

电力与传动控制

一种参数自适应增强型单相锁相环的研究与应用

陈 欣, 胡景瑜, 彭 赟, 付 刚
(中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 在铁路牵引供电系统中, 电压存在频率 / 相位突变、幅值波动、谐波污染等网压畸变问题。传统单相锁相环在动态响应速度及应对这类异常网压工况方面存在不足, 无法满足机车、动车四象限变流器的实时控制要求。为此, 文章提出了一种参数自适应增强型锁相环的方法, 其引用自适应控制策略, 使增益系数自适应变化, 改善了因相位跳变而导致的频率瞬间扰动问题。相较于传统锁相环, 参数自适应增强型锁相环对异常电网环境适应性强, 具有快速准确捕获电网信息的良好动态性能, 且锁相至少可以提前 2~3 个电网周期。仿真和实验结果验证了该锁相环方法的有效性和可行性。

关键词: 牵引供电网; 四象限; 单相; 增强型锁相环; 自适应

中图分类号: TM464; TM76 文献标识码: A 文章编号: 2096-5427(2021)01-0039-07

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2021.01.007

Research and Application of a Parameter Adaptive Enhanced Single-phase Phase-locked Loop

CHEN Xin, HU Jingyu, PENG Yun, FU Gang
(CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: In a railway traction power supply system, there are problems of network voltage distortion such as frequency / phase mutation, amplitude drop, harmonic pollution and so on. Traditional single-phase PLL has shortcomings in dynamic response speed and response to such abnormal network conditions. It is unable to meet the real-time control requirements of four-quadrant converter for locomotive and EMU. Therefore, a parameter-adaptive enhanced phase-locked loop method is proposed in this paper. This method uses an adaptive control strategy to adaptively adjust the gain coefficient to improve the frequency transient disturbance caused by phase jumps. Compared with the traditional phase-locked loop, it has good adaptability to abnormal power grid environment, and has a good dynamic performance in capturing the phase of the grid quickly and accurately. Finally, the validity and feasibility of the new phase-locked loop method are verified by simulation and experiment.

Keywords: traction power supply network; four-quadrant; single-phase; enhance phase-locked loop; adaptive

0 引言

在恶劣电网环境条件下, 快速准确地获取网压

的相位 / 频率信息是电力电子装置安全稳定运行的前提, 也是实现变流器高性能控制的基本要求, 其中高性能锁相环 (phase-locked loop, PLL) 技术起着至关重要的作用。锁相环的动稳态性能、对异常电网环境的适应性能及针对谐波污染的应对性能是衡量锁相技术性能优劣的主要指标^[1-5]。目前, 铁路牵引负荷具有功率大、随机波动性、非线性等特征并存在弓网

收稿日期: 2020-10-21

作者简介: 陈欣 (1990—), 男, 硕士, 主要从事轨道交通牵引变流控制技术研究。

基金项目: 长沙市科技重大专项 (kh2003030); 系列化中国标准地铁列车研制及试验

离线现象,会导致电网电压的频率/相位突变、电压幅值跌落和谐波污染等问题。面对这类恶劣的网压工况,需要四象限变流器能够正常运行或快速检测出网压异常并进行相应保护。另外,在铁路供电系统中,电子开关地面自动过分相装置可实现 20 ms 换相;为配合过分相装置工作,四象限变流器重新启动时间要求更短。这些对四象限控制中锁相技术的适应性及响应速度提出了更高的要求。

在单相锁相研究和应用中,文献[6]介绍了一种基于乘法鉴相器的 PLL,其原理简单且易于实现,但滤波器会造成系统带宽受限,从而影响锁相效果。类似于三相旋转坐标下的 PLL,文献[7]基于无延时生成虚拟正交信号的技术,提出了一种对输入信号移相 90° 生成正交虚拟信号的方法,其简单易行,但动态响应太慢,无法适应工况复杂的牵引供电网;文献[8]提出了一种基于微分法构造虚拟两相的单相 PLL,但在电网存在谐波污染时效果不佳。相关学者还提出了反派克变换 PLL^[9]、查正弦表动态生成正交分量^[10]、自适应陷波滤波器 PLL^[11]以及二阶通用积分器 PLL^[12]等方法,但当电网频率变化时,上述方法均无法保证准确的相移。此外,基于瞬时无功理论的软件锁相环由于结构简单、动态响应速度快而被广泛地应用,其通过迭代的方法消除锁相相位与输入相位的电压差来实现锁相,但算法本身存在较大延时^[13],锁相动态性能不佳。

