

文章编号: 2095-2163(2020)01-0160-05

中图分类号: TM464

文献标志码: A

基于虚拟阻抗的孤岛微网并联逆变器间环流抑制策略

刘滔, 官弼刚, 梁亦峰

(南华大学 电气工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 在孤岛微网中, 逆变器往往采取传统下垂控制方式来实现其输出有功和无功的解耦, 但是在线路连接阻抗不相等时, 各个逆变器的输出无功不能平均分配, 系统中存在较大环流。针对该问题, 本文对采用下垂控制的微电网逆变器并联系统进行了分析, 并提出了一种基于虚拟阻抗控制的环流抑制方法, 在电压电流控制环加入虚拟阻抗控制, 其中虚拟阻抗跟踪并联逆变器之间的无功相对误差变化。最后, 在 Matlab 中对 2 种控制方法进行了仿真比较。

关键词: 分布式电源; 并联逆变器; 环流; 下垂控制; 虚拟阻抗

Circulation suppression strategy of islanded microgrid parallel inverter based on virtual impedance

LIU Tao, GUAN Bigang, LIANG Yifeng

(School of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang Hunan 421001, China)

[Abstract] In the island microgrid, the inverter often adopts the traditional droop control method to achieve the decoupling of its output active and reactive power. However, when the line connection impedance is not equal, the output reactive power of each inverter cannot be evenly distributed. There is a large circulation in the system. Aiming at this problem, this paper analyzes the microgrid inverter parallel system with droop control, and proposes a loop suppression method based on virtual impedance control. Virtual voltage impedance control is added to the voltage and current control loop, and virtual impedance tracking is connected in parallel, while reactive power relative error between the inverters changes. Finally, simulation comparisons are made between the two control methods in Matlab.

[Key words] distributed power supply; parallel inverter; circulating current; droop control; virtual impedance

0 引言

随着化石能源等常规能源的不断消耗以及随之带来的环境污染日益严重, 风能、太阳能等清洁可再生能源的开发利用受到全球的高度重视^[1]。以分布式发电(Distributed Generation, DG)为支撑的微电网技术也得到了迅速的发展。微电网的优势在于既可以与大电网并网, 又可以在孤岛运行模式下工作, 而且可以在 2 种运行方式之间相互转换, 这样可以保证其供电可靠性^[2-3]。微电网中的微源主要包括风力发电、光伏发电、蓄电池等^[4]。大部分分布式发电都是通过逆变器接入微电网, 微电网孤岛运行时, 并联逆变器间会存在环流, 环流会使电力电子器件过热, 影响逆变器的工作效率, 严重时甚至会损坏逆变器^[5]。所以, 研究微电网环流抑制方法对实现微电网的稳定运行具有重要意义。

抑制环流最简单的方法就是外加限流电感法^[6], 但是要真正做到有效地抑制环流, 往往需要在逆变器输出端串入较大的电感, 从而使线损增大, 传输

效率降低, 并且造价昂贵。因此, 通过控制逆变器的输出来实现环流抑制的方法不断出现。文献[7]主要对 P-f、Q-U 下垂和 P-U、Q-f 下垂控制进行了总结, 并综合比较了相对应的各自优缺点。文献[8]在 Q-U 控制中加入了积分环节, 并且通过功率负反馈来微调逆变器下垂控制系数, 但是这种方法还是不能很好地抑制环流。文献[9]对传统的 Q-U 下垂控制环节进行了改进, 设计了无功均分模式和电压恢复模式, 并设计流程实现 2 种模式的协调运行。文献[10]在传统下垂控制的电压环中选用准谐振 PR 控制, 配合以虚拟电阻的调节, 来调整逆变器的等效输出, 其中虚拟电阻根据参考电压设定值和额定负载电压值来选取适宜的值。但是这种方法只考虑了逆变器内部控制参数不一致时的情况。文献[11]在分析环流的产生时综合考虑了逆变器内部参数差异和外部连线差异, 采用了在电压控制中加入虚拟电阻的逆变器并联运行环流抑制方法。但是虚拟电阻如何控制没有具体叙述。文献[12]通过

