

# 电力系统静态电压稳定的三维分析与临界电压

侯学勇 鞠平 陆杨文

(河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 从统一关联的角度, 重新审视静态电压稳定的机理, 并以图形的方式加以直观解释, 获得静态电压稳定判据. 通过三维图形分析, 指出静态电压稳定是由电源侧特性与负荷侧特性共同决定的, 各种二维平面分析可以统一到三维空间中.

关键词: 电力系统; 电压稳定; 临界电压; 电压裕度; 三维分析

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1000-198X(2008)03-0396-05

国内外近年来发生的一系列停电事故, 如美国和加拿大 2003 年的“8.14”事故、我国 2006 年的“7.1”事故、欧盟 2006 年的“11.4”事故等, 都与电压稳定有关, 电压稳定问题日益受到重视, 国内外有关的研究非常多<sup>[1-14]</sup>, 特别是有关静态电压稳定的研究, 已经取得了一系列成果. 不少文献中, 经常会采用二维平面曲线来分析静态电压稳定问题, 但不同文献<sup>[8-9, 14]</sup>中采用的二维平面可能不同, 所获得的静态电压稳定判据也不同.

本文从统一关联的角度, 重新审视静态电压稳定的机理, 并以图形的方式加以直观解释. 通过三维分析得出系统临界电压及电压稳定裕度, 比较了在系统参数不同的情形下, 系统临界电压及电压稳定裕度的变化.

## 1 电力系统模型

假设负荷以外的外部系统可以简化为发电机串联一条线路阻抗, 那么就可以用一个发电机-输电线-负荷组成的简单电力系统为背景进行分析, 如图 1 所示. 其中, 电源电势假设恒定.

不妨将负荷母线左侧称之为电源侧, 右侧称之为负荷侧. 根据潮流方程可以获得电源侧方程:

$$P = \frac{EU}{Z} \cos(\theta - \alpha) - \frac{U^2}{Z} \cos\theta \quad Q = \frac{EU}{Z} \sin(\theta - \alpha) - \frac{U^2}{Z} \sin\theta \quad (1)$$

为了表达方便, 定义:

$$u = U/E \quad p = P/S \quad q = Q/S \quad S = E^2/Z \quad (2)$$

这实际上类似于标么化, 电压的基准值为  $E$ , 功率的基准值为短路功率  $S$ , 一般来说  $S$  很大, 则式(1)变为

$$p = u \cos(\theta - \alpha) - u^2 \cos\theta \quad q = u \sin(\theta - \alpha) - u^2 \sin\theta \quad (3)$$

式(3)中有 4 个变量, 消去其中人们不太感兴趣的角度变量  $\alpha$ , 可得描述 3 个变量之间关系的 1 个方程:

$$(p + u^2 \cos\theta)^2 + (q + u^2 \sin\theta)^2 - u^2 = 0 \quad (4)$$

进一步假设:  $r \approx 0$ ;  $\theta = 90^\circ$ , 则可以得到电源侧方程:

$$p^2 + (q + u^2)^2 - u^2 = 0 \quad (5)$$

对于电力负荷, 其静态特性可以采用 ZIP 模型描述:

$$\begin{cases} P/P_0 = P(U/U_0)^2 + P(U/U_0) + P_P \\ Q/Q_0 = Q(U/U_0)^2 + Q(U/U_0) + Q_P \end{cases} \quad (6)$$

类似于输电侧特性, 两边进行标么化处理可得

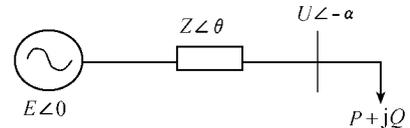


图 1 简化电力系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the simplified power system

$$\begin{cases} p = A_2 u^2 + A_1 u + A_0 \\ q = B_2 u^2 + B_1 u + B_0 \end{cases} \quad (7)$$

其中： $A_2 = \frac{P_z P_0 Z}{U_0^2}$ ,  $A_1 = \frac{P_1 P_0 Z}{E U_0}$ ,  $A_0 = \frac{P_P P_0 Z}{E^2}$ ,  $B_2 = \frac{Q_z Q_0 Z}{U_0^2}$ ,  $B_1 = \frac{Q_1 Q_0 Z}{E U_0}$ ,  $B_0 = \frac{Q_P Q_0 Z}{E^2}$ . 下面的分析为无因次分析. 取  $E = 1.20$ ,  $U_0 = 1.00$ ,  $P_0 = 0.90$ ,  $Q_0 = 0.44$ ,  $Z = 0.50$ ,  $P_z = Q_z = 0.4$ ,  $P_1 = Q_1 = 0.0$ ,  $P_P = Q_P = 0.6$ , 则由式 (7) 计算得负荷侧特性如下：

$$\begin{cases} p = 0.1800 u^2 + 0.1875 \\ q = 0.0880 u^2 + 0.0917 \end{cases} \quad (8)$$

联立求解式 (5) 和式 (8) 3 个方程可以求解 3 个变量. 如果有解的话, 则称之为平衡点. 而且, 电源侧方程 (式 (5)) 中系数与参数或功率没有关系, 但负荷侧方程 (式 (8)) 中系数与负荷参数和功率水平有关.

