

考虑安全性与可靠性的微电网电能优化调度

杨毅¹, 雷霞¹, 叶涛¹, 李挺², 徐贵阳¹

(1. 电力电子节能技术与装备重点实验室(西华大学), 四川省 成都市 610039;

2. 广安电业局, 四川省 广安市 638000)

Microgrid Energy Optimal Dispatch Considering the Security and Reliability

YANG Yi¹, LEI Xia¹, YE Tao¹, LI Ting², XU Guiyang¹

(1. Key Laboratory of Power Electronic Energy-saving Technology & Equipment (Xihua University), Chengdu 610039,

Sichuan Province, China; 2. Guangan Electrical Power Bureau, Guang'an 638000, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: Considering the factors including safety and economy, energy saving and environmental protection, efficiency and reliability, etc, the paper proposed an optimal load distribution method in microgrid. The model of economic dispatch of microgrid was set up to illuminate the intermittent uncertainty of power generation output, load and the system equipment which will have an influence on microgrid. In this model, the indexes of the voltage safety margin and the load loss rate were provided to satisfy the security and reliability of power system under the condition of system constraint. Meanwhile, the improved membrane computing algorithms (IMCA) was utilized to solve the mathematical model. The actual example analyzed the relationship between the economy and the security and reliability constraint indexes under the different confidence level of microgrid, which proved the validity of the proposed model and the effectiveness of the proposed method.

KEY WORDS: microgrid; energy optimal dispatch; load distribution optimization; uncertainty; security; reliability; improved membrane computing algorithms (IMCA)

摘要: 考虑微电网的安全与经济、节能环保、效率与可靠等诸多因素, 同时为消除间歇性发电设备出力、负荷以及系统设备的不确定因素带给微电网的影响, 实现微电网的负荷最优分配, 在满足系统约束条件下, 建立考虑不确定因素下含低估或高估费用的微电网经济调度模型。模型中设置了满足系统安全性与可靠性的电压安全裕度与失负荷率的安全约束指标, 同时利用改进的膜计算算法求解该数学模型。实

际算例分析了微电网经济性与不同置信水平下安全、可靠约束指标的关系, 验证了所提模型的正确性和求解方法的有效性。

关键词: 微电网; 电能优化调度; 负荷优化分配; 安全性; 可靠性; 改进膜计算算法

0 引言

随着电网结构和功能不断复杂化, 对电力系统经济、环保、可靠的要求越来越高。如何提高电力系统能源利用率、改善能源结构, 缓解能源需求与能源短缺、能源利用与环境保护之间的矛盾, 使电网走向清洁、安全、高效、可靠的发展道路已成为电网优化运行的难题与关键^[1-2]。为实现这一既定目标, 一方面, 电力调度需综合考虑机组燃料类型、能耗、机组启停费用、网损、污染物排放、电网安全等因素, 满足电网节能、环保、安全等方面的要求; 另一方面, 分布式电源(distributed generation, DG)以微电网形式并入到大电网中, 在一定程度上可以满足电网供电质量、供电可靠性以及供电安全性的要求, 但由于可再生能源固有的随机性和间歇性使得微电网优化调度模式变得复杂化, 因而对研究微电网调度方法和控制策略提出了新的挑战^[3-5]。

目前, 与上述问题相关的一些研究主要偏向于微电网经济与环保运行方面^[6-7]。文献[6]考虑微电网发电成本和环保成本条件下, 建立以运行费用最小的微电网经济调度模型, 同时考虑到该数学模型为离散的、非线性的优化问题, 利用混沌量子遗传算法求解该模型并确保发电计划的准确性和有效性。文献[7]提出了微电网最优运行策略和成本优化方案, 以微电网运行成本最小为目标函数, 目标函

基金项目: 国家自然科学基金项目(51007006); 电力电子节能技术与装备重点实验室开放基金(szjj2014-015); 四川省教育厅重点项目(11za002)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51007006); Supported by the Open Research Fund of Key Laboratory of Power Electronic Energy-saving Technology & Equipment (szjj2014-015); Key Program of Educational Department of Sichuan Province (11za002).

数中考虑微电网的运行维护成本和排污成本,利用 MSDS 算法求解微电网优化运行问题,仿真结果证明 MSDS 优于序列二次规划(sequential quadratic programming, SQP)算法。但是,微电网中负荷和间歇性 DG 机组出力随机性较大,概率分布也不尽相同,不确定性因素对微电网优化调度提出更大的挑战,对微电网安全、可靠、经济运行的研究还需进一步深入^[8-12]。文献[9]利用风速和负荷预测误差的概率分布函数来描述系统中不确定性因素,并在目标函数中加入风电计划出力相对于实际出力偏差造成的备用成本。文献[10]以条件风险值(conditional value at risk, CVaR)作为电网安全指标量化随机因素引起的不确定性,可在不同 CVaR 值和置信水平下获得相应的经济性或安全性的最优调度结果。文献[11]以发电成本最小和合同电量偏差最小为目标,建立电网安全约束经济调度模型,但难以确定许可度因子。文献[12]提出了一种基于互动电网的含多微电网电力系统调度模式,通过微电网与 DG、用户以及其他协议微电网间互动协调以消纳 DG 的不确定性。但以上文献都未考虑安全性、可靠性的微电网优化调度模型。

基于上述考虑,本文在考虑到微电网的风机、光伏电池的输出功率、负荷预测以及机组故障停运等不确定性因素的基础上,建立综合考虑可靠性与安全性的微电网系统负荷最优分配模型。模型中不仅考虑含低估或高估费用的微电网系统经济运行要求,同时兼顾微电网可靠性指标与安全运行指标以给定置信水平,该模型旨在为微电网调度提供更加有效的方法和措施。同时,采用改进的膜计算算法对其进行数值优化计算,并结合仿真算例验证上述方法的正确性和有效性。

