

水轮发电机和汽轮发电机失磁和自励磁仿真

钟慧荣, 周云海

(三峡大学电气信息学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 随着发电机容量的增大, 机组一旦出现事故, 即会造成不可估量的后果, 故有必要对发电机的异常运行工况进行仿真。对水轮发电机和汽轮发电机失磁异步运行及自励磁工况进行动态过程仿真。先用模块化建模法建立包括发电机、调速器、励磁系统、输电线在内的全系统元件数学模型, 再分别建立失磁及自励磁的系统模型, 最后用 Matlab 中调用 Fortran 程序的方法编写仿真程序, 仿真结果详细、逼真地再现了水轮发电机和汽轮发电机在各种失磁故障方式下的动态过程及同步自励磁、异步自励磁下的动态过程, 为继电保护的整定和辅助装置的研制提供了一种有效的分析工具。

关键词: 水轮发电机; 汽轮发电机; 失磁; 自励磁; 仿真

中图分类号: TM743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)20-0009-07

0 引言

随着仿真技术在电力系统中应用的不断发展, 对系统仿真全面化程度的要求日益提高。越来越多的客户不但要求对系统操作、正常运行进行仿真, 而且要求对非正常运行和故障处理进行较为准确的模拟^[1]。发电机是系统中的最主要元件, 且随着容量的增大, 一旦出现事故, 即会造成不可估量的后果, 故有必要对同步电机的异常运行工况进行仿真。机组非正常运行仿真有着广泛的内容, 诸如同步电机失磁异步运行、自励磁、机组低频振荡、机组甩负荷、机组误同期并列、不对称运行等, 本文就最常发生的水轮发电机和汽轮电机失磁异步运行及自励磁两种异常运行工况进行动态过程仿真。先用模块化建模法建立包括发电机、调速器、励磁系统、输电线在内的全系统元件数学模型, 再分别建立失磁及自励磁的系统模型, 最后用 Matlab 中调用 Fortran 程序的方法编写仿真程序, 仿真结果详细、逼真地再现了水轮发电机和汽轮发电机在各种失磁故障方式下的动态过程及同步自励磁、异步自励磁下的动态过程, 为继电保护的整定和辅助装置的研制提供了一种有效的分析工具。

1 模型与算法

要对同步电机失磁异步运行及自励磁运行工况进行动态过程仿真, 先要建立系统元件精确的数学模型, 再根据实际故障特性, 建立故障的模型, 然后

搭建系统仿真模型, 最后选择合适的算法进行仿真计算。

1.1 元件模型建立

为了提高仿真系统的通用性、可维护性及可扩充性, 文中采用模块化建模的方法建立了包括原动机、发电机、调速系统、励磁系统、输电线路的全系统元件较精确的数学模型。

1.1.1 发电机的数学模型

对同步电机的异常运行工况进行仿真, 发电机要用精确的模型, 水轮机常用五阶 Park 方程, 汽轮机常用 6 阶 Park 方程。下面发电机模型的推导是以水轮发电机 5 阶模型为例的, 要得到汽轮发电机的 6 阶模型, 则只需增加一个绕组即可。

水轮发电机 5 阶 PARK 方程^[2]如下:

$$u = p + ri \quad (1)$$

$$= Xi \quad (2)$$

其中: $u = |u_d \ u_q \ u_F \ 0 \ 0|^T$;

$$= |\phi_d \ \phi_q \ \phi_F \ \phi_D \ \phi_Q|^T$$

$$i = |i_d \ i_q \ i_F \ i_D \ i_Q|^T$$

$$r = \text{diag}\{-r \ -r \ r_F \ R_D \ R_Q\}$$

转子运动方程为:

$$\begin{cases} T_j p = T_m - T_e \\ p = \omega \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_j 为发电机转动部分的总的惯性常数。

