

不同运行调度模式下微网经济运行对比分析

陈洁, 杨秀, 朱兰, 张美霞

(上海电力学院 电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 为了对比分析不同运行调度模式对微网经济运行的影响,在考虑微源同时提供有功和无功功率的基础上,提出了计及制热收益的热电联产型微网系统经济运行优化模型。以一个包含风、光、储、微型燃气轮机、燃料电池以及热电负荷的具体微网为例,提出了不同运行调度模式下的经济调度策略,运用改进遗传算法优化了考虑实时电价的并网运行方式下各微源的有功和无功出力,并对比分析了微网与外网交互功率的约束以及不同运行调度模式对经济调度的影响。仿真结果表明微网可与外网自由双向交换功率的模式更具有经济优势,验证了所提模型、策略和算法的有效性。

关键词: 微网; 经济运行; 运行调度模式; 调度策略; 遗传算法; 热电联产; 网架结构; 模型

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.08.018

0 引言

微网^[1-3]将各种分布式电源、负荷、储能单元及控制装置等结合在一起,形成一个单一可控的单元,向用户同时提供电能和热能,实现热电联产 CHP (Combined Heat and Power)。微网已经成为智能电网中管理分布式能源的一种有效技术手段,针对微网的运行控制等方面已开展了广泛的研究^[4-7]。

目前对微网系统的经济运行与优化调度的研究主要集中于分布式电源、负荷及储能装置等都集中于同一母线的简化微网结构。文献[8]针对由风、光、储、燃料电池、余热锅炉及热/电负荷等构成的热电联产型微网系统,在微网可以与外网自由双向交换功率的调度模式下,建立了经济运行优化模型;文献[9]给出了供电、供热、供气一体化的微网结构,在考虑温室气体、污染物排放约束以及微网与外网可以自由双向交换功率的基础上,实现热、电、气各种能源的综合优化;国内学者刘小平、丁明等针对微网运行中各种不确定性因素的影响,在微网不可以向外网倒送功率的基础上,提出了基于机会约束规划的微网系统动态经济调度模型^[10];文献[11]在微网可以从外网吸收功率、但不可以向外网输出功率的运行调度模式下,讨论了不同电力市场方案对经济调度的影响。但是,这些研究很少针对具体的网

架进行经济调度,一般只考虑系统的有功平衡,较少考虑无功的影响,也并未考虑同时优化调度微源的有功和无功出力;另一方面,相应的约束条件过于简化,对微网联络线交换功率、旋转备用、储能元件充放电等指标与约束条件很少考虑。

本文以一个包含光伏 PV (PhotoVoltaic)、风机 WT (Wind Turbine)、微型燃气轮机 MT (Micro Turbine)、燃料电池 FC (Fuel Cell)、蓄电池 SB (Storage Battery) 及热电负荷的微网为对象,建立热电联供型微网经济运行模型,在考虑 FC、SB 的同时输出有功和无功,并在满足能量供需平衡、电能质量和 SB 充放电深度等约束条件的基础上,运用改进遗传算法优化了考虑实时电价的并网运行方式下各微源的有功、无功出力,并对比分析了微网与外网交互功率的约束及不同运行调度模式对经济调度的影响。

1 微网系统运行优化模型

在单位时间间隔 Δt 内,本文作如下假设:微源的有功和无功出力恒定;热、电负荷需求恒定;微网与主网间的交互功率恒定且交互电价维持恒定。对于 Δt 选取不同的值,以下所建立的优化模型都适用,本文取 Δt 为 1 h 来分析。

1.1 微源建模

1.1.1 MT 模型

含 MT 的热电联产系统的数学模型:

$$\begin{cases} Q_{MT}(t) = P_e(t) (1 - \eta_e(t) - \eta_l) / \eta_e(t) \\ Q_{he}(t) = Q_{MT}(t) K_{he} \\ V_{MT} = \sum [P_e(t) \Delta t / (\eta_e(t) L)] \end{cases} \quad (1)$$

其中, $Q_{MT}(t)$ 为 t 时刻 MT 排气余热; $\eta_e(t)$ 为 t 时刻 MT 的发电效率; η_l 为 MT 散热损失系数; $P_e(t)$ 为 t 时刻 MT 输出的电功率; $Q_{he}(t)$ 为 t 时刻 MT 烟气余热

收稿日期: 2012-09-03; 修回日期: 2013-06-21

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2011A-A05A106); 国家自然科学基金资助项目(50977055); 上海市科委重点科技攻关计划(10dz1203100, 11dz1210405); 曙光计划(10SG51); 上海高等教育“085”工程建设项目

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA-05A106), the National Natural Science Foundation of China(50977055), Key Technology R & D Program of Shanghai(10dz-1203100, 11dz1210405), Sunburst Project(10SG51) and Shanghai Higher Education “085” Engineering Construction Program

提供的制热量; K_{he} 为溴冷机的制热系数; V_{MT} 为 MT 消耗的天然气的量; Δt 为 MT 的运行时间; L 为天然气低热热值,取 $9.7 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

MT 的燃料成本计算式为:

$$C_{MT} = (C_{nl}/L) \sum [P_e(t) \Delta t / \eta_e(t)] \quad (2)$$

其中, C_{nl} 为天然气价格,本文取为 $2.5 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

