

兼具有源电力滤波器功能的多功能并网逆变器控制

黄鹏¹, 戴威², 张莹¹, 张敏霞¹, 文跃然³, 冯建周¹

(1. 电力电子节能与传动控制河北省重点实验室(燕山大学电气工程学院), 河北 秦皇岛 066004; 2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 3. 中国人民大学劳动人事学院, 北京 100872)

摘要:分布式发电系统中,为了能将风能和光伏等转化过来的能量最大限度地高效率传输到微电网单元内,通常采用恒功率(PQ)控制。当微电网系统中带非线性负载运行时,为保证入网电流的质量,在传统的PQ控制策略中加入谐波抑制功能,即将PQ控制和有源电力滤波器(APF)功能合二为一,形成兼具APF功能的多功能并网逆变器,既向电网传送了有功功率又达到了补偿谐波的目的。文中从并网逆变器入手,分析其工作原理及PQ控制策略,在此基础上添加了谐波抑制功能,并对其进行详细说明,主要包括基于瞬时无功功率理论的谐波检测和多谐振控制器部分。最后,仿真和实验验证了该控制策略的正确性和可行性。

关键词:并网逆变器;恒功率控制;谐波抑制;瞬时无功功率理论;非线性负载

中图分类号: TM464

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)01-0107-08

0 引言

近年来,光伏装机容量不断上涨,光伏发电产业迅速崛起^[1-3]。并网逆变器作为光伏系统并网的关键要素,实现其合理控制是实现电能高效安全应用的基础^[4-6]。并网逆变器将微电源进行逆变后接入电网,然而电力电子装置在电力系统中大量使用,且用电负载中含有非线性、不平衡负载以及无功功率特性,所产生的谐波已经严重危害到了电网的电能质量。

为解决谐波污染问题,传统思路是安装谐波补偿装置或者对电力电子装置本身进行改造,使其不再产生谐波^[7]。电力系统中最早使用无源电力滤波器(passive power filter, PPF)滤除电网中的谐波,但是PPF存在占地面积大、易形成谐振等缺点。目前,使用最广泛的是有源电力滤波器(active power filter, APF),特别是基于瞬时无功功率理论的谐波检测方法的提出,使得APF引起了广泛的重视,逐渐得到了国内外大范围的应用和推广^[8]。

APF虽然有着良好的谐波抑制和无功补偿性能,响应速度快、补偿灵活,但是微电网中的逆变器和APF有着相同的主电路结构,单独建立1组APF会增加系统成本^[9]。当系统规模较大时,高昂的投资成本和单一的功能决定了其难以长期更好地发展。文献[10]提出不在系统中添加其他控制装置,直接利用微电网现有的设备提高整体电能质量,实

现对微电网中重要节点的有效电能质量控制。

文中电路滤波器采用LCL滤波器,文献[11—13]中主要采用LC滤波器,2种滤波器在设计和电路控制策略中存在差异。目前,更多的并网逆变器采用LCL滤波器。文中采用QPR调节器进行参考电流的反馈控制,文献[14—16]主要进行参考电流组成设计,采用PI控制、滞环控制或者PR、PIR控制。QPR与PR相比,对设定频率跟踪性能差异不大,但是在频率波动的实际电网环境下更加实用,适用性更强。文中将APF功能和传统并网逆变器恒功率(PQ)控制方法相结合,形成兼具APF功能的多功能并网逆变器。因为分布式发电系统的总装机容量总是要大于额定容量,故可利用剩余容量检测母线电流质量并抑制谐波。

1 并网逆变器结构

图1为文中所研究的三相并网逆变器拓扑,开关管选用全控型开关IGBT,编号分别为 S_1 — S_6 。直流侧电压 V_{dc} 由可再生能源提供,逆变电路输出端接LCL滤波器。

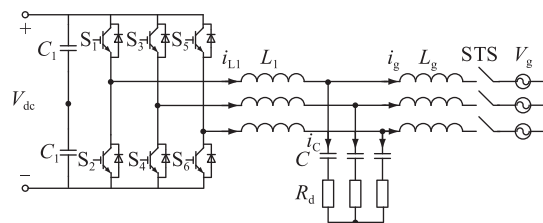


图1 三相并网逆变器拓扑

Fig.1 Topology of three-phase grid-connected inverter

LCL 滤波器相较于 LC 滤波器多了一个网侧电感,该电感可对入网电流的瞬时冲击电流起到抑制作用。同时,电容和网侧电感对高频谐波分别呈现出低阻和高阻特性,可实现良好的滤波效果^[17]。LCL 滤波器既包含 LC 滤波器的优点,又比 LC 滤波器的结构具有优越性,拥有更好的谐波衰减特性。更重要的是,LCL 滤波器对于兼具 APF 功能的并网逆变器而言,能够同时兼顾通带、阻带性能,保证所需的补偿带宽,更有利于逆变器在较低的开关频率下获得高质量的入网电流。

LCL 滤波器的参数包括前级电感 L_1 , 后级电感 L_2 和滤波电容 C 。另外,LCL 滤波器还存在谐振峰问题,通常通过在电容支路串联一个阻尼电阻来降低谐振峰,增加系统的稳定性,因此还需要进行阻尼电阻 R_d 的计算^[18]。加入阻尼电阻的 LCL 滤波器结构如图 2 所示。

