

# 一种三相制冷系统谐波改善的新方案

安伟国 罗焰明 薛超

(德州仪器半导体(上海)有限公司, 上海)

**摘要** 本文就三相 APF (有源滤波器) 与 PFC (功率因数调制) 系统的电路拓扑、工作原理、数字控制方案分别进行介绍, 并提供了仿真波形、数据, 进而针对三相系统的应用需求对两种方案进行综合对比, 给出两种方案各自占优势的应用条件: 在不需直流侧升压的大部分应用中, 用 APF 取代 PFC 可以保证性能不变的前提下, 功率部分节省成本最高可达 70%~50%, 并且实现自由扩容, 及减少产品平台从而达到降低生产环节成本的目的。

**关键词** APF (有源滤波器) PFC (功率因数调制) 三相系统 低成本 自由扩容

## The input current adjustments performance compare of APF and PFC for three phase air condition system

Weiguo AN Yanming LUO Chao XUE

(Texas Instruments Semiconductor Technologies(Shanghai) Co., Ltd, China)

**Abstract:** This paper presents separately the topology, principle and digital control method of APF and PFC, shows the simulation result wave. Based on the air condition system's requirement, the compare between APF and PFC is made and the conclusion shows the advantages and disadvantages, for the situation that system does not need to rise the Dc side voltage, use APF instead of PFC will economic the cost by 70% ~50% (the best), with the same performance, and will be easier to extend the volume and will economic also the cost during the fabrication process due to reduced product platforms.

**Key words:** Active power filter (APF), Power Factor Correction (PFC), three phase system, low cost, facility of volume extension

### 0 前言

也日趋提高, 同时由于各国各地区谐波标准的参  
随着市场竞争的日趋激烈, 电网谐波标准的要  
差参差不齐, 使得产品生产厂商必须同时维护数量众  
求日趋严格, 对三相系统及产品的谐波性能要求  
多的产品平台, 给产品成熟度及生产成本带来了

困难及挑战。

传统的改善三相系统输入端谐波方案一般是配备三相功率因数校正模块 ( PFC ) [2] , 但此种方案需要使 PFC 模块的功率等级与后端其他模块相同 , 不但成本较高且需要根据不同功率等级设计不同 PFC 方案 , 增加了产品平台数量 , 虽然就单一项目而言 , 成本可能有着一定优势 , 但综合全系列产品平台而言 , 由于平台数量众多 , 相互之间的可继承性不高 , 以致大大增加了生产和维护的复杂度和流程成本。同时 , 由于 PFC 模块与后端负载的串联关系 , 此种方案降低了系统的可靠度[5]。针对上述弊端 , 本文讨论了利用有源滤波器模块 ( APF ) [1]取代 PFC 的可行性及两者优缺点对比。从而得出 , 在无需 Dc 侧升压的应用情况下 , 用 APF 取代 PFC , 无论在降低成本 , 缩减产品平台 , 还是提高产品稳定性方面是十分具有竞争力和优势的。

## 1. 三相 PFC 及其控制

### 1.1. 三相 PFC 的数学模型[2]

实现三相功率因数校正功能的电路拓扑有很多 , 也有着各自不同的优缺点 , 本文选择应用较广的三相六管半桥式两电平功率拓扑作为研究对象。其电路拓扑图如图 1 所示。

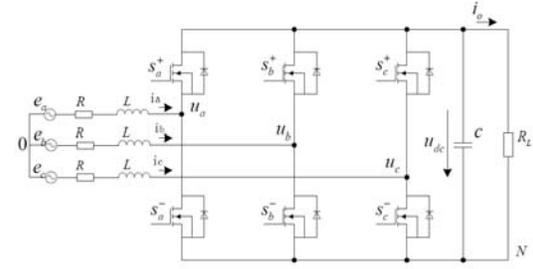


图 1 三相 PFC 电路拓扑

PFC 的控制目标为 , 维持母线电压 (  $u_{dc}$  ) 恒定 , 同时使得输入电流 (  $i_a$  ,  $i_b$  ,  $i_c$  ) 与输入电压 (  $e_a$  ,  $e_b$  ,  $e_c$  ) 同相 , 且 THD 达标。为了达到此控制目标 , 需要找到占空比变量 (  $d_a$  ,  $d_b$  ,  $d_c$  ) 与输入电流及母线电压的数学关系。