本文算例基于 Capstone 公司的 C65 型 MT,其 $\eta_e(t)$ 与 $P_e(t)$ 的函数参见文献[12]。

1.1.2 FC 模型

FC 发电过程中的燃料消耗费用计算公式如下:

$$C_{FC} = (C_{nl}/L) \sum [P_{FC}(t) \Delta t / \eta_{FC}(t)] \quad (3)$$

其中, $P_{FC}(t)$ 、 $\eta_{FC}(t)$ 分别为 t 时刻 FC 的输出功率与总效率。

本文算例基于质子交换膜 FC(40 kW IFC PC-29),其 $\eta_{FC}(t)$ 与 $P_{FC}(t)$ 的函数参见文献[12]。

1.1.3 SB 模型

SB^[13]在 t 时刻的剩余电量与 SB 在 $t-1$ 时刻的剩余电量、 $t-1$ 时刻到 t 时刻 SB 的充放电量和电量衰减量有关。

设 SB 在 t 时刻的充放电功率为 $P_{SB}(t)$,放电时, $P_{SB}(t) \geq 0$, t 时刻的剩余容量为:

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t-1) - P_{SB}(t) / \eta_D - D_B Q_B^S \quad (4)$$

SB 充电时, $P_{SB}(t) \leq 0$, t 时刻的剩余容量为:

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t-1) - P_{SB}(t) \eta_C - D_B Q_B^S \quad (5)$$

其中, $\text{SOC}(t)$ 为 t 时刻 SB 的剩余容量; η_C 、 η_D 分别为充、放电效率; D_B 为 SB 单位时间间隔的自放电比例; Q_B^S 为 SB 的总容量。

PV 的出力模型参见文献[14-15],WT 的出力模型参见文献[16]。

1.2 目标函数

本文未考虑微源的运行状态变化快等特点,仍采用常规的日前调度模型^[17],目标函数为微网一天内由发电成本(包括燃料成本、投资折旧成本、运行维护成本)、污染排放物对环境的影响成本、微网与外网的交互成本以及热电联产系统的制热收益所构成的综合成本^[18-21]最低。

$$\min C = \sum_{t=1}^{24} [C_f(t) + C_{DP}(t) + C_{OM}(t) + C_e(t)] + C_{grid} - C_{sh} \quad (6)$$

$$C_f(t) = \sum_{i=1}^n F_i(P_i(t)) \quad (7)$$

$$C_{DP}(t) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_{az,i}}{8760 k_i} \frac{r(1+r)^{n_i}}{(1+r)^{n_i} - 1} P_i(t) \right] \quad (8)$$

$$C_{OM}(t) = \sum_{i=1}^n [K_{OM,i} P_i(t)] \quad (9)$$

$$C_e(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [(V_{ej} + V_j) Q_{ij} P_i(t)] \quad (10)$$

$$C_{grid} = C_P(t) C_{GP}(t) - C_S(t) C_{SP}(t) \quad (11)$$

$$C_{sh} = Q_{he} K_{ph} \quad (12)$$

其中, $C_f(t)$ 、 $C_{DP}(t)$ 、 $C_{OM}(t)$ 、 $C_e(t)$ 分别为 t 时刻各微源的燃料成本、投资折旧成本、运行维护成本、环境成本总和; C_{grid} 为微网与外网的交互成本; C_{sh} 为热电联产系统的制热收益; F_i 为第 i 个微源的燃料成本函数; $P_i(t)$ 为第 i 个微源 t 时刻的有功出力; n 为微源的个数; $C_{az,i}$ 为第 i 个微源的单位容量安装成本; k_i 为第 i 个微源的容量因数; k_i 为第 i 个微源的年发电量/(8760×该微源的额定功率); r 为年利率; n_i 为第 i 个微源的投资偿还期; $K_{OM,i}$ 为第 i 个微源的单位电量运行维护成本系数; V_{ej} 为第 j 项污染物的环境价值; V_j 为第 j 项污染物所受罚款; Q_{ij} 为第 i 个微源单位电量的第 j 项污染物排放量; m 为污染物的种类; $C_P(t)$ 、 $C_S(t)$ 分别为 t 时刻微网向外网的购电电价和售电电价; $C_{GP}(t)$ 、 $C_{SP}(t)$ 分别为 t 时刻微网向外网的购电量和售电量; Q_{he} 为热电联产系统的制热量; K_{ph} 为单位制热量的售价。

1.3 约束条件

a. 潮流约束。

$$\Delta P_f = P_{fs} - \sum_{g \in f} U_f U_g (G_{fg} \cos \theta_{fg} + B_{fg} \sin \theta_{fg}) = 0 \quad (13)$$

$$\Delta Q_f = Q_{fs} - \sum_{g \in f} U_f U_g (G_{fg} \sin \theta_{fg} - B_{fg} \cos \theta_{fg}) = 0 \quad (14)$$

其中, P_{fs} 、 Q_{fs} 分别为节点 $f(f=1, 2, \dots, h)$ 给定的有功和无功功率值, h 为系统节点数; G_{fg} 、 B_{fg} 、 θ_{fg} 分别为节点 f 和节点 g 之间的导纳和相角差; $g \in f$ 表示与节点 f 相连的节点。

b. 运行电压约束。

$$U_{f,\min} \leq U_f \leq U_{f,\max} \quad (15)$$

其中, $U_{f,\min}$ 、 $U_{f,\max}$ 分别为节点 f 上运行电压的最小、最大值。

c. PV、WT 和 MT 的有功出力约束。

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

其中, $P_{i,\min}$ 、 $P_{i,\max}$ 分别为第 i 个微源有功功率的最小、最大值。

d. MT 爬坡率约束^[22]。

增负荷时:

$$P_{MT}(t) - P_{MT}(t-1) \leq R_{up,MT} \quad (17)$$

减负荷时:

$$P_{MT}(t-1) - P_{MT}(t) \leq R_{down,MT} \quad (18)$$

其中, $R_{up,MT}$ 、 $R_{down,MT}$ 分别为 MT 增加和降低有功功率的限值。

e. 微网与外网允许交互的传输功率约束。

$$P_{Grid,\min} \leq P_{Grid}(t) \leq P_{Grid,\max} \quad (19)$$

$$Q_{Grid,\min} \leq Q_{Grid}(t) \leq Q_{Grid,\max} \quad (20)$$

$$|\cos \varphi| = \frac{|P_{Grid}(t)|}{\sqrt{P_{Grid}^2(t) + Q_{Grid}^2(t)}} \geq c \quad (21)$$

