

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190207

# 基于 APEO 的分布式电源改进型下垂优化控制策略研究

王环, 曾国强, 戴瑜兴

(电气数字化设计技术国家地方联合工程实验室, 温州大学, 浙江 温州 325035)

**摘要:** 如何对分布式电源的控制策略和控制参数进行优化改进设计, 使其更适应于线路阻抗为阻性的低压离网微电网等工作环境, 具有重要意义。为此, 设计提出了一种基于自适应群体极值优化(APEO)的分布式电源改进型下垂优化控制方法。该方法内容为在传统下垂控制的基础上引入阻性下垂控制和相位平移量的累加控制, 并将分布式电源改进型下垂控制器参数优化设计问题转换为一个典型的有约束优化问题, 利用所设计的 APEO 算法获得分布式电源改进型下垂控制器最优参数, 最终实现了电压稳定和功率协调的解耦控制, 降低了分布式电源并网切换时的暂态冲击, 实现了分布式电源在工作模式未切换状态下的热插拔功能。最后在由两台容量为 10 kW 分布式电源构成的微电网实验系统上进行了硬件平台测试实验, 验证了所提出的控制策略的有效性和可行性。

**关键词:** 下垂控制策略; 分布式电源; 极值优化; 微电网(微网)

## Research on modified droop control of distributed generation units by adaptive population-based extremal optimization

WANG Huan, ZENG Guoqiang, DAI Yuxing

(National-Local Joint Engineering Laboratory of Electrical Digital Design Technology,  
Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

**Abstract:** How to optimize control strategy and parameters for Distributed Generation (DG) units in off-grid microgrids under resistive feeder impedance condition is great of practical significance. For this purpose, a modified droop controller design method for the DG units based on Adaptive Population-based Extremal Optimization (APEO) is designed. The content of the proposed method is that firstly through introducing the resistive droop control and the sum of phase translation based on the fundamental harmonic droop control. Then the design problem of modified droop controller for the DG units is formulated as a typical constrained optimization problem, and an APEO is designed to solve this formulated problem. Finally, the problem of the coupling between voltage stability and power shearing by DG units is solved; the transient impact of DG units on switching between grid-connected and islanded modes is reduced; and hot swap can be realized without DG changing work modes. At last, the superiority in power control performance of the proposed method is demonstrated by experimental results on a microgrid demonstration which is consist of two 10 kW three-phase inverters.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61972288), Welfare Technology Applied Research Project of Zhejiang Province (No. LGG20F030010), and Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No. LZ16E050002).

**Key words:** droop control strategy; distributed generation units; extremal optimization; microgrid

## 0 引言

在能源、环境问题日益严峻的当下, 微电网技

术既能满足能源缺口, 又能解决环境保护问题, 在过去的十年里得到了广泛的应用<sup>[1-5]</sup>。传统下垂控制策略通过模拟传统电力系统中同步发电机下垂外特性来实现分布式电源对输出电压和输出功率的控制<sup>[6-7]</sup>, 其不需要额外物理通信线路就能够基本实现微电网内功率协调控制而得到快速发展<sup>[8]</sup>。在以往的研究工作中发现, 传统下垂控制策略一般适用于

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61972288); 浙江省公益技术应用研究项目资助(LGG20F030010); 浙江省自然科学基金重点项目资助(LZ16E050002)

馈线阻抗呈感性的系统, 而中低压微电网其馈线阻抗呈现阻性<sup>[9-10]</sup>。此外, 传统下垂控制策略还存在电压稳定性和功率协调控制耦合, 以及并网切换时系统暂态冲击剧烈等问题。针对上述问题, 文献[11]中 Kahrobaeian 等人提出一种改进型下垂控制策略, 解决了传统 P-f、Q-U 下垂控制在电压稳定性和功率协调的内在矛盾, 但该方法存在系统动态性能较差的问题。文献[12]提出了基于动态虚拟阻抗的改进下垂控制策略, 在对电压稳定性和功率协调解耦控制的基础上改善了系统的电能质量, 但存在工作模式受限及系统控制参数取值困难的问题。针对上述文献存在的问题, 本文提出了基于 APEO 的分布式电源改进型下垂优化控制策略<sup>[13-14]</sup>, 通过引入带电压前馈控制的虚拟电阻来重塑线路阻抗, 采用改进型基波下垂控制器<sup>[15-18]</sup>, 解决了微电网中馈线阻抗和输出阻抗为阻性状态下的电压稳定性和功率协调解耦控制问题。通过增加相位平移量的累加控制, 降低了系统工作模式切换产生的暂态冲击。引入 APEO 对系统控制参数进行优化, 实现了系统最优状态的运行。最后在两台容量为 10 kW 分布式电源构成的微电网实验系统进行了实验测试, 验证了本文所提控制策略的有效性和可行性。

## 1 传统下垂控制策略及改进研究

### 1.1 低压微电网结构

离网模式下低压微电网的馈线阻抗呈现阻性, 此外分布式电源中的控制系统底层一般为基于优化谐振控制的双闭环控制策略, 其输出阻抗也呈现阻性<sup>[9-10]</sup>。为简化建模过程, 暂不考虑微电网中多发电源、多控制层耦合问题, 将微电网简化为两台三相并网逆变器并联的情况, 分别为 DG<sub>1</sub>、DG<sub>2</sub>, 其 A 相的互联拓扑结构如图 1 所示。

