

MATLAB 在系统灾变恢复相关问题研究中的应用

王丹昕, 房鑫炎

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 讨论了如何将 MATLAB 应用于电力系统恢复的仿真研究, 主要利用 MATLAB 进行了如下两方面的工作: 以黑启动机组为系统恢复起动电源, 仿真电网黑启动过程中可能出现的操作过电压和同步发电机的自励磁现象。仿真结果表明, 与传统的仿真手段相比, MATLAB 是一种强有力的仿真工具, 使用它能极大地提高工作效率, 而且其结果也是值得信赖的。

关键词: MATLAB; 电力系统恢复; 操作过电压; 自励磁; 电力系统工具箱; 黑启动

中图分类号: TM743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2002)04-0022-04

1 引言

MATLAB 是美国 MathWorks 公司推出的一种基于矩阵计算的科学仿真软件, 它采用了开放性开发的思想, 形成了一系列规模庞大、覆盖面极广的工具箱, 包含了控制理论、电力系统、数值计算等大量现代工程技术学科。与传统的编程语言相比, 它内建了丰富的库函数, 具有编程效率高, 程序设计灵活, 图形功能强等特点。它的电力系统工具箱 (Power System Blockset, 以下简称 PSB) 在 Simulink 环境下运行。所谓 Simulink, 实际上是指 MATLAB 内建的一个用来对动态系统进行建模, 仿真和分析的软件包, 它的出现, 为用户提供了用方框图进行建模的模型接口, 具有更直观、方便、灵活的特点。而 PSB 中几乎集成了组成电力系统的所有元件, 而且与之相联系的机械、热力、控制系统及其它设备规律的分析均包含其中。这就使得电力系统模型能够被快速建立起来。PSB 仿真结果的可靠性已被加拿大魁北克电站的运行、试验数据所证实。由于 MATLAB 拥有以上众多优点, 在研究电力系统恢复的过程中, 采用它来进行相关仿真计算。

在下面的讨论中, 结合黑龙江电网黑启动方案研究这一工程项目, 选择其西部电网的新华电厂作为系统恢复的黑启动电源, 利用 MATLAB 研究在小系统恢复过程中可能遇到的过电压与自励磁问题。

2 系统恢复过程中操作过电压的仿真

操作过电压实质上是由线路电容充放电引起的高频谐振所产生的, 在电力系统恢复过程中, 当合闸空载线路时, 由于充电线路上初始电压为零, 且线路中存在着感性和容性参数, 往往会诱发相当高的操作过电压。合空载线路时操作过电压的等值计算电

路见图 1:

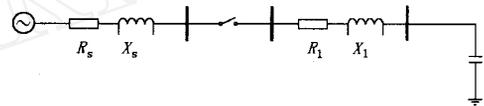


图 1 合空载线路时的操作过电压等值计算电路
借助于基本电路理论, 建立以下回路方程:

$$L_s \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_T} \int i dt = E_m \quad (1)$$

$$i = C_T \frac{du_c}{dt} \quad (2)$$

这里考虑最严重的情况, 即假设在电源电压幅值为 E_m 时合闸, 由该小系统的初始过界条件 $t=0$, $u_c=0$, $i=C_T \frac{du_c}{dt}=0$, 可解得 $t=\pi$ 时, $u_{c \max}=2E_m$, 考虑回路中存在损耗, 故实际振荡过程中线路上的电压要比 $2E_m$ 低。

在实际仿真过程中, 以黑龙江西部电网的新华电厂 5# 机组作为系统恢复的黑启动电源, 并闭合它与红旗变之间的一回 220kV 线路, 如图 2 所示:

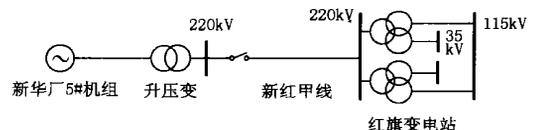


图 2 实际小系统

结合等值计算电路图, 可以用 PSB 建立如图 3 的系统模型图, 这里三相电源为理想正弦电源, 其电压为升压变高压侧电压 220kV, 发电机与升压变等值阻抗 (已折算到升压变高压侧) 为 $2.6939 + j228.2$, 其中, 发电机阻抗用 X_d 表示。从图中可以看到, 为了模拟实际的小系统, 开关采用带有并联泄漏电阻和并联泄漏电容的计算模型, 线路采用计及互感的 Z_1-Z_0 模型, 由于 PSB 输出不能直接由

