

文章编号: 1003-207(2014)03-0068-06

基于遗传算法的微电网负荷优化分配

周开乐^{1,2}, 沈超^{1,2}, 丁帅^{1,2}, 杨善林^{1,2}

(1. 合肥工业大学管理学院, 安徽 合肥 230009;

2. 过程优化与智能决策教育部重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘要: 负荷优化分配是电力系统中的一类重要优化问题, 即在满足各类系统约束条件下, 实现发电总成本最低。为了促进微电网的优化运行, 本文研究了包含柴油发电机、微型燃气轮机、光伏发电机和风力发电机组成的微电网的负荷优化分配问题。首先简要分析了各个微电源的发电特征和成本函数, 然后分别建立了孤岛模式和并网模式下的微电网负荷优化分配模型, 孤岛模式下优化模型的目标函数是包含燃料成本和运行维护成本的总成本, 约束条件包括发电能力约束和系统功率平衡约束, 并网模式下的优化模型则在此基础上, 在目标函数中增加了其与大电网交易的收入和支出, 在约束条件中增加了电力交易约束。最后, 通过遗传算法分别对两种模式下的优化模型进行仿真求解。结果表明, 本文提出的负荷优化分配方法可以有效降低微电网的运行成本, 促进微电网的优化运行。

关键词: 负荷优化分配; 优化模型; 遗传算法; 微电网

中图分类号: F407.6

文献标识码: A

1 引言

电力系统负荷优化分配^[1-3]是指在满足用户负荷需求和系统运行等约束的条件下, 合理分配各发电机组的出力, 以实现发电总成本最低的优化问题。它是电力系统规划和运行调度中的一类重要优化问题, 需要运用管理科学方法进行建模求解。负荷优化分配对于提高发电效率、增强电力系统稳定性和降低发电成本具有重要意义。

学者们采用不同的方法建立和求解负荷优化分配模型。一些研究基于传统优化算法, 如朱继忠和徐国禹将网流规划法运用到传统火电机组^[1]和水电火联运机组^[2]的负荷优化分配, 并分别采用递推算法和分解协调算法求解负荷分配模型。Kavrakoglu 和 Kiziltan^[4]采用多目标动态线性规划方法解决电力系统的规划问题。Makkonen 和 Lahdelma^[5]为了优化欧洲能源公司的发电, 建立了一个混合整形规划模型, 并将其划分为层次模块组件, 采用一个定制的分支定界算法解决这些子问题。Gardner 和 Rogers^[6]建立了一个热电联产电力系统的联合规划

优化模型。Nowark 和 Römisch^[7]设计了一个水热发电系统最优发电成本的动态多阶段随机规划模型, 并设计了一个随机拉格朗日松弛机制用于为各个发点单元的所有的约束分配乘法器。Thompson 等^[8]利用实物期权理论得出非线性偏微分方程(PIDEs), 对水电和火电发电机组设计优化运行策略。

随着智能算法的发展, 为了克服传统优化方法的缺陷, 一些学者研究了智能算法在电力系统负荷优化分配中的应用。Li^[9]比较了遗传算法和传统方法在电力系统经济负荷分配中的应用, 并在后续研究中提出了一个快速准确进行负荷分配的遗传算法和局部梯度方法^[10]。李翔等^[11]采用遗传粒子群(GPHA)混合优化算法, 并在适应度函数中引入罚函数的思想, 求解传统电网中的电源规划问题。Basu^[3]则基于蜜蜂的觅食行为, 提出了解决热电联产系统负荷优化分配的蜂群优化算法。但上述研究主要集中在以火电机组或水电火联运机组为主的传统大电网的负荷优化分配。

而随着新能源技术的发展和运用、人们对个性化电力需求的增加以及传统大电网带来的诸多问题, 微电网^[12]应运而生。它有两种运行模式, 即和大电网联合运行的并网模式和独立运行的孤岛模式。微电网中包含多种可再生能源发电系统, 如光伏发电机和风力发电机等; 同时还包括一些分布式电源和储能装置, 如柴油发电机和微型燃气轮机等。

