

计及安全约束的虚拟电厂两层优化调度

臧海祥¹, 余爽², 卫志农¹, 孙国强¹

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 国网江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 随着分布式电源接入电网比例不断提高, 其出力的随机性和间歇性对电力系统安全稳定运行造成威胁, 虚拟电厂(VPP)为有效解决分布式电源并网提供了新思路。风电等可再生能源的发电和电价具有不确定性, 如何在不确定环境下提高VPP的可调度性成为研究热点。针对电价预测精度高、误差分布较为规律的特点, 采用随机规划法处理电价的不确定性, 对于风电等可再生能源的出力, 其预测误差通常难以准确地用概率分布描述, 采用鲁棒优化法处理, 在此基础上建立VPP优化调度的上层经济调度模型。进一步考虑电网的安全约束, 建立VPP优化调度的下层安全调度模型, 最终形成VPP两层优化调度模型。通过对改进的IEEE 33节点系统及由风电场、抽水蓄能电站和燃气轮机组组成VPP的算例分析, 验证了所提模型的可行性和有效性。

关键词: 虚拟电厂; 随机规划; 鲁棒优化; 安全约束; 两层优化

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.08.015

0 引言

近年来, 随着化石能源短缺、环境污染等问题的日益突出, 分布式电源(DG)因其可靠、经济、灵活、环保等特点而被世界各国所采用, DG接入电网的比例不断地提高。虽然DG具有显著的优点, 但是DG容量小、数量大、分布不均, 使得单机接入成本高, 对系统操作员常不可见乃至管理困难; 其次, DG的接入给电网的稳定运行带来了许多技术难题, 如潮流改变、线路阻塞、电压闪变、谐波影响等; 最后, 目前“安装即忘记”的DG操作方式以及电力市场容量的限制亦更加阻碍了DG的大规模并网^[1-4]。

由于DG单机容量小、出力具有间歇性、随机性和波动性等特点, DG的直接并网运行会对电网的安全稳定运行带来极大的冲击。虚拟电厂VPP(Virtual Power Plant)的提出为解决这些问题提供了新的思路^[5-7]。虚拟电厂并未改变每个DG并网的方式, 而是通过先进的控制、计量、通信等技术聚合DG、储能系统、可控负荷等不同类型的分布式能源(DER), 同时通过更高层面的软件构架实现不同类型的分布式能源的协调优化运行。

虚拟电厂和微电网是目前实现DG并网最具创造力和吸引力的2种形式, 尽管虚拟电厂和微电网都是基于考虑解决DG及其他元件整合并网问题范畴, 但二者仍有诸多区别^[2,5-7]。首先, 微电网采用自

上而下的设计理念, 强调“自治”; 而虚拟电厂的概念强调“参与”, 强调对外呈现的功能和效果。其次, 微电网相对于外部大电网表现为单一的受控单元, 通过公共耦合开关, 微电网既可运行于并网模式, 又可运行于孤岛模式; 而虚拟电厂始终与公网相连, 即只能运行于并网模式。最后, 微电网的构成依赖于元件(DG、储能、负荷、电力线路等); 而虚拟电厂的构成则依赖于软件和技术, 引入虚拟电厂的概念不必拓展原有电网, 且能聚合微电网所辖范围之外的DG。

目前, 国内外学者已经开展了许多关于虚拟电厂调度模型方面的研究。文献[8-9]研究了虚拟电厂在能量市场和旋转备用市场中的竞标模型, 优化模型中考虑了供需平衡和网络安全约束。文献[10]研究了利用可变负荷抑制风电出力的不确定性、提高虚拟电厂自身收益的优化模型。文献[11]基于风、光、水电日内的互补性及各自的运行特性, 研究了含风、光、水电的虚拟电厂收益最大化协同调度优化模型。文献[12]研究了含海上风电场及小型核电站的虚拟电厂优化调度模型, 分析了虚拟电厂在基荷电厂和追随负荷曲线的情况下各电源的运行情况。文献[13]研究了在中期合同市场下虚拟电厂的中期优化调度, 模型中采用随机规划法处理电价和DG出力的不确定性。文献[14]研究了考虑不确定性的虚拟电厂竞标模型, 模型中采用随机规划法处理电价的不确定性, 采用鲁棒优化法处理风电出力的不确定性, 同时考虑环境成本。文献[15]按虚拟电厂内部需求响应类型把虚拟电厂分为激励需求响应虚拟电厂和价格需求响应虚拟电厂, 建立了考虑需求响应虚拟电厂的日前调度机组组合模型。文献[16]研究了虚拟电厂多目标优化调度模型, 模型中计及了电动

收稿日期: 2016-01-31; 修回日期: 2016-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51507052, 51277052); 中国博士后科学基金资助项目(2015M571653); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015B02714)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51507052, 51277052), China Postdoctoral Science Foundation(2015M571653) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2015B02714)

