

一种适应于配电网的交叉逼近状态估计方法

王 鹏¹, 陈 蕾², 陈艳波³, 沈玉兰³, 肖湘宁³

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310007;
3. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要:配电网的高阻抗比特点使得传统的输电网快速解耦状态估计无法使用,且快速解耦状态估计无法处理配电网中大量存在的电流幅值量测,因而往往不满足可观性要求。为此,提出一种适应于配电网的交叉逼近状态估计方法,通过交叉迭代求解所有节点电压幅值的平方和所有支路两端的相角差,待收敛后再求解电压复相量。算例分析表明所提方法对高阻抗比的配电网具有很好的适应性,在满足计算精度要求的同时具有较高的计算效率。

关键词:高阻抗比;电流幅值量测;配电网;状态估计

中图分类号:TM 711

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201911023

0 引言

当前配电网的规模不断扩大、运行方式日益复杂,为确保配电网的可靠运行,亟需构建配电自动化系统。配电网能量管理系统DMS(Distribution energy Management System)是配电自动化系统的基本系统之一。在DMS中,作为数据滤波器的配电网状态估计DSE(Distribution State Estimation)处于基础性地位,它为DMS各种高级应用提供可信的数据。

与DSE相比,输电网状态估计SE(State Estimation)在理论和实践上已趋于成熟。输电网SE主要包括加权最小二乘WLS(Weighted Least Square)法、快速解耦状态估计FDSE(Fast Decoupled State Estimation)及各种抗差估计方法。与输电网SE相比,DSE面临的问题主要包括:需处理大量支路电流幅值量测BCMMs(Branch Current Magnitude Measurements),量测冗余度不足;三相不平衡;高阻抗比(r/x)所导致的收敛困难及计算效率问题。

为解决量测冗余度不足的问题,可采用的方法包括利用零注入功率建立等式约束,利用历史数据或负荷预测形成伪量测量,以及对不同时间尺度和不同精度的量测量进行数据融合等^[1-5]。

由于配电网负荷的三相不对称,单相DSE不能实时反映配电网的运行状态,因此常需要进行三相DSE。文献[6]提出一种基于WLS的三相DSE算法。

收稿日期:2019-01-10;修回日期:2019-09-27

基金项目:国家电网公司科技项目(基于营配融合的配电台区拓扑辨识、智能监测关键技术研究及工程示范)(SGZJ0000-KXJS1800382)

Project supported by the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China (Key Technology Research and Engineering Demonstration of Topology Identification and Intelligent Monitoring for Distribution Network based on Data Integration)(SGZJ0000KXJS1800382)

文献[7]提出基于预测残差的三相抗差DSE方法,其收敛速度较好。文献[8]提出一种以支路电流为状态变量的DSE方法,其优点是在三相不对称的配电网中实现了雅可比矩阵的解耦。文献[9]提出基于神经网络伪量测建模的三相DSE算法,在通信故障时也能保证估计精度。文献[10]提出基于新息图的三相DSE方法,在估计的同时可辨识不良数据和拓扑错误。文献[11]提出了混合整数线性规划形式的抗差SE方法,从数学上可保证获得全局解,且无需非线性迭代。文献[12]提出了改进的基于复数域标幺化的快速解耦SE算法,但无法充分利用大量存在的BCMMs。文献[13]提出了面向电-热综合能源系统的双线性抗差SE方法。

由于配电网常不满足 $r \ll x$ 这一条件,故若将快速超级解耦估计FSDE(Fast Super Decoupled Estimation)直接应用于配电网可能存在收敛困难及计算效率不高的问题。为此,文献[14]提出精确解耦SE和改进解耦SE,但这2种方法无法处理BCMMs,因而可能不满足可观性条件。文献[15]提出一种FSDE,该方法通过对量测量进行旋转变换实现有功、无功解耦,FSDE能适用于 r/x 较大的网络,但其同样无法处理BCMMs,且计算效率不高。文献[16]利用量测变换技术使FDSE在 r/x 较大时也有良好的收敛性,但对高阻抗比配电网的适应性仍较差。文献[17]提出一种针对配电网的快速解耦SE方法,但该方法对支路电流幅值量测的变换忽略了对地导纳,降低了模型精确性,且在计算中引入新的状态变量会增加雅可比矩阵的维数,从而影响计算效率。为提高估计精度和计算效率,文献[18]在PQ解耦的基础上将P- θ 迭代替换为PQ- θ 迭代,并保留量测函数非线性项,有较好的收敛性和计算效率,但其对于高阻抗比配电网的适应性仍需进一步检验。

