

基于ICAP/4的UPQC直接控制模式研究

何莉萍

(临沂师范学院信息学院, 山东 临沂 276005)

摘要: 统一电能质量控制器 UPQC 集电压补偿装置、电流补偿装置和储能装置于一体, 统一实现多重电能质量调节功能, 具有较远的发展前景。运用新颖控制策略下的直接控制方法对单相 UPQC 整体系统按其动态物理规律进行数学模型建立, 采用典型二型控制系统设计方法分别对串、并联部分电压电流双闭环控制模型进行设计, 并对其进行了实际器件 ICAP/4 仿真, 达到了较为理想的补偿效果, 从理论上验证了设计方法的合理性、可行性和实际可操作性, 对 UPQC 的研究具有一定的指导作用。

关键词: 统一电能质量控制器 (UPQC); 直接控制; 双闭环; 有源滤波器 (APF); ICAP/4 软件

Study on direct control strategy of unified power quality conditioner using ICAP/4

HE Li-ping

(School of Informatics, Linyi Normal University, Linyi 276005, China)

Abstract: UPQC (Unified Power Quality Controller) combines the functions of voltage compensator, current compensator and energy storage device and must have a prospective future. Multiple power quality regulation functions are implemented in UPQC simultaneously. In this paper the unified model of the whole single-phase UPQC system is built according to its dynamic physical performance. Both the series part and shunt part of UPQC are designed as voltage-current double-closed loop control models. This paper uses the design principles of typical 2 order control system to design these two control models. Then the real hardware circuit is simulated using ICAP/4. The simulation results obtained verify that the control algorithms are feasible and rational and can be applied in practice and have certain guiding significance in the research of UPQC.

Key words: unified power quality conditioner; double-closed loop; direct control; active power filter; ICAP/4 software

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)21-0021-04

0 引言

随着非线性电力电子器件、装置和冲击性、波动性负荷在现代工业中的广泛应用以及各种复杂、精密、对电能质量敏感的用电设备的不断普及, 人们对电能质量的要求越来越高, 既要防止非线性负荷对电网的污染, 又面临如何向负荷提供高质量的电能。

日本学者 H.Akagi在1996年分析有源滤波器新趋势一文中, 首次提出由串并联有源滤波器整合起来所构成的统一电能质量调节器 UPQC (Unified Power Quality Conditioner), 结合了电压型补偿装置和电流型补偿装置两者的功能^[1], 不仅可以补偿由非线性负载产生的谐波、无功、负序电流, 还可以调节负载端电压为幅值额定的三相对称电压, 使用户免受电网电压不平衡和幅值波动的影响, 具有综合的调节功能, 被公认为是极有发展前途的补偿

调节装置。

1 新颖策略下的UPQC直接控制模式

统一电能质量控制器UPQC的基本拓扑如图1。

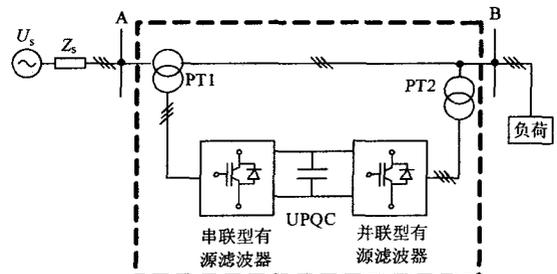


图1 UPQC基本拓扑结构图

Fig.1 The basic topology of UPQC

其核心部分主要由串联单元、并联单元两部分通过直流电容C耦合而成。由于其串、并联两部分

公用直流单元, 因此在电网和装置之间必须进行隔离, 即在并联或串联单元接入系统的地方增加隔离变压器, 否则会出现电容直通、相间短路等情况。

1.1 UPQC的控制策略和控制模式

在UPQC的控制策略中, 传统的控制策略是控制串联单元按受控电压源方式工作, 主要用来补偿电压谐波和不平衡, 调节负荷电压幅值为电网电压的额定值; 控制并联单元按受控电流源方式工作, 补偿无功、谐波和不平衡电流, 并调节两单元之间的直流母线电压恒定。近年来, 有人提出一种新颖的控制策略: 串联单元被控制为正弦电流源以使电网电流为标准正弦, 而并联单元则被控制为正弦电压源使以负载端电压为标准正弦。两种控制策略均需保证输入功率因数为1。

