

文章编号:1674-2974(2014)10-0077-07

基于模糊去约束法的 V2M 系统运行优化^{*}

余岳, 粟梅, 孙尧, 董密[†]

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:选取一个含有 EV(电动汽车)、光伏发电、风力发电、燃气轮机、蓄电池储能单元所组成的微电网运行优化问题作为研究对象,提出一种模糊去约束的求解方法.在系统对负载、光伏和风力发电出力有效监测和预测条件满足时使用这种方法,将 EV 与微网储能单元电池约束去除,将微电网带非线性约束的优化问题转变为线性优化问题.对比传统优化方法和模糊去约束法,系统的优化效率有显著提高.

关键词:微电网;电动汽车;模糊控制;去约束;运行优化

中图分类号:TM715

文献标识码:A

Fuzzy Control to Reduce the Constraints of V2M System Optimal Scheduling

YU Yue, SU Mei, SUN Yao, DONG Mi[†]

(School of Information Science and Engineering, Central South Univ, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: This article studied the operation optimization of a microgrid power system consisting of EVs (electric vehicles), a photovoltaic power, wind power, gas turbines, batteries and energy storage unit. When the loads, photovoltaic and wind power output for effective monitoring and forecasting conditions are met, we proposed to reduce the constraints in fuzzy control method, to remove the battery and EV constraints, and then the microgrid with nonlinear constrained optimization problem was transformed to a linear optimization problem. Compared with the traditional optimization methods and the unconstraints in fuzzy method, the optimization efficiency of the system has been greatly improved.

Key words: microgrid; electric vehicles; fuzzy control; reduce constraints; operational optimization

为了充分利用各地丰富的清洁和可再生能源,向用户提供“低碳电力”,实现我国“节能减排”的目标,将分布式发电、供电系统以微电网^[1]的形式接入到大电网运行^[2-3],或者独立运行^[4],是一种发挥分布式发电、供电非常有效的方式.

近年,为了减少污染气体的排放和对石油资源的依赖,电动汽车(EV)的使用受到广泛关注. EV

以电池为动力,能降低汽车尾气的排放,提高能源效率,是解决能源和环境问题的有效手段.基于两者的优点,微电网中接入 EV 有可能成为一种缓解当前能源需求紧张与环境保护的有效模式^[5-7].

微电网的经济性是吸引用户在电力系统中推广的关键所在,因此,对 V2M 进行运行优化,在满足负荷需求的前提下,考虑微电网的运行成本,合理、

^{*} 收稿日期:2014-04-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61174125)

作者简介:余岳(1978-),男,湖南长沙人,中南大学博士研究生

[†] 通讯联系人, E-mail: mi.dong@csu.edu.cn

有效地安排微电网各分布式电源的出力以及 EV 的充放电,可以实现 V2M 的经济运行^[8].微电网的运行优化模型一般属于含约束条件的优化问题模型^[9-11].EV 的接入,一方面相当于为微电网增加了额外储能电池单元;另一方面,EV 接入微电网最终是为了充电,相当于为微电网增加了一种特殊的负载.储能电池单元输入、输出功率与电池电荷状态(SOC)和最大充、放电电流都有关联,因此储能电池单元的约束条件是一个非线性约束,这种约束条件使得整个系统优化问题成为了一个非线性优化问题^[12-13].

目前,求解含非线性约束的优化方法通常有结合惩罚函数的遗传算法^[14-15]、动态规划算法^[16]、改进的粒子群算法^[17]等,这类优化方法求解一般耗时很长,才有可能找到全局最优解,求解过程效率不高.另外一种求解思路是,从约束条件入手,将优化问题中的复杂约束条件用其他方法简化,从而有效地处理约束条件,例如使用模糊方式表达,利用模糊理论与其他方法相结合来求得全局最优解.文献[18]对工程中复杂数学关系表示的问题采用模糊逻辑规则的推理形式描述,并将这种模糊逻辑方法应用于机组组合问题中,简化了求解过程.文献[19]中将基于约束满足的模糊排列方法应用于优化问题的求解中,可避免优化过程中的重复搜索,提高了优化效率,缩短了优化时间.

通过分析 V2M 系统运行过程中电池和 EV 的数学模型和工作方式,在对负载、光伏和风力发电出力有效监测和预测的条件下,针对储能电池单元和 EV 单元的约束条件,本文提出一种模糊去约束法,通过模糊专家系统,直接求解出电池充放电功率,将电池约束条件从系统约束条件中解除,使传统的含非线性约束优化问题转换为线性优化问题.通过算例场景,对比传统优化方法,新方法优化效率有显著提高,在对优化时间有特殊要求的问题求解中,模糊去约束法不失为一种实用的优化方法.