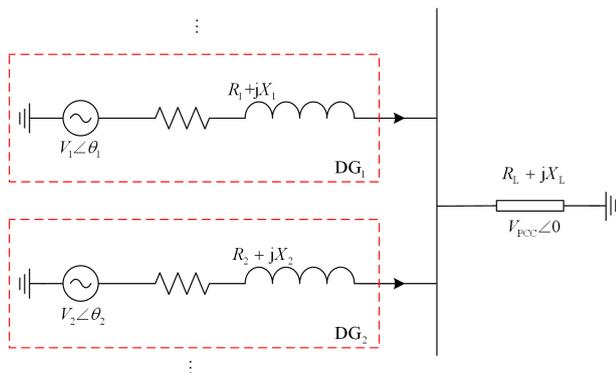


图 1 两台逆变器相连的简易结构图

Fig. 1 Equivalent diagram of two paralleled inverters

其中,  $V_{PCC}$  为公共点 A 相电压峰值, 设其相位为 0,  $V_1$  为 DG<sub>1</sub> 分布式电源 A 相的输出电压峰值, 其相位设为  $\theta_1$ ,  $V_2$  为 DG<sub>2</sub> 分布式电源 A 相的输出电压峰值, 其相位设为  $\theta_2$ ,  $R_1 + jX_1$ 、 $R_2 + jX_2$  以及  $R_L + jX_L$  分别为 DG<sub>1</sub> 分布式电源 A 相输出阻抗、DG<sub>2</sub> 分布式电源 A 相输出阻抗以及负载阻抗。上述两台分布式电源的输出阻抗为阻性时,  $X_1$ 、 $X_2$  等于 0。DG<sub>1</sub> 的 A 相输出视在功率  $S_1$  可表示为<sup>[11]</sup>

$$S_1 = \frac{V_{PCC}V_1 \cos \theta_1 - V_{PCC}^2}{R_1} + j \frac{V_{PCC}V_1 \sin \theta_1}{R_1} \quad (1)$$

当  $\theta_1$  很小时,  $\cos \theta_1 \approx 1$ ,  $\sin \theta_1 \approx \theta_1$ , 由此, 式(1)可等效为

$$S = \frac{V_{PCC}V_1 - V_{PCC}^2}{R_1} - j \frac{V_{PCC}V_1\theta_1}{R_1} \quad (2)$$

由此可得 DG<sub>1</sub> 的 A 相输出有功功率  $P_1$  和无功功率  $Q_1$  为

$$P_1 = \frac{V_{PCC}V_1 - V_{PCC}^2}{R_1} \quad (3)$$

$$Q_1 = -\frac{V_{PCC}V_1\theta_1}{R_1} \quad (4)$$

根据式(3)可知, DG<sub>1</sub> 的 A 相输出阻抗与线路阻抗之和  $R_1 + jX_1$  为阻性, 且  $R_1 + jX_1$  和互联公共点电压  $V_{PCC}$  恒定时, DG<sub>1</sub> 的 A 相并联输出的有功功率  $P_1$  仅由输出电压  $V_1$  决定。根据式(4), 由上述条件下亦可得, DG<sub>1</sub> 的无功功率  $Q_1$  仅由输出电压  $V_1$  与电压相角  $\theta_1$  决定。由此可得, 输出阻抗和线路阻抗之和为阻性时  $P$  与  $V$  正相关,  $Q$  与  $\theta$  负相关。此时, 离网状态下小范围低压微电网的下垂控制表达式为

$$V = V^* - nP \quad (5)$$

$$\theta = \theta^* + mQ \quad (6)$$

式中,  $m$ 、 $n$  为下垂控制系数。由式(5)、式(6)可知离网状态下低压微电网采用传统下垂控制策略会存在电压稳定性、功率协调性能耦合的问题, 且系统的功率协调的动态性能有待提升。

### 1.2 分布式电源改进型下垂控制策略研究

离网状态下小范围低压微电网线路阻抗呈现阻性, 但该状态不是恒定的, 通常会随系统工作条件变化而偏移, 这给分布式电源控制策略设计带来了挑战。为了降低分布式电源输出阻抗以及线路阻抗变化带来的误差, 一般通过引入虚拟电阻实现系统输出阻抗重塑成阻性, 以此来削弱工作条件变化给分布式电源的功率协调控制性能带来的不利影响<sup>[15-18]</sup>。但引入虚拟阻抗后, 会出现系统输出电压

控制精度下降的问题。因此,本文通过改进传统下垂控制策略,并增加积分控制项和电压前馈控制,实现系统电压稳定性、功率协调的解耦控制性能,同时系统的功率协调动态性能得到提升,具体表达式为

$$V = V^* + \int (K(V^* - v_{gd}) - nP) dt \quad (7)$$

$$\theta = \int (mQ + f^*) dt \quad (8)$$

在上述工作的基础上,为了实现无需工作模式切换的热插拔功能,本文在上述控制拓扑的基础上增加相位平移量的累加控制,提高了控制系统对相位误差的控制精度,实现分布式电源无需工作模式切换下的热插拔功能<sup>[19-22]</sup>,上述控制拓扑如图2所示。

