



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403031

引用格式:肖永超,康家玉,刘宝泉,等.光储多功能并网逆变器及其电能质量优化策略[J].科学技术与工程,2025,25(9):3712-3720.

Xiao Yongchao, Kang Jiayu, Liu Baoquan, et al. Optical storage multifunctional grid-connected inverter and its power quality optimization strategy[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(9): 3712-3720.

光储多功能并网逆变器及其电能质量优化策略

肖永超,康家玉*,刘宝泉,孙博阳,于淼

(陕西科技大学电气与控制工程学院,西安710021)

摘要 光伏并网系统配备一定容量的储能装置组成的交流微电网中使用了大量的非线性元件,当微电网中带有大量非线性负载时,易使微电网系统的电流波形出现畸变,产生谐波污染。为减小微电网系统并网对受纳电网的干扰,基于LCL并网逆变器结构,通过PI+重复控制的复合控制策略,在同时满足跟踪速度和精度基础上,实现对指令电流的追踪控制,能够有效抑制谐波电流、补偿无功功率。在复合控制基础上,考虑了光伏输出功率、负载功率突变,研究微电网与电网之间在不同模式下传输的不同功率,结果表明在该复合控制下的多功能并网逆变器依旧可以实现双重功能,最后通过仿真验证,该策略实现了谐波补偿和无功补偿,同时向电网传输功率。

关键词 微电网;多功能并网逆变器;非线性负载;谐波补偿;无功补偿

中图分类号 TM615; **文献标志码** A

Optical Storage Multifunctional Grid-connected Inverter and Its Power Quality Optimization Strategy

XIAO Yong-chao, KANG Jia-yu*, LIU Bao-quan, SUN Bo-yang, YU Miao

(School of Electrical and Control Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

[Abstract] A large number of nonlinear components are used in the AC microgrid of photovoltaic grid-connected system which is equipped with a certain capacity of energy storage devices. When there is a large number of nonlinear loads in the microgrid system, the current waveform of the microgrid system is prone to distortion, resulting in harmonic pollution. In order to reduce the interference of grid-connected microgrid system on the receiving grid, based on the LCL grid-connected inverter structure, PI + repeated control compound control strategy was adopted to realize the tracking and control of command current on the basis of meeting the tracking speed and accuracy, which can effectively suppress harmonic current and compensate reactive power. Based on the composite control, it is considered that when the photovoltaic output power and load power change, the multi-function grid-connected inverter under the composite control can still realize dual functions when the researched microgrid and the grid transmit different power in different modes. Finally, the simulation results show that the strategy realizes harmonic compensation and reactive power compensation, and transmits power to the grid at the same time.

[Keywords] microgrid; multifunctional grid-connected inverter; nonlinear load; harmonic compensation; reactive power compensation

为实现“双碳”目标^[1-2],分布式光伏发电在电网系统的渗透率不断提高,在微电网系统中^[3],非线性负载的接入^[4-5]对微电网在公共耦合点(point of common coupling, PCC)的电能质量造成严重危害。针对传统并网逆变器只局限于对电能的输送,在此基础上提出一种可以改善电能质量的光伏储能多功能并网逆变器(multi-functional grid-connected inverter, MFGCI)^[6-7],通过设计合理的控制策略,减少并网电流谐波,提高系统的功率因数^[8]。

目前,储能技术对微电网电能质量的改善具有明显优势,文献[9]针对电网出现的谐波污染,基于储能系统提出两段式双闭环充放电控制,实现谐波及无功电流全频段补偿。文献[10]提出储能型并联有源电力滤波器(shunt active power filter, SAPF),电流环采用单PI+重复的复合控制跟踪谐波检测所产生的指令电流,不仅能够治理系统谐波,而且平抑了微电网的功率波动。文献[11]针对传统储能有源滤波器(active power filter, APF)只可

收稿日期:2024-04-24 修订日期:2024-12-11

基金项目:陕西省自然科学基金(2023-JC-YB-381)

第一作者:肖永超(1999—),男,汉族,陕西渭南人,硕士研究生。研究方向:新能源发电。E-mail:1204271373@qq.com。

*通信作者:康家玉(1969—),女,汉族,江西泰和人,博士,副教授。研究方向:电力电子技术及其应用。E-mail:466347430@qq.com。

对特定谐波补偿,无法降低电网中原有谐波含量,提出了虚拟谐波电阻型储能逆变器。以上研究在改善电能质量有显著的效果,但其均未将光伏模块考虑进来。在接下来的研究中,将光伏并网系统和 APF 结合。

文献[12]将光伏并网系统与并联型有源电力滤波器结合,实现并网逆变器双重功能,即注入功率和有源滤波功能。文献[13]在光伏并网系统中,对微网并网电流采用准比例谐振(quasi proportional resonant, QPR) + 改进型的鲁棒重复的复合控制,有效降低逆变器输出电流谐波,提高了系统稳定性和动态性。文献[14]提出虚拟 APF 拓扑结构,设计了恒功率控制系统,使得虚拟 APF 能够在滤波、逆变、整流 3 种模式切换,实现了能量双向流动和电流谐波补偿。文献[15-17]在光伏并网系统,电流控制采用 PI + 重复的复合控制,提高了系统动态性和精度,但 PI 和重复控制在系统存在耦合会导致系统不稳定,因此提出 PI + 重复控制。文献[18]由于重复控制在电网频率波动时,导致重复控制性能下降,提出 PI + 自适应的重复控制,实现重复控制的谐振频率和电网频率保持一致。

上述文献在微电网系统改善电能质量有显著效果,但均未将光伏系统、储能系统、APF 三者统一成整体,基于此,现构建含非线性负载的光伏储能多功能并网系统,提出 PI + 重复的复合控制策略,使得多功能并网逆变器具有常规并网和有源滤波功能。通过直流侧稳压控制实现交直流两侧的有功功率传输;通过对谐波电流及无功电流控制、补偿,实现有源滤波功能,在光伏输出功率变化时,可依据储能装置充放电实现微电网与电网之间传输功率。在此控制基础上,分析不同工作模式下的系