汽车入网(V2G)。文献[17]研究了虚拟电厂参与日前市场的优化调度模型,模型中考虑了需求响应机制。但是,上述文献研究的虚拟电厂优化模型均未考虑电网的潮流约束。

在处理虚拟电厂优化调度模型中的相关不确定性时,目前主要采用备用整定法和数学方法。数学方法主要有随机规划法^[18-20]和鲁棒优化法^[21-23],随机规划法显式考虑不确定性因素,通过选取具有代表性的典型方案进行优化决策,该方法计算负担重且不确定性因素的概率分布难以准确获得。与随机规划法相比,鲁棒优化法将不确定性的所有可能划定在一个确定性的集合内,鲁棒优化的最优解对集合内每一元素可能造成的不良影响具有一定的抑制性,计算负担较轻。

基于上述分析,本文考虑由燃气轮机、风电场和抽水蓄能电站组成虚拟电厂,在中期合约市场、日前市场和平衡市场背景下,建立计及安全约束的虚拟电厂两层优化调度模型。首先,采用随机规划法处理电价的不确定性,采用鲁棒优化法处理风电出力的不确定性,建立虚拟电厂上层经济调度模型。其次,考虑电网的潮流约束,建立虚拟电厂下层安全调度模型。

1 虚拟电厂经济调度模型

1.1 基于电价随机规划模型

虚拟电厂参与的市场模式主要以中期合约市场、日前市场和平衡市场为主,本文在三者组成的混合电力市场模式下研究虚拟电厂经济调度模型。虚拟电厂的优化调度以利润最大化为目标函数。由于电力市场的电价具有不确定性的特点,本文采用随机规划法处理电价的不确定性,即采用蒙特卡洛模拟法产生 n 组电价方案。本文所描述问题的目标函数为:

$$\max \sum_{s=1}^{n_s} \sum_{t=1}^T \pi(s) (R_t - C_t) \quad (1)$$

$$R_t = H_t h + D_t \lambda_t^s \quad (2)$$

$$C_t = B_t \alpha \lambda_t^s + \sum_{i=1}^{n_i} \left[K_{t,i} k_i + p_i + \sum_{j=1}^{n_j} q_i^j g_{t,i}^j + \sum_{m=1}^{n_m} g_{t,i}^m \sum_{m=1}^{n_m} (v_{ei}^m + v_i^m) \right] \quad (3)$$

其中, T 为调度周期内总时段数; n_s 为蒙特卡洛模拟的电价方案数; $\pi(s)$ 对应第 s 组电价方案的概率; R_t 为 t 时段的收益函数; C_t 为 t 时段的成本函数; H_t 、 D_t 分别为 t 时段按合约要求输送的电能和向日前市场计划输送的电能,为决策变量; h 为合约电价; λ_t^s 为第 s 组方案中 t 时段的电价; B_t 为购电量,即购电价格按 $\alpha \lambda_t^s$ 计; n_i 为虚拟电厂内发电机组数; k_i 为机组 i

的动作(启动或关闭)成本;布尔变量 $K_{t,i}$ 表示 t 时段机组 i 是否动作,若是则置 1,否则置 0;将 DG 成本函数分段线性化, n_j 为分段数; p_i 为机组 i 的固定成本; q_i^j 为机组 i 第 j 段的斜率; $g_{t,i}^j$ 为第 j 段的发电量; $g_{t,i}$ 为 t 时段机组 i 的发电量,即 $g_{t,i} = \sum_{j=1}^{n_j} g_{t,i}^j$,为决策变量; v_{ei}^m 为机组 i 所产生的第 m 项污染物的环境价值; v_i^m 为机组 i 所产生的第 m 项污染物的惩罚系数; n_m 为污染物总数。

1.2 约束条件

(1) 燃气轮机的约束条件。

$$B_{\text{work } t,i}, K_{t,i}, B_{\text{on } t,i}, B_{\text{off } t,i} \in \{0, 1\} \quad (4)$$

$$B_{\text{on } t,i} + B_{\text{off } t,i} = K_{t,i} \quad (5)$$

$$K_{t,i} = |B_{\text{work } t,i} - B_{\text{work } t-1,i}| \quad (6)$$

$$g_{i,\min} B_{\text{work } t,i} \leq g_{t,i} \leq g_{i,\max} B_{\text{work } t,i} \quad (7)$$

$$-r_i^d \leq g_{t,i} - g_{t-1,i} \leq r_i^u \quad (8)$$

$$t_{\text{on } i,\min} t_{\text{on } x,i} \leq \sum_{y=1}^{t_{\text{on } i,\min}-1} B_{\text{work } x+y,i} \quad (9)$$

$$\forall x \in \{1, \dots, (T - t_{\text{on } i,\min} + 1)\}, x \in \mathbf{N}; y \in \mathbf{N}$$

$$t_{\text{off } i,\min} t_{\text{off } x',i} \leq \sum_{y'=1}^{t_{\text{off } i,\min}-1} B_{\text{work } x'+y',i} \quad (10)$$

$$\forall x' \in \{1, \dots, (T - t_{\text{off } i,\min} + 1)\}, x \in \mathbf{N}; y' \in \mathbf{N}$$

