

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.02.004

一种具备友好网荷交互功能的三相 PWM 整流器控制方法

郝振洋, 徐健, 王雪瑞, 曹鑫, 杨奇

(南京航空航天大学自动化学院, 南京, 211106)

摘要: 在智能电网的构建过程中, 越发强调用户与电网互动的重要性。当电网发生频率和电压波动时, 传统的变流器控制方法无法较好地进行网荷交互以实现对电网的支撑。本文在三相 PWM 整流器中运用虚拟同步机技术, 结合下垂控制方法, 当电网发生频率和电压波动时, 能够主动调节三相 PWM 整流器的有功功率和无功功率, 从而在负荷侧实现与电网的友好交互功能。建立了虚拟同步机控制在三相 PWM 整流器中的应用模型, 提出了采用虚拟同步机控制的有功功率和无功功率下垂机制及其控制框图, 仿真和实验结果证明了该方法的有效性。

关键词: 虚拟同步机; 三相 PWM 整流器; 下垂控制; 网荷交互

中图分类号: TM341

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2020)02-0199-08

A Control Method for Three-Phase PWM Rectifier with Function of Friendly Interaction Between Grid and Load

HAO Zhenyang, XU Jian, WANG Xuerui, CAO Xin, YANG Qi

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China)

Abstract: The interaction between load and grid has been one of important functions in the smart grid. Conventional converter control methods cannot well realize this interaction to support power grid when the frequency and voltage fluctuations occur. In this paper, the virtual synchronous machine technology is applied to three-phase PWM rectifier to realize the reasonable regulation of active power and reactive power. Combining with droop control, the proposed method can realize friendly interaction with power grid at the load side. The mathematical model of the virtual synchronous machine applied to three-phase PWM rectifiers is established. The mechanism and control block of the droop control with virtual synchronous machine technique are proposed and developed accordingly. Simulation and experimental results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: virtual synchronous machine; three-phase PWM rectifier; droop control; grid and load interaction

进入 21 世纪以来, “智能电网”这一概念受到不断发扬且逐步深入人心。《国家发展改革委国家能源局关于促进智能电网发展的指导意见》中提出“鼓励用户参与需求响应, 实现与电网协调互动”^[1]。在智能电网构建的大背景下, 负荷应逐步摆脱“只管用电, 不顾电网”的传统观念, 在电网需要支撑时, 应能较好地实现网荷交互功能, 为电网提供一

定的支撑。

三相 PWM 整流器是负荷接入电网的主要电力电子接口装置, 因其具备能量双向流通、单位功率因数运行等优点受到了广泛运用^[2]。现阶段三相 PWM 整流器运用较多的是电流控制策略和功率控制策略, 模型预测控制、自适应控制等新型控制算法学者们也在不断研究并推广其应用场合。

收稿日期: 2019-12-30; 修订日期: 2020-03-15

通信作者: 郝振洋, 男, 副教授, E-mail: zhenyang_hao@nuaa.edu.cn。

引用格式: 郝振洋, 徐健, 王雪瑞, 等. 一种具备友好网荷交互功能的三相 PWM 整流器控制方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(2): 199-206. HAO Zhenyang, XU Jian, WANG Xuerui, et al. A control method for three-phase PWM rectifier with function of friendly interaction between grid and load[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(2): 199-206.

为促进智能电网的构建,探求负荷与电网友好互动的新模式,诸多研究机构对此开展了深入研究。

文献[3-4]在微电网中运用下垂控制技术,通过合理调节微电源的有功功率和无功功率,提高微电网的频率和电压质量,从而实现了“微电源-微网”间的交互。文献[5]充分利用电动汽车的可调度容量,采用下垂控制技术,根据频率波动按一定比例调整电动汽车的充放电功率,从而从负载侧辅助电网调频,一定程度上实现了网荷交互,然而传统下垂控制方法不能使负载侧给电网提供惯量支撑。为了解决这一问题,文献[6-7]将虚拟同步机技术运用于三相PWM整流器中,通过在三相PWM整流器的控制中引入虚拟惯量、虚拟阻尼和虚拟励磁,使负荷侧可以给电网提供阻尼和惯量支撑。文献[8]将虚拟同步机技术运用于柔性直流输电系统换流站中,通过小信号分析法,研究了基于虚拟同步机的柔性直流输电系统整流侧的控制参数设计方法。文献[9-10]研究了虚拟同步整流器在不平衡电网电压下的控制,通过正负序分析法,改进控制策略,保证了直流侧负载电压的稳定。文献[11]探讨了虚拟同步机技术在电动汽车充电桩中的运用,重点研究了通过灵活改变电动汽车的充放电功率参与电网的一次、二次调频。文献[12]将虚拟同步机控制与模糊控制相结合,提出了一种电动汽车V2G智能充放电技术,使得电动汽车可友好参与电网的一次调频与调压。文献[13]提出了一种自主降额的虚拟同步机控制方法,分别针对DC/DC负荷与DC/AC负荷进行分析,当电力系统供电不足时,通过“减负荷”实现与电网的友好交互。文献[14-16]对本文设计具有参考作用。