1 考虑不确定性因素的微电网安全性与可靠性分析

1.1 不确定性因素下风险费用分析

本文考虑的微电网包含光伏电池(photovoltaic cell, PV)、风力发电(wind turbine, WT)、微型燃气轮机(micro turbine, MT)以及柴油机(diesel generator, DE),其中 PV 和 WT 为不可控电源,采用可再生能源最大化利用原则。MT 和 DE 为可控电源,同时微电网可以通过联络线向低压配电网(distribution network, DN)进行购电,MT、DE 和 DN 是微电网经济调度主要优化控制对象。

微电网的不确定性因素主要包括可再生能源

发电功率的不确定性、负荷预测误差以及机组故障停运的不确定性等。风力发电机的模型见文献[12],光伏电池和负荷的模型见文献[13],DG 故障停运状况通过随机数发生器随机模拟,具体的操作如下:利用随机数发生器产生 $[0,1]$ 区间的随机数 r ,如果随机数 r 小于机组的强迫停运率 s ,则机组停运;否则机组正常运行。以上不确定性因素将直接影响微电网优化调度方案。

为了减小不确定性因素对微电网优化调度的影响,微电网需增加部分风险费用以平衡功率预测偏差,因此,本文定义的微电网风险费用主要包括微电网所需承受的高估和低估费用,其表达式为

$$C_{\delta,t} = u_t C_{h,t} + (1 - u_t) C_{d,t} \quad (1)$$

式中: $C_{\delta,t}$ 为 t 时段高估或低估风险费用; u_t 为 t 时段互斥的 0-1 状态变量,当 u_t 为 0 时表示低估微电网中不确定性因素出力,当 u_t 为 1 时表示高估微电网中不确定性因素出力; $C_{h,t}$ 、 $C_{d,t}$ 分别为 t 时段微电网的高估费用和低估费用。

1) 高估费用。

高估费用是指当微电网中不确定性因素的预测出力总和高于实际出力总和时,微电网为平衡预测误差所需承担的风险费用。因此,本文的高估费用评估采用系统可靠性最高策略,即优先利用微电网系统中可控机组的正旋转备用以调整高估电量,不足的电量采用切负荷方式,以保证重要负荷的正常供电。因此,高估费用包括:①可控机组出力变化而增加的燃料费用和维护费用;②可控机组出力调整费用;③供电不足而引起中断负荷的补偿费用。高估费用表达式为

$$C_{h,t} = \begin{cases} \sum_{i=1}^n [C_{i,t}(P_{i,t} + \delta_{i,t}) - C_{i,t}(P_{i,t}) + K_i \delta_{i,t} + c_T \delta_{i,t}], & \delta_{h,t} \leq \sum_{i=1}^n r_{u,i} \Delta t \\ \sum_{i=1}^n [C_{i,t}(P_{i,t} + r_{u,i}) - C_{i,t}(P_{i,t}) + K_i r_{u,i} + c_T r_{u,i}] + c_{\text{loss}} \Delta P_{\text{loss},t}, & \sum_{i=1}^n r_{u,i} \Delta t < \delta_{h,t} \end{cases} \quad (2)$$

式中: n 为微电网中可控机组的个数; Δt 为机组运行时段长度; $C_{i,t}$ 为 t 时段可控机组 i 的燃料成本; $P_{i,t}$ 为 t 时段可控机组 i 有功功率计划出力; $\delta_{i,t}$ 为 t 时段可控机组 i 的调整功率; $r_{u,i}$ 为第 i 台可控机组的向上爬坡速率; K_i 为第 i 台 DG 的单位维护费用; c_T 为可控机组单位功率调整费用; $\delta_{h,t}$ 为 t 时段高估电量; c_{loss} 为中断负荷单位功率补偿费用; $\Delta P_{\text{loss},t}$

为 t 时段失负荷电量。

高估电量 $\delta_{h,t}$ 表达式为

$$\delta_{h,t} = (P_{L,t} \pm \delta_t^L) - [\sum_{i=1}^m k_{i,t} P_{i,t} + (P_{line,t} + R_{line,t}) + \sum_{j=1}^w k_{j,t} (P_{j,t} \pm \delta_{j,t}^w) + \sum_{l=1}^v k_{l,t} (P_{l,t} \pm \delta_{l,t}^s)] \quad (3)$$

式中: m 、 w 、 v 分别为可控机组、WT 和 PV 的数量; $P_{line,t}$ 为 t 时段微电网向 DN 计划购电电量; $k_{*,t}$ 为 0-1 状态变量, 表示 t 时段 DG 的开停状态; δ_t^L 、 $\delta_{j,t}^w$ 和 $\delta_{l,t}^s$ 分别为 t 时段负荷预测误差、WT 出力误差和 PV 出力误差; $R_{line,t}$ 为 t 时段微电网向 DN 计划购入旋转备用容量; $P_{j,t}$ 、 $P_{l,t}$ 、 $P_{L,t}$ 分别为 t 时段 WT、PV 和负荷的预测值。

