

DOI:10.7652/xjtuxb201411010

主动配电系统与主网的有功协调

邵成成, 王锡凡, 王秀丽, 杜超

(西安交通大学电力设备与电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对现有主动配电系统优化运行研究局限于主动配电网内部而忽略了其与主网间联系的问题,提出了一种主动配电网与主网的有功协调方法。基于奔德斯分解将协调调度问题转化为分层优化问题,在上层实施发电调度优化主网运行,在下层调度分布式能源优化主动配电系统运行。通过上下层协调迭代,考虑主动配电系统运行策略对主网运行的影响,实现主动配电系统和主网间的有功协调。改编的 IEEE-RTS 算例表明:主动配电系统的运行策略会对主网运行产生显著影响,甚至导致主网运行计划无解,在研究和运行中需要考虑二者的协调;限制馈线功率波动的策略能保证主网运行计划有解,但经济性较差;所提的有功协调方法可行、有效,能显著提升全系统的经济性与安全性,可将算例系统的生产成本由 638 326.62 美元降至 626 011.45 美元。

关键词: 主动配电网;主网;有功协调;奔德斯分解;分布式能源

中图分类号: TM 73 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)11-0058-06

Real Power Coordination Between Active Distribution Systems and Main Grid

SHAO Chengcheng, WANG Xifan, WANG Xiuli, DU Chao

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In the existing studies, the operation of the active distribution network (ADN) is optimized within itself and the relation between ADNs and the main grid are neglected. In this paper, a method is proposed to solve this problem and coordinate the real power operation of the main grid and ADNs. By Benders decomposition, the cooperative dispatch is reformed as a bi-level problem. On the upper level the centralized generation is scheduled and the main grid operation is optimized, while on the lower level the distributed energy resource (DER) is dispatched to minimize the ADN operation cost. The influence of ADNs on the main grid is considered and the cooperation between them are realized by the cooperative iterations of the levels. The case studies on the modified the IEEE-RTS have verified the following. Firstly, the ADN operation exerts a great effect on that of the main grid and it is necessary to consider the coordination between them. Secondly, the strategies may heighten the operation cost to constraint the fluctuation range of the feed power. Finally, the proposed method enables to feasibly improve the economics and security of the whole power system, and the operation cost of the modified IEEE-RTS is decreased from 638326.62 \$ to 626011.45 \$.

Keywords: active distribution network; main grid; real power coordination; Benders decomposition; distributed energy resource

收稿日期: 2014-05-14。 作者简介: 邵成成(1989—),男,博士生;王锡凡(通信作者),男,教授,博士生导师,科学院院士。

基金项目: 国家电网公司科技资助项目(DZN17201300045)。

网络出版时间: 2014-08-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140813.1008.001.html>

分布式电源的广泛接入和需求侧响应是发展智能电网的重要内涵。分布式风电、光伏发电和电动汽车等分布式能源(DER)的广泛接入将对电力系统各个层次的运行产生深刻影响,而配电网作为并网接口,所受影响最为直接,主动配电网^[1-2]的概念应运而生。按照 CIGRE C6 的定义,主动配电网指可以通过灵活的网络拓扑结构管理潮流以实现局部 DER 主动控制和主动管理的配电系统^[1],从功率平衡角度来说,它与传统配电网的区别在于:后者被动接受功率、功率单向流动;分布式电源并网提供技术支持的微网,容量规模较小,强调功率的自给自足和内部自治,与主电网联系不够紧密。

主动配电网作为规模较大的公共服务配电网,为保证供电可靠性,通过馈线与主网相连,与主网功率联系紧密,常态下不以孤岛方式运行(见图 1)。在强调对 DER 开展主动控制与主动管理实现多电源双向供电的同时,主动配电网实质上为零散分布的分布式电源以及可控负荷与主电网协调运行、参与电力市场提供了接口。随着 DER 渗透率提高和电力市场的开放,主动配电网的这种接口管理作用将更加凸显。

