基于虚拟相量直线的戴维南等值参数计算方法

李东东 1,2, 杨银台 1, 程云志 3, 尹 睿 1, 林顺富 1,2, 杨 帆 1,2, 边晓燕 1,2 (1. 上海电力学院 电气工程学院,上海 200090; 2. 上海高校高效电能应用工程研究中心,上海 200090; 3. 美国德州电力可靠性委员会,美国 泰勒 76574)

摘要:由于传统戴维南等值参数求取方法存在参数漂移等缺点,提出一种基于虚拟相量直线的戴维南等值参数识别方法。提出虚拟相量直线的概念,利用直线相交原理得出小扰动下电力系统的戴维南等值参数。为克服参数漂移和提高算法的收敛速度,利用阻抗轨迹圆法进行数据筛选。典型3机9节点系统的仿真结果表明,所提方法可以有效、准确地跟踪戴维南等值参数。

关键词:参数识别:虚拟相量直线:戴维南等值:参数漂移:稳定性

中图分类号: TM 761

文献标识码· A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.10.020

0 引言

132

近年来,世界各地发生的多起电压不稳定事故已造成巨大的经济损失[1-2],引起了人们的广泛关注。随着风能、太阳能等新能源发电渗透率的不断增加,电网的电压稳定性经受着前所未有的考验。为了保证电网的安全稳定运行,必须对电网电压稳定性进行实时监测。

由于相量量测技术的快速发展,基于相量量测和 戴维南等值的电压稳定分析方法受到了各国学者的 关注[3-5]。如何快速准确地求取戴维南等值参数成为 关键问题。20世纪90年代,文献[6]开创性地提出 仅利用本地测量信息来跟踪戴维南等值参数。该方 法利用 2 个或多个时刻的本地测量值求取系统戴维 南等值电路参数,但在实际应用中存在参数漂移等 问题[7]。此后,各国学者在此基础上不断进行改进和 完善[7-13],这些方法均以采样期间等值参数不变为 前提,对多个时间断面的电气信息进行采样,所以本 质上都是对文献 [6] 中最小二乘法辨识思想的延 续。文献[7]作为研究参数漂移的经典文献,不仅对 参数漂移进行了定义,也简单地探索了解决参数漂 移问题的方法,但是没有达到理想的效果。此后诸 多文献虽然对参数漂移问题有所提及,但依然没有 提出很好的解决方法。

为了克服多时间断面参数辨识法的缺陷,文献

收稿日期:2016-12-02;修回日期:2017-07-18 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51507100,51407114); 上海市科学技术委员会资助项目(15YF1404600,13DZ2251900, 10DZ2273400);上海市"曙光计划"资助项目(15SG50);上海市人才发展资金资助项目(201365)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51507100,51407114), Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (15YF1404600,13DZ2251900, 10DZ2273400), "Shuguang Program" of Shanghai Education Development Foundation and Shanghai Municipal Education Commission (15SG50) and Shanghai Talent Development Funding (201365)

[14-15]提出了只需系统当前运行数据来求解系统 戴维南等值参数的全微分法和时域仿真法。文献 [16]充分考虑了负荷之间的耦合特性,提出了多端 口等值的概念。根据多端口等值电路同样可以进行 电力系统电压稳定分析[17]。此种多端口等值方法本 质上已脱离传统戴维南等值的范畴。在多端口等值 电路的基础上,通过分析各个端口的相互影响,文献 [18-19]提出了一种耦合单端口等值电路。这种单端 口等值电路虽然充分考虑了负荷之间的相互影响, 但依然不能反映系统中负荷的动态特性。

本文提出虚拟相量直线的概念,利用直线相交原理求取等值参数,该方法从物理意义上求取并从几何意义上直观解释戴维南等值参数。本文利用统计学中概率论知识,对各种扰动后的等值参数求取平均值,避免测量误差及不可预计因素导致的影响。为了克服传统方法中参数漂移的缺点,本文提出阻抗圆轨迹数据筛选方法。该方法可直接对采样数据进行数据筛选,从数据源上避免参数漂移问题,亦可适用于其他戴维南等值参数辨识方法中。典型3机9节点系统的仿真结果证明本文算法可以准确跟踪系统的戴维南等值参数。

