

基于输电网广播机制的改进输配互联电网异步状态估计方法

唐滢淇¹, 董树锋¹, 唐坤杰¹, 朱英伟², 马翔²

(1. 浙江大学电气工程学院, 杭州 310027; 2. 国网浙江省电力有限公司金华供电公司, 金华 321017)

摘要: 随着电力系统规模的扩大及输电网和配电网之间耦合的不断增强, 大规模电力系统的分布式状态估计逐渐成为了研究热点。针对输配互联电网计算中数据交换存在的通信延时问题, 提出了一种基于输电网广播机制的输配互联电网异步状态估计(TNBM-based-async-SE)方法。首先, 对输配互联系统的状态估计问题进行了重新建模, 对传统的同步算法(sync-SE)进行了介绍。接着, 对异步机制建立了数学模型, 并根据数学模型对传统的异步算法(async-SE)进行改进, 引入输电网广播机制并提出了 TNBM-based-async-SE 算法。提出的算法具有较高的收敛速度和计算效率, 并且对参数设置的敏感性低于传统的异步算法, 能够适应参数的变化。实验结果表明, 在存在通信延迟的情况下, 提出的 TNBM-based-async-SE 算法相比于同步算法和传统的异步算法能够减少运行时间, 鲁棒性更强, 具有工程实用意义。

关键词: 输配互联电网; 广播机制; 异步状态估计; 通信延时; 分布式计算

Transmission Network Broadcasting Mechanism-based Improved Asynchronous State Estimation Method for Transmission and Distribution Interconnected Power Grid

TANG Yingqi¹, DONG Shufeng¹, TANG Kunjie¹, ZHU Yingwei², MA Xiang²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Jinhua Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Jinhua 321017, China)

Abstract: With the expansion of power system and the continuous enhancement of coupling between the transmission network and the distribution network, the distributed state estimation of large-scale systems has become a research hotspot. Aiming at the communication delay problem of data exchange in the calculation of the transmission and distribution interconnected power system, we propose an transmission network broadcasting mechanism-based asynchronous state estimation (TNBM-based-async-SE) method for transmission and distribution interconnected power grid. First, we remodel the state estimation problem of the transmission and distribution interconnected power system, and introduce the traditional synchronous algorithm (sync-SE). Next, we establish a mathematical model for the asynchronous mechanism, and improve the traditional asynchronous algorithm (async-SE) based on the mathematical model. By introducing the transmission grid broadcast mechanism, we propose the TNBM-based-async-SE algorithm. The algorithm proposed has higher convergence speed and computational efficiency with less sensitive to parameter settings than traditional asynchronous algorithm, and can adapt to parameter changes. Experiments show that when communication delays exist, the proposed TNBM-based-async-SE algorithm can reduce the time cost compared to the synchronous algorithm and the traditional asynchronous algorithm, and is more robust and has engineering practical significance.

Key words: transmission and distribution interconnected power grid; broadcast mechanism; asynchronous state estimation; communication delay; distributed calculation

0 引言

随着电网的不断扩展和可再生能源的日益普及, 输电网(transmission network, TN)和配电网(distribution network, DN)之间的耦合越来越强^[1-2]。但在实际的电力系统中, 这两个网络通常由各自的调度中心进行调度, 位于输电网调度中心中的能量管理系统和配电网调度中心中的配电管理系统存储的 TN 和 DN 模型和数据无法完全共享^[3], 造成了全局状态辨识、运行、调度和控制方面的困难^[4]。目前, 关于输配互联电网(interconnected transmission and distribution network, I-T&D network)的计算和分析已经有一些研究, 涵盖了潮流计算^[5-7], 最优潮流^[8-9], 状态估计(state estimation, SE)^[10-11]、经济调度^[12-13]和态势感知^[14]等多个方面。

在上述电力系统计算分析方法中, 状态估计是工程实际中能量管理系统和配电管理系统的基本工具。它通过对给定的一组量测值进行优化计算, 得到系统中所有节点的电压幅值和角度, 进而得到整个系统的潮流分布^[15-16]。状态估计可以为电力市场、经济调度、安全分析等提供有用的信息^[17], 许多研究在改进状态估计算法方面取得了丰硕的成果, 如文献[18-19]等基于最大测点正常率, 提出了一种抗差估计方法; 文献[20]提出了一种计及零注入约束的双线性抗差状态估计方法。在文中所讨论的输配互联电网中的分布式状态估计方面, 目前也取得了一些研究成果。文献[21-22]介绍了一种在输配互联电网上进行同步状态估计的算法, 但这些研究中对于线路功率和电流量测在输配互联电网状态估计中的处理方法并不明确, 算法离工程实际应用还有一定距离。

另外, 通信延时是分布式状态估计中的一个重要课题。文献[10, 22]没有考虑通信状况对分布式状态估计的影响, 文献[23]对分布式多区域状态估计进行了研究, 但认为每次迭代的通信延时都在可以忽略不计的纳秒级。文献[24]假设当遇到由通信中断引起的量测量丢失时, 量测之间的相关系数可用于补充拟合缺失的量测量。文献[25]为分布式状态估计引入了一个协调系统, 它预先为子系统的数据传输设置了一个超时时间, 如果在超时时间后还没有收到传来的数据, 则对子系统之前传输的数据进行降权, 再用这些数据进行状态估计。超时策略和降权策略可能导致某些子系统的最新数据无法被及

时使用, 造成较大的计算误差。这些研究主要是将大型系统划分为多个小区域进行分布式状态估计, 对输配互联电网中的数据壁垒和模型共享问题等缺少考虑。

当引入分布式机制时, 上面提到的一些传统的针对输配互联电网的算法可能存在收敛性问题。在文献[23]中, 当迭代次数增加到 30 000 次时, 所有区域的平均相对误差才能<10%。在文献[26]中, 只有当迭代次数达到几百的数量级时, 分布式算法和集中式算法估计得到的节点相角差才足够小。文献[27]中的实验表明, 当迭代次数达到 30~50 次之后, 分布式算法能够具有与集中式算法相同的精度。文献[28]提供了一种异步分布式状态估计的思想, 并提出了一种异步收敛检测方法。这些研究在处理分布式机制和收敛性问题时没有考虑通信延迟, 也给这些方法在工程实际中的应用造成了一些阻碍。