然而以上针对虚拟同步机控制的三相PWM整流器与电网之间的互动问题研究得不够深入,未能充分利用虚拟同步整流器的同步机制实现对电网频率的支撑与调节,且对电网电压跌落情形下的无功支撑问题研究较少,不能实现较为理想的网荷交互效果。

本文主要在三相PWM整流器上运用虚拟同步机技术,结合下垂控制,使得三相PWM整流器在电网频率发生变化时提供有功支撑,电网电压发生变化时提供无功支撑,充分实现网荷友好交互功能。首先运用虚拟同步机技术,对三相PWM整流器进行建模和功率控制;其后深入探讨了基于虚拟同步机的三相PWM整流器的频率有功下垂控制和电压无功下垂控制;最后给出了仿真和实验结果,证明了基于虚拟同步机的三相PWM整流器下垂控制方法可有效实现网荷的友好交互功能。

1 原理与设计

1.1 基于虚拟同步机的三相PWM整流器数学模型和控制方法

本文研究的三相PWM整流器采用如图1所示的L形滤波的三相全桥拓扑结构。图中, v_a, v_b, v_c 分别为三相PWM整流器的三相输入电压; i_a, i_b, i_c 分别为整流器的交流侧三相电流; e_a, e_b, e_c 分别为整流器三相桥臂的中点电压。三相PWM整流器交流侧采用L型滤波方式,输入端滤波电感记作 L_s , R_s 为滤波电感的附加电阻, C 为直流侧稳压电容, R 为直流侧负载电阻,采用的开关器件为6个含反并联二极管的IGBT($Q_1 \sim Q_6$)。三相PWM整流器的输出电压记作 V_o 。

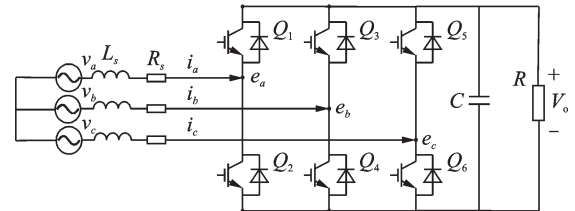


图1 三相PWM整流器电路拓扑

Fig.1 Topology of studied three-phase PWM rectifier

首先从电路角度对三相全桥拓扑结构的整流器与同步电动机进行等效,将三相PWM整流器的输入电压 v_a, v_b, v_c 视作同步电动机的定子端电压;交流侧电流 i_a, i_b, i_c 视作同步电动机的定子电流;滤波电感 L_s 和其附加电阻 R_s 视作同步电动机定子自感和内阻;桥臂中点电压 e_a, e_b, e_c 视作同步电动机因转子运动而产生的反电动势。通过以上的电路等效,可以建立式(1)~(4)所描述的基于虚拟同步机的三相PWM整流器数学模型,即

$$v = e + R_s i + L_s \frac{di}{dt} \quad (1)$$

$$e = M_f i_f \omega \widetilde{\sin\theta} - M_f \frac{di_f}{dt} \widetilde{\cos\theta} \quad (2)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_m + D_p (\omega_g - \omega) \quad (3)$$

$$T_e = M_f i_f \langle i, \widetilde{\sin\theta} \rangle \quad (4)$$

式(1)描述了三相PWM整流器的电路方程。式(2)根据同步电动机的反电动势方程,描述了三相PWM整流器的虚拟反电势,引入了虚拟励磁磁链 $M_f i_f$ 。式(3)将同步电动机的机械运动方程引入到三相PWM整流器的建模和控制中,式中 J 为虚拟惯量, T_e 为虚拟电磁转矩, T_m 为虚拟机械转矩, D_p 为虚拟阻尼, ω 为虚拟转速, ω_g 为电网角频率。式(4)根据同步电动机的电磁暂态关系,描述了三相PWM整流器的虚拟电磁转矩 T_e 。 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示

向量的内积运算。为简化表达,式(1)—(4)采用了向量方程的形式,其中 $v, e, i, \widetilde{\sin\theta}$ 和 $\widetilde{\cos\theta}$ 分别为

$$v = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$e = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$i = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\widetilde{\sin\theta} = \begin{bmatrix} \sin\theta \\ \sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \\ \sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\widetilde{\cos\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \quad (9)$$

基于以上建立的数学模型,再加入电压闭环和式(10)描述的三相 PWM 整流器的瞬时无功功率 Q ,可以方便地实现三相 PWM 整流器的虚拟同步控制。

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} [(v_b - v_c)i_a + (v_c - v_a)i_b + (v_a - v_b)i_c] \quad (10)$$

