



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20150091

## 双并联处理型综合电能质量调节器的研究

侯勇<sup>1</sup>, 吉荔<sup>1</sup>, 赵黎华<sup>2</sup>, 段英宏<sup>1</sup>

(1. 天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津市 300222;  
2. 天津出入境检验检疫局工业产品安全技术中心, 天津市 300308)

**摘要:** 提出了一种新型的综合电能质量调节装置, 通过在电源与负载之间连接一组三相电抗器, 在连接电抗器的两端分别并联一套逆变器, 能够实现与传统 UPQC 相似的综合电能质量调节功能, 且结构简单、易于控制。装置采用了基于功率控制的系统控制策略, 控制思路为: 负载在额定电压下的有功功率全部由电源通过连接电感提供, 谐波和无功功率由负载侧逆变器提供, 即可实现负载电压的补偿和有源滤波功能; 电源侧逆变器提供连接电感电流中的无功功率电流分量, 实现电源供电功率因数的调节。仿真表明: 电源电压发生跌落时, 通过调节可在半个工频周期内将负载电压稳定为额定值; 当负载电流中含有谐波和无功功率分量时, 可将电源电流调节为与电源电压同相位的基频正弦波。

**关键词:** 电能质量; 并联处理; 电压跌落; 谐波; 无功补偿

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2016)02-0067-05

## On Double Parallel Processing Type of Unified Power Quality Conditioner

HOU Yong<sup>1</sup>, JI Li<sup>1</sup>, ZHAO Lihua<sup>2</sup>, DUAN Yinghong<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China; 2. Tianjin Entry-exit Inspection and Quarantine Bureau of Industrial Product Safety Technology Center, Tianjin 300308, China)

**Abstract:** In this paper, a new type of unified power quality conditioner was proposed, which can realize unified power quality conditioning similar to the traditional UPQC by connecting a set of three-phase reactor between the power source and the load, and connecting two inverters respectively to both ends of the reactor in parallel. The device is simple in structure and easy to control. The system control strategy is based on power control, and the basic idea is that the active power of the load under the rated voltage is supplied by the power supply through the connected inductor; the load required harmonic power and reactive power are supplied by the load-side inverter; thus the load voltage compensation and active filtering can be realized. The source-side inverter provides the reactive power current component of the inductor current and realizes the source power factor adjustment. Simulation results show that when the power supply voltage sag occurs, the load voltage can be compensated to rated value by the device in half fundamental frequency cycle; when the load current contains harmonic wave and reactive power components, the device can adjust the supply current to fundamental sinusoidal current in-phase with the source voltage.

**Key words:** power quality; parallel processing; voltage sag; harmonic wave; reactive power compensation

电能是当今社会中应用最为广泛的一种能源形式, 随着社会的进步和现代科学技术的飞速发展, 对电能的需求也在不断地增加。同时, 电能质量问题也越来越受到重视, 一方面, 电力用户对供电的可靠性

及质量的要求不断提高; 另一方面, 一些大容量的、不对称的、非线性的电气设备也会给电能质量带来越来越多的冲击和干扰。国内外对电能质量问题的认识不断加深, 对改善电能质量的技术和装置的研究也

收稿日期: 2015-07-13; 修回日期: 2015-12-29

基金项目: 国家质检总局科技计划项目(2014IK193); 天津科技大学青年教师创新基金(2014CX1G27)

作者简介: 侯勇(1965—), 男, 吉林人, 教授, houyong@tust.edu.cn.

在不断发展. 供电部门旨在为用户提供一个理想的正弦波供电电压. 然而, 由于一些常见的系统原因和一些偶然事故的影响, 如短路故障等, 很难保证为用户提供理想供电电压. 同时, 供电部门也希望用户能够从供电电源汲取正弦波的电流, 而不会对电源的供电质量造成不利影响<sup>[1-4]</sup>.