为满足实际工程需要,应对复杂网压环境,四象限控制需要一种既简单易实现又能保证在非理想的恶劣电网环境下可有效跟踪基波信号、具有良好动态跟踪性能的锁相方法。因此,本文提出采用增强型锁相环 (enhance phase-locked loop, EPLL) 来捕获网压相位/频率的方法,但由于该方法自身结构原因,其频率与相位之间存在耦合的关系。为此,本文引用自适应控制策略,提出一种参数自适应增强型锁相环 (parameter-adaptive EPLL, PA-EPLL),使增益系数自适应变化,削弱了相位对频率的影响,可以在相位发生突变时瞬时响应并抑制相位对频率的影响,从而提高锁相的动态性能。

1 乘法鉴相锁相环

1.1 传统锁相环

传统锁相环一般是由鉴相器 (PD)、环路滤波器 (LPF) 和压控振荡器 (VCO) 3 部分组成,控制结构如图 1 所示。由图可知,传统锁相环是一个闭环

控制系统,其可使输出信号的频率跟踪输入信号的频率,当两者的频率达到一致时,两者相位差值保持恒定。

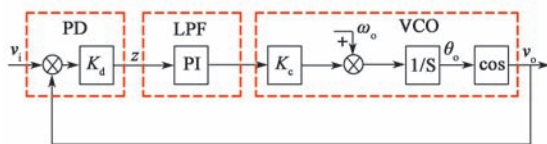


图 1 传统锁相环控制结构

Fig. 1 Control structure diagram of traditional PLL

当鉴相器采用乘法器时,构成基于乘法鉴相器的闭环锁相环。鉴相器主要是将被检测信号及其反馈信号的相位差值转换成电压信号;而环路滤波器为一个低通滤波器,用于滤除乘法鉴相器输出中夹杂的高频分量和干扰信号,从而产生压控振荡器的输入信号;压控振荡器的作用是完成信号的电压和频率转换。

不考虑电网输入信号的谐波,乘法鉴相器的输出如式 (1) 所示,式 (2) 和式 (3) 分别为锁相环的输入和输出。乘法鉴相器的输出由差频及和频两部分组成,其中和频部分是含两倍输入信号频率的纹波,其会影响锁相环输出精度。带有低通滤波特性的环路滤波器可滤除鉴相器输出的高频分量,保留低频相位差信号,即可滤除两倍频的纹波。该低通滤波器由于具有幅值衰减和相位延迟的特点,会影响锁相环的动态性能。

$$z = \frac{1}{2} V_i V_o K_d \sin[(\omega_i - \omega_o) \times t + (\theta_i - \theta_o)] + \frac{1}{2} V_i V_o K_d \sin[(\omega_i + \omega_o) \times t + (\theta_i + \theta_o)] \quad (1)$$

$$v_i = V_i \sin(\omega_i t + \theta_i) \quad (2)$$

$$v_o = V_o \sin(\omega_o t + \theta_o) \quad (3)$$

式中: v_o ——锁相环输出信号; v_i ——电网输入信号; V_o, θ_o, ω_o ——输出信号的幅值、相位和频率; V_i, θ_i, ω_i ——电网输入信号的幅值、相位和频率; K_d ——鉴相器的系数。

1.2 增强型锁相环

实际牵引供电网其正弦网压信号并不理想,存在大量电网谐波,并且还会出现频率波动、电压跌落以及相位突变等恶劣工况。四象限变流器运行一般要求功率因数近似为 1 (或者 -1) 且变压器一次侧谐波含量少,提供准确的网压相位信息是实现四象限运行要求的前提。因此,锁相环需要具备能够适应含大量谐波且可能发生各种突变情况的网压、同时能快速而准确地提供网压相位和频率信息的能力。而传统锁相环的输出是一个相位信号,对鉴相环节产生的高频分