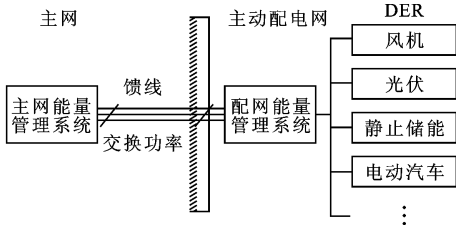


图 1 主动配电系统示意图

主动配电网通过内部能量管理和优化运行,协调分布式发电和电动汽车等可控负荷,形成规模化的发电或其他形式的系统可调度资源,由馈线并入主网,参与主网和电力市场的运行。作为 DER 并入主电网的实际接口,馈线上的交换功率集中反映了主动配电网外在的功率特性。考虑到风电、光伏的随机性,DER 规模较大时,随机波动的分布式电源出力将无法在主动配电网内部平衡、消纳,馈线交换功率将在一定范围内波动^[3];DER 规模进一步扩大时,也有可能出现文献[4]中提到的配电网向主网反送功率的情形。交换功率的波动会对主网运行的经济性产生影响,交换功率波动范围过大时还会超出主网大型发电机的功率调节范围,使主网运行困难。同时,主动配电网的运行策略还有可能会使主网线路潮流越限,影响主网运行的安全性。

诸多文献对主动配电网的能量管理和日运行问

题制定进行了研究^[5-11],部分文献还引入了长周期和短周期调整结合的方式来适应可再生能源出力的波动^[9],但它们大都以主网电价确定、馈线交换功率可以任意取用为基本假设,忽略了主动配电网运行策略对主网运行经济性和安全性的影响,也忽略了主网对其运行策略的限制。研究多个微电网协调运行的文献[12]和研究主动配电网与下辖微电网的协调运行的文献[11]描述了层面不同但性质相近的问题,然而它们尚不能从经济性和安全性两方面对此类问题进行完整考虑。

本文以馈线交换功率为联系变量,考虑主动配电网能量管理策略对主网运行的影响,建立主动配电系统与主网的有功协调模型,并基于奔德斯分解设计了协调算法,以提升主网、主动配电网日运行计划整体的经济性与安全性。

1 有功协调模型

受风电、光伏等出力随机波动 DER 的影响,馈线功率将呈现一定的随机、波动性,而主网发电机调节速率有限,主网的运行策略将受到影响。随着 DER 渗透率的提高和主动配电网技术的推广,这种交互影响会更加显著,因而有必要建立主动配电网和主网的协调调度模型。考虑到问题的复杂性和无功功率就地平衡的特点,本文重点关注二者的有功协调问题。

1.1 目标函数

以多场景模型描述主动配电系统中风电等可再生能源出力的随机波动性,根据日前的概率性出力预测,通过模拟抽样和场景削减技术,生成可再生能源出力场景^[13],通过不同的场景和相应的概率描述可再生能源出力的随机性。馈线功率的随机波动本质上源于风电、光伏出力的随机波动,因而馈线功率也可通过相应的多场景模型描述。

以整个系统生产成本最小为目标函数,可得

$$\min \sum_s \sum_{t=1}^{24} \sum_g f_g(P_{g,t,s}, u_{g,t}) p_s + \sum_a f_a \quad (1)$$

式中: s 为场景指标; p_s 为场景 s 出现的概率; $u_{g,t}$ 、 $P_{g,t,s}$ 分别为主网中发电机组 g 的开机状态和发电功率; f_g 为发电成本函数,通常包括燃料成本和启停成本; f_a 为第 a 个主动配电网的日运行成本,计算如下

$$f_a = \sum_s \sum_{t=1}^{24} \sum_k C_k^a(P_{k,t,s}) p_s \quad (2)$$

其中, $P_{k,t,s}$ 、 C_k^a 分别表示第 a 个主动配电网中第 k

个DER的出力 and 运行成本。

1.2 主网约束

主网约束包括系统潮流约束和主网发电机约束。本文采用直流潮流计算系统潮流,并考虑线路传输容量的限制条件

$$\sum_g P_{g,t,s} - \sum_i P_{Li,t} - \sum_a P_{ex,t,s} = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{g \in i} P_{g,t,s} - \sum_{a \in i} P_{ex,t,s} - P_{Li,t} = \sum_{j \in i} B_{ij} \theta_{i,t,s} \quad (4)$$

$$-P_{ij}^{\max} \leq P_{ij,t,s} = B_{ij}(\theta_{i,t,s} - \theta_{j,t,s}) \leq P_{ij}^{\max} \quad (5)$$