统功率传输和谐波抑制及无功补偿双重功能,最后通过 MATLAB/Simulink 仿真验证。

1 设计原理和系统结构

1.1 MFGCI 的微电网系统结构

并网逆变器是光伏发电系统向电网输送有功功率的核心设备,而 APF 可为系统反向注入谐波和无功电能,解决谐波电流和无功电流补偿等问题,且二者功能具有互补性,其结构和控制策略具有相似性,二者结合形成多功能并网逆变器,实现并网及 APF 双重功能。如图 1 所示,在含非线性负载的光伏储能并网系统包含光伏发电模块、储能双向 DC-DC 模块、非线性负载、交流电网 4 部分,其中光伏发电模块、储能模块通过公共直流母线连接在并网逆变器直流侧,其直流侧电压为 V_{dc} 。逆变器通过 LCL 滤波接入 PCC 点,非线性负载为三相不可控整流电路,其中 L 为滤波器,直流侧等效负载为 R ,也接入 PCC 点。

1.2 多功能并网逆变器控制策略

如图 2 所示是多功能并网逆变器的控制策略结构图,谐波电流和无功电流检测环节的输入为非线性负载电流 i_L 以及经电压经锁相环(phase-locked loop, PLL)后所得的角度 θ ,其输出为直流分量,与直流母线电压 V_{dc} 经 PI 调节所产生的有功电流 Δi_p 相加得到 i_{cp} ,此值与输入的负载电流相加减,得到内环参考电流 i_c^* 。

LCL 滤波电路与逆变电路构成整体,MFGCI 输出电流 i_c 即为 LCL 滤波后输出的电流, i_c 经坐标变化得到在 dq 轴下的分量,使其跟踪参考电流 i_c^* ,通过电流控制器调节,最后通过 SVPWM 调制,生成 PWM 波,驱动开关管,从而调节输出。

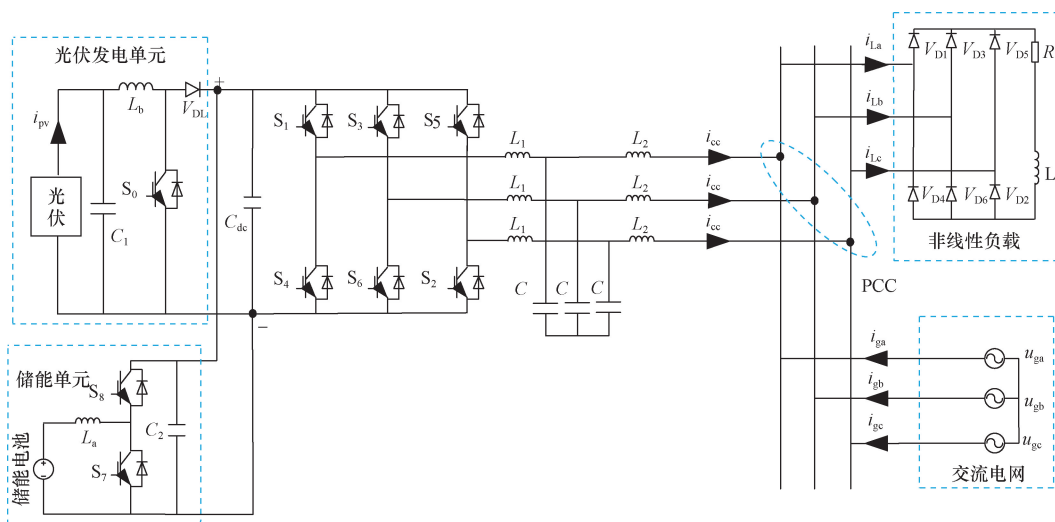


图 1 微电网系统结构图

Fig. 1 Microgrid system structure diagram

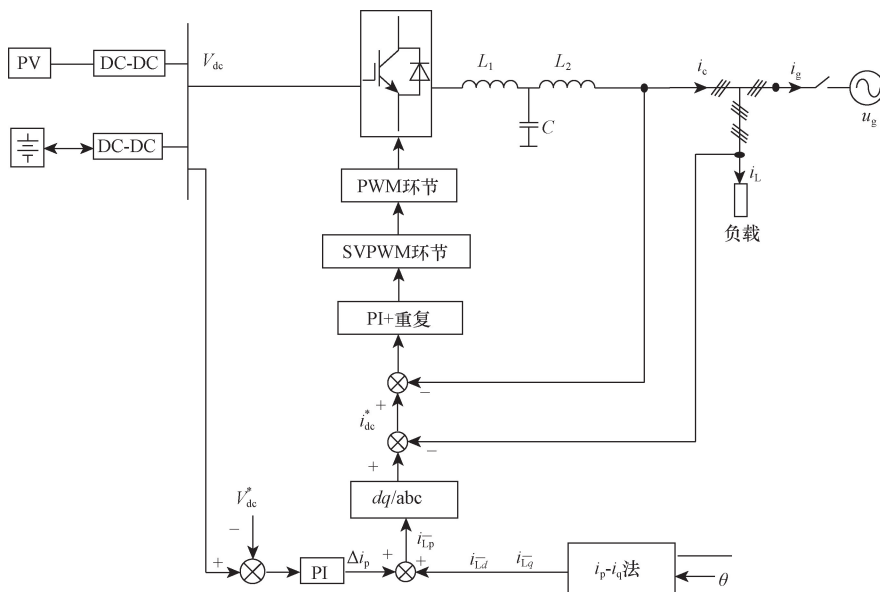


图2 多功能并网逆变器控制策略结构图

Fig. 2 Control strategy structure diagram of multi-function grid-connected inverter