1 系统运行优化传统模型

1.1 光伏发电出力的数学模型

光伏出力模型^[20]如式(1)所示, I_{sc} 代表光伏电池的短路电流; U_{oc} 代表光伏电池的开路电压,在不同的天气条件下,当光伏电池电压为 U_{pv} 时,其对应输出电流 I_{pv} 为:

$$I_{pv} = I_{sc} \left[1 - C_1 \left(\exp \left(\frac{U_{pv} - \Delta V}{C_2 U_{oc}} \right) - 1 \right) \right] + \Delta I. \tag{1}$$

其中:

$$\begin{aligned} C_1 &= (1 - I_{mp}/I_{sc}) \exp [-U_{mp}/(C_2 U_{oc})]; \\ C_2 &= \left(\frac{U_{mp}}{U_{oc}} - 1 \right) / \ln \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right); \\ \Delta I &= \alpha \left(\frac{R}{R_{ref}} \right) \Delta T + \left(\frac{R}{R_{ref}} - 1 \right) I_{sc}; \\ \Delta V &= U_{pv} - U_{mp}; \\ \Delta T &= T_c - T_{ref}. \end{aligned}$$

式中: I_{mp} , U_{mp} 为最大功率点电流和电压; α , R_{ref} , T_{ref} , R , T_c 分别为参考日照下电流变化的温度系数、太阳辐射参考值、光伏电池温度参考值、光伏阵列倾斜面上的总太阳辐射、光伏电池温度,这些参数由天气预报获得,然后计算出光伏发电输出功率为:

$$P_{pv} = U_{pv} I_{pv}. \tag{2}$$

1.2 风力发电系统模型

一般情况下认为风速满足两参数 Weibull 分布^[21],风速的概率密度函数 $f(v)$ 为:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right). \tag{3}$$

式中: v 为风速; k 为形状参数; c 为尺度参数.风速 v 和风力发电系统输出功率 P_w 的关系式为:

$$P_w = \begin{cases} 0, & v < v_{ci}; \\ k_1 v + k_0, & v_{ci} \leq v < v_r; \\ P_r, & v_r \leq v < v_{co}; \\ 0, & v > v_{co}. \end{cases} \tag{4}$$

其中: $k_1 = P_r/(v_r - v_{ci})$, $k_0 = -k_1 v_{ci}$.

式(4)中: P_r 表示风力发电机额定功率; v_{ci} , v_r , v_{co} 分别表示切入风速、额定风速、切出风速.

1.3 储能单元电池模型^[16]

为了简化分析,本文中假设电池在整个充放电过程中,电池两端电压基本维持不变.电池的工作状态分为充电和放电 2 种状态,电池放电时满足:

$$SOC_{batt}(t+1) = SOC_{batt}(t) - \Delta t P_{batt}^d / \eta_d, \forall t. \tag{5}$$

电池充电时满足:

$$SOC_{batt}(t+1) = SOC_{batt}(t) + \Delta t P_{batt}^c \eta_c, \forall t. \tag{6}$$

式中: $SOC_{batt}(t)$ 为 t 时段的电池储能容量; P_{batt}^c 和 P_{batt}^d 分别为 t 时段电池的充放电功率; η_c 和 η_d 分别为 t 时段充放电的效率; t 为时段长度.

1.4 EV 储能单元模型

本文假设接入微电网的 EV 都可以调度,而且 EV 都以充满电的状态离开微电网.行驶一天后重新接入电网,再充电时的初始状态为:

$$SOC_{ev} = (1 - l_d/L_r) \times 100\%. \tag{7}$$

式中: l_d 为电动汽车在充满电的状态下 1 d 行驶的实

际路程; L_r 为电动汽车在充满电的状态下可行驶的最大路程. 每天行驶路程 l_d 近似满足对数正态分布:

$$f(l) = \frac{1}{l\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln l - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right). \quad (8)$$

EV 的工作状态分为充电和放电 2 种, EV 放电时满足:

$$\text{SOC}_{\text{ev}}(t+1) = \text{SOC}_{\text{ev}}(t) - \Delta t P_{\text{ev}}^{\text{d}} / \eta_{\text{d}}, \quad \forall t. \quad (9)$$

电池充电时满足:

$$\text{SOC}_{\text{ev}}(t+1) = \text{SOC}_{\text{ev}}(t) + \Delta t P_{\text{ev}}^{\text{c}} \eta_{\text{c}}, \quad \forall t. \quad (10)$$

式中: $\text{SOC}_{\text{ev}}(t)$ 为 t 时段的电池储能容量; P_{ev}^{c} 和 P_{ev}^{d} 分别为 t 时段电池的充放电功率; η_{c} 和 η_{d} 分别为 t 时段充放电的效率; t 为时段长度.

1.5 V2M 运行优化目标函数

V2M 经济运行的目标为微型燃气轮机燃料费用以及从公网取电费用最小^[22]. 目标函数可以表示为:

$$\min F = \sum_{t=0}^T [C_u P_u(t) + C_t P_t(t) - C_s P_s(t)] \Delta t. \quad (11)$$

式中: $P_u(t)$, $P_t(t)$, $P_s(t)$ 分别表示微电网在 t 时段从公网吸收的功率、微型燃气轮机供给的功率、微电网在 t 时段向公网输出的功率, 本文中 Δt 取值为 1 h; C_u , C_t , C_s 分别表示从公网取电成本系数、微型燃气轮机发电成本、向公网售电利润系数, 单位均为“元/kW·h”. 离网运行时微电网从公网吸收的功率和向公网输出的功率均为零.

1.6 约束条件

忽略损耗, 系统运行时满足如下约束条件.

