

基于配网的无功和谐波综合补偿装置的设计仿真和应用研究

范瑞祥¹, 涂春鸣², 罗安²

(1. 江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330006; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 针对电力系统配网对大容量谐波抑制与无功补偿的要求, 笔者结合江西某铜箔厂大型整流负荷谐波抑制和无功补偿的工程实例, 通过比较分析, 提出以串联谐振注入式有源滤波器为基础的无功和谐波综合补偿方案, 应用于中高压系统的负荷补偿中, 同时介绍了其参数设计方法并进行了仿真研究和实际应用, 其软硬设计思路和一些工程经验还可推广到其它结构的并联补偿装置的设计和应用中, 为推进新型大功率的电能质量治理设备的实用化进程提供有益的参考和借鉴。

关键词: 配电网; 谐波抑制; 无功补偿; 谐振注入

中图分类号: TM714.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)01-0084-05

Design Simulation and Application of Combined System with Reactive Power and Harmonic Compensation

FAN Rui-xiang¹, TU Chun-ming², LUO An²

(1. Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330006, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: According to the requirement of harmonic suppression and reactive power compensation, this paper presents a combined compensation system based on resonance injection hybrid active power filter, which is suitable for high-voltage system. According to the project of harmonic suppression and reactive power compensation in a copper foil factory, the design method of the system is proposed. The simulation as well as the hardware and software of the system are also introduced. This study can also be applied to the design of other kinds of parallel compensation systems for high capacity applications.

Key words: distribution system; harmonic suppression; reactive power compensation; resonance injection

0 引言

当电力系统向非线性设备及负荷供电时, 这些设备或负荷在传递(如变压器)、变换(如交直流换流器)、吸收(如电弧炉)系统发电机所供给的基波能量的同时, 又把部分基波能量转换为谐波能量, 向系统注入大量的谐波, 使电力系统的正弦波形发生畸变, 电能质量降低^[1]。为了保证供电质量, 防止谐波的各种危害, 必须采取有效措施在补偿无功功率的同时有效抑制供电系统中的各次谐波。传统方法是采用 LC 无源滤波器^[2](PF), 但其通常只能滤除固定频率的谐波电流, 当电网频率发生偏移时其滤波特性将发生较大的变化, 同时因系统阻抗参数变化也易与系统发生并联谐振, 从而使装置无法运行^[3]。为了克服无源滤波器的不足, 有源电力滤波器(APF)应运而生^[4]。APF(包括混合型有源电力滤波器 HAPF)能对频率和幅值都变化的谐波进行跟踪补偿, 因而受

到广泛的重视。与 PF 相比, APF 具有高度可控性和快速响应性, 但是由于单独使用的有源电力滤波器容量小、结构比较复杂、成本高等原因而很少应用中高压系统。近年来, 结合 PF 和 APF 优点的混合型有源电力滤波器作为新型的无功和谐波综合补偿装置成为研究的热点^[5,6], 但目前主要还停留在仿真和实验室研究上, 缺乏工程应用的经验。

笔者结合江西某铜箔厂大型整流装置谐波抑制和无功补偿的工程实例, 通过方案比较, 提出将以串联谐振注入式有源滤波器为基础的无功和谐波综合补偿装置应用于中高压系统的负荷补偿中, 从结构参数和软硬件设计等方面介绍了项目的实施过程, 同时进行了必要的仿真研究和现场应用, 从中获得的一些经验和教训可为其它结构并联补偿装置的设计与应用提供一定的指导作用。

1 项目背景与补偿方案选择

在广大工矿企业的配电系统中, 经常出现需要

收稿日期: 2008-03-28; 修回日期: 2008-09-11

作者简介: 范瑞祥(1977-), 男, 博士, 湖南省湘潭人, 主要从事电力系统谐波抑制与无功补偿技术的研究。

进行大容量无功补偿的同时又需要对谐波进行有效治理的情况。以江西某铜箔厂为例,在其电网中除普遍存在的电力电子装置之外,主要负载是反星形连接的12脉波整流装置4套,分别挂在两组10 kV进线上,每组进线挂两套整流装置,见图1。

