

水电站水机电系统振动特性和稳定性研究综述

周建旭 索丽生

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 综述了国内外水机电系统振动特性和稳定性研究中采用的水力、机械、电力系统的数学模型以及水机电系统联合分析问题的提出和研究进展。指出现有研究虽已尽可能考虑了各系统动态特性之间的相互影响,但仍存在一定的简化或不完善之处,特别是关于水力系统的高阶振荡特性与电力系统低频振荡的相互影响研究较少,提出了几个有待深化研究的问题。

关键词 水力系统;机械系统;电力系统;振动特性;稳定性分析

中图分类号 :TV734 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2007)03-0086-04

Review of research on vibration characteristics and stability of hydro-mechanical-electrical system of hydropower station/ZHOU Jian-xu, SUO Li-sheng(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : A review was made of some advances in comprehensive analysis of vibration characteristics and stability of the hydro-mechanical-electrical system by use of the mathematic models for the hydraulic system, the mechanical system, and the electrical system at home and abroad. It is pointed out that, although the mutual effect of the dynamic characteristics of each system has been taken into account as much as possible, a certain simplification has been made and there are still some disadvantages in current research, especially, little research has been done on the interaction between the high-order oscillations of the hydraulic system and the low-frequency oscillations of the electrical system. Finally, some problems needed for further study were put forward.

Key words : hydraulic system; mechanical system; electrical system; vibration characteristic; stability analysis

近年来我国已建、拟建的常规水电站和抽水蓄能电站装机容量较大,在电力系统中占较大比重,水头较高,引水或尾水道较长。因此,水力系统的高阶振动有可能和电力系统的低频振荡周期相近,电力系统的振荡特性和水力-机械系统的振动特性相互影响,可能引起水机电系统的共振,同时有必要考虑电力系统及其所包括的不同负荷特性对水电站水力-机械系统稳定性的影响。上述各方面的研究,特别是考虑电力系统影响的水力-机械系统的振动特性和稳定性研究,涉及知识面广,研究成果较少,有待进一步研究。

电力系统的扩大以及电网峰谷差的增长,要求充分抑制水机电系统的共振。在国内外的水电站运行实践中,经常遇到涉及水机电系统振动特性和稳定性的事例或事故^[1-2]。文献^[3]指出水电站最常见的扰动是尾水涡带扰动,当扰动的频率与发电机电磁频率一致时,引起功率摆动,即电力系统的低频振

荡;当与压力钢管内水体的固有频率一致时,将引起钢管水压的强烈波动,进而引起功率摆动和钢管振动,还可能激发钢管的结构共振。实际表明,水电站的水力系统、机械系统和电力系统存在相对独立的振动和稳定性问题,同时,在一定条件下各系统之间的动态特性相互影响,可能引起系统过大的振动和机组的不稳定运行,并可能影响电力系统的安全性。因此,在对水电站特别是长引水式水电站进行振动特性和稳定性研究时,不仅需要分别针对水力系统、机械系统和电力系统进行相对独立的研究,而且应考虑各系统之间存在的必然联系,研究各系统动态特性的相互影响,即进行水机电系统的整体振动特性和稳定性研究。

1 水机电系统振动特性和稳定性研究进展

1.1 各系统的数学模型

水机电系统的振动特性和稳定性研究要求分别

建立水力系统、机械系统和电力系统的数学模型,并且充分考虑相互之间的关系。

1.1.1 水力系统的数学模型

因分析研究的侧重点和对水力系统的重视程度不同,描述有压管道内水体振动特性的数学模型存在一定的差异。1992年IEEE工作组^[4]归纳了几种适合于电力系统研究的压力管道内水体的数学模型,包括不考虑水体弹性的非线性模型和考虑摩擦的弹性模型等;1993年Vournas等^[5]采用状态矩阵建立了描述单管多机系统输水管道内水体的总状态矩阵,同时也考虑了刚性和弹性两种模型;1994年Jaeger等^[6]和Hannett等^[7]对水力系统模型的结构和部分参数进行现场测试,并应用于水电站的动态研究中;国内结合水电站压力管道内水体的刚性模型和弹性模型,开展了水电站水力-机械系统的稳定性研究和调节控制等方面的多项研究工作^[8]。

