

基于积分分离+死区 PID 的逆变电路 控制系统研究*

李耀贵

(广东理工学院 工业自动化系, 广东 肇庆 526100)

摘要: 为了提高逆变电路模块控制性能, 在传统 PID 控制方法基础上提出了一种基于积分分离+死区 PID 控制的逆变电路控制方法, 可有效解决传统 PID 控制引起的控制量超过被控对象而造成系统振荡的问题。积分分离+死区 PID 控制算法是在积分分离 PID 控制算法内引入死区 PID 控制算法, 综合了两种控制算法的优点, 既可延长控制系统使用寿命又可对系统偏差进行限制。最后通过 MATLAB/Simulink 建立具有逆变电路模块的高频电源仿真模型, 将所提 PID 控制方法应用于其中, 验证了所提方法的有效性和实用性。

关键词: 逆变电路模块; 控制系统; 积分分离 PID 控制; 死区 PID 控制

中图分类号: TM 464 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)07-0100-05

Research on Inverter Circuit Control System Based on Integral Separation and Dead-Time PID*

Li Yaogui

(Department of Industrial Automation, Guangdong Polytechnic College, Zhaoqing 526100, China)

Abstract: In order to improve the control performance of the module of the inverting circuit, a control method of the inverting circuit based on integral separation and dead-time PID control was proposed. This control method could effectively solve the problem that the control quantity caused by the traditional PID control exceeded the controlled object, thus leading to the system oscillation. Integral separation and dead-time PID control algorithm introduced dead-time PID control algorithm into integral separation PID control algorithm. By combining the advantages of the two control algorithms, it could not only prolong the service life of the control system, but also limit the system deviation. Finally, the simulation model of high frequency power supply with inverting circuit module was established by MATLAB/Simulink, and the effectiveness and practicability of the proposed PID control method were verified.

Key words: inverter circuit module; control system; integral separation PID control; dead-time PID control

0 引言

为了实现对 IGBT 逆变电路的控制, 目前广泛采用 PID 控制策略。该控制策略具有数学模型简单、响应速度快、控制效果良好等优点^[1]。但是, 存在无法过滤外界干扰、鲁棒性能差等缺点, 就会限制 IGBT 逆变电路在输入电流不稳定和输入存在扰动或负载突变等工况下的使用。为了解

决上述问题, 需要实时修正 PID 控制算法里的参数, 但导致整个控制系统变得复杂, 控制效果大打折扣^[2-4]。为了对传统 PID 控制系统进行改进, 一些学者提出利用模糊算法对 PID 控制算法里的参数进行整定, 利用系统的误差及其变化率来对参数作出实时调整, 以适应不同工况要求^[5-7]。该方法在理论上具有较好的控制效果, 但在实际运行过程中, 由于模型的不确定, 整定出的参数不能

* 基金项目: 广东理工学院教学研究与改革项目(JXGG2019012); 广东理工学院“质量工程”项目(ZXKCY2019011)

作者简介: 李耀贵(1979—), 男, 硕士, 研究方向为自动控制。

满足需求,在实际中应用受到限制^[8-10]。

本文提出了一种基于积分分离+死区 PID 控制方法的 IGBT 逆变电路控制系统。其在传统积分分离 PID 控制基础上引入带死区的 PID 控制方法构成新的 PID 控制系统。以高频电源逆变电路为研究模板,通过 MATLAB/Simulink 建立仿真模型,再通过仿真波形对所提控制方法进行分析、验证。

1 传统 PID 控制策略

传统 PID 控制原理图如图 1 所示。其中: $r(t)$ 为控制系统的给定值; $e(t)$ 为控制系统给定值和实际输出值之间的偏差; $u(t)$ 为控制系统的实际输出值; $y(t)$ 为控制系统的被控变量。

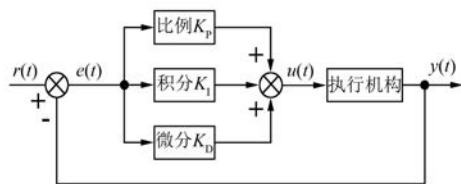


图 1 PID 控制系统原理图

传统 PID 控制又叫比例积分微分控制,其中用 K_p 作为控制系统的比例相,可以成比例反映系统的偏差信号; K_i 作为控制系统的积分相,可以对偏差信号进行积分运算,消除偏差; K_d 作为控制系统的微分相,可以对偏差信号进行微分运算,减少了系统的运算时间。根据以上分析可得,传统 PID 控制的控制规律为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_d}{dt} de(t) \right] \quad (1)$$

