

Matlab电力系统工具箱在发电机进相运行仿真中的应用

向婉芹,盛四清

(华北电力大学电力工程系,河北 保定 071003)

摘要: 首先对 Matlab6.0/Simulink中的电力系统工具箱 (SPS),与 Matlab5.x/Simulink中的 PSB 进行比较,分析 SPS相对于 PSB的优点。然后利用 SPS建立单机-无穷大系统中各元件的仿真模型和系统模型。最后对系统在发电机由迟相运行转为进相运行时,不同的有功功率和不同的外部系统阻抗两种情况进行仿真,并根据所得的仿真数据,对影响发电机进相运行的深度和稳定性进行分析。

关键词: Matlab; 进相运行; 仿真; SPS

中图分类号: TM743

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2005)20-0053-04

0 引言

Matlab是 Mathwork 公司推出的一套高效率的数值计算和可视化软件,适用于多种学科的大型仿真软件。它集数值分析、矩阵计算、信号处理和图形显示于一体,构成了一个方便的、界面友好的用户环境。为了准确地建立系统模型和进行仿真分析,Mathworks在 Matlab中提供了系统模型图形输入和仿真工具 - Simulink。从 Matlab5.2开始又增加了一个专用于电力系统分析的电力系统模块 (PSB),从 Matlab6.0开始又将其命名为 SPS (SimPowerSystems)^[1],它为电气工作者提供了一个现代化的设计工具,不但电路模型能够快速建立起来,而且与之相联系的机械、热力、控制系统及其他设备的分析均包含在其中^[2]。借助其他模块库或者工具箱以及自己在 Simulink下搭建的模块,在提供的仿真平台上可以进行电力系统的仿真计算^[3]。

1 SPS工具箱及其特点

SPS包含的元件模型与 PSB相同。SPS包含丰富的元件模型,包括同步机、异步机、变压器、直流机、特殊电机的线性与非线性、有名的和标么值系统的、不同仿真精度的设备模型库;单相、三相的分布和集中参数的传输线;单相、三相断路器及各种电力系统的负荷模型、电力半导体器件库以及控制和测量环节^[3]。

相对于 PSB而言,SPS具有以下两方面改进:

1) 增加了滤去直流与谐波分量计算的相量法,取消了电气状态量不能跃变的约束,将计算内容固定为额定频率下的交流量,仿真步长因此可由毫秒

级提高到毫秒级,从而减少了仿真步数、缩短了仿真时间。

2) 求解相量方程时 SPS采用了隐式梯形法,将微分方程在每一时步上差分为代数方程,同潮流方程一起用牛顿-拉夫逊法解算,这不但克服了微分与代数方程之间的交接误差而且具有良好的稳定性。由于对步长具有较好的鲁棒性,用户可以选择 Simulink微分方程解算器提供的专门针对刚性系统的变步长数值积分方法,使解算器视状态量变化趋势自动选择每一步的步长,而无须通过试算确定^[1]。

2 SPS工具箱的优点

1) Matlab具有更开放性,用户不但可以设计全新的元件(包括元件的图形显示,所需参数内部算法、内部算法等,并将其加入到元件库中,还可通过 Edit Mask对已有的元件的所有方面进行查看和修改。

2) 使用 Matlab进行仿真速度比较慢,这与其状态变量的计算方法有关。MATLAB将计算过程建立在最基本的电路原理和微分方程求解的基础之上,将电磁过程和机电过程同步计算,几乎没有考虑电力系统的特性而进行简化。但同时这种计算方法也使仿真非常细致,可以反映出很细微的变化。在计算中,除了部分电感、电容外,其状态变量的产生一般与耦合的非线性元件有关,如变压器、P型输电线等,而变量个数直接与微分方程中矩阵的阶数有关。