失负荷电量 $\Delta P_{loss,t}$ 表达式为

$$\Delta P_{loss,t} = \delta_{h,t} - \sum_{i=1}^n r_{u,i} \Delta t \quad (4)$$

2) 低估费用。

低估费用是指当微电网不确定性因素的预测出力总和低于实际出力总和时, 微电网为平衡预测误差所需承担的风险费用。低估费用采用资源浪费最小化策略, 即优先利用微电网系统可控机组的负旋转备用调整低估电量, 而多余的电量采用罚款的形式计入低估费用中。因此, 低估费用包括: ①可控机组的出力变化而减少的燃料费用和维护费用; ②可控机组出力调整费用; ③资源浪费而造成的惩罚费用。低估费用表达式为

$$C_{d,t} = \begin{cases} \sum_{i=1}^n [C_{i,t} (P_{i,t} - \delta_{i,t}) - C_{i,t} (P_{i,t}) - K_i \delta_{i,t} + c_T \delta_{i,t}], & \delta_{d,t} \leq \sum_{i=1}^n r_{d,i} \Delta t \\ \sum_{i=1}^n [C_{i,t} (P_{i,t} - r_{d,i}) - C_{i,t} (P_{i,t}) - K_i r_{d,i} + c_T r_{d,i}] + c_{pun} \Delta P_{was,t}, & \sum_{i=1}^n r_{d,i} \Delta t < \delta_{d,t} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\delta_{d,t}$ 为 t 时段低估电量; $r_{d,i}$ 表示为第 i 台可控机组的向下爬坡速率; c_{pun} 为资源浪费单位功率惩罚费用; $\Delta P_{was,t}$ 为 t 时段浪费电量。

低估电量 $\delta_{d,t}$ 表达式为

$$\delta_{d,t} = \sum_{i=1}^m k_{i,t} P_{i,t} + \sum_{j=1}^w k_{j,t} (P_{j,t} \pm \delta_{j,t}^w) + P_{line,t} + \sum_{l=1}^v k_{l,t} (P_{l,t} \pm \delta_{l,t}^s) - (P_{L,t} \pm \delta_t^L) \quad (6)$$

浪费电量 $\Delta P_{was,t}$ 表达式为

$$\Delta P_{was,t} = \delta_{d,t} - \sum_{i=1}^n r_{d,i} \Delta t \quad (7)$$

1.2 微电网安全性与可靠性约束分析

1.2.1 节点电压安全裕度

为保障微电网系统中各元器件安全运行, 系统的节点电压必须规定在一定范围内。本文定义微电网安全性指标即电压安全裕度 (voltage security margin, VSM), 表示为微电网最小节点电压偏差安全裕度以给定的置信水平要求。

$$M_{VSM} = P[\min \frac{\Phi \|\delta U_i\| - \|\Delta U_{i,t}\|}{\|\delta U_i\|} \geq \xi] \geq \beta \quad (8)$$

式中: $\Delta U_{i,t}$ 为 t 时段节点 i 的电压偏差量; δU_i 为节点 i 允许的最大节点电压偏差, 本文取为额定值的 $-8\% \sim +5\%$; ξ 为微电网安全裕度的门限值; β 为微电网节点电压安全裕度的置信水平; 函数 Φ 为 0-1 状态变量, 其计算公式表示为

$$\Phi = \begin{cases} 1, & |\Delta U_{i,t}| \leq |\delta U_i| \\ 0, & |\Delta U_{i,t}| > |\delta U_i| \end{cases} \quad (9)$$

1.2.2 供电可靠水平

微电网中的不确定性因素导致高估系统出力, 在满足系统可靠性前提下, 为保障微电网系统能为用户提供优质的电能, 本文定义微电网供电可靠性指标即失负荷概率 (loss of load probability, LOLP), 表示为微电网系统总输出功率小于系统总负荷的概率。因此, 不确定性因素下的微电网系统供电可靠性表示为系统失负荷概率以给定的置信水平要求。

$$P_{LOLP} = P[\sum_{i=1}^m k_{i,t} (P_{i,t} + r_{u,i}) + (P_{line,t} + R_{line,t}) + \sum_{j=1}^w k_{j,t} (P_{j,t} \pm \delta_{j,t}^w) + \sum_{l=1}^v k_{l,t} (P_{l,t} \pm \delta_{l,t}^s) \leq P_{L,t} \pm \delta_t^L] \leq 1 - \gamma \quad (10)$$

式中 γ 为微电网系统可靠性的置信水平。

2 考虑安全性与可靠性的微电网经济调度

2.1 微电网经济调度数学模型

微电网经济调度问题需将可控机组出力分配与微电网安全、可靠运行进行联合优化, 在满足功率平衡约束、安全运行约束、机组出力约束以及实时运行约束的前提下, 微电网系统以运行成本最小为目标, 实现微电网安全、可靠、经济的优化调度。微电网在实际运行过程中, 其运行成本主要考虑计划成本和风险成本, 计划成本主要包括燃料成本、维护成本和主网计划交换成本。综上分析, 采用机会约束规划的微电网经济调度目标函数表示为

$$\begin{cases} \text{Min } F \\ P\{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n [C_{\delta,t}(\delta_{d,t}, \delta_{h,t}) + C_{\text{line},t}(P_{\text{line},t}, R_{\text{line},t}) + \\ C_{i,t}(P_{i,t}) + CM_{i,t}(P_{i,t})] \leq F\} \geq \alpha \end{cases} \quad (11)$$

式中: T 为微电网调度周期的时段数; $C_{\text{line},t}$ 为 t 时段微电网通过联络线与 DN 交换费用; $CM_{i,t}$ 为 t 时段可控机组 i 的维护费用; α 为容忍度, 表示最大允许目标函数偏离的程度; F 为系统运行成本。

1) 燃料成本。

由于微电网中 PV 和 WT 为清洁可再生能源发电, 不会消耗化石燃料, 在计算燃料成本时只考虑消耗化石燃料的可控机组, 柴油机组其燃料成本用二次多项式函数近似表示为^[13]

$$C_{i,t}^{DE}(P_{i,t}) = A + B \times P_{i,t} + C \times P_{i,t}^2 \quad (12)$$

式中: A 、 B 、 C 为可控机组的燃料成本系数, 可以通过其耗量特性曲线拟合得到。

对于微型燃气轮机, 燃料成本与运行效率和输出功率有关。其燃料消耗成本^[14]近似表示为

$$C_{i,t}^{MT}(P_{i,t}) = \frac{C_{nl}}{L} \sum_J \frac{P_{i,t}}{\eta} \quad (13)$$

