

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105706

两种功率因数校正电路对比研究*

付晓军

(仙桃职业学院 仙桃 433000)

摘要: 针对电网运行中设备所作无用功较大的问题,为改善这种情况,增加系统有功输出,在电网中设计了微控制(MCU)校正电路和智能功率模块(IPM)校正电路对比方案。结果为MCU采用的是微控制单元和PWM联合控制技术;IPM采用大功率晶体管进行电路核准校正。对两种电路进行幅频特性和电源畸变校正效果进行对比;之后对两种电路的参数变化进行对比。分析出两种校正电路的优缺点和各自适用范围。结果表明,通过Proteus仿真,发现MCU校正电路和IPM校正电路测试功率临界点为3.5 kW;应用MATLAB对两种校正方法稳定性进行分析,发现MCU临界稳定校正功率为3.0 kW,IPM临界稳定校正功率为2.8 kW。经过对比研究分析两种校正方法的优缺点,明确了两种校正电路的适用条件。

关键词: MCU校正电路;IPM校正电路;幅频特性;电源电压畸变率;功率因数校正参数

中图分类号: TM714 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470

Comparative study of two power factor correction circuits

Fu Xiaojun

(Xiantao Vocational College, Xiantao 433000, China)

Abstract: Aiming at the problem of large useless power of equipment in power grid operation, in order to improve this situation and increase the active power output of the system, this study designed a comparison scheme of micro-control (MCU) correction circuit and intelligent power module (IPM) correction circuit in the power grid. The result is that the MCU uses a micro-control unit and PWM combined control technology; IPM uses high-power transistors for circuit verification and correction. The amplitude-frequency characteristics and power distortion correction effects of the two circuits are compared, then the parameter changes of the two circuits are compared. The advantages and disadvantages of the two correction circuits and their respective scope of application are analyzed. The results show that through Proteus simulation, it is found that the critical point of the test power of the MCU correction circuit and the IPM correction circuit is 3.5 kW; the stability of the two correction methods is analyzed using MATLAB, and it is found that the MCU critical stability correction power is 3.0 kW, and the IPM critical stability correction power is 2.8 kW. After comparative study and analysis of the advantages and disadvantages of the two correction methods, the applicable conditions of the two correction circuits are clearly defined.

Keywords: MCU correction circuit; IPM correction circuit; amplitude-frequency characteristics; power supply voltage distortion; power factor correction parameters

0 引言

电器运行效率往往通过其所作有用功的多少来决定,而有用功的判定则需要通过功率因数显示,两者一般为正比例关系。为达到增加电网运行的有功输出,避免不必要的无功损耗,增加能源利用率的目的。本文对其内部电路进行校正,由于校正电路较多,为方便商家选取合适的电

路,本文对两种校正电路进行对比,分析两者的优缺点,希望能够为商家提供参考。

通过参考多种功率因数校正资料,分析整理出多种功率因数校正方案,其中国外利用绝缘栅双极性晶体管(IGBT)进行设计,能够大幅增加电路校正速度,效率往往较低;国内大多采用DC-DC变换器,偏重于电路校正过程的稳定性,信号转换和运行速度较慢。文献[1]采用交错并联Boost

收稿日期:2021-01-17

*基金项目:2017年度湖北省教育厅科学研究计划指导性项目(B2018533)资助

技术,对电器内部线路进行改进,使开关转换速度加快,从而避免电路开关时造成的电流脉冲,增加了电器运行效率。但由于运行过程中载流密度较大,容易截断电流输入,而且这种方法所做实验没有明显数据支撑,缺乏实验依据;文献[2]利用电压型 PWM 逆变器进行校正,从而起到稳压通流的效果,增加了有功输出。但这种方法尚未实际运用,而且所做试验过于理想化,还需对运行线路进行排查,浪费人力资源,而且频繁更换逆变器成本较高,不利于电力发展。

综合上述国内外研究资料的缺陷,本文在此基础上进行创新:

1)通过微控制单元(MCU)的强控功能,研究改造出的 MCU 校正电路。

2)采用智能功率模块(IPM)设计校正电路,通过其内部的大功率晶体管进行系统驱动,从而增加系统有功输出。

在此基础上对两种电路性能进行对比,对两种方法的运行特性和校正效果进行对比,使两种校正方法能够根据不同需求进行选择,达到便捷选取的目的,从而最大限度的减少系统功耗^[3-4]。