## 2 静态电压稳定的三维空间直观表达

为了便于对静态电压稳定问题的直观理解, 下面以图形的方式进行分析.

a. 在三维空间画出电源特性 (式 (5)), 这是一个曲面, 图 2 是不同坐标情况下的三维曲面, 有点像悉尼歌剧院的形状. 需要指出的是图中的  $p = 0$  平面画出的部分实际是不存在的, 只是为了对比直观故将它也画出.

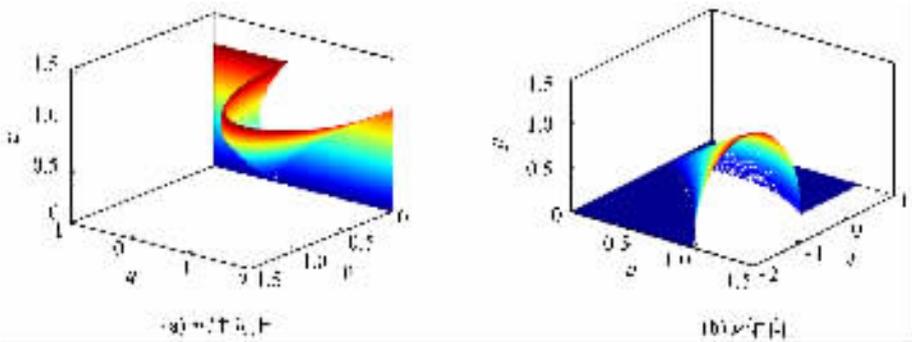


图 2 电源特性方程的三维曲面

Fig. 2 Three-dimensional curved surface of transmission characteristics equations

b. 对这个三维曲面, 采用不同的平面去切割, 就获得三维空间的曲线, 然后再投影到不同的二维平面. 图 3 是分别采用不同平面切割后投影到二维平面的结果, 图 3(a) 是用无功功率恒定的平面切割后投影到  $uOp$  二维平面, 图 3(b) 是用有功功率恒定的平面切割后投影到  $uOq$  二维平面, 图 3(c) 是用电压恒定的平面切割后投影到  $qOp$  二维平面. 实际上, 文献 [8-9, 14] 中的二维平面图就是各种特例. 这组曲线通常称之为“鼻形曲线”, 许多文献将“鼻尖”(极值点) 就作为临界电压.

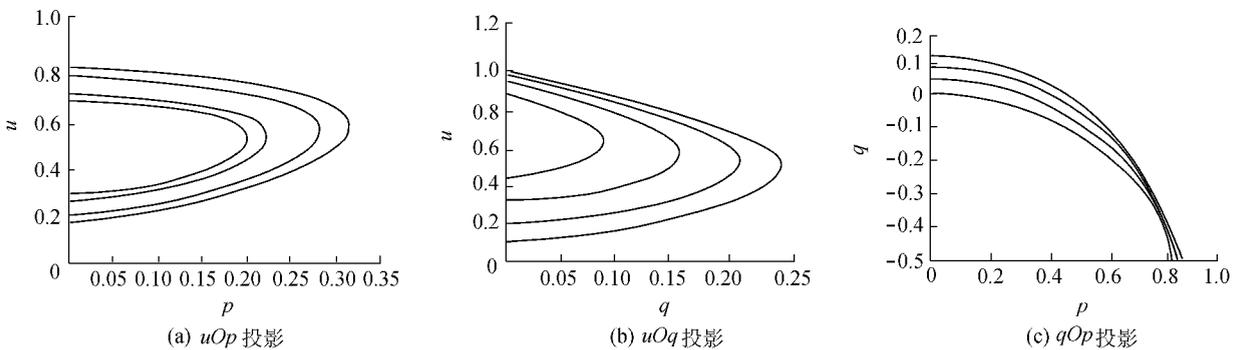


图 3 电源特性方程的二维投影

Fig. 3 Two-dimensional projection of transmission characteristics equations

c. 再在三维空间画出负荷特性 (式 (8)), 由于是 2 个方程, 所以是条空间曲线, 如图 4 中的点星曲线所示.

d. 负荷特性曲线穿越电源特性曲面得到的交点就是系统运行的平衡点, 如图 4 所示, 系统有 2 个平衡点.

