

电压之间的转化;脉冲变压器按照输出的实际需求把高频的方波电压升压到目标的脉冲电压,最后借助输出滤波电路和续流电路优化脉冲的波形,提升输出的稳定性^[1]。

为了能够提升主电路的功率密度和可靠性,IGBT的器件选择使用英飞凌FF450R17ME4的型号,额定电压为1700V、额定电流为450A,可以满足高功率脉冲输出的实际需求;整流桥选择使用模块化的三相整流桥,其有着体积小且散热性能较好的特点;LC滤波电路的电感和电容的参数按照输出纹波的实际要求开展设计,以此保证滤波之后的直流电压纹波系数要低于1%。

(二) 控制与保护电路模块划分

控制和保护电路是保证系统能够稳定运行的主要部分,其包含闭环反馈的采集模块、改进PID控制模块、自适应保护模块、驱动模块和人机交互模块^[2]。不同模块的功能为:

闭环反馈采集模块:使用高精度电压传感器和电流传感器来采集主电路的输出电压及电流信号,经过信号调整电路开展滤波、放大和隔离的处理之后,传输到控制模块与保护模块中;

改进PID模块:以反馈采集的电压和电流信号为主及西宁输入,借助PSO优化的PID算法计算实际的调节量,输出控制信号到驱动模块中;

自适应保护模块:实时地监测主电路和控制电路的实际工作状态,主要包含IGBT器件的温度、直流母线电压和输出电流等,识别故障的类型和故障的等级,并执行相对应的保护动作;

驱动模块:把控制模块输出的弱电控制信号转换成为强电驱动的信号,驱动IGBT器件的导通和关断,并同步实现控制电路和主电路的电气隔离;

人机交互模块:使用触摸屏及按键来实现输出电压、脉冲频率和脉冲宽度等的参数设定,并显示系统的工作状态和故障信息等。

二、闭环反馈控制系统设计

闭环反馈控制系统的主要目标为:实现高功率脉冲电源输出参数的高精度且稳定的控制,以此抵御一些外部的扰动和内部参数漂移等的影响^[3]。文章所涉及的闭环反馈控制系统主要以输出电压及电流为双反馈量,使用PSO优化的改进PID算法作为主要的控制核心,提升系统的调节精度和影响的速度。

(一) 反馈信号采集与调理

反馈信号的采集精度会直接地影响到闭环控制的效果,所以要选择精度较高且响应速度快的传感器及信号调理电路。电压采集使用LEM公司的LV25-P电压传感器,测量的范围在0-1000V,精度的等级为0.5级,响应的时小于1μs,可以精准地采集到输出脉冲电压信号;电流的采集使用LA25-NP的电流传感器,测量的范围在0-5000A,精度的等级为0.5级,响应的时小于0.5μs,可以实时地采集输出的电流信号。

信号调理电路主要负责实现对于传感器输出信号的滤波、放大等的处理。因为采集的信号中可能含有高频的噪声,使用RV低通滤波电路来滤除这些高频干扰,截止的频率设定在10kHz;传感器输出的信号是微弱的电流信号,借助运算放大

器转换成为0-5V的电压信号,以此满足控制芯片在输入上的需求;为了避免主电路的强电干扰影响到控制电流,使用光耦合隔离电路来实现信号的隔离传输,以此提升系统的整体抗干扰能力。

(二) 改进PID控制算法设计

传统PID控制算法通过比例(P)、积分(I)、微分(D)三个环节的协同作用实现对输出参数的调节,其控制规律为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