1 传统戴维南等值参数辨识法及缺点

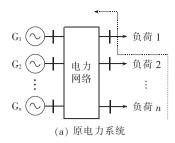
戴维南定理指出,对电力系统进行分析时,可以把除研究负荷母线外的其余部分等效成一个等值电势 $E_{\rm th}$ 和等值阻抗 $Z_{\rm th}$ 的串联模型。戴维南等值电路如图 1 所示,图中 U、I 分别为负荷母线的电压和电流相量值。

根据电压定律,可以得出戴维南等值电势 E_{th} 、等值阻抗 Z_{th} 和负荷母线电压、电流的关系:

$$E_{th} = IZ_{th} + U \tag{1}$$

假设在 t_1 、 t_2 2 个连续采样时刻等值参数不发生变化,把 2 个时刻的电压、电流相量值代入式(1),得:





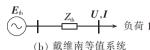


图 1 戴维南等值电路

Fig.1 Thevenin equivalent circuit

$$\begin{cases}
E_{th} = I_1 Z_{th} + U_1 \\
E_{th} = I_2 Z_{th} + U_2
\end{cases}$$
(2)

因此,戴维南等值参数就可以根据式(2)求得:

从上述分析可以看出,传统等值参数辨识法原理清晰易懂,计算简单快速,而且由于采用本地测量技术,采样数据已经包含了系统的动态特性。但是使用本方法时需要给负荷侧一个扰动,而且扰动不能太大,也不能太小。扰动过大,则不能满足2个连续采样时刻等值参数不发生变化的假设;扰动过小,则可能导致2个时刻的电压、电流相量近似相等,引起参数漂移门。为更好地解决参数漂移问题,本文对此作了改进。

2 基于虚拟相量直线的戴维南等值参数辨 识法

2.1 虚拟相量直线

对于 Y = AX + B, 如果相量 A 和 B 为已知常量,则一个相量 X 严格对应于一个相量 Y, 这种相量与相量一一对应的关系类似于二维 xy 平面坐标系统中用直线表示的线性函数关系, 故本文中将其称为虚拟相量直线, 如图 2(a) 所示。

2.2 虚拟相量直线相交法

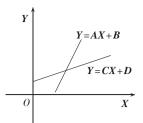
应用到戴维南等值参数辨识法中,在 t_1 、 t_2 2个连续时刻采样,可以得到2条虚拟相量直线。

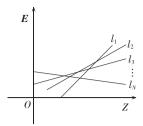
$$l_1: E = I_1 Z + U_1$$

$$l_2: E = I_2 Z + U_2$$
(4)

2条虚拟相量直线的交点即为电势和阻抗值。 利用N个时刻数据,即可得到N条虚拟相量直线,如图 2(b)所示。

在理想情况下,N 条直线相互相交可以得到 S=N(N-1)/2 个交点。不同的交点产生不同的横纵坐





(a) 2条虚拟相量直线相交

(b) N条虚拟电势-阻抗直线相交

图 2 虚拟相量直线

Fig.2 Virtual line in phasor space

标值,在小扰动时,横纵坐标变化的范围不大,而且会 以平均值为中心分布。故本文将横纵坐标的平均值 作为等值参数。

交点坐标可由如下公式求得:

$$\begin{bmatrix}
E_{T} = \frac{U_{i} - U_{j}}{I_{j} - I_{i}} \\
Z_{T} = \frac{U_{i}I_{j} - U_{j}I_{i}}{I_{i} - I_{i}}
\end{bmatrix} i \neq j$$
(5)

取所有交点坐标平均值,作为系统戴维南等值参数:

$$\begin{cases} E_{th} = E(E_T) = \sum_{i=1}^{S} \sum_{j>i}^{S} \left(\frac{U_i I_j - U_j I_i}{I_j - I_i} \right) / S \\ Z_{th} = E(Z_T) = \sum_{i=1}^{S} \sum_{j>i}^{S} \left(\frac{U_i - U_j}{I_i - I_i} \right) / S \end{cases}$$
(6)

$$\begin{cases}
E_{th} = |E(E_{th})| \\
Z_{thm} = |Z_{th}|
\end{cases}$$
(7)