1) 功率平衡约束条件:

$$P_u(t) + P_t(t) - P_s(t) + P_{\text{batt}}(t) + P_{\text{ev}}(t) = P_{\text{load}}(t) - P_{\text{pv}}(t) - P_{\text{wt}}(t), \quad \forall t. \quad (12)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_s(t), \\ 0 \leq P_u(t), \end{cases} \quad \forall t. \quad (13)$$

式中: $P_{\text{pv}}(t)$ 是根据当天每小时的温度和光辐射量, 并结合式(1)应用最大功率跟踪法求得; $P_{\text{wt}}(t)$ 通过式(3)得到当前风速再结合式(4)求得.

2) 微型燃气轮机的出力约束:

$$P_t^{\min} \leq P_t(t) \leq P_t^{\max}, \quad \forall t. \quad (14)$$

式中: $P_t^{\min}$, $P_t^{\max}$ 分别为燃气轮机最小输出功率和最大输出功率.

3) 储能电池单元约束:

假设在整个充放电过程中, 电池两端电压基本维持不变, 电池的出力还需要满足下列不等式约束:

$$0 \leq P_{\text{batt}}^{\text{d}}(t) \leq P_{\text{batt}}^{\text{dmax}}, \quad \forall t, \quad (15)$$

$$0 \leq P_{\text{batt}}^{\text{c}}(t) \leq P_{\text{batt}}^{\text{cmax}}, \quad \forall t. \quad (16)$$

电池容量限制约束为:

$$\text{SOC}_{\text{batt}}^{\min} \leq \text{SOC}_{\text{batt}}(t) \leq \text{SOC}_{\text{batt}}^{\max}, \quad \forall t. \quad (17)$$

式中: $P_{\text{batt}}^{\text{dmax}}$, $P_{\text{batt}}^{\text{cmax}}$, $\text{SOC}_{\text{batt}}^{\min}$, $\text{SOC}_{\text{batt}}^{\max}$ 分别为电池最大放电功率、电池最大充电功率、电池最小电荷状态、电池最大电荷状态.

4) EV 约束条件:

$$\text{SOC}_{\text{ev}}^{\min} \leq \text{SOC}_{\text{ev}}(t) \leq \text{SOC}_{\text{ev}}^{\max}, \quad \forall t, \quad (18)$$

$$0 \leq P_{\text{ev}}^{\text{d}}(t) \leq P_{\text{ev}}^{\text{dmax}}, \quad \forall t, \quad (19)$$

$$0 \leq P_{\text{ev}}^{\text{c}}(t) \leq P_{\text{ev}}^{\text{cmax}}, \quad \forall t. \quad (20)$$

式中: $P_{\text{ev}}^{\text{dmax}}$, $P_{\text{ev}}^{\text{cmax}}$, $\text{SOC}_{\text{ev}}^{\min}$, $\text{SOC}_{\text{ev}}^{\max}$ 分别为 EV 电池最大放电功率、EV 电池最大充电功率、EV 电池最小电荷状态、EV 电池最大电荷状态.

2 系统运行优化改进模型

2.1 去约束基本思想

传统优化模型中, 目标函数(11)中有 3 变量, 而等式约束条件(12)中包括 $P_{\text{batt}}(t)$, $P_{\text{ev}}(t)$ 在内有 5 变量, 且 EV 和电池充放电功率还与 SOC 相关联, 由(5)至(10)和(12)至(20)式构成了一系列的非线性约束. 整个优化问题是一个带非线性约束的优化问题.

这个问题的本质在于 V2M 系统优化调度中, 电池模型与 EV 模型既是系统调度的核心, 又是复杂非线性约束, 因此是难以规避的非线性优化变量; 同时, 系统还需要满足功率平衡式(12)的要求, 当负荷变化、微源出力趋势等剧烈变化难以预测时, 一般只能采用非线性优化方法进行优化.

但是, 实际环境中确实存在有些条件, 比如连续相对稳定的气象条件下, 光伏及风力发电出力在一段时间内能够有效地预测, 用户用电需求无剧烈波动, 这种条件下, 光伏、风力发电出力和用户负载能够通过相对准确的预测和监测而获得. “去约束”方法便是基于这种条件而产生的.

通过分析 V2M 系统的运行特点可发现, 电池和 EV 的充放电过程有其特殊规律可以遵循, 例如: 在凌晨 1 时到凌晨 5 时之间, 电网负荷通常很低, 电价也相对较低, 如果这个时间段预测风力发电出力强劲, 而且电池和 EV 电荷状态偏少时, 为了上午负荷的高峰期做准备也为电动汽车驶离做准备, 那么富余的电力应该充入电池和 EV, 而不是向电网输电. 这相当于根据当前的外部条件和人为的经验就确定了电池和 EV 充放电状态, 而不是像寻优算法, 可能会尝试放电这种情况去计算系统运行最优值.

