

# 智能配用电园区低碳效益仿真与评价系统及其在江西的应用

辛建波<sup>1</sup>, 范瑞祥<sup>1</sup>, 郑蜀江<sup>1</sup>, 赵唯嘉<sup>2</sup>, 周天睿<sup>2</sup>

(1. 江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330006; 2. 电力系统国家重点实验室, 清华大学电机系, 北京 100084)

**摘要:** 电力系统的碳排放监测与统计是电力行业低碳化发展的基础性工作。现有的电力系统碳排放的计算方法大多停留在理论层面, 与实际工程的结合亟待提高。在江西共青城的智能电网示范工程中建立了较为全面的低碳效益仿真与评价系统。从共青城智能电网示范工程出发, 介绍了低碳效益仿真与评价系统的应用对象和目标; 介绍了低碳效益仿真与评价系统的总体构架, 结合系统界面图从碳排放在线监测、低碳规划仿真对比、规划方案的效益分析三个方面介绍了低碳效益仿真与评价系统的具体功能, 并展示了系统对示范工程各类效益的仿真计算结果。最后对低碳效益仿真与评价系统的应用价值和发展空间进行了展望。

**关键词:** 低碳电力; 智能电网; 低碳效益仿真与评价; 碳排放流

## Low-carbon benefit simulation and evaluation system for smart distribution grid and its application in Jiangxi Province

XIN Jian-bo<sup>1</sup>, FAN Rui-xiang<sup>1</sup>, ZHENG Shu-jiang<sup>1</sup>, ZHAO Wei-jia<sup>2</sup>, ZHOU Tian-rui<sup>2</sup>

(1. Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330006, China;

2. State Key Lab of Power Systems, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** CO<sub>2</sub> emission monitoring and calculating of power system is fundamental for low-carbon development of electric power industry. Current calculating and analysis methods for CO<sub>2</sub> emission from power system are mostly theoretical. The application of CO<sub>2</sub> emission monitoring and analysis in existing projects is scarce. In Gongqing city of Jiangxi province, a comprehensive low-carbon benefit simulation and evaluation system is established in the smart grid demonstration project. In this paper, application of low-carbon benefit simulation and evaluation system is introduced based on this demonstration project. On the basis of overview of demonstration project and overall framework of low-carbon benefit simulation and evaluation system, specific functions are introduced in terms of CO<sub>2</sub> emission on-line monitoring, low-carbon planning simulation and comparison, and low-carbon planning benefit analysis. Moreover, benefits derived from demonstration project under different cases are shown, which are calculated by that system. Finally, prospects of application value of low-carbon benefit simulation and evaluation system are discussed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51107059).

**Key words:** low carbon electricity; smart grid; low-carbon benefit simulation and evaluation; carbon emission flow

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)07-0086-05

## 0 引言

随着能源危机与气候变化问题的不断凸显, 在保证经济发展的同时, 减少过度的化石能源消耗对人类社会的可持续发展至关重要<sup>[1]</sup>。我国的能源结构以煤炭为主, 电力行业是我国煤炭消耗的大户,

也是我国碳排放的主要来源<sup>[2-3]</sup>。电力行业的低碳发展是全社会实现低碳转变的关键要素, 应当被予以足够的重视<sup>[4]</sup>。

电力系统的碳排放监测与统计是电力行业低碳化发展的基础性工作, 应当与电力系统的调度控制实时结合, 为电力系统面向低碳的运行提供指导。然而, 现有的电力系统碳排放的计算方法大多均停留在理论层面, 未能与实际工程紧密结合。随着智能电网技术与量测技术发展, 对电力系统运行状态监测、用户用电监测的同时, 有必要将已有的碳排

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (51107059); 国家电网公司科技项目 (52182012Y00J); 国家科技支撑计划项目 (2013BAA01B01)

