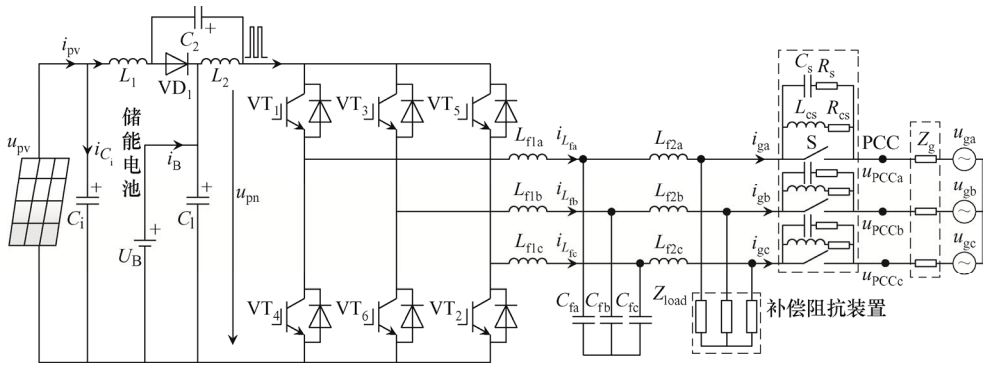


图 1 并网逆变器的电路拓扑

Fig. 1 Circuit topology of grid-connected inverter

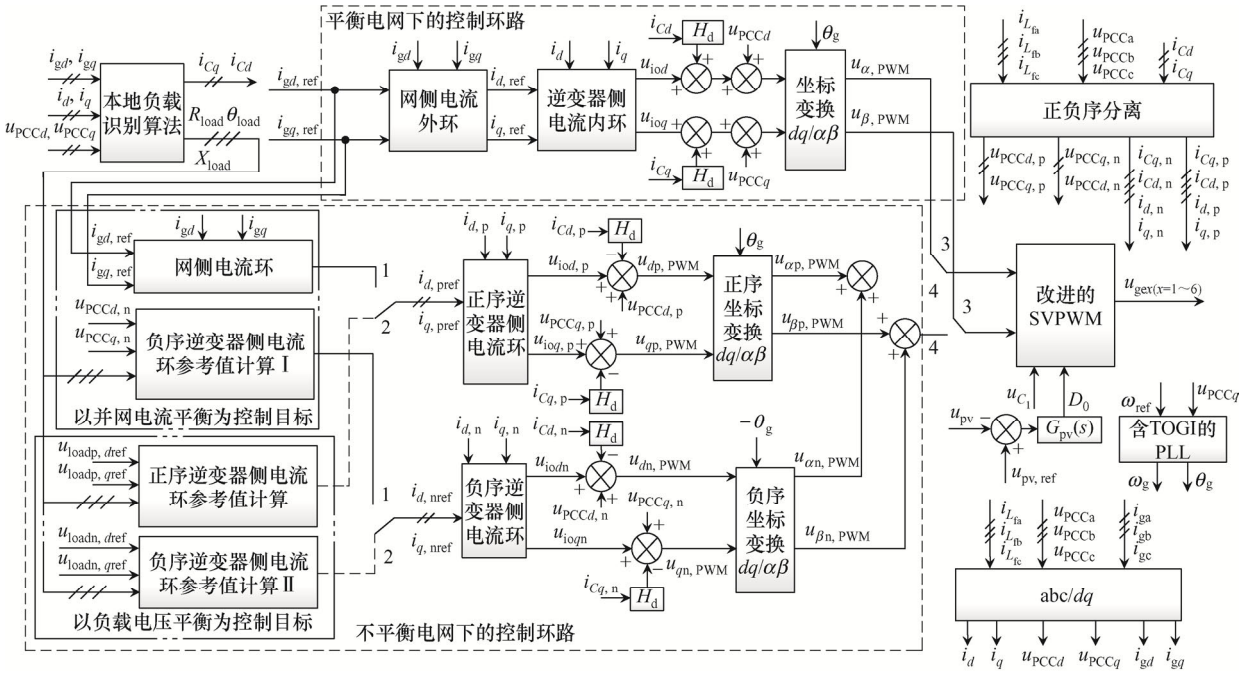


图 2 并网逆变系统控制策略

Fig. 2 Control strategy for grid-connected inverter system

反馈与 $u_{\mathrm{PCC}d}$、$u_{\mathrm{PCC}q}$ 前馈得到调制电压 dq 分量 $u_{d,\mathrm{PWM}}$、$u_{q,\mathrm{PWM}}$，并通过 $dq/\alpha\beta$ 变换得到调制电压 $\alpha\beta$ 分量 $u_{\alpha,\mathrm{PWM}}$、$u_{\beta,\mathrm{PWM}}$，最后与由光伏电压控制环得到的直通占空比 D_0、储能电容 C_1 的电压 u_{C_1} 一起输入 ZSVM2 改进的空间矢量脉宽调制 SVPWM(space vector pulse width modulation)[18] 策略中产生功率开关管(VT_1~VT_6)驱动信号 $u_{\mathrm{gex}}(x=1,2,\cdots,6)$，实现对光伏电池最大功率点跟踪 MPPT (maximum power point tracking) 控制和并网电流控制。由于 d、q 轴电流环对称，电流环控制器设计相同，图 4 给出了 d 轴下考虑延时的双环控制数学模型。其中，$D_{\mathrm{e}}(s)=D_{\mathrm{c}}(s)D_{\mathrm{p}}(s)$、$D_{\mathrm{c}}(s)=1/(1+sT_{\mathrm{s}})$ 为电流采样延时环节，$D_{\mathrm{p}}(s)=K_{\mathrm{PWM}}/(1+0.5sT_{\mathrm{s}})$ 为调制延时环节，逆变器调制比 $K_{\mathrm{PWM}}=1$。电流内环采用比例控制，开关频率为 10 kHz，电流内环的带宽 f_{ci} 为开关频率的 1/10，取 $f_{\mathrm{ci}}=1$ kHz，选取电流内环比例系数 $k_{\mathrm{ip}}=25.9$。本文采用有源阻尼抑制谐振 LCL 的固有谐振[19-20]，选取有源阻尼系数 $H_{\mathrm{d}}=-42.181\,8$。电流外环采用比例积分控制，电流外环带宽 f_{co} 为电流内环带宽 f_{ci} 的 1/4，取 $f_{\mathrm{co}}=250$ Hz，选取电流外环比例系数 $k_{\mathrm{op}}=0.8$。为了增加电流外环的开环增

益，提高网侧电流环的无静差跟踪能力，选取电　　流外环积分系数 k_{oi}=970。

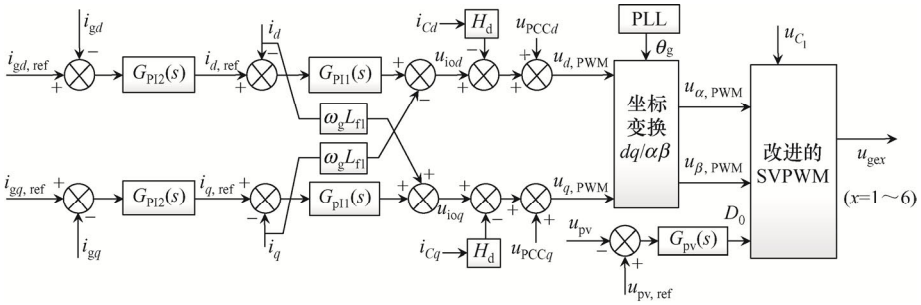


图 3　平衡电网下控制环路

Fig. 3 Control loop under balanced grid

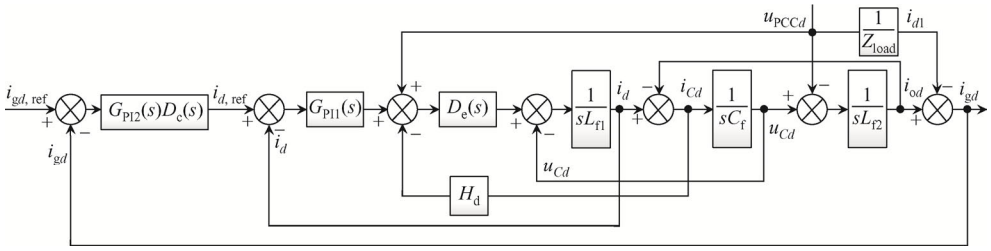


图 4　双环控制数学模型

Fig. 4 Mathematical model of double-loop control

本文所带的线性对称负载由 R_{load} 与 X_{load} 组成。本地负载识别算法为：根据瞬时功率理论得到逆变器输出有功功率 P_{out}、输出无功功率 Q_{out} 与并网有功功率 P_{outg}、并网无功功率 Q_{outg}，从而得到本地负载有功功率 $P_{out,load}$、负载无功功率 $Q_{out,load}$ 为