为适应配电网的高阻抗比特点,同时利用配电

网中存在的大量电流幅值量测,从而满足可观性要求,本文介绍笔者于2017年提出的发明专利——一种适应于配电网的交叉逼近状态估计CADSE(Cross Approximation Distribution State Estimation)方法^[19],该方法通过交叉迭代求解所有节点电压幅值的平方和所有支路两端的相角差,待收敛后再求解电压复相量。最后通过仿真算例测试所提方法的性能。

1 WLS和FDSE概述

理论上而言,只要满足可观性要求,则WLS既适用于输电网也适用于配电网。WLS迭代的每一步均需重新形成增益矩阵,并进行因子分解和前推回代,因而影响了计算效率。FDSE是借鉴潮流计算中的解耦思想而提出的。

FDSE建模基于以下3个假设:系统运行时各节点电压幅值近似为1 p.u.,支路两端相角差近似为0; r/x 非常小;有功型/无功型量测仅用于估计电压相角/幅值。据此,FDSE以2个解耦的正则方程代替WLS的正则方程,FDSE的2个信息矩阵均有常数矩阵,且各信息矩阵的维数约为WLS信息矩阵维数的一半。因此,与WLS相比,FDSE的计算效率大幅提高。

需指出的是,FDSE存在局限性:对输电网(特别是高压输电网),FDSE的前提条件近似满足,故FDSE对输电网(特别是高压输电网)有良好的适应性且有很高的计算效率,而当网络(如高阻抗比的配电网)参数或系统运行条件不满足解耦条件时,FDSE的收敛性变差甚至不收敛;FDSE无法使用BCMMs,从而造成量测冗余度的浪费(影响估计精度),并可能导致不可观,尤其是对存在大量BCMMs的配电网。

为了使FDSE能够适用于配电网,国内外学者进行了大量研究,其改进思路一般可归结为:不对WLS的雅可比矩阵非对角块进行近似处理,而是直接利用数学的方法进行量测变换或旋转变换^[5],从而实现有功分量和无功分量的解耦。这种方法虽然不受 r/x 大小的影响,但量测变换和旋转变换不仅增加了计算量,而且降低了计算精度。

2 CADSE的建模和求解

2.1 网络模型和量测方程

若将三绕组变压器等效为3个两绕组变压器,则所有的变压器支路和输电线支路可统一用图1所示的 π 型支路来表示。

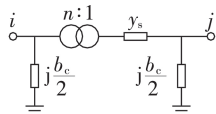


图1 两端口 π 型支路模型

Fig.1 Two-port π -type branch model

图1中, $y_s = g_s + jb_s = 1/(r_{ij} + jx_{ij})$ 为串联导纳, $r_{ij} + jx_{ij}$ 为串联阻抗; b_c 为线路充电电纳(对变压器支路 $b_c = 0$); n 为变比(对输电线路 $n = 1$)。图1可等效为图2,其中 $g_{ij} = g_s/n$, $b_{ij} = b_s/n$, $b_{si} = (1-n)b_s/n^2 + b_c/2$, $g_{sj} = (n-1)g_s/n$, $b_{sj} = (n-1)b_s/n + b_c/2$, $g_{si} = (1-n)g_s/n^2$ 。

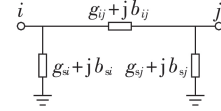


图2 π 型支路等效模型

Fig.2 Equivalent π -type branch model

DSE(包括有源配电网)常用的量测量一般包括实时量测、伪量测和虚拟量测3类^[20]。虚拟量测的精度高,因此在估计中应设置较大的权重;伪量测的精度较低,因此在估计中应设置较小的权重。

以上3类量测的量测量具体包括:节点 i 的电压幅值量测 v_i ;节点 i 的注入有功和无功量测 P_i, Q_i ;支路 ij 的有功和无功量测 P_{ij}, Q_{ij} ;支路 ij 的电流幅值量测 I_{ij} 及相角量测 θ_{ij} (由相量测量单元(PMU)提供)等。以上量测量对应的量测方程为(为简便忽略噪声):

$$v_i = v_i \quad (1)$$

$$P_i = v_i \sum_{j \in N_i} v_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2)$$

$$Q_i = v_i \sum_{j \in N_i} v_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (3)$$

$$P_{ij} = v_i^2 (g_{si} + g_{ij}) - v_i v_j g_{ij} \cos \theta_{ij} - v_i v_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (4)$$

$$Q_{ij} = -v_i^2 (b_{si} + b_{ij}) + v_i v_j b_{ij} \cos \theta_{ij} - v_i v_j g_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (5)$$