Simulink 中的 Scope 环节来显示,所以在 PSB 输出后 再加一个电压测量环节,通过它可以完成 PSB 与 Simulink 环节的联系。

为了使仿真结果接近实际情况,将参数设定为

表 1、2 所示。这里需要说明的是,由于新华厂到红旗变线路不长(约为 50km 左右),所以只需采用集中参数的线路模型来对其进行模拟,也能得到令人满意的精度。

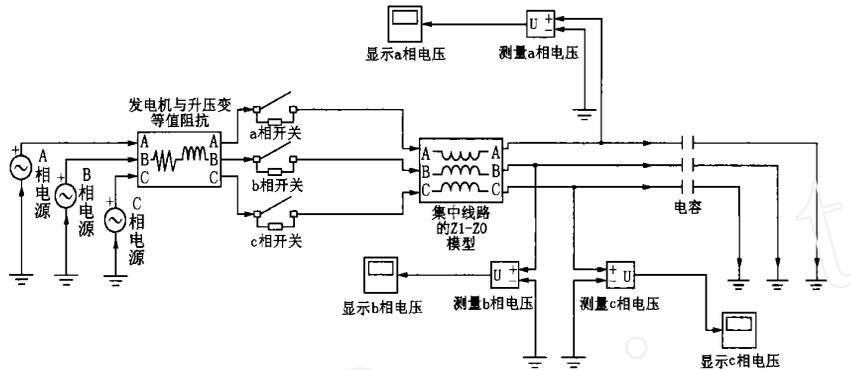


图 3 用 PSB 建立的系统模型图

表 1 开关参数

导通电感	导通电容	并联电感	并联电容	开关初态	合 A 相时刻	合 B 相时刻	合 C 相时刻
1e-5H	1e-3	100	0.1e-6F	全开	3.05ms	8.05ms	5.05ms

表 2 线路参数

正序电阻	零序电阻	正序电抗	零序电抗	对地电容
6.1952	15.0	23.8128	63.5008	0.3523μF

仿真过程中,为了提高计算速度和精度,选用 stiff 型的 Ode15s 积分法,积分步长设为变步长,并将仿真起始和结束时间分别设为 0s 和 1s。仿真结果如图 4(a)、(b)、(c) 所示。从仿真结果可以看出,当 A、B、C 三相开关不同时合闸时,空载的新红甲线上三相均将感应出超过 220kV 的过电压,最高值接近 400kV。虽然这些过电压的持续时间非常短暂,一般在 0.15s 时便已衰减,但仍然可能对线路和 1 变压器的绝缘造成严重的损害。

为了验证使用 PSB 进行操作过电压仿真的可靠性,还同时用经典电磁暂态仿真程序 EMTP 对新红甲线上的空载操作过电压进行仿真,结果表明,用 EMTP 仿真得到的过电压波形,峰值的幅值和出现时刻均与 PSB 仿真的一致,这证明,作为一种科学仿真工具,MAILAB 是可信的。

3 仿真恢复过程中的同步机自励磁

同步发电机的自励磁是指发电机在其励磁绕组电流为零时,由于带有过大的电容性负荷而电压自

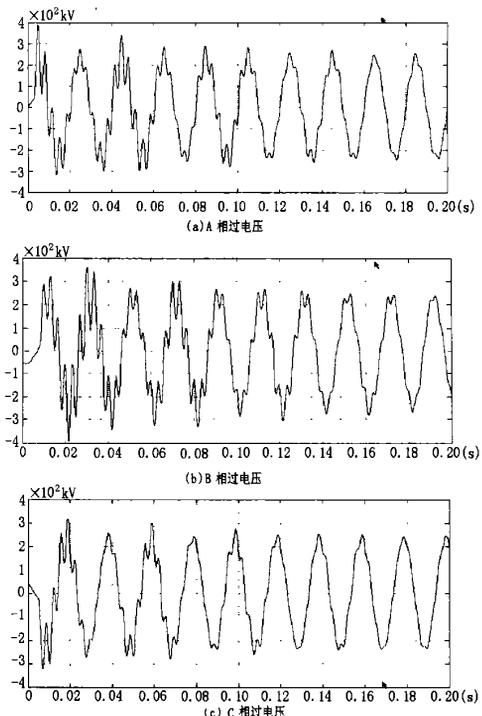


图 4 空载合闸操作过电压

发上升的现象。如图 5 所示,在电力系统恢复过程中,当发电机带空载长线路时,相当于带一容性负

荷,如果发电机有剩磁,则机端会有一个微小的电压 U_0 ,该电压加在容性负荷上,系统将产生容性电流,该容性电流会对发电机产生助磁效应;随着励磁电流的加大,机端电压会升得很高,则系统中的容性电流也将增大,助磁效应增强, U_0 又将上升……如此往复,机端电压将越来越高,但由于实际存在的磁路饱和,机端电压不会无限增大。同步发电机的自励磁是一种非正常运行方式,属于静态稳定范畴,其产生的条件可用“判别线性化方程组特征方程根的性质”的方法来分析。限于篇幅,我们在这里不给出具体的推导过程,而仅给出一个简便实用的判例。利用此判例,即可方便地判断所要研究的同步发电机是否会发生自励磁。如图6所示,当代表输电系统参数的点 (R, X_c) 落于半圆 m 内时,同步机将发生自励磁。

