

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221602

基于分层估计的戴维南等值阻抗在线计算方法

张森, 王慧芳, 叶睿恺

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 戴维南等值阻抗在线计算可以应用于系统稳定性分析和继电保护在线整定等场景。在分析已有的两类戴维南等值阻抗在线计算方法原理、误差原因的基础上, 提出了基于分层估计的戴维南等值阻抗计算方法。详细给出了该方法提出的依据和过程, 并通过误差分析说明了该方法利用分层抽样的思想, 根据负荷侧参数对样本进行分层, 分别构建计算式, 提高了计算精度, 并有效克服系统戴维南等值阻抗的波动影响。算例分析表明, 在等值电势各种幅度波动下, 所提方法与已有的两类方法相比, 能够在更少采样数量下识别出戴维南等值参数, 并显著减小误差。在加入戴维南等值阻抗波动时, 所提方法依然能估算出戴维南等值阻抗。

关键词: 参数估计; 等值阻抗计算; 继电保护; 戴维南等值

Thevenin equivalent impedance online calculation method based on hierarchical estimation

ZHANG Sen, WANG Huifang, YE Ruikai

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The Thevenin equivalent impedance online calculation can be applied to system stability analysis and online tuning of relay protection. The method based on hierarchical estimation is suggested after two types of Thevenin equivalent impedance calculation method principles and error causes have been analyzed. The proposed method's foundation and steps are presented, and an error analysis reveals that it stratifies the samples in accordance with the parameters on the load side and builds the calculation formulas in a way that can increase calculation accuracy and successfully counteract the fluctuating effects of the system's Thevenin equivalent impedance. The example analysis demonstrates that, with varied amplitude disturbances of the equivalent potential, the proposed method can identify the Thevenin equivalent parameters with fewer sampling numbers. Also it greatly minimizes the error compared to the two current methods. It can still estimate the Thevenin equivalent impedance even when the Thevenin equivalent impedance disturbance is included.

This work is supported by the Joint Fund of National Natural Science Foundation of China (No. U2166204).

Key words: parameter estimation; equivalent impedance calculation; relay protection; Thevenin equivalent

0 引言

实际电网实行分层分区运行管理。配电网的上层电网通常采用戴维南等值阻抗等值模型表达, 保护整定中按照系统侧戴维南等值阻抗的最大值、最小值进行离线整定。当反映系统侧运行方式的戴维南等值阻抗最大值、最小值相差较大时, 会导致保护整定困难, 且定值性能欠佳。若能实时计算等值阻抗, 就能实现自动感知系统侧运行方式变化, 在线估算系统短路电流水平, 为进一步自动调整保护

定值、实现保护性能提升奠定基础^[1-2]。

目前已有一些基于在线信息实时感知戴维南等值阻抗的方法被提出^[3-6], 研究较多的应用场景为电力系统电压稳定性分析^[7-11]和继电保护整定^[12-17]。上述两类场景计算戴维南等值阻抗的目标和利用的信息有所不同。在电压稳定性分析场景中, 戴维南等值阻抗主要用来估算本网内某一节点的电压稳定性裕度, 因此是从本网的量测和拓扑信息出发进行研究^[3,18], 需要依赖可靠通信完成。而在继电保护整定场景中, 戴维南等值阻抗计算主要为本网短路电流计算时提供相邻系统情况, 相邻系统的量测

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目资助 (U2166204)

信息或拓扑信息是不被获取的, 因此需要依靠本电网的就地信息进行估算^[12-16]。此外, 虽然只计算戴维南等值参数的阻抗值, 但是求解过程中需要同时确定戴维南等值阻抗和戴维南等值电压。考虑到系统的时变特性, 两个时刻之间的系统戴维南等值参数缺乏显性关联^[19], 本质上构成一个不定方程的求解问题, 因此该问题的求解需要增加假设。根据假设条件可以将目前的方法分为两类: 第一类是基于数值关系假设的方法^[4,7,20]; 第二类是基于统计量的方法^[12,14,21]。上述两类方法均存在原理性误差。

本文提出了基于分层估计的戴维南等值阻抗计算方法, 并应用于在线整定场景。首先分析已有两类等值阻抗计算方法的数学本质、适用情况和误差来源, 提出将等值阻抗计算问题转化为统计学问题的依据, 然后推导计算方法, 阐述了本文方法能适应系统等值参数波动的原因; 之后, 通过算例验证了该方法能有效适应系统随机波动, 比已有方法更加优秀; 最后, 根据实际系统模型验证本文方法能可靠求出等值阻抗, 并应用于电流速断保护整定计算场景。

1 系统戴维南等值阻抗计算方法与误差分析

1.1 基于数值关系假设的戴维南等值阻抗计算方法

基于就地信息的戴维南等值阻抗研究模型如图1所示。图中: \dot{E} 、 Z_s 和 Z_c 分别为系统戴维南等值电势相量、戴维南等值阻抗和负荷等值阻抗; \dot{U} 和 i 分别为节点电压相量、节点电流相量。

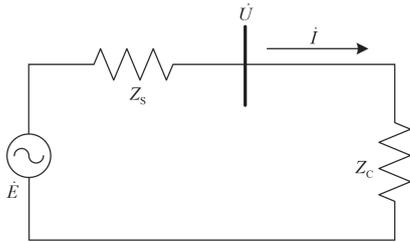


图1 戴维南参数模型

Fig. 1 Thevenin equivalent parameter model

基于数值关系假设的戴维南等值阻抗计算方法假设在估计的时间段内, 相邻时刻间的系统戴维南等值电势、戴维南等值阻抗存在某种数值关系。最简单的方法是假定戴维南等值电势和等值阻抗完全不变^[4-5], 在时间窗内多次测量节点电压、电流, 形成样本集, 再采用最小二乘法拟合所有的样本。

