

基于新型双闭环控制的统一电能质量调节器

习超¹, 余梦天¹, 聂健¹, 冯琦¹, 赵军波², 马辉²

(1. 国网湖北省电力有限公司洪湖市供电公司, 湖北 荆州 433200;

2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 针对统一电能质量调节器中传统 PI 控制器存在跟踪能力较差和控制精度较低的问题, 本文提出一种并联侧有源电力滤波器 (APF) 为双闭环非线性复合控制方法的统一电能质量调节器 (UPQC)。新型 UPQC 并联侧 APF 采用了一种新型双闭环非线性复合控制方法, 电压外环利用滑模 PI 复合非线性控制算法, 电流内环则使用重复 PI 非线性控制算法。通过实验装置对 UPQC 在静态干扰 (如电网电压谐波/不平衡和负载电流谐波) 及动态干扰 (如电压骤降/骤升和负载变化) 下的性能测试, 结果表明所提 UPQC 能够在负载突变和参考电压跳变时提高直流侧电压的响应速度和稳态精度, 验证了理论的正确性。

关键词: 统一电能质量调节器; 负载突变; 参考电压跳变; 双闭环非线性; 滑模控制

Unified Power Quality Conditioner Based on Novel Dual Closed-loop Control

XI Chao¹, YU Mengtian¹, NIE Jian¹, FENG Qi¹, ZHAO Junbo², MA Hui²

(1. State Grid Hubei Electric Power Company Limited Honghu Power Supply Company, Hubei Jingzhou

433200, China; 2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University,

Hubei Yichang 443002, China)

Abstract: Aiming at such issues as weak tracking ability and low control accuracy of traditional PI controllers in the unified power quality conditioner, a unified power quality conditioner (UPQC) with a parallel side active power filter (APF) as a double closed-loop nonlinear composite control method is proposed in this paper. A new dual-loop nonlinear composite control method of the APF at the parallel side of UPQC is adopted, a sliding mode PI composite nonlinear control algorithm is used for the voltage outer loop and a repetitive PI nonlinear control algorithm is used for the the current inner loop. Performance tests of the UPQC under static disturbances (such as grid voltage harmonics/imbalance and load current harmonics) and dynamic disturbances (such as voltage sags/surges and load variations) are performed through the experimental device. The results show that the proposed UPQC can, in case of load mutation and reference voltage jump, improve the response speed and steady-state accuracy of the DC-side voltage, thereby validating the correctness of the theory.

Keywords: unified power quality conditioner; load disturbances; reference voltage changes; double closed-loop nonlinearity; sliding mode control

0 引言

随着电力事业在快速发展及电力电子设备的广泛应用, 随之而来的便是输配电环节及用电终端的非线性负载显著增加, 电网电流和电压波形的畸变使得电网的安全与稳定运行受到影响。目前, 电

能质量问题的解决方案主要包括动态电压恢复器 (dynamic voltage regulator, DVR)、有源电力滤波器 (active power filter, APF) 和统一电能质量调节器 (unified power quality conditioner, UPQC) 等^[1-5]。UPQC 有能力将有源滤波器与动态电压恢复器的各项功能融合在一起, 一方面对供电电压的电能质量进行

调节,另一方面还能对负载电流和无功功率等电能质量问题进行调节^[6-9]。

UPQC 主流分为单相、三相三线制和三相四线制,文献[10-14]概述了单相(双线)和三相(包括三线和四线)结构的特点,分析对比这些文献之后选择了三相四线制来构建 UPQC 的并联侧 APF。关于 UPQC 与 APF 的控制方法研究,主要集中在无差拍控制^[15]和比例谐振控制^[16-17]等方面。当发生负载突变时,相较于传统的 PI 控制方法,选择滑模 PI 复合控制算法能够在较短时间内做出反应,并且可以保证较高的稳态精度^[18]。与传统的 UPQC 控制方法相比,新型 iUPQC 的并联侧 APF 充当交流电压源,串联 APF 侧充当交流电流源,iUPQC 的优势在于具有电压暂降/骤升补偿能力,响应速度快,可与动态电压恢复器相媲美^[19-20]。

本文将双闭环非线性复合控制方法应用在了 UPQC 的并联侧,串联侧 APF 被控制为电流源,将并联侧 APF 控制为电压源。本文主要描述了所提出 UPQC 的拓扑结构与工作原理,并分别介绍了串联侧与并联侧 APF 的数学模型,然后详细阐述串联侧与并联侧的控制方法,最后对 UPQC 的静态性能和动态性能进行了实验测试和评估,验证了所提 UPQC 及控制策略的正确性。

1 拓扑描述

1.1 工作原理

本文采用的 UPQC 拓扑结构为左边串联右边并联型,串联侧和并联侧共用直流侧电容连接起来构成完整的电路,如图 1 所示。传统 UPQC 的串联 APF 充当补偿电源电压的受控电压源,而并联 APF 充当补偿负载电流的受控电流源。而本文采用的双重控制方法让串联 APF 充当受控电流源,而并联 APF 充当受控电压源^[21]。并联 APF 的核心功能是将输出电压调整为正弦波,确保其处于平衡状态,并与电网的基波正序电压相匹配。为了达到这个目的,APF 的阻抗需要非常低,确保电网侧电流保持正弦特性^[22]。

