

电气化公路供电质量综合检测的仿真平台研究

孙洋锐

石家庄铁道大学 河北石家庄 050043

【摘要】为达成“碳达峰”、“碳中和”的美好愿景，需加快交通用能结构的转型升级，而公路“电气化”将是转型的关键。本小组基于电气化高速公路现有的供电制式，利用Hilbert滤波法、锁相环等方法，设计研制了电气化公路供电质量检测的仿真平台。本平台可以准确仿真检测电气化公路运行时的各项电能质量，既有利于其供电系统稳定性的提升，又可以为日后创新提供数据支撑，为未来大规模电气化公路的实践，开展新技术、新设备与系统集成特性奠定一定基础。

【关键词】电气化公路；电能质量；Hilbert滤波法；锁相

随着人类不文明行为的增加和对传统化石燃料的频繁消耗，全球变暖日益严重，造成这一现象的最大原因是二氧化碳以及其它“温室气体”的过度排放。而根据数据显示：仅占汽车保有量3.4%的重型柴油货车和大型客车的尾气污染物排放分别占全部汽车CO、HC、NO_x和PM总排放的25.7%，32.0%，70.8%和75.2%^[1]。为了解决重型柴油货车污染大的问题，人们想到了用电能代替柴油，尤其是来自光伏发电的电能更为环保，由此人们提出电气化公路概念。我国电气化公路目前正处于起步阶段，然而我国的电气化铁路系统已经相当成熟。因此，电气化公路的建设可以借鉴高铁的发展经验。例如，在高铁发展中，由于牵引负荷是一种特殊的负荷，其不对称性、波动性、冲击性特征非常明显，这种特性增加了供电难度。因此，电气化公路的供电系统难免会遇到同样的问题。基于上述情况，我们提出了电气化公路供电质量综合检测的仿真平台，该平台可以检测各项电能质量，如电压、电流、瞬时功率、谐波等，此举有利于提高供电系统的稳定性。该平台弥补了目前市场上在该领域的不足，有助于促进电气化公路的发展与推广。

1 平台介绍

本软件使用Matlab编写图形界面，本软件具有良好的人机交互界面，方便工作人员使用功能和查看存储数据。具体实现功能如下：

1.1 用户管理功能

系统设置登录权限，用户名、密码保存至数据库中，保障系统登录的安全性。

1.2 单独VSC(柔性直流输电技术)供电情况显示功能

用户可以选择VSC单独供电方式同时用户还可以选择不同的机车功率进行模拟。

1.3 光储、VSC混合供电方式显示功能

用户可以选择光储、VSC混合供电方式运行系统，与之前的单独VSC系统作比较。同时用户还可以选择不同的机车功率进行模拟。VSC有控制灵活、可向无源网络供电、谐波含量低等优点，而光储可提高能源利用率，两者都是十分先进的供电方式。

1.4 功率潮流分析功能

用户可以通过平台获取各个点功率，在进行正常供电能力分析前对汽车参数的设置。在进行汽车参数设置时需设置汽车的功率。汽车数量不超过6辆。参数设置完毕后点击数据导入，点击图中界面即可查看牵引变电所供电能力分析结果，首端电压、末端电压分布图，功率潮流分析中可查看功率分布以及谐波分析图。

1.5 连续化系统运行及数据保存

用户可以选择单车连续运行或者多辆车连续运行，在设置多辆车连续运行时需选择追踪间隔，默认为3分钟。在进行连续模块测试后，测试的数据可以选择保存，平台会自动生成数据Excel表，方便客户查看、分析。

2 平台各模块设计说明

2.1 电压、电流的有效值测量

由于受到许多整数次谐波的影响，电压和电流都存在各种程度的畸变，但经过傅立叶级数分解后，一般都可以分解为基波频率的整数倍数的傅立叶级数。对于任意一个周期的电流信号，可以定义其有效值为^[2]：

$$I \cong \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (1)$$

非正弦周期电流的有效值等于恒定分量的平方与各次谐波有效值的平方和的平方根，即：

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} = \sqrt{I_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} I_k^2} \quad (2)$$

同理可得任一周期电压的有效值计算公式为:

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots} = \sqrt{U_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k^2} \quad (3)$$

对于离散电压电流计算公式为:

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_k^2} \quad U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u_k^2} \quad (4)$$

2.2 瞬时功率与无功功率测量

根据瞬时功率的表达式:

$$p = ui = UI[(\cos \phi) - \cos(2\omega t - \phi)] = UI \cos \phi - (UI \cos \phi \cos 2\omega t - UI \sin \phi \sin 2\omega t) \\ = UI \cos \phi (1 - \cos 2\omega t) - UI \sin \phi \sin 2\omega t$$

第一项为非负数,表示等效电阻吸收的瞬时功率,第二项是以 $UI \sin \phi$ 为振幅的正弦分量。其正负半周期与横轴构成的面积相等,表示吸收功率=释放功率。即表示电源与负载间能量的交换部分(不做功)。往返能量交换的多少与 $UI \sin \phi$ 有关,交流电路中把该量定义为无功功率,即 $Q = UI \sin \phi$,表示电源与负载之间交换能量的最大速率。

而在实际的电力系统中,尤其是在牵引电网中,由于其供电方式的特殊性,电网中的电压和电流含有大量谐波,这使得无功功率的计算变得更加复杂。本文仅探讨在非正弦系统中的无功功率计算。

Hilbert滤波法

设 $x(t)$ 是连续时间信号,称如下积分:

$$X(\tau) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(t)}{\tau - t} dt \quad (5)$$

为 $x(t)$ 的连续希氏变换 (continuous Hilbert transform), 简记为CHT。

$$\text{设 } g(t) = \begin{cases} \frac{1}{\pi t} & (t \neq 0) \\ 0 & (t = 0) \end{cases}, \text{ 根据连续傅氏变换的线性卷积性质可得:}$$

$$F_x(j\Omega) = G(j\Omega)F_x(j\Omega) = -j \operatorname{sgn}(\Omega) F_x(j\Omega) = \begin{cases} -jF_x(j\Omega) & (\Omega > 0) \\ 0 & (\Omega = 0) \\ jF_x(j\Omega) & (\Omega < 0) \end{cases} = \begin{cases} F_x(j\Omega)e^{-\frac{\pi}{2}} & (\Omega > 0) \\ 0 & (\Omega = 0) \\ F_x(j\Omega)e^{\frac{\pi}{2}} & (\Omega < 0) \end{cases} \quad (6)$$

式中 $F_x(j\Omega)$, $F_x(j\Omega)$ 和 $G(j\Omega)$ 分别为 $X(\tau)$, $x(t)$ 和 $g(t)$ 的傅氏变换, 上式表明, 连续时间信号 $x(t)$ 的 Hilbert 变换 $X(\tau)$, 从连续傅氏变换的角度看, 仅仅是将 $x(t)$ 的各频率分量做了 $\frac{\pi}{2}$ 的移相。根据式(6)可知, 求取有功功率和无功率时, 电压信号在相位上相差 90° , 故对电压信号做 Hilbert 变换将其基波及各谐波成分做 $\frac{\pi}{2}$ 的移相来求取无功功率是可行的。

2.3 基于锁相环的谐波测量

锁相环 (Phase Locked Loop) 是一种利用反馈控制原理实现的频率和相位的同步技术, 它由压控振荡器、鉴相器和环路滤波器三部分组成, 这三部分协调作用, 构成的负反馈控制系统可以使自身系统的输出信号的频率和相位与外部参考输出信号保存一致, 从而实现锁相功能。但对于三相电网, 需综合考虑三相电网电压的相位信息, 但基本锁相环不能同时反映三相电压相位关系。本文以下内容主要论述空间矢量坐标变换原理。

设三相系统电压正序分量为 u_a 、 u_b 和 u_c , u_a 的初相角为 θ , 将三相电压信号从 abc 三相坐标变换到 $\alpha \beta$ 固定坐标系, 再将电压 $\alpha \beta$ 坐标矢量投影到 dq 旋转坐标系中, 得:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta^* & \sin \theta^* \\ -\sin \theta^* & \cos \theta^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{cases} u_d = \sqrt{\frac{3}{2}} U \cos(\theta - \theta^*) \\ u_q = \sqrt{\frac{3}{2}} U \sin(\theta - \theta^*) \end{cases} \quad (8)$$