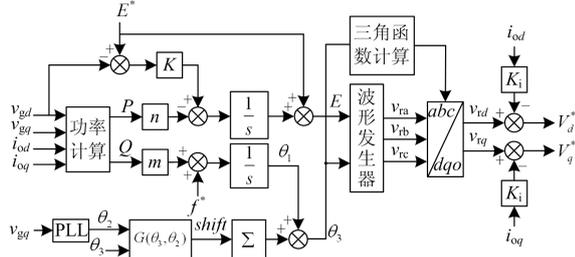


图2 带电压前馈控制的改进型下垂控制框图

Fig. 2 Block diagram of modified droop control strategy by introducing the forward feeding of voltage

图2中  $G(\theta_3, \theta_2)$  的表达式为

$$G(\theta_3, \theta_2) = \begin{cases} 0 & \text{abs}(\theta_3 - \theta_2) < \sigma \\ \varepsilon & \theta_3 - \theta_2 > \sigma + \frac{\pi}{2} \\ -\varepsilon & \sigma < \theta_3 - \theta_2 < \sigma + \frac{\pi}{2} \\ -\varepsilon & \theta_3 - \theta_2 < -\sigma - \frac{\pi}{2} \\ \varepsilon & -\sigma - \pi < \theta_3 - \theta_2 < -\sigma \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\sigma$  为并网逆变器可正常稳定并网的相位差阈值。由此,可以获得分布式电源并网切换时  $\theta_3$  的表达式为

$$\theta_3 = \int (mQ + f^*) dt + \sum G(\theta_3, \theta_2) \quad (10)$$

本文提出的分布式电源改进型下垂控制策略的内核为基于优化谐振控制的双闭环控制拓扑<sup>[23]</sup>,由此可得, SVPWM 调制前输入的  $d$ 、 $q$  轴电压分量为

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_{p2} & -\omega L_f \\ \omega L_f & -K_{p2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{p2} & 0 \\ 0 & K_{p2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} + \frac{1}{s} \begin{bmatrix} K_{i2} & 0 \\ 0 & K_{i2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^* - i_d \\ i_q^* - i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中:  $K_{p2}$ 、 $K_{i2}$  为比例控制参数和积分控制参数;  $\omega L_f$  为解耦分量;  $v_{od}$ 、 $v_{oq}$  为目标电压前馈控制分量。通过引入目标电压前馈控制,系统的稳态和动态控制性能得到有效的提升。其中  $i_d^*$ 、 $i_q^*$  可表示为

$$\begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_{p1} & -\omega C_f \\ \omega C_f & -K_{p1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{p1} & 0 \\ 0 & K_{p1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d^* \\ V_q^* \end{bmatrix} + \frac{1}{s} \begin{bmatrix} K_{i1} & 0 \\ 0 & K_{i1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d^* - v_{od} \\ V_q^* - v_{oq} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} v_d^* \\ v_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} - K_i \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中:  $K_{p1}$ 、 $K_{i1}$  为比例控制参数和积分控制参数;

$\omega C_f$  为解耦分量;  $K_i$  为虚拟电阻参数。

为了提升分布式能源改进型下垂控制策略系统的电压稳定性、功率协调解耦控制性能,本文将该控制系统中的控制参数  $K_{p1}$ 、 $K_{i1}$ 、 $K_{p2}$ 、 $K_{i2}$ 、 $K_i$  设计为一个典型的约束优化问题。其中控制系统中的 5 个控制参数作为决策变量,采用实数编码方式生成。为了实现下垂控制模式下分布式电源电压幅值和频率稳定的同时,提升系统的功率协调性能,将系统有功功率误差绝对值时间积分性能指标(ITAE)、无功功率的 ITAE、输出电压的 ITAE、输出电压的 THD 四项的加权和作为优化的目标函数,其详细过程如式(14)所示。

$$\begin{cases} \min F(\mathbf{x}) = w_1 \int_0^{T_{\max}} t |P_{\text{ref}} - P| dt + w_2 \int_0^{T_{\max}} t |Q_{\text{ref}} - Q| dt + w_3 \int_0^{T_{\max}} t |V_{et}| dt + w_4 THD_V \\ \mathbf{x} = (K_{p1}, K_{i1}, K_{p2}, K_{i2}, K_i) \\ \text{s.t. } l_1 \leq K_{p1} \leq u_1 \\ l_2 \leq K_{i1} \leq u_2 \\ l_3 \leq K_{p2} \leq u_3 \\ l_4 \leq K_{i2} \leq u_4 \\ l_5 \leq K_i \leq u_5 \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$ 、 $w_4$  为加权系数;  $T_{\max}$  为对象模型运行时间;  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 、 $l_4$ 、 $l_5$  和  $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$ 、 $u_4$ 、 $u_5$  分别为 5 个决策变量的下限和上限。