1.1.2 励磁系统的数学模型

本文仿真中, 选用 I 型可控硅励磁调节器, 其传递函数框图^[3]如图 1 所示。

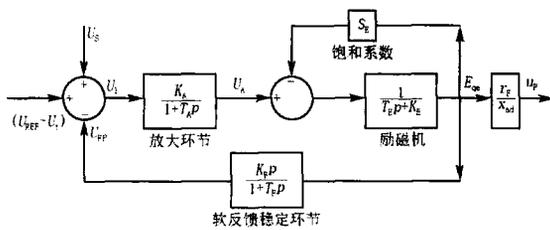


图 1 励磁调节系统传递函数框图

Fig 1 Schematic diagram of excitation control system

1. 1. 3 调速系统的数学模型

本文选用广泛应用的 水轮机调速器和汽轮机调速器经典模型, 水轮机模型中主要考虑了刚性引水管道的水锤效应, 汽轮机模型中主要考虑了蒸汽容积效应。

水轮机调速器和水轮机经典模型传递函数框图^[3]如图 2 所示。

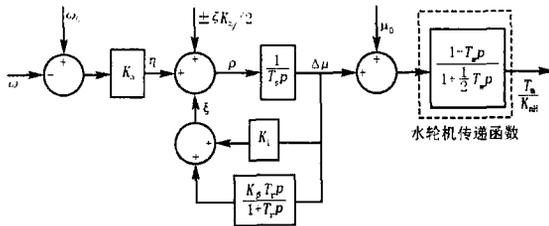


图 2 水轮机调速系统传递函数框图

Fig 2 Schematic diagram of governor for a hydro turbine

本次仿真, 将以上介绍的水轮机发电机的调速系统作两点修改即可得到汽轮机发电机的调速系统模型^[3]。其一是去除软反馈环节 (即 $K = 0$), 因为汽轮机调速器没有软反馈环节, 并令硬反馈放大倍数 $K_f = 1$ 。其二, 将水轮机发电机反映水锤效应的环节用汽轮机管道和再热器汽容环节代替, 如图 3 所示。

本文仿真中未计及调速器限幅环节和死区的影响。

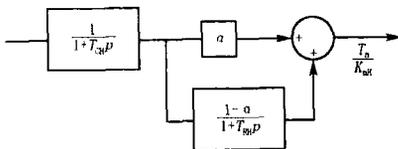


图 3 汽轮机管道和再热器汽容传递函数框图

Fig 3 Schematic diagram of steam turbine

1. 1. 4 输电线路数学模型

输电线路系统在 dq0 坐标系下的方程^[4]为:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & -x_s & \\ x_s & r_s & \\ & & r_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{i}_0 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} x_s \\ x_s \\ x_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \dot{i}_d \\ p \dot{i}_q \\ p \dot{i}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{s0} \end{bmatrix} \quad (4)$$

1. 2 算法

为求解系统中的各变量, 需联立求解描述系统元件的微分方程组和描述系统网络特性的代数方程组。当今, 微分方程组的求解方法主要有隐式梯形积分法、改进尤拉法、龙格 - 库塔法等, 其中, 隐式梯形法公式简洁, 计算精度高, 数值稳定性较好而得到越来越多的应用; 代数方程组的求解方法主要采用适于求解非线性代数方程组的牛顿法。故文中先用隐式梯形法将微分方程组差分化成代数方程组, 而后与网络代数方程组用牛顿 - 拉夫逊法联立求解。

Fortran 是目前最适合进行数值计算的一种计算机高级语言, 已广泛地应用于电力系统仿真计算中, 但图形处理能力差, 仿真结果不易可视化; Matlab 是近几年来在工程领域应用较多的高级语言, Matlab 有一系列的绘图函数、命令, 且这些函数、命令简单明了, 表现数据图形的能力强、灵活多变, 但循环运算速度慢。为了达到仿真的实时性及仿真结果分析的简便化, 文中采用 Matlab 中调用 Fortran 程序的方法编程。这样一来, 既充分发挥了 Matlab 的图形处理和 Fortran 的数值计算的长处, 又避开了它们各自的不足。