式果与加软锁相的FFT谐波中 $\theta^* = \omega^* t$, 其中 ω^* 为 dq 旋转坐标角速度。三相锁相环就是使实际正序电压空间矢量与 dq 旋转坐标系旋转角速度保持一致, 即 $\theta = \theta^*$ 时, $u_d = 0$ 来实现锁相^[3]。

为验证三相锁相环在谐波检测中的效果, 以软锁相加 FFT 为例, 分析构造信号, 电网频率分别为 49.5 Hz 和 50.5 Hz 的谐波检测效果如表 1 所示。

表1 2560点FFT谐波检测检测结果

实际值 (单位:V)		49.5Hz				50.5Hz			
		FFT	误差(%)	PLL+FFT	误差(%)	FFT	误差(%)	PLL+FFT	误差(%)
基波	100	98.4636	1.5364	99.9988	0.0012	98.283	1.717	99.997	0.003
2次谐波	5	5.269	5.38	4.9961	0.078	4.3113	13.774	4.990	0.194
3次谐波	20	17.4509	12.7455	19.9966	0.017	16.9551	15.225	19.991	0.05
4次谐波	3	2.6871	10.43	2.9959	0.1367	2.1819	27.27	2.990	0.343
5次谐波	10	6.5669	34.331	9.9954	0.046	6.501	34.99	9.988	0.119
6次谐波	1	0.9122	8.78	0.9948	0.52	1.0455	4.55	0.987	1.3
7次谐波	5	4.3227	13.546	4.9946	0.108	4.2585	14.83	4.986	0.276
63次谐波	1	0.9048	9.52	0.9977	0.23	0.8641	13.59	0.987	1.28

由表1中软锁相快速傅里叶变换(FFT)谐波检测结果可知,对于50Hz信号,软锁相快速傅里叶变换检测精度十分精确,其方法检测谐波误差接近为零;而对于49.5Hz频率信号,不论是基波信号检测误差,还是63次谐波检测误差,都十分精准,特别是在高频频段上,如63次谐波检测误差,软锁相FFT仅为0.23%;对于50.5Hz信号,也与49.5Hz信号检测结果相似,固软锁相FFT方法是十分精确的检测方法。

3 结束语

“十四五”期间,是为实现“双碳”目标奠定基础的关键时期,需要推动能源低碳转型,增加非化石能源消费比重,提升电气化水平,并提高能源利用效率^[4]。其中公路货运在能源消耗和碳排放方面扮演着重要角色,推动公路货运车辆,尤其是重型货车的电气化,对于节能减排、实现“双碳”目标具有重要意义^[5]。而本项目基于Hilbert滤波法、锁相环等方法,设计出可对电气化公路的供电质量进行仿真检测的平台,符合现代电力系统对电能质量的要求日益提高的趋势,同时可为新型电气化公路供电系统研制提供数据支撑,有助于电气化公路在我国的发展,进而推动“双碳”目标的实现。

参考文献:

- [1] 黄少雄, 蒋海峰, 杨文银, 刘志强, 袁旻恣. 电气化公路技术进展及在中国应用的可行性分析. 公路交通科技, 2020, 37(8): 118-126.
- [2] 张焯曦, 成荣凯, 薛强. 高铁供电质量综合检测系统的研究[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2023(5): 0021-0024.
- [3] 王硕禾, 许继勇, 蔡清亮等. 联合三相锁相环和优化三点法的供电频率高精度测量算法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(01): 88-92.
- [4] 国家发展改革委, 国家能源局. 国家发展改革委国家能源局关于印发《“十四五”现代能源体系规划》的通知[EBIOL. (202-01-29) [2022-04-07].
- [5] 张明琦, 郑泽东, 李永东. 公路货运能耗及低碳化发展路径研究[J]. 机车电传动, 2022(03): 10-16. DOI: 10.13890/j.issn.1000-128X.2022.03.002.

作者简介:

孙洋锐(2003.5-), 男, 汉族, 籍贯: 湖南, 学历: 本科, 研究方向: 公路工程。