

一种基于滑动平均滤波器的同步锁相算法研究

徐琳 唐永红 蒲维

(国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072)

摘要:提出了一种基于滑动平均滤波器的三相软件锁相环,在 $\alpha\beta$ 轴上添加延时信号消除器滤除直流分量和可能存在的偶次谐波,改进传统 PLL 的控制结构,克服了硬件锁相环存在漂移、失锁、抖动和依赖过零点检测等缺点,避免了传统软件锁相环难以兼顾稳态检测精度和动态响应速度的不足。采用时域仿真将该方法与传统锁相算法进行对比分析,结果表明,该算法在三相电压跌落、不平衡、频率跳变以及出现直流分量时均能够准确快速地提取基波正序电压的幅值、相位和频率。

关键词:同步锁相环;滑动平均滤波器;延时信号消除器

Abstract: A novel three-phase software phase-locked loop (PLL) based on moving average filter is proposed. The delay signal canceller is added on the $\alpha\beta$ frame to filter the DC component and the even harmonic components, and to improve the control structure of conventional PLL, which overcomes the deficiencies of hardware PLLs in terms of parameter deviation, out-of-lock, variation and dependency on zero-crossing detection, and also mitigates the shortcomings of the conventional software PLLs due to the tradeoff between the steady-state accuracy and dynamic response. The comparison between the moving average filter-PLL (MAF-PLL) and the conventional PLL algorithms is presented, which shows that the proposed MAF-PLL provides an accurate estimation of the amplitude, phase and frequency during three-phase voltage sag, voltage unbalance, frequency jump and DC offset.

Key words: phase-locked loop (PLL); moving average filter; delay signal canceller

中图分类号: TM76 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)03-0012-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.03.003

0 引言

当电网电压出现不对称故障时,三相电压中会出现负序分量,而在电压故障条件下实现双馈风机低电压穿越运行的控制中,需要对电网电压或定子磁链矢量进行精确的定向,电压矢量定向需要将精确的电网电压频率以及相位作为控制的基准,因此工作稳定、响应迅速的基波频率和相位跟踪系统是风机控制的重要组成部分。

目前常见的方法包括过零检测法和向量检测法^[1-5]。其中过零检测法将检测到的正弦电压过零点作为零相位点并以此为基准计算各时刻的相位值,但是当相位发生突变时,该方法要等到下一个过零点才能检测出随后各时刻的相位,因此动态性能往往不能满足快速控制的要求;同时电压谐波和过零点的测量噪声也会造成相位检测误差。向量检测

法通过 $\alpha\beta$ 变换实时计算电压相位,但该方法只适用于三相电压对称无畸变的场合。

文献[6]提出基于 dq 变换的传统三相软件锁相环,该方法在三相电压对称且不含谐波的情况下能够取得很好的结果;当三相电压中出现高次谐波时,应该尽量降低锁相环的带宽,谐波对输出基波相位的影响基本可忽略;当三相电压不平衡时,锁相环的带宽太窄,系统动态响应速度很慢,无法实现对基波电压相位的精确跟踪。为消除电网电压不平衡的影响,文献[7,8]中提出基于交叉解耦模块的解耦双坐标系统锁相环(decoupled double synchronous reference frame PLL, DDSRF-PLL),该方法通过双 dq 变换和解耦网络提取正序电压分量,在系统电压三相对称或者不对称的情况下均效果显著,但当电压畸变严重时锁相环相位检测误差仍比较大。

为克服以上锁相算法的不足,提出一种基于滑动平均滤波器的三相软件锁相环算法(moving average filter-PLL, MAF-PLL),该算法在三相系统电

科技项目: 国网四川省电力公司科技项目(52199715000W)

压对称、幅值跌落、不平衡或者畸变严重的情况下，均能准确快速地获取系统基波正序电压的相位和频率，为风机控制系统提供准确的同步相位信息，最后通过 Matlab/Simulink 仿真比较了所提的锁相算法与传统 PLL 算法的优缺点和适用范围。

1 理想电网下的锁相环技术^[1]

