

风电网源波动对并网点等值阻抗估计影响 及电网阻抗在线辨识

李春彦, 李少林, 王伟胜, 秦世耀, 李庆

(可再生能源并网全国重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 海淀区 100192)

Impact Analysis of Wind Power Grid and Source Fluctuations on Equivalent Impedance Estimation and Grid Impedance Online Identification

LI Chunyan, LI Shaolin, WANG Weisheng, QIN Shiyao, LI Qing

(National Key Laboratory of Renewable Energy Grid-integration (China Electric Power Research Institute),
Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: The power grid integration performance of renewable energy, such as wind power, is more sensitive to grid strength. As an important indicator of the grid strength at the wind farm point of connection, the online identification of grid Thevenin equivalent parameters is significant for stability risk assessment and control strategy optimization of the wind power integrated system. First, the principle of Thevenin equivalent impedance estimation is introduced, and the impacts of both side fluctuations on parameter estimation errors are analyzed. The principle of data screening for equivalent impedance identification and its online application is clarified. Then, a method based on data screening and impedance linear description for equivalent impedance online identification under resource side and grid side fluctuations is proposed, which can effectively overcome the problem of inaccurate equivalent parameters identification under system side fluctuations. Finally, the method is verified by simulation and field cases.

KEY WORDS: wind power; point of connection; Thevenin equivalent; impedance identification

摘要: 风电等新能源发电并网性能对电网强度较为敏感, 作为衡量新能源场站接入点电网强度的重要指标, 风电场并网点电网侧的戴维南等值阻抗在线辨识对风电稳定运行风险评估及策略优化意义重大。首先介绍了戴维南等值阻抗估计原理, 揭示了网源两侧波动对等值阻抗辨识精度的影响与变化规律, 明确了实现等值阻抗准确辨识及在线应用的波动数据筛选原则。在此基础上, 设计了测量点电压相量和功率波动信息相融合的数据筛选指标, 提出了网源数据波动特征筛选与等值阻抗线性关系描述相结合的电网友抗的在线辨识方法, 有效克服了复杂网源条件下等值阻抗辨识误差大的问

题。最后通过仿真和现场实测数据证明了理论分析与所提方法的准确性与有效性。

关键词: 风电; 并网点; 戴维南等值; 阻抗辨识

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2222

0 引言

近年来我国新能源发展迅猛, 受资源禀赋影响, 大规模新能源发电基地多处于电网末端, 逐渐形成了高比例新能源接入弱电网的运行场景。由于新能源的低抗扰、弱惯性和弱支撑性^[1-3], 含高比例新能源电力系统安全稳定运行面临极大挑战, 并网稳定事故时有发生^[4]。新能源接入系统的并网稳定运行能力与电网强度密切相关^[5-7], 文献[8]提出了一种基于电网强度的新能源并网变流器跟/构网双模式切换策略。文献[9]提出了一种根据电网强度优化调整新能源控制策略及参数的方法。作为衡量新能源场站接入点电网强度的重要指标^[10-11], 开展电网侧戴维南等值阻抗的评估方法研究对保障高比例新能源接入系统的安全稳定运行意义重大。

当前, 电力系统戴维南等值阻抗已经被广泛应用于电力系统短路电流计算^[12]、继电保护在线整定和电压稳定性监测^[13-16]等场景。随着同步相量测量技术在电力系统的广泛应用, 一些基于本地相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)量测信息的系统等值阻抗估计的方法被提出, 最小二乘估计、优化技术被广泛应用于等值阻抗计算^[17-19]。文献[20]利用递归最小二乘方法进行等效电路谐波戴维南阻抗的在线辨识, 可同时得到等值谐波阻抗和等值谐波电压。文献[21]提出了一种考虑电网相角变化

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4202303)。

This Work was Supported by the National Key Research and Development Program of China under Grant 2022YFB4202303.

的改进戴维南等值模型,利用 PMU 量测数据计算系统戴维南等值阻抗用于电压稳定在线监视。文献[22]为避免频率波动导致数据同步测量困难引发的计算误差,提出了一种测量数据相位矫正的方法,通过本地 PMU 测量数据进行戴维南等效阻抗在线辨识,可以提高频率变化情况下的戴维南等效阻抗在线计算精度。综上所述,以上这类戴维南等效阻抗辨识方法需要采集多个时间断面的测量信息进行戴维南等值阻抗参数计算,适用的前提是网侧在多个时间断面不存在波动或者仅存在很小的波动,具有较大的应用局限性,难以实际工程应用。

为解决多时间断面内网侧波动给戴维南等值阻抗辨识带来的问题,国内外学者做了一些积极有益的尝试。文献[23]提出了一种基于单时间断面信息的戴维南等值参数跟踪方法,该方法可适用于大扰动情况下的等值参数计算,但参数迭代计算需要依赖于初值。文献[24]提出了一种基于泰勒展开的戴维南等值参数计算方法,该方法使用递推进行等值参数计算,可解决系统波动带来的戴维南等值阻抗参数漂移问题,但该方法含有泰勒展开高阶项,计算量大,且同样依赖初值。此外,一些统计分析的方法被探索应用^[25-27]。文献[28]认为负荷侧和电网侧波动是不相关的,并在此基础上将戴维南参数识别问题转化为优化问题进行电网持续扰动下戴维南等值参数的在线识别。但在新能源接入场景下源网两侧的波动是否独立不相关还有待考证,该方法是否适用还有待验证。

