

摘要

随着微电网技术的不断发展，微电网的结构和电力负荷将日益复杂化，多种电能质量问题在微电网系统中同时出现的概率越来越高。为了解决微电网中存在的电压波动、三相不平衡和谐波等多种电能质量问题，本文采用统一电能质量调节器 (Unified Power Quality Controller, UPQC) 对微电网的电能质量进行控制。由于 UPQC 的控制策略直接影响其对电能质量的综合补偿能力，因此，本文着重对 UPQC 的控制方法进行研究。

深入分析了 UPQC 的基本结构、工作原理及补偿指令信号的产生原理，根据状态空间理论建立了 UPQC 的统一数学模型，为 UPQC 控制方法的研究打下了良好的基础。

针对 UPQC 谐波电流检测方法存在的延时问题，提出了一种基于前向线性预测理论的谐波电流预测控制方法，推导出了最佳预测系数正则方程、谐波电流最小预测误差和阶更新方程，给出了 1-3 阶滤波器的预测系数和最小预测误差值。该方法能准确预测谐波电流，通过自适应模糊控制方法，实现最小误差补偿。仿真和实验结果表明，该方法具有预测控制精度高、快速跟踪能力强和补偿效果好等特点。

针对 UPQC 常用控制方法大都是对串联和并联部分分别进行控制存在综合补偿效果较差等问题，提出了一种基于鲁棒 H_2/H_∞ 优化理论的 UPQC 控制方法，该方法将 UPQC 系统模型参数的不确定性引入到系统状态方程中，使得闭环系统中所允许存在的不确定性能够同时满足最优 H_2 性能和 H_∞ 干扰抑制，把鲁棒 H_2/H_∞ 控制器的设计转化为具有线性矩阵不等式的优化问题，进而推导出 UPQC 的线性动态反馈控制器，实现了对 UPQC 的优化控制，仿真分析表明该方法具有响应速度快、鲁棒性强等特点。

针对现有 UPQC 的控制方法对于 UPQC 输入、输出和状态的约束条件控制效果较差等问题，提出了一种基于变约束预测理论的 UPQC 控制方法。该方法在鲁棒预测控制的基础上，通过在线优化控制方法构建当前状态的反馈控制矩阵的凸组合系数，确定对应的控制约束，增加了在线求解的自由度，减少了运算时间，综合考虑了 UPQC 系统的动态性能和状态约束条件等，有效地提高了 UPQC 的综合补偿功能。仿真与实验验证了该方法的有效性和可行

性。

为了进一步分析本文提出的控制方法的补偿效果，搭建一个含 UPQC 的微电网电能质量 MATLAB 仿真模型，并分别对微电网中的电压波动和谐波污染等电能质量问题的控制效果进行了仿真和比较，仿真结果分析表明，基于变约束预测理论控制方法的补偿效果相对更好一些。

关键词： 微电网，电能质量，UPQC，前向线性预测理论，鲁棒 H_2/H_∞ 控制，变约束预测控制

ABSTRACT

With the continuous development of the microgrid technology, the structure of the microgrid and the power load will be increasingly complicated, and the probability of various power quality problems appeared in microgrid system gets higher and higher. In order to solve the power quality problems in microgrid about the voltage fluctuation, three-phase unbalance, harmonic pollution and so on, this paper used the UPQC to control the power quality. The UPQC control policy directly influences the comprehensive compensation ability for power quality. Therefore, this paper mainly studied the UPQC control method.

Deeply analyzed the basic structure, the working principle and the instruction signal generating principle of the UPQC, and according to the state space theory established a unified math model of the UPQC, which laid a good foundation for the study on the UPQC control method.

According to the delay problem in the harmonics detection method of the UPQC, a harmonic current forecasting method for the UPQC based on the forward linear prediction theory was proposed in this paper. The optimal forecasting coefficient canonical equation, minimum forecasting errors and rank update equation were deduced. The forecasting coefficient and minimum forecasting errors of one-three order filter were given. This method could predict the next time harmonic current, to realize minimum errors compensation by adaptive forecasting control. The simulation results show that the method has high forecasting precision and good compensation effect.

According to the poor comprehensive compensation effect, which the usual control method separately controlled the series and shunt part of the UPQC, a optimizing control method of base on robust H_2/H_∞ controllers was proposed. Uncertain parameters of structures are introduced into the state equation, meanwhile, both the H_∞ disturbance suppression and the optimal H_2 performances of the closed-loop control system are satisfied simultaneously for all allowable uncertainties. The robust H_2/H_∞ controller design was transformed into a optimal problem

with constraints of linear matrix inequalities, the robust H_2/H_∞ output feedback controllers can be applied, then realized the optimal control for the UPQC. The theoretically analysis and simulation results showed this method can get preferable control effect, fast dynamic response and good robustness.

According to the poor control effect for the constraint conditions of the input-output and status with the usual control methods. A UPQC control method based on variable constraint predictive theory was proposed. The convex combination coefficients for the state feedback matrix were obtained through on-line optimization, and obtained the current control, the corresponding control constraints were determined according to the elliptical stability domain, this method could increase the freedom of online solving effectively and reduce computing time. The simulation and experiment results showed that the method was feasibility and effectiveness.

In order to analysis the control effect about these control methods in this paper, a simulation model about the mocrogrid with the UPQC was established, and simulated and compared the control effect about the power quality problems as the voltage fluctuation and harmonic pollution. The simulation results showed that the control method based on variable constraint predictive theory has better control effect.

Key Words: microgrid, power quality, UPQC, forward linear prediction theory, robust H_2/H_∞ control, variable constraint predictive theory

目 录

摘要	I
ABSTRACT	III
第一章 绪 论	1
1.1 微电网及其电能质量问题	1
1.1.1 微电网及其发展前景	1
1.1.2 微电网中的电能质量问题分析	2
1.1.3 电能质量控制技术发展前景	4
1.2 UPQC 控制方法的研究现状	6
1.3 本文的主要研究工作	7
第二章 UPQC 的原理及数学模型	9
2.1 UPQC 的结构和工作原理	9
2.1.1 UPQC 的基本结构	9
2.1.2 UPQC 的工作原理	10
2.2 UPQC 补偿指令信号生成原理	13
2.3 UPQC 状态空间模型的建立	16
2.4 本章小结	18
第三章 UPQC 的谐波电流预测控制方法	19
3.1 产生延时的原因及解决方法	19
3.1.1 产生延时的原因	19
3.1.2 解决系统延时的方法	20
3.2 基于前向线性预测理论的谐波电流预测控制方法	21
3.2.1 前向线性预测系数及最小预测误差	21
3.2.2 谐波电流预测控制过程	22
3.2.3 仿真分析	23
3.3 本章小结	26
第四章 基于鲁棒 H_2/H_∞ 优化理论的 UPQC 控制方法	27
4.1 UPQC 的常用控制方法介绍	27
4.2 UPQC 鲁棒 H_2/H_∞ 优化控制方法研究	27
4.2.1 鲁棒 H_2/H_∞ 优化控制的提出	27
4.2.2 UPQC 鲁棒 H_2/H_∞ 控制设计	28

4.3 仿真分析.....	31
4.4 本章小结.....	33
第五章 基于变约束预测控制的 UPQC 控制方法	35
5.1 预测控制技术原理.....	35
5.2 UPQC 变约束预测控制方法设计	36
5.2.1 变约束预测控制方法.....	36
5.2.2 UPQC 变约束预测控制系统结构	40
5.3 仿真及实验分析.....	40
5.4 本章小结.....	44
第六章 微电网中 UPQC 控制方法的综合仿真	46
6.1 仿真模型.....	46
6.2 UPQC 控制方法的综合仿真	47
6.2.1 UPQC 对微电网中电压及电流的信号检测仿真	47
6.2.2 不同控制方式下 UPQC 补偿效果仿真	50
6.3 本章小结.....	52
结语	53
参考文献	55
攻读学位期间主要的研究成果	59
致谢	60

第一章 绪 论

本章首先分析了微电网及其发展前景、微电网电能质量问题产生的原因及其抑制措施，接着分析了电能质量控制技术的发展前景及 UPQC 控制方法的研究现状，最后介绍了本文研究的主要内容。

1.1 微电网及其电能质量问题

1.1.1 微电网及其发展前景

电能是我国经济和社会发展中具有重要战略意义的一种能源。现代社会对能源的需求日益增加，而煤炭、石油等不可再生能源越来越少，此外，集中发电、远距离输电和大电网互联的供电方式，存在着一些弊端：成本较高，运行难度较大，难以满足用户对安全和可靠性越来越高的要求以及多样化的供电需求^[1-3]。尤其是在近年来世界范围内接连发生几次大面积停电事故，如2003年8月24日的美加大停电，2008年初我国南方冰灾造成的大停电，大电网的脆弱性充分暴露了出来^[4]。为了避免能源短缺、环境污染和生态恶化，走可持续发展的道路，人们开始研究使用可再生能源，开发利用清洁高效的可再生能源是解决未来世纪能源问题的主要出路^[5]。目前欧美等发达国家已开始广泛研究能源多样化、高效和经济的分布式发电技术^[6, 7] (Distributed Generation, DG)。随着对分布式发电和储能技术的深入研究，以及电力系统发展和用户对电能质量的要求，为了缓解大电网和分布式发电之间的矛盾，使得分布式能源为电网和用户带来更大的效益和价值，通过研究将分布式发电的相关技术综合起来，便形成了一种新型电网形式——微电网 (Microgrid)^[1-3]。

微电网是在新能源发电背景下和分布式发电基础上新兴的前沿技术，它从整个系统出发，将发电机、控制装置、负荷及储能设备等结合起来，构成一个单一的可控单元，来满足用户对电能和热能的需求等。微电网既可与大电网联合运行，又可在大电网故障时与大网断开单独运行，具有灵活的可调度性且可适时向大电网提供有力支撑。微电网由于采用就地能源，可以在发生灾难性事件导致大电网瓦解时，保证对重要负荷的供电，并有助于大电网快速恢复供电^[8-13]。

微电网技术是将电力电子控制技术、分布式发电技术、可再生能源发电技术和储能技术相结合的一种新型电网技术，集成多个电源和负荷作为独立模块提供电能和热能，实现了分布式电源的大规模接入和灵活控制，具有“即插即用性”，

并网时无需特别修改大电网的运行策略。微电网中采用了较多具有不确定性的微电源以及电力电子装置，带来了特殊的电能质量问题，但同时，这些装置也存在改善电能质量的潜力，对其施加合理的控制不仅能减小自身带来的不利影响，还可能改善微电网的一些电能质量问题，减少相关治理设备的投资。因此微电网是未来实现优质、高效、环保供电的一种重要的电网形式^[15]。

1.1.2 微电网中的电能质量问题分析

1.1.2.1 微电网中电能质量问题产生的原因

微电网电能质量问题主要是受主网和自身特殊性的影响。主网对微电网造成的影响主要是电压三相不平衡和电压波动等。例如连接配电网和微电网的静态开关只有在主网电压严重失衡时才断开，也就是说当电压失衡的程度没有严重到可以引发静态开关动作时，微电网就会一直承受主网的影响，那么公共连接点（PCC）处电压会维持在不平衡状态。如果微电网内部没有适当的安装功率补偿装置，就无法维持电压和频率的稳定，会造成敏感负荷不能正常运行或断开连接，从而使电网的电能质量问题扩散到微电网中。微电网中微电源、微电网运行方式与控制方法、电力电子装置、储能设备和负荷特性等都会影响到电能质量，造成微电网电能质量的检测、分析、评估和改善等比较复杂和困难。而微电源所引起的电能质量问题最为突出，如采用全控型换流装置的风电、光伏发电等新型微电源接入，造成电能质量问题更为严重。可见微电网电能质量特殊性主要是由微电源、负荷及微电网运行和控制方法等共同决定的，微电网电能质量问题及特点主要有以下几个方面^[15]：

(1) 电压波动和闪变

可再生能源的运行受自然环境、本地用户需求等因素的影响，输出功率不规律且变化频繁，功率的突然变化会造成电源和反馈环节的电压控制设备交相影响，给电压调节增加难度。微电源接入位置、数量、容量和控制方式均会直接或间接造成微电网电压波动和闪变，与负荷的不协调运行也会加剧电能质量问题。当微电网转为孤岛运行模式时，需要协调控制维持自身的频率和电压，如果没有足够的无功补偿装置或储能元件，就容易导致电压波动和闪变等问题。

(2) 谐波和直流注入

谐波是微电网中最主要的电能质量问题之一。微电源大多采用电力电子转换器接入微电网，其电压调整和控制方式与传统方法不同，运行过程不可避免地会引起微电网电流、电压波形畸变，引入大量谐波污染，而且不同发电方式和转换器工作模式会对谐波的幅度和阶次造成不同的影响。此外，当微电网不采用隔离

变压器而直接接入电网时，就可能向电网注入直流，变压器和电磁元件就可能出现磁饱和现象，造成附近机械负荷发生转矩脉动。

(3) 频率调节难度增加

由于微电源大部分是建立在电力电子基础之上的，它们的原动机响应速度较慢且没有储备功率，使得惯性较小，无法对负荷的阶跃变化产生快速响应。当微电网与主网联网时主网可以平衡负荷变化，但在孤岛运行时，为了提高响应的速度、减小电压和频率波动，就需更多的功率快速补偿措施^[17-18]。

(4) 稳态电压分布变化

微电源的接入会影响微电网各点的电压分布，造成原有电压的骤升和骤降。与传统电网相比，微电网中微电源的接入使电网潮流复杂化，馈线上的功率减小，无功功率增加以及馈线各点电压幅值升高；当负荷减小，微电源接入点处电压可能会产生波动，严重时会导致电压超标。微电源也可能带来低压问题，例如馈线上安装一些补偿装置调节电压，当微电源处于补偿装置的下游时，其输出电压可能成为调节器电压的一部分，从而引起电压调节器的输出电压减小，当微电源无法吸收足够的无功功率，调节器下游电压就会降低^[16]。

(5) 短路电流增大

微电源会增大电网的短路电流水平，影响其大小、方向和持续时间，严重程度取决于很多因素，如微电源的技术类型、接入地点、容量、运行模式、渗透率与并网方式及采用的控制技术等。通常并网侧安装了逆功率继电器装置，正常运行时不会向电网注入功率，但配电网发生短路故障的瞬间，微电源可能会向电网注入较大电流，使得短路电流超标，导致断路器开断能力下降而不能切除故障，扩大了故障范围，危及系统安全。若发生接地故障时，注入大地的电流过大还会使地电位升高造成反击，严重威胁接地点附近的变电站和人身安全，还会影响通信设备的正常运行。

1.1.2.1 微电网中的电能质量问题抑制

微电网中微电源对电能质量的影响主要是微电源输出功率的不确定性和所采用的大量电力电子转换装置所造成的谐波污染和无功损耗，因此抑制和消除微电网谐波污染和进行无功补偿提高功率因数具有重要的研究意义。谐波抑制措施有两种方式：一是安装相应的补偿装置来抑制谐波，通常适用于各种谐波污染源；二是从谐波产生的源头入手，对谐波源本身进行改造，减少谐波的注入，适用于谐波源是电力电子装置的系统。而无功补偿与谐波抑制是紧密相关的，主要因为大多数产生谐波的装置都是吸收无功功率的装置，如电力电子装置、变压器和电弧炉等，既可以抑制谐波，又可用于补偿无功功率，如 LC 滤波器、有源电力滤

波器(Active Power Filter, APF)等。目前对于微电网中谐波污染及无功损耗治理已经有一些有效的改善措施,但主要是安装补偿装置,包括固态切换开关、无源电力滤波器、APF、动态电压恢复器、静止无功补偿装置(Static Var Compensator, SVC)等。随着电力电子元件(例如GTO、IGBT等)的发展,柔性交流输电(Flexible AC Transmission Systems, FACTS)技术也成为改善电能质量的有效工具。储能设备的发展也在抑制电压、频率波动上发挥了重要作用。

微电源给微电网带来了更多电能质量问题,但也存在改善电能质量的独特优势。首先微电源能及时快速地提供电能,在短时间内投入使用满足系统负荷变化,减少故障,提高系统稳定性。其次,微电源与电能质量调节器的优化配置能实现统一控制,如统一电能质量调节器(Unified Power Quality Controller, UPQC)、APF等电能质量调节器都是基于电力电子技术,而微电源中采用的电力电子转换器使实现转换器复用功能成为可能,可以改进现有的电力电子设备吸收、释放有功和无功功率,在改善微电网电能质量的同时还减少了系统的建设投资,这将是改善微电网电能质量的一个可行的经济方案。集合不同的控制方法并加以协调整合,形成复合控制方法,这将是未来微电网逆变技术发展的趋势。在向本地负荷及电网同步传输有功功率的同时,也能实现谐波抑制、无功调节和故障检测等多重功能^[19],这将是未来微电网电能质量治理的一个新的方向。

随着微电网技术的不断发展,微电网的结构和电力负荷也日益复杂,各种电能质量问题在微电网系统中同时出现的情况越来越多。如果对每一种电能质量问题都分别采用一种补偿装置,这样将会大大提高治理成本、运行维护的复杂程度以及降低联合运行的可靠性,这样既不经济,又不现实,更不合理。因此,如何对电能质量问题的进行综合治理,采用一种装置解决多种电能质量问题,是提高系统运行可靠性及降低运行成本的关键。

综合以上的分析,针对微电网中的电能质量问题的复杂性和多样性,本文主要研究采用UPQC来改善微电网电能质量问题,并对UPQC的控制方法进行深入的分析,提出新的UPQC控制方法。

1.1.3 电能质量控制技术发展前景

目前电能质量控制技术及其装置的发展十分迅速,如动态电压恢复器、并联补偿式交流稳压电源、串联型和并联型APF、综合潮流控制器、UPQC和在线串并联补偿式UPS等先进的电能质量装置和设备正在逐步的研究、开发和应用推广中。主要工作表现在以下几方面^[20-23]。

(1) 电能质量控制技术的理论研究,主要包括各种电能质量的界定方法、电能质量的含量定义以及评价系统的研究、各种功率的定义方法和物理意义等的

研究。目前，已经提出了许多对功率定义的方法，并且在数学表达式和物理意义等方面都各有所长，但这与理论和实践上的统一以及易于接受的表达式相比还存在一定的距离。

(2) 在不同干扰条件下，对不同类型电能质量检测设备的研究以及电能质量指标的合理分析和测量方法。各种电能质量指标都需要一种科学合理的计算和分析方法，尤其是在不同干扰条件下的预测计算方法和误差估计方法等；同时还需要建立电能质量指标数据库和计算分析程序，以及控制装置的系统仿真模型。

(3) 应用数字化控制技术。随着实时数字信号处理技术的研究发展和广泛应用，如高速数字信号处理器(Digital Signal Processing, DSP)，在电能质量控制领域的应用也越来越广泛。数字化控制技术可以实现程序化控制，在不改变控制电路的情况下可以通过改变控制方法或算法来进一步优化，控制更加灵活，便于调试和批量生产；系统不受外界温度的影响，提高了系统灵活性、可靠性和稳定性；易于实现智能控制和并联同步运行。

(4) FACTS 应用广泛。FACTS 是一种使用电力电子装置来提高输电系统性能的新技术。在此基础上研究产生了柔性配电技术 (Distributive FACTS, D-FACTS)^[24]，是在高压输电系统的基础上发展起来的一种配电系统中的 FACTS 技术。D-FACTS 技术可以有效提高供电电能质量，如抑制电流谐波和畸变、电压波动与闪变、消除三相不平衡和提高功率因数等。

(5) 采用非电力电子技术方法。即应用非电力电子技术方法来研发新器件提高电能质量，如提出新的拓扑，改进电路结构，采用新材料等，可显著改善电网和供电系统的控制能力。这种方法已经得到了广泛的发展和应用，如利用合成材料制成的绝缘子、避雷器等部件；利用高分子聚合物研制成的聚合物型故障电流限制器。

谐波污染和电压波动是影响电能质量的重要方面。对于谐波污染，一般从以下两个方面出发：一是改进电力电子装置，使其尽量不产生或少产生谐波干扰。对电力电子装置的改造方法有许多种，如开发新型变流器，使其尽量不产生谐波，并保证电流和电压相位相同；采用多重化技术，这样可以将多个方波叠加进而消除低次谐波，主要应用在大容量变流器中。二是安装谐波补偿装置。常用装置是 LC 无源滤波器，这种装置同时补偿谐波和无功功率，且结构简单，应用广泛，但是其容易受电网阻抗和运行状态的影响，造成与系统产生并联谐振使得谐波电流放大，且补偿谐波频率固定，不够灵活。目前，发展比较快应用比较广泛的是 APF，分为并联和串联型 APF 两种，它的补偿效果很好，也比较灵活。可以同时补偿谐波电流、谐波电压和谐波振荡。对于电压闪变、波动等问题，一般都是采用 SVC 来进行治理，常用的补偿装置有饱和电抗器(Saturated Reactor, SR)、晶闸

管控制电抗器(Thyristor Controlled Reactor, TCR)、晶闸管投切电容器(Thyristor Switched Capacitor, TSC)以及它们混合使用的装置等。

电能质量的综合治理就是综合以上各种电力电子装置的补偿功能,对电能质量问题进行改善,现在已得到了广泛的重视和深入研究。UPQC就是能实现这种综合补偿功能的装置。它是并联型和串联型APF相结合的一种装置,不仅能快速补偿负载的谐波等问题,又能快速补偿电压波动和三相不平衡以及短时电压中断等问题,具有对电能质量综合补偿的功能。

1.2 UPQC 控制方法的研究现状

文献[25]提出了 UPQC 的概念,该装置由并联和串联 APF 组成,并介绍了 UPQC 功能,即能够补偿电压闪变、不平衡、无功功率、负序电流和谐波等多种电能质量问题。目前,UPQC 作为一种新型的综合电能质量调节装置,对其控制方法已展开了广泛的研究^[26-36]。常用的 UPQC 控制方法有以下几种:

(1) 三角载波比较控制方法

三角载波比较控制是目前应用比较广泛的一种控制方法,是一种 PWM 调制的直接电流控制方法^[26]。该方法将调制后的电流实际值与参考值相减,得到的偏差信号经 PI 调节后与三角载波进行实时比较,进而产生逆变器开关控制信号。该方法具有开关频率固定,且响应速度快的优点,但由于高频的三角波将使逆变器始终处于高频工作状态,从而产生高频失真和开关损耗。

