

DOI: 10.7667/PSPC151576

主动配电网用户侧能量管理系统设计与实现

胡勇

(深圳市中业智能系统控制有限责任公司, 广东 深圳 518057)

摘要: 针对配电网中分布式能源随机波动性和不可控的特性, 提出了用户侧主动配电网能量管理系统建设方案。集分布式发电、储能装置、负荷等可控设备, 结合电网侧指导电价, 以减少费用经济运行为目标, 实现间歇式能源的消纳及优化和电网的削峰填谷功能。分析了系统需求和应具备的功能。介绍了系统控制策略、系统架构以及软件设计方案。示范工程已在广东佛山成功应用, 其实测数据对所设计控制策略进行了验证, 说明了其良好的优化效果。

关键词: 主动配电网; 负荷预测; 电价发布系统; 分时电价; 实时电价

Design and implementation of user energy management system on active distribution network

HU Yong

(Shenzhen Zhongye Intelligent System Control Co., Ltd., Shenzhen 518057, China)

Abstract: According to the random fluctuation and uncontrollability of distribution energy resource within distribution network, this paper puts forward the construction project for user-side energy management system on active distribution network. Aiming to reducing cost in economical operation and coupled with the grid-side reference electricity price, it integrates control of distributed generation, energy storage device and load to realize the accommodation and optimization of intermittent energy, as well as the peak load shifting function. Demands and required functions of the system are further analyzed. The control strategies and architecture of the system, as well as the plan of software design, are also introduced. A demonstration project has already operated successfully in Foshan, Guangdong Province; the actually measured data has been utilized to verify the design and control strategies and illustrate its favorable optimization effects.

Key words: active distribution network; load forecast; electricity price system; time-of-use electricity price; real-time electricity price

0 引言

面对全球节能减排和能源可持续发展的巨大挑战, 大力发展分布式可再生能源发电已经成为必然选择。主动配电网作为智能配电网未来的发展趋势^[1], 是可以实现分布式电源在配电网中广泛接入及高度渗透的重要技术手段, 国内高校及科研单位对主动配电网涉及的多方面课题展开研究, 如: 太阳能和风能等间歇性、多变性和不确定性的有效消纳、储能系统的最优控制策略、电力市场下的负荷需求响应等。文献[2-3]探讨了分布式发电调度的优化模型, 建立了含有风力发电机、光伏发电单元以及储能装置的主动配电网能量调度数学模型, 目标函数中没有考虑用户侧的电价激励策略; 文献[4-5]强调可再生能源节能减排作用, 建立了考虑经济性、环保性

和可靠性的多目标能量优化模型, 从发电侧和政策层面上展开分析, 讨论在电力市场下的经济补偿机制和实施方案; 文献[6-8]探讨了如何利用有限的电池容量达到最优的削峰填谷效果, 设定满足一组约束条件, 借助于优化算法来求解储能系统充放电策略; 文献[9-12]探讨微电网的运行控制和经济调度, 以保证微电网的可靠运行为前提, 以整体费用最优为目标, 提出了基于经济调度的蓄电池容量优化模型, 运行充放电控制策略仅考虑电池的安全性和负荷曲线, 没有与相应的电价策略结合, 不能体现出用户互动和经济收益。

针对配电网中分布式能源的随机波动性和不可控特性, 为提高分布式能源利用率, 考虑用户主动参与能量管理的需求, 本文提出了集分布式发电、储能装置、负荷等单一可控的用户侧主动配电网能

量管理系统的建设方案，在保证电网可靠运行的前提下，以用户用电费用最低为目标，实现间歇式能源消纳及优化，电网运营系统发布实时电价，指导用户参与电网削峰填谷^[13]。用户侧能量管理系统构建适应于主动配电网的运行与控制理论和应用系统，对主动配电网的运行控制具有重要的理论和实际意义。