1 两种功率因数校正电路

本文主要设计研发 MCU 和 IPM 两种功率因数校正电路,并对其性能进行对比,根据两种电路的校正效果进行针对性应用,从而增加有功输出。

1.1 MCU 功率因数校正电路

通过收集电力部门设备运行问题,参考多项电力研究资料,最终设计出以 MCU 为主控中心,多种边缘电路辅助控制的功率因数校正电路^[5]。设计电路如图 1 所示。

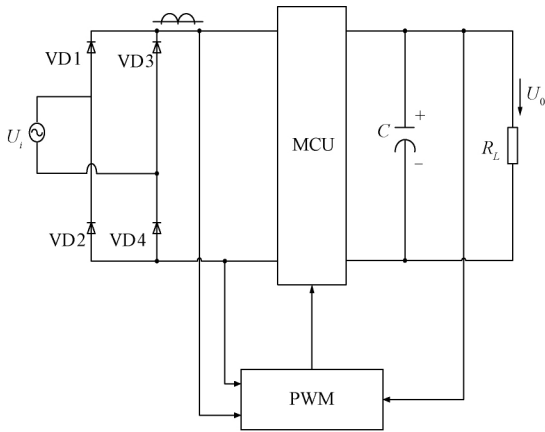


图 1 MCU 校正电路原理

图 1 中采用 4 个二极管组成通断回路,根据二极管导通原则缩短有源电路的开关延迟,使最终校正电路输出达到标准正弦曲线,同比提高功率因数 12% 以上。该技术电路结构比较复杂,因此一般采用集成控制。MCU 技术能够对电源产生的谐波进行校正,使谐波影响达到最低,从而提高有功输出,输出功率因数得到明显校正^[6]。

MCU 输入电压通过桥式整流器对交流信号进行整流,在通过 DC/DC 开关变换器稳定输出电压。通过 PWM 控制器调节二极管脉冲波形,使校正电路能够及时达到稳定状态。中央控制室采用微控制单元,对细小电流波动更加敏感,通过外接电容对电路进行充电,保证电源故障存在缓冲电压,避免电路关断瞬间造成设备损坏^[7]。

最终测试结果显示 MCU 有功输出同比增加 10% 以上,受到谐波影响减少 5% 左右,且输出电压基本保持稳定。输入电压范围一般可达到 90~270 V。

1.2 IPM 功率因数校正电路

为应对大型机器开关瞬间造成的噪声干扰,通过研究分析,设计出 IPM 电路,能够对瞬时校正瞬时功率因数,提高整体作功效率。根据其内部晶体管和整流桥实现电源及时关断,减弱了大型机器开关引起的噪声干扰,适用于大型机器作功线路^[8],设计电路如图 2 所示。

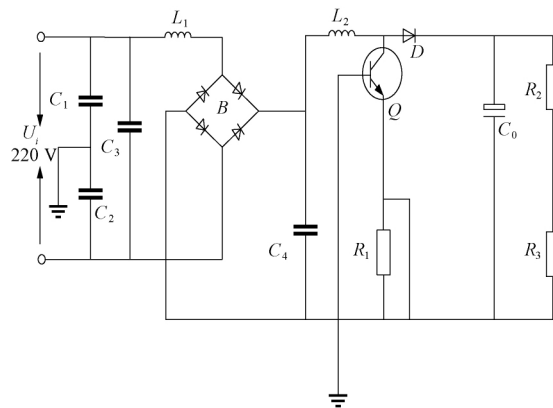


图 2 IPM 校正电路原理

分析图 2 电路,输入电网电压 220 V/50 Hz 经整流桥 B 变换得到全波脉动直流,再经大型晶体管转换为可控直流脉冲。 R_2, R_3 进行脉冲取样,与基准源 U_i 输入电流比对分析,比例放大器的输出作为电流基准。将功率开关电流与基准电流比较,如果小于基准值,就用开关电源专用集成块给定宽度的矩形波驱动功率开关 Q。如果在给定导通时间内, Q 的峰值电流提前达到基准值,则比较器翻转,提前关断 Q。电压源 U_i 发生波动时,电路整体电流进行放大,为抑制波动晶体管反向关断,使电流流速降低,当晶体管前后电压降为 0,此时导通,电压源波动影响得到缓解,避免了电路波动造成无功损耗^[9-10]。

图 2 电路中,根据电路原理分析,电源输入的有源电流经 IPM 校正后,电网电压瞬时值较大,电感电流连续,此瞬时脉动的电流经高频滤波后,输出端得到正弦波电流,电源电流得到校正。

