

DOI: 10.7667/PSPC160427

阻感性负载下单相离网逆变器稳定性分析与控制

丁凯¹, 陈章妍², 黄萌², 孙建军², 鲁莽³, 舒欣¹, 陈堃¹, 胡羽川¹

(1. 国网湖北省电力公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430077; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 3. 国网孝感供电公司, 湖北 孝感 432000)

摘要: 独立运行的单相全桥逆变器通常工作于电压源模式, 将直流源侧能量传送至交流负载侧。由于负载的多样性, 系统具有复杂的动态特性。阻感性负载(如电机、空调等)连接至逆变器交流输出时, 系统出现振荡失稳现象。首先, 建立单相逆变器系统数学模型, 并结合比例-谐振(PR)控制器特征对模型进行线性化处理, 得出了单相逆变器系统的输出阻抗表达。其次, 采用阻抗比判据方法, 绘制阻抗比的奈奎斯特曲线, 确定了系统不稳定运行的拒绝域, 从而解析性地得到了感性负载、控制系数、滤波电容等对拒绝域的影响。结果表明, 在实际运行参数范围内, 随逆变器的比例系数、滤波电感的减小, 或者滤波电容、滤波电感串联电阻的增大, 阻感性负载下的单相逆变器趋于稳定, 可得到稳定的输出电压波形。

关键词: 单相全桥逆变器; 阻感性负载; 比例-谐振控制; 稳定判据; 拒绝域

Stability analysis and control of single-phase off-grid inverters with inductive loads

DING Kai¹, CHEN Zhangyan², HUANG Meng², SUN Jianjun², LU Mang³, SHU Xin¹, CHEN Kun¹, HU Yuchuan¹

(1. State Grid Hubei Electric Power Research Institute, Wuhan 430077, China; 2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. State Grid Xiaogan Power Supply Company, Xiaogan 432000, China)

Abstract: The standalone single-phase H-bridge inverter usually works in voltage-mode control, converting DC power to AC local loads. Due to the diversity of loads, the inverter may have rich dynamic behaviors. Oscillation instability occurs when the inductive loads (e.g., electric machine and air conditioner) are connected to AC output of the inverter. Firstly, a mathematical model is established for the single-phase inverter system, and the linearization is processed by taking into account the characteristics of proportional-resonant (PR) controller. Then the inverter output impedance can be derived. Secondly, according to the Nyquist criterion, the impedance ratio curves are plotted to determine the forbidden region of operation. The forbidden region is studied in an analytical way by varying the inductive load, control factor and filter capacitor. The results show that single-phase inverters with inductive loads can achieve stability by the reduction of proportional coefficient and filter inductance, or increase of filter capacitance and series resistor filter inductance in practical parameter ranges.

This work is supported by Youth Science Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 51507118), Hubei Science and Technology Support Program (No. 2015BAA109), and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 410500078).

Key words: single-phase H-bridge inverter; resistive-inductive load; PR control; stability criterion; forbidden region

0 引言

独立混合电源系统通常为重要负荷提供可靠电能或作为偏远地区供电系统。典型混合动力系统包

括常规发电设备、储能电池和区域清洁可再生能源。近年来, 光伏、燃料电池等成为研究热点。光伏电池组件及各类可再生能源均通过升压、降压或双向变换电路连接至直流母线。生产生活中的大部分用电设备消纳交流电能, 因此逆变环节成为各类混合电源系统的重要部分。电压型控制的单相全桥逆变器在独立供电设备中应用广泛, 其逆变器的非线性动态特性较为复杂。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51507118); 湖北省科技支撑计划(2015BAA109); 中央高校基本科研业务费专项资金(410500078)

为了对逆变器系统的稳定性进行设计,可以参照直流变换器系统使用阻抗匹配方法。阻抗匹配方法首先由 Middlebrook 提出,通过计算电源的输入输出阻抗评估系统稳定性^[1]。该阻抗准则过于保守,要求源变换器的输出阻抗在全频率范围内都要远小于负载变换器的输入阻抗,在实际应用中难以实现。因此,又有学者提出改善的阻抗比禁止区,只要源、负载变换器的阻抗比在所给禁止区域以外,系统即可达到一定相角和增益裕量下的稳定^[2-5]。

