

分类号_____

学号 I200922009

学校代码 10487_____

密级_____

华中科技大学
博士学位论文

大型工业企业智能电网构建研究

学位申请人：黎春渥

学科专业：电力系统及其自动化

指导教师：毛承雄 教授

陆继明 教授

答辩日期：2012年5月30日

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Doctor of Philosophy in Engineering

**Research on Construction of Large Scale Industry
Enterprise Smart Grid**

**Ph. D. Candidate : LE XUAN SANH
(Li Chunsheng)**

Major : Power System and its Automation

**Supervisor : Prof. Mao Chengxiong
Prof. Lu Jiming**

Huazhong University of Science & Technology

Wuhan 430074, P.R.China

May, 2012

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权华中科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保 密 ，在 _____ 年解密后适用本授权书。
本论文属于 不保密 。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

华中科技大学博士学位论文

摘要

随着经济社会的发展，人类活动对地球环境产生了巨大的影响，能源短缺、环境污染和气候恶化已成为困扰全球的严重问题。在这样的背景下，发展低碳经济已经成为世界潮流，并正在世界范围内掀起一场涉及经济和社会发展的革命。大型工业企业是中国重要的基础产业部门之一，同时也是中国能耗大户。随着中国现代化进程的加快，中国工业行业得到了突飞猛进的发展。

世界各国积极对电网的发展模式进行思考和探索，以期提高电网运行水平、促进低碳经济发展。智能电网是目前国内外专家学者普遍认同的未来电网发展的主要方向，是提高电网运行能力和推动低碳经济发展的必然选择。根据国际上的实践表明，智能电网不是一个固定的、一成不变的方案，工业企业要根据自己的业务目标和需要解决的关键问题，对智能电网进行裁减和调整，以适应自己的情况；在智能电网建设过程中，工业企业要根据智能电网发展的要求进行有效的改革和调整，为智能电网的发展创造良好的环境和条件。

对于大型工业企业而言，智能电网的发展必然会带动中国工业行业的变革与创新，本文结合当前工业企业现状，构建了大型工业企业智能电网，具体内容包括：大型工业企业智能电网构建框架研究、大型工业企业智能电网基础设施关键技术、大型工业企业智能电网能量优化管理与决策支持系统，储能电站在智能电网中的应用研究。探讨了大型工业企业智能电网建设中接纳风电、光伏发电的应用前景，并针对基于储能的并网永磁同步直驱风力发电系统的特点，提出了一种网侧变换器的模糊功率控制策略，当电网发生故障时，实现风电系统在电网故障情况下的不脱网运行，为电网提供一定的无功功率，有助于电网恢复正常运行。研究目标是实现大型工业企业的节能减排、降低配电网损耗、提高大型工业企业供电电能质量、提高电能转换效率、提高企业的电能利用率和增强大型工业企业的供电可靠性，保证企业安全生产，形成友好环境，并为创建创新性企业做出贡献。

关键词：智能电网；大型工业企业；能量管理系统；储能电站；风电系统

ABSTRACT

With the Development of Economics and Society, People's activities has impacted to the environment of the Earth, caused energy shortage, Environment pollution, climate change creating Global major problems. In this situation, low-carbon (green economy) economy development is becoming the World trend, in the parallel of new developed revolution of World Economics. Large Industrial Enterprise of China is one of the important and basic domains, besides it is also a large energy consumption field.

Some countries have been trying to solve the problem, doing the research about Power Grid model, improving Power grid operation, to meet the Development of low-carbon Economics. Nowadays and in the early future, many Experts and Scholars address that Smart grid is one forward step of developing future Power grid. Improving the efficiency of operating Power Grid to meet the low-carbon Economics is a critical choice. In practical operation, Smart Grid addresses that it is not a fixed Power grid, formulating an invariability of scheme. Industrial Enterprise needs to rely on itself target and requirement solution of key problems to adapt with the present. In the process of designing Smart Grid, Industrial Enterprise should take the advantage and critical techniques of Smart Grid to carry out the most effective adjusting, by reason that Smart Grid is the developed creation contributing for the better environment condition.

For large scale Industrial Enterprise, the development of Smart Grid naturally comes out with the revolution and creation for developing the Chinese Industrial Enterprise. My thesis is based on the present condition of Industrial Enterprise, and trying to construct the Smart Grid model for large scale Industrial Enterprise, the contain includes: research on construction of Smart Grid for Large scale Industrial Enterprise; Key technology and equipments for Smart Grid Industrial Enterprise; Energy management System of Smart Grid Industrial Enterprise; Deploying the storage power station in Smart Grid; new energy and renewable energy resources should join Smart Grid, besides analyzing the operating wind energy system in case of fault, a fuzzy control strategy to regulate the power of converters on the network side is proposed based on the characteristics of directly driven

华中科技大学博士学位论文

wind turbine with permanent magnet synchronous generator. The output reactive current of the converter is derived by the fuzzy control strategy to provide suitable reactive power to maintain the desired voltage after voltage sag.

Research objective is realization energy saving and emission reduction, reducing loss for large scale industry enterprises, improving the electricity transformation, increasing the performance of reinforcement energy, the performance of using electrical energy; guarantee the reliability of power supply and production safety; friendly environment and contribution the new innovation for Industrial Enterprise.

Keywords: Smart Grid; Industry enterprise; Energy management system;
Energy storage station; Wind power system

华中科技大学博士学位论文

目 录

摘要	I
ABSTRACT	II
1 绪论	
1.1 研究背景	(1)
1.2 智能电网研究现状与趋势	(2)
1.3 智能电网的概念及特征	(5)
1.4 中国大型工业企业的发展及当前形势	(7)
1.5 本文的主要工作及章节安排	(11)
2 大型工业企业智能电网构建框架	
2.1 引言	(13)
2.2 大型工业企业智能电网构建框架研究	(13)
2.3 大型工业企业智能电网基础设施关键技术	(15)
2.4 大型工业企业智能电网能量优化管理与决策支持系统	(21)
2.5 本章小结	(24)
3 大型工业企业智能电网能量管理系统框架研究	
3.1 引言	(25)
3.2 大型工业企业能量种类、特点及相互关系	(26)
3.3 大型工业企业能量管理系统概述	(29)
3.4 系统关键模块和技术	(34)
3.5 本章小结	(38)

华中科技大学博士学位论文

4 储能电站在智能电网中的应用研究	
4.1 引言	(40)
4.2 多种储能技术详细介绍	(40)
4.3 储能电站在智能电网中的作用及意义	(54)
4.4 储能电站的拓扑结构	(56)
4.5 储能单元的模型	(56)
4.6 DC/DC 双向变换器结构及其控制方法	(59)
4.7 DC/AC 变换器模型及其介绍	(64)
4.8 本章小结	(69)
5 大型工业企业智能电网接纳新能源	
5.1 引言	(71)
5.2 风力发电, 太阳能发电	(71)
5.3 不对称电网故障下直驱永磁风力发电系统电网侧变换器的模糊功率控制	(74)
5.4 本章小结	(85)
6 全文总结与有待进一步开展的研究工作	
6.1 本文工作总结	(86)
6.2 有待进一步开展的研究工作	(87)
致谢	(88)
参考文献	(89)
附录 1 攻读博士学位期间发表的主要论文	(100)

1 绪论

1.1 研究背景

随着中国经济的高速发展，在创造大量社会财富的同时，消耗了大量的能源。随着经济的进一步增长，中国面对的能源短缺和环境污染问题将更加突出。“十一五”规划明确提出了中国阶段性节能减排目标：到 2010 年中国单位 GDP 能耗比 2005 年下降 20%左右。工业企业是中国能源消耗的大户，工业企业用电量约占全社会总用电量的 85%，其中冶金、化工、电力、有色、建材等 5 个高耗能行业又约占工业用电量的 60%。因此，下大力气解决重点地区、重点行业、重点企业的节能减排问题是搞好“两型社会”建设的关键所在。

“钢铁企业等大型工业企业电网的智能配用电集成技术”2012 年已经纳入科技部智能电网重大科技产业化工程“十二五”专项规划。重点研究配电自动化系统与智能用电信息支撑平台及智能配电网自愈控制系统的集成技术；用电信息采集系统与高级量测系统、智能用电互动平台的集成技术；分布式储能系统优化配置方法和运行控制技术。

智能电网的建设是美国总统奥巴马为应对当前经济危机提出经济刺激计划的措施之一。根据美国《财富》杂志，政府据估计，智能电网技术将使美国能耗降低 10%，温室气体排放量减少 25%，并节省 800 亿美元新建电厂的费用。因此美国政府非常重视智能电网的建设计划，美国能源部长朱棣文宣布，将在经济刺激计划资金中显著增加对智能电网项目的资助力度，将拨款 33 亿美元开发智能电网。

智能电网已受到中国政府的重视，继美国、欧盟之后，中国已启动了智能电网的研究，国家电网公司于 2009 年 5 月提出了建设统一坚强智能电网的战略规划，在青岛召开工作会议上专门就建设坚强智能电网首次开出了具体时间表：2010 年前，完成发展规划的制定，开展关键技术设备研发和试点工作；到 2015 年，在关键技术和设备上实现重大突破和广泛应用；到 2020 年，全面建成坚强智能电网。有消息

华中科技大学博士学位论文

称，智能电网的建设，可能耗资 4 万亿之巨。智能配电网的建设和用户侧智能管理是其中的重要内容之一，其目的不仅在于提高供电质量和可靠性，而且其更广泛的意义在于可将诸多形式的能源集成入网，还可以根据需求控制能量的生产、输配与转换，从而大幅提高能效，实现节能减排^[1-11]。

1.2 智能电网研究现状与趋势

1.2.1 国内外智能电网发展现状与趋势

美国、欧洲、韩国、日本等各国的情况不同，他们智能电网的建设动机和关注点也存在着一定差异。

对于美国来说，主要关注电力网络基础架构的升级更新，同时最大限度地利用信息、计算机技术，实现电网系统智能对人工的替代。主要实施项目有美国能源部和电网智能化联盟主导的 GridWise 项目，2001 年 EPRI 开始发起的 Intelligrid 项目。

欧洲国家对智能电网的主要研究是可再生能源和分布式能源的发展，并带动整个行业发展模式的转变，以及电网需求趋于饱和后提高电能质量和供电可靠性等。欧盟第 5 次框架计划（FP5）（1998-2002）中的“欧洲电网中的可再生能源和分布式发电整合”包括 50 多个项目，分为分布式发电、输电、配电、储能、高温超导体和其他整合项目 5 大类，而且多数项目于 2001 年开始实施并达到了预期目的，被认为是发展智能电网第一代构成元件和新结构的起点，其中主要项目有微网、Dispower 和 CRISP^[12-15]。

1.2.2 美国智能电网研究

近年来，国际上非常重视电网的智能化运行和控制，自美国提出 2030 年智能电网规划后，掀起了智能电网的研究热潮。智能调度技术、可视化技术、快速建模仿真为美国电网运行控制中得到了较为深入的应用。2002 年美国电科院开展能源和通讯系统框架项目研究，这也是世界上第一个智能电网框架研究。2005 年美国能源可靠局和国家能源技术成立了现代电网项目（MGI），以促进输配电网现代化。2006

华中科技大学博士学位论文

年，美国 IBM 公司和全球电力专业研究机构、电力企业合作开发了“智能电网”解决方案。2008 年，在全面努力下，Xcel 能源公司开始引进智能电网技术，并使美国科罗拉多州的 Boulder 市成为第一座智能电网城市，此项目获得了社会广泛关注。同时，美国另一家清洁技术公司 GridPoint 公司研发了智能电网平台，该平台使用数字电网技术，向电力公司提供一种关于分布式能源的智能化网络系统，从而能够控制电力负荷、电力生产、能源存储，并兼顾电力公司、消费者、环境三方利益。

2008 年 9 月 Google 与通用电气联合发表声明对外宣布，他们共同开发清洁能源业务，核心是为美国打造国家智能电网。

2009 年 2 月 4 日，IBM 与地中海岛国马耳他签署协议——双方将建立一个“智能公用系统”，以实现该国家电网和供水系统的数字化。2009 年 2 月 10 日 Google 开始测试名为谷歌电表的用电监测软件，这是一个测试版在线仪表盘，相当于 Google 正在成为信息时代的公用基础设施。该公司还向美国议会进言，要求在建设智能电网时采用非垄断性标准^[16-18]。

1.2.3 欧洲智能电网研究

欧洲各国电力网络运行模式不同，环保、节能减排、低煤经济等是欧洲智能电网的主要动因，因此欧洲国家对智能电网的主要研究是可再生能源和分布式能源的发展。

早在 2001 年，意大利国家就安装和改造了 3000 万个智能电表，建立起了智能化计量网络，可以实现峰谷平电量计量功能，率先实现了智能化。2002 年 5 月 31 日欧盟批准了京都议定书，计划到 2020 年欧洲必须减少 CO₂ 排放量 20%。2005 年欧盟提出了类似的智能电网“smart grid”概念。

2006 年欧盟理事会的能源绿皮书《欧洲可持续的、竞争的和安全的电能策略》明确指出，智能电网技术是保证欧盟电网电能质量的一个关键技术和发展方向。2008 年底欧盟公用事业电信联合发布了一份名为“智能电网——构建战略性技术规划蓝图（Smart Grids: Building a Strategic Technology Roadmap）”的报告，促进更好的制定智能电网发展计划，达到实现智能电网发展目标。

华中科技大学博士学位论文

1.2.4 日本智能电网研究

日本将根据自身国情，主要针对大规模开发可再生能源、新能源等，实现低煤社会，快速普及生态汽车，确保电网系统稳定。日本政府计划在与电力公司协商后，于 2010 年开始在孤岛进行大规模的构建智能电网试验，主要验证在大规模利用太阳能发电的情况下，如何统一控制剩余电力和频率波动，以及蓄电池等课题。日本政府期待智能电网试验获得成功并大规模实施，这样可以通过增加电力设备投资拉动内需，创造更多就业机会。

为配合企业技术研究，东京工业大学于 2010 年 3 月初成立“综合研究院”，其中，赤木泰文教授主持的关于可再生能源如何与电力系统相融合的“智能电网项目”备受瞩目。东京电力公司通过光线通信，正在进一步实现对系统范围内 6kV 中亚馈线的自动控制和实时量测。另外，日本 8 家电力相关企业也积极参与到该项目研究中，该项目计划用 3 年时间开发出高可靠性系统技术，使可再生能源、新能源与现有电力系统有机融合的智能电网模式得以实现^[20]。

1.2.5 中国智能电网研究

中国电网公司提出中国未来智能电网概念：坚强智能电网是以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强网架为基础，以通信信息平台为支撑，具有数字化、自动化、信息化、互动化特征，包含电力系统的发、输、变、配、用电和调度，覆盖所有电压等级，实现“电力流、业务流、信息流”的高度一体化融合的现代电网。构建高度一体化的智能电网结构体系，特别是“十二五”期间，中国在电网的安全、可靠、经济运行等各方面展开了大量基础研究和技术应用。

中国在智能电网相关技术领域已经开展了大量研究和实践，其中在特高压及输电有多项研究应用达到国际先进水平，在配电、用电领域，智能化应用研究也正在积极探索。近年来国内相关部门一直在跟踪国外智能电网方面的最新研究进展。2008 年，全面启动了以高级调度中心项目群为突破的第一阶段工作，以整合提升调度系统、完善电网规划体系、建设数字化变电站、建设企业统一信息平台为 4 条主

华中科技大学博士学位论文

线，力争到 2010 年全面建成华东电网高级调度中心，使电网安全控制水平、经营管理水平得到全面提升^[21]。

中国输电网建设领域，2006 年底交流特高压示范工程奠基，2008 年 8 月正式建成投运，表明国家电网优化配置资源的能力增强。

天津大学在国内较早开展智能配网方面的研究工作，在配网高级量测体系、高级配电运行、高级输电运行、高级资产管理的框架设计和实现智能电网顺序做了前瞻性工作，并于 2009 年 6 月召开了智能电网学术研讨会。

华北电力大学以智能调度为目标，开展了数据挖掘、电力系统在线分析、故障辨识和诊断以及 Agent 的理论和技术研究，取得了显著的成果。国家电网公司推行了 SG186 一体化平台建设，浙江、山东、上海、江苏等各省（市）电力公司都在积极推动用电信息采集系统、营销业务系统信息化建设等项目，并取得了突出成果。

在可再生能源、新能源发电领域，中国也启动了多项 863 高新技术研究发展计划项目，在“十一五”期间，在三大先进能源技术设立重大项目和重点项目，包括：以煤气化为基础的多联产示范工程，太阳能热发电技术，兆瓦级并网光伏电站系统及系统示范等项目。

2009年5月21日，国家电网公司公布了“智能电网”的发展计划，智能电网在中国的发展将分三个阶段逐步推进，到2020年全面建成统一的“坚强智能电网”。

1.3 智能电网的概念及特征

到目前为止，智能电网并没有统一的概念，各个国家理解了智能电网也不完全一样。智能电网是一个完全自动化的供电网络，其中的每一个用户和节点都得到了实时监控。并保证了从发电厂到用户端电器之间的每一点上的电流和信息的双向流动。通过广泛应用的分布式智能和宽带通讯及自动控制系统的集成。它能保证市场交易的实时进行和电网上各成员之间的无缝连接及实时互动。

智能电网是经济和技术发展的必然结果，具体是指利用先进的技术提高电力系统在能源转换效率、电能利用率、供电质量和可靠性等方面的性能。智能电网的基础是分布式数据传输、计算和控制技术，以及多个供电单元之间数据和控制命令的

华中科技大学博士学位论文

有效传输技术。

智能电网研究内容覆盖发电、输电、变电、配电、用电、调度和信息等各环节的电力系统为对象是新型的控制、信息和管理技术，并将其有机结合。智能电网的本质就是能源替代和兼容利用，创建开放的系统和建立共享的信息模式，通过新技术与具体业务的有效结合，使智能电网建设在企业生产经营过程中切实发挥作用，最终达到提高运营绩效的目的。

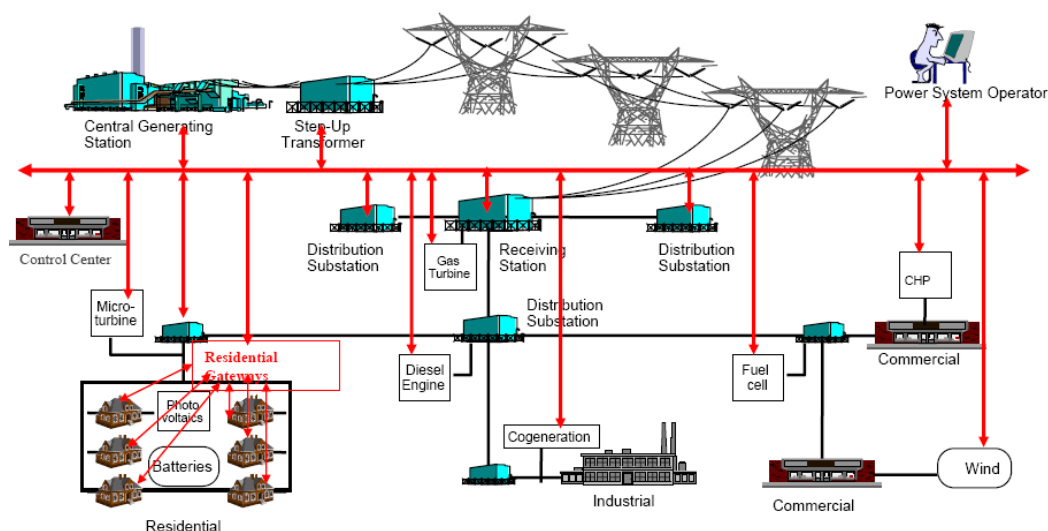


图1-1 智能电网简图

尽管各国根据自身的国情对智能电网建设有着不同的重点和目标，但是智能电网建设的驱动都是基于市场、安全、电网资产的利用率、用电效率、电能质量、使分布式电源和环境因素，其特征可归纳为自愈、安全可靠、经济高效、兼容、用户友好互动、集成。

1) 自愈和自适应。是实现电网安全稳定运行及可靠供电，实时监视电网运行状态，快速诊断和消除故障隐患、隔离故障，检测、分析、响应甚至恢复，避免大面积停电的发生。它可无需或尽量少量人工干预。

2) 安全可靠，优质。无论是电力系统的物理系统、计算机、通讯系统，它能保证设备、人身、和电网的安全，降低后果和快速恢复供电服务，强大的资源优化配置和故障预防，提高电能质量。

华中科技大学博士学位论文

3) 高效。它实现优化资源配置, 提高设备传输容量和利用率; 实现电网的经济调度和经济运行; 同时降低成本, 支持电力市场竞争的要求, 实行动态的浮动电价制度, 实现整个电力系统优化运行。

4) 兼容——发电资源。既能适应各种电源的集中接入, 也支持可再生能源、新能源的发展及分布式发电方式友好接入, 满足电力与自然环境、社会经济和谐发展的要求。

5) 与用户友好互动。实现与客户的智能互动, 以最佳的供电可靠性和电能质量满足客户需求。系统运行与批发、零售电力市场实现无缝衔接, 同时通过市场交易更好地激励电力市场主体参与电网安全管理, 从而提升电力系统的安全运行水平。

6) 集成——信息系统。它实现包括控制、监视、能量管理、维护、实时动态监测系统、配电管理、企业资源规划、市场运营等和其他各类信息系统之间的综合集成^[22-26]。

1.4 中国大型工业企业的发展及当前形势

中国工业能耗占全国总能耗的 70%以上, 而美国的工业能耗占全国总能耗的比重不到 20%, 日本不到 30%。其中钢铁、有色金属、化工、建材和机械是中国工业领域能耗重点行业。表 1-1 是中国与其它国家吨钢可比能耗对比情况。表 1-2 为中国大中型钢铁企业各工序能耗与世界主要产钢国家的对比情况^[27]。

表1-1 中国与其它国家吨钢可比能耗对比情况 (2004年)

	吨钢可比能耗/ kg*t ⁻¹
中国大中型钢铁企业	698
日本	620
德国	602
英国	663
法国	683

华中科技大学博士学位论文

表1-2 中国大中型钢铁企业各工序能耗与世界主要产钢国家对比 (kg/t 标准煤)

生产工序	2004年工 序能耗	国际先进水平	我国各工序能耗差距	
			绝对值	%
焦化	160.0	128.1	31.4	24.5
烧结	70.0	50.9	19.0	37.3
炼铁	466.0	417.2	48.8	10.5
转炉	28.8	-8.9	37.7	
电炉	273.7	198.6	75.1	37.8
轧钢	155.0	136.0	19.0	12.3

当前中国大型工业企业的节能工作已取得显著成绩，但距世界先进水平还有一定差距。工信部已明确提出了工业“十二五”节能减排目标，2015年单位工业增加值能耗和二氧化碳排放量分别要比2010年降低18%和18%以上、工业固体废物综合利用率要提高到72%左右。根据2005-2010年《中国统计年鉴》有关数据计算见表1-3，工业能源消费量一直占全国能源消费量的70%以上，是最大的能源消费部门，而且从近些年的情势来看，还有上升的趋势^[28]。

表1-3 2004—2008年工业增加值、能源消耗和CO₂排放表

年份	能源消费总量(万吨标准煤)	能源消费占全国总量的比重(%)	CO ₂ 排放量(万吨)	工业增加值(亿元)	单位工业增加值能耗(吨标准煤/万元)	单位工业增加值CO ₂ 排放量(吨/万元)
2004	143244.02	70.48	171187.78	65210.00	2.20	2.63
2005	158058.37	70.78	192813.23	77230.78	2.05	2.5
2006	175136.64	71.11	216061.83	91310.94	1.92	2.37
2007	190167.30	71.60	234111.19	110534.88	1.72	2.12
2008	209302.15	71.81	250157.61	130260.24	1.61	1.92

中国工业企业在低碳发展上已取得一定进步，但是目前仍存在不少亟待解决的问题：一是高耗能产业比重大，节能减排压力大。根据2005-2010年《中国统计年鉴》提供的资料进行计算分析，能耗排名前八位的产业依次为：黑色金属冶炼及压延

华中科技大学博士学位论文

加工、化学原料及化学制品制造、非金属矿物制品、电力热力的生产和供应、石油加工及炼焦、有色金属冶炼及压延加工、煤炭开采和洗选、纺织这八大行业，如表 1-4 所示。

2008 年这八大行业的能源消费量占全部工业能源消费总量的 79.18%，CO₂ 排放占工业总排放量的比重是 93.98%，CO₂ 排放量前六位的依次是电力热力的生产和供应、黑色金属冶炼及压延加工、石油加工及炼焦、非金属矿物制品、化学原料及化学制品制造、煤炭开采和洗选，见图 1-2^[28]。

表 1-4 2008 年工业能源消费前八名产业的碳排放量

排序	工业行业	能耗消费总量（万吨标准煤）	能源消费占工业总量的比重（%）	CO ₂ 排放量（万吨）	CO ₂ 排放占工业总排放量的比重（%）
1	黑色金属冶炼及压延加工业	51862.92	24.78	40174.41	16.06
2	化学原料及化学制品制造业	28961.13	13.84	15348.23	6.14
3	非金属矿物制品业	25460.52	12.16	18232.13	7.29
4	电力、热力的生产和供应业	18676.48	8.92	103798.3	41.49
5	石油加工、炼焦及核燃料加工业	13747.01	6.57	38598.07	15.43
6	有色金属冶炼及压延加工业	11287.99	5.39	3031.19	1.21
7	煤炭开采和洗选业	9356.17	4.47	13968.70	5.58
8	纺织业	6396.38	3.06	1982.35	0.79
	合计	165748.6	79.19	235133.4	93.99

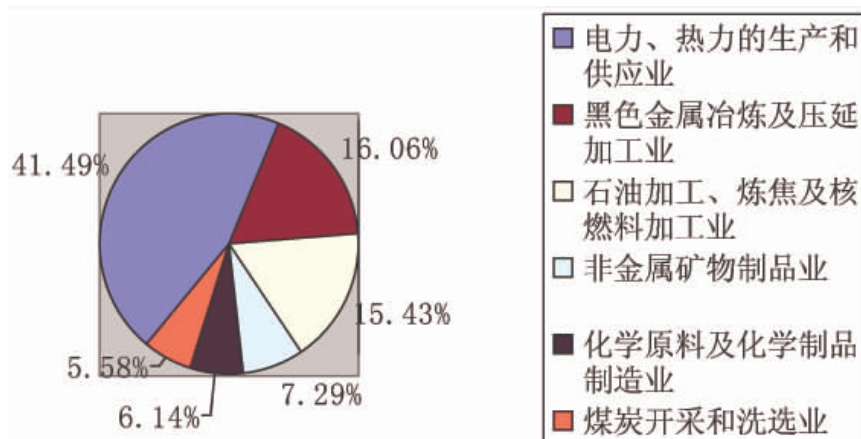


图 1-2 2008 年碳排放前六名行业的碳排放量占工业总碳排放量的比例图

华中科技大学博士学位论文

表1-5为2003年国内大型企业能耗比较与节能潜力情况。

表 1-5 国内大型企业能耗比较与节能潜力（2003 年）

序号	企业名称	钢产量 (万吨)	总能耗 (万吨标煤)	吨钢综合能 耗 (tce/t)	节能潜力 (万吨标煤)
1	鞍山钢铁集团公司	1017.67	904.58	0.889	218
2	武汉钢铁(集团)公司	831.38	653.3	0.786	92
3	首钢总公司	815.07	647.37	0.794	97
4	马鞍山钢铁般分公司	606.21	472.58	0.78	64
5	攀枝花钢铁(集团)公司	400.88	379.15	0.946	109
6	包头钢铁公司	525.06	535.25	1.019	181
7	太原钢铁(集团)公司	317.64	287.15	0.904	73
8	本溪钢铁(集团)公司	468.66	465.91	0.994	150
9	唐山钢铁集团公司	608.12	462.47	0.76	52
10	邯郸钢铁集团公司	500.24	388.18	0.776	51
11	济南钢铁集团总公司	505.02	381.39	0.755	40
12	安阳钢铁集团公司	463.89	362.07	0.781	49
13	宝山钢铁(集团)公司	1154.73	779.57	0.675	

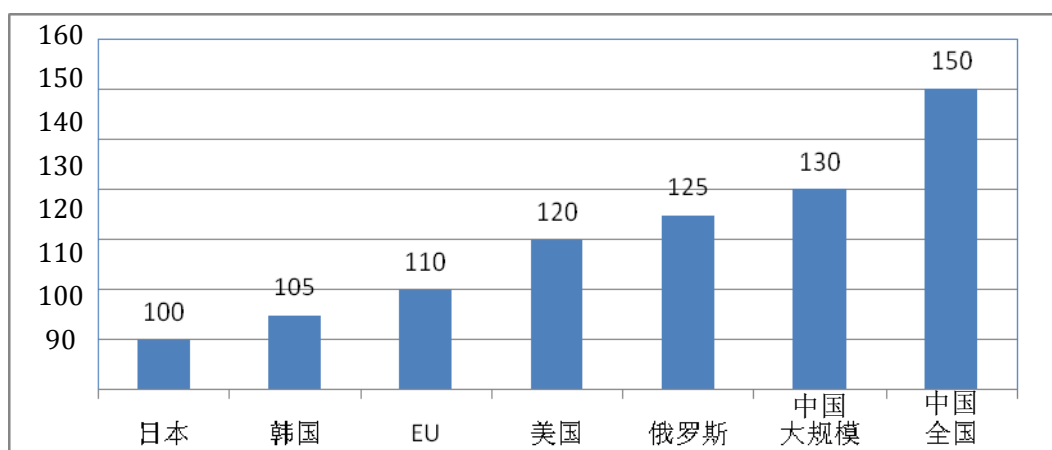


图1-3 世界各国钢铁企业能耗单耗对比情况 (以日本 = 100计算的指数)

