

# 综合电能质量调节器串联侧复合前馈控制研究

叶雅阁<sup>1</sup>, 郭春平<sup>1</sup>, 杨忠浩<sup>2</sup>, 虞剑文<sup>2</sup>, 叶政安<sup>3</sup>

(1.南京信息工程大学 自动化学院, 江苏 南京 210000;

2.南京智睿能源互联网研究院有限公司, 江苏 南京 210000;

3.国网浙江省电力有限公司丽水供电公司, 浙江 丽水 323000)

**摘要:**为提升综合电能质量调节器(unified power quality conditioner, UPQC)在不同工况下串联侧抗扰动性能,提出一种在abc坐标系下基于电压、电流前馈的复合控制,对传统电网电压前馈进行改进并引入负载电流前馈,以进一步提升控制器动、静态性能。首先,根据UPQC拓扑结构建立串联侧单相数学模型以分析扰动对系统影响;其次,依据数学模型提出改进的复合前馈控制策略;最后,通过实物试验,分别从不同工况验证了该控制策略在UPQC系统中的有效性及优越性。

**关键词:**综合电能质量调节器;电压前馈控制;电流前馈控制;抗扰动性能

中图分类号:TM761 文献标识码:A 文章编号:1003-7241(2025)09-0001-06

## Study of Series-side Feed-forward Control of Unified Power Quality Conditioner

YE Yage<sup>1</sup>, GUO Chunping<sup>1</sup>, YANG Zhonghao<sup>2</sup>, YU Jianwen<sup>2</sup>, YE Zheng'an<sup>3</sup>

(1. School of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210000, China;

2. Nanjing Zhirui Energy Internet Institute Co., Ltd., Nanjing 210000, China;

3. Lishui Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Lishui 323000, China)

**Abstract:** In order to improve the disturbance-resistant performance of the series side of the unified power quality conditioner (UPQC) under different operating conditions, a composite control based on voltage and current feed-forward in the abc coordinate system is proposed, which improves the traditional grid voltage feed-forward and introduces the load current feed-forward, so as to further improve the dynamic and static performance of the controller. Firstly, a single-phase mathematical model of the series side is established based on the UPQC topology to analyze the impact of disturbances on the system. Secondly, an improved composite feedforward control strategy is proposed based on the mathematical model. Finally, the effectiveness and superiority of the control strategy in the UPQC system are verified by physical tests, respectively from different working conditions.

**Keywords:** unified power quality conditioner; current feed-forward control; voltage feed-forward control; disturbance resistance performance

## 0 引言

随着新能源行业及工业化进程不断发展,大量的非线性负载被接入电力系统中<sup>[1-2]</sup>,此类负载在运行过程中易产生大量的高次谐波,使得电网电压与电流波形畸变严重,同时部分具有波动性负载还会导致电压波动,三相不平衡等问题<sup>[3]</sup>。而随着复杂、精密的用电设备不断增加,对电能质量的要求也愈来愈高,因而各种电力电子补偿设备被相继提出<sup>[4-6]</sup>,综合电能质量调节器(unified power quality conditioner, UPQC)则集合了负载电压调节、无功功率补偿、网侧谐波治理等诸多功能,成为目前国内外学者研究的热点。

UPQC根据其拓扑结构,可分为间接控制<sup>[7]</sup>和直接控制策略<sup>[8]</sup>,即通过串并联逆变器控制不同目标而实现综合电能质量调节,本文针对UPQC串联侧提出了一种在abc