文献[6-8]对连续导电模式下 Buck 型 DC-DC 变换器输出阻抗的小信号模型、影响因素及优化设计方法进行研究,为制定分布式电源系统中变换器的阻抗标准提供了参考依据。然而,DC-AC 逆变器的分析建模与 DC-DC 变换器存在差异^[9-10]。文献[11]将源于 DC-DC 变换器的状态空间平均法拓展用于 DC-AC 逆变器的分析建模,仅由不连续的统一状态方程得到状态空间平均模型方程,无法从中获取系统输出阻抗信息。文献[12]针对小功率单相光伏并网逆变器进行建模及控制,通过推导各控制环节的传递函数模型提出控制器优化设计。因此,对于单相逆变器系统而言,其阻抗建模无法直接套用直流系统的方法,需进一步考虑控制器特征建立有效的阻抗模型。

针对逆变器的稳定性,有较多文献讨论了三相系统的阻抗比判据及其应用。文献[13]基于阻抗的级联稳定判据,研究锁相环对 LCL 型并网逆变器稳定性的影响,主要给出锁相环参数的设计方法。文献[14]通过设计虚拟复阻抗参数值使逆变器等效输出阻抗在工频处呈阻性,主要分析等效输出阻抗参数与环流关系,其对系统稳定性影响有待进一步研究。文献[15]在分析了孤岛运行条件下微网系统及其底层分布式发电单元特点的基础上,采用阻抗匹配关系对分布式发电单元的输出阻抗进行优化设计以提高系统的稳定性。文献[16]针对储能逆变器离网模式下的运行工况,仿真分析了三相逆变器系统输出阻抗变化对系统稳定性带来的影响。但是,三相系统的结论不能完全适用于单相系统,特别是阻感性负载将使系统稳定性进一步恶化,需要详细考察系统参数对稳定性的影响。

本文针对阻感性负载接入问题,基于阻抗比判据划分稳定区域和拒绝域,分析独立运行工况下逆变系统的动态稳定性。从实际应用角度出发,建立了基于比例谐振控制的电压源型逆变器的系统传递函数和输出阻抗模型。根据所建模型进行仿真分析

和实验研究,得到控制参数对系统稳定性的调节作用,为控制参数优化设计和调整提供参考。

1 系统失稳现象

逆变系统有数字电源功能,其所连负载为一台单相异步电动机,在数学模型中可等效为电阻和电感串联。仿真研究中,独立单相全桥逆变器的参数设置如表 1 所示。

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

参数	数值	参数	数值
V_{in}	400 V	L_1	2 mH
$V_{ref}(\text{rms})$	220 V	r_1	2 Ω
N_T	1:1.2	C	9.4 μF
k_p	0.0002	R_d	2.2 k Ω
k_t	0.0001	C_d	0.01 μF

对系统失稳现象进行仿真实验,初始为空载状态,逆变器输出电压波形为稳定正弦波。0.5 s 时突加阻感性负载,失稳现象出现,如图 1 所示,输出电压和输出电流波形出现高频振荡(1.55 kHz)。所加感性负载的电抗值越小,则失稳现象越严重,甚至可能触发逆变器的保护装置。

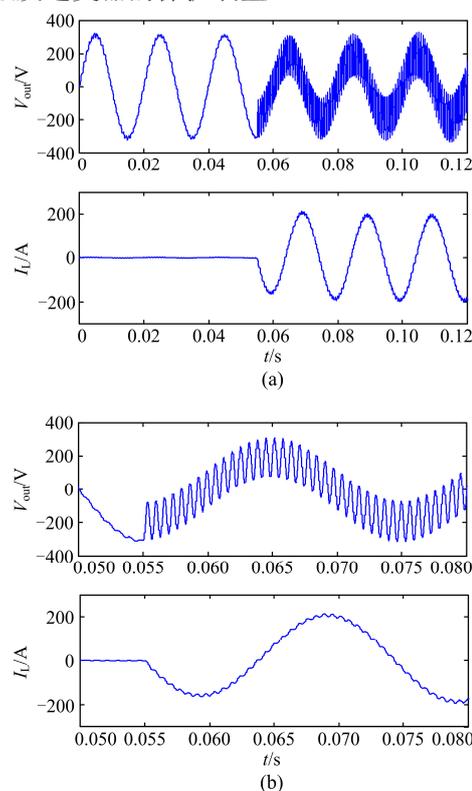


图 1 突加阻感性负载时逆变系统失稳现象

Fig. 1 Unstable phenomenon of inverter system in the case of abrupt inductive loading

