

基于复数域标幺化的配电网三相不对称快速分解状态估计算法

周佳伟,卫志农,孙国强,陈 胜,臧海祥

(河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100)

摘要: 提出一种基于复数域标幺化的配电网三相不对称快速分解状态估计算法。基于坐标变换的思想,引入基准相角进行复数域标幺化,对阻抗进行整体移相,减小 R/X 比值,弱化电压相角对有功、电压幅值对无功的影响,实现配电网状态估计的快速分解;根据网络特性,得出使得快速分解估计方法可靠收敛的最优基准相角的选取原则;为适应 PQ 快速分解状态估计模型,将电流幅值量测等效处理为功率量测。标准测试算例的仿真结果表明,所提快速分解状态估计方法在保证估计精度的同时,可改善配电网状态估计数值计算的稳定性,提高大规模配电网状态估计的在线计算速度。

关键词: 配电网; 三相不对称; 状态估计; 复数域标幺化

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.03.003

0 引言

随着智能配电系统的发展,以及分布式可再生能源的大量接入,配电网将呈现网络结构灵活化、运行方式多样化、规划布局复杂化的特点^[1-2],感知并估计配电网运行状态是实现配电自动化的前提^[3-5]。而配电网网络重构、分布式负荷投切等使网络拓扑变化频繁,为建立配电网准实时的网络模型,保证配电自动化高级应用软件的正常运行,需发展更为快速的配电网状态估计算法^[6-10]。

现有配电网状态估计大多以残差的加权平方和为目标函数,根据选取状态变量的不同可分为:基于节点电压的状态估计算法^[11]、基于支路电流的状态估计算法^[12]和基于支路功率的状态估计算法^[13-14]。以上算法多采用牛顿法求解,牛顿法收敛速度快,迭代次数不受网络规模的影响,可以适应不同类型的量测系统。但对于大规模配电网,雅可比矩阵更新复杂,计算效率低;同时由于配电网线路阻抗 R/X 比值较大,算法的数值稳定性难以得到保证。

为降低配电网状态估计的计算复杂度,提高数值稳定性,可采用解耦的方法,主要有以下 3 类。(1)相分量/序分量解耦状态估计:文献^[14]引入三相不对称潮流计算中的解耦-补偿电流模型,在相坐标下进行三相解耦;文献^[15]基于相量测量单元(PMU)量测,采用序分量法,三相不对称参数经序分量变换后互相独立,实现了序分量解耦状态估计。(2)多区域分布式状态估计:文献^[16]将配电网划分为若干子区域,实现分区状态估计,避免了大规模集中式的计

算。(3)快速分解状态估计:基于 $X \gg R$ 的假设,文献^[17-18]对雅可比矩阵和信息矩阵实行分块化和常数化处理,实现了有功、无功的解耦,有效提高了计算速度,在输电网得到了广泛的应用;然而,配电网 R/X 比值大的特点限制了快速分解方法在配电网的应用^[19]。文献^[20]提出一种复数域快速分解潮流计算方法,在传统标幺化的基础上,通过引入基准参考角度,将其拓展为复数域标幺化,从而减小了支路阻抗 R/X 比值,实现了配电网有功、无功解耦潮流计算。该方法可适应不同 R/X 比值的网络,对实现配电网状态估计的快速分解具有一定的指导意义。

本文提出一种配电网三相不对称快速分解状态估计算法,该算法基于坐标变换的思想,在复数域标幺化的前提下有效减小了 R/X 比值,使得雅可比矩阵和信息矩阵的非对角块元素近似为 0,有功、无功解耦,实现快速分解状态估计。IEEE 13、IEEE 123 节点系统及我国某实际 611 节点配电网系统的测试结果表明,本文方法能适应不同 R/X 比值的配电网,可改善数值计算收敛的稳定性,同时有功、无功的解耦可有效提高状态估计的计算速度,具有很好的工程应用前景。

1 复数域坐标变换

快速分解状态估计以计算速度快、内存占用量少、收敛条件好的优良特性,被广泛应用于电力系统状态估计中。然而,配电网支路阻抗 R/X 比值大,有功、无功解耦易带来数值稳定性问题,限制了快速分解在配电网状态估计中的应用。本文基于坐标变换的思想,选取复数域基准值进行标幺化,通过引入阻抗移相角,对线路阻抗整体移相,达到减小 R/X 比值

收稿日期:2016-04-07;修回日期:2016-11-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277052,51507052)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277052,51507052)

的目的,从而满足快速分解的简化条件,实现配电网状态估计的快速分解。

1.1 复数域标么化

在电力系统计算中,为了统一电压等级,简化计算,常采用标么化的方法,一般选取实数额定功率、电压幅值作为基准值。文献[20]提出在传统标么化的基础上,选取复数额定功率、复数电压作为基准进行复数域标么化,分别如式(1)、(2)所示。

$$S_{\text{base}} = |S_{\text{base}}| \angle -\phi_{\text{base}} \quad (1)$$

$$U_{\text{base}} = |U_{\text{base}}| \angle 0^\circ = U_{\text{base}} \quad (2)$$