因此, 文中针对输配互联电网, 提出了一种基于输电网广播机制的异步状态估计(transmission network broadcasting mechanism based asynchronous state estimation, TNBM-based-async-SE)方法。文中先对输配互联电网的状态估计问题进行建模, 介绍了传统的同步状态估计(synchronous state estimation, sync-SE)算法。接着, 文中用数学模型描述了异步机制和异步算法(asynchronous state estimation, async-SE), 并基于异步机制引入了输电网广播机制, 提高了算法的收敛性。最后, 文中通过几个算例验证了算法的实用性和有效性。实验结果表明, 文中提出的 TNBM-based-async-SE 算法具有良好的收敛性能, 引入的输电网广播机制和异步机制相互作用, 能够提高算法的计算速度, 减少算法收敛需要的时间, 适应工程实际中存在通信延时的状况。

1 输配互联电网状态估计建模和同步算法

1.1 输配协同状态估计问题的建模

对于一个电力系统, 可以通过求解以下优化问题^[29-30]来获得状态估计的加权最小二乘解

$$\min_x J(\mathbf{x}) = (\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}))^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})) \quad (1)$$

式中: $J(\mathbf{x})$ 为优化问题的目标函数; $\mathbf{z}$ 为量测量向量; $\mathbf{x}$ 为状态变量向量; $\mathbf{h}(\cdot)$ 为量测量与状态变量之间的关系函数向量; $\mathbf{R}$ 为对角协方差矩阵, 其逆为加权最小二乘法的权重矩阵。

如图 1 所示, 输配互联电网中包含一个 TN 和 n 个 DN, TN 和 DN 之间存在数据壁垒, 模型由各

自的控制中心所有。第 i 个 DN 的根节点为 r_i , 与第 i 个 DN 连接的 TN 中的节点记为 b_i 。考虑到 DN 可能具有辐射状、环状和网状^[31]等不同的拓扑结构, 其中的电源点数量可能也不止 1 个, 如图 1 中的 DN2, 因此将 DN 中所有的变电站节点与 TN 采用传输线方式一一进行连接, 连接节点 b_i 和 r_i 的传输线记为 l_{b_i, r_i} 。 r_i 、 b_i 、 l_{b_i, r_i} 等均可作为单变量或向量, 当 DN 中只有 1 个电源点时, 它们是单变量; 当 DN 中有多个电源点时, 它们是向量。下文模型建构中不区分单变量和向量。

基于文献[10]中的解耦模型, 再引入一些等效量测, 可以将整个互联网络解耦为扩展输电网 (extended transmission network, extended-TN) 和 n 个 DN。传输线 l_{b_i, r_i} 上从 TN 流向节点 r_i 的线路功率量测记为 $S_{g_i}^{\text{eq}}$, 从节点 r_i 流向 DN 的线路功率量测记为 $S_{d_i}^{\text{eq}}$, 节点 r_i 的电压幅值量测记为 V_{r_i} 。因此, 优化问题(1)可以分解为式(2)、(3)。

$$\min_{x_{\text{ET}}} J_{\text{ET}}(x_{\text{ET}}) = (z_{\text{ET}} - h_{\text{ET}}(x_{\text{ET}}))^T R_{\text{ET}}^{-1} (z_{\text{ET}} - h_{\text{ET}}(x_{\text{ET}})) \quad (2)$$

$$\min_{x_{\text{D}}} J_{\text{D}}(x_{\text{D}}) = (z_{\text{D}} - h_{\text{D}}(x_{\text{D}}))^T R_{\text{D}}^{-1} (z_{\text{D}} - h_{\text{D}}(x_{\text{D}})) \quad (3)$$

式中: 下标 ET、T 和 D 分别表示 extended-TN、原始 TN 和 DN 中的变量; $z_{\text{ET}} = [z_{\text{T}} \ S_{\text{d}}^{\text{eq}} \ V_{\text{T}}]^T$; z_{D} 中包含 r_i 的量测 $S_{g_i}^{\text{eq}}$ 和 V_{r_i} ; x_{ET} 除了原始 TN 中的状态变量, 还包含节点 r_i 的状态变量。

式(2)和式(3)的最优性条件是:

$$H_{\text{ET}}^T(x_{\text{ET}}) R_{\text{ET}}^{-1} (z_{\text{ET}} - h_{\text{ET}}(x_{\text{ET}})) = 0 \quad (4)$$

$$H_{\text{D}}^T(x_{\text{D}}) R_{\text{D}}^{-1} (z_{\text{D}} - h_{\text{D}}(x_{\text{D}})) = 0 \quad (5)$$

式中: H_{ET} 和 H_{D} 是 $h(\cdot)$ 对应的雅可比矩阵。

式(4)描述了扩展输电网状态估计 (extended transmission network state estimation, extended-TNSE) 子问题, 式(5)描述了配电网状态估计 (distribution network state estimation, DNSE) 子问题。在输配互联网状态估计问题的解耦形式中, 线路量测 $S_{g_i}^{\text{eq}}$ 和 $S_{d_i}^{\text{eq}}$ 作为节点 r_i 的等效功率注入量测, 并建立两个映射来描述 TN 和 DN 之间的迭代过程, 如式(6)和(7)所示。

$$[S_{g_1}^{\text{eq}}, \dots, S_{g_i}^{\text{eq}}, \dots, S_{g_n}^{\text{eq}}, V_{r_1}, \dots, V_{r_n}] = \Theta_{\text{T}} [S_{d_1}^{\text{eq}}, \dots, S_{d_i}^{\text{eq}}, \dots, S_{d_n}^{\text{eq}}] \quad (6)$$

$$[S_{d_i}^{\text{eq}}] = \Theta_{\text{D}_i} [S_{g_i}^{\text{eq}}, V_{r_i}] \quad (7)$$

