

电网正、负序电压基波分量的提取算法在并网型逆变器控制中的应用*

张伟^{1,2}, 张继元^{1,2}, 王浩¹, 舒杰^{1†}, 丁建宁³

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 江苏省光伏科学与工程协同创新中心, 江苏 常州 213164)

摘要: 提出一种在电网三相电压不平衡的情况下, 通过三角函数运算的方法解耦不平衡电网基波正、负序电压分量。由于电网负序电压分量送入锁相环后会造锁相环的震荡, 导致锁相环输出误差大无法精确锁相。根据正序分量与负序分量之间的相角关系, 推导出提取正序分量的公式, 将该公式进行数字化处理, 将其应用于 dq 数字锁相环, 提高了 dq 锁相环在电网三相电压不平衡条件下的有效性和准确性。提出了网压前馈对逆变器控制的重要性, 分析了利用正序电压瞬时值进行前馈控制的优点。并通过实验验证了公式的有效性和控制的稳定性、可靠性。

关键词: 电网电压不平衡; 三角函数运算; 电压正序基波分量; 锁相环; 网压前馈

中图分类号: TK514

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2015.05.010

A New Method of Calculation Positive Sequence Voltage of Asymmetric Power Grid and its Application in Grid Connected Inverter

ZHANG Wei^{1,2}, ZHANG Ji-yuan^{1,2}, WANG Hao¹, SHU Jie¹, DING Jian-ning³

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Photovoltaic Science and Engineering, Jiangsu Changzhou 213164, China)

Abstract: A new method of calculation positive sequence voltage of asymmetric power grid and the application of the phase locked loop (PLL) based on dq transform is developed in this paper. Because of the negative sequence voltage component in power grid, the output of PLL is not accurate. According to the phase relationship between positive sequence and negative sequence, the trigonometric function method is proposed to extract positive sequence. This method is used in the three-phase voltage phase locked loop based on the dq synchronous reference frame transformation. The accuracy and stability of the PLL in the asymmetric power grid were improved by using this method. The importance of grid voltage feed forward for the control of the inverter was discussed. The advantages of the feed forward control by using positive sequence were analyzed. All the methods were improved in the experiments.

Key words: asymmetric power grid; trigonometric function; positive sequence; PLL; grid voltage feed-forward

0 引言

并网型逆变器是光伏并网系统中与电网进行能量传递与交换的关键设备。并网型逆变器对输出电能质量有较高的要求, 要求逆变器输出波形的总谐波因数应小于 5%, 各次谐波因数小于 3%。因此对并网型逆变器的锁相环 (Phase locked loop, PLL) 的要求是能够快速、准确地获取电网基波正序电压分

量的信息。然而, 当电网电压发生不对称故障时, 电网电压中同时会存在正、负序分量。通过对基于 dq 变换的三相锁相环的原理和性能进行分析, 采用 dq 变换的 PLL 具有低通特性, 对输入的高次谐波具有抑制作用, 但当电网电压出现不平衡故障时, 锁相环就难以准确锁相^[1]。为了实现锁相环的准确性和可靠性, 必须消除电网中负序电压分量对锁相环的影响, 采用两次 dq 变换并利用低通滤波器进行处

* 收稿日期: 2015-08-21 修订日期: 2015-09-25

基金项目: 广东省自然科学基金 (2014A030310191); 中科院佛山市合作项目 (2014HK100051); 广州市创新平台与共享项目 (201509010018)

† 通信作者: 舒杰, E-mail: shujie@ms.giec.ac.cn

理可以实现正负序分量的检测^[2-5], 相较于 dq 锁相环, 该方法需要经过两次 dq 变换, 而且需要加入低通滤波器, 锁相输出容易受滤波参数的影响。采用对称分量法的软件锁相环技术, 通过计算可以将不平衡电压中的正序分量分解出来, 对正序电压分量进行相位跟踪^[6]; 采用瞬时对称分量法, 利用瞬时值用求导法和三角函数分解法构造无延时的旋转相量, 再利用这些相量进行对称分量变换, 来获取正负序分量的瞬时值^[7]; 基于相序解耦谐振控制器的锁相环技术, 利用 SDR 控制器解耦正负序电压分量, 再进行相位跟踪^[8-9]。前馈控制广泛应用于电流跟踪控制型并网逆变器中^[10-14], 用于解耦电压对电流环的影响, 减小电流环的输出, 提高系统稳定性, 降低系统震荡的影响。

