

不平衡工况下电网电压序分量快速提取方法

熊连松^{1,2}, 修连成³, 康志亮³, 宋汉梁¹, 刘 娣¹, 许 昭²

(1. 南京工程学院自动化学院, 江苏省南京市 211167; 2. 香港理工大学电机工程系, 香港 999077;

3. 四川农业大学机电学院, 四川省雅安市 625000)

摘要: 快速准确地获取三相不平衡电网电压的序分量(即正、负、零序分量)是实现高性能并网逆变器控制的基本要求。文中提出了一种实用的瞬时序分量提取方法,可提高不平衡电网电压序分量的提取速度。首先,使用虚拟正交信号构建法和单相锁相运算获得虚拟三相电压相量,之后利用对称分量法和单相锁相逆运算,即可快速获得序分量的幅值和实时相位。该方法仅需电网电压及其虚拟正交信号,即可直接获得瞬时电压序分量,无需闭环检测方法中的参数设计和调试过程,且计算精度能够满足工程要求。通过 MATLAB/Simulink 实时仿真平台验证了该方法的正确性。

关键词: 不平衡电网; 序分量; 对称分量法; 坐标变换; 虚拟正交信号

0 引言

三相电压不平衡是一种常见的电力系统运行工况,会对并网逆变器系统的稳定运行造成很大的影响。只有快速准确地获得不平衡电网电压的序分量,才能保证并网逆变器系统稳定运行^[1-2]。所以,研究快速准确的电网电压序分量检测方法具有重要的现实意义。目前的不平衡电网电压序分量检测技术主要包括锁相环(phase-locked loop, PLL)检测法、状态空间估计法以及坐标变换法^[3-5]。

PLL 检测法^[6-10]有单同步坐标系软 PLL、双同步坐标系解耦软 PLL(DDSRF-SPLL)、双广义二阶积分器 PLL(DSOGI-PLL)。其中,DDSRF-SPLL 可用于检测不平衡电压下的基波正负序分量,但是其动态过程复杂,导致暂态响应时间过长。文献[11]提出了增强型 PLL,通过改变鉴相器机制,使其具有了更好的灵活性,但是其响应时间仍然过长。文献[12]使用状态空间估计法,在卡尔曼滤波的基础上对电网电压的幅值和相位进行估计,但是该方法计算复杂,不能满足实际需要。坐标变换法主要包括无时延的 dq 和 $\alpha\beta$ 变换法^[13-17]。该类方法可以准确地检测出三相不平衡电网电压的序分量,但构造虚拟正交电压信号是该类方法的难点。

常用的构造虚拟正交信号方法主要有延时法^[18]和一阶差分法。前者通过将三相不平衡电网电压信号延时 $1/4$ 周期得到其虚拟正交信号。显然,该方法的动态响应慢。一阶差分法克服了延时法在响应速度上的不足,如文献[19]使用 $\alpha\beta$ 变换检测法利用差分方程从采样电压获得虚拟正交电压,但此方法是近似拟合不平衡电网电压的正交信号,采样周期 ΔT 减小则会放大噪声信号, ΔT 增大则误差也会越大。为了解决上述问题,文献[20-21]通过三角变换,得到一种三角函数虚拟正交信号构造方法,实现快速准确获得电网电压的实时正交信号。

本文提出的序分量快速提取方法,仅需要实际电网电压及其虚拟正交信号,即可直接获得不平衡电网电压的序分量。当电网频率在国家标准允许的限值内波动时,该方法无需实时更新电网频率,即可迅速地获取电网电压的序分量。

1 电网电压序分量的构造方案

1.1 电压序分量构造方法

不平衡电网电压序分量检测方法如图 1 所示。其中, U_w 与 θ_w ($w=a, b, c$) 分别为电网电压 w 相的幅值和初始相位; $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ 分别为 a, b, c 相不平衡电压的相量表达式; T^+, T^-, T^0 分别为序分量变换矩阵; $\dot{U}_a^s, \dot{U}_b^s, \dot{U}_c^s$ 分别为三相不平衡电压序分量的相量表达式,其中 s 取 $+, -, 0$; U^+, U^-, U^0 分别为瞬时的正、负、零序电压分量; φ 表示序分量的初始相位, $\varphi = \theta, \delta, \gamma$, 其中 θ, δ, γ 分别表示正、负、零序分量的初始相位。

收稿日期: 2018-10-10; 修回日期: 2019-02-11。

上网日期: 2019-04-11。

国家自然科学基金资助项目(51707091); 江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心开放基金资助项目(XTCX201711)。

