

分类号_____密级_____
UDC_____编号_____

清华大学

博士后研究报告

能源互联网关键技术及电能质量管理研究

杨明博

清华大学 (北京)

2015 年 8 月

能源互联网关键技术及电能质量管理研究

RESEARCH ON KEY TECHNOLOGY OF ENERGY INTERNET AND POWER QUALITY
MANAGEMENT

博士后姓名: 杨明博

流动站(一级学科)名称: 控制科学与工程

专业(二级学科)名称: 控制理论与控制工程

合作导师 : 邢春晓(教授)

曹军威(研究员)

研究工作起止日期 2013年11月—2015年09月

中文摘要

课题主要包括能源互联网、能源路由器及电能质量调节三部分内容，以递进的方式从宏观、核心和关键技术三个方面介绍了不同层次能源问题的解决方案。对能源互联网的特征、要素及发展趋势进行了探讨，进而结合电力电子技术的发展现状详细论述了能源互联网的核心-能源路由器应有的功能及架构设计，最后详细介绍了将能源互联网研究的重要问题之一电能质量问题，结合实际参与的深圳电能质量项目，详细介绍了在电能质量治理领域所开展的具体工作。

对能源互联网的相关问题进行梳理，阐述能源互联网的基本概念、内涵与外延、意义与作用，介绍了其开放、互联、对等、分离的本质属性。探讨了能源互联网的发展模式，认为能源互联网的发展应采取革新式和演进式相结合的发展模式，鼓励开展具有突破性的关键技术的先导性研究和综合一体化的解决方案。对能源互联网的架构进行分析讨论，对柔性直流输电在能源互联网发展过程中的作用进行了探讨。

能源路由器是能源互联网的核心单元，担负着能源互联网中能源-信息双向对等传输功能实现的主要任务。介绍了能源路由器的主要功能，涵盖能源的切换、路由、电能质量调节和大数据应用。对能源路由器发展的两个主要方向：电力电子相关技术和储能相关技术进行了探讨和梳理。介绍了柔性直流输电技术，提出了基于直流输电技术的能源互联网基本模型和能源路由器原型，并对基于此能源路由器的能源互联网应用场景给出了介绍。

进一步，以电力系统项目统一电能质量调节装置 UPQC 为依托，介绍了电能质量调节项目取得的成果。介绍了项目的主要任务，设计指标和完成情况。其中对 UPQC 的关键参数设计给出了详细介绍，提出了一种 LC 输出滤波器参数范围确定方法，通过对逆变输出的空载损耗指标、逆变输出对非线性负载的适应性指标和逆变输出谐波抑制指标的量化计算，通过求取指标值域的交集确定参数的有效域。对基于增强型 LCL 滤波器的 APF 模块控制流程进行了建模和稳定性分析，给出了系统稳定的电路参数设计条件，实验结果表明该方法有助于提升系统的输出频率特性。

关键词：能源互联网，能源路由器，电能质量调节，UPQC

ABSTRACT

This paper mainly includes three parts: energy Internet, energy router and power quality adjustment. The solutions of different levels of energy are introduced in three aspects: macro, core and key technologies with progressive manner. The characteristics, factors and development trend of the Internet are discussed, and the function and structure design of the energy Internet is discussed in detail based on the analysis of power electronics technology development. Finally, the power quality problems are introduced in detail, details of specific work in the field of power quality management are given according to Shenzhen Power Quality project.

To sort out the relevant issues of energy Internet, the basic concept, connotation and denotation, significance and function of energy Internet are described, and the essential attributes of its opening, interconnection, peer to peer and share are introduced as the key spirit of energy internet. It is discussed that the development pattern of energy internet should take innovation and evolutionary as its way by combining pilot studies and encouraging groundbreaking technology solutions. Architecture of energy internet is discussed, and role of flexible HVDC in the development process of energy internet were given in detail.

Energy router is the core element of the energy Internet, whose main task is realizing the function of the energy and information bidirectional transmission in the Internet. This paper introduces the main functions of energy router, including the energy of the switch, route, power quality adjustment and large data applications. Two main directions of the development of energy Router: power electronics technology and energy storage technology are discussed. This paper introduces the technology of flexible HVDC transmission, the energy internet and the energy router prototype based on DC transmission technology is proposed, and the application of the energy Internet based on this energy router is presented.

Furtherly, basis on unified power quality conditioner (UPQC) project, our work on power quality adjustment is introduced. This paper also introduces the main task, design index and process details of the project. Key parameter design of the UPQC are given in detail, this paper also puts forward a kind of LC output filter parameter selecting method through determining no-load loss index, the nonlinear load adaptability index and the

harmonic suppression index of the inverter. Furtherly, calculating indexintersection range could determine the effective domain of thetargetparameters. Modeling and stability analysis of the APF module control process based on the enhanced LCL filter are presented, and the stability of the system based onthe selected parameters is given. Experimental results show that the proposed method is helpful to improve the output frequency characteristic of the system.

Keywords: Energy Internet, energy routers, power quality conditioner, UPQC

目录

中文摘要	1
ABSTRACT.....	4
第 1 章绪论	8
1.1 引言	8
1.2 国内外研究现状	10
1.3 研究意义	15
1.4 主要内容和篇章结构	16
第 2 章能源互联网	18
2.1 引言	18
2.2 能源互联网思维	18
2.2.1 基本概念	18
2.2.2 内涵与外延	19
2.2.3 意义与作用	20
2.3.4 能源互联网可行发展模式	21
2.3 柔性直流与能源互联网	23
2.3.1 柔性直流输电优势	23
2.3.2 柔性直流与能源互联网	25
2.4 能源路由器	27
2.4.1 能源路由器架构研究	29
2.4.2 能源路由器关键电力电子技术研究	31
2.4.3 能源路由器储能技术研究	35
2.4.5 能源路由器-应用场景描述	37
2.5 能源互联网未来研究工作	40
2.5.1 高效、低能耗能源采集和转换设备亟待突破	40
2.5.2 能源互联传输所需的超导材料和技术突破尚没有时间表	40
2.5.3 能源互联互通仍存在技术障碍	41
2.5.4 新型能源存储材料发展面临瓶颈	41
2.6 小结	42
第 3 章 UPQC 算法及关键参数设计	43
3.1 引言	43
3.2 补偿信号检测方法	44
3.2.1 电压补偿信号检测	44
3.2.2 电流补偿信号检测	46
3.3 补偿控制算法	48
3.3.1 并联侧控制算法	48
3.3.2 串联侧补偿控制算法	52
3.3.3 直流侧电流电压控制	55
3.4 UPQC 输出滤波器参数设计指标分析	55
3.4.1 逆变输出的空载损耗指标	56
3.4.2 逆变输出对非线性负载的适应性指标	57
3.4.3 逆变输出谐波抑制指标	57

3.5 APF 侧参数计算	57
3.5.1 系统参数	57
3.5.2 谐波抑制	58
3.5.3 LC 滤波器参数计算	59
3.6 谐振条件验证	63
3.6.1 结果计算及谐振频率适应性验证:	63
3.6.2 经验法比较	63
3.7 反馈-逆变-滤波环节稳定性分析	65
3.7.1 串联侧传输特性	65
3.7.2 并联侧稳定性分析	66
3.7.3 仿真结果分析	72
3.8 小结	72
第 4 章统一电能质量调节装置(UPQC)功能设计	73
4.1 引言	73
4.2 UPQC 系统运行流程	75
4.2.1 系统切入流程	76
4.2.2 系统退出流程	76
4.3 UPQC 核心算法软件流程图	77
4.3.2 运行模式设计	83
4.4 串联变压器的励磁涌流抑制策略	85
4.5 UPQC 保护体系设计	85
4.6 小结	86
流程图附注:	86
第 5 章统一电能质量调节装置(UPQC)系统设计	94
5.1 引言	94
5.2 UPQC 总体结构	95
5.3 UPQC 控制系统结构	97
5.4 UPQC 监控系统	102
5.4.1 通信机制	102
5.4.2 数据结构	103
5.5 UPQC 产品机实验	106
5.5.1 中断信号设计	106
5.5.2 UPQC-APF 部分实验	106
5.5.3 UPQC-DVR 侧部分实验	111
5.6 小结	114
第 6 章结论	115
参考文献	116

第 1 章绪论

1.1 引言

目前，可再生能源利用技术的飞速发展正逐步减少人类对化石能源的依赖程度，欧盟、美国和中国相继分别提出到 2050 年实现可再生能源利用率达 100%、80%和 60-70%的目标；日益成熟的 Internet 技术正悄然改变着人们的沟通交流方式，以其巨大的通信潜力颠覆越来越多的传统产业。杰里米·里夫金鉴于上述观察，分析历次工业革命都发生在新通讯技术与新能源系统相结合的时期，指出“第三次工业革命”即将发生，并预言“能源互联网”（Energy Internet）将是第三次工业革命的重要代表技术^[1]，到那时，以家庭、办公室中和工厂为单位都将能够生产清洁能源，并通过“能源互联网”实现分享，就如同当前在 Internet 上发布和分享信息一样。然而，由于可再生能源自身的特性和现有能源系统的制约，以及现有 Internet 的通信和处理效率难以完全满足能源调度和控制的需求，使得能源互联网的架构设计、构建方法及相关通信和控制协议开发成为了当前亟待解决的问题。

太阳能、风能、潮汐能及生物质能等都是具有较大利用潜力的可再生能源，但是受到自然条件和生产效率的限制，上述能源往往具有间歇性和不稳定性特点，难以直接为人们所利用。以把上述能源转化为电能，并通过电网实现能源分享为例，太阳能发电受到光线强度、光照时间等影响，风力和潮汐发电受地域和能源自身特性的影响，生产的电能不仅在频率、电压等方面都难以与现有电网直接并网，而且还难以保证生产与需求负荷的匹配；生物质能的生产周期和生产能力取决于生物原料和转换设备的数量，虽然其提供了清洁电力生产方式，但其电力生产能力难以满足大范围的需求。因而，恰当地调度可再生能源的转化和存储成为了保证能源互联网能源充足供应的关键。

现有的能源体系还是主要以化石能源为主，石油资源是通过动力的主要方式；以电能驱动的各种应用设备的普及，使得电力传输网络较好地实现了能源的远距离配送，并已经达到了相当规模。随着越来越多的电动设备的成熟，如电动汽车等，电力资源将成为未来的主要能源形势，现有的电力网络将是未来能源互联网的主要组成部分。目前的电网运营还保持二元结构特点，电力生产、配送与电力消费相互割裂，个性化消费需求和分布式能源供给还不能被较好地支持；生产、配送过分依赖预测，缺乏高效的需求反馈通道，能源利用率处于较低的层次。在已有能源网络的基础上，搭建高

效的双向通信通道、开发便捷的、支持双向能源流动的网络接入装置成为了构建能源互联网传输通道的关键。

近半个世纪的发展，Internet 已成为连通世界的信息高速公路，并承载着越来越多的业务。人们对信息业务时效性的容忍程度使得现有的通信协议还能够兼顾性能、效率和公平性，但随着时效性要求的提高，尤其是应用于电力能源调度和控制，现有的通信协议将面临巨大挑战。按照能源互联网的美好愿景，通信系统将承担信息采集、信息处理和信息传输等业务，保证需求和环境的信息的及时采集，大规模数据的优化处理，有用信息的及时准确到达是其必须满足的要求。在以 Ethernet 为骨干的 Internet 系统中，链路共享、接收转发是其基本运行原则，导致数据拥塞、碰撞是不可避免的问题；而在现有的电网通信网络中，多采用专门通道的方式保证关键业务的高效完成。借鉴 Internet 和电网通信系统的成功经验，探讨可提供高带宽保障、海量计算能力、灵敏反应能力的通信方式是实现能源互联网高效互联的关键。

Internet 的 OSI 七层网络架构奠定了计算机网络（信息网络）的构建基础，细腰结构设计保证了 Internet 良好的可扩展性，针对该细腰设计的路由交换设备成为了 Internet 的核心设备，极大地支撑了互联网的快速发展。针对能源互联网在能源接入、能源控制和能源传输等方面面临的挑战，借鉴 Internet 成功经验成为了能源互联网领域广大研究人员的共识[3]。类似 Internet 中负责互联和数据转发功能的路由器，通过设计能够实现能源网络互联、调度 and 控制的“能源路由器”为构建能源互联网提供了一种可行途径[4]。在剩余的部分中，我们将针对能源路由器设计与实现过程中涉及到的各种关键技术进行深入分析，并试图给出一种基于能源路由器的能源互联网架构，并在此基础上探讨能源路由器必须具备的功能和及各部件的设计实现方法。

“在即将到来的时代，我们将需要创建一个能源互联网，让亿万人能够在自己的家中、办公室里和工厂里生产绿色可再生能源。多余的能源则可以与他人分享，就像我们现在在网络上分享信息一样。”这是美国华盛顿特区经济趋势基金会的主席杰里米·里夫金在其著作《第三次工业革命》中对未来的畅想。

国务院 2015 年 7 月 4 日发布了《国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》，意见明确了“互联网+”的十一个重点行动领域：创业创新、协同制造、现代农业、智慧能源、普惠金融、益民服务、高效物流、电子商务、便捷交通、绿色生态以及人工智能。其中能源互联网是一个重要方向，且已经上升到国家战略层面。

2015 年 7 月 26 日至 30 日，电气与电子工程师学会电力与能源协会（IEEE PES）2015 年年会在美国丹佛召开。中国国家电网公司在本届年会上发起并设立了“全球能源互联网”“清洁发电与管理的全球实践”“智能电网的全球实践”和“配电网规划”等 4 个专题研讨会，其中“全球能源互联网”以“最新重大消息特别研讨会”的形式召开。

28日上午,“最新重大消息—全球能源互联网”特别研讨会顺利召开,6名来自中国、美国和欧洲能源企业、大学的知名专家做了专题发言。研讨会主席、国网国际部副主任于军说,全球能源互联网是中国国家电网公司刘振亚董事长提出的重大战略构想,其核心是以特高压电网为骨干网架、以输送清洁能源为主导、全球互联泛在的坚强智能电网;推进全球能源互联网建设,实现“两个替代”,既面临可再生能源加快发展的历史机遇,也面临着一系列重大挑战,需要各方加强沟通、凝聚共识,共同推进全球能源互联网建设。国网能源院副院长蒋丽萍描绘了基于北极的富余风电资源和赤道的太阳能资源、以特高压为骨干输送网的全球能源互联网应用场景;国家“千人计划”专家、中国电科院博士曾平良提出了一套新颖的基于全球能源互联网的规划方法论。

基于全球能源观提出的全球能源互联网理念是解决全球能源问题的必经之路,世界各国在特高压、智能电网和清洁能源发展的创新实践,证明了全球能源互联网具有广阔的发展空间。

1.2 国内外研究现状

国际上针对能源互联网进行基础性的研究才刚刚起步,一些国家如德国、日本已经开始小范围实践能源互联网,下面对几个国际上能源互联网相关项目进行介绍和分析。

1、美国

2008年,美国国家科学基金项目“未来可再生电力能源传输与管理系统”(The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management system, FREEDM system) [12-13],研究一种构建在可再生能源发电和分布式储能装置基础上的新型电网结构,称之为能源互联网。效仿网络技术的核心路由器,他们提出了能源路由器概念并进行了原型实现[14],利用电力电子技术实现对变压器的控制,路由器之间利用通信技术实现对等交互。FREEDM是从电力电子技术的角度出发,希望以分布对等的系统控制与交互,实现能源互联网的理念。FREEDM系统的目的是架设智能微电网,并实现智能微型电网的互通互联。FREEDM系统的“Energy Router”是以电力电子变压器(也称为固态变压器)为核心^[15],通过远程可控制的快速智能开关实现微电网或者线路的智能通断控制,并加之以能量管理系统。该能源路由器的功率部分实现了7.2kV AC、10kV DC和120V AC、400V DC的控制,通信模块则采用了Zigbee、Ethernet和WLAN三种模式实现“Energy Router”内部和“Energy Router”之间的通信。

FREEDM所提出的能源互联网实现方式具有以下三个主要特征:即插即用接口、能量路由器和基于开放标准的操作系统。其中,即插即用接口包含一条400V直流母

线和一条 120V 的交流母线，还有一个开放标准的通讯界面，保证任何接入网络的电力设备可被迅速识别；能量路由器完成电网内不同电压等级的转换，识别并管理低压侧的所有设备；统一标准的操作系统运行于各个能量路由器，方便中央管理单元实现系统管理。

美国加利福尼亚大学伯克利分校的研究团队更关注智能电网的底层信息架构，提出“以信息为中心的能源网络”架构[16]。以期在一个通用架构中将智能通信协议与电能传输相结合，能够实现分布式控制，以及对于价格信号或更详细可用电量的持续需求响应。以信息为中心的能源网络在配电系统之上覆盖了信息传输，遍布各种物理场所，如机房、楼宇、社区、发电孤岛和区域电网等。该研究团队构建的能源网络对电源、负荷或储能容量进行分组，构成能源子网；子网通过名为“智能电源开关（IPS）”的接口与该网络的其他部分进行交互。能源网络将其子网成员的总供需以可预测、可筹集、可调整的计划商品的形式表示，并在电源和负荷间不断进行电力交易时为双方提供通信服务。该能源网络是以互联网数据中心作为研究的案例，对深层需求响应和“随供电量调整负荷”进行研究，随后将这种智能负荷的概念扩展到数据中心之外，应用于整座楼宇乃至楼宇群。需要提及的是，该课题组正在设计可扩展能源网络模型—LoCal。LoCal 旨在研究信息传输能如何更好地支持能源系统，紧密集成发电、储能和用电，并开发各种规模的能源信息接口和传输协议，包括机房、楼宇设施、储能设施、楼宇和电网发电级等。通过信息交流，更好地感知可用电量和负荷状况，能够更准确地匹配电源与负荷，消纳可再生能源，实现更高水平的整体能效，并避免过度超量配置能源系统。

MIT 的科技创新（Technology Review）报导了一个位于加州的叫做 Stem 的新兴能源公司[17]，开发了一款用于商业建筑的智能电池，将精简型的汽车锂离子电池和电力电子设备相连接，这些电力电子设备在向楼宇供电和从电网中充电这两种状态间快速切换，而大量的智能分析是通过云计算来完成。这样的智能电池稍加拓展实现相互间的通信与控制，就完全符合里夫金描述的以建筑楼宇为单元的能源互联网原型，这是从储能的角度实现能源互联网的典型例子。

美国的 Xcel Energy 电力公司自 2008 年开始在 Boulder 启动智能电网城市建设工作，这也将是全世界第一座智能电网城市。Xcel Energy 电力公司计划在这里对智能电网相关的多项智能技术和业务模式进行尝试。Boulder 智能电网城市的建设内容包括 AMI 实施、分布式能源接入、电动汽车接入、智能变电站改造、智能用电等多项内容。在智能用电管理系统方面，Xcel Energy 公司将建立新的量测系统，不仅可以测量用电，还可以将信息实时、高速、双向的与电网互联，对用电信息进行实时的搜

集和发布，使用户能够对家庭能源进行自动化操作，Xcel Energy 公司用 4-6 周时间来研究城市的电力基础设施，并提出修改意见，预计在 2010 年建成智能电网城市。

目前，美国在智能电网的研究和建设实践上处于世界领先地位，其代表性的智能电网研究组织包括美国能源部主持行业同盟协会成立的电网智能化联盟（GridWise Alliance）以及美国电力科学研究院（EPRI）。电网智能化联盟的研究把目标放在负荷侧的智能管理上，由其提出的“电网智能化”工程通过向现有的电力基础设施中安装远程通讯设备、传感器和计算机装置来改进电网，以减少电费开支、减轻电网负荷。EPRI 开展的智能电网（Intelligrid）的研究，项目在初衷上与“电网智能化”颇为相似，不同之处是 Intelligrid 更关心输配电网络和通信、信息技术的集成。

欧洲

E-Energy 是 2008 年德国联邦经济技术部与环境部在智能电网的基础上推出的一个技术创新促进计划，是基于 ICT 的未来能源系统[18]。它提出打造新型能源网络，在整个能源供应体系中实现综合数字化互联以及计算机控制和监测的目标。E-Energy 充分利用信息和通信技术开发新的解决方案，以满足未来以分布式能源供应结构为特点的电力系统的需求。它将实现电网基础设施与家用电器之间的相互通信和协调，进一步提高电网的智能化程度。换句话说，其目标不仅是通过供电系统的数字联网保证稳定高效供电，还要通过现代信息和通信技术优化能源供应系统。德国总理默克尔专门针对 E-Energy 表示：“应该为能量生产和消费提供智能 IT 支持，包括从电站中的发电机到客户的各个环节。把信息通信技术和能源这两个领域综合起来是 E-Energy 项目的重点，在解决核心技术之后，德国准备从配电到循环电网打造一个全新的能源互联网。到 2015 年，E-Energy 会引导德国由集中发电模式逐渐过渡到集中式大型发电厂和用户侧分布式可再生能源发电共存，最终在 2020 年实现在电力系统覆盖信息网络，能源网络中所有的元素通过互联网的信息协调工作。

瑞士联邦理工学院研究团队开发的“Energy Hub”称之为能量集线器[19-22]，是由计算机科学中集线器的概念引申而来，也叫能量控制中心。宏观上看，“Energy Hub”是一个信息中心，它通过超短期负荷预测以及实时在线监测分布式电源、配电网的潮流数据，对各发电侧及受控负荷侧进行优化控制。“Energy Hub”规模可以覆盖一个家庭甚至整个城市。“Energy Hub”在系统中是一个广义的多端口网络节点，它与配电网连接，对配电网上的能量起到补充、缓解、转换、调节、存储的作用。“Energy Hub”上的端口分为输入和输出两种，输入侧一部分为从配网流入 Hub 的电量，另一部分为从各分布式电源中流入 Hub 的不同形式的能量；输出侧一部分为供给各种负荷（电/热，冷）用的不同形式的能量，另一部分为反馈回配网中的冗余电量。

日本

日本研制的数字电网路由器，称之为“电力路由器”，可以统筹管理一定范围的地区的电力，并可通过电力路由器调度地区电力[23]。

日本数字电网是建立在互联网的基础之上，通过逐步重组国家电力系统，逐渐把目前同步电网细分成异步自主、但相互联系的不同大小电网，把相应的 IP 地址分配给发电机、电源转换器、风力发电场、存储系统、屋顶太阳能电池以及其他电网基础结构等。类似互联网中信息传递，该网中能源分配由电力路由器完成，旨在实现使电网的运转与 Internet 一样，其架构如图 2 所示。

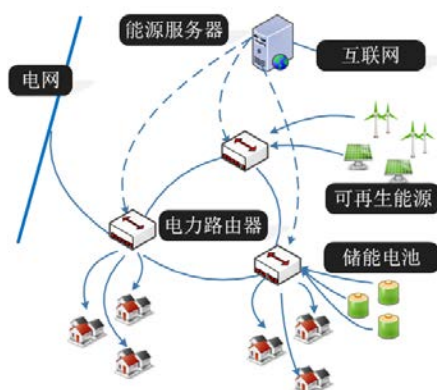


图 2 日本数字电网框架模型

Fig. 2 Digital Power Grid by Japan

电力路由器与现有电网及能源局域网相连，可以根据相当于互联网地址的“IP 地址”识别电源及基地，由此就可进行“将 A 地区的风力发电电力送往 B 地区的电力路由器”等控制。在电网因发生灾害而停止供电时，电力路由器之间可相互调度蓄电池存储的电力，从而防止造成地区停电。

2011 年，日本成功展示了“马克一号”数字电网路由器（DGR）。DGR 通过提供异步连接、协调局域网内部以及不同局域网来管理和规范用电需求。多支路的 DGR 由固态 AC/DC/AC 变换器组成，能够根据不同需求并随着电网频率的变化适时提升或降低电压。2013 年 5 月，数字电网联盟设立项目公司，在肯尼亚的未通电区域开展实验。

此外，位于东京都港区的 VPEC 公司通过电力系统自身携带信息，而不需要通过互联网实现信息传递。该公司开发了电力供给系统“ECO 网络”，如图 3 所示。

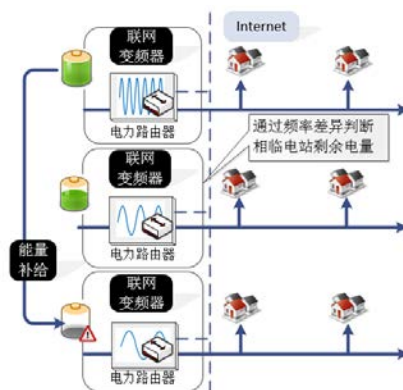


图3 ECO网络框架结构

Fig. 3 ECO Network Architecture

通过带有蓄电池的电力路由器，统筹含有发电设备以及需求侧的一定面积的区域。电力路由器能够根据蓄电池剩余电量改变输出电力的频率。电力路由器通过邻近电力路由器发来的频率信息来判断邻近发电站所具备的电量余量，再根据这一数值差异，形成站间自律性电力流通的机制。由于 ECO 网络中信息由电力特性体现，减少了对信息基础设施的依赖，结构较为简洁，也更具备抗灾害的能力。

总结以上项目，对能源互联网的理解主要有三种：

以互联网的开放对等理念和体系架构为指导，形成新型的能源网。这时候能源互联网（Energy Internet）的本质是能源网！以美国的 FREEDM 为典型代表，效仿网络技术的核心路由器，提出了能源路由器的概念并且进行了原型实现。

借助互联网收集能源相关信息，分析决策后指导能源网的运行调度。这时候能源互联网（Internet of Energy）的本质还是信息互联网！以欧洲的 E-Energy 为典型代表，打造一个基于信息和通信技术的能源供应系统，连接能源供应链各个环节业务流程，实现示范应用形成能源需求和供给的互动。

以上两种理解混合在一起，两种成分都有，以日本的数字电网、电力路由器为典型代表。

国内发展现状

2012 年 8 月 18 日和 2013 年 9 月 25 日，由中国科学院主办的能源互联网论坛分别在长沙和北京举行。会议文集刊登在《中国科学：信息科学》2014 年 6 月期的可再生能源互联网专题^[24]。

虽然能源互联网技术目前在国内引起了广泛关注，但相关研究尚处于起步阶段。从 2013 年开始，北京市科委组织了“第三次工业革命”和“能源互联网”专家研讨会，并启动了相关软课题研究，完成了《北京能源互联网技术及产业发展研究报告》，形成详细的能源互联网调研报告和路线图，为进一步科技立项提供指南。2014 年 2 月和 6 月国家电网公司于南京和北京召开“智能电网承载第三次工业革命”研讨会，中国

电科院于 2014 年 6 月启动了“能源互联网技术架构”方面的基础性前瞻性项目研究。2014 年 2 月国家能源局也启动了“中国能源互联网发展战略研究”。

除了清华大学，目前国内开始从事能源互联网研究的单位还包括国防科技大学^[25]、天津大学^[26]、中国电科院、中科院电工所、中科院声学所^[27]等。

1.3 研究意义

能源是人类生存发展的重要物质基础，但从世界范围来看，能源可持续发展的问題始终没有得到根本解决。解决能源问题，已不是简单地增加能源供给、提高能源利用效率，而是需要全面的变革，这个变革把能量流和信息流融合，建立一个全新的能源体系，形成能源应用的创新形式。基于现有的能源基础设施，可再生能源资源在传输和利用等方面仍存在瓶颈，基于现有的能源基础设施，运用先进的信息和互联网的理念、方法和技术，与可再生能源技术相结合，构建能源互联网，为实现能源可持续发展提出了一条可预见并且具有可行性的技术路线。

当前阶段看来，能源互联网是传统能源结构裂解的最好触媒，它推动能源设施从孤岛系统、自动化运转到柔性能源生态集群，会是人类智能化历史上最大的产业升迁。能源互联网将推动所有能源设施从孤立设施、专业系统、行业网络整合为网络化能源生态集群，形成人、机、网、市场四位一体的格局，全球能源结构正面临着一次前所未有的巨大转型和产业增长的爆发。

目前风电、太阳能等可再生能源单从经济性上而言，尚无明显优势，仍需要国家补贴；此外，由于其发电具有不稳定、间歇性等劣势，容易对电网造成冲击，如果对其发展不加以理性规划，会给电网造成巨大的负担。能源互联网利用系统能效技术、IT 互联网技术，形成信息和能量的耦合与协同，构建基于能源生产、储运、应用和再生四个环节的信息和能量循环回路，从而实现系统能效的最大化，促进能源与环境的和谐、可持续发展。信息和能源循环回路既可以形成每个能源用户的小循环，也可以形成广域的大循环，从而对于可再生能源的接入，以及彻底改变传统的能源生产与能源应用方式，向城区和企业提供节能减排的区域能源整体解决方案。

长期以来，传统的“竖井式”能源利用方式不仅效率低下、耗费严重，还大量增加温室气体的排放。能源互联网将从根本上实现区域性乃至国家的节能减排目标，是促进产业升级的重要手段。一方面，该产业将能源产业和 IT 产业的发展有机融为一体，不仅占据了下一轮 IT 应用领域的制高点，还催生了新的能源产业和能源装备产业。另一方面，该产业将大大提高能源利用效率并降低能源消费量，从而达到节能减排的效果，实现能源的循环经济和低碳经济。

传统的电网观念认为，电能是廉价的，而有关发电、配电和用电的信息则相对昂贵。但展望未来，能源将变得宝贵，而无所不在的信息将使我们能够通过灵活调度、间歇性可再生能源并网、随供电量智能调整负荷等措施实现能源的更高效利用。以信息为基础的能源网络将极大地提高配用电效率。不可否认，能源互联网作为未来可能的智能能源解决方案正逐渐成为研究的热点和潮流的同时也受到一定的质疑。电力专家、信息专家、经济学家等都在能源互联网系统相关研究中进行深入探讨、技术攻关等科学研究。尽管能源互联网是什么，有什么样的强大功能，离我们有多遥远，如何实现等一系列问题都未完全解决，但从世界及国内的研究动向和重视程度来判断，有必要对能源互联网及其关键技术进行研究和梳理，形成全面、客观、科学的看法。

1.4 主要内容和篇章结构

课题主要包括能源互联网、能源路由器及电能质量调节三部分内容，以递进的方式从宏观、核心和关键技术三个方面介绍了不同层次能源问题的解决方案。对能源互联网的特征、要素及发展趋势进行了探讨，进而结合电力电子技术的发展现状详细论述了能源互联网的核心-能源路由器应有的功能及架构设计，最后详细介绍了将能源互联网研究的重要问题之一电能质量问题，结合实际参与的深圳电能质量项目，详细介绍了在电能质量治理领域所开展的具体工作。

第一章论述了报告选题的内容和意义。介绍了能源互联网思维，论述了当前能源互联网的国内外现状及发展动态，阐述了能源互联网研究的意义，最后简要介绍了本报告的主要工作和篇章结构。

第二章对能源互联网的相关问题进行梳理，阐述能源互联网的基本概念、内涵与外延、意义与作用。探讨了能源互联网的发展模式，认为能源互联网的发展应采取革新式和演进式相结合的发展模式，鼓励开展具有突破性的关键技术的先导性研究和综合一体化的解决方案。对能源互联网的架构进行分析讨论，对柔性直流输电在能源互联网发展过程中的作用进行了探讨。

第三章以电力系统项目统一电能质量调节装置 UPQC 为依托，介绍了电能质量调节项目取得的成果。介绍了项目的主要任务，设计指标和完成情况。其中对 UPQC 的关键参数设计给出了详细介绍，提出了一种 LC 输出滤波器参数范围确定方法。基于增强型 LCL 滤波器的 APF 模块控制流程进行了建模和稳定性分析，给出了系统稳定的电路参数设计条件，实验结果表明该方法有助于提升系统的输出频率特性。

第四章对统一电能质量调节（UPQC）系统进行了介绍。首先介绍了系统软件，包括 UPQC 系统的运行流程，核心算法流程及串联变压器励磁涌流抑制策略，介绍

了系统的保护设计方案。第五章介绍了系统的硬件设计，功能分配及监控系统的设计和协议的规定情况。

最后为实验和结论，将对主要工作和结论进行总结。

第 2 章 能源互联网

2.1 引言

能源互联网是一个全新的概念，却不是一个全新的事物，能源互联网脱胎于智能电网、微电网等技术领域而产生，可以看到智能电网，智能配电网，微电网，分布式发电，先进计算技术，网络技术等元素，是能源技术和信息技术发展到一定程度的产物，是不同国家和地区能源理念与实践工作碰撞的产物，是集中式智能电网理念向分布式智能电网方向发展的变革。目前能源互联网尚处于初期阶段，对能源互联网进行研究，明确其概念与组成，梳理与智能电网的关系，研究、开发可实现能源网络互联的网络架构及关键技术和设备对推动能源互联网的发展至关重要的。

能源互联网虽然涉及多种能源，是复合能源体系，但是，因电力在国民经济中的重要地位以及电力系统发展的状况，从国内外能源的发展现状以及未来的发展趋势看，未来能量管理架构的主体必然是电能源，能源互联网的主体也必然是电能源，发展能源互联网应优先发展智能电网，并将超越智能电网的具体实现形式，构建基于信息架构的电网。在不到十年的时间，“智能电网”概念已从最初的输配电过程中的自动化技术，扩展到电力产业全流程实现智能化、信息化、分级化互动管理。而现在来看，电网正充分利用现代通信和信息技术成果，向着智能化的方向发展也即向着能源互联网的方向发展。

2.2 能源互联网思维

2.2.1 基本概念

能源互联网是以互联网理念构建的新型信息—能源融合“广域网”，它以大电网为“主干网”，以微网、分布式能源等能量自治单元为“局域网”，以开放对等的信息—能源一体化架构真正实现能源的双向按需传输和动态平衡使用，因此可以最大限度的适应新能源的接入^[8]。虽然能源形式多种多样，电能源仅仅是能源的一种，但电能 在能源传输效率等方面具有无法比拟的优势，未来能源基础设施在传输方面的主体必然还是电网，因此未来能源互联网基本上是互联网式的电网。

在未来以能源互联网为基础的能源消耗模式中，微网、分布式能源等能量自治单元可以作为能源互联网中的基本组成元素，通过新能源发电、微能源的采集、汇聚与

分享以及微网内的储能或用电消纳形成“局域网”。能源互联网是此基础上的广域连接形式，作为分布式能源的接入形式，是从分布式能源的大型、中型发展到了任意的小型、微型的“广域网”实现。大电网的形成有其必然性，在传输效率等方面仍然具有无法比拟的优势，将来仍然是能源互联网中的“主干网”。微网或分布式能源接入、互联和调度灵活但存在供电不稳定等问题，大电网供电稳定但无法适应大量新能源的灵活接入和动态调度，能源互联网可以起到衔接作用，综合两方面的优势。能源互联网是采取自下而上分散自治协同管理的模式，与目前集中大电网模式相辅相成，符合电网发展集中与分布相结合的大趋势。

目前开展的智能电网基本是现有电网架构下的信息化、智能化^[9-10]，能源互联网是借鉴互联网理念构架的新型电网，其中的开放互联、能量交换与路由等特征有别于目前一般意义下的智能电网，可以形象的称为智能电网的 2.0 版本^[11]。

2.2.2 内涵与外延

能源互联网的内涵是以互联网理念和思维变革能源基础设施。如果说智能电网还是现有电网架构上通过信息化和智能化的手段，解决设备利用率，安全可靠、电能质量等基本问题，能源互联网的根本不同则在于其采用互联网理念、方法和技术实现能源基础设施架构本身的重大变革，使得能量的开放互联与交换分享可以跟互联网信息分享一样便捷。能源互联网区别于传统能源基础设施的本质特征包括：

1) 开放

互联网实现信息的随时随地接入与获取，主要取决于开放式的体系结构。能源互联网要实现开放性需要可再生能源和储能、用能装置的“即插即用”。能源互联网的发展要借鉴互联网的发展方式，走标准先行，应用驱动，进一步带动产业和市场发展的道路。

2) 互联

“局域网”与“广域网”的本质不同在于“广域网”必须解决规模化开放互联的问题，这就需要简洁易行的标准协议作为基础。“局域网”内部可以进行多种能源形式的转换，可以进行风光储用的平滑与协调，但“广域网”的互联必须是建立在局域消纳的基础，形成简捷的能量交换方式，才可能实现大规模互联。

3) 对等

同传统电网自顶向下的树状结构相比，能源互联网的形成是能量自治单元之间的对等互联。任意单元之间的连接是逻辑上的，真正的实现必须建立在分散路由的基础之上。能量的传输应该是多次路由的结果，之间是解耦的进而可以避免一系列安全稳

