虚拟电厂的最优能量调度模型研究

虚拟电厂作为分布式电源、可控负荷以及储能装置的集合，对外呈现为一个特殊电厂，参与电力市场交易。研究虚拟电厂中最优能量调度模型，在最大收益目标下，提出相应的运行限制条件，使用优化算法求解最优调度策略，获取最大收益，合理安排分布式电源的出力，蓄电池的充放电以及可控负荷的投切，并与电力市场进行电能交易。通过改进的遗传算法对算例进行求解，结果表明该策略在满足限制条件下可以取得较好的经济收益。

朱　赫　许傲然　张　柳　谷彩连　白　迪/沈阳工程学院电力学院

朱　赫/硕士研究生

关键词/Keywords
虚拟电厂·
分布式能源·
储能·
可控负荷·
最优调度·
遗传算法·

能源危机和环境污染问题促进了分布式能源的发展。受到自然环境的影响，风力发电和光伏发电等间歇式分布式电源出力存在波动性和随机性，对电网产生的电压以及电能质量造成负面影响。采用微电网将分布式电源和储能装置结合起来，采用就地消纳原则，并且可以根据配电网的运行状态在并网状态和孤岛状态切换。微电网主要关注分布式电源的并网控制，如采用PQ控制或者VF控制，在多微电源中采用主从控制或者对等控制，强调分布式电源对电网状态的动态响应，保证电网的稳定运行。微电网实现了分布式电源与电网技术层面的交互，具备一些能量管理功能，但是其主要将分布式电源应用到局部区域的负荷，受到电源的地理分布区域限制，无法对分散接入的分布式电源优化控制。

基于远程测量和先进的通信技术，虚拟电厂（Virtual Power Plant，VPP）将分布式电源、储能装置、可中断负荷以及可插电混合汽车聚合为一个整体。VPP不涉及到具体的分布式电源并网控制，着眼于内部个体间的协调运行，实现电能和热能的合理分配和调度[1]。VPP的概念更多强调的是对外呈现的功能和效果，更新运营理念并产生社会经济效益，其基本的应用场景是电力市场研究。这种运行模式不需要改变原电网的架构，只需通过软件手段和相关的测控技术就可以聚合DG对公网稳定输电。VPP可以根据DG的运行特性进行互补研究，向配网提供稳定快速的后备服务，成为DG加入电力市场的有效方法，降低了其在市场中孤独运行的失衡风险，可以获得规模经济的效益。此外，VPP可以向系统操作员提供可视化视角，实现DG间的协调以及DG与电网间的互动，减少DG对电网的冲击，降低了DG增长带来的调度难度，使配电管理更趋于合理有序，提高了系统运行的稳定性[2]。

图1为VPP示意图，能量形式主要包括电能和热能。VPP内部包括电动汽车、分布式电源、电能负荷、可控负荷以及储能装置等与电能相关的元素。储

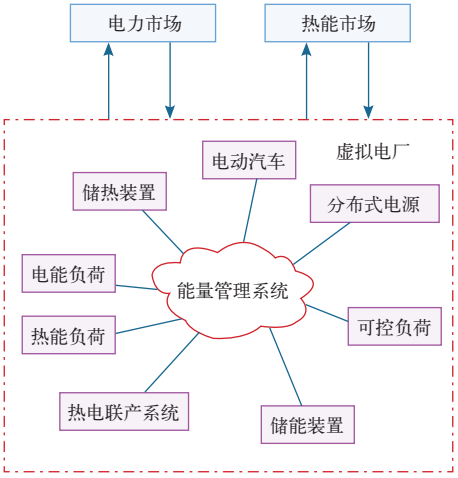

图1　VPP示意图

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

热装置和热能负荷构成热能元素。热电联产系统可以通过协调电能和热能输出。

根据欧盟FENIX 项目的定义，VPP 将分布式电源的打包组合，多点接入配电网，与整个电网进行能量互动，向系统操作员提供服务[3]。VPP中有两种：Technical VPP（TVPP）和Commercial VPP（CVPP）[4]。TVPP考虑了电力网络的运行状况和能量流动状态对于DG的实时影响，可以反映出多台DG的整体运行特性和消耗费用。TVPP向配电网操作员提供局部系统管理服务，以及向输电网操作员提供系统平衡和备用服务。在配电网服务中，主要包括以下三部分。