图 1 给出了经典的三相锁相环控制原理图，用于获取电压的频率、相位和幅值，由鉴相器、环路滤波器和压控振荡器三部分组成。

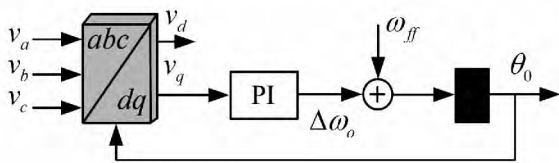


图 1 传统三相锁相环原理图

在理想电网条件下，该锁相环能准确地捕获电网频率和相位，但是当电网电压发生不对称故障时，导致电压中存在负序分量、直流分量或者谐波分量时，负序分量将导致捕获的频率和相位中存在 2 倍基波频率的波动，直流分量导致频率和相位中存在基波频率的波动，使得电网电压的频率和相位无法准确获取，这些频率和相位的不稳定将导致矢量定向控制中的定向误差，使控制策略失效，甚至导致整个控制系统的不稳定运行。因此，提出了一种响应快、精度高、电网适应能力强、抗干扰性能好的同步锁相算法。

2 基于滑动平均滤波器的同步锁相算法

在上述传统同步锁相算法中，通常是在内环增加滤波器增强 PLL 的抗干扰性，然而滤波器带来的相移会减小 PLL 的穿越频率，减慢响应速度，其滤波性能有限，无法完全滤除负序分量和谐波带来的影响，而且对直流分量产生的低频谐波的滤除效果更差。基于上述缺点，提出将传统滤波器改为滑动平均滤波器 (moving average filter, MAF)，在静止坐标系 $\alpha\beta$ 轴上添加延时信号消除器 (delay signal cancellation, DSC) 滤除直流分量和可能存在的偶次谐波，改进传统 PLL 的控制结构，加速动态响应。

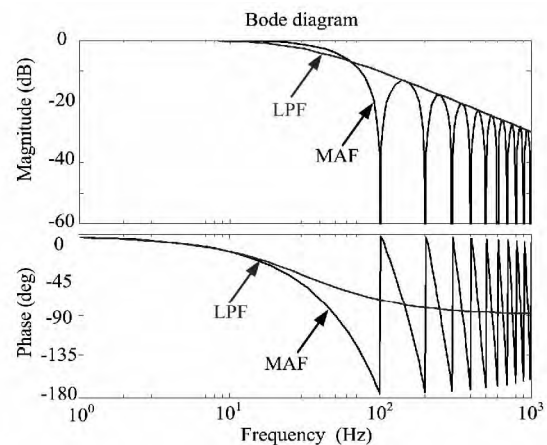
滑动平均滤波器及其 Padé 近似的低通滤波器传递函数可以表示为

$$G_{MAF}(s) = \frac{\bar{x}(s)}{x(s)} = \frac{1 - e^{-T\omega s}}{T\omega s} \approx \frac{2}{T\omega s + 2} \quad (1)$$

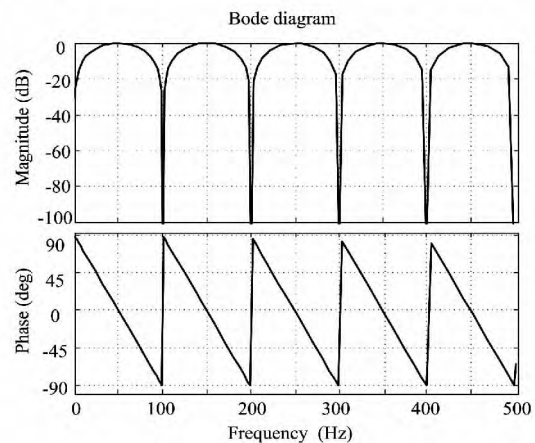
应用于 $\alpha\beta$ 轴上的延时信号消除器传递函数为

$$G_{\alpha\beta DSC_2}(s) = \frac{1}{2}(1 - e^{-\frac{T}{2}s}) \quad (2)$$

式中 T 为电网电压周期。因此，通过式 (1) 和式 (2) 可得到滑动平均滤波器、近似低通滤波器以及延时信号消除器的伯德图，如图 2 所示。



(a) MAF 和 LPF 的幅频相频特性图



(b) DSC 的幅频相频特性图

图 2 MAF、LPF 与 DSC 的幅频相频特性图

通过图 2 的伯德图对比看出，MAF 与 LPF 在低频段的性能基本一样；在高频段，MAF 与 DSC 都能完全滤除掉特定次数的谐波，在电网电压中含有直流分量、负序分量和谐波分量的情况下，可以实现频率和相位的精确跟踪。

