

简单电力系统暂态电压稳定的直接分析法

林舜江¹, 刘杨华²

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东技术师范学院 机电学院, 广东 广州 510665)

摘要: 对综合负荷采用三阶感应电动机并联恒阻抗动态模型, 构建了简单电力系统暂态电压稳定分析的微分代数方程组 (DAE) 模型, 并采用非线性动力系统理论计算系统故障后稳定平衡点的吸引域。针对采用牛顿法求取系统不稳定平衡点碰到的初值选取问题, 通过对综合负荷感应电动机部分采用其稳态等值电路来求得不稳定平衡点; 并采用将非线性系统化为规范型线性系统的方法求得系统故障后稳定平衡点的吸引域边界; 进而只须仿真得到故障切除时刻系统的状态即可判断系统能否保持电压稳定。通过与系统全故障过程仿真结果的比较验证了本文方法的正确性。

关键词: 电力系统; 暂态电压稳定; 感应电动机; 吸引域; 不稳定平衡点; 流形

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2011)01-0070-07

The Direct Analysis Method for Transient Voltage Stability of Simple Power System

Lin Shunjiang¹, Liu Yanghua²

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. College of Electromechanical Engineering, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China)

Abstract: The third-order induction motor paralleled with const impedance dynamic model is used to represent composite load, and the differential and algebraic equations (DAE) model of transient voltage stability analysis of a simple power system is established. By nonlinear dynamic system theory, the region of attraction of the post disturbance stable equilibrium point of the system is computed. In terms of the problem of determining the initial value when Newton method is used to compute the unstable equilibrium point, the method which uses steady model to represent the induction motor part of composite load is introduced. By converting nonlinear system to normal form linear system, the boundary of the attraction region of the post disturbance stable equilibrium point is computed. Then the transient voltage stability of the system can be determined just by simulating the state of the system at the fault clearing time. Compared to the simulation results of the whole fault of the system, the correctness of the method is verified.

Keywords : power system; transient voltage stability; induction motor; region of attraction; unstable equilibrium point; Manifold

0 引言

电力系统电压稳定性作为电力系统稳定性的一个

重要方面, 它本身是一个动态问题, 受系统中较多元件和控制装置的动态特性的影响。近年来, 由于系统中具有容易堵转的低转动惯量压缩机的空调、热泵、

收稿日期: 2010-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50777021)

作者简介: 林舜江 (1980-), 男, 广东澄海人, 华南理工大学助理研究员, 博士, 主要研究方向为电力系统优化, 运行与控制, E-mail: lsj19800918@yahoo.com.cn

冰箱,以及具有快速电子调节电源的近似恒功率特性的新型办公电器等类型负荷比重的不断增大,系统更易于发生暂态电压失稳,暂态电压稳定的研究受到越来越多的重视^[1-3]。感应电动机是负荷的重要组成部分,是最主要的动态负荷^[4],并且,感应电动机是引起系统发生暂态电压失稳的重要原因^[1]。所以,暂态电压稳定研究中必须考虑感应电动机的动态特性。

和暂态功角稳定一样,暂态电压稳定的分析方法可采用时域仿真法和直接法。时域仿真法能够详细地考虑系统中各种元件和控制装置的模型,具有较高的准确性。然而,这种方法的缺点是计算时间长,并且只能得出系统能否稳定运行而不能提供系统的稳定程度信息。直接法能够定量度量系统的电压稳定程度,并且根据故障清除时刻系统的状态是否位于电压稳定域内即可判断系统能否保持暂态电压稳定,便于实现在线的暂态电压稳定监控。然而,要建立电力系统的暂态电压稳定域并不容易。

本文采用直接法对一个简单电力系统进行暂态电压稳定分析:考虑综合负荷的三阶感应电动机并联恒阻抗动态模型,构建了系统暂态电压稳定分析的微分代数方程组(DAE)模型,采用非线性动力系统理论求取系统故障后稳定平衡点的吸引域,进而只须仿真得到故障切除时刻系统的状态并由该状态是否位于吸引域内即可判断系统能否保持电压稳定,并通过与系统全故障过程仿真结果比较验证了该方法的正确性。

