

基于卡尔曼滤波的谐波检测分析^①

王康宁¹, 王金浩¹, 徐 龙¹, 向 洁², 邱泽晶²

¹(国网山西省电力公司电力科学研究院, 太原 030001)

²(南瑞(武汉)电气设备与工程能效测评中心, 武汉 430074)

摘 要: 针对日益严重且复杂的电网谐波问题, 提出了一种基于卡尔曼滤波的谐波检测方法. 阐述了卡尔曼滤波器的跟踪估计原理, 并建立了基于卡尔曼滤波器谐波分析的数值模型, 结合 Matlab 仿真平台对算法检测稳态谐波和暂态谐波信号的性能进行了分析. 通过对比研究表明该算法在准确度、快速性、暂态谐波分析等方面均优于快速傅里叶变换(FFT), 仿真和试验结果表明该算法在分析复杂的电网电能质量事件中具有较高的实用性.

关键词: 电能质量; 谐波分析; kalman 滤波器; 暂态谐波; 跟踪估计

Harmonics Detection and Analysis Based on Kalman Filter

WANG Kang-Ning¹, WANG Jin-Hao¹, XU Long¹, Xiang Jie², QIU Ze-Jing²

¹(State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China)

²(Nari(Wuhan) Electrical Equipment & Engineering Efficiency Evaluation Center, Wuhan 430074, China)

Abstract: To solve the increasingly harmonic problem which is serious and complex, this paper presented a harmonic detection method based on Kalman filter. In this paper, the Kalman filter estimation theory was discussed, and the numerical model based on Kalman filter analysis was established. Combined with the performance of the simulation platform of Matlab, it discussed the performance of the algorithm for detecting the steady harmonic and transient harmonic signal. The comparative study shows that this algorithm is superior in accuracy, rapidity, transient harmonic analysis to the Fast Fourier Transform algorithm (FFT). The simulation and experiment results show that the algorithm is quite practical in complex electric power quality analysis.

Key words: power quality; harmonic analysis; kalman filter; transient harmonic; tracking estimation

随着日趋增加的分布式能源及非线性负载的接入, 电力系统谐波问题日益严重, 电网谐波分析和治理越来越受到重视. 目前针对电网谐波分析的方法很多, 快速傅里叶变换(FFT)因简单快速, 在工频下能够准确测出信号的幅值、频率和相位而得到了广泛应用. 然而 FFT 分析稳态谐波的准确度较高, 但对于暂态谐波信号, 由于傅里叶变换的谐波分析方法建立在信号平稳的假设基础之上, 该方法不适合分析暂态谐波. Kalman 滤波是近年来发展起来的一种将状态变量法引入到滤波理论中进行参数状态跟踪的方法, 因其实时性强、计算精度高、抗噪性强的特点, 已经广泛应

用于信号处理和通信领域中^[1,2]. 同时在电能质量分析中, 该方法不局限于稳态信号分析, 且对同步采样没有要求, 是频率跟踪、谐波跟踪、闪变、暂降等电能质量暂态事件分析的重要方法^[3].

1 Kalman滤波检测方法

工程实际中通常遇到的估计问题有两类, 参数估计和状态估计. 在电能质量分析中, 我们需要通过参数估计来实现各种电能质量事件的特征提取. 下面对 Kalman 进行参数估计的原理进行介绍, 并建立基于 Kalman 滤波器的谐波分析算法数值模型.

^① 收稿时间:2014-06-30;收到修改稿时间:2014-08-06

Kalman 滤波器用于估计时域信号的状态变量 $x \in R_n$, 其线性随机差分方程表示如式(1):

$$x_{k+1} = \Phi_k x_k + w_k \quad (1)$$

观测量 z_k 表示如式(2):

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (2)$$

式中, x_k 是系统的 n 维状态向量; z_k 是系统的 m 维观测向量; w_k 为 P 维系统噪声向量; v_k 为 m 维量测噪声向量; Φ_k 为状态转移矩阵; H_k 为观测矩阵. 假设系统噪声和量测噪声是互不相关的零均值高斯白噪声, 方差阵分别为 Q_k 、 R_k . 算法的流程如下:

第 k 步滤波增益为:

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T / (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_{k-1}) \quad (3)$$

估计的误差方差矩阵为:

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (4)$$

状态矩阵为:

$$x_k = x_{k|k-1} + K_k (z_k - H_k x_{k|k-1}) \quad (5)$$

预测第 $k+1$ 步状态矩阵为:

$$x_{k+1|k} = \Phi_k x_k \quad (6)$$

Kalman 估计值与测量值的误差为:

$$e_{k+1} = H_{k+1} x_{k+1|k} - z_{k+1} \quad (7)$$

预测第 $k+1$ 步误差方差矩阵为:

$$P_{k+1|k} = P_k + Q_k I \quad (8)$$

给定初值 P_{10} 和 x_{10} , 经过滤波递推便可得到状态变量序列^[4].

