

新电改形势下智能配电网调度互动研究应用

周冬旭¹, 张明¹, 朱红¹, 余昆²

(1. 国网南京供电公司, 江苏 南京 210019;

2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098)

摘要:考虑电力体制改革的背景,以智能配电网为研究对象,建立了互动体系结构,提出了互动机制、互动策略及实现方法,开发了智能配电网调度互动决策支持系统,并进行示范应用。研究成果实现了源网荷的统一协调互动,增强了智能配电网的运行弹性水平和互动响应能力,有力保障了智能配电网的灵活、高效运行。

关键词:智能配电网;电改;调度互动;分布式电源

中图分类号:TM743

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)02-0089-06

0 引言

随着分布式发电技术、电动汽车技术的发展和推广应用,配电网的运行特性发生了根本性改变,运行状态变化频繁,供电可靠性和电能质量下降,甚至引发电压不稳定的现象^[1-5]。同时,电力体制改革不断深入推进,特别是2015年《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》等一系列文件的颁布与实施,使得电力市场环境和机制日趋成熟,并呈现出多元化的态势。这就需要电力市场的参与者,包括发电侧、电网侧和需求侧,能够通过建立合理有效的交易机制,实现各方利益的共赢。

为了应对这一系列变化,重点解决能源双向互动控制、资源最优化运行模式,以及用户弹性控制等问题,源网荷互动运行控制概念应运而生^[6],即通过电源、电网、负荷三者之间进行协调互动以提高电网功率动态平衡能力,适应未来智能电网的发展需求。2016年江苏省电力公司提出并构建了大规模源网荷友好互动系统,旨在解决特高压等外部电源通道发生故障后,电网功率、频率的稳定问题^[7-8]。同时,以激励用户互动为目标的需求侧响应互动的研究也已逐步展开和深入,并取得良好的效果^[9-15]。

综上,虽然目前对于源网荷互动理论及技术的研究成果较多,但缺乏针对互动体系全局性的思考和把握,特别是欠缺对相关成果应用与实践的报道。文中考虑电力体制改革的大背景,以含分布式电源、电动汽车充换电站、微电网及智能小区等元素的智能配电网为研究对象,建立了智能配电网调度互动体系结构,提出了互动机制、互动策略及实

现方法,采用新型软件平台图模一体化方案开发了智能配电网调度互动决策支持系统,并进行示范应用。研究成果实现了源网荷的统一协调互动,增强了智能配电网的运行弹性水平和互动响应能力,降低了电网建设投资成本,提高了新能源消纳水平,有力保障了智能配电网的灵活、高效运行。

1 调度互动框架构建

1.1 网源荷互动条件下的电力流框架

随着各种新型电力元素的出现,配电网中的电能关系随之发生变化,形成的物理对象及其电力流关系如图1所示。

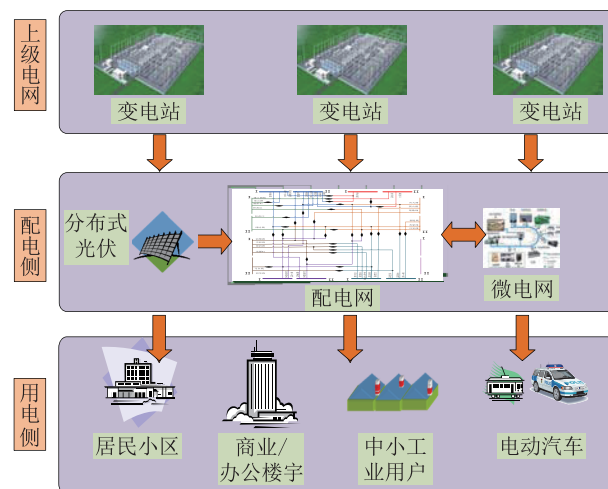


图1 电力流示意

Fig.1 Schematic diagram of power flow

电能经过变压器、输电网、配电网,最终达到用户端。而配电网在接受上级电源的同时,也消纳着分布式电源、微电网等新能源。配电网作为与广大电力用户密切相关的重要环节,为各类用户提供优质可靠电能,利用储能技术将多余的电能进行储存和再利用。

收稿日期:2017-11-17;修回日期:2018-01-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277027)