3 发电机进相运行的意义

电力系统容量逐步扩大,输电线路距离越来越长,加之有的配电网更使用了电缆线路,故输电线

路产生的容性无功功率增大。会带来局部电网无功过剩、电压偏高的问题。解决电网中过剩的无功功率,有两种方法,第一种是在送受两端配置一定容量的并联电抗器或同步调相机来吸收这部分剩余无功功率,这种方法不仅增加了固定设备的投资及维护,而且在运行上有一定的局限性,利用率较低;第二种是利用发电机的进相运行来吸收过剩的无功功率并进行电压调整,这种方法既不需要增加设备投资,又可实现对电压及无功的连续调节、合理分配无功。

发电机进相运行的原理:发电机正常运行(迟相运行)既发出有功功率,又发出无功功率。而发电机的进相运行是发电机发出有功功率,吸收无功功率,逐渐减小励磁电流,使得 $I_f = E_q \cos < 0$, 发电机即从迟相运行转为进相运行。

本文主要研究在 Simulink/SPS下对单机-无穷大系统,发电机由迟相运行转为进相运行时发电机参数变化情况,以及发电机输出的有功功率和外部系统阻抗值对发电机进相运行深度的影响。

4 仿真模型介绍

单机-无穷大系统(外接输电线路)的系统接线图如图 1。

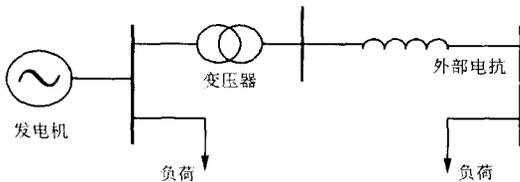


图 1 单机-无穷大系统接线图

Fig 1 Schematic diagram of a single-machine infinite-bus system

4.1 发电机的仿真模型

在 Matlab 中,其未简化的同步发电机模型电气部分采用五阶状态空间方程组(不考虑零轴的派克方程),即 d 轴考虑 2 个绕组, q 轴考虑 3 个绕组。其转子等值电路如图 2。其电压方程组如下:

$$\begin{aligned}
 u_d &= p \psi_d - R_s i_q + R_s i_d \\
 u_q &= p \psi_q + R_s i_d + R_s i_q \\
 u_{fd} &= p \psi_{fd} + R_{fd} \dot{i}_{fd} \\
 u_{kd} &= p \psi_{kd} + R_{kd} \dot{i}_{kd} \\
 u_{kq} &= p \psi_{kq} + R_{kq} \dot{i}_{kq}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

其中: p 为微分算子, ψ 为各绕组磁链。

磁链方程组如下:

$$\begin{aligned}
 \psi_d &= L_d i_d + L_{md} (\dot{i}_d + \dot{i}_{kd}) \\
 \psi_q &= L_q i_q + L_{mq} \dot{i}_{kq} \\
 \psi_{fd} &= L_{fd} \dot{i}_{fd} + L_{md} (\dot{i}_d + \dot{i}_{kd}) \\
 \psi_{kd} &= L_{kd} \dot{i}_{kd} + L_{md} (\dot{i}_d + \dot{i}_{kd}) \\
 \psi_{kq} &= L_{kq} \dot{i}_{kq} + L_{mq} \dot{i}_q
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

转子运动方程如下:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - K_d \frac{d\delta}{dt}) dt
 \tag{2}$$