目前, 两种策略下的UPQC控制模式都可以分为两大类: 直接控制和直接补偿。直接补偿法是主要的控制模式: 首先检测电压波动和谐波电压、无功电流和谐波电流, 作为目标畸变量, 然后通过逆变器跟踪输出这些目标量。而直接控制法则是一种新颖的控制模式: 直接控制电网流入负载的电流为标准正弦电流, 直接控制负载电压为同步标准正弦电压, 无需检测计算畸变量, 电路简单, 容易实现, 实时性好, 是一种很有前途的控制模式。

1.2 UPQC 直接控制模式

文献[2]仅考虑了电压输入谐波和负载电流谐波情况下UPQC直接控制模式的控制, 而没有考虑电压不平衡、波动等情况, 控制简单, 减少了繁琐的向量转换过程, 充分体现了直接控制模式的简便。电力系统中68%的干扰是短时电压暂降, 文献[3~5]研究了UPQC电压暂降补偿, 直接控制UPQC串联滤波器针对不同情况注入相应的补偿量, 降低了补偿器的容量和成本, 更易于实际应用。

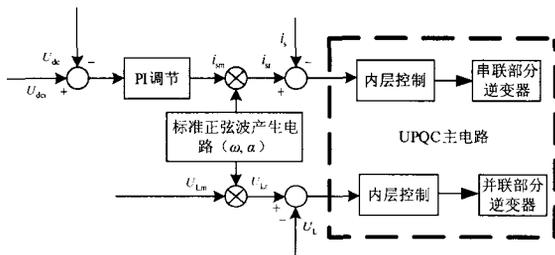


图2 直接控制模式基本原理图

Fig.2 The basic principle chart of direct control strategy

本文对新颖策略下的UPQC直接控制模式进行研究: 通过直接控制公共侧电容电压 U_{dc} 的恒定产生标准电源参考电流幅值 i_{sm} , 而标准参考电压 u_{Lr}

的产生则是根据负荷的额定需要确定的, 同时保证电压和电流的同步, 达到电源提供给负荷的电压为标准正弦电压, 电源电流为标准正弦电流, 输入功率因数近似为1的目标。其基本原理如图2所示。

1.3 UPQC串、并联部分控制设计

本文UPQC串、并联部分都采用电压电流双闭环控制, 外环电压环, 分别稳定 u_{dc} 和控制 u_L ; 内环电流环, 采用恒频滞环控制^[6], 分别跟踪控制电源电流 i_s 和并联APF电流 i_c 。为了分析和设计控制系统, 必须首先建立描述系统动态物理规律的数学模型, 如图3和4所示。每个双闭环系统最终都简化成典型II型控制系统^[7], 利用调节器的工程设计方法, 参考典型II型系统参数和性能指标的关系, 设计调节器参数。