### 3 静态电压稳定分析

电压静态稳定分析的任务就是要分析图4中负荷特性曲线在电源侧曲面的2个平衡点的静态电压稳定性.首先研究负荷侧方程(式7)即负荷电压特性的特点,联立消去 $u$ 的平方项可知,负荷电压特性曲线是在空间中的一个平面 $M$ 上的,用该平面切割电源侧曲面同样可以获得一条空间曲线,如图5所示.可以证明这2条曲线在空间中的2个交点就是前面负荷特性曲线在电源侧曲面上的那2个穿越点.下面首先在 $uOp$ 二维平面上来分析静态电压稳定性.

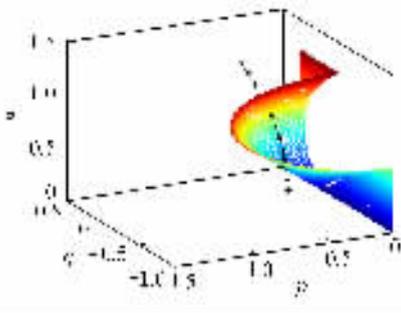


图4 负荷曲线与电源侧曲面相交

Fig.4 Crossover of the load curve and the transmission curved surface

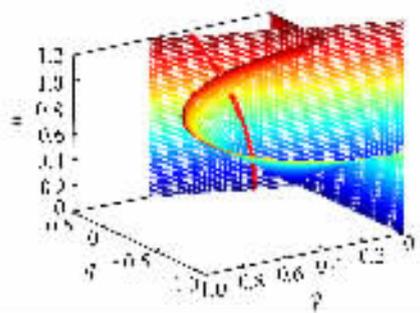


图5 负荷特性平面与电源侧曲面相交

Fig.5 Crossover of the load characteristics plane and transmission curved surface

根据式(7)消去 $u$ 的平方项得到一个三维空间平面方程:

$$ap + bq + cu + d = 0 \tag{9}$$

其中  $a = B_2, b = -A_2, c = B_1A_2 - A_1B_2, d = B_0A_2 - A_0B_2$ .

a. 将负荷特性曲线所在平面 $M$ (式9)在三维空间画出,该曲面切割电源侧曲面,就获得一条曲线 $Y$ ,如图5所示,空间粗线为负荷电压特性曲线(式8),同时也在 $M$ 平面上画出.

b. 将这条曲线 $Y$ 投影到 $uOp$ 平面,如图6中细实曲线 $Y_p$ 所示,该曲线实际上是联立式(5)和式(9)消去 $q$ 变量所得,且作图时考虑了 $p$ 和 $u$ 的实际可取值范围.

c. 将负荷电压特性曲线在 $uOp$ 平面上的投影画出,是一曲线 $X_p$ ,实际上就是负荷有功电压方程(式8)中的有功表达式,如图6中虚线所示.

d. 将2条曲线相减后的曲线 $Y - X$ 在 $uOp$ 平面中画出,称为差值

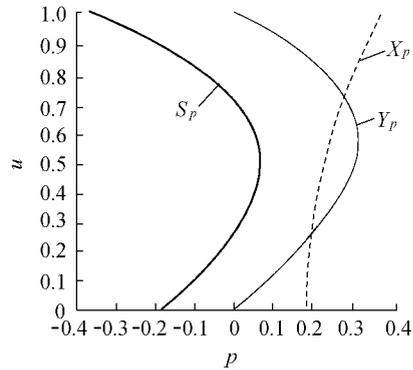


图6  $uOp$ 平面曲线

Fig.6  $uOp$  curves

线 $S_p$ ,如图6中粗实曲线所示.

e. 对于图6曲线 $X_p$ 和 $Y_p$ 的2个交点(对应于差值线上2个过 $p = 0$ 轴的点),进行摄动分析,可以得知电压较高的交点是稳定的,电压较低的交点是不稳定的.所以稳定判据为

$$\frac{\partial(p_g - p_l)}{\partial u} < 0 \quad \frac{\partial p_g}{\partial u} < \frac{\partial p_l}{\partial u}$$

即

$$\frac{\partial P_g}{\partial U} < \frac{\partial P_l}{\partial U} \tag{10}$$

类似地,将负荷特性曲线所在平面 $M$ 切割电源侧曲面所获得的曲线 $Y$ 投影到 $uOq$ 平面,再画出负荷无功电压特性曲线(式8)中的无功表达式)并画出它们的差值线 $S_q$ ,如图7中粗实曲线所示.通过摄动分析,可得稳定判据为

$$\frac{\partial(q_g - q_l)}{\partial u} < 0 \quad \frac{\partial q_g}{\partial u} < \frac{\partial q_l}{\partial u}$$

