

# 一种单相无隔离变压器 UPQC 的控制策略研究

袁 帅, 陈阿莲, 潘羿威, 张承慧  
(山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要:** 本文针对直流母线中点接入交流电网的单相半桥结构无隔离变压器统一电能质量调节器 (UPQC) 拓扑, 分析了其系统功率流动和直流母线工频纹波产生机理, 提出了一种改进的串并联协同控制策略。通过解耦控制, 使得该拓扑串联侧补偿电压暂降, 并联侧补偿电流谐波同时抑制直流母线电压工频脉动。并给出了该拓扑直流母线电容设计选型依据。最后通过仿真和实验, 验证了所提设计和控制策略的有效性。

**关键词:** 统一电能质量调节器; 电压暂降; 谐波补偿; 无隔离变压器

**DOI:** 10.12067/ATEEE1803057      **文章编号:** 1003-3076(2018)06-0010-08      **中图分类号:** TM46

## 1 引言

随着非线性负载与分布式电源的大量使用, 现代配电网中电能质量问题越发凸显, 主要包括电压暂升和暂降、电压电流谐波等危害电力设备的供电次生问题。现代综合配电网大多采用有源电力滤波器、动态电压恢复器等单一电力治理设备来提高关键电气设备的供电质量及可靠性, 抑制非线性负载引起的谐波污染<sup>[1]</sup>。

统一电能质量调节器 (Unified Power Quality Conditioner, UPQC) 被认为是一种理想的电能质量集中解决方案, 其包括串联、并联两部分。其中, 串联部分用于恢复电压暂降, 抑制电压闪变及谐波; 并联部分用于补偿非线性负载引发的谐波电流等。因此, UPQC 能够综合解决配电网电能质量问题。传统 UPQC 包括并联和串联两组变流器, 分为“左串右并”和“左并右串”两种结构<sup>[2]</sup>。其中, “左并右串”型 UPQC 所需变流器容量较小, 可节省装置成本<sup>[3]</sup>。

单相“左并右串”型 UPQC 系统常见拓扑有三种, 分别是 H 桥、三桥臂和半桥结构。文献[2, 4]分析了这三种拓扑, 指出双 H 桥背靠背结构的 UPQC 能够降低直流侧电压和输出电流纹波, 但结构复杂, 成本高; 三桥臂结构的 UPQC 中, 串并联变流器共用

同一桥臂, 使得该拓扑电压、电流串并联补偿存在耦合; 半桥结构的 UPQC 所需开关器件最少, 成本最低, 但是该结构将直流母线中点接入交流母线, 使得直流母线电压含有交流基波分量, 电压电流补偿控制耦合, 大大降低了补偿效果。文献[5]提出了一种针对半桥结构 UPQC 的谐波抑制控制策略, 但是无法有效补偿电压暂降。

传统 UPQC 系统串联侧均采用隔离变压器, 其可以提高补偿电压等级, 提供阻尼抑制谐振, 但是会带来一定的损耗, 同时增加 UPQC 体积和成本<sup>[6]</sup>。文献[7]提出了一种应用于无隔离变压器结构 UPQC 的控制策略, 但该策略仅能补偿网侧电压轻度跌落。

综上所述, 同时采用半桥结构、无隔离变压器方案的“左并右串”型 UPQC 和传统方案相比具有以下优势: 所用开关器件最少、所需变流器容量小、重量体积显著降低, 具有极大的成本优势。但由于该拓扑直流母线中点直接接入交流母线, 需进行解耦控制, 但目前对其解耦补偿控制策略的研究及系统补偿性能的分析较少。文献[8]通过增加电池储能来缓解该拓扑 UPQC 的直流电压波动, 该方法成本较高, 电压暂降和电流谐波同时补偿的效果也较差。本文提出的改进控制策略通过将电压电流串并联补偿进行解耦控制, 有效地协调 UPQC 串并联变流器

**收稿日期:** 2018-03-19  
**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51377101)  
**作者简介:** 袁 帅(1992-), 男, 山东籍, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网电能质量;  
陈阿莲(1976-), 女, 山东籍, 教授, 博士, 主要研究方向为新能源发电、电力电子应用技术(通讯作者)。

的补偿能力,实现同时补偿电网电压暂降和负载电流谐波,仿真和实验结果均验证了本文控制策略的补偿效果。

## 2 单相半桥无隔离变压器 UPQC 系统性能分析

单相半桥结构无隔离变压器 UPQC 的典型拓扑如图 1 所示。该拓扑主要由半桥结构变流器( $S_1 \sim S_4$ )、直流母线电容( $C_{dc,u}$ 、 $C_{dc,d}$ )、输出滤波电感( $L_d$ 、 $L_a$ )以及串联补偿电容( $C_d$ )构成。其中,电网电压、电流分别为  $v_g$ 、 $i_g$ ;负载电压、电流分别为  $v_l$ 、 $i_l$ ;UPQC 串联侧输出电压、电流分别为  $v_{dvr}$ 、 $i_{dvr}$ ;并联侧输出电流为  $i_{apf}$ 。该拓扑变流器采用“左并右串”结构,其中并联部分补偿电流谐波,维持直流母线电压稳定,串联部分补偿电压暂降。