定性问题；同时传输路由路径之间可以是动态互为备用的，在保证冗余和可靠性的同时不降低系统的利用率。

4) 分享

分布、分散与分享也是能源互联网的主要特征，没有中心化的调度与管理。借鉴互联网应用中借助社交网络的信息分享机制，能源互联网中各局域网间的能量交换与路由也都是就近实时动态进行的，以分散式的局部最优实现全局能量管理的调度优化。

能源互联网的外延在于信息物理融合，真正实现信息能源基础设施的一体化，这也是研究的重点。

信息基础设施与能源基础设施发展的内在动因决定了信息能源基础设施走向融合一体化发展的道路。未来信息基础设施以数据中心为核心，通过高速通信网络相连接，同时支持物联网和移动互联网的接入，其发展过程中遇到了明显的能源瓶颈；同时，智能电网与能源互联网的发展对信息化、智能化的要求越来越高，迫切需要新一代信息技术的支撑。信息能源基础设施之间的功能、性能等方面的互补性也为其融合一体化提供了经济可行性。

总的来说，信息通信与能源电力结合发展分为三个阶段，第一个阶段为数字化、信息化阶段。此时，信息通信为能源电力行业提供服务，带来方便、快捷等好处。第二个阶段为智能化阶段，也就是智能电网阶段。在该阶段，信息通信成为能源电力基础设施不可或缺的组成部分，以信息流与能量流的结合为特征。第三个阶段为信息物理融合阶段，表现为信息通信基础设施与能源电力基础设施的一体化，也就是信息能源基础设施一体化意义下的能源互联网阶段。

2.2.3 意义与作用

1) 能源互联网是现实意义下能源可持续发展提切实可行的道路

能源可持续发展是当前摆在人类面前最重要的难题，可再生能源的发展虽然提供了彻底解决能源可持续发展的希望，但可再生能源的利用方面仍然存在问题。能源互联网在现实意义下提供了一条切实可行的发展道路。里夫金在《第三次工业革命》一书中做了这样的描述：“当数以百万计的建筑实时收集可再生能源，并通过智能互联网将电力与其他几百万人共享，由此产生的电力使集中式核电与火电站都相形见绌。”

2) 能源互联网天然支持分布式可再生能源的接入

欧盟、美国和中国相继分别提出到 2050 年实现可再生能源在能源供给中占 100%、80%和 60%~70%的目标。而风光等大部分可再生能源的间歇不稳定性决定了现在的集中式电网结构是无法适应如此规模的可再生能源接入的。能源互联网通过局域自治

消纳和广域对等互联，最大程度的适应可再生能源接入的动态性，通过分散协同的管理和调度实现动态平衡。

3) 能源互联网在安全、可靠、稳定以及利用率等方面技术优势明显

互联网体系架构决定了其鲜有安全稳定性问题，通过大量冗余等方式保证整体上的可靠性，同时通过分散路由等方式实现设备和线路的动态备用，保持一定的利用率。能源互联网可以借鉴其中的机制，但能量和信息的交换和传输是有本质不同的。相比现在集中式电网自上而下的紧耦合模式，能源互联网是局域自治，在广域互联中可以通过储能缓冲、直流输电等方式实现解耦，同时局域不稳定问题可以通过广泛互联实现广域的动态互备用，达到安全稳定可靠的目标，而不是依靠过大的安全裕度而降低了系统利用率。

4) 能源互联网是源用混合场景下对现有输配网的有益补充

能源互联网不是取代现有电网架构，而是着重在分布式可再生能源接入越来越广泛，源用混合场景越来越普遍的形势下借鉴互联网理念提供一种自下而上的新型组网方式，能源互联网通过局域自治和广域能量交换最大限度的消纳源用的动态性，减少了对大电网的影响，大大降低大电网的安全稳定性风险，是对现有大电网的有益补充。这跟智能电网基于现有网架结构，通过提升信息通信以及控制能力来实现优化调度以提升安全稳定可靠性有本质的不同。

2.3.4 能源互联网可行发展模式

1) 发展方向

Internet 针对电话网的弊端，通过采用开放对等理念，在创新服务模式的基础上提供了多种多样的信息服务，使 Internet 成为了支撑当前社会发展的基础设施；能源互联网旨在实现能源的高效利用，为经济社会发展提供坚实的能源基础架构，因此，Internet 的发展模式对能源互联网的发展具有良好的借鉴作用。IP 技术曾经是推动 Internet 飞速发展的重要动力，但是随着网络服务内容的日益丰富，基于 IP 机制的 Internet 通信效率越来越难以支撑人们对网络的需求，关于构建非（后）IP 的下一代互联网的呼声越来越高[6,7]，鉴于此，关于能源互联网的发展模式存在两种不同的观点：革新式和演进式。

所谓革新式，强调较少地考虑现有能源网络的束缚，从未来能源需求的特征出发，探讨合适的通信、能源和控制技术，给出基于可再生能源的能源供应体系。里夫金认为第三次工业革命可能率先在发展中国家发生正是基于该种观点[1]，认为只要建立起以可再生能源为供应主体、以建筑物为能源共生产和存储主体、以电力网络为共享平台、以即插即用的电力交通工具为运输方式的能源系统即可成为能源互联网，为能

源互联网的发展提供了足够多的自由发挥空间，但与当前能源体系的脱离势必导致该种模式动力不足。

相对地，演进式发展能源互联网强调对现有能源系统的向前兼容，在不影响现有能源供应的基础上，探讨各种技术手段实现能源供应逐步转向以可再生能源为主，保证能源利用率的进一步提高。智能电网可以认为是这种观点的直接产物，首先通过探讨基于高效通信手段的能源供销平衡控制提高能源的利用率；智能电网 2.0 阶段[8-11]则更多强调可再生能源的接入、强调能源生产方与消费方的交互，其发展轨迹强调对现有基础设施的利用，收益分配模式等经济因素将制约该种发展模式的效率。

鉴于上述分析，我们认为能源互联网的发展应采取两者相结合的发展模式，一方面，鼓励开展相关关键技术的先导性研究，探讨综合一体化的解决方案，在传统能源供应相对不足的地区开展小范围的示范工程；另一方面，结合实际情况，开展基于现有能源基础设施能源调控、可再生能源接入、需求信息采集与分析、能源供需双向通信等方面的研究，积累能源互联网的建设经验。

2) 关键理念

习近平在 2013 年 9 月和 10 月分别提出建设“新丝绸之路经济带”和“21 世纪海上丝绸之路”的战略构想。“一带一路”必将促进我国与俄罗斯、哈萨克斯坦、土库曼斯坦等邻国在石油、天然气、电力和新能源等能源领域的广泛深入合作，因此“全球能源互联网”是结合“一带一路”发展战略打开能源领域的全球视野。

从世界清洁能源资源分布来看，北极圈及其周边地区(“一极”)风能资源和赤道及附近地区(“一道”)太阳能资源十分丰富，简称“一极一道”。集中开发北极风能和赤道太阳能资源，通过特高压等输电技术送至各大洲负荷中心，与各洲大型能源基地和分布式电源相互支撑，提供更安全、更可靠的清洁能源供应，将是未来世界能源发展的重要方向。

清洁替代，是指在能源开发上，以清洁能源替代化石能源，走低碳绿色发展道路，逐步实现从化石能源为主、清洁能源为辅向清洁能源为主、化石能源为辅转变。清洁替代将从根本上解决人类能源供应面临的资源约束和环境约束问题，是实现能源可持续发展的战略举措，也是未来全球能源发展的必然趋势。

电能替代，是指在能源消费上，以电能替代煤炭、石油、天然气等化石能源的直接消费，提高电能在终端能源消费中的比重。随着电气化进程加快，电能将在终端能源消费中扮演日益重要的角色，并最终成为最主要的终端能源品种，实现更加清洁、便捷、安全的能源利用。

全球能源观是遵循能源发展规律，适应能源发展新趋势，形成的关于全球能源可持续发展的基本观点和理论。全球能源观的核心是坚持以全球性、历史性、差异性、开放性的观点和立场来研究和解决世界能源发展问题，更加注重能源与政治、经济、

社会、环境的协调发展,更加注重各种集中式(基地式)与分布式清洁能源的统筹开发,要求以“两个替代”为方向,以全球能源互联网为载体,统筹全球能源资源开发、配置和利用,保障世界能源安全、清洁、高效、可持续供应。

2.3 柔性直流与能源互联网

能源互联网要实现大容量可再生能源发电的可靠接入,最大发挥可再生能源的使用效益。城市用电负荷的快速增加和城市规划的约束,需要不断增强电网的输送能力,利用有限的线路走廊输送更多的电能,迫切需要采用更加灵活、经济环保的输电方式。柔性直流输电技术是解决这些问题的重要手段之一。柔性直流输电没有障碍制约向更高电压等级和更大传输容量方面发展,呈现出良好的发展态势,适应于大规模间歇电源电网接入的应用。

柔性直流输电技术在世界范围内呈迅速发展的趋势,大规模间歇电源柔性直流输电网接入、柔性直流输配电网以及智能化柔性直流输电系统是未来可应用于能源互联网的重要发展方向。

多端柔性直流输配电网,为解决电网中多电源供电、多落点受电的问题,提高系统的稳定性,有效克服重大灾难性事件的发生,具有极大的意义。

智能化柔性直流输电具备智能电网的自愈、安全、交互、协调、兼容、高效、优质、集成等核心特征,达到了电力网络更加经济、可靠、安全、环保这一根本目标。

柔性直流输电经过十几年的发展,已经证明了其具有良好的技术和商业价值,但在一些方面还需要改进,如关键设备的运行可靠性,换流阀成本和损耗,挤压式电缆结构等问题还有待深入研究。ABB 等企业已基本掌握了柔性直流输电成套技术,我国柔性直流输电关键设备仍处于理论研究阶段,差距较大。

换流阀由晶闸管、阻尼电容、均压电容、阻尼电阻、均压电阻、饱和电抗器、晶闸管控制单元等零部件组成。其中,晶闸管是换流阀的核心部件,它决定了换流阀的通流能力(目前国内已研制出 6 英寸晶闸管,额定通流能力 4000 安培),通过将多个晶闸管元件串联可得到希望的系统电压。晶闸管的触发方式分为电触发和光触发,ABB 和西门子、阿海珐分别是其中的代表。

2.3.1 柔性直流输电优势

与传统的交流输电相比,柔性直流输电的以下特点使其更加适用于能源互联网应用:

1) VSC 电流能够自关断,可以工作在无源逆变方式,所以不需要外加的换相电压,受端系统可以是无源网络,克服了传统的 HVDC 受端必须是有源网络的根本缺陷,使利用 HVDC 为远距离的孤立负荷送电成为可能。

2) 且正常运行时 VSC 可以同时且相互独立控制有功功率、无功功率,控制更加灵活方便。而传统 HVDC 中控制量只有触发角,不可能单独控制有功功率或无功功率。

3) VSC 不仅不需要交流侧提供无功功率而且能够起到 STATCOM 的作用,动态补偿交流母线的无功功率,稳定交流母线电压。这意味着故障时,如 VSC 容量允许,那么 HVDC-VSC 系统既可向故障系统提供有功功率的紧急支援又可提供无功功率紧急支援,从而既能提高系统的功角稳定性又能提高系统的电压稳定性。

4) 潮流反转时直流电流方向反转而直流电压极性不变,与传统的 HVDC 恰好相反。这个特点有利于构成既能方便地控制潮流又有较高可靠性的并联多端直流系统,克服了传统多端 HVDC 系统并联连接时潮流控制不便、串联连接时又影响可靠性的缺点。

5) 由于 VSC 交流侧电流可以被控制,所以不会增加系统的短路功率。这意味着增加新的 HVDC-VSC 线路后,交流系统的保护整定基本不需改变。

6) VSC 通常采用 SPWM 技术,开关频率相对较高,经过低通滤波后就得到所需交流电压,可以不用变压器,所需滤波装置容量也大大减小。

由于电力电子器件容量及开关损耗的限制, HVDC-VSC 的输送容量尚不能与传统的 HVDC 相比。但是,由于 HVDC-VSC 克服了传统 HVDC 的固有缺陷,大大拓宽了 HVDC 可能的应用领域;同时挤压型 HVDC 电缆的研制成功^[5]大大降低了直流电缆的铺设成本,使直流电缆的铺设经济、快速、方便,这种电缆在 10kOV 的电压下可传输 30MW 的功率,而其重量仅为 1kg/m。HVDC-VSC 与挤压型 HVDC 电缆的结合,使直流输电的经济范围达到了几兆瓦至几百兆瓦。目前, HVDC-VSC 可在能源互联网中发挥作用的场合主要在以下三个方面:

① 连接分散的小型发电厂

为充分利用可再生能源及电力市场化的发展,已经或将会导致很多中小型电厂的产生,在这两种情况下都要求发电厂和电网具有足够的控制能力。比如,为了提高发电效率,风力发电厂希望可以根据风力的情况不断地改变机组的运行条件(包括发电频率);为提高电能交易的自由度,希望电能的交易不受系统安全稳定性及电能质量的约束。由于 HVDC-VSC 能够独立地控制有功功率和无功功率,并允许发电厂供电频率的变化,所以能够很好地满足上述要求。特别是 HVDC-VSC 不存在交流系统固有的稳定性问题,能够灵活地控制有功、无功潮流,这些特点非常适合电力市场的需要 [4]。哥得兰岛的 HVDC-VSC 工程便是一个这样的实例。

② 替代区域性小电厂,向远距离负荷供电

所谓远距离负荷指一些偏远的小城镇、村庄或岛屿等，其负荷从几个兆瓦到数百兆瓦。由于其输电距离超出了交流输电技术性或经济性的可行范围，而其输电容量又达不到传统 HVDC 经济性范围^[5]，且传统 HVDC 不能向无源网络供电，所以为了给这些远距离负荷供电往往要在当地建立小型的机组。这些小型机组不仅运营成本高，而且常常会破坏当地自然环境。由于 HVDC-VSC 可以向无源网络供电，且不受输电距离的限制，受端的 VSC 就相当于安装在当地的时间常数很小的发电机。所以从技术的角度看 HVDC-VSC 是向远距离负荷供电的理想选择，而从经济的角度看，HVDC-VSC 的经济输电范围为几个兆瓦到几百兆瓦，也完全符合要求。因此，HVDC-VSC 的技术和经济特性使其成为向远距离负荷供电的一种近乎理想的选择。

③ 向用电量快速增长的大城市供电^[13, 15]构筑直流配网

人口密集的大型城市负荷增长迅速，但由于空间的限制增加新的输电走廊代价很高，甚至根本不可能，因而必须尽可能地提高现有输电走廊的输电能力。

由于同样的输电走廊直流输电的输送能力是交流的 1.5 倍，且 HVDC-VSC 能同时且相互独立地控制有功功率和无功功率，消除有功环流，合理分配有功负荷，克服电压稳定性的制约，改善电能质量，所以 HVDC-VSC 被认为是向用电量快速增长的大城市供电甚至构筑城市配网的一个理想的工具。

以上讨论了 HVDC-VSC 目前和近期内三个可能的主要应用领域，可以相信，随着电力电子技术的发展，全控型电力电子器件性能及单管容量的迅速提高，HVDC-VSC 应用领域将不断向输电网扩展，并有可能最终在输电网中取代传统 HVDC，在人口密集的大城市里部分甚至完全地取代现有的交流配电网。

2.3.2 柔性直流与能源互联网

目前，世界上能源互联网雏形的电力系统网架大都包含交流电压母线和直流电压母线，通过交流电压母线向交流负荷供电，直流电压母线接入分布式发电，储能，直流负荷及变频负荷等。同时，为了不增加交流系统的短路容量，不构成电磁环网和实现功率双向可控的目标，各个区域之间的电网需要通过柔性直流技术进行互联。清华学者提出两种柔性直流技术在能源互联网中的应用方案：一种是中压柔直互联方案，将 10kV 电压等级的交流配电网通过 VSC 互联以实现各个供电区域潮流主动控制；另一种低压直流入户方案^[4]，通过柔直技术为敏感负荷提供专用供电通道来提高电能质量，并且直流母线可以友好接入风电、光伏等分布式电源。

1) 适用于中压配电网的中压直流互联方案；

如下图所示，采用柔直互联方式连接 110 kV 变电站，每个变电站母联开关 S 闭合。本方案有以下几个优势：1) 联网系统内各个主变互为“热备用”，大大节省了单

台主变的备用容量，从而节省了一次设备的投资，而且通过 VSC 的主动调节，可以实现潮流的主动控制；2) 提高单台主变的负载率，减少变压器总体损耗；3) VSC 换流站本身可以提供无功功率，节省了常规变电站的无功补偿设备；4) 有利于风电、光伏、储能装置及电动汽车的集中接入；5) 各个配电网、微电网之间互联，能够实现潮流的主动控制，以实现能源的最优利用。

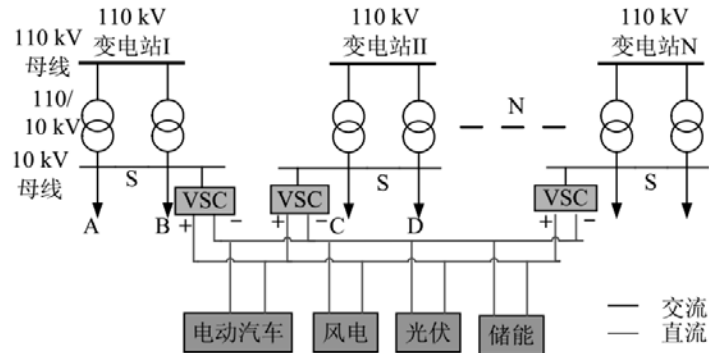
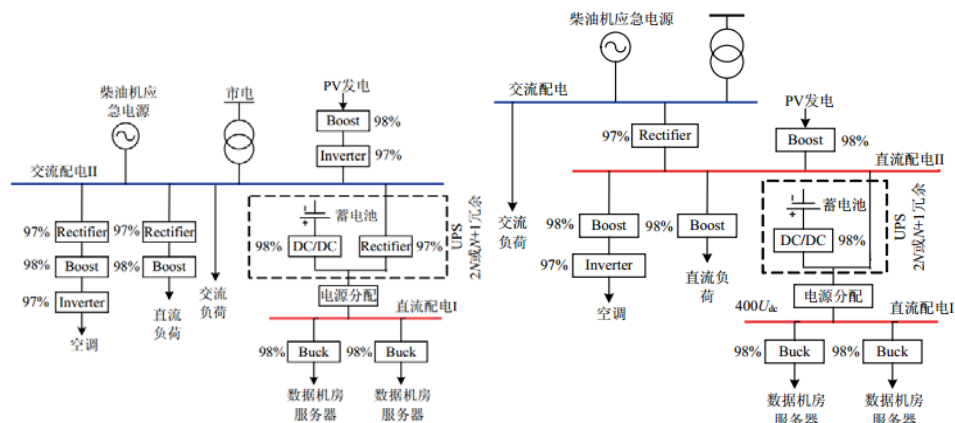


图 2-2 中压直流互联方案示意图

Fig. 2-2 Schematic diagram of MV DC interconnection scheme

2) 适用于低压配电网的低压直流入户方案。

对于传统的交流电网，电能质量问题主要表现为电压、电流或频率的偏差和造成用户设备故障或误动作的任何电力问题。而对于直流电网，问题就变得简单许多，因为直流系统没有频率偏差、三相电压不平衡和谐波污染等问题。而且绝大部分用电设备，如家电、办公自动化设备最终以直流电形式供电，另外，如电动汽车、空调、电梯等工商业负荷是通过变频器供电，中间有直流母线的存在。因此可以把直流负荷及变频交流负荷比重较大的用户设计为直流形式直接供电，不但节省了许多变流环节，而且减少传输损耗，没有同步稳定性问题。文章以数据中心为例探讨低压直流入户方案的可行性。



(a) 方案一 (b) 方案二

图 2-3 低压直流互联方案

Fig. 2-3 Schematic diagram of MV DC interconnection scheme

将供给机房服务器的交流配电母线改为直流，如上图 a 所示，则机房服务器负荷可以直接通过 Buck 电路接入直流配电母线 I，同时可以省去 UPS 系统的逆变器。方案二相对于低压直流入户方案一，增加了一条直流母线，作为数据中心所有分布式电源、直流负荷、空调等变频负荷的能量交换环节。对于变频空调及直流负荷，虽然减少了一级整流环节，但从交流配电母线变换到直流配电 II 增加了一级整流环节。此方案的优势体现在分布式电源接入环节上，相比于方案一，光伏发电接入减少了一级变流环节，节省了投资，也减少了传输损耗，随着分布式电源渗透率的提高，在未来能源互联网中，每家每户都是一个微电源，此方案适合于分布式电源渗透率较高的情况。

相比于传统交流配电系统，低压直流入户方案一可以为数据中心的大用户提供高可靠性、高电能质量的电能，并且可以减少一次设备的投资及损耗；低压直流入户方案二适用于直流负荷及分布式电源渗透率较高的大用户。中压直流互联方案对能源互联网的建设及城市配电网的改造有很大的借鉴意义；低压直流入户方案不仅能够节省一次设备的投资，而且可以节省系统损耗。随着全控型半导体器件技术的成熟，电动汽车不断增多，以及分布式电源渗透率的提高，柔性直流技术在未来能源互联网的应用将更为广泛。

2.4 能源路由器

正如因特网中的数据包路由器在信息传递中起到关键作用，在能源互联网中，也需要类似的有“能源路由器”来管理电力的传输和分配。能源路由器技术是电力传输和信息交换的技术组合，主要实现两项功能，一是能量流的动态调整，二是电力设备之间的实时通讯，还包含彼此之间的交互作用。

能源互联网中有八个领域：批量生产、存储、传输、分配、使用、市场、客户、服务提供商。在这七个领域中，能源路由器都有其独特的作用。

在电力批量生产领域，能量是从分布式能源资源大量的生产出来。这些能源资源常常与当地的电力负载设备相连。当本地供应超出了本地需求，多余的能量通过能源路由器流入电网中。当局部能源短缺时，电网通过能源路由器提供补充能量。任何不稳定的能源接入（例如风能）电网，都需要一个优秀的能源路由器。

在电力存储领域，超级电容的出现使得能量的存储方式更加灵活，容量更大，应用范围更广。储能/用电缓冲是能源互联网架构的重要组件，以打破供电和用电间的同步性。该架构的重要功能之一是能够预测供电量和用电量，并将其作为供电方和用电方之间协商的基础。对这些信息进行适当的汇总和交流，将有助于供需双方相互适

应、共同协作。借助定义明确的接口，能够实现逐步增量部署。此外，以信息流控制能量流还有助于供需双方更好地调整，提高可靠性和灵活性。在能源互联网架构中，储能装置既是负荷也是电源。电源是智能的，能够预计供电状况并发送相关信息；负荷也是智能的，能够根据接收到的供电信息调整自身工作。它们必须通过控制算法，根据电网和分布式发电的电量或电价，决定是充电以备将来使用，还是放电以供当前使用。除了采用电池等传统储能装置来缓冲用电，还可通过合理调度用电时间来缓冲。现在用电就等于提前了负荷的工作时间，调峰用电则是延后了负荷的工作时间，这个过程就是用电缓冲的过程。

在电力传输领域，需要把能源从生产地传送给顾客，对某个特定的分布式能源资源，如果其满足本地需求后还有剩余能量，传输领域将需要动态地把这个能源调度出去，这时能源路由器就要执行这种动态能源流的任务；如果本地需求超出本地发电能力及存储余量，需要人能源互联网的其他节点进行能量接入，则需要能源路由器的电力传输能量，同样来执行动态能源流的任务。

在分配领域，能量分配通过能源路由器来完成。当用户的需求随时间变化时，能源路由器将会跟踪顾客的需求变化，并且使能量分配与之动态地相匹配。

在使用领域，为了优化能量利用必须收集电网的状态信息，如当前在分布式能源中的电力生产容量，不同用户的电力需求。状态信息也可以通过传输和分配领域的能源路由器获得。

在市场领域，需要实现供应与需求之间的平衡。为了正确地运作市场，必须从各个局域电网中汇集能量供应和需求信息。这些信息收集工作依赖部署在整个电力网络中的能源路由器来完成。

在用户领域，用户通过能源路由器从电网中购买能量。当用户也使用可再生能源生产能量时，能源路由器为它所连接的用户调整能量需求和供应。如果一个能源路由器连接的用户们生产的能量总量超过了他们的需求，额外的能源将通过能源路由器卖回给电网。能源路由器的用户分为三种类型，即分布式可再生能源生产设备、储能装置和电力负载设备。

在服务提供商领域，服务提供商或者自己拥有能源生产设备，或者从其他分布式可再生能源资源出购买能量，然后卖给用户。他们需要有能源供应和需求信息，以便优化他们的服务，这些信息获得当然也需要能源路由器来完成。

对于整个电力网络来说，能源路由器不仅仅连接能源用户，也和电网中的其他能源路由器相链接，以实现智慧的能源管理。能源路由器管理它的微网有两种方式，一

是并网模式，一是孤岛运行模式。在并网模式下，能源路由器将其所在的微网联入大电网中，并且能量通过能源路由器从微网中流入流出。能源路由器作为能量流的管理者负责微网中的能量供应和需求。在孤岛运行模式，能源路由器为保护微网断开与大电网的连接。本地负载设备必须由微网内的分布式可再生能源和分布式储能装置来满足负荷需求，为了最大化运行时间，能源路由器将低优先权的电力使用安排到最后。

因此，接入到当前电网中的能源路由器可以完成区域能源的管理控制，对实现扩展当前电网的能源互联网是核心的设备。通过能源路由器可以管控能源互联网内的能源流。能源路由器提供多种接口对应多种能源流类型的接入和输出，可以提供对不同结构电网的管理，实现多层次能源网络的开放式管理控制。

2.4.1 能源路由器架构研究

能源路由器作为构建能源互联网的核心部件，需承担能源单元互联、各分布式能源或微网单元互联、能源质量监控和调配、信息通信保障及维护管理机制部署等功能。能源路由器是信息能源基础设施一体化理念的集中体现。

能源互联网从根本上是对能源流的精细化管理控制，改变传统单项的能源流流向为双向的流向，在能源网络中对电源、负荷或储能容量等进行分组，构成能源子网，分区域、分层次实现能源的管理控制。因此，可以友好接入到当前电网中的能源路由器，完成区域能源的管理控制，对实现覆盖于当前电网上的能源互联网是核心的设备。任何不稳定的能源接入（例如风能）都需要一个优秀的能源路由器。通过能源路由器可以管控能源网内的能源流，能源路由器提供多种接口对应多种能源流类型的接入和输出，可以提供对不同结构为电网的管理，实现多层次能源网络的开发式管理控制。能源输变路由装置是能源互联网能源“互联”的具体实施装置，包括能源的高效传输装置、低损耗转换装置、高度能源自由路由装置等。通过这些装置实现能源远距离、高功率、低消耗的传输和调配，完成不同地区上传能源的全网优化分配，实现不同地区用能需求的全网调配。如下图所示：

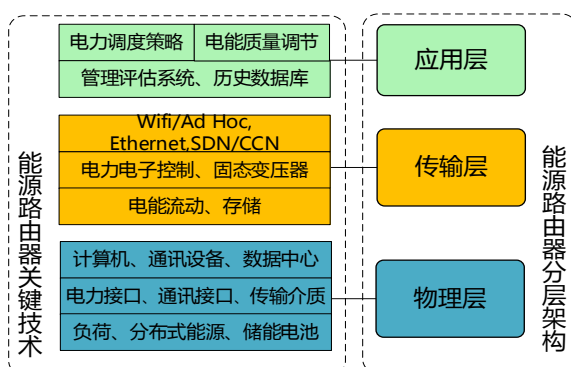


图 2-1 能源路由器结构
Fig.2-1 Energy router structure

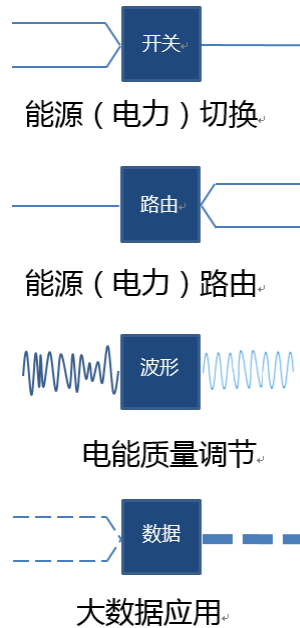


图 2-2 能源路由器结构
Fig.2-2 Energy router structure

基于能源路由器，可以实现多个能源局域网的互联，实现能量的交换和路由。局域网中可以由风光储与负荷协调消纳，互联可以通过交流和直流方式，也可以和传统大电网相联。

借鉴信息网络路由器实现的基本功能和结构，能源路由器实现的关键技术主要包括电力电子控制技术、大规模储能技术和柔性输电技术。

电力电子技术是实现能源互联网控制的主要手段，例如电力电子变压器和传统变压器相比仍然有效率、容量和可靠性等方面的瓶颈问题，需要材料等方面的技术突破，但在能源互联网场景下通过广域互联与优化调度，通过分布式能源的接入与分享等，可以一定程度的提升应用效益，提高技术经济可行性。同时，电力电子变压器还具备供电电压稳定性好、电能质量高、不存在铁心磁饱和问题、体积小、重量轻、环保效果好、兼有断路器功能、可以高度自动化等优点。电力电子技术中的传输策略及控制问题，实现电力电子变换器等设备的研制，仍然是能源互联网技术创新的重要方面。

储能/用电缓冲是能源路由器实现的重要组件，以打破供电和用电间的同步性。储能装置既是负荷也是电源。电源是智能的，能够预计供电状况并发送相关信息；负荷也是智能的，能够根据接收到的供电信息调整自身工作。它们必须通过控制算法，根据电网和分布式发电的电量或电价，决定是充电以备将来使用，还是放电以供当前使用。大规模储能还存在成本高等问题，可以通过与数据中心电池备用共用提高经济性。

能源路由器之间的能量交换可以通过柔性输电技术来实现。例如柔性直流输电技术是基于自关断器件的新一代高压直流输电技术，与常规高压直流输电技术相比，具有运行灵活、可控性强、设备体积小、模块化程度高等显著优点，广泛分布于风电场接入、城市供电、异步电网互联、海上钻井平台供电及电力市场交易等领域中。能源互联网涉及到多个区域自治电网或分布式能源的互联，柔性直流输电是可能的方式。

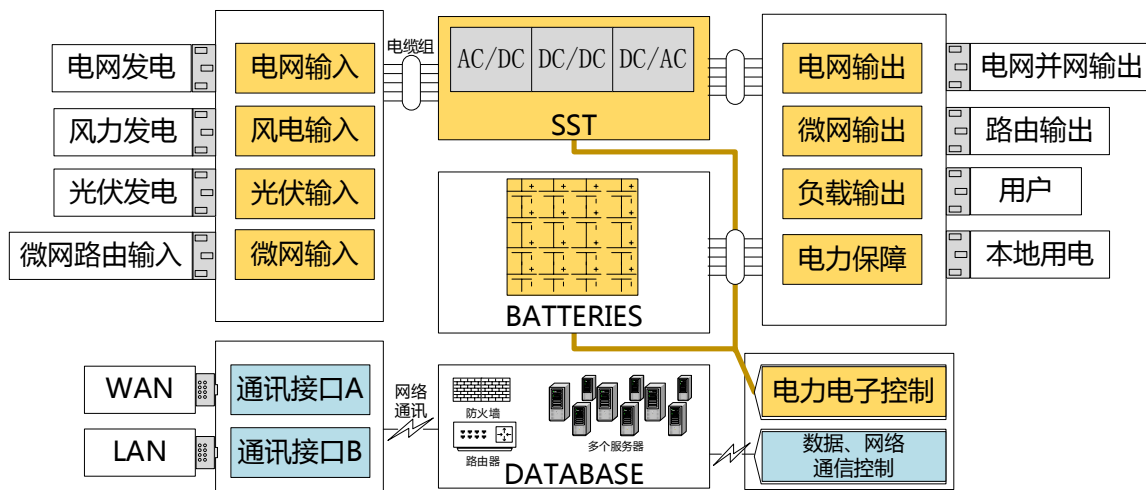


图 2-3 能源路由器即插即用接口设计

Fig 2-3 Plug and play interface design for energy router

2.4.2 能源路由器关键电力电子技术研究

1) 电力电子变流技术

能源互联网在于能源流与信息流的深度结合，建立构建于信息架构上的能源网络，能源与信息两相融合，实现发电、输电、变电、配电、用电的智能化管理。这些目标的实现都需要依托于当今电力电子技术的发展与成熟。

实现可再生能源的有效利用要依靠电力电子技术，并网逆变器、光伏电池、风机、燃料电池、储能元件等都需要通过电力电子变换器才能与能源局域网相连接。这些变换器可能既包括整流器也包括逆变器，也可能仅是一个逆变器，变换器具有响应速度快、惯性小、过流能力弱等特性，除了具备常规逆变器的功能以及能够并联运行外，还需要具备一些控制功能，如有功-频率下垂控制功能和电压-无功下垂控制功能。

实现能源流的精细化管控也需要利用电力电子技术。智能通用电力变压器是将电力电子变换技术和基于电磁感应原理的电能量变换技术相结合，实现将一种电力特征的电能量转变为另一种电力特征的电量的静止电气设备，具备可控性强，可实现所有 FACTS/DFACTS 功能，电源接口灵活多样，体积小等优点，便于多种类型电源接入，用电环境复杂多变情况下能源流的控制。

2) 大功率电力电子装置

随着坚强智能电网的建设、西部可再生能源东送赫全国联网等的开展，迫切需要降低网损、提高电网输电能力和系统稳定性，防止电力系统电压崩溃和直流输电出现连续换相失败，同时为适应未来电力市场发展，需要增加电网电压和无功的调节能力。利用以静止同步补偿器（STATCOM）、统一潮流控制器（UPFC）、固态变压器、固态限流器等为代表的全控型大功率电力电子装置来控制调节交流电力系统的运行参数或网络参数，将能够优化电力系统运行状态，提高交流电力系统线路的输电能力，使输电网能提供质量更高、更“柔性”可控的电力传输服务。

基于大功率电力电子装置的柔性交流输电（FACTS）技术，从发、受两区域、输电线路等各个环节实现电网输送功率和稳定性的充分可控，可大幅提高超高压电网的输电能力和安全稳定性。大功率电力电子技术的核心为高电压大容量变流器技术，近16年来韩英铎院士团队在这一领域取得了多项标志性成果。2011年，国家“十一五”科技支撑计划项目，在广东东莞成功运营的35kV±200MVar无变压式链式STATCOM为世界最大容量的无功补偿器，该装置为提高地区电力系统安全稳定做出了重要贡献。

3) 电力电子变压器

电力电子变压器PET（Power Electronic Transformer）又称为电力电子变压器（solid state transformer），从结构和功能上大大突破了传统变压器，可以提高供电可靠性，同时可将各种再生能源分布式发电接入电力系统。电力电子变压器采用电力电子变换技术对能量进行转换与控制，具有很高的现实意义和学术价值，是是美国北卡大学所兴建的新型智能微网示范工程FREEDM的核心设备。

与传统的变压器相比，电力电子变压器主要在五个方面有优势：

1) 供电电压稳定性好，电能质量高、电力电子变压器系统具有对电能变换过程的控制功能，可以实现输出电压的闭环控制，保持较高的输出电压调整率，为用户提供稳定的供电电压；由于电力电子变压器将电网与用户隔离开，既能消除网侧电压的波动、波形失真和频率波动，又能抑制由用户端产生的无功、谐波、瞬时短路对供电电网的影响。

2) 不存在铁心磁饱和问题。电力电子变压器能避免传统变压器由于铁心磁饱和而造成系统中电压、电流的波形畸变。

3) 体积小、重量轻、环保效果好。电力电子变压器采用高频变压器，体积将大幅度减小，可以空气自然冷却，省去充油，从而减少污染，维护简单，安全性好。

4) 兼有断路器的功能。大功率电力电子器件可瞬时（ μs 级）关断故障大电流，也无需常规的变压器继电保护装置。

5) 可以高度自动化。配电网的计算机监控系统可以直接远程通信控制电力电子变压器，实现在线连续监测和控制。

如果在电力系统装备电力电子变压器，并进行实时、适当的控制，就可以改变电力系统中节点电压的大小和相位，补偿电力网络的阻抗，减小甚至消除电力系统中的谐波，改变电力系统中的有功、无功潮流，并对正常运行和故障时电力系统的功率平衡要求予以快速补偿。这将能显著提高输电系统的极限传输功率能力，改善电力系统的运行特性。