式中: i, j 表示主网节点; B_{ij} 为主网导纳参数; $\theta_{i,t,s}$ 表示节点相角; $P_{Li,t}$ 表示节点*i*处主动配电网外的负荷; $P_{ex,t,s}^a$ 为馈线上流入主动配电网的功率; $P_{ij,t,s}$ 、 $P_{ij}^{\max}$ 分别表示线路*ij*上潮流功率和传输容量。

与机组组合问题类似,主网发电机需满足最大、最小出力,最小开停机时间等运行约束,见文献[14],不再赘述。考虑到馈线功率的随机、波动性,还需要考虑主网发电机功率调节速率的约束条件

$$P_{g,t,s_1} - P_{g,t,s_2} \leq \Delta P_g u_{g,t} \quad (6)$$

式中: ΔP_g 表示发电机的功率调节范围。

1.3 主动配电网约束

主动配电网约束主要包括各DER的运行约束、配网运行约束和馈线容量约束。研究人员对主动配电网日运行问题已有较为深入的研究,建立了风电、光伏、储能、热电联产机组等多种DER的模型[10-12],并考虑了网损、电压等多种运行因素的影响[8-10]。

在DER建模方面,本文重点考虑电动汽车,出行是电动汽车的首要功能。电动汽车不仅要满足设备的技术约束,还要满足用户出行需求,即

$$0 \leq P_{e,c,t}^a \leq P_{e,c,\max}^a u_{e,t}^a \quad (7)$$

$$0 \leq P_{e,d,t}^a \leq P_{e,d,\max}^a u_{e,t}^a \quad (8)$$

$$E_{e,\min}^a \leq E_{e,t} \leq E_{e,\max}^a \quad (9)$$

$$E_{e,t} = E_{e,t-1} + P_{e,c,t}^a \eta_{e,c}^a \Delta t - P_{e,d,t}^a / \eta_{e,d}^a \Delta t - \Delta E_{e,t}^a \quad (10)$$

$$P_{rp,e,t} = P_{e,c,t}^a - P_{e,d,t}^a \quad (11)$$

式中: e 为电动汽车标号;变量 $P_{e,c,t}^a$ 、 $P_{e,d,t}^a$ 、 $P_{rp,e,t}^a$ 和 $E_{e,t}^a$ 分别表示电动汽车的充电功率、放电功率、并网负荷功率和储能水平;参数 $u_{e,t}^a$ 和 $\Delta E_{e,t}^a$ 分别表示电动汽车的并网状态和行驶过程中的能量消耗,与出行过程相关,当电动汽车并网时取1,否则取0; $P_{e,c,\max}^a$ 、 $P_{e,d,\max}^a$ 、 $E_{e,\max}^a$ 、 $E_{e,\min}^a$ 和 $\eta_{e,c}^a$ 、 $\eta_{e,d}^a$ 是电动汽车主要技术参数,分别表示电动汽车的最大充、放电功率,最大、最小储能容量和充、放电效率; Δt 表示时间间隔长度,取1 h。

式(7)、式(8)描述了最大充、放电功率约束;式

(9)描述了储能容量约束;式(10)描述储能平衡,不仅与充放电过程有关,而且与用户出行耗能有关;式(9)、式(10)共同保证了用户出行需求的满足;式(11)计算了电动汽车实际并网的负荷功率。