1）向配电网提供可视化的便利性。系统操作员可以直接了解DG的运行状态，形成对系统的整体状态认识。

2）调配DG用于系统管理，可以直接作用到个体。根据个体的运行约束条件和系统的总体运行目标，集约化的调控DG。

3）优化备用服务。CVPP不考虑配电网的运行影响，用于电力市场交易，主要作用包括：①向电力市场提供可视化的便利性，系统操作员可以了解DG的产能和运行约束，便于制定合理报价方案；②调配DG参与电力市场交易，获取最大受益。

本文分析VPP的功能属性和能量流动情况，制定合理的目标函数和约束条件，综合考虑VPP外部的电能交易和内部的能量分配，采用改进的遗传算法进行模型求解，实现能量的最优分配进而获取最大的收益，算例结果表明该方法可以有效地实现分布式电源的优化调度。

能量调度模型

根据VPP的功能属性和能量交互情况，可知VPP主要通过外部能量交易和内部能量调配实现优化调度和最大收益。本文主要考虑VPP的电能分配，VPP同时作为生产者和消费者与电力市场进行电能的购买与售卖。通过DG产能调节，储能的充放电，可控负荷的切断和接入实现内部能量优化调配。

1. 目标函数

目标函数为

$$\begin{aligned}&\max(\text{profit}) = g_1 - c_1 - c_2\\&g_1 = \sum_{t=1}^{24}\rho_{e,t}E_t + \sum_{t=1}^{24}\rho_{1,t}L_t\\&c_1 = \sum_{\substack{t=1\\ i\in S_{\text{CL}}}}^{24}(C_{IL,i,t}IL_{i,t})\\&c_2 = \sum_{\substack{t=1\\ i\in S_{\text{DG}}}}^{24}(C_{\text{DG},i,t}P_{\text{DG},i,t} + ST_{i,t} + SS_{i,t})\end{aligned} \tag{1}$$

式中，g_1为售电收入；c_1为可控负荷停电补偿费用；c_2为分布式电源的运行费用，包括维护费用、起动费用和关停费用；S_{DG}，S_{CL}分别为分布式电源，可控负荷的集合；$\rho_{1,t}$为面向终端消费者的电能零售价格；E_t为VPP在电力日前市场的报价，正值为报价购买，负值为售卖；L_t为售卖给用户的电能；C_{DG}为分布式电源的运行费用；P_{DG}为分布式电源的出力；SS为分布式电源的开机费用；ST为分布式电源的停运费用。C_{IL}为可中断负荷停电补偿费用；IL为可控负荷的中断量。

2. VPP约束条件

（1）网络安全约束

VPP经济运行的前提是保证电网的安全稳定和优先保证电能的持续可靠供应，即

$$\begin{aligned}&P_i - P_j = |V_i||V_j||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j)\\&Q_i - Q_j = |V_i||V_j||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j)\\&V_{\min} \leqslant V \leqslant V_{\max}\\&S_{\min} \leqslant S \leqslant S_{\max}\end{aligned} \tag{2}$$

式中，P_i、P_j为母线两端节点i、j的有功功率；Q_i、Q_j为母线两端节点i、j的无功功率；V_i、V_j为母线两端节点i、j电压；δ_i、δ_j为母线两端节点i、j的相角；θ_{ij}为Y－bus矩阵相角；Y_{ij}为导纳矩阵幅值；$V_{\min}$、$V_{\max}$为母线电压上下限值；$S_{\min}$、$S_{\max}$为母线容量的上下限值。

（2）分布式电源约束

分布式电源需选择合理的处理范围，并且单位时间内的功率变化量需满足梯度要求。分布式电源的开机和停运都需要一定时间完成，需在实现运行状态的平稳切换后，才能进行下一阶段的运行状态操作，否则容易损坏电源。VPP中的分布