坐标系下基于电压、电流前馈的复合控制,对传统电网电压前馈进行改进并引入负载电流前馈,以进一步提升控制器动、静态性能。

## 1 UPQC 拓扑结构与数学模型分析

### 1.1 UPQC 拓扑结构

UPQC的拓扑结构如图1所示, $u_{ga}$ 、 $u_{gb}$ 、 $u_{gc}$ 为三相逆变桥输出电压; $u_{Ta}$ 、 $u_{Tb}$ 、 $u_{Tc}$ 为变压器折算电压; $i_{1a}$ 、 $i_{1b}$ 、 $i_{1c}$ 为串联变压器二次侧电流; $i_{L1a}$ 、 $i_{L1b}$ 、 $i_{L1c}$ 为串联侧电感电流; $i_{ga}$ 、 $i_{gb}$ 、 $i_{gc}$ 为电网电流; $u_{dc}$ 为直流母线电压; $i_{L2a}$ 、 $i_{L2b}$ 、 $i_{L2c}$ 为并联侧电感电流; $i_{2a}$ 、 $i_{2b}$ 、 $i_{2c}$ 为并联侧补偿电流; $u_{10a}$ 、 $u_{10b}$ 、 $u_{10c}$ 为负载电压; $C_{1a}$ 、 $C_{1b}$ 、 $C_{1c}$ 为串联侧滤波电容; $C_{2a}$ 、 $C_{2b}$ 、 $C_{2c}$ 为并联侧滤波电容; $L_{1a}$ 、 $L_{1b}$ 、 $L_{1c}$ 为串联侧滤波电感; $L_{2a}$ 、 $L_{2b}$ 、 $L_{2c}$ 为并联侧滤波电感; $C_{dc}$ 为直流侧电容。

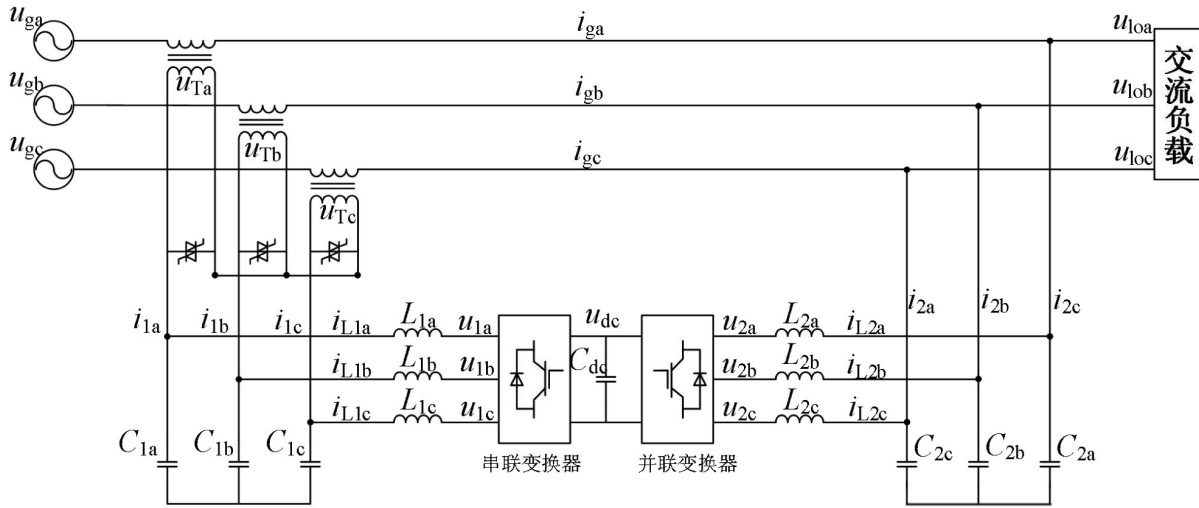


图1 UPQC拓扑结构

1.2 UPQC 串联侧数学模型分析

在三相坐标系中UPQC串联侧数学模型可简化为单相进行分析,串联侧单相等效电路如图2所示,其中 $R_t$ 、 $L_t$ 为变压器短路电阻与漏感。

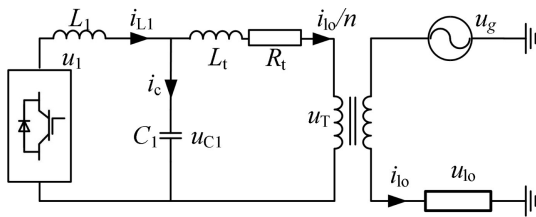


图2 UPQC 串联侧单相等效电路

设变压器一次侧二次侧变比为 $n$ ,则由图根据基尔霍

夫定律可得出,UPQC串联侧的数学模型为

$$\begin{cases} u_1 = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} + u_c \\ i_{L1} = C_1 \frac{du_{C1}}{dt} + \frac{i_{lo}}{n} \\ u_T = u_{c1} - \frac{1}{n}(i_{lo}R_t + L_t \frac{di_{lo}}{dt}) \\ u_{lo} = \frac{u_T}{n} + u_g \end{cases} \quad (1)$$

根据式(1)分析,基于UPQC间接控制方法在abc三相坐标系下进行控制时控制对象为交流量,故多采用比例谐振控制以获得更佳控制效果,可得出UPQC串联侧控制框图如图3所示。