同时，为了加快跟踪速度，将锁相环中传统的比例积分控制器改进为比例控制器；但由于采用比例控制器，即从二阶系统降为一阶系统，导致 PLL 不能无静差地跟踪频率跳变（对应于输入相位的斜坡

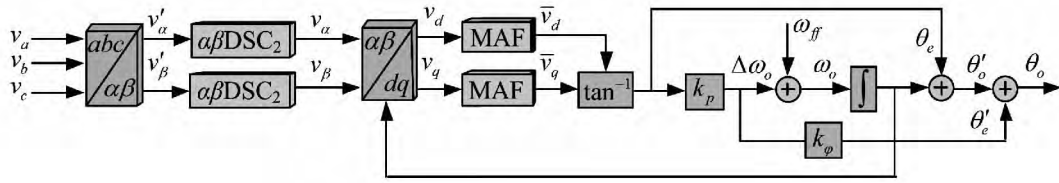


图 3 基于混合坐标系改进锁相环的原理框图

响应) ,因此 ,将跟踪误差信号补偿到相位的输出 ,实现了频率跳变下的无静差跟踪控制。改进 PLL 的控制框图如图 3 所示。

在图 3 中 θ_e 表示电网发生频率跳变时 ,控制器产生的跟踪误差; θ'_e 表示频率跳变时 ,由于非频率适应性的滤波器产生的相移 ,通过将相移误差补偿到输出相位 θ ,从而消除滤波器带来的误差。

设输入电压频率为 $\omega_i = \omega_{ff} + \Delta\omega_i$,其中 ω_{ff} 为理想电网频率 50Hz; $\Delta\omega_i$ 为频率偏移值 ,在锁相环锁定的状态下 θ_e 为一个常数; 根据工程控制理论 ,在传递函数为 k_p/s 的系统中 ,输入发生斜坡响应 ,且斜率为 $\Delta\omega_i$ 。

因此 输出稳态误差为

$$\theta_e = \frac{\Delta\omega_i}{k_p} \quad (3)$$

而在锁相环锁定的状态下 , $\Delta\omega_i$ 的均值等于 $\Delta\omega_o$ 的均值 ,故输出误差又可表示为

$$\theta_e = \frac{\Delta\omega_o}{k_p} \quad (4)$$

根据式 (4) ,可通过前馈方式补偿因控制系统阶数产生的稳态误差。而当频率跳变时 ,非频率适应性的滤波器也将产生相移。根据式 (2) 可以得到 $\alpha\beta\text{DSC}_2$ 相频表达式

$$\angle\alpha\beta\text{DSC}_2(j\omega) = \angle\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\omega T}{4}\right) \quad (5)$$

将 $\omega_i = \omega_{ff} + \Delta\omega_i$ 代入式 (5) ,即频率跳变后相移为

$$\Delta\alpha\beta\text{DSC}_2(\omega_i) = -\frac{T}{4}\omega_i \quad (6)$$

同样在锁相环锁定的状态下 ,式 (6) 表示为

$$\Delta\alpha\beta\text{DSC}_2(\omega_i) = -\frac{T}{4}\omega_o \quad (7)$$

根据式 (7) 可以得到由滤波器产生的相位误差 ,补偿方法如图 3 所示 ,图中 k_ϕ 即为补偿系数 $T/4$ 。

3 改进 PLL 与传统 PLL 的仿真对比

为了对比改进 PLL 与传统 PLL 的动态特性和适应能力 ,下面分别在电网电压不平衡、相位跳变、频率跳变、谐波畸变以及直流偏置等情况下 ,比较两种算法对基波频率和相位的跟踪效果。

图 4 为电网电压在 0.2 ~ 0.4 s 期间发生 A 相跌落到 0.6 p. u. 时传统 PLL 和改进 PLL 的仿真结果 ,其中曲线 1 代表传统 PLL ,曲线 2 代表改进 PLL ,曲线从上到下依次为: (a) 为三相电压; (b) 为基波频率; (c) 为正序电压的 d、q 轴分量; (d) 为估算的基波相位与实际基波相位的偏差 ,后续几种工况的曲线标识与之相同。