2 幅频特性对比

考虑两种功率因数校正方法适用情境有所区别,根据运行过程进行幅频特性分析,根据两种电路幅频特性曲线

对比,找到两种电路具体适用范围,为厂家选用合适方法提供参考^[11]。两种方法运行特性对比如图3所示。

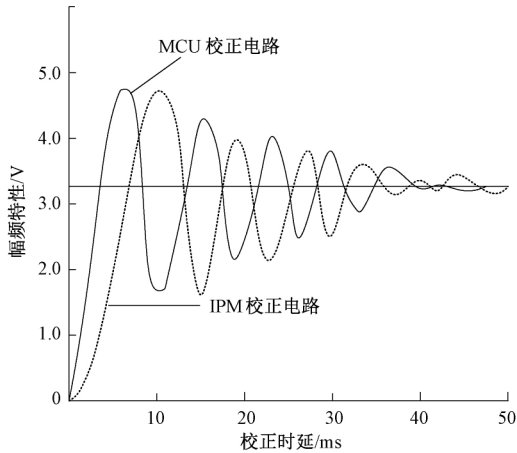


图3 幅频特性对比

图3中MCU校正电路超前于IPM电路135个相位差,IPM校正电路具有明显运行滞后性;从图中可以看出两种电路均在35ms完成校正,但MCU在5ms时幅频特性达到最大值,IPM则在10ms时达到最大,因此IPM校正时延要短于MCU校正电路;另外两种校正电路幅频特性峰值为4.8V,谷值为1.8V,基本相同,而且两者最终校正幅频特性均为3.2V。

综上所述MCU校正电路更加适用于小电流电路,能够精确控制细微电路功率变化;IPM则适用于大电流电路,更加具有广泛性,对大功率电路集成统一校正功率因数,保证整体有用功输出^[12]。

3 电源电压畸变校正效果

系统功率因数变化的原因较多,尤其受电源影响较大,因此本文对电源电压畸变电路进行分析,根据两种方法对畸变电路校正效果进行对比,电源畸变校正效果如图4、5所示。

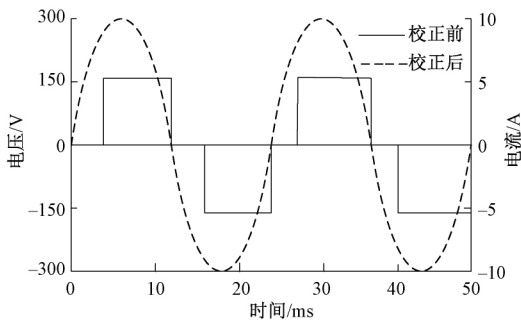


图4 MCU校正效果

对比两图可知,对于畸变电压两者校正过程有所区别,分析图中数据,电压源畸变谐波差异为:

1)图5中的IPM电压畸变电路含有谐波,使输出的三相电流同样受谐波影响。

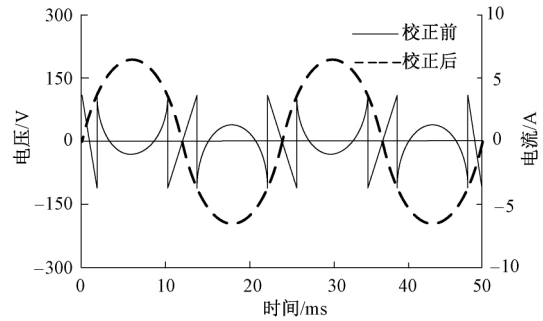


图5 IPM校正效果

2)图4中MCU校正电路只有中值电压相互作用,而图5中的IPM校正电路整个过程都存在谐波影响。

3)图4中校正后电源电压正弦峰值比图5中要大,表明MCU校正效果更加明显^[13]。

若电源电压畸变不大时,MCU方法校正效果较好,但当畸变较大时两种校正效果相差明显,此时IPM校正效果优于MCU方法。通常若电压畸变可以忽略,则选用MCU校正^[9]。

校正波形最终功率因数计算结果是通过正弦和余弦值分析得出,因此电源畸变率直接忽略,得到的校正波形结果与无畸变时校正情况大致相同,即采用MCU校正方法^[14]。

综上分析均在三相对称环境下进行。若当三相不对称时,IPM校正方法运算方式仍能准确校正功率因数,MCU无法计算出正确功率因数结果,则认为IPM电源畸变校正效果较好^[15]。