电力电子变压器主要由电力电子变换器、高频变压器和控制器等组成。其中，由 IGBT 或 IGCT 等高频大功率电力电子器件组成的电力电子变换器是电力电子变压器的核心，其功能是完成电能的频率、幅值转换；高频变压器的功能是隔离及变压；控制器的功能是实现对电能变换、电压稳定和电能质量的控制。可再生能源分布式发电交直流兼有，容量小，分布广，且其电压或频率波动性较大，而电力电子变压器交直流环节兼有，故可灵活地将各种可再生能源分布式发电接入电力系统。

根据电力电子变压器中是否存在直流单元，SST 的拓扑结构分为两大类：一种是在电力电子变压器中不存在直流单元，称为直接交-交型 SST；另一种是在电力电子变压器中包含直流单元，称为交-直-交型 SST。在能源互联网中，从电网角度看，通过采用合适的控制策略，SST 需要实现以下功能目标：①输出电压控制为恒定的工频正弦交流电压，能有效抵抗电网电压扰动和负载扰动；②无功功率补偿，SST 能在优先满足负载有功功率需求的情况下根据设定的功率因数目标向电网注入或吸收无功电流，最好是单位输入功率因数；③过电流保护和欠电压保护。

由于 SST 中存在的非线性、复杂性、时变性和不确定性等，很难得到精确的数学模型，导致采用传统的 PI 调节器控制很难得到满意的结果，因此可以考虑将智能控制理论中的专家控制、模糊控制等引入 SST 的控制，保证系统的跟随性能，提高 SST 的鲁棒性和自适应性。

4) 智能传感与量测技术

输电线路运行状态是线路安全健康水平的直接反映，通过研制出先进适用、稳定可靠的线路运行状态检测装置，可及时获取线路运行信息，以便在发现线路隐患时及时预警和检修处理，从而避免电网事故的发生。气象参数、环境参数、雷击故障、电晕等都是线路监测的重要内容。通过开发输电电缆设备状态的在线监测系统，以有效的集中监测与管理手段来获取线路自身运行及周边环境状态，为输电线路生产运行管理、设备运行维护、状态检修、应急防灾等提供准确的动态信息，实现输电线路安全预警和辅助决策，提高电力网络运行维护与安全管理的精细化水平，是能源互联网得以广泛应用的必要技术条件。实现输配电网在线监测的关键技术是智能传感与量测技术。

电气设备的在线监测和故障诊断是其智能化的基本手段，起源于 20 世纪 70 年代。经过多年的发展，现代高压开关设备的监测功能正日趋完善，例如：对电压、电流、

功率和功率因数、有功和无功电能、电网频率以及断路器合 / 分工作状态等的检测功能；对过电流、短路、不平衡运行、电机启动、接地、过电压、欠电压等的保护功能；对就地断路器和远方断路器的操作控制功能等。这些功能依靠先进的显示、通信手段将各单元联系起来，实现变电站的集中微机监控。

高压开关设备在线监测与故障诊断系统，它由信号变送系统、数据采集系统以及处理和诊断系统构成。高压开关设备常见的监测内容可归纳为绝缘性能监测、机械性能监测和电气性能监测三部分，具体包括：通过检测开断电流和燃弧时间这两个影响触头磨损量的主要参数来判断触头的电寿命，通过检测关键部件的机械振动、合 / 分闸线圈电流和电压的波形变化、控制回路通断状态以及操动机构储能完成状况等信号来判断断路器的机械故障，近年来发展起来的采用 UHF 电磁波来监测绝缘状态，应用感温元件或红外线技术来监控载流导体及接触部位温度等。这些监测与诊断技术的实际应用可实现高压开关设备的状态检修及智能化控制。

在输电线路状态监测方面，目前在国外一些发达国家，如美国、加拿大等，输电线路运行状态与气象环境监测装置都有一定的应用，但并不十分普及。其中用量较大、时间较长的典型线路运行状态监测装置有美国生产的能同时测量导线温度、倾角和线路电流的 PowerDonut2 电力测量环，以及加拿大生产的 PAVICA 型测振仪。目前，欧美日等非常重视输电线路安全运行技术及 IT 技术在管理和运行维护中的应用，都在更加深入研究输电线路数据采集、处理、存储的方法，研究使用新的诊断工具和方法来评估运行中设备的预期使用寿命、运行风险和维修策略。

在输变电领域，在线监测及故障诊断技术将逐步实现变电站一次主设备的全息监测和实时状态评价，为电网安全运行提供决策依据。需要全面采用智能传感技术和自动实时的预警机制，以期大幅度减少检修工作量，彻底改变目前以预防性试验为主的工作状态，全面提高电网安全经济运行水平。

传感技术是电力一次设备智能化的关键技术之一。以往电力系统中作为测量和保护用的互感器普遍使用电磁式的，随着现代电力系统电压的升高和容量的增长，某些复杂的继电保护装置不仅能反映短路电流的大小，还能反映相位和波形，甚至反映电流的突变率，因而使用传统的 电磁式互感器 已不能满足目前高压开关设备多功能的需要，这就对现代传感器技术提出了更严格的要求。目前在配电领域重点研究的新型传感技术有无线传感器、光纤传感器、电子式互感器等。

随着现代光纤技术的发展，基于法拉第旋光效应的 光电互感器 和 光电传感器 (OCT) 相继出现，日本 Nisi-Nagoya 电站目前使用的 OCT 结构。初级线圈环绕在套于高压母线的环型磁芯上，螺线管与初级线圈产生的磁场方向平行，法拉第传感器沿着螺线管轴线方向安装于螺线管内，一个法拉第螺线管可同时连接多个带有磁芯的线圈，该螺线管具有磁场屏蔽功能。初级线圈产生的电流用来形成螺线管中的磁场，而螺线

管中安装的法拉第元件作为传感器将该电信号转换成光信号。该类型 OCT 产品应用于 275kV 变电站的故障定位监测系统中, 被测电流高达 50kA, 可在-20~+80℃的温度范围内使用, 精度为 1.5%, 可满足故障定位系统要求。

目前已投入使用的 光学电流互感器 由于测量范围宽、绝缘简单可靠、无磁饱和、无二次开路危险、抗电磁干扰能力强、体积小、重量轻、安装运输方便、易于同微机保护接口等优点, 已在高压开关设备中得到应用。

对于变配电环节来说, 应研制符合智能配电网需求的, 集保护、测量、控制、计量、通信等功能于一体的智能配变监测监测终端, 实现配电台区的智能监测控制、用电信息采集等功能。

2.4.3 能源路由器储能技术研究

1) 引入储能的意义

储能/用电缓冲是能源互联网架构的重要组件, 可以打破供电和用电间的同步性。在能源互联网架构中, 储能装置既是负荷也是电源。电源是智能的, 能够预计供电状况并发送相关信息; 负荷也是智能的, 能够根据接收到的供电信息调整自身工作。它们必须通过控制算法, 根据电网和分布式发电的电量或电价, 决定是充电以备将来使用, 还是放电以供当前使用。除了采用电池等传统储能装置来缓冲用电, 还可通过合理调度用电时间来缓冲。现在用电就等于提前了负荷的工作时间, 调峰用电则是延后了负荷的工作时间, 这个过程就是用电缓冲的过程。

分布式可再生能源的输出功率随着环境因素的变化等情况发生波动, 如何对间歇式的可再生能源进行洁净存储和提取, 保持能源供应系统的稳定性, 是能源互联网面临的主要挑战之一。能量储能系统(ESS)可以作为电能的缓冲池有效解决这个问题, 可以在负荷低落时储存电源的多余电能, 而在负荷高峰时回馈给电网以调节功率需求。而对于光伏或者风电等具有间歇性特性的电源, 外在条件的变化会导致输出功率的变化而引起电能质量的下降, 与储能装置结合可以很好地解决电压骤降、电压跌落等电能质量问题。针对系统故障引发的瞬时停电、电压骤升、电压骤降等问题, 此时利用储能装置提供快速功率缓冲, 吸收或补充电能, 提供有功功率支撑, 进行有功或无功补偿, 以稳定、平滑电网电压的波动。当能源微电网与大电网并联运行时, 微电网相当于一个有源电力滤波器, 能够补偿谐波电流和负载尖峰; 当微电网与大电网断开孤岛运行时, 储能系统能够很好地保持电压稳定^[40-41]。

风力发电、光伏发电等可再生能源发电的输出功率会跟随外界变化而具有较大的波动性, 随着在电网中的渗透率提高, 其对传统电网的安全性、稳定性、电能质量等多方面造成了冲击和影响, 国内外都对此进行了规范^[42-43]。在间歇性电源出口配置一

定容量和功率的储能装置，可以有效抑制输出功率的波动及骤变，提高并网稳定性和调度性，增强此类可再生能源发电的可利用性^[44-45]。鉴于目前储能装置的成本较高，使用寿命较短，如何配置储能系统的容量^[46-48]，以及利用有限容量的储能系统平滑波动性功率输出^[49-58]，并保证储能系统的安全持续运行，对控制提出了较高的要求。

分布式储能装置是能源互联网系统的重要组成部分，在以下三个方面发挥重要作用：

第一，储能装置对于能源正常有效的持续供应起到保障作用。在分布式发电装置不能正常工作时，如太阳能发电的夜间或风力发电无风时，储能装置能够起到过渡的作用，持续向用户供电储能装置能够起到过渡作用，持续向用户稳定供应能源。

第二，储能装置能够改善电能质量，维持系统稳定。应用储能装置是改善发电机输出电压和频率质量的有效途径，同时增加了分布式发电机组与电网并网运行时的可靠性。可靠的分布式发电单元与储能装置的结合是解决诸如电压跌落、涌流和瞬时供电中断等动态电能质量问题的有效手段之一。

第三，储能装置是能源合理调度的必要支持，根据需求提供调峰和紧急功率支持等服务，同时提高分布式发电单元拥有者的经济效益。在电力市场的环境下，分布式发电单元与电网并网运行，有了足够的储存电力，分布式发电单元成为可调度的机组单元，发电单元拥有者可以根据不同情况向电力公司卖电，提供调峰和紧急功率支持等服务，获取最大的经济效益。

2) 能源互联网中的分布式储能技术分析

储能技术主要有机械储能、电化学储能和电磁储能等三大类。由于各种储能技术都存在一定的优势和局限性，因此针对不同的应用领域，多种技术并存是未来储能技术发展的趋势。现阶段分布式储能中可利用的储能装置很多，主要包括电池类储能、超导储能、飞轮储能、超级电容器储能等。

(1) 电池类储能

电池储能是目前分布式储能中应用最广泛、最有前途的储能方式之一。电池储能可以解决系统高峰负荷时的电能需求，也可用电池协助无功补偿装置，有利于抑制电压波动和闪变。然而电池的充电电压不能太高，要求充电器具有稳压和限压功能。电池的充电电流不能过大，要求充电器具有稳流和限流功能，所以它的充电回路也比较复杂。另外充电时间长，充放电次数有限，因此限制了使用寿命，维护、维修费用高。如果过度充电或短路容易爆炸，不如其他储能方式安全，并且由于电池中化学物质的使用，还会造成环境污染。目前电池的效率一般在60%~80%之间，这主要取决于使用的周期和电化学性质。

目前电池的种类较多，主要有铅酸蓄电池、锂电池、钠硫电池和液流电池等。其中，铅酸蓄电池技术成熟、成本低廉，但是体积大、寿命短；锂电池体积小、寿命长、

密度高，但是成本高；钠硫电池和液流电池具有效率高、寿命长等优点，近年的研究取得了突破性进展，在少量微电网研究系统中得到了应用，但大规模应用还有待时日。

（2）超级电容储能

超级电容器作为一种新兴的储能元件，它与其他储能方式比较起来有很多的优势。超级电容器与电池比较具有功率密度大、充放电循环寿命长、充放电效率高、充放电速率快、高低温性能好、能量储存寿命长等特点。与飞轮储能和超导储能相比，它在工作过程中没有运动部件，维护工作极少，相应的可靠性非常高。但是超级电容的缺点是容量较小，因此难以单独使用，一般与其他储能方式（如电池类储能）联合使用构成符合储能系统。

（3）超导储能

超导储能系统利用由超导体制成的线圈，将电网供电励磁产生的磁场能量储存起来，在需要时再将储存的能量送回电网或直接给负荷供电。超导储能系统与其他储能技术相比，由于可以长期无损耗储存能量，能量返回效率很高，并且能量的释放速度快，通常只需几秒钟，因此采用超导储能系统可使电网电压、频率、有功和无功功率容易调节。但是，超导体由于价格太高，造成了一次性投资太大。

（4）飞轮储能

飞轮储能技术是一种机械储能方式。早在20世纪50年代就有人提出利用高速旋转的飞轮来储存能量，但是直到80年代，随着磁悬浮技术、高强度碳素纤维和现代电力电子技术的新进展，才使得飞轮储能真正得到应用。飞轮储能具有效率高、建设周期短、寿命长、高储能量等优点，并且充电快捷，充放电次数无限，对环境无污染。但是，飞轮储能的维护费用相对其他储能方式要昂贵得多。

上述是目前可用于分布式储能场景的几种较为成熟的储能技术，其中电池储能系统是目前最实用，且应用最广泛的储能技术，性能上可满足大容量、快速反应的要求，有时会与超级电容储能构成复合储能发挥各自优势，但相对于复合储能系统，电池储能系统（BESS）还是具有结构简单、控制方便的优点，因此在较多数的场景中或的利用，本章的工作也将集中于对电池储能系统控制策略的研究。

2.4.5 能源路由器-应用场景描述

既然未来能源互联网与信息基础设施有着类似的互联结构，我们提出将信息基础设施整体嵌入能源互联网，实现信息能源基础设施一体化。虽然国内外从电力电子技术、储能、信息采集决策支持、多种能源形式转换、直流输电等角度出发分别提出了能源互联网和能源路由器的概念和模型，我们提出的能源互联网着重借鉴互联网理念将信息基础设施（如数据中心、云计算平台）和能源基础设施（如储能、电力电子控

制、电网等) 彻底做一体化设计尚属首次。图 1-5 设计了一个信息能源基础设施一体化的典型场景。

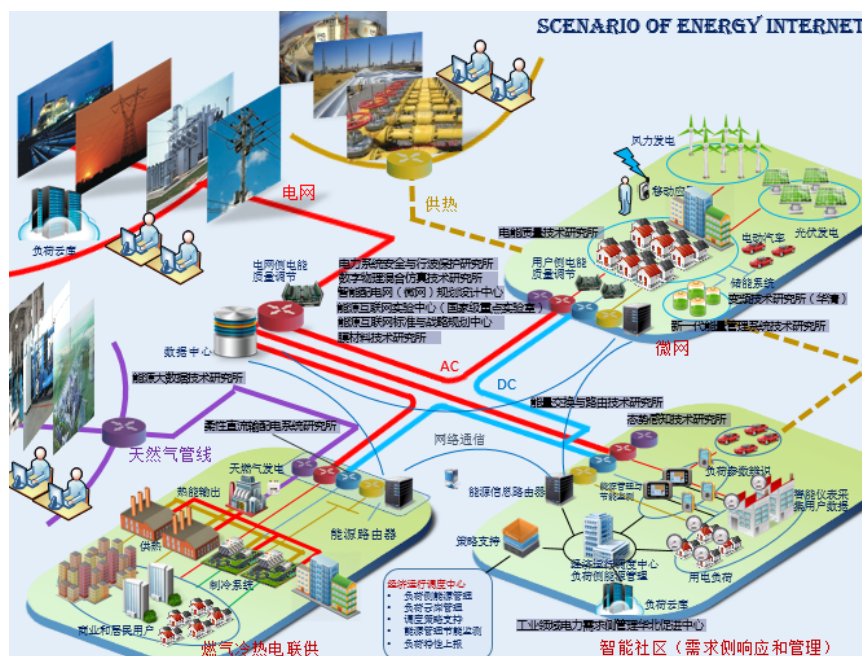


图 1-5 信息能源基础设施应用场景示意图

Fig. 1-5 Application scenarios for energy internet

场景组成：由三个微网和大电网组成，二者即包含能源基础设施范畴也包含了信息基础设施范畴。其中，微网是一个地域范畴也是能源互联网供电模型中的基本单元，微网中包含有家庭用户，商业用户以及工厂或各类用电机构，总之从用户角度看微网就是一个小的社会范畴。微网的供电由分布式能源和大电网共同支撑，例如以分布式发电为主，以大电网供电为辅。微网内部即有风、光、储、电动汽车等基本分布式能源单元（微网的基本要素），还包含了信息基础设施建设，如光纤通信、移动通信、传感器及数据中心。信息层收集用电信息，发电信息、环境信息并参照历史数据，根据当前用户用电需求，进行供电、调度决策。

场景运行机制：三个上述微网组成了设计的模型，用以描述微网间电能交换与路由。大电网与三个微网分别联通，也可以保障微网用电。当微网内部的分布式能源发电不中以满足微网的用电需求时，则该微网的供电有可能考虑由其他两个微网提供，也可能由大电网提供。

信息与能源基础设施融合：能源路由器是能源互联网的核心要素，与数据中心做一体化设计，同时能源基础设施中的“物”通过传感器接入，用户通过移动终端接入。通过能源路由器，能量层和信息层得以有效融合：一方面路由器为基于信息的能量控

制提供了电力电子接口,可以实现能量在网络模型中的路由、实现能量流的精细管控、如电能质量控制等等;同时,能源路由器的是基于能源基础设施的信息采集的主要渠道,以数据中心为核心,以用户、电力设施上的采集装置、传感器为信息来源,能源路由器将能源基础设施、用户、运行状态等等相关信息抓取并反馈给数据中心,实现能源互联网的信息互联。

融合需要数据中心和能源路由器融合、输电线路和光纤通信融合、传感器和局域、广域网融合等等。可以通过能源路由器为数据中心供电,降低数据中心静默成本。由于通信基础设施和电力基础设施的一体化,可以节省数据中心的电缆铺设成本;理论上可以通过通信网络和数据中心设施更好的监控电力设备的运行状态,通过电力网络拓扑和通信网络拓扑的结合,可以更好的定位故障位置和及时的采取修复工作,提高系统安全性和运行效率;每个能源路由器会配备一定容量的储能设备,可用于数据中心备用电力,平滑能量的传输。同时储能设备的一个重要功能是当正在进行电力传输的能源路由器节点或线路出现故障时,可以实时的吸收中断电路上的电流,保证该电流不会对其它设备造成影响;通信链路可以采用电力线通信或光纤通信,二者均可以与输电线路一体化建设。极大的减少了安装成本。融合的过程是一个信息化的过程,同时融合的过程也是一个立足现有设施进行过渡的过程,是一个将互联网嵌入能源网的过程。

应用场景分析:微网的风、光、储及电动汽车的基本功能与目前研究的微网概念没有本质区别,主要区别在于微网间的开放对等的信息和能量交换。信息层面,即通过增加的信息层,使得微网本身不再是一个简单的能源供给环节,而变成一个智能的能源补给实体,即多种能源之间有了协调与平衡;此外,更为重要的一点是信息层的存在使得微网不再是一个独立的个体,信息层为微网之间的互通建立了信息通道,使得微网的组网成为可能,也使得能量在微网间流动得以实现。例如基于这样的框架,当微网 A 处于缺电状态, A 并不急于向广域大电网提出电能需求,而可以转向附近电价更加低廉,使用更加环保的微网 B 或微网 C 提出供电需求,后者根据自己发电和用电情况同时或单独向微网 A 供电,这一过程代表能源互联网自底向上开放互联、能量和信息对等交换的典型场景。类似信息互联网中局域网与广域网的本质区别一样,能源互联网中广域互联也必须以设备的即插即用和开放简洁的标准协议为基础。而具体控制的目标函数可以有多种、以电价为目标、以节能环保为目标、以最大输出功率为目标,或者以综合指标为目标等等,以实现实时在线动态的更加精细化的分散协同式的能量管理。

2.5 能源互联网未来研究工作

尽管能源互联网的构想给了我们一个美好的愿景，但要真正实现能源的互联互通，尚需解决众多的技术难题。

2.5.1 高效、低能耗能源采集和转换设备亟待突破

分布式可再生能源系统使得能源采集和生产小型化，并更贴近需求，其实现依赖于低能耗、高转换效率的可再生能源的采集和转换设备。现有设备和技术远不能满足要求。

一是太阳能的采集、转换为电能的效率仍较低。目前，在实验室研发的硅基太阳能电池中，单晶硅电池的最高转换效率为 29%，即便采用太阳能电池堆叠技术，也仅实现 41.1% 的转换率。

二是小容量、低损耗的变压器、稳压器、逆变器等转换设备亟待开发。我国变压器的总损耗占发电量的 10% 左右，每年有近千亿度电浪费在升压降压转换中。在能源互联网时代，分布式能源系统的普及，尤其是安装在建筑物上的太阳能电池板输出电力均为低电压直流电，需要巨量小容量的转换设备支撑。现有技术条件的大量换转设备将消耗海量能源，这将完全蚕食掉分布式能源系统中微小能源采集单元生产的电力。

2.5.2 能源互联传输所需的超导材料和技术突破尚没有时间表

发展新型输电材料——常温超导材料是能源互联网实现的关键。能源互联网的一个关键设想，就是充分利用太阳能和风能等可再生能源，使每栋建筑都成为一个微型发电厂，除供本建筑使用外，还可对主干网输出多余的电力。这个大胆的设想，需要有新的电力传输材料和技术加以支撑。采用常规材料和低电压传输方式，能源互联网中各个分散在生活或生产单元的发电单元的微小余电将在传输线路上损耗殆尽，根本无法上传到主干网，无法实现能源的回收，能源的互联便无从谈起。所以，要实现电力在低压传输过程中有效输送和回收，充分利用各分布式小功率能源采集和生产单元的余电并网，必须使用常温超导体。

但在可预见的未来几十年内，常温超导材料（工作温区在 355K，即 80℃ 左右）很难取得实质性突破。高温超导体需要消耗巨大能源将其工作温度维持在低温状态，利用高温超导体实现能源的互联不具现实意义。

2.5.3 能源互联互通仍存在技术障碍

利用电力网加载高频信号实现信息通信，是当前研究热点之一。尽管小范围、小规模的数据传输已进入实际应用，如电力猫可以实现电力线传输数据，但局限于同一个电表内，大规模、广域网的大数据传输尚有待于技术突破。一是输送速度低，难以承载海量数据。能源互联网实现时，将产生千万亿甚至上万亿的能源采集生产单元和用能终端。对这些终端实时反馈控制，实现电力智能调度，将产生当前人类难以想像数量级的海量数据，即便下一代互联网恐怕也难以承受。尽管未来技术可能会实现更高的传输速度，但突破尚需时日。

二是传输范围有限，无法实现全网传输。在常温超导未实现的情况下，为减少线损，电力传输必须通过变压器层层升压，再层层降压来完成。高频信号无法通过变压器传输，信息只能在同一个变压器的电力子网内传输。在可以预见的未来几十年内，这将是信息在全网传输不可逾越的鸿沟。

2.5.4 新型能源存储材料发展面临瓶颈

如何对间歇式的可再生能源进行洁净存储和提取，保持能源供应系统的稳定性，是能源互联网面临的又一挑战。一是小型化、大功率、安全性好的电池研发和商用尚需时日。大功率锂电池尚未进入实用阶段，且安全性仍有待提高。钒电池虽具有功率大、容量大、效率高、寿命长等特点，但不适合作为分布式能源系统的小型化存储设备。钠硫电池虽具储量大、能量和功率密度大、充放电效率高、不受场地限制、维护方便等特点，但正、负极活性物质的强侵蚀性，对电池资料、电池构造及运转前提的要求苛刻，且存在安全、寿命、处置难等问题。

二是作为终极储能的“氢储能”，由于氢制备成本高、存储困难，仍属于亟待攻克的技术难题，“氢储能”之路仍很遥远。气态储氢能量密度低，安全性差；氢液化消耗能量巨大，是氢热值的 30%，对储罐的绝热性能要求高，能源可再利用率低。金属氢化物、配位氢化物、纳米材料吸附等固态储氢技术仍处于实验室阶段，且可逆性差，能源提取难度大。

从当前乃至今后一段时间的技术水平和发展来看，能源互联网的实现仍有待时日。面对能源互联网掀起的热潮，我们更应保持客观、冷静，要立足眼前，脚踏实地，提升基础制造和能源生产能力，做好关键技术和设备的储备。

综上，能源互联网相关研究可围绕以下三方面开展：

1) 能源互联网仿真环境。基于现有的电网仿真环境, 结合信息物理融合仿真技术, 将信息基础设施和能源基础设施仿真紧密结合, 开发适合能源互联网场景的软硬件结合的仿真和开发环境, 为能源互联网研究与发展奠定基础。

2) 能源路由器样机研制。集成新一代信息技术、柔性输电技术、大规模储能技术和电力电子控制等方面技术的最新成果, 研发新一代能量管理系统实现分散协同式的能量交换和路由管理, 研制具有产业化前景的中低压大容量的能源路由器样机。

3) 能源互联网示范工程。根据本文提出的信息能源基础设施一体化意义下的能源互联网典型场景, 结合以上提出的能源互联网仿真环境和能源路由器设备的实现, 示范工程是对能源互联网理念、技术与标准的整体验证, 是能源互联网大规模发展的必经之路。

2.6 小结

本章首先对能源互联网的概况进行了阐述, 主要包括能源互联网的特征、组成及其技术体系。对目前国内外主要的能源互联网架构及关键技术进行分析, 在此基础上提出了符合信息物理融合体系的能源互联网架构, 并给出了两种能源路由器的原型设计, 通过这两种能源路由器可以在现有配电网基础上实现所提出的能源互联网。最后根据所给能源互联网架构设计了能源互联网示范工程, 并分析了能源互联网示范工程的运营模式。

第 3 章 UPQC 算法及关键参数设计

3.1 引言

像银行数据中心、网络中心及芯片制造等高精尖产业，当电能质量出现问题时，容易影响到用电企业的正常生产，严重时更会导致用户的设备损坏，造成用户和电力公司的经济损失。对于传统的交流电网，电能质量问题主要表现为电压、电流或频率的偏差和造成用户设备故障或误动作的任何电力问题，因此，敏感用户需要电能质量调节装置来保障电力的正常供应，进而减免不必要的损失。统一电能质量调节装置由 DVR 和 APF 两个部分组成。通常，DVR 控制器实时检测电网电压的畸变和暂降，并以此作为电压指令，对串联变流器进行控制，使得串联变流器通过串联变压器输出一个与电网电压畸变和基波偏差相抵消的补偿电压，从而保证负载电压是一个额定的正弦电压；APF 控制器实时检测负载的无功和谐波电流，并以此作为电流指令，对并联变流器进行控制，使得并联变流器输出与负载无功和谐波电流大小相等的无功和谐波，从而实现对负载无功和谐波电流的补偿，使得电网输入电流为正弦波电流，且功率因数为近似 1。项目拟开发研制的三相补偿式 UPQC 主电路结构如图 3-1 所示。UPQC 是由相对独立的串联补偿单元（以下简称 DVR）和并联补偿单元（以下简称 APF）组成，两者通过直流电容耦合在一起（本系统使用超级电容储能）。

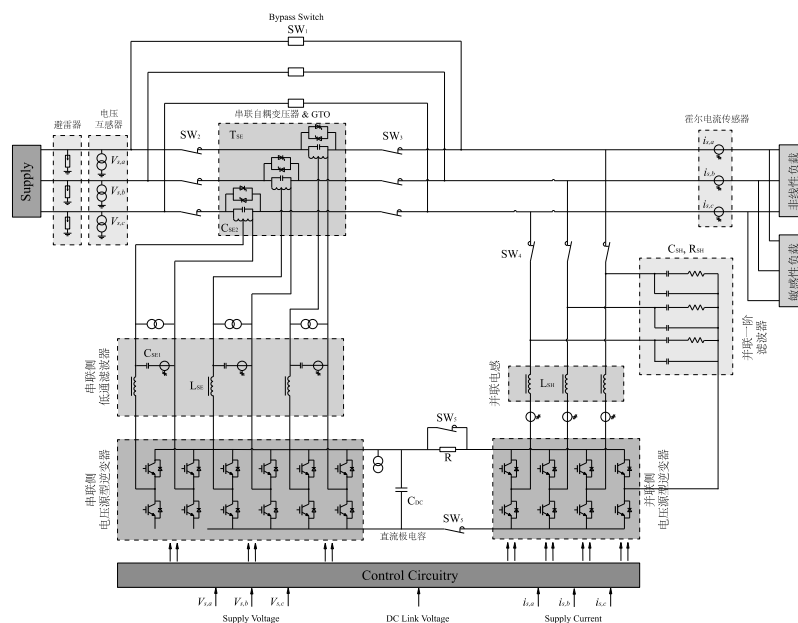


图 3-1 UPQC 系统结构图

Fig.3-1 Structure of UPQC system

3.2 补偿信号检测方法

3.2.1 电压补偿信号检测

1) 电压补偿检测-基于改进 $\alpha\beta$ -dq 变换电压跌落算法

方法通过测量单相电压，利用小角度延时后的量与当前量作为输入计算出 90 虚拟电压，进而利用 dq 法检测出电压跌落。该方法简洁明了，只需要构造一个数据，简化了计算，且可以根据实际情况灵活选择构造时的延时角度，能更快速地检测出凹陷发生和结束的时间，是很有实用价值的一种电压检测法。

设需要检测相的电压信号为 a 相，其表达式如下：

$$v_a = \sqrt{2}V \sin(\omega t + \theta) \quad (3-1)$$

将 v_a 滞后 δ 角得到向量 v_n ，其中 δ 为 0 到 60° 之间任意角度，即：

$$v_n = \sqrt{2}V \sin(\omega t + \theta + \delta) \quad (3-2)$$

$$\text{可得出 } v_{a1} = \frac{1}{\sin \delta} v_n - \frac{1}{\tan \delta} v_a \quad (3-3)$$

其中 v_{a1} 为滞后 v_a 90 度，且大小相等的电压信号，利用 $\alpha\beta$ 坐标系到 dq 坐标系的变换，即：

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & -\cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_{a1} \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

将 v_a 、 v_{a1} 的表达式代入，得：

$$\begin{cases} v_d = \sqrt{2}V \sin(\delta) \\ v_q = \sqrt{2}V \cos(\delta) \end{cases} \quad (3-5)$$

则检测相的电压有效值为：

$$V = \sqrt{\frac{v_d^2 + v_q^2}{2}} \quad (3-6)$$

该方法简洁明了，只需要构造一个数据，简化了计算，且可以根据实际情况灵活选择构造时的延时角度，能更快速地检测出凹陷发生和结束的时间，是很有实用价值的一种电压检测法。

实际检测时电压中通常含有畸变分量和高频分量，在进行 $\alpha\beta$ -dq 变换时这些畸变分量会变成交流分量，可在 v_d 、 v_q 后通以低通滤波器，得到其中的直流分量，再计算检测相的电压有效值。

上述方法虽然延时时间短，能提高系统反应速度，但利用小角度构造延时 90 度虚拟电压的方法容易引入系统误差，即将小的电压波动放大，最终影响电压跌落判断的准确性。项目中我们使用了如下方法，达到了很好的效果。

用于不对称故障下单相电路瞬时电压 dq0 法：是一种利用单相信号构造三相信号的基于 dq 变换的瞬时检测法。它利用单相的检测数据延时 60° 构造出三相数据，再通过 dq 变换即可求出单相的电压信号的幅值和相位，一般称其为虚拟三相 dq 变换检测法。这种方法的延时只有 1/6 个工频周期，实时性较好，而且采用了检测中常用的变换方法，实现起来比较简单。

设需要检测相的电压信号为 a 相，其表达式如下：

$$v_a = \sqrt{2}V \sin(\omega t + \theta) + \sum v_h(t) \quad (3-7)$$

其中 V ——基波电压有效值；

θ ——基波电压相位；

$v_h(t)$ —— n 次谐波电压瞬时值；

当三相电压平衡时，a 相比 c 相滞后 120°，可以由 a 相延时 60° 后反相构造出 c 相，再由三相三线制中三相电压之和为零可以得出 b 相电压。因此，可以得出利用 a 相构造出的 b、c 相信号。

对构造的三相电压 v_a 、 v_b 、 v_c 进行 dq 变换后，基波分量成为直流分量，而原来的 h 次谐波分量变为 $h \pm 1$ 次谐波分量，通过低通滤波器后可以得到：

$$\begin{cases} \overline{v_d} = \sqrt{3}V \cos(\theta) \\ \overline{v_q} = \sqrt{3}V \sin(\theta) \end{cases} \quad (3-8)$$

因此可以得出所检测的电压基波和相伴如下：

$$V = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\overline{v_d}^2 + \overline{v_q}^2}, \quad \theta = \arctan\left(\frac{\overline{v_q}}{\overline{v_d}}\right) \quad (3-9)$$

这种方法虽然有 60° 的相位延迟，但抗干扰性好，因此实际应用中采用了这种方法，效果良好。

仿真分析：

仿真系统为三相三线制系统，单相电压有效值为 220V。电网系统中谐波含量在 6% 左右，三相电压在 2.3 秒发生单相电压跌落，在 2.6 秒时恢复正常。单相幅值跌落至 94%，阈值设为 95% 的正常电压有效值。仿真结果如下图所示

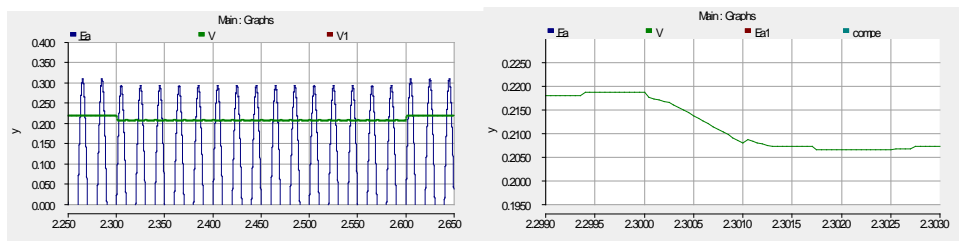


图 3-9 电压跌落检测仿真结果

Fig.3-9 Simulation results of voltage sag detection

可见，单相电压跌落 6% 时，方法能完全检测出电压跌落，时延 3.3ms，实时性较高，可以。由于电网电压中还含有少量的谐波，因此有必要在电压检测的过程中增加滤波装置。实际应用中，电网电压不同的跌落深度会对检测速度有影响，上述分析基于电网电压跌落较小的情况，因此反映相对较慢，当电网电压跌落幅值较大时，跌落事件检测速度会大幅增加。

总之，检测电压跌落方法，单相检测时，用单相延时 60 度，虚拟出其他两相，然后计算各相有效值的平方；三相电压跌落检测则可以使用各相采回的有效值进行比较检测，但此种三相电压跌落检测方法比较结果不稳定，目前只用于检测补偿效果。

3.2.2 电流补偿信号检测

电流检测采用了指定次数谐波电流直接检测方法，对目标谐波具有更好的检测结果，有助于谐波电流补偿功能指标的实现。

在瞬时基波有功电流和瞬时基波无功电流直接检测方法的基础上，可以实现整次谐波的检测，检测时可将检测到的标准电压信号倍频后作为基准，应用直接检测方法就可检测到相应次数的谐波电流。下面以检测五次谐波电流为例进行说明，检测原理图下图所示：

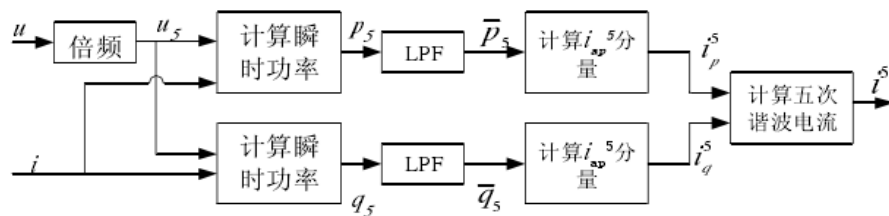


图 3-10 指定次数谐波电流直接检测框图

Fig.3-10 diagram of direct detection for specified harmonic current

先将电压信号倍频，得到五倍频的参考电压：

$$\begin{cases} u_{a5} = \sqrt{2}U_5 \sin 5\omega t \\ u_{b5} = \sqrt{2}U_5 \sin 5(\omega t - 120^\circ) = \sqrt{2}U_5 \sin(5\omega t + 120^\circ) \\ u_{c5} = \sqrt{2}U_5 \sin 5(\omega t + 120^\circ) = \sqrt{2}U_5 \sin(5\omega t - 120^\circ) \end{cases} \quad (3-10)$$

用上式中的参考电压代替基波参考正弦电压，按照图 3-10 方法进行计算可得（以 A 相为例）

$$\begin{cases} i_{ap}^5 = \frac{\bar{p}_5}{3U_5^2} u_{a5} \\ i_{aq}^5 = \frac{1}{\sqrt{3}} (u_{b5} - u_{c5}) \frac{\bar{q}_5}{3U_5^2} \end{cases} \quad (3-11)$$

