

# 基于偏差校正的戴维南等值参数在线跟踪改进算法

牟善科<sup>1</sup>, 丁涛<sup>2</sup>, 顾伟<sup>2</sup>, 万秋兰<sup>2</sup>

(1. 华东电网有限公司, 上海 200002; 2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 针对戴维南等值参数的在线跟踪提出了一种基于偏差量修正的迭代算法, 并用一致性检验对初值进行选择。推导了估计参数的表达式及参数的修正量, 根据实时变化的数据判断修正量的变化方向, 并对参数进行迭代修正得出实时估计的参数值。同时计及了戴维南等值电阻的估计, 使整个估计都在向量空间进行。算例结果表明, 该方法能够快速有效地跟踪估计戴维南等值参数, 并只需一个工频周期的采样值就能达到跟踪的效果。

**关键词:** 参数漂移; 戴维南等值; 参数跟踪估计; 偏差量

## An improved algorithm for on-line tracking Thevenin equivalent parameters based on deviation correction

MOU Shan-ke<sup>1</sup>, DING Tao<sup>2</sup>, GU Wei<sup>2</sup>, WAN Qiu-lan<sup>2</sup>

(1. East China Grid Company Limited, Shanghai 200002, China;

2. Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Based on the method for on-line tracking Thevenin equivalent parameters, an iterative algorithm using the deviation correction method is proposed and the initial value by consistency test is chosen. The expression and correction of estimate parameters are derived, the direction of the corrected value is judged according to the real-time changing data, and the iteration parameter estimation is obtained through iteration and correction. At the same time, the Thevenin equivalent resistance is concerned which makes whole estimation be conducted in vector space. The simulation results show that this method can quickly and efficiently track the estimated Thevenin equivalent parameters by only using one sampling frequency cycle.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50907008 and No. 60974036).

**Key words:** parameters drift; Thevenin equivalent; parameters on-line tracking; deviation

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)02-0023-06

## 0 引言

电压稳定是电力系统稳定的一个重要方面, 它由负荷和系统两部分决定<sup>[1-3]</sup>。随着 PMU 在电力系统中的广泛应用, 通过对部分重要节点的电压和电流向量的测量, 根据系统实时运行状态, 对系统戴维南等值参数进行跟踪, 成为判断电压稳定的一种重要方法<sup>[4-6]</sup>。目前, 戴维南等值参数估计方法大多采用最小二乘法、曲线拟合法以及一些智能算法<sup>[7-11]</sup>, 然而最小二乘法和曲线拟合法都可能存在参数漂移, 而智能算法计算时间较长, 很难满足在线实时估计, 常用于离线估计。电网在运行过程中, 其网络的拓扑结构、发电机以及负荷的模型都不断发生变化, 戴维南等值参数也将随时间发生变化。

文献[12]提出对戴维南等值参数进行实时跟踪; 文献[13]提出了数据采集的误差对等值参数的影响, 并使用相关性检验对数据进行处理; 文献[14]指出了参数 0/0 模型的漂移问题。以上文献从不同的方面对现有的方法进行了改进, 但有些方法在速度和精度上仍不能满足在线辨识要求。文献[4]则提出了戴维南等值参数跟踪算法, 该算法利用因子  $K^*$  在前一次等值的基础上进行修正, 从而解决了参数漂移的问题。

本文在文献[4]的基础上, 针对戴维南等值参数的在线跟踪提出了一种基于偏差量修正的迭代算法, 并用一致性检验对初值进行选择。文献[4]提出使用因子  $K^*$  进行变量的修正, 指出  $K^*$  越大, 收敛速度越快, 而波动也越大, 然后凭经验给出  $K^*$  在 0.01%~0.1%之间。然而算法中将戴维南等值的电阻  $R$  忽略, 在高压输电网中, 输电线路的电阻相对于

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (50907008, 60974036)

