

# 基于自适应增强型复系数滤波器的 多电飞机变频电网状态估计

胡欣<sup>1</sup>, 郭梦洁<sup>1</sup>, 张震<sup>1</sup>, 马瑞卿<sup>2</sup>, 段晨东<sup>1</sup>

(1. 长安大学 能源与电气工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710129)

**摘要:** 多电飞机的电网是一种典型的孤岛微网, 具有 360~800 Hz 的宽频率工作范围, 传统恒定频率电网同步方法的动态性能在飞机变频电网中有所不足。为了准确估计飞机变频电网的电网状态, 结合自适应模块, 对增强型复系数滤波器锁相环进行改进, 设计了一种适用于 MEA 变频电网的自适应增强型复系数滤波器锁相环结构(AECCF-PLL)。分析了其传递函数与阶跃响应之间的关系, 推导了模型参数与频率的关系, 建立了频率自适应模块, 满足飞机变频交流电网状态估计对稳定性和快速性的要求。实验结果表明, 在飞机变频电网含有大小频率跳变、谐波、斜坡等扰动情况时, 提出的 AECCF-PLL 可以实现对电网状态的快速稳定估计。

**关键词:** 变频电网; 电网同步; 频率自适应; 锁相环

中图分类号: TM935

文献标志码: A

文章编号: 1000-2758(2024)03-0460-07

与传统飞机相比, 多电飞机(MEA)具有质量轻、可靠性高、损耗低的优势, 受到了越来越多的关注, 成为航空技术的发展趋势<sup>[1]</sup>。随着电力系统和电网容量的增加, MEA 中的拓扑、控制和参数估计等电网技术的研究越来越重要。在 MEA 技术中, 电网电压参数的估计为电力系统提供了关键信息, 频率和相位的估计对于 MEA 电网的功率控制和电网同步必不可少。MEA 电网是典型的孤岛微网, 具有 360~800 Hz 的宽频率范围, 从一个正常频率瞬变开始, 在大于 25 ms 时段测量的频率变化率应不大于 250 Hz/s, 但随着不同功能的需求, 频率会进行大范围跳变, 超过了正常频率波动变化率, 条件更加苛刻, 因此对其状态估计方法提出了一个更高的要求<sup>[2]</sup>。工频电网具有恒定频率, 相比之下, 在 MEA

电网中估计频率和相位比在工频电网中的难度更加提高<sup>[3]</sup>。

目前许多学者已经提出了多种用于工频电网交流系统的电网电压参数估计方法。主要方法有卡尔曼滤波<sup>[4-5]</sup>、离散傅里叶变换<sup>[6-7]</sup>、过零检测<sup>[8]</sup>、自适应陷波滤波器<sup>[9-10]</sup>、最小二乘估计和锁相环(PLL)<sup>[11-14]</sup>。估计参数通常包括电网频率和相位。在这些估计方法中, PLL 因为结构简单且性能良好, 是最常用的估计公用电网电压参数的方法。单同步参考坐标系锁相环(SSRF-SPLL)作为电网同步的一种经典方法, 经常用于公用电网的参数估计<sup>[15]</sup>。但 PLL 锁相后会出现 2 倍频振荡, 影响检测精度和性能, 因此需要改进锁相环来提高检测精度和性能<sup>[16]</sup>。文献[16]提供了基于双二阶广义积分器和解耦双同步参考坐标系的锁相环方法, 适用于基频不对称电网故障下的电网同步。文献[17]研究了一种基于广义 DFT 的同步参考帧锁相环, 来提高基频电网抑制谐波的能力。文献[18]中复系数滤波器锁相环(CCF-PLL)能够选择性地提取/抑制不同信号的干扰, 提高在基频下的抗干扰能力, 但 PLL 的 VCO 输入到 CCF 之间存在一个频率反馈环路, 导致它们之间的动态相互作用, 使动态响应较差。

收稿日期: 2023-05-25

基金项目: 航空科学基金(202200190Q6002)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2023JC-YB-450)、陕西省重点研发计划(2023-YBGY-094)、西安市重点产业链(23ZDCYJSGG0013-2023)与陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2024QCY-KXJ-161)资助

