

基于PR控制器的低频逆变装置的设计研究

伴随着交流调速技术的快速发展和应用，低频逆变技术愈发引起了研究人员的重视。传统基于PI控制器的低频逆变装置，通过采用坐标变换和 d, q 解耦的方法来提高控制准确度和控制效果，但是增加了控制的复杂性。设计出的基于PR控制器的低频逆变控制在保证控制效果的同时，可有效简化控制算法，提升系统的控制性能。在仿真验证PR低频逆变控制策略的可行性基础之上，以DSP为核心设计并实现了低频逆变装置，完成了相关实验验证工作，证明了控制策略正确性和逆变装置的实用性。

白少佐/国网冀北电力有限公司承德供电公司 刘 成/大庆油田力神泵业有限公司 张 强/哈尔滨工程大学



白少佐/工程师

0 引言

在交流调速领域，为了实现变频调速的控制目标，研究人员对主电路拓扑结构、控制策略以及相关技术进行了深入的研究^[1-5]，并取得了丰硕的成果。在低频逆变技术中，虽然AC-AC变换电路的输出谐波含量低，控制效果好，但是电路结构复杂，经济性和可靠性较差。因此本文以DC-AC逆变电路为基础，结合PR控制器和SVPWM调制技术，对低频逆变装置的总体设计进行了研究和验证。

1 总体方案设计

关键词/Keywords

PR控制 ·
低频逆变 ·
数字信号处理器 ·

所设计的低频逆变装置的总体结构框图如图1所示，包括逆变电路主电路、中央处理器、信号处理电路、故障保护电路、触发脉冲互锁电路和驱动接口电路等组成部分。逆变电路的输出电压和输出电流经过传感器采集和信号处理电路后送至中央处理器，中央处理器根据检测到的电压和电流信号，利用PR控制器生成控制信号，再经过SVPWM调制方

法输出触发脉冲信号，触发脉冲信号经过互锁电路、故障保护电路和驱动接口电路后实现对逆变电路中的电力电子器件开关状态的控制。

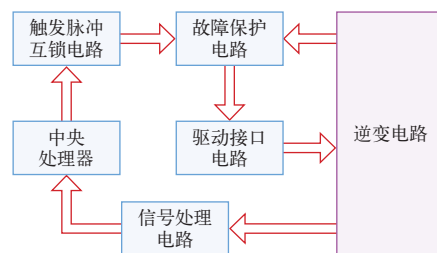


图1 总体结构框图

2 逆变电路设计

(1) 逆变电路设计

逆变电路为三相三桥臂拓扑结构，其中的电力电子器件选用的是三菱公司的IPM智能功率模块（型号为PM100CSA060），与其他功率开关器件相比，IPM具有开关速度快、开关功耗低、抗干扰的能力强和硬件电路设计简单等优点，可有效提高系统的可靠性。

(2) 滤波电路设计

滤波电路采用的是LC滤波，三相电容为星形接法，由于逆变电路采用的是SVPWM调制方法，其开关频率为5 kHz，因此LC滤波器的转折频率取为0.5 kHz，通过综合考虑和实验验证，滤波电感取值为 $L=2\text{ mH}$ ，滤波电容值 $C=40\text{ }\mu\text{F}$ 。

3 控制电路模块设计

(1) 中央处理器

在低频逆变的控制过程中，需要对多种电气量进行实时检测、运算等

数据处理,要求中央处理器具有运算速度快、准确度高的特点,并且外设功能齐全,因此使用传统的单片机难以满足控制要求。本方案选择了美国德州仪器公司生产的32位浮点DSP芯片TMS320F28335。

(2) 信号处理电路设计

采用莱姆公司生产的电压霍尔传感器(LV25

-P)和电流霍尔传感器(LA55-P),对交流电压、电流信号进行实时采样。由于传感器模块输出的是双极性模拟信号,而DSP的ADC转换单元只能处理0~3 V单极性的电压信号,所以必须对传感器输出信号进行比例调整、电压提升和电压限幅等操作。具体信号处理电路如图2所示。