$$\begin{cases} P_{out,load} = P_{out} - P_{outg} \\ Q_{out,load} = Q_{out} - Q_{outg} \end{cases} \tag{2}$$

$P_{out,load}$、$Q_{out,load}$ 经过三阶广义积分器的陷波功能[17]滤除二倍频分量得到 P_{out2}、Q_{out2}，由此得到本地负载的功率因数角 θ_{load}(θ_{load} =arctan(Q_{out2}/P_{out2}))和负载电流 dq 轴分量 i_{d1}、i_{q1} 为

$$\begin{cases} i_{d1} = \dfrac{u_{PCCd}P_{out2} + u_{PCCq}Q_{out2}}{1.5(u_{PCCd}^2 + u_{PCCq}^2)} \\ i_{q1} = \dfrac{u_{PCCq}P_{out2} - u_{PCCd}Q_{out2}}{1.5(u_{PCCd}^2 + u_{PCCq}^2)} \end{cases} \tag{3}$$

进而得到

$$\begin{cases} Z_{load} = \sqrt{u_{PCCd}^2 + u_{PCCq}^2}/\sqrt{i_{d1}^2 + i_{q1}^2} \\ R_{load} = Z_{load}\cos\theta_{load} \\ X_{load} = Z_{load}\sin\theta_{load} \end{cases} \tag{4}$$

同时，由式(3)得到 i_{Cd}、i_{Cq} 为

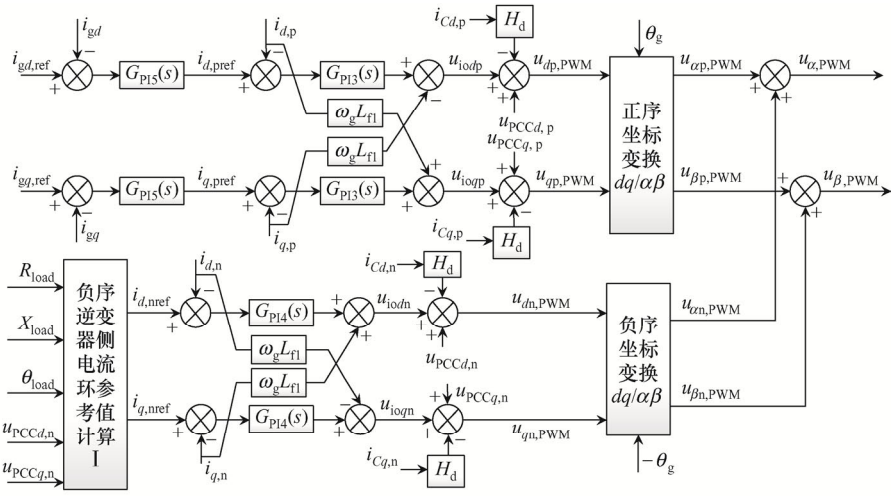
$$\begin{cases} i_{Cd} = i_d - i_{gd} - i_{d1} \\ i_{Cq} = i_q - i_{gq} - i_{q1} \end{cases} \tag{5}$$

2　不平衡电网下不同目标的平衡控制策略

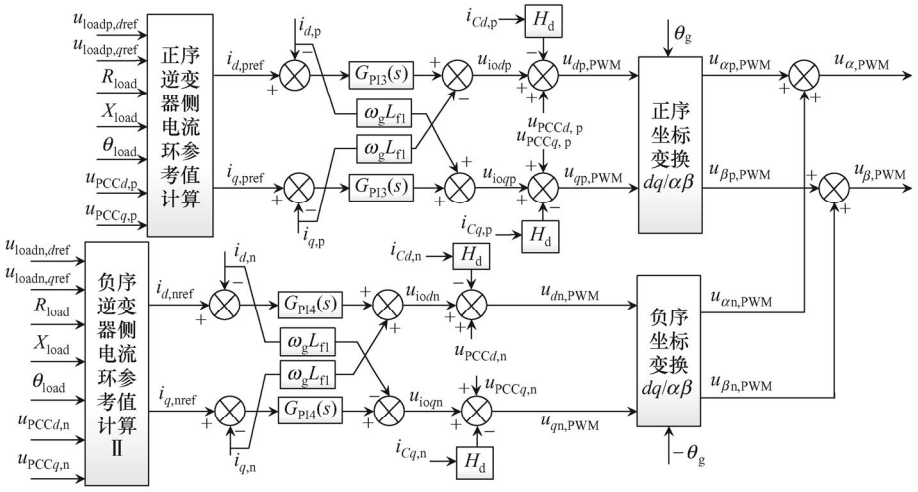
不平衡电网下在同步旋转 dq 坐标系中并网电流与负载电压含有二倍频负序分量，为此本文采用正、负序环路分别控制。当关注逆变系统并网电流质量时，以并网电流平衡为控制目标；当关注所带敏感负载时，以负载电压平衡为控制目标。本文把 2 种平衡控制目标的控制环路进行融合，通过选择开关选取不同的逆变器侧电流环正、负序电流参考生成模块以实现不同目标的平衡控制，如图 2 所示。图 5 给出了具体的并网电流平衡和负载电压平衡控制框图。

2.1　并网电流平衡控制

以并网电流平衡为控制目标时，网侧电流环参考值只有正序分量，正序环路采用网侧电流外环逆变器侧电流内环的双环控制，负序环路采用逆变器侧电流环控制。逆变器侧电流、滤波电容电流与 PCC 电压的采样信号通过陷波器滤除在进行正、负



(a) 并网电流平衡



(b) 负载电压平衡

图 5 平衡控制策略框图

Fig. 5 Block diagram of balance control strategy

序 abc/dq 变换时的二倍频分量，实现正、负序分离，得到正序直流分量 $i_{d,\mathrm{p}}$、$i_{q,\mathrm{p}}$，$i_{Cd,\mathrm{p}}$、$i_{Cq,\mathrm{p}}$，$u_{\mathrm{PCC}d,\mathrm{p}}$、$u_{\mathrm{PCC}q,\mathrm{p}}$，与负序直流分量 $i_{d,\mathrm{n}}$、$i_{q,\mathrm{n}}$，$i_{Cd,\mathrm{n}}$、$i_{Cq,\mathrm{n}}$，$u_{\mathrm{PCC}d,\mathrm{n}}$、$u_{\mathrm{PCC}q,\mathrm{n}}$。设平衡控制的网侧电流环参考值为 $i_{\mathrm{g}d,\mathrm{ref}}$、$i_{\mathrm{g}q,\mathrm{ref}}$，则正序逆变器侧电流环的参考值 $i_{d,\mathrm{pref}}$、$i_{q,\mathrm{pref}}$ 为

$$\begin{cases} i_{d,\mathrm{pref}} = \left(k_{\mathrm{ip,p}} + \dfrac{k_{\mathrm{ii,p}}}{s}\right)(i_{\mathrm{g}d,\mathrm{ref}} - i_{\mathrm{g}d}) \\ i_{q,\mathrm{pref}} = \left(k_{\mathrm{ip,p}} + \dfrac{k_{\mathrm{ii,p}}}{s}\right)(i_{\mathrm{g}q,\mathrm{ref}} - i_{\mathrm{g}q}) \end{cases} \tag{6}$$