## 2 基于 APEO 的分布式电源改进型下垂优化控制研究

为了实现上述控制策略下的分布式电源最优状态运行,本文设计提出了基于 APEO 的分布式电源改进型下垂优化控制方法,采用式(14)的目标函数,

将系统有功功率的 ITAE、无功功率的 ITAE、输出电压的 ITAE、输出电压的 THD 四项的加权和作为优化的目标函数, 采用高效的 APEO 优化算法对决策变量进行参数整定优化。基于 APEO 的分布式电源改进型下垂优化控制的设计流程见图 3, 具体实现过程如下。

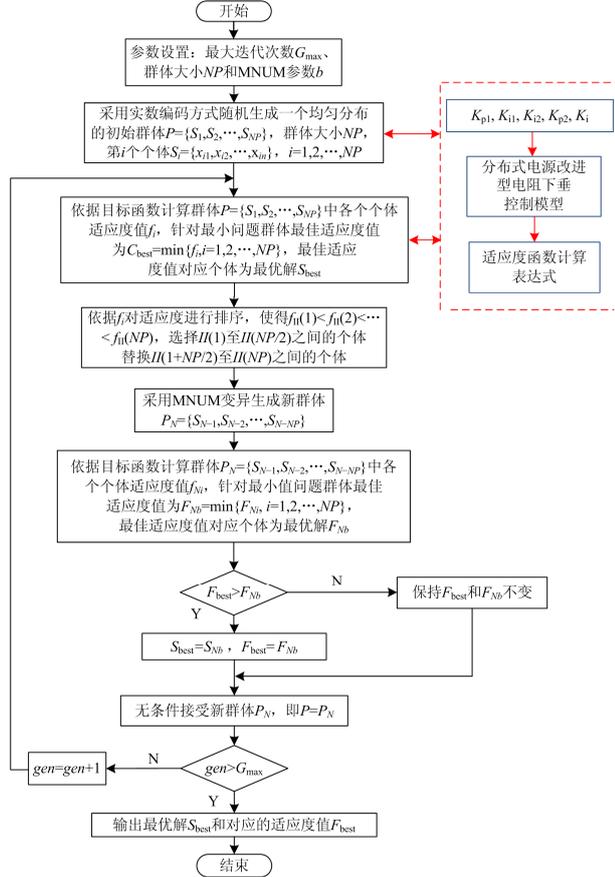


图 3 基于 APEO 的分布式电源改进型下垂优化控制设计流程图

Fig. 3 Flowchart of APEO-based modified droop controller design method

输入: 分布式电源改进型电阻下垂控制系统模型, 控制系统采样周期  $T_s$ , 决策变量的上限  $(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5)$  和下限  $(u_1, u_2, u_3, u_4, u_5)$ , 目标函数中的权重系数  $w_1, w_2, w_3, w_4$ , 种群大小  $N$ , 最大迭代次数  $G_{max}$ , MNUM 参数  $b$ 。

输出: 全局最优解集  $S_{best}$ , 以及相对应的全局最优适应度值  $C_{best}$ , 分布式电源逆变输出的电压、电流曲线。

步骤 1: 采用实数编码方式随机生成一个均匀分布的初始群体  $P=\{S_1, S_2, \dots, S_{NP}\}$ ,  $S_i=\{K_{p1}, K_{i1}, K_{p2}, K_{i2}\}$ , 其计算过程如下。

$$S_i = \bar{L} + (\bar{U} - \bar{L})\bar{R}(0,1), \quad i=1,2,\dots, NP \quad (15)$$

$$x_{ij} = l_j + (u_j - l_j)r_j(0,1), i=1,\dots, NP; j=1,\dots, n$$

式中:  $\bar{R}(0,1)$  为介于  $[0,1]$  之间的均匀分布随机数组;  $x_{ij}$  表示潜在解  $S_i$  的第  $j$  个变量,  $r_j(0,1)$  为  $\bar{R}(0,1)$  的第  $j$  个元素;  $\bar{L}$  和  $\bar{U}$  分别为变量下界和上界;  $l_j$  和  $u_j$  分别为  $\bar{L}$  和  $\bar{U}$  的第  $j$  个变量取值。

步骤 2: 依据目标函数式(14)计算群体  $P=\{S_1, S_2, \dots, S_{NP}\}$  中各个个体的适应度值  $\{F_i, i=1, 2, \dots, NP\}$ , 依据  $F_i$  对适应度进行排序, 使得  $F_{\Pi(1)} < F_{\Pi(2)} < \dots < F_{\Pi(NP)}$ , 设置  $F_{best} = F_{\Pi(1)}$ , 设置对应的最优解  $S_{best} = S_{\Pi(1)}$ 。

步骤 3: 选择  $\Pi(1)$  至  $\Pi(NP/2)$  之间的个体替换  $\Pi(1+NP/2)$  至  $\Pi(NP)$  之间的个体, 设置种群  $P_M=\{S_{M1}, S_{M2}, \dots, S_{MN}\}$ , 其中  $S_{Mj}=S_{M(j+N/2)}=S_{\Pi(j)}$ ,  $j=1, 2, \dots, N/2$ 。