现在假定有一个离散电压信号, 其数学表达式为:

$$v(k) = \sum_{i=1}^n A_i(k\Delta t) \cos(2\pi i f_0 k\Delta t + \varphi_{0i}) \quad (9)$$

其中 $A_i(k\Delta t)$ 是第 i 次谐波随时间变化的幅值, 基波频率 f_0 和初相位 φ_{0i} 都是未知量. 由三角变换可得:

$$v(k) = \sum_{i=1}^n (A_i(k\Delta t) \cos(\varphi_{0i}) \cos(2\pi i f_0 k\Delta t) - A_i(k\Delta t) \sin(\varphi_{0i}) \sin(2\pi i f_0 k\Delta t)) \quad (10)$$

基波频率 f_0 在正常情况下偏移较小, 可预置频率跟踪变量 $f_{Track}=50\text{Hz}$. 由于该方法是为了获得电压信号的包络线以及相位信息, 因此线性 Kalman 滤波算法的状态变量可以设为 $x(x=[x_{11} \ x_{12} \ \dots \ x_{n1} \ x_{n2} \ \dots \ x_{n1} \ x_{n2}])$, 其中 x_{11}

为第 i 次谐波电压向量的平行分量, x_{i2} 为正交分量^[5].

$$\begin{cases} x_{11} = A_1(k\Delta t) \cos(\varphi_0) \\ x_{12} = -A_1(k\Delta t) \sin(\varphi_0) \\ \vdots \\ x_{n1} = A_n(k\Delta t) \cos(\varphi_0) \\ x_{n2} = -A_n(k\Delta t) \sin(\varphi_0) \end{cases} \quad (11)$$

则 $v(k)$ 可以表示为:

$$v(k) = \sum_{i=1}^n (x_{i1} \cos(2\pi f_{Track} k\Delta t) + x_{i2} \sin(2\pi f_{Track} k\Delta t)) \quad (12)$$

$$\Phi_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (13)$$

考虑电网中 3 次、5 次和 7 次谐波含量较高, 高次谐波含量较低, 故对基波和 3 次、5 次、7 次谐波进行建模. 取 $n=8$, 一共 8 个状态变量, Φ_k 为 8×8 矩阵.

$$H_k = \begin{bmatrix} \cos(2\pi f_{Track} k\Delta t) & \sin(2\pi f_{Track} k\Delta t) \\ \vdots & \vdots \\ \cos(2\pi i f_{Track} k\Delta t) & \sin(2\pi i f_{Track} k\Delta t) \\ \vdots & \vdots \\ \cos(2\pi n f_{Track} k\Delta t) & \sin(2\pi n f_{Track} k\Delta t) \end{bmatrix}_{n \times 2} \quad (14)$$

将 Φ_k 和 H_k 代入上述算法中, 便可得到状态变量 x . 根据式(15)和(16)可得到各次谐波信号的幅值曲线和相位曲线.

$$A_i(k) = \sqrt{(x_{i1}^2(k) + x_{i2}^2(k))} \quad (15)$$

$$\theta_i(k) = \arg \tan(-x_{i2}(k)/x_{i1}(k)) \quad (16)$$

2 仿真分析

2.1 稳态谐波检测

由电网谐波的定义可知, 其表达式为:

$$u(t) = \sum_{k=1}^M U_k \cos(2\pi f k t + \alpha_k) \quad (17)$$

式中, f 为基波频率, k 为谐波的次数, U_k 为电压有效值, α_k 为 k 次谐波的初相位. 谐波次数和大小按照电网谐波的特点来设置, 初相位随意设定, 其参数如表 1 中所示. 信号时长为 0.2s, 幅值设为 1p.u., 采样频率 $f_s=10\text{kHz}$, 并且加入 0.01p.u. 观测噪声. 采用 Matlab7.6 进行仿真, 稳态谐波波形 $u_1(t)$ 如图 1 所示.

对于输入信号 $u_1(t)$, 根据谐波的特点主要跟踪 3, 5, 7 次谐波, 引入四个状态变量的 Kalman 滤波器进行参数估计.