式中 i_{aq}^5 为与参考电压 u_{a5} 同向的五次谐波电流分量； \bar{q}_5 对应与参考电压 u_{a5} 同向的五次谐波正序电流分量； U_5 为参考电压的有效值。 i_{ap}^5 为与参考电压 u_{a5} 垂直方向的五次谐波电流分量； \bar{q}_5 对应与参考电压 u_{a5} 垂直方向的五次谐波正序电流分量。由式 (3-11) 可得五次谐波瞬时值：

相应的 PSCAD 仿真模型：

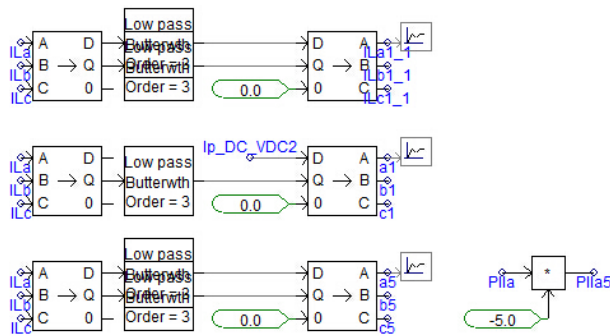


图 3-11 电流检测的基本框图

Fig. 3-11 Diagram of harmonic current detection

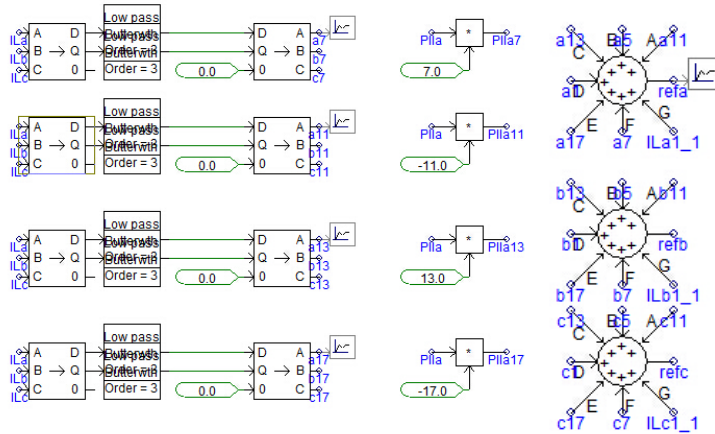


图 3-12 谐波分离与参考电流合成

Fig. 3-12 harmonic current separation and reference current synthesis

图 3-11 为电流检测的基本框图，通过对检测到的电流信号进行 park 变换，通过滤波器滤波将特定频率的电流信号与其他分量分离，然后再经过反变换还原为三相电流信号，图 3-12 为对特定次数谐波进行检测分离，根据电网谐波信号的特点，在满足补偿效果要求的精度下，设定检测补偿的谐波次数依次为 5、7、11、13、17。

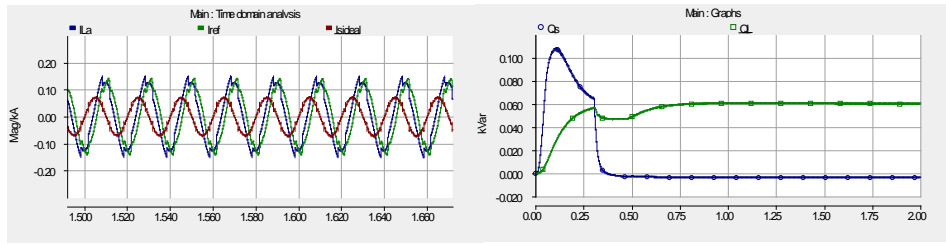


图 3-13 谐波电流补偿仿真结果

Fig. 3-13 Simulation results of harmonic current compensation

图中 I_{La} 为负载侧电流， I_{ref} 谐波补偿电流， I_{sideal} 为补偿后系统侧电流。在时域时间点同为 1.25s 时分别对负载侧电流（即 I_{La} ）、补偿电流（即 I_{ref} ）和补偿后系统侧电流（即 I_{sideal} ）进行频域分析，其主要谐波含量及补偿效果如下图所示：

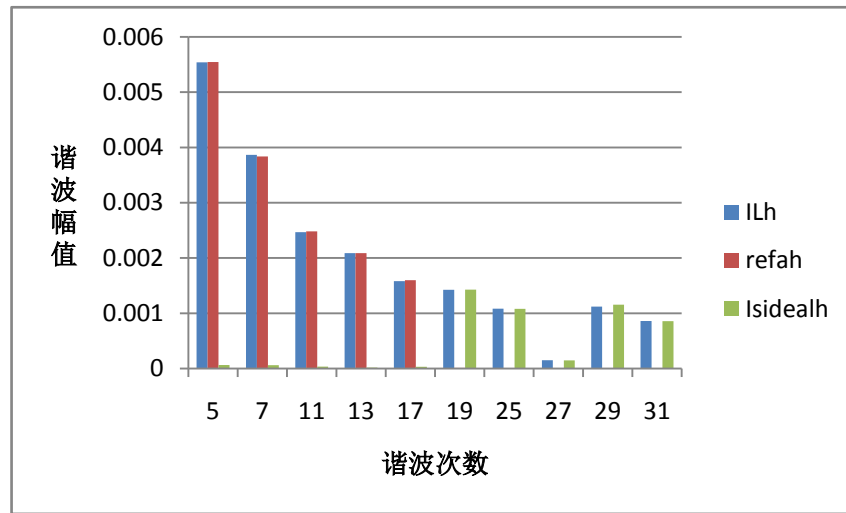


图 3-14 补偿效果分析

Fig. 3-14 Analysis of compensation effect

观察上图可以看出在 5 次、7 次、11 次、13 次、17 次出的谐波补偿效果很好，基本上消除了由非线性负载所引起的谐波电流分量。

3.3 补偿控制算法

3.3.1 并联侧控制算法

UPQC 并联侧有源电力滤波器（APF 单元）应该控制成受控电流源，使得有源电力滤波器产生的补偿电流实时跟随参考指令电流信号的变化，通常采用实时性较好的电流跟踪算法来实现，其作用是根据有源电力滤波器实际补偿电流和补偿电流的指令信号之间的偏差，得出控制主电路通断的 PWM 信号，控制结果应保证补偿电流跟踪

其指令信号的变化。目前跟踪型 PWM 控制的方法主要有滞环控制、无差拍控制和三角波比较方式（线性 PID 控制算法）。

滞环电流控制是应用最广泛的非线性闭环电流控制方法，它利用滞环比较器形成一个以给定电流 i_c^* 为中心的死区或滞环，通过反馈电流 i_c 与给定电流 i_c^* 的滞环比较误差 Δi_c 来控制变流器的开关动作，从而控制补偿电流 i_c 的变化。

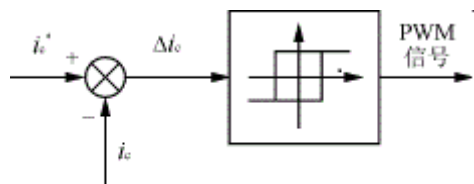


图 3-15 滞环比较法原理图

Fig. 3-15 Schematic diagram of hysteresis comparison method

这种控制方式中，滞环的宽度 H 对滞环电流控制的开关频率，响应速度和电流跟踪精度均有较大的影响。当滞环带 H 较小时，响应速度快，精度高，但开关频率也较高，导致开关损耗增加、开关器件的要求升高。当滞环带 H 较大时，电力半导体器件的开关频率降低，但是电流跟随误差变大，补偿电流中高次谐波也增多。目前滞环电流控制的研究主要集中在矢量化和定频化两方面，通过矢量化来避免无效的开关动作减小开关频率，通过定频化来克服滞环控制开关频率变化范围大的缺陷。不过这些改进方法在达到开关频率和电流跟踪误差恒定的同时，也存在计算复杂、需要准确估计系统阻抗等缺点，削弱了滞环控制简单可靠的优点。

对于数字控制器在实现上述滞环控制算法时，只能够采用定时信号控制的比较器代替模拟的滞环比较器（称为定时比较控制），此时数字控制器采样时钟信号的频率限定了器件的最高工作频率，可以避免器件开关频率过高的情况发生，但是相应地补偿电流的跟随误差变得不固定，忽大忽小。因此跟踪同样频率的输出电流时，为达到较好的跟踪效果，定时比较法需要开关频率为基频的十倍左右，而其他方法最多只要 7 倍左右。

无差拍控制 DBC(DeadBeat Control)实际上是一种预测控制，它的基本原理是：“根据在第 K 个采样时刻所检测出的非线性负载电流和补偿电流，通过一种的方法计算出第 $K+1$ 时刻的指令电流值，利用这个指令电流值计算出补偿电流的预测值，然后把根据 K 时刻计算出来 $K+1$ 时刻的补偿电流预测值输入到系统中。这样，当 $K+1$ 时刻的补偿电流输入到系统中的时候，系统时间也刚好到了 $K+1$ 时刻。”该方法的优点是动态响应很快，易于计算机执行。无差拍方法是基于预测的控制机制，因此响应速度快，但随之而来的是系统的鲁棒性差，控制精度很难提升。因此项目开发过程中选择了另一种方法，也是一种较为常用的方法，三角波比较法。

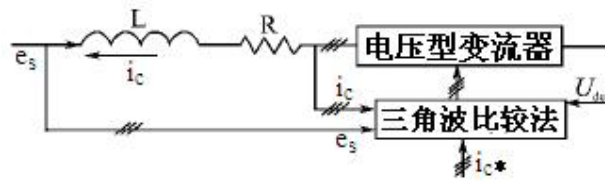


图 3-16 电压型变流器框图

Fig. 3-16 Diagram of voltage type converter

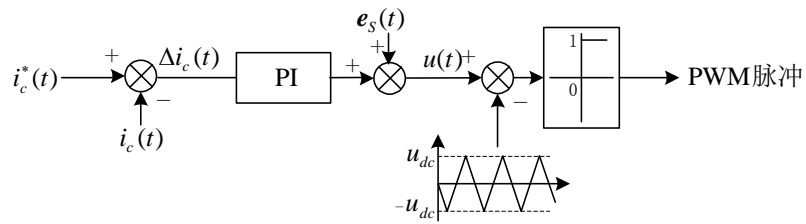
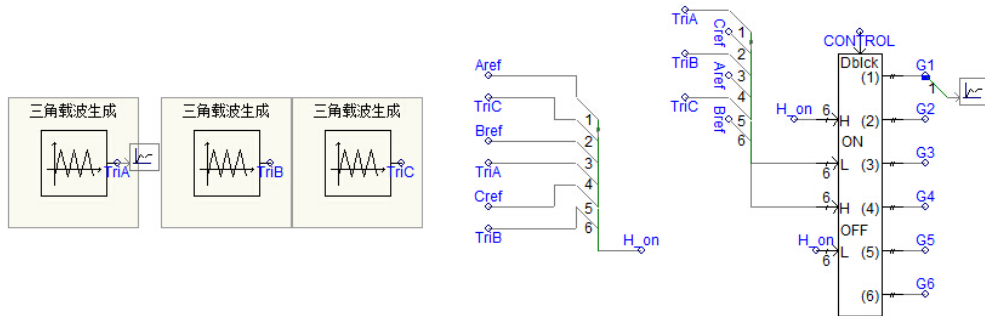


图 3-17 带电压前馈的静止坐标系下的三角波比较法

Fig.3-17 Triangular wave comparison method for static coordinate system with voltage feed forward

设 e_s 为系统电压， U_c 为变流器输出电压， i_c 为装置输出电流， i_c^* 为装置指令电流。

PSCAD 仿真：



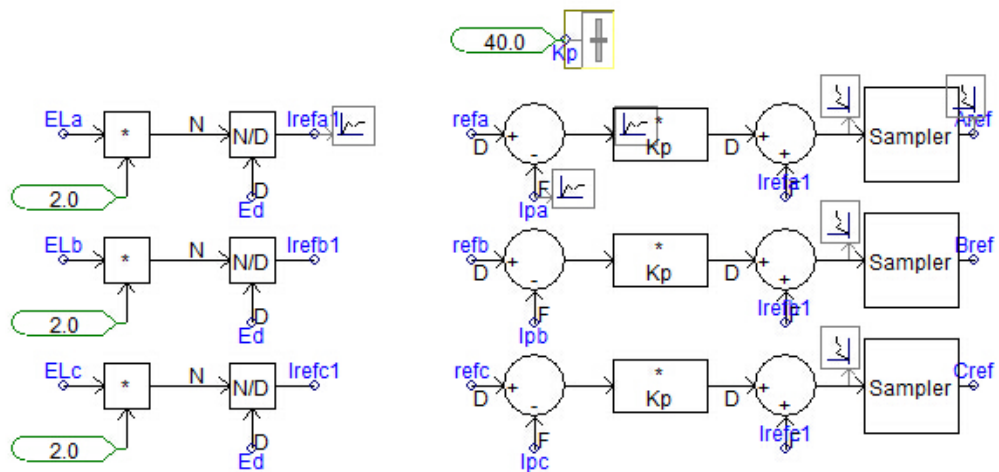


图 3-18 三角波比较法仿真框图

Fig.3-18 Triangular wave comparison method for PSCAD simulation

上图上部所示，从左到右依次是三角载波生成模块，信号汇总模块和脉冲产生模块；上图下部所示为带电压前馈的三角波比较法实现模块。对其进行仿真可以得到，负载电流、谐波补偿电流和系统侧电流的时域图如下所示：

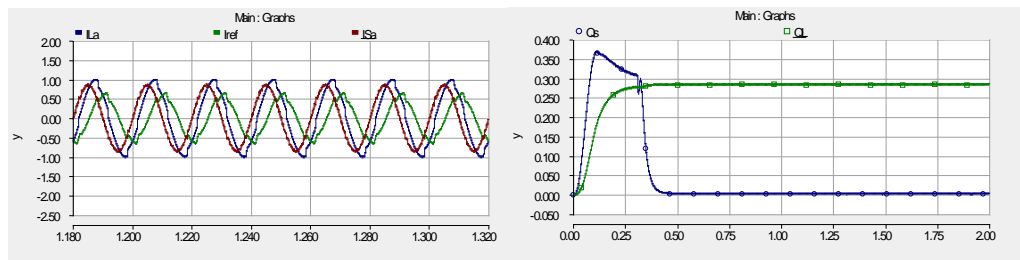


图 3-19 三角波比较法仿真结果

Fig.3-19 Compensation result of triangular wave comparison method

图中 I_{La} 为负载侧电流， I_{ref} 谐波补偿电流， I_{sideal} 为补偿后系统侧电流。在时域时间点同为 1.25s 时分别对负载侧电流（即 I_{La} ）、补偿电流（即 I_{ref} ）和补偿后系统侧电流（即 I_{sideal} ）进行频域分析，其主要谐波含量如下图所示：

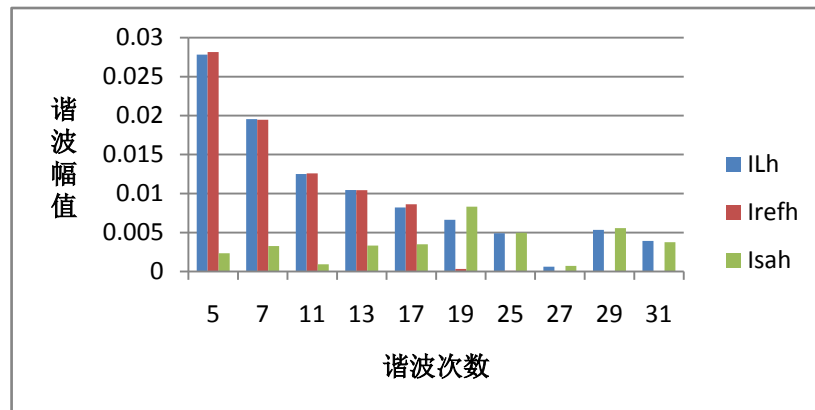


图 3-20 三角波比较法仿真结果

Fig.3-20 Compensation result of triangular wave comparison method

观察上图可以看出在 5 次、7 次、11 次、13 次、17 次处的谐波分量能准确的检测出来，经补偿后谐波分量有显著减小，同时有源电力滤波器能有效的对负载进行一定无功功率的补偿。

3.3.2 串联侧补偿控制算法

DVR 串联在电网与敏感负载之间，要求能快速、准确的补偿电网电压的跌落、闪边。为了能快速、准确地补偿电网电压的跌落，保证敏感负载侧电压稳定，避免系统的振荡，就需要由快速、准确、鲁棒的控制系统。因此，DVR 的控制系统的设计十分关键。控制系统首先要能保证系统输出快速、准确、无误差地跟踪指令，同时也要具备抑制各种干扰的能力。常用的控制算法有：负载电压外环电感电流内环控制、负载电压外环电容电流内环控制，状态空间反馈控制、小波控制等等。

本项目采用了负载电压外环电感电流内环控制的控制方法，为了分析 DVR 输出电压闭环控制系统的控制性能，方便控制系统的设计，下面对动态电压恢复器串联补偿系统在电网中的数学模型进行详细分析。

系统采用的是三个独立的单相 H 桥逆变器结构，各相独立控制，在研究其控制系统时，可以将其简化为单相系统进行分析。

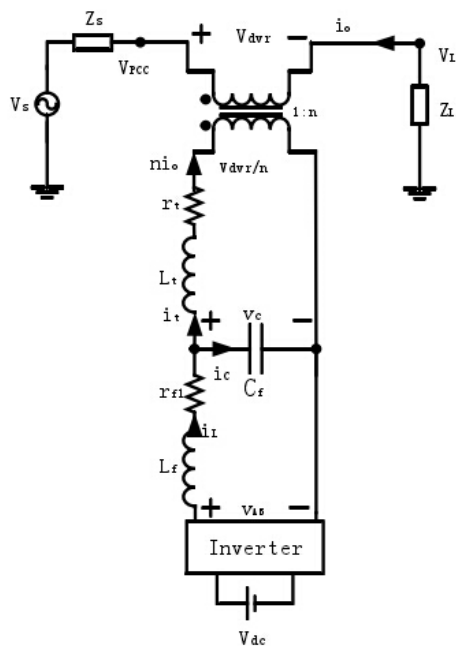


图 3-21 DVR 串联补偿系统单相等效电路图

Fig.3-21 Single phase equivalent circuit diagram of series compensation system

上图为考虑了耦合变压器的 DVR 串联补偿系统的单相等效电路图，DVR 的逆变器经 LC 低通滤波器后，经过耦合变压器串联在电网与敏感负载之间。图中 V_s 为电网电压， Z_s 为电网内阻抗， $Z_s = j\omega L_s + r_s$ ， V_{pcc} 为公共耦合点（PCC，Point of Common Couple）电压， v_{dvr} 为 DVR 输出补偿电压， v_L 为负载侧电压。

结合 DVR 串联补偿器在电网中的整体模型等效框图可以得到 DVR 输出电压闭环控制方法原理图如下所示：

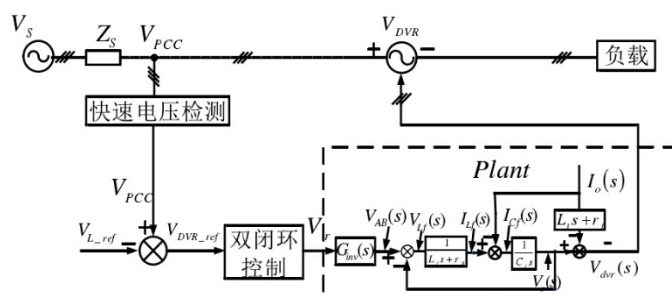


图 3-22DVR 输出电压闭环控制方法原理图

Fig.3-22close loop control method of output voltage for DVR

动态电压恢复期的控制原理与方法如上图所示，由快速电压检测算法与锁相算法，得到 PCC 点电压的幅值与相位，并将其去指令电压 V_{L-ref} 相比较，得到 DVR 输出指令电压 $V_{DVR-ref}$ 。DVR 输出指令电压 $V_{DVR-ref}$ 通过电容电压外环以及电感电流内环得到控制信号 V_r ，作用于对象模型，从而得到 DVR 输出电压 V_{DVR} ， V_{DVR} 与 PCC 点电压串联作用在负载上，保证负载电压为稳定的正弦电压。

控制方案可由电容电压瞬时值反馈构成控制系统的电压外环，电压外环的误差信号经过比例积分调节后作为电感电流内环的基准信号。闭环系统控制框图如下所示：

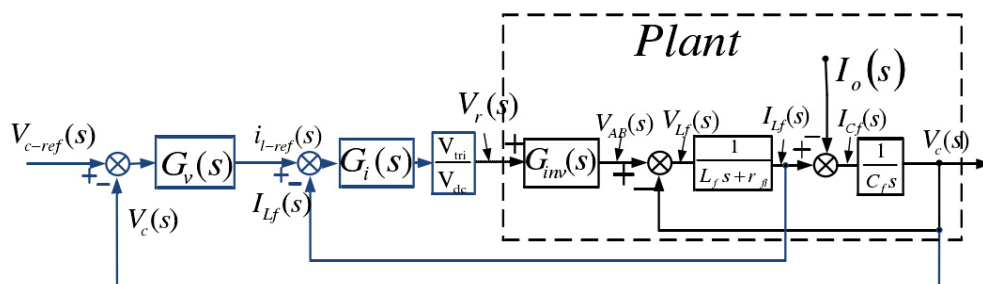


图 3-23 电容电压、电感电流的双闭环控制策略框图

Fig.3-23Double closed loop control strategy diagram of capacitor voltage and inductor current

如上图所示，采用电容电压外环、电感电流内环的控制策略框图中，电感电流内环控制器为 $G_f(s)$ ，电容电压外环控制器为 $G_v(s)$ 。电容电压外环控制器为 G_v 采用 P 控制器，电感电流内环控制器为 G_f 采用 P 控制器。逆变桥的调制模型 $G_{inv} = v_{dc} / v_{in}$ 。

逆变桥的调制模型中的参数与直流母线电压 V_{dc} 有关。在动态电压恢复器的实际工作过程中，电流电压不可避免的存在波动，为了消除直流电压波动对整个系统的影响，在电感电流内环控制器输出侧，引入比例环节 V_{tri}/V_{dc} 。比例环节的引入，能有效地消除直流母线电压波动给系统带来的影响。

PSCAD 仿真：电压跌落及补偿结果，跌落时间 1.2s ~ 1.7s，跌落深度 50% (110V)：

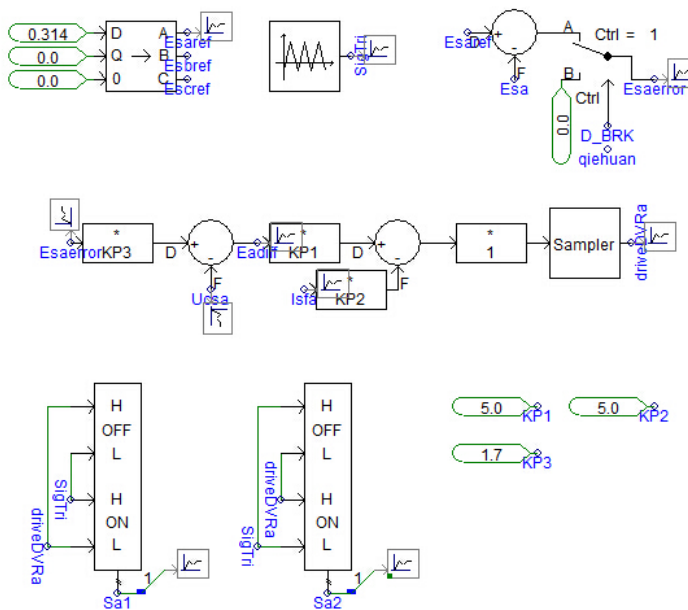


图 3-24 单相 DVR 控制算法仿真

Fig.3-24control algorithm simulation for single phase

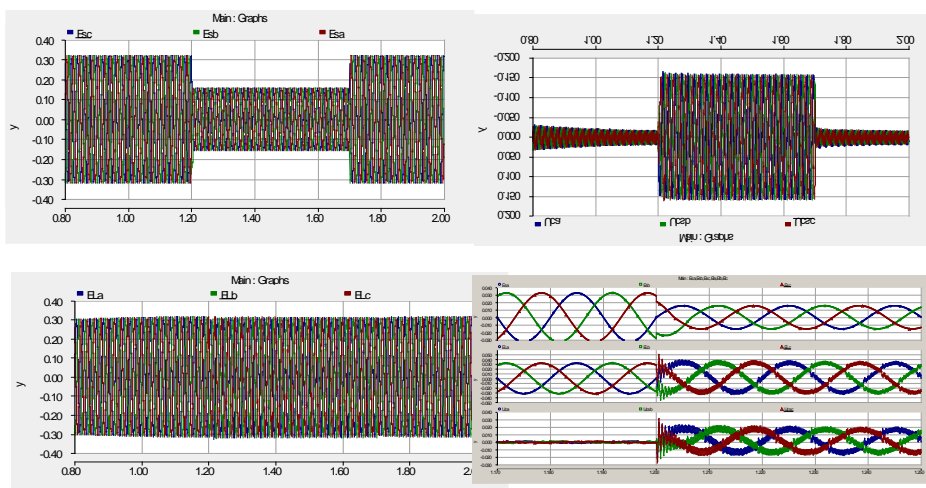


图 3-25 电压暂降，补偿电压及补偿后负载电压波形

Fig.3-25Waveform of voltage sag, compensation voltage and load voltage

分析补偿效果图可以看出：在电感电流内环控制的同时采用电容电压外环控制，能使输出电压准确跟踪指令信号，减小系统的稳态误差。

故本项目采用的 DVR 输出电压控制系统采用电感电流内环、电容电压（DVR 输出电压）外环的双环控制策略。这种双环控制，能同时改善 DVR 系统的动态、稳态性能，即提高系统的动态响应速度，和减小系统的稳态误差，能较好的满足一般情况下的动态电压恢复器的输出特性要求。

3.3.3 直流侧电流电压控制

直流侧电压的稳定是 APF 正常工作的前提条件。直流侧电压的稳定一般采用 PI 控制得到稳定直流侧所需的基波有功电流叠加到 APF 的参考指令电流当中，如下图所示。具体的做法是，将电容实际电压与设定值的差值经 PI 调节器后得到调节信号 Δi_p ，叠加到瞬时有功直流分量 \bar{i}_p 上，经运算控制输出一个与流过无源滤波器电流同相位的基波电压，使 APF 直流侧与交流侧实现能量交换，从而达到对电容电压的控制。

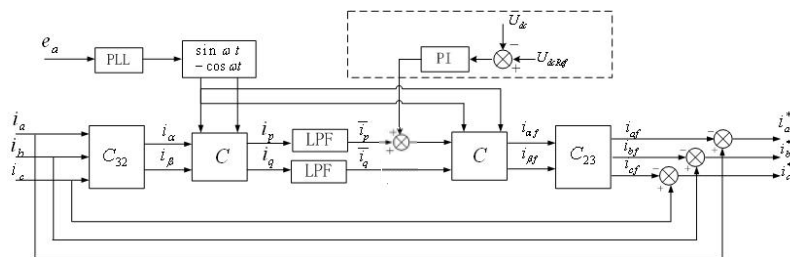


图 3-26 带直流电压控制的瞬时无功理论谐波检测算法框图

Fig.3-26 Algorithm of instantaneous reactive power theory based on DC voltage control

3.4 UPQC 输出滤波器参数设计指标分析

针对 UPQC 系统中涉及到的输出滤波器设计问题，提出了一种 LC 输出滤波器参数范围确定方法，通过对逆变输出的空载损耗指标、逆变输出对非线性负载的适应性指标和逆变输出谐波抑制指标的量化计算，取三个指标值域的交集，进而确定参数的有效值域。仿真验证了方法的可行性，方法为 UPQC 的串联侧及并联侧 LC 滤波器设计提供了数值分析方式，相比传统的经验法确定输出滤波参数更加准确可靠。

变流器的输出中除含有我们需要的基波和谐波外，还含有变流器开关频率和开关频率整数倍附近的谐波。如果不滤除这些高频谐波，显然会给电网带来新的高频谐波污染。滤波器的设计主要是解决好电感和电容之间的分压问题，在 PWM 载波频率附近，感值和容值应该满足下列两个条件：

(1) $X_C \ll X_L$ ，确保有源变流器输出的高频电压成分大部分落在电感 L 上，而电容两端电压近似为零；

(2) X_C 和 $X_L \ll Z_L$ ，其中 Z_L 为负载等效阻抗，这样确保分压是在电感和电容之间进行，受 Z_L 的影响不大。

对于低频次的谐波，电感上的分压应该很小，电容两端的电压基本上等于逆变器的输出电压。

3.4.1 逆变输出的空载损耗指标

逆变输出的空载指标是逆变器输出特性的主要参数之一。为限制空载电流，空载时滤波器的输入电流不能太大。一般来讲，空载时滤波器的输入基波电流不能超过逆变输出的额定输出电流的 30%。（空载损耗与空载时滤波器的输入电流有关，电流越大，损耗越大：一方面，滤波器的输入电流越大，逆变开关器件上的电流越大，逆变器的损耗就越大；另一方面，空载时滤波器的输入电流也流过电抗器及电容器，电流增大也会使电抗器及电容器的损耗增大。）

由下图：

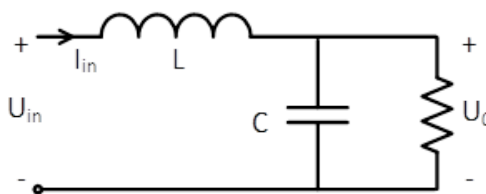


图 3-1 LC 滤波输出模型

Fig 3-1 Model of LC output circuit

有

$$I_{in} = \omega_0 C U_0 \quad (3-1)$$

I_{in} 表示空载时输入滤波器的输入基波电流的有效值， U_0 表示输出电压基波的有效值， ω_0 基波角频率。可知，空载时滤波器输入基波电流的大小与 C 成正比。所以从限制逆变电源空载损耗的角度来讲，LC 滤波器的电容值不能太大。

		1.0 /1.41 4)							H F ₀
计算 参考	800V /300 A		5K		500k*0.5 *0.95/3		Z= U ² /P 566 ² /79167 W	25000 0/(sqrt(3))* 800)	
参数 指标	800V	566V	50 00	0.95	79167w	0.95U ₀ 1.05U ₀	4.05	180A	5 %

3.5.2 谐波抑制

与负载相比，空载时电压中的频率($2\omega_s - \omega_0$)的谐波含量是最大的，根据公式：

$$HF_0(2\omega_s - \omega_0) = \frac{2}{\pi b} * \frac{1}{|N^2 \beta - 1|} * J_1(a\pi) \quad (3-3)$$

$$\text{其中, } \begin{cases} N = \frac{2\omega_s - \omega_0}{\omega_0} \\ \beta = \omega_0^2 LC \\ b = \sqrt{2}U_0 / E \\ a = b|1 - \beta| \\ J_1(a\pi): \text{一阶Bessel函数} \end{cases} \quad (3-4)$$

对(3-3)进行分析，可得空载时 $HF_0(2\omega_s - \omega_0)$ 的特性如下：

1) 当逆变电源输入电压增大时，输出电压中的频率为($2\omega_s - \omega_0$)的谐波的谐波含量将增大；

2) 当 β 在(0, 1/N²)范围内取值时，随 β 的增加而增加，其中最小值是一个大于18%的数；

3) 当 β 在 (1/N², 1) 范围内取值时，随着 β 的增大， $HF_0(2\omega_s - \omega_0)$ 将减小，其最小值为0。

因此，考察输出电压中各次谐波含量大小时，可以特定谐波 ω_s 或 $2\omega_s - \omega_0$ 的谐波含量为依据。只要特定谐波的含量满足要求，则其他各次谐波的含量均能符合要求。在输入电压最高并且空载的情况下，输出电压的谐波含量是最大的。

3.5.3 LC 滤波器参数计算

1) 输出电压谐波含量指标

令

$$HF_0(2\omega_s - \omega_0) = \frac{2}{\pi b} * \frac{1}{|N^2 \beta - 1|} * J_1(a \pi) \leq HF_0 \quad (3-5)$$

当 β 在 $(1/N^2, 1)$ 范围内取值时, 可满足(3-5)的 β 的范围为 $\beta_0 < \beta < 1$, β_0 为当(3-5)中取等号时 β 的值。

参数代入:

$$\begin{cases} \beta_0 = \omega_0 LC = 1/N^2 \\ N = \frac{2f_s - f_0}{f_0} = 199 \\ \omega_0 = 2\pi f_0 \\ f_s = 10000 \\ f_0 = 50 \\ b = \sqrt{2}U_0 / E_{\max} = \frac{\sqrt{2} * 566}{800 * 1.05 * 1.25} = 0.7622 \\ a = b|1 - \beta| \\ HF_0 = 0.05(\text{谐波含量上限}) \end{cases} \quad (3-6)$$

求解 β_0 , 有:

$$\begin{cases} Hf_0(2\omega_s - \omega_0) = \frac{2}{\pi b} * \frac{1}{N^2 \beta - 1} * J_1(a \pi) \leq HF_0 = 0.05 \\ \frac{2}{3.14 * 0.7622} * \frac{1}{199^2 \beta - 1} * J_1(0.7622 * |1 - \beta| * 3.14) = 0.05 \end{cases} \quad (3-7)$$

求解得: $\beta_0 = 0.000554$ 。由 $\beta_0 = \omega_0^2 LC$ 所确定的曲线如图所示, 该曲线定义为临界谐波含量曲线。满足输出电压谐波含量指标的 LC 区域为图中曲线右侧区域:

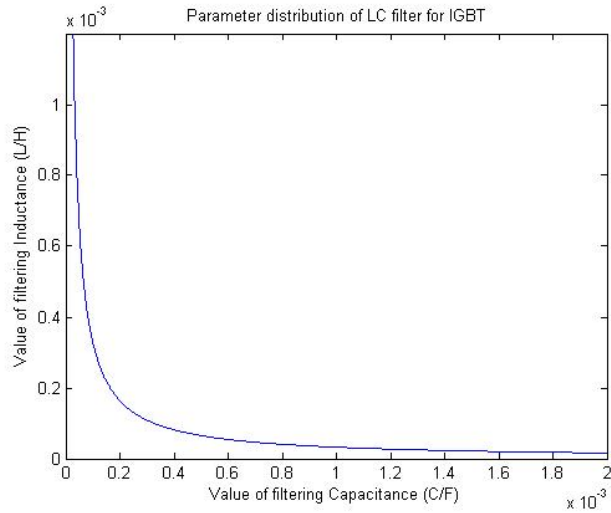


图 3-2 满足谐波含量指标的 LC 参数分布（曲线右侧）

Fig 3-2 Area of available LC parameters which meat harmonic content criteria (right graph)

2)基波电压增益确定 L、C 的取值范围

滤波器的基波电压增益 g 为:

$$g = 1 / \sqrt{(1 - \beta^2) + (\omega_0 L / Z) + 2\omega_0 L(1 - \beta) \sin \theta / |Z|} \quad (3-8)$$

式中， ω_0 为基波角频率， $|Z|$ 为负载功率最大时的负载的阻抗值， θ 为最低感性负载功，为了使基波电压增益指标符合要求，应当使最大功率、最低感性功率因数负载条件下的基波电压增益不小于 g' ，根据式(3-8)可得:

$$g = 1 / \sqrt{(1 - \beta^2) + (\omega_0 L / Z) + 2\omega_0 L(1 - \beta) \sin \theta / |Z|} \geq g' \quad (3-9)$$

当 β 为小于 1 的某一特定值时，可求得(8)取等号时的 L, C 值为:

$$\begin{cases} C_0 = \frac{\beta}{\omega_0 |Z| [\sqrt{(1/g')^2 - (1-\beta)^2} \cos^2 \theta - (1-\beta) \sin \theta]} \\ L_0 = \beta / \omega_0^2 C_0 \end{cases} \quad (3-10)$$

参数代入:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{\min} = 800 * 0.95 * 1.25 \\ g' = \sqrt{2}U_0 / E_{\min} = \frac{\sqrt{2} * 566}{800 * 0.8 * 1.25} = 0.7431 \\ Z = U_0^2 / P = 4.02 \\ \cos \theta = 0.95 (\text{方案中为} 0.92, \text{且未标明是否为感性功率因数}) \\ \sin \theta = 0.3122 \end{array} \right. \quad (3-11)$$