式中: 式(6)描述了 extended-TNSE 子问题的迭代过程, Θ_{T} 表示迭代映射; 式(7)描述了 DNSE 子问题的迭代过程, Θ_{D_i} 表示迭代映射; 不带下标 i 的变量

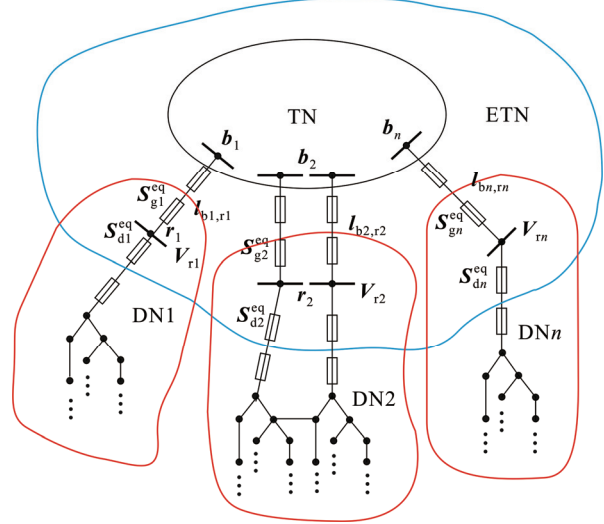


图1 配置有等值量测的输配互联网

Fig.1 I-T&D network with equivalent measurements

S_{g}^{eq} 、 S_{d}^{eq} 和 V_{r} 分别表示所有 $S_{g_i}^{\text{eq}}$ 、 $S_{d_i}^{\text{eq}}$ 和 V_{r_i} 的集合。在每次来回迭代之后, S_{g}^{eq} 、 S_{d}^{eq} 和 V_{r} 的值都会更新。

将上述映射进行组合, 表示从第 k 次迭代到第 $k+1$ 次迭代的过程, 得到

$$[S_{\text{g}, k+1}^{\text{eq}}; V_{\text{r}, k+1}] = \Theta_{\text{B}} [S_{\text{g}, k}^{\text{eq}}; V_{\text{r}, k}] \quad (8)$$

式中: $\Theta_{\text{B}} = \Theta_{\text{T}}(\Theta_{\text{D}_1}(\cdot), \Theta_{\text{D}_2}(\cdot), \dots, \Theta_{\text{D}_n}(\cdot))$; $S_{\text{g}, k}^{\text{eq}}$ 和 $V_{\text{r}, k}$ 是第 k 次迭代的 S_{g}^{eq} 和 V_{r} 的值。

与文献[10]相比, 文中重新建立的输配互联网状态估计模型更符合工程实际。在提出的模型中, 连接到第 i 个 DN 的根节点 r_i 的传输线功率量测转换为节点注入量测, 这一点在之前的研究中没有进行明确。此外, extended-TNSE 和 DNSE 子问题可以用不同的目标函数进行求解, 进而实现两部分状态估计的解耦, 也更加符合工程实际。

1.2 输配协同状态估计问题的同步解法

传统的 sync-SE 算法^[21-22]在求解输配互联网状态估计问题时, TN 和 DN 之间的数据通信流如图 2 所示。在传统的 sync-SE 中, TN 需要等待所有 DN 传输的数据到达后才能开始状态估计计算, TN 计算的开始时间取决于最后一个数据到达的时间。如果任意 DN 计算效率低下, 或通信条件较差导致数据传输较慢, 则求解过程可能用时较多。

2 基于输电网广播机制的改进输配互联网异步状态估计方法

2.1 输配互联网状态估计的异步迭代数学模型

如前文所述, 输配互联网状态估计问题的迭

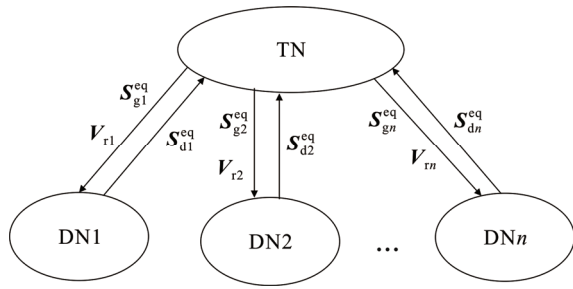


图2 sync-SE算法中TN和DN之间的数据流

Fig.2 Data flow among TN and DNs of sync-SE algorithm

代解法可抽象为式(8)所描述的不动点问题^[32],对于不动点问题,采用异步迭代方法也可以进行求解,并且能够在一定程度上提高求解效率^[33]。异步迭代过程从给定的初值 $[S_{g,0}^{eq} \ V_{r,0}]$ 开始,按照映射 Θ_B 的方法进行迭代,得到一组向量对序列 $[S_{g,k}^{eq} \ V_{r,k}]$, $k=0,1,\dots$,数学表示如下

$$[S_{g,k+1}^{eq}; V_{r,k+1}] = \begin{cases} [S_{gi,k}^{eq}; V_{ri,k}] & , i \notin \Phi_k \\ \Theta_B [S_{gi,k}^{eq}; V_{ri,k}] & , i \in \Phi_k \end{cases} \quad (9)$$

式中, Φ_k 是数据可以在预先设置的超时时间前到达TN的DN集合。

式(9)给出了异步解法的基本迭代形式,该算法是基于同步的sync-SE算法^[21-22]改进的。将式(9)解耦后得到extended-TNSE和DNSE子问题中异步状态估计算法的形式:

$$[S_{g,k+1}^{eq}; V_{r,k+1}] = \Theta_T [S_{d1,s_1(k)}^{eq}, \dots, S_{di,s_i(k)}^{eq}, \dots, S_{dn,s_n(k)}^{eq}] \quad (10)$$

$$[S_{di,s_i(k)}^{eq}] = \Theta_{Di} [S_{gi,s_i(k)}^{eq}; V_{ri,s_i(k)}] \quad (11)$$

式中: $s_i(k)$ 是 k 的函数;式(10)、(11)分别描述了extended-TNSE和DNSE子问题的异步迭代形式。

在传统的异步状态估计算法中,一般引入参数 S 和 τ 以提高收敛速度,参数应满足以下约束

$$\begin{cases} k+1-s_i(k) \leq \tau \\ \sum_{i=1}^n \text{sgn}(s_i(k)-k) \leq -n+S \\ s_i(k) \leq k \end{cases} \quad (12)$$

