

[电能转换]

基于VVC控制的大功率逆变电源

文/刘培哲 张平

艾德克斯电子（南京）有限公司研发部开关电源组

阐述峰值电流模式的工作原理，将电压外环、峰值电流内环的控制模式应用在大功率开关电源的控制上，为加快输出电压的响应速度，采取将输出电压前馈的控制方式，即电压-电压-电流的控制。在Simulink下，仿真整个控制系统的原理，并搭建硬件平台，测试该算法的工程实现性。

作为大功率开关电源的控制方法，电压型控制算法和电流型控制算法的理论已进行深入研究，并得到广泛应用。电压单环控制算法采取的是采集输出电压做电压闭环，只有在输出电压有变化时，才会反馈到电压环路上，导致设备的响应速度比较慢。传统的电压电流双闭环的控制算法采用电压外环、电流内环的控制算法，电流内环采集电感电流或是负载电流作为电流内环的反馈量，负载电流里包括电容电流，可以加快设备的动态响应速度；电感电流可以用来做峰值电流限制，以增强设备的可靠性。本文中采用的峰值电流控制模式，只能采集电感电流作为电流环路的反馈量。电压外环采集输出电压作为电压环路的反馈量，电压环路的输出作为电流环路的给定值。鉴于电流环路的带宽在开关频率的 $1/5 \sim 1/10$ ，而峰值电流控制的电流环带宽可以超越传统电流内环的带宽，从而使得电流环的响应速度更快。由于本文采取的是电感电流作为电流环的反馈量，其中不包括电容电流，导致只有在输出电压发生变化时，才能引起环路的变化，从而使得设备的响应速度较慢。为了加快设备的响应速度，将输出电压引入占空比的控制中，当输出电压稍微变化时，可以快速地反馈到占空比上，从而加快设备的响应速度。

工作原理

1. 峰值电流控制原理

峰值电流控制原理图如图1所示，稳态工作时，电压环路输出作为峰值电流的指令值，当电感电流的峰值达到指令电流值时，关断PWM信号；在下一个时钟周期的开始时刻，复位PWM信号，使PWM信号输出高电平，从而控制功率管开通。由于峰值电流控制时会产生次谐波震荡，所以在电感电流上要增加斜坡补偿，即电感电流的斜率加上斜坡补偿的斜率，当二者的总和达到指令电流值时，关断PWM信号，从而控制功率管的关断^[1]。

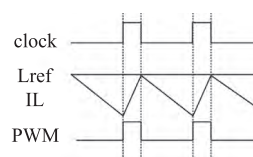


图1 峰值电流控制原理图

2. DC-AC原理

单相逆变器原理如图2所示，此部分为逆变电源的核心部分。三相逆变电源由三个单相逆变电源组成，可以输出三相三线，也可以输出三相四线。图2中 L 为逆变器的滤波电感， C 为滤波电容， R_L 为逆变器的负载， C_{bus} 为母线电容。功率管按照开关频

率切换，将直流电压转换成占空比变化的矩形波，矩形波通过LC滤波器，将高频电压滤除，输出标准的正弦波^[2]。

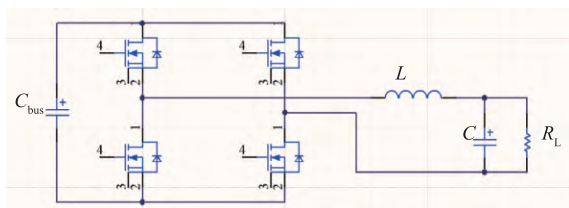


图2 单相逆变器原理图

硬件设计

1. 采样电路

如图3所示，电感电流采样采取的是差分采样方式，这样可以更好地抵抗功率级带来的干扰，保证峰值电流的准确性。差分信号来自采样电阻，将采样电阻两端的信号，差分输入到运算放大器两端，由于做了峰值电流限制，电感电流RC滤波参数设计得比较高，不影响开关频率处的信号。

