

考虑可再生能源随机性的微电网经济性与稳定性 协调优化策略

杨 健¹, 唐 飞¹, 廖清芬¹, 朱学栋¹, 闫秉科²

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072;

2. 国网湖北省电力公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430077)

摘要: 当前含高渗透率可再生能源的微电网稳定运行问题日趋严重。通过场景生成与削减方法对可再生能源的随机性进行建模和求解; 基于下垂控制理论, 利用时间乘以误差绝对值积分指标实现微电网稳定性的快速判断; 提出一种考虑可再生能源随机性的微电网经济性与稳定性协调优化策略。MATLAB/Simulink 仿真结果验证了所提模型与方法的正确性与有效性。

关键词: 微电网; 可再生能源; ITAE 指标; 经济与稳定协调优化

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.08.024

0 引言

微电网是利用现代技术将风力发电、光伏发电等分布式电源及负荷、储能设备等装置结合, 形成的能够满足个性化需求供电的新型终端电网^[1-2]。充分利用可再生分布式电能, 发挥其经济环保特性是微电网的最大优势^[3]。微电网的经济运行是目前电力系统研究的热点之一^[4]。随着分布式电源渗透率逐渐增加, 风力发电及光伏发电等可再生能源发电所具有的随机性和不可确定性, 不仅给微电网的经济调度带来了挑战, 同时增大了微电网稳定运行的风险。微电网稳定运行不仅要解决如何保持孤岛运行下的静态稳定性问题^[5], 同时也要保证微电网运行方式发生剧烈变化等各种动态过程中的稳定运行。大量的实际运行经验表明, 由于环境、天气等原因造成的可再生能源出力随机波动会对微电网的稳定运行造成极大影响, 因此, 如何在可再生能源出力不确定的前提下, 考虑微电网运行过程中运行方式的剧烈变动, 实现对微电网的经济优化与稳定协调是研究的难点。

目前, 国内外学者针对微电网经济优化运行进行了大量研究^[6-8]。文献[9-11]提出了考虑可再生能源出力随机性的微电网经济优化模型, 建立分布式电源出力不确定集合, 实现了微电网的动态经济优化调度, 但是文献中并未考虑在分布式电源出力变化时微电网的动态稳定性, 事实上, 微电网经济最优运行方案并不能保证系统有较好的稳定性。文献[12]中提出了经济性与可靠性相协调的微电网能量优化模型, 权衡停电损失及投资费用, 实现微电网经济静态调

度, 但是文献中对于不可再生能源出力的处理过于简单, 考虑的是微电网全年的经济调度, 该模型不能满足微电网实时动态调度运行要求。文献[13]提出了基于智能电网及微电网能量管理系统的电能实时调度方案, 其目标是降低客户的用电费用, 提高智能电网和微电网的社会效益以及能源效率和微电网依靠本地产生的电力可靠性。但是文中所提最佳经济方案需要集中控制系统和额外的通信基础设施, 这将导致投资成本增加。

微电网孤岛运行的稳定性问题也引起了大量学者的关注, 文献[14]提出了一种改善微电网频率稳定性的分布式逆变电源虚拟同步发电机(VSG)整体控制策略, 通过模拟负荷动态变化仿真验证了所提的 VSG 控制策略对微电网频率稳定性的改善作用。文献[15-16]研究了微电网下垂控制及 PQ 控制 2 种不同控制方式下的变流器模型, 建立微电网小信号模型, 研究了负荷变化、下垂特性参数等对微电网稳定性的影响, 并通过时域仿真微电网功率及频率响应验证模型的正确性。上述文献[14-16]中均探讨了微电网孤岛运行模式下的稳定性问题, 通过微电网频率以及功率响应验证所提模型及策略的有效性。但上述文献缺乏对微电网经济性的综合考虑。

综上所述, 学者们对于微电网经济优化与稳定性研究均是孤立的, 并未将两者进行综合考虑, 更没有对微电网经济性与稳定性进行协调优化。本文针对上述不足, 提出了微电网的经济优化与稳定协调优化策略, 在不增加外加装置成本的情况下, 通过下垂控制实现微电网经济稳定最优运行。首先在考虑可再生能源发电出力随机性前提下, 应用拉丁超立方采样 LHS (Latin Hypercube Sampling) 法对可再生能源出力进行预测, 生成具有高概率和代表性的场景。然后采用下垂控制的方法对各可控分布式微源 DDER (Dispatchable Distributed Energy Resource) 输出功

收稿日期: 2016-11-22; 修回日期: 2017-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51507116); 国网科技项目(52150016000Y)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51507116) and Science and Technology Project of SGCC(52150016000Y)