参考图 1 所示及相关变量标识 , 对系统在 ABC 象限中建模如方程 ( 1 ) 所示。

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = e_a - \frac{u_{dc}}{3} (2d_a - d_b - d_c) \\ L \frac{di_b}{dt} = e_b - \frac{u_{dc}}{3} (2d_b - d_a - d_c) \\ L \frac{di_c}{dt} = e_c - \frac{u_{dc}}{3} (2d_c - d_a - d_b) \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = (i_a d_a + i_b d_b + i_c d_c) - \frac{u_{dc}}{R} \end{cases} \quad (1)$$

其中 , L 为电感值 ; C 为电容值

经 Clark 和 Park 变换得到的 dq 象限模型如方程

( 2 ) 所示 ,

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = e_d - u_{dc} d_d + L \omega i_q \\ L \frac{di_q}{dt} = e_q - u_{dc} d_q - L \omega i_d \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (i_d d_d + i_q d_q) - \frac{u_{dc}}{R} \end{cases} \quad (2)$$



的仍然是为了系统能够产生补偿电网所需要的谐波电流，若不设计电压环路来稳定母线电压，使之高于输入相电压峰值，则某些谐波电流成分将无法注入电网。

从控制原理角度看,APF 的控制基本与 PFC 控制相同，只是电流参考给定不同而已。因此，对系统的建模到控制回路设计，可直接利用式 ( 1 ) 或 ( 2 ) 完全按照 PFC 系统相同的方法实现。

### 2.3. APF 控制回路设计

APF 的数学模型与 PFC 完全相同 ,但其控制回路则有细微差别，在电流参考给定处加入了负载电流高频谐波量，环路其他部分均与 PFC 控制回路完全相同。

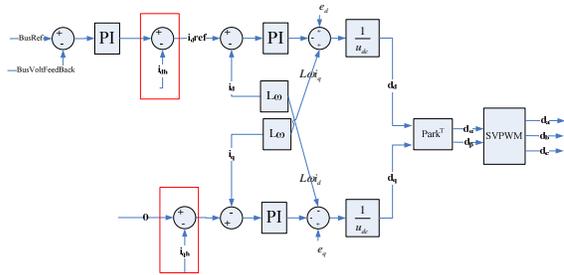


图 5 三相 APF 控制回路框图

该环路设计的物理意义可以理解为，电压环输出量是 APF 维持母线电压恒定所需的 Id 分量，高频谐波量作为需要从 APF 侧注入到电网侧的电流

参考被加入，方向与维持母线的电流相反。

### 2.4. 高频谐波电流检测[6]

从上述分析可见 ,APF 与 PFC 系统控制的主要区别在于 APF 加入了一个高频谐波电流参考，其获取方式早期一般应用 FFT 方式。但由于计算量大，实时性差的缺点，逐步被瞬时电流检测法取代[3]。

设三相负载电流可表示为基波电流叠加谐波电流如式子 ( 3 ) 所示，

$$\begin{cases} I_{load\_a}(t) = I_B \sin(\omega t) + \sum_{k \rightarrow n} I_k \sin(k\omega t) \\ I_{load\_b}(t) = I_B \sin(\omega t + 120^\circ) + \sum_{k \rightarrow n} I_k \sin(k\omega t + 120^\circ) \\ I_{load\_c}(t) = I_B \sin(\omega t - 120^\circ) + \sum_{k \rightarrow n} I_k \sin(k\omega t - 120^\circ) \end{cases} \quad (3)$$

其中， $I_B$  为基波电流幅值， $I_k$  为除基波外相应谐波电流幅值。式 ( 3 ) 经 Clark 及 Park 变换后得到

$$\begin{cases} I_{ld}(t) = I_{ldb} + \sum_{k \rightarrow n} I_{ldk} \sin(k\omega t) \\ I_{lq}(t) = I_{lqb} + \sum_{k \rightarrow n} I_{lqk} \cos(k\omega t) \end{cases} \quad (4)$$

其中  $I_{Bd}$  与  $I_{Bq}$  为基波电流在 dq 坐标系所对应的直流量，第二项为各次谐波电流在 dq 坐标系所对应的交流量。

从式 ( 4 ) 可知，将三相负载侧电流进行 dq 分解，由于负载电流不但包含基波频率信号，也包含大量高次谐波。

将式 ( 4 ) 通过低通滤波器滤除交流信息，则得到

的基波电流在dq坐标系的对应直流电流量 ( $i_{idb}$ ,  $i_{iqb}$ )。而要得到谐波电流则只需从原始的dq电流中减去基波dq电流即可 ( $i_{idh}$ ,  $i_{iqh}$ )。