电抗较小，可以忽略。但对从某一负荷节点往系统看进去的戴维南等值阻抗而言，其电阻是否一定还存在可以忽略的条件，值得慎重。因为戴维南等值阻抗除了包含各种输电线路、变压器、电抗器、电容器等元件参数的影响外，还受到系统中其他负荷及各种受控电源的影响，负荷的等值电阻不可忽略。戴维南等值阻抗中同时包含了电阻较小和电阻不可忽略的成分，是两方面综合作用的结果。实际分析发现，许多情况，戴维南等值阻抗的电阻成分不一定很小，有时数值较大，甚至还有出现等值负电阻的现象。

本文首先推导出所估计参数的表达式以及参数的修正量，并根据实时变化的数据判断修正量的变化方向，进而对参数进行迭代修正，得出实时估计的参数值。文献[4]由于忽略电阻，使整个估计和修正都是标量运算，本文为了更加精确估计等值参数，仍对戴维南等值电阻估计，这样使得整个估计都在向量空间进行。另外，文献[4]将变量的初值定为最大值和最小值的平均值，但根据  $E_{\max} = V_i \cos \theta / \cos \beta$ ，若  $\beta$  初始值较大， $E_{\max}$  也会很大，这样便会影响到收敛速度。本文只需对初值进行一次选择，而不需对所有的采样点进行校验，节省了采样数据处理时间。因此，迭代法只需一个工频周期的采样值就能达到较好的跟踪效果，具有很好的实时价值。

### 1 戴维南等值参数估计的数学描述

戴维南等值电路如图 1 所示。由图 1 可得  $\vec{E}_{th} = \vec{U} + \vec{Z}_{th} \vec{I}$ ，倘若通过 PMU 装置，便可得到一系列实时的  $\vec{U}$  和  $\vec{I}$ ，然而该方程有两个未知变量，如果在戴维南等值参数不变的情况下，只需两组数据就可估计出  $\vec{E}_{th}$  和  $\vec{Z}_{th}$  的等值。当然，也可采用最小二乘法利用多组数据对其进行估计，但要想保持戴维南等值参数不变却很困难，尤其是在扰动的情況下，戴维南的等值参数是实时变化的。

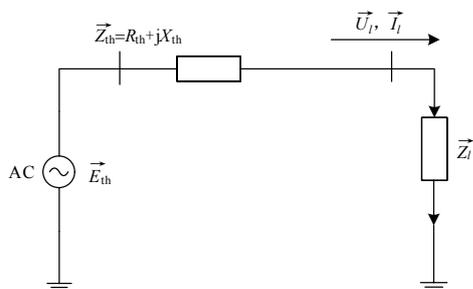


图 1 戴维南等值电路

Fig.1 Thevenin equivalent circuit

戴维南等值向量图如图 2 所示。以电流向量的方向为参考方向，将图 2 中的向量写成代数形式如式 (1)：

$$\begin{cases} E_{th} \cos \beta = R_{th} I_i + V_i \cos \theta \\ E_{th} \sin \beta = X_{th} I_i + V_i \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中，如果  $\vec{E}_{th}$  的向量值估计出来，便可得到  $R$  和  $X$  的估计值。

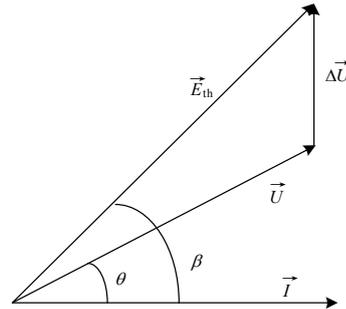


图 2 戴维南等值向量图

Fig.2 Phasor of the equivalent circuit

$$\overline{\Delta Z}_{th}^i - \overline{\Delta Z}_{th}^{i-1} = \overline{\Delta E}_{th} \cdot \left( \frac{1}{I_i^i} - \frac{1}{I_i^{i-1}} \right) \quad (2)$$

