基于 PMU 量测信息的电压稳定在线评估指标

董 雷[1]，张 昭[1]，蒲天骄[2]，于 汀[2]，韩 巍[2]

(1.新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学)，北京 102206;
2.中国电力科学研究院，北京 100192)

摘要：为实现对电压稳定的实时在线监测，亟需研究具有良好精确度、线性度和计算快速性的电压稳定在线评估指标，为此提出一种新的基于支路电压方程可行解域的静态电压稳定 L_u 指标。该指标可由 PMU 的局部量测信息快速计算获得。进而，为了消除冗余量测信息对指标精确度的影响，提出了仅利用 PMU 电压量测信息的 L_u 改进指标 $L_{u.pro}$。最后，通过仿真算例验证了 L_u 及 $L_{u.pro}$ 指标具有很好的准确性和线性度，并进一步验证了 $L_{u.pro}$ 指标在三相不对称情况下的适用性和有效性。结果表明，L_u 指标以及改进的 $L_{u.pro}$ 指标能够反映系统中电压稳定的薄弱节点及区域，适用于电压稳定的在线监测与评估。

关键词：电压稳定性；电压稳定指标；在线监测；同步向量测量单元；不对称系统

An online voltage stability index based on measuring information of phasor measurement unit

DONG Lei[1], ZHANG Zhao[1], PU Tianjiao[2], YU Ting[2], HAN Wei[2]

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: To realize online monitoring of system voltage stability, it is in urgent need of proposing a voltage stability index with ideal accuracy, linearity and computation speed. This paper proposes a new voltage stability index of L_u based on the feasible solution domain of branch voltage equation which can be fast calculated using the local measurement information of PMU. Moreover, in order to eliminate the error produced by redundant measurement information, the improved index $L_{u.pro}$ is proposed which can be calculated merely with the voltage measurement information of PMU. Simulations are made to prove that L_u and $L_{u.pro}$ are ideal voltage stability indexes with good accuracy and linearity. Furthermore, it is also demonstrated by simulations that $L_{u.pro}$ can be used to evaluate the voltage stability of three-phase unbalanced system. Simulation results show that indexes of L_u and $L_{u.pro}$ can indicate the weak nodes and areas of voltage stability which can be used in online monitoring and evaluation of voltage stability.

Key words: voltage stability; voltage stability index; online monitoring; phasor measurement unit; unbalanced system

中图分类号： TM71 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2015)11-0006-01

0 引言

电力系统电压稳定性是电力系统安全运行的基本要求之一。电压稳定本身是一个动态过程，但动态问题求解复杂且难于在线应用，同时电压崩溃的慢动作特征为用静态方法分析电压稳定性问题提供了可能[1]。从静态电压稳定角度出发并利用系统状态的量测量得到一个反映系统静态电压稳定程度的指标，可以预先告知调度运行人员系统当前的电压稳定裕度，并辅助采取相应的对策。

经过多年的发展，广域测量系统(Wide Area Measurement System，WAMS)领域的一些关键技术问题已得到了基本解决，并在电力系统动态状态估计、动态安全监测与稳定控制、广域保护等领域得到了普遍的关注和应用[2-4]。而利用 WAMS 的同步向量测量单元(Phasor Measurement Unit，PMU)的量测信息对系统电压稳定进行在线监测和分析，将是一个具有重要意义的研究方向[5-6]。相较于数据采集与监控系统的远方数据终端，PMU 量测数据的更新速率

基金项目：国家电网公司基础性前瞻性科技项目(DZ71-14-006)

