

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190850

# 不平衡负载下三相离网逆变器的序阻抗建模及特性分析

骆坚<sup>1</sup>, 张瀚宇<sup>2</sup>, 张松<sup>1</sup>, 伍文华<sup>1</sup>, 欧阳红林<sup>1</sup>, 陈燕东<sup>1</sup>

(1. 国家电能变换与控制工程技术研究中心(湖南大学), 湖南 长沙 410082;

2. 河北工业大学电气工程学院, 天津 300401)

**摘要:** 孤岛微电网中三相负载不平衡是引起微电网电压不对称的主要原因。为了清晰直观地分析和改善电压不对称问题, 从序阻抗角度, 采用一种谐波线性化方法, 建立了不平衡负载下三相离网逆变器采用无正负序分离电压控制模式的正负序阻抗模型, 在不同PI控制参数、不同的运行工况下对三相离网逆变器的正负序阻抗特性进行了对比分析。分析表明PI控制参数对正负序阻抗特性影响较大, 运行工况产生的影响较小。然后在三种不同运行工况下, 对单序dq控制模式和无正负序分离电压控制模式进行了仿真对比分析。得到的序阻抗特性曲线和输出波形表明: 采用单序dq电压控制模式时离网逆变器的输出电压幅值不平衡度高, 而采用无正负序分离电压控制模式时, 由于三相离网逆变器的负序等效输出阻抗在基频下较小, 不平衡负载引起的负序电流流过阻抗产生的压降也较小, 使逆变器的输出电压幅值基本保持平衡。最后, 仿真验证了无正负序分离电压控制模式下的序阻抗模型的有效性。  
**关键词:** 三相离网逆变器; 不平衡负载; 序阻抗建模; 阻抗特性分析; Matlab 仿真

## Modeling and characteristic analysis of sequential impedance of three-phase off-grid inverter under unbalanced load

LUO Jian<sup>1</sup>, ZHANG Hanyu<sup>2</sup>, ZHANG Song<sup>1</sup>, WU Wenhua<sup>1</sup>, OUYANG Honglin<sup>1</sup>, CHEN Yandong<sup>1</sup>

(1. National Electric Energy Conversion and Control Engineering Technology Research Center (Hunan University), Changsha 410082, China; 2. School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** In order to analyze and improve the voltage asymmetry problem clearly and intuitively, this paper adopts a harmonic linearization method from the order impedance angle to establish a three-phase off-grid inverter with unbalanced load and phase separation voltage control mode under unbalanced load. The positive and negative sequence impedance models are compared and analyzed under different PI control parameters and different operating conditions. The analysis shows that the PI control parameters have a great influence on the positive and negative sequence impedance characteristics, and the impact of the operating conditions is small. Then, under three different operating conditions, the single-sequence dq control mode and the non-positive-negative-sequence separation voltage control mode are simulated and compared. The obtained sequence impedance characteristic curve and output waveform show that when the single-sequence dq voltage control mode is adopted, the output voltage amplitude of the off-grid inverter is unbalanced. When the positive and negative sequence separation voltage control mode is adopted, since the negative-sequence equivalent output impedance of the three-phase off-grid inverter is small at the fundamental frequency, the voltage drop caused by the negative sequence current flowing through the balanced load is also small. The output voltage amplitude of the inverter is basically balanced. Finally, the simulation verifies the effectiveness of the sequence impedance model without positive and negative sequence separation voltage control mode.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902000), National Natural Science Foundation of China (No. 51677063), and Postdoctoral Innovation Talents Support Project (No. BX20190109).

**Key words:** three-phase off-grid inverter; unbalanced load; sequence impedance modeling; impedance characteristic analysis; Matlab simulation

## 0 引言

随着新能源的快速发展, 微电网逐渐成为目前

学者们的研究热点, 因为具备可靠和灵活的特点, 它既可以运行在并网模式, 又可以运行在离网模式<sup>[1-4]</sup>。运行在离网模式下, 可以实现对本地负载的高可靠性供给, 同时由于没有大电网的支撑, 在不平衡负载的条件下, 微电网会产生负序电流分量, 负序电流分量经过三相离网逆变器等效输出阻抗时, 产生的电压降落将导致负载电压的不平衡<sup>[5]</sup>。

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0902000); 国家自然科学基金资助项目资助(51677063); 博士后创新人才支持计划(BX20190109)

根据对称分量法分析,三相不对称电压可分为正序、负序和零序三个分量,通过安装 APF 并联补偿装置、注入负序电流等方法来补偿负序电流,可以达到维持电压平衡的效果<sup>[6-11]</sup>,但这样会增加微电网的投资成本或使系统控制变得复杂。PI 控制是应用不平衡环境下的主流策略,PI 调节器能对电压信号进行无静差控制,但控制只对直流量有效,所以文献[12]通过三相静止坐标系到两相同步旋转坐标系( $dq$  坐标系)的变换,将三相交流信号转换成直流信号,实现 PI 调节器的无静差控制。但基于单序(正序) $dq$  坐标系的 PI 闭环控制无法对负序电压分量进行有效的控制。对此,文献[13-14]提出了基于正序与负序的双序同步旋转坐标系的 PI 闭环控制,但该控制使得正负序分量分离,正负序分离控制是建立在同步旋转坐标变换的基础上的,这样就会产生过多的正负序旋转坐标变换,将加重控制的复杂性和运算量<sup>[14-18]</sup>。同时,目前的序阻抗建模只集中在并网逆变器<sup>[19]</sup>,离网逆变器的序阻抗模型少有研究。