(2) 滞环控制方法

滞环控制是应用最广泛的一种控制方法,该方法在谐波电流跟踪控制方面效果比较好^[31, 34]。该方法在给定范围内,使被控量和参考值进行比较,以确定开关元件的开关时序。虽然该方法具有反应速度快、容易实现和不需要了解负载特性等优点,但是开关频率不固定,被控量在负载换路时不能得到有效控制。

(3) PID 控制方法

PID 控制包括比例、积分和微分控制模块,通过与适当的校正网络系统结合,实现对系统动态和稳态性能的改善,在可建立精确数学模型的确定性控制系统中应用广泛^[32]。PID 控制方法虽然具有结构简单、稳定性好、可靠性高、易于工程实现的优点,但是控制系统存在响应超调、且对抗负载扰动和系统参数摄动能力差, PID 参数的整定很复杂。

(4) 无差拍控制方法

无差拍控制是一种新型全数字化控制技术^[33]。该方法根据当前周期的系统状态信息和系统的状态方程,计算出下一周期的开关控制信号,实现输出量跟踪输入量的控制效果。无差拍控制具有动态性能好,能够快速响应电流的突变、消除

稳态误差，并在最短的时间内结束过渡过程等优点，但其缺点是对系统参数依赖性较大、鲁棒性较差、瞬态响应超调量大和对硬件要求高等。

(5) 单周控制方法

单周控制是一种新型非线性控制方法，该方法把开关电路与非线性控制理论有机的结合起来，具有快速瞬态响应的能力。通过控制各周期的开关占空比，使开关变量的平均值与控制给定量保持大小相等或成相应比例，进而达到消除瞬态和稳态误差的目的，该方法具有结构简单、响应速度快和控制精度高等优点，但是对模型参数要求较高，鲁棒性较差^[36]。

(6) 模糊控制方法

模糊控制是对难以用已有规律描述的复杂系统，采用自然语言加以描述，借助不精确的、定性的及模糊的条件语句来表达，是一种语言的智能控制策略。模糊控制不需要建立精确的系统数学模型，且能够处理非线性问题^[28, 39]。模糊控制具有鲁棒性强，对外界干扰、参数变化和非线性因素不敏感的优点，但在工作点附近容易引起小范围的振荡，且存在稳态误差。

(7) 自适应控制方法

自适应控制方法通过在线辨识系统模型，根据系统模型和控制指标及时调整控制器参数，实现高精度控制^[37]。该控制系统主要有自校正控制和模型参考自适应控制系统两类。模型参考自适应控制在 UPQC 中主要用于参考信号的修正和谐波的检测方面。由于自适应控制对过程参数的变化以及对未建模部分的动态过程不敏感、对动态过程变化的自适应性的优点，必将越来越多地应用于电力电子技术中。但现有的研究仅仅局限于对已获得参考信号的修正，对于系统的稳定性和负载中的参数变化问题的研究还不成熟。

这些控制方法大都是对 UPQC 中串联和并联 APF 分别进行检测和控制，实际上相当于在电网和负载之间分别安装串联型和并联型 APF，这在很大程度上难以实现串联和并联 APF 的协调工作，甚至两者之间会产生干扰。针对 UPQC 系统的特殊性，一般的控制方法很难发挥 UPQC 补偿效果的动态性和实时性。因此，研究 UPQC 的新型控制方法，实现 UPQC 串联和并联 APF 的优化控制，是提高 UPQC 综合补偿功能的关键。本文以提高 UPQC 的综合补偿功能为目的，重点对 UPQC 控制方法进行深入的研究。

1.3 本文的主要研究工作

本文分析了微电网中的电能质量问题与抑制措施，以及 UPQC 控制方法的研究现状。并对 UPQC 的基本结构和工作原理进行了深入的分析。针对检测控制以及硬件系统造成的延时问题，提出了一种基于前向线性预测理论的谐波电流预测

控制方法。为了提高 UPQC 的综合补偿效果，建立了 UPQC 统一数学模型，提出了 UPQC 鲁棒 H_2/H_∞ 控制方法和变约束预测控制方法，通过仿真分析，证明控制方法的有效性和可行性。论文共分为六章，具体内容如下：

第一章 主要介绍了微电网电能质量问题的产生原因、抑制措施和电能质量控制技术发展前景，并详细地阐述了 UPQC 控制方法的研究现状。

第二章 主要介绍了 UPQC 基本结构，分别对 UPQC 的串联 APF 和并联 APF 的结构、补偿原理和指令信号产生原理进行了详细的分析。通过把 UPQC 转换到两相静止参考坐标 d-q 下的等效电路，利用状态空间理论建立了 UPQC 的统一数学模型，为后文对 UPQC 控制方法的研究以及仿真模型搭建打下良好的基础。

第三章 主要分析 UPQC 谐波电流检测及控制系统中存在的延时问题，以及解决措施，并分析现有检测预测方法的优缺点，提出了一种基于前向线性预测理论的谐波电流预测控制方法，该方法推导出了最佳预测系数正则方程、谐波电流最小预测误差和阶更新方程，给出了 1-3 阶滤波器的预测系数和最小预测误差值。该方法能准确预测谐波电流，通过自适应模糊控制策略，实现最小误差补偿。该方法具有原理简单和实时性好等特点，并进行了仿真分析。

第四章 主要研究 UPQC 的控制策略，通过对鲁棒控制理论的研究，在 UPQC 统一数学模型的基础上，提出一种基于鲁棒 H_2/H_∞ 控制的 UPQC 控制方法。该方法将 UPQC 系统模型参数的不确定性引入到系统状态方程中，使得闭环系统中所允许存在的不确定性能够同时满足最优 H_2 性能和 H_∞ 干扰抑制，把鲁棒 H_2/H_∞ 控制器的设计转化为具有线性矩阵不等式的优化问题，进而推导出 UPQC 的线性动态反馈控制器，实现了对 UPQC 串联和并联部分的优化控制，并进行了仿真分析。

第五章 通过对 UPQC 鲁棒控制方法的进一步研究，提出了一种基于变约束预测理论的微电网 UPQC 控制方法。该方法在鲁棒预测控制研究的基础上，通过在线优化控制方法构建当前状态的反馈控制矩阵的凸组合系数，确定对应的控制约束，增加了在线求解的自由度，减少了运算时间，该方法综合考虑了 UPQC 输入输出的动态性能和状态约束等，有效地提高了 UPQC 的综合补偿功能，并进行仿真分析，验证了该方法的可行性。

第六章 搭建含 UPQC 的微电网电能质量仿真模型，结合本文提出的控制方法，对微电网电压电流信号检测以及发生突变情况下的跟踪效果，同时对微电网中比较常见的电能质量问题，如电压波动，谐波等问题，进行了详细的仿真，并通过仿真结果对本文提出的控制方法进行了比较分析。

第二章 UPQC 的原理及数学模型

本章介绍了 UPQC 基本结构，并分别对 UPQC 的串联和并联部分的补偿原理进行了详细的分析，阐述了 UPQC 的补偿指令信号产生原理，利用状态空间理论建立了 UPQC 的统一数学模型。

2.1 UPQC 的结构和工作原理

2.1.1 UPQC 的基本结构

UPQC 是把串联型 APF 和并联型 APF 通过直流电容组合而成，把两者的补偿功能综合一起，使其具备综合的电能质量调节功能。既可以补偿非线性负载产生的无功功率、谐波和负序电流等，又可以补偿电压谐波和电压闪变等。因此，UPQC 是一种发展前景非常好的电能质量综合补偿装置，目前越来越多的研究机构和学者都开始对 UPQC 展开深入的研究工作。

一般微电网由以下几个部分组成：微电源、储能单元、负载、配电线路以及相应的控制和保护装置。图 2-1 是一个包含 UPQC 的单相微电网简单结构^[38]，图中的 UPQC 由一个集成的并联和串联 APF 组成，安装在微电源和负载之间的交流连接点上。UPQC 用于补偿非线性负载的谐波电流和电源非线性导致的电压畸变，并提供功率因数校正。

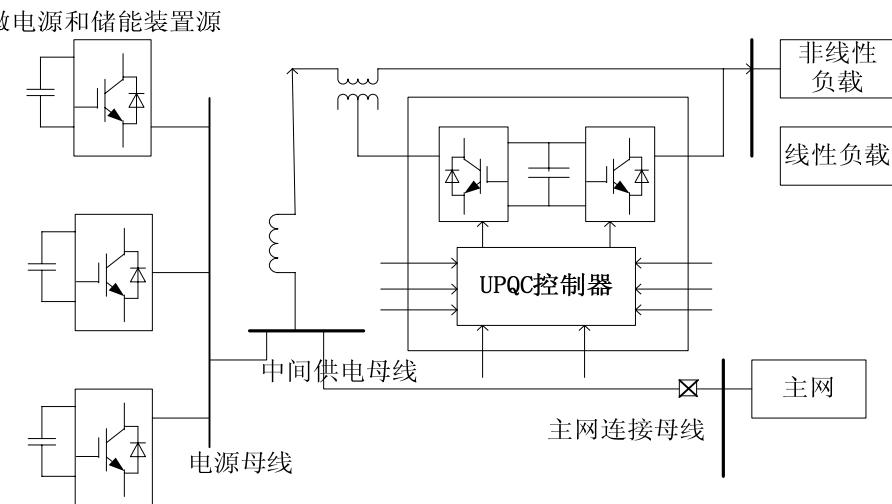


图 2-2 是 UPQC 的基本结构^[39]，电路系统为三相三线结构，它由串联 APF 和并联 APF 组成，两者直流侧通过电容连接。串联 PAF 补偿来自电网侧的电压谐波和

抑制电压波动，并联 APF 补偿来自负载的谐波电流和负序电流等，从而提高供电质量和运行的可靠性，直流侧电容为串联和并联型 APF 的正常工作提供直流电压和有功支持。

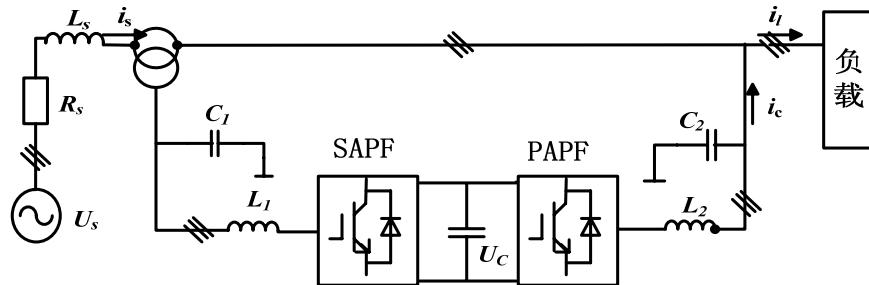


图 2-2 UPQC 的基本结构

2.1.2 UPQC 的工作原理

2.1.2.1 APF 的基本原理

UPQC 中的核心功能部分就是 APF，它是一种动态的谐波补偿装置，并得到了深入研究和实际应用。其基本的系统构成原理如图 2-3 所示^[40]，主要包括谐波电流检测电路、PWM 生成模块和主电路组成。谐波电流检测电路作用是检测负载电流中的谐波分量和无功电流分量，以确定补偿指令信号，主电路为双向功率传输的逆变电路，PWM 为逆变电路的控制部分，PWM 和主电路的作用就是对负载电流中的谐波分量和无功电流进行补偿。

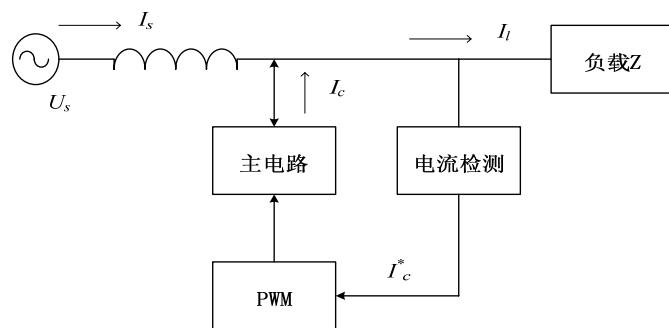


图 2-3 APF 的基本组成结构

APF 的基本工作原理是谐波检测电路对待补偿的电压和电流进行检测，计算出补偿指令信号，然后补偿信号发生电路对指令信号进行放大处理，得出补偿信号，抵消掉电压电流中谐波畸变部分。由图 2-3 可以看出电网输入的电流 I_s 由负载电流 I_l 和补偿电流 I_c 组成，可以表述为：

$$I_s = I_l - I_c \quad (2-1)$$

由于 I_c 的跟踪指令信号为 I_c^* , 所以 $I_c = I_c^*$, 那么可得

$$I_s = I_l - I_c^* \quad (2-2)$$

又因 I_c^* 是检测电路从负载电流 I_l 中检测得到的谐波电流 I_n 和无功电流 I_q 之和, 即

$$I_c^* = I_n + I_q \quad (2-3)$$

又有

$$I_l = I_n + I_p + I_q \quad (2-4)$$

I_p 为基波有功电流, 所以式 (2-1) 可以化为

$$I_s = I_l - (I_n + I_q) = I_p \quad (2-5)$$

因此, APF 既能抑制谐波电流, 又能对无功电流进行补偿。根据 APF 直流侧的储能元件不同, 可以把它分为两种类型: 以电容器作为储能单元时, 为电压型 APF, 优点是效率高, APF 一般都采用这种形式; 以电感器作为储能单元时, 为电流型 APF, 该种形式的 APF 损耗大, 效率低。

2.1.2.2 UPQC 中串联补偿部分的结构和功能

(1) 串联补偿部分的主电路结构

串联部分相当于串联型 APF, 主要有电压源型逆变器、输出滤波器、串联变压器和直流电容组成^[41-43]。其结构图如图 2-4 所示:

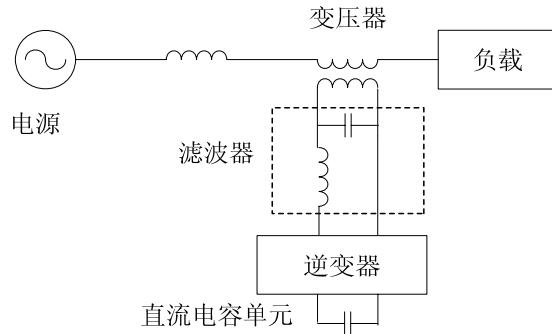


图 2-4 UPQC 串联补偿部分结构图

图 2-5 为串联补偿部分的单相主电路结构。串联型 APF 过变压器串联在交流电网和负载之间, 电压源型逆变器通过对直流电压的逆变产生串联交流电压, 用于补偿供电电压。串联变压器既可以传输逆变器输出的补偿电压, 又可以起到隔离逆变器与电网作用, 使补偿电压与供电电压迭加, 恢复电压至用户要求的水平。输出滤波器主要用于滤除补偿电压中的高次谐波。直流电容单元不仅可以为逆变器提供稳定的直流电压, 也可以在供电电压发生故障时提供有功功率^[44]。

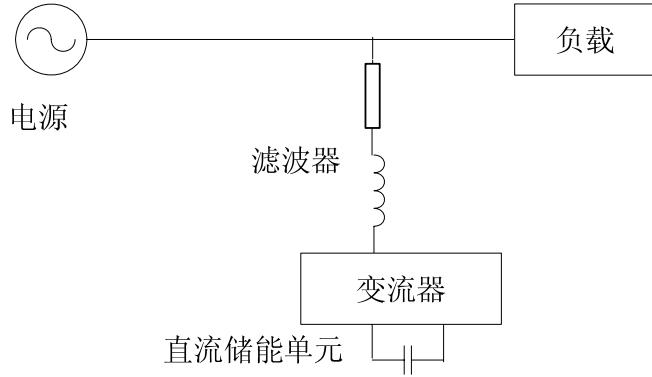


图 2-5 UPQC 串联补偿部分的单相主电路结构

(2) 串联补偿部分的主要功能：

串联补偿部分向供电网络输入与电压谐波各次分量极性相反、大小相等的电压分量，与各次谐波电压相抵消，使负载电压为标准的正弦波电压，以达到消除电压谐波的目的；通过检测电源电压中的波动成分，向供电系统输入一个电压分量来抵消波动，从而可以消除供电系统中经常发生的电压波动和闪变等现象；限制故障电流，串联补偿部分还可以产生一个滞后电流相位 90° 的电压分量来提高线路的阻抗，从而可以达到限制故障电流的作用^[45]。

2.1.2.3 UPQC 并联补偿部分的结构和功能

(1) 并联补偿部分电路结构

并联补偿部分相当于并联型 APF，主电路由电压源型逆变器、输出滤波器、直流电容单元组成，如图 2-6 所示^[46-47]：

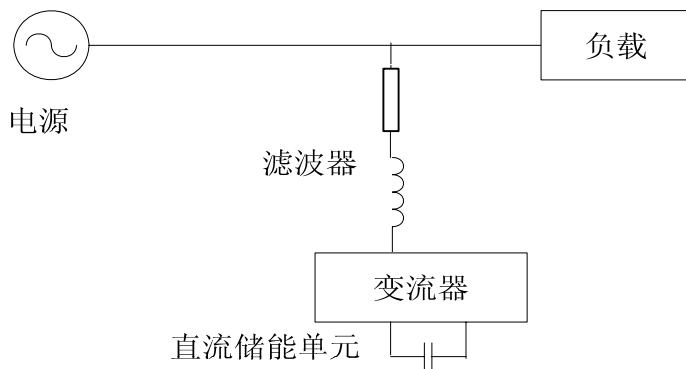


图 2-6 UPQC 并联补偿部分的构成图

并联补偿部分主电路拓扑结构如图 2-7 所示，通过检测出电流中的谐波和无功分量，再经过运算处理产生电流补偿指令信号，根据电流补偿指令信号和实际补偿电流之间的关系，使补偿电流跟踪电流补偿指令信号的变化，产生逆变器的 PWM 控制信号，从而使其输出的补偿电流跟踪其指令信号的变化，同时还要通过

向直流电容单元注入有功电流，保证直流电压维持不变。

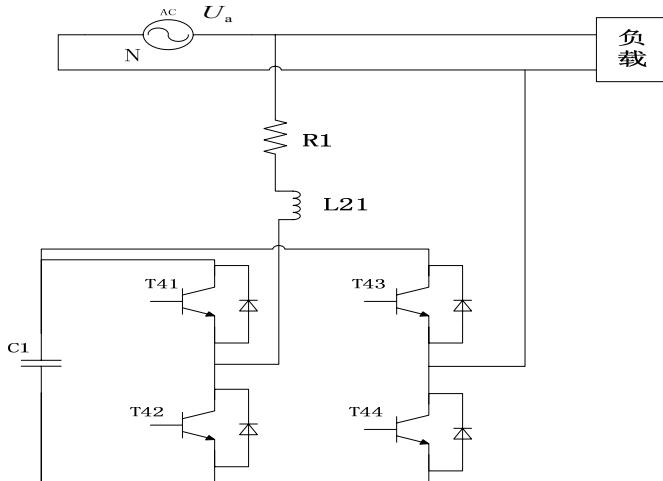


图 2-7 并联补偿部单相主电路结构

(2) 并联补偿部分的功能

并联补偿部分从补偿对象中检测出谐波电流，由并联部分的逆变器产生一个与谐波电流大小相等且方向相反的补偿电流，从而消除谐波电流使电网电流为标准的正弦波电流；并联补偿部分还具有很好动态跟踪补偿性能，可以实现对频率和幅值都变化的谐波电流的补偿，且不受电网阻抗参数的影响^[45]。

综合以上分析，可以得出 UPQC 的基本工作原理如下：

1) 当配电系统电压 U_s 因存在谐波和瞬时波动等畸变而偏离正常值时，UPQC 的串联补偿部分中的逆变器，将直流侧电压进行 PWM 调制变换为补偿电压分量，经变压器输入到线路中，以对供电电压的畸变进行补偿，使得负载电压 U_L 保持稳定的正弦波电压，从而确保对电压敏感的用电设备可靠的工作；

2) 当因存在非线性负载而使电网电流发生畸变时，UPQC 中并联补偿部分中的逆变器，通过对直流电容电压进行 PWM 调制来改变逆变器的输出电压，进而来调节 UPQC 的并联补偿部分与电网连接处之间的阻抗电流，即 UPQC 的并联补偿部分输出的补偿电流与负载的谐波电流大小相等、方向相反，相互抵消后只有基波电流输入到负载中，从而确保电网不受负载谐波的影响。

可见，UPQC 中的串联型 APF 可以视为可控电压源来消除电压畸变及波动等问题，并联型 APF 可以视为可控电流源来消除电压电流畸变等问题，两者联合起来就实现了 UPQC 综合的电能质量调节功能，既可以同时有效地解决电压电流谐波、电压波动和脉冲瞬变等多种电能质量问题。

2.2 UPQC 补偿指令信号生成原理

UPQC 指令信号生成电路的原理框图如图 2-8 所示。包括了 UPQC 串联型 APF、并联型 APF 和直流侧电压控制指令信号的生成模块。图 2-9 为图 2-8 中的三相负载正序电压参考电压计算单元原理图。

图中 2-8 中上半部分为 UPQC 串联 APF 补偿指令电压生成电路的原理图，根据网侧 A 相电压 u_{sa} 的相位和负载侧电压的瞬时值，经三相负载正序参考电压计算单元，得到负载电压的参考电压 u_{ar} 、 u_{br} 和 u_{cr} ，将 u_{ar} 、 u_{br} 和 u_{cr} 与网侧电压电压相比较，得到 UPQC 串联 APF 补偿电压指令 u_{ca}^* 、 u_{cb}^* 和 u_{cc}^* ， u_{ca}^* 、 u_{cb}^* 和 u_{cc}^* 在补偿网侧电压谐波的同时，还可以抑制电压波动。图中 2-8 中下半部分为 UPQC 并联 APF 补偿指令电流生成原理图，根据检测网侧谐波电流的瞬时值，经过瞬时无功功率的 i_p-i_q 运算，计算得到三相电流补偿指令信号，其中包括了直流侧电压波动的补偿，进而实现对电流谐波的补偿和直流侧电压的稳定控制^[40]。