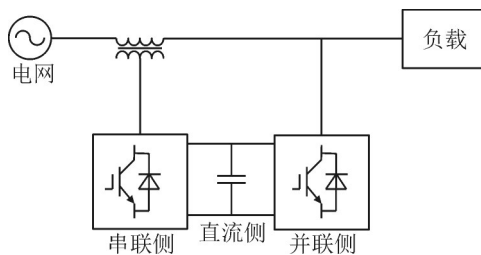


图1 左串右并型UPQC

Fig. 1 UPQC with left in series and right in parallel

1.2 数学模型

UPQC 串联侧拓扑结构见图 2。UPQC 并联侧拓扑结构见图 3。假设串联变压器是理想线性变压器,并且让电路中的开关都处于理想状态,且不考虑开关参数的影响。根据图 2 所示的串联侧拓扑图,在 dq 坐标系下,串联侧 APF 的数学模型为

$$\begin{cases} L_1 di_{sd}/dt = -R_1 i_{sd} + \omega L_1 i_{sq} + K_{PWM} U_{dc} - u_{cd} \\ L_1 di_{sq}/dt = -R_1 i_{sq} - \omega L_1 i_{sd} + K_{PWM} U_{dc} - u_{cq} \end{cases} \quad (1)$$

式中: L_1 为串联侧输出滤波电感; i_{sd} 、 i_{sq} 分别为 dq 轴上的输入电流; R_1 为线路的等效电阻; K_{PWM} 为相对直流侧的等效输出增益; U_{dc} 为直流电容两端的电压 $U_{dc} = U_{dc1} + U_{dc2}$; u_{cd} 、 u_{cq} 分别为串联侧输出电压在 dq 轴的分量。

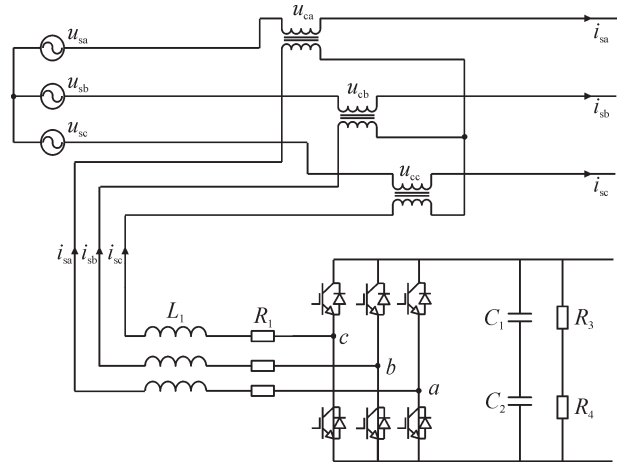


图2 UPQC串联侧拓扑结构

Fig. 2 Topology on the series side of UPQC

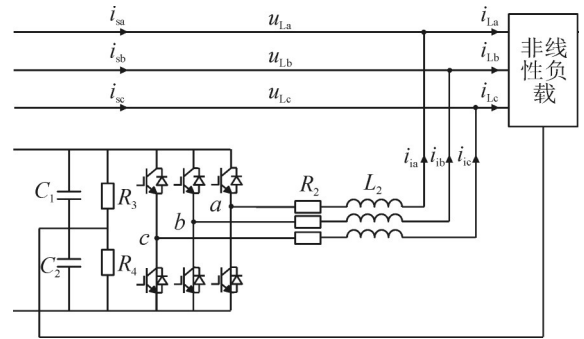


图3 UPQC并联侧拓扑结构

Fig. 3 Topology on the parallel side of UPQC

根据图 3 所示的并联侧拓扑图,在 dq0 坐标系下,并联侧 APF 的数学模型为

$$\begin{cases} L_2 di_{id}/dt = -R_2 i_{id} + \omega L_2 i_{iq} - S_d(U_{dc1} + U_{dc2}) - u_{Ld} \\ L_2 di_{iq}/dt = -R_2 i_{iq} - \omega L_2 i_{id} - S_q(U_{dc1} + U_{dc2}) - u_{Lq} \\ L_2 di_{i0}/dt = -R_2 i_{i0} - S_0(U_{dc1} + U_{dc2}) - u_{L0} \\ C_1 dU_{dc1}/dt = S_d i_{id} + S_q i_{iq} + S_0 i_{i0} - U_{dc1}/R_c \\ C_2 dU_{dc2}/dt = S_d i_{id} + S_q i_{iq} + S_0 i_{i0} - U_{dc2}/R_c - \sqrt{3} i_{i0} \end{cases} \quad (2)$$

式中: L_2 为并联侧输出滤波电感; i_{id} 、 i_{iq} 、 i_{i0} 分别为在 dq0 坐标系下并联侧的电感电流; R_2 为线路的等效电阻; S_d 、 S_q 、 S_0 分别为 dq0 坐标系下并联侧桥臂导通开关函数; u_{1d} 、 u_{1q} 、 u_{10} 分别为并联侧输出电压在 dq0 坐标系下的分量; C_1 、 C_2 为直流侧上下电容 $C_1=C_2=C$; R_c 为直流侧上下电阻 $R_3=R_4=R_c$ 。