目前, 改善电能质量主要手段是借助于电力电子装置, 国内外专家和学者研制出了具有多种不同结构和功能的电能质量调节装置, 如动态电压恢复器、有源滤波器和无功补偿装置等. 但这些装置的功能往往比较单一, 能够较全面地实现用户电能质量调节的装置是统一电能质量调节器(unified power quality conditioner, UPQC), 由于 UPQC 采用的是串联型和并联型变流器以及串联变压器的结构, 成本较高, 控制上也较为复杂, 其应用受到了很大的限制<sup>[3-9]</sup>. 文献[10-12]研究了一种并联型综合电能质量调节装置, 采用三端口的主电路结构, 该结构仅采用一套并联逆变器和电源与负载之间的串联电感, 兼有负载电压补偿和有源滤波的电能质量调节功能, 但该结构并不具备电源侧的无功补偿作用, 功率因数不可控.

本文提出了一种新型的综合电能质量调节装置, 特点是在电源与负载之间连接一组三相电抗器, 替代传统 UPQC 结构中的串联变压器部件, 在连接电抗器的两端分别并联一套逆变器, 通过负载侧逆变器的调节实现负载电压补偿和非线性负载时的有源滤波, 通过电源侧逆变器的调节使电源的供电功率因数为 1, 能够用较简单的主电路结构和控制策略实现与传统 UPQC 相似的综合电能质量调节功能.

### 1 双并联型 UPQC 的结构和原理

本文研究的新型电能质量调节器的主电路结构如图 1 所示.

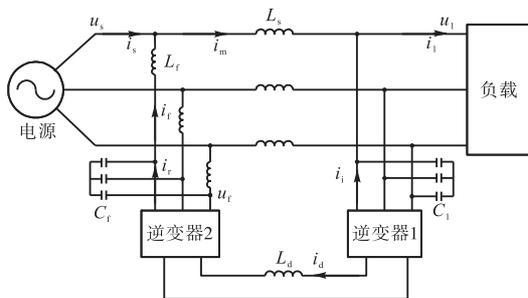


图 1 双并联型综合电能质量调节器的主电路

Fig. 1 Main circuit of double parallel processing type of unified power quality conditioner

图 1 中:  $L_s$  为连接电感;  $L_d$  为逆变器直流侧电感;  $C_f$  为负载侧逆变器的滤波电容;  $C_f$  和  $L_f$  分别为电源侧逆变器的滤波电容和电感;  $u_s$ 、 $u_l$ 、 $u_f$  分别为电源、负载和逆变器 2 交流侧电压;  $i_s$ 、 $i_m$ 、 $i_l$  分别为电源、连接电感和负载电流;  $i_i$ 、 $i_r$  分别为逆变器 1 和逆变器 2 的交流侧电流;  $i_f$  为逆变器 2 滤波电感电流;  $i_d$  为逆变器直流侧电感电流.

本装置与传统 UPQC 的电路结构的显著区别在于, 在电源与负载之间串联一组三相连接电感, 并在电感的两端, 即电源侧和负载侧各并联连接一套共用直流母线的背靠背形式的逆变器. 本文采用的是电流型逆变器, 直流侧采用串联电感作为储能元件. 本装置可实现以下电能质量调节功能:

- (1) 当电源电压发生跌落时, 可维持负载电压为额定电压;
- (2) 当负载为非线性负载时, 可使电源供电波形为基频正弦波;
- (3) 当负载存在一定程度的不对称时, 可使电源供电波形保持正序对称;
- (4) 补偿电源侧的无功功率, 以提高供电的功率因数.

装置的工作原理是: 当电源电压发生跌落时, 通过控制负载侧逆变器 1 的注入电流, 改变连接电感  $L_s$  上的电压, 从而使电源电压与电感电压叠加后将负载电压维持为额定值; 带非线性负载时, 控制负载侧逆变器 1 向系统注入相应的谐波电流, 以抵消负载电流中谐波分量; 当负载不对称时, 控制负载侧逆变器 1 向系统注入相应的负序电流分量, 以抵消负载电流中负序分量; 通过控制电源侧逆变器 2 向电源端的连接点注入适当的无功功率, 提高电源供电的功率因数; 通过功率控制, 由负载侧逆变器完成对逆变器直流侧母线电感的充电并维持电感电流恒定(如采用电压型逆变器结构, 则是维持直流侧电容电压的恒定).

