

基于广域测量的在线电压稳定监视

段俊东¹, 郭志忠^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2 许继电力科学研究院, 北京 100085)

摘要: 广域测量技术的发展和应用于电力系统电压稳定监视奠定了基础。对采用局部电压、电流变化估计电网侧等值阻抗进行了分析, 指出利用 SCADA/EMS 测量数据不能准确估计电网侧等值阻抗的缺陷, 提出基于节点电压和负荷电流相量变化的改进方法和电压稳定性指标。采用广域测量系统间接地避免潮流方程在临界点的不收敛, 弥补传统方法在应用中存在的系统规模过大、非线性模型不准确、数据多且更新不及时、速度慢等缺陷。通过仿真计算表明该指标能够正确指示节点的电压稳定性, 适于对节点在线静态电压稳定的监视, 具有一定实用性。

关键词: 电力系统; 阻抗模判据; 电压稳定; 网络等值阻抗; 广域测量系统

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)15-0024-05

0 引言

随着电力系统的不断扩大和电力体制改革, 现在电力系统常常运行在稳定的边界。近几年来发生的电力事故表明大系统的安全性和稳定问题越来越重要。其中许多事故都造成了电压稳定破坏进而电压崩溃^[1-5]。为了提高电力系统的在线运行的安全性、可靠性和灵活性, 必须对节点电压进行在线监视和稳定裕度判断, 为系统的运行调整和事故中处理以及事故后恢复提供一定的在线可行依据。

采取一定的电压稳定指标^[6-8]来表示节点的电压稳定程度是目前常用的方法。由于负荷阻抗模可在线测量得到, 阻抗模指标电力系统电压稳定分析和在线电压稳定监视中得到了一定的运用^[10-13]。这一类问题的关键就是计算关键节点电网侧的等值阻抗, 在 SCADA/EMS 下在线同时得到全网测量数据具有很大的难度, 同时数据刷新时间长, 只能根据系统的几种典型运行方式和状态来进行在线分析, 具有一定的缺陷^[14, 15]。

随着广域测量技术^[16, 17]的发展和应用于电力系统提供了新的数据采集和测量, 该系统实现了向量测量, 数据刷新比 SCADA/EMS 要快, 为关键节点^[18, 19]电网侧等值阻抗的估计提供了很好的技术平台。本文从理论上对采用局部电压、电流矢量变化估计电网侧等值阻抗进行了分析, 提出了基于广域测量系统的电网侧等值阻抗模的估计和用于估计的电压、电流矢量参数的筛选, 提高了在线估计的精度, 并提出了一种在线判断电压稳定的指标。

1 关键节点局部电压电流矢量变化的特性

对于关键节点常采用等值的方式来进行分析, 通常将所考察的节点进行戴维南等值, 得到一个单机无穷大电源通过网络等值阻抗向一个节点供电的单电源单回路的简单系统, 如图 1(b)所示。这一类问题的关键就是节点的网络侧等值阻抗的求取, 然后根据得到的网络侧等值阻抗模与测量得到的负荷阻抗模采用阻抗模判据来判断节点的电压稳定性。

从理论上讲, 考察的节点网络等值阻抗在网络参数不变的情况下, 通过节点的电压、电流的两种状态就可以确定下来。但是, 实际上, 考察的节点网络等值阻抗与其他节点的负荷阻抗变化有一定的关系; 同时, 当网络结构发生变化时, 也会造成考察节点的网络阻抗变化, 这些变化从表现来看都是考察节点电压和电流的矢量变化, 采用电压、电流的有效值测量来估计网络侧阻抗模, 则影响着在线估计的精度。因此, 在线利用节点电压、电流有效值和矢量变化的两种状态准确地在线求取节点的网络侧等值阻抗存在很大的难度。

本文对图 1(b)所示的节点的简化模型进行分析, 一是当节点负荷等值阻抗不变时, 电网侧阻抗发生变化时, 节点电压和电流的变化特性; 二是电网侧等值阻抗不变时, 节点电压和电流的变化特性。前一种情况对应的是网络参数变化时, 对节点传输特性的影响; 后一种情况是网络参数不变时, 节点的传输特性。

