

继电保护 PWM 电流功放的三种闭环控制方法对比研究

周鹏鹏¹, 王峥夏¹, 李志勇¹, 李书琰², 王兰君¹

(1. 许昌开普电器检测研究院, 河南 许昌 461000; 2. 许昌供电公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 电流型功率放大器是电力系统实时数字仿真和继电保护测试的输出环节, 需要具有较高的幅值精度和较快的响应速度。其实现方式分为线性功放和 PWM 功放两种, PWM 功放因具有输出效率高等优点受到广泛关注, 但是与线性功放相比, PWM 功放需要解决更为复杂的滤波输出和闭环控制问题。针对 PWM 电流功放设计了三种闭环控制方法, 进行了详细的数值分析和研究, 对比了三种控制方法在低频精度、响应速度、幅值精度的不同侧重, 并对三种控制方法的选用提出了建议。

关键词: 继电保护; PWM 电流功放; 输出滤波器; 闭环控制方法; 数值分析

Comparative study of three closed-loop control methods for PWM current amplifier of relay protection

ZHOU Peng-peng¹, WANG Zheng-xia¹, LI Zhi-yong¹, LI Shu-yan², WANG Lan-jun¹

(1. Xuchang KETOP Electrical Apparatus Testing & Research Institute, Xuchang 461000, China;

2. Xuchang Power Supply Company, Xuchang 461000, China)

Abstract: As the output stage of power system real-time simulation and relay protection testing, the current type power amplifier needs high precision and quick response. There are two kinds of manners to implement the current type power amplifier: linear power amplifier and PWM power amplifier. The PWM power amplifier gains widespread concern due to its high output efficiency. But compared to the linear power amplifier, it needs to resolve the complicated problem of filtering output and closed-loop control. The paper designs three closed-loop control methods applicable to the current type power amplifier, makes detailed numerical analysis and research, contrasts the different emphasis of the three control methods in low frequency accuracy, response speed and amplitude accuracy, and offers suggestion to the choice of three control methods.

Key words: protection relay; PWM current amplifier; output filter; closed-loop control method; numeric analysis

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)04-0105-05

0 引言

继电保护对保证电网安全、稳定运行, 阻止事故的扩大, 发挥着极其重要的作用。随着电力系统自动化技术的发展, 继电保护装置的复杂性大大提高^[1-3], 相应地对继电保护的测试需要也越来越高^[4]。电力系统实时数字仿真是目前对继电保护功能和性能检测的主要手段, 仿真器输出的约±10 V 信号, 必须通过电压、电流功率放大器, 放大到 100 V/1 A(5 A)量级才能与继电保护装置相连^[5], 因此功率放大器的输出精度和响应速度对试验结果起到决定作用。

适用于继电保护的电流功率放大器有两种实现方式: 线性功放和 PWM 功放。虽然线性功放在输出精度和噪声控制方面具有优势^[6], 但是其 AB

类结构决定了较低的转换效率, 造成其散热器重量很大, 也很难长时间输出大电流。PWM 功放属于 D 类放大器, 其输出器件工作在开通和关断状态, 具有极高的转换效率, 大功率输出时效率可超过 90%^[7], 只需要很小的散热器就可以长时间输出大电流。

为了滤除 PWM 输出中的载波频率, 恢复出有用的低频信号, 必须使用 LC 滤波器。由于 LC 滤波器的谐振特性, 因此 PWM 功放的闭环控制就变得比较困难。D 类放大器在音频领域比较成熟, 音频放大器属于电压功放, 反馈电压大多取自 LC 滤波器前, 负载为 2~8 Ω, 并且允许部分载波频率进入扬声器; 用于继电保护的 PWM 电流功放, 反馈电流必须取自负载, 负载阻抗为 0.1 Ω 左右, 并且载波频率必须尽可能滤除; 因此音频放大器的控制

方法不能直接用于 PWM 电流功放。文献[8-9]提到了在 PWM 电流功放使用 PID 控制方法,但对控制效果和性能没有深入研究。本文设计了三种闭环控制方法,从阶跃性能和频率响应对三种方法进行了数值分析,并对三种方法进行了优缺点对比,最后对三种控制方法的选用提出了建议。

1 PWM 电流功放的设计指标与数学模型

本文设计的电流功放主要指标为:输出负载变化范围:0.1~0.3 Ω,输出频率变化范围:10~3 kHz,输出电流最大 40 A 有效值。

由于 PWM 放大器的纹波和死区时间^[10],输出波形具有较大的畸变,因此必须引入负反馈控制以减少失真,从而提高 THD 的性能指标。如图 1 所示,PWM 电流功放主要输入环节、串联校正、PWM 生成环节、输出滤波器、反馈测量五部分组成,其中串联校正和输出滤波器是动态特性的主要影响因素。