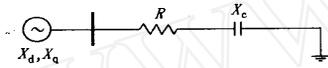


图5 自励磁研究用系统简图

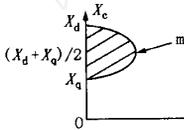


图6 同步发电机自励磁区域

下面用 MATLAB 辅助编程的方法来研究同步发电机的自励磁问题,假设发电机为隐极机,转子 d 轴和 q 轴各有两个绕组,即 d 轴的励磁绕组 F 和阻尼绕组 D ,以及 q 轴的短路绕组 H 和阻尼绕组 Q 。考虑发电机磁路的饱和,其 d 轴和 q 轴的磁路饱和特性相同,发电机转速等于额定值,其标么值为 1。通过分析发电机绕组磁链,系统各元件电压和电流的关系,可以得到一个 16 维的微分方程组(由于篇幅所限,这里不给出具体的方程组和其推导过程),经过线性化,可以将其表示为一个矩阵 $AX = B$,式中 A 为 16×16 维系数矩阵, B 为 16 维常数列矢量。将各个时段初的状态变量代入,即可求得各时段末的状态变量值。由于发电机磁路的饱和,磁链方程中的 X_{ad} 、 X_{aq} 应随磁路饱和而变化,饱和 X_{ad} 可从发电机空载特性上求得。当发电机各个绕组均有电流时,电枢反应电抗 X_{ad} 和 X_{aq} 取决于合成磁势 I ,而 I 可以通过下式计算得到:

$$I = [(i_f + i_{dc} - i_d)^2 + K_q^2 (i_{hc} + i_{qc} - i_q)^2]^{1/2} \quad (3)$$

整个仿真计算的流程为:

- (1) 选定时间段 t ,并将时间用标么值表示;
- (2) 对 X 赋初值 $X(0)$ 。若不赋初值,所有变量在计算过程中将始终等于零,原则上对 X 中任意个变量各赋任意微小值均可;
- (3) 计算系数矩阵 $A(0)$;
- (4) 计算常量列矢量 $B(0)$, B 中元素需要随变量的变化而逐段更新;
- (5) 使用式 $A(0) X(1) = B(0)$ 计算第一时间段末的状态列矢量 $X(1)$ 。一般地,应用式 $A(t) X(t + \Delta t) = B(t)$ 计算 $(t + \Delta t)$ 时刻的状态列矢量 $X(t + \Delta t)$;
- (6) 在初始时刻,将 $A(0)$ 、 $B(0)$ 更新为 $A(1)$ 、 $B(1)$ 。一般地,把 $A(t)$ 、 $B(t)$ 更新为 $A(t + \Delta t)$ 、 $B(t + \Delta t)$;
- (7) 重复(5)、(6)步,直到设定的时间为止。

在使用 MATLAB 进行电力系统恢复仿真研究时,按照上面的计算方法,仍然以新华厂 5# 机组和新红甲线为研究对象,自行编程进行仿真计算,来考察该机组在带空载的新红甲线时是否会发生自励磁现象。参数设定如表 3 所示:

表3 自励磁仿真用参数

符号	参数值	符号	参数值	符号	参数值
X_{ad}	0.806	X_{aq}	0.806	X	0.2
X_{Fc}	0.2	X_{Hc}	0.257	X_{rc}	0.0
X_{Dc}	0.0055	X_{Qc}	0.085	r	0.005
R_F	0.005	R_{Hc}	0.028	R	0.1
R_{Dc}	0.0041	R_{Qc}	0.0082	X_c	23.15

由于 MATLAB 良好的矩阵计算功能,在求解 16 维线性方程组时,并没有采用常规的高斯列主元消去法,而是直接调用 MATLAB 中的矩阵求逆函数 $\text{inv}(P)$,这里 P 为非奇异方阵, $\text{inv}(P)$ 表示对 P 求逆。在本次仿真中,直接令 $X = \text{inv}(A) * B$,便可求出状态列矢量 X 。这就使程序得到简化,同时使其可读性也得到了提高。并且, MATLAB 中提供了丰富的绘图函数,使用户可以选择在一个坐标平面上绘制单独的曲线,也可以将几条曲线画在同一个坐标平面内,还可以选择在同一个区内分块绘制,如下列程序段:

```

.....
subplot(2,2,1),plot(t, I_d(t));
subplot(2,2,2),plot(t, IF(t));
subplot(2,2,3),plot(t, I_q(t));
subplot(2,2,4),plot(t, I(t))
.....