依据上述思想,如果根据相对准确的预测和专家经验就能确定电池和 EV 的充放电功率,那么式(12)中 $P_{batt}(t)$ 和 $P_{ev}(t)$ 就是确定量,式(12)就转化为 3 变量的等式约束,同时式(5)至(10)和(12)至(20)都将从约束条件中去除. 最后系统的优化模型就被改进为:

$$\begin{aligned} \min F = & \sum_{t=0}^T [C_u P_u(t) + C_t P_t(t) - C_s P_s(t)] \Delta t, \\ \text{s. t.} \\ & P_u(t) + P_t(t) - P_s(t) = \\ & \begin{cases} P_{load}(t) - P_{pv}(t) - P_{wt}(t) - P_{batt}(t) - P_{ev}(t), \forall t, \\ 0 \leq P_s(t), \forall t, \\ 0 \leq P_u(t), \forall t, \\ |P_t^{min} \leq P_t(t) \leq P_t^{max}, \forall t. \end{cases} \end{aligned}$$

(21)

显然,式(21)是一个典型的 3 变量线性优化问题,可以采用诸如单纯形法等经典线性优化算法求解,非线性约束优化问题就转化为了经典线性优化问题,复杂求解过程转化为了简单求解过程.

2.2 基于模糊专家系统的 EV 与电池调度

实现式(21)的关键是基于光伏、风力发电出力 and 用户用电需求的有效预测,并且,在全局的条件下,也就是在 24 h 范围内,根据当前状态和未来预测,合理地给出 $P_{batt}(t)$ 和 $P_{ev}(t)$,从而保证求解过程不限于局部最优解. 本文采用模糊专家系统求解 $P_{batt}(t)$ 和 $P_{ev}(t)$.

2.2.1 电池调度

电池调度主要参考 5 个输入参数:24 h 内系统当前所处的时间 T , 电池状态 SOC, 电网电价 EP, 负载 Load, 分布式发电出力总和 DG. 根据专家经验设置的输入隶属度函数^[23]如图 1(a)~(e)所示.

图 1(a)描述的是系统当前时间 T 的隶属度函数. 为了与 EV 一个充电周期配合,系统起始优化时间从每日 13 时开始,至次日 13 时结束. Md 表示中午至下午时段,N 表示下午至晚间,Mr 表示凌晨至上午时段. 图 1(b)描述电池荷电状态 BSOC,VL 表示电池荷电状态很低,L 表示电池荷电状态低,M 表示电池荷电状态处于中等状态,H 表示电池荷电状态高. 图 1(c)描述电网售购电价水平,L 表示电价低,M 表示电价居中,H 表示电价高. 图 1(d)是负载需求描述,L 表示负载需求低,M 表示负载需求中等,H 表示负载需求高. 图 1(e)描述分布式发电总出力,L,M,H 分别表示分布式发电出力总功率低、中、高. 图 1(f)描述的是电池调度功率输出隶属度函数,CH, CM, CL 分别表示充电功率高、中、

低;DL, DM, DH 分别表示放电功率低、中、高.

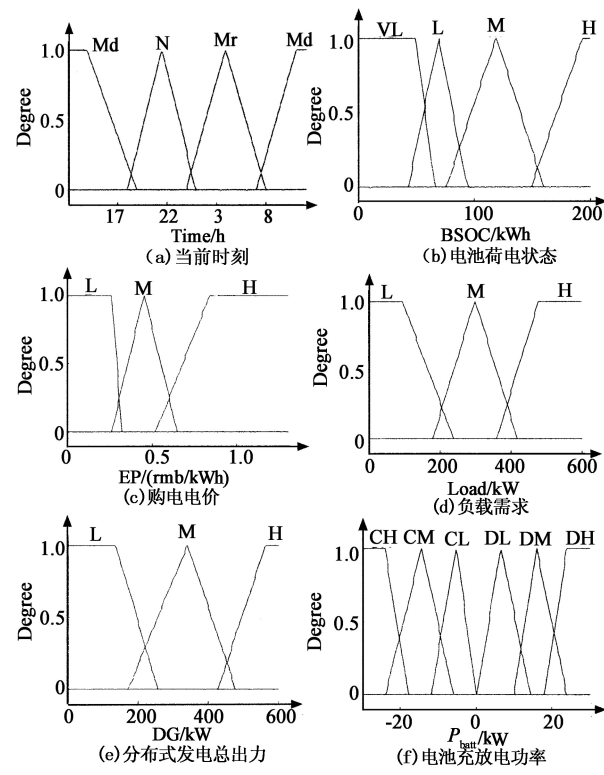


图 1 储能单元电池输入输出隶属度函数
Fig. 1 Battery input and output membership functions

根据控制规则通过输出隶属度函数图 1(f)求出 $P_{batt}(t)$. 控制规则的制定除了依赖 5 个输入参数的当前状态,同时还参考输入参数的未来预测值,然后由专家经验判断输出数值. 典型的控制规则如式(22)所示.

If (T is “Mr”) and (BSOC is “L”) and (EP is “L”) and (Load is “L”) and (DG is “M”) Then (Pbatt is “CM”).