2 基于阻抗比判据的稳定性分析

2.1 单相全桥逆变器的闭环输出阻抗表达式

根据实验情况绘制逆变系统拓扑电路图,如图2所示。忽略开关频率次谐波,则全桥逆变电路可等效为线性比例环节。电机的启动电流是其满载电流的3~7倍,电阻 R_{load} 和电感 L_{load} 表征电机启动过程的短路阻抗,将隔离变压器等效为T型电路,则系统等效电路如图3所示。简化电路中, L_2 和 R_2 表示包含隔离变压器的等效负载。仿真及实验验证中采用比例-谐振(PR)控制^[17-18],考虑采样电路中的RC滤波器对系统产生的影响,则系统闭环控制框如图4所示。

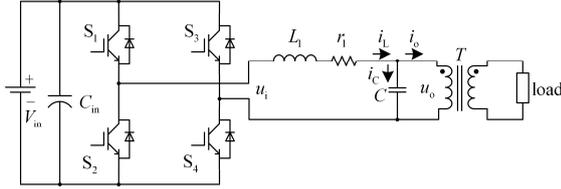
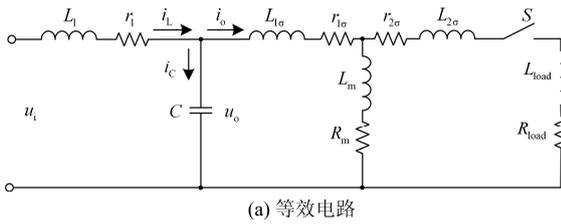
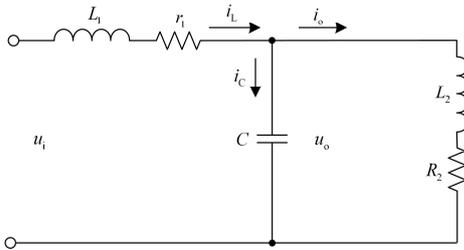


图2 单相全桥逆变系统

Fig. 2 Single-phase H-bridge inverter



(a) 等效电路



(b) 简化电路

图3 含隔离变压器的系统T型等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of system with T-type transformer

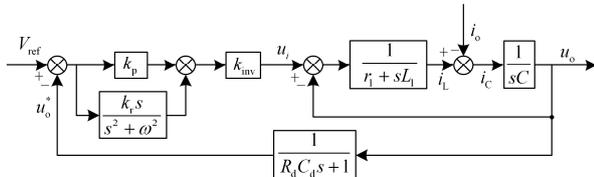


图4 闭环控制框图

Fig. 4 Closed-loop control block diagram

根据图4列出单相逆变器系统传递函数:

$$U_o(s) = \left\{ \frac{\left(k_p + \frac{k_r s}{s^2 + \omega^2} \right) \times k_{inv} \times \frac{1}{r_1 + sL_1} \times \frac{1}{sC}}{1 + \left(k_p + \frac{k_r s}{s^2 + \omega^2} \right) \times k_{inv} \times \frac{1}{r_1 + sL_1} \times \frac{1}{sC} \times \left[\frac{1}{R_d C_d s + 1} + \frac{1}{r_1 + sL_1} \times \frac{1}{sC} \right]} \right\} U_{ref}(s) - \left\{ \frac{1}{sC} / \left[\frac{1 + \left(k_p + \frac{k_r s}{s^2 + \omega^2} \right) \times k_{inv} \times \frac{1}{r_1 + sL_1} \times \frac{1}{sC}}{R_d C_d s + 1} + \frac{1}{r_1 + sL_1} \times \frac{1}{sC} \right]} \right\} I_o(s) \quad (1)$$

即:

$$U_o(s) = \left\{ \frac{\left[k_p k_{inv} R_d C_d s^3 + (k_p + k_r R_d C_d) k_{inv} s^2 + (k_r + \omega^2 k_p R_d C_d) k_{inv} s + \omega^2 k_p k_{inv} \right]}{\left[N_5 s^5 + N_4 s^4 + N_3 s^3 + N_2 s^2 + N_1 s + (k_p k_{inv} + 1) \omega^2 \right]} \right\} U_{ref}(s) - \left\{ \frac{\left[R_d C_d L_1 s^4 + (L_1 + R_d C_d r_1) s^3 + (r_1 + \omega^2 R_d C_d L_1) s^2 + \omega^2 (L_1 + R_d C_d r_1) s + \omega^2 r_1 \right]}{\left[N_5 s^5 + N_4 s^4 + N_3 s^3 + N_2 s^2 + N_1 s + (k_p k_{inv} + 1) \omega^2 \right]} \right\} I_o(s) \quad (2)$$