基于以上分析,本文首先采用谐波线性化方法<sup>[20]</sup>推导出无正负序分量分离电压控制模式<sup>[21]</sup>下三相离网逆变器的序阻抗模型,接着研究 PI 控制参数、

不同运行工况两个方面对离网逆变器的阻抗特性的影响。然后对比分析常规单序  $dq$  控制和无正负序分量分离的电压控制下的序阻抗特性曲线和负载电压幅值不平衡度。最后,仿真结果验证了本文所提分析方法的合理性和有效性。

### 1 三相离网逆变器的结构与控制

图 1 为单台三相离网逆变器的结构与控制框图。图中:  $V_{dc}$  为三相离网逆变器直流侧电压,  $e_a$ 、 $e_b$  和  $e_c$  为逆变器的内电势,  $i_{La}$ 、 $i_{Lb}$  和  $i_{Lc}$  为经过电感  $L$  上的电流,  $v_{sa}$ 、 $v_{sb}$  和  $v_{sc}$  为逆变器的输出电压,  $i_{sa}$ 、 $i_{sb}$  和  $i_{sc}$  为逆变器的输出电流,  $L$  和  $C$  分别为滤波电感和滤波电容,  $Z_a$ 、 $Z_b$  和  $Z_c$  为不对称负载。输出电压  $v_{sa}$ 、 $v_{sb}$  和  $v_{sc}$  经过传感器采样和  $abc/\alpha\beta$  变换后分为两条支路,先经过  $D_{dq}^+$  的为正序电压控制支路,经过  $D_{dq}^-$  的为负序电压控制支路。  $i_{La}$ 、 $i_{Lb}$  和  $i_{Lc}$  经过传感器采样和  $abc/\alpha\beta$  变换后,与  $\alpha\beta$  坐标系下产生的正序电压分量和负序电压分量叠加,最后经过电感电流内环比例控制器、 $\alpha\beta/abc$  变换和 PWM 调制后形成电力电子开关 IGBT 的触发信号。其中,

$$\begin{bmatrix} D_{dq}^+ \\ D_{dq}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{dq}^- \\ D_{dq}^+ \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

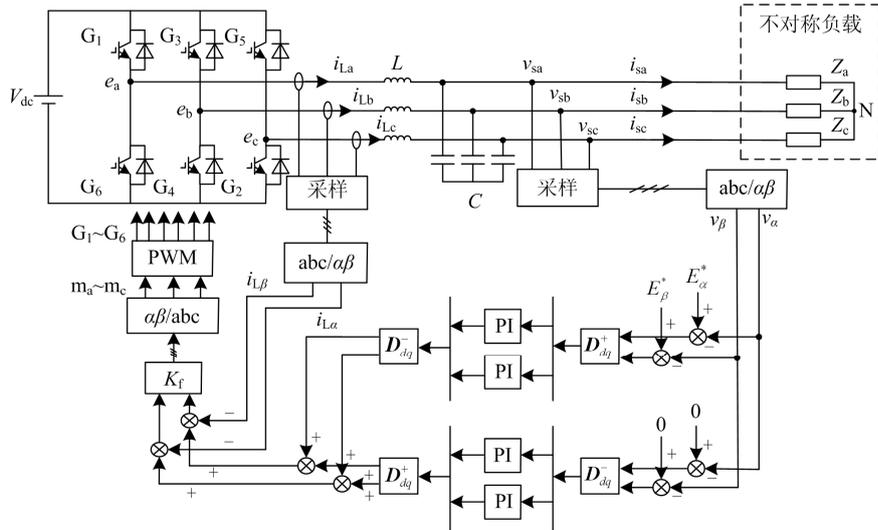


图 1 三相离网逆变器的结构与控制框图

Fig. 1 Structure and control block diagram of three-phase off-grid inverter

选取电压支路中的 PI 控制器传递函数为  $G_{eq}$ , 从而正序电压支路在静止坐标系下的传递函数  $G_p$  为

$$G_p = k_p + \frac{k_i}{j\omega - j\omega_0} \quad (2)$$

负序电压控制支路在静止坐标系下的传递函数  $G_N$  为

$$G_N = k_p + \frac{k_i}{j\omega + j\omega_0} \quad (3)$$

选取  $k_p=0.001$ ,  $k_i=50$ ,  $\omega_0$  为  $100\pi$ , 得到正序电压控制支路和负序电压控制支路的幅相频率特性曲线如图 2 所示。由图 2 可知, 正序电压控制支路和负序电压控制支路分别在正序基波频率处和负序基波频率处具有无穷大增益, 而在其他频率处的增益

较小, 因此, 正序电压控制支路和负序电压控制支路可分别对各自输入信号中的正序分量和负序分量进行独立控制, 实现不同控制目标<sup>[21]</sup>。

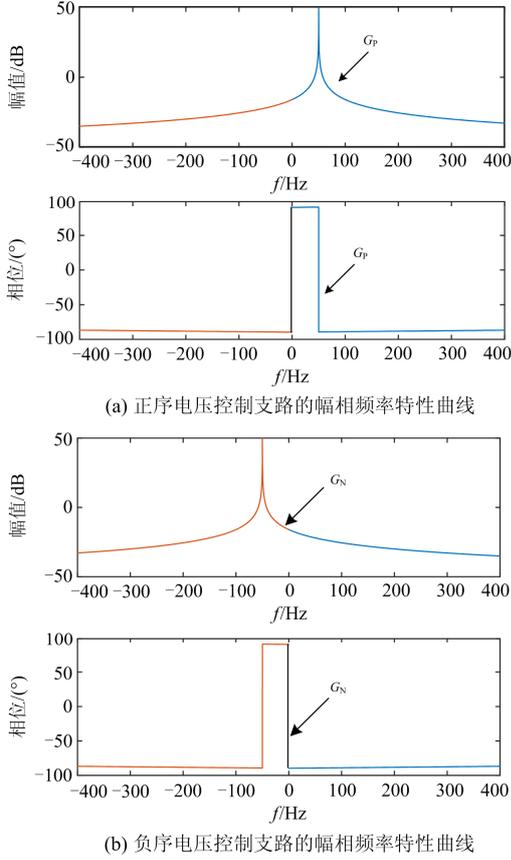


图 2 正负序电压控制支路的幅相频率特性曲线

Fig. 2 Amplitude-phase frequency characteristic curves of positive and negative sequence voltage control branches

