

# 基于复变自适应神经网络的电网相位估计方法

李云路, 王大志, 宁一, 回楠木

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 针对非理想电网电压下, 不平衡电压、频率偏移引起的电网相位难以检测的问题, 提出了一种在复变域下使用的基于自适应神经网络的电网相位估计方法. 首先, 对非理想电网电压进行建模, 在得到神经网络模型的基础上, 将复变最小均方算法的权值更新方法应用到神经网络权值更新过程中, 利用神经网络权值实现对相位的估计. 为了跟踪电网频率, 设计了电网频率跟踪环节, 并对收敛性进行了分析. 仿真和实验的结果表明所提出的方法能够快速准确地对非理想电压下的电网相位进行估计.

**关 键 词:** 相位估计; 神经网络; 不平衡电压; 频率跟踪; 电网相位

中图分类号: TM 76

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2017)01-0006-05

## Phase Estimation Method for Power System Based on Complex Adaptive Neural Network

LI Yun-lu, WANG Da-zhi, NING Yi, HUI Nan-mu

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LI Yun-lu, E-mail: lyl41368@126.com)

**Abstract:** Aiming at the difficulty of grid phase detection under non-ideal voltage caused by unbalanced voltage and frequency fluctuation, a phase estimation method was proposed for power system based on complex adaptive neural network. On the basis of neural network model of non-ideal grid voltage, the weight update method of complex least mean squares to the process of weight update procedure of neural network was introduced. Then the weights of neural network were used to calculate the phase. To trace the frequency of grid, a frequency tracing unit was designed and it was proved to be convergent. The simulation and experiment results demonstrate that the proposed method is able to estimate the phase rapidly and precisely under non-ideal voltage conditions.

**Key words:** phase estimation; neural network; unbalanced voltage; frequency tracing; grid phase

能否快速准确地对电网正序分量的相位进行估计是影响交流电力变换器性能的关键<sup>[1-2]</sup>. 随着分布电源技术、微网技术的快速发展, 电网运行状况日益复杂<sup>[3]</sup>. 电网的故障、大量非线性负载对电网的污染, 会引起电网三相电压的不平衡和电网频率的偏移<sup>[4]</sup>. 在非理想的电网电压下对电网的相位进行估计是当前一个研究热点<sup>[5]</sup>.

针对非理想电网电压下的相位估计问题, 国内外的学者进行了大量的研究. 这些方法大多是基于同步旋转坐标系下锁相技术(SRF-PLL)的

相位估计方法. SRF-PLL方法在理想的三相平衡电压下具有令人满意的相位、频率跟踪特性, 但当三相电压不平衡时, 会在相位估计中引入震荡<sup>[6]</sup>. 文献[7]将不平衡的三相电压重构成三相平衡的电压, 既保留了原有的相位信息, 又实现了相位检测; 但该方法受过零检测误差影响较大, 且没有考虑到电网频率发生偏移对相位检测的影响. 文献[8]通过引入滑窗均值滤波器来抑制电压不平衡对相位估计的影响, 并且专门设计了频率估计环节, 对电网电压的频率进行自适应估计;

但该方法中包含有均值滤波器,这使得该方法存在一个电网周期以上的延迟,该方法同时没有考虑检测噪声的影响.文献[9]同时针对电网电压不平衡并伴有谐波污染的情况,提出了一种基于 SRF-PLL 的消除不平衡及谐波影响的同步方法,但该方法也未考虑频率波动对相位估计的影响.另一类方法是以自适应滤波理论为基础提出的.文献[10]提出了一种基于广义线性模型的不平衡电网同步技术,能够实现对频率的跟踪,并具有一定的鲁棒性,该方法取得了很好的效果,但该方法缺少对跟踪稳定性的讨论.文献[11]提出了一种基于复变最小二乘的不平衡电网频率跟踪方法,能够实现非理想电压下的同步,复变模型的建立使得基于自适应滤波理论的方法更加容易应用,该方法具有良好的抗扰动能力,但由于优化目标复杂,该方法计算量可能无法应用于实际,且只有仿真支撑,缺乏实验验证.此外,还有利用人工神经网络<sup>[12]</sup>、回归最小均方差<sup>[13]</sup>来解决上述问题,并取得了一定的成果.