其中, $u(t)$ 为控制器输出, K_p 为比例系数, K_i 为积分系数, K_d 为微分系数, $e(t)$ 为设定值与反馈值的偏差。

传统的PID算法在结构上比较简单,也比较容易实现,但是在一些复杂的工况之下,固定的PID参数很难适应系统参数的动态变化,使得调节的精度下降,响应的速度也会变慢,严重的还会出现超调的情况。为了能够解决这样的问题,文章使用PSO算法对PID的参数开展动态的整定,以此实现PID参数的自适应优化。PSO算法是一种基于群体智能的优化算法,借助模拟鸟群的觅食行为,把每一个粒子看作成为一个潜在的解,借助粒子的位置和速度更新来实现对最优解的搜索。把PID参数的 K_p 、 K_i 、 K_d 作为粒子的位置向量,以系统的超调量和调节时间及稳态误差的加权和作为适应度的函数,借助PSO算法搜索最优的PID参数组合。

改进之后的PID控制算法工作流程为:

1. 初始化PSO算法参数,包含粒子数量、搜索范围、最大迭代次数和学习因子等;
2. 把初始化之后的PID参数代入到控制系统中,计算出系统的超调量、调节时间和稳态误差,创建适应度函数;
3. 按照适应度函数的数值来更新粒子的实际位置与速度,并判断是不是达到了最大的迭代次数或者最优的适应度数值;
4. 如果达到终止的条件,则会输出最优的PID参数,如果没有达到,则会返回步骤2继续迭代;
5. 把最优的PID参数应用在PID控制器中,按照反馈的偏差来调节输出的控制量,并实时地监测系统的实际运行状态,如果出现工况的变化所导致的调节性能下降,要重新启动PSO算法开展参数整定。

(三) 闭环控制逻辑实现

闭环控制的逻辑使用STM32F407作为主要的控制芯片,这一芯片有着高性能的ARM Cortex-M4内核,主频高达168MHz,有着丰富的外设接口,可以满足高精度控制及快速数据处理的相关需求^[4]。控制芯片的实际工作流程为:

1. 借助人机交互模块获得用户所设定的输出电压和电流等参数;
2. 闭环反馈采集模块会把所采集到的电压和电流信号传输到控制芯片的ADC接口中,经过ADC转换成为数字信号;
3. 控制芯片计算设定值和反馈值的偏差,调用改进的PID算法来计算调节量;
4. 按照调节量来生成PEM控制信号,借助定时器输出到驱动模块中;

5. 驱动模块把 PEM 信号转换成为驱动信号, 控制 IGBT 器件的导通和关断, 调节主电路的实际输出参数, 从而实现闭环控制。

三、自适应保护系统设计

自适应保护系统的主要目标为: 实现高功率脉冲电源相关故障的全面检测、精准识别和灵活的防护, 以避免故障扩大所导致的电源设备损坏或者终端的设备故障^[5]。文章的自适应保护系统使用“多维度检测+分级式保护”的基本思路, 实现对于过压、过流、过热和短路等故障的自适应防护。

(一) 多维度故障监测模型

多维度的故障检测模型借助采集主电路和控制电路的一些关键状态的参数, 实现对相关故障的全方位检测。主要检测的参数为: 直流母线电压、输出电压、输出电流、IGBT 器件温度、散热风扇转速等。对于不同的检测参数, 设计相对应的检测电路及故障的判断逻辑:

过压故障检测: 借助电压的传感器采集到直流母线电压及输出电压, 并设定电压的阈值(直流母线电压的阈值为 1200V, 输出电压阈值为设定值的 110%), 如果所采集到的电压信号超过了相关阈值, 则会判定为过压故障;

过流故障检测: 借助电流传感器所采集到的输出电流, 设定电流的阈值(为额定电流的 120%), 如果所采集到的电流信号超过阈值, 则会判定为过流故障;

过热故障检测: 在 IGBT 器件表面粘贴 PT100 温度传感器, 以此采集器件的温度, 设定温度的阈值(85℃), 如果所采集到的温度超过了阈值, 则会判定为过热故障;

短路故障检测: 借助电流传感器来采集输出的电流, 如果电流的信号在短时间之内急剧上升到额定电流的 3 倍以上, 则判定其为短路故障。

为了有效提升故障检测的可靠性, 使用“多传感器融合”及“故障防抖”的设计: 针对一些关键的检测参数, 使用多个传感器同时采集, 借助数据融合算法来提升检测的精度; 设置故障防抖时间(5μs), 如果检测到的故障信号的持续时间超过了防抖实践, 才会被判定成为真实的故障, 避免因瞬时的干扰导致误保护。