式中: C_{nl} 为天然气价格; L 为天然气低热值; η 为时间间隔 J 内的机组效率。

2) 维护成本。

微电网的维护成本正比于 DG 有功功率出力, 其表达式为

$$CM_{i,t}(P_{i,t}) = K_i \times P_{i,t} \quad (14)$$

3) 计划交换费用。

由于微电网受不确定性因素的影响, 微电网需要向 DN 购电的同时还需购买旋转备用以平衡微电网系统功率波动。因此, 微电网计划交换费用为购电成本与旋转备用成本总和, 其表达式为

$$C_{\text{line},t}(P_{\text{line},t}, R_{\text{line},t}) = \lambda_{\text{line},t} P_{\text{line},t} + \lambda_{r,t} R_{\text{line},t} \quad (15)$$

式中: $\lambda_{\text{line},t}$ 为 t 时段 DN 售电电价; $\lambda_{r,t}$ 为 t 时段 DN 旋转备用价格。

2.2 约束条件

为保证微电网安全、可靠、经济的运行, 除满足式(8)–(10)外, 还需满足如下的约束条件:

1) DG 出力约束。

$$P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \quad (16)$$

式中 $P_{i,\min}$ 、 $P_{i,\max}$ 为第 i 台 DG 出力下限和上限。

2) 微电网功率平衡约束。

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^m k_{i,t}(P_{i,t} \pm \delta_{i,t}) + \sum_{j=1}^w k_{j,t}(P_{j,t} \pm \delta_{j,t}^w) + \Delta P_{\text{loss},t} + \\ & \sum_{l=1}^v k_{l,t}(P_{l,t} \pm \delta_{l,t}^s) + (P_{\text{line},t} + \delta_{\text{line},t}) = P_{L,t} \pm \delta_t^L \end{aligned} \quad (17)$$

式中 $\delta_{\text{line},t}$ 为 t 时段 DN 与微电网交换功率的调整量, 且有 $\delta_{\text{line},t} \leq R_{\text{line},t}$ 。

3) 微电网与主网联络线传输功率约束。

$$P_{\text{line},\min} \leq P_{\text{line},t} \leq P_{\text{line},\max} \quad (18)$$

式中 $P_{\text{line},\max}$ 、 $P_{\text{line},\min}$ 分别为联络线的传输功率上限和下限。

4) 可控机组爬坡率约束。

$$-r_{d,i} \Delta t \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq r_{u,i} \Delta t \quad (19)$$

5) 输电线路传输功率安全约束。

为保障输电线路安全运行, 各支路的输送功率必须小于支路允许输送功率的最大值。

$$\left| \sum_i [(P_{i,t} - l_{i,t}) S_{i,j,t}] \right| \leq p_{i,j,\max} \quad (20)$$

式中: $i \in M$, M 为微电网总节点数; $l_{i,t}$ 为节点 i 在第 t 时段的负荷功率; $S_{i,j,t}$ 为节点 i 第 t 时段的注入功率对支路 $i-j$ 的灵敏度; $p_{i,j,\max}$ 为支路 $i-j$ 允许输送功率的最大值。

3 改进的膜计算算法

膜计算(membrane computing)是由欧洲科学院院士、罗马尼亚学院院士 Gheorghe Păun 于 1998 年在芬兰图尔库计算机研究中心的研究报告中提出, 膜计算是从活细胞以及细胞的组织或器官的功能和结构中抽象出的模型和思想^[15-16]。该算法的最大特点是计算能力强和计算效率高。因此, 利用膜计算的优点可以用于求解电力调度复杂问题。

本文在膜计算算法基础上提出了改进的膜计算算法(improved membrane computing algorithms, IMCA)。算法中细胞模型中包含一个表层膜和两个子系统 SUB , 其中 $SUB_i = [sub_{i,1}, sub_{i,2}, \dots, sub_{i,N}]$, 当 $N=3$ 时表示子系统 SUB 中包含内层膜、中间膜和外层膜, 每层膜中包括种群数为 n 的子种群 $sub_{i,j} = [P_{*,1}, P_{*,2}, \dots, P_{*,n}]$, 每个子系统在计算过程中采用并行计算规则, 该算法主要包括交流、进化、选择、膜融合和分裂以及变异等 5 个过程。

本文采用 IMCA 求得微电网负荷最优分配的流程如图 1 所示。

利用 IMCA 求解微电网调度的具体步骤如下:

1) 数据进行初始化, 包括负荷、风速、光照、

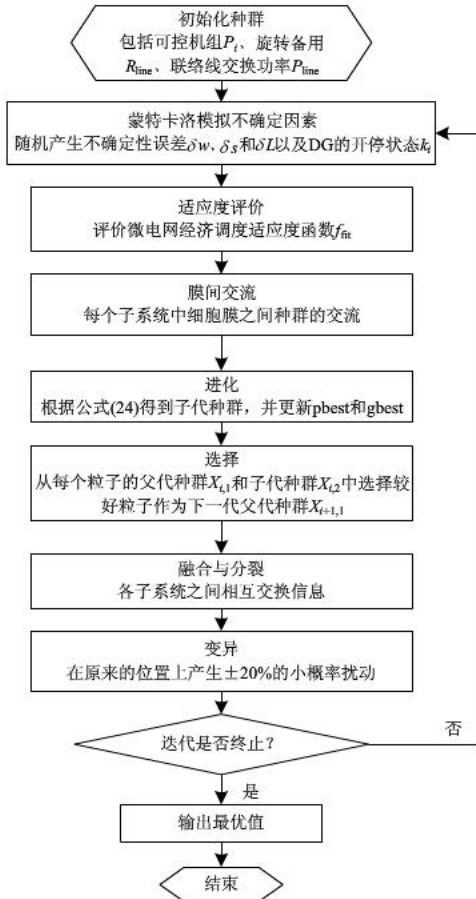


图1 利用IMCA求解微电网调度问题流程图

Fig. 1 Calculation flow chart of the improved membrane computing in solving the dispatch of microgrid