1.2 网源荷互动条件下的业务流和信息流框架

随着电力体制改革的进一步推进,除了电能转换、输送和分配相关的物理对象发生了变化,其管理部门也发生了较大的变化,出现了能源服务公司、电动汽车运营商、售电公司等新兴行业。这些新的要素大多与配电网相关,鉴于此可建立与电力流相对应的智能配电网互动主体与业务关系,如图2所示。分布式光伏与微电网为配电网提供电能,并受能源服务公司的管理,同时能源服务公司参与配电网的调度互动响应。配电网运行管理的部门主要分为调度、营销、运检、发策等部门,不同部门承担着配电网不同的业务,如保电业务、检修业务、业扩业务、运行优化等。负荷侧分为政府定价用户、中小型用户以及电动汽车用户,其中政府定价用户、中小型用户购入电能,并参与配网侧的需求响应。电动汽车则通过充换电站运营商与配电网互动,一方面消耗配电网电能,一方面在配电网用电紧张时向配电网输送电能。

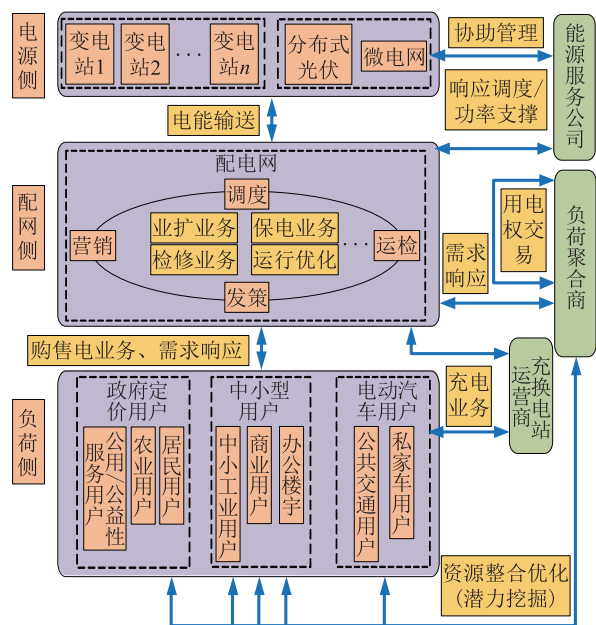


图2 业务流示意

Fig.2 Schematic diagram of operation flow

信息流主要是指为实现上述的电力流、业务流而建立的网源荷三侧相关互动主体间的信息流动。

1.3 调度互动体系结构

在建立电力流、业务流、信息流的基础上,文中提出了智能配电网调度互动体系结构,如图3所示。考虑不同互动场景和互动条件,对源网荷各侧互动主体,特别是能源服务公司、负荷聚合商等新兴元素的互动特性进行分析,以电网峰谷差、负荷均衡、供电可靠率为互动目标,构建智能配电网调度互动框架。在此基础上,设计相应的互动机制,并与各

类互动场景实现方法相适应,以实现智能配电网的可靠、灵活、经济、高效运行。

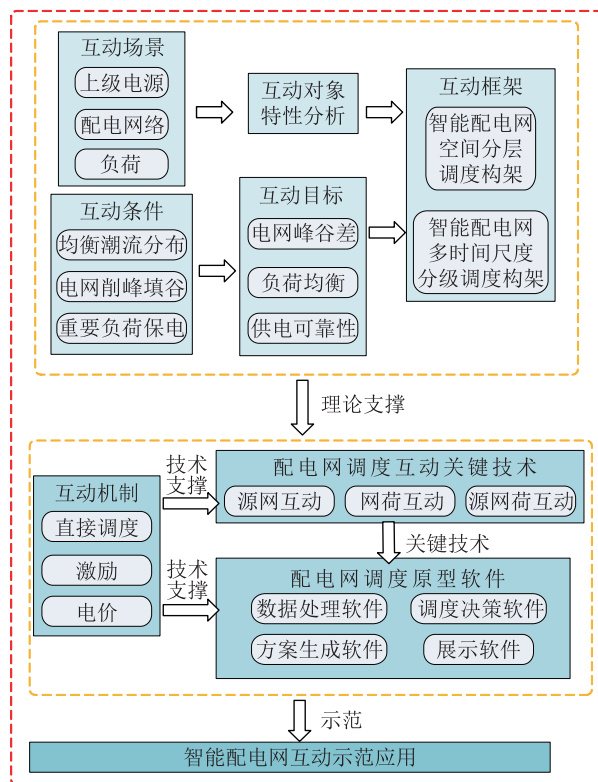


图3 调度互动体系结构

Fig.3 Structure of dispatching interaction

2 调度互动机制设计

智能配电网的可调度互动资源包括负荷资源、分布式电源资源,以及储能资源。其中负荷资源包括工业负荷、商业办公负荷、居民负荷;分布式电源资源包括可控和不可控类型;储能资源包括电动汽车及充换电站。在归纳并分析上述可调度资源特性的基础上^[16-19],文中将工业负荷、商业办公负荷划分为可中断调度资源,将居民负荷、分布式电源、电动汽车及充换电站划分为可平移调度资源。可中断调度资源和可平移调度资源在不同互动场景下,所包含的资源类型也会发生相应调整。