$$\delta(t) = \delta(0) + \int_0^t (\omega - \omega_0) dt$$

其中: H 为惯性时间常数, T_m 为机械转矩, T_e 为电磁转矩, K_d 为阻尼系数。

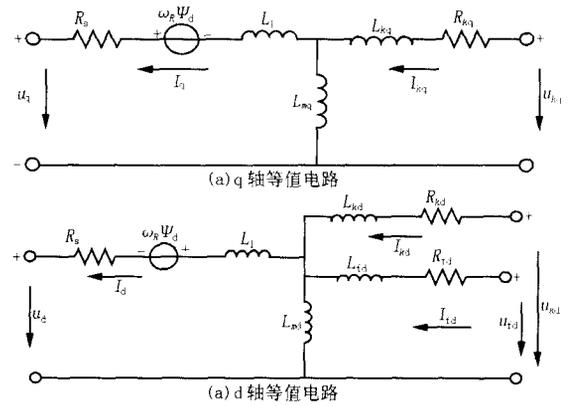


图 2 发电机转子等值电路

Fig 2 Equivalent circuit of generator rotor

4.2 励磁系统模型

励磁系统为自并励静止励磁系统,其数学模型如图 3,其中 $f(u) = \sqrt{u_d^2 + u_q^2}$ 。

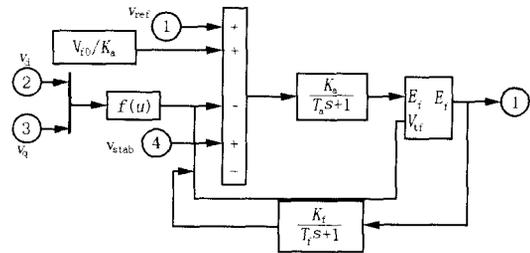


图 3 励磁系统模型

Fig 3 Block diagram of the excitation system

4.3 变压器和输电线路模型

Matlab 中提供的线路模型有两种,PI 型和分布参数型,此外还有串联 RLC 和并联 RLC 代替线路。本文采用 PI 型线路。Matlab 提供各种型号的变压器,可以根据自己的要求选择。本文采用 three-phase transform (two windings), 接线方式设为 $Y_g / -11$ 。

4.4 发电机励磁调节装置模型

逐渐减少发电机的励磁电流,发电机从迟相运行转为进相运行。而励磁电流的减小是通过发电机励磁电压来调节的。在仿真实验中,要减小发电机的励磁电压,本文采取在励磁系统模型和发电机模型之间加上一个比例器。改变比例系数 k 就可以改变励磁电压。

4.5 单机无穷大系统仿真模型

在 Simulink 环境下利用 SPS 按照系统接线图建立如图 4 的仿真模型。其中, Synchronous Machine 为同步发电机, STG 为原动机和调速器, Machine Measurement Demux 为发电机测量元件; Transformer 为变压器,接线方式设为 $Y_g / -11$; Excitation 为励

磁系统; 10 000 MVA, 230 kV source 是无穷大电源。three-phase PI Section 为 P 型输电线路模型, Power GUI 用于计算系统稳态潮流及设定初始值,其目的是为了仿真从稳定状态下开始运行。

建立如图 4 的仿真模型后,在系统分析图形界面 (Power GUI) 中计算系统稳态潮流并设置初始值。然后在 Simulation/Simulation parameters 对话框中设定合适的仿真算法,本文选择 ode23tb (stiff/TR - BDF2)。

