

一种基于新型控制策略的 统一电能质量控制器

郭茂峰,王广柱

(山东大学 电气工程学院,山东 济南 250061)

摘要: 提出一种新型的统一电能质量控制器 UPQC (Unified Power Quality Controller) 控制策略: 串联有源滤波器作为电流源, 直接控制电网流入的电流为基频同步正弦电流; 并联有源滤波器作为电压源, 直接控制负载电压为标准基频同步电压; 不必计算电压和电流的补偿量, 只需锁定电网电压相位, 利用能量平衡实现电流幅值的自动调节。目标电压幅值恒定, 省去了繁琐计算, 简化了电路。介绍了 UPQC 的结构原理、控制原理以及控制器的实现。最后通过仿真试验验证了该控制策略的有效性。

关键词: 统一电能质量控制器; 有源滤波器; 控制策略

中图分类号: TM 714.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)07-0044-04

0 引言

有源电力滤波器 APF (Active Power Filter) 已成为抑制谐波、补偿无功、平衡负载、调节电压、抑制电压闪变等的有效工具。从滤波器与电网的连接方式看, APF 分为串联型和并联型。一般, 串联 APF 更适用于电压型谐波源的抑制, 并联 APF 则在电流型谐波源补偿中体现出优势^[1,2], 两者单独使用时都需考察负载特性。将串联 APF 和并联 APF 通过一个公用直流电容背靠背连接, 就构成了统一电能质量控制器 UPQC (Unified Power Quality Controller)^[3]。

对于 UPQC 的控制, 人们通常将串联 APF 作为一个可控谐波电压源, 补偿电网电压波动和谐波电压, 为用户提供同步正弦电压; 并联 APF 作为可控谐波电流源, 补偿负载无功和谐波电流, 剩下的同步正弦电流从电网流入。串、并联 APF 分别以电压、电流补偿量为控制目标, 补偿量往往通过实时检测电压、电流值, 再用对称分量法^[4,5]、瞬时功率理论^[6,7]、神经网络^[8]和小波变换^[9]等方法计算得到。最后, 串、并联 APF 分别跟踪电压、电流补偿量。显然, 补偿量检测的精度和实时性直接影响了 UPQC 的补偿特性, 且高频量控制比低频量控制更困难。神经网络和小波变换法都离不开高速处理芯片及配套电路, 成本较高。

本文提出一种等效的直接控制方案: 串联 APF 作为电流源, 直接控制电网流入的电流为基频同步正弦电流; 并联 APF 作为电压源, 直接控制负载电压为标准基频同步电压。不必计算电压和电流的补偿量, 只需锁定电网电压相位, 利用能量平衡实现电流幅值的自动调节, 目标电压幅值恒定, 省去了繁琐的计算, 简化了电路。

1 统一电能质量控制器 UPQC

1.1 UPQC 结构原理

UPQC 原理结构如图 1 所示。

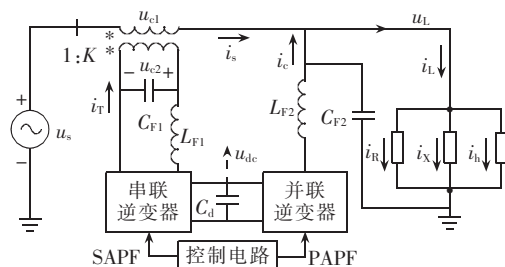


图 1 UPQC 的主电路结构原理

Fig.1 The main circuitry of UPQC

图中串联 APF (SAPF) 和并联 APF (PAPF) 通过电容背靠背连接。串联 APF 通过变压器串联于主电路中, 控制电流, 补偿电压; 并联 APF 直接与负载并联, 控制电压, 补偿电流。LC 滤波器用于滤除开关谐波。