量只能抑制，无法完全消除，因此环路滤波器的输出信号中总会存在高频分量。这部分高频分量信号会以纹波的形式存在于锁相环链路中，影响锁相环的控制性能与精度。

针对传统锁相环的缺点，本文提出了一种具备网压幅值捕获能力的单相增强型锁相环，其在传统锁相环的基础之上增加了一个幅值跟踪控制环节，具体结构如图 2 所示。

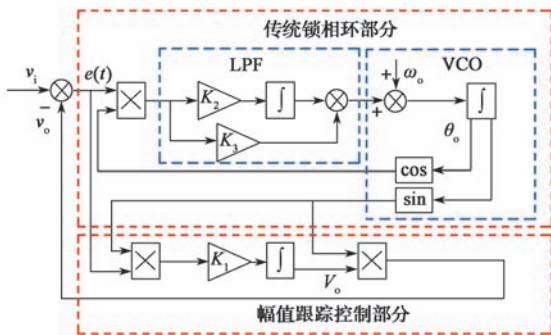


图 2 增强型锁相环结构框图
Fig. 2 Structure diagram of EPLL

由图 2 可知，增强型锁相环与传统锁相环相同之处在于都具有环路滤波器 LPF 与压控振荡器 VCO；不同之处在于 LPF 的输入，增强型锁相环通过闭环获取输入信号与输出信号的差值，并将误差信号 $e(t)$ 与闭环输出信号 θ_o 的余弦量相乘后得到 LPF 的输入。另外增强型锁相环增加了对输入信号幅值的获取功能，通过输入与输出的差值和输出的正弦量相乘后再经过积分器，完成对输入信号幅值的跟随，最终完成对频率、相位和幅值的锁定，实现锁相。当该锁相环的输出信号 v_o 能够完全跟随输入信号 v_i 时，输入、输出信号的幅值、相位、频率是一致的。

在不考虑输入信号存在谐波情况下，式 (4) 为环路滤波器输入，其由两部分组成。与传统乘法鉴相器的闭环锁相环不同，其和频部分在 V_o 和 θ_o 跟踪到目标量后会被消除。因此系统稳态时，环路滤波器的输入不存在和频部分；在考虑高频分量和干扰信号的影响时，两倍频的纹波影响是不存在的，故相比传统锁相环，提高了锁相环整体动态性能与输出精度。

$$e(t) \times \cos \theta_o = \frac{1}{2} V \sin[(\omega_i - \omega_o) \times t + (\theta_i - \theta_o)] + \frac{1}{2} V_i \sin[(\omega_i + \omega_o) \times t + (\theta_i + \theta_o)] - \frac{1}{2} V_o \sin(2\omega_o t + 2\theta_o) \quad (4)$$

式中： $e(t)$ ——输入与输出的误差信号。

图 3 示出两种锁相环在对输入频率为 50 Hz 信号进行锁相时所捕获的频率波形。由图可知，传统锁相环（虚线）的频率是含有两倍网压频率的脉动，频率在 49.96~50.04 Hz 范围内波动；而 EPLL（实线）的频率维持在 50 Hz，与理论分析结果一致。

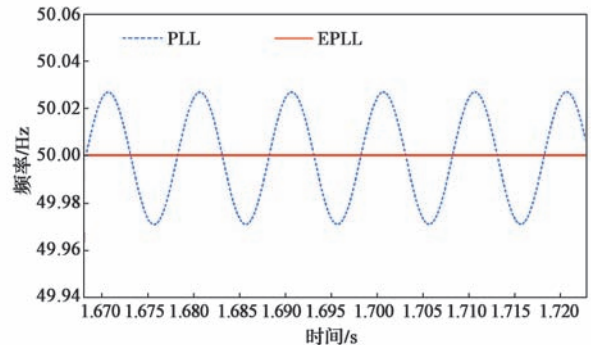


图 3 锁相环频率输出
Fig. 3 Frequency output of PLL

图 4 示出 EPLL 在对幅值变化的电压输入信号进行锁相时所捕获的幅值 V_o 波形。可以看出，网压逐渐增大，EPLL 捕获的 V_o 也会跟随电压幅值变化，表明 EPLL 具有良好跟随输入信号幅值（或有效值）的能力，可实时反应输入信号真实幅度变化情况。

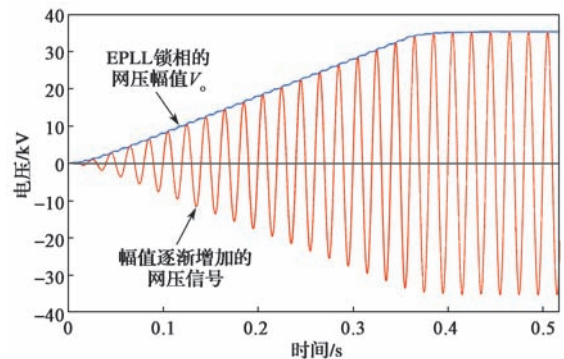


图 4 EPLL 幅值输出
Fig. 4 Amplitude output of EPLL

与传统锁相环一样，单相增强型锁相环能够抑制输入信号中所含有的谐波成分，并且在输入信号发生畸变的动态情况下仍然能准确快速地检测出输入信号的相位、频率和幅值。此部分功能将在仿真与实验部分做进一步分析与讨论。