5 仿真数据及其结果分析

下面是单机 - 无穷大系统,发电机由迟相运行转为进相运行时的仿真数据。

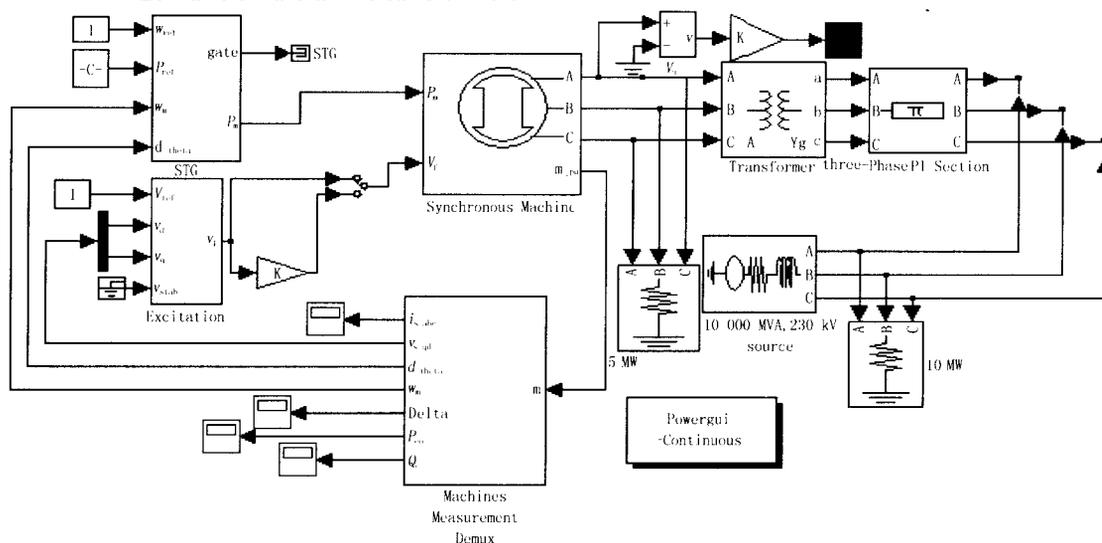


图 4 单机 无穷大系统仿真模型

Fig 4 Simulink block diagram of the single-machine infinite-bus system

表 1 有功负荷为 150 MW,外部输电线路为 150 km,不同的无功功率下对应的测试参数

Tab 1 Test parameter with 150 MW active load, 150km outside electric transmission line and the different reactive power

测试参数 /Mvar	50	30	20	0	- 10	- 30	- 40	- 60	- 70
发电机定子电压 /kV	21. 331	20. 874	20. 639	20. 149	19. 895	19. 364	19. 086	18. 502	18. 192
发电机定子电流 /kA	4. 279	4. 230	4. 233	4. 298	4. 362	4. 561	4. 696	5. 041	5. 253
功率因数	0. 948	0. 980	0. 991	1	0. 998	0. 981	0. 996	0. 928	0. 906
发电机功角 / (°)	20. 8	21. 6	22. 1	22. 8	23. 5	24. 5	25. 0	26. 0	27. 0

表 2 有功负荷为 150 MW,外部输电线路为 80 km,不同的无功功率下对应的测试参数

Tab 2 Test parameter with 150 MW active load, 80km outside electric transmission line and the different reactive power

测试参数 /Mvar	50	30	20	0	- 10	- 30	- 40	- 60	- 80	- 100
发电机定子电压 /kV	20. 846	20. 531	20. 370	20. 040	19. 871	19. 523	19. 344	18. 975	18. 590	18. 186
发电机定子电流 /kA	4. 279	4. 301	4. 289	4. 321	4. 367	4. 524	4. 633	4. 916	5. 279	5. 723
功率因数	0. 948	0. 980	0. 991	1	0. 998	0. 980	0. 996	0. 928	0. 882	0. 832
发电机功角 / (°)	15. 8	16. 2	16. 5	16. 9	17. 2	17. 5	18. 1	19. 0	19. 5	21. 0

表 3 有功负荷为 200 MW,外部输电线路为 80 km,不同的无功功率下对应的测试参数

Tab 3 Test parameter with 200 MW active load, 80km outside electric transmission line and the different reactive power

测试参数 /Mvar	50	30	20	0	- 10	- 30	- 40	- 60	- 80	- 100
发电机定子电压 /kV	20. 775	20. 456	20. 292	19. 957	19. 785	19. 430	19. 248	18. 871	18. 477	18. 062
发电机定子电流 /kA	5. 729	5. 708	5. 718	5. 786	5. 844	6. 009	6. 117	6. 388	6. 731	7. 147
功率因数	0. 970	0. 988	0. 995	1	0. 999	0. 989	0. 981	0. 958	0. 928	0. 894
发电机功角 / (°)	21. 6	22. 2	22. 6	23. 2	23. 5	24. 2	24. 6	25. 4	26. 5	28. 0

表 4 有功负荷为 300 MW,外部输电线路为 80 km,不同的无功功率下对应的测试参数

Tab 3 Test parameter with 300 MW active load, 80 km outside electric transmission line and the different reactive power

