

DOI: 10.7667/PSPC180564

基于幂级数展开的电力系统戴维南等值参数跟踪算法

李东东, 刘振宇, 尹睿

(上海电力学院, 上海 200090)

摘要: 针对传统电力系统戴维南等值参数计算方法中存在的弊端, 提出一种基于幂级数展开的戴维南等值参数跟踪算法。该算法假设在相邻采样时刻内系统戴维南等值参数幅值不变, 利用幂级数展开式跟踪系统戴维南等值参数, 不仅有效避免了参数漂移问题, 而且能较大幅度地反映等值系统内部负荷扰动。同时, 该算法在系统三相短路故障后能瞬间恢复对戴维南等值参数的准确跟踪, 即适用于系统短路故障切除后的暂态过程。最后, 分别通过在简单双母线算例系统和 IEEE39 节点算例系统中的仿真验证了所提算法的鲁棒性和准确性。

关键词: 戴维南等值; 幂级数展开式; 参数漂移; 负荷扰动; 故障

A tracing algorithm of Thevenin equivalent parameters for power systems based on power series expansion

LI Dongdong, LIU Zhenyu, YIN Rui

(Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of the traditional power system's Thevenin equivalent parameter calculation method, this paper puts forward a tracing algorithm for the Thevenin equivalent parameters based on power series expansion. The algorithm assumes that the amplitude of the system's Thevenin equivalent parameters is constant during the adjacent sampling time, and uses the power series expansion to track the Thevenin equivalent parameters. The algorithm not only effectively avoids the parameter drift problem, but also reflects internal load disturbance of the equivalent system to a large extent. At the same time, the algorithm can instantly restore the accurate tracking of the Thevenin equivalent parameter after the system three-phase short-circuit fault, which is available for the transient process after the system short-circuit fault is removed. Finally, the robustness and accuracy of the proposed algorithm are verified by simulations in a simple double bus example system and an IEEE39 node example system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507100), Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (No. 17020500800, No. 13DZ2251900 and No. 10DZ2273400) and "Shuguang Program" of Shanghai Education Development Foundation and Shanghai Municipal Education Commission (No.15SG50).

Key words: Thevenin equivalent; power series expansion; parameter drift; load disturbance; fault

0 引言

近年来, 在我国的社会发展中, 电网规模和电能需求持续扩大^[1], 电力系统的运行已不断接近其稳定极限^[2]。因此, 如何准确预测电力系统电压稳定临界点成为研究的热点。目前, 电压稳定分析方

法主要分为基于模型的电压稳定评估方法和基于测量信息的评估方法^[3]。随着相量测量单元(Phasor Measurement Unit, PMU)的广泛使用, 基于测量信息的电压稳定在线评估方法在系统电压稳定性分析中扮演越来越重要的角色。其中, 戴维南等值方法因其物理概念明确、模型简单且能清晰地表征电压稳定性成为核心算法之一。然而由于戴维南等值参数受系统网络拓扑、发电机状况、无功源状况等诸多因素影响^[4], 因此戴维南等值参数的准确辨识是实现电网电压稳定在线评估的关键^[5]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51507100); 上海市科学技术委员会资助(17020500800, 13DZ2251900, 10DZ2273400); 上海市“曙光计划”资助(15SG50)

1999年 Khoi.Vu^[6]首次提出基于本地相量测量值计算系统戴维南等值参数的传统算法。该算法通过选取多个时间断面局部电气测量信息,基于相邻采样时刻内戴维南等值参数不变的假设,采用最小二乘辨识思想计算系统戴维南等值参数。基于相同的思路,国内外学者又陆续提出了多种戴维南等值参数的计算方法^[7-9],由于此类算法计算等值参数时皆选取多个时间断面的局部测量数据,因此该类算法也称为基于外部测量信息的多时间断面算法。然而,此类算法仅适用于等值系统负荷侧扰动适当且等值系统内部几乎无扰动情况^[10],当在所等值的节点处出现了不合理的扰动或系统内部出现了较大扰动时,由这一假设条件引起的误差通常较大。