1 子系统构成

传统配电网采用集中调度方式，配电自动化系统实现对用户的运行监视和控制，形成“电网-用电负荷”二元结构。随着大量分布式能源的接入和电力通信技术的广泛应用，终端用户拥有分布式电源、储能设备等多种电力调节设备，多方信息及时交互为分布式能源的高效利用提供保障。电网侧预测负荷曲线及综合天气、重大事件等因素预测第二天实时电价，引导用户消纳分布式能源发电功率、平抑电网负荷峰-谷值，形成以“电网-电价决策-分布式电源-用电负荷-用户”多元结构为特征的崭新的配用电技术——主动配电网技术。

主动配电网技术能够“主动”主要体现电网侧评估整体用户负荷需求，及时利用电力价格杠杆调整策略，并通过信息化手段调动电力需方响应；用户侧对发电能力进行评估，响应电网的指导电价，调整用电计划，实现电力负荷需求的理想化。通过能量管理系统，保证了用户侧与电网侧的互动，从而把电力生产和消费集中控制的电网，转变成用户侧有大量分布式电源并能与电网有更多互动的主动配电网。涉及子系统包括电网侧电价策略制定及发布子系统、用户侧负荷、发电预测子系统以及储能和配电等数据采集与监控系统，系统组成如图 1 所示。

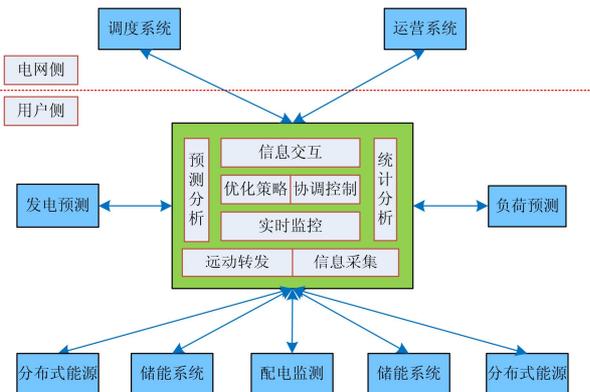


图 1 系统组成

Fig. 1 Composition of the system

1.1 光伏发电预测子系统

光伏发电功率预测结果为电力生产单位和大

用户制定发电计划和生产计划提供理论依据。光伏电站建设规范中也明确要求具备光功率预测功能，并网光伏电站需按时报送次日 96 点光伏预测功率(0:15~24:00)及超短期(未来 4 小时，16 点光伏预测功率)光功率预测曲线。光功率预测方法有基于神经网络的光伏发电功率预测^[14-15]，也有采用光伏电站历史功率数据建模来直接预测光伏发电功率^[16]等，这些方法都已有实际应用案例，为系统中光伏发电功率预测提供了多种可行路径。

1.2 用户侧负荷预测子系统

用户侧负荷预测是电网侧负荷预测的依据，为电力系统运行及电价政策的制定提供了可靠的决策依据。大用户负荷具有随机性、波动性、冲击性等特点，给实际的负荷预测工作增加了很多困难。大用户进行预测研究及应用的智能算法文献较多，主要有以下两种类型：(1)神经网络法，如 BP 神经网络、广义回归神经网络、灰色神经网络等。(2)修正算法^[17-18]，在取得大用户的生产检修计划表的基础上，根据检修时间和检修设备的详细资料进行负荷预测。现场应用表明，采用修正算法负荷预测提高大用户参与程度，预测精度更接近于实际值。

1.3 电价策略制定和发布子系统

电价是电网引导用户实现平衡峰谷差的关键因素，常用电价模式包括分时电价、实时电价等，分时电价是基于峰、平、谷负荷来计算每个时段电价，一般确定后不再调整；实时电价根据某一时段的电力供应情况及时调整，反映负荷，发电的充裕度及成本，输、配电网的充裕度及损耗，实时电价模型以社会利润最大化为目标，在最优化条件下电价的值，文献[19]按库恩-塔克(Kuhn-Tucker)的最优必要条件，用拉格朗日乘法求得实时电价。随着信息技术、计算机技术的发展，电网利用负荷预测结果，综合发电、输送能力等相关信息，把电价更新周期设为一天，每天划为 96 个时段(15 min)，实时地反映供应和需求来确定电价，通过电价发布子系统面向所有电网用户。