同样可以求得交点坐标的标准差:

$$\begin{cases} \delta_{\rm E} = D(\mathbf{E}_{\rm T}) \\ \delta_{\rm Z} = D(Z_{\rm T}) \end{cases} \tag{8}$$

其中, E_{th} 为等值电势模值; Z_{thm} 为等值阻抗模值; δ_{E} 为交点横坐标的标准差; δ_{Z} 为交点纵坐标的标准差; $D \setminus E$ 分别表示取标准差和期望, | |表示对相量取模值,下文同。

当采样时间太近或采样时刻内扰动过小时,2 条虚拟相量直线会重合或平行,可能发生了参数漂移, 交点的总个数 *S* 减少。此时应对 *S* 进行修正,然后求 取戴维南等值参数。

3 数据筛选

3.1 数据筛选原理

为不失一般性,令 $I=I \angle 0^\circ$ 。由图 1 可得:

$$\boldsymbol{E}_{th} = I Z_{th} + \boldsymbol{U} \tag{9}$$

$$E_{th} = (IR_{th} + U_x) + j(IX_{th} + U_y)$$
 (10)

对式(10)两边取模值,再平方,得:

$$E_{th}^2 = (IR_{th} + U_x)^2 + (IX_{th} + U_y)^2$$
 (11)
两边同时除以 I^2 .得:

$$\left(R_{th} + \frac{U_x}{I}\right)^2 + \left(X_{th} + \frac{U_y}{I}\right)^2 = \left(\frac{E_{th}}{I}\right)^2 \tag{12}$$

在阻抗 Z_{th} 的复平面中,式(12)的轨迹是一个以 $(-U_x/I,-U_y/I)$ 为圆心、 E_{th}/I 为半径的圆。在任意 t 时刻,均可在阻抗 Z_{th} 复平面求得一个圆轨迹。在等 值参数不发生变化的前提下,任意 2 个圆轨迹交点的 横纵坐标即为等值电阻 R_{th} 和等值电抗 X_{th} 。由于等值参数的唯一性,3 个或者多个圆轨迹交点应该重合,即要求所有圆轨迹圆心在同一条直线上。

在实际系统中,若扰动过小,负荷母线电压、电流值基本保持不变(即发生参数漂移),此时阻抗圆轨迹的圆心近似重合;若扰动过大,等值参数发生变化,此时阻抗圆轨迹的圆心将偏离直线。综上所述,某个时刻采样数据的有效性可以通过该时刻阻抗圆轨迹的圆心位置来判定,从而达到数据筛选的效果。

以某系统中9个不同时刻采集的数据为例,根据式 (12)可在阻抗复平面上画出9个阻抗圆轨迹。这9个阻抗圆轨迹的圆心分布图如图3所示。

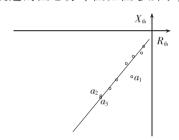


图 3 圆心分布图 Fig.3 Distribution of circle centres

图 3 中,圆心 a_1 严重偏离直线,表明系统此时受到过大扰动,数据不宜采用;圆心 a_2 和 a_3 近似重合,表示这 2 个时刻参数基本保持不变,即出现参数漂移,因此这 2 个时刻数据只需采用其中一个。

3.2 数据筛选阈值设置

设任意 2 个圆心 $a_i(-U_{xi}/I_i, -U_{yi}/I_i)$ 、 $a_j(-U_{xj}/I_j, -U_{yi}/I_i)$ 的距离为 L_{ii} ,由数学距离公式可知:

$$L_{ij} = \sqrt{\left(\frac{U_{xi}}{I_i} - \frac{U_{xj}}{I_j}\right)^2 + \left(\frac{U_{yi}}{I_i} - \frac{U_{yj}}{I_j}\right)^2}$$

$$i \neq j; i, j = 1, 2, \cdots$$

$$(13)$$

给定足够小的正数 δ 作为阈值,如若 L_{ij} < δ ,则可认为两圆心近似重合,据此可剔除扰动过小时的采样数据。

同理可提出剔除偏离直线点的阈值。对于任一圆心点 $a(-U_x/I,-U_y/I)$,与其他不重合圆心点连线的斜率为 k_1,k_2,\cdots ,计算公式为:

$$k_m = \frac{U_{y_m}/I_m - U_y/I}{U_{x_m}/I_m - U_x/I}$$
 $m = 1, 2, \cdots$ (14)