其中, $P_{\text{Grid},\min}$ 、 $P_{\text{Grid},\max}$ 、 $Q_{\text{Grid},\min}$ 、 $Q_{\text{Grid},\max}$ 分别为微网与外网允许交互传输的最小、最大有功功率和最小、最大无功功率; $\cos \varphi$ 为联络线传输功率的功率因数; c 为联络线传输功率的功率因数限值。

式(19)—(21)表明将微网作为外部电网的一个“可控负荷”, 保证联络线与微网交互传输的功率保持在一定的范围, 且具有较高的功率因数, 确保了联络线传输功率的安全性且更符合供电公司对接入微网的要求。

f. SB 运行约束。

$$P_{\text{SB},\min} \leq P_{\text{SB}}(t) \leq P_{\text{SB},\max} \quad (22)$$

$$-S_{\text{inv},\text{SB}} \leq P_{\text{SB}}(t) \leq S_{\text{inv},\text{SB}} \quad (23)$$

$$-\sqrt{S_{\text{inv},\text{SB}}^2 - P_{\text{SB}}^2(t)} \leq Q_{\text{SB}}(t) \leq \sqrt{S_{\text{inv},\text{SB}}^2 - P_{\text{SB}}^2(t)} \quad (24)$$

$$\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}(t) \leq \text{SOC}_{\max} \quad (25)$$

其中, $P_{\text{SB},\max}$ 、 $P_{\text{SB},\min}$ 分别为 SB 的最大和最小有功功率; $S_{\text{inv},\text{SB}}$ 为 SB 逆变器的容量; $P_{\text{SB}}(t)$ 、 $Q_{\text{SB}}(t)$ 分别为 t 时刻 SB 交流侧的充放电有功功率和无功功率; $\text{SOC}_{\min}$ 、 $\text{SOC}_{\max}$ 分别为 SB 的最小和最大剩余容量。

从式(24)可以看出, SB 的无功出力仅受逆变器容量的限制, 与设备本身的容量无关^[23]。

g. FC 运行约束。

$$P_{\text{FC},\min} \leq P_{\text{FC}}(t) \leq P_{\text{FC},\max} \quad (26)$$

$$P_{\text{FC}}(t) \leq S_{\text{inv},\text{FC}} \quad (27)$$

$$0 \leq Q_{\text{FC}}(t) \leq \sqrt{S_{\text{inv},\text{FC}}^2 - P_{\text{FC}}^2(t)} \quad (28)$$

其中, $P_{\text{FC},\min}$ 、 $P_{\text{FC},\max}$ 分别为 FC 有功功率的最小、最大值; $P_{\text{FC}}(t)$ 、 $Q_{\text{FC}}(t)$ 分别为 t 时刻 FC 交流侧的有功功率和无功功率; $S_{\text{inv},\text{FC}}$ 为 FC 逆变器的容量。

式(23)、(24)及(27)、(28)表明 SB 和 FC 逆变器的容量优先分配给有功出力。

h. 旋转备用约束。

$$\begin{aligned} &P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{MT}}(t) + \min \{P_{\text{SB},\max}, \\ &\sqrt{S_{\text{inv},\text{SB}}^2 - Q_{\text{SB}}^2(t)}, (\text{SOC}(t-1) - \\ &\text{SOC}_{\min} - D_{\text{B}} Q_{\text{B}}^{\text{S}}) \eta_{\text{D}}\} + \min \{P_{\text{FC},\max}, \\ &\sqrt{S_{\text{inv},\text{FC}}^2 - Q_{\text{FC}}^2(t)}\} + P_{\text{Grid},\max} \geq \\ &P_{\text{D}}(t) + P_{\text{loss}}(t) + R(t) \end{aligned} \quad (29)$$

其中, $P_{\text{D}}(t)$ 、 $P_{\text{loss}}(t)$ 、 $R_{\text{D}}(t)$ 分别为 t 时刻微网系统的总负荷、总网损和所需备用容量。

微源和外网的无功出力影响系统的网损, 而网损与系统总有功负荷之和与微源和外网的总有功出力相等, 从而无功出力影响了微源和外网的有功出力, 进而影响各项成本。从式(24)、(28)可看出, 微源的有功出力又影响其无功出力的变化范围, 故本文模型是在有功与无功相互影响的基础上优化求解的。

1.4 系统运行调度模式

微网经济调度模型需要基于一种确定的运行调度模式进行优化, 本文根据微网与外网间的能量交

互方式及微网内分布式电源是否享受优先调度权, 将微网与外网间的交互运行分为以下 3 种典型的调度模式^[24]。

(1) 模式 1: 优先利用微源来满足微网内的负荷需求, 若存在功率缺额, 可以从外网吸收功率, 但不可以向外网输出功率。调度策略为:

a. 由于 PV 和 WT 发电具有不可控性, 且作为可再生能源不直接消耗燃料, 不污染环境, 故优先利用其出力, 跟踪控制最大功率输出;

b. 为使热电联产系统运行效率最高, 其采用“以热定电”的方式, 由热负荷确定 MT 的有功出力;

c. 当 WT、PV 和 MT 的有功出力超过微网电负荷和网损时, 超出的部分给 SB 充电, 同时监视 SB 的充放电状态, 当 SB 充满时依次切除部分发电成本较高的 PV 或 WT;

d. 当 WT、PV 和 MT 的有功出力无法满足微网电负荷和网损时, 首先令 SB 输出有功, 同时检测 SB 的充放电状态;

e. 若 SB 在出力范围内无法确保微网安全可靠运行(在不切负荷的基础上, 微网能在满足所有约束条件下运行), 则优先调用 FC 的有功出力, 若在 FC 出力范围内仍无法满足微网安全可靠运行, 则再从外网购电。