1) 电网侧等值阻抗变化时电压电流特性

当电源等值电势和节点负荷等值阻抗不变、电

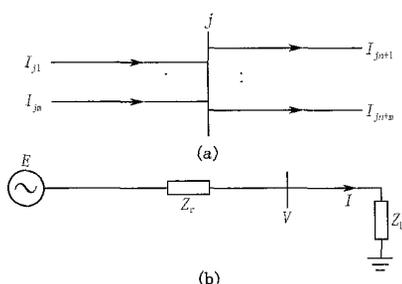


图 1 节点的戴维南等效

Fig 1 The node j and the rest of the system treated as a Thevenin Equivalent

网侧等值阻抗变化时,则节点电压的变化量与负荷电流的变化量之比等于常数,等于节点负荷阻抗。即

$$\Delta V / \Delta I = Z_L \quad (1)$$

证明:由 $V = E - IZ_r$ 知,当 Z_r 变化引起 V 和 I 变化,变化量分别为 ΔV 和 ΔI ,则有:

$$V + \Delta V = E - (I + \Delta I)Z_r, \text{ 化简得式 (1), 证毕。}$$

由此可见,在利用局部电压、电流矢量变化来估计电网侧等值阻抗时,有许多伪数据,这些伪数据是由电网侧负荷和结构等变化引起的,必须对这一类数据进行筛选,以提高运用广域测量数据在线估计电网侧等值阻抗参数的准确性。对于 SCADA/EMS 测量得到的有效值数据来说也有很多伪数据,采用有效值来估计电网侧等值阻抗只有在节点负荷大范围变化时才比较有效,而且等值阻抗的估计在正常运行范围内更新不及时,误差较大。

2) 电网侧等值阻抗不变时电压电流特性

当电源等值电势和电网侧等值阻抗不变、节点负荷等值阻抗变化时,则节点电压矢量的变化量与负荷电流矢量的变化量之比等于常数,等于网络等值阻抗,符号表示电压增量的方向与电流增量的方向相反。即

$$\Delta V / \Delta I = -Z_r \quad (2)$$

证明:由 $V = E - IZ_r$ 知,当 Z_r 变化引起 V 和 I 变化,变化量分别为 ΔV 和 ΔI ,则有:

$$V + \Delta V = E - (I + \Delta I)Z_r, \text{ 化简得式 (2), 证毕。}$$

由此可见,利用局部节点电压、电流的矢量变化可以得到电网侧等值阻抗。但是,在 SCADA/EMS 下无法得到局部电压相角的变化,即不能实现向量测量,故不能直接用上式实现。采用广域测量系统实现了节点电压、电流的矢量测量,可以采用式 (2) 对电网侧等值阻抗进行在线准确估计。

2 基于广域测量的电网侧等值阻抗模的在线估计方法

设 t 时刻的节点电压测量值为 V_t , 负荷电流测量值为 I_t ; $t-1$ 时刻的电压测量值为 V_{t-1} , 电流测量值为 I_{t-1} 。则由式 (2) 可知,如果节点电压、电流变化是主要由该节点负荷变化引起的,则电网侧等值阻抗近似为:

$$Z_r = - (V_t - V_{t-1}) / (I_t - I_{t-1}) \quad (3)$$

其阻抗模近似为:

$$|Z_r| = |V_t - V_{t-1}| / |I_t - I_{t-1}| \quad (4)$$

为了将实际测量中的一些伪数据有效筛选掉,可采用下式来筛选。

$$\left| \frac{V_t}{I_t} \right| \left| \frac{V_t - V_{t-1}}{I_t - I_{t-1}} \right| = \left| 1 - \frac{I_{t-1}}{I_t} \right| \left| 1 - \frac{V_{t-1}}{V_t} \right| \quad (5)$$

