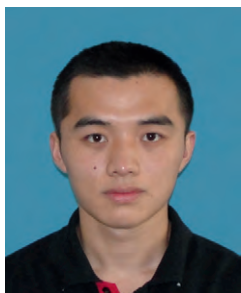


基于细菌觅食算法的热电联产微电网经济环保优化调度

热电联产（CHP）系统具有高效、环保和经济等特点，能提高一次能源的利用率，具有良好的发展前景和应用价值。针对由光伏发电、风力发电、燃料电池、微型燃气轮机、辅助锅炉、蓄电池和热储能系统，以及热电负荷构成的热电联供型微电网系统，建立一个热电联产微电网模型。该模型考虑各种分布式电源的发电成本、环境成本和微电网设备维护成本，在满足微电网运行约束条件的基础上，优化微电网内不同分布式电源和储能系统的功率输出，使系统的总运行成本最小。从经济和环保方面分析了微电网的优化运行特性，针对发电成本和排放成本的不同权重，采用细菌觅食优化算法（BFOA）对模型进行求解，通过算例验证了数学模型与优化算法的正确性与可行性。

李锐 窦鹏冲 李鹏/新能源电力系统国家重点实验室（华北电力大学）
牛星岩 Xavier Yang/法国电力集团研究院



李锐/硕士研究生

由于不断上涨的能源价格，以及化石燃料短缺、环境污染、电能质量和供电可靠性问题，分布式发电得到了快速发展^[1]。分布式发电靠近负荷需求侧，使附近产生的能量被就近使用，从而减少运输和输配电中的损失。它包括可再生能源技术（风力发电、光伏和生物质等）和不可再生能源技术（柴油发电机、燃料电池和微型燃气轮机）。分布式发电机对配电系统来说是一个挑战，需要改变操作策略和配电网设计。

虽然分布式发电可能会带来一些有利的影响（环境效益，降低配电损耗，电源的可靠性，减缓进行电网新的投资，更稳定的系统，易于扩展的基础上

的现成成品等），但个别分布式发电机的应用可能会导致配电系统中亏损增加^[2]。于是，微电网（Micro Grid, MG）的概念被提了出来，微电网系统内包括一系列的分布式发电机，它们向用户提供电能，并在某些情况下，也可以进行供热。微电网与主电网互联，与之进行交互电能。微电网也包括一些存储设备，如蓄电池、飞轮储能，以满足负荷需求。

微电网的优化运行必须要考虑最大限度地降低成本，特别是燃料消耗成本和环境成本，具有热电联产功能的分布式发电机已成为传统的集中式发电厂的有力竞争者。微电网采用热电联产的运行方式后，可以增加能源的梯级利用，提高能源利用率。文献[3]中，一般微型燃气轮机的效率为25%~35%，而热电联产（Combined Heat and Power, CHP）微燃机的效率最高可达75%。CHP型微电网是一个复杂的能量系统，存在多种能量平衡关系。在满足用户热电负荷需求的前提下，如何根据微源配置（即参与微源的种类、微源的运行参数等）制定系统未来一段时间内的运行方案（即各微源在各时段的功率分配），以使系统获得最佳经济效益，是微电网经济运行研究中的一个重要内容^[4]。目前为止，国内的研究还仅局限于电力微电网的层面上^[5]，对CHP方面的内容涉及较少，但在国外，此方面的相关研究已经展开。文献[6]研究了由燃气轮机、余热锅炉和吸附式制冷机组成的冷热电联供（Combined Cooling Heating and Power,

关键词/Keywords

微电网 ·
优化运行 ·
热电联产 ·
细菌觅食优化 ·

国家自然科学基金（50977029），河北省自然科学基金（E2013502074）。

CCHP) 系统, 建立了一个简单的系统线性模型, 并对系统运行策略进行优化。

本文建立了一个含可再生能源的微电网系统, 并且配备了热电联产装置和辅助供热锅炉, 热电联产系统实现能量的高效利用, 从经营成本和污染排放两个方面详细分析了微电网在经济环保方面的作用, 并利用细菌觅食算法进行求解, 在对未来一天中24 h的风电、光伏功率以及热电负荷进行预测的基础上, 根据不同的微源出力, 对系统的运行方案进行优化。

