

双闭环控制的逆变电源研究

黄泽武, 岳改丽

(西安科技大学电气与控制工程学院, 陕西省 西安市 710054)

Research on Inverter Power Supply with Double Closed Loop Control

Huang Zewu, Yue Gaili

(Xi'an University of Science and Technology School of Electrical and Control Engineering, Xi'an 710054, Shaanxi Province, China)

Abstract: With the rapid development of power electronics technology, inverter power supplies have been widely used in many fields, and the waveform quality requirements of their output voltages are also getting higher and higher. Due to various reasons, the voltage waveform is seriously distorted and the accuracy of the output voltage is not high enough. To improve the voltage waveform distortion and output voltage accuracy, this paper proposes an inductor current inner loop and voltage outer loop with load current feedforward. The double closed-loop control strategy, by analyzing the closed-loop control characteristics, uses the pole placement method to find the parameters of the closed-loop regulator. Finally, the circuit is simulated by MATLAB/Simulink. The experimental results show that the dual closed-loop controlled inverter power supply has good stability, fast dynamic response and high output voltage waveform quality.

Key Word: Inverter; Double closed-loop loop control; PI reconciliation; MATLAB

摘要: 随着电力电子技术的迅猛发展, 逆变电源在许多领域得到了广泛应用, 对其输出电压的波形质量要求也越来越高。由于各种原因造成的电压波形严重畸变以及输出电压的精度不够高等问题进一步凸显出来, 针对改善电压波形畸变和输出电压精度, 本文提出一种带负载电流前馈的电感电流内环、电压外环的双闭环控制策略, 通过分析闭环控制特性, 利用极点配置法求出闭环调节器的参数。最后通过 MATLAB/Simulink 对电路进行了仿真, 实验结果证明, 双闭环控制的逆变电源稳定性较好, 动态响应速度快且输出电压波形质量高。

关键词: 逆变器; 双闭环回路控制; PI 调节; MATLAB

1 引言

近些年, 电力电子技术的发展较为迅猛, 在各

个领域中逆变电源应用越来越广泛, 对其输出的电压波形要求也越来越高。

逆变器在开环时, 无法抑制直流和低次谐波带来的扰动, 且整个系统的动态性能完全由滤波器和负载的特性来决定。因此, 要改善逆变器的性能, 就要加入闭环控制环节, 对系统进行零点补偿。可利用电感电流反馈引入零点, 提高系统动态性能。而电压瞬时值反馈能改善输出电压波形, 增加开环增益。因此, 本文主要讨论了电压外环、电感电流内环的双闭环控制方法, 用极点配置法求出双闭环调节器的参数, 推导其闭环传递函数, 并详细分析了闭环特性。实验结果表明, 双闭环逆变器能够满足逆变器电压输出的波形稳态精度高、动态性能好。

2 双闭环逆变电源建模及分析

逆变器的主电路拓扑有推挽、半桥、全桥等。本文选择单相全桥逆变电路, 其电路如图 2.1 所示。它是由逆变桥、LC 滤波和负载 R 组成。且每个开关管的漏源极间都反并联一个二极管, 此二极管既能为负载续流, 还能为负载向直流侧反馈能量提供通道, 一般选择超快恢复二极管。其中, VT3~VT6 为功率开关管, VD7~VD10 为反馈二极管, L 为滤波电感, C 为滤波电容, U_d 为直流母线电压, u_i 为逆变桥的输出电压, u_o 为输出电压, i_L 为电感电流, i_C 为电容电流, i_o 为输出电流, r 为等效串联电阻、死区效应、线路阻抗等因素的等效电阻。

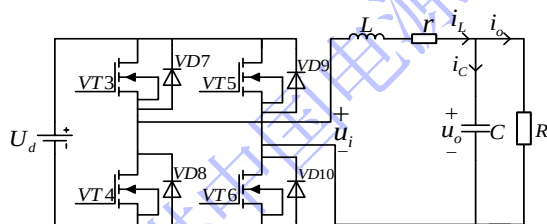


图 2.1 单相全桥逆变电路

逆变器并联控制的关键是实现均流,则电流环不可或缺。且电压电流双环控制的稳定性高于电流单环,因此本文采用电压电流双闭环控制。

在双闭环控制中,电压环能改善输出电压波形质量;电流环可快速抑制负载电流的扰动,动态响应速度快。综合考虑,电压和电流控制器均为比例积分(PI)调节。其中,电流调节器的比例环节可增强阻尼系数,鲁棒性好,积分环节可减小其稳态误差;电压调节器也用PI调节,输出电压瞬时值可跟踪其给定值,提高系统的动静态性能。