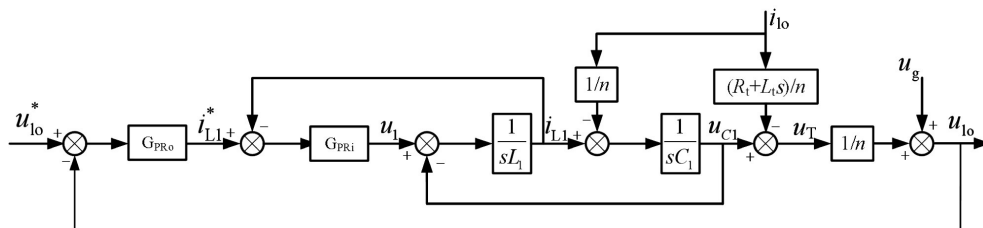


图3 UPQC 串联侧控制框图

图3中, $u_{lo}^*$ 为负载电压参考值; $i_{L1}^*$ 为串联侧电感电流参考值, $G_{PRo}$ 为电压外环控制器传递函数、 $G_{PRi}$ 为电流内环控制器传递函数,即由负载电压外环、串联侧电感电流内环组成的双闭环控制系统。为进一步分析该系统,将框图简化后如图4所示。

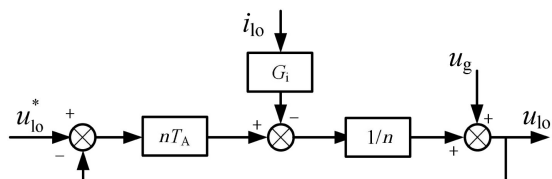


图4 简化后UPQC 串联侧控制框图

图4中, $T_A$ 为系统环路增益, $G_i$ 为负载电流 $i_l$ 扰动函数,如式(2)、(3)所示。

$$T_A = \frac{G_{PRo} + G_{PRi}}{n(C_1L_1s^2 + C_1G_{PRi}s + 1)} \quad (2)$$

$$G_i = \frac{a_0s^3 + a_1s^2 + a_2s + a_3}{n(C_1L_1s^2 + C_1G_{PRi}s + 1)} \quad (3)$$

式中, $a_0=L_1C_1L_1$ ;  $a_1=R_1C_1L_1+L_1G_{PRi}$ ;  $a_2=L_1+L_1+R_1G_{PRi}$ ;  $a_3=G_{PRi}+R_{l0}$ 。通过框图可推导出系统闭环传递函数为

$$G_u = \frac{T_A}{1+T_A}u_1 - \frac{G_i}{n(1+T_A)}i_l + \frac{1}{1+T_A}u_g \quad (4)$$

由式(4)分析可知,系统除被控对象负载电压  $u_l$  外,还存在电网电压  $u_g$ 、负载电流  $i_l$  扰动,若电网电压不稳定或存在谐波,易导致负载电压产生波动或含有谐波从而影响负载侧敏感设备运行。另外,负载电流  $i_l$  作为逆变器外部扰动处于电流内环之外,因此系统对非线性负载扰动无法起到较好的抑制效果,从而导致稳定性降低。为解决上述问题,本文提出一种基于双闭环的复合前馈控制,以降低扰动对系统的影响。

## 2 UPQC 串联侧复合前馈控制

### 2.1 UPQC 串联侧电压前馈控制

由上述分析可知,电网电压  $u_g$  易对负载侧电压产生直接扰动,为抑制该扰动影响、提升系统抗干扰能力,目前在 LCL 型逆变器补偿负载电压时常使用电网电压前馈控制策略<sup>[9]</sup>。本文基于电网电压前馈提出一种改进方法,并结合 UPQC 串联侧进行分析应用。