## 2 三相离网逆变器的输出序阻抗建模与阻抗特性分析

### 2.1 三相离网逆变器输出阻抗建模

本文采用谐波线性化方法, 推导出三相离网逆变器正、负序输出阻抗模型。在时域中加入正、负序小信号扰动后, 逆变器的 A 相输出电压和电流为

$$v_{sa}(t) = V_1 \cos(2\pi f_1 t) + V_p \cos(2\pi f_p t + \varphi_{vp}) + V_n \cos(2\pi f_n t + \varphi_{vn}) \quad (4)$$

$$i_{sa}(t) = I_1 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_{i1}) + I_p \cos(2\pi f_p t + \varphi_{ip}) + I_n \cos(2\pi f_n t + \varphi_{in}) \quad (5)$$

式中:  $V_1$ 、 $V_p$  和  $V_n$  分别为基波电压、正序扰动电压和负序扰动电压的幅值;  $f_1$ 、 $f_p$  和  $f_n$  分别为基波频率、正序扰动频率和负序扰动频率;  $\varphi_{vp}$  和  $\varphi_{vn}$  分别为正序扰动电压和负序扰动电压的初相角;  $I_1$ 、 $I_p$  和  $I_n$  分别为基波电流、正序扰动电流响应和负序扰

动电流响应的幅值;  $\varphi_{i1}$ 、 $\varphi_{ip}$  和  $\varphi_{in}$  分别为基波电流、正序扰动电流响应和负序扰动电流响应的初相角<sup>[22]</sup>。

当系统三相对称时, 电压  $v_{sa}$  和电流  $i_{sa}$  的频域表达式为

$$v_{sa}[f] = \begin{cases} V_1 & f = \pm f_1 \\ V_p & f = \pm f_p \\ V_n & f = \pm f_n \end{cases} \quad (6)$$

$$i_{sa}[f] = \begin{cases} I_1 & f = \pm f_1 \\ I_p & f = \pm f_p \\ I_n & f = \pm f_n \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $V_1 = V_1/2$ ;  $V_p = (V_p/2)e^{\pm j\varphi_p}$ ;  $V_n = (V_n/2)e^{\pm j\varphi_n}$ ;

$I_1 = (I_1/2)e^{\pm j\varphi_{i1}}$ ;  $I_p = (I_p/2)e^{\pm j\varphi_{ip}}$ ;  $I_n = (I_n/2)e^{\pm j\varphi_{in}}$ 。

当系统三相对称时, 可得  $\alpha\beta$  坐标系下三相离网逆变器的输出端电压和输出端电流的频域表达式为

$$v_{\alpha}[f] = \begin{cases} V_1 & f = \pm f_1 \\ V_p & f = \pm f_p \\ V_n & f = \pm f_n \end{cases} \quad (8)$$

$$v_{\beta}[f] = \begin{cases} \mp j V_1 & f = \pm f_1 \\ \mp j V_p & f = \pm f_p \\ \pm j V_n & f = \pm f_n \end{cases}$$

$$i_{\alpha}[f] = \begin{cases} I_1 & f = \pm f_1 \\ I_p & f = \pm f_p \\ I_n & f = \pm f_n \end{cases} \quad (9)$$

$$i_{\beta}[f] = \begin{cases} \mp j I_1 & f = \pm f_1 \\ \mp j I_p & f = \pm f_p \\ \pm j I_n & f = \pm f_n \end{cases}$$

由式(1)和式(8)得:  $\alpha\beta$  坐标系下三相离网逆变器的输出端电压经过加入指令信号  $E_{\alpha}^*$  和  $E_{\beta}^*$ 、 $D_{dq}^+$  控制后得到的表达式为

$$\begin{bmatrix} Y_d^+ \\ Y_q^+ \end{bmatrix} = \mathbf{D}_{dq}^+ \begin{bmatrix} E_{\alpha}^* - v_{\alpha} \\ E_{\beta}^* - v_{\beta} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$Y_d^+ = \begin{cases} -2V_1 & DC \\ -V_p & f = \pm(f_p - f_1) \\ -V_n & f = \pm(f_n + f_1) \end{cases} \quad (11)$$

$$Y_q^+ = \begin{cases} 0 & DC \\ \pm j V_p & f = \pm(f_p - f_1) \\ \mp j V_n & f = \pm(f_n + f_1) \end{cases}$$

式中:  $Y_d^+$  和  $Y_q^+$  分别为  $\alpha\beta$  坐标轴上的逆变器输出电压  $v_\alpha$  和  $v_\beta$  经过加入指令信号  $E_\alpha^*$  和  $E_\beta^*$ 、 $D_{dq}^+$  控制后的  $d$  坐标轴和  $q$  坐标轴上的电压。