(2) 模式 2: 微源与外网共同参与系统的运行优化, 但仍只可以从外网吸收功率, 不可以倒送功率。调度策略为:

a. 前 4 条调度策略同模式 1;

b. 若 SB 在出力范围内无法确保微网安全可靠运行, 则比较 FC 的发电成本与购电成本, 若 FC 的发电成本高于电价, 则 FC 不发有功, 微网从外网购电, 此时若在联络线交换功率范围内仍无法满足微网安全可靠运行, 则再调度 FC 发有功来满足微网安全可靠运行需求;

c. 反之, 若 FC 的发电成本低于电价, 微网优先调用 FC 的有功出力, 若在 FC 出力范围内仍无法满足微网安全可靠运行, 则再从外网购电。

(3) 模式 3: 微网可与外网自由双向交换功率, 谷时电价较低不向外网售电, 峰时电价较高, 微网在安全可靠运行的基础上, 可向外网售电。调度策略为:

a. 前 2 条调度策略同模式 1;

b. 当 WT、PV 和 MT 的有功出力超过微网电负荷和网损时, 超出的部分在峰时向外网出售, 在谷时向 SB 充电(峰时电价高, 谷时电价低, 而 SB 的储能有限, 采用此运行策略能取得更好的经济效益), 若 SB 充满则向外网售电, 此时若 FC 发电成本低于电价, 可在容量范围内增加出力向外网售电来获益;

c. 当 WT、PV 和 MT 的有功出力无法满足微网

电负荷和网损时,首先令 SB 输出有功,同时监视 SB 的充放电状态;

d. 若 SB 在出力范围内可满足微网安全可靠运行,若在峰时可考虑增加 SB 的有功功率向外网售电,否则维持原出力;

e. 若 SB 在出力范围内无法确保微网安全可靠运行,则再比较 FC 的发电成本与购电成本,若 FC 的发电成本高于电价,则 FC 不发有功,微网从外网购电,此时若在联络线交换功率范围内仍无法满足微网安全可靠运行,则再调度 FC 发有功来满足微网安全可靠运行需求;

f. 反之,若 FC 的发电成本低于电价,微网优先调用 FC 的有功出力,若 FC 在出力范围内能满足微网安全可靠运行,可继续增加 FC 的有功出力向外网售电来获取收益,此时若在 FC 出力范围内仍无法满足微网安全可靠运行,则再从外网购电。

本文所提的经济调度策略与国家节能减排的政策相符,在满足节能环保调度的基础上,实现微网的经济效益最好。本文利用经济调度策略确定各微源的出力以及外网和微网之间传输功率的运行状态(即确定有功出力的状态变量),与下述改进遗传算法相结合,共同对模型进行优化求解。

2 模型求解算法

遗传算法是一种基于自然选择和基因遗传学原理的随机并行搜索算法,是一种寻求全局最优解而不需要任何初始化信息的高效优化算法。遗传算法的参数中交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 的选择是影响遗传算法性能的关键, P_c 越大,新个体产生的速度越快,然而 P_c 过大时遗传模式被破坏的可能性越大, P_c 过小,会使得搜索过程缓慢。对于变异概率 P_m , P_m 过小,不容易产生新的个体结构,而 P_m 过大,遗传算法变成了纯粹的随机搜索算法。M. Srinivas 等提出了一种自适应算法, P_c 和 P_m 能随适应度自动改变,但此算法对个体适应度接近或等于最大适应度时, P_c 和 P_m 接近或等于 0,这对进化初期是不利的,使得进化初期的优良个体处在一种不发生变化的状态,导致进化走向局部最优解的可能性增加^[25]。本文对 P_c 和 P_m 做如下改进:

$$P_c = \begin{cases} P_{c2} - \frac{(P_{c2} - P_{c3})(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}} & f' \geq f_{avg} \\ P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f' - f_{min})}{f_{avg} - f_{min}} & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (30)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m2} - \frac{(P_{m2} - P_{m3})(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}} & f' \geq f_{avg} \\ P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f' - f_{min})}{f_{avg} - f_{min}} & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (31)$$

其中, f_{max} 、 f_{min} 和 f_{avg} 分别为种群中的最大、最小和平均

适应度; f' 为要交叉的两个体中较大的适应度。取 $P_{c1} = 0.85$ 、 $P_{c2} = 0.5$ 、 $P_{c3} = 0.2$ 、 $P_{m1} = 0.09$ 、 $P_{m2} = 0.05$ 、 $P_{m3} = 0.01$ 。

改进算法使群体中最大适应度个体的 P_c 和 P_m 不为 0,分别提高到 P_{c3} 和 P_{m3} ,使优良个体不处于一种停滞状态,从而使算法跳出局部最优解。而当个体的适应度小于平均适应度时,适应度值比较集中,容易陷入局部最优解,此时改进算法增大了 P_c 和 P_m ,从而增加了种群的多样性。

本文运用改进自适应遗传算法并采取轮盘赌选择、多点交叉和多点变异来求解以下算例。群体规模为 30,迭代次数为 300。由于遗传算法属于启发式优化算法,本身具有随机性,每次优化会有不同的结果,故下文结果均是重复计算 20 次得到的平均值。