对于每一次测量, 有

$$\dot{E} = \dot{I}_i Z_s + \dot{U}_i \quad (1)$$

式中, 下标 i 代表第 i 次测量。当样本数量大于 2 时, 采用最小二乘法拟合式(1), 拟合目标函数为

$$\min f(Z_s, \dot{E}) = \sum_{i=1}^N (\dot{E} - Z_s \dot{I}_i - \dot{U}_i)^2 \quad (2)$$

式中, N 为总样本数量。

通过求解式(2), 即可得到基于最小二乘法的计算结果。上述求解过程假设了模型中除 Z_c 外的任何一个参数都不发生波动^[19]。当 \dot{E} 存在波动时, 将给计算结果带来显著误差。特别地, 当采用两次测量进行计算时, 式(2)退化为简单方程组的求解问题。

1.2 基于统计量的戴维南等值阻抗计算方法

基于本地量测信息的戴维南等值阻抗计算方法, 每次测量只能获得一对电流电压相量。对于电力系统这样的时变系统, 各次采样时刻间的系统戴维南等值参数组合 $[Z_s, \dot{E}_i]$ 的时变规律未知, 采集得到的 $[\dot{U}, \dot{I}]$ 样本之间也不存在数值关系。但随着样本数量的增加, $[\dot{U}, \dot{I}]$ 样本集中会体现出一定的统计规律, 利用样本集中的统计规律也可实现计算。目前基于统计量的方法主要是以“源荷波动不相关”假设为前提^[21], 即假设系统侧的波动与负荷侧的波动互不相关, 具体有两种表达形式。为了求解 Z_s 的值, 在讨论中一般假设 Z_s 保持不变。

第一种, 利用 \dot{E} 、 Z_c 相邻时刻的变化量 $\Delta \dot{E}$ 、 ΔZ_c 的协方差构建计算式^[15]。取相邻时刻电气量的变化量为

$$\Delta \dot{E} = \Delta \dot{I} \cdot Z_s + \Delta \dot{U} \quad (3)$$

式中, $\Delta \dot{I}$ 、 $\Delta \dot{U}$ 分别代表两个时刻间电流相量、电压相量的变化量。

对式(3)两侧取关于 ΔZ_c 的协方差, 可得

$$\text{Cov}[\Delta \dot{E}, \Delta Z_c] = \text{Cov}[\Delta \dot{I}, \Delta Z_c] \cdot Z_s + \text{Cov}[\Delta \dot{U}, \Delta Z_c] \quad (4)$$

由于假设中系统等值电势变化量与负荷等值阻抗变化量互不相关, 即协方差等于 0, 由式(4)左侧等于 0, 可得

$$Z_s = -\frac{\text{Cov}[\Delta \dot{U}, \Delta Z_c]}{\text{Cov}[\Delta \dot{I}, \Delta Z_c]} \quad (5)$$

第二种, 将 $\Delta \dot{I}$ 分解为因系统侧变化产生的变化量 $\Delta \dot{I}_s$ 和因负荷侧变化产生的变化量 $\Delta \dot{I}_c$, 根据两个序列不相关的特性设计计算算法^[22], 具体为

$$\Delta \dot{I} = \Delta \dot{I}_s + \Delta \dot{I}_c \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_s = \frac{\dot{E}_2 - \dot{E}_1}{Z_s + Z_{c1}} \\ \Delta \dot{I}_c = -\frac{(Z_{c2} - Z_{c1})\dot{E}_2}{(Z_s + Z_{c2})(Z_s + Z_{c1})} \end{cases} \quad (7)$$

式中,下标数字 1、2 分别代表前一时刻和后一时刻的值。由于 $\Delta \dot{I}_S$ 和 $\Delta \dot{I}_C$ 两个序列互不相关,求出使得两个序列的协方差最小的 Z_S 值,即为 Z_S 计算结果。上述两种方法的表达式不同,但是数学本质一致,算例验证中采用第二种作为对比算法。

1.3 误差分析

基于数值关系假设的方法是假定 \dot{E} 和 Z_S 在时间窗内不变,因此在系统侧满足假设的情况下,能够准确计算 Z_S 。若系统侧发生波动,则会出现明显误差,在极端情况下,当负荷侧未发生波动,仅有系统侧波动时,计算结果为 $-Z_C$ ^[6]。本质上,该方法认为所有的样本均符合假设,系统波动带来的影响会随着样本数量增加而减小。但最小二乘法拟合了所有样本^[19],当样本集中存在系统侧波动巨大的样本时,会产生显著误差^[23]。此外,当样本数量增加时,不同时刻系统侧等值参数之间的数值假设关系更难满足,因此简单增加样本数量无法减小最小二乘法的误差。为解决这一问题,文献[24-25]通过对测量所得的样本进行筛选,将负荷侧波动较大、系统侧波动较小的测量点筛选出来进行计算,虽然能够减小系统侧波动带来的误差,但是并没有从机理上解决问题。

上述基于统计量的两种方法中,均假设 Z_S 在时间窗内不变,而 \dot{E} 和 Z_C 则存在随机波动。基于统计量的方法本质上是一种抽样调查方法,从样本中估计总体的情况^[26]。而无偏统计量随着样本数量的增加而渐进稳定于原分布参数附近。受样本数量的限制,基于统计量的方法只能反映出样本之间的相关特性,并不能直接反映出 \dot{E} 和 Z_C 的分布特性。

对于式(4)中左侧的分布协方差无偏估计值,其计算式为

$$\text{Cov}[\Delta \dot{E}, \Delta Z_C] = \frac{1}{N_\Delta - 1} \sum_{i=1}^{N_\Delta} (\Delta \dot{E}_{i,i+1} - \overline{\Delta \dot{E}})(\Delta Z_{C_i,i+1} - \overline{\Delta Z_C}) \quad (8)$$