1.3 指令电流合成

采用基于瞬时无功功率的 i_p-i_q 电流检测法,如图3所示,电网电压 u_{ga} 、 u_{gb} 、 u_{gc} 经过 PLL 得到 θ ; 非线性负载电流 i_{La} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc} 经过克拉克和派克变换,得到 i_{Ld} 和 i_{Lq} , 经过低通滤波器 (low pass filter, LPF) 得到直流分量 i_{Lp} 、 i_{Lq} , 经式(1)计算,得到基波电流 i_{Lfa} 、 i_{Lfb} 、 i_{Lfc} , 负载电流经式(4)与基波电流相减得到谐波电流。同时为实现无功补偿,则令 i_{Lq} 为0,使得最终指令电流信号 i_c^* 包含谐波电流、无功电流。

$$\begin{bmatrix} i_{Lfa} \\ i_{Lfb} \\ i_{Lfc} \end{bmatrix} = C_{23} C^{-1} \begin{bmatrix} i_{Lp} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$C_{23} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}^{-1} \tag{3}$$

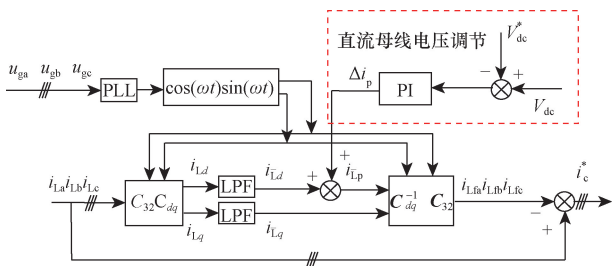


图3 i_p-i_q 法电流检测原理

Fig. 3 Current detection principle of i_p-i_q method

$$\begin{bmatrix} i_{Lah} \\ i_{Lbh} \\ i_{Lbh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{Laf} \\ i_{Lbf} \\ i_{Lbf} \end{bmatrix} \tag{4}$$

1.4 储能控制

在系统功率出现缺额和超额时,储能模块可以起到补充和吸收的作用,储能双向 DC-DC 的控制分为电压控制和电流控制,电压控制主要是用于直流母线电压的稳定,即直流侧稳压通过并网逆变器完成,因此不需双向 DC-DC 来稳定直流母线电压,只需控制电流的大小和方向,如图4所示是储能单元输出功率控制结构图。

P_{ref} 与储能电池电压相除得到储能电池输出电流参考信号 i_{ref} , 该信号和实际储能输出电流 i_{bat}^* 做差,经 PI 调节,输出互补电流控制的调制信号,将该信号与载波相比,即可得到开关管的控制信号。

P_{ref} 表示以电网电流为被控对象,所得到的储能输出功率的指令信号,系统功率平衡,通过 P_{ref} 可灵活控制储能的充放电,实现光储协调配置,规定: $P_{ref} > 0$, 储能以该参考值发出功率,储能电池放电; $P_{ref} < 0$, 储能以该参考值吸收功率,储能电池充电。

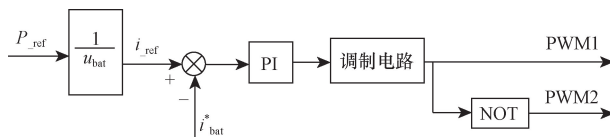


图4 储能单元功率控制结构图

Fig. 4 Power control structure diagram of energy storage unit

2 控制器设计

2.1 直流母线电压控制

利用图 3 的电压反馈控制电路,来保证直流母线电压的稳定,其调节过程为:直流侧母线电压的参考值 V_{dc}^* 和直流侧母线电压的实际值 V_{dc} 做差,得到的偏差值经过 PI 调节得到表征有功功率传输的有功电流 Δi_p ,将所得到的值与上述直流分量 i_{Ld} 叠加得到 i_{Lp} ,经运算得到基波电流,与负载电流相减,所得到的指令电流信号包含谐波电流和具有调节作用的有功电流,控制逆变器的能量流动,维持直流侧母线电压的稳定,保证 APF 功能。

2.2 电流环控制

复合控制结构如图 5 所示,重复控制可以对基波及各次谐波电流实现无静差跟踪,但重复控制存在 N 个周期的延迟信号,使系统的动态性能较差,而 PI 控制在跟踪系周期信号具有较好的动态性能,使用 PI + 重复的复合控制,在满足系统的动态性能同时也提高了系统的精度。

重复控制是基于内模原理的一种控制方式,其控制结构图如图 6 所示,其传递函数为

$$G_1(z) = \frac{Z^{-N} K_r z^k S(z)}{1 - Z^{-N} Q(z)} \quad (5)$$

式(5)中: N 为在一个周期采样次数, $N = 200$; $Q(z)$ 为小于 1 的常数,在 $Q(z)$ 的值较大时,幅值增益较大,系统控制精度高但稳定性降低, $Q(z)$ 较小时则与之相反,取值要同时兼顾控制精度和稳定性, $Q(z)$ 取值为 0.5; $K_r z^k S(z)$ 为系统的补偿环节,对被控对象的幅值和相位校正; K_r 为重复控制增益,

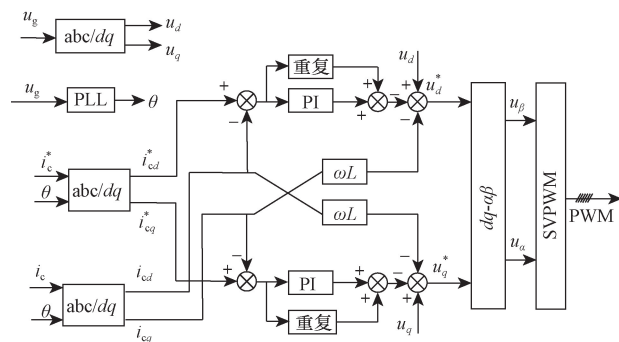


图 5 重复 + PI 复合控制系统框图
Fig. 5 Block diagram of repetitive + PI composite control system