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式电源应该满足功率约束、梯度约束以及开关机时间约束，即

$$\begin{aligned} P_{\mathrm{DG\cdot min}} \leqslant P_{\mathrm{DG}} \leqslant P_{\mathrm{DG.max}} \\ P_{\mathrm{DG},i,t+1} - P_{\mathrm{DG},i,t} \leqslant R_{\mathrm{DG.max}} \\ P_{\mathrm{DG},i,t} - P_{\mathrm{DG},i,t-1} \leqslant R_{\mathrm{DG.min}} \\ [T_{i,t-1}^{\mathrm{on}} - \mathrm{MUT}_i] \times [I_{i,t-1} - I_{i,t}] \geqslant 0 \\ [T_{i,t-1}^{\mathrm{off}} - \mathrm{MDT}_i] \times [I_{i,t-1} - I_{i,t}] \geqslant 0 \end{aligned} \tag{3}$$

式中，$P_{\mathrm{DG\cdot min}}$、$P_{\mathrm{DG\cdot max}}$为分布式电源有功的上下限值；$R_{\mathrm{DG\cdot min}}$、$R_{\mathrm{DG\cdot max}}$为分布式电源单位时间内变化量的上下限值；MDT、MUT为分布式电源允许的最小关机时间和最小开机时间；T^{off}、T^{on}为分布式电源已经关机或开机的小时数；$I_{i,\ t}$为布尔量，表示分布式电源i在时间t的运行状态，数值是1为正常运行，0为处于停运状态。

（3）能量平衡约束

VPP通过与外部市场的能量交换和电厂内能量的生产、储存和消耗环节实现能量平衡，即

$$E_t + SE_{\mathrm{dis}} + \sum P_{\mathrm{DG}} = SE_{\mathrm{ch}} + L_t \tag{4}$$

式中，SE_{ch}和SE_{dis}为蓄电池的充电和放电电能；$\sum P_{\mathrm{DG}}$为分布式电源的总出力。

（4）储能约束

储能约束为

$$SE_{\min} \leqslant SE \leqslant SE_{\max} \tag{5}$$

式中，$SE_{\max}$和$SE_{\min}$为储能电池中电能的上下限值。

（5）可控负荷约束

可控负荷约束为

$$IL \leqslant IL_{\max} \tag{6}$$

式中，$IL_{\max}$为可控负荷可被允许切除的最大数值。

3. 改进遗传算法

遗传算法是一种借鉴生物界进化规律的随机搜索优化算法，其对优化目标函数无须连续可微等苛刻条件已被应用于无功优化、分布式电源协调等方面研究[5]，但是由于群体中的各个体非常相似，群体多样性急剧下降甚至丧失，导致遗传算法出现早熟和收敛速度慢的现象。因为种群多样性决定了GA的搜索能力，个体间的差异越大，种群的多样性越好，则GA进化种产生更优的子代，加快收敛速度[6]。本文采用一种改进遗传算法，该改进遗传算法通过精英个体的保留以及惩罚函数的应用，能够十分有效地克服早熟，避免近亲繁殖，明显提高收敛速度和收敛准确度。改进遗传算法流程如图2所示。

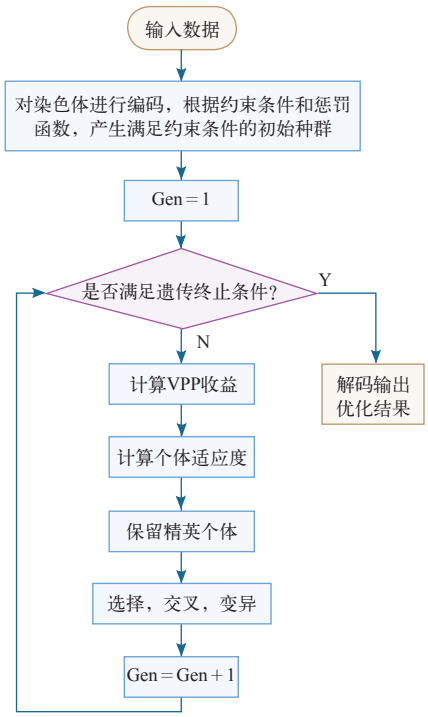

图2 改进遗传算法流程图

1）为了保证种群的多样性，防止种群早熟。本文精英策略：在初始随机种群中随机选择若干个体，将其中个体中适应度最高的个体保存到下一代群体中，直到保存到子代的个体数达到预设值。同时为了防止由于选择误差，或者交叉和变异的破坏作用而导致当前群体的最佳个体在下一代丢失，还采用了最优个体保存法，即将种群中适应度最高的个体不进行交叉和变异，而直接复制到下一代中。这种选择方法既保证了子代中的个体在解空间中有较好的分散性，同时又使子代中的个体具有较大的适应度。