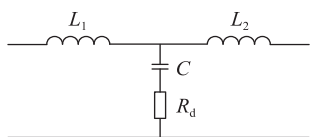


图 2 加入阻尼电阻的 LCL 滤波器结构

Fig.2 LCL filter structure with damping resistance

逆变器实现功率传输和谐波抑制功能所流过滤波器的均为低频次电流,在此频段 LCL 滤波器与 L 滤波器的滤波效果大致相同,因此可将 LCL 滤波器视作一个大电感 L_T , $L_T = L_1 + L_2$ 。电容支路暂且视为开路,先设计总电感量 L_T 。

逆变器的输出电压 V_o , 电网电压 V_g 以及入网电流 I_g 有如下关系:

$$V_o = \sqrt{V_g^2 + \omega^2 L_T^2 I_g^2} - 2V_g \omega L_T I_g \sin \theta \quad (1)$$

式中: ω 为基波角频率。

当逆变器实现单位功率因数并网时,有 $\theta = -180^\circ$, 式(1)可改写为:

$$V_o = \sqrt{V_g^2 + \omega^2 L_T^2 I_g^2} \quad (2)$$

当采用双极性 SPWM 调制时,逆变器的输出电压最大值为:

$$V_{o\max} = \frac{V_{dc}}{2\sqrt{2}} \quad (3)$$

逆变器输出电压 V_o 必须满足:

$$V_o \leq V_{o\max} \quad (4)$$

根据式(1)一式(4)可得总电感 L_T 的最大值为:

$$L_{T\max} = \sqrt{\frac{V_{dc}^2}{4} - V_{gm}^2} / (\omega I_{\max}) \quad (5)$$

式中: V_{gm} 为电网电压的幅值; I_{\max} 为相电流最大值的幅值。

根据电流纹波系数要求,可以得出总电感 L_T 的最小值为:

$$L_{T\min} = \frac{V_{dc}}{8f_s \Delta I_{\max}} \quad (6)$$

式中: ΔI_{\max} 为电感电流纹波值; f_s 为系统开关频率。

根据滤波器对高次谐波的衰减比例来选定前后级电感 L_1 和 L_2 的大小,根据经验,确定 $L_1/L_2 = 3$ 。

当滤波效果一定时,电容 C 越大则 L_T 越小,即总电感量越小,可大大降低 LCL 滤波器的成本。但是滤波电容 C 越大产生的无功分量就越大,逆变器并网运行时功率因数会降低。电容产生的无功分量一般限制在系统额定容量的 5% 以内,计算如下:

$$C \leq \frac{5\%P_n}{3\omega V_n^2} \quad (7)$$

式中: P_n 为系统有功功率; V_n 为电网电压有效值。

通常情况下,阻尼电阻 R_d 取滤波电容在谐振频率处阻抗的 1/3,计算如下:

$$\begin{cases} R_d = \frac{1}{3 \times 2\pi f_{res} C} \\ f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: f_{res} 为 LCL 滤波器的谐振频率。

根据上述设计原则,最终选择的 LCL 滤波器参数为: $L_1 = 3 \text{ mH}$, $L_2 = 1 \text{ mH}$, 滤波电容 $C = 5 \text{ }\mu\text{F}$, 阻尼电阻 $R_d = 4 \text{ }\Omega$ 。

2 控制策略设计

兼具 APF 功能的多功能并网逆变器控制框图如图 3 所示。该控制系统包括功率计算、谐波检测以及电流闭环控制 3 个部分。首先采集母线电压信号 V_{gabc} , 逆变器输出三相电流信号 i_{abc} 以及非线性负载电流信号 i_{oabc} , 在 $\alpha\beta$ 静止坐标系下通过功率计算模块和谐波检测模块得到基波参考电流 $i_{g\alpha\beta}^*$ 和谐波参考电流 i_{gh}^* , 二者叠加作为最终的电流参考值, 再与采集的逆变器输出三相电流 i_{abc} 作差, 经过多谐振控制器 G(PR) 调节, 得到调制波信号 $V_{\alpha\beta}^*$ 。 $V_{\alpha\beta}^*$ 经过 SPWM 输出驱动波形, 控制逆变器开关管的开通与关断。

文中 APF 功能是一直存在的, 因为负载侧电流总会有或多或少的畸变, 谐波抑制功能需要持续工作, 且并不影响电路其他功能。为了完成 APF 功能, 除了增加准谐波控制器外还增加了谐波检测功能, 从而使系统不需要再增加其他器件来完成电能

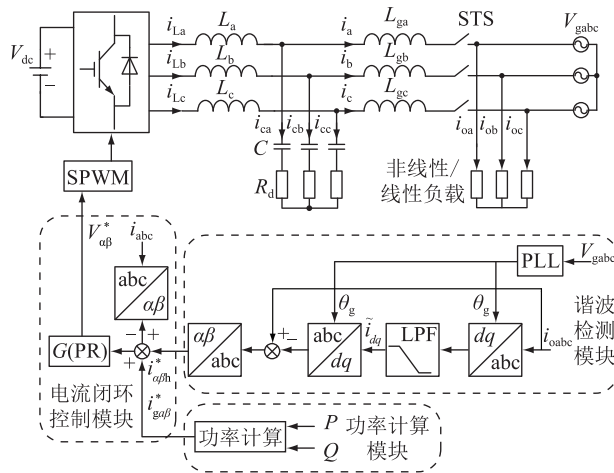


图3 逆变器控制策略框图

Fig.3 Block diagram of inverter control strategy

质量控制。并联支路采用电容电阻是为了抑制 LCL 谐振。多功能的含义是指并网逆变器从原来只负责完成功率输出变为不仅负责功率输出还要保证在非线性负载情况下并网电流的谐波抑制。新增功能依靠有源滤波器原理完成,在算法中实现。

