

基于 MATLAB 的复杂电力系统动态仿真

王晓蔚,张承学,胡志坚

(武汉大学电气工程学院,湖北 武汉 430072)

摘要:介绍了电力系统暂态稳定的基本概念,研究了各种短路故障对系统暂态稳定的影响。采用先进的仿真软件工具 MATLAB 中的电力系统仿真工具箱,建立各元件的数学模型,最后组成仿真模块,对复杂电力系统进行动态仿真。仿真结果表明,故障切除时间对于电力系统稳定性有着决定性的意义。

关键词:等面积定则; (t) 曲线; ode115 法; Power System Blockset

中图分类号: TM743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2002)10-0021-04

1 引言

电力系统稳定性问题是指电力系统运行中受到扰动之后能否继续保持发电机间同步运行的问题。根据扰动大小所确定的稳定问题的性质,把它分为静态稳定和暂态稳定。所谓电力系统静态稳定性,一般是指电力系统在运行中受到微小扰动后,独立地恢复到它原来的运行状态的能力。电力系统具有暂态稳定性,一般是指电力系统在正常运行时,受到一个大的扰动后,能从原来的运行状态,不失去同步地过渡到新的运行状态,并在新的运行状态下稳定地运行。

功角 在电力系统稳定问题的研究中占有特别重要的地位。因为它除了表示电势和电压之间的相位差,即表征系统的电磁关系之外,还表明了各发电机转子之间的相对位置(故又称为“位置角”)。角随时间的变化描述了各发电机转子间的相对运动。发电机转子运动方程,是电力系统稳定分析计算中最基本的方程。在多机系统中,对于第 i 台发电机有

$$\frac{T_{ji}}{N} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = M_{ai} = \frac{1}{N} (P_{Ti} - P_{ei}) \quad (1)$$

式中: δ_i 为第 i 台发电机相对于同步旋转轴的角位移; M_{ai} 为净加速转矩; T_{ji} 为第 i 台发电机的惯性时间常数; P_{Ti} 是第 i 台发电机的原动机的功率; P_{ei} 是第 i 台发电机的电磁功率。

电力系统受扰动后发电机之间的相对运动,是用这些方程的解来描述的,这些解也是用来判断系统稳定性的最直接的判据。

对于简单电力系统,根据等面积定则可简便地确定最大摇摆角 δ_{max} ,并判断系统稳定性。如果在

某一切除角时,最大可能的减速面积与加速面积大小相等,则系统将处于稳定的极限情况,大于这个角度切除故障,系统将失去稳定。这个角度称为极限切除角 $\delta_{c,lim}$ 。对于实用目的而言,例如在对继电保护和断路器提出切除故障速度的要求时,还必须知道转子抵达极限切除角所用的时间,即所谓切除故障的极限允许时间 $t_{c,lim}$ 。要确定它就必须知道功角随时间变化的特性。为此,必须求解转子运动方程。发电机转子运动方程是非线性常微分方程,一般不能求得解析解,只能用数值计算方法求它们的近似解。暂态稳定计算中常用两种方法:分段算法和改进欧拉法。

2 复杂电力系统暂态稳定性的分析研究

引起电力系统大扰动的原因主要有以下几种:

- (1) 负荷的突然变化,如投入或切除大容量的用户等;
- (2) 切除或投入系统的主要元件,如发电机、变压器及线路等;
- (3) 发生短路故障。

其中短路故障的扰动最为严重,常以此作为检验系统是否具有暂态稳定的依据。

当电力系统受到大的扰动时,表征系统运行状态的各种电磁参数都要发生急剧的变化,甚至几乎是突然的变动。但是,由于原动机调速器具有相当大的惯性,它必须经过一定的时间后才能改变原动机的功率。这样,发电机的电磁功率与原动机的机械功率之间便失去了平衡,于是产生了不平衡转矩。在这个不平衡转矩作用下,发电机开始改变转速,使各发电机转子间的相对位置发生变化。发电机转子相对位置,即相对角的变化,反过来又将影响到电力系统中电流、电压和发电机电磁功率的变化。所以,

