

# 基于神经网络的实时仿真在新型调速器研制中的应用

杨炳良

(中国华电集团公司福建分公司,福州 350000)

**摘要:**依托中国华电集团公司福建分公司棉花滩水电站 4 台调速器的更新改造,围绕水电机组一次调频功能对电网稳定和重要的作用,提出了兼顾快速性和稳定性的水轮机调速器一次调频新的调节模式及协调控制策略,在建立基于神经网络的水轮发电机组非线性模型的基础上,研制满足国际标准的变参数功率调节与变参数功率前馈控制相结合的复合控制模式的新型调速器,并取得成功,解决了棉花滩水电站目前调速器关键部件主要依赖进口产品问题。

**关键词:**水轮机调速器;神经网络;非线性模型;实时仿真

**中图分类号:**TV 734

**文献标志码:**A

**文章编号:**1674-1951(2017)12-0014-05

## 0 引言

棉花滩水电站系国家九五重点工程,为中国华电集团公司全资的国有大型水电厂,2001 年 4 月正式投产发电。其水轮机调速器采用德国福伊特(VOITH)公司生产的 VGC211 型微机调速器,该调速器以可编程序控制器为核心,采用总线插入式模块,双中央处理器(CPU),64KB 存储器(EPROM),功率控制采用线性控制器(PI)调节规律,频率控制采用比例积分微分调节器(PID)调节规律,开度控制为电手动控制。在专用软件的支持下,主要可实现的控制方式包括:空载频率控制、并网频率控制、并网功率控制、孤网频率控制和开度控制。

随着时间的推移,原有调速器已运行 10 年以上,系统元器件出现老化,发生故障的概率加大。维护中存在零部件及备品备件采购成本高,售后服务不及时,售后服务成本增加等诸多问题。因此,利用国内近年来在调速器生产制造水平方面的科技发展,寻找并研制国产新型调速器并替换进口设备具有显著的理论意义和实际应用价值。

## 1 调速器设计原则

### 1.1 水轮机调速系统特点

水轮机调速系统是以水轮机调速器为控制器,以水轮发电机组及引水系统为控制对象共同构成的频率或功率闭环控制系统,其性能好坏将直接关系到水电厂的安全运行和供电品质。与其他控制系统显著的不同点在于作为受控对象的水轮发电机组及

引水系统通常存在着较强的非线性,这意味着在不同的水头、转速和开度下,水轮机的流量特性和力矩特性不能用简单的线性关系描述,因而,表征其特性的传递函数参数将有着很大的变化。

在仅具有速度调节方式的传统水轮机调速系统中,一旦机组并网,调速系统基本可以认为是一开环或接近于开环的系统,其速动性可通过调节器的参数设置实现,而无需考虑系统的稳定性问题。因而调节器参数的选择只需保证在空载工况下的系统稳定性和动态品质即可。然而,对于具有功率调节方式的水轮机调速系统,由于机组并网后始终处于功率闭环工作状态,工况的变化导致对象参数的变化,使得系统的稳定性和动态特性品质均发生较大的变化,有时可能导致系统失去稳定性。因而,对于功率的闭环控制而言,使用固定的调节器参数和前馈参数显然是不合理的。在这种情况下,确定调节器的结构和控制策略,寻找随工况变闭环调节参数和功率前馈参数,是获得快速、稳定的功率闭环控制的关键。

### 1.2 水轮机调速器设计应达到的目标

水轮机新型调速器围绕水电机组一次调频功能对电网稳定和重要的作用,其产品除兼顾快速性和稳定性的一次调频调节模式及协调控制策略,各项性能指标应达到或超过国家标准外,同时应满足先进性、安全性原则,达到电厂“无人值班(少人值守)”的要求。在可靠性、通用性上,采用了高性能、高可靠性的进口可编程控制器,标准模块配置,适于工业环境使用,具有硬件和软件兼容性。配置和原件选型符合计算机控制技术发展迅速的特点,便于功能和硬件设备的扩充升级,同时系统应具有