综上所述,为了实现在非理想电压下对电网相位进行快速准确地估计,本文在分析了非理想电压对相位估计的影响的基础上,建立电网电压神经网络模型,并引入自适应神经元权值调节机制,设计频率跟踪环节,实现相位的估计.最后通过仿真和实验验证方法的有效性.

## 1 非理想电压下的相位检测分析

不平衡的三相电压可以通过正负序分量的向量叠加来表示:

$$\mathbf{E}_{dqs}(t_i) = \mathbf{e}^{j\omega t_i} \mathbf{E}_{dqe}^p(t_i) + \mathbf{e}^{-j\omega t_i} \mathbf{E}_{dqe}^n(t_i). \quad (1)$$

式中:下角标  $dqs$  表示静止  $dq$  坐标系,  $dqe$  表示以  $\omega$  旋转的同步旋转  $dq$  坐标系;上角标  $p$  表示正序,  $n$  表示负序.当电网频率为 50 Hz 时,  $\omega = 2\pi \times 50$  (rad/s).令静止  $dq$  坐标系下的向量以  $\omega$  的角速度旋转,则  $\mathbf{E}_{dqs}(t_i)$  在同步旋转  $dq$  坐标系下的相位可以表示为

$$\begin{aligned} \varphi(t_i) &= \angle(\mathbf{e}^{-j\omega t_i} \mathbf{E}_{dqs}(t_i)) = \\ &= \angle(\mathbf{E}_{dqe}^p(t_i) + \mathbf{e}^{-2j\omega t_i} \mathbf{E}_{dqe}^n(t_i)) = \\ &= \bar{\varphi}(t_i) + \tilde{\varphi}(t_i). \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中,  $\varphi(t_i)$  由表示正序分量相位的直流分量  $\bar{\varphi}(t_i)$  和由负序分量引起的  $2\omega$  的交流相位震荡  $\tilde{\varphi}(t_i)$  组成.图 1 对比显示了不平衡电压对相位检测的影响.50 Hz 的三相不平衡电网在同步旋转  $dq$  坐标系下会存在 100 Hz 的相位震荡误差.

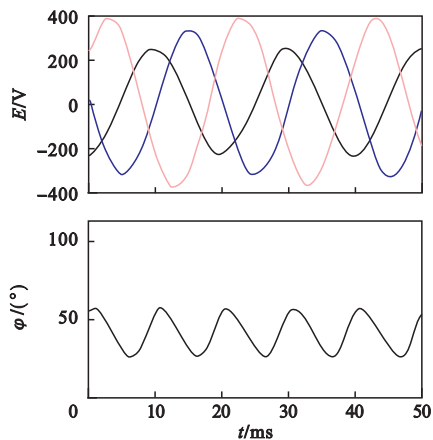


图 1 不平衡电压对相位检测的影响

Fig. 1 Phase detection under unbalanced voltage

当  $\omega$  与电网频率存在偏差  $\Delta\omega$  时,式(2)变为式(3).其中,频率的偏差会使得式(2)中相位的直流分量和交流分量分别叠加了  $\Delta\omega$  的频率震荡误差.

$$\begin{aligned} \varphi(t_i) &= \angle(\mathbf{e}^{-j(\omega + \Delta\omega)t_i} \mathbf{E}_{dqs}(t_i)) = \\ &= \angle(\mathbf{e}^{-j\Delta\omega t_i} \mathbf{E}_{dqe}^p(t_i) + \mathbf{e}^{-j(2\omega + \Delta\omega)t_i} \times \\ &\quad \mathbf{E}_{dqe}^n(t_i)). \end{aligned} \quad (3)$$

## 2 复变自适应神经网络的相位估计

首先建立非理想电网电压的神经网络模型,然后提出神经网络自适应相位估计方法,并设计电网频率跟踪环节.

