

考虑三相不平衡潮流的微网分相优化调度

陈洁

(国网江苏省电力有限公司常州供电分公司,江苏 常州 213003)

摘要:由于微网中微源和负荷存在不对称性,若微源出力仍采用传统的三相对称模型,则并网时外网与微网间的联络线功率的对称性较差,孤网时由于没有微源能够承受微网的不平衡性导致微网无法稳定运行。提出考虑三相潮流与制热收益的热电联产型微网系统分相优化调度模型。以热电联产型 Benchmark 微网为例,提出并网和孤网运行方式下的调度策略。在考虑实时电价和保证敏感负荷供电可靠性的基础上,运用改进遗传算法优化各微源的每相有功、无功出力及微网向外网的购售电量。对比分析2种运行方式下一天内蓄电池的充放电次数、切负荷量、综合成本以及电压质量。算例验证了所提模型、策略和算法的有效性。

关键词:微网;三相不平衡潮流;分相调度;改进遗传算法;热电联产;网架结构;Benchmark

中图分类号:TM 73

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.03.025

0 引言

目前,分布式发电技术在全球范围迅速发展,在大电网供电的基础上,在配电系统靠近用户侧引入由小容量分布式电源构成的微网^[1-2]供电,可以综合利用现有资源和设备,向用户提供可靠、清洁和优质的电能。如何在满足安全性、可靠性和供电质量等的约束条件下,对微网系统的电源进行优化调度、合理分配出力,实现冷、热、电各种能源的综合优化,以达到分布式能源微网系统的优化运行一直是国内外研究的热点^[3-4]。

微网系统中三相负荷经常具有不平衡的特点,而不对称分布式电源(如单相光伏和单相风机)的接入又加重了三相潮流的不平衡性。此时若仍按对称模型计算微网的潮流分布,必将产生较大的误差。因此,研究微网三相不平衡潮流对微网经济调度的影响具有重要的意义。针对微网的三相不平衡性,国内外学者提出了微网三相潮流的计算方法,如:前推回代法、改进牛顿法、改进快速解耦法等^[5]。若微源出力仍采用常规的对称模型,并网时微网的不平衡性将都由外网承担,不符合电力公司对接入微网的要求;而孤网时由于没有微源可承担微网的不平衡性,故无法孤岛运行。对于由能承受一定不平衡度的逆变器接入微网的可控微源(如燃料电池、蓄电池等),通过调节其每相出力,可使并网时外网与微网间的联络线功率恢复对称,孤网时不对称微网能够稳定运行。

目前,国内外对微网经济运行的研究基本都针对三相对称的微网系统。文献[6]建立了集中控制模式下的微网优化调度模型,探讨了不同电力市场方案对经济调度的影响;文献[7]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,考虑风电、光伏功率和热电负荷的随机

性,应用机会约束规划理论建立了经济运行优化模型;文献[8]建立了同时考虑运行维护成本最低与环境污染最小的多目标优化模型,应用线性加权法和法将多目标问题转换为单目标优化问题;文献[9]在详细分析分布式电源特性和优化目标数学模型的基础上,提出了一种基于小生境进化的多目标免疫算法来优化微源出力。但这些研究所采用的微网网架十分简单,一般只考虑系统的有功平衡,较少考虑无功的影响,且都未考虑三相潮流对微网经济调度的影响,也没有考虑对由能承受一定不平衡度的逆变器接入微网的分布式电源进行分相调度时其有功和无功出力。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)以及热电负荷的 Benchmark 微网为对象,建立了考虑三相潮流与制热收益的热电联供型微网分相优化调度模型,在考虑燃料电池、蓄电池可以分相输出有功和无功功率,并在满足能量供需平衡、电能质量和蓄电池充放电深度等约束条件的基础上,运用改进遗传算法优化考虑实时电价的并网运行方式和保证敏感负荷供电可靠性的孤网运行方式下各微源的每相有功、无功出力及微网向外网的购售电量,通过让微源承担微网的不平衡性,使并网时外网与微网间联络线功率恢复对称,孤网时不对称微网能够稳定运行。本文检验了节点电压质量,并对比分析了2种运行方式下一天内蓄电池的充放电次数、切负荷量、综合成本、电压不平衡度以及电压波动。

1 三相潮流模型

1.1 微源潮流计算模型

传统发电机节点在潮流计算中一般取为 PQ 节

点、PV节点或平衡节点,而各种分布式电源具有其特殊性,在选取节点模型时需要区别对待。

燃料电池、储能元件等分布式电源大多采用电压源型电流控制逆变器输出电能,使用这种控制方式的分布式电源可以处理为有功输出和注入电网电流恒定的PI节点^[10]。相应的无功功率可由前次迭代得到的电压、恒定的电流幅值和有功功率计算得出:

$$Q_{k+1}^p = \sqrt{|I^p|^2 [(e_k^p)^2 + (f_k^p)^2] - (P^p)^2} \quad (1)$$

其中, $p = a, b, c$; Q_{k+1}^p 为第 $k+1$ 次迭代的微源 p 相的无功功率值; e_k^p, f_k^p 分别为第 k 次迭代得到的该节点 p 相电压的实部和虚部; I^p 为微源 p 相恒定的电流相量有效值; P^p 为 p 相恒定的有功功率值。

进行潮流计算时,每次迭代前可求出PI节点各相的无功注入量,在第 $k+1$ 次迭代过程中便可将PI节点处理成 p 相有功和无功输出分别为 P^p 和 Q_{k+1}^p 的PQ节点。

本文优先利用风机和光伏机组的出力,跟踪控制其最大功率输出,潮流计算时将它们都处理为无功输出为0的PQ节点。由微型燃气轮机构成的热电联产系统采取“以热定电”的方式,由热负荷确定微型燃气轮机的有功出力,且不考虑微型燃气轮机输出无功功率,故潮流计算时也将其简化为无功输出为0的PQ节点。由于风机、光伏和微型燃气轮机属于不可调度机组,假设其三相出力对称。

1.2 三相潮流算法

前推回代法^[11]充分利用了微网辐射状的结构特点,具有较高的计算效率和优良的收敛特性。

运用前推回代法进行三相潮流计算前,需要对支路进行分层和编号。辐射状微网前推回代法潮流计算包含连续的2步迭代计算,称之为回代和前推,根据微网馈线的辐射状结构,在推算过程中不断更新支路电流和节点电压,如图1所示。