式中: $\Delta \dot{E}_{i,i+1}$ 和 $\Delta Z_{C_i,i+1}$ 分别为 i 时刻到 $i+1$ 时刻 \dot{E} 、 Z_C 的变化量; N_Δ 为 $\Delta \dot{E}_{i,i+1}$ 和 $\Delta Z_{C_i,i+1}$ 的序列长度; $\overline{\Delta \dot{E}}$ 和 $\overline{\Delta Z_C}$ 分别为 $\Delta \dot{E}_{i,i+1}$ 和 $\Delta Z_{C_i,i+1}$ 的均值。

由此可见,协方差估计值中隐含了对均值 $\overline{\Delta \dot{E}}$ 和 $\overline{\Delta Z_C}$ 的估计。实际系统中,时间窗越长,均值发生变化的可能性越大,误差就会增大。该问题的特点是可以利用样本获取到负荷侧的信息,当系统侧波动和负荷侧波动不相关时,可以利用样本中的负荷侧信息对样本进行处理。因此可以利用样本的 \dot{U} 和 \dot{I} 得到该样本的 Z_C 计算值,进而对样本进行分

层,依照分层统计思想,通过分层估计方法计算 Z_S ,可以更加充分地利用样本信息,针对性地计算系统侧的波动特性,提高计算精度。

2 基于分层估计的戴维南等值阻抗计算方法

2.1 利用 Z_C 样本分层的戴维南等值阻抗计算方法

假设负荷等值阻抗 Z_C 和系统戴维南等值电势 \dot{E} 分别服从均值为 Z_{C_0} 和均值为 \dot{E}_0 的随机分布。

在时间 T 内,采样 N 个电压 \dot{U}_i 和电流 \dot{I}_i 样本,构成样本集合 $S = \{(\dot{U}_1, \dot{I}_1), \dots, (\dot{U}_i, \dot{I}_i), \dots, (\dot{U}_N, \dot{I}_N)\}$ 。

对于每一个采样时刻 $i(i=1, 2, \dots, N)$ 有

$$\dot{E}_i = \dot{I}_i Z_S + \dot{I}_i Z_{C_i} \quad (9)$$

$$Z_{C_i} = \dot{U}_i / \dot{I}_i \quad (10)$$

对于分布均值 \dot{E}_0 、 Z_{C_0} 有

$$\dot{E}_0 = \dot{I}_0 Z_S + \dot{I}_0 Z_{C_0} \quad (11)$$

式中, \dot{I}_0 为分布均值 \dot{E}_0 、 Z_{C_0} 对应的节点电流相量,需要通过样本进行估计。

负荷等值阻抗均值 Z_{C_0} 的无偏估计为

$$\hat{Z}_{C_0} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_{C_i} \quad (12)$$

下面通过 Z_{C_i} 的不同取值对样本进行分层处理。将式(9)的系统等值电势分解为均值和波动量。

$$\dot{E}_0 + \Delta \dot{E}_i = \dot{I}_i Z_S + \dot{I}_i Z_{C_i} \quad (13)$$

式中, $\Delta \dot{E}_i$ 为随机变量。

将 $Z_{C_i} = \hat{Z}_{C_0} + \Delta \hat{Z}_{C_i}$ 和式(11)代入式(13),得到

$$\Delta \dot{E}_i = \dot{I}_i \Delta \hat{Z}_{C_i} + \dot{I}_i (Z_S + \hat{Z}_{C_0}) - \dot{I}_0 (Z_S + \hat{Z}_{C_0}) \quad (14)$$

由于 \dot{E} 、 Z_C 相互独立,按一定规则选择特定 Z_C 的样本时,式(14)左侧依然为随机变量,将各个样本对应的式(14)进行求和,左侧应接近于 0。为此,提出采用 Z_{C_i} 进行样本分层,使得每一层样本都能利用式(14)左侧的随机性。下面给出一种分层指标。

在样本集 S 中,按照 $\Delta \hat{Z}_{C_i}$ 的虚部是否小于零将 $[\dot{U}, \dot{I}]$ 样本集合分为两层,一层为 $\Delta \hat{Z}_{C_i}$ 的虚部小于零,另一层为 $\Delta \hat{Z}_{C_i}$ 的虚部不小于零。以 $\Delta \hat{Z}_{C_i}$ 的虚部小于零的部分样本为例说明计算方法。取该部分样本集合为 $S_1 = \{(\dot{U}_j, \dot{I}_j) | \text{Im}(\Delta \hat{Z}_{C_j}) < 0\}$, 样本数为 N_1 , 将其对应的式(14)累加,左侧取 0,得到

$$\sum_{j=1}^{N_1} \Delta \dot{E}_j = 0 = \sum_{j=1}^{N_1} \Delta \hat{Z}_{C_j} \dot{I}_j + (Z_S + \hat{Z}_{C_0}) \sum_{j=1}^{N_1} \dot{I}_j - N_1 \dot{I}_0 (Z_S + \hat{Z}_{C_0}) \quad (15)$$

式(15)中, 除 Z_s 和 \dot{I}_0 外, 各变量均已知。为了求解 Z_c , 需要确定 \dot{I}_0 的取值。将式(9)变形得到

$$\frac{\dot{E}_i}{Z_s + Z_{C_i}} = \dot{I}_i \quad (16)$$

由式(16)可以看出, 分子分母分别为具有均值的对称分布。两个对称分布相除得到的 \dot{I}_i 的分布并不围绕均值对称, \dot{I}_i 的均值并不等于 \dot{I}_0 。由于分母中的 Z_{C_i} 已知, 可以选择 Z_{C_i} 接近于 Z_{C_0} 的一部分样本, 这部分的 \dot{I}_i 的均值更接近于 \dot{I}_0 。取这部分样本集合为 $S_{I_0} = \{(\dot{U}_i, \dot{I}_i) | Z_{C_i} - Z_{C_0} < \varepsilon_{I_0}\}$, 样本数为 N_{I_0} , ε_{I_0} 为选定的临近 Z_{C_0} 的范围。这一部分的 \dot{I}_i 近似于对称分布, 可得 $\hat{\dot{I}}_0$ 为

$$\hat{\dot{I}}_0 = \frac{1}{N_{I_0}} \sum_{i=1}^{N_{I_0}} \dot{I}_i \quad (17)$$