电价等,随机生成种群数为 N 的粒子,其中每个粒子由 MT 出力、DE 出力、联络线交换功率以及计划备用容量组成,初始输出功率 P_* 表示为

$$P_* = P_{*,\min} + (P_{*,\max} - P_{*,\min})\theta \quad (21)$$

式中: $P_{*,\max}$ 和 $P_{*,\min}$ 分别为 P_* 的上、下限; θ 为位于 0-1 之间的随机数。

2) 利用蒙特卡罗法模拟风速、光照以及负荷的波动量以及机组的故障停运状态。

3) 根据式(11)计算微电网经济调度的目标函数 F 与式(8)~(10)、(17)、(20)计算不满足约束条件的惩罚项 P_{eq} , 并利用目标函数和惩罚项之和得到该粒子的适应度值 f_{fit} :

$$f_{fit} = F + \sum_{i=1}^M \varphi P_{eq,i} \quad (22)$$

式中: $P_{eq,i}$ 为不满足能量约束条件的惩罚量; φ 为惩罚因子。

4) 膜间交流。将第 N 层膜 $[]_N$ 中较差的 q 个 $P_{*,q}^{\text{worse}}$ 与第 $N-1$ 层膜 $[]_{N-1}$ 中较好的 q 个 $P_{*,q}^{\text{best}}$ 进行互换。同时,复制外层膜的最优值并存入表层膜,其

过程表示为

$$[P_{*,n-q}, P_{*,q}^{\text{best}}]_{N-1} + [P_{*,q}^{\text{worse}}, P_{*,n-q}]_N \rightarrow [P_{*,n-q}, P_{*,q}^{\text{worse}}]_{N-1} + [P_{*,q}^{\text{best}}, P_{*,n-q}]_N \quad (23)$$

5) 进化。本文利用粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)粒子更新过程思想设计 IMCA 的进化过程。从表层膜中选取最优值作为粒子的全局最优值 P_*^{gbest} , 而粒子自身在更新过程中经历的最优值作为局部最优值 P_*^{pbest} 。进化过程的更新式为

$$\begin{cases} \hat{U}(t) = \psi \times U(t) + c_1 \times r_{\text{and}} \times [P_*^{\text{pbest}} - P_{*,i}(t)] + \\ c_2 \times r_{\text{and}} \times [P_*^{\text{gbest}} - P_{*,i}(t)] \\ \hat{P}_{*,i}(t) = P_{*,i}(t) + \hat{U}(t) \end{cases} \quad (24)$$

式中: ψ 为权重系数; $P_{*,i}(t)$ 和 $\hat{P}_{*,i}(t)$ 分别为第 t 次迭代父代和子代粒子 i 的位置; r_{and} 是介于(0-1)之间的随机数; $U(t)$ 和 $\hat{U}(t)$ 分别为第 t 次迭代父代粒子与子代粒子的更新速度; c_1 和 c_2 是学习因子。

6) 选择。从每个粒子的父代种群 $P_{*,i}$ 和子代种群 $\hat{P}_{*,i}$ 中选择适应度较好的个体作为下一代种群 $P_{*,i+1}$, 并更新下一代粒子的更新速度 $U(t+1)$, 选择规则如下:

$$[P_{*,i}, P_{*,i}^{\wedge}]_N \rightarrow [P_{*,i+1}]_N \quad (25)$$

7) 膜融合和分裂。各子系统中所有的膜融合成一个中间形态的膜 instar , 再经历一个极短的时间, 膜 instar 分裂成与原系统相同结构的膜结构, 同时每个子系统中的按照粒子的适应度大小依次分配到各层膜中, 以实现各子系统交换信息的目的。

8) 变异。为防止粒子过早陷入局部最优值, 本文引入小范围内的变异过程, 对粒子的位置在原来的位置上产生小概率扰动, 增加粒子全局最优值的寻优能力。 P_* 经过变异后的值为

$$P_* = P_* \pm 20\%(P_{*,\max} - P_{*,\min})\kappa \quad (26)$$

式中 κ 为 0-1 之间的随机数。

9) 判断是否达到最大的迭代次数, 若是则优化过程结束, 输出最优的粒子即为最优的机组组合和联络线交换计划, 否则返回步骤 2)。

4 算例分析

4.1 算例参数

采用 17 节点的辐射状的微电网验证本文模型, 在满足系统约束条件下实现微电网能量优化分配。微电网结构图如图 2 所示。其中, 节点 5 接入 2 台

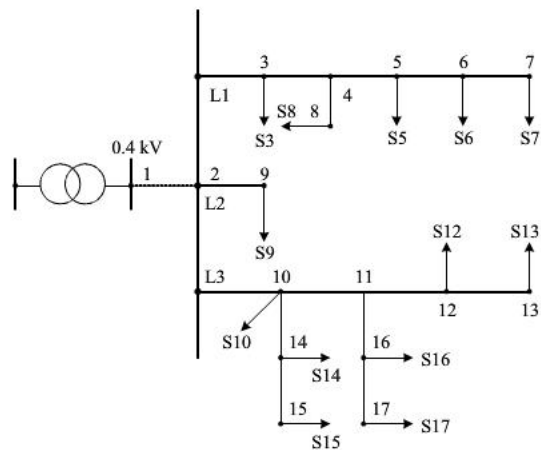


图 2 17 节点微电网系统结构图
Fig. 2 17-bus microgrid structure

WT 和 5 台 PV，节点 7 接入 1 台 DE，节点 8 接入 1 台 MT。线路采用 LGJ-185，其电阻为 $0.17\ \Omega/\text{km}$ ，电抗为 $0.402\ \Omega/\text{km}$ ，最大载流量为 530 A。微电网各 DG 参数见表 1，DG 总装机出力为 210 kW。在计算微电网系统潮流时，取节点 1 的电压作为微电网参考电压^[17]。微电网与主网联络线最大传输容量 50 kW，DN 向微电网提供的最大旋转备用 20 kW。