2 UPQC 串联侧控制

根据式(1),串联侧 dq 轴之间会出现耦合,原因在于电流 PI 调节器的输出会对 i_{sd} 和 i_{sq} 产生影响,同时耦合电感电压 $i_{sq}\omega L_1$ 和 $-i_{sd}\omega L_1$ 也会对其产生作用,需要采用前馈补偿解耦的方法来处理。在这种情况下需要对双输入双输出的系统进行拆分转化,从而得到相互独立的单输入单输出系统^[23]。电流控制器的信号流图见图 4,SRF dq 轴上的非耦合系统模型见图 5,图 5 中的虚线区域表示了在图 4 的框图中实现的去耦效果,UPQC 串联侧的控制框图见图 6。

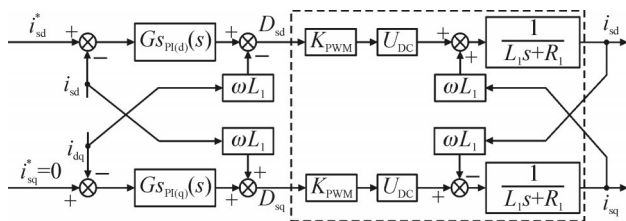


图 4 电流控制器的信号流图

Fig. 4 Signal flow diagram of the current controller

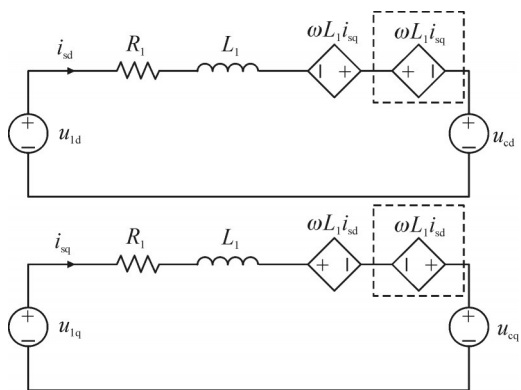


图 5 SRF dq 轴上的非耦合系统模型

Fig. 5 Uncoupled system model on the SRF dq axis

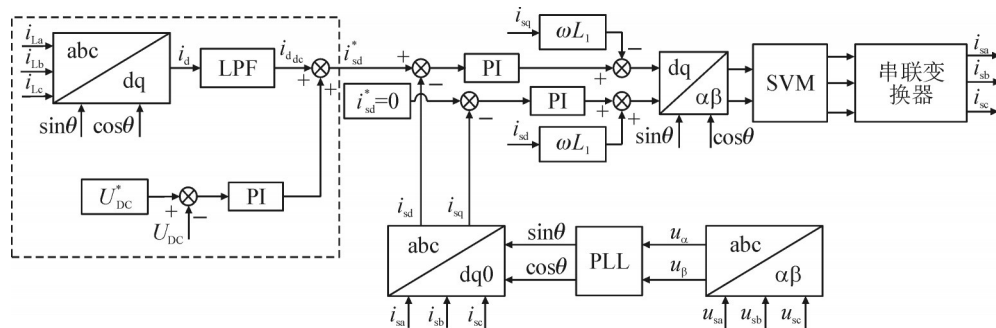


图 6 串联侧的控制框图

Fig. 6 Control block diagram on the series side

由于在同步参考坐标系下使用 PI 控制器可以有效减小系统的稳态误差。针对串联侧的电流控制器可表示为

$$\begin{aligned} u_{1d} &= (K_{dpi} + K_{dii}/s)(i_{sd}^* - i_{sd}) - i_{sq}\omega L_1 \\ u_{1q} &= (K_{qpi} + K_{qii}/s)(i_{sq}^* - i_{sq}) - i_{sd}\omega L_1 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: K_{dpi} 代表控制器的比例系数; K_{dii} 代表控制器的积分系数; u_{1d} 和 u_{1q} 为串联侧在 dq 轴上的电压。

为了达到正弦电流的平衡状态,可以使 q 轴电流指令 i_{sq}^* 直接设置为零。而 d 轴电流指令 i_{sd}^* 的计算公式为

$$i_{sd}^* = i_{dc} + i_{d_{dc}} \quad (4)$$

式中: $i_{d_{dc}}$ 为通过对 i_{lk} 的 d 轴分量 i_d 进行低通滤波处理,成功消除了后续直流量会受到谐波电流和无功电流不良影响; $i_{d_{dc}}$ 为系统损耗的补偿增量。

考虑图 4 中电流控制器信号流图, dq 坐标下的闭环传递函数可以表示为

$$\frac{i_{s(d,q)}(s)}{i_{s(d,q)}^*(s)} = \frac{K_{PWM} U_{dc} (K_{p_{s(d,q)}} s + K_{i_{s(d,q)}})}{L_1 s^2 + (R_1 + K_{PWM} U_{dc} K_{p_{s(d,q)}}) s + K_{PWM} U_{dc} K_{i_{s(d,q)}}} \quad (5)$$

式中: $K_{p_{s(d,q)}}$ 和 $K_{i_{s(d,q)}}$ 分别为比例和积分控制器的增益,而 $i_{s(d,q)}^*$ 表示 dq 坐标系中的连续电流参考值。

为了分析串联侧的稳定性,只需关注式(5)的二阶分母。当二阶分母的系数都是一致的符号时,分析显示,串联变流器的控制系统始终稳定。此外,负载瞬态只会影响串联电流参考的产生,不会影响串联变流器的基本稳定性。由于参考电流始终保持正弦波形,因此即使在负载瞬态发生时,也可以假设串联变流器在有效充当正弦电流源。这种假设简化了分析过程,同时确保了变流器在各种工况下的正常运行。