特别地, 在误差要求较宽时, 可以取全部样本进行计算。

得到 $\hat{\dot{I}}_0$ 后, 取电流相量的变化量为 $\Delta \hat{\dot{I}}_i = \dot{I}_i - \hat{\dot{I}}_0$ 。可以得到式(15)的计算结果为

$$\hat{Z}_s = -\frac{\sum_{j=1}^{N_1} \Delta \hat{Z}_{C_j} \dot{I}_j}{\sum_{j=1}^{N_1} \Delta \hat{\dot{I}}_j} - \hat{Z}_{C_0} \quad (18)$$

因此, 可以得到一个计算值, 由 $\Delta \hat{Z}_c$ 的虚部不小于零的部分样本可以得到根据虚部分层的第二个计算值。由于样本随机分布, 两部分样本的数量相近, 将两个计算值取平均, 即为合理的 Z_s 。

为了提高样本数据的利用率和计算结果的准确性, 按照 $\Delta \hat{Z}_c$ 的实部是否小于零将 $[\dot{U}, \dot{I}]$ 样本集合重新分层, 得到两个 Z_s 计算值。由于样本对称分布, 各层内的样本数量相近, 取所有 Z_s 计算值的平均值作为最终计算结果。

2.2 戴维南等值阻抗波动时的误差分析

以上基于 Z_s 不变的情况, 实际上假设 \dot{E} 或 Z_s 不发生波动都是不合理的。因此, 有必要讨论 Z_s 波动下本文方法的计算误差。

假设负荷等值阻抗 Z_s 服从均值为 Z_{S_0} 的随机分布, 式(14)的 Z_s 替换为 $Z_{S_i} = Z_{S_0} + \Delta Z_{S_i}$, 可得

$$\Delta \dot{E}_i = \dot{I}_i \Delta \hat{Z}_{C_i} + (\dot{I}_i - \dot{I}_0)(Z_{S_0} + \hat{Z}_{C_0}) + \dot{I}_i \Delta Z_s - \dot{I}_0 \Delta Z_s \quad (19)$$

式(19)中的 $\Delta \dot{E}_i$ 为随机变量, 同样采用 2.1 节中分层处理样本的思想, 根据 $\Delta \hat{Z}_{C_i}$ 选择特定样本, 将

各样本对应的式(19)进行累加, 可得

$$0 = \sum_{j=1}^{N_1} \Delta \hat{Z}_{C_j} \dot{I}_j + (Z_{S_0} + \hat{Z}_{C_0}) \sum_{j=1}^{N_1} \dot{I}_j - N_1 \dot{I}_0 (Z_{S_0} + \hat{Z}_{C_0}) + \sum_{j=1}^{N_1} (\dot{I}_j - \dot{I}_0) \Delta Z_{S_j} \quad (20)$$

采用 2.1 节中计算 $\hat{\dot{I}}_0$ 的方法, 此时计算结果为

$$\hat{Z}_{S_0} = -\frac{\sum_{j=1}^{N_1} \Delta \hat{Z}_{C_j} \dot{I}_j}{\sum_{j=1}^{N_1} \Delta \hat{\dot{I}}_j} - \frac{\sum_{j=1}^{N_1} \Delta \hat{\dot{I}}_j \Delta Z_{S_j}}{\sum_{j=1}^{N_1} \Delta \hat{\dot{I}}_j} - \hat{Z}_{C_0} \quad (21)$$

当 Z_s 不波动时, 式(21)第二项为 0, 计算结果即为式(18)。当 Z_s 波动时, 误差来源于式(21)第二项。此项幅值始终小于 ΔZ_{S_j} 的最大值, 所以波动产生的 Z_{S_0} 误差不大于 Z_s 的波动幅度。因此, 本文方法能够有效克服系统等值阻抗的波动影响。

2.3 戴维南等值阻抗在线计算的应用

电流速断保护的整定目标是瞬时切除本线路中的相间短路故障, 因此为避免下级线路故障时发生误动, 按躲开本级线路末端的最大三相短路电流进行整定, 其定值 I'_{act} 的整定公式为

$$I'_{act} = K'_{rel} \frac{E}{Z_{S.min} + Z_{line}} \quad (22)$$

式中: E 为系统电源电势, 通常取 1.0 p.u.; $Z_{S.min}$ 为系统电源的最小等值阻抗; Z_{line} 为线路的阻抗; K'_{rel} 为速断保护的可靠系数, 一般取 1.2~1.3。

按式(22)离线整定的定值能够保证各种运行方式下都不误动。此外还需对定值进行灵敏性校验, 在最小运行方式下, 即系统等值阻抗为 $Z_{S.max}$ 时的两相短路情况进行保护范围校验, 校验公式为

$$I'_{act} = 0.866 \frac{E}{Z_{S.max} + x\% Z_{line}} \quad (23)$$

式中: $Z_{S.max}$ 为系统最大等值阻抗; x 为保护范围, 要求保护范围大于被保护线路全长的 15%~20%。因此, 当 Z_s 的最大值和最小值相差较大时, 会出现保护范围过小甚至没有保护范围的情况, 离线整定有可能没有合适的定值。

联立式(22)、式(23), 取可靠系数为 1.25, 求出保护范围的计算公式为

$$x\% = 0.69 - \frac{Z_{S.max} - 0.69 Z_{S.min}}{Z_{line}} \quad (24)$$

由式(24)可知, 影响保护范围的两个原因为系统最大、最小等值阻抗差距太大, 以及线路阻抗值

过小。而采用本文方法在线计算系统电源等值阻抗时，式(24)中的最大、最小系统等值阻抗均为同一个 Z_s ，因此避免了系统最大、最小等值阻抗差距太大引起的保护范围缩小问题。更进一步地，在被保护线路阻抗已知的情况下，在线计算得到系统等值阻抗，就能判断保护定值是否满足最小保护范围要求。因此，电流速断保护在线整定，不仅能减少离线整定难以获得定值的情况，且能可靠降低电流保护定值，使得保护范围扩大，保护性能得到有效提高^[27]。

