

# 基于PMU的支路电压稳定指标研究

张洪喜

(南瑞继保电气有限公司,江苏南京 211106)

**摘要:**基于PMU技术的电压稳定预警需要对功率传输通道的运行情况进行实时监测。已有的支路电压稳定指标忽略了无功的影响因素,且仅适用于负荷功率因数恒定的情况。文中提出了综合考虑支路有功与无功的新指标,该指标适用于任何负荷功率因数的情况,并对该指标进行了详细的推导。用IEEE14节点系统对该指标进行了测试,结果表明该指标能更好地反映支路的运行和电压稳定情况。

**关键词:**PMU;戴维南等值;T型等值;支路电压稳定指标

**中图分类号:**TM761

**文献标志码:**B

**文章编号:**1009-0665(2012)02-0059-03

随着负荷的增加、输电线路传输功率的不断增长,电压稳定问题日益突出。电力系统实时电压稳定预警与控制是防御电力事故的重要环节。开发实用性高的电压稳定指标是目前广域电压保护课题的研究重点<sup>[1]</sup>。随着PMU测量技术的发展,国内外许多学者提出了基于PMU的电压稳定指标<sup>[2]</sup>。这些指标以负荷端母线电压为研究对象,反映支路运行状态的电压稳定指标研究较少<sup>[3]</sup>。在实际的电力系统中,不同区域之间的功率传输能力是影响电压稳定的重要因素<sup>[4]</sup>。开发普适的支路电压稳定指标是十分必要的。

本文提出基于PMU测量量的支路电压稳定指标LVSI<sub>K</sub>。该指标利用PMU测得的同步数据、综合考虑支路传输有功和无功两方面的因素,不受功率因数变化的限制,有很强的普适性。

## 1 支路电压稳定指标模型

对于系统中任一支路,利用PMU测量量对其网络等值<sup>[5]</sup>。原始网络如图1所示。

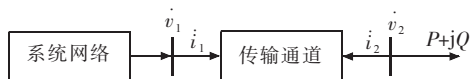


图1 原始网络图

图1中的 $\dot{v}_1, \dot{i}_1, \dot{v}_2, \dot{i}_2$ 分别为送端和受端节点电压、电流相量。利用基于偏差校正的戴维南等值参数在线跟踪改进算法,将系统网络等值为电压源和阻抗模型<sup>[6]</sup>:

$$\dot{Z}_T = 2 \frac{\dot{v}_1 - \dot{v}_2}{\dot{i}_1 - \dot{i}_2} \quad (1)$$

$$\dot{Z}_T = \frac{\dot{v}_1 \dot{i}_1 - \dot{v}_2 \dot{i}_2}{\dot{i}_1^2 - \dot{i}_2^2} \quad (2)$$

利用式(1)和式(2)将传输通道进行T型等值。

等值后的模型如图2所示。

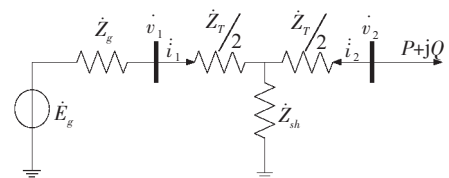


图2 戴维南等值和T型等值

将模型进一步等值为简单两节点系统:

$$\dot{Z}_{th} = \frac{\dot{Z}_T}{2} + \frac{1}{\frac{1}{\dot{Z}_{th}} + \frac{1}{\dot{Z}_T + \dot{Z}_g}} \quad (3)$$

$$\dot{E}_{th} = \dot{v}_2 - \dot{Z}_{th} \dot{i}_2 \quad (4)$$

式(4)中: $\dot{E}_{th} = E_{th} \angle \delta_1$ ;  $\dot{Z}_{th} = R_{th} + jX_{th}$ ;  $\dot{v}_2 = v_2 \angle \delta_2$ 。等值后模型如图3所示。