3 UPQC 并联侧控制

根据式(2),将并联侧系统分成两个子系统,一个为交叉耦合的 dq 轴系统,另一个则是独立于 dq 轴系统的 0 轴系统。并且为了消除 dq 轴间的耦合干扰,采用双解耦双环控制策略,该策略通过引入两个独立的环路来分别调节电压和电流,使得电压控制回路和电流控制回路互不干扰,从而实现了电

压和电流的独立调节。图 7 为电压控制器的信号流程图。图 8 展示了并联侧解耦的系统模型,虚线框表示了解耦电压和解耦电流,二者的大小相同但方向相反,从而抵消了耦合量的影响。经过解耦处理,并联侧系统就被转换成了 3 个相互独立的单输入单输出系统。这种解耦控制策略简化了系统的控制设计,提高了稳定性和性能,使各控制回路能独立设计和调节。

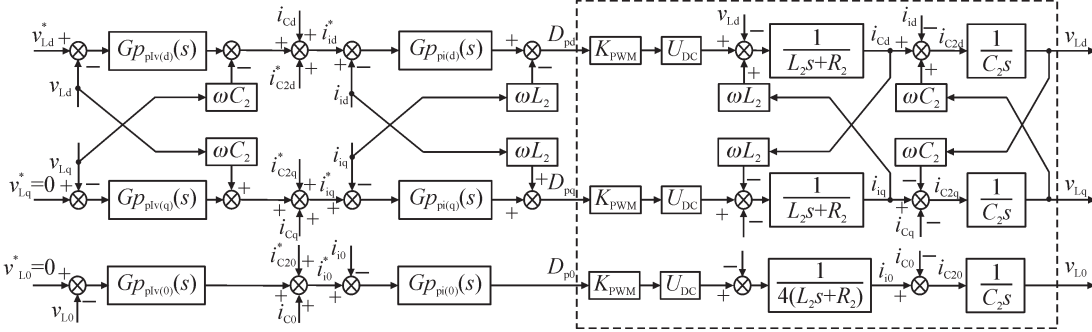


图 7 电压控制器的信号流程图
Fig. 7 Signal flow diagram of voltage controller

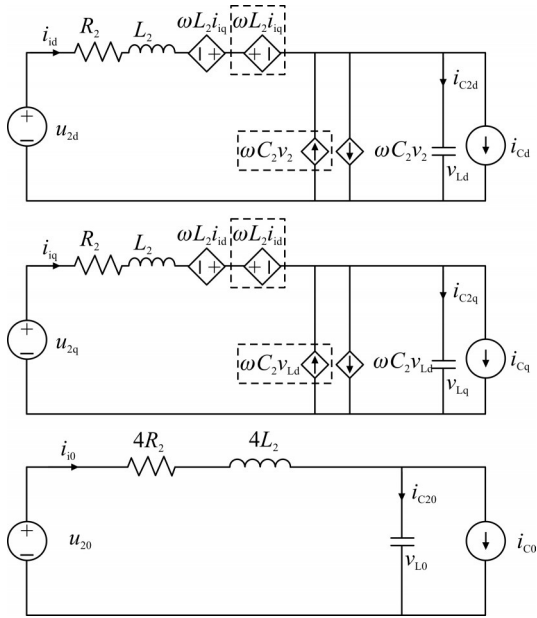


图 8 SRF dq0 轴上的非耦合系统模型
Fig. 8 Uncoupled system model on the SRF dq0 axis

在并联侧使用双闭环非线性复合控制,电压外环的控制中为了能够优化电流控制器,选择滑模 PI 控制的方法。由于此方法在系统变化下的自适应特性,使得 PI 控制器的参数能够在直流侧电压发生波动时同步变化,能够实现所提要求^[24]。所以此方法可以实现直流侧电压的稳定,继而通过直流侧电压变量 U_{dc} 承担此控制器的控制自由度,得到滑模面的函数为

$$S = k(U_{dc_ref} - U_{dc}) + \frac{d(U_{dc_ref} - U_{dc})}{dt} \quad (6)$$

式中: U_{dc_ref} 是直流侧电压参考值; k 为正实数;定

义跟踪误差 $e_{dc} = U_{dc_ref} - U_{dc}$,可以对式(6)进行简化。

由式(6)可知并联侧 APF 在正常工作状态下仅能补偿谐波和无功电流,为了实后续推导过程的简化,可以设置 q 轴的电流为零单独使用 d 轴电流来推导。推导出来的 APF 直流侧电压的传递函数为

$$G_{dc}(s) = \frac{U_{dc1}(s)}{I_d(s)} = \frac{U_{dc2}(s)}{I_d(s)} = \frac{R_c}{R_c C s + 1} \quad (7)$$

式中: C 代表直流侧的电容。

通过分析传统 PI 控制器的原理,定义滑模控制下 PI 控制器传递函数为 $C_{SMC_PI}(s)$,从而得到滑模控制下 PI 控制器公式为

$$C_{SMC_PI}(s) = \frac{k_{sp}s + k_{si}}{s} \quad (8)$$

式中: s 代表拉普拉斯的变量因子; k_{sp} 、 k_{si} 是 PI 控制器的关键参数。

根据式(7)–(8)可以得到 U_{dc} 的动态闭环函数为

$$\frac{U_{dc}(s)}{U_{dc_ref}(s)} = \frac{R_c k_{si}s + R_c k_{sk}}{R_c C s^2 + (1 + R_c)s + R_c k_{si}} = \frac{b k_{sp}(s + k_{si}/k_{sp})}{s^2 + (a + b k_{sp})s + b k_{si}} \quad (9)$$