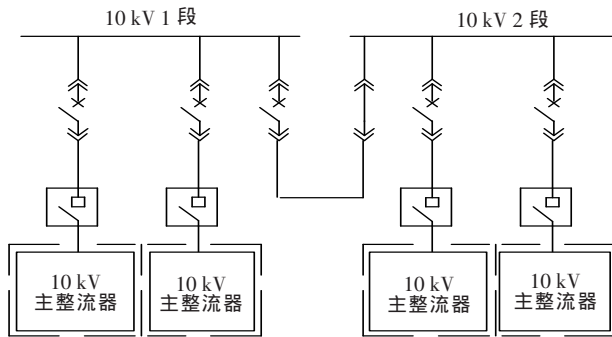


图1 整流装置进线图

图1中每套整流装置直流输出容量为2500 kV·A,交流输出容量3150 kV·A,最大输出电流50000 A,最大输出电压50 V。每套整流装置的负载为6组电解槽。考虑到铜箔厂是按订单进行生产,且生产设备在一定时期必须进行检修或维护,因此可将其生产情况分为以下4种典型的运行工况: 整流装置仅投运一套且负荷较小; 整流装置仅投运一套且负荷较大; 两套整流装置都投运,其中一套负荷较大,另一套负荷较小; 两套整流装置都投运且负荷都较大。

项目设计之初的实测工况为:进线只有一套整流装置投入生产,而且负载只有3组电解槽,根据现场数据,此时整流输出电压为15.3 V,输出电流35300 A,功率因数0.3左右,且系统中11和13次谐波严重超标。产生这种情况的原因是由于负载偏低,导致整流装置控制角 α 偏大,从而降低了功率因数,增大了谐波污染,增加了输电线路的能耗,影响了电网的安全稳定运行。根据整流器厂家提供的资料,该套整流装置在不同运行工况下的功率因数是有所差异的,但即使在较理想的满负荷情况下其功率因数最高也仅能达到0.8左右,如不进行有效的无功补偿将招致供电部门的高额罚款。考虑到电网中的谐波含量也较高,在这种情况下直接投入电容器进行无功补偿将会造成高频谐波的放大,可能引起电网不稳定,造成电容器承受高压,减少电容器的寿命,甚至损坏电容器。因此,系统应同时进行谐波治理和无功补偿,既实现功率因数的大幅度提高,又有效降低谐波污染,从而保证配电系统的安全稳定运行。

针对铜箔厂的实际情况,主要有以下几种补偿方案可供选择: 投入电容器进行无功补偿。这是最直接也是最常用的方法,可以大幅度提高平均功率因数。但由于电网中的主要负载是12脉波的整流

器,11次和13次的谐波含量较高,同时电网中还存在大量其它类型的电力电子装置,因此在这种电网本身谐波含量比较高的情况下,直接投入电容器进行无功补偿可能造成高频谐波的放大,从而引起电网不稳定,使得电容器过压或过流,减少电容器的寿命,甚至损坏电容器; 针对整流负载采用有载调压变压器以减小控制角 α 。可将有载调压变压器接于10 kV母线和整流变压器之间,分成几个档位,在整流装置处于低负荷或设备调试期间,功率因数较低的工况下,用来降低整流变压器进线电压,在保持整流装置直流输出电流和电压不变的情况下可有效减小整流装置的控制角 α ,从而大幅度提高功率因数。根据整流装置的工作原理,控制角 α 的减小同样也有助于降低整流装置产生的谐波。采用有载调压变压器在一定程度上可以提高系统的功率因数并降低谐波含量,但其投资较多,进线线路调整的工作量也比较大,将影响企业的正常生产,更为重要的是其无功补偿和谐波抑制的效果是较为有限的,较难满足功率因数超过0.92、谐波含量低于国标的要求; 安装无源滤波器组。安装无源滤波器组也是一种较为常规的选择。尽管参数设计合理的无源滤波器既可滤除固定次数的谐波,又能进行一定量的无功补偿,但仍有其无法克服的缺点,如只能滤除固定频率的谐波,滤波效果易受电网参数变化的影响,而且有与系统发生并联谐振的危险。另外,铜箔厂除了12脉波的大型整流装置之外还有大量的其它电力电子装置,因此谐波含量较为复杂,若完全使用无源滤波器进行谐波抑制和无功补偿将需要设置多路滤波器,从而造成整套补偿装置的体积过大,造价上升; 每段10 kV进线各投入一套如图2所示的以串联谐振注入式有源滤波器^[7,8]为基础的无功和谐波综合补偿装置进行谐波抑制和无功功率补偿。