由文献[4]和附录的推导可以得到式(2)；式(2)由于以电流向量作为参考，则电流的向量形式可以表示为标量形式，得到式(3)。

$$\overline{\Delta Z}_{th}^i - \overline{\Delta Z}_{th}^{i-1} = \overline{\Delta E}_{th} \cdot \left( \frac{1}{I_i^i} - \frac{1}{I_i^{i-1}} \right) \quad (3)$$

从附录推导可知：①等值阻抗中，阻抗估计值偏差的相角和等值电势偏差的相角相同。②另外，由于 PMU 的采样速度很快，因此算法中假设第  $i$  次和第  $i-1$  次采样之间，戴维南的等值参数保持不变。在此情况下，当负荷阻抗的幅值  $Z_l$  和估计出的戴维南等值阻抗  $Z_{th}$  有相同的变化方向，那么等值电势幅值有减小的趋势，否则会增加。

### 2 戴维南参数估计的算法分析

由式 (1) 可知，方程中有四个未知量需要估计。在估计出  $E_{th}^{i-1}$  和  $\beta_{th}^{i-1}$ 、 $R_{th}^{i-1}$  和  $X_{th}^{i-1}$  后，若本次采样值为  $V_i^i$  和  $I_i^i$ ，则定义  $*R_{th}$  和  $*X_{th}$  分别为本次的  $V_i^i$  和  $I_i^i$  以及上次的估计值  $E_{th}^{i-1}$  和  $\beta_{th}^{i-1}$  通过式 (2) 计算出的预测值，而以阻抗预测值  $*Z_{th}^i$  与上次估计值  $Z_{th}^{i-1}$  之间的偏差量，来预测  $E_{th}^i$  和  $\beta_{th}^i$  的变化方向。定义三个变量：

$$|\Delta Z| = |*Z_{th}^i - Z_{th}^{i-1}| = A \angle \phi \quad (4)$$

$$\phi = \left| \tan^{-1} \left( \frac{{}^*X_{th}^i - X_{th}^{i-1}}{{}^*R_{th}^i - R_{th}^{i-1}} \right) \right| \quad (5)$$

$$B = |{}^*Z_{th}^i| - |Z_{th}^{i-1}| \quad (6)$$

$$\overline{E}_{th}^i = \overline{E}_{th}^{i-1} + \overline{\Delta E} \quad (7)$$

改进算法的流程如下:

- 1) 首先估计出  $E_{th}^0$  和  $\beta_{th}^0$  的初始估计值。
- 2) 通过式 (1), 计算出  $R_{th}^0$  和  $X_{th}^0$ 。
- 3) 利用本次的采样值  $V_i^i$  和  $I_i^i$  以及上次的估计值  $E_{th}^{i-1}$  和  $\beta_{th}^{i-1}$ , 计算出等值阻抗的预测值  ${}^*R_{th}^i$

和  ${}^*X_{th}^i$ , 并根据式 (5) 和式 (6), 计算出  $\phi$  和  $B$ 。

- 4) 判断等值电势变化的方向。

如果  $Z_i^i > Z_i^{i-1}$ , 即负荷阻抗增加, 那么

如果  $B > 0$ , 则  $\overline{\Delta E} = -\varepsilon \angle \phi$ ;

如果  $B \leq 0$ , 则  $\overline{\Delta E} = \varepsilon \angle \phi$ 。

如果  $Z_i^i < Z_i^{i-1}$ , 即负荷阻抗增加, 那么

如果  $B > 0$ , 则  $\overline{\Delta E} = \varepsilon \angle \phi$ ;