由文献[10-12]可知,较为常见的电网电压前馈多在坐标系  $\alpha\beta$ 、 $dq$  轴实现,且多直接使用负载参考电压  $u_l^*$  减去电网电压  $u_g$  进行前馈补偿,如式(5)所示。

$$u_f = u_l^* - u_g \quad (5)$$

式中,  $u_f$  为前馈补偿信号。在补偿时,通常通过将补偿信

号与图3中电流内环控制器  $G_{PRi}$  输出叠加,进入空间矢量脉宽调制以实现补偿效果。

而该方法在电网存在谐波时,无法很好地抑制谐波对系统的扰动,故根据上文所建立的 UPQC 串联侧控制框图,提出一种改进方法。

由系统闭环传递函数式(4)可得,系统以电网电压作为输入时其传递函数为

$$G_g = \frac{1}{1+T_A} u_g \quad (6)$$

因此,在前向通道补偿  $-G_g$  即在电网电压扰动  $u_g$  后补偿反向扰动以抵消其对系统的影响,控制框图如图5所示。

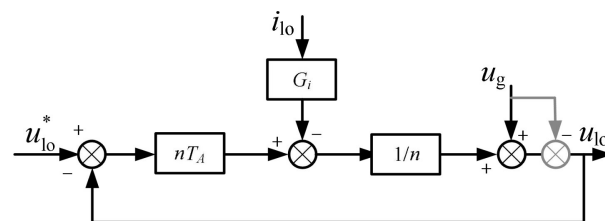


图5 引入电网电压补偿

为便于控制,将补偿信号前移至  $G_{PRi}$  电流内环控制器输出之后,与传统电网电压前馈信号  $u_f$ 、电流内环控制器  $G_{PRi}$  输出叠加进入空间矢量脉宽调制,控制框图如图6所示。

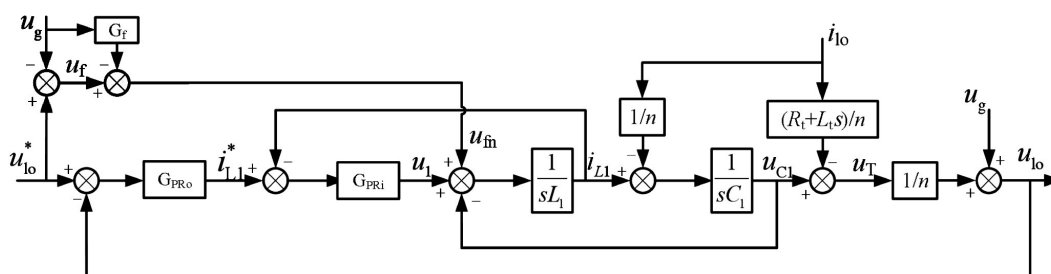


图6 电压补偿信号前移控制框图

其中,  $G_f$  为前向通道补偿前移后的前馈信号,如式(7)所示。

$$G_f = n(C_1 L_1 s^2 + C_1 G_{PRi} s + 1) \quad (7)$$

由于电压前馈信号完全进入系统后在一定工程应用时无法保证最佳补偿效果,故引入电压前馈增益  $k_{uf}$  以调节前馈信号,则叠加过后的前馈信号函数  $u_m$  为

$$u_m = (u_f - u_g G_f) \cdot k_{uf} \quad (8)$$

### 2.2 UPQC 串联侧电流前馈控制

根据式(4)可知,系统还存在负载电压  $i_l$  扰动,而由图3分析可得,在反馈闭环控制系统中,若系统含有较大时间常数环节或系统响应速度要求较高时,其调节速度无法跟随干扰变化导致系统常处于误差状态,而通过提高系统开环增益或型别减小系统误差则会影响系统稳定性且降低动态性能<sup>[13]</sup>。

为解决上述问题,可在电压前馈补偿的基础上再引入电流前馈控制以抑制非线性负载扰动对系统造成的影响,由系统闭环传递函数可得,在系统以负载电流  $i_l$  为输入时,其传递函数为

$$G_{ir} = \frac{G_i}{n(1+T_A)} i_l \quad (9)$$

同理,在前向通道补偿  $-G_{ir}$  以抵消负载电流对系统扰动,且由于负载电流作为内环参考量,需将补偿信号前移至电压外环控制器输出之后,与外环输出叠加作为电流内环控制器参考量,控制框图如图7所示。

图7中,  $G_n$  为  $G_{ir}$  前移至外环控制器之后的函数,如式(10)所示。

$$G_n = \frac{a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3}{n G_{PRi}} \quad (10)$$