网侧波动会给电网戴维南等效阻抗的准确辨识带来不良影响已成为共识,但新能源具有随机波动性,新能源高比例接入系统不可避免地存在网源双重波动,给其接入点等效阻抗辨识带来极大困难。源侧和网侧波动特性不同、对系统等效阻抗的影响机制不同^[29],为准确获取网源双重波动下的电网等值阻抗,应深入研究网源波动程度对阻抗估计精度的影响及变化规律,并在此基础上提出简便实用的新能源并网点电网阻抗在线辨识方法,以满足工程应用需求。

针对以上问题与不足,本文首先介绍了戴维南等值阻抗估计原理和方法,揭示了不同程度网源波动对电网戴维南等值参数辨识误差的影响及变化规律,明晰了实现等值阻抗准确辨识及在线应用的波动数据筛选原则;在此基础上,设计了测量点电压相量和功率波动率相融合的数据筛选指标,提出了数据波动特征筛选与等值阻抗线性关系描述相结合的电网友抗的在线辨识方法;最后,通过仿真

和现场实测数据证明此方法可有效克服由网侧波动引起的戴维南等值阻抗无法准确辨识的难题,能够在电网等效电动势存在 10% 以内的幅值波动情况下准确辨识电网阻抗,阻抗模值最大辨识误差可控制在 2% 以内。

1 戴维南等值电路及参数辨识方法

1.1 戴维南等值基本原理

在新能源场站并网点对源侧和电网侧分别进行戴维南等效,等效电路如图 1 所示。

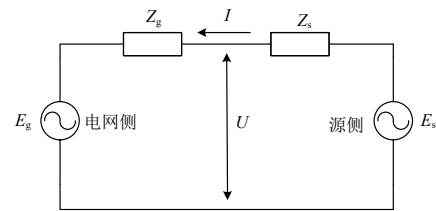


图 1 戴维南等值电路

Fig. 1 Thevenin equivalent circuit

对于新能源场站并网点任意时刻的测量值 I_i 和 U_i , 下列表达式成立:

$$U_i = E_g + Z_g I_i \quad (1)$$

$$U_i = E_s - Z_s I_i \quad (2)$$

式中: I_i 为并网点在测量时刻 i 的电流相量; U_i 为并网点在测量时刻 i 的电压相量; E_g 和 Z_g 分别为网侧的戴维南等效电动势相量和戴维南等效阻抗; E_s 和 Z_s 分别为源侧的戴维南等效电动势相量和戴维南等效阻抗。

假设网侧戴维南等效电动势 E_g 和等效阻抗 Z_g 在进行参数辨识的时间段内不发生变化,则基于不同时刻的并网点量测数据 (I_1, U_1) 和 (I_2, U_2) , 基于式(1), 网侧等效电动势和阻抗的估计值可表示为

$$\hat{Z}_g = \frac{U_2 - U_1}{I_2 - I_1} \quad (3)$$

$$\hat{E}_g = \frac{U_1 I_2 - U_2 I_1}{I_2 - I_1} \quad (4)$$

类似地,如果源侧戴维南等效电动势 E_s 和等效阻抗 Z_s 在参数辨识期间不发生变化,则由式(2)可得到:

$$\hat{Z}_s = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2} \quad (5)$$

$$\hat{E}_s = \frac{U_1 I_2 - U_2 I_1}{I_2 - I_1} \quad (6)$$

基于上述分析可知,利用并网点多时间断面的电压电流测量信息进行戴维南等效阻抗辨识,在网侧不变但源侧波动场景下得到的是网侧阻抗,而在源侧不变但网侧波动场景下得到的却是源侧阻抗。

网源双重波动给戴维南等值阻抗辨识带来的影响和其变化规律将在本文第2节进行分析。

1.2 戴维南等值参数辨识方法

为避免实际应用中由于测量点频率波动造成的电压电流测量相量的相角漂移^[22]，本文使用测量点电压电流相量幅值和功率来进行戴维南等效阻抗的在线辨识^[29]。

对于并网点的任意测量电压相量 \dot{U} 和电流相量 \dot{I} ，式(1)可以表示为图2所示的相量图。

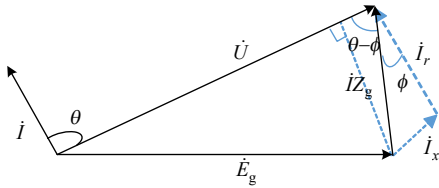


图2 并网点电压电流矢量图

Fig. 2 Phasor measurement of voltage and current at point of connection

图2中， Z_g 代表并网点网侧戴维南等效阻抗， r 和 x 分别为 Z_g 所代表的电阻和电抗，即 Z_g 的实部和虚部， θ 代表电流相量与电压相量的夹角， ϕ 代表电流相量 \dot{I} 与相量 $\dot{I}Z_g$ 的夹角。根据图2所示的几何关系，可以得到下面的等式：

$$\dot{E}_g^2 = (\dot{U} - \dot{I}Z_g \cos(\theta - \phi))^2 + (\dot{I}Z_g \sin(\theta - \phi))^2 \quad (7)$$

