

基于模糊去约束法的微电网系统运行优化*

余岳, 粟梅, 孙尧, 韩华
(中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)

摘要: 在微电网的运行优化中,由于电池约束条件的特殊性,系统运行优化是含非线性约束的优化问题,因此通常采用诸如 PSO 算法、动态规划等算法进行求解。这类算法普遍存在求解效率不高的问题。选取一个含有光伏发电、风力发电、燃气轮机、电池储能单元所组成的并网型微电网运行优化问题作为研究对象,提出一种模糊去约束法,将电池约束去除,将微电网含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,系统的优化效率有了显著的提高。

关键词: 微电网; 模糊控制; 去约束; 运行优化

中图分类号: TM715 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.40

Microgrid system optimal scheduling based on fuzzy control constraint reduction

Yu Yue, Su Mei, Sun Yao, Han Hua

(School of Information Science & Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In the optimization of micro-grid system operation, due to the particularity of the battery constraint, the optimization of the system operation is an optimization problem containing nonlinear constraints; the algorithms, such as PSO algorithm, dynamic programming algorithm are usually used for the system solution. These algorithms generally have low efficiency. In this paper, the operation optimization problem of a micro-grid power system consisting of photovoltaic power generation, wind power generation, gas turbine and battery energy storage unit is taken as the study object; a fuzzy control constraint reduction method is proposed. The battery constraint is removed, and the optimization problem of the micro-grid with nonlinear constraints is transformed into a linear optimization problem. Compared with traditional optimization methods, the new fuzzy control constraint reduction method improves the system optimization efficiency significantly.

Keywords: microgrid; fuzzy control; constraint reduction; operation optimization

1 引言

电能相对于其他常用的能源,具有清洁、便利等特点,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。

微电网的经济性是吸引用户并能在电力系统中得以推广的关键所在,所以微电网的优化运行是微电网的研

究重点之一。在满足负荷需求的前提下,考虑微电网的运行成本,合理、有效地安排微电网各分布式电源的出力,可以实现微电网的经济运行^[5-6]。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。而且,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^[7-9]。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^[10-11]、动态规划算法^[12]、改进的粒子群算法^[13]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

收稿日期: 2013-10 Received Date: 2013-10

* 基金项目: 国家自然科学基金(61174125)资助项目

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[14]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[15]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。

通过分析微电网运行过程中电池的数学模型和工作方式,针对储能电池单元的约束条件,本文提出一种模糊去约束法,在基于对用电负荷、光伏和风力发电出力有效监测和预测的条件下,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。通过两例算例场景对比,相比传统优化方法,新方法的优化结果为次优解,但是优化效率上有了十分显著的提高,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。

2 系统运行优化传统模型

2.1 光伏发电出力的数学模型

光伏出力模型^[16]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:

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

式中:

$$C_1 = (1 - I_{mp}/I_{sc}) \exp[-U_{mp}/(C_2 U_{oc})]$$

$$C_2 = \left(\frac{U_{mp}}{U_{oc}} - 1\right) \ln\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right)$$

$$\Delta I = \alpha \left(\frac{R}{R_{ref}}\right) \Delta T + \left(\frac{R}{R_{ref}} - 1\right) I_{sc}$$

$$\Delta V = U_{pv} - U_{mp}$$

$$\Delta T = T_c - T_{ref}$$

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、太阳辐射和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:

$$P_{pv} = U_{pv} I_{pv} \quad (2)$$

2.2 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^[17-18],风速的概率密度函数 $f(v)$ 为:

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

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:

$$P_w = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \\ k_1 v + k_0 & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_r & v_r \leq v < v_{co} \\ 0 & v > v_{co} \end{cases} \quad (4)$$

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

式中: 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。

2.3 储能单元电池模型^[12]

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:

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

电池充电时满足:

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

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。

2.4 微电网运行优化目标函数

微电网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^[19-20]。目标函数可表示为:

$$\min F = \sum_{t=0}^T [C_u P_u(t) + C_t P_t(t) - C_s P_s(t)] \quad (7)$$

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; 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。

2.5 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

$$P_u(t) + P_t(t) - P_s(t) + P_{batt}(t) = P_{load}(t) - P_{pv}(t) - P_{wt}(t), \quad \forall t \quad (8)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_s(t) \\ 0 \leq P_u(t) \end{cases}, \forall t \quad (9)$$