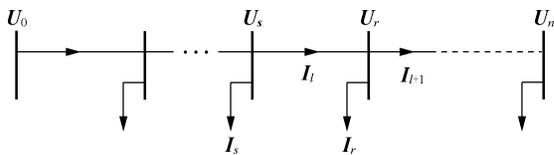


图1 前推回代潮流计算

Fig.1 Power flow with back/forward sweep method

a. 回代过程:更新支路电流。

首先利用已经更新的节点电压 $U_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 计算负荷电流。例如:对于一个三相星型恒功率的负荷,负荷电流为:

$$I^p = (S_L^p / U^p)^* \quad (2)$$

其中, I^p, S_L^p, U^p 分别为负荷 p 相电流、复功率和电压。

然后利用负荷电流更新支路电流:从主干线或分支线的末端开始向根节点推进,支路上的电流只

是后面所有支路电流的向量和。如图1中支路 l 的电流为:

$$I_l^p = I_r^p + I_{l+1}^p \quad (3)$$

其中, I_l^p, I_r^p, I_{l+1}^p 分别为支路 l, r 和 $l+1$ 的 p 相电流。

b. 前推过程:更新节点电压。

从根节点开始,向主干线和分支线的末端推进,根节点电压已知,如图1中节点 r 的电压为:

$$\begin{bmatrix} U_r^a \\ U_r^b \\ U_r^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_s^a \\ U_s^b \\ U_s^c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_l^{aa} & Z_l^{ab} & Z_l^{ac} \\ Z_l^{ba} & Z_l^{bb} & Z_l^{bc} \\ Z_l^{ca} & Z_l^{cb} & Z_l^{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_l^a \\ I_l^b \\ I_l^c \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $Z_l^{aa} - Z_l^{cc}$ 构成支路 l 的阻抗矩阵。

2 微网系统优化调度模型

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 Δt 选取不同的值均可适用于以下所建立的所有优化模型,本文取 $\Delta t = 1 \text{ h}$ 来进行分析。

2.1 微源出力和成本模型

2.1.1 燃料电池成本模型

燃料电池发电过程中的燃料消耗费用计算公式如下:

$$C_{FC} = (C_{nl} / L) \sum_t (P_{FC}(t) \Delta t / \eta_{FC}(t)) \quad (5)$$

其中, C_{nl} 为天然气价格,本文取为 2.5 元/m^3 ; L 为天然气低热热值,取 $9.7 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^3$; $P_{FC}(t), \eta_{FC}(t)$ 分别为 t 时刻燃料电池三相输出的总有功功率与总效率。

本文算例基于质子交换膜燃料电池(40 kW IFC PC-29),其 $\eta_{FC}(t)$ 与 $P_{FC}(t)$ 之间的函数关系见文献[12]。

2.1.2 蓄电池出力模型

蓄电池^[13]在 t 时刻的剩余电量与蓄电池在 $t-1$ 时刻的剩余电量、 $t-1$ 时刻到 t 时刻蓄电池的充放电电量以及每小时的电量衰减量有关。

蓄电池放电时, $P_{SB}(t) \geq 0$, t 时刻的剩余容量为:

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t-1) - P_{SB}(t) / \eta_D - D_B Q_B^S \quad (6)$$

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

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t-1) - P_{SB}(t) \eta_C - D_B Q_B^S \quad (7)$$

其中, $\text{SOC}(t)$ 为 t 时刻蓄电池的剩余容量; $P_{SB}(t)$ 为 t 时刻蓄电池的三相总充放电功率; η_C, η_D 分别为充、放电效率; D_B 为蓄电池每小时的自放电比例; Q_B^S 为蓄电池的总容量。

光伏电池出力模型、风机出力模型、微型燃气轮

机出力模型和成本模型见文献[14]。

2.2 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^[15]。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)、用户停电损失费用、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^[16-18]最低。

$$\min C = \sum_{t=1}^{24} (C_f(t) + C_{DP}(t) + C_{OM}(t) + C_e(t)) + C_L + C_{grid} - C_{sh} \quad (8)$$

$$C_f(t) = \sum_{i=1}^n F_i(P_i(t)) \quad (9)$$

$$C_{DP}(t) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_{az,i}}{8760k_i} \frac{r(1+r)^{n_i}}{(1+r)^{n_i} - 1} P_i(t) \right] \quad (10)$$

$$C_{OM}(t) = \sum_{i=1}^n K_{OM,i} \cdot P_i(t) \quad (11)$$

$$C_e(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [(V_{ej} + V_j) Q_{ij} P_i(t)] \quad (12)$$

$$C_L = C_{bu} L_d(t) \quad (13)$$

$$C_{grid} = C_p(t) C_{GP}(t) - C_s(t) C_{SP}(t) \quad (14)$$

$$C_{sh} = Q_{he} K_{ph} \quad (15)$$

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_L 为切负荷的补偿费用; C_{grid} 为微网与外网的交互成本(当孤网运行时,此项成本为0); 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 时刻三相输出的总有功功率; 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, $k_i =$ 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 个微电源单位电量的第 j 项污染物排放量; m 为污染物的种类; C_{bu} 为微网向用户支付的单位停电量损失费用; $L_d(t)$ 为 t 时刻的切有功负荷电量; $C_p(t)$ 、 $C_s(t)$ 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。

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(27)和式(32)可以看出,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进行

优化求解的。

2.3 约束条件

a. 潮流约束^[10]:

$$\Delta P_f^p = P_f^p - |U_f^p|^2 \times \sum_{g \in f} \sum_q |U_g^p| (G_{fg}^{pq} \cos \theta_{fg}^{pq} + B_{fg}^{pq} \sin \theta_{fg}^{pq}) = 0 \quad (16)$$

$$\Delta Q_f^p = Q_f^p - |U_f^p|^2 \times \sum_{g \in f} \sum_q |U_g^p| (G_{fg}^{pq} \sin \theta_{fg}^{pq} - B_{fg}^{pq} \cos \theta_{fg}^{pq}) = 0 \quad (17)$$