由式 (1) 可知,当测量数据主要是由网络侧变化引起的,则式 (4) 得到的是节点负荷阻抗,由式 (5) 得到的值则等于或近似为 1,应该筛选掉。由此实现了对测量数据的有效筛选,提高了在线估算电网侧等值阻抗的准确性。

3 对节点电压稳定程度的在线监视

电力系统的任意节点都可以也总可以按照有功功率的流动方向把与节点相连的支路分为两类,一类是有功功率流入的支路集合,一类是有功功率流出的支路集合。从电路上看,功率流入的支路集合相当于电源侧通过支路向节点提供功率,可称为节点的并联电源支路集合;功率流出的支路集合相当于节点向外负荷通过支路提供功率,可称为节点的并联负荷支路集合。这样功率流入的支路集合可以进行戴维南等效,近似表示成一个等效电动势和内阻抗的形式,功率流出的支路集合可以等效成一个总的负荷支路,如图 1 所示。实际上电压薄弱节点或关键节点都是功率汇点或源点,在线电压稳定主要就是监视这些功率汇点或源点。

设与节点 j 的相连的支路有 $n+m$ 条,其中编号从 $1, 2, \dots, n$, 为电流流入节点的支路集合,编号为 $n+1, \dots, n+m$, 为电流流出节点的支路集合 (实际上是按照有功功率的方向来判断电流的方向)。按照图 1 (a) 的正方向可得:

$$I_j = \sum_{i=1}^n I_{ji} = \sum_{i=n+1}^{n+m} I_{ji} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{ji} - Q_{ji})}{V_j} =$$

$$\frac{\sum_{i=n+1}^{n+m} (P_{ji} - Q_{ji})}{V_j} \quad (6)$$

式中： P_{ji} 、 Q_{ji} 为与节点 j 相连的支路有功、无功功率； V_j 为节点电压的共轭。

对于图 1(b)中戴维南等效电路,其节点 j 的电压还是原网络节点的电压,电流则是按照节点功率流出方向确定的并联负荷支路集合的电流矢量和,由式 (6)决定。

在此基础上对节点采用式 (4)进行电网侧等值阻抗模估计,采用式 (5)作为测量数据筛选,采用负荷阻抗模与电网侧等值阻抗模之比作为对各个节点电压稳定程度的指示。即:

$$k = |Z_L| / |Z_r| \quad (7)$$

根据阻抗模判据可知, k 值大于 1 时,系统是电压稳定的, k 值越小,电压稳定裕度越小,节点越脆弱;反之,则电压稳定裕度越大,节点越强劲。

实际运用中有下列几种情况值得注意:

1)如果局部电压、电流的测量数据变化主要是由节点负荷变化引起的,则可用式 (5)的 k 值作为各个节点电压稳定的指示。

2)如果测量数据变化主要是由电网侧变化引起的,则采用当前采样得到的负荷阻抗模与上一个采样得到的电网侧等值阻抗模代入式 (7)计算得到的 k 值近似作为节点电压稳定程度的指示值。

3)如果测量数据包含两种变化,可采用式 (5)近似指示节点电压的稳定程度,也可以采用上述 2)的方法来近似指示节点电压的稳定程度。

4 算例

本文用 2 机 5 节点的算例^[9]进行了仿真计算,采用平衡节点电压矢量为参考相量。表 1 为改变节点 1 (功率汇点)的负荷,并保持节点 1 的功率因数不变和其他节点负荷功率不变,模拟的是节点 1 电网侧参数近似不变时电压电流的变化,用式 (5)计算得到的 k 值大于 1,结果表明可用局部电压电流矢量变化求取电网侧的等值阻抗模。表 2 为节点 1 负荷不变,节点 2、3 负荷变化,表中打 * 号的数据是节点 1、2、3 负荷都变化,模拟的是节点 1 负荷不变时电网侧参数变化对节点 1 电压电流变化的影响,采用式 (5)计算得到的 k 值近似等于 1,不能将局部电压电流矢量变化用于估计电网侧的等值阻抗模。结果表明采用式 (5)可以对节点 1 的测量数据进行有效筛选,提高了采用局部电压电流矢量变化估计