运用阶数不同的压力管道内水体的数学模型形成相应的传递函数或状态方程的方法主要有4种:①模型1:考虑水体弹性和压力管道弹性,在全频域内描述压力管道内水体的振动特性^[9];②模型2:从频域出发,依据 $\sinh x$ 和 $\cosh x$ 的二阶近似表达式提出压力管道内水体弹性模型的低阶近似格式^[10-11];③模型3:应用非线性函数 $\tanh x$ 的泰勒展开式,根据实际需要得到各阶弹性模型^[8],该模型在实际中应用较广;④模型4:应用非线性函数 $\tanh x$ 的连乘展开式,得到保留 $\tanh x$ 所有零点和极点的各阶弹性模型^[1]。其中模型1适用于频域分析,模型2~4基于多项式或连乘式展开处理,若选择较高的模型阶数时不易解耦,对于单管单机系统或低阶弹性模型较为适用。

1999年Souza^[12]应用差分格式对压力管道内水体的运动方程和连续方程离散化,得到描述压力管道内水体的非线性差分方程,同时引进压力管道等效电路的思路讨论压力管道内水体的数学模型。

综上所述可知,已有的水力系统数学模型在应用中存在一定的局限性,不易考虑电力系统的影响;采用不易解耦的低阶弹性模型,不能依据实际要求直观地反映水力系统高阶振动特性。

1.1.2 机械系统的数学模型

水电站机械系统主要包括水力机组和调速器等。文献[8]详细讨论了机组和各种调速器的模型,广泛应用于水电站的运行和控制领域。

1.1.3 电力系统的数学模型

对于电力系统而言,主要考虑发电机、励磁机和负荷的数学模型。对于水轮发电机组(隐式机)可采用IEEE推荐的5阶综合稳定计算模型^[13];励磁系

统应根据需要选择合适的数学模型,若进行电力系统的动态分析,可采用较简单的典型模型^[13];负荷是电力系统的重要组成部分,常用的负荷分析模型包括静态负荷模型和动态负荷模型^[13],电力系统负荷的动态特性主要取决于感应电动机的暂态过程。

1.2 理论研究进展

1.2.1 水电系统振动特性及稳定性的简化研究

在水电站的水机电系统中,鉴于水力系统的时间常数通常远大于电力系统的时间常数,研究水力系统的动态特性时可认为电力系统已进入稳态阶段,而研究电力系统的暂态过程时可近似认为水力系统处于稳态阶段。因此,分别针对水力系统、机械系统和电力系统进行相对独立的研究至今已经取得了较大进展,理论已趋于完善。然而,若研究电力系统的长期动态过程,上述简化研究则可能不能真实地反映系统的动态特性^[14-15]。

国内外此类研究一般有所侧重,如:①应用水力振动理论,侧重研究压力管道内水体振动特性,包括水力振动特性的评价、流固耦合振动和水力振动的案例分析等^[16-17];②简单考虑电力系统的影响,即电力系统等值为恒定电磁功率或线性变化的电功率,进行水力-机械系统的小扰动和水力干扰稳定性分析^[8];③不考虑或考虑简化的水力系统,进行电力系统的低频振荡研究和稳定性分析^[18-19]。至于水力系统振动特性对电力系统低频振荡阻尼的影响,以及电力系统低频振荡对水力-机械系统振动特性和稳定性分析有何影响,均未作分析。