参数 S 表示TN直到接收到来自 S 个DN的更新数据后,才会开始extended-TNSE问题的求解,称为最少数据参数。为了确保收敛,TN应该在 τ 次迭代中至少使用一次DN的更新数据,称为最长延时参数。每个DN都有一个名为 $\tau_i^* = k+1-s_i(k)$ 的变量,记录目前TN的迭代次数与上一次它的数据被TN使用时的差值。当 $S=n$ 或 $\tau=1$ 时,异步状态估计算法就退化为同步状态估计。

2.2 输电网广播机制

在传统的异步状态估计中,当 $i \in \Phi_k$ 时, $s_i(k) \leq k$,即TN在求解extended-TNSE问题时,可能会使用一些过时数据,而这些数据可能是很久以前DN计算得到的,会对算法的收敛性能造成不利影响。文中引入输电网广播机制,确保TN每次计算的状态估计结果都向所有DN进行并行广播发送,每一个DN接收到TN传输来的计算结果后,无论上一次计算或数据传输任务是否结束,都利用TN提供的估计结果开始新的计算。这样就能保证每一次TN在求解extended-TNSE问题时,用于求解的接收到的DN计算结果都是最新的,提高算法的收敛性能。具体来说,将式(12)的第2个约束条件修改为式(13)所示的形式,以实现输电网广播机制(transmission network broadcasting mechanism, TNBM)。

$$\sum_{i=1}^n \text{sgn}(s_i(k)-k) = -n+S \quad (13)$$

2.3 基于输电网广播机制的改进异步求解方法

文中提出的TNBM-based-async-SE算法流程图如图3所示,其中左侧线框为需要在TN上运行的算法,右侧线框为需要在DN上运行的算法。在算法开始时,先由每个DN运行状态估计算法求解DNSE问题,在求解完成后分别向TN发送计算结果。当TN接收到 S 个DN的数据,且所有DN均未达到设置的最长延时参数 τ 时,开始求解extended-TNSE问题,并在完成求解后向所有DN并行发送计算结果;否则继续等待DN的数据回传直到条件满足。各个DN接收到TN回传的数据后开始新一轮的DNSE问题求解。如此循环往复迭代,直到相邻两次迭代过程中边界节点的电压变化值小于预先设置的收敛条件,算法结束并输出结果。

引入的参数 S 和 τ 需要满足的约束条件为

$$\begin{cases} k+1-s_i(k) \leq \tau \\ \sum_{i=1}^n \text{sgn}(s_i(k)-k) = -n+S \\ s_i(k) \leq k \end{cases} \quad (14)$$

算法需要在TN和DN上同时部署,各系统上算法的收敛条件,均为边界节点的电压幅值在相邻两次迭代中的差值小于收敛误差限要求。

3 算例分析

本章通过两个算例验证了基于输电网广播机制的改进输配互联电网异步状态估计方法的精确度

和有效性。实验使用的编程语言是 MathScript, 采用的计算机 CPU 型号为 Intel Core i7-8700, 主频 3.20 GHz, 可用内存为 15.8 GB, MATLAB 为 R2019b 版本, 使用程序在本地模拟通信过程。

量测配置方案如下: TN 中配置全量测, 包含节点有功功率、无功功率、电压幅值量测以及线路的有功和无功功率量测; DN 中配置的量测包括节点的有功功率、无功功率和电压幅值量测。在潮流计算得到的真实值上叠加高斯噪声生成量测值, 以模拟测量仪器的误差。对于功率注入量测, 量测标准差 $\sigma=0.01$; 对于电压幅值量测, $\sigma=0.01$; 对于线路功率量测, $\sigma=0.02$; 对于边界节点相关量的量测, $\sigma=0.005$ 。每个状态估计子问题的收敛误差限设置为 10^{-6} , 边界状态变量的误差设置为 10^{-4} , 矩阵 R^{-1} 的元素按照加权最小二乘状态估计的权重设置准则设置。

采用节点的电压幅值和相角作为状态变量, 使用状态变量相对于潮流计算得到的真实值的均方根误差(root mean square error, RMSE)指标评估算法的精度, 使用算法运行时间指标评估算法的效率。

测试算例构成方法如下: 通过将 MATPOWER 7.1 中 30 节点 TN 标准算例与多个 DN 算例采用传输线方式进行连接构建测试算例, 如图 1 所示, 记为 TN30DN*i*, 容量基准值设为 100 MVA, 电压基准值设为 135 kV, TN、DN 之间的传输线阻抗设置为 $0.002+j0.01$ (标么值)。通信延时按正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 进行模拟, 其平均值 μ 和标准差 σ 如附录 A 中表 A1 和表 A2 所示。

3.1 算法在 TN30DN4 上的测试结果

本节测试了不同算法在 TN30DN4 算例上的准确性和计算效率, 算例由附录 A 中表 A1 编号为 1—4 的 DN 按照一定方法与 30 节点 TN 标准算例进行连接形成, 总节点数为 446。图 4 显示了 sync-SE、async-SE 和文中提出的 TNBM-based-async-SE 算法在 TN30DN4 算例上计算得到的状态变量与其真实值的 RMSE, 当 (S, τ) 设置为 (4, 1) 时即为 sync-SE 算法, 也是 async-SE 的一种特殊情况。由实验结果可知, 3 种算法的精度都在 6×10^{-4} 左右, 没有显著差异。这表明提出的 TNBM-based-async-SE 算法能够满足工程实际需求, 具有较高的准确性和计算精度。