2.1 恒功率控制

恒功率控制(PQ 控制)策略适用于逆变器并网运行模式,可实现逆变器最大功率跟踪高效率并网,基本原理如图 4 所示。其基本思想是给定有功功率和无功功率的参考值,通过控制器设计实现逆变器的输出功率跟踪其参考值。即当逆变器所处网络的电压和频率发生变化时,逆变器输出功率始终不变^[19]。

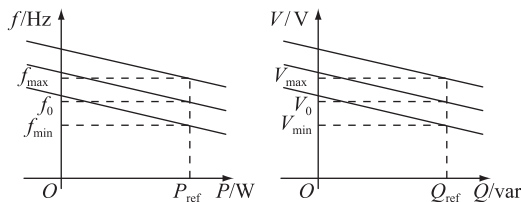


图4 PQ 控制原理图

Fig.4 Schematic diagram of PQ control

从图 4 可以看出,当系统频率 f 在 $[f_{\min}, f_{\max}]$ 这一范围内变化时,逆变器输出的有功功率保持恒定不变,仍为有功功率参考值 P_{ref} 。同样的,当系统的电压 V 在 $[V_{\min}, V_{\max}]$ 这一范围变化时,逆变器输出的无功功率仍为无功功率参考值 Q_{ref} 。

2.2 谐波检测方法

负载电流的谐波检测方法源于经典的三相电路瞬时无功功率理论,该理论提出后便得到国内外学者广泛关注,经过不断研究逐渐得到完善^[20]。

图 5 为基于瞬时无功功率理论的谐波检测框图,其步骤方法可以简单描述为:将采样得到的三

相负载电流 i_{oa}, i_{ob}, i_{oc} 经过三相坐标到两相坐标的变换,变换到两相正交的 $\alpha\beta$ 坐标系下得到 i_{α}, i_{β} , 再将其变换到两相旋转 dq 坐标系下,得到的是有功分量 i_d 和无功分量 i_q ,再经过低通滤波器(low-pass filter, LPF)分别得到其直流部分 i_{d0} 和 i_{q0} ,即不含有谐波的基波部分。将 i_{d0} 和 i_{q0} 经过一系列的反变换得到只含有基波成分的三相电流 i_{af}, i_{bf}, i_{cf} ,用三相采样电流 i_{oa}, i_{ob}, i_{oc} 减去只含有基波成分的电流 i_{af}, i_{bf}, i_{cf} 便可得到谐波电流 i_{ah}, i_{bh}, i_{ch} 。

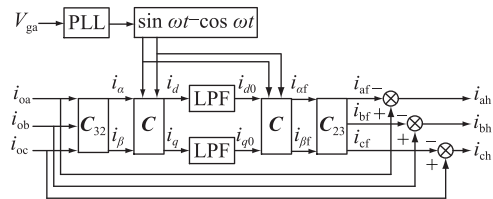


图5 基于瞬时无功功率理论的谐波检测框图

Fig.5 Harmonic detection block diagram based on instantaneous reactive power theory

图中 V_{ga} 为电网 a 相电压,经过锁相环(phase locked loop, PLL)得到与 a 相电压同频同相的正弦信号 $\sin \omega t$ 和余弦信号 $\cos \omega t$ 。涉及到的坐标变换公式如下:

$$C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$C_{23} = C_{32}^T \quad (10)$$

$$C = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix} \quad (11)$$

将检测得到的三相谐波电流参考值 i_{abch} 进行坐标变换,得到 $\alpha\beta$ 坐标系下的谐波补偿参考电流 $i_{\alpha\beta h}^*$ 。

2.3 多谐振控制器

实现并网逆变器的一机多用功能,离不开对多谐振控制器的合理设计。控制器的参考电流由并网功率跟踪电流 $i_{\alpha\beta}^*$ 和谐波补偿电流 $i_{\alpha\beta h}^*$ 两部分组成,2.2 节介绍了谐波补偿参考电流的检测方法,在进行控制器的设计之前,先对参考电流的另一部分,即并网功率跟踪电流 $i_{\alpha\beta}^*$ 的生成进行介绍。

通过瞬时功率计算公式可得到 P 与 Q 的表达式:

$$\begin{cases} P = 1.5(u_{\alpha}i_{\alpha} + u_{\beta}i_{\beta}) \\ Q = 1.5(u_{\beta}i_{\alpha} - u_{\alpha}i_{\beta}) \end{cases} \quad (12)$$