等值阻抗模的精度;从表 1 发现, k 值也可以近似指示节点 1 负荷增加时的电压稳定程度。

节点 2 的支路 2 - 4 是个功率“源点”支路,表 2 中节点 2 的 k 值近似等于 1,表明采用式 (5)也可以将具有“源点”功率近似不变的节点筛选出来。

表 3、4、5 分别模拟了功率因数为 0.9 (滞后)、1.0、0.9 (超前)等三种负荷增长模式,采用连续潮流计算出了节点 1 的多个状态以及电压临界点,并采用式 (5)计算得到的 k 值作为节点 1 在各个状态下的电压稳定指示值,结果表明,引入向量测量,只通过局部节点电压和电流的矢量变化就可以实现节点电网侧等值阻抗模的在线估计与更新,采用式 (5)的 k 值或式 (7)的 k 值能比较准确地指示节点的电压稳定程度。

表 1 $\cos\phi = 0.9$ (滞后)的计算结果

Tab 1 Results of $\cos\phi = 0.9$ (lagged)

P_1	1	2	3
1.6			
1.8	1.855 9	1.177 5	6.415 9
1.9	1.648 8	1.339 8	6.343 6
2.0	1.396 2	1.620 1	6.154 1

表 2 节点 2、3 负荷变化时的计算结果

Tab 2 Results of Load 2 and 3 variations

P_2	Q_2	P_3	Q_3	1	2	3
2.0	1.0	3.7	1.3			
2.0	1.0	4.0	1.3	0.999 4	1.000 3	7.060 1
2.2	1.0	4.0	1.3	1.007 4	1.006 2	8.376 7
2.2	1.0	4.4	1.3	0.999 1	1.000 4	3.446 9
2.4	1.0	4.6	1.3	1.005 6	1.003 3	4.128 2
* 2.4	1.0	4.6	1.3	1.574 1	1.005 5	4.637 4

表 3 $\cos\phi = 0.9$ (滞后)的计算结果

Tab 3 Results of $\cos\phi = 0.9$ (lagged)

P_1	V_1	1	R_d	X_d	$ Z_d $	k_1
1.6	0.869 0	-4.743 7				
1.8	0.814 1	-8.515 2	-0.002 9	0.178 5	0.178 6	1.855 9
1.9	0.777 9	-10.802	0.003 0	0.173 8	0.173 8	1.648 8
2.0	0.727 7	-13.726	0.009 9	0.170 4	0.170 7	1.396 2
2.06	0.676 2	-16.462	0.018 1	0.167 3	0.168 3	1.187 0
2.08	0.628 0	-18.795	0.033 0	0.164 1	0.177 4	1.012 2

表 4 $\cos\phi = 1.0$ 的计算结果

Tab 4 Results of $\cos\phi = 1.0$

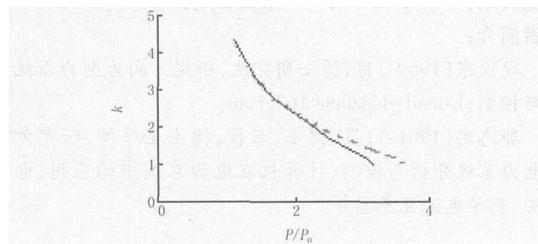
P_1	V_1	1	R_d	X_d	$ Z_d $	k_1
1.6	1.032 4	-4.587 1				
1.8	1.018 4	-7.380 0	-0.018 4	0.222 7	0.223 5	2.577 5
2.0	1.002 1	-10.289	-0.019 2	0.216 6	0.217 4	2.308 5
2.2	0.982 9	-13.357	-0.019 2	0.210 2	0.211 1	2.080
2.6	0.931 9	-20.261	-0.017 5	0.199 8	0.200 6	1.665 6
3.0	0.842 3	-29.730	-0.009 3	0.184 1	0.184 3	1.283 3
3.08	0.808 5	-32.710	0.001 6	0.174 4	0.174 4	1.216 9
3.14	0.762 9	-36.329	0.009 6	0.170 1	0.170 4	1.088 0