可求得 C_0 :

$$\begin{aligned} C_0 &= \frac{\beta}{\omega_0 |Z| [\sqrt{(1/g')^2 - (1-\beta)^2} \cos^2 \theta - (1-\beta) \sin \theta]} \\ &= \frac{\beta}{2 * 3.14 * 50 * 0.4643 * [\sqrt{1.564 - 0.81 * (1-\beta)^2} - 0.436 * (1-\beta)]} \\ &= \frac{\beta}{145.79 * [\sqrt{1.564 - 0.81 * (1-\beta)^2} - 0.436 * (1-\beta)]} \end{aligned} \quad (3-12)$$

绘制 ($0 \leq \beta \leq 1$) 在 LC 平面上的曲线:

$$\left\{ \begin{array}{l} C \geq C_0 \\ L = \frac{\beta}{\omega_0^2 C_0} \\ 0 \leq \beta \leq 1 \end{array} \right. \quad (3-13)$$

有,

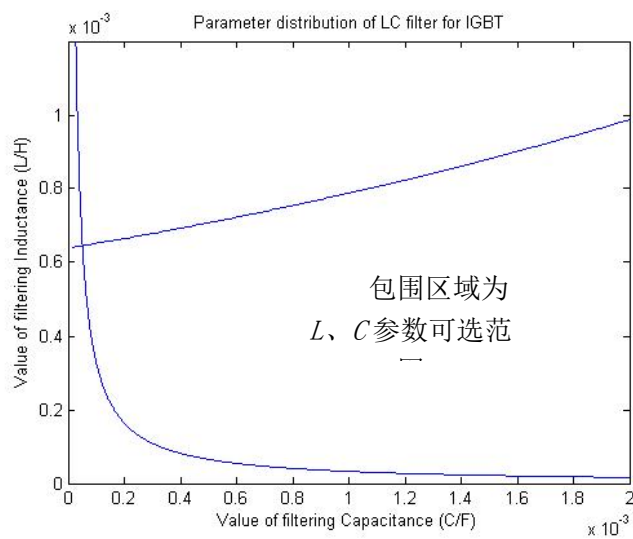


图 3-3 满足电压增益指标的 LC 参数分布 (曲线右侧)

Fig 3-3 Area of available LC parameters which meet voltage gain criteria (right graph)

3) 空载输入基波电流确定 L、C 的取值范围

a) 确定临界滤波电容值 C_{min}

临界谐波含量曲线与临界电压增益曲线相交的点同时满足谐波含量指标及电压增益指标的 L、C 区域上图中阴影所示。A 点对应的 C 值称为临界滤波电容值 C_{min} ，临界滤波电容值是同时满足谐波含量指标及电压增益指标条件下滤波电容 C 的最小值，由式(3-12)得：

$$C_{min} = \frac{\beta_0}{\omega_0 |Z| [\sqrt{(1/g')^2 - (1-\beta)^2} \cos^2 \theta - (1-\beta) \sin \theta]} \quad (3-14)$$

b) 确定空载输入基波电流指标

当滤波电容取临界电容值 C_{min} 时，滤波器的空载输入基波电流的有效值为：

$$I_{min} = \omega_0 C_{min} U_0 \quad (3-15)$$

空载输入基波电流指标 I_{min} 确定方法应在满足 $I_{in} \geq I_{min}$ 的前提下大一些，一般不超过逆变电源额定输出电流的 30%，空载输入基波电流可取 $0.3I_{min}$ 。

c) 确定临界滤波电容

空载电流对应的电容值为：

$$C_{max} = \frac{I_{in}}{\omega_0 U_0} \quad (3-16)$$

满足空载输入基波电流指标的 C 值为：

$$C \leq C_{max} \quad (3-17)$$

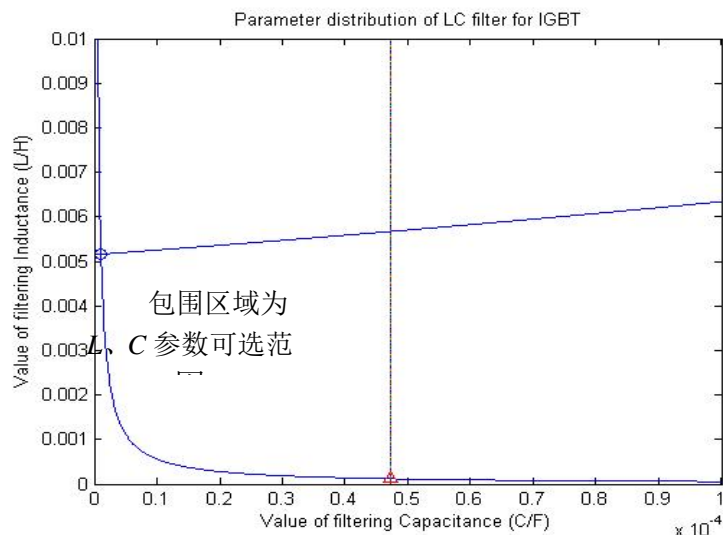


图 3-4 满足空载电流指标的 LC 参数分布（曲线右侧）

Fig 3-4 Area of available LC parameters which meet no-load current criteria (right graph)

3.3.4 根据逆变单元对负载适应性指标确定最优的 LC 值

同时满足谐波含量指标、电压增益指标和空载输入基波电流指标的 LC 区域如上图曲线包围部分。由前面的分析可知：

1) 在 LC 之积恒定时，L 越小，逆变电源的输出阻抗越小，逆变电源对非线性负载的适应性越好；

2) L 越小，越不容易出现过调制，逆变电源对非线性负载的适应性越好。因此，LC 最佳数值应选择图中红色三角位置：

$$\begin{cases} C_{find} = C_{max} \\ L_{find} = \frac{b_0}{\omega^2 C_{find}} \end{cases} \quad (3-18)$$

3.6 谐振条件验证

3.6.1 结果计算及谐振频率适应性验证：

根据上述系统特性，计算得 LC 滤波参考结果：

[L,C]=[119uH, 47uF]

已有文献研究表明，为达到较好的输出特性，LC 谐振频率

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3-19)$$

应该满足(3-20)，以避免 LC 滤波器进入谐振状态：

$$10f_0 < f_c < f_s / 5 \quad (3-20)$$

其中 f_0 为基波频率， f_c 为谐振频率， f_s 为 PWM 载波频率。

本例计算结果谐振频率计算结果为 2124.5Hz，略高于系统理想谐振频率范围（本例中心值为 500Hz），能够满足谐振限制条件。

3.6.2 经验法比较

1) IGBT 变流器输出滤波电路参数设计一般遵循经验法设计。电感电压法，步骤如下：

a) 确定滤波电感值

根据系统电感压降允许范围确定电感，当

$$I_f \omega L \leq aU_\varphi \quad (3-21)$$

其中 U_ϕ 为输出电压， I_f 为输出电流， a 为电压降比例系数，用以确定系统中可以容忍的电感压降，可得

$$L \leq \frac{aU_0}{I_f \omega} = \frac{5\% * U_0}{\frac{S * 0.95}{\sqrt{3}U_0} * 314} = \frac{5\% * \sqrt{3}U_0^2}{S * 0.95 * 314} \quad (3-22)$$

当输入条件为：

$$\begin{cases} S = 250000W \\ U_0 = 566V \\ a = 5\% \end{cases} \quad (3-23)$$

可计算得滤波电感值为：

$$L \leq 372\mu H \quad (3-24)$$

b) 确定滤波电容

再根据谐振频率限定经验公式 $10f_0 < f_c < f_s / 10$ 计算电容值，选择谐振频率 f_c ，

并求解 $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ，当取 $f_c = 1500$ 时，计算可得滤波电容值为：

$$C = 30\mu F \quad (3-25)$$

2) IGBT 变流器输出滤波电路参数设计一般遵循经验法设计。电感电流法，步骤如下：

a) 确定滤波电感

根据电流波动允许范围确定电感值：

$$\Delta I_{\max} = \frac{T_s}{2L} = \frac{U_0}{2f_s L} \quad (3-26)$$

求解并确定电感范围。

b) 确定滤波电容

考虑 LC 滤波回路二阶振荡误差系数

$$\zeta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \geq \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (3-27)$$

其中， R 为逆变器有功损耗（IGBT 手册可查），进而可求得 LC 滤波电容值。

$$C \geq \frac{2L}{R^2} \quad (3-28)$$

实际应用中计算 IGBT 输出滤波的方法有多种，即有详细计算，也有经验公式，设计灵活性较高。系统搭建过程中，可根据系统具体要求改变相关参数进而求解和装置实验。

与 APF 侧相同，DVR 亦可采用上述区域逼近的方法实现参数范围的确定。本项目 DVR 系统的参数如表 3-2 所示：

表 3-2DVR 系统参数设计

Table.3-2 Parameters of DVR system

系统参数类型	输入电压 E(直流母排电压电流)	输出电压有效值 U_0 ($E*1.0/1.414$)	开关频率 f_s	功率因数 $\cos \theta$ (感性)	滤波器负载额定功率	滤波器输入电压幅值变化范围 $E_{min}-E_{mzx}$	额定负载	逆变器输出电流	谐波含量上限 HF_0
计算参考	1100V/600A	578 (2890V/5)			1.53MW/5	$0.8U_0 \sim 1.1U_0$	$Z=U^2/P$	$5MW/(\sqrt{3}) * 5000$	
参数指标	1100	2.89KV	5000	0.92	1.53MW	$0.8U_0 \sim 1.1U_0$	0.218	577A	5%

上述方法可用于计算 PWM 输出 LC 滤波参数。实际应用中计算 IGBT 输出滤波的方法有多种，即有详细计算，也有经验公式，设计灵活性较高。系统搭建过程中，可根据系统具体要求改变相关参数进而求解和装置实验。

3.7 反馈-逆变-滤波环节稳定性分析

3.7.1 串联侧传输特性

LC 参数的选取与负载电流密切相关。且滤波结构的选取不仅影响对开关次谐波的滤除效果，也能影响负载电流的谐波。

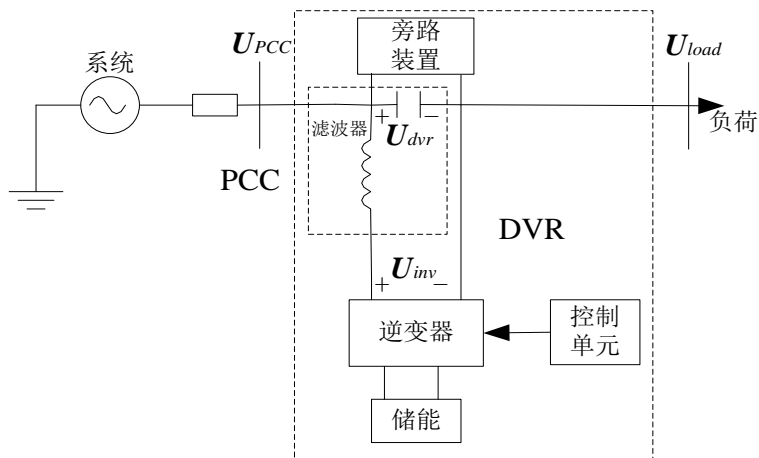


图 3-5 常规的 DVR 的单相电路

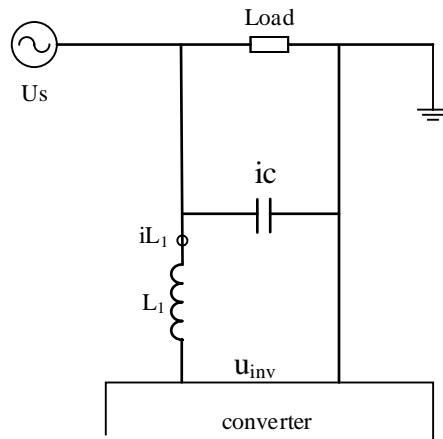


图 3-7UPQC 系统中的 APF 侧滤波电路模型

Fig 3-7 Circuit schematic diagram of APF in UPQC

根据上图系统电路模型可得 APF 侧计算模型：

$$\begin{cases} (i_{ref} - iL_1) * (k_p + \frac{k_i}{s}) * k_{PWM} = U_{inv} \\ (U_{inv} - i_c * 1/sc) * \frac{1}{L_1 s} = iL_1 \\ iL_1 + U_s * s * c = 0 \end{cases} \quad (3-30)$$

2) 改进型并联侧系统电路模型：

LC 滤波的一个主要问题是谐振现象的发生。即在开关频率及其倍数的频率条件下，滤波电容电感组成的 LC 网络会在这些频率上形成 LC 振荡，导致网络对这些频率的电流的阻抗为零，产生较大的谐振电流，因而严重影响 LC 滤波特性甚至损坏设备。为了阻止 LC 谐振的发生，我们在基本 LC 电路的基础上，增加了补偿单元，希望通过增加的阻容网络增加系统对谐振电流的阻尼，减小谐振电流，此外将 LC 结构拓扑为 LCL 结构，增加了开关频率阈值范围，进而获得更好的谐波抑制特性。

LCL 滤波器相当于一个 LC 滤波器的电感分成两个部分。滤波器参数设计时有 $L_1 + L_2 = L$ 。L 和 C 的具体参数计算方法可参考相关文献 [39-40]。下图为采用谐振抑制结构的滤波电路结构，

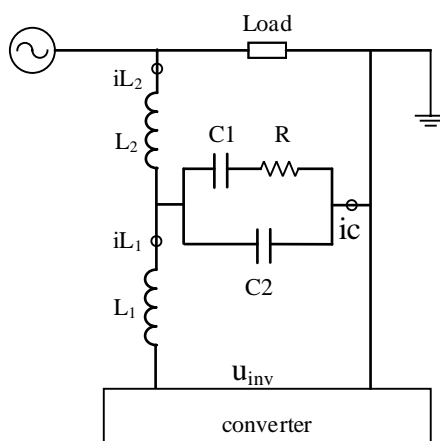


图 3-8 改进型 UPQC 系统中的 APF 单相电路模型

Fig.3-8 Improved circuit schematic diagram of APF in UPQC

其中, U_{inv} 为逆变器输出电压, i_{L1}, i_{L2} 为第一级和第二级滤波电感电流, $C1, R, C2$ 为补偿网络的电容和电阻, i_c 为补偿网络的总电流, U_s 为系统电压。

对于 UPQC 系统, 逆变器输出电压 U_{inv} 是由输入参考电流决定, 参见控制框图:

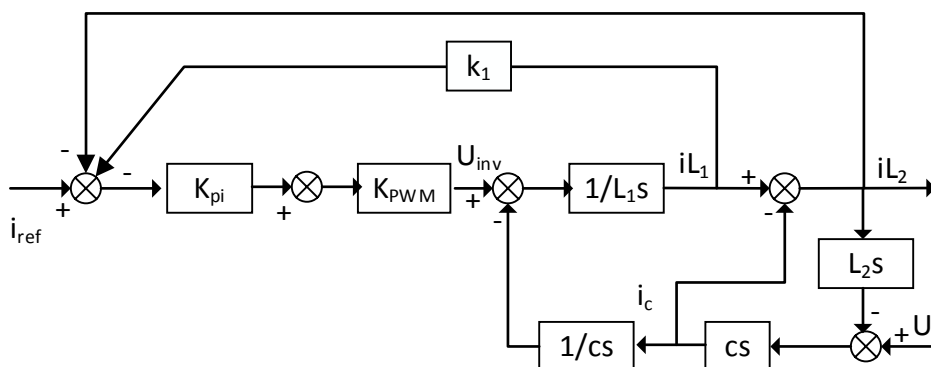


图 3-9UPQC 系统中的 APF 侧控制框图

Fig 3-9 Control diagram of APF in UPQC

可以建立其数学模型:

$$\begin{cases} (i_{ref} - i_{L1} - i_{L2}) * (k_p + \frac{k_i}{s}) * k_{PWM} = U_{inv} \\ (U_{inv} - i_c * 1/s) * \frac{1}{L_1 s} = i_{L1} \\ i_{L1} - (i_{L2} * s * L_2 - U_s) * s * c = i_{L2} \end{cases} \quad (3-31)$$

写出 i_{L2} 关于 i_{ref} 和 U_s 和传递函数:

$$iL_2 = \frac{(b_0s + b_1) * i_{ref} + (n_0s^3 + n_1s^2 + n_2s) * U_s}{a_0 * s^4 + a_1 * s^3 + a_2 * s^2 + a_3 * s + a_4} \quad (3-32)$$

其中,

$$\begin{cases} b_0 = k_p k_{pwm} (c_1 + c_2 + R) \\ b_1 = k_i k_{pwm} (c_1 + c_2 + R) \\ n_0 = (L_1 R c_2 + L_1 c_1 c_2) \\ n_1 = (R + c_1) c_2 k_p k_{pwm} \\ n_2 = (R + c_1 + c_2 + R c_2 k_i k_{pwm} + c_1 c_2 k_i k_{pwm}) \end{cases} \quad (3-33)$$

$$\begin{cases} a_0 = (L_1 L_2 R c_2 + L_1 L_2 c_1 c_2) \\ a_1 = (L_2 R c_2 k_p k_{pwm} + L_2 c_1 c_2 k_p k_{pwm}) \\ a_2 = (L_1 + L_2) (c_1 + c_2 + R) + (c_1 + R) L_2 c_2 k_i k_{pwm} \\ a_3 = 2(c_1 + c_2 + R) k_p k_{pwm} \\ a_4 = 2(c_1 + c_2 + R) k_i k_{pwm} \end{cases} \quad (3-34)$$

稳定性分析:

稳定性是控制系统的重要性能,也是系统能够正常运行的首要条件。系统在运行时会受到 U_s 的扰动,此时以参考电流为输入量对滤波网络输出电流进行有效控制是 APF 侧正常工作的关键。

写出式(3-32)的 Routh 判据表为:

$$\begin{cases} s^4 : a_0 & a_2 & a_4 \\ s^3 : a_1 & a_3 & 0 \\ s^2 : c_{13} & c_{23} & 0 \\ s^1 : c_{14} & c_{24} & 0 \\ s^0 : c_{15} & 0 & \end{cases}$$

其中,

$$\begin{cases} c_{13} = \frac{a_1 a_2 - a_0 a_3}{a_1} \\ c_{23} = \frac{a_1 a_4 - a_0 a_5}{a_1} = a_4 \end{cases}, \begin{cases} c_{14} = \frac{c_{13} a_3 - a_1 c_{23}}{c_{13}} \\ c_{24} = \frac{c_{13} a_5 - a_1 c_{33}}{c_{13}} = 0 \end{cases}, \begin{cases} c_{15} = \frac{c_{14} c_{23} - c_{13} c_{24}}{c_{14}} = a_4 \\ c_{25} = 0 \end{cases}$$

当 a_0 、 a_1 、 b_1 、 c_{13} 、 c_{14} 和 c_{15} 大于零时,系统即可保持稳定,而根据系数方程可知 a_0 、 a_1 和 c_{15} 大于零。因此,系统稳定的条件范围缩小至 c_{13} 、 c_{14} 大于零。

$$\begin{cases} (L_2 - L_1) (c_1 + c_2 + R) + (c_1 + R) L_2 c_2 k_i k_{pwm} > 0 \\ (L_2 - L_1) / ((c_1 + c_2 + R) (L_2 - L_1) + (c_1 + R) L_2 c_2 k_i k_{pwm}) > 0 \end{cases} \quad (3-35)$$

化简可得

$$L_1 < L_2 * [1 + \frac{(c_1 + R)c_2 k_{kpwm}}{(c_1 + c_2 + R)}] \quad (3-36)$$

式(3-36)表示了系统稳定的基本条件。

对采用增强型 LCL 滤波器的系统特性与传统 LC 滤波器的性能进行对比，为保证实验的有效性，对滤波电感量进行统一设定，即 $L=L_1+L_2$ ， $C=C_1//C_2$ ，最终的参数设计如下：

表 3-3 装置参数

Table 3-3 parameters of LCL model

总电感量	$L=1.0\text{mH}$
总电容量	$C=60\mu\text{F}$
逆变器侧电感量	$L_1=0.8\text{mH}$
电网侧电感量	$L_2=0.2\text{mH}$
补偿电容 1	$C_1=2.5\mu\text{F}$
补偿电容 2	$C_2=2.5\mu\text{F}$
电阻	2Ω
比例系数	$K_p=2$
积分系数	$K_i=0.1$
PWM 变比	$K_{PWM}=1$

可由式(3-32)，画出采用传统和补偿型滤波器 APF 的输出电流相对参考电流的幅频响应特性分别如下图所示：

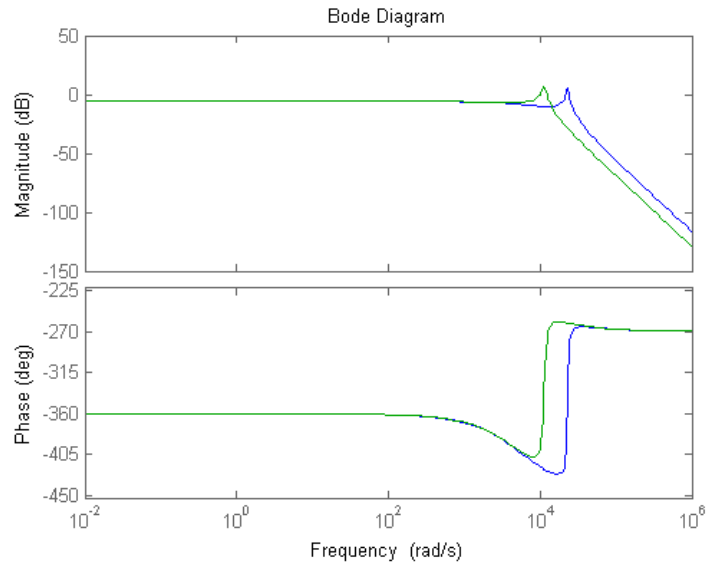


图 3-10 输出电流对参考电流的幅频响应特性

Fig 3-10 Amplitude-frequency characteristic of output current relative to reference current

在相对参考电流的情况下，APF 滤波器的主要作用就是滤除高频开关次谐波电流。由上图可以看出，采用双级增强型滤波器具有更高的高频谐波衰减系统，能在一定程度增加抑制高次谐波的能力。

输出电流对系统电压的幅频特性：

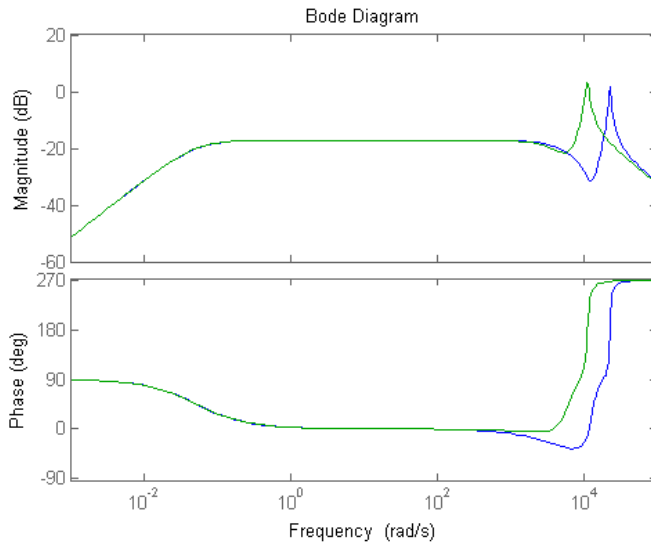


图 3-11 输出电流对系统电压的幅频响应特性

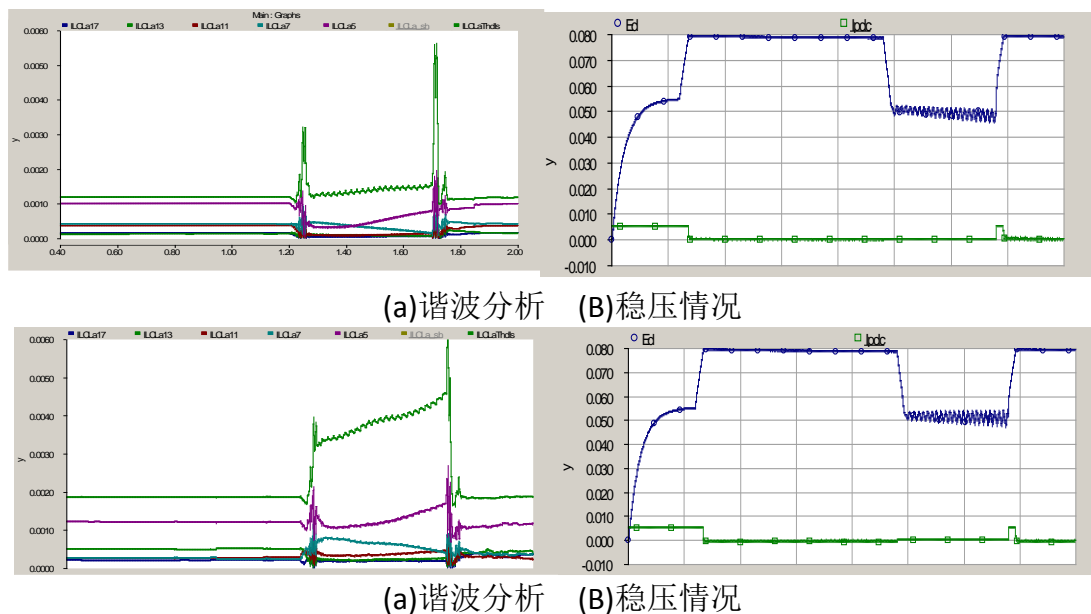
Fig 3-11 Amplitude-frequency characteristic of output current relative to U_s

在相对系统电压的情况下，APF 滤波器的主要作用是抑制系统电压谐波对 APF 输出电流的影响。由上图可以看出，补偿型 LCL 滤波电路对系统电压扰动量的抑制作用

并没有减小，在截止频率处依然具有-20db 的衰减特性，可满足系统的抗系统电压扰动的需要。

3.7.3 仿真结果分析

LCL 滤波输出实验的 PSCAD 仿真结果：



结果表明，相比于普通滤波器，增强型 LCL 滤波器的滤波效果更好，其对 11 次，13 次，17 次谐波效果滤波效果更加明显。

3.8 小结

对电压跌落和电流谐波补偿指令信号检测算法进行了介绍，并对谐波补偿算法进行了仿真。仿真结果表明采用的指定次数谐波电流直接检测方法能够对电网中的电流谐波进行有效的滤波，使得电源侧电流基本不含有谐波分量，同时有源电力滤波器能有效的对负载进行一定无功功率的补偿。对目前常用的 APF 控制算法进行了介绍，详细介绍了基于三角波比较方式的控制原理，并对其进行了仿真。仿真结果表明该算法能够对电网中的电流谐波进行有效的滤波，使得电源侧电流基本不含有谐波分量，同时有源电力滤波器能有效的对负载进行一定无功功率的补偿。提出了一种 LC 输出滤波器参数范围确定方法，通过对逆变输出的空载损耗指标、逆变输出对非线性负载的适应性指标和逆变输出谐波抑制指标的量化计算，通过求取指标值域的交集确定参数的有效域。通过仿真及经验法验证了方法的可行性。对基于增强型 LCL 滤波器的 APF 模块控制流程进行了建模和稳定性分析，给出了系统稳定的电路参数设计条件，实验结果表明该方法有助于提升系统的输出频率特性。

第 4 章统一电能质量调节装置(UPQC)功能设计

4.1 引言

鉴于电能质量问题的危害,世界各国对于电能质量的治理都投入了大量的人力物力进行研究。目前主要的电能质量治理装置有:有源滤波器(APF)、动态电压恢复器(DVR)、配电系统用静止无功补偿器(D-STATCOM)、固态断路器(SSTS)、统一电能质量调节器(UPQC)等。这些设备按照与系统的连接方式可以分为串联型,并联型和综合型,详细的各种类型的电能质量治理装置的性能比较请参考表 1-1。

在以往的电能质量治理案例中,串联型补偿装置主要解决电压方面的电能质量问题,如 DVR 通过自身的储能单元,在毫秒级内向系统注入正常电压与故障电压之差,以抑制系统电压动态故障,有效避免跌落,电压闪变,三相不平衡等对敏感负荷的影响,而并联型的补偿装置非常适合解决电流方面的电能质量问题,如 D-STATCOM 通过向系统中注入可控的无功电流来对动态负荷进行补偿,有效的解决无功波动所带来的电压波动和闪变以及不平衡负荷对系统的影响等问题,同时可产生和谐波负载的谐波电流具有相同幅值而相位相反的补偿电流来消除谐波,使得负荷从系统中吸取的电流为标准的基波正弦电流。无论这两种装置的哪一种都只能针对电能质量问题的一个方面进行处理,因此都存在着功能方面的不足,难以达到理想的补偿效果。

UPQC 的技术优势则在于在供电电压出现暂态或是稳态故障的时候,既可以维持负载侧的电压为标称值,并可以提供非线性负载需要的谐波电流,从而保证系统电流的质量;同时,又可以提供负载所需要的无功,使系统电流和电压同相,提高负载的功率因数,不需要额外的功率因数校正装置,也同样不需要额外的整流装置提供串联单元直流侧的能量。由于这部分能量由并联单元提供,因此不会对系统电流产生额外的干扰。

除此之外,由于传统的 DVR 和 D-STATCOM 等电能质量治理装置所需的基本组件,如变压柜,变电柜,开关柜,配电柜以及储能柜等所占的使用空间都非常大。如果需要同时治理电压类型和电流类型等供电质量问题的情况,就需要单独配备 DVR 和 D-STATCOM 各一台,极大的增加了系统的冗余性和占地空间。对于一般企业来说,先期的投入成本也非常巨大。如果能够将 DVR 和 D-STATCOM 的功能统合,如传统的 DVR 直流侧需要储能装置或直流支撑电容,同时 D-STATCOM 的直流侧的可控电压源也需要直流电容支撑,因此将串联侧和并联侧的直流极共用同一组储能装置或直流支撑电容,不仅节省了大量的成本和减小了设备的体积,同时串联侧 DVR 独立的对储能装

置进行充电的充电机也可以被并联侧的 D-STATCOM 所替代；两套系统独立存在时，两套设备需各自配备独立的开关柜和配电柜，用以保护整个系统的正常运作和故障投切，如果将串联侧和并联侧的功能单元统合，那么实际“两套系统”只需要一套开关柜和配电柜。因此，统一电能质量调节装置（UPQC）被公认为是极有发展前途的一种电能质量治理装置。

表 4-1 电能质量治理装置性能比较

Table 4-1 Performance comparison of power quality control device

电能质量控制技术	防停电	补偿稳态电压	补偿动态电压	节能	消除谐波	防灾害	容量	成本
稳压电源	无	有	无	无	无	无	大	高
无源滤波	无	无	无	无	有	无	大	低
自启动电源	有	有	无	无	无	无	大	高
静态 UPS	有	有	无	无	无	无	大	高
动态 UPS	有	有	有	无	有	无	大	高
DVR	无	有	有	有	有	无	小	低
D-STATCOM	无	无	无	有	有	有	大	低
APF	无	无	无	有	有	有	小	低
UPQC	有	有	有	有	有	有	小	较高
SSTS	有	无	有	无	无	有	大	低
分布式发电	有	有	有	有	有	有	大	高

UPQC 治理装置系统的设计目标主要从实际出发，通过有针对性地对深圳供电区敏感类用电企业所面临的用电核心问题进行概念化，特征化，模块化手段进行综合设计，如由变流器所引起的电力系统谐波问题，可造成电力系统局部并联谐振或串联谐振，造成电容器设备等烧毁，或引起继电保护和自动保护装置误动作使电能计量出现混乱，同时对于电力系统外部的通信，电子设备等造成严重的干扰；由电力系统中三相元件，线路参数或负荷不对称所引起的三相不平衡问题，可造成电动机输出功率减少，从而导致电动机的效率降低，同时电动机的升温和无功损耗问题也会随着三相不平衡问题的加深而变得更加严重；如故障或落雷引起的电压波动问题，电压质量要求高的高新科技和精密设备影响非常严重，造成计算机数据流失，档案损毁。

综上所述，针对深圳电网供电问题的概念化，将治理装置的主要功能特征化，具体应具备的主要功能如下：

- 具备消除或极大地减弱负载侧对系统侧谐波污染的功能；

- 具备补偿负载侧无功电流，调整不平衡有功电流的功能；
- 具备补偿负载侧谐波电流的功能；
- 具备自滤除并联侧 APF 开关频率的高次谐波；
- 针对电压波动，如闪变，暂升暂降等，具备保持负载电压稳定的功能

4.2 UPQC 系统运行流程

UPQC 的总体控制架构如下图 4-1 所示，主控制器负责串联侧有源电力滤波器（APF）的功率元件（PCS），并联侧有源电力滤波器（APF）的功率单元（PCS）和 DC-DC 变换器的功率指令接收与运行，组成两套即独立又为统一的分布式控制系统。其中，工控机负责由超级电容模组组成的储能高级应用系（ESDMS），和电能质量一体化平台进行远程通讯以及人机界面等相关功能。储能装置管理系统由工控机进行统一整合，并以图形化的界面显示目前储能设备的运转情况和故障路径等。主控制器，工控机和调试上位机通过 LAN 或 CAN 总线进行通讯，具有结构简单，数据传输速率快，可靠性高等特点。

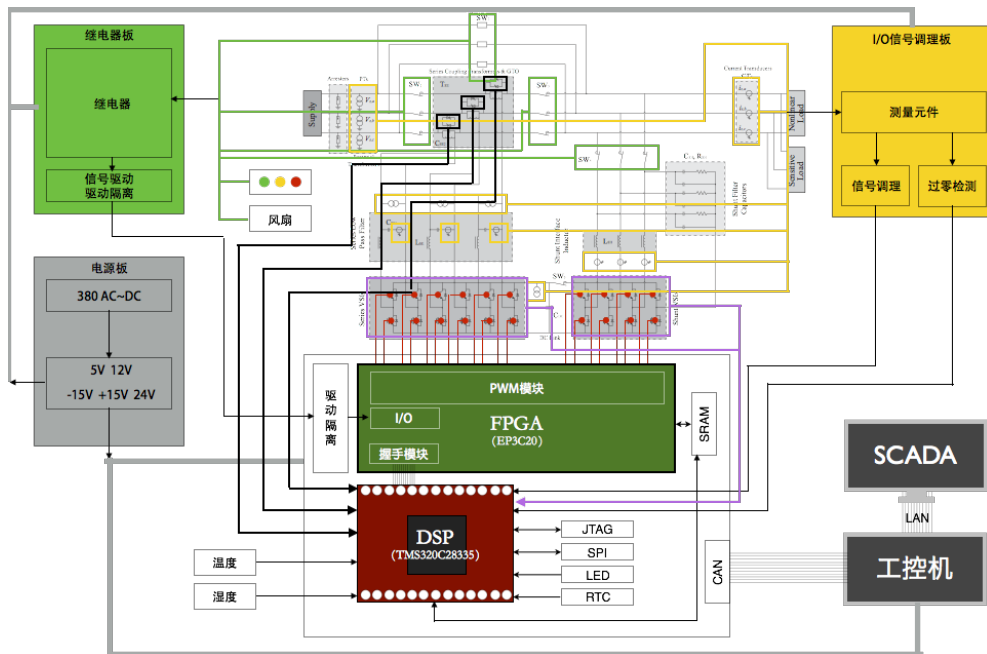


图 4-1 UQPC 控制系统组成

Fig 4-1 Diagram of control system of UPQC

4.2.1 系统切入流程

本项目串联变流器被控制成受控电压源，输出电网电压与额定标准电压的偏差经串联变压器供给负载，其所需要的能量由并联变流器或超级电容提供。因此整个系统必须先启动并联变流器，而后启动串联变流器；在投入串联变压器时要采取适当的措施抑制可能存在的励磁涌流；当然在主电路接入之前，还必须保证辅助电源给控制板、驱动板、霍尔检测板提供电源，使串联变流器及并联变流器处于待机状态。

与其它电力电子装置类似，UPQC 当中的 IGBT 非常脆弱，必须设计一套行之有效的系统控制方案以保证其可靠安全正常运行，且整个过程对电网而言平滑无冲击，此外在负载投入/切除，负载/系统故障时，也要能够安全运行或者退出。

具体启动流程如下：

- 1) 闭合并联单元的断路器 (SW2, SW3)，将并联变流器接入到电网；
- 2) 闭合储能单元的联动开关 K6、K6*，接入超级电容组；
- 3) 待母线电容充电到 500V 后，闭合限流电阻的旁路开关 K4，切除充电限流电阻；
- 4) 并联控制单元进入直流电容充电模式，将超级电容充电到 780V，之后并联变流器启动结束，自动进入 APF 补偿模式；
- 5) 并联变流器启动后，闭合串联单元的断路器 SW2、SW3，让旁路晶闸管导通运行，之后断开机械旁路开关 SW1，串联单元进入待机旁路运行状态，整个启动流程结束。