4 运行参数分析

通过幅频特性和畸变校正效果对比,对两种校正方法适用范围做了详细阐述,为进一步了解运行过程中的参数变化^[16],本文对其中的参数变化进行计算,从而有利于把握系统运行状态,清晰了解校正过程中的参数变化。

对于校正电路运行过程中的参数计算,一般采用解析的方法分析其输入电流的谐波含量与输出有功功率关系,由于开关频率较电网变化频率要大,因此在输入端插入高频滤波装置^[17]。

对于校正电路,通过有源输入电压周期变化,对变化中的电压进行畸变分析,经过校正后输出表示为:

$$V_o = \frac{V_i}{1-D} \quad (1)$$

式中: D 表示电源占空比, $D = T_{on}/T$, T_{on} 表示校正电路晶体管导通时间, T 表示电路运行周期。

电源输入电压一般是变化量,呈正弦曲线变化,输入电压变化频率较大时可认定为电压输入常数,即:

$$V_i = V_m \sin knT \quad (2)$$

式中: V_m 为电路幅值输入量; T 表示电路校正过程的通断时间; $n = 0, 1, 2, \dots, 1/(50T)$; $k = 2\pi f$ 表示校正电路角频率。

校正电路运行中将电源输入量离散变化,关断瞬间过零电压较小,电感电流无法达到功率开关导通条件;当输入大于有源额定值时,通过时间短,电感运行缓慢,校正电路断续运行;当电源处于额定工作状态时,电压输入变大,电感导通时间长,此时处于连续导通状态^[18]。

由于校正电流通断过程反复进行,对某段运行范围采用平均值法计算平均电流为:

$$I_p = (I_{n-1} + I_{pn})T_{on}/2T + (I_n + I_{pn})T_{off}/2T \quad (3)$$

式中: I_{n-1} 表示周期电流变化的初始值; I_n 表示周期电流变化的最终值; I_{pn} 为电流变化的峰值; T_{off} 表示电路运行校正之后电流断开延迟。

根据校正电路运行状态,在电流正弦变化范围内计算峰值电流为:

$$I_{pn} = \frac{V_i \times T_{on}}{L} + I_{n-1} \quad (4)$$

式中: V_i 表示电路输入电流; T_{on} 表示校正电路晶体管导通时间; L 表示电路校正过程中的线路长度; I_{n-1} 表示周期电流变化的初始值。当电流变化峰值小于标准校正电流时,晶体管的导通随给定电流脉冲变化而变化^[19]。若电流变化峰值大于标准电流时,则:

$$I_{pn} = I_R \quad (5)$$

式中: I_R 表示校正给定标准电流,在给定电流的标准下进行校正,此时校正电路的导通时间为:

$$T_{on} = \frac{L(I_R - I_{n-1})}{V_i} \quad (6)$$

经过校正之后,功率因数达到校正标准,然后停机,此时停机时间记为:

$$T_{off} = \frac{I_{pn} \times L}{V_o - V_i} \quad (7)$$

若式(7)计算结果与 $T - T_{on}$ 相比,两者相差较大,则表明校正过程加长,电路连续导通,此时停机时间为 $T_{off} = T - T_{on}$ 。这段校正过程电流变化为:

$$I_n = I_{pn} - (V_o - V_i)(T - T_{on})/L \quad (8)$$

校正电流的变化反映了输出功率因数变化,证明此校正过程是有效的,可以推断出最终两种校正电路各自校正输出的功率因数^[20]。

根据输入的电压进行推测,若电流校正连续发生,则输入与输出的关系需满足:

$$V_i = LI_r/T_{on} \quad (9)$$

$$V_o - V_i = LI_r/T_{off}$$

式中: I_r 表示校正电路的电流连续变化,经过聚合相加,应用代入法得到时间比例关系。

$$T_{on}^2 - TT_{on} + LI_r T/V_o = 0 \quad (10)$$

对上式进行占空度代换,即:

$$D^2 - D + LI_r/(TV_o) = 0 \quad (11)$$

经过瞬时变化,对整个校正电路是否保持连续分析,设连续变化初始标准为 $I_r = 19.2 \text{ A}$,据此对式(11)进行分

析,当 $D = 0.5$ 时,校正电路输出电压满足:

$$V_r/V_o = 0.25 \quad (12)$$

式中: V_r 表示校正电路的电压连续变化,根据设定的电流连续值得到代数式,即 $V_r = LI_r/T$ 。

由此证明了电路运行参数无法影响最终功率因数的输出,校正后的功率因数始终为最大值^[21]。

5 试验结果与分析

本文实验对三相电路进行分析,通过可控晶体管进行电路桥式变换,根据运行测试结果记录,对运行结果探讨,根据具体实验判断两种校正电路的优缺点,从而方便采用合适的校正方法^[22]。电路运行环境为:输入电源额定功率 < 15%,运行数据误差 < 5%,变压器功率为 500 kW,电脑采用 Intel 系列处理器,控制过程采用 PWM 控制器,电路仿真软件为 Proteus,数据仿真软件为 MATLAB,测试电路运行环境如表 1 所示。