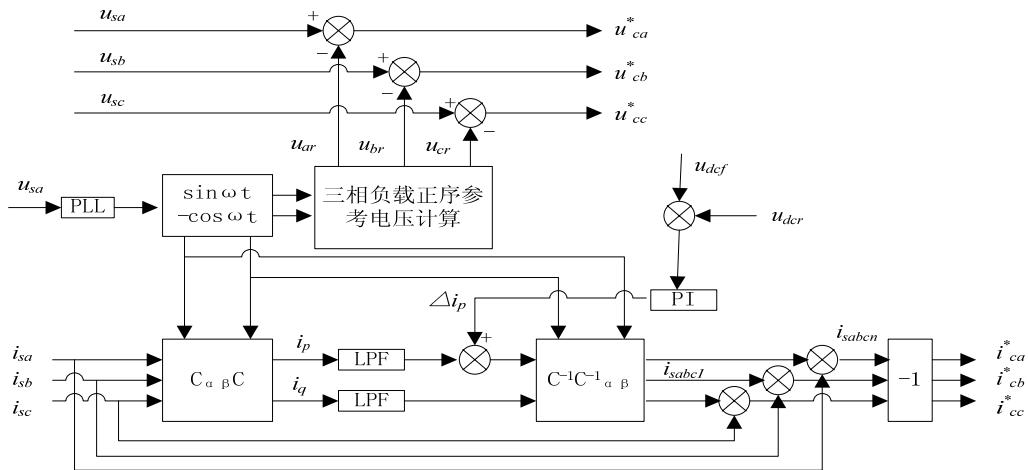


图 2-8 UPQC 指令信号生成原理图

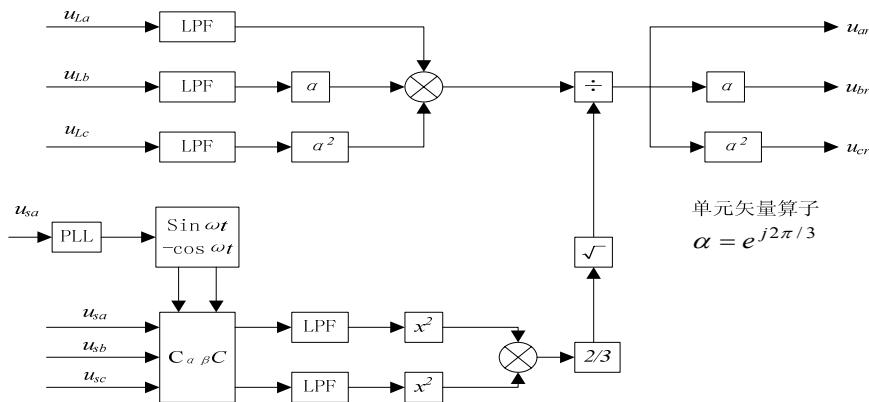


图 2-9 三相负载正序电压参考电压计算原理图

图 2-8 中用的检测运算方法为基于瞬时无功功率的 i_p-i_q 运算方式。并联和串联指令信号基本运算过程如下：

(1) 在检测网侧谐波电流时, 产生的指令信号等于电网侧电流的分量, 且方向与其相反, 可以表示为:

$$i_c^* = -i_{sn} \quad (2-6)$$

利用 i_p - i_q 运算方式可以得到:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = CC_{\alpha\beta} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

式中 $C = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix}$, $C_{\alpha\beta} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} \end{bmatrix}$, i_{sa} 、 i_{sb} 、
 i_{sc} 分别为电网侧的瞬时电流值。

对于 i_p 和 i_q , 设其包含的基波正序分量为 \bar{i}_p 和 \bar{i}_q , 通过低通滤波器(Low-Pass Filter, LPF) 滤除 i_p 和 i_q 中的交流分量得到:

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} = CC_{\alpha\beta} \begin{bmatrix} i_{sa1} \\ i_{sb1} \\ i_{sc1} \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

式中 i_{sa1} 、 i_{sb1} 、 i_{sc1} 分表对应 i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 的基波分量。

对式 (2-8) 进行反变换得到基波分量:

$$\begin{bmatrix} i_{sa1} \\ i_{sb1} \\ i_{sc1} \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta}^{-1} C^{-1} \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

式中 $C_{\alpha\beta}^{-1} = C_{\alpha\beta}^T$, $C^{-1} = C^T$ 。

由此可以得到三相电流补偿指令为:

$$\begin{cases} i_{ca}^* = i_{san} = i_{sa} - i_{sa1} \\ i_{cb}^* = i_{sbn} = i_{sb} - i_{sb1} \\ i_{cc}^* = i_{scn} = i_{sc} - i_{sc1} \end{cases} \quad (2-10)$$

利用上述的检测方法, 可以使电网侧三相电流实时跟踪三相指令电流, 实现对谐波的实时补偿。

直流侧电容电压的控制电路如图 2-8 中所示, 图中 u_{dcf} 为直接测量得到直流侧的电压值, u_{dcr} 为设定的直流侧电压参考值, 把 u_{dcf} 和 u_{dcr} 的差经过 PI 调节以后得到直流侧电压调节信号 Δi_p , 在把该信号叠加到检测到的 UPQC 并联 APF 的有功电流分量中, 进而实现对直流侧电容电压的控制。

(2) 在计算负载正序参考电压时, 负载电压先经过 LPF 后, 可得负载基波

正序分量:

$$u_{la+} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{la1} \\ u_{lb1} \\ u_{lc1} \end{bmatrix} = U_1 \sin(\omega t + \theta_l) \quad (2-11)$$

式中 $\alpha = e^{j2\pi/3}$ 为单元矢量算子, $u_{la1}, u_{lb1}, u_{lc1}$ 为经过低通滤波后的负载基波电压。

三相电源电压经过 i_p-i_q 运算可以得到:

$$\begin{bmatrix} u_{sp} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta} C \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

则电源基波电压幅值:

$$U = \sqrt{\frac{2}{3}(u_{sp1}^2 + u_{sq1}^2)} \quad (2-13)$$

式中 u_{sp1}, u_{sq1} 为 u_{sp}, u_{sq} 经过 LPF 后得到的电压分量。

由以上计算可以得到负载电压 A 相正序参考电压:

$$u_{ar} = \frac{U_1 \sin(\omega t + \theta_l)}{U} = U^* \sin(\omega t + \theta_l) \quad (2-14)$$

由公式 (2-14) 可得到三相负载正序参考电压为:

$$\begin{bmatrix} u_{ar} \\ u_{br} \\ u_{cr} \end{bmatrix} = u_{ar} \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha \\ \alpha^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U^* \sin(\omega t + \theta_l) \\ U^* \sin(\omega t + \theta_l - 2\pi/3) \\ U^* \sin(\omega t + \theta_l + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

2.3 UPQC 状态空间模型的建立

根据前文中介绍的 UPQC 基本结构和工作原理, 可以把它变换到两相静止参考坐标 d-q 下的等效电路, 图 2-10 为两相静止参考坐标 d-q 下 d 轴等效电路^[48-49], q 轴等效电路与 d 轴相似, 不再详细画出。图中 u_s 为电力系统供电电压; 供电端电流用 i_s 表示; 负载电压 u_l 来表示; 负载电流用 i_l 来表示; u_{ss} 和 u_{pp} 分别表示 UPQC 串联和并联型 APF 的输出电压; L_s 表示线路电感与串联变压器漏电感之和; R_s 表示线路电阻与串联变压器漏电阻之和; L_1, C_1, L_2, C_2 分别为串联和并联出口处 LC 滤波器的电容和电感的值; R_1 和 R_2 为电抗等效电阻。

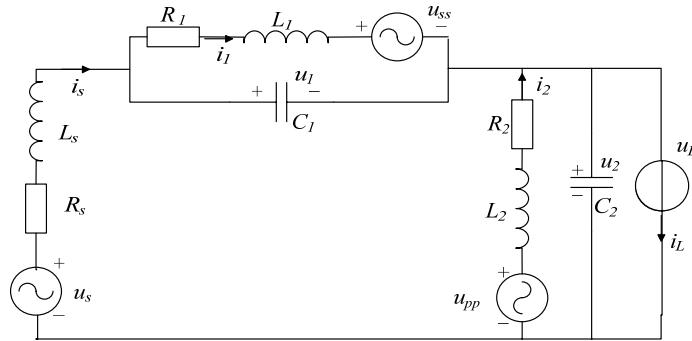


图 2-10 UPQC 的等效电路图

UPQC 基本工作原理就是将负载电压补偿为标准的三相正弦电压，同时将电源电流补偿为标准的三相正弦电流。因此，可以把串联和并联型 APF 的输出电压作为控制输入量，用 u 表示；将负载电压和电源电流作为被控输出量，用 y 来表示；将电源电压和负载电流分别等效为谐波电压源和电流源，可以视为模型中的未建模外部干扰，用 w 来表示。

对于图 2-10 所示的等效电路图，应用基尔霍夫定理推导出如下的表达式^[48-49]：

$$u_s = i_s R_s + L_s \frac{di_s}{dt} + u_1 + u_l \quad (2-16)$$

$$u_{ss} = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + u_1 \quad (2-17)$$

$$u_1 = \frac{1}{C_1} \int (i_s + i_1) dt \quad (2-18)$$

$$u_{pp} = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + U_2 \quad (2-19)$$

$$u_2 = \frac{1}{C_2} \int (i_s + i_1 + i_2) dt \quad (2-20)$$

式中 $u_2 = u_l$ 。

状态空间描述是一个对系统进行完整描述的方法，适合于描述复杂的动态系统，可以显示系统的动态特性，实现了系统的各种形式的统一描述。状态空间描述的方式，促进控制理论的发展，实现了从经典控制理论到现代控制理论的过渡。基于状态空间的动态系统，称为状态空间模型是一个时域模型，主要描述系统状态方程的输出变量和状态变量之间的关系。系统输出方程的数学模型描述是应用现代控制理论进行系统的综合分析的基础。

因此将公式 (2-16) ~ (2-20) 联立，可以得到 UPQC 系统的状态空间统一数学模型^[50-51]：

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1\omega + B_2u \\ y = Cx \end{cases} \quad (2-21)$$

式中 x 为状态变量, w 为系统外部输入, 即为外部干扰, u 为控制输入量, y 为系统输出。分别可以表示如下:

$$\begin{aligned} \omega &= \begin{bmatrix} u_s \\ i_l \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} u_{ss} \\ u_{pp} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} i_s \\ u_l \end{bmatrix}, \quad x = [i_s \quad u_2 \quad i_1 \quad i_2 \quad u_1]^T, \\ A &= \begin{bmatrix} -R_s/L_s & -1/L_s & 0 & 0 & -1/L_s \\ 1/C_2 & 0 & 0 & 1/C_2 & 0 \\ 0 & 0 & -R_1/L_1 & 0 & -1/L_1 \\ 0 & -1/L_2 & 0 & -R_2/L_2 & 0 \\ 1/C_1 & 0 & 1/C_1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ B_1 &= \begin{bmatrix} 1/L_s & 0 \\ 0 & -1/C_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1/L_1 & 0 \\ 0 & 1/L_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

上述的数学模型将 UPQC 系统描述成一个多输入多输出的动态系统, 即将 UPQC 的串联和并联 APF 视为一个整体系统来控制, 进而提高 UPQC 的综合电能质量补偿性能。因此, UPQC 也可以用如下的系统框图来表示:

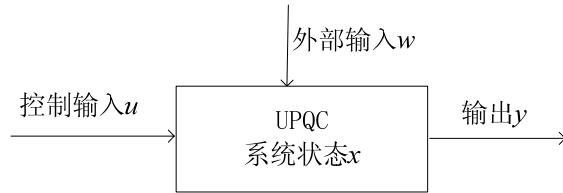


图 2-11 UPQC 状态空间方程表示的系统框图

2.4 本章小结

本章介绍 UPQC 基本结构, 分别对 UPQC 的串联回路型和并联回路型 APF 的结构和补偿原理进行了详细的分析, 并归纳出 UPQC 的工作原理和综合补偿功能, 以及分析 UPQC 补偿指令信号生成原理。通过把 UPQC 转换到两相静止参考坐标 $d-q$ 下的等效电路, 利用状态空间理论建立了 UPQC 的统一数学模型, 为后文对 UPQC 控制方法的研究以及仿真模型搭建打下基础。

第三章 UPQC 的谐波电流预测控制方法

本章分析了 UPQC 谐波电流检测及控制系统中存在延时原因，以及延时对 UPQC 补偿性能所造成的影响。着重研究如何解决延时问题，并对现有的谐波电流预测控制方法以及它们的优缺点进行了分析。针对这些预测控制方法所存在的问题，本章提出了一种基于前向线性预测理论的谐波电流预测控制方法。

3.1 产生延时的原因及解决方法

3.1.1 产生延时的原因

能否快速而准确地检测出谐波信号，是 UPQC 能否实现有效快速的补偿谐波功能的关键。由于受软件和硬件条件的限制，现有的各种检测方法大都存在着延时问题，使得检测出的结果实际上经过延时后的谐波电流，产生了较大误差。延时主要由以下两个方面造成^[50-51]：

(1) 硬件电路引起的延时

随着实时数字信号处理技术的迅速发展和广泛应用，如高速数字信号处理器 (DSP)。数字化控制术可以程序控制，在不改变控制电路的情况下可以改变控制方法或算法，控制更加灵活，便于调试和批量生产；系统稳定性、可靠性和灵活性强。因此，数字化控制技术在工业控制领域得到了越来越广泛的应用。但是，数字化控制器的各个环节和信号取样都需要时间等，必然造成延时问题，例如由数字化UPQC系统各部分引入的延时和指令电流更新时引起的延时等。

(2) 检测方法引起的延时

引起延时的另一个重要原因是检测方法造成的。现有的检测方法中，如文献[52, 53]提出的基于自适应原理的谐波检测方法，该方法虽然具有良好的自适应能力，但是动态响应速度较慢，延时达到一个周期之多。文献[54]提出了一种基于傅立叶变换算法的谐波检测方法，该方法具有功能多、实现简单和准确度高等优点，但是计算工作量较大且运算时间长，延时也超过了两个周期。文献[55]提出了一种基于瞬时无功功率理论的谐波检测方法，该方法实时性较好，动态响应速度快，但该方法受被检测电流中谐波构成和滤波器参数所限制，产生的延时接近一个周期，虽然检测整流负载的谐波时延时最小，但也达到 $1/6$ 周期。因此上述检测方法的结果实际上都

是延时以后的谐波电流，必然产生较大的误差。

3.1.2 解决系统延时的方法

(1) 解决措施

解决 UPQC 系统延时问题有两种方法，一是在硬件电路中采用快速微处理器；二是检测方法中采用谐波信号的预测方法。第一种方法是虽然可以缓解数字化控制技术引起的延时，但是 UPQC 补偿性能受延时的影响并没有得到有效的解决，且成本也较高。第二种方法是从信号处理方面来处理延时问题，易于软件来实现，且成本低，尤其对复杂的非线性、时变性和不确定性系统具有较强的处理能力。由于大多数负载电流呈周期性且变化缓慢，通过适当的预测方法可以从当前周期电流波形的变化预测下一个周期电流波形的变化，以及从当前采样周期的电流数据预测下一个采样点的电流数据，进而实现对谐波电流的无差时检测，有效提高 UPQC 的补偿性能。因此，本文选择第二种方法来解决 UPQC 的延时问题。

(2) 常用的预测方法^[56-59]

在选择预测方法时，应着重考虑以下几点：

- 1) 算法要简单，预测精度要高，实时性要好，易于工程实现；
- 2) 应具有良好的动态性能；
- 3) 对硬件条件要求低，投资成本低。

目前常用的预测方法有以下几种：

1) 基于神经网络理论的预测方法。该方法具有可以逼近任意复杂的非线性关系、较强的鲁棒性和容错性等优点。尤其对不确定性和非线性问题的处理具有较好的效果。但是该方法不易于软件实现，计算比较复杂，计算时间较长^[57]。

2) 基于自适应滤波理论的预测算法。该方法是根据当前输入信号和历史输入信号的信息来预测某种频率的变化，预测的具体频率与期望信号的选取相关。该方法同时具有滤波和预测的功能，易于计算机实现。但是，计算过程比较复杂，动态响应速度较慢，计算精度不够高^[47]。

3) 基于 LMS 理论的预测方法。该方法将 FFT 变换运用到块 LMS 算法中，对 LMS 算法滤波器抽头权值更新进行块处理，采用重叠存储方法，将大大提高算法的精度、收敛速度和信息处理量，但是由于信号的计算处理和控制部分存在着误差，因而必然会引起延时，使得该谐波预测方法仍然会存在一些误差^[59]。

3.2 基于前向线性预测理论的谐波电流预测控制方法

针对以上预测方法存在的问题，本章通过对前向线性预测理论的研究，提出了一种基于前向线性预测理论的谐波电流预测方法。该方法通过推导出最佳预测系数正则方程、谐波电流最小预测误差和阶更新方程，给出了1-3阶滤波器的预测系数和最小预测误差值，准确预测谐波电流，实现最小误差补偿。

3.2.1 前向线性预测系数及最小预测误差

设谐波电流信号 $x(t)$ 在 $t = 0, T, \dots, nT, \dots$ 的采样值分别为 $x(0), x(1), \dots, x(n-m), \dots, x(n-1), x(n), \dots$ ，其中 T 为采样周期。若已知其中的 $x(n-1), \dots, x(n-m)$ 等 m 个值，则谐波电流线性预测值和预测误差值分别为^[61]

$$\hat{x}(n) = \sum_{k=1}^m a_{mk} x(n-k) \quad (3-1)$$

$$e_m(n) = x(n) - \hat{x}(n) = x(n) - \sum_{k=1}^m a_{mk} x(n-k) \quad (3-2)$$

式中 $x(n)$ 为其真值， a_{mk} 为线性预测系数。

对式 (3-2) 进行 Z 变换可得

$$E_m(z) = X(z) - \sum_{k=1}^m a_{mk} z^{-k} X(z) \quad (3-3)$$

式中 $E_m(z)$ 、 $X(z)$ 分别为 $e_m(n)$ 、 $x(n)$ 的 z 变换。

由式 (3-3) 可得传输函数为

$$H_m(z) = 1 - \sum_{k=1}^m a_{mk} z^{-k} \quad (3-4)$$

不同的线性预测系数得到不同的预测误差，使误差 $e_m(n)$ 均方值最小的预测系数称为最佳预测系数。令 $E\{[e_m(n)]^2\}$ 对 a_{mk} 的偏导数为零，并代入式 (3-2) 可得

$$E\{e_m(n)x(n-k)\} = 0 \quad (3-5)$$

由式 (3-2)、(3-5) 可得

$$E\{x(n)x(n-k)\} - \sum_{i=1}^m a_{mi} E\{x(n-i)x(n-k)\} = 0 \quad (3-6)$$

因为对实平稳过程 $x(n)$ 的相关函数为 $r(k) = E\{x(n)x(n-k)\}$ ，且有

$r(-k) = r(k)$ 。因此，最佳预测系数必须满足的正则方程，以及预测系数的阶更新方程分别为

$$r(k) - \sum_{i=1}^m a_{mi} r(k-i) = 0 \quad (3-7)$$

$$a_{mk} = a_{m-1,k} + k_m a_{m-1,m-k}^* \quad (3-8)$$

式中 k_m 为反射系数， $a_{m-1,m-k}^*$ 为 k_m 与 $a_{m-1,m-k}$ 内积的标量形式。

由式 (3-5) ~ (3-7) 可求得对应于最佳 a_{mk} 的谐波电流最小预测误差，以及预测误差的阶更新方程分别为

$$\varepsilon_m = E\{e_m^f[x(n) - \sum_{i=1}^m a_{mi} x(n-i)]\} = r(0) + \sum_{i=1}^m a_{mi} r(i) \quad (3-9)$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_{m-1} (1 - |k_m|^2) \quad (3-10)$$

由 Levinson-Durbin 算法^[61]求出低阶预测滤波器的最佳预测系数和最小预测误差值分别为

- (1) 一阶预测滤波器， $a_{10} = 1$ ， $a_{11} = k_1$ ， $\varepsilon_1 = \varepsilon_0 (1 - |k_1|^2)$ ；
- (2) 二阶预测滤波器， $a_{20} = 1$ ， $a_{21} = k_1 + k_2 k_1^*$ ， $a_{22} = k_2$ ， $\varepsilon_2 = \varepsilon_1 (1 - |k_2|^2)$ ；
- (3) 三阶预测滤波器， $a_{30} = 1$ ， $a_{31} = a_{21} + k_3 k_2^*$ ， $a_{32} = k_2 + k_3 a_{21}^*$ ， $a_{33} = k_3$ ， $\varepsilon_3 = \varepsilon_2 (1 - |k_3|^2)$ 。

综上所述，该方法给出的最佳预测系数、最小预测误差值，以及预测系数和预测误差的及时更新，从而确保了该方法预测电力谐波的高精确度和快速跟踪能力。

3.2.2 谐波电流预测控制过程

图 3-1 为 UPQC 基于前向线性预测理论的谐波电流预测控制模型示意图。它由谐波电流检测、预测、控制和 UPQC 模块组成。

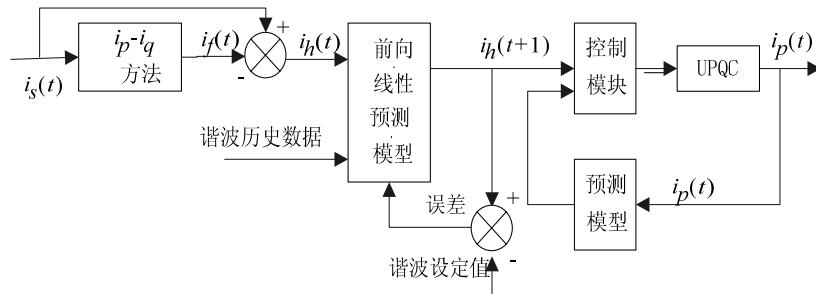


图 3-1 谐波电流预测控制模型

谐波电流检测模块采用 $i_p - i_q$ 算法，通过计算出 t 时刻电网或负载的基波电流，与电网或负载电流叠加后得到 t 时刻谐波电流，送入预测模块。预测模块采用前向线性预测方法，根据 t 时刻电网或负载的谐波电流和历史经验数据，计算出 $t+1$ 时刻的谐波电流。具体而言，从当前时刻开始，从电网或负载过去 2 个周期的谐波电流数据中等间隔地抽取 $i_h(t-7)、i_h(t-6)…、i_h(t)$ 等 8 个数据建立线性预测模型。根据这些抽样谐波数据，采用该方法预测前采样周期以后第 k 个采样周期的电网或负载谐波电流。该算法每 k 个采样周期执行 1 次，并完成滤波器预测系数的自适应调整，确保下 1 个采样周期到来之前，新的滤波器预测系数准备就绪。其优点是预测系数的调节不影响预测功能程序的执行，并确保有足够的时间完成预测系数的调节运算。为了进一步提高预测精度，将线性预测模型输出的部分谐波信号与谐波参考值相比较，计算模型的预测误差，再由该误差来校正预测系数，使得到谐波电流预测值更为准确，实现最小误差补偿效果。