优化问题

提出能量管理的目标是在经济和环境标准下提供电力负荷和热力负荷, 本文的研究中, 假定所有的分布式电源供应电能需求, 所产生的热能与热电联产机组所发出的电能成正比。如果所产生的热量超过热负荷的需求, 多余的热量将会存入热储能系统, 如果是低于热负荷的需求, 则通过辅助锅炉补偿所需要的热能。

该微电网系统的总成本目标函数为

$$\min F = \alpha J_1 + \beta J_2 \quad (1)$$

式中, F 为总成本; J_1 、 J_2 分别为微电网系统的经营成本和污染排放成本; α 、 β 分别为经营成本和污染排放成本的权重系数, α 、 β 取值的不同表示考虑发电成本与排放成本的偏重点也不同, 优化结果也将不同。

1. 经营成本最小化

微电网的经营成本包括分布式电源和辅助锅炉的燃料、维护和起停成本, 与上游电网交互电能损耗成本, 为辅助锅炉供应的天然气成本。此目标函数为

$$J_1 = \min \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^{N_g} [u_i(t) P_{gi}(t) (B_{gi} + K_{OM_i}) + S_{gi} |U_i(t) - U_i(t-1)|] + \sum_{j=1}^{N_{Es}} [u_j(t) P_{sj}(t) B_{sj}] + P_{Grid}(t) B_{Grid}(t) + (C_{gas} + K_{OM.bl}) G_{bl}(t) \right\} \quad (2)$$

式中, N_g 为发电机总数; N_{Es} 为蓄电池总数; B_{gi} 、 B_{sj} 分别为第*i*个DG单元和第*j*个蓄电池的发电/产热成本; $P_{gi}(t)$ 为第*i*个DG单元的发电功率; $P_{sj}(t)$ 为第

*j*个储能装置在*t*时刻的充/放电功率; $U_i(t)$ 为在*t*时刻各单位的开关状态; S_{gi} 为第*i*个DG单元机组的起停成本; B_{Grid} 是从大电网的购电价格; C_{gas} 是天然气购买价格, 元/ m^3 ; K_{OM_i} 、 $K_{OM.bl}$ 为发电机组和辅助锅炉的成本维护系数; $P_{Grid}(t)$ 为微电网与大电网之间的购电(售电)功率

$$P_{Grid}(t) = P_L(t) - \left[\sum_{i=1}^{N_g} P_{gi}(t) + \sum_{j=1}^{N_{Es}} P_{sj}(t) \right] \quad (3)$$

其值为正时, 微电网从大电网购电; 其值为负时, 微电网向大电网售电。

2. 污染排放最小

该目标函数是关于大气污染物的, 如 NO_x 、 SO_2 和 CO_2 。关于污染物排放量的数学公式为

$$J_2 = \min \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{j=1}^{T_j} \delta_j \left[\sum_{i=1}^N EF_{ij} P_{gi}(t) \right] + P_{bl}(t) EF_{bl} \right\} \quad (4)$$

式中, EF_{ij} 为第*i*个发电单元和第*j*种污染物的排放系数; T_j 为污染物排放类型(NO_x 、 SO_2 和 CO_2); δ_j 为第*j*种污染物的排放成本, 元/kg; N 为排放污染物发电机(微型燃气轮机、柴油发电机和燃料电池等)的总数; F_{bl} 为辅助锅炉的排放因子。

3. 约束条件

电能功率供需平衡为

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{gi}(t) + \sum_{j=1}^{N_{Es}} P_{sj}(t) + P_{Grid}(t) = P_{L_{elec}}(t) \quad (5)$$