其中,布尔变量 $B_{\text{work } t,i}$ 表示 t 时段机组 i 是否工作,若是则置 1,否则置 0;布尔变量 $B_{\text{on } t,i}$ 表示 t 时段机组 i 是否启动,若是则置 1,否则置 0; $B_{\text{off } t,i}$ 表示 t 时段机组 i 是否关闭,若是则置 1,否则置 0; $g_{i,\max}$ 、 $g_{i,\min}$ 分别为机组 i 的最大、最小发电量; $t_{\text{on } i,\min}$ 、 $t_{\text{off } i,\min}$ 分别为机组 i 的最小开、关时间;式(8)为机组的爬坡约束, r_i^u 为机组 i 的向上爬坡率, r_i^d 为机组 i 的向下爬坡率;式(9)为最小开机时间约束;式(10)为最小停机时间约束。

(2) 抽水蓄能电站的约束条件。

假设抽水蓄能电站初始时刻的储能为 0,抽水蓄能电站的蓄水量可以等效为蓄电量, E_{int} 和 E_{out} 分别为 t 时段蓄入和放出的电量,为决策变量, E_{max} 为最大蓄电量, E_c 为最大蓄入电量, E_d 为最大放出电量,则有:

$$E_1 = 0 \quad (11)$$

$$E_t + E_{\text{int}} \leq E_{\text{max}} \quad (12)$$

$$E_{\text{out } t} \leq E_{t-1} \quad (13)$$

$$E_{\text{int}} \leq E_c \quad (14)$$

$$E_{\text{out } t} \leq E_d \quad (15)$$

$$E_t - E_{t-1} = E_{\text{int}} - E_{\text{out } t} \quad (16)$$

(3) 远期合同的约束条件。

在合约市场中,在满足一天的输电总量相同的前提下,虚拟电厂的实际输电量与合同电量可以存在一定偏差,引入合约允许的偏差系数 z , $z \in [0, 1]$,

即有:

$$(1-z)H_t \leq H'_t \leq (1+z)H_t \quad (17)$$

$$\sum_{t=1}^T H_t = \sum_{t=1}^T H'_t \quad (18)$$

其中, H'_t 表示满足合约要求输送的实际电量, 为决策变量。

(4) 功率平衡约束条件。

$$W_t + g_t + B_t + E_{\text{out}t} \mu_1 = H'_t + D_t + E_{\text{int}t} / \mu_2 \quad (19)$$

其中, W_t 为 t 时段风机出力的预测值; g_t 为机组总发电量; μ_1 、 μ_2 分别为发电效率和蓄能效率; B_t 为虚拟电厂 t 时段在经济调度模型下求得的向平衡市场提交的计划购电量; D_t 为 t 时段向日前市场计划输送的电能。

1.3 鲁棒随机优化模型

在 1.1 节基于电价随机规划的优化模型中, 利用风电出力的预测值建立优化模型并未考虑风机出力的不确定性。然而, 当前缺乏相应的技术对风机出力进行准确预测。另一方面, 风机出力可用基于预测结果的形式进行刻画, 即:

$$\widetilde{W}_t = W_t + \eta_t \rho_t W_t \quad \eta_t \in [-1, 1] \quad (20)$$

其中, $\widetilde{W}_t$ 为风机出力的不确定形式; W_t 为风机出力预测值; η_t 为不确定区间系数; ρ_t 为经验误差系数。由式(20)知不确定的风机出力的预测值在 $[(1-\rho_t)W_t, (1+\rho_t)W_t]$ 内波动。

在式(20)约束的风机出力条件下, 为了获得调度可行解, 需将约束式(19)修正为:

$$\widetilde{W}_t + g_t + B_t + E_{\text{out}t} \mu_1 \geq H'_t + D_t + \frac{E_{\text{int}t}}{\mu_2} \quad (21)$$

令:

$$F_t = g_t + B_t + E_{\text{out}t} \mu_1 - \left(H'_t + D_t + \frac{E_{\text{int}t}}{\mu_2} \right) \quad (22)$$

则式(21)变换为:

$$-\widetilde{W}_t \leq F_t \quad (23)$$

将式(20)代入式(23), 即有:

$$-W_t - \eta_t \rho_t W_t \leq F_t \quad (24)$$

可以看出, 式(24)的不等式约束随着风机出力不确定性的增加变得更加严格。为了使约束条件在风机出力为预测边界时仍可得到满足, 需要对式(24)的约束条件进行加强。引入辅助变量 y_t , 令 $y_t \geq |W_t|$, 则有:

$$-W_t - \eta_t \rho_t W_t \leq -W_t + \rho_t |W_t| \leq -W_t + \rho_t y_t \leq F_t \quad (25)$$