更快。同时，PMU 可以实时测量装配点的电压相角信息，这也为新的静态电压稳定指标的提出提供更丰富的系统运行状态量测信息和更广阔的研究思路。

为适用于在线应用的需求，静态电压稳定性指标必须具备良好的准确性、线性度和计算快速性[7]。目前电力系统常用的静态电压稳定指标有灵敏度指标[8]、最小奇异值(特征值)指标[9-10]、L 指标[11]等，但这些指标存在着物理意义不明显、线性度不好的缺陷，且计算量会随着系统规模的增加而急剧增大，不适于在线应用。随着 PMU 技术的迅速发展，基于同步相量量测的电压稳定在线指标——基于支路末端电压可行解域的静态电压稳定指标[12-17]受到了重视。这类指标通常可由 PMU 的量测信息直接计算得到，完全可以达到在线应用的要求，但目前此类指标的精确度和线性度存在不足，有待于进一步加以深入研究。

鉴于此，本文提出了一种新的基于支路电压方程可行解域的静态电压稳定指标 L_{u} 及其改进指标 $L_{\mathrm{u.pro}}$，该指标可利用 PMU 量测信息通过简单的代数计算快速得到，具有很好的准确性和线性度。进而针对系统不对称的情况，本文提出了可利用 $L_{\mathrm{u.pro}}$ 的正序电压指标 $L_{\mathrm{u.pro(1)}}$ 监测电压稳定。最后，通过算例系统验证了指标的适用性和有效性。

1 基于支路电压方程可行解域的电压稳定指标分析

基于支路电压方程可行解域的电压稳定指标一般是由关于支路末端电压的支路潮流一元二次方程有解而推导得到的，通常采用如图 1 所示的 Π 型支路模型作为分析的基础。

图中，$U_i\angle\delta_i$、$U_j\angle\delta_j$ 为节点 i 和节点 j 的电压幅值和相角标幺值；$\delta=\delta_i-\delta_j$ 为节点 i 与 j 之间的相角差；$Z\angle\theta=R+\mathrm{j}X$ 为支路阻抗标幺值，$\mathrm{j}B/2$ 为支路两端对地电纳标幺值。$P_i+\mathrm{j}Q_i$、$P_j+\mathrm{j}Q_j$ 分别为节点 i 注入的功率标幺值和节点 j 流出的功率标幺值；$\dot{I}_{ij}$ 为支路 ij 末端流向节点 j 的电流。

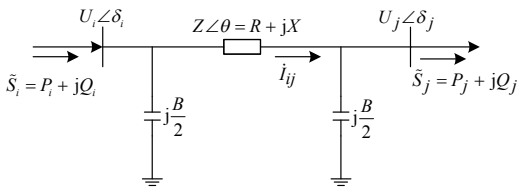

图 1 Π 型支路模型图

Fig. 1 Π-type equivalent branch model

文献[12]根据关于支路末端电压的无功潮流一元二次方程有解，并忽略支路对地电容，得到静态电压稳定的 L_{q} 指标为

$$L_{\mathrm{q}}=\frac{4Q_jX}{(U_i\sin(\theta-\delta))^2} \tag{1}$$

文献[13-14]认为 L_{q} 指标的推导模型忽略了支路对地电容，使得指标的精确度降低，因此由支路有功潮流方程有解推得静态电压稳定 L_{p} 指标为

$$L_{\mathrm{p}}=\frac{4P_jR}{(U_i\cos(\theta-\delta))^2} \tag{2}$$

以上指标在模型推导上存在着一定问题。事实上关于末端电压的支路有功/无功潮流方程有解只是不发生电压崩溃的一个必要条件，文献[18]指出 L_{p} 指标只适用于 R/X 比值较大的系统支路中，从 L_{p} 指标的表达式也可看出 R=0 或 R 很小时，L_{p} 指标失效；文献[19]则给出证明，只有当支路末端功率的功率因素 $\alpha=\mathrm{tg}^{-1}Q_j/P_j$ 与该支路的阻抗角 θ 相等且 PV 曲线到达鼻尖点时，L_{p} 和 L_{q} 指标才等于 1，而 $\alpha=\theta$ 仅仅是一个特殊的系统运行工况。