$$I_{ij} = \sqrt{A_{ij} v_i^2 + \Xi_{ij} v_j^2 - 2 v_i v_j (C_{ij} \cos \theta_{ij} - D_{ij} \sin \theta_{ij})} \quad (6)$$

$$\theta_{ij} = \theta_{ij} \quad (7)$$

其中, $A_{ij} = (g_{si} + g_{ij})^2 + (b_{si} + b_{ij})^2$; $\Xi_{ij} = g_{ij}^2 + b_{ij}^2$; $C_{ij} = g_{ij}^2 + b_{ij}^2 + g_{si} g_{ij} + b_{si} b_{ij}$; $D_{ij} = -g_{si} b_{ij} + b_{si} g_{ij}$; N_i 为与节点 i 直接相连的所有节点的集合; $G_{ij} + jB_{ij}$ 为节点导纳矩阵中第 i 行第 j 列元素。

值得注意的是,PMU还可提供节点相角量测,对其和后文式(18)得到的节点相角的估计值取平均值得到最终的节点相角估计值。

2.2 模型构建

本文提出的CADSE包括以下2个阶段。

(1)CADSE第一阶段。

引入中间状态变量 $\mathbf{y} = [\mathbf{U}^T, \boldsymbol{\mu}^T]^T$,其中, $\mathbf{U} = [v_i^2]$ 为所有节点电压幅值的平方构成的列向量, $\boldsymbol{\mu} = [\boldsymbol{\mu}_1, \boldsymbol{\mu}_2]^T = [\cos \theta_{ij}, \sin \theta_{ij}]^T$ 为所有支路两端节点的相角差的余弦和正弦组成的列向量。

第一阶段的任务是通过迭代得到 $\mathbf{y}$ 的估计值 $\hat{\mathbf{y}}$,具体做法是在每次迭代中进行 $\mathbf{U}$ 和 $\boldsymbol{\mu}$ 的解耦估计。

a. 估计 $U^{(k+1)}$ (k 为迭代次数)。

令 $\mu^{(k+1)} = \mu^{(k)} (\mu^{(0)} = [1, 0]^T)$, 分别对式(1)~(6)所示的所有量测量进行变换, 变换方法为:

$$\begin{cases} \bar{v}_i^2 = v_i^2 \\ \bar{P}_i = P_i - v_i \sum_{j \neq i} v_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ \bar{Q}_i = Q_i - v_i \sum_{j \neq i} v_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ \bar{P}_{ij} = P_{ij} + v_i v_j g_{ij} \cos \theta_{ij} + v_i v_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \\ \bar{Q}_{ij} = Q_{ij} - v_i v_j b_{ij} \cos \theta_{ij} + v_i v_j g_{ij} \sin \theta_{ij} \\ \bar{I}_{ij}^2 = I_{ij}^2 + 2v_i v_j (C_{ij} \cos \theta_{ij} - D_{ij} \sin \theta_{ij}) \end{cases} \quad (8)$$

经过式(8)变换, 可得新的量测方程为:

$$\bar{z}^{(k+1)} = F U^{(k+1)} + \bar{e}^{(k+1)} \quad (9)$$

其中, $\bar{z}^{(k+1)} = [\bar{v}_i^2, \bar{P}_i, \bar{Q}_i, \bar{P}_{ij}, \bar{Q}_{ij}, \bar{I}_{ij}]^T$; $\bar{e}$ 为中间噪声矢量, 依据噪声传递原理得到; F 为常数矩阵, 其元素分别为 $\partial \bar{v}_i^2 / \partial v_i^2 = 1$, $\partial \bar{v}_i^2 / \partial v_j^2 = 0$, $\partial \bar{P}_i / \partial v_i^2 = G_{ii}$, $\partial \bar{P}_i / \partial v_j^2 = 0$, $\partial \bar{Q}_i / \partial v_i^2 = -B_{ii}$, $\partial \bar{Q}_i / \partial v_j^2 = 0$, $\partial \bar{P}_{ij} / \partial v_i^2 = g_{si} + g_{ij}$, $\partial \bar{P}_{ij} / \partial v_j^2 = -(b_{si} + b_{ij})$, $\partial \bar{P}_{ij} / \partial v_i^2 = 0$, $\partial \bar{Q}_{ij} / \partial v_j^2 = 0$, $\partial \bar{I}_{ij}^2 / \partial v_i^2 = A_{ij}$, $\partial \bar{I}_{ij}^2 / \partial v_j^2 = \Xi_{ij}$ 。

