

① 73-77

变电站电压稳定性的实用判据

Practical Criterion for Voltage Stability of Substation

周念成
Zhou Niancheng

钟岷秀
Zhong Mingxiu

徐国禹
Xu Guoyu

TM 712

(重庆大学电气工程系, 重庆, 630044; 第一作者 26岁, 男, 博士)

A 摘要 给出了基于变电站实时信息和电网准实时信息的电压稳定性实用判据。利用该判据能有效地预测节点电压稳定裕度, 并用 IEEE-14 节点系统对判据进行了验证。

关键词 电压稳定; 实用判据; 信息
中国图书资料分类法分类号 TM712

变电站
电力系统

ABSTRACT This paper presents a new practical criterion for voltage stability based on the real-time information at the substation and the quasi-time information from power system. By using the criterion, it is effective to predict the bus voltage stability margin. This is of great importance to raise the security operation level and prevent voltage collapse. The practical criterion for voltage stability is tested on the IEEE-14-bus test system. It needs less calculation time and is very suitable for real-time control of power systems.

KEYWORDS voltage stability; practical criterion; information

0 引 言

随着电力系统的不断发展和负荷的持续增加, 电压稳定和电压崩溃问题吸引了越来越多的注意力^[1]。许多学者提出了各种电压稳定判据, 但对其在电网中的在线应用研究得不够。因此将其实用化, 使之真正服务于电力系统是目前摆在人们面前的一个重要课题^[2]。

系统的电压水平是电力系统无功功率供需平衡的具体表现, 和系统频率与有功功率供需平衡关系有很大的不同, 无功功率的传输不但产生功率损耗而且沿传输途径产生电压降落, 因而系统中各枢纽点的电压特性更具有“地区”性质。从经济性、有效性和可靠性的角度来看, 电压及无功功率的最优控制都需要在整个系统范围内进行统一协调、分层控制, 这就要求电网对各配电中心具有遥测、遥信、遥控的功能, 对通道的可靠性要求高, 投资大, 难以在近期内推广运用^[3]。

随着电网自动化水平的提高以及微机在电力系统的广泛运用, 研究利用变电站就地的实时信息和电网准实时信息, 在线地计算出电压稳定裕度, 进行实时控制, 对提高电网安全稳定运行水平具有重要的理论意义和实用价值。

* 收文日期 1995-06-02

1 变电站电压稳定实用判据的推导

文献[4]推导出了电压崩溃邻近指标 Z_{si}/Z_i (Z_{si} 为负荷节点 i 的短路阻抗; Z_i 为负荷节点 i 的负荷阻抗), 当满足下式: $Z_{si}/Z_i \leq 1$ (1)

表示节点电压稳定, $Z_{si}/Z_i > 1$ 表示节点电压崩溃。在这个判据中, Z_{si} 和 Z_i 都是随着系统的运行状态的不同而发生变化的, 对这个判据的应用必须获得全网的实时运行数据, 求出负荷节点的短路阻抗, 由前述的理由, 这个判据用于电力系统实时电压稳定控制, 还存在一定的困难。文献[4]从内阻为 $Z_{si} \angle \beta$ 的恒压源 V_{si} 供电的两节点系统(如图1所示, 假设负荷的功率因数为常数即 $\cos \varphi = \text{常数}$) 推导出了公式(2)和(3)。

$$P_{T^m} = \frac{V_{si}^2 \cos \varphi}{Z_{si} 2[1 + \cos(\beta - \varphi)]} = \frac{V_{si}^2 \cos \varphi}{Z_{si} 4 \cos^2((\beta - \varphi)/2)} \quad (2)$$

$$V_{T^m} = \frac{V_{si}}{\sqrt{2[1 + \cos(\beta - \varphi)]}} = \frac{V_{si}}{2 \cos((\beta - \varphi)/2)} \quad (3)$$

式中 $Z_{si} \angle \beta$ 为电源内阻即负荷节点的短路阻抗;

$Z_i \angle \varphi$ 为负荷阻抗;

V_{si} 为负荷节点的开路电势;

P_{T^m} 为系统能向负荷传输的极限功率 ($Z_{si}/Z_i = 1$ 时的传输功率);