### 2 系统控制策略

根据装置的结构和原理, 本文采用了基于功率控制的系统控制策略, 控制思路为: 负载在额定电压下的有功功率全部由电源通过连接电感提供, 调节逆变器 1 的无功功率维持负载电压的大小为额定值; 当负载为非线性时, 负载功率是波动的, 此时, 由电源提供负载有功功率的平均值, 由逆变器 1 提供波动部分, 即可维持连接电感的电流的波形为基频正弦波, 实现有源滤波的功能; 逆变器 2 提供连接电感电流中

的无功功率电流分量,从而使电源只提供对应负载平均有功功率的有功电流分量,实现电源供电功率因数的调节.本系统采用了建立在同步旋转坐标系统中的状态模型来实施控制.

## 2.1 负载侧逆变器 1 的控制

逆变器 1 相关的状态方程为

$$\begin{cases} C_1 \frac{du_{1a}}{dt} = i_{ma} + i_{ia} - i_a \\ C_1 \frac{du_{1b}}{dt} = i_{mb} + i_{ib} - i_b \\ C_1 \frac{du_{1c}}{dt} = i_{mc} + i_{ic} - i_c \end{cases} \quad (1)$$

转换到  $dq$  坐标系统中,有

$$\begin{cases} C_1 \frac{du_{1d}}{dt} = i_{md} + i_{id} - i_d + \omega C_1 u_{1q} \\ C_1 \frac{du_{1q}}{dt} = i_{mq} + i_{iq} - i_q - \omega C_1 u_{1d} \end{cases} \quad (2)$$

采用 PI 加前馈补偿的方法实现逆变器 1 输出电流的控制,控制原理如图 2 所示.

图 2 中  $u_{1d}^*$  和  $u_{1q}^*$  分别表示负载电压  $d$ 、 $q$  轴分量的参考值,确定方法如下:选择 A 相电源电压相量方向为同步旋转坐标系统的  $d$  轴方向,并设电源相电压有效值为  $U_s$ ,负载相电压有效值为  $U_1$ ,电源电压超前负载电压的相位角为  $\delta$ ,根据 abc/dq 变换原理,可得负载电压的  $d$ 、 $q$  轴分量为

$$\begin{cases} u_{1d} = \sqrt{3}U_1 \cos \delta \\ u_{1q} = -\sqrt{3}U_1 \sin \delta \end{cases} \quad (3)$$

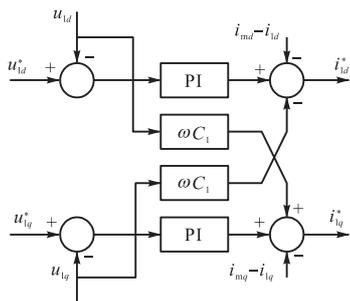


图 2 逆变器 1 控制框图

Fig. 2 Control diagram of inverter 1

电路分析可得,流过连接电感  $L_s$  上的有功功率为<sup>[10]</sup>

$$P_s = 3 \frac{U_s U_1}{X_s} \sin \delta \quad (4)$$

其中  $X_s = \omega L_s$ ,为连接电感的基频电抗.

由式(3)、式(4)可以得到负载电压  $q$  轴分量的参考值为

$$u_{1q}^* = -\sqrt{3}U_1 \sin \delta = -\frac{P_s X_s}{\sqrt{3}U_s} \quad (5)$$

式中: $P_s$  取为负载的有功功率  $P_1$ ,即采用由电源提供负载所需全部有功功率的控制模式, $P_1$  可通过检测负载电压和电流计算求取.

为维持负载电压为额定值,负载电压  $d$  轴分量的参考值应为

$$u_{1d}^* = \sqrt{3U_N^2 - u_{1q}^{*2}} \quad (6)$$

其中  $U_N$  为额定相电压的有效值.