由式(1)和式(11)得:  $Y_d^+$  和  $Y_q^+$  经过 PI 控制器和  $D_{dq}^-$  控制后得到的表达式为

$$\begin{bmatrix} Y_\alpha^+ \\ Y_\beta^+ \end{bmatrix} = G_p D_{dq}^- \begin{bmatrix} Y_d^+ \\ Y_q^+ \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{cases} Y_\alpha^+ = \begin{cases} -G_p V_1 & f = \pm f_1 \\ -G_p V_p & f = \pm f_p \\ -G_p V_n & f = \pm f_n \end{cases} \\ Y_\beta^+ = \begin{cases} \pm j G_p V_1 & f = \pm f_1 \\ \pm j G_p V_p & f = \pm f_p \\ \mp j G_p V_n & f = \pm f_n \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $Y_\alpha^+$  和  $Y_\beta^+$  分别为  $dq$  坐标轴上的电压经过正序电压支路中  $D_{dq}^-$  后的  $d$  坐标轴和  $q$  坐标轴上的电压;  $G_p$  为 PI 控制器在旋转  $dq$  坐标轴下正序电压控制支路的等效传递模型。

由式(8)和式(13)比较得,  $Y_\alpha^+$  和  $Y_\beta^+$  与  $v_\alpha$  和  $v_\beta$  频域表达式中只差一个  $-G_p$  乘积, 又因为  $G_p$  为 PI 控制器的传递函数, 负号为加入指令信号所产生的, 所以说明频域下矩阵  $D_{dq}^+$  和  $D_{dq}^-$  的卷积为 1。进行  $D_{dq}^+$  控制的目的是为了使交流量  $v_\alpha$  和  $v_\beta$  经过  $\alpha\beta/dq$  变换后变成直流量, 从而充分利用 PI 控制器的无静差控制。

由图 1 可知,  $Y_\alpha^+$  和  $Y_\beta^+$  经过了电感电流内环比例控制器( $K_f$ )和  $\alpha\beta/abc$  坐标变换后得到正序支路上的部分调制信号  $s_a^+$ 、 $s_b^+$  和  $s_c^+$ 。其中  $s_a^+$  的表达式为

$$s_a^+[f] = \begin{cases} -G_p K_f V_1 & f = \pm f_1 \\ -G_p K_f V_p & f = \pm f_p \\ -G_p K_f V_n & f = \pm f_n \end{cases} \quad (14)$$

由式(6)和式(14)比较得:  $s_a^+$  和  $v_{sa}$  的频域表达式中只差  $-G_p$  和电感电流内环比例控制器增益  $K_f$  的乘积。由上可知, 矩阵  $D_{dq}^+$  和  $D_{dq}^-$  的卷积为 1, 所以说明  $abc/\alpha\beta$  坐标变换矩阵和  $\alpha\beta/abc$  坐标变换矩阵的卷积也为 1。

同上可得,  $\alpha\beta$  坐标系下三相离网逆变器的输出端电压经过加入指令信号 0 和 0、 $D_{dq}^-$  控制、PI 控制和  $D_{dq}^+$  控制后得到的表达式为

$$\begin{cases} Y_\alpha^- = \begin{cases} -G_N V_1 & f = \pm f_1 \\ -G_N V_p & f = \pm f_p \\ -G_N V_n & f = \pm f_n \end{cases} \\ Y_\beta^- = \begin{cases} \pm j G_N V_1 & f = \pm f_1 \\ \pm j G_N V_p & f = \pm f_p \\ \mp j G_N V_n & f = \pm f_n \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

由图 1 可知,  $Y_\alpha^-$  和  $Y_\beta^-$  经过了电感电流内环比例控制器( $K_f$ )和  $\alpha\beta/abc$  坐标变换后得到负序支路上的部分调制信号  $s_a^-$ 、 $s_b^-$  和  $s_c^-$ 。其中  $s_a^-$  的表达式为

$$s_a^-[f] = \begin{cases} -G_N K_f V_1 & f = \pm f_1 \\ -G_N K_f V_p & f = \pm f_p \\ -G_N K_f V_n & f = \pm f_n \end{cases} \quad (16)$$

三相离网逆变器的输出电流与滤波电感电流和滤波电容电压的关系表达式为

$$i_{La} = i_{sa} + C(dv_{sa}/dt) \quad (17)$$

同上可得, 滤波电感上的采样电流  $i_{La}$ 、 $i_{Lb}$  和  $i_{Lc}$  经过  $abc/\alpha\beta$  变换, 电感电流内环比例控制器  $K_f$  和  $\alpha\beta/abc$  变换后得到采样电流支路上的部分调制信号  $s_{a0}$ 、 $s_{b0}$  和  $s_{c0}$ , 其中  $s_{a0}$  的表达式为

$$s_{a0} = \begin{cases} -(I_1 + CsV_1)K_f & f = \pm f_1 \\ -(I_p + CsV_p)K_f & f = \pm f_p \\ -(I_n + CsV_n)K_f & f = \pm f_n \end{cases} \quad (18)$$

所以由卷积的分配律得总调制信号由正序电压支路、负序电压支路和采样电流支路三条支路叠加而成, 所以 A 相总调制信号的频域表达式由式(14)、式(16)和式(18)得

$$m_a[f] = \begin{cases} [-G_v(s)G_p V_p - G_v(s)G_N \times \\ V_p - G_i(s)(I_p + CsU_p)]K_f & f = \pm f_p \\ [-G_v(s)G_p V_p - G_v(s)G_N \times \\ V_p - G_i(s)(I_p + CsU_p)]K_f & f = \pm f_n \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $G_v(s)$ 、 $G_i(s)$  分别为电压和电流的信号采样和 PWM 的延时传递函数。分别为

$$G_v(s) = e^{-sT_s} \frac{1 - e^{-sT_s}}{sT_s} \frac{1}{1 + s/\omega_i} \quad (20)$$

$$G_i(s) = e^{-sT_s} \frac{1 - e^{-sT_s}}{sT_s} \frac{1}{1 + s/\omega_v} \quad (21)$$