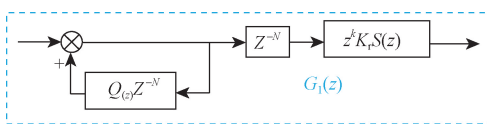


图 6 重复控制结构图
Fig. 6 Repetitive control structure diagram

取值小于 1,值越大收敛速度越快,稳态误差越小,取值为 0.8; z^k 为相位延迟补偿环节,使系统在中低频处有较好的谐波抑制能力, k 值取 3。

$S(z)$ 表示二阶低通滤波器,可以增加在高频处的幅值衰减,其传递函数为

$$G_s = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (6)$$

式(6)中: ω_0 为截止频率,取 2 000 rad/s; ξ 为 0.707,代入之后离散化得

$$S_z = \frac{0.772z + 0.2614}{z^2 - 0.07574z + 0.05913} \quad (7)$$

基于内模的重复控制虽然具有较好的精度,但由于在控制器的前向通道存在 N 个周期性的延迟环节,导致系统的动态响应速度变慢,为了提高系统的动态性能,在重复控制的基础上加入 PI 控制,同时满足系统的跟踪精度和跟踪速度,如图 7 所示是 PI 控制和重复控制并联,构成的复合控制结构图。采用 LCL 并网逆变器, $G(z)$ 为被控对象, $G(s)$ 在复频域离散化后的传递函数为

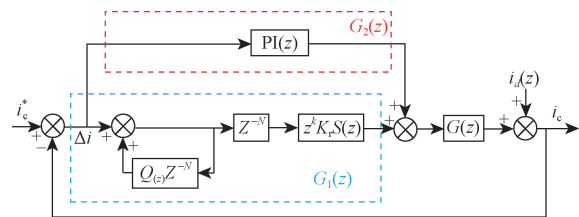


图 7 重复 + PI 复合控制结构图
Fig. 7 Repeated + PI composite control structure diagram

$$G(s) = \frac{i_g(s)}{V_{dc}(s)} = \frac{1}{L_1 L_2 C s^3 + (L_1 + L_2) s} \quad (8)$$

式(8)中:滤波电感 $L_1 = 1\ 000\ \mu\text{H}$;滤波电感 $L_2 = 10\ \mu\text{H}$;滤波电容 $C = 50\ \mu\text{F}$,离散后得

$$G_z = \frac{0.1205z^2 - 0.0002z + 0.1205}{z^3 - 0.5675z^2 + 0.5675z - 1} \quad (9)$$

$G_2(z)$ 是 PI 控制在离散域下的传递函数,表达式为

$$G_2(z) = K_p + K_i T_s \frac{1}{z - 1} \quad (10)$$

则 PI + 重复的复合控制传递函数为

$$\frac{i_c}{i_c^*} = \frac{[G_1(z) + G_2(z)]G(z)}{1 + [G_1(z) + G_2(z)]G(z)} \quad (11)$$

展开可得

$$\frac{i_c}{i_c^*} = \frac{G_2(z)G(z)}{1 + G(z)G_1(z)} + \frac{G_1(z)G(z)}{1 + G(z)G_2(z)} \quad (12)$$

将 $\varphi_1(z) = \frac{G(z)}{1 + G(z)G_1(z)}$ 等效为 PI 控制环的闭环传递函数, 将 $\varphi_2(z) = \frac{G(z)}{1 + G(z)G_2(z)}$ 等效为重复控制的闭环传递函数, 可得

$$\frac{i_c}{i_c^*} = \frac{G_2(z)\varphi_1(z)}{1 + G_2(z)\varphi_1(z)} + \frac{\varphi_2(z)G_1(z)}{1 + G_1(z)\varphi_2(z)} \quad (13)$$

通过 MATLAB/Simulink 仿真, 在 0 ~ 0.5 s, 非线性负载的输出波形如图 8 所示, 波形发生严重畸变, 在 0.5 s 时, APF 投入, 电流控制采用 PI 控制, 谐波电流和无功电流得到补偿, 在 0.5 ~ 1 s, 此时并网电流的谐波含量显著降低, 总谐波畸变率 (total harmonic distortion, THD) 由 12.1% 降低到 3.73%。如图 9 所示, 在 1 s 时, 电流环控制采用 PI + 重复的复合控制, 并网电流 THD 相比采用 PI 控制时, 由 3.73% 降到 2.45%。由此表明复合控制策略在谐波电流补偿有更好的效果, 如图 10 所示, 系统的功率因数在 APF 投入后显著提升, 从之前的 0.8 左右增加到 1。因此复合控制在治理谐波和提高功率因数有更好的效果, 后续研究均基于 PI + 重复的复合控制。