收稿日期: 2012-01-19; 修订日期: 2012-11-04

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)(2011AA05A116);
国家自然科学基金资助项目(71131002, 71201042)

作者简介: 周开乐(1987-), 男(汉族), 江苏铜山人, 合肥工业大学管理学院, 博士研究生, 研究方向: 优化与决策。

因此,微电网的负荷优化分配不同于传统大电网。

目前对微电网负荷优化分配的研究较少^[13-14],而且这些研究对包含多种微电源的并网模式微电网在某一周期内的负荷优化分配问题关注较少。为了促进微电网的优化运行、提高微电网发电效率和降低发电成本,本文建立了孤岛模式和并网模式下,包含柴油发电机、微型燃气轮机、光伏发电机和风力发电机的微电网负荷优化分配模型。然后,通过遗传算法对两种模式下的微电网进行24小时负荷优化分配仿真实验,实验结果表明了本文模型方法的正确性和有效性。

2 微电网负荷优化分配模型

2.1 微电源特性

(1) 柴油发电机(Diesel Generator, DG)

DG是柴油机驱动发电机运转,将柴油的能量转化为电能的发电装置,它是目前最常用的微电源。柴油发电机的燃料成本函数可以描述为实际输出功率的二次函数,即:

$$F_1(P_i) = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 \quad (1)$$

式中 α_i 、 β_i 和 γ_i 分别为柴油发电机的系数, P_i 是柴油发电机*i*的输出功率(kW)。系数 α_i 、 β_i 和 γ_i 一般由柴油发电机的制造商给出,本文采用Mohamed等^[13]中的6-kW康明斯柴油发电机组模型DNAC 50Hz的参数。

(2) 微型燃气轮机(Microturbine, MT)

MT是指功率在几百千瓦以内的小型热动装置,它通过整合在发电机中的燃气涡轮发动机的高速运转产生电能。微型燃气轮机的总效率函数^[15]为:

$$\eta_{MT} = \frac{P_{ne} + P_{th,rec}}{m_f LHV_f} \quad (2)$$

式中 P_{ne} 为净电力输出(kW), $P_{th,rec}$ 为恢复热功率(kW), LHV_f 为低燃料加热率(kJ/kgf), m_f 为燃料的质量流速(kg/s)。

微型燃气轮机的成本函数为:

$$C_{MT} = C_{nl} \sum_j \frac{P_j}{\eta_{jJ}} \quad (3)$$

式中 C_{nl} 为供应给微型燃气轮机的天然气价格, P_j 为时间间隔*J*的净电力输出, η_{jJ} 为时间间隔*J*的电池效率。

(3) 光伏发电机(Photovoltaic, PV)

PV是利用半导体平面的光生伏特效应将太阳能转换为电能的发电系统。光伏发电机是一种非线性

性的直流源,其输出电压和电流随着光照强度和电池结温的变化呈现强烈的非线性变化,为了达到最大功率点,需要对光伏发电系统进行最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)^[15]。光伏发电机的输出功率为:

$$P_{PV} = P_{STC} \frac{G_{ING}}{G_{STC}} [1 + k(T_c - T_r)] \quad (4)$$

式中 P_{PV} 为光照强度 G_{ING} 条件下的输出功率, P_{STC} 为标准测试条件(Standard Test Condition, STC)下的最大输出功率, G_{ING} 为光照强度, G_{STC} 为STC条件(1000W/m²)下的光照强度, k 为发电温度系数, T_c 为电池温度, T_r 为参照温度。某光伏发电机的24小时输出功率如图1所示。

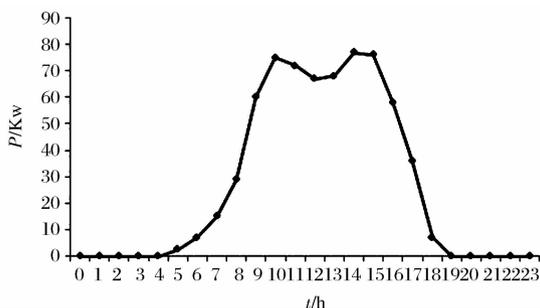


图1 光伏发电机的24小时输出功率

(4) 风力发电机(Wind Turbine, WT)