针对多时间断面算法的局限性,基于外部测量信息的单时间断面算法^[11-13]被陆续提出。该类方法取消了相邻采样时刻内戴维南等值参数不变的假设,仅选取当前时间断面的局部测量信息迭代计算系统戴维南等值参数,虽在一定程度上提高了计算精度,但仍存在初值依赖性、迭代复杂等缺点。为了进一步提高计算精度,相关文献^[14-15]提出了基于内部网络结构信息的戴维南等值参数跟踪算法。该类方法通过采集整个系统网络的测量信息获取算法数据,能更全面地反映系统整体的运行状态,但是由于需要实时更新系统信息,因此计算过程复杂且耗时较长。除此之外,考虑到系统复杂的动态特性,由传统戴维南等值拓展出的基于动态等值理论的电压稳定分析方法^[16-17]也逐渐受到人们的关注。

综上,本文提出了一种基于幂级数展开式的系统戴维南等值参数跟踪算法。该方法简化了传统法的假设条件,利用幂级数展开式跟踪计算相邻采样时刻内等值参数的增量,有效地避免了参数漂移现象,且能较大程度反映等值系统内部扰动。同时,该方法适用于系统内部故障切除后的暂态恢复过程,在不需要初值的情况下能够快速、准确地求解复杂系统的戴维南等值参数。最后,本文基于简单双母线系统中的仿真验证了所提算法的鲁棒性,同时也在新英格兰 IEEE39 节点系统中验证了所提算法的准确性与优越性。

1 传统戴维南等值参数计算方法

戴维南等值原理认为,任意线性系统在任一时间断面都可等值为一个理想电压源经过一个阻抗向等值负荷节点供电的两节点系统,该两节点系统称为戴维南等值系统。任意时刻 k 的戴维南等值系统如图 1 所示。

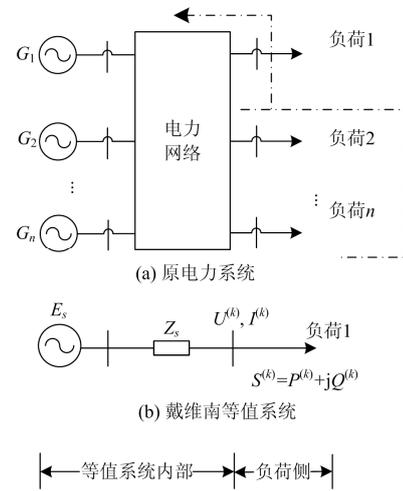


图 1 电力系统戴维南等值示意图

Fig. 1 Schematic diagram of power system Thevenin equivalent

图 1 中, E_s 和 Z_s 分别为 k 时刻等值系统内部的戴维南等值电势和戴维南等值阻抗,统称为戴维南等值参数; $U^{(k)}$ 和 $I^{(k)}$ 分别为 k 时刻负荷侧电压相量和电流相量; $P^{(k)}$ 和 $Q^{(k)}$ 分别为 k 时刻负荷侧有功功率和无功功率。对于一个戴维南等值系统而言,若系统中的扰动发生在负荷侧,则该扰动称为负荷侧扰动,若扰动发生在除负荷节点以外的部分,则该扰动为等值系统内部扰动。

由于传统戴维南等值参数计算方法(简称传统法,下同)假设相邻两个采样时刻内戴维南等值参数不变,故可根据图 1 列写相邻采样时刻的电路方程。其中 k 和 $k+1$ 分别代表两个相邻采样时刻,下文同。

$$\begin{cases} U^{(k)} + I^{(k)} Z_s = E_s \\ U^{(k+1)} + I^{(k+1)} Z_s = E_s \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可计算出相邻采样时刻内戴维南等值参数如式(2)、式(3)所示。

$$Z_s = \frac{U^{(k)} - U^{(k+1)}}{I^{(k+1)} - I^{(k)}} \quad (2)$$

$$E_s = \frac{U^{(k)} I^{(k+1)} - U^{(k+1)} I^{(k)}}{I^{(k+1)} - I^{(k)}} \quad (3)$$

利用 PMU 测量装置分别采集 k 时刻和 $k+1$ 时刻的负荷电压和电流相量即可计算在该时间段内的系统戴维南等值参数。

2 传统戴维南等值参数计算方法分析

由以上所述,传统法正确计算戴维南等值参数的前提是假设在相邻两个采样时刻内戴维南等值参数不变,即戴维南等值电势及戴维南等值阻抗的幅值和幅角均不发生变化。若将式(1)中所有的相量以