显然, 式(9)为线性量测方程。基于式(9)可采用WLS求解中间状态变量中的 $U^{(k+1)}$, 可得:

$$U^{(k+1)} = [F^T S^{-1} F]^{-1} F^T S^{-1} \bar{z}^{(k+1)} \quad (10)$$

其中, S^{-1} 为根据 $\bar{e}$ 得到的权重矩阵, 在简化计算中可取 S^{-1} 为单位矩阵。

b. 估计 $\mu^{(k+1)}$ 。

根据 $U^{(k+1)}$ 可得 $[v_i]^{(k+1)} = [\sqrt{v_i^2}]^{(k+1)}$, 进一步将 $[v_i]^{(k+1)}$ 代入式(2)~(7), 并进行变换, 变换方法为:

$$\begin{cases} \tilde{P}_i = P_i - v_i^2 G_{ii} \\ \tilde{Q}_i = Q_i + v_i^2 B_{ii} \\ \tilde{P}_{ij} = P_{ij} - v_i^2 (g_{si} + g_{ij}) \\ \tilde{Q}_{ij} = Q_{ij} + v_i^2 (b_{si} + b_{ij}) \\ \tilde{I}_{ij}^2 = I_{ij}^2 - (A_{ij} v_i^2 + \Xi_{ij} v_j^2) \\ \cos \tilde{\theta}_{ij} = \cos \theta_{ij} \\ \sin \tilde{\theta}_{ij} = \sin \theta_{ij} \end{cases} \quad (11)$$

经过式(11)变换, 可得新的量测方程为:

$$\tilde{z}^{(k+1)} = K \mu^{(k+1)} + \tilde{e}^{(k+1)} \quad (12)$$

其中, $\tilde{z}^{(k+1)} = [\tilde{P}_i, \tilde{Q}_i, \tilde{P}_{ij}, \tilde{Q}_{ij}, \tilde{I}_{ij}, \cos \tilde{\theta}_{ij}, \sin \tilde{\theta}_{ij}]^T$; $\tilde{e}$ 为中间噪声矢量, 依据噪声传递原理得到; K 为常数矩阵, 其元素为 $\partial \cos \tilde{\theta}_{ij} / \partial \cos \theta_{ij} = 1$, $\partial \cos \tilde{\theta}_{ij} / \partial \sin \theta_{ij} = 0$, $\partial \sin \tilde{\theta}_{ij} / \partial \cos \theta_{ij} = 0$, $\partial \sin \tilde{\theta}_{ij} / \partial \sin \theta_{ij} = 1$, $\partial \tilde{P}_i / \partial \cos \theta_{ij} = v_i^2 G_{ij} \approx G_{ij}$, $\partial \tilde{P}_i / \partial \sin \theta_{ij} = v_i^2 B_{ij} \approx B_{ij}$, $\partial \tilde{Q}_i / \partial \cos \theta_{ij} = -v_i v_j B_{ij} \approx -B_{ij}$, $\partial \tilde{Q}_i / \partial \sin \theta_{ij} = v_i v_j G_{ij} \approx G_{ij}$, $\partial \tilde{P}_{ij} / \partial \cos \theta_{ij} = -v_i v_j g_{ij} \approx -g_{ij}$, $\partial \tilde{P}_{ij} / \partial \sin \theta_{ij} = -v_i v_j b_{ij} \approx -b_{ij}$, $\partial \tilde{Q}_{ij} / \partial \cos \theta_{ij} = v_i v_j b_{ij} \approx b_{ij}$, $\partial \tilde{Q}_{ij} / \partial \sin \theta_{ij} = v_i v_j g_{ij} \approx g_{ij}$ 。

$$\begin{aligned} \partial \sin \theta_{ij} &= -v_i v_j g_{ij} \approx -g_{ij}, \partial \tilde{I}_{ij}^2 / \partial \cos \theta_{ij} = -2v_i v_j C_{ij} \approx -2C_{ij}, \\ \partial \tilde{I}_{ij}^2 / \partial \sin \theta_{ij} &= 2v_i v_j D_{ij} \approx 2D_{ij} \end{aligned}$$

显然, 式(12)为线性量测方程。基于式(12)可采用WLS求解中间状态变量中的 $\mu^{(k+1)}$, 可得:

$$\mu^{(k+1)} = [K^T W^{-1} K]^{-1} K^T W^{-1} \tilde{z}^{(k+1)} \quad (13)$$

其中, W^{-1} 为根据 $\tilde{e}$ 得到的权重矩阵, 在简化计算中可取 W^{-1} 为单位矩阵。

重复以上步骤a和b, 直到收敛, 可得中间状态变量的估计值 $\hat{y} = [\hat{U}^T, \hat{\mu}^T]^T$ 。第一阶段结束。

其中, 收敛判据为:

$$\max \{ \|U^{(k+1)} - U^{(k)}\|, \|\mu^{(k+1)} - \mu^{(k)}\| \} \leq \varepsilon \quad (14)$$