WT是利用风力带动风车叶片旋转,再通过增速机将旋转速度提升,从而促使发电及发电。风力发电机的输出功率是风速的函数^[16]:

$$\begin{cases} P_{WT} = 0 & V < V_{ci} \\ P_{WT} = a * V^3 - b * P_r & V_{ci} < V < V_r \\ P_{WT} = P_r & V_r < V < V_{co} \\ P_{WT} = 0 & V > V_{co} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $a = \frac{P_r}{V_r^3 - V_{ci}^3}$, $b = \frac{V_{ci}^3}{V_r^3 - V_{ci}^3}$, V_{ci} 、 V_r 和 V_{co}

分别为切入风速、额定风速和切出风速, P_r 为额定功率。

某风力发电机的24小时输出功率如图2所示。

2.2 孤岛模式微电网负荷优化分配模型

(1) 目标函数

孤岛模式下,微电网不存在与大电网之间的交易,本文建立的成本目标函数中包括燃料成本和运行维护成本,即:

$$\min F = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [F_i(P_i(t)) + OM_i(P_i(t))] \quad (6)$$

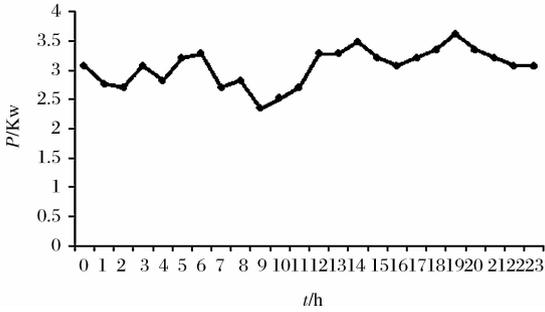


图2 风力发电机 24 小时输出功率

式中 F 为微电网系统发电的总成本； T 为调度周期的总时段数； t 为时段编号； N 为系统中微电源的总数； $F_i(P_i)$ 为微电源 i 的燃料成本； $OM_i(P_i)$ 为微电源 i 的运行维护成本。

微电网的调度周期一般可以取 24 小时、1 个月、1 个季度或 1 年等，本文取一天 24 小时为优化调度周期。微电源的运行维护成本一般可以认为与输出功率成比例^[1-3]，其比例系数为 K_{OM} ，所以微电源 i 的运行维护成本为：

$$OM_i(P_i) = K_{OM_i} P_i \tag{7}$$

光伏发电和风力发电的运行维护成本可以忽略，因此取 $K_{OM}(PV) = 0$ 、 $K_{OM}(WT) = 0$ ；柴油发电机组和微型燃气轮机的 $K_{OM}(MT)$ 值分别为^[1-3]： $K_{OM}(DG) = 0.01258$ \$/kWh， $K_{OM}(MT) = 0.00587$ \$/kW h。

(2) 约束条件

微电源的运行必须满足其发电能力约束，即：

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}, i = 1, 2, \dots, N \tag{8}$$

式中 P_i 为微电源 i 的实际输出功率； P_i^{\min} 、 P_i^{\max} 分别为其上下限。

同时，整个微电网系统中，电力系统功率要达到平衡，即：

$$\sum_{i=1}^N P_i = L + P_{Loss} \tag{9}$$

式中 P_i 为微电源 i 的输出功率； L 为系统总负荷； P_{Loss} 为系统总网损。

2.3 并网模式微电网负荷优化分配模型

(1) 目标函数

并网模式微电网与大电网之间存在电力交易，总成本函数中增加了向大电网购电的支出成本和向大电网售电的收入。此时的目标函数为：

$$\min F = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [F_i(P_i(t)) + OM_i(P_i(t))] + PE_t - SE_t \tag{10}$$