图 2 给出了基于虚拟同步机的三相 PWM 整流器的控制框图。

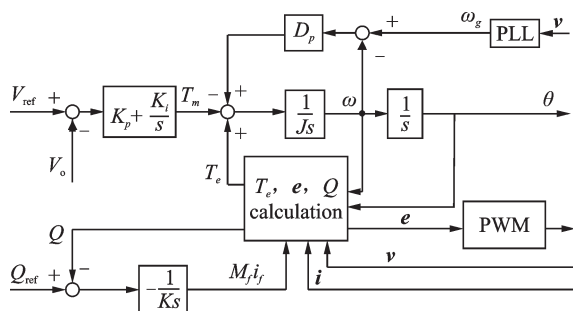


图 2 基于虚拟同步机的三相 PWM 整流器控制框图

Fig.2 Control block of three-phase PWM rectifier based on virtual synchronous machine

图 2 中的控制框图主要由电压环、无功环和一个计算模块组成。首先通过电压闭环得到虚拟机械转矩给定 T_m ,进而通过模拟同步电机的摇摆方程,得到虚拟转速 ω 。对虚拟转速进一步积分,可以得到调制波的相位角。无功环通过模拟同步电

机的励磁特性,得到虚拟励磁磁链 M_{fj} ,其中 K 为无功调节系数。计算模块负责计算控制过程中需要使用的重要参量,包括瞬时无功功率 Q ,虚拟电磁转矩 T_c 和虚拟反电势 e ,虚拟反电势 e 即控制过程中所需要的调制波。对虚拟反电势 e 进行 PWM 调制,便可得到三相 PWM 整流器虚拟同步控制的 PWM 脉冲。

1.2 基于虚拟同步机的三相 PWM 整流器网荷交互功能实现方法

通过类比同步电动机的数学模型,在实现三相 PWM 整流器的虚拟同步控制的同时,与常见的下垂控制相结合,进一步模拟同步电动机的同步机制,根据电网的频率和电压变化,实时改变三相 PWM 整流器吸收的有功功率和无功功率,从而实现友好的网荷交互功能。

1.2.1 频率有功下垂控制

接入电网的电源和负荷是时刻变化的,因此电网的频率也会随着电源和负荷的变化而不断变化。一旦电网的频率变化超出安全范围,将对用电设备造成巨大影响,因此需要对电网频率进行动态调整。目前对于电网频率的调整主要着手于电源侧的调整,通过调速器调节发电机组的转速实现频率调节。类比电源侧的频率调节方法,本文着眼于负荷侧,通过调整负荷侧吸收的有功功率实现对电网的频率支撑。

在电源侧的频率调节中,图 3 所示的发电机组的静态调节特性曲线描述了发电机组的输出功率与系统频率之间的关系。

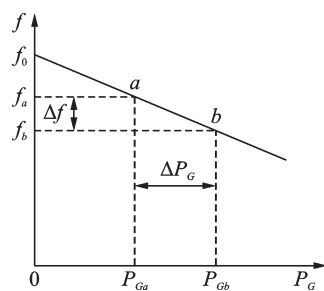


图 3 发电机组的静态调节特性曲线

Fig.3 Curve of generator regulation characteristics

曲线的斜率定义为发电机组的调差系数

$$\delta = -\frac{f_b - f_a}{P_{Gb} - P_{Ga}} = -\frac{\Delta f}{\Delta P_G} \quad (11)$$

式中: (P_{Ga}, f_a) 和 (P_{Gb}, f_b) 为发电机组静态调节特性曲线上的任意两点; ΔP_G 为两点间的输出功率之差; Δf 为两点间的系统频率之差。

对调差系数取倒数,即为发电机组的单位调节功率

$$K_G = \frac{1}{\delta} = -\frac{P_{Gb} - P_{Ga}}{f_b - f_a} = -\frac{\Delta P_G}{\Delta f} \quad (12)$$

单位调节功率直观反映了电力系统的频率上升或下降一个单位量时,发电机组应减少或增加多少有功功率以减小负荷变化对系统频率的影响, K_G 为负值则表明发电机组的有功功率调节方向应与电力系统的频率变化方向相反。

类比发电机组的静态调节特性曲线,可以在基于虚拟同步机的三相PWM整流器中进一步引入频率有功下垂控制单元,从而在负荷侧实现对电网的频率支撑。当电网频率降低时,减少三相PWM整流器吸收的有功功率,减轻电网负担,避免电网频率进一步降低;当电网频率上升时,在三相PWM整流器可承受的范围内增加吸收的有功功率,避免电网频率进一步升高。定义 K_f 为频率有功下垂系数为

$$K_f = \frac{\Delta P}{\Delta \omega} = \frac{\Delta P}{\omega_g - \omega_r} \quad (13)$$