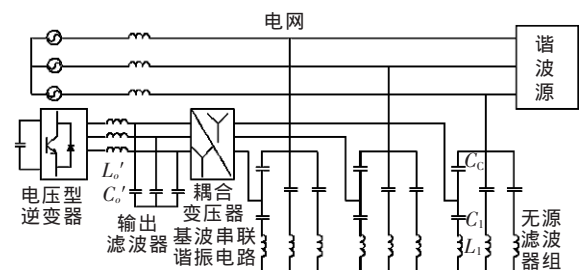


图2 配网无功和谐波综合补偿装置

从图2可以看出,该装置是将单独串联谐振注入式有源滤波器与无源滤波器并联混合而成,只由无源部分补偿无功功率,有源部分和无源部分共同抑制谐波,这使得其兼具较大容量的无功补偿和谐波抑制能力以及较小的逆变器容量的特点,同时实现对电网谐波先由无源滤波器进行“初滤”,再由有源滤波器进行“精滤”的谐波治理思路。其结构特点决定了它比较适合应用于中高压系统进行大容量的

谐波抑制和无功补偿,既可提高滤波效果,又能确保投入的无功补偿容量具有一定的灵活性,从而满足铜箔厂在不同工况下对电能质量的要求。

2 主电路参数设计与仿真

作为影响综合补偿装置性能的重要因素,主电路参数的设计极为重要,下面就系统的各组成部分详细进行介绍。

对于图2中的单调谐无源滤波器组,主要由电感、电容和电阻组成,它的工作原理是利用电感和电容对某次谐波频率产生串联谐振使得滤波器的阻抗很小,从而把负载中的该次谐波电流引入滤波器,以滤除一定次数的谐波,同时由于该支路对基波的阻抗是呈容性的,因此还可进行大容量的无功补偿。对其设计,首先应当根据谐波治理对象的谐波含量特点确定单调谐无源滤波器的具体滤波次数,而后根据分档补偿的原则确定无功补偿的具体容量。

考虑到单调谐滤波器中的电容和电抗器主要承受两种频率的激励作用,一个是电网基波频率电压,另一个是调谐频率电流,那么电容和电抗器的容量可表示为

$$\begin{cases} Q_C \approx U_2^2 w_s C + \frac{I_n^2}{n w_s C} \\ Q_L \approx (U_2 w_s C)^2 w_s L + I_n^2 n w_s L \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, U_2 为基波相电压; I_n 为 n 次谐波电流。值得注意的是,实际应用中应增大10%来考虑背景谐波的影响,以保证滤波器的安全稳定运行。在此基础上对于电容和电感的具体数值可采用投资费用最小法。设电容和电感的单位容量的投资为 P 和 H ,则滤波器所需的资金为

$$y = PQ_C + HQ_L \quad (2)$$

考虑到在谐振次数和容量已确定的情况下 y 可表达为 C 的函数,为求得 y 取最小值时 C 的值,可用 y 对 C 求导并令其等于0从而得到电容和电感值为

$$C = \sqrt{\frac{(P+H)I_n^2}{n w_s^2 U_2^2 (P+H/n^2)}}, L = \frac{1}{C n^2 w_s^2} \quad (3)$$

对于图2中的基波串联谐振注入支路,其既承担单调谐滤波的功能,又起到有效降低装置有源部分容量的作用,同时还是补偿谐波的主要注入通道,因此参数设计不同于普通的单调谐滤波器。

在设计中首先要保证装置中有源部分输出的补偿谐波能够尽可能多地流入电网,则应有基波谐振支路阻抗与整条注入支路阻抗的比值足够大,若设有源部分最有可能输出的补偿电流次数为 n ,则有

$$\max \left| \frac{Z_{基}}{Z_{总}} \right| = \max \left| \frac{(1-n^2)C_C}{C_1 + (1-n^2)C_C} \right| \quad (4)$$