作者简介: 胡欣(1975—), 教授

通信作者: 张震(1986—), 讲师 e-mail: zhenzhang@chd.edu.cn

为了提高该锁相环的性能,文献[19]中提出了 ECCF-PLL,对文献[18]中的频率反馈信息进行改变,避免了动态交互,并不添加额外的计算负担。这些适用在工频电网下的锁相环方法,在 MEA 变频电网下将远离平衡点工作,性能显著下降<sup>[20]</sup>。因此一些学者针对 MEA 变频电网,提出了一些改进方案。在文献[21]中,通过增加重复观测器(RO)增强线性卡尔曼滤波器 PLL 的抗扰能力。在文献[22]中,提出了一种基于自适应观测器的多正弦信号鲁棒估计的方法,以便提高飞机电网同步的动态响应。

本文首先分析了典型 SSRF-SPLL 在工频电网下能有效应对电网小频率跳变时追踪频率和相位的情况,但在变频电网频率跳变时可能会远离平衡点工作,动态性能可能有所损失。针对此问题,结合自适应模块和增强型复系数滤波器锁相环(ECCF-PLL)<sup>[23]</sup>,设计了一种适应于 MEA 变频电网的自适应增强型复系数滤波器锁相环结构(AECCF-PLL)。先阐述 AECCF-PLL 的工作原理,后给出了 AECCF-PLL 中的参数设计方法。最后,通过实验结果验证了设计的 AECCF-PLL 在变频电网下含有大小频率跳变、谐波、斜坡时,均可以实现对电网电压信息稳定快速精确的估计。

## 1 典型锁相环的分析

典型锁相环(SSRF-SPLL)的结构图如图1所示,包含3个基本模块:相角检测器(PD)、环路滤波器(LF)和电压控制振荡器(VCO)。

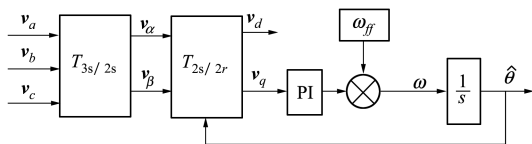


图1 单同步参考坐标系锁相环(SSRF-SPLL)结构图

根据文献[18],SSRF-SPLL 中相角估计的闭环误差传递函数为

$$E_{\theta}(s) = \frac{s^2}{s^2 + k_p s + k_i} \quad (1)$$

$k_p, k_i$  为比例积分器的系数。由经典控制理论可知 SSRF-SPLL 以恒定频率应用于公用电网时,它在平衡点附近工作,在稳态精度和动态响应方面都具有良好的性能。当电网电压的频率大范围变化时,假设电网电压的频率变化  $\Delta\omega_m$  在电网频率  $\omega_c$  -

$\Delta\omega_L$  和  $\omega_c + \Delta\omega_L$  之间,SSRF-SPLL 具有快速的动态响应,其中 PI 环路滤波器的锁定范围  $\Delta\omega_L$  近似为

$$\Delta\omega_L \approx 2\xi\sqrt{k_p k_i} \quad (2)$$

阻尼系数  $\xi$  取最佳阻尼比为  $1/\sqrt{2}$ ,其锁定时间  $T_L$  计算为

$$T_L \approx 2\pi\sqrt{1/(k_p k_i)} \quad (3)$$

如果频率变化  $\Delta\omega_m$  超出范围  $\omega_c \pm \Delta\omega_L$ ,但落在 SSRF-SPLL 总能牵引进入锁相状态的牵入范围  $\Delta\omega_p$  内,则锁相环所需的锁相时间为

$$T_p \approx (\pi^2 \Delta\omega_m^2 / 16\xi) \sqrt{1/(k_p k_i)^3} \quad (4)$$

会使 PLL 的动态响应变得非常慢。总之,在电网频率小范围内变化的工频电网中,PLL 在  $\omega_c \pm \Delta\omega_L$  范围内运行,具有良好的动态响应。然而,频率范围在 360 ~ 800 Hz 之间的 MEA 变频电网中,锁相环可能在  $\omega_c \pm \Delta\omega_L$  范围外工作,因此其动态性能显著下降。