2 策略设计

主动配电网和微电网均需对分布式电源及储能设备进行控制，控制策略有所不同。微电网以实现区域内的自治为目标，对微电源所发功率在微网内进行消纳，强调运行模式控制；主动配电网以消纳间歇式能源的调节为目标^[20]，控制策略综合考虑用户与电网的双方因素，在保证系统的安全性前提下，对分布能源有效消纳和生产计划合理安排，提高电网的负荷特性和用户的经济效益。

2.1 系统控制策略

国家电网对分布式电源接入系统提出了总容量的要求，原则上不宜超过上一级变压器供电区域内最大负荷的 25%^[21]。当公共连接点处并入一个以上的电源、负载可调且具有储能的系统中，光伏阵列尽量工作在最大功率点(MPP)状态，因光能为不可控绿色能源，通过储能系统平抑光伏能源的随机性及波动性。系统控制策略如图 2，设定系统尽量做到不向上一级电压等级电网倒送电能，避免电能倒送可能引起的电网末端电压升高等问题，当光伏发电功率大于负载需求时，多余的能量储存到蓄电池中，尽量减少从公共电网吸收能量，禁止高电价时段向蓄电池充电，可适度由低电价时段向蓄电池充电。

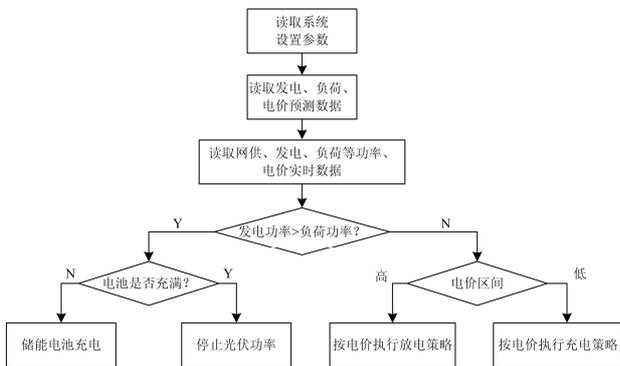


图 2 系统控制策略

Fig. 2 System control strategy

2.2 蓄电池控制策略

蓄电池的充放电策略管理具备自动控制、手动配置控制这两种模式。自动控制策略适用于电网发布实时电价模式，利用信息技术为依托，实时监控运行状态，预置的优化算法程序按策略控制其发电、储能、用电设备；手动配置策略适用于用户选择分时电价模式，用户生产计划明确且日负荷曲线可控有规律，程序根据配置策略在指定时间段投入发电、储能及用电设备并监控系统运行。

2.2.1 自动控制策略

为了保护储能设备，防止过度充放电，对充放电功率进行上下限设置，即储能元件电量较少时限制其放电功率，达到电量下限时停止向外放电，储能剩余电量较多时限制充电功率，达到电量上限时限制充电，控制策略如图 3 所示。