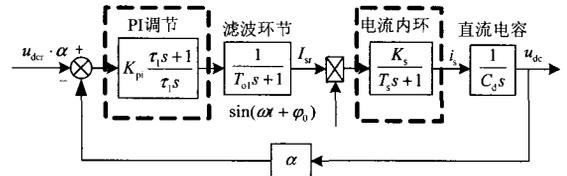


图3 串联部分的控制数学模型

Fig.3 Control mathematical model of the series part

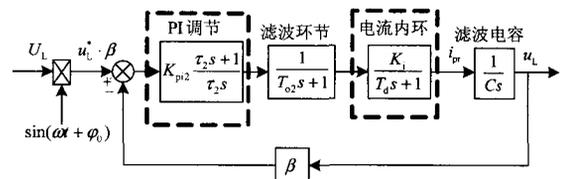


图4 并联部分的控制数学模型

Fig.4 Control mathematical model of the parallel part

2 单相UPQC硬件电路ICAP/4仿真

2.1 ICAP/4仿真软件介绍

ICAP/4 (IsSpice) 是由美国intusoft公司开发, 以加州大学柏克莱SPICE 3F.5版为基础的软件, 另开发了很多人机接口界面, 使软件操作和使用更加方便, 统称ICAP/4。不同的是它包含较多的大功率电力电子器件库和磁元件库, 并搭配了建立功率元件模型和磁元件设计的软件, 更适合电力电子电路的仿真。ICAP/4是一款强大的模拟和混合信号电路仿真软件包, 易用加上交互式的设计风格取代了直接制作电路板原型的缓慢和繁杂, 不用使用面包板, 可以用不同的电路结构画出原理图, 即刻进行仿真, 可以称得上是一个理想的虚拟电子实验室^[8]。利用ICAP/4系统进行电子电路仿真实验, 可以排除原材料的消耗和仪器损坏等因素, 使实验快速、准确、方便、灵活。

2.2 UPQC直接控制模式 ICAP/4仿真

2.2.1 仿真参数

串联部分控制系统：直流侧电容电压指令值 $u_{dc}^* = 400 \text{ V}$ ， $C_d = 2\ 200 \mu\text{F}$ ，开关频率 $f_s = 20 \text{ kHz}$ ， $T_{ol} = 10 \text{ ms}$ ， $\tau_1 = 50 \text{ ms}$ ， $\alpha = 1/80$ ， $K_{pi} = 13.6$ ， $R_0 = 10 \text{ k}\Omega$ ， $R_1 = 140 \text{ k}\Omega$ ， $C_1 = 0.36 \mu\text{F}$ ， $L_{F1} = 10 \text{ mH}$ ， $C_{F1} = 2 \mu\text{F}$ 。

并联部分控制系统：负载电压指令信号峰值 U_L 为标准的 $220\sqrt{2} \text{ V}$ ，与电网电流指令值 i_{sr} 同步，即 $\omega = 2\pi f = 100 \pi$ ， $\varphi_0 = 0$ ； $T_d = 25 \mu\text{s}$ ， $\tau_2 = 250 \mu\text{s}$ ， $\beta = 1/22$ ， $C = C_{F2} = 40 \mu\text{F}$ ， $L_{F2} = 2 \text{ mH}$ ， $K_{pi2} = 5.48$ ， $R_0 = 10 \text{ k}\Omega$ ， $R_{12} = 51 \text{ k}\Omega$ ， $C_{12} = 4.7 \text{ nF}$ 。

2.2.2 主要器件选择

本文设计的 UPQC 装置容量为 10 kVA ，电源电压峰值为 311 V ，主电路开关器件型号为 MOSFET-IRFP460；器件的驱动由功率驱动集成电路 IR2110 完成^[9]；采用 HCNR200 实现直流侧电容电压采样隔离线性转换^[10]；恒频滞环跟踪控制是通过由逻辑门器件构成的 RS 触发器 DM74121 功能模块和型号为 LM339 的比较器实现的；指令信号的产生是通过锁相环技术实现的。

2.2.3 仿真结果

由于 ICAP/4 仿真系统均采用实际器件模型，仿真时间比较长，所以本文对以下两种情况进行了仿真分析，以验证硬件电路设计的正确性：

(1) 电网电压和负载电流含有 3 次、5 次谐波；

(2) 电网电压存在基波电压暂降并含有 3 次、5 次谐波，负载电流含有 3 次、5 次谐波。

仿真结果依次如图 5、6 所示。

从图 5、6 波形可以看出：无论针对哪一种情况，UPQC 装置投入后负载电压和电网电流都得到了很好地补偿，实现了标准正弦且保持同步的控制目标，见图 5 (b)、6 (b)： $u_L = 220\sqrt{2} \sin 100\pi t$ ， $i_s = 60 \sin 100\pi t$ ；直流侧电容电压波形一直比较平稳，基本保持 400 V 不变；串联部分电流恒频滞环跟踪控制快速、效果理想，而并联部分电流滞环跟踪在其峰值处速度明显变慢，但并不影响整体补偿效果。上述结果充分证明了新颖控制策略下 UPQC 装置直接控制方法硬件设计的实际可操作性。