其中:

$$\begin{cases} N_5 = R_d C_d C L_1 \\ N_4 = (L_1 + R_d C_d r_1) C \\ N_3 = R_d C_d (\omega^2 L_1 C + 1) + r_1 C \\ N_2 = \omega^2 C (L_1 + R_d C_d r_1) + k_p k_{inv} + 1 \\ N_1 = \omega^2 (C r_1 + R_d C_d) + k_r k_{inv} \end{cases} \quad (3)$$

在PR控制器参数设计的基础上,进一步基于阻抗分析法对系统的稳定性进行分析。将式(2)写为含内阻抗电压源的形式为

$$U_o = G(s)U_{ref} - Z(s)I_o \quad (4)$$

式中, $G(s)$ 和 $Z(s)$ 分别为逆变器系统和阻抗传递函数。

由式(3)、式(4)可得到逆变器的输出阻抗为

$$Z(s) = \frac{Ls^3 + (R + 2L\omega_r)s^2 + (2R\omega_r + L\omega^2)s + R\omega^2}{LCs^4 + L_3(s)s^3 + L_2(s)s^2 + L_1(s)s + k_3\omega^2} \quad (5)$$

逆变器的输出阻抗为

$$Z_o = \left[\frac{R_d C_d L_1 s^4 + (L_1 + R_d C_d r_1) s^3 + (r_1 + \omega^2 R_d C_d L_1) s^2 + \omega^2 (L_1 + R_d C_d r_1) s + \omega^2 r_1}{N_5 s^5 + N_4 s^4 + N_3 s^3 + N_2 s^2 + N_1 s + (k_p k_{inv} + 1) \omega^2} \right] \quad (6)$$

2.2 阻抗比拒绝域

结合控制理论中奈奎斯特稳定判据和传递函数极点分布判稳理论, 得到级联系统稳定性的阻抗分析方法, 通过比较输入侧子系统的输出阻抗 Z_o 和输出侧子系统的输入阻抗 Z_i 判定级联系统的稳定性。

由 2.1 节分析已知输入侧逆变系统输出阻抗 Z_o ; 负载模块的输入阻抗, 即所接负载阻抗(包含隔离变压器的等效阻抗)为

$$Z_i = sL_2 + R_2 \quad (7)$$

根据奈奎斯特稳定判据, 系统稳定的基本要求是阻抗比为 Z_o/Z_i 的奈奎斯特曲线不环绕 S 平面上的点 $(-1, 0)$ 。系统稳定的鲁棒性以及系统的动态过程中都要求系统具有适当的稳定裕量, 这其中包含了增益裕量及相位裕量。增益裕量为阻抗比 Z_o/Z_i 的奈奎斯特曲线与实轴交点距离点 $(-1, 0)$ 之间的距离 G_M , 传统概念中要求系统具有至少 6 dB 的增益裕量, 即 $-20\lg(G_M) \geq 6 \text{ dB}$ 。相位裕量为阻抗比为 Z_o/Z_i 的奈奎斯特曲线与单位圆的交点与负实轴之间的夹角 δ_M , 传统概念中要求系统具有 60° 的相角裕量。根据上述稳定判据, 衍生出了多种判定系统稳定的拒绝域, 本文选择的拒绝域规定级联系统的稳定条件由 $|Z_i| - |Z_o| > 6 \text{ dB}$, $-120^\circ < \angle Z_o - Z_i < 120^\circ$ 变为 $R_c(Z_o/Z_i) \geq -0.5$ 。

3 仿真验证

在 Matlab/Simulink 中搭建上文所述单相全桥逆变器, 通过隔离变压器与阻感性负载相连。初始状态下逆变系统空载运行, 仿真开始后 0.095 s 时突加感性负载, 观察系统输出电压波形变化情况, 判定系统为保持稳定或开始振荡。利用前文所述阻抗比的稳定判据, 对不稳定现象进行理论分析和印证。进一步结合阻抗比的奈奎斯特图中拒绝域的划分情况和曲线随控制参数变化的规律, 提出相应的解决方法, 通过控制参数的调整避免逆变器带感性负载时出现的振荡现象, 保持系统稳定性。