1 系统模型及参数

本文分析的系统如图1,送端电源通过双回输电线路向负荷中心供电,假设送端电源母线电压维持在242 kV不变,各元件参数如图中所示。

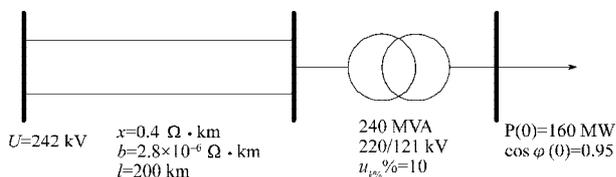


图1 系统结构和参数

Fig. 1 Structure and parameters of the system

选变压器高压侧电压基准 $U_{1B}=220$ kV, 低压侧电压基准 $U_{2B}=121$ kV; 并且综合负荷采用三阶感应电动机并联恒阻抗模型, 则系统等值电路如图2。

对负荷母线向系统侧看进去部分进行戴维南等值, 等值电势为 $E_{eq}+jE_{eq}$, 等值阻抗为 $R_{eq}+jX_{eq}$, 则 $x-y$ 坐标下系统 DAE 模型如式(1)~(5)。

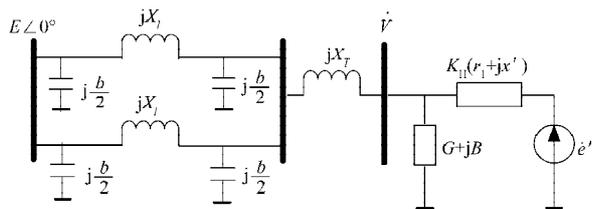


图2 系统等值电路

Fig. 2 Equivalent circuit of the system

$$\frac{de'_x}{dt} = s\omega_0 e'_y - \frac{1}{T_{d0}} e'_x - \frac{x-x'}{T_{d0}'(r_1^2+x^2)} \left[r_1 (u_y - e'_y) - x'(u_x - e'_x) \right], \quad (1)$$

$$\frac{de'_y}{dt} = -s\omega_0 e'_x - \frac{1}{T_{d0}} e'_y + \frac{x-x'}{T_{d0}'(r_1^2+x^2)} \left[r_1 (u_x - e'_x) + x'(u_y - e'_y) \right], \quad (2)$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{P_m}{T_j} - \frac{(r_1 e'_y + x' e'_x)(u_y - e'_y) + (r_1 e'_x - x' e'_y)(u_x - e'_x)}{T_j (r_1^2 + x^2)}, \quad (3)$$

$$a_1 u_x - a_2 u_y - R_{eq} e'_x + X_{eq} e'_y - E_{eq} K_H r_1 + E_{eq} K_H x' = 0, \quad (4)$$

$$a_2 u_x + a_1 u_y - X_{eq} e'_x - R_{eq} e'_y - E_{eq} K_H x' - E_{eq} K_H r_1 = 0, \quad (5)$$

式(4)和(5)中 a_1 和 a_2 的表达式如下:

$$a_1 = K_H r_1 + (R_{eq} K_H r_1 - X_{eq} K_H x') G - (R_{eq} K_H x' + X_{eq} K_H r_1) B + R_{eq}, \quad (6)$$

$$a_2 = K_H x' + (R_{eq} K_H r_1 - X_{eq} K_H x') B + (R_{eq} K_H x' + X_{eq} K_H r_1) G + X_{eq}. \quad (7)$$

式中: $u_x+j u_y$ 为负荷母线电压;
 $e'_x+j e'_y$ 为电动机暂态电势;
 r_1, x_1, r_2, x_2 和 x_m 分别为电动机定子电阻、定子电抗、转子电阻、转子电抗和激磁电抗;
 $x=x_1+x_m$ 为电动机同步电抗;
 $x'=x_1+x_m/x_2$ 为电动机暂态电抗;
 $T_{d0}'=(x_m+x_2)/(\omega_0 r_2)$ 为电动机暂态电势衰减时间常数;

ω_0 为同步角频率;
 s 为电动机转差率;
 T_j 为电动机转子惯性时间常数;
 k_d 为综合负荷中电动机部分所占比例;
 G 和 B 为综合负荷静态部分的电导和电纳;
 K_H 为容量折算比, 即系统容量基值与电动机自身

容量基值之比;

P_m 为电动机的机械负载功率, 其表达式如下:

$$P_m = K_L [a + (1-a)(1-s)^n] \quad (8)$$

式中 K_L 为负载率, a 为机械负载中与转速无关部分所占的百分率, n 为负载指数。选 $S_B=100$ MVA, 结合相应的电压基准值, 即可算得线路和变压器参数的标幺值。综合负荷则采用文献[5]中的典型参数值, 如表 1 所示。