具有不确定量的线性规划即转化为确定性规划。

2 虚拟电厂安全调度模型

2.1 问题描述

虚拟电厂的经济调度模型并未考虑电网的潮流约束, 仅仅是在不考虑具体潮流约束的情况下求得

经济上的最优解, 实现虚拟电厂整体利润的最大化。但是, 事实上, 经济调度的最优解很有可能违反电网的潮流约束, 给线路带来过负荷、节点电压越界等问题, 对电网的安全运行造成危害。因此, 在虚拟电厂的调度过程中, 需要考虑电网的安全约束, 在提高经济性的同时保证电网能够安全、稳定运行。因此, 本文将一个大规模复杂的电源调度规划问题分解为上下两层调度子问题(即上层经济调度问题和下层安全调度问题), 在保证调度方案经济性以及可靠性的同时, 降低计算的复杂性。

2.2 目标函数

在安全调度模型中, 虚拟电厂以安全调度最优解与经济调度最优解的离差最小为优化目标:

$$\min \sum_{t=1}^T |g'_{t,i} - g_{t,i}| + |E'_{\text{int}t} - E_{\text{int}t}| + |E'_{\text{out}t} - E_{\text{out}t}| + |B'_t - B_t| \quad (26)$$

其中, $g'_{t,i}$ 为决策变量, 是燃气轮机 i 在 t 时段安全调度模型下求得的出力最优解; $E'_{\text{int}t}$ 为决策变量, 是抽水蓄能电站在 t 时段安全调度模型下求得的蓄能最优解; $E'_{\text{out}t}$ 为决策变量, 是抽水蓄能电站在 t 时段安全调度模型下求得的发电最优解; B'_t 为决策变量, 是虚拟电厂在 t 时段安全调度模型下求得的向平衡市场提交的修正后的购电量。

2.3 约束条件

(1) 潮流约束。

$$P_{g,i,t} - P_{d,i,t} = \sum_j |U_{i,t}| |U_{j,t}| |Y_{ij}| \cos(\delta_{ij} + \theta_{j,t} - \theta_{i,t}) \quad (27)$$

$$Q_{g,i,t} - Q_{d,i,t} = -\sum_j |U_{i,t}| |U_{j,t}| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_{j,t} - \delta_{i,t}) \quad (28)$$

其中, $U_{i,t}$ 为 t 时段节点 i 的电压幅值; $\theta_{i,t}$ 为 t 时段节点 i 的电压相角; $P_{i,t}$ 为 t 时段节点 i 的注入有功功率; $P_{g,i,t}$ 为 t 时段节点 i 上 DG 发出的总有功功率; $P_{d,i,t}$ 为 t 时段节点 i 消耗的有功功率; $Q_{i,t}$ 为 t 时段节点 i 的注入无功功率; $Q_{g,i,t}$ 为 t 时段节点 i 上 DG 发出的总无功功率; $Q_{d,i,t}$ 为 t 时段节点 i 消耗的无功功率; Y_{ij} 为节点导纳矩阵元素的幅值; δ_{ij} 为节点 i 到节点 j 之间线路导纳的相角; $\theta_{i,t}$ 为 t 时段节点 i 的电压相角; $\theta_{j,t}$ 为 t 时段节点 j 的电压相角。

(2) 线路的视在功率约束。

$$S_{ij,t}(\theta_{i,t}, U_{i,t}) \leq S_{ij}^{\max} \quad ij \in S_b \quad (29)$$

其中, $S_{ij,t}$ 为 t 时段节点 i 到节点 j 之间的视在功率; $S_{ij}^{\max}$ 为节点 i 和节点 j 之间的线路容量; S_b 为配电网中所有支路的集合。

(3) 配电网与主网连接点的容量约束。

$$S_{\text{GSP},t} \leq S_{\text{GSP}}^{\max} \quad (30)$$

其中, $S_{\text{GSP},t}$ 、 $S_{\text{GSP}}^{\max}$ 分别为在公共连接点配电网与主网交换的视在功率及其上限。

(4)节点电压约束。

$$U_i^{\min} \leq U_{i,t} \leq U_i^{\max} \tag{31}$$

其中, $U_{i,t}$ 为配电网 t 时段节点 i 的电压幅值; $U_i^{\min}$ 、 $U_i^{\max}$ 分别为节点 i 允许的最小和最大电压值。

3 虚拟电厂两层优化调度的求解

本文将一个大规模复杂的电源调度规划问题分解为上层经济调度和下层安全调度两层调度子问题,在保证调度方案经济性以及可靠性的同时,降低计算的复杂性。采用基于改进粒子群优化算法和 CPLEX 软件实现上述模型的求解,将虚拟电厂的上层经济调度和下层安全调度融为一体。求解的具体流程图如图 1 所示。