根据内环反馈的类型不同,有电感电流和电容电流两种。当内环反馈为电容电流时,因电容电流可在瞬间得以控制,且利用微分作用可让电容电流提前矫正电容电压,因此对各类负载的动态抑制效果都较好。虽然控制系统中增加了电流限幅环节,但它只能对电容电流加以约束,却很难对负载电流和电感电流进行控制,因而采用数字控制时不能实现软件限流保护。而以电感电流为内环时,通过限制电感电流来实现过流保护,但其抗负载扰动能力较弱。综上所述,本文选择电感电流内环、电压外环双闭环控制策略。

电压电流双闭环控制框图如图 2.2 所示。其工作原理为:将实时采样到的输出电压与基准给定值作差得到电压误差信号,经过电压环 PI 调节后,得到电流参考值 i_{ref} , 将其与电感电流比较得到电流误差信号,再进行电流环 PI 调节得到最终控制量,再和三角波比较,得到 SPWM 信号,进而控制开关管的通断。

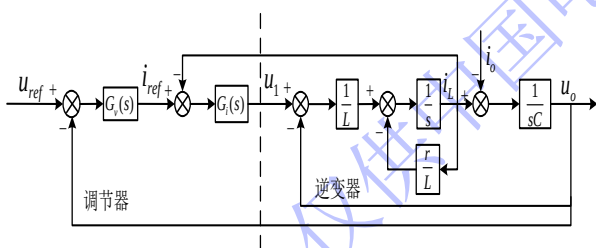


图 2.2 双闭环控制系统框图

图 2.2 中,由于在以电感电流为内环的双闭环控制时,负载电流对逆变器也有扰动作用,且不受电流内环回路的控制,因此仅采用电感电流内环方式,其抗负载扰动的能力较差。为了使系统抑制负载电流扰动的能力提高,在控制系统中加入负载电流前馈来进行补偿,图 2.3 为带负载电流前馈的电压电流双闭环控制系统框图。

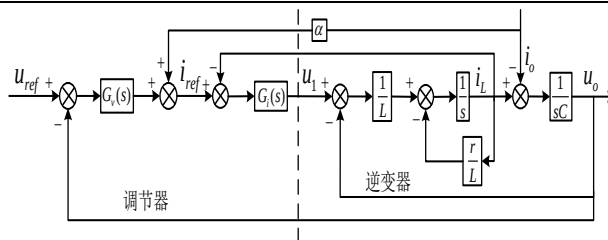


图 2.3 带负载电流前馈的双闭环控制系统框图

其中, α 为负载电流前馈系数,一般为不大于 1 的正实数。

3 控制器的参数设计

要使逆变器的动静态性能良好,需要将各种控制方案取长补短、相互借鉴。本文用极点配置法对调节器参数进行设计。设电压和电流的传递函数分别为:

$$G_v(s) = k_{1p} + \frac{k_{1i}}{s} \quad (3.1)$$

$$G_i(s) = k_{2p} + \frac{k_{2i}}{s} \quad (3.2)$$

由图 2.3 可得下列方程:

$$i_{ref}(s) = (u_{ref}(s) - u_o(s))(k_{1p} + \frac{k_{1i}}{s}) \quad (3.3)$$

$$u_1(s) = (i_{ref}(s) + \alpha \cdot i_o(s) - i_L(s))(k_{2p} + \frac{k_{2i}}{s}) \quad (3.4)$$

$$i_L(s) = (u_1(s) - u_o(s))(sL + r) \quad (3.5)$$

$$i_L(s) - i_o(s) = sC \cdot u_o(s) \quad (3.6)$$

联立上式,可得未加负载电流前馈时,该控制系统的传递函数为:

$$\begin{aligned} U_o(s) &= \frac{(k_{1p}s + k_{1i})(k_{2p} + k_{2i})}{LCD(s)} U_{ref}(s) - \frac{s^2(sL + r)}{LCD(s)} I_o(s) \\ &= \frac{(k_{1p}k_{2p}s^2 + (k_{1p}k_{2i} + k_{2p}k_{1i})s + k_{1i}k_{2i})}{LCD(s)} U_{ref}(s) \\ &\quad - \frac{s^2(sL + r)}{LCD(s)} I_o(s) \end{aligned} \quad (3.7)$$