对式(7)进行展开可得：

$$\dot{E}_g^2 = \dot{U}^2 + \dot{I}^2 Z_g^2 - 2Pr - 2Qx \quad (8)$$

式中 P 和 Q 分别为测量点的有功功率和无功功率。

对于3个不同时刻的测量数据，则有：

$$\begin{aligned} & (U_1^2 - U_2^2)(I_2^2 - I_3^2) - (U_2^2 - U_3^2)(I_1^2 - I_2^2) - \\ & 2((P_1 - P_2)(I_2^2 - I_3^2) - (P_2 - P_3)(I_1^2 - I_2^2))r - \\ & 2((Q_1 - Q_2)(I_2^2 - I_3^2) - (Q_2 - Q_3)(I_1^2 - I_2^2))x = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)可改写成以下一般描述：

$$A - 2Br - 2Cx = 0 \quad (10)$$

其中：

$$\begin{aligned} A &= \det \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ U_1^2 & U_2^2 & U_3^2 \\ I_1^2 & I_2^2 & I_3^2 \end{bmatrix}, B = \det \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ P_1 & P_2 & P_3 \\ I_1^2 & I_2^2 & I_3^2 \end{bmatrix}, \\ C &= \det \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ Q_1 & Q_2 & Q_3 \\ I_1^2 & I_2^2 & I_3^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可知，每3个测量点可以确定一条代表戴维南等效参数 r 和 x 之间关系的直线。理论上，任意2条由式(10)确定的不同直线交点即等效戴维南阻抗参数的解。可以证明，可行解的个数 N_z 和测量点的个数 N 存在以下关系：

$$N_z = \frac{N(N-1)(N-2)(N(N-1)(N-2)-6)}{72} \quad (12)$$

由于进行一次戴维南等效参数辨识利用的测量点 N 越多，电网侧变化的可能性越大，在实际工程应用中， N 取值为4或者5比较合适。

对于任意的由 $\{A, B, C\}_i$ 和 $\{A, B, C\}_k$ ， $i \neq k$ ，构成的2条直线，由式(10)可得：

$$r = \frac{A_i C_k - A_k C_i}{2(B_i C_k - B_k C_i)}, x = \frac{A_k B_i - A_i B_k}{2(B_i C_k - B_k C_i)} \quad (13)$$

从数学的角度直观分析，戴维南等效参数 r 和 x 能够准确计算的前提是 $A_i, A_k, B_i, B_k, C_i, C_k$ 均不为0，且 $|B_i C_k - B_k C_i|$ 也不能为0或者很小。为更好地筛选出能准确辨识戴维南等效参数 r 和 x 的数据对，可设定一个阈值 S_{th} ，当 $|B_i C_k - B_k C_i| > S_{th}$ 时，选取此对数据进行戴维南等效参数 r 和 x 的辨识，反之，则认为此对数据无效。

2 网源波动对等值阻抗参数辨识影响分析

戴维南等值电路参数辨识方法适用的前提条件是网侧戴维南等效电动势 E_g 和等效阻抗 Z_g 不发生变化，但这在实际系统中显然无法保证完全成立。为探明戴维南等值参数辨识方法的适用场景，了解网源双侧波动对等值阻抗参数辨识精度的影响，本节开展网源波动对阻抗辨识的影响分析。

2.1 场景介绍

在MATLAB/Simulink中搭建一个风电场接入等效外部电网的仿真模型，风电场额定容量为75 MW，并网点电压等级为110 kV，采用多机等值模型。源侧使用3组不同的风速，其中一组为恒定风速加上均值为0、方差为 5×10^{-4} pu的随机扰动信号，另外2组风速选用现场实际测量风速，其中一组风速变化较小，波动区间为[7.67, 8.92] m/s，另外一组变化较大，波动区间为[7.29, 11.74] m/s，3组风速曲线如图3所示。为模拟电网波动，在网侧戴维南等值电动势 E_g 上添加均值为0，方差分别为 $[1 \times 10^{-4}, 5 \times 10^{-4}, 1 \times 10^{-3}]$ pu的服从正态分布的噪声

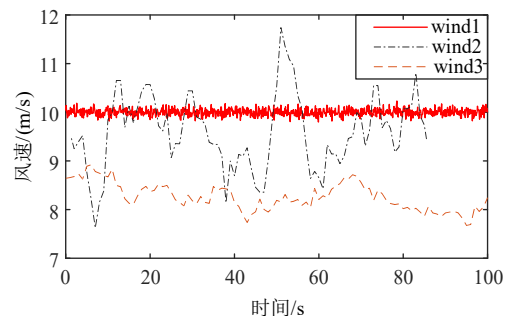


图3 3组风速变化曲线

Fig. 3 Three groups of wind speed curve

信号。为验证电网强度变化对戴维南等效阻抗辨识精度的影响，分别根据短路容量 1000 MVA 和 300 MVA 设置电网等效阻抗。

基于上述分析，在每个短路容量下，3 组不同风速和 3 组不同网侧戴维南等效电动势共存在 9 个不同的仿真场景，如表 1 所示。

源侧风速	网侧噪声方差		
	1×10^{-4}	5×10^{-4}	1×10^{-3}
wind1	case1	case2	case3
wind2	case4	case5	case6
wind3	case7	case8	case9

2.2 影响分析

图 4(a)–(c)用箱线图给出了系统短路容量为 1000 MW 时，不同场景下电网电阻、电抗及阻抗的辨识结果分布情况箱线图，其中蓝色箱子的底边和顶边分别为辨识结果的第 25 和 75 百分位数，红色横线为中位数。可以看出，case1–3 场景下电网阻抗的辨识误差较大，阻抗模值辨识误差最高可达 36.55%，此种场景下源侧和网侧均只施加了噪声信号，网源两侧波动水平基本相当。对比 case 4–6 和 7–9 的阻抗辨识结果，虽然电阻、感抗和阻抗的辨识误差相差不大，但从辨识结果分布情况来看，在风速变化较为明显的场景下，电网阻抗辨识值的分布较为集中，即源侧波动越明显越有利于电网阻抗的辨识。

