

基于 PEBB 的并联有源电力滤波器 在立辊轧机中应用

江俊敏, 刘惠康

(武汉科技大学 信息科学与工程学院, 湖北 武汉 430081)

摘要: 有源电力滤波器是一种用于动态抑制谐波、补偿无功功率的新型电力电子装置。基于电子组块 PEBB(Power Electronic Building Block)的有源电力滤波器的控制系统主要由谐波检测电路和补偿电流发生电路组成,其基本原理是由谐波检测电路检测出被补偿对象的谐波电流,然后经过补偿电流发生电路采用滞环比较方法控制补偿电流的变化,最后得到期望的电源电流。该装置采用比例积分(PI)控制器使直流侧电容电压维持在要求的水平。该装置通过现场的智能仪表和系统管理软件可以对电能质量进行监视与校正,在立辊轧机上的实验运行取得了良好的效果。

关键词: 有源电力滤波器; 谐波; 动态补偿; 电力电子组块

中图分类号: TM 713

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2006)11-0064-03

0 引言

传统的无源补偿装置是并联电容器或 LC 滤波器,其阻抗固定,不能跟踪负荷无功需求的变化,不能满足电力系统对无功功率和谐波进行快速动态补偿的要求;而传统的模拟控制、DSP 控制较复杂,特别是谐波检测需要多个乘法器,硬件成本高,且易受温漂影响,存在着精度低、抗干扰差及电路复杂等缺陷,尤其是反应速度无法适应电力电子器件微秒级的要求^[1]。而基于电力电子组块 PEBB(Power Electronic Building Block)的有源电力滤波器(APF)是一种高精度、功能完备、谐波检测实时性好的用于动态抑制谐波和补偿无功的新型电力电子装置。

1 PEBB 的构成

PEBB 并不是一种特定的半导体器件、一种无源器件或某一种电路结构,它是依照最优的电路结构和系统结构设计的不同器件和技术的集成。PEBB 是可以处理电能集成的器件或模块^[2]。PEBB 包括的东西很多,除了功率半导体器件外,它还可以包括门极驱动电路、电平转换、传感器、保护电路、电源和无源器件。作为一种模块化产品,PEBB 有 2 种接口:能量接口和通信接口。通过这 2 种接口,几个 PEBB 可以组成电力电子系统,这些系统可以像小型的 DC-DC 转换器一样简单,也可以像大型的分布式电力系统一样复杂。一个系统中 PEBB 的数量可以从一个到所需要的任何数量。多个 PEBB 模块一道工作可以完成系统级的功能,例如电压转换、能量的储存和转换、阻抗匹配等。

2 APF 的工作原理与控制

APF 的基本工作原理是检测补偿对象的电流和电压,经谐波和无功电流检测电路计算得出补偿电流的指令信号,该信号经补偿电流发生电路放大,得出补偿电流,补偿电流与负载电流中要补偿的谐波及无功等电流相抵消,最终得到期望的电源电流。作为一种用于动态抑制谐波、补偿无功的新型电力电子装置,APF 能对大小和频率都变化的谐波及变化的无功进行实时补偿,具有响应速度快、补偿效果好,能实现动态连续实时补偿等特点^[3-4]。基于 PEBB 的电力滤波器工作原理见图 1。

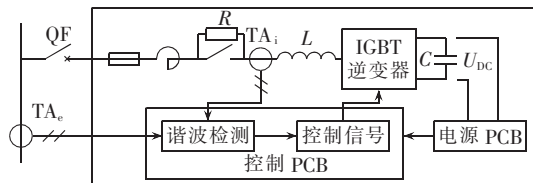


图 1 基于 PEBB 的电力滤波器工作原理

Fig.1 Operational principle of PEBB-based active power filter

如图 1 所示,电源印刷电路板 PCB(Printer Circuit Board)从 DC 母线电容器 C 上获取控制电源,经过转换后向控制 PCB 提供工作电源。控制 PCB 通过 TA₁ 采集负载电流信号,谐波检测模块抑制其中的基波成分后,再将得到的谐波成分送到调节和监控模块,该模块一是可以产生调节谐波电流给控制信号模块,其次是对系统所有功能进行监测。

2.1 直流侧电压控制

在控制 APF 补偿电流快速跟踪负荷谐波电流的过程中,由于 APF 本身存在线路电阻和开关损耗带来的有功损耗,以及在工作状态变化时有时需从系统

吸收一定的有功功率,可能会引起其直流侧电容电压波动或引起直流侧出现欠压,危及滤波器安全运行^[5-6]。为使 APF 正常工作,达到所要求的补偿效果,必须使直流侧电容电压 U_{dc} 维持足够高并且稳定,以保证在动态补偿的任何瞬间能根据控制要求输出所需的补偿电流;不过因为直流侧电容电压变化不快,直流侧电容电压的控制环节的响应速度不需要很快。本装置采用 PI 控制器使直流侧电容电压维持在要求的水平。即将电容电压 U_{dc} 与设定的电压参考值 U_{ref} 相比较,并将比较结果 ΔU_{dc} 经过 PI 控制器输出并叠加到 APF 参考电流的有功分量中,从而实现了对直流侧电容电压的控制。

