

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.12.023

电力系统不同过程仿真中的核电机组 数学模型研究

黄岳峰, 徐 政*
(浙江大学 电机系, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对“核电机组单机容量普遍比火电机组大、运行特性不同于火电机组且在电力系统中比例不断升高从而给电力系统稳定运行造成影响”的问题,在前人建立的详细核电机组数学模型的基础上,建立了适用于电力系统中长期稳定性分析的核电机组数学模型,并在Simulink平台上,通过对单机无穷大系统的暂态稳定性仿真测试,考察了在暂态稳定性仿真中核电机组机械出力以及其他相关变量的变化。研究表明,在电力系统暂态稳定性分析中,核电机组机械出力和其他核电机组内部的相关变量变化很小,因此核电机组的机械功率可以当作恒功率来处理,这样可以极大地简化核电机组在电力系统暂态稳定性研究中的数学模型。

关键词: 核电机组; 数学模型; 中长期稳定; 暂态稳定

中图分类号: TM712 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)12-1546-04

Mathematical model of nuclear power plants for different power system processes

HUANG Yue-feng, XV Zheng
(Department of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the capacity of nuclear power generating units is generally larger than that of thermal power generating units, the operational characteristics of nuclear power generating units are different from those of thermal power generating units, and the proportion of nuclear power rises in the power system which will cause a series of stability problems, a relative simple mathematical model of nuclear power generating unit was established on the basis of previous detailed models, which can be used in medium-term and long-term power system simulation. Through the transient stability simulation of the single machine infinite bus system in Simulink, the mechanical output and other relevant variables of nuclear power generating unit were observed. The results indicate that in transient stability simulation the mechanical output and other relevant variables change little. So the mechanical output can be treated as a constant. This will greatly simplify the mathematical model of nuclear power generating unit in power system transient stability simulation.

Key words: nuclear power generating unit; mathematical model; medium and long term stability; transient stability

0 引 言

2011年日本福岛的核事故严重打击了全球的核电事业,核电进入了短暂的低谷。各国在权衡利弊之下,除了个别国家决定逐渐退出核电行列外,大多数国家依然坚持大力发展核电。如今世界上几个主要

的核电国家都在积极出口本国的核电技术,拥有核能发电的国家也将越来越多,全世界范围内将迎来新一波的核电发展高潮。我国也坚持核电在能源战略中的重要地位,正在建造世界首批AP1000机组,并逐步实现核电技术的国产化和自主化,与此同时,在我国北方已查明10个万吨级铀矿^[1],为国家大力发展核电提供了核燃料保障。

收稿日期: 2013-08-12

作者简介: 黄岳峰(1989-),男,浙江绍兴人,主要从事核电系统建模方面的研究. E-mail: huangyuefeng1989@163.com

通信联系人: 徐 政,男,博士,教授,博士生导师. E-mail: xuzheng007@zju.edu.cn

但是核电机组单机容量较火电机组大,因此,如果电网的故障或者核电站内部的误操作等引起核电机组跟电网解列,对电网带来的影响也较火电机组大。同时,核电机组对电网的响应特性也不同于传统的火电机组,因此有必要建立详细的核电机组数学模型。美国电科院建立的高阶核电机组数学模型达到 57 阶,低阶模型也有 25 阶^[2]。国内也建立了不少核电机组的数学模型^[3-9],但都存在阶数较高的问题,同时也没有针对电力系统的不同过程仿真进行相应的简化。

本研究在文献[10-12]建立的核电机组数学模型基础上,建立适合于电力系统中长期稳定性分析的核电机组数学模型,同时通过单机无穷大系统测试证明,在暂态稳定性分析中,核电机组的机械出力变化较小,可以近似当作恒功率处理,从而大大地简化在暂态稳定性分析中核电机组的数学模型。

1 适用于电力系统中长期稳定性分析的核电机组数学模型

核电机组电气部分与同容量的火力发电机组类似,两者的区别主要在于原动机部分,因此,本研究建立的核电机组数学模型如图 1 所示。其主要针对能量从反应堆产生到汽轮机输出的过程建模。

