

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.04.005

## 面向主动配电网的统一电能质量控制器补偿策略研究

张少凡<sup>1</sup>, 高强<sup>1</sup>, 华煌圣<sup>1</sup>, 李妍红<sup>1</sup>, 祁忠<sup>2</sup>

(1. 广州供电局有限公司, 广东 广州 510620; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:**主动配电网在充分发挥多种清洁能源优势的同时,不得面对电能质量问题日益突出的困境。统一电能质量控制器(UPQC)可综合治理主动配电网中的电压质量和电流质量问题,是解决该问题的重要突破口。首先对UPQC系统进行解耦控制,将 $dq$ 坐标下的数学模型转换到 $\alpha\beta$ 坐标系下实现全解耦,得到串联侧和并联侧变流器的传递函数,然后分别设计了串联侧和并联侧的控制器,最后建立了UPQC系统整体的仿真模型。通过仿真验证了在电压跌落/暂升、负载电流畸变和无功电流、及综合电能质量存在的情况下,文中所设计的控制器具有较好的补偿效果。

**关键词:**主动配电网;统一电能质量控制器;串联侧补偿;并联侧补偿

**中图分类号:**TM615

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2019)04-0034-08

### 0 引言

大量分布式电源接入配电网,使得传统配电网具备了有源化和主动化的特征<sup>[1-4]</sup>。主动在配电网充分发挥多种清洁能源优势的同时,也不得不面对电能质量问题日益突出的困境。不断增加的电力电子装置等非线性负荷,加剧了原配电网中的电能质量问题,使其更加复杂化<sup>[5-8]</sup>,且对电网和电力用户带来各种危害和损失。

单台电能质量调节装置不具备解决多种类型电能质量问题的能力,而采用多台装置又不合理。为此,日本学者H. Akagi于1996年首次提出统一电能质量控制器(unified power quality controller, UPQC)的概念<sup>[9]</sup>,在结合串联型电能质量调节装置(如动态电压调节器(dynamic voltage regulator, DVR)、不间断电源供应(uninterruptible power supply, UPS))和并联型电能质量调节装置(如有源电力滤波器(active power filter, APF)、静止同步补偿器(distribution static synchronous compensator, DSTATCOM)的同时,拥有改善电压和电流波形质量的能力,如抑制谐波电压、消除电压波动、补偿电压跌落、治理三相不平衡等和抑制谐波电流、补偿不平衡与无功电流等。

系统补偿策略、电压或电流跟踪控制方法很大程度上决定了UPQC装置的性能。其中,间接控制策略应用最为广泛<sup>[10-11]</sup>。UPQC串联侧被控制为一个可控电压源,补偿电网电压扰动,其功能相当于串联型补偿装置;UPQC并联侧部分被控制为一

个可控电流源,其功能类似于并联型补偿装置。该方法有一定的缺陷:电网断电或恢复供电时,其并联部分的控制策略需要在间接控制与直接控制之间进行切换,降低了系统的稳定性。UPQC直接控制策略是一种新型的控制方案,目前国内主要有华中科技大学、哈尔滨工业大学等高校进行研究<sup>[12-13]</sup>。UPQC采用直接控制时,其串联部分吸收了电网电压的扰动量,并联部分吸收了负载无功、谐波和不平衡电流。相比于间接控制方案,直接控制方案不需要检测电网电压和负载电流,且当电网断电或恢复供电时,不需要切换工作模式<sup>[14-18]</sup>。

实现UPQC两侧变流器的输出电压和输出电流的准确快速跟踪指令信号是控制中的一项重要技术。在满足快速动态响应的同时又需要保证稳态精度,还要能应对不同结构的电网和不同类型的负载,以上这些性能指标都与UPQC控制器紧密相关,控制器的设计将直接影响UPQC的补偿性能。因此,文中对UPQC系统进行解耦控制,在 $\alpha\beta$ 坐标系下分别设计了串联侧和并联侧的控制器,通过系统仿真表明UPQC可综合治理主动配电网中的电压质量和电流质量问题。

### 1 UPQC系统的控制思想

文中研究的UPQC拓扑结构如图1所示,主要由三相交流电网、串联变压器、串联变流器、并联变流器、直流侧电容以及负载组成。

(1) 三相交流电网。网侧线电压额定值为380 V,频率为50 Hz;电源可模拟电网电压扰动、三相电压不平衡及电压畸变等问题。

(2) 串联变压器 $T_s$ 。选用三相变压器,绕组采

收稿日期:2019-01-25;修回日期:2019-02-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577028)

用 Yy-12 接线方式,也可采用 Dy-11 接线方式。

(3) 串联变流器 VSC1。该变流器经串联变压器  $T_s$ 、滤波电感  $L_1$  和电容  $C_1$  组成的 LC 型滤波器接入电网。

(4) 并联变流器 VSC2。该变流器经滤波电感  $L_{21}$ 、电容  $C_2$  和滤波电感  $L_{22}$  组成的 LCL 型滤波器并联到电网。