2 自适应增强型锁相环

目前，铁路牵引供电网网压异常工况呈现多样化趋势，如果能快速精确识别，一方面，可在允许网压畸变范围或短时网压畸变时维持四象限变流器运行；

另一方面,可借此迅速判断出网压异常并做出相应保护,因此高性能的锁相环对四象限控制至关重要。

除网压本身发生相位突变外,网压畸变一般也会伴随相位发生改变,即相位瞬间突变,可以说相位突变是锁相环必须面对的一种常见的异常网压工况。此外,车载主断路器闭合时进行重新锁相,网压信号的初始相位是未知的,也可称之为一种相位突变。

在图2中,增益系数 K_2 和 K_3 控制相位/频率环,其中 K_2 直接控制相位/频率环的带宽。快速的反应需要宽带宽,即 K_2 取值要大,但这将使频率和相位耦合程度更高。当相位跳变时,这种耦合特性将影响频率的变化,不仅不利于在相位发生突变时追踪频率,还会降低锁相精度。图5是相位突变时频率瞬时变化情况。由图可知,当网压相位突变,频率扰动的峰值可达到59 Hz,需要2~3个网压周期才能重新恢复到正常的频率(50 Hz)。

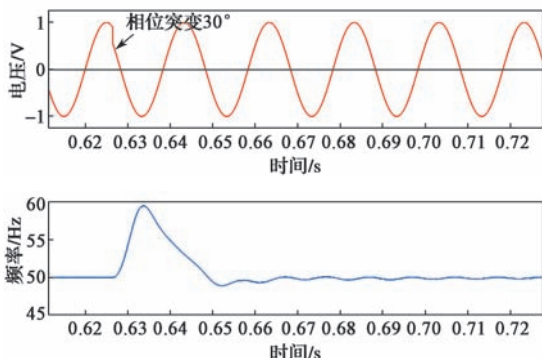


图5 相位突变时频率瞬时变化

Fig. 5 Instantaneous change of frequency as phase suddenly changes

为克服耦合特性带来的不良影响,改善在相位跳变时对频率的波动影响或网压相位未知对锁相速度的影响,进一步提高锁相的动态性能,本文提出一种自适应增强型锁相环(PA-EPLL),其针对 K_2 进行优化改进,使之具有自适应变化的特点,可随相位偏移而相应变化。即面对相位突变时,通过减小 K_2 值来削弱相位变化对系统的影响。相位的突变不可预知,由于误差信号 $e(t)$ 、频率增量 $\Delta\omega$ 均可真实反映相位变化(即相位跳变越大则频率增量 $\Delta\omega$ 就越大、误差信号 $e(t)$ 也越大),因此可用含有 $e(t)$ 的新系数 K'_2 替换 K_2 ,如式(5)所示。改进后的自适应增强型锁相环结构如图6所示。

$$K'_2 = \frac{K_2}{1 + (1-\lambda) \times (\Delta\omega)^2 + \lambda \times (e(t))^2} \quad (5)$$

式(5)中, λ 为0~1的正实数,是 K'_2 系数的权

重值。该值大小可以代表 $e(t)$ 或者 $\Delta\omega$ 对 K'_2 影响程度,数值越大,影响越大。

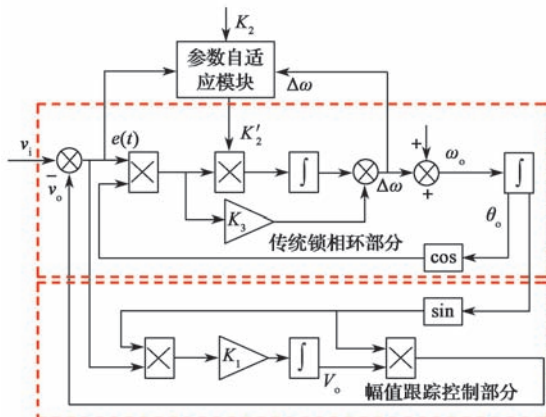


图6 自适应EPLL结构框图

Fig. 6 Structure diagram of adaptive EPLL

结合图6与式(5)可知,当误差系数 $e(t)$ 增大时,增益 K'_2 将减小;当误差系数 $e(t)$ 减小时,增益 K'_2 将趋近于 K_2 。 K'_2 随相位变化而变化,在相位跳变的瞬间抑制了频率的变化。