式中: ω_r 为电网参考角频率,选为 100π rad/s (50 Hz); $\Delta\omega$ 为电网实际角频率相对参考角频率的偏移量; ΔP 为在频率有功下垂机制的作用下,三相PWM整流器应改变吸收的有功功率。这里 K_f 为正号,表明基于虚拟同步机的三相PWM整流器的有功功率调节方向应与电网的频率变化方向相同。进一步地,计算直流侧电压下垂指令 V_{droop}

$$V_{\text{droop}} = \sqrt{V_{\text{ref}}^2 + K_f \Delta \omega R} - V_{\text{ref}} \quad (14)$$

通过直流侧电压下垂指令,进行直流电压参考指令的重构,新的直流电压参考值为

$$V_{\text{new}} = V_{\text{ref}} + V_{\text{droop}} = \sqrt{V_{\text{ref}}^2 + K_f \Delta \omega R} \quad (15)$$

引入频率有功下垂机制的三相PWM整流器控制框图如图4所示。

三相PWM整流器工作于频率有功下垂模式时, K_f 可依据实际需求进行设定,如设定电网频率

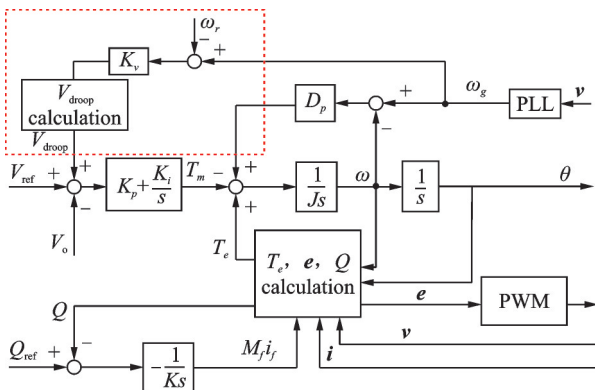


图4 含频率下垂控制的三相PWM整流器控制框图

Fig.4 Control block of three-phase PWM rectifier with frequency droop control

变化1 Hz,三相PWM整流器吸收的有功功率变化为额定值的100%,则 K_f 可设为 $K_f = \frac{P_n}{2\pi}$ 。设定 K_f 为0可关闭频率有功下垂控制功能。

1.2.2 电压无功下垂控制

当接入电网的无功负荷发生变化时,电网的电压也将发生波动。为保证电网电压的波动范围不超过安全界限,需要对电压进行动态调整。通过引入电压无功下垂控制机制,三相PWM整流器可模拟同步电机的励磁特性,根据电网电压的变化实时调整三相PWM整流器输出的无功功率,从而实现了对电网电压的支撑作用。当电网电压下降时,电网中的感性无功负荷过多,此时三相PWM整流器应增加向电网输出感性无功,避免电网电压进一步跌落;当电网电压上升时,三相PWM整流器应增加向电网输出容性无功以避免电网电压进一步抬升。定义 K_v 为电压无功下垂系数为

$$K_v = \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{\Delta Q}{V_g - V_r} \quad (16)$$

式中: V_r 为电网参考电压有效值, V_g 为电网实际电压有效值, ΔV 为电网实际电压相对参考电压的偏移量, ΔQ 为在电压无功下垂机制的作用下,三相PWM整流器应改变输出的无功功率。引入电压无功下垂控制机制的三相PWM整流器控制框图如图5所示。

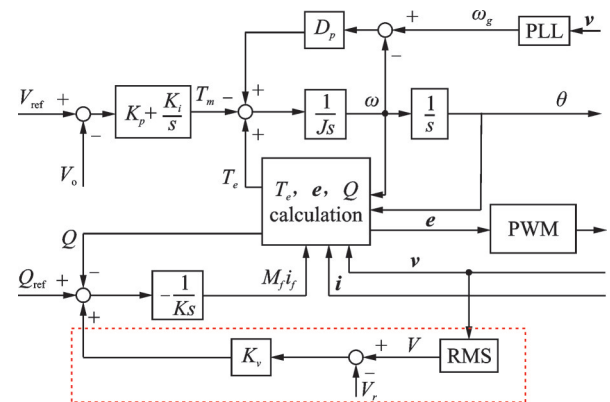


图5 含电压下垂控制的三相PWM整流器控制框图

Fig.5 Control block of three-phase PWM rectifier with voltage droop control

同样地,无须调整三相PWM整流器的虚拟同步核心控制部分,仅通过增加电压无功下垂环节,新的无功功率参考值为

$$Q_{\text{new}} = Q_{\text{ref}} + \Delta Q = Q_{\text{ref}} + K_v \Delta V \quad (17)$$

式中: K_v 可依据实际的电网无功支撑需求进行设定。当三相PWM整流器需以单位功率因数运行时,可将 K_v 和 Q_{ref} 同时设为0。应当指出,当电网电压下降时, $\Delta Q < 0$;当电网电压上升时, $\Delta Q > 0$,

ΔQ 的正负仅表示向电网输出的无功功率为容性或感性而与数值无关。

2 仿真与实验验证

2.1 基于 MATLAB/Simulink 平台的系统仿真

本文在 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建了基于虚拟同步机的三相 PWM 整流器下垂控制模型以验证该方法在促进网荷交互方面的有效性,仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数表
Table 1 Simulation parameters