在每一个可再生能源出力的场景下,系统调用可再生能源的出力 $R_{r,t,s}^a$ 应低于其模拟值 $P_{r,t,s}^a$,即

$$R_{r,t,s}^a - P_{r,t,s}^a \leq 0 \quad (12)$$

其他类型DER的约束可以参见文献[10-12],此处不再详述。

考虑到与主网协调调度问题的复杂性,在运行约束方面,我们仅考虑有功平衡

$$\sum_k P_{k,t,s}^a + P_{ex,t,s}^a - \sum_e P_{rp,e,t}^a - D_t^a - P_{Loss,t}^a = 0 \quad (13)$$

式中: D_t^a 表示配网常规用电负荷; $P_{Loss,t}^a$ 表示网损;可再生能源DER的功率归入一般DER中,未单独列出。

此外,不同场景下馈线功率均应满足传输容量约束条件

$$-P_{ex,\max}^a \leq P_{ex,t,s}^a \leq P_{ex,\max}^a \quad (14)$$

式中: $P_{ex,\max}^a$ 表示馈线的传输容量。

2 算法设计与流程

由于DER种类数量繁多,而单个DER的容量规模远小于主网中的大型发电机组,从数学角度分析,有功协调模型是一个变量繁多、约束复杂的数学规划问题,难以直接求解。

因此,将有功协调模型抽象为如下形式

$$\begin{aligned} \min f(x) + \sum_a g_a(z_a) \\ \text{s. t. : } h_1(x, y) \leq 0 \\ h_{2,a}(y_a, z_a) \leq 0 \end{aligned} \quad (15)$$

式中: x 、 y_a 和 z_a 分别表示主电网运行变量、主网与第*a*个主动配电网联结的馈线交换功率和第*a*个主动配电网内部的运行变量。如式(15)所示,有功协调问题由主网有功运行问题和 N_{adn} (表示主网接受主网供电的主动配电网数目)个并行的主动配电网优化运行问题组成。这两类问题相对独立,通过馈线功率 y_{ai} 相互关联。

采用奔德斯分解法[15]求解上述问题,首先忽略与主动配电网相关的约束 h_2 ,求解上层主问题(即主网问题),即

$$\begin{aligned} \min f(x) + v_{\text{sum}}(\beta) \\ \text{s. t. : } h_1(x, y) \leq 0 \\ \beta \geq 0 \end{aligned} \quad (16)$$

式中: $v_{\text{sum}}()$ 表示求取向量的各元素之和; β 为非负辅助变量。求解主问题得到馈线功率 y_a^0 后,依次代入各主动配电网子问题

$$\begin{aligned} \min \quad & g_a(z_a) \\ \text{s. t.} \quad & h_{2,a}(y_a^0, z_a) \leq 0 \end{aligned} \tag{17}$$

若式(16)有解,则生成可行割

$$g_a^* + \frac{\partial g_a}{\partial y_a}(y_a - y_a^0) \leq \beta \tag{18}$$

作为约束加入式(16)进行下次迭代的求解过程,式中带星标的量表示相应优化问题的最优解。若式(17)无解,则改为求解子问题

$$\begin{aligned} \min \quad & g'_a = v_{\text{sum}}(v_s) \\ \text{s. t.} \quad & h_{2,a}(y_a^0, z_a) - v_s \leq 0 \\ & v_s > 0 \end{aligned} \tag{19}$$

式中: v_s 为约束松弛变量。求解式(19)后,形成不可行割

$$g'_a + \frac{\partial g'_a}{\partial y_a}(y_a - y_a^0) \leq 0 \tag{20}$$

作为约束加入式(16)迭代,得

$$f_{\text{gap}} = \frac{v_{\text{sum}}(\beta) - \sum_a g_a^*}{f^* + \sum_a g_a^*} \times 100\% \tag{21}$$