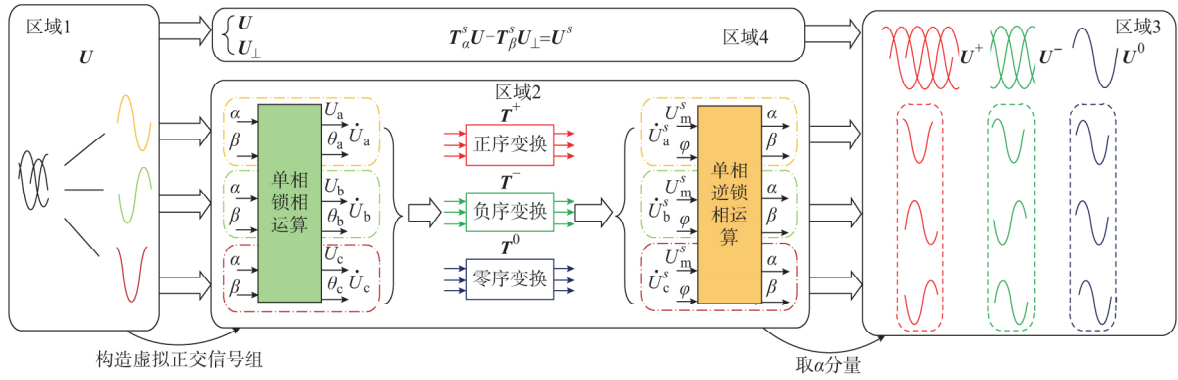


图1 不平衡电网电压序分量快速提取方案

Fig. 1 Fast extraction scheme of voltage sequence components in unbalanced power system

首先,将三相不平衡的电网电压(U)作为相互独立的3个单相电压,如图1中区域1所示。构造单相电压 α 的虚拟正交分量 β ,然后将3组信号分别进行单相锁相运算即可获得3组独立单相电压的幅值(U_w)和相位(θ_w),进而获得三相不平衡电网电压的相量表达式($\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$)。采用对称分量法对不平衡电网电压的相量表达式进行正、负、零序变换(T^+, T^-, T^0),从而得到三相不平衡电网电压中正、负、零序分量的相量表达式($\dot{U}_a^s, \dot{U}_b^s, \dot{U}_c^s$),如图1中区域2所示。随后,将上述对应序分量的相量表达式($\dot{U}_a^s, \dot{U}_b^s, \dot{U}_c^s$),分别进行单相逆锁相运算,所得结果中 α 分量就是不平衡电网电压对应序分量的时域表达式(U^+, U^-, U^0),如图1中区域3所示。最后,综合以上步骤推导出可以直接获得序分量的计算公式,如图1中区域4所示。该算法只需要三相不平衡电网电压 α 及其虚拟正交分量 β ,即可直接计算三相不平衡电网电压的序分量。若不考虑谐波因素,该方法可实现瞬时获取,减少了不平衡环境下的电网电压序分量获取时间。

根据对称分量法可知,三相不平衡电网电压可用下式表达:

$$U = U^+ + U^- + U^0 \quad (1)$$

根据式(1),三相不平衡电网电压的正、负、零序分量可以分别表示为:

$$U^+ = \begin{bmatrix} u_a^+(t) \\ u_b^+(t) \\ u_c^+(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m^+ \sin(\omega t + \theta) \\ U_m^+ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta) \\ U_m^+ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$U^- = \begin{bmatrix} u_a^-(t) \\ u_b^-(t) \\ u_c^-(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m^- \sin(\omega t + \delta) \\ U_m^- \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \delta) \\ U_m^- \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \delta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$U^0 = \begin{bmatrix} u_a^0(t) \\ u_b^0(t) \\ u_c^0(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m^0 \sin(\omega t + \gamma) \\ U_m^0 \sin(\omega t + \gamma) \\ U_m^0 \sin(\omega t + \gamma) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: ω 为不平衡电网电压角频率; u_a^s, u_b^s, u_c^s 分别为序分量的三相电压时域表达式; U_m^+, U_m^-, U_m^0 分别为三相不平衡电网电压正、负、零序分量的幅值。

式(1)可以改写为:

$$U = \begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_a \sin(\omega t + \theta_a) \\ U_b \sin(\omega t + \theta_b) \\ U_c \sin(\omega t + \theta_c) \end{bmatrix} \quad (5)$$

图1中区域4的数学公式推导如下。

根据对称分量法可得^[22]:

$$\dot{U}_v^s = T^s \dot{U}_v \quad (6)$$

式中: $\dot{U}_v$ 和 $\dot{U}_v^s$ 分别为虚拟三相不平衡电网电压和虚拟电压序分量。显然有

$$T^+ = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \quad T^- = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ a^2 & a & 1 \\ a & 1 & a^2 \end{bmatrix}$$

$$T^0 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad a = e^{\frac{j2\pi}{3}}$$

根据对称分量法原理可知,首先需要构造不平衡电网电压的相量形式^[23]。因此,在两相静止坐标系中虚拟不平衡电网电压和虚拟序分量的旋转相量分别为:

$$\dot{U}_v = U_a - jU_\beta \quad (7)$$

$$\dot{U}_v^s = U_a^s - jU_\beta^s \quad (8)$$

式中: U_a 和 U_β 分别为虚拟电网电压相量的 α 轴和 β 轴分量; U_a^s 和 U_β^s 分别为虚拟序分量的 α 轴和 β 轴分量。

单相锁相运算方法的使用需要一组正交信号。因此,本文使用单相锁相运算的 α 轴和 β 轴分量为

采集到的实时不平衡电网电压和其虚拟正交信号, 即可得:

$$U_a = U \quad (9)$$

$$U_a^s = U^s = \begin{bmatrix} u_a^s(t) \\ u_b^s(t) \\ u_c^s(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$U_\beta = U_\perp = \begin{bmatrix} u_{a\perp}(t) \\ u_{b\perp}(t) \\ u_{c\perp}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_a \cos(\omega t + \theta_a) \\ U_b \cos(\omega t + \theta_b) \\ U_c \cos(\omega t + \theta_c) \end{bmatrix} \quad (11)$$