步骤 4: 采用 MNUM 变异, 根据式(16)和式(17)生成新群体  $P_N=\{S_{N1}, S_{N2}, \dots, S_{NNP}\}$ 。

$$x_{ij} = \begin{cases} x_{ij} + (u_j - x_{ij})A(gen), & r < 0.5 \\ x_{ij} + (x_{ij} - l_j)A(gen), & r \geq 0.5 \end{cases} \quad (16)$$

$$A(gen) = [r_i(1 - gen/G_{max})]^b \quad (17)$$

式中:  $i=1, \dots, NP$ ;  $x_{ij}$  表示潜在解  $S_i$  的第  $j$  个变量;  $gen$  为当前迭代次数;  $G_{max}$  为最大迭代次数;  $r$  和  $r_i$  为介于  $[0,1]$  均匀分布随机数;  $b$  为 MNUM 参数。

步骤 5: 依据目标函数式(14)计算群体  $P_N$  中各个个体  $S_{Ni}$  的适应度值  $F_{Ni}$ , 针对最小值问题的群体最佳适应度值为  $F_{Nb} = \min\{F_{Ni}, i=1, 2, \dots, N\}$  及其对应的最优解  $S_{Nb}$ 。

步骤 6: 针对最小值问题, 判断  $F_{Nb} \leq F_{best}$  是否成立。若是, 执行  $S_{best} = S_{Nb}$ ,  $F_{best} = F_{Nb}$ , 否则保持不变。

步骤 7: 无条件接受新群体, 即执行  $P = P_N$ 。

步骤 8: 判断是否满足终止条件。若是, 执行步骤 9; 否则, 跳转到步骤 2。

步骤 9: 输出最优解  $S_{best}=\{K_{p1}, K_{i1}, K_{p2}, K_{i2}, K_i\}$  和对应的全局最优适应度值  $F_{best}$ , 系统输出三相电压、三相电流波形。

为了验证所提出的基于 APEO 的分布式电源改进型下垂优化控制算法, 利用 Matlab/Simulink 搭建了由 2 台容量为 10 kW 的分布式电源构成的小型微电网系统。其中分布式电源的相关参数为:  $V_{dc}=600$  V,  $C_d=1$  120  $\mu$ F,  $R_f=0.15$   $\Omega$ ,  $L_f=5$  mH,  $C_f=45$   $\mu$ F。四个控制器参数的范围设置如下:  $l_1=0.000$  01,  $l_2=0.000$  01,  $l_3=0.000$  01,  $l_4=0.000$  01,  $l_5=0$ ,  $u_1=2$ ,

$u_2=200, u_3=10, u_4=500, u_5=1$ 。采样时间设置为  $T_s=1 \times 10^{-4} \text{ s}$ 。权重系数  $w_1, w_2, w_3, w_4$  都设置为 1。仿真中 APEO 的参数设置如下: 种群大小  $N$  设为 30, 最大迭代次数  $I_{\max}$  设为 30, MNUM 参数  $b$  设为 0.1。经过 APEO 优化后获得的控制参数如下:  $K_{p1}=0.01, K_{i1}=30, K_{p2}=0.1, K_{i2}=170, K_f=2 \times 10^{-6}$ 。从优化流程可以看出, 基于 APEO 的分布式电源改进型下垂优化控制算法仅有选择和变异两项关键步骤, 比传统优化算法(如遗传算法和粒子群算法等)更加高效、简便, 后续将通过实验验证上述算法的可行性和有效性。

### 3 实验验证

为了进一步验证所提出的基于 APEO 的分布式电源改进型下垂控制策略的可行性和有效性, 在两台分布式电源构成的小型微电网系统进行了硬件平台测试实验。两台分布式电源的系统参数与仿真实验中分布式电源的系统参数一致。实验平台的外观如图 4 所示, 主要包括了两台分布式电源、三相负载、横河示波器、Chroma 直流电源、福禄克电能质量分析仪等。

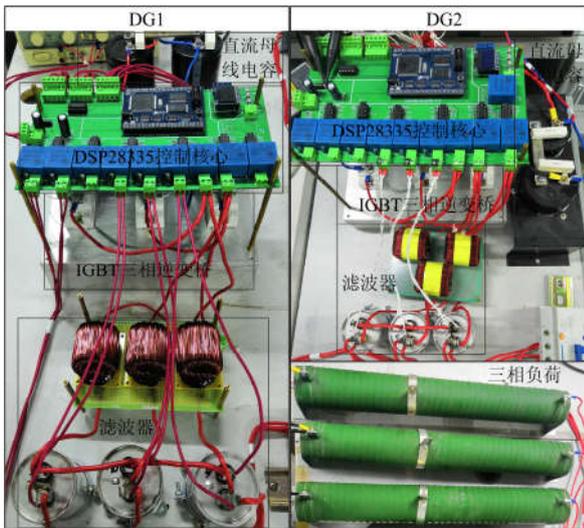


图 4 实验平台

Fig. 4 Experimental platform

后续将在上述实验平台上进行传统下垂控制策略和基于 APEO 的改进型下垂控制策略的系统性能对比测试, 包括系统的静态性能和动态性能的对比测试。上述两种控制策略下实验平台的稳态输出波形如图 5 和图 6 所示。上述波形的 THD 值如表 1 所示。为了公平起见, 测量 THD 时所采样的波形周期一致。从上述数据可以得出, 基于 APEO 的分布式电源改进型下垂控制策略的系统在输出电压和