式中，$k_{\mathrm{ip,p}}$、$k_{\mathrm{ii,p}}$ 分别为正序网侧电流环的比例系数和积分系数。正序调制电压 $u_{d\mathrm{p,PWM}}$、$u_{q\mathrm{p,PWM}}$ 为

$$\begin{cases} u_{d\mathrm{p,PWM}} = \left(k_{\mathrm{p,p}} + \dfrac{k_{\mathrm{i,p}}}{s}\right)(i_{d,\mathrm{pref}} - i_{d,\mathrm{p}}) - k_{\mathrm{x}}\omega_{\mathrm{g}}L_{\mathrm{f1}}i_{q,\mathrm{p}} - \\ \qquad H_{\mathrm{d}}i_{Cd} + u_{\mathrm{PCC}d,\mathrm{p}} \\ u_{q\mathrm{p,PWM}} = \left(k_{\mathrm{p,p}} + \dfrac{k_{\mathrm{i,p}}}{s}\right)(i_{q,\mathrm{pref}} - i_{q,\mathrm{p}}) + k_{\mathrm{x}}\omega_{\mathrm{g}}L_{\mathrm{f1}}i_{d,\mathrm{p}} - \\ \qquad H_{\mathrm{d}}i_{Cq} + u_{\mathrm{PCC}q,\mathrm{p}} \end{cases} \tag{7}$$

式中：$k_{\mathrm{p,p}}$、$k_{\mathrm{i,p}}$ 分别为正序逆变器侧电流环的比例系数和积分系数；k_{x} 为解耦系数，正序环路 k_{x}=1。

负序逆变器侧的电流环参考值的计算过程为：当实现并网电流平衡控制后，逆变器侧电流负序分量等于负载电流的负序分量，结合式(4)推导出负序逆变器侧的电流环参考值 $i_{d,\mathrm{nref}}$、$i_{q,\mathrm{nref}}$ 分别为

$$\begin{cases} i_{d,\mathrm{nref}}=\dfrac{A_{\mathrm{load}}u_{\mathrm{PCC}d,\mathrm{n}}-B_{\mathrm{load}}u_{\mathrm{PCC}q,\mathrm{n}}}{A_{\mathrm{load}}^2+B_{\mathrm{load}}^2} \\ i_{q,\mathrm{nref}}=\dfrac{A_{\mathrm{load}}u_{\mathrm{PCC}q,\mathrm{n}}+B_{\mathrm{load}}u_{\mathrm{PCC}d,\mathrm{n}}}{A_{\mathrm{load}}^2+B_{\mathrm{load}}^2} \end{cases} \tag{8}$$

式中：$A_{\mathrm{load}}=R_{\mathrm{load}}\cos\theta_{\mathrm{load}}+X_{\mathrm{load}}\sin\theta_{\mathrm{load}}$；$B_{\mathrm{load}}=R_{\mathrm{load}}\cdot\sin\theta_{\mathrm{load}}-X_{\mathrm{load}}\cos\theta_{\mathrm{load}}$。负序调制电压 $u_{d\mathrm{n,PWM}}$、$u_{q\mathrm{n,PWM}}$ 的获得方法与式(7)原理相同，负序环路 $k_{\mathrm{x}}=-1$。最后，通过正序环路控制并网电流正序分量达到设定的 $i_{\mathrm{g}d,\mathrm{ref}}$、$i_{\mathrm{g}q,\mathrm{ref}}$，负序环路控制并网电流负序分量为 0，实现了并网电流平衡控制。

2.2 负载电压平衡控制

以负载电压平衡为控制目标时，S 断开，将由电感 L_{cs} 与电阻 R_{cs} 组成的补偿阻抗和由电容 C_{s} 与电阻 R_{s} 组成的缓冲阻抗并联组成的初偿阻抗装置接入到本地负载与 PCC 之间，如图 1 所示。补偿阻抗接入电路瞬间，L_{cs} 上的电流突变，在 L_{cs} 上会产生较大的电压冲击，此时利用 C_{s} 接入瞬间的短路效应，使 L_{cs} 上的电流分流到 R_{s}，抑制电压冲击。

控制环路采用逆变器侧电流环正序环路与负序环路分别控制，且与并网电流平衡控制时的逆变器侧电流环共用同一个控制环路，具体设计见 2.1 节。通过正序环路与负序环路分别控制逆变器侧电流的正序分量与负序分量，进而分别间接控制并网电流和负载电流的正序分量与负序分量，在补偿阻抗上建立补偿电压的正序分量与负序分量，以补偿 PCC 电压正序分量与负序分量，实现负载电压的平衡控制。由于正、负序逆变器侧的电流环参考值的计算过程相似，因此本文以正序逆变器侧的电流环参考值的计算过程为例进行介绍。设定 dq 坐标系下负载电压正序分量目标值为 $u_{\mathrm{loadp},d\mathrm{ref}}$、$u_{\mathrm{loadp},q\mathrm{ref}}$。并网电流正序分量的目标值 $i_{\mathrm{g}d\mathrm{p,ref}}$、$i_{\mathrm{g}q\mathrm{p,ref}}$ 为

$$\begin{cases} i_{\mathrm{g}d\mathrm{p,ref}}=\dfrac{u_{\mathrm{loadp},d\mathrm{ref}}R_{\mathrm{cs}}-u_{\mathrm{PCC}d,\mathrm{p}}R_{\mathrm{cs}}-u_{\mathrm{loadp},q\mathrm{ref}}X_{\mathrm{cs}}+u_{\mathrm{PCC}q,\mathrm{p}}X_{\mathrm{cs}}}{R_{\mathrm{cs}}^2+X_{\mathrm{cs}}^2} \\ i_{\mathrm{g}q\mathrm{p,ref}}=\dfrac{u_{\mathrm{loadp},q\mathrm{ref}}R_{\mathrm{cs}}-u_{\mathrm{PCC}q,\mathrm{p}}R_{\mathrm{cs}}+u_{\mathrm{loadp},d\mathrm{ref}}X_{\mathrm{cs}}-u_{\mathrm{PCC}d,\mathrm{p}}X_{\mathrm{cs}}}{R_{\mathrm{cs}}^2+X_{\mathrm{cs}}^2} \end{cases} \tag{9}$$

式中，X_{cs} 为 L_{cs} 的感抗。负载电流正序分量目标值 $i_{\mathrm{loadp},d\mathrm{ref}}$、$i_{\mathrm{loadp},q\mathrm{ref}}$ 分别为

$$\begin{cases} i_{\mathrm{loadp},d\mathrm{ref}}=\dfrac{A_{\mathrm{load}}u_{\mathrm{loadp},d\mathrm{ref}}-B_{\mathrm{load}}u_{\mathrm{loadp},q\mathrm{ref}}}{A_{\mathrm{load}}^2+B_{\mathrm{load}}^2} \\ i_{\mathrm{loadp},q\mathrm{ref}}=\dfrac{A_{\mathrm{load}}u_{\mathrm{loadp},q\mathrm{ref}}+B_{\mathrm{load}}u_{\mathrm{loadp},d\mathrm{ref}}}{A_{\mathrm{load}}^2+B_{\mathrm{load}}^2} \end{cases} \tag{10}$$