由欧姆定律可得到电流基准和阻抗基准,分别如式(3)、(4)所示。

$$I_{\text{base}} = \left(\frac{S_{\text{base}}}{U_{\text{base}}} \right)^* = |I_{\text{base}}| \angle \phi_{\text{base}} \quad (3)$$

$$Z_{\text{base}} = \frac{U_{\text{base}}^2}{S_{\text{base}}^*} = |Z_{\text{base}}| \angle -\phi_{\text{base}} \quad (4)$$

其中, ϕ_{base} 为引入的基准相角。

复数域基准值与传统基准值具有相同的模值,仅是参考角度的不同,因此,复数域标么化是在传统标么化基础上对相角的标么化。若令线路阻抗有名值为 $Z=R+jX=|Z| \angle \theta$, 则复数域标么化后为:

$$Z_{\text{cpu}} = \frac{|Z| \angle \theta}{|Z_{\text{base}}| \angle -\phi_{\text{base}}} = |Z_{\text{pu}}| \angle (\theta + \phi_{\text{base}}) \quad (5)$$

其中, θ 为支路阻抗角; Z_{pu} 为传统基准值下的阻抗标么值; Z_{cpu} 为复数域基准值下的阻抗标么值。相应地,线路阻抗比 R/X 可表示为:

$$\frac{R_{\text{cpu}}}{X_{\text{cpu}}} = \frac{1}{\tan(\theta + \phi_{\text{base}})} \quad (6)$$

可见,在复数域标么化下,线路阻抗比 R/X 是可控的,该比值可通过调节基准角 ϕ_{base} 进行缩放。为使得快速分解状态估计得以在配电网中应用, R/X 比值应尽可能小,由式(6)可知,如果 ϕ_{base} 满足式(7),则 R/X 比值趋近于 0,可达到快速分解的理想状态,同时由 R/X 比值带来的数值稳定性问题也将迎刃而解。

$$\theta + \phi_{\text{base}} = 90^\circ \quad (7)$$

1.2 最优基准角度的选取

快速分解基于 $X \gg R$ 的假设进行有功和无功的解耦,计算速度、收敛性能、存储占用率等方面均优于传统的牛顿法。而且 R/X 比值越小,有功和电压幅值、无功和电压相角之间的耦合就越小,快速分解收敛越快,数值稳定性越好。

配电网三相参数不对称,支路阻抗 R/X 比值参差不齐,尤其是部分阻抗比较大的支路,易造成数值计算收敛困难。对此,本文在复数域引入基准角度进行标么化的主要目的是减小阻抗比中极端值的影响,同时将整体的阻抗比规范化至统一水平。本文最优基准角度的选取原则是:(1)能够整体减小 R/X

比值,确保有功、无功解耦,实现快速分解;(2)能够弱化支路阻抗 R/X 比值的极端值对数值稳定性的影响。具体选取方法如下。

为保证 $X \gg R$ 成立,实现快速分解,支路阻抗比至少满足 $|X/R| \geq 2$,结合式(6),基准角度 ϕ_{base} 应满足:

$$65^\circ < \theta + \phi_{\text{base}} < 115^\circ \quad (8)$$

文献[21]指出,支路阻抗比的最大值是影响收敛性的关键因素,因此首先由式(9)、(10)计算系统阻抗角的最小、最大值,确定基准角度选取的边界条件。

$$\theta_{\min} = \min[\arctan(X_i/R_i)] \quad (9)$$

$$\theta_{\max} = \max[\arctan(X_i/R_i)] \quad (10)$$

其中, $i=1,2,\dots,b$; b 为网络支路数。

为保证所有支路阻抗比 R/X 经移相后均能趋近 0,即标么化后的阻抗能够分布在虚轴附近,关于虚轴对称且呈均匀分布,则由式(9)、(10)确定的阻抗角边界条件应满足式(11),从而可得式(12)。

$$\theta_{\max} + \phi_{\text{base}} = 180^\circ - (\theta_{\min} + \phi_{\text{base}}) \quad (11)$$

$$\phi_{\text{base}} = \frac{180^\circ - (\theta_{\min} + \theta_{\max})}{2} \quad (12)$$

由式(8)—(12)可知,给定一个网络,该网络的基准角度 ϕ_{base} 由其线路参数唯一确定。以该参考基准对网络进行整体移相,可使阻抗比 R/X 整体缩小,弱化电压幅值对有功、电压相角对无功的影响,实现快速分解。若假设某网络的最大、最小阻抗角分别为 $\theta_{\max}$ 和 $\theta_{\min}$,整体移相 ϕ_{base} 后(实施复数域标么化),变为 $\theta'_{\max}$ 和 $\theta'_{\min}$,由上述选取最优基准相角的原则可知,移相后的角度为 $\theta'_{\max}$ 和 $\theta'_{\min}$ 所对应矢量应关于虚轴对称。复数域标么化前后阻抗角的变化情况见图 1。