2 失磁异步运行仿真分析

同步发电机失磁 (突然部分失磁或全部失磁) 异步运行, 是指同步发电机失磁后, 仍带有一定的有功功率, 以小滑差与电网并列运行的一种运行方式。同步发电机的失磁故障占机组故障的比例最大, 是电力系统中常见故障之一, 特别是大型机组, 励磁环节较多, 造成励磁回路短路或开路的几率增大^[1]。故应首先对发电机的失磁异步运行进行研究。本文仿真中, 发电机组采用单机 - 无穷大系统模型, 如图 4 所示。

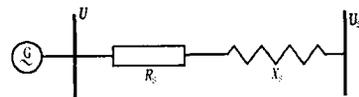
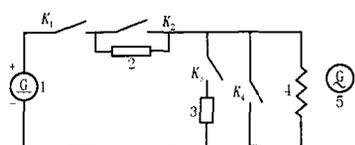


图 4 单机 - 无穷大系统

Fig 4 One machine to infinite bus system

2. 1 失磁故障模型建立

励磁系统的简单原理图如图 5。



1为直流励磁机电枢;2为减磁电阻 r_p ;3为灭磁电阻 r_m ;
4为励磁绕组;5为发电机定子

图5 励磁系统原理图

Fig 5 Schematic diagram of excitation system

机组正常运行时,开关 K_1 、 K_2 闭合, K_3 、 K_4 断开。发生失磁故障时,根据故障的不同类型,开关的动作不同,其故障的模型也不同,下面分别建立部分失磁、励磁绕组直接短路失磁、经灭磁绕组闭合短路失磁和励磁绕组开路失磁四种失磁故障的数学模型。

1) 部分失磁

模拟部分失磁时,开关 K_1 闭合, K_2 、 K_3 、 K_4 断开。相当于机组正常运行时,突然向励磁绕组投入一个减磁电阻 r_p ,此时,励磁回路电压方程为:

$$p\phi_F + (r_F + r_p) i_F = u_F \quad (5)$$

式中: ϕ_F 为励磁绕组磁链, r_F 为励磁电阻, i_F 为励磁电流, u_F 为励磁电压, r_p 为减磁电阻,一般取 $r_p = 10 r_F$ 。

仿真时,在故障时刻,将励磁电阻由 r_F 变为 $(r_F + r_p)$ 即可。

2) 励磁绕组直接短路失磁

模拟直接短路失磁时,开关 K_1 断开, K_4 闭合,此时,励磁电压 $u_F = 0$,励磁回路电压方程为:

$$p\phi_F + r_F i_F = 0 \quad (6)$$

仿真时,在故障时刻,令励磁电压 u_F 变为常数 0即可。

3) 励磁绕组经灭磁电阻闭合短路失磁

模拟经灭磁绕组闭合短路失磁时,开关 K_1 、 K_4 断开, K_3 闭合,此时励磁绕组与灭磁绕组形成闭合回路,励磁回路电压方程为:

$$p\phi_F + (r_F + r_m) i_F = 0 \quad (7)$$

式中: r_m 为灭磁电阻,一般取 $r_m = 5 r_F$ 。

仿真时,在故障时刻,除令励磁电压 u_F 变为常数 0外,还要将励磁电阻由 r_F 变为 $(r_F + r_m)$ 。

4) 励磁绕组开路失磁

模拟开路失磁时,开关 K_1 、 K_3 、 K_4 断开, K_2 闭合,仿真时,可认为突然向励磁绕组串联投入一无穷大的电阻 r ,但考虑到方程的求解,实际计算中,不可能用一无穷大电阻代入,此处,取 $r = 500 r_F$,此时,励磁回路电压方程为:

$$p\phi_F + (r_F + r) i_F = u_F \quad (8)$$

仿真时,在故障时刻,将励磁电阻由 r_F 变为 $(r_F + r)$ 即可。

2.2 计算结果及分析

本文以某台水轮发电机为算例,分别对其所有失磁故障方式,即部分失磁、励磁回路直接短路失磁、励磁绕组经灭磁电阻闭合失磁和励磁回路开路失磁进行动态过程仿真。

发生故障前,其运行工况为:机端电压 $U = 1.05 p.u.$,电流幅值 $I = 0.6 p.u.$,功率因数 $\cos \phi = 0.755$ (滞后)。