表 1 综合负荷模型的参数值

Table 1 Parameters of the composite load model

r_1	x_1	r_2	x_2	x_m	T_j	a	n	s_0	k_d
0	0.295	0.02	0.12	3.5	2	0.15	2	0.011 6	0.65

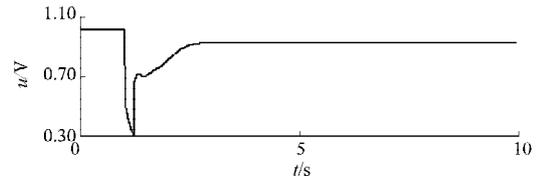
在对系统 DAE 模型进行电压稳定分析之前, 必须先计算 DAE 模型的状态变量的初值 $e'_x(0), e'_y(0)$ 和导出参数 K_L, G, B, K_H (状态变量初值 $s(0)$ 为表 1 中的参数 s_0), 具体过程详见文献[6]。

2 暂态电压稳定性分析直接法的基本思路

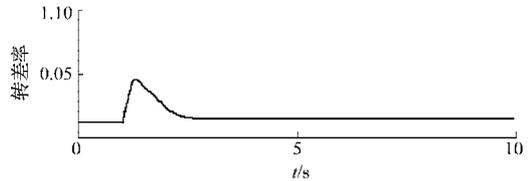
故障设置为图 1 系统中一回输电线路的中点位置在 1.0 s 时刻发生三相短路接地, 经过一定时间后切除该线路。设置仿真步长 $\Delta t=0.001$ s, 仿真总时间为 10 s。当故障切除时间为 0.2 s 和 0.3 s 时负荷母线电压和感应电动机转差率的仿真结果分别如图 3 和 4, 对应于暂态电压稳定和不稳定 2 种情况。

可以看到, 若由时域仿真结果来判断系统的暂态电压稳定性, 则至少需要仿真故障发生后好几秒钟时间系统的变化情况才能做出判断, 这对于实际大系统将需要耗费较多的计算机机时。而非线性动力系统的稳定性理论给我们提供了一个直接判断系统暂态电压稳定性的有效途径。对于非线性系统, 在遭受大扰动后, 系统故障后的稳定平衡点 (stable equilibrium point, 简称 SEP) 具有有限的吸引域, 若故障切除时刻系统的状态位于吸引域内则系统渐近稳定, 反之则不稳定。因此, 若得到式 (1)~(5) 的非线性系统故障后 SEP 的吸引域, 则只须仿真得到故障切除时刻系统的状态即可判断系统能否保持电压稳定, 而不必对故障切除后的系统进行仿真, 可大大提高计算效率。

由文献[7]的结论可知, 受扰动后系统的稳定域 (即 SEP 吸引域) 边界是由稳定边界上不稳定平衡点 (unstable equilibrium point, 简称 UEP) 的稳定流形的并集构成, 这一重要结论提供了计算系统故障后 SEP 的吸引域的基本思路和方法。



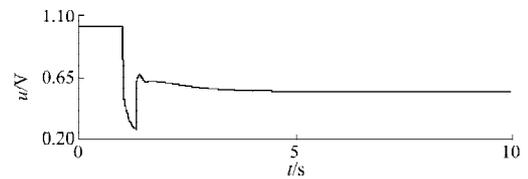
a) 负荷母线电压



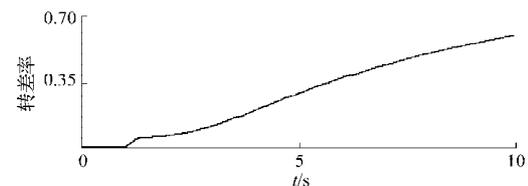
b) 感应电动机转差率

图 3 故障切除时间为 0.2 s 的仿真结果

Fig. 3 Simulation result with fault clearing time equal to 0.2 s



a) 负荷母线电压



b) 感应电动机转差率

图 4 故障切除时间为 0.3 s 的仿真结果

Fig. 4 Simulation result with fault clearing time equal to 0.3 s

3 系统故障后平衡点的计算及小干扰分析

3.1 平衡点的计算

平衡点的求解问题就是求解系统 DAE 模型的稳态方程, 即在式 (1)~(5) 中, 令 $de'_x/dt=0, de'_y/dt=0, ds/dt=0$, 则转化为关于 e'_x, e'_y, s, u_x 和 u_y 5 个变量的非线性代数方程组, 通过采用牛顿法并选定适当的初值进行迭代即可求解。