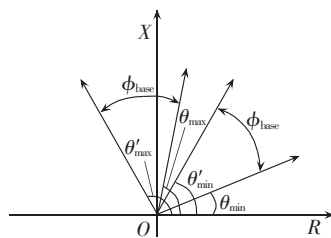


图 1 标么化前后阻抗角的变化情形

Fig.1 Comparison of impedance angle between before and after normalization

2 量测变换

配电网三相状态估计难以实现快速分解的限制条件是双重耦合,即相间耦合和有功、无功耦合。本文的快速分解法利用复数域标么化将量测分为有功、无功两大类实现解耦,为充分利用电流幅值量测并使之适应快速分解的模型,需采用量测变换技术,将其等效成支路有功、无功功率量测[22]。

2.1 功率量测标么化

负荷功率量测和支路功率量测同属于功率量测

类型,标幺化可统一表示。

设功率量测为:

$$S^{p,m} = P^{p,m} + j Q^{p,m} \quad p=a,b,c \quad (13)$$

其中, $S^{p,m}$ 、 $P^{p,m}$ 、 $Q^{p,m}$ 分别为 p 相复功率、有功功率和无功功率。

对 $S^{p,m}$ 进行复数域标幺化,即有:

$$S_{\text{cpu}}^{p,m} = \frac{P_{\text{pu}}^{p,m} + j Q_{\text{pu}}^{p,m}}{|S_{\text{base}}| \angle -\phi_{\text{base}}} = (P_{\text{pu}}^{p,m} + j Q_{\text{pu}}^{p,m}) \angle \phi_{\text{base}} \quad (14)$$

$$P_{\text{cpu}}^{p,m} = P_{\text{pu}}^{p,m} \cos \phi_{\text{base}} - Q_{\text{pu}}^{p,m} \sin \phi_{\text{base}} \quad (15)$$

$$Q_{\text{cpu}}^{p,m} = P_{\text{pu}}^{p,m} \sin \phi_{\text{base}} + Q_{\text{pu}}^{p,m} \cos \phi_{\text{base}} \quad (16)$$

其中, $p=a,b,c$; $P_{\text{cpu}}^{p,m}$ 、 $Q_{\text{cpu}}^{p,m}$ 分别为复数域标幺化下的有功、无功功率量测; $P_{\text{pu}}^{p,m}$ 、 $Q_{\text{pu}}^{p,m}$ 分别为实数域标幺化下的有功、无功功率量测。

由于复数域标幺化改变了系统的参考基准,采用加权最小二乘法(WLS)模型进行状态估计求解时,还需对权重进行标幺化,由文献[23]中的独立方差合成定理可得功率量测(节点注入功率、支路功率)的方差为:

$$\sigma_{P_{\text{cpu}}}^2 = \sigma_{P_{\text{pu}}}^2 \cos^2 \phi_{\text{base}} + \sigma_{Q_{\text{pu}}}^2 \sin^2 \phi_{\text{base}} \quad (17)$$

$$\sigma_{Q_{\text{cpu}}}^2 = \sigma_{P_{\text{pu}}}^2 \sin^2 \phi_{\text{base}} + \sigma_{Q_{\text{pu}}}^2 \cos^2 \phi_{\text{base}} \quad (18)$$

其中, $\sigma_{P_{\text{cpu}}}^2$ 、 $\sigma_{Q_{\text{cpu}}}^2$ 分别为复数域标幺化下的有功、无功功率量测方差; $\sigma_{P_{\text{pu}}}^2$ 、 $\sigma_{Q_{\text{pu}}}^2$ 分别为实数域标幺化下的有功、无功功率量测方差。

2.2 电压幅值量测标幺化

p 相电压幅值量测可表示为:

$$U^{p,m} \quad p=a,b,c \quad (19)$$

电压幅值量测复数域标幺化 后为:

$$U_{\text{cpu}}^{p,m} = \frac{U_{\text{pu}}^{p,m}}{|U_{\text{base}}| \angle 0^\circ} = U_{\text{pu}}^{p,m} \quad p=a,b,c \quad (20)$$

其中, $U_{\text{cpu}}^{p,m}$ 为复数域标幺化下的 p 相电压幅值量测; $U_{\text{pu}}^{p,m}$ 为实数域标幺化下的 p 相电压幅值量测。

根据式(20),由独立方差合成定理可知,复数域标幺化和实数域标幺化下电压幅值量测的权重相同,即:

$$\sigma_{U_{\text{cpu}}} = \sigma_{U_{\text{pu}}} \quad (21)$$

2.3 电流幅值量测标幺化

配电网中相当一部分实时量测为支路电流幅值量测,但快速分解法难以直接计及电流幅值。为此,本文将支路电流幅值量测转化为如式(22)所示的等效支路功率量测。

$$\begin{cases} P_{ij}^{p,e} = U_i^p I_{ij}^{p,m} \cos \varphi \\ Q_{ij}^{p,e} = U_i^p I_{ij}^{p,m} \sin \varphi \end{cases} \quad p=a,b,c \quad (22)$$