(22)

式(22)的控制规则是,根据条件:1)当前系统输入条件:时间为凌晨至早晨时段,当前电池荷电状态为“低”状态,电网售、购电价处于谷时低价状态,系统负载为“低”状态,微源出力为“中”功率;2)未来预测:上午 11 时左右和晚间 21 时左右将有 2 次负载高峰到来,上午 11 时开始 DG 出力将逐步达到最大值;所以,当前电池荷电状态为“低”,而且负载为轻载,同时电价较低,此时电池不应该放电. 相反,为了给负载高峰做准备,此时电池应该充电. 由于当前 DG 出力为“中”状态,而且预期 DG 出力将继续增加,所以当前电池充电功率选择“中”等充电功率 CM,充分利用 DG 出力存储至电池,并且等待 DG 出力为“高”时,再加大电池充电功率.

以此类推,充分考虑 24 h 内系统当前所处的时间 T , 电池状态 BSOC, 电网电价 EP, 负载 Load, 分布式发电出力总和 DG 的当前状态和未来预测, 制定系统、全面的控制规则, 从而获得相对合理的 $P_{\text{batt}}(t)$.

2.2.2 EV 调度

EV 相比储能单元电池的不同点有: 1) 在全天时间的角度上, EV 最终是一种负载, 从驶入微电网到驶离微电网, 需要从微电网吸收电能. 2) EV 驶入微电网时, 初始荷电状态为随机变量. 假设接入微电网的 EV 全部可调度, 而且 EV 驶入时间为每晚 19:00, 驶离时间为每天上午 07:00. EV 接入微电网的初始 EVSOC 由式(7)(8)确定, EV 以满荷电状态驶离. EV 调度包含 5 个输入参数: 当前时间 T , EV-SOC, 电网电价 EP, 负载 Load, 分布式发电出力总和 DG, 输入隶属度函数如图 2(a)~(e)所示.

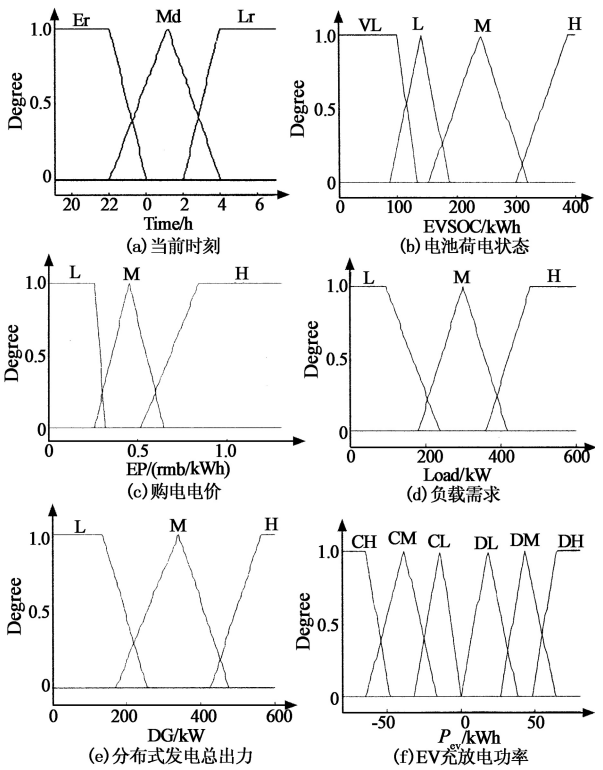


图 2 EV 输入输出隶属度函数
Fig. 2 EV input and output membership functions

因为 EV 驶入时间为每天夜间 19:00, 驶离时间为每天上午 07:00, 所以与储能单元电池调度中时间隶属度函数设计不同, EV 调度的时间隶属度函数如图 2(a)所示, 时间范围从每日 19 时开始, 至次日早上 7 时结束. Er 表示距离驶离时间较早, Md 表示距离驶离时间偏中, Lr 表示距离驶离时间很近. EV 其他隶属度函数的描述与相应的电池调度

中所描述的隶属度函数相似. 根据输入参数得到隶属度, 然后根据控制规则通过输出隶属度函数图 2(f)求出 $P_{\text{ev}}(t)$. 典型的控制规则如式(23)所示. 典型控制规则的制定原理与本文 2.2.1 节描述方法一致.

If (T is “Md”) and (EVSOC is “L”) and (EP is “L”) and (Load is “L”) and (DG is “M”) Then (P_{evis} is “CM”). (23)

但是, 与储能单元电池不同, EV 在次日 7 时需要以满电荷状态驶离, 因此 EV 调度中, 当时间 T 处于 Lr 时, 控制规则重点需要保证 EV 的充电量, 控制规则(24)描述的是当 T 处于距离驶离时间很近、EVSOC 状态为“低”时, EV 的充电功率为“高”.

If (T is “Lr”) and (EVSOC is “L”) Then (P_{evis} is “CH”). (24)

以此类推, 考虑 12 h 充电周期内系统当前所处的时间 T 和 EV 储能电池状态 EVSOC, 电网电价 EP, 负载 Load, 分布式发电出力总和 DG 的当前状态和未来预测, 制定系统和全面的控制规则, 从而获得相对合理的 $P_{\text{ev}}(t)$.