图中 u_s , u_L 和 u_{cl} 分别表示电源电压、负载电压和串联 APF 补偿电压; i_s , i_L 和 i_c 分别表示电源电流、负载电流和并联 APF 补偿电流; i_R , i_X 和 i_h 分别代表负载的基频有功、无功电流和高次谐波电流; u_{dc} 为直流电容上的电压; 变压器的变比 $u_{cl} : u_{c2} = 1 : K$, 其同名端由图中 * 标出; $L_{F1} C_{F1}$ 和 $L_{F2} C_{F2}$ 分别是串、并联 APF 的输出滤波器, 滤除开关谐波; i_T 是串联变压器二次侧电流。

1.2 控制原理

图 2 是 UPQC 的控制电路。 u_{Lr} 是控制的负载电压理想值; E_c 是直流参考电压; i_{sr} 和 i_{pr} 分别是串、并联 APF 的内环跟踪目标电流。

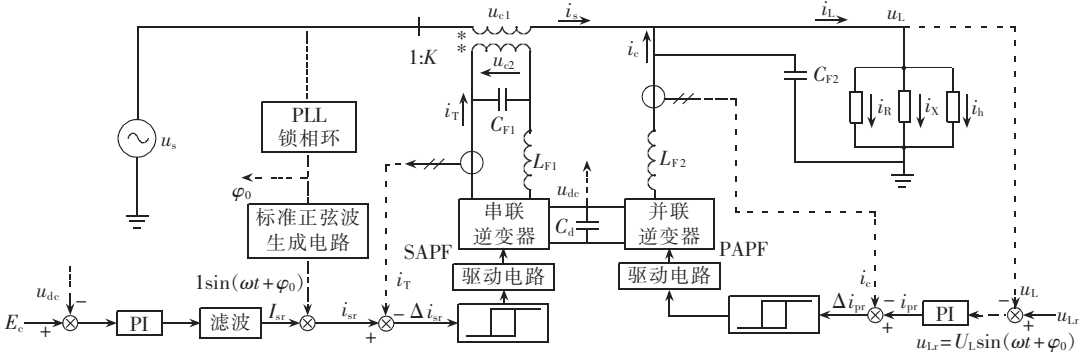


图 2 UPQC 的控制电路

Fig.2 The control circuit of UPQC

串联 APF 被控制成电流源:通过锁相环得到电网基频电压的相位,利用 u_{dc} 的稳定调目标电流的幅值 I_{sr} ,由正弦同步的电流 i_{sr} 控制 i_{T} 。当 i_s 和 i_T 刚好满足磁通平衡时,变压器一次侧电路对谐波呈现高阻状态,对基频同步电流阻抗很小^[10],将负载谐波和无功电流逼向并联 APF。磁通不平衡时,还可以产生基频电压,补偿电网电压的波动。并联 APF 被控制成电压源:以理想的标准同步电压作参考,将并联 APF 控制为电压源,直接控制 u_L 为与电网同步的恒幅正弦电压,为高次谐波电流提供通路。UPQC 之所以能够很好地控制电压,就是因为串、并联 APF 形成双向能量传递回路。设从电网流入系统的总功率为

$$P_{in} = u_s i_s = (u_L + u_{c1}) i_s \quad (1)$$

式中 u_s, i_s, u_{c1} 都是瞬时值。

又 $i_s = i_L - i_c$, 得:

$$P_{in} = u_L i_L - u_L i_c + u_{c1} i_s \quad (2)$$

根据能量守恒:

$$u_s i_s = u_L i_L + P_{dc} = u_L i_L + P_C + \Delta P_{UC} \quad (3)$$

式中 P_{dc} 代表整个 UPQC 与电网的功率交换,包括: P_C 为直流电容 C 上的功率交换; ΔP_{UC} 为整个 UPQC 系统上的有功损耗,一般很小。