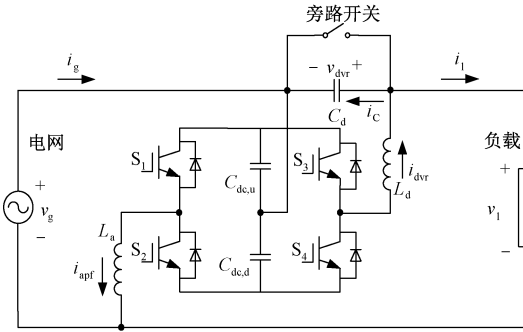


图 1 单相半桥结构无隔离变压器 UPQC 拓扑  
Fig. 1 Schematic diagram of single phase transformer-less UPQC

传统 H 桥结构 UPQC 的直流母线与交流电网相互隔离,直流母线电压主要含有串、并联瞬时功率交换引起的二次纹波。单相半桥结构无隔离变压器 UPQC 的直流母线中点与交流电网相连,使得直流母线又引入工频电压波动。在 UPQC 补偿电流谐波,尤其是补偿电网电压深度暂降时,易引发直流母线电压波动,甚至发生振荡,严重制约该拓扑 UPQC 的补偿范围与补偿效果。下面从 UPQC 系统功率流动、直流母线瞬时功率波动角度来具体分析。

### 2.1 功率流动分析

由于该拓扑直流母线中点接入交流电网,电网与 UPQC 系统的基频功率相互耦合。在电网电压跌落时,该拓扑谐波功率交换引起的直流母线脉动相比于基频功率引起的直流脉动可以忽略不计,所以对 UPQC 系统的功率流动主要基于基波等效电路进行分析。

首先建立 UPQC 系统的稳态基波等效电路模型。将串联变流器和并联变流器分别等效为一稳态基波电压源和电流源,得到单相半桥结构无隔离变压器 UPQC 的基波稳态等效模型,如图 2 所示。串联等效电压源输出基波电压  $v_{dvr}$ ,并联等效电流源输出基波电流  $i_{apf}$ 。其中  $\theta$  为 UPQC 输出基波补偿电流相位,与负载功率因数角  $\varphi$  相关。

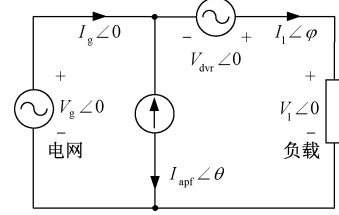


图 2 UPQC 稳态基波等效电路模型  
Fig. 2 Steady-state equivalent model of UPQC

由基波等效电路可得,负载有功、无功功率分别为:

$$P_l = V_l I_l \cos \varphi \quad (1)$$

$$Q_l = V_l I_l \sin \varphi \quad (2)$$

电网电压跌落补偿时的功率流动如图 3 所示。假设 UPQC 系统没有损耗,交流电网只提供有功功率  $P_g$ ,UPQC 并联侧吸收有功功率  $P_a$ ,直流母线交换功率后,通过串联侧向负载提供有功功率。由于串联电压补偿采用同相补偿方法,只补偿有功功率,所以二者有功功率相等,即

$$P_a = P_d = P_l - P_g = P_l - I_l V_g \quad (3)$$

$$P_a = V_g (I_l \cos \varphi - I_g) \quad (4)$$

$$P_d = I_l (V_l - V_g) \quad (5)$$

式中,  $P_a$  为同相补偿电网电压跌落时并联侧吸收的有功功率;  $P_d$  为串联侧补偿负载发出的有功功率。

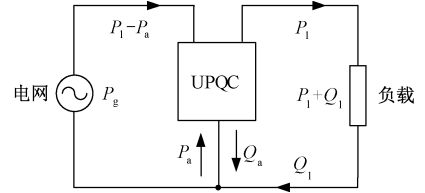


图 3 UPQC 基波功率流动框图  
Fig. 3 Power flow of proposed UPQC system

同时,UPQC 并联侧还提供负载所需的无功功率,即

$$Q_a = Q_l \quad (6)$$

通过以上分析可知,单相半桥无变压器 UPQC 通过功率解耦控制,可分别向负载提供有功、无功功

率,并提高电网侧电能质量。该 UPQC 系统在功率交换过程中,直流母线会产生工频电压波动,下面进行具体分析。

## 2.2 直流母线工频纹波分析

针对单相半桥无变压器式 UPQC 系统,由于直流母线中点接入交流电网,在同时补偿电网电压及负载电流谐波时,直流母线电压存在工频波动。下面分析串并联变流器在补偿过程中流入直流母线的瞬时功率。