4.2.2 系统退出流程

当系统需要退出时需要分两种情况考虑，如果串联单元在旁路状态，具体步骤如下：

- 1) 给串联单元的旁路开关发合闸信号，使串联单元工作到机械旁路状态；
- 2) 在机械旁路开关可靠合上后，断开串联单元的断路器 SW2、SW3；
- 3) 之后断开并联单元断路器 SW4；
- 4) 然后合上直流电容卸荷开关，将直流电容上存储的能量全部释放。

如果串联单元在补偿状态，则为了确保退出过程中滤波电容上不产生太大的放电电流，需要在上述操作之前先按照以下步骤将串联单元切换到旁路状态：

- 1) 将串联补偿电压指令强制为 0；
- 2) 同时开始合上旁路晶闸管；
- 3) 待旁路晶闸管可靠合上后，闭锁串联单元的 IGBT。

- 4) 给串联单元的旁路开关发合闸信号，使串联单元工作到机械旁路状态；
- 5) 在机械旁路开关可靠合上后，断开串联单元的断路器 SW2、SW3；
- 6) 之后断开并联单元断路器 SW4；
- 7) 然后合上直流电容卸荷开关，将直流电容上存储的能量全部释放。

4.3 UPQC 核心算法软件流程图

通过适当的软件控制算法，UPQC 将具有针对电网的电压电流的谐波、负序和无功综合调节功能，它既能补偿电压，又能补偿谐波电流。为确保 UPQC 系统补偿功能完善、运行简洁、高可靠性以及便于软硬件维护，需要对 UPQC 系统策略进行清晰合理地划分。

本设计中控制策略的设计以模块化思想为基础，兼顾系统运行的可靠性和可维护性，采用分层控制思想，将控制策略划分为两个层面：运行状态层级和运行模式层级。UPQC 中需解决的三个关键问题是：电能质量的检测方法、直流侧稳压策略和电能质量补偿控制策略。

UPQC 的补偿控制策略直接影响其对电能质量的补偿能力，本节详细给出了补偿控制思想、原理及补偿控制策略，提出了能在 DSP 上快速运行的控制策略。UPQC 控制策略由，系统设计中将这两部分控制进行模块区分，通过控制系统解耦实现对两个部分的单独控制。其中，在运行状态层级上，控制策略从电网层面展开，包括电网正常运行状态（即 UPQC 被旁路）、UPQC 的切入、补偿运行，到 UPQC 故障、切出。控制策略实现的基本前提是确保设备安装、调试及运行期间不会对电网造成负面影响，同时确保系统完成相应检测、补偿及电能质量调节的各项指标要求。

运行模式层级上，从 UPQC 功能模块角度将系统划分为多个子功能模块，这些功能模块之间没有交集，独立完成系统的独立的功能需求，这些底层的功能模块的并集涵盖系统所有功能元素。功能模块组成控制策略中的底层驱动，虽然彼此没有功能重叠，但可以被不同工作状态调用，用以确定系统实现既定的运行状态所设计的功能。

UPQC 系统运行状态及运行模式对应框图如图 1-2 所示：

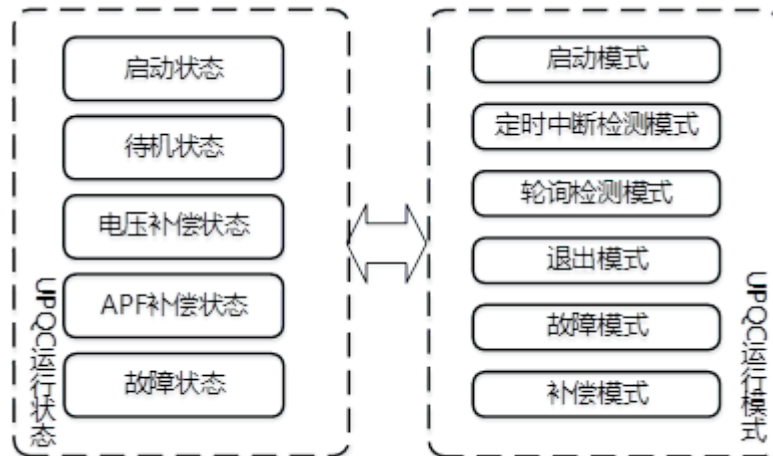


图 4-2 UPQC 系统运行状态及运行模式对应框图

Fig 4-2 Running state of UPQC system and the corresponding block diagram of running mode

4.3.1 运行状态设计

在运行状态层级上，从系统运行角度，将系统分为 5 个工作状态：启动状态、待机状态、电压补偿状态、APF 补偿状态以及故障状态。五个状态包含了系统从启动、补偿功能实现到故障等等全部可预见的工作情况。系统运行过程就是在 5 个状态中按照既定设计目标有序跳转的过程。

启动状态用于启动系统，为运行状态的第一个状态，系统由此开始运行。待机状态为系统正常运行并等待电压补偿或 APF 补偿指令的等待状态，在这工作状态下系统除对自身状态进行周期性检测和状态上报之外，不对电网产生任何补偿或治理动作；UPQC 补偿状态下系统进入电压补偿状态，针对电网的电压跌落进行补偿；APF 补偿状态用于实现电流质量控制，包括动态抑制谐波、补偿无功等。故障状态为系统出现故障后的状态目标，故障可以由多种原因引入，包括电网电压电流特性超出 UPQC 承受范围，UPQC 装置自身故障及手动或远程切出动作控制，进入故障状态后，故障状态为系统的停止状态，为吸收态，系统无法继续跳出或在各状态之间跳转，只能通过手动可远程控制的方法重新进入启动状态。

1) 状态机设计

运行状态转换关系如下图所示。系统首先进入启动状态，启动过程分为手动启动方式和远程网络控制启动方式。系统启动后，根据状态检测结果判断进入待机状态或故障状态，若启动过程中 UPQC 检测出故障信号，则系统直接进入故障状态，若无故障信号，系统自身或环境指标满足工作要求，则系统进入待机状态，切入电网等待补偿指令；在待机状态下，根据系统检测到的电网参数，决定系统进入电压补偿状态或 APF 补偿状态。系统在电压补偿状态下，根据系统轮询自检结果，决定是否进入故障

封锁 DVR 补偿功能/装置投入功能 2) 断路器状态复位, 3) AD 定时采样及其他中断初始化, 4) 软件看门狗初始化, 5) 直流电压自励启动; 通信模块初始化, 包括 LAN 口、CAN 端口的初始化。断路器复位, 确保断路器处于正确的开关状态; 装置故障信号检测, 用于检测 UPQC 装置是否处于正常状态, 若启动过程中有装置状态异常信号, 则系统退出启动状态, 进入故障状态, 若系统故障信号检测无异常结果, 则进入功能模块启动状态; 由于需要并联侧对直流电容进行充电, 因此首先启动 UPQC 并联侧, 接通并联开关 SW4, 直流电容开关 SW5 接通; 启动串联部分, 串联输出开关 SW2, SW3 闭合, 充电电阻旁路开关闭合; 旁路开关 SW1 断开, 系统切入电网; 直流电压自励, 直至电容电压达到设定阈值, 系统进入待机状态。

b) 待机状态

在待机状态下, 系统控制器部分已经进行轮询状态, 一方面对电网进行电压、电流及相伴的监测, 同时对 UPQC 装置本身的工作状态进行监测。

系统进入待机状态后, 首先进行装置故障信号检测, 包括对 IGBT 驱动板故障信号和断路器状态信号等, 当检测到异常信号时, 系统直接进入故障状态, 做及时判断处理同时尽快切出, 防止系统故障对电网产生不利影响; 若检测结果正常, 系统状态良好, 则进行装置参数检测, 其中包括直流电容电压, 并联输出电流, 串联输出电压, 若并联输出电流、串联输出电压, 则系统进入故障状态; 若二者数值正常, 对直流电压进行判断, 低于设定阈值则进入直流电压自励模式, 充电结束后系统返回并重新进行装置参数检测, 直至直流电压进入正常工作范围; 接下来为储能装置进行充电, 系统循环等待直至储能装置充满; 上述条件满足后, 系统进入检测模式, 即进行电网参数检测, 包括系统侧及负载侧电压电流, 若检测结果未超出设定阈值, 则系统返回至待机状态初始阶段, 重新进行上述循环过程; 若检测到电网参数异常, 需要进行补偿, 则根据参数异动类型决定系统进入电压补偿状态或 APF 补偿状态。

c) 故障状态

故障状态下, 系统迅速从电网切出, 同时判断功率器件和相应断路器, 将系统对电网的影响能及自身的损耗降到最低。

进入故障状态后, 系统首先接通旁路开关 SW1, 将系统旁路从电网断开, 保证电网自主运行。接下来对装置进行保护性动作, 系统进入退出模式, 包括封锁 IGBT 脉冲, 合上旁路双向可控硅和机柜开关, 断开并联侧断路器 SW4, 断开串联侧断路器 SW2, SW3, 直流电容能量卸荷; 接下来进入故障模式, 将故障信息上报。至此通过故障状态流程可使系统在发生故障或电网参数超出阈值时, 能在第一时间切出电网, 关断设备, 减小故障对电网和系统造成的损害。

d) UPQC 补偿+超级电容能量充足状态

UPQC 的主要功能之一是对电网电压进行检测和补偿。电压补偿状态流程如下图所示。

系统进入电压补偿状态后,首先计算电压补偿指令,经过 PI 控制调节后得出 PWM 调制信号波形,进行电压补偿输出;补偿输出同时,进行装置故障信号检测,包括 IGBT 驱动板故障信号,断路器状态信号,若检测出故障信号异常,则系统立即进入故障状态;若系统状态良好,则进行装置参数检测,包括直流电容电压,串联输出电压,若串联输出电压超过阈值范围,则返回至 PI 调节处,循环上述过程,若串联输出电压正常,继续检测直流电容电压是否正常,若电压低于设计阈值,则系统进入直流电压自励模式,直至电压上升至设定阈值,系统重新开始计算输出电压指令,并按上述流程运行;若直流电容电压正常,继续对电网参数进行检测,如果有谐波、有功、无功电压补偿需要,即并联侧参数条件超出阈值,则系统进入 APF 补偿状态。若无 APF 补偿需求,则系统将电压检测值与理想值对比,进行补偿结束判断,若检测结果与理想值偏差超出阈值,则补偿未完成,接下来进行储能装置电量检测,若剩余电量充足,高于补偿所需要电压阈值,则返回电压补偿状态初始,重新进行电压补偿流程,或电容电压低于预设阈值,则系统进行待机状态,进行电压补充,并重新检测电网参数,进而进行电压补偿或 APF 补偿;若比较检测结果与理想值比较误差小于预设阈值,则电压补偿结束,系统返回待机状态。

f) APF 补偿状态

UPQC 的另一主要功能是对实现 APF 功能,包括对谐波,有功,无功进行补偿。APF 状态流程如图 5-6 所示。

系统进入 APF 补偿状态后,首先计算电流补偿指令,经过 PI 控制调节后得出 PWM 调制信号波形,进行 APF 补偿输出;补偿输出同时,进行装置故障信号检测,包括 IGBT 驱动板故障信号,断路器状态信号,若检测出故障信号异常,则系统立即进入故障状态;若系统状态良好,则进行装置参数检测,包括直流电容电压,并联输出电流,若并联输出电流超过阈值范围,则返回至 PI 调节处,循环上述过程,若并联输出电流正常,继续检测直流电容电压是否正常,若电压低于设计阈值,则系统进入直流电压自励模式,直至电压上升至设定阈值,系统重新开始计算输出电流指令,并按上述流程运行;若直流电容电压正常;继续对电网参数进行检测,如果有电压补偿需要,即串联侧补偿参数条件超出阈值,则系统进入电压补偿状态。若无电压补偿需求,则系统将谐波,有功,无功检测值与理想值对比,进行补偿结束判断,若检测结果与理想值偏差超出阈值,则补偿未完成,则返回 APF 补偿状态初始,重新进行 APF 补偿流程;若比较检测结果与理想值比较误差小于预设阈值,则 APF 补偿结束,系统返回待机状态。

在此工作状态下，不对串联单元和 DC-DC 变换器的 IGBT 进行控制，它们的状态一直保持启动完成后的初始状态（一般是脉冲闭锁的）。在 DVR 向 APF 过度时串联完成脉冲闭锁。当指令电流超过 APF 补偿容量时，对指令电流进行限幅。限幅按照：先限制无功补偿容量，然后限制谐波补偿容量，最后限制有功电流的顺序，直到指令电流不超过 APF 补偿容量为止（具体的限幅算法有待进一步仿真优化）。并把限幅的情况上报给上位机。即分别上报：负载无功电流超限；负载谐波电流超限；装置有功超限三个信息。

因为 IGBT 驱动板会自带过压过流保护（这个响应速度最快），所以在程序当中没有必要再进行直流电容电压异常升高/直流电容电压欠压/输出电流过流诸如此类的保护功能，因为严重的情况下，它们应该会触发 IGBT 驱动板自带的保护（此部分处理在故障状态中执行），如果没有触发 IGBT 驱动板的保护，说明情况不是很严重，那么应该让 APF 状态继续保持工作，以充分利用 IGBT 的过载能力。况且程序当中对输出指令电流有限幅，对直流电容电压也有一个闭环调节过程，所以出现上述故障情况的可能性也比较小。

g) APF 补偿+超级电容充电状态

（执行 APF 补偿所有的步骤，额外增加 DC-DC 变换器的控制，检测计算出超级电容当前电压与设定值的误差；通过双闭环控制器将该误差信号转换为占空比指令（拟采用带负载电压前馈的静止坐标系下的 PI 调节器）；三角载波 PWM 调制完成占空比脉冲的输出）

在此工作状态下，不对串联单元的 IGBT 进行控制，它的状态一直保持启动完成后的初始状态（一般是脉冲闭锁的）。会对并联单元和 DC-DC 变换器的 IGBT 进行控制。APF 补偿部分的控制算法可能需要进行参数调整，比如：放宽对 APF 吸取有功功率的限幅幅值，修改 APF 直流电容电压闭环 PI 调节器的参数（增大比例系数加快直流电容电压闭环调节的响应速度），不过总体上算法与 6 相同保持不变。DC-DC 变换器采取快速充电算法，采用检测充电电流和超级电容电压的双闭环控制，在超级电容的电压比较低的时候，以最大的充电电流的恒流充电，当超级电容的电压接近设定值时投入积分控制环节，消除静差和防止过充。如果超级电容充电时间超过设定的阈值仍未完成，则退出 APF 补偿+超级电容充电状态返回到 APF 补偿状态，并闭锁超级电容充放电功能，上报：超级电容充电超时故障给上位机。

4.3.2 运行模式设计

运行模式层级上，从 UPQC 功能模块角度将系统划分为多个子功能模块。主要包括启动模式，定时中断检测模式，轮询检测模式，退出模式，故障模式及补偿模式。这些功能模式涵盖系统运行需要的所有功能子模块，每个子模块包含独立的控制算法或控制流程。作为控制策略中的底层驱动，子模块之间彼此没有交集。系统利用既定的逻辑转换关系在运行状态之间转换，同时分时调用这些子模块，实现 UPQC 设计功能。

程序主流程如下图所示：

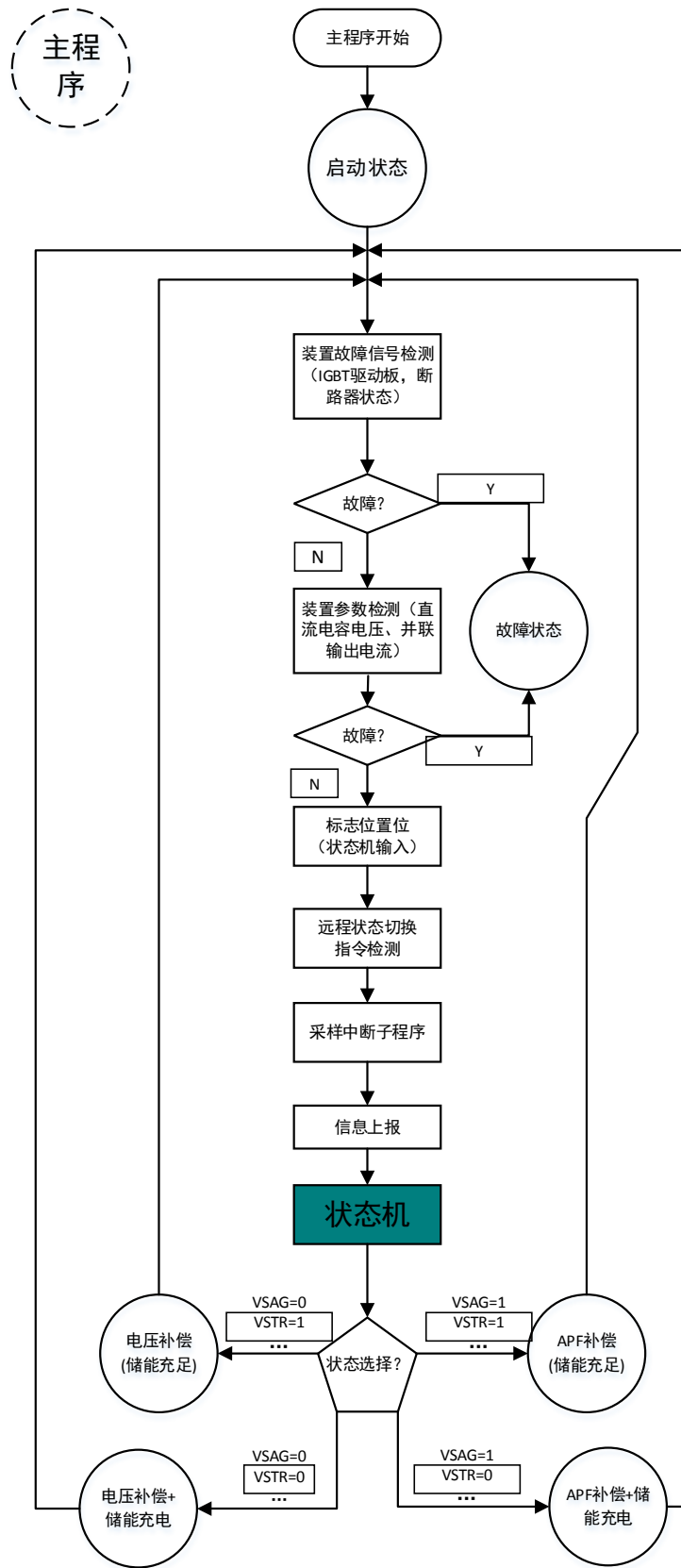


图 4-3UPQC 系统程序框架

Fig 4-3Software framework of UPQC

4.4 串联变压器的励磁涌流抑制策略

投入串联变压器时必须采取适当的措施抑制可能存在的励磁涌流，具体步骤如下：

1) 通过对施加在串联变压器上的电压累计积分，实时估算串联变压器铁芯当中的磁通量，具体计算方法为：设置一个变量，实时累加串联变压器所承受的电压；

2) 每次装置需要投入串联变压器进行电压串补时，需要预先判断一下是否能够立刻投入：如果铁芯当中的磁通量没有达到饱和值，或者虽然铁芯的磁通量已经达到饱和值，但当前需要补偿的电压与铁芯当前的磁通量极性相反，则可以立刻投入串联变压器进行电压串补；否则，需要等待电压补偿指令过零后才能投入串联变压器；

3) 在串补过程中，如果铁芯磁通量累积达到饱和值，则立刻将电压补偿指令强制为 0，直到系统电压过零之后再恢复为正常计算得到的值。

4.5 UPQC 保护体系设计

安全保护体系是 UPQC 实用化的关键技术之一，拟将 UPQC 的安全运行保护系统划分为三个层次，按响应速度从快到慢依次为：IGBT 自身的安全保护措施、异常和故障条件下控制器和 PLC 的紧急保护措施、以及正常工作条件下的预防保护措施。

第一级保护主要由 IGBT 的驱动板来完成。IGBT 驱动板可以通过监测 IGBT 的饱和压降的变化第一时间发现 IGBT 的过压和过流，从而采取一系列措施避免 IGBT 损坏，并把相应的故障信息反馈给控制器和过温保护，能够第一时间对 IGBT 进行保护同时将相应的。

该当 IGBT 发生故障时，装置将立即跳闸退出运行同时封锁脉冲，需要检修排除故障后才能重新启动。系统异常和故障条件下通常只封锁脉冲，若系统只是瞬时性的故障，则 APF 过一段时间后能够自动解锁脉冲，重新投入运行；若系统是永久性的故障，则装置重新投入失败后，将跳闸退出运行。正常运行条件下的预防保护与传统意义上的保护功能不尽相同，它实际上是一些提高 APF 抗扰动能力的措施，从而使得装置能够在保证自身安全的前提下尽可能地充分发挥其补偿作用，包括装置的软启动和输出电流限幅等。

表 4-1 装置涉及跳闸的故障处理机制

Table 4-1 The mechanism of fault handling for the device

故障名	故障检测方法	故障处理
过流	根据隔离插件进来的模拟量，利用比较器判断	FPGA 封锁脉冲， 开出跳闸，DSP
过压		
IGBT 故障	根据光纤的故障返回信号判断	作后备跳闸

	IGBT 故障可作为过流保护的后备	
电流霍尔故障	如果 $I_A + I_B + I_C + I_N \neq 0$ ，则故障	先封脉冲，然后上报故障给 DSP，由 DSP 跳闸
CT 断线		
过压	连续 20 个采样点均大于 980V 认为故障	
欠压	连续 20 个采样点均小于给定值认为故障	
PT 断线	用有效值检测，若某相电压有效值连续 n 次小于基准值则认为故障	
AD 故障	连续 n 次没在规定时间内收到 AD 转换成功信号则故障	
同步故障	32182 对每周期的同步有 400 个点的计数，如果同步到来时该计数小于 392（即 49Hz），则认为同步乱了	
过温	利用温度继电器来检测，开入量为 1 则故障	故障退出
过载	装置输出电流的有效值连续 n 次大于上位机设置的基准值即故障	
通讯中断	上位机，下位机在定时时间内通信中断标志位被置位	上位机尝试连接，下位机直接退出
其他事件	装置无法退出运行，	PLC 处理

4.6 小结

本章详细介绍了 UPQC 系统的运行规则。介绍了系统的框架及运行流程设计。详细介绍系统的切入、切出流程。为实现 UPQC 系统的检测、补偿功能，设计了基于运行状态和运行模式的运行机制，从架构设计上保证系统的高效性。对 DVR 侧变压器励磁涌流的问题进行了分析并提出了磁通量补偿和特殊时刻投入两种解决方法，实验证实了方法的有效性。最后介绍了 UPQC 的保护体系设计，确保系统的运行不会对电网造成影响，同时良好的故障机制也为装置的安全运行提供保障。