## 2 增强型复系数滤波器锁相环

ECCF-PLL 的结构图如图2所示。ECCF-PLL 使用2个复系数带通滤波器以协作的方式提取基频正负序分量,同时为了避免电压控制振荡器(VCO)和频率反馈之间的动态交互,将传统 PLL 估计频率的输出改为 VCO 的输入加上 PI 控制器中的积分器的输出来提供电网频率的估计,将该频率估计值用于反馈到滤波器的信号,将改进的 PLL 结构来检测基频正序分量的参数。

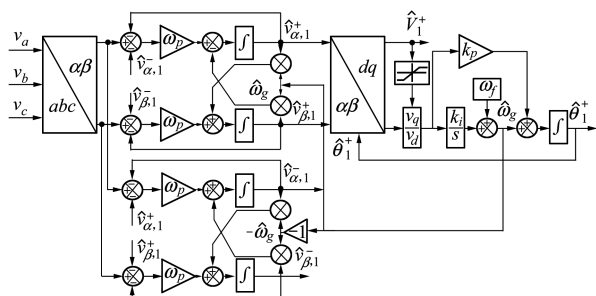


图2 增强型复系数滤波器锁相环(ECCF-PLL)结构图

将模型线性化可得到 ECCF-PLL 的传递函数为

$$\frac{\hat{\theta}_1^+}{\theta_1} = \frac{\omega_p(k_p s + k_i)}{s^3 + (\omega_p + k_p)s^2 + \omega_p k_p s + \omega_p k_i} \quad (5)$$

复系数滤波器具有序列选择性滤波能力,使 ECCF-PLL 能够在 PLL 控制回路之前有效抑制谐波扰动,而为了避免动态交互后改进的 PLL 结构,使

ECCF-PLL 在基频电网下可以获得较好的动态性能和鲁棒性。但在 MEA 变频电网大范围频率变化下, 锁相环可能在  $\omega_c \pm \Delta\omega_L$  范围外工作, 系统的动态响应降低。

### 3 变频电网自适应增强型复系数滤波器锁相环

为了提高锁相环在 MEA 变频电网下的动态性能, 使频率变化  $\Delta\omega_{in}$  落在  $\omega_c \pm \Delta\omega_L$  范围, 提出了 AECCF-PLL, 该模型将锁相环输出的电网频率反馈给复系数滤波器中的截止频率  $\omega_p$  和锁相环中 PI 控制器的比例系数  $k_p$  与积分系数  $k_i$ , 使模型参数随电网频率变化来实时修正, 从而构成自适应的复系数滤波器和自适应的锁相环。提出的 AECCF-PLL 结构如图 3 所示, 使用 2 个自适应的复带通滤波器提取频率的正负序分量, 使用 PI 自适应的 PLL 检测频率正序分量的频率和相位。

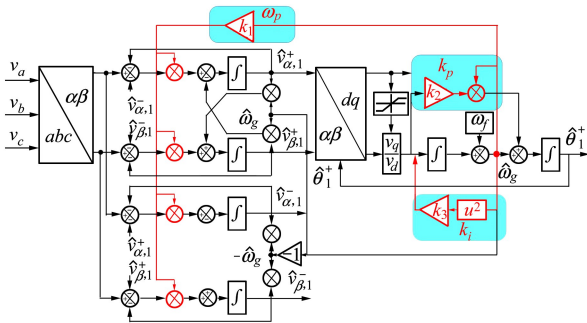


图 3 自适应增强型复系数滤波器锁相环 (AECCF-PLL) 结构图

由复系数滤波器的传递函数<sup>[20]</sup>可知截止频率  $\omega_p$  决定了传递函数的阻尼因子。通常二阶系统采用的最佳阻尼系数为  $1/\sqrt{2}$ 。在自适应增强型复系数滤波器中, 截止频率  $\omega_p$  对应于  $\omega_p = \omega_c/\sqrt{2}$ ,  $\omega_c$  表示在 MEA 变频电网下实时变化输出的电网频率。