本文提出正序分量提取的方法, 根据正序分量、负序分量之间的角度关系, 采用一个一阶惯性环节产生一个延时 60° 辅助分量, 并利用矢量变换和叠加的原理, 将正序分量和负序分量分离, 然后将该算法进行数字化处理, 将其应用于基于 dq 坐标变换的数字锁相环和网压前馈控制, 并通过实验验证了算法和控制的有效性。

1 正、负序解耦算法

1.1 公式介绍

当电网运行故障时, 三相电压会变得不平衡, 除了正序分量, 电网中还存在负序和零序分量。为分析方便, 设不对称三相电压表达式:

$$\begin{cases} u_a = v^+ \cos(\omega t + \phi^+) + v^- \cos(\omega t + \phi^-) \\ u_b = v^+ \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi^+\right) + v^- \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi^-\right) \\ u_c = v^+ \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi^+\right) + v^- \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi^-\right) \end{cases} \quad (1)$$

其中: v^+ 、 v^- 分别表示正序电压分量的幅值和负序电压分量的幅值, ω 表示电网角频率。用 u_x^+ 、 u_x^- 分别表示正序电压分量和负序电压分量:

$$\begin{cases} u_a^+ = v^+ \cos(\omega t + \phi^+) \\ u_b^+ = v^+ \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi^+\right) \\ u_c^+ = v^+ \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi^+\right) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} u_a^- = v^- \cos(\omega t + \phi^-) \\ u_b^- = v^- \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi^-\right) \\ u_c^- = v^- \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi^-\right) \end{cases} \quad (3)$$

引入各分量的幅值与正序、负序电压分量相等, 相位滞后 60° 的辅助电压相量, u_{a1} 、 u_{b1} 、 u_{c1} , 其表达式:

$$\begin{cases} u_{a1} = v^+ \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{3} + \phi^+\right) + v^- \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{3} + \phi^-\right) \\ u_{b1} = v^+ \cos\left(\omega t - \pi + \phi^+\right) + v^- \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{3} + \phi^-\right) \\ u_{c1} = v^+ \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi^+\right) + v^- \cos\left(\omega t - \pi + \phi^-\right) \end{cases} \quad (4)$$

为了获得正序, 需要对辅助相量进行矢量变换, 获取一个新的相量:

$$\begin{cases} u_{a2} = u_a + u_{c1} = \sqrt{3}v^+ \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6} + \phi^+\right) \\ u_{b2} = u_b + u_{a1} = \sqrt{3}v^+ \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2} + \phi^+\right) \\ u_{c2} = u_c + u_{b1} = \sqrt{3}v^+ \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6} + \phi^+\right) \end{cases} \quad (5)$$

采用辅助相量计算正序电压分量的过程实质上也是一个滤波过程, 由式 (5) 可见, u_{a2} 、 u_{b2} 、 u_{c2} 相当于已经将电网负序电压相量进行滤波, 相应地对正序电压分量产生了 $\sqrt{3}$ 倍的增益和 $\frac{\pi}{2}$ 的相位滞后。根据三角函数运算公式, 最终的正序电压分量表达式如下所示。

$$\begin{cases} u_a^+ = \frac{1}{3}u_{a2} + \frac{2}{3}u_{c2} = v^+ \cos(\omega t + \phi^+) \\ u_b^+ = \frac{1}{3}u_{b2} + \frac{2}{3}u_{a2} = v^+ \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi^+\right) \\ u_c^+ = \frac{1}{3}u_{c2} + \frac{2}{3}u_{b2} = v^+ \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi^+\right) \end{cases} \quad (6)$$

相应地, 可以求出负序电压分量的表达式:

$$\begin{cases} u_a^- = u_a + u_a^+ = v^- \cos(\omega t + \phi^-) \\ u_b^- = u_b + u_b^+ = v^- \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi^-\right) \\ u_c^- = u_c + u_c^+ = v^- \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi^-\right) \end{cases} \quad (7)$$

