

三相 PWM 逆变电源控制系统 PID 参数设计

吴小华,王欢欢,郑先成

(西北工业大学 自动化学院,陕西 西安 710129)

摘要: 针对PWM 电源控制系统中 PID 参数难以确定这一实际问题,提出了根据系统极点配置设计 PID 参数的方法。给出了整个系统的结构,分析了采用极点配置方法设计 PID 控制回路的过程,保证了控制系统具有理想的动态品质。通过对控制系统仿真验证了该方法的有效性。

关键词: PWM 逆变电源;极点配置;PID 参数

中图分类号: TP13

文献标识码: B

文章编号: 1674-7720(2010)24-0083-03

Design of PID parameters in three phase PWM inverter control system

WU Xiao Hua, WANG Huan Huan, ZHENG Xian Cheng

(Dept. of Automation, North Western Polytechnical University, Xi'an 710029, China)

Abstract: In order to improve the performance of PWM inverter control system, a new method is presented according to the pole assignment aimed to the actual problems of designing of PID parameters. It is proposed the structure of the whole system and analyzed the procedure of the designing. The design assured control system to have ideal dynamic characteristics. The efficacy of this method is proved through simulation.

Key words: PWM inverter; pole assignment; PID parameters

PID 控制是最早发展起来的控制策略之一,具有算法简单、易于实现、鲁棒性好且可靠性高等优点,是一种最通用的控制方法,在各种电源控制系统中得到了很好的应用。对于 PID 参数的确定,一般有经验的技术人员会根据以往的调试经验,直接设置控制系统的 PID 参数,最终通过不断调试来满足要求。没有经验的大多数人选择用仿真的方法预先试出一个较为合适的 PID 参数,然后在此基础上不断调试。这两种方法都缺少一定的理论依据,工作量比较大,并且在系统参数变化的情况下,所选的 PID 参数对系统性能的影响无从得知。

虽然复杂的、非线性系统的数学模型难以确定,但是在前人所做工作的基础上,经过一定的分析和简化,最终可表示成传递函数的形式。本文将 PID 控制应用于 PWM 电源系统中,该系统的传递函数可由零点、极点和增益因子完全确定。零点和极点的含义是,当复频率取值在零点或极点上时,传递函数取零值或趋向无穷大。因此,零极点必然和频率响应密切相关。故通过零极点协调配置的方法,可以达到所期望的响应。

1 PWM 逆变电源主电路结构及数学模型

图 1 所示为三相 PWM 逆变器主电路原理图^[1], V_{dc}

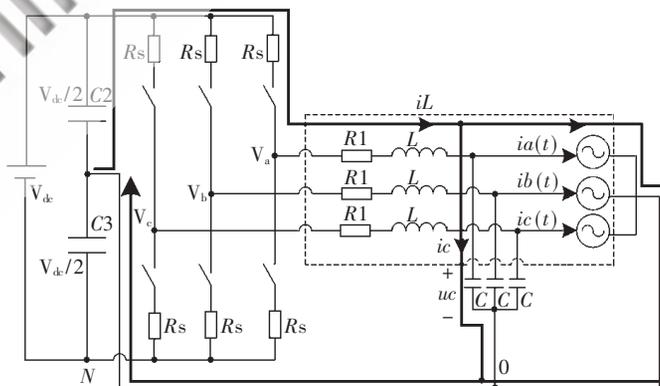


图 1 三相 PWM 逆变器主电路

为直流侧电源, $C2$ 、 $C3$ 两个电容为负载提供地线, R_s 为 IGBT 开关的等效电阻, $R1$ 和 L 为输出滤波电感的等效电阻和电感量, C 为滤波电容, i_{k0} 表示负载电流。图 1 粗线所示的一相回路中,采用如图 2 所示的 PID 调节产生一相的调制波,再与三角载波比较产生 PWM 信号。由于三相的控制方式与此相同,因此只对一相电路分析。