由大扰动引起的电力系统暂态过程,是一个电磁暂态过程和发电机转子之间机械运动暂态过程交织在一起的复杂过程。

以一个三机五节点系统为例,研究其发生短路后的暂态稳定性,系统如图 1 所示。

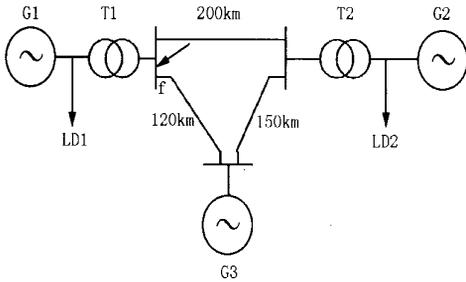


图 1 三机五节点系统图

Fig. 1 System with three generators and five nodes

笔者曾尝试用 TurboC 语言编制 400 多行的程序,分别研究系统发生三相短路、两相短路、两相短路接地、单相接地短路,并于故障后某一时刻切除故障线路,系统是否保持稳定。采用改进欧拉法计算发电机转子运动方程,得出 (t) 曲线,根据各发电机转子之间相对角的变化特性可得出结论:快速切除短路故障,对于提高电力系统的暂态稳定性,有着决定性的意义。下面应用 MATLAB 进行仿真验证。

3 复杂电力系统仿真模型的建立

复杂电力系统各部分连接如图 2 所示。

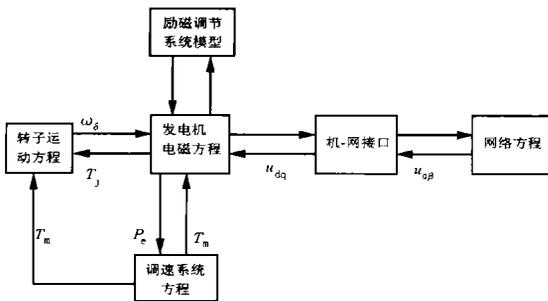


图 2 复杂电力系统联接图

Fig. 2 Connections of complex electric power system

3.1 数学模型

(1) 发电机转子模型。

采用五阶模型,d 轴考虑二个绕组,q 轴考虑三个绕组,同步电机等值电路如图 3 所示。

其电压方程组如下:

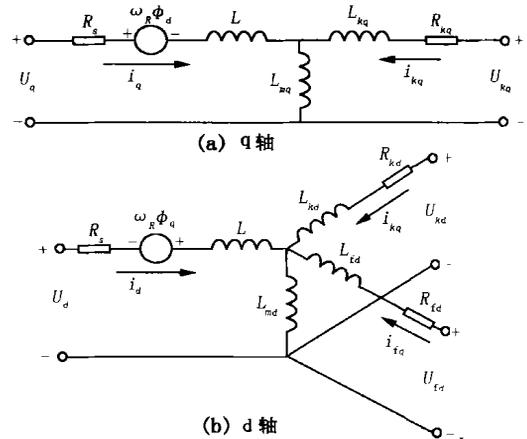


图 3 同步电机等值电路

Fig. 3 Equivalent circuit of synchro generator

$$\left. \begin{aligned} U_d &= R_s i_d + \frac{d\phi_d}{dt} - R\phi_q \\ U_q &= R_s i_q + \frac{d\phi_q}{dt} + R\phi_d \\ U_{fd} &= R_s i_q + \frac{d\phi_q}{dt} + R\phi_d \\ U_{kd} &= R_{kd} i_{kd} + \frac{d\phi_{kd}}{dt} \\ U_{kq} &= R_{kq} i_{kq} + \frac{d\phi_{kq}}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: U 为各绕组端电压; i 为各绕组电流; R_s 为定子每相绕组电阻; R_{kd} 、 R_{kq} 转子绕组电阻; ϕ 为各绕组的总磁链; $d\phi/dt$ 为磁链对时间的导数。

其磁链方程组如下:

$$\left. \begin{aligned} \phi_d &= L_d i_d + L_{md} (i_{fd} + i_{kd}) \\ \phi_q &= L_q i_q + L_{mq} i_{kq} \\ \phi_{fd} &= L_{fd} i_{fd} + L_{md} (i_d + i_{kd}) \\ \phi_{kd} &= L_{kd} i_{kd} + L_{md} (i_d + i_{fd}) \\ \phi_{kq} &= L_{kq} i_{kq} + L_{mq} i_q \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: ϕ 为各绕组的总磁链; L_d 称为纵轴同步电感; L_q 称为横轴同步电感; L_{fd} 为两个纵轴绕组(励磁绕组 f 和阻尼绕组 d)之间的互感系数,其余互感系数依此类推; i 为各绕组电流。

(2) 发电机定子绕组回路方程

$$\begin{bmatrix} U_q \\ U_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & -X_d \\ X_q & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_q \\ I_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_q \\ E_d \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: U_q 、 U_d 、 I_q 、 I_d 为定子电压和电流的 d、q 轴分量; X_q 称为横轴次暂态电抗; X_d 称为纵轴次暂态电抗; $E = E_d + jE_q$ 称为次暂态电势。