式中: $P_{pv}(t)$ 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; $P_{wt}(t)$ 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

$$P_t^{\min} \leq P_t(t) \leq P_t^{\max}, \forall t \quad (10)$$

式中: P_t^{\min} 、 P_t^{\max} 为燃气轮机最小输出功率和最大输出功率。

3) 储能单元约束

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:

$$0 \leq P_{batt}^d(t) \leq P_{batt}^{dmax}, \forall t \quad (11)$$

$$0 \leq P_{batt}^c(t) \leq P_{batt}^{cmax}, \forall t \quad (12)$$

电池容量限制约束为:

$$SOC_{batt}^{min} \leq SOC_{batt}(t) \leq SOC_{batt}^{max}, \forall t \quad (13)$$

P_{batt}^{dmax} 、 P_{batt}^{cmax} 、 SOC_{batt}^{min} 、 SOC_{batt}^{max} 分别为电池最大放电功率、电池最大充电电功率、电池最小电荷状态、电池最大电荷状态。

3 系统运行优化改进模型

3.1 去约束基本思想

传统优化模型中,目标函数式(7)中有 3 变量,而等式约束条件式(8)中包括 $P_{batt}(t)$ 在内有 4 变量,且电池充放电功率还与 SOC 相关联,由式(8)~(13)构成了一系列的复杂约束。整个优化问题是一个带非线性约束的优化问题。

通过分析微电网的运行特点可以发现,在微电网运行的某些时段,如果通过有效的监测手段和基本准确的预测方法,对系统负载、天气条件有相对准确的评估和预测,从而能够确定系统 24 h 内的负载情况和分布式发电的出力数据。基于这些数据,电池的充放电过程有其特殊的规律可以遵循,例如:在凌晨 1 点到凌晨 5 点之间,电网负荷通常很低,电价此时也相对较低,如果这个时间段风力发电出力强劲,而且当前电池电荷状态偏少时,面对即将到来的上午负荷的高峰期做准备,富余的电力应该充入电池,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,如果根据外部条件和经验就能确定电池的充放电功率,那么式(8)中 $P_{batt}(t)$ 就是确定量,式(8)就转化为 3 变量的等式约束,同时式(11)~(13)都将约束条件中去除。最后系统的优化模型就被改进为:

$$\begin{cases} \min F = \sum_{t=0}^T [C_u P_u(t) + C_r P_r(t) - C_s P_s(t)] \\ \text{s. t.} \\ P_u(t) + P_r(t) - P_s(t) = \\ P_{load}(t) - P_{pv}(t) - P_{wt}(t) - P_{batt}(t), \forall t \\ 0 \leq P_s(t), \forall t \\ 0 \leq P_u(t), \forall t \\ P_r^{min} \leq P_r(t) \leq P_r^{max}, \forall t \end{cases} \quad (14)$$

显然,式(14)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的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。

3.2 基于模糊专家系统的电池调度

实现式(14)的关键是根据实际条件,在全局的条件下,也就是在一天 24 h 范围内,根据当前条件和未来预测,合理地给出 $P_{batt}(t)$,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^[21]求解 $P_{batt}(t)$ 。

电池调度主要参考 5 个输入参数:24 h 范围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 。根据专家经验设置的输入隶属度函数^[7]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,Mr 表示凌晨至上午时段,Md 表示中午至下午时段,N 表示下午至晚间。图 1(b)描述电池电荷状态 $BSOC$,VL 表示电池电荷状态很低,L 表示电池电荷状态低,M 表示电池电荷状态处于中等状态,H 表示电池电荷状态高。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。