将(5)式中的特征多项式与三阶系统的单位阶跃响应联立可得

$$s^3 + (\omega_p + k_p)s^2 + \omega_p k_p s + \omega_p k_i = (s + \mu\omega_n)(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2) \quad (6)$$

展开(6)式中对应系数可得

$$\omega_p + k_p = (2\xi + \mu)\omega_n \quad (7)$$

$$\omega_p k_p = (2\xi\mu + 1)\omega_n^2 \quad (8)$$

$$\omega_p k_i = \mu\omega_n^3 \quad (9)$$

由(7) ~ (8)式联立可得

$$k_p^2 + \omega_p \left( \frac{2 - 4\xi^2 - \mu^2}{2\xi\mu + 1} \right) k_p + \omega_p^2 = 0 \quad (10)$$

根据二次函数判别性质(由于比例增益  $k_p$  只能具有实数值(相对于复数来说), 因此二次方程(10)的判别式应该大于或等于 0), 结合  $\xi = 1/\sqrt{2}$  和  $\omega_p = \omega_c/\sqrt{2}$  可得

$$\mu \geq 2 + \sqrt{2} \quad (11)$$

$\mu$  是根据固有频率值确定实际极点位置的系数, 由(10)式中二次函数判别式可知,  $\mu$  不受  $\omega_p$  值的影响, 为保持锁相环的高滤波能力, 实际极点位置应尽可能靠近原点, 即选择  $\mu$  的最小可能值  $2 + \sqrt{2}$  代入(7) ~ (9)式, 可得出 AECCF-PLL 中  $\omega_p, k_p, k_i$  三者与电网频率  $\omega_c$ (等同于模型结构图中的  $\omega_g$ ) 之间的关系式。

$$\omega_n = \frac{\omega_p}{2.414} \quad (12)$$

$$\omega_p = \frac{\omega_c}{\sqrt{2}} \quad (13)$$

$$k_p \approx \omega_p = 0.707\omega_c \quad (14)$$

$$k_i = 0.243\omega_p^2 = 0.1215\omega_c^2 \quad (15)$$

由(13) ~ (15)式可知变化的电网频率与模型参数之间关系式, 在 MEA 变频电网下 AECCF-PLL 的自适应复系数滤波器的截止频率  $\omega_p$  会随着频率  $\omega_c$  的变化而变化, 从而影响系统的带宽; 电网频率  $\omega_c$  变化的同时, 也会改变自适应 PI 中  $k_p, k_i$  的值, 随之改变  $\Delta\omega_L$  的值, 使频率变化  $\Delta\omega_{in}$  落在  $\omega_c \pm \Delta\omega_L$  范围, 以获得较好的动态响应。

### 4 实验

在本节中, 将设计的 AECCF-PLL 与 ECCF-PLL、SSRF-SPLL 进行对比。实验装置如图 4 所示。使用基于 DSP TMS320C28346 的 RTU-BOX 平台。

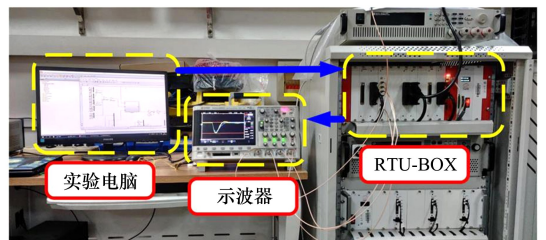


图 4 实验装置

实验参数设置如表 1 所示。

表 1 实验参数表

实验参数	数值
系统采样频率/kHz	10
电网电压角频率 $\omega / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$2\pi(450/460/750)$
ECCF-PLL 参数 PI	$k_p = 222.1; k_i = 11\ 974$
ECCF-PLL 参数 $\omega_p$	$\omega_p = 222.1$