首先,引入串并联变流器开关函数:

$$S_{d,a} = \begin{cases} 1 & S_{1,3} \text{ 导通}, S_{2,4} \text{ 关断} \\ 0 & S_{2,4} \text{ 导通}, S_{1,3} \text{ 关断} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $S_d$ 、 $S_a$  分别为串联侧、并联侧开关函数。不考虑输出阻抗,可以得到串联补偿电压与直流母线电压的描述方程:

$$v_{dvr} = L_d \frac{di_l}{dt} + L_d C_d \frac{d^2 v_{dvr}}{dt^2} + S_d v_{dc,u} - (1 - S_d) v_{dc,d} \quad (8)$$

式中,  $v_{dc,u}$ 、 $v_{dc,d}$  分别为直流母线上、下电容电压。

同样的,并联变流器输入电流与直流母线电压的描述方程为:

$$L_a \frac{di_{apf}}{dt} = v_g + v_{out2} = v_g + S_a v_{dc,u} - (1 - S_a) v_{dc,d} \quad (9)$$

式中,  $v_{out2}$  为并联变流器输出电压。

忽略变流器高频分量并引入中点电压小信号扰动  $\Delta v$ , 即

$$\begin{cases} v_{dc,u} = \frac{V_{dc}}{2} + \Delta v \\ v_{dc,d} = \frac{V_{dc}}{2} - \Delta v \end{cases} \quad (10)$$

可得 UPQC 系统输出电压电流瞬时方程为:

$$\begin{cases} \Delta v_{dvr} = L_d \frac{d\Delta i_l}{dt} + L_d C_d \frac{d^2 \Delta v_{dvr}}{dt^2} + \Delta v \\ L_a \frac{d\Delta i_{apf}}{dt} = \Delta v_g + \Delta v \end{cases} \quad (11)$$

假设直流母线上、下电容相等,即  $C_{dc} = C_{dc,u} = C_{dc,d}$ , 直流母线储存能量为:

$$E_{dc} = \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc,u}^2 + \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc,d}^2 \quad (12)$$

可得直流母线瞬时能量表达式为:

$$\Delta e_{dc} = \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc} \Delta v_{dc} \quad (13)$$

由式(13)可得直流母线瞬时有功功率为:

$$\Delta p_{dc} = \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc} \Delta v_{dc} \frac{d\Delta v_{dc}}{dt} \quad (14)$$

UPQC 补偿电网电压跌落时,UPQC 发出的有功功率为:

$$p_a = v_g (i_l \cos \varphi - i_g) \quad (15)$$

引入小信号扰动,可得 UPQC 交流瞬时有功功率为:

$$\Delta p_a = V_g (\Delta i_l \cos \varphi - \Delta i_g) + \Delta v_g (I_l \cos \varphi - I_g) \quad (16)$$

根据能量流动分析可得:

$$\Delta p_a = \Delta p_{dc} \quad (17)$$

又有如下三角函数关系:

$$i_{apf}^2 = i_l^2 - 2i_l i_g \cos \varphi + i_g^2 \quad (18)$$

可得:

$$\Delta i_g = \frac{I_{apf}}{I_g - I_l \cos \varphi} \Delta i_l - \frac{I_l - I_g \cos \varphi}{I_g - I_l \cos \varphi} \Delta i_l \quad (19)$$

将式(11)、式(19)代入式(16)经拉氏变换可得:

$$\begin{aligned} \Delta p_a(s) &= A \Delta i_l(s) - B \Delta i_{apf}(s) - \\ &\quad (I_l \cos \varphi - I_g) C \Delta v_{dvr}(s) \end{aligned} \quad (20)$$

式中

$$\begin{cases} A = \frac{V_g I_l \sin^2 \varphi}{I_g - I_l \cos \varphi} + (I_l \cos \varphi - I_g) L_d s \\ B = \frac{V_g I_{apf}}{I_g - I_l \cos \varphi} + (I_l \cos \varphi - I_g) L_a s \\ C = 1 - L_d C_d s^2 \end{cases}$$

由式(14)、式(16)和式(17)可得:

$$\begin{aligned} \Delta v_{dc}(s) &= \frac{2A}{C_{dc} V_{dc} s} \Delta i_l(s) - \frac{2B}{C_{dc} V_{dc} s} \Delta i_{apf}(s) - \\ &\quad (I_l \cos \varphi - I_g) \frac{2C}{C_{dc} V_{dc} s} \Delta v_{dvr}(s) \end{aligned} \quad (21)$$

由式(21)可得该拓扑 UPQC 系统工作时,直流母线会引入工频交流分量,波动范围与系统参数相关。图 4 为不同功率因数  $\cos \varphi$  与跌落深度下,直流母线工频电压波动范围。其中,  $\Delta v_{dc}$  为直流母线工频电压波动值。由图 4 可知,在其他条件一定时,负载功率因数越小,电网电压跌落越深,直流母线工频电压波动越大,UPQC 系统补偿效果越差。