式中: $U_{dc}(s)$ 和 $U_{dc_ref}(s)$ 分别代表 U_{dc} 和 U_{dc_ref} 的拉普拉斯形式; a 代表电阻 R_c 与电容 C 的乘积的倒数, b 代表电容 C 的倒数。

式(9)控制系统的稳定性是有条件的,具体而言,这是一个二阶系统,可以通过劳斯—赫尔维茨稳定判据来设立稳定条件,即式(9)的特征根方程的各项系数同时大于 0,满足此条件才能使系统避免出现不稳定状态,即

$$\begin{cases} a + bk_{sp} > 0 \\ bk_{si} > 0 \end{cases} \quad (10)$$

式(10)的成立是建立在滑模 PI 控制器上,从而得到式(11)所示控制参数的输出函数为

$$\begin{cases} k_{sp} = [1 + \operatorname{sgn}(s)]k_{p+} - [1 - \operatorname{sgn}(s)]k_{p-} + k_{av_p} \\ k_{si} = [1 + \operatorname{sgn}(s)]k_{i+} - [1 - \operatorname{sgn}(s)]k_{i-} + k_{av_i} \end{cases} \quad (11)$$

式中: k_{p+} 、 k_{p-} 、 k_{i+} 、 k_{i-} 皆为控制参数; k_{av_p} 和 k_{av_i} 是附加在控制器微分参数和积分参数上的正参数。

图 9 为直流侧电压的滑模 PI 复合控制框图,控制系统通过滑模 PI 控制器实现对电压的精确调节,式(12)定义了饱和函数 $\operatorname{sgn}(s)$,其在控制算法中起到了关键作用。

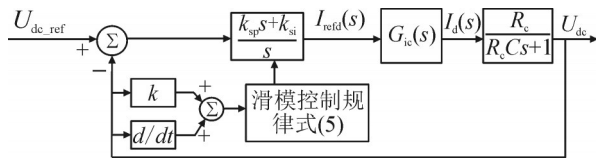


图 9 直流侧电压的滑模 PI 复合控制框图
Fig. 9 Block diagram of sliding mode PI composite control of DC side voltage

$$\operatorname{sgn}(s) = \begin{cases} 1, & s > 0 \\ -1, & s < 0 \end{cases} \quad (12)$$

电流内环部分采用了重复 PI 控制方法,通过引入重复控制策略,实现不同频率下的精确调节,确保系统在快速变化和稳定输出之间达到最佳平衡。PI 控制器的主要作用是修正谐波指令与实际电流之间的差异,从而增强 APF 系统在动态响应方面的性能。通过迅速调整误差,PI 控制器能够有效应对系统中的突发情况,提升系统的稳定性和瞬态响应能力。与此同时,重复控制器的功能是消除系统中出现的周期性跟踪误差,改善系统在稳态下的运行效果,并通过持续修正周期性误差,确保了对周期性谐波的有效补偿。鉴于 PI 控制器是基于开关周期来进行调整的,而重复控制器则是依据基波周期来操作的。这种设计上的差异使得两者的工作机制在时间维度上实现了解耦,各自独立运作,有效避免了两者之间的相互干扰。图 10 表示了电流内环重复 PI 控制框图。

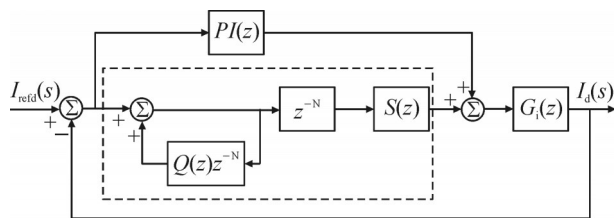


图 10 电流内环重复 PI 控制框图
Fig. 10 Block diagram of current inner loop repetitive PI control

在图 10 中, $PI(z)$ 代表了电流环使用的 PI 控制器的离散化模型,是一种通过调整控制误差来实现精确电流控制的策略。该控制器的主要功能是基于实时反馈的误差动态调整控制输入,从而达到对电流的精确调节。在此控制策略的基础上, $Q(z)$ 与 z^{-N} 一起构成了重复控制器。重复控制器通过对周期性信号进行反馈,优化控制系统的整体性能。 $Q(z)$ 作为衰减环节,负责维持系统稳定性,主要作用是限制周期性误差的增长,从而避免外部扰动引起的系统不稳定。 z^{-N} 则是周期延迟环,解决了周期性信号中的时间延迟问题,确保控制策略能够准确跟踪周期信号的变化,减小由延迟带来的误差积累。重复控制器的增益由 k_r 表示,决定了系统对周期性误差的抑制强度。通过适当调整增益值,可以优化控制系统的响应性能,提升系统的精度与鲁棒性。 z^k 为相位补偿,式(13)展示了补偿器 $S(z)$,作用是在频域内对被控对象 $G_i(z)$ 进行幅值与相位的补偿^[25]。

$$S(z) = k_r z^k F_1(z) F_2(z) \quad (13)$$

双闭环非线性复合控制策略的整体控制示意图如图 11 所示。

该策略通过传感器实时监测输入电压的幅值和频率变化,快速响应电网动态和调整补偿电流。采用双环反馈控制来增强系统稳定性和精度。电压信号经坐标变换提取相位信息,简化控制过程,确保补偿电流与谐波相位同步。基于相位信息,选择合适的基本空间矢量,通过空间矢量调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)优化开关频率和谐波补偿效果。最终生成开关脉冲信号,控制 APF 装置补偿谐波,提升电力系统电能质量。