其中, $\|\cdot\|$ 为范数运算; ε 为收敛精度, 本文取 $\varepsilon = 10^{-5}$ 。

(2) CADSE第二阶段。

第二阶段的任务是根据 $\hat{y}$ 求出电压复相量。

所有节点电压幅值的估计值 $[\hat{v}_i]$ 为:

$$[\hat{v}_i] = [\sqrt{\hat{v}_i^2}] \quad (15)$$

支路 ij 两端相角差估计值为 $[\theta_{ij}^{(e)}] = [\arccos \hat{\mu}_1]$ 和 $[\theta_{ij}^{(s)}] = [\arcsin \hat{\mu}_2]$, 进一步可得所有支路两端电压相角差的估计值 $\theta_b = [(\theta_{ij}^{(e)} + \theta_{ij}^{(s)}) / 2]$ 。

理论上而言, 所有支路两端电压相角差的估计值 θ_b 与所有节点的相角关系为:

$$\theta_b = A \theta \quad (16)$$

其中, $\theta = [\theta_2, \theta_3, \dots, \theta_N]^T \in \mathbb{R}^{N-1}$ 为除参考节点外所有节点相角组成的向量(设节点1为参考节点), N 为节点总数; $A = [a_{ij}]$ ($1 \leq i \leq l, 1 \leq j \leq N-1$) 为降阶支路-节点关联矩阵(不含参考节点对应列, l 为支路数), 其元素由式(17)决定。

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{节点 } j \text{ 为支路 } i \text{ 发端节点} \\ -1 & \text{节点 } j \text{ 为支路 } i \text{ 收端节点} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

对于配电网, $l=N-1$, 故 A 为稀疏方阵。由式(16)容易得 θ 的估计值 $\hat{\theta}$ 为:

$$\hat{\theta} = A^{-1} \theta_b \quad (18)$$

综上可得CADSE的计算流程图如图3所示。

2.3 算法分析

(1) 对有源配电网的适应性分析。

有源配电网中有大量的分布式电源接入。分布式电源接入的方法一般为直接并网和经电力电子换流器并网2种^[5]。当配电网中有分布式电源接入时, 应定义扩展状态变量为 $x_{ex} = [x, E_0, \delta_0]^T$, 其中 x 为电压复相量这一常规状态变量, E_0 与 δ_0 分别为风电机组(或脉宽调制(PWM)换流器)端口电压幅值与相角。此时, 可将 E_0 与 x 中所有节点的电压幅值一起进行估计, 并将 δ_0 与 x 中所有节点的电压相角

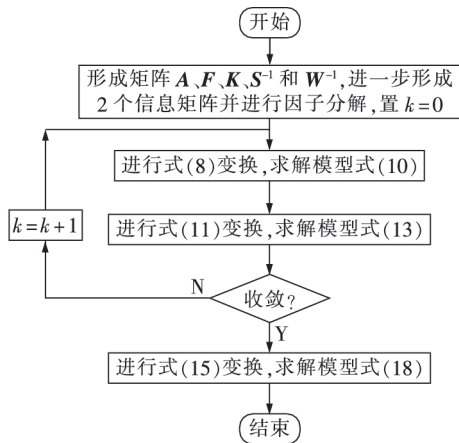


图3 CADSE的计算流程图

Fig.3 Calculation flowchart of CADSE

一起进行估计。在运行 CADSE 之前,可按照文献[5]的方法求得伪量测。

此外,实际配电网可能三相不对称。对三相不平衡配电网进行 SE 时,状态变量需要用三相变量表示。因为 CADSE 在建模过程中并未建立在三相对称的基础上,因此理论上 CADSE 同样适用于三相不平衡配电网。但需要注意的是,当状态变量用三相变量表示时,由于状态变量的数目增多,为保证可观性,需要使用更多的伪量测。

(2)与 FDSE 的对比。

与已有的 FDSE 方法相比,CADSE 具有以下优点:电压幅值和支路相角解耦迭代,且其建模过程无需 $r \ll x$ 这个前提条件,故 CADSE 对不同 r/x 的网络均具有很好的适应性,表现出很好的收敛性和较高的计算效率;CADSE 可以处理 BCMMs,从而充分利用量测冗余度,提高了估计精度,对于存在大量 BCMMs 的配电网,CADSE 的可观性更易得到满足。