因此, 根据上述构造规则可以构造出正、负、零序电压的虚拟正交信号, 得:

$$U_\beta^+ = U_\perp^+ = \begin{bmatrix} u_{a\perp}^+(t) \\ u_{b\perp}^+(t) \\ u_{c\perp}^+(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m^+ \cos(\omega t + \theta) \\ U_m^+ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta) \\ U_m^+ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$U_\beta^- = U_\perp^- = \begin{bmatrix} u_{a\perp}^-(t) \\ u_{b\perp}^-(t) \\ u_{c\perp}^-(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m^- \cos(\omega t + \delta) \\ U_m^- \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \delta) \\ U_m^- \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \delta) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$U_\beta^0 = U_\perp^0 = \begin{bmatrix} u_{a\perp}^0(t) \\ u_{b\perp}^0(t) \\ u_{c\perp}^0(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m^0 \cos(\omega t + \gamma) \\ U_m^0 \cos(\omega t + \gamma) \\ U_m^0 \cos(\omega t + \gamma) \end{bmatrix} \quad (14)$$

由式(9)~式(14), 可将式(7)和式(8)改写为:

$$\dot{U}_v = U - jU_\perp \quad (15)$$

$$\dot{U}_v^s = U^s - jU_\perp^s \quad (16)$$

将式(15)、式(16)代入式(6), 随后取其实部, 即可得到正、负、零序电压分量:

$$U^+ = T_a^+ U - T_\beta^+ U_\perp \quad (17)$$

$$U^- = T_a^- U - T_\beta^- U_\perp \quad (18)$$

$$U^0 = T_a^0 U - T_\beta^0 U_\perp \quad (19)$$

其中

$$T_a^+ = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad T_\beta^+ = \frac{\sqrt{3}}{6} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\lim_{\Delta T \rightarrow 0} A = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{u_\beta''(k)}{u_\beta'(k)} = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{(u_a(k) \cos(\omega_0 \Delta T) - u_a(k-1)) \sin((\omega_0 + \Delta\omega) \Delta T)}{\sin(\omega_0 \Delta T) (u_a(k) \cos((\omega_0 + \Delta\omega) \Delta T) - u_a(k-1))} \approx \frac{(u_a(k) - u_a(k-1))(\omega_0 + \Delta\omega) \Delta T}{\omega_0 \Delta T (u_a(k) - u_a(k-1))} = \frac{\omega_0 + \Delta\omega}{\omega_0} = 1 + \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = 1 + \frac{\Delta f}{f_0} \quad (23)$$

$$T_a^- = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad T_\beta^- = \frac{\sqrt{3}}{6} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_a^0 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad T_\beta^0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

1.2 三角函数虚拟正交信号

使用式(17)、式(18)和式(19)计算三相电网电压的正、负、零序分量时, 本方法需要获得实时的电网电压正交分量。本文利用三角函数虚拟正交信号构造方法, 实现低采样率时准确构造虚拟正交信号, 计算公式为:

$$u_\beta(k) = \frac{u_a(k) \cos(\omega \Delta T) - u_a(k-1)}{\sin(\omega \Delta T)} \quad (20)$$

式中: $u_a(k)$ 和 $u_\beta(k)$ 分别为第 k 次采样电压的实际电压信号和其虚拟正交信号。

根据式(20)可知, 三角函数虚拟正交信号构造方法将不严格依赖采样频率。此外, 与电网电压的幅值、相位变化规律不同, 电网频率是全局物理量, 不能发生大范围的变化^[24]。根据国家电网运行规则要求, 电网频率的变化范围在 49.8~50.2 Hz 之内。因此, 在上述频率运行范围内, 使用电网同步频率进行虚拟正交信号计算将不会产生明显误差。其中, 北美国家的电网同步频率为 60 Hz, 中国以及欧亚等国家的电网同步频率为 50 Hz。

根据式(20)可知, 使用电网同步频率替代实际电网频率计算虚拟正交信号时将产生误差。实际的电网频率下, 虚拟正交分量为:

$$u_\beta'(k) = \frac{u_a(k) \cos((\omega_0 + \Delta\omega) \Delta T) - u_a(k-1)}{\sin((\omega_0 + \Delta\omega) \Delta T)} \quad (21)$$

式中: ω_0 为固定的旋转角频率, 即电网同步角频率; $\Delta\omega$ 为实际的电网角频率与固定的旋转角频率之间的偏差。

根据式(20), 在固定的旋转频率下, 虚拟正交分量为:

$$u_\beta''(k) = \frac{u_a(k) \cos(\omega_0 \Delta T) - u_a(k-1)}{\sin(\omega_0 \Delta T)} \quad (22)$$

由式(21)、式(22), 可得到式(23)。

式中: f_0 为固定的旋转频率,即电网同步频率; Δf 为实际的电网频率与固定的旋转频率之间的偏差。

式(23)表明,误差主要来自固定旋转频率与实际电网频率之间的差值;两者之间的差值越小,则使用固定旋转频率计算虚拟正交信号时产生的误差也越小。当电网频率运行在国家标准限值范围内时,采用固定旋转频率计算虚拟正交信号时产生的误差不超过 0.4% (采样频率大于 6 kHz)。因此,在精度要求不高时,可以采用固定的旋转频率代替实际的电网频率进行实时计算。根据式(23)可知,三角函数虚拟正交信号构造方法使用实际的电网频率就可以避免产生误差。因此,当稳态精度要求特别高时,三角函数虚拟正交信号构造方法需利用频率检测环节^[25]来实时更新式(20)中的频率信息,以实现虚拟正交信号的高精度计算。

