

## 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

安天瑜, 周苏荃

(哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 提出了用戴维南等值参数对电压薄弱负荷节点群进行监视的一种方案。静态分析中, 采用连续潮流法确定负荷节点电压—负荷参数曲线; 在负荷变化率相同情况下, 根据电压幅值变化量确定电压薄弱负荷节点; 考虑低电压水平与电压崩溃的关系, 提出电压幅值变化率作为电压薄弱负荷节点分群所观察信息, 考虑地理因素, 将电压薄弱负荷节点模糊聚类分群; 将每个电压薄弱负荷节点群中典型节点电网侧戴维南等值参数跟踪。提出基于潮流的仿真计算方法进行戴维南等值参数跟踪, 观测电压薄弱负荷节点群的电压稳定裕度。该方法在 IEEE 118 节点系统上验证了其有效性。

**关键词:** 电压薄弱负荷节点分群; 典型节点; 潮流; 戴维南等值参数跟踪

## Research on a weak voltage node group's Thevenin equivalents tracing method

AN Tian-yu, ZHOU Su-quan

(Dept of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** A method is presented to monitor the weak voltage load node groups with Thevenin equivalents. First, continuation power flow solves voltage-load parameter curves of the load nodes. Then weak voltage nodes are selected with voltage magnitude variation under similar load variation rate. With considering about the relation of low voltage level and voltage collapse, voltage magnitude variation rate is chosen as the observation information of weak voltage load nodes grouping. The weak voltage load nodes are fuzzily clustered according to their similarities and simultaneously the geographic factors are taken into consideration. This paper tracks network side Thevenin equivalents on each typical node of weak voltage load node group and analyzes the problems of Thevenin equivalents computing based on local measurements. Therefore, a power flow data based simulation method to track Thevenin equivalents is proposed, which can observe the voltage stability margin of weak voltage load node group. The simulations on IEEE 118 system show the proposed scheme is effective.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50177006).

**Key words:** weak voltage load node grouping; typical node of weak voltage load node group; power flow; Thevenin equivalents' tracing

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)24-0021-05

## 0 引言

电力系统负荷节点中, 电压薄弱点需要进行重点监视。因此, 电压薄弱负荷节点的选择十分必要。而电压薄弱负荷节点中经常有些节点具有类似的特征, 寻找最具有代表性的节点进行监视不但可以直观清晰地得到系统电压薄弱负荷节点的信息, 还可以减少进行监视的工作量。

电压稳定分析中, 可以用比较节点负荷阻抗模与戴维南阻抗模来作为电压稳定判据。戴维南等值参数包括戴维南电势和戴维南阻抗。从节点看电网, 戴维南等值阻抗就是整个电网的内阻抗。无论是戴

维南等值参数还是节点负荷阻抗都不是固定不变的, 他们依赖于网络拓扑结构、系统运行模式、发电状况以及无功电源等诸多因素<sup>[1~6]</sup>, 因此需要及时跟踪戴维南等值参数。基于当地测量的戴维南等值参数跟踪具有速度快等良好特性<sup>[7]</sup>, 但是尚有不足之处: 测量时间间隔较大, 则戴维南等值参数可能发生变化; 测量时间间隔较小, 则可能遇到严重的病态方程组带来的解数值不稳定现象。本文提出立足于更加接近系统真实状态最佳估计值的潮流数据的仿真方法来解决这一问题。

## 1 电压薄弱节点分析

电压崩溃具有事故的突发性和隐蔽性, 在电压不稳定事故形成期间很难觉察, 因此需要对系统中

最容易发生电压不稳定的节点进行监测以做好预防措施。例如,在电压薄弱的节点安装快速采样的高精度测量装置使之能够直接观测具有非常重要的意义。在电力系统电压稳定分析中,主要关心的是表征功率极限和电压临界值的鞍节点(SNB),即临界点或者崩溃点,由于常规潮流在临界点处雅可比矩阵奇异,临界点附近病态,潮流计算将无法收敛,因此SNB的求取方法一般采用和连续潮流法相结合的常规潮流<sup>[8]</sup>。

在连续潮流分析中,随着负荷的变化,电压幅值 $V$ 也将随之变化。在相同的负荷变化率的情形下,用电压幅值 $V$ 的变化量 $\Delta V$ 来识别电压薄弱节点十分直观,即对负荷变化所引起的电压变动最大的节点是电压薄弱节点。将规格化后的 $\Delta V$  ( $\Delta V/V_0$ ),按照从大到小进行排序,选出较大的那些节点作为电压薄弱节点集,这里 $V_0$ 是节点额定电压幅值。