当系统带有非线性负载时,由于谐波电流的作用,导致瞬时功率  $P_1$  是波动的,采用数字低通滤波,取其平均值,作为式(5)中的  $P_s$  值,即由电源来提供负载功率的平均值,这样就可保证连接电感电流中没有谐波分量,达到有源滤波的效果.

## 2.2 电源侧逆变器 2 的控制

逆变器 2 的功能是向电源侧的公共连接点注入适当的无功功率,以使电源侧的功率因数为 1,即由控制逆变器 2 提供连接电感上所需的无功电流分量,电源提供连接电感上的有功电流分量.分析可得连接电感电流的有功分量和无功分量为

$$\begin{cases} i_{sd}^* = \frac{u_{sq} - u_{1q}}{\omega L_s} \\ i_{sq}^* = -\frac{u_{sd} - u_{1d}}{\omega L_s} \end{cases} \quad (7)$$

滤波电感  $L_f$  和电容  $C_f$  的状态方程分别为

$$L_f \frac{di_f}{dt} = -u_s + u_f \quad (8)$$

$$C_f \frac{du_f}{dt} = i_r - i_f \quad (9)$$

转换到  $dq$  坐标系统下,有

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{fd}}{dt} = -u_{sd} + u_{fd} + \omega L_f i_{fq} \\ L_f \frac{di_{fq}}{dt} = -u_{sq} + u_{fq} - \omega L_f i_{fd} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} C_f \frac{du_{fd}}{dt} = i_{rd} - i_{fd} + \omega C_f u_{fq} \\ C_f \frac{du_{fq}}{dt} = i_{rq} - i_{fq} - \omega C_f u_{fd} \end{cases} \quad (11)$$

根据逆变器 2 的工作原理,滤波电感  $L_f$  电流输出电流的参考值为

$$\begin{cases} i_{fd}^* = 0 \\ i_{fq}^* = i_{sq}^* \end{cases} \quad (12)$$

仍采用 PI 加前馈补偿的方法实现逆变器 2 输出电流的控制,控制原理如图 3 所示。

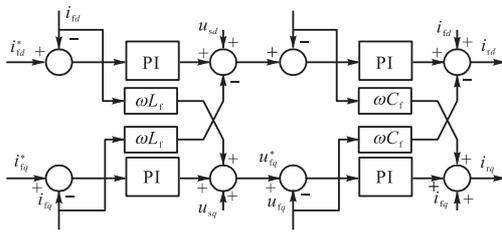


图 3 逆变器 2 控制框图  
Fig. 3 Control diagram of inverter 2

电源电压的  $d$ 、 $q$  轴分量为

$$\begin{cases} u_{sd} = \sqrt{3}U_s \\ u_{sq} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

其中  $U_s$  为电源相电压有效值。

### 3 仿真验证

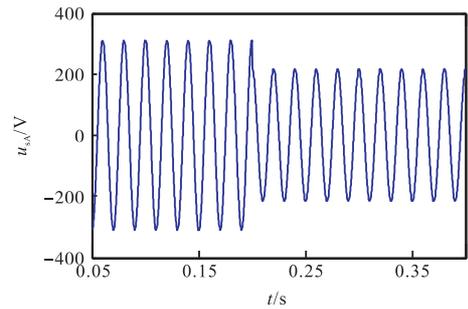
利用仿真工具 Matlab 对本文提出的双并联型综合电能质量调节器及其控制策略进行仿真验证。仿真系统参数设置为：额定容量 110 kVA；额定电压 220 V（相电压）；连接电感  $L_s = 2.5$  mH；滤波电容  $C_1 = C_f = 400$   $\mu$ F；滤波电感  $L_f = 0.325$  mH；直流电感参考电流  $I_d = 400$  A；负载为三相不控整流的非线性负载、直流侧负载参数为  $R_1 = 3.5$   $\Omega$ ,  $L_1 = 1.2$  mH；控制频率  $f_c = 10$  kHz。

各 PI 控制器参数设置如下：(1)  $u_i$  控制器,  $k_p = 3.2$ ,  $k_i = 77$ ；(2)  $i_f$  控制器,  $k_p = 2.3$ ,  $k_i = 125$ ； $u_f$  控制器,  $k_p = 1.6$ ,  $k_i = 40$ 。