联合(2)(3)得:

$$u_{c1} i_s = u_L i_c + P_C + \Delta P_{UC} \quad (4)$$

如忽略 ΔP_{UC} , 则式(4)可转换为

$$P_C = u_{c1} i_s - u_L i_c = (u_s - u_L) i_s - u_L (i_L - i_s) \quad (5)$$

其中电网电压 u_s 由电网决定,负载电压 u_L 被控制成为与 u_s 的基波 U_s^1 同步的恒幅电压, i_L 由负载的特性决定,而电网电流 i_s 被控与 U_s^1 同步,因此只有调节 i_s 的幅值才能控制 UPQC 的功率平衡。而且,对式(5)两边同时积分,可得电容上的平均功率:

$$\begin{aligned} \bar{P}_C &= \frac{1}{T} \int_0^T P_C dt = \frac{1}{T} \int_0^T (u_{c1} i_s - u_L i_c) dt = \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T [(u_s - u_L) i_s - u_L (i_L - i_s)] dt = \\ &= (U_s^1 - U_L) I_s - U_L (I_L^1 - i_s) \end{aligned} \quad (6)$$

式中 U_s^1 和 U_L^1 分别代表电源基频电压和负载电压

的有效值; I_s 和 I_L^1 分别代表电源电流和负载电流基频的有效值。

考虑电容电压与有功的关系,设某时刻 t_0 电容电压为 U_{c0} , 经 Δt 到 t_1 , 电容电压变化 ΔU_C , 则

$$\int_{t_0}^{t_1} P_C dt = \bar{P}_C \Delta t = \frac{1}{2} (2CU_{c0} - \Delta U_C) \Delta U_C \quad (7)$$

可见,只要控制电容电压基本稳定,则流入电容平均功率为零($\bar{P}_C = 0$)。因此可通过控制电容电压稳定来控制功率的平衡。

在稳态情况下($\bar{P}_C = 0$),由方程(6)得并联 APF 输出有功电流为

$$I_c = \frac{(U_s^1 - U_L) I_s}{U_L} = \frac{(U_s^1 - U_L) I_L^1}{U_s^1} = (1 - \frac{U_L}{U_s^1}) I_L \quad (8)$$

流过 UPQC 的功率,不妨视作并联 APF 输出功率($P_{PAPFout}$),忽略 ΔP_{UC} , 就等于串联 APF 流入的功率(P_{SAPFin}):

$$\begin{aligned} P_{SAPFin} &= P_{PAPFout} = U_L I_c^1 = \\ &= U_L (1 - U_L / U_s^1) I_L^1 = (1 - U_L / U_s^1) P_L \end{aligned} \quad (9)$$

可见,UPQC 传递功率大小受制于负载功率和电网电压幅值。能量传递的方向决定于负载电压与电网电压基频分量的比较。当 $U_s^1 > U_L$ 时,串联部分吸收高电压,转换成并联部分输出的有功电流,补偿负载的有功电流;当 $U_s^1 < U_L$ 时,并联部分吸收有功电流,转换成串联部分输出的有功电压,补偿电网电压的跌落。

同样,只要控制直流电容 C_d 的电压基本稳定,由式(4)可知,UPQC 的有功损耗自然会得以补偿。所以本文直接利用 u_{dc} 获得目标电流的幅值,免去了复杂的计算。

1.3 UPQC 控制器的实现

图 2 中串、并联部分都用双闭环控制: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,控制跟踪电流,具有反应速度快、控制精度高、易于实现、不需了解负载特性等优点。Band-band 控制下的逆变器及其输出电感一同等效成一

个滞后环节： $\frac{K_s}{\tau_s s + 1}$ (串) 或者 $\frac{K_p}{\tau_p s + 1}$ (并), 很方便地将滤波电感和滤波电容解耦, 可以解决控制模型中电感电容串联出现的控制不稳问题。电路的数学模型如图 3 所示 (图中, PI 调节器参数可根据文献 [11] 中的工程设计方法选择)。