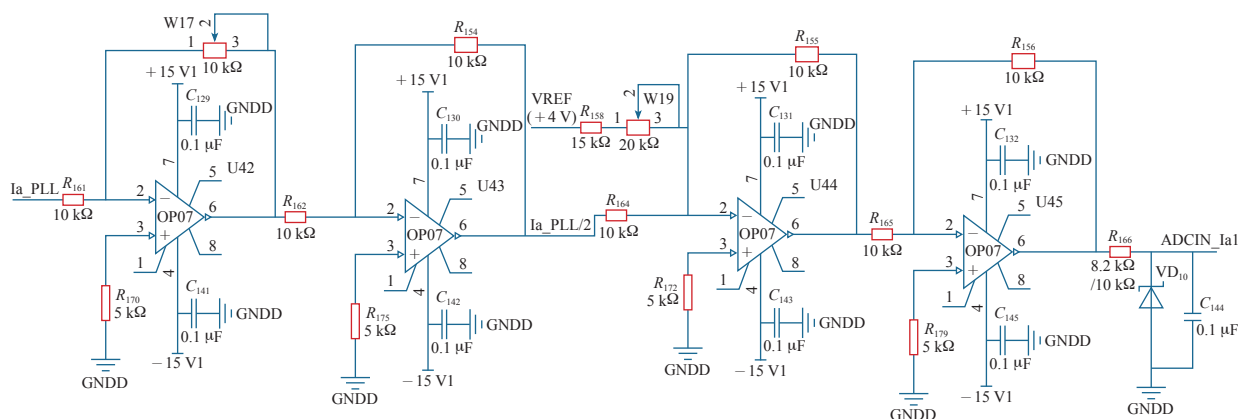


图2 信号处理电路

传感器输出信号先经过比例放大电路,将传感器采样的信号转变到 $-1.5 \sim +1.5$ V范围之内;再经反向器送入反向偏置电路,将其电压提升1.5 V,即电压变为 $-3 \sim 0$ V之间;为了确保与输入信号的相位相同,故在输出端加入了反向放大器,此时电压输出范围变为 $0 \sim 3$ V;最后利用稳压值为3 V的稳压二极管来确保输出电压不超过3 V,以保证DSP控制芯片的ADC单元不被过电压损坏。

(3) 触发脉冲互锁电路

在IPM模块的工作过程中,为了有效地避免直通故障的发生,保护功率开关器件的安全运行,设计了PWM脉冲互锁电路,具体如图3所示。

该电路主要是由反向器74LS04和与门74LS08构成,经电路逻辑分析可知:当PWM脉冲控制信号输入正常时,所输出的PWM控制信号(EPWM1A、EPWM1B)是对互补的信号;当输入的PWM脉冲控制信号由于干扰或者控制而出错时,即控制信号(EPWM1A、EPWM1B)均为高电平或者同为低电平时,经过共态互锁电路处理后PWM控制信号均变为低电平输出,这样可以有

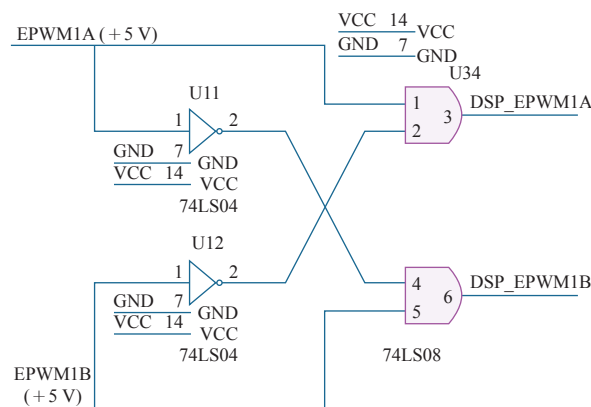


图3 PWM脉冲互锁电路

效防止直通现象的发生,起到保护作用。

(4) 故障保护电路设计

当IPM模块内部各个单元中任一故障保护电路工作时,就会自动关断功率开关元件,并发出故障输出信号FO。如果故障保护信号FO持续时间完成后,故障依然存在,会致使故障保护信号不断重复,并且可能致使IPM模块损坏。因此在实际使用中,不能完全依赖于IPM的内部自保护机制,故设计出相应的故障信号处理电路,如图4所示。

