

基于同步相量和相对电距离的电压静态稳定性评价

叶 华, 刘玉田

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 论述了负荷特性对相对电距离指标的影响, 并与电压稳定性负荷节点指标进行了比较, 论证了两种方法的等价性。提出利用从相量测量装置获得的电压和电流相量, 并基于静态等值的思想, 通过相对电距离指标对各负荷节点的静态电压稳定性进行排序, 从而可对关键节点进行监测和控制。多机系统的仿真结果表明了该方法的有效性。

关键词: 电压稳定; 同步相量; 相对电距离

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)13-0017-04

0 引言

随着全球定位系统(GPS)、DSP高速数字信号处理技术以及通讯技术的发展,使得全网同步相量测量已成为现实,并已有有一定数量的相量测量装置(PMU)在电网中安装运行。

同步相量测量在电力系统中有着广泛的应用前景^[1],在暂态稳定评价^[2]和电压稳定性的监视与控制^[3,4]等方面开展了研究。文献[3]探讨了在包含电压依赖性负荷以及发电机有无功功率极限限制的系统中电力系统电压稳定性的监视和控制;文献[4]通过与传统的SCADA/BMS相比较,利用广域相量测量和保护作为电力系统电压稳定性紧急控制。

本文利用同步相量测量获得的数据,结合相对电距离指标研究了电力系统静态电压稳定性,并讨论了负荷特性对相对电距离指标的影响。

1 简单系统电压稳定分析

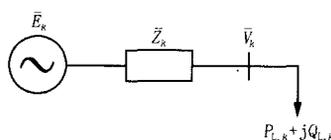


图 1 两节点等值系统

Fig 1 Equivalence of two-bus system

简单的两节点等值系统如图 1 所示。设在时刻 t_k , 无穷大电源 $\bar{E}_k = E_k \angle 0$ 经传输线 $\bar{Z}_k = R_k + jX_k = Z_k \angle \theta_k$ 向集中负荷 $\bar{Z}_f = Z_f \angle \phi_f$ 输送电能 $P_{L,k} + jQ_{L,k}$, 负荷节点的电压为 $\bar{V}_k = V_k \angle \delta_k$ 。为了简便,以下均省去下标 k ,但应当注意的是系统的运行状态是随

着时间不断变化的,我们分析的是 t_k 时刻的系统。

该简单系统的潮流方程为:

$$P_L = \frac{V}{Z} [E \cos(\theta_k + \delta_k) - V \cos \theta_k] \quad (1)$$

$$Q_L = \frac{V}{Z} [E \sin(\theta_k + \delta_k) - V \sin \theta_k] \quad (2)$$

化简后可得:

$$V^4 + V^2 [2(P_L R + Q_L X) - E^2] + Z^2 (P_L^2 + Q_L^2) = 0 \quad (3)$$

式(3)定义了 (P, Q, V) 空间的一个曲面,其在 (P, V) 平面的投影就是我们所熟知的 $P-V$ 曲线。当系统负荷为恒功率负荷时,负荷曲线与 $P-V$ 曲线的上、下半支相交于两点,这两个交点分别对应关于 V 的四次代数方程的两个解,即一个高电压解与一个低电压解。当高电压解和低电压解相等时,系统电压临界稳定,此时系统传输的功率达到最大,即:

$$V_+ = V_- = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{E^2 - 2(P_L R + Q_L X)} \quad (4)$$