通常,电压薄弱的节点可能是全网负荷和线路潮流最重的节点,全网电压最低点,无功负荷较大的节点,无功负荷密集而且负荷增长很快的节点以及同一条线路串带过多节点的节点。

## 2 电压薄弱负荷节点分群

### 2.1 电压薄弱负荷节点分群信息

实际中可以将具有某种相似特征的电压薄弱负荷节点分群,这样我们对电压薄弱负荷节点只需对群中最具有代表特性的节点进行监视,监视的信息量将较未分群前降低。目前关于节点分群的研究中,均以节点信息的空间距离作为表征节点信息相似程度的度量指标。在电压稳定中电压失稳必然导致低电压现象,而电压水平低并不一定会导致电压崩溃,电压崩溃有时会发生在高电压水平。考虑到此种情形,本文提出采用电压幅值变化率作为待考察的电压薄弱负荷节点分群信息。令 $\zeta_i(\lambda)$ 为第 $i$ 节点电压幅值对负荷参数 $\lambda$ 的变化率函数,即,

$$\zeta_i = \frac{\partial V_i}{\partial \lambda} \quad (1)$$

描述节点同群的指标可以有多种形式,既可以在时域中从欧氏空间距离出发建立指标,又可以在频域中从相干性分析角度着手构建的指标。

### 2.2 电压薄弱负荷节点分群方法

由上面指标得到的节点之间的关系只是对称的和自反的关系,还不具有传递性,不能用来直接进行聚类,又考虑到节点分群是个动态聚类问题,因此构造一种模糊最大树进行聚类,该方法还可以避免将分群指标组成矩阵而导致将其改造成模糊等

价关系阵的繁琐计算,可以很直观而简便的进行聚类。

由于电网具有地理特性,因此不能直接应用上述分群的结果。本文认为,相距甚远的节点用同一节点的状态量所表征不切合实际意义,所以所有同群节点应该保证在同一地理范围内。

## 3 电压薄弱负荷节点群典型节点

基于戴维南等值参数跟踪的待监视负荷节点从同一地理范围内隶属于同群的电压薄弱负荷节点中选出,该节点的分群信息最具有代表性,能够表征该群分群信息特征。

设共有 $Z'$ 个电压薄弱负荷节点群; $C_k$ 为其中第 $k$ 个群,其中, $1 \leq k \leq Z'$ ,且 $k$ 为正整数; $x_i^k$ 为第 $k$ 群中的节点, $NC_k$ 为 $C_k$ 中节点元素的个数,即, $x_i^k \in C_k$ , $1 \leq i \leq NC_k$ ,其中, $i$ 为正整数。

定义电压薄弱负荷节点分群信息中心为电压薄弱负荷节点分群信息的算术平均值。记 $\zeta_{\text{Mean}}^k$ 为第 $k$ 电压薄弱负荷节点群的分群信息中心,故

$$\zeta_{\text{Mean}}^k = \frac{1}{NC_k} \sum_{i=1}^{NC_k} \zeta_i^k \quad (2)$$

第 $k$ 群电压薄弱负荷节点群典型节点 $x_{x_i^k}$ 应满足:

$$\int_0^r (\zeta_{x_i^k}^k(\lambda) - \zeta_{\text{Msrn}}^k(\lambda))^2 d\lambda = \min_{1 \leq i \leq NC_k} \int_0^r (\zeta_{x_i^k}^k(\lambda) - \zeta_{\text{Msrn}}^k(\lambda))^2 d\lambda \quad (3)$$

得到电压薄弱负荷节点群典型节点后,便可在进行戴维南等值参数跟踪,以提供电压薄弱负荷节点的电压稳定信息。

## 4 基于当地测量的戴维南等值参数跟踪数值分析

利用本地测量值估计戴维南等值参数已经应用到实际装置中,这种装置原理较简单,可以在数字继电器中实现,但是这种装置在实际应用中仍然存在问题。

无论是应用两次还是多次(二次以上)的电压、电流测量值进行戴维南等值参数跟踪时,均可以得到如下形式的方程组(多次测量值时采用最小二乘法<sup>[10]</sup>写戴维南方程组)

$$AX = b \quad (4)$$

这里, $X$ 为戴维南等值参数。实际中,为了能够保证式(4)得到性能良好的精确解,即使尝试正交

化方法使得矩阵  $A$  行向量两两正交, 进而一定程度上改进矩阵中行向量之间近似线性相关性, 但是依然无法保证线性方程组严重病态的不发生, 因此要求将两次测量的时间间隔尽量拉开。但是这是基于戴维南参数不变的前提下, 而电力系统却是一个复杂的时变系统, 网络物理结构随时在变, 每次测量的系统戴维南等值参数很难保证不发生变化, 此时的戴维南等值参数线性方程组如式(5)

$$\begin{cases} E'_T = Z'_T \cdot I_1 + V_1 \\ E''_T = Z''_T \cdot I_2 + V_2 \\ E'_T \neq E''_T \\ Z'_T \neq Z''_T \end{cases} \quad (5)$$