3 等值阻抗计算方法验证

3.1 系统戴维南等值电势波动下对样本数量的要求

本文方法基于参数估计，根据样本得出的计算值随样本数量的增加收敛于真实值，所以计算误差随着样本数量的增大而减小，因此有必要分析样本数量对本文方法计算误差的影响。

仿真模型如图 1 所示，模型参数参照文献[22]： $Z_s = (3 + j4)\Omega$ ， \dot{E} 幅值的均值为 120 V， Z_c 的均值为 $(15 + j12)\Omega$ ， Z_c 以 $\pm 5\%$ 幅度随机波动， \dot{E} 以 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 2\%$ 两个幅度随机波动。由于波动随机出现，每种实验重复 60 次，取最大误差与平均误差作为对比指标。本文方法与其他方法的实验结果如表 1 和表 2 所示，其中，方法 1 为 1.2 节的第二种方法，方法 2 为 1.1 节基于数值关系假设的最小二乘法。

表 1 \dot{E} 以 $\pm 0.5\%$ 幅度随机波动下的 $|Z_s|$ 计算误差

Table 1 $|Z_s|$ calculation errors when \dot{E} changes randomly with $\pm 0.5\%$ amplitude

采样数量	$ Z_s $ 计算最大误差/%			$ Z_s $ 计算平均误差/%		
	本文方法	方法 1	方法 2	本文方法	方法 1	方法 2
20	20.93	25.10	24.30	5.33	10.59	11.24
40	8.44	9.84	21.73	2.54	5.63	11.15
80	5.93	8.39	18.26	1.64	3.90	8.56
120	5.07	7.17	16.00	1.19	2.17	8.02
240	2.54	4.33	14.53	0.80	1.46	6.84
480	1.20	2.27	9.73	0.45	0.55	6.89

表 2 \dot{E} 以 $\pm 2\%$ 幅度随机波动下的 $|Z_s|$ 计算误差

Table 2 $|Z_s|$ calculation errors when \dot{E} changes randomly with $\pm 2\%$ amplitude

采样数量	$ Z_s $ 计算最大误差/%			$ Z_s $ 计算平均误差/%		
	本文方法	方法 1	方法 2	本文方法	方法 1	方法 2
20	71.23	82.32	97.78	19.31	30.46	60.94
40	61.79	76.02	91.84	13.60	27.95	68.27
80	22.65	54.23	99.05	7.88	20.58	71.31
120	22.29	42.87	97.91	5.12	15.83	73.44
240	12.97	35.21	98.27	3.34	8.49	77.27
480	9.57	25.67	98.44	2.05	6.44	79.16

从表 1、表 2 可知，方法 2 呈现出有偏性，当 \dot{E} 以 $\pm 0.5\%$ 波动时，方法 2 的结果偏离真实值最多，而以 $\pm 2\%$ 波动时，方法 2 已经失效，无法给出合理的计算值^[9]。这与数值假设方法无法适应系统参数波动的分析结论一致。

本文方法和方法 1 的误差都随着样本数量的增加而减小，并且呈现无偏性。在同等 \dot{E} 波动幅度和同等样本数量的情况下，本文方法误差显著优于方法 1。当 \dot{E} 以 $\pm 0.5\%$ 波动时，本文方法采用 120 个样本的计算误差在可以接受的范围内；当样本数量少于 120 个时，只有本文方法能够有效计算出结果，而方法 1 的计算误差幅度较大。当 \dot{E} 以 $\pm 2\%$ 波动时，本文方法采用 120 个样本已达到方法 1 采用 480 个样本的计算效果。因此，与直接利用协方差最小构建表达式的方法 1 相比，本文方法具有对样本数量要求低的优势，也就是总采样时间更短，使其能够在系统参数连续变化情况下依然具有较好的戴维南等值阻抗估算能力。在实际系统中，可以根据系统波动情况选取合适的样本数量。

3.2 系统戴维南等值参数波动下计算方法的验证

研究系统戴维南等值参数 \dot{E} 和 Z_s 的波动对计算结果的影响，需先研究因 \dot{E} 波动带来的误差。设置 \dot{E} 以 5 种幅度随机波动，其余模型参数不变，每种实验重复 60 次，同样取最大误差与平均误差作为对比指标。其中，本文方法和方法 1 均采用 480 个样本。实验结果如表 3 所示。整体来看，随着 \dot{E} 波动幅度的增大，两种方法计算结果的最大误差和平均误差都明显增大，但方法 1 误差增长速度更快，说明本文方法根据样本的 Z_c 进行样本分层，可以利用 \dot{E} 的分布特性，能更有效地避免 \dot{E} 波动的影响，在各种波动幅度内都能获得较好的计算结果。

表 3 \dot{E} 以不同幅度随机波动下的 $|Z_s|$ 计算误差

Table 3 $|Z_s|$ calculation errors when \dot{E} changes randomly with different degrees of fluctuation

\dot{E} 波动幅度/%	$ Z_s $ 计算最大误差/%		$ Z_s $ 计算平均误差/%	
	本文方法	方法 1	本文方法	方法 1
0.2	0.58	0.92	0.20	0.29
0.6	3.01	3.45	0.61	0.66
1.0	5.44	15.05	1.01	3.43
3.0	11.78	38.32	2.93	10.13
5.0	22.95	58.46	5.37	16.80

为了更直观地对比 \dot{E} 的波动对本文方法计算结果的影响，选择 3 种 \dot{E} 的波动幅度绘制出如图 2 所示的计算结果分布直方图。可以看到，在各种波动情况下计算结果都随机散布于真实值附近。随着 \dot{E} 波动幅度的增大，计算值散布范围逐渐增大。当 \dot{E} 以 $\pm 0.5\%$ 幅度波动时， $|Z_s|$ 的结果只在 $\pm 2\%$ 的范围