3 算例分析

3.1 微网系统结构

本文在文献[26]中微网结构图的基础上进行了相应的改动,如图 1 所示。

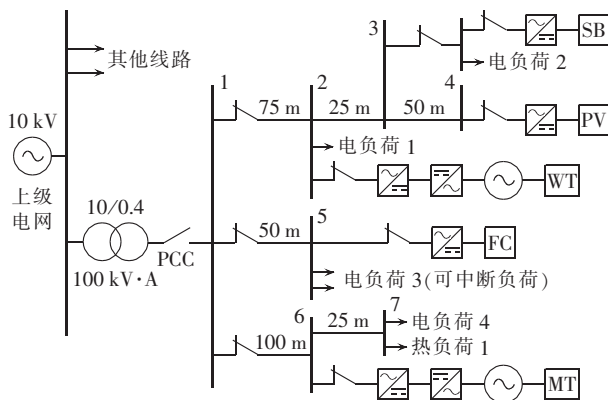


图 1 微网系统结构图

Fig.1 System structure of microgrid

图 1 中,电负荷 1 为居民负荷,最大有功功率为 15 kW;电负荷 2 为商业负荷,最大有功功率为 30 kW;电负荷 3 为工业负荷,最大有功功率为 2×15 kW,属于可中断负荷;电负荷 4 为工业负荷,最大有功功率为 40 kW。3 种负荷的功率因数都取 0.85。考虑到配网辐射状的网络结构与低压线路参数的特点,取线路电阻 $R = 0.64 \Omega/\text{km}$, $X = 0.1 \Omega/\text{km}$ 。

3.2 基础数据

本文中制热收益取为 0.1 元/(kW·h)^[12];电压允许偏差为 $-5\% \sim +5\%$;微网与外网传输的有功和无功功率上、下限分别为 50 kW、-50 kW 和 30.987 kvar、-30.987 kvar(外网向微网注入功率为正,反之则为负),联络线传输功率的功率因数限值为 0.85;SB 逆变器的容量为 60 kV·A,SB 的最大、最小剩余容量和初始容量分别为 100%、30%、70% 的额定容量,其额

定容量为 900 kW·h;FC 逆变器的容量为 40 kV·A;峰时为 09:00—24:00,谷时为 01:00—08:00。各微源的相关信息如表 1 所示,WT 出力、PV 出力、热负荷、由热负荷求出的 MT 有功出力曲线以及 3 种性质电负荷的日负荷曲线(与该日最大电负荷百分比)如图 2 所示。实时电价参见文献[24],各微源污染物排放数据、污染物价值标准、罚款等级参见文献[21]。

表 1 各微源的参数

Tab.1 Parameters of various micro sources

电源类型	安装成本/ (万元·kW ⁻¹)	寿命/a	功率下限/ kW	功率上限/ kW
MT	1.0	10	15	65
FC	2.8	10	8	40
PV	2	20	0	12
WT	1.2	10	0	24
SB	0.0667	10	-60	60

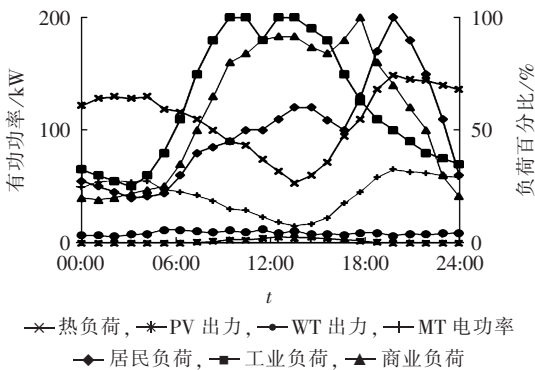


图 2 已知机组出力及热/电负荷

Fig.2 Unit outputs known and heating/electric loads

3.3 优化结果

本文假设各时段微网不能仅与外网交互传输无功功率,且 MT 不提供无功出力。

3.3.1 考虑/不考虑联络线功率的功率因数限制对比

并网运行时,由于节点 1 连接配网,潮流计算时将其看成平衡节点,同时取它的电压作为微网的参考电压,MT、FC 和 SB 都采用功率(PQ)控制。微网运行调度采用模式 2 时,不考虑联络线传输功率的功率因数限制(即式(21))的有功优化结果如图 3 所示,无功优化结果如图 4 所示;考虑联络线传输功率的功率因数限制的有功优化结果如图 5 所示,无功优化结果如图 6 所示,其中有功缺额=总有功负荷-PV 有功出力-WT 有功出力-MT 有功出力,无功缺额=总无功负荷。

从图 3 可以看出,采用调度模式 2 时,能量只能由外网系统向微网系统传输,微网内部的电源与外网共同参与系统的优化运行。17:00 之前微网的有功缺额主要由 SB 提供,当 17:00 时 SB 剩余电量到达下限后,系统的有功缺额主要由外网来提供,联络线传输功率主要起到了调峰的作用,FC 仅在发电成本

低于购电电价时才提供有功出力。

从图 4 可以看出,SB 和 FC 在优先满足有功需求基础上所提供的无功,配合联络线无功来满足微网的无功需求。微网负荷较轻的时段(01:00—07:00 和 23:00—24:00),微网系统的无功需求主要由 SB 来提供,而其他时段主要由 FC 和外网来提供。

微网运行调度采用模式 2 且不考虑式(21)的约束时,一天内 SB 只需充电 2 次、放电 1 次,延长了 SB 的使用寿命。一天内联络线传输功率的最低功率因数为 0.000377,综合成本为 1323.7 元。

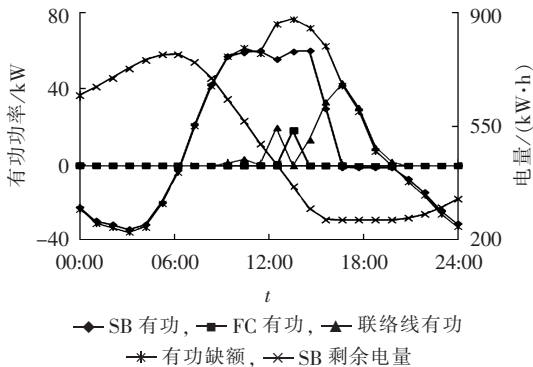


图 3 模式 2 时微网有功出力优化结果(不考虑式(21))