$E'_T$ 、 $Z'_T$  和  $E''_T$ 、 $Z''_T$  为不同的戴维南等值参数, 这时方程式(5)显然无法求解。针对这些问题, 本文提出了基于潮流数据的仿真方法进行戴维南等值参数跟踪。

### 5 基于潮流的戴维南等值参数跟踪

第  $t$  时刻潮流计算结果中, 待进行戴维南等值参数的负荷节点  $k$  的电压记做  $V_{i,1}^k$ , 此时的输入负荷

为  $\tilde{S}_{i,1}^k$ , 则负荷电流为  $I_{i,1}^k = \left[ \frac{\tilde{S}_{i,1}^k}{V_{i,1}^k} \right]^*$ 。将负荷施加一

较小增量  $\Delta\tilde{S}_{i,1}^k$  (可正可负, 并认为此增量对戴维南等值参数影响可以忽略), 令  $\tilde{S}_{i,2}^k = \tilde{S}_{i,1}^k + \Delta\tilde{S}_{i,1}^k$ 。

再进行潮流计算, 得到负荷节点  $k$  的电压为

$V_{i,2}^k$ , 则此时负荷电流  $I_{i,2}^k = \left[ \frac{\tilde{S}_{i,2}^k}{V_{i,2}^k} \right]^*$ 。

由  $V_{i,1}^k$ 、 $V_{i,2}^k$ 、 $I_{i,1}^k$ 、 $I_{i,2}^k$  的实部、虚部  $V_{r,(t,1)}^k$ 、 $V_{i,(t,1)}^k$ 、 $V_{r,(t,2)}^k$ 、 $V_{i,(t,2)}^k$ 、 $I_{r,(t,1)}^k$ 、 $I_{i,(t,1)}^k$ 、 $I_{r,(t,2)}^k$ 、 $I_{i,(t,2)}^k$  建立线性方程组

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_{r,(t,1)}^k & I_{i,(t,1)}^k \\ 0 & 1 & -I_{i,(t,1)}^k & -I_{r,(t,1)}^k \\ 1 & 0 & -I_{r,(t,2)}^k & I_{i,(t,2)}^k \\ 0 & 1 & -I_{i,(t,2)}^k & -I_{r,(t,2)}^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{r,t}^k \\ E_{i,t}^k \\ R_{T,t}^k \\ X_{T,t}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{r,(t,1)}^k \\ V_{i,(t,1)}^k \\ V_{r,(t,2)}^k \\ V_{i,(t,2)}^k \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: 所解得的  $E_{r,t}^k$ 、 $E_{i,t}^k$ 、 $R_{T,t}^k$ 、 $X_{T,t}^k$  为负荷节点  $k$  在第  $t$  时刻的戴维南等值参数的实部和虚部。

### 6 仿真算例

本文对 IEEE118 典型系统进行了计算。连续潮流计算得出纯负荷节点的电压-负荷参数曲线簇, 计算到 SNB 点停止, 如图 1 所示。

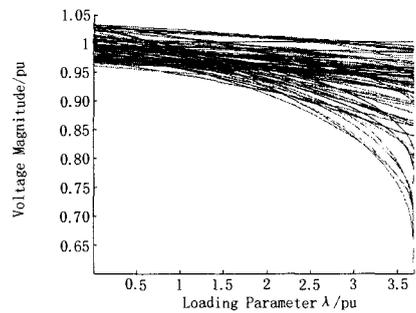


图 1 IEEE 118 系统负荷节点电压-负荷参数曲线  
Fig. 1  $V-\lambda$  Load nodes' curves of IEEE 118 system

按照规格化的  $\Delta V$  的大小挑选出如下电压薄弱母线: 20、21、22、43、44、45 (这里规格化的  $\Delta V$  的阈值为 0.192, 最大负荷参数为 3.68481)。