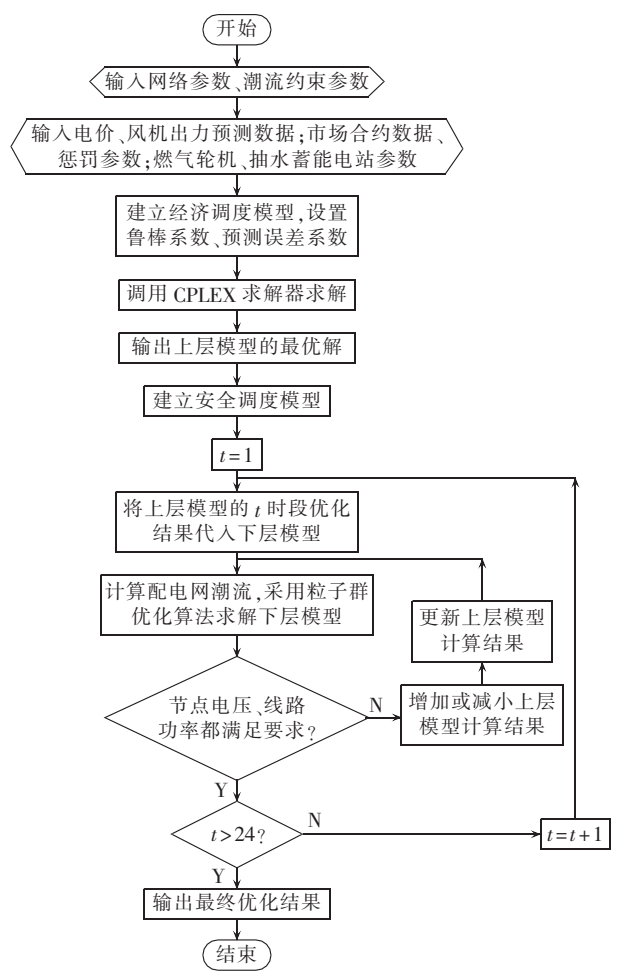


图 1 两层优化调度的求解流程图
Fig.1 Flowchart of two-layer optimal dispatch model

4 算例分析

4.1 系统参数

本文考虑由燃气轮机、风电场和抽水蓄能电站 (PHSP) 组成虚拟电厂,虚拟电厂中各元件参数、市场电价、风电出力的历史数据及下一交易日的合约要求输电量均取自文献[11]。设电价的预测相对

误差为±15%,蒙特卡洛模拟中电价总方案数取为 50;中期合约中合约电价为 45€/ (MW·h),允许某一时刻供电量与合约要求电量有±10%的偏差;平衡市场中,取 $\alpha=1.1$ 。

4.2 优化结果及分析

采用 IBM 公司的优化软件 CPLEX12.5 在四核 3.30 GHz CPU 和 4 GB 内存的个人计算机上对上述经济调度模型进行求解,得到市场调度方案和 DG 调度方案分别如图 2 和图 3 所示。

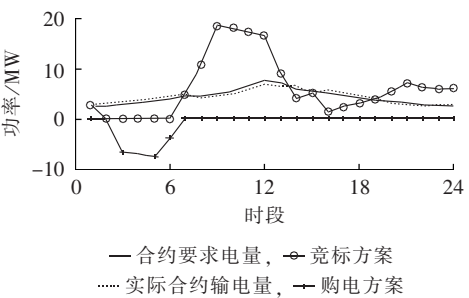


图 2 虚拟电厂优化市场调度方案
Fig.2 Optimal VPP dispatch scheme for market side

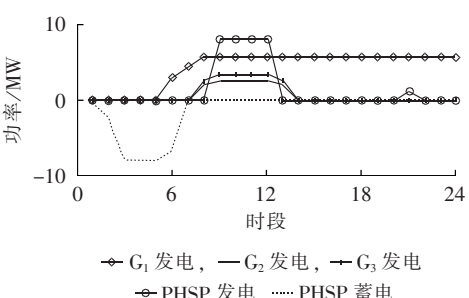


图 3 虚拟电厂优化 DG 调度方案
Fig.3 Optimal VPP dispatch scheme for DG side

从图 2 可以看出,在电价较低的时段,虚拟电厂从平衡市场购电以节约发电成本;在电价较高时段,虚拟电厂并不从平衡市场购电,而是向日前市场提供尽可能多的发电量。对于合约供电,当 $\lambda_i^* > h$ 时,虚拟电厂增加合约供电量,以增大收益;当 $\lambda_i^* < h$ 时,虚拟电厂减少合约供电量,以减小发电成本。从图 3 可以看出,抽水蓄能电站在电价较低时进行抽水蓄能,在电价较高时进行发电,从而起到削峰填谷的作用。同样,燃气轮机机组在较高电价的激励下发电,以满足合约要求并提供日前发电。同时,低成本高效的燃气轮机机组优先发电,这也与 DG 发展的方向相吻合。

选取 IEEE 33 节点配电网测试系统作为潮流计算对象,并对其进行改进,将风电场、抽水蓄能电站和 3 台燃气轮机机组分别接于节点 21、10、17、24、32,改进的 IEEE 33 节点配电网测试系统如图 4 所示,系统的安全约束参数如表 1 所示(电压和功率