基金项目: 湖南省南华大学校级科研创新项目。

作者简介: 刘滔(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统运行与控制。

收稿日期: 2019-07-28

改进下垂控制和虚拟电抗相结合的方法, 实现有功和无功解耦, 但是这种方法无功平均分配的准确度不高。文献[13]考虑了虚拟阻抗的分压会导致逆变器输出电压降低, 提出让虚拟阻抗跟随负载端电压变化, 来弥补逆变器输出电压的降落。文献[14]采用实时监测微电网各条线路的电压与电流, 通过计算得到线路阻抗的实时值, 并让虚拟阻抗参数跟随其调整。文献[15]为了减少由非线性负载引起的谐波, 提出了基于重复和状态反馈控制的策略, 通过状态反馈抑制滤波器的谐振, 且不会有额外的功率损耗。

针对孤岛微电网逆变器并联系统线路连接阻抗不一致引起的环流问题, 本文提出了一种基于虚拟阻抗的孤岛微网逆变器控制方法。逆变器采用下垂控制可以实现功率解耦, 本文首先对孤岛运行模式下的微电网等效电路进行了分析, 并得出了并联逆变器之间的输出无功相对误差和线路阻抗差值的关系式, 在此基础上提出了使虚拟阻抗跟随无功相对误差变化, 改变逆变器的等效输出阻抗, 使各条线路阻抗达成一致, 从而提高逆变器无功平均分配的准确度并有效抑制逆变器间的环流。

1 并联逆变器等效电路分析

微电网孤岛运行模式下的等效电路如图 1 所示, 其中 DG_1 和 DG_2 都由分布式电源、三相逆变器和 LC 滤波电路三部分组成。图 1 中, $U_n (n=1, 2)$ 表示逆变器出口电压, $Z_{on} (n=1, 2)$ 表示逆变器等效输出阻抗, U_0 和 Z_L 表示负载端电压和负载阻抗, $Z_{ln} (n=1, 2)$ 表示线路连接阻抗, $Z_n (n=1, 2)$ 表示线路阻抗。

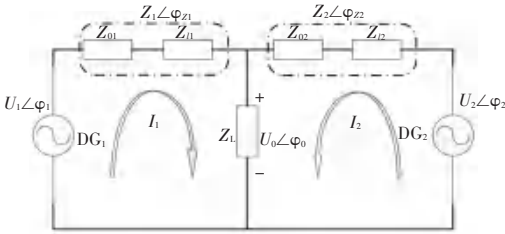


图 1 微电网逆变器并联等效电路图

Fig. 1 Parallel equivalent circuit diagram of microgrid inverter

则逆变器输出电流为:

$$I_1 = \frac{U_1 \angle \varphi_1 - U_0 \angle \varphi_0}{Z_1 \angle \varphi_{z1}}, \quad (1)$$

$$I_2 = \frac{U_2 \angle \varphi_2 - U_0 \angle \varphi_0}{Z_2 \angle \varphi_{z2}}, \quad (2)$$

由图 1 可知, 式(1)、式(2)中 Z_1 和 Z_2 满足:

$$Z_1 = Z_{o1} + Z_{l1}, \quad (3)$$

$$Z_2 = Z_{o2} + Z_{l2}, \quad (4)$$

由式(1)、式(2)可以看出, 当 2 个 DG 结构完全对称时, 只要二者的线路连接阻抗相同, 其对应的输出电流就会相等, 此时并联逆变器系统中不存在环流。但在实际工程应用中, 由于分布式电源的分散性, 每个 DG 的线路连接长度不同, 线路连接阻抗就不相等, 此时 $I_1 \neq I_2$, 并联系统中存在环流 I_H 。环流大小为:

$$I_H = \frac{I_1 - I_2}{2}. \quad (5)$$

当 DG_1 和 DG_2 的控制系统参数完全相同时, 即有 $U_1 = U_2, Z_{o1} = Z_{o2}$, 若 $Z_{l1} > Z_{l2}$, 则有 $Z_1 > Z_2$, 根据式(1)、式(2)可得 $I_1 < I_2$, 此时环流方向由 DG_2 流向 DG_1 ; 若 $Z_{l1} < Z_{l2}$, 则有 $Z_1 < Z_2$, 根据公式(1)、式(2)可得 $I_1 > I_2$, 此时环流方向由 DG_1 流向 DG_2 。由上述分析可以得出: 线路连接长度相差越多, 逆变器之间的环流就会越大。

2 逆变器的下垂控制

下垂控制的基本原理: 根据发电机的一次调频原理, 各个微源的输出有功与频率呈线性负相关关系, 输出无功与电压呈线性负相关关系。根据 P-f、Q-U 下垂直线, 可以通过频率来调整逆变器输出有功, 通过电压来调整逆变器输出无功, 从而实现系统的功率平衡。