对上式进行整理得到关于电流的表达式:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 \\ v_2 & -v_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中： u_α, u_β 分别为 $\alpha\beta$ 坐标下的母线电压 $V_{g\alpha}, V_{g\beta}$ ； i_α, i_β 分别为 $\alpha\beta$ 坐标下的并网功率跟踪电流 $i_{g\alpha}^*, i_{g\beta}^*$ 。

v_1, v_2 表达式如下：

$$v_1 = \frac{2}{3} \frac{u_\alpha}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \quad (14)$$

$$v_2 = \frac{2}{3} \frac{u_\beta}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \quad (15)$$

通过以上计算，得到并网功率跟踪电流参考值 $i_{g\alpha\beta}^*$ ，将其与谐波补偿参考电流 $i_{\alpha\beta h}^*$ 相加，即可得到最终的逆变器输出电流参考值。

对于三相不控整流桥带阻性负载的非线性负载，含有特定次的谐波，即 $6n\pm 1 (n=1, 2, 3, \dots)$ 次谐波。并且各次谐波的含量与其次数成反比关系，因此文中对 5、7、11 及 13 次含量较高的低次谐波进行重点补偿，以降低入网电流的总谐波失真值 (total harmonic distortion, THD)。由于理想的谐振控制器在谐振频率处的增益无穷大，使得与谐振频率具有相同频率的正弦信号可实现零稳态误差控制。因此，采用多个谐振控制器并联对特定次谐波进行补偿。谐振控制器的传递函数为：

$$G_R(s) = \frac{k_R s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (16)$$

式中： k_R 为积分系数； ω_0 为谐振频率。

当 $k_R = 1, \omega_0 = 100\pi \text{ rad/s}$ 时，可做出幅频特性曲线如图 6 所示。从图中可以看出，在谐振频率处的增益近似无穷大，在其他频率处的衰减作用很强，增益近乎为 0。因此，可以实现与谐振频率同频率的零稳态误差控制。

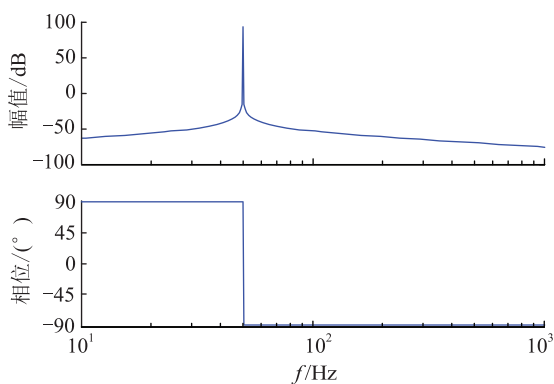


图 6 谐振控制器的幅频特性

Fig.6 Amplitude-frequency characteristics of resonant controller

在电流闭环调节部分，对基频和 5、7、11 及 13 次谐波进行相应的补偿，只需要添加相应频次的谐振调节器即可，不改变原有系统结构。同时为了提高系统的动态性能，在谐振环节并联一个比例系数

k_p ，将各控制器进行并联形成多谐振调节器。

采用多谐振控制器分别实现采样电流对不同频次谐波电流的跟踪，即谐振频率为相应的特定次频率，以达到集 PQ 控制和谐波抑制于一体的控制效果。具体调节框图如图 7 所示。

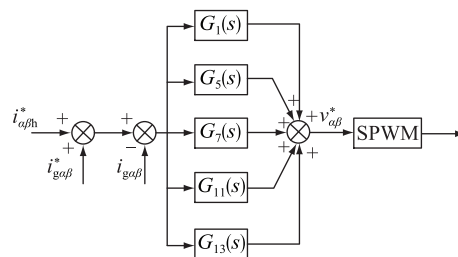


图 7 闭环电流调节框图

Fig.7 Closed loop current regulation block diagram

多谐振控制器传递函数 $G_{PR}(s)$ 由两部分组成，分别是基频控制器传递函数 $G_1(s)$ 和倍频控制器传递函数 $G_b(s)$ 。表达式如下：

$$G_{PR}(s) = G_1(s) + G_b(s) = k_p + \frac{k_R s}{s^2 + \omega_0^2} + \frac{k_{R5} s}{s^2 + (5\omega_0)^2} + \frac{k_{R7} s}{s^2 + (7\omega_0)^2} + \frac{k_{R11} s}{s^2 + (11\omega_0)^2} + \frac{k_{R13} s}{s^2 + (13\omega_0)^2} \quad (17)$$

式中： k_p 为比例系数； $k_R, k_{R5}, k_{R7}, k_{R11}, k_{R13}$ 分别为各次谐波传递函数对应的谐振系数； ω_0 为谐振频率，此处 $\omega_0 = 314 \text{ rad/s}$ 。

根据多谐振控制器传递函数 $G_{PR}(s)$ 做出幅频特性 Bode 图如图 8 所示。可以看出，在相应的特定次频率处增益被放大，非特定次频率处的增益近乎为 0，符合控制要求。且各频次相互间干扰极小，彼此独立，各倍频控制器可单独设计。