### 2.1 非理想电压的自适应神经网络相位估计

将式(1)用式(4)中估计的形式表示:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{E}}_{dqs}(t_i) &= [\hat{\mathbf{E}}_{dqe}^p(t_i) \quad \hat{\mathbf{E}}_{dqe}^n(t_i)] \begin{bmatrix} \mathbf{e}^{j\omega t_i} \\ \mathbf{e}^{-j\omega t_i} \end{bmatrix} = \hat{\boldsymbol{\omega}}^H(t_i) \times \\ &\quad \begin{bmatrix} \mathbf{e}^{j\omega t_i} \\ \mathbf{e}^{-j\omega t_i} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

其中,上标  $H$  代表共轭转置,则非理想电压的神经网络模型如图 2 所示.

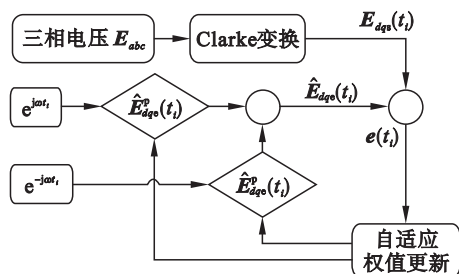


图 2 非理想电压的神经网络模型

Fig. 2 Neural network model of non-ideal voltage

图 2 中,三相电压  $\mathbf{E}_{abc}$  经过 Clarke 变换后得

到静止坐标系下的向量  $\mathbf{E}_{dqs}(t_i)$ , 与神经网络对三相电压的估计值作差, 得到误差  $\mathbf{e}(t_i)$  用于自适应更新神经网络的两个权值向量。

由于神经网络的两个权值向量在复变域内, 则令估计误差  $\mathbf{e}(t_i)$  及  $\mathbf{e}^{j\omega t_i}$ ,  $\mathbf{e}^{-j\omega t_i}$  作为自适应权值更新环节的输入, 将文献[14]中复数 LMS 权值更新方法引入到本文方法中。首先作以下设定:

$$\mathbf{y}(t_i) = \hat{\mathbf{E}}_{dqs}(t_i) = \hat{\mathbf{E}}_{ds}(t_i) + j\hat{\mathbf{E}}_{qs}(t_i) = y_{\text{Re}}(t_i) + jy_{\text{Im}}(t_i), \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{w}}(t_i) = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{de}^p(t_i) - j\mathbf{E}_{qe}^p(t_i) \\ \mathbf{E}_{de}^n(t_i) - j\mathbf{E}_{qe}^n(t_i) \end{bmatrix} = \hat{w}_{\text{Re}}(t_i) + j\hat{w}_{\text{Im}}(t_i), \quad (6)$$

$$\mathbf{u}(t_i) = \begin{bmatrix} \cos\omega t_i + j\sin\omega t_i \\ \cos\omega t_i - j\sin\omega t_i \end{bmatrix} = u_{\text{Re}}(t_i) + ju_{\text{Im}}(t_i), \quad (7)$$

$$\mathbf{d}(t_i) = \mathbf{E}_{dqs}(t_i) = \mathbf{E}_{ds}(t_i) + j\mathbf{E}_{qs}(t_i) = d_{\text{Re}}(t_i) + jd_{\text{Im}}(t_i), \quad (8)$$

$$\mathbf{e}(t_i) = e_{\text{Re}}(t_i) + je_{\text{Im}}(t_i). \quad (9)$$

则复数 LMS 权值更新方法可以表示为式(10), 式(11), 其中  $\mu$  是 LMS 算法的步长。根据复数 LMS 的稳定条件, 当 LMS 满足  $0 < \mu < 1/\lambda_{\max}$  时, 算法收敛, 其中  $\lambda_{\max}$  是输入信号自相关矩阵的最大值, 这里取  $\mu = 0.5/\lambda_{\max}$ 。

$$\hat{w}_{\text{Re}}(t_{i+1}) = \hat{w}_{\text{Re}}(t_i) + \mu [e_{\text{Re}}(t_i)u_{\text{Re}}(t_i) - e_{\text{Im}}(t_i)u_{\text{Im}}(t_i)], \quad (10)$$

$$\hat{w}_{\text{Im}}(t_{i+1}) = \hat{w}_{\text{Im}}(t_i) + \mu [e_{\text{Re}}(t_i)u_{\text{Im}}(t_i) + e_{\text{Im}}(t_i)u_{\text{Re}}(t_i)]. \quad (11)$$