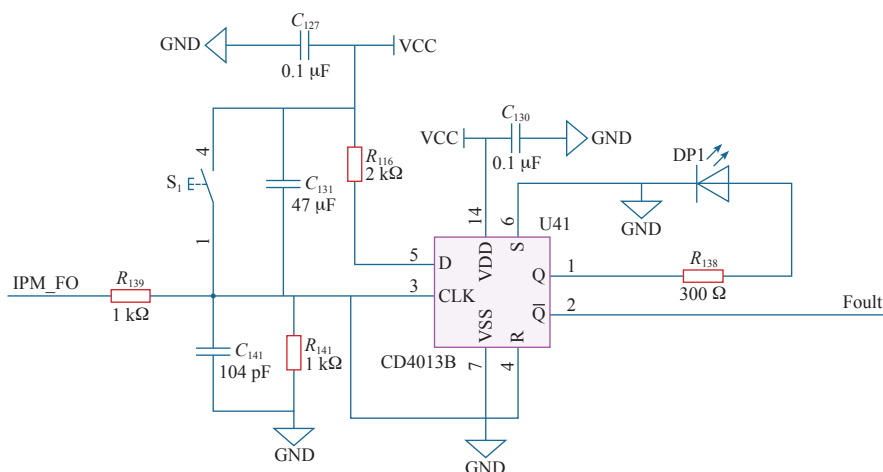


图4 IPM自保护故障信号处理电路

该电路具体工作过程如下：当系统初始瞬时通电，由于电容（ $C_{131} = 47 \mu\text{F}$ ）的存在，触发器CD4013B的复位端口R变为高电平，Q非为高电平，即此时将触发器CD4013B瞬时清零。当电容 C_{131} 被充电完成后，电路系统处在正常状态，此时触发器CD4013B的R端为低电平，它的工作状态将会由CLK信号端来决定。当系统发生故障时，故障保护信号IPM_FO由低电平转变为高电平，再经RC低通滤波去除噪声干扰后，送入触发器CD4013B的CLK信号输入端。此时，输出端Q将被置为高电平，点亮故障指示LED灯，反向输出端被置为低电平，同时该信号（即信号Fout）被送至PWM脉冲封锁电路。在确认IPM正常后，可以使用手动按下开关 S_1 来清除掉保持封锁的故障信号。

PWM脉冲封锁电路的设计如图5所示。该电路

可以把IPM内部保护机制产生的故障保护信号进行处理，变成封锁IPM的输入信号的控制信号，从而实现保护IPM的目的。

其具体工作过程为：IPM的故障信号（Fout）经过反向器74LS04及RC低通滤波器消除开关噪声干扰后，被送入到三态收发器74HC245D的使能端。当IPM智能模块没有发生故障时，反向器74LS04输出保持为低电平，即74HC245D被选通使能，此时IPM控制信号可以正常进入到接口电路中，并实现对IGBT的通断控制。当IPM智能模块有故障发生时，反向器74LS04的输出变为高电平，此时所有的IPM控制信号都被封锁，从而达到IPM故障保护的目的。