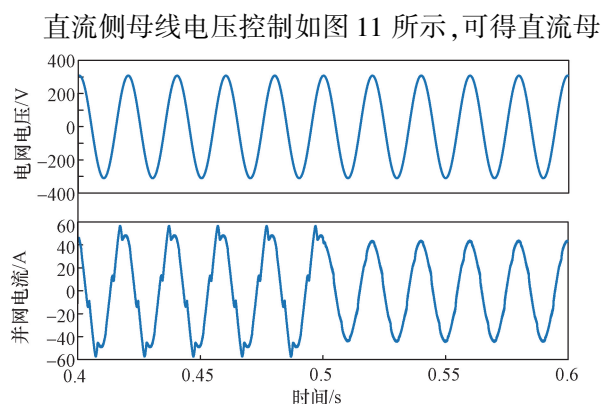


图 8 PI 控制输出电压电流波形

Fig. 8 PI control output voltage and current waveform

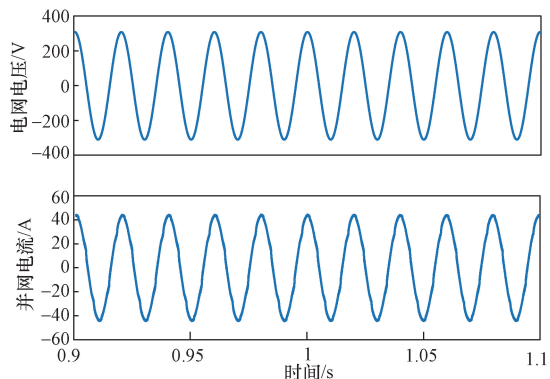


图 9 PI + 重复控制输出电压电流波形

Fig. 9 PI + repeated control output voltage and current waveform

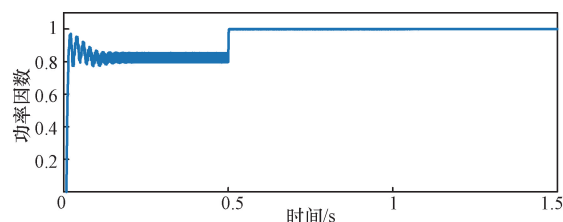


图 10 系统输出功率因数图

Fig. 10 System output power factor diagram

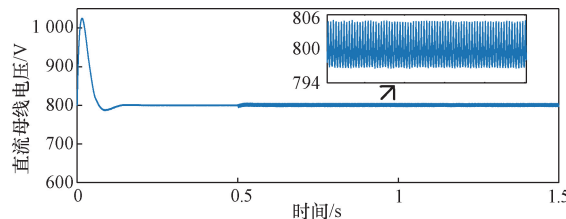


图 11 直流母线电压图

Fig. 11 DC bus voltage diagram

线电压在 ± 5 V 范围内波动, 误差在 0.625%, 稳定在 800 V, 验证了电压控制策略的正确性。

3 仿真实验

3.1 储能协调出力策略

根据系统功率平衡, 并网逆变器交直流两侧功率相等, 可得

$$P_{DC} = P_{AC} \quad (14)$$

可得系统各模块的功率平衡关系为

$$P_{pv} + P_B = P_L - P_g \quad (15)$$

式(15)中: P_{pv} 为光伏发电输出功率; P_B 为储能充放电功率, $P_B > 0$ 表示储能放电, $P_B < 0$ 表示储能充电; P_L 为负载输出功率; P_g 为电网有功功率, 规定: $P_g > 0$, 电网给负载供电, $P_g < 0$, 系统有功馈网。

在 PCC 点根据电流 KCL 定律可得

$$i_c + i_g = i_L \quad (16)$$

式(16)中: 系统通过控制电流 i_c 来控制电流 i_g 的大小, 因此取值存在 3 种情况, $i_g = 0$ 时, 负载的功率由直流侧提供; $i_g > 0$ 时, 电网给负载供电; $i_g < 0$, 即有功馈网。

在 dq 坐标系, 可得系统的瞬时功率为

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d & u_q \\ -u_q & u_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (17)$$

当系统的非线性负载经过无功和谐波补偿后, 认为系统不存在无功功率和谐波电流, 仅考虑有功功率, 可得

$$\begin{cases} P_g = i_{gd}u_{gd} \\ P_c = i_{cd}u_{gd} \end{cases} \quad (18)$$

式(18)中: i_{gd} 为电网电流的 d 轴分量; u_{gd} 为交流电

压的 d 轴分量; P_c 为由并网逆变器交换的有功功率; i_{cd} 为逆变器输出的 d 轴分量。

根据式(15)、式(16)、式(18)可得

$$i_{gd} = \frac{1}{u_{gd}} [P_L - (P_{pv} + P_B)] \quad (19)$$

根据坐标变化可得如式(20)、式(21)所示形式。

由于 u_{ga} 、 u_{gb} 、 u_{gc} 为定值,可得在 d 轴上的分量也为定值,光伏储能与负载的功率匹配原则是尽量由储能单元来平衡光伏与负载之间的功率差额,即 $i_{gd} = 0$, 则 $P_L - (P_{pv} + P_B) = 0$ 。

为了满足负载有功功率匹配,同时也考虑储能单元的荷电状态(state of charge, SOC):当 SOC 在阈值范围之内,在 $P_g = 0$ 时,负载与光伏之间的功率差额完全由储能单元来平衡;当 SOC 到阈值下限或上限,储能单元失去充电或放电能力,则功率差额由电网来平衡。当实际反馈值不为 0 时,当大于 0 时,电网输出功率;当小于 0 时,电网得到光伏储能侧的馈能,此时并网电流环饱和。实际的并网电流等于负载电流 i_{Ld} 与逆变输出电流 i_{cd} 的差值,由电网来完成负载、光伏、储能之间的功率平衡。根据以上分析,可得系统各模块基于 d 轴分量之间关于储能协调出力的控制结构图,如图 12 所示。

光伏工作在 MPPT,实现最大功率输出,系统的功率调节由储能完成,由 1.4 节可得通过控制 P_{ref} 就可以控制储能充放电,现只需得到储能的生成系数 K_b ($-1 < K_b < 1$),图 13 中,数值 10 000 表示储能电池最大功率输出为 10 kW,储能出力系数与其相乘得到 P_{ref} ,如图 13 所示为储能模块协调出力的原理图。

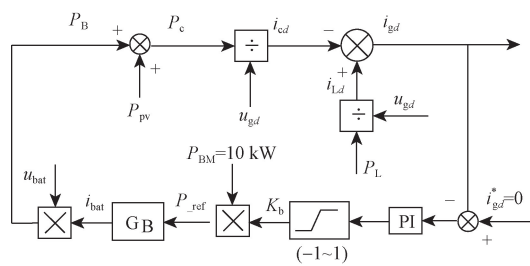


图 12 储能协调出力控制结构图

Fig. 12 Energy storage coordinated output control structure diagram

$$\begin{bmatrix} u_{gd} \\ u_{gd} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin(\omega t - 120^\circ) & \sin(\omega t + 120^\circ) \\ \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 120^\circ) & \cos(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} i_{gd} \\ i_{gd} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin(\omega t - 120^\circ) & \sin(\omega t + 120^\circ) \\ \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 120^\circ) & \cos(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} \quad (21)$$