计算系统故障后的 SEP 时, 迭代初值可设置为系统故障前的初始平衡点, 系统故障前的初始平衡点已由第 1 节的初值计算过程得到。经过计算, 系统故障后的 SEP 为 $(e'_x, e'_y, s) = (0.668 5, -0.437 9, 1.417 3 \times 10^{-2})$ 。

计算系统故障后的不稳定平衡点时, 该如何确定迭代初值是个重要的问题, 本文通过对感应电动机采用其平衡条件下的稳态等值电路来解决。此时, 系统的等值电路如图 5, 对虚线左边部分再进行戴维南等

值,等值电势为 \dot{E}_{eq2} ,等值阻抗为 $R_{eq2}+jX_{eq2}$,则感应电动机的转矩平衡方程如式(9),

$$\frac{E_{eq2}^2 K_H \frac{r_2}{s}}{\left(R_{eq2} + K_H \frac{r_2}{s}\right)^2 + \left(X_{eq2} + K_H x_2\right)^2} = \frac{K_L \left[a + (1-a)(1-s)^n\right]}{K_H} \quad (9)$$

这是一个关于变量 s 的非线性方程,采用牛顿法并选定适当的初值进行迭代求解即可得到UEP的 s 值。迭代初值的设置方法如下:先假定电动机的机械转矩为恒定值,其值可由故障后SEP的 s 值代入式(9)右边计算得到,因而式(9)就成为关于变量 s 的一元二次方程,解此一元二次方程得到 s 的两根中值大的一根即可作为求解UEP的 s 值的初值。迭代得到UEP的 s 值后,就可得到此时对应的综合负荷等值阻抗 R_L+jx_L ,再由式(10)和(11)即可得到UEP对应的 e_x' 和 e_y' 值。经过计算,系统故障后的UEP为

$$\left(e_x'^u, e_y'^u, s^u\right) = \left(0.1373, -0.3548, 5.7950 \times 10^{-2}\right)$$

$$u_x + ju_y = \frac{R_L + jx_L}{R_{eq} + jX_{eq} + R_L + jx_L} \dot{E}_{eq} \quad (10)$$

$$e_x' + je_y' = \frac{j \frac{x - x'}{r_1 + jx'}}{1 + j \left(\frac{x - x'}{r_1 + jx'} + T_{d0}' s \omega_0 \right)} (u_x + ju_y) \quad (11)$$

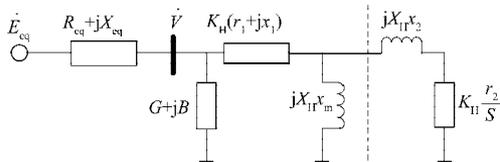


图5 系统稳态等值电路

Fig. 5 Steady equivalent circuit of the system

3.2 平衡点的小干扰分析

将系统DAE模型式(1)~(5)在平衡点处进行线性化,并消去非状态变量 Δu_x 和 Δu_y ,则得到系统小干扰方程(12),其中 $\Delta x = \left[\Delta e_x' \quad \Delta e_y' \quad \Delta s\right]^T$,状态矩阵 A 的表达式见文献[8],

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x \quad (12)$$

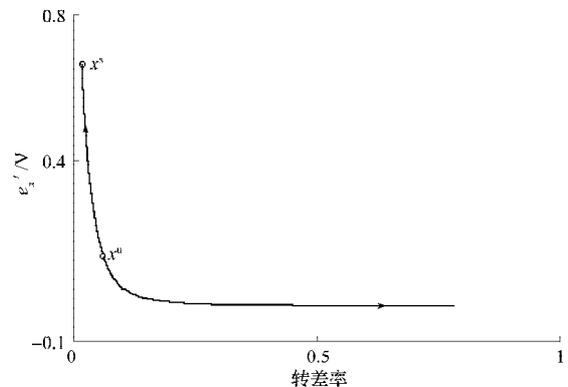
经过计算,系统故障后的SEP处矩阵 A 的特征值为 $\lambda_1 = -4.9607, \lambda_{2,3} = -6.1500 \pm j12.1122$;系统故障后的UEP处矩阵 A 的特征值为 $\lambda_{1,2} = -9.4803 \pm j19.9973, \lambda_3 = 1.7182$ 。由于SEP和UEP处矩阵 A 没有零实部特征值,故它们都是双曲平衡点。另外,UEP处矩阵 A 具有正实部的特征值的数目为1,故UEP是1型不稳定