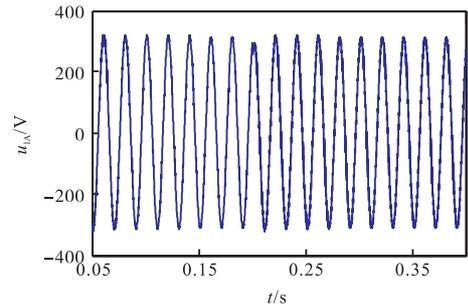
假设电源电压起始值为额定值,在 0.2 s 时跌至额定电压的 70%，仿真结果如图 4—图 7 所示。为清晰起见,图中仅显示 A 相的仿真结果。

图 4 为电源 A 相电压和负载 A 相电压,图 5 为负载电压有效值。仿真结果表明：当电源电压发生跌落时,通过逆变器 1 的补偿控制,可在半个工频周期内将负载电压稳定为额定值。

图 6 显示的是电源 A 相电压、电源 A 相电流和负载 A 相电流。仿真结果表明：当系统带非线性负载时,负载电流为非正弦,并且与电源电压不同相位,即负载电流中含有谐波和无功功率分量。通过本装置的调节,电源电流变为与电源电压同相位的基频正弦波。



(a) 电源 A 相电压



(b) 负载 A 相电压

图 4 电源 A 相电压和负载 A 相电压

Fig. 4 A-phase supply voltage and load voltage

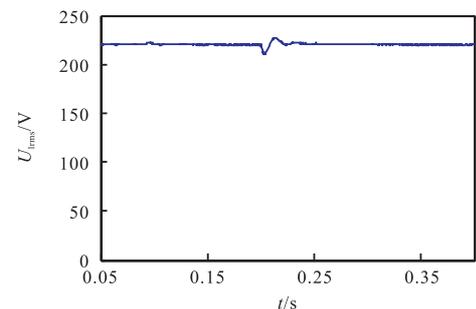
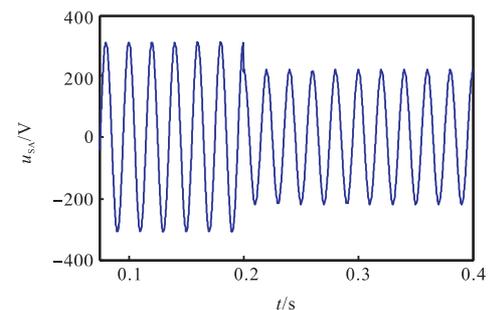


图 5 负载电压有效值

Fig. 5 Load RMS voltage

图 7 是负载电流和电源电流的谐波分析的直方图。可以看出：系统带三相整流负载时,负载电流中含有明显的  $6k \pm 1$  ( $k$  为整数) 次谐波,其谐波畸变率  $THD = 30.6%$ ；而电源电流中的各谐波幅值接近为 0,  $THD = 0.4%$ 。仿真结果充分验证了系统的有源滤波和无功补偿的效果。



(a) 电源 A 相电压

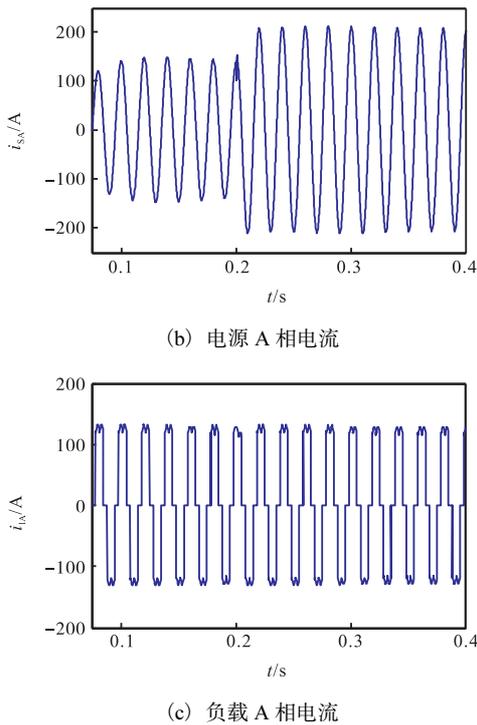


图6 电源A相电压、电源A相电流和负载A相电流  
Fig.6 A-phase supply voltage, supply current and load current

