

感应电动机参数对小干扰电压稳定影响

李 林, 康积涛, 张学群, 刘永江

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:以简单经典两节点电力系统为研究对象,采用考虑机电暂态过程的三阶感应电动机负荷模型,建立系统的小干扰微分方程组,应用系统状态矩阵的特征值和分岔理论来分析感应电动机参数对系统电压稳定性的影响。分析结果表明:综合负荷中定子电阻和电抗、转子电阻、励磁电抗、感应电动机恒定转矩所占的比例较大时,转子电阻、与机械特性有关的指数较小时的感应电动机更易出现电压失稳。

关键词:小干扰电压稳定;感应电动机;鞍结分岔

Abstract: The simple classic two-node power system is taken as the investigated subject. The third-order model of induction motor load is used in which the electromechanical transient process is taken into account. Small disturbance differential equations of the system are set up and the influences of the induction motor load parameters on voltage stability are analyzed by state matrix eigenvalues of the system and bifurcation theory. The analysis results show that when there are a large proportion of stator resistance and reactance, rotor resistance, excitation reactance and constant torque in integrated load, the voltage instability will occur more easily in induction motor with small rotor resistance and small index related to mechanical properties.

Key words: small signal voltage stability; induction motor; saddle node bifurcation (SNB)

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0068-03

电力市场化改革以后,市场参与者要求增加电网输送能力和稳定限额^[1],将使电力系统的运行条件变得更为紧张,容易出现电力系统电压稳定性问题。在电力系统中一些小干扰常常引起频率和电压的波动,小干扰稳定性已成为制约电力传输容量的主要因素之一^[2]。负荷的性质也是影响电力系统稳定性的一个重要因素,电压的稳定性主要是负荷的稳定性^[3]。电力系统中的大部分负荷都是电动机,尤其是感应电动机组成了电力工业的主要动力^[4],并且是引起系统发生电压失稳的重要原因^[5]。文献[6]用时域仿真的方法分析了感应电动机动态负荷特性对系统电压稳定性的影响,文献[7]通过时域仿真分析了输电线路电抗、负荷母线并联补偿容抗和感应电动机负荷参数的变化对电力系统暂态电压稳定极限切除时间的影响。

基于以上两篇文献的思路,采用了小干扰分析方法对一个典型两节点系统进行了分析。通过引入感应电动机的三阶模型建立系统的小干扰微分方程组,应用系统状态矩阵的特征值和分岔理论分析了感应电动机参数对系统电压稳定性的影响。

1 系统模型

电力系统的动态行为可以用微分代数方程组的

形式来描述^[8]。

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y, \mu) \\ 0 = g(x, y, \mu) \end{cases} \quad (1)$$

式中, X 为系统微分状态变量; y 为系统代数状态变量; μ 为系统控制参数。

当系统受到小扰动时,可以用线性化系统的动态稳定性来近似,在平衡点 (x_0, y_0, μ_0) 处对式(1)进行线性化。

$$\begin{cases} \frac{d\Delta x}{dt} = D_x f(x_0, y_0) \cdot \Delta x + D_y f(x_0, y_0) \cdot \Delta y \\ 0 = D_x g(x_0, y_0) \cdot \Delta x + D_y g(x_0, y_0) \cdot \Delta y \end{cases} \quad (2)$$

令 $A = D_x f(x_0, y_0)$, $B = D_y f(x_0, y_0)$, $C = D_x g(x_0, y_0)$, $D = D_y g(x_0, y_0)$ 。消去式(2)中的代数变量 Δy , 则可以得到描述系统动力特性的微分状态方程

$$\dot{\Delta x} = \tilde{A} \cdot \Delta x \quad (3)$$

式中, $\tilde{A} = A - BD^{-1}C$ 为微分状态方程的系统状态矩阵。它包含了各种动态元件的特点和网络连接关系^[9,10]。

2 基于感应电动机小干扰的数学模型

下面主要针对图 1 所示的两节点系统进行讨论,图中节点 1 为发电机无穷大节点,节点 2 为感应电动

机负荷节点, r 为线路电阻, x_0 为线路电抗, r_s 为感应电动机定子电阻。这样的系统中只存在电压稳定, 而不存在功角稳定^[11], 并且电力系统的复杂网络都可以通过戴维南等效变换成此两节点模型。