平衡点,因而UEP的不稳定流形维数为1,稳定流形维数为2^[9]。

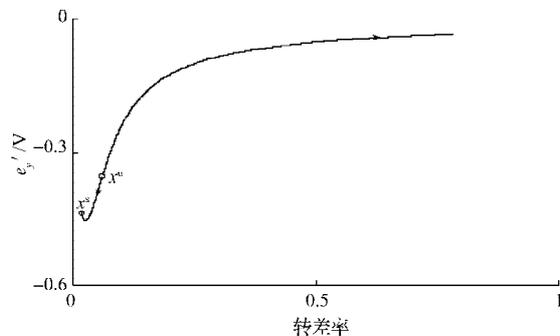
4 系统故障后稳定平衡点的吸引域边界

4.1 不稳定平衡点的不稳定流形的求解

文献[7]中指出,若某个不稳定平衡点的不稳定流形中有一条趋于稳定平衡点,则该不稳定平衡点必在稳定边界上。由该文中的方法,先求得UEP处矩阵 A 对应于不稳定特征值 $\lambda_3 = 1.7182$ 的特征向量 $[v_1, v_2, v_3]^T = [-0.7512, 0.6365, 0.1747]^T$,再分别以 $(e_x'^u, e_y'^u, s^u) + \varepsilon[v_1, v_2, v_3]^T$ 和 $(e_x'^u, e_y'^u, s^u) - \varepsilon[v_1, v_2, v_3]^T$ (ε 为足够小正数)为起始点对系统DAE模型进行时域仿真,即可求得UEP的不稳定流形,不稳定流形在 $s-e_x'$ 平面和 $s-e_y'$ 平面的投影如图6所示,图中 x^u 为UEP, x^s 为SEP。由图6可清楚看到,不稳定平衡点 x^u 的不稳定流形中一条趋于稳定平衡点 x^s ,另一条趋于 s 逐渐增大的方向,即系统走向失稳的方向。因此,系统故障后的不稳定平衡点 x^u 必在稳定边界上。



a) $s-e_x'$ 平面



b) $s-e_y'$ 平面

图6 不稳定平衡点的不稳定流形的投影

Fig. 6 Projection of unstable manifold of the UEP

4.2 不稳定平衡点的稳定流形求解

文献[7]中提出的求取平衡点的稳定流形的方法只适用于二维平面系统, 该文中还指出求取高维系统平衡点的稳定流形是一个困难问题。文献[10-11]则提供了一种求取高维系统平衡点的近似稳定流形的有效方法, 这2篇文章指出, 若平衡点是双曲的, 则平衡点的稳定流形与规范型线性系统的稳定子空间具有对应关系。其关键是如何将非线性系统化化为规范型线性系统, 具体步骤如下:

1) 将描述系统的 DAE 模型的坐标原点移至系统故障后的 UEP, 即令 $e_x' = x_1 + e_x'^u$, $e_y' = x_2 + e_y'^u$, $s = x_3 + s^u$, 代入 DAE 模型中, 并消去非状态变量 u_x 和 u_y , 则系统可化为式(13)的表示形式,

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1(x_1, x_2, x_3) \\ F_2(x_1, x_2, x_3) \\ F_3(x_1, x_2, x_3) \end{pmatrix}. \quad (13)$$

经过计算, SEP 对应点为 $(x_1^s, x_2^s, x_3^s) = (0.5312, -0.0831, -4.3778 \times 10^{-2})$ 。

2) 将式(13)方程右端在 UEP (原点) 处作泰勒级数展开, 由于函数 F_1, F_2 和 F_3 关于 x_1, x_2 和 x_3 的最高次数是 2 (感应电动机机械负载指数 $n=2$), 故展开式中只包括 x_1, x_2 和 x_3 的 2 次及以下项, 如式(14)。

$$\dot{x}_i = A_i \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} (x_1 \ x_2 \ x_3) H^i \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}, \quad i=1,2,3. \quad (14)$$

经过计算,

$$A = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -8.4226 & 18.6269 & -111.4503 \\ -18.6269 & -8.4226 & -43.1390 \\ 4.6471 \times 10^{-2} & 0.6355 & -0.3972 \end{pmatrix},$$

$$H^1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 314.1593 \\ 0 & 314.1593 & 0 \end{pmatrix},$$

$$H^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -314.1593 \\ 0 & 0 & 0 \\ -314.1593 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$H^3 = \begin{pmatrix} 7.1721 \times 10^{-2} & 0 & 0 \\ 0 & 7.1721 \times 10^{-2} & 0 \\ 0 & 0 & 0.4216 \end{pmatrix}.$$