式中 PE_t 为微电网在时段 t 向大电网的购电

量， SE_t 为微电网在时段 t 向大电网的售电量。其他参数的含义与式(6)中相同。

(2) 约束条件

除了满足孤岛模式下微电网负荷优化分配的约束条件式(8)和式(9)以外，还应满足，微电网向大电网的售电不可能超过微电网的总输出功率：

$$\sum_{i=1}^N P_i \geq P_{sold} \tag{11}$$

式中 P_i 为微电源 i 在某一时段的输出功率， P_{sold} 为微电网在该时段向大电网的售电量。

3 仿真算例

本文提出的微电网负荷优化分配方法操作流程如图 3 所示。

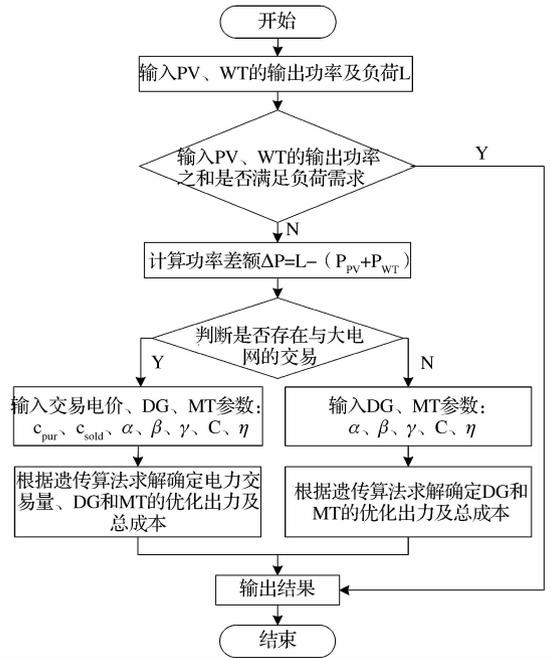


图3 微电网负荷优化分配算法流程

光伏发电机的输入主要是光照和温度等，风力发电的输入主要是风速等，这些可再生能源发电的燃料成本和运行维护成本较低，可以忽略。同时，可再生能源发电受光照、温度和风速等自然条件影响较大，我们将其作为“负”负荷(Negative Load)，采用 MPPT 模式输出功率。用于本文仿真实验输入的 PV 和 WT 24 小时输出功率分别如图 1 和图 2 所示。用于本文仿真实验的 24 小时负荷分布曲线如图 4 所示。