其中, $f=1,2,\dots,h$, h 为系统节点数; $p,q=a,b,c$; P_f^p 、 Q_f^p 分别为节点 f 上 p 相注入的有功和无功功率; G_{fg}^{pq} 、 B_{fg}^{pq} 、 θ_{fg}^{pq} 分别为节点 f 和节点 g 之间 p 相和 q 相的导纳和相角差; $g \in f$ 表示 g 为与节点 f 相连的节点。

b. 运行电压约束:

$$U_{fmin}^p \leq |U_f^p| \leq U_{fmax}^p \quad (18)$$

其中, U_{fmin}^p 、 U_{fmax}^p 分别为节点 f 上 p 相运行电压的最小、最大值。

c. 光伏、风机和微型燃气轮机的有功出力约束:

$$P_{imin} \leq P_i \leq P_{imax} \quad (19)$$

其中, P_{imin} 、 P_{imax} 分别为第 i 个微源三相输出的总有功功率的最小、最大值。

d. 微型燃气轮机爬坡率约束^[19]。

增负荷时,为:

$$P_{MT}(t) - P_{MT}(t-1) \leq R_{up,MT} \quad (20)$$

减负荷时,为:

$$P_{MT}(t-1) - P_{MT}(t) \leq R_{down,MT} \quad (21)$$

其中, $R_{up,MT}$ 、 $R_{down,MT}$ 分别为微型燃气轮机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:

$$P_{Gridmin}^p \leq P_{Grid}^p(t) \leq P_{Gridmax}^p \quad (22)$$

$$Q_{Gridmin}^p \leq Q_{Grid}^p(t) \leq Q_{Gridmax}^p \quad (23)$$

$$\cos \varphi^p = \frac{P_{Grid}^p(t)}{\sqrt{(P_{Grid}^p(t))^2 + (Q_{Grid}^p(t))^2}} \geq c_{lim}^p \quad (24)$$

其中, $P_{Gridmax}^p$ 、 $P_{Gridmin}^p$ 、 $Q_{Gridmax}^p$ 、 $Q_{Gridmin}^p$ 分别为微网向外网允许交互传输的 p 相最大、最小有功功率和无功功率; $\cos \varphi^p$ 为联络线 p 相传输功率的功率因数; c_{lim}^p 为联络线 p 相传输功率的功率因数限值。

式(22)~(24)表明将微网作为外部电网的一个“可控负荷”,保证联络线向微网传输的功率保持在一定的范围,且具有较高的功率因数。

f. 蓄电池运行约束:

$$P_{SBmin}/3 \leq P_{SB}^p(t) \leq P_{SBmax}/3 \quad (25)$$

$$-S_{inv,SB}/3 \leq P_{SB}^p(t) \leq S_{inv,SB}/3 \quad (26)$$

$$|Q_{SB}^p(t)| \leq \sqrt{(S_{inv,SB}/3)^2 - (P_{SB}^p(t))^2} \quad (27)$$

$$\varepsilon_{SB}(t) = (I_{SBmax}^p(t) - I_{SBmin}^p(t))/I_{SBmax}^p(t) \leq \varepsilon_{SBlim} \quad (28)$$

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (29)$$

其中, P_{SBmax} 、 P_{SBmin} 分别为蓄电池三相输出的总有功功率上限和下限; $S_{inv,SB}$ 为蓄电池三相逆变器的总容量; $P_{SB}^p(t)$ 、 $Q_{SB}^p(t)$ 分别为 t 时刻蓄电池交流侧 p 相的充放电有功功率和无功功率; $\varepsilon_{SB}(t)$ 为 t 时刻蓄电池逆变器承受的电流不平衡度; $I_{SBmax}^p(t)$ 、 $I_{SBmin}^p(t)$ 分别为 t 时刻流经逆变器的最大和最小单相电流; ε_{SBlim} 为逆变器能承受的电流不平衡度限值; SOC_{max} 、 SOC_{min} 分别为蓄电池的最大和最小剩余容量。

从式(27)可以看出, 蓄电池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^[20]。

g. 燃料电池运行约束:

$$P_{FCmin}/3 \leq P_{FC}^p(t) \leq P_{FCmax}/3 \quad (30)$$

$$P_{FC}^p(t) \leq S_{inv,FC}/3 \quad (31)$$

$$0 \leq Q_{FC}^p(t) \leq \sqrt{(S_{inv,FC}/3)^2 - (P_{FC}^p(t))^2} \quad (32)$$

$$\varepsilon_{FC}(t) = (I_{FCmax}^p(t) - I_{FCmin}^p(t))/I_{FCmax}^p(t) \leq \varepsilon_{FClim} \quad (33)$$

其中, P_{FCmax} 、 P_{FCmin} 分别为燃料电池三相输出总有功功率上限和下限; $P_{FC}^p(t)$ 、 $Q_{FC}^p(t)$ 分别为 t 时刻燃料电池交流侧 p 相的有功功率和无功功率; $S_{inv,FC}$ 为燃料电池三相逆变器的总容量; $\varepsilon_{FC}(t)$ 为 t 时刻燃料电池逆变器承受的电流不平衡度; $I_{FCmax}^p(t)$ 、 $I_{FCmin}^p(t)$ 分别为 t 时刻逆变器流经的最大和最小单相电流; ε_{FClim} 为逆变器能承受的电流不平衡度限值。

式(26)、(27)、(31)、(32)表明蓄电池和燃料电池逆变器的容量优先分配给有功出力。

h. 旋转备用约束:

$$\begin{aligned} & (P_{PV}(t) + P_{WT}(t) + P_{MT}(t))/3 + \min\{P_{SBmax}/3, \\ & \sqrt{(S_{inv,SB}/3)^2 - (Q_{SB}^p(t))^2}, (SOC(t-1) - \\ & SOC_{min} - D_B Q_B^S) \eta_D/3\} + \min\{P_{FCmax}/3, \\ & \sqrt{(S_{inv,FC}/3)^2 - (Q_{FC}^p(t))^2}\} + P_{Gridmax}^p \geq \\ & P_D^p(t) + P_{loss}^p(t) + R^p(t) \end{aligned} \quad (34)$$