高频电流计算框图如图 6 所示。

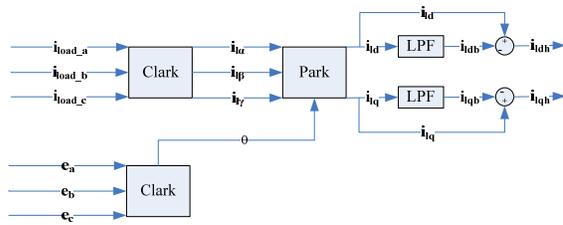


图 6 瞬时高频电流检测法框图

其中，dq 坐标系角度的计算可直接利用电压经 Clark 变换后得到的 alpha,beta 坐标系的分解值求取。

从控制原理上分析，APF 所注入的谐波电流参考值的得到 (图 6 所示过程)，完全是一个开环计算的过程，因此此过程会带来一些计算误差，也是对 APF 最终性能影响较大的环节之一，进一步的工作也可针对该技术点进一步展开深入。

## 2.5. APF 仿真波形

按照上述理论，建立 APF 仿真模型，APF 设定在仿真时间 0.05s 时刻启动工作。

仿真系统参数选取一额定 20KVA 负载容量系统。

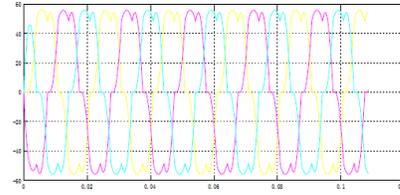


图 7 负载电流仿真波形

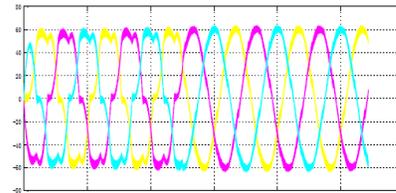


图 8 电网侧电流仿真波形

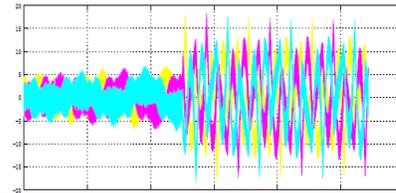


图 9 APF 电流仿真波形

从仿真波形图上可以看出，在 APF 启动前，网侧电流与负载电流基本相等；启动 APF 后，网侧电流 THD 指标明显改善。

同时，观察电流幅值可直观读出，网侧及负载电流峰值约为 60A，而 APF 流过的电流峰值仅为近 20A。APF 系统容量大约为负载容量的 30% 左右。

## 3. 谐波改善 PFC 方案及 APF 方案对比

从上述分析可以了解，PFC 与 APF 均可以改善网侧谐波指标，但由于其连接方式及原理不同，它们有着各自不同的优缺点。

项目	PFC 方案	APF 方案
直流母线电压	高于输入电压峰值	等于输入电压峰值
稳定性	串联, 系统可靠性系数下降	并联, 系统可靠性系数不受 APF 影响
容量	必须与直流负载容量相同	只需 30~50%负载容量
过载	输出功率限制, 直至关机	不影响负载工作, 只是网侧电流谐波补偿能力受限, 电流波形变差
扩容	需设计并机方案, 设计硬件改变	随意扩容, 互不影响
多功能	谐波补偿, 功率因数校正, AC-DC 变换	谐波补偿, 功率因数校正, 太阳能供电系统变换器
成本	相对较高	相对较低
采样点	三路电流采样, 四路电压采样	六路电流采样, 四路电压采样
算法计算量	相对较少	相对较多

由于 PFC 与负载的串联关系, 则 PFC 的容量配

置必须与负载容量一致, 但 APF 由于与负载并联, 并且只补偿负载的谐波电流, 因此, 总体上其容量只要与负载谐波电流相当即可。因此, APF 的容量计算, 须考虑负载的非线性特性, 即其谐波电流占比, 及要求网侧电流达到的 THD 指标, 综合两者考虑计算 APF 的配置容量。此外, 由于并联关系, 可自由的增加 APF 的数量, 无需进行其他额外系统更改, 便可提高谐波改善的性能。即使 APF 的容量配置不足, 所产生的后果也只是网侧电流谐波含量相对较高, 并不影响 Dc 侧负载运行。

从成本上考虑, 虽然 APF 增加了三路负载侧电流采样, 但其功率部分容量可大大节省, 同时考虑到生产流程, 如果在现有产品中增加 PFC 部分, 势必需要在系统级进行整体更改, 但如果采用 APF 方案, 则无需对现有方案更改, 只需加入 APF 模块即可。

#### 4. 结论

针对全球不同市场对谐波要求的不同, 各大三相系统生产厂商往往需要分别设计不同的产品架构, 以平衡成本与性能指标。通过上述分析对比可见, 当不需要 Dc 侧升压的条件下, 利用 APF 替代 PFC 进行谐波和无功功率补偿, 虽然增加了

