

单周期控制策略在统一电能质量调节器中的应用研究

张志超¹, 魏富建², 王义峰¹

(1. 国家电网保定供电公司, 河北 保定 071000; 2. 湖北省随州供电公司, 湖北 随州 441300)

摘要: 基于统一电能质量调节器(UPQC)对电能质量进行补偿时的同步性问题和控制的复杂性两个方面的考虑, 在对 UPQC 拓扑结构与工作原理的分析基础上, 提出了基于单周期控制的统一电能质量调节器控制策略, 完成对 UPQC 中的 DVR 和 APF 两部分的同步控制, 并且结构简单、易于实现。在理论分析的基础上, 应用 Simulink 对单周期控制的统一电能质量系统进行了建模和仿真, 仿真结果表明, 该方法能在一个开关周期内消除稳态误差, 提高 UPQC 的稳定性和对电能质量补偿的快速性, 很好地证明了该拓扑的实用性和控制方法的有效性。

关键词: 统一电能质量调节器; 单周期控制; 有源电力滤波器; 动态电压恢复器; 仿真

Applied research on one-cycle control method of unified power quality conditioner

ZHANG Zhi-chao¹, WEI Fu-jian², WANG Yi-feng¹

(1. State Grid Hebei Baoding Power Supply Company, Baoding 071000, China;

2. Suizhou Power Supply Company, Suizhou 441300, China)

Abstract: Based on analysis of the configuration and principle of power quality by unified power quality conditioner (UPQC), a one-cycle control method for UPQC is designed to realize the synchronism compensating and reduce the control method. In this paper, one-cycle control method is used to control the active power filter (APF) and dynamic voltage restorer (DVR) in the UPQC at the same time. The theoretically analysis and simulation result show this method can remove the steady-state error in on-off cycle controller and improve the stability and rapidity of the UPQC to get preferable control effect in improving power quality.

Key words: UPQC; one-cycle control; active power filter; dynamic voltage restorer; simulation

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)22-0028-06

0 引言

随着电力系统中非线性负荷、冲击负荷的不断增加, 尤其是电力电子变换装置的广泛应用, 电网的谐波畸变越来越严重。同时电网电压也经常出现三相不平衡和谐波干扰现象。另一方面, 随着各种复杂的精密的, 对电能质量要求较高的装置(如计算机)的普及, 人们对电能质量提出了越来越高的要求。低劣的供电质量将导致低劣的产品质量, 特别是在重要的工业生产过程中, 供电的中断或波动将带来巨大的经济损失。

为了消除用户对电网的影响, 实现真正“绿色电网”, 世界各国均投入了大量资金和人力对各种电能质量控制设备的理论、拓扑结构和控制策略进行了深入研究, 包括有源电力滤波器(Active Power Filters)、不间断电源(Uninterruptible Power System)、动态电压恢复器(Dynamic Voltage Restorer)和静止

无功补偿装置(SVC)等。这些装置都得到了较广泛的应用, 但是每一种装置只能解决特定的一些电能质量问题。如有源电力滤波器(APF)是用于动态抑制非线性负载产生的谐波电流和无功电流; 动态电压恢复器(DVR)用于动态抑制电网电压谐波、骤降、闪变等电压质量问题。在这种背景下日本学者 H.Akagi 于 1996 年提出新的补偿装置系统——统一电能质量调节器, 它能很好地使串联和并联有源滤波器的特点互补, 并能在一定程度上抑制电压闪变, 但它不能补偿类似电压长时间降落等电压质量问题^[1,2]。随着近几年对 DVR 研究的快速发展, 一些学者提出 UPQC 的串联侧实现 DVR 功能, 并联侧主要实现 APF 功能, 这样既可解决 APF 工作会受电网电压干扰影响以及在三相不对称条件下运行等问题, 又弥补了 DVR 不能长时间补偿电压变化的缺陷^[3]。但是传统的 PWM 控制方法实际上仍是将 UPQC 拆分为 APF 与 DVR, 从而分别进行控