另一方面,若由于网络背景谐波电压导致的注入支路中的基波谐振电路的谐波分压很高,则有可

能通过有源逆变器对图2的有源部分的直流电容进行反向充电,导致其电压飙升从而影响整套装置的安全稳定运行。为此,为保证系统的安全,在忽略有源部分参数影响时,基波谐振支路分压不得高于可承受的极值,即

$$\left| u_{mnc} \frac{C_2(1-m^2)}{C_1 + C_2(1-m^2)} \right| - u_{msct} < 0 \quad (5)$$

式(5)中, u_{mnc} 为电网中存在的较大的第 m 次谐波电压; u_{msct} 为基波谐振支路可承受的 m 次谐波电压极值。在实际应用中,精确值的确定是一个难点,它不仅与功率开关器件的选型有关,而且与逆变器直流侧的稳定电压值有关,当不对直流侧电压进行控制时,从现有对并联混合型滤波装置的研究成果和公开发表的文献来看, u_{msct} 的精确计算公式尚未见到,目前只能通过经验取值并由仿真和全参数低压实验进行确认。

由以上分析可知,对于谐振注入支路的参数设计,必须以网络背景谐波的有效测量和分析为基础,在考虑无功补偿容量合理配置的基础上,根据式(4)和式(5)优化选取合适的相关参数。

对于图2所示的耦合变压器,其连接在输出滤波器和谐振注入支路之间,不仅用来匹配有源部分的电压和电流,而且可以起到电气隔离的作用,使得逆变器的维护和绝缘都比较容易。从变比取值来看,一方面要考虑匹配功率器件,比如说IGBT就分600V/20A、1200V/600A等,并不是任何电压和电流的都有,所以在有源逆变器容量为定额时,需要通过耦合变压器来进行匹配,使功率开关器件的容量得到充分的利用;另一方面,变压器的变比也不宜取值过大或过小,过大则逆变器输出的补偿谐波电流将很难通过 C_C 注入电网中,而过小则可能使得有源部分的分压偏大,导致直流侧的电压上升,进而影响装置的安全运行。

对于图2中的输出滤波器,设计应主要考虑4个方面的因素^[9]:输出特性最佳,即保证在主要谐波补偿频率段上不会对有效输出产生较大的影响;

高频谐波输出足够小,即尽可能滤除逆变器的开关谐波;滤波电感不宜过大,以满足动态电流跟踪补偿的要求;在系统无源部分相关参数不变的前提下,确保由系统电压闪变产生的反相整流现象不会导致功率器件的损坏。

以这4个条件作为基准,即可采用各种算法进行多目标优化设计,寻求最佳的输出滤波器参数^[10]。

图2中的有源逆变器,其设计主要在于IGBT器件的选择和直流侧电容值的确定。对于IGBT器件,可根据设计的输出容量在保证一定裕度的情况下选择合适电压和电流等级的相应模块。而对于直流电容,其作用是稳定电压,理论上电容值越大越有

利于电压的稳定,但大电容成本高,体积大,不利于现场应用。工程实践中确定电容量的主要依据是限制逆变器工作在最低输出频率和额定输出电流时直流电压的低频脉动率。所需滤波电容量可按工程经验公式计算

$$C = \frac{I}{afU_d} K \quad (6)$$

式(6)中, I 为逆变器的额定输出电流方均根值; U_d 为直流电压平均值; f 为逆变器的最低输出频率; a 为允许的直流电压频率低峰值纹波因数; K 是与负载位移因数角有关的系数。

在以上分析的基础上,结合铜箔厂的实际情况,按图2所示的结构得到无源部分各条支路的调谐次数和无功补偿容量,见表1。

表1 无源支路设计表

调谐次数/次	注入支路		单调谐支路
	6	11	13
无功容量/kvar	600	1 600	1 400

以上设计的 HAPF 运行特点是:只由无源部分补偿无功功率,有源部分和无源部分共同抑制谐波。在无功补偿方面,混合型有源滤波系统提供的无功在 0~3 600 kvar 之间分档可调,从而在最大程度上保证了补偿参数的灵活性,能够满足整流装置不同工况的要求。谐波抑制方面,在 11 次和 13 次无源滤波器对单次谐波有效治理的基础上,有源滤波器还可以对电网中其它次数的谐波实施动态治理,进一步提高谐波治理的效果,同时有效避免无功补偿系统与电网发生谐振,提高补偿装置的安全性和稳定性。