3 算例分析

3.1 算例参数

本文以某地区的 V2M 系统为例进行计算和分析. 微电网包含光伏阵列、风电场、微型燃气轮机和蓄电池. 光伏阵列最大输出功率 400 kW, 风机额定输出功率 200 kW, 微型燃气轮机最大输出功率总和 300 kW; 对于蓄电池, 采用铅酸蓄电池: $\text{SOC}_{\text{max}} = 200 \text{ kW} \cdot \text{h}$, $\text{SOC}_{\text{min}} = 50 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 最大充放电功率 30 kW, 充放电效率 0.9, 电池初始 SOC 为 50 kW · h. 微电网中接入 20 辆 EV, 车载锂电池总容量为 $\text{EVSOC}_{\text{max}} = 400 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 最大充放电功率 80 kW, $\text{EVSOC}_{\text{min}} = 80 \text{ kW} \cdot \text{h}$; 除 EV 外, 该地区总的负载为 600 kW. 24 h 内, 光伏出力 P_v , 风力发电出力 P_w 和负载 P_{load} 预测值如图 3 所示, 电网电价见表 1.

表 1 24 h 不同时段的价格 Tab. 1 The price in different periods of 24 hours			
元/kWh			
时段	峰时段 8—11 时, 18—21 时	平时 6—8 时, 11—18 时, 21—22 时	谷时段 22 时—次日 6 时
购电电价	1.143	0.685	0.333
售电电价	0.8	0.5	0.2

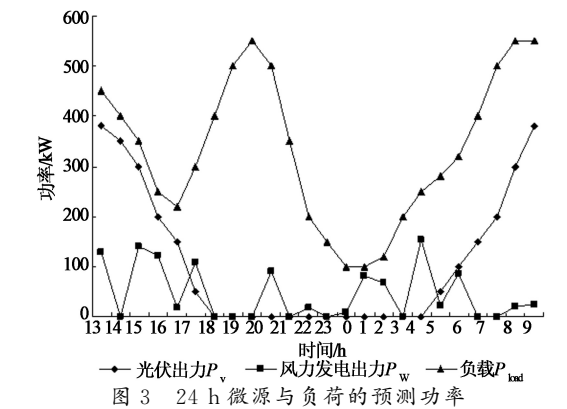


Fig. 3 DGs and load forecasting of power in 24 hours

3.2 求解与分析

3.2.1 传统优化方法结果分析

采用传统优化模型,即对(11)至(20)所组成的优化模型进行优化,采用动态规划法求解,系统运行成本为3 225.2元,求解耗时596.455 958 s,系统优化运行结果如图4所示。

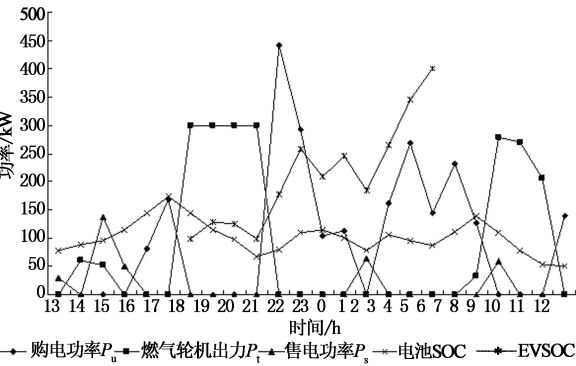


图4 传统优化模型24 h系统功率优化调度结果
Fig. 4 The traditional optimization model optimal scheduling results for 24 hours

3.2.2 模糊去约束法优化结果分析

采用改进后的优化模型,即对式(21)所组成的优化模型进行优化,使用单纯形法求解,系统运行总成本3 301.8元,求解耗时0.999 083 s,系统优化运行结果如图5所示。

传统优化方法结果与改进优化方法对比结果如表2所示,模糊去约束法运行成本略高于传统模型法2.375%,两种方法优化的结果相近。但是,在同一计算环境条件下,模糊去约束法的优化时间为传统模型法的0.168%,优化效率远高于传统模型法。由此可见,当优化问题中存在更复杂的非线性约束条件而且对优化求解时间有一定要求的场合,如果能使用模糊去约束法将复杂非线性约束解除,那么系统优化效率将显著提高。

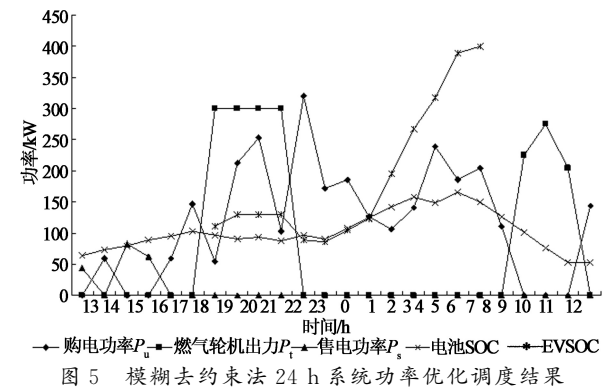


图5 模糊去约束法24 h系统功率优化调度结果
Fig. 5 Unconstraint by fuzzy method 24 hours system power optimization results

表2 传统优化方法与模糊去约束法结果对比
Tab. 2 Traditional optimization methods and unconstraint by fuzzy method comparison results