开放性。

为便于电厂工程技术人员检修维护,设计中采用了容错性原则,即采用故障容错设计以期达到调速器安全、稳定地运行。同时为满足市场和经济要求,新型调速器应充分利用分析和吸收原有调速器的先进的控制策略,保留原有机液系统油和油压装置,尽量减低产品成本、改造成本和后期的运行与维护成本。

2 水轮机调速器一次调频调节模式

在大多数水电机组一次调频试验过程中,往往采用一组专门参数来解决一次调频的速动性问题,事实上是牺牲了一定的稳定性,当电站与大电网解列带地区负荷,不能保证调速系统稳定,从而可能使地区系统进一步瓦解,扩大事故。另一方面,稳定性差的机组并入电网后是靠吸收电网的稳定储备而稳定的,这在一定程度上降低了电网的稳定性。为此有必要对水轮机调速器一次调频的模式进行研究,在保证调节速动性的前提下,保证各台机组的单机

稳定性,保证电网有足够的稳定储备,确保电网的安全运行。

为解决上述问题,本次通过建立“功率与频率的综合控制”、“功率与频率的选择控制”、“一次调频前馈控制”、“功率给定前馈控制”4 种仿真模型(如图 1~4 所示),考察不同的一次调频调节模式下的静态特性及不同调节参数对动态特性的影响、不同控制模式对功率给定的响应。通过分析,得出以下结论。

(1)两种控制方式的静态特性相同,动态特性不同。对功率与频率的综合控制,当频率给定或频率扰动相同时,调差系数速度变动率( $e_p$ )不同,稳定目标值不同,响应时间不同;当功率给定相同时, $e_p$ 不同,稳定目标值相同,响应时间不同;对功率与频率的选择控制,当频率给定或频率扰动相同时, $e_p$ 不同,稳定目标值不同,响应时间相同;当功率给定相同时, $e_p$ 不同,稳定目标值相同,响应时间相同。