设2个斜率差值的绝对值为ABSi;:

$$ABS_{ii} = |k_i - k_i| \quad i \neq j; i, j = 1, 2, \cdots$$
 (15)

给定一个足够小的正数 σ ,若 $ABS_{ij} < \sigma$,则称其为正常斜率差,否则称之为反常斜率差。设圆心点 a与其他不重合圆心点构成的所有直线中.反常斜率

差数量为 P_1 ,斜率差总数量为 P_2 ,则它们的比值 λ 为:

$$\lambda = P_1 / P_2 \tag{16}$$

因为偏离圆心直线的圆心数量相对总圆心数量很少,所以由正常圆心点计算的 λ 很小,而由偏离圆心直线的圆心点计算的 λ 很大。给定一个足够小的值 β (例如 β =5%)作为阈值,当 λ > β 时,表明该圆心点严重偏离圆心直线,对应的采样数据应剔除。

本算法流程图如图 4 所示,图中 I_i 、 I_j 分别为任意 2 个不同时刻的电流源样值, ε_1 和 ε_2 为给定的足够小正数。

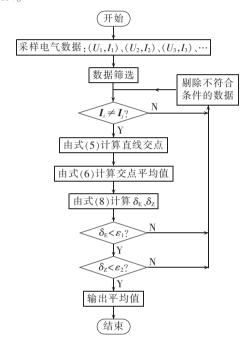


图 4 算法流程图 Fig.4 Flowchart of algorithm

首先,采样所研究母线的电压、电流值,对采样值进行初步筛选;然后利用本文所提算法进行参数的预估计算;最后,当等值参数的标准差小于 ε_1 和 ε_2 时,输出结果。

4 算例仿真

4.1 简单双母线系统

对图 5 所示的简单双母线系统进行仿真,仿真数据为: R_{th} =3 p.u., X_{th} =4 p.u., E_{th} =1 \angle 0° p.u., R_{L} 、 X_{L} 予以 ±5% 的随机扰动。选取 10 个时刻数据,利用本文算法计算戴维南等值阻抗(标幺值)如表 1 所示。表

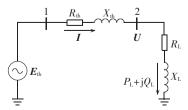


图 5 简单双母线系统

Fig.5 A simple double bus power system



表 1 简单双母线系统等值阻抗

Table 1 Equivalent impedance of simple double bus power system

δ	σ	β/%	Z_1	Z_2	Z_3
0.0300	0.0045	8	5.0000	4.9652	4.7584
0.0300	0.0045	5	5.0000	4.9680	3.6479
0.0300	0.0035	5	5.0000	4.9747	-0.7560
0.0200	0.0035	5	5.0000	4.9780	9.2519

中 Z₁、Z₂ 和 Z₃ 分别表示戴维南等值阻抗真实值、含 筛选算法等值阻抗值和不含筛选算法等值阻抗值。

从表 1 可知,随着阈值 δ 、 σ 和 β 的减小,阻抗 Z_2 不断趋于真实值,但由于现实条件的约束,阈值有下限。表中不含筛选算法的阻抗值出现严重偏离真实值甚至负值的情况,这是因为没有进行数据筛选时计算出现 0/0 的情况,亦即文献[7]指出的参数漂移现象。通过大量仿真得出, δ 、 σ 和 β 分别为 0.0200、0.0025 和 4.5% 时效果最好,可作为推荐值。

同样对上述系统选取 100 个时刻的数据,分成 10 组,求得各组阻抗的平均值 Z_{AVE} 和出现频率最高值 Z_{FRE} ,阻抗分布范围为 Z_{RAN} ,筛选阈值使用推荐值。阻抗(标幺值)分布规律如表 2 所示,表中 Z_{REAL} 表示真实值。