华中科技大学博士学位论文

中国工业企业的能源消耗结构中，煤炭占主导第一位，电力其次，其他能源占有份额很少。2003 年的企业能源消耗见图 1-4。

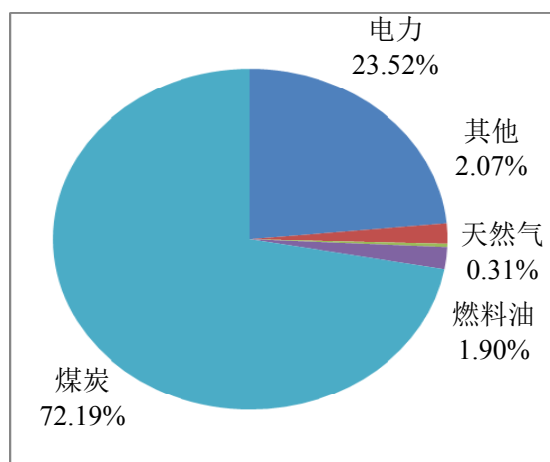


图 1-4 中国能源的消耗结构

中国的能源资源比较贫乏，能源的利用率不高，工业企业尤其是重点耗能企业的能源消耗还比较高，距离国际先进水平还有较大差距。2004 年中国重点钢铁企业的吨钢可比能耗比国际先进水平高 9.81%，其中主要工序如转炉炼钢工序的能耗同比高 35.43%，炼铁工序能耗同比高 28.27%。大型工业企业有很大节能减排的空间，保证安全生产和构建创新性企业提供了一个新的思路 and 手段。

1.5 本文的主要工作及章节安排

本文研究工作的大背景是智能电网。根据面前对大型工业企业电力系统现状、特点，智能电网的基本特征和研究进程与现状的分析。通过构建大型工业企业智能电网，实现大型工业企业的节能减排、降低配电网损耗、提高大型工业企业供电电能质量、提高电能转换效率、提高企业的电能利用率和增强大型工业企业的供电可靠性，保证企业安全生产并为创建创新性企业做出贡献。本文的主要研究内容如下：

第一章是智能电网的定义及特征，各个国家的智能电网研究进展，分析了中国大型工业企业的发展及当前形势。

华中科技大学博士学位论文

第二章是大型工业企业智能电网构建框架研究、大型工业企业智能电网基础设施关键技术。

第三章针对目前中国坚强智能电网的发展要求，并结合大型工业企业能量系统的特点，提出了大型工业企业能量管理系统的构架及其分析技术要求，解决了长期以来在用电企业中电气和能量管理的非专业化，为大多数企业提供了一个可持续实现能耗及节能管理的统一平台。

第四章详细分析了多种储能技术的特性，并针对储能装置的控制方式研究。各种储能技术优缺点不同，根据其各自的充放电特性、规模化程度，可以应用在智能电网的不同节点上。

第五章，可再生能源发电在智能电网的建设中的必要性。从风力发电、太阳能发电的背景和意义着手，分析了两种新能源发电的优缺点及技术难点。并针对基于储能的并网永磁同步直驱风力发电系统的特点，提出了一种网侧变换器的模糊功率控制策略，当电网发生故障时，实现风电系统在电网故障情况下的不脱网运，为电网提供一定的无功功率，有助于电网恢复正常运行。

2 大型工业企业智能电网构建框架

2.1 引言

大型工业企业智能电网的构建有其自身的特点，主要是与大型工业企业的生产过程紧密相关。其智能电网的构建框架与电力系统输电系统和配电系统的智能电网的有许多不同之处。大型工业企业智能电网框架构建将确定大型工业企业智能电网的形式、基础设施和高级应用软件系统等，并影响整个智能电网的运行效率和节能减排效果。

2.2 大型工业企业智能电网构建框架研究

对于智能电网的构建，国际上已经进行了许多探索，很多国家主要从智能电表开始，中国国家电网公司根据我国实际国情主要从建设坚强输电网开始。本论文提出从大型工业企业电网着手，围绕解决大型工业企业的节能减排、供电电能质量、供电可靠性和保证安全生产开展研究。本论文拟根据大型工业企业电网的特点，紧密结合其生产过程，研究和提出大型工业企业智能电网构建框架理论和方法。

大型工业企业电网与常规配电网相比有其特殊性。相同点在于：电压等级与输送容量基本相当，也与常规电力系统配电网一样，一端与大电力系统相连，另一端与用户相连，其许多调度、运行与控制以及保护策略与常规电力系统配电网基本一致。其不同点在于：

(1) 大型工业企业电网常常拥有自备电厂以及余热、余压等中小型发电机，即：内部有电源，而常规配电网一般是无电源的。故大型工业企业智能电网的控制与保护要复杂一些。

(2) 大型工业企业电网的工业负荷，常常具有非线性、冲击性、间歇性等突出特点，单台负荷的启动与停止会对电网产生很大影响，其负荷种类和容量大小与大型工业企业的生产过程紧密相关。

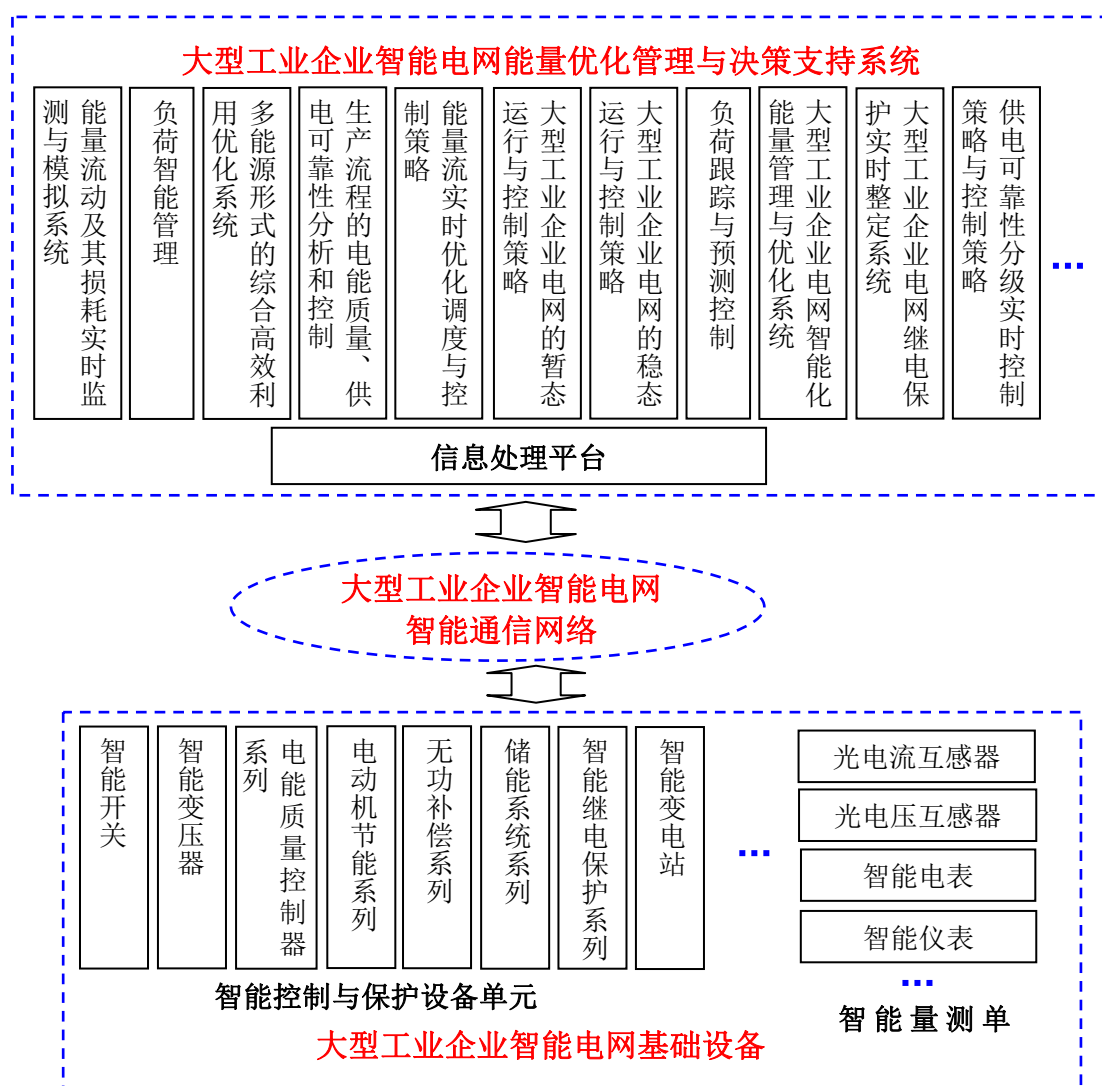


图 2-1 大型工业企业智能电网构建框架初步设想

常规配电网也带有一定的工业负荷，但比较分散，且同时也带有大量的民用负荷，单台负荷变动对电网的影响很小，可以忽略不计。

(3) 大型工业企业往往拥有大量进口设备和精密设备，对电网的供电电能质量和供电可靠性的要求很高。电网电压、频率以及波形变化或短时停电就有可能对生产流程和产品质量产生很大影响，对于一些配置有非常灵敏继电保护的装置就有可能自动跳开，使整个生产线停电，这些都会对大型工业企业造成巨大的经济损失。常规配电网的用户一般对电能质量要求没有这样高。

华中科技大学博士学位论文

(4) 大型工业企业高耗能设备众多，单台设备容量大，设备比较集中，容易采取节能措施，且节能效果显著。常规配电网用户分散，单台容量较小，节能措施实施难度要大一些。

(5) 大型工业企业生产厂房比较集中，率先进行智能电网示范，安装调试、以及运行管理方便，且实施成本比常规配电网的要低很多。

(6) 大型工业企业电网运行状态与其生产流程紧密相关，大型工业企业的用能形式多样，易于实施能源循环综合利用，提高能源利用效率。图 2-1 提出了大型工业企业智能电网构建框架初步设想^[29-31]。

2.3 大型工业企业智能电网基础设施关键技术

大型工业企业智能电网基础设施是大型工业企业智能电网的基础，增强智能电网的能观性和能控性，形象地讲就是实现人的眼睛、手和脚的功能。根据大型工业企业智能电网总体框架，需要研究的基础设备关键技术包括以下六个方面的内容。

2.3.1 智能测量技术及设备

包括智能电流互感器 (TA)、智能电压互感器(TV)、智能电表及其它智能计量仪表。由这些智能测量设备组成的高级计量体系，能根据需要，同时实现多种计量（如电量、压力、温度、湿度及其它一些物理量），设定计量间隔（如 5 min，15 min，1 h 等），并具有双向通讯功能，支持远程设置、接通或断离、双向计量、定时或随机计量读取和用电实时管理。

2.3.2 节能技术及设备

静止无功功率补偿装置(SVC)：能够减小电压闪变；提高电网的功率因数；滤除负荷的谐波；消除三相不平衡电流；减小无功潮流、降低网损。

静止同步补偿器(STATCOM)：能够维持系统电压基本不变；抑制电压波动、闪变；提高供电系统及负载的功率因数，减小功率损耗；提高电力系统的静态和动态

华中科技大学博士学位论文

稳定性，阻尼功率振荡；提高发电机有功输出能力。

高压变频器及节能型电机：占工业用电 30%以上的各种风机、泵类负载总功率约 1.3 亿千瓦，此类负载工况变化较大，如采用交流调速技术实现变速运行，节能效果非常显著，通常情况下可以节能 30%左右。

软启动装置：软启动装置采用高压、大功率电力电子器件作为主回路部件，具有技术先进、工作可靠、结构模块化、便于维护的优点。可实现频繁启停操作，采用真空开关，具有很强的分断能力、使用寿命长、电弧不外露、安全可靠。由于软启动器比水电阻启动的启动电流小 1.5 倍，所以启动过程中软启动器起到节能效果。同时也可减少每年的维修费用，减少启动时对机组的冲击，延长电机寿命。

储能装置：可用于大型工业企业的储能方式有蓄电池储能、超导磁储能、超级电容器储能、飞轮储能、热储能等。储能装置能够在电网负荷低谷时从电网获取电能充电，在电网负荷高峰时向电网输送电能，这种方式有助于减少系统输电网络的损耗，对负荷实行削峰填谷，从而获得经济效益。

2.3.3 改善电能质量的技术及设备

动态电压调节器（DVR）：能够消除电压跌落或电压突升、减少电压谐波、限制故障电流。

有源电力滤波器（APF）：用于动态抑制谐波、补偿无功的电力电子装置，能够对大小和频率都变化的谐波以及变化的无功进行补偿，实现了动态跟踪补偿，而且可以既补谐波又补无功。

统一电能质量调节器（UPQC）：可以有效的满足电力用户的电能质量要求，即消除电网谐波电压、基波偏差、不平衡，保持负载端电压的额定和正弦，还可以消除负载产生的无功、谐波电流，使得电网输入电流为正弦，功率因数为 1，实现负载和电网之间完全的扰动隔离。

电子电力变压器（EPT）：EPT 是全新概念的下一代变压器，也称为智能变压器。它除了可实现传统变压器变压、隔离和传递能量的功能，还可以实现输电系统的潮流控制及配电系统的电能质量控制。EPT 输入级可替代现有的功率因数校正

器，实现功率因数校正功能；EPT 输出级可替代 STATCOM，实现无功和谐波的同时动态补偿功能。利用 PWM 高频整流技术，EPT 可以改善和提高电网的电能质量，减少对电网的谐波污染。

储能装置：储能装置是解决诸如电压脉冲、涌流、电压跌落和瞬时供电中断等动态电能质量问题的有效途径^[32-50]。

2.3.4 提高供电可靠性的技术及设备

(1) 智能开关：智能开关是微处理器技术、传感器技术、电力电子开关技术和通信技术的结合，应用智能开关技术，可以提高设备的使用寿命、提高供电可靠性，同时能够一定程度的节约电能^[51]。

(2) 储能装置：储能装置可以抑制电网功率波动，从而提高电网运行的稳定性。特别是，在供电线路故障情况下可以提供短时供电，并自动切换到备用供电线路重新供电，对于用户来讲感觉不到电源故障，可大幅度提高供电可靠性，有效保证安全生产。

(3) 电源相互支撑：大型工业企业的负荷要求，供电可靠性和供电质量都提出了更高的要求。对于重要工业负荷，短时间停电或者几个周波的电压暂降都有可能导导致生产线的瘫痪，给企业造成重大损失。

由于大型工业企业负荷容量较大，而一般的不间断电源(Uninterrupted Power Supply, UPS)容量较小，因此在这种场合并不适用。对于大型工业企业负荷，一般采用常用电源加备用电源的方式（备用电源可是储能），在常用电源正常的情况下，负荷由常用电源供电，当常用电源出现异常时，切换到备用电源，由备用电源向负荷供电，这个切换过程中需要一个转换开关，目前自动转换开关(Automatic Transfer Switch Equipment, ATSE)能完成这个功能。但是 ATSE 的操动机构和开关本体都是机械式的，转换时间长，典型值是 60ms 至 80ms，因此，对于要求断电时间很短(小于 20ms)的重要负荷，ATSE 难以满足要求。

随着电力电子器件的发展，用电力电子器件这种无触点开关作为自动转换开关的开关本体，可以避免机械开关过程中的电弧，而且动作时间大大缩短（微秒级）。

华中科技大学博士学位论文

用电力电子器件作为开关本体的自动转换开关称为静态转换开关(Static Transfer Switch, STS)。STS 中的电力电子器件主要是晶闸管和绝缘门极双极性晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)。由于 IGBT 属全控器件,性能好,能控制开通和关断。

大型工业企业一般有多电源多负荷,为了提高供电可靠性,课题组提出了一种新型 STS 电路^[52],如图 2-2 所示。该电路用于切换常用电源和备用电源,当常用电源正常时,由常用电源给负荷供电,当常用电源异常时,该电路把负荷切换到备用电源,由备用电源给负荷供电,当常用电源恢复正常时,该电路又把负荷切换到常用电源。每一路负荷有一路常用电源和两路备用电源,电源之间相互备用,大大提高了供电可靠性。

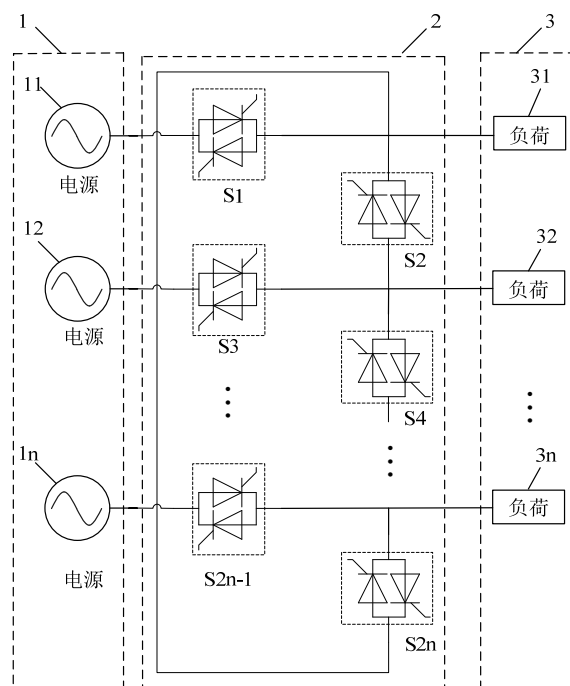


图 2-2 STS 多电源多负荷结构图

新型静态转换开关具体实施方式:

以图 2-3 为例,对三电源三负荷场合的介绍具体实施方式。三电源三负荷场合下,共需要六组反并联的晶闸管。当电源 11, 电源 12, 和电源 13 都正常时,正常用晶闸管开关 S1,S3,S5 闭合,故障用晶闸管开关 S2,S4,S6 断开,负荷 31, 负荷 32, 和负荷 33 分别由电源 11, 电源 12, 电源 13 独立供电;当电源 11 异常时,迅速断开

S1, 同时检测电源 12 和电源 13, 如果电源 12 的相位和电源 11 故障前的相位相差较小, 那么选择闭合 S2, 此时, 负荷 31 由电源 12 经过 S3, S2 供电; 如果电源 13 的相位和电源 11 故障前的相位相差较小, 那么选择闭合 S6, 此时, 负荷 31 由电源 13 经过 S5, S6 供电; 电源恢复正常后, 恢复到三电源独立供三负荷的状态。电源 12 和电源 13 故障后的操作规律与电源 11 故障后的操作规律类似。

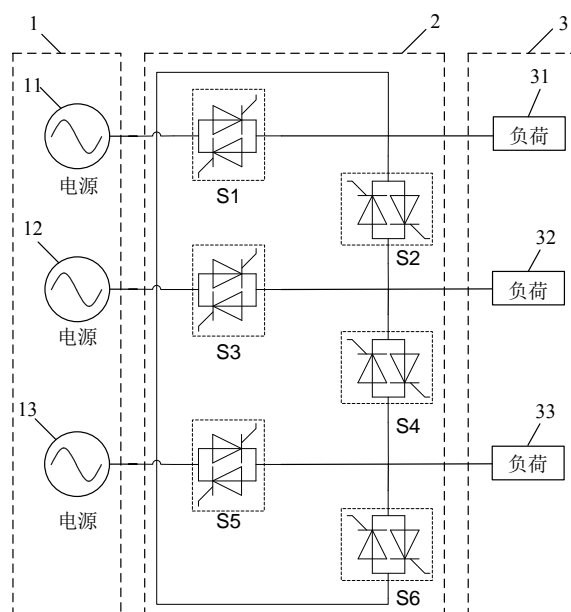


图 2-3 STS 三电源三负荷结构图

n 电源 n 负荷情况与三电源三负荷类似, 如四电源四负荷, 则需要八组晶闸管, 其中四组为正常用晶闸管, 四组为故障用晶闸管。电源都正常时, 正常用晶闸管导通, 故障用将闸管关断; 其中某一路电源故障后, 选择相位差小的相邻一路故障用晶闸管闭合。

如果只有两路电源和两路负荷, 如图 2-4 所示。主电路包括三组反并联的晶闸管, 其中两组为正常用晶闸管, 一组为故障用晶闸管。当电源 11 和电源 12 都正常时, S1, S3 闭合, S2 断开, 负荷 31 由电源 11 供电, 负荷 32 由电源 12 供电; 当电源 11 出现异常时, 迅速断开 S1, 同时闭合 S2, 保持 S3 闭合, 此时, 负荷 31 由电源 12 经过晶闸管开关 S3, S2 供电, 负荷 32 还是由电源 12 经过 S3 供电; 当电源 11 恢复正常后, S1 闭合, 同时 S2 断开, 负荷 31 恢复到由电源 11 供电, 负荷 32 仍然

由电源 12 供电；当电源 2 异常时，切换方式类似，此时，S3 断开，同时 S2 闭合，负荷 32 由电源 11 经过 S1，S2 供电，负荷 31 还是由电源 11 供电，当电源 12 恢复正常时，S3 闭合，S2 断开，恢复到两路电源独立给两路负荷供电的状态。

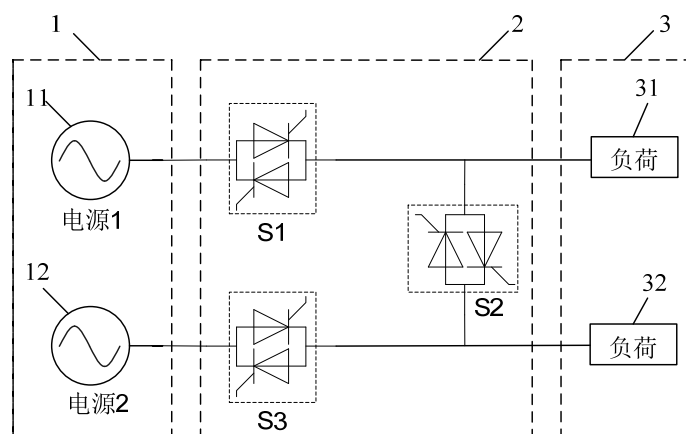


图 2-4 STS 双电源双负荷结构图

新型 STS 电路达到一种电源之间相互支撑的效果，提高可靠性，这主要表现在使负荷有一路常用电源和两路备用电源，而传统 STS 电路每一路负荷只有一路常用电源和一路备用电源。而且，在常用电源发生故障后，可以在两路备用电源中选择与常用电源故障前相位差小的一路备用电源。在电源和负荷对数为 2 对时，新型比传统 STS 电路结构简洁，少一组晶闸管，少一根电力电缆，降低了成本。

输配电设备的状态检修技术：包括状态评估方法，设备可靠性预测技术，设备故障模式及风险评估模型（FMECA），设备寿命周期成本管理，设备可靠性数值预报和预警系统，以及输变电设备自诊断与自愈技术，电介质材料老化检测和故障机理、红/紫外成像技术，传感器、微电子、信号处理技术以及神经网络、专家系统、模糊集理论等技术在电力设备状态检修方面的综合应用。

2.3.5 智能继电保护技术及设备

继电保护技术发展趋势是网络化，智能化，保护、控制、测量和数据通信一体化。智能继电保护包括元件的智能保护、线路的智能保护及系统的智能保护。继电保护的作用的是切除故障、限制事故影响范围（是首要任务），保证电力系统安全稳

定运行。继电保护要求每个保护单元与重合闸装置等都能共享全系统的运行和故障信息的数据，分析信息协调动作，确保系统的安全稳定运行。

智能继电保护装置的发展方向是微机化、计算机化，包括广域继电保护，自适应保护，基于本地信息的系统保护、继电保护智能整定技术；故障定位、间歇式能源接入的并网控制和保护系统^[54-56]。

2.3.6 智能通讯技术及设备

光通讯：光通讯把光子作为信息载体，具有更高的容量和速度。电力光缆包括 OPGW（架空地线复合光缆）、ADSS（无金属自承式光缆）及全非金属管道光缆等。电力光通信网络将各级电力调度所与发电厂、变电站等连为一体，保障了电力调度生产、电网安全运行、生产管理及客户服务的需求。

无线通讯：无线通讯技术不必在厂区范围内进行繁杂、昂贵的布线，并具有高度灵活性、易于使用、通过远程链接可实现远方设备或系统的可视化、参数调整和诊断等独特功能。无线通讯技术主要有 GSM/GPRS、900MHz Radios、wi-Fi(802.11a/b/g)、WIMAX(802.16)、ZigBee(802.15.4)、自组织网络等。

载波通讯：电力线载波通讯是利用现有电力线，通过载波方式高速传输模拟或数字信号的技术，由于使用坚固可靠的电力线作为载波信号的传输介质，因此具有信息传输稳定可靠、路由合理等特点，是不需要线路投资的有线通讯方式。

2.4 大型工业企业智能电网能量优化管理与决策支持系统

根据大型工业企业智能电网总体框架，大型工业企业智能电网能量优化管理与决策支持系统需要研究：通信网络构建、信息处理平台、高级应用软件系统等。高级应用软件系统主要从两方面进行研究，即用户侧和电网侧的能量优化管理与决策支持。

2.4.1 智能通信网络构建技术

建立高速、双向、实时、集成的通信系统是实现智能电网的基础，主要研究内容包括：智能光传输技术；无线、光纤、电力线载波等通信接入技术；广域时间同步技术；通信安全防护技术；特种光缆及其监测技术；数据通信技术；多媒体通信技术；通信信息化及管理系统；应急通信技术及其应用管理技术。

2.4.2 智能信息平台构建技术

智能信息平台是智能电网优化管理大型工业企业的关键，需要建立先进、开放、安全、可靠、灵活并贯穿生产、运行、经营全价值链的信息高度融合、模型高度统一的统一信息支撑平台，以及广域、层次化的知识资源智能共享的电网综合知识系统。构建智能信息平台的主要研究内容包括：信息集成与共享技术；智能电网统一信息模型；信息展现技术；海量电网信息数据存储与备份技术；知识管理与应用技术；信息安全技术。

2.4.3 大型工业企业智能电网能量优化管理与决策支持系统

大型工业企业智能电网能量优化管理与决策支持系统指根据企业“物质流”和“能量流”相关的电能耗散结构与运行特点，对用户侧和电网侧进行智能化的动态科学管理与控制，使用户侧和电网侧能够高效优质、安全可靠运行，实现节能减排、高电能质量供应和可靠性供电。

1. 用户侧能量优化管理与决策支持系统研究

(1) 基于大型工业企业已有的自动化系统（包含 SCADA 系统和针对具体设备或生产环节的监控系统），并借鉴电网上运行的 EMS/DMS，利用分布式传感器网络，建立包括大型工业企业所有生产流程的能量优化管理和决策支持平台（i-EMS）。

(2) 利用 i-EMS 提供的信息采集功能，通过合理配置传感器，有效监视工业企业的能量供给和消耗、能量损耗、能量利用效率等企业关注的信息，研究生产流程中的能量跟踪机制，建立能量流动及其损耗实时监测与模拟系统。

华中科技大学博士学位论文

(3) 根据大型工业企业的生产流程，结合能量跟踪机制，准确预测各个生产环节的能量流，从而进行优化调度，实现高效生产。

(4) 分析大型工业企业中的余热发电、余气发电或其它分布式能源发电系统特点，结合生产环节中的能量消耗，建立整个企业节能效益最大化的优化模型，提出含电能、冷、热、可燃气等多能源形式的综合高效利用方法。

(5) 基于能量统计、能量控制、能量跟踪和预测，并结合电能网络系统、负载管理系统，研究能量流的实时优化调度与控制策略。

2. 电网侧供电电能质量与可靠性研究

(1) 分析大型工业企业中动态变化的非线性负荷，如炼钢电弧炉、可逆式大型轧钢机等，结合气象因素和各生产部门用电特征，开展快速跟踪负荷变动的负荷预测算法研究，实现负荷智能管理。

(2) 研究大型工业企业电网的稳态运行与控制策略，包括有功、无功、电压、频率和谐波等特性。针对非线性负荷引起的供电电压波动、闪变、动态不平衡问题和谐波问题，利用无功补偿技术和谐波抑制技术改善电能质量、降低网损。

(3) 研究大型工业企业电网的暂态运行与控制策略，研究电网故障条件下的紧急控制策略以及电力系统侧供电和自备电厂间的协调控制策略，当引入太阳能光伏发电或风力发电等新能源时，研究暂态过程中新能源的运行与控制策略。

(4) 研究大型工业企业电网的继电保护实时整定系统，根据能量的多元化利用，如余气余压的循环利用，灵活的可再生能源发电系统的接入，使得电网的电源多元化，研究电网的双端或多段有源网络以及网络结构形式，针对线路潮流方向频繁改变的情况，深入研究继电保护的配置与整定，实现实时可控。

(5) 研究供电可靠性分级实时控制策略，按照差异化设计的思想，根据生产特点和设备的重要性对企业负荷综合分级，对重要、敏感型负荷加装储能型装置，保障其不间断供电，增强供电可靠性。

(6) 研究含基础智能设备的电网统一协调优化控制，结合电网的稳态和暂态运行与控制策略，通过安装基础智能设备，智能开关、无功补偿和滤波设备，实现电网重构并具有自愈功能^[58-62]。