放计算与分析方法与实际工程相结合, 实现低碳电力“从理论走向实际, 从统计走向监测”的飞跃。

欲实现对系统运行排放的实时监测, 需要有与系统运行紧密结合的碳排放分析方法。现有的碳排放统计方法主要包括宏观统计法和全生命周期法。宏观统计法先统计各类化石燃料的消耗总量, 然后按照各类化石燃料的碳排放因子计算总的碳排放量<sup>[5-6]</sup>。全生命周期法可以全面评价电力系统在规划、建设、运行、升级、退役等阶段中的碳排放情况<sup>[7-8]</sup>。在此基础上, 文献[9]提出了碳排放流的概念, 将电力系统碳排放流定义为依附于电力潮流存在且用于表征电力系统中维持任一支路潮流的碳排放所形成的虚拟网络流。文献[10-11]对碳排放流的计算方法与分析方法进行了讨论, 为低碳电力领域的研究提供了新的思路。与宏观统计法和全生命周期法相比, 碳排放流分析法更容易应用于系统实时运行的碳排放分析, 同时可准确计算需求侧管理和用户用电行为对碳排放的影响机理与减排效果。

本文将从共青城智能电网示范工程出发, 对智能配用电园区低碳效益仿真与评价系统进行应用介绍。该低碳效益仿真与评价系统通过对系统运行数据的采集, 提供常规碳排放统计和碳排放流计算所需的数据支撑, 实现对系统的碳排放情况进行实时监测。在此基础上, 低碳效益仿真与评价系统可结合共青城电网的规划方案和电力需求预测结果, 对示范工程实施后和强化后的各类低碳效益和经济效益进行评价, 为电网的低碳化设计与优化运行提供理论依据。

## 1 共青城智能配用电示范工程概述

### 1.1 工程概述

共青城位于江西省北部, 昌九工业走廊中段, 东邻长沙、武汉, 西傍鄱阳湖, 南接南昌, 北依九江, 距南昌、九江均为 50 km。现有面积 170 km<sup>2</sup>, 人口 10 万。

2011 年 6 月, 日本“新能源·产业技术综合开发机构”(NEDO) 在东京正式启动了与中国江西省共青城的“智能社区”示范项目。示范项目由日本东芝、伊藤忠商事等 4 个集团下的 7 家中标公司与江西省及国家电网公司合作, 预计 2014 年完成。项目内容是建设一个兼顾经济发展与低碳发展的智能技术示范区。该示范工程区域为共青城区东至富华大道, 西至九仙大道, 北至创业路, 南至发展大道, 其范围包括现北峰线、环湖线、新村线、米粮铺线、火车站线、发展线及畜牧线全部或部分线路。

### 1.2 低碳效益仿真与评价系统的分析对象

低碳效益仿真与评价系统的分析对象为共青城南中环、市中环和市西环三个环状结构配电网。

共青城示范工程区域三环网的结构如图 1 所示。该示范区域涉及 10 kV 主线路 7 条, 线路总长超过 13 km。正常情况下各环采取开环运行, 各条母线之间互不相连。示范区面积约 6.5 km<sup>2</sup>, 共有配变 194 台, 总容量 59.4 MVA, 最大负荷 19 MW, 负荷密度约为 2.92 MW/km<sup>2</sup>。

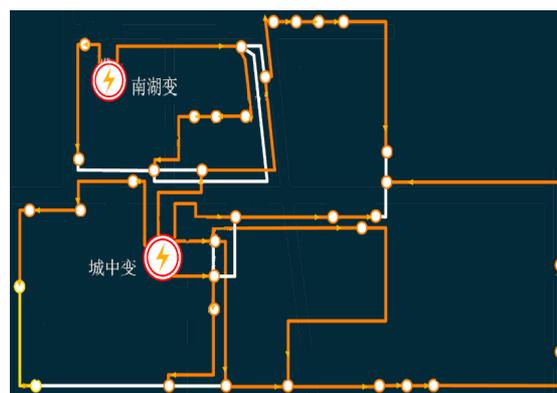


图 1 共青城示范工程区域三环网结构示意图

Fig. 1 Triple-loop distribution system of demonstration project in Gongqing city

## 2 低碳效益仿真与评价系统的功能架构

低碳效益仿真与评价系统将实现智能配电网的数据交换集成、电网信息采集、电网统一建模、数据分析与评估、信息展现、图模一体化与电网空间信息一体化, 根据这一要求, 系统总体构架可分为五大层次, 从底层到顶层分别为数据与模型层、仿真层、评估层、应用层以及展示层。底层系统将作为上层系统运行的基础, 上层系统通过调用底层系统与数据实现其功能。