(3) 发电机电磁功率

$$P_e = I_q U_q + I_d U_d + I_d I_q (X_q - X_d) \quad (5)$$

式中: U_q 、 U_d 、 I_q 、 I_d 为定子电压和电流的 d、q 轴分量; X_q 称为横轴次暂态电抗; X_d 称为纵轴次暂态电抗。

(4) 网络的组成

输电线路:由潮流导纳矩阵或阻抗矩阵组成。

$$YU = I$$

变压器:电路如图 4 所示。

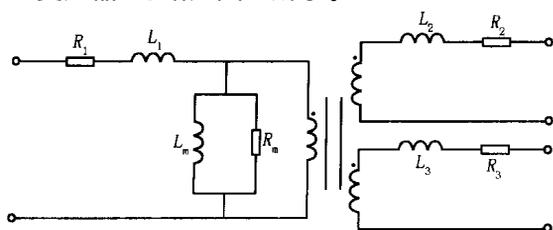


图 4 变压器结构图

Fig.4 Transformer structure

负荷节点:由恒定阻抗表示。

$$Z_{ld} = \frac{U_{ld}^2}{P_{ld}^2 + Q_{ld}^2} \times (P_{ld} + jQ_{ld}) \quad (6)$$

式中: U_{ld} 为负荷节点的电压; P_{ld} 和 Q_{ld} 分别为负荷的有功功率和无功功率。

4 系统仿真模拟

4.1 故障设置

在系统稳定性仿真中,分别设置如下故障:

- (1) 5 s 时发生三相短路,5.2 s 切除故障。
- (2) 5 s 时发生三相短路,5.8 s 切除故障。
- (3) 5 s 时发生两相短路接地,5.2 s 切除故障。
- (4) 5 s 时发生两相短路接地,5.8 s 切除故障。
- (5) 5 s 时发生两相短路,5.2 s 切除故障。
- (6) 5 s 时发生两相短路,5.8 s 切除故障。
- (7) 5 s 时发生单相接地短路,5.2 s 切除故障。
- (8) 5 s 时发生单相接地短路,5.8 s 切除故障。

4.2 仿真算法

采用 ode15 法,可变阶次的数值微分公式算法,属多步解法,可以解刚性问题。

用 MATLAB 进行仿真,可以很方便地得出各种故障情况的波形。通过波形分析可以看出:故障切除越快越有利于稳定。这与 Turbo C 程序的计算结果相同,但工作量比编程少得多。下面仅给出三相短路时的 MATLAB 仿真波形。根据波形可判断电

力系统是否具有暂态稳定性。系统受到大扰动后各发电机之间能否继续保持同步运行,是根据各发电机转子之间相对角的变化特性来判断的。在相对角中,只要有一个相对角随时间的变化趋势是不断增大时,系统是不稳定的。如果所有的相对角经过振荡之后都能稳定在某一值,则系统是稳定的。

(1) 图 5 为三相短路 5 s 时发生故障,5.2 s 切除时系统稳定的波形。由 (t) 曲线可看出,系统经过一段时间振荡后逐渐趋于零。故障点电压 5 s 发生故障时降低,5.2 s 切除故障后电压恢复正常。转速 5 s 发生故障时剧烈振荡,然后趋于额定转速。电磁功率曲线、网络电压曲线、定子电流曲线都是经过一段时间振荡后逐渐趋于稳定值。由波形图可以判断出系统稳定。

(2) 图 6 为三相短路 5 s 时故障,5.8 s 切除,系统不稳定波形。由 (t) 曲线可看出,系统经过一段时间振荡后,不能稳定在某一值。故障点电压 5 s 发生故障时降低,5.2 s 切除故障后电压依然振荡。转速 5 s 发生故障后不断增大。电磁功率曲线、网络电压曲线、定子电流曲线故障后都不断振荡。由波形图可以判断出系统失去稳定。