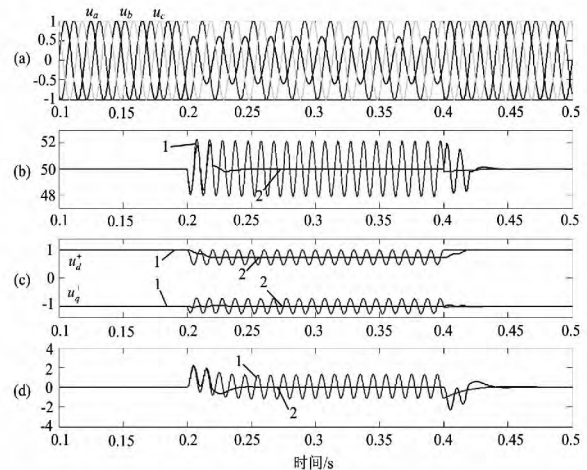


图 4 单相电压跌落至 0.6 p. u. 时 ,传统 PLL 与改进 PLL 检测结果对比曲线

从图 4 看出 ,传统 PLL 在电网电压单相跌落时 ,不能准确地检测出电压频率、正负序分量以及相位。单相电压跌落产生的负序分量在正序同步旋转坐标轴中体现为 2 倍电网频率的交流分量 ,PI 控制器无法对其实现无静差调节。而在改进 PLL 中 ,滑动平均滤波器可完全滤除 2 倍电网频率的交流分量 ,实现电压频率和相位的无静差调节 ,同时准确地提取电压的正负序分量。

图 5 为电网电压发生相位跳变 40° 时 ,采用传统 PLL 和改进 PLL 的仿真结果。不难看出 ,当相位跳变时 ,传统 PLL 和改进 PLL 都能快速准确地检测出电压的频率、正负序分量以及相位 ,均具有较好的

性能。

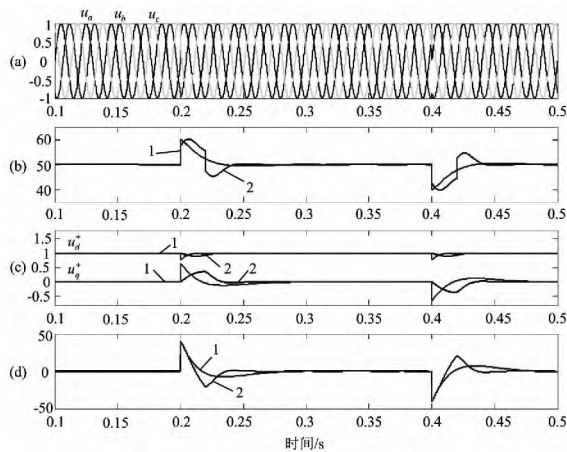


图5 相位跳变40°时两种锁相环算法的对比曲线

图6为电网电压频率在0.2~0.4s期间从50Hz跳变至55Hz时采用传统PLL和改进PLL的仿真结果,不难看出,两种锁相算法均能准确地跟踪频率的跳变,且改进PLL响应速度更快。