其中, $P_D^p(t)$ 、 $P_{loss}^p(t)$ 、 $R^p(t)$ 分别为 t 时刻 p 相总负荷、总网损和所需的备用容量。

由于孤网运行方式下微源容量不充裕, 且重负荷时刻需要考虑切除部分非敏感负荷, 故此式只需在并网运行方式下考虑。

2.4 调度策略

2.4.1 并网运行方式

并网运行时, 通过燃料电池和蓄电池各相出力间的协调配合, 使外网与微网间的联络线功率恢复对称。在电价市场化的改革中, 确保微网运行的经济性和收益最大化的各相调度策略相同, 总结如下: 优先利用风机和光伏机组的出力, 跟踪控制最大功率输出; 热电联产系统“以热定电”, 由热负荷确定

微型燃气轮机的有功出力; 当风机、光伏和微型燃气轮机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, 在谷时向蓄电池充电(峰时电价高, 谷时电价低, 而蓄电池的储能有限, 采用此运行方式能取得更好的经济效益), 若蓄电池充满则向外网售电, 此时若燃料电池发电成本低于电价, 可在容量范围内增加出力向外网售电来获益; 当风机、光伏和微型燃气轮机的有功出力无法满足微网电负荷和网损时, 首先令蓄电池输出有功, 同时检测蓄电池的充放电状态; 若蓄电池在出力范围内可满足微网安全可靠运行(在不切负荷的基础上, 微网能在满足所有约束条件下运行), 如果在峰时可考虑增加蓄电池的有功功率向外网售电, 否则维持原出力; 若蓄电池在出力范围内无法确保微网安全可靠运行, 则再比较燃料电池的发电成本与购电成本, 若燃料电池的发电成本高于电价, 则燃料电池不发有功, 微网从外网购电, 此时如果在联络线交换功率范围内仍无法满足微网安全可靠运行, 则再调度燃料电池发有功来满足微网安全可靠运行需求; 反之, 若燃料电池的发电成本低于电价, 微网优先调用燃料电池的有功出力, 如果燃料电池在出力范围内能满足微网安全可靠运行可继续增加燃料电池的有功出力向外网售电来获取收益, 此时如果在燃料电池出力范围内仍不能满足微网安全可靠运行, 则再从外网购电。

2.4.2 孤网运行方式

孤网运行时, 通过燃料电池和蓄电池各相出力间的协调配合, 让其承担微网的不平衡性, 使不对称微网能够稳定运行。各相调度策略为: 优先利用风机和光伏机组的出力, 跟踪控制最大功率输出; 热电联产系统“以热定电”, 由热负荷确定微型燃气轮机的有功出力; 当风机、光伏和微型燃气轮机的有功出力超过全部电负荷和网损时, 首先给蓄电池充电, 同时监测蓄电池的充放电状态, 当蓄电池充满时可以考虑依次切除部分发电成本较高的风机或光伏; 当风机、光伏和微型燃气轮机的有功出力无法满足微网电负荷和网损时, 优先调用蓄电池来提供有功功率, 如果仍存在有功缺额则再调用燃料电池来输出有功功率; 若所有微源在出力范围内仍不能满足微网安全可靠运行, 则按照负荷的重要程度依次切除。

本文利用经济调度策略确定各微源的各相出力状态、外网和微网间传输功率的各相运行状态以及各相切负荷状态(即确定有功出力的各相状态变量和判断各相是否需要切负荷), 与下述改进遗传算法相结合, 共同对模型进行优化求解。

3 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,遗传算法就变成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,但当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^[21]。本文对 P_c 和 P_m 进行如下改进:

$$P_c = \begin{cases} P_{c2} - \frac{(P_{c2} - P_{c3})(f' - f_{\text{avg}})}{f_{\text{max}} - f_{\text{avg}}} f' \geq f_{\text{avg}} \\ P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f' - f_{\text{min}})}{f_{\text{avg}} - f_{\text{min}}} f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (35)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m2} - \frac{(P_{m2} - P_{m3})(f' - f_{\text{avg}})}{f_{\text{max}} - f_{\text{avg}}} f' \geq f_{\text{avg}} \\ P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f' - f_{\text{min}})}{f_{\text{avg}} - f_{\text{min}}} f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (36)$$

其中, f_{max} 、 f_{min} 和 f_{avg} 分别为种群中最大、最小和平均适应度; f' 为要交叉的 2 个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,使算法容易陷入局部最优解,此时该改进增大了 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。并网时群体规模为 50,孤网时群体规模为 30,迭代次数均为 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,故下文给出的结果均是重复计算 20 次得到的平均值。

4 算例分析

4.1 微网系统结构

本文在文献[22]中 Benchmark 0.4 kV 微网的基础上进行了相应的改动,如图 2 所示,图中 3+N+PE 表示三相+中性线+保护接地,1×3φ 表示 1 个三相电源/负荷,其他类似。

图 2 中,为了降低微网的不平衡度,本文采取尽量将单相微源和负荷平均接入各相的方式。假设 8 个单相工业负荷中 B 相接 2 个,A、C 相分别接 3 个;