2.4.4 搜索新能源发电接入及可行性

主要针对太阳能、风能等其它形式的新能源探索接入大型工业企业智能电网的方案和可行性开展研究，为后续进一步开展提升大型工业企业节能减排工作打下一定基础。

2.5 本章小结

本章根据大型工业企业电网的特点，提出了大型工业企业智能电网构建的目标、思路和主要内容。围绕提高大型工业企业供电可靠性和供电电能质量、供电可靠性和保证安全生产、节能减排。

3 大型工业企业智能电网能量管理系统框架研究

3.1 引言

能量管理系统就是对能量进行实时监测和控制的系统。根据 IEEE 标准给出的定义：“能量管理系统包括工程、设计、应用以及扩展的对电源的维修等，来为以电能作为能量的系统达到最佳性能”。大型工业企业智能电网能量优化管理与决策支持系统是大型工业企业智能电网的核心，通过该系统处理智能电网基础设备收集的信息，进行优化计算，再通过智能电网基础设备去控制实际电网，形象地讲就是实现人的大脑功能。

20 世纪 80 年代，中国开始开展能量管理的优化工作，并着手开展能量中心的设想。90 年代，信息化技术的发展，工业企业开始开发节能技术层面的系统管理信息化平台，奥地利 VASL 钢铁厂与奥钢联联合于 1992 年开发了 EMS 系统。目前中国企业大部分装置都已有自动化系统（包含 SCADA 系统和针对具体设备或生产环节的监控系统，DCS 或 FCS 系统）。但是多数企业没有实现在线监测；基础统计信息不尽准确和全面，还没有统一的能量统计方法，统计算法不够完全合理与完善；用能单位能量数据汇总体系不完善；缺乏必要的工具和系统平台。缺乏可用于分析和查询的能量数据库和能量数据的分析工具，数据汇总工作复杂、庞大，而且极易出错，导致能量数据缺乏完整性、可靠性、一致性、灵活性等等^[63-64]。

随着智能电网技术的发展，利用分布式传感器网络，根据企业“物质流”和“能量流”相关的电能耗散结构与运行特点，结合能量跟踪机制，分析企业的余热发电、余气发电或其它分布式能源发电系统特点，结合生产环节中的能量消耗，建立包括大型工业企业所有生产流程的能量优化管理和决策支持平台（i-EMS）。能量管理系统实现能量统计、能量控制、能量跟踪和预测，并结合电能网络系统、负载管理系统，研究能量流的实时优化调度与控制策略，准确预测各个生产环节的能量流，从而进行优化调度，降低生产成本，实现高效生产，实现节能减排。构建能量

华中科技大学博士学位论文

管理系统对企业联合生产的子系统进行实时检测、分析以及动态调控，系统智能化、操作自动化。

3.2 大型工业企业能量种类、特点及相互关系

构建工业企业能量管理系统必须在现有企业能量管理系统的分析，结合能源种类、特点和相互关系。

3.2.1 工业企业能量种类

大型工业企业能量流是指各种能量随物质流动的全过程沿着转换，能量来源于能源，所以能量流主要包括煤炭、石油、蒸汽等能源物质发生物理化学变化的流程过程。能量是工业企业生产的大动脉，目前用能结构大致是煤炭，电力，油，天然气等。目前工业企业能量消费还较高，各工序不同的工艺特点和要求，因此能量系统还是一个复杂的网络，主要包括电力系统、空气分离系统、煤气系统、蒸汽系统与热能系统。

各种能源物质在流动过程中会产生能量的转换、能量的利用和能量的回收，各种能量沿着转换、利用和排放回收各种能量转换的路径形成能量流，可以分为：

(1) 一次能源，即自然界存在的未经加工和转换的能源。

(2) 二次能源，即由其它载能体转换而来的能源，主要是指在生产过程中可回收利用的副产能源，包括：电能、可燃性余能，即可以作为燃料利用的可燃物；载热性余能、余压、余热、蒸汽、压缩空气等。

3.2.2 工业企业能量的特点

大型工业企业结构能量系统相对复杂，能量种类较多，呈现出以下几个特点：

(1) 品种类型多，多种形式的一次能源、二次性能源等。

(2) 副产能源多，由于工业企业生产过程中用煤量多，能量是以副产煤气形式来体现。

华中科技大学博士学位论文

(3) 能量转换空间大、形式选择性较强。在工业企业生产流程中, 可根据流程、工序的实际需要, 灵活调整能量转换方式。

(4) 优化难度高, 大型工业企业能量系统多种类型(煤气系统、电力系统、蒸汽系统等), 多个大量工序流程, 能量输入、输出有多不同的形式。

(5) 依附能力强, 在生产过程中原料形成了生产物质流, 能量主要是依附于物质流, 能量与物质流的关系既独立又相互联系, 同时又受到彼此的制约。

大型工业企业能量系统的特点是一个既独立、又相互关联的系统网络^[68]。

3.2.3 工业企业能量相互关系

大型工业企业能量相互关系主要体现在能量之间的转换关系、转换效率关系和替代关系三个方面:

(1) 能量之间的转换关系系统是一个交织在一起的复杂的能量网络, 各能量之间既相互联系, 又相对独立。能量的转换主要体现在可利用能量向电力的转换:
①煤炭发电, 即余气发电。②余热发电, 即各工序用于设备、产品冷却的余热及加热炉产生的高热烟气、废气发电。③余压发电, 如高炉炉顶余压发电等。

(2) 能量转换的效率关系各种能量的表现形式不同, 其单位能量产品所包含的能量也有所不同。企业的管理水平高与低、能量加工转换装置和生产工艺先进与落后等方面影响企业能量转换效率。为了提高能量转换效率, 在能量利用过程中, 智能化能量管理, 减少能量损耗, 完善生产工艺条件和提高技术装备水平。

(3) 能量之间的替代关系工业所用煤炭的能量有 30%左右以煤气的形式存在。同时, 通过处理后的煤气可向社会供应, 减少社会煤炭使用量, 煤气之间可以相互替代, 提高了煤气利用效率^[27, 70]。

3.2.4 能量流, 物质流

(1) 物质流

物质的流动总是要沿着一定路径流动, 物质流动在不同阶段路径的形态及方式也不同。不同的系统物质流也不一样, 而且物质流动的轨迹也不一样, 但物质流动

而形成的物质流结构应该是大同小异的，物质流结构图 3-1 所示。

在大型工业企业中物质流主要包括几类：①能源类：化石燃料（煤炭、石油、天然气）、可再生能源；②水类：热水、冷水；③空气类：新风、回风等；④蒸汽类：饱和蒸汽、过热蒸汽；⑤制冷流类；⑥助流类，等等。

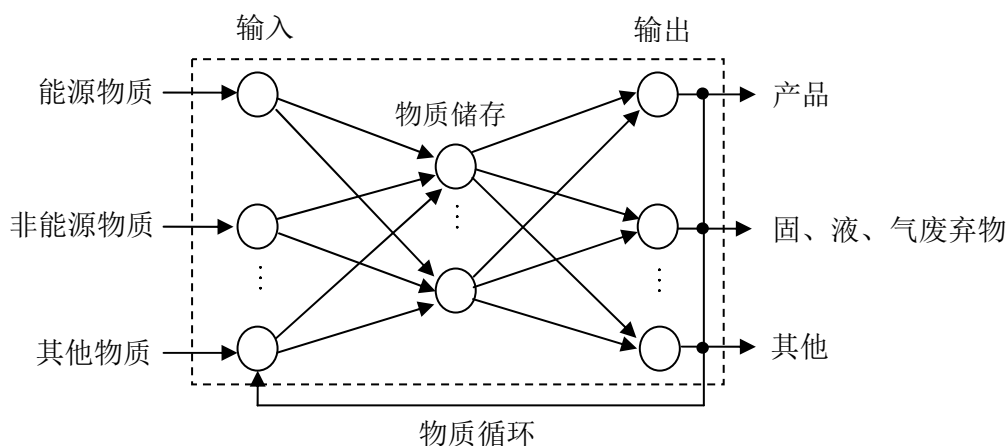


图 3-1 大系统中物质结构网络简图

(2) 能量流

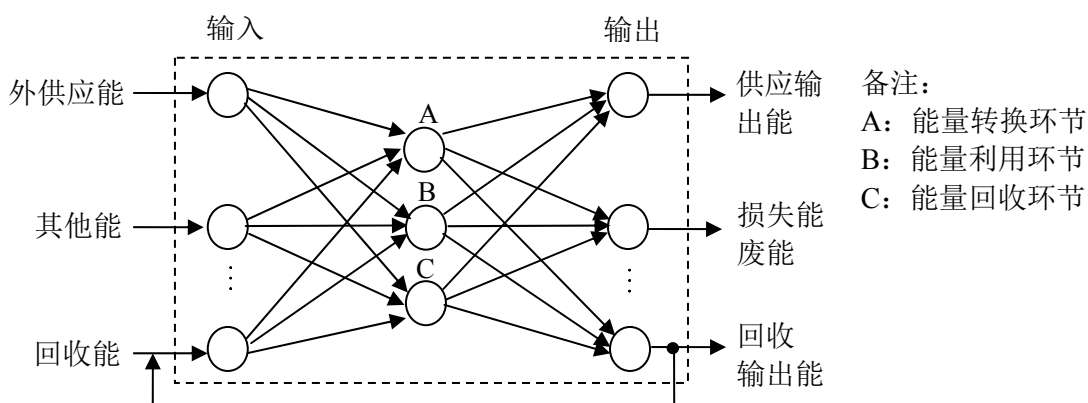


图 3-2 大系统中能量流结构网络简图

能量流是各种能量随物质流动的全过程沿着转换，利用和排放回收的路径流动的过程。能量来源于能源，能量流实际上就是煤炭、蒸汽、石油等，各种能源物质在流动过程会产生能量转换，能量的回收和能量的利用，利用和排放回收的路径形成能量流。跟物质流结构类似，能量流结构将能量静态组元，大系统的能量结构如图 3-2 所示。能量类包括来源于化石燃料，可再生能源，热能、电能、废能。

3.3 大型工业企业能量管理系统概述

3.3.1 系统的功能及作用

通过对能量进行有效地管理和控制可以降低能量的消耗，提高经济效率，提高电源系统的可靠性，保障安全，环保等等。能量管理系统最直接的目标是最大化能量利用率，将电源中的能量最大限度的发挥出来，减少不必要的浪费。要达到该目的，能量管理系统必须具备下述功能^[71]，见图 3-3：

能量管理系统的作用：作为工业企业自动化和信息化的重要组成部分，能量管理系统为安全运行、经济运行、友好环境等提供了有力的技术保证，作用要求大约有以下几点：

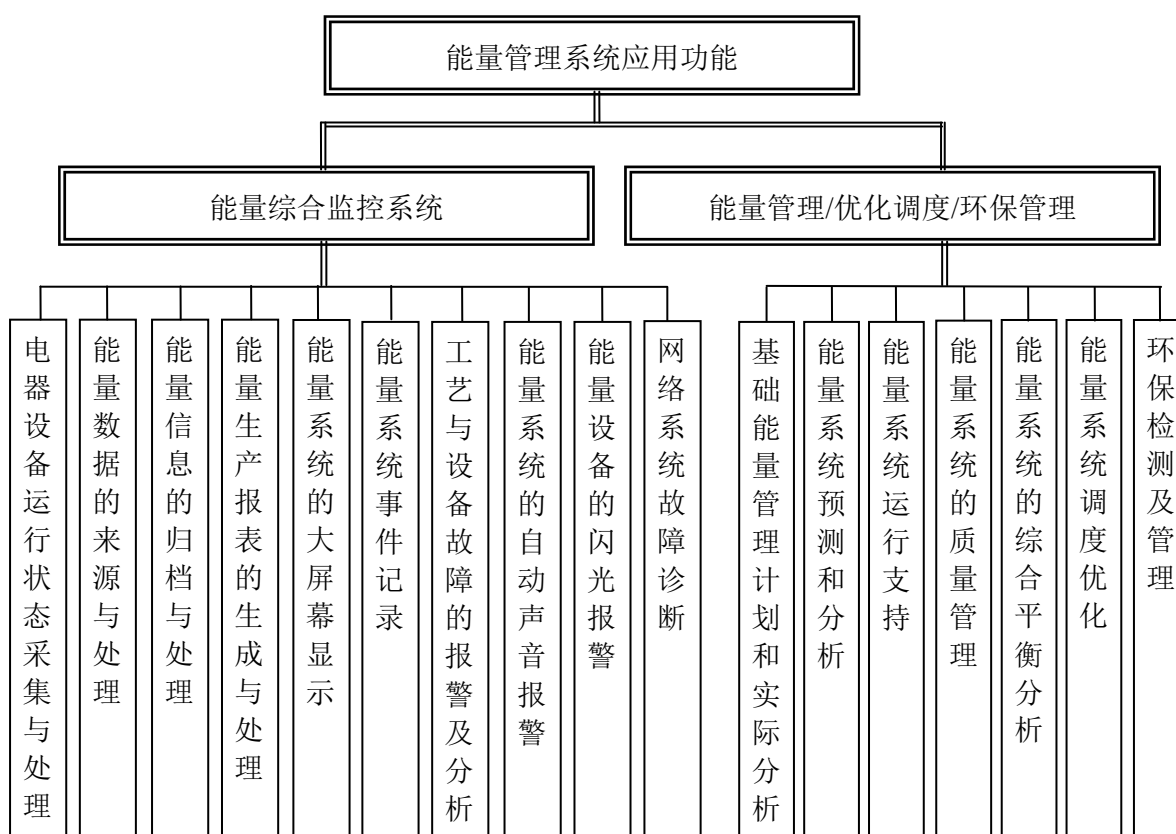


图 3-3 能量管理系统功能图

- (1) 提高工业企业能量系统劳动生产率，改善能量系统的及时平衡调整、保证生产的稳定运行。

- (2) 对所有运转当中的电器设备能够进行再校核。
- (3) 提高能量供需的动态平衡水平，从而实现良好的平衡节能环保效果。
- (4) 提高全厂系统的运行状况，异常和故障的快速分析和处理，故障的影响程度，及时采取系统的措施。
- (5) 完善能量信息的采集、存储、管理和有效利用。调度员进行经济方面的数据分析时，直观的数据便于比较，实时掌握系统运行情况，及时采取调度措施，使系统尽可能运行在最佳状态。

3.3.2 系统应对智能电网技术要求

针对智能电网特征，特别是中国坚强智能电网特点，大型工业企业能量管理系统设计应对要求，如图3-4。

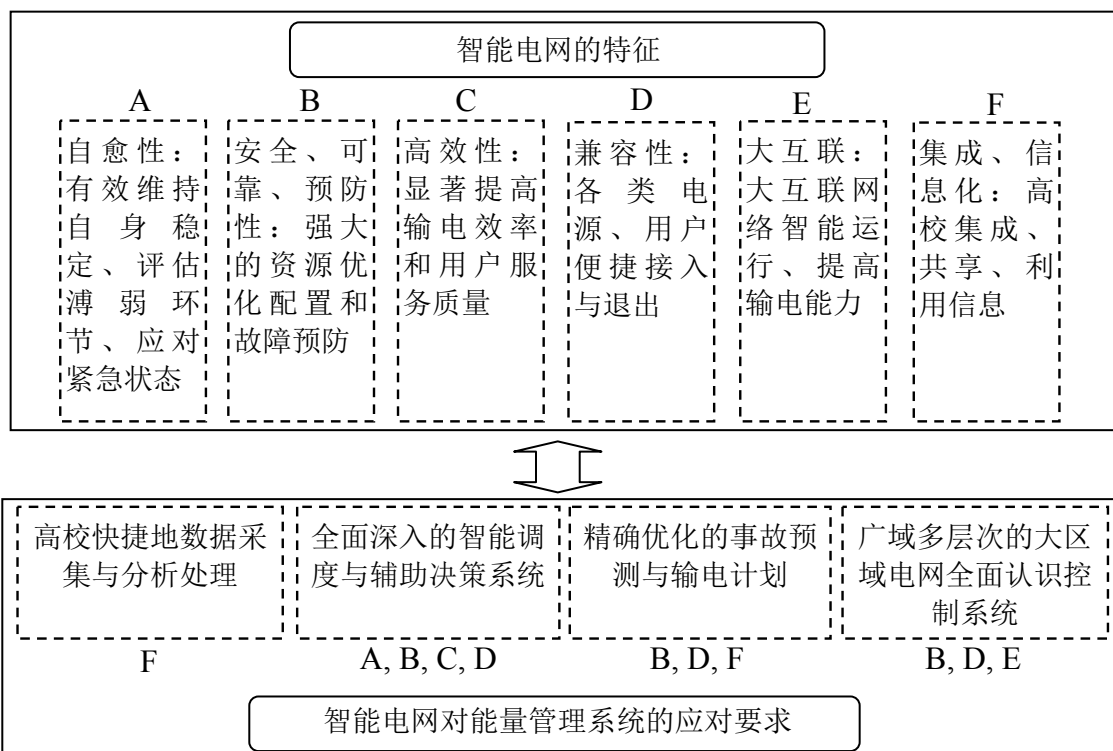


图 3-4 智能电网对能量管理系统的应用要求

3.3.3 系统设计原则

智能能量管理系统是智能电网优化管理大型工业企业的关键，需要建立先进、开放、安全、可靠、灵活并贯穿生产、运行、经营全价值链的信息高度融合、模型高度统一的统一信息支撑平台，以及广域、层次化的知识资源智能共享的电网综合知识系统。

(1) 开放性：系统运行软硬件环境符合开放的工业标准，系统必须在各个层次上实现开放性，应用平台、网络构架，一方面还需要实时数据、接口、历史数据和通信的都要开放性。

(2) 可靠性：系统应在平台服务器覆盖数据库服务器、应用服务器、实现服务器、当主还是备用服务器等各种服务器出现异常或平常，系统保持服务的不间断性和可靠性。

(3) 对象技术：系统平台除了能够针对设备、遥信、遥测和故障录波等采集对象进行建模，必须还能够进行更高层次的对象组织。平台必须适应不同对象机制的扩展和信息组织。

(4) 国际、国内标准：系统要满足国际、国内的各种标准。例如，标准的商业、数据库系统：Oracle、Sybase、DB2 以及 MS SQL Server；数据库语言标准 SQL；保护测控终端装置的可靠性满足 IEC 61000-4 的四级要求；数据通信规约层国际标准的 IEC 61850，IEC 60870；遵循 ISO-OSI 七层网络参考模型，等等。

3.3.4 系统框架设计

根据大型工业企业智能电网总体框架，大型工业企业智能电网能量优化管理系统主要包括：保障用电设备安全运行和可靠控制的电气监控系统，高效能运行的企业电气能量管理系统，以及在此基础上实现用电系统经济调度，总体框架如图 3-5 所示。通过工业现场总线技术，实时能量监测数据、用能量情况、能耗以及故障情况，实现测控保护设备的组网连接和电气设备运行参数和特征状态信息采集，组建电气监控管理系统，保证配用电设备运行状态的全局监控、故障处理及运行管理，

华中科技大学博士学位论文

提高企业配用电设备运行的系统级安全性，实现定量节能管理策略。

大型工业企业能量管理系统采用分层分布式构架，各层功能如下：

(1) 基础数据采集层：各个数据采集站组成，完成现场的控制和数据采集功能。通过通信方式将各个采集站和监控中心应用服务器连接，实现基础数据的集成。

(2) 数据处理层：由三层交换机、应用服务器、数据服务器、磁盘阵列和后备电源（UPS）等构成。基础数据采集层通过数据采集站把过程数据发送上来，数据处理层的数据服务器对过程数据进行记录、分析、查询、报警等处理。

(3) 监控管理层：由能量监控中心的多个监控管理站及能量监控中心的大屏幕显示系统构成，各监控站可以利用以太网与数据处理层服务器通讯，对数据进行显示、查询、分析、报警等处理，便于更及时、准确地了解各种能量的使用情况。

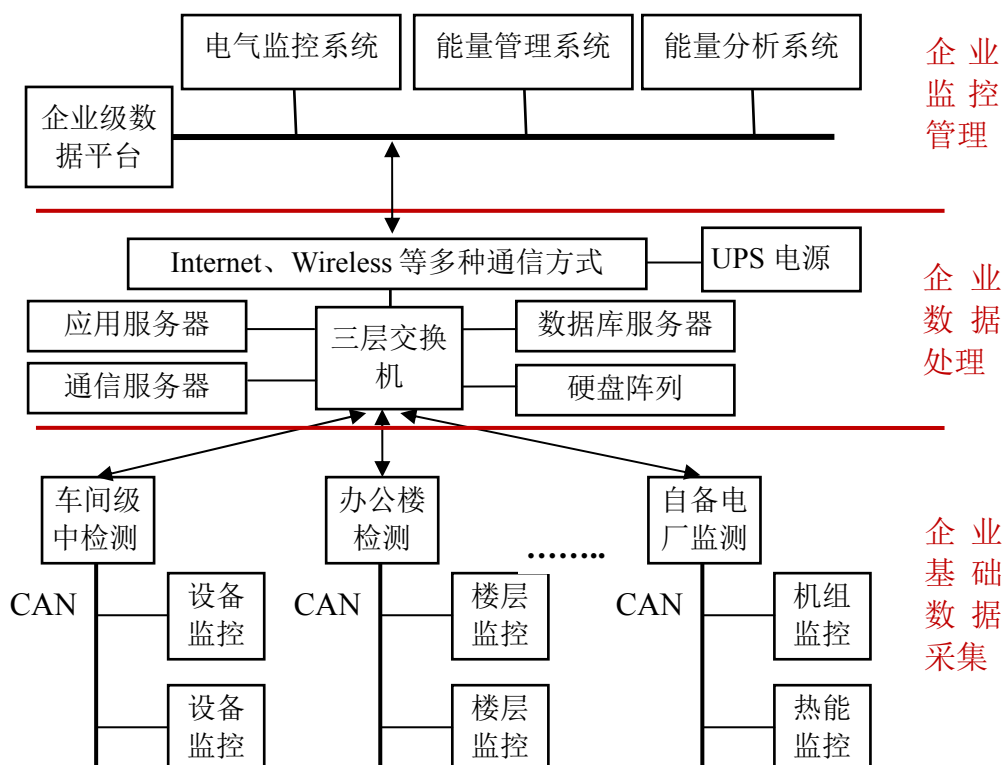


图 3-5 能量管理系统体系结构

华中科技大学博士学位论文

系统对生产过程中所发生的能量信息进行准确汇总，同时对能量采集设备的运行状况进行实时监控。基于系统强大的能量生产信息数据、制造执行系统的综合生产信息数据。

从软件层次结构上看，能量管理系统可分为企业配用电设备层、图模一体化数据层、企业能量分析和管理层以及人机交互界面 4 层，如图 3-6 所示。

(1) 工业企业配用电设备层：主要任务是实时采集企业电气设备、电网运行数据并监视其运行状态，及时控制指令操作终端设备。它向数据平台层提供终端设备运行的实时数据，数据平台层通过它向企业电网发送控制信号。

(2) 图模一体化数据层：主要任务是综合数据平台利用统一建模技术对企业全局信息建模，达到信息的充分共享和访问，从而为企业级能量管理奠定坚实的数据层基础。

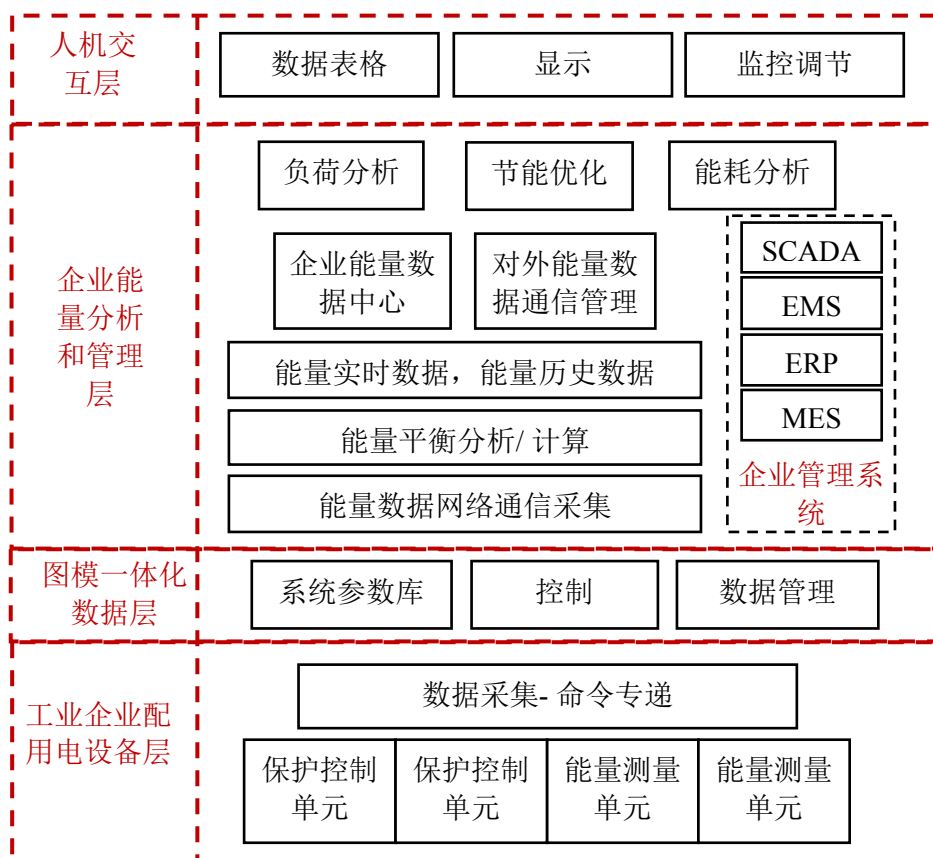


图 3-6 能量管理系统结构层次

(3) 企业能量分析和管理层：利用企业电网全局信息进行调度决策，主要目标是提高控制质量（电源控制、负荷控制）和改善运行的经济性，主要包括负荷预测和管理、动态无功调度、节能调度和能量平衡。

(4) 人机交互层：主要提供管理员与系统的联系手段，使管理员能监视、分析和控制企业电网，并通过图形、报表等形式显示能量管理的过程和结果。

3.4 系统关键模块和技术

3.4.1 人机交互层设计

智能电网的实施，调度员将要面临数据量更大、数据更复杂的电网，会引致调度员难以迅速、准确、全面地了解系统运行实时状态。因此，依照计算机领域人机交互的发展方向以及能量管理系统的实际需求。为满足调度员实时大容量信息、多种类的数据监测和合理显示的需求。

能量管理系统屏幕人机界面要多视图、多个窗口甚至多个屏幕和可视化技术的结合使用，更加显著，有利于减少大量的调画面操作。多视图，多通道界面建立基于交互行为的联动关系，随着计算机软件技术的发展而进步，多通道界面允许用户通过语音、手势、视线等感觉通道、效应通道直接和计算机进行交互，观察对象，内容也随之更新，从而达到人机交互的平衡通讯，并扩大用户的输入带宽，改进输入效率和交互自然性。

鼠标和键盘仍是目前最常用的输入工具，即调度员需操纵辅助工具间接完成输入任务。间接操作模式会使得计算机和调度员之间产生“隔阂”，交互的自然性较差。计算机人机交互技术的发展，提供了实现直接操作的可能性。其中多通道用户界面，常见的输入方式有语音技术、手势技术、视线跟踪技术：

(1) 语音识别技术。大词汇量识别、连续语音识别、多人识别等关键技术已有了很大突破，在某些环境下已达到实用化的标准。此外，结合语音合成技术，可实现直接的问答交互模式。

(2) 手势识别技术。手势识别为实现调度员和计算机进行直接的手势交互提供可能。

(3) 视线跟踪技术。视线跟踪技术的目的在于取代鼠标的选择与点击功能。与鼠标相比，视线跟踪技术有潜力提供更快和更便捷的操作。

在人机交互中，手势识别和视线跟踪都不宜单独使用，有必要与语音识别整合，多个通道整合后的并行输入会比单一的通道更加高效、自然等。

3.4.2 能量分析和管理

能量分析与管理是大选厂能量管理信息系统的重要功能，它是建立在企业现场能量数据采集的可靠性和实时性的基础上。实现能量分析与管理要掌握工业企业完整的能量流向，能量消耗、能量平衡、自动排产等；预测分析模块具有设备故障诊断分析、能耗预测、企业节假日工作安排以及当地的天气环境因素、供电趋势分析、供电质量分析、系统维护等，基于数学模型、计算机和智能控制技术，对相关能量数据进行自动分析和挖掘生产制造，建立企业内部具有能量平衡和预测分析、能量分配与系统优化等功能的能量管理系统，系统功能见图 3-7 所示，介绍系统几种主要功能。

3.4.3 分布式电气化监控

广域电气设备化监控，使终端用户能够安全、可靠和舒适的用电，其关键是解决空间上广域分布的工业企业各厂区用电设备的保护和控制。

实现设备用电的安全保护、运行状态与能耗的测量、电能调节，完成各种预制的逻辑或远程指令控制等分散功能，设备满足国家标准，要安装方便，适应各种现场环境使用。采集的数据通过多种通信方式、保证企业内部通信网络的灵活性和可扩展性，组网灵活。考虑到能量管理的实时性要求，融合工业数据特点的应用层数据交换技术，开发具备智能、开放及分散的具有自检测机制的 CAN 通信总线。利用一体化智能测控和保护装置对分布在生产现场的各个用电能耗设备进行信号采集