其中, $P_{ij}^{p,e}$ 为等效支路有功功率量测; $Q_{ij}^{p,e}$ 为等效支路无功功率量测; φ 为支路功率因数角; U_i^p 为支路电流首端 p 相电压,是前次迭代求得的电压幅值; $I_{ij}^{p,m}$ 为支路电流幅值量测,该电流幅值量测的等效变换需在每次迭代过后更新,以确保等效的精确性。

设 p 相支路电流为:

$$I_{ij}^p = |I_{ij}^p| \angle -\theta \quad p=a,b,c \quad (23)$$

经复数域标幺化后,有:

$$I_{ij,\text{cpu}}^p = \frac{I_{ij}^p}{|I_{\text{base}}| \angle \phi_{\text{base}}} = |I_{ij,\text{pu}}^p| \angle -(\theta + \phi_{\text{base}}) \quad p=a,b,c \quad (24)$$

由式(24)可知,电流幅值和电压幅值一样具有实、复数域标幺化幅值不变的特性,类似式(21),电流幅值量测的权重同样保持不变,即:

$$\sigma_{I_{\text{cpu}}} = \sigma_{I_{\text{pu}}} \quad (25)$$

因而,电流幅值量测经等效变换后的复数域表达式为:

$$\begin{cases} P_{ij,\text{cpu}}^{p,e} = U_{i,\text{pu}}^p |I_{ij,\text{pu}}^p| \cos(\varphi + \phi_{\text{base}}) \\ Q_{ij,\text{cpu}}^{p,e} = U_{i,\text{pu}}^p |I_{ij,\text{pu}}^p| \sin(\varphi + \phi_{\text{base}}) \end{cases} \quad p=a,b,c \quad (26)$$

相应地,等效有功功率、无功功率的复数域量测权重为:

$$\begin{cases} \sigma_{P_{\text{cpu}}}^{p,e} = U_{i,\text{pu}}^p \cos(\varphi + \phi_{\text{base}}) \sigma_{I_{\text{pu}}} \\ \sigma_{Q_{\text{cpu}}}^{p,e} = U_{i,\text{pu}}^p \sin(\varphi + \phi_{\text{base}}) \sigma_{I_{\text{pu}}} \end{cases} \quad p=a,b,c \quad (27)$$

3 快速分解状态估计模型

加权最小二乘法是求解状态估计最常用的一种方法,其本质是求解如下优化目标函数:

$$J(\mathbf{x}) = \min [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \mathbf{W} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] \quad (28)$$

其中, $\mathbf{z} \in \mathbf{R}^m$ 为量测量; $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ 为状态变量; $\mathbf{W} \in \mathbf{R}^{m \times m}$ 为量测权重矩阵,其对角元素是量测方差的倒数; $\mathbf{h}(\cdot)$ 为关于 $\mathbf{x}$ 的非线性量测函数。

本文选取三相电压幅值、相角作为状态变量,即 $\mathbf{x} = [\mathbf{U}^{\text{abc}}, \boldsymbol{\theta}^{\text{abc}}]^T$; 量测分为有功、无功 2 类,即 $\mathbf{z} = [\mathbf{z}_a, \mathbf{z}_r]^T$, $\mathbf{z}_a$ 包括有功负荷量测、支路有功功率量测(包括电流幅值量测的等效有功功率), $\mathbf{z}_r$ 包括无功负荷量测、支路无功功率量测(包括电流幅值量测的等效无功功率)、节点电压量测。

求解式(28)的非线性函数优化问题,首先求得其一阶最优性条件,之后以牛顿法逐次线性化量测函数。在加速潮流计算时,Stott 和 Alsac 利用雅可比矩阵分解和常数化 2 项简化假设形成了经典的快速分解潮流计算模型^[24]。本文配电网三相快速分解状态估计经复数域标幺化后, R/X 比值减小,可采用相似的简化模型:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta}^{\text{abc}} \\ \Delta \mathbf{U}^{\text{abc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\alpha} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \boldsymbol{\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{z}_a - \mathbf{h}_a \\ \mathbf{z}_r - \mathbf{h}_r \end{bmatrix} \quad (29)$$

其中, $\Delta \boldsymbol{\theta}^{\text{abc}}$ 、 $\Delta \mathbf{U}^{\text{abc}}$ 分别为三相电压相角、幅值修正量; $\mathbf{A} = \mathbf{H}_{\text{aa}}^T \mathbf{W}_a^{-1} \mathbf{H}_{\text{aa}}$ 为关于有功的信息矩阵块; $\mathbf{B} = \mathbf{H}_{\text{rr}}^T \mathbf{W}_r^{-1} \mathbf{H}_{\text{rr}}$ 为关于无功的信息矩阵块; $\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{H}_{\text{aa}}^T \mathbf{W}_a^{-1}$ 为关于有功的修正矩阵块; $\boldsymbol{\beta} = \mathbf{H}_{\text{rr}}^T \mathbf{W}_r^{-1}$ 为关于无功的修正矩阵块; $\mathbf{z}_a$ 为 $\mathbf{z}$ 中有功量测部分向量; $\mathbf{z}_r$ 为 $\mathbf{z}$ 中无功量测部分向量; $\mathbf{h}_a$ 为 $\mathbf{h}$ 中对应 $\mathbf{z}_a$ 部分的量测函数向量; $\mathbf{h}_r$ 为 $\mathbf{h}$ 中

