

微电网弱约束容性等效输出阻抗逆变器控制方法

曹一家¹, 郑玉芳¹, 于晶荣², 段娟凤¹, 章文远¹

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 绝大多数逆变器在低频时为感性输出阻抗。提出一种结合电感-电容-电感(LCCL)滤波器配置、采样电流选取以及虚拟阻抗控制器设计的控制策略, 其为逆变微源等效输出阻抗建模提供一个可控自由度, 使逆变器等效输出阻抗为容性阻抗。针对所提的 LCCL 滤波器, 选取裂解点电流为采样电流, 能够有效降低电流控制系统的阶次。同时, 通过对 LCCL 滤波器电感、电容的配置, 获得合理的虚拟阻抗控制器, 使得逆变器的等效输出阻抗为纯容性。最后, 对比仿真实验验证了所提控制方案的有效性。

关键词: 微电网; 逆变器; 容性逆变器; LCCL 滤波器; 虚拟阻抗

中图分类号: TM 721; TM 464

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.02.001

0 引言

近年来, 分布式发电作为优化能源结构和实现节能减排的关键技术之一, 受到了世界各国的广泛关注。然而, 高渗透率的分布式电源, 特别是光伏、风电等具有随机性和间歇性特点的分布式电源, 大量接入住宅家庭、办公楼宇等配电网末端时, 会造成配电网和分布式电源自身稳定性和可靠性等方面的一系列严重问题。

微电网技术能够实现分布式电源与大电网的协调和互为支撑, 是发挥分布式发电系统技术优势的最有效方式。由于电网络承载更多的是阻感性负载, 目前, 大多数文献针对阻性和感性逆变器控制策略进行研究, 并取得了一定的成果。采用虚拟阻抗法^[1-6]或者基于电感电流反馈方式的阻抗控制方法^[7], 能够保证逆变器在工频附近的输出阻抗特性。但是, 当微电网受到大量的非线性阻感性负荷冲击时, 阻性或感性逆变电源会引起逆变器输出电压的波动, 不利于微电网电压的稳定。

为了解决这一问题, 进一步提出将逆变器等效输出阻抗设计成容性, 使其呈无功补偿器的倾斜特性, 改善微网的电压偏移^[8-12]。在文献[11]中, 为了使逆变器等效输出阻抗为容性, 设计了复杂的控制器且忽略了滤波电容对等效阻抗的影响。文献[9]中, 采用单阻抗环控制, 但是逆变器等效输出阻抗在低频时近似为虚拟电容, 高频时近似为滤波电容, 并不能在一定带宽下保持逆变器固定的容性特性。

本文针对文献[9, 11]中存在的问题, 在虚拟阻抗控制策略研究的基础上, 提出了一种考虑逆变器输出电路、采样点选取和控制器等影响阻抗控制的

软硬件关键环节的容性逆变器设计方法。该方法可有效弱化目前容性逆变器设计的约束条件, 所设计的容性逆变器能有效改善微电网电压的稳定。

1 传统的逆变器输出阻抗双环控制

图 1 为微网逆变电源并联系统等效原理图。 U_1 、 U_2 和 U_o 分别为逆变电源 1 的输出电压、逆变电源 2 的输出电压和交流母线电压; δ_1 、 δ_2 和 δ_o 分别为逆变电源 1 输出电压相位、逆变电源 2 输出电压相位和公共点电压的相位; 设逆变电源的等效输出阻抗及其相位分别为 $Z_i (i=1, 2)$ 和 $\theta_i (i=1, 2)$ 。

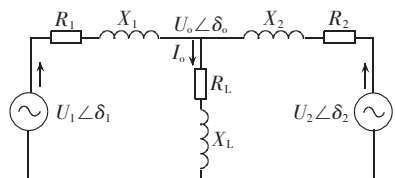


图 1 微源并联系统简化原理图

Fig.1 Simplified schematic diagram of system with parallel micro-sources

输出功率^[7, 13-14]表达式为:

$$\begin{cases} P_i = [U_i U_o \cos(\theta_i - \delta_i) - U_o^2 \cos \theta_i] / Z_i \\ Q_i = [U_i U_o \sin(\theta_i - \delta_i) - U_o^2 \sin \theta_i] / Z_i \end{cases} \quad (1)$$