(5) 驱动接口电路

由于DSP控制芯片的输出信号电压只有+3.3V，

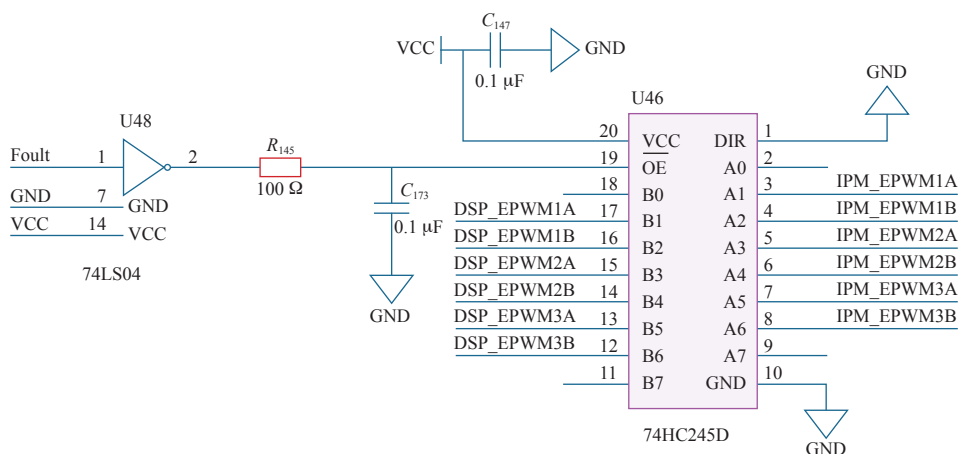


图5 硬件封锁PWM脉冲控制信号电路

而IPM智能模块的驱动信号是+15 V，所以需要合理设计IPM接口电路才能达到驱动IPM智能模块的目的。此外，控制电路与系统主电路必须进行有效的电气隔离，以防止干扰。综合以上设计要求，本方案设计的IPM接口电路如图6所示，图6中所给出是IPM智能模块六个接口电路中的一个，其余的电路结构与之相同。

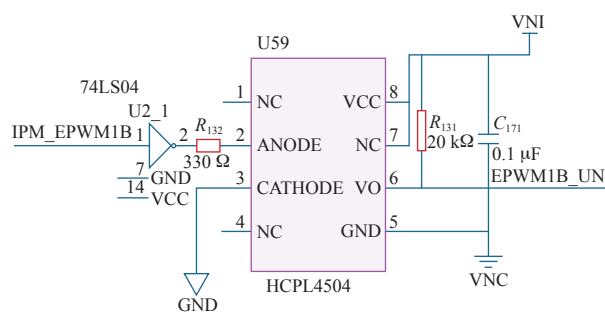


图6 IPM模块接口电路

DSP输出的PWM脉冲信号（IPM_EPWM1B）经过反相器74LS04和限流电阻（ $R_{132}=330\ \Omega$ ）限流后，送入高速光电隔离器HCPL4504进行隔离放大操作，再将产生的隔离控制信号（EPWM1B_UN）接入IPM内部驱动电路来控制IGBT的导通和关断。输出端选用的退耦电容为独石电容（ $C_{171}=0.1\ \mu\text{F}$ ），输出限流电阻（ $R_{131}=20\ \text{k}\Omega$ ）。

4 控制策略的设计

4.1 比例谐振控制器设计

PI控制器对频率为零的直流信号进行无限大的增益，因此PI控制器能够很好地跟踪直流信号，实现无静差调节，对于频率不为零的信号调节效果较差。当低频逆变器应用于交流电动机调速场合时，控制过程中需要实现解耦控制，往往还要加入前馈补偿项。在补偿项中包含有电动机电感、电阻等容易受到工作环境影响的参数，会给控制系统的稳定性和动态响应速度造成不良的影响。

因此在设计中采用了PR控制器。PR控制器因其含有广义积分环节也称作广义积分器，其由比例环节与广义积分环节组成，能够对正弦交流信号实现无静控制，其传递函数为

$$G(s) = K_p + \frac{K_R s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (1)$$

式中， ω_0 为PR控制器的谐振角频率。

将 $s=j\omega$ 带入式（1），可以得到PR控制器的幅频特性为

$$A(\omega) = \sqrt{K_p^2 + \left(\frac{K_R \omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \right)^2} \quad (2)$$