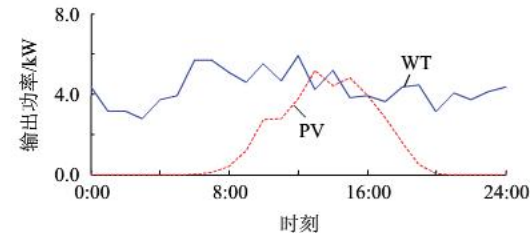
表 1 分布式电源参数

Tab. 1 Parameters of distributed generation

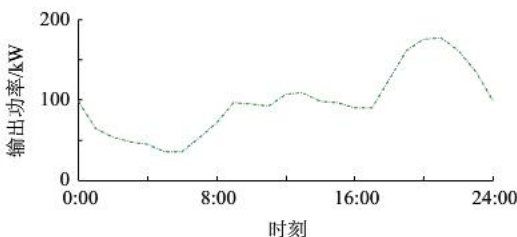
类型	功率/kW		强迫停运率	爬坡速率/ (kW·h ⁻¹)	维护费用/ (元/kW)	数量
	下限	上限				
WT	0	15	0.040		0.029 3	2
PV	0	10	0.030		0.009 6	5
MT	10	30	0.050	10	0.041 9	1
DE	40	100	0.080	20	0.088 0	1

微电网经济调度周期为 1 天，分为 24 个时段。根据历史风速、太阳辐射强度预测 PV、WT 出力曲线以及负荷需求曲线如图 3 所示。DN 售电电价和旋转备用价格^[12,18]见表 2，机组单位功率调整费用 c_T 、中断负荷单位补偿费用 c_{loss} 和资源浪费单位惩罚费用 c_{pun} 分别为 0.520 元/kW、0.612 元/kW 和 0.320 元/kW。

采用 IMCA 进行仿真，其参数分别为：最大迭代次数为 80；权重系数 ψ 为 0.9；学习因子 $c_1=c_2=0.12$ ；种群规模 $N=40$ ；每个子系统 sub 中外层膜，中间膜和内层膜种群数分别为 5,10,5；蒙特卡罗模



(a) PV 和 WT 预测出力



(b) 负荷预测值

图 3 可再生能源发电和负荷需求功率预测
Fig. 3 Power forecast of renewable energy generation and load demand

表 2 微电网购电和旋转备用价格

Tab. 2 Power purchase and spinning reserve price of microgrid

名称	时段	价格/(元/(kW·h))	
		购电	旋转备用
峰时段	10:00-15:00,	0.83	0.44
	18:00-21:00		
平时段	07:00-10:00,	0.49	0.22
	15:00-18:00,		
	21:00-23:00		
谷时段	23:00-次日 07:00	0.17	0.10

拟次数 $M=1000$ 。

4.2 结果与分析

1) 安全裕度门限值 ζ 对调度结果的影响。

本文为分析安全裕度门限值 ζ 对调度结果的影响，选取容忍度 $\alpha=0.90$ 、可靠性置信水平 $\gamma=0.95$ 的条件下进行分析，仿真结果如图 4 所示。分析结论如下：

①微电网系统在门限值 $\zeta=0.56$ 到 $\zeta=0.59$ 区间范围内的运行成本基本维持在 960.00 元附近，而当门限值 ζ 大于 0.59 时，系统的运行成本随着门限值 ζ 的增加而逐渐增大，且安全裕度置信水平 $\beta=0.99$ 、 $\beta=0.97$ 和 $\beta=0.95$ 的曲线趋势一致。

②当微电网安全裕度置信水平 β 增大时，系统的运行成本也相应的增大。同时，在维持微电网系统运行成本不变的门限值区域也相对减少。

③在维持运行成本不变的条件下，提高安全裕

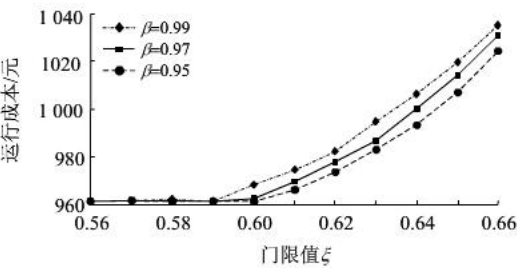


图 4 不同门限值下的运行成本

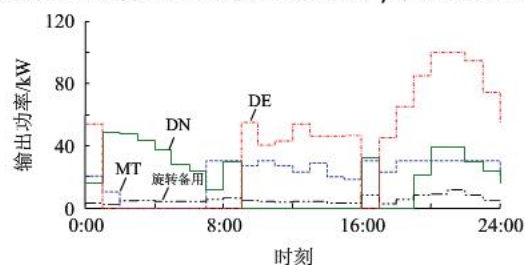
Fig. 4 Operating cost under different threshold value

度置信水平 β 值,需减小对安全裕度的门限值的要求,但对电网安全运行是不利的。因此,在对微电网系统安全性分析时,需选着合理的门限值 ζ 和安全裕度置信水平 β 值,实现微电网安全、经济运行。