控制模块采用自适应模糊控制算法^[48]，串联侧与并联侧结构相同，其控制结构如图 3-2 所示，通过预测模型得到补偿指令电流 $i_h(t+1)$ 和 UPQC 是输出的补偿指令电流 $i_p^*(t)$ ，将两者的偏差 e 与偏差 e 的变化率输入到模糊控制器中，应用模糊推理进行运算，得到最佳 PI 参数，计算出下一时刻 PWM 脉宽调制信号，实现对 UPQC 主电路的控制作用。这里的模型预测加反馈校正的过程，使得该方法具有较强的抗干扰和克服系统不稳定性的能力，而且鲁棒性好。

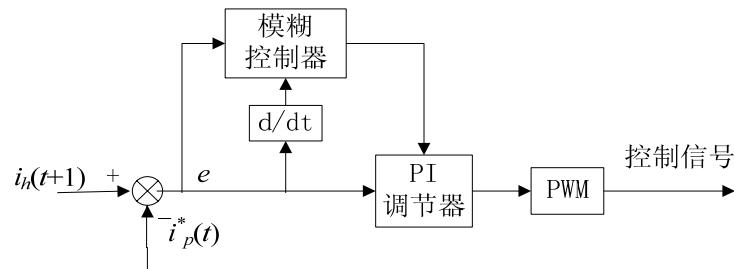


图 3-2 自适应模糊控制结构图

3.2.3 仿真分析

在仿真软件 MATLAB 中建立 UPQC 仿真模型。UPQC 负载为非线性三相整流装置，输入三相交流电压为 380V/50Hz，串并联侧的滤波电容和滤波电感分别为 $3000 \mu F$ 和 $1.5mH$ ，储能电容为 $2500 \mu F$ 。分别对三相负载电流幅度和相位不平衡两种情况进行了仿真。

(1) 三相负载电流幅度不平衡情况

图 3-3 (a) 为补偿前三相不平衡负载电流波形，在 0.06 秒时改变负载使得

a、b 两相幅度变化。图 3-3 (b)、(c) 为传统预测方法的 UPQC 注入电流和补偿后电流波形，图中表明三相幅度不平衡现象虽然得到改善，但是 a 相电流幅度仍然明显高于其它两相。图 3-4 (a)、(b) 为基于前向线性预测方法的 UPQC 注入电流和补偿后电流波形（补偿前三相不平衡负载电流同图 3-3 (a)），三相幅度不平衡问题基本得到解决，三相电流的幅度大小几乎相等，而且响应速度快，表现出良好的幅度跟踪效果。

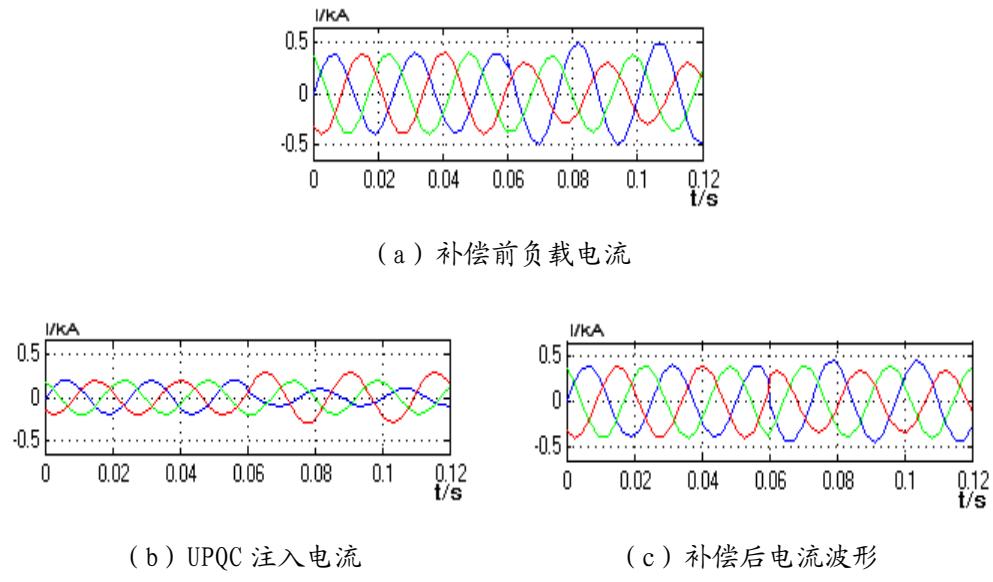


图 3-3 传统预测方法的 UPQC 三相电流幅度补偿

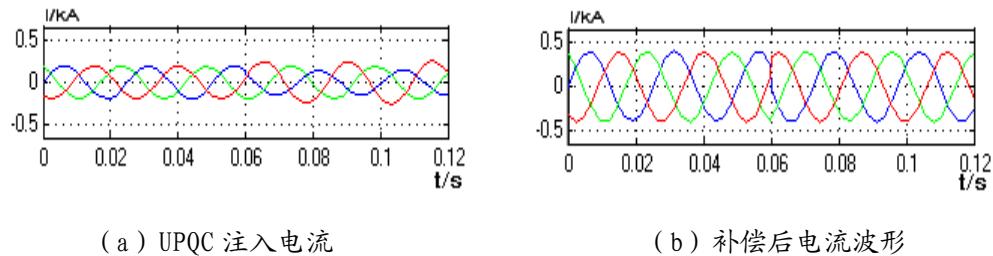


图 3-4 前向线性预测方法的 UPQC 三相电流幅度补偿

(2) 三相负载电流相位不平衡情况

图 3-5 (a) 为补偿前三相相位不平衡负载电流波形，仍然在 0.06 秒时改变负载使得三相相位失真。图 3-5 (b)、(c) 为传统预测方法的 UPQC 注入电流和补偿后电流波形，补偿后的相位失真得到一些改善，但仍有比较严重的相位失真。图 3-6 (a)(b) 为基于前向线性预测理论的 UPQC 注入电流和补偿后电流波形（补偿前三相不平衡负载电流同图 3-5 (a)），补偿后的三相负载电流相位基本对称，其相位补偿效果明显高于传统方法，而且表现出良好的相位跟踪效果。

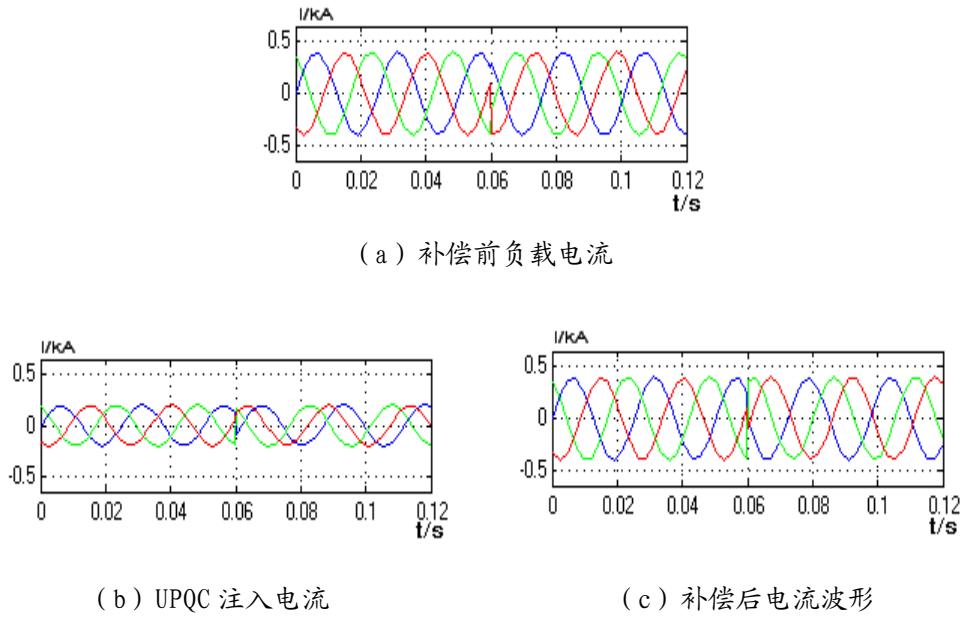


图 3-5 传统预测方法的 UPQC 三相电流相位补偿

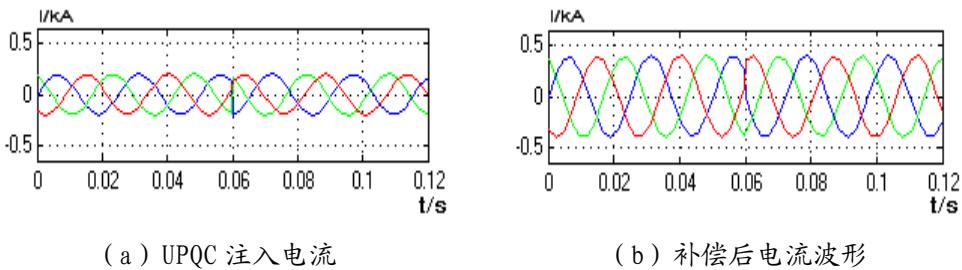


图 3-6 前向线性预测方法的 UPQC 三相电流相位补偿

表 3-1 为实验检测网侧电流中 3 次、5 次、7 次、9 次和 11 次谐波含有率及谐波总畸变率。由表 3-1 可以看出，本文所提出预测方法的对谐波具有很好的检测效果，有效的提高了 UPQC 的对谐波补偿效果的。

表 3-1 电网电流中主要谐波的含有率和畸变率

预测方法	主要谐波含有率					谐波总畸变率
	3 次	5 次	7 次	9 次	11 次	
滤波前	20.02	17.48	9.03	13.13	5.94	25.7
传统预测方法	2.96	2.53	1.91	2.35	1.63	5.1
本文预测方法	1.02	0.81	0.73	0.75	0.83	1.3

以上仿真结果表明，该方法能准确预测下一时刻的谐波电流，实现谐波电流最小误差补偿。当三相负载幅度和相位不对称时，该方法均能对快速变换的各次谐波电流进行准确的预测和补偿，和传统方法相比具有预测精度高、快速跟踪能力强和补偿效果好等优点。

3.3 本章小结

本章通过对谐波电流检测出现延时问题的原因进行了详细的分析以及对相应的解决方法做了说明，并对常用的谐波电流预测方法进行了分析和比较。针对现有预测方法的不足，本章将前向线性预测理论应用于 UPQC 的谐波电流预测之中，提出了基于前向线性预测理论的谐波电流预测控制方法。该方法推导出了最佳预测系数正则方程、谐波电流最小预测误差和阶更新方程，给出了 1-3 阶滤波器的预测系数和最小预测误差值。该方法能准确预测谐波电流，实现最小误差补偿，大大提高了 UPQC 的补偿控制效果。

第四章 基于鲁棒 H_2/H_∞ 优化理论的 UPQC 控制方法

UPQC 的控制策略直接影响其对电能质量的补偿能力,但 UPQC 系统的补偿功能多样性又决定了对其控制的复杂性,如果能对并联和串联 APF 进行优化控制,将可以实现 UPQC 的最优控制效果。本章先对现有常用的控制方法进行简单的分析,然后通过对鲁棒控制的研究,提出一种基于鲁棒 H_2/H_∞ 控制的 UPQC 优化控制方法,并进行仿真分析。

4.1 UPQC 的常用控制方法介绍

目前,针对 UPQC 的控制策略已经开展了广泛的研究,现已提出的 UPQC 控制方法有很多,既有简单的电流控制方法,又有基于模糊控制和智能控制等现代控制方法,根据控制思想的不同大致可以划分为两种类型。第一种是对 UPQC 中的串联和并联 APF 分别进行检测与控制,此类方法是依据有源电力滤波器的控制方法,分别实现对 UPQC 的串联和并联 APF 的控制,基本控制原理就是通过实时检测系统计算得到指令信号,再通过 PWM 调制技术得到控制信号,实现对系统的补偿。此类常用的控制方法有以下几种:

- (1) 滞环比较控制方法;
- (2) 三角载波比较控制方法;
- (3) 空间矢量控制方法。

第二种是通过建立一个模型对系统特性进行准确的描述,对 UPQC 的串联和并联有源滤波器实行统一协调控制,有效发挥 UPQC 的综合补偿调节功能。目前,此类控制方法有以下几种:

- (1) PID 控制方法;
- (2) 无差拍控制方法;
- (3) 自适应控制方法;
- (4) 智能控制方法。

4.2 UPQC 鲁棒 H_2/H_∞ 优化控制方法研究

4.2.1 鲁棒 H_2/H_∞ 优化控制的提出

H_2 和 H_∞ 范数是鲁棒优化控制理论中的两个重要的指标,这两个指标都有对应的控制系统设计。 H_2 最优控制设计的控制效果受被控对象的数学模型的准确

性，从而影响了传统 H_2 最优控制器设计和实际应用。20世纪80年代中期， H_∞ 问题开始兴起，一直是控制理论及应用研究领域的热点问题。由于 H_∞ 控制只考虑系统的鲁棒稳定性，而忽略了系统的其他性能指标，则使得控制系统性能具有局限性。将鲁棒 H_2 和 H_∞ 两种控制设计的优点综合加起来，就产生了鲁棒 H_2/H_∞ 控制方法，并且得到了迅速发展^[62]。

UPQC 的补偿效果很大程度上通过所实施的控制策略来调节。微电网在并网及运行过程中会存在大量与电能质量有关的扰动信号，因此需要进行有效的控制来消除或者抑制这种与电能质量有关的扰动现象。通过实施适当准确的 UPQC 控制策略，可有效地获取精度高、稳定性好和鲁棒性强的微电网动、静态系统性能。本文通过对鲁棒控制研究的基础上，结合第二章建立的 UPQC 统一数学模型，提出一种基于鲁棒 H_2/H_∞ 控制的 UPQC 控制方法。该方法将 UPQC 系统模型参数的不确定性引入到系统状态方程中，使得闭环系统中所允许存在的不确定性能够同时满足最优 H_2 性能和 H_∞ 干扰抑制，把鲁棒 H_2/H_∞ 控制器的设计转化为具有线性矩阵不等式的优化问题，进而推导出 UPQC 的线性动态反馈控制器，实现串联和并联部分的协调控制，有效提高 UPQC 的综合补偿功能。理论分析和仿真实验结果表明该方法具有控制效果好、响应速度快、鲁棒性强等特点。

4.2.2 UPQC 鲁棒 H_2/H_∞ 控制设计

由于电网中的负载与电源类型多样，造成电网大量谐波的注入和电压波动等电能质量问题，研究新的 UPQC 优化控制方法就显得十分重要。UPQC 鲁棒 H_2/H_∞ 控制系统如图 4-1 所示，图中 W 、 U 、 Z 和 Y_s 均为向量值符号， W 为外部输入信号， U 为控制输入信号， Z 为控制输出信号， Y_s 为测量输出信号。

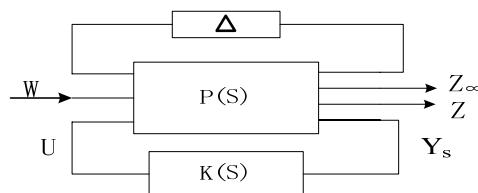


图 4-1 鲁棒 H_2/H_∞ 控制系统方框图

图 4-1 系统的状态方程^[62-63]可表示为：

$$\begin{cases} \dot{X} = (A + \Delta A)X + B_1 W + (B_2 + \Delta B_2)U \\ Z_\infty = C_\infty X + D_\infty U \\ Z_2 = C_2 X + D_2 U \end{cases} \quad (4-1)$$

式中 X 是系统状态向量， A 、 B_1 、 B_2 、 C_∞ 、 C_2 、 D_∞ 、 D_2 是描述系统模型的已知实常数矩阵。 ΔA 和 ΔB_2 为表示不确定性系统参数的未知实矩阵，假定其是范

数且有界的，则有如下表达式：

$$[\Delta A \quad \Delta B] = HF [E_1 \quad E_2] \quad (4-2)$$

式中 H 、 E_1 、 E_2 是已知的常实矩阵，反映了不确定系数的结构信息， $F \in R_{i^*j}$ ，是一个满足 $F^T F \leq I$ 的不确定矩阵。

对系统结构进行鲁棒控制就是给定一个 $\gamma > 0$ ，设计一个鲁棒 H_2/H_∞ 控制器 $U = K(s)X$ 使得闭环系统满足以下要求：

- (1) 闭环系统是渐进稳定的；
- (2) 从 W 到 Z_∞ 的闭环传递函数 $T_w(z)_\infty$ 满足 $\|T_w(s)_\infty\|_\infty < \gamma$ ，以保证闭环系统具有鲁棒稳定性；
- (3) 从 W 到 Z_2 的闭环传递函数 $T_w(s)_2$ 满足 $\|T_w(s)_2\|_2 < \gamma_2$ ，以保证系统具有良好的动态性能。

在满足上述条件的控制器中，使 γ_2 最小的控制器就是鲁棒 H_2/H_∞ 最优控制。考虑设计一个满足上述 3 个条件的满阶动态输出反馈控制器：

$$\begin{cases} \dot{X}_c = A_c X_c + B_c Y_s \\ U = C_c X_c \end{cases} \quad (4-3)$$

式中 X_c 为控制器的状态向量； A_c 、 B_c 、 C_c 为待求矩阵。

由公式(4-1)、(4-3)可得闭环系统：

$$\begin{cases} \dot{\bar{X}} = (\bar{A} + \bar{H}\bar{F}\bar{E})\bar{X} + \bar{B}W \\ Z_\infty = \bar{C}_\infty \bar{X} \\ Z_2 = \bar{C}_2 \bar{X} \end{cases} \quad (4-4)$$

$$\text{式中 } \bar{X} = \begin{bmatrix} X \\ X_C \end{bmatrix}, \quad \bar{H} = \begin{bmatrix} H \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{A} = \begin{bmatrix} A & B_2 C_C \\ B_C C_s & A_C + B_C D_s C_C \end{bmatrix}, \quad \bar{E} = [E_1 \quad E_2 C_C],$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} B_2 \\ B_C B_s \end{bmatrix}, \quad \bar{C}_\infty = [C_\infty \quad D_\infty C_C], \quad \bar{C}_2 = [C_2 \quad D_2 C_C].$$

由文献[63]可知，对于给定标量 $\gamma_2 > 0$ ，当且仅当存在对称正定矩阵 P 、 Q 满足三个目标条件，使得

$$\begin{bmatrix} (\bar{A} + \bar{H}\bar{F}\bar{E})P + P(\bar{A} + \bar{H}\bar{F}\bar{E})^T & \bar{B} & P\bar{C}_\infty^T \\ \bar{B}^T & -I & 0 \\ \bar{C}_\infty P & 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (4-5)$$

$$(\bar{A} + \bar{H}\bar{F}\bar{E})P + P(\bar{A} + \bar{H}\bar{F}\bar{E})^T + \bar{B}\bar{B}^T < 0 \quad (4-6)$$

$$\begin{bmatrix} -Q & \bar{C}_2 P \\ P\bar{C}_2^T & -P \end{bmatrix} < 0 \quad (4-7)$$

$$\text{Trace}(Q) < \gamma_2^2 \quad (4-8)$$

上式对所有满足 $F^T F \leq I$ 的矩阵 F 都成立。由文献[62]中矩阵的 Schur 补性质，存在一个常数 $\mu > 0$ 使得式(4-5)等效为：

$$\begin{bmatrix} \bar{A}\bar{P} + \bar{P}\bar{A}^T & \bar{B} & \bar{P}\bar{C}_\infty^T & \bar{H} & P\bar{E}^T \\ \bar{B}^T & -I & 0 & 0 & 0 \\ \bar{C}_\infty P & 0 & -\gamma^2 I & 0 & 0 \\ \bar{H}^T & 0 & 0 & -\mu^{-1} I & 0 \\ \bar{E}P & 0 & 0 & 0 & -\mu I \end{bmatrix} < 0 \quad (4-9)$$

由此可以把矩阵 P 及其逆矩阵做如下处理：

$$P = \begin{bmatrix} P_1 & P_3 \\ P_3^T & P_5 \end{bmatrix}, \quad P^{-1} = \begin{bmatrix} P_2 & P_4 \\ P_4^T & P_6 \end{bmatrix} \quad (4-10)$$

式(4-10)中 P_1 和 P_2 为正定的对称矩阵，由 $PP^{-1}=I$ 可得：

$$P_3 P_4^T = I - P_1 P_2 \quad (4-11)$$

则可以定义两矩阵 F_1 和 F_2 如下：

$$F_1 = \begin{bmatrix} P_1 & I \\ P_3^T & 0 \end{bmatrix}, \quad F_2 = \begin{bmatrix} I & P_2 \\ 0 & P_4^T \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

由式(4-10)~(4-12)可得：

$$PF_2 = F_1, \quad F_2^T PF_2 = F_2^T F_1 = \begin{bmatrix} P_1 & I \\ I & P_2 \end{bmatrix} \quad (4-13)$$

定义如下替换公式

$$\begin{cases} \hat{A} = P_2 A P_1 + P_2 B_2 C_C P_3^T + P_4 B_C C_s P_{11} + \\ P_4 B_C C_s P_1 + P_4 A_C P_3^T + P_4 B_C D_s C_C P_3 \\ \hat{B} = P_4 B_C \\ \hat{C} = C_C P_4^T \end{cases} \quad (4-14)$$

对式(4-9)左乘矩阵 $\text{diag}([F_2^T \ I \ I \ I \ I])$ 和右乘矩阵 $\text{diag}([F_2 \ I \ I \ I \ I])$ ，并结合式(4-14)可得线性矩阵不等式：

$$\begin{bmatrix} J_{11} & * & * & * & * \\ J_{21} & -I & * & * & * \\ J_{31} & 0 & -\gamma^2 I & * & * \\ J_{41} & 0 & 0 & -\mu^{-1} I & * \\ J_{51} & 0 & 0 & 0 & -\mu I \end{bmatrix} < 0 \quad (4-15)$$