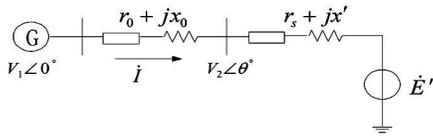


图 1 两节点示例系统

感应电动机采用三阶模型^[4], 方程如下。

$$T_{d0}' \dot{E}_d' = -\dot{E}_d' - (x - x') I_q' + \omega_0 T_{d0}' s E_q' \quad (3)$$

$$T_{d0}' \dot{E}_q' = -\dot{E}_q' - (x - x') I_d' + \omega_0 T_{d0}' s E_d' \quad (4)$$

$$T_j \dot{s} = T_m - T_e \quad (5)$$

式中, E_d' 、 E_q' 分别为转子暂态电势的 d、q 轴分量; I_d' 、 I_q' 分别为定子电流的 d、q 轴分量; T_{d0}' 、 T_j 分别为定子暂态开路时间和转子惯性时间常数; ω_0 为同步转速; x 为感应电动机稳态电抗; x' 为感应电动机暂态电抗; s 为转子滑差; T_m 、 T_e 分别为机械负载力矩和电磁转矩, 在标么值下分别为机械功率 P_m 和电磁功率 P_e , 分别由式 (6)、(7) 确定。

$$T_m = k[a + (1-a)(1-s)^b] \quad (6)$$

$$T_e = R_e (\dot{E}' \cdot I) = E_d' I_q' + E_q' I_d' \quad (7)$$

式中, k 为感应电动机的负荷率系数; a 为感应电动机恒定转矩所占比例; b 为与机械特性有关的指数。

网络方程

$$\dot{V}_1 = \dot{E}^1 + [(r + r_s) + j(x_0 + x')] \cdot I \quad (8)$$

虚实部分开可得

$$\begin{bmatrix} \dot{V} \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_d' \\ E_q' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r + r_s - x_0 - x' & \\ & x_0 + x' & r - r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_q' \\ I_d' \end{bmatrix} \quad (9)$$

由式 (3)、(4)、(5)、(6)、(7)、(9) 就构成了形如式 (1) 的微分代数方程组。

3 仿真结果及分析

为了分析感应电动机的参数对系统电压稳定性的影响, 图 1 中感应电动机负荷模型均采用典型参数同文献 [12], 每次只改变感应电动机负荷的某一个参数大小, 保持系统其他参数不变, 观察小干扰稳定性分析结果, 以期得出参数变化对小干扰稳定性的影响。图 1 中的线路参数 $r = 0.05$ (p u), $x_0 = 0.2$ (p u)。

3.1 感应电动机机械参数对系统电压稳定性的影响

随着感应电动机机械功率的增加, 其端口电压 V_2 的变化曲线如图 2 所示, 图中鼻端对应最大功率 $P_{max} = 0.6001$; 系统状态矩阵特征值 λ 轨迹如图 3 所示, 由图可看出当感应电动机机械功率增加到一定程度时, 特征值 λ_3 的值为零, 此时系统发生鞍结分岔。感应电动机恒定转矩所占的比例 a 取不同值时, 系统的鞍结分岔点都在 PV 曲线下半支, 特征值 λ_3 与电压 V_2 的曲线如图 4, 鞍结分岔点的值如表 1。由图 4 和表 1 可看出: $a=1$ 时感应电动机的机械转矩为恒定转矩, 此时所对应的鞍结分岔点是负荷的最大功率点, 随着 a 值的减小机械功率和不稳定临界电压也减小, 此时鞍结分岔点不是负荷的最大功率点。说明 a 越大, 越不利于系统的小干扰稳定运行。