3) 作线性变换 $X=UY$, $X=[x_1 \ x_2 \ x_3]^T$, $Y=[y_1 \ y_2 \ y_3]^T$, 矩阵 U 满足 $A \times U = U \times J_r$, J_r 为矩阵 A 的特征值对角阵, 则原系统可化为式(15),

$$\dot{y}_i = J_{ri} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} + (y_1 \ y_2 \ y_3) C^i \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix}, \quad i=1,2,3. \quad (15)$$

经过计算可得:

$$J_r = \begin{pmatrix} J_{r1} \\ J_{r2} \\ J_{r3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma & \omega & 0 \\ -\omega & \sigma & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -9.4803 & 9.9973 & 0 \\ -19.9973 & -9.4803 & 0 \\ 0 & 0 & 1.7182 \end{pmatrix},$$

$$U = \begin{pmatrix} 29.0135 & 19.3271 & -0.7512 \\ -16.4132 & 30.0506 & 0.6365 \\ 1 & 0 & 0.1747 \end{pmatrix},$$

$$C^1 = \begin{pmatrix} 21.0330 & 144.7424 & 1.6946 \\ 144.7424 & 6.5808 & 25.2495 \\ 1.6946 & 25.2495 & 0.1881 \end{pmatrix},$$

$$C^2 = \begin{pmatrix} -294.1358 & -4.7146 & -21.3013 \\ -4.7146 & -1.1581 & -0.8171 \\ -21.3013 & -0.8171 & 1.4925 \end{pmatrix},$$

$$C^3 = \begin{pmatrix} 108.9031 & -814.6599 & -16.1076 \\ -814.6599 & 224.3738 & -143.5843 \\ -16.1076 & -143.5843 & -0.8407 \end{pmatrix}.$$

SEP 对应点为 $(y_1^s, y_2^s, y_3^s) = (0.0064, 0.0068, -0.2870)$ 。

4) 作非线性变换 $Y = Z + h_2(Z)$, $Z = [z_1 \ z_2 \ z_3]^T$,

$$y_i = z_i + (z_1 \ z_2 \ z_3) h_2^i \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{pmatrix}, \quad i=1,2,3. \quad (16)$$

则原系统可化为规范型线性系统, 如式(17),

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{pmatrix} = J_r \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

经过计算可得:

$$h_2^1 = \begin{pmatrix} -0.4040 & -2.9648 & 0.3060 \\ -2.9648 & -12.1874 & 13.5172 \\ 0.3060 & 13.5172 & 5.6950 \times 10^{-2} \end{pmatrix},$$

$$h_2^2 = \begin{pmatrix} 5.0693 & 5.9507 & -13.5756 \\ 5.9507 & -0.4808 & 0.2047 \\ -13.5756 & 0.2047 & 2.7379 \times 10^{-2} \end{pmatrix},$$

$$h_2^3 = \begin{pmatrix} -23.5420 & 9.4492 & -5.5508 \\ 9.4492 & 7.4252 & 3.4370 \\ -5.5508 & 3.4370 & -0.4893 \end{pmatrix}.$$

对根据式(16)从Y空间映射到Z空间时存在的多值性问题的处理方法见文献[11]。SEP对应点为 $(z_1^s, z_2^s, z_3^s) = (7.509 0 \times 10^{-4}, -2.873 4 \times 10^{-4}, -0.257 3)$ 。

将原系统化为规范型线性系统(17)后,系统不稳定平衡点的稳定流形映射到Z空间中,就是规范型线性系统(17)的稳定子空间 $z_3=0$ 。

5 暂态电压稳定性的快速判断

由上面分析计算可知,在Z空间中,系统故障后SEP为 $(7.509 0 \times 10^{-4}, -2.873 4 \times 10^{-4}, -0.257 3)$,SEP的

吸引域边界为 $z_3=0$ 。所以,在Z空间中系统故障后SEP的吸引域为 $z_3 < 0$ 子空间。因此,将故障切除时刻系统状态量进行“相空间到X空间”、“X空间到Y空间”和“Y空间到Z空间”3个映射,若对应于Z空间中的点满足 $z_3 < 0$,则系统保持暂态电压稳定,否则将暂态电压失稳。