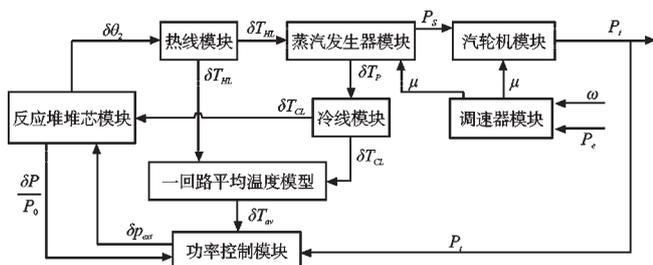


图 1 核电机组整体数学模型

1.1 反应堆堆芯模块

反应堆堆芯模块包括中子动力学模块、燃料和冷却剂之间的热传递模块。假设冷却剂流速恒定,则这些模型均可以简化为一系列的一阶线性微分方程表示:

$$\frac{d\Delta P/P_0}{dt} = -\frac{\beta_T}{\Lambda} \frac{\Delta P}{P_0} + \lambda \Delta C + \frac{\alpha_F}{\Lambda} \Delta T_F + \frac{\alpha_c}{2\Lambda} (\Delta \theta_1 + \Delta \theta_2) + \frac{\beta_T}{\Lambda} \Delta \rho_{ext} \quad (1)$$

$$\frac{d\Delta C}{dt} = \frac{\beta_T}{\Lambda} \frac{\Delta P}{P_0} - \lambda \Delta C \quad (2)$$

$$\frac{d\Delta T_F}{dt} = \frac{fP_0}{(mc_p)_F} \frac{\Delta P}{P_0} + \frac{hA}{(mc_p)_F} (\Delta \theta_1 - \Delta T_F) \quad (3)$$

$$\frac{d\Delta \theta_1}{dt} = \frac{(1-f)P_0}{(mc_p)_c} \frac{\Delta P}{P_0} + \frac{hA}{(mc_p)_c} (\Delta T_F - \Delta \theta_1) + \left(\frac{\dot{m}}{m}\right)_c (\Delta T_{cl} - \Delta \theta_1) \quad (4)$$

$$\frac{d\Delta \theta_2}{dt} = \frac{(1-f)P_0}{(mc_p)_c} \frac{\Delta P}{P_0} + \frac{hA}{(mc_p)_c} (\Delta T_F - \Delta \theta_1) + \left(\frac{\dot{m}}{m}\right)_c (\Delta \theta_1 - \Delta \theta_2) \quad (5)$$

式中: $\Delta P/P_0$ —反应堆功率变化量, ΔC —等效先驱核密度, ΔT_F —燃料温度, $\Delta \rho_{ext}$ —控制棒引入的反应性, $\Delta \theta_1$ —反应堆入口处冷却剂温度, $\Delta \theta_2$ —反应堆出口处冷却剂温度, ΔT_{cl} —冷线温度, β_T —缓发中子总份额, Λ —中子寿命, λ —等效缓发中子衰减时间常数, α_F —燃料温度负反馈系数, α_c —冷却剂温度负反馈系数, f —燃料产生的能量占堆芯总能量的百分比, h —燃料到冷却剂的传热系数, A —燃料到冷却剂的传热面积, m_c —堆芯冷却剂质量, c_{pc} —堆芯冷却剂比热, m_F —堆芯燃料温度, c_{pF} —堆芯燃料比热, \dot{m}_c —冷却剂流过堆芯的速率。

1.2 热线、冷线模块

忽略冷却剂与管道壁及外界的热交换,冷却剂在热线、冷线管道中的热量传递过程可以简化为一阶惯性环节:

$$\frac{d\Delta T_{hl}}{dt} = \frac{1}{\tau_{hl}} (\Delta T_{o2} - \Delta T_{hl}) \quad (6)$$

$$\frac{d\Delta T_{cl}}{dt} = \frac{1}{\tau_{cl}} (\Delta T_p - \Delta T_{cl}) \quad (7)$$