式中: T_i ——积分时间常数;

T_d ——微分时间常数。

将式(1)进行离散化处理,设定采样周期为 T ,在第 k 次离散化后,输出值可表示为

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_d}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (2)$$

在第 $(k-1)$ 次离散化后,输出值可表示为

$$u(k-1) = K_p \left\{ e(k-1) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + \frac{T_d}{T} [e(k-1) - e(k-2)] \right\} \quad (3)$$

式中: $e(k)$ 、 $e(k-1)$ ——第 k 次和第 $(k-1)$ 次采样信号之间的偏差。

用式(2)减式(3)可得传统 PID 算法的控制量,即输出改变量:

$$\Delta u(k) = K_p \Delta e(k) + K_i e(k) + K_D [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \quad (4)$$

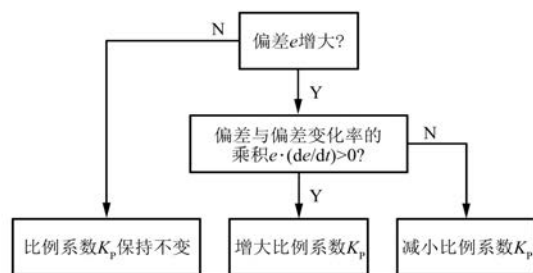
其中: $K_i = K_p T / T_i$, $K_D = K_p T_d / T$, $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$ 。

基于以上分析可得,传统 PID 控制算法使用比例、积分、微分对被控变量与系统给定之间的偏差进行线性运算,虽然简单、高效,但不适用于不同工况。

2 积分分离+死区 PID 控制策略

2.1 比例控制

当出现扰动时,系统输出量偏差变大,导致系统输出量偏差变化率也随之变大。当系统输出量的偏差与系统输出量的偏差变化率乘积大于零时,表明实际输出已经偏离输出参考指令信号,此时,应该放大控制器补偿环节的比例系数 K_p ,及时调整,使得实际输出向输出参考指令信号靠近。当系统输出量的偏差与系统输出量的偏差变化率乘积小于零时,表明实际输出与输出参考指令信号吻合,系统稳定,此时应该减小控制器补偿环节的比例系数 K_p ,避免比例系数较大引起系统超调而造成振荡^[6]。比例系数 K_p 调节原理如图 2 所示。



2.2 积分控制

PID 控制器中的积分 I 可以降低误差对系统的影响,提高控制器的稳态性能。但在起始阶段,由于实际输出值与输出指令信号的偏差较大,此时积分 I 会使 PID 控制器在运算过程中积分积累,造成系统超调振荡,对稳定性不利。

因此,在实际输出值与输出指令信号的偏差

较大时,使 PID 控制算法中的积分模块分离,既改善了控制性能,也降低了系统超调。根据系统误差来分析基于积分分离的 PID 算法原理,被控对象偏差曲线如图 3 所示。

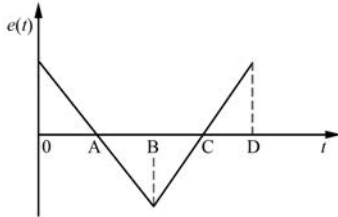


图 3 被控对象偏差曲线

从图 3 可以看出,在区间(A,B)和区间(B,C)出现超调,针对传统 PID 控制算法的不足,基于积分分离的 PID 控制算法仅在在区间(A,B)和区间(C,D)阶段进行 PID 控制,在区间(0,A)和区间(B,C)阶段采用 PD 控制,既保证了系统的快速响应特性,也避免了超调。PID 控制算法的控制量 $u(k)$ 可以写成:

$$u(k) = Ae(k) + g(k-1) \quad (5)$$

其中: $A = K_p \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T}\right)$; $B = K_p \left(1 + 2 \frac{T_d}{T}\right)$;

$C = K_p \frac{T_d}{T}$; $g(k-1) = u(k-1) - Be(k-1) + Ce(k-2)$ 。

在区间(0,A)和区间(B,C)阶段采用 PD 控制算法,控制算法的控制量 $u(k)$ 可以写成:

$$u(k) = A'e(k) - f(k-1) \quad (6)$$

其中: $A' = K_p \left(1 + \frac{T_d}{T}\right)$; $f(k-1) = B'e(k-1)$; $B' = e(k-1)$ 。