此时,负荷等值阻抗的幅值与传输线的阻抗幅值之间有如下关系^[5]:

$$Z_f = Z \quad (5)$$

即在临界点处负荷等值阻抗幅值等于传输线的阻抗幅值。

对于简单系统,在某一运行状态下,针对某一负荷水平 $P_L + jQ_L$ 及其相应的状态 \bar{V} 和等值阻抗 \bar{Z}_L ,为了考察系统在该运行状态下的稳定裕度,可定义相对电距离指标 Z_D 如下^[5]:

$$Z_D = \frac{Z_f}{Z} \quad (6)$$

由于 Z 表明了电源与负荷之间的电距离, Z 越小系统带负荷能力越强,因而用相对电距离指标 Z_D

基金项目:教育部留学回国人员科研启动基金资助 [2003]406

衡量负荷节点稳定程度的物理意义明确。当 $Z_D > 1$ 时,系统稳定,且 Z_D 越大稳定程度越高; Z_D 接近于 1 时,可以认为系统临近电压失稳;当 Z_D 的值为 1 时,系统达到临界稳定。

2 负荷特性对电压稳定性的影响

考虑图 1 中两节点等值系统计及电压静特性的负荷模型如下^[31]:

$$\begin{aligned} P_L &= P_{con} + aV + V^2 \\ Q_L &= Q_{con} + bV + V^2 \end{aligned} \quad (7)$$

其中: P_{con} 、 Q_{con} 为恒功率负荷的有功和无功功率, a 、 b 、均为常数。

运用戴维南等效定理从恒功率负荷看进去,将带有上述混合负荷的两节点系统等效为只带有恒功率负荷的两节点等效系统。将恒阻抗负荷和恒电流负荷分别等效为恒定的 \bar{Z}_L 和 \bar{I}_L , 则从恒功率负荷看进去时等效系统的电源和传输阻抗分别为^[31]:

$$\bar{E}_{eq} = E_{eq} \quad e_{eq} = \bar{Z}_L \frac{\bar{E} - \bar{I}}{\bar{Z} + \bar{Z}_L} \quad (8)$$

$$\bar{Z}_{eq} = R_{eq} + jX_{eq} = \frac{\bar{Z}\bar{Z}_L}{\bar{Z} + \bar{Z}_L} \quad (9)$$

与式 (6) 类似, 当系统带混合负荷时可定义等效相对电距离指标为:

$$Z_{Deq} = \frac{Z_f}{Z_{eq}} \quad (10)$$

其中: Z_{eq} 为 \bar{Z}_{eq} 的幅值。

由于恒阻抗和恒电流负荷消耗的功率与节点电压的幅值有关。当节点电压幅值降低时,其消耗的有功和无功功率也随之下降。从 $P-V$ 曲线上分析可知,当仅有恒功率负荷时,在 $P-V$ 曲线上表示为一条垂直线^[8],系统最容易出现电压失稳;当系统含恒阻抗和恒电流负荷时,系统的临界电压运行点超过了最大传输功率运行点而出现在 $P-V$ 曲线的下半支,且恒阻抗和恒电流负荷在总负荷中占的比例越大,等效相对电距离的值越大,系统就越不容易发生电压失稳;当仅有恒阻抗或恒电流负荷时,则不会发生电压失稳^[3]。

文献 [3] 中提出了采用电压稳定负荷节点指标来确定电力系统薄弱节点的方法,其负荷节点电压稳定指标 $VSLB I_k$ 定义为:

$$VSLB I_k = \frac{V}{V} \quad (11)$$

其中: V 为负荷节点的电压幅值, V 为在等值传输线上的电压降落的幅值。当 $VSLB I_k$ 的值接近于 1

时,可以认为系统临近电压失稳;当 $VSLB I_k$ 的值为 1 时,系统传输的功率最大,系统达到临界稳定;当 $VSLB I_k$ 的值大于 1 时,系统稳定。

将式 (1) 和 (2) 合并化简,并将式 (4) 代入,可以得到当系统达到临界稳定时,等值系统的电源幅值与负荷节点电压幅值之间有如下的关系:

$$E = 2V \cos \quad (12)$$

上式表明,在最大功率情况下,等值传输线上的电压降落的幅值 V 等于负荷节点的电压幅值 V , 即:

$$V = V \quad (13)$$

由此也就证明了恒功率负荷时相对电距离指标 Z_D 和电压稳定负荷节点指标 $VSLB I$ 是一致的。

使用戴维南等效定理,可将带混合负荷的系统等效为只带恒功率负荷的系统,因此,等效相对电距离指标和等效 $VSLB I$ 仍然是等价的。因此,采用相对电距离 Z_D 和负荷节点电压稳定指标 $VSLB I$ 来确定电力系统薄弱节点的方法是等价的。