2.4 可观性分析

CADSE 第一阶段的每步迭代均需求解 2 个子问题。子问题 1 是求解模型式(10),这一步量测量个数与常规 WLS 基本相同,而状态变量个数仅为 N (WLS 状态变量个数为 $2N-1$),故满足可观性要求。子问题 2 是求解模型式(12),这一步状态变量个数为 $2(N-1)$,而量测量个数仅比常规 WLS 少了电压幅值量测量个数,子问题 2 同样满足可观性要求。

CADSE 第二阶段显然是满足可观性要求的。

3 算例分析

本节在 IEEE 配电系统以及一个实际包含 213 个节点的配电系统对 WLS、FDSE 及本文所提 CADSE 的性能进行对比测试。对 IEEE 系统,采用全量测(包含 BCMMs),量测量产生的方法是在潮流计算的结果上叠加正态分布的随机数(噪声标准差为 0.001 p.u.)。算法采用 JAVA 编程,测试环境为 PC

机,CPU 为 Intel(R) Core(TM) i3 M370,主频为 2.40 GHz,内存为 4.00 GB。

3.1 量测冗余度和可观性测试

表 1 给出了对 IEEE 各测试系统,WLS 和 CADSE 第一阶段的量测冗余度。由表中可见,CADSE 第一阶段子问题 1 和子问题 2 的量测冗余度均很好,因此 CADSE 的可观性要求容易得到满足。

表 1 WLS 和 CADSE 的量测冗余度

Table 1 Measurement redundancy of WLS and CADSE

系统	WLS	量测冗余度	
		CADSE	
		子问题 1	子问题 2
IEEE 4 节点	4.2857	7.5000	4.3334
IEEE 33 节点	4.0154	7.9091	3.5625
IEEE 43 节点	4.4353	8.7674	3.9762
IEEE 69 节点	4.0073	7.9565	3.5294
实际 213 节点	1.9466	3.8832	1.7959

3.2 正常阻抗比的估计精度和计算效率测试

(1)估计精度。当噪声标准差为 0.001 p.u. 时,由 CADSE 得到的状态变量最大估计误差如表 2 所示(表中电压幅值最大估计误差为标么值)。由表中可见,在所有的测试中,CADSE 的估计结果均正确。进一步减小噪声标准差,重复以上实验,可以发现:随着噪声标准差的减小,由 CADSE 得到的状态变量最大估计误差也随之减小,从而证明了 CADSE 的估计值逼近于真值。

表 2 CADSE 得到的状态变量最大估计误差

Table 2 Maximum estimation errors of state variables obtained by CADSE

系统	电压幅值最大估计误差	相角最大估计误差/rad
IEEE 4 节点	4.6×10^{-6}	8.7×10^{-6}
IEEE 33 节点	3.9×10^{-6}	9.2×10^{-6}
IEEE 43 节点	6.8×10^{-6}	9.6×10^{-6}
IEEE 69 节点	5.4×10^{-6}	9.8×10^{-6}
实际 213 节点	5.8×10^{-6}	9.2×10^{-6}

(2)计算效率。对 IEEE 各测试系统及实际系统,当不使用 BCMMs 时,分别测试 WLS、FDSE 及 CADSE 在 1000 次独立实验中的平均迭代次数和计算耗时;当使用 BCMMs,分别测试 WLS 和 CADSE 在 1000 次独立实验中的平均迭代次数和计算耗时(FDSE 无法处理 BCMMs)。测试结果如表 3 所示,表中同时给出每个系统的最大阻抗比。

由表 3 可见,由于 FDSE 无法处理 BCMMs,因此在规模较大的实际 213 节点配电网中,FDSE 不满足可观性要求;而本文提出的 CADSE 则可有效处理 BCMMs,从而保证了满足可观性要求。在计算效率方面,当使用 BCMMs 时,FDSE 无法估计,此时 CADSE 的计算效率远高于 WLS。图 4 进一步给出了 CADSE 的计算耗时与节点数之间的关系。由图中

表3 正常阻抗比系统WLS和CADSE的平均
迭代次数及计算耗时

Table 3 Average iterative times and calculation time
of WLS and CADSE for systems with
normal impedance ratio