(1) 系统启动准备

(a) 读取预测电价：0 点(可配置)时从服务器读取全天的 96 时段的预测电价，计算其平均值。

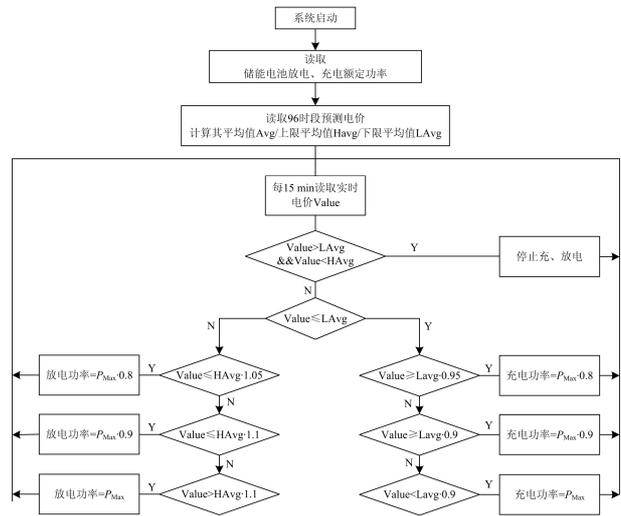


图 3 自动控制策略

Fig. 3 Automatic control strategy

(b) 计算上限值和下限值：上限值为所有大于平均值电价的平均值，下限值为所有小于平均值电价的平均值。

(2) 蓄电池控制原则

(a) 在每个时段从服务器取得实时电价。

(b) 当实时值在上限值和下限值之间时，停止充放电，充放电功率置 0。

(c) 当实时值小于下限值时，启动充电。并设置充电功率。

(d) 当实时值大于上限值时，启动放电。并设置放电功率。

(3) 充电及放电功率设置原则

(a) 蓄电池停止运行，充电及放电功率初始化为 0。

(b) 放电功率的计算

当实时值在大于上限值并小于上限值上浮 5% 范围内，放电功率设置为 80% 的最大可放电功率。

当实时值在大于上限值上浮 5% 并小于上限值上浮 10% 的范围内，放电功率设置为 90% 的最大可放电功率。

当实时值大于上限值上浮 10% 的值，放电功率设置为 100% 最大可放电功率。

(c) 充电功率的计算

当实时值在小于下限值并大于下限值下浮 5% 范围内，充电功率设置为 80% 的最大可充电功率。

当实时值在小于下限值下浮 5% 并大于下限值下浮 10% 的范围内，放电功率设置为 90% 的最大可充电功率。

当实时值小于下限值下浮 10% 的值，放电功率设置为 100% 最大可充电功率。

2.2.2 手动配置策略

手动配置策略适用于分时电价模式，用户根据已发布的峰谷平电价配置蓄电池充电时段、充电功率和放电时段、放电功率，程序按时段执行配置方案，进行充放电控制并监控系统运行。图 4 表示按分时电价的用户可选择的配置方案，光伏系统是按最大功率发电，发电时间一般是(09:00~17:00)；电池充电时间配置只能在低谷区，时间段为(23:00~07:30)；放电时间配置在高峰区，时间段为(09:00~11:30, 12:00~16:30, 19:00~21:00)，根据电池单位时间充放电功率，提前把电池充放容量配置到不同的时间区域。

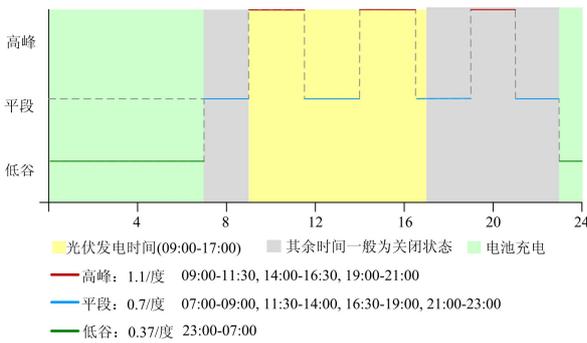


图 4 分时电价配置区间

Fig. 4 Configuration interval of time-of-use electricity price

3 系统实现

3.1 系统整体概述

用户侧能量管理系统采用一体化设计^[22]，软件基于数据采集与监视控制(Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA)平台，整体结构采用服务器/客户端模式，设计采用分布式的基于组件方法，将功能设计为独立的组件，组件间以软总线的方式进行通信，在原系统基础上扩充高级应用组件^[23]，新增电价发布、控制策略、负荷及发电预测等功能，这样可大大提高系统的内聚度，增强稳定性。组件关系如图 5。