表 5 $\cos\phi = 0.9$ (超前) 的计算结果Tab 5 Results of $\cos\phi = 1.0$ (ahead)

P_i	V_i	I_i	R_{ji}	X_{ji}	$ Z_{ji} $	k_i
1.6	1.1513	-5.0888				
2.0	1.1553	-10.235	0.0058	0.2529	0.2530	2.3744
2.4	1.1546	-15.498	0.0211	0.1697	0.1710	2.6900
3.2	1.1359	-26.854	-0.0548	0.2677	0.2732	1.3280
3.6	1.1420	-33.377	-0.0165	0.2167	0.2173	1.4281
4.0	1.0773	-41.171	-0.0170	0.2043	0.2050	1.2741
4.4	0.9964	-52.980	-0.0118	0.1879	0.1883	1.0787
4.49	0.9275	-60.355	0.0012	0.1743	0.1743	0.9894

本方法用于 IEEE - 新英格兰 10 机 39 节点^[7]系统也可以实现对关键节点电压稳定程度的估计。

图 2 是利用连续潮流的结果采用本文式 (7) 计算得到的 k 值与功率增量之间的变化曲线, 连续潮流算法采用 32 节点为平衡节点, 节点 8 (功率汇点) 单独增负荷, 实线表示为保持功率因数不变负荷增加时按照本文的方法计算得到节点 8 的 k 值与功率增量之间的变化曲线, 虚线为保持无功不变负荷增加时 k 值与功率增量之间的变化曲线。曲线变化结果表明, 当电压达到静态稳定极限功率增量达到极限时, k 值都近似为 1, 能够近似指示出节点当前状态下的电压稳定程度。

图 2 节点 8 的 k 值变化曲线Fig 2 Curves of k of node 8

5 结论

根据理论分析和仿真结果表明, 采用本文提出的方法能够实现对测量数据进行有效筛选, 并对关键节点的电网侧等值阻抗模实现在线准确地估计和更新, 提高了在线获得等值阻抗模的准确性和比较准确地指示了稳态运行下节点电压的稳定程度。

本文提出的方法直接利用采用局部的电压电流矢量的测量值, 不需要当前的运行方式和全网的测量数据, 也不需要复杂的非线性模型及其参数, 实现了关键节点电压稳定程度在线判断和指示; 间接地避免了潮流方程在临界点的不收敛、系统规模过大、非线性模型不准确、数据多且不同时等缺陷。采用广域测量技术实现, 数据采集速度快、更新及时, 准

确可靠, 需求数据少易于实现, 能够给运行人员的调度和控制提供一定的准确参数值, 具有一定的实用性。

参考文献:

- [1] 印永华, 郭剑波, 赵建军, 等. 美加“8.14”大停电事故初步分析以及应吸取的教训 [J]. 电网技术, 2003, 27(10): 8-11.
YN Yong-hua, GUO Jian-bo, ZHAO Jian-jun, et al Preliminary Analysis of Large Scale Blackout in Interconnected North America Power Grid on August 14 and Lessons to Be Drawn [J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 8-11.
- [2] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示 [J]. 电网技术, 2003, 27(9): 72-76.
HU Xue-hao Rethinking and Enlightenment of Large Scope Blackout in Interconnected North America Power Grid [J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 72-76.
- [3] 赵希正. 强化电网安全 保障可靠供电——美加“8.14”停电事件给我们的启示 [J]. 电网技术, 2003, 27(10): 1-7.
ZHAO Xi-zheng Strengthen Power System Security to Ensure Reliable Delivery [J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 1-7.
- [4] 刘鹏, 吴刚. 世界范围内两起典型电压崩溃事故分析 [J]. 电网技术, 2003, 27(5): 35-37.
LIU Peng, WU Gang Analysis of Two Typical Voltage Collapse Incidents Worldwide [J]. Power System Technology, 2003, 27(5): 35-37.
- [5] 唐葆生. 伦敦地区大停电及其教训 [J]. 电网技术, 2003, 27(11): 1-5.
TANG Bao-sheng Blackout in South of London and Its Lessons [J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 1-5.
- [6] Taylor C W. Power System Voltage Stability [M]. New York: McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [7] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi, GUO Xi-jiu, et al Power System Voltage Stability and Its Control [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [8] 鲁宝春, 王成山, 郭志忠, 等. 一种实用的静态电压稳定判别新方法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(2): 225-227, 231.
LU Bao-chun, WANG Cheng-shan, GUO Zhi-zhong, et al Judgement of Static Voltage Stability in Power System [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2002, 34(2): 225-227, 231.