率进行控制,通过对下垂系数的优化,实现对微电网的经济成本及系统稳定指标 ITAE(Integrated of Time-weighted Absolute Error)的双重调节,建立了基于下垂系数的微电网经济性与稳定性相协调的优化模型。最后采用微分进化算法对模型进行优化求解,且分析对比了不同优化策略下微电网的经济性与稳定性。本文在 MATLAB 中结合仿真算例验证了该模型的正确性和有效性。

1 可再生能源功率随机性出力方法

传统微电网经济调度模型中常采用确定性的风机或光伏输出功率预测结果,进而实现微电网经济优化。事实上,可再生能源发电出力具有随机性和不可确定性,本文采用 LHS 法将可再生能源输出功率离散化为多个场景。LHS 法属于多维分层采样方法,是一种有效的用采样值反映随机变量整体分布的方法^[17]。首先通过采样不同时段风机及光伏发电输出功率,生成具有概率分布的场景集合,然后通过消减聚合的方式选取具有代表性的期望场景。

本文对风机及光伏出力分别预测,通过 LHS 法生成了具有 3000 个场景的集合,最终消减聚合形成 10 个有效场景^[18],如图 1、图 2 所示。

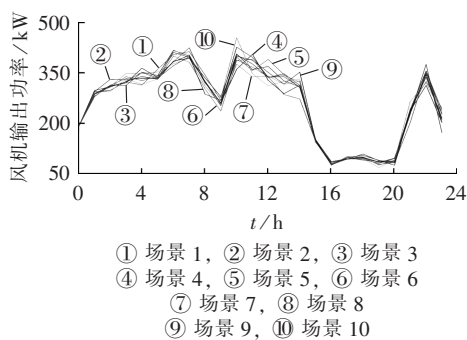


图 1 风机输出功率场景

Fig.1 Scenarios of wind-turbine output

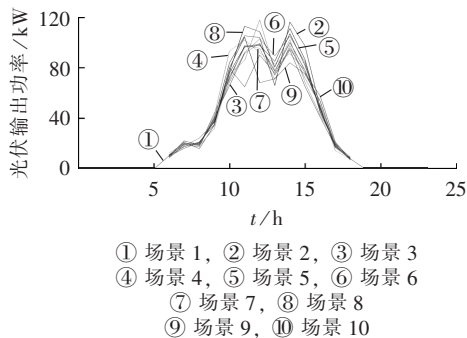


图 2 光伏输出功率场景

Fig.2 Scenarios of photovoltaic output

2 微电网经济优化模型

2.1 微电网有功控制策略

在分布式电源并联运行时,传统的对于每个

可控微源的下垂系数的分配是基于各自容量分配实现的,即 $m_{p1}P_1 = m_{p2}P_2 = \dots = m_{pn}P_n$,并没有考虑经济性与稳定性原则。本文提出的基于下垂系数的微电网经济调度策略,是通过判断微电网频率来平衡有功功率的供需匹配。可控微源 i 输出的有功功率由 m_{pi} 决定。在场景 s 情景下,微源 i 在 t 时刻输出功率 $P_i^{t,s}$ 与系统频率 $\omega^{t,s}$ 的关系可由式(1)推导。

$$P_i^{t,s} = -\frac{\omega^{t,s} - \omega^{t-1,s}}{m_{pi}^{t-1}} + P_i^{t-1,s} \quad (1)$$

其中, m_{pi}^{t-1} 为微源 i 在 $t-1$ 时刻的下垂系数。

由式(1)可得到多可调微源的下垂特性曲线,如图 3 所示。图中 $\omega^{\max}$ 、 $\omega^{\min}$ 分别为微电网频率的上、下限值。

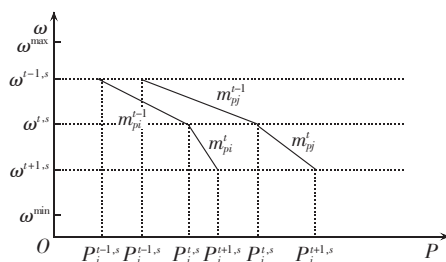


图 3 多可控微源的下垂特性

Fig.3 Droop characteristics of multiple DDERS

图 3 反映了系统运行状态发生变化时,最优输出功率、系统频率与下垂系数的关系。

2.2 微电网经济优化数学模型

2.2.1 经济优化目标

微电网经济调度是指在满足功率平衡约束、安全运行约束、机组出力约束等条件下实现微电网运行成本最小。微电网运行成本主要包括常规发电机组燃料成本、运行维护及污染气体排放成本。在不考虑可再生能源发电(风机及光伏)输出功率随机性时,微电网经济优化目标为:

$$f_1 = \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_i} F_{Ci}^t(P_{i,new}^t) + \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{k=1}^{N_k} \alpha_k E_{Fi,k} P_{i,new}^t \quad (2)$$