根据实验情况设定仿真参数, 控制部分与实验保持一致, 变压器及负载的等效参数如表 2 所示。

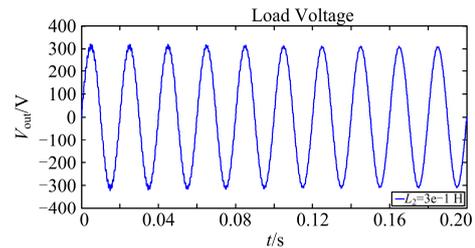
表 2 实验参数

Table 2 Experimental parameters

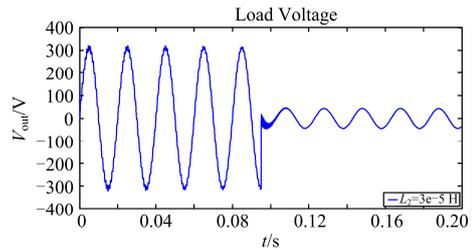
参数	数值	参数	数值
$r_{1\sigma}$	0.1 Ω	L_m	82 mH
$L_{1\sigma}$	116 μH	R_m	0.1 Ω
$r_{2\sigma}$	0.1 Ω	L_{load}	3 Ω
$L_{2\sigma}$	168 μH	R_{load}	0.1 Ω

3.1 不稳定现象及其阻抗比分析

将比例系数 k_p 设定为 0.0002, 改变逆变系统所连阻感性负载中电感值的大小。由仿真实验结果可知: 随电感负载的减小, 系统稳定性逐渐下降。电感大小为 0.3 H 时系统处于稳定状态, 突加感性负载时无振荡现象如图 5(a)所示, 对应图 6 中 $L_2 = 3e-1\text{H}$ 时的阻抗比奈奎斯特曲线, 可以看到阻抗比的根轨迹曲线在禁止区域之外, 系统可以保证 6 dB 的增益裕量和 60° 的相角裕量。电感大小为 30 μH 时系统无法维持稳定状态, 突加感性负载时出现振荡现象如图 5(b)所示, 对应图 6 中 $L_2 = 3e-5\text{H}$ 时的情况, 系统阻抗比的奈奎斯特曲线进入拒绝域。仿真实验结果与阻抗比分析结果一致, 通过阻抗比禁止区域的概念判断系统稳定性的方法准确、有效。



(a) 电感值 0.3 H



(b) 电感值 30 μH

图 5 逆变系统输出电压波形(电感负载大小变化)

Fig. 5 Output voltage waveform of inverter (inductance value changed)

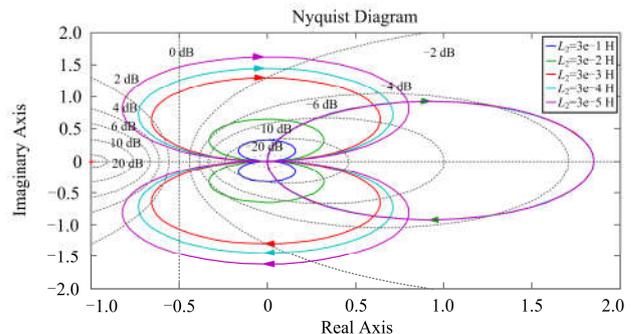
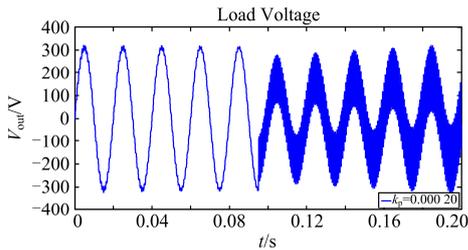


图 6 随电感负载大小改变的阻抗比奈奎斯特曲线

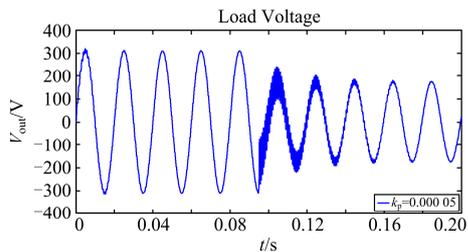
Fig. 6 Impedance ratio Nyquist curve with the decrease of inductance value

3.2 控制参数对系统稳定性的影响

PR 控制中谐振系数 k_p 主要影响逆变器的控制精度, 系统输出阻抗对比例系数的改变较敏感。已知当比例系数 k_p 设定为 0.0002, 所连感性负载中电感值 $L_2 = 3 \text{ mH}$ 时系统出现振荡, 如图 7(a)所示。调整比例系数 k_p , 发现随比例系数 k_p 的减小, 系统稳定性逐渐提高。若比例系数 k_p 减小至 0.000 05, 突加感性负载后系统经过调整最终处于稳定状态, 如图 7 (b)所示。对应图 8 所示的阻抗比奈奎斯特曲线, 以 $R_c(Z_o / Z_i) \geq -0.5$ 为稳定条件。随着比例系数 k_p 的减小, 曲线包围面积逐渐变小, 比例系数 k_p 减小至 0.0001 时曲线离开拒绝域。继续减小比例系数则稳定裕度增加, 系统稳定性进一步提高, 但控制精度有所下降。