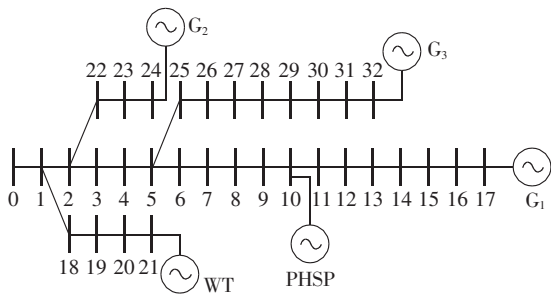


图 4 改进的 IEEE 33 节点配电网测试系统
Fig.4 Modified IEEE 33-bus test system of distribution network

表 1 系统的安全约束参数
Table 1 Safety constraint parameters of system

方案	节点电压 上限	节点电压 下限	线路最大 传输功率	最大交换 功率
1	1.05	0.95	1.5	2.0
2	1.015	0.985	1.4	1.8

皆为标么值)。选取上述算例中得到的经济调度解作为粒子群优化算法的初始解,根据第 3 节两层优化调度的求解方法求解虚拟电厂安全调度模型。

对改进的 IEEE 33 节点配电网测试系统进行计算,得到修正后的虚拟电厂优化调度方案如图 5 所示。图 5 分别给出了初始方案(不加安全约束)、方案 1、方案 2 下,3 组燃气轮机出力、抽水蓄能电站充放电以及平衡市场购电的调度策略。从图 5 可以看出,相比于初始方案,方案 1 和方案 2 下的各 DG 的

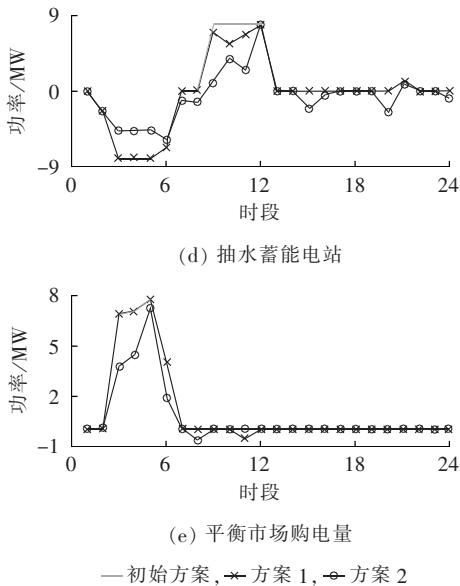
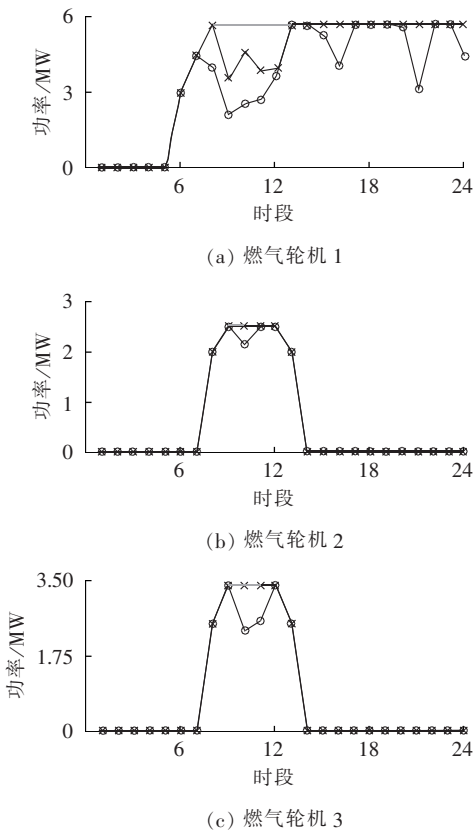


图 5 修正后的虚拟电厂调度方案

Fig.5 Modified optimal VPP dispatch scheme

发电量、抽水蓄能电站的充放电量以及平衡市场的购电量均明显减少。对比方案 1 和方案 2,可以看出,方案 2 下各电源以及市场购电的削减幅度更大。即考虑安全约束会降低初始调度值以满足安全约束的要求;安全约束越严格,初始调度值的削减量越大。

图 6 分别给出了初始方案、方案 1、方案 2 下第 3 时段和第 9 时段的配电网各节点电压(均为标么值)。由表 1 可知,方案 2 的电压约束等条件要远强于方案 1,图中的节点电压曲线均能够满足各方案的要求。在初始方案下越界的节点电压,均能够被拉回到方案 1、2 要求的电压界限。节点 17、24、32(燃气轮机接入的)的电压均能够保持在 1 p.u. 左右,在潮流计算过程中,满足 PV 型 DG 的模型要求。