由图 1 给出的微电网孤岛运行模式下的等效电路图可计算得出逆变器输出有功 P_n 和无功 Q_n 分别为:

$$P_n = \frac{U_n U_0 \cos(\varphi_{zn} - \varphi_n + \varphi_0) - U_0^2 \cos \varphi_{zn}}{Z_n}, \quad (6)$$

$$Q_n = \frac{U_n U_0 \sin(\varphi_{zn} - \varphi_n + \varphi_0) - U_0^2 \sin \varphi_{zn}}{Z_n}, \quad (7)$$

在微电网的实际线路中, 其电阻远大于电抗。通过参数设计可以实现逆变器等效输出阻抗呈感性, 使得逆变器线路阻抗呈感性, 即有式(6)、式(7)中 $\varphi_{zn} = 90^\circ (n=1, 2)$, 则式(6)、式(7)可化简为:

$$P_n = \frac{U_n U_0 \sin(\varphi_n - \varphi_0)}{Z_n}, \quad (8)$$

$$Q_n = \frac{U_n U_0 \cos(\varphi_n - \varphi_0) - U_0^2}{Z_n}, \quad (9)$$

通常逆变器的出口电压与负载端电压功角数值相差不大, 可近似看作 $\varphi_n \approx \varphi_0$, 则 $\sin(\varphi_n - \varphi_0) \approx \varphi_n - \varphi_0, \cos(\varphi_n - \varphi_0) \approx 1$ 。则式(8)、式(9)可化简为:

$$P_n = \frac{U_n U_0 (\varphi_n - \varphi_0)}{Z_n}, \quad (10)$$

$$Q_n = \frac{U_n U_0 - U_0^2}{Z_n}, \quad (11)$$

此时所对应的下垂控制方程为:

$$f_n = f_N - m P_n, \quad (12)$$

$$U_n = U_N - n Q_n, \quad (13)$$

其中, f_n 和 U_n 分别表示各个逆变器实际的频率值和出口电压值; f_N 和 U_N 分别表示空载时各个逆变器出口电压频率和电压值; P_n 和 Q_n 分别表示各个逆变器实际输出的有功和无功; m 和 n 分别表示 P-f 下垂系数和 Q-U 下垂系数。

当微电网工作在稳定状态时, 整个系统的频率会是一个确定值, 频率的全局稳定性可以实现微电网系统有功功率的分配平衡, 此时系统中不会存在有功环流。但是逆变器出口电压在稳态时也会变化, 逆变器出口电压的差异会导致逆变器输出无功功率不能平均分, 此时系统中主要存在无功环流。将 $U_n = U_N - n Q_n$ 代入式(11)可得:

$$Q_n = \frac{U_N U_0 - U_0^2}{Z_n + n U_0}, \quad (14)$$

即:

$$Q_1 = \frac{U_{N1} U_0 - U_0^2}{Z_1 + n_1 U_0}, \quad (15)$$

$$Q_2 = \frac{U_{N2} U_0 - U_0^2}{Z_2 + n_2 U_0}, \quad (16)$$

假设 DG₁ 和 DG₂ 的结构和控制设定参数都相同, 则有 $U_{N1} = U_{N2}$, $n_1 = n_2$, 此时各个微源输出无功相对误差为:

$$\Delta Q_c = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{Z_2 + n_2 U_0}{Z_1 + n_1 U_0} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + n_1 U_0}. \quad (17)$$

由式(17)可以看出, 无功相对误差和各条线路的阻抗差值及逆变器的 Q-U 下垂系数有关。当增大 Q-U 下垂控制系数 n 时, 无功相对误差会减小。但是根据式(13)可知, 增大 Q-U 下垂控制系数会使逆变器出口电压降低, 不能保证对负载的供电质量。当减小各条线路的阻抗差值 $Z_1 - Z_2$ 时, 无功相对误差也会减小。因此, 本文提出在传统下垂控制的基础上加入跟随无功相对误差自适应调整的虚拟阻抗, 使各条线路的阻抗差值 $Z_1 - Z_2$ 变小, 从而减小无功相对误差, 达到抑制系统无功环流的目的。

3 引入虚拟阻抗的逆变器控制策略

3.1 虚拟阻抗的原理

加入虚拟阻抗后的孤岛微电网等效电路如图 2

所示。图 2 中, Z_2 表示 DG₂ 的线路阻抗(包括逆变器输出阻抗和连线阻抗), Z_v 表示虚拟阻抗(包含虚拟电阻和虚拟电感), ΔZ 表示 DG₁ 的线路阻抗与 DG₂ 的线路阻抗的差值, 即 $\Delta Z = Z_1 - Z_2$ 。