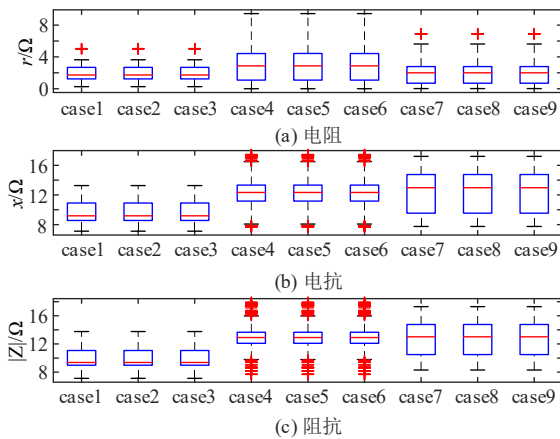


图 4 短路容量为 1000MW 时不同场景下的阻抗辨识值
Fig. 4 Impedance values identified in scenarios when system short circuit capacity is 1000MW

图 5(a)–(c)分别为系统短路容量为 300 MW 不同场景下电网电阻、电抗和阻抗的辨识结果分布情况箱线图，箱线图符号含义与图 4 一致。与图 4 的结论类似，图 5 也证实了网源波动水平相当的情况下，阻抗辨识误差较大。同时由于短路容量较小，较大的风速波动引起的并网点的电压波动越明显，

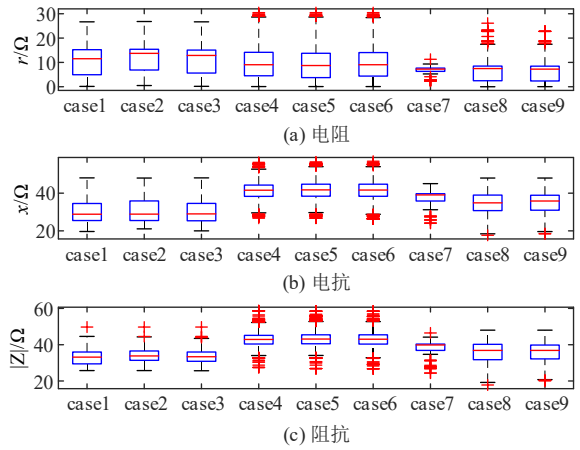


图 5 短路容量为 300MW 时不同场景下的阻抗辨识值
Fig. 5 Impedance values identified in scenarios when system short circuit capacity is 300MW

对比图 5 中 case 4–6 与 7–9 的阻抗辨识结果，可明显看出在相同的网侧波动下，源侧波动越大，阻抗辨识的误差越小。

表 2 给出了不同短路容量和场景下，由阻抗估计值分布的中位数计算的阻抗测量误差。对比短路容量为 1000 MVA 与 300 MVA 在 case 7–9 的阻抗辨识误差可知，电网越弱，实际风速变化不大的情况下阻抗辨识误差越大，电网阻抗越难辨识。

场景	1000 MVA (阻抗真值: 1.44+j14.40)		300 MVA (阻抗真值: 4.80+j48.00)	
	辨识值	Z 辨识误差/%	辨识值	Z 辨识误差/%
	case1	1.73+j9.19	35.24	11.52+j28.85
case2	1.73+j9.19	35.24	13.71+j28.86	29.90
case3	1.73+j9.19	35.24	12.85+j29.00	30.82
case4	2.88+j12.33	10.79	9.03+j41.49	11.10
case5	2.89+j12.34	10.79	8.72+j41.75	10.54
case6	2.88+j12.33	10.79	9.03+j41.67	10.84
case7	2.01+j12.98	10.06	7.25+j39.07	17.36
case8	2.01+j12.98	10.06	7.45+j34.87	23.62
case9	2.01+j12.98	10.06	7.23+j35.85	23.62

对比分析表 2 可知，大部分工况下网侧波动变化情况下阻抗辨识误差基本不变，考虑仿真场景中网侧添加的是服从正态分布的扰动信号，虽然不同场景下扰动信号的方差不同，但都存在扰动幅值较小的点。图 6 给出了不同场景下落在箱线图内的数据个数，其中 case X-1 表示短路容量为 1000 MVA 时不同场景下的数据点个数，case X-2 则代表短路容量为 300 时不同场景下的数据点个数，X 表示表 1 中列出的不同场景。

由图 6 可知，系统短路容量越小，同一场景下有效数据越多，这是因为相同的风速波动情况下电网越弱则引发并网点的电压、电流波动越大，导致

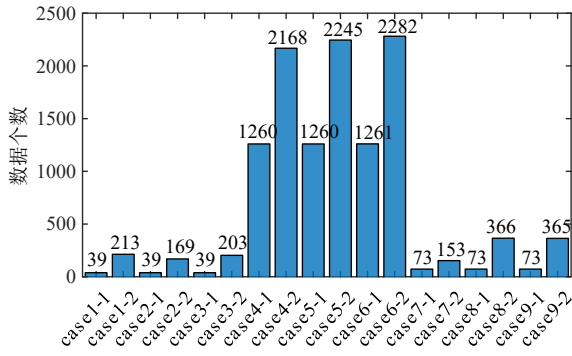


图6 不同场景下的阻抗辨识算法筛选出的统计点
Fig. 6 Selected points in different scenarios for impedance identification

在同一筛选阈值下符合条件的数据点越多。在同一短路容量下，不同程度网侧等效电动势随机波动情况下筛选出的数据点个数基本相同，基于文中仿真场景，在网侧等效电动势上施加的正态分布噪声的最大方差 δ^2 为 1×10^{-3} pu，根据正态分布的“ 3δ ”原则，网侧等效电动势最大的波动范围约为 $\pm 10\%$ ，说明网侧等效电动势在 $\pm 10\%$ 以内的波动基本不会影响数据筛选后阻抗辨识方法的估算精度。