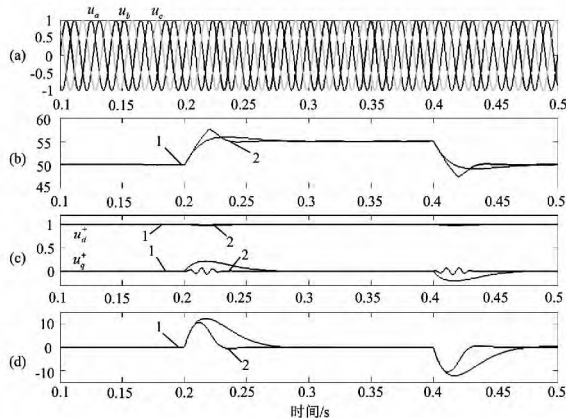


图6 频率跳变5 Hz时两种锁相环算法的对比曲线

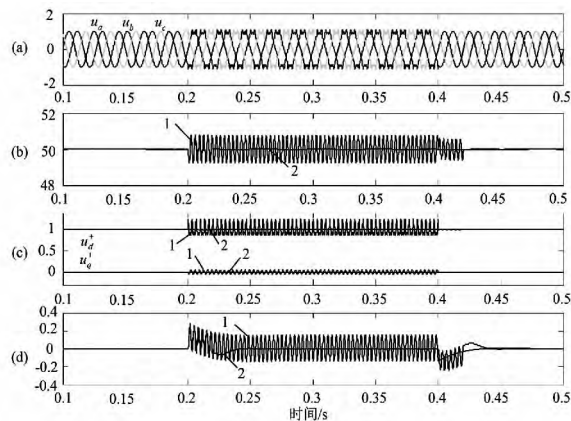


图7 当电网电压畸变时两种锁相环算法的对比曲线

图7为0.2~0.4s期间电网电压注入5%的5次谐波和5%的7次谐波时采用传统PLL和改进PLL的仿真结果。不难看出,由于传统PLL不能对谐波进行有效抑制,导致提取的电压频率、正负序分

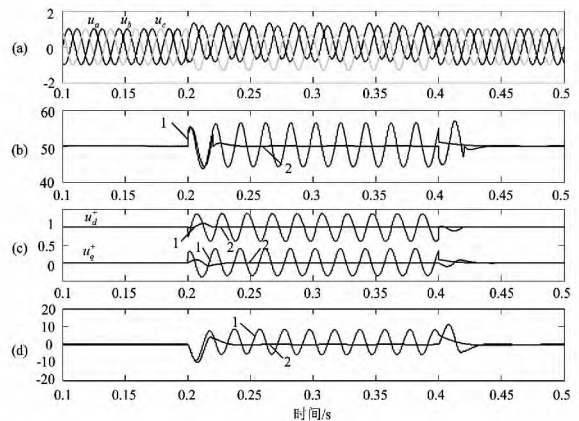


图8 电网电压出现直流偏置时,传统PLL与改进PLL检测结果对比曲线

量以及相位中均出现高频波动;由于MAF与DSC的作用,改进PLL可以无静差地检测出电压频率、正负序分量和相位。

图8为电网电压在0.2~0.4s期间出现直流偏置时采用传统PLL和改进PLL的仿真结果。不难看出,电网电压的直流偏置在dq轴上表现为50Hz正弦信号,一般的滤波器或PI控制器均不能实现无静差控制,导致传统PLL检测的电压频率、正负序分量以及相位中均出现电网频率的波动;对于改进PLL,应用在 $\alpha\beta$ 轴上DSC滤波器可以完全滤除掉直流偏置以及可能存在的偶次谐波,因此实现了基波相位和频率的准确提取。

从以上各种工况的仿真对比结果看出,改进PLL具有抗干扰能力强、响应速度快、检测精度高等优点,在电压不平衡、畸变等多种扰动下能够实现基波频率和相位的跟踪,其动态特性和稳态精度明显优于传统三相锁相环,在更大范围内准确地锁定基波正序电压的频率和相位,提取基波正序分量的幅值,便于在逆变器控制系统中得到广泛应用。

4 结 论

针对传统三相软件锁相算法的缺点,提出基于滑动平均滤波器的三相锁相环算法,推导了算法的数学模型和控制策略,并通过Matlab仿真对比该算法与传统PLL在各种电网扰动下的稳态精度和动态性能。结果表明,MAF-PLL在三相电压对称、不平衡、畸变、相位或频率跳变等诸多情况下,均能准确快速地获得系统基波正序电压的相位和频率,同时有一定的噪声抑制作用,为风机控制系统提供准

确的同步相位信息,其控制精度和动态特性远远优于传统的锁相算法。

参考文献

[1] GU H. Jung ,GC Cho ,GH Cho. Improved Control for High Power Static var Compensator Using Novel Vector Product Phase Locked Loop [J]. International Journal of Electronics ,1999 ,86(7) : 837 - 855.

[2] Kaura V ,Blasko V. Operation of a Phase Locked Loop System under Distorted Utility Conditions [J]. IEEE Trans. on Industry Application ,1997 ,33(1) : 58 - 63.