制^[4]。为解决控制方法中的问题, 文献[5]提出了一种新的无差拍控制, 该方法跟踪速度快, 控制精度高, 但其控制效果依赖与系统状态空间表达式中的参数精确度, 鲁棒性较差。文献[6]提出了一种基于混合灵敏度的 H_∞ 控制策略, 这种方法虽然提高了鲁棒性, 但都有大量的矩阵运算或求解微分方程, 不仅运算量巨大, 且不易实现数字化。

基于上述考虑, 本文将一种新型非线性控制方法——单周控制应用于 UPQC 的控制, 该方法不仅结构简单、易于实现, 且能在一个开关周期内消除稳态误差。仿真表明该新型的 UPQC 具有一定的实用性。

1 UPQC 系统的拓扑结构和等效电路

图 1 为三相三线制系统 UPQC 的拓扑结构, 由两个背靠背的电压型变流器组成, 其左侧通过变压器串联入电网, 右侧则与电网并联。两变流器之间通过超级电容等储能单元连接。本文应用的 UPQC 的结构让串联侧执行 DVR 功能, 动态补偿电网电压谐波、跌落和闪变等电压质量问题, 使负载电压为基波正弦; 让并联侧执行 APF 功能, 补偿负载产生的谐波和无功电流, 使流入电网的电流为基波正弦。这种结构的特点是省去了整流环节, 而采用一定的控制算法使能量能够在交流侧和直流侧之间双向流动, 即变流器工作于四象限。图中的 L_1 、 C_1 和 L_2 、 C_2 分别为串联侧和并联侧的滤波电路。

对于图 1 所示的系统, 可将其变换到两相静止参考坐标 d-q 下, 转换后的 UPQC 系统 d 轴等效电路如图 2 所示, q 轴与 d 轴类似。

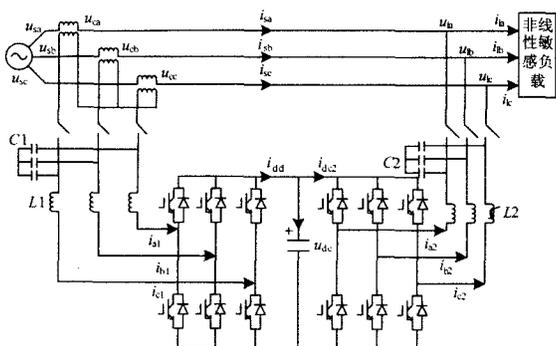


图 1 UPQC 拓扑结构

Fig.1 Topological structure of UPQC

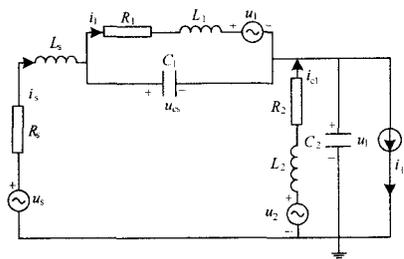


图 2 UPQC d 轴等效电路图

Fig.2 D-axis equivalent circuit of UPQC

2 单周控制的结构和原理

单周控制是在开关放大器的 PWM 控制基础上发展起来的一种大信号非线性控制技术。最早由美国学者 Keyue M.Smedley 和 Slobodan Cuk 提出。其基本思想是: 控制开关占空比, 在每个周期内使逆变器开关变量的平均值与控制参考电压相等或成一定比例, 从而消除稳态和瞬态误差。图 3 所示为单周控制的控制器原理图。由图可见, 单周控制器主要由控制器(触发器)、比较器、可复位积分器以及时钟组成。当一个时钟脉冲到来时, RS 触发器的 S 触发, 由 Q 输出控制信号, 即控制开关 K 导通; 同时 \bar{Q} 输出为低电平, 积分器开始对输入量进行积分。随着积分值的不断升高, 当积分值上升到控制参考值 v_{ref} 时, 比较器的输出结果发生变化, 触发器 R 端使能, Q 输出为低电平, 从而关断控制开关 K; 同时 \bar{Q} 输出为高电平, 复位积分器, 使积分器清零, 直到下一个时钟脉冲到来, 开始新的周期。合理的选择积分器的积分时间常数和时钟周期, 就可以保证每个开关周期内控制对象的平均值等于给定值 v_{ref} 。