3 仿真分析

为了验证本文所提出的基于参数自适应型增强型锁相环的正确性与可行性,利用Matlab分别搭建了传统锁相环(PLL)、增强型锁相环(EPLL)和参数自适应型锁相环(PA-EPLL)的仿真模型,将现场实际网压数据作为锁相输入导入仿真模型,验证各种锁相方法在电网相位发生突变时追踪频率的精度和过渡时间。

3.1 理想网压下的仿真实验

理想网压条件下进行如下仿真实验:(1)传统PLL与EPLL锁相对比;(2)网压相位突变时EPLL与PA-EPLL锁相对比实验。仿真条件如下:电网电压25 kV,基波频率50 Hz,器件的开关频率450 Hz。

图7、图8和图9分别是在理想电网电压且初始相位为 0° 与 30° ,传统PLL与EPLL两者的正弦信号与网压同步信号的仿真波形。一旦正弦信号与网压同步信号的相位重叠,即可认为锁相成功。从图7可知,EPLL正弦信号经过1个网压周期便与网压同步信号重叠,即锁相成功;PLL则需要经过2个周期才能锁相成功。

图8中,EPLL经过2个网压周期便与网压同步信号重叠,而PLL则需要9个网压周期时间才能锁

相成功（图9）。从图9可以看出，EPLL成功锁相后，PLL还需要经历7个网压周期才能锁定网压同步信号。

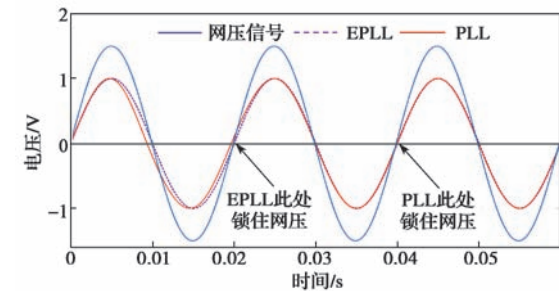


图7 初始相位 0° 锁相波形
Fig. 7 Phase-locked waveforms as initial phase is 0°

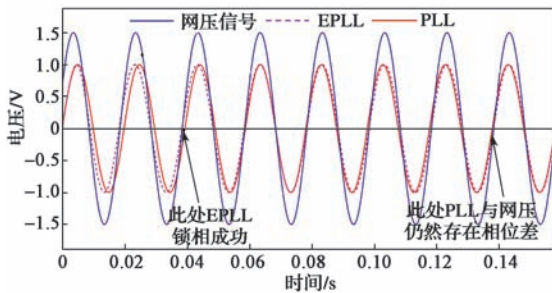


图8 初始相位 30° 锁相波形
Fig. 8 Phase-locked waveforms as initial phase is 30°

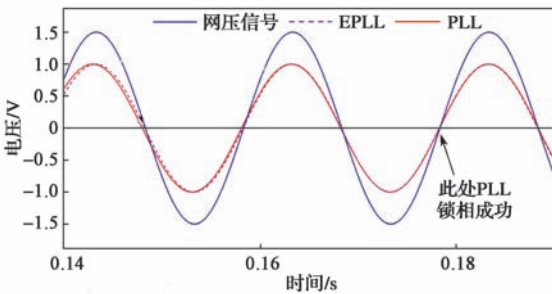


图9 锁相成功的局部波形
Fig. 9 Local waveforms of successful phase locking

从上述仿真实验可知，仿真结果与理论分析结果相一致：一方面EPLL锁相动态性能优于PLL的，特别是在初始相位不为0°时；另一方面，初始相位或者说网压的相位会影响锁相的速度。

图10示出在理想网压工况下，相位发生突变（30°）时，EPLL与PA-EPLL两者的频率瞬时变化仿真波形。可以看出，在发生相位突变30°时，EPLL需要6个网压周期频率才能稳定在50 Hz，且在此过程中频率存在波动，峰值达到了57 Hz；而PA-EPLL在2个网压周期内频率就可以稳定在50 Hz，响应速度更快且频率波动的峰值（56 Hz）低些。