式(10), 式(11)组成了自适应权值更新算法, 其流程如图 3 所示。随着算法的收敛, 神经网络的权值逐渐趋于稳定, 即算法对正序向量、负序向量幅值的估计。进而可以运用式(12)对当前电网的相位进行估计。

$$\hat{\phi}(t_i) = \tan^{-1}[\hat{\mathbf{E}}_{qe}^p(t_i)/\hat{\mathbf{E}}_{de}^p(t_i)]. \quad (12)$$

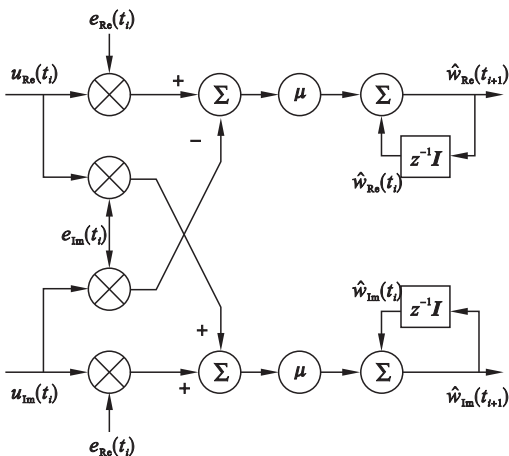


图 3 权值更新算法信号流程图

Fig. 3 Signal flow of the weight update algorithm

## 2.2 电网频率跟踪

作为神经网络模型的输入,  $\mathbf{e}^{j\omega t_i}$ ,  $\mathbf{e}^{-j\omega t_i}$  中  $\omega$  的准确与否对相位估计的准确性影响很大。避免由于电网频率偏移而给相位估计引入误差, 本小节在上一节研究基础上设计了频率跟踪方法。定义  $\hat{\omega}$  为电压频率  $\omega$  的估计, 则相位估计可以表达为

$$\Delta\hat{\phi}(t_i) = \Delta\omega\tau = \hat{\phi}(t_i) - \hat{\phi}(t_{i-1}). \quad (13)$$

其中:  $\Delta\omega = \omega - \hat{\omega}$ ;  $\tau = t_i - t_{i-1}$ 。将相位估计算法与频率跟踪方法相结合, 频率跟踪算法的原理如图 4 所示。

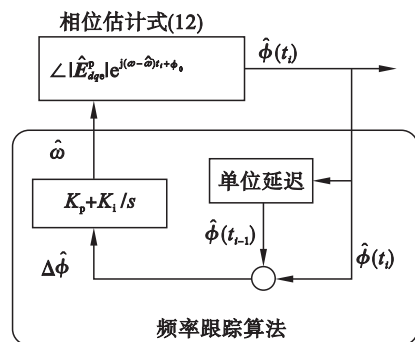


图 4 频率跟踪方法

Fig. 4 Frequency tracing method

图 4 中,  $K_p, K_i$  分别是 PI 控制器的比例系数和积分系数。频率的估计值  $\hat{\omega}$  由 PI 控制器计算得到, 然后传入神经网络中进行计算。  $\phi_0$  是电压的实际相位。根据图 4, 可以得到  $\hat{\omega}/\omega$  的传递函数为

$$\frac{\hat{\omega}}{\omega} = \frac{\tau(K_p + K_i/s)}{1 + \tau(K_p + K_i/s)} = \frac{s\tau K_p + \tau K_i}{s(1 + \tau K_p) + \tau K_i}. \quad (14)$$