与机械特性有关的指数 b 取不同值时, 系统的鞍结分岔点也在 PV 曲线下半支, 特征值 λ_3 与电压 V_2

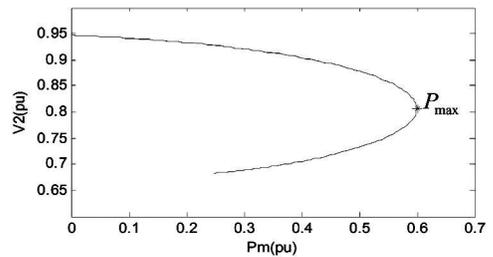


图 2 感应电动机 PV 曲线

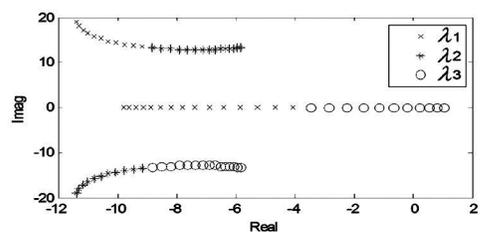


图 3 状态矩阵特征值 λ 轨迹

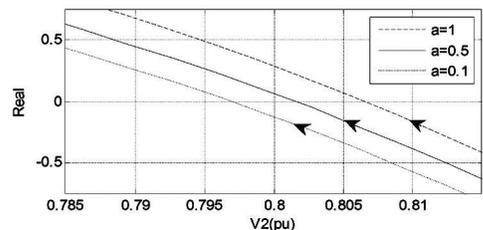


图 4 a 取不同值的 $V_2 - \lambda_3$ 曲线

表 1 a 取不同值所对应的 PV 值

α 的取值	P_m	V_2
$\alpha = 1$	0.600 1	0.805 6
$\alpha = 0.5$	0.599 3	0.799 4
$\alpha = 0.1$	0.596 9	0.792 7

的变化曲线如图 5 鞍结分岔点的值如表 2。由图 5 和表 2 可以看出： $b=0$ 时感应电动机的机械转矩也为恒定转矩，此时所对应的鞍结分岔点也是负荷的最大功率点，随着 b 值的增加机械功率和临界电压都减小，即 b 越大，越有利于系统保持小干扰稳定运行。由此可以得出：感应电动机的恒定转矩所占的比例越大越容易发生电压稳定问题，这同文献 [13] 的结论一致。

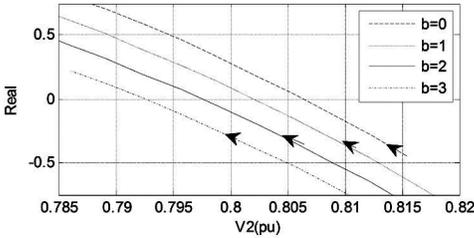


图 5 取不同值的 $V_2 - \lambda_3$ 曲线

表 2 取不同值所对应的 PV 值

b 的取值	P_m	V_2
$b=0$	0.600 1	0.805 6
$b=1$	0.599 8	0.801 8
$b=2$	0.598 9	0.797 4
$b=3$	0.597 1	0.793 1

3.2 感应电动机电气参数对系统电压稳定性的影响

感应电动机定子绕组的电阻 r_1 和漏抗 x_1 分别取不同值时的 PV 曲线如图 6、图 7 所示，图中星号表示鞍结分岔点（以下所有的 PV 曲线上的星号都表示鞍结分岔点）。由图可看出，随着 r_1 、 x_1 的增加，分岔点对应的机械功率减少，不稳定临界电压增大，说明 r_1 、 x_1 越大，越不利于系统保持小干扰稳定运行。

感应电动机转子绕组的电阻 r_2 取不同值时的曲线如图 8 所示，图中星号从上到下分别对应 $r_2 = 0.12$ 、 $r_2 = 0.15$ 、 $r_2 = 0.18$ 的鞍结分岔点。由图 8 可以看出 r_2 越大，不稳定临界电压越小，越有利于系统保持小干扰稳定运行。由于大型工业电动机参数 r_2 的值比较小，大约为 $0.009^{[9]}$ ，所以对于综合负荷成分中含有大量大型工业电动机如水泵、鼓风机和空压机等的实际系统，负荷节点将较容易发生电压失稳。