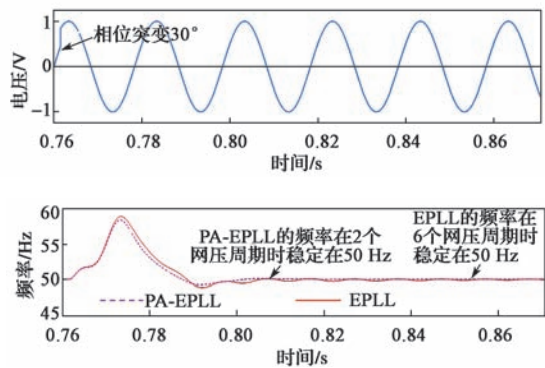


图10 相位突变时频率瞬时变化
Fig. 10 Instantaneous change of frequency when phase changes

图11示出EPLL与PA-EPLL两者在网压启动时刻（初始相位为0°）锁相动态性能的仿真情况。由图可知，在网压启动时，PA-EPLL的频率控制方面优于EPLL的：PA-EPLL频率波动范围在47~55.1 Hz，EPLL频率波动范围在46~56.1 Hz，针对工频50 Hz，PA-EPLL比EPLL频率波动范围更小。

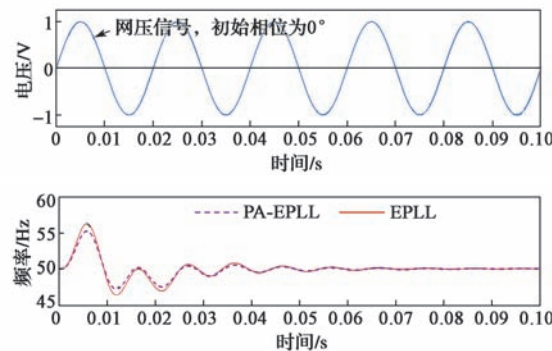


图11 网压启动时频率变化
Fig. 11 Frequency changes when the grid voltage starts

综上所述，在输入信号发生相位跃变时，PA-EPLL频率跟踪准确度高于EPLL的，同时输出信号能够更快地重新追踪到输入信号，频率过渡时间更短。总之，在电网相位发生跃变和网压以未知相位启动时，PA-EPLL追踪频率更加准确，过渡时间大大缩短，动态性能更佳。

3.2 实际网压下的仿真实验

在采用理想网压进行Matlab软件仿真验证的基础上，基于牵引网真实网压数据，进一步验证PA-EPLL的在工程应用中的有效性与可行性。

图12示出网压起始时，PA-EPLL与传统PLL锁相情况。由图可知，PA-EPLL经过4个网压基波周期便可锁定网压，而PLL需要10个网压基波周期才能锁定。

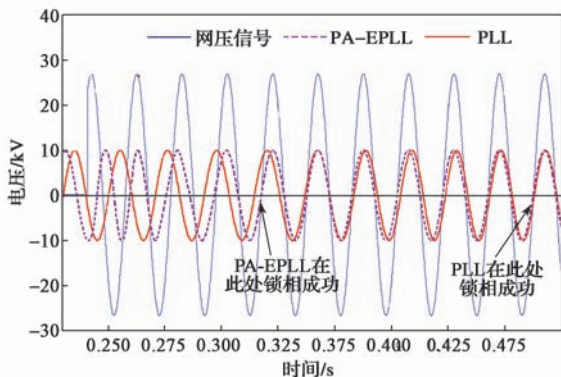


图 12 网压起始锁相情况

Fig. 12 Initial phase lock state of grid voltage

实际牵引供电网的电压不是理想的正弦信号,可能会出现频率波动情况。图 13 是网压发生频率波动(从 50 Hz 突变成 52.5 Hz)时锁相的仿真实验波形。可以看出,PA-EPLL 在频率波动后经过 3 个网压基波周期锁相成功,而 PLL 需要经过 8~9 个网压基波周期才能锁住网压信号。