3.2 软件功能架构

软件采用三层架构设计，分为系统支撑层、信息交互层、应用服务层，如图 6 所示，实现服务与应用的分离，有益于系统多功能的扩充。系统支撑层是基于统一规范的底层交互平台，为其他服务与应用提供底层支撑；信息交互层是通过数据库服务及软件总线为各服务及应用功能模块间架设的通信桥梁，提供统一的数据传输接口，数据库访问接口以及控制命令接口；应用服务层包括 SCADA 服务、高级应用服务及可视化应用，实现系统各种应用功能。

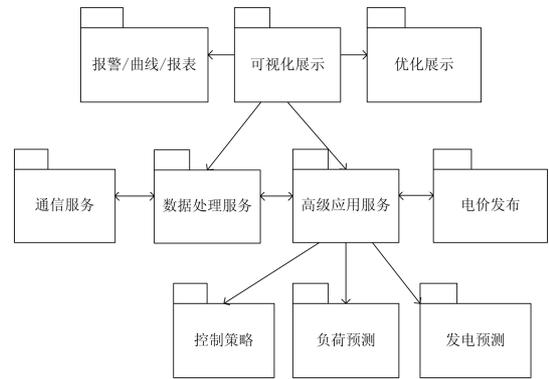


图 5 组件关系

Fig. 5 Component relationship

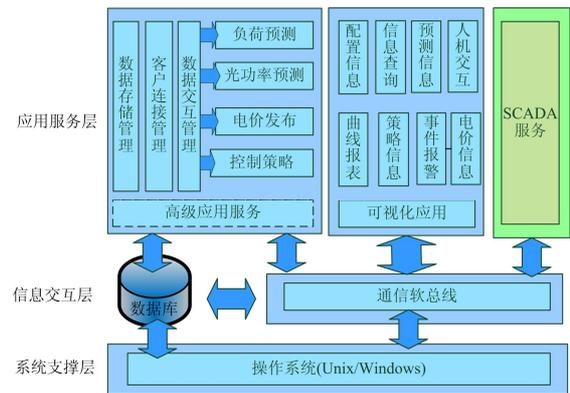


图 6 功能架构

Fig. 6 Functional architecture

SCADA 服务是系统的基础服务，包含通信服务、实时数据采集与处理、历史数据存储等功能，为核心分析计算提供数据服务。

高级应用服务基于 SCADA 服务，通过通信软总线及数据库服务信息交互，执行高级应用功能的调用、计算、数据传输等，包括根据功率、负荷预测和电网发布电价信息以及综合各方信息生成的储能控制策略，并通过 SCADA 的通信服务，对储能装置管理系统的运行模式进行实时控制。

可视化应用在服务功能模块搭建出不同的应用人机交互系统，实现图形化状态监视、操作控制、预测数据、电价信息、报表曲线、统计分析等。

4 示范应用

项目所在地全年日照小时数达 1 600~1 700 h，太阳辐射总量为 4 803.408 MJ/m²，适宜建设分布式太阳能光伏发电。示范工程包括广东 4 个大工业用户和 1 个管理中心，电网侧部署中心能量管理系统、电价发布系统以及光功率预测系统，运行表明基于主动能量管理的技术，结合天气预测和负荷预测信息，通过电价杠杆刺激用户需求响应，调整了负荷

在时间与空间的多维度分布。随着参与用户增多，会进一步降低馈线负荷峰谷差，降低网络线损，优化电压水平，改善负荷特性，电网侧数据分析本文不做详细介绍。

图7为用户侧佛山某铝厂接入分布式能源及储能系统后的配电部分一次接线及相关参数，用户侧能量管理系统根据运行策略对并网开关、光伏发电系统、储能系统以及重要负荷等实时控制。