内分布。而当 \dot{E} 以 $\pm 5\%$ 幅度波动时, $|Z_S|$ 的最大频数依然出现在 $5\ \Omega$ 附近, 但 $|Z_S|$ 的范围已经扩大到 $2.3\sim 6.2\ \Omega$ 。

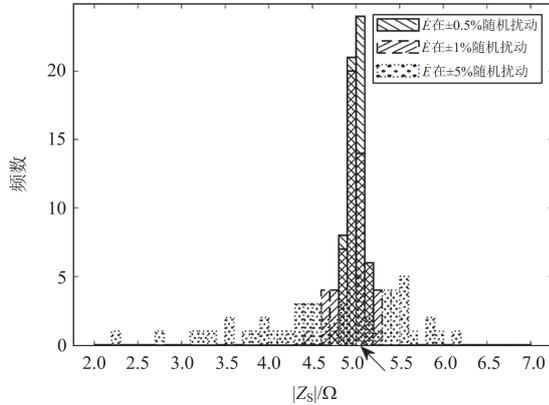


图2 以 \dot{E} 不同幅度随机波动下的计算值 $|Z_S|$ 直方图

Fig. 2 Histogram of the calculated value $|Z_S|$ when \dot{E} changes randomly with different degrees of fluctuation

在戴维南等值阻抗计算问题中, 为了给出合理的求解方法, 都需要假设 Z_S 在时间窗内保持不变或者遵从一定的数值规律。但是实际电力系统中 Z_S 与 \dot{E} 一样, 都会受到系统波动的影响, 存在一定幅度的随机波动。因此下面验证本文方法对 Z_S 波动的接受程度。

设置 \dot{E} 、 Z_S 分别以 0.5% 、 $\pm 2\%$ 、 $\pm 5\%$ 幅度随机波动, 其余参数不变, 每种波动情况设置60次重复实验。同样采用480个样本数量进行计算, 测试结果如表4所示。

表4 考虑 \dot{E} 和 Z_S 随机波动的 $|Z_S|$ 计算平均误差
Table 4 $|Z_S|$ calculation average errors considering the random fluctuation of \dot{E} and Z_S

$ Z_S $ 计算平均误差		\dot{E} 波动幅度		
		0.5	2.0	5.0
Z_S 波动幅度	0.5	0.79	1.34	2.90
	2.0	2.88	2.91	3.79
	5.0	7.21	7.10	6.84

由表4可以看出, 随着 Z_S 波动幅度的增大, 计算结果平均误差也在增大。这是由于 Z_S 是待求量, 一般假设 Z_S 不变才能计算出结果, 当 Z_S 也存在波动时, 待求量将不再等于 Z_{S0} , 所以 Z_S 波动幅度越大, 误差范围越大。并且 Z_S 波动带来的误差幅度与 Z_S 的波动幅度相当, 并没有因为 Z_S 的波动使得误差增大过于显著。当 Z_S 波动幅度较大时, \dot{E} 波动对

计算结果误差影响不大, 说明本文方法在各种 Z_S 波动下都能适应 \dot{E} 的波动, 并且能够保证计算结果的有效性。因此本文方法具有允许 Z_S 存在一定幅度波动的优势。

3.3 参数变化、突变跟踪验证

在继电保护整定场景中, 戴维南等值参数反映的是系统运行方式。电网运行时, 等值电势较为稳定, 而等值阻抗会随着设备检修、故障隔离等操作而发生较大变化, 因此设置验证 Z_S 参数跟踪情况的实验条件为: Z_S 以 $\pm 2\%$ 幅度随机波动, 按照图3中的实线进行变化, 该轨迹模拟了3次运行方式突变, 其余为运行方式渐变, 其中第三段变化幅度最大。

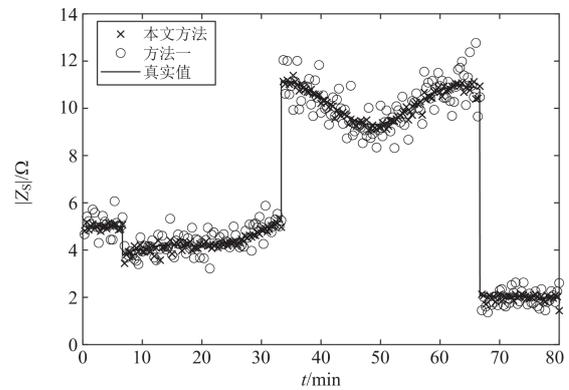


图3 计算值 $|Z_S|$ 跟踪真实值实验

Fig. 3 The calculated value $|Z_S|$ track the actual value

从图3可以看出, 当 Z_S 发生变化时, 本文方法和方法1都能够有效跟踪 Z_S 的变化, 但本文方法的计算结果在真实值上下较小范围内波动, 分布范围显著小于方法1的结果。

在线应用时, 样本数量主要由系统实际的波动幅度以及精度要求决定。由于计算时间几乎可以忽略不计, 采样时间更为重要, 由3.2节可知, 采用480个样本即可计算出较为准确的戴维南等值阻抗。目前的继电保护装置的采样频率较高, 完全满足在线采集要求, 因此本文方法能实现在线应用。

4 应用验证

4.1 应用算例情况

考虑到实际系统的戴维南等值阻抗主要受到元件投切的影响, 因此建立一个如图4所示的电网模型, 以验证本方法可应用于继电保护的在线整定。

以母线C作为电网分层分区点, 左上侧为上级35 kV电网, 左下侧为备用的另一上级电网, 右侧为所管理的配电网, 需要在C处使用本文方法估算系统戴维南等值阻抗。相关参数为: $E_1 = E_2 =$