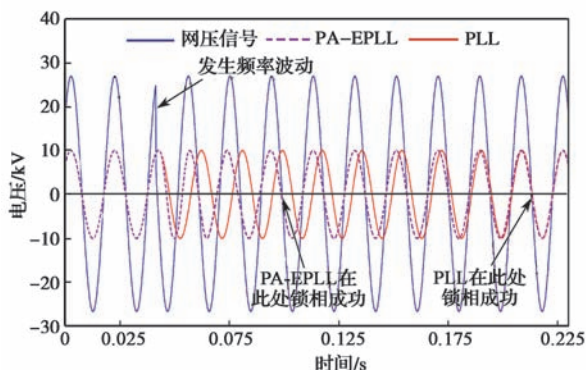
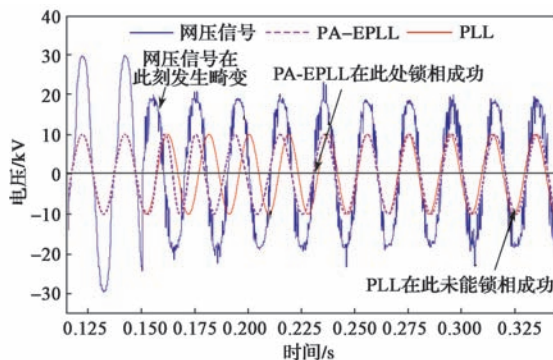


图 13 网压频率波动锁相情况

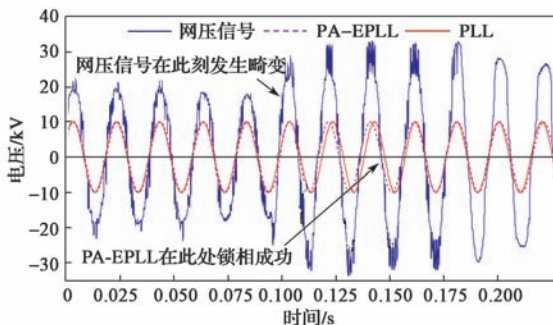
Fig. 13 Phase lock state of grid voltage frequency fluctuation

图 14 中的两类网压都反映了实际牵引供电网真实网压情况,图 14 (a) 中网压工况 1 是电压突然发生严重畸变同时伴随网压幅值跌落;图 14 (b) 中网压工况 2 是网压谐波含量丰富,并且出现网压幅值抬升。此处两类实际网压工况是用来对比 PA-EPLL 与 PLL 实际网压锁相情况。

由图 14 (a) 可知,PA-EPLL 经过 5 个网压周期,便可完全跟踪网压信号的基波成分,避免了谐波信号的干扰;而 PLL 锁相受网压畸变影响(频率与相位均有改变),无法快速锁定网压。图 14 (b) 中,PA-EPLL 可快速锁住网压的频率与相位,不受网压畸变的影响。由图 14 可知,对于不同程度的网压畸变工况,PA-EPLL 都有较强的抗干扰能力。



(a) 实际电网工况 1 的锁相



(b) 实际电网工况 2 的锁相

图 14 网压畸变锁相情况

Fig. 14 Phase lock states in the condition of network pressure distortion

3.3 仿真对比分析

无论在理想网压还是非理想电网环境下(谐波污染、相位突变、频率突变等),PA-EPLL 都具有优于 EPLL 的良好动态跟踪性能,为变流器实时控制提供了准确的网压信息,有利于提高变流器的输出功率因数,同时使输出电流波形畸变减小。

此外,PA-EPLL 可提供网压的幅值或者有效值,如图 15 所示。采用通常的滤波方法虽能获取网压有效值,但是滤波会造成一定的延时,无法及时反映网压实时情况,而 PA-EPLL 捕获的网压有效值可实时反映网压真实情况,具有良好的动态性能。