幅值和幅角的形式表达, 式(1)可写为式(4)。

$$\begin{cases} U^{(k)} e^{j\theta_v^{(k)}} + I^{(k)} Z_s e^{j(\varphi_i^{(k)} + \varphi_z)} = E_s e^{j\varphi_e} \\ U^{(k+1)} e^{j\theta_v^{(k+1)}} + I^{(k+1)} Z_s e^{j(\varphi_i^{(k+1)} + \varphi_z)} = E_s e^{j\varphi_e} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: 上标 k 、 $k+1$ 分别代表相邻两个采样时刻; U 、 I 、 E_s 和 Z_s 分别代表节点电压、负荷电流、戴维南等值电势和戴维南等值阻抗的幅值; θ_v 、 φ_i 、 φ_z 和 φ_e 分别代表节点电压、负荷电流、戴维南等值阻抗和戴维南等值电势的幅角。

由于传统法要求相邻两个采样时刻内戴维南等值参数不变, 这就相当于要求相邻两个采样时刻内负荷侧发生合适的扰动(扰动既不能过大也不能过小), 等值系统内部几乎不发生扰动。反之, 若相邻采样时刻内等值系统内部几乎未遭受扰动或负荷水平的差别很小, 式(2)和式(3)将趋近于 $0/0$ 的形式无法计算, 产生参数漂移现象^[18]; 若负荷侧不发生扰动, 仅等值系统内部发生扰动时, 利用式(2)计算出的戴维南等值阻抗的模值将始终等于负荷等值阻抗的模值^[19], 导致戴维南等值参数无法计算。然而系统的实际运行环境十分复杂, 大多数情况下传统法的假设无法成立。因此, 为了解决上述传统法存在的缺陷, 本文提出了更适用于实际电力系统运行的戴维南等值参数跟踪算法。

3 基于幂级数展开的电力系统戴维南等值参数跟踪算法

由于传统法仅适用于相邻两个采样时刻内负荷侧扰动合适且等值系统内部几乎无扰动的系统, 故本文对传统法的理想化假设进行改进, 提出新的戴维南等值参数跟踪算法。该算法仅假设相邻两个采样时刻内电力系统戴维南等值参数的幅值不变, 利用幂级数展开式跟踪求取相邻采样时刻间隔内戴维南等值参数幅角的增量, 进而求取相邻采样时刻内系统的戴维南等值参数。根据上述假设, 重写式(4)为式(5)。

$$\begin{cases} U^{(k)} e^{j\theta_v^{(k)}} + I^{(k)} Z_s e^{j(\varphi_i^{(k)} + \varphi_z^{(k)})} = E_s e^{j\varphi_e^{(k)}} \\ U^{(k+1)} e^{j\theta_v^{(k+1)}} + I^{(k+1)} Z_s e^{j(\varphi_i^{(k+1)} + \varphi_z^{(k)} + \Delta\varphi_z)} = E_s e^{j(\varphi_e^{(k)} + \Delta\varphi_e)} \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_z = \varphi_z^{(k+1)} - \varphi_z^{(k)} \\ \Delta\varphi_e = \varphi_e^{(k+1)} - \varphi_e^{(k)} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: φ_z 代表戴维南等值阻抗幅角; φ_e 代表戴维南等值电势幅角; $\Delta\varphi_z$ 和 $\Delta\varphi_e$ 分别代表相邻采样时刻内戴维南等值阻抗幅角变化量和戴维南等值电势

幅角变化量。

根据式(5)对相邻采样时刻的戴维南等值系统模型进行求商运算, 得到含有戴维南等值阻抗幅角增量的新增方程如式(7)。

$$\frac{I^{(k+1)}}{I^{(k)}} e^{j(\varphi_i^{(k+1)} - \varphi_i^{(k)} + \Delta\varphi_z)} = \frac{E_s e^{j\varphi_e^{(k+1)}} - U^{(k+1)} e^{j\theta_v^{(k+1)}}}{E_s e^{j\varphi_e^{(k)}} - U^{(k)} e^{j\theta_v^{(k)}}} \quad (7)$$

将幂级数展开式代入上式, 由于当系统中未发生大扰动时, 相邻两个采样时间间隔内 φ_z 变化很小, 因此在幂级数展开式中省略戴维南等值阻抗幅角变化量的高阶项 $o(\Delta\varphi_z)$, 改写式(7)为式(8)。

$$\frac{I^{(k+1)}}{I^{(k)}} \{1 + j(\Delta\varphi_i + \Delta\varphi_z)\} = \frac{E_s e^{j\varphi_e^{(k+1)}} - U^{(k+1)} e^{j\theta_v^{(k+1)}}}{E_s e^{j\varphi_e^{(k)}} - U^{(k)} e^{j\theta_v^{(k)}}} \quad (8)$$