系统	最大 阻抗 比	平均迭代次数(计算耗时/ms)				
		不使用BCMMs			使用BCMMs	
		WLS	FDSE	CADSE	WLS	CADSE
IEEE 4节点	0.20	4(7)	4(6)	4(7)	5(7)	4(7)
IEEE 33节点	3.02	4(51)	19(17)	14(11)	5(70)	15(12)
IEEE 43节点	0.98	5(82)	9(15)	7(14)	5(89)	8(16)
IEEE 69节点	3.36	5(169)	47(35)	14(30)	5(176)	14(32)
实际213节点	1.21	不可观	不可观	不可观	6(703)	15(113)

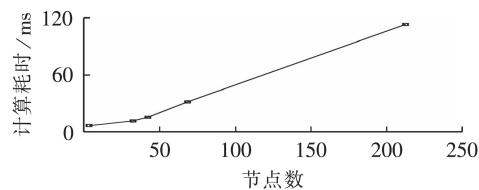


图4 CADSE的计算耗时与节点数的关系

Fig.4 Relationship between calculation time of
CADSE and node number

可见,CADSE的计算耗时随着系统规模的增大近似呈线性增长,表现出较高的计算效率。

3.3 高阻抗比的计算效率测试

进一步对WLS、FDSE及CADSE在高阻抗比系统中的估计性能进行测试。在IEEE各测试系统中,从所有支路中随机选取一条支路,将其电抗变为原来的1/2,然后测试WLS、FDSE及CADSE在所有支路组合情况下的估计性能。测试结果见表4。对比表3和表4可见,随着阻抗比的增大,FDSE的估计性能下降,而本文提出的CADSE的性能则变化不大,故CADSE对不同的阻抗比系统均具有良好的适应性。

表4 高阻抗比系统WLS和CADSE的平均
迭代次数及计算耗时

Table 4 Average iterative times and calculation time
of WLS and CADSE for systems with
high impedance ratio

系统	最大 阻抗 比	平均迭代次数(计算耗时/ms)				
		不使用BCMMs			使用BCMMs	
		WLS	FDSE	CADSE	WLS	CADSE
IEEE 4节点	0.40	5(48)	6(10)	5(8)	5(8)	5(8)
IEEE 33节点	6.05	5(131)	19(25)	14(14)	5(72)	14(16)
IEEE 43节点	1.96	6(124)	9(18)	7(15)	5(92)	7(17)
IEEE 69节点	6.71	6(211)	48(40)	15(32)	5(182)	15(35)
实际213节点	2.42	不可观	不可观	不可观	6(721)	15(138)

3.4 三相不平衡时的测试

实际配电网可能三相不对称,为此进一步在实际213节点系统中测试CADSE在三相不平衡时的性能。三相不平衡度设置为1%,分别运行WLS和CADSE,2种方法得到的结果对比如表5所示(表中

估计误差均为标么值)。

表5 三相不平衡时的结果对比

Table 5 Results comparison with three-phase unbalance

方法	电压幅值最大 估计误差	电压幅值平均 估计误差	平均迭代次数 (计算耗时/ms)
WLS	3.8×10^{-3}	4.2×10^{-4}	7(2467)
CADSE	3.8×10^{-3}	4.2×10^{-4}	15(342)

由表5可见,当三相不平衡时,CADSE与WLS的估计精度相同;但CADSE的计算效率远高于WLS,从而验证了CADSE的优越性。

4 结语

现有的FDSE难以适应配电网的高阻抗比特点,且无法处理电流幅值量测,因而无法应用于配电网。本文提出一种适用于配电网的CADSE方法。该方法首先迭代求解所有节点电压幅值的平方和所有支路两端的相角差,然后求解电压复相量。建模过程和算例分析均证明了所提方法对高阻抗比的配电网有很好的适应性。与常规WLS方法相比,所提方法在计算精度相同的情况下有更高的计算效率。

参考文献:

- [1] 李滨,杜孟远,祝云,等. 基于准实时数据的智能配电网状态估计[J]. 电工技术学报,2016,31(1):34-44.
LI Bin, DU Mengyuan, ZHU Yun, et al. A state estimator for smart distribution networks with quasi-real time data[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 34-44.
- [2] LIN W M, TENG J H. State estimation for distribution systems with zero-injection constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(1): 518-524.
- [3] 李建,王心丰,段刚,等. 基于等效功率变换的配电网状态估计算法[J]. 电力系统自动化,2003,27(10):39-44.
LI Jian, WANG Xinfeng, DUAN Gang, et al. A state estimation method for distribution systems based on equivalent power transformation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 39-44.
- [4] 吴为麟,侯勇,方鸽飞. 基于支路电流的配电网状态估计[J]. 电力系统及其自动化学报,2001,13(6):13-19.
WU Weilin, HOU Yong, FANG Gefei. Status estimation of distribution system based on branch currents[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2001, 13(6): 13-19.
- [5] 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 network integrated with different types of distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 68-74.
- [6] BARAN M E, KELLEY A W. State estimation for real-time monitoring of distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3): 1601-1609.
- [7] 王少芳,刘广一,郎燕生,等. 基于预测残差的配电网三相状态估计[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(22):51-56.
WANG Shaofang, LIU Guangyi, LANG Yansheng, et al. Study on three-phase state estimation for distribution networks