### 2.1 数据与模型层

主要负责整个平台中面向智能配用电系统的数据及元件模型存储, 同时负责平台中数据管理、维护与交换。平台中的元件模型定义了智能配用电系统中各种元件的电气模型、用电/发电特性模型及其碳排放模型, 描述对象主要包括配变电设备、分布式电源、电动汽车等配电网元素<sup>[12-14]</sup>。平台的数据主要包括智能配电网实时参数、系统拓扑参数与设备配置方案、系统设备参数与运行参数、系统仿真方案与仿真结果以及系统低碳效益指标体系。其中实时参数来自智能配用电高级量测系统以及 D5000 系统, 系统拓扑参数与设备配置方案、系统

设备参数与运行参数、系统仿真方案等可用数据导入或人工设定的方式获取，系统仿真结果与低碳效益评估指标体系分别来自仿真层与评估层的计算结果。

## 2.2 仿真层

根据系统仿真方案，根据智能配用电系统中各种设备的运行特性，利用先进的电力系统分析理论、随机模拟技术以及优化技术，根据一定的优化原则，仿真系统一段时期内的整体的运行情况，得到用于评估系统低碳效益的全方位模拟运行结果。仿真的内容包括电动汽车充放电仿真、清洁能源间歇性仿真、智能配用电系统运行仿真、系统碳排放强度仿真、系统潮流仿真以及系统碳排放流仿真。仿真中通过设定系统设备的不同配置方案以及运行方式能够得到不同的运行结果与评估结果，进而通过多方案对比实现应用层的各种分析与优化决策功能。

## 2.3 评估层

根据系统实时参数或系统仿真结果，基于特定的参照系评估系统的低碳效益、发电成本以及能耗水平。评估在从时间维度可分为历史评估、在线评估与对未来系统形态的仿真结果评估，其数据分别来自对实际数据的积累、实时数据以及对系统未来运行的仿真结果。低碳效益需要通过对比的参照系实现，参照系可选择为同省配电网的单位碳排放标准，也可选为国家标准或其他智能配用电园区的排放水平。

## 2.4 应用层

利用评估层得到的低碳效益评价指标体系，通过不同维度的对比分析实现系统的优化运行与优化规划等高级功能。主要应用包含三个方面：通过对比实际系统运行效益与同行业的平均标准评估智能配用电设备的价值；通过对比实际系统运行效益与理想状态下的运行结果评估实际系统的优化潜力；通过对不同智能配用电系统运行方式优化现有系统运行方式；通过对比不同设备配置实现系统设备的优化选型。

## 2.5 展示层

展示层作为该平台的最高层级，将数据与模型层、仿真层、评估层以及应用层以科学的方式进行组织与展示，借鉴感知化系统中的一些先进的展示方法与技术，实现智能配用电系统低碳效益的可视化<sup>[15]</sup>。

系统通过对智能配用电系统的运行状态以及低碳效益评价指标进行深度的加工与处理，以直观的图像信息反映智能配用电系统的运行特征。同时定制新颖、丰富的图形元素并大量运用，打破传统调度界面多由表格、文字、数据构成的单调风格，实