(a) 比例系数0.0002



(b) 比例系数0.00005

图 7 逆变系统输出电压波形(改变比例系数大小)

Fig. 7 Output voltage waveform of inverter (proportional gain changed)

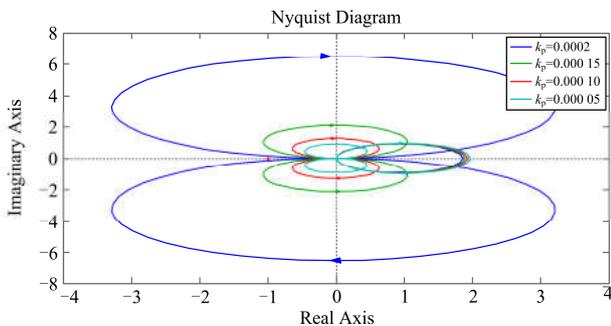


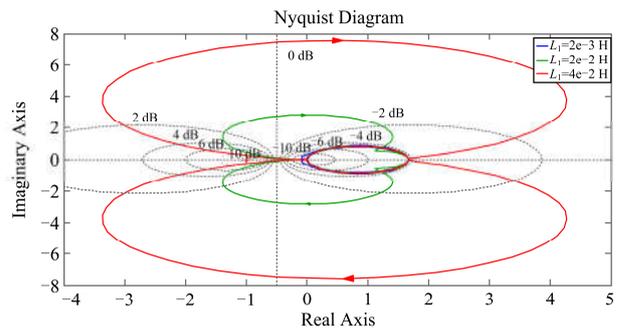
图 8 随比例系数 k_p 改变的阻抗比奈奎斯特曲线

Fig. 8 Impedance ratio Nyquist curve with the decrease of proportional gain k_p

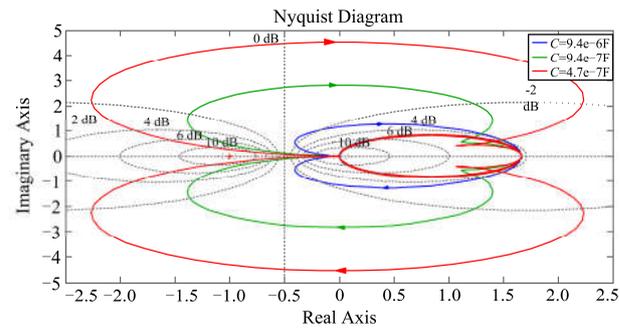
3.3 滤波参数对系统稳定性的影响

逆变系统阻抗比的奈奎斯特曲线随滤波参数变化如图 9 所示。图 9(a)中, 随着滤波电感的增大, 曲线包围面积增大。滤波电感为 2 mH 时, 系统稳定; 电感值为 20 mH 时, 阻抗比奈奎斯特曲线越过拒绝域; 电感值为 40 mH 时, 系统稳定性继续下降。图 9(b)中, 随着滤波电容的减小, 曲线包围面积增大。滤波电容为 9.4 μF 时, 系统稳定; 电容值为 0.94 μF 时, 阻抗比奈奎斯特曲线越过拒绝域; 电容值为 0.47 μF 时, 系统稳定性继续下降。

由图 8、图 9 阻抗比的奈奎斯特曲线可知, 控制参数及滤波参数对系统稳定性的影响情况如表 3 所示。



(a) 改变滤波电感



(b) 改变滤波电容

图 9 滤波参数改变时的阻抗比奈奎斯特曲线

Fig. 9 Impedance ratio Nyquist curve with filter parameters changed

表 3 参数改变对系统稳定性的影响

Table 3 Effect of changing parameters on system stability

参数	参数变化范围	变化方向	稳定性
比例系数	0.0005~0.002	减小	提高
		增大	减弱
滤波电感	2~40 mH	减小	提高
		增大	减弱
滤波电容	0.47~9.4 μF	增大	提高
		减小	减弱

4 阻尼控制

阻感性负载的固有特性及逆变系统的滤波环节引起谐波, 造成系统不稳定。为了解决这一问题, 可通过增大控制系统阻尼提高系统性, 避免启动过程中阻感负载突加于系统时的失稳现象。无源阻尼法在滤波元件上串并联阻尼电阻, 对谐振起衰减作用; 有源阻尼法通过控制算法的改进消除谐振。无源阻尼方法简单, 受控制系统的影响较小, 一般情况下运行可靠。