式中, $P_{L_{elec}}(t)$ 为*t*时刻的电力总负荷; 其他参数前文均已提到。

热能功率供需平衡为

$$P_{L_{th}}(t) = \sum_{i=1}^{N_{CHP}} P_i^{CHP}(t) + P_{bl}(t) + P_{s_{th}}(t) \quad (6)$$

$$G_{bl}(t) = \frac{P_{bl}(t)}{\eta_{bl} HHV} \quad (7)$$

式中, $P_{L_{th}}(t)$ 为微电网在*t*时刻的热负荷; N_{CHP} 是热电联产机组的数量; $P_{bl}(t)$ 是辅助锅炉的供热功率; $P_i^{CHP}(t)$ 为热电联产机组供热功率; $P_{s_{th}}(t)$ 为热能存储装置的存热或者放热功率; $G_{bl}(t)$ 为辅助锅炉所消耗的天然气量, m^3 ; η_{bl} 为辅助锅炉的效率; HHV 为天然气的热值, 这里取值为 $9.7 \text{ kW} \cdot \text{h}/m^3$ 。

电能输出功率限制为

$$P_{gi,\min}(t) < P_{gi}(t) < P_{gi,\max}(t) \quad (8)$$

$$|P_{\text{Grid}}| \leq P_{\text{exch}}^{\max} \quad (9)$$

式中, $P_{\text{exch}}^{\max}$ 为公共电网和微电网之间的最大电能交互功率; $P_{\text{gi.min}}(t)$ 、 $P_{\text{gi.max}}(t)$ 分别为第 i 个分布式单元在 t 时刻的最小、最大发电功率。

热能输出功率限制为

$$P_{i,\min}^{\text{CHP}} \leq P_i^{\text{CHP}}(t) \leq P_{i,\max}^{\text{CHP}} \quad (10)$$

$$P_{\text{bl}}^{\min} \leq P_{\text{bl}}(t) \leq P_{\text{bl}}^{\max} \quad (11)$$

式中, $P_{i,\max}^{\text{CHP}}$ 、 $P_{i,\min}^{\text{CHP}}$ 分别为第 i 个热电联产机组最大、最小热功率; $P_{\text{bl}}^{\max}$ 、 $P_{\text{bl}}^{\min}$ 分别为辅助供热锅炉最大、最小热功率。

细菌觅食优化算法

针对热电联产微电网系统经济环保优化特点, 采用细菌觅食优化算法^[7]。细菌觅食算法通过模拟大肠杆菌的趋药性行为, 即根据趋化、繁殖和迁移这3个算子的迭代进行优化, 该算法本身并不涉及到群体细菌相互之间的影响和相互作用的机制, 主要用于解决局部优化问题^[8]。空间矢量 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_x]$ (x 为矢量维度), 作为一个细菌, 优化问题的解 $J(\theta)$ 是空间中细菌的健康状态, 也就是优化函数的适应度值。

(1) 趋化

算法模型中, 趋化算子是模拟细菌实现最优觅食的一种行为, 集中向营养丰富的地方进行移动, 从而为不断寻找最优出路而实现的一种有目的的运动。趋化的过程为

$$\theta^i(j+1, k, l) = \theta^i(j, k, l) + C(i) \frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta^T(i) \Delta(i)}} \quad (12)$$

式中, $\theta^i(j, k, l)$ 为细菌 i 的第 j 次趋化过程、第 k 次复制和第 l 次驱散的空间矢量; $C(i)$ 为细菌 i 移动的长度向量; $\Delta(i)$ 为单位方向向量, $\Delta \in (-1, 1)$ 。

菌群中细菌之间的前进信号为

$$\begin{aligned} J_{\text{cc}}[\theta, P(j, k, l)] &= \sum_{i=1}^S J_{\text{cc}}^i[\theta, \theta^i(j, k, l)] \\ &= \sum_{i=1}^S \left\{ -d_{\text{attract}} \exp \left[-w_{\text{attract}} \sum_{m=1}^p (\theta_m - \theta_m^i)^2 \right] \right\} + \\ &\quad \sum_{i=1}^S \left\{ -h_{\text{repellent}} \exp \left[-w_{\text{attract}} \sum_{m=1}^p (\theta_m - \theta_m^i)^2 \right] \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