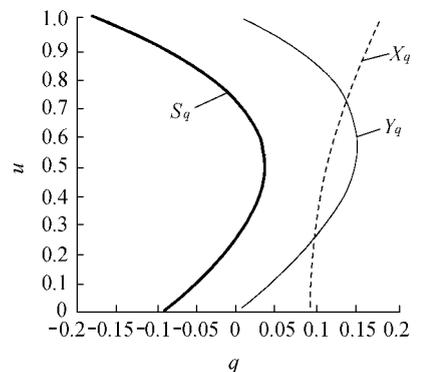


图7  $uOq$ 平面曲线

Fig.7  $uOq$  curves

即 
$$\frac{\partial Q_g}{\partial U} < \frac{\partial Q_l}{\partial U} \tag{11}$$

由图 6 和图 7 获得的临界电压是相同的, 将图 6 和图 7 的差值线合并到图 8 后看得更加直观, 其极值点就是临界电压点, 此时

即 
$$\frac{\partial(P_g - P_l)}{\partial u} = \frac{\partial(Q_g - Q_l)}{\partial u} = 0$$

$$\frac{\partial P_g}{\partial U} = \frac{\partial P_l}{\partial U} \quad \frac{\partial Q_g}{\partial U} = \frac{\partial Q_l}{\partial U} \tag{12}$$

据此得到  $u_{cr} = 0.5098$ , 即  $U_{cr} = u_{cr}E = 0.6118$ .

图 8 中 2 条差值线的过零点也相同, 也就是平衡点, 电压高的为稳定平衡点  $U_s = 0.8782$ . 电压稳定裕度定义如下:

$$K_U = \frac{U_s - U_{cr}}{U_s} \times 100\% \tag{13}$$

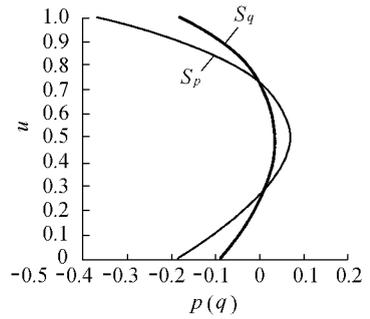


图 8  $uOp$  平面和  $uOq$  平面曲线

Fig.8  $uOp$  and  $uOq$  curves

由以上分析可知, 系统稳定平衡点电压和临界电压都是由电源和负荷特性共同决定的, 所以电压稳定裕度也是由电源和负荷特性共同决定的. 采用不同的负荷特性方程以及改变电源侧参数, 式(7)中系数随之变化, 则所获得的稳定平衡点电压及临界电压是不一样的, 电压稳定裕度也就不同. 表 1 给出了选取不同参数时的临界电压及电压稳定裕度.

表 1 临界电压及电压稳定裕度  $K_U$

Table 1 Critical voltage and voltage stability margin  $K_U$

电源侧参数		功率水平			负荷模型参数				指标		
$E$	$Z$	$U_0$	$P_0$	$Q_0$	$P_z$	$P_P$	$Q_z$	$Q_P$	$U_s$	$U_{cr}$	$K_U/\%$
1.2	0.5	1.0	0.9	0.44	0.4	0.6	0.4	0.6	0.8782	0.6118	30.34
					0.4	0.5	0.6	0.4	0.8952	0.5775	35.50
					0.8	0.2	0.2	0.8	0.8858	0.5729	35.32
	1.0	0.7	0.30	0.4	0.6	0.4	0.6	0.9976	0.6457	35.28	
				0.4	0.5	0.6	0.4	0.8316	0.6115	38.72	
				0.8	0.2	0.2	0.8	0.9977	0.6289	36.97	
1.2	0.3	1.0	0.9	0.44	0.4	0.6	0.4	0.6	1.0385	0.6488	37.52
					0.4	0.5	0.6	0.4	1.0358	0.6128	40.84
					0.8	0.2	0.2	0.8	1.0384	0.6555	36.88
					0.4	0.6	0.4	0.6	1.0932	0.6734	38.40
1.0	0.7	0.30	0.4	0.5	0.6	0.4	1.0890	0.6387	41.35		
			0.8	0.2	0.2	0.8	1.0936	0.5801	36.35		