计算前面得到的 6 个电压薄弱母线的  $\zeta(\lambda)$ , 结果如图 2。

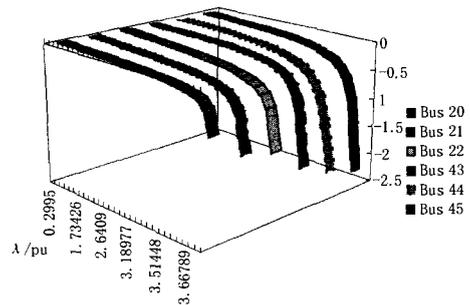


图 2 电压薄弱母线  $\zeta(\lambda)$   
Fig. 2  $\zeta(\lambda)$  of weak voltage nodes

考虑地域因素采用电压薄弱分群指标  $v^V$  对电压薄弱负荷节点进行分群, 得到表 1 中的 2 个电压薄弱负荷节点群。

表 1 IEEE 118 系统电压薄弱负荷节点分群结果

Tab.1 IEEE 118 system weak voltage load node group result

群	节点
1	20、21、22
3	43、44、45

根据式(2)计算得到电压薄弱负荷节点群典型节点为 21 和 45。图 3 和图 4 为电压薄弱负荷节点群各节点的  $\zeta(\lambda)$  和  $\zeta_{Mean}(\lambda)$ 。下面对节点 21、45 进行戴维南等值参数计算。

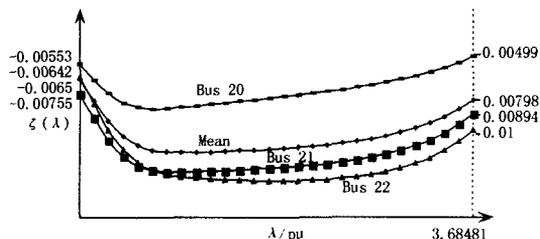


图3 群1 电压薄弱负荷节点的  $\zeta(\lambda)$  和  $\zeta_{Mean}(\lambda)$   
Fig.3  $\zeta(\lambda)$  and  $\zeta_{Mean}(\lambda)$  of weak voltage load nodes in group 1

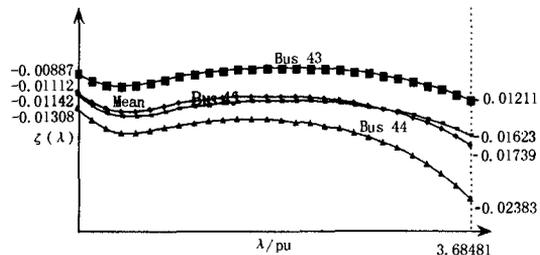


图4 群2 电压薄弱负荷节点的  $\zeta(\lambda)$  和  $\zeta_{Mean}(\lambda)$   
Fig.4  $\zeta(\lambda)$  and  $\zeta_{Mean}(\lambda)$  of weak voltage load nodes in group 2

下面对节点 21、45 进行戴维南等值参数计算。  
21 节点第  $k$  时刻该点有功负荷为 0.14 p.u., 无功负荷为 0.08 p.u.; 潮流计算后节点电压幅值为 0.95772 p.u., 节点电压相角为 0.24047 rad。在该点增加或者减少一定的负荷, 按照第 5 节方法计算出戴维南等值。

类似的, 45 节点第  $k$  时刻该点有功负荷为 0.53 p.u., 无功负荷为 0.22 p.u.; 潮流计算后节点电压幅值为 0.98638 p.u., 节点电压相角为 0.27528 rad。在该点增加或者减少一定的负荷, 按照第 5 节方法计算出戴维南等值。

表 2 和表 3 中, 在波动范围为 0.5%~10% 的负荷变化量  $\Delta \tilde{S}_i^k$  下, 戴维南等值参数的计算结果稳定性较好, 这也说明我们追踪戴维南等值的方法对于负荷的非大幅波动具有良好的适应性, 亦证明该追踪策略之可行性。

表 2 IEEE 118 系统 21 节点戴维南等值参数分析

Tab.2 IEEE 118 system Thevenin equivalent parameters analysis of node 21

21 节点	最大值/p.u.	最小值/p.u.	平均值/p.u.	最大值偏于平均值/(%)	最小值偏于平均值/(%)
$ E_T $	0.9739	0.972	0.972489474	0.145042803	-0.050332061
$\theta_{E_T}$	0.273517528	0.271430115	0.272016821	0.551696396	-0.215687396
$ Z_T $	0.2082	0.1973	0.201047368	3.557684973	-1.863922934
$\theta_{Z_T}$	0.88919813	0.811064975	0.856305655	3.841207261	-5.283239663