式中: ΔT_p —蒸汽发生器一回路冷却剂平均温度, ΔT_{hl} —热线温度, τ_{hl} —热线时间常数, τ_{cl} —冷线时间常数。

1.3 蒸汽发生器模型

反应堆裂变产生的能量主要是通过蒸汽发生器向二回路传递,因此蒸汽发生器是连接一回路和二回路热量传递的桥梁。对蒸汽发生器作如下假设:

- (1) 蒸汽发生器中一回路和二回路流体均只沿着一个方向流动,且流速恒定;
- (2) 蒸汽发生器中一回路和二回路流体的密度和比热恒定;
- (3) U型金属管的热导率恒定。

则蒸汽发生器的集中参数模型如下所示:

$$\frac{d\Delta T_p}{dt} = \frac{1}{\tau_p} (k_{pm} \Delta T_m + k_{pc} \Delta T_{hl} - \Delta T_p) \quad (8)$$

$$\frac{d\Delta T_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} (k_{mp} \Delta T_p + k_{ms} \Delta P_s - \Delta T_m) \quad (9)$$

$$\frac{d\Delta P_s}{dt} = \frac{1}{\tau_{ps}} (k_{psm} \Delta T_m - k_{psy} \Delta y - \Delta P_s) \quad (10)$$

式中: ΔT_m —金属管温度, ΔP_s —蒸汽压力, $\Delta \mu$ —气门开度变化。

1.4 反应堆功率控制模块

由于存在燃料和冷却剂温度的负反馈作用,反应

堆堆芯本身是个自稳定的系统,因此在反应堆正常情况下不需要功率控制系统也能稳定运行。但是当反应堆受到的扰动比较大时,如果仅依靠反应堆的负反馈效应,则达到稳定的时间将会很长,这对核电机组的稳定运行极为不利,因此需要利用反应堆功率控制模块,缩短核电机组内部的暂态过程。

其控制框图如图2所示^[13]。

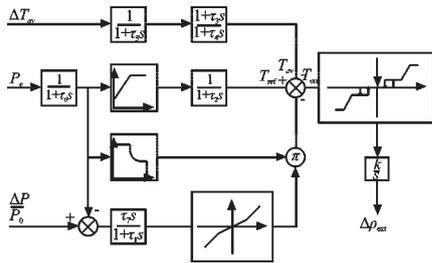


图2 反应堆功率控制模型

P_e —发电机有功出力; ΔT_m —回路平均温度; T_{err} —温度偏差

1.5 汽轮机模块

核电机组和普通火电机组的汽轮机模型基本相同,差异主要在于容积时间常数^[14-15],简化的核电机组汽轮机模型如图3所示。

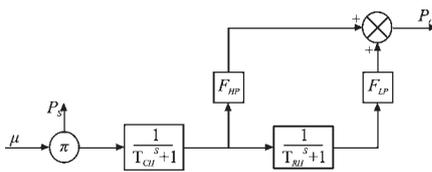


图3 汽轮机模型

μ —气门开度; T_{CH} —高压缸容积常数; F_{HP} —高压缸出力占比; T_{RH} —再热时间常数; F_{LP} —中低压缸出力占比; P_t —机械出力

1.6 调速器模块

调速器采用通用的功频电液调速器模型,其框图如图4所示。

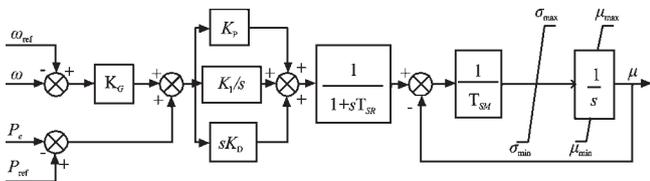


图4 调速器模型

K_G —速度调节器常数; T_{SR} —速度继电器常数; T_{SM} —油动机常数; σ_{max} , σ_{min} —气门速率极限; μ_{max} , μ_{min} —气门位置极限

1.7 核电机组模拟中长期负荷跟踪以及负荷阶跃

目前国内的核电机组普遍带基荷运行,但是随着国家积极建设核电,电网中核电比例的不断增长,原本不参加调峰的核电机组也将逐步参与调峰运行^[16-17],因此

在建立了核电机组中长期数学模型的基础上,有必要研究核电机组在负荷跟踪以及负荷突变时的运行情况。现在的核电机组在设计时就考虑了负荷跟踪的要求,一般都具有10%负荷阶跃和5%/min的负荷跟踪能力。