由图 3 分析可以看出,当输出偏差 e 和输出偏差变化率 de/dt 满足如下条件时,系统采用 PID 控制:

$$\begin{cases} de(t)/dt > 0, & e(t) > 0 \\ de(t)/dt < 0, & e(t) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

当满足如下条件时,系统采用 PD 控制:

$$\begin{cases} de(t)/dt < 0, & e(t) > 0 \\ de(t)/dt > 0, & e(t) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

2.3 积分分离+死区 PID 控制

基于积分分离的 PID 控制器在运算过程中,频繁的动作会造成系统振荡,不利于系统稳定,还

将降低控制器的使用寿命。为了在保证系统稳定的情况下,尽量延长控制器的使用寿命,需引入控制器的死区时间。具体方法是在控制算法中加入一个误差参数 e_0 ,当输出误差的绝对值 $|e|$ 小于等于设定的参数 $|e_0|$ 时,使控制器的控制输出 $u(k)$ 为上一个周期的控制输出 $u(k-1)$,即 $u(k) = u(k-1)$ ^[8]。将死区控制思想引入到基于积分分离的 PID 控制算法中,在高频电源控制系统中具有重要的应用价值。基于积分分离+死区 PID 的控制算法原理框图如图 4 所示。

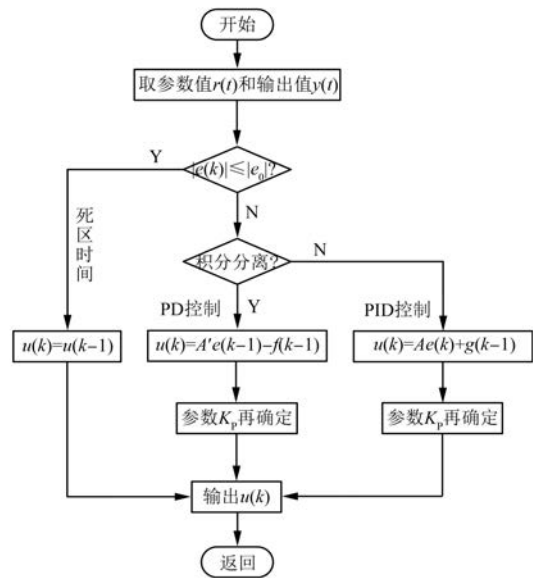


图 4 基于积分分离+死区 PID 的控制策略

图 4 中, $|e_0|$ 为死区参数,当 $|e(k)| \leq |e_0|$ 时,基于积分分离的 PID 控制器的控制输出为上次输出值。 ε 为积分分离参数,且 $\varepsilon \geq |e_0|$ 。

结合死区控制思想的基于积分分离的 PID 控制算法中,首先对实际输出和输出参考指令信号进行作差处理,得到误差信号 $e(k)$,判断误差信号的绝对值 $|e(k)|$ 与 $|e_0|$ 的关系,确定控制器是否动作,延长了基于积分分离的 PID 控制器和高频电源驱动电路的使用寿命;若 $|e(k)| > |e_0|$,则根据式(7)和式(8)确定采用 PID 控制或 PD 控制,最大限度减小系统超调量;最后判断比例系数 K_p 的具体参数值,保证系统具有良好的动态响应特性。