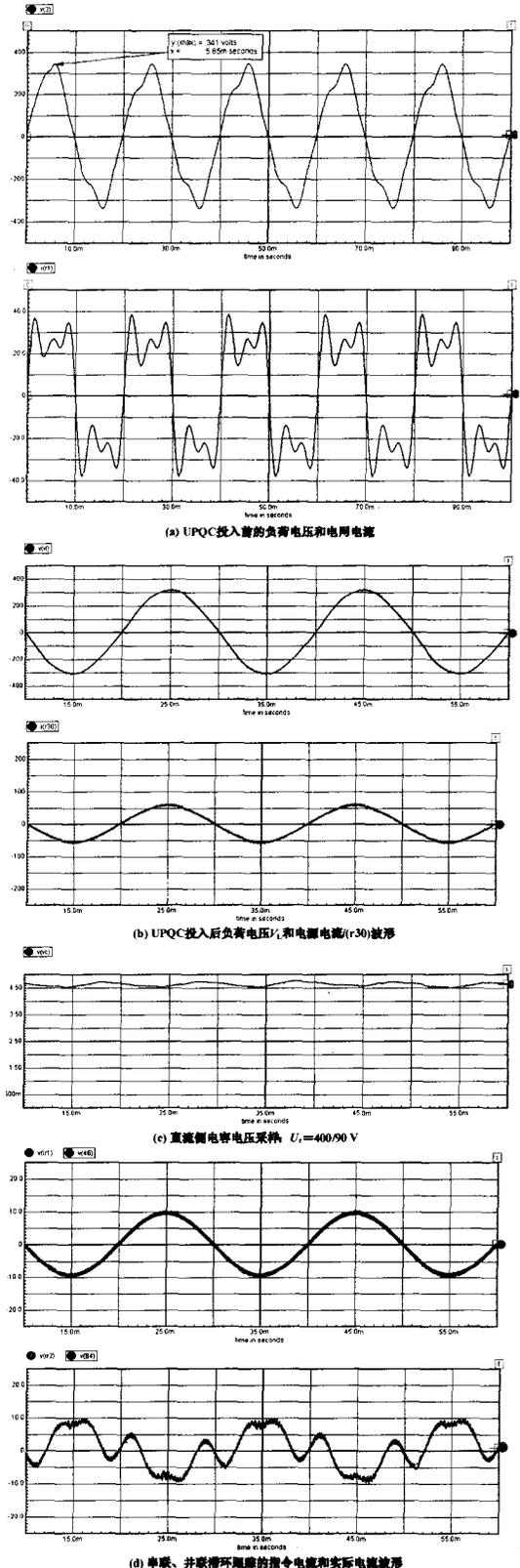


图 5 电网电压和负载电流仅含有谐波时的仿真结果
Fig.5 Simulation results when network voltage and load current contains only harmonics