#### 4.1 小频率跳变

为验证 AECCF-PLL 在 MEA 电网小频率跳变下

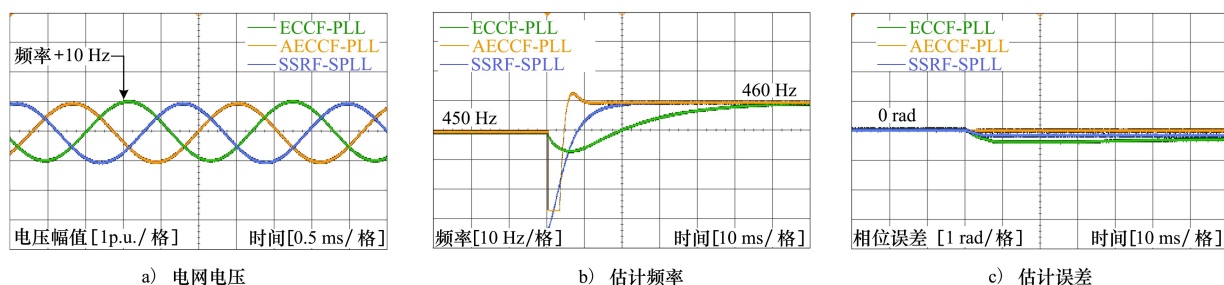


图 5 电网频率发生小频率跳变 450~460 Hz 的实验结果

#### 4.2 大频率跳变

为验证 AECCF-PLL 在 MEA 电网大频率跳变下跟踪性能,电网电压频率从 450 Hz 跳变为 750 Hz。图 6b) 为 3 种锁相环在 450 Hz 时进行大频率跳变对电网频率估计的结果,可以看出所提出的 AECCF-PLL 可以在 8 ms 内准确估计电网频率,

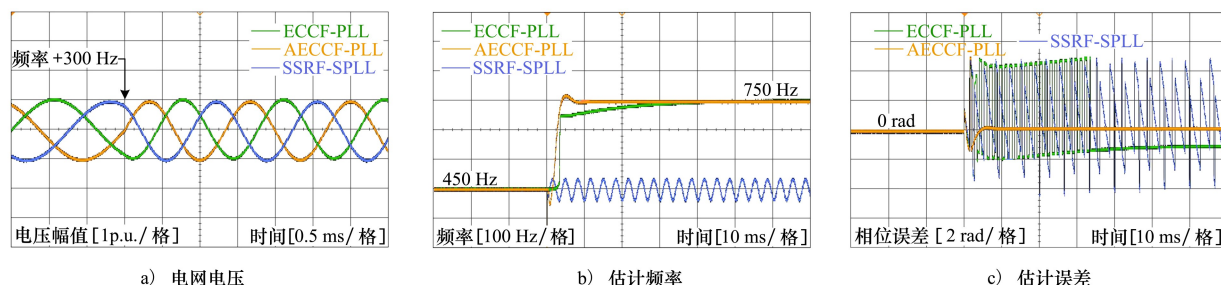


图 6 电网频率发生大频率跳变 450~750 Hz 的实验结果

#### 4.3 谐波

为验证 AECCF-PLL 对于谐波抑制的效果,为 450 Hz 频率施加谐波分量,谐波分量中含有 5, 7, 11 次谐波,其中  $V_5 = 0.1 \text{ p.u.}$ ,  $V_7 = 0.1 \text{ p.u.}$ ,  $V_{11} =$

的跟踪性能,电网电压频率从 450 Hz 跳变为 460 Hz。图 5a) 为输入信号,图 5b) 为 3 种锁相环在进行小频率跳变时对电网频率估计的结果,在发生小频率跳变时,所提出的 AECCF-PLL 可以在 9 ms 内准确估计电网频率,其动态响应速度快于 ECCF-PLL、SSRF-SPLL。图 5c) 为 3 种锁相环估计的相位误差,其中 AECCF-PLL 的相位误差收敛于零,另外 2 种锁相环均含有静差,得出 AECCF-PLL 在 450 Hz 的小频率跳变下具有更短的稳定时间和更高的稳定性。

SSRF-SPLL 不稳定震荡,AECCF-PLL 具有更短的稳定时间和更平滑的动态行为。从图 6c) 可以看出 AECCF-PLL 短暂震荡后趋近于零的相位误差,其他两者均有持续震荡。综合对比看出 AECCF-PLL 在 MEA 电网大频率跳变时,有较好的动态响应。