式中

$$J_{11} = \begin{bmatrix} AP_1 + B_2 \hat{C} + P_1 A^T + (B_2 \hat{C})^T & A + \hat{A}^T \\ \hat{A} + A^T & P_2^T A + A^T P_2 + BC_s + (\hat{B} C_s)^T \end{bmatrix},$$

$$J_{21} = \begin{bmatrix} B_1^T & B_1^T P_{n11} + (\hat{B} B_s)^T \end{bmatrix},$$

$$J_{31} = \begin{bmatrix} C_\infty P_1 + D_\infty \hat{C} & C_\infty \end{bmatrix},$$

$$J_{41} = \begin{bmatrix} H^T & H^T P_2 \end{bmatrix},$$

$$J_{51} = \begin{bmatrix} E_1 P_1 + E_2 \hat{C} & E_1 \end{bmatrix}, \text{“*”表示矩阵的对称矩阵子块。}$$

对式(4-7)左乘矩阵 $\text{diag}(F_2^T I)$ 和右乘矩阵 $\text{diag}([F_2 I])$, 并结合式(4-14)可得

$$\begin{bmatrix} -Q & C_2 P_1 + D_2 \hat{C} & C_2 \\ P_1^T C_2^T + \hat{C}^T D_{2T} & -P_1 & -I \\ C_2^T & -I & -P_2 \end{bmatrix} < 0 \quad (4-16)$$

由上述推导, 在满足式(4-5)~(4-7)的条件下使式(4-7)最小化时就有最优解 P 和 Q , 从而找到鲁棒 H_2/H_∞ 控制系统的最优控制规律。对于闭环系统式(4-4)和给定的标量 $\gamma > 0$ 和 $\mu > 0$, 则可有下面的优化问题来表示:

$$\begin{aligned} \min_{P_1, P_2, \hat{A}, \hat{B}, \hat{C}} & \gamma^2 \\ \text{s.t.} & (i) (4-15) \ (ii) (4-8) \ (iii) (4-16) \end{aligned} \quad (4-17)$$

求解式(4-17), 并对式(4-11)进行奇异值分解可得到 P_1 和 P_2 , 再代入式(4-14)求 A_c , B_c , C_c , 就可以得到形如式(4-3)的控制器, 即为满足三个目标条件的微电网 UPQC 鲁棒 H_2/H_∞ 优化控制器。

4.3 仿真分析

根据本文提出的鲁棒 H_2/H_∞ 优化控制器, 结合 UPQC 数学模型, 利用 Matlab 仿真软件搭建微电网中 UPQC 仿真模型。模型中使用一个 380V /50 Hz 的三相交流电源, 非线性负载由三相不控整流桥构成。电路参数: 线路电感与串联变压器漏电感和漏电阻之和分别为 0.4mH 和 0.5Ω; 串联侧输入滤波电感、滤波电容和滤波电感等效电阻值分别为 5mH、10 μF 和 1Ω; 并联侧输入滤波电感、滤波电容和滤波电感等效电阻值分别为 3mH、30 μF 和 1Ω; 直流母线滤波电容设置为 2200 μF。由此可得 UPQC 系统数学模型的参数为:

$$A = \begin{bmatrix} -1250 & -2.5 & 0 & 0 & -2.5 \\ 33333 & 0 & 0 & 33333 & 0 \\ 0 & 0 & -200 & 0 & -200 \\ 0 & -333 & 0 & -333 & 0 \\ 100000 & 0 & 100000 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} 2.5 & 0 \\ 0 & 33333 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -200 & 0 \\ 0 & 333 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

鲁棒 H_2/H_∞ 控制器可利用 MATLAB 中的鲁棒工具箱来设计。利用 MATLAB 的 Lmivar 和 Limterm 指令，对系统状态方程进行描述，然后调用 MATLAB 中的 mincx 函数，对公式（4-17）的优化问题求解，计算出反馈增益矩阵 K，并在 SIMULINK 中调用。

图 4-2 为电网补偿前电源电压波形，在 0.07s 时接入一个三相交流电源造成 A、B、C 电压跌落。

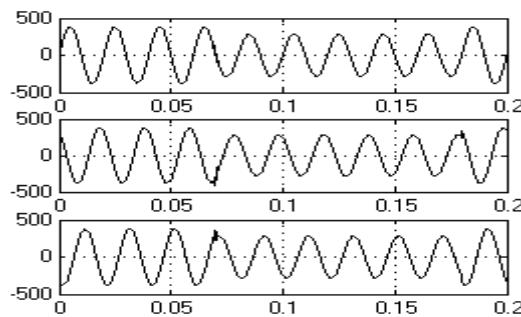


图 4-2 补偿前电源电压波形

图 4-3 为采用三角载波控制方法和鲁棒 H_2/H_∞ 控制方法补偿后的电源电压波形。从图 4-3(a)、(b) 可看出，三角载波控制补偿后跌落的电源电压波形在 0.1 秒时才恢复，而且恢复后电压幅值仍有变化；鲁棒 H_2/H_∞ 控制方法补偿后在 0.08s 时电压跌落就得到迅速恢复，而且恢复后电压幅值几乎不变，可见鲁棒 H_2/H_∞ 控制方法响应速度更快且更稳定。

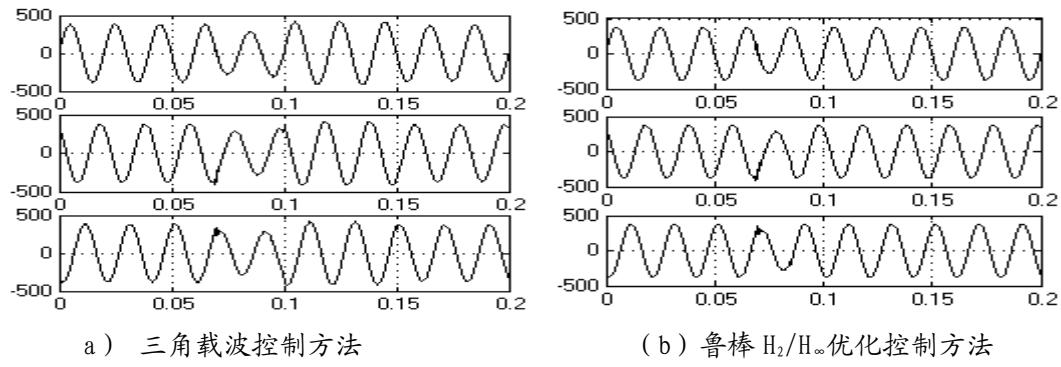


图 4-3 补偿后电源电压波形

图 4-4 为补偿前负载电流波形及 A 相电流频谱图。从图 4-4(a)可以看出，负载电流存在三相严重不平衡问题，这是由负载不平衡造成的。图 4-4(b) 中 A 相频谱图显示，负载电流含有很高的谐波成分，该相总谐波含量达到 28.40%。

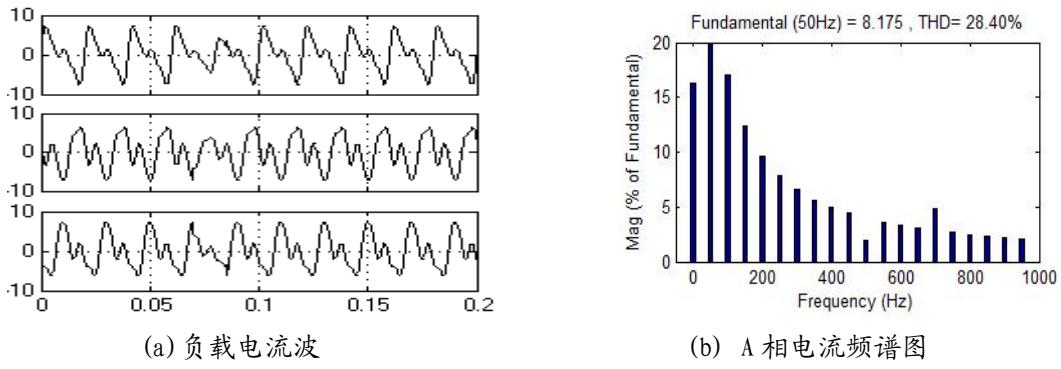


图 4-4 补偿前的负载电流波形及 A 相频谱图

图 4-5 为采用三角载波控制方法和鲁棒 H_2/H_∞ 控制方法补偿后的负载电流波形及补偿后的 A 相频谱图。

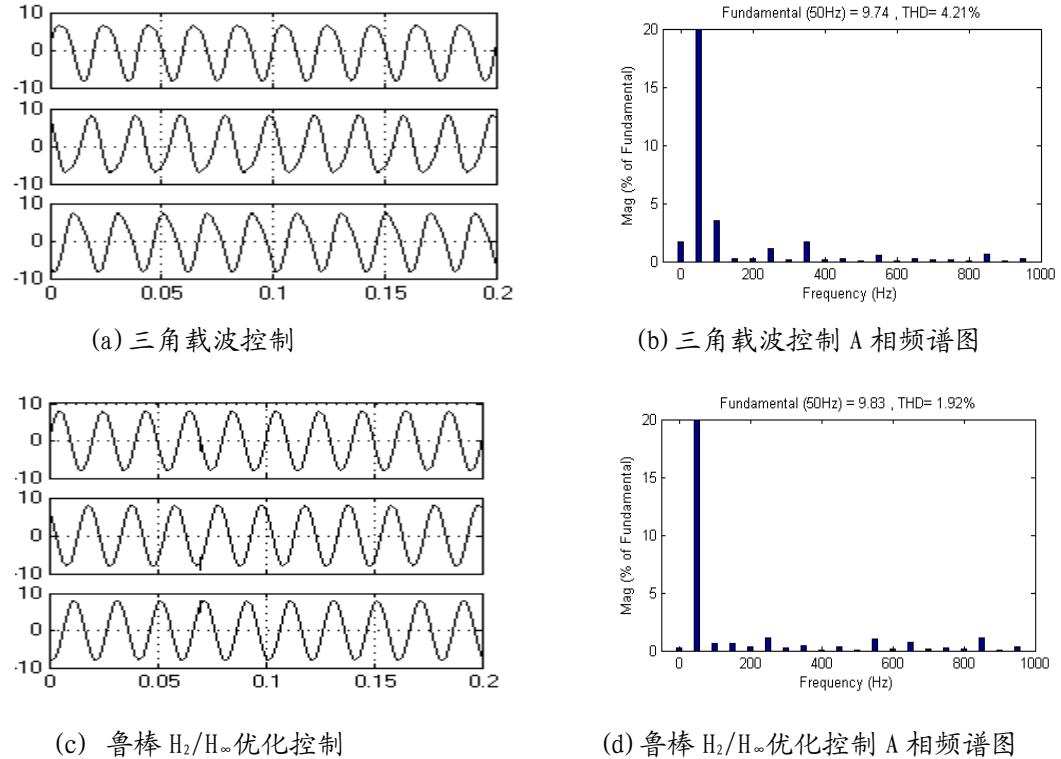


图 4-5 补偿后的负载电流波形及 A 相频谱图

由图 4-5(a)、(c)可看出鲁棒 H_2/H_∞ 优化控制的效果明显，波形更近似三相平衡的正弦波。由图 4-5(b)、(d)可以看出三角载波控制三次以上谐波被控制在 3.5 % 以下，总谐波含量为 4.21%，而鲁棒 H_2/H_∞ 优化控制的三次以上谐波被控制在 1.8% 以下，总谐波含量为 1.92%，可见采用鲁棒 H_2/H_∞ 控制的谐波畸变率小。

4.4 本章小结

本章在 UPQC 统一数学模型基础上，提出了基于鲁棒 H_2/H_∞ 的 UPQC 优化控制

方法，该方法将 UPQC 系统模型参数的不确定性引入到系统状态方程中，使得闭环系统中所允许存在的不确定性能够同时满足最优 H_2 性能和 H_∞ 干扰抑制，把鲁棒 H_2/H_∞ 控制器的设计转化为具有线性矩阵不等式的优化问题，进而推导出 UPQC 的线性动态反馈控制器，实现 UPQC 的优化控制，有效的提高 UPQC 的综合补偿功能。仿真和实验结果表明，该方法对微电网中经常出现的三相电网电压跌落、不平衡和谐波等电能质量问题，具有快速稳定的补偿效果和较强的鲁棒性能。

第五章 基于变约束预测控制的 UPQC 控制方法

由于常用 UPQC 的控制方法对于 UPQC 输入、输出和状态的约束条件控制效果较差，很大程度上限制了 UPQC 的综合调节性能。本章提出了一种基于变约束预测理论的 UPQC 控制方法。该方法在鲁棒预测控制的基础上，通过在线优化控制方法构建当前状态的反馈控制矩阵的凸组合系数，确定对应的控制约束，增加了在线求解的自由度，减少了运算时间。

5.1 预测控制技术原理

预测理论是从 20 世纪 80 年代开始发展起来一种新型的计算机控制算法，是在工业过程实际应用的基础上产生的，并在工业应用的过程中不断的完善和发展。目前预测控制技术主要包括非线性预测控制、鲁棒预测控制和自适应预测控制等。预测控制的算法大多采用多步预测、滚动优化和反馈校正等控制方法，对系统模型的参数要求低，且控制效果好、鲁棒性强。对于非线性、不确定性和时变的系统，很难建立精确的系统模型，传统的控制方法，如 PID 控制和现代控制理论等，都难以达到良好的控制效果，而预测控制方法的优点决定了其应用领域的广泛性以及良好的发展前景。

预测控制可以根据被控对象的历史信息 $\{u(k-j), y(k-j) | j \geq 1\}$ 和未来输入 $\{u(k+j-1), j = 1, \dots, m\}$ ，预测对象未来输出 $\{y(k+j), |j = 1, \dots, p\}$ 。

设系统预测控制输出为：

$$y_p(k+j) = y_m(k+j) + [y(k) - y_m(k)] \quad (5-1)$$

参考轨迹方程：

$$\begin{cases} y_r(k+j) = \alpha^j y(k) + (1 - \alpha^j) w \\ y_r(k) = y(k) \end{cases} \quad (5-2)$$

则优化目标函数：

$$J_{\min} = \sum_{i=1}^p [y_p(k+i) - y_r(k+i)]^2 q_i \quad (5-3)$$

预测控制的基本原理可以用下图来表示：

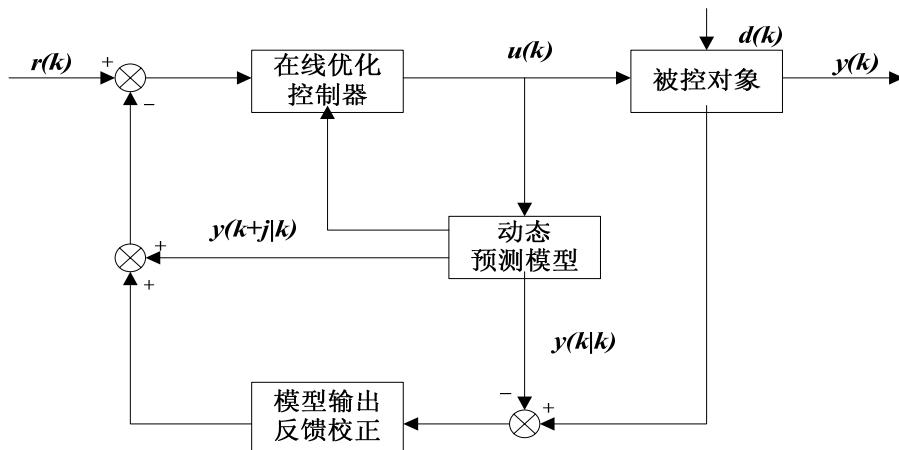


图 5-1 预测控制基本原理图

图 5-1 中控制结构包括动态预测模型、输出反馈校正模块、优化控制模块和被控对象模块。 $r(k)$ 、 $u(k)$ 、 $y(k)$ 和 $d(k)$ 分别表示系统输入参考信号、控制输出信号、系统输出和系统干扰输入信号。从图中可以看出：从被控对象的控制信号 $u(k)$ 以及当前时刻的状态信号出发，建立动态预测模型，通过在线优化模块，求解最佳性能指标 J 使得预测模型趋近于参考轨迹，并确定未来的控制信号 $u(k+j|k)$ 。优化过程是在线反复进行的，且时刻关注系统的动态性能。在下一个状态采样时刻，通过被控的对象的输出信号对预测模型的输出进行校正，然后继续进行在线优化。

常用的预测控制一般是保持在约束恒定的条件下，在约束范围内通过优化求解得到最佳性能的控制量。这在一定程度上虽然保证了求解环境的稳定性，但是使得优化求解的过程繁琐，造成在线优化求解时间过长。本文采用的变约束预测控制是建立在鲁棒预测控制的基础上，利用采样一系列的离线状态点构建嵌套且渐进稳定不变的椭圆集，根据状态在不同椭圆内的不同约束值，建立新的约束，再计算出对应椭圆的控制规律。并把该控制方法应用到 UPQC 中，进而提高 UPQC 的综合补偿效果。

5.2 UPQC 变约束预测控制方法设计

5.2.1 变约束预测控制方法

变约束预测控制设计需要建立一个离散时间的动态预测模型，再根据系统动态预测模型的性能指标及约束条件等，构建一个最优控制函数，在每个采样时刻，以当前系统的状态为初始状态，并结合前一时刻的历史信息预测下一时刻的状态，在每一时刻都要更新该状态的约束条件，在线优化求解得到最优控制规律。

本文根据 UPQC 的状态空间的统一数学模型，来建立动态预测模型，进行优化设计。

首先将第二章公式 (2-21) 转化成离散模型，：

$$\begin{cases} \dot{x}(k+1) = Ax(k) + B_1w(k) + C_2u(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (5-4)$$

变约束预测控制方法是随着状态在不同位置求解出输入控制规律，在不影响求解的情况下，依照状态对约束进行调整，减少求解范围和计算时间，以达到最佳优化控制效果。由于 w 可测，故可采用前馈方式，将 UPQC 的状态分为稳态和暂态两部分，通过计算可以将式 (5-4) 转化成暂态模型，既动态预测模型：

$$\begin{cases} \dot{X}(k+1) = AX(k) + B_2U(k) \\ Y(k) = CX(k) \end{cases} \quad (5-5)$$

式中： $X(k)$ ， $U(k)$ ， $Y(k)$ 为 UPQC 离散模型与稳态模型经过相减处理后的结果； $U(k)$ 和 $X(k)$ 分别为输入和可测状态，而 $Y(k)$ 相当于暂态误差信号。

从式 (5-5) 可看出暂态模型可以不考虑外部输入 w 的影响。

根据鲁棒预测控制原理，对式 (5-5) 设计预测控制器，为使系统达到稳定状态，可以先构造出性能指标函数^[63-64]

$$J(k) = \sum_{i=0}^{N_1-1} \|X(k+i)\|_D^2 + \sum_{i=0}^{N_2-1} \|U(k+i)\|_R^2 \quad (5-6)$$

式中： N_1 和 N_2 分别为预测时域和控制时域，可以根据系统的采样时间和系统周期来确定； D 和 R 是大于零的相应维数加权矩阵。

对 UPQC 的多输入多输出系统的求解，通常采用最小化最差性能指标形式，即在每个采样时刻 k ，求解控制规律 $U(k+i) = G(k)X(k+i)$ 。从而有：

$$\min_{U(k+i)=G(k)X(k+i)} \max_{[A|B_2] \in \Omega} J(k) \quad (5-7)$$

$$\text{s.t. } \begin{cases} |U(k+i)| \leq \bar{U} \\ |\psi X(k+i)| \leq \bar{\psi} \end{cases} \quad (5-8)$$

$$\begin{cases} \|X(k+i+1)\|_{P(k)}^2 - \|X(k+i)\|_{P(k)}^2 \leq \|X(k+i)\|_D^2 - \|U(k+i)\|_R^2 \\ P(k) > 0 \end{cases} \quad (5-9)$$

式中 $P(k)$ 是正定矩阵， $G(k)$ 为最优反馈控制增益， \bar{U} 和 $\bar{\psi}$ 为对应的控制输入和状态约束。

式 (5-9) 能保证性能指标函数单调且鲁棒稳定，式 (5-9) 从 $i=1$ 逐次累加，并定义标量 $\gamma > 0$ ，可得：

$$\max_{[A|B_2] \in \Omega} J(k) \leq \|X(k)\|_{P(k)}^2 \leq \gamma \quad (5-10)$$

若存在矩阵 $Z > 0$ ，定义 $Q = \gamma P(k)^{-1}$ ， $G(k) = ZQ^{-1}$ ，通过 Schur 补引理^[63-65]

把式(7)和 $\|X(k)\|_{P(k)}^2 \leq \gamma$ 转换成LMI^[64-67]形式:

$$\begin{bmatrix} Q & * & * & * \\ A_1 Q + B_2 Z & Q & * & * \\ D^{\frac{1}{2}} Q & 0 & \gamma I & * \\ R^{\frac{1}{2}} Z & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} \geq 0 \quad (5-11)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & * \\ X(k) & Q \end{bmatrix} \geq 0 \quad (5-12)$$

对于公式(5-5)在k时刻的控制规律 $U(k+i) = G(k)X(k+i)$, 应用最小化性能指标公式(5-10)求得上界 γ , 其中 $G(k)=ZQ^{-1}$, Z 和 Q 可以应用下式求得:

$$\min_{\gamma, Z, Q} \gamma \quad (5-13)$$

s.t 式(5-11), (5-12)

变约束预测控制方法设计包括离线和在线两部分, 利用每个采样时刻的状态点构建嵌套渐进稳定的椭圆集, 再计算出对应椭圆的控制规律。离散部分主要是根据每个逐渐趋于原点的离散状态点, 由公式(5-13)计算对应的 Z 、 Q 和 γ , 并进行储存。而在线部分主要是对每个状态 $X(k)$ 在储存库中搜索, 求解满足条件的控制规律。