V_{T^m} 为在极限功率下的节点极限电压。

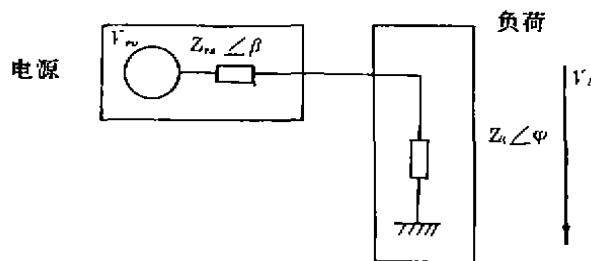


图1 两节点系统

文献[4]的两节点系统具有普遍的意义, 因为不管系统接线怎样复杂, 从负荷节点(变电所母线)看向系统, 在任一瞬间, 都可以等价为电源(开路电势), 经过一个传输阻抗(到该节点系统侧的短路阻抗)向该节点供电的单机系统^[1]。又根据电网络理论, 对于线性网络, 任一节点与线性网络都可以得到戴维南等效电路, 及由开路电势 V_{si} 和戴维南等效阻抗 Z_{si} 构成的系统(如图1)。对具有 n 个节点的网络, 节点 i 的戴维南等效阻抗就是节点阻抗矩阵 Z 的第 i 个对角元 $Z_{ii} \angle \alpha_i$ ^[5], 文献[4]根据传输功率极限推出了公式(1)。在节点 i 与系统等值为戴维南等效电路中, 如果我们已知节点 i 的实时开路电势 V_{si} 、负荷阻抗 $Z_i \angle \varphi_i$ 、电流 I_i , 可以求出短路阻抗 $Z_{si} \angle \beta_{si}$, 而且与 $Z_{ii} \angle \alpha_i$ 应是完全相等的。同理, 我们可以得到, 节点电压稳定必须满足: $Z_{si}/Z_i \leq 1$ (4)

系统中由于存在非线性元件(如发电机、负荷等), 使得戴维南等效电路不能精确成立, 只能将发电机及负荷在运行点线性化:

$$Z_i \angle \varphi_i = \frac{V_i}{I_i \angle \varphi_i} = \frac{V_i^2 \cos \varphi_i}{P_i} \angle \varphi_i \quad (5)$$

则:
$$Y_i \angle -\varphi_i = \frac{P_i}{V_i^2 \cos \varphi_i} \angle -\varphi_i \quad (6)$$

$$\angle \varphi_i = \text{tg}^{-1}(Q_i/P_i) \quad (7)$$

式中, V_i , P_i 和 Q_i 是潮流计算后得到的节点 i 的电压, 有功功率和无功功率。

由上述可知,按文献[4],负荷节点*i*要准确地得出 P_i^{max} , V_i^{max} 及 Z_{in}/Z_i ,必须知道节点*i*的实时开路电势 V_{in} ,因此如何在线求出节点的实时开路电势 V_{in} 和短路阻抗 $Z_{in}\angle\beta_i$,是将该判据在线运用的主要问题。文献[4]没有考虑 SCADA 系统数据收集、计算和发送的时间,只是取系统的同时数据进行理论上的研究。本文考虑了地区电网,地调收集各变电站的运行数据,计算机计算出各节点的开路电势,将开路电势发送到各变电站均需要一定的时间,使变电站收到的开路电势与系统当前的运行状态有一时差(该时差由系统的调度自动化水平而定,约 10 秒钟,调度中心主机的任务分配,时差约为 1~5 分钟)。但是,地区供电网络,在其负荷变化不大的情况下各节点的开路电势变化不大,而且有一定的变化规律^[4],本文提出了地调可以根据收集到的各配电变电站的运行数据、枢纽站维持的电压水平*,计算出各节点的开路电势 V_{in} (图 1 用 V_{in} 表示),再根据系统的日负荷运行曲线以及负荷的变化趋势进行修正(系统的调度自动化水平越高,修正后的实时性也越高),将已修正后的数据定时发送到各配电变电站,配电变电站用得到的系统准实时信息(开路电势 V_{in})和本站的实时信息:母线电压 V_i ,负荷功率 $S_i(S_i = P_i + jQ_i)$ 和电流 I_i ,可以按下列步骤计算出 $Z_{in}\angle\beta_i$:

在某一瞬间,可将一负荷节点和系统等值为一两节点系统得:

$$I_i = \frac{V_{in}}{Z_{in}\angle\beta_i + Z_i\angle\varphi_i} \quad (8)$$

由公式(8)可以解出:

$$Z_{in}\cos\beta_i = \frac{R_i(I_i)V_{in}}{[R_i(I_i)]^2 + [I_{in}(I_i)]^2} - Z_i\cos\varphi_i \quad (9)$$

$$Z_{in}\sin\beta_i = \frac{I_{in}(I_i)V_{in}}{[R_i(I_i)]^2 + [I_{in}(I_i)]^2} - Z_i\sin\varphi_i \quad (10)$$