运用高性能的工业现场总线技术对测控设备进行分布式组网，从而建立适合大型工业企业的分布式电气监控系统^[85]。

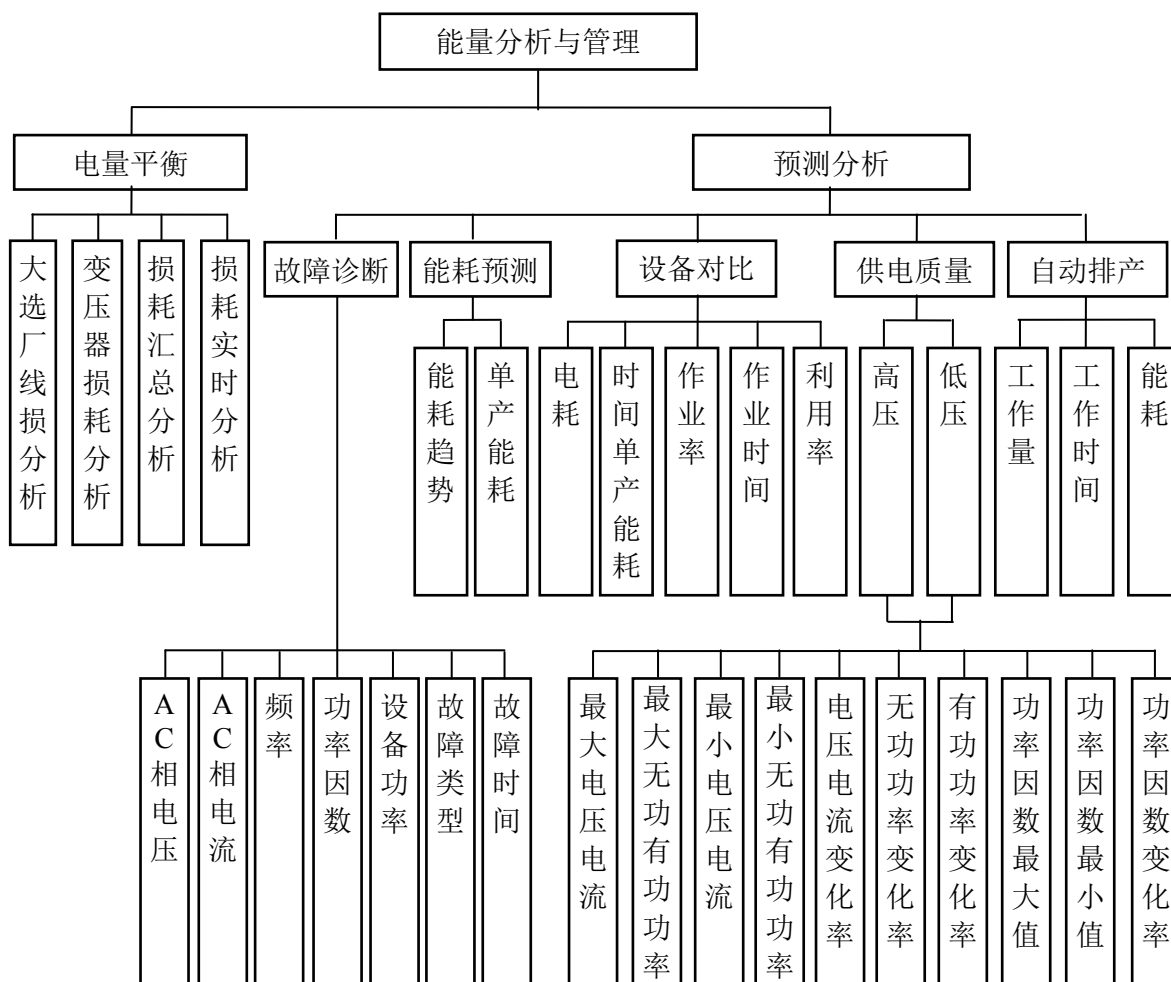


图 3-7 能量分析与管理系统框图

3.4.4 能量管理系统数据流程

能量中心由 I/O 数据服务器、Web 服务器、关系数据服务器等组成。I/O 数据服务器负责原始计量数据的实时采集、历史压缩存储等为能量系统提供实时数据，数据库服务器负责统计数据的收集和存储，工作站负责运行管理系统软件，对数据进行分析处理、权限分配、设备管理、报表打印以及调阅等，系统数据流程如图 3-8 所示。

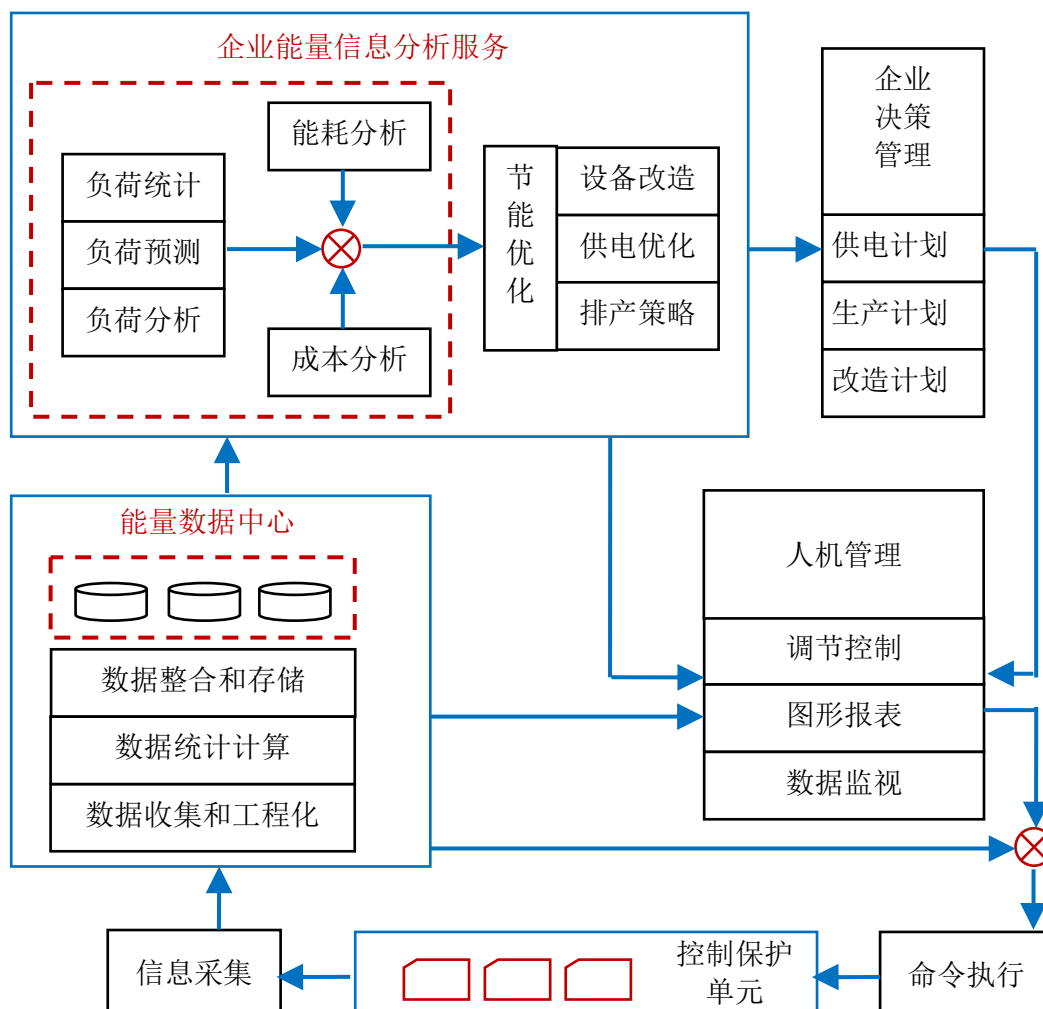


图 3-8 能量管理系统数据流程图

3.4.5 网络设计

根据企业各能量生产站点地理分布广阔的特点，将整个网络系统可分为：数据管理层和数据采集层。

(1) 数据管理层主要实现远程数据采集、管理及服务等功，即对各缓存服务器通过网络传输上来的生产实时数据进行归纳整理、分析处理和分类归档，以形成各种生产报表，并把所有资源信息送入数据库服务器保存，同时把相关的能量数据通过 Web 服务器发布，让企业管理层或调度中心获取更多更高精度的历史生产信

华中科技大学博士学位论文

息，以完成对生产过程分析、生产过程改善、故障查找、跟踪和事故分析和生成各种报表等多项任务。

(2) 数据采集层，主要功能是将采集到的实时数据传送到为该数据采集现场所分配的缓存服务器。

在网络系统设计中，整个网络系统是由一台 Web 服务器、一台实时数据库服务器、一台能量分析数据库和多台数据采集服务器、多台操作员站和一台工程师站构成，系统的结构如图 3-9 所示

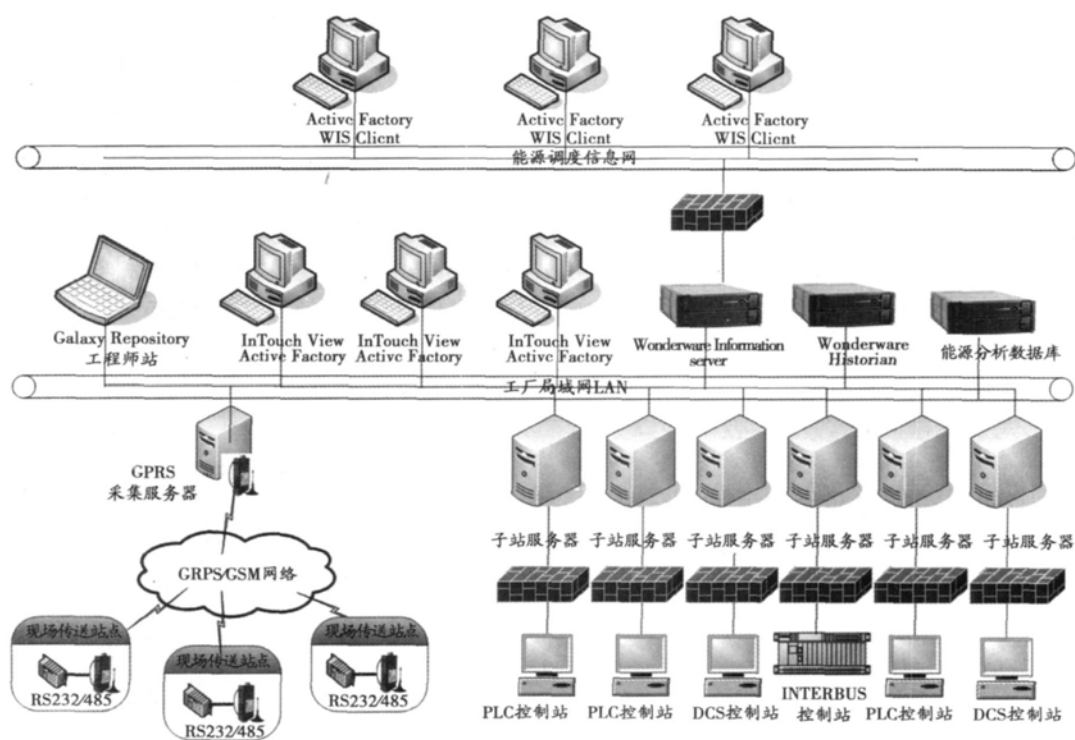


图 3-9 能量综合调度信息网络平台系统结构

3.5 本章小结

本章针对目前中国坚强智能电网的发展要求，并结合大型工业企业能量系统的特点，提出了大型工业企业能量管理系统的构架及其分析技术要求，解决了长期以来在用电企业中电气和能量管理的非专业化，为大多数企业提供了一个可持续实现能耗及节能管理的统一平台。随着国家能源政策的逐步完善和科学化，大型工业企

华中科技大学博士学位论文

业能量管理系统将向着多级分层分布式部署管理的模式发展，为解决企业安全可靠用电、节约用电、节能减排，完善能量生产和使用的评价体制，提高劳动生产率，减少能量消耗，提高能量回收，对企业经济运行、友好环境等，有重要意义。

4 储能电站在智能电网中的应用研究

4.1 引言

电能可以转换为电磁能、势能、动能、化学能等形式存储、按照其转换方式的不同可分为电磁、物理、电化学和相变储能等四大类型。其中电化学储能包括镍氢、铅酸、镍镉、钠硫、锂离子和液流等蓄电池储能；物理储能包括压缩空气储能、飞轮储能和抽水蓄能；电磁储能包括超导磁储能和超级电容器储能；相变储能包括冰蓄冷储能等^[86]。

储能技术是建设智能电网的核心技术之一，智能电网可以对能源进行更有效的调度，使整个电网的能源效率提高。储能技术可以在电力系统中的实现：削峰填谷、需求侧管理、降低供电成本、解决太阳能、风能等新能源并入电网时引起的电网频率及电压的波动、功率优化输出及稳定控制问题、提高系统运行稳定性和可靠性，提高电能质量、实现快速功率响应、黑启动以及参与频率的调整。因此从建设智能电网和平衡负载的角度对多种储能技术进行了综述，通过比较这些储能技术的发展现状及各种储能的优缺点，旨在找出适合智能电网的储能方式^[87-88]。

4.2 多种储能技术详细介绍

4.2.1 超级电容（电容储能）

1. 超级电容器是基于电解液中离子在电极表面形成双电层的理论发展起来一类新型储能元件，该器件具有超大的法拉级电容量，如图 4-1 所示。自本世纪 60 年代以来在研究领域得以广泛的关注，由于该器件在具有较大储能密度的基础上还可以得到超大的比功率，故可广泛应用于各种记忆、储能或备用电源系统。90 年代以来，是计算机、通信设备时代，能源器件的应用日益广泛，更为超级电容器提供了一个巨大的市场，目前已经用于多种后备电源、点火器、太阳能钟表、道路指示标

记、路灯电源和需要快速大电流放电的场合。此外，超级电容器可能的应用领域还包括高功率脉冲激光、电子熔结等方面；超级电容器也有望在大型太阳能储能系统中作为无人职守的能量收集和供给中得到应用。随着超级电容器研究的深入，其应用正在不断的扩展，该器件的市场前景也越来越被看好。

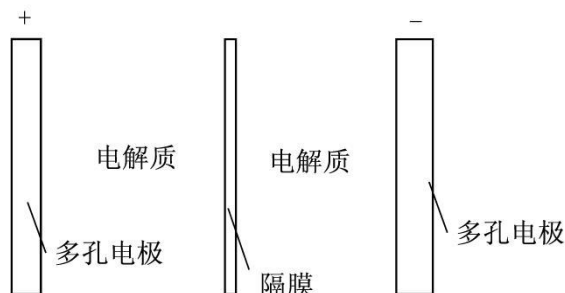


图 4-1 超级电容器储能示意图

2. 超级电容器的结构和原理介绍

按原理分为双电层型超级电容器和赝电容型超级电容器（也称伪电容型超级电容器）：双电层型超级电容器，包括：

(1) 活性炭电极材料，采用了高比面积的活性炭材料经过成型制备电极。

(2) 碳纤维电极材料，采用布、毡等活性炭纤维成形材料，经金属喷涂或熔融浸渍增强其导电性制备电极。

(3) 碳气凝胶电极材料，采用各种含碳前驱材料制备凝胶，经过炭化活化得到电极材料。

(4) 碳纳米管电极材料，碳纳米管具有极好的中孔性能和导电性，采用高比面积的碳纳米管材料，可以制得非常优良的超级电容器电极。

超级电容器的基本类型是利用双电层原理制成的电容器，它是超级电容器中最重要的一种类型，从双电层电容量产生的机理上可见，电解质溶液中只存在离子电导，不允许电子电导，这是双电层电容器的特点，因此也被称为离子电容器。显然，它和一般电容器不同，一般电容器是靠电解质极化能力取得电容量的，而双电层电容器是靠液体和固体界面处存在的正负双电层来取得容量的。双电层电容器的电容量取决于界面双电层电荷，这种电荷不同于电解质的极化电荷。因此，双电层电容器的工作原理完全不同于用氧化物介电质作储电材料的电解电容及陶瓷电容等

华中科技大学博士学位论文

普通电容器，它的静电容量可达几法拉到上万法拉，成为一种介于电容和电池之间的新型电子元件。双电层电容器在充放电过程中，电解质离子在溶液中移动，在电极上仅产生吸附和脱附，因此和伴有化学反应的普通充电电池不同，在反复充放电后其性能的降低极小。

双电层电容器的两个电极是对称的，均是利用了双电层原理获得电容量，两个电极均采用高比面积的活性炭材料制备，另外一类超级电容器是电极不对称的类型，采用氧化物材料作为正极，如氧化钨、氧化镍、氧化锰等，活性炭作为负极，这类电容器称为赝电容型超级电容器，它是利用正极发生电化学反应，负极仍为双电层吸附的机理制作，这类电容器可以看作是介于双电层电容器和充电电池之间的一类超级电容器。还存在一类赝电容型电容器，正负极均利用了材料的电化学反应，如聚合物电极材料制备的超级电容器，这类超级电容器机理与充电电池的原理更相似，可以得到更大的电容量，在外特性上仍表现为电容特征。

比较而言，双电层型超级电容器无论在循环寿命、工作温度、工作电压范围、功率密度以及稳定性和可靠性上，比赝电容型超级电容器具有更大的优势，后者的优点是可以得到更大在能量密度。

赝电容型超级电容器，包括：

包括金属氧化物电极材料与聚合物电极材料，金属氧化物包括 NiOx 、 MnO_2 、 V_2O_5 等作为正极材料，活性炭作为负极材料制备的超级电容器，导电聚合物材料包括 PANi、PPY、PTH、PFPT、PAS 等经 P 型或 N 型或 P/N 型掺杂制取电极，聚合物作为双极或单极制备超级电容器。赝电容型超级电容器具有非常高的能量密度，特别是聚合物作为双极的超级电容器，但是目前除 NiOx 型外，其它类型多处于研究阶段，还没有实现产业化生产。

按电极材料类型可以分为平板型和绕卷型超级电容器：

(1) 平板型超级电容器，在扣式体系中多采用平板状和圆片状的电极，由多对电极隔离叠合而成，多用于制作小容量低功率型超级电容器，另外也有俄罗斯 Econd 公司的多层叠片串联组合而成的高压大功率超级电容器产品，可以达到 300V 以上的工作电压。

华中科技大学博士学位论文

(2) 绕卷型超级电容器，采用活性电极材料涂覆在集流体上，经过绕制得到，这类电容器通常具有更大的电容量和更高的功率密度。

按电解质类型可以分为水性电解质和有机电解质类型：

水性电解质，包括以下几类：

(1) 酸性电解质，多采用 36% 的 H_2SO_4 水溶液作为电解质。

(2) 碱性电解质，通常采用 NaOH 、 KOH 等强碱作为电解质，水作为溶剂。

(3) 中性电解质，通常采用 NaCl 、 KCl 等盐作为电解质，水作为溶剂，多用于氧化物电极材料的电解液。

有机电解质：

通常采用以 LiClO_4 为典型代表的锂盐、 TEABF_4 作为典型代表的季胺盐作为电解质，采用 PC 、 ACN 、 GBL 、 THL 等作为有机溶剂，采用该类电解质可以获得 2 倍于水性电解质的工作电压，可以得到更高的能量密度，因此目前得到更多的重视。

另外还可以分为液体电解质和固体电解质超级电容器：

(1) 液体电解质超级电容器，多数超级电容器电解质均为液态。

(2) 固体电解质超级电容器，随着锂离子电池固态电解质的发展，凝胶电解质和 PEO 等固体电解质应用于超级电容器的研究也随之出现。

3. 超级电容器的特点

超级电容器的显著特点是储能密度大、功率密度高、快速充放电能力强、循环寿命长，尽管该器件出现时间短，但它却有极旺盛的生命力和发展前景，这是因为它具有普通电容器和电池难以兼顾的优点：

(1) 尺寸小，容量大，比电容极高，储能密度大。

(2) 使用温度范围宽。可达 -40°C + 85°C 特殊类型可以得到更宽使用温度。

(3) 功率密度高，可达 300W/kg ~ 5000W/kg ，大电流放电能力超强，能量转换效率高，过程损失小，大电流能量循环效率 $>90\%$ 。

(4) 充放电性能好，无需特殊的限流和充放电控制回路，安全系数高，长期使用免维护，同时循环寿命超长。双电层电容器不受充电电流限制，可快速充电，几秒到几十秒即可达到额定容量的 95% 以上。充电电池的循环寿命多为 300~500

次，超级电容器充放电次数通常大于 10000 次，双电层型甚至可达 500000 次以上，没有“记忆效应”。

(5) 存储和使用寿命长。由于电极采用惰性材料，无化学破坏发生。

(6) 生产成本低，生产、储存、使用、拆解没有污染。

超级电容器可以得到极大的电容量以及优异的瞬时充放电性能，与充电电池相比具有更高的功率密度和更长的使用寿命，与普通电容器相比具有更大的能量密度，此外超级电容器还具有免维护、高可靠性等优点，是一种兼备电容和电池特性的新型元件^[89-93]。

4.2.2 铅酸蓄电池

1. 铅酸蓄电池发展的介绍

蓄电池是电池中的一种，它的作用是把有限的电能储存起来，在合适的地方使用。它的工作原理就是把化学能转化为电能。目前，蓄电池主要按以下原理分类：一般的蓄电池指的就是二次性蓄电池（Chemical Batteries）Secondary Batteries，主要包括锂电池（Lithium Batteries）、铅酸蓄电池（Lead Batteries）、镍镉电池（Ni-Cd）、镍氢电池（Ni-MH）和锂离子电池（Li-ion）；其它类蓄电池，主要包括燃料蓄电池（Fuel Cell）、物理蓄电池（Physical Energy）和太阳蓄电池（Solar Cellbatteries）。铅酸蓄电池应用广泛，交通、电力、航海、航空、通信、军事等各个经济领域。

2. 铅酸蓄电池的结构和原理介绍

常用的铅酸蓄电池主要分为三类，分别为普通蓄电池、干荷蓄电池和免维护蓄电池。

(1) 免维护蓄电池（主要指阀控式密封铅酸蓄电池）：免维护蓄电池的自身结构有优势而且免维护。它还具有耐震、体积小、耐高温、自放电小、电解液的消耗量非常小，使用寿命长。

(2) 普通蓄电池：它的极板是由铅和铅的氧化物构成。普通蓄电池主要优点是价格便宜、电压稳定；普通蓄电池主要缺点是使用寿命短、比能低、日常维护频

繁。

(3) 干荷蓄电池：干荷蓄电池主要优点的是在完全干燥状态下，能在两年内保存所得到的电量，使用时，只需加入电解液，等过 20~30 分钟就可使用。

3. 铅酸蓄电池的特点

(1) 蓄电池在长期运行中无需补充任何液体，在使用过程中不会产生酸雾，气体，维护工作量极小；

(2) 阀控式密封铅酸蓄电池的体积比老式电池小。

(3) 阀控式密封铅酸蓄电池的极板栅采用无锑铅合金、自放电系数很小；

(3) 密封程度高，电解液像凝胶一样被吸收在高孔率的隔离板内，不会轻易流动；

(5) 使用寿命较长，蓄电池的正负极板完全被隔离板包围，有效物质不易脱落。

(6) 蓄电池的内阻较小，大电流放电的特性好。

由于这些优点，近几年在电力系统各个专业部门中得到了广泛应用。但是蓄电池有自身难以克服的问题：

(1) 蓄电池需要严格的维护。为避免 VRLA 蓄电池提前失效，应对 VRLA 蓄电池加以严格的维护，严格根据生产厂家提供的相关设置参数对开关电源进行设定。平时应经常根据蓄电池及充电设备的运行情况及时调整浮充电压，使浮充电压符合 VRLA 蓄电池的要求，避免电压过高，造成对电池的过充引起水分的损失；同时防止电压过低，造成 VRLA 蓄电池的欠充，引起电池极板的硫酸盐化，使电池的容量大大降低。使用先进的具有温度补偿功能的运行设备，可以根据运行环境自动调整运行参数，延长蓄电池使用寿命。

(2) 蓄电池对温度要求高。在实际运行中，VRLA 蓄电池对环境温度的要求比较高，VRLA 蓄电池的最佳环境运行温度为 20~25⁰C。如果使用环境温度过高，使 VRLA 蓄电池在充电过程中产生的热量无法及时扩散到空气中去，加速了电解液的损失，同时也容易通过壳体损失水分，导致电解液的比重升高加速了正极板栅的腐蚀，最终导致 VRLA 蓄电池未达到电池的设计寿命而提前失效。

华中科技大学博士学位论文

(3) 蓄电池的储能电量不能直接得到。在实际应用中，不能根据其储能电量的多寡实时调整储能控制策略^[95-98]。

4.2.3 镍氢蓄电池

1. 镍氢蓄电池的结构和原理介绍

20 世纪 70 年代，镍氢蓄电池是少数国家才正式开始研究。到了 1988 年，镍氢蓄电池开始实用化阶段。20 世纪 90 年代初，日本、美国、法国、德国等国家纷纷开始以镍氢电池为代表的动力电池的研究工作。镍镉电池由于环境污染原因正被污染较小的镍氢电池所取代。

2. 镍氢蓄电池的特点

镍氢电池这些年迅猛发展，表现出来了不少优秀的特性：

(1) 镍氢电池具有较好的低温放电特性，即使在 -20°C 环境温度下，放出的电量也能达到标称容量的 85% 以上，几次充放电循环就能恢复到最大容量。镍氢电池的开路电压为 1.2V，与镍镉电池相同。

(2) 镍氢电池与镍镉电池相同都有记忆效应，但远小于镍镉电池，但大于锂离子电池。每 3 个月进行一次完全充放电可以缓解记忆效应。在良好的使用方式下，镍氢电池的充放电次数可以达到 500 次。

(3) 这种高新技术产品，功率密度和能量密度大，中国 80Ah 的镍氢动力电池功率密度达到了 550W/kg，8Ah 的镍氢电池功率密度达到了 1000 W/kg，春兰公司研发出的镍氢电池最大 600Ah；日本生产的 8Ah 镍氢电池功率密度达到了 1300W/kg，能量密度到达了 45Wh/kg。

(4) 生产成本已经低于锂离子电池，和镍镉电池生产成本相当。

(5) 环保。

4.2.4 锂电池

1. 锂电池的发展，结构和原理介绍

华中科技大学博士学位论文

锂电池（Lithium Battery，简写成 LB）分为锂二次电（Rechargeable LB）和锂一次电池（Primary LB）。锂金属二次电池于 20 世纪 80 年代推出市场，锂原电池的研究开始于 20 世纪 50 年代，在 70 年代实现了民用和军用，后来基于资源与环保的考虑，研究重点转向可反复使用的二次电池。

2. 锂电池的特点

锂电池，这里主要指锂离子电池具有特点：工作电压高；能量密度高；循环寿命长；自放电率小；允许温度范围宽，具有优良的高低温放电性能（可在 -20°C 至 $+60^{\circ}\text{C}$ 之间工作）；无环境污染；无记忆效应。由于锂离子电池具有那些优良的性能，因此它在便携式电子设备、国防工业、空间技术、电动汽车等多方面均展示了广阔的应用前景和潜在的巨大经济效益^[105]。

4.2.5 燃料电池

1. 燃料电池的种类和原理介绍

燃料电池（Fuel Cell）是一种将存在于燃料与氧化剂中的化学能直接转化为电能的发电装置。它从外表上看有正负极和电解质等，像一个蓄电池，它不能“储电”而是“放电长”。1839 年，G.R.Grove 提出了燃料电池的概念，1889 年，Charles Langer 和 Ludwig Mond 两位利用空气和工业煤气制造一个实用的能提供电能的装置，“燃料电池”也就随着他们的发明而为人所知了。

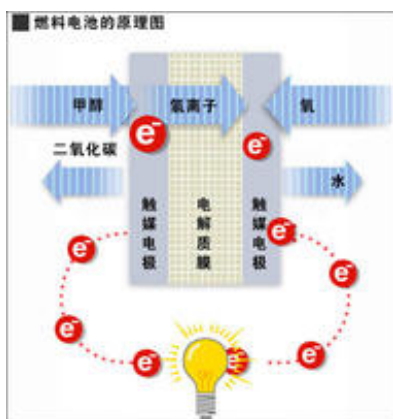


图 4-2 燃料电池原理

华中科技大学博士学位论文

经过多年的探索，最有望用于汽车的是质子交换膜燃料电池（PEMFC）。它的工作原理是：将氢气送到负极，经过催化剂（铂）的作用，氢原子中两个电子被分离出来，这两个电子在正极的吸引下，经外部电路产生电流，失去电子的氢离子（质子）可穿过质子交换膜（即固体电解质），在正极与氧原子和电子重新结合为水，其原理如图 4-2 所示。

燃料电池的种类按不同的方法可大致分类如下：①按燃料类型分：有机燃料，柴油、汽油和天然气等有氢气、甲醇、甲烷、乙烷、丁烷等气体燃料，有气体燃料和机燃料；②按燃料电池工作温度分：有低温型（温度低于 200°C ）；中温型（温度为 $200\sim 750^{\circ}\text{C}$ ）；高温型（温度高于 750°C ）；③按燃料电池的运行机理分：为碱性燃料电池和酸性燃料电池；④按电解质的种类不同分：有熔融盐、酸性、碱性类或固体电解质。

2. 燃料电池的特点

燃料电池十分复杂，涉及化学热力学、电化学、电催化、材料科学、电力系统、及自动控制等学科的有关理论，具有低环境污染、发电效率高等优点，具有以下特点：

- (1) 有害气体、噪音排放都很低，无机械振动。
- (2) 能量转化效率高，因而不受卡诺循环的限制。
- (3) 燃料适用范围广。
- (4) 负荷响应快，运行质量高。
- (5) 容易实现模块化，建设周期短、面积小，规模及安装地点灵活。
- (6) 需要添加燃料，不能进行电能到化学能的转化。