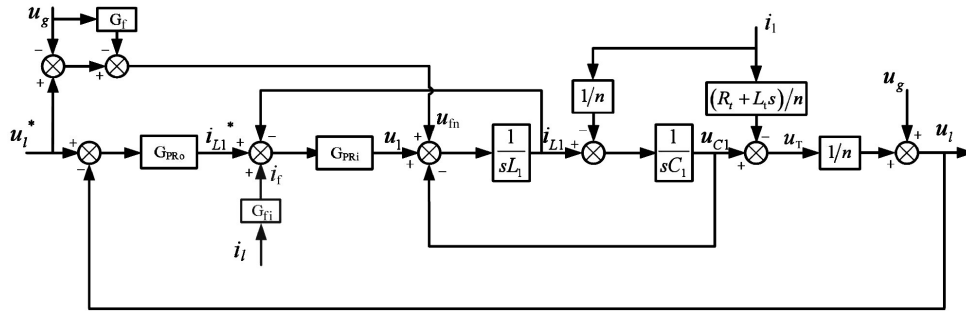


图7 电流前馈控制框图

由于控制器  $G_{PRi}$  在谐振频率除增益接近无穷大,故可将式(10)进行简化,如式(11)所示。

$$G_{fn} = \frac{L_t s^2 + R_t s + 1}{n} \quad (11)$$

同样引入电流前馈增益  $k_{if}$  以调节前馈信号,则电流前馈函数  $i_f$  为

$$i_f = k_{if} \cdot G_{fn} \quad (12)$$

### 3 试验验证

为验证本文提出的控制策略,对UPQC串联侧控制策略采用实物试验进行验证,由于研究主要针对串联侧,因此只给出串联侧试验元件参数,实物试验元件如表1所示。

表1 UPQC 串联侧元件参数

元件参数	数值
滤波电感 $L_{1a}, L_{1b}, L_{1c}$	0.2 mH
滤波电容 $C_{1a}, C_{1b}, C_{1c}$	165 $\mu$ F
直流侧电容 $C_{dc}$	20 mF
直流母线电压 $u_{dc}$ 设定值	750 V
电压前馈增益 $k_{uf}$	0.7
电流前馈增益 $k_{if}$	1
变压器变比	1:3.2
电网电压(相)	220 V

为验证上述控制策略在真机实际控制时的有效性,通过智睿UPQC样机、横河录波仪、福禄克电能质量分析仪、100 kW可调RLC负载、模拟可调电源搭建试验平台如图8所示。

#### 3.1 电压前馈试验验证

将本文使用的控制策略与直接使用电网电压前馈的控制策略分别从负载电压及PR控制器输出的动静态性能、负载电压谐波进行对比分析,结果如图9~11所示。

实物试验中电网电压三相骤降5%采用模拟可调电源实现。由图9可知,使用本文电网电压前馈的负载电压在加入干扰后,波动最大误差在10 V左右,恢复时间约为10 ms,而传统电网电压前馈控制波动最大误差在20 V左右,恢复时间约为20 ms。



图8 UPQC 实物试验平台

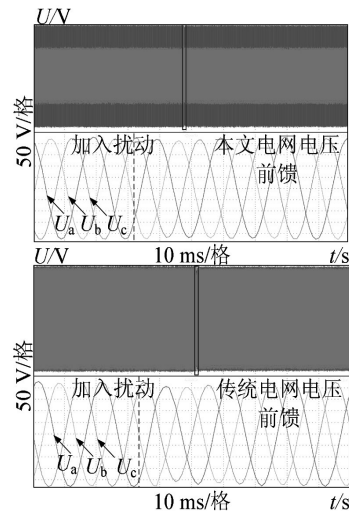


图9 电压前馈控制负载电压波形对比

由图10可得,使用本文电网电压前馈的PR电压外环控制波形在加入扰动后跟踪误差较小且在一个周期内完成稳态,传统电网电压前馈则需两个周期时间完成稳态,因此本文使用的电网电压前馈具有更好的鲁棒性,跟踪性能、响应速度皆优于直接使用电网电压前馈。

图11中,为模拟电网存在谐波工况,使用模拟可调电源往电网中注入3、5、7、11次谐波,当电网电压THD=5.3%时,使用本文电网电压前馈的负载电压THD=3.2%,而传统电网电压前馈的负载电压THD=4.0%。