Fig.3 Results of active power optimization of microgrid in mode 2(neglect formula(21))

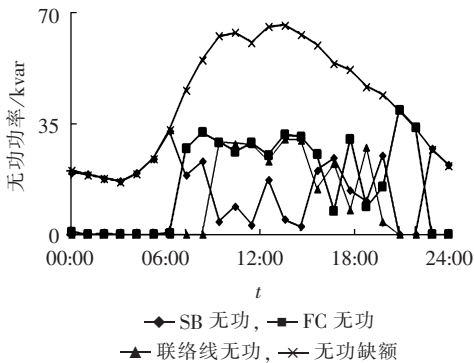


图 4 模式 2 时微网无功出力优化结果(不考虑式(21))

Fig.4 Results of reactive power optimization of microgrid in mode 2(neglect formula(21))

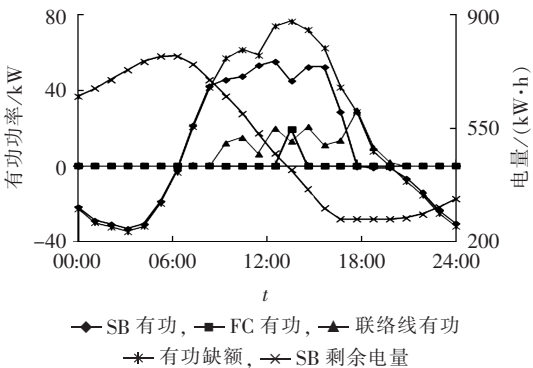


图 5 模式 2 时微网有功出力优化结果(考虑式(21))

Fig.5 Results of active power optimization of microgrid in mode 2(consider formula(21))

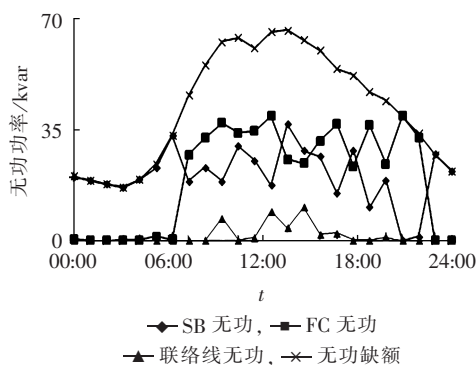


图 6 模式 2 时微网无功出力优化结果(考虑式(21))

Fig.6 Results of reactive power optimization of microgrid in mode 2(consider formula(21))

微网运行调度采用模式 2 时,考虑式(21)约束与不考虑式(21)约束时,各微源的有功出力及外网提供的有功出力具有相似的规律。

从图 6 可以看出,在微网负荷较轻时段(01:00—07:00 和 23:00—24:00),系统的无功需求主要由 SB 来提供,而其他时段主要由 SB 和 FC 共同提供,微网只从外网吸收较少的无功,且外网向微网传输功率的功率因数较高,与微网作为一个可控负荷接入配网,配网对负荷电能质量的要求相符。

微网在采用模式 2 且考虑式(21)约束时,一天内 SB 需充电 2 次、放电 1 次,各时段联络线传输功率的功率因数都不低于 0.85,综合成本为 1344.1 元。

微网运行调度采用模式 2 时,不考虑式(21)相比于考虑式(21)更有经济优势,但联络线传输功率的功率因数较差,与微网作为一个可控负荷接入配网,配网对负荷电能质量的要求不符。

3.3.2 系统运行时采用不同调度模式对比

在考虑式(21)的约束下,微网运行调度采用模式 1 时有功优化结果如图 7 所示,无功优化结果如图 8 所示;微网运行调度采用模式 3 时有功优化结果如图 9 所示,无功优化结果如图 10 所示。

从图 7 可以看出,采用调度模式 1 时,能量只能由外网向微网系统传输,当微网中存在有功缺口时,

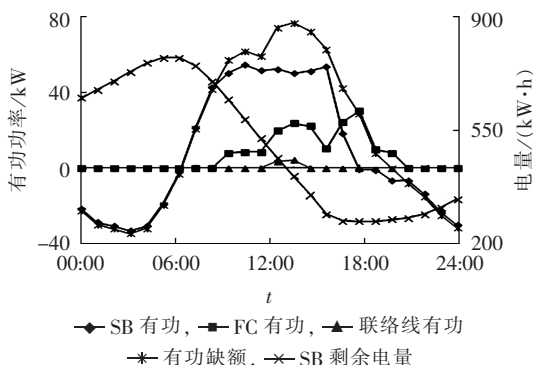


图 7 模式 1 时微网有功出力优化结果(考虑式(21))

Fig.7 Results of active power optimization of microgrid in mode 1(consider formula(21))

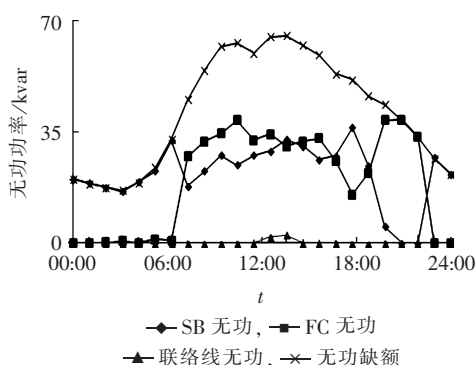


图 8 模式 1 时微网无功出力优化结果(考虑式(21))

Fig.8 Results of reactive power optimization of microgrid in mode 1(consider formula(21))