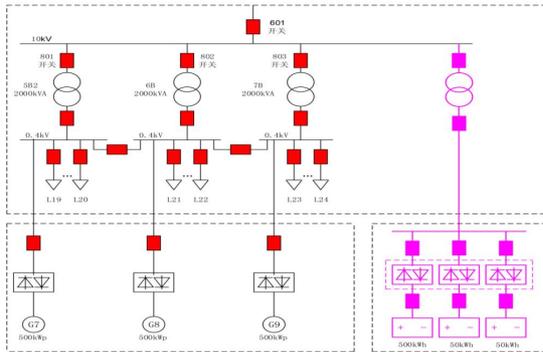


图7 一次接线图

Fig. 7 Primary connection diagram

表1为用户某天运行数据，光伏发电主要6-19点区间，发电功率最大值在15点左右，每天发电情况与天气情况密切相关，如风速、光照、温度等；能量管理系统根据光伏发电、电价以及负荷曲线等信息，优化储能充放电策略，达到了削峰填谷的目的，调节前后的负荷曲线如图8，实现最大峰谷差降低约7.8%。值得注意的是，在节假日的白天时段，由于工厂停工，用户的负荷很小，存在光伏出力大于负荷值的现象，需要利用主动配电网技术实现光伏发电的100%高效消纳。

表1中包含有2种电价模式，用户根据自己用电情况，在一定期间内合理选择其电价模式。分时电价模式的发布电价每天各时段是不变的；实时电价模式的发布电价各时段值取决于预测负荷曲线、天气信息以及重大事件等多种因素，每15min发布一次电价。表1数据可以明显看出实时电价几乎都高于分时电价，可能是受天气因素的影响，这只是某天特殊现象。

表1 光伏、储能、网供、负荷电量及分时、实时电价

Table 1 Energy of photovoltaic, battery pack, grid supply, local load and time-of-use, real-time electricity price

电量: kWh; 电价: 元/kWh

时间	光伏电量	储能	网供	负荷	分时	实时(15 min)
0~1 时	0	0	-3 404.42	3 403.32	0.401 5	0.45/0.45/0.56/0.86
1~2 时	0	0	-3 359.91	3 358.813	0.401 5	0.43/0.64/0.85/0.73
2~3 时	0	0	-3 420.81	3 419.74	0.401 5	0.71/0.7/0.47/0.56
3~4 时	0	+136.44	-3 408.33	3 270.79	0.401 5	0.88/0.67/0.53/0.76
4~5 时	0	+149.02	-3 623.47	3 473.38	0.401 5	0.44/0.86/0.56/0.72
5~6 时	0	+120.83	-3 539.43	3 417.51	0.401 5	0.89/0.46/0.78/0.87
6~7 时	-8.87	+21.64	-3 357.38	3 344.60	0.401 5	0.46/0.46/0.9/0.87
7~8 时	-98.5	+15.63	-3 112.85	3 195.718	0.401 5	0.79/0.78/0.78/0.59
8~9 时	-173.7	0	-3 408.39	3 582.08	0.736 2	1.0/0.8/1.13/0.91
9~10 时	-138.87	-122.34	-3 384.02	3 645.22	1.171 3	1.44/1.53/1.59/1.53
10~11 时	-149.47	-133.51	-3 340.52	3 623.49	1.171 3	1.51/1.53/1.43/1.59
11~12 时	-50.83	-105.34	-3 431.7	3 587.87	1.171 3	1.43/1.43/1.59/1.59
12~13 时	-90.8	+53.92	-3 533.72	3 570.60	0.736 2	1.1/0.94/0.94/0.94
13~14 时	-90.4	+148.79	-3 599.16	3 540.77	0.736 2	0.63/0.56/1.05/0.74
14~15 时	-337.3	+143.45	-3 278.99	3 472.84	0.736 2	0.92/0.5/0.61/0.88
15~16 时	-469.7	+73.62	-3 151.86	3 547.94	0.736 2	0.5/0.88/0.67/0.64
16~17 时	-235.33	+13.06	-3 297.54	3 519.81	0.736 2	0.88/0.55/0.8/0.8
17~18 时	-109.83	+6.118	-3 468.81	3 572.52	0.736 2	0.8/0.51/0.43/1.01
18~19 时	-32.333	0	-3 514.26	3 546.60	0.736 2	0.79/0.78/0.87/0.79
19~20 时	0	-122.30	-3 327.62	3 448.42	1.171 3	1.09/1.49/1.59/1.49
20~21 时	0	-133.42	-3 362.77	3 495.15	1.171 3	1.54/1.43/1.5/1.5
21~22 时	0	-106.83	-3 345.33	3 451.12	1.171 3	1.5/1.43/1.5/1.43
22~23 时	0	-7.980 3	-3 552.59	3 559.47	0.736 2	0.87/0.95/1.06/0.94
23~0 时	0	0	-3 609.83	3 608.73	0.736 2	0.8/0.92/0.66/0.45