优化方法	优化时间/s	优化结果/元
传统模型法	596.455 958	3 225.2
模糊去约束法	0.999 083	3 301.8

4 结 语

在V2M运行的模型基础上,提出一种基于模糊去约束法的V2M经济运行模型,模型中利用模糊专家系统对微电网储能电池单元和EV出力进行调度,将电池约束与EV储能环节约束去除,将微电网带约束非线性运行优化问题转变为线性优化问题。算例分析结果表明,本文提出的模型求解结果与传统模型相近,优化效率显著提高,特别在针对复杂非线性约束条件下的优化问题,提供了一种在极短的时间内快速求取近似解的方法,为系统求取全局最优解提供快速可靠的参考依据,也为V2M运行优化问题提供了一种具有实用价值的求解方法。

参考文献

[1] LASSETER R H. Microgrid[C]//Proceedings of 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, NewYork: IEEE, 2002:305-308.

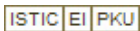
[2] 戴上, 张焰, 祝达康. 含有微电网的配电网规划方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(22): 41-45.

DAI Shang, ZHANG Yan, ZHU Da-kang. Distribution network planning method containing micro-grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(22): 41-45. (In Chinese)

[3] 王成山, 王守相. 分布式发电供电系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1-4.

WANG Cheng-shan, WANG Shou-xiang. Study on some key problems related to distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 1-4. (In Chinese)

- [4] ZELAZO D, DAI R, MESBAHI M. An energy management system for off-grid power systems[J]. *Energy*, 2012, 42(1): 321—330.
- [5] 张文亮, 武斌, 李武峰, 等. 我国纯电动汽车的发展方向及能源供给模式的探讨[J]. *电网技术*, 2009, 33(4): 1—5.
ZHANG Wen-liang, WU Bin, LI Wu-feng, *et al.* Discussion on development trend of battery electric vehicles in China and its energy supply mode[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(4): 1—5. (In Chinese)
- [6] 陈良亮, 张浩, 倪峰, 等. 电动汽车能源供给设施建设现状与发展探讨[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(14): 11—17.
CHEN Liang-liang, ZHANG Hao, NI Feng, *et al.* Present situation and development trend for construction of electric vehicles energy supply infrastructure[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(14): 11—17. (In Chinese)
- [7] 周逢权, 连湛伟, 王晓雷, 等. 电动汽车充电站运营模式探析[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(21): 63—66.
ZHOU Feng-quan, LIAN Zhan-wei, WANG Xiao-lei, *et al.* Discussion on operation mode to the electric vehicle charging station[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(21): 63—66. (In Chinese)
- [8] 曹一家, 苗轶群, 江全元. 含电动汽车换电站的微电网孤岛运行优化[J]. *电力系统自动化*, 2012, 32(5): 1—6.
CAO Yi-jia, MIAO Yi-qun, JIANG Quan-yuan, *et al.* Optimal operation of islanded microgrid with battery swap stations[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2012, 32(5): 1—6. (In Chinese)
- [9] HAWKES A D, LEACH M A. Modelling high level system design and unit commitment for a microgrid[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(7/8): 1253—1265.
- [10] MOHAMED F A, KOIVO H N. System modeling and online optimal management of MicroGrid using mesh adaptive direct search[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy System*, 2010, 32(5): 398—407.
- [11] CHEN S C, CAI D T, LIU B, *et al.* Smart energy management system for optimal microgrid economic operation[J]. *IEE Proceedings: Renewable Power Generation*, 2011, 5(3): 258—267.
- [12] KRIETT P O, SALANI M. Optimal control of a residential microgrid[J]. *Energy*, 2012, 42(4): 321—330.
- [13] HERNANDEZ-ARAMBURO C A, GREEN T C, MUGNIOT N, *et al.* Fuel consumption minimization of a microgrid[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, 41(3): 673—681.
- [14] 余廷芳, 林中达. 部分解约束算法在机组负荷优化组合中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(2): 107—112.
YU Ting-fang, LIN Zhong-da. Application of float genetic algorithms-partially solved combined with punishing function in power plant units commitment problem[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(2): 107—112. (In Chinese)
- [15] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, *et al.* A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182—197.
- [16] 申彩英, 夏超英. 基于改进型动态规划算法的串联混合动力汽车控制策略[J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(3): 427—432.
SHEN Cai-ying, XIA Chao-ying. Control strategy of series hybrid electric vehicle based on improved dynamic programming[J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(3): 427—432. (In Chinese)
- [17] 李炳宇, 萧蕴诗, 吴启迪. 一种基于粒子群算法求解约束优化问题的混合算法[J]. *控制与决策*, 2004, 19(7): 804—807.
LI Bing-yu, XIAO Yun-shi, WU Qi-di. Hybrid algorithm based on particle swarm optimization for solving constrained optimization problems[J]. *Control and Decision*, 2004, 19(7): 804—807. (In Chinese)
- [18] SANEIFARD S, PRASAD N R, SMOLLECK H A. A fuzzy logic approach to unit commitment[J]. *IEEE Transactions on Power System*, 1991, 6(3): 1231—1237.
- [19] JANTZEN J, ELIASSEN B. Fuzzy array approach to unit commitment [C]//*Proceedings of the Fourth International Conference on Power System Control and Management*. London, U K: The Institute of Electrical Engineers Press, 1996: 47—51.
- [20] 金鹏, 艾欣, 许佳佳. 基于序列运算理论的孤立微电网经济运行模型[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(25): 52—59.
JIN Peng, AI Xin, XU Jia-jia. An economic operation model for isolated microgrid based on sequence operation theory[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(25): 52—59. (In Chinese)
- [21] KARKI R, HU P, BILLINTON R. A simplified wind power generation model for reliability evaluation[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006, 21(2): 533—540.
- [22] CHAOUACHI A, KAMEL R M, ANDOULSI R, *et al.* Multiobjective intelligent energy management for a microgrid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(4): 1688—1699.
- [23] SINGH M, KUMAR P, KAR I. Implementation of vehicle to grid infrastructure using fuzzy logic controller[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(1): 565—577.