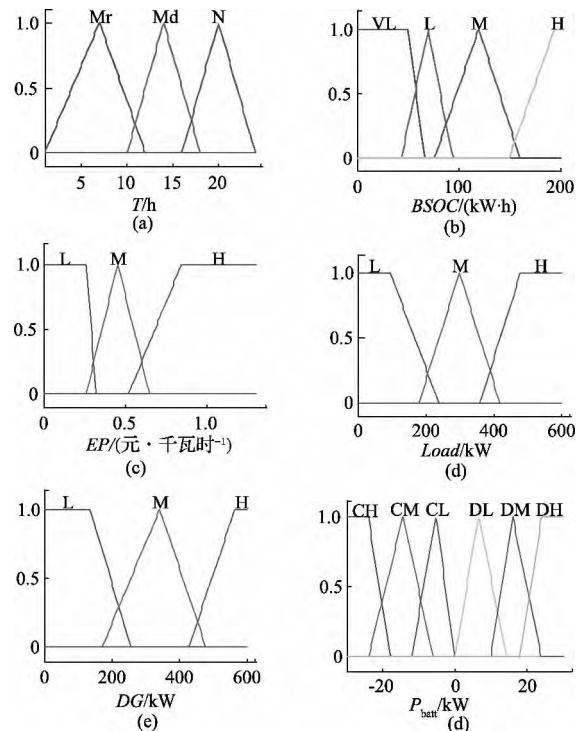


图 1 储能单元电池输入输出隶属度函数

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(15)所示。

If (T is “Mr”) and ($BSOC$ is “L”) and (EP is “L”) and ($Load$ is “L”) and (DG is “M”) Then (P_{batt} is “CM”)

式(15)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 点左右和晚间 21 点左右将有 2 次负载高峰到来,上午 11 点开始 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,制定系统和全面的控制规则,从而获得相对合理的 $P_{batt}(t)$ 。

4 算例分析

4.1 算例方案 1

本文以某地区的微电网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: $SOC_{max} = 200 \text{ kW} \cdot \text{h}$, $SOC_{min} = 50 \text{ kW} \cdot \text{h}$,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。该地区总的负载为 600 kW。一天 24 h 内,光伏出力 P_v 、风力发电出力 P_w 、负载 P_{load} 预测值如图 2 所示,电网电价如表 1 所示。

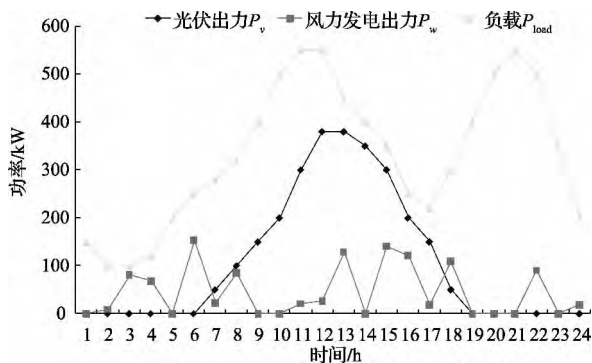


图 2 算例 1 24 h 微源与负荷的预测功率

Fig. 2 The forecast power of DGs and load in 24 h (scenario 1)

表 1 24 h 不同时段的电价

Table 1 The price for different periods in 24 h

时段	元/千瓦时		
	峰时段 8-11 时、18-21 时	平时段 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	0.800	0.500	0.200

4.1.1 求解与分析

1) 传统优化方法结果分析

采用传统优化模型,即对式(7)~(13)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 2 768.2 元,求解耗时 353.514 354 s,系统优化运行结果如图 3 所示。

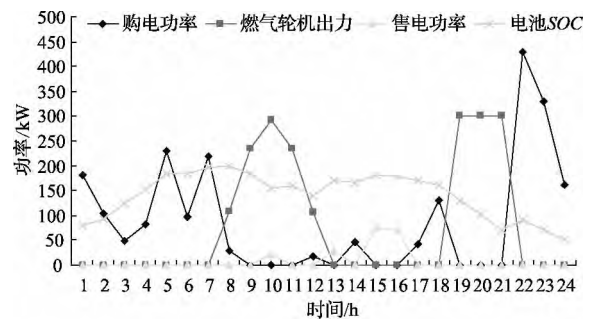


图 3 算例 1 传统优化模型 24 h 系统功率优化调度结果

Fig. 3 The system power optimization scheduling results for traditional optimization model in 24 h (scenario 1)

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(14)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 2 862.6 元,求解耗时 0.943 615 s,系统优化运行结果如图 4 所示。