为解决上述指标存在的问题，文献[17]将支路末端的有(无)功潮流方程与首端无(有)功潮流方程做联立，根据关于 U_i/U_j 的一元二次方程有解得到 L_{PQI} 指标如式(3)。但该表达式较为复杂且支路首末端潮流方程的联立并没有实际的物理意义，指标正确性有待进一步验证。

$$L_{\mathrm{PQI}}=\max\left\{\frac{4(P_i/Q_j)(\sin\theta-BZ/2)\cos\theta}{[(P_i/Q_j)\sin(\theta-\delta)+\cos(\theta+\delta)]^2},\ \frac{4(Q_i/P_j)(\sin\theta-BZ/2)\cos\theta}{[(Q_i/P_j)\cos(\theta-\delta)+\sin(\theta+\delta)]^2}\right\} \tag{3}$$

文献[18]提出一种静态电压稳定的 L_{pq} 指标，忽略支路对地电容，并将支路有功潮流方程和无功潮流方程联立推得 L_{pq} 指标，其表达式为

$$L_{\mathrm{pq}}=\frac{2(S_jZ+P_jR+Q_jX)}{U_i^2} \tag{4}$$

该指标的模型从 PV 曲线的推导过程入手，有较强的理论依据。但指标的推导过程忽略了支路对地电容，而且表达式中的支路阻抗参数的辨识总会存在误差，阻抗参数的估计模型及方法的准确性将直接影响 L_{pq} 指标误差的大小。

2 基于 PMU 量测量的静态电压稳定 L_{u} 指标

2.1 L_{u} 指标的推导

针对以上各类基于支路电压方程可行解域的电压稳定指标存在的种种问题，本文提出一种新的静态电压稳定指标——L_{u} 指标。前文介绍的指标多基于支路潮流方程有解进行推导，L_{u} 指标则从支路电

压方程有解进行推导。对图 1 所示的 Π 型等值支路，其支路电压方程为

$$\dot{U}_i = \dot{U}_j + \dot{I}_{ij}(R + \mathrm{j}X) \tag{5}$$

将式(5)的实部和虚部展开分别列写为

$$(1-\frac{BX}{2})U_j^{\,2} - U_iU_j\cos\delta + P_jR + Q_jX = 0 \tag{6}$$

$$\frac{BR}{2}U_j^{\,2} - U_iU_j\sin\delta + P_jX - Q_jR = 0 \tag{7}$$

由式(6)和式(7)相加，整理得到关于 U_j 的二次方程式为

$$[1-\frac{B(X-R)}{2}]U_j^{\,2} - [U_i(\cos\delta+\sin\delta)]U_j + [P_j(X+R)+Q_j(X-R)] = 0 \tag{8}$$

若系统电压不发生崩溃，则对系统中的每一条支路，关于支路末端电压 U_j 的二次方程式(8)均有解，即 Δ>0。由此推得静态电压稳定的 L_{u} 指标为

$$L_{\mathrm{u}} = \frac{4[1-\frac{B(X-R)}{2}](P_j(X+R)+Q_j(X-R))}{U_i^2(1+\sin 2\delta)} < 1 \tag{9}$$

由于电压稳定具有区域特性，系统中的任意支路发生电压崩溃就会导致整个系统的电压崩溃[2]，而 L_{u} 指标可以很好地指示系统中静态电压稳定的薄弱支路，当 Δ 趋近于 0，L_{u} 指标趋近于 1，则相应支路越容易发生电压崩溃而导致局部或全局电压失稳。同时可将系统中所有支路 L_{u} 指标的最大值 L_{umax} 作为反映系统静态电压稳定的指标：

$$L_{\mathrm{u\,max}} = \max_{k\in S}\{L_{\mathrm{u}k}\} \tag{10}$$

其中，S 是系统中所有支路的集合。

2.2 改进电压稳定指标 $L_{\mathrm{u.pro}}$

由式(9)可知，计算 L_{u} 指标所需要的原始数据包括支路始末端 PMU 的状态量测量以及支路的阻抗信息。电力系统线路参数辨识模型及辨识方法的不同都会对辨识参数的准确性产生影响，而支路阻抗及导纳参数的辨识误差则会对 L_{u} 指标的精确性产生直接影响。