现信息从静态、二维平面、孤立数据的展示到动态、三维立体、连续图形展示方式的转变；使运行人员动态感知智能配用电系统的运行状态，准确判断系统的低碳效益。

## 3 低碳效益仿真与评价系统的功能描述

系统排放在线分析功能主要结合共青城配电网自动化系统的实时数据采集功能展开，主要包含两部分内容。一方面，低碳效益仿真与评价系统根据智能配用电园区的运行实时数据进行碳排放流和低碳的实时评价与分析，作为“园区碳排放在线监测”功能；另一方面，系统根据园区智能配用电系统建设规划以及园区产值预测等数据实现对示范工程不同建设阶段的运行仿真模拟，并得到园区的碳排放特性预测以及效益评估结果，作为“园区低碳规划仿真对比”功能。

### 3.1 园区碳排放在线监测

宏观排放计算分析主要结合共青城上述三个环网的宏观碳排放统计数据展开，力求展示该部分电网的整体排放特征与统计指标。微观排放透视分析主要围绕三个环网的碳排放流的分析展开，力求描述该部分电网的局部特征和每部分细节的碳排放指标和信息。图2为“宏观碳排放分析”功能展示页面。左上饼状图柱为“示范区实时电源结构明细”，以共青城环网结构为分析对象，展示了为示范区供电的各类型电源的实时出力占示范区总负荷的百分比。上方中部图表为“示范区用电碳排放分析”，根据碳排放流计算结果，与系统负荷数据共同展示，以监测园区实时碳排放与用电量的相对大小与变化趋势。右上方图表为“示范区减排量”，展示智能配用电园区因分布式能源等低碳因素产生的碳减排量，通过对示范区实时用电碳排放强度和江西全网碳排放强度进行对比计算得到。下方图表为“示范区本日/月/年累积用电量/碳排放/减排量”。展示内容分别为本日零时至当前时刻、本月首日零时至本日零时以及本年首日零时至本月首日零时的总用电量、总碳排放量和总减排量，通过电力消费和基于碳排放流的计算统计得到，以展示电力消费与碳排放的相对关系，并展示示范园区的运行低碳效益。

### 3.2 园区低碳规划仿真对比

规划效益仿真评价主要以清华大学开发的智能配用电系统低碳效益仿真模拟技术算法，根据目标电网的规划方案、边界条件和系统参数，对目标电网的运行特性进行模拟，在此基础上进行碳排放的宏观分析与碳排放流的计算和分析，以计算共青城智能配电网的低碳效益，得到对系统规划有指导

意义的结论。该部分功能主要内容为仿真计算。图 3 为“低碳规划仿真”页面。页面中间为示范区的拓扑结构图。拓扑图左侧为仿真方案的描述信息, 分别为仿真年份、分布式能源接入、电动汽车充电电量、年总电量、年总碳排放量等信息。右侧四个图表展示不同年份规划方案仿真结果的对比情况, 展示内容分别为工

程实施的不同阶段(工程实施前、工程实施后、提升后)示范区分布式电源与电网降损带来的低碳效益和经济效益、园区单位 GDP 排放与清洁能源消费比例、年供电碳排放强度与年供电量、示范区年碳排放量与分布式能源减排量。拓扑图左上方有展示不同场景仿真结果的选项, 通过点击不同的场景可显示该场景的规划方案与仿真结果。