当 $\omega \rightarrow \omega_0$ ， $A(\omega_0) \rightarrow \infty$ ，PR控制器对角频率为 ω_0 的信号增益为无穷大，即PR控制器可以无静差跟踪角频率为 ω_0 的交流信号。

4.2 比例谐振控制器数字化实现

比例谐振控制器的传递函数中含有广义积分项，广义积分项的数字化实现较为困难，将PR控制器中的广义积分项分解为 $U_1(s)$ ， $V(s)$ 两个简单的积分项，分解框图如图7所示。

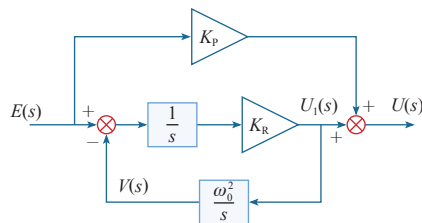


图7 比例谐振控制器分解框图

利用abc到 $\alpha\beta 0$ 的坐标变换可以得到如图8所示的基于PR控制器的逆变器控制系统。 u_{abc}^* 为期望获得的逆变输出电压， u_{abc} 为负载两端反馈的电压。经过PR控制器直接得到 U_α 和 U_β 控制电压信号，利用SVPWM调制技术实现对逆变器的控制。

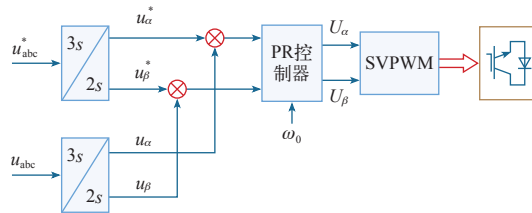


图8 基于PR控制器的逆变器控制系统

根据图7可列写出 $U_1(s)$ 、 $V(s)$ 和 $U(s)$ 的表达式为

$$\begin{cases} U_1(s) = K_R [E(s) - V(s)] / s \\ V(s) = U_1(s) \omega_0^2 / s \\ U(s) = K_p E(s) + U_1(s) \end{cases} \quad (3)$$

将式 (3) 进行 z 变换, 得到方程

$$\begin{cases} U_1(z) = K_R [E(z) - V(z)] \frac{zT}{z-1} \\ V(z) = U_1(z) \omega_0^2 \frac{zT}{z-1} \\ U(z) = K_P E(z) + U_1(z) \end{cases} \quad (4)$$

式中, T 为采样周期。

将式 (4) 等号两边同时乘以 $(1 - z^{-1})$ 转化为差分方程, 得到如下方程

$$\begin{cases} U_1(k) = K_R T [e(k) - V(k)] + U_1(k-1) \\ V(k) = U_1(k) \omega_0^2 T + V(k-1) \\ U(k) = K_P [e(k) - e(k-1)] + [U_1(k) - U_1(k-1)] \end{cases} \quad (5)$$

式中, k 为相关变量的本周期数值; $k-1$ 为相关变量的上一周期数值; e 为误差变量。

以式 (5) 为依据, 可以利用软件编程在DSP中实现比例谐振控制。

5 实验验证

根据上述的硬件电路设计方案, 搭建了低频逆变装置, 具体如图9所示, 并实现了基于PR控制器的控制算法软件编程, 进行了相关的低频逆变实验。图10给出了输出频率分别为1 Hz、5 Hz和10 Hz时的输出电压实验波形 (利用示波器测得的分压电阻两端电压波形)。图11为幅值和频率给定值突变时的输出电压实验波形。根据实验结