2 序分量的同步相位和幅值计算方法

三相不平衡电网电压的正序 abc/dq 坐标变换公式可以用式(24)表示。

$$\begin{bmatrix} U_d^+ \\ U_q^+ \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{abc/dq}^+(\omega t) \begin{bmatrix} u_a^+(t) \\ u_b^+(t) \\ u_c^+(t) \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\mathbf{T}_{abc/dq}^+(\omega t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (25)$$

式(17)获得不平衡电网电压的正序分量,将其代入式(24)进行旋转坐标变换,得到:

$$\begin{cases} U_d^+ = U_m^+ \cos \theta \\ U_q^+ = U_m^+ \sin \theta \end{cases} \quad (26)$$

三相不平衡电网电压的负序坐标变换公式为:

$$\begin{bmatrix} U_d^- \\ U_q^- \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{abc/dq}^-(\omega t) \begin{bmatrix} u_a^-(t) \\ u_b^-(t) \\ u_c^-(t) \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\mathbf{T}_{abc/dq}^-(\omega t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (28)$$

根据式(18)获得不平衡电网电压负序分量,将其代入式(27)进行同步旋转坐标变换(abc/dq),即可得:

$$\begin{cases} U_d^- = U_m^- \cos \delta \\ U_q^- = U_m^- \sin \delta \end{cases} \quad (29)$$

根据式(9)、式(11)可知,零序分量需要构造虚拟正交信号。将式(19)所示的电网零序分量和零序分量的虚拟正交信号进行零序同步旋转坐标变换($\alpha\beta/dq$),即

$$\begin{bmatrix} U_d^0 \\ U_q^0 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{\alpha\beta/dq}^0(\omega t) \begin{bmatrix} u_\alpha^0(t) \\ u_\beta^0(t) \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\mathbf{T}_{\alpha\beta/dq}^0(\omega t) = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \end{bmatrix} \quad (31)$$

将式(19)的零序分量代入式(30)进行零序坐标变换,得:

$$\begin{cases} U_d^0 = U_m^0 \cos \gamma \\ U_q^0 = U_m^0 \sin \gamma \end{cases} \quad (32)$$

假设初始相位 $\theta, \delta, \gamma \in [0, 2\pi)$ 。当 U_q^s 和 U_d^s 同时为零时,同步相位不存在。因此,式(26)、式(29)和式(32)获得三相不平衡电网电压正、负、零序分量的同步相位为:

$$\begin{aligned} \phi^s &= \omega t + \varphi = \omega t + \arctan\left(\frac{U_q^s}{U_d^s}\right) + \theta_{ex}^s \\ |U_d^s| + |U_q^s| &\neq 0 \end{aligned} \quad (33)$$

式中:

$$\theta_{ex}^s = \begin{cases} 0 & U_d^s > 0, U_q^s > 0 \\ 0 & U_q^s = 0 \\ 0 & U_d^s = 0, U_q^s > 0 \\ \pi & U_d^s < 0, U_q^s \neq 0 \\ \pi & U_d^s = 0, U_q^s < 0 \\ 2\pi & U_d^s > 0, U_q^s < 0 \end{cases}$$

三相不平衡电网电压序分量的幅值为:

$$U_m^s = \sqrt{(U_d^s)^2 + (U_q^s)^2} \quad (34)$$

因此,将式(17)、式(18)、式(19)分别经过式(24)、式(27)、式(30)坐标变换后代入式(33)、式(34)就可以获得电网电压正、负、零序分量的同步相位和幅值。

综上所述,本文方法的整体流程如图 2 所示。当电网频率在国家标准允许的限值范围内波动时,本文方法使用固定的旋转频率实现快速准确提取不平衡电网电压序分量,无需实时更新电网频率,同时也可获得三相不平衡电压序分量的同步相位和幅值。当三相不平衡电压含有谐波时,可在旋转坐标系下加入谐波消除算法,即可有效解决谐波问题。现今比较常用的谐波消除算法包括延时信号消除法(delayed signal cancellation, DSC)以及滑动平均滤波(moving average filter, MAF)方法。这两种算法均可以解决电压谐波的影响^[26-27]。

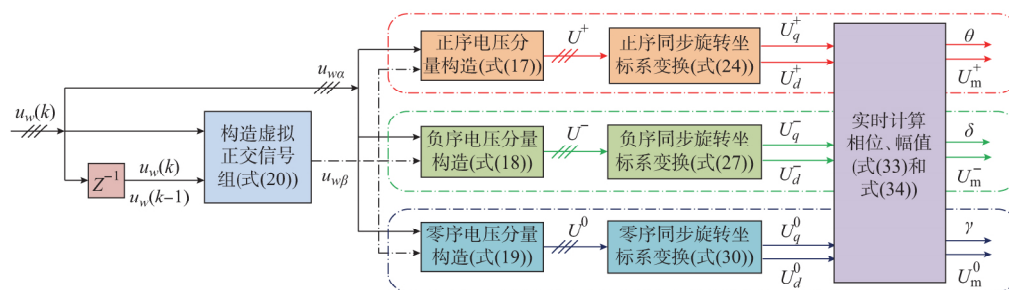


图2 不平衡电网电压序分量提取过程

Fig. 2 Extraction process of voltage sequence components in unbalanced power system