如果  $B \leq 0$ , 则  $\overline{\Delta E} = -\varepsilon \angle \phi$ 。

如果  $Z_i^i = Z_i^{i-1}$ , 即负荷阻抗增加, 那么  $\overline{\Delta Z} = 0$ 。

- 5) 由求得的偏差量和式 (7) 计算出  $E_{th}^i$  和  $\beta_{th}^i$ 。

- 6) 由式 (1) 计算出  $R_{th}^i$  和  $X_{th}^i$  的估计值。

- 7) 进行下一次的数据采集,  $i=i+1$ , 返回到 3)。

可以看出, 这种迭代法一旦开始, 就可以随着 PMU 实时采集的数据不断进行下去, 从而对戴维南参数进行跟踪估计。

其中一个问题是  $\varepsilon \angle \phi$  中的  $\varepsilon$  的选择, 文献[4]中指出, 比例因子  $K^*$  在 0.01%~0.1%之间, 效果很明显, 本文通过大量实验仿真, 发现  $\varepsilon$  与  $K^*$  的选择具有相似的特点,  $\varepsilon$  过大会造成等值数据波动太大, 过小不能达到快速跟踪的效果, 而选择  $\varepsilon$  在 0.005%~0.05%之间的效果很好。

另一个重要的问题是  $E_{th}^0$  和  $\beta_{th}^0$  初始值选择。由式 (1) 可知, 任意两组数据便可确定  $E_{th}$  和  $\beta_{th}$  的初始值。然而为了避免两组数据比较接近, 从而产生 0/0 的漂移, 本文采用一致性检验方法对其进行选择, 首先选用具有代表性的一组  $U$  和  $I$ 。由式 (1) 可以得到

$$\tan \beta_{th} = \frac{R_{th} I_l + V_l \cos \theta_l}{X_{th} I_l + V_l \sin \theta_l} = \frac{R_{th} + Z_l \cos \theta_l}{X_{th} + Z_l \sin \theta_l}$$

由于一般情况下  $R_{th} \ll X_{th}$ , 并且  $|Z_l| > |Z_{th}|$ , 当  $|Z_l| \approx |Z_{th}|$  时, 达到电压崩溃点。因此可得到:  $Z_{th} = 0$

时, 即  $\overline{E}_{th} = \overline{U}_l$  时, 得到  $\beta_{th}^{\max} = \theta_l$ ;  $|X_{th}| \approx |Z_l|$  时,

有  $\beta_{th}^{\min} = \arctan \left( \frac{\cos \theta_l}{1 + \sin \theta_l} \right)$ ;  $\beta_{th}^0 = (\beta^{\max} + \beta^{\min}) / 2$ ;

$E_{th}^0 = V_l \cos \theta_l / \cos \beta_{th}^0$ 。此时通过式 (1) 计算出  $R_{th}^0$  和  $X_{th}^0$ , 如果计算值满足  $R_{th}^0 \ll X_{th}^0$ , 那么认为是可靠的, 可以继续实时计算。否则重新选择初始运行点。

### 3 算例分析

本文对 IEEE14 节点系统的 5 号母线进行仿真, 并设该母线装有 PMU 装置进行实时检测。仿真时, 系统以各节点的有功功率同比例增加的方式, 得到一组连续潮流的采样值, 将其作为 PMU 实时采样的数据, 设采样的周期为工频周期。仿真中均采用标么值, 并假定采样的数据中没有噪声。得到仿真结果如图 3 和图 4 所示。

