

DOI: 10.3969/j.issn.1006-4729.2016.02.010

基于 dq 变换的三相自适应锁相环技术

温华生, 谢 潮

(上海电力学院 电气工程学院, 上海 200090)

摘要:针对基于 dq 变换的传统三相锁相环技术在电网扰动情况下不能准确获取相位的问题,提出了一种基于 dq 变换的三相自适应锁相环,通过一个自适应环节检测出锁相环三相输入电压信号的基波分量,并将基波分量送给 dq 变换锁相环以检测出电压的相位.同传统锁相环相比,所提的自适应 dq 锁相环能在电网电压暂降、电压不平衡、频率跳变、相位跳变以及含有较高谐波的情况下更精确地检测出电压相位.仿真结果表明,该自适应 dq 锁相环在检测精度和稳定性等方面都优于传统 dq 锁相环.

关键词:锁相环; dq 变换; 三相自适应锁相环

中图分类号: TM464

文献标志码: A

文章编号: 1006-4729(2016)02-0151-05

Three-phase Adaptive Phase-locked Loop Based on dq Transformation

WEN Huasheng, XIE Chao

(School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Due to the problem that the traditional PLL cannot detect the voltage phase accurately when the system voltage is disturbed, a novel three phase adaptive PLL (TPAPLL) based on dq transformation is proposed. An adaptive unit is introduced to detect the fundamental component of the three phase voltages. Compared with the traditional PLL, the proposed TPAPLL can detect the voltage phase more accurately under the conditions of voltage sag, voltage swell, voltage unbalance frequency and phase jump and high voltage harmonics. The simulation results prove that the three phase adaptive phase locked loop has a better stability and accuracy than the traditional PLL.

Key words: phase locked loop; dq transformation; three phase adaptive phase locked loop

当前,在公用电网、微电网以及主动配电网中,广泛存在电压谐波、电压暂将、相位跳变以及电压不平衡等电能质量问题,而用户对电能质量的要求越来越高,在此背景下,有源电力滤波器(Active Power Filter, APF),动态电压恢复器(Dy-

namic Voltage Restorer, DVR)等电能质量调节装置发展迅速.其中,锁相环技术对 APF 和 DVR 等装置性能的优劣起决定性作用,而且微电网能否在并网和孤岛这两种运行模式进行平滑切换,锁相环技术至关重要,因此研究一种在电压畸变、电

收稿日期: 2015-09-25

通讯作者简介:温华生(1989-),男,在读硕士,江西宜春人.主要研究方向为有源电力滤波器技术. E-mail: wen-huasheng1@sina.com.

基金项目:国家自然科学基金(51207088);上海市学科委员会项目(14DZ1201602,13DZ2251900).

压不平衡等条件下依然能够准确获得电网基波相位的锁相环技术具有重要意义。

目前,采用过零检测和锁相环(Phase Locked Loop, PLL)技术来获取电网电压的基波相位信息。过零检测法在过零点时容易受到电压波动的影响而产生误差。采用锁相环技术获取电网电压基波相位信息在有源电力滤波器、静止无功发生器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)以及并网逆变器中应用广泛。文献[1]提出了一种基于dq变换的锁相环,该方法克服了过零点检测对电压波动敏感的缺点,但是当电网电压含谐波时,对电网相位的追踪存在一定的误差。文献[2]提出了一种新型的基于dq变换的三相软件锁相环,该锁相环通过PI控制,在电网电压不平衡的情况下,用 $T/4$ (T 为标准的三相电网电压周期)延时算法对正序和负序分量进行分离,结果表明,该方法有效地抑制了在电压不平衡时负序分量对电网电压相位的影响。文献[3]设计分析了一种改进型锁相环(Improved Phase Locked Loop, IPLL),当电网电压发生相位、幅值跳变以及还有谐波时,IPLL能够准确地跟踪电网电压的幅值、相位以及频率信息,并且可以分离基波和谐波信号。文献[4]针对风机在复杂工况下对电网频率和相位进行准确快速检测的需求,对传统dq锁相环结构进行改进,改进的锁相环分别通过正反向同步旋转坐标变换后,得到正负序电压矢量,并且能够提取相位、频率和谐波信息,提高了锁相环在电网电压不对称的情况下对电压相位的跟踪能力。文献[5]提出双同步旋转坐标系法进行正负序分量解耦,对正序进行锁相。文献[6]至文献[8]提出了一种单同步轴系锁相环方案,该方案是通过三相电压合成矢量进行坐标变换从而实现在理想工况下对电网电压相位进行跟踪的目的。文献[9]对基于正负序坐标轴下的双增强型锁相环进行了研究,当负载变化时,该方法对电网电压的相位跟踪存在一定的偏差。