```

可将绘图区分成四块,每块单独绘制一条曲线,结果如图 7 所示:

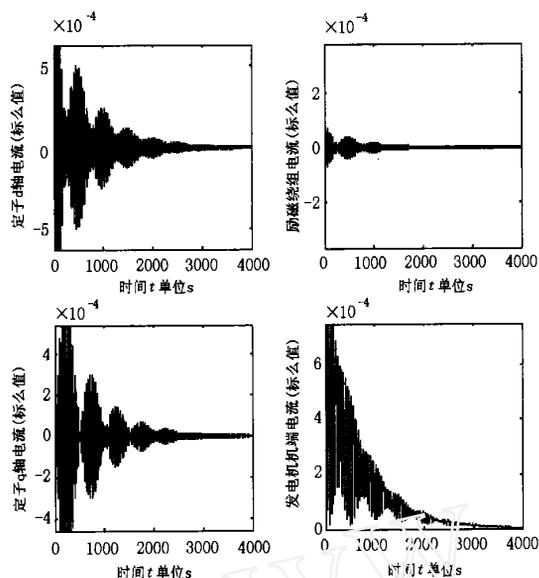


图 7 自励磁仿真结果

从上面的结果可看出,由于发电机定子 d、q 轴电流,机端电流和励磁绕组电流均衰减为 0,说明在起动新华厂 5 # 机组时,发电机不会发生自励磁。还可以用前述的判例来对此进行判断:当点 (R, X_c) 落入由方程 $\left(X_c - \frac{X_d + X_q}{2}\right)^2 + R^2 = \left(\frac{X_d - X_q}{2}\right)^2$ 确定的半圆内时,发电机将发生自励磁。现在将 $X_d = X_q = 1.006$, $R = 0.1$, $X_c = 23.15$ 代入方程,可见此点落在半圆以外,故新华厂 5 # 机组不会发生自励磁。

4 结论

本文利用 MATLAB 科学仿真软件,对电力系统恢复中的两大问题即合空载长线时产生的操作过电压和同步机组自励磁问题进行了研究。结果表明,与传统的仿真手段,如电力系统电磁暂态仿真程序 EMTP 相比,MAILAB 具有界面十分友好,操作更加简单方便,所建模型更加形象直观等特点。同时,通过对 EMTP 和 MAILAB 仿真结果比较可知,两者基本上趋于一致,这证明,作为科学仿真软件,MAILAB 是值得信赖的。此外,MAILAB 也是一种优良的数值计算工具,通过简单的调用相关函数,便可以轻松地完成矩阵运算和一系列复杂问题的求解。同时,MAILAB 在图形输出方面也具有十分明显的优势。这些均表明,MAILAB 是一种强有力的科研工具,必然会在电力系统研究的各个领域得到更广泛的应用。

参考文献:

- [1] Dormmel H W, Abbas ketabi. Power System Blockset For Use With Simulink [C]. Hydro - Quebec, TEQSIM International, 2000.
- [2] 黄家裕. 同步电机基本方程和短路分析 [M]. 上海交通大学出版社, 1992.
- [3] 熊惠敏. 华东电力系统黑起动研究 [M]. 上海交通大学出版社, 1999.
- [4] 徐昕, 李涛, 伯晓晨, 等. MATLAB 工具箱应用指南—控制工程篇 [M]. 电子工业出版社, 2000.

收稿日期: 2001-09-04

作者简介: 王丹昕(1977 -), 男, 硕士, 主要从事电力系统恢复的研究工作; 房鑫炎(1963 -), 男, 副教授, 主要从事继电保护及系统恢复理论的研究。

Matlab's application in relevant aspects of power system restoration

WANG Darr xin, FANG Xir yan

(The Department of E. E of SJTU, Shanghai 200240, China)

Abstract: This paper discusses how to apply the scientific simulation tool Matlab to the field of power system restoration, and it is used to simulate the possible switching transients and synchronous machine's self-excitation during the power system restoration process, on the condition that a Xinhua plant's unit is serving as the black-start unit. And Xinhua power plant is located on the western part of Hei Long Jiang province. The simulation results show that Matlab is indeed a powerful simulation tool, because it will definitely improve the working efficiency, and also, it output reliable results.

Key words: Matlab; power system restoration; switching transients; self-excitation; power system tool; black-start