对频率跟踪误差  $\Delta\omega$  进行分析, 当  $\omega$  发生阶跃变化时, 有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta\omega = \lim_{s \rightarrow 0} s(\omega - \hat{\omega}) = \lim_{s \rightarrow 0} s \times \left[ \frac{1}{s} \left( 1 - \frac{s\tau K_p + \tau K_i}{s(1 + \tau K_p) + \tau K_i} \right) \right] = 0. \quad (15)$$

从式(15)可知, 本文方法能够实现电网频率的无误差跟踪。选取  $K_p = 0.0004$ ,  $K_i = 0.00006$  以获得较快的响应速度。

## 3 仿真与实验结果分析

对本文所提出的方法进行仿真及实验验证分析, 与 Kalman 滤波相位估计方法<sup>[15]</sup>、dqPLL 方法<sup>[16]</sup>进行对比分析。

### 3.1 相位估计仿真分析

为了验证本文所提出的相位估计方法的有效性, 将本文方法与 Kalman 滤波相位估计方法、dqPLL 方法进行对比仿真。

待测的三相不平衡电压源由正序分量与负序分量叠加而成：

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 311\cos(\omega t + 45^\circ) \\ 311\cos(\omega t + 165^\circ) \\ 311\cos(\omega t - 75^\circ) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 50\cos(\omega t) \\ 50\cos(\omega t - 120^\circ) \\ 50\cos(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix}. \quad (16)$$

$\omega$  是电网频率 50 Hz, 其三相不平衡波形见图 5.

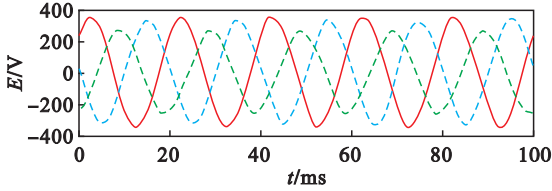


图 5 三相不平衡电压波形

Fig. 5 Waveform of three phase unbalanced voltage

依照文献[15]中的 Kalman 滤波器设计方法, 得到其观测器矩阵  $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0.248 & 0.051 & 3 \\ 0.173 & 0.046 & 0.067 & 4 & 0.043 & 4 & 0.009 & 16 \\ 0.023 & 6 & -0.000 & 415 & 0.113 & 0.080 & 2 \end{bmatrix}$ .

依照文献[16]中 PI 控制器的参数设置方法, dqPLL 方法中的  $K_p = 9.2/T_s$ ,  $\omega_0 = K_p/(2\zeta)$ ,  $K_i = \omega_0^2$ . 其中, 电网周期为 50 Hz, 则  $T_s = 20$  ms. 阻尼系数  $\zeta = 0.707$ ,  $K_p = 460$ ,  $\omega_0 = 325$  rad/s,  $K_i = 105\,831$ . 具体的仿真结果如图 6 所示.

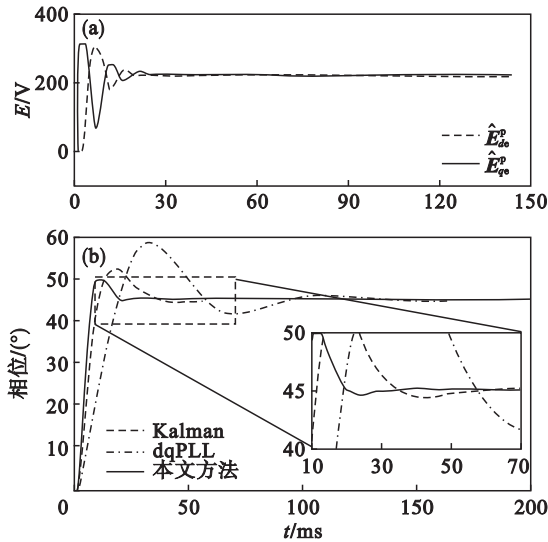


图 6 不同算法相位估计结果

Fig. 6 Phase estimation results with different algorithms

(a)—正序分量的正交分解  $\hat{E}_{dc}^p, \hat{E}_{qc}^p$ ;  
(b)—相位估计波形.