3 多机系统电压稳定评价

无论系统如何复杂,从系统中某一节点向系统看,在任意时刻都可以将系统等值为一个电势源经等值阻抗向负荷节点供电的单机系统^[6]。对于多机系统,目前由于 PMU 的价格昂贵,在系统中的所有节点都装设是不现实的,可以优化配置 PMU^[7],只在关键节点安装。对于装设了 PMU 的多机系统,进行电压静态稳定评价的步骤为:

- 1) 在时刻 t_k , 从各 PMU 中获取电压和电流相量数据,从能量管理系统 EMS 获得其它数据;
- 2) 求取从负荷节点看进去的等值两节点系统的参数 \bar{E} 、 \bar{V} 以及负荷等值阻抗幅值与传输线等值阻抗幅值 Z_f 、 Z ;
- 3) 计算系统各个负荷节点相对电距离指标,并按其大小进行排序,也即对系统中各个节点的静态电压稳定性进行排序,从而可以对关键节点和薄弱节点进行监视和控制。

4 算例结果

本文以如图 2 所示的典型五节点系统为例进行仿真,分析系统的静态电压稳定性,并与文献 [5] 中提出的方法进行了比较,部分结果如下。

5 节点系统网络接线和各支路阻抗参数如图 2 所示,各节点功率均以标么值标于图中。其中,节点 2 连接的实际是发给定功率的发电厂,设平衡节点 1 的电压保持为定值 1.06 p.u。

表 1 为各负荷节点等效参数及相对电距离 Z_D 、临界电压 V_{cr} 和临界功率 P_{cr} 。从中可以看出,负荷节点 4 的相对电距离最大,而负荷节点 3 相对电距离最小,为电压稳定薄弱节点。

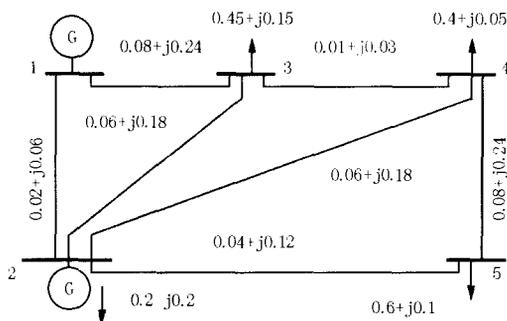


图 2 5 节点系统图

Fig 2 Diagram of five-bus system

表 1 各负荷节点恒功率负荷时的 Z_D 、 V_{cr} 和 P_{cr}

Tab 1 Z_D , V_{cr} and P_{cr} for constant power load

节点	E	Z	Z_f	Z_D	V_{cr}	P_{cr}
3	1.052 5	0.092 2	2.145 2	23.266 8	0.590 3	3.145 5
4	1.031 3	0.097 6	2.516 8	25.786 9	0.622 3	3.320 0
5	1.060 8	0.137 1	1.649 1	12.028 4	0.623 9	2.598 0

图 3 为负荷节点 3 在恒功率负荷下,其它节点负荷不变,按恒定功率因数不断增加负荷时等值阻抗的幅值 Z_f 与传输线等值阻抗幅值 Z 的变化曲线。从曲线中可以看出,在负荷不断增加的过程中,负荷等值阻抗的幅值 Z_f 不断减小,而系统传输线等值阻抗的幅值变化较小,可以认为不变,当系统电压临近崩溃时, Z_f 与 Z 相等,即 Z_D 为 1。其中横坐标 k 为初始负荷倍数。图 4 为负荷节点 3、4、5 分别按恒定功率因数不断增加负荷,而其它节点负荷不变时相对电距离 Z_D 的变化曲线,从图中也可以看出负荷节点 4 的相对电距离 Z_D 最大,而负荷节点 3 相对电距离最小,与表 1 中的结果一致。