3 系统模型建立及仿真验证

具有 IGBT 逆变电路模块的高频电源电路拓

扑结构如图 5 所示。

为了减小开关损耗,实现输出电压的精准控制,需要构建合适的控制电路拓扑;同时,在高频电源电路拓扑内实现使软开关功能。本文采用脉

冲频率调制(PFM)变频控制。

在 MATLAB/Simulink 中,根据高频电源电路拓扑结构,建立高频电源系统仿真模型,如图 6 所示。

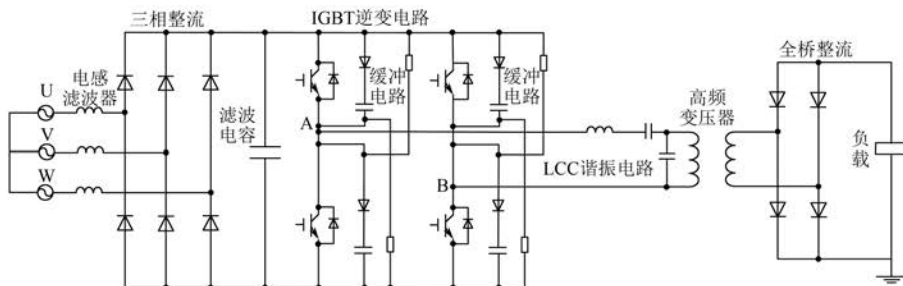


图 5 高频电源电路拓扑结构

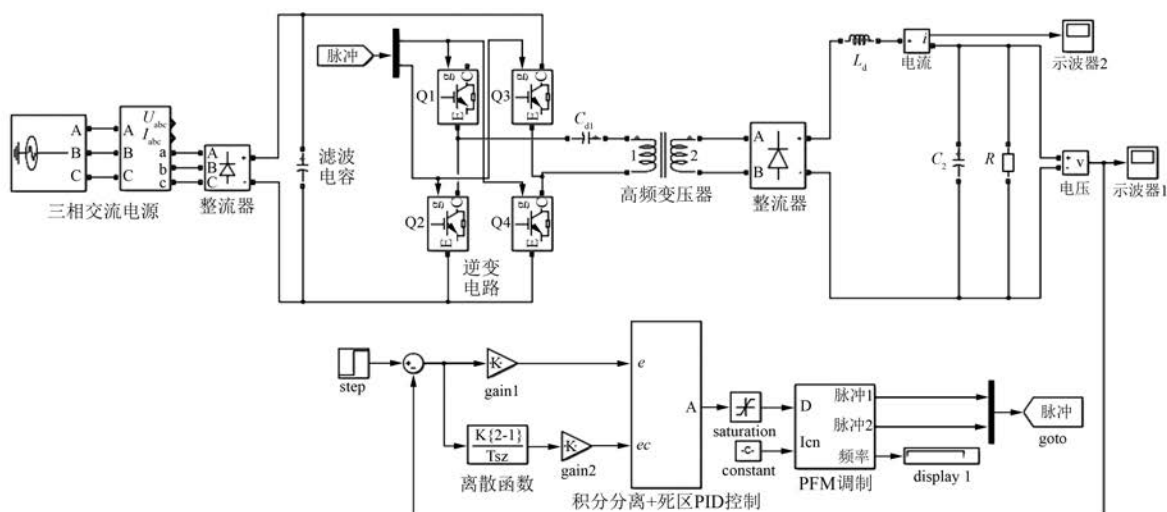


图 6 高频电源系统仿真模型

系统的仿真模型主要包括直流供电模块、全桥逆变器模块、升压变压器、整流电路模块、驱动信号产生模块及改进型 PID 控制模块,负载可等效为电容 C_0 与电阻 R_0 的并联形式。系统仿真模型高频电源的直流母线输入电压 $U_{in} = 500 \text{ V}$, 输出电压 $U_o = 60 \text{ kV}$, 工作开关频率 $f_s = 20 \text{ kHz}$, 负载侧接 $2 \mu\text{F}$ 电容、 $72 \text{ k}\Omega$ 电阻, 则基于积分分离+死区 PID 控制系统的初始整定参数为 $K_{p0} = 0.02$ 、 $K_{i0} = 200$ 。

在不加扰动的情況下,传统 PID 控制输出电压波形与本文所提出的基于积分分离+死区 PID 控制输出电压波形如图 7 所示。

由图 7 可知,在 PID 控制算法起动过程中,传

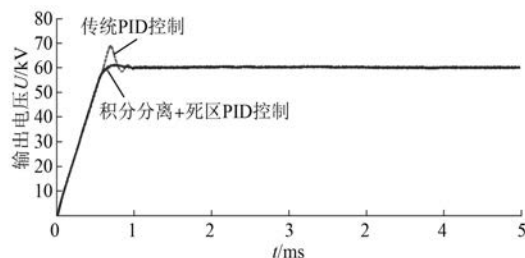


图 7 无扰动时,两种控制算法输出对比波形图

统 PID 控制输出电压由于惯性,存在较大的超调量,且会造成系统振荡,而本文所提出的基于积分分离+死区 PID 的控制输出电压波形则可以有效避免超调和系统振荡。

当直流母线电压在 $\pm 5\%$ 范围内波动,即 475~525 V 的范围内时,其他参数不变,基于传统 PID 控制算法和基于积分分离+死区 PID 控制算法的输出电压波形仿真曲线如图 8。