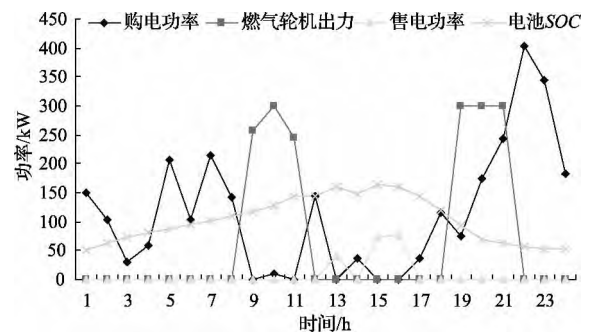


图 4 算例 1 模糊去约束法 24 h 系统功率优化调度结果

Fig. 4 The system power optimization scheduling results for the fuzzy control constraint reduction method in 24 h (scenario 1)

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 3.41% ,

2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0.267%,优化效率远高于传统模型法。

在微电网运行优化过程中,虽然24h内的电网负荷存在随机变化,特别是风电、太阳能电站出力变化剧烈且随不同的季节而变化,但是如果基于有效的监测手段,在负载或者是光伏和风力发电出力能够相对准确预测的时段采用“模糊去约束法”,在其他不能准确预测时段采用“传统模型法”,那么“模糊去约束法”对于微电网运行优化仍有使用条件和价值。同时,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。

表2 算例1传统优化方法与模糊去约束法结果对比

Table 2 Result comparison between traditional optimization method and the fuzzy control constraint reduction method (scenario 1)

优化方法	优化时间/s	优化结果/元
传统模型法	353.514 354	2 768.2
模糊去约束法	0.943 615	2 862.6

4.2 算例方案2

以所在地区构建的微电网为例进行计算和分析。微电网包含公共电网,风力发电40kW、光伏发电20kW、蓄电池20kW·h、微型燃气轮机30kW。

对于蓄电池, $SOC_{max} = 20 \text{ kW} \cdot \text{h}$, $SOC_{min} = 5 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 最大充放电功率3kW,充放电效率0.9,优化开始电池初始SOC为5kW·h,优化结束时电池SOC为5kW·h,优化开始前和优化结束后,电池SOC保持不变,从而保证电池在系统优化工程中只起到能量转存作用,而不影响系统总的能量供给和消耗。

微电网所在地区总的负载约为60kW,某天24h内,光伏出力 P_v 、风力发电出力 P_w 、负载 P_{load} 的统计数值如图5所示,电网电价如表1所示。

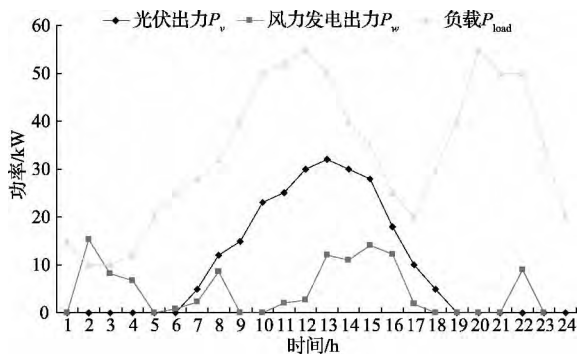


图5 算例2 24h微源与负荷的预测功率

Fig. 5 The forecast power of DGs and load in 24 h (scenario 2)

根据实际系统参数,相应修改输入隶属度函数,根据2.2节基于模糊专家系统的电池调度原则,修改新参数下的系统输入输出隶属度函数,新的输入隶属度函数如图6(a)~(e)所示。