(5) 直流侧电容  $C_{DC}$ 。连接在 VSC1 和 VSC2 的公共直流端,可以存储一定的能量,主要起维持直流侧电压稳定的作用。

(6) 负载。负载类型包括线性/非线性、对称/不对称、纯阻性/阻感性负载等。

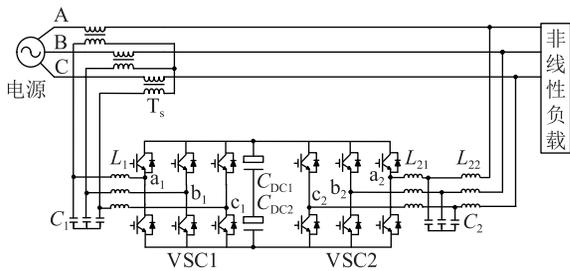


图 1 三相三线制 UPQC 功率电路

Fig.1 UPQC power circuit for three phase three wire system

UPQC 综合了并联型和串联型补偿装置的功能,其控制目标包括 2 个部分。一是当负载电流有畸变、无功和三相不平衡时,UPQC 并联侧发挥 APF 功能,保证电网电流为三相平衡、与基波正序电压同相位的正弦电流;二是当电网电压畸变、波动和不平衡时,UPQC 串联侧发挥 DVR 功能,保证负载电压为理想三相电压<sup>[19-21]</sup>。

由于间接控制策略具有物理意义清晰、控制目标明确等优点,文中采用此控制方案,其单相等效原理电路如图 2 所示,间接控制策略如图 3 所示。图 2 中,  $v_s$  为电网电压;  $R_s, L_s$  分别为电网的电阻和电抗;  $v_c, i_{22}$  分别为 UPQC 串联侧输出电压和并联侧输出电压。

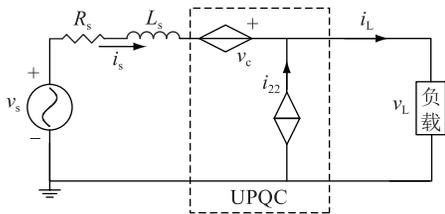


图 2 UPQC 单相等效原理电路

Fig.2 Single-phase equivalence circuit for UPQC

UPQC 控制策略的目标是完成两侧变流器的输出电压、电流快速准确跟踪指令值。因此,首先对

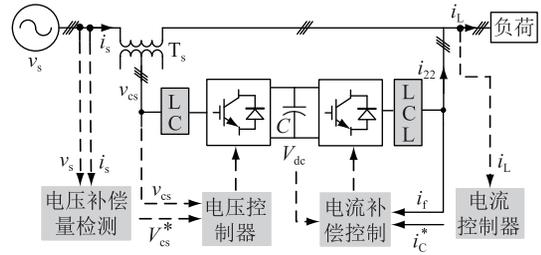


图 3 UPQC 间接控制策略

Fig.3 Indirect control strategy of UPQC

电网电压、负载电流进行采样,并经 UPQC 检测算法获取补偿电压指令和补偿电流指令,然后由电压、电流跟踪控制器实现闭环控制,最后通过 PWM 调制技术生产开关脉冲信号,经驱动电路功率放大后,控制变流器工作,输出电压或电流补偿量。需要注意的是 UPQC 直流侧电容电压稳定是保证其补偿效果的一个重要因素,而维持直流侧电压稳定是由并联侧变流器实现的。

## 2 UPQC 控制器设计

### 2.1 串联侧控制器设计

UPQC 串联部分可视为一个受控电压源,向电网补偿一个电压,该电压值等于负载额定电压和电网实际电压的差值,补偿电网电压中的不平衡、谐波以及波动量,为负载提供理想的三相电压<sup>[22-23]</sup>。

UPQC 串联部分补偿思想如图 4 所示,反馈控制结构如图 5 所示。图中,  $v_L$  为三相负载电压;  $v_L^*$  为理想负载电压;  $v_c^*$  为串联侧电压补偿指令值;  $v_c$  为串联侧实际补偿值;  $v_{ce}^*$  为补偿指令值与实际补偿的差值;  $G_{c1}(s)$  为串联侧控制器的传递函数;  $k_{PWM1}$  为串联侧变流器的传递函数(一般变流器可等效为一个增益  $k$ );  $L_1 C_1$  为输出滤波器环节;  $H_1(s)$  为串联侧闭环控制的反馈网络的传递函数,一般设为 1。

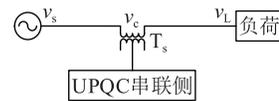


图 4 UPQC 串联侧补偿思想

Fig.4 UPQC compensation in series side

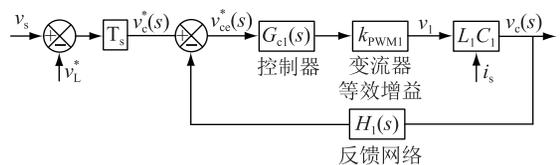


图 5 UPQC 串联补偿部分反馈控制

Fig.5 Feedback control of UPQC series compensation part

图中,

$$v_s = v_{sf}^+ + v_{sf}^- + v_{sf}^0 + v_{sh} \quad (1)$$

令:

$$v_c = -\Delta v_{sf}^+ + v_{sf}^- + v_{sf}^0 + v_{sh} \quad (2)$$

则:

$$v_L = v_s - v_c = v_{sf} + \Delta v_{sf} \quad (3)$$

式中:  $v_{sf}^+, v_{sf}^-, v_{sf}^0$  分别为电网基波正序、负序、零序电压;  $v_{sh}$  为各次电网谐波电压总和;  $\Delta v_{sf}$  为电网电压幅值扰动量。