4.2.6 全钒液流电池

1. 全钒液流电池的原理介绍与结构

全钒氧化还原液流电池是一种活性物质呈循环流动液态的氧化还原电池，（Vanadium Redox Battery，简称 VRB），目前发展势头强劲的优秀绿色环保蓄电池之一。全钒液流电池系统主要分 3 部分：电解液、电堆部分、控制系统。

(1) 电堆技术

电堆是提供电化学反应、储能系统电能及化学能相互转换的场所。电堆对电池系统的核心部分，对储能系统的成本、功率、循环寿命、维护等性能有很大的影响。它的研究重点是密封设计、集流体的研究、流场设计、隔膜的研究和电堆的集成等关键技术

(2) 电解液技术

电解液中不同杂质元素的含量对电解液的长期稳定性和充放电效率有影响，向电解液中加入某些适量的稳定剂，提高温度适应范围、长期稳定性等。

(3) 控制系统

主要包括放电、充电控制系统和泵循环。放电控制系统是通过逆变器将钒电池输出的直流电转换。泵循环系统主要包括泵的选择和循环管路设计。充电控制系统主要由直流变换模块和均流控制电路组成。

全钒液流电池工作原理是在对电池进行充、放电实验时，电解液通过泵的作用。钒电池将存储在电解液中的能量转换为电能，这是通过两个不同类型的、被一层隔膜隔开的钒离子之间交换电子来实现的，如图 4-3 所示。

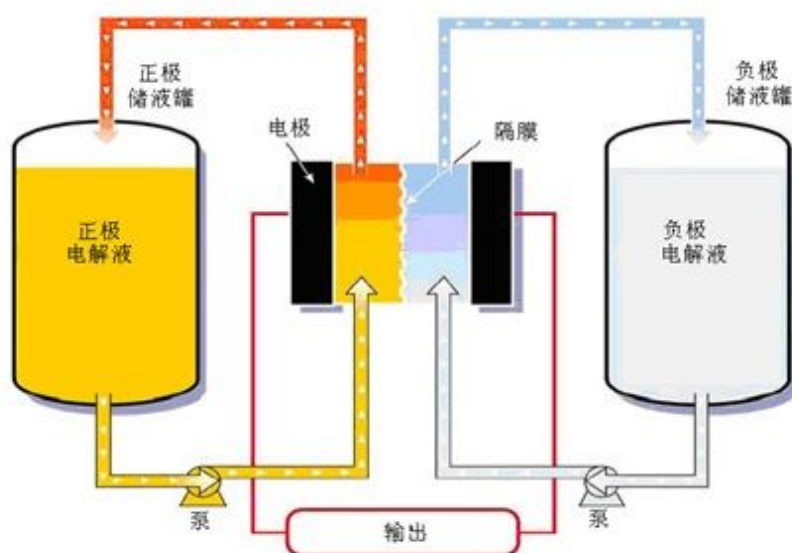


图 4-3 钒电池工作原理示意图

2. 全钒液流电池的特点

(1) 全钒液流系统设计灵活，全钒液流电池系统的功率与容量可以独立设计，按照客户需求配置，其电能的存储量可以在方便地添加来增加系统的独立运行的时间，并实现快速升级。

(2) 能量循环效率高。全钒液流电池系统循环效率可达 65-80%。

(3) 电池寿命长，深度充放电和重复充放电其寿命不会受影响。电池正负极反应均在液相中完成，充放电过程仅仅改变电解液中钒离子状态，没有外界离子参与电化学反应，所以可以满足频繁大电流充放电要求，每天可实现充放电数百次，而不会造成电池容量下降，其电解液可以无限期使用（仅受隔膜的限制）。全钒液流电池充放电次数超过 100000 次，5~10 年后只需更换部分零部件，维护量很少。日本 Tomammae 风电场的全钒液流电池系统，在 3 年的运行时间里实现循环 270000 次。

(4) 能量的存储量可以精确地测量出来；存储起来的能量很稳定。

(5) 全钒液流电池系统充电速度比铅酸蓄电池快，能够实现快速充放电，充放电速度比可达 1.8: 1，满足负载需要，启动速度也快；其输入输出特性可以灵活调整；全钒液流电池系统运行过程中充放电切换时间小于 1 毫秒；全钒液流电池系统支持深度充放电，允许过充过放，深度放电而不损坏电池。

(6) 环保无污染。全钒液流电池系统在常温下封闭运行，符合环保要求，可以完全回收，无处置问题。

(7) 低成本维护。全钒液流电池系统维护成本为 \$0.008/kWh。

中国钒电池产业已经起步，而且发展很快，中国钒电池发展规模预测见表 4-1。

4.2.7 钠硫电池

1. 钠硫电池的原理和结构介绍

钠硫电池是美国福特（Ford）公司于 1967 年首先发明公布，它作为新型化学电源家族中的一个新成员，它有一系列诱人特点，所以现已在很多国家受到较大的发展。

华中科技大学博士学位论文

表 4-1 中国钒电池市场规模

年份	2008 年		2010 年		2020 年	
	需求/GW	产值/亿元	需求/GW	产值/亿元	需求/GW	产值/亿元
光伏发电	0.065	13	0.125	25	7.5	1500
风力发电	3	600	6.25	1250	30	6000
储能调峰	14.16	2832	20	4000	44	8800
通信基站	1.72	344	—	—	—	—
总计	18.945	3789	26.375	5275	81.5	16300

钠硫电池是由正极、电解质、负极、隔膜和外壳等几部分组成，如图 4-4 所示。它是由熔融液态电极和固体电解质组成的，构成其负极的活性物质是熔融金属钠，正极的活性物质是硫和多硫化钠熔盐。钠硫电池中的金属钠为负极，硫为正极，陶瓷管为电解质隔膜，在一定的工作温度下，钠离子透过电解质隔膜与硫之间发生的可逆反应，形成能量的释放和储存^[107]。

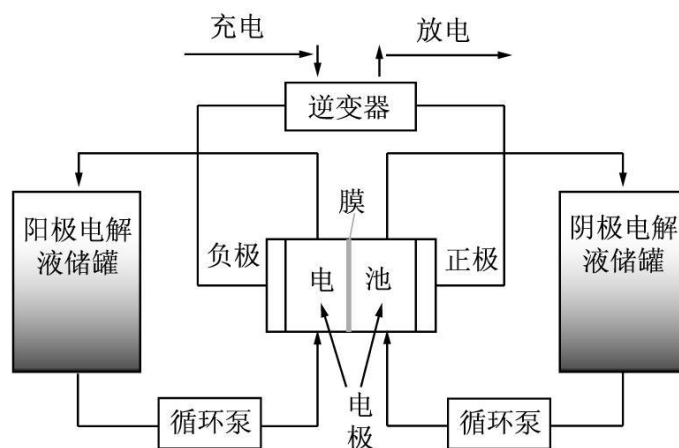


图 4-4 钠硫电池储能示意图

2. 钠硫电池有以下的特点

(1) 钠硫电池的比能量高。

(2) 钠硫电池可高功率、大电流放电，放电电流密度一般可达 200~300mA/cm²。

(3) 钠硫电池充放电效率高。

(4) 钠硫电池和全钒液流电池一样，使用寿命长。

(5) 钠硫电池工作时需要一定的加热保温，因钠硫电池的不足之处是其工作温度在 $300\sim 350^{\circ}\text{C}$ ，但采用高性能的真空绝热保温技术，可有效地解决这一问题。

4.2.8 超导储能

1. 超导储能的结构和原理介绍

超导磁储能系统是以直接利用超导磁体本身存储的能量为目的的超导装置，一般由超导储能线圈、电力电子变流器、低温、测控和保护系统几个主要部分组成，如图 4-5 所示。

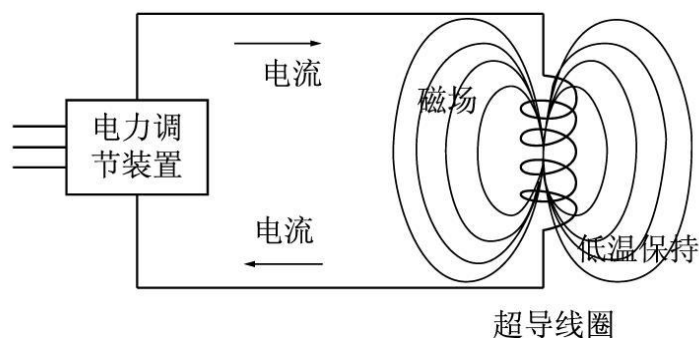


图 4-5 超导储能示意图

超导储能线圈是整个超导储能系统的核心部件，可以是螺旋管线圈或是环形线圈，螺线管线圈结构简单，但其周围的杂散磁场较大，而环形线圈周围的杂散磁场较小，但其结构较复杂。在超导状态时，通过超导线圈直流电流是没有能量损耗，所以可以通过变流器将电网能量整流成直流电流，将能量存储在超导线圈中；同样可以通过变流器的逆变控制，将超导线圈中的能量释放出来。

低温系统用来维持超导材料的极低温的超导状态。一方面减小超导体和外界高温物体的热交换，另一方面可以对系统进行低温控制，保证超导体处于超导状态。

电力电子变流器用于控制电网能量和超导线圈能量交换，使其在整流器和逆变器之间切换，达到有功调节的目的。通过设计控制算法，谐波抑制、亦可达到无功

补偿、潮流控制等目的。测控和保护系统用来保证系统的可靠、安全运行。

2. 超导储能的特点

超导储能和其他的储能方法相比，有如下特点：

- (1) 效率高，其转换效率可达 95%，超导储能装置可以长期无损地存储能量；
- (2) 超导储能响应速度快，可以利用电力电子器件实现与电网的能量交换；
- (3) 超导储能线圈的储能量与功率调制系统的容量可以独立在大范围选取，功率密度大，所以超导储能装置可以建成所需的大能量系统和大功率系统；
- (4) 其不足之处是维持超导所需的低温需要消耗电能。
- (5) 超导储能装置除了制冷和真空系统外，没有转动部分，使用寿命长。
- (6) 超导储能装置的建造不受地点限制，维护简单，低污染。

4.2.9 飞轮储能

1. 飞轮储能的结构和原理介绍

飞轮储能电池系统突破了化学电池的局限，用物理方法实现储能，其结构主要包括三个核心部分：电动机—发电机，电力电子变换装置和一个飞轮，如图 4-6 所示。

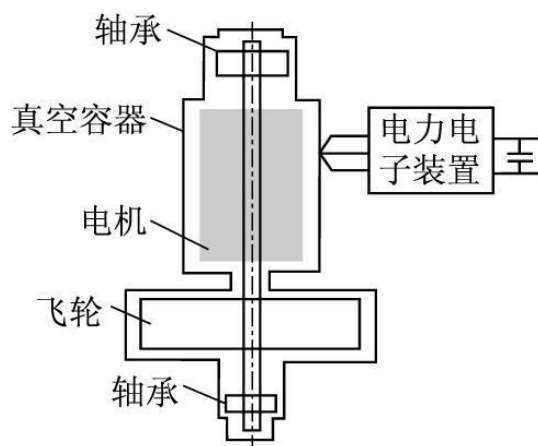


图 4-6 飞轮储能示意图

2. 飞轮储能的特点

与传统的电池（包括蓄电池）相比，飞轮储能电池具有如下优点：

（1）飞轮储能电池有较大的放、充电功率，且无过充、过放问题。飞轮储能系统的充电一般在几分钟之内即可完成，其在深度放电时，性能完全不受影响。而且在电力电子变换装置的协助下，非常容易防止过充电（实际上是限制转子的最高转速）；

（2）飞轮储能电池储能密度高，转子转速大于 60000r/min 的飞轮储能系统，在 75%放电深度下产生大于 20Whr/lb 的比能量；

（3）飞轮储能电池干净、清洁，对环境无任何不良影响。

（4）飞轮储能电池具有较长的使用寿命，其寿命主要取决于其电力电子器件的寿命，故一般可达到 20 年左右，比一般的化学电池的寿命长 5~10 倍，相对整个使用周期来说价格较低；

（5）飞轮储能电池的放电深度容易测量，只要测出转子的转速，就能确切知道其放电深度；

（6）飞轮储能电池储能稳定，对温度不敏感，储能能力不因外界温度等因素的变化而波动；

（7）飞轮储能电池经过合理设计，具有很高的效率，总效率达到 90%以上。

除了上述的几种储能方式外，在电力系统中应用较多的储能方式还有抽水蓄能、压缩空气储能等，这些储能方式在分布式发电中应用不多^[109]。

4.3 储能电站在智能电网中的作用及意义

利用各种类型的储能方式构成的储能系统，实现的储能电站，它应包括储能单元和储能控制模块。它可解决电能供需不平衡问题，自动调节峰谷负荷性，有效地实现需求侧管理，有助于电网大规模并入分布式电源，促进可再生能源、新能源接入电网。并提高电网的安全稳定性，调峰和供电质量，实现电能质量水平，提高经济效益。

各种形式的储能电站可以三种方式帮助用户可靠供电：①调节供电负荷需

华中科技大学博士学位论文

求。②关键时刻辅助供电或者传输电能。③供电中断，为用户供能。根据电网负荷的变化改变运行方式向电网解放或吸收电能，对负荷实施削峰填谷以减少系统输电网络的损耗，获取经济利益。储能电站用于用户侧，可提高电能质量，增强系统可靠性。

新能源、可再生能源直接接入电网后，会引入各种扰动，从而引起系统电压波动和闪变，频率偏差等等电能质量下降，降低可靠度，如果仅将分布式电源作为备用电源，则将会造成资源浪费，经济效益不高。安装一些大容量的电能储能元件，电力紧缺时释放电能，解决供需矛盾。储能电站对风电站、光伏电站等新能源分布式电源送出的电能进行储存或调节，如在一些特殊情况下，无风、夜间时，储能能够向用户供电，还能改善发电机的输出电压和频率质量，增加了分布式发电机组与电网并网运行时的可靠性，有效解决新能源发电不稳定对电网造成的冲击。在电力市场环境下，发电单元拥有者可以根据不同情况向电力公司卖电、供电、提供调峰和紧急功率支持等服务，明显提高分布式发电单元经济效益。

从用电侧考虑，调整用户的用电习惯，错峰用电，调节用户峰谷性，使负荷曲线趋于平缓。电网供电故障中断停电或供电不足储能电站向用户提供电能或辅助供电或传输电能。另外，在坚强智能电网的建设电动汽车的发展，储能技术能够实现运行时低噪音、零排放、环保^[110-112]。

储能电站在增强系统运行稳定性和提高电能质量方面具有更大的优势。总之上看，在智能电网的各个节点储能技术的应用可分类：

- (1) 发电系统：峰荷运行，能量管理，负荷跟踪，负荷调节。
- (2) 输配电系统：改善电能质量，电压控制，提高资产利用率，提高系统可靠性。
- (3) 辅助服务：备用容量管理，频率控制，旋转备用管理，长时期备用管理。
- (4) 可再生能源：可再生能源储备，可再生能源系统集成和发电控制，系统错峰发电。

(5) 终端用户：无功/电压支撑，不停电电源应用，外购电力优化，穿透功率管理。

4.4 储能电站的拓扑结构

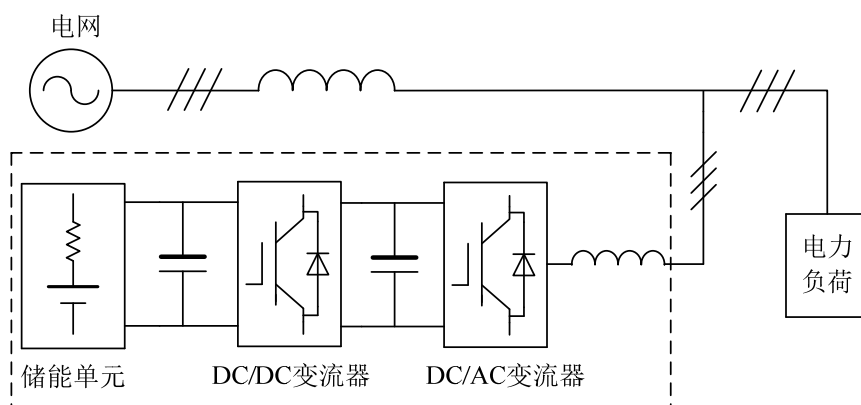


图 4-7 储能电站的拓扑结构图

储能电站的拓扑结构如图 4-7 所示，它主要包括储能单元、DC/DC 变流器以及 DC/AC 变流器等三个部分。整个系统可以进行四个象限运行，实现与电网有功和无功的交换。该储能电站系统在电网正常运行时可以起到静止同步补偿器（D_STATCOM）的作用：抑制电压波动、闪变，维持系统电压基本不变；提高电力系统的静态和动态稳定性，阻尼功率振荡；提高供电系统及负载的功率因数，减小功率损耗。当电网发生供电中断时，储能电站系统能够短时给负荷继续提供电能，从而能够有效提高其供电可靠性。以下将对储能电站各组成部分做进一步的分析和说明。

4.5 储能单元的模型

4.5.1 超级电容器模型

超级电容器最简单的模型结构，如图 4-8 所示，串联 RC 电路，ESR 是等效串联电阻，C 是理想电容，ESR 较重要的参数，它表征了超级电容器内部的发热损耗。只考虑了超级电容器的瞬时动态响应，不能完全符合超级电容器的电气特性。



图 4-8 串联 RC 电路

在串联 RC 电路模型，增加了一个并联等效电阻 EPR 来表征超级电容器的漏电流效应，EPR 影响超级电容器长期储能的参数，如图 4-9 所示。这个改进的模型，能够反映出超级电容器的基本物理特性。

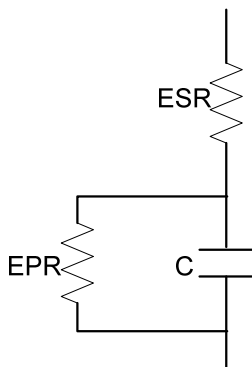


图 4-9 改进型的串联 RC 电路

线性的 RC 网络模型，图 4-10 所示。这超级电容器模型包括五个不同时间常数的 RC 电路。模型的电路结构与传输线模型非常相似，RC 电路的时间常数从左到右依次增大。但线性 RC 模型支路太多，它没有考虑漏电流对超级电容器的长期影响，模型参数辨识复杂。

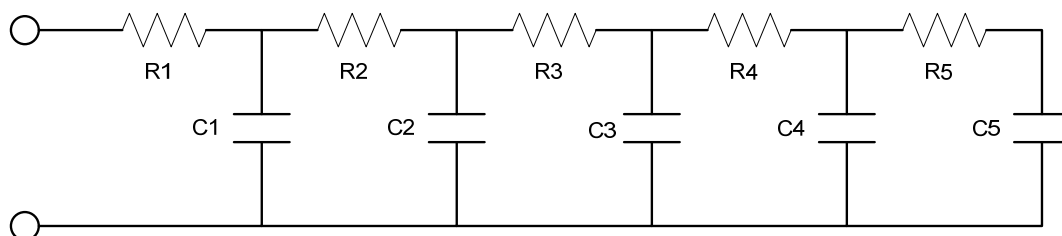


图 4-10 线性 RC 网络模型

在国内外某些文献中，提到了超级电容的非线性 RC 网络模型（三个 RC 支路的非线性模型，参数随温度变化的非线性模型），还提到了基于神经网络（ANN）的模型。这些模型中，最常用的还是串联 RC 电路模型和改进型的串联 RC 电路模型。

4.5.2 蓄电池组模型

蓄电池按照内阻模型建模，可以近似等效为电阻的串联和电动势。该串联电阻和电动势受蓄电池初始状态、温升以及蓄电池的荷电状态（State of Charge, SOC）等因素的影响。

图 4-11 为充电时蓄电池组的等效模型。这些电池采用同一型号，其并联数为 P ，串联数为 S ， I_b 为充电电流（由双向 DC/DC 变换器提供）， E 为单节蓄电池开路电压， I 为流过单节电池的电流， V 为单节电池输出电压， V_{bat} 为蓄电池组的输出电压， R_{SC} 为充电时的等效电阻。

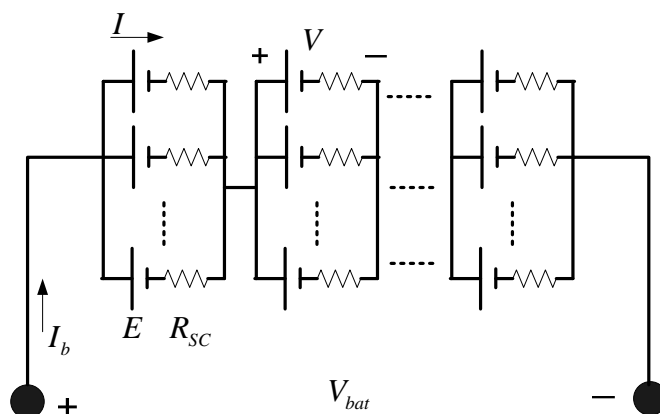


图 4-11 充电时蓄电池组的等效模型

蓄电池工作时的 SOC，是对蓄电池性能影响比较大的参数。由于蓄电池存在自放电，置时间长了相关参数会发生变化，因此在使蓄电池前要知道其初始状态。蓄电池的充电电阻 R_{SC} （与温度 T 和 SOC 关）；蓄电池的开路电压 E （与温度 T 和 SOC 相关）；蓄电池的放电电阻 R_{SD} （与温度 T 和 SOC 相关）；蓄电池的容量 C （与蓄电池的电流 I 关）。相关数据都可以从厂商提供的数据表中查得。

蓄电池的数学模型由以下公式确定：

充电时的功耗 P_{loss} ：

$$P_{loss} = I_b^2 R_{SC_e} \quad (4-1)$$

充电时蓄电池组的等效电阻 R_{SC_e} ：

$$R_{SC_e} = R_{SC} S / P \quad (4-2)$$

放电时蓄电池组的等效电阻 R_{SD_e} :

$$R_{SD_e} = R_{SD} S / P \quad (4-3)$$

放电时的功耗 P_{loss} :

$$P_{loss} = I_h^2 R_{SD_e} \quad (4-4)$$

4.6 DC/DC 双向变换器结构及其控制方法

4.6.1 DC/DC 双向变换器的结构

(1) 电流双象限变换器

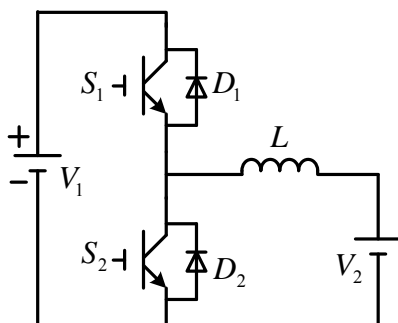


图 4-12 电流双象限变换器

图 4-12 为电流双象限变换器。 S_2 、 D_1 、 L 构成升压变换器，实现电源 V_2 能量向 V_1 的转移。 S_1 、 D_2 、 L 构成降压变换器，可以实现电源 V_1 能量向 V_2 的转移；该拓扑结构简单可靠，开关管和二极管应力较小。

(2) 全桥变换器

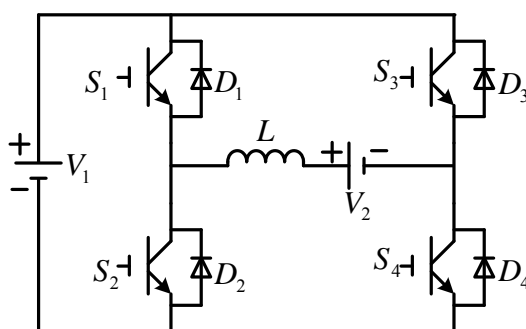


图 4-13 全桥变换器

图 4-13 为全桥变换器。该结构中使 S_4 闭合，则 S_1 、 D_1 、 S_2 、 D_2 、 L 、 V_2 就和电

流双象限变换器结构一致。全桥变换器的优势在于可以实现输出的四象限运行，此处用来传递电源能量，仅利用了电流可逆的功能，且所用开关器件较多。全桥的双向变换功能在隔离式输出中有更广泛的应用，常用于大中功率场合，非隔离式限制了其使用。

(3) T型双向升降压变换器

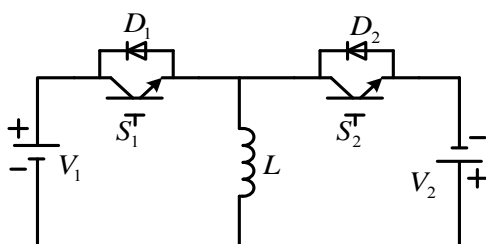


图 4-14 T型双向升降压变换器

图 4-14 为 T 型双向升降压变换器。S₁、D₂、L 和 S₂、D₁、L 分别构成升降压变换器实现能量在 V₁、V₂ 之间的双向流动，但是 V₁、V₂ 的极性相反。

(4) 级联式升降压变换器

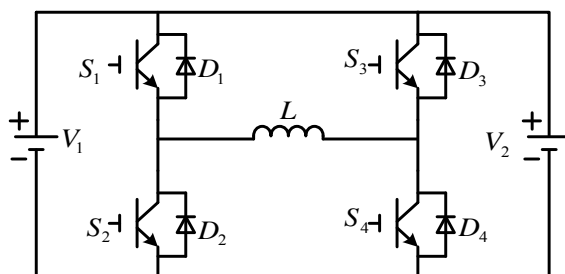


图 4-15 级联式升降压变换器

图 4-15 为级联式升降压变换器。该结构实际上是两个电流双象限变换器的复合，可以实现双向升降压的变换，且其两种电源的极性相同。

(5) CUK 双向变换器

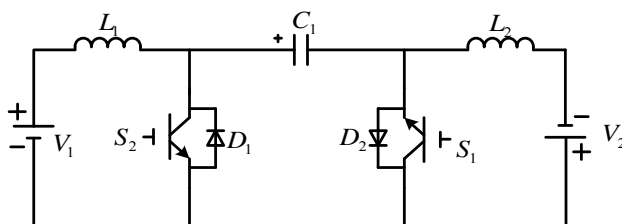


图 4-16 CUK 双向变换器

图 4-16 为 CUK 双向变换器。 L_1 、 S_1 、 C_1 、 D_2 、 L_2 和 L_2 、 S_2 、 C_1 、 D_1 、 L_1 分别构成 CUK 变换器，实现两种能量源之间交换。其优势在于输出输入都有电感滤波，因而输出输入纹波比较小，这对电池的使用非常有益。不过，和 T 型双向升降压变换器的拓扑相同的是，两种电源的极性相反，能量传递过程的中间环节 C_1 为一大容量的电容器，其体积大，成本高，是变换器中最薄弱的环节。与电流双象限变换器结构相比，其所用器件稍多，结构复杂。

(6) Sepic/Zeta 变换器

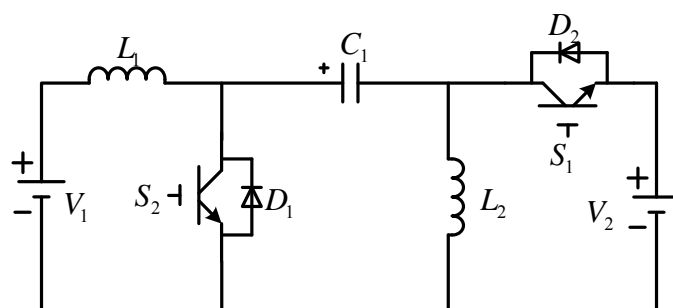


图 4-17 Sepic/Zeta 变换器

图 4-17 为 Sepic/Zeta 变换器。脱胎于 CUK 变换器的 Sepic 和 Zeta 变换器，互为逆反，二者一起构成了具有双向升降压功能的变换器，并且输出输入极性相同，具有共同的参考，这对于测量和使用有益。

基于上述众多优点，目前国外混合储能系统中的变换器多采用的是电流双象限变换器。将以上各种双向变换器功能、特点简单地用表格形式比较如下表 4-2 所示：

表 4-2 常见双向变换器功能及特点对比

变换器	功能	特点
电流双象限变换器	降压/升压	结构简单，电流双象限，应用成熟，电感易于优化设计，同等功率条件下主开关管电压电流应力小
全桥变换器	降压/升压	结构复杂，四象限运行，所用器件较多，应用于中大功率场合，
T 型双向升降压变换器	双向升降压	结构简单，开关管应力大，输出输入极性相反
级联式升降压变换器	双向升降压	结构复杂，开关管应力与电流双象限变换器相似，所用器件多，成本高
CUK 双向变换器	双向升降压	电路结构稍显复杂，电容的使用降低了可靠性，输出输入极性相反
Sepic/Zeta 变换器	双向升降压	电路结构稍显复杂，电容的使用降低了可靠性

4.6.2 DC/DC 双向变换器的控制方法

(1) 电压控制模式

DC/DC 变换器结构如下图 4-18 所示，它以输出电压作为反馈信号构成单闭环电压型控制系统。当电路开关频率远远大于系统开环截止频率时，可将 PWM 功率变换环节近似等效成比例环节，比例系数为 K_{PWM} ，滤波环节一般采用 LC 滤波，传递函数为：

$$G(s) = \frac{R}{RLCs^2 + Ls + R} \quad (4-5)$$

VR 为 PI 环节，传递函数为： $K_{vp} + \frac{K_{vi}}{s}$ ，因此电压开环传递函数：

$$G_{vo}(s) = \frac{K_{PWM}(K_{vp}s + K_{vi})R}{s(RLCs^2 + Ls + R)} \quad (4-6)$$

电压闭环传递函数：

$$G_{vc}(s) = \frac{K_{PWM}(K_{vp}s + K_{vi})R}{RLCs^3 + Ls^2 + (K_{fv}K_{PWM}K_{vp}R + R)s + K_{fv}K_{PWM}K_{vi}R} \quad (4-7)$$