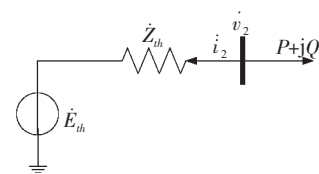


图3 等值后简单两节点系统

## 2 支路电压稳定指标定义

参考文献[5]中提出的支路电压稳定指标是将支路传输的功率等值为恒定阻抗 $Z_L$ ,用支路等值阻抗 $Z_{th}$ 和负荷 $Z_L$ 的比值来确定支路有功传输极限<sup>[5]</sup>。当 $Z_{th}/Z_L=1$ 时,节点电压达到临界值,但是功率不一定达到极限值。只有在功率因数恒定的情况下,支路传输的有功才达到极限值 $P_{max}$ ,指标定义为:

$$LVSI_{p} = \begin{cases} \frac{P_{max}}{P_l} - 1 & Z_L > Z_{th} \\ 0 & Z_L \leq Z_{th} \end{cases} \quad (5)$$

该指标从支路有功传输量来定义支路电压稳定指标,只适用于功率因数恒定的情况。支路功率传输能力的大小反映了系统电压的运行情况。随着负荷功率的增加,支路传输的功率逐渐增加,节点电压逐步下降。当电压下降到临界点时,支路传输的功率达到极限<sup>[7]</sup>。根据图3所示等值两节点系统,由支路潮流计算方法得:

$$\dot{S} = -\dot{v}_2 \dot{v}_2^* = \dot{v}_2 \frac{\dot{E} - \dot{v}_2}{\dot{Z}_{th}} \quad (6)$$

将式(6)的实部与虚部展开后得:

$$P = \frac{-R_{th} v_2^2 + R_{th} E_{th} v_2 \cos \delta + X_{th} E_{th} v_2 \sin \delta}{R_{th}^2 + X_{th}^2} \quad (7)$$

$$Q = \frac{-X_{th} v_2^2 + X_{th} E_{th} v_2 \cos \delta - R_{th} E_{th} v_2 \sin \delta}{R_{th}^2 + X_{th}^2} \quad (8)$$

式(7,8)中:  $\delta = \delta_1 - \delta_2$ 。

式(7)是  $P$  关于电压的一元二次函数,式(8)是  $Q$  关于电压的一元二次函数。它们的二次项系数都为负值,存在最大值点。根据式(7)和式(8),当  $dP/dv_2 = 0$  时  $P$  达到最大值;当  $dQ/dv_2 = 0$  时  $Q$  达到最大值<sup>[8]</sup>。它们达到最大值时的电压计算公式为:

$$v_{2p} = \frac{R_{th} E_{th} \cos \delta + X_{th} E_{th} \sin \delta}{2R_{th}} \quad (9)$$

$$v_{2q} = \frac{X_{th} E_{th} \cos \delta - R_{th} E_{th} \sin \delta}{2X_{th}} \quad (10)$$

分别将式(9)和式(10)带入式(7)和式(8)可得  $P$  与  $Q$  的传输极限:

$$P_{\max} = \frac{[E_{th} (R_{th} \cos \delta + X_{th} \sin \delta)]^2}{4R_{th} Z_{th}^2} \quad (11)$$

$$Q_{\max} = \frac{[E_{th} (X_{th} \cos \delta - R_{th} \sin \delta)]^2}{4X_{th} Z_{th}^2} \quad (12)$$

根据式(11)和式(12),定义支路的有功电压与无功电压稳定指标为:

$$LVSI_p = 1 - \frac{P_l}{P_{\max}} \quad (13)$$

$$LVSI_q = 1 - \frac{Q_l}{Q_{\max}} \quad (14)$$

式(13,14)中:  $P_l$  和  $Q_l$  为支路当前有功与无功传输量。这两个指标反映的是同一支路在同一时刻的有功与无功传输能力的大小。在网络正常运行情况下,它们的取值区间为(0,1),其中0为临界点。综合考虑有功和无功这两方面的影响因素<sup>[9]</sup>,定义某支路  $i$  在时刻  $k$  时的支路电压稳定指标为:

$$LVSI_{i,k} = \min_{p,q} (LVSI_{i,k,p}, LVSI_{i,k,q}) \quad (15)$$

式(15)反映的是支路中功率传输能力的大小,它的值反映了支路的运行状态。该指标值越小,支路的功率传输能力就越小。当负荷端功率逐步增加到临界点时,支路的传输能力将达到极限,受端电压将达到临界点。如果进一步增加负荷端功率,支路将无法传输更多的功率,受端电压将会崩溃,进而扩展到整个网络<sup>[10]</sup>。对整个网络中所有或部分关键支路和传输通道的功率传输能力进行实时监测,定义整个网络的支路电压稳定指标为:

$$LVSI_k = \min_{i \in A} (LVSI_{i,k}) \quad (16)$$

式(16)中:  $A$  为网络中需要监测支路或通道的集合。网络的电压崩溃最先发生在指标  $LVS I_k$  的值最小的位置<sup>[11]</sup>。

### 3 算例分析

算例以 IEEE14 节点系统为研究对象。在变功率因数的情况下,分别增加第14号负荷节点的有功和无功,使14号节点电压逐步下降到临界点处。同时监测与14号节点强相关的四条支路传输的功率相量及这些支路两端的电压、电流相量。用这些仿真量模拟 PMU 的实测数据进行仿真分析。

将14号节点 PV 曲线的上半支和 L13-14 的支路电压稳定指标进行比较的仿真曲线如图4所示。

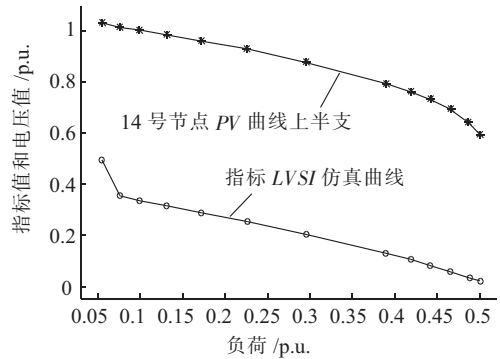


图4 L13-14 指标曲线与 PV 曲线比较

从图4可以看出,随着14号节点负荷功率的增加,节点电压在下降,支路电压稳定指标值在减小。当电压逐渐降低到临界点时,支路电压稳定指标值随之降低到0附近。节点电压的临界点与支路指标的临界点功率都在0.5附近,因此支路指标值能够反映支路的运行状态和受端电压的稳定情况。

支路指标  $LVS I$ 、参考文献[5]中支路指标  $LVS I R$  和14号节点 PV 曲线的上半支进行比较的仿真曲线如图5所示。

从图5中可以看出,支路指标  $LVS I$  随着负荷的增加逐步减小,在功率临界点处减小到0附近。而参考文献[5]中的支路指标  $LVS I R$  的值也随负荷的增加而降低,但是它在功率临界点之前达到0。这说