仿真算例所用的遗传算法的参数值为：种群大小为 100，精英数目为 10，交叉概率为 0.8，最大进化代数为 200，停止代数为 200，适应度函数值偏差

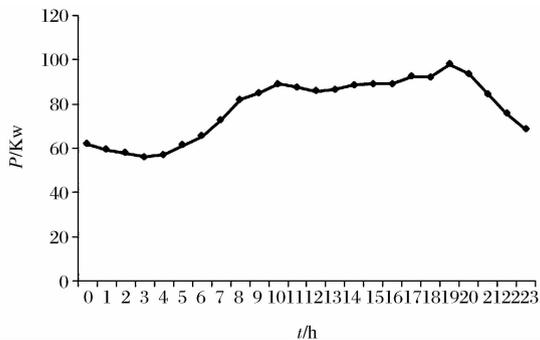


图 4 24 小时负荷分布曲线

为 $1e-100$ 。

3.1 孤岛模式算例

根据上述模型,通过遗传算法对孤岛模式下包含一台 DG、MT、PV 和 WT 的微电网进行仿真实验。负荷优化分配优化结果如图 5 所示。

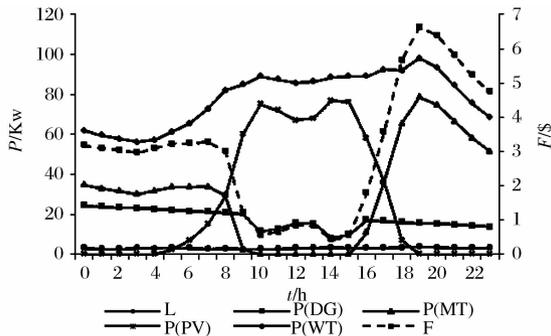


图 5 孤岛模式微电网负荷优化分配结果

从图 5 可以看出, PV 起到了很好的负荷分配平衡作用,可以减少微电网系统总成本。大约在 $0 \sim 9h$ 和 $18 \sim 23h$ 之间, PV 输出很小,此时 DG 和 MT 作为微电网中的主要电源进行供电,这段时间内的系统总成本也较高。大约在 $9 \sim 18h$ 之间, PV 输出功率较大,此时 DG 和 MT 的优化输出功率则较小,因为 PV 的发电成本较低,这段时间内系统总成本也较低。

为了比较微电网负荷优化分配的经济效益,我们将用本文方法进行的负荷优化分配与简单平均分配的结果进行比较。光伏发电机和风力发电机仍采用 MPPT 模式,而对 DG 和 MT 采用简单平均分配方法,这样计算求得的总成本为 F_2 ,与通过遗传算法进行负荷优化分配的总成本 F_1 的对比,其总成本减少百分率为 k 。结果如图 6 所示。

从图 6 以看出,进行负荷优化分配的微电网总成本低于进行简单平均分配的微电网总成本。实验结果显示,对孤岛模式微电网进行负荷优化分配约

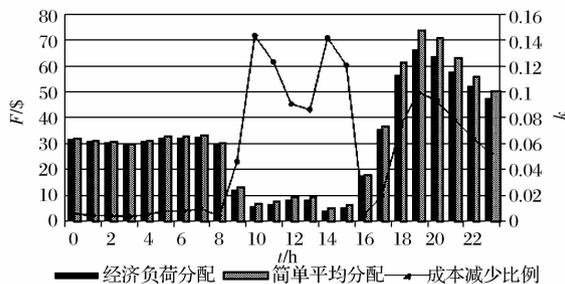


图 6 负荷优化分配与简单平均分配总成本比较

可以减少 $0.3 \sim 14.3$ 个百分点的总成本。

3.2 并网模式算例

并网模式微电网中,增加了微电网与大电网的交易,假设微电网向大电网的售电价格为 $0.03 \$ / kWh$,向大电网购电的价格 $0.05 \$ / kWh$ 。利用遗传算法对并网模式微电网进行负荷优化分配,其优化结果如图 7 示。

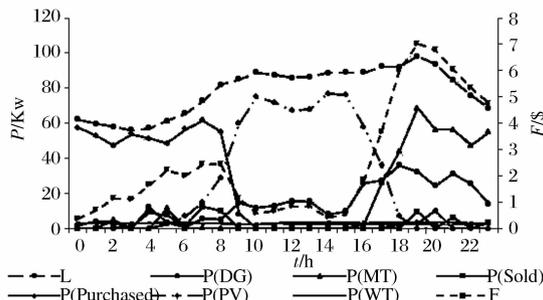


图 7 并网模式微电网负荷优化分配结果

从图 7 以看出,由于存在与大电网之间的交易,微电网可以在自主发电和与大电网交易之间做出更加灵活的选择。算例结果显示,大约在 $0 \sim 9h$ 之间负荷处于上升阶段,且 PV 发电较少,并网模式微电网向大电网购电较多,而自身 DG 和 MT 的发电较少,有效减少了系统总成本。大约在 $9 \sim 18h$ 之间, PV 功率输出较多,此时,微电网向大电网购电以及自身 DG、MT 的输出功率都明显减少。大约在 $18 \sim 23h$ 之间,负荷仍然较高,而光伏发电机输出功率迅速减少,此时微电网选择采用 DG、MT 发电为主,购电量减少,但系统总成本也相对较高。

为了对比孤岛模式和并网模式下, DG 和 MT 的出力情况,我们将两种模式下, DG 和 MT 的 24 小时分配情况以及并网模式下的购电情况绘成折线图,如图 8 示。