0.1 p.u.。3 种锁相环对于谐波抑制的效果如图 7 所示,图 7a) 为输入信号,图 7b) 为 3 种锁相环在频率不发生变化时施加谐波对电网频率估计的结果,可以看出在谐波下 SSRF-SPLL 对电网频率的估计含

有持续震荡,效果较差,AECCF-PLL 有极小的震荡,估计频率的稳态误差为 0.097%,效果好于 SSRF-SPLL,略低于 ECCF-PLL。图 7c)为 3 种锁相环估计

的相位误差,三者的相位误差均收敛于零,可知 AECCF-PLL 和 ECCF-PLL 对谐波抑制有较好的效果。

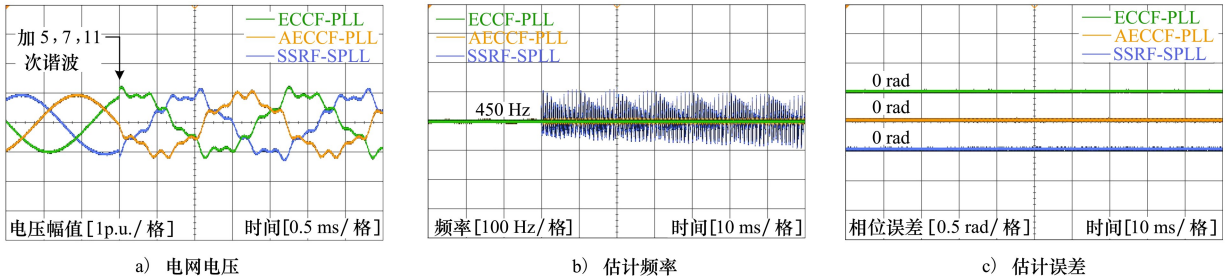


图 7 电网电压中含有 5,7,11 次谐波的实验结果

### 4.4 斜坡

为验证 AECCF-PLL 对于 MEA 电网频率斜坡变化的跟踪效果,输入电网电压频率为 450~750 Hz 的斜坡变化。图 8a)为 3 种锁相环对电网频率估计的对比,可以看出 AECCF-PLL、ECCF-PLL 在对频率追踪的过程中,具有平滑的动态行为,AECCF-PLL 达到近乎零误差的频率追踪,ECCF-PLL 追踪频率有明显延迟,图 8b)可以看出 ECCF-PLL 在斜坡变化时,有持续的稳态误差,SSRF-SPLL 持续震荡波动,AECCF-PLL 保持零稳态误差。综合看出 AECCF-PLL 在频率斜坡变化追踪时,有更好的稳定性。

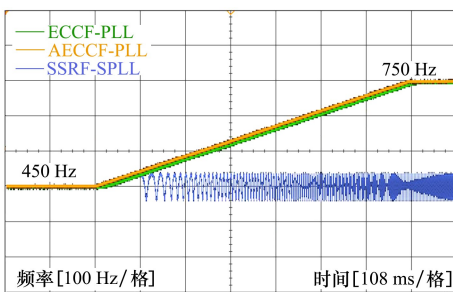
表 2~3 提供了 3 种锁相环在不同情况下的动态性能总结。SSRF-SPLL 在变频电网中不稳定,多数情况下会一直出现震荡,数据较少,出现震荡时在表中用“/”来表示。

表 2 不同方法的性能比较

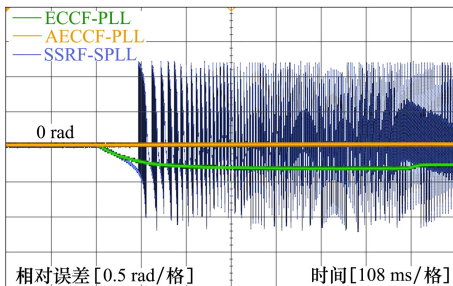
方法	小频率跳变		大频率跳变	
	调整时间/ms	相位误差/rad	调整时间/ms	相位误差/rad
AECCF-PLL	9	0	8	0.05
ECCF-PLL	52	0.4	30	/
SSRF-SPLL	22	0.2	/	/