2）通过构造惩罚函数处理约束条件，将约束条件转化为非约束问题。不必严苛执行所有约束条件，避免早熟或者陷入局部解。对于不能满足约束的个体，根据越限程度，采用惩罚因子降低个体适应度，一方面可以保证此类个体在下一代进化中易被淘汰，另一方面可以容许一部分违反约束个体存在以保证个体的多样性。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

算例分析

本文采用如图3所示的VPP进行算例分析。该VPP包括两个分布式电源、一个热电联产系统及额定容量为25 kW的铅酸蓄电池，此外还包括最大量为40 kW的可控负荷。分布式电源的具体参数如下表所示，其中DG_1和DG_2单位功率费用为30元。图4为日前市场电力价格和电力零售价格，图5为电力负荷曲线。

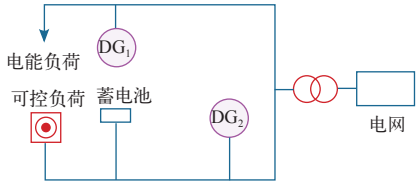

图3 VPP单线图

表 分布式电源参数

项目	DG_1	DG_2
P_{min}/kW	0	0
P_{max}/kW	50	35
R_{min}/（kW/h）	5.0	3.0
R_{max}/（kW/h）	10.0	5.0
MUT/h	2	1
MDT/h	3	1
SS/元	6	2
ST/元	5.5	1