对应 $\mathbf{z}_r$ 部分的量测函数向量; $\mathbf{H}_{aa}$ 为 $\mathbf{h}_a$ 对 $\boldsymbol{\theta}^{abc}$ 的偏导矩阵块; $\mathbf{H}_{rr}$ 为 $\mathbf{h}_r$ 对 $\mathbf{U}^{abc}$ 的偏导矩阵块; $\mathbf{W}_a$ 为对应有功部分的权重矩阵; $\mathbf{W}_r$ 为对应无功部分的权重矩阵。

由于快速分解基于 $\sin \theta_{ij} \approx 0, \cos \theta_{ij} \approx 1, \mathbf{U}^{abc} \approx \mathbf{U}_0^{abc} = [1, 1, 1]$ 的假设, 线性化量测函数时的雅可比矩阵可简化为由支路导纳构成的常数阵, 即:

$$\mathbf{H}_{aa} = \mathbf{B}_a \tag{30}$$

$$\mathbf{H}_{rr} = \mathbf{B}_r \tag{31}$$

其中, $\mathbf{B}_a, \mathbf{B}_r$ 为量测雅可比子矩阵。

至此, 有功和无功完全解耦, 为进一步加速迭代收敛过程, 按式(32)对有功和无功进行交叉迭代求解。

$$\begin{cases} \mathbf{A} \Delta \boldsymbol{\theta}^{k-1} = \boldsymbol{\alpha} [\mathbf{z}_a - \mathbf{h}_a(\boldsymbol{\theta}^{k-1}, \mathbf{U}^{k-1})] \\ \boldsymbol{\theta}^k = \boldsymbol{\theta}^{k-1} + \Delta \boldsymbol{\theta}^{k-1} \\ \mathbf{B} \Delta \mathbf{U}^{k-1} = \boldsymbol{\beta} [\mathbf{z}_r - \mathbf{h}_r(\boldsymbol{\theta}^k, \mathbf{U}^{k-1})] \\ \mathbf{U}^k = \mathbf{U}^{k-1} + \Delta \mathbf{U}^{k-1} \end{cases} \tag{32}$$

4 算法流程

本文研究配电网三相不对称快速分解状态估计, 状态变量以极坐标形式表示, 选取复数基准实行一种广义的标幺化, 将阻抗角整体移相满足快速分解的简化条件, 具体的流程图如图 2 所示。

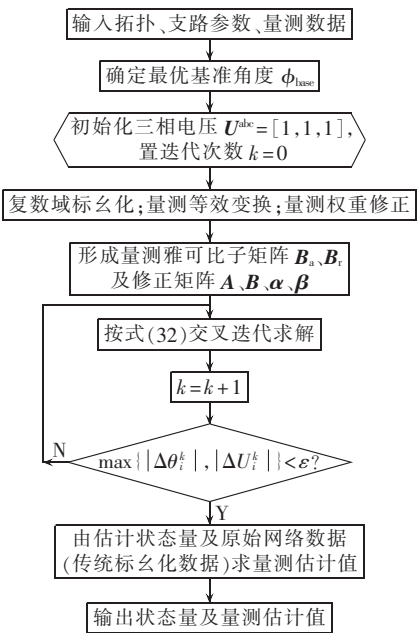


图 2 基于复数域标幺化的快速分解状态估计算法流程图
Fig.2 Flowchart of fast decoupled state-estimation algorithm based on complex normalization

5 算例分析

本文以 IEEE 13、IEEE 123 节点系统^[25]及我国某实际 611 节点配电网系统(记为 C611)为测试算例, 将本文算法与基于牛顿法求解的状态估计算法进行比较, 验证本文所提快速分解状态估计方法的有效性。量测数据是由配电网三相潮流计算获得的真值

叠加服从高斯分布的随机噪声而获得, 其中, 实时量测误差标准差为真值的 1%, 伪量测误差的标准差为真值的 10%~15%。

为重点分析基准相角对配电网状态估计快速分解的影响程度, 以收敛迭代次数为评判指标, 分析不同基准角度下快速分解状态估计程序的收敛性能。

5.1 基准角度对收敛性能的影响

由式(1)、(2)分析可知本文的复数域标幺化方法是一种增加了基准相角的广义标幺化方法, 当 $\phi_{base} = 0^\circ$ 时, 复数域标幺化就是传统标幺化。图 3 为对应不同基准相角下快速分解状态估计的迭代次数。表 1 为各标准算例根据式(12)选取的最优基准相角。

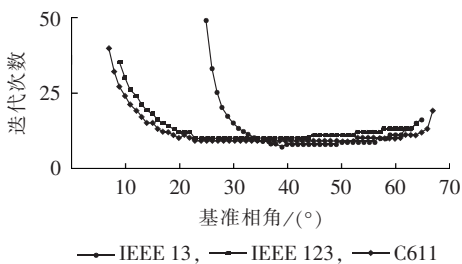


图 3 不同基准相角对快速分解状态估计算法收敛性能的影响

Fig.3 Effect of angle reference on convergence of fast decoupled state-estimation algorithm