表 2 阻抗分布规律 Table 2 Distribution rule of impedance

组号	$Z_{\scriptscriptstyle ext{AVE}}$	$Z_{\scriptscriptstyle ext{FRE}}$	$Z_{ m RAN}/\%$	$Z_{\scriptscriptstyle ext{REAL}}$
1	4.9835	4.7895	0.36	5.0000
2	4.9796	4.8721	0.32	5.0000
3	4.9910	4.7802	0.29	5.0000
4	4.9857	4.8012	0.35	5.0000
5	4.9783	4.8654	0.28	5.0000
6	4.9922	4.8314	0.39	5.0000
7	4.9876	4.8043	0.28	5.0000
8	4.9918	4.9012	0.29	5.0000
9	4.9817	4.8812	0.30	5.0000
10	4.9903	4.7698	0.32	5.0000

从表 2 可知,10 组数据的虚拟相量直线的交点 横坐标即阻抗的分布范围很"窄",且平均值与真实 值十分接近,交点纵坐标即等值电势的分布规律和阻 抗分布规律相似,故不再列出。

对图 5 所示的简单双母线系统分别利用本文算法和传统等值算法计算戴维南等值阻抗,并与真实值对比,结果如图 6 所示,图中等值阻抗为标幺值。图 6 中基于传统等值算法的戴维南等值参数计算值在 1.5 s 左右出现剧烈波动的原因是加入了微小的内部扰动。由图 6 可知,基于虚拟相量直线法的戴维南等值参数计算值与真实值基本吻合。

挑选 5 个有代表性的时刻,与文献[7]中所述的 P-U 关系检验解决漂移问题的等值算法进行对比。表 3 为戴维南等值阻抗(标幺值),表中,t 表示时间, Z_1 、 Z_4 、 Z_5 和 Z_6 分别表示戴维南等值阻抗真实值、本

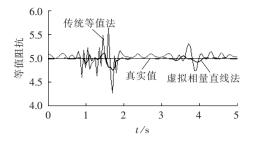


图 6 简单双母线系统等值阻抗对比结果 Fig.6 Comparison results of equivalent impedance of simple double bus power system

表 3 简单双母线系统等值阻抗比较 Table 3 Comparison of equivalent impedance of simple double bus power system

t/s	Z_1	Z_4	Z_5	Z_6
0.50	5.0000	4.9998	5.0690	4.9982
1.50	5.0000	5.0016	4.6584	4.8698
1.80	5.0000	4.8632	5.6023	5.3914
2.00	5.0000	4.9971	5.0239	4.9955
3.80	5.0000	5.0032	5.0694	5.0102

文算法阻抗计算值、传统等值算法阻抗计算值和文献 [7]算法阻抗计算值。由表 3 得,本文算法结果比其 他 2 种算法结果更逼近真实值。

4.2 戴维南等值参数验证方法

为验证本文所提出算法的正确性,在电力系统仿真软件 DIgSILENT/PowerFactory 中搭建含有风电系统的 3 机 9 节点系统进行仿真计算。验证方法为:用暂态仿真得到的任意一个时刻母线电压、有功功率曲线与用该时刻戴维南等值参数计算得到的母线电压、有功功率曲线进行对比[15]。其中,利用第 k 个时刻等值参数计算母线的电压、有功功率公式为:

$$U_{k} = \left| \frac{E_{th}}{Z_{th} + Z_{L}} \right| \left| Z_{L} \right| \tag{17}$$

$$P_{k} = \left| \frac{E_{\text{th}}}{Z_{\text{th}} + Z_{\text{L}}} \right|^{2} |R_{\text{L}}| \tag{18}$$