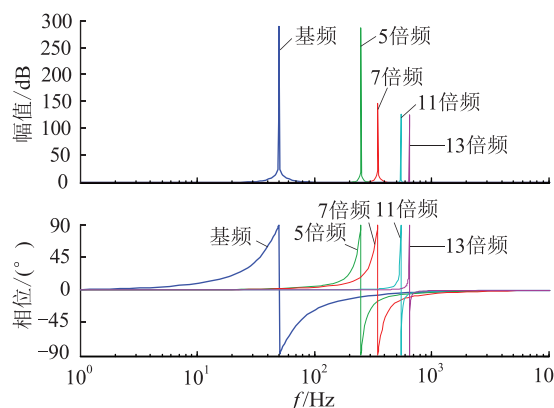


图 8 多谐振控制器传递函数的 Bode 图

Fig.8 Bode diagram of transfer function of multi-resonant controller

由于理想的谐振控制器在实际应用中很难实现，而且抗频率的扰动性能差。因此，在后续的实

验证环节中,采用准谐振控制器,其传递函数为:

$$G_R(s) = \frac{k_R \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (18)$$

式中: ω_c 为截止频率。

随着 ω_c 的增加,控制器的带宽会增大,为将其控制在一个尽可能小的范围,同时不影响谐波信号的滤除效果,折中选择 $\omega_c = 5$ 。

3 系统仿真与实验

3.1 仿真分析

利用 Matlab/Simulink 仿真软件对兼具 APF 功能的多功能并网逆变器性能进行验证。当系统中带有非线性负载运行时,文中选用典型的三相不控整流桥带阻性负载的非线性负载进行研究,其负载电流中含有 $6n \pm 1 (n = 1, 2, 3, \dots)$ 次谐波,当其接入系统后将使入网电流增加谐波分量。非线性负载电流波形与其谐波分布分别如图 9 和图 10 所示,各次谐波的有效值与谐波次数成反比。

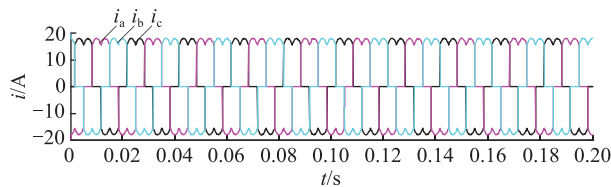


图 9 非线性负载电流

Fig.9 Nonlinear load current

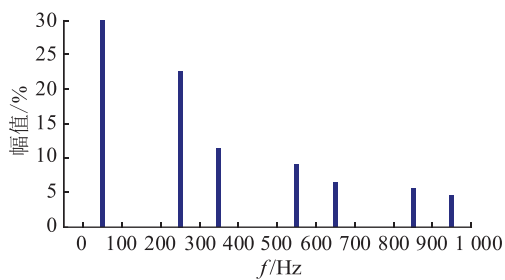


图 10 非线性负载电流谐波分布

Fig.10 Harmonic distribution of nonlinear load current

文中对含量高的低次谐波进行重点补偿,即 5、7、11 及 13 次谐波。设定系统启动时工作在线性负载条件下,稳定运行至 0.1 s 时刻切换为非线性负载。电网电压维持恒定,为逆变器提供电压和频率支撑。电网电压波形如图 11 所示。

图 12 和图 13 分别为入网电流波形以及并网逆变器输出电流波形,可以看出当负载切换为非线性负载时入网电流仍保持为质量较好的正弦波,低次谐波得到较好的补偿,THD 值大大降低。逆变器输出电流中含有相应的特定次谐波电流做补偿,且输