由图 1 可知, 三相离网逆变器的内电势、输出电压和滤波电感电流的关系式为

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_a \\ m_b \\ m_c \end{bmatrix} K_m V_{dc} - \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中,  $K_m$ 为逆变器增益。

由式(17)、式(19)和式(22)得到正负序阻抗表达式。

$$Z_p(s) = Z_n(s) = [G_i(s)K_f K_m V_{dc} + sL] \times [s^2 LC + 1 + (G_p + G_N + sC)G_v(s)K_f K_m V_{dc}]^{-1} \quad (23)$$

### 2.2 三相离网逆变器输出序阻抗特性分析

为了研究三相离网逆变器输出序阻抗特性的影响因素,利用 Matlab 仿真平台搭建单台三相离网逆变器模型,逆变器额定容量为 50 kVA,载波频率为 10 kHz,采用 LC 滤波器,具体系统参数如表 1 所示。图 3、图 4 分别表示无正负序分离的电压控制模式下不同 PI 参数下和不同运行工况下三相离网逆变器的序阻抗特性。图中,蓝色实线表示式(23)所建正、负序阻抗的测量结果,红色圆圈代表式(23)所建正负序阻抗仿真结果。因为正负序阻抗的表达式一样,所以为了作图方便,图中只有正序阻抗仿真结果和正序阻抗测量结果。

表 1 三相离网逆变器的系统参数和控制参数

Table 1 System parameters and control parameters of three-phase off-grid inverter

参数	数值	参数	数值
$V_{dc}$	700 V	$L$	$6e^{-3}$ H
$K_m$	0.5	$C$	$10e^{-6}$ F
$K_f$	0.005	$k_p$	0.03
$T_s$	$e^{-4}$ s	$k_i$	50
$\omega_v$	$8\,000\pi$ rad/s	$f_1$	50 Hz
$\omega_i$	$8\,000\pi$ rad/s	$\omega_0$	$100\pi$ rad/s

1) 当三相负载( $Z_a=5\ \Omega$ 、 $Z_b=5\ \Omega$ 、 $Z_c=15\ \Omega$ )固定不变时,不同的 PI 控制参数(图 3)。

2) 当 PI 控制参数( $k_p=0.03$ 、 $k_i=50$ )固定不变时,不同的运行工况(图 4)。

由图 3、图 4 可得三相离网逆变器的序阻抗有以下特性。

1) 三相离网逆变器的输出电压在 6 种情况下基本都能保持平衡,证明了无正负序分离电压控制下三相离网逆变器序阻抗建模的可行性。

2) 在无正负序分离的电压控制下,中低频段,三相离网逆变器的正负序阻抗幅值都较小,外端口特性可等效为电压源,并且受 PI 调节器的控制参数影响较小。高频段,三相离网逆变器的正负序阻抗主要呈阻容性,电阻分量为负电阻,相位低于  $90^\circ$ ,受 PI 调节器的控制参数影响较大。

3) 无正负序分离的电压控制下,由于在相域下控制取消了锁相环,在坐标变换中,也就是在卷积运算中不会产生非线性效果,所以,正负序阻抗特性基本上不会受运行工况的影响。

### 3 不同控制方法的仿真对比分析

为了验证无正负序分离电压控制模式的序阻抗模型的有效性,利用 Matlab 仿真平台搭建单台三相离网逆变器模型。三相离网逆变器的参数如表 1 所示。先对两种控制模式下的序阻抗模型进行对比分析,然后在 3 种不同运行工况,即三相负载两相不对称、三相不对称和在三相负载的 A、C 两相

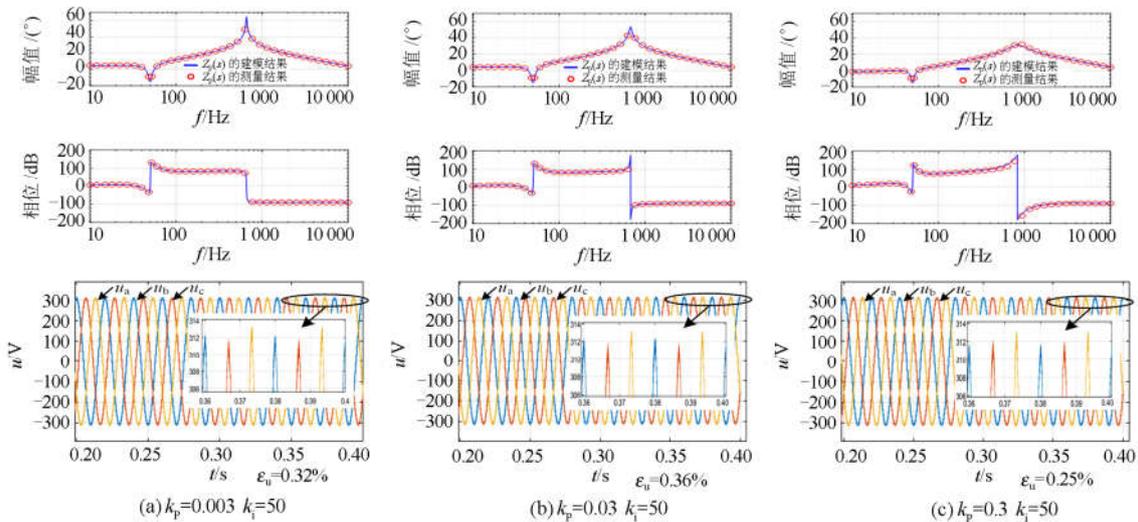


图 3 不同 PI 参数条件下三相离网逆变器的正负序输出阻抗特性及其测量仿真结果

Fig. 3 Positive and negative sequence output impedance characteristics of three-phase off-grid inverter under different PI parameters and its measurement simulation results