式中, $J_{\text{cc}}(\theta, P(j, k, l))$ 为一个被添加到实际的目标函数, 是 $J(i, j, k, l)$ 中随时间变化的函数; S 为总的细菌数; P 为优化变量的数目; d_{attract} 、 w_{attract} 、 $h_{\text{repellent}}$ 和 $w_{\text{repellent}}$ 为不同的系数。

(2) 繁殖

在繁殖循环步骤中, 细菌遵循“优胜劣汰”的自然选择原则, 即对每个细菌的适应度值进行排序, 淘汰掉适应度值最不合适的一半细菌, 使健康细菌的一半 (具有更高价值的目标函数) 生存, 生存到每个细菌分裂成两个相同的细菌, 然后被放置在相同的位置。因此, 细菌的总数保持不变。

(3) 驱散

由于营养物质的消耗或其他一些原因, 生存细菌的数量可能会逐渐或突然发生改变, 这可能会导致某些细菌被杀死, 在环境内移动到另一个位置。为了模拟这种现象, 每个细菌选择了基本驱散的概率为 P_{ed} , 细菌在完成一定次数的繁殖后, 将以一定概率被驱散到搜索空间中的任意位置。引入驱散过程可以加强算法全局寻优能力。

将细菌觅食算法应用于微电网电源出力的优化运行, 并做了如下改进。

1) 原始细菌觅食算法对于搜索一个很大的约束问题时, 很难找到全局最优解。为了克服这个问题, 每趋化一步就需要更新细菌位置。采用这种改进策略后, 使细菌有一个更好的移动方向, 并提高本地和全局最优解的准确性。要做到这一点, 在第 j 个趋化步骤后, 变异策略必须应用于细菌, 更新它们的位置。在本文中, 将电源的类型作为细菌的变量, 所有变量应为整数, 空间矢量 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_x]$ 作为一个细菌。变异策略可以描述如下。

假设 θ^{k1} 、 θ^{k2} 和 θ^{k3} 为3个细菌的位置; k_1 、 k_2 和 k_3 为 $[0, S]$ 之间的整数随机数, 并求可 $k_1 \neq k_2 \neq k_3$ 。突变细菌的位置可以由下式确定, 即

$$\theta_{\text{mut}}(j, k, l) = \theta^k(j, k, l) + F[\theta^{k_2}(j, k, l) - \theta^{k_3}(j, k, l)] \quad (14)$$

F 为突变的因素, 通常在 $[0.1, 1]$ 之间取值。令 $\theta_{\text{new}}^i = [\theta_{\text{new}_1}^i, \theta_{\text{new}_2}^i, \theta_{\text{new}_3}^i]$ 为细菌的位置向量, 其元素新位置的计算如下, 即

$$\theta_{new_1}^i = \begin{cases} \theta^i & Cr_1 > rand \\ \theta_{mut} & \text{else} \end{cases} \quad (15)$$

$$\theta_{new_2}^i = \begin{cases} \theta^i & Cr_2 > rand \\ \theta_{best} & \text{else} \end{cases} \quad (16)$$

$$\theta_{new_3}^i = \begin{cases} \theta_{best} & Cr_3 > rand \\ \theta_{mut} & \text{else} \end{cases} \quad (17)$$

式中， θ_{best} 为目标函数取得最小值的细菌的位置；计算出 $\theta_{new_1}^i$ 、 $\theta_{new_2}^i$ 和 $\theta_{new_3}^i$ 的数值，求出它们的目标函数的值，如果这些值低于 $J(\theta^i)$ ，它们的位置将会被 θ 所取代。

2) 细菌的单位移动步长是收敛速度和全局最优解的准确度的一个重要参数。如果步长选取过大，那么全局最优解的准确度就会降低，而如果选取过小，那么收敛速度就会降低。在文献[9]中，提出一个非线性动态减小的动态函数，以提高全局最优解的准确度和搜索能力，因此不是选择恒定的移动步长。所使用的动态函数为

$$C(i,j+1) = \left[\frac{C(i,j) - C(N_c)}{N_c + C(N_c)} \right] (N_c - j) \quad (18)$$