根据式(4)~式(7)就可以完成不对称三相电网电压基波正负序电压分量的提取。将该公式进行数字化处理,就可以实时地检测采样所得电压信号中的正序电压分量。

1.2 原理分析

为了分析更直观,假设正、负序相量之间的初始相位差为0,则正、负序相量关系如图1所示

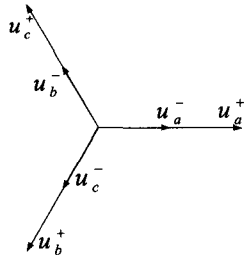


图 1 正、负序电压相量关系图
Fig. 1 Positive and negative sequence voltage phasor

由于正、负序相量之间存在耦合关系,为了分离正、负序相量,需要延时 60° 的辅助分量,图 2 中 u_{a1} 、 u_{b1} 、 u_{c1} 为延时 60° 得到的辅助相量。从向量图及式(1)、式(4)中可以看出,相量 u_a^-/u_{c1}^- 、 u_b^-/u_{a1}^- 、 u_c^-/u_{b1}^- 是三只幅值相等、方向相反的相量,利用相量运算的性质,运用公式(5)的运算,可以得到如图 3 所示幅值是正序分量的 $\sqrt{3}$ 倍、相位超前 $\frac{\pi}{6}$ 的相量。

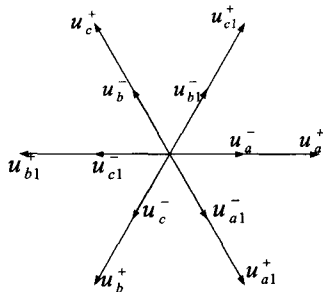


图 2 延时 60° 辅助相量
Fig. 2 Phase delay of 60°

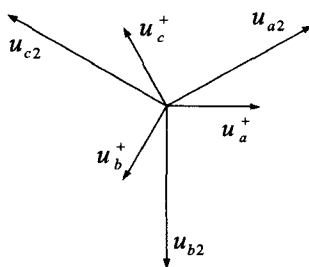


图 3 运算得到的正序相量
Fig. 3 Positive sequence superimposed phase

最后,根据三角函数的运算法则,利用式(6)和式(7)就可以将正、负序分量分离。

2 在数字锁相环中的应用

2.1 基于 dq 变换的数字锁相环分析

基于 dq 坐标变换的数字锁相环,其原理是将三相输入电压 u_a 、 u_b 、 u_c 先经过 Clarke 变换转换到两相静止坐标系 $\alpha\beta$ 中,再经过 Park 变换转换到同步旋转 dq 坐标系中,得到电压直流分量 u_d 、 u_q 。当锁相环输出相位 $\hat{\theta}$ 与 dq 坐标系旋转角度同步时,即为锁相成功,此时 u_d 等于电网电压幅值, u_q 为零。

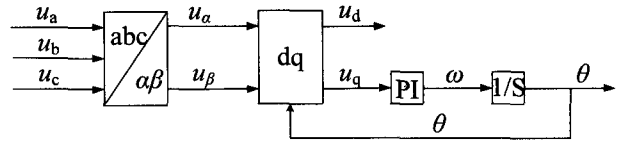


图 4 数字锁相环控制框图
Fig. 4 Block diagram of PLL

当电网三相平衡时,基于 dq 变换的数字锁相环能够精确锁相,实现锁相功能。然而当三相电压不平衡,其中含有的负序分量较大时,会引起锁相环 PI 输出的震荡,导致无法精确锁相。根据信号的叠加性,可以单独地分析负序分量对 dq 锁相环的影响。式(3)为不平衡三相电压的负序分量表达式。

Clarke 变换公式:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha}^{-} \\ u_{\beta}^{-} \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} u_a^{-} \\ u_b^{-} \\ u_c^{-} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Park 变换公式:

$$\begin{bmatrix} u_d^{-} \\ u_q^{-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \hat{\theta} & \sin \hat{\theta} \\ -\sin \hat{\theta} & \cos \hat{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\alpha}^{-} \\ u_{\beta}^{-} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, $C_{32} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$, 最终的表达式如下:

$$\begin{cases} u_d^{-} = v^{-} \cos(\omega t + \hat{\theta} + \phi^{-}) \\ u_q^{-} = -v^{-} \sin(\omega t + \hat{\theta} + \phi^{-}) \end{cases} \quad (10)$$

当锁相环跟踪上电网电压矢量正序分量的旋转角度,输出相角 $\hat{\theta} \approx \omega t$ 、 $u_d^{-} = v^{-} \cos(2\omega t + \phi^{-})$ 、