下垂控制方程如表 1 所示, 其中 m_i 、 n_i 为下垂系数, ω^* 、 U^* 分别为参考电压频率和参考电压幅值。

表 1 下垂控制方程

Table 1 Droop control equations

θ_i	下垂控制方程
90°	$\omega_i = \omega^* - m_i P_i, \quad U_i = U^* - n_i Q_i$
0°	$\omega_i = \omega^* + m_i Q_i, \quad U_i = U^* - n_i P_i$
-90°	$\omega_i = \omega^* + m_i P_i, \quad U_i = U^* + n_i Q_i$

感性逆变器与容性逆变器具有相反的下垂曲线特性, 即当微网负荷功率需求急剧增加时, 感性逆变器输出电压会出现暂降现象, 而容性逆变器恰恰相反。容性逆变器在微网中有助于平衡无功, 从而改善

收稿日期: 2015-09-11; 修回日期: 2015-12-30

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(61233008); 国际科技合作计划项目(2012DFA70580)

Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China(61233008) and the International Scientific Cooperation Program of China(2012DFA70580)

系,设 G_u 为比例控制器, G_v 相当于积分控制器。由图 4 可得系统的开环传递函数为:

$$L(s)=\frac{G_u(s)k_{pwm}}{LCs^2+rCs+[(1-\beta)G_u(s)k_{pwm}+1]/\beta}$$
 (7)

图 5 为系统典型奈奎斯特图,其中, $A=(\beta-1)\div(1-\beta)$,系统的稳定性主要取决于 G_u 控制器和 β 的取值。当 $G_u>A$ 时,系统开环传递函数的奈奎斯特轨迹沿逆时针方向没有包围实轴上的点 $(-1,j0)$,且由式 (7)可知,系统开环传递函数在 S 复平面的虚轴上既无零点也无极点。由奈奎斯特稳定判据得,当 $G_u>A$ 时系统稳定。

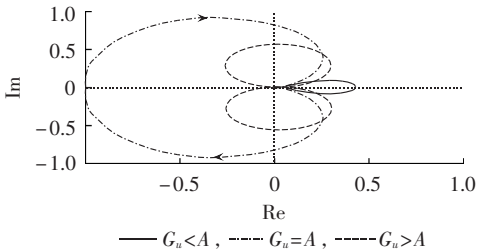


图 5 系统典型奈奎斯特图
Fig.5 Typical Nyquist plot of system

3 仿真结果及分析

本文采用 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建单相逆变微源仿真模型, $L=0.585\text{ mH}$, $C=1\text{ 000 }\mu\text{F}$, $\beta=0.1$, $G_u=-0.9$ 。逆变器的额定视在功率为 $6.5\text{ kV}\cdot\text{A}$, 逆变电源的直流母线电压为 350 V (由直流稳压电源提供), 额定输出电压为 230 V , 额定输出电流峰值为 40 A , 系统频率为 50 Hz , 开关频率为 10 kHz 。负载阻抗为 $R_L=30\text{ }\Omega$ 和 $Z_L=(20+j22)\text{ }\Omega$ 。

本文采用文献[8]中所提出的鲁棒下垂控制, 取 $K_e=10$, $n_i=6.3\times10^{-4}$, $m_i=3.4\times10^{-5}$, $U^*=230\text{ V}$, $\omega^*=100\pi\text{ rad/s}$ 。

本文共搭建 2 组仿真实验模型。第 1 组实验: 同等硬件条件下, 不同等效输出阻抗逆变微源独立运行, 负载阻抗为 R_L , 运行时长为 5 s , 2 s 时并联负载 Z_L , 4 s 时断开 Z_L 。实验结果如图 6 所示, (a)—(d) 各图中从上到下分别对应容性逆变器、阻性逆变器和感性逆变器。从图 6 可以看出, 当并入或者切断额外负荷 Z_L 时, 容性、阻性和感性逆变器均能快速地响应并达到稳定状态, 且容性逆变器响应速度最快。对比各逆变器的输出电压的有效值, 在系统负荷变动下, 感性和阻性逆变器的输出电压有效值波动接近 20 V , 而容性逆变器只波动 10 V 左右。可见, 相比阻性和感性逆变器, 在系统负荷变动下, 容性逆变器的电压波动更小, 响应速度更快。