方式 3~方式 8 的 MATLAB 仿真波形与方式 1 和方式 2 相似。通过波形分析可以看出:故障切除越快,越有利于稳定。

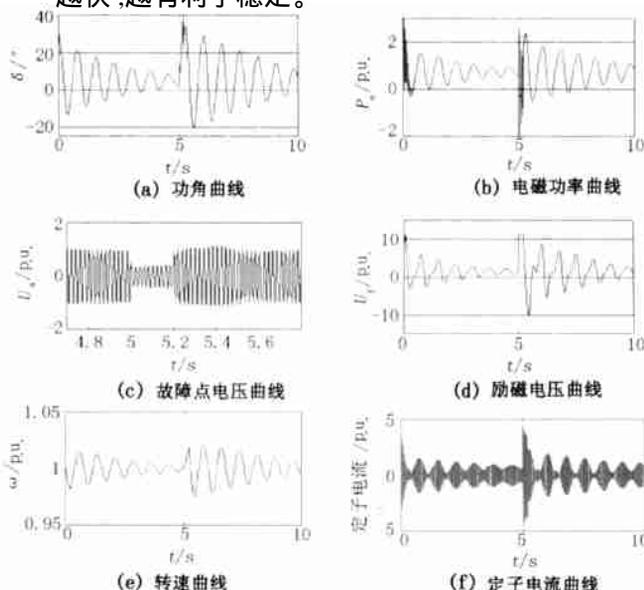


图 5 故障方式 1 的系统仿真波形图

Fig.5 Simulated waveform of fault mode 1

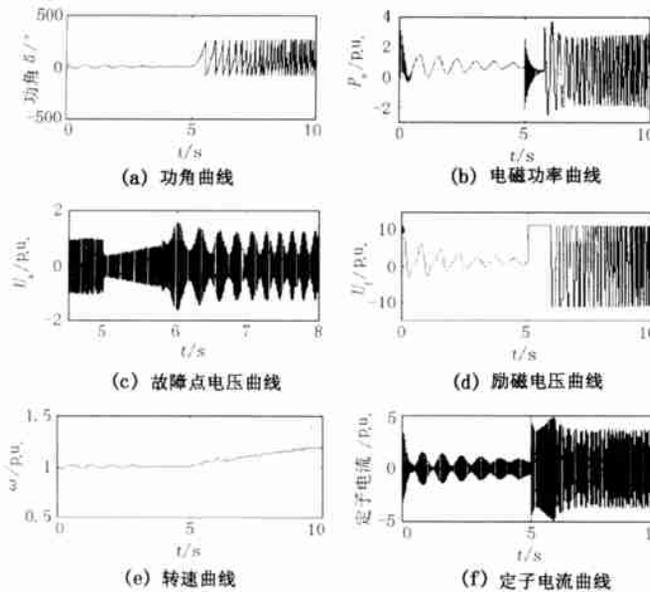


图6 故障方式2的系统仿真波形图

Fig.6 Simulated waveform of fault mode 2

5 结论

本文研究基于 MATLAB 的复杂电力系统动态仿真。在多机电力系统中,某些发电机模型须用详细模型,而且需要详细考虑发电机组的调速系统和励

磁调节系统,其他发电机只用经典模型或等值成发电机或无穷大系统。这种仿真方法主要是先把各种模型用结构图表示出来,然后选择基本模块,每一种模块都有相应的功能和算法,最后组成仿真程序。应用 MATLAB5.3 中 Power System Blockset 的模块可以很方便地通过人机会话来完成,使仿真系统整体精度提高,数值稳定性好。实践表明 MATLAB 仿真软件可以很容易地应用于电力系统仿真领域,是电力系统分析的有力工具。

参考文献:

- [1] 韩祯祥. 电力系统稳定[M]. 北京:中国电力出版社, 1995.
- [2] 何仰赞. 电力系统分析[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1985.
- [3] 杨冠城. 电力系统自动装置原理[M]. 北京:水利电力出版社,1986.
- [4] 程卫国. MATLAB5.3 应用指南[M]. 北京:人民邮电出版社,1999.

收稿日期: 2001-11-20; 修回日期: 2002-03-12

作者简介:

王晓蔚(1970-),女,硕士,研究方向为电力系统继电保护、动态仿真;

张承学(1952-),男,教授,从事电力系统继电保护与自动化的教学与研究。

Dynamic simulation of complex electric power system based on MATLAB

WANG Xiao-wei, ZHANG Cheng-xue, HU Zhi-jian

(Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Describes the basic concept of electric power system's transient stability. Many kinds of short circuit faults effects to electric power system's transient stability are studied. We use MATLAB, which is a simulation tool for power system, to simulate complex electric power system. We found maths models of every component firstly. Then simulated module is composed. The simulated result confirms that the time of removal fault is crucial for electric power system stability.

Key words: formula of equality area; curve of $\delta(t)$; principle of ode115; power system blockset

(上接第9页)

Abstract: The investment decision-making of distribution power sub-system should be considered under the best social benefit. The investment of the power system and the user are taken into consideration in this paper. The loss of power cut is also considered in this paper, which is based on the reliability of the power. Combined the loss and the investment, the lowest cost scheme is found. The result shows that the best scheme depends on the conditions both of the user and of the power system.

Key words: distribution system; customer power; reliability