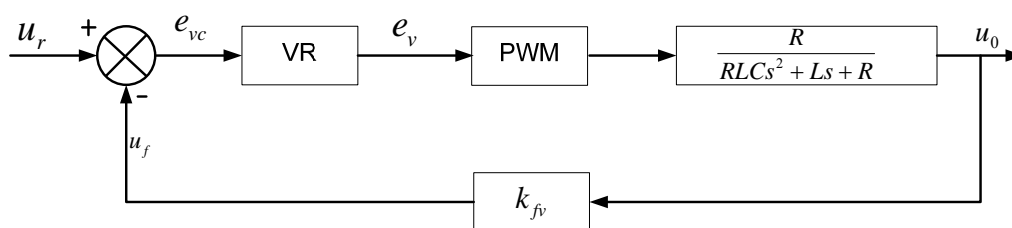


图 4-18 电压模式控制系统框图

由于控制对象为二阶振荡环节，闭环系统等效为三阶模型，当 $k_{vi} = 0$ 时，系统等效为二阶模型，因此系统稳定性差，响应速度慢。

(2) 电流控制模式

为克服电压型控制的不足，有学者提出电流型控制模式，它是在电压环基础上进行状态反馈校正，以输出电感电流为反馈量构成电流内环。下面分析平均电流模式控制的系统特性，其结构如下图 4-19 所示。

CR 为 PI 环节，传递函数为 $K_{ip} + \frac{K_{ii}}{s}$ ，因此电流内环的开环传递函数为：

$$G_{vo}(s) = \frac{K_{PWM}(K_{ip}s + K_{ii})(RCs + 1)}{s(RLCs^2 + Ls + R)} \quad (4-8)$$

电流内环的闭环传递函数为：

$$G_{ic}(s) = \frac{K_{PWM}(K_{ip}s + K_{ii})(RCs + 1)}{RLCs^3 + k_1s^2 + k_2s + K_{fi}K_{PWM}K_{ii}R} \quad (4-9)$$

$$G_{vc}(s) = \frac{K_{PWM}(K_{vp}s + K_{vi})R}{RLCs^3 + Ls^2 + (K_{fv}K_{PWM}K_{vp}R + R)s + K_{fv}K_{PWM}K_{vi}R} \quad (4-10)$$

其中： $k_1 = L + K_{fi}K_{PWM}K_{ip}RC$ ， $k_2 = K_{fi}K_{PWM}K_{ip} + K_{fi}K_{PWM}K_{ii}RC + R$

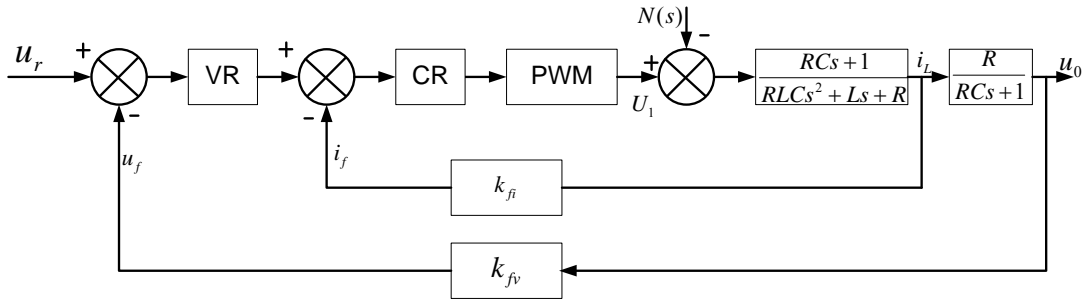


图 4-19 电流模式控制系统框图

由于开环传递函数中有两个零点，使幅频特性展宽，开环截止频率较大，使得电流闭环是一个快速的电流跟随器，而且在稳态时无误差。电流环的截止频率及其时间常数相对电压环而言可以忽略，因此电流环可等效为一个比例环节 $G_i(s)=1/k_{fi}$ ，简化后的电压环等效结构如图 4-20 所示。

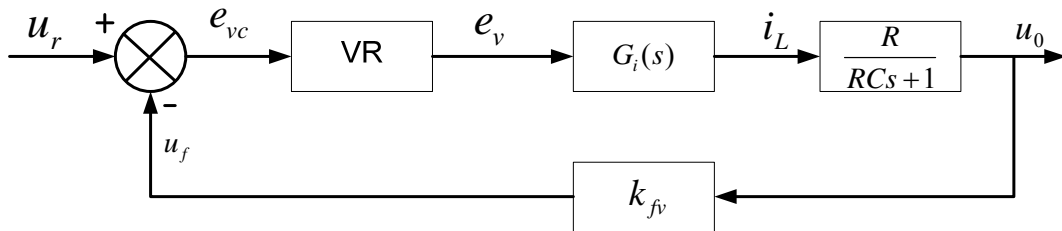


图 4-20 电流模式控制系统电压环等效结构图

这时，电压开环传递函数为：

$$G_{vo}(s) = \frac{(K_{vp}s + K_{vi})R}{K_{fi}s(RCs + 1)} \quad (4-11)$$

电压闭环传递函数为：

$$G_{vc}(s) = \frac{(K_{vp}s + K_{vi})R}{K_{fi}RCs^2 + (K_{fi} + K_{fv}K_{vp}R)s + K_{fv}K_{vi}R} \quad (4-12)$$

电流型控制系统的特点是：①系统稳定范围宽，稳定性强；②系统具有快速电流限制能力，有效降低了开关元件、电感、变压器等关键元器件的电流冲击，保障系统安全工作；③系统动态特性好，响应速度快，可以完全消除输出电压中由于输入电压引入的低频纹波。

(3) 恒压、恒流、恒功率充放电控制

设计了一个具有恒流、恒压、恒功率多种控制功能的控制单元，其结构如图 4-21 所示。采用电流模式控制，系统具有电流和电压两个闭环，可分别对输出电流和输出电压进行精确控制，可方便地实现恒流、恒压、恒功率等多种控制功能。

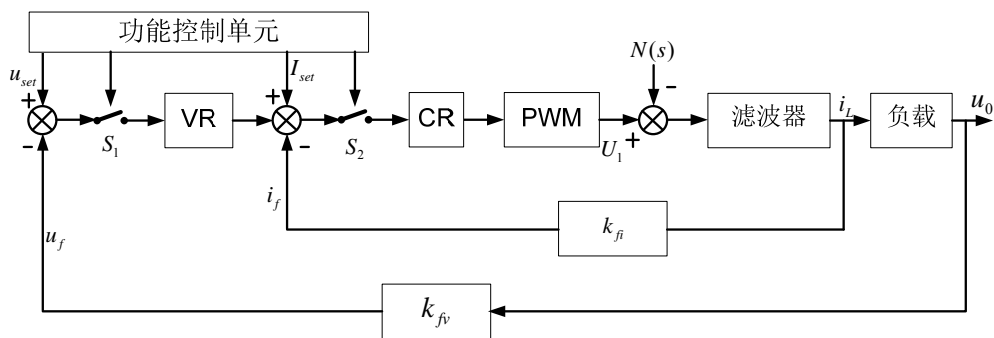


图 4-21 恒压、恒流、恒功率控制结构图

4.7 DC/AC 变换器模型及其介绍

4.7.1 DC/AC 变换器的结构

三相半桥电压源型变换器：图 4-22 是 STATCOM 的基本结构，电容 C 用来保持直流电压，三相桥式变换器用来进行交流直流的变换，经过变压器 T 和三相电网连接。

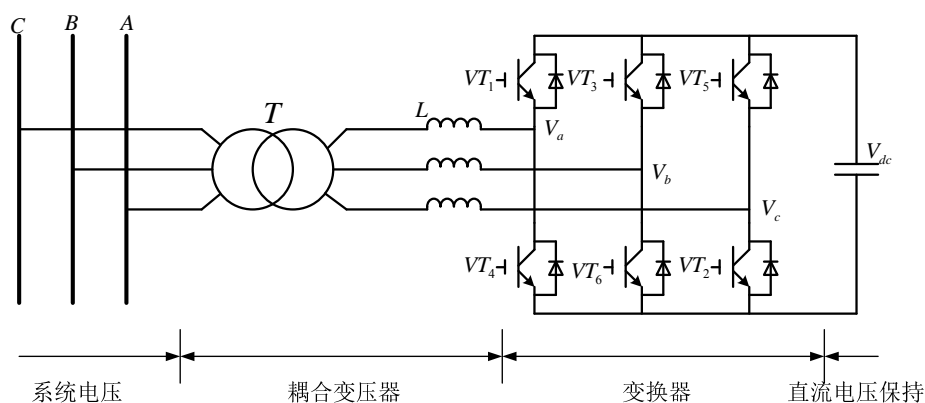


图 4-22 STATCOM 基本结构

4.7.2 DC/AC 变换器电路主参数设计

(1) 开关管 IGBT 的选择

参数主要根据装置的容量和直流侧电压的大小来选择。

U_d 是直流母线电压，逆变器输出的电压最大值：

$$U_{i\max} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_d \quad (4-13)$$

逆变器输出电压实际的有效值为：

$$U_i = \frac{U_{i\max}}{2} \times \alpha \times \beta \quad (4-14)$$

式中， α 是最大调制度， β 是考虑死区的影响系数。

假设系统容量为 S ，其输出线电流 I_N 近似计算为：

$$I_N = \frac{S}{U_i \times \sqrt{3}} \quad (4-15)$$

通态峰值电流 $I_m = \sqrt{2} \times I_N$

一般情况下为了保证器件的可靠工作，器件的耐压水平应选择其工作中可能承受的最大值的两倍。

(2) 连接电感（平波电抗器）的选择

对于连接电感的选择必须满足无功发生器对补偿电流的跟踪能力的要求，所以

华中科技大学博士学位论文

电感不能过大，会导致跟踪电流和参考电流之间的误差较大。如当电感选择太小，会动态相应快，但实际补偿电流相对于期望补偿电流具有较大的超调，造成系统振荡、工作不稳定。

在电感值的选择时可参考工程上推导出的经验公式可以得到电感的上限：

$$L \leq \frac{4U_{dc}}{9 \cdot \omega \cdot I_N} \text{ 或 } L \leq \frac{0.3U_{2N}}{\omega \cdot I_N} \quad (4-16)$$

其中， ω 是需要储能装置补偿的最大谐波的角频率； I_N 是输出线电流有效值。

通过下式可以得到电感的下限值：

$$L \geq \left| \frac{\left(u_{sa} - Ri_{am} - \frac{2}{3}U_{dc} \right) (u_{sa} - Ri_{am}) T_s}{\Delta i_{g \max} \left(2u_{sa} - 2Ri_{am} - \frac{2}{3}U_{dc} \right)} \right| \quad (4-17)$$

式中， u_{sa} 是 A 相电压， T_s 为 PWM 开关周期， $i_{am} = I_{gm} = \sqrt{2}I_{gN}$ ， $\Delta i_{g \max} = THD \times I_{gm}$ ， R 为变换器等效损耗， U_{dc} 是直流母线电压。

(3) 变压器的选择

使用电力电子器件达到交、直流变换的目的，但由于电力电子器件耐压所限，其产生的交流电压一般不会超过 1kV，所以必须使用三相变压器和电网的 10kV 母线连接。该三相变压器选择有以下几点要求：按照变换器设计容量的 120% 设计，20% 的裕度保证安全可靠；不能选用一般的变压器，必须选取具有一定漏抗值的整流变压器，可以选择油浸式或干式变压器；其漏抗值可以和平波电抗器为参考选取。

4.7.3 DC/AC 变换器的控制方法

(1) DC/AC 变换器原型

设计中使用的变换器原型是 STATCOM 的基本模型。通过控制变换器输出的交流电压的幅值，便可以控制 STATCOM 向交流电网提供或是吸收的无功功率大小。基本的向量关系如图 4-23 所示：

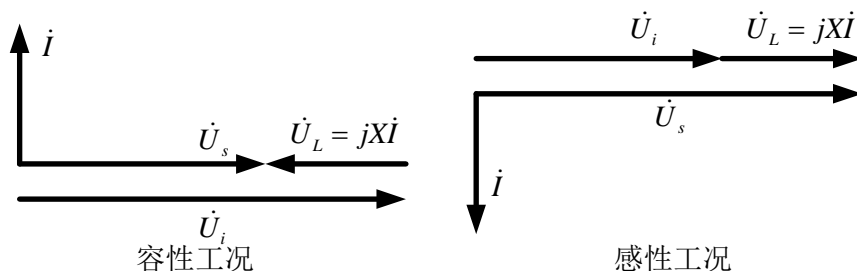


图 4-23 STATCOM 的容性工况和感性工况原理

为了平衡无功补偿中装置的有功损耗，可以控制 STATCOM 的交流电压的相位，适当地吸收电网的有功功率，用来稳定直流母线电容的电压。所以实际的 STATCOM 工作的基本向量关系如下图 4-24 所示：

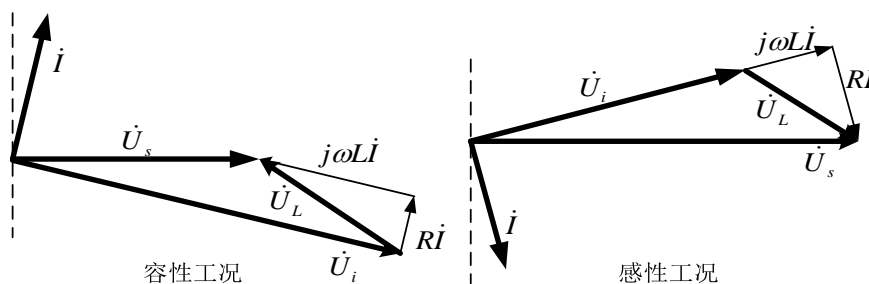


图 4-24 实际工作时 STATCOM 的容性工况和感性工况向量关系

为了分别控制有功和无功的大小，一般采用双轴变换法（dq0 分解法）进行控制。

(2) 双轴变换法原理

这里的双轴变换法就是著名的派克变换，即根据双反应原理将参考坐标自旋转电机的定子侧转移到转子上的坐标变换。在 a、b、c 三相对称的电路中，使用一组参考旋转向量为坐标亦可以借鉴这种变换。其变换关系为：

$$f_{dq0} = P f_{abc} \text{ 或 } f_{abc} = P^{-1} f_{dq0} \tag{4-18}$$

其中，

$$P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (4-19)$$

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) & 1 \end{bmatrix} \quad (4-20)$$

$$f_{dq0} = \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix}, \quad f_{abc} = \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (4-21)$$

参与变换的三相波形 f_{abc} 的幅值为: $|f_a| = |f_b| = |f_c| = \sqrt{f_d^2 + f_q^2}$

其与参考旋转向量的相角为: $\angle f = \arctan(V_q/V_d)$

特别地, 将三相线路中的电流和电压信号检测出来, 并将三相电流和电压信号按照其三相电压信号为参考旋转向量做上述变换, 得到电流和电压的 dq 结果, 即 i_d 、 i_q 、 U_d 、 U_q 。线路的有功功率和无功功率为:

$$\begin{aligned} P &= V_d \times I_d + V_q \times I_q \\ Q &= V_q \times I_d - V_d \times I_q \end{aligned} \quad (4-22)$$

经过 dq 解耦控制, 可以方便地控制 STATCOM 输出的有功和无功功率。

(3) DC/AC 变换器的改进

使用 STATCOM 的 DC/AC 变换器原型以及 dq 解耦控制方式, 可以独立控制 STATCOM 输出的有功和无功功率。为了满足本工程的需要, DC/AC 变换器需要部分改进。

有功的控制, STATCOM 的有功控制主要用来稳定直流母线的电容电压, 改进后的变换器可以按照有功功率指令输出或输入有功功率。大容量有功功率的交换, 会导致直流母线电容电压的剧烈变化, 这就要使用 DC/DC 变换器将电容中的能量和

超级电容或电池的存储能量进行交换，稳定直流电容电压。

有功负荷功率平滑控制。在控制器的有功功率控制设计中，控制该储能系统在负荷较小时从电网吸收电能并存储在超级电容等储能体中，在负荷高峰时将存储的电能释放，达到将负荷功率波动削峰填谷的目的，进而提高电力设备的使用效率。

备用安全电源功能。在电网失电的情况下，使用该储能系统为工业企业电设备提供 2 小时到 4 小时的 1MW 左右的电力支撑，保证在电网恢复前企业生产系统正常运行或重要设备的安全退出。

无功的控制。按照控制器的设计可以完成电压补偿无功动态控制和固定无功容量补偿方式两种。按照仿真结果可以看到无功补偿的响应速度可以达到 30ms 以内，满足负荷的无功动态需求，达到无功功率就地补偿的目的。

谐波抑制控制。从控制器的拓扑结构可以看出，该结构与有源电力滤波器相近，所以仅改进控制器的设计就可以达到抑制谐波电流的功能：产生一组和负载谐波幅值相同、相位相反的谐波电流，达到抵消谐波、抑制谐波的目的。

电能质量监控。综合谐波抑制功能和无功补偿功能，将电网电压和电流的波形进行控制，使谐波电流和工频电压幅值误差减小，保护工业企业重要敏感设备的运行安全。

控制系统的 PI 调节器的设计。为了使有功、无功控制达到快速响应的目的，这里会加入闭环 PI 调节控制。在电压闭环控制的基础上，研究以输出电感电流为反馈量的电流内环闭环控制策略，建立“电流内环、电压外环控制”，达到有功功率和无功功率控制快速响应的目的。

冗余性设计。为了保证储能系统的可靠性，还应该加入冗余性设计：使用不同的厂家生产的储能体，互为安全后备，满足供电可靠性。

4.8 本章小结

本章详细分析了多种储能技术的特性、优缺点，并针对储能装置的控制方式研究。智能电网要求电能质量更高，适应所有的电源种类和电能储存方式，掌握各种储能技术的充放电特性、控制方法、规模化程度等，可以应用在智能电网的不同节

华中科技大学博士学位论文

点上。提高运营效率，能优化电网资产，并且电网能够经济、互动、优质、自愈、安全，是中国建设智能电网的目标。

而风能、太阳能等新能源发电要求平滑上网，储能电站保证发出的电力能够平稳地输送到电网。储能电站响应快速，能大电流放电，可以作为供电的备用电源的首选。储能电站在改变了传统电力系统发电、输电、变电、配用电瞬时平衡的运行规律，将会给电力系统带来一系列革命性的变化，储能电站向电网提供最优化的有功和无功功率，支持电网的黑启动，进行电能质量控制等其他领域。

5 大型工业企业智能电网接纳新能源

5.1 引言

可再生能源和新能源（除水能外还主要包括风能、地热能、太阳能、海洋能、生物质能、氢能等），与化石燃料和核燃料相比，其资源更丰富、分布更广泛，其具有可持续性和环境友好性，能够有效降低 CO₂ 等温室气体的排放。一方面能源危机与环境污染的加剧，迫切需要引入低排放、低污染的能源以降低环境压力。为降低随之产生的社会成本、减少温室气体的排放，需要建立考虑可再生能源潜在价值的新能源发展机制^[121-122]。

为了实现国家能源发展战略目标，国家电网公司提出，智能电网的规划与建设应高度重视新能源发电，促进中国新能源的规模化发展，要引入大量新能源发电，智能电网可以让新能源的使用占能源需求的 30% 或以上这些新能源包括风能、太阳能、海洋能等，可持续利用，资源潜力大，在满足能源需求、保护环境、促进经济发展等方面发挥着重要作用，但受地理环境、季节、昼夜等影响。而智能电网，新技术的研究和应用将使之成为接纳新能源的“高速公路”^[123]。

5.2 风力发电，太阳能发电

本论文只参阅相关的材料、文章等总结了风力发电的特点及中国风机研发的主要技术难点和太阳能发电的优点及其存在的问题。

5.2.1 风力发电特点

1. 优点：

- (1) 风力发电不消耗资源、不污染环境，具有广阔的发展前景；
- (2) 建设周期一般很短，一台风机的运输安装时间不超过三个月，万千瓦级风电场建设期不到一年，而且安装一台可投产一台；

- (3) 装机规模灵活，可根据资金多少来确定，为筹集资金带来便利；
- (4) 运行简单，可完全做到无人值守；
- (5) 实际占地少，机组与监控、变电等建筑仅占风电场约 1% 的土地，其余场地仍可供农、牧、渔使用；
- (6) 对土地要求低，在山丘、海边、河堤、荒漠等地形条件下均可建设；
- (7) 在发电方式上还有多样化的特点，既可联网运行，也可和柴油发电机等级成互补系统或独立运行^[124]。

2. 缺点：

- (1) 风能与风电的不确定性和波动性，无法准确估计每台风电机组的输出功率的分布情况，电源频率需要变频，一般先整流在逆变成 50Hz 交流。
- (2) 风力发电仅当有风时才能够发电，调度能力较差；
- (3) 风力发电通常集中于边远地区或沿海地区，远离主要的负荷中心，需要坚强的输电系统支持；
- (4) 可预测性差，受当前预测技术的限制，很难准确预测风力情况以安排发电计划；
- (5) 占用空间大，通常生产相同的电量，需要多台风力发电设备才能够达到一台火电机组正常运行时的水平；
- (6) 发电成本还较高，现风力发电成本通常是火电成本的 2~5 倍^[121-124]。

5.2.2 中国风机研发的主要技术难点

(1) 现在风机理论研究的一个重要方向就是设计合理、使用寿命较长的风机叶片、气动性能优良。中国实际情况下，设计出高质量的叶片，提高风能利用系数。在确定产品总体设计方案要充分应用国际最新科技发展水平，又要注意与中国的实际整体工业发展水平相结合。

(2) 风速的可变性，直接导致了风电机组输出功率，影响电网中大规模。因此要依靠气象预测和历史数据，预测的方法，考虑风电场的风力特性，考虑其平均

华中科技大学博士学位论文

风速。掌握风速的变化规律有助于电网的规划和电力系统的运行。

(3) 开发、研究具有自主知识产权的风力发电机控制技术。在风机设计领域，目前中国的大型风机制造厂家多数采用引进国外技术的方式，或联合设计的方式，既充分吸收国外风机控制技术的先进发展成果，还要独立的自主知识产权。

(4) 研究适合国内运行环境特点的风机设计方案

由于中国面积大，风能资源较好，大多处于北方地区，沿海等。但中国南北的环境温度有差异的特点，例如北方风电场要求的风机生存温度为零下 40° ，正常运行温度为零下 30° 。因此，在风机设计过程中，针对高风沙、超低温的恶劣运行环境，零部件结构设计、材料的选择及性能的控制方面须具有保证产品运行高可靠性及高安全性的特点。

(5) 准确的风机载荷计算及优化设计分析

由于风机运行工况的多样性及受力情况的复杂性，在各种运行工况下准确计算风机各零部件的载荷对于优化产品设计，提高产品运行的可靠性及安全性，降低产品成本。利用风机设计领域国际先进的载荷计算方法及先进的有限元分析方法进行风机的优化设计。

5.2.3 光伏发电的优点及其存在问题

目前太阳能的利用形式主要有光伏发电利用、光热利用、光化学转换三种形式。其中，光化学转换在自然界中以光合作用的形式普遍存在，但目前人类还不能很好地利用。光伏发电以电能作为最终输出形式，具有传输极其方便的特点，在通用性，可存储性等方面具有前两者无法替代的优势。光热利用具有方便、低成本、利用效率较高等优点，但热能不便传输，一般只能就地使用，而且热能不具备通用性^[130]。且由于光伏电池的原料一硅的储量十分丰富、转换效率的不断提高、生产成本的不断下降，都促使太阳能光伏发电在能、环境和人类社会未来发展中占据重要地位，因而光伏发电受到广泛关注。

光伏发电还有许多特殊优势，尤其是它可以为特殊场合供电，边远地区，综合经济效益大大提升，因此不能单纯与传统发电模式比较单位发电成本。光伏发电可

华中科技大学博士学位论文

以降低温室气体和污染物排放、保障能源安全和促进边远农村、创造就业机会，尤其是海岛的发展。总之，发展光伏发电有许多经济、社会和环境保护的积极意义。

实际应用中光伏发电还存在以下问题：

(1) 光伏发电成本高。但近年来多晶硅等上游材料价格的降低，光伏发电的成本与传统发电的成本差距也减小。

(2) 光伏发电中光电转换效率低，且光伏阵列的输出功率大小与外部环境密切相关，为了充分利用光伏阵列，通常在光伏发电系统中增加辅助电路以获得最大的输出功率。从而使系统的控制难度和复杂性相应增加。

(3) 光伏发电在系统并网运行时，需要同时实现的目标包括并网电流的正弦度、最大功率点跟踪、孤岛检测等，控制复杂。另外，光伏阵列一般安装在屋顶等工程技术人员比较难以达到的地方，实现并网发电系统要远程监控^[130]。

5.3 不对称电网故障下直驱永磁风力发电系统电网侧变换器的模糊功率控制

直驱永磁式同步风力发电机组与非直驱式风力发电系统（即双馈式风力发电系统）的区别主要是没有齿轮箱的直接发电机驱动结构，因没有变速箱而具有机组寿命长、维护方便、效率高、稳定性高、有功及无功功率可调等优点^[135]，一方面直驱型风力发电系统有机械损耗小、运行可靠性和发电效率高、装机容量大、便于维护等特点，近年来在风电场中逐步得到了广泛应用。

风电系统在电网运行中，若风电机组在电网发生故障时仍采取被动保护式解列方式，则会增加整个系统的恢复难度，甚至可能加剧故障，严重影响到电网的安全运行。为此，新的电网规则均要求当电网发生故障时，风电系统能够在一定时间范围内保持并网运行，甚至还需为电网提供一定的无功功率以帮助电网恢复正常工作。目前，国内外学者在风电故障穿越方面的研究已取得了丰硕的成果^[136-146]。其中，文献[139-144]主要侧重于解决电网规则提出的第一项要求，即电网故障时风机保持不脱网运行，而对于电网规则提出的第二项要求，即同时为电网提供一定的无功功率以支撑电网电压，并未做进一步的分析研究。文献[145]通过在并网变换器直

流侧增加卸荷负载构成直流侧 Crowbar 保护电路，实现了电网电压跌落时永磁直驱发电系统在保持不脱网运行的同时，还能为电网提供一定的无功功率，但所提出的无功控制方式在电网电压处于深度跌落，且风机输出功率也较大时，可能会导致并网变换器直流侧产生较大的卸荷功率，从而给卸荷负载造成较大的负担，如散热设计等问题，严重时还会影响到系统的正常运行。

文献[146]提出了一种基于储能的直驱风电系统的功率控制策略，在使风电系统输出较为平滑的功率的同时，还具有较强的低电压穿越能力。本节在文献[146]的基础上对电网侧变换器提出了一种模糊功率控制策略，使得风电系统在电网发生故障时仍能正常运行的同时，还能适度地为电网提供一定的无功功率以帮助电网恢复正常工作。

5.3.1 系统的工作原理

图 5-1 是本节采用的含储能的直驱永磁风电系统的拓扑结构。电机侧变流器由 Boost 变换器、滤波电容、以及三相不可控整流桥构成，用于控制风力发电机的有功输出，并实现最大功率跟踪；电网侧变流器通过调节网侧的 q 轴和 d 轴电流，控制其直流侧电压稳定以及输出到电网的无功功率，实现有功和无功的解耦控制，通常运行在单位功率因数状态。电网侧变流器直流侧接入储能系统，该系统由双向 DC/DC 变换器以及超级电容器组等构成，用于调节风力发电机的有功输出，使风电系统输出较为平滑的有功功率。

图 5-2 是本节采用的基于超级电容器的直驱永磁风电系统变流器的控制框图。电网侧变流器采用抑制交流侧负序电流的不平衡控制策略，使得电网在不对称故障情况下，风力发电系统的三相并网电流仍然能够保持基本对称，从而有利于对电网侧变换器可能会产生的过电流进行统一限流控制。当电网电压正常时，储能控制系统的控制开关切换至端口 1，这样储能系统将运行在平滑风电功率波动的模式，使风力发电系统输出较为平滑的有功功率^[135]。当电网电压发生深度跌落时，电机侧变流器仍保持其输出功率 P_G 不变，当电网侧变流器的正序有功指令电流 i_{qP^*} 超过其限制值时，储能控制系统的控制开关切换至端口 2，

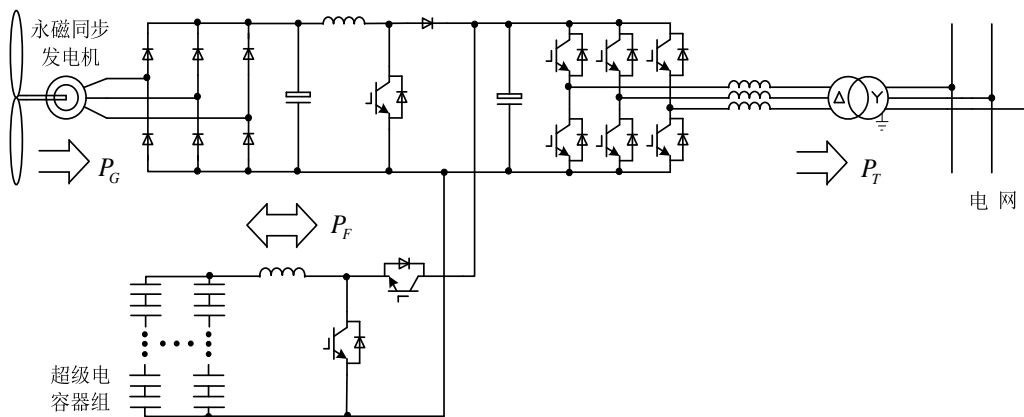


图 5-1 基于超级电容器的并网永磁直驱式风力发电系统

储能系统按照电压外环、电流内环的双闭环控制方式运行，从而限制直流侧的电压升高，以保持直流侧的输入/输出功率平衡，使得电网故障期间风力发电系统仍然能够保持不脱网运行。当电网故障切除后，储能控制系统的控制开关重新切换至端口 1，系统将迅速恢复到正常的工作状态。