仿真结果如图 6~9,图 6为励磁回路部分失磁时、图 7为励磁回路直接短路失磁时、图 8为经灭磁绕组闭合短路失磁时、图 9为开路失磁时各量的仿真波形。

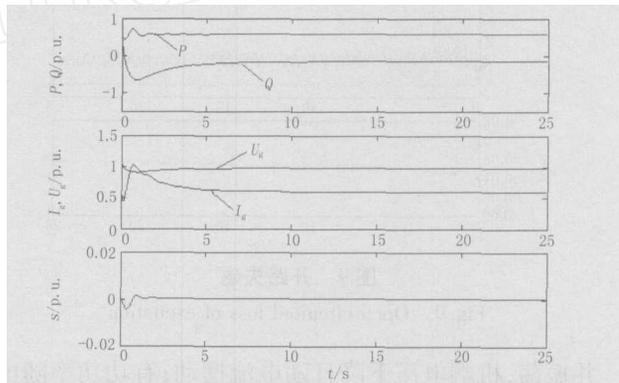


图6 部分失磁

Fig 6 Partially loss of excitation

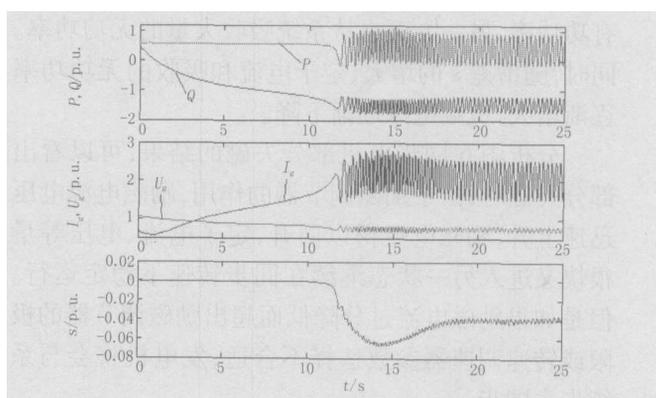


图7 直接短路失磁

Fig 7 Direct short-circuited loss of excitation

从图 6~9中可以大致看出,发生失磁故障后,励磁电流下降,故障机组先经短时的同步振荡再过渡到异步运行,最后进入转差为 s 的稳态异步运行。当励磁电流接近于 0后,机组转速升高且振荡,定子电流刚开始时下降,随即又逐步增大且超过额定值

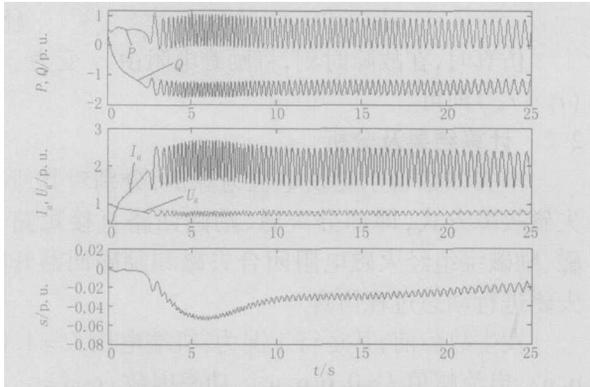


图 8 经灭磁绕组短路失磁

Fig 8 Killed winding short-circuited loss of excitation

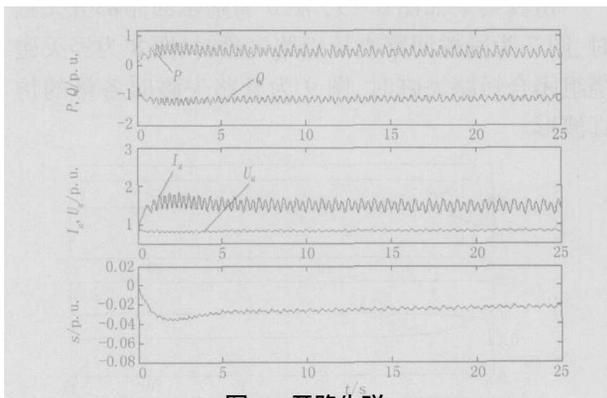


图 9 开路失磁

Fig 9 Open-circuited loss of excitation

并振荡,机端电压下降且随电流摆动;有功功率随电流振荡且为正值,无功功率下降为负值且振荡,表明此时机组进相运行,即失磁机组一方面向系统输出有功功率,另一方面也从系统吸收大量的无功功率。同时,随滑差 s 的增大,定子电流和吸收的无功功率逐渐增大,机端电压逐渐下降。