其中, N_t 、 N_i 和 N_k 分别为时段数、可调微源数、排污类别数; $P_{i,new}^t$ 为第 i 个微源在 t 时刻的输出功率; $F_{Ci}^t(P_{i,new}^t)$ 为其燃料消耗成本; α_k 为第 k 种废弃物的处理成本; $E_{Fi,k}$ 为第 i 个微源第 k 种废弃物的排放因子。对于风力发电光伏发电机组,其污染气体排放成本为 0。

其中第 i 个可控微源在 t 时刻的燃料成本可由其输出功率的二次函数表示^[19]。

$$F_{Ci}^t(P_{i,new}^t) = a_i + b_i P_{i,new}^t + c_i (P_{i,new}^t)^2 \quad (3)$$

其中, a_i 、 b_i 、 c_i 为可控机组的燃料成本系数,可以通过其耗量特性曲线拟合得到。

2.2.2 约束条件

为保证微电网安全正常运行,除需满足式(2)、(3)以外,还需满足如下约束条件。

a. 功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^{N_i} P_i^t + P_W^t + P_P^t + P_E^t = P_{NL}^t + P_{IL}^t \quad (4)$$

其中, P_W^t 、 P_P^t 分别为 t 时刻风电及太阳能机组预测输出功率; P_E^t 为 t 时刻储能装置 ESS (Energy Storage System) 输出功率; P_{NL}^t 、 P_{IL}^t 分别为 t 时刻不可中断负荷 (NIL) 及可中断负荷 (IL)。

b. 发电功率约束。

$$P_{i,\min} \leq P_i^t \leq P_{i,\max} \quad (5)$$

c. 储能约束。

在周期 T 内, 储能装置充放电电能为:

$$E_E^t = \int_0^T P_E^t dt \quad t=1, 2, \dots, N_t \quad (6)$$

周期结束时, 储能装置的电能 E_t^r 为:

$$E_t^r = E_{\text{int}} + \sum_{i=1}^T E_E^i \quad t=1, 2, \dots, N_t \quad (7)$$

其中, E_{int} 为储能装置初始电能。

d. 运行储备约束。

为了保证不可中断负荷保持连续运行, 微电网的输出功率必须大于不可中断负荷需求。

$$\sum_{i=1}^{N_i} P_{i,\max} + P_{E,\max} + P_W^t + P_P^t > P_{NL}^t \quad (8)$$

其中, $P_{E,\max}$ 为储能装置最大充放电功率。

为了保证不可中断负荷从 t 时刻能够持续供电一个周期 T , 因此整个微电网的电量必须大于不可中断负荷需求。

$$E_t^r + \sum_{i=1}^{N_i} \int_0^T P_{i,\max} dt + \int_0^T P_P^t dt + \int_0^T P_W^t dt > \int_0^T P_{NL}^t dt \quad (9)$$

e. 微电网的频率和电压约束。

$$f^{\min} \leq f^t \leq f^{\max} \quad (10)$$

$$U^{\min} \leq U^t \leq U^{\max} \quad (11)$$

f. 风机及光伏输出功率随机性约束。

本文考虑到可再生能源输出功率的随机性, 因而增加了场景约束。式(4)~(11)中相应的约束条件在增加了场景约束后如式(12)所示。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_i} P_i^{t,s} + P_W^{t,s} + P_P^{t,s} + P_E^{t,s} = P_{NL}^{t,s} + P_{IL}^{t,s} \\ P_{i,\min} \leq P_i^{t,s} \leq P_{i,\max} \\ E_{E,\min} \leq E_E^{t,s} \leq E_{E,\max} \\ \sum_{i=1}^{N_i} P_{i,\max} + P_{E,\max} + P_W^{t,s} + P_P^{t,s} \geq P_{NL}^{t,s} \\ E_t^r + \sum_{i=1}^{N_i} \int_0^T P_{i,\max} dt + \int_0^T P_P^{t,s} dt + \int_0^T P_W^{t,s} dt \geq \int_0^T P_{NL}^{t,s} dt \\ f^{\min} \leq f^{t,s} \leq f^{\max} \\ U^{\min} \leq U^{t,s} \leq U^{\max} \end{cases} \quad (12)$$

3 微电网稳定性评价

考虑到可再生能源输出功率的随机性与负荷时变性, 微电网在孤网运行时的运行工况在时刻变化, 因而本文采用 ITAE 指标对微电网主要状态变量进

行评价, 如系统频率、母线电压及各微源的输出功率。ITAE 是综合考量被测量的误差与调节时间的指标, 能够指导被测量在扰动过度过程中, 调节时间短, 超调量小, 振荡衰减迅速, 具有良好的实用性^[20]。

以 ITAE 为稳定性评价指标的目标函数为:

$$f_2 = \sum_{k=k_0}^{T_0} (k-k_0) \mathbf{W} \mathbf{E}_{\text{abs}}(k) \quad (13)$$