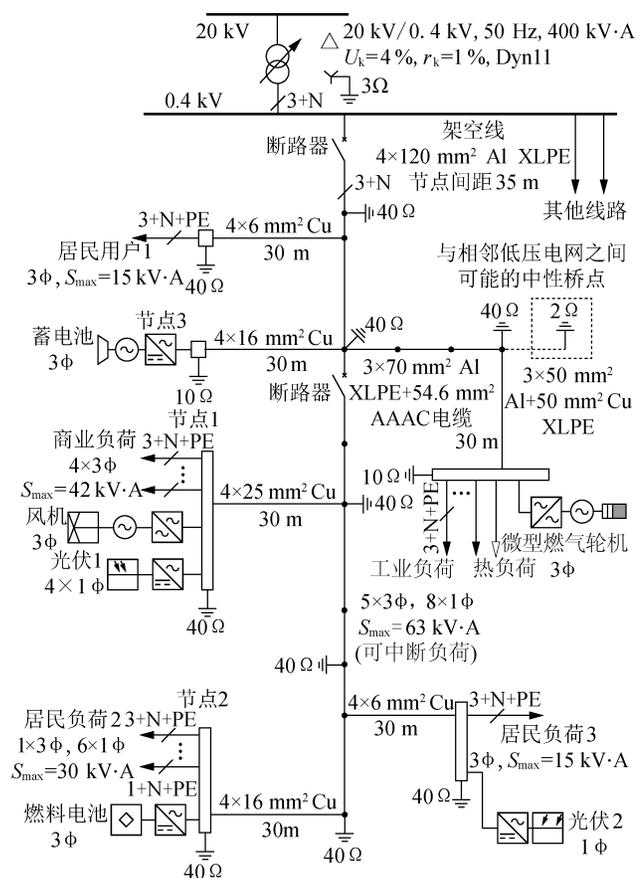


图 2 Benchmark 微网系统结构图

Fig.2 Structure of Benchmark microgrid system

4 个单相光伏中 A 相接 2 个,B、C 相分别接 1 个;6 个单相居民负荷平均接入各相;1 台单相光伏接在 C 相。工业负荷属于可中断负荷,为了减小用户停电损失,切负荷时优先切负荷较重相的单相负荷,如果三相都需切单相负荷,则直接切除一个三相负荷,据此原则依次切除负荷直至微网能可靠运行。3 种负荷的功率因数均取 0.85,假设三相负荷对称,不考虑中性线和地线对三相潮流计算的影响,且忽略线路的不对称性。

4.2 基础数据

本文中的切负荷补偿费用的取值为 1.277 5 元/(kW·h)^[23],制热收益取为 0.1 元/(kW·h)^[12],每相电压允许偏差为 -5%~5%,微网与外网传输的有功和无功上、下限分别取为 15 kW、-15 kW、9.296 kvar、-9.296 kvar(外网向微网注入功率为正,反之为负),联络线传输功率的每相功率因数限值为 0.85,蓄电池三相逆变器的总容量为 60 kV·A,最大、最小剩余容量及初始容量分别为 100%、30%、80%的额定容量,蓄电池的额定容量为 900 kW·h,燃料电池三相逆变器的总容量为 40 kV·A(经调研 40 kV·A 及以上的逆变器大多采用 3 个单相逆变器并联组成三相逆变器,能承受的最大三相不平衡度为 100%),峰时为 07:00—22:00,谷时为 23:00 至次日

06:00。各微源的相关信息如表 1 所示,三相风机和单相光伏的出力、热负荷、由热负荷求出的微型燃气轮机三相总有功出力曲线以及 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 3 所示。实时电价见文献[24],各微源污染物排放数据、污染物价值标准、罚款等级见文献[18]。

表 1 各微源的参数

Table 1 Parameters of various microsources

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
微型燃气轮机	1.0	10	15	65
燃料电池	2.8	10	6	40
单相光伏	2	20	0	6
风机	1.2	10	0	30
储能	0.066 7	10	-60	60

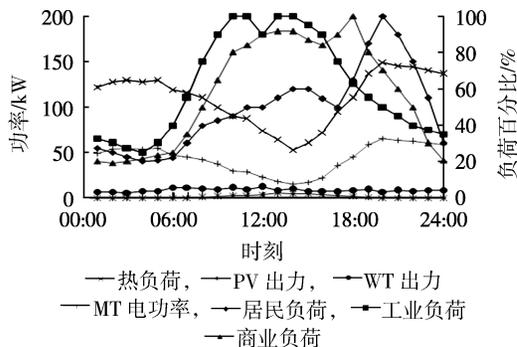


图 3 已知机组出力及热电负荷

Fig.3 Known unit output, and heating and electric loads

4.3 优化结果

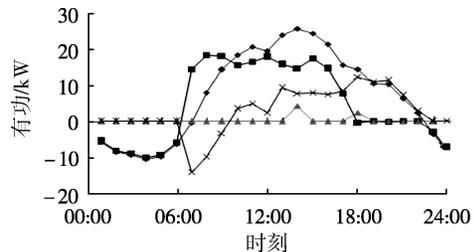
4.3.1 出力优化结果

a. 并网运行方式。

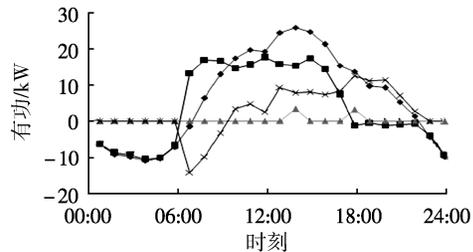
并网运行时,由于微网的并网点与配网相连,三相潮流计算时将其看成平衡节点,同时取其电压作为微网的参考电压,微型燃气轮机、燃料电池和蓄电池都采用功率(PQ)控制。潮流计算时将燃料电池和蓄电池都作为 PI 节点,调节微源各相出力使联络线功率恢复对称时,各相有功出力优化结果如图 4 所示,无功优化结果如图 5 所示,图中各相有功缺额=各相总有功负荷-各相光伏、风机、微型燃气轮机有功出力之和,各相无功缺额=各相总无功负荷。

从图 4 可看出,各相有功出力优化结果规律类似。18:00 之前微网的有功缺额主要由蓄电池和外网提供,峰时蓄电池在出力范围内可增加出力向外网售电而获益,当 17:00 末蓄电池剩余电量到达下限后有功缺额主要由外网来提供,联络线传输功率在这里主要起到了调峰的作用,燃料电池只在发电成本低于购电电价时刻(14:00)及燃料电池仅输出无功无法满足微网安全可靠运行的时刻(18:00)才输出有功出力。

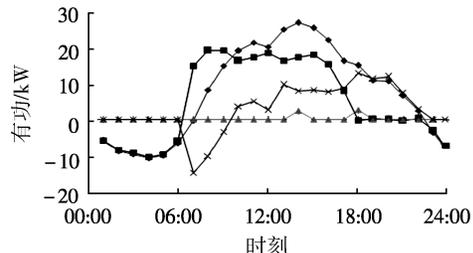
从图 5 可以看出,各相无功出力优化结果规律



(a) A 相有功



(b) B 相有功



(c) C 相有功

→ 有功缺额, → SB 有功
→ FC 有功, → 联络线有功

图 4 并网时微网各相有功出力优化结果

Fig.4 Optimization results of active power in each phase of microgrid in grid-connected mode