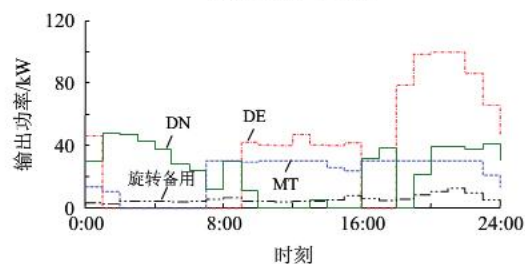
2) 安全裕度与可靠水平对调度结果的影响。

为验证安全裕度置信水平 β 和可靠性置信水平 γ 对微电网经济调度结果的影响,本文在微电网安全裕度门限值 $\zeta=65\%$ 、容忍度 $\alpha=0.90$ 条件下,选取不同安全裕度置信水平 β 和不同可靠性置信水平 γ 进行分析,微电网系统的优化调度结果以及运行成本如图5、6所示。分析结论如下:

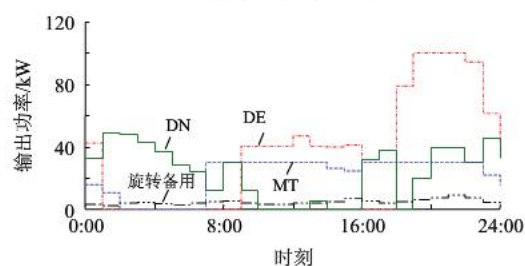
①当可靠性置信水平 γ 值不变时,微电网的运行成本会随着安全裕度置信水平 β 值的增大而增



(a) $\gamma=0.97, \beta=0.99$



(b) $\gamma=0.97, \beta=0.97$



(c) $\gamma=0.95, \beta=0.97$

图5 不同置信水平下的调度结果

Fig. 5 Dispatch results under different confidence level

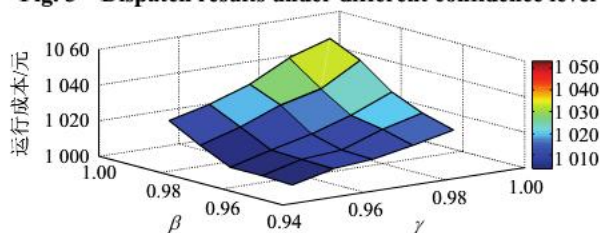


图6 不同安全裕度与可靠水平的运行成本

Fig. 6 Operation costs under different safety margin and reliable level

大。为保证微电网安全可靠运行,系统的节点电压需有足够的安全裕度,微电网在平时段增大DE出力而减少DN购电电量,谷时段增大MT、DE出力而减少DN购电电量,而平时段DE发电成本高于DN平时段电价,谷时段MT、DE发电成本高于DN谷时段电价,导致微电网系统运行成本增加。

②当安全裕度置信水平 β 值不变时,微电网的运行成本F会随着可靠性置信水平 γ 值的增大而增大。为满足微电网系统失负荷以给定的置信水平要求,微电网系统增加购买旋转备用容量来满足系统可靠性的要求,导致微电网系统运行成本增加。

③在容忍度 α 一定的条件下,系统的运行成本与安全裕度置信水平 β 和可靠性置信水平 γ 是密切相关的,需综合权衡系统经济性与可靠性和安全性之间的关系。

3) 容忍度对调度结果的影响。

为验证不同容忍度 α 对调度结果的影响,本文在可靠性置信水平 $\gamma=0.97$ 、安全裕度置信水平 $\beta=0.99$ 条件下,选取不同容忍度进行仿真分析,其结果如图7所示。

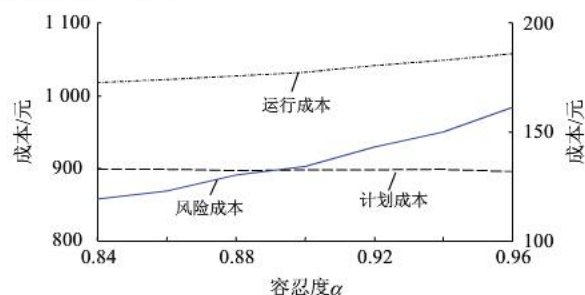


图7 不同容忍度下的调度结果

Fig. 7 Dispatch results under different tolerability

从图7中可以看出,当安全裕度置信水平 β 和置信度置信水平 γ 不变时,风险成本随着容忍度 α 的增大而逐渐增大,系统运行成本也随之增大。由于增大容忍度 α ,系统受不确定因素的影响将越大,系统需增加风险费用以平衡功率预测偏差,系统计划成本基本维持不变。

4) 安全裕度置信水平对微电网节点电压的影响。

为验证在不同安全裕度置信水平对微电网节点电压偏差的影响,本文在容忍度 $\alpha=0.90$ 条件下,选取不同安全裕度置信水平 β 进行仿真分析,24h系统节点电压最大偏差的平均值如图8所示。

从图8可以看出:当容忍度 α 和可靠性置信水平 γ 不变时,安全裕度置信水平 β 越大,系统平均节点电压偏差的越小,对系统安全运行贡献越大,

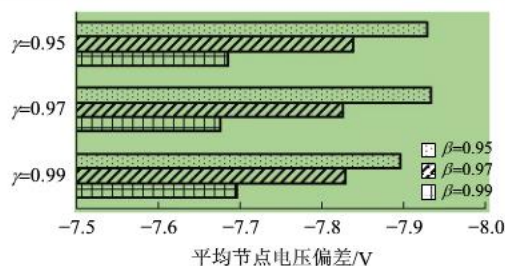


图 8 不同安全裕度下的平均节点电压偏差

Fig. 8 Average node voltage deviation under different safety margin

反之亦然。

5) IMCA 与 PSO、SGA 算法比较。

通过本文提出的 IMCA 结果与 PSO 和简单遗传算法(simple genetic algorithm, SGA)计算结果比较,在相同条件下微电网的发电成本优化值与迭代次数的关系如图 9 所示。