为此，对 L_{u} 指标进行改进，由式(8)可得

$$P_j(X+R)+Q_j(X-R) = U_iU_j(\sin\delta+\cos\delta) - [1-\frac{B(X-R)}{2}]U_j^2 \tag{11}$$

将式(11)代入式(9)，并忽略 $B(X-R)/2$ 项，可得到改进的电压稳定指标 $L_{\mathrm{u.pro}}$ 为

$$L_{\mathrm{u.pro}} = \frac{4[U_iU_j(\sin\delta+\cos\delta)-U_j^2]}{U_i^2(1+\sin 2\delta)} < 1 \tag{12}$$

可以看到，$L_{\mathrm{u.pro}}$ 指标可以仅由 PMU 量测的支路始末端电压幅值和相角信息计算得到，从而避免了 L_{u} 指标计算过程中因支路阻抗及导纳参数辨识不准确而引入的误差。同时，$L_{\mathrm{u.pro}}$ 指标的表达式中也不含有支路末端潮流 P_j 和 Q_j 信息，而 P_j 和 Q_j 一般由相关支路末端 PMU 的直接量测量——支路末端电压相量和电流相量计算得到，从而进一步减少了计算 $L_{\mathrm{u.pro}}$ 指标所需要的 PMU 量测信息，最大限度地避免了冗余量测信息的误差对指标精度的影响。

2.3 $L_{\mathrm{u.pro}}$ 指标在不对称网络中的应用

前面的研究根据支路的电压方程有解，提出了一种基于支路量测信息的电压稳定指标。通过对该指标进行改进，得到仅利用支路首末端电压相量量测信息计算的改进电压稳定指标，可应用于常规的对称网络，而对于不对称网络的电压稳定监测评估，则需要进一步研究。

电力系统中，三相负荷及线路参数的不对称会引起系统三相运行参数不平衡。负荷的增长会导致支路潮流的加重，在一些极端情况下容易导致电压稳定问题的发生。而相较于一般的对称负荷，不对称负荷对电压稳定的影响显然更加严重，且这种影响随着负荷不对称程度的增加而增大。

由于在不对称情况下系统的三相运行参数不再具有平衡关系，所以不对称运行情况下的系统电压稳定指标研究，一个直观的思路是由支路的各相电压方程出发进行指标的推导。但由于支路的相与相之间存在耦合，支路中任意一相电压与各相电流具有相关关系，由支路的相电压方程推导出的电压稳定指标将会变得异常复杂。

在系统不对称情况下，依然可以使用系统状态量的正序分量推导 L_{u} 及 $L_{\mathrm{u.pro}}$ 指标，不对称系统发生电压稳定问题也必然导致支路正序电压方程无解。因此对于不对称系统，依然可以选取正序分量计算得到正序的电压稳定指标 $L_{\mathrm{u.pro(1)}}$，对不对称系统的电压稳定进行监测。

$$L_{\mathrm{u.pro(1)}} = \frac{4[U_{i(1)}U_{j(1)}(\sin\delta_{(1)}+\cos\delta_{(1)})-U_{j(1)}^2]}{U_{i(1)}^2(1+\sin 2\delta_{(1)})} \tag{13}$$

其中：$U_{i(1)}$和 $U_{j(1)}$表示 i、j 节点的正序电压幅值；$\delta_{(1)}$ 表示 i、j 节点正序电压相角差。

3　算例分析

本文分别采用 IEEE9 节点系统和 New England 39 节点系统作为仿真算例，对比验证 L_{u}、$L_{\mathrm{u.pro}}$ 指标和其他指标的准确性和线性度优劣。最后针对系统不对称的情况，通过 IEEE9 节点系统算例仿真验证 $L_{\mathrm{u.pro}}$ 指标的适用性。