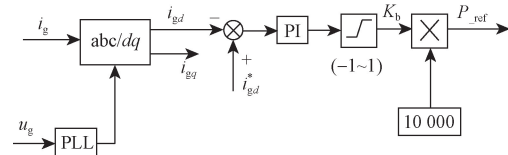


图 13 储能模块协调出力原理图

Fig. 13 Schematic diagram of coordinated output of energy storage module

3.2 工作模式分类

系统中,光伏输出功率的变化直接影响系统的功率平衡,在不同情况下微电网的功率流动也不同,通过研究并网电流的 THD 和系统的功率因数,如图 14 所示,分析了光伏单元、储能单元、负载单元和电网不同组合模式下的电能质量和功率流动。

模式 1 $P_{pv} - P_L < 0$, 储能电池放电。在 0 ~ 0.5 s 时,光伏发电输出功率(0.5 kW)几乎为 0,此时负载的功率(7 kW)由储能(3.5 kW)和电网(3 kW)提供,可以观察到,光伏发出的功率很少,不足以提供给负载,则由储能单元和电网提供剩余功率供给负载,系统功率保持平衡。

模式 2 $P_{pv} - P_L > 0$, 储能电池充电。在 0.5 ~ 1 s 时,光伏发电输出功率增大,输出功率(15.9 kW)大于负载功率,一部分功率提供给负载(7 kW),剩余的功率分为两部分,分别给储能电池充电(2.9 kW)和电网供电(6 kW),系统功率保持平衡。

模式 3 $P_{pv} - P_L < 0$, 储能电池放电。在 1 s 时负载功率(17 kW)突增,在 1 ~ 1.5 s 时,光伏输出功率下降,光伏输出功率小于负载功率,光伏(7.2 kW)、储能(3 kW)、电网(6.8 kW)同时给负载提供功率。

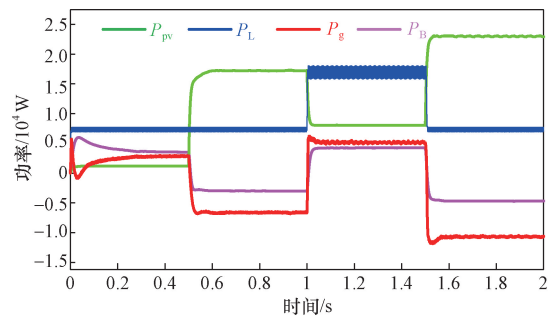


图 14 4种工作模式图

Fig. 14 Four kinds of working model diagram

模式4 $P_{pv} - P_L > 0$, 储能电池充电。在 1.5 s 时, 负载功率(7 kW)突降时, 在 1.5~2 s 时, 光伏发电输出功率(23 kW)大于负载功率时, 在满足负载所需功率的前提下, 将剩余功率提供给储能(4.9 kW)和电网(12 kW)。

3.3 电能质量改进

如图 15 所示是未治理之前并网电流波形。可以看出, 未进行谐波补偿以前, 波形失真严重。在多功能并网逆变器投入后, 在 4 种工作模式下, 对系统仿真, 图 16~图 19 的仿真曲线分别对应模式 1、模式 2、模式 3、模式 4 输出波形, 为便于观察, 只绘制了 a 相。每个图的 3 条曲线顺序为并网电压波形、并网电流波形、APF 输出电流波形。如表 1 所示是 4 种模式下的并网电流谐波畸变率, 可以看出, 在不同模式下, 均能使谐波得到很好的补偿, 满足并网需求。

从图 16 可以观察到并网电流波形为正弦波形, 并网电压和并网电流波形同频同相, 在该模式下通过 APF, 实现谐波电流和无功功率补偿。

如图 17 所示, 并网电流波形为正弦波形, 电压电流相位相差 180°, 这是因为在模式 2, 有功馈网, 电网吸收有功功率, 在光伏输出功率波动时, 在该模式下谐波电流和无功功率得到补偿。

