

基于小生境遗传算法的微电网控制与优化

王瑞琪^{1,2}, 张承慧^{1,2}, 李珂^{1,2}, 陈阿莲^{1,2}, 杜春水^{1,2}

(1. 山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250061;

2. 山东大学 电力电子节能技术与装备教育部工程中心, 山东 济南 250061)

摘要: 提出一种基于小生境遗传算法的微电网控制策略及优化方法。建立整个微电网的小信号动态模型, 分析得到影响微电网运行特性的主要控制参数及其优化取值域, 有效提高了优化过程的计算效率。为构建准确的优化目标函数, 采用 PSCAD/EMTDC 搭建微电网平台并进行各种工作模式及模式切换的时域仿真。针对传统遗传算法存在的非全局性收敛、收敛速度慢等问题, 采用小生境技术和自适应技术改进的遗传算法优化微电网的运行特性。算例分析结果验证了所提微电网控制策略及优化方法的有效性和鲁棒性。

关键词: 微电网; 小信号模型; 小生境技术; 遗传算法; 优化; 控制

图分类号: TM 727; TM 76

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.08.002

0 引言

微电网作为一种能量供应系统中增加可再生能源和分布式能源渗透率的新型能量传输模式和组织形式, 成为国内外研究的重点^[1-2]。微电网由分布式电源(DG)、储能装置、能量变换装置、相关负载和监控、保护装置汇集而成, 能够有效提高电力系统运行的灵活性、高效性和清洁性, 更好地满足电力用户对电能质量、供电可靠性的要求^[3-4]。微电网存在 2 种典型的运行模式: 在正常情况下, 微电网与主电网并联运行, 称为并网运行模式; 当检测到电网故障或者电能质量不满足要求时, 微电网将及时与主电网断开而处于独立运行模式。微电网同时需要根据实际运行状况在 2 种模式之间切换运行。

无论是并网运行还是独立运行, 在维持电压幅值和频率稳定的同时实现功率的快速准确分配, 以及在模式切换过程中保证扰动振荡在可接受的范围之内, 是微电网控制问题的难点和重点。文献[5]提出了一种针对微电网不同运行模式对 DG 采用不同控制策略的思想, 并网运行时 DG 采用 PQ 控制, 独立运行时采用 U/f 控制, 但这种方法会在运行模式切换时产生暂态振荡。文献[6]根据微电网内不同的 DG 单元采用不同的控制策略, 对电能输出稳定的 DG 采用 U/f 控制策略, 对受外部条件影响较大的 DG 采用 PQ 控制, 改善了微电网运行特性, 但降低了系统运行的灵活性和稳定性。

另一方面, 微电网在不同工作模式下以及模式切换过程中的稳态和暂态性能与控制参数密切相

关。文献[7-10]分别通过频域特性和小信号动态模型分析了控制参数对微电网运行特性的影响, 但是只能得到控制参数的大致范围。文献[11]采用粒子群算法优化微电网小信号模型的方法获取控制参数的最优值, 但是小信号模型本质上依赖于具体的稳态运行点且无法考虑动态切换过程。

本文提出了一种包含改进动态特性的功率分配控制器、带前馈补偿的电压电流双闭环控制器的微电网控制策略, 并基于小生境遗传算法优化微电网的运行特性。基于微电网的小信号动态模型, 分析了影响微电网运行特性的主要控制参数及其优化取值域。为提高优化目标函数的精确性, 采用专业暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 搭建了微电网时域仿真模型, 并进行了微电网各种运行状态及模式切换的仿真, 保证了控制策略在多种工作模式下的鲁棒性能。基于小生境遗传算法对所提微电网控制策略的主要参数进行了优化设计, 提高了微电网在不同运行模式下以及模式切换过程中的稳态特性和动态性能。

1 微电网结构

在典型的微电网结构中, 风力发电机、光伏电池、燃料电池等 DG 通过电力电子变换装置转换后, 经逆变器并入微电网。微电网通过静态切换开关在公共连接点(PCC)处与主网相连。本文所采用的微电网系统等效电路如图 1 所示, DG_1 与负载之间部分由 LC 滤波器电感 L_n 、电容 C_n 、耦合电感 L_{C1} 及寄生电阻 R_n 、 R_{C1} 组成。Load1 和 Load2 为本地负荷, Load3 为公共负荷, R_{n1} 、 R_{n2} 、 L_{n1} 、 L_{n2} 为线路电阻与电感。文中 DG_1 和 DG_2 均假设为直流源或整流后的直流源。对于出力具有不稳定性 and 间歇性的能源如风能、太阳能, DG 在其整流后的直流母线侧通过双向 DC-DC 变换器并联储能装置^[12-13], 可以平抑功率波动, 维持直流母线电压稳定, 亦适用于本文方法。

收稿日期: 2012-08-16; 修回日期: 2013-06-12

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2009AA05Z212); 国家自然科学基金资助项目(51107069)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2009AA05Z212) and the National Natural Science Foundation of China(51107069)

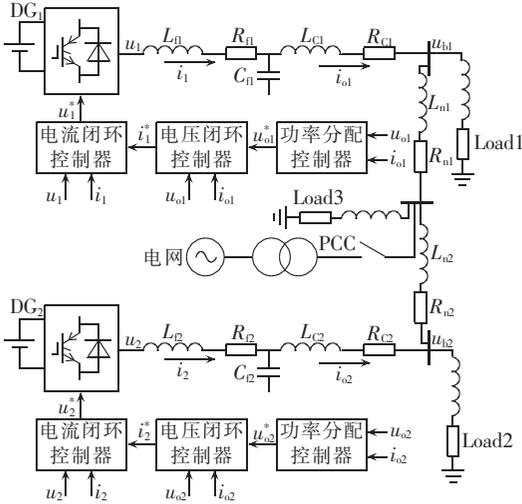


图 1 微电网系统等效电路及控制结构图

Fig.1 Equivalent circuit of microgrid and control structure

2 微电网控制策略

微电网的控制结构如图 1 所示,无论是处于并网运行还是孤岛运行模式, DG 都可以通过功率分配控制器实现功率共享,产生闭环控制的参考电压。带前馈补偿的电压电流双闭环控制保证了逆变器输出电压和输出电流的快速调节和无差跟踪。