- based on residual prediction[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 51-56.
- [8] 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.
- [9] 黄蔓云, 孙国强, 卫志农, 等. 基于脉冲神经网络伪量测建模的配电网三相状态估计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 38-43, 82.
- HUANG Manyun, SUN Guoqiang, WEI Zhinong, et al. Three-phase state estimation in distribution systems based on pseudo measurement modeling using spiking neural network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 38-43, 82.
- [10] 马春阳. 基于新息图的配电网三相状态估计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- MA Chunyang. Distribution network three phase state estimation base on the innovation graph[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [11] 陈艳波, 马进, 陈茜. 混合整数线性规划形式的抗差状态估计方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(7): 26-31, 49.
- CHEN Yanbo, MA Jin, CHEN Qian. Robust state estimation in form of mixed integer linear programming[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7): 26-31, 49.
- [12] 钱婧, 孙国强, 徐伟, 等. 改进的基于复数域标么化的快速解耦状态估计算法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(6): 153-158.
- QIAN Qiang, SUN Guoqiang, XU Wei, et al. Improved fast decoupled state estimation algorithm based on complex normalization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6): 153-158.
- [13] 陈艳波, 姚远, 杨晓楠, 等. 面向电-热综合能源系统的双线性抗差状态估计方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 47-54.
- CHEN Yanbo, YAO Yuan, YANG Xiaonan, et al. Bilinear robust state estimation method for integrated electricity-heat energy systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 47-54.
- [14] HABIBALLAH I O, QUINTANA V H. Fast-decoupled rectangular co-ordinate state estimation with efficient data structure management[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1991, 138(5): 462.
- [15] ROY L, MOHAMMED T A. Fast super decoupled state estimator for power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(4): 1597-1603.
- [16] LIN W M, TENG J H. Distribution fast decoupled state estimation by measurement pairing[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(1): 43.
- [17] JU Y T, WU W C, GE F C, et. Distribution fast decoupled state estimation by measurement pairing[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 1(1): 1-10.
- [18] 和敬涵, 刘琳. 解耦变换模式下智能配电网快速状态估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1088-1096.
- HE Jinghan, LIU Lin. A fast state estimation algorithm for intelligent distribution network based on decoupling transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1088-1096.
- [19] 陈艳波, 张智, 沈玉兰. 一种广义快速分解状态估计方法: CN107994567A[P]. 2018-05-04.
- [20] 马健, 唐巍, 徐升, 等. 基于多准则分区和WLS-PDIPM算法的有源配电网状态估计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 28-36.
- MA Jian, TANG Wei, XU Sheng, et al. State estimation of active distribution network based on multi-criteria partition and WLS-PDIPM algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 28-36.

作者简介:



王 鹏

王 鹏(1982—),男,北京人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统优化与分析(E-mail: 252329231@qq.com);

陈 蕾(1985—),女,浙江杭州人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统优化与分析;

陈艳波(1982—),男,北京人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统优化与分析(E-mail: yanbochen2008@sina.com);

沈玉兰(1993—),女,江苏扬州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化与分析;

肖湘宁(1953—),男,北京人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电能质量。

(编辑 王锦秀)

Cross approximation state estimation method for distribution network

WANG Peng¹, CHEN Lei², CHEN Yanbo³, SHEN Yulan³, XIAO Xiangning³

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China;

3. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The traditional fast decoupled state estimation method of transmission network cannot adapt to distribution network with high impedance ratio, and cannot deal with a lot of current magnitude measurements in distribution network, thereby it usually fails to meet the requirements of observability, for which, a CADSE (Cross Approximation Distribution State Estimation) method is proposed. The square of voltage amplitude of all nodes and the phase difference between two terminals of all branches are solved by cross iteration, and the voltage complex phasor is obtained after convergence. Cases analysis shows that the proposed method has good adaptability to the distribution network with high impedance ratio, and has high computational efficiency while satisfying the requirements of computational accuracy.

Key words: high impedance ratio; current magnitude measurement; distribution network; state estimation