其中:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_i = \varphi_i^{(k+1)} - \varphi_i^{(k)} \\ \Delta\varphi_z = \varphi_z^{(k+1)} - \varphi_z^{(k)} = \arctan \frac{X_s^{(k+1)}}{R_s^{(k+1)}} - \arctan \frac{X_s^{(k)}}{R_s^{(k)}} \end{cases} \quad (9)$$

利用欧拉公式分别将式(5)、式(8)中指数形式转化成三角函数形式, 并将实部、虚部分离分别得式(10)、式(11)。

$$\begin{cases} U_r^{(k)} + I_r^{(k)} R_s^{(k)} - I_i^{(k)} X_s^{(k)} = E_{sr}^{(k)} \\ U_i^{(k)} + I_r^{(k)} X_s^{(k)} + I_i^{(k)} R_s^{(k)} = E_{si}^{(k)} \\ U_r^{(k+1)} + I_r^{(k+1)} R_s^{(k+1)} - I_i^{(k+1)} X_s^{(k+1)} = E_{sr}^{(k+1)} \\ U_i^{(k+1)} + I_r^{(k+1)} X_s^{(k+1)} + I_i^{(k+1)} R_s^{(k+1)} = E_{si}^{(k+1)} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} I^{(k)} (E_{sr}^{(k+1)} - U_r^{(k+1)}) = I^{(k+1)} \{ (E_{sr}^{(k)} - U_r^{(k)}) - (E_{si}^{(k)} - U_i^{(k)}) (\Delta\varphi_i + \Delta\varphi_z) \} \\ I^{(k)} (E_{si}^{(k+1)} - U_i^{(k+1)}) = I^{(k+1)} \{ (E_{si}^{(k)} - U_i^{(k)}) + (E_{sr}^{(k)} - U_r^{(k)}) (\Delta\varphi_i + \Delta\varphi_z) \} \end{cases} \quad (11)$$

式(10)、式(11)中, 有

$$\begin{cases} U^{(k)} = U_r^{(k)} + jU_i^{(k)} \\ U^{(k+1)} = U_r^{(k+1)} + jU_i^{(k+1)} \\ I^{(k)} = I_r^{(k)} + jI_i^{(k)} \\ I^{(k+1)} = I_r^{(k+1)} + jI_i^{(k+1)} \\ E_s^{(k)} = E_{sr}^{(k)} + jE_{si}^{(k)} \\ E_s^{(k+1)} = E_{sr}^{(k+1)} + jE_{si}^{(k+1)} \\ Z_s^{(k)} = Z_{sr}^{(k)} + jZ_{si}^{(k)} \\ Z_s^{(k+1)} = Z_{sr}^{(k+1)} + jZ_{si}^{(k+1)} \end{cases} \quad (12)$$

同时由假设条件为连续两个时间间隔内戴维南等值参数的幅值不变可得

$$\begin{cases} \sqrt{(E_{sr}^{(k)})^2 + (E_{si}^{(k)})^2} = \sqrt{(E_{sr}^{(k+1)})^2 + (E_{si}^{(k+1)})^2} \\ \sqrt{(Z_{sr}^{(k)})^2 + (Z_{si}^{(k)})^2} = \sqrt{(Z_{sr}^{(k+1)})^2 + (Z_{si}^{(k+1)})^2} \end{cases} \quad (13)$$

由式(10)一式(13)可知, 已知量为相邻两个采样时刻电压实部 U_r 、电压虚部 U_i 、电流实部 I_r 、电流虚部 I_i ; 未知量为相邻两个采样时刻戴维南等值电势实部 E_{sr} 、戴维南等值电势虚部 E_{si} 、戴维南等值电阻 R_s 、戴维南等值电抗 X_s 。

该算法仅假设连续两个采样时间间隔内戴维南等值参数幅值不变, 不需要给定初值即可快速求解出戴维南等值参数, 避免了算法的初值依赖性, 同时考虑到了系统实际运行过程中负荷扰动给戴维南等值参数幅角带来的影响, 具有良好的实用性。

4 算例分析

4.1 简单双母线系统仿真

由于数据采集过程中存在测量误差及噪声干扰, 本文首先通过搭建简单双母线系统仿真验证所提算法的鲁棒性。简单双母线系统如图 2 所示, 系统参数设置如下: $R_{th}=0.3$, $X_{th}=0.4$, $\dot{E}_{th}=1\angle 0$, $R_L=6$, $X_L=8$ 。