参数	数值
滤波电感内阻 R_f/Ω	0.135
滤波电感值 L_f/mH	3
直流侧滤波电容 $C/\mu F$	3 300
电网相电压有效值 v/V	220
虚拟转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.12
虚拟阻尼系数 D_p	60
无功调节系数 K	500
PI 调节器比例参数 K_p	0.3
PI 调节器比例参数 K_i	0.5
开关频率 f/kHz	10

为验证频率有功下垂控制功能,设定电网频率下降 0.25 Hz,三相 PWM 整流器从电网吸收的有功功率减少 10 kW,即频率有功下垂系数 $K_f=6.366$ 。仿真中,三相 PWM 整流器并网后,初始输出有功功率 50 kW,无功功率 0 kVar,1~2 s 电网频率降低 0.25 Hz,2 s 后电网频率恢复正常。图 6 所示为输出有功功率和无功功率仿真波形,图 7 所示为电网频率与虚拟同步机的虚拟频率仿真波形。由图 6 可知,当电网频率正常时,三相 PWM 整流器工作于设定状态下,当电网频率跌落时,在频率有功下垂机制的作用下,三相 PWM 整流器可实时

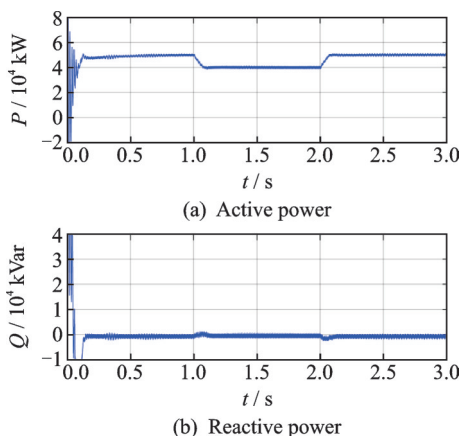


图 6 三相 PWM 整流器输出有功功率、无功功率仿真结果
Fig.6 Simulation results of output power of the three-phase PWM rectifier

调节从电网吸收的有功功率,实现对电网的频率支撑。在有功功率调节过程中,无功功率基本保持不变。由图 7 可知,基于虚拟同步机的三相 PWM 整

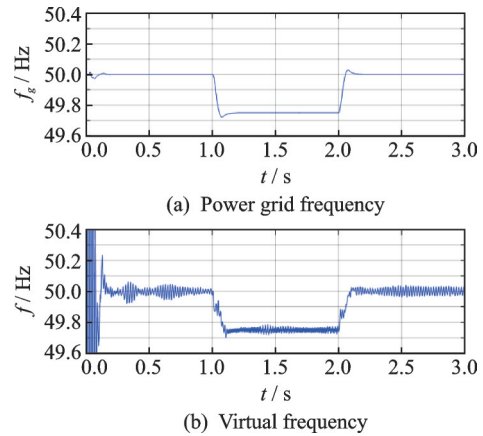


图 7 电网频率和虚拟频率仿真结果
Fig.7 Simulation results of grid frequency and virtual frequency

流器可充分模拟同步电机的同步机制,较好地追踪电网频率,跟踪误差不超过 0.05 Hz。

为验证电压无功下垂功能,设定电网电压有效值降低 10 V,三相 PWM 整流器向电网输出的感性无功功率增加 10 kVar,即电压无功下垂系数 $K_v=1000$ 。仿真中,三相 PWM 整流器并网后,初始的工作状态为输出有功功率 50 kW,无功功率 0 kVar,1~2 s 电网电压降低 10 V,2 s 后电网电压恢复正常。图 8 所示为电网电压和三相 PWM 整流器输出的有功功率、无功功率的仿真波形。当电

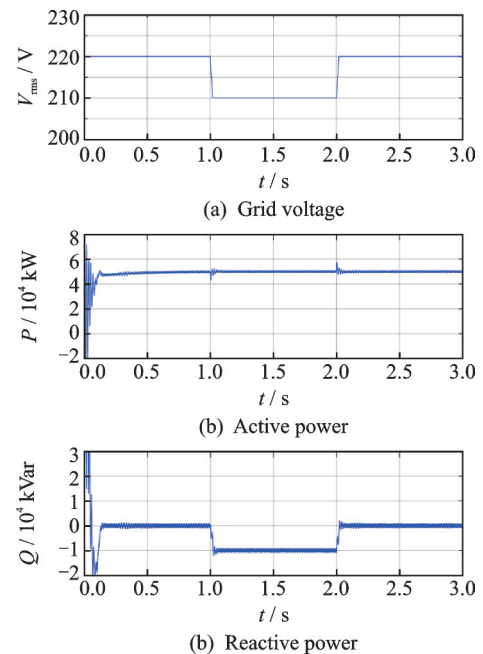


图 8 电网电压有效值及三相 PWM 整流器输出有功功率、无功功率仿真结果
Fig.8 Simulation results of grid voltage and output power of three-phase PWM rectifier