3.1 IEEE9 节点系统仿真

在电力系统仿真软件 PSAT 中搭建 IEEE 9 节点系统仿真模型，系统电压等级为 220 kV，负荷模型采用对称负荷，并设定全网负荷以各自初始的功率因数，随着负荷增长率 λ 的增加而增长，使用 PSAT 连续潮流计算程序可得到系统从空载到电压崩溃全过程中的多组潮流数据。对系统中所有支路计算对比其在电压崩溃临界点时的电压稳定指标 L_u、L_p、L_q、L_{PQI} 和 L_{pq}，计算结果如表 1 所示。

表 1 电压崩溃临界点时各电压稳定指标值

Table 1 Values of various voltage stability indexes on system critical point

支路编号	L_u	$L_{u.pro}$	L_p	L_q	L_{PQI}	L_{pq}
7-5	1.000 0	0.999 3	0.614 6	−0.067 8	0.259 2	0.985 9
4-5	0.955 0	0.951 6	0.769 0	0.739 8	0.552 0	0.842 2
9-6	0.949 7	0.938 7	0.872 4	0.268 2	0.244 9	0.816 9
2-7	0.905 4	0.905 4	0.000 0	0.460 6	0.000 0	0.760 5
1-4	0.842 3	0.842 3	0.000 0	0.607 5	0.000 0	0.689 6
3-9	0.662 8	0.662 8	0.000 0	0.353 2	0.000 0	0.477 4
7-8	0.661 2	0.652 4	0.890 6	0.018 6	0.083 2	0.469 0
4-6	0.640 4	0.631 8	0.989 3	0.327 7	0.445 4	0.454 6
9-8	0.595 6	0.584 8	0.981 2	0.438 9	0.615 9	0.452 3

由仿真结果可以看出，L_q 和 L_{PQI} 指标的准确性较差，L_u、$L_{u.pro}$ 和 L_{pq} 指标表现都较为理想，而 L_u 和 $L_{u.pro}$ 指标的准确性更佳。$L_{u.pro}$ 指标相对于 L_u 指标的误差主要在于 $L_{u.pro}$ 指标的推导过程中忽略了 $B(X-R)/2$ 项，IEEE9 节点系统所有支路中 $B(X-R)/2$ 项最大的 9-6 支路，其 $B(X-R)/2$ 的标幺值为 0.023，由此产生的支路 $L_{u.pro}$ 指标误差为 1.16%，在可以接受范围内。