由式(9)与式(10)可得正序逆变器侧的电流环参考值 $i_{d,\mathrm{pref}}$、$i_{q,\mathrm{pref}}$ 分别为

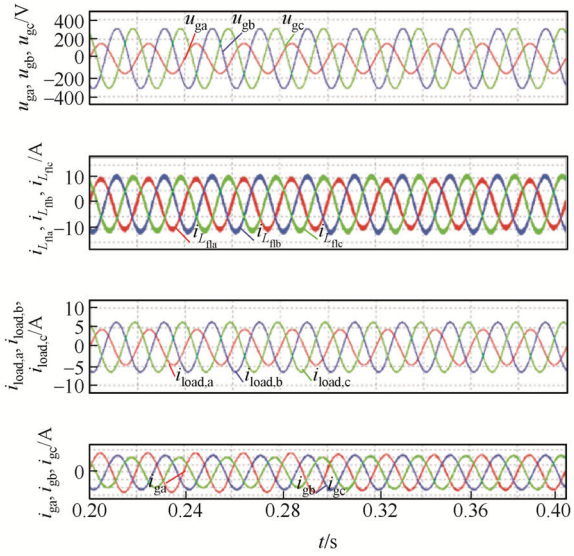
$$\begin{cases} i_{d,\mathrm{pref}}=i_{\mathrm{g}d\mathrm{p,ref}}+i_{\mathrm{loadp},d\mathrm{ref}} \\ i_{q,\mathrm{pref}}=i_{\mathrm{g}q\mathrm{p,ref}}+i_{\mathrm{loadp},q\mathrm{ref}} \end{cases} \tag{11}$$

3 仿真与实验

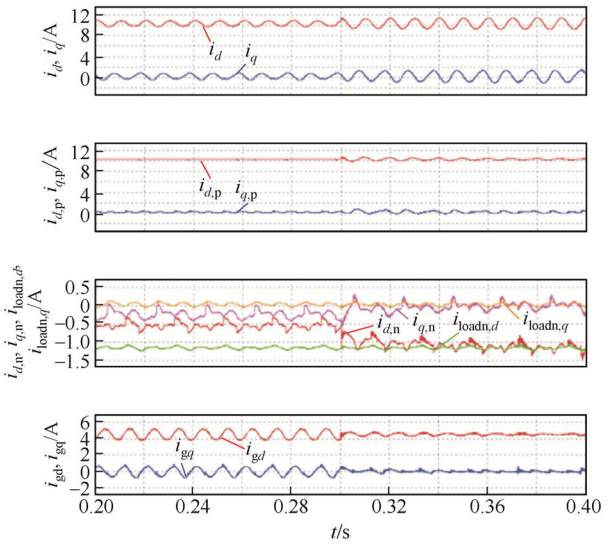
3.1 仿真验证

为了验证所提方案，搭建了 PSIM 仿真平台。系统仿真参数为：电网频率为 50 Hz；开关频率为 10 kHz；$L_1=L_2=1.1$ mH；$C_1=110$ μF、$C_2=120$ μF；$L_{\mathrm{fl}}=3$ mH、$L_{\mathrm{f2}}=0.6$ mH；$C_{\mathrm{f}}=2.2$ μF；Z_{g} 由 L_{g} 与 R_{g} 组成，$L_{\mathrm{g}}=0.16$ mH，$R_{\mathrm{g}}=0.32$ Ω；$R_{\mathrm{load}}=45$ Ω；光伏源最大功率点电压为 576 V，最大功率为 4.9 kW；$U_{\mathrm{B}}=624$ V。

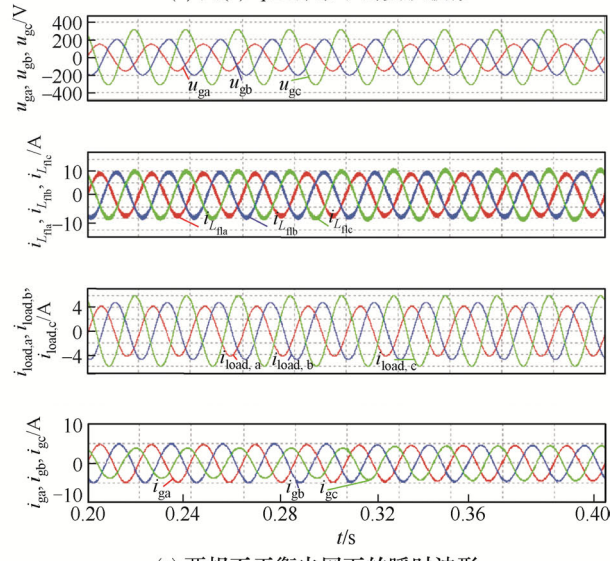
以并网电流平衡为控制目标的仿真电路中，S 闭合。单相不平衡电网电压 $u_{\mathrm{ga}}=110\angle0°$，$u_{\mathrm{gb}}=220\angle-120°$，$u_{\mathrm{gc}}=220\angle120°$；两相不平衡电网电压 $u_{\mathrm{ga}}=107\angle0°$，$u_{\mathrm{gb}}=142\angle-120°$，$u_{\mathrm{gc}}=220\angle120°$；相位不平衡电网电压 $u_{\mathrm{ga}}=107\angle0°$，$u_{\mathrm{gb}}=142\angle-110°$，$u_{\mathrm{gc}}=220\angle110°$；$i_{\mathrm{g}d,\mathrm{ref}}=4.5$，$i_{\mathrm{g}q,\mathrm{ref}}=0$。并网电流平衡控制的仿真波形如图 6 所示。0.30 s 前，选择开关 3 闭合；0.30 s 时，选择开关 3 断开，选择开关 4 和 1 闭合，切换到并网电流平衡控制环路。从图 6 可以看出，切换前逆变器侧电流 $i_{\mathrm{Lfl}y}$(y=a,b,c)、负载电流 $i_{\mathrm{load},y}$ 与并网电流 $i_{\mathrm{g}y}$ 三相不平衡。切换后，负载电流不变，逆变器侧电流 dq 轴正序直流分量 $i_{d,\mathrm{p}}$、$i_{q,\mathrm{p}}$ 幅值几乎不变，逆变器侧电流 dq 轴负序直流分量 $i_{d,\mathrm{n}}$、$i_{q,\mathrm{n}}$ 跟随负载电流 dq 轴负序直流分量 $i_{\mathrm{loadn},d}$、$i_{\mathrm{loadn},q}$，并网电流 dq 轴二倍频负序分量大幅减小；三相并网电流有效值相等，实现了并网电流的平衡控制。