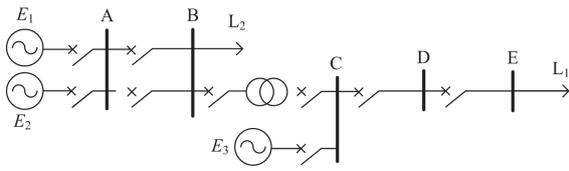


图 4 应用电网示例

Fig. 4 Application grid example

35 kV, $E_3 = 10 \text{ kV}$, $Z_1 = (1.46 + j2.02) \Omega$, $Z_2 = (2.38 + j3.52) \Omega$, $Z_3 = (2.42 + j3.26) \Omega$; 35 kV 线路参数为 $r = 0.034 \Omega/\text{km}$ 、 $x = 0.024 \Omega/\text{km}$; 10 kV 线路参数为 $r = 0.34 \Omega/\text{km}$ 、 $x = 0.33 \Omega/\text{km}$; 双回线路 AB 长度均为 15 km, CD、DE 线路长度均为 5 km, 变压器变比为 35 kV/10.5 kV, 等值阻抗为 $(4.56 + j3.24) \Omega$, 负荷等值阻抗为 $Z_{L1} = (15 + j12) \Omega$, $Z_{L2} = (12 + j9) \Omega$ 。 Z_{L1} 以 $\pm 5\%$ 幅度随机波动, 各电源电势 \dot{E} 以 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 2\%$ 两个幅度随机波动。

4.2 系统运行方式变化感知验证

在图 4 所示的系统中, 将系统电源以及不同的线路投入情况进行组合, 可以选取多种运行方式。为了验证本文方法感知系统等值阻抗的准确性, 选取表 5 中的 4 种典型系统运行方式, 其中方式一为最大运行方式, 此时除 E_3 外所有电源和线路均投入运行, 系统等值阻抗最小; 方式二在方式一的基础上切除 AB 线路中的一条; 方式三在方式二的基础上切除电源 E_2 ; 方式四为主变检修切除, 切换为另一电源 E_3 投入运行供电。针对每个典型运行方式, 考虑各电源电势 \dot{E} 和负荷 Z_{L1} 随机波动, 为提高应用性, 采用 120 个电压电流样本计算 C 处的戴维南等值阻抗, 计算结果如表 5 所示。

表 5 典型运行方式与 Z_s 值

Table 5 Typical operation mode and Z_s value

典型运行方式	系统等值阻抗/ Ω	$ Z_s $ 计算平均误差/%	
		\dot{E} 以 0.5% 波动	\dot{E} 以 2% 波动
方式一	1.49 + j1.56	1.44	5.34
方式二	1.69 + j1.69	1.36	5.12
方式三	2.12 + j2.20	1.38	5.78
方式四	2.42 + j3.26	1.28	5.66

由表 5 可知, 在各种典型运行方式下, 本文方法计算结果误差均较小, 与第 3 节得到的误差水平基本相近, 说明本文方法在研究模型和仿真系统中均能准确地计算出系统等值阻抗, 具有较好的应用前景。

4.3 在电流速断保护在线整定中的应用

本文研究结果可应用于配电网电流速断保护在

线整定。具体整定方法为: 电流速断保护的电流定值按躲过当前运行方式下末端三相短路电流计算, 再校验当前方式下两相相间短路的保护范围。而离线整定的电流定值是按躲过最大运行方式下线路末端三相短路电流计算, 然后校验该定值在最小运行方式下两相相间短路时的保护范围。各运行方式在线整定结果以及离线整定结果如表 6 所示。

表 6 典型运行方式与整定值

Table 6 Typical operation mode and setting value

典型运行方式	等值阻抗/ Ω	整定值/A	保护范围/%
方式一	1.49 + j1.56	2762.12	41.04
方式二	1.69 + j1.69	2626.62	37.72
方式三	2.12 + j2.20	2304.76	29.02
方式四	2.42 + j3.26	1950.21	15.87
离线整定	-	2762.12	-40.14

由表 6 可知, 当系统的最大、最小运行方式变化较大时, 按照离线整定方法, 无法获得各种运行方式下选择性和灵敏性都满足的定值, 因此电流速断保护需要退出运行。但是本文方法能够实时跟踪运行方式的变化, 给出当前系统等值阻抗, 进而对电流速断保护定值进行重新整定, 使得保护性能一直处于最优状态。

5 结语

戴维南等值参数计算是简化电力系统分析的一种有效手段。本文分析了目前基于数值假设的最小二乘估计方法和基于统计量的计算方法的适用情况和误差来源, 进而从统计学角度进行了数学推导, 提出了基于分层估计的戴维南等值阻抗计算方法。该方法在系统等值阻抗不发生波动的情况下, 优于已有的基于统计量的方法, 在相同的误差情况下所需样本数量更小; 当系统等值阻抗存在波动时, 该方法依然可以估算出可用的计算值。最后验证了本文方法可以应用于配电网电流速断保护的在线整定。

本文研究基于常规电源和交流电网的情况, 随着新能源电源的不断接入, 系统等值阻抗会出现新的特征, 考虑新能源接入情况下的戴维南等值阻抗计算和应用方法有待进一步研究。

参考文献

[1] 任康杰, 刘阳, 李勇, 等. 一种适用于继电保护在线整定的极小断点集求取算法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 47-52.
REN Kangjie, LIU Yang, LI Yong, et al. An algorithm to calculate the minimal break point set for relay protection