2.2 控制系统 PCB 部分

如图 1 所示,控制信号模块产生驱动信号触发 IGBT 逆变器,向系统反送补偿谐波电流。断路器 QF 合闸后,首先通过预充电电阻 R 对 DC 母线的电容器充电,这个过程会持续 8 s,是防止上电后对 DC 母线电容器的瞬间冲击。当母线电压 U_{dc} 达到额定值后,预充电接触器闭合。此后,无论是停止还是故障条件下,接触器都保持闭合。只有当滤波器失电时,接触器才会打开。

从功能上分,APF 的控制系统由 2 大部分组成,即指令电流运算电路和补偿电流发生电路^[7]。其中,指令电流运算电路的主要功能是由补偿对象的电流中提取所需补偿的谐波和无功分量,然后将其反极性作用后发生补偿电流的指令信号,即所谓的谐波检测电路;而补偿电流发生电路的功能是根据主电路产生的补偿电流,计算出主电路各开关器件的触发脉冲,此脉冲经驱动电路后作用于主电路,从而构造实际的补偿电流。

2.2.1 谐波检测电路

谐波检测是 APF 非常关键的一环,因为只有检测到了谐波才能进行合理的补偿,谐波检测环节给出 APF 需要补偿谐波的参考值,控制系统根据该参考值产生相应的脉冲^[7]。本装置采取基于瞬时无功理论的谐波检测方法,该谐波检测方法的核心思想是根据所定义的瞬时功率的波动部分为谐波电流和系统电压作用的特点提取谐波分量。基于瞬时无功功率理论的谐波检测方法如图 2 所示,APF 的谐波检测环节原理见图 3。

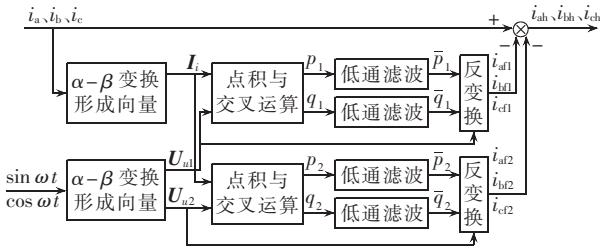


图 2 基于瞬时无功功率理论的谐波检测方法

Fig.2 Harmonic detection based on instantaneous reactive power theory

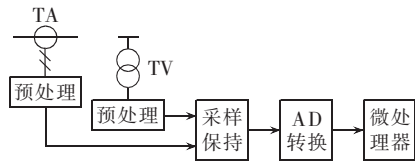


图 3 有源电力滤波器的谐波检测环节原理

Fig.3 Harmonic detection part of active power filter

本文以三相三线制系统为例,三相电流、电压的瞬时值分别用 i_a, i_b, i_c 和 u_a, u_b, u_c 表示,电流和电压满足 $i_a + i_b + i_c = 0, u_a + u_b + u_c = 0$;利用 $\alpha-\beta$ 变换,可以将三相电流、电压变换为正交的 $\alpha-\beta$ 坐标系中的向量。并在 $\alpha-\beta$ 坐标系内构造虚拟单位正序电压向量 U_{u1} 和虚拟单位负序电压向量^[4,8-9] U_{u2} ,即得:

$$I_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$
$$U_{u1} = \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ -\cos \omega t \end{bmatrix}, \quad U_{u2} = \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ \cos \omega t \end{bmatrix}$$

利用上述电压向量分别与 $\alpha-\beta$ 坐标系内电流向量计算瞬时有功功率和瞬时无功功率,即得:

$$p_1 = U_{u1} \cdot I_i = \bar{p}_1 + \tilde{p}_1, \quad q_1 = U_{u1} \otimes I_i = \bar{q}_1 + \tilde{q}_1$$
$$p_2 = U_{u2} \cdot I_i = \bar{p}_2 + \tilde{p}_2, \quad q_2 = U_{u2} \otimes I_i = \bar{q}_2 + \tilde{q}_2$$