表 1 测试电路运行环境

实验环境	配置参数
数据采集	电力传感器
CPU	Intel i8 9600KF
计算机配置	酷睿 8 核,128 G 内存
数据仿真	MATLAB 2019
电路仿真	Proteus 8.6

对华中电网台区进行测试,通过实际应用记录数据,将结果输入到 Windows 10 操作系统下,对测试电路进行 Proteus 校正仿真运行,根据实验记录报表,经过后续加工处理,将校正后的功率因数数据提取,从而得到测试电路校正数据如表 2 所示。

表 2 测试电路校正数据

测试功率/kW	MCU 输出/kW	IPM 输出/kW
2.5	3.5	3.0
3.0	4.0	3.5
3.5	4.5	4.3
4.0	5.0	5.5
4.5	5.5	6.0

分析表 2 测试结果,对两种校正电路输出功率因数进行对比,测试功率在 2.5~3.5 kW,MCU 校正输出功率比 IPM 高;在 2.5~3.5 kW 范围内,MCU 校正输出功率比 IPM 低。说明 MCU 对测试功率较小的电路校正效果更好,IPM 对测试功率较大电路校正效果更好。

校正电路的好坏另一重要因素为稳定性,对两种校正电路稳定性进行 MATLAB 仿真,得到稳定性曲线微机显示如图 6、7 所示。

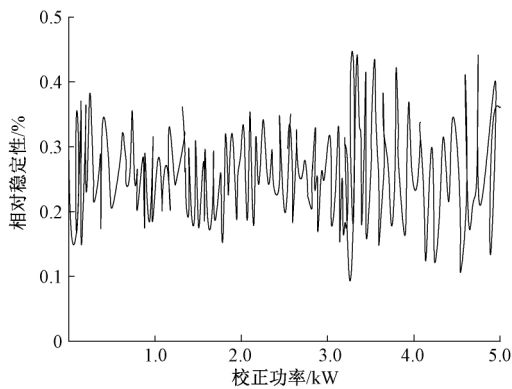


图6 MCU稳定性曲线

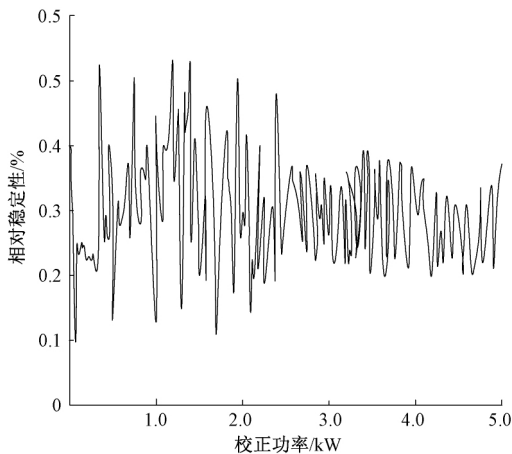


图7 IPM稳定性曲线

通过对比分析发现,两种校正电路稳定性分为两个稳定区域,MCU校正方法分界点在校正功率为3.0 kW时出现;而IPM校正方法分界点在校正功率为2.8 kW时出现,同样分为两个稳定区域。即MCU在校正功率较小时稳定性好,IPM在校正功率较大时稳定性好。

综上所述,MCU和IPM校正电路适用范围不同,根据电源畸变率和校正功率大小不同选取适当的校正方法,能够更加有效的校正功率因数。

6 结论

本文设计研发了MCU微控校正法和IPM强控校正法,增加电路功率因数,并对其性能进行对比,从而能够清晰了解两者的具体应用价值。根据其幅频特性对比分析,发现MCU适用于小电流电路,IPM适用于大电流电路;根据电源畸变率的差异进行分析,发现MCU电路对无谐波电路校正效果更好,IPM对谐波较大电路校正效果更好;之后对两种电路的校正过程中的运行参数进行分析,证明两种方法都能对参数变化的电路进行校正。最后通过测试结果,分析出两者适用的不同功率范围;通过MATLAB仿真进行校正电路稳定性分析,从而能够更加具有针对性的应用两种校正电路。