本文中单相逆变系统采用 LC 滤波, 在电感上串联或并联电阻或在电容上串联电阻, 构成无源阻尼。在 3 种基本的无源阻尼方案中, 在滤波电感上串入电阻的方式应用较多。在图 7(a)的仿真条件下, 系统为不稳定状态。随着滤波电感串联阻尼电阻阻值的增大, 系统稳定性逐渐提高, 阻尼控制下的阻抗比奈奎斯特曲线如图 10 所示。当阻尼电阻为 0.2Ω 时, 系统仍出现震荡现象, 输出电压波形如图 11 所示。对应图中 $R_d = 0.2 \Omega$ 的阻抗比奈奎斯特曲线越过稳定界线, 进入 $R_c \leq -0.5$ 的区域。当阻尼电阻增大为 0.6Ω 时, 阻感负载的接入造成的系统振荡收敛, 输出电压波形趋于稳定, 如图 11 所示。对应图中 $R_d = 0.6 \Omega$ 的阻抗比奈奎斯特曲线, 处于稳定区域内且具有一定的相角裕度和增益裕度。

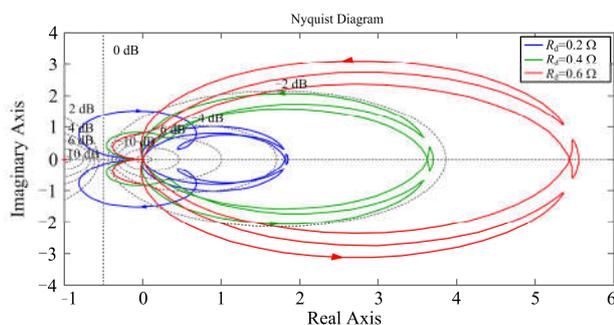
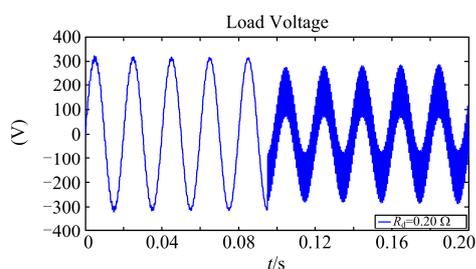
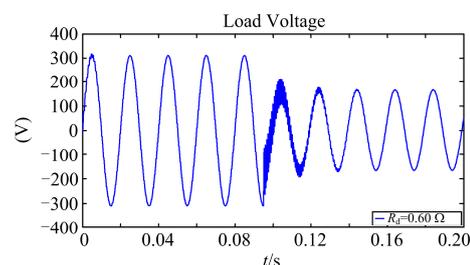


图 10 阻尼电阻阻值改变时的阻抗比奈奎斯特曲线

Fig. 10 Impedance ratio Nyquist curve with damping resistance changed



(a) 阻尼电阻 0.2Ω



(b) 阻尼电阻 0.6Ω

图 11 逆变系统输出电压波形(改变阻尼电阻阻值)

Fig. 11 Output voltage waveform of inverter (damping resistance changed)

5 结论

单相逆变器带阻感性负载时, 电感值大小影响系统稳定性, 随着电感的减小系统趋于不稳定, 在突加感性负载后出现振荡现象。对逆变系统建立级联系统模型, 绘制阻抗比的奈奎斯特曲线, 由稳定判据可知, 适当减小比例系数可提高系统稳定性。因此, 通过对比例系数的合理设置和适当调整, 可避免系统突加小电感值感性负载时的振荡现象。例如, 逆变器带单相异步电动机, 在启动阶段等效阻抗值较小。此时需要调节控制参数, 适度减小比例系数, 使系统保持稳定, 否则极易振荡失稳。另外, 滤波电感的减小或滤波电容的增大亦可加强系统稳定性, 如表 3 所示。通过增大控制系统阻尼, 亦可提高阻感性负载下逆变系统的稳定性。通过仿真分析, 完成了阻感性负载下单相逆变器的稳定性分析, 为逆变器控制参数的设计调节提供指导原则。