设状态向量 $x_k=[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8]$, 其中: x_1 和 x_2 分别为基波下的平行与正交分量, x_3 和 x_4 分别为 3 次谐波的平行与正交分量, x_5 和 x_6 分别为 5 次谐波的平行与正交分量, x_7 和 x_8 分别为 7 次谐波的平行与正交分量.

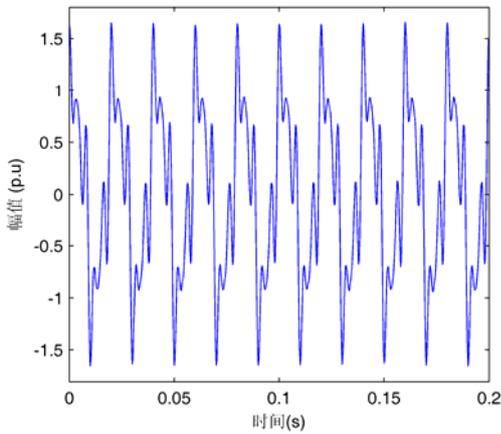


图 1 输入稳态谐波信号波形 $u_1(t)$

设观测矩阵 $H_k=[\cos(\omega_0tk), -\sin(\omega_0tk), \cos(3\omega_0tk), -\sin(3\omega_0tk), \cos(5\omega_0tk), -\sin(5\omega_0tk), \cos(7\omega_0tk), -\sin(7\omega_0tk)]$, $\omega_0=2\pi f_0$, f_0 为已知的基波频率.

Kalman 滤波跟踪的幅值波形和相位波形分别如图 2 和图 3 所示. 图 2 中(a)、(b)、(c)、(d)实线分别表示基波、3 次谐波、5 次谐波、7 次谐波的幅值跟踪波形, 虚线为 $u_1(t)$ 基波、3 次谐波、5 次谐波、7 次谐波的幅值实际值. 图 3 中(a)、(b)、(c)、(d)中实线表示基波、3 次谐波、5 次谐波、7 次谐波的初相位跟踪波形, 虚线为 $u_1(t)$ 基波、3 次谐波、5 次谐波、7 次谐波的初相位实际值.

由图 2 和图 3 可知, 采用 Kalman 滤波器检测算法约在一个周期之后准确的追踪输入信号的大小和初相位值, 实时跟踪效果较好, 而采用 FFT 算法至少需要两个周期的历史数据才能保证缓解频谱泄漏, 且有一定的时延^[6]. 在计算精度方面, 基于 Kalman 滤波和 FFT 算法的参数估计结果如表 1 和表 2 所示.

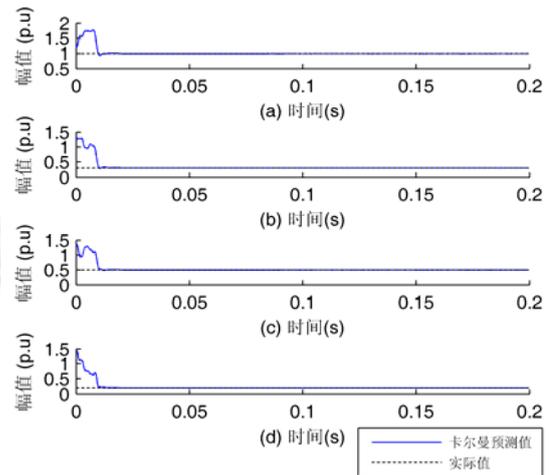


图 2 稳态谐波信号幅值检测波形

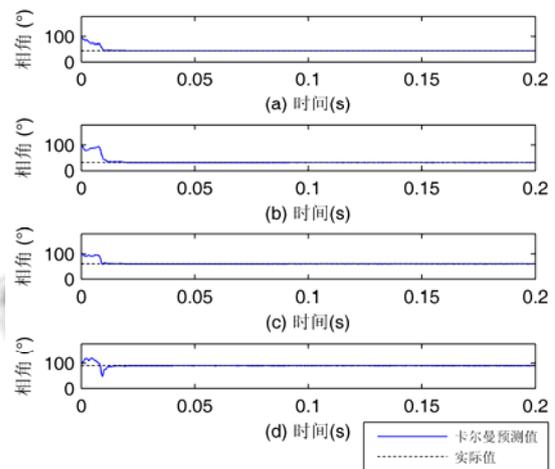


图 3 稳态谐波信号相位检测波形

表 1 稳态谐波信号时, Kalman 滤波与 FFT 幅值分析比较

谐波(次)	设定值(p.u.)	Kalman 滤波		FFT	
		估计值(p.u.)	估计偏差(%)	估计值(p.u.)	估计偏差(%)
1	1	1.0002	0.0200	1.0004	0.0400
3	0.3	0.300	0.0000	0.301	0.3333
5	0.5	0.503	0.6000	0.503	0.6000
7	0.2	0.201	0.5000	0.198	-1.0000