$u_q^- = -\sin(2\omega t + \phi^-)$ 。根据叠加原理，正序分量送入锁相环后，d 轴输出近似为正序分量电压幅值，q 轴输出约为零。而负序分量送入锁相环后，会在 d 轴与 q 轴分别产生一个二倍频的干扰信号，导致锁相环的输出震荡，无法准确得到电网的相位和幅值信息。因此，在使用基于 dq 变换的数字锁相环时，必须对负序分量进行滤波。

2.2 正序提取公式在锁相环中的应用

为了精确地获取电网电压基波正序分量的信息，需要将上述正序提取公式数字化，并应用于基于 dq 变换的数字锁相环中。式 (4)~ 式 (7) 进行离散化处理，其中关键是获取滞后电网电压 u_a 、 u_b 、 u_c 的辅助相量 u_{a1} 、 u_{b1} 、 u_{c1} 。为了获得滞后输入电压 60° 并且使电压频率幅值信息不失真，本文采用一个一阶惯性环节 $\frac{k}{Ts+1}$ ，根据其频域特性得

$|A| = \frac{k}{\sqrt{1+T^2\omega^2}}$ 、 $\phi = -\arctan\omega T$ ，其中 $\omega = 100\pi$ 、 $|A|=1$ 、 $\phi = 60^\circ$ ，可以求得 k 取 2、 T 取 $1/182$ ，其伯德图见图 5。

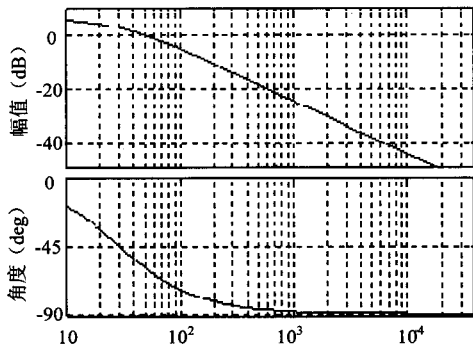


图 5 一阶惯性环节的伯德图
Fig. 5 Bode diagram of first order inertial link

当输入频率为 50 Hz 的工频电网电压信号，根据其幅频特性曲线，对其幅值响应为 0 (dB)，对其相角响应为 -60° 。由于一阶惯性环节的低通特性，使系统对于高次谐波具有一定的滤波效果，在分离基波正负序电压分量的同时，对电网中可能存在的高次谐波分量具有抑制作用，可提高锁相环的精准度。

图 6 所示为将式 (4)~ 式 (7) 进行数字化处理的控制流程图。在应用中，将采样信号通过由上述流程图构成的模块进行滤波，获取电网基波电压正序分量后送入图 4 基于 dq 变换的数字锁相环中，就可以实现在电网三相电压不平衡的情况下精确锁相。

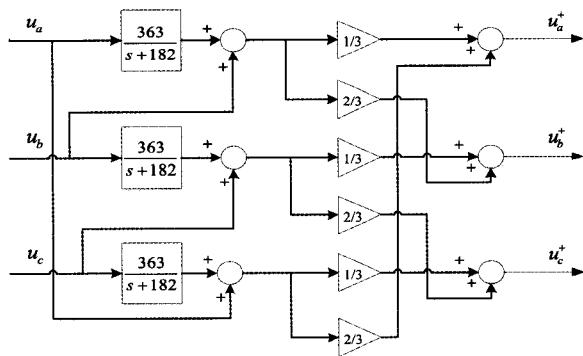
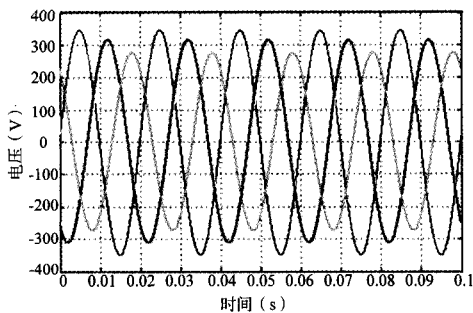
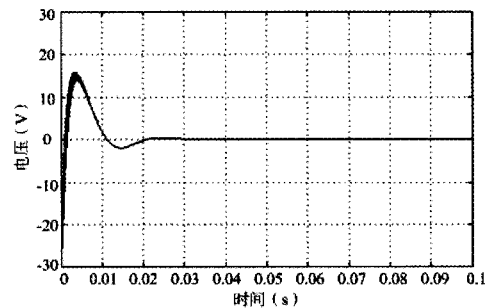