在 $t=40$ s 时,功率参考值 P_{ref} 从 75% 以 5%/min 的速率线性增加;在 $t=160$ s 至 $t=360$ s 间, P_{ref} 稳定在 85%; $t=360$ s 时, P_{ref} 从 85% 以 5%/min 的速率线性减少;至 $t=480$ s 时, P_{ref} 保持恒定。在该过程中核电机组的出力跟踪过程如图5所示。

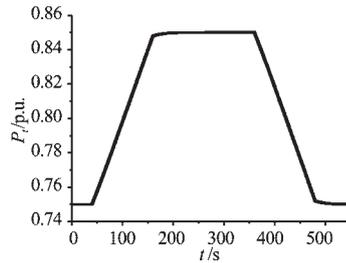


图5 功率参考值线性变化过程中核电机组机械功率

在 $t=10$ s 时,功率参考值 P_{ref} 从 80% 阶跃至 90%;在 $t=70$ s 时, P_{ref} 从 90% 阶跃至 80%。在该过程中核电机组的出力如图6所示。

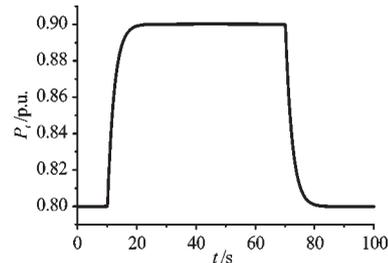


图6 功率参考值阶跃过程中核电机组机械功率

通过仿真可知,核电机组在功率参考值线性变化和阶跃变化时都能很好地跟踪功率的变化,这证明了本研究所建立的适用于电力系统中长期稳定性分析的核电机组数学模型的正确性。

2 适用于电力系统暂态稳定分析的核电机组数学模型

前面所建立的核电机组数学模型虽然已经在前人的基础上进行了简化,但是还是存在阶数太高的问题,因此根据不同的研究目的,还可以将核电机组数学模型进行进一步的简化。下面将通过单机无穷大系统的仿真,证明在电力系统暂态分析中,核电机组的机械出力可以当作恒定。

单机无穷大系统如图7所示^[18]。

在 $t=1$ s 时,母线2处发生三相接地短路故障, $t=1.1$ s 时,故障清除,按照上文所建立的模型,核电机组

的响应如图8所示。

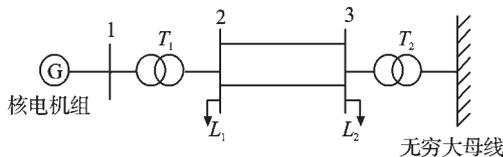


图7 单机无穷大系统

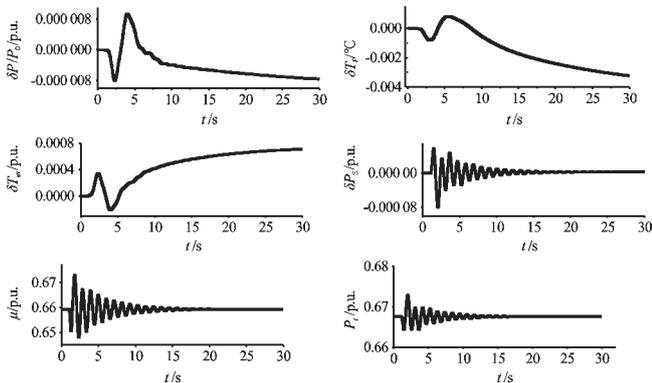


图8 暂态过程中核电机组的响应

从仿真结果可以看到,母线2处发生三相接地短路故障后,如果故障在0.1 s内切除,则核电机组的机械出力 P_1 在整个暂态过程变化很小,在1%之内,可以近似认为恒定不变。

核电机组输出到电网的唯一变量就是机械功率,而且在暂态过程中,核电机组内部的其他变量的变化也非常小,因此,在电力系统暂态稳定性分析中,可以简化核电机组的数学模型,近似认为其出力是恒定的,即省去反应堆芯、蒸汽发生器等建模环节,有效降低有核电机组参与的电网的运算维数。

