

智能配电网技术研究综述

Research Review on Smart Distribution Grids

李鹏波 徐建政 吕 昂

(山东大学 电气工程学院, 济南 250061)

摘 要: 系统介绍了智能配电网的概念、结构组成以及国内外智能配电网研究与发展现状。重点探讨了智能配电网要求下的高级配电网自动化、智能配电网的自愈功能、高级测量体系以及分布式电源接入后对配电网的影响。结合我国城市配电网的现状,指出在新形势下开展未来智能配电网的研究对我国经济社会发展意义尤为重大。

关键词: 智能配电网 自愈功能 高级配电网自动 高级测量体系 分布式电源 城市电网

DOI: 10.3969/j.issn.1007-080x.2013.10.001

Abstract: The concept and structure composition of smart distribution grids (SDG) are systematically introduced in this paper, as well as domestic and foreign research and development status. The key technologies deployed for the realization of the smart distribution grid are explored in depth, including the smart distribution grid under the requirements of advanced distribution automation (ADA), smart distribution grids self-healing capabilities, advanced measurement infrastructure (AMI) and the influence after distributed electric resource access to distribution grid. Combined with the current situation of urban distribution grid, it points that it is particularly significant to carry out future smart distribution grids research for China's economic and social development.

Key words: smart distribution grids self-healing capabilities advanced distribution automation advanced measurement infrastructure distributed electric resource city power grid

0 引 言

近年来,世界各国加快了智能电网技术的发展,并有力地促进了电网的智能化。智能电网已成为未来电网发展的新趋势^[1,2]。国家电网公司提出了加快建设以特高压电网为骨干网架,以信息化、自动化、互动化为特征的各级电网协调发展的坚强智能电网,努力实现我国电网从传统电网向高效、经济、清洁、互动的现代电网的升级和跨越,积极促进清洁能源发展,

重点从发电、输电、变电、配电、用电、调度、通信信息等7个方面研究电网智能化的关键技术^[3,4]。智能电网包括智能输电网和智能配电网(smart distribution grids, SDG)两方面的内容。国内外已有不少文献介绍智能电网的基本概念和技术^[5],但是针对SDG的文献研究则比较少^[6]。智能配电网技术更新快,内容繁多,与传统电网相比有着极为重要的区别。就建设中国最坚强的智能电网这一总体目标而言,智能配电

作者简介: 李鹏波 1989年生,硕士研究生。研究方向为新能源发电调度运行与控制技术。

徐建政 1956年生,硕士,教授,研究方向为电力系统运行与控制。

吕 昂 1990年生,硕士研究生,研究方向为配电网馈线自动化。

网是不可缺少的部分。从智能电网发展的要求来看,提高配电自动化技术,对帮助构建智能配电网以及配电自动化的发展有着举足轻重的意义。

1 智能配电网基本概念

1.1 智能配电网含义

SDG 是人们对未来配电网的愿景。它不是一项局部的技术,也不是传统配电网的简单改进与提高,而是将各种配电新技术进行有机的集成、融合,使系统的性能出现革命性的变化。智能配电网基于配电网高级自动化技术,借助应用和融合先进的测量和传感技术、控制技术、计算机和网络技术、信息与通信等技术,利用智能化的开关设备、配电终端设备,在坚强电网架构和双向通信网络的物理支持以及各种集成高级应用功能的可视化软件支持下,允许可再生能源和分布式发电单元的大量接入和微网运行,鼓励各类不同电力用户积极参与电网互动,以实现配电网在正常运行状态下完善的监测、保护、控制、优化和非正常运行状态下的自愈控制,最终为电力用户提供安全、可靠、优质、经济、环保的电力供应和其他附加服务。借鉴传统配电网结构并按照智能电网要求设计智能配电网,智能配电网主要包括核心构件能量与通信系统(integrated energy and communication system architecture, IECSA)以及用户管理系统、分布式电源管理系统、高级电力电子设备、高级传感器、电能质量优化与评估系统。