第 2 组实验: 2 台逆变器并联运行, 负载阻抗为 R_L 和 Z_L 并联, 并在第 2 台逆变器增加线路阻抗 $Z_{line}=(0.2+j0.02)\text{ }\Omega$, 运行时长为 5 s , 最初第 1 台逆变器

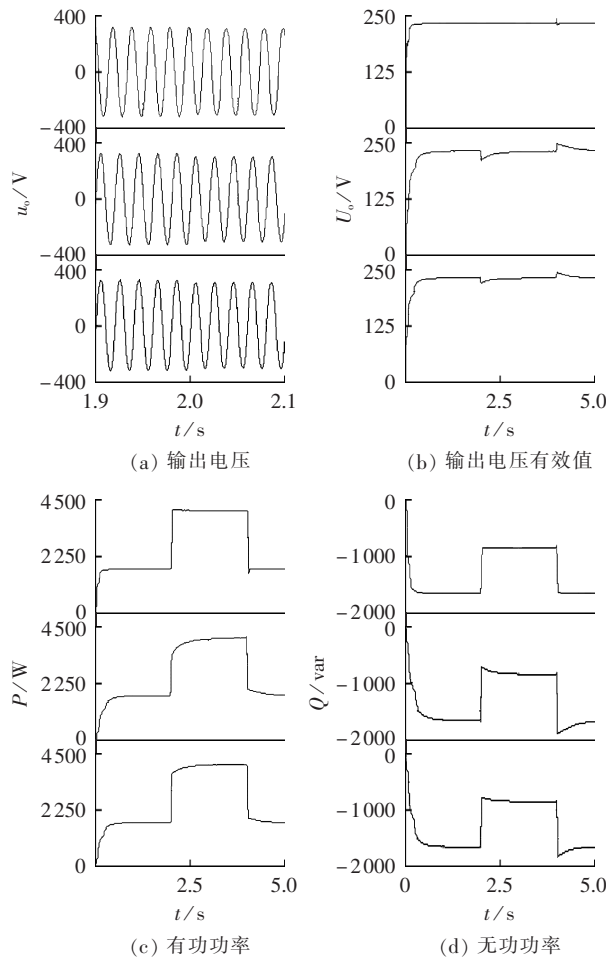


图 6 第 1 组仿真波形
Fig.6 Simulative waveforms of test 1

独立运行, 2 s 时并联第 2 台逆变器, 4 s 时将其切断。2 台逆变器的并联环流 $i_h=(i_1-i_2)/2$ (i_1 和 i_2 为各逆变器的输出电流)。图 7 和图 8 给出了分别

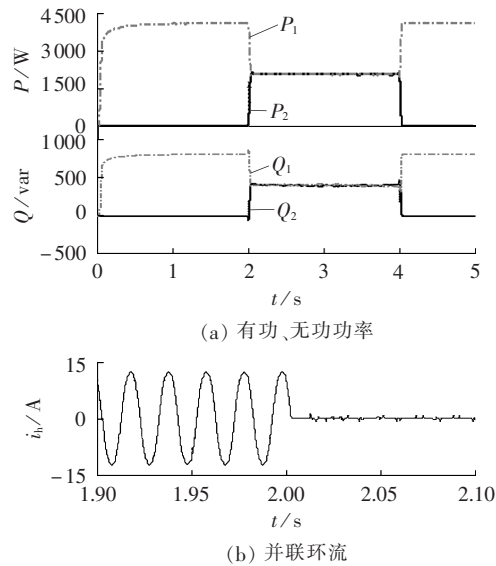


图 7 2 台容性逆变器并联仿真波形
Fig.7 Simulative waveforms of two parallel capacitive inverters