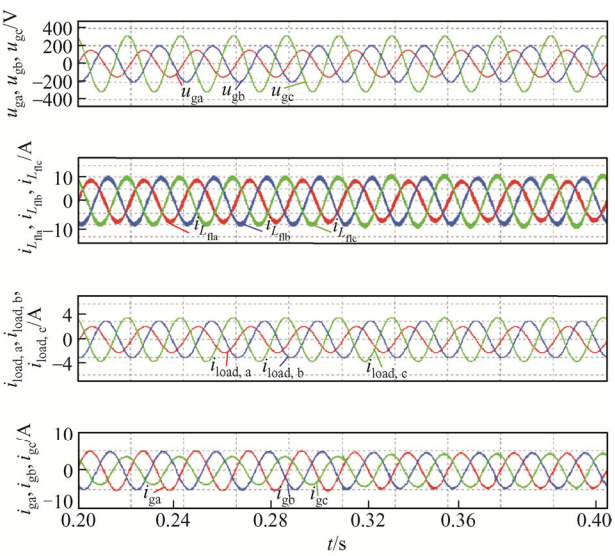
(a) 单相不平衡电网下的瞬时波形



(b) 图(a)dq坐标系下的变换波形



(c) 两相不平衡电网下的瞬时波形

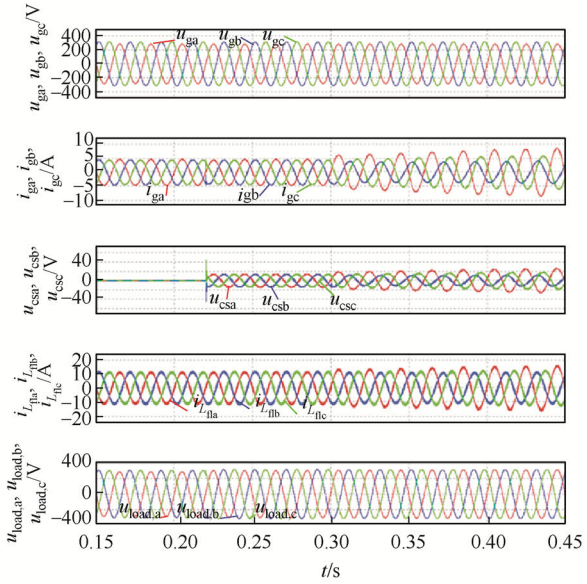


(d) 相位不平衡电网下的瞬时波形

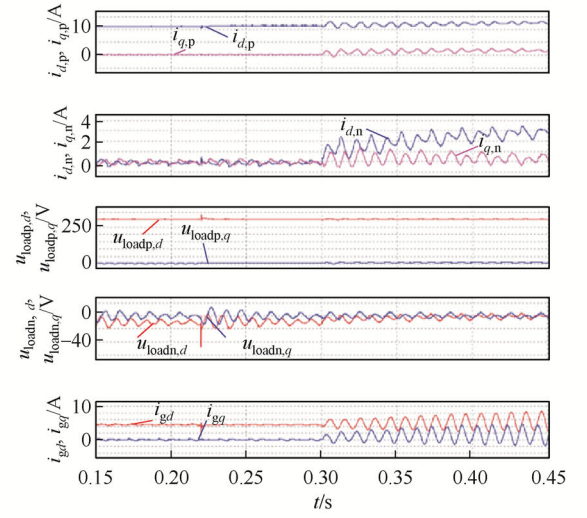
图 6 并网电流平衡控制的仿真波形

Fig. 6 Simulation waveforms under grid-connected current balance control

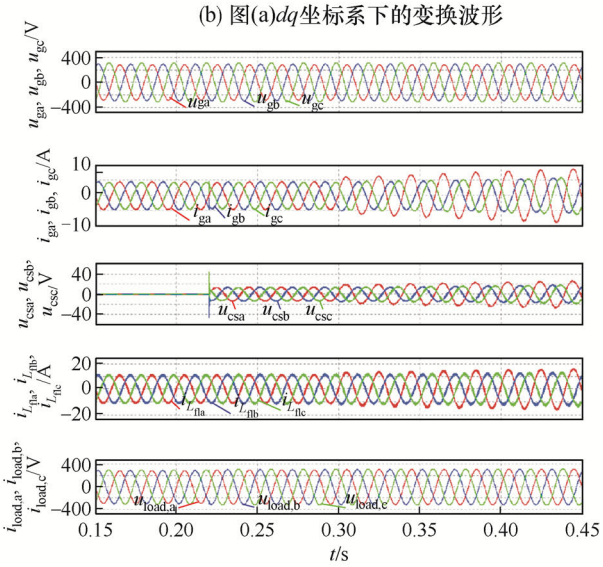
以负载电压平衡为控制目标的仿真电路中，单相不平衡电网电压 u_{ga}=199∠0°，u_{gb}=220∠−120°，u_{gc}=220∠120°；两相不平衡电网电压 u_{ga}=199∠0°，u_{gb}=205∠−120°，u_{gc}=220∠120°；相位不平衡电网电压 u_{ga}=199∠0°，u_{gb}=205∠−110°，u_{gc}=220∠110°；补偿阻抗 R_{cs}=3 Ω、L_{cs}=1 mH；缓冲阻抗 C_s=2.2 μF、R_s=1 Ω。负载电压目标值分别为 $u_{loadp,dref}$=320 V、$u_{loadp,qref}$=0、$u_{loadn,dref}$=0、$u_{loadn,qref}$=0。负载电压平衡控制的仿真波形如图 7 所示。刚开始 S 处于闭合状态，选择开关 3 闭合；在 0.22 s 时 S 断开，加入补偿阻抗；在 0.30 s 时，选择开关 3 断开，选择开关 4 和 2 闭合，切换到负载电压平衡控制环路。从图 7 可以看出切换前逆变器侧电流、并网电流与负载电压 $u_{load,y}$(y=a,b,c)三相不平衡。补偿阻抗串入时，本地负载没有承受电压冲击。切换到负载电压平衡控制环路后，通过控制逆变器侧电流 dq 轴正、负序直流分量，使得并网电流 dq 轴二倍频负序分量增加，从而利用补偿阻抗电压 u_{csy}(y=a,b,c)补偿并网电压的不平衡，使得负载电压 dq 轴负序分量大大减小，实现了负载电压的平衡控制。