三路电流采样，但仍然可在成本，可靠性，可扩展性等诸多方面体现明显优势。同时，只需根据功率及其他需求设计产品平台，在所有产品平台上均使用同样的 APF 模块来进行谐波性能的改善，从而减少产品平台，降低生产和维护成本。

同时，APF 的数字化实现也十分便捷，虽然其数字计算量相对 PFC 较高，但随着 MCU 性能的大幅提升，和产品价格的下降，MCU 的性价比大幅提升，该方案利用 TI C2000 PICOLO A 系列的低端 MCU 足可完成。

#### 参 考 文 献

- [1] Cheng-Che Chen and Yuan-Yih Hsu A Novel Approach to the Design of a Shunt Active Filter for an Unbalanced three-Phase Four-Wire System under No sinusoidal Conditions. ASHRAE Transaction.IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 15, NO. 4, OCTOBER 2000.
- [2] Ende Wang, Shenghua Huang , A Control Strategy of Three-phase Voltage-sourced PWM Rectifier, (ICEMS), 2011
- [3] HUANG Xinming, LIU Jinjun and ZHANG Hui, A Simplified Shunt APF Model Based on Instantaneous Energy Equilibrium and Its Application in DC Voltage Control
- [4] Zhikang Shuai, An Luo, John Shen, and Xiao Wang , Double Closed-Loop Control Method for Injection-Type Hybrid Active Power Filter , IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 26, NO. 9, SEPTEMBER 2011
- [5] Hoyland,A and M.Rausand, System Reliability Theory; Models and Statistical Methods, Wiley, NY,1994
- [6] 谢斌，华中科技大学博士论文，并联型有源电力滤波器 谐波检测及控制技术研究，2010

## 重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或隐含权作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独力负责满足与其产品及其应用中使用的 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独力负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

产品	应用
数字音频	<a href="http://www.ti.com.cn/audio">www.ti.com.cn/audio</a> 通信与电信 <a href="http://www.ti.com.cn/telecom">www.ti.com.cn/telecom</a>
放大器和线性器件	<a href="http://www.ti.com.cn/amplifiers">www.ti.com.cn/amplifiers</a> 计算机及周边 <a href="http://www.ti.com.cn/computer">www.ti.com.cn/computer</a>
数据转换器	<a href="http://www.ti.com.cn/dataconverters">www.ti.com.cn/dataconverters</a> 消费电子 <a href="http://www.ti.com.cn/consumer-apps">www.ti.com.cn/consumer-apps</a>
DLP® 产品	<a href="http://www.dlp.com">www.dlp.com</a> 能源 <a href="http://www.ti.com.cn/energy">www.ti.com.cn/energy</a>
DSP - 数字信号处理器	<a href="http://www.ti.com.cn/dsp">www.ti.com.cn/dsp</a> 工业应用 <a href="http://www.ti.com.cn/industrial">www.ti.com.cn/industrial</a>
时钟和计时器	<a href="http://www.ti.com.cn/clockandtimers">www.ti.com.cn/clockandtimers</a> 医疗电子 <a href="http://www.ti.com.cn/medical">www.ti.com.cn/medical</a>
接口	<a href="http://www.ti.com.cn/interface">www.ti.com.cn/interface</a> 安防应用 <a href="http://www.ti.com.cn/security">www.ti.com.cn/security</a>
逻辑	<a href="http://www.ti.com.cn/logic">www.ti.com.cn/logic</a> 汽车电子 <a href="http://www.ti.com.cn/automotive">www.ti.com.cn/automotive</a>
电源管理	<a href="http://www.ti.com.cn/power">www.ti.com.cn/power</a> 视频和影像 <a href="http://www.ti.com.cn/video">www.ti.com.cn/video</a>
微控制器 (MCU)	<a href="http://www.ti.com.cn/microcontrollers">www.ti.com.cn/microcontrollers</a>
RFID 系统	<a href="http://www.ti.com.cn/rfidsys">www.ti.com.cn/rfidsys</a>
OMAP应用处理器	<a href="http://www.ti.com.cn/omap">www.ti.com.cn/omap</a>
无线连通性	<a href="http://www.ti.com.cn/wirelessconnectivity">www.ti.com.cn/wirelessconnectivity</a> 德州仪器在线技术支持社区 <a href="http://www.deyisupport.com">www.deyisupport.com</a>

邮寄地址: 上海市浦东新区世纪大道 1568 号, 中建大厦 32 楼 邮政编码: 200122  
Copyright © 2013 德州仪器 半导体技术 (上海) 有限公司