基于以上仿真场景和阻抗辨识值计算精度和分布情况分析，可以总结出以下结论：1) 源侧资源波动越明显，对电网戴维南等效阻抗的辨识越有利；2) 对比表2中同一短路容量下case1—3与case4—9的阻抗辨识结果和数据筛选个数可知，当源侧波动和网侧波动处于同一水平时，阻抗辨识可用的有效点较少且辨识误差明显增大，上述数据筛选方法无法判断并网点的波动是由源侧引起还是网侧引起；3) 对比分析表2中不同短路容量下case7—9的阻抗辨识结果可知，并网点的短路容量越小，虽然在相同的筛选阈值下筛选出的有效的阻抗估计值较多，但在源侧波动风速波动较小的情况下，阻抗辨识精度可能会下降。

3 数据筛选方法与指标设计

通过第2节的影响分析可知，电网戴维南等值阻抗辨识的关键是筛选出网侧波动不大但源侧资源波动较大的数据，第1节介绍的通过 S_{th} 阈值筛选的方法虽然可筛选出某些无效的数据点，但留下的数据对之间的波动是由源侧资源波动引起还是网侧波动引起无从判断，给戴维南等效参数的辨识带来不利的影 响。本节提出一种基于测量点电压波动阈值和功率波动率相融合的数据筛选方法，筛选出测量电压波动不明显但功率存在明显波动的数据，从而保证戴维南等值参数辨识的准确度。

由于电网波动在并网点主要体现在电压波动

上，本文将参考离群值检测的相关原理，基于并网点电压数据的标准差系数来进行数据筛选。标准差系数用来度量测量点电压相量的差异及离散程度，是反映测量数据变化程度的重要指标。对于一组测量点的电压相量幅值，样本的均值 \bar{E} 和标准差 σ 及标准差系数 c_v 可用式(14)表示：

$$\bar{E} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i, \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2}{N-1}}, \quad c_v = \frac{\sigma}{\bar{E}} \quad (14)$$

设定一个波动阈值 k ， $0 < k < c_v$ ，如果某一测量点的电压相量 U_i 满足式(15)，则认为电压波动不明显，该数据可以用来进行电网戴维南等效参数辨识，否则，从样本中剔除。

$$U_i \in [\bar{E} - k\sigma\bar{E}, \bar{E} + k\sigma\bar{E}] \quad (15)$$

一般地， k 值可通过测量点电压波动程度的概率分布来确定，一般可取值为 $0.5c_v \sim 0.8c_v$ 。

参考功率波动率(记为 μ_{FLp})的定义^[30]，定义电压波动率(记为 μ_{FLc})为

$$\mu_{FLc} = \frac{|U_2 - U_1|}{|U_1|} \quad (16)$$

图7给出了某在运风电场并网点的现场量测电压和功率波动率的累积概率分布，可以看出：此刻风电场并网点的电压波动在0.1%以内的累积概率大于70%，而功率波动率在0.8%以内的累积概率可达90%。通过计算可知电压波动率和功率波动率的Pearson相关系数为-0.0097，基本不具备相关性。因此可以分别利用电压波动和功率波动来筛选出电网侧波动较小和风电场侧波动较大的数据。

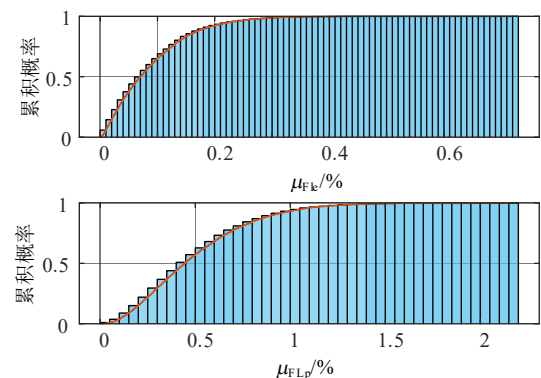


图7 某并网点电压和功率波动率累积概率分布
Fig. 7 Cumulative probability distribution of voltage and power fluctuations

由于此刻风电场0.1%的电压波动率相对较小^[31]，可以适当放宽数据选择波动阈值 k ，本文设定 k 值为 $0.8c_v$ ，按式(14)所示约束和功率波动率 $\geq 0.8\%$ 为条件进行数据筛选，筛选前的原始数据和筛选出的数据散点图如图8所示。

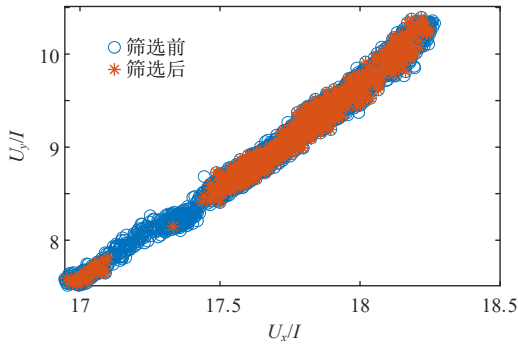


图8 数据点($U_x/I, U_y/I$)在复平面分布

Fig. 8 ($U_x/I, U_y/I$) on Z panel of data collection

理论上测量数据点 ($U_x / I, U_y / I$) 在复平面上应该呈直线分布^[22], 因为对于任意测量点, 式(17)成立。

$$\left(r - \frac{U_x}{I}\right)^2 + \left(x - \frac{U_y}{I}\right)^2 = \left(\frac{E_g}{I}\right)^2 \quad (17)$$