分析图 6 同步电机部分失磁的结果,可以看出部分失磁时,由于励磁调节器的作用,励磁电源电压迅速上升,励磁电流得以回升,定子电流、电压等量很快又进入另一状态继续在同步转速下稳定运行。但是如果励磁电流过分降低而超出励磁调节器的极限或转速调速器参数选择不合适,发电机将会与系统失去同步。

对比另三种失磁方式(直接短路失磁、经励磁绕组闭合短路失磁、开路失磁)下的仿真结果可知,开路失磁时,机组最先进相运行,转子的过渡过程最短,最先失磁进入异步运行,以下依次为经灭磁电阻短路失磁、直接短路失磁。开路失磁后 E_q 和 P 衰减最快,短路失磁时 E_q 和 P 衰减缓慢,发电机转速缓慢加快,功角增大到 180 机组失步时, P 才开始

振荡,经灭磁电阻短路失磁时, E_q 和 P 的衰减速度介于两者之间。

3 自励磁仿真分析

同步电机定子回路中联接有电容时,例如:与空载线路相联或经串联电容与无限大母线相联时,系统崩溃后“黑启动”时,就有可能因电枢反应的助磁作用而发生定子电流、电压幅值自发增大的现象。这种现象就称为自发激磁,简称自励磁^[5-7]。当同步发电机发生自励磁时,定子电流的振荡频率决定于定子回路中的电感和电容,当定子自励磁电流的频率为额定频率时,称为同步自励磁;当定子自励磁电流的频率不为额定频率时,称为异步自励磁。自励磁的发生将对同步发电机及电站的电气设备产生极大的危害,因此,同步发电机的自励磁的研究已引起了人们的特别关注。自励磁产生条件和自励磁暂态过程是研究自励磁的两个方面。

3.1 模型建立

以单机与长空载线路相联系统为研究系统,该系统由发电机、外接电阻、外接电容三部分组成^[5]。

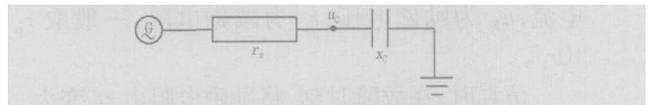


图 10 自励磁研究系统简图

Fig 10 System diagram of self-excitation

由图 10 可知:

$$\frac{x_c}{p} \begin{vmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{vmatrix} = p \begin{vmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{vmatrix} - (r + r_s) \begin{vmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{vmatrix} \quad (9)$$

式中: x_c 为线路串联电容; r 为同步电机定子电阻; r_s 为输电线路电阻。

为分析问题的方便,把线路电阻 r_s 计入同步电机定子电阻 r ,即令:

$$r_a = r + r_s \quad (10)$$

将式(5)转换到 dq0 坐标系,并略去零序分量得:

$$\begin{cases} p(p\phi_d - r_a \dot{i}_d - \phi_q) - x_c \dot{i}_d = (p\phi_q - r_a \dot{i}_q + \phi_d) \\ p(p\phi_q - r_a \dot{i}_q + \phi_d) - x_c \dot{i}_q = -(p\phi_d - r_a \dot{i}_d - \phi_q) \end{cases} \quad (11)$$

不难发现,上式中 $(p\phi_d - r_a \dot{i}_d - \phi_q)$ 、 $(p\phi_q - r_a \dot{i}_q + \phi_d)$ 项,其实就是电容器中电压降落的正、交轴分量—以 u_{cd} 、 u_{cq} 表示,亦即

$$\lambda_5 = 0.0002; \quad \lambda_6 = -0.0023; \quad \lambda_7 = -0.0076$$

从以上计算结果可知,除了 λ_5 为一正数外,别的特征值都为实负数或实部为负数的复数,故用状态法判断得出当前条件下将发生同步自励磁。其动态过程仿真结果如图 11 所示。