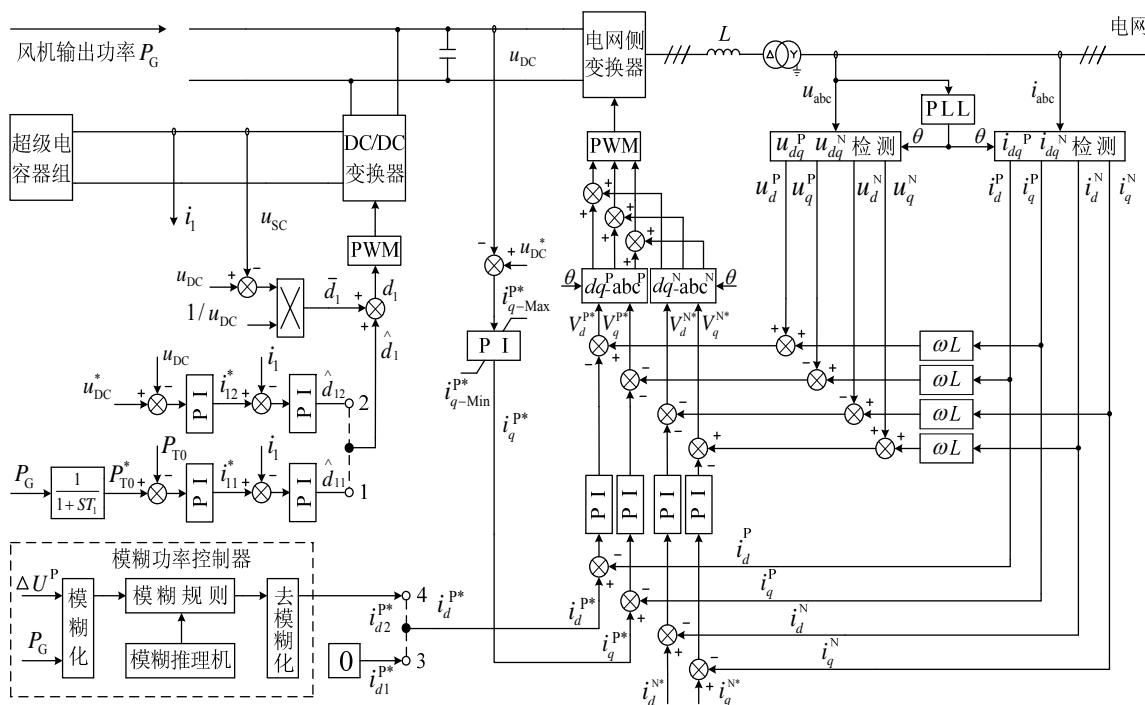


图 5-2 基于超级电容器的并网永磁直驱式风力发电系统中变换器的控制框图

5.3.2 网侧变换器的模糊功率控制

文献[146]中电网侧变流器的无功给定为 0，始终运行在单位功率因数状态，即当电网发生故障时缺乏向电网提供无功功率的能力。对此，本节在无功给定环节引入模糊功率控制器，如图 5-2 所示。当电网正常运行时，控制开关连接端口 3，此时系统将运行在单位功率因数状态；当电网发生故障时，控制开关切换到端口 4，此时系统将运行在模糊功率控制状态，实时适度地向电网输出一定的无功功率以帮助电网恢复正常工作。当电网故障切除后，控制开关再重新切换到端口 3，系统将随之恢复到单位功率因数状态。

当电网发生不对称故障时，风电系统的并网功率可表示为^[135]：

$$\begin{bmatrix} P_{T0} \\ P_{Ts2} \\ P_{Tc2} \\ Q_{T0} \\ Q_{Ts2} \\ Q_{Tc2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d^P & u_q^P & u_d^N & u_q^N \\ u_q^N & -u_d^N & -u_q^P & u_d^P \\ u_d^N & u_q^N & u_d^P & u_q^P \\ u_q^P & -u_d^P & u_q^N & -u_d^N \\ -u_d^N & -u_q^N & u_d^P & u_q^P \\ u_q^N & -u_d^N & u_q^P & -u_d^P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^P \\ i_q^P \\ i_d^N \\ i_q^N \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

式中 P_{T0} 表示为并网平均有功功率、 Q_{T0} 表示为并网平均无功功率， P_{Ts2} 、 P_{Tc2} 表示为 2 倍频有功正弦分量， P_{Tc2} 表示为 2 倍频有功余弦分量， Q_{Ts2} 表示为 2 倍频无功正弦分量， Q_{Tc2} 表示为 2 倍频无功余弦分量， i_d^P 、 i_q^P 分别表示为并网正序电流的有功、无功分量， i_d^N 、 i_q^N 分别表示为并网负序电流的有功、无功分量。所有变量均采用标么值。

电网侧变流器在采用抑制交流侧负序电流的不平衡控制策略下，可消除网侧变换器交流侧的负序电流，即 $i_d^N=i_q^N=0$ 。代入式 (5-1) 可得：

$$\begin{cases} P_{T0} = u_q^P i_q^P + u_d^P i_d^P \\ Q_{T0} = u_q^P i_d^P - u_d^P i_q^P \end{cases} \quad (5-2)$$

若采用 q 轴与电网正序电压矢量同轴，则 $u_d^P = 0$ ，代入式 (5-2) 可得：

华中科技大学博士学位论文

$$\begin{cases} P_{T0} = u_q^P i_q^P \\ Q_{T0} = u_d^P i_d^P \end{cases} \quad (5-3)$$

由此可知，电网正序电压的幅值大小 U^P 将直接影响到风电系统的功率输出能力。

为满足网侧变流器热容量要求，需限定其输出电流 i^P ，本节取 $i_{_Max}^P = 1.5$ (pu)。

当电网发生故障时，若正序无功电流的控制输出为 i_d^P ，则正序有功电流的最大允许值 $i_{q_Max}^P$ 为：

$$i_{q_Max}^P = \sqrt{(i_{_Max}^P)^2 - (i_d^P)^2} = \sqrt{(1.5)^2 - (i_d^P)^2} \quad (5-4)$$

一般情况下，电网正序电压跌落的越深，则希望风电系统能够向电网输出越多的无功来支撑电网电压，但这样一来，系统的有功输出也随之进一步受到限制，一旦风机的输出功率 P_G 较大时，可能会导致直流侧的冗余功率超过储能系统的功率承受能力，以至于引起直流母线电压的急剧上升，这将不利于系统的正常运行。因此，本节结合电网正序电压的跌落深度 ΔU^P 以及风机的输出功率 P_G 这两个方面，通过模糊控制器来控制正序无功电流 i_d^P 的大小。例如，当 ΔU^P 和 P_G 同时都比较大时，可控制 i_d^P 输出一个适中的值，这样既可以向电网输出一定的无功功率，同时也不会影响系统的正常运行。

5.3.3 模糊功率控制器的设计

本节设计的模糊功率控制器采用两输入-单输出的二维结构形式。

输入 1：电网正序电压的跌落深度 ΔU^P ，基本论域为[0,1]，模糊论域为{0,1,2,3,4,5}，对应的模糊子集为{ES,VS,RS,RB,VB,EB}，分别表示当前电网正序电压的跌落深度为{极小，很小，偏小，偏高，很高，极高}。

输入 2：风电机组的输出功率 P_G ，基本论域为[0,1]，模糊论域为{0,1,2,3,4}，对应的模糊子集为{VS,RS,ZO,RB,VB}，分别表示当前风机的输出功率为{很小，偏小，适中，偏大，很大}。

华中科技大学博士学位论文

输出：并网正序无功电流的参考值 i_{d2}^{P*} ，基本论域为[0,1]，模糊论域为{0,1,2,3,4}，对应的模糊子集为{VS,RS,ZO,RB,VB}，分别表示输出 i_{d2}^{P*} 值为{很小，偏小，适中，偏大，很大}。模糊控制器的输入输出隶属度函数都采用灵敏性较强的高斯隶属函数，去模糊化方法采用重心法。

根据电网正序电压的跌落深度 ΔU^P 以及风机的输出功率 P_G 与并网正序无功电流的参考值 i_{d2}^{P*} 之间的逻辑关系，给出模糊控制器的控制规则如表 5-1 所示。表 5-1 的模糊规则充分反映了 i_{d2}^{P*} 在不同 U^P 和 P_G 取值下的变化特性。现从表 5-1 中选取以下 2 条规则加以说明。

表 5-1 模糊控制器规则表

i_{d2}^{P*} \ ΔU^P / P_G	ES	VS	RS	RB	VB	EB
VS	RS	ZO	RB	VB	VB	VB
RS	RS	ZO	RB	VB	VB	VB
ZO	RS	ZO	RB	RB	VB	VB
RB	VS	RS	ZO	ZO	RB	RB
VB	VS	VS	RS	RS	ZO	ZO

规则 1：IF ΔU^P is VB and P_G is VS, THEN i_{d2}^{P*} is VB;

规则 2：IF ΔU^P is VB and P_G is VB, THEN i_{d2}^{P*} is ZO。

规则 1 解释为：当电网正序电压的跌落深度 ΔU^P 很大 (EB)，且风机的输出功率 P_G 很小 (VS) 时，并网正序无功电流的参考值 i_{d2}^{P*} 输出为很大值(VB)。

规则 2 解释为：当电网正序电压的跌落深度 ΔU^P 很大 (EB)，且风机的输出功率 P_G 也很大 (VB) 时，并网正序无功电流的参考值 i_{d2}^{P*} 输出为适中值(ZO)。

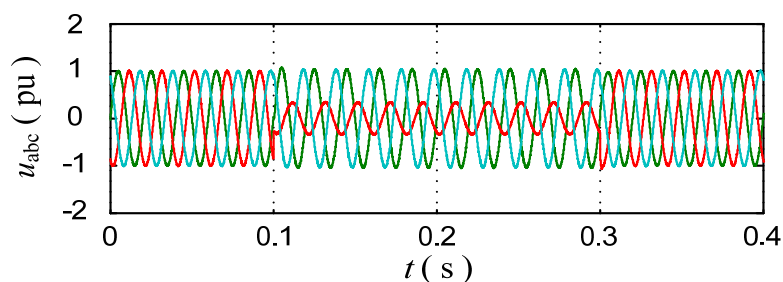
5.3.4 仿真分析

利用 Matlab/Simulink 对图 5-1 所示的基于超级电容器的直驱永磁风电系统进行仿真。具体仿真参数如下：风电系统的额定输出功率为 1.5MW，输出线电压有效值

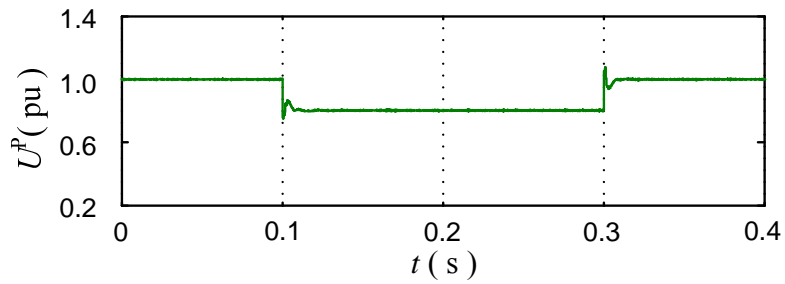
华中科技大学博士学位论文

为 690V，最大输出电流限定值为 1.5 (pu)，电网线电压有效值为 20kV，频率均为 50HZ；超级电容器组的额定容量为 1MW/1kW·h，额定电压为 600V，连接超级电容器组的双向 DC/DC 变流器的升压电感为 0.04mH；电网侧变流器的直流母线电压额定值为 2400V，变流器开关频率均为 5kHz，直流侧电容为 $C_{DC}=60000\mu\text{F}$ ，输出滤波电感为 1.3mH。

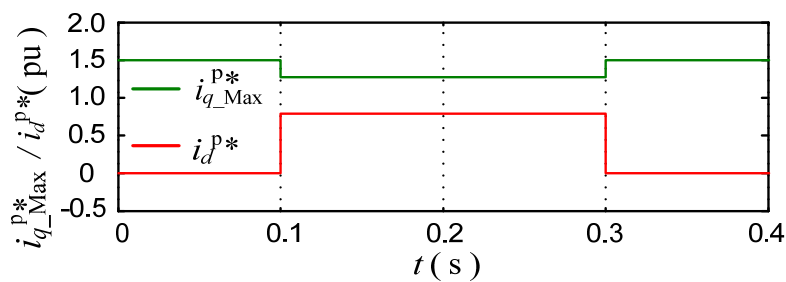
图 5-3 为电网电压在 0.1s~0.3s 时发生单相跌落，跌幅为 0.7 (pu)，且风机输出功率为 0.11 (pu) 的情况下，系统相关特性参数的仿真波形。图 5-4 为电网电压在 0.1s~0.3s 时发生两相跌落，跌幅为 0.7 (pu)，且风机输出功率为 0.83 (pu) 的情况下，系统相关特性参数的仿真波形。根据电网正序电压的幅值 U^P 可知其跌落深度 ΔU^P ，再结合风机的输出功率 P_G ，经模糊功率控制器可得到并网正序无功电流的参考值 i_d^{P*} ，相应可确定并网正序有功电流的最大允许值 $i_{q_Max}^{P*}$ 即： $i_{q_Max}^{P*} = \sqrt{1.5^2 - i_d^{P*}}$ ，如图 5-3 (c)、5-4 (c) 所示。图 5-3 (d) ~5-3 (g)、5-4 (d) ~5-4 (g) 为风电系统实际并网电流及其功率的仿真波形，其中，并网三相电流 i_{abc} 均未超过其限定值 1.5 (pu)；电网故障期间系统向电网输出了一定的无功功率；且电网侧变换器的直流母线电压 u_{dc} 一直保持在其所允许的范围之内，如图 5-3 (h)、5-4 (h) 所示，从而实现了电网电压跌落时永磁直驱发电系统在保持不脱网运行的同时，还能适度地向电网提供一定的无功功率，进一步增强了系统的低电压穿越能力。



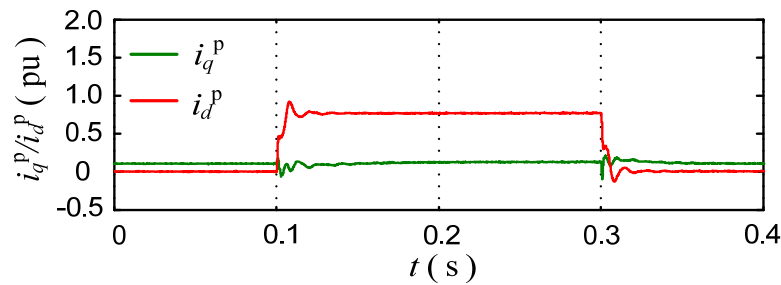
(a) 电网三相电压 u_{abc}



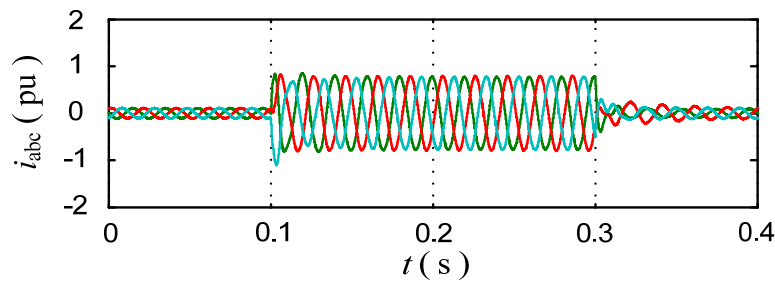
(b) 电网正序电压的幅值 U^P



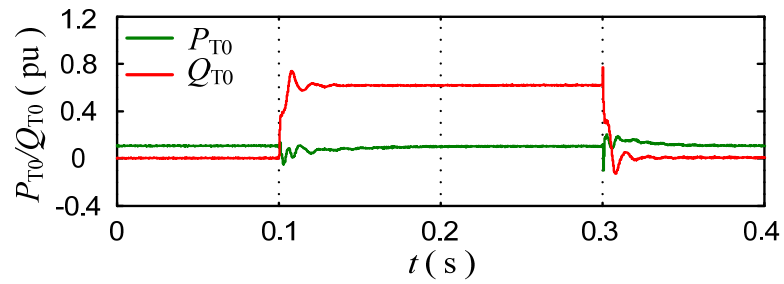
(c) 并网正序有功电流的最大允许值 $i_{q_Max}^{P*}$ // 并网正序无功电流的参考值 i_d^{P*}



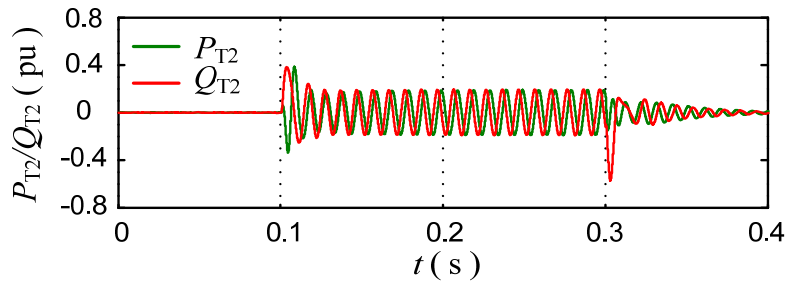
(d) 并网正序有功电流 i_q^P / 并网正序无功电流 i_d^P



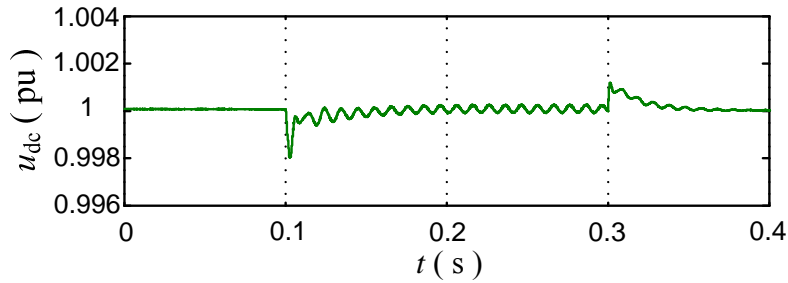
(e) 并网三相电流 i_{abc}



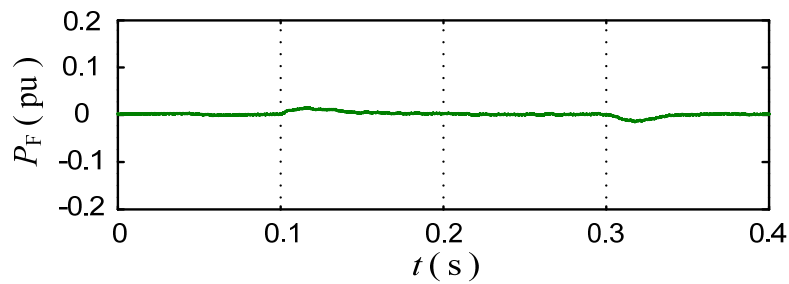
(f) 并网平均有功功率 P_{T0} / 并网平均无功功率 Q_{T0}



(g) 并网 2 倍频有功功率 P_{T2} / 并网 2 倍频无功功率 Q_{T2}

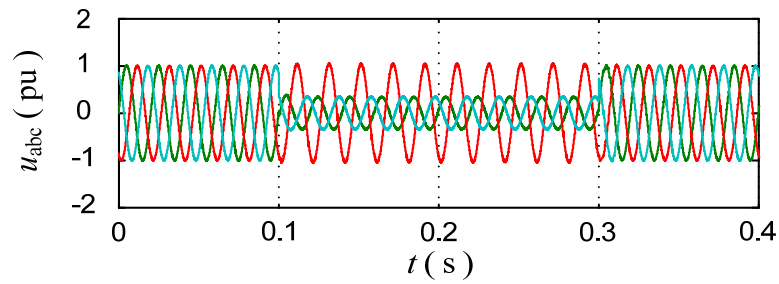


(h) 电网侧变换器的直流侧电压 u_{dc}

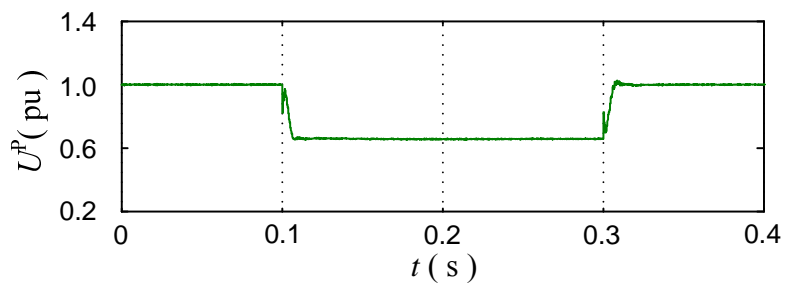


(i) 储能系统输出的功率 P_F

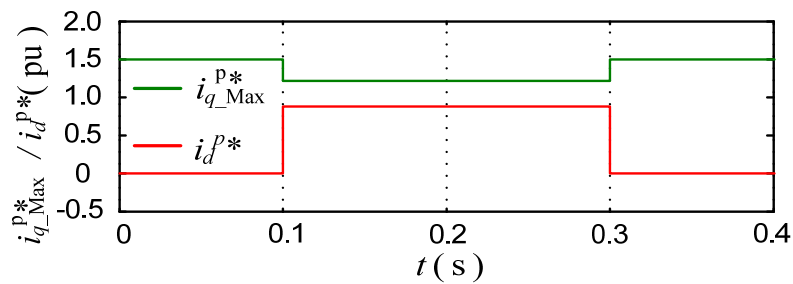
图 5-3 风力机输出功率为 0.11 (pu) 时电网电压发生单相跌落的仿真结果



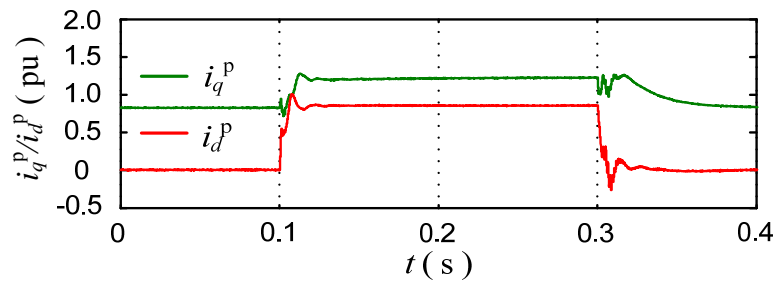
(a) 电网三相电压 u_{abc}



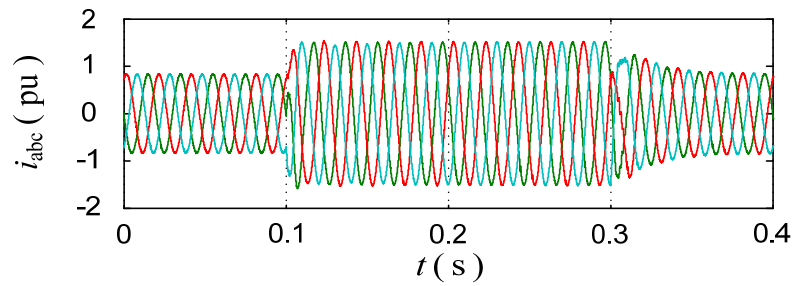
(b) 电网正序电压的幅值 U^p



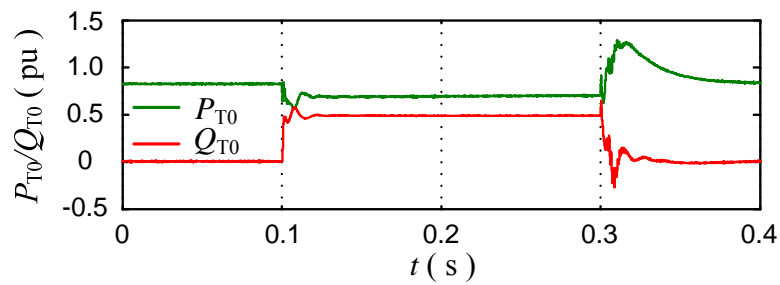
(c) 并网正序有功电流的最大允许值 $i_{q_Max}^{p*}$ / 并网正序无功电流的参考值 i_d^{p*}



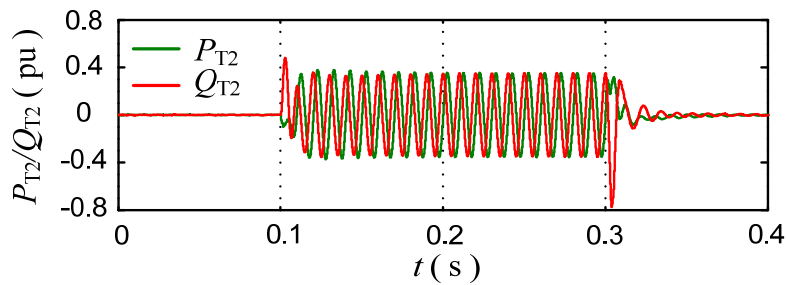
(d) 并网正序有功电流 i_q^p / 并网正序无功电流 i_d^p



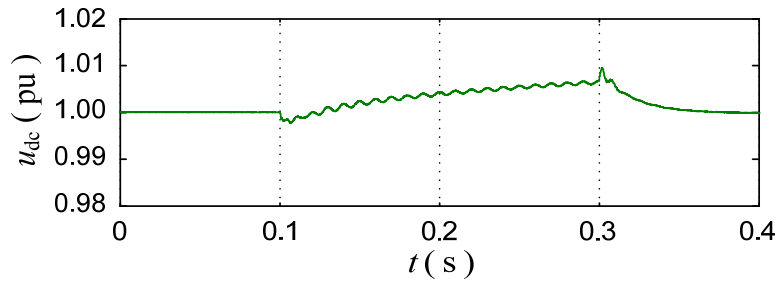
(e) 并网三相电流 i_{abc}



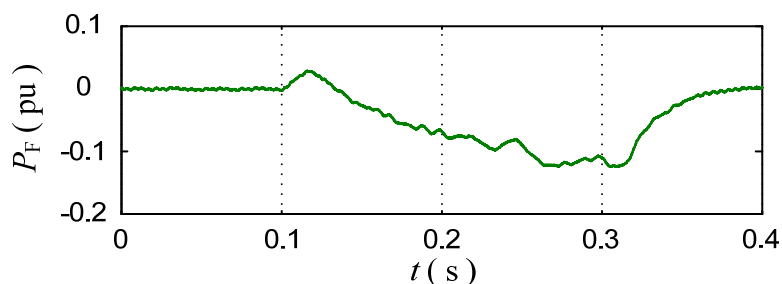
(f) 并网平均有功功率 P_{T0} / 并网平均无功功率 Q_{T0}



(g) 并网 2 倍频有功功率 P_{T2} / 并网 2 倍频无功功率 Q_{T2}



(h) 电网侧变换器的直流侧电压 u_{dc}



(i) 储能系统输出的功率 P_F

图 5-4 风力机输出功率为 0.83 (pu) 时电网电压发生两相跌落的仿真结果
仿真结果很好地证明了所提出的控制策略的正确性和有效性。

5.4 本章小结

加快坚强智能电网的建设, 实现可再生能源发电大规模并网, 以促进电力行业的可持续发展, 从而可有效实现电网可靠、高效、经济、环境友好地运行。从风力发电、太阳能发电的背景和意义着手, 分析了两种新能源发电的分析优缺点及技术难点。并针对基于储能的并网永磁同步直驱风力发电系统的特点, 提出了一种网侧变换器的模糊功率控制策略, 当电网发生故障时, 根据电网电压的跌落深度和风机输出功率的大小, 通过模糊控制器得到并网无功电流的参考值大小, 从而能够有效地控制风电系统向电网输出的无功功率以及有功功率的大小, 实现风电系统在电网故障情况下的不脱网运时, 还能为电网适度地提供一定的无功功率以帮助电网恢复正常工作。

6 全文总结与有待进一步开展的研究工作

6.1 本文工作总结

论文以大型工业企业节能减排、提高供电电能质量、增强供电可靠性和保证安全生产为研究背景，结合智能电网的概念、特征、技术需求对大型工业企业进行了深入的理论研究与现状分析，提出了大型工业企业智能电网构建的目标、思路和主要内容的关键技术，提高了大型工业企业经济效率、使企业能实现安全运行，节能减排、环境友好，主要研究成果如下：

(1) 针对大型工业企业的用电特点，对节能减排情况进行了深入的分析。结合智能电网的特征和技术要求提出了大型工业企业智能电网构建的目标、思路和主要内容。围绕提高大型工业企业供电可靠性和供电电能质量、供电可靠性和保证安全生产、节能减排做了详细研究。

(2) 针对大型工业企业能量系统的特点，对能量种类、特点及相互关系、能量转换、消耗进行了深入的分析，提出了大型工业企业能量管理系统的构架及其分析技术要求，为大多数企业提供了一个可持续实现能耗及节能管理的同一平台。大型工业企业能量管理系统将向着多级分层分布式部署管理的模式发展，改进能量系统的运行管理和安全管理水平，完善能量生产和使用的评价体制，提高劳动生产率，减少能量消耗，增加能量回收，改善环境质量，提高企业的市场竞争力。