3 结束语

在前人建立的核电机组数学模型的基础上,本研究根据电力系统不同过程仿真的特点,进行了相应的简化,分别建立了适用于电力系统中长期稳定分析和暂态稳定分析的核电机组数学模型,并得到了如下的结论:

(1) 核电机组具有一定的负荷跟踪的能力,能适应5%/min线性变化和10%阶跃变化的功率跟踪。

(2) 在电力系统暂态稳定性分析中,核电机组的功率输出变化很小,且在暂态过程中核电机组内部的其他变量的变化也都非常小,因此在电力系统暂态稳定性分析中,可以简化核电机组的数学模型,将其当作机械功率恒定的发电机处理。

参考文献(References):

- [1] 中国核电. 稳步前行中面临更高要求[EB/OL]. [2013-05-29]. <http://news.bjx.com.cn/html/20130529/436966.shtml>.
- [2] KERLIN T W, KATZ E M. Pressurized Water Reactor Modeling for Long-term Power System Dynamic Simulation[R]. EPRI Final Report EL-3087;1983.
- [3] 张学成,胡学浩,周修铭,等. 具有核电模型的中期动态模拟程序开发及大型核电站与电力系统相互影响的研究[J]. 电网技术,1995,19(2):5-10.
- [4] 张学成. 用于电力系统动态模拟的压水堆核电站数学模型[J]. 电网技术,1990,11(4):71-77.
- [5] 赵洁,刘涤尘,吴耀文. 压水堆核电厂接入电力系统建模[J]. 中国电机工程学报,2009,29(31):8-13.
- [6] 施希,刘涤尘,吴萍,等. 基于PSASP的压水堆核电站堆芯建模及仿真研究[J]. 核动力工程,2009,30(3):126-130.
- [7] 赵洁,刘涤尘,熊莉,等. 基于PSASP自定义模型的核电机组动态响应仿真[J]. 核动力工程,2010,31(3):113-118.
- [8] 赵洁,刘涤尘,欧阳利平,等. 大型压水堆核电机组与电网相互影响机制的研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(1):64-70.
- [9] 熊莉,刘涤尘,赵洁,等. 大型核电站的建模及接入电网的相互影响[J]. 电力自动化设备,2011,31(5):10-14.
- [10] ICHIKAWA T, INOUE T. Light water reactor plant modeling for power system dynamics simulation[J]. **IEEE Transaction on Power System**, 1988,3(2):463-471.
- [11] INOUE T, ICHIKAWA T, KUNDUR P, et al. Nuclear plant models for medium- to long-term power system stability studies[J]. **IEEE Transaction on Power System**, 1995,10(1):141-147.
- [12] 高慧敏,孙蓉,徐政. 田湾核电机组动态模型研究及其对江苏电网系统扰动的响应分析[J]. 华东电力,2006,34(5):6-9.
- [13] 张建民. 核反应堆控制[M]. 北京:原子能出版社,2009:148-152.
- [14] 宋百玲,曹照,宋恩哲. 核动力汽轮机甩负荷建模与仿真分析[J]. 汽轮机技术,2008,50(4):265-266,278.
- [15] 于仁达,阎志刚,楼安平,等. 核电站汽轮机数学模型[J]. 核动力工程,1999,20(1):76-78.
- [16] 马习册. 探讨大型压水堆核电机组参与电网中间负荷调峰[J]. 现代电力,2007,24(4):28-33.
- [17] 赵洁,刘涤尘,雷庆生,等. 核电机组参与电网调峰及与抽水蓄能电站联合运行研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(7):1-6.
- [18] 于群,曹娜. MATLAB/Simulink 电力系统建模与仿真[M]. 北京:机械工业出版社,2011:127-134.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

黄岳峰,徐政. 电力系统不同过程仿真中的核电机组数学模型研究[J]. 机电工程,2013,30(12):1546-1549.

HUANG Yue-feng, XU Zheng. Mathematical model of nuclear power plants for different power system processes[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(12): 1546-1549.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>