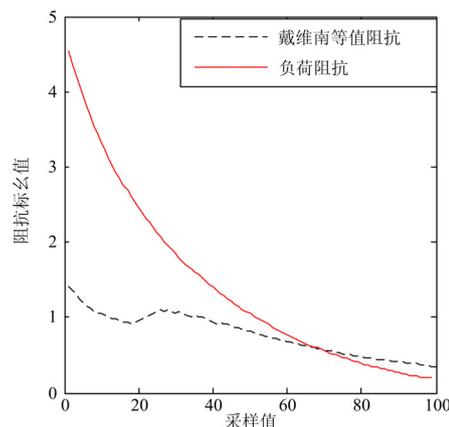


图 3 戴维南等值阻抗、负荷阻抗

Fig.3 Thevenin equivalent impedance and load impedance

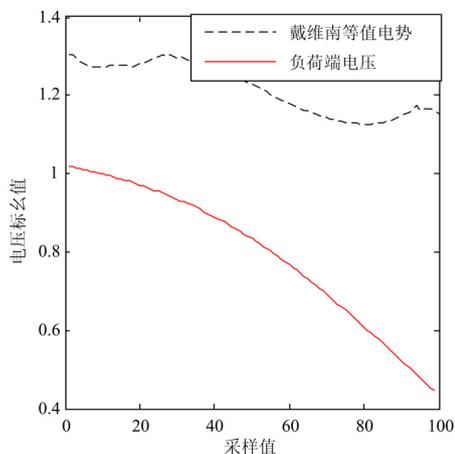


图 4 戴维南等值电势、负荷端电压

Fig.4 Thevenin voltage and load voltage

仿真采用 100 组数据，采样周期为 0.02 s，得到随时间不断变化的戴维南等值参数，取其中具有代表性的 14 组进行分析，结果如表 1 所示。

表 1 戴维南等值参数的实时跟踪值

Tab.1 Thevenin parameters on-line tracking

采样点	采样值 (标么值)			等值参数估计 (标么值)		
	电压 ( $U$ )	电流 ( $I$ )	角度 ( $\theta$ )	等值电势 ( $E_m$ )	等值电阻 ( $R_m$ )	等值电抗 ( $X_m$ )
0.02	1.018 5	0.081 308	11.888 7	1.303 6	0.472 6	1.319 1
0.04	1.016 6	0.086 498	11.888 7	1.302 0	0.415 2	1.309 6
0.06	1.014 6	0.091 694	11.888 7	1.294 1	0.406 1	1.243 6
0.08	1.012 6	0.096 895	11.888 7	1.287 4	0.394 5	1.186 6
0.10	1.010 6	0.102 100	11.888 7	1.281 9	0.380 9	1.138 1
0.16	1.004 0	0.117 756	11.888 7	1.273 0	0.334 1	1.037 2
0.48	0.957 9	0.202 472	11.888 7	1.296 3	0.473 0	0.941 2
0.64	0.926 9	0.245 788	11.888 6	1.297 2	0.531 6	0.913 9
0.80	0.889 7	0.289 789	11.888 7	1.268 9	0.438 7	0.830 6
0.96	0.845 6	0.334 361	11.888 7	1.238 8	0.352 1	0.762 0
1.12	0.795 2	0.378 511	11.888 7	1.198 5	0.247 9	0.682 4
1.28	0.639 0	0.422 228	11.888 7	1.163 3	0.152 8	0.610 8
1.44	0.753 1	0.465 132	11.888 7	1.137 7	0.065 1	0.542 8
1.60	0.609 2	0.507 283	11.888 7	1.126 9	-0.013 6	0.476 4

由图 3 可以看出，随着有功功率的增加，负荷阻抗和戴维南等值阻抗将逐渐接近，当二者相等时，线路的传输功率达到最大，达到电压崩溃点，所得结果均与文献[7]中仿真结果一致。此外，从表 1 中还可看出，该算法可以利用一个工频周期的采样值对戴维南等值参数实时更新，在采样时间为 1.5 s 附近，此时传输功率达到最大，这与连续潮流的分析结果一致<sup>[15]</sup>。

另外，考虑在系统扰动的情况下，也必须保证戴维南等值参数能够实时跟踪，并且在系统恢复稳定后，等值参数也必须恢复稳定。采用 EPRI7 节点系统某母线进行仿真，取 2 000 个数据点仿真，假设系统在第 100 个点处发生大扰动，仿真结果如图 5 和图 6 所示。