3 仿真验证

本文使用 MATLAB/Simulink 实时仿真平台来验证不平衡电网电压序分量快速开环提取方法的正确性。首先,实时仿真平台在电网电压平衡状态下稳定运行一段时间,随后突变为三相不平衡状态。仿真实验研究了多个参数(幅值、相位以及频率)发生突变时,提取不平衡电网电压序分量的结果。各仿真实验状况下的参数如表 1 所示。MATLAB/Simulink 实时仿真平台如附录 A 图 A1 所示。

表 1 各仿真实验工况下的参数
Table 1 Parameters under each simulation condition

实验工况	U_m^+/V	$\theta/(^\circ)$	U_m^-/V	$\delta/(^\circ)$	U_m^0/V	$\gamma/(^\circ)$	f/Hz
正常运行	220	90	0	0	0	0	50.0
幅值突变	210	90	100	45	80	30	50.0
幅值、相位和频率突变	210	100	100	45	80	30	50.5

3.1 不平衡电网电压仿真实验

图 3 和图 4 为三相不平衡时电网电压的提取结果。图 3 所示为电网电压序分量幅值、负序和零序电压分量相位发生突变时,本文方法获取的不平衡环境下的电网电压序分量结果。

图 3(a)是三相电网电压波形。图 3(b)至(d)分别是本文所提方法计算出的三相不平衡电网电压的正、负、零序电压分量。由式(33)和式(34)可知,当电网负序和零序的电压分量相位都发生了改变时,负序和零序电压的 d 轴和 q 轴分量比值也发生了变化,进而负序和零序电压分量输出相位和幅值也随之变化,理论分析与仿真结果一致。同时,本方法的响应速度非常快,其输出波形的动态响应时间均小于 2 ms。因此,本文提出的方法可在不平衡电网电压下快速提取电压序分量。

图 4 所示为电网电压序分量的幅值、相位以及电网频率均发生突变时,本文所提方法获取不平衡环境下的电网电压序分量结果。图 4(a)是电网三相电压波形图。图 4(b)至(d)分别是本文所提方法计算出的不平衡电网电压的正、负、零序电压分量。

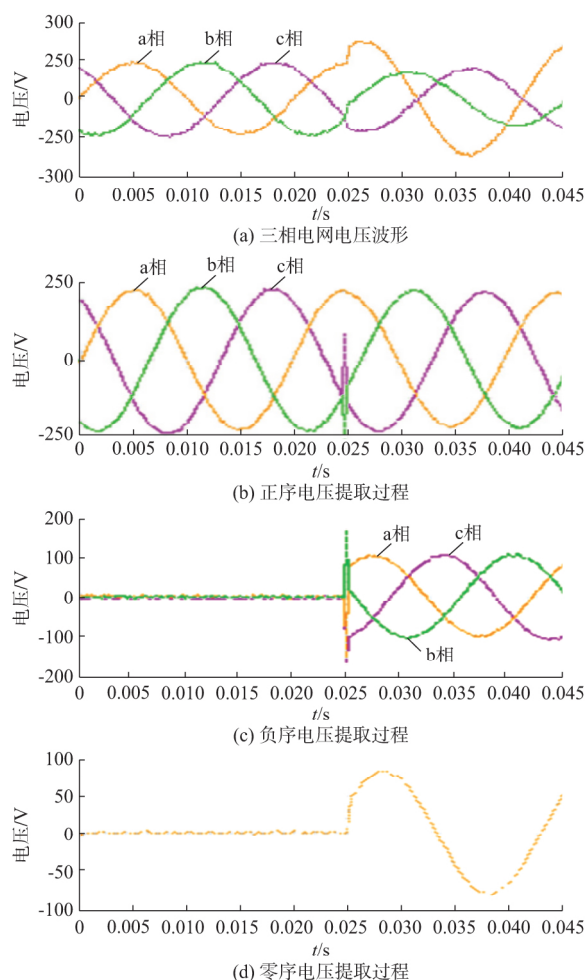


图3 单因素突变时的电网电压序分量的提取过程

Fig. 3 Extraction process of grid voltage sequence components with sudden change of single factor

由图 4(a)可知,电压序分量的相位、幅值同时发生了突变,但本文方法获取不平衡电网电压序分量的响应时间小于 2 ms。正序电压分量的同步相位在频率突变时,由于使用固定的旋转频率(50 Hz)与实际的电网频率(50.5 Hz)不一致,因此正序电压分量的 U_q^+ 和 U_d^+ 含有振荡频率为 0.5 Hz 的交流量。根据式(33)、式(34)可知,用低频振荡的

U_q^+ 和 U_d^+ 计算实时幅值、同步相位时,不会产生幅值和同步相位的误差,但使用固定的旋转频率构造虚拟正交信号时会导致微小的幅值误差、同步相位误差,从而导致最后得到的幅值和同步相位结果产生误差。