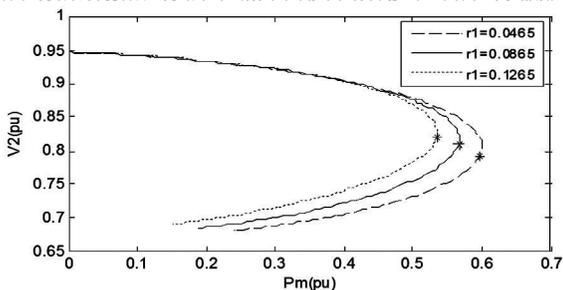


图 6 r_1 取不同值的 PV 曲线

转子绕组漏抗 x_2 和励磁电抗 x_m 取不同值时的 PV 曲线如图 9、图 10 所示。由图可看出，随着 x_2 的增加，分岔点对应的机械功率减少，不稳定临界电压增加，随着 x_m 的增加，分岔点对应不稳定临界电压也增加了。说明 x_2 、 x_m 越大，越不利于系统保持小干扰稳定运行。

4 结 论

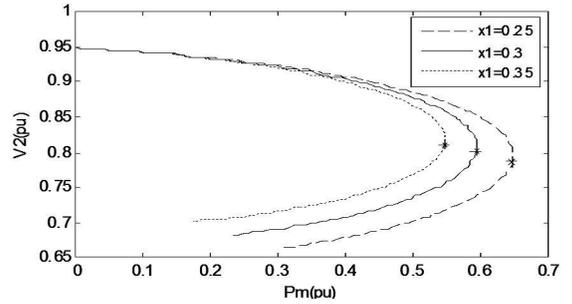


图 7 x_1 取不同值的 PV 曲线

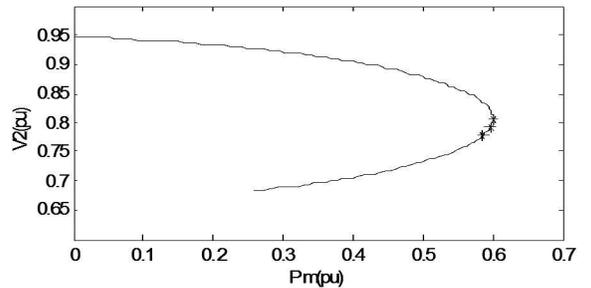


图 8 r_2 取不同值的 PV 曲线

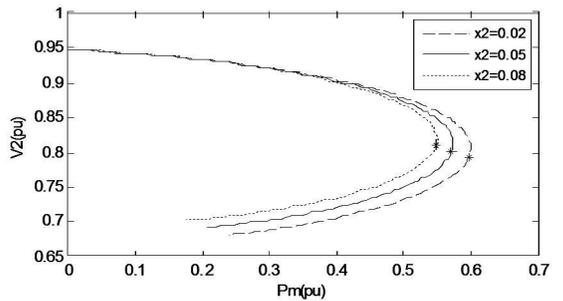


图 9 x_2 取不同值的 PV 曲线

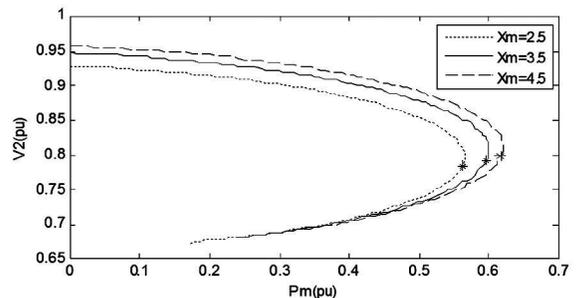


图 10 x_m 取不同值的 PV 曲线

(下转第 86 页)

表 2 走马 CVY 现场测试结果

型号: WV110 $\sqrt{3}$ -10H, 额定电容: 10 nF				
使用仪器	E 点	二次绕组	$\lg\delta/\%$	C_x (nF)
山东泛华 AI-6000(C)	接地	不短接	-0.327	10.18
山东泛华 AI-6000(C)	悬空	短接	0.047	9.95
上海思源 M-2000	接地	不短接	-0.227	10.16
上海思源 M-2000	悬空	短接	0.045	9.96

根据标准的规定, CVT 介损值不大于 0.5%, 电容量偏差
不超过 -5% ~ 10%

5 结 语

前面主要针对 110 kV CVT 中电容分压器整体介损值的测量, 而对于由两节组成的 220 kV 的 CVT, 上节的耦合电容采用正接线进行测量, 下节的测量方法

(上接第 70 页)