图5采用的是经典的PI控制器<sup>[24]</sup>, 是UPQC控制部分的核心单元, 为了获取良好的补偿效果, 需整定合适的控制参数。对应UPQC串联变流器的电流、电压微分方程式, 其 $\alpha\beta$ 坐标系状态方程分别如式(4)、式(5)所示。

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{1\alpha}}{dt} \\ \frac{di_{1\beta}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L_1 & 0 \\ 0 & 1/L_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{1\alpha} - v_{c\alpha} \\ v_{1\beta} - v_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dv_{c\alpha}}{dt} \\ \frac{dv_{c\beta}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{c\alpha} \\ v_{c\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/C_1 & 0 \\ 0 & 1/C_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1\alpha} - i_{c\alpha} \\ i_{1\beta} - i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据式(4)和式(5), 以  $v_{1\alpha}, v_{1\beta}$  作为控制量, 采用PI控制器,  $v_{c\alpha}^*, v_{c\beta}^*$  作为电压补偿的指令值, 可得  $v_{1\alpha}, v_{1\beta}$  的控制方程如式(6)所示。

$$\begin{cases} v_{1\alpha} = \left( k_{vp\alpha} + \frac{k_{vi\alpha}}{s} \right) k_{PWM1} (v_{c\alpha}^* - v_{c\alpha}) \\ v_{1\beta} = \left( k_{vp\beta} + \frac{k_{vi\beta}}{s} \right) k_{PWM1} (v_{c\beta}^* - v_{c\beta}) \end{cases} \quad (6)$$

从而得到UPQC串联变流器反馈控制如图6所示,  $G_{c\alpha 1}(s), G_{c\beta 1}(s)$  分别为 $\alpha, \beta$ 轴的PI控制器的传递函数。

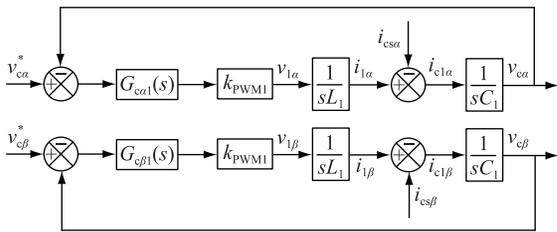


图6 UPQC 串联变流器 PI 控制

Fig.6 The PI control of the UPQC series converter

由图6可知, UPQC 串联变流器在 $\alpha\beta$ 坐标系下的  $s$  域模型是完全解耦的。另外, 根据图6, 可求出

系统输出补偿电压对电压指令信号的开环和闭环传递函数, 如式(7)和式(8)所示(仅列出 $\alpha$ 轴的传递函数,  $\beta$ 轴的与此相似):

$$G_{open}(s) = \frac{v_{c\alpha}}{v_{c\alpha}^*} \Big|_{i_{c1\alpha}=0} = \left( k_{vp\alpha} + \frac{k_{vi\alpha}}{s} \right) k_{PWM1} \frac{1}{sL_1} \frac{1}{sC_1} = \frac{k_{PWM1} (sk_{vp\alpha} + k_{vi\alpha})}{s^3 L_1 C_1} \quad (7)$$

$$G_{close}(s) = \frac{G_{open}(s)}{1 + G_{open}(s)} = \frac{k_{PWM1} (sk_{vp\alpha} + k_{vi\alpha})}{s^3 L_1 C_1 + k_{PWM1} (sk_{vp\alpha} + k_{vi\alpha})} \quad (8)$$

式中:  $k_{vp\alpha} + (k_{vi\alpha}/s)$  是 $\alpha$ 轴上的比例积分环节的传递函数, 调整系统传递函数渐近线到虚轴的距离以提升系统的稳定裕度。

## 2.2 并联侧控制器设计

UPQC 并联部分可视为一个受控电流源, 补偿负载电流不平衡、谐波及无功分量, 提高电网电流质量, 并使电网功率因数为1。与串联变流器相似, 并联变流器在  $dq$  坐标系下的  $d, q$  轴间存在强耦合, 设计控制器时, 先将  $dq$  坐标下的数学模型转换到 $\alpha\beta$ 坐标系下实现全解耦, 再设计电流跟踪控制器。