不同直流侧电容容值  $C_{dc}$ 、直流母线电压  $V_{dc}$  下,取负载功率因数  $\cos \varphi = 0.707$ ,跌落深度 50% 时,直流母线工频电压的波动范围如图 5 所示。由图 5 可知,直流侧电容越大,直流母线电压波动越小,且提升直流母线电压有利于抑制直流侧工频脉动。

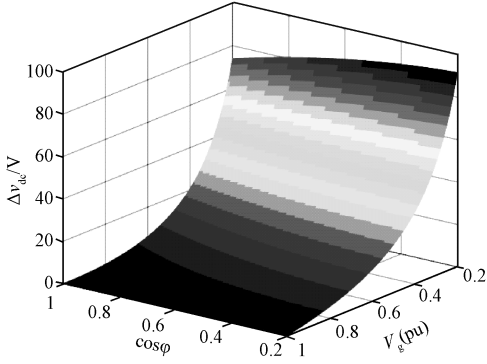


图4 不同功率因数及跌落深度下母线工频电压波动范围

Fig. 4 Fundamental waveform fluctuation of DC-bus voltage at different power factor and sag depth

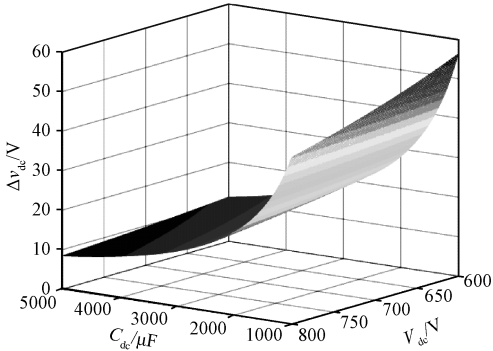


图5 不同电容值及直流电压下母线工频电压波动范围

Fig. 5 Fundamental waveform fluctuation of DC-bus voltage at different capacitor and DC side operating voltage

由以上分析可知,单相半桥无隔离变压器UPQC直流母线工频电压波动与系统补偿功率、母线电容值、负载功率因数、跌落深度等因素有关,合理设计该拓扑UPQC相关参数有助于抑制直流母线工频波动,提高系统补偿性能。

### 2.3 直流母线电容设计

由2.2节分析可知,通过选择合适的直流母线电容值能够抑制该工频纹波。下面为满足系统补偿容量及允许的电压波动范围设计直流侧电容。由式(20)、式(21)化简,可得直流母线电容选型范围为:

$$C_{dc} \geq \frac{2P_{dc}}{\pi f V_{dc} \Delta v_{dc}} \quad (22)$$

式中,  $P_{dc}$  为UPQC系统容量;  $f$  为电网频率;  $V_{dc}$  为直流母线电压;  $\Delta v_{dc}$  为直流母线电压波动。

取  $f=50\text{Hz}$ , 补偿容量  $10\text{kV} \cdot \text{A}$ , 直流母线电压  $720\text{V}$ , 上下直流母线纹波峰值均小于  $10\%$ , 则直流母线电容至少为  $5900\mu\text{F}$ 。考虑一定余量, 选择

$6300\mu\text{F}/600\text{V}$  交流电容串联使用。

## 3 单相半桥无隔离变压器UPQC系统控制策略

### 3.1 锁相及暂降检测

单相UPQC系统锁相采用基于二阶广义积分器的锁相环(SOGI-PLL)<sup>[9]</sup>, 如图6所示。SOGI-PLL在网侧发生故障后, 仍能准确跟踪电网电压正序基波分量, 并提供精确的幅值与相位信息。系统暂降检测模块通过将网侧电压与给定电压比较, 判定跌落深度及补偿效果, 及时投切串联侧补偿电容<sup>[10]</sup>。

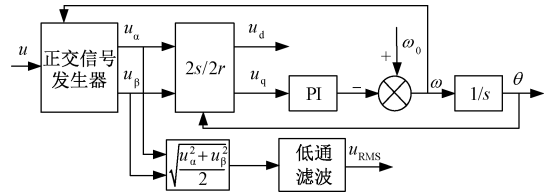


图6 基于SOGI-PLL的单相锁相环框图

Fig. 6 Control diagram of single-phase SOGI-PLL

### 3.2 串联动态电压恢复器控制策略

串联部分即动态电压恢复器(Dynamic Voltage Restorer, DVR)通过向电网注入适当的补偿电压来维持负载电压。串联DVR采用同相电压补偿方法, 当电网电压跌落时, 串联DVR接入电网与负载之间, 注入与电网电压同相的补偿电压, 迅速恢复负载电压。当电网正常时, 旁路开关将串联DVR切除。控制框图如图7所示。采用基于内模原理无差跟踪的比例谐振(Proportional Resonant, PR)控制器<sup>[11]</sup>。电压外环控制器  $G_{v,dvr}$  用于补偿电网电压跌落, 其输出作为电流内环给定  $I_{dvr}^*$  进入控制器  $G_{i,dvr}$  跟踪输出电流。表达式如下:

$$\begin{aligned} I_{dvr}^* &= G_{v,dvr}(s)(V_{dvr}^* - V_{dvr}) \\ &= (K_{p1} + \sum_{h=1,3,5,7} \frac{2K_{il}\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_h^2})(V_{dvr}^* - V_{dvr}) \end{aligned} \quad (23)$$

$$V_{out1} = G_{i,dvr}(s)(I_{dvr}^* - I_{dvr}) = K_{p2}(I_{dvr}^* - I_{dvr}) \quad (24)$$

式中,  $K_{p1}$ 、 $K_{il}$  分别为电压外环比例、谐振控制器增益;  $K_{p2}$  为电流内环比例控制器增益;  $V_{out1}$  为串联变流器PWM调制输出参考电压;  $\omega_h$  为系统基波和特定谐波频率;  $\omega_c$  为系统截止频率。

### 3.3 并联有源电力滤波器控制策略

并联侧即有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)通过向电网注入与负载电流谐波等值反向的



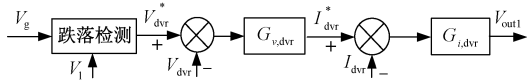


图7 串联 DVR 控制框图

Fig. 7 Control diagram of series-side UPQC

电流来进行补偿,同时从电网抽取基波电流向电容充电,维持直流母线电压,抑制基波脉动。其中谐波检测模块采用基于瞬时功率理论的谐波检测方法<sup>[12]</sup>,能够迅速、准确检测谐波分量。并联 APF 控制框图如图 8 所示。负载电流经谐波提取环节得到谐波参考电流  $I_{har}^*$ <sup>[13]</sup>,将  $I_{har}^*$  取反作为电流环给定进入控制器  $G_{har,apf}$  得到谐波补偿电流  $I_{har,apf}^*$ 。表达式如下:

$$\begin{aligned} I_{har,apf}^* &= G_{har,apf}(s)(0 - I_{har}^*) \\ &= (K_{p3} + \sum_{h=3,5,7} \frac{2K_{i3}\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_h^2})(0 - I_{har}^*) \end{aligned} \tag{25}$$

式中,  $K_{p3}$ 、 $K_{i3}$  分别为比例、谐振控制器增益。

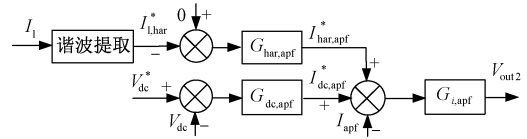


图8 并联 APF 控制框图

Fig. 8 Control diagram of parallel-side UPQC

同时,直流母线电压经 PIR 控制器  $G_{dc,apf}$  输出给定电流  $I_{dc,apf}^*$ ,与谐波补偿电流相加进入控制器  $G_{i,apf}$  跟踪输出补偿电流。表达式为:

$$\begin{aligned} I_{dc,apf}^* &= G_{dc,apf}(s)(V_{dc}^* - V_{dc}) \\ &= (K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{2K_r\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_1^2})(V_{dc}^* - V_{dc}) \end{aligned} \tag{26}$$

$$\begin{aligned} V_{out2} &= G_{i,apf}(s)(I_{har,apf}^* + I_{dc,apf}^* - I_{apf}) \\ &= (K_{p4} + \sum_{h=1,3,5,7} \frac{2K_{i4}\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_h^2}) \cdot (I_{har,apf}^* + I_{dc,apf}^* - I_{apf}) \end{aligned} \tag{27}$$

式中,  $K_{p4}$ 、 $K_{i4}$  分别为电压外环比例、谐振控制器增益;  $V_{out2}$  为并联变流器 PWM 调制输出参考电压。

串并联侧解耦控制信号  $V_{out1}$ 、 $V_{out2}$  采用正弦波脉宽调制策略 (SPWM) 进行串并联协同补偿,相较于传统滞环调制,该调制策略开关频率固定,减小了脉冲电流和开关噪声。

4 仿真结果分析

为了验证单相半桥无变压器 UPQC 拓扑建模分析和串并联补偿控制策略的有效性,基于 Matlab/Simulink 搭建 UPQC 系统并进行仿真验证。其中交流电网额定电压频率为 220V/50Hz,负载为单相不控整流桥和电感电阻。仿真参数见表 1。