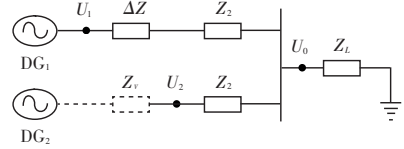


图 2 加入虚拟阻抗的孤岛微电网等效电路

Fig. 2 Isolated microgrid equivalent circuit with virtual impedance

由图 2 可以看出, 只要加入的虚拟阻抗等于线路阻抗的差值 ΔZ 就可以使并联线路完全对称, 从而达到抑制环流的目的。但是在实际微电网线路中, 连线阻抗 Z_{11} 和 Z_{12} 与连线长度成正比, 这就使得线路阻抗 Z_1 和 Z_2 是不确定的, 也就不能确定需要加入多大的虚拟阻抗才可以实现 2 条线路对称。因此只有通过能反映线路阻抗差值的量来自适应调节虚拟阻抗的大小。

3.2 加入虚拟阻抗的逆变器控制策略

加入虚拟阻抗的逆变器电压电流控制框图如图 3 所示, 其中 U_0^* 是负载电压 U_0 的参考值, i_c^* 是电容电流 i_c 的参考值。电压外环主要作用是保证负载电压, 采用 PI 控制来提高负载电压的稳态精度, K_{up} 是控制器比例系数, K_{ui} 是控制器积分系数。电流内环主要是要加快系统的反映速度, 因此直接采用比例控制器, 比例系数为 K ^[13]。在传统下垂控制的双环控制的基础上引入了自适应虚拟阻抗控制, 虚拟阻抗跟随无功相对误差自适应调整, 构造逆变器输出阻抗, 以实现逆变器输出无功均分。

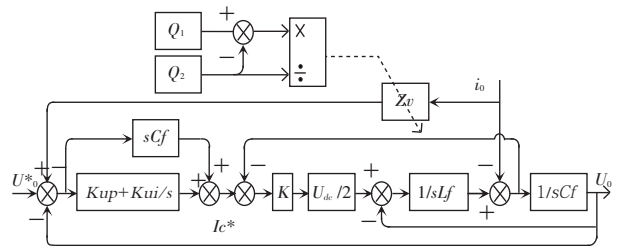


图 3 加入虚拟阻抗的逆变器电压电流控制框图

Fig. 3 Voltage and current control block diagram of inverter with virtual impedance

4 仿真

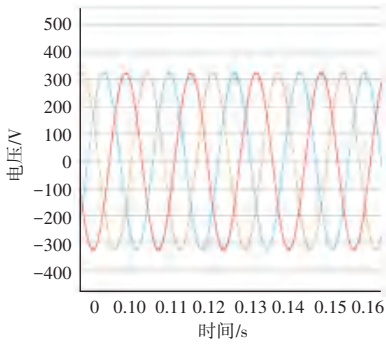
用 Matlab 中的 Simulink 建立微电网仿真模型, 仿真电路见图 1。其中, 分布式电源由直流电源代替, 2 台逆变器除外部连接线路长度不相同外, 其余控制参数均保持一致, 具体的仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数表
Tab. 1 Simulation parameter table

参数名称	数值	参数名称	数值
直流电源电压	800 V	负载	4+j3kVA
额定功率	5 kW	虚拟电感	3 mH
滤波电容 C_f	1 500 μ F	微电网额定电压幅值	311 V
滤波电感 L_f	0.6 mH	微电网额定频率	50 Hz
线路阻抗参数	0.641+j0.101 Ω /km	参考电压幅值	325 V
线路长度	$l_1 = 500$ m, $l_2 = 800$ m	参考角频率	314 rad \cdot s $^{-1}$

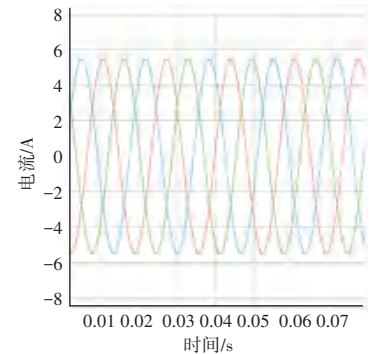
首先对逆变器选用传统下垂控制策略时进行仿真, P-f、Q-U 下垂控制系数分别取: $m = 3e-5$, $n =$