应用该方法对系统在不同故障切除时间 t_c 下的暂态电压稳定性进行快速判断,故障切除时刻系统的状态量和其映射到各个空间中的对应值以及稳定性判定结果如表2所示。由表中可看出,系统保持暂态电压稳定的极限切除时间 $t_{cl}=0.270$ s。

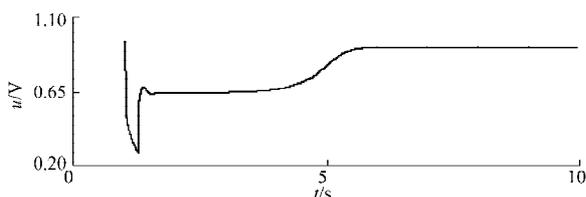
表2 暂态电压稳定快速判断
Table 2 Quick judgment of transient voltage stability

t_c	相空间	X空间	Y空间	Z空间	稳定否
0.200	0.136 4	$-9.249 4 \times 10^{-4}$	-0.003 8	$2.683 3 \times 10^{-4}$	稳定
	-0.250 6	0.104 1	0.002 9	$2.351 3 \times 10^{-3}$	
	$4.200 8 \times 10^{-2}$	$-1.594 3 \times 10^{-2}$	-0.069 7	$-6.669 5 \times 10^{-2}$	
0.270	$7.326 4 \times 10^{-2}$	$-6.405 2 \times 10^{-2}$	-0.004 3	$-4.206 2 \times 10^{-3}$	稳定
	-0.192 0	0.162 8	0.003 1	$3.231 6 \times 10^{-3}$	
	$5.346 8 \times 10^{-2}$	$-4.482 4 \times 10^{-3}$	-0.001 1	$-4.715 5 \times 10^{-4}$	
0.271	$7.273 7 \times 10^{-2}$	$-6.457 9 \times 10^{-2}$	-0.004 3	$-4.276 1 \times 10^{-3}$	不稳定
	-0.191 2	0.163 8	0.003 1	$3.137 6 \times 10^{-3}$	
	$5.363 8 \times 10^{-2}$	$-4.312 7 \times 10^{-3}$	-0.000 3	$2.908 8 \times 10^{-4}$	
0.300	$6.087 6 \times 10^{-2}$	$-7.644 0 \times 10^{-2}$	-0.004 1	$-4.175 9 \times 10^{-3}$	不稳定
	-0.170 6	0.184 1	0.003 3	$1.473 3 \times 10^{-4}$	
	$5.862 0 \times 10^{-2}$	$6.690 8 \times 10^{-4}$	0.027 4	0.026 9	

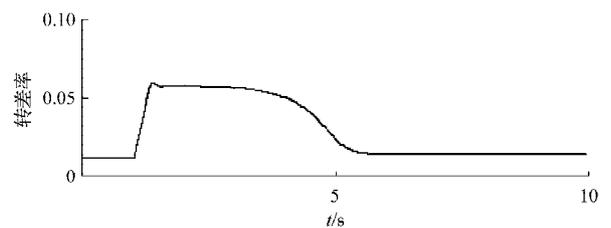
注 对应于每一个 t_c ,相空间的3个数从上往下对应于 e_x', e_y', s 的值,X空间的3个数从上往下对应于 x_1, x_2, x_3 的值,Y空间的3个数从上往下对应于 y_1, y_2, y_3 的值,Z空间的3个数从上往下对应于 z_1, z_2, z_3 的值, z_3 的值加粗。

通过对系统全故障过程进行时域仿真,对故障切除时间进行试凑,得到系统保持暂态电压稳定的极限切除时间 $t_{cl}=0.270$ s。临界稳定($t_c=0.270$ s)和临界不稳定($t_c=0.271$ s)2种情况下负荷母线电压和感应电动机转差率的仿真结果如图7和图8。

由上面分析可知,在仿真步长 $\Delta t=0.001$ s时,运用本文提出的暂态电压稳定直接判断方法得到的极限切除时间 t_{cl} 与试凑故障切除时间对系统进行全故障过程时域仿真得到的结果一致。这充分验证了本文方法的有效,并且可看出采用该方法对系统的暂态电压稳定性进行快速判断的结果具有较高的准确度。