从图 8 可以看出,并网模式微电网存在与大电网之间的交易可以成为微电源自身系统发电的有力补充。算例结果显示,并网模式微电网中 MT 的输

出功率总是低于孤岛模式微电网;大约在 0~9h 之间,并网模式微电网向大电网购电较多时,其 DG 输出功率明显低于孤岛模式下的 DG 输出,大约在 18~24h 之间,并网模式微电网向大电网购电较少时,其 DG 输出功率则明显高于孤岛模式下的 DG 输出。

力补充,增强微电网系统稳定可靠性。但是这些微电源需要燃料输入,其成本也较高,会增加微电网系统的总成本;(4)并网模式微电网相对于孤岛模式运行成本更高;

4 结语

本文研究了孤岛和并网两种模式下包含柴油发电机、微型燃气轮机、光伏发电机和风力发电机的微电网负荷优化分配问题,建立相应的负荷优化分配数学模型,并利用遗传算法对模型进行求解。对微电网中可再生能源发电特性的分析,有利于可再生能源发电负荷优化模型的构建,更好的揭示可再生能源发电的作用和意义,推动新能源技术的发展和应用。本文提出的微电网负荷优化分配方法可以有效减少微电网的运行成本,促进微电网的优化运行和微电网技术的普及应用。

微电网中微电源种类繁多,且包括成本、环境、安全稳定和时间效率等不同类型的目标和约束,本文建立的微电网负荷优化分配模型仅考虑了四种常用的微电源,目标函数和约束条件还不够完善。微电网技术的发展才刚刚起步,建立更加完善的微电网负荷优化分配模型,还需要更加先进的电力系统技术支撑。

参考文献:

[1] 朱继忠,徐国禹. 用网流法求解电力系统动态经济调度[J]. 系统工程学报,1991,6(1):33-40.
 [2] 朱继忠,徐国禹. 用网流法求解水火电力系统有功负荷分配,系统工程理论与实践,1995,1:69-73.
 [3] Basu M. Bee colony optimization for combined heat and power economic dispatch[J]. Expert Systems with Applications, 2011,38(11):13527-13531.
 [4] Kavrakoglu K, Kiziltan G. Multiobjective strategies in power systems planning[J]. European Journal of Operational Research,1983,12(2):159-170.
 [5] Makkonen S, Lahdelma R. Non-convex power plant modelling in energy optimization[J]. European Journal of Operational Research,2006,171(3):1113-1126.
 [6] Gardner D T, Rogers J S. Joint planning of combined heat and power and electric power systems: An efficient model formulation[J]. European Journal of Operational Research,1997,102(1):58-72.
 [7] Nowak M P, Römisch W. Stochastic lagrangian relaxation applied to power scheduling in a hydro-thermal system under uncertainty[J]. Annals of Operations Research,2000,100(1-4):251-272.