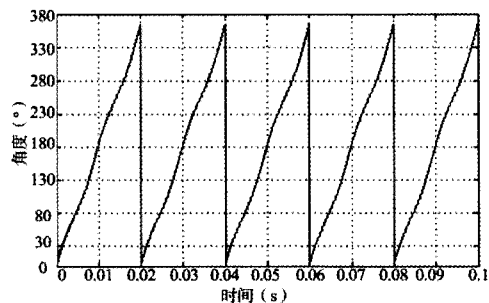
图 6 正序提取算法控制框图
Fig. 6 Block diagram of positive sequence extraction



(a) 不平衡三相电网电压



(b) 锁相环 q 轴输出



(c) 锁相环相位输出

图 7 仿真结果
Fig. 7 Simulation results

通过仿真实验，选取电网电压幅值 311 V，频率为 50 Hz，初始相位为 0° ；加入负序分量，幅值 40 V，频率为 50 Hz，初始相位为 30° 。图 7 中的结果证明了锁相环的有效性。

3 正序电网电压前馈环节

三相并网逆变器电流跟踪法控制的框图如图 8 所示,以 A 相为例,为简化模型分析忽略滤波电路中寄生电阻和滤波电容参数对电路的影响,采用 PI 控制器作为电流调节器, k_p 、 k_i 为电流调节器的比例系数和积分参数, K_{PWM} 为由逆变器输入电压和开关频率及三角载波幅值决定的一个比例系数。

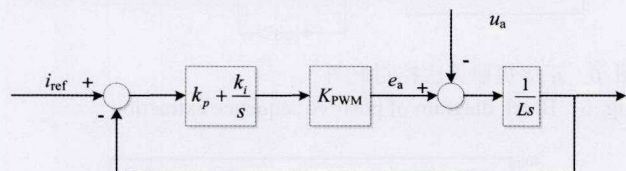


图 8 电流环框图
Fig. 8 Current loop controller

设 PI 控制器传递函数为 $G(s)$, 根据控制框图可以写出电流环的传递函数:

$$i_a = \frac{K_{PWM}G(s)}{LS + K_{PWM}G(s)} i_{ref} - \frac{K_{PWM}G(s)}{LS + K_{PWM}G(s)} u_a \quad (11)$$

由于式 (11) 中 $\left| \frac{K_{PWM}G(s)}{LS + K_{PWM}G(s)} \right| < 1$, 即输出电流略小于 i_{ref} , 系统存在稳态误差。同理式 (11) 第二项不为零, 控制环路受到电网电压的影响。由于 PI 控制器具有低通特性, 无法有效滤除电网电压中的低次谐波分量。因此采用 PI 控制器的电流环一般需要加入网压前馈环节。

采用网压前馈控制, 最直接的方式是根据电网电压的瞬时值作为前馈控制量。在理论上采用瞬时电压前馈是可行的, 并不会对控制造成负面影响。然而实际工程中, 由于 A/D 采样延时, 处理器计算周期延时等延时存在, 最后叠加在控制器输出量上的前馈值与当前电网电压值并不能保持同步。当所在电网中由于非线性负载造成接入点电压畸变的条件下, 利用瞬时网压前馈控制就会导致控制系统的不稳定, 引入大量谐波。而 PI 控制器对负序电压分量的抑制效果有限, 需要对负序电网电压进行补偿。

为了提升系统的鲁棒性, 抑制控制器的震荡, 本文采取一种权重加成的方式进行网压前馈补偿方式。如图 9 所示, 带有比例系数的前馈补偿为 $k_1 u_a^+ + k_2 u_a^-$, 其中 $k_1 + k_2 \leq 1$ 。一般情况下, 为了试验的安全性, 开始试验时, $k_1 + k_2 = 1$ 。若电网中谐波含量较大, 适当降低比例系数和网压比例, 负序分量较大时, 需要增加网压比例。

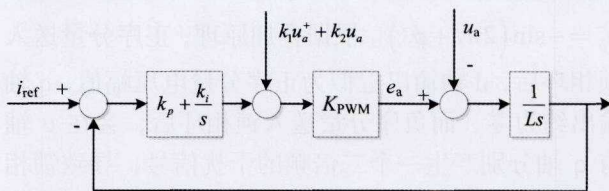
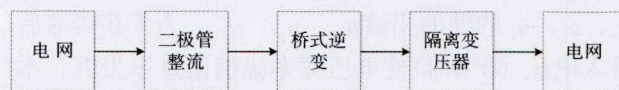