表 1 各测试算例的最优基准相角

Table 1 Optimal angle references of different test examples			
标准算例	最优基准相角/(°)	标准算例	最优基准相角/(°)
IEEE 13	43	C611	45
IEEE 123	45		

由图 3 可知, 当基准相角 $\phi_{base} = 0^\circ$ 时, 快速分解状态估计算法发散, 说明传统标幺化下, 配电网三相状态估计难以实现快速分解; 结合表 1 及式(6), 随着基准相角的调整, 支路阻抗比 R/X 相应减小, 快速分解均能可靠收敛, 且在最优基准相角附近, 快速分解达到最优的收敛性能。由此说明: 复数域标幺化是实现配电网状态估计快速分解的有效方法, 基准相角选取的合适与否是决定快速分解能否可靠收敛的关键因素; 依据式(12)确定的基准相角是实现快速分解的最优基准角度。

5.2 快速分解与牛顿法比较

表 2、表 3 及图 4 分别给出了本文快速分解方法和牛顿法三相不对称状态估计算法迭代次数、计算时间、估计精度和数值稳定性性能指标的比较。此外, 表 4 给出了 IEEE 13 节点系统在 2 种估计方法下的三相电压幅值估计值(标幺值)。

分析表 2, 本文复数域快速分解状态估计算法保持了经典快速分解方法收敛特性好的优点, 虽然迭代次数是牛顿法的 2 倍, 但总体计算速度仍快于牛顿

表 2 快速分解法与牛顿法的迭代次数和计算时间比较

Table 2 Comparison of iteration turns and computing time between fast decoupled state-estimation algorithm and Newton state estimation algorithm

测试算例	迭代次数		计算时间/s	
	NRSE	FDSE	NRSE	FDSE
IEEE 13	4	8	0.084	0.082
IEEE 123	5	11	0.237	0.102
C611	4	9	3.727	0.193

注:NRSE、FDSE 分别指基于牛顿法的三相状态估计方法和本文快速分解状态估计方法,后同。

表 3 快速分解法与牛顿法的电压幅值估计精度比较

Table 3 Comparison of voltage amplitude estimation precision between fast decoupled state-estimation algorithm and Newton state estimation algorithm

测试算例	平均误差			最大误差		
	NRSE	FDSE	Δ	NRSE	FDSE	Δ
IEEE 13	1.9×10^{-3}	1.7×10^{-3}	2.1×10^{-4}	5.9×10^{-3}	6.2×10^{-3}	5.0×10^{-4}
IEEE 123	2.2×10^{-3}	2.5×10^{-3}	4.2×10^{-4}	7.7×10^{-3}	8.2×10^{-3}	1.3×10^{-3}
C611	1.3×10^{-3}	1.2×10^{-3}	7.9×10^{-4}	4.1×10^{-3}	4.8×10^{-3}	1.9×10^{-3}

注: Δ 为 NRSE 和 FDSE 电压幅值估计结果之差。

表 4 IEEE 13 节点系统三相电压幅值的估计值

Table 4 Estimated three-phase voltages of IEEE 13-bus system

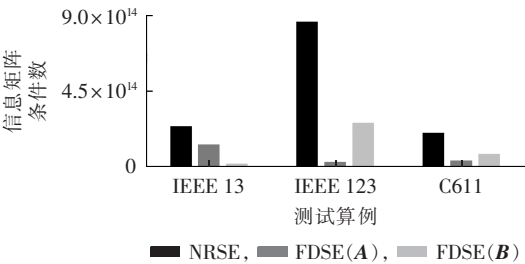
节点号	A 相			B 相			C 相		
	潮流真值	NRSE	FDSE	潮流真值	NRSE	FDSE	潮流真值	NRSE	FDSE
1	1.0625	1.0639	1.0641	1.0500	1.0446	1.4510	1.0687	1.0746	1.0754
2	1.0211	1.0225	1.0224	1.0420	1.0400	1.0401	1.0174	1.0214	1.0213
3	1.0181	1.0195	1.0194	1.0401	1.0381	1.0382	1.0148	1.0188	1.0187
4	0.9941	0.9957	0.9956	1.0217	1.0198	1.0198	0.9960	0.9999	0.9998
5	—	—	—	1.0327	1.0308	1.0308	1.0153	1.0194	1.0193
6	—	—	—	1.0310	1.0294	1.0295	1.0132	1.0172	1.0171
7	0.9901	0.9922	0.9918	1.0529	1.0542	1.0537	0.9777	0.9798	0.9789
8	0.9901	0.9922	0.9918	1.0529	1.0541	1.0537	0.9777	0.9798	0.9789
9	0.9882	0.9902	0.9899	—	—	—	0.9757	0.9778	0.9769
10	—	—	—	—	—	—	0.9737	0.9758	0.9750
11	0.9827	0.9846	0.9843	—	—	—	—	—	—
12	0.9901	0.9921	0.9918	1.0529	1.0542	1.0538	0.9777	0.9797	0.9789
13	0.9836	0.9848	0.9843	1.0553	1.0566	1.0562	0.9758	0.9778	0.9768