注：表中+数据为吸收点能量，-数据为释放点能量。



图 8 调节后负荷曲线

Fig. 8 Load curve before and after adjustment

用户采用分时电价或实时电价模式当天产生 1 926 元或 2 118 元收益, 如表 2, 年度直接经济收益可达 69.34 或 76.27 万元; 电网通过对可控资源的充分引导, 有效降低配电网的建设投资, 提高电网设备利用率, 同时能够实现间歇式能源的高效消纳以及较高的供电可靠性。

表 2 实时电价与分时电价费用比较

Table 2 Cost list of time-of-use or real-time electricity price

电源	类别	电度/(°)	分时电价电费/元	实时电价电费/元
储能	吸收电能	882.50	501.24	491.60
	释放电能	-731.72	-853.60	-850.68
光伏	释放电能	-1 985.93	-1 573.68 元	-1 759.41
总计			-1 926.04 元	-2 118.49

5 结语

主动配电网是未来配电网发展的必然方向, 本文提出了用户侧能量管理系统建设方案并投入示范应用, 系统运行结果达到预期目标, 实现了分布式能源的消纳, 减少了用户的用电费用, 验证了策略的合理性和有效性。但是, 由于光伏发电系统运行状态、负荷水平、实时电价等多方面都存在不确定性因素, 这些不确定性因素的数学建模和系统优化将是下一步的主要研究工作。

参考文献

[1] 张建华, 曾博, 张玉莹, 等. 主动配电网规划关键问题与研究展望[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 13-23.
ZHANG Jianhua, ZENG Bo, ZHANG Yuying, et al. Key Issues and research prospects of active distribution network planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 13-23.

[2] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网优化调度策略研究[J]. 电力系统自动化, 2012, 32(14): 95-100.
YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Research on optimal schedule strategy for active distribution network[J].

Automation of Electric Power Systems, 2012, 32(14): 95-100.

[3] 王健, 谢桦, 孙健. 基于机会约束规划的主动配电网能量优化调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 45-52.
WANG Jian, XIE Hua, SUN Jian. Study on energy dispatch strategy of active distribution network using chance-constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 45-52.

[4] 王超, 张晓明, 唐茂林, 等. 四川电网节能减排发电实时调度优化模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 89-92.
WANG Chao, ZHANG Xiaoming, TANG Maolin, et al. Realtime dispatching optimization model for energy-saving and emission-reduction generation in Sichuan Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 89-92.

[5] 陈之栩, 谢开, 张晶, 等. 电网安全节能发电日前调度优化模型及算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 10-14.
CHEN Zhixu, XIE Kai, ZHANG Jing, et al. Optimal model and algorithm for day-ahead generation scheduling of transmission grid security constrained convention dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(1): 10-14.

[6] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 面向最大供电能力提升的配电网主动重构策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 137-147.
JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. An active reconfiguration strategy for distribution network based on maximum power supply capability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 137-147.

[7] 孔令志, 唐西胜, 齐智平. 光柴储微网系统的储能动态能量调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 7-14.
KONG Lingzhi, TANG Xisheng, QI Zhiping. Study on dynamic energy dispatch strategy of energy storage in PV-diesel-energy storage microgrid system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 7-14.

[8] 鲍冠南, 陆超, 袁志昌, 等. 基于动态规划的电池储能系统削峰填谷实时优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(12): 11-16.
BAO Guannan, LU Chao, YUAN Zhichang, et al. Load shift real-time optimization strategy of battery energy storage system based on dynamic programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(12): 11-16.