其中, k_0 为风力及负荷变化起始时间; T_0 为系统达到新稳态的时间; $\mathbf{W}$ 为 $\mathbf{E}_{\text{abs}}(k)$ 的加权矩阵; $\mathbf{E}_{\text{abs}}(k)$ 为各被测量在 k 时刻的绝对误差向量, 可由式(14)求得。

$$\mathbf{E}_{\text{abs}}(k) = \left[\sum_{t=1}^{N_t} |f_{\text{new}}^t - f^t(k)|, \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_j} |U_{j,\text{new}}^t - U_j^t(k)|, \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_i} |P_{i,\text{new}}^t - P_i^t(k)|, \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_i} |Q_{i,\text{new}}^t - Q_i^t(k)| \right]^T \quad (14)$$

其中, f_{new}^t 为 t 时刻微电网的新稳态频率; $U_{j,\text{new}}^t$ 为 t 时刻微电网母线 j 的新稳态电压; N_j 为母线节点数; $Q_{i,\text{new}}^t$ 为第 i 个微源 t 时刻输出的无功功率; $f^t(k)$ 、 $U_j^t(k)$ 、 $P_i^t(k)$ 、 $Q_i^t(k)$ 分别为 t 时刻测量的系统频率、母线电压、可控微源的输出有功功率与无功功率。

为防止微电网运行过程中系统频率、母线电压及微源输出功率越限, 还需满足如下约束:

$$\begin{cases} f^{\min} \leq f^t(k) \leq f^{\max} \\ U_j^{\min} \leq U_j^t(k) \leq U_j^{\max} \\ \sqrt{(P_i^t(k))^2 + (Q_i^t(k))^2} \leq S_i^{\max} \end{cases} \quad (15)$$

其中, $f^{\max}$ 、 $f^{\min}$ 分别为系统频率的上、下限; $U_j^{\max}$ 、 $U_j^{\min}$ 分别为母线 j 电压上、下限; $S_i^{\max}$ 为微源 i 容量限值。

4 微电网经济性与稳定性协调优化策略

4.1 综合协调优化模型

微电网在运行时存在很多的不确定性因素, 如风机及光伏出力的不确定性、负荷预测误差、储能装置工况变化等。这些因素不仅是微电网经济调度的关键, 也是维持系统稳定的重要手段。为减少运行成本, 每个可调度微源的下垂系数应根据微源运行成本的大小进行分配, 同时, 微电网的稳定性也在很大程度上受下垂系数的影响。不恰当的下垂系数的分配, 在微电网出力或负荷发生变化时, 可能导致较大的超调和振荡过程。为了实现微电网的经济性和较好的稳定性, 本文提出了包含运行成本及 ITAE 准则对下垂系数进行优化的多目标模型。

$$\min C = \omega_1 f_1 + \omega_2 F_{\text{sc}} f_2 \quad (16)$$

其中, f_1 为最优成本; f_2 为 ITAE 评价指标; F_{sc} 为缩放因子; ω_1 和 ω_2 为相应的加权因子。

不同子目标函数的值通常在某可变长度范围内变化, 一些子目标函数可能总是被其他子目标所主导。为了使评价更为有效, 利用模糊逻辑理论对每个子目标函数进行归一化处理, 式(17)即对 2 个子目标函数 f_1 、 f_2 的归一化处理。

$$\mu(f_{1,i}) = \begin{cases} 1 & f_{1,i} \leq f_{1,\min} \\ \frac{f_{1,\max} - f_{1,i}}{f_{1,\max} - f_{1,\min}} & f_{1,\min} \leq f_{1,i} \leq f_{1,\max} \\ 0 & f_{1,i} \geq f_{1,\max} \end{cases} \quad (17)$$
$$\mu(f_{2,i}) = \begin{cases} 1 & f_{2,i} \leq f_{2,\min} \\ \frac{f_{2,\max} - f_{2,i}}{f_{2,\max} - f_{2,\min}} & f_{2,\min} \leq f_{2,i} \leq f_{2,\max} \\ 0 & f_{2,i} \geq f_{2,\max} \end{cases}$$

则综合优化模型为：

$$F_i = \omega_1 \mu(f_{1,i}) + \omega_2 \mu(f_{2,i}) \quad (18)$$

对上述模型的求解即为对各可控微源下垂系数 m_{pi} 的优化。

4.2 优化求解过程

上述所提出的优化问题是一个约束非线性优化问题,本文采用的微分进化(DE)算法具有无导性,能够有效求解出最优结果的特性,在计算目标函数后,会检查所有的约束条件,如果违反了任何约束,则会增加一个惩罚项。

整个微电网的经济稳定优化过程主要有 2 个关键性步骤:首先是对经济性及稳定性指标的加权因子进行确定;然后通过微分进化算法对目标函数进行优化求解。具体步骤如下。

a. 确定加权因子。

将 ω_1 和 ω_2 2 个加权因子分别以 0.1 的步长划分为 10 个子区间,从而得到 2 组子目标函数 $f_{1,i}$ 和 $f_{2,i}$,见表 1。