由公式(5)~(10)求出的 $Z_{in}\angle\beta_i$ 值是根据电网的准实时信息 V_{in} 和变电站的实时信息 V_i, S_i, I_i 得出的,命名为变电站的准短路阻抗,这样我们就将上面推导的公式(4)实用化,得出下式:

$$Z_{in}/Z_i \leq 1 \quad (11)$$

式(11)为新的电压稳定判据,即变电站电压稳定实用判据。 $Z_{in}/Z_i < 1$ 表示节点电压是稳定的, $Z_{in}/Z_i = 1$ 表示节点电压稳定极限,($1 - Z_{in}/Z_i$)为电压稳定裕度,值愈大,表示电压稳定裕度愈大。

2 数值仿真

本节用 IEEE-14 节点系统对式(1)、式(4)和式(11)进行验证及比较,讨论电压稳定实用判据中准实时信息 V_{in} 对计算精度的影响,计算结果用标么值表示。软件用 FORTRAN 77 编写。

2.1 仿真步骤

- 1) 进行潮流计算,得到系统各节点的功率和电压值;
- 2) 线性化发电机及负荷的有功及无功功率,由公式(5)、(7)将其等效为一个并联阻抗;
- 3) 计算节点的开路电势 V_{in} ;

* 电力系统电压和无功电力技术导则(试行),1989

- 4) 形成新的节点导纳矩阵 Y , 求逆得节点阻抗矩阵 Z ;
- 5) 从 Z 矩阵的第 i 个对角元得到节点 i 的短路阻抗 Z_{ii} ;
- 6) 求出利用全局信息的电压崩溃近似指标 Z_{in}/Z_i ;
- 7) 利用 i 节点的 S_i, V_i, I_i, V_{ro} , 用公式(5)~(10) 求出 Z_{in}, β_{in} ;
- 8) 求出 Z_{in}/Z_i , 用公式(3) 求出负荷节点的极限电压 V^{crit} ;
- 9) 维持典型的开路电压 V_o 不变(前期和中期各取一点, 即准实时开路电势), 计算电压稳定实用判据 Z_{in}/Z_i ;
- 10) 增加系统负荷, 再进行潮流计算, 如果发散, 停止计算, 否则转到第 2) 步。

2.2 仿真结果

在仿真计算中, 我们以第 14 节点为考查的节点。节点负荷的增加按文献[4]的方式分为两种情况, 第一种情况是单一节点负荷增加(第 14 节点负荷增加, 步长 $\Delta P = 0.01 \cos \varphi =$ 常数), 直至潮流计算发散。第二种情况是系统负荷都增加(步长 $\Delta P = 0.004$, 负荷的 $\cos \varphi =$ 常数), 直至潮流计算发散。节点 3, 6, 8 装有调相机, 能补偿的最大无功功率 $Q/Q_s = 0.1$ 。仿真结果见图 2~图 3, 图中 P_s 和 V_s 为基准值。