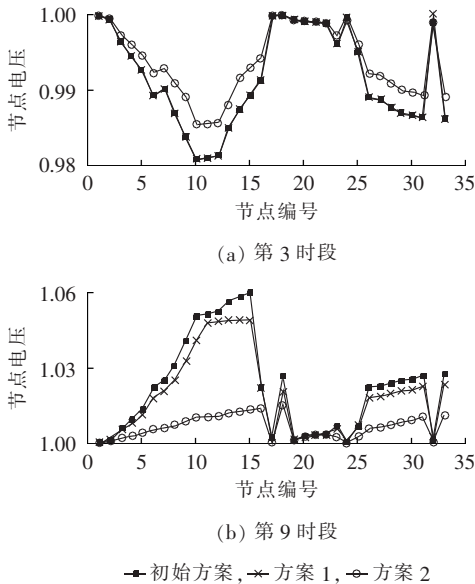


图 6 配电网各节点电压

Fig.6 Bus voltages of distribution system

5 结论

本文建立了电力市场环境计及安全约束的虚拟电厂两层优化调度模型。应用该模型对算例进行分析,可以得出以下结论:

a. 虚拟电厂经济调度模型中采用随机规划法处理电价的不确定性,采用鲁棒优化法处理风电出力的不确定性,可以提高经济调度的经济效益,增强调度方案的鲁棒性;

b. 虚拟电厂安全调度模型中,安全约束会降低初始调度值以满足安全约束的要求,安全约束越严格,初始调度值的削减量越大;

c. 将一个大规模复杂的电源调度规划问题分解为上层经济调度和下层安全调度两层调度子问题,可在保证调度方案经济性以及可靠性的同时,降低计算的复杂性。

参考文献:

- [1] 于慎航,孙莹,牛晓娜,等. 基于分布式可再生能源发电的能源互联网系统[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):104-108.
YU Shenhong,SUN Ying,NIU Xiaona,et al. Energy internet system based on distributed renewable energy generation[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(5):104-108.
- [2] 王成山,李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):10-23.
WANG Chengshan,LI Peng. Development and challenges of distributed generation,the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(2):10-23.
- [3] 徐成,梁睿,程真何,等. 面向能源互联网的智能配电网安全态势感知[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):13-18.
XU Cheng,LIANG Rui,CHENG Zhenhe,et al. Security situation awareness of smart distribution grid for future energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):13-18.
- [4] 徐芮,刘俊勇,刘友波,等. 考虑负荷聚类分区与分布式发电接入的配电网主网架规划方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):48-55.
XU Rui,LIU Junyong,LIU Youbo,et al. Primary and subordinate distribution network planning considering load clustering partition and DG integration[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):48-55.
- [5] 卫志农,余爽,孙国强,等. 虚拟电厂的概念与发展[J]. 电力系统自动化,2013,37(13):1-9.
WEI Zhinong,YU Shuang,SUN Guoqiang,et al. Concept and development of virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(13):1-9.
- [6] NIKONOWICZ L,MILEWSKI J. Virtual power plant general review:structure,application and optimization[J]. Journal of Power Technologies,2012,92(3):135-149.
- [7] 陈春武,李娜,钟朋园,等. 虚拟电厂发展的国际经验及启示[J]. 电网技术,2013,37(8):2258-2263.
CHEN Chunwu,LI Na,ZHONG Pengyuan,et al. Review of virtual power plant technology abroad and enlightenment to China[J]. Power System Technology,2013,37(8):2258-2263.
- [8] MASHHOUR E,MOGHADDAS M S. Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets:part I problem formulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011,26(2):949-956.
- [9] MASHHOUR E,MOGHADDAS M S. Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets:part II numerical analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011,26(2):957-964.
- [10] MOHAMMADI J,RAHIMIKIAN A,GHAZIZADEH M S. Aggregated wind power and flexible load offering strategy[J]. IET Renewable Power Generation,2007,5(6):439-447.
- [11] 邹云阳,杨莉. 基于经典场景集的风光水虚拟电厂协同调度模型[J]. 电网技术,2015,39(7):1855-1859.
ZOU Yunyang,YANG Li. Synergetic dispatch models of a wind/PV/hydro virtual power plant[J]. Power System Technology,2015,39(7):1855-1859.
- [12] SHROPSHIRE D,PURVINS A,PAPAIIOANNOU I,et al. Benefits and cost implications from integrating small flexible nuclear reactors with offshore wind farms in a virtual power plant[J]. Energy Policy,2012(46):558-573.
- [13] PANDZIC H,KUZLE I,CAPUDER T. Virtual power plant mid-term dispatch optimization[J]. Applied Energy,2013(101):134-141.
- [14] 余爽,卫志农,孙国强,等. 考虑不确定性因素的虚拟电厂竞标模型[J]. 电力系统自动化,2014,38(22):43-49.
YU Shuang,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,et al. A bidding model for a virtual power plant considering uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(22):43-49.
- [15] JOAO S,MOHAMMAD A F G,ZITA V,et al. A multi-objective model for the day-ahead energy resource scheduling of a smart grid with high penetration of sensitive loads[J]. Applied Energy,2016(162):1074-1088.
- [16] WU H Y,MOHAMMAD S. Demand response exchange in the stochastic day-ahead scheduling with variable renewable generation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2015,6(2):516-525.
- [17] 牛文娟,李扬,王蓓蓓. 考虑不确定性的需求响应虚拟发电厂建模[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3630-3637.
NIU Wenjuan,LI Yang,WANG Beibei. Demand response based virtual power plant modeling considering uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(22):3630-3637.
- [18] 黄杨,胡伟,闵勇,等. 计及风险备用的大规模风储联合系统广域协调调度[J]. 电力系统自动化,2014,38(9):41-47.
HUANG Yang,HU Wei,MIN Yong,et al. Risk-constrained coordinative dispatching for large-scale wind-storage system[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(9):41-47.
- [19] 白晓清,赵瞻,鲍海波. 基于 CLARA 算法的考虑时序特性分布式电源规划[J]. 电力自动化设备,2016,36(5):14-22.
BAI Xiaoqing,ZHAO Zhan,BAO Haibo. DG planning based on CLARA algorithm with consideration of timing characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(5):14-22.
- [20] 冯永青,吴文传,张伯明,等. 基于可信性理论的水火发电机组检修计划[J]. 中国电机工程学报,2006,26(13):14-19.
FENG Yongqing,WU Wenchuan,ZHANG Boming,et al. Hydro-thermal generation maintenance scheduling based on credibility

theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 14-19.

- [21] 魏韡, 刘峰, 梅生伟. 电力系统鲁棒经济调度: (一) 理论基础[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 37-43.

WEI Wei, LIU Feng, MEI Shengwei. Robust and economic scheduling methodology for power system: part one theoretical foundation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 37-43.

- [22] 陈思, 张焰, 薛贵挺, 等. 考虑与电动汽车换电站互动的微电网经济调度[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 60-69.

CHEN Si, ZHANG Yan, XUE Guiting, et al. Microgrid economic dispatch considering interaction with EV BSS [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 60-69.

- [23] BARINGO L, CONEJO A J. Offering strategy via robust optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1418-1425.

作者简介:



臧海祥

臧海祥(1986—), 男, 江苏江都人, 讲师, 博士, 研究方向为虚拟电厂、新能源发电技术(E-mail: zanghaixiang@hhu.edu.cn);

余爽(1991—), 男, 江苏徐州人, 助理工程师, 硕士, 研究方向为虚拟电厂、高压直流输电(E-mail: hhuyushuang@163.com);

卫志农(1962—), 男, 江苏江阴人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 研究方向为电力系统运行分析与控制、输配电系统自动化等(E-mail: wzn_nj@263.net);

孙国强(1978—), 男, 江苏江阴人, 副教授, 博士, 研究方向为电力系统分析与运行控制(E-mail: hhusunguoqiang@163.com)。

Safety-constrained two-layer optimal dispatch of virtual power plant

ZANG Haixiang¹, YU Shuang², WEI Zhinong¹, SUN Guoqiang¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Maintenance Branch Company, Nanjing 211100, China)

Abstract: With the unceasing increase of grid-connected distributed generations, the uncertainties and intermittency of their power outputs bring enormous challenges to power grid. VPP (Virtual Power Plant) is a new concept to effectively integrate them into grid. The power generation and electricity price of renewable energy sources, e.g. wind, have inherent uncertainty and the improvement of VPP schedulability in an uncertain environment becomes a hot spot. As the electricity price can be accurately predicted and its error distribution precisely described, a stochastic programming approach is applied to deal with its uncertainty; as the error distribution of power output prediction for renewable energy sources cannot be accurately described, a robust optimization approach is applied to deal with its uncertainty, based on which, the upper-layer economic dispatch model of the proposed two-layer VPP optimal dispatch model is established. Its lower-layer safe dispatch model is established to further consider the safety constraints of power grid. The case study based on the modified IEEE 33-bus test system and a VPP, consisting of a wind farm, a pumped storage power plant and three gas turbines, show the validity and effectiveness of the proposed model.

Key words: virtual power plant; stochastic programming; robust optimization; safety constraints; two-layer optimization

(上接第95页 continued from page 95)

Grid cascading failure control based on fuzzy CA

YU Qun¹, ZHANG Min¹, CAO Na¹, HE Qing², SHI Liang¹, YI Jun²

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: In order to reduce the occurrence frequency and scale of grid cascading failure, a grid failure model based on fuzzy theory and CA (Cellular Automata) theory is constructed, which considers the operating condition change of elements and power grid after the initial failure, as well as the failure spreading degree. The control rules for load shedding and reactive power compensation during the failure evolution are proposed based on the power flow transmission principle to alleviate the power outage and the control strategy, including time, location and adjustment amount, is determined. A power outage of IEEE 39-bus system is simulated and results show that, with the proposed control strategy, the failure occurrence frequency is decreased from 100 times per 4300 days to 100 times per 7000 days while the times of failure resulting in larger load loss per a certain number of power failures is obviously reduced, which enhances the grid stability.

Key words: electric power systems; cascading failure; fuzzy rules; cellular automata; self-organized criticality; outages; control