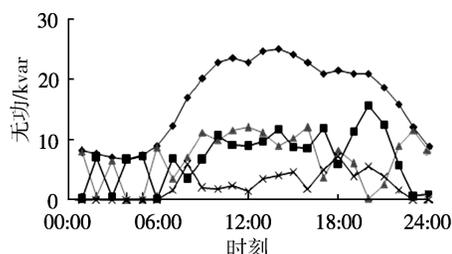
类似。蓄电池和燃料电池在优先满足有功需求基础上所提供的无功,配合联络线传输的无功来满足微网的无功需求。谷时外网不向微网提供无功功率,微网系统的无功需求由蓄电池和燃料电池提供,峰时系统的无功需求主要由蓄电池和燃料电池提供,微网仅从外网吸收较少的无功,且外网向微网传输功率的功率因数较高,与微网作为一个“可控负荷”接入配网,配网对接入负荷的功率因数要求相符。

在微网并网运行方式下,一天内蓄电池只需充电 2 次、放电 1 次,较好地延长了蓄电池使用寿命。一天内切负荷量为 0,微网综合成本为 1 494.2 元。

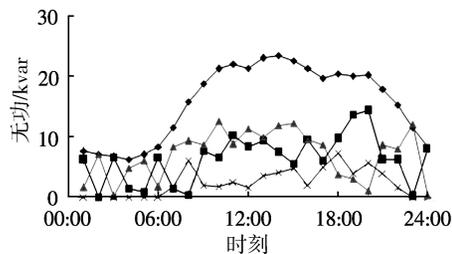
b. 孤网运行方式。

孤网运行时,由于蓄电池逆变器的容量较大,蓄电池储能较多,故三相潮流计算时将蓄电池节点看成平衡节点,同时取其电压作为微网的参考电压,蓄电池采用电压频率(V/f)控制,而微型燃气轮机和燃料电池采用 PQ 控制,有功优化结果如图 6 所示,无功优化结果如图 7 所示。

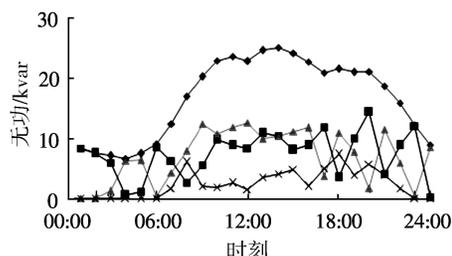
从图 6 可以看出,微网的有功缺额主要由蓄电池提供,燃料电池在这里主要起到了调峰的作用,在



(a) A相无功



(b) B相无功



(c) C相无功

—○— 无功缺额, —■— SB 无功
—△— FC 无功, —×— 联络线无功

图 5 并网时微网各相无功出力优化结果

Fig.5 Optimization results of reactive power in each phase of microgrid in grid-connected mode

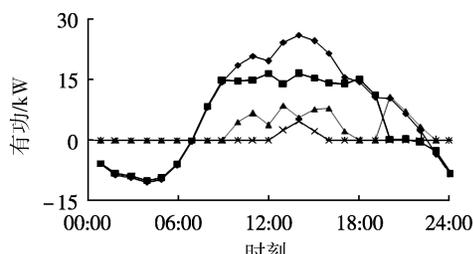
峰时仅其他微源无法满足微网有功缺额的情况下才调用燃料电池来提供有功出力,只有在所有微源出力范围内无法满足微网可靠运行时才切除负荷(13:00和15:00切除1个三相负荷,14:00负荷较重,在切除1个三相负荷的基础上AC相各需切除1个单相负荷),优先满足了微网的供电可靠性。

图7中,蓄电池和燃料电池在优先满足有功需求基础上提供无功来满足微网的无功需求,13:00—15:00蓄电池和燃料电池在出力范围内无法满足微网安全可靠运行的要求,13:00和15:00切除1个三相负荷,14:00切除1个三相负荷且AC相各切除1个单相负荷。

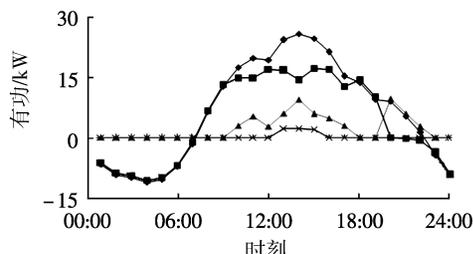
孤网运行方式下一天内蓄电池也仅需充电2次、放电1次。微网一天内综合成本为1557.4元。由于并网运行时在电价低于微源发电成本的时刻,可优先从外网购电来满足微网功率缺额,而在峰时,微网在满足安全可靠运行的基础上又可向外网售电,故相比于孤网运行方式,并网运行方式的经济效益更好。

4.3.2 节点电压

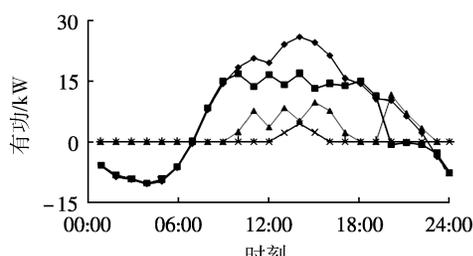
本文验证了2种运行方式下各节点电压都符合



(a) A相有功



(b) B相有功



(c) C相有功

—○— 有功缺额, —■— SB 有功
—△— FC 有功, —×— 切有功负荷

图 6 孤网时微网各相有功出力优化结果

Fig.6 Optimization results of active power in each phase of microgrid in islanded mode

要求,选取并网时商业负荷点(节点1)和辐射状微网末节点(节点2)的各相电压进行对比,如表2所示,表中电压均为标么值。

令电压不平衡度 ε_U 为:

$$\varepsilon_U(t) = (U_{\max}^p(t) - U_{\min}^p(t)) / U_{\max}^p(t) \quad (37)$$