主电路中功率开关管工作于“开”和“关”两种状态,桥臂中点输出电压 V_{dk} 是以 $V_{dc}/2$ 为幅值的脉冲电压, V_k

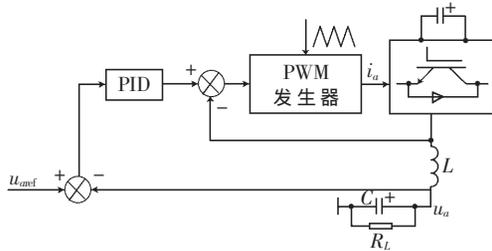


图2 一相控制原理图

($k=a, b, c$)是不连续的。工程应用中通常采用状态空间平均法处理,选择电容电压 u_c 、电感电流 i_L 作为状态变量,桥臂中点电压 $v_k(k=a, b, c)$ 作为输入,以平均值 \bar{v}_k 代替,负载电流 $i_{k0}(k=a, b, c)$ 作为扰动输入,得到逆变器连续系统的状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \frac{du_c}{dt} \\ \frac{di_L}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & -\frac{R_1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \bar{v}_k + \begin{bmatrix} -\frac{1}{C} \\ 0 \end{bmatrix} i_{k0} \quad (1)$$

2 控制系统传递函数及 PID 参数设计

假设直流输入电压源 v_{dk} 恒定,并且功率开关管是理想的,开关频率与逆变器的输出基波频率、LC 滤波器谐振频率相比足够高,且不考虑死区,则逆变桥可以等效为一个恒定增益为 1 的放大器,这样由状态空间平均模型得到整个逆变器的线性化模型如图 3 所示,图中输出的三相电压记为 $v_{k0}(k=a, b, c)$,而每相电压又等于滤波电容上的电压 u_c 。

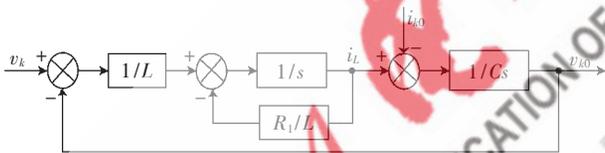


图3 三相逆变器一相开环系统方框图模型

由上述模型可以推导出输入 $V_k(s)$ 和输出 $I_{k0}(s)$ 同时作用时,系统的 s 域输出响应关系式为:

$$U_c(s) = \frac{1}{LCs^2 + R_1Cs + 1} V_k(s) - \frac{Ls + R_1}{LCs^2 + R_1Cs + 1} I_{k0}(s) \quad (2)$$

实际系统中选择 $L=500 \mu\text{H}$, $C=120 \mu\text{F}$,电感的内阻很小,由式(2)可知,开环时逆变器空载谐振频率 $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$,阻尼比 $\zeta = \frac{R_1}{2} \sqrt{C/L}$ 远小于 1,系统是一个阻尼很小的欠阻尼二阶系统,系统动态性能很差,控制难度也最大,因此控制器的设计必须基于空载来进行。

考虑逆变器在参考正弦输入信号 v_r 、负载电流扰动信号 i_{k0} 同时作用下,闭环输出电压 v_{k0} 的函数关系:

$$V_{k0}(s) = \frac{k_d s^2 + k_p s + k_i}{LCs^3 + (R_1C + k_d)s^2 + (1 + k_p)s + k_i} V_r(s) - \frac{s(Ls + R_1)}{LCs^3 + (R_1C + k_d)s^2 + (1 + k_p)s + k_i} I_{k0}(s) \quad (3)$$

逆变器闭环系统特征方程:

$$C_C(s) = S^2 + \frac{R_1C + k_d}{LC} S^2 + \frac{1 + k_p}{LC} S + \frac{k_i}{LC} \quad (4)$$

从式(4)可以看出,瞬时电压 PID 闭环控制系统是一个高阶系统。在控制工程实践中,考虑到控制系统既要有一定的响应速度,又要有一定的阻尼程度,还要求减少死区、摩擦等非线性因素对系统性能的影响,常常将高阶系统的增益调整到使系统具有一对闭环共振主导极点。这时,可以用二阶系统的动态性能指标来估算高阶系统的动态性能。

对于上式的三阶系统,如果根据控制系统的动态性能指标确定了闭环系统期望的阻尼比 ζ_r 和自然振荡频率 ω_r ,则系统期望的闭环主导极点为:

$$s_{r1,2} = -\zeta_r \omega_r \pm j \omega_r \sqrt{1 - \zeta_r^2} \quad (5)$$

则三阶系统的动态特性主要由式(5)得到的系统闭环主导极点决定。系统的闭环非主导极点,可以选取为:

$$s_{r3} = -n\zeta_r \omega_r \quad (6)$$

式中 n 是正常数, n 的取值越大则由 s_{r1}, s_{r2}, s_{r3} 三个极点确定的三阶系统响应特性越接近由闭环主导极点 $s_{r1,2}$ 决定的二阶系统,一般 $n=5 \sim 10$ 时均可。