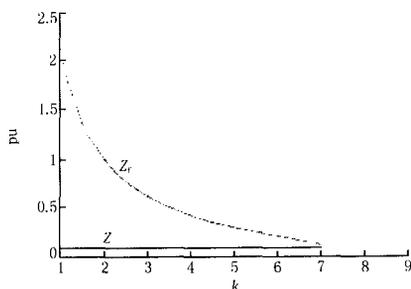


图 3 节点 3 恒功率负荷时 Z_f 和 Z 变化曲线

Fig 3 Z_f and Z curve for bus 3 with constant power

节点 3 恒功率负荷时 V 、 V 的变化曲线如图 5

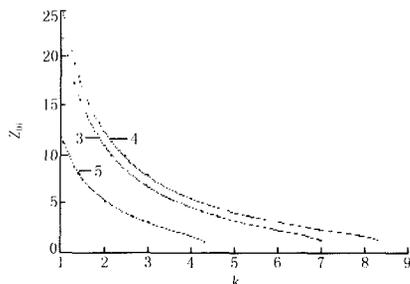


图 4 节点 3、4、5 恒功率负荷时 Z_D 变化曲线

Fig 4 Z_D curve for bus 3, 4 and 5 with constant power

所示。如前所述,恒功率负荷时相对电距离指标 Z_D 和电压稳定负荷节点指标 $VSLBI$ 是一致的,因此各节点的 Z_D 曲线和 $VSLBI$ 曲线是相同的,如图 4 所示。

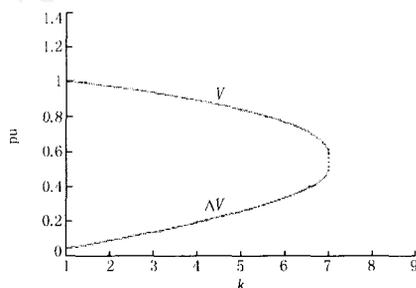


图 5 节点 3 恒功率负荷时 V 和 V 变化曲线

Fig 5 V and V curve for bus 3 with constant power

表 2 为负荷节点 3 在各种负荷组成情况下的相对电距离 Z_{Deq} 。计算结果表明,电压依赖性(恒电流)负荷比例越大,系统带负荷的能力越强,越不容易发生电压失稳,相对电距离越大。图 6 为相对电距离指标随负荷增长的变化曲线,其与表 2 的分析结果一致。图 7 为 75% 恒功率, 25% 恒电流负荷时,节点 3、4、5 的 Z_{Deq} 随负荷变化曲线,可以看出,仍然是节点 4 的相对电距离最大,节点 5 的相对电距离最小。

表 2 节点 3 带混合负荷时的 Z_{Deq}

Tab 2 Z_{Deq} for bus 3 with mixed loads

负荷	E	Z	Z_f	Z_{Deq}
25% PQ, 75% I	1.029 9	0.092 2	8.827 3	95.740 8
50% PQ, 50% I	1.037 4	0.092 2	4.419 2	47.930 6
75% PQ, 25% I	1.044 9	0.099 2	2.949 9	31.994 6

5 结论

本文利用从相量测量装置获得的电压和电流相量数据,并基于静态等值的思想,求出各负荷节点的相对电距离指标,利用该指标可对各负荷节点的静态电压稳定性进行排序,进而来评判系统的静态电