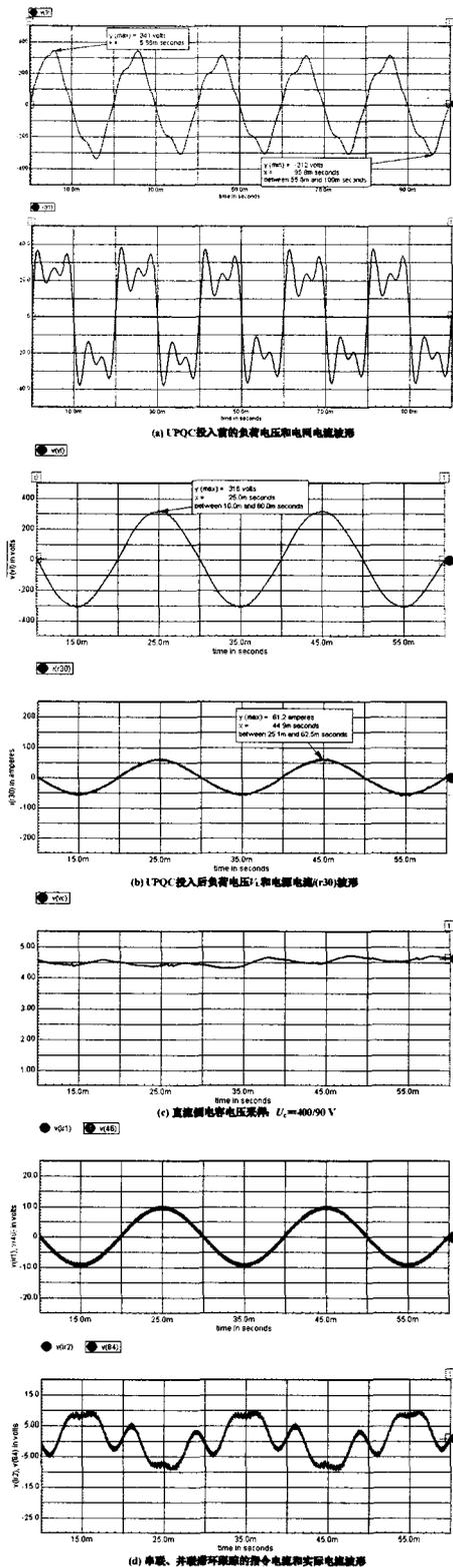


图6 电网电压存在电压暂降及谐波和负荷电流仅含有谐波时的仿真结果

Fig.5 Simulation results when network voltage contains harmonics and drag and load current contains only harmonics

3 结论

UPQC 集电压补偿装置、电流补偿装置和储能装置于一体，一机多能，具有更高的性价比。本文运用新颖控制策略下的直接控制方法对 UPQC 整体系统按其动态物理规律进行数学模型建立，并对其进行了实际器件 ICAP/4 仿真，达到了较为理想的补偿效果，从理论上验证了该方法的合理性、可行性和实际可操作性，具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] Akagi H. New Trends in Active Filter for Power Conditioning[J]. IEEE Trans on Ind Application,1996, 32(6):1312-1322.
- [2] Khadkikar V, Agarwal P, Chandra A, et al. A Simple New Control Technique for Unified Power Quality Conditioner[A]. in: 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power[C].2004.289-293.
- [3] Basu M, Farrell M, Conlon K M C. et al. Optimal Control Strategy of UPQC for Minimum Operational Losses[A]. in:The 39th International Universities Power Engineering Conference[C]. 2004.246-250.
- [4] Basu M, Das S P, Dubey G K. Experimental Investigation of Performance of a Single Phase UPQC for Voltage Sensitive and Non-linear Loads[A]. in:The 4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems[C]. 2001. 218-222.
- [5] Yun Min-Sung, Lee Woo-Cheol, Suh Inyoung, et al. A New Control Scheme of Unified Power Quality Compensator-Q with Minimum Power Injection[A]. in:30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society[C].2004. 51-56.
- [6] Dawande M, Dubey G K. Bang Bang Current Control with Pre-decided Switching Frequency for Switch Mode Rectifiers[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics,1999, 46(2): 61- 66.
- [7] 陈伯时.电力拖动自动控制系统[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [8] 贾默伊, 黄晓红. 利用ICAP/4仿真系统进行电子电路虚拟实验[J]. 河北理工学院学报, 2002,24(3):48-51. JIA Mo-yi, HUANG Xiao-hong. Making the Virtual Experiments of Electronic Circuit with ICAP/4 Simulation System[J]. Journal of Hebei Institute of Technology,2002,24(3):48-51.
- [9] 陶海敏, 何湘宁. IR2110在驱动大中功率IGBT模块中的应用[J]. 电工技术杂志, 2002,9:44-46. TAO Hai-min, HE Xiang-ning. Application of IR2110 on Driving Medium and High Power IGBT Modules[J]. Journal of Electrical Engineering, 2002,9:44-46.
- [10] 杨小晨, 王欣. 高精度线性光耦HCNR200/201及其应用[J]. 仪器仪表用户, 2003,10(5):41-42. YANG Xiao-chen, WANG Xin. High-Linearity Analog Opto-coupler HCNR200/201 and Its Application[J]. EIC, 2003,10(5):41-42.

收稿日期: 2009-02-11; 修回日期: 2009-03-23

作者简介:

何莉萍(1982-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术电力系统中的应用。E-mail:lp-h@163.com