测试参数 /Mvar	50	30	20	0	- 10	- 30	- 40	- 60	- 70	- 80
发电机定子电压 /kV	20. 528	20. 195	20. 022	19. 688	19. 486	19. 110	18. 915	18. 510	18. 300	18. 084
发电机定子电流 /kA	8. 554	8. 620	8. 670	8. 806	8. 894	9. 109	9. 238	9. 542	9. 719	9. 913
功率因数	0. 948	0. 995	0. 998	1	0. 999	0. 995	0. 991	0. 981	0. 974	0. 966
发电机功角 / (°)	33. 9	34. 8	35. 2	36. 5	36. 9	37. 9	38. 4	39. 8	40. 5	42. 0

发电机参数: $P_{GN} = 600 \text{ MW}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $X_d = 0.0323$, $X_q = 0.315$, $X_d' = 0.037$, $X_d'' = 0.031$, $X_q' = 0.03$, $T_d = 0.045 \text{ s}$, $T_d' = 8.61 \text{ s}$, $T_{q0} = 0.096 \text{ s}$, $T_j = 5 \text{ s}$, $R_a = 0.002$.

励磁系统参数: $T_f = 0$, $K_a = 150$, $T_a = 0.001$, $K_e = 1$, $T_c = 0$, $K_f = 0.04$, $T_f = 0.7$, $E_{fmin} = -5.5$, $E_{fmax} = 8.49$

由上面仿真数据可以得出以下结论:

1) 由表 1 和表 2 可以看出:发电机进相运行深度与外部系统阻抗 X_e 的大小有关。输出有功功率一定,随着 X_e 增大,允许进相的无功相应减少。

2) 由表 2、表 3、表 4 可以看出:当发电机进相运行时,在允许的静稳定极限内,要增大吸收的无功功率,必须相应减少有功功率的输出。

3) 由上面的所有表可以看出:发电机进相运行时,发电机端电压逐渐下降,端电流逐渐上升,功角逐渐增大。

6 结论

1) 基于 Matlab/Simulink 仿真系统操作简单,界面清楚,为电力系统提供了良好的仿真环境。

2) 本文利用 Matlab/Simulink 中的 SPS,对单机-无穷大系统中的发电机进相运行进行了仿真。分析了发电机进相运行与系统阻抗、发电机有功输出的关系。对发电机实际的进相运行有一定的参考价值。

3) 由于本文是对发电机运行的一个模拟,并且是作用于单机-无穷大系统,同时,仿真是通过 Power GUI 在稳定的情况下进行的,因此,远不及实际系统准确,所以,发电机进相运行时,发电机机端电压会比实际运行中降得多一些。

4) Matlab、Simulink 中的 SPS 同样可以应用与

多机系统,但是由于多机系统含有较多的状态变量,仿真之前必须使用 Powergui 模块计算潮流初值并完成状态变量的初值设定,以避免仿真初始阶段不必要的暂态过程。如果需要从同一初始点出发进行反复计算,可以将扰动发生时间点之前的状态量保存,以避免重复计算。同时,为进一步加速,仿真中不宜打开过多的示波器,并应减小各示波器历史数据的存储以及节省内存。

参考文献:

- [1] 周兆庆,陈星莺. Matlab 电力系统工具箱在电力系统机电暂态仿真中的应用 [J]. 电力自动化设备, 2005, 25 (4): 51-54.
ZHOU Zhao-qing, CHEN Xing-ying Application of Transient State Based on Matlab Power System Blockset [J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25 (4): 51-54.
- [2] 张颖,金维香. 基于 Matlab 的电力系统暂态稳定仿真研究 [J]. 大电机技术, 2004, (1): 46-48.
ZHANG Ying, JIN Wei-xiang Power System Transient Stability Simulation Based on MATLAB [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2004, (1): 46-48.
- [3] 刘兴杰,田建设,丁波,等. 应用 Matlab 进行电力系统动态仿真 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (3): 43-45.
LU Xing-jie, TIAN Jian-she, DING Bo, et al Power System Analysis and Simulation with Matlab [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (3): 43-45.
- [4] 范锡普. 发电厂电气部分 [M]. 北京:水利电力出版社, 1998.
FAN Xi-pu Power Generation Plant, Electrical Part [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1998.