2.1 考虑价格偏好因素的可中断资源互动模型

考虑价格偏好因素的可中断资源互动模型的目标为在既定的购电价格下,供电公司原本用于购电的费用补偿用户可中断负荷,若两者差值大于0,则相当于负荷削减带来了成本的节约,再考虑输配电成本和运行费用,使供电公司成本节约函数最大。

约束条件包括:(1)个人理性条件。即要鼓励用户参与,满足用户参与能获得更多利润。(2)激励相容条件。即用户参与可中断负荷合同后,披露

真实信息的利润大于机会成本,从而保证用户上报真实的用户类型。

2.2 基于贝叶斯纳什均衡的可平移资源互动机制

供电公司的电价策略可以影响用户的用电行为,但不能控制用户的用电行为,则这个问题可以用 Stackelberg 博弈模型来描述。供电公司和用户视为一对博弈参与者,有 N 个 Stackelberg 博弈模型,就有 N 对供电公司与用户博弈参与者。

供电公司在某个时间段发布可平移资源的基准电价信息并传递给用户,用户设计自身可平移负荷用电初步计划,再报给供电公司。供电公司结合此项用电计划,计算此时节点潮流分布并获得各时刻节点灵敏度,根据灵敏度重新拟定电价再次发布用电价格信息。用户根据新的电价拟定最终用电计划。在整个博弈过程中,用户根据用电价格不断调整用电计划,达到用电成本最低的目标。

3 调度互动实现技术

在前文建立调度互动框架和互动机制的条件下,文中考虑年度负荷、月度负荷,以及日负荷等多负荷水平下的源网荷调度互动,并分别制定相应的实现技术。

3.1 长期(年度)调度互动技术

通过长期时间尺度下的互动,利用源网荷三侧资源的协调降低负荷峰谷差、减少尖峰负荷;优化馈线联络点的分布,合理规划分布式电源、电动汽车充放电设施、可中断负荷,实现网源荷的协调发展。

考虑到配电网源、荷资源的规划不在调度部门完成,而电价等政策也不是由调度部门掌控,因此对于配网调度来说,长期调度互动分为两个阶段:配电网薄弱环节辨识阶段和常态运行方式优化决策阶段。

(1) 配电网薄弱环节辨识阶段。针对配电网的历史运行数据,如配电网的电压功率数据,设备的负载率,故障信息,保电申请等,评估配电网的薄弱环节。

(2) 常态运行方式优化决策阶段。主要考虑的是季节性运行方式的优化。由于天气、温度、湿度、生产生活规律的变化,在不同的季节,负荷的特点存在较大的不同,而电价也存在差异,比如江苏省在夏季实行尖峰电价。在不同的季节里,分时电价的费率不同,使得负荷的响应也不同。

3.2 中长期(月度)调度互动技术

综合考虑社会生产和生活规律、检修方式、负

荷平衡和保电方式对用电负荷的影响,同时计及分布式发电和电动汽车充放电等因素,对电网运行方式进行优化调整,形成智能配电网的中长期调度互动方案。中长期调度互动方案重点解决以下问题:

(1) 用能管理。供电公司与大用户或者负荷聚合商协商互动,针对某段时间可能出现的检修计划、高峰负荷等,建议用户改变用电的时间。

(2) 保电业务与检修业务的互动。如某条线路有保电的需求,则应不安排检修计划;而如果必须进行检修,则保电的时间应与用户进行沟通协商,并缩短检修工作时间。

3.3 短期(日前)调度互动技术

短期调度互动是在中长期调度互动实施基础上,对一天内的能量平衡进行优化,并计及临时检修和临时保电因素,优化调整运行方式以弥补常态运行方式的不足。短期调度互动主要考虑日前的多时段优化,内容包括:

(1) 检修计划、保电计划等。这两项业务在中长期已经确定了日期、时段以及相关的设备,作为不可控变量。

(2) 各类负荷对于电价响应的潜力,微电网的调控潜力,充换电站和电动汽车的调峰潜力等。

(3) 各时段尖峰电价、分时电价。

各阶段调度互动策略如表 1 所示。

表 1 各阶段调度互动策略
Tab.1 Interactive scheduling strategy

项目	长期调度	中长期调度	短期调度
互动目标	降低配电网整体薄弱程度; 降低配电网全年网络; 均衡负荷分布	降低配电网月度网络损耗; 均衡负荷分布	降低电压偏移率; 降低综合负荷波动系数; 降低日网络损耗; 降低峰谷差率; 开关动作次数最低; 中断调度成本最小
互动对象	配电网、用户、分布式电源、微电网、上级电源、电动汽车充换电站	配电网、用户、电动汽车、充换电站、上级电源	配电网、用户、分布式电源、微电网、上级电源、电动汽车充换电站
考虑因素	年度负荷、保电需求	月度负荷、检修需求	电价信息、保电需求、检修需求、削峰需求
约束条件	重要负荷保电的网络拓扑约束; 主变容量约束; 潮流约束	重要负荷保电的网络拓扑约束; 主变容量约束; 潮流约束; 计划检修约束	主变容量约束; 潮流约束; 分布式电源出力约束

4 实践探索及示范应用

为了促进技术成果转化和落地应用,课题组开发了基于 OPEN3200 系统的智能配电网调度互动决

策支持系统。该系统具备分时(尖峰)电价仿真、长期调度互动方案、中长期调度互动方案,以及短期调度互动方案等功能,并通过数据接口实现电网实时数据的导入与计算。系统界面如图4所示。

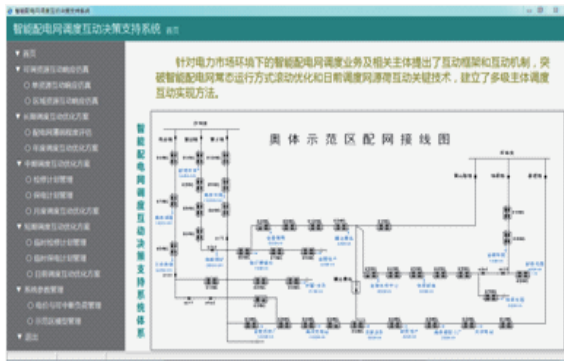


图4 系统界面

Fig.4 System interface

课题组选取南京青奥智能电网示范区作为试点应用对象,以验证研究成果的有效性和系统运行的可靠性。建立了相应的电网模型,包括220 kV变电站2座,110 kV变电站7座,10 kV馈线154条,以及1家分布式光伏电源和1座公共汽车充换电站。

4.1 薄弱性分析计算

选取2016年示范区内全年电网运行数据进行配电网薄弱度评估和薄弱环节辨识,以此形成长期优化调度方案。部分计算结果如表2所示。

表2 计算结果
Tab.2 Calculation results

序号	馈线名称	馈线整体薄弱度
1	香堤线	0.72
2	黄山路线	0.56
3	怡康线	2.57
4	紫创线	1.27
5	风台线	1.20
6	赛上线	1.23

从表2可以看出,怡康线整体薄弱度最高(计算结果越高,代表线路越薄弱)。同时,通过实地调查、运行数据分析得出,怡康线主干线电缆截面较小,并且由于所供负荷容量逐年增长,线路在负荷高峰期经常出现重载情况。特别是怡康线与其他线路联络较少,一旦出现故障跳闸、临时消缺等异常情况,大部分负荷无法在短时间内转供,造成负荷失电,影响供电可靠性。实际结论与系统计算结果相一致。解决这一“卡脖子”现象是通过上报技改,合理规划供电路径及更换大截面导线,同时加强对重点用户、重点区域设备的巡视和检查,及时

发现并解决设备缺陷和异常。

4.2 可中断资源及可平移资源互动响应

(1) 可中断资源互动响应。

2016年8月20日,根据上级调度要求,香堤线需要在8:00—17:00削减负荷200 kW,经智能配电网调度互动决策支持系统计算后,得出了可中断负荷执行方案,并通过运行方式的调整,完成了预期目标。结果如图5所示。