网电压正常时,三相PWM整流器工作于设定状态下,当电网电压跌落时,在电压无功下垂机制的作用下,三相PWM整流器将增加向电网输出感性无功功率,实现对电网的电压支撑作用。同时,在无功功率调节过程中,有功功率基本保持不变。

2.2 基于DSP+FPGA数字控制平台的系统实验

为充分验证基于虚拟同步机的三相PWM整流器下垂控制方法在网荷交互中的有效性,搭建了实验平台进行进一步验证。实验中采用的初始参数与表1中的仿真参数一致。

由于电网的实际频率和电压有效值难以改变,首先以在线修改控制策略中的电网参考频率和参考电压来模拟实际电网频率和电压的波动。实验中,三相PWM整流器原工作状态为输出有功功率50 kW,无功功率0 kVar,与仿真情况一致,图9给出了稳态实验波形。由实验波形可知,电流质量好,与电压相位对应准确。

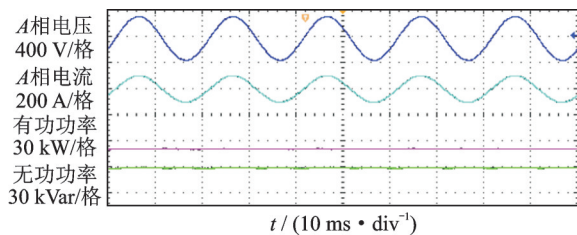
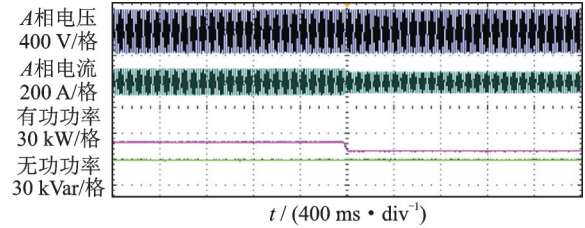


图9 三相PWM整流器稳态实验波形图

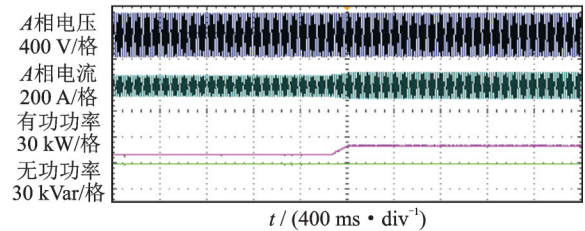
Fig.9 Steady-state experimental results of three-phase PWM rectifier

在频率有功下垂实验中,设定频率有功下垂系数 $K_f = 6.366$ 。修改电网参考频率,使其升高0.25 Hz,等效模拟实际电网频率下降0.25 Hz,此时三相PWM整流器减少输出10 kW有功功率。当电网参考频率恢复正常后,三相PWM整流器又重新恢复正常工作状态。有功功率的调节过程快速准确,响应时间约为100 ms,且有功功率的调节期间,无功功率基本保持不变。图10所示为相应的实验波形。

在电压无功下垂实验中,设定电压无功下垂系数 $K_v = 1000$ 。改变电网参考电压,使其升高10 V,等效于实际电网电压跌落10 V,此时三相PWM整流器增加向电网输出10 kVar感性无功以实现对电网的电压支撑。当电网参考电压恢复正常后,三相PWM整流器重新恢复正常工作状态。三相PWM整流器在对电网进行无功支撑时,无功功率的调节迅速、精准,响应时间约为50 ms,无功功率调节期间,有功功率稍有波动,但只需约150 ms的调节时间,三相PWM整流器即可进入稳态。图11所示为相应的实验波形。



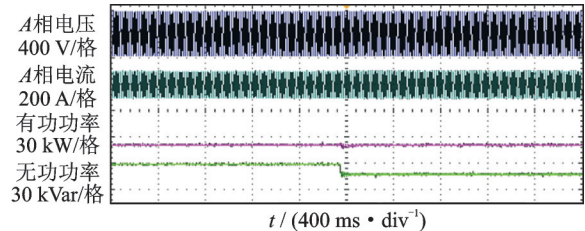
(a) Experimental waveforms of simulated grid frequency drop



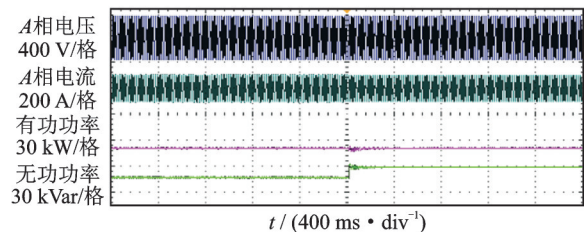
(b) Experimental waveforms of simulated grid frequency recovery