有源部分方面,逆变器采用三菱公司的第 5 代智能功率模块 PM300CLV120,逆变器直流侧电容取 10 000 μ F,由 4 个额定电压为 450 V 的 10 000 μ F 电容两串两并构成,采用三相不可控整流桥供电。输出滤波器电容取值为 60 μ F,电感取值为 0.2 mH,耦合变压器的变比定为 400:200。

为验证以上设计参数的合理性,进行了系统仿真。仿真主要分为两个部分,首先对无源支路的投入情况进行仿真,以分析无源参数设计是否合理,确保在电网主要次谐波作用下无源支路不会与电网发生谐振。第 2 部分是对整体装置进行滤波和无功补偿效果的仿真,以确保在前文分析的铜箔厂整流器 4 种典型工况下补偿装置都有比较好的效果。

首先采用 MATLAB 软件对系统投入电网的情况进行仿真,若与电网产生谐振的可能性比较大,则需对设计参数作进一步调整。仿真分为 3 类情况,即仅投入一条支路、投入两条支路和 3 条支路全部投入。为简缩篇幅,以下仅显示并分析 3 条支路都投入时的仿真曲线,见图 3,其中 x 轴均表示谐波次数, y 轴表示以 H 为单位的母线电感, z 轴表示母线电流

谐波与谐波电流源谐波的比值,即谐波放大倍数。

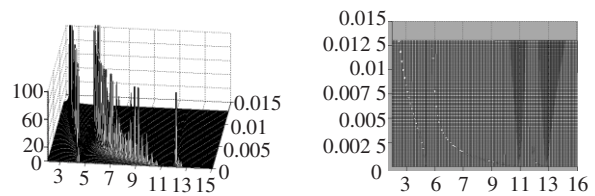


图3 3条支路都投入时可能谐振点的三维和其二维投影图

由图3可知,3条支路都投入时可能产生的谐振点基本不在电网主要谐波频率上,或是其谐振点对应的网络阻抗与实际可能的网络阻抗相差很大,由此可知以上设计参数构成的无源滤波器组在电网中主要存在的谐波次数上发生谐振的可能性并不大。对于无源支路其他几种可能的投入情况,都应按上述思路对其相对应的仿真曲线进行分析以尽量排除由于参数设计不当而与系统产生谐振的可能性。

在以上仿真的基础上,结合铜箔厂的实际情况,以两套 12 脉波整流装置作为主要负载,采用 PSIM 软件进行不同工况下综合补偿装置的整体性能仿真,仿真模型见图 4。

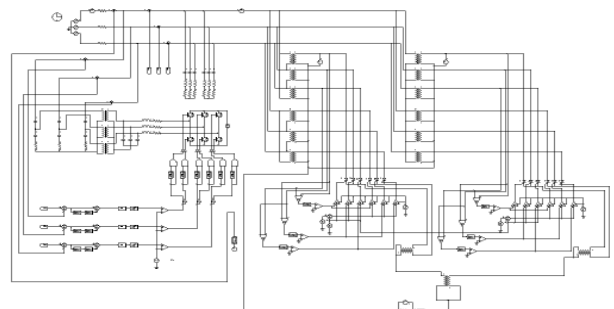


图4 补偿装置 PSIM 仿真图

对于工况 1,控制角为 72° ,补偿前基波电流 145.56 A,功率因数 0.3,电流总畸变率为 14.47%,补偿后基波为 46.23 A,功率因数上升到 0.953 8,电流总畸变率下降为 4.65%;对于工况 2,控制角为 36° ,补偿前基波电流 172.21A,功率因数 0.79,电流总畸变率为 14.01%,补偿后基波为 140.69 A,功率因数上升到 0.975,电流总畸变率下降为 3.64%;对于工况 3,控制角分别为 36° 和 72° ,补偿前基波电流 301.25 A,功率因数 0.597,电流总畸变率为 11.72%,补偿后基波为 191.69 A,功率因数上升到 0.948,电流总畸变率下降为 3.17%;对于工况 4,控制角都为 36° ,补偿前基波电流 340.65 A,功率因数 0.804,电流总畸变率为 13.89%,补偿后基波为 285.58A,功率因数上升到 0.96,电流总畸变率下降为 3.19%。由以上仿真结果分析可知,在不同工况下综合补偿装置的谐波抑制和无功补偿效果都较为理想。