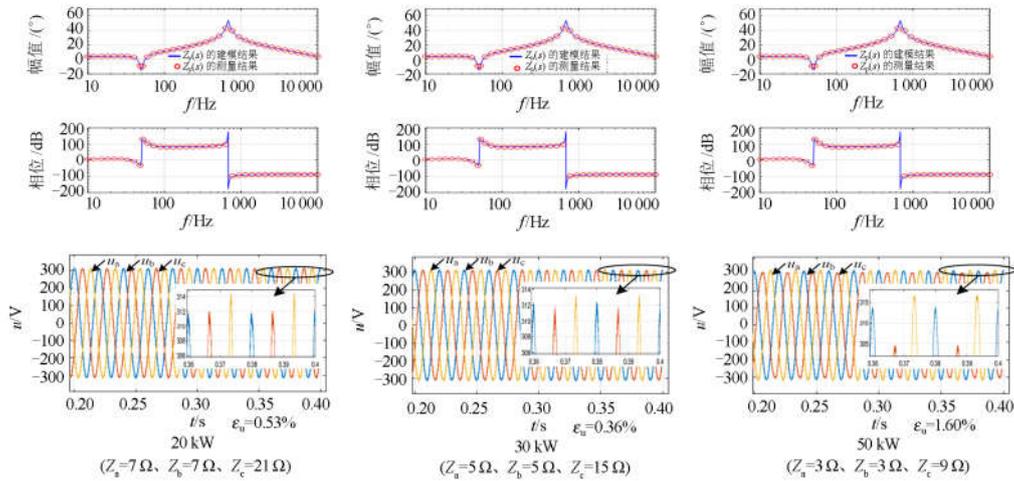


图 4 不同运行工况条件下三相离网逆变器的正负序输出阻抗特性及其测量仿真结果

Fig. 4 Positive and negative sequence output impedance characteristics of three-phase off-grid inverter under different operating conditions and its measurement simulation results

中跨接电阻等情况下，对两种控制模式中的三相离网逆变器输出电压进行对比分析。设  $\varepsilon_u$  为三相负载相电压，也就是三相离网逆变器输出电压幅值的不平衡度。

三相离网逆变器在基波频率下，对比图 5 的单

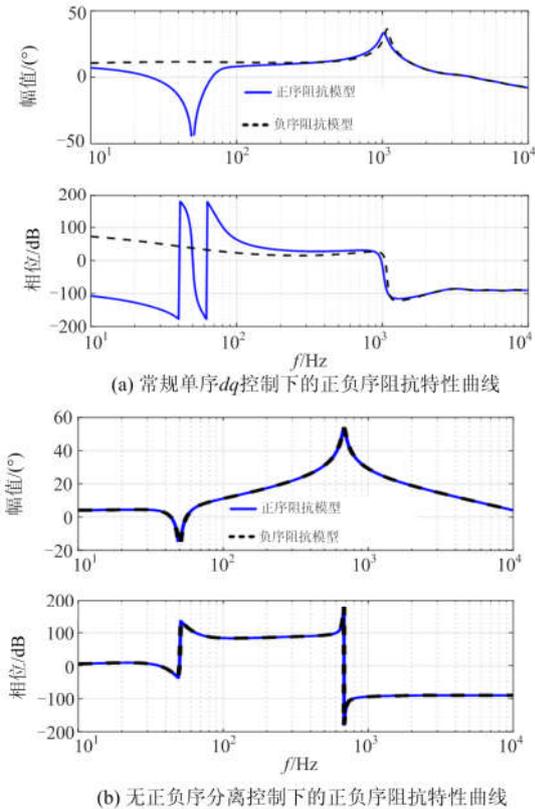


图 5 两种控制模式下的序阻抗特性曲线

Fig. 5 Sequence impedance characteristic curves in two control modes

序  $dq$  控制和无正负序分量分离的电压控制的阻抗特性曲线得，对数下负序阻抗由 10 dB 降至 -20 dB 以下，其线性幅值变得很小，正序阻抗由 -50 dB 变为 -20 dB，线性幅值变化很小。

- 1) 两相负载不对称 ( $Z_a=5\ \Omega, Z_b=5\ \Omega, Z_c=15\ \Omega$ ) 时，不同的控制方法(图 6)。
- 2) 三相负载不对称 ( $Z_a=5\ \Omega, Z_b=9\ \Omega, Z_c=15\ \Omega$ ) 时，不同的控制方法(图 7)。
- 3) 三相对称负载 ( $Z_a=5\ \Omega, Z_b=5\ \Omega, Z_c=5\ \Omega$ ) 其中 A、C 两相跨接 9  $\Omega$  电阻时，不同的控制方法(图 8)。