针对精确度较高的 L_u、$L_{u.pro}$ 和 L_{pq} 指标，对其进行支路 7-5 和支路 4-5 的指标线性度对比，结果如图 2 和图 3 所示。

可以看出，随着负荷增长率 λ 的增加，系统中

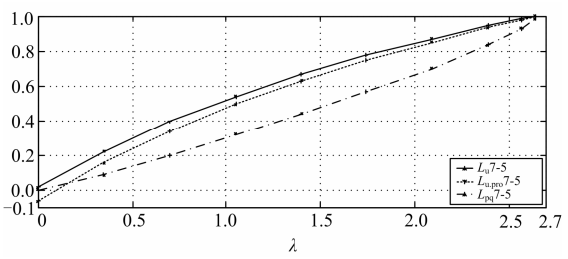

图 2 支路 7-5 的 L_u、$L_{u.pro}$ 和 L_{pq} 指标曲线

Fig. 2 Curves of L_u, $L_{u.pro}$ and L_{pq} of branch 7-5

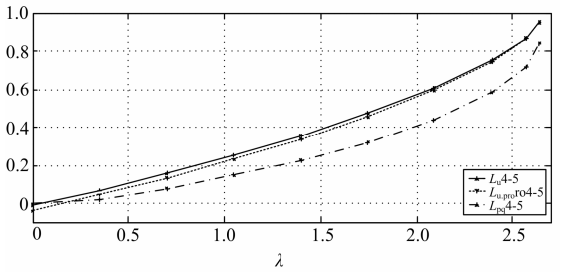

图 3 支路 4-5 的 L_u、$L_{u.pro}$ 和 L_{pq} 指标曲线

Fig. 3 Curves of L_u, $L_{u.pro}$ and L_{pq} of branch 4-5

电压稳定薄弱支路的 L_u、$L_{u.pro}$ 和 L_{pq} 指标都是单调递增的，且线性度都较为理想。λ 增长全过程中，支路 7-5 的 L_u 和 $L_{u.pro}$ 指标一直大于支路 4-5 的相应指标，由此可以判断 5 节点电压的稳定问题主要是由支路 7-5 的负荷过重引起的，调度人员可根据此信息采取相应的措施缓解由支路 7-5 的负荷过重引起的电压稳定问题。

3.2 New England 39 节点系统仿真

鉴于 IEEE9 节点系统的仿真结果，对各指标在 New England 10 机 39 节点系统中做进一步对比验证。设定全网负荷以负荷增长率 λ 增长，通过连续潮流分析得到系统中所有支路的各电压稳定指标结果，仿真结果显示在电压崩溃临界点时，支路 31-6 的 L_u、$L_{u.pro}$ 和 L_{pq} 指标值均为所有支路中最大的，支路 32-10 次之，说明三种指标对电压稳定薄弱节点及相关支路的判断指向是一致的。由表 2 可以看出，L_u 和 $L_{u.pro}$ 指标的准确性依然是极高的，L_{pq} 指标的准确度和 L_u、$L_{u.pro}$ 指标相比还有一定差距，其他指标则表现较差。另外，支路 31-6、32-10 的 L_u 和 $L_{u.pro}$ 指标值完全一致，这是因为两条支路的对地电容值为 0，对这两条支路 L_u 和 $L_{u.pro}$ 指标是等价的。

表 2 电压崩溃临界点时薄弱支路的各电压稳定指标值

Table 2 Values of voltage stability indexes of weak branch on system critical point

支路编号	L_u	$L_{u.pro}$	L_p	L_q	L_{PQI}	L_{pq}
31-6	0.999 0	0.999 0	0.000 0	0.583 6	0.000 0	0.969 7
32-10	0.975 1	0.975 1	0.000 0	0.567 6	0.000 0	0.888 1

图 4 和图 5 给出了随负荷增长率 λ 增加，6、10 节点的电压值及其相关支路的 L_u($L_{u.pro}$)和 L_{pq} 指标变化。可以看到 L_u($L_{u.pro}$)和 L_{pq} 指标的线性度都是较为理想的。

3.3 不对称网络中 $L_{u.pro}$ 指标适用性验证

对 IEEE9 节点测试系统，在 5 节点接入不对称

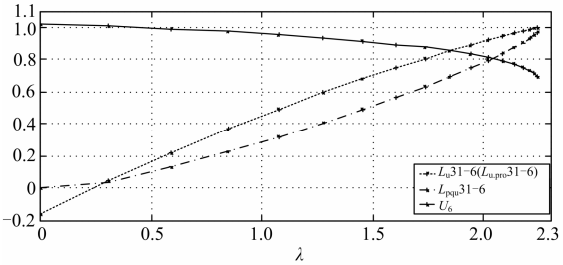

图 4 节点 6 的 PV 曲线及关联支路的 L_u、L_{pq} 指标曲线

Fig. 4 PV Curves of Bus 6 together with L_u and L_{pq} curves of relative branches

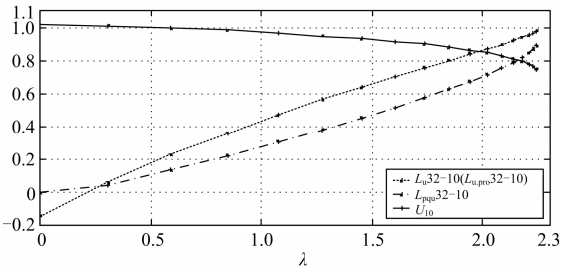

图 5 节点 10 的 PV 曲线及关联支路的 L_u、L_{pq} 指标曲线

Fig. 5 PV Curves of Bus 10 together with L_u and L_{pq} curves of relative branches