图 5 展示了在不同参数设置下的 sync-SE、async-SE 和 TNBM-based-async-SE 的运行时间。其

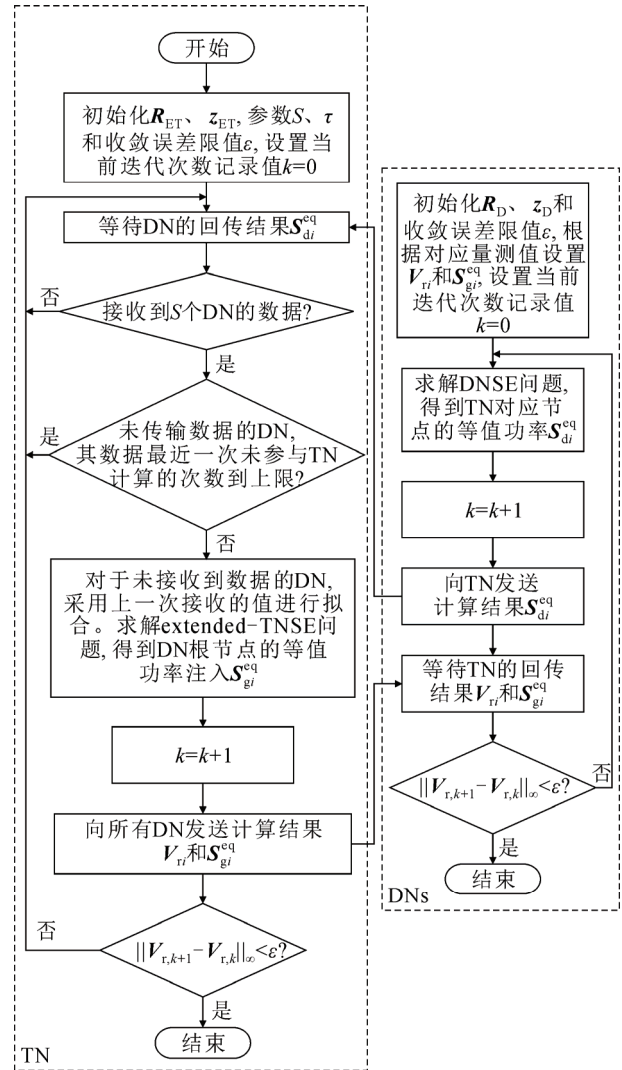


图 3 TNBM-based-async-SE 算法流程框图

Fig.3 Block diagram of TNBM-based-async-SE algorithm

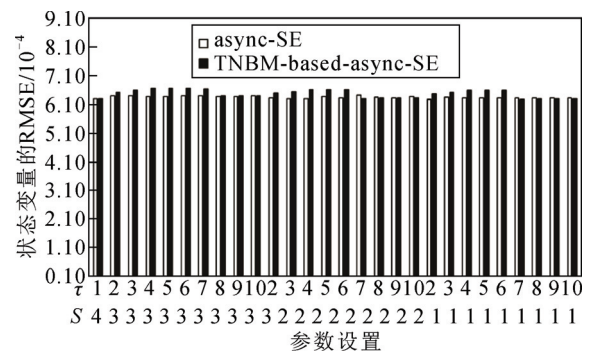


图 4 在 TN30DN4 算例上 sync-SE, async-SE 和 TNBM-based-async-SE 的 RMSE

Fig.4 RMSE of sync-SE, async-SE and TNBM-based-async-SE on case TN30DN4

中, 传统 async-SE 算法的运行时间为 1.6~2.0 s, 在不同参数设置值下, 其运行时间差异较大。当在工

程实际中使用 `async-SE` 算法, 但参数设置不正确时, 其计算效率甚至可能不如 `sync-SE` 算法。对于 `sync-SE` 算法来说, 其运行时间约为 1.6 s, 比文中所提的 `TNBM-based-async-SE` 算法的运行时间更长。相比之下, `TNBM-based-async-SE` 算法的运行时间对参数设置的敏感度较低, 表现出更稳定的性能。

3 种算法在不同参数设置下的平均迭代次数和运行时间分析如表 1 所示。由于引入了异步机制其收敛性能变差, `async-SE` 算法的迭代次数大于 `sync-SE` 和 `TNBM-based-async-SE` 算法的迭代次数, 限制了计算效率的提升。从实验结果也可以看出, `async-SE` 算法在不同参数设置下的最少用时小于 `sync-SE` 算法, 这说明异步机制的引入确实有利于算法计算效率的提升, 但提升效果有限。`async-SE` 算法在不同参数设置下的平均用时大于 `sync-SE` 算法, 表明虽然此算法引入了异步机制, 一定程度上减少了等待时间, 但因引入异步机制, 算法收敛性能变差, 导致其平均用时仍然较多。同时, 传统的 `async-SE` 算法对于不同参数的敏感度较高, 使用时需要对参数进行精确调整和设定。

文中提出的 `TNBM-based-async-SE` 算法的平均迭代次数与同步算法相当, 计算平均用时也小于 `sync-SE` 和 `async-SE` 算法, 这表明文中提出的 `TNBM-based-async-SE` 算法具有显著的加速效果, 能够克服引入异步机制后收敛性能变差的问题。输电网广播机制和异步机制的同时作用, 使得其运行时间明显少于 `sync-SE` 和 `async-SE` 算法, 具有较高的计算效率。文中提出的算法的用时标准差也小于 `async-SE` 算法, 表明其对参数设置敏感度较低, 具有较高的鲁棒性。

3.2 算法在 TN30DN20 上的测试结果

针对更大规模的算例进行测试, 本节采用 `TN30DN20` 算例进行测试, 算例由附录 A 中表 A1 编号为 1—20 的 DN 按照一定方法与 30 节点 TN 标准算例进行连接形成, 总节点数为 1 633。对 `sync-SE`、`async-SE` 和 `TNBM-based-async-SE` 这 3 种算法的运行时间进行测试, 结果如图 6 所示。

设置不同的 (S, τ) 参数, 发现传统 `async-SE` 算法的运行时间差异较大, 在参数设置不当的情况下, 其运行时间甚至可能 >5 s, 而 `sync-SE` 算法的运行时间仅在 3 s 左右。在工程实际中, 当使用 `async-SE` 算法, 但 (S, τ) 参数设置不当时, 这种算法的效率甚至可能不如 `sync-SE` 算法。相比之下, 文中提出的