加入负载电流前馈后的传递函数为:

$$\begin{aligned} u_o(s) &= \frac{(k_{1p}s + k_{1i})(k_{2p}s + k_{2i})}{LCD(s)} u_{ref}(s) \\ &\quad - \frac{[(Ls^2 + (r + k_{2p}(1 - \alpha))s + k_{2i}(1 - \alpha))]s}{LCD(s)} i_o(s) \\ &= G_{ur}(s)u_{ref}(s) - G_{io}(s)i_o(s) \end{aligned} \quad (3.8)$$

则闭环控制系统的特征方程为:

$$D(s) = LCs^4 + (rC + k_{2p}C)s^3 + (k_{1p}k_{2p} + k_{2i}C + 1)s^2 + (k_{1p}k_{2i} + k_{2p}k_{1i})s + k_{1i}k_{2i} \quad (3.9)$$

设希望的闭环主导极点为 $s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\xi^2}$ ，非主导极点为 $s_3 = -m\xi\omega_n$ ， $s_4 = -n\xi\omega_n$ ， m 、 n 取 5~10。

则系统的希望特征方程为：

$$D_r(s) = (s-s_1)(s-s_2)(s-s_3)(s-s_4) = (s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)(s + m\xi\omega_n)(s + n\xi\omega_n) \quad (3.10)$$

可得下式：

$$\begin{cases} k_{2p} = \frac{a_3}{C} - r \\ k_{1p}k_{2p} + Ck_{2i} = a_2 - 1 \\ k_{1p}k_{2i} + k_{2p}k_{1i} = a_1 \\ k_{1i}k_{2i} = a_0 \end{cases} \begin{cases} a_3 = LC(2+m+n)\xi\omega_n \\ a_2 = LC[1 + (2m+2n+mn)\xi^2]\omega_n^2 \\ a_1 = LC(m+n+2mn\xi^2)\xi\omega_n^3 \\ a_0 = LCmn\xi^2\omega_n^4 \end{cases} \quad (3.11)$$

由式(3.11)可得：

$$Ck_{2i}^3 + (1-a_2)k_{2i}^2 + a_1k_{2p}k_{2i} - a_0k_{2p}^2 = 0 \quad (3.12)$$

式(3.12)中的 k_{2i} 有 3 个解，包括一个实数根和两个复数根，则 k_{ii} 应取实数解，可得：

$$k_{1p} = \frac{a_2 - Ck_{2i} - 1}{k_{2p}} \quad (3.13)$$

$$k_{1i} = \frac{a_0}{k_{2i}} \quad (3.14)$$

因此取 $m=8$ ， $n=10$ ， $\xi=0.8$ ， $\omega_n=3500\text{rad/s}$ ，可得， $k_{1p}=0.05$ ， $k_{1i}=126.89$ ， $k_{2p}=52.8$ ， $k_{2i}=787155$ ，则电压、电流调节器分别为：

$$\begin{cases} G_v(s) = 0.05 + \frac{126.89}{s} \\ G_i(s) = 52.8 + \frac{787155}{s} \end{cases} \quad (3.15)$$

式(3.15)是由极点配置法得到电压电流调节器的参数，它能简化参数设计过程，提高系统的动静态性能。

从式(3.8)可知，前馈系数 α 对 $G_{io}(s)$ 的极点位置没有影响，只对零点有影响。且输出阻抗 $G_{io}(s)$ 和传递函数 $G_{ur}(s)$ 的极点相同，因此可通过减小 $G_{io}(s)$ 的增益来减小输出阻抗，增强抗负载扰动的能力。

若满足下式要求：

$$G_{io}(s) = \frac{[(Ls^2 + (r + k_{2p}(1-\alpha))s + k_{2i}(1-\alpha))]s}{LCD(s)} = 0 \quad (3.16)$$

则对于任何负载电流的扰动作用，其输出阻抗均为 0，且输出电压不会受到负载电流扰动的影响。

由式(3.16)能求出 $\alpha = 1 + \frac{(Ls+r)s}{k_{2p}s + k_{2i}}$ ，且分子的

阶数高于分母，一般取 α 为稍小于 1 的正实数，此时的控制效果较好。

此时，逆变器双闭环控制时系统输出阻抗的传递函数为：

$$G_{io}(s)_{\text{闭环}} = \frac{s(\frac{1}{C}s^2 + \frac{r+k_{2p}(1-\alpha)}{LC}s + \frac{k_{2i}(1-\alpha)}{LC})}{s^4 + \frac{r+k_{2p}}{L}s^3 + \frac{k_{1p}k_{2p}+Ck_{2i}+1}{LC}s^2 + \frac{k_{1p}k_{2i}+k_{2p}k_{1i}}{LC}s + \frac{k_{1i}k_{2i}}{LC}} \quad (3.17)$$