3 软硬件设计及应用

在现场应用的装置中,三条无源支路都通过高

压开关柜接入 10 kV 电网,有源部分则主要安放在监控屏、逆变屏和输出屏中,通过隔离变压器与注入电路中的基波谐振支路相连,以下分别介绍。

有源监控屏中装设的主要是并联型 HAPF 的上位机系统,以完成电网参数的实时监控与分析及其数据的海量存储,其硬件结构见图 5。装置通过采用高线性、宽频带交流变送器和高精度的 A/D 采样卡以确保整个系统的精度和可靠性,通过串行通讯口与下位机进行联系,控制下位机发出控制功率器件开关的脉冲信号,同时还经 I/O 卡驱动保护继电器完成保护跳闸动作。其中 A/D 采样卡选用有 16 路 12 位的 A/D 输入、2 路 12 位 D/A 输出、最高采样频率为 330 kHz 的威达 PCI-1800,实际应用中采样频率定为 200 kHz。

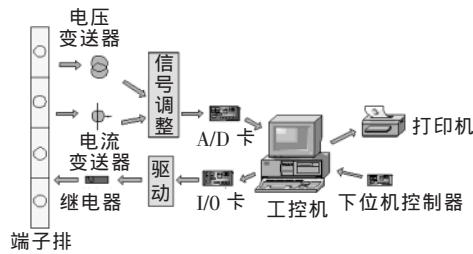


图 5 上位机系统硬件平台

有源逆变屏用于完成补偿谐波的控制输出,其最主要的两个构成部分是基于智能 IPM 模块的电压型逆变器和基于 DSP 的下位机控制器,见图 6。

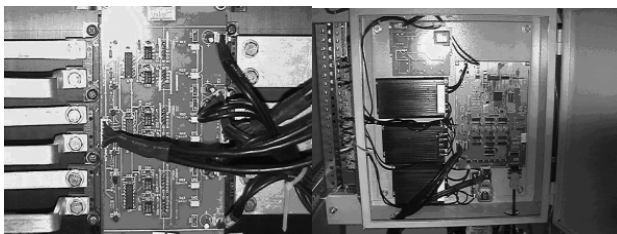


图 6 基于 IPM 模块的电压型逆变器和基于 DSP 的控制器

逆变器采用的是三菱公司的第 5 代智能功率模块 PM300CLV120,其内部集成了 6 个 IGBT 单元,每个单元有 4 个引脚,分别是 +15 V 控制电源、电源地、信号输入引脚、故障输出引脚,各个单元的引脚都是相互独立的,不能连结在一起,所以在应用的过程中,必须使用 6 组独立的电源来控制智能模块,其对电源的要求比较高,只能允许 ±10% 的波动,即正常的工作电压在 13.5~16.5,当电源电压低于 13.5 V 时,驱动电路产生的驱动脉冲电压会下降,功率器件不可能饱和导通,也就是说功率器件会工作在放大状态,从而使功率器件的功耗过大导致器件烧毁。

对于 DSP 控制器,其结构见图 7,主要包括处理器模块、A/D 采样模块、扩展存储器模块、液晶显示模块、键盘输入模块、硬件倍频模块、PWM 脉冲输出模块和通信模块,以完成信号检测、控制计算和发出 PWM 脉冲的功能。处理器模块以美国德州仪器公司