图10 模拟电网频率变化的频率有功下垂实验结果

Fig.10 Experimental results of frequency droop control by simulating change of grid frequency



(a) Experimental waveforms of simulated grid voltage drop



(b) Experimental waveforms of simulated grid frequency recovery

图11 模拟电网电压变化的电压无功下垂实验结果

Fig.11 Experimental results of voltage droop control by simulating change of grid voltage

另外,使用三相可编程交流电源进行下垂控制实验,此时三相可编程交流电源代替电网作为三相PWM整流器的交流输入电压。受电源功率限制,输出电压设置为110 V,三相PWM整流器初始工作状态为5 kW,0 kVar。在频率有功下垂实验中,设定频率有功下垂系数 $K_f = 1591$,即输入交流电压频率变化0.25 Hz,三相PWM整流器输出有功功率变化2.5 kW。使用交流电源连续阶跃改变输入电压的频率,在频率有功下垂机制的作用下,三相PWM整流器不断改变输出有功功率以实现网荷交互。在此过程中,三相PWM整流器的虚拟同步频率始终能良好地跟随输入电压频率。图12给出了相应的实验波形。

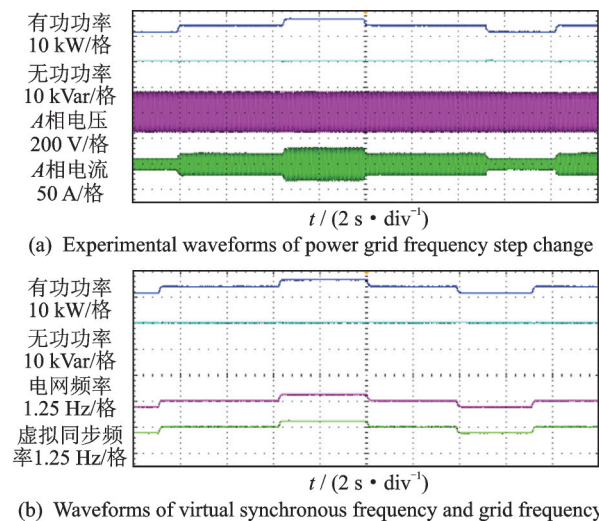


图12 使用三相可编程交流电源的频率有功下垂实验结果

Fig.12 Experimental results of frequency droop control with three-phase programmable AC power supply

在电压无功下垂实验中,设定电压无功下垂系数 $K_v = 454$,即当输入交流电压有效值变化10%时,三相PWM整流器输出无功功率变化5 kVar。使用交流电源连续阶跃改变输入电压的有效值,在电压无功下垂机制的作用下,三相PWM整流器能够不断调节输出无功功率以实现网荷交互。图13给出了相应的实验波形。当电网电压跌落时,整流器向电网输出感性无功;当电网电压上升时,整流器向电网输出容性无功。在电压无功下垂控制机制的调节下,三相PWM整流器与电网侧实现了良好地交互。

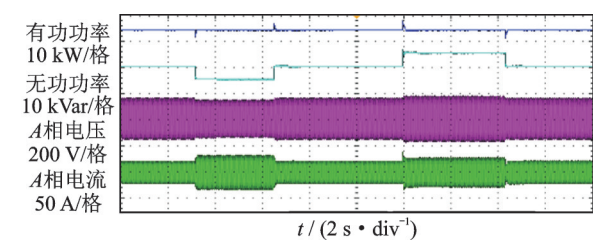


图13 使用三相可编程交流电源的电压无功下垂实验结果

Fig.13 Experimental results of voltage droop control with three-phase programmable AC power supply

3 结 论

本文在三相PWM整流器中运用虚拟同步机技术,进一步挖掘其下垂控制功能,通过仿真和实验验证了三相PWM整流器与电网的友好交互控制,得到如下结论:

(1)采用本文方法后,三相PWM整流器作为电网负荷,能够在电网发生频率和电压波动时,合理

调节有功功率和无功功率的输出,快速地对电网的支撑作用。实验结果表明,当电网频率发生波动时,在频率有功下垂机制的作用下,三相PWM整流器有功功率调节的响应时间约为100 ms,在此期间,无功功率基本保持不变;当电网电压发生波动时,在电压无功下垂机制的作用下,无功功率调节的响应时间约为50 ms,在此期间,有功功率稍有波动,但只需约150 ms的调节时间,三相整流器即可迅速进入稳态。

(2)通过调节有功和无功下垂系数 K_f 和 K_v ,可灵活调整PWM整流器对电网的有功功率和无功功率的支撑能力。进一步地,可通过对 K_f 和 K_v 的自适应调参研究,提高负荷对电网的自适应网荷交互能力。