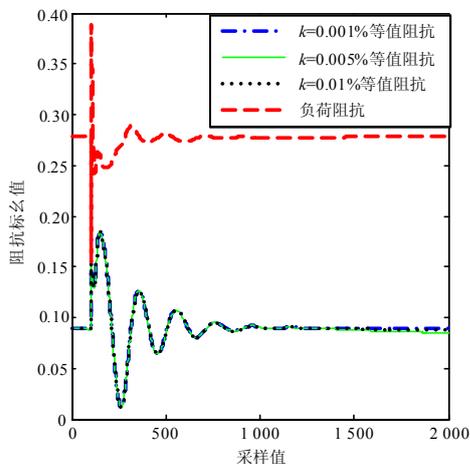


图 5 戴维南等值阻抗、负荷阻抗

Fig.5 Thevenin equivalent impedance and load impedance

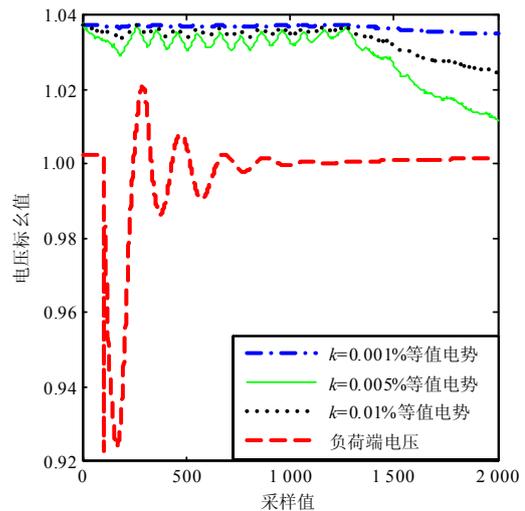


图 6 戴维南等值电势、负荷端电压

Fig.6 Thevenin equivalent potential and load voltage

从仿真的结果可以发现，本文的改进算法能够很好地跟踪戴维南等值参数，并且在扰动情况下，也能保证实时跟踪并且快速到达稳定。另外，也能看出，选择  $\varepsilon$  在 0.005%~0.05%之间时，因子  $\varepsilon$  的不同值，等值的阻抗基本相同，而等值电势略有不同，但是误差很小，能够满足等值的精度要求，因此  $\varepsilon$  在此范围内选择具有一定的合理性。

#### 4 结论

基于已解决参数漂移问题的戴维南等值参数跟踪方法，本文提出了采用偏差量对变量进行修正，在修正时对方向进行判断，使得参数估计误差减小，

进而能够快速有效地跟踪估计戴维南等值参数。尤其在扰动情况下, 也能使估计值快速稳定, 另外迭代法只需一个工频周期的采样值就能达到很好的跟踪效果, 具有很好的实时性。本文所提出的改进算法有望在实际工程中得到应用。

#### 附录:

根据文献[4], 将所有的标量式转换成向量的形式, 首先重新定义符号,  $\overline{\Delta}$  表示参数估计的误差。并假设 PMU 采集数据的电压和电流没有误差, 则有式 (1) ~ (4) 成立。

$$\overline{E}_{th} = \overline{E}_{th} + \overline{\Delta E}_{th} = \overline{E}_{th} + \overline{\Delta Z}_{th} \cdot \overline{I}_l \quad (1)$$

$$\overline{E}_{th} = \overline{V}_l + Z_{th} \cdot \overline{I}_l \quad (2)$$

$$\overline{\Delta E}_{th} = \overline{\Delta Z}_{th} \cdot \overline{I}_l \quad (3)$$

$$\overline{\Delta Z}_{th} = \frac{\overline{\Delta E}_{th} \cdot (Z_{th} + Z_l)}{\overline{E}_{th}} \quad (4)$$

假设在两次采样时, 负荷阻抗不变化, 那么无法得知测量的误差, 此时等值的参数保持不变, 无需对等值参数修正, 所以误差量也不必得到。如果负荷阻抗变化但此时保持等值的电动势的测量误差保持不变, 那么可以得到阻抗的变化所造成阻抗误差的偏差量, 从而根据偏差量进行修正, 则有:

$$\overline{\Delta E}_{th} = \overline{\Delta Z}_{th}^{i-1} \cdot \overline{I}_l^{i-1} \Rightarrow \overline{\Delta Z}_{th}^{i-1} = \frac{\overline{\Delta E}_{th}}{\overline{I}_l^{i-1}} \quad (5)$$