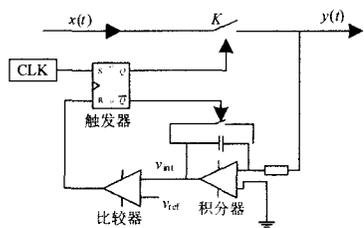


图 3 单周控制的原理图

Fig.3 Topological structure of one-cycle control

3 单周期控制的 UPQC 设计

单周控制在有源电力滤波器上的应用已经趋于成熟, 但还没有很好的应用到统一电能质量调节器当中, 本文对目前在 APF 上应用的单周控制策略

的工作原理进行深入研究, 并将尝试应用到动态电压恢复器上, 最后根据 UPQC 结构特点, 提出了基于单周控制策略的 UPQC。

3.1 并联侧 APF 单周期控制

为了分析简单, 本文首先从单相有源电力滤波器着手分析, 再将分析结果推广到三相三线制有源电力滤波器。图 4 所示为单周控制单相 APF 原理图。图中 R_1 和 R_2 为用于对直流电压 V_c 分压, 分压结果为 $K_c V_c$; V_{cref} 为给定的直流侧电压基准; 三个电流 i_s 、 i_L 和 i_p 的方向为规定的正方向^[7]。

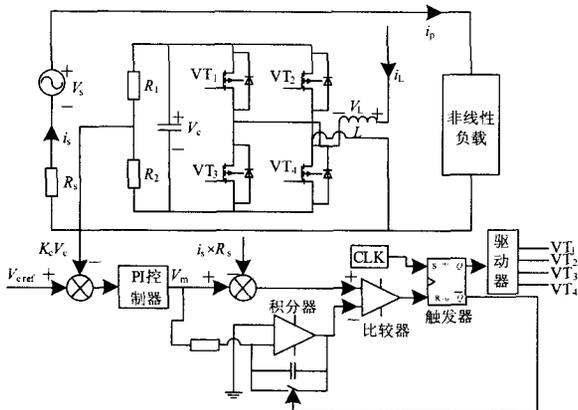


图 4 单周控制单相 APF 原理图

Fig.4 Topological structure of single phase APF of one-cycle control

设开关周期为 T_s , 占空比为 D , 令 $V_m = (R_s/R_c)V_c$, 则系统进线电流 i_s 、电流采样电阻值 R_s 与逆变器开关占空比 D 之间的关系为:

$$2DV_m = V_m - R_s i_s \quad (1)$$

由于开关频率远大于电网电压频率, V_m 在一个开关周期内可近似视为常数。由此可以看出通过单周控制即可实现式 (1)。取单周积分常数 $T_i = T_s/2$, 则单周控制方程为:

$$\frac{1}{T_i} \int_0^{T_s} V_m dt = \frac{1}{T_i} DT_s V_m = 2DV_m = V_m - R_s i_s \quad (2)$$

图 5 中的控制部分, 即是由式 (2) 得到的。

三相 APF 的单周控制原理与单相 APF 的控制原理相似, 只是其控制方程由一个变为三个, 并认为三相电流采样电阻值 $R_{sa} = R_{sb} = R_{sc} = R_s$, 如式 (3) 所示。

$$\begin{cases} 2D_a V_m = V_m - R_s i_{sa} \\ 2D_b V_m = V_m - R_s i_{sb} \\ 2D_c V_m = V_m - R_s i_{sc} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $V_m = \frac{V_c R_s}{R_c}$ 。

单周控制三相 APF 的控制电路原理图如图 5 所示。其基本思想与单相 APF 相同, 只是又增加了两套控制装置, 包括触发器、比较器和可复位的积分器等。且驱动信号的输出稍有不同: 单相 APF 是一个触发器控制四个开关, 只需一个触发器; 而三相 APF 的每一个触发器控制一个变流器桥臂的上下两个开关, 总共需要三个触发器。