表1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters	
系统参数	数值
电网电压/频率	220V/50Hz
馈线阻抗	$R_g = 0.1\Omega, L_g = 0.1mH$
直流母线电压/V	720
直流母线电容/ $\mu F$	6300
串联侧电感/mH	0.25
串联侧电容/ $\mu F$	80
并联侧电感/mH	0.50
负载容量/(kV·A)	10
开关频率/kHz	10
控制参数	数值
串联侧	$K_{p1} = 0.5, K_{i1} = 20 (h = 1, 3, 5, 7)$ $K_{p2} = 5$
并联侧	$K_{p3} = 0.3, K_{i3} = 25 (h = 3, 5, 7)$ $K_{p4} = 0.4, K_{i4} = 20 (h = 1, 3, 5, 7)$
直流母线	$K_p = 0.5, K_i = 1.2, K_r = 20 (h = 1)$

仿真分为两步,首先 UPQC 并联侧接入,补偿负载电流谐波;然后电网电压发生跌落,UPQC 串并联同时投入,迅速恢复负载电压,并补偿负载谐波电流。

4.1 稳态补偿

在此阶段,即  $t = 0 \sim 0.5s$ ,电网供电正常。由于负载为单相不控整流桥,所以向电网注入了大量谐波电流。UPQC 系统在  $t = 0.2s$  时投入。仿真波形如图 9 所示,分别为电网电流  $i_g$ 、UPQC 补偿电流  $i_{apf}$  和负载电流  $i_l$  波形图。由图 9 可知,  $t = 0.2s$  后,UPQC 开始工作,补偿负载谐波电流。UPQC 接入冲击小,补偿效果好,电网电流波形基本为正弦波。

进一步分析谐波电流补偿效果。图 10 为 UPQC 补偿前后  $THDi$  及各次谐波含量分析图,其中  $Mag$  表示相对基波的谐波幅值。由图 10 可知,补偿前后负载电流  $THDi$  由 51.69% 降为 4.31%,各低次谐波抑制效果较好。

4.2 动态补偿

当  $t = 0.5s$  时,电网电压开始跌落,跌落幅度为 50%。图 11 为 UPQC 补偿电压暂降波形图,分别为

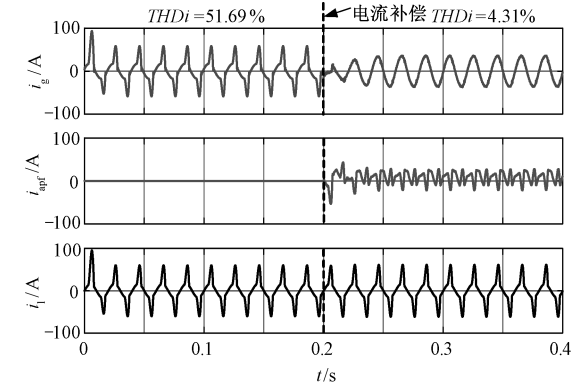


图 9 UPQC 谐波电流补偿波形图

Fig. 9 Current waveforms using proposed method in steady-state

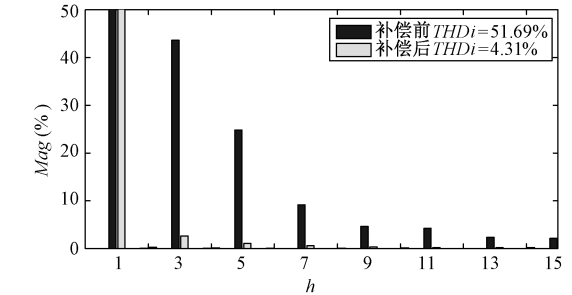


图 10 UPQC 补偿前后谐波电流分析

Fig. 10 Current harmonics analysis using proposed method

电网电压  $v_g$ 、UPQC 补偿电压  $v_{dvr}$  和负载电压  $v_l$  波形图。由图 11 可知,  $t=0.5\text{s}$ , UPQC 串联侧接入, 负载电压  $v_l$  在跌落 1/4 个周期内恢复正常。UPQC 补偿电压  $v_{dvr}$  与电网跌落电压  $v_g$  同相位, 负载电压  $v_l$  在电压跌落前后基本保持稳定, 稳定后其  $THDv=2.96\%$ 。

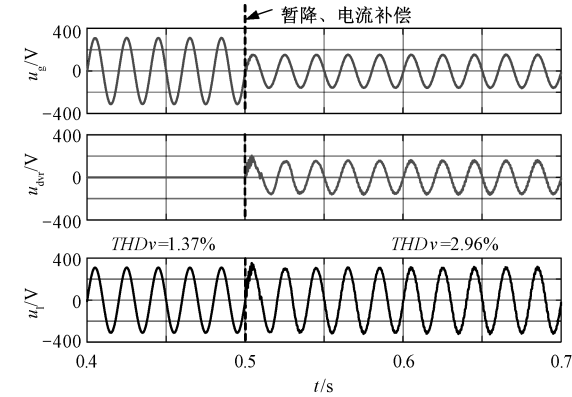


图 11 UPQC 电压暂降补偿波形图

Fig. 11 Voltage waveforms using proposed method in dynamic sag

图 12 为 UPQC 电压暂降前后谐波电流补偿波形图, 分别为电网电流  $i_g$ 、UPQC 补偿电流  $i_{apf}$  和负载电流  $i_l$  波形图。由图 12 可知, UPQC 在电压跌落后仍可继续补偿负载谐波电流, 并抽取有功电流, 维持直流母线电压平衡, 同时经串联侧恢复负载电压, 补偿负载有功功率。电网电流  $i_g$  波形在跌落前后基本保持正弦。