生产的 DSP2407A 为核心;A/D 采样模块主要采用两片 MAXMIN 公司的 MAX125;液晶显示模块分辨率为 320×240,实现人机交互界面;键盘输入模块采用 2×3 矩阵键盘;硬件倍频及过零同步模块主要功能是给 A/D 采样模块提供采样的触发信号,同时保证 APF 发出的补偿电流是在电网电流过零的时刻,以确保相角的正确,防止误补偿;通信模块由 DSP2407 的异步串口通过 MAX232 芯片实现电平转换和与计算机通信,通讯协议采用 RS-232,半双工方式,波特率为 19 200 bps;硬件互锁电路是防止断电或者上电的瞬间,不确定的脉冲信号导致 IGBT 模块上下桥臂直通,造成短路,同时通过电容和电阻的配合给出了硬件死区 8 μs。

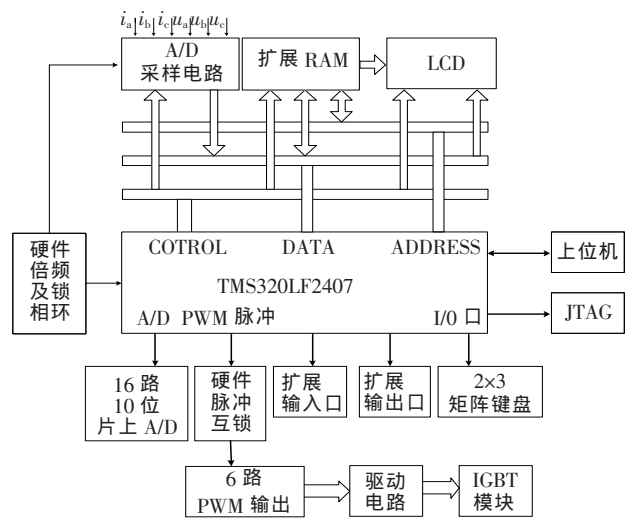


图 7 DSP 控制器结构框图

有源输出屏主要安放滤波电容和滤波电感,构成输出滤波器,以滤除逆变电路发出的高频开关谐波。与无源滤波器一样,滤波电感也采用等边三角形放置,以提高滤波效果。为保护有源装置的安全,在电容和电感回路上还分别连接了过压和过流继电器,其输出经时间继电器通过 220 V 直流中间继电器接入注入支路的高压开关柜,用于故障跳闸。

目前,综合补偿装置已投入实际运行,并取得了较好的滤波效果,其现场装置和投运效果见图 8、9。



图 8 综合补偿装置现场图

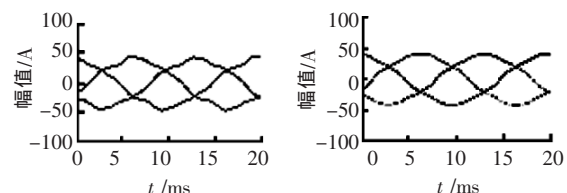


图 9 综合补偿装置投运前后对比波形图 (下转第 94 页)

4 结语

局部放电混沌分析方法有效地刻画了局部放电连续脉冲之间的关联性,多角度地反映了局部放电源的放电特性。如果结合 PRPD 方法,对局部放电源的特性分析将会更加全面,更加准确。研究局部放电混沌分析方法在局部放电检测和模式识别方面具有重要意义。从目前国内外研究局部放电混沌分析方法的现状看来,无论是对局部放电源的放电特性的定性分析,还是相空间重构后的定量分析,以及定量分析中特征量算法等的研究等,仍有许多待探索或解决的问题,这也为今后局部放电的研究工作提供了新的切入点。

参考文献:

- [1] LIM Y, KOO J. Chaotic Analysis of Partial Discharge (CAPD) as a Novel Approach to Investigate Insulation Degradation Caused by the Various Defects [C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Pusan, Korea. 2001: 413-416.
- [2] OKAMOTO T, TANAKA T. Novel Partial Discharge Measurement Computer-aided Measurement Systems [J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1986, 21(6): 1015-1019.
- [3] GLUSKI E. Computer-aided Recognition of Partial Discharges Using Statistical Tools[M]. Delft University Press, 1991.
- [4] KRIVDA A. Recognition of Discharges Discrimination and Classification[M]. Delft University Press, 1995.
- [5] 单平. 变压器局部放电超高频模式识别系统的研究 [D]. 西安: 西安交通大学硕士学位论文, 2003.
- [6] PATSCH R, BERTON F. Pulse Sequence Analysis-a Diagnostic Tool Based on the Physics Behind Partial Discharges [J]. Journal of Physics D: Applied Physics. 2002, 35(1): 25-32.