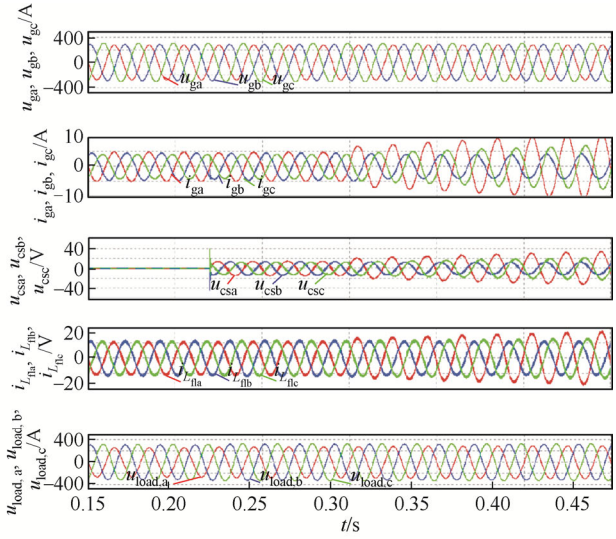
(a) 单相不平衡电网下的瞬时波形



(b) 图(a)*dq*坐标系下的变换波形



(c) 两相不平衡电网下的瞬时波形



(d) 相位不平衡电网下的瞬时波形

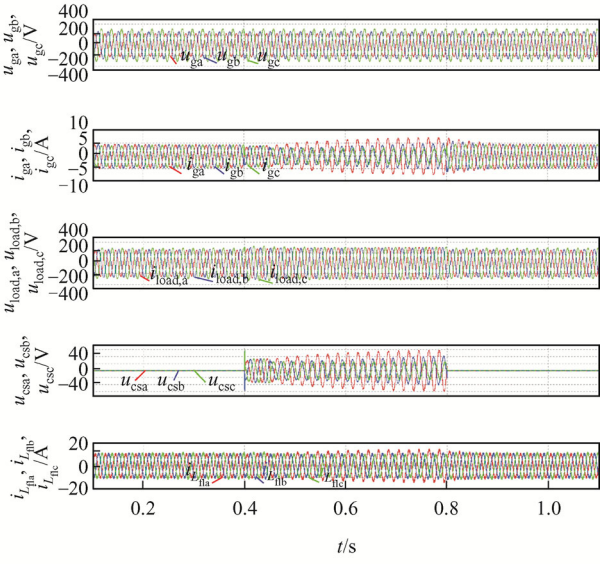
图 7　负载电压平衡控制的仿真波形

Fig. 7 Simulation waveforms under load voltage balance control

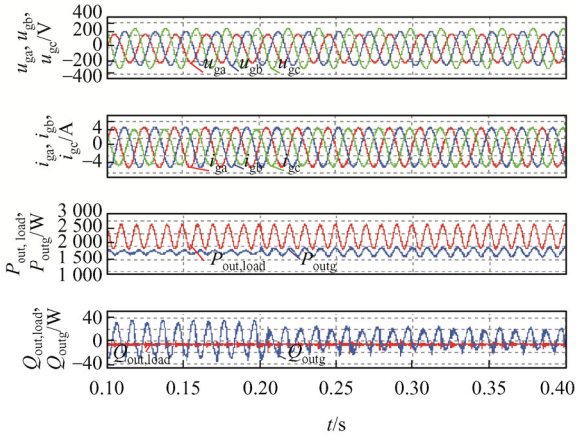
在不同平衡控制目标灵活切换的仿真电路中，不平衡电网电压 u_{ga}=156∠0°，u_{gb}=185∠−120°，u_{gc}=220∠120°；补偿阻抗 R_{cs}=8 Ω、L_{cs}=2 mH，其他仿真参数与图 7 仿真参数相同。刚开始 S 处于闭合状态，选择开关 3 闭合；在 0.20 s 时选择开关 3 断开，选择开关 4 和 1 闭合，切换到并网电流平衡控制环路；在 0.40 s 时 S 断开，加入补偿阻抗，在 0.45 s 时，选择开关 4 和 2 闭合，切换到负载电压平衡控制环路；在 0.80 s 时 S 闭合，不加入补偿阻抗，并把选择开关 4 和 1 闭合，切换到并网电流平衡控制环路，如图 8 所示。图 8(b)、(c)分别给出了在不同平衡控制策略下的 P_{outg} 和 Q_{outg} 及 $P_{out,load}$ 和 $Q_{out,load}$ 的波形。从图 8 可以看出本文所提的控制策略可以实现并网电流与负载电压不同平衡控制目标的灵活切换。

3.2　实验验证

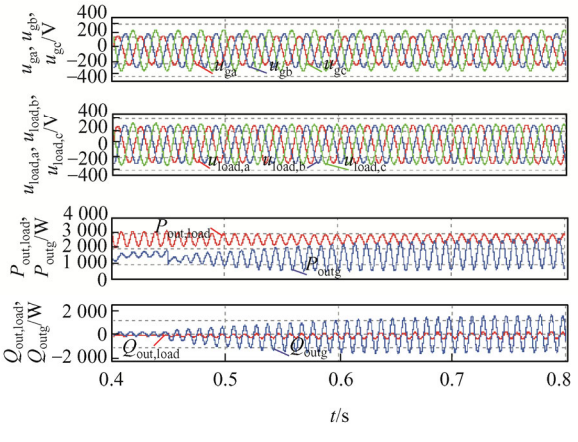
为了验证所提方案的可行性与有效性，以 DSP28335 为主控芯片搭建了储能型准 Z 源光伏并网逆变器实验样机，如图 9 所示。出于安全考虑，采用低压小功率的实验参数。除负载外，实



(a) 不同平衡控制目标切换的瞬时波形



(b) 并网电流平衡控制前后的瞬时波形



(c) 负载电压平衡控制前后的瞬时波形

图 8 不同平衡控制目标灵活切换的仿真波形

Fig. 8 Simulation waveforms during flexible switching between different balance control objectives

验装置元器件参数与仿真模型相同。实验中 R_{load} 取 31.4 Ω。采用可编程直流源 TC.P.32.200.400.S 模拟光伏源，光伏最大功率点电压设为 144 V，最大功率设为 1 550 W；采用可编程直流源 Chroma 62100H-600 并联 200 Ω 的电阻再串 2 Ω 的电阻来模拟储能电池，储能电池电压设为 235 V；采用可编程交流源 ITE900P 模拟交流电网。

以并网电流平衡为控制目标的实验中，设定三相电网电压 U_{ga}=50 V、U_{gb}=80 V、U_{gc}=80 V，$i_{gd,ref}$=4.7 A，$i_{gq,ref}$=0。图 10 为并网电流平衡控制的实验波形，表 1 为并网电流平衡控制前后的电流有效值。由实验波形可知，未切换到并网电流平衡控制环路时，逆变器侧电流、负载电流与并网电流三相不平衡。切换到并网电流平衡控制环路后，负载电流切换前后波形不变，逆变器侧电流与并网电流 a 相有效值减小，b 相有效值不变，c 相有效值增加，三相并网电流的有效值近似相等。实验验证了基于负序电流补偿算法的并网电流平衡控制策略可以有效地平衡并网电流。

以负载电压平衡为控制目标的实验中，设定三相电网电压 U_{ga}=72 V，U_{gb}=80 V，U_{gc}=80 V；负载电压目标值 $u_{loadp,dref}$=120，$u_{loadp,qref}$=0，$u_{loadn,dref}$=0，$u_{loadn,qref}$=0。图 11 给出了负载电压平衡控制的实验波形，表 2 为负载电压平衡控制前后电压电流有效值。由实验波形可知，未切换到负载电压平衡控制环路时，并网电流、补偿阻抗电压与负载电压三相不平衡。切换到负载电压平衡控制环路后，并网电流的 a 相有效值增加，b、c 相有效值减小；补偿阻抗电压 a 相有效值增加，b、c 相有效值减小；三相负载电压有效值相等。实验验证了基于负序电压补偿算法的负载电压平衡控制策略可以有效地平衡负载电压。