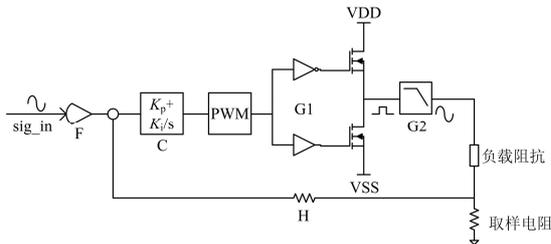


图 1 PWM 电流功放的组成部分

Fig. 1 Components of the PWM current amplifier

1.1 数学模型及其简化

PWM 电流功放各个环节数学模型分析:输入环节 F 完成输入信号缩放,可简化为比例环节;PWM 生成环节 G1 完成模拟量的脉宽调制,可简化为比例加延时环节,延时时间约 300 ns;反馈环节 H 将输出电流变换为小电压,可简化为比例环节。输出滤波器 G2 为 LC 滤波器,数学模型为两阶到四阶的振荡环节,输出电压经负载阻抗变换为电流;串联校正 C 是待设计的补偿环节,一般为比例积分校正。整个系统的数学模型是典型的单输入单输出系统,系统结构如图 2 所示。

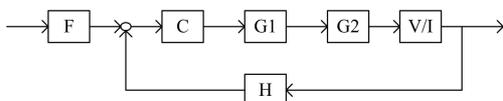


图 2 PWM 电流功放的数学模型

Fig. 2 Mathematical model of the PWM current amplifier

1.2 输出滤波器参数设计

由于继电保护测试的高精度需求,输出纹波必须被过滤到较低水平,选择纹波衰减量大于 60 dB;为了满足输出 3 kHz 信号的要求,需要较高的载波频率,考虑到 MOSFET 器件及调制手段的限制,选取载波频率为 300 kHz。三阶 LC 滤波器的衰减速度约为 60 dB/十倍频程,则截止频率应小于等于 30 kHz;两阶 LC 滤波器的衰减速度约为 40 dB/十倍频程,则截止频率应小于等于 9 kHz。

1.3 直流电源参数的确定

PWM 输出级采用半桥拓扑,因此需要正负直流电源,直流电压的确定对 PWM 逆变的工作状态具有重要意义:如果偏大,PWM 的最大调制比偏小;如果偏小,输出波形将发生削顶畸变^[11]。

在输出频率为 3 kHz 的情况下,LC 滤波器的压降最大,初步假定负载上的电压衰减到 60%,则直流电源电压最小值由式(1)决定^[11]。

$$V_{dmin} = \sqrt{2} \times I_{max} \times R_{max} \div 60\% = 1.414 \times 40 \times 0.3 \div 0.6 = 28.3 \text{ V} \quad (1)$$

因此初步选定直流电源电压为 ±30 V。负载电压的衰减比例必须小于负载阻抗的衰减比例,这样才能保证输出电流的恒定。

2 控制方法及结果分析

2.1 三阶贝塞尔滤波器,比例积分校正

当负载阻抗降低时,LC 滤波器的幅频特性下降,因此必须按最大负载 0.3 Ω 设计滤波器。选择三阶贝塞尔 LC 滤波器,滤波器结构如图 3 所示,传递函数见式(2),伯德图见图 4。其中 L₁=4.2082 μH, L₃=0.6444 μH, C₂=20.595 μF, R=0.3 Ω,滤波器在 300 kHz 处有 62 dB 衰减量,负载为 0.1 Ω 时有 71 dB 衰减量。

$$G_2 = \frac{R}{L_1 L_3 C_2 S^3 + R L_1 C_2 S^2 + (L_1 + L_3) S + R} \quad (2)$$