式中， j 为趋化步骤； N_c 为一个预定的参数。

在 BFA 算法中，细菌是7维空间矢量，代表7种电源类型，每代细菌总数为25个，趋化8次，最大前进步数为10步，繁殖4次，驱散3次，细菌繁殖期死亡概率为0.5，驱散概率为0.3。

算例分析

1. 微电网结构与参数

所采用的算例为基于某一地区的一热电联产的微电网，结构如图1所示。该地区的峰谷电价如表1所示，天然气价格为2.5元/m³。系统内各种DG参数如表2所示，光伏和风电这种间歇性能源，其出力是不可控的，当地的风光出力预测和负荷预测如图2所示。

表中电价峰段时间为10：00～15：00和18：00～21：00；平段时间为7：00～10：00、15：00～18：00和21：00～23：00；谷段时间为23：00～7：00。

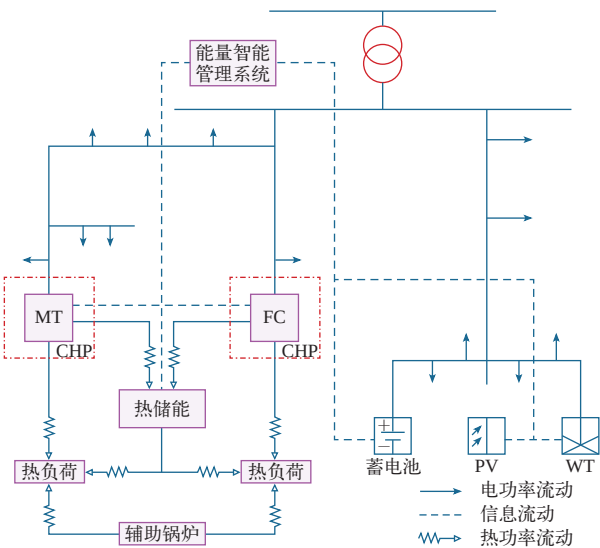


图1 CHP微电网结构图

表1 峰谷电价

购/售电时段	价格/ [元/(kW·h)]
购电峰段	0.83
购电平段	0.49
购电谷段	0.17
售电峰段	0.65
售电平段	0.38
售电谷段	0.13

表2 DG参数

DG编号	DG类型	功率下限/kW	功率上限/kW	起停成本/(元/kW)
1	MT	6	30	0.90
2	FC	3	30	1.16
3	PV	0	25	0
4	WT	0	15	0
5	ESS	-30	30	0

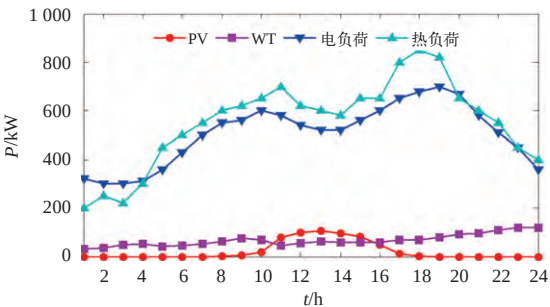


图2 PV和WT的24 h出力

各DG的污染物排放参数如表3所示，污染物折算成本如文献[10]，通过汇率转换成人民币。

表3 DG的排放参数和污染物处理成本

排放类型	折算成本 /(元/kg)	排放因子/[kg/(MW·h)]			
		MT	FC	辅助锅炉	大电网
CO ₂	0.086 8	724	489	845	922
NO _x	26.04	0.2	0.013 6	1.812	2.295
SO ₂	6.14	0.003 6	0.002 7	2.545	3.582