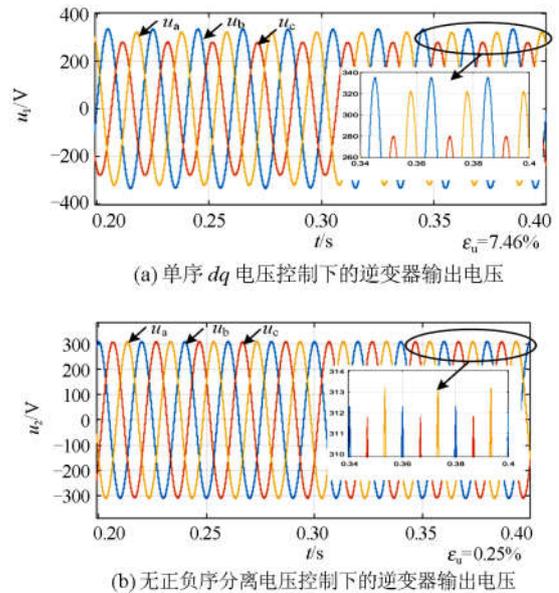


图 6 两种控制模式下的离网逆变器输出电压

Fig. 6 Off-grid inverter output voltage in two control modes

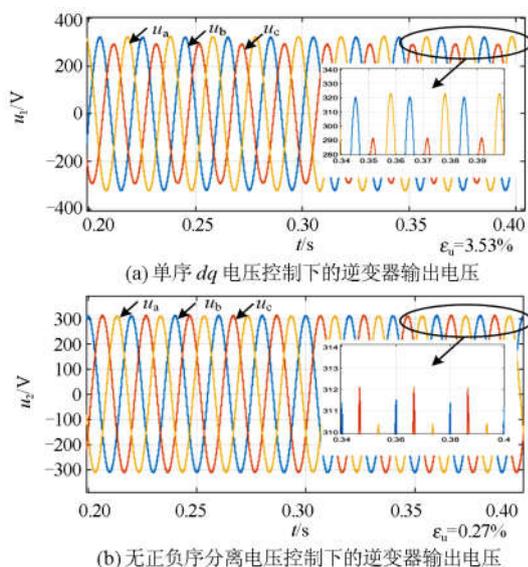


图 7 两种控制模式下的离网逆变器输出电压

Fig. 7 Off-grid inverter output voltage in two control modes

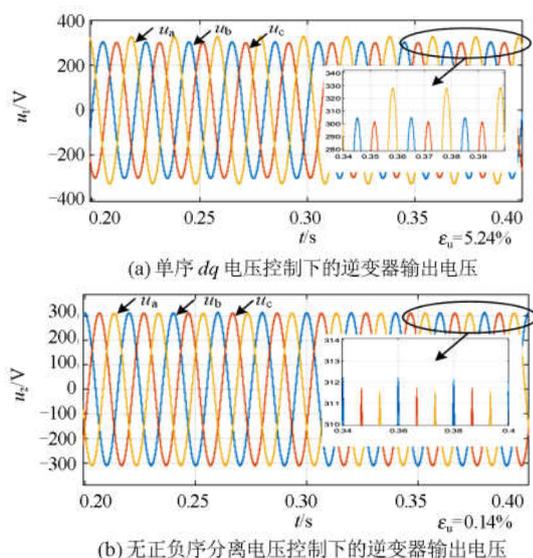


图 8 两种控制模式下的离网逆变器输出电压

Fig. 8 Off-grid inverter output voltage in two control modes

由图 6—图 8 可知, 两相负载不对称时, 三相离网逆变器的输出电压幅值的不平衡度由单序  $dq$  控制下的 7.46% 变为无正负序分离电压控制下的 0.25%; 三相负载不对称时, 由 3.53% 到 0.27%; 三相对称负载  $Z_a=5\ \Omega$ 、 $Z_b=5\ \Omega$ 、 $Z_c=5\ \Omega$ , 其中 A、C 两相跨越  $9\ \Omega$  电阻时, 由 5.24% 到 0.14%。0.25%、0.27%、0.14% 均符合了国际电工委员会所建议的电力系统三相电压不平衡度 2%, 使电网能安全稳定运行。从而验证了无正负序分离电压控制模式的序阻抗模型的有效性。结合图 5 可以分析出: 无正负序分离电压控制模式下, 三相离网逆变器的等效负

序阻抗在基频时较小, 当不平衡负载产生的负序电流流过, 产生的压降也很小, 所以可以使三相离网逆变器的输出电压基本保持平衡。

## 4 结论

三相离网逆变器中, 易发生三相负载不平衡引起的电压不平衡问题。对此, 为了分析改善电压不平衡问题, 本文建立了三相离网逆变器的正、负序阻抗模型, 从序阻抗的角度清晰直观地分析了不平衡负载条件下逆变器的阻抗特性, 并在传统双闭环控制方法的基础上, 采用已有的一种逆变器电压控制策略, 可达到基本保持电压稳定的效果。经本文研究后, 得到如下结论:

1) 与经过含有锁相环的并网三相逆变器控制不同, 本文所提三相离网逆变器取消了锁相环, 使得输出阻抗特性不受运行工况的影响;

2) 本文分析改善不平衡负载所导致的电压不平衡问题, 与常见的电压补偿方式不同, 本文是通过控制方法使三相离网逆变器的等效输出正、负序阻抗在基波频率下降至很小, 使得不平衡负载所产生的负序电流分量经过逆变器等效输出正、负序阻抗时产生的电压降落极小, 从而达到基本保持输出电压稳定的效果;

3) 因为过多的正负序旋转坐标变换将加重控制器的运算量, 若在电压外环控制的双同步旋转坐标系变换中, 不进行正负序分量分离, 就可以使控制器的运算量由繁变简, 并且还可以极大地简化系统控制结构。