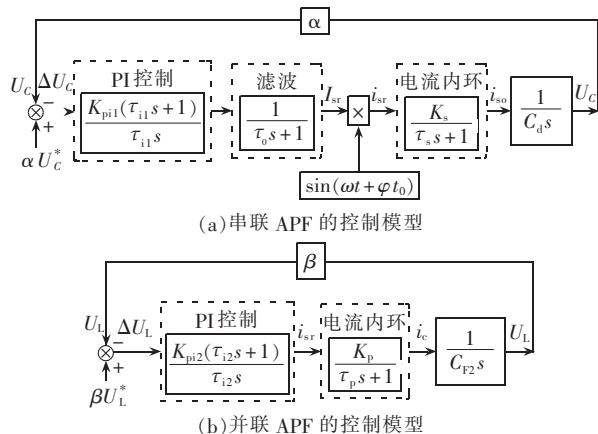


图 3 UPQC 的控制模型

Fig.3 The control model of UPQC

2 仿真结果

以图 2 所示的结构建立仿真模型, 各参数如下: 直流侧 $E_c=400$ V, $C_d=3\ 300\ \mu\text{F}$; 串联部分变压器变比 $K=3$, $L_{F1}=8$ mH, $C_{F1}=2\ \mu\text{F}$, $f_{s1}=20$ kHz, $K_s=3$, $\alpha=0.025$, $\tau_c=10$ ms, $\tau_0=6$ ms, $K_{pi1}=4.4$, $\tau_{i1}=30$ ms; 并联部分 $L_{F2}=1$ mH, $C_{F2}=40\ \mu\text{F}$, $f_{s2}=20$ kHz, $\beta=1/22$, $\tau_{s2}=50\ \mu\text{s}$, $\tau_{i2}=250\ \mu\text{s}$, $K_{pi2}=20$; 负载侧电阻 $R_L=6\ \Omega$, 电感 $L_L=50$ mH, 及高次谐波 i_{Lh} ; 电网侧标准电压 $U_s^1=220\sqrt{2}\sin(100\pi t)$, 及电压的波动和谐波。

仿真结果如图 4 所示。从上到下依次给出了负载基波有功和无功电流 (i_{lp}, i_{lq})、负载高次谐波电流 (i_{Lh})、负载总电流 (i_L)、并联补偿电流 (i_c)、电网电流 (i_s)、电网总电压 (u_s)、负载电压 (u_L)、串联变压器补偿电压 (u_{c1})、电网基波电压波动 (Δu_{s1})、电网高次谐波投入过程电压 (u_{sh}) 及直流电容电压 (u_{dc})。

a. $0\sim 0.085$ s, u_s 为理想值, 负载为 R 和 L , 启动时, i_s 有一个上升和波动过程, 由 i_c 提供了部分有功电流和负载所有无功电流, 在 2 个工频周期内 i_s 就趋于平稳了, u_{dc} 有一个波动; 但 u_L 一直比较理想, i_s 等于 i_{lp} , u_{c1} 几乎为零。

b. $0.085\sim 0.295$ s, 电网基频电压上升了 20%, 见 Δu_{s1} 和 u_s 。 u_{c1} 补偿了此波动, u_L 仍保持很好, i_s 幅值明显减小, $i_s < i_{lp}$, 直流电容电压有一个波动。

c. 0.155 s 时刻, 负载中投入 30% 的 3 次谐波电流 (i_{Lh})。可看出 3 次谐波电流流向 i_c , 而 i_s, u_L 等几乎不受影响。