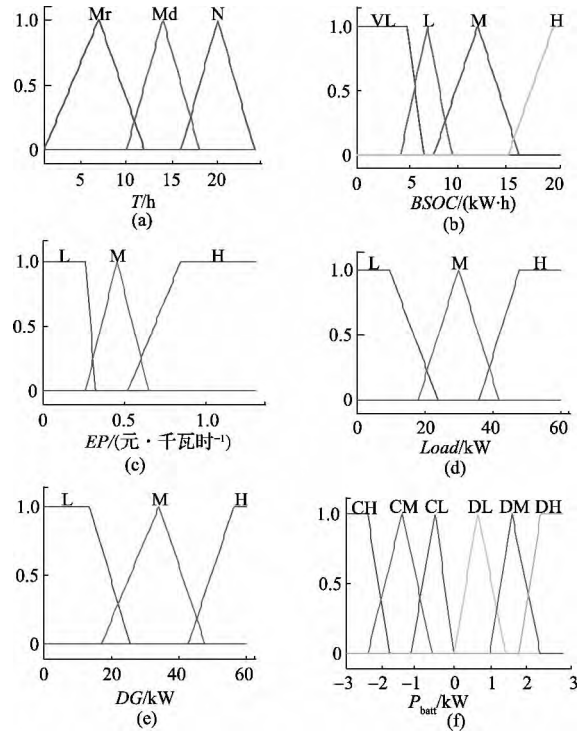


图6 算例2 储能单元电池输入输出隶属度函数
Fig. 6 Battery input and output membership functions (scenario 2)

1) 传统优化方法结果分析

针对传统优化模型,采用动态规划法求解,系统运行成本为306.8626元,求解耗时351.288219s,系统优化调度结果如图7所示。

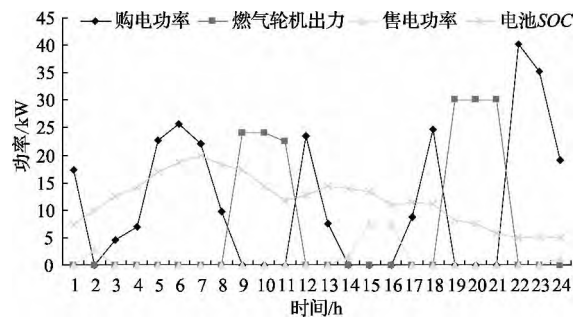


图7 算例2 传统优化模型 24h系统功率优化调度结果
Fig. 7 The system power optimization scheduling results for traditional optimization model in 24 h (scenario 2)

2) 模糊去约束法优化结果分析

采用模糊去约束法,优化算例2描述的系统,系统运行总成本319.6528元,求解耗时1.113413s,系统优化

调度结果如图 8 所示。

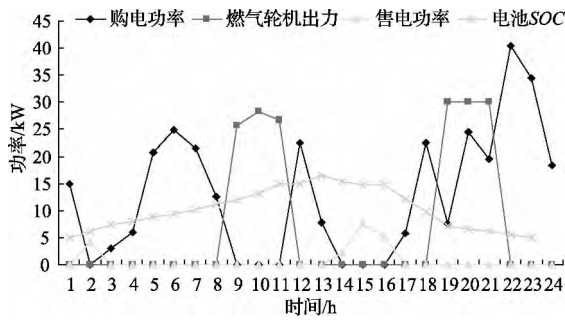


图 8 算例 2 模糊去约束法 24 h 系统功率优化调度结果

Fig. 8 The system power optimization scheduling results for the fuzzy control constraint reduction method in 24 h(scenario 2)

对于实际系统参数,与算例 1 相比,传统优化方法结果与改进优化方法对比结果如表 3 所示。模糊去约束法运行成本略高于传统模型法 4.00%。2 种方法优化的结果仍然比较相近。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 0.317%,优化效率同样远高于传统模型法。

表 3 算例 2 传统优化方法与模糊去约束法结果对比

Table 3 Result comparison between traditional optimization method and the fuzzy control constraint reduction method (scenario 2)

优化方法	优化时间/s	优化结果/元
传统模型法	351.288 219	306.862 6
模糊去约束法	1.113 413	319.652 8

5 结 论

在微电网并网运行的模型基础上,提出一种基于模糊去约束法的微电网经济运行模型。模型中利用模糊专家系统对微电网储能电池单元出力进行调度,将电池约束去除,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,也为微电网并网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]. Power Engineering Society Winter Meeting 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 2012,34(22):41-45.