$$\overline{\Delta E}_{th} = \overline{\Delta Z}_{th}^i \cdot \overline{I}_l^i \Rightarrow \overline{\Delta Z}_{th}^i = \frac{\overline{\Delta E}_{th}}{\overline{I}_l^i} \quad (6)$$

$$\overline{\Delta Z}_{th}^i - \overline{\Delta Z}_{th}^{i-1} = \overline{\Delta E}_{th} \cdot \left( \frac{1}{\overline{I}_l^i} - \frac{1}{\overline{I}_l^{i-1}} \right) \quad (7)$$

$$\overline{\Delta Z}_{th}^i - \overline{\Delta Z}_{th}^{i-1} = \overline{\Delta E}_{th} \cdot \frac{(\overline{I}_l^{i-1} - \overline{I}_l^i)}{(\overline{I}_l^{i-1} \cdot \overline{I}_l^i)} \quad (8)$$

从式 (8) 可以看出, 如果以电流向量作为参考方向, 那么  $\overline{\Delta Z}_{th}^i - \overline{\Delta Z}_{th}^{i-1}$  的角度与  $\overline{\Delta E}_{th}$  的角度是一样的, 从而得到结论: ①阻抗估计值偏差的相角和等值电势偏差的相角相同。另外, 由于 PMU 的采样速度很快, 因此算法中假设第  $i$  次和第  $i-1$  次采样之间, 戴维南的等值参数保持不变。在此情况下, 由式 (7) 可以看出, 当负荷阻抗的幅值  $Z_l$  增加时,

$\frac{1}{\overline{I}_l^i} - \frac{1}{\overline{I}_l^{i-1}}$  为负值, 如果  $|\overline{\Delta Z}_{th}^i| - |\overline{\Delta Z}_{th}^{i-1}|$  增加, 即变

化方向为正方向, 如图 1 所示, 但是此时  $\frac{1}{\overline{I}_l^i} - \frac{1}{\overline{I}_l^{i-1}}$  为负值, 那么第  $i$  时刻的电势的变化为负方向, 即会有向  $E_1$  变化的趋势, 也即电势幅值有下降的趋势; 如果  $|\overline{\Delta Z}_{th}^i| - |\overline{\Delta Z}_{th}^{i-1}|$  减小, 那么变化方向为正方向, 但是此时  $\frac{1}{\overline{I}_l^i} - \frac{1}{\overline{I}_l^{i-1}}$  为负值, 那么第  $i$  时刻的电势的变化为正方向, 即会有向  $E_2$  变化的趋势, 也即电势幅值有上升的趋势。同理, 当负荷减小也同样可以推出。②总之, 当负荷阻抗的幅值  $Z_l$  和估计出的戴维南等值阻抗  $Z_{th}$  有相同的变化方向, 那么等值电势幅值有减小的趋势, 否则会增加。

结论②表明了算法中对等值参数修正的方向, 当式 (7) 中产生误差, 则可根据图 1 所设的正方向, 得到等值电势修正的方向。

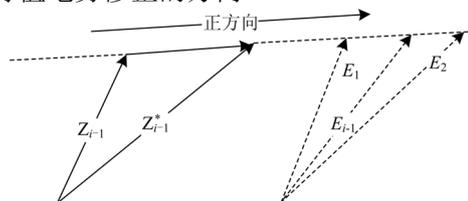


图 1 电势修正方向

Fig.1 The direction of voltage deviation

#### 参考文献

- [1] 苏永春, 汪晓明. 基于延拓法的电力系统动态电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(7): 12-18. SU Yong-chun, WANG Xiao-ming. Power system dynamic voltage stability analysis based on the continuation method[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(7): 12-18.
- [2] Begovic M, Milosevic B, Novosel D. A novel method for voltage instability protection[C]. //Proceedings of the 35th Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii(USA): 2002.
- [3] 肖玲, 李华强, 唐国栋. 基于静态电压稳定的事故筛选和排序算法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 15-23. XIAO Ling, LI Hua-qiang, TANG Guo-dong. A summary of contingency screening and ranking based on static voltage stability[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 15-23.
- [4] Sandro Corsi, Taranto G N. A real-time voltage instability identification algorithm based on local phasor measurements[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008.
- [5] 安天瑜, 周苏荃. 一种电压薄弱负荷节点群的戴维南等值参数跟踪方法研究[J]. 继电器, 2007, 35(24):