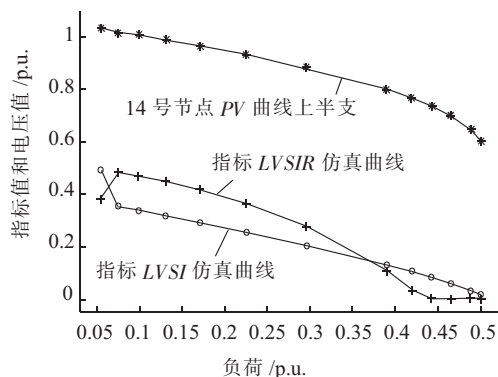


图5 L13-14 的 LVSI 指标与 LVSIR 指标比较

明在功率因数变化的情况下,指标 LVSIR 存在一定的误差。

与 14 号节点强相关的 4 条支路电压稳定指标 LVSI 和 14 号节点 PV 曲线上半支的仿真曲线的比较如图 6 所示。

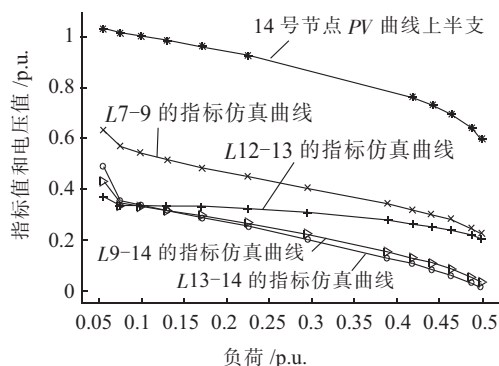


图6 4条支路的 LVSI 指标曲线的比较

在图 6 中,随着负荷节点功率的增加,4 条支路指标值逐步减小,说明这些支路的功率传输能力在下降。在负荷功率增加过程中,支路 L13-14 和支路 L9-14 的指标值小于支路 L7-9 和 L12-13 的值。且在电压临界点处,支路 L9-14 和 L13-14 的指标值接近于临界值 0,而支路 L7-9 和 L12-13 的值在 0.2 附近。这是因为支路 L9-14 和 L13-14 与 14 号节点直接相连,14 号节点负荷功率的变化直接影响这两条支路的运行状态。临界点处 4 条支路电压稳定指标 LVSI 的值从小到大排列如表 1 所示。

表 1 功率临界点处 LVSI 值排序

序号	支路	LVSI
1	L13-14	0.012 2
2	L9-14	0.027 6
3	L12-13	0.203 2
4	L7-9	0.219 1

从表 1 可以看出,在电压临界点处,支路 L13-14 和 L9-14 的指标值都很小,接近于 0,它们是系统中的弱传输支路。因此通过支路指标的仿真

分析可以确定网络中每条支路的运行情况,找出网络中的薄弱支路,增强了电力调度中心对电力系统的动态稳定检测和分析能力,为调度人员及时采取预防控制措施提供可靠依据。

## 4 结束语

本文利用 PMU 测量量开发了支路电压稳定指标 LVSI。用该指标值的大小来确定网络中支路的薄弱程度,进而分析网络的电压稳定情况。该指标综合考虑了有功和无功两方面的因素,且避免了负荷功率因数恒定的限制。用 IEEE14 节点系统对该指标进行了仿真分析。仿真结果表明该指标能正确反映支路的运行状态和系统电压稳定的实际情况。

## 参考文献:

- [1] 薛禹胜,徐伟,DONG Zhaoyang,等.关于广域测量系统及广域控制保护系统的评述[J].电力系统自动化,2007,31(15):1-5.
- [2] 闫常友,刘建飞,杨奇逊.基于当地量的电压稳定指标[J].电力系统自动化,2006,30(5):29-32.
- [3] 邢卫荣.基于 PMU 分析的电力系统电压稳定指标研究[D].南京:东南大学电气工程学院,2008.
- [4] 刘道伟,谢小荣,穆刚,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):13-17.
- [5] REHTANZ C. Wide Area Monitoring and Control for Transmission Capability Enhancement [R]. GIGRE, Paris, France, 2006.
- [6] 牟善科,丁涛,顾伟,等.基于偏差校正的戴维南等值参数在线跟踪改进算法[J].电力系统保护与控制,2011(2):23-28.
- [7] 周双喜,朱凌志,郭锡欢,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.
- [8] MILOSEVIC B, BEGOVIC M M. Voltage-stability Protection and Control Using a Wide-area Network of Phasor Measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(1):121-127.
- [9] 常森伟,安天瑜,周苏荃.基于支路潮流的电压稳定指标研究[J].黑龙江电力,2007,29(4):252-254.
- [10] 姜彤,艾琳,杨以涵.基于支路裕度的在线电压稳定指标[J].电力自动化设备,2009,29(10):39-42.
- [11] 李大虎,曹一家.基于同步相量测量的实时电压稳定分析方法[J].电力系统自动化,2006,30(12):17-22.
- [12] 顾伟,万秋兰.广域电压检测的线性稳定指标研究[J].电工技术学报,2010,25(1):1-6.