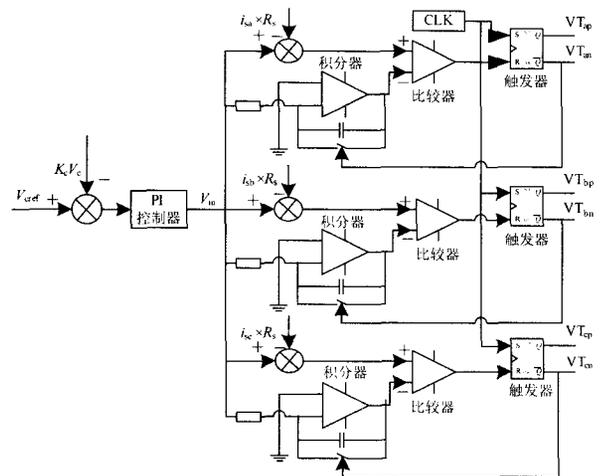


图 5 单周控制三相 APF 控制电路原理图

Fig.5 Topological structure of three phase APF of one-cycle control

3.2 串联侧 DVR 单周期控制

UPQC 的串联侧是作为 DVR 控制负载电压, 并联侧作为 APF 控制电源电流。要实现 UPQC 的“统一”控制, 就必须对 DVR 的单周控制方法进行研究。同单周控制的 APF 一样, 为了分析简单, 本文先对单相动态电压恢复器 (DVR) 的单周控制的原理和结构进行分析, 再推广到三相 DVR。

图 6 示出单周控制单相 DVR 的原理, 电源经过变压器的原边串接到负载上, 由图中规定的正方向可知, 负载两端的电压等于电源电压与变压器原边电压之和。由图 6 可知为保证负载两端电压 V_L 在接近额定电压的等级上, 当电源电压 V_s 变化时, 相应的变压器电压 V_1 就应做出调整^[8]。由上面的分析可知:

$$V_1 = V_l - V_s \quad (4)$$

设变压器的变比为 N , 则有:

$$V_1 = NV_2 \quad (5)$$

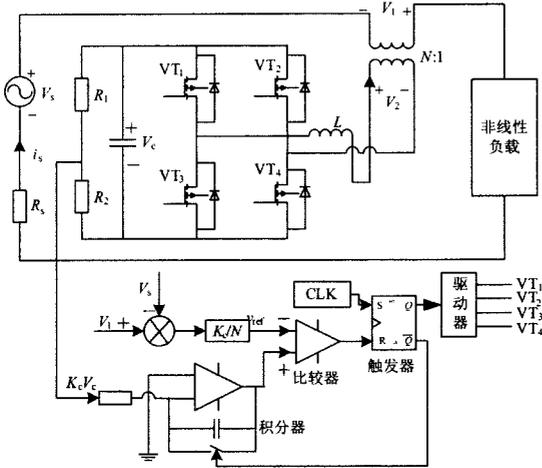


图6 单周控制单相 DVR 原理图

Fig.6 Topological structure of single phase DVR of one-cycle control

根据单周控制原理, 将 V_c 视为输入量, 即 $x(t)$; 将 V_2 视为希望输出的给定控制参考信号, 即 v_{ref} 。即在一个开关周期 T_s 内有:

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} V_c dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} V_2 dt \quad (6)$$

由于开关频率远大于电网电压频率, 可认为在一个开关周期内, 电压 V_c 和 V_2 均为常数。这样式 (6) 可以写成:

$$DV_c = V_2 \quad (7)$$

将式(4)、(5)和(7)合并, 得:

$$DV_c = \frac{1}{N}(V_l - V_s) \quad (8)$$

式 (8) 两边同时乘以直流侧电压的分压系数 K_c , 得:

$$K_c D V_c = \frac{K_c}{N}(V_l - V_s) \quad (9)$$

三相 DVR 的单周控制原理及控制方程与单相 DVR 相似, 其控制方程如式 (10) 所示。三相 DVR 控制电路部分与单相 DVR 相同, 本文就不再赘述。

$$\begin{cases} K_c D_a V_c = \frac{K_c}{N}(V_{la} - V_{sa}) \\ K_c D_b V_c = \frac{K_c}{N}(V_{lb} - V_{sb}) \\ K_c D_c V_c = \frac{K_c}{N}(V_{lc} - V_{sc}) \end{cases} \quad (10)$$