UPQC 并联部分补偿的目标是使负载从电网吸取的电流波形为理想正弦波, 且需要保持直流侧电压稳定, 补偿思想如图7所示, 其反馈控制如图8所示。其中,  $i_s$  为电网电流;  $i_{22}$  为并联侧变流器输出的补偿电流;  $i_L$  为三相负载电流;  $i_{22}^*(s)$  为并联侧补偿指令值;  $i_{22}(s)$  为并联侧实际补偿值;  $i_{ce}^*(s)$  为补偿指令信号与实际补偿的差值;  $d_2(s)$  为 PWM 调制信号的占空比;  $G_{d2}(s)$  为并联侧检测算法的传递函数;  $G_{c2}(s)$  为并联侧控制器的传递函数;  $L_{21} C_2 L_{22}$  为并联侧滤波器;  $H_2(s)$  为并联侧闭环控制的反馈网络的传递函数, 一般设为1;  $v_{DCref}$  为 UPQC 直流侧电压参考值;  $v_{DC}$  为 UPQC 直流侧电压实际值;  $G_{DC}(s)$  为直流侧稳压控制器的传递函数。UPQC 直流侧电压稳定是 UPQC 工作的前提, 文中采用 UPQC 并联侧变流器调节直流侧电压。



图7 UPQC 并联侧补偿

Fig.7 UPQC compensation in parallel side

图中,

$$i_L = i_{Lr}^+ + i_{Lr}^- + i_{Lr}^0 + i_q + i_{Lh} \quad (9)$$

令:

$$i_{22} = i_{Lr}^- + i_{Lr}^0 + i_q + i_{Lh} \quad (10)$$

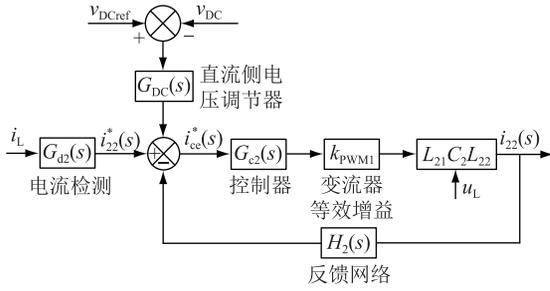


图8 UPQC 并联补偿部分反馈控制

Fig.8 Feedback control of UPQC parallel compensation part

则:

$$i_s = i_L - i_{22} = i_{L_f}^+ \quad (11)$$

式中:  $i_{L_f}^+$ ,  $i_{L_f}^-$ ,  $i_{L_f}^0$  分别为负载基波正序、负序、零序电流;  $i_q$  为负载无功电流;  $i_{L_n}$  为各次负载谐波电流总和。

对应 UPQC 并联变流器的微分方程式, 其  $\alpha\beta$  坐标系状态方程如式(12)所示。

$$\begin{cases} \frac{di_{21m}}{dt} = \frac{v_{2m}}{L_{21}} - \frac{v_{c2m}}{L_{21}} \\ \frac{di_{22m}}{dt} = \frac{v_{c2m}}{L_{22}} - \frac{v_{Lm}}{L_{22}} \\ \frac{dv_{c2m}}{dt} = \frac{i_{22m}}{C_2} - \frac{i_{21m}}{C_2} \end{cases} \quad m = \alpha, \beta \quad (12)$$

根据式(12), 以  $v_{2\alpha}$ ,  $v_{2\beta}$  作为控制量, 采用 PI 控制器,  $i_{22\alpha}^*$ ,  $i_{22\beta}^*$  作为电流补偿的指令值,  $k_{PWM2}$  是并联变流器的等效增益, 可得到  $v_{2\alpha}$ ,  $v_{2\beta}$  的控制方程如式(13)所示。

$$\begin{cases} v_{2\alpha} = \left( k_{ip\alpha} + \frac{k_{ii\alpha}}{s} \right) k_{PWM2} (i_{22\alpha}^* - i_{22\alpha}) \\ v_{2\beta} = \left( k_{ip\beta} + \frac{k_{ii\beta}}{s} \right) k_{PWM2} (i_{22\beta}^* - i_{22\beta}) \end{cases} \quad (13)$$

进而得到 UPQC 并联变流器反馈控制如图 9 所示, 其中  $k_\alpha = k_{ip\alpha} + (k_{ii\alpha}/s)$ ,  $k_\beta = k_{ip\beta} + (k_{ii\beta}/s)$ 。

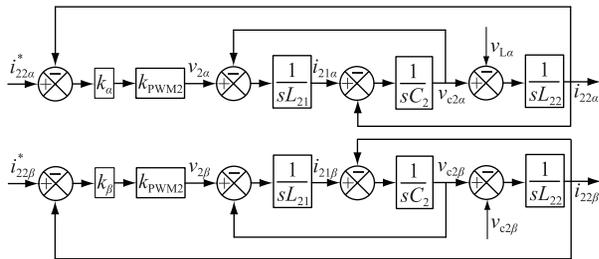


图9 UPQC 并联变流器 PI 控制

Fig.9 The PI control of the UPQC parallel converter

由图 9 可知, UPQC 并联变流器在  $\alpha\beta$  坐标系下的  $s$  域模型也是完全解耦的, 可以对任一轴上的变

量进行独立控制。另外, 根据图 9, 可求出系统输出补偿电流对指令电流信号的开环和闭环传递函数, 如式(14)和式(15)所示(仅列出  $\alpha$  轴的传递函数,  $\beta$  轴的与此相似)。

$$G_{open}(s) = \frac{i_{22}}{i_{22}^*} \Big|_{v_{L\alpha}=0} = \left( k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s} \right) k_{PWM2} \frac{1}{sL_{21}} \frac{1}{sC_2} \frac{1}{sL_{22}} = \frac{k_{PWM2}(sk_{ip} + k_{ii})}{s^4 L_{21} L_{22} C_2} \quad (14)$$

$$G_{close}(s) = \frac{G_{open}(s)}{1 + G_{open}(s)} = \frac{k_{PWM2}(sk_{ip} + k_{ii})}{s^4 L_{21} L_{22} C_2 + k_{PWM2}(sk_{ip} + k_{ii})} \quad (15)$$