功率分配控制器基于改进动态性能的下垂控制特性,其控制结构如图 2 所示。

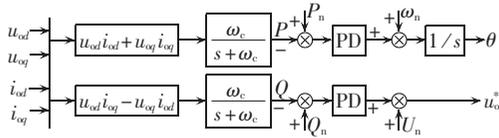


图 2 功率分配控制器框图

Fig.2 Block diagram of power allocation controller

平均功率 P 、 Q 由瞬时输出电压和电流计算后经低通滤波器得到:

$$P = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} (u_{od} i_{od} + u_{oq} i_{oq}) \quad (1)$$

$$Q = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} (u_{od} i_{oq} - u_{oq} i_{od}) \quad (2)$$

其中, ω_c 为低通滤波器的截止频率; u_{od} 、 u_{oq} 、 i_{od} 、 i_{oq} 分别为输出电压和电流的 d 、 q 轴分量。

为提高系统动态性能,基于改进下垂特性的功率调节关系为:

$$\theta = \int \omega dt = \left[\omega_n + m_p (P_n - P) + m_d \frac{d}{dt} (P_n - P) \right] dt \quad (3)$$

$$u_o^* = U_n + n_q (Q_n - Q) + n_d \frac{d}{dt} (Q_n - Q) \quad (4)$$

其中, ω 和 θ 分别为 DG 所在 dq 旋转坐标系的旋转角频率和相角; ω_n 、 U_n 分别为额定角频率和电压幅值; P_n 、 Q_n 分别为 DG 的额定有功和无功功率,一般取 P_n 为逆变器的额定有功功率, $Q_n = 0$; m_p 、 n_q 为下

垂增益, m_d 、 n_d 为暂态增益。

由式(3)、(4)及图 2 可见,功率分配控制器可等效为比例微分(PD)控制器, m_p 、 n_q 可有效实现功率分配及电压幅值和频率调节; m_d 、 n_d 对不同运行状态下的振荡起阻尼作用,提高系统的动态性能。因此,微电网在孤岛运行时, DG 基于改进的下垂特性实现功率共享并承担电压和频率的调节作用;并网运行时,微电网由主电网提供电压和频率的支撑,功率分配控制器等效为 PQ 控制方式使 DG 输出给定功率。无论微电网处于并网还是孤岛运行模式,都可以通过功率分配控制器实现 DG 之间的负荷分配,无需控制策略切换,降低了暂态振荡的可能性。

为稳定负载电压,提高系统的动态响应,采用带前馈补偿的电压电流双闭环控制器,其结构见图 3。

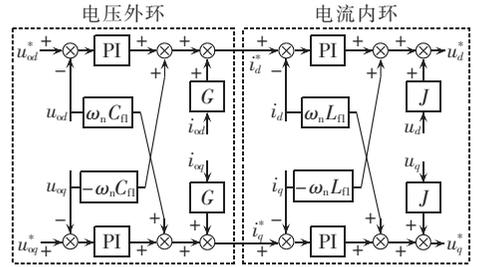


图 3 电压电流双闭环控制框图

Fig.3 Block diagram of voltage and current dual close loop control

电压外环控制的动态特性为:

$$\frac{d\phi_d}{dt} = u_{od}^* - u_{od}$$

$$\frac{d\phi_q}{dt} = u_{oq}^* - u_{oq}$$

$$i_d^* = k_{pi} (u_{od}^* - u_{od}) + k_{ii} \phi_d - \omega_n C_{\Pi} u_{oq} + G i_{od} \quad (5)$$

$$i_q^* = k_{pi} (u_{oq}^* - u_{oq}) + k_{ii} \phi_q + \omega_n C_{\Pi} u_{od} + G i_{oq} \quad (6)$$

其中, k_{pi} 、 k_{ii} 分别为电压 PI 控制器的比例和积分系数; ϕ_d 、 ϕ_q 为电压比较的积分量; G 为前馈增益。

电流内环控制的动态特性为:

$$\frac{d\phi_d}{dt} = i_d^* - i_d$$

$$\frac{d\phi_q}{dt} = i_q^* - i_q$$

$$u_d^* = k_{pi} (i_d^* - i_d) + k_{ii} \phi_d - \omega_n L_{\Pi} i_q + J u_d \quad (7)$$

$$u_q^* = k_{pi} (i_q^* - i_q) + k_{ii} \phi_q + \omega_n L_{\Pi} i_d + J u_q \quad (8)$$

其中, u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q 分别为逆变器 d 、 q 轴的电压和电流; k_{pi} 、 k_{ii} 分别为电流 PI 控制器的比例和积分系数; ϕ_d 、 ϕ_q 为电流比较的积分量; J 为前馈增益。

3 微电网小信号动态建模与分析

3.1 微电网的小信号动态建模

为了分析微电网的内在运行机理以及控制参数

对微电网运行特性的影响,建立如图 1 所示的微电网电路及控制结构的小信号动态模型。

每个 DG 的逆变器模型建立在其输出电压确定的旋转角频率为 ω_i 的 dq 旋转坐标系上,为建立整个微电网的动态模型,需要将 DG 模型变换到旋转角频率为 ω_{com} 的微电网全局参考坐标系下^[14],则第 i 个 DG 的逆变器参考坐标系与微电网全局参考坐标系的夹角为:

$$\delta = \int (\omega_i - \omega_{\text{com}}) dt \quad (9)$$

DG₁ 接口电路的电压、电流动态特性可以表示为:

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_{\Pi}}{L_{\Pi}} i_d + \omega_i i_q + \frac{u_d - u_{od}}{L_{\Pi}} \quad (10)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_{\Pi}}{L_{\Pi}} i_q - \omega_i i_d + \frac{u_q - u_{oq}}{L_{\Pi}} \quad (11)$$

$$\frac{du_{od}}{dt} = \omega_i u_{oq} + \frac{i_d - i_{od}}{C_{\Pi}} \quad (12)$$

$$\frac{du_{oq}}{dt} = -\omega_i u_{od} + \frac{i_q - i_{oq}}{C_{\Pi}} \quad (13)$$

$$\frac{di_{od}}{dt} = -\frac{R_{C1}}{L_{C1}} i_{od} + \omega_i i_{oq} + \frac{u_{od} - u_{sd}}{L_{C1}} \quad (14)$$

$$\frac{di_{oq}}{dt} = -\frac{R_{C1}}{L_{C1}} i_{oq} - \omega_i i_{od} + \frac{u_{oq} - u_{sq}}{L_{C1}} \quad (15)$$

其中, u_{sd} 、 u_{sq} 分别为 d 、 q 轴的交流母线电压。

式(1)~(15)描述了微电网中 DG 的动态特性,将其在稳态运行点处线性化可得:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_{\text{DG}} = \mathbf{A}_{\text{DG}} \Delta \mathbf{x}_{\text{DG}} + \mathbf{B}_{\text{DG}} \Delta \mathbf{u}_{\text{sdq}} \quad (16)$$

其中, $\Delta \mathbf{x}_{\text{DG}} = [\Delta \delta \ \Delta P \ \Delta Q \ \Delta \phi_{dq} \ \Delta \varphi_{dq} \ \Delta i_{dq} \ \Delta u_{odq} \ \Delta i_{odq}]^T$; \mathbf{A}_{DG} 、 \mathbf{B}_{DG} 分别为状态矩阵和输入矩阵; $\Delta \mathbf{u}_{\text{sdq}} = [\Delta u_{sd} \ \Delta u_{sq}]^T$,文中所有下标为 dq 的变量均为类似列向量。

\mathbf{A}_{DG} 、 \mathbf{B}_{DG} 为:

$$\mathbf{A}_{\text{DG}} = \begin{bmatrix} 0 & -m_p & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega J_{od} & \omega J_{oq} & \omega_c U_{od} & \omega_c U_{oq} \\ 0 & 0 & -\omega_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega J_{oq} & -\omega J_{od} & -\omega_c U_{oq} & \omega_c U_{od} \\ 0 & -\omega_c m_d & -n_q & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_c n_d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_c m_d k_{pu} & -n_q k_{pu} & k_{pi} & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -k_{pu} & -\omega_1 C_{\Pi} & J & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_c n_d k_{pu} & 0 & k_{pi} & 0 & 0 & 0 & -1 & -\omega_1 C_{\Pi} & -k_{pu} & 0 & J \\ 0 & -m_p J_q - \frac{\omega_c m_d k_{pu} k_{pv}}{L_{\Pi}} & -\frac{n_q k_{pu} k_{pv}}{L_{\Pi}} & \frac{k_{pv}}{L_{\Pi}} & 0 & \frac{k_{vi}}{L_{\Pi}} & 0 & \frac{-k_{pv} - R_{\Pi}}{L_{\Pi}} & \omega_1 - \omega_{\text{com}} & \frac{-G - k_{pv} k_{pv}}{L_{\Pi}} & \frac{-\omega_1 C_{\Pi} k_{pv}}{L_{\Pi}} & \frac{k_{pv} J}{L_{\Pi}} & 0 \\ 0 & m_p J_d & \frac{-\omega_c n_d k_{pu} k_{pv}}{L_{\Pi}} & 0 & \frac{k_{pv}}{L_{\Pi}} & 0 & \frac{k_{vi}}{L_{\Pi}} & \omega_1 - \omega_{\text{com}} & \frac{-k_{pv} - R_{\Pi}}{L_{\Pi}} & \frac{\omega_1 C_{\Pi} k_{pv}}{L_{\Pi}} & \frac{-G - k_{pv} k_{pv}}{L_{\Pi}} & 0 & \frac{k_{pv} J}{L_{\Pi}} \\ 0 & -m_p U_{od} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{\Pi}} & 0 & 0 & \omega_1 & -\frac{1}{C_{\Pi}} & 0 \\ 0 & m_p U_{od} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{\Pi}} & -\omega_1 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_{\Pi}} \\ \frac{U_{sq} \sin \delta - U_{sd} \cos \delta}{L_{C1}} & -m_p J_{oq} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_{C1}} & 0 & -\frac{R_{C1}}{L_{C1}} & \omega_1 & 0 \\ \frac{U_{sd} \cos \delta + U_{sq} \sin \delta}{L_{C1}} & m_p J_{od} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_{C1}} & -\omega_1 & -\frac{R_{C1}}{L_{C1}} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_{\text{DG}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\cos \delta}{L_{C1}} & -\frac{\sin \delta}{L_{C1}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\sin \delta}{L_{C1}} & -\frac{\cos \delta}{L_{C1}} \end{bmatrix}^T$$

其中, ω_1 为 DG₁ 的旋转角频率, J_d 、 J_q 、 J_{od} 、 J_{oq} 分别为 i_d 、 i_q 、 i_{od} 、 i_{oq} 的稳态值, U_{od} 、 U_{oq} 、 U_{sd} 、 U_{sq} 分别为 u_{od} 、 u_{oq} 、 u_{sd} 、 u_{sq} 的稳态值。

整个微电网的小信号动态模型包括: DG 的小信号动态子模型和网络及负载小信号动态子模型。类似于 DG 的接口电路模型,网络及负载小信号模型由网络及负载的电路等效微分方程线性化后得到^[15]。通过坐标变换将各 DG 的小信号模型和网络及负载小信号模型变换到全局参考坐标系下,得到整个微电网的小信号状态空间模型:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \quad (17)$$

其中, \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 分别为微电网的状态矩阵和输入矩阵, $\Delta \mathbf{x}$ 、 $\Delta \mathbf{u}$ 分别为包含 DG、线路和负载状态变量的微电网状态矢量和输入矢量。