表 1 加权方式
Table 1 Weighting patterns

变量	加权方式										
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ω_1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
ω_2	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
$f_{1,i}$	$f_{1,1}$	$f_{1,2}$	$f_{1,3}$	$f_{1,4}$	$f_{1,5}$	$f_{1,6}$	$f_{1,7}$	$f_{1,8}$	$f_{1,9}$	$f_{1,10}$	$f_{1,11}$
$f_{2,i}$	$f_{2,1}$	$f_{2,2}$	$f_{2,3}$	$f_{2,4}$	$f_{2,5}$	$f_{2,6}$	$f_{2,7}$	$f_{2,8}$	$f_{2,9}$	$f_{2,10}$	$f_{2,11}$

b. 优化求解。

在不同的权重分配情景下,对综合优化函数式(18)进行优化求解,得出一系列的优化结果,当式(19)中 C_i 为最小时,即为最优解。

$$C_i = F_i / \sum_{i=1}^{11} F_i \quad (19)$$

5 算例分析

本文在图 4 所示微电网中进行仿真验证。图 4 表示微电网的孤岛运行模式,其中包含有 3 个可控分布式微源、风力发电机(WTG)、光伏电站(PV)、储能装置,以及母线上的负荷。考虑到实际情况,本文将负荷分为可中断负荷及不可中断负荷。

在微电网孤岛模式运行下,设定微电网的频率为 50 Hz,基准电压为 380 V。每个可控微源的容量为

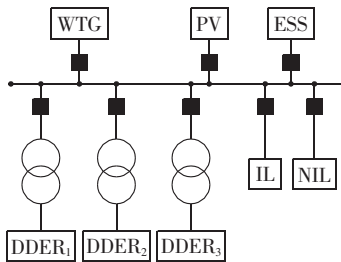


图 4 微电网结构图

Fig.4 Structure of microgrid

300 kV·A,3 个可控微源的燃料成本与输出功率极限、维护成本系数及储能装置容量分别见表 2—4。

表 2 可控微源燃料成本

Table 2 Fuel costs of DDERs

可控微源	$a_i/\$$	$b_i/[\$ \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	$c_i/[\$ \cdot (\text{kW}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$	$P_{i,\min}/\text{kW}$	$P_{i,\max}/\text{kW}$
DDER ₁	1.150	57.783	-133.092	10	200
DDER ₂	5.717	100.937	0	15	300
DDER ₃	10.193	105.180	62.560	20	400

表 3 可控微源排污成本

Table 3 Emission costs of DDERs

污染物	$\alpha_k/(\$ \cdot \text{lb}^{-1})$	$E_{F1,k}/[\text{lb} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	$E_{F2,k}/[\text{lb} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$
NO _x	4.200	0.440	0.400
SO ₂	0.990	0.008	0.006
CO ₂	0.014	1.596	1.378

表 4 储能装置储能容量

Table 4 Energy storage capacity of ESS

$P_{E,\max}/\text{kW}$	$E_{\text{ini}}/(\text{kW} \cdot \text{h})$	$E_{E,\max}/(\text{kW} \cdot \text{h})$	$E_{E,\min}/(\text{kW} \cdot \text{h})$
100	10	200	10

微电网各时段的总负荷如表 5 所示,其中有 50% 非可中断负荷。

表 5 微电网各时段负荷

Table 5 Hourly loads of microgrid

时段	有功功率/kW	无功功率/kvar	时段	有功功率/kW	无功功率/kvar
1	535	175.8	13	789	259.3
2	575	189.0	14	783	257.4
3	574	188.6	15	790	259.7
4	579	190.3	16	696	228.8
5	585	192.3	17	630	207.1
6	598	196.6	18	599	196.9
7	667	219.2	19	621	204.1
8	707	232.4	20	577	189.7
9	689	226.5	21	591	194.3
10	683	224.5	22	687	225.8
11	796	261.6	23	688	226.1
12	794	261.0	24	606	199.2

本文通过基于模糊逻辑理论的微分进化算法对优化模型方程式(1)—(19)进行求解,计算得出目标函数方程式(19)的值是 0.0375,对应各可调微源的最优下垂系数如表 6 所示,表中 m_{pi} 、 n_{qi} 分别为各可控微源的有功功率及无功功率分配系数。

表 6 微电网最优下垂系数
Table 6 Optimal droop coefficients of microgrid

$m_{p1}/[\text{rad}\cdot(\text{s}\cdot\text{W})^{-1}]$	$m_{p2}/[\text{rad}\cdot(\text{s}\cdot\text{W})^{-1}]$	$m_{p3}/[\text{rad}\cdot(\text{s}\cdot\text{W})^{-1}]$	$n_{q1}/(\text{V}\cdot\text{var}^{-1})$	$n_{q2}/(\text{V}\cdot\text{var}^{-1})$	$n_{q3}/(\text{V}\cdot\text{var}^{-1})$
2.596×10^{-6}	3.845×10^{-6}	4.811×10^{-6}	8.152×10^{-7}	5.493×10^{-6}	9.885×10^{-6}