表 2 稳态谐波信号时, Kalman 滤波与 FFT 相位分析比

谐波(次)	设定值(°)	Kalman 滤波		FFT	
		估计值(°)	估计偏差(%)	估计值(°)	估计偏差(%)
1	45	45.0003	0.0007	45.0501	0.1113
3	30	30.0065	0.0217	28.5059	4.9803
5	60	60.0060	0.0100	60.4841	0.8068
7	90	90.0174	0.0193	89.9863	0.0152

对表 1 和表 2 分析可知两种算法在有噪声干扰时的计算精度都能达到国家标准, 其中 Kalman 滤波算法幅值和相位的估计精度要高于 FFT 算法。

2.2 暂态谐波检测

在实际电网电能质量分析中, 电网谐波并不是稳态的, 随着新能源的大量接入, 电力电子的广泛使用, 大功率用电设备增加, 暂态谐波问题日益突出^[7]。基于 FFT 的方法对于暂态谐波难以进行有效的频谱分析, 测量精度较差, 采用 kalman 滤波器能够很好的解决这类问题。如图 4 为暂态谐波输入信号 $u_2(t)$ 。

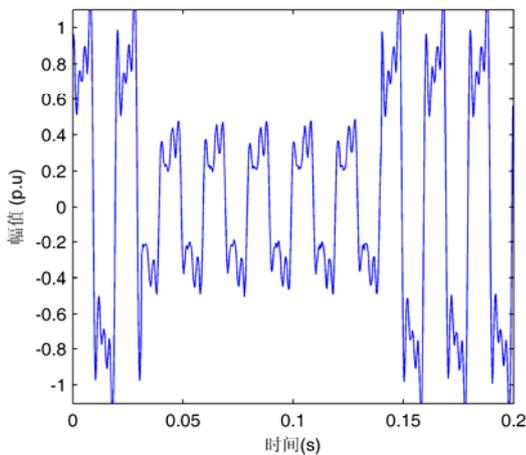


图 4 输入暂态谐波信号波形 $u_2(t)$

Kalman 滤波跟踪的幅值波形和相位波形分别如图 5 和图 6 所示。图 5 中(a)、(b)、(c)、(d)实线分别表示基波、3 次谐波、5 次谐波、7 次谐波的幅值跟踪波形, 虚线为 $u_2(t)$ 基波、3 次谐波、5 次谐波、7 次谐波的幅值实际值。图 6 中(a)、(b)、(c)、(d)中实线表示基波、3 次谐波、5 次谐波、7 次谐波的初相位跟踪波形, 虚线为 $u_2(t)$ 基波、3 次谐波、5 次谐波、7 次谐波的初相位实际值。

由图 5 和图 6 可知, 采用 Kalman 滤波器检测算法

可以准确追踪输入信号, 实时跟踪效果较好。经仿真得出, 稳态谐波仿真运行时间 0.03s, 而暂态运行仿真时间为 0.05s, 其原因是状态方程参数重置, 需要重新匹配跟踪。