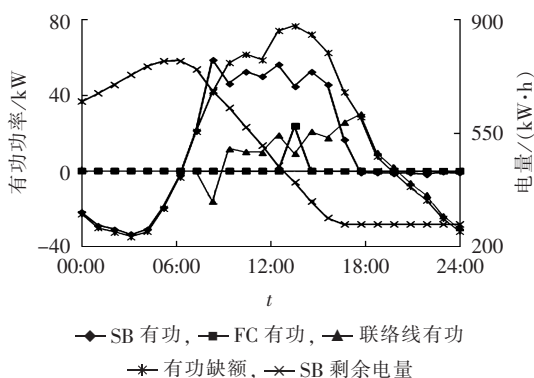


图 9 模式 3 时微网有功出力优化结果(考虑式(21))

Fig.9 Results of active power optimization of microgrid in mode 3(consider formula(21))

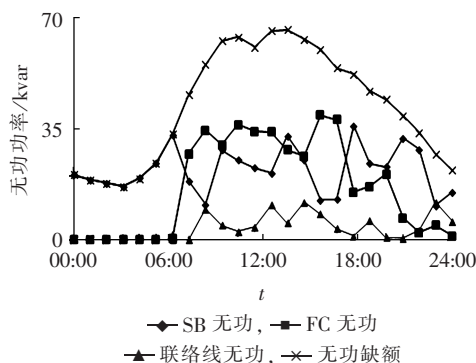


图 10 模式 3 时微网无功出力优化结果(考虑式(21))

Fig.10 Results of reactive power optimization of microgrid in mode 3(consider formula(21))

优先调用微源的出力,当所有微源的出力范围内仍无法满足微网安全可靠运行时才向外网购电。17:00 之前微网的有功缺口主要由 SB 提供,当 17:00 时 SB 剩余电量到达下限后,有功缺口主要由 FC 来提供,FC 在这里主要起到了调峰的作用,微网只在仅由内部电源无法满足微网安全可靠运行的时段(13:00—14:00)才向外网购电。

从图 8 可以看出,在微网负荷较轻时段(01:00—07:00 和 23:00—24:00),系统的无功需求主要由 SB 来提供,而其他时段主要由 SB 和 FC 共同提供,微

网只在仅由内部电源无法满足微网安全可靠运行的时段(13:00—14:00)才向外网吸取少量的无功,且外网向微网传输功率的功率因数较高。

从图 9 可以看出,采用调度模式 3 时,能量在微网系统与外网系统间可双向自由交互,峰时微源在满足微网安全可靠运行的基础上,在出力范围内可增加出力向外网售电来获益。17:00 之前微网系统的有功缺额主要由 SB 来提供,当 17:00 时 SB 剩余电量到达下限后,有功缺额主要由外网来提供,FC 只在发电成本低于电价的时段(14:00)才提供有功出力。

从图 10 可看出,在微网负荷较轻时段(01:00—07:00),系统的无功需求主要由 SB 来提供,而其他时段主要由 SB 和 FC 共同提供,微网仅在峰时段才向外网吸取少量的无功,且外网向微网传输功率的功率因数较高。

对比负荷需求全部由外网系统提供的模式,在满足微网与外网交互功率约束的基础上,采用上述 3 种调度模式所需费用对比情况如下:外网供电、调度模式 1、调度模式 2、调度模式 3 所需费用分别为 995.889、1 404、1 344.1、1 317.8 元。可以看出,微网系统相比于外网供电模式在经济上不占优势,但微网提高了用户的供电可靠性和供电质量,有效利用了可再生能源,提高了环境效益。对比微网运行调度分别采用模式 1、2、3,可知:采用模式 3 时,在满足微网安全可靠运行的基础上,微网在峰时利用成本较低的分布式电源可向外网售电来获取收益,较之采用模式 1 和模式 2,使微网系统的经济效益有所提高;采用模式 2 时,在电价低于微源发电成本的时段,可优先从外网购电来满足微网功率缺额,较之采用模式 1,使微网更具有经济优势。

4 结论

本文建立了考虑微源同时提供有功和无功出力并计及制热收益的热电联产型微网系统经济调度模型,以一个包含 WT、PV、SB、MT、FC 以及热/电负荷的具体微网为例,提出了不同运行调度模式下的经济调度策略,运用改进遗传算法优化了考虑实时电价的并网运行方式下各微源的有功、无功出力,并对比分析了微网与外网交互功率的约束以及不同运行调度模式对微网经济调度的影响,验证了所提模型和算法的有效性。

本文提出由微源本身提供无功出力配合外网向微网提供的无功出力来满足系统无功需求,降低了安装无功补偿装置的额外投资,确保外网无需向微网提供过大的无功支撑且保证外网与微网间传输的功率具有较高的功率因数,较好地符合了供电公司对接入微网的要求。

参考文献:

- [1] HATZIARGYRIOU N, ASANO H, IRANVANI R, et al. Microgrids [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.
- [2] 汪少勇. 基于分布式电源的微网的设计与运行[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 120-123.
WANG Shaoyong. Design and operation of micro-grid based on distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 120-123.
- [3] 石庆均, 江全元. 包含蓄电池储能的微网实时能量优化调度[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 76-82.
SHI Qingjun, JIANG Quanyuan. Real-time optimal energy dispatch for microgrid with battery storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 76-82.
- [4] KOJIMA Y, KOSHIO M, NAKAMURA S, et al. A demonstration project in Hachinohe: microgrid with private distribution line[C]// Proceedings of 2007 IEEE International Conference on System of Systems Engineering. San Antonio, TX, USA: IEEE SMC Society, 2007: 1-6.
- [5] DIMEAS A L, HATZIARGYRIOU N D. Agent based control for microgrids[C]// Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa, FL, USA: IEEE Power Engineering Society, 2007: 1-5.
- [6] TSIKALAKIS A G, HATZIARGYRIOU N D. Centralized control for optimizing microgrids operation[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2008, 23(1): 241-248.
- [7] KATIRAEI F, IRANVANI R, HATZIARGYRIOU N, et al. Microgrids management[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 54-65.
- [8] 王锐, 顾伟, 吴志. 含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 22-27.
WANG Rui, GU Wei, WU Zhi. Economic and optimal operation of a combined heat and power microgrid with renewable energy resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 22-27.
- [9] 杨佩佩, 艾欣, 崔明勇, 等. 基于粒子群优化算法的含多种供能系统的微网经济运行分析[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 38-42.
YANG Peipei, AI Xin, CUI Mingyong, et al. Particle swarm optimization based economic operation analysis of microgrid containing multi energy supply system[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 38-42.
- [10] 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.
- [11] TSIKALAKIS A G, HATZIARGYRIOU N D. Centralized control for optimizing microgrids operation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 241-248.
- [12] 李乐. 微网的经济运行研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
LI Le. Study of economic operation in microgrid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [13] 菲美琴, 孙树娟, 苏建徽. 包含电动汽车的风/光/储微电网经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 30-35.
MAO Meiqin, SUN Shujuan, SU Jianhui. Economic analysis of a microgrid with wind/photovoltaic/storages and electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 30-35.
- [14] 牛铭, 黄伟, 郭佳欢, 等. 微网并网时的经济运行研究[J]. 电网

- 技术,2010,34(11):38-42.
- NIU Ming,HUANG Wei,GUO Jiahuan,et al. Research on economic operation of grid-connected microgrid[J]. Power System Technology,2010,34(11):38-42.
- [15] 丁明,张颖媛,茆美琴,等. 集中控制式微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.
- DING Ming,ZHANG Yingyuan,MAO Meiqin,et al. Steady model and operation optimization for microgrids under centralized control[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(24):78-82.
- [16] DENG Qijun,GAO Xing,ZHOU Hong. System modeling and optimization of microgrid using genetic algorithm[C]//The 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing. Harbin,China:[s.n.],2011:540-544.
- [17] MASHHOUR E,MOGHADDAS-TAFRESHI S M. Integration of distributed energy resources into low voltage grid[J]. Electric Power Systems Research,2010,80(4):473-480.
- [18] CHEN C,DUAN S,CAI T,et al. Smart energy management system for optimal microgrid economic operation[J]. IET Renewable Power Generation,2011,5(3):258-267.
- [19] MOHAMED F A,KOIVO H N. Online management of microgrid with battery storage using multiobjective optimization[C]//POWERENG 2007. Setubal,Portugal:IEEE,2007:231-236.
- [20] 石庆均. 微网容量优化配置与能量优化管理研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
- SHI Qingjun. Research on optimal sizing and optimal energy management for microgrid[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2012.
- [21] 钱科军,袁越,石晓丹,等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(29):11-15.
- QIAN Kejun,YUAN Yue,SHI Xiaodan,et al. Environmental benefits analysis of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(29):11-15.
- [22] 丁明,包敏,吴红斌,等. 复合能源分布式发电系统的机组组合问题[J]. 电力系统自动化,2008,32(6):46-50.
- DING Ming,BAO Min,WU Hongbin,et al. Unit commitment problem in distributed generation system with multiple energy sources[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(6):46-50.
- [23] CHEN Changsong,DUAN Shanxu,CAI Tao. Optimal allocation and economic analysis of energy storage system in microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2011,26(10):2762-2773.
- [24] 丁明,张颖媛,茆美琴,等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报,2011,31(4):7-14.
- DING Ming,ZHANG Yingyuan,MAO Meiqin,et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(4):7-14.
- [25] 任子武,伞冶. 自适应遗传算法的改进及在系统辨识中应用研究[J]. 系统仿真学报,2006,18(1):41-43.
- REN Ziwu,SAN Ye. Improved adaptive genetic algorithm and its application research in parameter identification[J]. Journal of System Simulation,2006,18(1):41-43.
- [26] 王新刚,艾芊,徐伟华,等. 含分布式发电的微电网能量管理多目标优化[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(20):79-83.
- WANG Xingang,AI Qian,XU Weihua,et al. Multi-objective optimal energy management of microgrid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control,2009,37(20):79-83.

作者简介:

陈洁(1987-),男,江苏常州人,硕士研究生,主要研究方向为微网运行与控制(E-mail:chenjie_boys@163.com);

杨秀(1972-),男,江苏扬州人,教授,博士,主要研究方向为分布式发电与微电网的运行与仿真;

朱兰(1978-),女,湖南岳阳人,讲师,博士研究生,主要研究方向为微网规划与运行;

张美霞(1979-),女,江苏盐城人,讲师,硕士,主要研究方向为微网运行与控制。

Comparison of microgrid economic operation among different dispatch modes

CHEN Jie,YANG Xiu,ZHU Lan,ZHANG Meixia

(Electric Power Engineering,Shanghai University of Electric Power,Shanghai 200090,China)

Abstract: To analyze the impact of dispatch mode on microgrid economic operation,an optimization model of economic operation considering heating income is presented for CHP microgrid system providing both active and reactive powers. An economic dispatch strategy is presented for a typical microgrid consisting of wind turbine,photovoltaic generation,storage battery,micro gas-turbine,fuel cell,heating load and electric load under different dispatch modes. The improved genetic algorithm is used to optimize the active and reactive outputs of micro sources in grid-connection mode considering the spot price. The constraint of power exchange between microgrid and external power network is studied and the impact of dispatch mode on microgrid economic dispatch is analyzed. Simulative results show that,the dispatch mode which allows the free power exchange between microgrid and external power network is more economical. The validity of the proposed model,dispatch strategy and algorithm is proved.

Key words: microgrid; economic operation; dispatch mode; dispatch strategy; genetic algorithms; CHP; network structure; models