图 5 为微分进化算法求解的收敛特性,从图中可以看出,该方法能够快速收敛。

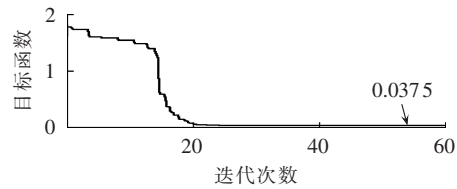


图 5 优化函数收敛曲线

Fig.5 Convergence curve of optimization function

表 7 展示了不同优化策略下的微电网经济性与稳定性。在最优下垂系数的控制下,系统的运行成本 f_1 为 \$1483.3, ITAE 准则 f_2 为 0.0229,此时微电网经济性与稳定性协调最优。

表 7 微电网经济与稳定协调优化结果

Table 7 Results of coordinated optimization for economy and stability of microgrid

ω_1	ω_2	最优成本 $f_1/\$$	ITAE 指标 f_2
0.5	0.5	1483.3	0.0229
1	0	1276.6	0.3452
0	1	1846.1	0.0124

为了证明本文所提微电网经济调度方案能提高系统的暂态和动态稳定性,对比分析了对经济性与稳定性不同加权情况下微电网的动态稳定性。

图 6—9 分别为 2 种不同调度方式下系统的频率响应、母线电压幅值响应、DDER₂ 的有功功率及 DDER₁ 的无功功率响应。方式 1 为最优调度策略 ($\omega_1=0.5, \omega_2=0.5$), 方式 2 为不考虑稳定性的最优经济调度 ($\omega_1=1, \omega_2=0$)。

从图 6—9 中可以看出,采用最优调度策略 ($\omega_1=0.5, \omega_2=0.5$) 时,微电网具有较好的动态稳定性,当风机出力和负载变化时,系统瞬态过程具有的超调量小,调节时间少,且振荡能够快速衰减。所有的监测量如电压、频率、可调微源的出力均未超出系统允许范围。

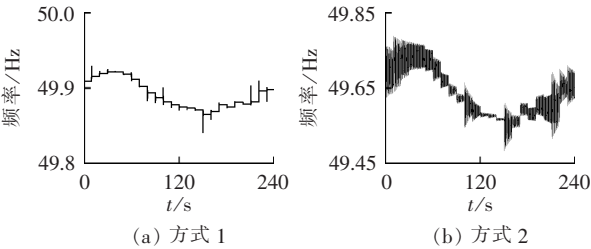


图 6 2 种不同调度策略下系统的频率响应

Fig.6 Frequency response of system for two different dispatch strategies

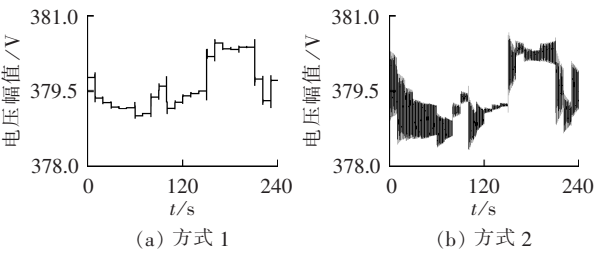


图 7 2 种不同调度策略下的母线电压幅值响应

Fig.7 Amplitude response of bus voltage for two different dispatch strategies

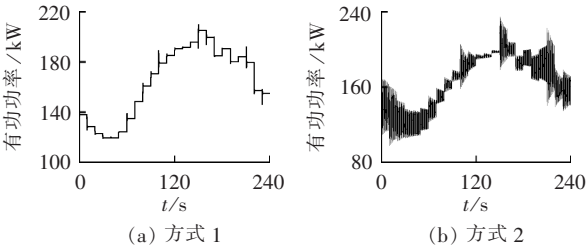


图 8 2 种不同调度策略下 DDER₂ 的有功功率

Fig.8 Active power of DDER₂ for two different dispatch strategies

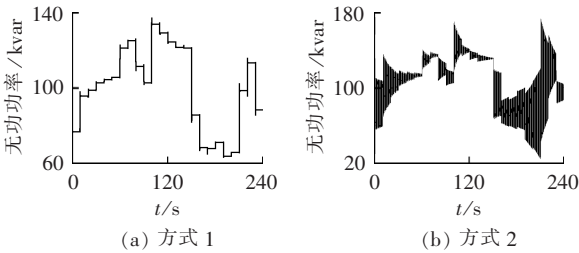


图 9 2 种不同调度策略下 DDER₁ 的无功功率

Fig.9 Reactive power of DDER₁ for two different dispatch strategies

如果只考虑运行费用最小,即 $\omega_1=1, \omega_2=0$,当运行条件发生变化时,系统的动态特性较差,系统将会失去稳定。

6 结论

本文在考虑可再生能源输出功率具有随机性的前提下,对微电网进行了经济性与稳定性相协调的优化。仿真结果表明:

a. 微电网在各微源出力及负荷变化时,ITAE 指标能够有效表征微电网系统的稳定性能,并且各可控微源下垂系数对 ITAE 指标有较大的影响,因此通过下垂控制能够实现对微电网稳定性的调节;

b. 本文提出的微电网经济性与稳定性相协调的优化策略能够适应各种不同的运行方式变化,通过微分进化算法对下垂系数优化求解,能够在实现微电网较好经济性的同时具有良好的动态稳定性,为微电网的经济调度提供了一种新的思路。

参考文献:

[1] 王成山,洪博文,郭力. 不同场景下的光蓄微电网调度策略[J].

- 电网技术,2013,37(7):1775-1782.
- WANG Chengshan,HONG Bowen,GUO Li. Dispatch strategies of PV-battery microgrid in different scenarios[J]. Power System Technology,2013,37(7):1775-1782.
- [2] 刘春阳,王秀丽,刘世民,等. 计及蓄电池使用寿命的微电网经济调度模型[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):29-36.
- LIU Chunyang,WANG Xiuli,LIU Shimin,et al. Economic dispatch model considering battery lifetime for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(10):29-36.
- [3] 陈健,王成山,赵波,等. 考虑储能系统特性的独立微电网系统经济运行优化[J]. 电力系统自动化,2012,36(20):25-31.
- CHEN Jian,WANG Chengshan,ZHAO Bo,et al. Economic operation optimization of a stand-alone microgrid system considering characteristics of energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(20):25-31.
- [4] 董小娇,尹坤,刘亚娟,等. 包含可控负荷的微电网经济调度[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):21-28.
- TONG Xiaojiao,YIN Kun,LIU Yajuan,et al. Economic dispatch for microgrid with controllable loads[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(10):21-28.
- [5] 郑竞宏,李兴旺,王燕廷,等. 微电网切换至孤岛运行时的小信号稳定性分析[J]. 电力系统自动化,2012,36(15):25-32.
- ZHENG Jinghong,LI Xingwang,WANG Yanting,et al. Small-signal stability analysis of a microgrid switching to islanded mode[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(15):25-32.
- [6] 洪博文,郭力,王成山,等. 微电网多目标动态优化模型与方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):100-107.
- HONG Bowen,GUO Li,WANG Chengshan,et al. Model and method of dynamic multi-objective optimal dispatch for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(3):100-107.
- [7] 陈洁,杨秀,朱兰,等. 微网多目标经济调度优化[J]. 中国电机工程学报,2013,33(19):57-66.
- CHEN Jie,YANG Xiu,ZHU Lan,et al. Microgrid multi-objective economic dispatch optimization[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(19):57-66.
- [8] 张建华,苏玲,陈勇,等. 微网的能量管理及其控制策略[J]. 电网技术,2011,35(7):24-28.
- ZHANG Jianhua,SU Ling,CHEN Yong,et al. Energy management of microgrid and its control strategy[J]. Power System Technology,2011,35(7):24-28.
- [9] 向月,刘俊勇,魏震波,等. 考虑可再生能源出力不确定性的微电网能量优化鲁棒模型[J]. 中国电机工程学报,2014,34(19):3063-3072.
- XIANG Yue,LIU Junyong,WEI Zhenbo,et al. Robust model of microgrid energy optimization with uncertain renewable energy sources[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(19):3063-3072.
- [10] 孙元章,吴俊,李国杰,等. 基于风速预测和随机规划的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报,2009,29(4):41-47.
- SUN Yuanzhang,WU Jun,LI Guojie,et al. Dynamic economic dispatch considering wind power penetration based on wind speed forecasting and stochastic programming[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(4):41-47.
- [11] 柳丹,李强,袁晓冬. 考虑随机性的微网能量优化调度模型[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(11):112-117.
- LIU Dan,LI Qiang,YUAN Xiaodong. Economic and optimal dispatching of power microgrid with renewable energy resources based on stochastic optimization[J]. Power System Protection and Control,2014,42(11):112-117.
- [12] 言大伟,韦钢,胡吟,等. 可靠性与经济性相协调的微电网能量优化[J]. 电力系统自动化,2012,36(8):18-23,51.
- YAN Dawei,WEI Gang,HU Yin,et al. Microgrid energy optimization with coordination of reliability and economy[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(8):18-23,51.
- [13] TUSHAR M H K,ASSI C,MAIER M. Distributed real-time electricity allocation mechanism for large residential microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2015,6(3):1353-1363.
- [14] 孟建辉,石新春,王毅,等. 改善微电网频率稳定性的分布式逆变电源控制策略[J]. 电工技术学报,2015,30(4):70-79.
- MENG Jianhui,SHI Xinchun,WANG Yi,et al. Control strategy of DER inverter for improving frequency stability of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(4):70-79.
- [15] 马添翼,金新民,黄杏. 含多变流器的微电网建模与稳定性分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(6):12-17.
- MA Tianyi,JIN Xinmin,HUANG Xing. Modeling and stability analysis of microgrid with multiple converters[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(6):12-17.
- [16] 李洋,张辉,苏冰,等. 含多微源的微电网离网运行小信号稳定性分析[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):159-164.
- LI Yang,ZHANG Hui,SU Bing,et al. Small-signal stability analysis of islanded microgrid with microsources[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(1):159-164.
- [17] THAKUR D,MITHULANANTHAN N. Influence of constant speed wind turbine generator on power system oscillation[J]. Electric Power Components & Systems,2009,37(5):478-494.
- [18] SHARMA K C,JAIN P,BHAKAR R. Wind power scenario generation and reduction in stochastic programming framework[J]. Electric Power Components & Systems,2013,41(3):271-285.
- [19] 艾欣,许佳佳. 基于互动调度的微网与配电网协调运行模式研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(1):143-149.
- AI Xin,XU Jiajia. Study on the microgrid and distribution network cooperation model based on interactive scheduling[J]. Power System Protection and Control,2013,41(1):143-149.
- [20] DEEPYAMAN M,AYAN A,MITHUN C. Tuning PID and PIAD δ controllers using the integral time absolute error criteria[C]//4th International Conference on Information and Automation for Sustainability. Colombo,Sri Lanka:[s.n.],2008:457-462.