$5e-4$, 电压电流双环控制参数分别取 $K = 5$, $K_{up} = 10$, $K_{ui} = 100$ 。仿真结果如图 4 所示。



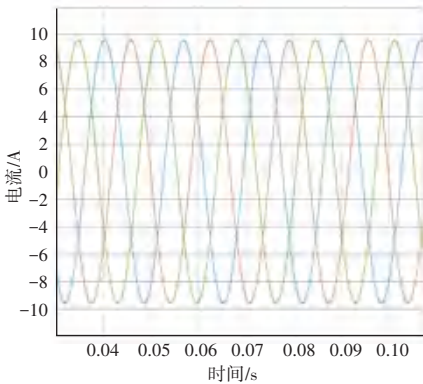
(a) 负载端电压波形图

(a) Voltage waveform diagram of load terminal



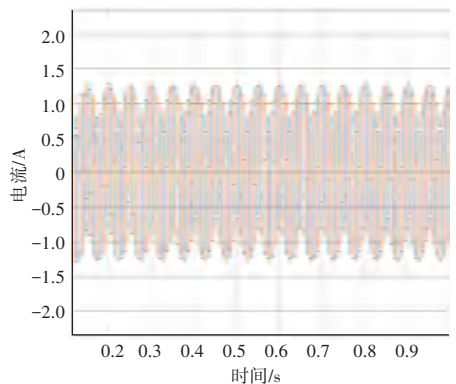
(b) 逆变器 1 输出电流波形图

(b) Inverter 1 output current waveform



(c) 逆变器 2 输出电流波形图

(c) Inverter 2 output current waveform



(d) 环流波形图

(d) Circulation waveform

图 4 传统下垂控制仿真波形

Fig. 4 Traditional droop control simulation waveform

由图 4(a) 可以看出, 逆变器采用传统下垂控制, 系统输出电压接近额定电压幅值 311 V, 而图 4(d) 显示系统中存在较大环流, 究其原因主要是微电网中 2 条线路连接阻抗不同导致 2 条线路的出口电压不相等。

接下来, 在电压电流双环控制模块中加入自适应虚拟阻抗控制进行仿真, 得到如图 5 所示的仿真

波形。

如图 5(a) 所示, 加入虚拟阻抗后系统出口电压依旧满足额定值, 大约 310 V。如图 5(b)、5(c) 所示, 两逆变器的出口电流十分稳定。对比图 4(d) 和 5(d), 本文提出的环流抑制策略具有更好的环流抑制效果, 更有利于微电网的安全稳定运行。