如图 18 所示, 在 1 s 时负载突增, 电网电流稳定, 说明本文采用的 PI + 重复控制的电流内环控制能够在保证补偿精度的同时兼顾系统的动态性。

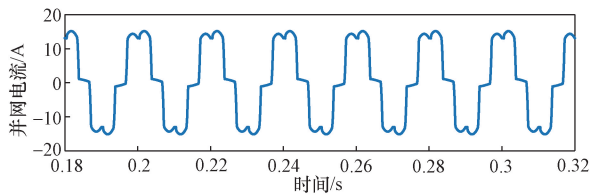


图 15 未治理之前并网电流波形

Fig. 15 Waveform of grid-connected current before treatment

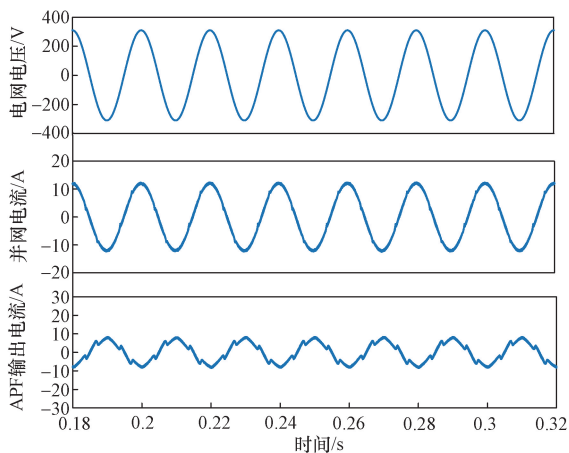


图 16 模式 1

Fig. 16 Mode 1

如图 19 所示, 在 1.5 s 时负载突降, 输出电流波形稳定, 复合控制在保证补偿精度的同时也满足了系统的动态性能。

由上述 4 种模式下的波形对比可知, 在 APF 投

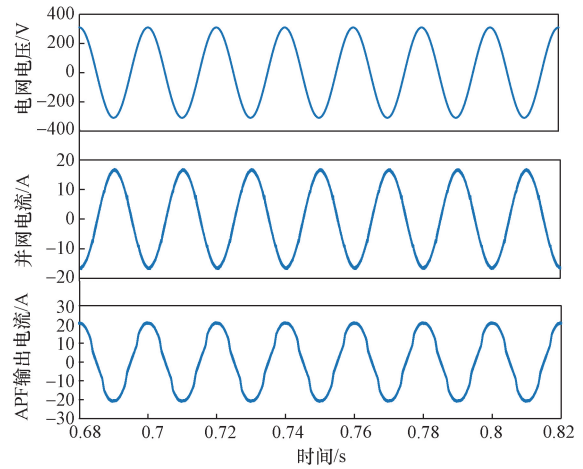


图 17 模式 2

Fig. 17 Mode 2

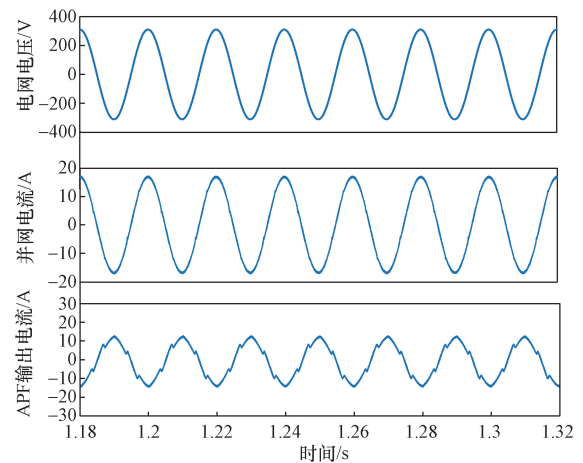


图 18 模式 3

Fig. 18 Mode 3

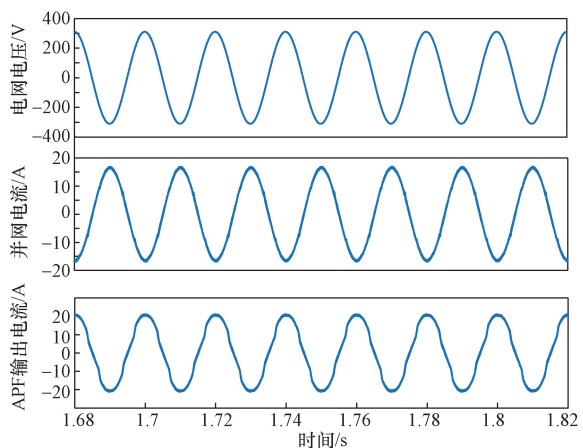


图 19 模式 4

Fig. 19 Mode 4

表 1 输出并网电流总谐波畸变率
Table 1 Total harmonic distortion rate of output grid-connected current

工作模式	APF 投入前 THD/%	APF 投入后 THD/%
模式 1	26.07	2.63
模式 2	26.07	1.89
模式 3	26.07	2.20
模式 4	26.07	1.90

入之后,并网电流波形明显好转,这说明 4 种模式下 APF 都完成了谐波电流补偿的功能。在谐波治理之前,并网电流波形失真严重,谐波含量较高,THD 为 26.07%;对比分析了 4 种模式下的 THD,所有模式下的 THD 均在 5% 以下,其中 THD 在模式 2 和模式 4 下,即在向电网注入功率时,此时系统的 THD 较低,在模式 1 和模式 3 下,即电网在输出功率时,THD 相比模式 2 和模式 4 较高。同时在 4 种模式下系统功率因数趋近于 1。

3.4 直流母线电压分析

此外,对 4 种模式下的直流母线电压进行了仿真验证,如图 20 所示,直流母线电压保持稳定,在模式切换时电压小范围波动,模式切换完后,电压逐渐趋于稳定,其值在 (800 ± 1) V 范围内波动,误差在 0.125%,符合标准。