15-21.  
AN Tian-yu, ZHOU Su-quan. Research on a weak voltage node group's Thevenin equivalents tracing method[J]. Relay, 2007, 35(24): 15-21.

[6] 刘宝柱, 于继来. 基于阻抗动态步进的PVZ曲线快速求解[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 104-109.  
LIU Bao-zhu, YU Ji-lai. Fast computation of PVZ curves with impedance dynamic step[J]. Power System Technology, 2004, 24(9): 104-109.

[7] 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 Guo-dong, WANG Xiao-ru. Uncertain models for identification of electric power system Thevenin equivalent parameters[J]. Power System Technology, 2008, 28(28): 74-79.

[8] Smon I, Verbic G, Gubina F. Local voltage-stability index using Tllegen's theorem[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(3): 1267-1275.

[9] 李娟, 刘修宽, 曾圈臣, 等. 一种面向节点的电网等值参数跟踪估计方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 30-33.  
LI Juan, LIU Xiu-kuan, ZENG Quan-chen, et al. A tracking estimation method for network equivalent parameters of facing the node[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 30-33.

[10] Corsi S, Taranto G N, Guerra L. New real-time voltage stability indicators based on phasor measurement unit[C]. // Proc CIGRE Conf. 2008.

[11] 王芝茗, 王漪, 徐敬友, 等. 关键负荷节点集合电网侧戴维南参数预估[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 16-20.  
WANG Zhi-ming, WANG Yi, XU Jing-you, et al. Prediction of Thevenin's equivalent parameters on electrical power network side for the muster of key load nodes[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 16-20.

[12] 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): 40-43.  
LI Lai-fu, LIU Jin, YU Ji-lai, et al. A simple and direct method of on-line tracking Thevenin equivalent parameters of load node[J]. Power System Technology, 2006, 26(10): 40-43.

[13] 赵金利, 余贻鑫. 基于本地向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): 5-8,14.  
ZHAO Jin-li, YU Yi-xin. Condition of applying voltage instability predictor(VIP) based on local measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(24): 5-8,14.

[14] 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): 1-4.  
LI Lai-fu, YU Ji-lai, LIU Zhuo. Research parameters drift problem in tracking Thevenin equivalent[J]. Power System Technology, 2005, 25(20): 1-5.

[15] 祝达康, 程浩忠. 求取电力系统PV曲线的改进连续潮流法[J]. 电网技术, 1999, 23(4): 37-40.  
ZHU Da-kang, CHENG Hao-zhong. An improved continuation method intracing PV curves of power systems[J]. Power System Technology, 1999, 23(4): 37-40.

收稿日期: 2010-01-23; 修回日期: 2010-05-08

作者简介:

牟善科 (1982-), 男, 工程师, 硕士, 从事电力系统运行和稳定分析工作;

丁涛 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行和控制; E-mail: yuhan19860601@sina.com

顾伟 (1981-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统电压稳定和PMU应用。

封面人物介绍

右七 国家电网公司科技部主任 葛正翔

右五 国家电网公司科技部副主任 周宏

左三 中国电力技术装备有限公司副总经理李光范

左二 国家电网公司科技部处长 葛俊

左一 国家电网公司科技部办公室主任 杨建莲

左四 许继集团总裁 李富生

右一 中国电力技术装备有限公司 韩书谟

右六 许继集团副总裁 于世新

右二 许继集团副总裁 檀国彪

左五 许继集团副总裁 王定国

右三 许继集团副总裁 姚致清

右四 许继电气有限公司总经理 张新昌