1.2.2 水电系统联合分析的提出和研究进展

李敬恒等^[20]提出水电站运行涉及水力、机械、电力系统之间的固有联系,各机组之间的水力联系取决于水力系统的布置,各机组之间的电力联系取决于水电站的接线方式以及在电力系统中的位置。谷口治人等^[1]指出,在水头较高和输水道较长的抽水蓄能电站或大容量常规水电站的动态分析中,必须充分考虑压力管道内水体的弹性模型阶数(3阶或3阶以上),以便能够较精确地分析水力系统和电力系统的动态特性。综合研究水力、机械和电力系统之间的相互影响。鉴于抽水蓄能电站发电和抽水工况特性的差异,这一点显得尤为重要。基于此,谷口治人等分析了在电力系统影响下压力管道内水体弹性模型阶数的选择,通过数值计算和仿真试验,研究了水力系统、机械系统和电力系统之间动态特性的相关关系,初步讨论了水力系统模型对低频振荡阻尼的影响。

IEEE工作组^[4]认为,在特定条件下水电站稳定分析需进一步研究包括尾水管脉动在内的水力-机械系统动态特性和电力系统振荡之间的相互作用,

并要求相应的数学模型必须尽可能反映水电系统的整体特性。Vournas 等^[5]针对一管多机的水电站,考虑机组间的水力联系和电力联系,初步讨论了不同接线方式对各机组运行稳定性的影响,结果表明对于多机共管路的水电站,除了存在必然的水力干扰以外,各机组采用单元接线或扩大单元接线、电站单独运行或并网运行时,水电站的运行稳定性存在较大的差别。沈祖诒等^[8]认为绝大多数水轮发电机组是并网运行的,若机组与大电网相连的输电线较长,电气联系相对较弱,阻抗较大,容易形成弱阻尼系统,产生低频振荡(机电振荡)。为此,依据压力管道内水体、调速器以及发电机和励磁机的数学模型,研究了单机无穷大系统的振荡模式,讨论了水轮机调速器 PI 调节对弱阻尼系统的影响,并采用状态反馈控制以改善系统低频振荡。曹荣章等^[15]分析了在电力系统发生低频振荡的情况下三峡水电站机组调速系统的动态特性,从电力系统低频振荡产生的机理出发,寻求调速系统对低频振荡产生抑制作用的控制策略,仿真研究了调速器参数不同取值和不同运行参数对低频振荡的影响。

文献[14, 21-23]综合了水力系统和机械系统的几种线性或非线性模型,结合电力系统各部分的数学模型,探讨了水力系统对电力系统低频振荡的影响,讨论了系统的各振荡模式与状态变量之间的相关关系以及特征值关于其他参数的灵敏度,分析了不同水力系统模型及参数对水力系统及转子振荡阻尼的影响。

文献[24]建立电力系统直观线性化模型和水电站水力系统弹性水击线性化等效电路模型,研究抽水蓄能电站小扰动稳定的特殊问题;同时基于线性化水电整体数学模型对具有一元水力系统的并网或独立运行单机系统进行了研究。文献[25]基于水力系统的特征线法以及发电机、励磁机、电网模型,建立了水机电联合仿真的整体数学模型,进行了复杂水系统的单机无穷大系统短路扰动过程仿真计算。文献[26]建立了包含水力瞬变过程、机械运动过程和电气过渡过程的完整的非线性数学模型,研究了负载阶跃扰动下,励磁调节、调速器调节以及水力系统对转速调节品质的影响,比较分析发电机分别采用恒定力矩、恒定功率和三阶模型时的小扰动仿真过程,还分析了运行机组分别与孤立小电网相连或与无穷大电网相连时的水力干扰过程。

综上所述可知:在水机电系统振动特性和稳定性研究中虽已尽可能考虑了各系统之间动态特性的相互影响,但仍存在不同程度的简化、侧重或不完善之处,并且各系统之间振动特性的相互影响的研究

较少。在研究过程中,水力系统一般采用从泰勒展开式或保留零点和极点的连乘式得到的弹性模型,相应的高阶弹性模型不易解耦,不能明显反映管道内水体的高阶频率特性,使其应用存在一定的局限性,水力系统和电力系统负荷特性对电力系统低频振荡及稳定性的影响研究不够完善;对于采用一管多机布置和扩大单元接线的系统,由于各机组之间既存在水力联系,又存在电力联系,相应的水机电系统振动特性和稳定性研究相对缺乏。另外,抽水蓄能电站中因可逆式机组的“S”形特性引起的水机电系统振动和不稳定问题反映较多,而实际研究很少。