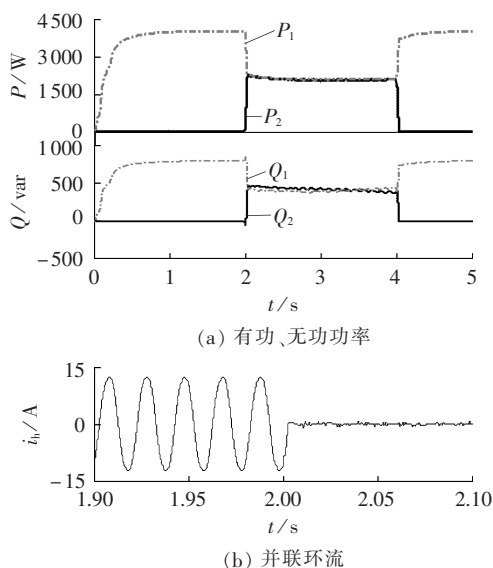


图8 2台感性逆变器并联仿真波形

Fig.8 Simulative waveforms of two parallel inductive inverters

用2台容性逆变器和2台感性逆变器并联的仿真结果。从仿真结果可以看出,对比感性逆变器并联系统,容性逆变器并联系统具有更好的功率均分特性和更快的动态响应速度。

4 结语

本文提出一种综合滤波电路配置、采样电流选取以及阻抗控制器设计的容性逆变器的控制策略。该方法能为逆变器输出阻抗模型提供一个可控自由度,弱化约束条件,使得逆变器输出阻抗在一定频带下保持容性特性。

设计的2组仿真实验证明,在同等硬件条件下,对比感性和阻性逆变器,本文所提出的容性逆变器能有效改善微电网电压质量,具备较快的响应速度和较强的电压稳定能力。

参考文献:

- [1] GUERRERO J M, VICUNNA L G, MATAS J, et al. Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(4): 1126-1135.
- [2] GUERRERO J M, MATAS J, VICUNNA L G, et al. Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(2): 994-1004.
- [3] HE J, LI Y W. Analysis, design, and implementation of virtual impedance for power electronics interfaced distributed generation[J]. IEEE Transactions on Industrial Application, 2011, 47(6): 2525-2538.
- [4] 关雅娟, 邹伟扬, 郭小强. 微电网中三相逆变器孤岛运行控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(33): 52-60.

for three-phase inverters dominated microgrid in autonomous operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(33): 52-60.

- [5] 张宸宇, 梅军, 郑建勇, 等. 一种适用于低压微电网的改进型下垂控制器[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 53-59.
- ZHANG Chenyu, MEI Jun, ZHENG Jianyong, et al. Improved droop controller for low-voltage micro-grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 53-59.
- [6] 胡雯, 孙云莲. 逆变型微电源孤岛模式下的控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7): 107-113.
- HU Wen, SUN Yunlian. Control strategy of inverter-based micro-sources in island mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 107-113.
- [7] 吕志鹏, 罗安. 不同容量微源逆变器并联功率鲁棒性控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(12): 35-42.
- LÜ Zhipeng, LUO An. Robust power control of paralleled micro-source inverters with different power ratings[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(12): 35-42.
- [8] ZHONG Q C, ZENG Y. Can the output impedance of an inverter be designed capacitive? [C]//37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Melbourne, Australia: IEEE, 2011: 1220-1225.
- [9] ZHONG Q C, ZENG Y. Control of inverters via a virtual capacitor to achieve capacitive output impedance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(10): 5568-5578.
- [10] 汪英, 张庆海. 容性等效输出阻抗的逆变器并联控制研究[J]. 电源技术, 2014, 38(11): 2188-2191.
- WANG Ying, ZHANG Qinghai. Research of parallel control for inverters with capacitive equivalent output impedance[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2014, 38(11): 2188-2191.
- [11] 陈燕东, 罗安, 王文, 等. 阻容性逆变器及其并联功率精确分配方法[C]//第七届中国高校电力电子与电力传动学会年会 (SPEED). 上海, 中国: [出版者不详], 2013: 150-156.
- CHEN Yandong, LUO An, WANG Wen, et al. Rapid reactive power control method for parallel inverters using resistive-capacitive output impedance[C]//7th Symposium on Power Electronics & Electrical Drives. Shanghai, China: [s.n.], 2013: 150-156.
- [12] SAVAGHEBI M, JALILIAN A, VASQUEZ J C, et al. Secondary control scheme for voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2): 797-807.
- [13] YAO W, CHEN M, MATAS J, et al. Design and analysis of the droop control method for parallel inverters considering the impact of the complex impedance on the power sharing[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(2): 576-587.
- [14] 王成山, 高菲, 李鹏, 等. 低压微网控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 2-8.
- WANG Chengshan, GAO Fei, LI Peng, et al. Control strategy research on low voltage microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 2-8.
- [15] 陈燕东, 罗安, 龙际根, 等. 阻性逆变器并联环流分析及鲁棒性下垂多环控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 18-29.
- CHEN Yandong, LUO An, LONG Jigen, et al. Circulation current analysis and robust droop multiple loop control for parallel inverters using resistive output impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 18-29.