3.2 小信号动态分析

根据经典控制理论,小信号模型的特征根反映了系统的稳定性、动态性能和阻尼特性,而且系统的频率模式与特征根也密切相关^[16-17]。微电网小信号模型的所有特征根分布如图 4 所示,在较宽的频带内,系统的特征根被明显地分为高频(约 1.6 kHz)、中频(400~650 Hz)、低频(2~10 Hz)3 组频率模式。根据敏感度分析理论,特定的特征根针对某频率模式的敏感度很强,而对其他频率模式的敏感度可以忽略不计。例如高频模式对应于电流控制闭环和滤波电路;中频模式对电压控制闭环的特征根较为敏感;功率分配控制器处于低频模式。这种频率模式分布特征

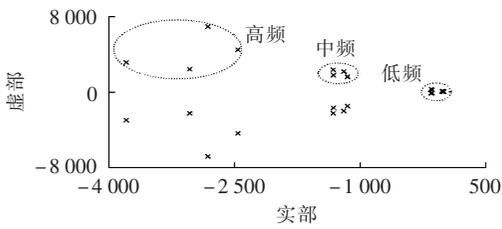
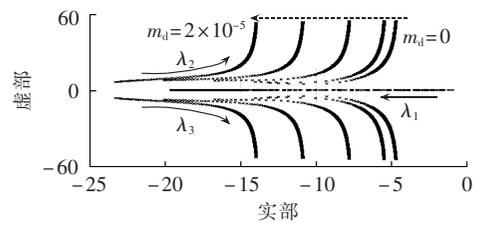


图 4 微电网的特征根分布
Fig.4 Eigenvalue distribution of microgrid

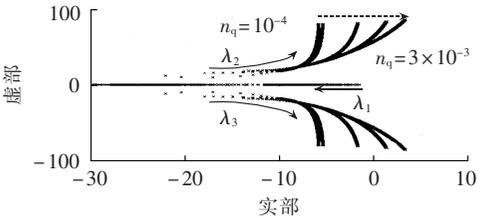
避免了外层控制闭环对内层控制闭环稳定性和鲁棒性的影响,保证了微电网的良好运行,同时为单独整定不同频率模式下的控制器参数提供了理论基础。功率控制器的特征向量对应于低频模式下的主导极点,对微电网运行的稳定性和动态性能的影响起主导作用。因此,功率控制器的下垂增益 m_p 、 n_q 和暂态增益 m_d 、 n_d 的优化设计,可以有效提高微电网系统的运行特性。

图 5(a)为 $5 \times 10^{-6} \leq m_p \leq 3 \times 10^{-4}$ 且 $m_d=0, 10^{-6}, 5 \times 10^{-6}, 10^{-5}, 2 \times 10^{-5}$ 时,功率控制器的特征根 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 的变化轨迹,其中实线箭头表示 m_p 增加时特征根的变化方向,虚线箭头表示 m_d 增加时根轨迹簇的变化方向。当 m_p 较小时,系统的一对共轭复根 λ_2, λ_3 距虚轴较远,接近虚轴的实根 λ_1 为主导极点,系统可以等价为一阶系统。此时系统无超调,但是存在稳态误差且动态响应慢。随着 m_p 的增加,实根 λ_1 逐渐远离虚轴而共轭复根 λ_2, λ_3 逐渐接近虚轴成为主导极点,系统近似为二阶系统,动态响应性能提高。同时,共轭复根 λ_2, λ_3 也逐渐远离实轴,系统有超调且存在振荡,振荡幅值越来越大。当加入暂态环节时,随着 m_d 的增大,特征根 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 与虚轴的距离越来越大,因此系统的动态响应越来越快,验证了本文采用的功率控制器能够有效提高微电网的动态性能。图 5(b)为 $5 \times 10^{-6} \leq m_p \leq 3 \times 10^{-4}$ 且 $n_q=10^{-4}, 5 \times 10^{-4}, 10^{-3}, 2 \times 10^{-3}, 3 \times 10^{-3}$ 时,功率控制器的特征根 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 的变化轨迹,其中实线箭头表示 m_p 增加时特征根的变化方向,虚线箭头表示 n_q 增加时根轨迹簇的变化方向。从图中可以看出,不断增加 n_q ,会使系统共轭复根 λ_2, λ_3 落在虚轴的右侧,此时系统不稳定。

根据上述分析可知,功率控制器参数的匹配选择决定了微电网系统的稳定性和动态性能,同时不同参数对系统稳定性和动态性能的影响不同,且参数间也存在耦合作用。图 6(a)和(b)分别为 $0 \leq m_d \leq 2 \times 10^{-5}$ 和 $5 \times 10^{-6} \leq m_p \leq 3 \times 10^{-4}$ 时的根轨迹在 n_d 取不同值时形成的曲线簇,其中实线箭头分别表示 m_d, m_p 增加时特征根的变化方向,虚线箭头表示 n_d 增加时根轨迹簇的变化方向。



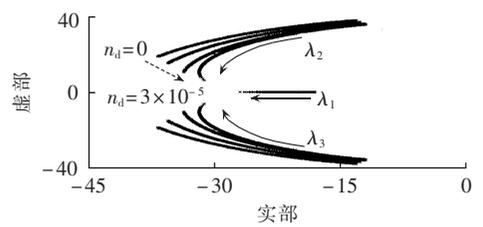
(a) $m_d=0, 10^{-6}, 5 \times 10^{-6}, 10^{-5}, 2 \times 10^{-5}$ 时的根轨迹图



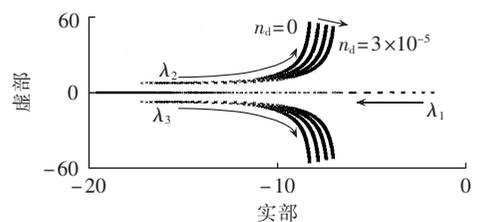
(b) $n_q=10^{-4}, 5 \times 10^{-4}, 10^{-3}, 2 \times 10^{-3}, 3 \times 10^{-3}$ 时的根轨迹图

图 5 m_p 变化时的根轨迹图 ($5 \times 10^{-6} \leq m_p \leq 3 \times 10^{-4}$)

Fig.5 Root locus diagram for m_p change ($5 \times 10^{-6} \leq m_p \leq 3 \times 10^{-4}$)