### 3 仿真与分析

为了验证文中提出的 UPQC 控制策略, 在 Matlab/Simulink 仿真软件中搭建了仿真模型, 仿真模型中重要参数说明如下:

- (1) 电网参数。额定电压 380 V, 频率 50 Hz, 可模拟电压扰动、谐波等电压质量问题;
- (2) 负荷参数。额定电压 380 V, 包括线性/非线性、平衡/不平衡, 纯阻性/阻感性负载等;
- (3) UPQC 直流侧电压参考值 750 V;
- (4) UPQC 系统详细参数如表 1 所示。

表 1 UPQC 各元件仿真参数

Table 1 Simulation parameters of UPQC

元件	参数	元件	参数
$L_1$ /mH	5	$L_{22}$ /mH	1
$C_1$ / $\mu$ F	140	$C_2$ / $\mu$ F	5
$L_{21}$ /mH	5	$C_{DC}$ / $\mu$ F	6 000

仿真时根据不同类型的电能质量问题设置了 2 种运行状态, 下面分别给出不同情况的仿真结果与分析。

#### 3.1 运行状态 I

三相电网电压幅值同时跌落 20%, 持续时间为 0.04~0.08 s; 三相电网电压幅值上升 20%, 持续时间为 0.12~0.14 s; 负荷类型由纯阻性变为阻感性。运行状态 I 下的电网电压波形如图 10 所示。

UPQC 治理运行状态 I 电能质量问题的仿真结果如图 11 所示, 由图 11(a) 与图 10 比较可知, UPQC 可准确去除电网电压扰动, 保证负荷电压达到额定值; 由图 11(b) 所示的电网电流和 UPQC 补偿的电流波形可知, 当 UPQC 串联侧补偿电压跌落的同时, UPQC 并联侧输出补偿电流, 使负载电流保持平稳; 由图 11(c) 可知, UPQC 可补偿负载无功电

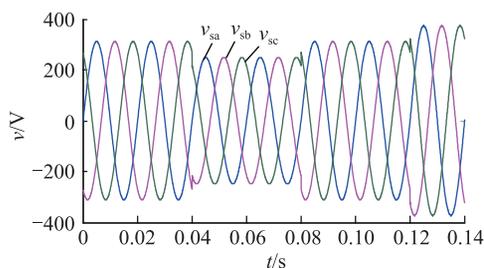
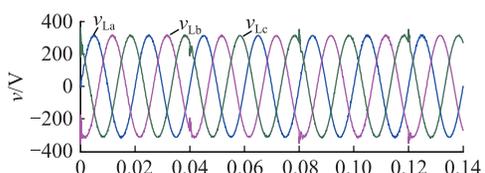


图 10 运行状态 I 三相电网电压波形  
Fig.10 Operating state I three phase grid voltage waveform

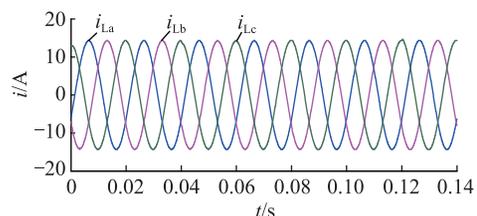
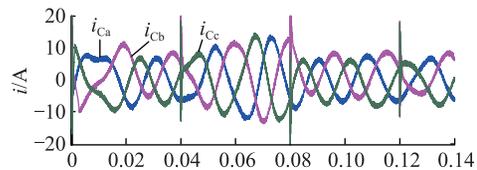
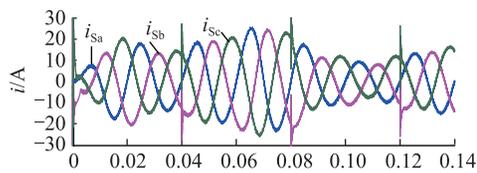
流、电网无功功率,使电网功率因数达到 1。综上所述,采用文中所述的 UPQC 控制策略,可获得良好的稳态补偿效果。另外,由图 11(d)可知,UPQC 输出的电压和电流动态跟踪指令信号效果良好,直流侧电压波动范围小于 2%,直流侧稳压效果良好,可知采用 PI 控制器的直流侧稳压策略可满足直流侧电压稳定的需求,PI 控制器参数设置恰当。