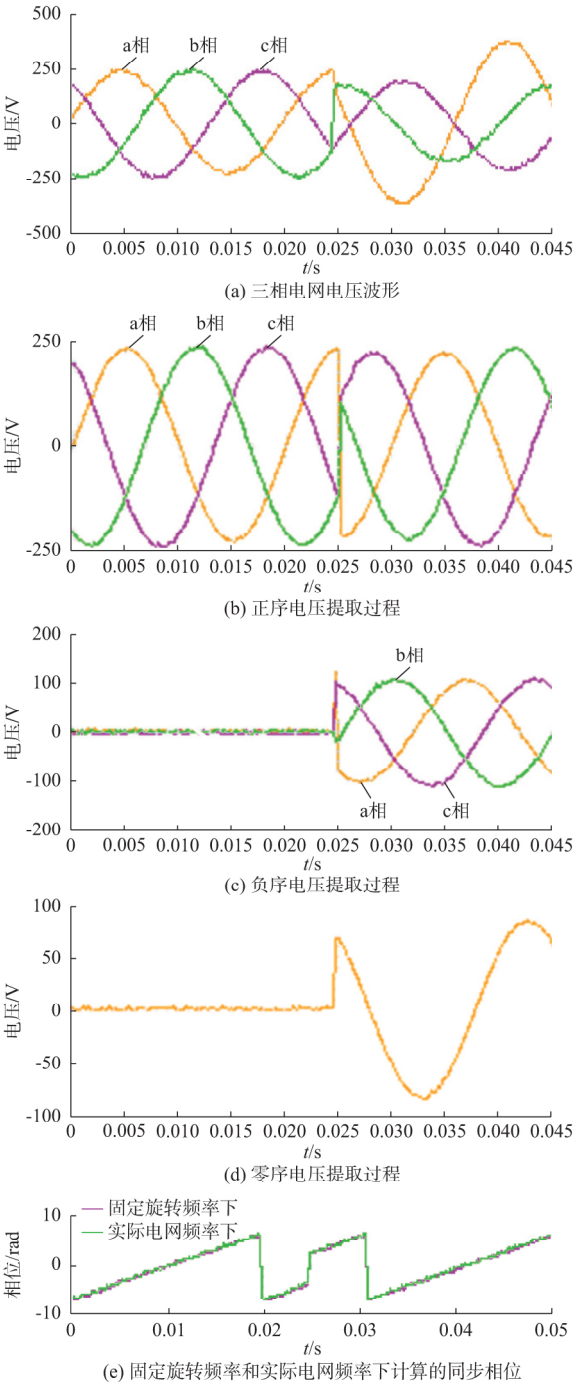


图 4 主要因素全部突变时的电网电压序分量提取过程

Fig. 4 Extraction process of grid voltage sequence components with sudden change of all main factors

图 4(e)是正序分量使用固定的旋转频率和实

际的电网频率计算虚拟正交信号后所得的同步相位对比图。由图可知,与实际电网频率计算所得的结果相比,使用固定旋转频率带来的误差并不大。因此,当电网频率运行在国家标准允许的限值内时,本文方法不用实时更新频率信息也可以获得足够精确的电网同步相位。

3.2 暂态响应时间

以提取正序分量为例,本文将所提出的方法与目前常用的 DDSRF-SPLL 和 DSOGI-FLL 算法进行了对比分析^[28-30]。各个仿真实验工况的参数如表 1 所示。幅值、相位突变工况为正序分量的幅值(210 V)和相位(100°)同时突变。各个仿真工况下的实验结果如表 2 所示。

表 2 暂态响应时间
Table 2 Transient response time

算法	响应时间/ms		
	幅值突变	幅值、相位突变	幅值、相位和频率突变
DDSRF-SPLL	<17	<31	<36
DSOGI-FLL	<15	<22	<24
本文方法	≈2	≈2	≈2

在电压不平衡环境下,3 种算法均能获得较好的动态性能。其中,DDSRF-PLL 算法结构相对复杂,导致其暂态响应时间较长。而 DSOGI-PLL 算法虽然避免了 DDSRF-PLL 的复杂性,但其暂态响应时间与算法的闭环控制参数有很强的关联性,控制参数对算法性能的影响较大。

与 DDSRF-SPLL 和 DSOGI-FLL 算法相比,本文算法在动态响应速度上的优势非常明显。电网频率在国家标准允许的限值范围内波动时,本文方法无需实时更新电网频率和闭环控制参数,因此获取序分量的速度明显快于其他两种算法。本文方法虽然在稳态精度上略差于 DDSRF-SPLL 算法以及 DSOGI-FLL 算法,但计算精度能够满足工程要求,且简单有效。

4 结语

并网逆变器安全稳定运行的先决条件是快速准确地获取不平衡电压的序分量。基于对称分量法与三角函数虚拟正交信号构造法,本文提出了一种在不平衡电压中快速准确地提取三相不平衡电网电压序分量的方法。本文方法经过数学简化后给出了直接获取序分量的计算公式,仅需要电网电压及其虚拟正交信号,即可直接获得瞬时不平衡电网电压序分量,同时也可通过公式获得序分量的同步相位和幅值。当电网频率在国家标准允许的限值范围内波动时,本文方法使用固定旋转频率代替实际的电网

频率进行计算,这不但减小了计算量,还明显缩短了动态响应时间,而且不会产生明显的误差。因此,本文提出的方法提高了不平衡电网电压序分量的获取速度,为不对称工况下的并网变流器控制提供了实时、准确的电网电压序分量信息。后续将进一步拓展该方法的应用范围,例如:电网严重畸变、严重不平衡时的并网变流器故障穿越控制。

本文研究得到“南京工程学院高层次人才科研基金(YKJ201613)”的资助,谨此致谢!