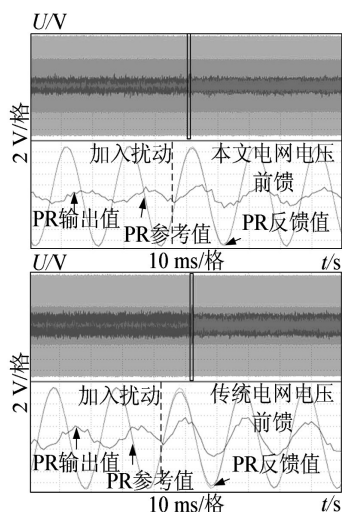


图10 电压前馈控制PR控制波形对比

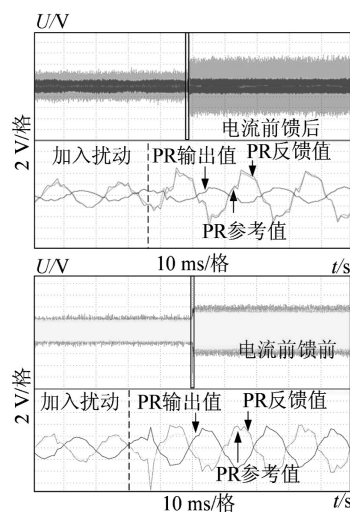


图12 电流前馈PR控制波形对比

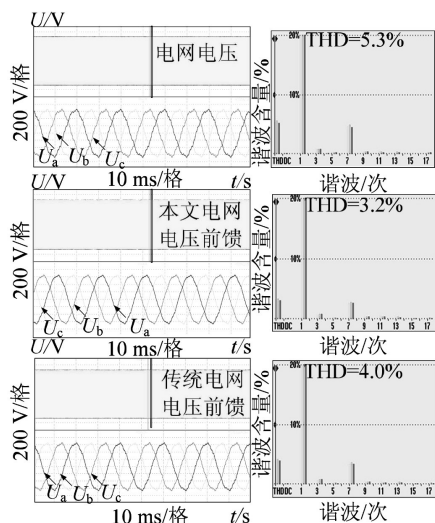


图11 电压前馈控制电压谐波对比

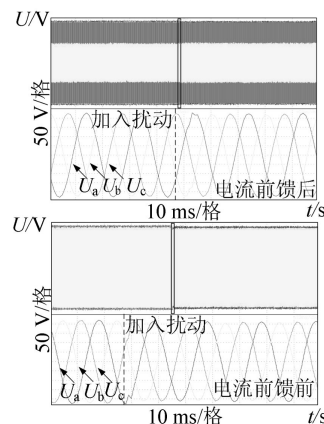


图13 电流前馈PR负载电压波形对比

根据上述分析,验证了采用本文电网电压前馈控制策略可提升动态响应与稳态控制精度,降低电网电压谐波对负载电压的影响,且效果优于直接使用电网电压前馈的控制策略。

### 3.2 电流前馈试验验证

扰动通过100 kW可调RLC负载加载RC进行模拟非线性负载扰动工况,根据电流内环PR控制波形和负载电压波形进行对比分析,结果如图12、13所示。

由图12对比分析可知,在引入电流反馈后,电流内环PR控制的抗扰动性能明显优于未引入电流前馈控制,具有更小的跟踪误差、响应速度,几乎不存在静态误差。

图13中,负载电压在引入电流前馈后抗扰动性能增强、响应速度提升,加入扰动后畸变较小,而未引入电流前馈的负载电压在加入扰动后存在20 V明显静态误差。

综上,实物试验证明了本文所提出的控制策略具有一定的优越性。

## 4 结束语

本文提出一种在综合电能质量调节器串联侧的电压、电流复合前馈控制。首先,对UPQC串联侧进行数学建模,构建单相控制框图,理论上分析系统存在的干扰及其对系统的影响。其次,构建在abc坐标系下电压、电流前馈控制简化框图,系统说明所提出的电压、电流前馈控制方法,为提升UPQC串联侧负载电压控制动、静态性能提供了新思路。最后,真实样机试验,模拟在电网电压骤降、非线性负载扰动等干扰工况,验证了该控制策略对UPQC串联侧抗电网谐波干扰、电网电压抖动、非线性负载波动等扰动具有明显的效果,证明了其对系统的动、静态性能有一定的提升。

### 参考文献:

[1] 欧阳森, 辛曦, 王凤学, 等. 考虑保供需求的光储微电网优化配置及电能质量评估[J]. 南方电网技术, 2024, 18(4): 106-119, 151.  
[2] ZIMANN F J, BATSCHAUER A L, MEZARоба M, et al.

(下转第11页)