[3] 徐健飞 ,庞浩 ,王赞基 ,等. 新型全数字锁相环的逻辑电路设计 [J]. 电网技术 ,2006 ,30(13) : 81 - 84.

[4] 吴静 ,赵伟. 适用于非同步采样的相位差准确测量方法 [J]. 电网技术 ,2006 ,30(7) : 73 - 76.

[5] 袁志昌 ,宋强 ,刘文华. 改善动态相位跟踪和不平衡电压检测性能的改进软锁相环算法 [J]. 电网技术 ,

2010 ,34(1) : 31 - 35.

[6] SK Chung. A Phase Tracking System for Three Phase Utility Interface Inverters [J]. IEEE Trans. on Power Electronics ,2000 ,15(3) : 431 - 438.

[7] Pedro Rodriguez ,Josep Pou ,Joan Bergas , et al. Decoupled Double Synchronous Reference Frame PLL for Power Converters Control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics ,2007 ,22(2) : 584 - 592.

[8] P. Rodriguez , L. Sainz , J. Bergas. Synchronous Double Reference Frame PLL Applied to a Unified Power Quality Conditioner [C]. in Proc. IEEE Int. Conf. Harm. Power Quality ,2002(2) : 614 - 619.

作者简介:

徐琳(1984),博士、高级工程师,主要从事基于 RTDS 的电力系统仿真分析。

(收稿日期:2016-01-05)

(上接第 6 页)

[10] Naka S ,Genji T ,Yura T , et al. A Hybrid Particle Swarm Optimization for Distribution State Estimation [J]. IEEE Trans. Power Syst 2003 ,18(1) : 60 - 68.

[11] Nanchian S ,Majumdar A ,Pal B C. Three - phase State Estimation Using Hybrid Particle Swarm Optimization [J]. IEEE Transactions on Smart Grid 2015 ,PP(99) : 1.

[12] 杨延西 ,刘丁. 基于小波变换和最小二乘支持向量机的短期电力负荷预测 [J]. 电网技术 ,2005 ,29(13) : 60 - 64.

[13] 王德意 ,杨卓 ,杨国清. 基于负荷混沌特性和最小二乘支持向量机的短期负荷预测 [J]. 电网技术 ,2008 ,32(7) : 66 - 71.

[14] 卫志农 ,谢铁明 ,孙国强. 基于超短期负荷预测和混合量测的线性动态状态估计 [J]. 中国电机工程学报 ,2010 ,30(1) : 47 - 51.

[15] Brest J ,Greiner S ,Boskovic B , et al. Self - adapting Control Parameters in Differential Evolution: A Comparative Study on Numerical Benchmark Problems [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation ,2006 ,10(6) : 646 - 657.

[16] Zhang J Q ,Arthu C S. JADE: Adaptive Differential Evolution with Optional External Archive [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation ,2009 ,13

(5) : 945 - 958.

[17] Cuello - Reyna A A ,Cedeno - Maldonado J R. Differential Evolution - based Weighted Least Squares State Estimation with Phasor Measurement Units [C]. in Proc. 49th IEEE Int. Midwest Symp. Circuits and Systems , 2006: 576 - 580.

[18] Martin T H ,Suzanne M B. The Times Series Approach to Short Term Load Forecasting [J]. IEEE Trans. Power Systems ,1987 ,2(3) : 785 - 791.

[19] 马静波 ,杨洪耕. 自适应卡尔曼滤波在电力系统短期负荷预测中的应用 [J]. 电网技术 ,2005 ,29(1) : 75 - 79.

[20] 赵宇红 ,唐耀庚 ,张韵辉. 基于神经网络和模糊理论的短期负荷预测 [J]. 高电压技术 ,2006 ,32(5) : 107 - 110.

[21] 康操. 基于最小二乘支持向量机的短期电力负荷预测模型的研究 [D]. 四川:西南交通大学 ,2012.

[22] Gol M ,Abur A. A Robust PMU Based Three - phase State Estimator Using Modal Decoupling [J]. IEEE Transactions on Power Systems ,2014 ,29(5) : 2292 - 2299.

作者简介:

黎津池(1988),硕士研究生,研究方向为含分布式发电的电力系统状态估计。

(收稿日期:2016-03-28)