(二) 分级式自适应保护策略

按照故障类型及故障的实际程度, 把保护的等级分为三个级别: 预警级、将额级和紧急停机级, 不同的保护等级对应不同的保护动作, 以此实现自适应防护。各个级别保护的判定条件和保护的动作为:

预警级保护: 当所检测到的参数接近阈值但是没有超过阈值的时候, 会判定为预警级的故障。此时所执行的保护动作为: 人机交互模块显示预警信息、启动散热风扇的高速运行、记录故障预警时间及参数;

降额级保护: 当时欧检测的参数超过了阈值, 但是没有达到危险值的时候, 会被判定成为降额级的故障。此时所执行的保护动作为: 输出预警信号、借助改进 PID 控制算法降低输出的功率、加大散热风扇的转速、实时监测故障参数的变化, 如

果故障消除, 会逐渐地恢复到额定功率; 如果故障恶化, 则会升级成为紧急停机保护;

紧急停机保护: 当所检测到的参数达到了危险值的时候, 判定为紧急停机故障。此时所执行的保护动作包含: 立即输出停机信号, 切断驱动模块的 PEM 信号, 关断 IGBT 器件; 触发继电器切断主电路的电源; 人机交互模块显示故障的类型、时间和故障的具体参数; 记录故障信息到存储模块中, 方便后续的故障排查工作。

(三) 保护系统硬件与软件实现

保护系统的硬件主要包含故障信号采集电路、信号调理电路、保护动作执行电路和报警电路。其中, 信号采集电路借助电压传感器、电流传感器和温度传感器等来采集状态的参数; 信号调理电路对所采集的信号开展滤波、放大和隔离的处理, 并上传到控制芯片中; 保护动作执行电路主要由继电器、IGBT 驱动禁止电路组成, 按照控制芯片所输出的保护信号执行相关的保护动作; 报警电流使用声光报警方式, 当出现故障的时候, 会发出声光的报警信号, 以此提醒相关工作人员及时地处理。

保护系统的软件是基于 STM32F407 的固件库来开发, 使用模块化的编程思路, 主要包含故障检测模块、故障等级判断模块、保护动作执行模块和故障信息记录模块。软件的工作流程为:

1. 系统启动之后, 初始化相关的传感器与外设;
2. 实时地采集相关状态参数, 开展信号调理和数据的处理;
3. 按照故障来判断逻辑的判定是不是存在故障和故障的等级;
4. 按照故障等级执行相对应的保护动作;
5. 记录故障的信息, 更新人机交互界面所显示的内容;
6. 故障排除之后, 借助复位操作来恢复系统的运行。

结束语

文章围绕着高功率脉冲电源的闭环反馈和自适应保护系统进行设计研究, 借助优化反馈控制算法来提升电源输出的稳定性, 依托多参数的检测和动态的调节机制来创建自适应保护体系, 期望能够解决高功率工况之下的电源容易过载或者输出精度不足等问题。

[参考文献]

- [1]王燕, 张钦, 林福昌, 等. 高功率高储能脉冲电源中重频电感的设计与分析[J].强激光与粒子束, 2022, 34(05): 162-168.
- [2]杨丹, 康强, 金晖, 等. 高功率脉冲电源的强电磁脉冲干扰防护技术研究[J].科技与创新, 2020, (21): 36-37.
- [3]马游春, 刘鹏媛, 李迪, 等. 高功率脉冲电源超大电流检测技术研究[J].电子器件, 2020, 43(02): 321-326.
- [4]何巧, 马游春, 马子光, 等. 高功率脉冲电源电压测试系统设计[J].仪表技术与传感器, 2020, (02): 46-49+113.
- [5]任人.级联拓扑高功率脉冲充电电源研究[D].西安电子科技大学, 2019.