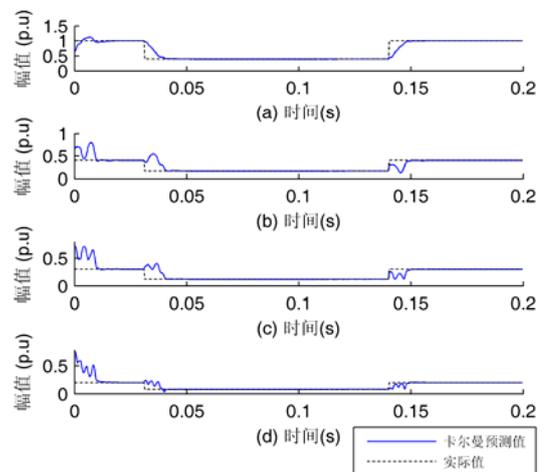


图 5 暂态谐波信号幅值检测波形

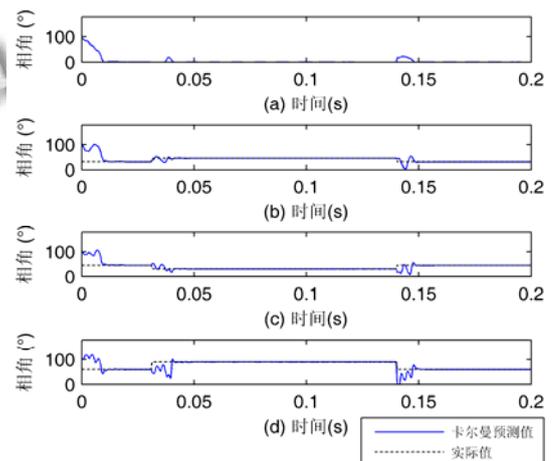


图 6 暂态谐波信号相位检测波形

如表 3 和表 4 所示, 当输入 1、3、5、7 次谐波时, 采用 Kalman 滤波器检测算法分别对稳态谐波分量和

暂态谐波分量进行跟踪和估计. 对于谐波幅值跟踪, 当稳态分量在 0.2~1.0 变化时, 最大估计偏差 0.37%, 暂态分量在 0.08~0.4 变化时, 最大估计偏差 0.8125%,

检测精度均满足相关标准的要求, 且稳态分析精度未受到暂态分量的影响. 同理, 对于谐波相位跟踪, 亦可以验证 Kalman 滤波器检测算法的准确度.

表3 暂态谐波信号时, Kalman 滤波器幅值偏差分

谐波(次)	稳态分量			暂态分量		
	设定值(p.u.)	估计值(p.u.)	估计偏差(%)	设定值(p.u.)	估计值(p.u.)	估计偏差(%)
1	1	0.9963	0.3700	0.4	0.4009	0.2250
3	0.4	0.3994	0.1500	0.16	0.1613	0.8125
5	0.3	0.2995	0.1667	0.12	0.1209	0.7500
7	0.2	0.2004	0.2000	0.08	0.0796	0.5000

表4 暂态谐波信号时, Kalman 滤波器相位偏差分

谐波(次)	稳态分量			暂态分量		
	设定值(°)	估计值(°)	估计偏差(%)	设定值(°)	估计值(°)	估计偏差(%)
1	0	0.0891	-	0	0.0261	-
3	30	30.0404	0.1347	45	45.1368	0.3040
5	45	44.8969	0.2291	30	30.0509	0.1697
7	60	59.8801	0.1998	90	89.5241	0.5287

表5 暂态谐波信号时, FFT 幅值和相位偏差分析

谐波(次)	幅值			相位		
	设定值(p.u.)	估计值(p.u.)	估计偏差(%)	设定值(°)	估计值(°)	估计偏差(%)
1	1	0.6714	32.86	0	0.3458	-
3	0.4	0.2709	32.28	30	35.1483	17.16
5	0.3	0.2035	32.16	45	39.8403	11.47
7	0.2	0.1297	35.15	60	68.6989	14.50

而当采用 FFT 对信号 $u_2(t)$ 进行分析时, 幅值和相位的估计精度较差, 且无法识别信号 $u_2(t)$ 的稳态分量和暂态分量, 如表 5 所示. 故 FFT 对于暂态谐波难以进行有效的频谱分析.

3 结论

本文介绍了 Kalman 滤波器的电网谐波检测原理及实现方法, 对算法的性能进行了仿真和验证. 比较了 Kalman 滤波算法与 FFT 算法在稳态谐波幅值和相位检测的精确度, 同时分析了暂态谐波下, Kalman 滤波算法的跟踪性能和检测精度, 试验结果表明 Kalman 滤波算法在快速性、准确性及抗噪性上更有优势, 对于谐波幅值和相位的估计精度要高于 FFT 算法, 且能很好地跟踪暂态谐波信号, 能够很好的应用于电力系统谐波分析中.

参考文献

- 1 Chui CK, Chen GR. 卡尔曼滤波及其实时应用. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- 2 肖湘宁, 韩民晓, 徐永海, 等. 电能质量分析与控制. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- 3 于静文, 薛蕙, 温渤婴. 基于卡尔曼滤波的电能质量分析方法综述. 电网技术, 2010, 34(2): 97-103.
- 4 于九祥. 利用卡尔曼滤波技术滤取工频分量的方法. 电网技术, 1993, 17(6): 44-50.
- 5 Girgis AA, Stephens JW, Makram EB. Measurement and prediction of voltage flicker magnitude and frequency. IEEE Trans. on Power Delivery, 1995, 10(3): 1600-1605.
- 6 贾嵘, 杨可, 原丽, 等. 基于卡尔曼滤波和加窗插值谐波分析法的介损测量方法. 电网技术, 2007, 31(19): 52-55.
- 7 林海雪. 现代电能质量的基本问题. 电网技术, 2001, 25(10): 5-12.