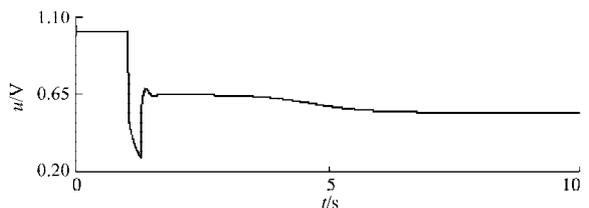


a) 负荷母线电压



b) 感应电动机转差率

图7 临界稳定($t_c=0.270$ s)的仿真结果
Fig. 7 Simulation result of critical stability ($t_c=0.270$ s)



a) 负荷母线电压

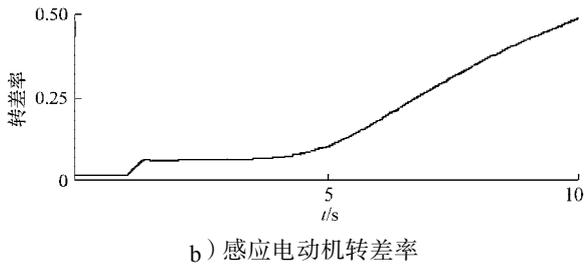


图8 临界不稳定 ($t_c=0.271$ s) 的仿真结果

Fig. 8 Simulation result of critical instability ($t_c=0.271$ s)

6 结语

本文对综合负荷采用三阶感应电动机并联恒阻抗动态模型,采用非线性动力系统理论直接分析一个简单电力系统暂态电压稳定性。所采用的对综合负荷感应电动机部分采用其稳态等值电路的方法能够有效求取系统故障后的不稳定平衡点,而采用的将非线性系统化规范型线性系统的方法能够准确得到系统故障后稳定平衡点的吸引域边界。进而只需仿真得到故障切除时刻系统的状态并将该状态映射到规范型线性系统的状态空间即 Z 空间中,就可直接判断系统的暂态电压稳定性。本文的研究为直接法应用于电力系统暂态电压稳定分析提供了一些有益的探索。

参考文献:

- [1] Diaz de Leon II J A, Taylor C W. Understanding and Solving Short-Term Voltage Stability Problem[C]//Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Chicago: IL, USA, 2002: 745-752.
- [2] Potamianakis E G, Vournas C D. Short-Term Voltage Instability: Effects on Synchronous and Induction Machines [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 791-798.
- [3] Tiwari A, Ajjarapu V. Contingency Assessment for Voltage Dip and Short-Term Voltage Stability Analysis[C]//IREP Symposium 2007, Charleston: SC, USA, 2007: 1-8.
- [4] 李欣然,贺仁睦,周文.一种具有全电压范围适应性的综合负荷模型[J].中国电机工程学报,1999,19(5): 71-75.

Li Xinran, He Renmu, Zhou Wen. Synthesis Load Model Suiting for Voltage Stability Analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(5): 71-75.

- [5] 西安交通大学,清华大学,浙江大学,等.电子数字计算机的应用—电力系统计算[M].北京:水利电力出版社,1978.
- [6] 林舜江,李欣然,刘杨华.考虑负荷动态模型的在线小干扰电压稳定指标[J].电力系统自动化,2008,32(9): 25-29.
- [7] Lin Shunjiang, Li Xinran, Liu Yanghua. On-Line Small Disturbance Voltage Stability Index Considering Dynamic Load Model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 25-29.
- [8] Chiang H D, Hirsch M, Wu F F. Stability Region of Nonlinear Autonomous Dynamic Systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1988, 33 (1): 16-27.
- [9] 林舜江,李欣然,刘杨华.考虑综合负荷动态模型的小干扰电压稳定研究[J].电气应用,2009,28(5): 24-28.
- [10] Lin Shunjiang, Li Xinran, Liu Yanghua. Studies on Small Disturbance Voltage Stability Considering Composite Load Dynamic Model[J]. Electrotechnical Application, 2009, 28 (5): 24-28.
- [11] 余贻鑫,王成山.电力系统稳定性理论与方法[M].北京:科学出版社,1999.
- [12] Yu Yixin, Wang Chengshan. Power System Stability Theory and Method[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [13] 李颖晖,张保会.运用非线性系统理论确定电力系统暂态稳定域的一种新方法[J].中国电机工程学报,2000,20 (1): 41-44.
- [14] Li Yinghui, Zhang Baohui. A New Method to Determine the Transient Stability Boundary Using Nonlinear Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 41-44.
- [15] 李颖晖,张保会.对 Normal Form 变换的多值性的分析与研究[J].电力系统自动化,2000,24(6): 35-39.
- [16] Li Yinghui, Zhang Baohui. Analysis and Investigation of Multi-Value of Normal Form Transformation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(6): 35-39.

(责任编辑:罗立宇)