从本节的分析可以看出, 虽然目前基于单周控制的 DVR 研究较少, 但是将单周控制技术应用于 DVR 是可行的。

3.3 UPQC 的单周期控制

根据上述分析, 可知基于单周控制的 APF, 可实现 UPQC 中的电流控制; 基于单周控制的 DVR, 可实现 UPQC 中的电压控制。将这串、并联两联合起来便可实现真正意义上的单周控制下的 UPQC, 如图 7 所示。单周控制的 UPQC 很好地解决了串联侧和并联侧的同步控制, 而且实现起来算法简单, 易于数字化实现。

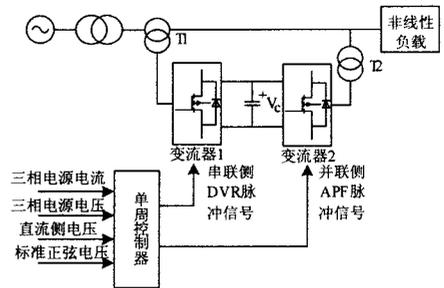


图7 单周控制 UPQC 原理图

Fig.7 Topological structure of one-cycle control

根据式 (3) 和式 (10) 即可实现 UPQC 的单周控制。式 (3) 中的 R_{sa}, R_{sb}, R_{sc} 可根据实际的系统参数选定。 i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} 可利用电流传感器直接测量得到。式 (10) 中的 $V_{la}-V_{sa}, V_{lb}-V_{sb}, V_{lc}-V_{sc}$ 即电压补偿量可按照文献[8]上单位正序分量提取的方法来获得。

通过上述理论分析, 与传统的三角波比较或滞环比较等控制方法相比, 基于单周控制的 UPQC 的优点主要有: 一、能在一个开关周期内消除稳态误差; 二、电路简单, 实现方便; 三、不需要过多的编写软件, 大部分都可用硬件搭建, 调节速度快; 四、无需过多的传感器, 仿真中总共用到了七个传感器 (三个电压传感器测电源电压 V_s , 一个电压传感器测直流侧电压 V_c , 三个电流传感器测电源电流 i_s), 相对于滞环比较控制方法, 少用了三个电流传感器。下面的仿真分析验证了基于单周控制 UPQC 的可行性, 并通过与传统控制方法比较, 证实了单周控制的优越性。

4 仿真分析

应用 Matlab 仿真软件对单周期控制的 UPQC 进行动态仿真。使用一个 5 kV /50 Hz 的三相交流电源，经过定时器接入电网或从电网中切除，模拟电网电压跌落问题；非线性负载由三相不控整流桥构成，直流侧为阻性负载，并在 A、B 两相之间接一个阻感负载来模拟负载的三相不平衡。

由于在实际中超级电容两侧是两个背靠背的电压型变流器，保证电容器与输入、输出侧电压的关系，选择以下参数：电源相电压有效值为 220 V，变压器变比为 2:1，超级电容器的参考电压 $V_c=500$ V， $R_{sa}=R_{sb}=R_{sc}=R_s=0.2 \Omega$ 。