(下转第10页 continued on page 10)

Analysis of MMC power interface stability and improvement measures

LI Guoqing¹, GU Huaiguang¹, WU Xueguang², LIU Dong²

(1. Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. State Grid Smart Grid Research Institute, SGCC, Beijing 102211, China)

Abstract: In order to improve the power interface stability of digital-analog hybrid simulation for MMC (Modular Multilevel Converter), the Routh stability criterion is adopted to derive the necessary conditions of stable interface for the hybrid simulation system based on the interface algorithm of voltage-type ITM (Ideal Transformer Model). A digital technology is proposed to compensate the time delay induced by the interface devices, such as the power amplifier. The equivalent model of MMC in the STATCOM mode is established and the PSCAD simulation software is applied to realize the digital-analog hybrid simulation based on the voltage-type ITM for the 401-level MMC. Simulative results show that, the application of Routh stability criterion as the condition of stable power interface in the digital-analog hybrid simulation is correct and the proposed digital technology for compensating the time delay is effective.

Key words: MMC; hybrid simulation; interface algorithm; Routh criterion; time-delay compensation; stability

(上接第4页 continued from page 4)

[16] 吕志鹏, 刘海涛, 苏剑, 等. 可改善微网电压调整的容性等效输出阻抗逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(9): 1-8.

LÜ Zhipeng, LIU Haitao, SU Jian, et al. Micro-source inverters with capacitive equivalent output impedance for improving micro-grid voltages[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(9): 1-8.

[17] SHEN G Q, XU D H, CAO L P, et al. An improved control strategy for grid-connected voltage source inverter with an LCL filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(4): 1899-1906.

作者简介:



曹一家

曹一家(1969—), 男, 湖南益阳人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 从事电力系统稳定与控制、电力市场与信息技术(IT)、复杂系统的智能控制方面的研究 (E-mail: yjcao@hnu.edu.cn);

郑玉芳(1990—), 女, 福建泉州人, 硕士研究生, 从事新能源发电技术、微电网技术方面的研究 (E-mail: zyfcusu@163.com)。

Weakly-constrained control of microgrid inverter with capacitive equivalent output impedance

CAO Yijia¹, ZHENG Yufang¹, YU Jingrong², DUAN Juanfeng¹, ZHANG Wenyuan¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: As most inverters have the inductive output impedance at low frequencies, a strategy of inverter control, including the LCCL filter configuration, sampling current selection and virtual impedance controller design, is proposed to make its output impedance capacitive by providing a controllable degree of freedom for its output impedance model, which splits the capacitor of LCL filter into two parts and takes the current flowing between them as the sampling current to effectively reduce the order of current control system. The inductors and capacitors of LCCL filter are properly configured to achieve a reasonable virtual impedance controller for making the inverter equivalent output impedance capacitive. The effectiveness of the proposed control strategy is verified by the simulative results.

Key words: microgrid; electric inverters; capacitive inverter; LCCL filter; virtual impedance