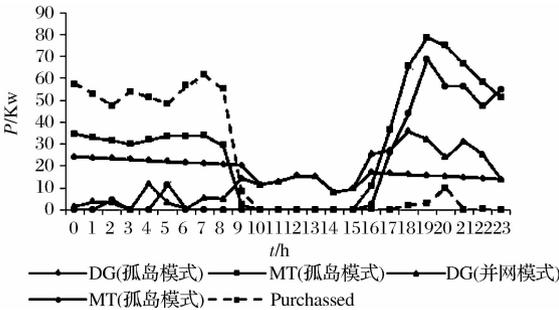


图8 两种模式下 DG 和 MT 出力比较

为了比较并网模式与孤岛模式微电网负荷优化分配的总成本,我们将两种模式下的总成本以及孤岛模式与并网模式总成本之差绘制如图 9 所示。

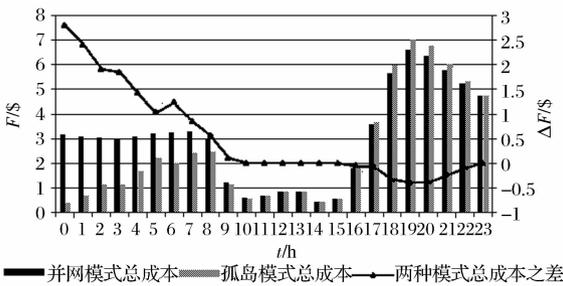


图9 两种模式下总成本比较

从图 9 可以看出,相比于并网模式微电网负荷优化分配,孤岛模式总体上更加经济高效。在大约 0~10h 之间,孤岛模式微电网负荷优化分配总成本明显低于并网模式总成本,在大约 10~17h 之间,两种模式总成本大致相等,大约在 17~23h 时间段内,孤岛模式微电网负荷优化分配总成本略高于并网模式总成本。总体上,孤岛模式下,微电网负荷优化分配总成本低于并网模式。

上述实验分析表明:(1)太阳能和风能等可再生能源发电成本较低,可以起到很好的平衡负荷分配作用,减少微电网系统运行成本,但受自然条件影响,不确定性较大;(2)通过合理建模优化的微电网负荷分配,可以有效减少微电网系统总成本;(3)DG、MT 和 FC 等它们几乎不受自然条件影响,其功率输出易于控制,可以成为可再生能源发电的有

- [8] Thompson M, Davison M, Rasmussen H. Valuation and optimal operation of electric power plants in competitive markets[J]. *Operations Research*, 2004, 52(4): 546—562.
- [9] Li F. A comparison of genetic algorithms with conventional techniques on spectrum of power economic dispatch problems[J]. *Expert Systems with Applications*, 1998, 15(2): 133—142.
- [10] Li F, Aggarwal R K. Fast and accurate power dispatch using a relaxed genetical gorithm and a local gradient technique[J]. *Expert Systems with Applications*, 2000, 19(3): 159—165.
- [11] 李翔, 牛东晓, 杨尚东. 改进粒子群优化算法在电源规划中的应用[J]. *中国管理科学*, 2006, 14(6): 113—118.
- [12] Lasster R H, Paigi P. Microgrid: A conceptual solution [C]. *Proceedings of IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, Aachen, June 20—25, 2004.
- [13] Mohamed F A, Koivo H N. System modeling and on-line management of MicroGrid using multiobjective optimization[C]. *Proceedings of International Conference on Clean Electrical Power*, Capri, May 21—23, 2007.
- [14] Mohamed F A, Koivo H N. System modelling and on-line optimal management of MicroGrid using Mesh Adaptive Direct Search[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2010, 32(5): 398—407.
- [15] Esram T, Chapman P L. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, 22(2): 439—449.
- [16] Chedid R, Akiki H, Rahman S. A decision support technique for the design of hybrid solar—wind power systems[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1998, 13(1): 76—83.

Power Economic Dispatch of Microgrid Based on Genetic Algorithm

ZHOU Kai-le^{1,2}, SHEN Chao^{1,2}, DING Shuai^{1,2}, YANG Shan-lin^{1,2}

(1. School of Management, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Key Laboratory of Process Optimization and Intelligent Decision-Making, Ministry of Education, Hefei 230009, China)

Abstract: Power economic dispatch is an important kind of optimization problem in the power systems, that is, achieving the lowest total cost of power generation while meet many kinds of system constraints. In order to promote the optimal operation of microgrid, the power economic dispatch problem is studied in this paper of the microgrid with diesel generator, microturbine, photovoltaic power generator and wind turbine. At first, the generation characteristics and cost functions of the micro power generators are analyzed. Then the power economic dispatch models under islanded mode and grid-connected mode are constructed respectively. The objective function of the optimization model under islanded mode is the total costs which include the fuel costs and operation maintenance costs, and the constraint conditions include the constraint of power generation and the constraint of system power balance. While the income and expenses of the transaction between microgrid and the large power grids are added to the objective function of the optimization model under grid-connected model based on the model under islanded mode, and the electricity transaction constraint are added to the constraint conditions. Finally, the optimization models under both modes are solved by genetic algorithm. The results show that the power economic dispatch method proposed in this paper can effectively reduce the operating costs and promote the optimal operation of microgrid.

Key words: economic load dispatch; optimization models; genetic algorithm; microgrid