总结了感应电动机的参数对小干扰电压稳定性的影响。得出了当感应电动机的机械功率为恒定转矩时才是 PV 曲线的最大功率点, 并且恒定转矩的比例 α 越大, 与机械特性有关的指数 b 越小时越不利于电压的稳定; 感应电动机定子绕组的电阻 r_1 、定子绕组的漏抗 x_1 、转子绕组漏抗 x_2 、励磁电抗 x_m 越大, 感应电动机转子绕组的电阻 r_2 越小越不利于电压的稳定。因此, 在实际系统的综合负荷中 r_1 、 x_1 、 x_2 、 x_m 较大, r_2 较小的感应电动机更易出现电压失稳。

参考文献

[1] 辛耀中. 2006 年国际大电网会议系列报 (二) 电力系统运行与控制技术新进展 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(22): 1-6

[2] Xiaoqing Han, Nannan Tian, Zhijing Zheng. Small Signal Stability Analysis on Power System Considering Load Characteristics [C]. Power and Energy Engineering Conference Asia-Pacific 2009: 1-4

[3] Voumas C D, Sauer P W, Pai M A. Relationships between Voltage and Angle Stability of Power Systems [J]. International Journal of Electrical Power and Energy System, 1996, 493-500

[4] Prabha Kundur. Power System Stability and Control (电力系统稳定与控制) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002

[5] John A Diaz de Leon, Carson W Taylor. Understanding and Solving Short-term Voltage Stability Problem [C]. Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting Chicago USA, 2002, 745-752

[6] 郭琼, 李晨辉. 计及电动机动态的电压稳定问题仿真分

析 [J]. 继电器, 2005, 33(5): 12-14

[7] 孙华东, 周孝信, 李若梅. 感应电动机负荷参数对电力系统暂态电压稳定性的影响 [J]. 电网技术, 2005, 29(23): 1-6

[8] Venkataramana A Jiarapu. A study of Dynamic Aspects Related to Voltage Collapse in Power Systems [C]. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control 1989, 351-352

[9] Wen Binwei, Li Gang, Chen Chen. Object Oriented Modeling Method for Power System Small Signal Stability Analysis [J]. Power System Technology, 2000, 24(10): 15-18

[10] Kundur Prabhashankar, Rogers Graham J, Wong David Y. A Comprehensive Computer Program for Small Signal Stability Analysis of Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems 1990, 5(11): 1076-1083

[11] 余贻鑫, 王成山. 电力系统稳定性的理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1999

[12] 章健. 电力系统负荷模型与辨识 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007

[13] Carson W Taylor. Power System Voltage Stability (电力系统电压稳定) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002

参考文献

[1] 四川省电力公司行业标准. 电力设备预防性试验规程 [S]

[2] 何伟. 电容式电压互感器介质损耗角正切值的测量, 西北电力技术 [J]. 2003, 31(5): 31-32, 35

[3] 李建明, 朱康. 高压电气设备试验方法 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001 (收稿日期: 2010-01-26)

析 [J]. 继电器, 2005, 33(5): 12-14

[7] 孙华东, 周孝信, 李若梅. 感应电动机负荷参数对电力系统暂态电压稳定性的影响 [J]. 电网技术, 2005, 29(23): 1-6

[8] Venkataramana A Jiarapu. A study of Dynamic Aspects Related to Voltage Collapse in Power Systems [C]. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control 1989, 351-352

[9] Wen Binwei, Li Gang, Chen Chen. Object Oriented Modeling Method for Power System Small Signal Stability Analysis [J]. Power System Technology, 2000, 24(10): 15-18

[10] Kundur Prabhashankar, Rogers Graham J, Wong David Y. A Comprehensive Computer Program for Small Signal Stability Analysis of Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems 1990, 5(11): 1076-1083

[11] 余贻鑫, 王成山. 电力系统稳定性的理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1999

[12] 章健. 电力系统负荷模型与辨识 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007

[13] Carson W Taylor. Power System Voltage Stability (电力系统电压稳定) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002

作者简介:

李林 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统及其自动化方面的研究。

康积涛 (1962-), 男, 教授, 博士, 主要从事电力调度自动化系统, 电力系统无功优化计算、电压稳定性、工业测控的研究工作。

张学群 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统及其自动化方面的研究。

刘永江 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统及其自动化方面的研究。 (收稿日期: 2010-01-14)