1.2 SDG 各组成部分的作用

1) IECSA——能量与通信系统集成 它是开放式的、基于标准的架构,集成了数据通信网络和智能设备,用于支持未来的电力交换系统。

2) 用户管理系统 积极地把电力用户集成到配电网中,使用户参与到(削峰的)输电运行员的辅助服务中来。

3) 分布式电源管理系统 把分布式电源接入配电网,使分布式电源能够为配电网提供辅助服务。

4) 高级电力电子设备 配电灵活输电(distribution flexible AC transmission system, DFACTS)和配电静止无功补偿装置的计算,使 DFACTS 参与到网络重构中来。

5) 高级的传感器 自动把分布式电源接入配电网,使参与者能够提供辅助服务。

6) 电能质量优化和评估系统 使中压与低压配电网的电能质量优化,使电能质量可以评估。

1.3 SDG 的技术要求

1) 自愈 通过快速预测、快速检测、快速响应(解决反应延迟问题),避免出现紧急状态,降低大面积停电风险。要求具有灵活的、可重构的网络拓扑、新型保护和控制仪表。

2) 互动 配电网与用户、设备、环境互通信息。

3) 优化 安全,优质,低耗,清洁,多目标自趋优化(电网自动对自身进行综合调控,使得自身状态趋向最优);采用闭环控制,以提高设备和资产(分布式发电、储能和需求响应)利用率;提高供电可靠性、电能质量,降低网损。

4) 预测 提前把系统从不安全状态调整回安全状态,而不只是对紧急情况做出反应。

5) 鲁棒性 系统的抗扰动能力,满足弹性负荷需求、电动汽车充电、突发故障、微电网接入和退出对系统的冲击。

2 智能配电网的国内外发展状况

世界上不同国家针对本国的能源和电网现状制定了不同的智能电网发展目标,其重心大部分都在配电侧。2001 年美国电科院(Electric Power Research Institute, EPRI)启动的智能电网研究计划,致力于开发智能电网架构,目标是为未来的电网建立一个全面、开放的技术体系,支持电网及其设备间的通信与信息交换。2004 年,完成了集成能源及通信系统体系结构(IECSA)研究(4 卷);2005 年发布的成果中包含了 EPRI 称为“分布式自治实时架构(DART)”的自动化系统架构。欧洲的《20/20/20/20 计划》在 2020 年可再生能源增加 20%,碳排放量减少 20%,能源效率提高 20%。2008 年 9 月发布的《欧洲未来电网发展策略》提出了欧洲智能电网的发展重点和路线图。优先关注的重点领域包括:①优化电网的运行和使用;②优化电网基础设施;③大规模间歇性电源接入;④信息和通信技术;⑤主动的配电网;⑥电力市场和能效(通过虚拟电厂提高能源利用效率)。其中有两部分内容重点放在了配网侧。中国提出建设国际领先、自主创新、中国特色的“坚强智能电网”,包含电力系统的发电、输电、变电、配电、用电、调度和通信信息

共 7 个环节,具有信息化、自动化、数字化、互动化的智能技术特征。

3 智能配电网关键技术

3.1 高级 DA 技术

3.1.1 高级 DA 结构

在智能配电网中,配电自动化 (distribution automation, DA) 改为高级配电自动化 (advanced distribution automation, ADA)。美国电力科学研究院在“智能电网体系” (intelligrid architecture) 研究报告中

提出了高级 DA 的概念。该报告将高级 DA 定义为配电网革命性的管理与控制方法,它实现接有分布式电源的配电系统的全面控制与自动化,使系统的性能得到优化^[7]。ADA 主要功能如图 1 所示。ADA 包括高级配电运行 (advanced distribution operation, ADO) 和高级配电管理 (advanced distribution management, ADM) 两方面的技术内容。ADA 是配电网革命性的管理与控制方法,是电能进行智能化分配的技术核心,是智能配电网中的配电自动化。