## 参考文献

- [1] GUO W, MU L. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 56-62. DOI: 10.1186/s41601-016-0019-8.
- [2] HAIDER S, LI G, WANG K. A dual control strategy for power sharing improvement in islanded mode of AC microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 111-118. DOI: 10.1186/s41601-018-0084-2.
- [3] 王成山, 高菲, 李鹏, 等. 低压微网控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 2-8. WANG Chengshan, GAO Fei, LI Peng, et al. Control strategy research on low voltage microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 2-8.
- [4] 黄杏, 金新民. 微网用分布式电源变流器下垂特性控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 93-100. HUANG Xing, JIN Xinmin. A voltage and frequency droop control method for microsources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 93-100.
- [5] 王逸超. 微网逆变器并联及电能质量主动控制方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015. WANG Yichao. Research on parallel control strategy and

- power quality active control strategy of inverters in microgrid[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [6] 魏学良, 戴珂, 谢斌, 等. 不平衡负载下并联有源电力滤波器的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(24): 64-69.  
WEI Xueliang, DAI Ke, XIE Bin, et al. Control scheme for three-phase three-wire shunt active power filter with unbalanced loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(24): 64-69.
- [7] 陈琪蕾, 范忻蓉, 张沛超, 等. 变型分布式电源的灵活正负序电流控制方法与等值序网模型[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 57-62.  
CHEN Qilei, FAN Xinrong, ZHANG Peichao, et al. Flexible positive and negative sequence current control strategy and equivalent sequence network model of inverter interfaced distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 57-62.
- [8] 朱永强, 王腾飞. 应用于 DSTATCOM 的负序电流优先补偿策略[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 106-110.  
ZHU Yongqiang, WANG Tengfei. A negative sequence current preferred compensation strategy applied in DSTATCOM[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 106-110.
- [9] 周建萍, 王涛, 张纬舟, 等. 基于 FOGI 的微网不平衡负载补偿策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 11-17.  
ZHOU Jianping, WANG Tao, ZHANG Weizhou, et al. Research on compensation strategy of unbalanced load of microgrid based on FOGI[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 11-17.
- [10] 韦徵, 茹心芹, 石伟, 等. 适用于不平衡负载工况下的微网逆变器控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 76-82.  
WEI Zheng, RU Xinqin, SHI Wei, et al. Control strategy for microgrid inverter under unbalanced load conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 76-82.
- [11] 傅军栋, 喻勇, 黄来福. 不平衡负载的一种更加经济的补偿方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 126-132.  
FU Jundong, YU Yong, HUANG Laifu. A more economical compensation method for unbalanced load[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 126-132.
- [12] 顾和荣, 王德玉, 沈虹, 等. 三相四桥臂逆变器控制技术[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 41-46.  
GU Herong, WANG Deyu, SHEN Hong, et al. Research on control scheme of three-phase four-leg inverter[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 41-46.
- [13] 邓文浪, 杨欣荣, 朱建林. 不平衡负载情况下基于双序 dq 坐标系双级矩阵变换器的闭环控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 70-75.  
DENG Wenlang, YANG Xinrong, ZHU Jianlin. Study of closed loop control based on double synchronous rotating frame for two-stage matrix converter under unbalanced load[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 70-75.
- [14] 王恒利, 付立军, 肖飞, 等. 三相逆变器不平衡负载条件下双环控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 398-404.  
WANG Hengli, FU Lijun, XIAO Fei, et al. A double-loop control strategy for three-phase inverter with unbalanced load[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 398-404.
- [15] CESPEDES M, SUN J. Impedance modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1254-1261.
- [16] 刘晓东, 胡勇, 方炜, 等. 直流微电网节点阻抗特性与系统稳定性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3463-3469.  
LIU Xiaodong, HU Yong, FANG Wei, et al. Analysis of node impedance characteristics and stability in DC microgrids[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3463-3469.
- [17] 杨洪雨. 双馈异步发电机系统阻抗建模及稳定性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.  
YANG Hongyu. The impedance modeling and stability analysis of doubly fed induction generator system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [18] 周啸, 金新民, 唐芬, 等. 三相四桥臂微网变流器在离网不平衡负载下的控制策略及其实现[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(19): 24-31.  
ZHOU Xiao, JIN Xinmin, TANG Fen, et al. Islanded-mode control and implementation of a three-phase four-leg based microgrid converter under unbalanced load conditions[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 24-31.
- [19] 王赟程, 陈新, 张昉, 等. 三相并网逆变器锁相环频率特性分析及其稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3843-3853.  
WANG Yuncheng, CHEN Xin, ZHANG Yang, et al. Frequency characteristics analysis and stability research of phase locked loop for three-phase grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3843-3853.
- [20] 王赟程, 陈新, 陈杰, 等. 基于谐波线性化的三相 LCL 型并网逆变器正负序阻抗建模分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5890-5898.  
WANG Yicheng, CHEN Xin, CHEN Jie, et al. Analysis of positive-sequence and negative-sequence impedance modeling of three-phase LCL-type grid-connected inverters based on harmonic linearization[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5890-5898.
- [21] 王逸超, 罗安, 金国彬. 微网逆变器的不平衡电压补偿策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4956-4964.  
WANG Yichao, LUO An, JIN Guobin. An unbalanced voltage compensation method for parallel inverters in microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4956-4964.
- [22] 伍文华, 陈燕东, 周乐明, 等. 虚拟同步发电机接入弱电网的序阻抗建模与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1560-1571.  
WU Wenhua, CHEN Yandong, ZHOU Leming, et al. Sequence impedance modeling and stability analysis for virtual synchronous generator connected to the weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1560-1571.

收稿日期: 2019-07-20; 修回日期: 2019-09-04

作者简介:

骆坚(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子阻抗测量装备研制; E-mail: ljmaster1@163.com

陈燕东(1979—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为微电网运行与电能质量调节。E-mail: yandong\_chen@hnu.edu.cn

(编辑 姜新丽)