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] GUO Xiaoqiang, LIU Wenzhao, LU Zhigang. Flexible power regulation and current-limited control of the grid-connected inverter under unbalanced grid voltage faults [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7425-7432.
- [2] 何安然,侯凯,王小红,等.不对称条件下的储能虚拟同步发电机低电压穿越控制技术[J].电力系统自动化,2018,42(10):122-127.DOI:10.7500/AEPS20170605004.
HE Anran, HOU Kai, WANG Xiaohong, et al. A low voltage ride through control technique for energy storage virtual synchronous generator under asymmetric condition [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 122-127. DOI: 10.7500/AEPS20170605004.
- [3] XIONG Liansong, ZHUO Fang, WANG Feng, et al. A fast orthogonal signal-generation algorithm characterized by noise immunity and high accuracy for single-phase grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(3): 1847-1851.
- [4] WANG Liang, JIANG Qirong, HONG Lucheng, et al. A novel phase-locked loop based on frequency detector and initial phase angle detector[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(10): 4538-4549.
- [5] 张学广,付志超,陈文佳,等.弱电网下考虑锁相环影响的并网逆变器改进控制方法[J].电力系统自动化,2018,42(7):139-145. DOI:10.7500/AEPS20170623002.
ZHANG Xueguang, FU Zhichao, CHEN Wenjia, et al. An improved control method for grid-connected inverters considering impact of phase-locked loop under weak grid condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 139-145. DOI: 10.7500/AEPS20170623002.
- [6] RODRIGUEZ P, POUL J, BERGAS J, et al. Decoupled double synchronous reference frame PLL for power converters control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 584-592.
- [7] 王宝诚,伞国成,郭小强,等.分布式发电系统电网同步锁相技术[J].中国电机工程学报,2013,33(1):50-55.
WANG Baocheng, SAN Guocheng, GUO Xiaoqiang, et al. Grid synchronization and PLL for distributed power generation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 50-55.
- [8] 文武松,张颖超,王璐,等.解耦双同步坐标系下单相锁相技术[J].电力系统自动化,2016,40(20):114-120.
WEN Wusong, ZHANG Yingchao, WANG Lu, et al. Phase-locked loop technology for single-phase system in decoupled double synchronous reference frame[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 114-120.
- [9] 张崇巍,张兴.PWM整流器及其控制[M].北京:机械工业出版社,2003.
ZHANG Chongwei, ZHANG Xing. PWM rectifier and its control[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [10] 周皓,董朝南,刘宝其,等.电网不平衡条件下的光伏并网发电控制策略[J].电力系统自动化,2015,39(12):27-32.
ZHOU Hao, TONG Chaonan, LIU Baoqi, et al. A control strategy for grid-connected photovoltaic system under unbalanced voltages [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 27-32.
- [11] KARIMI-GHARTEMANI M, IRAVANI M R. A method for synchronization of power electronic converters in polluted and variable-frequency environments [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1263-1270.
- [12] HUANG C H, LEE C H, SHIH K J, et al. Frequency estimation of distorted power system signals using a robust algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1): 41-51.
- [13] FILHO R S, SEIXAS P F, CORTIZO P C, et al. Comparison of three single-phase PLL algorithms for UPS applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(8): 2923-2932.
- [14] 张勋,刘汝峰,王婷,等.一种基于双同步坐标变换的开环锁相方法[J].电工技术学报,2016,31(12):184-192.
ZHANG Xun, LIU Rufeng, WANG Ting, et al. An open-loop synchronization method based on double synchronous coordinate transformation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(12): 184-192.
- [15] 周海亮,万健如,李树超,等.电压畸变和不平衡状态下无锁相环UPQC补偿量检测方法[J].电力自动化设备,2012,32(5):50-56.
ZHOU Hailiang, WAN Jianru, LI Shuchao, et al. Compensation detection for UPQC without PLL under voltage distortion and unbalance [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 50-56.
- [16] 刘桂英,栗时平,秦志清.基于多倍频旋转坐标正交变换的三相四线制电路谐波检测方法[J].电网技术,2010,34(7):87-93.
LIU Guiying, SU Shiping, QIN Zhiqing. A new harmonic detection method for three-phase four-wire system based on orthogonal transformation of multi-frequency rotating coordinate[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 87-93.
- [17] 雷芸,肖岚,郑昕昕.不平衡电网下无锁相环三相并网逆变器控制策略[J].中国电机工程学报,2015,35(18):4744-4752.
LEI Yun, XIAO Lan, ZHENG Xinxin. Control strategies of three-phase grid-connected inverters without phase-lock loop under unbalanced grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4744-4752.
- [18] 蒋辰晖.不对称电网电压下基于正负序分量检测风电换流器控制策略[J].电网与清洁能源,2016,32(1):89-94.
JIANG Chenhui. Control strategy of wind power converter based on negative sequence component detection under asymmetric grid voltage[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(1): 89-94.
- [19] LUO An, CHEN Yandong, SHUAI Zhikang, et al. An