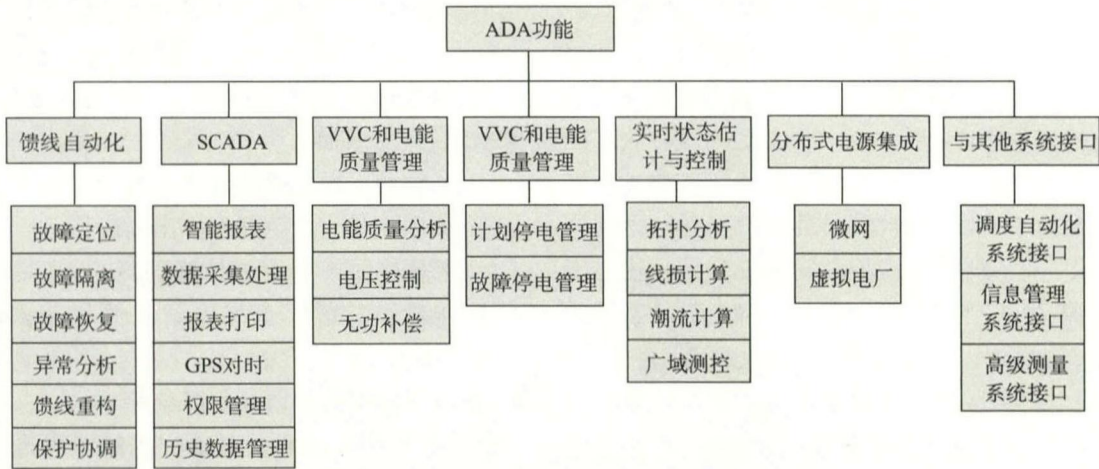


图 1 ADA 主要功能

ADO 完成配电网安全监控与数据采集 (distribution supervisory control and data acquisition, DSC-ADA)、馈线自动化 (feeder automation, FA)、电压无功控制、分布式发电 (distributed generation, DG) 调度等实时应用功能;ADM 以地理图像为背景信息,实现配电设备空间与属性数据以及网络拓扑数据的录入、编

辑、查询与统计管理。ADO 系统从 ADM 系统中获取配电网属性与网络拓扑数据和线路出线断路器运行信息,通过向开关传送操作命令,配合智能配电终端 (intelligent distribution terminal, IDT) 实现故障定位、隔离和供电恢复。高级配电运行 (ADO) 系统结构如图 2 所示。变电站与 IDT 通过光纤以太网构成一个分

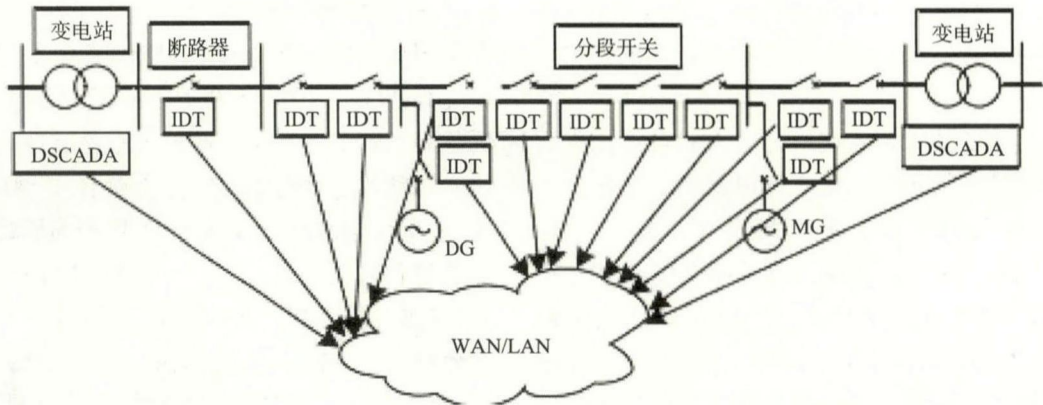


图 2 高级配电运行系统结构

布式控制系统。

智能配电终端 IDT 具有状态监测、故障检测、故障定位、故障诊断、交互信息、控制开关动作的作用。它通过检测线路是否失压、过流以及暂稳态电流和暂稳态电压来判断故障所在,继而操作开关,隔离故障,恢复供电。IDT 模型如图 3 所示。

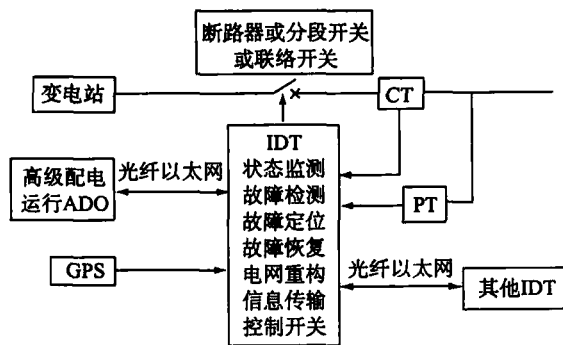


图3 智能配电终端模型

3.1.2 高级 DA 技术要求

1) IP 通信网络 长期以来,通信是制约常规 DA 技术发展的瓶颈,存在的主要问题有:

(1) 采用点对点或点对多点通信方式,只能在终端与主站或配电子站之间进行通信,配电终端之间不能交换数据,无法实现一些就地控制功能(如就地快速故障隔离)。

(2) 采用配电子站转发终端数据,终端与主站之间不是透明传输,配置与管理维护工作量大。

(3) 通道带宽有限,难以传输故障录波、电能质量扰动记录等批量数据。

随着通信技术的进步和通信设备成本的降低,目前已具备条件建设一个覆盖配电网中所有节点(控制中心、变电站、分段开关、用户端口等)的广域 IP 通信网。它将克服常规 DA 通信技术存在的问题,给配电网保护、监控与自动化技术带来革命性的变化。配电网广域 IP 通信网的主干网采用光纤组网技术,分支网可采用无线(如 ZigBee 技术)、载波等方式。

2) 配电网广域测控体系 高级配电网运行自动化(distribution operation automation, DOA)系统由配电网调度主站(简称主站)、IP 通信网络、各种现场智能电子设备(intelligent electronic device, IED)和局域分析控制子站(简称子站)组成。从逻辑上,可把高级

DOA 系统分成配电网广域测控体系和高级 DA 应用软件(包括 IED 的应用软件)2 个层次。配电网广域测控体系包括 IP 通信网络与主站和 IED 中的数据采集、管理、通信等部分的技术内容,其作用类似能量管理系统(EMS)、配电管理系统(distribution management system, DMS)中的 SCADA 子系统,为主站、子站与 IED 中的高级 DA 应用软件提供配电网运行数据采集、传输与管理服务。配电网广域测控体系与用户端的 AMI 一起,构成 SDG 信息交换与集成的基础设施^[8]。

3) DER 控制与调度技术 高级 DA 支持分布式电源(distributed electric resource, DER)的“即插即用”与优化调度,其核心支撑技术除广域保护、电压无功控制外,还包括以下 2 项内容:

(1) 微网(micro grid, MG)技术^[9] 高级 DA 采用面向 MG 的子站和分布式智能技术,控制 MG 与主网的连接与脱离,实时调控 MG 中的 DER 与负荷,在其与主网脱离后,保证电压与频率的稳定。

(2) 虚拟发电厂(virtual power plant, VPP)技术 VPP 将配电网中分散安装的 DER 进行统一调度,以达到优化 DER 的利用、降低电网峰值负荷、提高供电可靠性的目的。高级 DA 主站支持对 DER 的可视化管理,具备在线快速模拟仿真与分析功能,为调度员决策提供技术支持。

3.2 配电网自愈控制技术

智能电网的自愈控制通过应用先进的数学和控制理论,建立起配电网在异常脆弱区、故障扰动区、检修维护区、正常运行区下的自动判别算法,在稳定评价指标、电能质量评价指标、经济评价指标、兼容评价指标、用户服务评价指标体系下,对配电网运行状态进行实时评估和隐患预测,并执行相应区域的控制方案,以实现配电网优化运行和自愈控制的目的,达到安全可靠、经济高效、清洁环保、灵活互动和友好开放的供电要求^[10,11]。配电网自愈控制流程如图 4 所示。

要实现智能电网的自愈和优化控制,需要满足以下几个条件。

1) 具备各种智能化的开关设备和智能化终端设备 配电网中的智能开关设备具有高性能、高可靠性、硬件软件化特点和在线监测、功能自适应、自诊断等功能,提供网络化远程接口;配电终端设备应具有