(3)采用本文方法的三相PWM整流器可作为新能源与智能电网的接口装置,为智能电网的网荷友好交互建设提供新的思路。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委国家能源局关于促进智能电网发展的指导意见 [EB/OL]. (2015-07-06) [2019-10-05]. http://www.nea.gov.cn/2015-07/07/c_134388049.htm.
- [2] 张兴. PWM整流器及其控制策略的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.
ZHANG Xing. Study on the PWM rectifier and its control strategies[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2003.
- [3] 孙孝峰, 吕庆秋. 低压微电网逆变器频率电压协调控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 77-84.
SUN Xiaofeng, LYU Qingqiu. Improved PV control of grid-connected inverter in low voltage micro-grid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 77-84.
- [4] 鲍薇, 胡学浩, 李光辉, 等. 提高负荷功率均分和电能质量的微电网分层控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 106-113.
BAO Wei, HU Xuehao, LI Guanghui, et al. Hierarchical control of microgrid to improve power sharing and power quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 106-113.
- [5] 何晨颖, 耿天翔, 许晓慧, 等. 利用电动汽车可调度容量辅助电网调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 134-140.
HE Chenying, GENG Tianxiang, XU Xiaohui, et al. Research on grid frequency regulation using schedulable capacity of electric vehicles[J]. Power Systems Protection and Control, 2015, 43(22): 134-140.
- [6] MA Z, ZHONG Q, YAN J. Synchronverter-based

- control strategies for three-phase PWM rectifiers[C]// Proceedings of the 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Singapore: IEEE, 2012: 225-230.
- [7] 王雪瑞,曹鑫,郝振洋.基于虚拟同步机的三相PWM整流器直接功率控制[J].电力电子技术,2019,53(6): 49-52.
WANG Xuerui, CAO Xin, HAO Zhenyang. Direct power control of three-phase PWM rectifier based on virtual synchronous machine [J]. Power Electronics, 2019, 53(6): 49-52.
- [8] 高丙团,夏超鹏,张磊,等.基于虚拟同步电机技术的VSC-HVDC整流侧建模及参数设计[J].中国电机工程学报,2017,37(2): 534-544.
GAO Bingtuan, XIA Chaopeng, ZHANG Lei, et al. Modeling and parameters design for rectifier side of VSC-HVDC based on virtual synchronous machine technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 534-544.
- [9] 缪惠宇,郑建勇,顾盼盼,等.虚拟同步整流器的不平衡电压改进控制[J].电力工程技术,2017,36(5): 2-7.
MIAO Huiyu, ZHENG Jianyong, GU Panpan, et al. Improved control of virtual synchronous rectifier with unbalanced voltage[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5): 2-7.
- [10] 缪惠宇,梅飞,张宸宇,等.基于虚拟阻抗的虚拟同步整流器三相不平衡控制策略[J].电工技术学报,2019,34(17): 3622-3630.
MIAO Huiyu, MEI Fei, ZHANG Chenyu, et al. Three phase unbalanced control strategy for virtual synchronous rectifier based on virtual impedance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(17): 3622-3630.
- [11] 刘其辉,逯胜建.参与微电网调频的电动汽车虚拟同步机充放电控制策略[J].电力系统自动化,2018,42(9): 171-179.
LIU Qihui, LU Shengjian. Charging and discharging control strategy based on virtual synchronous machine for electrical vehicles participating in frequency regula-
- tion of microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 171-179.
- [12] 刘东奇,钟庆昌,王耀南,等.基于同步逆变器的电动汽车V2G智能充放电控制技术[J].中国电机工程学报,2017,37(2): 544-556.
LIU Dongqi, ZHONG Qingchang, WANG Yaonan, et al. Synchronverter-based V2G smart charging and discharging control strategy for electric vehicles [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 544-556.
- [13] 刘海涛,吕志鹏,吴争,等.一种自主降额运行的负荷虚拟同步机控制方法[J].可再生能源,2019,37(8): 1179-1184.
LIU Haitao, LYU Zhipeng, WU Zheng, et al. Load virtual synchronous machine control method for autonomous derating operation [J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(8): 1179-1184.
- [14] 高晓帆,田书,常永强.一种新的大型光伏并网系统稳定性分析方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(1): 26-32.
GAO Xiaofan, TIAN Shu, CHANG Yongqiang. A new method for stability analysis of large-scale photovoltaic grid-connected systems [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 26-32.
- [15] 陈佳瑜,李征,张骞,等.基于虚拟同步发电机控制的分布式发电系统的阻抗边界分析[J].电力系统保护与控制,2019,47(21): 30-40.
CHEN Jiayu, LI Zheng, ZHANG Qian, et al. Impedance boundary analysis of distributed generation system based on virtual synchronous generator control [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 30-40.
- [16] 谢民,王同文,徐靖东,等.分布式电源对配网继电保护影响及综合改进保护方案[J].电力系统保护与控制,2019,47(19): 78-84.
XIE Min, WANG Tongwen, XU Jingdong, et al. Impact of distributed power on relay protection in distribution networks and comprehensive improvement protection schemes [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 78-84.

(编辑:孙静)