作者: 余岳, 粟梅, 孙尧, 董密, YU Yue, SU Mei, SUN Yao, DONG Mi
作者单位: 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙, 410083
刊名: 湖南大学学报 (自然科学版) 
英文刊名: Journal of Hunan University (Natural Sciences)
年, 卷(期): 2014(10)

参考文献(23条)

1. LASSETER R H. Microgrid[C]//Proceedings of 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. New York: IEEE, 2002:305-308. 2002
2. 戴上, 张焰, 祝达康 含有微电网的配电网规划方法[期刊论文]-电力系统自动化 2010(22)
3. 王成山, 王守相 分布式发电供能系统若干问题研究[期刊论文]-电力系统自动化 2008(20)
4. ZELAZO D, DAI R, MESBAHI M. An energy management system for off-grid power systems[J]. Energy, 2012, 42(1):321-330. 2012
5. 张文亮, 武斌, 李武峰, 来小康 我国纯电动汽车的发展方向及能源供给模式的探讨[期刊论文]-电网技术 2009(04)
6. 陈良亮, 张浩, 倪峰, 朱金大 电动汽车能源供给设施建设现状与发展探讨[期刊论文]-电力系统自动化 2011(14)
7. 周逢权, 连湛伟, 王晓雷, 杨校辉, 徐怡山 电动汽车充电站运营模式探析[期刊论文]-电力系统保护与控制 2010(21)
8. 曹一家, 苗铁群, 江全元 含电动汽车换电站的微电网孤岛运行优化[期刊论文]-电力自动化设备 2012(05)
9. HAWKES A D, LEACH M A. Modelling high level system de-sign and unit commitment for a microgrid[J]. Applied Energy, 2009, 86(7/8):1253-1265. 2009
10. MOHAMED F A, KOIVO H N. System modeling and online optimal management of MicroGrid using mesh adaptive direct search[J]. International Journal of Electrical Power & Energy System, 2010, 32(5):398-407. 2010
11. CHEN S C, CAI D T, LIU B, et al. Smart energy management system for optimal microgrid economic operation [J]. IEE Proceedings: Renewable Power Generation, 2011, 5(3):258-267. 2011
12. KRIETT P O, SALANI M. Optimal control of a residential microgrid[J]. Energy, 2012, 42(4):321-330. 2012
13. HERNANDEZ-ARAMBURO C A, GREEN T C, MUGNIOT N, et al. Fuel consumption minimization of a microgrid [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(3):673-681. 2005
14. 余廷芳, 林中达 部分解约束算法在机组负荷优化组合中的应用[期刊论文]-中国电机工程学报 2009(02)
15. DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2):182-197. 2002
16. 申彩英, 夏超英 基于改进型动态规划算法的串联混合动力汽车控制策略[期刊论文]-控制理论与应用 2011(03)
17. 李炳宇, 萧蕴诗, 吴启迪 一种基于粒子群算法求解约束优化问题的混合算法[期刊论文]-控制与决策 2004(07)
18. SANEIFARD S, PRASD N R, SMOLLECK H A. A fuzzy logic approach to unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power System, 1991, 6(3):1231-1237. 1991
19. JANTZEN J, ELIASSON B. Fuzzy array approach to unit commitment [C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Power System Control and Management. London, U K: The Institute of Electrical Engineers Press, 1996:47-51. 1996
20. 金鹏, 艾欣, 许佳佳 基于序列运算理论的孤立微电网经济运行模型[期刊论文]-中国电机工程学报 2012(25)
21. KARKI R, HU P, BILLINTON R. A simplified wind power generation model for reliability

[evaluation\[J\]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21\(2\):533-540. 2006](#)

22. [CHAOUACHI A, KAMEL R M, ANDOULSI R, et al. Mul-tiobjective intelligent energy management for a microgrid\[J\]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60\(4\):1688-1699. 2013](#)

23. [SINGH M, KUMAR P, KAR I. Implementation of vehicle to grid infrastructure using fuzzy logic controller \[J\]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3\(1\):565-577. 2012](#)

引用本文格式：余岳. 栗梅. 孙尧. 董密. [YU Yue. SU Mei. SUN Yao. DONG Mi 基于模糊去约束法的V2 M系统运行优化](#)
[期刊论文]-[湖南大学学报（自然科学版）](#) 2014(10)