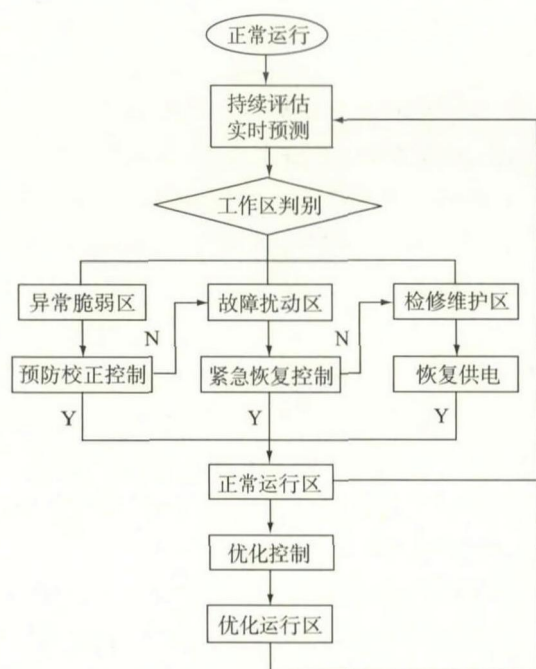


图4 配电网自愈控制流程图

故障自动检测与识别功能,提供可靠的不间断电源,满足户外工作环境和电磁兼容性要求,支持多种通信方式和通信协议,具有远程维护、诊断和自诊断功能。

2) 配电网系统中拥有多电源,具有灵活可靠的拓扑结构 智能配电网要实现/手拉手供电,网络当中要兼容分布式发电、可再生能源和储能装置,并能灵活调度;同时,网架结构要灵活、坚强、可靠,既能实现正常运行下的拓扑结构优化,又能实现故障控制中的拓扑结构快速重构。

3) 可靠的通信网络 智能配电网运行优化和自愈控制功能是通过在控制或配调中心后台在线、实时、连续分析和远方遥控实现的,要求配电通信网络必须可靠,要考虑主通信网络瘫痪情况下的备用通信网络或备用控制方案;同时,还要求通信速度快、信息处理能力强。配电网自愈和优化控制可最后通过软件模块嵌入配电自动化监控系统来实现。届时,将会在很大程度上提高配电网的整体自动化水平、优化能力和自愈控制能力,为配电网的智能化增加有力的砝码,产生很大的经济效益和社会价值。

3.3 AMI 技术

高级量测体系(advanced metering infrastructure, AMI)是一套完整的系统,如图5所示,由智能电能

表、通信网络、家庭局域网、计量数据管理系统和AMI接口等组成。它不是单一的技术实现,能够利用双向通信系统和记录用户详细负荷信息的智能电表,定时并即时获得用户带有时标的多种计量值,如用电量、用电需求和电压、电流等信息,同时向用户端发布命令和信息,与用户建立紧密联系。

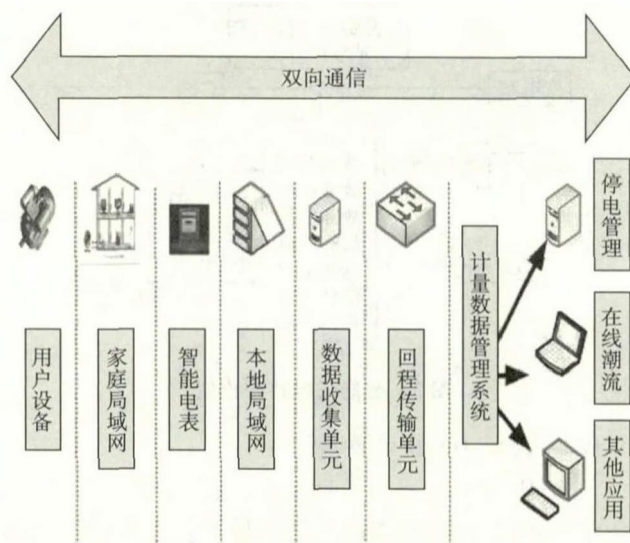


图5 AMI 系统架构

AMI 是一个使用智能电表通过多种通信介质,按需或以设定的方式测量、收集并分析用户用电数据的系统。AMI 使用户由被动的电力消费者变为配电网运行控制的积极参与者,根据电价变化来选择用电时间。用户可以利用其分布式发电与储能装置参与削峰填谷。

AMI 是传统 AMR 技术的新发展,属于用户自动化的内容;同时 AMI 是智能电网的基础设施,国外许多供电企业把实施 AMI 作为建设智能电网的第一步。AMI 的使用可以提升分布式能源接入的可实施性以及用户参与电网运行和管理的积极性;可增进公用事业与用户的关系,提高用户满意度,降低服务成本;物联网技术的快速发展,并结合智能电网的 AMI,使得智能家居成为可能。AMI 和配电管理系统是实现智能电网蓝图的重要一步。将两者有机地结合起来,可以提高电网运行效率和实现资源的优化配置。从目前研究情况来看,建设 AMI 还需解决以下若干问题:

——元件兼容 不同厂商的数据采集、监视、控制装置等之间的无缝连接;

——通信 主要指各组件之间的通信、通信方式和通信协议等;

——网络安全 包括数据的保密性、完整性、可用性和不可否认性等方面。

3.4 分布式发电与微电网

分布式电源(DER)概念上包括分布式储能装置和分布式发电装置。

分布式发电(DG)是指直接布置在配电网或分布在负荷附近的发电设施,经济、高效、可靠地发电^[12]。一般认为分布式发电机组定义在50MW以下。从并网发电角度,DER和DG不做严格区分。分布式发电是提高能源利用效率、发展可再生能源的必然选择。分布式发电技术包括热电冷联产(含热电厂、微型燃气轮机等)、小水电、风力发电、太阳能发电、生物质发电等方面。典型的微网结构如图6所示。

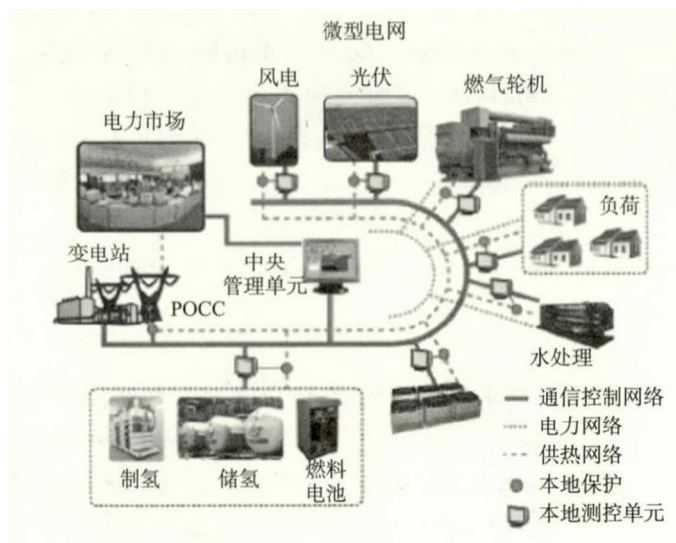


图6 微网结构

分布式发电装置并网后会给配电网带来一系列积极的影响。

——提高了电能质量 微电网作为一个相对独立的电力网络,在与配电网并网运行时,一方面能满足配电网对微电网提出的功率因数或无功吸收要求,以减少无功的长距离输送;另一方面需要保证微电网内部的电压质量,微电网需要有对内对外的电压无功平衡控制,从而优化配电网与微电网电能质量。

——提高电网的防灾害水平 灾害期间,DER可维持部分重要负荷的供电,减少灾害损失。

——启停方便 调峰性能好,有利于平衡负荷。

——投资小、见效快 发展DG可以减少、延缓对大型常规发电厂与输配电系统的投资,降低投资风险。

——可以满足特殊场合的用电需求 如用于大电网不易到达的偏远地区的供电;在重要集会或庆典上,DER处于热备用状态可作为移动应急发电。

——减少传输损耗 DER就近向用电设备供电,避免输电网长距离送电的电能传输损耗。与此同时,分布式电源的接入也对配电网的建设带来众多的问题:技术问题包括电压调整、保护装置的误动作、对短路电流水平的影响以及对配电网供电质量的影响;管理问题包括增加配电网运行与调度的复杂性,并且给配电网的检修与维护带来了影响,不仅如此,对配电网规划建设与经营也带来了重大的影响^[13]。

4 结束语

市电网中包含220kV送电网和110kV、63kV、35kV高压配电网,10kV中压配电网以及380V低压配电网,庞大而复杂;且用户停电80%~90%主要是由城市电网故障引起的,网损的大部分也发生在这一部分网络上。我国电力建设在20世纪长期存在“重发、轻供、不管用”的问题,常常有电“送不进、落不下、用不上、损耗大”。有资料显示,我国目前设备检修停电占总停电的70%~80%,这说明网络拓扑不够强,或设备检修工作实施得不够科学,需要加强电网的规划、建设和管理工作。SDG是客观发展的必然结果,不是可选择或不可选择的。我国城市电网正在快速发展中,开展未来配电网的研究对我国社会经济发展尤其具有重大意义。

参考文献

- [1] 余贻鑫,栾文鹏.智能电网述评[J].中国电机工程学报,2009,29(34):1-8.
- [2] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等.智能电网技术综述[J].电网技术,2009,33(8):1-7.
- [3] 肖世杰.构建中国智能电网技术思考[J].电力系统自动化,2009,33(9):1-4.