### 3.2 运行状态 II

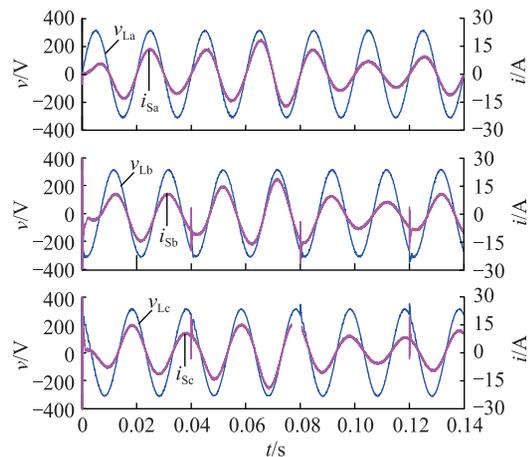
电网电压发生畸变和不平衡,在 0.04 s 后增加 5 次、7 次谐波并且 a 相电压发生跌落(持续时间为



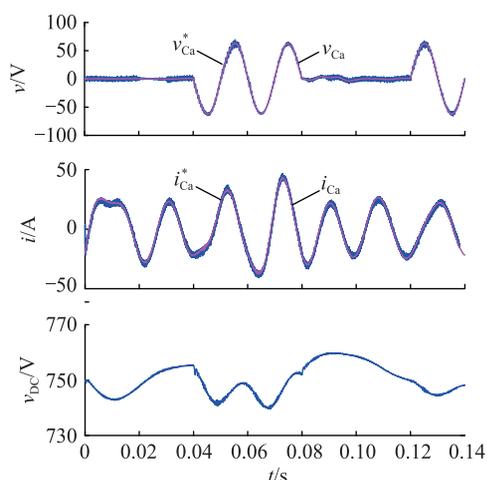
(a) 负载电压波形和 UPQC 串联部分补偿的电压波形



(b) 电网电流波形和 UPQC 并联侧输出的补偿电流与负载电流波形



(c) 三相负载电压和电网电流波形



(d) 电压和电流跟踪指令信号及直流侧电压波形

图 11 运行状态 II 的仿真结果

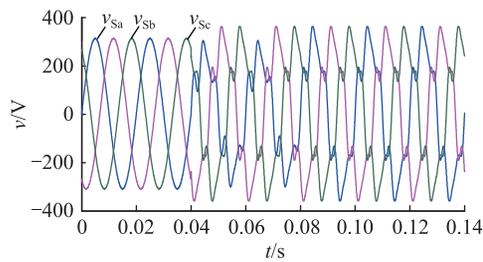
Fig.11 Simulation results of operating state II

0.04~0.08 s),即电网电压同时存在跌落、畸变及不平衡问题,负荷由状态 I 中的电阻负荷变为三相不可控整流桥,整流桥的直流侧为电阻,其电网电压波形和负载电流波形如图 12 所示。

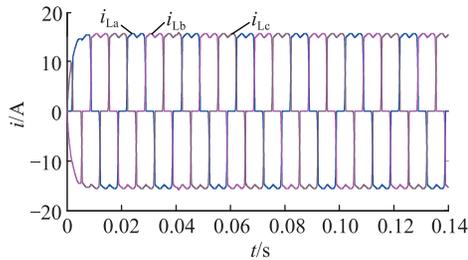
图 12(a)所示的 a、b、c 三相电网电压畸变率皆为 22.36%,其中 5 次、7 次谐波电压分别为 0.2 p.u., 0.1 p.u.。负载为三相二极管整流桥,整流桥为非线性负载,其理论谐波次数主要为  $6n \pm 1$  次 ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ),且随谐波次数升高,谐波幅值减小。

UPQC 治理运行状态 II 电能质量问题的仿真结果如图 13 所示。

对比图 13(a)与图 12(a)可知,当电网电压存在畸变且仅 a 相电压发生跌落时(0.04~0.14 s),UPQC 具备处理复合型电压质量问题的能力,可同时补偿电压跌落、改善不平衡电压及抑制谐波电压,为负载提供理想的三相电压。补偿后的负载电压 a、b、c 三相的谐波含量分别为 2.22%, 2.19%, 2.28%,三相对称且幅值均约等于标准值,电压偏差小于 1%,满足我国公用电网电压波动及谐波标准



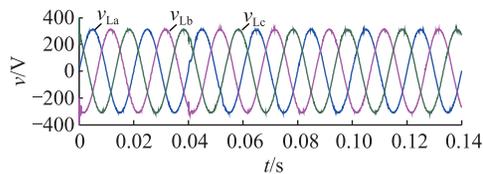
(a) 电网电压波形



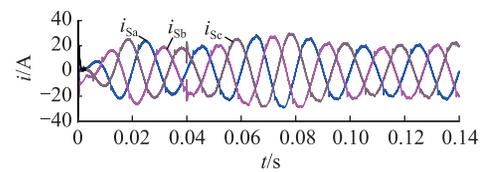
(b) 负载电流波形

图 12 运行状态 II 的电网电压和负载电流波形

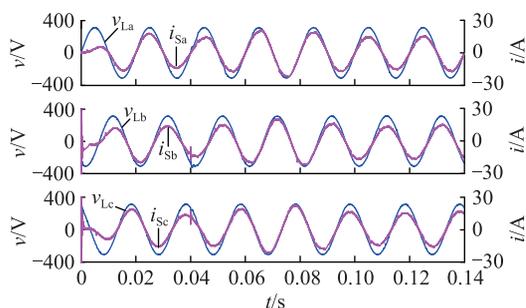
Fig.12 Grid voltage and load current waveform of operating state II