表 3 不同方法的性能比较

方法	谐波		斜坡	
	稳态误差/Hz	相位误差/rad	稳态误差/Hz	相位误差/rad
AECCF-PLL	0.435	0	0	0
ECCF-PLL	0.17	0	20	0.33
SSRF-SPLL	/	0.04	/	/



a) 电网电压



b) 估计频率

图 8 电网频率出现斜坡(450~750 Hz)变化的实验结果

## 5 结论

本文提出了一种自适应增强型复系数滤波器锁相环(AECCF-PLL),用于 MEA 变频电网状态估计。与 ECCF-PLL 和 SSRF-SPLL 相比,该方法通过建立频率反馈自适应模块,使模型参数随电网频率变化实时修正,该方法在大小频率跳变、斜坡和谐波情况下都可以较快且稳定地估计出电网状态。本文给出了详细的参数设计方法,最后通过对比实验结果,验证了设计的 AECCF-PLL 在应对 MEA 变频电网故障时,具备了良好的参数状态估计准确性。

## 参考文献:

- [1] MADONNA V, GIANGRANDE P, GALEA M. Electrical power generation in aircraft: review, challenges, and opportunities [J]. *IEEE Trans on Transportation Electrification*, 2018, 4(3): 646-659
- [2] DAI Z, LV S, MWANIKI J K, et al. Global accurate estimation of positive-and negative-sequence voltage components for variable frequency AC systems[J]. *IET Power Electronics*, 2018, 11(10): 1730-1737
- [3] FAN M, DAI Z, YANG Y, et al. Fast grid synchronization method for variable-frequency AC systems[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 120: 105990
- [4] NIE X. Detection of grid voltage fundamental and harmonic components using Kalman filter based on dynamic tracking model [J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2020, 67(2): 1191-1200
- [5] XU W, HUANG C, GOLESTAN S. Design-oriented study of the orthogonal vector-based linear Kalman filter: enhancements and applications[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2022, 69(12): 13359-13372
- [6] 李海, 杨小柳. 基于自适应滑模观测器的新型快速锁相环设计[J]. *电源学报*, 2021, 19(5): 143-149  
LI Hai, YANG Xiaoliu. Design of a new fast phase locked loop based on adaptive sliding mode observer[J]. *Journal of power Sources*, 2021, 19(5): 143-149 (in Chinese)
- [7] XU Z, DAI K, YANG B, et al. Three-phase PLL based on vector dft under distorted and unbalanced grid[C]//2022 IEEE 3rd China International Youth Conference on Electrical Engineering, Wuhan, 2022: 8881-8891
- [8] REZA M S, SADEQUE F, HOSSAIN M M, et al. Three-phase PLL for grid-connected power converters under both amplitude and phase unbalanced conditions[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2019, 66(11): 8881-8891
- [9] HE X, GENG H, YANG G. A generalized design framework of notch filter based frequency-locked loop for three-phase grid voltage[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2018, 65(9): 7072-7084
- [10] ZHANG Q, FAN Y, CHEN J, et al. A current harmonic suppression method for PMSM based on harmonic prediction adaptive notch filter[J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2022, 37(3): 2107-2118
- [11] 王旭斌, 杜文娟, 王海风. 弱连接条件下并网 VSC 系统稳定性分析研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(6): 1593-1604  
WANG Xubin, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Review of stability analysis of grid-connected VSC systems with weak connections [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2018, 38(6): 1593-1604 (in Chinese)
- [12] 胡祺, 付立军, 马凡, 等. 弱电网下基于锁相控制并网变换器小扰动同步稳定分析[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(1): 98-108  
HU Qi, FU Lijun, MA Fan, et al. Small disturbance synchronous stability analysis of grid-connected converter based on phase-locked control in weak current network[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2021, 41(1): 98-108 (in Chinese)
- [13] HASSAN F, KUMAR A, PATI A. Recent advances in phase locked loops for grid connected systems; a review[C]//2022 IEEE Delhi Section Conference, New Delhi, India, 2022: 1-6
- [14] BABU B C. A novel adaptive bandpass filter based pll for grid synchronization under distorted grid conditions[J]. *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1-11
- [15] 张兴, 张崇魏. PWM 整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2012  
ZHANG Xing, ZHANG Chongwei. PWM rectifier and its control[M]. Beijing: China Machine Press, 2012 (in Chinese)
- [16] TEODORESCU R, LISERRE M, RODRIGUEZ P. 光伏与风力发电系统并网变换器[M]. 周克亮, 王政, 徐青山, 译. 北京:机械工业出版社, 2012  
TEODORESCU R, LISERRE M, RODRIGUEZ P. Grid converters for photovoltaic and wind power systems [M]. ZHOU Keliang, WANG Zheng, XU Qingshan, Translated, Beijing: China Machine Press, 2012 (in Chinese)
- [17] YANG T, LU D, XING Y, et al. Generalized DFT-based synchronous reference frame phase-locked loop applicable to distorted grid conditions[C]//IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, Gliwice, Poland, 2021: 319-324
- [18] DAI Z, YANG J, RAO D, et al. A global convergence estimator of grid voltage parameters for more electric aircraft[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2020, 67(9): 7540-7549