对于在线部分, 为了提高运行的自由度, 提高控制的可行性和最优性, 引入一个新的自由度值 θ 。在k时刻的状态 $X(k)$, 每次计算前都要确定该状态下的不变椭圆集, 同时还要确定对应椭圆 ε_{out} 和与其相邻内部椭圆 ε_{in} 。目标是实现该状态能达到内部嵌套椭圆集合 $M_f(\theta(k))$, 并且使 $M_f(\theta(k))$ 尽可能的接近最小椭圆 M_{in} , 由此可设

$$\begin{aligned} & (\gamma(\theta(k)), Q(\theta(k)), X(\theta(k)), Z(\theta(k))) \\ &= \theta(k)(\gamma_{out}, Q_{out}, X_{out}, Z_{out}) + (1 - \theta(k))(\gamma_{in}, Q_{in}, X_{in}, Z_{in}) \end{aligned} \quad (5-14)$$

式中: γ_{out} 、 Q_{out} 、 X_{out} 、 Z_{out} 、 γ_{in} 、 Q_{in} 、 X_{in} 、 Z_{in} 分别表示在k时刻确定的对应椭圆 ε_{out} 和与其相邻内部椭圆 ε_{in} 内 γ 、 Q 、 X 和 Z 的值。

对 θ 优化求解如下:

$$\theta^*(k) = \min_{\theta(k)} \theta(k) \quad (5-15)$$

$$\text{s.t } 0 < \theta(k) < 1 \quad (5-16)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & * \\ X(k) & Q(\theta(k)) \end{bmatrix} \geq 0 \quad (5-17)$$

$$\begin{bmatrix} H(\theta(k)) & * \\ G(\theta(k))^T & Q(\theta(k))^{-1} \end{bmatrix} \geq 0 \quad (5-18)$$

式(5-18)中 $H(\theta(k)) = H(\theta(k))^T$ 。

通过求解可以得到如下公式:

$$\begin{cases} Z(\theta^*(k)) = \theta^*(k)Z_{out} + (1 - \theta^*(k))Z_{in} \\ Q(\theta^*(k)) = \theta^*(k)Q_{out} + (1 - \theta^*(k))Q_{in} \end{cases} \quad (5-19)$$

对于 $0 < \theta^*(k) < 1$, 存在着如公式(5-14)的线性组合:

$$\begin{aligned} & (\gamma(\theta^*(k)), Q(\theta^*(k)), X(\theta^*(k)), Z(\theta^*(k))) = \\ & \theta^*(k)(\gamma_{out}, Q_{out}, X_{out}, Z_{out}) + (1 - \theta^*(k))(\gamma_{in}, Q_{in}, X_{in}, Z_{in}) \end{aligned} \quad (5-20)$$

这样就形成一个状态不变集合 $M_f(\theta^*(k)) = \{X \in R^n \mid X^T(k)Q(\theta^*(k))^{-1}X(k) \leq 1\}$,

对应的内部控制规律为:

$$U(k) = Z(\theta^*(k))Q(\theta^*(k))^{-1}X(k) \quad (5-21)$$

上述计算得到的 $Q(\theta^*(k))^{-1}$ 和 $Z(\theta^*(k))$ 是椭圆 ε_{out} 和椭圆 ε_{in} 的凸组合, 考虑椭圆 ε_i 内的状态对应的最大控制量可以由相邻椭圆的参数给定, 这样相邻的椭圆之间就只需很小的计算量就可以使系统向平衡点收敛, 每步都需要重新定义椭圆 ε_{out} 和椭圆 ε_{in} , 直到系统状态可以直接采用控制规律 $U(k+i) = G(k)X(k+i)$ 为止。

根据求解输出的控制量随着在不同时刻状态下而有所不同, 对当前时刻状态的约束条件进行调整, 从而减少了优化求解的范围, 是计算时间大大的降低。具体的变约束预测控制计算步骤为:

(1) 离散部分: 对于给定的每个离散状态点 X_i ($i=1,2,\dots,N$), 计算得到其对应的 Z_i 、 Q_i 及 γ_i 的值, 并附加约束条件 $Q_{i-1} > Q_i$ ($i \neq 1$), 确保椭圆间互相嵌套提高求解过程的精确性, 并建立一次存储空间来储存 Z_i 、 Q_i 及 γ_i 的值, 同时保存

$$\begin{aligned} U_{\max i,n} = \\ \max \left\{ (Z_i Q_i^{-1})_r X(i), (Z_{i+1} Q_{i+1}^{-1})_r X(i) \right\} \end{aligned} \quad (5-22)$$

计算可以得到对应时刻状态的最优控制规律:

$$G_i(k) = Z_i Q_i^{-1} \quad (5-23)$$

(2) 在线部分:

a) 在 k 时刻确定离散状态 $X(k)$ 所在的椭圆, 并判断其是否为最小椭圆, 如果不是最小椭圆, 则 $Q_{out}=Q_i$, $Q_{in}=Q_{i+1}$, $Z_{out}=Z_i$, $Z_{in}=Z_{i+1}$, $U_{\max} = \min\{U_{\max i,r}, U\}$, 那么转到 b); 如果是最小椭圆, 那么转到 c)。

b) 求解公式 (5-15) 得到 θ^* , 并应用到公式(5-21), 即为对应的控制规律, 返回 a) 继续。

c) $X(k)$ 处于最小椭圆内, 则控制规律为 $U(k+i) = G(k)X(k+i)$, 此时

$$G(k) = G_i(k)。$$

变约束优化控制原理结构如下图：

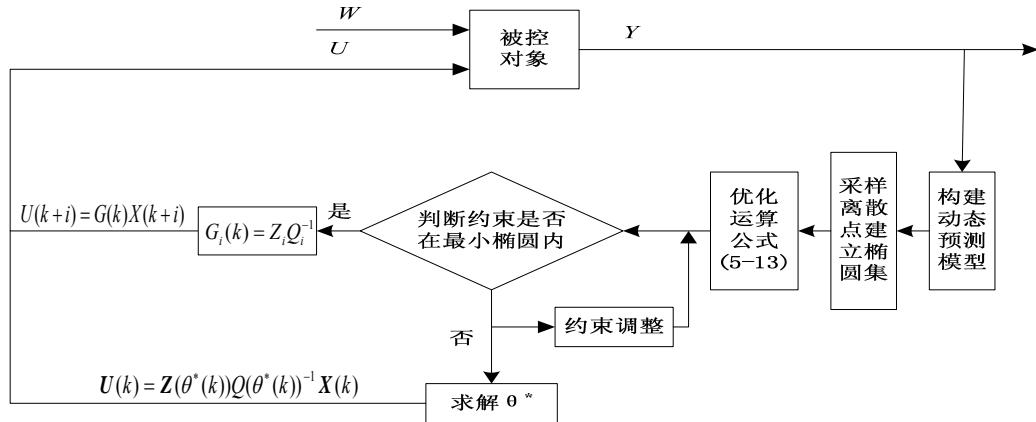


图 5-2 变约束预测控制原理结构图

以上的优化求解过程，把约束条件限制在 $\min\{U_{\max i,r}, \bar{U}\}$ 范围内，而不会影响优化运算的最优性和稳定性，使变约束预测控制规律计算精确，提高了控制的有效性和实时性。

5.2.2 UPQC 变约束预测控制系统结构

基于变约束预测理论的 UPQC 控制原理如图 2 所示，主要包括 UPQC 模块、状态估算模块和变约束预测控制模块。该控制器主要是对输入量 U 进行协调控制，来补偿电源电压和负载电流中的谐波以及抑制干扰。通过状态估算模块对外部干扰 w 进行估算，得到 w 的状态 ζ ，并输出参考值 y ；然后对 UPQC 的输出 Y 进行估算，得到状态 x 和系统偏差 e ；根据得到的状态信息构建预测模型，通过变约束预测优化控制得到每一时刻状态的最优控制规律，得到 UPQC 的控制输入 U ，从而实现对 UPQC 的有效控制。

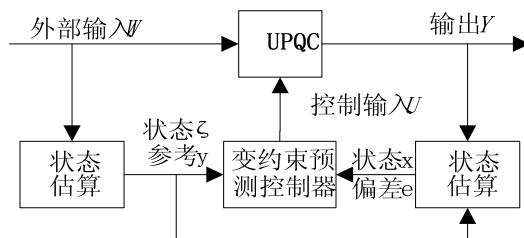


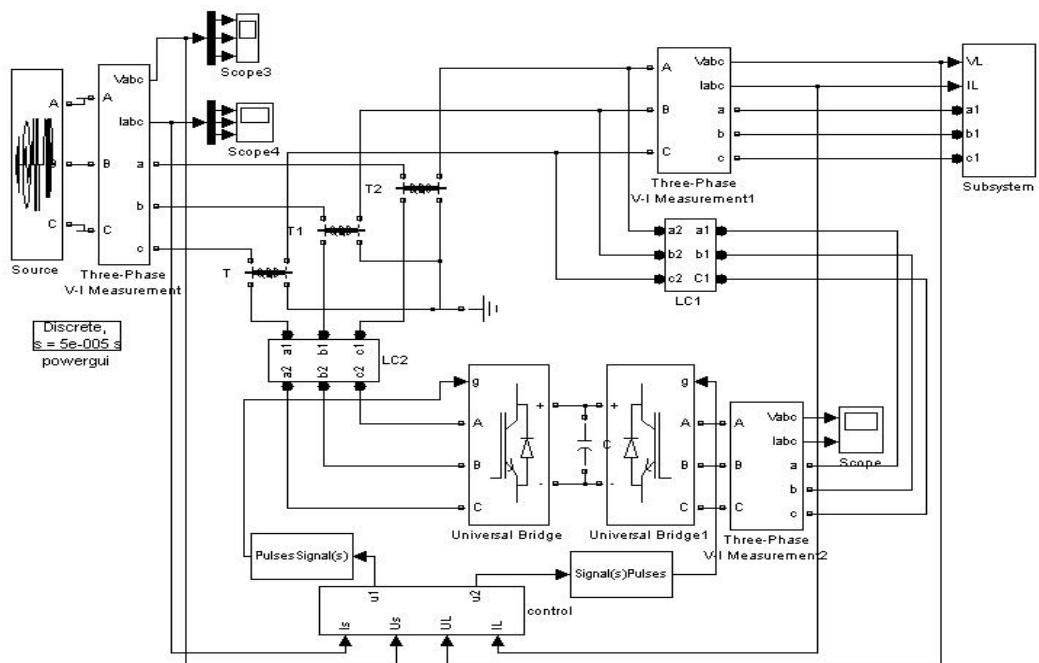
图 5-3 基于变约束预测控制的 UPQC 系统

5.3 仿真及实验分析

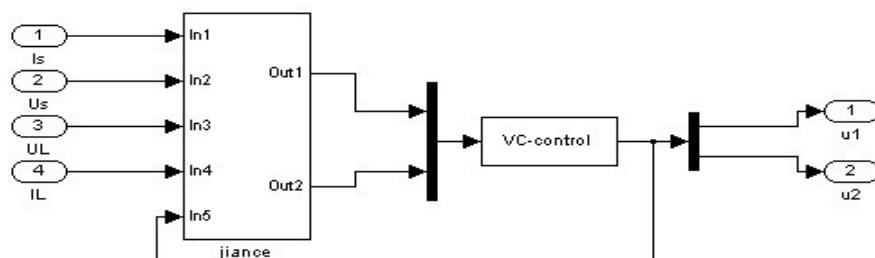
(1) 仿真分析

为了验证该控制方法的正确性，通过 MATLAB 软件建立仿真模型，分析 UPQC 改善电能质量的效果。电路参数：三相交流电源为 380V /50 Hz，非线性负载为三相不可控整流桥，串联侧输入滤波电感和滤波电容分别为 5mH 和 10 μ F，并联侧输入滤波电感和滤波电容分别为 3mH 和 30 μ F，直流母线滤波电容设置为 2200 μ F。

根据 MATLAB 中预测控制函数对 UPQC 变约束预测控制进行设计和仿真，主要过程包括：定义 UPQC 的系统模型、应用预测控制工具箱命令和 S-Function 设计控制器。仿真模型如图 5-4 所示：



(a) UPQC 的 MATLAB 仿真模型



(b) 变约束控制模块

图 5-4 基于变约束控制的 UPQC 仿真模型

图 5-5 是 UPQC 对谐波畸变的仿真波形。图 5-5(a)、(b)是存在谐波畸变的电源电压和负载电流波形，经过 FFT 分析谐波畸变率分别为 48.2% 与 51.3%；图 5-5(c)、(d)是补偿后负载电压和电源电流波形，经过 FFT 分析谐波畸变率分别为 0.95% 与 1.1%，可见基于变约束预测控制的 UPQC 可以对谐波畸变进行有效的

补偿。

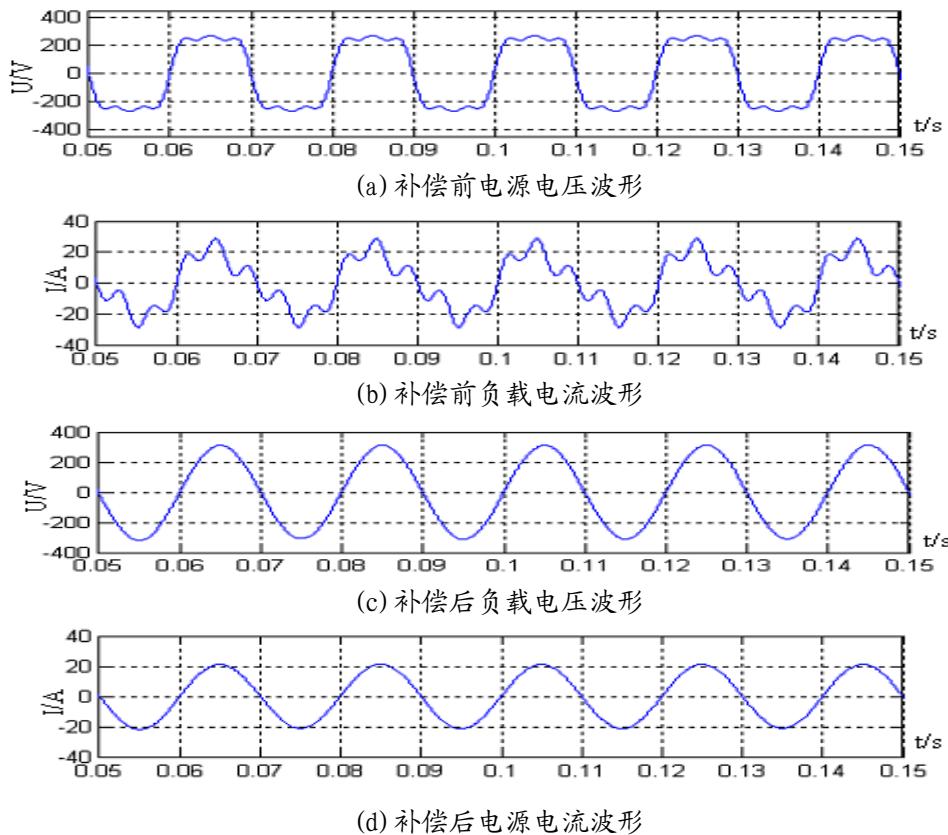


图 5-5 UPQC 对谐波畸变的仿真波形

图 5-6 是 UPQC 对电压波动的仿真波形，图 5-6(a)是电源电压的波形，电压在 0.25s 到 0.35s 时上升 30%，在 0.45s 到 0.55s 时下降 25%，谐波畸变率约 48%；图 5-6(b)是负载电压波形，由图中看出，负载电压几乎不随电源电压的变化而变化，且接近正弦波，谐波畸变率约 1.33%。可见本文提出的方法可以实时、有效地控制 UPQC 实现抑制电压波动，有效地改善电能质量。

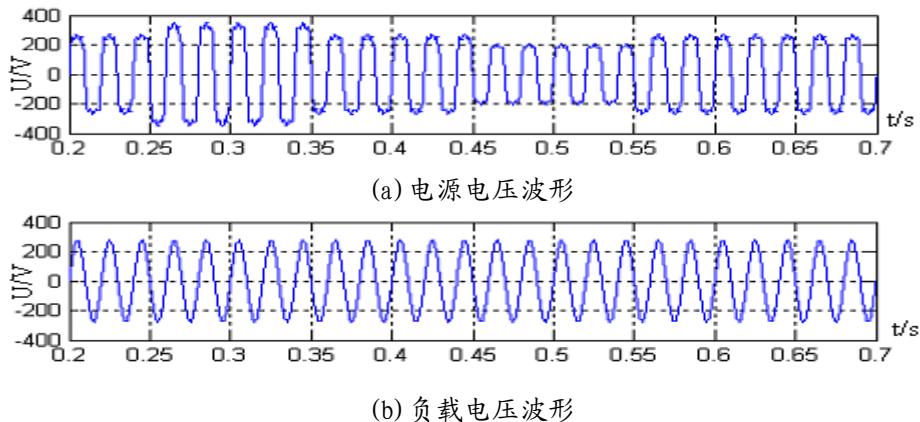


图 5-6 UPQC 对电压波动的仿真波形

(2) 实验分析

为了进一步验证本章提出变约束预测控制方法的可行性，对 UPQC 进行了实

验。电源采用额定电压为 220V/50Hz，为了验证该控制方法下 UPQC 对波形畸变的补偿效果，负载采用无电容整流桥并联电阻负载（其直流负载电阻为 18Ω ）及与之并联的电阻负载（每相电阻为 15Ω ），三相电网输入电压为常压无波动状态，由于该情况下三相电压电流波形相似，这里只给出了 A 相的电压电流波形，实验波形如图 5-7 所示。

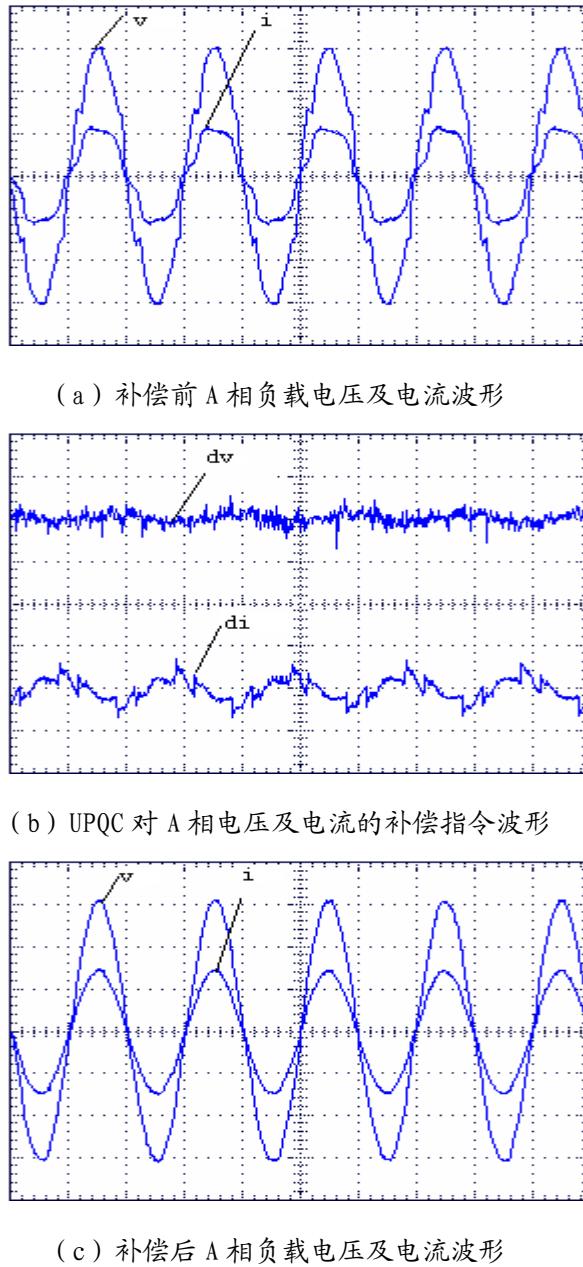
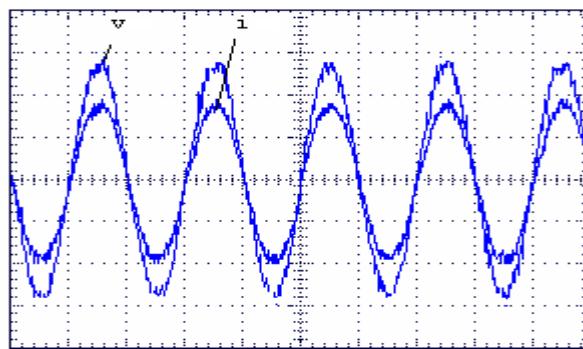


图 5-7 UPQC 对电压和电流畸变补偿实验波形

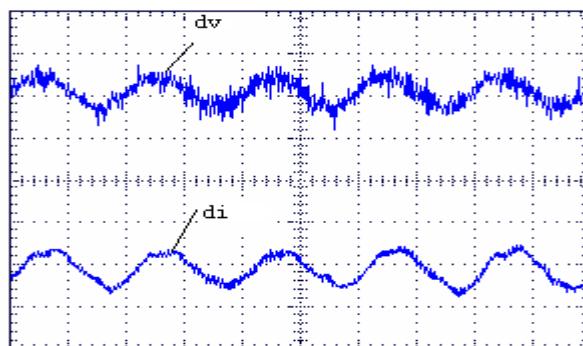
图 5-7 中纵坐标表示电压为 $100V/div$ ，电流为 $40A/div$ ，横坐标表示时间为 $10ms/div$ 。图 5-7 (a) 中 A 相负载电压畸变率为 6.73% ，电流畸变率为 13.32% ；图 5-7 (c) 中 A 相负载电压畸变率为 2.64% ，电流畸变率为 2.36% ，可见经过补偿以后，电压畸变率下降 60% 左右，电流畸变率下降 80% 左右，表明该控制方法

下 UPQC 可以有效实现对电流及电压畸变的补偿。

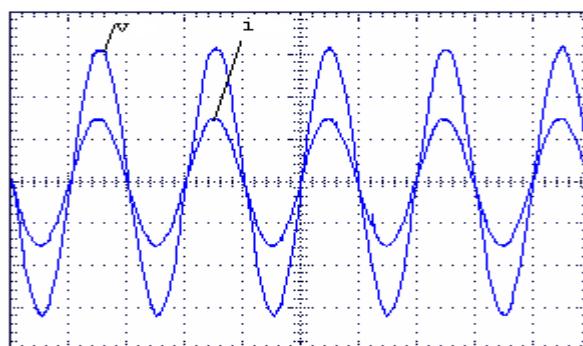
为了验证该控制方法下 UPQC 对电压波动的补偿效果，负载采用三相平衡电阻负载（每相负载电阻为 5Ω ），额定电压设置为 220V。三相电网输入电压为欠压状态时，输入值为 195V，实验波形如图 5-8 所示。图 5-8 (a) 中 A 相负载电压峰值约为 275V，畸变率为 6.55%，电流畸变率为 5.95%；图 5-8 (c) 中 A 相负载电压峰值约为 311V，畸变率为 2.26%，电流畸变率为 2.23%，分析可得，基于该方法 UPQC 可以有效补偿欠电压情况。