(a) $0 \leq m_d \leq 2 \times 10^{-5}$ 时的根轨迹图



(b) $5 \times 10^{-6} \leq m_p \leq 3 \times 10^{-4}$ 时的根轨迹图

图 6 n_d 取 $0, 5 \times 10^{-6}, 10^{-5}, 3 \times 10^{-5}$ 时的根轨迹图

Fig.6 Root locus diagram for n_d take $0, 5 \times 10^{-6}, 10^{-5}, 3 \times 10^{-5}$

综合考虑微电网系统的稳态性能和动态特性,基于小信号动态分析理论设计参数 m_p, m_d, n_q, n_d 的优化取值域,可以有效提高优化效率,大幅降低计算成本,保证综合优化目标的实现。表 1 为经过小信号动态分析之后的参数优化取值域。在复平面上对应于参数优化取值域的特征根区域如图 7 所示,其兼顾了微电网系统的稳定性和动态性能。

表 1 参数优化取值域

Tab.1 Optimization range of parameters

| 参数 | 优化取值域 |
|-------|--|
| m_p | $(5 \times 10^{-6}, 3 \times 10^{-4})$ |
| m_d | $(10^{-6}, 2 \times 10^{-5})$ |
| n_q | $(2 \times 10^{-5}, 10^{-3})$ |
| n_d | $(10^{-6}, 3 \times 10^{-5})$ |

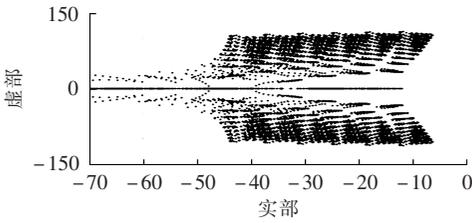


图 7 参数优化取值域的特征根区域图

Fig.7 Root area diagram of optimization range of parameters

4 基于小生境遗传算法的微电网运行优化

4.1 目标函数

微电网运行涉及多种工作模式:并网运行模式、并网与独立运行模式的切换、负荷突变的独立运行模式、重新并网运行模式。为了使微电网实现多种工作模式的稳定运行和平滑切换,稳定高效地控制 DG 输出,同时使系统电压幅值和频率较快地稳定在额定值附近,建立了微电网运行优化的目标函数:

$$f = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M f_{ij} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left[\sum_{t=T_0^j}^{T_1^j} (t - T_0^j) \mathbf{H} |\mathbf{K}_i^j(t)| \right] \quad (18)$$

$$|\mathbf{K}_i^j(t)| = \left| [\Delta P_i^j(t), \Delta Q_i^j(t), \Delta U_i^j(t), \Delta F_i^j(t)]^T \right| \quad (19)$$

其中, N 和 M 分别为微电网的 DG 数量和工作模式数量, $N=2, M=4$; t 为仿真时间; T_0^j, T_1^j 分别为工作模式 j 下的计算开始与终止时间; \mathbf{H} 为权值矩阵, $\mathbf{H}=[1, 1, 10, 20]$; $|\mathbf{K}_i^j(t)|$ 为 t 时刻第 i 个 DG 在工作模式 j 下的绝对误差矩阵, $\Delta P_i^j(t)$ 和 $\Delta Q_i^j(t)$ 分别为 t 时刻采样的第 i 个 DG 在工作模式 j 下的有功功率和无功功率控制误差; $\Delta U_i^j(t)$ 和 $\Delta F_i^j(t)$ 分别为 t 时刻采样的第 i 个 DG 在工作模式 j 下的电压幅值和频率与额定值的偏差。需要指出的是,计算目标函数的采样数据均转化为标么值。

目标函数的计算需要不断采样 t 时刻的有功功率、无功功率、输出电压幅值和频率等数据,因此采样数据的准确性决定了微电网运行优化结果的实用性和有效性。电力系统暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 能够有效逼近真实的电力系统稳态和暂态过程,在国际电力系统分析领域得到了广泛应用和认可^[18-19]。为了实现目标函数的准确建模,本文利用 PSCAD/EMTDC 软件建立了如图 1 所示的微电网模型并进行微电网多种工作模式及模式切换的非线性时域仿真。利用 PSCAD/EMTDC 与 MATLAB 的数据接口,基于 MATLAB 的强大计算能力和可视化技术进行了优化算法编程和数据处理。

4.2 基于小生境遗传算法的微电网运行优化

微电网的运行优化是具有约束域的非线性优化问题,其优化变量 $[m_p, m_d, n_q, n_d]$ 之间存在复杂的耦合作用且目标函数不可微,故常规的数学优化方法

并不适用。遗传算法是一种模拟生物遗传和进化过程的现代启发式算法,具有高度并行、随机、全局搜索以及自适应等特点,非常适合复杂非线性优化问题的求解。但遗传算法容易发生非全局性收敛或收敛速度缓慢等问题,主要表现在种群中所有个体都趋于同一状态时停止进化,从而收敛于局部最优解。

本文采用小生境技术^[20]和自适应技术^[21]改进传统遗传算法。小生境技术采用海明距离作为共享函数,当遗传算法种群中的 2 个个体 X_i 和 X_j 之间的海明距离小于预先指定的某一距离 L 时,比较个体 X_i 和 X_j 的适应度大小,并对其中适应度较低的个体处以惩罚函数。这样,较差的个体在后面的进化过程中被淘汰的概率极大,即在距离 L 之内只存在 1 个优良个体,从而既维护了种群的多样性,又使得个体能够在整个优化取值域中分散开来,避免陷入局部最优。同时,采用自适应概率算术交叉与变异运算,根据进化过程自适应调整算术交叉和变异的概率,有效提高小生境遗传算法的寻优效率和收敛速度。

本文以微电网控制参数为优化变量 $\mathbf{X}=[m_p, m_d, n_q, n_d]$,综合利用 PSCAD/EMTDC 与 MATLAB 软件,基于小生境遗传算法优化微电网运行的流程如图 8 所示,其中无阴影图框表示 MATLAB 环境下的进程,有阴影图框表示 PSCAD/EMTDC 环境下的进程。