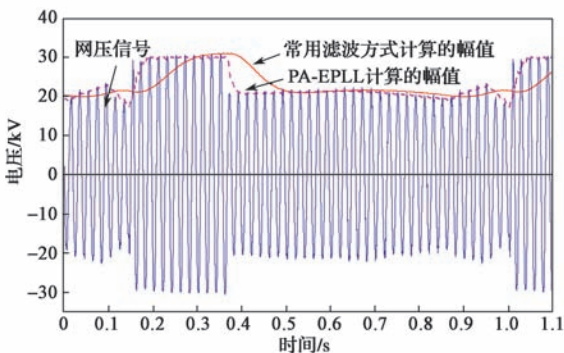


图 15 PA-EPLL 捕获的网压幅值

Fig. 15 Voltage amplitude of power network with PA-EPLL

4 结语

快速准确地获取同步相位是电网环境恶劣条件下机车/动车四象限变流器稳定运行的基本要求。由于环路滤波器具有低通滤波特性,基于低通滤波器的闭环锁相方法无法在电网环境恶劣条件下快速准确地对网压锁相。本文针对该问题提出了一种参数自适应增强型锁相环的方法,首先分析了传统闭环锁相方法动态响应速度的不足,在一种能够快速提取网压信息的增强型锁相环(EPLL)方法基础上,引用自适应控制策略,使增益系数具有自适应变化的特点,即在相位发生突变时能瞬时反应并抑制相位参数变化对于频率的影响,进一步提高锁相的动态性能。该参数自适应型增强型锁相环(PA-EPLL)能够克服传统EPLL参数的耦合特性带来的不良影响,在相位发生跳变时可抑制频率的波动,进一步提升锁相的动态跟踪性能与抗干扰性。实验结果表明,本文提出的自适应增强型锁相环能够实现快速准确地捕获电网电压同步相位、频率与幅值,在网压发生畸变时也具有良好动态性能。

尽管PA-EPLL能够实现快速准确地捕获电网电压,但是相较于PLL,PA-EPLL捕获的电网频率在稳态时尚不够平滑,存在一定的波动。后续将研究分析到这部分波动产生的原因并找出解决方法。

参考文献:

- [1] SINGH B, ARYA S R. Implementation of single-phase enhanced phase-locked loop-based control algorithm for three-phase DSTATCOM [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1516-1524.
- [2] WANG L, JIANG Q, HONG L C, 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.
- [3] 闫士杰, 纪茂新, 黄丽萍, 等. 带多频段采样观测器的单相逆变器控制 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 81-89.
YAN S J, JI M X, HUANG L P, et al. A Single-phase Inverter Control With Multi-band Sampling Observers[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 81-89.
- [4] 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.
YUAN Z C, SONG Q, LIU W H. A Modified Soft Phase Lock Loop Algorithm Improving the Performance in Dynamic Phase Tracking and Detection of Unbalanced Voltage[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 31-35.
- [5] 熊连松, 刘小康, 卓放, 等. 光伏发电系统的小信号建模及其控制器参数的全局优化设计方法 [J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1234-1241.
XIONG L S, LIU X K, ZHUO F, et al. Small-Signal Modeling of Photovoltaic Power Generation System and Global Optimal Design for Its Controller Parameters[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1234-1241.
- [6] 陈世伟. 锁相环路原理及应用 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1990: 90-127.
- [7] SILVA S M, LOPES B M, FILHO B J C, et al. Performance evaluation of PLL algorithms for single-phase grid-connected systems[C]//2004 IEEE Industry Applications Conference, 39th IAS Annual Meeting, Seattle: IEEE, 2004.
- [8] 袁庆庆, 戴鹏, 符晓, 等. 单相电力锁相环技术综述 [J]. 变频器世界, 2010(7): 43-46.
YUAN Q Q, DAI P, FU X, et al. An Overview of Single-phase Power Phase-locked Loop Technique[J]. The World of Inverters, 2010(7): 43-46.
- [9] AMUDA L N, FILHO B J C, SILVA S M, et al. Wide bandwidth single and three-phase PLL structures for grid-tied PV systems[C]//Conference Record of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Anchorage: IEEE, 2000.
- [10] 李明, 王跃, 王兆安, 等. 正交分量动态生成的单相锁相环 [J]. 电力电子技术, 2014, 48(2): 56-58.
LI M, WANG Y, WANG Z A, et al. Single-phase PLL With Dynamic Orthogonal Signal Generation[J]. Power Electronics, 2014, 48(2): 56-58.
- [11] MOJIRI M, BAKHSHAI A R. An adaptive notch filter for frequency estimation of a periodic signal[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(2): 314-318.
- [12] CIOBOTARU M, TEODORESCU R, BLAABJERG F. A new single-phase PLL structure based on second order generalized integrator[C]//37th IEEE Power Electronics Specialists Conference. Jeju: IEEE, 2006.
- [13] 薛畅, 王建赟, 纪延超, 等. 具有高动态性能和锁相精确度的改进 PLL 设计 [J]. 电机与控制学报, 2014, 18(8): 116-120.
XUE C, WANG J Z, JI Y C, et al. Design of improved PLL with high dynamic performance and phase-locked precision[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(8): 116-120.