(a) 补偿前 A 相负载电压及电流波形



(b) UPQC 对 A 相电压及电流的补偿指令波形



(c) 补偿后 A 相负载电压及电流波形

图 5-8 UPQC 对欠电压时补偿实验波形

5.4 本章小结

针对现有控制方法对于 UPQC 输入、输出和状态的约束条件控制效果较差的缺点，本文在鲁棒控制方法研究的基础上，提出了一种基于变约束预测理论的 UPQC 控制方法。该方法通过在线优化控制方法构建当前状态的反馈控制矩阵的凸组合系数，确定对应的控制约束，增加了在线求解的自由度，减少了运算时间，综合考虑了 UPQC 多输入多输出系统的动态性能和状态约束条件等，有效地提高了 UPQC 的综合补偿功能。仿真及实验结果表明，该方法能够补偿谐波畸变和抑制电压波动，有效地改善电能质量问题，具有实时稳定的控制效果。

第六章 微电网中 UPQC 控制方法的综合仿真

本章采用MATLAB搭建了含UPQC的微电网电能质量仿真模型，根据本文提出的控制方法，分别对微电网中的电压波动和谐波污染问题进行详细的综合仿真，并对仿真结果进行比较与分析。

6.1 仿真模型

根据第二章介绍的微电网和UPQC的结构，以及本文提出的UPQC控制方法，利用Matlab/simulink软件，构建了一个含UPQC的微电网电能质量仿真模型。如图6-1 所示，整个仿真模型可以分为三个部分：微电网、 UPQC 和负载，分别对应图6-1中M-Grid模块、 UPQC模块和load模块。

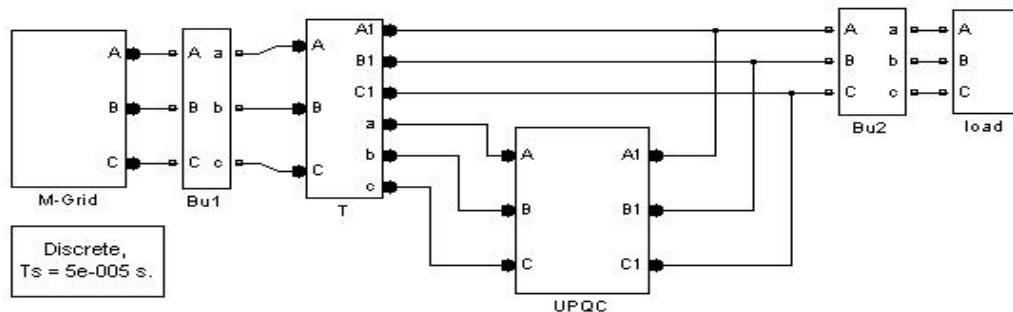


图6-1 含UPQC的微电网电能质量整体仿真模型

图6-2为图6-1中的M-Grid模块，图中Source模块是由电压源模拟的主网模块，电压为380V/50Hz。微电网主要由多个微电源、断路器和若干负荷构成，为了便于仿真模型的搭建以及仿真操作，这里只给出了2个微电源，直流侧电压设置为800V，分别采用V/f控制和P/Q控制方法，通过控制定时断路器的开断来模拟实现微电网的简单并网。

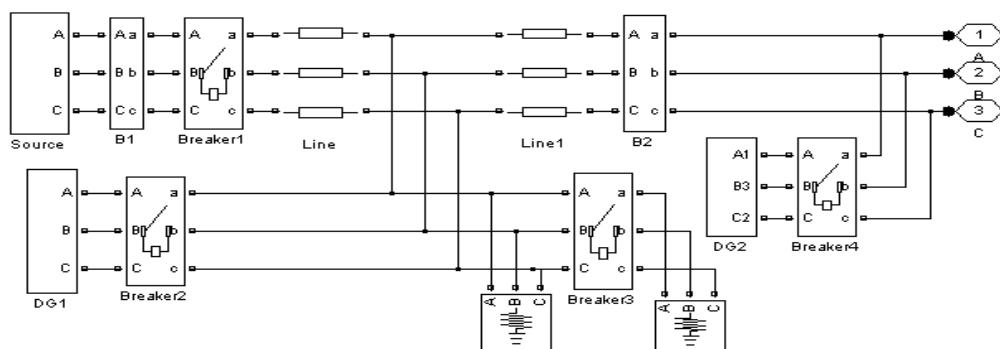


图6-2 微电网仿真模块

图6-3为图6-1中load模块，包括整流负载、线性负载和断路器。其中整流负载是三相二极管桥式整流器，负载为 10Ω ，滤波电感为 $10mH$ ，可以根据仿真需要模拟不同情况的负载。

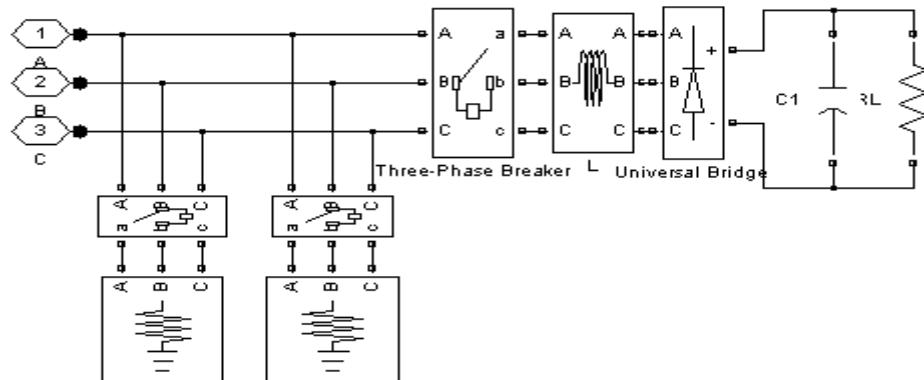


图6-3 负载仿真模块

图6-4为图6-1中的UPQC模块，主要由串联电压型变换器（Voltage-Source Converter, VSC）和并联VSC、LC滤波模块和控制模块组成，控制模块包括检测和控制部分，根据Matlab中系统函数(S-Function)的设计方法进行创建封装，用来实现UPQC系统的检测和控制部分的动态仿真。

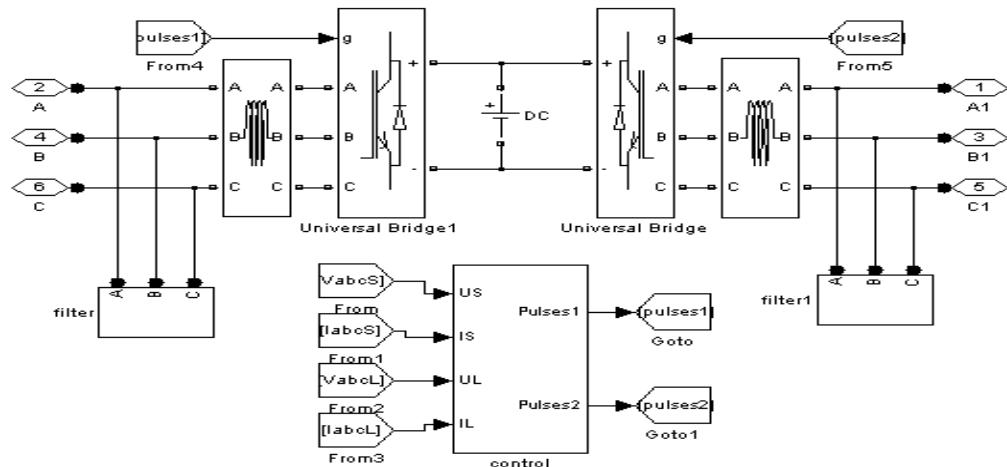


图6-4 UPQC仿真模块

6.2 UPQC 控制方法的综合仿真

6.2.1 UPQC对微电网中电压及电流的信号检测仿真

根据图6-1的仿真模型模拟微电网输出电压是三相不对称且畸变的电压，负载设置为三相整流负载。详细仿真如下：

图6-5 (a) 为微电网提供的三相不对称且畸变的电压波形，图6-5 (b) 为检测电压补偿信号波形，图6-5 (c) 为检测三相基波正弦电压波形。图6-6 (a) 为

三相负载电流的波形，图6-6（b）为检测电流补偿信号波形，图6-6（c）为检测到的三相基波正弦电流波形。由图6-5和图6-6的仿真结果分析，可以得出基波正弦电压初相角的检测误差小于1.6%，而且电流波形能够有效地跟踪电压的相位。

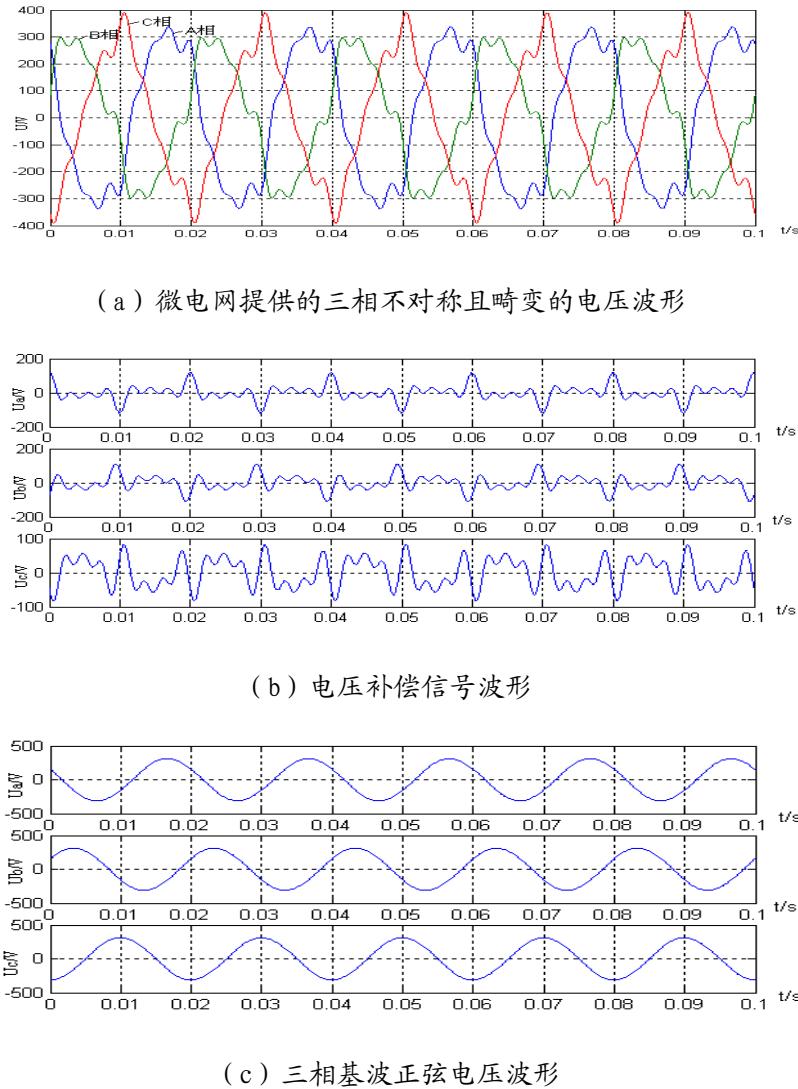


图6-5 UPQC对电压信号的检测

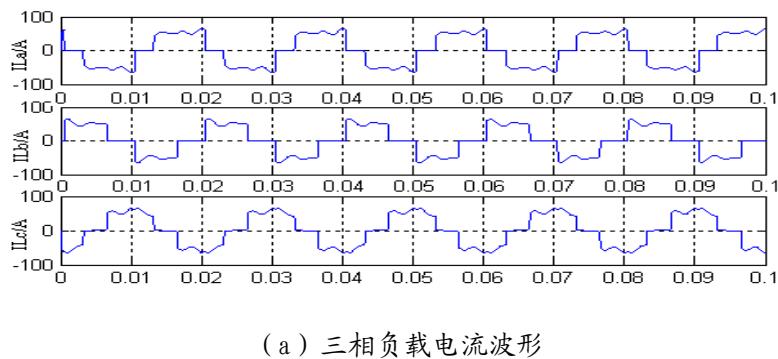
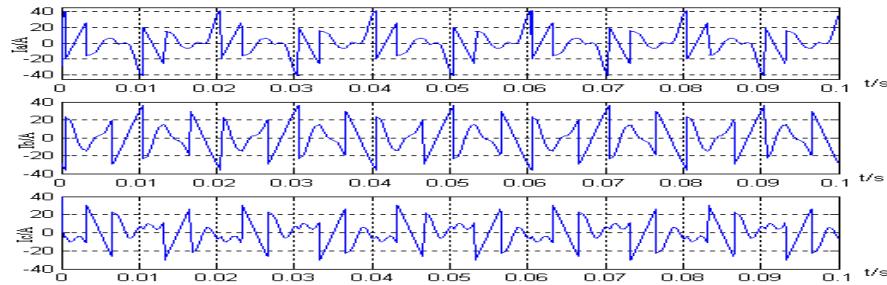
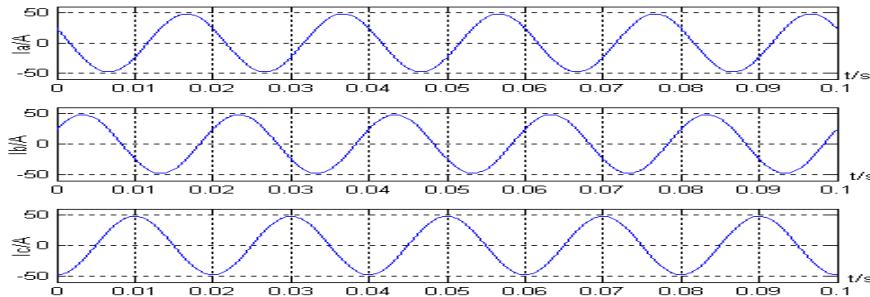


图6-6 UPQC对电流信号的检测



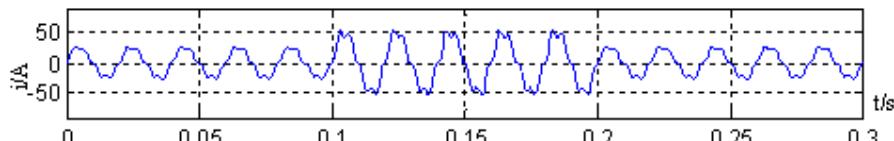
(b) 电流补偿信号波形



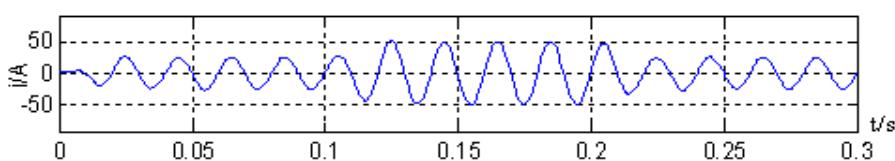
(c) 三相基波正弦电流波形

图 6-6 UPQC 对电流的检测

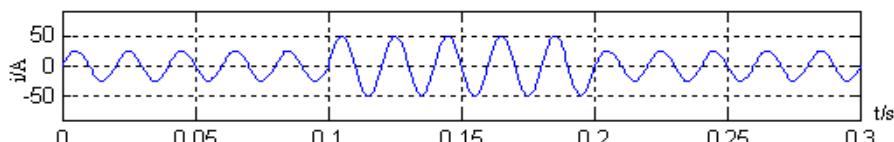
为了更好的说明该仿真模型对谐波电流的检测效果, 将文献[60]提出的基于自适应滤波器的动态谐波电流预测方法与本文提出的方法进行仿真比较。现模拟负载电流发生突变, 仿真波形如图6-7所示, 由仿真波形比较分析可得, 基于前向线性预测理论的谐波电流预测方法检测输出的响应信号几乎无延时地接近真实值, 而且负载电流的相位和大小几乎不受影响, 具有良好的跟踪和检测效果。



(a) 负载电流突变的仿真波形



(b) 基于自适应滤波器的预测方法检测到的电流基波波形



(c) 基于前向线性预测理论的预测方法检测到的电流基波波形

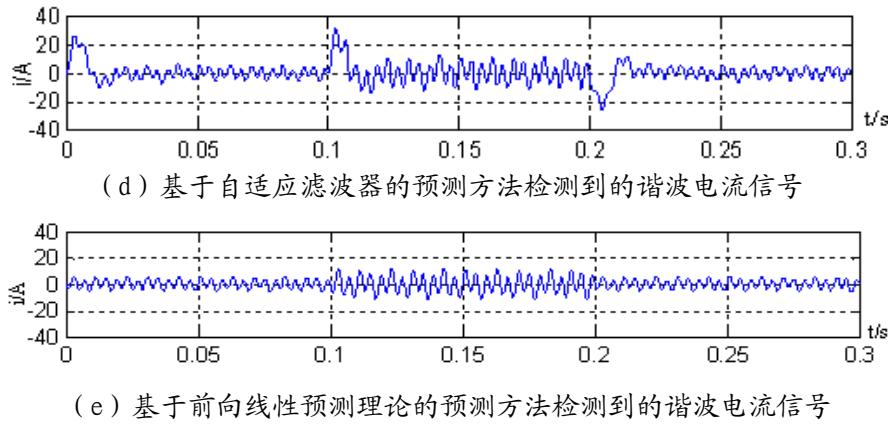


图6-7 负载电流突变时的谐波电流检测仿真

6.2.2 不同控制方式下UPQC补偿效果仿真

本章主要研究的是UPQC对微电网的电能质量问题的抑制和改善，而微电网中的电能质量问题主要是电压波动和大量的谐波等问题，因此本节的仿真主要是UPQC对电压暂升、暂降和谐波的抑制来进行，同时对本文提出的控制方法进行了比较分析。

6.2.2.1 电压暂升与暂降的补偿仿真

微电网中的电压暂升和暂降主要是由微电源单元启动和输出时的短时巨变以及与系统中的电压反馈控制设备相互作用引起的，利用本章搭建的MATLAB仿真模型对电压波动的仿真结果如图6-8和6-9所示：

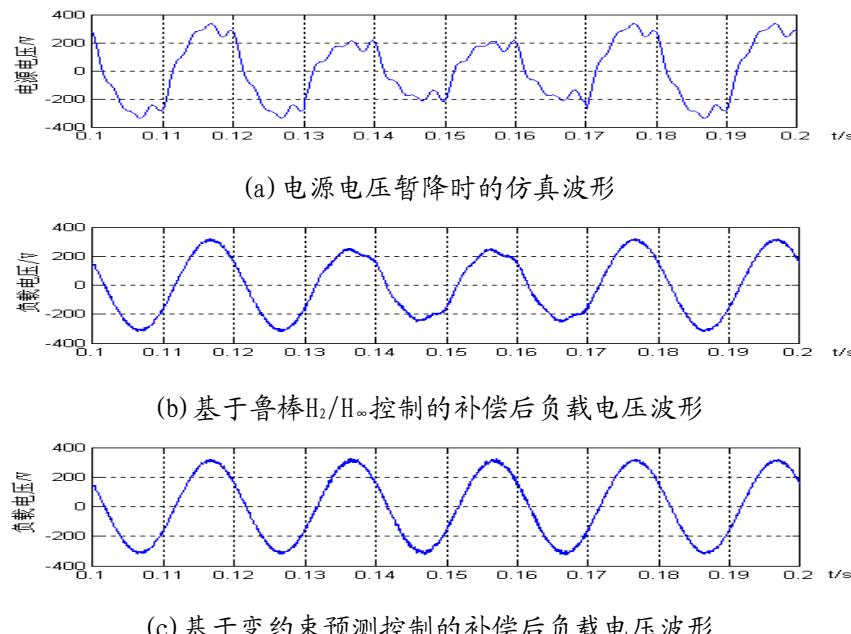


图6-8 不同控制方法下UPQC对微电网中电压暂降的仿真波形

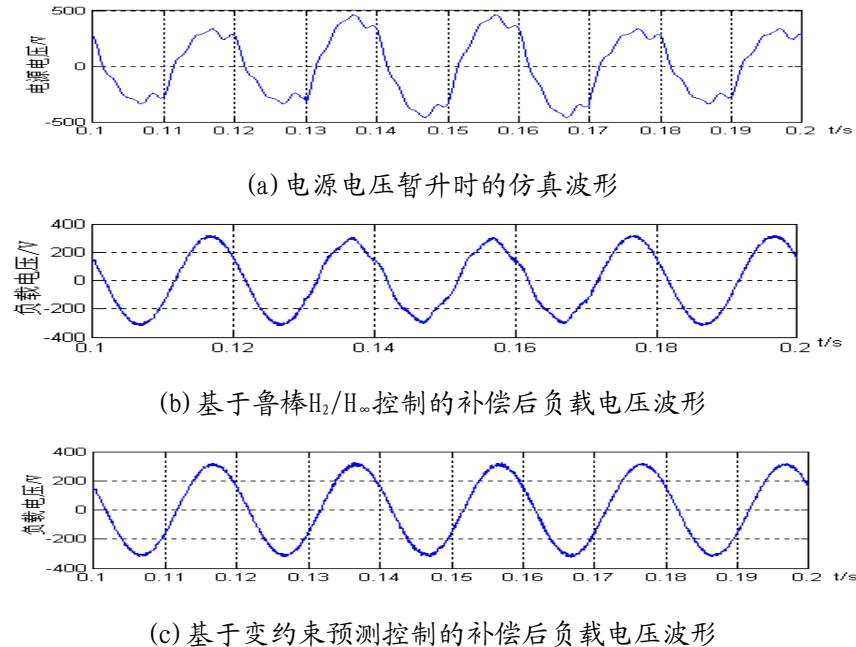
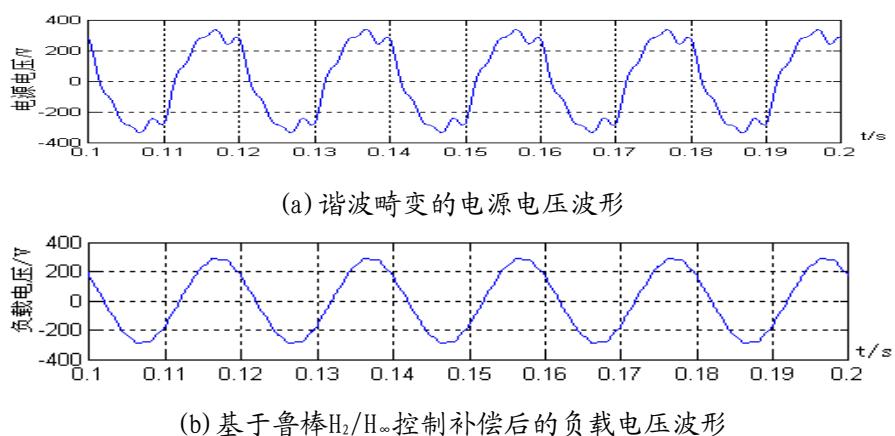