1.3 试验研究进展

国内外已开展了大量的试验研究,取得了一定的研究成果,主要包括以下两方面内容。

a. 原型观测试验^[2-3]。在水电站实际运行中,进行效率试验、稳定性监视等原型观测试验,以掌握电站的实际运行情况和各系统的动态特性,及时发现和解决可能存在的问题。实践表明,振动和稳定性问题较多,应该引起足够的重视。

b. 室内试验模拟^[27-28]。在试验室内构建水电站水机电系统整体试验装置,开展试验研究。已有研究多侧重于水力-机械系统。水力-机械系统和电力系统动态特性的相互影响,以及电力系统负荷对系统稳定性的影响研究较少。

2 研究方向

针对国内外在水机电振动特性和稳定性研究方面的不足,认为以下几个方面应作进一步研究。

a. 压力管道内水体弹性模型的研究。采用合适的数学分析方法,建立适合于水机电联合分析且易于解耦的描述压力管道内水体振动特性的弹性模型,以直观反映压力管道内水体的各阶振荡特性。

b. 可逆式机组自激振动特性研究。应用非线性振动理论和分析方法,研究抽水蓄能电站可逆式机组产生自激振动的机理,进而建立描述可逆式机组“S”形特性的基本方程,以分析可逆式机组自激振动引起的水机电系统振动和稳定性问题。

c. 水机电系统振动特性和稳定性研究。考虑采用不同阶数的弹性模型来描述压力管道内水体的振动特性,研究其对水力-机械系统动态特性和电力系统低频振荡阻尼的影响,结合试验模拟,分析不同特性的负荷对系统稳定性的影响;结合双机共管路系统建立扩大单元接线数学模型,考虑两机组之间的水力耦合和电力耦合,研究扩大单元接线对电力系统低频振荡阻尼的影响,以及水力-机械系统和电力系统动态特性的相互影响。

3 结 语

对于水头较高和输水道较长的常规水电站和抽水蓄能电站,水力系统的高阶振动周期有可能和电力系统的低频振荡周期相近,为了反映水力系统的高阶振荡特性和水力、机械、电力系统振动特性的相互影响,有必要对水电站水机电系统的振动特性和稳定性进行研究。此类研究涉及知识面广,研究成果相对较少,有一些问题尚未完全解决,有待进行深入研究。

参考文献：

[1] 谷口治人,长尾待士,木通笠博正.安定度解析のための揚发电所モデルの開発[J].电气学会论文 B,1991(平成3年),11(2):197-203.

[2] 王仲.溪口抽水蓄能电站机组振动监视系统及动平衡试验[C]/《水电站机电技术》编辑部.水电站机电技术:水利水机电技术年会论文集.天津:《水电站机电技术》编辑部,2002:60-61.

[3] 迟斌.水轮发电机组振动浅析[C]/《水电站机电技术》编辑部.水电站机电技术:水利水机电技术年会论文集.天津:《水电站机电技术》编辑部,2002:18-22.

[4] IEEE working group. Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(1):167-179.

[5] VOURNAS C D, ZAHARAKIS A. Hydro turbine transfer functions with hydraulic coupling[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1993, 8(3):527-531.

[6] JAEGER E D, JANSSENS N. Hydro turbine model for system dynamic studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(4):1709-1715.

[7] HANNETT L N, FELTES J W. Field tests to validate hydro turbine-governor model structure and parameters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(4):1744-1751.

[8] 沈祖诒,田树棠,支培法.水力机械优化设计和计算机辅助分析[M].南京:河海大学出版社,1995.

[9] WYLIE E B, STREETER V L, SUO Li-sheng. Fluid transients in systems[M]. New Jersey:Prentice-Hall Inc,1993.