流程图附注：

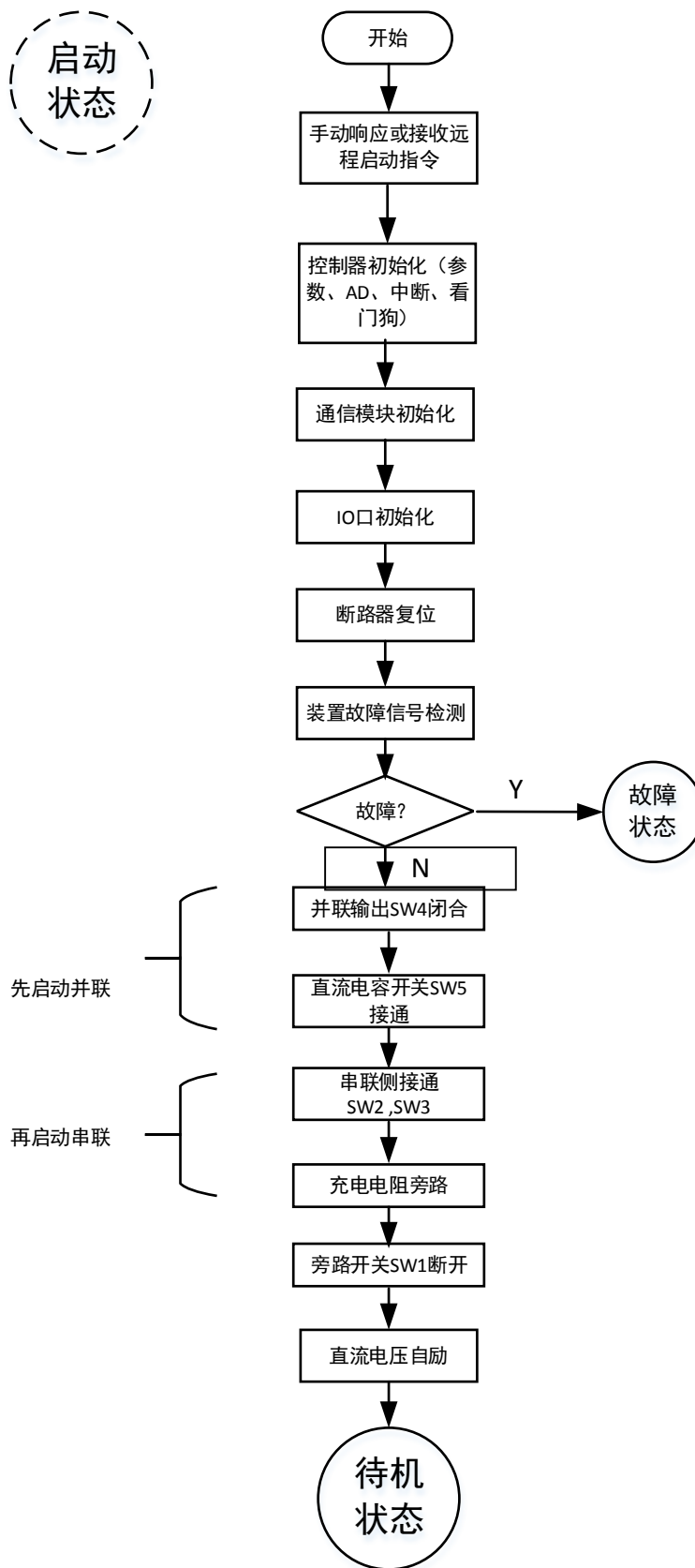


图 4-4UPQC 启动流程
Fig 4-4 Start process of UPQC

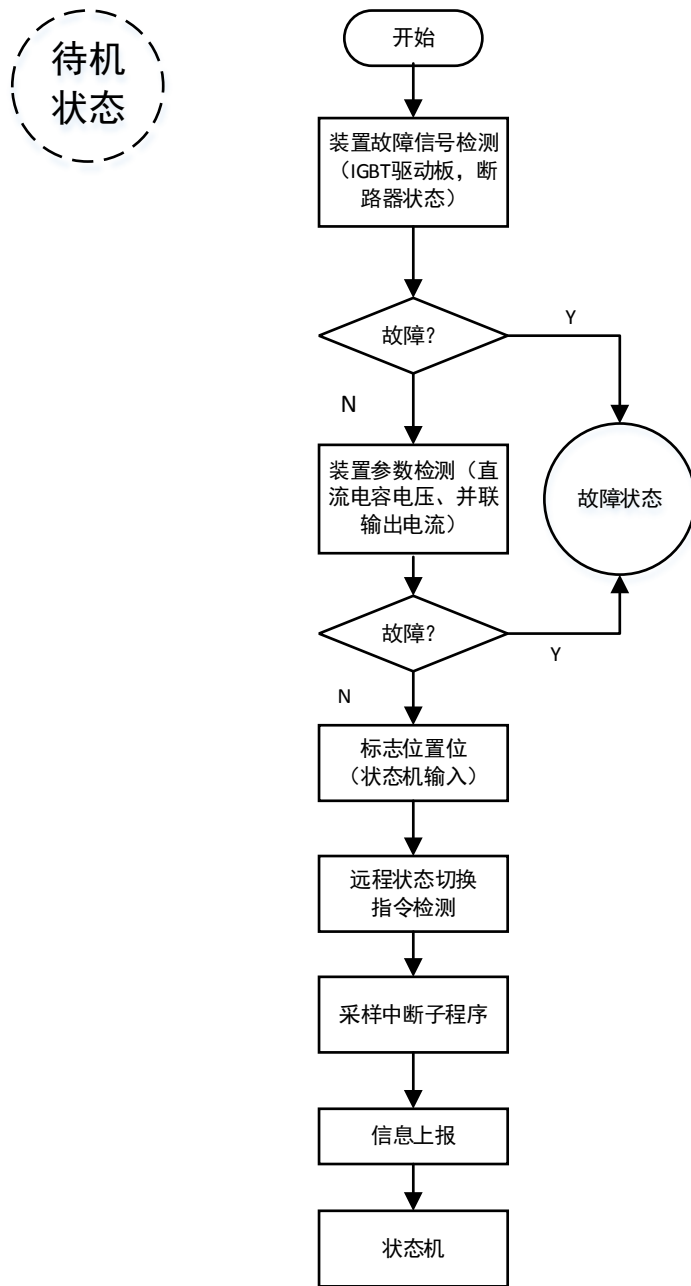


图 4-5UPQC 待机状态流程
Fig 4-5Idle state of UPQC system

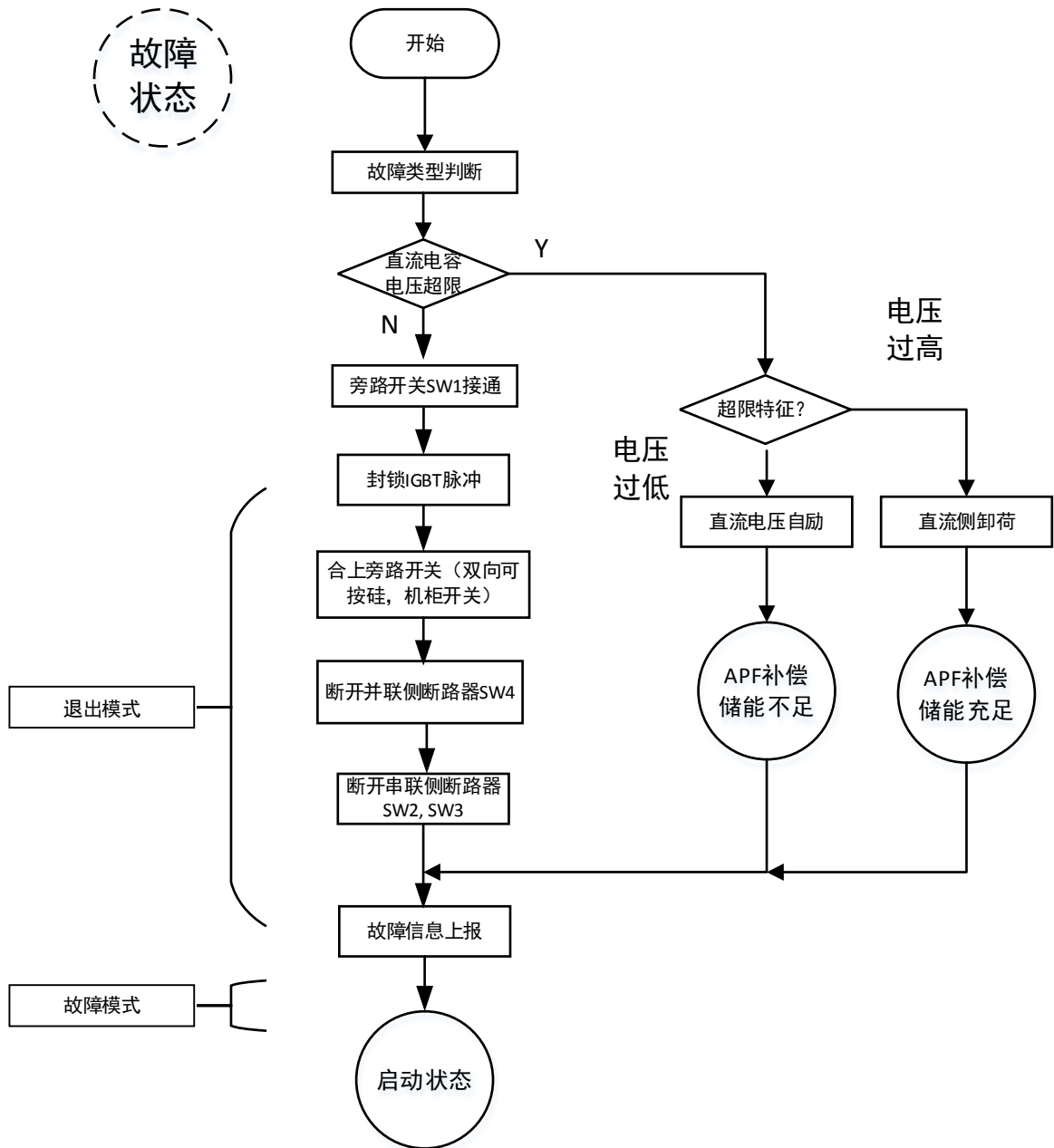


图 4-6UPQC 故障状态流程设计
Fig 4-6Process of fault state for UPQC

电压
补偿
状态

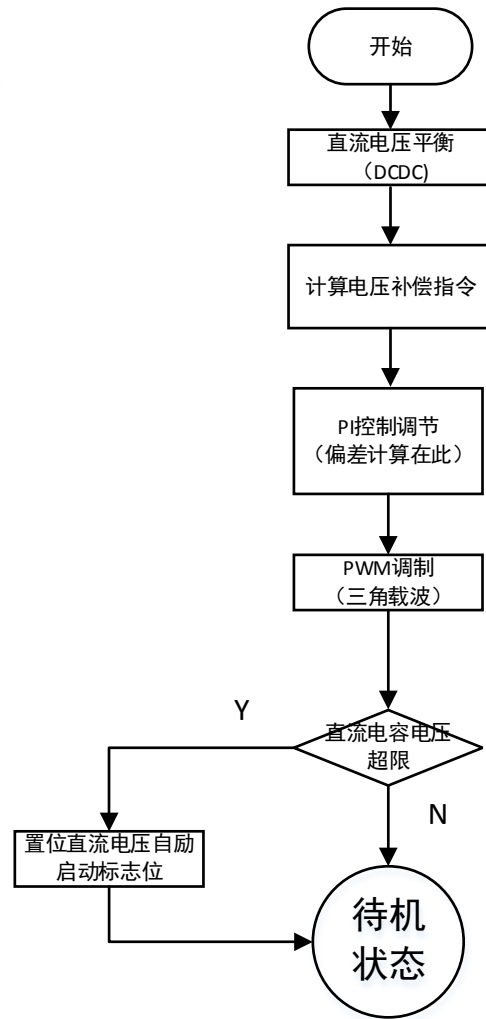


图 4-7UPQC 补偿状态流程设计

Fig 4-7 Compensation process design for UPQC

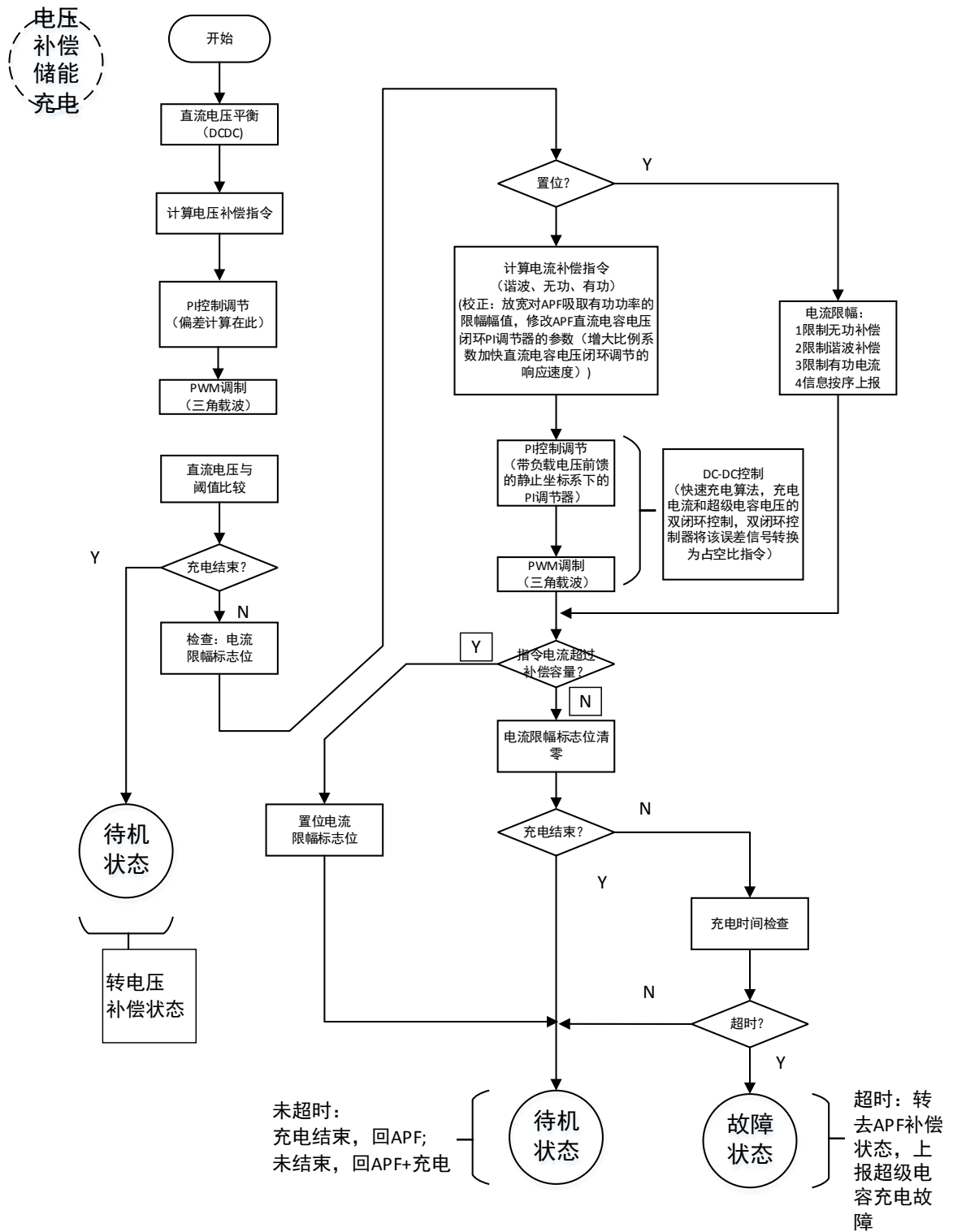


图 4-8UPQC 电压补偿储能充电流程设计

Fig 4-8Design of voltage compensationandEnergy storage charging process for UPQC

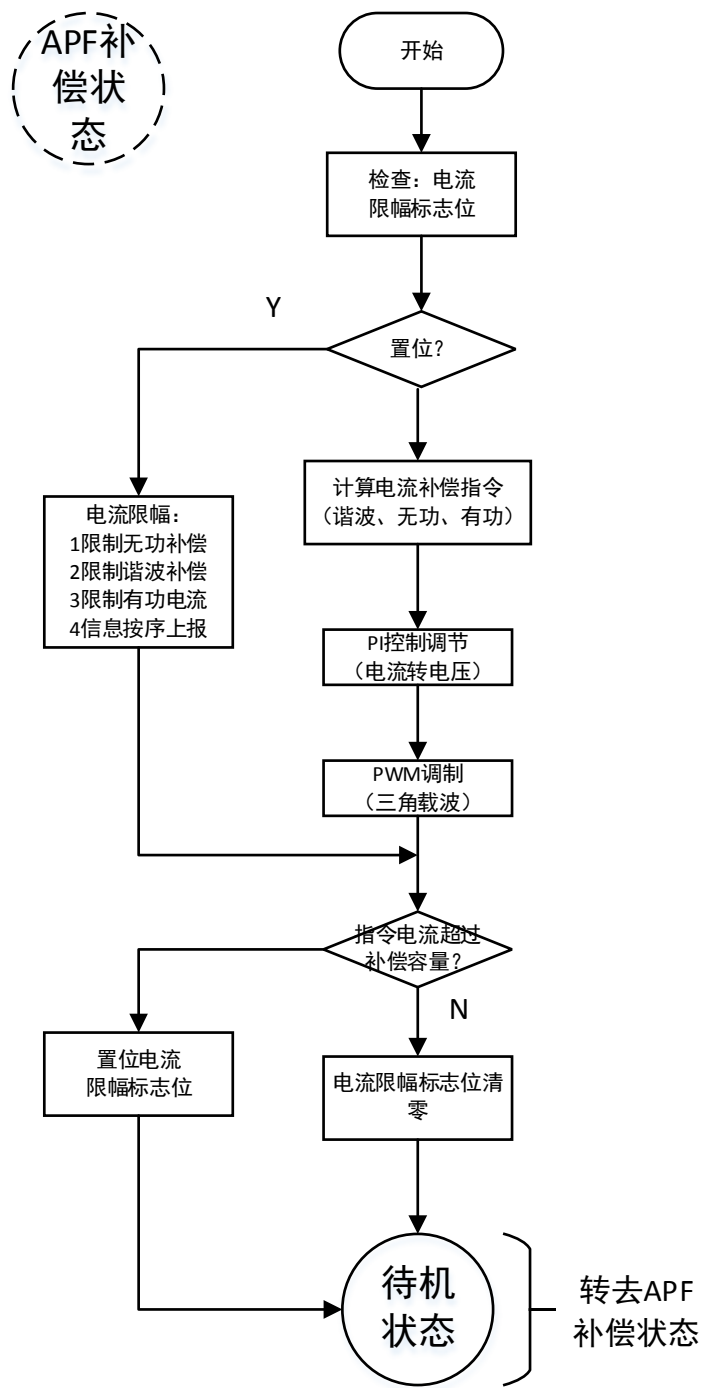


图 4-9UPQC 系统 APF 补偿流程设计

Fig 4-9Design of APF compensation process for UPQC system

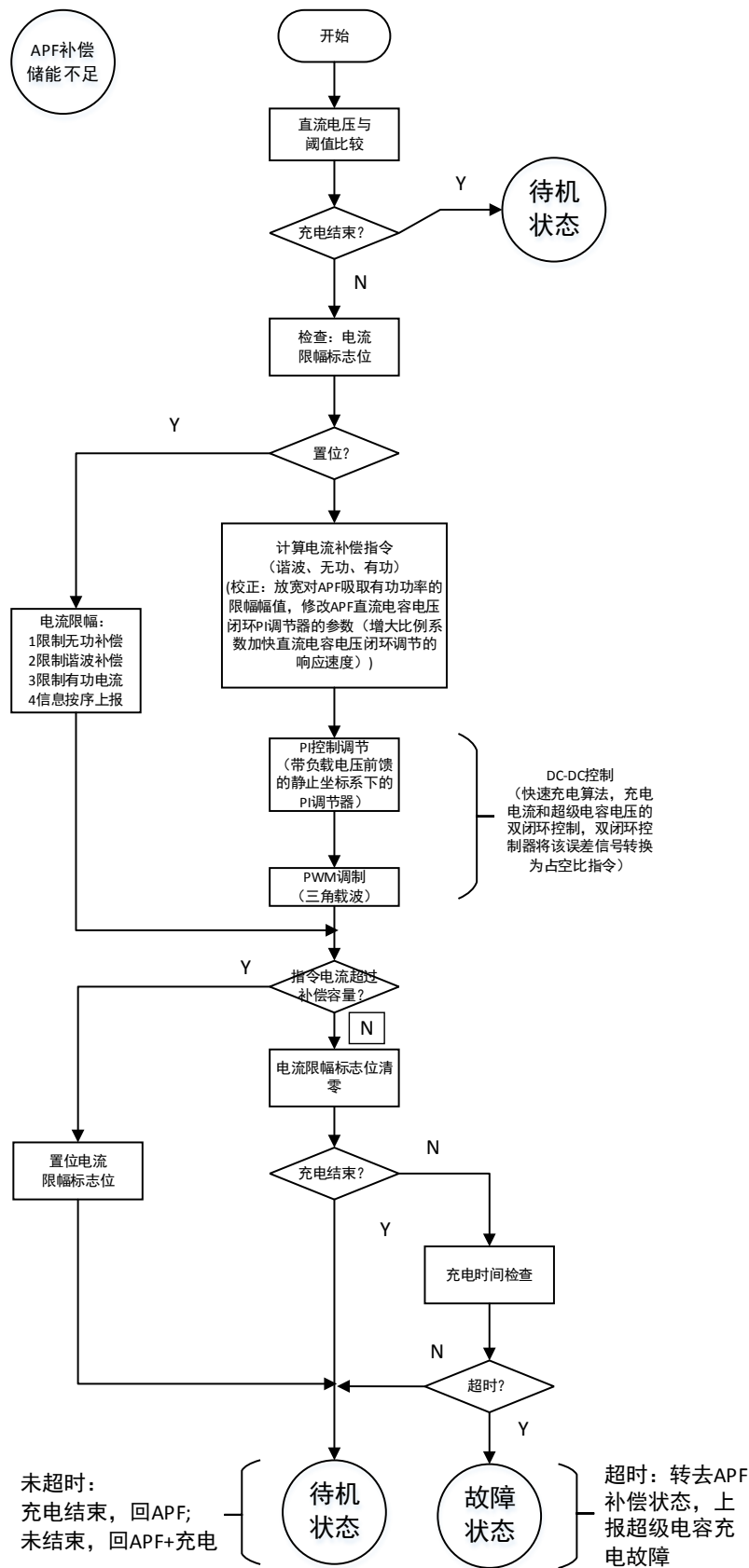


图 4-10 储能不足条件下 APF 补偿流程设计

Fig 4-10 Design of APF compensation process under insufficient energy storage situation for UPQC system

第 5 章统一电能质量调节装置(UPQC)系统设计

5.1 引言

针对深圳高新企业分布的特点及不同企业的不同需求, UPQC 系统设计的主要补偿对象以深圳高新类企业的常用设备为标准, 如空气压缩机(1000KVA 以上级别), 贴片机(70KVA 以上级别), 数控机床等动力终端及其相关联的控制设备等控制终端等。同时, 为了扩大 UPQC 对企业侧需要保护的生产设备的涵盖范围, UPQC 系统的补偿容量以 200~500KVA 的补偿区间为主, 补偿时间设定为 1 秒以上, 三相平衡跌落的补偿能力为 10~35%, 单相不平衡跌落的补偿能力为 10%~50%。因此, 具备上述保护能力的电能质量治理装置可以有效应对空气压缩机等 1000KVA 级设备两台, 70KVA 级贴片机 10~15 台(一条生产线)以上的补偿能力。

根据市场目前流通的 DVR 及 SVG 等电能质量治理装置的有效参数为基准, UPQC 的补偿效率应至少达到 95%以上, 从系统切入切除的时间控制在 5ms 以内, 由此保证 UPQC 不会对系统侧产生任何不良影响的同时又能够瞬时投入并保护负载侧的敏感设备不受任何低电能质量的影响。储能装置的设备采用超级电容模组架构, 由超级电容单体所组成, 容量设定为 100~250KVA, 总静电容量可达到 4 法拉以上, 同比铁锂电池具有短时大电流放电, 高可靠性和极长的使用寿命。变电设备由并联侧三相全桥以及串联侧单相 H 桥架构所组成, 总容量的设计可达到连续 1 秒有效输出 240 千瓦有功功率的能力。

表 5-1 UPQC 系统基本规格参数

Table. 5-1 System parameters of UPQC system

类型	参数	备注
直流极储能设备类型	卷绕型超级电容模组(或铁锂电池)	
补偿容量	500 kVA	从成本高度靠两个, 目前的补偿容量比较经济
补偿幅值	10%~35%	三相补偿
	50%	单相补偿
补偿时间	1 s	可根据实际成本调整为 500ms 或 2s~
补偿效率	≥95%	
反应时间	≤5 ms	

总静电容量	800 mF	792 mF, 如超级电容作为储能装置的情况
总电池容量	400 Ah	如铁锂电池作为储能装置的情况
直流极额定电压	800 V	根据补偿容量计算的设定值
直流极电压波动范围	445V ~ 800 V	
直流极额定电流	300 A	根据补偿容量计算的设定值
功率元件参数		
逆变器容量	240 kW × 1 s	
逆变器开关频率	10 kHz	
交流侧额定出口电压	800 V	变压器副边侧
交流侧额定输出电流	110 A	单相
PWM 变换器 直流侧电压	800±5% V	
PWM 变换器 直流侧额定电流	300 A	
额定并网频率	50 Hz	
温度范围	-20~50 °C	因为地处南方室内, 因此零下可以不必考虑
防护等级	IP42	

5.2UPQC 总体结构

统一电能质量治理装置 (UPQC) 由变压柜, 变电柜及控制与开关柜组成, 变压柜主要承担将逆变器交流侧电压以一定变压比降压后注入系统侧的功能; 变电柜由储能柜和功率元件柜构成, 储能柜用容纳摆超级电容模组, 各模组之间通过直流母排 (铜排或铝排) 的形式互相连接; 控制与开关柜由控制器, 工控机, 各种传感器及断路器接触器组成, 控制器负责整台机器的补偿运算和逻辑运算; 工控机负责和外界的通讯及电能质量一体化平台的信息交换; 传感器包括霍尔电压传感器、霍尔电流传感器、温度传感器和湿度传感器等; 断路器和接触器则用于 UPQC 的各种保护机能。各功能柜的位置及主要部件示意图请参考图 5-3:

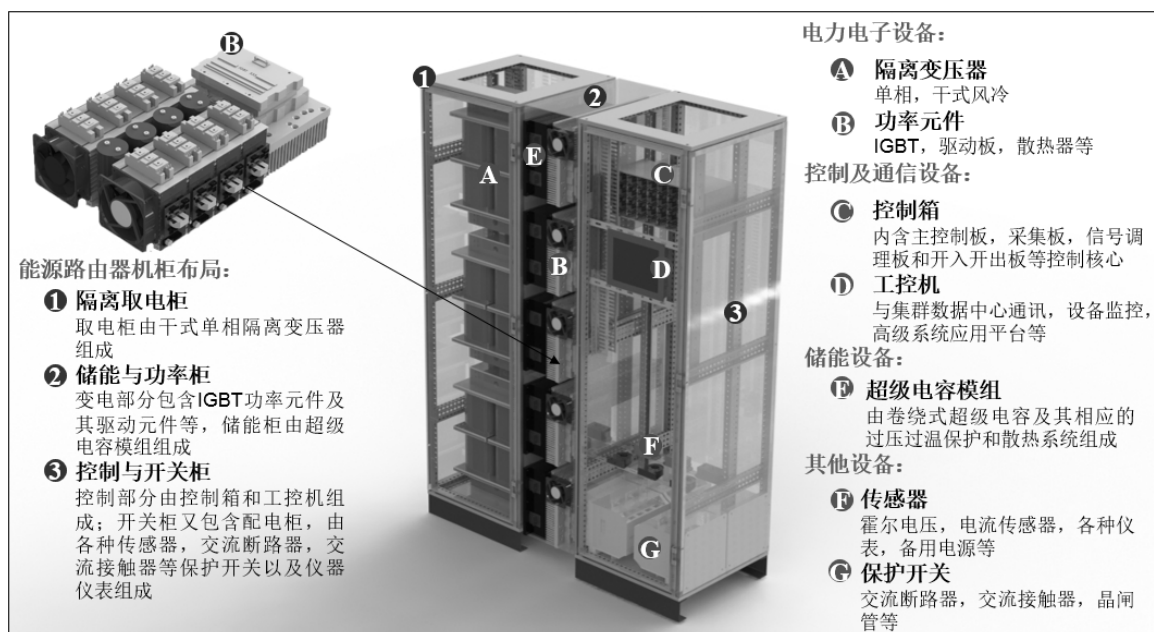


图 5-1 UPQC 系统控制柜框图

Fig 5-1 Control cabinet and design for UPQC system

主电路如图 5-1 所示，采用三相补偿式 UPQC 主电路拓扑结构（串联侧有源电力滤波器靠近系统侧，并联侧有源电力滤波器靠近负载侧的方式），功率元件采用单极式结构，由电压源型逆变器构成。当负载侧需要补偿电压暂降，三相电压不平衡及滤除电压谐波的时候，串联侧的有源电力滤波器（APF）工作在逆变状态，并联侧有源电力滤波器（APF）工作在整流状态，由直流极储能电容的能量向系统侧输送有功功率补偿负载侧电压不足的成分，并在逆变器交流侧设置低通滤波器（series LPF）滤除电压谐波；当需要校正负载侧的功率因数，补偿无功电流，负载侧谐波电流及电流不平衡的时候，并联侧有源电力滤波器（APF）工作在逆变状态，由直流母线侧储能电容的能量向系统侧提供无功电流支撑补偿负载侧所需要的无功电流。

串联侧 APF 功率单元采用单相 H 桥模块，并联侧 APF 功率单元采用三相全桥模块的形式。其中，串联侧的低通滤波器（LPF）用于阻止串联侧功率元件的开关频率谐波注入系统侧电网，而并联侧的一阶滤波器（RC）和电感线圈则是用于滤除功率元件开关的高频谐波。在一阶滤波器中，阻尼电阻器可有效避免逆变器开关频率（滞环带宽）的共振。

5.3 UPQC 控制系统结构

UPQC 的控制系统由主控制器，模拟信号采集板，I/O 信号调理板，继电器板和电源板构成，具体如图 5-2 所示。其中，IO 信号调理板又分 I/O 信号输入板和 I/O 信号输出板，具备调理开入开出信号、驱动 IGBT 驱动板和 GTO 驱动板的功能。

1) 总体架构

如图 5-2 所示，主控制器采用 DSP，协处理器采用 FPGA 的架构，分别执行控制算法和控制单元。

主控制器的核心设计，首先考虑的是运算性能和快速的逻辑处理能力，DSP 成本低，低功耗，高性能的处理能力以及总线分布结构使其在运算领域上具有得天独厚的优势。如 DSP 不仅在一个指令周期内可完成一次乘法和一次加法，且程序和数据空间分开，可以同时访问指令和数据；在通讯方面，DSP 强大的外部通信接口（SCI、SPI、CAN 等）便于构成庞大而又复杂的控制系统。但由于 DSP 的 I/O 接口数量非常有限，所以扩展性相对较低，且大量的 I/O 信号控制会消耗 DSP 很多的系统资源。另一方面，FPGA 具有体系结构和逻辑单元灵活、集成度高以及适用范围宽等特点，同时兼容了 PLD 和通用门阵列的优点，可实现较大规模的电路，I/O 信号控制等，编程也非常灵活。因此本装置采用 DSP 作为主控制器运用于算法计算，FPGA 作为协处理器用于逻辑控制和 I/O 管理及扩展的架构。

主控板控制器职能划分：

DSP 实现算法，计算占空比，软件保护，实时通讯，录波功能；

DSP 实现与工控机，之间的信息交互；

FPGA 实现定时器功能，PWM 输出功能，I/O 管理功能，硬件保护功能。

其中，主控制器共做四块板卡，如图 5-3 所示：IGBT 驱动板（IPM）、核心板 + 信号调理 IO 板、继电器 + 传感器与保护板、DC 电源板。

主控制器共做四块板卡，如图 5-3 所示：IGBT 驱动板（IPM）、核心板 + 信号调理 IO 板、继电器 + 传感器与保护板、DC 电源板。其中 IGBT 驱动位于 PCS 装置上，其它板卡置于控制机箱内。与主控板一起置于控制机箱中，以插槽的形式通过背板走线互联。

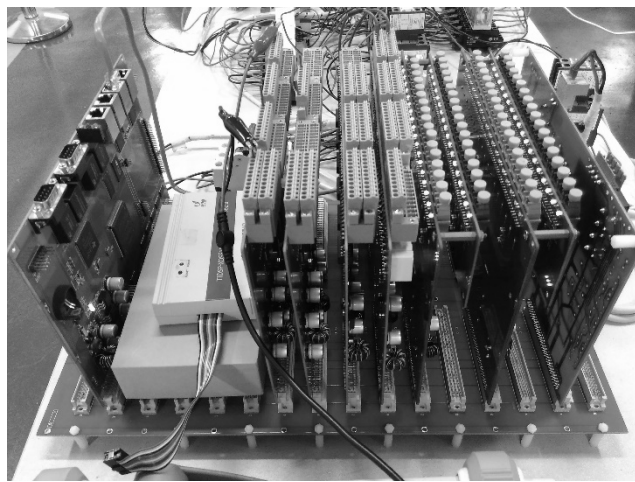
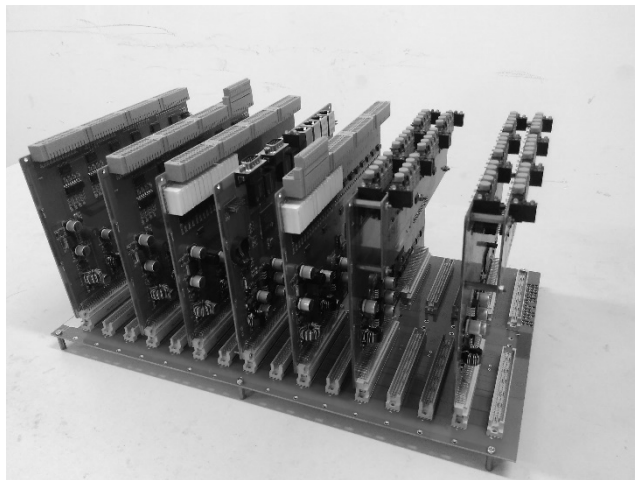
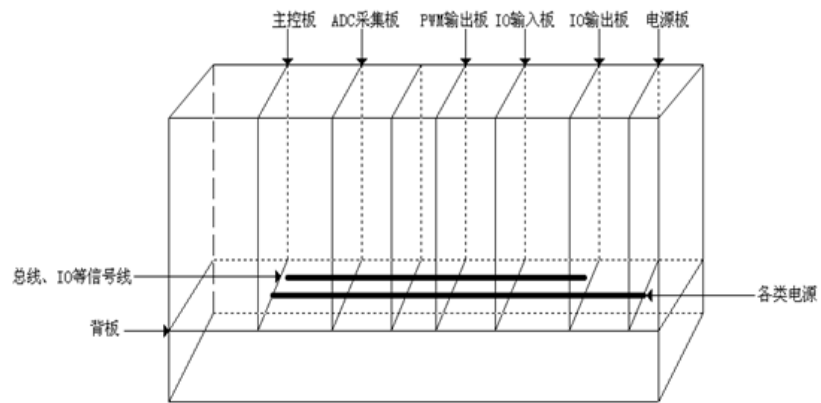


图 5-2 UPQC 系统控制器设计

Fig 5-2 Controller design for UPQC system

板卡

之间的通信信号以及各类板卡所需的电源都在背板上流过。表 2.1 为背板各类信号线和电源线的定义以及各类功能板连通的线路。

其中“√”：表示需要连通；

“-”：表示不需要连通；

“O”：表示针对此功能板为输出口；

“I”：表示针对此功能板为输入口；

“I/O”：表示针对此功能板为输入输出口；

“OC”：表示集电极开路输出口；

“DS-O”：表示可选择输出口；（所谓可选择表示用硬件拨码开关进行选通。）

表 5-2 背板总线及其他控制信号表

Table 5-2 Back board bus and diagram of other control signals

板卡→ 信号↓	线 数	CPU	AD	PWM	DO	DI	说明
数据	16	I/O	I/O	I/O	I/O	I/O	D15-D0, 为 CPU_BOARD 上 DSP 的数据总线, 对每块板卡是双向信号, 用于传输数据
地址	20	O	I	I	I	I	A19-A0, 为 CPU_BOARD 上 DSP 的地址总线, CPU_BOARD 输出, 其他板卡为输入, 用于地址译码
控制总线	6	√	√	√	√	√	RD、RW、WE、RST、CS7、CS0, CPU_BOARD 输出的 DSP 控制总线, 其他板卡为输入, 用于锁存数据以及系统复位
CLK	1	O	-	I	-	-	CPU_BOARD 输出, PWM_BOARD 为输入, 用于同步多组 PWM_BOARD 的信号输出
PWM 封锁	32	I	-	I	I	DS-O	DIN_BOARD 输出, 对 CPU_BOARD、PWM_BOARD、DO_BOARD 为输入, 用于判断故障时, 紧急封锁输出
CAP 信号	6	I	O	-	-	-	ADC_BOARD 给 CPU_BOARD, 用于判断过零点以及确定控制周期时刻点
AD Sync	1	O	I	-	-	-	CPU_BOARD 给 ADC_BOARD, 用于同步多组 ADC_BOARD 的 ADC 采集
AD Ready	4	I	DS-O	-	-	-	ADC_BOARD 给 CPU_BOARD, 用于判断 ADC 采集完成读取数据的标志
GPIO	8	O	I	I	I	I	CPU_BOARD 输出, 其他板卡输入, 此为冗余设计, 后期考虑 CPU_BOARD 可以用 GPIO 方式控制外扩功能板
INT	8	I	DS-O	DS-O	DS-O	DS-O	CPU_BOARD 的中断输入, 其他板卡可通过拨码开关选择连通, 以外部中断的方式通知 CPU_BOARD 处理事件
INT*	1	I	OC	OC	OC	OC	CPU_BOARD 的中断输入, 其他板卡为集电极开路输出, 都可发出中断请求
+5V	15	√	√	√	√	√	各类板卡的 5V 电源供电, 所有板卡都需要 5V
AD±15V	6	-	√	-	-	-	ADC_BOARD 的±15V 调理电路供电, 只有 ADC_BOARD 使用此±15V
系统 GND	27	√	√	√	√	√	所有板卡的电源地, 此电源地应为 5V 和 AD±15V 的负端

+24V	9	-	-	-	√	-	24V 电源正端供电, 只有 DO_BOARD 使用此 24V
隔离 GND	9	-	-	-	√	-	24V 电源负端。注意与上面的系统地不连通, 是彼此隔离的。
预留 3.3V	3	√	√	√	√	√	以防止板卡之间 3.3V 不平衡, 正常情况下不使用。
DSP JTAG	8	√	-	-	-	-	CPU 的 JTAG 信号引致背板。
FPGA JTAG	11	√	√	√	√	√	FPGA 的 JTAG 和 AS 烧写引脚引致背板
未用	1						
总线数	192						

2)主要板卡功能:

CPU_BOARD 板:

在此控制器中, CPU_BOARD 作为主设备, 通过总线的方式访问 ADC_BOARD、PWM_BOARD、DIN_BOARD、DOUT_BOARD 等从设备。CPU_BOARD 可以主动的轮询其他从设备, 也可以接到其他从设备的中断信号再去有目的的轮询。

CPU_BOARD 收集 ADC_BOARD 数据以及 DIN_BOARD 数据, 内部经过处理后, 将处理结果送给 PWM_BOARD 以及 DOUT_BOARD 输出。从而到达一个闭环控制的目的。

CPU_BOARD 通过地址总线锁定各类功能板的访问地址, 只要保证每个访问地址在 DSP 空间有对应而且唯一对应就可以。各类功能板卡根据规定的访问地址, 将数据存放到此, CPU_BOARD 就可以进行访问或者 CPU_BOARD 将数据存放到规定的访问地址, 其他功能板卡就可以在此地址读取数据。所以可以将各类板卡看似 SRAM。

CPU_BOARD 可以通过 6 路 CAP 捕捉口采集信号的频率或者中断响应处理。

CPU_BOARD 可以将数据通过 RS232、RS485、CAN、LAN 送给其他设备。

ADC_BOARD 主要作用:

- 1、 最主要作用就是采集模拟量;
- 2、 可以通过选择采样电路的焊接, 进而采集电压信号或者电流信号, 具体请参照焊接表格;
- 3、 可以对电压信号进行放大处理或者跟随处理;
- 4、 可以对模拟信号过零点检测;
- 5、 可以对模拟信号的过零信号倍频处理, 具体请参考焊接表格;
- 6、 可以通过拨码开关选择多组 ADC 采集板的 READY 信号输出;
- 7、 可以通过拨码开关选择 IO 输出功能与 CPU_BOARD 通讯;
- 8、 可以通过拉低 XTOINT 信号与 CPU_BOARD 通讯;

首先介绍第 2 项和第 3 项, 如果此时需要采集电压信号, 那么不用焊接采样电阻, 直接将电压信号连接至 DB50 接口处即可。如果此时需要采集电流信号, 那么需要焊接相应的采样电阻, 采样阻值也可以进行选择焊接。

放大倍数主要取决于当下传感器输出幅值，结合 ADC 输入范围进行放大电阻的阻值选择。举例说明，若目前采集高压范围是-311 至+311，传感器输出范围为-2V 至+2V，那么，此时不用焊接采样电阻，同时将信号需要经过放大 5 倍，再输入到 ADC 中。

第 4 项是针对需要检测过零点设计的，由于传感器的差异，此 ADC_BOARD 设计了过零比较电路和过 2.5V 比较电路，二者的区别在于前者传感器范围是+ -5V 或者+ -10V，后者的传感器范围是+ - 5V，2.5V 相当于参考 0 点。如果选择前者，那么需要进行相关器件的焊接，如果选择后者，也需要进行相关器件的焊接，具体焊接请参照焊接表格。ADC_BOARD 共设计了 6 路过零比较，其中 3 路可选过零比较或者过 2.5V 比较，而且后续加入了倍频电路，另外 3 路单纯为过零比较电路，也没有经过任何倍频电路。

第 5 项，倍频共有 3 种选择，分别是 6.4KHZ，12.8KHZ，25.6KHZ。通过选择焊接电阻进行选择，具体可参考焊接清单。

DOUT_BOARD 资源：

CPU：采用了 ALTERA 的飓风 3 系列的 FPGA- EP3C25F324C8N。

高速光耦：22 路，采用 HCPL-3120，具有最高 1A 的驱动能力，以便长距离驱动。

光耦继电器：32 路，采用 AQW280，可以驱动 350V，120ma 的负载。

共 54 路 DO 接口（包括 22 路高速和 32 路低速），采用 DB-50 座子，引脚标号如图 2.6 所示。此处 DOUTX 表示低速 IO 口，PWMX 表示高速 IO 口

DIN_BOARD 资源与接口介绍

CPU：采用了 ALTERA 的飓风 1 系列的 FPGA- EP1C3T144C8；

光耦隔离：72 路 DI 信号全部经过 PC874 进行隔离；

功能类型：其中 32 路作为 PWM 封锁故障引脚，未经过 DIN_BOARD 的 FPGA 内部，直接送给 PWM_BOARD 或者 DOUT_BOARD。另外 40 路是普通的 IO 输入接口，经过 DIN_BOARD 内部做好逻辑再发送给 CPU_BOARD；

输入电压范围宽：由于采用了 ULN2804 三极管基极接收，故电压可以为 5V-30V；

共 72 路 DI 接口，采用 DB-50 座子，引脚标号如图 2.7 所示。

1、可以接受 32 路 PWM 封锁信号，将此信号隔离处理后直接送给 PWM_BOARD、DOUT_BOARD、CPU_BOARD；

2、可以接受 40 路普通的 5V-30V 范围的电平信号，若外部信号为高，FPGA 接收也是高。

3、可以通过拨码开关选择 IO 输出功能与 CPU_BOARD 通讯；

4、可以通过拉低 XTOINT 信号与 CPU_BOARD 通讯；

PWM_BOARD 功能介绍

PWM_BOARD 主要作用：

1、接收 CPU_BOARD 数据，产生相应的输出波形，PWM_BOARD 光纤只能作为输出使用；

2、接收 DIN_BOARD 的 PWM 封锁信号，控制 PWM 禁止输出；

3、外扩 3 块 PWM 子板，即外扩 54 路 PWM 输出或者光纤输入；

4、PWM 子板都可以通过 IO 选择电阻来选择 FPGA 的 IO 控制；

5、可以通过拨码开关选择 IO 输出功能与 CPU_BOARD 通讯；

6、可以通过拉低 XTOINT 信号与 CPU_BOARD 通讯；

为了使 PWM 输出具有绝对的同步性，从而设计了扩展 PWM 子板，PWM 子板与 PWM 板采用 50 芯贴片接插件连接。上图为 PWM 子板 PCB 示意图。

PWM 子板作用：

1、PWM 子板通过选择器件的焊接，可以作为光纤输入板也可以作为光纤输出板；

2、PWM 子板作为光纤输入板时，所有 18 路必须同时作为输入；

3、PWM 子板作为光纤输出板时，所有 18 路必须同时作为输出；

5.4UPQC 监控系统

装置的控制器(MC)和 PLC 分别通过 LAN 和 RS232/RS485 与工控机通信

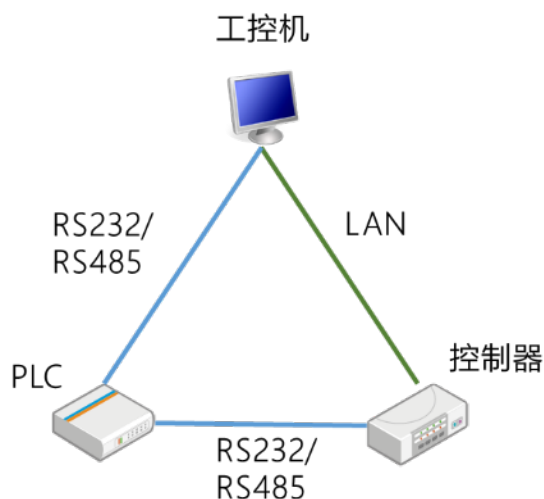


图 5-3UPQC 监控系统架构

Fig 5-3 Diagram of Monitor system architecturefor UPQC system

5.4.1 通信机制

1. 控制器(MC)与上位机监控系统之间的通信,以标准 TCP/IP 协议作为基础协议,并在各自逻辑中实现私有通信协议,以实现装置信息的上报与上位机监控系统控制命令的下发,并以私有通信协议为基础完成应用层的功能实现。

2. PLC 与上位机监控系统之间的通信，以 RS485/232 协议作为基础协议，并在各自逻辑中实现私有通信协议，以实现 PLC 状态信息上报与上位机监控系统控制命令的下发，并以私有通信协议为基础完成应用层的功能实现。

3. 数据分类

在与装置通信过程中存在如下 4 类信息(Infomation)。

1) 装置录波文件(file)

用于装置向上位机传送存储装置在发生电压跌落的时候的波形数据文件
文件数据格式参考附录二。

2) 装置状态信息(status)

用于向上位机传递装置的各信号开关量检测数值等状态信息
来源有：控制器，PLC
文件数据格式参考附录三。

3) 装置消息信息(message)

用于装置向上位机传递装置的警报，告警，以及普通消息等信息。
来源有：控制器，PLC
文件数据格式参考附录四。

4) 控制命令(command)

用于上位机向装置发送控制指令信息。包括业务指令与数据设置查询指令
上述 4 类数据分别通过各自特定的 Socket 进行发送与接收。

5.4.2 数据结构

装置的录波文件采用如下数据结构封装：

```
Wavedata{
    long head          //4byte 包头固定为'ELOP'
    int purelength     //2byte 净荷包长 sizeof(Wavedata)-6
    int padding0       //2byte 字节对齐
    char[] metadata    //录波元数据
    float[][] data     //录波数据
}8+ Bytes
```

装置的状态数据采用如下数据结构封装

```

Status{
    long head//4byte 包头固定为'ELOP'
    int purelength//2byte 净荷包长 sizeof(Status)-6
    int padding0//2byte 字节对齐
    long long timestamp; //8Byte 时间戳
    char type;//1Byte 装置类型
    char[] padding1;//7byte 填充保留字段
    struct{
        ....
    }// UPQC 状态数据
}24+sizeof(DVRStatus/UPQCStatus)Bytes

```

其中 UPQC 的状态数据结构如下:

```

UPQCStatus {
    sign char out_temp//外部温度
    char out_humi//外部湿度
    sign char in_temp0//内部温度 0 号柜
    char in_humi0//内部湿度 0 号柜
    sign char in_temp1//内部温度 1 号柜
    char in_humi1//内部湿度 1 号柜
    sign char in_temp2//内部温度 2 号柜
    char in_humi2//内部湿度 2 号柜
    sign char in_temp3//内部温度 3 号柜
    char in_humi3//内部湿度 3 号柜
    char system_status//系统运行模式, 为枚举型变量
    char[] igbt_status[10]//储能模组状态
    char[] power_status[10]//功率元件状态
    char[] cur_sensor[14]//电流传感器
    char[] vol_sensor[7]//电压传感器
    ...
} //54+byte

```

装置的告警数据采用如下数据结构封装:


```

Alarm{
    long head//4byte 包头固定为'ELOP'
    int purelength//2byte 净荷包长 sizeof(Alarm)-6
    int padding//2byte 字节对齐
    long long timestamp; //8Byte 时间戳
    char type//1Byte 装置类型
    char[] padding1;//7byte 填充保留字段
    int atype//2Byte; 告警类型
    int source//2Byte 告警源
    char[] reserved//36Byte 保留字段
} //64Bytes

```

装置的消息信息采用如下数据结构封装

```

Message{
    long head//4byte 包头固定为' ELOP'
    int purelength//2byte 净荷包长 sizeof(Message)-6
    int padding0//2byte 字节对齐
    long long timestamp; //8Byte 时间戳
    char type//1Byte 装置类型
    char[] padding1;//7byte 填充保留字段
    int mtype//2Byte; 消息类型
    char[] reserved//38Byte 保留字段
} //64Bytes