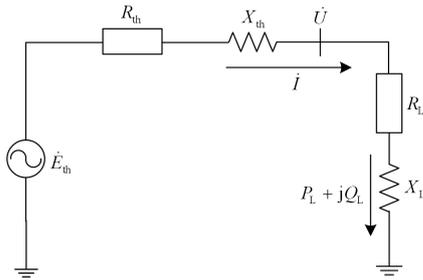


图 2 简单双母线系统

Fig. 2 A simple two-bus power system

考虑到 PMU 标准及实际采样频率、噪声等随机扰动在电压及电流测量值上产生的误差通常被限制在 $0.02\% \text{ p.u.}$ ^[20], 本文选取任意 20 个时刻的测量数据, 并在每个时刻的测量值(U, I)上分别叠加幅度为 $\pm 0.010\%$ 、 $\pm 0.015\%$ 、 $\pm 0.020\%$ 、 $\pm 0.025\%$ 的随机扰动。本文算法计算戴维南等值阻抗结果平均值和计算误差如表 1 所示。

表 1 戴维南等值阻抗计算结果分析

Table 1 Analysis of the results of Thevenin equivalent impedance calculation

随机扰动/ %	戴维南等值阻抗 真实值/p.u.	本文算法计算结果 平均值/p.u.	计算误差/ %
无扰动	0.500 0	0.499 9	0.020
± 0.010	0.500 0	0.499 9	0.020
± 0.015	0.500 0	0.499 2	0.160
± 0.020	0.500 0	0.498 9	0.220
± 0.025	0.500 0	0.498 0	0.400

由表 1 可以看出, 当测量数据无扰动时, 本文算法计算结果精确, 计算误差仅 0.02% ; 随着随机扰动的不断增大, 戴维南等值阻抗计算误差也随之增长, 但是增长量极小, 且与无扰动时的计算结果相差仅 0.38% , 说明本文算法自身具有较强的抗数据干扰的能力, 鲁棒性较好。

此外, 本文在 PMU 测量值(U, I)上叠加 $\pm 0.020\%$ 的随机扰动, 观察 10 s 内戴维南等值阻抗计算结果的变化情况。图 3 为扰动前后戴维南等值阻抗计算结果对比图。

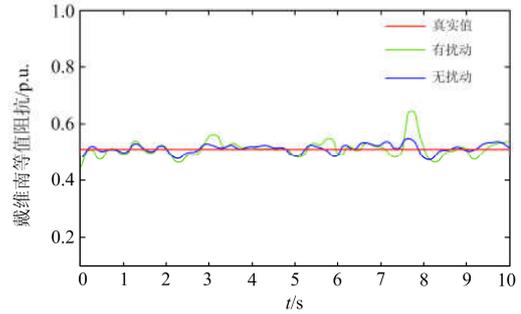


图 3 戴维南等值阻抗计算结果对比图

Fig. 3 Comparison of the results of the Thevenin equivalent impedance calculation

由图 3 可知, 加入数据扰动前后本文算法计算戴维南等值阻抗结果相差不大, 且都接近于真实值, 因此本文算法对于由噪声和测量误差带来的数据扰动具有良好的抵抗性。

4.2 验证方法

本文通过与基于戴维南等值系统的负荷有功、无功功率的计算式, 即与式(14)、式(15)的比较来验证所提算法的准确性。若计算得到的数值与利用 PMU 装置测量得到的测量值一致, 则可证明本文算法跟踪系统戴维南等值参数的准确性。

$$P_k = \left| \frac{E_s}{Z_s + Z_l} \right|^2 \cdot R_l \quad (14)$$

$$Q_k = \left| \frac{E_s}{Z_s + Z_l} \right|^2 \cdot X_l \quad (15)$$

式(14)和式(15)中, E_s 和 Z_s 分别为系统戴维南等值电势和戴维南等值阻抗; R_l 和 X_l 分别为等值负荷节点的等值电阻和等值电抗; Z_l 为等值负荷节点的等值阻抗。 P_k 和 Q_k 分别为负荷节点处有功功率和无功功率的计算结果。