本文在详细分析基于dq变换的三相锁相环原理基础上,提出了一种基于dq变换的三相自适应锁相环技术,在基于dq变换锁相环的基础上增加了一个自适应环节,通过采样得到的三相电网电压以及锁相环输出的相位先经过自适应计算得到三相基波电压,再对基波电压进行坐标变换得到q轴分量,当电网电压畸变时,q轴分量所含高

频分量就会大大减少,锁相环精度更高,稳定性更强。

1 锁相环基本原理

锁相环的作用就是快速检测并锁定信号的频率和相位。锁相环一般由鉴相器、环路滤波器、压控振荡器3部分组成。基本工作原理为:鉴相器是一个相位比较单元,它将输入信号和输出信号的相位进行比较,得到一个正比于相位差的电压信号,该电压信号输入环路滤波器,通过滤波,其高频分量被滤除,从而得到一个正比于相位差的低频电压信号,该低频电压信号控制压控振荡器,使系统内部的相位和频率与输入信号一致。

2 基于dq变换的自适应锁相环

2.1 基于dq变换的锁相环原理

将三相电网电压向量经Clarke变换,使其由三相静止坐标系变换到两相静止坐标系中,假设归一化后的标准三相电压表达式为:

$$\mathbf{u}_{abc} = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{cases} u_a = \cos(\omega t) \\ u_b = \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \\ u_c = \cos\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) \end{cases} \quad (1)$$

通过静止坐标变换,将三相电压由三相静止坐标系变换到两相静止坐标系中,坐标变换为:

$$\mathbf{T}_{32} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_{\alpha\beta} = \mathbf{T}_{32} \mathbf{u}_{abc} \quad (3)$$

$$\mathbf{u}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: \mathbf{T}_{32} ——Clarke变换的变换矩阵。

然后再由两相静止坐标系变换到两相旋转坐标系,坐标变换为:

$$\mathbf{T}_{dq} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{u}_{dq} = \mathbf{T}_{dq} \mathbf{u}_{\alpha\beta} \quad (6)$$

$$\mathbf{u}_{dq} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \theta) \\ \sin(\omega t - \theta) \end{bmatrix} \quad (7)$$

通过控制三相电压合成矢量 \mathbf{u}_{abc} 在q轴上的

投影 u_q 来跟踪电网相位. 当 $u_q > 0$ 时, d 轴滞后 u_{abc} , 此时应增大 dq 坐标系的旋转角频率; 当 $u_q < 0$ 时, d 轴超前 u_{abc} , 此时应减小 dq 坐标系的旋转角频率; 当 $u_q = 0$ 时, d 轴和 u_{abc} 重合, 此时 d 轴和 u_{abc} 同相位. 因此, 只要控制三相电压合成矢量在 q 轴上的投影 u_q 使其为零即可完成鉴相.

基于 dq 变换的三相锁相环结构图如图 1 所示.

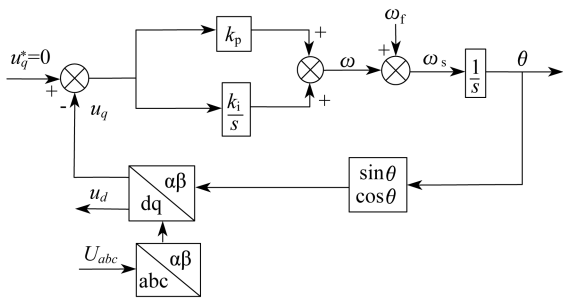


图 1 基于旋转坐标变换的三相锁相环结构示意图

其中, abc/ab, ab/dq, $\sin\theta/\cos\theta$ 共同组成鉴相器 (Phase Detector, PD) 模块. 该锁相环系统中环路滤波器的作用是消除鉴相器输出信号中的高频噪声信号, 然后将环路滤波器输出的控制信号送给压控振荡器 (Voltage Controlled Oscillator, VCO), 由于送入压控振荡器的控制信号多为低频信号, 所以环路滤波器具有低通特性. 本文采用的环路滤波器是一个一阶比例积分器. 环路滤波器输出的控制信号经过压控振荡器后转换成频率, 但在锁相环系统中, 压控振荡器需要输出的是相位, 因此本文将积分器 $1/s$ 作为压控振荡器, 对频率进行积分得到相位.