2) 汽轮发电机自励磁仿真

某台汽轮发电机,当外接电阻 $r_s = 0.1$ p.u., 外接电抗 $x_{cs} = 1.3943$ p.u. 时。判断是否会发生自励磁现象,并仿真计算 $i_q = 0.01$ 时其暂态过程。

用式 (18) 计算系统矩阵 A,再用 Matlab 内带的函数 eig(A) 求得 A 的特征值为:

$$\begin{aligned} \lambda_{1,2} &= -0.2002 \pm j 2.539; \\ \lambda_{3,4} &= -0.2039 \pm j 2.333; \\ \lambda_5 &= -0.1346; \quad \lambda_{6,7} = 0.0006 \pm j 0.001; \\ \lambda_8 &= -0.0860 \end{aligned}$$

从以上计算结果可知,除了 λ_6 、 λ_7 为一对实部为正的共轭复数,别的值都为实负数或实部为负数的复数,故用状态法判断得当前条件下系统将发生异步自励磁。其动态过程仿真结果如图 12 所示。

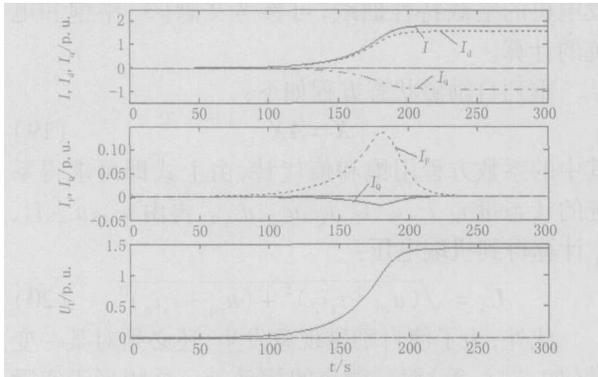


图 11 水轮发电机同步自励磁

Fig 11 Synchronous self-excitation of hydro-generator

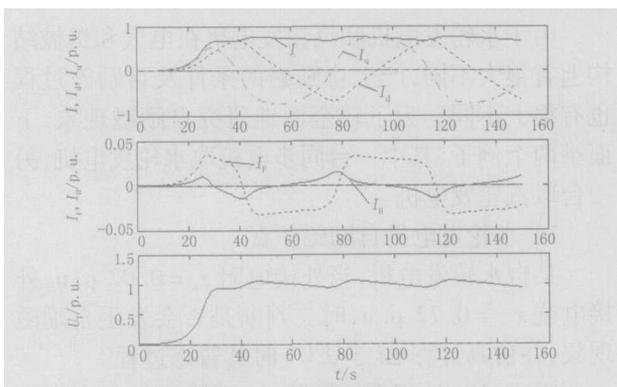


图 12 汽轮机异步自励磁

Fig 12 Asynchronous self-excitation of turbine-generator

从以上两个例子可看出,当特征值具有正实数

时,电机各绕组电流幅值将不断增长,机端电压也不断增大,发生凸极同步自励磁。由于磁路饱和,自励电流将稳定到一定的幅值;当特征值具有正实部的复数时,自励电流为幅值不断增长的振荡电流,发生异步自励磁,由于磁路饱和,异步自励电流也将稳定在一定幅值。

上两例中,自励磁电流 I 并不是很大,同步自励磁时,其最大标么值约为 2,异步自励磁时,其最大标么值约为 0.75,这是由于电容器容抗 x_{cs} 比非饱和电抗 x_d 小得不多的原因。如果 x_{cs} 比非饱和电抗 x_d 小很多(即电容 C 很大),则自励磁电流和发电机电压将很大,并且上升速度很快,在实际电力系统中可能会导致电气设备的损坏。