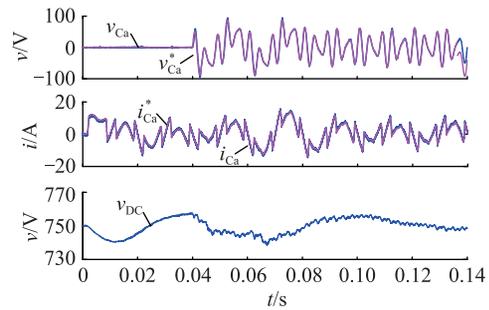
(a) 负载电压及UPQC补偿电压波形



(b) 电网电流及UPQC补偿电流波形



(c) 三相负载电压和电网电流波形



(d) 电压和电流跟踪指令信号及直流侧电压波形

图 13 运行状态 II 的仿真结果

Fig.13 Simulation results of operating state II

的要求。将图 13(b)与图 12(b)所示的电网电流波形和负载电流波形进行比较可知,当负载电流发生畸变时,UPQC 可补偿谐波电流,保证电网电流为正弦波,补偿后的电网电流 a、b、c 三相的谐波含量分别为 3.98%,4.27%,4.29%,满足我国公用电网谐波标准。由图 13(c)可知,UPQC 可在调节电压和电流电能质量的同时补偿无功电流,使电网功率因数为 1。综上分析,采用文中所述的 UPQC 控制策略,可获得良好的动态补偿效果,且 UPQC 兼具电压补偿能力和电流补偿能力。

## 4 结语

以三相三线制结构的左串右并形式 UPQC 电路拓扑分析为基础,针对主动配电网中电流谐波以及电压跌落等电能质量问题的产生机理,分别建立了串联补偿单元与并联补偿单元基于变流器状态方程的数学模型,将  $dq$  坐标下的数学模型转换到  $\alpha\beta$  坐标系下实现了全解耦,得到了串联侧和并联侧变流器的传递函数,并基于传递函数分别设计了串联侧和并联侧的控制器。最后采用文中所提的 UPQC 控制策略和电压、电流跟踪补偿方法,对运行状态 I 和运行状态 II 分别进行仿真验证。通过仿真验证了电源的电压跌落和非线性负载引起的谐波干扰都得到了一定的补偿和抑制,功率因数也得到了提高,说明该控制策略是有效可行的,具有很好的跟踪性能,为实验装置的设计提供了一定理论依据。

## 参考文献:

- [1] 赵波,王财胜,周金辉,等. 主动配电网现状与未来发展[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18):125-135.  
ZHAO Bo, WANG Caisheng, ZHOU Jinhui, et al. Present and future development trend of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18):125-135.
- [2] 王甜婧,许阔,朱永强. 主动配电网的源-网-荷多层博弈经济调度策略[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(4):10-19.