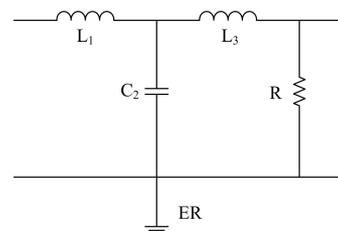


图 3 三阶 LC 滤波器结构图

Fig. 3 Structure chart of the third order LC filters

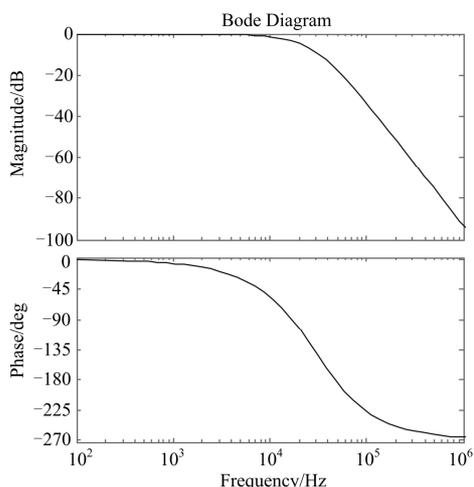


图 4 三阶 LC 滤波器伯德图

Fig. 4 Bode diagram of the third order LC filters

由于滤波器在 30 kHz 之后相位迅速越过 180° , 只能在 30 kHz 之前实现比例积分校正。经过优化, 校正传递函数见公式 (3), 校正后开环伯德图见图 5。

$$C = 0.2 + \frac{2\pi \cdot 5 \cdot 10^3}{s} \quad (3)$$

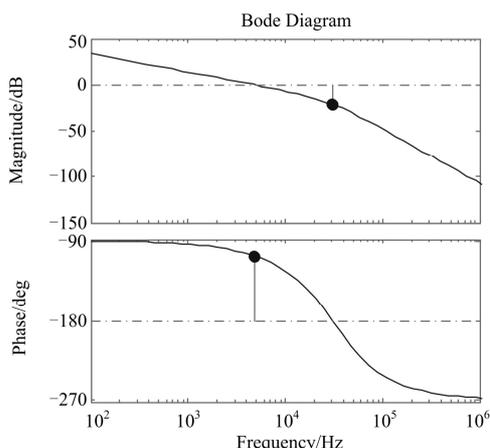


图 5 校正后开环伯德图

Fig. 5 The corrected open loop Bode diagram

在开环传递函数中有积分环节, 因此稳态误差为 0, 输入环节 F 增益为 1。这种控制方法的主要性能指标见表 1 和表 2。

表 1 控制方法 1 的阶跃响应

Table 1 Step response of control method 1

负载/ Ω	上升时间/ μs	超调量/%	稳定时间/ μs
0.3	47.7	0.0	84.6
0.1	26.5	32.9	236

表 2 控制方法 1 的频率性能

Table 2 Frequency performance of control method 1

频率/负载 (Hz/ Ω)	控制误差/ %	相位滞后/ deg	滤波器压降/ %
50/0.3	-0.01	1.06	0.003
1k/0.3	-0.81	11.5	0.177
3k/0.3	-6.67	33.8	1.576
50/0.1	0.01	0.32	0.017
1k/0.1	1.66	4.01	4.214
3k/0.1	15.2	14.5	25.18

可以看出, 控制方法 1 的基波精度比较高。但是在 0.1Ω 负载时, 由于相位裕量只有 37.5° , 造成阶跃超调量和稳定时间大大增加。

2.2 两阶相位平坦滤波器, 比例校正

控制方法 1 的低频段幅频斜率为 20 dB , 造成 3 kHz 处开环增益只有约 5 dB , 因此控制误差较大。两阶 LC 滤波器的幅频斜率约为 40 dB , 如果设计一个相位平坦的滤波器, 就能够增加 3 kHz 处的开环增益, 从而改善 3 kHz 的控制误差。两阶 LC 滤波器结构如图 6 所示, 传递函数见式 (4), 伯德图见图 7。其中 $L=20 \mu\text{H}$, $C=15 \mu\text{F}$, $R=0.3 \Omega$, 滤波器在 300 kHz 处有 60.7 dB 衰减量。