其中, $U_{\max}^p(t)$ 、 $U_{\min}^p(t)$ 分别为 t 时刻最大和最小单相电压。

从表2可以看出,各时刻两节点的电压都符合电压偏差要求,节点1、节点2一天内的电压最大不平衡度分别为0.86%和4.3%,故两节点一天内的电压不平衡度都较小。

4.3.3 节点电压不平衡度

并网和孤网运行方式下节点1和节点2一天内的电压不平衡度如图8所示。

从图8可以看出,大多数时刻并网运行方式下节点1和节点2的电压不平衡度相比于孤网运行方式更小,故并网下节点电压对称性更好。

4.3.4 节点电压波动

并网和孤网运行方式下节点1和节点2一天内的A相电压如图9所示,图中电压为标么值。

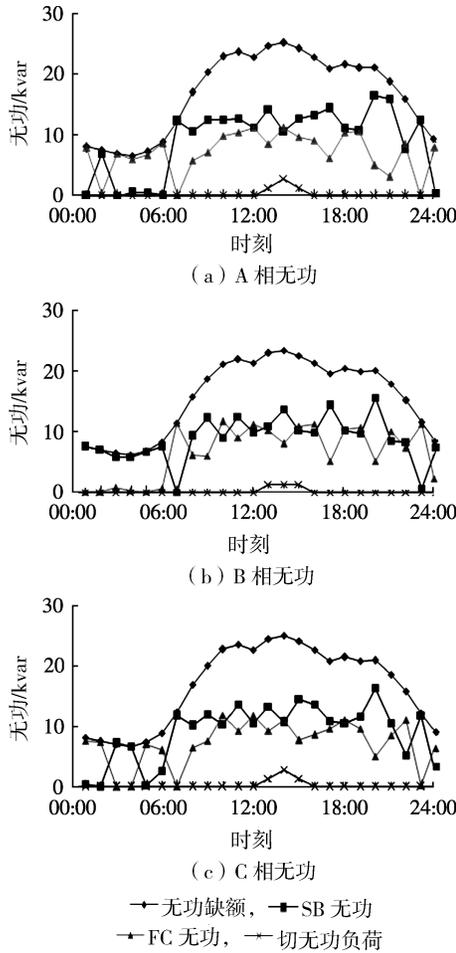


图 7 孤网时微网各相无功出力优化结果
Fig.7 Optimization results of reactive power in each phase of microgrid in islanded mode

表 2 三相潮流所得节点电压
Table 2 Node voltage of three-phase power flow

时刻	节点 1 电压			节点 2 电压		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
01:00	1.000 1	1.001 5	0.995 5	0.998 2	1.008 8	0.979 1
02:00	0.995 9	1.001 0	1.000 7	0.980 0	1.002 1	1.005 0
03:00	1.000 7	1.000 1	0.996 1	1.002 7	1.003 2	0.982 2
04:00	0.998 8	0.997 8	1.002 3	0.995 4	0.987 0	1.009 4
05:00	0.998 3	0.998 0	1.002 6	0.992 8	0.987 9	1.011 2
06:00	1.001 8	1.003 0	0.996 8	1.000 7	1.010 8	0.980 1
07:00	1.002 3	1.005 2	1.005 9	0.990 7	1.003 0	1.008 7
08:00	0.999 6	1.000 1	1.001 0	0.992 9	0.996 3	1.000 9
09:00	0.999 1	0.995 1	0.996 5	1.001 7	0.989 6	0.992 4
10:00	0.994 6	0.992 8	0.995 2	0.986 3	0.990 5	0.998 4
11:00	0.995 3	0.989 9	0.991 8	0.995 5	0.985 3	0.987 5
12:00	0.996 9	0.991 7	0.994 4	0.992 9	0.987 8	0.993 6
13:00	0.993 7	0.987 9	0.990 3	0.986 4	0.986 2	0.988 0
14:00	0.994 8	0.989 5	0.992 7	0.992 2	0.988 6	0.996 7
15:00	0.992 6	0.988 0	0.991 8	0.981 7	0.983 8	0.993 8
16:00	0.994 7	0.988 7	0.991 0	0.992 2	0.984 8	0.986 9
17:00	0.987 9	0.988 1	0.990 2	0.973 0	0.987 4	0.994 8
18:00	0.989 8	0.983 1	0.985 5	0.998 7	0.976 2	0.980 8
19:00	0.988 7	0.984 5	0.986 1	0.986 1	0.969 5	0.973 5
20:00	0.984 7	0.984 1	0.985 2	0.970 9	0.967 7	0.973 0
21:00	0.988 7	0.986 6	0.993 1	0.977 2	0.963 0	0.994 6
22:00	0.992 8	0.994 3	0.992 1	0.981 6	0.990 2	0.980 1
23:00	0.994 8	1.003 4	0.995 1	0.973 7	1.017 4	0.982 2
24:00	1.003 9	0.997 7	0.998 1	1.015 1	0.988 2	0.985 0

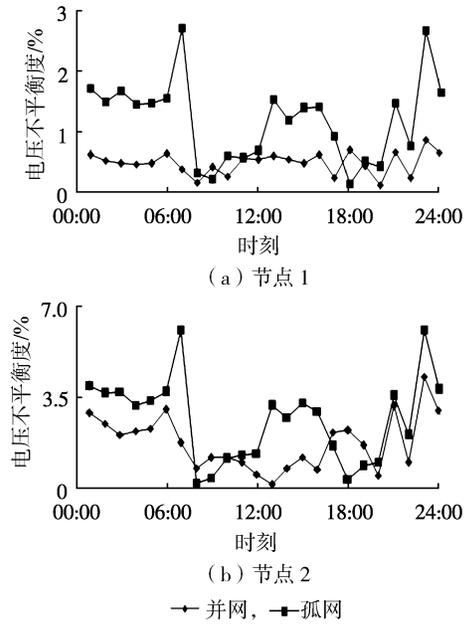


图 8 2 种运行方式下节点电压不平衡度对比
Fig.8 Node voltage unbalanced degree for two operation modes

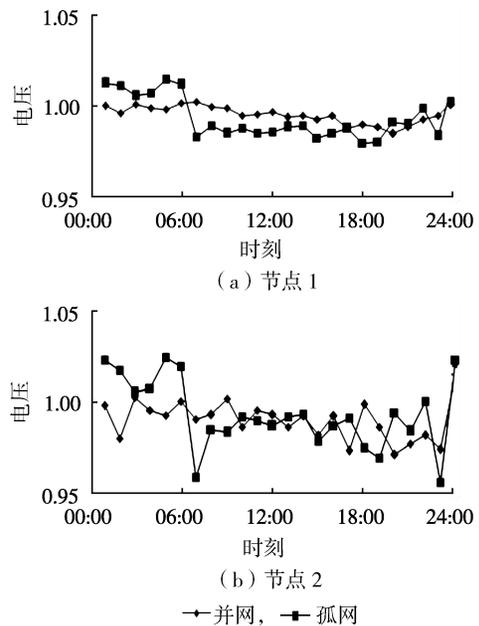


图 9 2 种运行方式下节点 A 相电压对比
Fig.9 Comparison of phase-A node voltage between two operation modes