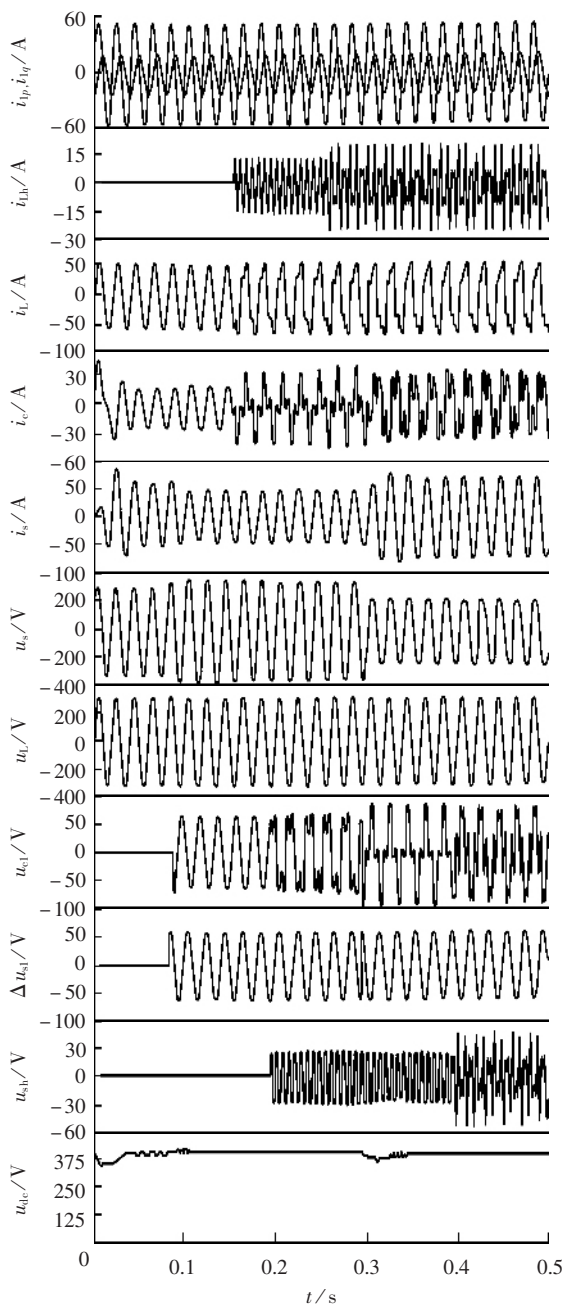


图 4 仿真结果

Fig.4 The simulative results

d. 0.195 s 时刻, 电网侧投入了 10% 的 3 次电压 (u_{sh}, u_s)。可看出 u_{c1} 补偿此谐波电压, u_L, i_s 等几乎不受影响。

e. 0.255 s 时刻, 负载侧再投入 20% 的 5 次谐波电流 (i_{Lh}, i_L)。可看出 5 次谐波电流流向 i_c , 而 i_s, u_L 等几乎不受影响。

f. $0.295\sim 0.50$ s, 降低电网基频电压为标准值的 80%, 见 Δu_1 和 u_s 。可看出, u_L 仍然保持很好, u_{c1} 补偿了电压的降低。 i_s 幅值明显增加了, $i_s > i_{lp}$, 直流电容电压产生一个波动。

g. 0.395 s 时刻, 电网侧投入了 10% 的 5 次谐波电压 (u_{sh}, u_s)。可以看出 u_{c1} 补偿此谐波电压, u_L, i_s 等几乎不受影响。

由以上可以看出,直流电容电压 u_{dc} 一直比较平稳,只是在 u_s 波动时,才会产生短暂波动。电网电流 i_s 始终保持正弦,其幅值随电网基频电压的升高(降低)而小于(大于)负载的有功电流 i_{lp} ,不受 u_h 和 i_h 的影响。 u_L 始终较为理想,即使电网电压波动,负载突加谐波, u_L 都观察不到任何的畸变。事实上,只要电网输出电流是与电网电压同步的正弦波,就可以防止谐波和无功电流流入电网,没必要控制电网输出电流与负载有功电流时刻严格相同。在电网电压波动时,由并联部分提供一定的有功电流也可以。从功率的角度看,在电网电压波动时,除了线路传输有功外,UPQC 系统也可能传输一部分有功,以用来补偿电网电压的跌落、过压和闪变等。