2. 优化结果

算例1。将经营成本和污染排放成本的系数分别设置为0.95和0.05（即 $\alpha=0.95$ ， $\beta=0.05$ ），此时DG的经营成本远大于排放成本，各DG的24 h出力如图3所示，负数表示向电网卖电或向储能装置充电或虚热。此时经营成本 $J_1=1\ 165.89$ 元，排放成本 $J_2=110.45$ 元。此时虽然经营成本最低，但污染物排放量较多，每天排放CO₂为1 165.68 kg，排放NO_x为0.292 5 kg，排放SO₂为0.268 3 kg。

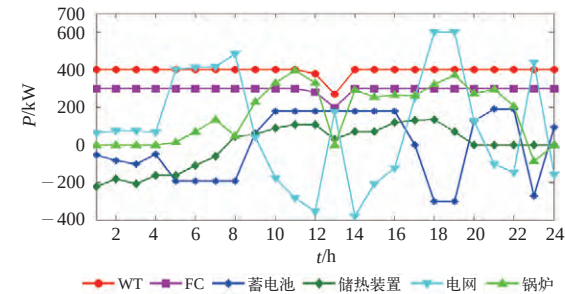


图3 偏重经营成本时各DG出力

算例2。将经营成本和污染排放成本的系数分别设置为0.05和0.95（即 $\alpha=0.05$ ， $\beta=0.95$ ），此时DG的经营成本远小于排放成本，对微电网进行环保调度，优化后，各DG的24 h出力如图4所示，负数表示向电网卖电或向储能装置充电或虚热。由于辅助锅炉和电网侧发电机的污染排放量更大，为了减少排放，尽可能安排微电网系统内的DG参与发电和供热，这样对减

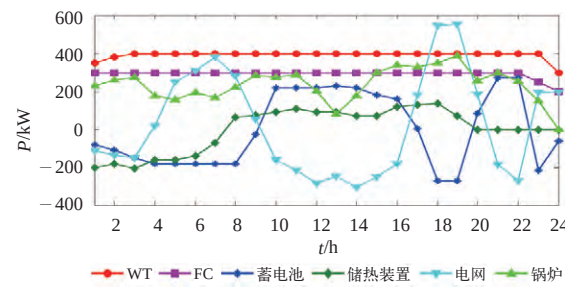


图4 按照污染物排放最少计算出的微电源出力

少排放是非常有利的，但其经济性并不高，此时经营成本 $J_1=1\ 280.14$ 元， $J_2=90.09$ 元，每天排放CO₂为953.34 kg，排放NO_x为0.231 7 kg，排放SO₂为0.212 6 kg。

算例3。将经营成本和污染排放成本的系数均设置为0.5（即 $\alpha=\beta=0.5$ ），此时DG的经营成本与排放成本同等重要，对微电网进行环保经济调度，优化后，各DG的24 h出力如图5所示，负数表示向电网卖电或向储能装置充电或虚热。此时经营成本 $J_1=1\ 203.87$ 元， $J_2=101.97$ 元，每天排放CO₂为1 078.68 kg，排放NO_x为0.263 3 kg，排放SO₂为0.241 4 kg。PSO算法所求得的结果分别是 $J_1=1\ 214.92$ 元， $J_2=106.77$ 元。

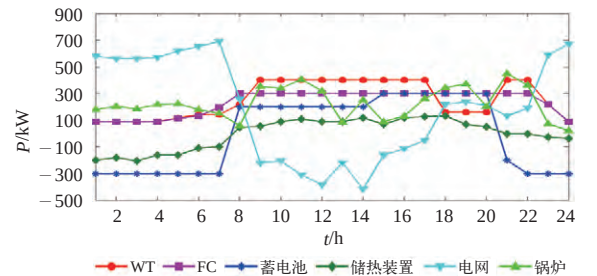


图5 最终优化结果

优化结果与PSO算法所求得的结果比较，比较结果如表4所示。

表4 算法比较

	BFO算法		PSO算法	
	经营成本 J_1 /元	排放成本 J_2 /元	经营成本 J_1 /元	排放成本 J_2 /元
算例1	1 165.89	110.45	1 170.62	113.58
算例2	1 280.14	90.09	1 288.23	92.32
算例3	1 203.87	101.97	1 214.92	106.77