其中, U_k 、 P_k 分别为戴维南等值参数计算的电压、有功功率; Z_L 、 R_L 分别为暂态仿真得到的负荷阻抗、电阻, Z_L =U/I。

4.3 基于 3 机 9 节点系统的仿真验证

图 7 所示系统采用 3 机 9 节点系统,在公共接入点接入 18 台并联风机组成的等效风力发电系统,每台风机容量为 5 MW,单机网侧变流器容量为 2 MW,经电抗器接入三绕组变压器,三绕组变压器高、中、低电压分别为 30 kV、3.3 kV、0.69 kV。其中单台双馈风机的仿真参数如表 4 所示,表中电阻、电抗、互感均为标幺值。

本系统进行了3个算例的仿真。

- **a.** 算例 A:从 Load_A 向 Bus₅ 看进去对系统进行戴 维南等值。
 - b. 算例 B:从 Load_B 向 Bus₆ 看进去对系统进行戴



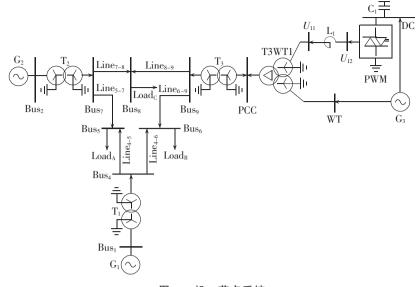


图 7 3 机 9 节点系统 Fig.7 3-generator 9-bus system

表 4 单台双馈风机仿真参数 Table 4 Simulative parameters of a single doubly-fed induction generator

参数	数值	参数	数值
额定频率/Hz	50	定子电阻	0.0029
额定电压/V	690	转子电阻	0.0040
额定容量/MW	5	定子电抗	0.1250
额定风速/(m·s ⁻¹)	15	转子电抗	0.0500
GSC 容量/MW	2	定转子互感	2.5
直流母线电压/kV	1.15	直流侧电容/μF	4.81

维南等值。

c. 算例 C:从 Load_c 向 Bus₈ 看进去对系统进行戴维南等值。

在 3 次算例中,仿真时间为 5 s,仿真时间内分别在各自负荷处施加 4% 的负荷斜坡增长。取 9 个时刻数据的期望作为中间时刻的等值参数。采样时间间隔为 0.01 s,负荷变化时保持恒功率因数。

利用仿真数据,基于虚拟相量直线相交等值参数辨识法,得到算例 A、算例 B 和算例 C 各自的等值阻抗模值和等值电势频率分布图如图 8 所示。从图中可知,等值参数预估值的变化范围是"狭窄"的,因此其标准差很小。这意味着平均值会非常接近高频值,可把它们作为戴维南等值参数。

算例 B中,选择 10个时刻计算虚拟相量直线交点的横、纵坐标的期望和标准差,各参数(标幺值)示于表 5。定义标准差与期望比值为相对标准差,其中 δ_{RE} 、 δ_{RE} 分别表示戴维南等值电势和等值阻抗的相对标准差的百分数。从表 5中可看出,每个时刻点的标准差和相对标准差均较小,几乎都小于 1%,说明通过取平均值得到的戴维南等值参数是可以保证精确度的。

算例 B 的戴维南等值参数计算结果如图 9、图

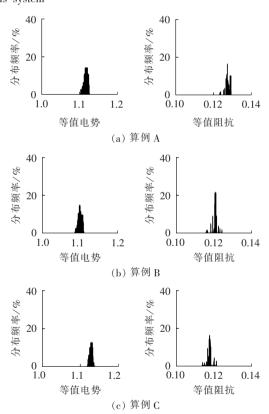


图 8 等值参数频率分布图 Fig.8 Frequency distribution of equivalent parameters

10 所示,图中 E_{th} 、 $|Z_{th}|$ 为标幺值。由仿真结果可知,随着 $Load_B$ 处负荷的增长,系统戴维南等值电势和等值阻抗均略微增大。

应用图 9、图 10 的计算结果,利用式(17)、式(18) 求得戴维南等值系统中每个时刻的 Bus₆ 母线电压和 Load_B 有功功率。戴维南等值系统中 Bus₆ 母线电压和 Load_B 处有功功率的计算结果如图 11、图 12 所示,图中母线电压、有功功率为标幺值。图 11 中加入原电力系统中 Bus₆ 母线电压暂态仿真结果进行对