[10] SMITH J R, ROBBIE J F. Assessment of hydroturbine models for power-systems studies[J]. IEE Proc,1983,130(1):1-7.

[11] MARGOLIS D L, YANG W C. Bond graph models for fluid networks using model approximation[J]. J of Dynamic Systems, Measurement and Control,1985,107:169-175.

[12] SOUZA O H, Jr, BARBIERI N. Study of hydraulic transients in hydropower plants through simulation of nonlinear model of penstock and hydraulic turbine model[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1999,14(4):1269-1272.

[13] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York:McGraw-Hill Companies Inc,1994.

[14] 卫志农,陈剑光,潘学萍,等.水机电系统相互作用研究[J].电力系统自动化,2000,24(24):26-29.

[15] 曹荣章,王力科,曾继伦.三峡电站调速系统对电力系统低频振荡的影响[J].电力系统自动化,1996,20(12):4-9.

[16] 周建旭,索丽生,郭锐勤.水电站水力振动实例分析[J].水力发电学报,1998,17(4):50-55.

[17] 索丽生,周建旭,刘德有.水电站有压输水系统的水力共振[J].水利水电科技进展,1998,18(4):12-14.

[18] 赵书强,常鲜戎,潘沿江,等.多机系统低频振荡模式阻尼分配规律分析[J].电网技术,1999,23(7):26-27.

[19] 杨艳,赵书强.负荷特性对电力系统低频振荡阻尼的影响[J].电力自动化设备,2003,23(11):13-16.

[20] 李敬恒,刘昌玉.水电站水机电过渡过程数字仿真研究[J].水电能源科学,1989,7(2):113-119.

[21] 潘学萍,鞠平,卫志农,等.水力系统对低频振荡的影响[J].电力系统自动化,2002,26(2):24-27.

[22] 陈舟,陈寿孙,张中华,等.水力系统模型对电力系统暂态稳定分析的影响[J].清华大学学报:自然科学版,1996,36(7):13-18.

[23] 陈舟,刁勤华,陈寿孙,等.水力系统模型对电力系统低频振荡分析的影响[J].清华大学学报:自然科学版,1996,36(7):67-72.

[24] 刘宪林.基于同步机和水系统详细模型的电力系统小扰动稳定研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2002.

[25] 高慧敏,刘宪林.基于详细水机电模型的水电系统动态过程仿真[J].系统仿真学报,2003,15(4):469-471.

[26] 赵桂连.水电站水机电联合过渡过程研究[D].武汉:武汉大学,2004.

[27] 杨建东,赖旭.武汉大学水电站过渡过程与控制实验室[J].国际电力,2001,23(3):58-60.

[28] 杨建东,李进平,王丹,等.水电站引水发电系统过渡过程整体物理模型试验探讨[J].水力发电学报,2004,23(1):56-63.

(收稿日期 2006-10-20 编辑 骆超)

(上接第 66 页)

参考文献：

[1] 袁庚尧,于伦创.全国病险水闸除险加固专项规划综述[J].水利水电工程设计,2003,23(3):6-9.

[2] 文恒,智泓,牟献友.水闸消能防冲设计条件的确定[J].水利水电科技进展,2005,25(6):17-20.

[3] 文恒,王永利,郑锦麟.灌区水闸海漫段柔性材料加糙防冲效果的试验研究[C]/中国农业工程学会农业水土专业委员会.农业水土工程科学.呼和浩特:内蒙古教育出版社,2001:366-372.

[4] 毛昶熙,周名德,柴恭纯.闸坝工程水力学与设计管理[M].北京:水利电力出版社,1995:77.

[5] 华东水利学院.水工设计手册:泄水与过坝建筑物[M].北京:水利电力出版社,1987:23.

[6] 王晋军.粗糙床面的阻力特性[J].水动力学研究与进展:A辑,1992,7(2):132-136.

(收稿日期 2006-10-16 编辑 骆超)