DAI SH ,ZHANG Y ,ZHU D K. Distribution network planning method containing micro-grid [J]. Automation of Electric Power Systems 2011,34(22):41-45.
 [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):1-4,31.
 WANG CH SH ,WANG SH X. Study on some key problems related to distributed generation systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008,32(20):1-4,31.
 [4] ZELAZO D ,DAI R ,MESBAHI M , An energy management system for off-grid power systems [J]. Energy Syst. ,2012,3:153-179.
 [5] 冬雷,廖晓钟,刘广忱,等.分布式风光互补发电系统及其多目标优化控制策略研究[J].仪器仪表学报,2005,26(8):2553-2556.
 DONG L ,LIAO X ZH ,LIU G CH ,et al. Multi-index optimization control strategy based on distributed PV and wind energy complementary generation system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005,26(8):2553-2556.
 [6] 王占国,文锋,盛大双,等.新型充放电均衡一体化电池管理系统研究[J].电子测量与仪器学报,2012,26(5):431-436.
 WANG ZH G WEN F ,SHENG D SH ,et al. New battery management system of integrated charging and discharging balance [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument 2012,26(5):431-436.
 [7] 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.
 [8] KRIETT P O ,SALANI M. Optimal control of a residential microgrid[J]. Energy 2012,42(1):321-330.
 [9] HERNANDEZ-ARAMBURO C A ,GREEN T C ,MUGNIOT N. Fuel consumption minimization of a microgrid [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005,41(3):673-681.
 [10] 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 T F ,LIN ZH D. 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.
 [11] 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.

- [12] 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 C Y, XIA CH Y. Control strategy of series hybrid electric vehicle based on improved dynamic programming [J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(3): 427-432.
- [13] 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): 804-807 812.
LI B Y, XIAO Y SH, WU Q D. Hybrid algorithm based on particle swarm optimization for solving constrained optimization problems [J]. Control and Decision, 2004, 19(7): 804-807.
- [14] SANEIFARD S, PRASD N R, SMOLLECK H A. A fuzzy logic approach to unit commitment [J]. IEEE Trans. on Power System, 1991, 6(3): 1231-1237.
- [15] JANTZEN J, ELIASSON B. Fuzzy array approach to unit commitment [C]. Fourth International Conference on Power System Control and Management. London, UK: The Institute of Electrical Engineers Press, 1996: 47-51.
- [16] 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 P, AI X, XU J J. An economic operation model for isolated microgrid based on sequence operation theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 52-59.
- [17] 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.
- [18] 吴忠强,庄述燕,韩延光. 直驱永磁风电系统能量成形与最大风能捕获[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 343-351.
WU ZH Q, ZHUANG SH Y, HAN Y G. Energy shaping and maximum wind energy capture in direct-drive permanent-magnet wind power system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(2): 344-351.
- [19] 吴红斌,郭彩云. 计及电动汽车的分布式发电系统中储能单元的优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32: 15-21.
WU H B, GUO C Y. Capacity optimization of energy storage

unit in distribution generation system considering electric vehicle [J]. Proceeding of CSEE, 2012, 32: 15-21.

- [20] CHAOUACHI A, KAMEL R M, ANDOULSI R, et al. Multiobjective intelligent energy management for a Microgrid [J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2013, 60(4): 1688-1699.
- [21] SINGH M, KUMAR P, KAR I. Implementation of vehicle to grid infrastructure using fuzzy logic controller [J]. IEEE Trans. Smart Grid, 2012, 3(1): 565-577.

作者简介



余岳, 2007 年于中南大学获得硕士学位, 现为中南大学博士研究生, 主要研究方向为微电网运行优化、电力电子与电力传动。

E-mail: 68613367@qq.com

Yu Yue received M. Sc. degree from Central South University in 2007. Now, he is a Ph. D. candidate in Central South University. His main research interest is microgrid operation optimization, and power electronics and power drives.



粟梅, 分别于 1989、1992 和 2005 年于中南大学学士、硕士和博士学位, 现为中南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为矩阵变换器、电机调速驱动、风力发电系统。

Su Mei received her B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Central South University, in 1989, 1992 and 2005, respectively. Since 2006, she has been a professor Central South University. Her research interests include matrix converter, adjustable speed drive and wind energy conversion system.



韩华(通讯作者), 分别于 1998 和 2008 年在中南大学获得硕士和博士学位, 现为中南大学副教授, 主要研究方向为可再生能源发电、电力电子装置。

Han Hua (Corresponding author) received her M. Sc. and Ph. D. degrees both from Central South University in 1998 and 2008, respectively. She is an assistant professor with School of Information Science and Engineering, Central South University, China. Her current research interests include renewable energy power generation system and power electronic equipment.