频率稳定性最优, 系统的稳态性能得到了优化。

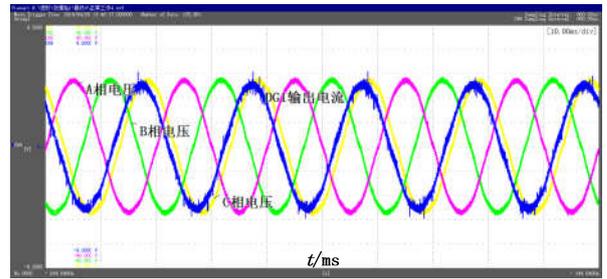


图 5 基于传统下垂控制策略的分布式电源稳态输出波形

Fig. 5 Output waveform of DG with the conventional droop controller

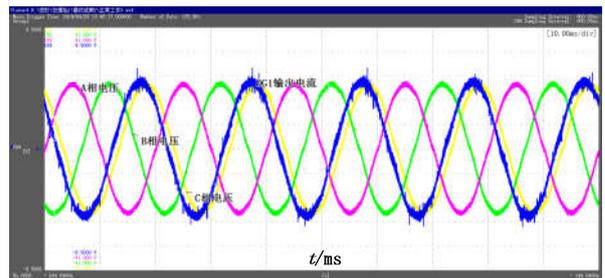


图 6 基于 APEO 的改进型下垂控制策略的分布式电源稳态输出波形

Fig. 6 Output waveform of DG with the modified droop controllers obtained by APEO

表 1 不同控制策略下的分布式电源输出电压的 THD 值

Table 1 Corresponding THD performance of output voltage obtained by different methods

控制策略	A 相电压	B 相电压	C 相电压
	THD/%	THD/%	THD/%
传统下垂控制	2.24	2.18	1.65
改进型下垂控制	1.99	1.96	1.62

为了测试基于传统下垂控制策略和基于 APEO 的改进型下垂控制策略下的分布式电源的即插即用性能, 进行了两台分布式电源的并联测试项目。采用上述两种控制策略下两台分布式电源并联的动态波形如图 7 和图 8 所示。由图 7 和图 8 可以得出, 两台采用了基于 APEO 的改进型下垂控制策略的分布式电源在并联过程中电流波形最优。

为了测试采用上述两种控制策略下微电网电压稳定性、功率协调的解耦控制性能差异, 进行了负载功率突变测试, 测试结果如图 9 和图 10 所示。从图 9 和图 10 可以得出负载功率突加后, 基于传统下垂控制策略的微电网能够对负载功率进行均分控制, 但存在电压幅值偏移的情况, 而采用基于 APEO 的改进型下垂控制策略的微电网对负载功率进行均

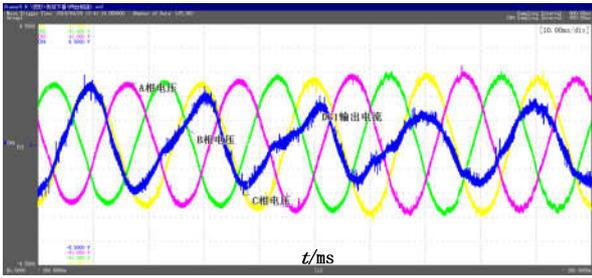


图 7 主从并联模式输出波形

Fig. 7 Output waveform by master-slave control strategy

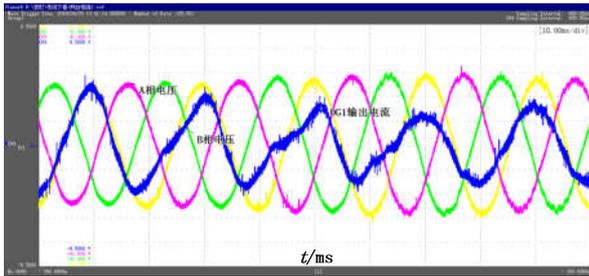


图 8 基于 APEO 的改进型下垂并联输出波形

Fig. 8 Output waveform of the modified droop controllers obtained by APEO

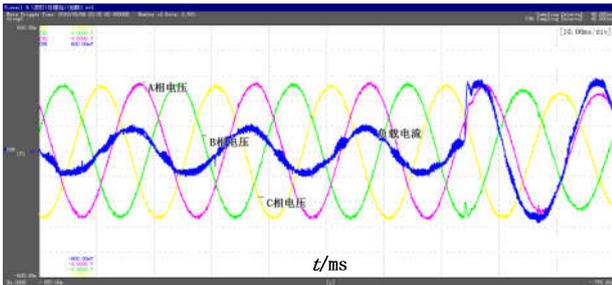


图 9 基于传统下垂控制策略的微电网负载功率突变波形

Fig. 9 Waveform of microgrid under the variable loads obtained by the conventional droop controller

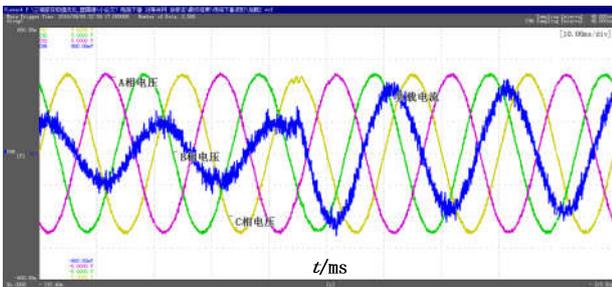


图 10 基于 APEO 的改进型下垂控制策略的微电网负载功率突变输出波形

Fig. 10 Waveform of microgrid under the variable loads obtained by the modified droop controller