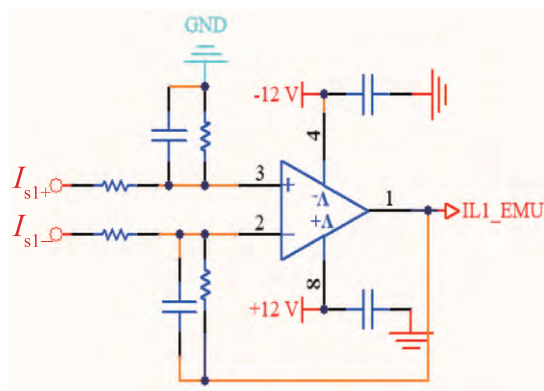


图3 电感电流采样电路

2. VVC控制电路

如图4所示，前部分电路为求和电路，将电感电流、斜坡补偿和输出电压进行求和，结果作为比较器的负端输入、电压环路输出作为比较器的正端输入，当负端信号增大到和正端信号相等时，比较器输出信号为高电平，其余时间信号为低电平，此电平信号作为触发PWM关断的信号。

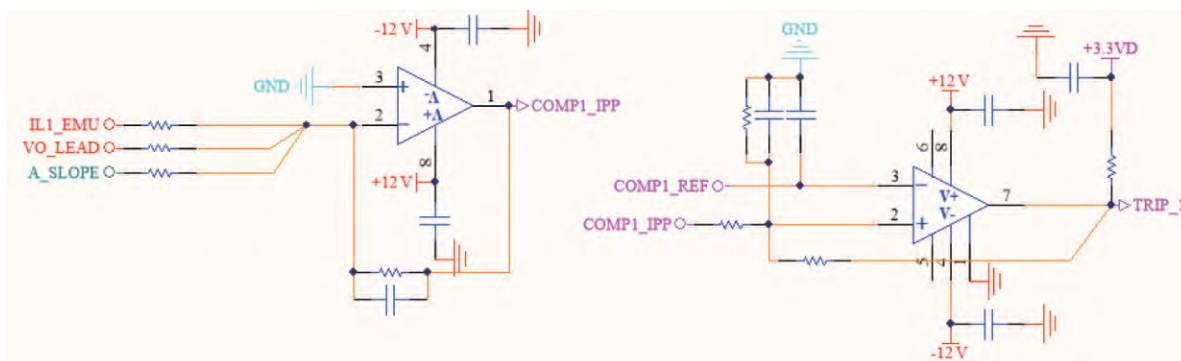


图4 峰值电流控制电路

软件设计

1. 电压环路设计

因为电流采用峰值电流控制，电流环路的带宽够高，在设计电压环路时，取电流环路闭环增益为1，相位未产生偏移^[3]。如图5所示是电压控制环路简化图，输出电压和电感电流的传递函数如下，其中字母含义见图5中标识，即

$$G_v = \frac{s \times C \times esr \times RL + RL}{s \times C \times (esr \times RL) + 1}$$

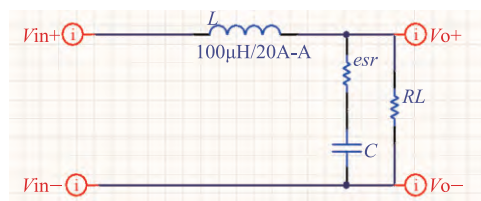


图5 电压环路电路

2. 补偿器设计

本文电压环路包括瞬时值电压环路及电压有效值环路，其中电压有效值环路属于慢速环路，参数设计比较简单，此处不再赘述。下面主要设计

按照图8所搭建的模型图,进行仿真设置,在0.01 s时,设置输出电压为166 V (RMS),在0.02 s时,突加纯阻性负载 $5.5\ \Omega$,由于在电压过零点处突加负载,此处未出现电压下降的情况。图9为参考电压与输出电压波形图,图10为电流波形图,图中电流有效值为30 A,输出电压有效值为166 V,单相功率为5 kW,三相输出总功率为15 kW。