3 结论

本文提出了一种新颖的 UPFC 控制策略,利用 UPQC 的串联 APF 直接控制电网流入的电流为正弦波,利用并联 APF 直接控制负载的电压为理想的同步电压,无需检测电流或电压的补偿量,只需通过电网电压锁相和功率平衡即可获得指令电流;指令电压的产生也只需要电网电压相位和简单的正弦波发生电路。该方法简单、直接、实用。仿真实验验证了该控制策略的有效性。该控制策略不仅适用于单相系统,对三相系统同样有效。

参考文献:

- [1] PENG F Z. Application issues of active power filter[J]. **IEEE Industry Applications Magazine**,1998,(9):21-30.
- [2] 王 群,姚为正,刘进军,等. 谐波源与有源电力滤波器的补偿特性[J]. **中国电机工程学报**,2001,21(2):16-20.
WANG Qun, YAO Wei-zheng, LIU Jin-jun, *et al.* Harmonic source and the compensatory characteristics of active power filter[J]. **Proceedings of the CSEE**,2001,21(2):16-20.
- [3] AKUGI H. New trends in active filters for power conditioning[J]. **IEEE Trans. on Ind. Appl.**,1996,32(6):1312-1322.
- [4] 顾建军,刘汉奎,徐殿国. 统一电能质量控制器的实验研究[J]. **电气工程自动化**,2002,26(19):45-48.
GU Jian-jun, LIU Han-kui, XU Dian-guo. Experimental research for unified power quality controller [J]. **Automation of Electrical Engineering**,2002,26(19):45-48.
- [5] HAQUE M T, ISE T, HOSSEINI S H. A novel control strategy for unified power quality conditioner (UPQC) [A]. **IEEE-PESC, 2002 33rd Annual [C]**. [s.l.]: IEEE, 2002. 94-98.
- [6] MONTEIRO L F C. A control strategy for unified power quality conditioner [J]. **IEEE Industrial Electronics**, 2003,1(9):391-396.
- [7] FUJITA H, AKAGI H. The unified power quality conditioner; The integration of series active filters and shunt active filters [J]. **IEEE Power Electronics**, 1998,13(2):315-322.
- [8] TEY L H, SO P L, CHU Y C. Neural network-controlled unified power quality conditioner for system harmonics compensation [A]. **IEEE/PES 2002, Asia Pacific [C]**. [s.l.]: IEEE, 2002. 1038-1043.
- [9] ELNADY A, GOAUDA A, SALAMA M M A. Unified power quality conditioner with a novel control algorithm based on wavelet transform [A]. **IEEE Electrical and Computer Engineering [C]**. [s.l.]: IEEE, 2002. 1041-1045.
- [10] LI Da-yi, CHEN Qiao-fu, JIA Zheng-chun, *et al.* A novel active power filter with fundamental magnetic flux compensation [J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 2004,19(2):799-805.
- [11] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,1992.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

郭茂峰(1979-),男,山东曹县人,硕士研究生,从事直流输电与交流灵活输电技术研究(E-mail:guomaofeng11@163.com);

王广柱(1963-),男,山东高唐人,教授,研究方向为现代电力电子技术及应用。



郭茂峰

Unified power quality controller using new control strategy

GUO Mao-feng, WANG Guang-zhu

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: A new control strategy is proposed for UPQC (Unified Power Quality Controller). The series APF (Active Power Filter), as a current source, makes the network injection current sinusoidal, while the parallel APF, as a voltage source, makes the load voltage synchronized. It is unnecessary to calculate the compensations of voltage and current, but the network voltage phase should be locked to automatically regulate the current amplitude by energy balance. Due to the constant amplitude of the object voltage, the circuits are simplified, as well as the calculations. The structure, control principle and implementation of UPQC are introduced and a simulation verifies its effectiveness.

Key words: unified power quality controller; active power filter; control strategy