```

装置控制命令采用如下数据结构封装

```

Command{
    long head//4byte 包头“ELOP”
    int purelength//2byte 净荷包长 sizeof(Command)-6
    int padding//2byte 字节对齐
    int fn//2Byte; 功能码
    Int afn;//2Byte 子功能码
    Long len;//2Byte 后续的数据长度单位字节
    Long[] data//2Byte 后续实际数据
    .....
} //16+ Bytes

```

FN 按位使用，从高到低位。

15 位-12 位：

0000-0011	UPQC 控制
0100-0111	DVR 控制
1000-1011	UPQC 查询、设置
1100-1111	DVR 查询设置

5.5 UPQC 产品机实验

本节介绍 UPQC 产品相关实验情况。实验内容包括：APF 侧系统电流检测，谐波及无功补偿；DVR 侧系统电压检测、电压跌落补偿；监控实验。

5.5.1 中断信号设计

中断信号为 AD 板 AD7606 通过驱动 FPGA 发出的采样结果信号，为保证 DSP 板快速响应 AD 中断，减小延时导致的检测和补偿衰减，DSP 板测减小的 AD 信号的滤波电容设计。此外，系统目前需要两块 AD 板配合使用，因此，在 DSP 板的 FPGA 上对两块 AD 的中断信号进行了同步处理，使得 DSP 只在两块 AD 板返回中断信号的时间误差小于中断信号为低电平的时间时才会有效。

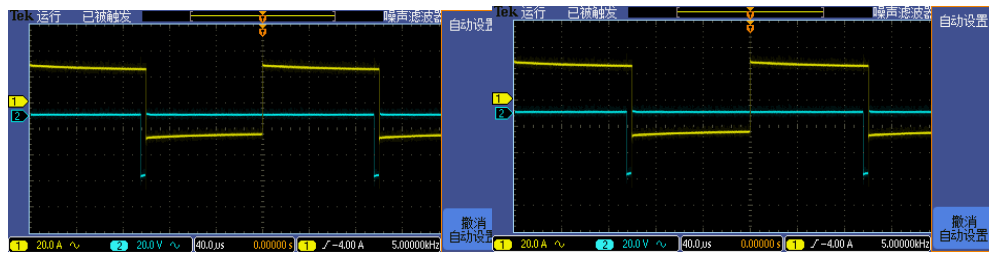


图 5-4UPQC 中断信号测试

Fig 5-4Interrupt signal testfor UPQC system

5.5.2UPQC-APF 部分实验

1) 电流跟踪实验

原理图：

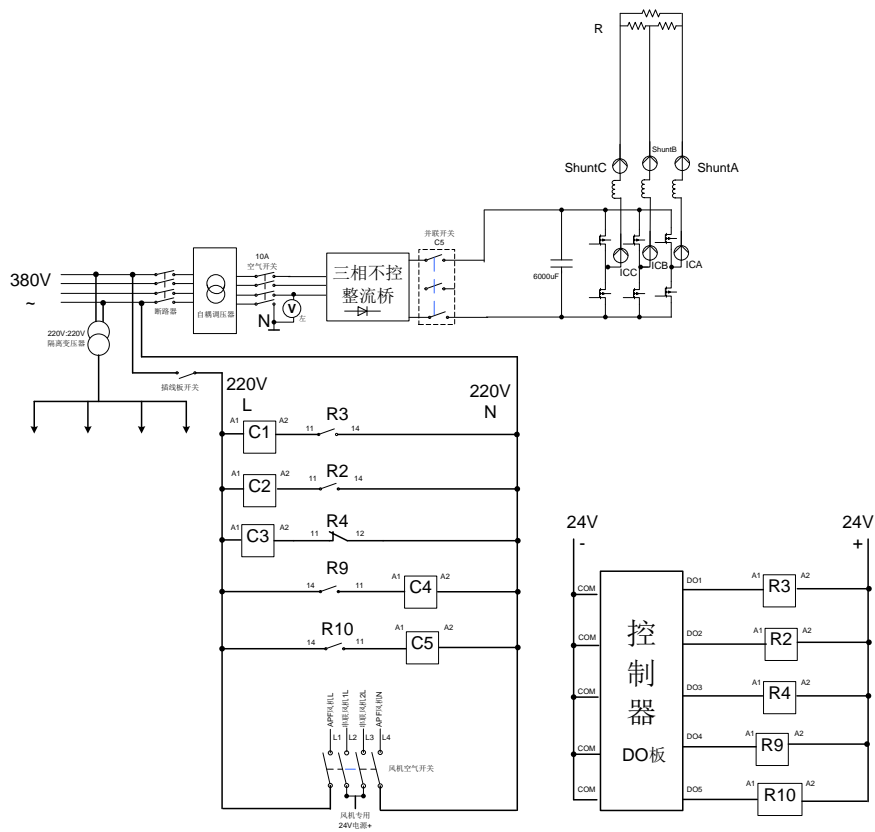


图 5-5 电流跟踪实验原理图

Fig.5-5 Schematic diagram of current tracking experiment

实验控制方法：380V 电压通过调压器和不控整流器对直流电容进行充电，电阻的参数为 37Ω ，直流电容为 $6800\mu\text{F}$ ，电抗器为 10.6mH 。通过调节调压器来改变直流电容的电压，直流电压设置在小于 120V 做开环控制，直流大于 120V 是做电流为 1A 的电流跟踪，直流电压在 $120\text{V}\sim 200\text{V}$ 之间逆变器输出的电流为恒定的 1A 。

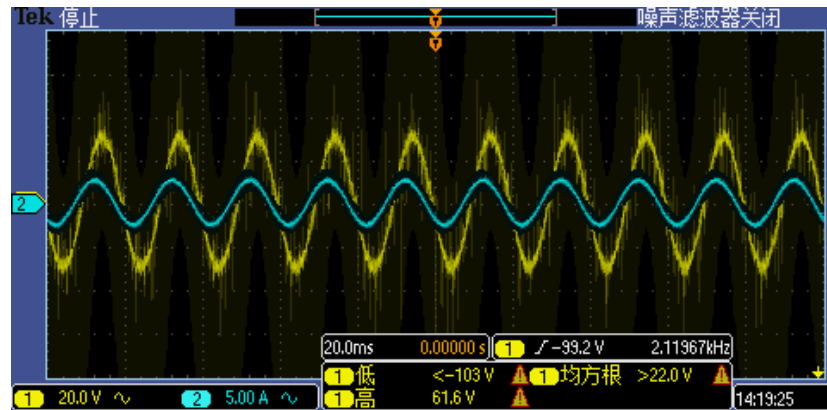
表 5-3 电流跟踪实验

Table5-3 Current tracking experiment

实验名称:	电流跟踪:
实验目的:	APF 按照指令电流输出控制验证。是 APF 侧谐波电流补偿、无功补偿和超级电容稳压的控制基础
实验条件:	380V 电压通过调压器和不控整流器对直流电容进行充电，电阻的参数为 37Ω ，直流电容为 $6800\mu\text{F}$ ，电抗器为 10.6mH 。通过调节调压器来改变直流电容的电压，直流电压设置在小于 120V 做开环控制，直流大于 120V 是做电流为 1A 的电流跟踪，直流电压在 $120\text{V}\sim 200\text{V}$ 之间逆变器输出的电

	流为恒定的 1A
实验结果:	有效跟踪
存在问题:	跟踪精度和反应速度
解决方法:	采样频率提升

实验波形:



a 开环电流波形



b 电流闭环的波形

图 5-6UPQC 电流跟踪实验

Fig 5-6Current tracking experimentfor UPQC system

波形说明: ①开环电流波形是在直流为 80V 时的波形, 电流钳绕五圈, 黄色为电阻上的电压波形, 蓝色电流波形。②电流闭环波形是在直流 160V 时的波形, 黄色为电阻上的电压波形, 蓝色电流波形。

2) 谐波检测实验

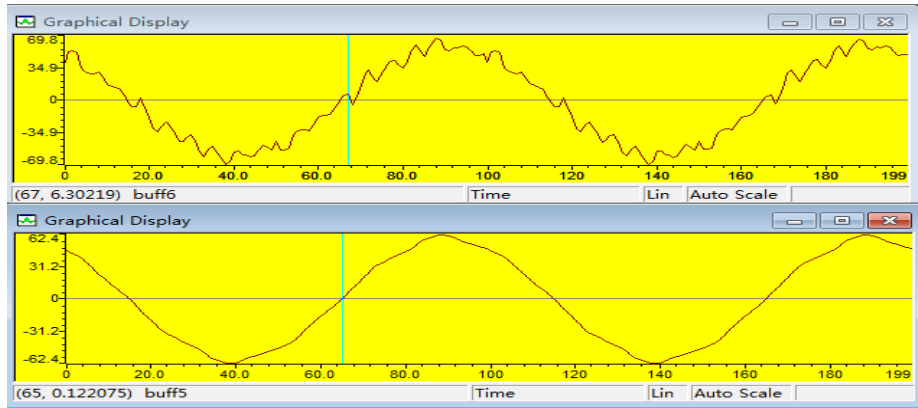
表 5-4 谐波检测补偿实验

Table5-4Harmonic detection and compensation experiment

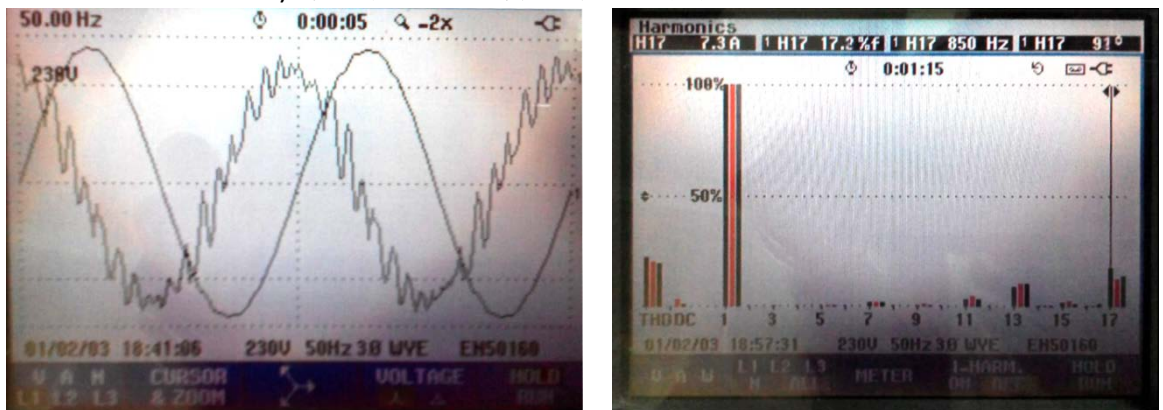
实验名称:	谐波电流检测
实验目的:	用实验样机模拟 SVG, 用以当作产品机的负载, 进而测试产品机功能。
实验条件:	直流给定 350V, 以电容为负载,

实验结果:	表明算法没有问题
存在问题:	11, 13, 17 次谐波补偿效果不明显
解决方法:	提高系统采样频率

APF 分次补偿 (总的 AD 计算时间为 53uS), 下图分别的电容波形和计算出要补偿的电流波形



a) 负载电流和计算出来的要补偿的电流



b) FLUKE 分析仪显示结果

图 5-7UPQC 特定谐波补偿实验

Fig 5-7 Specific harmonic compensation experiment

总结, FLUKE 测量结果: 5 次 7 次补偿效果明显。

谐波检测算法效果良好, 但由于受系统采样和补偿频率限制, 高效谐波补偿效果不够明显。提升的有效办法是提升采样和补偿频率。

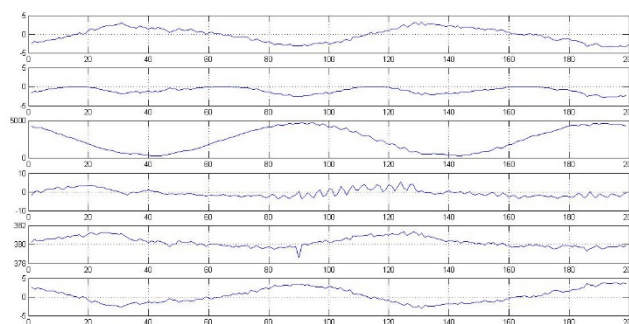
3) 直流稳压实验:

表 5-5 APF 稳直流电压实验

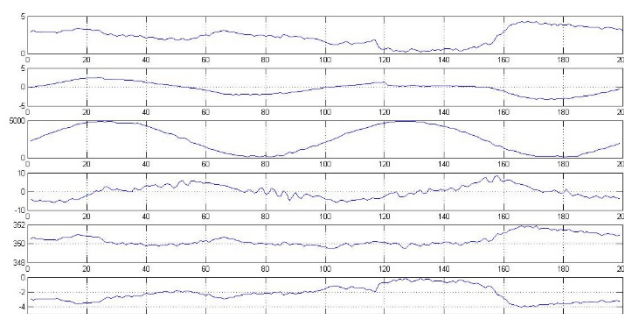
Table5-5 Diagram of DC stabilized voltage test for super CAP

实验名称:	APF 稳直流电压实验:
实验目的:	用实验样机模拟 SVG, 用以当作产品机的负载, 进而测试产品机功能。
实验条件:	直流给定 350V

实验结果:	图 b 稳压效果好于图 a。跟踪效果不理想，误差方差较小，但均值较大； A、PI 输出的误差值；B、指令电流 C、占空比 D、跟踪电流 E、直流稳压结果
存在问题:	PI 参数选择影响稳压效果
解决方法:	优化 PI 参数



(a)



(b)

图 5-8UPQCAPF 稳直流电压实验(超级电容)

Fig 5-8 Diagram of DC stabilized voltage test for super CAP

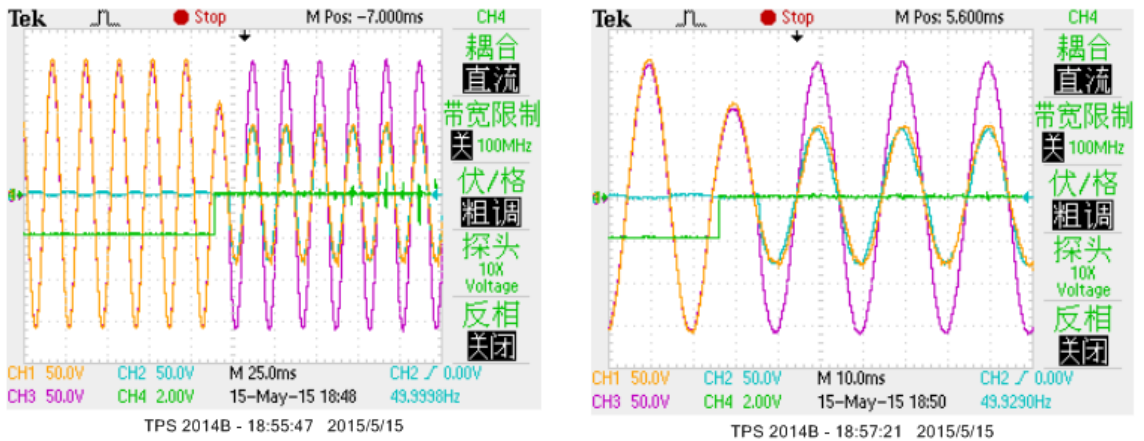
APF 不带任何负载，APF 空载启动稳直流电压，看其是否能够稳定住直流电容电压，系统电压也可以调至 50V 左右或者更低；然后逐步提高系统电压，直至最终可以在额定系统电压下空载启动(具体试验接线如下图所示，装置投入和切除过程如下：
1) 启动控制器，之后合上主电路开关；2) 上位机给控制器下达投入命令，控制器合上 C5 开关，通过限流电阻给直流电容充电；3) 当充电到调压器交流电压的 1.3 倍左右时，合上限流电阻两边的并联开关，旁路限流电阻；4) 投入直流电容电压闭环调节，直流电容电压软启动充电，直到直流电容电压稳定到设定值。5) 调试过程中，可以将一些需要观察的变量存放到片外 Ram，由 DSP 通过网口发送到上位机。6) 装置要退出时，由上位机给控制器下达切除命令，控制器收到命令后，控制器断开 C5。

5.5.3 UPQC-DVR 侧部分实验

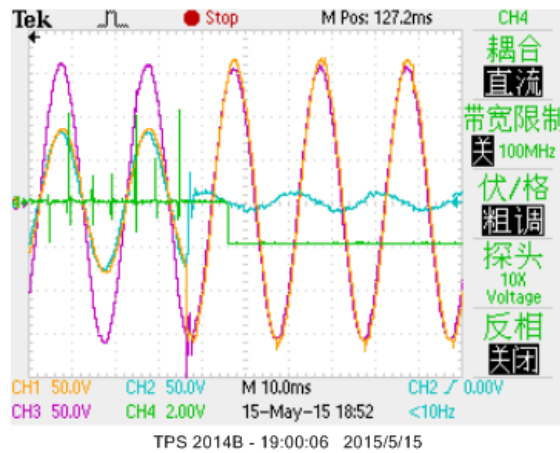
表 5-6 过零点补偿实验

Table5-6 Zero crossing compensation experiment

实验名称:	过零点补偿实验
实验目的:	在系统电压发生跌落时，及时检测出电压跌落，并在跌落后的下一个过零点处输出补偿电压
实验条件:	200V 线电压条件下进行实验
实验结果:	能够完成补偿
存在问题:	
解决方法:	



(A) 过零点补偿 (B) 放大波形



(C) 电压恢复

图 5-9 过零点补偿实验

Fig.5-9 Zero crossing compensation experiment

A、B 是电压跌落时波形，C 电压恢复时波形，ch1 是系统电压，ch2 是 DVR 输出电压，ch3 是负载电压，ch4 电压当前状态。0 是跌落，-3 是正常

表 5-6 非过零点补偿实验

Table5-6Non zero crossing compensation experiment

实验名称:	非过零点补偿实验
实验目的:	在系统电压发生跌落时，及时检测出电压跌落，并在跌落后的立即输出补偿电压
实验条件:	200V 线电压条件下进行实验
实验结果:	能够完成补偿
存在问题:	
解决方法:	

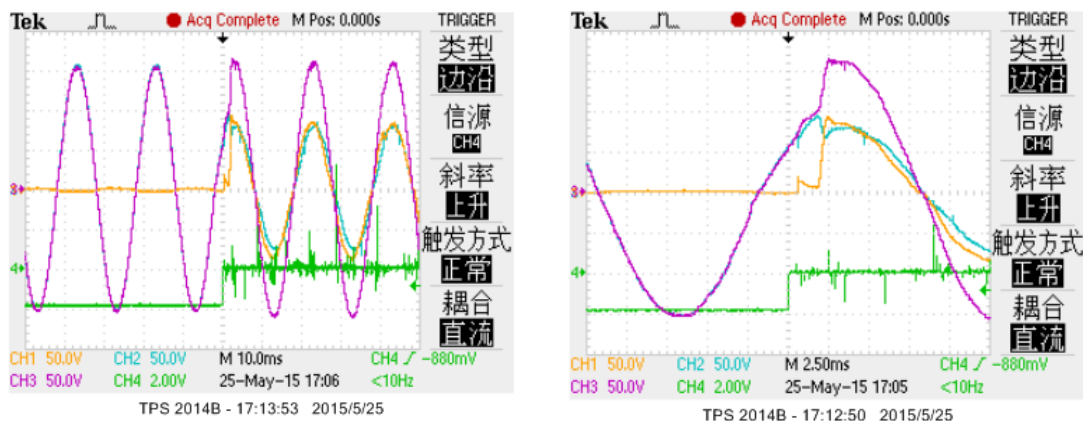


图 5-10 非过零点补偿实验

Fig.5-10Non zero crossing compensation experiment

4) 励磁涌流实验

由于变压器存在剩磁，DVR 侧投入时如果瞬时磁通量与剩磁磁通量方向一致，则投入瞬间变压器电抗骤降，导致变压器饱和。由此带来的问题是 IGBT 输出电流瞬时过大，容易损坏 DVR 侧 IGBT 单元。

表 5-7 实验 1

Table5-7 Experiment 1

实验名称:	励磁涌流检测实验
实验目的:	去除励磁涌流和规避励磁涌流
实验条件:	200V 线电压条件下进行实验
实验结果:	可准确计算变压器电抗动态变化规律
存在问题:	
解决方法:	

下图是计算出的瞬时励磁电抗：

利用公式

$$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

通过 DSP 采样 Δt 时间内的电流和电压变化率，可求出变压器在 IGBT 投入时刻的电感变化值。计算结果如下图所示：

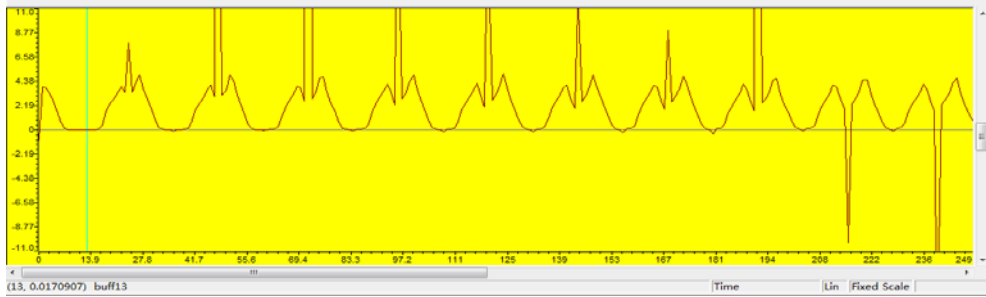
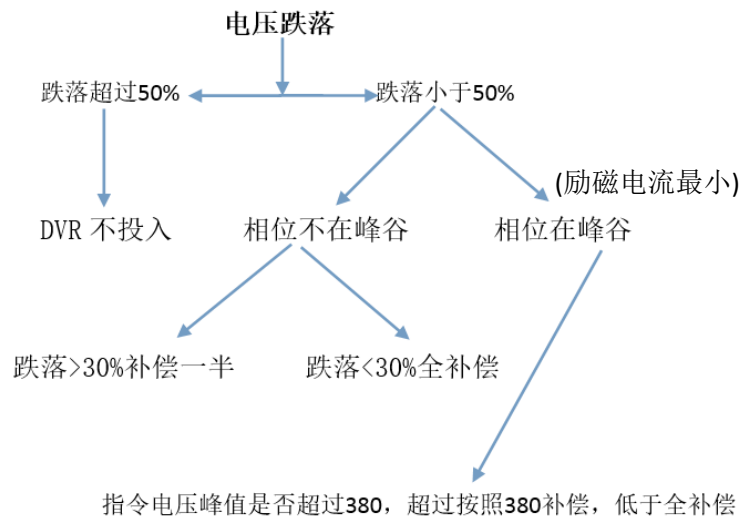


图 6-14 励磁涌流导致的变压器电抗变化分布

Fig.6-14 Transformer reactance variation distribution caused by inrush current

解决上述问题可以从两个角度来考虑，一是想办法消除变压器中的剩磁（通过测量瞬时电感值求解并联电容），二是选择合适的投入角度，有效利用剩磁。前者的优势在于不会影响 DVR 的响应速度，可保证 DVR 在任意时刻投入，但抵消剩磁需要控制器对变压器电压积分来计算磁通，同时 DVR 要发出相反电流来消除剩磁，增加系统负担。后者优势在于系统负担小，无需主动消磁，而只需要在适当的时刻切入，但此方法影响系统反应速度，会因剩磁的存在而等待投入时机。项目中采用了如下解决方法：

减小励磁涌流 DVR 补偿规范：



上述方法可有效减小 DVR 工作时，励磁涌流过大对 IGBT 造成损坏，但上述策略的应用也会使 DVR 的补偿能力受到限制。

5.6 小结

基于前言所述分析及仿真，本章介绍了 UPQC 装置的开发情况。首先介绍了系统的总体结构，包括机柜组成、之间的连接形式及各部分主要功能；接下来介绍了 UPQC 控制器结构，详细介绍了主控制器，模拟信号采集板，I/O 信号调理板，继电器板和电源板的主要功能划分和信号关系；接下来介绍了 UPQC 监控系统的设计及关键数据结构。最后详细介绍了 UPQC 产品机实验情况，包括直流稳压，并联侧 APF、串联侧 DVR 补偿的实验结果。

第 6 章 结论

课题主要包括能源互联网、能源路由器及电能质量调节三部分内容，以递进的方式从宏观、核心和关键技术三个方面介绍了不同层次能源问题的解决方案。报告的主要工作包括：

1、能源互联网研究工作

对能源互联网的概况进行了阐述，提出了符合信息物理融合体系的能源互联网架构，并给出了能源路由器的原型设计，通过这种能源路由器可以在现有配电网基础上实现所提出的能源互联网。探讨了能源互联网的发展模式，认为能源互联网的发展应采取革新式和演进式相结合的发展模式。对能源互联网的架构进行分析讨论，并对直流输电在能源互联网中的应用给出了解决方案。

2、能源路由器研究

能源路由器是能源互联网的核心单元，担负着能源互联网中能源-信息双向对等传输功能实现的主要任务。介绍了能源路由器的主要功能，涵盖能源的切换、路由、电能质量调节和大数据应用。对能源路由器发展的两个主要方向：电力电子相关技术和储能相关技术进行了探讨和梳理。介绍了柔性直流输电技术，提出了基于直流输电技术的能源互联网基本模型和能源路由器原型，并对基于此能源路由器的能源互联网应用场景给出了介绍。

3、统一电能质量调节（UPQC）项目开发

全程参与并完成 UPQC 系统的开发。给出了 UPQC 系统的关键参数设计方法，提出了一种 LC 输出滤波器参数范围确定方法，对基于增强型 LCL 滤波器的 APF 模块控制流程进行了建模和稳定性分析，求解了系统稳定的电路参数设计条件。参与设计了 UPQC 系统的框架及运行流程。为 UPQC 系统的检测、补偿功能的实现设计了基于运行状态和运行模式的运行机制，并软件实现了 UPQC 系统程序架构。完成主控制器，模拟信号采集板，I/O 信号调理板，继电器板和电源板的硬件调试、FPGA 驱动编写、下位机程序开发及与监控系统对接的 TCP/IP 通信程序。参与了样机、产品机的硬件搭建、调试及最终检测和补偿实验。

参考文献

- [1] Talluri TT, Van Ryzin GJ. The Theory and Practice of Revenue Management. Heidelberg: Springer, 2004
- [2] Computer Communication Review, 2011, 41(1): 109-114.
- [3] Xu Y, Zhang J, Wang W, et al. Energy router: Architectures and functionalities toward energy internet[C]//Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2011 IEEE International Conference on. IEEE, 2011: 31-36.
- [4] 王一振, 赵彪, 袁志昌等. 柔性直流技术在能源互联网中的应用探讨[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14), 3551-3560.
- [5] Lei X, Lerch E, Povh D, Ruhle O. A large intergrated power system software package NETOMAC[C]. Proceedings of POWERCON' 98, Beijing, China;17~22
- [6] 林闯, 贾子骁, 孟坤. 自适应的未来网络体系架构[J]. 计算机学报, 2012, 35(6): 1077-1093.
- [7] 谢高岗, 张玉军, 李振宇, 等. 未来互联网体系结构研究综述[J]. 计算机学报, 2012, 35(6): 1109-1119.
- [8] 曹军威, 孟坤, 王继业, 等. 能源互联网与能源路由器[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44 (6): 714-727.
- [9] WANG J, MENG K, CAO J, et al. Electricity Services Based Dependability Model of Power Grid Communication Networking [J]. Tsinghua Science and Technology, Special Section on Smart Grid, 2014, 19 (2): 121-132.
- [10] WAN Y, CAO J, ZHANG S, et al. An Integrated Cyber-Physical Simulation Environment for Smart Grid Applications [J]. Tsinghua Science and Technology, Special Section on Smart Grid, 2014, 19 (2): 133-143.
- [11] CAO J, YANG M. Energy Internet - Towards Smart Grid 2.0 [C]. Proc. 4th Int. Conf. on Networking and Distributed Computing, Hongkong, China, 2013.
- [11] CAO Junwei, MENG Kun, WANG Jiye, etc. Energy Internet and Energy Router[J]. Science China Press: Information Science, 2014, 44 (6): 714-727.
- [12] HUANG A Q. FREEDM System – A Vision for the Future Grid [C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010: 1-4.
- [13] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System: The Energy Internet [J]. Proc. the IEEE, 2011,12,17. Page: 133-148.
- [14] XU Y, ZHANG J H, WANG W Y, et al. Energy Router: Architectures and Functionalities toward Energy Internet [C]// Proc. 2011 IEEE Int. Conf. on Smart Grid Communications, 2011: 31-36.
- [15] ZHANG J H, WANG W Y, Bhattacharya, S. Architecture of Solid State Tranformer-based Energy Router and Models of Energy Traffic [C]// Proc. 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, 2012: 1-8.

- [16] KATZ R H, CULLER D E, SANDERS S, et al. An Information-centric Energy Infrastructure: The Berkeley View [J]. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2011, 1 (1): 7-22.
- [17] LaMonica M. A Startup's Smart Batteries Reduce Buildings' Electric Bills, MIT Technology Review [R/OL]. <http://www.technologyreview.com/news/506776/a-startups-smart-batteries-reduce-buildings-electric-bills/>. 2012-11-06.
- [18] VERMESAN O, BLYSTAD L.-C, ZAFALON R. Zafalon A, et al. Internet of Energy – Connecting Energy Anywhere Anytime [C]// MEYER G, VALLDORF J (Eds.). *Advanced Microsystems for Automotive Applications*, Springer-Verlag, 2011.
- [19] PERROD P F, GEIDL M, KLOKL B, et al. A Vision of Future Energy Networks [C]. *Proc. Power Engineering Society Inaugural Conf. and Expo. in Africa*, 2005: 13-17.
- [20] GEIDL M, KLOKL B, KOEPEL G, et al. Energy Hubs for the Futures [J]. *IEEE power & Energy Magazine*, 2007 (1): 24-30.
- [21] GHASEMI A, HOJIAT M, JAVIDI M H. Introducing a New Framework for Management of Future Distribution Networks using Potentials of Energy Hubs [C]. *Proc. 2nd Iranian Conf. on Smart Grids*, 2012: 1-7.
- [22] SCHULZE M, FRIEDRICH L, GAUTSCHI M. Modeling and Optimization of Renewables: Applying the Energy Hub Approach [C]. *Proc. Int. Conf. on Sustainable Energy Technologies*, 2008: 83-88.
- [23] BOYD J. An Internet-inspired Electricity Grid [C]. *IEEE Spectrum*, 12-14, Jan 2013.
- [24] 查亚兵、张涛、黄卓、等. 能源互联网关键技术分析[J]. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44 (6): 702-713.
ZHA Yabing, ZHANG Tao, HUANG Zhuo, etc. Analysis of Key Technologies of Energy Internet[J]. *Science China Press: Information Science*, 2014, 44 (6): 702-713.
- [25] 查亚兵、张涛、谭树人、等. 关于能源互联网的认识与思考[J]. *国防科技*, 2012 (5): 1-6.
ZHA Yabing, ZHANG Tao, TAN Shuren, etc. Understanding and Thinking of the Energy Internet[J]. *National defense science and technology journal*. 2012 (5): 1-6.
- [26] 余贻鑫、秦超, 智能电网基本理念阐释[J]. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44(6): 694-701.
YU Yixin, QIN Chao. *Science China Press: Information Science*. 2014, 44 (6): 694-701.
- [27] 慈松、李宏佳、陈鑫、等. 能源互联网重要基础支撑: 分布式储能技术的探索与实践[J]. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44 (6): 762-773.
CI Song, LI Hongjia, CHEN Xin, etc. Crucial Support of Energy Internet: Exploration and Practice of Distributed Energy Storage Technology[J]. *Science China Press: Information Science*. 2014, 44 (6): 762-773.
- [28] SMARR L, CATLLET C E. Metacomputing [J]. *Communications of the ACM*, 1992, 35 (6): 44-52.
- [29] FOSTER I, KESSELMAN C. *The Grid: Blueprint for a New Computing Infrastructure* [M]. Morgan-Kaufmann, 1998.
- [30] ZHANG L J, ZHANG J, CAI H. *Services Computing* [M]. Tsinghua University Press / Springer Verlag, 2007.

- [31] BUYYA R, YEO C S, VENNGOPALA S, et al. Cloud Computing and Emerging IT Platforms: Vision, Hype, and Reality for Delivering Computing as the 5th Utility, Future Generation Computer Systems [J]. Future Generation Computer Systems. 2009, 25 (6): 599-616.
- [32] HWANG K, DONGARRA J, FOX G C. Distributed and Cloud Computing [M]. Morgan-Kaufmann, 2012.
- [33] CAO J, HWANG K, LI K. Li, et al. Optimal Multiserver Configuration for Profit Maximization in Cloud Computing [J]. IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems, Special Issue on Cloud Computing, 2013, 24 (6): 1087-1096.
- [34] BARHAM P, DRAGOVIC B, FRASER K, et al. Xen and the Art of Virtualization, Proc [C]. ACM Symp. on Operating Systems Principles, 2003: 164-177.
- [35] SHENKER S. Software-Defined Networking: History, Hype, and Hope [C]. Proc. the Conf. on Large-Scale Distributed Systems and Middleware, 2012.
- [36] 周晖, 齐智平. 动态电压恢复器检测方法和补偿策略综述[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 23-29.
- Zhou H, Qi Z. A Survey on Detection Algorithm and Restoring Strategy of Dynamic Voltage Restorer[J]. Power System Technology, 2006, 6: 006.
- [37] 冯小明, 杨仁刚. 动态电压恢复器电压补偿策略的研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(6): 68-72.
- Xiaoming F, Rengang Y. ANALYSIS OF VOLTAGE COMPENSATION STRATEGIES FOR DYNAMIC VOLTAGE RESTORER (DVR)[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 6: 017.
- [38] 孙哲, 郭春林, 肖湘宁, 等. 基于负荷电压的 DVR 补偿策略分析方法及最小能量控制[J]. 中国电机工程学报, 2011 (31): 43-49.
- SUN Z, GUO C, XIAO X, et al. Analysis Method of DVR Compensation Strategy Based on Load Voltage and Minimum Energy Control[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 31: 007.
- [39] Cho Y H, Sul S K. Controller design for dynamic voltage restorer with harmonics compensation function[C]. Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE. IEEE, 2004, 3: 1452-1457.
- [40] 周卫平, 吴正国, 夏立, 等. 基于电容谐波电流抑制的动态电压恢复器控制方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 64-69.
- Zhou Weipin, Wu Zhengguo, Xia Li. Dynamic voltage restorer control based on capacitor harmonic current suppression[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 64-69.
- [40] 陈伟, 石晶, 任丽, 等. 微网中的多元复合储能技术[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 112-115.
- [41] 丁明, 陈忠, 苏建徽, 等. 可再生能源发电中的电池储能系统综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 19-26.
- [42] GBT 19963-2011. 风电场接入电力系统技术规定[S].
- [43] IEEE Std 1547-2003 IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems[S].

- [44] J P Barton, D G Infield. Energy storage and its use with intermittent renewable energy[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(2): 441-448.
- [45] 张步涵, 曾杰, 毛承雄, 等. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 54-58.
- [46] 吴云亮, 孙元章, 徐箭, 等. 基于饱和控制理论的储能装置容量配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 32-39.
- [47] 王成山, 于波, 肖峻等. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 1-8.
- [48] 张坤, 毛承雄, 谢俊文, 等. 风电场符合储能系统容量配置的优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 79-87.
- [49] K Yoshimoto, T Nanahara, G Koshimizu. New control method for regulating state-of-charge of a battery in hybrid wind power/battery energy storage system[C]. Power Systems Conference and Exposition, 2006: 1244-1251.
- [50] 张野, 郭力, 贾宏杰, 等. 基于电池荷电状态和可变滤波时间常数的储能控制方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 34-38.
- [51] 谢俊文, 陆继明, 毛承雄. 基于变平滑时间常数的电池储能系统优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 96-102.
- [52] 刘霞, 江全元. 风光储混合系统的协调优化控制[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 95-100.
- [53] 丁明, 吴建锋, 朱承治, 等. 具备荷电状态调节功能的储能系统实时平滑控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 22-29.
- [54] 张国驹, 唐西胜, 齐智平. 平滑间歇式电源功率波动的混合储能系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 24-28.
- [55] 鲍雪娜, 张建成, 徐明, 等. 基于混合储能的并网光伏电站有功分级控制策[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 115-121.
- [56] S Teleke, M E Baran, A Huang, et al. Control strategies for battery energy storage for wind farm dispatching[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2009, 24(3): 725-732.
- [57] S Teleke, M E Baran, A Huang. Optimal control of battery energy storage for wind farm dispatching[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2010, 25(3): 787-794.
- [58] 洪海生, 江全元, 严玉婷. 实时平滑风电场功率波动的电池储能系统优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 103-109.