可以求出正序电流基波向量和负序电流基波向量,经反变换可以得到 a、b、c 三相的正序基波电流和负序基波电流,即得:

$$\begin{bmatrix} i_{af1} \\ i_{bf1} \\ i_{cf1} \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta}^T \begin{bmatrix} i_{af1} \\ i_{bf1} \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta}^T \begin{bmatrix} \bar{p}_1 \sin \omega t + \bar{q}_1 \cos \omega t \\ -\bar{p}_1 \cos \omega t + \bar{q}_1 \sin \omega t \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} i_{af2} \\ i_{bf2} \\ i_{cf2} \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta}^T \begin{bmatrix} i_{af2} \\ i_{bf2} \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta}^T \begin{bmatrix} \bar{p}_2 \sin \omega t - \bar{q}_2 \cos \omega t \\ \bar{p}_2 \cos \omega t + \bar{q}_2 \sin \omega t \end{bmatrix}$$

得到三相电流中的基波分量为

$$\begin{bmatrix} i_{ah} \\ i_{bh} \\ i_{ch} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{af1} \\ i_{bf1} \\ i_{cf1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{af2} \\ i_{bf2} \\ i_{cf2} \end{bmatrix}$$

这种方法由于没有直接使用系统电压信息,因此检测结果的精度不受系统电压波形畸变与否的影响,克服了普通基于瞬时无功理论谐波检测方法受系统电压波形影响的不足。

2.2.2 补偿电流发生电路

在谐波检测电路检测出非线性负荷需要补偿的电流之后,APF 需要控制逆变器使其输出的电流跟踪所需补偿的非线性负荷的谐波电流。本装置采用了滞环比较方法确定 APF 开关器件的开与关,从而实现电流跟踪。见图 4,当 $I_c > I_{ref} + H$ 时,比较器输出为 1,控制 APF 的逆变器开关使补偿电流减小;而当 $I_c < I_{ref} - H$ 时,比较器输出为 0,控制 APF 的逆变器开关使补偿电流增加;而当 $(I_{ref} - H) < I_c < (I_{ref} + H)$ 时,比较器的输出与原来的输

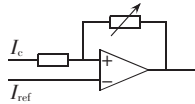


图 4 滞环控制方法

Fig.4 Hysteresis control

出一样,即保持逆变器开关的状态不变。这样可以使 APF 输出的电流在一个 $2H$ 宽的带中跟踪参考电流。通过调解 H 的大小控制 APF 的电流跟踪精度及改变开关频率。这种电流跟踪控制方法简单,对并联型 APF 的参数和结构依赖性很小。

2.3 电能质量监视及校正系统

为了及时了解电网情况,使用了电能质量监视系统。电能质量监视系统是通过现场安装的智能电力仪表和远方的系统管理软件实现对电力系统内一般电气参数和电能质量的实时监视。现场的智能电力仪表可以独立完成对电力系统内电能质量问题的监测,并将相应的监测结果记录在仪表内的存储器。

3 应用效果分析

本装置采用了基于瞬时功率的控制方法,利用三相系统电压的计算得到电压矢量的角度,也即进行同步变换所需的参考信号的基频相位 θ ,据此对系统三相电流进行同步变换和滤波得到谐波分量的有功和无功电流参考信号 I_d 和 I_q ,再将其变换为三相补偿电流的参考信号,然后与实际的谐波电流相比较,经滞环控制器生成逆变器的门极控制信号;在获取参考信号后,通过模拟电路实现谐波跟踪并产生控制 APF 所需的 PWM 脉冲。因为与数字电路相比,采用模拟芯片实现一般的谐波跟踪(用比例积分 PI 控制)和 PWM 脉冲控制具有更快的速度和更高的分辨率。图 5 中的滞环控制器能够快速、准确地产生补偿电流参考信号,具有实时性。