负荷，三相负荷大小分别为(51+j15)MVA、(40+j20)MVA、(35+j16)MVA。令 5 节点负荷随负载率 λ 增加，直到发生电压崩溃，此时计算得到 $L_{u.pro(1)}$指标最大的两条支路为支路 1-4 和支路 2-7，其指标值分别为 0.999 4 和 0.927 5，这两条支路为临近 5 节点的发电机出口支路，5 节点不对称负荷的增长导致临近的 1、2 节点发电机出力增加，从而导致电压崩溃的发生。

图 6 给出了随负荷增长率 λ 增加直至发生电压崩溃，支路 1-4 的 $L_{u.pro(1)}$指标值。由图 6 的仿真结果可以看出，在网络不对称情况下，$L_{u.pro(1)}$指标依然具有较理想的准确性和线性度，也即验证了在不对称负荷情况下，可利用 $L_{u.pro(1)}$指标监测不对称网络的电压稳定水平。

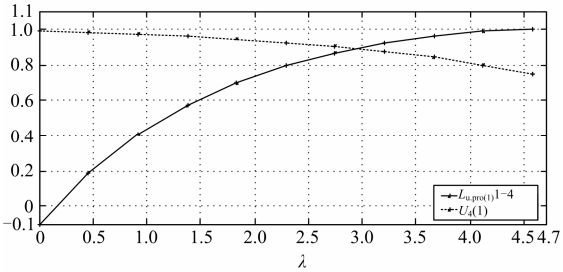

图 6 节点 4 的 PV 曲线及支路 1-4 的 $L_{u.pro(1)}$指标曲线

Fig. 6 PV curves of Bus 4 together with $L_{u.pro(1)}$ curves of branch 1-4

4 结论

(1) 本文提出了一种基于支路电压方程可行解域的电压稳定在线评估 L_u 指标，该指标计算所需的系统运行参数可全部由 PMU 的量测信息得到，且指标的计算仅涉及到简单的代数运算，完全可以满足在线应用实时性的要求。由仿真结果证明，与一般的电压稳定在线指标相比，L_u 指标具有较为理想的准确性和线性度。

(2) 进一步提出了 L_u 指标的改进指标 $L_{u.pro}$，该指标仅由 PMU 量测的支路始末端电压值表示，可最大程度地消除冗余量测信息误差对指标精度的影响，并进一步仿真验证了在不对称网络中，可利用 $L_{u.pro}$ 评估不对称系统的电压稳定水平。

(3) 由于 $L_u(L_{u.pro})$指标运算的快捷性，可以实现对复杂电力系统的每一条支路电压稳定的实时监测，由系统中各支路的 $L_u(L_{u.pro})$指标大小可判断系统电压稳定薄弱点及薄弱区域，并可由 L_{umax} 指标反映系统的全局电压稳定程度。因此根据各支路的 $L_u(L_{u.pro})$指标大小及变化趋势采取相应对策，可以保证系统的电压稳定性。

参考文献

[1] TAYLOR C W. Power system voltage stability[M]. New York, America: McGraw-Hill, 1994: 19-22.

[2] 李虹, 李卫国, 熊浩清, 等. WAMS 中计及量测函数非线性项的电力系统自适应动态状态估计[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 155-161.
LI Hong, LI Weiguo, XIONG Haoqing, et al. Adaptive dynamic state estimation including nonlinearities of measurement function in WAMS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 155-161.

[3] 古丽扎提·海拉提, 王杰. 多时滞广域测量电力系统稳定分析与协调控制器设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 279-289.
GULIZHATI Hailati, WANG Jie. Multiple time delays analysis and coordinated stability control for power system wide area measurement[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 279-289.