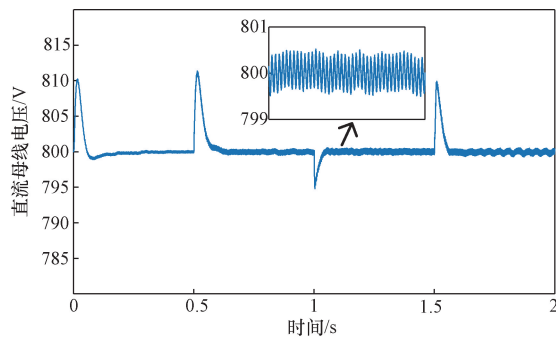


图 20 直流母线电压
Fig. 20 DC bus voltage

4 结论

提出了含非线性负载的微电网系统结构及其控制策略。主要结论如下。

(1) 通过比对 PI 控制与 PI + 重复的复合控制对指令电流的追踪控制,结果表明复合控制在谐波补偿效果更好,并网电流的 THD 更低。

(2) 基于 PI + 重复的复合控制,该系统实现有源滤波功能和常规并网双重功能,实现谐波补偿和无功补偿。

(3) 针对光伏发电的间歇性、随机性,通过对储能单元的充放电控制实现了系统功率平衡,在不同的工作模式下,仿真验证了并网电流的 THD 均在

5% 以内,系统的功率因数接近于 1,直流母线电压在 (800 ± 1) V 范围波动,有效实现了向电网注入功率和有源滤波双重功能。

参考文献

- [1] 武昭原,周明,王剑晓,等. 双碳目标下提升电力系统灵活性的市场机制综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 7746-7764.
Wu Zhaoyuan, Zhou Ming, Wang Jianxiao, et al. Review of market mechanism for improving power system flexibility under dual-carbon target[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 7746-7764.
- [2] 王毅泰,王维庆,王海云,等. 基于源-荷-储的直流微电网系统协调控制[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(5): 1991-1996.
Wang Yitai, Wang Weiqing, Wang Haiyun, et al. Coordinated control of DC microgrid system based on source-charge-storage[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(5): 1991-1996.
- [3] 林智乐,张靖雨,何良宗. 基于分数阶电容的多个低次电流谐波抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(24): 8921-8933.
Lin Zhile, Zhang Jingyu, He Liangzong. Multiple low order current harmonic suppression methods based on fractional order capacitors[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(24): 8921-8933.
- [4] 郑许林,袁源,柏晶晶,等. 分布式光伏无功电压主动支撑控制方法[J]. 可再生能源, 2023, 41(12): 1685-1690.
Zheng Xulin, Yuan Yuan, Bo Jingjing, et al. Active reactive voltage support control method for distributed photovoltaic[J]. Renewable Energy, 2023, 41(12): 1685-1690.
- [5] Wang Z L, Chen Y D, Li X P, et al. Impedance-based adaptively reshaping method for enhancing nonlinear load sharing and voltage quality in islanded microgrids with virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 2568-2578.
- [6] Roditis I, Dakanalis M, Koutroulis E, et al. Three-phase multiport DC-AC inverter for interfacing photovoltaic and energy storage systems to the electric grid[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2023, 4(3): 982-994.
- [7] Kong F, Zhang H, Wang Z L, et al. Nonlinear adaptive disturbance rejection control strategy based on vsg for photovoltaic-storage grid-connected inverter[J]. IEEE Access, 2023, 11: 139534-139545.
- [8] 孙广宇,李永丽,靳伟,等. 基于三相多功能逆变器的微电网电能质量综合治理策略[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1211-1221.
Sun Guangyu, Li Yongli, Jin Wei, et al. Power quality management strategy for microgrid based on three-phase multi-function inverter[J]. Power Grid Technology, 2019, 43(4): 1211-1221.
- [9] 成煜铃,李帅,孟高军,等. 基于微电网储能控制系统的电能质量综合治理研究[J]. 可再生能源, 2023, 41(6): 810-817.
Cheng Yuyuan, Li Shuai, Meng Gaojun, et al. Research on power quality comprehensive management based on microgrid energy storage control system[J]. Renewable Energy, 2023, 41(6): 810-817.
- [10] 袁性忠,王辉,贾宏刚,等. 基于储能型 APF 的微电网电能质量综合治理[J]. 高压电器, 2022, 58(8): 238-244, 251.
Yuan Xingzhong, Wang Hui, Jia Honggang, et al. Integrated power quality management of microgrid based on energy storage

- APF[J]. High Voltage Electrical Apparatus, 2022, 58(8): 238-244, 251.
- [11] 曾江,冯健磊,陈书樑,等. 具有谐波治理功能的虚拟谐波电阻型储能逆变器控制策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(11): 86-91.
Zeng Jiang, Feng Jianlei, Chen Shuliang, et al. Control strategy of virtual harmonic resistance energy storage inverter with harmonic control function [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(11): 86-91.
- [12] 张国祥,严兴宇. 分布式光伏发电与 APF 协调统一控制策略[J]. 电力电子技术, 2021, 55(11): 71-74.
Zhang Guoxiang, Yan Xingyu. Coordinated and unified control strategy of distributed photovoltaic power generation and APF[J]. Power Electronics Technology, 2021, 55(11): 71-74.
- [13] 陈建福,谭喆,刘仁亮,等. 基于改进鲁棒重复控制与 QPR 的光伏电流控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(3): 100-110.
Chen Jianfu, Tan Zhe, Liu Renliang, et al. Photovoltaic current control strategy based on improved robust repeat control and QPR [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3): 100-110.
- [14] 郑征,金建新,陶海军,等. 交直流混合微电网虚拟 APF 的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 11-17.
Zheng Zheng, Jin Jianxin, Tao Haijun, et al. Research on virtual APF of AC-DC hybrid microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 11-17.
- [15] 高云广,宋建成,郑丽君,等. 基于 LCL 型有源电力滤波器的复合电流控制策略研究[J]. 工矿自动化, 2017, 43(4): 49-54.
Gao Yunguang, Song Jiancheng, Zheng Lijun, et al. Research on compound current control strategy based on LCL active power filter [J]. Industrial and Mine Automation, 2017, 43(4): 49-54.
- [16] 王弋飞,朱静,李侠,等. 基于 PI 和重复控制的并网逆变器复合控制方案研究[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 87-91.
Wang Yifei, Zhu Jing, Li Xia, et al. Research on composite control scheme of grid-connected inverter based on PI and repetitive control[J]. High Voltage Electrical Apparatus, 2015, 51(7): 87-91.
- [17] 刘重洋,高志军,刘刚,等. 基于双 PI + 重复控制的光伏逆变器谐波抑制策略[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(3): 397-402.
Liu Chongyang, Gao Zhijun, Liu Gang, et al. Harmonic suppression strategy for photovoltaic inverters based on double PI + repetitive control[J]. Global Energy Internet, 2018, 1(3): 397-402.
- [18] 边庆超,胡铭,杨沛豪. 基于 PI + 自适应内模重复控制的并网逆变器系统研究[J]. 电源学报, 2021, 19(1): 97-106.
Bian Qingchao, Hu Ming, Yang Peihao. Research on grid-connected inverter system based on PI + adaptive internal model repetitive control[J]. Journal of Power Sources, 2021, 19(1): 97-106.