但是本文设计在具体测试中暴露出诸多问题,由于电源输入设备故障导致的功率变化无法校正;无法同时校正两种及以上连续变化的畸变电路。希望后续能够针对这些问题加以完善。

参考文献

- [1] 崔迎,龙洁,常润. 交错并联 Boost 功率校正技术的研究[J]. 电子测量技术,2018,41(2):27-30.
- [2] 王瑜瑜,刘少军. 电压型 PWM 串级调速系统控制策略的研究[J]. 电子测量技术,2017,40(6):80-84.
- [3] 王楠,许建平,刘雪山. 单开关 Buck-Flyback 功率因数校正变换器[J]. 中国电机工程学报,2015,35(3):679-687.
- [4] 刘洪臣,管恩慧,王云,等. 单周期控制三电平 Boost 功率因数校正变换器的慢尺度分岔分析[J]. 物理学报,2015,64(4):17-25.
- [5] HONG C L, GAO E H, YUN W, et al. Slow-scale bifurcation analysis of one-cycle-controlled three-level Boost power factor correction converter [J]. Acta Physica Sinica,2015,64(4):40502-40505.
- [6] 胡玮,康勇,胡昊,等. 可实现辅助开关管准零电流开关的半无桥功率因数校正变换器[J]. 中国电机工程学报,2017(21):6390-6399.
- [7] 邓勇,胡徐松. 基于 EMD 和 SPS 的容差模拟电路故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(2):67-72.
- [8] 贾强,亓迎川,王栋,等. 降压型功率因数校正电路拓扑结构综述[J]. 通信电源技术,2018,35(11):37-41.
- [9] 刘雪山,许建平,王楠. 临界连续模式单电感双输出 Buck 功率因数校正变换器[J]. 电力自动化设备,2015,35(5):64-69,82.
- [10] 孙骊洲,孟樱. 基于 UC3854 功率因数校正器的电源设计[J]. 宿州学院学报,2015,30(1):76-78.
- [11] 渠浩,冯瑞昀,杨喜军,等. 单相无桥功率因数校正器的分析与设计[J]. 电气应用,2015,34(8):134-139.
- [12] 李山,汪鹏,郭强,等. 整流器电流谐波抑制及功率因数校正仿真[J]. 计算机仿真,2017(10):87-92.
- [13] 王尚宁,丘东元,张波. 基于 TRIZ 理论的单级功率因数校正电路拓扑分析[J]. 电工电能新技术,2016,35(1):60-66.
- [14] 韩蒙,吴红飞,邢岩. 基于隔离升降压变换器的单级软开关功率因数校正变换器[J]. 中国电机工程学报,2017,37(8):2361-2369.
- [15] 龚文倩,朱俊杰,郑志安,等. 基于 SEPIC 变换器的无位置传感器无刷直流电机换相误差校正[J]. 仪器仪表学报,2019,40(5):112-120.
- [16] PACHECO E J I. Implementacion de un control operacional de gestion de seguridad y salud en un centro de distribucion de productos de consumo masivo [J]. Paris, 2015,31(12):2018-2023.

- [17] 吴振宇,吴冀平,杨启涯,等. 基于 UCC28019 的功率因数校正实验平台设计[J]. 电子产品世界,2017,24(2):48-50.
- [18] WANG L Q, CUI S M, CHEN M. Parallel compensation control of power factor corrector without electrolytic capacitor by power decoupling [J]. Diangong Jishu Xuebao/Transactions of China Electrotechnical Society, 2019,34(3):516-528.
- [19] 陈文博,程红,王聪. 三相无桥功率因数校正器开路故障的快速诊断与定位策略[J]. 电工技术学报,2019,34(18):155-165.
- [20] 刘雪山,许建平,王楠,等. 断续模式单电感双输出 Buck 功率因数校正变换器[J]. 电工技术学报,2015,30(22):62-70.
- [21] 高志亨,刘新妹,殷俊龄,等. 一种基于误差补偿的电路板位置校准[J]. 国外电子测量技术,2020,39(5):130-134.
- [22] 周晓敏,孙文,高大威,等. 应用于无线电能传输系统的三相单开关功率因数校正方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(2):137-142.

作者简介

付晓军,硕士,副教授,主要研究方向为机电控制技术。

E-mail: tuhua517540@163.com