2.2 自适应原理

在自适应信号处理应用领域, WIDROW Bernard 等人提出了噪声抵消原理, 即: 当参考输入和原始输入中的噪声相关时, 保证参考输入通过自适应滤波器^[10-11]后其输出抵消原始输入中的噪声成分, 将原始信号中的噪声信号与有用信号分离. 噪声抵消原理如图 2 所示.

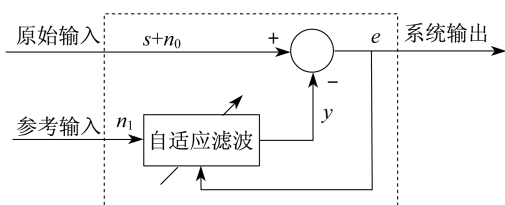


图 2 自适应噪声抵消原理示意

系统有两个输入信号, 它由原始输入信号 $s + n_0$ 和参考输入信号 n_1 组成, 同时原始输入信号中的 s 与 n_0 和参考输入信号 n_1 不相关, 且原始输入信号中的 n_0 和参考输入信号 n_1 是由同一个噪声源发出的两个相关的噪声信号. 系统经过自适应算法的调整, 使得滤波器的输出信号 y 逼近 n_0 , 经过相减抵消原始输入中的 n_0 的成分, 使原始输入信号中只含有有用信号 s , 同时将与自适应滤波器输出信号相减抵消后的原始输入信号 (输出的误差信号 e) 反馈给自适应滤波器, 通过反馈回来的误差信号来调整自适应滤波器的权系数, 使其工作在最佳状态. 通过噪声抵消后的输出 e 中仅含有信号 s , 从而达到提取原始输入信号 s 的目的.

2.3 基于旋转坐标变换的三相自适应锁相环原理

自适应环节由一个自适应滤波器^[12]组成, 参考输入信号 $x_\alpha(n)$ 和 $x_\beta(n)$ 分别对应的权值 $w_1(n)$ 和 $w_2(n)$ 采用 LMS (Least Mean Squared) 算法^[13-14]在线自动调节, 滤波器的输入是 $d(n)$, 在本文中, $d(n)$ 表示有畸变的电网电压, $x_\alpha(n)$ 和 $x_\beta(n)$ 分别表示由锁相环输出相位对应的正余弦信号, 自适应输出 $y(n)$ 表示电网电压的基波成分, 其表达式为:

$$y(n) = w_1(n)x_\alpha(n) + w_2(n)x_\beta(n) \quad (8)$$

因此, 电网电压的谐波成分可以表示为:

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (9)$$

采用 LMS 算法对权值 $w_1(n)$ 和 $w_2(n)$ 进行更新, 权值更新表达式为:

$$w_1(n+1) = w_1(n) + 2\mu e(n)x_\alpha(n) \quad (10)$$

$$w_2(n+1) = w_2(n) + 2\mu e(n)x_\beta(n) \quad (11)$$

式中: $x_\alpha(n), x_\beta(n)$ ——自适应环节的参考输入信号;

$w_1(n), w_2(n)$ ——参考输入信号对应的权值;

μ ——对权值进行更新的步长.

基于 dq 变换的三相自适应锁相环 (Three Phase Adaptive Phase Locked Loop, TPAPLL) 拓扑结构如图 3 所示. 图 3 中虚线框部分即为自适应环节. 由图 3 可以看出, 本文提出的 TPAPLL 与普通 dq 锁相环的不同之处是先将输入的三相电网电压 u_s 和锁相回路输出相位的正余弦值 ($\sin q$ 和 $\cos q$) 进行自适应计算, 求得电网电压的基波成分 u_{s1} , 然后再对基波电压进行坐标变换, 这就避免了当电网