- online setting[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(14): 47-52.
- [2] RAGHVENDRA T, RAVINDRA K S, NIRAJ K C. Coordination of dual setting overcurrent relays in microgrid with optimally determined relay characteristics for dual operating modes[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2022, 7(1): 64-81.
- [3] 肖健, 甘明, 刘有志, 等. 基于量测数据的外部电网在线等值实用方法[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(2): 157-163.
XIAO Jian, GAN Ming, LIU Youzhi, et al. Practical online equivalent method for external grid based on measurement data[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(2): 157-163.
- [4] VU K, BEGOVIC M 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.
- [5] 王漪, 柳焯. 基于戴维南等值的系统参数跟踪估计[J]. *电网技术*, 2000, 24(11): 28-30.
WANG Yi, LIU Zhuo. Tracking and estimation of system parameter using Thevenin's equivalent[J]. *Power System Technology*, 2000, 24(11): 28-30.
- [6] 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.
- [7] 刘明松, 张伯明, 姚良忠, 等. 基于 PMU 和改进戴维南等值模型的电压稳定在线监视[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(10): 6-10.
LIU Mingsong, ZHANG Boming, YAO Liangzhong, et al. On-line voltage stability monitoring based on PMU and improved Thevenin equivalent model[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(10): 6-10.
- [8] 叶平峰, 韩学山, 裴佑楠, 等. 考虑源网荷关联戴维南等值的解析与辨识[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(9): 2842-2854.
YE Pingfeng, HAN Xueshan, PEI Younan, et al. Analysis and identification on the Thevenin equivalent considering the correlation of source-grid-load[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(9): 2842-2854.
- [9] ISLAM M N, ONGSAKUL W. Thevenin equivalent parameter tracking for on-line voltage stability assessment[C] // 2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies — Asia (ISGT ASIA), November 3-6, 2015, Bangkok, Thailand.
- [10] 吴亚宁, 罗毅, 周生存, 等. 计及源-荷功率波动性的静态电压稳定故障快速筛选和排序方法[J]. *中国电力*, 2022, 55(11): 29-40.
WU Yaning, LUO Yi, ZHOU Shengcun, et al. A fast static voltage stability contingency screening and ranking method considering source-load power fluctuation[J]. *Electric Power*, 2022, 55(11): 29-40.
- [11] 程军照, 林涛, 杜惠. 计及新能源出力波动性的节点状态脆弱性评估[J]. *电测与仪表*, 2021, 58(12): 118-124.
CHENG Junzhao, LIN Tao, DU Hui. The state vulnerability assessment considering the output fluctuation of renewable power supply nodes[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2021, 58(12): 118-124.
- [12] SHEN S, WANG H, HU P, et al. A nonparametric denoising approach for Thevenin equivalent parameters estimation based on taut-string-multiresolution algorithm[C] // 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 16-20, 2017, Chicago, IL, USA.
- [13] RAHMATI A, DIMASSI M A, ADHAMI R, et al. An overcurrent protection relay based on local measurements[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015, 51(3): 2081-2085.
- [14] SHEN S, DA L, WANG H, et al. An adaptive protection scheme for distribution systems with DGs based on optimized Thevenin equivalent parameters estimation[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, 32(1): 411-419.
- [15] 沈绍斐. 基于就地和区域信息的自适应保护研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
SHEN Shaofei. Research on the local and regional area information-based adaptive protection[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [16] 李媛. 基于智能电能表数据的配电网状态估计[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(4): 182-185.
LI Yuan. Distribution network state estimation based on smart meter data[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(4): 182-185.
- [17] 张江南, 雷江龙, 贺勇, 等. 基于 PMU 误差校正的输电线路参数在线辨识方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(19): 130-137.
ZHANG Jiangnan, LEI Jianglong, et al. Transmission line parameter identification method based on PMU error correction[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(19): 130-137.
- [18] 章锐, 陈树勇, 刘道伟, 等. 戴维南等值参数辨识方法综述[J]. *电网技术*, 2017, 41(1): 146-156.
ZHANG Rui, CHEN Shuyong, LIU Daowei, et al. Review of the Thevenin equivalent parameters identification

methods[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 146-156.

[19] 廖国栋, 王晓茹. 电力系统戴维南等值参数辨识的不确定模型[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 74-79. LIAO Guodong, WANG Xiaoru. Uncertain models for identification of electric power system Thevenin equivalent parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 74-79.

[20] 李东东, 刘振宇, 尹睿. 基于幂级数展开的电力系统戴维南等值参数跟踪算法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 35-41. LI Dongdong, LIU Zhenyu, YIN Rui. A tracing algorithm of Thevenin equivalent parameters for power systems based on power series expansion[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 35-41.

[21] OJAGHI M, SUDI Z, FAIZ J. Implementation of full adaptive technique to optimal coordination of overcurrent relays[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 235-244.

[22] 李卓艺, 刘俊勇, 刘友波, 等. 系统持续扰动下的电力系统戴维南等值参数在线识别[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 1900-1908. LI Zhuoyi, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. An on-line parameter identification of Thevenin equivalent circuit for power systems with persistent disturbance[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 1900-1908.

[23] SOBHY M, MORROW D J. Online Thevenin equivalent determination considering system side changes and measurement errors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2716-2725.

[24] 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.

[25] AREFIFAR S A, XU W. Online tracking of power system impedance parameters and field experiences[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 1781-1788.

[26] 刘瑶, 刘健, 张志华, 等. 评估不确定性的影响—不确定性分析[J]. 供用电, 2022, 39(9): 1-4, 26. LIU Yao, LIU Jian, ZHANG Zhihua, et al. Uncertainty analysis to evaluate the influence of uncertainty[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(9): 1-4, 26.

[27] 宋国兵, 常娜娜, 侯俊杰, 等. 基于系统电压分布曲线拟合的后备保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 95-104. SONG Guobing, CHANG Nana, HOU Junjie, et al. Backup protection scheme based on system voltage distribution using curve fitting[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 95-104.

收稿日期: 2022-10-08; 修回日期: 2023-01-05

作者简介:

张森(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新型电力系统短路电流计算、人工智能应用; E-mail: 1132435751@qq.com

王慧芳(1974—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为继电保护与控制、多模态数据挖掘、人工智能应用; E-mail: huifangwang@zju.edu.cn

叶睿恺(1992—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统数据挖掘、人工智能应用。E-mail: pokagic@zju.edu.cn

(编辑 许威)