作者简介:



杨 健

杨 健(1990—),男,湖北荆州人,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制(E-mail:ddjyayang@163.com);

唐 飞(1982—),男,湖北黄石人,副教授,博士,研究方向为电力系统暂态稳定、电力系统紧急控制、主动配电网等(E-mail:tangfei@whu.edu.cn)。

(下转第 200 页 continued on page 200)

- [20] ZHONG Q C, NGUYEN P L, MA Z, et al. Self-synchronized synchronverters: inverters without a dedicated synchronization unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 617-630.
- [21] 郭小强, 刘文钊, 王宝程, 等. 光伏并网逆变器不平衡故障穿越限流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5155-5162.
- GUO Xiaoqiang, LIU Wenzhao, WANG Baocheng, et al. Fault ride through control of PV grid-connected inverter with current-limited capability under unbalanced grid voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5155-5162.
- [22] PEDRO R, ALVARO L, IGNACIO C, et al. Multiresonant frequency-

locked loop for grid synchronization of power converters under distorted grid conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 127-138.

作者简介:



肖湘宁

肖湘宁(1953—),男,北京人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统中的电力电子技术(E-mail:xxn@ncepu.edu.cn);

陈萌(1991—),男,山东淄博人,博士研究生,主要研究方向为微电网稳定控制(E-mail:chen_free@126.com)。

Power control of virtual synchronous generator under unbalanced grid voltage

XIAO Xiangning, CHEN Meng

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The output power of virtual synchronous generator under unbalanced grid voltage is analyzed and a power control strategy based on the stationary frame is proposed, which, without the phase locked loop, applies the negative-sequence voltage control to suppress the active-power oscillation, reactive-power oscillation and unbalanced three-phase currents respectively for ensuring the voltage-source nature and inertia property of the virtual synchronous generators and for enabling the distributed generation to output constant active-power, constant reactive-power or balanced three-phase currents as required. The effectiveness of the proposed control strategy is verified by PSCAD/EMTDC simulations and RTDS-based real-time digital-physical closed-loop experiments, and the features of its different control modes are quantitatively analyzed.

Key words: distributed power generation; virtual synchronous generator; unbalanced grid voltage; power oscillation; positive and negative sequence components; power control

(上接第184页 continued from page 184)

Microgrid economy and stability coordinated optimization considering randomness of renewable energy resource

YANG Jian¹, TANG Fei¹, LIAO Qingfen¹, ZHU Xuedong¹, YAN Bingke²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China)

Abstract: Because of the high penetration rate of renewable energy, the stable operation of microgrid is seriously affected. The method of scenarios generation and reduction is applied to build and solve the model of renewable energy randomness. Based on the droop control theory, ITAE index is used to realize the fast judgment of microgrid stability. A strategy considering the randomness of renewable energy sources is proposed to coordinate the economy optimization and stability optimization of microgrid. Results of MATLAB/Simulink simulation verify the correctness and effectiveness of the proposed model and method.

Key words: microgrid; renewable energy; ITAE index; coordinated optimization of economy and stability