表 5 等值参数及其标准差

Table 5 Equivalent parameters and its standard deviations

$E_{ m th}$	$\delta_{\scriptscriptstyle m E}$	$\delta_{\scriptscriptstyle m RE}$ / $\%$	$ Z_{ ext{th}} $	δ_{z}	$\delta_{ ext{RZ}}/\%$
1.10450	0.00044	0.03983	0.12189	0.00062	0.40819
1.10463	0.00045	0.04073	0.12198	0.00063	0.41452
1.10493	0.00002	0.00181	0.12250	0.00037	0.24262
1.10492	0.00002	0.00181	0.12261	0.00038	0.24900
1.105 19	0.00043	0.03890	0.12283	0.00006	0.03925
1.10375	0.00056	0.05073	0.12288	0.00009	0.05886
1.10405	0.00050	0.04528	0.123 14	0.00036	0.23507
1.10380	0.00054	0.04892	0.12321	0.00037	0.24149
1.10400	0.00048	0.04347	0.12323	0.00036	0.23490
1.10400	0.00047	0.04257	0.12341	0.00040	0.26073

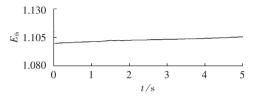


图 9 戴维南等值电势

Fig.9 Thevenin equivalent potential

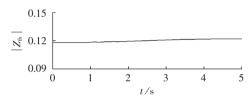


图 10 戴维南等值阻抗

Fig.10 Thevenin equivalent impedance

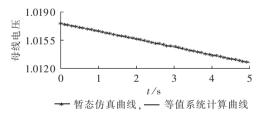


图 11 Bus6 母线电压曲线

Fig.11 Voltage curve of Bus6

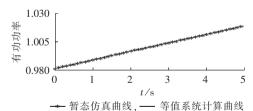


图 12 Load_R线路有功功率曲线

Fig.12 Active power curve of Load_B

比,图 12 中加入原电力系统中 Load_B 处有功功率暂态仿真结果进行对比。由仿真结果可见,基于虚拟相量直线的戴维南等值参数辨识法的计算结果与真实的戴维南等值参数基本一致。

5 结论

本文通过理论分析传统戴维南等值参数辨识法

的缺点,提出基于虚拟相量直线相交的戴维南等值参数辨识法。该方法克服了传统参数辨识法中参数漂移带来的误差,利用本地测量相量值快速、准确地跟踪戴维南等值参数。本文采用阻抗圆轨迹数据筛选法较好地提高等值参数精确度,该筛选方法也适用于其他戴维南等值参数辨识法。本文方法可用于实际电力系统在线分析,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 周孝信,郑健超,沈国荣,等. 从美加东北部电网大面积停电事故中吸取教训[J]. 电网技术,2003,27(9):T1.
- [2] 李升,卫志农,孙国强,等. 大规模光伏发电并网系统电压稳定分 盆研究[J]. 电力自动化设备,2016,36(1):17-23.

 LI Sheng,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,et al. Voltage stability bifurcation of large-scale grid-connected PV system[J]. Electric
- [3] 鲍海波,韦化,郭小璇、考虑双馈异步风电机组无功极限的静态电压稳定概率评估[J]. 电力自动化设备,2016,36(11):87-93. BAO Haibo,WEI Hua,GUO Xiaoxuan. Static voltage stability probabilistic evaluation considering reactive power limit of DFIG [J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(11):87-93.

Power Automation Equipment, 2016, 36(1):17-23.

[4] 周林,绍念彬. 大型光伏电站无功电压控制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):116-122,128.

ZHOU Lin,SHAO Nianbin. Reactive-power and voltage control for large-scale grid-connected photovoltaic plants[J]. Electric Power

Automation Equipment, 2016, 36(4): 116-122, 128.