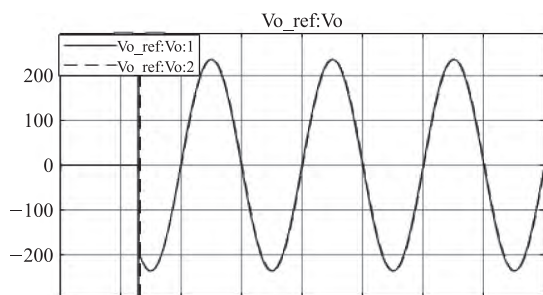


图9 输出电压仿真图

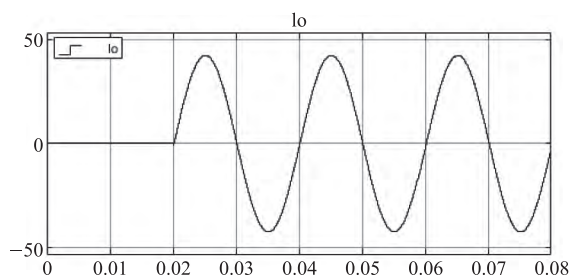


图10 输出电流仿真图

将突加纯阻性负载的时间改为0.025 s,再次仿真该模型,查看电压电流波形。图11为电压仿真波形图,图12为空载时,电压上升时间仿真图,测量其时间大约为270 μs ;图13为电压峰值处突加阻性负载时,电压恢复波形图,测量其时间为377 μs 。

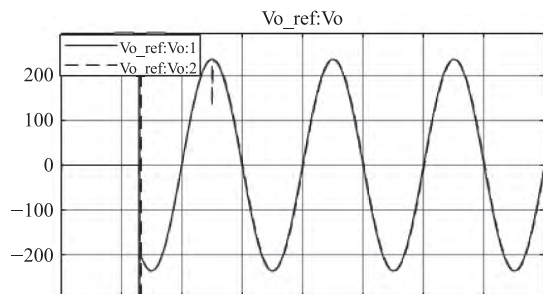


图11 电压波形仿真图

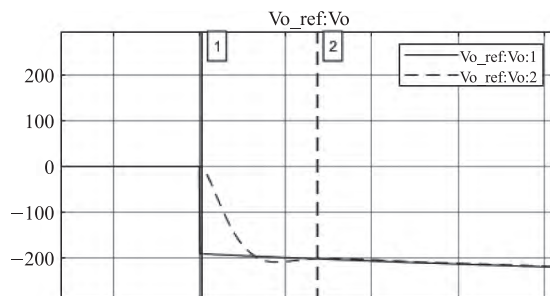


图12 空载电压上升仿真图

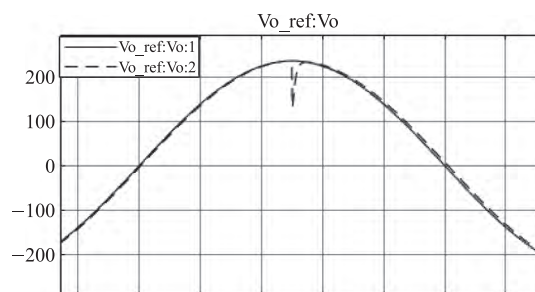


图13 电压恢复仿真图

2. 实验波形

搭建实际的硬件平台,测试其基本功能输出正常,设备保护功能正常的情况下,单独测试了其在电压峰值处,突加整流性负载,使其突然输出大电流,保证电流峰值不超过设备输出的额定电流峰值,测试其电压突降波形及电压恢复波形,图14所示为突加半载的电压电流波形图,图15为突加满载的电压电流波形图。图15中通道1为电压波形,通道3为电流波形。