按式(21)计算收敛间隙,当收敛间隙达到预设精度时,则认为算法收敛。

图 2 给出了本文算法流程。按照图中流程,迭代达到问题收敛标准后,可以得到考虑有功协调时主网和各个主动配电网的日运行计划和它们之间的功率交换计划。

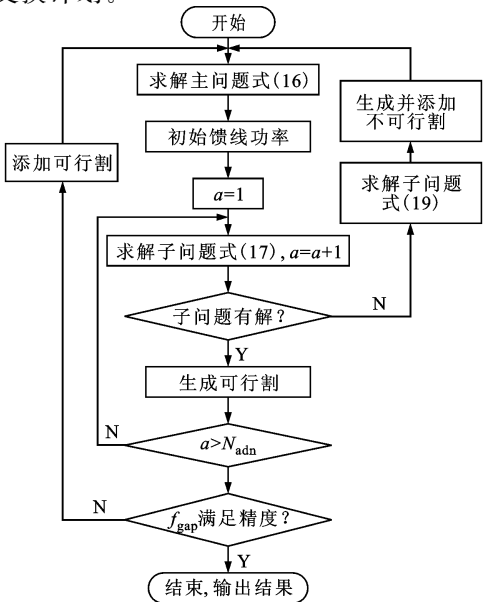


图 2 协调算法流程图

需要指出的是,尽管本文在处理主动配电网日运行问题时仅考虑了有功平衡约束,但本文所设计算法的逻辑结构对不同复杂程度的主动配电网优化子问题均适用。考虑电压、线路传输容量等复杂约束只是加重了子问题求解的复杂性,对主网主问题与主动配电网子问题间的协调迭代、算法的主体结构并无显著影响。

3 算例分析

以改编的 IEEE-RTS^[14,16]为主网系统进行算例计算。系统常规负荷最大值为 2 850 MW,设其中 35%为配电网负荷,将其中 300 MW 的水电装机替换为 960 MW 的分布式风电,风电出力数据选用我国西北某地实测数据,考虑 20%预测误差。假定系统中含有 5 万辆电动汽车(以全国 8 000 万辆私人汽车,最大用电负荷 500 GW 进行等比例折算,电动汽车比例约为 10%)。电动汽车的类型分布按表 1 假设,电动汽车出行和出行距离分布参见文献[17],电动汽车总耗能为 956.73 MW·h。

表 1 电动汽车类型分布

类型	电池容量/kW·h	最大充电功率/kW	比例/%
1	20	3.2	60
2	30	4.8	30
3	40	6.4	10

假设 RTS 主网的每一个负荷节点处有一个主动配电网,共 17 个,各个主动配电网的负荷规模、分布式发电装机以及电动汽车数量按原系统中各节点负荷所占比例分配。

3.1 不计有功协调

首先就不计主动配电网和主网有功协调的情况进行分析。根据预测风电功率的期望值,进行主系统日运行方式安排(机组组合计算),得出系统节点电价,以此为基础,以各个主动配电网自身成本最小化为目标安排它们的运行计划。当允许的馈线功率波动范围为 0%~20%风电出力期望值时,全系统经济技术指标见表 2。

当馈线功率允许的波动范围较小时,主动配电网弃风量较大;随着允许波动范围增加,主动配电网吸纳风电的能力逐步提升,弃风量较小;当馈线功率允许的波动范围较大(20%左右)时,馈线功率波动将超出主网发电机的调节范围,造成主网运行困难,主网日运行计划无解。

表 2 全系统经济技术指标(不计有功协调)

波动范围 /%	弃风电量 /MW·h	燃料成本 /美元	启停成本 /美元	总成本 /美元
0	1 693.85	636 506.62	1 820	638 326.62
±5	1 263.52	630 149.99	1 780	631 928.99
±10	908.13	625 820.71	1 780	627 600.71
±15	622.99	661 201.47	2 500	663 701.47
±20	392.74	—	—	—

值得注意的是,随着馈线功率允许波动范围的增加、弃风量的减少,系统总生产成本并不单调减少。图 3 给出了允许波动范围由 0% 增长至 15% 时,主网和配电网运行成本的变化情况。随着允许波动范围不断增加,配电网弃风量越来越小,运行成本不断降低,但主网需调整运行计划,适应馈线功率在一定范围内波动的要求,因而主网运行效率受到影响,主网运行成本提高。比较明显的体现是:当允许波动范围增长至 15% 时,主网已需要通过频繁启停机组的方式适应馈线功率波动、维持系统功率平衡,机组启停成本显著增加,机组的使用寿命也会受到影响。