4 实验分析

为验证本文所提出 UPQC 拓扑及控制策略调节电能质量的效果,基于图 1 所示拓扑构建了一个原型,其中的样机控制单元采用了 DSP 控制器来以数字方式实现 SRF 和 PLL 算法。实验参数如表 1 所示。

表 1 实验参数
Table 1 Experimental parameters

参数	数值
电源电压/V	220
直流电压/V	580
变压器的变比	1:1
串联侧参数	$L=3 \text{ mH}$, $R=0.1 \Omega$
并联侧参数	$L=5 \text{ mH}$, $R=0.18 \Omega$
基波频率/Hz	50
直流电容/ μF	3 650

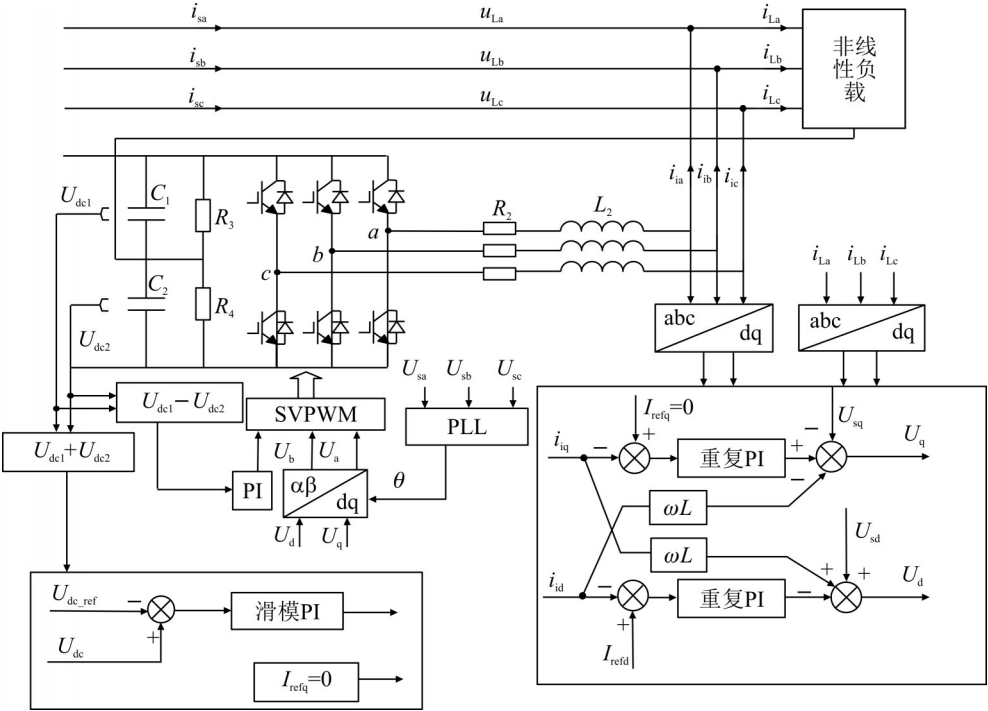


图 11 双闭环非线性复合控制策略的控制图
Fig. 11 Control chart for dual closed-loop nonlinear composite control strategy

图 12 显示了在本文控制方法下 UPQC 电流补偿的显著效果。

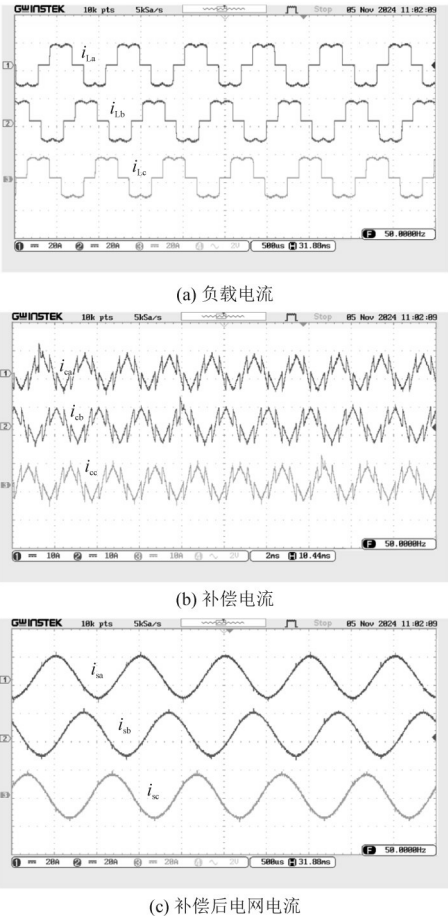


图 12 补偿策略下 UPQC 电流补偿效果
Fig. 12 UPQC current compensation effect under control strategy

如图 12(a)所示,补偿前的负载电流主要由 $6k\pm 1$ 次谐波组成,总谐波的畸变率高达 30.73%,这表明负载电流中的谐波污染相当严重。图 12(b)为补偿电流,图 12(c)为补偿后的电网电流。经过 UPQC 的补偿后,电网电流的波形几乎呈现理想的正弦波形,且 THD 显著下降至 4.79%,远低于电网电流 THD 小于 5% 的标准要求。