电压畸变时 u_d 含有大量高频成分,因此较普通 dq 锁相环而言,本文提出的 TPAPLL 在电网电压畸变时更具有优越性。

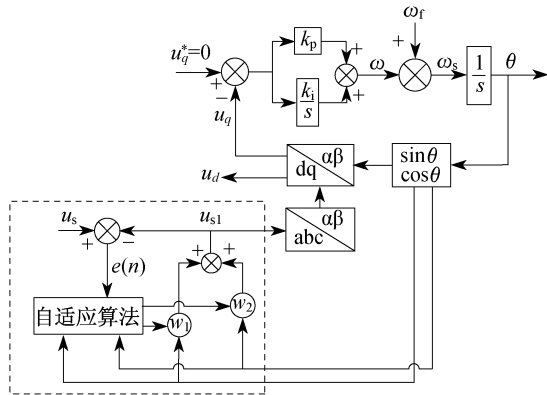


图3 基于旋转坐标变换的三相自适应锁相环原理示意

3 建模与仿真

为了验证本文所提方法的优越性,在上述理论分析的基础上,对图3所示的原理结构搭建 MATLAB 仿真模型进行仿真研究.部分仿真参数如下:标准三相交流电源,相电压有效值为 220 V,频率 50 Hz,自适应权值更新步长 μ 取 0.000 7。

在 0.2 ~ 0.3 s 间切换阻感负载时,电压出现跌落,0.3 s 后切回原来的负载,仿真结果如图4所示.由图4可以看出:负载切换前后 TPAPLL 锁定的频率几乎没有偏差;而在电压跌落期间,传统 dq 锁相环锁定的频率存在约 0.08 Hz 的偏差且不稳定,并且在切回到原来的负载后频率依然存在偏差.由此可见,在负荷变化电压降低时,TPAPLL 对应电网频率锁定的准确度和稳定性优于传统 dq 锁相环。

当电网电压在 0.2 ~ 0.3 s 期间相位跳变 30° 时,锁相环仿真结果如图5所示.由图5可以看出,在电压相位跳变时,传统的 dq 锁相环锁定的电网频率存在约 0.35 Hz 的频率偏差,并且直到电网电压相位恢复正常时仍然存在约 0.01 Hz 的频率偏差;而 TPAPLL 锁定的频率只有 0.025 Hz 的微小偏差,并且在电压相位恢复正常时恢复跟踪到 50 Hz 且保持稳定.因此,当电网电压相位跳变时,TPAPLL 锁相更精确,稳定性更高。

当电网电压在 0.2 ~ 0.3 s 间加入 3 次谐波时,仿真结果如图6所示.由图6可以看出:电压畸变期间,传统 dq 锁相环锁定的频率持续波动;TPAPLL 锁定的频率短暂波动后恢复到了 50 Hz.因此,在三相电网电压含有谐波的情况下,TPAPLL 几乎不受影响。

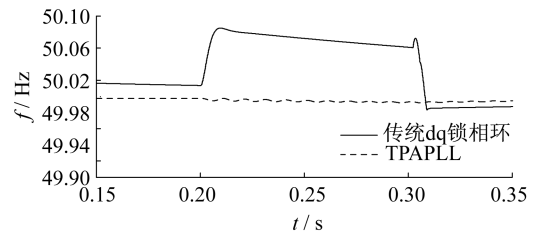


图4 电压跌落的仿真结果

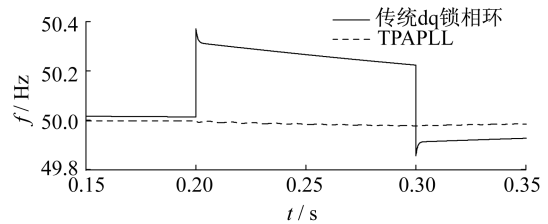


图5 三相电网电压相位跳变的仿真结果

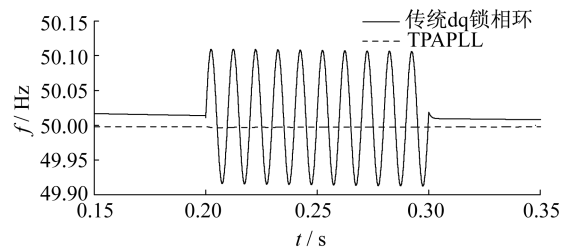


图6 三相电网电压含谐波的仿真结果

当三相电网电压在 0.2 ~ 0.3 s 期间存在 5 Hz 的频率偏移时,仿真结果如图7所示.由图7可以看出:传统的 dq 锁相环锁定的频率存在约 0.6 Hz 的频率跳变,并且在电网频率正常时依然持续波动,不稳定;而 TPAPLL 锁定的频率在电网频率偏移时仅有微小的抖动,之后恢复跟踪到 50 Hz 并保持稳定。