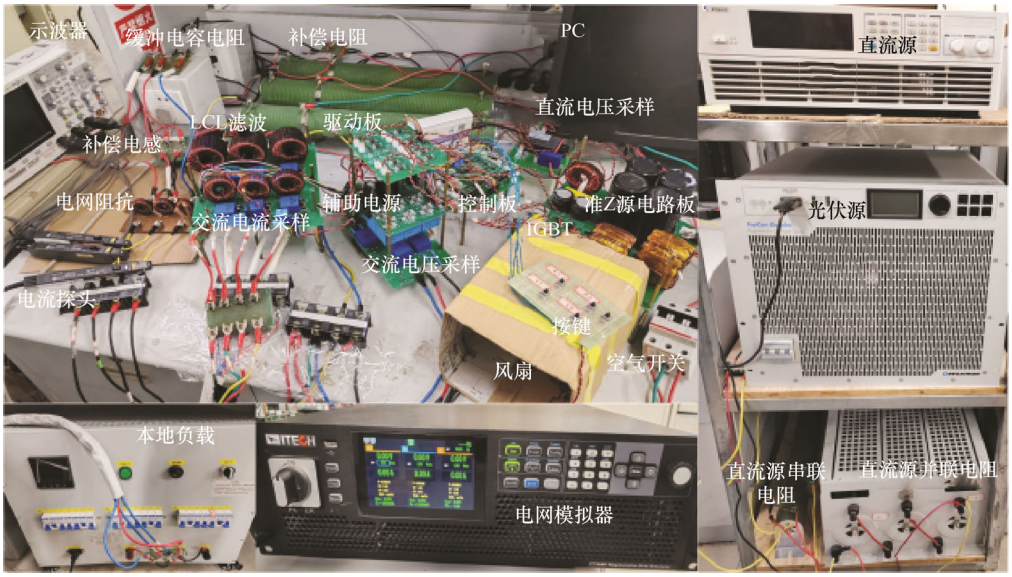


图 9　实验样机

Fig. 9 Experimental prototype

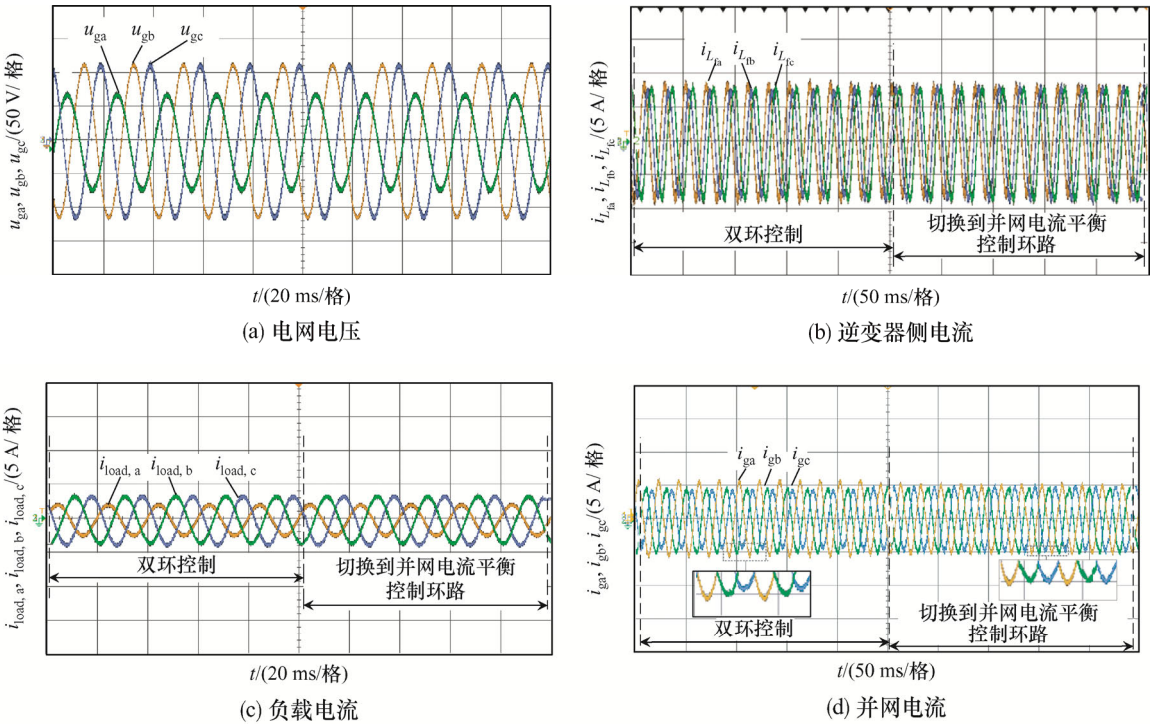


图 10　并网电流平衡控制的实验波形

Fig. 10 Experimental waveforms under grid-connected current balance control

表 1　并网电流平衡控制前、后电流有效值

Tab. 1 RMS values of current before and after grid-connected current balance control

参数	未切换到并网电流平衡控制环路	切换到并网电流平衡控制环路
$I_{L_{fa}}/I_{L_{fb}}/I_{L_{fc}}$/A	5.79/5.77/5.44	5.31/5.78/5.79
$I_{load,a}/I_{load,b}/I_{load,c}$/A	1.93/2.39/2.40	1.93/2.39/2.40
$I_{ga}/I_{gb}/I_{gc}$/A	3.84/3.37/3.04	3.38/3.40/3.39
并网电流不平衡度/%	3.90	0.16

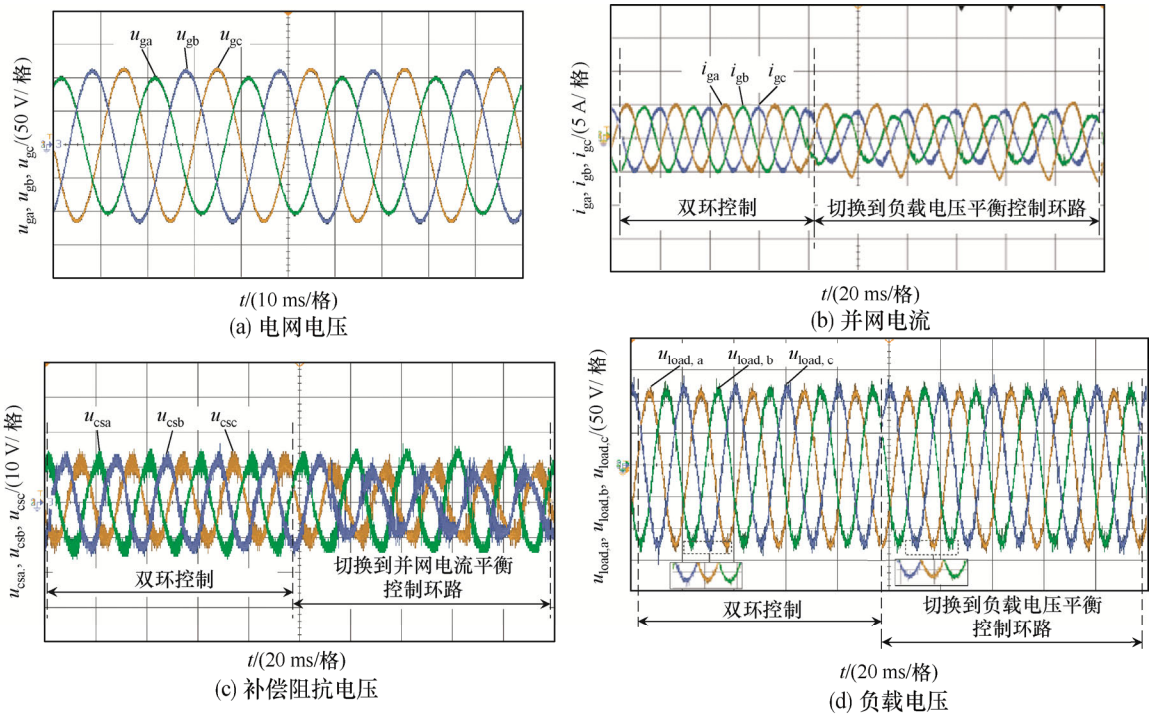


图 11 负载电压平衡控制的实验波形

Fig. 11 Experimental waveforms under load voltage balance control

表 2 负载电压平衡控制前、后的电压、电流有效值

Tab. 2 RMS values of voltage and current before and after load voltage balance control

参数	未切换到负载电压平衡控制环路	切换到负载电压平衡控制环路
$I_{ga}/I_{gb}/I_{gc}$/A	3.45/3.41/3.32	3.96/2.52/2.89
$U_{csa}/U_{csb}/U_{csc}$/V	8.96/9.02/7.92	9.97/6.43/7.22
$U_{load,a}/U_{load,b}/U_{load,c}$/V	84.56/88.57/87.28	85.49/85.30/85.25
负载电压不平衡度/%	1.36	0.08

4 结语

本文提出了分别以并网电流平衡与负载电压平衡为控制目标的不同目标平衡控制策略，以解决不平衡电网下带线性对称负载的并网逆变系统的平衡控制问题。通过 PCC 电压不平衡度与平衡控制目标选择逆变系统的控制环路，通过基于负序补偿算法的正、负序逆变器侧电流环有效地控制了逆变器侧电流正、负序分量，从而间接控制了并网电流和负载电流的正、负序分量，实现了不同目标的平衡控制。最后，搭建了带线性对称负载的储能型准 Z 源光伏并网逆变器系统，通过仿真与实验验证了所提策略的可行性与有效性。

参考文献：

[1] Tian Li, Yang Xiaojie, Huang Bingde. Grid connected current/power coordinated control of quasi Z-source inverter in unbalanced power grid [J]. Journal of Applied Science and Engineering, 2022, 26(5): 719-728.

[2] Alathamneh M, Ghanayem H, Yang Xingyu, et al. Three-phase grid-connected inverter power control under unbalanced grid conditions using a proportional-resonant control method [J]. Energies, 2022, 15(19): 7051.