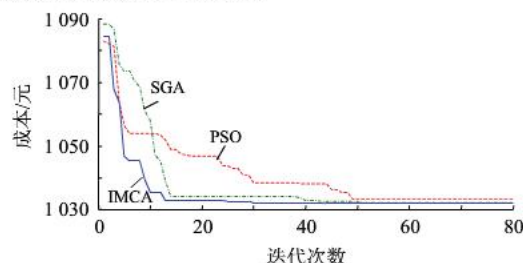


图 9 微电网运行成本和迭代次数的关系

Fig. 9 Cost and iteration relationship of microgrid

通过对图 9 中 3 种算法计算结果的对比得知,本文所提出的 IMCA 算法具有更好的收敛性,且不失全局性。

5 结论

本文分析了在考虑不确定性因素下微电网负荷优化分配问题,在考虑微电网中间歇性发电设备出力不确定性、负荷不确定性以及系统设备的不确定因素的带给微电网的影响,建立了不确定因素下考虑系统安全性和可靠性约束的微电网负荷优化分配模型,采用 IMCA 求解该数值优化问题,并以一个典型算例为例,分析讨论了微电网经济性与安全性和可靠性之间的关系。算例分析验证了模型和算法的有效性,对微电网安全、可靠、经济运行具有一定的指导作用。

参考文献

[1] 徐帆,耿建,姚建国,等. 安全约束经济调度建模及应用[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 55-58.
Xu Fan, Geng Jian, Yao Jianguo, et al. Modeling and application of security constrained economic dispatch [J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 55-58(in

Chinese).

[2] 黄伟,孙昶辉,吴子平,等. 含分布式发电系统的微网技术研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 14-18, 34.
Huang Wei, Sun Changhui, Wu Ziping, et al. A review on microgrid technology containing distributed generation system[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 14-18, 34(in Chinese).
[3] Hatziaargyriou N, Asano H, Iravani R, et al. Microgrids [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.
[4] Katiraei F, Iravani R, Hatziaargyriou N, et al. Microgrids management[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 54-65.
[5] 郑漳华,艾芊. 微电网的研究现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 27-32.
Zheng Zhanghua, Ai Qian. Present situation of research on microgrid and its application prospects in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 27-32(in Chinese).
[6] Gwo-Ching Lia. Solve environmental economic dispatch of smart microgrid containing distributed generation system: using chaotic quantum genetic algorithm [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2012, 43(1): 779-787.
[7] Mohamed F A, Koivo H. System modelling and online optimal management of microgrid using mesh adaptive direct search[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2010, 32(5): 398-407.
[8] 许丹,丁强,潘毅,等. 基于经济调度的微电网蓄电池容量优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 55-59.
Xu Dan, Ding Qiang, Pan Yi, et al. Study on optimizing capacity of storage battery in microgrid system based on economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 55-59(in Chinese).
[9] 周玮,孙辉,顾宏,等. 计及风险备用约束的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 47-55.
Zhou Wei, Sun Hui, Gu Hong, et al. Dynamic economic dispatch of wind integrated power systems based on risk reserve constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 47-55(in Chinese).
[10] 周任军,姚龙华,童小娇,等. 采用条件风险方法的含风电系统安全经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 56-63.
Zhou Renjun, Yao Longhua, Tong Xiaojiao, et al. Security economic dispatch in wind power integrated systems using a conditional risk method[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 56-63(in Chinese).
[11] 朱泽磊,周京阳,潘毅,等. 考虑电力电量平衡的安全约束经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 168-176.
Zhu Zelei, Zhou Jingyang, Pan Yi, et al. Security

- constrained economic dispatch considering balance of electric power and energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 168-176(in Chinese).
- [12] 刘小平, 丁明, 张颖媛, 等. 微网系统的动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 77-84.
Liu Xiaoping, Ding Ming, Zhang Yingyuan, et al. Dynamic economic dispatch for microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 77-84(in Chinese).
- [13] 艾欣, 许佳佳. 基于互动调度的微网与配电网协调运行模式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 143-149.
Ai Xin, Xu Jiajia. Study on the microgrid and distribution network co-operation model based on interactive scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 143-149(in Chinese).
- [14] 林伟, 陈光堂, 邱晓燕, 等. 基于改进自适应遗传算法的微电网负荷优化分配[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 49-55.
Lin Wei, Chen Guangtang, Qiu Xiaoyan, et al. Optimal load distribution of microgrid based on improved self-adaptive genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 49-55(in Chinese).
- [15] Păun G. Computing with membranes[J]. Journal of Computer and System Sciences, 2000, 61(1): 108-143.
- [16] 张葛祥, 潘林强. 自然计算的新分支: 膜计算[J]. 计算机学报, 2010, 33(2): 208-214.
Zhang Gexiang, Pan Linqiang. A survey of membrane computing as a new branch of natural computing[J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(2): 208-214(in Chinese).
- [17] Papathanassiou S, Hatziargyriou N, Strunz K. A benchmark LV microgrid for steady state and transient analysis[C]//Proceedings of the Cigre Symposium on Power Systems with Dispersed Generation. Athens, 2005.
- [18] 曹培, 王媚, 郭创新, 等. 智能微网运行的低碳综合效益分析[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 15-20.
Cao Pei, Wang Mei, Guo Chuangxin, et al. Analysis on low-carbon integrative benefits of smart microgrid operation[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 15-20(in Chinese).



杨毅

收稿日期: 2014-03-31。

作者简介:

杨毅(1989), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网系统经济优化运行, 348122460@qq.com;

雷霞(1973), 女, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力市场、调度自动化、配电自动化等, Snow_lei246@mail.xhu.edu.cn。

(责任编辑 张玉荣)