如图 6a 所示, 经过约 20 ms 后, 采用本文方法进行电压正序分量的正交分解得到的  $\hat{E}_{dc}^p, \hat{E}_{qc}^p$  趋于稳定. 如图 6b 所示, 本文采用的复变神经网络

方法的仿真曲线对应为图中实线. 在进行相位估计时, 经过一个电网周期, 即 20 ms 以后能够准确估计当前的电压正序分量的相位在  $45^\circ$ . 使用 Kalman 滤波方法进行相位估计时, 则需要两个以上的电网周期, 当使用传统的 dqPLL 方法进行估计时, 则需要 6~7 个基波周期.

为了验证本文方法对频率进行跟踪的性能, 进行频率跟踪仿真. 电网电压频率在 60 ms 时由 50 Hz 跳变到 51 Hz. 3 种方法对频率的跟踪效果如图 7 所示. 3 种方法对相位的估计效果如图 8 所示.

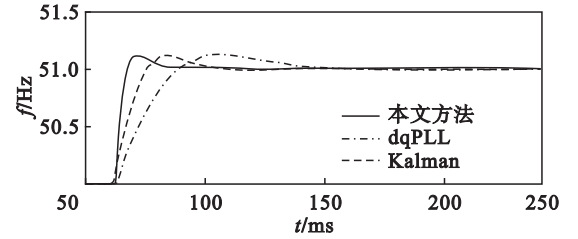


图 7 不同算法频率跟踪结果

Fig. 7 Frequency tracking results with different algorithms

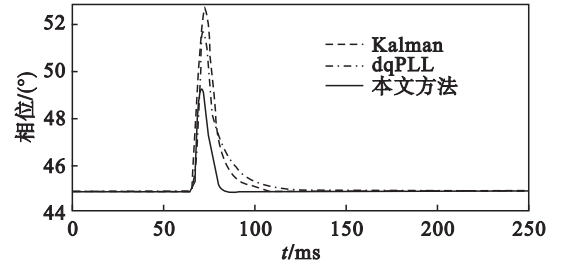


图 8 不同算法相位估计结果

Fig. 8 Phase estimation results with different algorithms

如图 7 所示, 本文方法较其他两种方法能够更加快速地跟踪电网频率的变化, 在 80 ms 左右达到跟踪目标. 如图 8 所示, 本文方法在电网频率发生变化时, 经过 20 ms 左右的时间能够恢复对相位的精确估计. 而其他两种方法则需要 30 ms 左右的时间.

### 3.2 相位估计实验及结果分析

为了验证本文所提出的方法的有效性, 将传统的 dqPLL 方法与本文方法的相位估计效果进行比较. 三相不平衡电压由三相可编程电源产生, 而后利用电压传感器对电压信号进行采集后传递给 OP5600 仿真机. OP5600 仿真机是加拿大 OPAL 公司的半实物仿真机. 将本文设计的方法和 dqPLL 方法通过 Matlab/Simulink 建立仿真模型下载到 OP5600 中, 再将运算结果输出到示波器进行观察.



由三相可编程电源发出的不平衡电压波形包含峰值 100 V 的正序分量和 10 V 的负序分量,另外包含 5 次谐波和 7 次谐波各 5 V。在使用两种方法进行相位估计收敛后,突加 1 Hz 频率偏移,观察对比两种方法进行频率跟踪和相位估计的过程,如图 9 所示。当电网频率发生 1 Hz 偏移后,两种方法在进行频率跟踪的速度上大致相同。但在进行相位估计上,本文提出的复变自适应神经网络估计方法较传统方法能够迅速地重新回归收敛,准确实现对相位的估计,对于电网中出现的频率的波动,具有更好的抗干扰能力。