[3] 潘子迅, 杨晓峰, 赵锐, 等. 不平衡电网下虚拟同步机的多模式协调策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(16): 4274-4285.
Pan Zixun, Yang Xiaofeng, Zhao Rui, et al. Multi-mode coordination control of virtual synchronous generator under unbalanced power grid [J]. Transactions of China

Electrotechnical Society, 2023, 38(16): 4274-4285. (in Chinese)

[4] Maganti S, Padhy N P. A flexible compensation strategy for weak grid-tied current controlled converters under unbalanced and harmonic conditions [C]// 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). Jaipur, India, 2021: 1-5.

[5] 潘子迅, 杨晓峰, 赵锐, 等. 不平衡电网下模块化多电平换流器的直流环流均衡策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(2): 541-553.
Pan Zixun, Yang Xiaofeng, Zhao Rui, et al. DC circulating current balancing control of modular multilevel converter under unbalanced power grid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(2): 541-553. (in Chinese)

[6] 罗艺, 姚骏, 杨东, 等. 电网不对称故障下锁相同步型并网变流器控制耦合特性与暂态同步稳定增强控制策略[J]. 电工技术学报, 2026, 41(7): 2353-2367, 2382.
Luo Yi, Yao Jun, Yang Dong, et al. Coupling control characteristics and transient synchronous stability enhancement control strategy of PLL-based grid-connected VSC under asymmetrical grid faults [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2026, 41(7): 2353-2367, 2382. (in Chinese)

[7] 熊亮雳, 游力, 韩刚, 等. 基于统一不平衡/谐波电压−电流下垂的构网型变流器电能质量控制[J]. 电源学报, 2025, 23(4): 186-199.
Xiong Liangli, You Li, Han Gang, et al. Power quality control for grid-forming converters based on unified unbalanced/harmonic voltage-current droop [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(4): 186-199. (in Chinese)

[8] 杨明, 高龙将, 王海星, 等. 电网不平衡下虚拟同步发电机功率−电流协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 17-23.
Yang Ming, Gao Longjiang, Wang Haixing, et al. Coordinate control of power and current for virtual synchronous generator under unbalanced grid voltage [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 17-23. (in Chinese)

[9] 程静, 赵振民, 张陵, 等. 不平衡电压条件下 VSG-SST 控制策略[J]. 太阳能学报, 2023, 44(3): 393-400.
Cheng Jing, Zhao Zhenmin, Zhang Ling, et al. Control strategy of VSG-SST under unbalanced voltage condition [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(3): 393-400. (in Chinese)

[10] 叶吉亮, 李岚, 刘海霞, 等. 电网电压不平衡及谐波状态下的并网逆变器控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 113-119.
Ye Jiliang, Li Lan, Liu Haixia, et al. Control strategy of grid-connected inverter under unbalanced and harmonic voltage condition [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 113-119. (in Chinese)

[11] 韦徵, 姬秋华, 王伟, 等. 适用于电网不对称下的自同步电压源逆变器控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 124-131.
Wei Zheng, Ji Qiuhua, Wang Wei, et al. Control strategy of self-synchronous voltage source inverter for asymmetric power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 124-131. (in Chinese)

[12] Alsaif A, Miao Zhixin, Fan Lingling. Inner current controls of grid-connected PV for unbalanced grid conditions [C]// 2021 North American Power Symposium (NAPS). College Station, TX, USA, 2021: 1-6.

[13] 殷桂梁, 陈思佳, 吴杰, 等. 含不平衡负荷的微电网中并网逆变器的滑模控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2698-2705.
Yin Guiliang, Chen Sijia, Wu Jie, et al. Sliding-mode control strategies of grid-connected inverters in microgrid containing unbalanced loads [J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2698-2705. (in Chinese)

[14] 王吉彪, 陈启宏, 刘莉, 等. 面向微电网三相电压不平衡补偿的逆变器并网控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 38-44.
Wang Jibiao, Chen Qihong, Liu Li, et al. Grid-connected control for inverters oriented to microgrid with unbalance compensation for three-phase voltage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 38-44. (in Chinese)

[15] Borrell Á, Velasco M, Miret J, et al. Collaborative voltage unbalance elimination in grid-connected AC microgrids with grid-feeding inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(6): 7189-7201.

[16] Chen Yan, Meng Junli, Yan Yuanyuan, et al. Quasi-Z

(下转第 276 页)

(in Chinese)

[17] Luhtala R, Alenius H, Messo T, et al. Online frequency response measurements of grid-connected systems in presence of grid harmonics and unbalance [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3343-3347.

[18] Xie Zhiwei, Chen Yandong, Wu Wenhua, et al. Admittance modeling and stability analysis of grid-connected inverter with LADRC-PLL [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12): 12272-12284.

[19] Familiant Y A, Huang Jing, Corzine K A, et al. New techniques for measuring impedance characteristics of three-phase AC power systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(7): 1802-1810.

[20] 许苏迪, 刘灏, 毕天姝. 同步相量测量装置校准器参考相量计算方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 168-175.
Xu Sudi, Liu Hao, Bi Tianshu. Reference phasor calculation method for calibrator of synchronous phasor measurement unit [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 168-175. (in Chinese)



卓浩泽

作者简介：

卓浩泽(1986—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：电学计量。E-mail：zhuo_hz.sy@gx.csg.cn。

林杰(1996—)，男，博士研究生。研究方向：广域同步相量测量技术，电能质量分析。E-mail：linj@hnu.edu.cn。

姚文轩(1988—)，男，博士，教授。研究方向：智能电网，广域同步相量测量技术与应用，电能质量监控。E-mail：wenxuanyao@hnu.edu.cn。

张梓霖(1996—)，男，中国电源学会学生会员，博士研究生。研究方向：电力电子化电力系统。E-mail：zhangzilin1996@hnu.edu.cn。

伍文华(1991—)，男，中国电源学会会员，博士，副教授。研究方向：电力电子化电力系统，并网逆变器分析与控制。E-mail：wuwenhua168@hnu.edu.cn。

莫枝阅(1989—)，男，通信作者，硕士，工程师。研究方向：输电线路运行与在线监测技术，阻抗测量。E-mail：mozhiyue_csg@163.com。

(责任编辑：郭凯凯)

(上接第 231 页)

based adaptive sliding mode control for three-phase photovoltaic grid-connected system [J]. IET Power Electronics, 2023, 16(15): 2577-2591.

[17] 武健, 张彩红, 王蕊, 等. 基于三阶广义积分器的谐波检测算法[J]. 电源学报, 2018, 16(2): 131-136.
Wu Jian, Zhang Caihong, Wang Rui, et al. Harmonic detection algorithm based on third-order generalized-integrator [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(2): 131-136. (in Chinese)

[18] 屈艾文, 陈道炼, 苏倩. 三相准 Z 源并网逆变器的简单升压改进空间矢量调制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 826-836.
Qu Aiwen, Chen Daolian, Su Qian. Simple Boost modified space vector modulation strategy for three-phase quasi-Z-source grid-connected inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 826-836. (in Chinese)

[19] Chen Wei, Zhang Yan, Tu Yiming, et al. Active damping control for LCL filters with inverter-side current feedback only [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(9): 10065-10069.

[20] 李智, 曾垂辉, 谢俊, 等. LCL 型并网逆变器电容电流反馈有源阻尼特性通用图形化评估方法及应用[J]. 电源学报, 2025, 23(8): 60-69.
Li Zhi, Zeng Chuihui, Xie Jun, et al. General graphical evaluation method for capacitor current feedback active damping characteristics of LCL grid-connected inverter and its applications [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(8): 60-69. (in Chinese)



屈艾文

作者简介：

屈艾文(1980—)，女，中国电源学会会员，通信作者，博士，讲师。研究方向：新能源发电技术，微网控制技术。E-mail：awqu@fzu.edu.cn。

韦道洲(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：新能源发电技术。E-mail：3104675319@qq.com。

薛建华(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：新能源发电技术。E-mail：2907904836@qq.com。

(责任编辑：孙美菊)