配电网状态估计的在线计算速度,具有较好的工程应用价值。

此外,通过比较图 4 所示 2 种方法的信息矩阵条件数可知,本文实现的配电网三相不对称快速分解状态估计是在 $X \gg R$ 的前提下,利用了有功、无功解耦,使信息矩阵分块并常数化,以达到减小矩阵条件数、提高状态估计数值稳定性的目的。

6 结论

本文提出了一种基于复数域的配电网三相不对称快速分解状态估计算法。根据网络特性选取基准相角进行复数域标幺化,可以有效减小支路阻抗比 R/X ,实现有功和无功的解耦。与此同时,由解耦带来的信息矩阵分块化且常数化的处理可显著减少计算复杂度,并提高数值计算收敛的稳定性。此外,由于基准相角由网络特性决定,本文算法可适用于特性



注:A、B 分别为本文快速分解修正有功、无功的信息矩阵。

图 4 快速分解法与牛顿法的数值稳定性比较

Fig.4 Comparison of numerical stability between fast decoupled state-estimation algorithm and Newton state estimation algorithm

法,而且系统规模越大,本文方法在计算速度上的优势越明显。

由表 3 和表 4 可知,本文快速分解法与牛顿法具有相近的估计精度。同时,2 种方法估计结果之差的平均估计误差和最大估计误差约为 0.001,说明本文快速分解方法可保证估计精度,有利于提高大规模

不一(阻抗比不同)的配电网。

对比基于牛顿法求解的加权最小二乘方法,本文所提快速分解方法和牛顿法具有相似的估计精度,并保留了经典快速分解的线性收敛特性。虽然解耦后对有功、无功的交替迭代求解增加了迭代次数,但分块化和常数化后的信息矩阵可提前进行三角分解,缩短单次迭代的时间,从整体计算时间上看,快速分解仍比一般的牛顿法具有更高的计算效率,多个算例验证了本文方法的有效性。综上所述,本文提出的复数域快速分解算法性能优越,具有较好的工程应用前景。

参考文献:

[1] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考[J]. 电力系统自动化, 2009,33(9):1-4.
XIAO Shijie. Consideration of technology for constructing Chinese smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(9):

- 1-4.
- [2] 王成山,王守相,郭力. 我国智能配电技术展望[J]. 南方电网技术,2010,4(1):18-22.
WANG Chengshan,WANG Shouxiang,GUO Li. Prospect over the techniques of smart distribution network in China[J]. Southern Power System Technology,2010,4(1):18-22.
- [3] 王守相,葛磊蛟,王凯. 智能配电系统的内涵及其关键技术[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):1-6.
WANG Shouxiang,GE Leijiao,WANG Kai. Connotation of intelligent distribution system and its key technology[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):1-6.
- [4] 王成山,王丹,周越. 智能配电系统架构分析及技术挑战[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):1-9.
WANG Chengshan,WANG Dan,ZHOU Yue. Framework analysis and technical challenges to smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(9):1-9.
- [5] HUANG Y F,WERNER S,HUANG J,et al. State estimation in electric power grids:meeting new challenges presented by the requirements of the future grid[J]. IEEE Signal Processing Magazine,2012,29(5):33-43.
- [6] 吴文传,张伯明,巨云涛,等. 配电网高级应用软件及其实用化关键技术[J]. 电力系统自动化,2015,39(1):1-9.
WU Wenchuan,ZHANG Boming,JU Yuntao,et al. Distribution network advanced application software and its key techniques [J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(1):1-9.
- [7] 赵俊博,张葛祥,黄彦全. 含新能源电力系统状态估计研究现状和展望[J]. 电力自动化设备,2014,34(5):7-20.
ZHAO Junbo,ZHANG Gexiang,HUANG Yanquan. Research and prospect of electric power system state estimation including renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(5):7-20.
- [8] 杨雄,卫志农,孙国强,等. 含分布式电源的配电网三相解耦潮流计算方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):99-107.
YANG Xiong,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,et al. Three-phase decoupled load flow calculation of distribution network with distributed power supply [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):99-107.
- [9] 张沈习,程浩忠,邢海军,等. 配电网中考虑不确定性的分布式电源规划研究综述[J]. 电力自动化设备,2016,36(8):99-107.
ZHANG Shenxi,CHENG Haozhong,XING Haijun,et al. A survey of distributed power planning considering uncertainty in distribution networks[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(8):99-107.
- [10] SINGH R,PAL B C,JABR R A. Choice of estimator for distribution system state estimation[J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2009,3(7):666-678.
- [11] BARAN M E,KELLEY A W. A branch-current-based state estimation method for distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1995,10(1):483-491.
- [12] 孙宏斌,张伯明. 基于支路功率的配电状态估计方法[J]. 电力系统自动化,1998,22(8):12-16.
SUN Hongbin,ZHANG Boming. A branch-power-based state estimation method for distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems,1998,22(8):12-16.
- [13] 程浩忠,袁青山. 基于等效电流量测变换的电力系统状态估计方法[J]. 电力系统自动化,2000,24(14):25-29.
CHENG Haozhong,YUAN Qingshan. A state estimation method of power systems based on equivalent current measurement transformation[J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(14):25-29.
- [14] 卫志农,王丹,孙国强,等. 基于相坐标系的配电网三相不对称解耦状态估计算法[J]. 电力系统自动化,2005,29(16):16-21.
WEI Zhinong,WANG Dan,SUN Guoqiang,et al. New algorithm for state estimation based on fast decoupling of distribution systems asymmetrical three-phase in phase coordinates[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(16):16-21.
- [15] GOL M,ABUR A. A robust PMU based three-phase state estimator using modal decoupling[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2014,29(5):2292-2299.
- [16] 卫志农,陈胜,孙国强,等. 含多类型分布式电源的主动配电网分布式三相状态估计[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):68-74.
WEI Zhinong,CHEN Sheng,SUN Guoqiang,et al. Distributed three-phase state estimation for active distribution system integrated with different types of DG[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(9):68-74.
- [17] ROY L,MOHAMMED T A. Fast super decoupled state estimator for power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1997,12(4):1597-1603.
- [18] LIN W M,TENG J H. A new transmission fast-decoupled state estimation with equality constraints[J]. International Journal of Electrical Power & Energy System,1998,20(7):489-493.
- [19] OCHI T,YAMASHITA D,KOYANAGI K,et al. The development and the application of fast decoupled load flow method for distribution systems with high R/X ratios lines[C]//Innovative Smart Grid Technologies (ISGT). Washington DC,USA: IEEE,2013:1-6.
- [20] TORTELLI O L,LOURENCO E M,GARCIA A V,et al. Fast decoupled power flow to emerging distribution systems via complex pu normalization[J]. IEEE Transactions on Power System,2014,30(3):1351-1358.
- [21] WU F F. Theoretical study of the convergence of the fast decoupled load flow[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1977,96(1):268-275.
- [22] 孙国强. 基于相量测量的电力系统状态估计研究[D]. 南京:河海大学,2005.
SUN Guoqiang. State estimation of power system based on phasor measurement[D]. Nanjing:Hohai University,2005.
- [23] 肖明耀. 误差理论与应用[M]. 北京:计量出版社,1985:92-94.
- [24] STOTT B,ALSAC O. Fast decoupled load flow[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System,1974,93(3):859-869.
- [25] IEEE Power & Energy Society. IEEE test feeder specifications [EB/OL]. (2015-01-02)[2016-01-15]. <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/>.