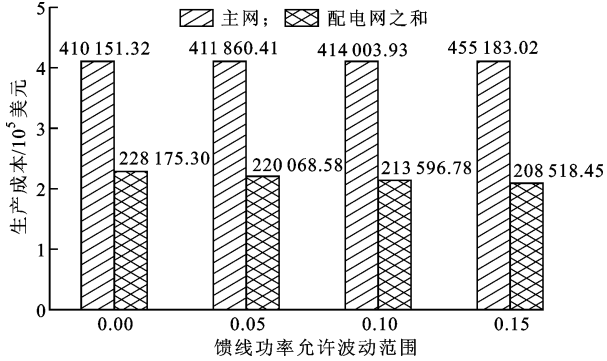


图 3 主网与主动配电网生产成本变化

可见,主动配电网的运行策略会对主网日运行计划的经济性、安全性产生显著影响,而主网运行所允许的馈线功率及其波动范围也会显著影响主动配电网吸纳可再生能源发电的能力和运行的经济性。

3.2 考虑有功协调

采用本文提出的有功协调模型,进行主电网和多个主动配电网日运行计划的协调安排,系统的经济技术指标对比如表 3 所示。方式 I、方式 II 和方式 III 分别表示固定馈线功率方式、不限制馈线功率波动方式和本文提出的有功协调方式。

首先,方式 II 算例结果直接表明:当 DER 渗透率较高时,馈线功率波动将超出主网发电机的功率调节能力,现有的不计联络馈线交换功率波动范围

的主动配电网日运行计划制定方法将不再适用。相比而言,方式 III 考虑了馈线功率波动对主系统有功平衡的影响,能避免上述现象的发生,确保了日运行计划的可行性。

表 3 全系统经济技术指标对比

方式	弃风电量 /MW·h	燃料成本 /美元	启停成本 /美元	总成本 /美元
I	1 693.85	636 506.62	1 820	638 326.62
II	0	—	—	—
III	543.45	624 391.45	1 620	626 011.45

按方式 I 运行时,馈线功率不允许波动,所有随机性 DER 出力只能在主动配电网内部消纳。相比而言,方式 III 更加灵活,当 DER 规模较大、出力波动性强、主动配电网内部平衡困难时,该方式为 DER 在整个系统内全局消纳提供了可能。

与固定的馈线功率波动范围约束(见 3.1 节)相比,本文提出的方法更加灵活,可以根据主网运行和可再生能源出力的实际情况,灵活地调整馈线功率及其波动范围,协调主网和多个主动配电网运行的经济性,实现系统日运行的全局优化。

4 结 论

主动配电网为分布式风电、电动汽车等 DER 的并网运行和参与市场提供了接口。随着 DER 渗透率的提高和主动配电网的推广发展,主动配电网对电力系统运行的影响将日趋显著。本文对随机的分布式发电、电动汽车与主动配电网的互动特性进行了建模描述,提出了主动配电网与主网有功协调模型,并基于奔德斯分解法进行了算法设计。改编的 IEEE-RTS 算例表明:①主动配电网和主网之间存在显著的相互影响关系,对馈线功率波动范围不加控制的运行计划会造成主网运行困难,日运行计划的经济性和安全性受到显著影响;②采用本文提出的有功协调方法,可以灵活调整馈线功率,实现主动配电网和主网的协调运行,进而实现整个系统生产的全局优化。

参考文献:

[1] 范明天, 张祖平, 苏傲雪, 等. 主动配电系统可行技术的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 12-18.
FAN Mingtian, ZHANG Zuping, SU Aoxue, et al. An investigation of enabling technologies for active distribution system [J]. Proceedings of CSEE, 2013, 33