这一数据点的直线分布特性可以帮助发现由于测量误差和噪声引发的异常数据。由图8所示的数据分布可知, 筛选前后数据在复平面的分布基本上都满足直线分布, 因此基于测量数据点 ($U_x / I, U_y / I$) 在复平面分布呈现直线这一特征只适用于筛选异常数据, 无法判断测量点的网源波动情况。

基于以上分析, 本文提出一种基于测量点电压相量和功率波动特征相融合的数据筛选方法, 具体的筛选步骤如下:

- 1) 基于测量点的电压、电流数据计算其正序电压、电流、有功功率和无功功率。
- 2) 选定电压波动阈值 k , 根据式(15)所示约束和功率波动率 μ_{FLP} 的下限阈值筛选出网侧波动较小但功率波动明显的的数据。
- 3) 根据测量数据 ($U_x / I, U_y / I$) 在复平面呈线性分布这一特性剔除异常数据。

筛选后的数据为网侧波动小但源侧波动明显的的数据, 根据文中第2节的分析, 利用筛选后的数据进行网侧戴维南等值阻抗的辨识理论上可提高阻抗辨识精度。

4 算法验证

为验证本文所提数据波动特征筛选与等值阻抗线性关系描述相结合的电网阻抗的在线辨识方法的有效性, 本节分别基于仿真场景和现场实测数据开展电网戴维南等值阻抗辨识。

4.1 仿真验证

本节选取风电场并网短路容量为 1000MW, 网源两侧波动在同一量级的仿真场景(case1-1), 验

证文中所提数据筛选方法的有效性。

设置电压和功率波动阈值分别为 $0.8c_v$ 和 0.5%, 对该仿真场景下并网点测量的正序电压电流相量进行数据筛选, 筛选后的数据如图9所示。

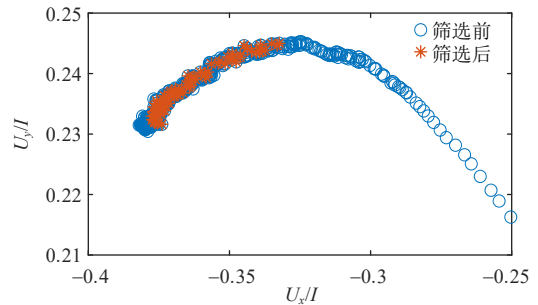


图9 筛选前后数据点($U_x/I, U_y/I$)在复平面分布

Fig. 9 ($U_x/I, U_y/I$) on Z panel of original and selection data

图10(a)–(b)分别给出了利用筛选后的数据进行等值电阻和电抗参数辨识的结果。此场景下辨识出的电阻和电抗的平均值分别为 1.66Ω 和 14.35Ω , 与电阻真实值 1.44Ω 和电抗真实值 14.40Ω 相比, 电阻和电抗的辨识误差分别为 15.44% 和 0.33%。需要说明的是, 由于电网等效电阻的幅值比电抗幅值小得多, 因此电阻辨识的相对误差较大, 但此误差对整体阻抗模值的辨识精度影响很小。对照表2中 1000MW 短路阻抗下 case1 场景的阻抗辨识结果可知, 利用文中所提的阻抗辨识方法, 阻抗模值辨识误差可从 35.24% 降至 0.16%, 可显著提高同一场景下等效阻抗的辨识精度。

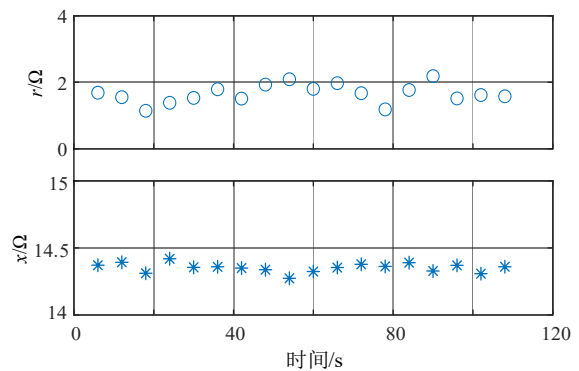


图10 数据筛选后 case1-1 场景下的阻抗辨识结果

Fig. 10 Impedance values identified in case1-1 with data selection

由于在 case1-1 场景下, 源侧风速波动很小, 电网阻抗不易辨识, 戴维南等值阻抗最常用的最小二乘法在此场景下无法正确辨识出电网阻抗。本文在 case1-4 场景下比较本文方法与最小二乘法。

图11给出了 case4-1 场景下本文方法与戴维南等值阻抗辨识常用的最小二乘法的计算结果。由图中计算结果的分布可明显看出, 相较于最小二乘法, 本文所提方法可明显提高阻抗辨识精度, 阻抗

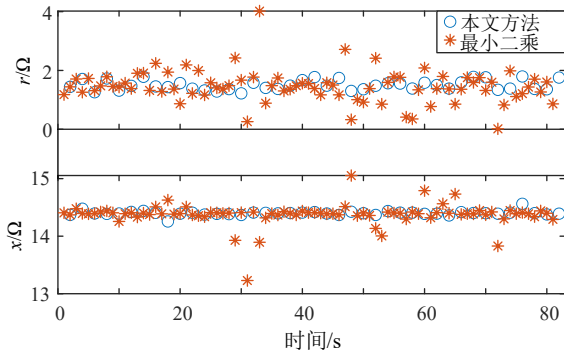


图 11 Case4-1 场景下的阻抗辨识结果

Fig. 11 Impedance values identified in case4-1

模值的最大误差可由 8.56% 降低至 1.38%。

4.2 实测数据验证

选取某实际在运风电场并网点的三相电压、电流测量数据，量测频率为 6.4kHz，基于测量数据计算每 10 个工频周期的正序电压相量、正序电流相量、有功功率和无功功率，按照文中所提方法进行电网戴维南等值阻抗辨识。