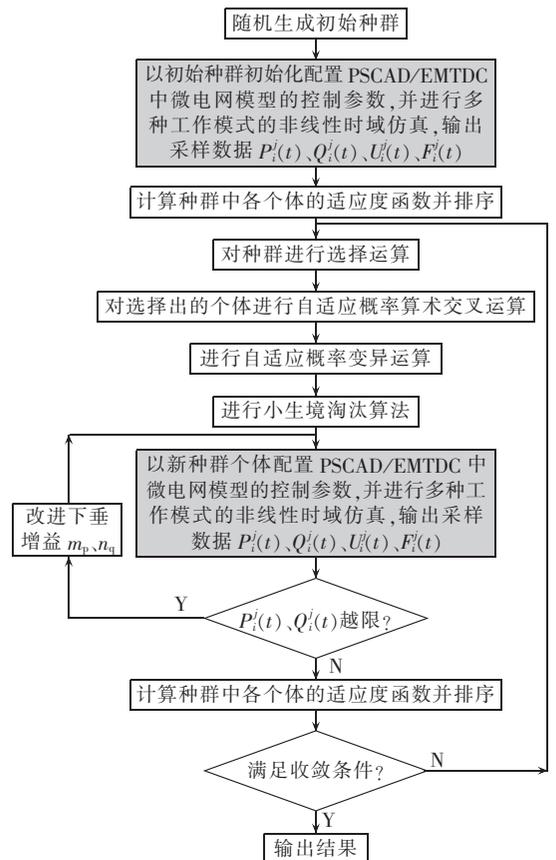


图 8 微电网运行优化的流程图

Fig.8 Flowchart of microgrid operation optimization

需要说明的是,在实际微电网运行中,算法优化结果可能会超出 DG 出力的限制,造成系统的电压幅值和频率不符合 IEEE Std 1547.4—2011^[22]标准要求,严重时会导致系统失稳。因此,在循环周期内根据 PSCAD/EMTDC 下的微电网仿真结果对下垂增益进行改进:

$$m_p = \begin{cases} \frac{\omega_n - \omega_{\min}}{P_{ni} - P_{imax}} & P_i > P_{imax} \\ \frac{\omega_n - \omega_{\max}}{P_{ni} - P_{imin}} & P_i < P_{imin} \end{cases} \quad (20)$$

$$n_q = \begin{cases} \frac{U_n - U_{\min}}{Q_{ni} - Q_{imax}} & Q_i > Q_{imax} \\ \frac{U_n - U_{\max}}{Q_{ni} - Q_{imin}} & Q_i < Q_{imin} \end{cases} \quad (21)$$

其中, P_i 、 Q_i 、 P_{ni} 、 Q_{ni} 分别为微电网中第 i 个 DG 的实际输出功率和额定功率; P_{imax} 、 Q_{imax} 、 P_{imin} 、 Q_{imin} 分别为微电网中第 i 个 DG 输出有功功率和无功功率的上限和下限;微电网的电压频率和幅值范围分别为 $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$ 、 $[U_{\min}, U_{\max}]$, $\omega_{\max}=50.2$ Hz, $\omega_{\min}=49.0$ Hz, $U_{\max}-U_{\min}=U_n-U_{\min}=10\% \times U_{n0}$

5 算例分析

在 PSCAD/EMTDC 环境下搭建了图 1 所示结构的微电网平台,具体参数如下。

DG₁: 380 V, 50 Hz, $\omega_c=30$ rad/s, $L_{l1}=1.5$ mH, $L_{C1}=0.5$ mH, $C_{f1}=50$ μ F, $R_{l1}=0.15$ Ω , $R_{C1}=0.05$ Ω , $k_{pu}=0.045$, $k_{iu}=400$, $k_{pi}=12$, $k_{ii}=15\ 000$, $G=0.7$, $J=0.75$ 。

DG₂: 380 V, 50 Hz, $\omega_c=30$ rad/s, $L_{l2}=1.5$ mH, $L_{C2}=0.5$ mH, $C_{f2}=50$ μ F, $R_{l2}=0.15$ Ω , $R_{C2}=0.05$ Ω , $k_{pu}=0.05$, $k_{iu}=500$, $k_{pi}=15$, $k_{ii}=15\ 300$, $G=0.68$, $J=0.7$ 。

负荷: Load1 为 10 kW/5 kvar, Load2 为 10 kW/5 kvar, Load3 为 20 kW/19 kvar。

线路: $R_{nl}=0.147$ Ω , $L_{nl}=1.63$ mH, $R_{n2}=0.11$ Ω , $L_{n2}=1.25$ mH。

为了验证所设计控制策略的可行性和鲁棒性,微电网的运行过程涉及多种工作模式:1.0 s 前并网运行;1.0 s 时与主电网断开独立运行;2.0 s 时独立运行状态下发生负荷突变,Load3 突降为 16 kW/5 kvar;3.0 s 时重新联到电网。

5.1 基于小生境遗传算法的微电网运行优化

根据第 4 节所述优化过程,基于小生境遗传算法优化微电网的运行性能。小生境遗传算法的种群数量为 20,最大进化代数为 100。优化后的微电网控制参数 $[m_p, m_d, n_q, n_d] = [2.44 \times 10^{-5}, 0.72 \times 10^{-5}, 5.13 \times 10^{-4}, 1.29 \times 10^{-5}]$ 。由图 9 优化过程中目标函数 f 的收敛曲线可以看出,小生境遗传算法能够较快地收敛到全局最优。图 10 为第 30 代至第 35 代进化时,微电网中 DG₁ 和 DG₂ 输出的有功功率变化曲线。随着