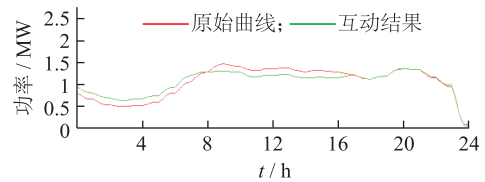
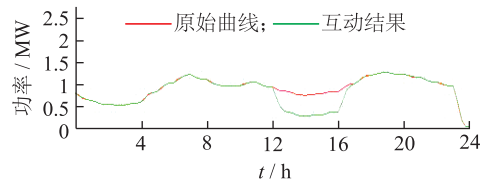


图5 香堤线互动结果

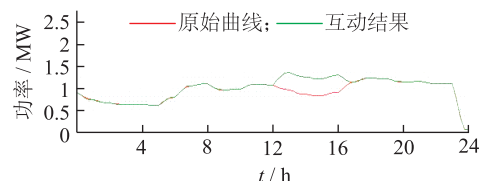
Fig.5 Interactive results of Xiangdi

(2) 可平移资源互动响应。

2016年8月25日14:00—17:00,紫创线需要临时消缺,停电范围包括橡胶某厂、充换电站2家用户。通过系统给出的转供方案,以上2家用户作为可平移资源,由黄山路线转供。结果如图6所示。



(a) 紫创线



(b) 黄山线

图6 紫创线和黄山路线互动结果

Fig.6 Interactive results of Zichuang and Huangshan

2016年迎峰度夏期间,该系统安排可中断负荷执行计划13项、调整运行方式257次、微电网交换功率调控5次,平均每天削减高峰负荷5.2 MW,平均负荷峰谷差率降低5.7%,电压合格率100%,实施效果显著,精准实现了源网荷的统一协调互动,有效保障了南京电网安全稳定运行。

5 结语

文中在考虑电力体制改革大背景下,提出了智能配电网调度互动体系框架,包括源网荷各侧互动主体,特别是能源服务公司、负荷聚合商等新兴元素。在此基础上,设计了考虑价格偏好因素的可中

断资源和基于贝叶斯纳什均衡的可平移资源的互动机制,结合年度负荷、月度负荷、日负荷等多负荷水平提出了长期、中长期、短期的调度互动实现技术。最后,将研究成果进行提炼总结,研发了智能配电网调度互动决策支持系统,并进行示范应用。工程实践结果验证了所提理论和方法的有效性和合理性,有效增强了智能配电网的运行弹性水平和互动响应能力。

参考文献:

- [1] 陈星莺,陈楷,刘健,等. 配电网智能调度模式及关键技术[J]. 电力系统自动化,2012,36(18):22-26.
CHEN Xingying, CHEN Kai, LIU Jian, et al. A distribution network intelligent dispatching mode and its key techniques[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(18):22-26.
- [2] 李威,丁杰,姚建国. 智能电网发展形态探讨[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):24-28.
LI Wei, DING Jie, YAO Jianguo. Views on smart grid evolution[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(2):24-28.
- [3] 胡泽春,宋永华,徐智威,等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报,2012,32(4):1-10.
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(4):1-10.
- [4] 姚建国,赖业宁. 智能电网的本质动因和技术需求[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):1-4.
YAO Jianguo, LAI Yening. The essential cause and technical requirements of the smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(2):1-4.
- [5] 汪隆君,许海林,王钢. 计及分布式电源功率特性的微电网经济调度模型[J]. 电力系统自动化,2016,40(11):31-38.
WANG Longjun, XU Hailin, WANG Gang. Economic dispatch model of microgrid considering power characteristics of distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(11):31-38.
- [6] 姚建国,杨胜春,王珂,等. 智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架[J]. 电力系统自动化,2012,36(21):1-6.
YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Concept and research framework of smart grid “source-grid-load” interactive operation and control[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(21):1-6.
- [7] 尹积军. 支持特高压互联电网安全运行的供需友好互动技术研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(21):5715-5723.
YIN Jijun. Research on load friendly interactive technology for safe operation of uhv interconnected power grid[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(21):5715-5723.
- [8] 夏飞,鲍丽山,王纪军,等. 源网荷友好互动系统通信组网方案介绍[J]. 江苏电机工程,2016,35(6):65-69.
XIA Fei, BAO Lishan, WANG Jijun, et al. Introduction of communication network scheme for source-grid-load friendly interaction system[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2016,35(6):65-69.
- [9] 王珂,刘建涛,姚建国,等. 基于多代理技术的需求响应互动调度模型[J]. 电力系统自动化,2014,38(13):121-127.
WANG Ke, LIU Jiantao, YAO Jianguo, et al. A multi-agent based interactive scheduling model considering demand response[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(13):121-127.
- [10] 李强,宋宁希,王剑晓,等. 基于用户互动能力的优化用电模式与方法[J]. 电网技术,2016,40(6):1818-1824.
LI Qiang, SONG Ningxi, WANG Jianxiao, et al. A pattern and method of optimized power utilization based on consumers' interaction capability[J]. Power System Technology,2016,40(6):1818-1824.
- [11] 李作锋,黄奇峰,杨世海,等. 适应新型电力供需的多元化友好互动体系研究[J]. 江苏电机工程,2016,35(5):1-5.
LI Zuofeng, HUANG Qifeng, YANG Shihai, et al. Research on a pluralistic and friendly interaction system adapted for new power supply and demand[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2016,35(5):1-5.
- [12] 王锡凡,肖云鹏,王秀丽. 新形势下电力系统供需互动问题研究及分析[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5018-5028.
WANG Xifan, XIAO Yunpeng, WANG Xiuli. Study and analysis on supply-demand interaction of power systems under [J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(29):5018-5028.
- [13] 庞鹏. 电力市场化改革背景下电力需求响应机制与支撑技术[J]. 广东电力,2016,29(1):70-78.
PANG Peng. Electric power demand response mechanism and support technology under electric power market reform[J]. Guangdong Electric Power,2016,29(1):70-78.
- [14] 杨威,曾智健,陈皓勇,等. 广东电力市场需求侧响应交易机制研究[J]. 广东电力,2017,30(5):25-34,68.
YANG Wei, ZENG Zhijian, CHEN Haoyong, et al. Research on demand response trading mechanism in Guangdong electricity market[J]. Guangdong Electric Power,2017,30(5):25-34,68.
- [15] 孙国强,李逸驰,卫志农,等. 智能用电互动体系构架探讨[J]. 电力系统自动化,2015,39(17):68-74.
SUN Guoqiang, LI Yichi, WEI Zhinong, et al. Discussion on interactive architecture of smart power utilization[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(17):68-74.
- [16] 颜庆国,薛溟枫,范洁,等. 有序用电用户负荷特性分析方法研究[J]. 江苏电机工程,2014,33(6):48-54.
YAN Qingguo, XUE Mingfeng, FAN Jie, et al. Load property analysis method for demanders participating orderly power utilization[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2014,33(6):48-54.
- [17] 王珂,姚建国,姚良忠,等. 电力柔性负荷调度研究综述[J]. 电力系统自动化,2014,38(20):127-135.
WANG Ke, YAO Jianguo, YAO Liangzhong, et al. Survey of re-

- search on flexible loads scheduling technologies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38 (20): 127-135.
- [18] 徐智威, 胡泽春, 宋永华, 等. 基于动态分时电价的电动汽车充电站有序充电策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (22): 3638-3644.
- XU Zhiwei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Coordinated charging strategy for pev charging stations based on dynamic time-of-use tariffs [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34 (22): 3638-3644.
- [19] 王昌照, 汪隆君, 王 钢, 等. 分布式电源出力与负荷相关性对配电网可靠性的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 99-105.

WANG Changzhao, WANG Longjun, WANG Gang, et al. Impact of distributed generation output and load correlation on distribution network reliability [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 99-105.

作者简介:



周冬旭

周冬旭(1984—),男,博士,高级工程师,从事配电网调控运行工作(E-mail:zdx2001@163.com);

张 明(1976—),男,硕士,高级工程师,从事配电自动化相关工作;

朱 红(1974—),男,硕士,研究员级高级工程师,从事电网调度通信工作。

Research and Application of Intelligent Distribution Network Dispatching Interactive Under the Background of Electric Power System Reformation

ZHOU Dongxu¹, ZHANG Ming¹, ZHU Hong¹, YU Kun²

(1. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China;

2. School of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Considering the power system reform, the intelligent distribution network as the research object, this paper establishes the interactive system structure, puts forward the interaction mechanism, strategy and implementation method, develops the intelligent distribution network interactive scheduling decision support system, and demonstration application. The results of the research have realized the unification and interaction of the source network load, enhanced the flexibility level and the interactive response ability of the intelligent distribution network, and effectively ensured the flexible and efficient operation of the intelligent distribution network.

Key words: intelligent distribution network; electric power system reformation; scheduling interaction; distributed power

(编辑 方 晶)