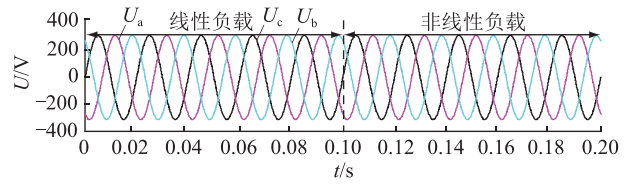


图 11 电网电压波形

Fig.11 Power grid voltage waveform

出电流幅值保持恒定,即保证输出功率恒定不变。图 14 为入网电流 FFT 分析,THD 值低于 5%,符合运行要求。图 15 为增加算法前后入网电流波形对比。

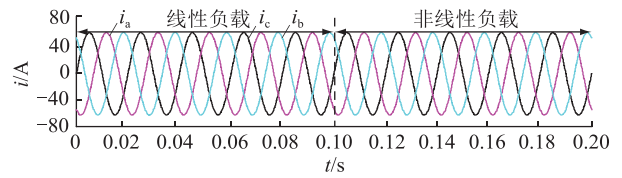


图 12 入网电流波形

Fig.12 Waveform of incoming current

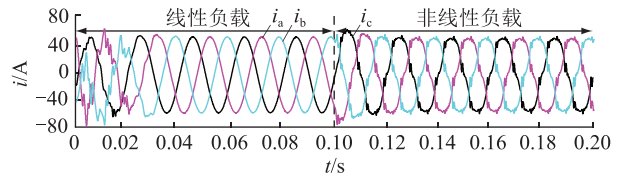


图 13 并网逆变器输出电流波形

Fig.13 Output current waveform of grid-connected inverter

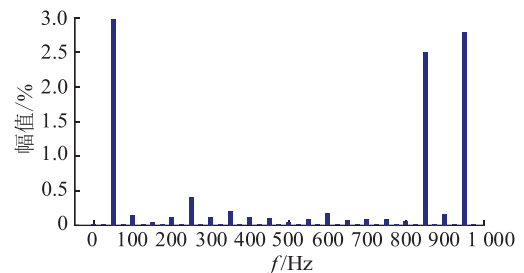


图 14 入网电流 FFT 分析

Fig.14 FFT analysis of incoming current

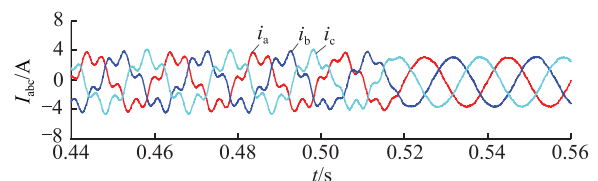


图 15 增加算法前后入网电流波形对比

Fig.15 Comparison of current waveforms before and after adding algorithm

3.2 实验验证

搭建了三相并网逆变器的实验平台,对兼具

APF 功能的多功能并网逆变器性能进行实验验证。系统实验参数如表 1 所示,设计原理如图 16 所示。

表 1 系统实验参数
Table 1 System experimental parameters

参数	数值	参数	数值
V_{dc}/V	80	L_g/mH	1
V_g/V	30	R_d/Ω	5
L_1/mH	4	f_s/kHz	20
$C/\mu F$	20		

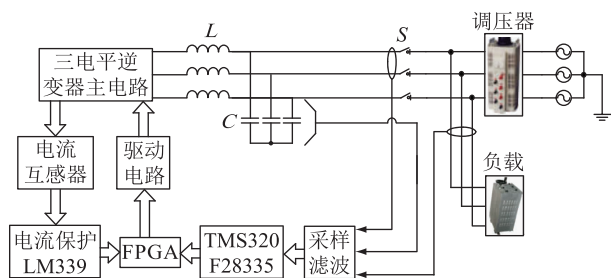


图 16 实验设计原理

Fig.16 Experimental design principle

逆变器主电路采用二极管箝位型三电平逆变器结构,根据设计要求,系统输出功率定为 5 kW,直流侧电源电压为 700 V,开关频率为 20 kHz。综合考虑,主电路开关管选择 SGL160N60 型号的 IGBT,其额定耐压 L_T ,额定电流 $L_T = L_1 + L_2$ 。LCL 滤波器参数:前级电感为 4 mH,网侧电感为 1 mH,滤波电容为 $20 L_T$,阻尼电阻为 $5 V_0$ 。

A 相电网电压及锁相实验波形如图 17 所示。正弦波为 A 相电网电压,三角波为锁相环输出弧度。从图 17 可以看出,逆变器能较好地锁住电网电压相位,验证了逆变器锁相环的有效性。

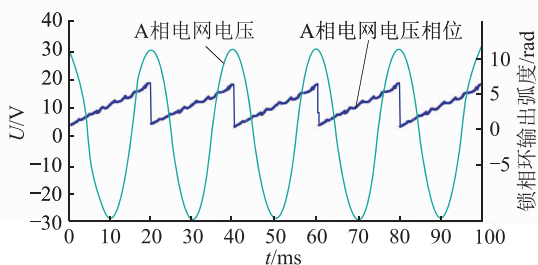


图 17 电网电压及锁相实验波形

Fig.17 Voltage and phase-locked experimental waveform of power network

图 18 为并网运行时的电网电压、逆变器输出电压以及入网电流波形。系统带阻性负载运行,运行中逆变器输出电压和电网电压近乎完全相等,逆变器输出电压能够较好地跟随电网电压,实现了电压同步运行。同时,入网电流与电网电压同频同相。

图 19 为逆变器带非线性负载运行时的并网实

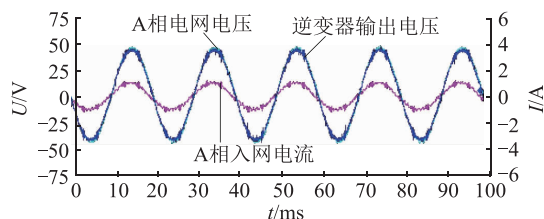


图 18 并网运行时电压电流波形

Fig.18 Voltage and current waveforms during grid-connected operation

验波形。当逆变器系统的负载为三相不控整流桥带阻性负载的非线性负载时,非线性负载电流表现出严重的畸变性,绝对不允许流入电网。

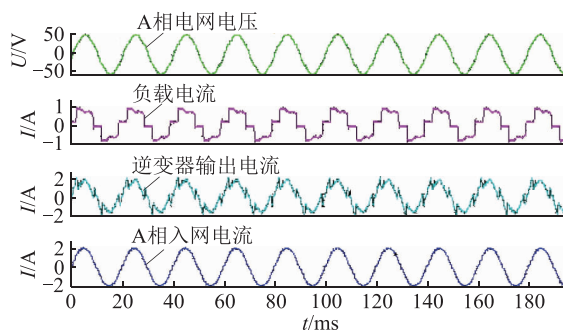


图 19 逆变器带非线性负载并网运行实验波形

Fig.19 Experimental waveform of inverter operation with nonlinear load

在并网逆变器控制策略的设计中加入了 APF 功能,补偿非线性负载电流中的 5 次和 7 次谐波。并网运行时,电网为逆变器提供稳定的电压支撑,逆变器输出电流波形含有相应的补偿电流分量,使入网电流不再严重畸变而是接近正弦波的电流波形,验证了谐波抑制控制策略的可行性。