(3) 智能电网技术离不开储能技术，因此详细分析了多种储能技术的特性、优缺点，并针对储能装置的控制方式进行了研究。智能电网要求电能质量更高，适应所有的电源种类和电能储存方式，掌握各种储能技术的充放电特性、控制方法、规模化程度等，可以应用在智能电网的不同节点上。提高运营效率，能优化电网资产，并且电网能够经济、互动、优质、自愈、安全，是中国建设智能电网的目标；储能电站对新能源发电保证发出的电力能够平稳的输送到电网，储能电站向电网提供最优化的有功和无功功率，支持电网的黑启动。储能电站响应快速，能大电流放

电，可以作为供电的备用电源的首选，进行电能质量控制等其他领域。

(4) 对新能源与可再生能源的开发应用接入智能电网，从而可有效实现电网可靠、高效、经济、环境友好地运行。从风力发电、太阳能发电的背景和意义，分析了其优缺点及技术难点。

(5) 永磁同步直驱风力发电系统的应用日益广泛，针对基于储能的并网永磁直驱风力发电系统的运行特点，提出了一种对网侧变换器的模糊功率控制策略，当电网发生故障时，根据电网电压的跌落深度和风机输出功率的大小，通过模糊控制器得到并网无功电流的参考值大小，从而能够有效地控制风电系统向电网输出的无功功率以及有功功率的大小，实现风电系统在电网故障情况下的不脱网运，还能为电网适度地提供一定的无功功率以帮助电网恢复正常工作。

6.2 有待进一步开展的研究工作

本论文较系统地研究了大型工业企业智能电网的相关问题，取得了一些阶段性的成果。由于目前国内外对大型工业企业智能电网的基础设备，关键技术、能量管理系统平台、应用软件等，整体的智能电网还是处于起步阶段，而本文的研究也有限，因此，大型工业企业智能电网研究还有许多工作有待进一步开展。就本文目前已奠定的研究基础而言，下一步开展下述几方面的工作：

(1) 对智能电网基础设备关键技术研制新型智能设备和提出新的控制与保护方法。

(2) 大型工业企业能量管理系统平台建立高级应用软件研究，

(3) 研制大容量储能电站，促进电网的灵活应用，降低成本，增强供电可靠性，实现提高电能质量，促进可再生能源大规模接入电网，等等。

(4) 研究开发新能源接入智能电网，实现节能减排，环境友好，等等。

华中科技大学博士学位论文

致谢

博士研究生的学习生活即将结束，在此向给予我指导、帮助和关心的华中科技大学各位老师、同学和朋友们表示忠心地感谢！

本论文是在导师毛承雄教授和陆继明教授的悉心指导和亲切关怀下完成的，在论文即将完成之际，我要向两位老师致以衷心的感谢和崇高的敬意！三年中国留学生活中，两位导师高深渊博的知识、严谨的治学态度、精益求精的工作作风给我留下了深刻的印象，让我受益匪浅。在论文写作过程中，两位老师给我提供了许多建设性的建议和指导，特别是毛承雄老师，多次为我指点迷津，正是在两位老师的指导帮助下，我才能够顺利完成研究生阶段的研究工作。而他们对我在学习生活上的无微不至的关怀更令我深深的感动，作为一名在异乡留学的学生，三年中我遇到过很多的困难，学习上、研究中、语言上还有生活上，两位老师尽可能的为我提供最大的便利，多次给予我及时热情的帮助，让我这三年在中国的留学生活始终感觉到温暖，也始终有家的感觉。我非常庆幸自己可以成为两位老师的学生，我将永远铭记两位老师对我的教诲！

课题组王丹副教授也给了我很多指导和帮助，多次在我论文遇到问题的时候给我指出问题并提出建议，在此也要向他表示深深的感谢。

我要感谢本课题组所有同学的大力帮助和支持，特别感谢张坤博士生师兄、黄汉奇博士生师兄等几位师兄的指导，感谢詹老师、肖睿研究生、柴继勇硕士等对我关心和指导。感谢课题组的师弟师妹们，谢谢你们对我的帮助。

我还要感谢华科大留学生办公室赵晓峰副院长、任宇老师等几位老师，感谢汉语老师们，特别是周彬老师的关心和帮助，感谢我中国朋友们、我的同胞们在华科大学习生活中给予的关心和支持，感谢我的所有亲人，感谢你们一直以来对我的支持、帮助和鼓励。

最后再次感谢所有关心和帮助过我的人，谢谢！

黎春渥

2012年5月15日于华中科技大学

参考文献

- [1] 许晓慧,陈丽娟,钟小强,车延博. 智能电网导论(书). 中国电力出版社,2009
- [2] 刘振亚. 智能电网知识读本(书). 中国电力出版社, 2010
- [3] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评. 中国电机工程学报, 2009(34):1-8
- [4] Richard DeBlasio, Cherry Tom. Standards for the Smart Grid. IEEE, 2008,11: 17-18
- [5] Gopalakrishnan Iyer, Prathima Agrawal. Smart Power Grids. IEEE, 2010, 3:152-155.
- [6] 胡学浩. 智能电网: 未来电网的发展态势. 电网技术, 2009(14): 1-5
- [7] 刘振亚. 智能电网技术,北京. 中国电力出版社, 2010
- [8] K.P.Schneider, D.Chassin, Y.Chen, J.C.Fuller. Distribution Power Flow for Smart Grid Technologies. IEEE, 2009: 1-7.
- [9] Xu Zhichao, Li Xiaoming. The Construction of Interconnected Communication System among Smart Grid and a variety of Networks. IEEE, 2010.
- [10] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 沈杰. 智能电网技术综述. 电网技术,2009(8):1-7
- [11] 徐一哲, 沈瑞寒.智能电网浅析. 百科论坛: 335-336
- [12] C.Marinescu, A.Deaconu, E.Ciurea, Daniela Marinescu. From Microgrids to Smart Grids: Modeling and Simulating using Graphs. Part II Optimization of Reactive Power Flow. IEEE, 2010, 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM: 1251-1256.
- [13] 张梦. 浅谈智能电网. 中国建设教育, 2011,2(3,4): 93-95
- [14] 王正风, 高涛. 智能电网及国内外发展概述. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2011,16: 126-132
- [15] 高涛, 邓玲. 智能电网及其国内外发展概述. 东北电力技术, 2012,2: 5-10
- [16] K Moslehi, R Kumar. Smart Grid - A Reliability Perspective. IEEE PES Conference on "Innovative Smart Grid Technologies" January 19-20, 2010, NIST Conference Center, Washington, DC.
- [17] 汤奕, M Pipattanasomporn, 邵盛楠, 刘浩明, S Rahman. 中国与美国和欧盟智能电网之比较研究. 电网技术, 2009(15): 7-15

华中科技大学博士学位论文

- [18] A P Johnson. The History of the Smart Grid Evolution at Southern California Edison. IEEE PES Conference on “Innovative Smart Grid Technologies” January 19-20, 2010, NIST Conference Center, Washington, DC.
- [19] Andreas Lugmaier, Hubert Fechner, Wolfgang Prügler. NATIONAL TECHNOLOGY PLATFORM – SMART GRIDS AUSTRIA, 2008, 23: 92-93.
- [20] Hiromu Kobayashi and Ikuo Kurihara. Research and Development of Grid Integration of Distributed Generation in Japan. IEEE, 2009: 1-8.
- [21] 常康, 薛峰, 杨卫东. 中国智能电网基本特征及其技术进展评述. 电力系统自动化, 2009(17):10-15
- [22] Bob Saint. Rural Distribution System Planning using Smart Grid Technologies. IEEE, 2007.
- [23] 冯俊青. 智能电网的实现与发展趋势. 信息与电脑, 2010,12: 37-38
- [24] Xia Lili, Qiu Xiaoyan, Wei Xiwen, Li Xingyuan. Research of Distribution Generation Planning in Smart Grid Construction. IEEE, 2010.
- [25] 张柯. 浅述智能电网的发展. 科技资讯, 2011,4: 141-142
- [26] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 沈杰. 智能电网技术综述. 电网技术, 2009,33(8): 01-07
- [27] 邱东. 基于节能目标的钢铁企业能源集成管理系统的研究与实现. 吉林大学博士学位论文, 2009年5月
- [28] 胡俊南, 何宜庆. 中国工业企业低碳发展路径与政策研究. 技术, 2011,12
- [29] 王哲. 智能电网涉及的关键技术. 江苏省电力设计院: 10-12.
- [30] James A. Momoh. Smart Grid Design for Efficient and Flexible Power Networks Operation and Control. IEEE, 2009.
- [31] Paola Bresesti, Alberto Cerretti. SDNO: Smart Distribution Network Operation Project. IEEE, 2007: 1-4.
- [32] 施婕, 艾芊. 智能电网实现的若干关键技术问题研究. 电力系统保护与控制, 2009,37(19): 01-04
- [33] Ming Ding, Yingyuan Zhang, and Meiqin Mao. Key Technologies for Microgrids-A Review. IEEE, 2009.
- [34] 李兴源, 魏巍, 王渝红, 穆子龙, 顾威. 坚强智能电网发展技术的研究. 电力系统保
-

华中科技大学博士学位论文

- 护与控制, 2009,37(17): 1-6
- [35] 方晓燕, 姚致清, 贺春, 果岩. 智能电网设备标准化建设构想. 标准化综合. 中国电力行业, 2010: 70-76
- [36] Magnus Olofsson. Power Quality and EMC in Smart Grid. IEEE, 2009.
- [37] 林宇峰, 钟金, 吴复立. 智能电网技术体系探讨. 电网技术, 2009(12):8-14
- [38] D. Divan and H. Johal. A Smarter Grid for Improving System Reliability and Asset Utilization. IEEE, 2006.
- [39] Xilin Zhang, Xiaojuan Han, Xiaohua Wan, Shuo Wang. Functional Requirement and Realization of Regional Smart Grid Energy Management System. Proceeding of the IEEE International Conference on Information and Automation , Shenzhen, China, June 2011: 847-850.
- [40] Fanjun Meng, Badrul H.Chowdhury. Distribution LMP-Based Economic Operation for future Smart Grid. IEEE, 2011.
- [41] 张文亮, 汤广福, 查鲲鹏, 贺之渊. 先进电力电子技术在智能电网中应用. 中国电机工程学报,2010(4): 1-7
- [42] Javier Rodríguez Roncero. INTEGRATION IS KEY TO SMART GRID MANAGEMENT. CIRED Seminar 2008: SmartGrids for Distribution., 2008, 23(9): 1-4.
- [43] Xavier Mamo, Sylvie Mallet, Thierry Coste, Sebastien Grenard. Distribution automation: the cornerstone for Smart Grid development strategy. IEEE, 2009: 1-6.
- [44] James A Momoh.Smart Grid Design for Efficient and Flexible Power Networks Operation and Control.IEEE,2009.
- [45] 余贻鑫. 智能电网的技术组成和实现顺序. 南方电网技术,2009,3(2): 01-05
- [46] E. Tom Jauch. Implementing “SMART GRID” Integrated Distribution Volt/var/kW Management. IEEE, 2010: 1-5.
- [47] JUN WANG,ALEX Q.HUANG,WOONGJE SUNG, YU LIU, B.JAYANT BALIGA.SmartGrid Technologies.IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS MAGAZINE,2009: 16-23
- [48] Zeng Ming, Tian Kuo, Li Na, Qiu Liuqing. Bottleneck Problem Structure of Technical Economy to Strong Smart Grid in China. IEEE, 2010
-

华中科技大学博士学位论文

- [49] 宋德军. 浅谈继电保护技术的现状与发展. 科技论坛: 41
- [50] 李兴源, 魏巍, 王渝红, 穆子龙, 顾威. 坚强智能电网发展技术的研究. 电力系统保护与控制, 2009,37(17): 1-6.
- [51] 张静宇. 电力系统继电保护技术的现状与发展. 辽宁建材,2005(5): 80-81
- [52] 田兵, 毛承雄, 段余平, 陆继明, 邱军, 李妍, 张步涵, 马爱芳. 大型工业企业供电电源快速无缝相互支撑方法. 水电能源科学, 2011,29(3): 178-180.
- [53] 曾烽. 建设电能信息化系统推动电网智能化发展. 湖北电力, 2009,33(4): 59-61.
- [54] 张来福, 马丽英, 翟晓慧. 对建设坚强智能电网的认识. 山西电力, 2010, 1(158): 1-6
- [55] 杨德昌, 李勇, C.Rehtanz, 刘泽洪, 罗隆福. 中国式智能电网的构成和发展规划研究. 电网技术, 2009,33(2): 13-20
- [56] 静恩波. 智能电网发展技术综述. 低压电器 2010,6: 14-18
- [57] 李斌, 薄志谦. 智能配电网保护控制的设计与研究. 中国电机工程学报, 2009,29(增刊): 01-05
- [58] Asif Mahmood, Muhammad Aamir, Muhammad Irfan Anis. Design and Implementation of AMR Smart Grid System. IEEE Electrical Power & Energy Conference, 2008: 1-6
- [59] QiuDong, Zhang De-jiang. The Research and Realization of Energy Management System in Iron and Steel Enterprise. International Conference on Information, Networking and Automation (ICINA), 2010: 448-451.
- [60] Nikhil Gudi, Lingfeng Wang, Vijay Devabhaktuni, Soma Shekara Sreenadh Reddy Depuru. A Demand-Side Management Simulation Platform Incorporating Optimal Management of Distributed Renewable Resources. IEEE, 2011: 1-7.
- [61] Chang-Sic Choi, Jinsoo Han, Wan-Ki Park, Youn-Kwae Jeong, Il-Woo Lee. PROACTIVE ENERGY MANAGEMENT SYSTEM ARCHITECTURE INTERWORKING WITH SMART GRID. IEEE 15th International Symposium on Consumer Electronics, 2011: 621-624.
- [62] G.施密特, F.布朗迈胡伯, G.斯卓卡. 奥钢联林茨钢厂的能量管理系统. 中国冶金, 1999(6): 39-42
-

华中科技大学博士学位论文

- [63] 田敬龙. 中国十大钢铁企业能耗分析及节能工作建议. 冶金能源, 2007(6): 3-7
- [64] 雷珽, 艾芊, 解大. 现代 EMS 在智能电网中的应用发展. 华东电力, 2010,38(9): 1343-1349
- [65] Dongping Tang, Xinming Feng. Management Information System used in enterprise's energy conservation and emission reduction. IEEE, 2011: 44-47.
- [66] Rui Qiang, Yixian Jiang. Enterprise Energy Saving and Emission Reduction Level Assessment Research Based on the Capability Maturity Model. IEEE, 2009.
- [67] 蒋育翔, 黄全福, 洪小和. 基于钢铁企业能源特点及相互关系的能源管理信息系统的研究. 冶金自动化, 2011,35(2): 18-23
- [68] 蒋育翔, 黄全福, 洪小和. 大型钢铁企业能源管理分析与研究. 华东能源管理, 2011,25(1): 104-108.
- [69] John C. Van Gorp. Enterprising Energy Management. IEEE power & energy magazine, 2004: 59-63.
- [70] 朱传柏, 曹一家, 郭创新, 韩文, 刘勇. 分布式企业级电气监控与能量管理系统的设计与实现. 电力电气, 2010,29(9): 30-34
- [71] 刘树利. 分布式企业级电气监控与能量管理系统的设计与实现. 山西能源与节能, 2010(5): 12-14
- [72] 蒋育翔, 黄全福, 洪小和. 钢铁企业能源及相互关系研究. 经济问题探索, 2011,1: 125-129
- [73] Jian Zhang, Yuchen Zhang, Song Chen, Sizhuo Gong. How to Reduce Energy Consumption by Energy Audits and Energy Management: The Case of Province Jilin in China. IEEE, 2011.
- [74] John C. Van Gorp, C.E.M. MAXIMIZING ENERGY SAVINGS WITH ENTERPRISE ENERGY MANAGEMENT SYSTEMS. IEEE. Reprinted from IEEE Power & Energy, 2004: 175-181.
- [75] Li Chuang. Research on Energy-saving Management of Coal Enterprises in China. International Conference on Industrial and Information Systems, 2009: 11-14.
- [76] ZHAO Fei, ZHU Jun, QIAO Fei, WU Qi-di. Application of Hybrid Petri Net in Modeling of Enterprise Energy System. IEEE, 2010: 398-401.
-

华中科技大学博士学位论文

- [77] 郭创新, 周恒俊, 秦杰. 分布式企业级电气化监控和能量管理系统(E3CS). 电力科学与技术学报, 2010,25(1): 15-20.
- [78] Do-Eun Oh, Nam-Joon Jung, Seung-Hwan Choi, Il-Kwon Yang. An Enterprise-level System View for the Intelligent Grid in Korea. International Conference on Control, Automation and Systems, KINTEX, Gyeonggi-do, Korea, 2010: 792-795.
- [79] Lin WANG, Xu XIAO, Fei XIONG. Research on Path Coordination Model of Energy Saving and Emission Reduction for Government and Enterprise. IEEE, 2011: 4365-4368.
- [80] Zhi Li, Zhi Wen and Guofeng Lou. Research of Energy Optimization Dispatching Model in EMS of Iron and Steel Enterprises. IEEE, 2011: 566-569.
- [81] 朱全胜, 朱作欣, 李卫东. 基于多通道界面的控制中心大屏幕人机界面模型. 电网与清洁能源, 2011,27(6): 8-11
- [82] 朱全胜, 孙怡, 李卫东. 智能电网中EMS人机交互的关键技术. 电力自动化设备, 2011,31(8): 117-121
- [83] Zhiping Wang, Xiantang Liu, Baojian Wu. The Study and Application of Steel Enterprise Energy Management System.. IEEE , 2011.
- [84] 金艳, 余兵, 张兴兰. 基于Wonderware的钢铁企业能源管理系统设计. 重庆工学院学报(自然科学), 2009,23(12): 82-86.
- [85] 何维. 钢铁企业能源管理系统智能优化调度研究. 湘潭大学硕士学位论文, 2010年6月6日.
- [86] 曾杰. 华中科技大学博士学位论文. 可再生能源发电与微网中储能系统的构建与控制研究, 2009年8月31日
- [87] I.D.Lasseter,S.G.Jalali. Dynamic Response of Power Conditioning Systems for Superconductive Magnetic Energy Storage[J].IEEE Trans.on Energy Conversion, 1991,16(3):388-393.
- [88] L.Wang,S.M.Lee,C.L.Huang.Damping Subsynchronous Resonance using Superconducting Magnetic Energy Storage Unit[J].IEEE Trans.on Energy Conversion,1994,9(4):770-775.
- [89] 张慧妍. 超级电容器直流储能系统分析与控制技术的研究[D]. 中国科学院研究
-

华中科技大学博士学位论文

- 生院博士学位论文, 2005
- [90] 商淼. 超级电容器储能系统的研究[D]. 华北电力大学硕士学位论文, 2004
- [91] 李霄, 胡长生, 刘昌金, 徐德鸿. 基于超级电容储能的风电场功率调节系统建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2009,37(9)
- [92] V.H. Johnson. Battery performance models in ADVISOR[J]. Journal of Power Sources 110 (2002) 321–329.
- [93] 薛洪发. 超级电容器在变配电站直流系统中的应用[J]. 电气时代, 2001,11
- [94] 周新民, 孙晖. 新型储能元件综述——超级电容及其应用[J]. THE WORLD OF INVERTERS
- [95] 朱顺泉, 孙妮荣等. 大规模蓄电储能全钒液流电池研究进展[J]. 化工进展, 2007,26(2)
- [96] R.Cardenas,R.Pena,J.Clare.Control strategy for enhanced power smoothing in wind energysystems using a flywheel driven by a vector-controlled induction machine[J]. IEEE Trans.on Industrial Electronics,2001,48(3):625-635.
- [97] Niknam.T,Ranjbar.A.M,Shirani.A.R.Impact of Distributed Generation on Volt/Var Control in Distribution Networks. IEEE Bologna Power Tech Conference, 2003,3: 1-7.
- [98] E. Ortjohann, M.Lingemann, W.Sinsukthavorn, A. Mohd, A.Schmelter, N.Hamsic, D.Morton. A General Modular Design Methodology for Flexible Smart Grid Inverters. IEEE, 2009: 1-8.
- [99] 王心尘等. 替代蓄电池的超级电容储能模块设计[J]. 电源世界, 2007,11: 40-43
- [100] 周思亮, 董明望. 超级电容技术在港口机械中的应用研究[J]. 港口装卸, 2009,2
- [101] 王铁成, 于海芳, 朱春波. 混合动力汽车复合储能技术[J]. 电力电子技术, 2008,42(10)
- [102] 唐西胜, 武鑫, 齐智平. 超级电容器蓄电池混合储能独立光伏系统研究[J]. 太阳能学报, 2007,28(2)
- [103] 陈慧玲. 高寒地区独立光伏电站中铅酸蓄电池的设计和维护[J]. 青海科技, 2004,6
- [104] Benjamin Kroposki, Christopher Pink, Thomas Basso, Richard DeBlasio. Microgrid
-

华中科技大学博士学位论文

- Standards and Technology Development. IEEE, 2007.
- [105] 黄彦瑜. 锂电池发展简史[J]. 物理学史和物理学家, 2007,36(8)
- [106] Mario Cacciato, Alfio Consoli, Vittorio Crisafulli. POWER CONVERTERS FOR PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEMS IN SMART GRID APPLICATIONS. IEEE, 2009: 26-31.
- [107] 王振文, 刘文华. 钠硫电池储能系统在电力系统中的应用[J]. 中国科技信息, 2006,13
- [108] 吕春泉, 厉一梅, 刘宏志, 刘清宇, 张鲲, 许文秀, 曾鸣. 智能电网环境下可再生能源发电并网机制研究. 华东电力, 2011,39(9): 1405-1409
- [109] 邓自刚, 王家素等. 高温超导飞轮储能技术发展现状[J]. 电工技术学报, 2008,23(12)
- [110] 张海梁, 孙婉胜. 储能电站在智能配网中的应用探讨. 中国电力教育, 211: 91-92
- [111] 孔令怡, 廖丽莹等. 电池储能系统在电力系统中的应用[J]. 电气开关, 2008,5
- [112] 魏增福, 郑金. 应用于智能电网的储能技术. 广东电力, 2010,23(11): 22-27
- [113] 许湘莲. 基于级联多电平逆变器的STATCOM及其控制策略研究[D]. 华中科技大学博士学位论文, 2006
- [114] 王伟. 基于IGBT的静止同步补偿器STATCOM主电路的研究[D]. 江苏大学硕士学位论文, 2007
- [115] Sortomme, M.A.El-Sharkawi. Optimal Power Flow for a System of Microgrids with Controllable Loads and Battery Storage. IEEE, 2009: 1-5
- [116] 唐杰. 配电网静止同步补偿器(D—STATCOM)的理论与技术研究[D]. 湖南大学博士学位论文, 2007年
- [117] 许海平, 温旭辉, 孔力. 全数字化双向 DC/DC 变换器的分析和设计[J]. 电力电子技术, 2003.12 第 37(6)
- [118] 马晓军, 刘文华, 王仲鸿, 臧克茂. 新型同步补偿器直流侧储能电容值的选取方法[J]. 中国电机工程学报, 2000,20(10)
- [119] 俞霖. 低压STATCOM系统设计与实验研究[D]. 江苏大学硕士学位论文, 2009
- [120] 毛承雄, 范澍等. 电力电子变压器的理论及其应用[J]. 高电压技术, 2003,29(10)
-

华中科技大学博士学位论文

- [121] 吕春泉, 厉一梅, 刘宏志, 刘清宇, 张鲲, 许文秀, 曾鸣. 智能电网环境下可再生能源发电并网机制研究. 华东电力, 2011,39(9): 1405-1409
- [122] Faisal A. Mohamed, Heikki N. Koivo. MicroGrid Online Management and Balancing Using Multiobjective Optimization. IEEE, 2007: 639-644.
- [123] 张彦, 战杰, 马梦朝, 赵义术. 论电网企业开展风力发电培训的必要性. 中国电力教育, 2011,33: 68-69
- [124] 蒋宏春. 风力发电技术综述. 机械设计与制造, 2010,9(9): 250-251.
- [125] 项喆. 智能电网中分布式电源对改善配电网电能质量方面的应用研究. 上海交通大学工程硕士学位论文, 2010年1月.
- [126] 曾杰. 可再生能源发电与微网中储能系统的构建与控制研究. 华中科技大学博士学位论文, 2009年8月31日.
- [127] W.Gu, Z.Wu, X.Yuan. Microgrid Economic Optimal Operation of the Combined Heat and Power System with Renewable Energy. IEEE, 2010: 1-6.
- [128] 胡忠文, 张明锋, 郑继华. 太阳能发电研究综述. 能源研究与管理, 2011,1: 14-16
- [129] Shantanu Chakraborty, Tomonobu Senjyu, Toshihisa Funabashi. Optimal Energy Storage Size of Thermal/Wind Power System Using Tabu Search Optimizer. IPEC 2010: 423-428.
- [130] 熊远生. 太阳能光伏发电系统的控制问题研究. 浙江工业大学博士学位论文, 2009年12月3日
- [131] 刘博. 我国新能源技术发展问题及对策[J]. 辽宁工业大学学报(社会科学版), 2009,11(2)
- [132] Xuan Liu, Bin Su. Microgrids - An Integration of Renewable Energy Technologies. CICED2008: 1-7.
- [133] Hanane Dagdougui, Riccardo Minciardi, Ahmed Ouammi, Roberto Sacile. Optimal control of a regional power microgrid network driven by wind and solar energy. IEEE, 2011.
- [134] H.M. Khodr, Zita A. Vale, Carlos Ramos, J.P. Soares, H.Morais, Péter Kádár. Optimal Methodology for Renewable Energy Dispatching in Islanded Operation. IEEE, 2010: 1-7.
-

华中科技大学博士学位论文

- [135] 余晓鸿,熊焱.永磁同步直驱风力发电系统并网的仿真研究.华中电力, 2011,4(24): 4-8
- [136] 姚骏, 廖勇, 庄凯. 电网故障时永磁直驱风电机组的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009,33(12): 91-95.
- [137] 朱全胜, 朱作欣, 李卫东. 基于多通道界面的控制中心大屏幕人机界面模型. 电网与清洁能源, 2011,27(6): 8-11
- [138] 王新运, 康龙云. 太阳能电动车最大功率跟踪器的研究与开发. 电力电子技术, 2010,44(3): 12-14
- [139] 朱全胜, 孙怡, 李卫东. 智能电网中EMS人机交互的关键技术. 电力自动化设备, 2011,31(8): 117-121
- [140] 李建林, 高志刚, 胡书举, 等. 并联背靠背PWM变流器在直驱型风力发电系统的应用[J]. 电力系统自动化, 2008,32(5): 59-62.
- [141] 胡书举,李建林,许洪华. 直驱风电系统变流器建模和跌落特性仿真[J]. 高电压技术, 2008,34(5): 949-954
- [142] 张兴, 张龙云, 杨淑英,等. 风力发电低电压穿越技术综述[J]. 电力系统及其自动化学报,2008,20(2): 1-8
- [143] 肖磊,黄守道,黄科元,等. 不对称电网故障下直驱永磁风力发电系统直流母线电压稳定控制[J]. 电工技术学报, 2010,25(7): 123-129
- [144] 王虹富,林国庆,邱家驹,等.利用串联制动电阻提高风电场低电压穿越能力[J].电力系统自动化, 2008,32(18)
- [145] 李建林,胡书举,孔德国,等. 全功率变流器永磁直驱风电系统低电压穿越特性研究[J]. 电力系统自动化, 2008,32(19): 92-95
- [146] 张坤, 毛承雄, 陆继明,等. 基于储能的直驱风力发电系统的功率控制[J].电工技术学报,2011,26(7): 7-14
- [147] 张坤,毛承雄,陆继明,王丹. 用于直驱式风力发电的复合储能系统.电力系统及其自动化学报, 2011,23(4): 1-5
- [148] Ramtharan,G, Arulampalam,A.,et al. "Fault ride through of fully rated converter wind turbines with AC and DC transmission". IET Renewable Power Generation,
-

华中科技大学博士学位论文

vol. 3, no. 4, pp. 426–438, 2009. 119

- [149] 徐金榜,何顶新,赵金,等. 电压不平衡情况下PWM整流器功率分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2006,26(16): 80-85.
- [150] 姚骏,陈西寅,廖勇,等. 抑制负序和谐波电流的永磁直驱风电系统并网控制策略[J]. 电网技术, 2011,35(7): 29-34
- [151] 尹明,李庚银,张建成,等. 直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略[J]. 电网技术,2007,31(15): 61-65.
- [152] Mullane A,Lightbody G,Yacamini R. Wind-turbine fault ride through enhancement[J].IEEE Transactions on Power Systems, 2005,20(4): 1929-1937.

附录 1 攻读博士学位期间发表的主要论文

- [1] 黎春渥, 张坤, 毛承雄, 陆继明, 王丹. 不对称电网故障下直驱永磁风力发电系统电网侧变换器的模糊功率控制. 水电能源科学, 2012, 已录用.
- [2] 毛承雄, 黎春渥, 段余平, 邱军. 大型工业企业智能电网构建. 水电能源科学, 2012, 已录用.
- [3] 张坤, 黎春渥, 毛承雄, 等. 基于超级电容器-蓄电池复合储能的直驱风力发电系统的功率控制策略. 中国电机工程学报, 2012, 已录用.

大型工业企业智能电网构建研究

作者: [黎春渥](#)
学位授予单位: [华中科技大学](#)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_D229847.aspx