- improved reactive current detection and power control method for single-phase photovoltaic grid-connected DG system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(4): 823-831.
- [20] 熊连松,卓放,祝明华,等.单相电力信号同步相位的快速捕获方法研究[J].中国电机工程学报,2015,35(9):2209-2216.
XIONG Liansong, ZHUO Fang, ZHU Minghua, et al. Research on fast phase synchronization in single-phase power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2209-2216.
- [21] XIONG Liansong, ZHUO Fang, WANG Feng, et al. A novel fast open-loop phase locking scheme based on synchronous reference frame for three-phase non-ideal power grids[J]. Journal of Power Electronics, 2016, 16(4): 1513-1525.
- [22] 潘文霞,刘明洋,张艺博,等.单相接地故障下双馈感应发电机短路电流计算[J].太阳能学报,2018,39(1):180-185.
PAN Wenxia, LIU Mingyang, ZHANG Yibo, et al. Calculation of short-circuit current of DFIG under single-phase to ground fault[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2018, 39(1): 180-185.
- [23] 李希年,庞清乐,孙静.基于瞬时对称分量变换的单相电压暂降检测[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(1):76-80.
LI Xinian, PANG Qingle, SUN Jing. Detection of single-phase voltage sag based on instantaneous symmetrical component transform[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2018, 30(1): 76-80.
- [24] 孙晓强,程松,刘鑫,等.西北送端大电网频率特性试验方法[J].电力系统自动化,2018,42(2):148-153. DOI: 10.7500/AEPS20170418006.
SUN Xiaoliang, CHENG Song, LIU Xin, et al. Test method for frequency characteristics of Northwest sending-end power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 148-153. DOI: 10.7500/AEPS20170418006.
- [25] LEE K J, LEE J P, SHIN D, et al. A novel grid synchronization PLL method based on adaptive low-pass notch filter for grid-connected PCS[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(1): 292-301.
- [26] WANG L, JIANG J R, HONG L, et al. A novel phase-locked loop based on frequency detector and initial phase angle-detector[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(10): 4538-4549.
- [27] XIONG Liansong, ZHUO Fang, WANG Feng, et al. A quantitative evaluation and comparison of harmonic elimination algorithms based on moving average filter and delayed signal cancellation in phase synchronization applications[J]. Journal of Power Electronics, 2016, 16(2): 717-730.
- [28] 涂娟,汤宁平.基于改进型DSOGI-PLL的电网电压同步信号检测[J].中国电机工程学报,2016,36(9):2350-2356.
TU Juan, TANG Ningping. Synchronizing signal detection for grid voltage based on modified DSOGI-PLL[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2350-2356.
- [29] 巩冰,王科俊,马晓伟.DSOGI-PLL算法在不平衡和畸变电网电压监测中的应用[J].传感器与微系统,2015,34(1):154-156.
GONG Bing, WANG Kejun, MA Xiaowei. Application of DSOGI-PLL algorithm in unbalanced and distorted grid voltage monitoring[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(1): 154-156.
- [30] 高文森,樊艳芳,王一波.优化型DDSRF-PLL在不平衡和畸变电网电压下的仿真研究[J].可再生能源,2017,35(5):86-92.
GAO Wensen, FAN Yanfang, WANG Yibo. Simulation studies of optimized DDSRF-PLL under unbalanced and distorted grid voltage[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(5): 86-92.

熊连松(1986—),男,通信作者,博士,副教授,副研究员,主要研究方向:新能源发电、电能质量控制、电力电子化电力系统。E-mail: xiongliansong@163.com

修连成(1992—),男,硕士,主要研究方向:电力电子化电力系统、电力市场。E-mail: xiuliancheng@163.com

康志亮(1976—),男,硕士,教授,主要研究方向:农业装备、新能源发电。E-mail: kangzhiliang96@163.com

(编辑 蔡静雯)

Fast Extraction Method of Grid Voltage Sequence Components in Unbalanced Conditions

XIONG Liansong^{1,2}, XIU Liancheng³, KANG Zhiliang³, SONG Hanliang¹, LIU Di¹, XU Zhao²

(1. School of Automation, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China;

3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625000, China)

Abstract: The basic requirement for implementing high-performance grid-connected inverter control is to quickly and accurately obtain the sequence components (i.e., positive, negative and zero sequence components) of the three-phase unbalanced grid voltage. This paper proposes a practical extraction method of sequence components, and it can significantly improve the extraction speed of voltage sequence components in unbalanced grid. The method first uses the virtual quadrature signal construction method and the single-phase locked operation to obtain the virtual three-phase voltage phasor. Next, the symmetrical component method and the single-phase-locked inverse operation can be used to quickly obtain the amplitude and real-time phase of the sequence component. The method only needs the grid voltage and its virtual orthogonal signal to calculate the amplitude and phase of the voltage sequence component, and the method does not require parameter design and debugging process. Meanwhile, its calculation accuracy can meet engineering requirements. The correctness of the method is verified by MATLAB/Simulink real-time simulation platform.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51707091) and Open Research Fund of Jiangsu Collaborative Innovation Center for Smart Distribution Network (No. XTCX201711).

Key words: unbalanced power system; sequence component; symmetrical component method; coordinate transformation; virtual orthogonal signal

附录 A



图 A1 MATLAB/Simulink 实时仿真平台

Fig. A1 MATLAB/Simulink real-time simulation platform