4.3 IEEE39 节点系统仿真

本文在 DIgSILENT /Power Factory 14.0 中搭建了新英格兰 IEEE39 节点算例系统。该算例系统中

共有 10 台发电机、39 个系统节点、12 台变压器、34 条输电线路。系统拓扑结构如图 4 所示。

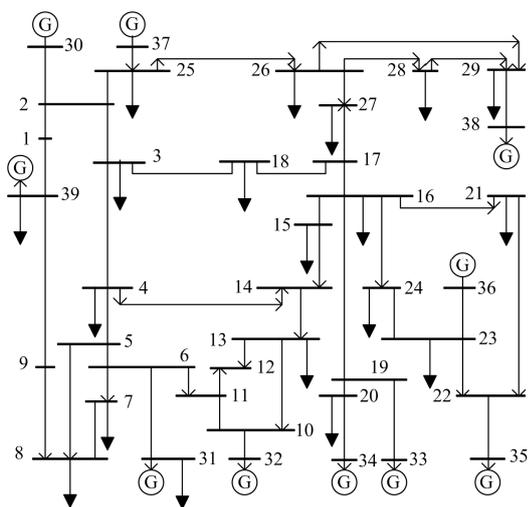


图 4 IEEE 39 节点系统

Fig. 4 IEEE39 node system

(1) 算例系统中仅存在负荷扰动

该仿真以 Load8 作为戴维南等值节点。以 Load 39 增长模拟等值系统内部扰动；以 Load8 增长模拟负荷侧扰动。负荷扰动设置如下。

0~2 s 内：Load39 负荷有功、无功功率同时增长 2%，Load8 负荷有功、无功功率同时增长 20%，其余负荷保持不变。

2~6 s 内：仅 Load39 负荷有功、无功功率同时增长 0.5%，其余负荷保持不变。

6~8 s 内：Load39 负荷有功、无功功率同时增长 80%，Load8 负荷有功、无功功率同时增长 20%，其余负荷保持不变。

8~10 s 内：仅 Load39 负荷有功、无功功率同时增长 20%，其余负荷保持不变。图 5 为负荷扰动期间系统戴维南等值阻抗仿真结果图。

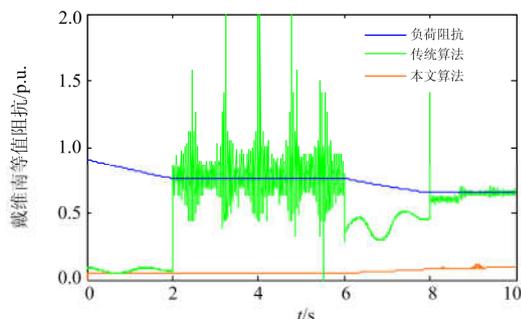


图 5 戴维南等值阻抗仿真图

Fig. 5 Simulation results of the Thevenin equivalent impedance

观察图 5 并结合前文所述，可以看出：由于传统法适用于等值系统内部扰动微小且负荷侧扰动合适的工况，因此在 0~2 s 内传统法能正确跟踪系统戴维南等值参数。本文算法的计算结果与传统算法的计算结果一致，证明本文算法同样适用于该工况。而在 2~6 s 内由于等值系统内部几乎未遭受扰动，传统戴维南等值阻抗计算式趋近于 0/0 模式，产生参数漂移现象。同时本文算法的计算结果几乎未发生变化，这是由于此时系统网络结构并未改变，因此系统戴维南等值阻抗也不应发生变化。故本文算法能很好地克服传统法的参数漂移现象。

同理，6~8 s 内当负荷侧的负荷扰动小于等值系统内部的负荷扰动时，传统法计算结果出现明显误差。8~10 s 内当仅等值系统内部存在负荷扰动时，传统法计算出的戴维南等值阻抗等于负荷等值阻抗，而本文算法的计算结果仍基本保持不变，说明与传统法相比，本文算法能充分反映等值系统内部负荷扰动，适用于实际电力系统戴维南等值参数的计算。

图 6 为负荷扰动期间利用本文算法和 PMU 测量装置得到的等值负荷点处的有功功率和无功功率对比图。

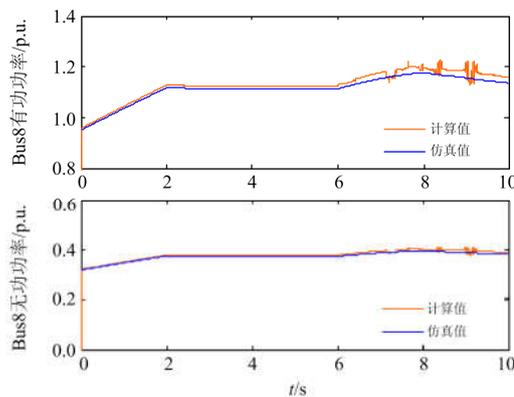


图 6 负荷扰动工况下验证仿真图

Fig. 6 Simulation results under load disturbance

由图 6 可知，利用本文算法计算出的等值负荷点处的有功功率和无功功率与 PMU 测量数据基本一致。进一步验证了在实际系统发生不同程度的负荷扰动时，本文算法能准确计算系统戴维南等值参数。