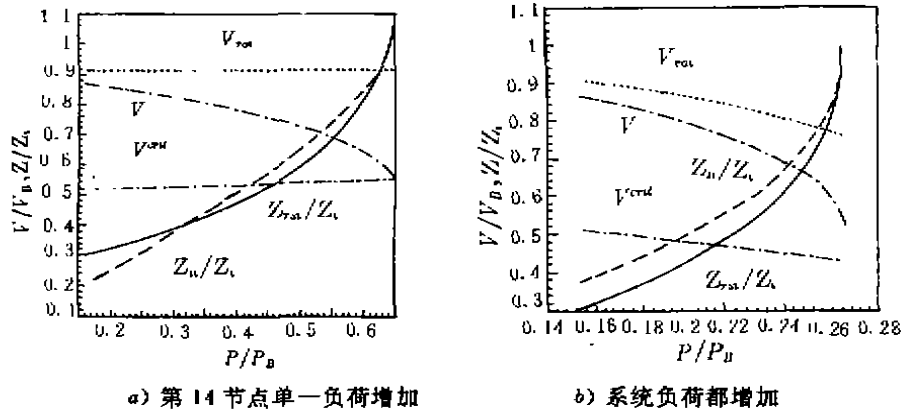


图 2 第 14 节点各参量随负荷增加的变化

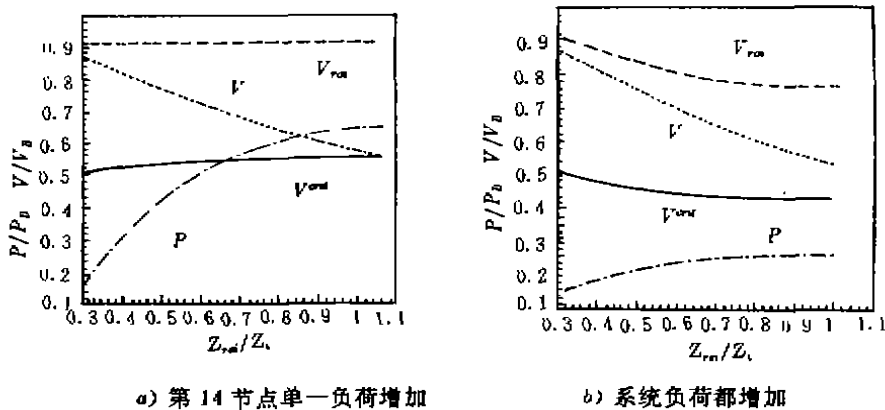


图 3 第 14 节点参量随 Z_{in}/Z_i 的变化

从图 2(a), 图 3(a) 可以看出, 当第 14 节点负荷持续增加其它节点负荷不变时, 第 14 节点开路电势 V_o 变化很小, 图 2(a) 可知, 利用 V_o 与 Z_i 计算出的 Z_{in}/Z_i 与利用全网数据计算出

的电压崩溃近似指标 Z_n/Z_i 变化趋势一致,能较好的接近,当 $Z_{rn}/Z_i = 1.062$, $Z_n/Z_i = 1.0133$ 时,潮流计算发散。由于开路电势变化很小,因此计算出的电压稳定实用判据 Z_n/Z_i 与 Z_{rn}/Z_i 相差很小,有较好的精度。

在图 2(b),图 3(b) 中,当 $Z_{rn}/Z_i = 1.0027$, $Z_n/Z_i = 0.9904$ (计算存在一定的误差)时,潮流计算发散。 Z_{rn}/Z_i 与 Z_n/Z_i 存在误差,从图 2(b) 可见,误差最大为 6%,当 $Z_n/Z_i > 0.85$,两曲线完全重合,我们用初始阶段(前期 A 点)的一个开路电势 $V_o = 0.9105$ ($P/P_B = 0.1590$,计算是从这个负荷开始的)和负荷增加中(中期 B 点)的一个开路电势 $V_o = 0.8480$ ($P/P_B = 0.2090$),维持不变,运行到潮流计算发散,计算的电压稳定实用判据 Z_n/Z_i 与实时的开路电势 V_o 计算的 Z_{rn}/Z_i 比较发散前的几步,结果如下表:

不同的 V_o 值计算出的电压稳定实用判据与 Z_{rn}/Z_i 比较(标么值)

P_{11}	Z_n/Z_i		Z_{rn}/Z_i
	$V_o = 0.9105$	$V_o = 0.8480$	V_o
0.257 0	0.910 6	0.837 2	0.758 2
0.261 0	1.002 7	0.922 6	0.825 9
0.265 0	1.231 2	1.134 4	1.002 7

注:表中 V_o 为实时的开路电势,这三步开路电势为 0.773 4, 0.765 6, 0.757 3。

从表中可以看出,维持前期 A 点的 $V_o = 0.910 5$, 和中期 B 点的 $V_o = 0.848 0$ 不变,求出的电压稳定实用判据误差分别为 23%, 13%, 用实时的开路电势计算的电压稳定判据的误差为 0.27%, 表中的数据说明,对地区电网,如准实时信息的实时性愈高,并根据负荷曲线、系统负荷变化趋势及开路电势的变化趋势对开路电势 V_o 进行相应的修正,与实时开路电势越接近,计算的电压稳定实用判据的误差就愈小,而当电压稳定实用判据大于某一值时(表中 $P/P_B = 0.257 0$ 时,节点电压已降至 0.615 4)节点电压已经趋于不稳定,已处于崩溃边缘,因此,用式(11)作为节点电压稳定实用判据时,节点定时接收来自调度的准实时信息 V_o (即使地调对开路电势 V_o 没有修正或修正得不够准确)进行计算,算出的电压稳定判据仍能有效的使用。

3 结 论

从上面的推导和仿真计算,可以得出以下结论:

- 1) 利用变电站的实时信息和来自电网的准实时信息计算出的 $Z_n/Z_i < 1$ 可以作为节点的电压稳定实用判据, $Z_n/Z_i < 1$ 表节点电压稳定,当 $Z_n/Z_i > 1$ 表示节点电压崩溃。
- 2) 该电压稳定实用判据计算量极小,完全适用于电网的实时控制。

参 考 文 献

- 1 王梅义,吴竞昌,蒙定中. 大电网系统技术. 北京:水利电力出版社,1991. 244~253
- 2 杨恩惠. 对当前我国电网无功电压的调查分析. 电网技术,1992,8(2):22~27
- 3 黄益庄. 变电所微机电压无功综合控制装置. 中国电力,1993,26(10):46~49
- 4 Chebbo A M, Irving M R, Sterling M J H. Voltage collapse proximity indicator; behaviour and implications. IEE PRO-C, 1992, 139(3):241~252
- 5 李光琦. 电力系统暂态分析. 北京:水利电力出版社,1988. 87~95