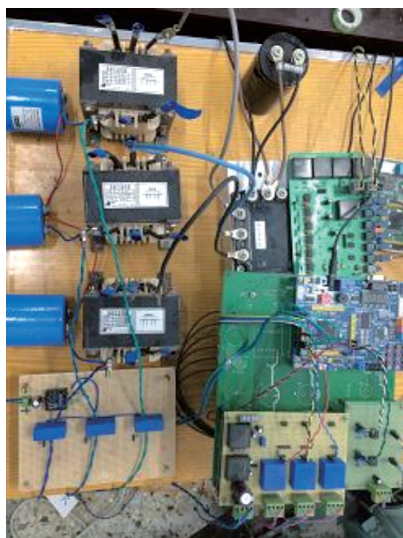
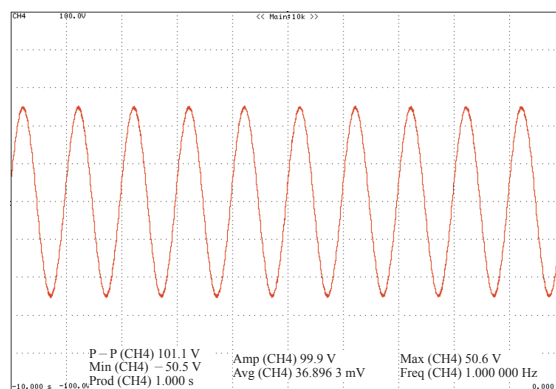
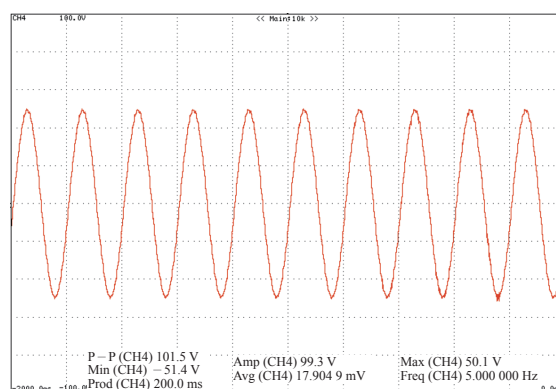