(2) 等值系统内部线路发生三相短路故障并切除为验证所提算法在系统内部发生故障时计算的准确性，本文在新英格兰 IEEE39 节点系统内部设置等值节点连接线路发生三相短路故障并延时清除。故障工况设置如下。

0~5 s 内 Load8 负荷有功、无功功率同时增长

20%，Load39 负荷有功、无功功率同时增长 2%。等值负荷节点附近线路 Line8-9 在 1 s 时发生三相短路故障，在 1.05 s^[21]时清除故障。图 7 为故障前后系统戴维南等值阻抗仿真结果图。

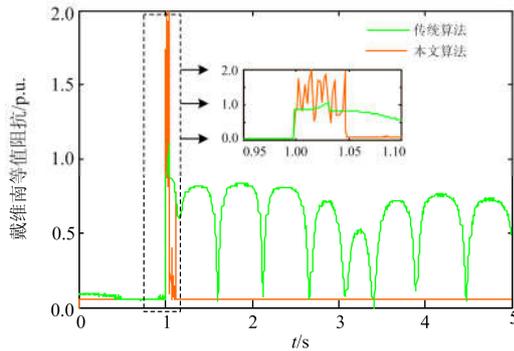


图 7 故障前后戴维南等值阻抗仿真图

Fig. 7 Equivalent impedance simulation diagram under fault conditions

由图 7 可以看出，0~1 s 内系统未发生故障时，由于负荷侧扰动合适且系统内部扰动微小，此时传统法和本文算法均能准确计算系统戴维南等值参数。在 1 s 时刻系统发生故障后传统法失效，计算结果产生了明显的振荡。而本文算法在 1.05 s 时刻故障清除后能迅速恢复对系统戴维南等值参数的跟踪，且计算结果与故障发生前一致。这是由于清除故障是通过设置清除事件实现的，故障清除后系统网络结构并未改变。因此本文算法能迅速跟踪等值系统内部三相短路故障后的系统戴维南等值阻抗，具有显著的实用性。

5 结论

本文在分析传统戴维南等值参数计算方法准确性的基础上，提出了一种基于幂级数展开式的戴维南等值参数跟踪计算方法。该算法仅需要本地测量数据，且不需要初值即可准确计算系统戴维南等值参数。与传统戴维南等值参数计算方法相比，本文算法仅假设相邻采样时刻内戴维南等值参数幅值不变，并利用幂级数展开式跟踪相邻采样时刻内戴维南等值参数幅角的增量，解决了传统法的参数漂移问题和等值系统内部负荷扰动较大时无法计算的问题。此外，当系统内部发生三相短路故障并清除后，本文算法可以迅速恢复对系统戴维南等值参数的准确跟踪，即适用于系统故障清除后的暂态过程，具有良好的实用性。

参考文献

[1] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui, WANG Haiming, et al.

Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 2(2): 3-11. DOI: 10.1186/s41601-018-0086-0.

[2] 颜廷鑫, 刘光晔, 谢冬冬. 计及发电机运行极限的电压稳定临界点计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(8): 119-125.

YAN Tingxin, LIU Guangye, XIE Dongdong. Calculation of voltage stability critical point considering generator capability limits[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2017, 29(8): 119-125.

[3] LIU JianHong, CHU C C. Wide-area measurement-based voltage stability Indicator by modified coupled single-port models[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 756-764.

[4] 赵建伟, 严正, 徐潇源, 等. 戴维南等值参数时域仿真跟踪算法分析与改进[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 115-122.

ZHAO Jianwei, YAN Zheng, XU Xiaoyuan, et al. Analysis and improvement of Thevenin equivalent parameter tracking based on time domain simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 115-122.

[5] 梁辰, 刘道伟, 焦彦军. 基于改进动态阻抗法的电网静态电压稳定裕度快速评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 44-49.

LIANG Chen, LIU Daowei, JIAO Yanjun. Rapid evaluation of power system static voltage stability margin based on improved dynamic impedance[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 44-49.