图 13 以 a 相为例显示了 UPQC 在电压暂降情况下的运行情况。电网在 0.3 s 发生 20% 的电压暂降,随后恢复至正常电压水平,观察图 13 可知,在电网电压出现波动时 UPQC 设备通过补偿作用,使得负载电压保持稳定,未受到电压骤降的影响。

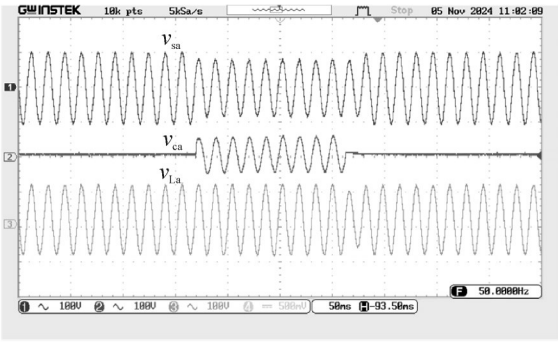


图 13 电网电压波动时电压补偿效果
Fig. 13 Voltage compensation effect in voltage fluctuation of grid

图 14 显示了 UPQC 在电网电压畸变情况下的运行结果。

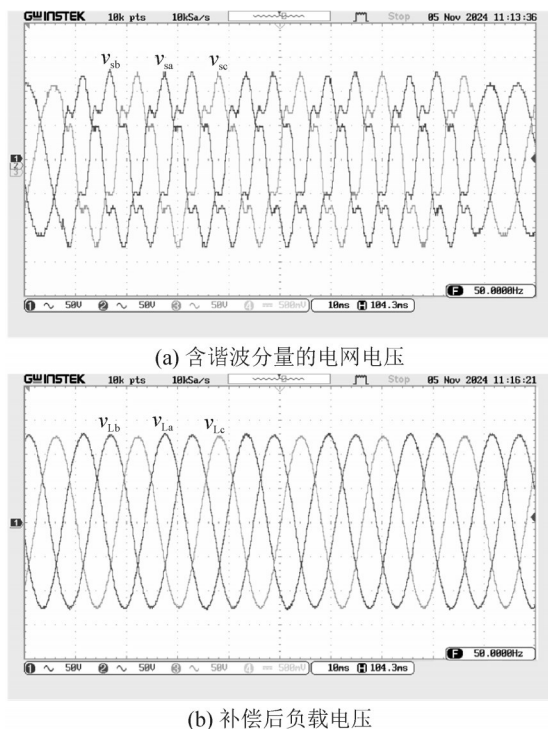


图14 电网电压畸变时电压补偿效果
Fig. 14 Voltage compensation effect in case of grid voltage distortion

图13(a)为含谐波分量的电网电压,图14(b)为经过补偿后的负载电压。由图14可见,在电网电压畸变时,UPQC能够有效地进行补偿,使得负载电压恢复为接近理想的正弦波形。电网电压的畸变可能会引起设备的故障或性能下降,然而通过UPQC的补偿作用,负载电压几乎不受影响,维持了稳定的正弦波形,保障了负载设备的正常运行和电能质量的稳定性。

5 结语

针对UPQC中传统PI控制器存在的跟踪能力较差和控制精度较低问题,本文提出了并联侧APF为双闭环非线性复合控制方法的UPQC。不仅分析了该拓扑的数学模型和工作原理,还着重叙述了双闭环非线性复合控制方法的原理。最后通过实验装置对拓扑在电压暂降和电网电压畸变的效果进行测试,证明了本文所提UPQC能够实现当负载突变和参考电压跳变时,直流侧电压的较快的响应速度和较高稳态精度。

参考文献

[1] 张喆,孟祥亮,肖新华,等. 配电物联网电能质量复合扰动检测研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(2): 40-45.
ZHANG Zhe, MENG Xiangliang, XIAO Xinhua, et al. Research on power quality composite disturbance detection in power distribution IOT[J]. Power System and Clean Energy,

2023, 39(2): 40-45.

- [2] BRENNAN, M. FARANDA. A new proposal for power quality and custom power improvement: open UPQC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 2107-2116.
- [3] CAMPANHOL G B L, SILVA D O A S, GOEDEL A. Application of shunt active power filter for harmonic reduction and reactive power compensation in three-phase four-wire systems[J]. IET Power Electronics, 2014, 7 (11): 2825 - 2836.
- [4] 王函韵,周雅婷,程启明,等. 非理想条件下MMC-DVR的Lyapunov控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 22-33.
WANG Hanyun, ZHOU Yating, CHENG Qiming, et al. Study on Lyapunov control strategy of MMC-DVR under non-ideal conditions[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 22-33.
- [5] 刘涛,何启发,肖朝霞,等. 基于FCS-MPC的五桥臂UPQC电能质量补偿策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 66-74.
LIU Tao, HE Qifa, XIAO Zhaoxia, et al. Research on power quality compensation strategy of five-bridge arm UPQC based on FCS-MPC[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 66-74.
- [6] S. SHI, D. LIU, J. HAN. Small signal modeling and performance analysis of conventional-and dual-UPQC[J]. IEEE Access, 2024(12): 11909-11925.
- [7] C. D. SANJENBAM, B. SINGH, P. SHAH. Reduced voltage sensors based UPQC tied solar PV system enabling power quality improvement[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023(38) 392-403.
- [8] AXENTE, I. GANESH. A 12 kVA DSP-controlled laboratory prototype UPQC capable of mitigating unbalance in source voltage and load current[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(6): 1471-1479.
- [9] YU J, XU Y, LI Y, et al. An inductive hybrid UPQC for power quality management in premium-power-supply-required applications[J]. IEEE Access, 2020(2): 10809-10825.
- [10] KHADKIKAR, V. ENHANCING. Electric power quality using UPQC: A comprehensive overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5): 2284-2297.
- [11] MUÑOZ A J, ESPINOZA R J, BAIER R C, et al. Design of a discrete-time linear control strategy for a multi cell UPQC[J]. IEEE Trans. Industrial Electronics, 2012, 59 (10): 3797 - 3807.
- [12] 于昊正,全少理,李文峰,等. 基于串/并联APF的统一电能质量调节器[J]. 电力电子技术, 2023, 57(5): 60-63.
YU Haozheng, QUAN Shaoli, LI Wenfeng, et al. Unified power quality regulator based on series/parallel APF[J]. Power Electronics Technology, 2023, 57(5): 60-63.