参考文献

- [1] MIDDLEBROOK R D. Input filter considerations in design and application of switching regulators[C] // IEEE Industrial Application Society Annual Meeting, Chicago, USA: IEEE, 1976: 366-382.
- [2] FENG X G, LIU J J, LEE F C. Impedance specifications for stable DC distributed power systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(2): 157-162.
- [3] FENG X G, LEE F C. On-line measurement on stability margin of dc distributed power system[C] // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, New Orleans, USA: IEEE, 2000, 2: 1190-1196.
- [4] JIANG S, WANG W, MIAO F, et al. Research on admittance specification stability of microgrid at autonomous mode[C] // 7th International Power Electronics and Motion Control Conference, Harbin: IEEE, 2012: 2090-2094.
- [5] 朱成花, 严仰光. 一种改进的阻抗比判据[J]. 南京航

- 空航天大学学报, 2006, 38(3): 315-320.
ZHU Chenghua, YAN Yangguang. Improved impedance criterion[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2006, 38(3): 315-320.
- [6] 佟强, 张东来, 徐殿国. 分布式电源系统中变换器的输出阻抗与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 57-64.
TONG Qiang, ZHANG Donglai, XU Dianguo. Output impedance and stability analysis of converters in distributed power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(12): 57-64.
- [7] 吴涛, 阮新波. 分布式供电系统中源变换器输出阻抗的研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(3): 66-72.
WU Tao, RUAN Xinbo. Output impedance analysis of source converters in the DC distributed power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(3): 66-72.
- [8] 吴涛, 阮新波. 分布式供电系统中负载变换器的输入阻抗分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(12): 20-25.
WU Tao, RUAN Xinbo. Input Impedance analysis of load converters in the distributed power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(12): 20-25.
- [9] FRASER M E, MANNING C D. Performance of average current mode controlled PWM UPS inverter with high crest factor load[C] // Power Electronics and Variable-Speed Drives, 1994. Fifth International Conference. London, 1994: 661-667.
- [10] KUKRER O. Control strategy for single phase UPS inverters[J]. IEE Proc Electric Power Application, 2003, 150(6): 743-746.
- [11] 王归新, 康勇, 陈坚. 基于状态空间平均法的单相逆变器控制建模[J]. 电力电子技术, 2004, 38(5): 9-12.
WANG Guixin, KANG Yong, CHEN Jian. Control modeling of a single-phase inverter based on state-space average method[J]. Power Electronics, 2004, 38(5): 9-12.
- [12] 易映萍, 罗海, 胡四全. 小功率光伏并网逆变器控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 64-68.
YI Yingping, LUO Hai, HU Siqian. Study on control scheme based on low-power photovoltaic grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 64-68.
- [13] 吴恒, 阮新波, 杨东升. 弱电网条件下锁相环对LCL型并网逆变器稳定性的影响研究及锁相环参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5259-5268.
WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng. Research on the stability caused by phase-locked loop for LCL-type grid-connected inverter in weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5259-5268.
- [14] 李浩然, 杨旭红, 冯成臣. 多逆变器并联下的输出阻抗分析和改进下垂控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 29-35.
LI Haoran, YANG Xuhong, FENG Chengchen. Control strategy research of output impedance analysis and improved droop control based on multiple-inverters parallel[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 29-35.
- [15] 姜世公, 王卫, 刘桂花, 等. 微网孤岛运行条件下基于导纳域的稳定性研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 19-25.
JIANG Shigong, WANG Wei, LIU Guihua, et al. Admittance specification stability of islanded microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 19-25.
- [16] 徐少华, 李建林, 惠东. 基于准PR控制的储能逆变器离网模式下稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 107-112.
XU Shaohua, LI Jianlin, HUI Dong. Stability analysis of energy storage inverter based on quasi PR controller under off-grid mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 107-112.
- [17] 雷亚雄, 李建文, 李永刚. 基于准PR调节器电流双闭环LCL三相并网逆变器控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 44-50.
LEI Yaxiong, LI Jianwen, LI Yonggang. Control strategy of three-phase LCL grid-connected inverter based on quasi-PR adjuster[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 44-50.
- [18] 赵爽, 刘飞, 孙建军, 等. 基于改进PR控制器的新能源并网检测平台设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 118-125.
ZHAO Shuang, LIU Fei, SUN Jianjun, et al. Parameter design of testing platform for new energy grid connected devices based on improved PR controller[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 118-125.

收稿日期: 2016-03-27; 修回日期: 2016-06-05

作者简介:

丁凯(1974-), 男, 博士, 高级工程师, 从事新能源接入系统关键技术研究; E-mail: dingkay@sina.com

陈章妍(1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为单相逆变器建模分析及应用; E-mail: zhangyan_chen@whu.edu.cn

黄萌(1984-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力电子变换器非线性分析、可靠性评估。E-mail: meng.huang@whu.edu.cn

(编辑 姜新丽)