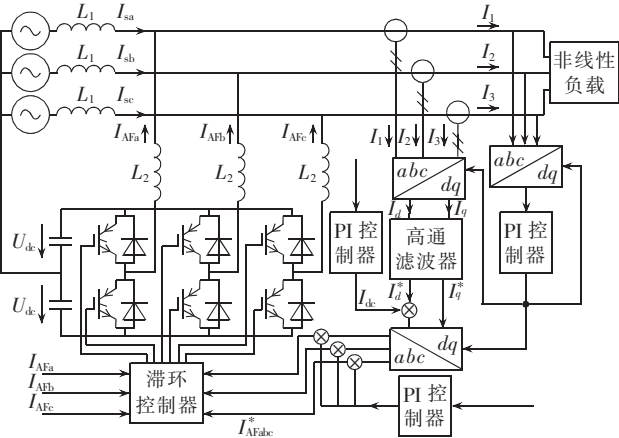


图 5 基于 PEBB 的有源电力滤波器的电路
Fig.5 Circuit of PEBB-based active power filter

这套基于 PEBB 的 APF 在舞阳立辊轧机变压器副边低压侧经一段时间的实验运行,取得了相当不错的效果,实际波形如图 6 所示。

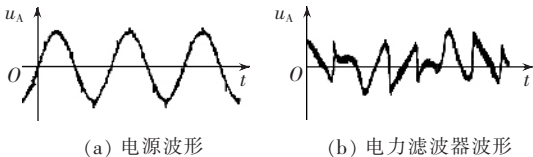


图 6 实际波形
Fig.6 Measured waveforms

加装基于 PEBB 有源滤波器电流谐波效果如表 1 所示。

表 1 PEBB 有源滤波器电流谐波效果表
Tab.1 Filtering effect of PEBB-based active power filter

谐波次数	滤波器		谐波次数	滤波器		%
	未投入	投入		未投入	投入	
3	0.04	0.48	13	4.27	0.52	
5	31.66	0.67	15	0.37	0.05	
7	11.48	0.68	17	3.44	0.46	
9	0.44	0.30	19	2.90	0.64	
11	7.07	0.71	21	0.28	0.26	

表 1 电流监测结果说明该 APF 能降低畸变率,效果显著。

4 结语

基于 PEBB 的电力滤波器,当用储能装置代替储能电容时,不仅可以执行滤波功能,同时可以平抑负载有功功率的波动和提高负载的功率因数;当电网电压跌落时,该装置又能动态补偿电压^[10],保证负载电压不受影响。这种具有储能单元的有源滤波器在全面改善负载特性、屏蔽负载对电网影响的同时,也全面改善了负载电压的质量,屏蔽了电网电压的质量问题对负载的影响。因此,该装置实际是储能型的用户电能质量综合控制器,而滤波仅是它的众多功能之一。

参考文献:

[1] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 4 版. 北京:机械工业出版社, 2000.

[2] 林平,张仲超. 分布式数字控制和 PEBB 技术[J]. 电工技术杂志, 2002(6): 8-10.

LIN Ping,ZHANG Zhong-chao. Study on the techniques of distributed digital control and PEBB[J]. Electrotechnical Journal, 2002(6): 8-10.

[3] 浣喜明. 电力有源滤波器的原理与应用[J]. 湖南工程学院学报, 2003, 13(4): 14-17.

HUAN Xi-ming. The principles and applications of active power filter[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering, 2003, 13(4): 14-17.

[4] 姜齐荣,谢小荣,陈建业. 电力系统并联补偿——结构、原理、控制与应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.

[5] 赵地. 有源滤波装置控制器设计的研究[D]. 北京:清华大学, 2002.

ZHAO Di. Study on the design of active power filter controller [D]. Beijing:Tsinghua University, 2002.

[6] 黄民聪. 三相四线制并联型电能质量控制器的研究[D]. 北京:清华大学, 2003.

HUANG Min-cong. Study on three-phase four wire shunt power controller[D]. Beijing:Tsinghua University, 2003.

[7] 李序葆,赵永健. 电力电子器件及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 1996.

[8] 余健明,同向前. 基于瞬时无功理论的瞬时谐波电流检测误差与消除对策[J]. 西安理工大学学报, 1998, 14(4): 357-362.

YU Jian-ming,TONG Xiang-qian. The detecting error of instantaneous harmonic current based on $P-Q$ theory and its eliminate countermeasures[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1998, 14(4): 357-362.

[9] TANAKA T,AKAGI H. A new method of harmonic power detection based on the instantaneous active power in three-phase circuits [J]. IEEE Trans on Power Delivery ,1995 ,10 (4) : 1737 - 1742.

[10] GRUNBAM R. SVC light,a powerful means for dynamic voltage and power quality control in industry and distribution[C] //IEE Conference Publication on Power Electronics and Va-

作者简介:

江俊敏(1975-),男,湖北武穴人,硕士研究生,研究方向为电气传动、智能控制(**E-mail**:jiangjunmin007@sina.com);

刘惠康(1963-),男,湖南涟源人,教授,主要从事传动自动化及供配电系统的教学科研工作。

Application of PEBB-based shunt active power filter in rolling mill

JIANG Jun-min,LIU Hui-kang

(College of Information Science and Engineering,Wuhan University
of Science and Technology,Wuhan 430081,China)

Abstract: APF(Active Power Filter) is a kind of electric power equipment for dynamic harmonic suppression and var compensation. The APF control system based on PEBB(Power Electronic Building Block) is composed mainly of harmonic detection circuit and compensation current generation circuit,which detects the harmonic current by the harmonic detection circuit and controls the change of compensation current by the compensation current generation circuit applying stagnant loop comparison method to obtain the expected source current. The PI(Proportional-Integral) controller is used to maintain the required capacitive voltage at the DC side. With field intelligent instrument and system management software,the system can be used to monitor and adjust the power quality. It runs well in experimental operation.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China(60074032).

Key words: active power filter; harmonics; dynamic compensation; PEBB