在 0.2 ~ 0.3 s 间电网电压不平衡时,仿真结果如图8所示。

由图8可以看出:传统 dq 锁相环锁定的频率存在 0.08 Hz 的频率偏差,一直到不平衡消失时才恢复跟踪到 50 Hz;TPAPLL 锁定的频率在电压不平衡时仅有较微小的波动.因此,在电压不平衡

时,TPAPLL 的频率跟踪性能比传统 dq 锁相环更精确,更稳定.

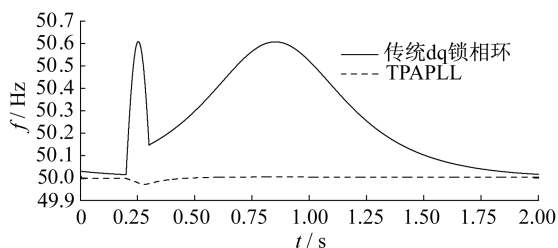


图7 电压频率偏移的仿真结果

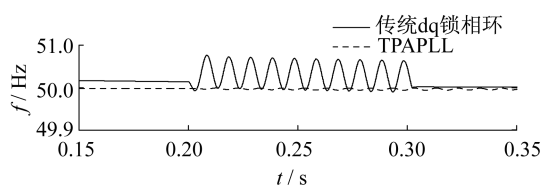


图8 电压不平衡的仿真结果

4 结 语

本文提出的基于dq变换的TPAPLL技术,在电压谐波、电压暂升、电压暂降等情况下具有较好的稳态性能以及较高的锁相精度.在后续的研究中,需要对TPAPLL中自适应环节的迭代步长进行优化,选取一个最优步长,进一步提高TPAPLL的动态响应速度.

参考文献:

- [1] 姜英,陈明莉,刘宁.基于dq坐标变换的三相锁相环研究[J].电工研究:电子世界,2013(7):61-63.
- [2] 吉正华,韦芬卿,杨海英.基于dq变换的三相软件锁相环设计[J].电力自动化设备,2011,31(4):104-107.
- [3] 张志霞,朴在林,郭丹,等.一种应用于电力系统的锁相环

[J].电工技术学报,2012,27(2):250-255.

- [4] 周鹏,贺益康,胡佳兵.电网不平衡状态下风电机组运行控制中电压同步信号的检测[J].电工技术学报,2008,23(5):108-113.
- [5] 李明,王跃,方雄,等.无正交虚拟信号生成的单相DQ锁相环研究[J].中国电机工程学报,2011,31(15):27-32.
- [6] CHUNG S K. A phase tracking system for three phase utility interface inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(3):431-438.
- [7] HILMY A, JAN S, BOLLEN M J. Tuning software phase-locked loop for series-connected converters [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1):300-308.
- [8] KARIMI G M, IRAVANI M R. A method for synchronization of power electronic converters in polluted and variable-frequency environments [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19:1 263-1 270.
- [9] RODRIGUEZ P, LUNA A, CIOBOTAIU M, et al. Advanced grid synchronization system for power converters under unbalanced and distorted operating conditions[C]//Proc of the 32st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON, 2006; 5 173-5 178.
- [10] 吕振林,田岚.基于一种新型自适应滤波的谐波检测算法[J].电力系统及其自动化学报,2007,19(5):75-78.
- [11] ABABNEH J I, BATAINEHM H. Linear phase FIR filter design using particle swarm optimization and genetic algorithms [J]. Digital Signal Processing, 2008, 18(4):657-668.
- [12] KARIMI M, IRAVANI M R, A nonlinear adaptive filter for online signal analysis in power systems: applications [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(2):617-622.
- [13] QUY B, MENG F G, GAO L. A new variable step size LMS adaptive filtering algorithm [C]//Proc of the International symposium of The IEEE Industrial Electronics, ISIE, 2007: 1 601-1 605.
- [14] LI N, ZHANG Y G, ZHAO Y X, et al. An improved variable tap-length LMS algorithm [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009(5):628-631.

(编辑 桂金星)