图 20 为逆变器并网运行切入非线性负载的实验波形。逆变器系统运行初期不带负载运行,并网后入网电流波形良好,入网电流即等于逆变器输出电流。在 T 时刻切入非线性负载,由图 20 可以看出,谐波抑制效果明显,入网电流依旧保持为正弦波。电流中含少量低次谐波成分,是因为文中仅对低次谐波中的 5、7 次谐波做了重点补偿以此来观察控制效果。

文中谐波电流与入网电路之和是逆变器输出电流,所以为保证入网电流的质量,逆变器输出电流会含有相应谐波。如果不增加文中所提的策略,逆变器输出电流不变,但是入网电流会增加负载谐波,进而发生畸变。

实验结果较好地验证了兼具 APF 功能的多功能并网逆变器的控制策略的正确性以及可行性,与文中所进行的理论分析、仿真分析结果一致。

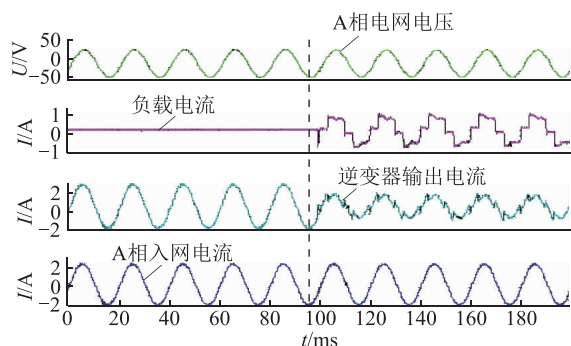


图 20 逆变器带非线性负载并网运行实验波形

Fig.20 Experimental waveform of inverter operation with nonlinear load

4 结语

实现稳定运行,优质供电是当前新能源发电的基本要求。文中对并网逆变器的功能进行了设计,使其兼具 APF 的谐波抑制功能,形成一机多用的增强型控制策略。该控制策略利用逆变器与 APF 在电路结构上的一致性,将 PQ 控制与 APF 功能进行整合,既实现了功率传输,又达到了补偿低次谐波的作用,实现逆变器的多功能应用。文中并网逆变器采用 LCL 滤波器,选用 QPR 调节器进行参考电流的反馈控制,使得系统本身更适用于有背景谐波的实际电网,在完成谐波抑制的同时提高了系统运行能力,为可再生能源的工程设计及应用提供有益参考。

本文得到河北高校基金项目(QN2017362)资助,谨此致谢!

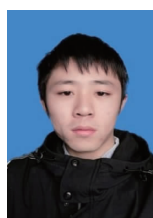
参考文献:

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京:中国电力出版社, 2015:106-111.
LIU Zhenya. Global energy Internet[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2015:106-111.
- [2] 胡兵,张彦虎,赵为,等. 光伏发电逆变器拓扑及关键技术综述[J]. 电力电子技术,2013,47(3):18-20.
HU Bing, ZHANG Yanhu, ZHAO Wei, et al. Overview of PV power inverter topology and key technology[J]. Power Electronics, 2013, 47(3):18-20.
- [3] 张文杰,吴杰康,赵俊浩,等. 考虑源-荷不确定性的水风柴微电网优化配置[J]. 电力工程技术,2020,39(2):117-126.
ZHANG Wenjie, WU Jiekang, ZHAO Junhao, et al. Optimal capacity configuration of hydro-wind-diesel microgrid considering uncertainty of renewable energy and load[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(2):117-126.
- [4] 陈哲照,薛媛,王涛,等. 分布式电源并网系统控制策略的研究[J]. 电力电子技术,2008,42(4):41-42.
CHEN Zhezao, XUE Yuan, WANG Tao, et al. Study on control strategy of grid-connected distributed generation power system