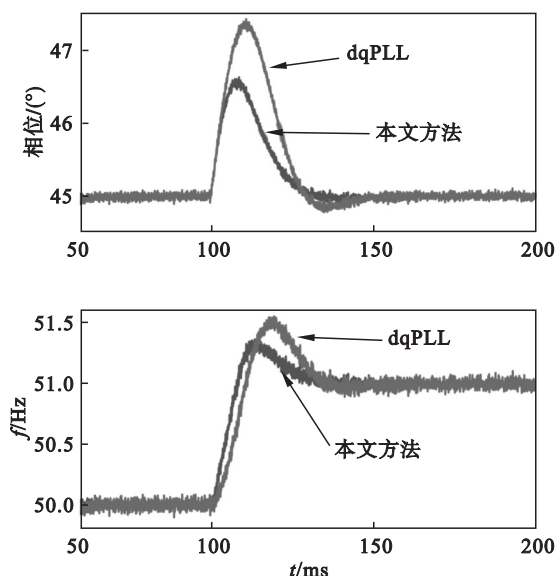


图 9 频率和相位估计波形

Fig. 9 Waveform of frequency and phase estimation

## 4 结 论

本文在研究了不平衡电压对电网正序分量相位估计造成的影响的基础上,提出了一种基于复变自适应神经网络的电压正序分量相位估计方法。该方法能够有效地克服三相不平衡电压以及电压频率波动给相位估计带来的影响,准确地提取电网电压正序分量的相位和频率信息。仿真及实验验证了本文方法的有效性。

## 参考文献:

[1] Baradarani F, Mohammad R, Zadeh D, et al. A phase-angle estimation method for synchronization of grid-connected power-electronic converters[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, 30(2): 827–835.

[2] Du S, Liu J, Lin J, et al. A novel DC voltage control method for STATCOM based on hybrid multilevel H-bridge converter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(1): 101–111.

[3] Rady Y A, Mohamed I, Saadany F E. A robust natural frame based inter facing scheme for grid-connected distributed generation inverters[J]. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 2011, 26(8): 728–736.

[4] Xia Y L, Douglas S C, Mandic D P. Adaptive frequency estimation in smart grid applications: exploiting non circularity and widely linear adaptive estimators[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2012, 29(5): 44–54.

[5] Roncero-Sanchez P, Garcia X D T, Torres A P, et al. Fundamental positive-and negative-sequence estimator for grid synchronization under highly disturbed operating conditions[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(8): 3733–3746.

[6] Golestan S, Monfared M, Freijedo F D. Design-oriented study of advanced synchronous reference frame phase-locked loops[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(2): 765–778.

[7] Liu B Q, Zhuo F, Zhu Y X, et al. A three-phase PLL algorithm based on signal reforming under distorted grid conditions[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(9): 5272–5283.

[8] Wang L, Jiang Q R, Hong L C, et al. A novel phase-locked loop based frequency detector and initial phase angle detector[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(10): 4538–4549.

[9] Safayet A, Husain I, Elrattyah A, et al. Grid harmonics and voltage unbalance effect elimination for three-phase PLL grid synchronization algorithm[C]//Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Denver, 2013: 3299–3304.

[10] Dini D H, Mandic D P. Widely linear modeling for frequency estimation in unbalanced three phase power system[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2013, 62(2): 353–363.

[11] Xia Y L, Blazic Z, Mandic D P. Complex-valued least squares frequency estimation for unbalanced power systems[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, 64(3): 638–648.

[12] Qasim M, Kanjiya P, Khadkikar V. Artificial-neural-network-based phase-locking scheme for active power filters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(8): 3857–3866.

[13] Sadinezhad I, Agelidis V G. Real-time power system phasors and harmonics estimation using a new decoupled recursive-least-squares technique for DSP implementation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(6): 2295–2308.

[14] Haykin S. Adaptive filter theory[M]. Edinburgh: Pearson Education Limited, 2013.

[15] Sadinezhad I, Joorabian M. A novel frequency tracking method based on complex adaptive linear neural network state vector in power systems[J]. *Electric Power Systems Research*, 2009, 79(8): 1216–1225.

[16] Rodriguez P, Teodorescu R, Candela I, et al. New positive sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid condition[C]//Power Electronics Specialists Conference (PESC'06). Barcelona, 2006: 1–7.