分析表 1 可知, 电压稳定裕度是由电源侧参数、功率水平和负荷模型参数 3 组因素共同决定的, 电源侧阻抗越小、负荷水平越低、负荷模型成分中恒功率比例越低, 负荷节点的电压稳定裕度就越高, 但是此时的临界电压却是相对较高的. 由此可以澄清一个观点, 临界电压高低并不能判定静态电压稳定的好坏, 以往认为临界电压高对应着静态电压稳定性不好的观点是有局限性的, 它仅适用于稳定平衡点的电压基本不变的情况. 这一观点也可以很好地解释通过连续潮流等方法计算负荷水平低的工况却获得相对较高的临界电压(“鼻形曲线”拐点电压), 这是因为负荷水平较低工况的初始平衡点电压水平也较高, 实际上对应的电压稳定裕度是相对较高的.

还需要注意的是, 文献 [8-9, 14] 中将图 3(a) 或图 3(b) 的“鼻形曲线”的极值点认为是临界电压点, 实际上这也是不妥当的. 因为这些曲线都是电源侧特性, 而临界电压并不单单取决于电源侧特性. 例如图 3(a) “鼻形曲线”是用无功功率恒定的平面切割电源侧曲面获得的, 所以只有当负荷特性为有功功率和无功功率都恒定的情况下, “鼻形曲线”的极值点才是临界电压点, 但这并不符合实际情况.

## 4 结 语

通过图形直观地解释了电力系统静态电压稳定问题, 各种二维平面的分析可以统一到三维空间中; “鼻形曲线”的极值点并不一定是临界电压点. 临界电压和电压稳定裕度都是由电源侧和负荷侧特性共同决定

的,临界电压的高低并不是判断静态电压稳定好坏的唯一指标.

#### 参考文献:

- [ 1 ] IEEE Task Force. Load representation for dynamic performance analysis[ J ]. IEEE Trans on PWRS ,1993 ,8( 2 ) :472-482.
- [ 2 ] IEEE Task Force. Standard load models for power flow and dynamic performance simulation[ J ]. IEEE Trans on Power System ,1995 ,10( 3 ) :1302-1313.
- [ 3 ] IEEE Task Force. Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation[ J ]. IEEE Trans on Power System , 1995 ,10( 1 ) :523-538.
- [ 4 ] CIGRE Task Force. Load modeling and dynamics[ J ]. Electra ,1990 ,130 :124-141.
- [ 5 ] CIGRE Task Force. Modeling of voltage collapse including dynamic phenomena[ J ]. Electra ,1993 ,147 :71-77.
- [ 6 ] CONCORDIA C ,HARA S. Load representation in power system stability studies[ J ]. IEEE Tran on PAS ,1982 ,101( 4 ) :969-977.
- [ 7 ] TAYLOR C W. Power system voltage stability[ M ]. New York :McGraw-Hill Inc ,1994.
- [ 8 ] Van CUTSEM T ,VOURNAS C D. Voltage stability of electric power system[ M ]. Boston :Kluwer Academic Publishers ,1998.
- [ 9 ] 米增强,田建设,刘力丰. 低压减载对电压稳定作用机理的探讨[ J ]. 华北电力大学学报 ,1999 ,26( 1 ) :31-36.
- [ 10 ] 余贻鑫,曾沅,贾宏杰. 静态电压稳定灵敏度判据及对  $dQ_L/dV_L$  和  $dP_L/dV_L$  判据的评析[ J ]. 电力系统及其自动化学报 ,2000 ,12( 3 ) :1-4.
- [ 11 ] 李欣然. 负荷特性对电力系统静态电压稳定性的影响及静态电压稳定性广义实用判据[ J ]. 中国电机工程学报 ,1999 ,19( 4 ) :26-30.
- [ 12 ] 鞠平. 电力系统负荷建模理论与实践[ J ]. 电力系统自动化 ,1999 ,23( 19 ) :1-7.
- [ 13 ] 鞠平,谢会玲,陈谦. 电力负荷建模研究的发展趋势[ J ]. 电力系统自动化 ,2007 ,31( 2 ) :1-4.
- [ 14 ] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[ M ]. 北京:清华大学出版社,2002.

## Three-dimensional analysis of the static voltage stability and the critical voltage in power system

HOU Xue-yong , JU Ping , LU Yang-wen

( College of Electrical Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China )

**Abstract :** The mechanism of static voltage stability is discussed and shown in diagrams , allowing the static voltage stability criterion to be obtained. Analysis of three-dimensional diagrams indicates that the static voltage stability is determined by both transmission characteristics and load characteristics. Any two-dimensional analyses can be conducted within three-dimensional analyses.

**Key words :** power system ; voltage stability ; critical voltage ; voltage margin ; three-dimensional analysis