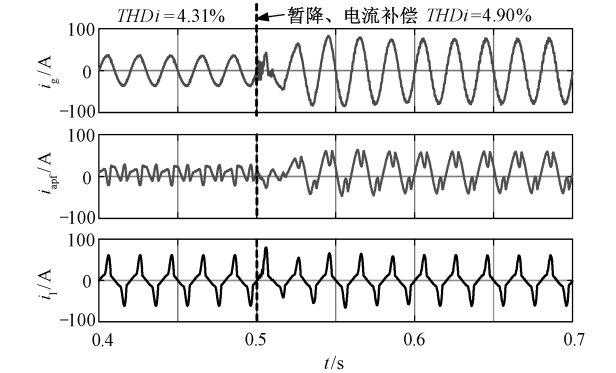


图 12 UPQC 电压暂降前后谐波电流补偿波形图

Fig. 12 Current waveforms using proposed method in dynamic sag

图 13 为 UPQC 直流母线波形图, 分别为直流母线电压  $v_{dc}$  和上、下直流母线电压  $v_{dc,u}$ 、 $v_{dc,d}$  波形图。由图 13 可知, 直流母线电压  $v_{dc}$  在 UPQC 补偿谐波电流、电压暂降过程中均基本保持稳定。上下直流母线电压在 UPQC 补偿电压暂降后出现工频波动, 波动幅度小于 10%。

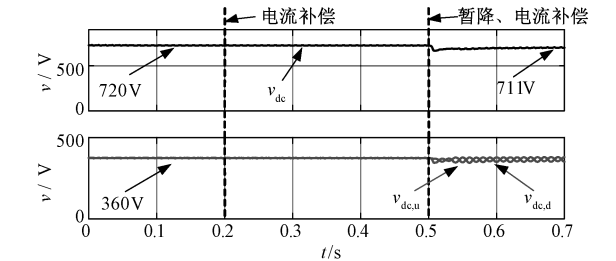


图 13 UPQC 直流母线波形图

Fig. 13 DC-bus voltage waveforms using proposed method

5 仿真实验验证

利用 RT-Lab 半实物仿真平台对所提单相半桥 UPQC 拓扑及控制策略进行实时仿真实验验证。采用图 1 的拓扑结构, 系统仿真参数与表 1 相同。系统设计容量  $10\text{kV}\cdot\text{A}$ , 非线性负载采用单相不控整流桥和电阻电感, 直流母线电容按照计算值选择。

图 14 为采用无变压器半桥结构 UPQC 对负载谐波电流的补偿结果,其中分别为网侧电压电流和负载侧电流波形。负载电流有较大畸变,经过UPQC 补偿后,网侧电流基本为正弦,谐波电流稳态补偿效果较好。

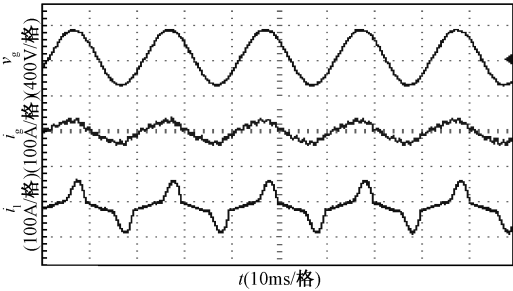


图 14 UPQC 谐波电流补偿实验波形图  
Fig. 14 Experimental waveforms using proposed method in steady-state

图 15 为电网电压暂降时 UPQC 补偿负载电压的实验波形图。由图 15 可知,UPQC 系统能够迅速检测电压跌落,在 2 个周波内迅速恢复负载电压。补偿后负载电压波形质量较好,THD<sub>v</sub> = 3.23%,满足用户电能质量要求。该无变压器半桥式拓扑串联侧补偿电容投切迅速且无冲击,动态补偿效果良好。