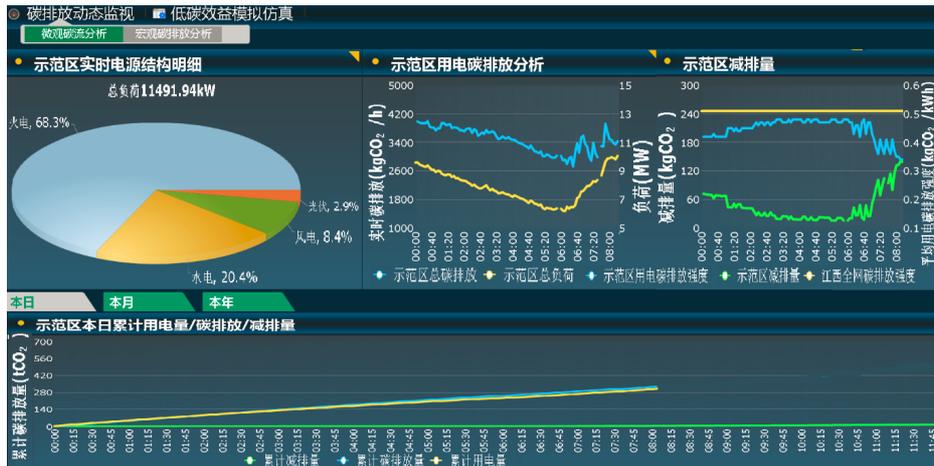


图 2 宏观碳排放分析页面

Fig. 2 Page of macroscopic CO<sub>2</sub> emission analysis

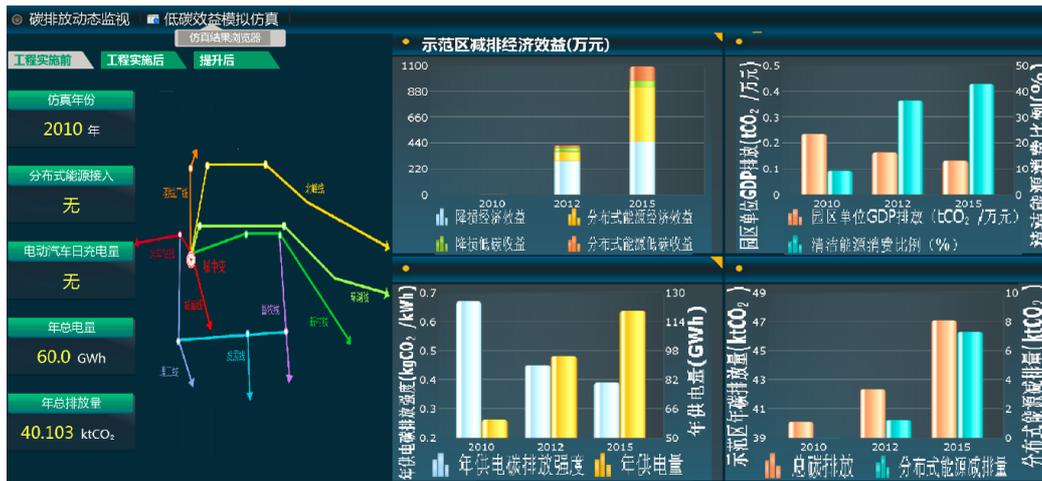


图 3 低碳规划仿真页面图

Fig. 3 Page of low-carbon planning and simulation

### 3.3 园区规划方案的效益分析

智能配用电园区可产生的各类经济效益和低碳效益是示范工程经济性评价的关键内容。在低碳效益仿真与评价系统中, 充分考虑了示范工程通过节能降损、分布式能源、电动汽车等因素可实现的减排效益和经济效益, 并考虑了在不同低碳环境下收益的影响。据仿真系统分析估算, 示范工程提升后每年最多可实现碳减排 10 779 t, 直接降损经济

效益 915 万元, 总效益最高可达 1 088 万元。进一步, 示范工程实施后, 园区内单位 GDP 碳排放相比工程实施前下降高达 47.7%, 为共青城乃至江西省的低碳发展均可作出指导。

## 4 结论与展望

本文从共青城智能电网示范工程的实际出发, 对共青城智能配用电园区低碳效益仿真与评价系统

的设计与应用进行了研究。该低碳效益仿真与评价系统利用碳排放流计算所需的数据可以进行示范区能源消费结构、碳排放和减排效益的实时分析。在此基础上,结合共青城示范工程的规划方案和电力需求和经济发展等方面的预测,该低碳效益仿真与评价系统可以对示范工程实施后和强化后的各类低碳效益和经济效益进行评价。本研究在国内首次实现了碳排放流概念的工程化应用,为电网的低碳化设计与优化运行提供了理论依据和分析工具。随着未来碳交易机制的逐步建立和碳交易市场的形成,基于智能配用电系统示范工程的低碳效益仿真与评价系统将具备更大的应用价值和发展空间。