分控制的同时未对电压稳定性产生影响, 验证了本文所提控制策略在解决电压稳定性和功率协调解耦问题的同时提升了系统的动态性能。

采用传统下垂控制策略的分布电源在并离网过程中存在工作模式切换, 容易出现暂态电压和暂态电流冲击过大的问题, 影响微电网的正常工作。基于 APEO 改进型下垂优化控制策略的微电网, 通过合理地设计虚拟电阻来重塑线路阻抗, 通过引入相位平移量的累加, 增加了相位锁相控制功能, 提高了系统相位误差的控制精度, 使并离网中无需工作模式的切换, 有效降低了并离网切换时系统的暂态冲击, 保障了微电网的正常工作。图 11 和图 12 为基于 APEO 改进型下垂优化控制策略的微电网并网和离网过程波形图, 从图中可以得出基于 APEO 的改进型下垂控制策略的微电网系统, 在并网和离网的过程中未产生过大的暂态电压冲击, 微电网系统在并网和离网过程中工作平稳。

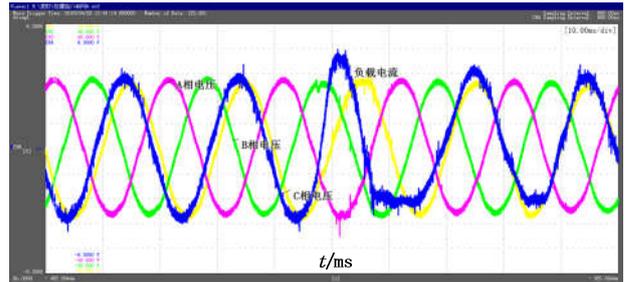


图 11 基于 APEO 的改进型下垂优化控制策略的微电网并网波形

Fig. 11 Instant waveform of microgrid connecting to the grid with the proposed strategy

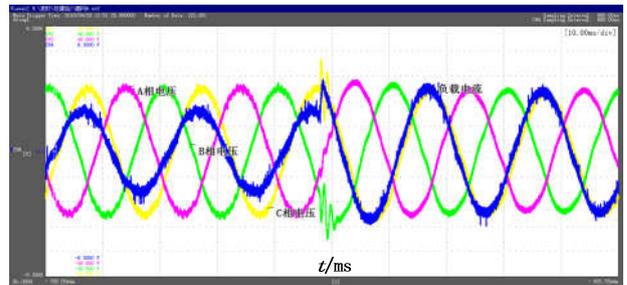


图 12 基于 APEO 的改进型下垂优化控制策略的微电网离网波形

Fig. 12 Instant waveform of microgrid off the grid with the proposed strategy

## 4 结论

本文针对低压离网微电网提出了一种基于 APEO 的分布式电源改进型下垂优化控制策略。在

带虚拟电阻的基波下垂控制基础上引入电压前馈控制,并增加系统相位锁相控制功能,引入 APEO 优化算法对系统控制参数进行优化,最终实现了分布式电源在微电网其馈线阻抗呈现阻性的状态下系统电压稳定性、功率协调的解耦控制。有效降低了并网切换时系统的暂态电压冲击,解决了分布式电源由于外在条件和物理因素改变对系统功率分配控制的影响,提高了系统的控制精度和响应速度。在此基础上,搭建了实验平台进行控制策略的测试,实验结果验证了该控制策略的有效性和可行性。