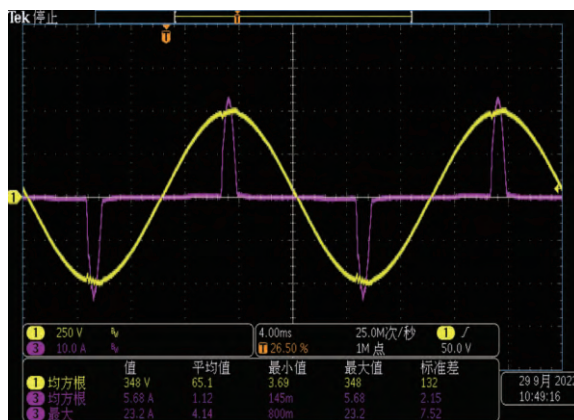


图14 半载下电压电流波形图

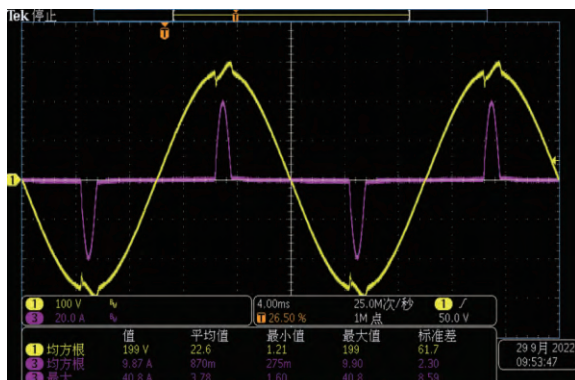


图15 满载下电压电流波形图

结束语

通过对峰值电流控制理论、仿真和实际工程样机的调试,可以得出其控制方法可以应用于大功率电源的控制当中,但对硬件的抗干扰要求比较高。相较于传统的电压电流双闭环控制,峰值电流模式可以做到响应速度更快、可靠性更高。文中未对峰值电流模式的次谐波振荡进行讲述,相关内容可查阅相关文献。由于斜坡补偿的存在,在一定程度上降低了电流响应的速度,从而影响了电源的动态响

(上接第110页)

和自适应优化,在不同负荷条件下灵活调整设备的功率分配,有效减少不必要的功耗,显著降低整体能耗。

在设备利用率方面,智能控制策略的平均值为87.84%,显著高于传统方法的75.81%,提升15.87%。在所有时间段内,智能控制策略都表现出较高的设备利用率,在时间段3虽然最低,但是相比传统方法提升了14.69%。实验结果表明,智能控制策略能够有效提升设备的运行效率,使设备在较长时间内保持高效运行状态,避免因静态负荷分配导致的设备低效运行。

结束语

本文提出的基于智能控制的电力负荷优化调节技术在煤矿机电系统中展示了显著的优势。通过负荷预测、动态负荷分配和自适应优化等智能技术的结合,实现电力资源的高效利用。实验结果表明,与传统静态负荷分配方法相比,智能控制策略在多

应时间。**EA**

(收稿日期:2024-11-26)

参考文献

- [1] 王凤岩,许建平.V2C控制BUCK变换器分析[J].中国电机工程学报,2006,26(2):121-126.
- [2] 林维明.具有快速负载动态响应的DC/DC开关变换器控制新策略[J].中国电机工程学报,2001,21(9):133-139.
- [3] 陈东华,谢少军,周波.瞬时值电流控制逆变技术比较[J].南京航空航天大学学报,2004,36(3):343-347.
- [4] 谢力华,苏彦民.正弦波逆变电源的数字控制技术[J].电力电子,2001,35(6):52-60.
- [5] 李颖,朱伯立,张威.Simulink动态系统建模与仿真基础[M].西安:西安电子科技大学出版社,2004:50-150.
- [6] 刘凤君.正弦波逆变器[M].北京:科学出版社,2002:98-238.

方面均有显著提升。该技术提高设备的运行效率,减少能源浪费,为煤矿机电系统的高效、安全运行提供有力支持。**EA**

(收稿日期:2024-10-22)

参考文献

- [1] 翟宗健.煤矿机电系统的可靠性分析与优化[J].冶金与材料,2024,44(7):25-27.
- [2] 张惠隆,李晓泉.基于电化学储能的电力系统负荷调节和峰谷填平技术研究[J].中华传奇(下旬),2021(27):188-190.
- [3] 王历晔.面向多生产线工业电力负荷的调节方法及评价研究[D].广州:华南理工大学,2022.
- [4] 林俊光,周雅敏,冯彦皓,等.基于热湿负荷与自适应预测时域微网优化调度[J].浙江大学学报(工学版),2023,57(9):1832-1842.