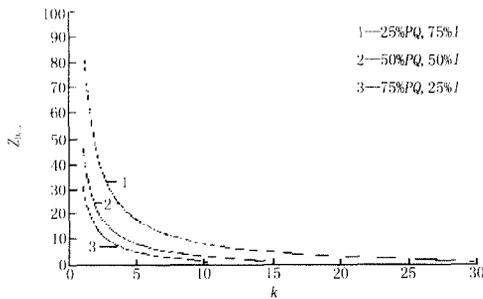


图 6 节点 3 带混合负荷时的 Z_{Dequiv} 变化曲线

Fig 6 Z_{Dequiv} curve for bus 3 with mixed loads

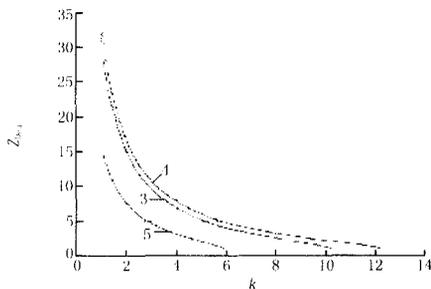


图 7 75% PQ、25% I 时, 节点 3、4、5 的 Z_{Dequiv} 变化曲线

Fig 7 Z_{Dequiv} curve for bus 3, 4 and 5 with

75% PQ and 25% I load

压稳定性,以期达到对关键节点进行监测和控制;与电压稳定性负荷节点指标进行了比较,说明了这两种方法的等价性。

参考文献:

- [1] 王克英. 基于部分量测的解耦计算方法及其在稳态分析中的应用(博士学位论文)[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2001.
WANG Ke-ying The Decoupled Algorithm Based on Partial Measurements and Its Application in the Steady State Analysis of Power System, Doctoral Dissertation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2001.
- [2] 刘玉田, 林飞. 基于相量测量技术和模糊径向基网络的暂态稳定性预测[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 19-23.

LIU Yu-tian, LIN Fei Application of PMU and Fuzzy Radial Basis Function Network to Power System Transient Stability Prediction [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 19-23.

- [3] Mibsevic B, Begovic M. Voltage Stability Protection and Control Using a Wide-area Network of Phasor Measurements [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 121-127.
- [4] Rehtanz C, Bertsch J. Wide Area Measurement and Protection System for Emergency Voltage Stability Control [A]. Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE 2002 842-847.
- [5] 栾兆文, 刘玉田, 樊涛. 电压静态稳定的等效电距离法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(3): 41-45.
LUAN Zhao-wen, LIU Yu-tian, FAN Tao Equivalent Method for Voltage Stability Analysis [J]. Proceedings of the EPSA, 1999, 11(3): 41-45.
- [6] 李兴源, 王秀英. 基于静态等值和奇异值分解的快速电压稳定性分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 1-4.
LI Xing-yuan, WANG Xiu-ying Fast Voltage Stability Analysis Methods Based on Static Equivalence and Singular Value Resolution [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 1-4.
- [7] CHU Xiao-dong, LIU Yu-tian Optimal Placement of Rotor Angle Transducers for Power System Stability [J]. Electric Power Systems Research, 2003, 67(2): 133-142.
- [8] Taylor C W. Power System Voltage Stability (影印版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
Taylor C W. Power System Voltage Stability, Process Plate [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.

收稿日期: 2004-10-21; 修回日期: 2004-12-13

作者简介:

叶华(1981-),男,博士研究生,研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: yehua9016@mail.sdu.edu.cn

刘玉田(1964-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统运行与控制及人工智能在电力系统中的应用。

Voltage stability evaluation based on PMUs and relative electrical distance

YE Hua, LIU Yu-tian

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The influence of load characteristics to the relative electrical distance index is discussed and compared with the voltage stability load bus index. The equivalence of both indexes is proved. Based on the voltage and current phasors derived from phasor measurement units and the basic concept of steady-state equivalence, a method is presented to evaluate the power system voltage stability. The voltage stability for load bus is listed out in terms of the relative electrical distance index to monitor and control for key buses. Simulation results of a test system demonstrate the validity of this method.

Key words: voltage stability; PMUs; relative electrical distance