结束语

在满足负荷需求与分布式电源出力限制的前提下，同时考虑发电成本与污染物排放成本，提出了微电网环保经济调度的数学模型。针对发电成本与排放成本的不同权重，运用细菌觅食算法进行优化调度。主要结论如下。

- 1) 重点考虑发电成本时，优先安排发电成本最小的DG最大限度出力；当重点排放成本时，优先安排排放成本最小的DG最大限度出力。
- 2) 当发电成本与排放成本同等重要时，发电

成本与排放成本的权重系数相同,等效成本为二者之和,此时优先安排等效总成本最小的DG出力。

参考文献

- [1] Molderink A, Bakker V, Bosman MGC, et al. A three-step methodology to improve domestic energy efficiency [C]. Innovative Smart Grid Technologies, 2010: 1-8.
- [2] Gomez San Román T, Rivier Abad J. Assessment of energy distribution losses for increasing penetration of distributed generation [J]. IEEE Transactions Power Systems, 2006, 21 (2): 533-540.
- [3] Hawkes A D, Leach M A. Modelling high level system design and unit commitment for a microgrid [J]. Applied Energy, 2009, 86 (7): 1253-1265.
- [4] 王锐, 顾伟, 吴志. 含可再生能源的热电联供型微电网经济运行优化 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (8): 22-27.
- [5] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 集中控制式微电网系统的稳态建模与运行优化 [J]. 电力系统自动

化, 2009, 33 (24): 78-82.

- [6] 李今朝. 国产300 MW火电机组调峰方式的研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2005.
- [7] Dong H, Ajith A, Jae H. A hybrid genetic algorithm and bacterial foraging approach for global optimization [J]. Journal of Information Science, 2007 (18): 3918-3937.
- [8] 刘小龙, 赵奎领. 基于免疫算法的细菌觅食优化算法 [J]. 计算机应用, 2012, 32 (3): 634-637.
- [9] Farhat I A, El-Hawary M E. Dynamic adaptive bacterial foraging algorithm for optimum economic dispatch with valve-point effects and wind power [J]. IET generation, transmission & distribution, 2010, 4 (9): 989-999.
- [10] Bhuvaneswari R, Edrington C S, Cartes D A, et al. Online economic environmental optimization of a microgrid using an improved fast evolutionary programming technique [C]. North American Power Symposium (NAPS), 2009: 1-6.

(收稿日期: 2014-05-21) EA

(上接第37页)

算静态潮流,对于风力发电系统中时变系统无法计算随着时间变化的动态潮流,在以后的工作中有待开发、更新。

参考文献

- [1] 徐恒娇, 王洪诚, 胡江航, 等. 基于Matpower的潮流计算方法 [J]. 物联网技术, 2013 (1): 43-45.
- [2] 吕莎. 基于逐步倒推法结合Matpower潮流计算的地市级电网网架规划方法 [J]. 湖北电力, 2012, 14 (14): 10-12.
- [3] 康丽, 陈丽丹, 刘欣, 等. 电力系统潮流计算的牛顿二阶法新解 [J]. 河海大学学报, 2013, 42 (3): 277-282.
- [4] 栗超. 电流注入型牛顿法潮流计算的研究及其应用 [D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- [5] 陈珏. 电力系统稳态分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

- [6] 于群, 曹娜. Matlab/Simulink电力系统建模与仿真 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [7] Zimmerman Ray Daniel, Thomas Robert John. Matpower: steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26 (1): 1-4.
- [8] 纪建伟. 电力系统分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [9] 张立梅, 唐巍计. 计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算 [J]. 电工技术学报, 2010, 25 (8): 123-129.
- [10] Yan Sun, Nan Shan Hang. Power flow calculation method for islanded power network [C]. Power and Energy Engineering Conference, 2009: 1-5.
- [11] 陈亚宁, 李晓明. 基于Ybus法的配电网改进牛顿潮流算法 [J]. 浙江电力, 2008 (3): 13-16.

(收稿日期: 2014-06-10) EA