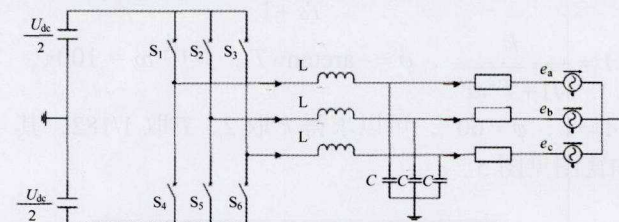
图 9 前馈电流环框图
Fig. 9 Feed-forward Current loop controller

4 试验结果分析

试验装置的结构图如图 10 所示, 采用不控二极管整流作为逆变器的输入端, 输出接三角形变星型变压器, 变比为 1 : 2, 逆变器滤波参数电感 200 mH、电容 40 μ F、额定输出功率 100 kVA。



(a) 实验装置结构示意图



(b) 拓扑结构示意图



(c) 实验装置实物图
图 10 实验装置结构图
Fig. 10 Experimental apparatus structure diagram

图 11 是上位机采集到的逆变器锁相环输出，其中电压瞬时值比实际电压放大了 4.096 倍，锁相环输出取值 [0, 192]，起始值为 144。

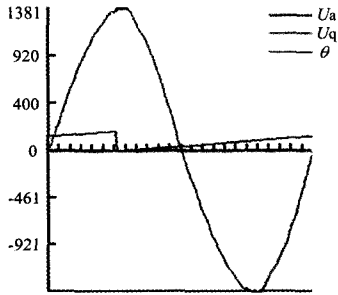


图 11 空载时锁相环输出
Fig. 11 Phase locked loop output without load

图 12 是电网电压、正序电压、前馈电压（继电器未吸合，电流环 PI 输出为 0）的比较。当电网电压谐波率较低时，三者基本重合，正序电压相位略滞于电网电压，前馈电压可以通过调整比例系数改变其输出。为了防止继电器吸合时产生电流反向对直流侧充电，一般情况下，前馈电压幅值应该与电网相近，相位略超前。