## 作者简介:

张洪喜(1983),男,河南平顶人,硕士研究生,从事电力系统稳定分析与控制研究工作。

不会超过 3.5 倍相电压,这实质上是否认弧光过电压存在危害性。

以两起因弧光过电压造成的事故为例。一次事故是一座 35 kV 农村变电站,10 kV 架空线路约 210 km,线路对地电容电流为 7.5 A。事发当天天气晴朗,因线路发生单相接地时,室内出线柜内少油断路器边相对柜的金属隔板放电,主变压器 10 kV 进线柜过流 1 s 后跳闸。经检查,10 kV 控制室 10 kV 母线单相接地光字牌亮,一出线柜内少油断路器边相有烧伤痕迹,金属隔板烧穿有一直径约 5 cm 的洞,少油断路器边相至金属隔板距离有 18 cm。3.5 倍相电压是不可能击穿的。

另一次事故是一座 110/35/10 kV 的城市变电站,10 kV 架空线路和电缆混合,线路对地电容电流为 9.2 A,事故当天天气晴朗,因是春节期间负荷较轻,10 kV 线路发生单相接地的时候,造成室内 10 kV 母线 4 组隔离开关对地放电,其中三组紧挨一起,另一组与其他三组中间隔一间隔,说明系统发生单相接地时,10 kV 母线都发生过电压。经过检查,控制室 10 kV 母线单相接地光字牌亮,主变压器 10 kV 进线过电流 1 s 跳闸。该变电站的检修才一个月,母线也曾清扫过。后经江苏省电力公司电力科

学研究院专家到场后确认,这是一起弧光过电压事故。综上所述,两起事故说明了弧光接地过电压危害性较大。

#### 4 结束语

目前,在我国现行规程 DL/T 620—1997《交流电气装置过电压保护和绝缘要配合》的提法中,提出间歇性弧光过电压一般不超过 3.5 倍<sup>[2]</sup>。根据本文上述的两起事故案例,这一提法不严格,且值得商榷。另外广州局与武高所在《10 kV 城市电网中性点经电阻接地方式的研究》一文中,也对这一提法提出了疑问。为进一步正确表述弧光过电压的理论特性,建议采用 IEEE 的提法,即间歇性弧光过电压一般不超过 3.9 倍的提法。

#### 参考文献:

- [1] 平绍勋,周玉芳.电力系统中性点接地方式及运行分析[M].北京:中国电力出版社,2010.  
[2] DL/T 620—1997,交流电气装置过电压保护和绝缘配合[S].

#### 作者简介:

颜建国(1961),男,江苏常熟人,工程师,从事技术管理工作;  
平绍勋(1941),男,上海人,高级工程师,从事技术管理工作。

## Investigation of the Analysis Methods for Arc Grounding over Voltage

YAN Jian-guo, PING Shao-xun

(Ru Gao Power Supply Company, Rugao 226500, China)

**Abstract:** There are two different theories about over voltage generated by arc grounding in insulated neutral system, arc extinguishing theories of fundamental frequency and high frequency. With fundamental frequency theory, the over voltage can not endanger the safe operation of equipments because it is only 3.5 times. While with high frequency theory, the over voltage can lead to the system faults because it is 7.5 times than normal one. Two faults had been analyzed to prove the correctness of high frequency act extinguishing theory, one is two phase grounding fault of 10 kV bus and another is C-phase grounding fault of 10 kV oil-minimum breaker.

**Key words:** over voltage; fundamental frequency; high frequency; grounding; arc

(上接第 61 页)

## Study on Voltage Stability Index of Branch Power Flow Based on PMU

ZHANG Hong-xi

(Nari-relays Electric Co.Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Voltage stability prewarning based on the PMU technology needs to monitor operation of power transmission lines in real-time. The existing branch voltage stability index only can be used in the case of the constant power factor because it ignores the effect of reactive power. A new index considering branch active and reactive comprehensively was proposed in this paper. The index is applicable to various load power factors. Detailed derivation was made on this index. The index was tested in IEEE14 bus system, and the results indicate that it could reflect branch operation and voltage stability conditions better.

**Key words:** PMU; thevenin equivalent; t-equivalent; branch voltage stability index