加入 PI 控制后，电压和电流闭环传递函数的伯德图如图 3.1 和 3.2 所示。

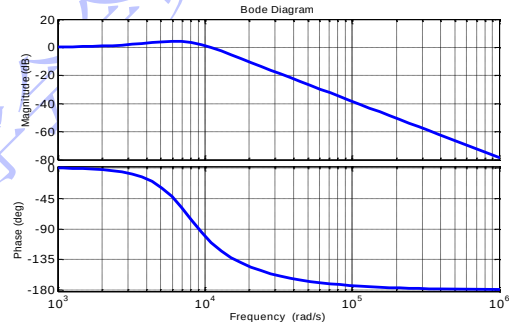


图 3.1 电压环闭环传递函数的伯德图

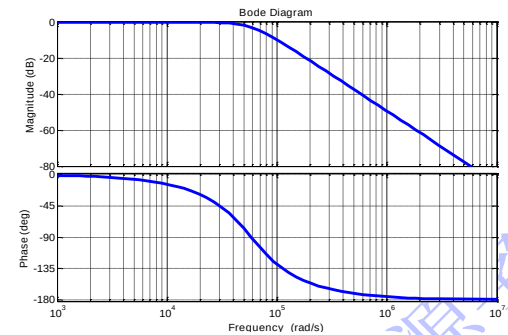


图 3.2 电流环闭环传递函数的伯德图

4 仿真分析

逆变器在开环情况下，输入电压或负载变化对输出电压起决定性作用。在 MATLAB 中搭建其开环仿真模型如图 4.1 所示。

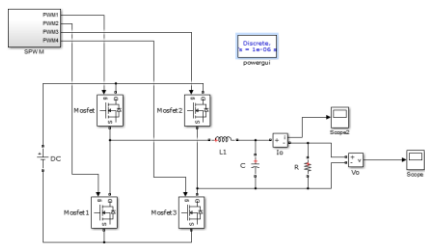


图 4.1 逆变器开环仿真模型

仿真参数: 直流母线电压 $U_{DC} = 360V$, 额定输出电压为 $220V$, 电感 $L = 1.3mH$, 电容 $C = 10\mu F$, 负载 $R = 20\Omega$, 仿真时间为 $0.08s$, 其输出电压波形如图 4.2 所示。

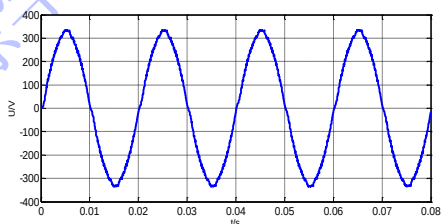


图 4.2 逆变器开环输出电压波形

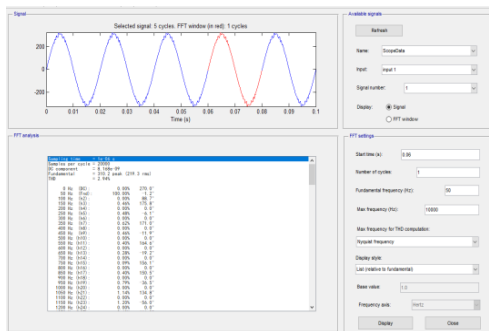


图 4.3 逆变器开环输出电压 FFT 分析图

由上图看出, 逆变器在开环状态下, 输出电压的幅值虽能达到 $311V$, 但波形不太稳定, 波形顶部、底部均有失真。由仿真结果得出 FFT 分析图, 则 THD 为 2.94% 。则需设计闭环系统。闭环仿真模型如图 4.4 所示。