- (22): 12-18.
- [2] 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.
- [3] 于文鹏, 刘东, 余南华. 馈线控制误差及其在主动配电网协调控制中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 108-115.
YU Wenpeng, LIU Dong, YU Nanhua. Feeder control error and its application in coordinate control of active distribution network [J]. Proceedings of CSEE, 2013, 33(13): 108-115.
- [4] CURRIE R A, AULT G W, FOOTE C E, et al. Fundamental research challenges for active management of distribution networks with high levels of renewable generation [C]//Proceeding of 39th International Universities Power Engineering Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 1024-1028.
- [5] CURRIE R A, AULT G W, FOOTE C E, et al. Active power-flow management utilizing operating margins for the increased connection of distributed generation [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2007, 1(1): 197-202.
- [6] PILO F, PISANO G, SOMA G G. Advanced DMS to manage active distribution networks [C]//Proceeding of 2009 Power Tech. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 1-8.
- [7] PILO F, PISANO G, SOMA G G. Optimal coordination of energy resources with a two-stage online active management [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4526-4537.
- [8] PEIKHEREH M, SEIFI H, ESLAMI M K. Active management of distribution networks in presence of distributed generations [C]//Proceedings of 2011 International Conference on Clean Electric Power. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 725-729.
- [9] ALBERTO B, MAURO B, SAMUELE G, et al. Short-term scheduling and control of active distribution systems with high penetration of renewable resources [J]. IEEE Systems Journal, 2010, 4(3): 313-322.
- [10] 杨帆. 分布式能源接入的主动配电网典型系统构建与分析 [D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2011.
- [11] 高燕. 主动配电网计划孤岛与日前调度方法研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2013.
- [12] WU Jiang, GUAN Xiaohong. Coordinated multi-microgrids optimal control algorithm for smart distribution management system [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 2174-2181.
- [13] WANG Jianhui, SHAHIDEHPOUR M, LI Zuyi. Security-constrained unit commitment with volatile wind power generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1319-1327.
- [14] WANG S, SHAHIDEHPOUR M, KIRISCHEIN D, et al. Short-term generation scheduling with transmission and environmental constraints using an augmented Lagrangian relaxation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3): 1294-1301.
- [15] GEOFFRION A M. Generalized benders decomposition [J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1972, 10(4): 237-260.
- [16] SUBCOMMITTEE P M. IEEE reliability test system, power apparatus and systems [J]. IEEE Transactions on PAS, 1979, 98(6): 2047-2054.
- [17] 田立亭, 史双龙, 贾卓, 等. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法 [J]. 电网技术, 2010, 34(11): 126-130.
TIAN Liting, SHI Shuanglong, JIA Zhuo, et al. Statistical model for charging power demand of electric vehicles [J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 126-130.

[本刊相关文献链接]

- 王兵, 白智全, 董培浩, 等. 采用空时分组编码的动态分组加权合作频谱感知方案. 2014, 48(8): 23-28. [doi:10.7652/xjtuxb201408005]
- 李鹏, 杨玉龙, 黄越辉, 等. 综合热负荷控制下的省级电网风电并网研究. 2014, 48(2): 69-73. [doi:10.7652/xjtuxb201402012]
- 丁文俊, 宋保维, 毛昭勇, 等. 浅水域探测型无人水下航行器海洋动能发电装置特性研究. 2014, 48(4): 73-78. [doi:10.7652/xjtuxb201404013]
- 包献文, 卓放, 谭佩喧. 三相 LCL 型并网逆变器的模型分析及解耦控制. 2014, 48(2): 44-49. [doi:10.7652/xjtuxb201402008]
- 田文龙, 宋保维, 毛昭勇, 等. 水下航行器垂直轴海流发电装置叶轮特性的数值仿真. 2013, 47(11): 19-24. [doi:10.7652/xjtuxb201311004]
- 刘连理, 李庆, 顾运, 等. 电力定价策略的多目标优化模型及其应用. 2013, 47(10): 115-120. [doi:10.7652/xjtuxb201310020]
- 闫丽梅, 谢一冰, 徐建军, 等. 改进的前推回代法在含分布式电源配电网计算中的应用. 2013, 47(6): 117-123. [doi:10.7652/xjtuxb201306020]

(编辑 赵炜 杜秀杰)