由此得到了满足系统动态性能要求期望的闭环系统特征方程为:

$$C_C(s) = (s - s_{r1})(s - s_{r2})(s - s_{r3}) = (s^2 + 2\zeta_r \omega_r s + \omega_r^2)(s + n\zeta_r \omega_r) \quad (7)$$

用基于极点配置的思想,对比实际系统的特征方程式(1)得到:

$$\begin{cases} k_p = (2n\zeta_r^2 + 1)\omega_r^2 LC - 1 \\ k_i = n\zeta_r \omega_r^3 LC \\ k_d = (2 + n)\zeta_r \omega_r LC - R_1 C \end{cases} \quad (8)$$

式(8)是基于极点配置思想设计的逆变器瞬时电压反馈闭环 PID 控制器的参数,PID 控制器参数的选择直接与闭环系统的性能指标建立了量化关系。

从所选取的期望闭环极点均位于 s 平面的左半平面,就能知道按上述方法设计得到的 PID 控制系统是稳定的。

从控制器参数的设计中可见,在 n 取得足够大时逆变器闭环系统近似为二阶系统,此时按期望特性选取的阻尼比 ζ_r 和自然振荡频率 ω_r ,系统的动态振荡性、过渡过程响应时间均由二阶系统 ζ_r, ω_r 决定,所以控制系统能满足期望的动态指标要求。

3 PWM 电源系统仿真

取 $\zeta_r=0.5$, $\omega_r=800 \text{ rad/s}$,算出 $k_p=-0.86$, $k_i=80.6$, $k_d=0.0002$,主电路参数为 $v_{dk}=400 \text{ V}$, $u_{ref}=115 \text{ V}$,采用 Saber 仿真软件,得出逆变器输出三相电压和电流如图 4 所示。虽然结果与参考值不是完全吻合,但极点配置思想给出了 PID 参数的理论值,在此基础上,只需要稍加调节,就可以达到要求。

通过一系列的推导和研究,给出了三相 PWM 逆变电源控制系统 PID 参数的理论值,仿真初步验证了该参数的有效性。研究对于三相 PWM 逆变电源控制系统的设计具有较强的工程应用价值。

技术与方法 Technique and Method

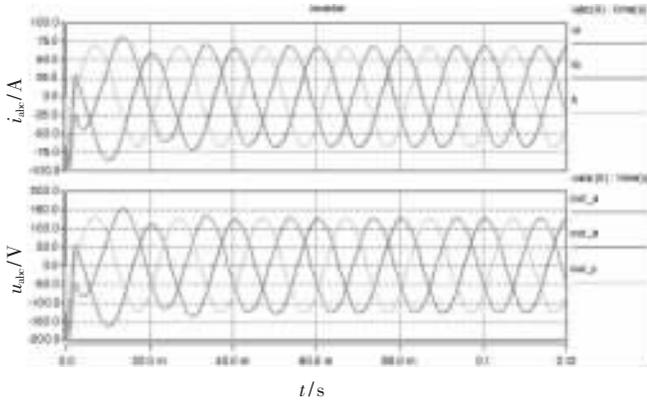


图 4 Saber 仿真输出图

参考文献

[1] TAHA M H, SKINNER D, GAMI S, et al. Power Electronics, Machines and Drives, 2002. International Conference on (Conf. Publ. No. 487), 2002; 235-240.

[2] 陈曦, 马江华, 杨振兴, 等. 基于 DSP 的三相 SPWM 逆变系统的设计[J]. 微型机与应用, 2010, 29(2): 86-88.
[3] 吴振顺, 肖原. 零极点配置智能 PID 控制器在系统控制中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 1(1): 54-57.
[4] 牛燕炜. 基于零极点分析法的谐振电路的频率响应研究[J]. 青海师范大学学报, 2006, 4(2): 30-33.
[5] 夏德铃, 翁贻方. 自动控制理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

(收稿日期: 2010-07-23)

作者简介:

吴小华, 女, 1969 年生, 教授, 主要研究方向: 电力电子和计算机测控技术。

王欢欢, 女, 1985 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力电子与电力传动。

郑先成, 男, 1977 年生, 副教授, 主要研究方向: 飞机电力系统分析与控制、自动测试系统以及嵌入式实时系统设计。

电子技术应用
APPLICATION OF ELECTRONIC TECHNIQUE
www.chinaAET.com