(下转第65页)

地性能,改善轮边驱动系统簧下质量过大而导致的接地性能问题。

5 结束语

本文针对轮边驱动系统簧下质量过大的问题,设计和研究一种集轮毂电机、制动器、定轴减速装置为一体的高效、紧凑、可靠的轮边驱动系统,其中的轮毂电机作为动力吸振器的质量单元。采用动力吸振器不仅从根本上减小了非簧载质量,而且还利用了这部分分离的质量进行了动态减振,进一步提高了汽车的垂向性能,特别是车轮的接地性能有了很大的提升。

参考文献

- [1] 机械设计手册编委会. 机械设计手册: 齿轮传动(单行本)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [2] 闻邦椿. 机械设计手册[M]. 5版. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [3] 李阳, 梁臻. 基于 Matlab 的双级齿轮减速器优化设计[J]. 装备制造技术, 2011(10): 51-53.
- [4] 宁国宝. 轮边驱动系统垂向振动负效应的抑制研究方法[D]. 上海: 同济大学汽车学院, 2006.
- [5] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

(上接第9页)

- [4] 施婕, 艾芊. 智能电网实现的若干关键技术问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 1-4, 55.
- [5] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 1-4.
- [6] 丁民丞, 王靖, 朱治中. 方兴未艾的智能电网[EB/OL]. [2008-08-09]. http://www.indaa.com.cn/zz/gjdwzz/gjdw0805/200808/t20080821_74908.html.
- [7] 余贻鑫. 面向 21 世纪的智能配电网[J]. 南方电网技术, 2006, 2(6): 14-16.
- [8] 徐丙垠, 李天友, 薛永瑞. 智能配电网与配电自动化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 39-40.
- [9] 王成山, 王守相. 分布式发电供电系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1-4.
- [10] 郭志忠. 电网自愈控制方案[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 85-91.
- [11] 陈星莺, 顾欣欣, 余昆, 等. 城市电网自愈控制体系结构[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 38-42.
- [12] 张文亮, 刘壮志, 王明俊, 等. 智能电网的研究进展及发展趋势[J]. 电网技术, 2009, 23(13): 1-11.
- [13] 马其燕. 智能配电网运行方式优化和自愈控制研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2010.

全球智能控制与自动化大会将于 2014 年 6 月在沈阳召开

预定于 2014 年 6 月 27 日至 30 日在沈阳召开的全球智能控制与自动化大会(WCICA)是在中国召开的每两年一次的重要国际会议。经会议录用的论文将由 IEEE 出版, EI 检索。该会议由中国两院院士宋健、美国哈佛大学教授何毓琦和美国华盛顿大学教授谈自忠共同发起, 旨在为全球从事智能控制和自动化的专家、学者和工程技术人员提供一个交流的平台。自 1993 年 8 月第 1 届会议在北京召开以来, 已先后在合肥、西安、上海、大连和重庆等地举办了 10 届, 成为该学术领域在中国举行的最高规格的国际会议。

WCICA2014 会议将针对控制理论与工程、工程优化、系统感知建模与分析、大数据自动化和智能自

动化系统 5 个方向面向全球广泛征集稿件, 并邀请智能控制与自动化领域国际著名教授作大会主报告和分会报告。会议将评选出大会最佳理论论文奖、最佳应用论文奖、最佳学生论文奖以及生物医学与生物系统、工业自动化和供应链等相关领域最佳论文奖。会议也联系了 IEEE Transactions on Control Systems Technology 和《自动化学报》等十余家国际国内权威期刊, 对会议录用论文进一步发表。本次会议将为全球学术界与工业界在智能控制与自动化的融合方面做出卓有成效的贡献。大会的召开将对我国在该领域的发展起到重要的推动作用, 并且提升我国在该领域的国际影响力。