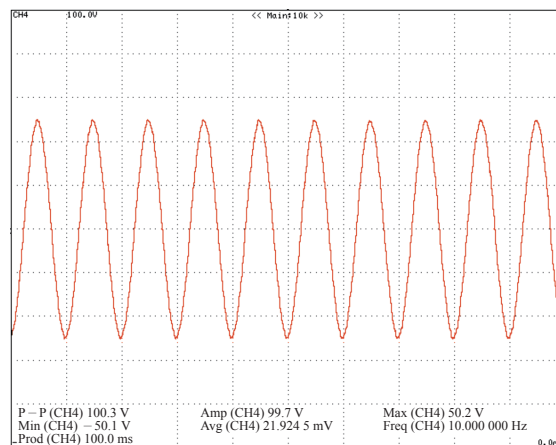
图9 低频逆变装置实物图



(a) $f=1$ Hz时的输出电压波形



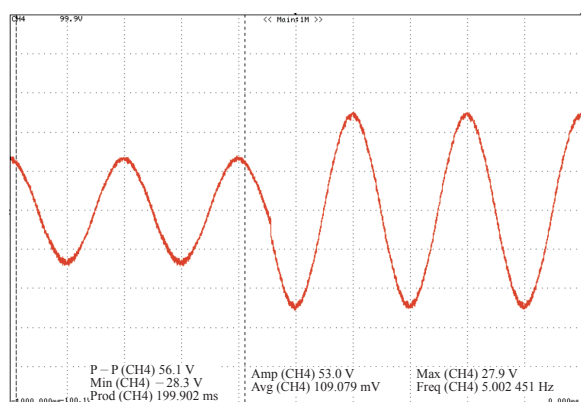
(b) $f=5$ Hz时的输出电压波形



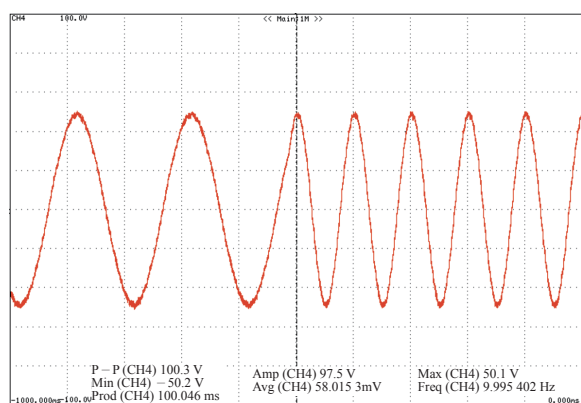
(c) $f=10$ Hz时的输出电压波形

图10 不同输出频率时的输出电压波形

果, 可以看出稳态运行时, 逆变装置输出电压幅值稳定, 波形正弦度高, 谐波含量小; 动态调节过程中, 无明显的超调和振荡现象, 输出响应迅速, 动态调节时间短。因此本文所设计出的基于PR控制器的低频逆变装置完全可以满足交流调速系统的实际需求。



(a) 幅值突变时的输出电压波形



(b) 频率突变时的输出电压波形

图11 给定突变时的输出电压波形

6 结束语

结合上述的设计方案和实验结果,本文设计出的低频逆变装置具备以下特点。

1) 硬件电路结构完善,在满足低频逆变输出的前提下,通过有效的保护电路设计,可以提高装置运行的安全性和可靠性。

2) 基于PR控制器的控制算法,不仅可以实现对交流输出电压的精准控制,而且当负荷是交流电动机时,能够直接与电动机控制策略相结合,简化控制算法,提高控制准确度。

3) 所设计的低频逆变装置不仅稳态运行准确度高,而且动态调节过程迅速,没有明显的幅值超调和振荡,因此具有优异的工作特性。

参考文献

- [1] 李浩然,杨旭红,王亚楠.基于模糊PR和PI控制的三相逆变器并网研究[J].电气传动,2016,46(1):55-59.
- [2] 汪江其,王群京,李国丽,等.基于SPWM/SVPWM调制策略的逆变器效率研究[J].电气传动,2013,43(1):39-43.
- [3] 刘向东,专祥涛.基于载波频率的变功率逆变器效率研究[J].电气传动,2017,47(5):22-27.
- [4] 戚烈,周超英.大功率逆变器PWM调制方法研究[J].电气传动,2015,45(5):30-34.
- [5] 赵新,金新民,周飞,等.基于比例积分-降阶谐振调节器的并网逆变器不平衡控制[J].中国电机工程学报,2013,33(19):84-92.

(收稿日期:2017-09-15) EA

信息动态

Perkins® 智能机油盖 夺2018年爱迪生发明大奖金奖殊荣

爱迪生发明大奖 (Edison Awards™) 的设立,旨在表彰在开发新产品和服务方面最具创新性和卓越成就的技术成果、企业和商业领袖,2018年已是第31届。2018年4月11日在纽约市Capitale会所举行的年度颁奖典礼上,Perkins® 智能机油盖获颁授创新应用技术类别金奖。

Perkins营销总监聶大卫 (David Nicoll) 在接过奖杯后说:“获颁这项奖,我们确实深感荣幸。我谨代表Perkins整个团队接受这项殊荣。我们拥有超过85年的优良研发传统和深厚实力,一直致力时刻不断创新、寻求突破,满足

客户对Perkins这个优秀品牌的期望。”

Perkins智能机油盖 (Perkins® SmartCap) 适用于Perkins所有新型和既有的机械式和电控发动机型号。终端用户只需用它取代原来的机油盖,即可通过智能手机上的Perkins® 维护宝 (Perkins® My Engine) App,将他们正在使用的发动机和手机连接起来。机油盖会监测发动机的运行情况,然后把数据直接传送到Perkins维护宝App。可让客户掌握真正有用的信息,包括:发动机运行时数;发动机位置;维护提示和维护记录;零部件手册和耗材信息。