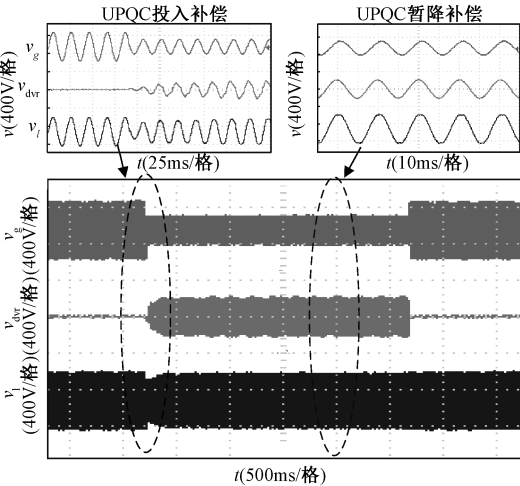


图 15 UPQC 电压暂降补偿实验波形图  
Fig. 15 Experimental voltage waveforms using proposed method in dynamic sag

6 结 论

本文针对单相半桥结构无隔离变压器 UPQC 拓扑,提出了补偿电压暂降、电流谐波的改进控制方法;分析了该拓扑系统功率流动与直流母线工频脉

动产生机理;建立了影响该 UPQC 拓扑补偿性能的关系模型并据此优化了直流母线电容选型。仿真和实验结果均证明所提出的设计和控制方法能够有效降低直流母线电压波动,提高串并联协同补偿效果。

参考文献 (References):

[ 1 ] 许晓笛, 李子欣, 楚遵方, 等 (Xu Xiaodi, Li Zixin, Chu Zunfang, et al. ). 三相四线三电平 APF 并联运行有源阻尼方法 (Active damping method of three-phase four-wire three-level multi-APF system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (7): 12-19.

[ 2 ] Khadkikar V. Enhancing electric power quality using UPQC: A comprehensive overview [J]. IEEE transactions on Power Electronics, 2012, 27 (5): 2284-2297.

[ 3 ] 巫付专, 万健如, 沈虹 (Wu Fuzhuan, Wan Jianru, Shen Hong). 基于 UPQC 主电路容量最小的控制策略的研究 (Research of control strategy based on the UPQC minimum capacity method) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2010, 38 (11): 1-5.

[ 4 ] Nasiri A, Emadi A. Different topologies for single-phase unified power quality conditioners [A]. 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference [C]. 2003. 2: 976-981.

[ 5 ] Prieto J, Salmeron P, Herrera R S. A unified power quality conditioner for wide load range: Practical design and experimental results [A]. 2005 IEEE Russia Power Tech [C]. 2005. 1-7.

[ 6 ] Lu Y, Xiao G, Wang X, et al. Control strategy for single-phase transformerless three-leg unified power quality conditioner based on space vector modulation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31 (4): 2840-2849.

[ 7 ] Su Mei, Tan Chong, Zhang Wei, et al. Research on non-isolated transformer single-phase UPQC system [A]. 2015 Chinese Automation Congress (CAC) [C]. Wuhan, China, 2015. 2152-2157.

[ 8 ] Khoo M S, Machmoum M. A novel single-phase reduced parts on-line UPS with power quality conditioning capability [A]. 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference [C]. Orlando, FL, USA, 2007. 1170-1175.

[ 9 ] 李练兵, 郭向尚, 王增喜 (Li Lianbing, Guo Xiangshang, Wang Zengxi). 基于多重二阶广义积分的电网谐波分量检测 (Harmonic detection of power grid based on multiple second order generalized integrators) [J].

- 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (9): 33-37.
- [10] 王浩, 刘进军, 梅桂华 (Wang Hao, Liu Jinjun, Mei Guihua). 一种动态调节电压暂降补偿深度的统一电能质量控制器 (UPQC for dynamically adjusting voltage sag compensation depth) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2014, 33 (8): 11-14, 27.
- [11] He J, Li Y W, Blaabjerg F, et al. Active harmonic filtering using current-controlled, grid-connected DG units with closed-loop power control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29 (2): 642-653.
- [12] 李兰芳, 曾志武, 王映品, 等 (Li Lanfang, Zeng Zhiwu, Wang Yingpin, et al.). 基于时域的谐波和无功检测技术的对比研究 (Comparative study of harmonic and reactive power detections based on time domain) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (11): 79-88.
- [13] He J, Li Y W, Bosnjak D, et al. Investigation and active damping of multiple resonances in a parallel-inverter-based microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28 (1): 234-246.

## Control strategy for single-phase transformer-less UPQC system

YUAN Shuai, CHEN A-lian, PAN Yi-wei, ZHANG Cheng-hui

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** This paper analyzes the power flow and DC-link ripple of the single-phase dual-half-bridge UPQC system without transformer. In this paper, an enhanced control method is proposed to restore voltage sag in series and drain sinusoidal current to the grid-side while maintain the DC-link voltage in parallel. The capacitor is selected to satisfy the requirement of the compensation capability and the DC voltage fluctuation. The proposed UPQC configuration is more cost-effective than other UPQC systems with transformer. Experimental results are provided to validate the correctness of the proposed system.

**Key words:** UPQC; voltage sag; harmonic compensation; transformer-less