(上接第 88 页)

4 结语

针对大型整流负荷的特点,笔者提出一种基于串联谐振注入式有源滤波器的无功和谐波综合补偿方案,从单调谐波滤波器、无源注入支路、耦合变压器、输出滤波器和电压型逆变器各个组成部分详细介绍了参数设计方法,根据实际运行工况,提出运用 MATLAB 和 PSIM 软件分别进行系统投入状况和不同工况下补偿效果的仿真,同时结合实际运行装置,给出了有源部分软硬件设计的一些思路与注意事项,获得的结论和经验可为先进并联补偿装置的推广应用起到一定的指导和借鉴作用。

参考文献:

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制与无功功率补偿 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 仇润鹤, 吴震春. 电力谐波滤波器设计与调试 [J]. 电工技术

- [7] LEE J S, KOO J Y. An Analysis of the Partial Discharge Pattern Related to the Artificial Defects Introduced at the Interface in XLPE Cable Joint Using Laboratory Model [C]// 2002 Annual Report, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Pusan, Korea, 2002: 482-485.
- [8] LIM Y, KOO J. Chaotic Analysis of Partial Discharge (CAPD) -A novel Approach to Identify the Nature of PD Source [C]// 2001 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2001: 324-328.
- [9] DISSADO L A, SUZUOKI Y, KANEIWA H. Are Partial Discharges in Artificial Tubes Chaotic?[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Nagoya, Japan. 2003: 871-874.
- [10] KOO J Y, LIM Y S, KANG W J, et al. A Possible Application of the PD Detection Technique Using Electro-optic Pockels Cell with Nonlinear Characteristic Analysis on the PD Signals[C]// IEEE-CEIDP, 2000: 531-534.
- [11] KOO J Y, LEE J, LIM Y, et al. Comparison of Diagnostic Method for the Pattern Analysis Due to Artificial Defects Introduced at the Interface in XLPE Cable Joint Using Laboratory Model [C]// Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Asia Pacific, 2002: 1426-1431.
- [12] TAKENS F. Determining Strang Attractors in Turbulence [C]// Lecture Notes in Math, 1981: 361-381.
- [13] 吕金虎, 陆君安, 陈士华. 混沌时间序列分析及应用 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- [14] EDWARD O T S, JAMES A Y. Coping with Chaos-Analysis of Chaotic Data and the Exploitation of Chaotic Systems[M]. John Wiley & Sons Inc, 1994.
- [15] MATHEW B K, REGGIE B, HARRY D I. Abarbanel Determining Embedding Dimension for Phase-space Reconstruction Using a Geometrical Construction [J]. Physical Review A, 1992, 45(5): 3403-3411.

杂志, 2001, 23 (1): 44-45.

- [3] 肖湘宁, 徐永海. 电网谐波与无功功率有源补偿技术的进展 [J]. 中国电力, 1999, 32(3): 10-13.
- [4] 卓放, 胡军飞, 王兆安. 采用多重化主电路实现的大功率有源电力滤波器 [J]. 电网技术, 2000, 24(8): 5-7.
- [5] 徐万方, 罗安, 王莉娜, 等. 采用智能控制器的混合型有源电力滤波系统 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 49-52.
- [6] 罗安. 电网谐波治理和无功补偿技术及装备 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [7] JOU H L, WU J C, WU K D. Paralled Operation of Passive Power Filter and Hybrid Power Filter for Harmonic Suppression [J]. IEE Proc-gener, Transom Distrib, 2001, 148 (1): 8-14.
- [8] 刘飞, 邹云屏, 李辉. C 型混合有源电力滤波器 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 75-80.
- [9] 范瑞祥, 罗安, 章兢, 等. 谐振注入式有源滤波器的输出滤波器研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 95-100.
- [10] 涂春鸣, 罗安. 无源滤波器的多目标优化设计 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 17-21.