4 结论

文中对水轮发电机和汽轮发电机失磁异步运行及自励磁进行了仿真计算,仿真结果与以前大量文献分析和实际的物理过程相吻合,且能在与异常运行实际过程相应的时间内完成仿真计算,故说明仿真结果是合理的。仿真结果详细、逼真地再现了机组在失磁异步运行、自励磁二种异常工况下的动态过程,为运行人员提供了一个直观的认识,且仿真计算能在与异常运行实际过程相应的时间内完成,这为继电保护的整定和辅助装置的研制提供了一种有效的分析工具。

参考文献:

- [1] 鲍婕,沈善德,朱守真,等. 电站仿真系统中的发电机异常运行建模[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(10): 41-44.
BAO Jie, SHEN Shan-de, ZHU Shou-zhen, et al Modeling of Generator's Abnormal Running Mode in Power Station Simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(10): 41-44.
- [2] 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, 2002.
NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin Theory and Analysis of Dynamic Power System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [3] 黄家裕,等. 电力系统数学仿真[M]. 北京:水利电力出版社, 1995.
HUANG Jia-yu, et al Power System Digital Simulation[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1995.
- [4] Kundur P. Power System Stability and Control (影印版)[M]. 北京:中国电力出版社, 2001. 184-188

- Kundur P. Power System Stability and Control, Process Plate [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001. 184-188
- [5] 崔文进,等. 与长线相联的发电机自励磁仿真与实验 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, (9): 1154-1157.
CU I Wen-jin, et al. Simulation of Self-excitation of Generators Connected to Long Transmission Lines [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2002, (9): 1154-1157.
- [6] 李顺江. 同步发电机自励磁产生条件的研究 [J]. 广西师范大学学报, 2000, (2): 143-148.
LI Shun-jiang. Conditions of Self-excitation for Synchronous Generator [J]. Journal of Guangxi Normal University, 2000, (2): 143-148.
- [7] 何雄. 同步电机自励磁浅述 [J]. 电机技术, 2004, (2): 33-36
- HE Xiong. Analysis of Generator Self-excitation [J]. Technology of Electric Engine, 2004, (2): 33-36
- [8] 西安交通大学,等. 电力系统计算 [M]. 北京: 水利水电出版社, 1978.
Xi'an Jiaotong University, et al. Power System Computation [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1978.

收稿日期: 2006-03-31; 修回日期: 2006-06-27

作者简介:

钟慧荣 (1977 -), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: zh-h-r@163.com

周云海 (1972 -), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行和控制和黑启动等。

Simulation of dynamic processes for hydro-generator and turbine-generator under loss of excitation and self-excitation

ZHONG Hui-rong, ZHOU Yun-hai

(College of Electric Engineering & Information Science, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: With the enlargement of generator capacity, generator fault will cause immensurable consequence, so it is necessary to emulate the generator's abnormal operating condition. In the paper, the dynamic processes of excitation loss and self-excitation are simulated. Firstly, accurate mathematical models of system element are built with modular modeling method including generator, speed governor, excitation system and electric transmission line. Secondly, system models of excitation loss and self-excitation are built. Finally, simulative software is programmed with Matlab calling Fortran language. Dynamic processes of generator under different loss-exciting faults and synchronous, asynchronous self-excitation are simulated. The simulation results provide an effective diagnostic tool for relay protection setting and the auxiliary device development.

Key words: hydro-generator; turbine-generator; loss of excitation; self-excitation; simulation

(上接第 8 页 continued from page 8)

Practicality study of protection setting management software

ZHANG Jin-ai, LU Qian-jin, LI N Zhen-zhi

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to deal with a lot of setting lists effectively, a set of setting management software is developed and applied in a series of power company and transformer substation. The software is projected based on practicality with the characteristic of universality, intelligent and friendly interface and takes C++ to carry out its function. This paper introduces the structure designing of the software and analyzes the function. Compared with manual operation, the software manages many setting lists correctly, simply and expediently. It has been applied in some Guangdong power companies. The application demonstrates the software can enhance the workers for setting management effectively and improve the management level for relaying protection.

Key words: relay protection; setting management system; database