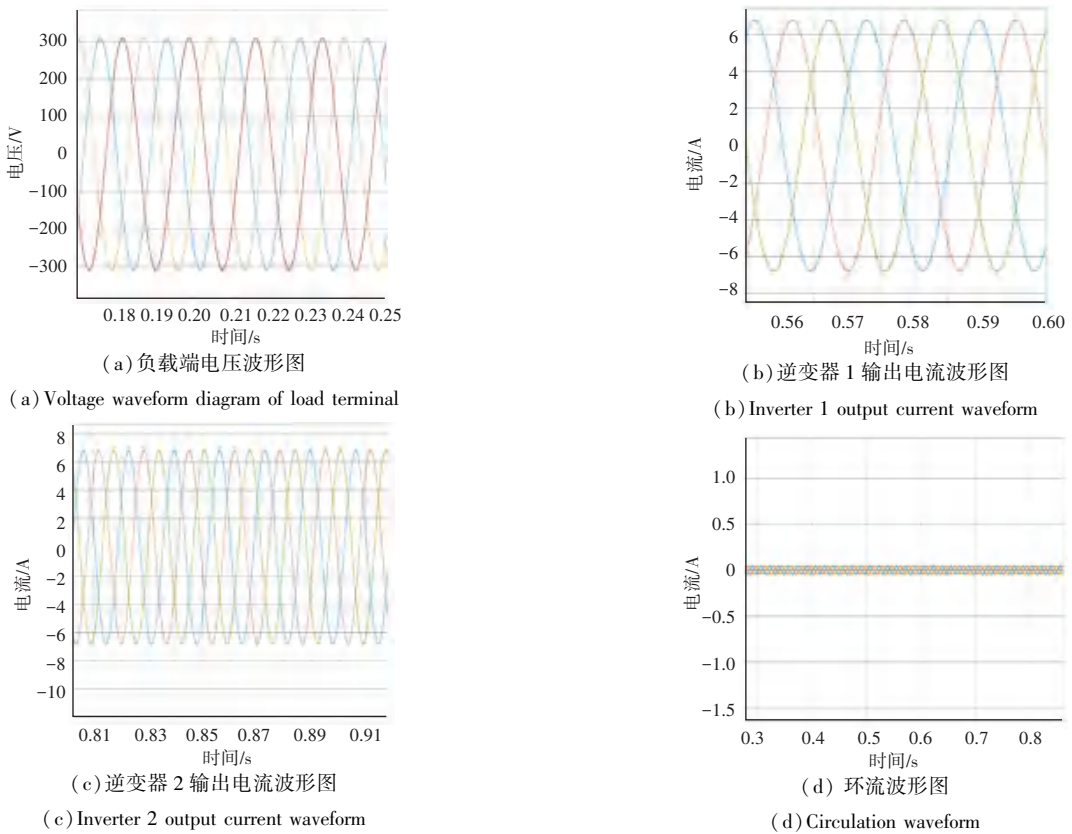


图5 引入虚拟阻抗的仿真波形

Fig. 5 Display of the simulated waveform of the virtual impedance

5 结束语

本文对孤岛微电网多逆变器并联运行等效电路进行了详细分析,当各微源及逆变器参数均保持一致时,各条线路连接长度不一致是导致系统存在环流的主要原因。然后对逆变器的传统下垂控制策略进行了研究,在线路阻抗不匹配时采用下垂控制会导致逆变器输出无功分配不均,系统存在无功环流。根据公式推导得出了线路阻抗的差值与逆变器输出无功相对误差之间的关系,本文提出加入跟踪无功相对误差自适应调节的虚拟阻抗控制,更改逆变器的输出阻抗,消除线路阻抗之间的差异,从而减小逆变器无功相对误差并达到抑制无功环流的目的。对比2种控制方法的仿真波形可知,本文所提出的方法抑制环流效果更佳,更能提高系统运行的稳定性。

参考文献

- [1] 鲍薇. 多电压源型微源组网的微电网运行控制与能量管理策略研究[D]. 北京:中国电力科学研究院, 2014.
- [2] 唐西胜, 齐智平. 应用于微电网的储能及其控制技术[J]. 太阳能学报, 2012, 33(3):517-524.
- [3] 孙孝峰, 陈敬娴, 骆志伟, 等. 基于并网逆变器的一种基波阻抗识别方法[J]. 太阳能学报, 2014, 35(7):1237-1243.
- [4] 李建林, 徐少华, 惠东. 百MW级储能电站用PCS多机并联稳定性分析及其控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36

(15):4034-4046.

- [5] ZHANG Mingrui, DU Zhichao, LIN Xiangqi, et al. Control strategy design and parameter selection for suppressing circulating current among SSTs in parallel[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4):1602-1609.
- [6] 肖华根, 罗安, 王逸超, 等. 微网中并联逆变器的环流控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19):3098-3104.
- [7] 张春刚, 罗璐, 李青璇, 等. 低压微电网多台并联逆变电源的功率分配策略综述[J]. 电气技术, 2018, 19(9):1-5, 11.
- [8] 李国武, 梁吉, 许健, 等. 适用于不同等效阻抗的并联逆变器环流抑制方法研究[J]. 电子设计工程, 2016, 24(19):141-144.
- [9] 米阳, 蔡杭宜, 宋元元, 等. 基于同步补偿的孤岛微电网无功均分研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(9):1934-1943.
- [10] 徐柏榆, 马明, 李珂, 等. 一种可抑制环流的微电网逆变器并联控制策略[J]. 太阳能学报, 2017, 38(3):789-797.
- [11] 陈薇, 赵强. 基于虚拟阻抗的逆变器并联控制策略的研究[J]. 电气工程学报, 2018, 13(8):7-11, 31.
- [12] 邓天成, 颜湘武, 程云帆, 等. 微电网中不同容量逆变器经线路并联的环流特性分析和功率分配控制[J]. 南方电网技术, 2017, 11(1):58-64.
- [13] 裴淑曼, 张军. 基于自适应虚拟阻抗的微电网控制策略研究[J]. 电测与仪表, 2017, 55(12):82-87.
- [14] 张明锐, 宋柏慧. 一种孤岛微网并联逆变器间环流抑制方法: 中国, CN107181281A[P]. 2017-09-19.
- [15] MA Wenjie, OUYANG Sen. Control strategy for inverters in microgrid based on repetitive and state feedback control[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 111:447-458.