- [13] 蔡重凯, 赵越, 俞永军, 等. 基于并联型电压源变换器的统一电能质量控制器[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(5):94-101.
CAI Chongkai, ZHAO Yue, YU Yongjun, et al. Unified power quality controller based on shunt-type voltage source converter[J]. Power Capacitor and Reactive Power Compensation, 2022, 43(5):94-101.
- [14] 黄晓明, 范志华, 苗世洪, 等. 含储能单元的统一电能质量调节器功率协调控制策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(10):3390-3398.
HUANG Xiaoming, FAN Zhihua, MIAO Shihong, et al. Power coordinated control strategy of unified power quality regulator containing energy storage unit[J]. High Voltage Technology, 2018, 44(10):3390-3398.
- [15] 王贵峰, 祝莘莘, 武泽文. 一种新型无差拍UPQC预测直接控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(11):40-49.
WANG Guifeng, ZHU Xinxin, WU Zewen. A novel differential beat-free UPQC predictive direct control strategy[J]. Grid and Clean Energy, 2023, 39(11):40-49.
- [16] C. ZHANG, X. LI, X. XING, et al. Modeling and mitigation of resonance current for modified LCL-type parallel inverters with inverter-side current control[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics [J]. 2022, 18(2):932-942.
- [17] 姜亚峰, 李仪博, 吴秋伟, 等. 基于准比例谐振控制的模块化多电平矩阵变换器环流抑制策略[J]. 上海交通大学学报, 2025, (2): 242-251.
JIANG Yafeng, LI Yibo, WU Qiwei, et al. Circulation suppression strategy for modular multilevel matrix converter based on quasi-proportional resonance control[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2025(2): 242-251.
- [18] 马辉, 程江洲, 王辉, 等. 滑模PI控制在APF直流侧电压控制中的应用[J]. 电力电子技术, 2017, 51(5):61-64.
MA Hui, CHENG Jiangzhou, WANG Hui, et al. Application of sliding mode PI control in APF DC side voltage control[J]. Power Electronics Technology, 2017, 51(5):61-64.
- [19] M. AREDES, R. M. FERNANDES. A dual topology of unified power quality conditioner: the iUPQC [C]//2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona, Spain, 2009.
- [20] FRANCA, W. B., SILVA D, et al. An improved iUPQC controller to provide additional grid-voltage regulation as a STATCOM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3):1345-1352.
- [21] B. W. FRANÇA, M. AREDES. Comparisons between the UPQC and its dual topology (iUPQC) in dynamic response and steady-state [C]//IECON 2011-37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Melbourne, VIC, Australia, 2011.
- [22] 陈伟, 齐养梓, 裴喜平, 等. 一种新型统一电能质量调节器结构及控制策略研究[C]//“紫金论电”2017智能电网保护和运行控制国际学术研讨会论文集, 南京, 2017.
- [23] 谷泓杰, 汪一帆, 黄丽丽, 等. 新型站用统一电能质量调节器及控制策略[J]. 电力电子技术, 2023, 57(2):85-88.
GU Hongjie, WANG Yifan, HUANG Lili, et al. Novel station unified power quality regulator and control strategy[J]. Power Electronics Technology, 2023, 57(2):85-88.
- [24] 李兰芳, 徐晓刚, 吴国兵, 等. 并联型APF直流侧电压的滑模PI控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5):32-37.
LI Lanfang, XU Xiaogang, WU Guobing, et al. Research on sliding mode PI control strategy for DC side voltage of parallel type APF[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5):32-37.
- [25] 谢锡锋. 基于重复控制和滑模控制的APF电流控制方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(1):23-28.
XIE Xifeng. APF current control method based on repetitive control and sliding mode control[J]. Power Capacitor and Reactive Power Compensation, 2019, 40(1):23-28.

作者简介:

习超(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统及其自动化工作。

余梦天(1991—), 男, 工程师, 主要从事配电网规划及运行可靠性分析工作。

聂健(1982—), 男, 工程师, 主要从事电力系统及其自动化工作。

冯琦(1986—), 女, 工程师, 主要从事供电服务工作。

赵军波(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化方向。

马辉(1985—), 男, 副教授, 研究方向综合能源规划及控制等方向。E-mail: fightingpig@163.com。