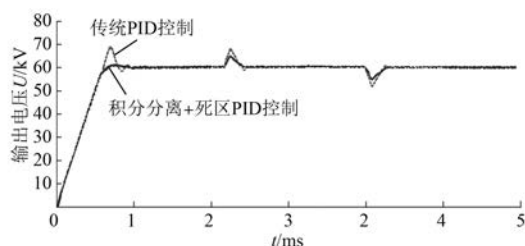


图 8 输入存在 5% 波动,两种控制算法输出对比波形图

由图 8 可知,当直流母线输入电压达到 525 V,常规 PID 控制输出电压存在较大超调量,输出电压最大值达到 68.28 kV,超调量达到 13.8% 且会造成系统振荡。同理,当直流母线输入电压减少 5%,至 475 V,输出电压也存在较大超调量。基于积分分离的 PID 控制无超调,不管直流母线输入电压增大 5% 或者减少 5%,均不存在超调现象,调节时间较短且整个过渡过程更为平稳。

当直流母线电压在 $\pm 0.5\%$ 范围内波动,即 497.5~502.5 V 范围内时,其他参数不变,基于传统 PID 控制算法和基于积分分离+死区 PID 控制算法的输出电压波形仿真曲线如图 9 所示。

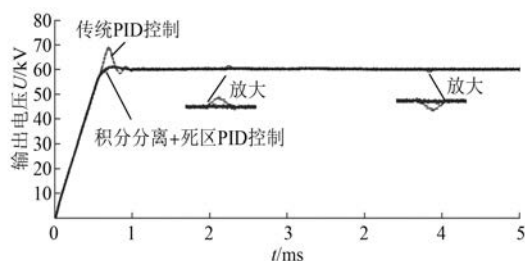


图 9 输入存在 0.5% 波动,两种控制算法输出对比波形图

图 9 中,当直流母线输入电压达到 502.5 V 时,常规 PID 控制输出电压响应偏差,对 IGBT 元器件下达动作指令。

基于积分分离的 PID 控制算法,因为引入死区参数,不响应波动范围很小的电压,起到避免元器件频繁动作作用的同时,还有效避免了控制系统频繁动作引起的系统振荡,比常规 PID 控制具有更好的抗干扰能力。

4 结 语

本文提出一种基于积分分离+死区 PID 的控制方案。该方案仅在输出电压偏差较大时,才引入积分环节,偏差较小时,去掉积分作用,提高了控制精度,在延长了控制系统使用寿命的同时还有效避免了控制系统频繁动作引起的系统振荡。

通过 MATLAB/Simulink 建立仿真模型进行仿真。仿真结果表明:基于积分分离+死区 PID 控制方法既能减少超调量,又能使控制性能得到较大的改善。所提控制方案适用于有逆变电路模块的高频电源且负载波动较大的场合,使输出电压具有动态性能良好的优点。

【参考文献】

- [1] 杨沛豪.无刷直流电机无位置传感器控制系统研究[D].兰州:兰州理工大学,2018.
- [2] LIN J, YUAN J S. A 300 mV, 6-bit ultra-low power SAR ADC [C] // 2016 13th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT), Hangzhou, 2016.
- [3] 刘景林,公超,韩泽秀,等.永磁同步电机闭环控制系统数字 PI 参数整定[J].电机与控制学报,2018,22(4): 26.
- [4] 吴宏鑫,沈少萍.PID 控制的应用与理论依据[J].控制工程,2003(1): 37.
- [5] 孟庆硕,许鸣珠,李玲瑞.基于自适应 PID 的异步电机电流控制[J].电机与控制应用,2018,45(4): 39.
- [6] 谢磊,聂洪平,何莹.改进型 PID 控制永磁偏置磁悬浮轴承[J].微特电机,2017,45(2): 23.
- [7] LIN J, YUAN J S. Analysis and simulation of capacitor-less ReRAM-based stochastic neurons for the in-memory spiking neural network [J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2018,12(5): 1004.
- [8] 李庆哲,梁秀满,刘振东,等.改进型增量式 PID 算法在 S7-200 中的程序实现[J].工业仪表与自动化装置,2013(6): 29.
- [9] 杨旭红,杨峰峰,郭凯,等.基于 SVPWM 和模糊 PI 参数自整定的 Z 源逆变器并网研究[J].电机与控制应用,2017,44(7): 59.
- [10] MU F Y, YE B S, LIN J, et al. An L-band low spurious multi-tuned frequency synthesizer [J]. Advanced Materials Research, 2014, 850/851: 441.

收稿日期: 2019-03-04