作者简介:



周佳伟

周佳伟(1992—),女,江苏常熟人,硕士研究生,研究方向为电力系统状态估计(E-mail: 2271141544@qq.com);

卫志农(1962—),男,江苏江阴人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统运行分析与控制、输配电系统自动化(E-mail: wzn_nj@263.net);

孙国强(1978—),男,江苏江阴人,副教授,博士,从事电力系统分析与控制方面的研究工作(E-mail: hhusunguoqiang@163.com)。

(下转第25页 continued on page 25)

Grounding wire detection based on three-phase symmetrical voltage injection
method for distribution network

CHENG Lefeng, YU Tao

(College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A technique based on the three-phase symmetrical voltage injection method for detecting the grounding wire of distribution network is proposed to prevent the serious accident of “closure with grounding wire”, and a DSP-based device is developed to detect the temporarily-grounding wire of distribution network. The currents sampled under the injected voltages of different frequencies are compared with the thresholds to check if there is any grounding wire remained in the distribution network. The results of field test show that, the proposed method and the developed device could effectively detect any remained three-phase, two-phase or single-phase grounding wire, and identify the inter-phase short circuit fault, which simplifies the quick detection and removal of temporarily-grounding wire for the safe distribution network energizing.

Key words: distribution network; maintenance; grounding wire detection; DSP; three-phase symmetrical voltage injection method

+++++

(上接第 18 页 continued from page 18)

Fast decoupled state-estimation algorithm based on complex normalization for
three-phase asymmetrical distribution network

ZHOU Jiawei, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, CHEN Sheng, ZANG Haixiang

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: A fast decoupled state-estimation algorithm based on complex normalization is proposed for three-phase asymmetrical distribution network. Based on the coordinate transformation, an angle reference is introduced to implement the complex normalization for shifting the whole impedance phases to decrease the ratio of R/X , which weakens the effect of voltage phase-angle on the active power and the effect of voltage magnitude on the reactive power for the fast decoupling of distribution network state-estimation. The principle of optimal angle reference selection is obtained according to the network characteristics, which ensures the reliable convergence of the fast decoupled state-estimation algorithm. The current measurements are treated as the power measurements to fit for the PQ fast decoupled state-estimation model. Simulative results of standard test examples show that, the proposed algorithm improves the numerical computation stability of distribution network state estimation and enhances the online state estimation speed of large-scale distribution network, while guarantees the estimation precision.

Key words: distribution network; three-phase unbalance; state estimation; complex normalization