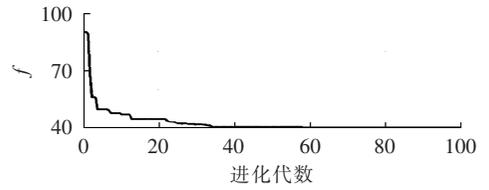


图 9 目标函数的收敛曲线

Fig.9 Convergence curve of objective function

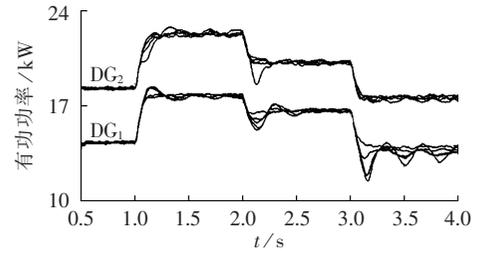


图 10 微电网的有功功率优化过程

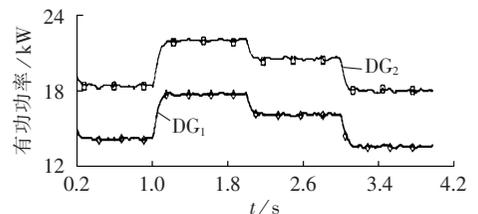
Fig.10 Process of active power optimization for microgrid

种群的不断进化,微电网稳态运行的误差和振荡越来越小,而且动态切换过程的响应时间越来越短,超调也越来越小,验证了所采用的优化方法可以不断改进微电网控制的稳态性能和动态特性。

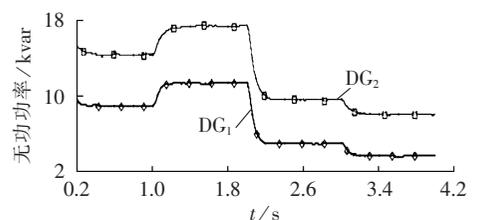
5.2 优化后的微电网运行特性

基于小生境遗传算法优化后的微电网, DG₁ 和 DG₂ 输出的有功功率和无功功率分别如图 11(a)和(b)所示,交流母线频率和电压分别如图 11(c)和(d)所示。由于断开前微电网从主电网吸收部分功率,所以独立运行后微电网中 DG 输出的有功功率和无功功率均增加。在独立运行时,微电网能够快速准确地实现 DG 间负荷功率分配,且电压幅值和频率都稳定在允许范围内。图 11(e)、(f)为 DG 输出电流及局部放大图,表明系统均流特性良好,且重新并网过程中无明显的冲击电流。

从优化后的微电网运行特性可以看出,本文所设计的控制策略及优化方法有效实现了微电网在不同工作模式间的平滑切换,且在不同工作模式下都



(a) 输出有功功率



(b) 输出无功功率

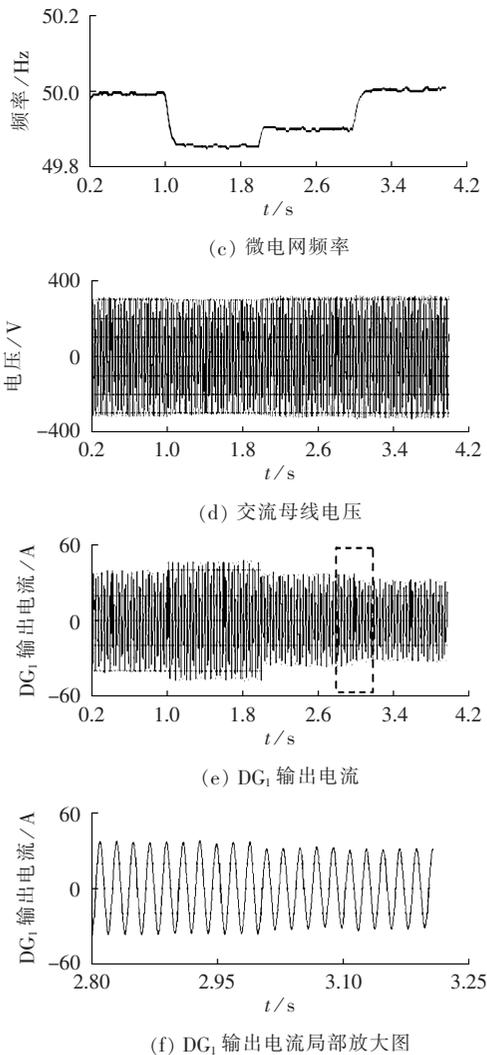


图 11 微电网运行特性

Fig.11 Operating performance of microgrid

能快速无振荡地进入稳态运行,保证了系统稳定性的同时提高了动态性能。

5.3 优化方法的鲁棒性测试

基于小生境遗传算法的微电网运行优化考虑了微电网的多种运行状态,从而保证了本文优化设计的控制策略在多种工作模式下都具有较强的鲁棒性。

图 12 为在初始种群不同的情况下,多次优化过程的目标函数收敛曲线。可以看出,目标函数在多次优化过程中都收敛于相同值,表明了基于小生境遗

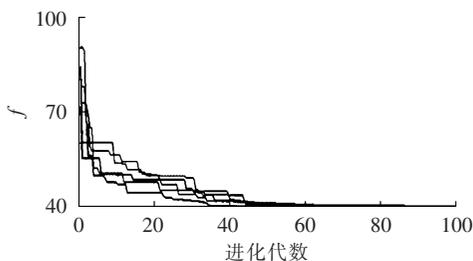


图 12 多次运行的目标函数收敛曲线

Fig.12 Convergence curve of objective function for multiple runs

传算法的优化方法对于初始种群具有较强鲁棒性,能够有效避免非全局性收敛。

6 结论

为了提高微电网在不同工作模式下以及模式切换过程中的稳态特性和动态性能,本文提出了一种包含改进动态特性的功率分配控制器、带前馈补偿的电压电流双闭环控制器的微电网控制策略,并基于小生境遗传算法优化微电网运行特性。基于小信号动态模型分析了影响微电网运行特性的主要控制参数及其优化取值域,有效提高了优化过程的计算效率。构建了基于 PSCAD/EMTDC 时域仿真模型的优化目标函数,采用小生境技术和自适应技术改进的遗传算法对所提出微电网控制策略的主要参数进行了优化设计。微电网多种工作模式和模式切换的时域仿真以及自适应小生境遗传算法保证了微电网控制策略及优化方法的鲁棒性。对于具有不同原动机部分的 DG 及不同拓扑结构的微电网的控制与优化值得进一步研究。同时,微电网运行涉及的因素较多,其运行优化的目标函数建模有待后续研究。

参考文献:

- [1] 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 microgrid based on distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 120-123.
- [2] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 25-34.
LU Zongxiang, WANG Caixia, MIN Yong, et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 25-34.
- [3] LI Yunwei, VILATHGAMUWA D M, LOH P C. Design, analysis and real time testing of controllers for multi-bus micro-grid system[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(5): 1195-1204.
- [4] 王鹤, 李国庆. 含多种分布式电源的微电网控制策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 19-23.
WANG He, LI Guoqing. Control strategy of microgrid with different DG types[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 19-23.
- [5] KATIREI F, IRAVANI M R. Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(4): 1821-1831.
- [6] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微电网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-103.
WANG Chengshan, XIAO Zhaoxia, WANG Shouxiang. Synthetical control and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103.
- [7] 郑竞宏, 王燕廷, 李兴旺, 等. 微电网平滑切换控制方法及策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 17-24.
ZHENG Jinghong, WANG Yanting, LI Xingwang, et al. Control methods and strategies of microgrid switchover[J]. Automation of

- Electric Power Systems, 2011, 35(18):17-24.
- [8] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网中分布式电源逆变器的多换反反馈控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2):100-107.
WANG Chengshan, XIAO Zhaoxia, WANG Shouxiang. Multiple feedback loop control scheme for inverters of the micro source in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2):100-107.
- [9] 张建华, 苏玲, 刘若曦, 等. 逆变型分布式电源微网小信号稳定性动态建模分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(22):97-102.
ZHANG Jianhua, SU Ling, LIU Ruoxi, et al. Small-signal dynamic modeling and analysis of a microgrid composed of inverter-interfaced distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(22):97-102.
- [10] 张建华, 苏玲, 刘若曦, 等. 逆变型分布式电源微网并网小信号稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6):76-80.
ZHANG Jianhua, SU Ling, LIU Ruoxi, et al. Small-signal analysis of grid-connected microgrid with inverter-interfaced distributed resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(6):76-80.
- [11] HASSAN M A, ABIDO M A. Optimal design of microgrids in autonomous and grid-connected modes using particle swarm optimization[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2011, 26(3):755-769.
- [12] 胡雪松, 孙才新, 刘刃, 等. 采用飞轮储能的永磁直驱风电机组有功平滑控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(13):79-83.
HU Xuesong, SUN Caixin, LIU Ren, et al. An active power smoothing strategy for direct-driven permanent synchronous generator based wind turbine using flywheel energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(13):79-83.
- [13] 唐西胜, 邓卫, 李宇宁, 等. 基于储能的可再生能源微网运行控制技术[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3):99-103.
TANG Xisheng, DENG Wei, LI Ningning, et al. Control strategy of micro-grid operation based on energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3):99-103.
- [14] YASSER A I M, EHAB F E. Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of parallel inverters in distributed generation microgrid[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2008, 23(6):2806-2816.
- [15] NAGARA P, MILAN P, TIMOTHY C G. Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(2):613-625.
- [16] GUERRERO J M, MATAS J, VICUNA L G, et al. Wireless-control strategy for parallel operation of distribution generation inverters[J]. IEEE Trans on Industrial Electronic, 2006, 53(5):1462-1470.
- [17] GUERRERO J M, JUAN C V, MATAS J, et al. Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems[J]. IEEE Trans on Industrial Electronic, 2009, 56(3):726-735.
- [18] KATIRAEI F, IRAVANI M R, LEHN P W. Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1):248-257.
- [19] CHUNG I Y, LIU W X, CARTES D A, et al. Control method of inverter-interfaced distributed generators in a microgrid system[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2010, 46(3):1078-1088.
- [20] 向铁元, 周青山, 李富鹏, 等. 小生境遗传算法在无功优化中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17):48-51.
XIANG Tiejuan, ZHOU Qingshan, LI Fupeng, et al. Research on niche genetic algorithm for reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17):48-51.
- [21] 王瑞琪, 李珂, 张承慧. 基于混沌多目标遗传算法的微网系统容量优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22):16-22.
WANG Ruiqi, LI Ke, ZHANG Chenghui. Optimization allocation of microgrid capacity based on chaotic multi-objective genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(22):16-22.
- [22] IEEE Standards Coordinating Committee 21. IEEE Std 1547.4-2011 IEEE guide for design, operation, and integration of distributed resource island systems with electric power system[S]. New York, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2011.

作者简介:

王瑞琪(1986-), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 主要研究方向为微电网运行优化控制技术(E-mail: 393794404@qq.com);

张承慧(1963-), 男, 山东德州人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为控制理论与应用、工程优化节能控制和可再生能源等;

李珂(1979-), 男, 山东济南人, 副教授, 主要研究方向为新能源并网发电和电动汽车驱动系统效率优化等;

陈阿莲(1976-), 女, 山东潍坊人, 教授, 主要研究方向为三电平变换技术及其在新能源中的应用;

杜春水(1973-), 男, 山东潍坊人, 副教授, 主要研究方向为光伏并网发电技术。

Control and optimization based on niche genetic algorithm for microgrid

WANG Ruiqi^{1,2}, ZHANG Chenghui^{1,2}, LI Ke^{1,2}, CHEN Alian^{1,2}, DU Chunshui^{1,2}

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China;

2. Engineering Center of Power Electronic Saving Technology and Equipment, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: A control strategy and optimization method based on the niche genetic algorithm is proposed for microgrid. In order to effectively improve the optimization efficiency, a small-signal dynamic model of whole microgrid is built and the main control parameters, which influence the operating performance of microgrid, and their optimum ranges are obtained by analysis. For establishing the accurate objective function of optimization, the microgrid platform is built based on PSCAD/EMTDC and the time-domain simulation is carried out for different operating modes and corresponding mode switching of microgrid. Aiming at the non-global convergence and slow convergence rate of traditional genetic algorithm, a genetic algorithm improved by niche technique and adaptive technique is adopted to optimize the operating performance of microgrid. The result of example analysis verifies the validity and robustness of the proposed control strategy and optimization method.

Key words: microgrid; small-signal model; niche technology; genetic algorithms; optimization; control