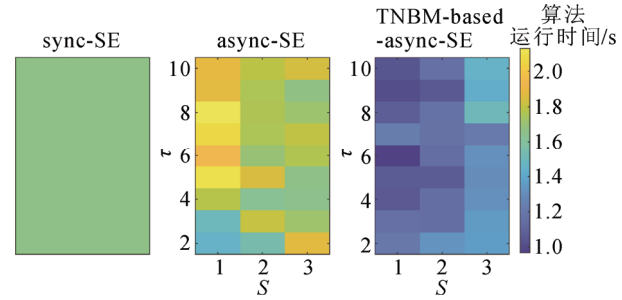


图 5 在 TN30DN4 算例上 `sync-SE`、`async-SE` 和 `TNBM-based-async-SE` 的运行时间比较

Fig.5 Time cost of `sync-SE`, `async-SE` and `TNBM-based-async-SE` on case TN30DN4

表 1 在 TN30DN4 算例上 3 种算法的性能比较

Table 1 Performance comparison of the three algorithms on case TN30DN4				
算法	平均迭代次数	平均用时/s	最少用时/s	用时标准差/s
<code>sync-SE</code>	8.00	1.667	1.667	—
<code>async-SE</code>	19.96	1.779	1.452	0.163
<code>TNBM-based-async-SE</code>	8.41	1.200	0.968	0.144

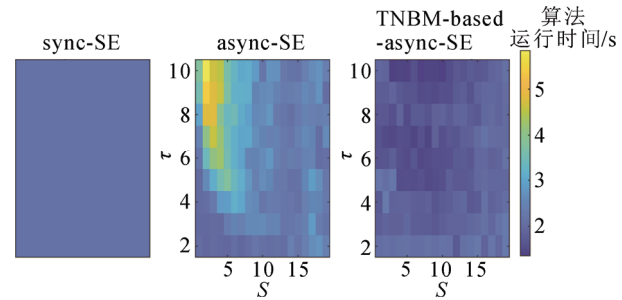


图 6 在 TN30DN20 算例上 `sync-SE`、`async-SE` 和 `TNBM-based-async-SE` 的运行时间比较

Fig.6 Time cost of `sync-SE`, `async-SE` and `TNBM-based-async-SE` on case TN30DN20

`TNBM-based-async-SE` 算法的所需运行时间对参数设置的敏感度较低, 在不同的 (S, τ) 参数设置下运行时间波动较小, 同时整体上来说, 其运行时间较 `sync-SE` 算法更小, 具有更高的计算效率。

对 `TNBM-based-async-SE` 算法在不同参数对 (S, τ) 设置情况下的平均迭代次数和运行时间, 与传统算法进行对比分析, 结果如表 2 所示。实验结果表明, `async-SE` 算法引入了异步机制, 因此存在一定的收敛困难, 平均迭代次数相比于同步算法来说增加较多。尽管采用了异步机制, 但迭代次数的增加限制了算法运行速度的提升。`async-SE` 算法的最少用时小于同步算法, 但平均运行时间大于同步算法,

这也印证了对于迭代次数的分析。当使用 `async-SE` 算法, 但参数设置不当时, 其计算效率可能不及同步算法。

对于文中提出的 `TNBM-based-async-SE` 算法, 其平均迭代次数与同步算法相同, 说明引入的广播机制有效改善了收敛性问题, 能够提高算法的鲁棒性和稳定性。在广播机制和异步机制同时作用的情况下, 文中提出的 `TNBM-based-async-SE` 算法的平均运行时间小于传统的同步和异步算法, 其最少用时也明显小于传统算法, 算法的效率提升明显。同时, 其用时标准差也小于传统的 `async-SE` 算法, 说明其在不同参数下具有较好的适应性。当工程实际中参数设置较为困难, 或无法确定最佳参数时, 文中提出的 `TNBM-based-async-SE` 算法能够适应参数变化, 具有鲁棒稳定性。

3.3 算法在 TN30DN10 上的测试结果

工程实际中, 考虑到网架结构复杂度和成本限制, 大部分配电网为单电源点的辐射状拓扑结构^[34]。但文献^[31]也指出, 配电网的拓扑结构不仅仅是辐射状的, 也可以具有环状、网状等拓扑结构, 因而其源点可能不只有一个。针对工程实际中可能遇到的多电源点配电网拓扑结构, 本节采用 `TN30DN10` 算例进行测试, 算例由附录 A 中表 A2 编号为 1—10 的 DN 按照一定方法与 30 节点 TN 标准算例进行连接形成, 总节点数为 579, 其中非辐射状 DN 算例 `case16ci` 有 3 个电源点, 其详细拓扑可参见文献^[35]。

对 3 种算法的运行时间进行测试, 结果如图 7 所示。在不同的(S, τ)参数下, 传统 `async-SE` 算法的运行时间差异较大, 而 `TNBM-based-async-SE` 算法相比于 `sync-SE` 算法和 `async-SE` 算法, 在不同参数设置情况下计算时间变化不大, 受到参数变化的影响较小。

对 `TNBM-based-async-SE` 算法在不同参数对(S, τ)设置情况下的平均迭代次数和运行时间, 与传统算法进行对比分析, 结果如表 3 所示。在具有多电源非辐射状 DN 算例 `TN30DN10` 上的实验结果与 3.1、3.2 节全为辐射状 DN 网络的趋势相同, `async-SE` 算法的平均迭代次数同样较多。而文中提出的 `TNBM-based-async-SE` 算法平均迭代次数与同步算法接近, 在广播机制和异步机制同时作用的情况下, 文中提出的 `TNBM-based-async-SE` 算法的平

表 2 在 TN30DN20 算例上 3 种算法的性能比较
Table 2 Performance comparison of the three algorithms on

case TN30DN20				
算法	平均迭代次数	平均用时/s	最少用时/s	用时标准差/s
sync-SE	9.00	2.131	2.131	—
async-SE	24.29	2.710	1.916	0.721
TNBM-based-async-SE	10.35	1.784	1.357	0.224