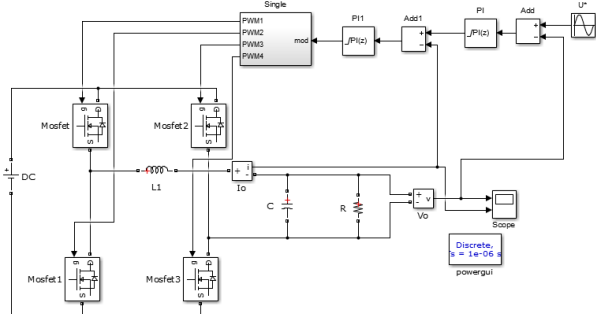


图 4.4 逆变器闭环仿真模型

仿真参数与开环模型中的参数相同, 前文已经算出控制参数为 $k_{ip}=0.05$, $k_{ii}=126.89$, $k_{2p}=52.8$, $k_{2i}=787155$, 载波频率 $f_c = 20kHz$, 调制频率 $f_s = 50Hz$, 输出电压电流波形如图 4.5 所示。

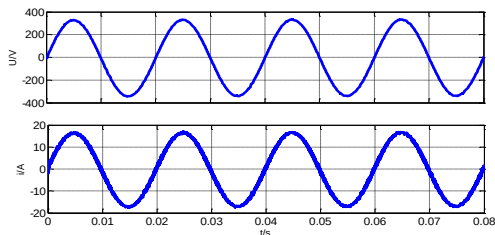


图 4.5 逆变器闭环输出电压电流波形

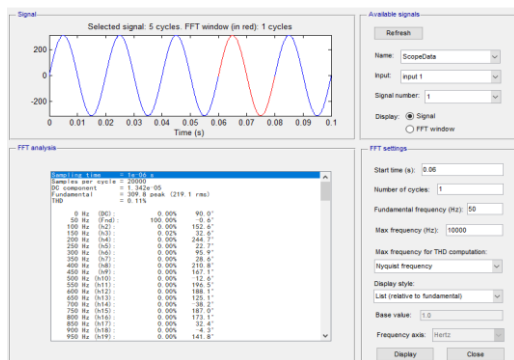


图 4.6 逆变器输出电压 FFT 分析图

和开环的输出波形和 FFT 分析图相比, 闭环控制所得的输出电压电流波形较稳定, 正弦度高, 且失真度小, 其输出电压峰值约为 $313V$, 频率为 $50Hz$, THD 为 0.11% , 满足设计要求。

5 结论

本文提出了一种带负载电流前馈的电感电流内环、电压外环的双闭环控制策略, 并用极点配置法求出闭环调节器的参数。双闭环控制能够提高逆变器的动态性能, 输出电压瞬时值反馈缩短了系统扰动的响应时间, 且输出电压具有良好的稳定性; 提高输出电压的波形质量。电感电流瞬时值反馈能加快电流的跟踪, 增强系统稳定性。并对增量式 PI 算法作了离散化处理。最后在 MATLAB/Simulink 中对主电路的开环和闭环控制分别进行了仿真分析, 结果说明闭环控制的谐波畸变率很小, 稳定性较好, 且动态响应速度快。

参考文献

- [1] 李文娟, 绳燕, 吴天强, 于长胜. 单相逆变电路单闭环与双环控制的仿真实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.7.
- [2] J.H. Choi, J.C. Kim. Advanced Voltage Regulation Method at the Power Distribution Systems Interconnected with Dispersed Storage and Generation Systems, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.15, No.2, 2000, pp: 691-696.
- [3] 李泽斌, 罗安, 田园. LCL 型光伏并网逆变器电流内环控制方法[J]. 电网技术, 2014.10.

- [4] 喻晨龙, 鞠志忠, 祁承超. 逆变器的两种双环控制技术的比较分析[J]. 通信电源技术, 2013, 30 (5) : 9-12.
- [5] F. Petruzzello, P.D.Z. Ioqas, G. Joos. A Novel Approach to Paralleling of Power Units with True Redundancy, IEEE PESC'90, pp: 808-812
- [6] 李琛, 李敏远, 计时鸣, 谭大鹏. 400Hz 逆变电源新型多环控制系统[J]. 中国电机学报, 2010, 30 (36) : 71-78.
- [7] 李东旭, 黄灿水. 基于 DSP 双闭环的单相逆变电源设计与实现[J]. 电工电气, 2011.
- [8] 王昉, 马爱平. 光伏逆变器控制策略的仿真研究[J]. 船电技术, 2014, 11: 7-9.

- [9] 孙立军. 逆变电源的发展与技术革新[J]. 农业科技与装备, 2012, 219(9): 55-58

作者简介:

黄泽武(1995), 女, 西安科技大学研究生, 研究方向为电子与电力传动, 605055393@qq.com;

岳改丽(1967), 女, 西安科技大学硕士研究生导师, 副教授, 研究方向为电力电子与电力传动, yuegl@xust.edu.cn。