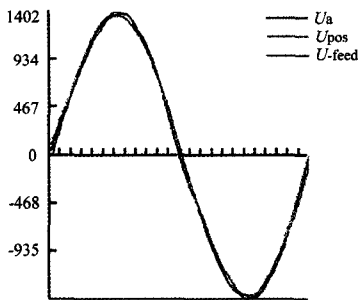


图 12 空载时前馈电压
Fig. 12 Voltage feed-forward without load

当输出功率为 60 kW 时，由于前端二极管整流器的影响，电网畸变明显，此时网侧含有大量的五七次谐波，如图 13 所示，此时锁相环仍然能够稳定工作。

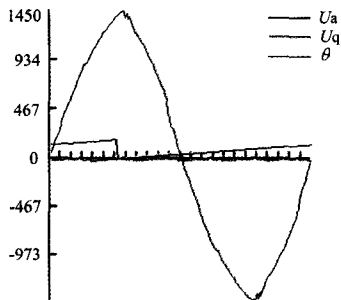


图 13 60 kW 时锁相环输出
Fig. 13 Phase locked loop output without 60 kW

U_a 与 U -feed 在继电器吸合时采样点相同，波形重合，从图 14 可以看到，当 U_a 存在明显畸变时，正序电压仍然是标准的正弦波形。

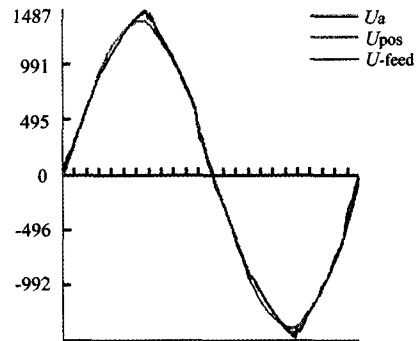


图 14 60 kW 时正序电压
Fig. 14 U -pos without 60 kW

图 15 和图 16 为 60 kW 功率时电流输出波形图和电流谐波分析。

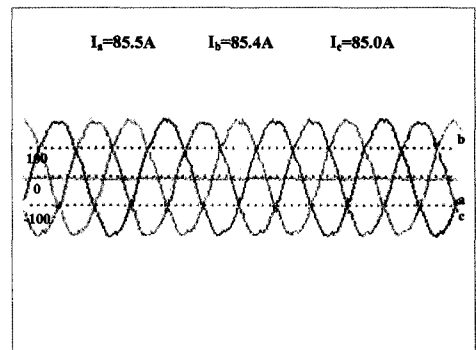


图 15 60 kW 时输出电流波形图
Fig. 15 60 kW output current waveform

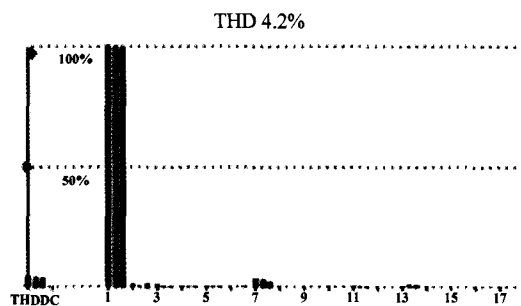


图 16 60 kW 时电流谐波分析
Fig. 16 60 kW output current THD

5 结 论

当电网发生故障，三相电压不平衡，由于负序分量的原因导致锁相环运行不稳定，无法精确锁相。而本文所提出的正序提取算法，能够有效地滤除负

序分量,能够快速精确地获取电网正序基波电压分量,由于其算法简单,易于数字化的特点,并提出了用该算法改进的锁相环和网压前馈控制。通过仿真和实验分析,验证了该算法的有效性和准确性。

参考文献:

- [1] 龚锦霞,解大,张延迟.三相数字锁相环的原理及性能[J].电工技术学报,2009,24(10):94-100.
- [2] 王颢雄,马伟明,肖飞,等.双dq变换软件锁相环的数学模型研究[J].电工技术学报,2011,26(7):238-24.
- [3] RODRÍGUEZ P, POU J, BERGAS J, et al. Decoupled double synchronous reference frame PLL for power converters control[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(2): 584-592.
- [4] 张治俊,李辉,张煦,等.基于单/双同步坐标系的软件锁相环建模和仿真[J].电力系统保护与控制,2011,39(11):138-144.
- [5] 辛业春,李国庆,王尧,等.基于双dq坐标变换的三相电压锁相环的研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(10):114-118.
- [6] RODRIGUEZ P, TEODORESCU R, CANDELA I, et al. New Positive-Sequence Voltage Detector For Grid Synchronization of Power Converters Under Faulty Grid Conditions: Power Electronics Specialists Conference[C]. PESC '06. 37th IEEE. 2006: 1-7.
- [7] 袁旭峰,程时杰,文劲宇.改进瞬时对称分量法及其在正负序电量检测中的应用[J].中国电机工程学报,2008,28(1):52-58.
- [8] 黄建明,吴春华,许富强.基于相序解耦谐振控制器的基波正序电压相位检测方法[J].电网技术,2013,37(3):667-672.
- [9] 戴志威,舒杰,吴昌宏,等.基于LC滤波的光伏逆变器电感电流反馈控制策略研究[J].新能源进展,2014(6):449-453.
- [10] ZMOOD D N, HOLMES D G. Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error[J]. Power Electronics IEEE Transactions on, 2003, 18(3): 814-822.
- [11] 马琳,金新民,唐芬,等.三相并网逆变器比例谐振控制及其网压前馈问题分析[J].电工技术学报,2012,27(8):56-63.
- [12] 周德佳,赵争鸣,袁立强,等.300 kW光伏并网系统优化控制与稳定性分析[J].电工技术学报,2008,23(11):116-122.
- [13] MA L, JIN X, KEREKES T, et al. The PWM strategies of grid-connected distributed generation active NPC inverters: Energy Conversion Congress and Exposition[C]. ECCE 2009. IEEEIEEE, 2009: 920-927.
- [14] HASANZADEH A, ONAR O C, MOKHTARI H, et al. A Proportional-Resonant Controller-Based Wireless Control Strategy With a Reduced Number of Sensors for Parallel-Operated UPSs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25: 468-478.

作者简介:

张伟(1987-),男,硕士研究生,主要从事可再生能源发电及微网技术研究。

张继元(1990-),男,硕士,助理研究员,主要从事可再生能源发电及微网技术研究。

王浩(1976-),男,博士,助理研究员,主要从事可再生能源发电及微网技术研究。

舒杰(1970-),男,博士,研究员,主要从事可再生能源发电及微网技术研究。

丁建宁(1966-),男,博士,教授,主要从事低维材料微纳器件与系统、太阳能电池方面的研究。