- WANG Tianjin, XU Kuo, ZHU Yongqiang. Multi-layer game economic dispatching strategy of active distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46 (4) : 10-19.
- [3] 刘东,张弘,王建春. 主动配电网技术研究现状综述[J]. 电力工程技术,2017,36(4) :2-7,20.
- LIU Dong, ZHANG Hong, WANG Jianchun. Review on the state of the art of active distribution network technology research [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4) :2-7,20.
- [4] 黄素娟,张晓青,孙保华,等. 主动配电网协调控制系统设计及应用[J]. 电力工程技术,2017,36(4) :25-30.
- HUANG Sujuan, ZHANG Xiaoqing, SUN Baohua, et al. Design and application of coordinated control system for active distribution network [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4) :25-30.
- [5] 于海,谢冬阳,王厚军. 基于 APF 电能质量调节装置的研究[J]. 电气技术, 2016, 17(2) :114-116.
- YU Hai, XIE Dongyang, WANG Houjun. Research of power quality control device based on APF[J]. Electrical Engineering, 2016, 17(2) :114-116.
- [6] 朱明星,潘岩,高博. 光伏扶贫地区调压器提升低压配电网电能质量的应用研究[J]. 供用电,2017,34(10) :19-25.
- ZHU Mingxing, PAN Yan, GAO Bo. Application of voltage regulator in photovoltaic poverty alleviation areas to enhance the power quality of low-voltage distribution networks[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(10) :19-25.
- [7] 任杰,陈文波,肖先勇,等. 2017 年国际供电会议电能质量和电磁兼容研究热点及新趋势 [J]. 供用电,2017,34(11) :43-49.
- REN Jie, CHEN Wenbo, XIAO Xianyong, et al. Research hotspots and new trends of power quality and electromagnetic compatibility[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(11) :43-49.
- [8] 王成山,王守相. 分布式发电供电系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20) :1-4.
- WANG Chengshan, WANG Shouxiang. Study on some key problems related to distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20) :1-4.
- [9] AKAGI H. New trends in active filters for powerconditioning [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32 (6) :1312-1322.
- [10] 谭智力. 不平衡及非线性条件下三相四线 UPQC 的控制策略研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2007.
- TAN Zhili. Research on control strategy of three-phase four-wire UPQC under unbalanced and nonlinear conditions [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [11] 张国荣. 电能质量综合调节器(UPQC)及其控制策略研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2008.
- ZHANG Guorong. Research on power quality integrated regulator (UPQC) and its control strategy [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2008.
- [12] 梁祖权. 统一电能质量调节器检测与控制技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008.
- LIANG Zuquan. Research on detection and control technology of unified power quality regulator [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [13] 李勋. 统一电能质量调节器(UPQC)的分析与控制[D]. 武汉:华中科技大学, 2006.
- LI Xun. Analysis and control of unified power quality regulator (UPQC) [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [14] 梁祖权,束洪春,刘志坚,等. UPQC 完全解耦直接控制策略[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(4) :27-31.
- LIANG Zuquan, SHU Hongchun, LIU Zhijian, et al. Completely decoupled direct control strategy of UPQC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(4) :27-31.
- [15] 章雷其,汪湘晋,徐珂,等. 基于柔性互联的源网荷储协同主动配电网设计研究[J]. 供用电,2018,35(1) :28-33.
- ZHANG Leiqi, WANG Xiangjin, XU Ke, et al. Research on design of a source-grid-load-storage-collaborated active distribution network based on flexible interconnection[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(1) :28-33.
- [16] 陈锦铭,李岩,孔月萍,等. 含高渗透率分布式光伏的配电网故障停电损失评估[J]. 电力需求侧管理,2017,19(5) :18-22.
- CHEN Jinming, LI Yan, KONG Yueping, et al. Fault outage loss assessment of distribution networks with high permeability distributed photovoltaics[J]. Power Demand Side Management, 2017, 19 (5) : 18-22.
- [17] 张志华,刘健,张小庆,等. 配电自动化系统中相间短路故障处理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45 (20) : 143-151.
- ZHANG Zhihua, LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, et al. Interphase short circuit fault treatment strategy in distribution automation system [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45 (20) : 143-151.
- [18] SUN C, WEIG H, ZENGJUN B I. Detection for reactive and harmonics currents of unbalanced three-phase systems based on synchronous reference frame transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003;251-256.
- [19] 周海亮. 统一电能质量调节器检测与补偿控制策略研究[D]. 天津:天津大学, 2012.
- ZHOU Hailiang. Research on detection and compensation control strategy of unified power quality regulator [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [20] 林静怀. 基于大数据平台的电网运行指标统一管控方案[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(4) :165-170.
- LIN Jinghui. Unified management and control scheme of power grid operation index based on big data platform [J]. Protection and Control of Power System, 2018, 46 (4) : 165-170.
- [21] 竺庆茸,黄文杰,徐修华,等. 分布式能源对主动配电网谐波特性影响的研究[J]. 电力工程技术,2017,36(5) :93-97,108.

- ZHU Qingrong, HUANG Wenjie, XU Xiuhua, et al. The impact of distributed energy on harmonic characteristics in active distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5):93-97, 108.
- [22] 汤其彩, 刘惠康, 周华忠. 统一电能质量调节器(UPQC)的补偿控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2007, 35(12):32-35.  
TANG Qicai, LIU Huikang, ZHOU Huazhong. Strategy for reactive control in low voltage ride through of photovoltaic power station[J]. Power System Protection and Control, 2007, 35(12):32-35.
- [23] EBADIAN M, TALEBI M, GHANIZADEH R. A new approach based on instantaneous power theory for improving the performance of UPQC under unbalanced and distortional load conditions[J]. Automatika, 2015, 56(2):268-273.
- [24] LIU C H, HSU Y Y. Design of a self-tuning PI controller for a STATCOM using particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(2):702-715.

作者简介:



张少凡

张少凡(1978),男,学士,工程师,从事继电保护专业相关工作(E-mail: 503010607@139.com);

高强(1985),男,硕士,高级工程师,从事继电保护专业相关工作;

华焯圣(1984),男,硕士,工程师,从事电力调度与继电保护专业相关工作。

## Compensation strategy of unified power quality controller for active distribution network

ZHANG Shaofan<sup>1</sup>, GAO Qiang<sup>1</sup>, HUA Huangsheng<sup>1</sup>, LI Yanhong<sup>1</sup>, QI Zhong<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510620, China;

2. NanRi-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** While the active distribution network has fully utilized the advantages of various clean energy sources, it has to face the dilemma of increasing power quality problems. The unified power quality controller can comprehensively deal with the voltage quality and current quality problems in the active distribution network. Firstly, the UPQC system is decoupled and controlled, and the mathematical model under dq coordinates is converted to the  $\alpha\beta$  coordinating system to achieve full decoupling. The transfer functions of the series side and parallel side converters are obtained. Then the controllers on the series side and the parallel side are designed respectively. Finally, the simulation model of the UPQC system is established. The simulation results show that the controller designed in this paper has better compensation effect under the condition of the voltage drop or suspension, load current distortion.

**Keywords:** active distribution network; unified power quality controller; series side compensation; parallel side compensation

(编辑 钱悦)