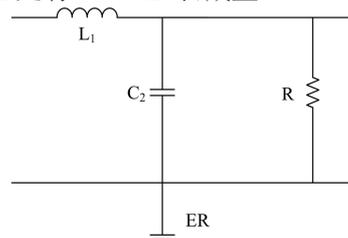


图 6 两阶 LC 滤波器结构图

Fig. 6 Structure chart of the second order LC filters

$$G_2 = \frac{R}{LCRS^2 + LS + R} \quad (4)$$

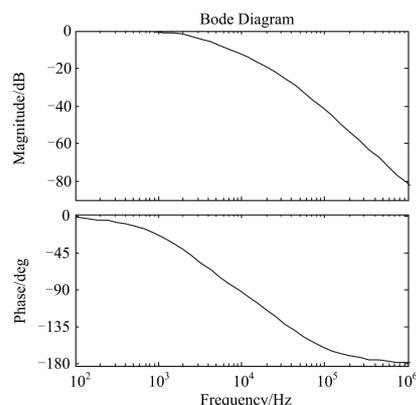


图 7 两阶 LC 滤波器伯德图

Fig. 7 Bode diagram of the second order LC filters

该滤波器相位滞后 137° 增益为 -28 dB , 因此

3 结论

本文分析了继电保护 PWM 电流功放的数学模型, 并设计了三种闭环控制方法, 分别计算了三种方法的阶跃响应和频率特性, 重点分析了负载阻抗变化对控制性能的影响。三种方法在低频精度、响应速度、幅值精度具有不同的侧重, 可以根据实际需求进行选用。其中控制方法 1 具有无需校准的基波精度, 适合于对阶跃性能要求不高的场合; 控制方法 3 比较适合于校准仪器使用, 控制方法 2 比较适合于实时数字仿真系统。如果将控制方法 3 的思想融合到控制方法 2, 在负载接入后用平均值对输入环节 F 进行校准, 就可以在控制精度和响应速度上达到更好的平衡。

参考文献

- [1] 汪旸, 尹项根, 张哲, 等. 基于遗传信息融合技术的广域继电保护[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 174-180.
WANG Yang, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Wide area protection based on genetic information fusion technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 174-180.
- [2] 王兴国, 黄少锋. 基于复解析带通滤波器的固有频率自适应提取原理和方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 179-185.
WANG Xing-guo, HUANG Shao-feng. Natural frequency adaptive extracting principle and method based on multiple analysis band-pass filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(12): 179-185.
- [3] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于综合阻抗比较原理的广域继电保护算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 179-187.
LI Zhen-xing, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. A study of wide-area protection algorithm based on integrated impedance comparison[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 179-187.
- [4] 李先妹, 黄家栋, 唐宝锋. 数字化变电站继电保护测试技术的分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 105-108.
LI Xian-mei, HUANG Jia-dong, TANG Bao-feng. Research on testing technology of relay protection for digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 105-108.
- [5] 李付亮, 吴涛, 周有庆. 继电保护测试仪用高电压功率放大电路的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 78-81.
LI Fu-liang, WU Tao, ZHOU You-qing. Research on high-voltage power amplifying circuit in protective relay test device[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 78-81.
- [6] 李辰, 李开成, 陈浩, 等. 继电保护测试仪用大电流功率放大器的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 129-134.
LI Chen, LI Kai-cheng, CHEN Hao, et al. Research on high-current power amplifying circuit in protective relay test device[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 129-134.
- [7] 李婕妤. PWM 调制的无滤波 Class D 音频功率放大器的设计[D]. 南京: 东南大学, 2008.
LI Jie-yu. The design of PWM filterless class D audio power amplifier[D]. Nanjing: Southeast University, 2008.
- [8] 隗思. 微机继电测试系统开关功率放大技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
WEI Si. The research of switching power amplifier for microprocessor relay protection testing system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011.
- [9] 冯波. 用于电力系统混合仿真器的 D 类功率放大器的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 1999.
FENG Bo. The research on class D amplifier used in hybrid power system simulator[D]. Beijing: North China Electric Power University, 1999.
- [10] 王军生. 开关功率放大器与 DSP 在电力系统谐波模拟装置中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
WANG Jun-sheng. Application of switching amplifier and DSP in electric power system harmonics simulator rig[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.
- [11] 吴昊, 管松敏, 陈乾宏, 等. 继电保护测试仪用 30V/100A 宽变频电流功放的研制[J]. 电工电能新技术, 2011, 30(4): 35-39.
WU Hao, GUAN Song-min, CHEN Qian-hong, et al. Development of 30 V /100 A wide-variable-frequency current power amplifier in relay protection testing apparatus[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2011, 30(4): 35-39.
- [12] 武传欣. 一款基于 $\Sigma\Delta$ 调制技术的高性能 D 类音频功率放大器的设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
WU Chuan-xin. A high performance class D audio power amplifier based on sigma-delta modulation[D]. Xi'an: Xidian University, 2009.

收稿日期: 2013-05-24; 修回日期: 2013-06-14

作者简介:

周鹏鹏 (1982-), 男, 硕士, 工程师, 从事电力系统仿真以及高压直流输电的研究; E-mail: zhoupeng@ketop.cn

王峥夏 (1986-), 女, 本科, 助理工程师, 从事电力系统仿真方面的研究;

李志勇 (1986-), 男, 硕士, 助理工程师, 从事电力系统仿真方面的研究。