[4] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于序电流相位比较和幅值比较的广域后备保护方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 242-250.
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Algorithm of wide-area protection on comparison of current phase and amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 242-250.

[5] 程云峰, 张欣然, 陆超, 等. 广域测量技术在电力系统

中的应用研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 145-153.
CHENG Yunfeng, ZHANG Xinran, LU Chao, et al. Research progress of the application of wide area measurement technology in power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 145-153.

[6] 干磊, 康河文, 何敏, 等. 基于广域测量系统的电压稳定动态监测[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 152-155.
GAN Lei, KANG Hewen, HE Min, et al. The dynamic monitoring of voltage stability based on wide-area measurement system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 152-155.

[7] 周双喜, 姜勇, 朱凌志. 电力系统电压静态稳定性指标述评[J]. 电网技术, 2001, 25(1): 1-7.
ZHOU Shuangxi, JIANG Yong, ZHU Lingzhi. Review on steady state voltage stability indices of power systems[J]. Power System Technology, 2001, 25(1): 1-7.

[8] LEE B, AJJARAPU V. Invariant subspace parametric sensitivity (ISPS) of structure-preserving power system models[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(2): 845-850.

[9] ARAPOSTHATIS A, SASTRY S, VARAIYA P. Analysis of power flow equation[J]. Electric Power & Energy Systems, 1981, 3(3): 115-126.

[10] LOF P A, SMED T, ANDERSON G, et al. Fast calculation of a voltage stability index[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(1): 54-64.

[11] KESSEL P, GLAVITSCH H. Estimating the voltage stability of a power system[J]. IEEE Transactions of Power Delivery, 1986, 3(3): 346-354.

[12] MOGHAVVEMI M, FARUQUE M O. Power system security and voltage collapse: a line outage based indicator for prediction[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1999, 21(6): 455-461.

[13] MOGHAVVEMI M, FARUQUE M O. Technique for assessment of voltage stability in ill-conditioned radial distribution network[J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 21(1): 58-60.

[14] 刘道伟, 谢小荣, 穆钢, 等. 基于同步相量测量的电力系统在线电压稳定指标[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 16-20.
LIU Daowei, XIE Xiaorong, MU Gang, et al. An on-line voltage stability index of power system based on synchronized phasor measurement[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 16-20.

[15] 乔媛媛, 郑飞平, 杨若松, 等. 一种基于支路量测的电压稳定评估指标[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 18-22.
QIAO Yuanyuan, ZHENG Feiping, YANG Ruosong, et al. A voltage stability assessment index based on branch measurement[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 18-22.

[16] 巩伟峥, 房鑫炎. 基于广域测量系统的电压稳定指标[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 71-75.
GONG Weizheng, FANG Xinyan. An on-line voltage stability index based on wide area measurement system[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 71-75.

[17] 刘爱国, 万辉龙, 陈爱军, 等. 计及负荷静态特性的在线电压稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 113-118.
LIU Aiguo, WAN Huilong, CHEN Aijun, et al. Research on on-line voltage stability considering static characteristics of load[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 113-118.

[18] QUINTELA A S, CASTRO C A. Improved branch-based voltage stability proximity indices part I: theoretical background[C] // Proceedings of 2002 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering. Canada: IEEE, 2002: 109-114.

[19] 余娟, 李文沅, 颜伟. 对几个基于线路局部信息的电压稳定指标有效性的质疑[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 27-35.
YU Juan, LI Wenyuan, YAN Wei. Querying effectiveness of several existing line-based voltage stability indices[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19): 27-35.

收稿日期：2014-07-29； 修回日期：2014-09-15

作者简介：

董 雷(1967-)，女，副教授，研究方向为电力系统分析、运行与控制；

张 昭(1989-)，男，硕士研究生，研究方向为电力系统分析、运行与控制；E-mail: zhao-zz@163.com

蒲天骄(1970-)，男，硕士，教授级高工，研究方向为电力系统运行控制、智能电网仿真。

（编辑 姜新丽）