图 12 给出了未经数据筛选情况下，基于并网点测量数据进行阻抗辨识的结果。图 12(a)(b) 分别给出了未经数据筛选情况下，辨识出的电网电阻和电抗。由图 12(a) 和 (b) 均可明显看出电阻和电抗的辨识值明显分布在图中 A、B 两条数值带附近，基于经验分析，A 数值带代表了源侧风电场的电阻和电抗，B 数值带内包含了电网的戴维南等效电阻和电抗信息。可推断此风电场存在网侧波动大于源侧波动的情形，因此有必要筛选出源侧波动比网侧波动明显的的数据，以便得到准确的电网阻抗辨识值。

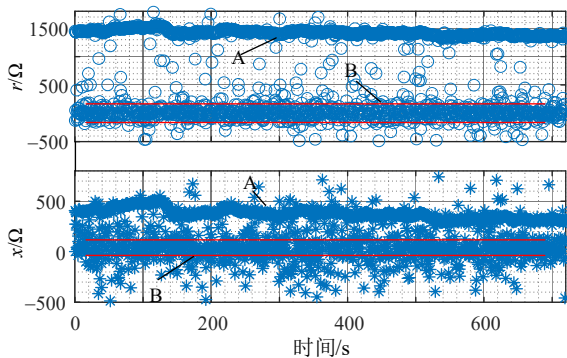


图 12 未经数据筛选情况下的电网阻抗辨识结果

Fig. 12 Identified grid impedance without data selection

设置电压波动阈值为 $0.8c_v$ ，功率波动率阈值为 0.7%，可以在 7199 个原始数据中筛选出 674 个数据，基于文中提出的阻抗辨识方法进行辨识，得到的阻抗辨识结果如图 13 所示。

进一步，基于该风电场并入电网 PSASP 仿真模型短路电流计算分析，该风电场并网点 220 kV 母线在大运行方式下短路容量约为 1326 MVA，小

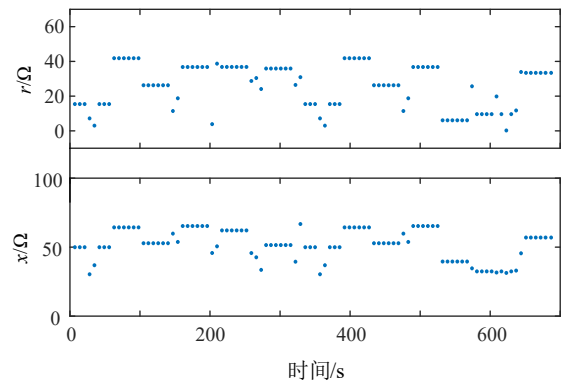


图 13 数据筛选后电网阻抗辨识结果

Fig. 13 Identified grid impedance with data selection

运行方式下短路容量约为 719.40 MVA，对应并网点在大、小运行方式下的短路阻抗分别为 39.89Ω 和 73.53Ω 。受网源随机波动的影响，利用本文所提方法所辨识出的电网阻抗随时间波动，阻抗模值的波动范围处于大小运行方式之间，平均阻抗模值为 58.18Ω ，处于合理的范围内。由于实际风电场并网点的电网阻抗受开机方式等多重因素的影响，电网侧的戴维南等值阻抗的真实值难以准确获取，因此，此处只对辨识结果的合理性进行验证。

5 结论

本文通过仿真分析了网源波动对电网戴维南等值阻抗辨识精度的影响，证实了网侧随机波动给基于本地测量数据的电网戴维南等值辨识带来的挑战，并提出了一种网源数据波动特征筛选与等值阻抗线性关系描述相结合的电网阻抗的在线辨识方法，并利用仿真场景和实际电网数据进行了准确性与合理性验证。本文结论如下：

- 1) 网源波动程度对电网戴维南等值参数辨识精度有明显影响，等值阻抗正确辨识的关键在于筛选出源侧波动明显，网侧无明显波动的数据。
- 2) 由于实际运行场景下网侧波动较大，传统的基于本地测量数据的电网戴维南等值阻抗辨识方法存在局限性，难以实际工程应用。
- 3) 通过有效的电压和功率波动特征融合筛选，可以在一定程度上提高传统戴维南等值阻抗辨识方法的工程适用性和辨识精度。

虽然基于本地量测数据的电网戴维南等值阻抗辨识在原理上有一定的局限性，但该方法所需数据少且均来自本地测点，无需进行数据同步，易于在线化，具有较高的工程应用价值。

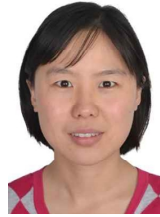
后续将深入研究风电场并网点网侧波动特征和规律，探索如何克服电网波动给戴维南等值阻抗辨识带来的影响，提升复杂网源波动下的电网戴维