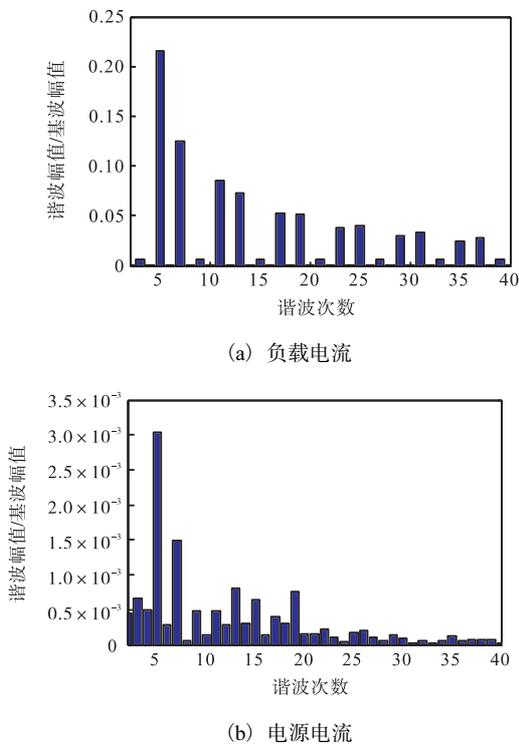


图7 负载电流和电源电流谐波分析直方图  
Fig.7 Harmonic histograms of load current and supply current

### 4 结 语

本文介绍了一种低成本的双逆变器并联处理型综合电能质量调节器,其结构特点是在电源和负载之间采用串联的三相电感替代传统 UPQC 结构的串联变压器,两台逆变器分别并联连接在串联电感两端.负载侧逆变器用于补偿负载电压和有源滤波,电源侧逆变器用于补偿电源侧的无功功率,可以相对独立地对两个逆变器实施控制,从而降低了控制策略的复杂性.通过对系统带非线性负载并发生电源电压跌落时的运行效果仿真,验证了装置的电能质量综合调节效果.

### 参考文献:

- [1] 林海雪. 现代电能质量的基本问题[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 5-12.
- [2] 肖湘宁, 尹忠东, 徐永海. 现代电能质量问题综述[J]. 电气时代, 2004(11): 48-52.
- [3] 吕广强, 赵剑锋, 程明, 等. 配电网动态电能质量问题及其解决方案[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 53-56.
- [4] 张济韬, 郝思鹏, 楚成彪, 等. 配电网电能质量分析及其治理技术[J]. 电工电气, 2014(11): 1-5.
- [5] 肖国春, 刘进军, 王兆安. 电能质量控制技术的发展[J]. 江苏机械制造与自动化, 2001(1): 10-13.
- [6] 郭昌林, 徐国强, 王凌飞. 统一电能质量调节器 UPQC 的研究现状[J]. 中国电力教育, 2012(S1): 609-611.
- [7] 李侃, 顾和荣. 统一电能质量控制器的研究[J]. 变频器世界, 2010(5): 119-122.
- [8] 丁洪发, 段献忠, 朱庆春. 混合型电能质量调节器及其控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 33-38.
- [9] 朱鹏程, 李勋, 康勇, 等. 统一电能质量控制器控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 67-73.
- [10] 侯勇, 姜建国. 基于 SMES 的综合电能质量调节器及其设计[J]. 电工电能新技术, 2004, 23(4): 26-29.
- [11] 侯勇, 蒋晓华, 姜建国. 基于超导储能的综合电能质量调节装置及其控制策略[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(21): 49-53.
- [12] 侯勇, 蒋晓华, 姜建国. 基于超导储能的并联处理不间断供电系统及其控制策略的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(6): 1-6.

责任编辑: 常涛