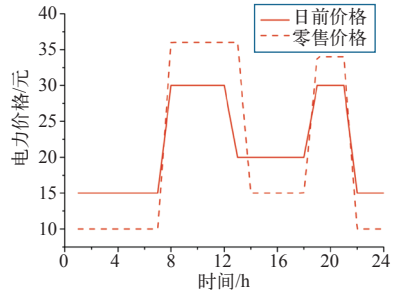

图4 日前市场价格和零售价格

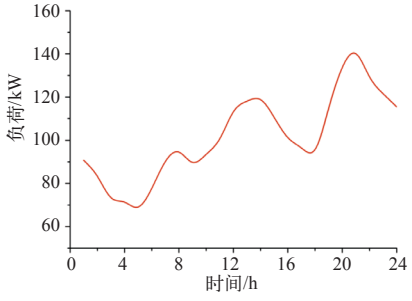

图5 负荷曲线

本文采用改进遗传算法进行求解，求解结果如图6～图8所示。图6为DG的出力曲线；图7为储能电池的剩余电量，可以反映其充放电操作；图8为可控负荷变化情况。

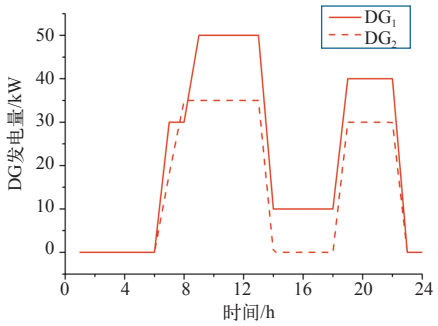

图6 DG的出力曲线

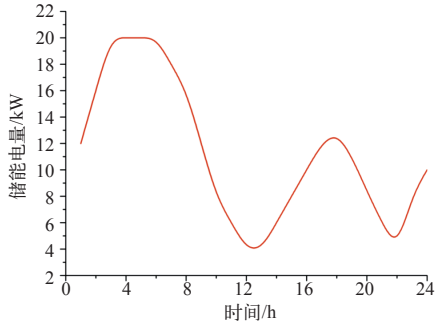

图7 储能电池的剩余电量

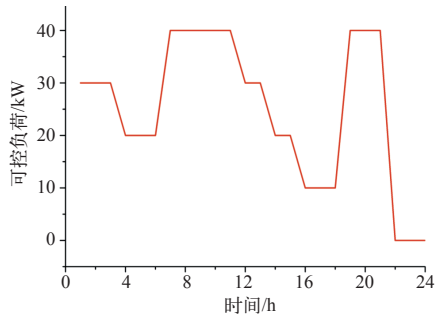

图8 可控负荷变化情况

在22：00～7：00，日前市场的电力价格低于DG的运行消耗费用，所以VPP从电力市场购买电能，向终端负荷售卖以及存储到铅酸电池中，可以观察到这时DG处于停机状态，储能装置进行充电操作，由于零售价格低于日前价格，VPP切除可控负荷。

在7：00～14 ：00，日前市场的电力价格高于DG的运行消耗费用，VPP由消费者转换为电力生

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

产商。DG_1和DG_2过渡到额定功率输出，尽可能地提高电能产能。同时储能装置通过放电，将电量售卖给日前市场获利。由于此时零售价格高于日前价格，所以VPP不会切除可控负荷，通过售卖电力获取收益。

在14：00～18：00，日前市场电力价格较低，应该关闭DG以减少支出，但是DG_1开起和关停费用较高，并且MUT和MDT限值较长，不能很好响应功率变化收益，所以VPP关停DG_2，将DG_1减产。这时零售价格低于日前市场价格，可以切除可中断负荷将多余电量出售获利。

在18：00～22：00，日前市场和零售市场价格都处于较高水平，VPP调动DG生产电能，并且储能装置进行放电操作，将电能售卖向电力市场和终端负荷。

图9为VPP与电力市场下的交易情况，正值为VPP作为消费者购买电力，负值为VPP作为生产者出售电力，可以清晰地观察到日前市场电力价格和负荷用量对VPP角色的转换影响。日前市场电力价格较高并且内部负荷消耗较少时，VPP就可以等效为发电机，向电网侧售卖电力，反之VPP根据电力价格，发电机损耗决定购买的电量。

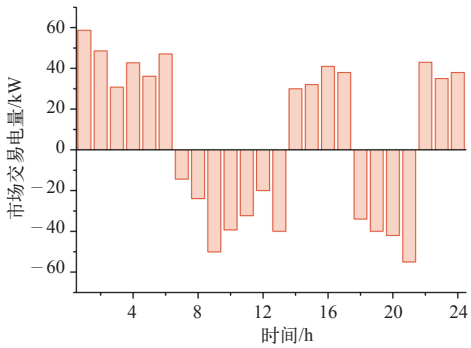

图9 VPP电力交易情况

根据改进遗传算法求得的能量分配情况，VPP的总收益为2 348.1元，可以实现分布式电源的最优调度，储能以及可控负荷的最优能量流动和电力市场的合理交易方案。

结束语

本文将VPP与电力市场的交易收入和向负荷的售电收入作为收益函数。并考虑了网络安全约束、分布式电源运行约束、可控负荷约束、储能约束和能量平衡约束。通过精英保留以及惩罚函数对遗传算法进行改进，并用于VPP的优化调度模型求解，运行功能属性和能量流动情况，制定合理的目标函数和约束条件，算例结果表明该模型综合考虑VPP外部的电能交易和内部的能量分配，可以实现能量的最优分配和获取最大的收益。

参考文献

[1] 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．

[2] 卫志农，余爽，孙国强，等．虚拟电厂欧洲研究项目述评 [J]．电力系统自动化，2013 (21)：196-202．

[3] 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 (8)：2258-2263．

[4] Asmus P．Microgrids virtual power plants and our distributed energy future [J]．The Electricity Journal，2010，23 (10)：72-82．

[5] 麻秀范，崔换君．改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用 [J]．电工技术学报，2011，26 (3)：175-181．

[6] 丁明，吴义纯．基于改进遗传算法的风力－柴油联合发电系统扩展规划 [J]．中国电机工程学报，2006，26 (8)：23-27．

（收稿日期：2014－10－11）EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net