### 参考文献

- [1] 康重庆,陈启鑫,夏清. 低碳电力技术的研究展望[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 1-7.  
KANG Chong-qing, CHEN Qi-xin, XIA Qing. Prospects of low-carbon electricity[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 1-7.
- [2] 魏一鸣,刘兰翠,范英,等. 中国能源报告(2008): 碳排放研究[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [3] 卢斯煜,娄素华,吴耀武. 低碳经济下基于排放轨迹约束的电力系统电源扩展规划模型[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 175-181.  
LU Si-yu, LOU Su-hua, WU Yao-wu. A model for generation expansion planning of power system based on carbon emission trajectory model under low-carbon economy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(11): 175-181.
- [4] Secretary of State for Trade and Industry, UK. Our energy future—creating a low carbon economy[M]. Energy White Paper, 2003.
- [5] 中华人民共和国国家统计局. 中国能源统计年鉴2006[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [6] EGGLESTON H S, UENDIA L, MIWA K, et al. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: prepared by the national greenhouse gas inventories programme[R]. Kamiyamaguchi Hayama, Kanagawa, Japan: IGES, 2006
- [7] HONDO H. Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case[J]. Energy, 2005(30): 2042-2056.
- [8] 蔡亦竹,柳璐,程浩忠,等. 全寿命周期成本(LCC)技术在电力系统中的应用综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 149-154.  
CAI Yi-zhu, LIU Lu, CHENG Hao-zhong, et al. Application review of life cycle cost (LCC) technology in power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 149-154.
- [9] 周天睿,康重庆,徐乾耀,等. 电力系统碳排放流分析理论初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 38-43.  
ZHOU Tian-rui, KANG Chong-qing, XU Qian-yao, et al. Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 38-43.
- [10] 周天睿,康重庆,徐乾耀,等. 电力系统碳排放流的计算方法初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 44-49.  
ZHOU Tian-rui, KANG Chong-qing, XU Qian-yao, et al. Preliminary investigation on a method for carbon emission flow calculation of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 44-49.
- [11] 周天睿,康重庆,徐乾耀,等. 碳排放流在电力网络中分布的特性与机理分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 39-44.  
ZHOU Tian-rui, KANG Chong-qing, XU Qian-yao, et al. Analysis on distribution characteristics and mechanisms of carbon emission flow in electric power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 39-44.
- [12] 肖湘宁,陈征,刘念. 可再生能源与电动汽车充电设施在微电网中的集成模式与关键问题[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 1-14.  
XIAO Xiang-ning, CHEN Zheng, LIU Nian. Integrated mode and key issues of renewable energy sources and electric vehicles' charging and discharging facilities in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 1-14.
- [13] 刘晓飞,张千帆,崔淑梅. 电动汽车 V2G 技术综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 121-127.  
LIU Xiao-fei, ZHANG Qian-fan, CUI Shu-mei. Review of electric vehicle V2G technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 121-127.
- [14] 张保会,付科源,郑涛,等. 用电设备智(自)联网的概念与实现技术(一)——定义、架构与功能[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 1-6.  
ZHANG Bao-hui, FU Ke-yuan, ZHENG Tao, et al. Conception and technologies of the smart (autonomous) internet of power consumption equipments part 1: conception, architecture and functions[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 1-6.
- [15] 李大勇,马冬雪,王晓宁,等. 电网信息可视化应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 156-158.  
LI Da-yong, MA Dong-xue, WANG Xiao-ning, et al. Application of network information visualization[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23): 156-158.

收稿日期: 2013-10-21

作者简介:

辛建波(1970-),男,博士,高工,研究方向为低碳电力、电能质量等;

范瑞祥(1977-),男,博士,高工,主要从事配电系统、电力电子技术的研究工作;

郑蜀江(1979-),男,高工,主要从事配电网运检技术工作;

赵唯嘉(1990-),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向为低碳电力、智能电网。E-mail: 15210590960@163.com