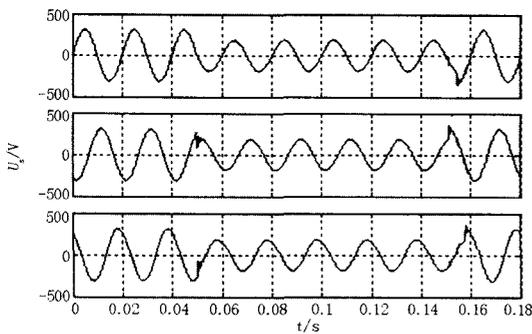


图 8 电网电压跌落波形

Fig.8 Curve of electric power voltage when sags

图 8 所示为电网在 0.05 s 时并联接入一个三相交流电源，造成电网电压跌落的波形，从上至下依次为 A、B、C 三相。

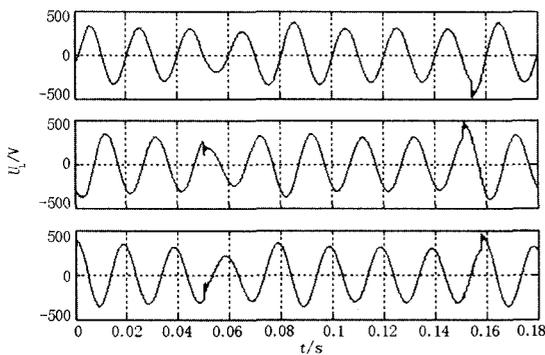


图 9 补偿后负载电压波形

Fig.9 Curve of load voltage after being compensated

电网电压跌落必然造成负载电压随之跌落，通过单周期控制使之产生一个与电网电压跌落量大小相等、方向相反的电压，可使跌落的负载电压在一个周期内得到恢复。图 9 为补偿后负载电压波形，可以看出，电压在一个周期内得到恢复，证实了单周期控制的可行性，并体现了单周期控制策略调节速度

快的特点。

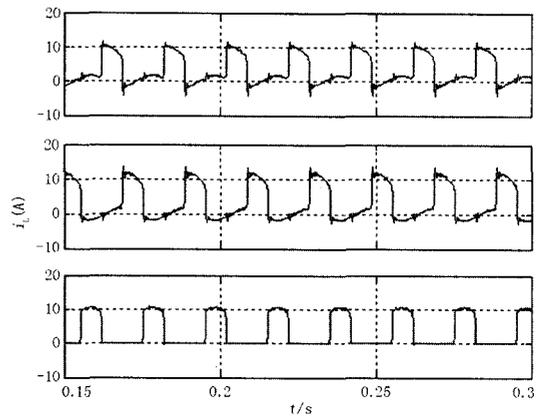


图 10 补偿前负载电流波形

Fig.10 Curve of load current before being compensated

图 10 所示为补偿前负载电流波形，从图 10 中可以看出，由于负载不平衡，造成负载电流三相之间不平衡。

图 11 为补偿后电源电流波形。当负载谐波电流流入电网时，引起电源电流相应地发生畸变。通过单周控制使之产生一个与负载谐波电流大小相等、方向相反的电流，客观上可以起到阻止谐波流入电网的作用。如图 11 所示，经过电流补偿之后，电源电流波形近似为三相平衡的正弦波。

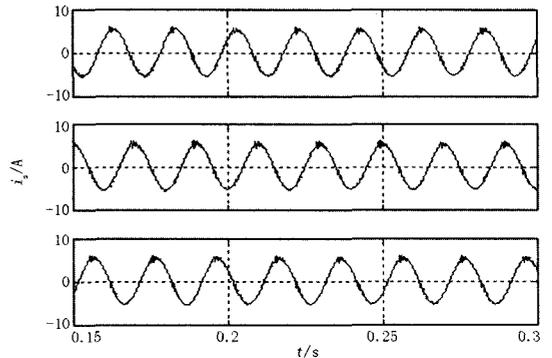


图 11 补偿后电源电流波形及 A 相频谱

Fig.11 Curve of source current after being compensated

图 12 为单周控制策略与传统的三角波比较方法的实际补偿的电压、电流波形的比较。将(a)和(b)进行对比，可以看出基于单周控制的电压补偿更精确，尤其是在电网电压没有产生跌落的阶段，补偿过程在一个周期内完成，调节速度快，从而对电网的干扰更小。通过比较(c)和(d)，可知单周控制策略下 UPQC 注入电网的补偿电流高频谐波含量较传统控制方法少很多，波形更加平滑。