[9] 刘霞, 江金元. 风光储混合系统的协调优化控制[J].

- 电力系统自动化, 2012, 32(14): 95-100.
- LIU Xia, JIANG Quanyuan. An optimal coordination control of hybrid wind photovoltaic energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 32(14): 95-100.
- [10] 许丹, 丁强, 潘毅, 等. 基于经济调度的微电网蓄电池容量优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 56-59.
- XU Dan, DING Qiang, PAN Yi, et al. Study on optimizing capacity of storage battery in micro grid system based on economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 56-59.
- [11] 李瑞生. 微电网关键技术实践及实验[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 73-78.
- LI Ruisheng. Practice and experiment of the key microgrid technologies[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 73-78.
- [12] 蔡宇, 林今, 宋永华, 等. 基于模型预测控制的主动配电网电压控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 42-49.
- CAI Yu, LIN Jin, SONG Yonghua, et al. Voltage control strategy in active distribution network based on model predictive control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 42-49.
- [13] 郭红霞, 白浩, 刘磊, 等. 统一电能交易市场下的虚拟电厂优化调度模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 136-145.
- GUO Hongxia, BAI Hao, LIU Lei, et al. Optimal scheduling model of virtual power plant in a unified electricity trading market[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 136-145.
- [14] 刘立阳, 吴军基, 孟绍良. 短期风电功率预测误差分布研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 65-72.
- LIU Liyang, WU Junji, MENG Shaoliang. Research on error distribution of short-term wind power prediction[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 65-72.
- [15] 陈世慧, 阮大兵. 光伏发电有功功率预测及其在电网频率控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 125-129.
- CHEN Shihui, RUAN Dabing. Prediction of photovoltaic power and its application in power grid frequency control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 125-129.
- [16] 丁明, 徐宁舟. 基于马尔可夫链的光伏发电系统输出功率短期预测方法[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 152-157.
- DING Ming, XU Ningzhou. A method to forecast short-term output power of photovoltaic generation system based on Markov chain[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 152-157.
- [17] 李霄, 王昕, 郑益慧, 等. 基于改进最小二乘支持向量机和预测误差校正的短期风电负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 63-69.
- LI Xiao, WANG Xin, ZHENG Yihui, et al. Short-term wind load forecasting based on improved LSSVM and error forecasting correction[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 63-69.
- [18] 彭显刚, 胡松峰, 吕大勇. 基于 RBF 神经网络的短期负荷预测方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 144-148.
- PENG Xiangang, HU Songfeng, LÜ Dayong. Review on grid short-term load forecasting methods based on RBF neural network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 144-148.
- [19] 马金明, 秦雷鸣, 朱振青. 供电公司分时售电电价研究[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(3): 9-12.
- MA Jinming, QIN Leiming, ZHU Zhengqing. Studies on spot price for regional energy utility[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(3): 9-12.
- [20] 尤毅, 刘东, 于文鹏, 等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 10-16.
- YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.
- [21] Q/GDW 480 — 2010 Q/GDW 分布式电源接入电网技术规范[S].
- Q/GDW 480 — 2010 Q/GDW technical rule for distributed resources connected to power grid[S]. 2010.
- [22] 柳春芳. 主动配电网的一体化设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 49-55.
- LIU Chunfang. An integrated design method of active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 49-55.
- [23] 胡勇, 刘奇峰. 基于 WEBGIS 的分布式电动汽车充电桩运营管理系统设计与实现[J]. 电力建设, 2014, 35(1): 98-103.
- HU Yong, LIU Qifeng. Design and implementation of operation management system for distributed EV charging pile based on WEBGIS[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(1): 98-103.

收稿日期: 2015-09-06; 修回日期: 2016-03-21

作者简介:

胡勇(1968-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事新能源发电及电动汽车充电解决方案和软件研发。E-mail: wilard@21cn.com

(编辑 葛艳娜)