[6] VU K, BEGOVIC M, NOVOSEL D, et al. Use of local measurements to estimate voltage stability margin[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 1029-1035.

[7] 赵金利, 余贻鑫, ZHANG Pei. 基于本地相量测量的电压失稳指标工作条件分析[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(24): 1-4.

ZHAO Jinli, YU Yixin, ZHANG Pei. Condition of applying voltage instability predictor based on local measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(24): 1-4.

[8] 李来福, 柳进, 于继来, 等. 节点戴维南等值参数在线跟踪简捷算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 40-44.

LI Laifu, LIU Jin, YU Jilai, et al. A simple and direct method of on-line tracking Thevenin equivalent parameters of load node[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 40-44.

[9] HASHMI M U, CHOUDHARY R, PRIOLKAR J G

- Online Thevenin equivalent parameter estimation using nonlinear and linear recursive least square algorithm[C] // IEEE international conference on Electrical, Computer and Communication Technologies, March 5-7, 2015, Coimbatore, India: 1-6.
- [10] 李卫星, 牟晓明, 李志民. 电力系统戴维南等值参数的解析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(增刊): 28-34.
- LI Weixing, MOU Xiaoming, LI Zhimin. Analysis and thoughts on the Thevenin equivalent parameters for power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(S): 28-34.
- [11] 汤涌, 孙华东, 易俊, 等. 基于全微分的戴维南等值参数跟踪算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 48-53.
- TANG Yong, SUN Huadong, YI Jun, et al. Tracing algorithm for Thevenin equivalent parameters based on complete differential equation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 48-53.
- [12] CORSI S, TARANTO G N. A real-time voltage instability identification algorithm based on local phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1271-1279.
- [13] 孙华东, 陈树勇, 常晓鹏, 等. 适应大扰动的电力系统戴维南等值参数跟踪算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(8): 126-132.
- SUN Huadong, CHEN Shuyong, CHANG Xiaopeng, et al. A tracing algorithm of Thevenin equivalent parameters for power systems with large disturbance[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(8): 126-132.
- [14] 汤涌, 易俊, 侯俊贤, 等. 基于时域仿真的戴维南等值参数跟踪计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 63-68.
- TANG Yong, YI Jun, HOU Junxian, et al. Calculation method for Thevenin equivalent parameters based on time domain simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 63-68.
- [15] WANG Yunfei, PORDANJANI I R, LI Weixing, et al. Voltage stability monitoring based on the concept of coupled single-port circuit[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2154-2163.
- [16] 颜廷鑫, 刘光晔, 肖白雪, 等. 基于动态等效电路的含 DG 电力系统电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 74-79.
- YAN Tingxin, LIU Guangye, XIAO Baixue, et al. Voltage stability analysis of power system with DGs based on dynamic equivalent circuit[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 74-79.
- [17] 罗岩菲, 刘光晔, 谢冬冬, 等. 基于动态分析方法的电网 $N-1$ 关键支路识别[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 1-6.
- LUO Yanfei, LIU Guangye, XIE Dongdong, et al. Power grid $N-1$ key branch identification based on dynamic analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 1-6.
- [18] 李来福, 于继来, 柳焯. 戴维南等值跟踪的参数漂移问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 1-5.
- LI Laifu, YU Jilai, LIU Zhuo. Research on parameters drift problem in tracking Thevenin equivalent[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 1-5.
- [19] 李东东, 尹睿, 杨银台, 等. 考虑系统内部扰动的戴维南等值参数跟踪方法[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2528-2536.
- LI Dongdong, YIN Rui, YANG Yintai, et al. Online tracking of Thevenin parameters considering system side changes[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2528-2536.
- [20] MATAVALAM A R R, AJJARAPU V. Sensitivity based Thevenin index with systematic inclusion of reactive power limits[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 33(1): 932-942.
- [21] 闫常友, 周孝信. 电力系统三相短路故障临界切除时间求解方法的在线应用[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 56-63.
- YAN Changyou, ZHOU Xiaoxin. Online application of solving method for critical clearing time of three-phase short circuit in power system[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 56-63.

收稿日期: 2018-05-14; 修回日期: 2018-08-05

作者简介:

李东东(1976—), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统分析、新能源并网和智能用电; E-mail: upwgrp@163.com

刘振宇(1995—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电压稳定分析与控制。E-mail: 18817931258@163.com

(编辑 魏小丽)