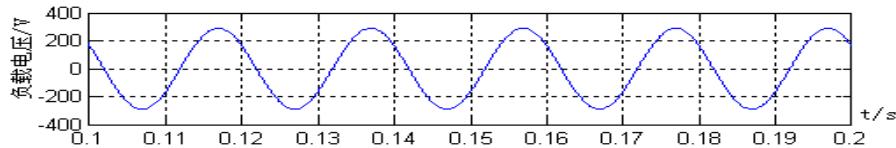
图6-9 不同控制方法下UPQC对微电网中电压暂升的仿真波形

从图6-8和6-9可以看出，在微电网输出电压波动期间，UPQC对电压波动起到了有效补偿作用，同时也有效地补偿了电压中谐波和不对称分量，通过两种控制方法的补偿结果分析可得，基于变约束预测理论控制方法的补偿后的波形更接近于正弦波，补偿效果相对较好。

6.2.2.2 谐波补偿仿真

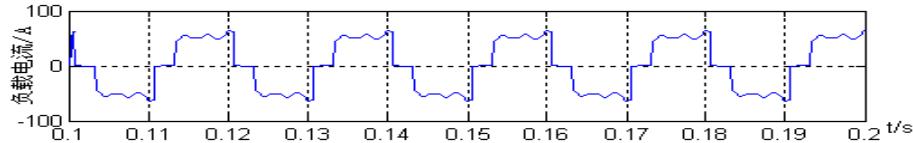
由于电力电子器件在微电网中广泛应用，微电源在并网时，就不可避免的会带来大量的谐波影响，同时也会对电压的稳定性和电压的波动造成不同程度的影响。利用本章搭建的MATLAB仿真模型对电压和电流谐波影响的仿真结果如图6-10和6-11所示：



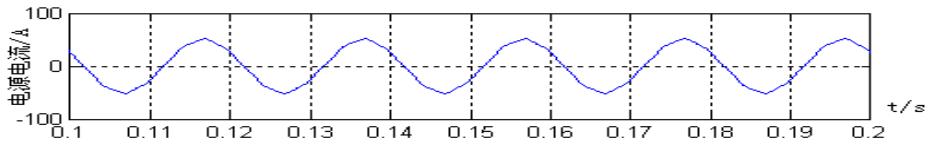
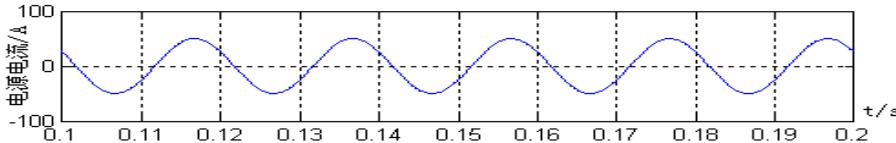


(c) 基于变约束预测控制补偿后的负载电压波形

图6-10 不同控制方法下对电压谐波补偿仿真波形



(a) 谐波畸变的负载电流波形

(b) 基于鲁棒 H_2/H_∞ 控制的电源电流波形

(c) 基于变约束预测控制的电源电流波形

图6-11 不同控制方法下对电流谐波补偿仿真波形

由图6-10和图6-11可看出，UPQC不仅几乎完全补偿了微电网输出电压中的谐波和不对称分量，而且还有效地补偿了非线性负载所产生的绝大部分谐波电流。补偿前电源电压和负载电流的谐波畸变率分别为25.3%和50.1%，经过补偿后，基于鲁棒 H_2/H_∞ 控制方法，负载电压和电源电流的谐波畸变率分别为2.83%和2.75%；基于变约束预测控制方法，负载电压和电源电流的谐波畸变率分别为1.9%和2.2%，波形接近标准的正弦波。

6.3 本章小结

本文通过搭建含UPQC的微电网电能质量仿真模型，结合本文提出的方法，对微电网输出的电压和电流信号检测，以及微电网中比较常见的电能质量问题，进行详细的仿真，并对本文提出的控制方法进行了比较。仿真结果分析表明，UPQC对微电网的电压电流信号，以及在发生突变的情况下，都能有效地跟踪检测出补偿指令信号；UPQC不仅能有效地的补偿电压波动，而且对电压谐波和不对称分量以及非线性负载所产生的绝大部分谐波电流都具有良好的补偿效果；经过仿真比较分析可得，基于变约束预测理论控制方法的补偿效果相对更好一些。

结语

微电网技术综合了电力电子技术、分布式发电、可再生能源发电和储能技术。由于微电网中采用了较多具有不确定性的微电源和电力电子装置，带来了特殊的电能质量问题，因此，采用适当的 UPQC 控制方法来调节微电网的电能质量问题，是提高微电网运行特性的关键。主要完成的工作有：

(1) 分析了 UPQC 的基本结构和工作原理，在此基础上根据状态空间理论建立了 UPQC 的统一数学模型，为本文的研究打下良好基础。

(2) 通过对 UPQC 常用检测和预测方法的分析和比较，提出了一种基于前向线性预测理论的谐波电流预测控制方法。推导出了最佳预测系数正则方程、谐波电流最小预测误差和阶更新方程，给出了 1-3 阶滤波器的预测系数和最小预测误差值，仿真分析表明，该方法能准确预测下一个采样周期电容谐波补偿电流，实现谐波电流的最小误差补偿，大大提高 UPQC 的补偿效果。

(3) 通过对鲁棒控制的研究，提出了一种基于鲁棒 H_2/H_∞ 优化理论的 UPQC 控制方法，该方法将 UPQC 系统模型参数的不确定性引入到系统状态方程中，使得闭环系统中所允许存在的不确定性能够同时满足最优 H_2 性能和 H_∞ 干扰抑制，把鲁棒 H_2/H_∞ 控制器的设计转化为具有线性矩阵不等式的优化问题，进而推导出 UPQC 的线性动态反馈控制器，实现了对 UPQC 串联和并联部分的优化控制，仿真分析表明该方法具有响应速度快、鲁棒性强等特点。

(4) 由于现有控制方法对于 UPQC 输入、输出和状态的约束条件控制效果较差，限制了 UPQC 的综合调节性能。提出了一种基于变约束预测理论的 UPQC 控制方法。该方法在鲁棒预测控制的基础上，通过在线优化控制方法构建当前状态的反馈控制矩阵的凸组合系数，确定对应的控制约束，增加了在线求解的自由度，减少了运算时间，综合考虑了 UPQC 多输入多输出系统的动态性能和状态约束条件等，有效地提高了 UPQC 的综合补偿功能。仿真验证了该方法的有效性和可行性。

(5) 为了进一步分析本文提出控制方法的补偿效果，搭建一个含 UPQC 的微电网 MATLAB 仿真模型，并分别对微电网中的电压波动和谐波污染等电能质量问题的控制效果进行了仿真和比较，仿真结果分析表明，基于变约束预测理论控制方法的补偿效果相对更好一些。

由于本人的能力和专业知识有限，对 UPQC 的研究还处于开始阶段，本文主要是对 UPQC 控制方法的理论和仿真进行研究，对于主电路的参数设计和控制部分参数的选取等工作，以及这些参数对 UPQC 控制精度的影响还需要更深

一步的研究；UPQC 的数字化设计及工程实现也需要做大量的仿真和实验工作。因此在以后的工作中还需要继续 UPQC 的研究工作，真正地实现 UPQC 装置在微电网中的广泛应用。

参考文献

- [1] Basak P , Saha A K , Chowdhury S , et al . Microgrid : control techniques and modeling[C]. //Proceedings of the 44th International Universities Power Engineering Conference(UPEC). Glasgow: IEEE, 2009: 1-5.
- [2] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 1-8.
- [3] Guerrer J M, Matas J, Devicsa L G. Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance[J]. IEEE Trans On Industrial Electronics. 2007, 54(2): 56-60.
- [4] Benjamin Kroposki, Robert Lasseter, et al. A look at Microgrid Technologies and Testing, Projects from Around the World[J]. IEEE power and energy magazine, 2008: 41-53.
- [5] 裴玮, 盛鹏, 孔力, 齐智平. 分布式电源对配电网供电电压质量的影响与改善[J]. 中国电机工程学报, 2008, 18(13): 152-158.
- [6] Gaonkar D N. Investigation on Electromagnetic Transients of Distributed Generation Systems in the Microgrid[J]. Electric Power Components & Systems, 2010, 38(13): 1486-1497.
- [7] Vandoorn Tine L, Meersman Bart, Degroote Lieven, et al. A Control Strategy for Islanded Microgrids With DC-Link Voltage Control [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26 (2): 703-713.
- [8] Martins Vinicius F, Borges Carmen L T. Active Distribution Network Integrated Planning Incorporating Distributed Generation and Load Response Uncertainties[J]. IEEE Transaction On Power Systems, 2011. 26(4): 2164-2172.
- [9] 袁超, 吴刚, 曾祥君, 乔辉. 分布式发电系统继电保护技术[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (2): 99-105.
- [10] Engel M V. Flexible Transmission Network Planning Considering Distributed Generation Impacts [J]. IEEE Transaction On Power Systems, 2011. 26(3): 1434-1443.
- [11] 盛鹏, 孔力, 齐智平, 等. 新型电网-微电网(Microgrid)研究综述[J]. 继电器, 2007, 35(12): 75-81.
- [12] 石嘉川, 刘玉田. 计及分布式发电的配电网多目标电压优化控制[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (13): 47-51.
- [13] 王守相, 王慧, 蔡声霞. 分布式发电优化配置研究综述[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (18): 110-114.
- [14] 郑漳华, 艾莘. 微电网研究现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 27-31.
- [15] 李浙. 微网中光伏发电系统的电能质量分析与控制[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [16] 张峥, 南海鹏, 余向阳, 窦亚菲. 基于 Matlab/simulink 的两级式光伏并网系统仿真分

- 析[J]. 可再生能源, 2010, 28(1): 81-84.
- [17] 张国荣, 张铁良, 丁明, 等. 光伏并网发电与有源电力滤波器的统一控制[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(8): 61-66.
- [18] 李炜, 朱新坚. 光伏系统最大功率点跟踪控制仿真模型[J]. 计算机仿真, 2006, 23(6): 239-243.
- [19] Dudgeon Graham , Chandrachood Shripad . Developing Microgrid Systems Using Model-based Design [J]. Powergrid International, 2011, 16 (9): 70-73.
- [20] Jing Ping, Guo Jianbo, Zhao Bo, et al. Applications of Power Electronic Technologies in Smart Grid [J]. Power System Technology, 2009, 33(15), 1-6.
- [21] 王同勋, 薛禹胜, S S Choi. 动态电压恢复器研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(9): 101-107.
- [22] 韩民晓, 肖湘宁, 徐水海. 柔性化供电技术[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(8): 1-5.
- [23] 李家坤. 柔性交流输电技术在电力系统中的应用[J]. 电力学报, 2007, 22(3): 328-330.
- [24] 翁利民, 陈允平, 刘琨. D-FACTS 技术及电能质量的改善[J]. 电力电容器, 2005, (2): 1-5.
- [25] Domijan Jr Alexander, Montenegro Alejandro, Keri Albert J F, et al. Custom Power Devices: An Interaction Study [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 1111-1118.
- [26] Shah Shahil, Sensarma Partha Sarathi. Three Degree of Freedom Robust Voltage Controller for Instantaneous Current Sharing Among Voltage Source Inverters in Parallel[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 3003-3014.
- [27] Khoor M S, Machmoum M. Simplified analogical control of a unified power quality conditioner[C]. //Proceedings of the IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference, Recife, Brazil, 2005.
- [28] Tzung-Lin Lee, Jian-Cheng Li, Po-Tai Cheng. Discrete Frequency Tuning Active Filter for Power System Harmonics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24 (5): 1209-1217.
- [29] Kesler Metin, Ozdemir Engin. Synchronous-Reference-Frame-Based Control Method for UPQC Under Unbalanced and Distorted Load Conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (9): 3967-3975.
- [30] Kian Hoong Kwan, Yun Chung Chu, Ping Lam So. Model Based H_{∞} Control of a Unified Power Quality Conditioner[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(7): 2493-2504.
- [31] Radzi Mohd Amran Mohd, Rahim Nasrudin Abd. Neural Network and Bandless Hysteresis Approach to Control Switched Capacitor Active Power Filter for Reduction of Harmonics[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 58 (5): 1477-1484.
- [32] 刘金锟. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真(第 2 版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

- [33] 万健如, 裴玮, 张国香. 统一电能质量调节器同步无差拍控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 63-67.
- [34] Fatiha Mekri, Mohamed Machmoum, Nadia Ait-Ahmed. New hysteresis control band of an unified power quality conditioner[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(9): 1743-1753.
- [35] Vodyakho Oleg, Hackstein Detlev, Steimel Andreas, et al. Novel Direct Current-Space-Vector Control for Shunt Active Power Filters Based on the Three-Level Inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(4): 1668-1678.
- [36] 张志超, 魏富建, 王义峰. 单周期控制策略在统一电能质量调节器中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 28-33.
- [37] 吴士昌, 吴忠强. 自适应控制(第2版)[M], 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [38] 徐政. 智能电网中的电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 165-167.
- [39] 朱鹏程, 李勋. 统一电能质量控制器的控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 68-73.
- [40] Teke Ahmet, Sarıbulut Lütfü, Tumay Mehmet. A Novel Reference Signal Generation Method for Power-Quality Improvement of Unified Power-Quality Conditioner[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2205-2214.
- [41] N H Woody. Field Experience With Dynamie Voltage Restorer Systems[J]. IEEE PES, 2000: 2864-2871.
- [42] N H Woody, Trevor Holden, Ashok Sundarm, et al. Field Experience With the New Platform-Mounted DVRTM[J]. IEEE PWERCON, 2000: 1323-1328.
- [43] 韩民晓, 尤勇, 刘昊. 线电压补偿型动态电压调节器(DVR)的原理与实现[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12):49-53.
- [44] 李亚峰, 李含善, 任永峰. 用于串联型有源电力滤波器的 dq0 变换[J]. 电工技术学报, 2005, 20(8): 59-63.
- [45] 赵剑锋. 基于电压型逆变器的可连续运行的动态电压恢复器的研究[D]. 南京: 东南大学, 2001.
- [46] 蒋平, 赵剑锋, 唐国庆, 等. 串联型电能质量补偿器的研究[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 54-57.
- [47] 王凯斐, 李彦栋, 卓放, 王兆安. 一种可持续补偿三相动态电压恢复器的研究[J]. 电力电子技术, 2004, 38(1): 1-3.
- [48] 崔健. 统一电能质量调节器新型控制策略研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [49] 张旭. 基于模型预测控制和卡尔曼滤波的统一电能质量调节器的研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [50] 王莉娜. 产矿企业配电网谐波治理控制策略和工程应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2003.
- [51] 李圣清. 有源电力滤波器滤波技术及其补偿特性的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.

- [52] 何娜, 黄丽娜, 武健, 徐殿国. 一种新型快速自适应谐波检测算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (22): 124-129.
- [53] 李圣清, 彭玉楼, 周有庆. 一种改进型自适应谐波电流检测方法的研究[J]. 高电压技术, 2002, 28 (12): 3-5.
- [54] 陈国志, 陈隆道, 蔡忠法. 基于 Nuttall 窗插值 FFT 的谐波分析方法[J]. 电工技术学报, 2011, 31 (4): 27-31.
- [55] 李圣清, 朱英浩, 周有庆, 等. 电网谐波检测方法的综述[J]. 高电压技术, 2004.3
- [56] 李江, 孙海顺, 程时杰, 等. 基于灰色系统理论的有源滤波器的预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (2): 6-10.
- [57] Bhattacharya Avik, Chakraborty Chandan, TC Green. A Shunt Active Power Filter With Enhanced Performance Using ANN-Based Predictive and Adaptive Controllers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (2): 421-428.
- [58] 李圣清, 朱英浩, 周有庆, 等. 基于加权一阶局部理论的谐波电流预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (6): 19-23.
- [59] 李圣清, 罗飞, 陈兴国. 基于快速块 LMS 算法的统一电能质量调节器谐波电流预测方法[J]. 电工电能新技术技术, 2010, 29(2): 53-56.
- [60] 谭甜源, 乐健, 阮江军. 基于自适应滤波器的动态谐波电流预测方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(11): 43-47.
- [61] Haykin S. Adaptive filter theory[M]. 4thed. USA: Prentice Hall, 2003:105-110.
- [62] Farsangi M M, Song Y H, an M. Multi-objective design of damping controllers of FACTS devices via mixed H_2/H_∞ with regional pole placement[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2003, 25: 339-346.
- [63] Rafiei S MR, Asadi R, Griva G, et al. Optimal unified power quality conditioner with improved compensation performance under distorted voltages[C]. Proceedings of the 2009 IEEE Bucharest Power Technology, Bucharest Romania, 2009.
- [64] 高宪文, 张立, 王介生, 等. 变约束高效预测控制[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(6): 855-860.
- [65] 丁宝苍, 邹涛. 约束时变不确定系统的输出反馈预测控制综合[J]. 自动化学报, 2007, 33(1): 78-83.
- [66] Imsland L, Rossiter J A. Robust triple model MPC[J]. International Journal of Control, 2008, 81(4): 679 - 689.
- [67] 李德伟, 席裕庚. 有界扰动系统高效鲁棒预测控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(5): 535 - 539.

攻读学位期间主要的研究成果

攻读硕士学位期间发表论文:

- [1] 李圣清, 罗晓东, 李永安, 等. 基于前向线性预测理论的混合电力滤波器的谐波电流预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 100-104. (EI 收录)
- [2] 李圣清, 罗晓东, 李永安, 等. 微电网背景下 UPQC 鲁棒 H_2/H_∞ 优化控制方法研究[J]. 湖南大学学报, 2012, 39(7). (已录稿)
- [3] 罗晓东, 李圣清, 李永安, 等. 基于变约束预测理论的微电网 UPQC 控制方法[J]. 湖南工业大学学报, 2012, 26 (2): 39-43.
- [4] Li Shengqing, **Luo Xiaodong**, Li Yong'an, et al. Harmonic Current Forecasting Method for Hybrid Active Power Filter Based on Optimal linear Prediction Theory[C]. 2011 International Conference on Electrical and control Engineering (ICECE), Yichang:2011:4806-4809. (EI 收录)
- [5] Li Shengqing, **Luo Xiaodong**, Li Yong'an, et al. Research On Robust H_2 and H_∞ Optimization control For Unified Power Quality Conditioner in Micorgrid[C]. The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), Harbin:2012, 2864-2867. (EI 收录)
- [6] 罗晓东, 李圣清, 李永安, 等. 微电网 UPQC 鲁棒 H_2/H_∞ 优化控制研究[C]. 第二届全国电能质量学术会议论文集, 长沙: 2011: 343-350.
- [7] 罗晓东, 李圣清, 李永安, 等. 先进静止无功发生器 (ASVG) 直接控制策略仿真[C]. 湖南工业大学第二届“百草论坛”优胜论文. 2011.11.
- [8] Li Shengqing, Zeng Lilin, **Luo Xiaodong**, et al. Reactive power optimization of power system based on Multi-Objective Concordance Evolutionary Algorithm[C]. 2011 International Conference on Electrical and control Engineering(ICECE), Yichang: 2011:4878-4881. (EI 收录)
- [9] 李圣清, 李永安, 罗晓东, 等. 基于菌群-粒子群算法的混合有源滤波器中无源滤波器多目标优化设计[J]. 大功率变流技术, 2011, (4): 13-16.
- [10] 李圣清, 李永安, 罗晓东, 等. 混合有源电力滤波器中无源滤波器多目标优化设计[J]. 湖南工业大学学报, 2012, 26 (1): 45-49.

攻读硕士学位期间参与项目:

- [1] 项目主要参与者, 微电网变换器间交互影响及多目标协调控制研究 (国家自然科学基金项目 51077046)
- [2] 项目主要参与者, 基于快速块最小均方算法的电力谐波检测与控制新方法 (湖南省自然科学基金项目 09JJ6070)
- [3] 项目主要参与者, 电力谐波检测与分析新方法及应用的研究 (湖南省教育厅重点项目 09A22)
- [4] 项目主要参与者, 微电网电压、无功及谐波多目标协调控制研究 (湖南工业大学研究生创新基金项目 CX1113)

攻读硕士学位期间申请专利:

排名 3, 基于多岛粒子群算法的混合有源滤波器中无源滤波器多目标优化设计 (发明专利, 申请号: 201210103794.5)

致 谢

本文的研究工作是在我的导师李圣清教授精心指导和悉心关怀下完成的，在我的学业和论文的研究工作中无不倾注着李老师的汗水和心血。李老师严谨的治学态度、渊博的学识、兢兢业业的科研精神以及处处为人师表的朴实作风使我深受启迪，受益匪浅。三年来，不管在学习上还是生活上，李老师都给予我无微不至的关怀、支持和照顾，在此谨向辛勤培育我的导师李圣清老师致以崇高的敬意和衷心的感谢！

在此也向同班同学和实验室同学在学习以及课题完成过程中给予的支持和帮助在此一并表示谢意。

我还要特别感谢我的父母和哥哥，是他们给予了我学习及生活上的无限支持和关爱，谢谢他们的理解和支持！

对一直在学习和生活上热情帮助、鼓励和关心我的老师、同学和朋友们也表示感谢！

罗晓东

2012年5月

于湖南工业大学