- [19] GUO X, WU W, CHEN Z. Multiple-complex coefficient-filter-based phase-locked loop and synchronization technique for three-phase grid-interfaced converters in distributed utility networks [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1194-1204
- [20] RAMEZANI M, GOLESTAN S, LI S, et al. A simple approach to enhance the performance of complex-coefficient filter-based PLL in grid-connected applications[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2018, 65(6): 5081-5085
- [21] TANG M, BIFARETTI S, PIPOLO S, et al. A novel low computational burden dual-observer phase-locked loop with strong disturbance rejection capability for more electric aircraft[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2021, 57(4): 3832-3841
- [22] CHEN B, PIN G, NG W M, et al. An adaptive observer-based robust estimator of multi-sinusoidal signals[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2018, 63(6): 1618-1631
- [23] RAMEZANI M, GOLESTAN S, LI S, et al. A simple approach to enhance the performance of complex-coefficient filter-based PLL in grid-connected applications[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2018, 65(6): 5081-5085

## State estimation of variable frequency power grid of multi-electric aircraft based on adaptive enhanced complex-coefficient filter

HU Xin<sup>1</sup>, GUO Mengjie<sup>1</sup>, ZHANG Zhen<sup>1</sup>, MA Ruiqing<sup>2</sup>, DUAN Chendong<sup>1</sup>

(1.College of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;  
2.School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

**Abstract:** The power grid of a multi-electric aircraft is a typical isolated island microgrid with a wide frequency range from 360 to 800 Hz. The dynamic performance of the traditional constant-frequency power grid synchronization method is insufficient in the variable frequency power grid of the multi-electric aircraft. An adaptive enhanced complex-coefficient filter-based phase locked loop (AECCF-PLL) is designed for the variable frequency power grid by integrating an adaptive module into the enhanced complex-coefficient filter-based phase locked loop to accurately estimate the state of variable frequency power grid. The relationship between the transfer function and the step response is analyzed. The relationship between the model parameters and the frequency is derived, and the frequency adaptive module is established to meet the requirements for stability and rapidity in the state estimation of the variable frequency power grid. The experimental results show that the proposed AECCF-PLL can achieve the rapid and stable estimation of the state of the variable frequency power grid when there are disturbances such as large or small frequency jumps, harmonics and slopes.

**Keywords:** variable frequency power grid; grid synchronization; adaptive frequency; phase locked loop

**引用格式:** 胡欣, 郭梦洁, 张震, 等. 基于自适应增强型复系数滤波器的多电机变频电网状态估计[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(3): 460-466

HU Xin, GUO Mengjie, ZHANG Zhen, et al. State estimation of variable frequency power grid of multi-electric aircraft based on adaptive enhanced complex-coefficient filter[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2024, 42(3): 460-466 (in Chinese)