从图 9 可以看出,并网运行下节点 1 和节点 2 的 A 相电压波动相比于孤网运行方式更小,本文同样验证了其他两相电压也符合同样的规律,故并网下节点电压波动更小。从节点电压不平衡度对比和节点电压波动对比可以看出,并网运行方式更能保证微网的电能质量。

5 结论

本文提出了考虑三相潮流与制热收益的热电联产型微网系统分相优化调度模型,以热电联产型

Benchmark 微网为例,提出了并网和孤网运行方式下的经济调度策略,在考虑实时电价和保证敏感负荷供电可靠性的基础上,运用改进遗传算法优化了各微源的每相有功、无功出力及向外网的购售电量,使并网时外网与微网间联络线功率恢复对称,孤网时不对称微网能够稳定运行。算例表明2种运行方式下节点电压质量都符合要求,而并网相比于孤网运行方式的经济效益更好,且更能确保电压质量,验证了所提模型、策略和算法的有效性。

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的无功需求,减少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以及外网与微网间的传输功率具有较高的功率因数,较好地符合供电公司对接入微网的要求。

参考文献:

- [1] 张晓波,张保会,吴雄. 风光预测后微电网的优化运行[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):21-25.
ZHANG Xiaobo,ZHANG Baohui,WU Xiong. Optimal microgrid operation based on wind/PV power prediction[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(3):21-25.
- [2] 任建文,渠卫东. 基于机会约束规划的孤岛模式下微电网动态经济调度[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):73-78.
REN Jianwen,QU Weidong. Dynamic economic dispatch based on chance-constrained programming for islanded microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(3):73-78.
- [3] 窦晓波,徐恣慧,董建达,等. 微电网改进多时间尺度能量管理模型[J]. 电力系统自动化,2016,40(9):48-55.
DOU Xiaobo,XU Minhui,DONG Jianda,et al. Multi-time scale based improved energy management model for microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(9):48-55.
- [4] 周晓倩,余志文,艾芊,等. 含冷热电联供的微网优化调度策略综述[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):26-33.
ZHOU Xiaolian,YU Zhiwen,AI Qian,et al. Review of optimal dispatch strategy of microgrid with CCHP system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(6):26-33.
- [5] SERGIO B,SILVIA L,GIUSEPPE R,et al. Unbalanced three-phase optimal power flow for smart grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,58(10):4504-4513.
- [6] TSICALAKIS A G,HATZIARGYRIOU N D. Centralized control for optimizing microgrids operation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2008,23(1):241-248.
- [7] 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.
- [8] MOHAMED F A,KOIVO H N. Online management of microgrid with battery storage using multiobjective optimization[C]//International Conference on Power Engineering,2007. Setubal,Portugal:[s.n.],2007:231-236.
- [9] 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.
- [10] 王守相,黄丽娟,王成山,等. 分布式发电系统的不平衡三相潮流计算[J]. 电力自动化设备,2007,27(8):11-15.
WANG Shouxiang,HUANG Lijuan,WANG Chengshan,et al. Unbalanced three-phase power flow calculation for distributed power generation system [J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(8):11-15.
- [11] CHENG C S,SHIRMOHAMMADI D. A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1995,10(2):671-679.
- [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] CHEN S X,GOOI H B,WANG M Q. Sizing of energy storage for microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(1):142-151.
- [14] 陈洁,杨秀,朱兰,等. 不同运行调度模式下微网经济运行对比分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):106-113.
CHEN Jie,YANG Xiu,ZHU Lan,et al. Comparison of microgrid economic operation among different dispatch modes [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(8):106-113.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] CHEN C,DUAN S,CAI T. Smart energy management system for optimal microgrid economic operation[J]. IET Renewable Power Generation,2011,5(3):258-267.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 任子武,伞治. 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.
- [22] MAO Biao,ZHANG Buhan,WANG Jianghong,et al. Dynamic modelling for distribution networks containing dispersed generations and energy storage devices[C]//International Conference on Power System Technology. Hangzhou,China;IEEE,2010:1-6.
- [23] 谭忠富,谢品杰,王绵斌,等. 提高电能使用效率的可中断电价与峰谷分时电价的联合优化设计[J]. 电工技术学报,2009,24(5):161-168.

TAN Zhongfu, XIE Pinjie, WANG Mianbin, et al. The optimal design of integrating interruptible price with peak-valley time-of-use power price based on improving electricity efficiency[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 161-168.

[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.

作者简介:



陈洁(1987—),男,江苏常州人,工程师,硕士,主要研究方向为微网运行与控制、输电线路运维与检修(E-mail: chenjie_boys@163.com)。

Optimal single-phase scheduling for microgrid considering unbalanced three-phase power flow

CHEN Jie

(Changzhou Power Supply Branch of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Changzhou 213003, China)

Abstract: Because of the unbalance of microsources and loads, if using the traditional three-phase symmetric model for the power output of microsource, the symmetry of tie-line power between external network and microgrid will be worse in grid-connected mode and microgrid can't operate stably in islanded mode for no microsource can undertake the unbalance of microgrid. An optimal single-phase scheduling model for CHP (Combined Heat and Power)-based microgrid is proposed, which considers three-phase power flow and heating benefit. Taking CHP-based Benchmark microgrid as an example, the scheduling strategies under the grid-connected mode and the islanded mode are proposed. On the basis of real-time electricity price and reliable power supply of sensitive loads, the improved genetic algorithm is adopted to optimize the active and reactive power in each phase of each microsource and the purchasing and selling electric quantity of microgrid from the external grids. The charging and discharging times of storage battery, shedding load, comprehensive cost, and voltage quality in one day are compared between the two operation modes. Case verifies the effectiveness of the proposed model, strategy and algorithm.

Key words: microgrid; unbalanced three-phase power flow; single-phase scheduling; improved genetic algorithm; CHP; network structure; Benchmark