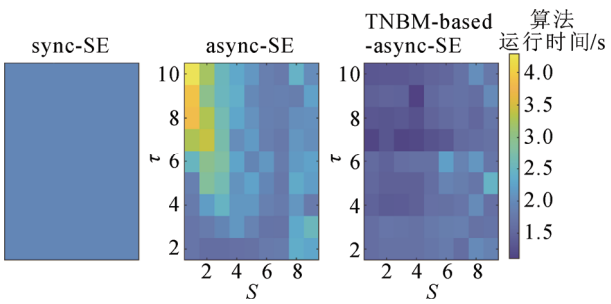


图 7 在 TN30DN10 算例上 `sync-SE`, `async-SE` 和 `TNBM-based-async-SE` 的运行时间比较
Fig.7 Time cost of `sync-SE`, `async-SE` and `TNBM-based-async-SE` on case TN30DN10

表 3 在 TN30DN10 算例上 3 种算法的性能比较
Table 3 Performance comparison of the three algorithms on

case TN30DN10				
算法	平均迭代次数	平均用时/s	最少用时/s	用时标准差/s
sync-SE	8.00	1.955	1.955	—
async-SE	20.44	2.228	1.596	0.547
TNBM-based-async-SE	9.32	1.594	1.107	0.246

均运行时间小于传统的同步和异步算法, 其最少用时也明显小于传统算法, 算法的效率提升明显。

4 结论

文中提出了一种用于输配互联网的 `TNBM-based-async-SE` 算法, 基于输电网广播机制和异步计算思想进行分布式状态估计, 能够提升计算效率, 解决引入异步计算后的收敛性问题。算例分析结果表明:

- 1) 传统 `sync-SE`、`async-SE` 和文中提出的 `TNBM-based-async-SE` 算法的计算精度相当, 验证了文中提出的算法的正确性。
- 2) 提出的 `TNBM-based-async-SE` 算法能够适应存在通信时延的情况, 引入的输电网广播机制能够较好地解决异步算法的收敛性问题, 与同步算法

相比,文中提出的算法能节省 30%~50%的运行时间。

在后续工程实际应用时,需要考虑如何进一步减小算法对参数的敏感性,并采用高性能分布式计算技术进行加速。

附录见本刊网络版(<http://hve.epri.sgcc.com.cn/CN/volumn/current.shtml>)。

参考文献 References

- [1] 余佳音,唐坤杰,章杜锡,等.输配网一体化建模与分析方法研究综述[J].浙江电力,2019,38(11):1-9.
YU Jiayin, TANG Kunjie, ZHANG Duxi, et al. Overview of modeling and analysis methods for integrated transmission and distribution network[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(11): 1-9.
- [2] 嵇文路,徐春雷,余璟,等.调配一体化电网调度控制系统建设模式及方案研究[J].电力工程技术,2018,37(3):61-66.
JI Wenlu, XU Chunlei, YU Jing, et al. Construction mode and scheme of integrated power grid dispatching and controlling system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(3): 61-66.
- [3] 廖胜利,刘晓娟,刘本希,等.省地县一体化电力调度管理系统分级用户权限方案[J].电力系统自动化,2013,37(18):88-92,135.
LIAO Shengli, LIU Xiaojuan, LIU Benxi, et al. Hierarchical user permission scheme in province-prefecture-county integrated power grid dispatching management system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 88-92, 135.
- [4] 刘涛,米为民,陈郑平,等.适用于大运行体系的电网模型一体化共享方案[J].电力系统自动化,2015,39(1):36-41.
LIU Tao, MI Weimin, CHEN Zhengping, et al. Integrated sharing scheme for grid model and graphics applicable to grand operation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 36-41.
- [5] TANG K J, DONG S F, LIU Y Q, et al. Asynchronous distributed global power flow method for transmission-distribution coordinated analysis considering communication conditions[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 182: 106256.
- [6] 孙宏斌,张伯明,相年德.发输配全局潮流计算——第一部分:数学模型和基本算法[J].电网技术,1998,22(12):39-42,46.
SUN Hongbin, ZHANG Boming, XIANG Niande. Global power flow calculation-part 1: model and method[J]. Power System Technology, 1998, 22(12): 39-42, 46.
- [7] 张英敏,蒋容,刘凯,等.含柔性直流电网的交直流系统潮流转移搜索与量化分析[J].高电压技术,2019,45(8):2553-2561.
ZHANG Yingmin, JIANG Rong, LIU Kai, et al. Path search and analysis on power flow transferring of power system with VSC-HVDC grid[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2553-2561.
- [8] LIN C H, WU W C, SHAHIDEHPOUR M. Decentralized AC optimal power flow for integrated transmission and distribution grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2531-2540.
- [9] TANG K J, DONG S F, MA X, et al. Heterogeneous-decomposition-based coordinated optimisation for integrated transmission and distribution networks considering communication conditions[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(13): 2558-2565.
- [10] SUN H B, ZHANG B M. Global state estimation for whole transmission and distribution networks[J]. Electric Power Systems Research, 2005, 74(2): 187-195.
- [11] NOGUEIRA E M, PORTELINHA R K, LOURENÇO E M, et al. Novel approach to power system state estimation for transmission and distribution systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(10): 1970-1978.
- [12] YUAN Z, HESAMZADEH M R. Hierarchical coordination of TSO-DSO economic dispatch considering large-scale integration of distributed energy resources[J]. Applied Energy, 2017, 195: 600-615.
- [13] 赵晋泉,杨婷,姚建国,等.电力现货市场下输配协同传输阻塞管理[J].电力系统自动化,2020,44(7):107-114.
ZHAO Jinquan, YANG Ting, YAO Jianguo, et al. Transmission congestion management based on transmission and distribution coordination in spot power market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 107-114.
- [14] GE L J, LI Y L, LI S X, et al. Evaluation of the situational awareness effects for smart distribution networks under the novel design of indicator framework and hybrid weighting method[J]. Frontiers in Energy, 2021, 15(1): 143-158.
- [15] 元俊健,何光宇,梅生伟,等.电力系统抗差状态估计研究综述[J].电工电能新技术,2011,30(3):59-64.
QI Junjian, HE Guangyu, MEI Shengwei, et al. A review of power system robust state estimation[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2011, 30(3): 59-64.
- [16] 魏大千,王波,刘涤尘,等.基于时序数据相关性挖掘的WAMS/SCADA数据融合方法[J].高电压技术,2016,42(1):315-320.
WEI Daqian, WANG Bo, LIU Dichen, et al. WAMS/SCADA data fusion method based on time-series data correlation mining[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 315-320.
- [17] 李延真,郭英雷,彭博,等.基于多时间尺度状态估计的配电网实时态势预测[J].电力工程技术,2020,39(2):127-134.
LI Yanzhen, GUO Yinglei, PENG Bo, et al. Real-time situation prediction of distribution network based on multi-time scale state estimation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(2): 127-134.
- [18] WANG B, HE G Y, DONG S F. An improved algorithm for state estimator based on maximum normal measurement rate[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4879-4880.
- [19] HE G Y, DONG S F, QI J J, et al. Robust state estimator based on maximum normal measurement rate[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2058-2065.
- [20] 胥峥,周洪益,沈甜甜,等.改进的零注入约束双线性WLAV状态估计[J].电力工程技术,2019,38(4):106-111.
XU Zheng, ZHOU Hongyi, SHEN Tiantian, et al. Modified bilinear WLAV state estimation with zero injections[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(4): 106-111.
- [21] 孙宏斌,张伯明,相年德.发输配全局状态估计[J].清华大学学报(自然科学版),1999,39(7):20-24.
SUN Hongbin, ZHANG Boming, XIANG Niande. Global state estimation for power system including transmission and distribution networks[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1999, 39(7): 20-24.
- [22] ABBASI A R, SEIFI A R. A new coordinated approach to state estimation in integrated power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 45(1): 152-158.
- [23] WANG J X, LI T. Distributed multi-area state estimation for power systems with switching communication graphs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 787-797.