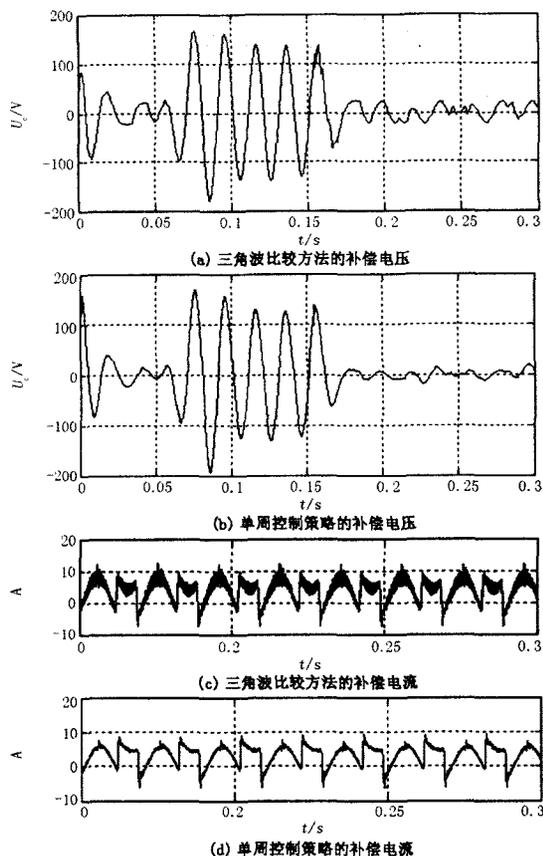


图 12 单周控制策略与三角波控制方法比较

Fig.10 Curve of the UPQC compared to the triangle-wave pulse-width modulation current control method

5 结束语

本文主要对统一电能质量调节器(UPQC)在控制策略上进行深入的分析,将一种新型非线性控制方法——单周控制应用于UPQC,旨在解决传统方法对电能质量进行补偿时的同步性问题和控制的复杂性问题。本文在分析单周期控制在并联侧APF应用的原理的基础上,尝试将其应用在串联侧DVR中,最后完成对整个UPQC的统一同步控制,实现了真正意义上的单周控制统一电能质量调节器。仿真结果表明基于单周控制策略的UPQC不仅可行,而且由于这种控制方法能在一个开关周期内消除稳态误差且控制简单,这使得其补偿精度和速度都优于传统的控制方法。

参考文献

- [1] Fujita H, Akagi H. The Unified Power Quality Conditioner: the Integration of Series-active and Shunt-active Filters[J]. IEEE Trans Power Electronics, 1998, 13(2): 315-322.
- [2] Akagi H. New Trends in Active Filters for Power Conditioning[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1996, 32(6): 1312-1322.
- [3] Chilali M, Gahinet P, Apkarian P. Robust Pole Placement in LMI Regions[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1999, 44(12): 2257-2270.
- [4] 王宝安, 蒋平, 刘成民. 电能质量综合补偿器补偿电压跌落和浪涌的新策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(4): 19-23.
- [5] 万健如, 裴玮, 张国香. 统一电能质量调节器同步无差拍控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 67-73.
WAN Jian-ru, PEI Wei, ZHANG Guo-xiang. Research on Synchronization Deadbeat Control Algorithm for Unified Power Quality Conditioner[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 67-73.
- [6] 褚健, 俞立, 苏宏业. 鲁棒控制理论及应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2000.
- [7] QIAO Chong-ming, JIN Tao-tao, Smedley K M. One-Cycle Control of Three-Phase Active Power Filter With Vector Operation[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2004, 51(2): 455-4.
- [8] 裴玮. 统一电能质量调节器控制方法研究(硕士学位论文)[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [9] 李承, 邹云屏, 范婕. 动态电压恢复器单周控制策略的建模与仿真研究[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(4): 7-10.

收稿日期: 2008-12-16; 修回日期: 2009-04-06

作者简介:

张志强(1982-), 男, 硕士, 研究方向为电力电子与电能质量, 从事电力设备检修工作; E-mail: zhichao_zhang@163.com

魏富建(1972-), 男, 大学本科, 工程师, 主要从事电力系统电气设备的维护、检修工作。