- [J]. Power Electronics, 2008, 42(4):41-42.
- [5] 胡兵轩,任庭昊,车洵,等. 基于 QPCI 控制的微电网并网逆变器控制技术[J]. 智慧电力,2020,48(1):23-27,41.
HU Bingxuan, REN Tinghao, CHE Xun, et al. Single-phase grid-connected inverter control technology for microgrid based on QPCI control[J]. Smart Power, 2020, 48(1):23-27,41.
- [6] 潘力,李红伟,代云中,等. 六开关非隔离型双降压光伏并网逆变器共模漏电流抑制研究[J]. 智慧电力,2019,47(2):43-48.
PAN Li, LI Hongwei, DAI Yunzhong, et al. Research on common-mode leakage current suppression for non-isolated dual-buck photovoltaic grid-connected inverter with six power-switch[J]. Smart Power, 2019, 47(2):43-48.
- [7] 王兆安. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
WANG Zhaoan. Harmonic suppression and reactive power compensation[M]. Beijing:China Machine Press, 1998.
- [8] WANG G, ZHANG G. Direct AC main current control of shunt active power filters-feasibility and performance[C]// Power Electronics Specialists Conference. IEEE, 2006:1-6.
- [9] 周柯,王凯,刘路,等. 一种改进型并联混合有源电力滤波器及其控制[J]. 中国电机工程学报,2012,32(30):67-72.
ZHOU Ke, WANG Kai, LIU Lu, et al. An improved shunt-hybrid-type active power filter and its control method[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(30):67-72.
- [10] 李国庆,王鹤,张慧杰. 微电网中基于逆变电源控制的重要节点电能质量管理方法[J]. 电工技术学报,2014,29(2):177-184.
LI Guoqing, WANG He, ZHANG Huijie. Power quality management method based on inverter source control for important node in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2):177-184.
- [11] 曾正,赵荣祥,杨欢,等. 多功能并网逆变器及其在微电网电能质量定制中的应用[J]. 电网技术,2012,36(5):58-67.
ZENG Zheng, ZHAO Rongxiang, YANG Huan, et al. Multi-function grid-connected inverter and its application in micro-grid power quality customization[J]. Power Grid Technology, 2012, 36(5):58-67.
- [12] 程冲. 多功能并网逆变器若干关键技术的研究[D]. 杭州:浙江大学,2018.
CHENG Chong. Research on some key technologies of multi-function grid-connected inverter[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2018.
- [13] 余攀,瞿李锋,杨泽洲,等. 级联 H 桥混合型有源电力滤波器直流电压控制[J]. 中国电机工程学报,2019,39(16):4866-4875.
YU Pan, QU Lifeng, YANG Zezhou, et al. Improved DC voltage control method for H-bridge-based hybrid active power filter[J]. Proceeding of the CSEE, 2019, 39(16):4866-4875.
- [14] 叶珠环,肖国春,曾忠,等. 基于电流状态反馈的串联电压质量调节器比例谐振和谐波补偿控制[J]. 电工技术学报,2011,26(10):84-92.

- YE Zhuhuan, XIAO Guochun, ZENG Zhong, et al. PR and harmonic compensation control for an active voltage quality regulator with current state feedback scheme[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 84-92.
- [15] 韩莹, 陈维荣, 李奇, 等. 分布式电源并网逆变器谐波抑制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(9): 1-6.
HAN Ying, CHEN Weirong, LI Qi, et al. Harmonic suppression method for distributed power grid-connected inverter[J]. Journal of Power Systems and Automation, 2014, 26(9): 1-6.
- [16] PREETHA K P, JAYANAND B, REJI P. Performance comparison of hysteresis and resonant current controllers for a multi-functional grid connected inverter[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing. YPICC, 2015: 1-6.
- [17] 蒋晓艳, 何川, 唐波. 并网逆变器 LCL 滤波器参数的优化与设计研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(10): 2533-2538.
JIANG Xiaoyan, HE Chuan, TANG Bo. Optimization and design of parameters for LCL filter of on-grid inverter[J]. ACTA Energaie Solaris Sinica, 2016, 37(10): 2533-2538.
- [18] 刘飞, 段善旭, 查晓明. 基于 LCL 滤波器的并网逆变器双环控制设计[J]. 中国电机工程学报, 2009(S1): 234-240.
LIU Fei, DUAN Shanxu, ZHA Xiaoming. Design of twoloop controller in grid-connected inverter with LCL filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009(S1): 234-240.
- [19] DIMEAS A L, HATZIARGYRIOU N D. Operation of a multi-agent system for microgrid control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1447-1455.
- [20] 罗超, 陶顺, 肖湘宁, 等. 瞬时无功功率理论与电流物理分量理论的分析与比较[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(23): 130-135.
LUO Chao, TAO Shun, XIAO Xiangning, et al. Comparison and analysis of instantaneous reactive power theory and currents' physical components theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(23): 130-135.

作者简介:



黄鹏

黄鹏(1999),男,硕士在读,研究方向为逆变器并联及控制(E-mail: 779946584@qq.com);

戴威(1986),男,硕士,高级工程师,从事培训信息技术工作;

张莹(1982),硕士,高级工程师,从事电力电子技术相关实践教学。

Multi-function grid-connected inverter control with APF function

HUANG Peng¹, DAI Wei², ZHANG Ying¹, ZHANG Minxia¹, WEN Yueran³, FENG Jianzhou¹

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Electronics Energy Conservation and Transmission Control

(School of Electrical Engineering, Yanshan University), Qinhuangdao 066004, China; 2. State Grid

Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

3. School of Labor and Human Resources, Renmin University of China, Beijing 100872)

Abstract: In distributed generation systems, constant power (PQ) control is often used in order to transmit energy from wind energy and photovoltaics to the micro-grid unit as efficiently as possible. When the micro-grid system is operating with a non-linear load, in order to ensure the quality of the incoming network current, the harmonic suppression function is added to the traditional PQ control strategy, that is, the PQ control and the active power filter (APF) function are combined into one. A multi-function grid-connected inverter with APF function is formed, which not only transmits active power to the grid, but also achieves the purpose of compensating for harmonics. This paper starts with the grid-connected inverter and analyzes its working principle and PQ control strategy. Based on this, the harmonic suppression function is added and explained in detail, mainly including harmonic detection based on instantaneous reactive power theory, and multi-resonant controller section. Finally, simulation and experiment verify the correctness and feasibility of this control strategy.

Keywords: grid-connected inverter; constant power control; harmonic suppression; instantaneous reactive power theory; non-linear load

(编辑 方晶)