南等值阻抗辨识精度,使其更具工程应用价值。

参考文献

- [1] 韩民晓,赵正奎,郑竞宏,等. 新能源场站电网暂态电压支撑技术发展动态[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1309-1327.
HAN Minxiao, Zhao Zhengkui, ZHENG Jinghong, et al. Development of dynamic voltage support for power grid with large sale renewable energy generation[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1309-1327(in Chinese).
- [2] 李少林,王伟胜,张兴,等. 风力发电对系统频率影响及虚拟惯量综合控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 64-70.
LI Shaolin, WANG Weisheng, ZHANG Xing, et al. Impact of wind power on power system frequency and combined virtual inertia control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 64-70(in Chinese).
- [3] 陈国平,李明节,许涛,等. 我国电网支撑可再生能源发展的实践与挑战[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3095-3103.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Practice and challenge of renewable energy development based on interconnected power grids [J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3095-3103(in Chinese).
- [4] 王伟胜,林伟芳,何国庆,等. 美国德州2021年大停电事故对我国新能源发展的启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4033-4042.
WANG Weisheng, LIN Weifang, HE Guoqing, et al. Enlightenment of 2021 Texas blackout to the renewable energy development in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4033-4042(in Chinese).
- [5] 梁军,李传明. 并网换流器控制模式发展及弱电网稳定研究[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3703-3711.
LIANG Jun, LI Chuanyue. Recent development of grid-connected inverters and weak-grid stabilization[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3703-3711(in Chinese).
- [6] 易俊,林伟芳,余芳芳,等. 受静态电压稳定约束的新能源临界渗透率计算方法[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2906-2912.
YI Jun, LIN Weifang, YU Fangfang, et al. Calculation method of critical penetration of renewable energy constrained by static voltage stability[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2906-2912(in Chinese).
- [7] 许洁翊,刘威,刘树,等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3586-3595.
Xu Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3586-3595(in Chinese).
- [8] LI Ming, ZHANG Xing, YANG Yang, et al. The grid impedance adaptation dual mode control strategy in weak grid[C]//2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia). Niigata, Japan: IEEE, 2018: 2973-2979.
- [9] 闫培雷,葛兴来,王惠民,等. 弱电网下新能源并网逆变器锁相环参数优化设计方法[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2210-2221.
YAN Peilei, GE Xinglai, WANG Huimin, et al. PLL parameter optimization design for renewable energy grid-connected inverters in weak grid[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2210-2221(in Chinese).
- [10] IEEE. IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities: IEEE 1204—1997[S]. New York: IEEE, 1997.
- [11] 徐政. 新型电力系统背景下电网强度的合理定义及其计算方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3805-3819.
XU Zheng. Reasonable definition and calculation method of power grid strength under the background of new type power systems[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3805-3819(in Chinese).
- [12] DILEK M, BROADWATER R, SEQUIN R. Computing distribution system fault currents and voltages via numerically computed Thevenin equivalents and sensitivity matrices[C]//Proceedings of 2004 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition. New York, NY, USA: IEEE, 2004: 244-251.
- [13] VU K, BEGOVIC M M, NOVOSSEL D, et al. Use of local measurements to estimate voltage-stability margin[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 1029-1035.
- [14] 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.
- [15] PHADKE A R, FOZDAR M, NIAZI K R. A new technique for on-line monitoring of voltage stability margin using local signals [C]//Proceedings of the Fifteenth National Power Systems Conference. IIT Bombay, 2008: 488-492.
- [16] 颜伟,文一字,余娟,等. 基于戴维南等值的静态电压稳定广域切负荷控制策略[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 88-92.
YAN Wei, WEN Yiyu, YU Juan, et al. A wide-area load shedding strategy based on Thevenin equivalence and considering static voltage stability[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 88-92(in Chinese).
- [17] 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(in Chinese).
- [18] 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(in Chinese).
- [19] 刘道伟,韩学山,任玲玉,等. 基于轨迹灵敏度的戴维南等效参数迭代优化辨识[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(S1): 37-42.
LIU Daowei, HAN Xueshan, REN Lingyu, et al. Identification of Thevenin equivalent parameters using iterative optimization approach based on the trajectory sensitivity[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(S1): 37-42(in Chinese).
- [20] FUSCO G, LOSIA A, RUSSO M. Constrained least squares methods for parameter tracking of power system steady-state equivalent circuits[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(3): 1073-1080.
- [21] 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(in Chinese).
- [22] ABDELKADER S M, MORROW D J. Online tracking of Thevenin equivalent parameters using PMU measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 975-983.
- [23] 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(22): 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(22): 126-132(in Chinese).
- [24] 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(in Chinese).
- [25] SHEN Shaofei, WANG Huifang, HU Peijun, et al. A nonparametric denoising approach for Thevenin equivalent parameters estimation based on taut-string-multiresolution algorithm[C]//Proceedings of 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Chicago, IL, USA: IEEE, 2017: 1-5.
- [26] 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.
- [27] 张森, 王慧芳, 叶睿恺. 基于分层估计的戴维南等值阻抗在线计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 90-98.
ZHANG Sen, WANG Huifang, YE Ruikai. Thevenin equivalent impedance online calculation method based on hierarchical estimation [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 90-98(in Chinese).
- [28] 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(in Chinese).
- [29] ABDELKADER S M, MORROW D J. Online Thévenin equivalent determination considering system side changes and measurement errors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2716-2725.
- [30] 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.
- [31] 邢伟, 刘利, 王健, 等. 华东电网特高压网架电压波动影响因素及波动率指标[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(4): 73-79.
XING Wei, LIU Li, WANG Jian, et al. Influencing factors and assessment indexes of UHV grid voltage fluctuations in East China Power Grid[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(4): 73-79(in Chinese).



李春彦

在线出版日期: 2024-02-20。

收稿日期: 2023-12-15。

作者简介:

李春彦(1983), 女, 博士, 研究方向为新能源并网控制, E-mail: lichunyan@epri.sgcc.com.cn;

李少林(1984), 男, 博士, 通信作者, 研究方向为新能源并网控制及仿真试验等, E-mail: lishaolin@epri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 马晓华)