- [5] 侯建兰,刘育权,谢小荣,等. 一种量化评估暂态电压稳定性的指标与方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):151-156.
 HOU Jianlan,LIU Yuquan,XIE Xiaorong,et al. Quantitative assessment index and method of transient voltage stability[J]. Elec-
- tric Power Automation Equipment, 2015, 35(10):151-156.
 [6] 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.
- [7] 李来福,于继来,柳焯. 戴维南等值参数的漂移问题研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(20):1-5.
 LI Laifu,YU Jilai,LIU Zhuo. Research parameters drift problem
 - in tracking Thevenin equivalent[J]. Power System Technology, 2005,25(20):1-5.
- [8] HU Fengkai, SUN Kai. Measurement-based real-time voltage stability monitoring for load areas [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4):2787-2798.
- [9] CHEN Chen, ZHENG Shuo. PMU uncertainty quantification in voltage stability analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4):2196-2197.
- [10] SU Hengyi, LIU Chihwen. Estimating the voltage stability margin using PMU measurements [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4):3221-3229.
- [11] SUN Kai, HU Fengkai. A new approach for real-time voltage sta-bility monitoring using PMUs[C]//IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia). Kuala Lumpur, Malaysia: [s.n.], 2014; 232-237.
- [12] 罗建,徐馨,张林,等. 微小扰动状况下的戴维南等值参数辨识方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(20):61-66.
 - LUO Jian, XU Xin, ZHANG Lin, et al. Identification method for Thevenin equivalent parameters under tiny disturbance condi-



- tions[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(20):61-66.
- [13] 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辨识[J]. 中国电机工程学报,2015,35(8):1900-1908.
 - LI Zhuoyi, LU 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.
- [14] 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. Tracking algorithm for Thevenin equivalent parameters based on complete differential equation [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13):48-53.
- [15] 汤涌,易俊,候俊贤,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.
- [16] 李卫星,年晓明,李志民,等. 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,et al. Analysis and thoughts on the Thevenin equivalent parameters for power systems [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(Supplement):28-34.
- [17] 李国庆,姜涛,徐秋蒙,等. 基于局部电压稳定指标的裕度灵敏

- 度分析及应用[J]. 电力自动化设备,2012,32(4):1-5.
- LI Guoqing, JIANG Tao, XU Qiumeng, et al. Sensitivity analysis based on local voltage stability margin and its application [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(4):1-5.
- [18] WANG Yunfei, LI Weixing. Voltage stability monitoring based on the concept of coupled single-port circuit[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4):2154-2163.
- [19] LIU Jianhong, CHU Chiachi. Wide-area measurement-based voltage stability indicators by modified coupled single-port models [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2):756-764.

作者简介:



李东东(1976—),男,安徽阜阳人,教授,博士,主要研究方向为风力发电及并网、微电网运行及智能用电、电力系统电压稳定分析等(E-mail:powerldd@163.com);

杨银台(1991—), 男, 江西南昌人, 硕士 研究生, 主要研究方向为电力系统电压稳定 分析(**E-mail**:18317025716@163.com);

程云志(1979—),男,安徽桐城人,高级工程师,博士,主要研究方向为新能源建模及并网、电力系统稳定分析、零售电力市场、分布式电源、微电网等(E-mail:situ yh@hotmail.com)。

Calculation method of Thevenin equivalent parameters based on virtual line in phasor space

LI Dongdong^{1,2}, YANG Yintai¹, CHENG Yunzhi³, YIN Rui¹, LIN Shunfu^{1,2}, YANG Fan^{1,2}, BIAN Xiaoyan^{1,2}

- (1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
- Shanghai Higher Institution Engineering Research Center of High Efficiency Electricity Application,
 Shanghai 200090, China; 3. Electric Reliability Council of Texas, Taylor 76574, USA)

Abstract: Since the traditional calculation method of Thevenin equivalent parameters has the shortages, such as parameter drift, an identification method of Thevenin equivalent parameters based on virtual line in the phasor space is proposed. The concept of virtual line in the phasor space is proposed. The linear intersection principle is adopted to derive the Thevenin equivalent parameters of power system with small disturbance. In order to overcome the parameter drift and improve the convergence speed of the algorithm, the impedance locus circle method is used for data screening. The simulative results of a typical 3-generator 9-bus system show that the proposed method can effectively and accurately track Thevenin equivalent parameters.

Key words: parameter identification; virtual line in phasor space; Thevenin equivalent; parameter drift; stability