### 参考文献

- [1] YANG H, HONG L, PAN S, et al. Review of active and reactive power sharing strategies in hierarchical controlled microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(3): 2427-2451.
- [2] 张中丹, 吕金历, 赵宇洋, 等. 基于双层 MPC 的多源孤岛微网经济运行控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 168-174.  
ZHANG Zhongdan, LÜ Jinli, ZHAO Yuyang, et al. Multi-source island microgrid economic operation control strategy based on double-layer MPC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 168-174.
- [3] PAN Y, CHEN L, LU X, et al. Stability region of droop-controlled distributed generation in autonomous microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 2288-2300.
- [4] 陈宏, 冷华, 唐海国, 等. 含可再生能源的微电网经济运行双层优化方法[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(3): 95-100.  
CHEN Hong, LENG Hua, TANG Haiguo, et al. Two-stage optimization method on micro-grid economic operation with renewable energy resources[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(3): 95-100.
- [5] 蔡宏达, 夏杨红, 杨鹏程, 等. 交直流混合微电网多模式协调下垂控制[J]. 供用电, 2018, 35(1): 2-7.  
CAI Hongda, XIA Yanghong, YANG Pengcheng, et al. Multi-mode coordination droop control for hybrid AC/DC microgrids[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(1): 2-7.
- [6] 李昊, 王杰. 基于虚拟同步发电机技术的改进微网下垂控制[J]. 电力科学与技术学报, 2018(2): 11-19.  
LI Hao, WANG Jie. Modified Droop control based on virtual synchronous generator[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018(2): 11-19.
- [7] 彭湃. 基于虚拟阻抗的微电网下垂控制策略研究[J]. 供用电, 2018, 35(1): 65-70.  
PENG Pai. Research on droop control strategy in micro-grid based on virtual impedance[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(1): 65-70.
- [8] 孙钢虎, 王恩南, 贺婷, 等. 基于自适应暂态下垂控制的光伏频率快速响应方案[J]. 热力发电, 2019, 48(8): 94-100.  
SUN Ganghu, WANG Ennan, HE Ting, et al. Fast response scheme of photovoltaic frequency based on self-adaptive transient droop control[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(8): 94-100.
- [9] MICALLEF A, APAP M, SPITERI-STAINES C, et al. Single-phase microgrid with seamless transition capabilities between modes of operation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 2736-2745.
- [10] NUTKANI I U, LOH P C, BLAABJERG F. Droop scheme with consideration of operating costs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1047-1052.
- [11] KAHROBAEIAN A, MOHAMED Y A R I. Networked-based hybrid distributed power sharing and control for islanded microgrid systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2): 603-617.
- [12] 闫俊丽, 彭春华, 陈臣. 基于动态虚拟阻抗的低压微电网下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 1-6.  
YAN Junli, PENG Chunhua, CHEN Chen. Droop control strategy based on dynamic virtual impedance in low-voltage microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 1-6.
- [13] ZENG G Q, CHEN J, CHEN M R, et al. Design of multivariable PID controllers using real-coded population-based extremal optimization[J]. Neurocomputing, 2015, 151: 1343-1353.
- [14] ZENG G Q, CHEN J, DAI Y X, et al. Design of fractional order PID controller for automatic regulator voltage system based on multi-objective extremal optimization[J]. Neurocomputing, 2015, 160: 173-184.
- [15] 赵巧娥, 张乐乐, 武晓冬, 等. 基于并联虚拟电阻的多逆变器控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 30-39.  
ZHAO Qiao'e, ZHANG Lele, WU Xiaodong, et al. Control strategy for multi-inverters based on parallel virtual resistance[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 30-39.
- [16] 冯磊, 杨淑连, 徐达, 等. 考虑风电输出功率波动性的混合储能容量多级优化配置[J]. 热力发电, 2019, 48(10): 44-50.  
FENG Lei, YANG Shulian, XU Da, et al. Multistage optimal capacity configuration of hybrid energy storage

- considering wind power fluctuation[J]. *Thermal Power Generation*, 2019, 48(10): 44-50.
- [17] ZENG G Q, CHEN J, DAI Y X, et al. Design of fractional order PID controller for automatic regulator voltage system based on multi-objective extremal optimization[J]. *Neurocomputing*, 2015, 160: 173-184.
- [18] 李浩然, 杨旭红, 冯成臣. 多逆变器并联下的输出阻抗分析和改进下垂控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(20): 29-35.
- LI Haoran, YANG Xuhong, FENG Chengchen. Control strategy research of output impedance analysis and improved droop control based on multiple-inverters parallel[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(20): 29-35.
- [19] 欧阳逸风, 邹宇. 弱电网条件下并网逆变器的锁相环静态稳定分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(18): 74-79.
- OUYANG Yifeng, ZOU Yu. Static stability analysis of phase-locked loop in grid-connected inverters under weak grid condition[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(18): 74-79.
- [20] 李江, 张永利, 刘强, 等. 分布式光储微电网系统并网控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(23): 90-97.
- LI Jiang, ZHANG Yongli, LIU Qiang, et al. Research on grid-connected control strategy of distributed PV-storage microgrid system[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(23): 90-97.
- [21] DAI Y X, WANG H, ZENG G Q. Double closed-loop PI control of three-phase inverters by binary-coded extremal optimization[J]. *IEEE Access*, 2017, 4: 7621-7632.
- [22] 王环, 戴瑜兴, 曾国强. 基于 MNUM-遗传算法的分布式电源 P-Q 优化控制设计[J]. *电力电子技术*, 2019, 53(3): 114-146.
- WANG Huan, DAI Yuxing, ZENG Guoqiang. Research on P-Q control of distributed generation units by mnum-genetic algorithm optimization[J]. *Power Electronics*, 2019, 53(3): 114-146.
- [23] MAJUMDER R, GHOSH A, LEDWICH G, et al. Operation and control of hybrid microgrid with angle droop controller[C] // *Tencon IEEE Region 10 Conference*, November 21-24, Fukuoka, Japan: 509-515.
- 
- 收稿日期: 2019-02-27; 修回日期: 2019-05-31
- 作者简介:
- 王 环(1983—), 男, 博士, 实验师, 研究方向为新能源发电技术、微电网技术; E-mail: wh83@wzu.edu.cn
- 曾国强(1983—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为复杂系统的建模、控制、优化等; E-mail: 158397411@qq.com
- 戴瑜兴(1956—), 男, 博士, 教授, 研究方向为大功率变流技术与逆变装备、新能源微电网技术及应用、数控技术与装备信息化。E-mail: daiyx@wzu.edu.cn
- (编辑 许 威)