- [24] ANANDINI G N, GUPTA I. Estimating the lost real-time measurements under communication failure for distribution system state estimation[C]//2016 National Power Systems Conference (NPSC). Bhubaneswar, India: IEEE, 2016: 1-5.
- [25] LAKSHMINARASIMHAN S, GIRGIS A A. Hierarchical state estimation applied to wide-area power systems[C]//2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa, USA: IEEE, 2007: 1-6.
- [26] XIE L, CHOI D H, KAR S. Cooperative distributed state estimation: Local observability relaxed[C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit, USA: IEEE, 2011: 1-11.
- [27] KEKATOS V, GIANNAKIS G B. Distributed robust power system state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1617-1626.
- [28] REN Z W, CHEN Y, HUANG S W, et al. A fully distributed coordination method for fast decoupled multi-region state estimation[J]. IEEE Access, 2019, 7: 132859-132870.
- [29] ABUR A, EXPÓSITO A G. Power system state estimation: theory and implementation[M]. New York, USA: Marcel Dekker, 2004.
- [30] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- YU Erkeng. Power system state estimation[M]. Beijing, China: China Water&Power Press, 1985.
- [31] BOUCHEKARA H, LATRECHE Y, NAIDU K, et al. Comprehensive review of radial distribution test systems for power system distribution education and research[J]. Resource-Efficient Technologies, 2019(3): 1-12.
- [32] 王德人. 不动点问题的异步并行算法[J]. 数值计算与计算机应用, 1995(4): 299-309.
- WANG Deren. Asynchronous parallel algorithms of fixed point problems[J]. Journal of Unmerical Methods and Computer Applications, 1995(4): 299-309.
- [33] BAUDET G M. Asynchronous iterative methods for multiprocessors[J]. Journal of the ACM, 1978, 25(2): 226-244.
- [34] LLAVALL B, XAVIER F. Reliability worth assessment of radial systems with distributed generation[D]. Catalan, Spain: Universitat

Politécnica de Catalunya, 2010.

- [35] ZHU J Z. Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined genetic algorithm[J]. Electric Power Systems Research, 2002, 62(1): 37-42.



TANG Yingqi

唐滢淇

1997—, 男, 硕士生

主要从事电力系统状态估计、高性能计算、人工智能与电力系统等方面的研究工作

E-mail: tangyq@zju.edu.cn



DONG Shufeng

Ph.D.

Associate professor

Corresponding author

董树锋(通信作者)

1982—, 男, 博士, 副教授, 博导

主要从事智能电网优化与控制技术等方面的研究工作

E-mail: dongshufeng@zju.edu.cn



TANG Kunjie

Ph.D. candidate

唐坤杰

1994—, 男, 博士生

主要从事电力系统高性能计算方法、输配协同计算等方面的研究工作

E-mail: tangkunjie1994@zju.edu.cn

收稿日期 2021-03-31 修回日期 2021-05-08 编辑 程子丰

附录 A

表 A1 对应于 3.1、3.2 节的 DN 算例信息

Table A1 Information of DN cases for section 3.1, 3.2

DN 序号	MATPOWER 中的 DN 算例名称	TN 中被连接的节点编号	μ/ms	σ/ms
1	case136ma	11	100	20
2	case118zh	12	75	15
3	case85	13	50	10
4	case74ds	14	25	5
5	case69	15	100	20
6	case22	20	75	15
7	case28da	21	50	10
8	case33mg	22	25	5
9	case34sa	23	100	20
10	case38si	24	75	15
11	case51ga	25	50	10
12	case51he	26	25	5
13	case69	27	100	20
14	case141	28	75	15
15	case74ds	29	50	10
16	case85	30	25	5
17	case94pi	19	100	20
18	case118zh	18	75	15
19	case136ma	17	50	10
20	case141	16	25	5

表 A2 对应于 3.3 节的 DN 算例信息

Table A2 Information of DN cases for section 3.3

DN 序号	MATPOWER 中的 DN 算例名称	TN 中被连接的节点编号	μ/ms	σ/ms
1	case136ma	11	100	20
2	case118zh	12	75	15
3	case16ci	17、18、19	50	10
4	case74ds	14	25	5
5	case22	20	100	20
6	case28da	21	75	15
7	case33mg	22	50	10
8	case34sa	23	25	5
9	case16ci	16、30、29	100	20
10	case69	27	75	15