- [9] 柳焯. 电压稳定问题中重负荷节点的阻抗解析 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(4): 35-39.
L U Zhuo. The Impedance Analysis of Heavy Load Node in Voltage Stability Studies [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(4): 35-39.
- [10] 柳焯. 基于节点阻抗解析的电压稳定性评估 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(11): 64-68.
L U Zhuo. Voltage Stability Evaluation Based on Node Load Impedance Analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(11): 64-68.
- [11] Vu K, Begovic M M, Novosel D, et al. Use of Local Measurements to Estimate Voltage-Stability Margin [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 1029-1035.
- [12] Julian D E, Schulz R P, Vu K T, et al. Quantifying Proximity to Voltage Collapse Using the Voltage Instability Predictor (VIP) [A]. Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE 2000. 931-936.
- [13] Quaintance W H, Uhlen K, Julian D E, et al. Raising Energy Transfer in Corridors Constrained by Voltage Instability-Statnett Case [A]. Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE: 2000. 2021-2026.
- [14] 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 Zhiming, 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.
- [15] 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, L U Zhuo. Tracking and Estimation of System Parameter Using Thevenin's Equivalent [J]. Power System Technology, 2000, 24(11): 28-30.
- [16] Phadke A G. Synchronized Phasor Measurements in Power Systems [J]. IEEE Computer Applications in Power, 1993, (6): 10-15.
- [17] Workshop Reports on Wide Area Measurements [A]. International Conference on Power System and Communication Systems Infrastructures for the Future Beijing: 2002. 23-27.
- [18] 张尧, 宋文南. 节点电压稳定临界状态和弱节点的确定 [J]. 中国电机工程学报, 1993, 13(6): 40-45.
ZHANG Yao, SONG Wen-nan. Determination of the Critical State of Voltage Stability in Load Buses and the Weakest Bus of the Power System [J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(6): 40-45.
- [19] 冯治鸿, 周双喜. 大规模电力系统电压失稳区的确定方法 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 152-156.
FENG Zhi-hong, ZHOU Shuang-xi. Determination of Voltage Collapse Areas in Large Scale Power System [J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(3): 152-156.

收稿日期: 2005-12-16; 修回日期: 2006-02-10

作者简介:

段俊东 (1969-)男, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: dddzfn@163.com

郭志忠 (1961-)男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制、计算机在电力系统中的应用、电力市场、光学电流互感器等。

On-line assessment of voltage stability of power system based on wide-area measurement system

DUAN Jun-dong¹, GUO Zhi-zhong^{1,2}

(1. Dept of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. XJ Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: The development and applications of wide-area measurement system (WAMS) established the foundation of on-line assessment of voltage stability in large-scale power system. The network equivalent impedance (NEI) estimation of using local voltage and current increment is discussed, and the estimation inaccuracy of using data of SCADA/EMS is indicated. The improvement and indices of voltage stability are proposed using the nodal voltage and load current vector's measurement. Using WAMS, the method can indirectly solve the divergence problem caused by the Jacobian matrix singularity of load flow at the critical state. And it avoids the limitations of the conventional methods in on-line applications such as the large-scale power system, the nonlinear model inaccuracy, slow updating of large amount of data. Simulation results show that the proposed method can make an accurate estimation of NEI, and it is applicable to on-line assessment of the node static voltage stability.

Key words: power system; impedance module criteria; voltage stability; network equivalent impedance (NEI); wide-area measurement system (WAMS)