(下转第 73 页 continued on page 73)

- [3] 张焰,陈章潮,吴思谋. 提高供电可靠性的配电网重构[J]. 电工电能新技术, 1997, 60(2): 14-17.
ZHANG Yan, CHEN Zhang-chao, WU Simou Network Reconfiguration to Enhance Reliability of Electric Distribution Systems[J]. New Technology of Electrical Power and Energy, 1997, 60(2): 14-17.
- [4] Su C T, Lee C S, Huang L L. Feeder Reconfiguration Employing Simulated Annealing for Distribution Systems[J]. European Transactions on Electrical Power, 2001, 11(5): 341-347.
- [5] 王秀丽,吴宏晓,别朝红,等. 以提高系统可靠性为目的的配电网重构[J]. 中国电力, 2001, 34(9): 40-43.
WANG Xiu-li, WU Hong-xiao, BIE Chao-hong, et al Distribution Network Reconfiguration to Enhance Reliability [J]. Electric Power, 2001, 34(9): 40-43.
- [6] 别林登,等. 电力系统可靠性评估[M]. 周家启,等译. 重庆:科学技术文献出版社重庆分社, 1986.
Billinton R, et al Reliability Assessment of Power Systems [M]. ZHOU Jia-qi, et al Trans Chongqing: Chongqing Branch of Science and Technology Literature Press, 1986.

收稿日期: 2005-02-24

作者简介:

刘军(1971-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析与计算; E-mail: liujun0923@163.com

刘明波(1964-),男,教授,博士,主要研究方向为电力系统优化计算与稳定性分析及电力市场。

A reconfiguration algorithm for complex distribution networks based on reliability index

LIU Jun^{1,2}, LIU Ming-bo²

(1. Guangzhou Branch, Guangdong Power Grid Co., Ltd, Guangzhou 510600, China;

2. Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Based on the reliability index, a simple and efficient reconfiguration algorithm for complex distribution networks is presented. This algorithm decomposes the optimization process of network reconfiguration into the sub-reconfiguration problem corresponding to dynamic change of connection switches. One-loop networks with different network topology will be obtained through closing connection switches one by one, and a new reconfiguration algorithm is proposed for the one-loop network between the feeders and the one-loop network inside the feeder respectively. Furthermore, results on a real power system show effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: reliability index; complex distribution network; network reconfiguration

(上接第 56 页 continued from page 56)

- [5] Kundur P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京:中国电力出版社, 1994.
Kundur P. Power System Stability and Control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1994.
- [6] 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, 1994.
NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin Theory and Analysis of Power System Dynamic[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994.
- [7] 李志军,杨梅,等. Matlab在同步发电机仿真中的初始问题[J]. 大电机技术, 2003, (6): 62-66.
- LI Zhi-jun, YANG Mei, et al Research in Several Aspects of Synchronous Machine Simulation Based on Matlab[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2003, (6): 62-66.

收稿日期: 2005-07-22; 修回日期: 2005-08-22

作者简介:

向婉芹(1981-),女,研究生,研究方向为电力系统分析、运行与控制; E-mail: malaqincai@eyou.com

盛四清(1965-),男,博士,副教授,研究方向为电力系统分析、运行与控制,人工智能在电力系统中的应用等。

Application of leading phase operation of generation based on Matlab power system blockset

XIANG Wan-qin, SHENG Si-qing

(Dept of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: This paper compares SPS of Matlab6.0/Simulink with PSB of Matlab5.x/Simulink and analyses the merits of SPS. It uses SPS to build the simulation models on single-machine infinite-bus power system. Simulation is contracted from lagging phase operation to leading phase operation when the active power and outside system resistance are different. The effects on depth and stability of leading phase operation based on the simulation data are analysed.

Key words: Matlab; leading phase operation; simulation; SPS