表 3 IEEE 118 系统 45 节点戴维南等值参数分析

Tab.3 IEEE 118 system Thevenin equivalent parameters analysis of node 45

45 节点	最大值/p.u.	最小值/p.u.	平均值/p.u.	最大值偏于平均值/(%)	最小值偏于平均值/(%)
$ E_T $	1.0178	1.0157	1.017278947	0.051220562	-0.155212786
$\theta_{E_T}$	0.343756559	0.341531264	0.342899878	0.249834151	-0.399129334
$ Z_T $	0.1283	0.1247	0.127947368	0.275607076	-2.538049864
$\theta_{Z_T}$	1.082186167	1.045844921	1.058759439	3.474821674	-1.219778311

## 7 结语

通过静态分析, 选出电压薄弱的负荷节点, 将

这些节点进行分群并选出具有代表群内节点的典型节点。选择在典型节点进行重点监视, 分析了基于就地测量的跟踪戴维南等值参数时遇到的问题, 提

出基于潮流计算数据的跟踪戴维南等值参数, IEEE 118 系统算例表明了该方法的可行性和有效性。

随着广域测量系统(WAMS)的推广与发展,在负荷节点跟踪戴维南等值参数的数据源可以采用更具有同步性的动态数据,得到更加接近真实状况的电压稳定信息。

### 参考文献

- [1] 王漪, 柳焯. 电力系统紧急无功补偿调控模式[J]. 电力系统自动化, 2000, 8(10): 45-48.  
WANG Yi, LIU Zhuo. Emergent Reactive Power Compensation in Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 20(2): 19-23.
- [2] 徐冰凉, 柳焯, 王永刚, 等. 电网负荷节点临界阻抗模的性质及意义[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(4): 91-95.  
XU Bing-liang, LIU Zhuo, WANG Yong-gang, et al. The Nature and Connotation of the Critical Impedance Module of the Load Bus in Power Network[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1999, 31(4): 91-95.
- [3] 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 Equivalency[J]. Power System Technology, 2000, 24(11): 28-30.
- [4] 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(1): 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(1):

16-20.

- [5] 李娟, 刘修宽, 曹国臣, 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, CAO Guo-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.
- [6] 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 Lai-fu, YU Ji-lai, LIU Zhuo. Research on Parameters Drift Problem in Tracking Thevenin Equivalent[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 1-5.
- [7] Begovic V K. Use of Local Measurement to Estimate Voltage-Stability Margin[J]. IEEE Trans on PWRS, 1999, 14(3): 1029-1035.
- [8] Ajarapu V, Christy C. The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 416-423.
- [9] Fusco G, Losi A, Russo M. Constrained Least Squares Method for Parameter Tracking of Power System Steady-State Equivalent Circuits[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(3): 1073-1080.

收稿日期: 2007-06-06; 修回日期: 2007-06-27

作者简介:

安天瑜 (1978-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析和控制、电力系统风险评估等; E-mail: antianyu2001@yahoo.com.cn

周苏荃 (1958-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制、电力系统状态估计等。

(上接第 39 页 continued from page 39)

桥中以电流作为控制参考, 并进行了控制方程的推导和建模。采用该控制方法的四桥臂三相四线制有源电力滤波器不需要谐波检测电路, 控制电路简单可靠, 仿真结果证明了该方法是有效的, 且更具实用性。

### 参考文献

- [1] 卓放, 杨君, 胡君飞, 等. 三相四线制有源电力滤波器主电路的结构形式与控制[J]. 电工电能新技术, 2002, (2): 1-6.  
ZHOU Fang, YANG Jun, HU Jun-fei, et al. Main circuit Structure and Control of the Active Power Filter for Three-phase Four-wire System[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2002, (2): 1-6.
- [2] Smith K M, Lai Z. A New PWM Controller with One

Cycle Response[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1999, 14(1): 142-150.

- [3] QIAO Chong-ming, Smedley K M. Three-phase Active Power Filter with Unified Constant-frequency Integration Control[A]. In: PIEMC[C]. 2000.698-705.

收稿日期: 2007-03-05; 修回日期: 2007-07-17

作者简介:

庄华 (1980-) 女, 硕士, 主要从事电力系统谐波的研究和治理; E-mail: huahuacq@sohu.com

周林 (1961-) 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电能质量的研究;

张代红 (1979-), 女, 硕士, 主要从事变电站的设计工作。