(2)对于采用前馈控制的系统,应对前馈的加入量及加入速度进行分析,并根据前馈的加入量及

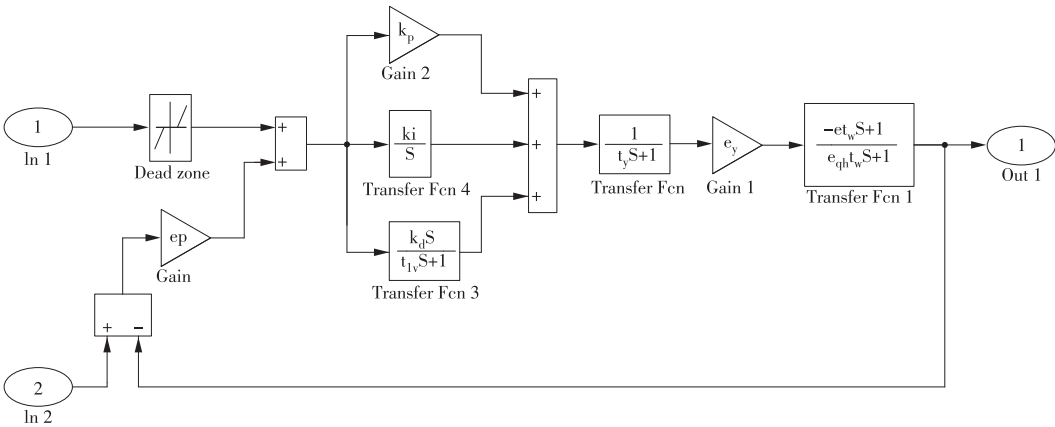


图 1 功率与频率的综合控制仿真模型

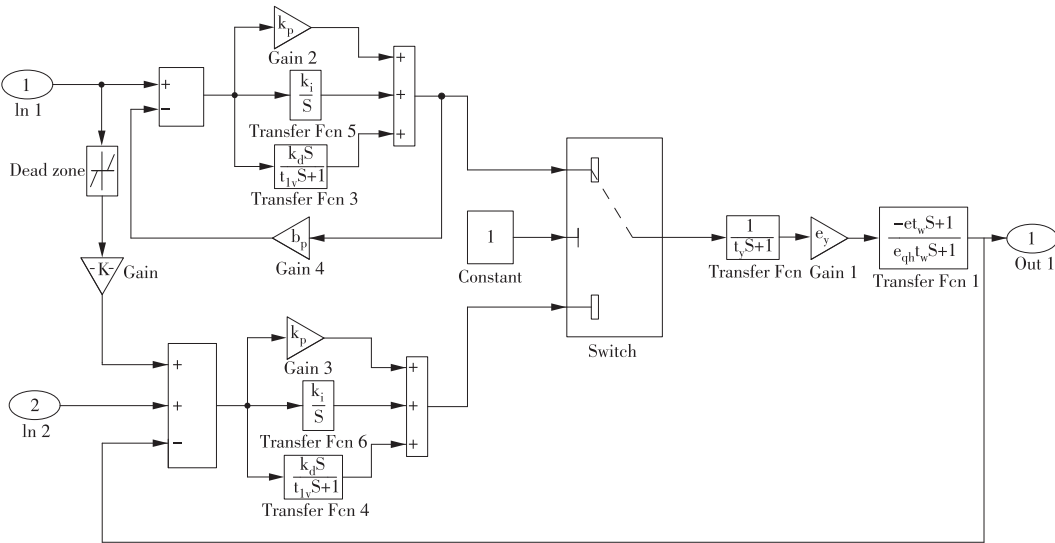


图 2 功率与频率的选择控制仿真模型

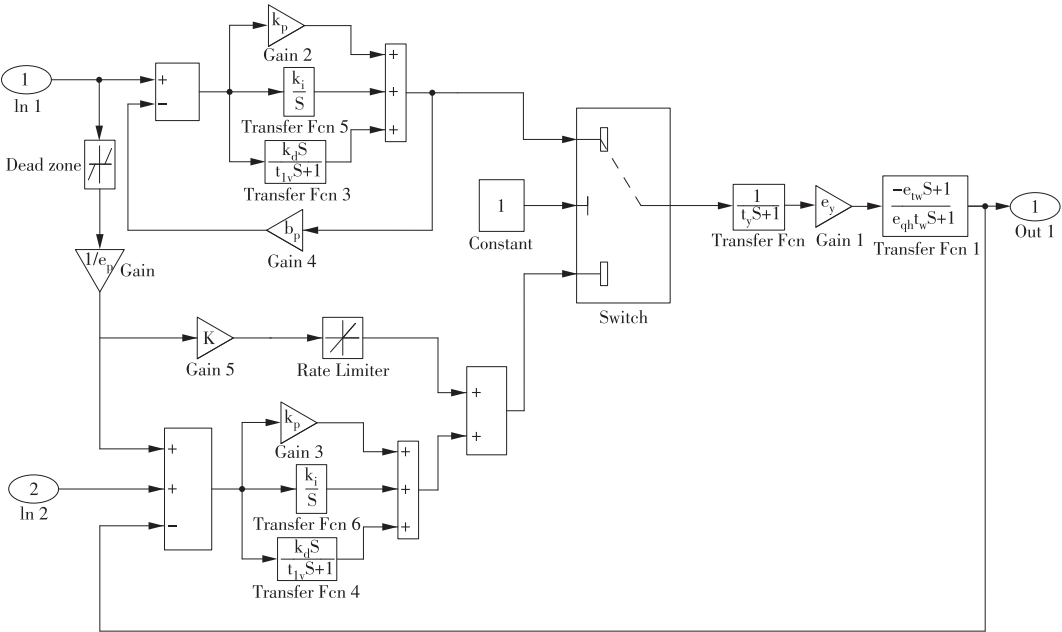


图 3 一次调频前馈控制仿真模型

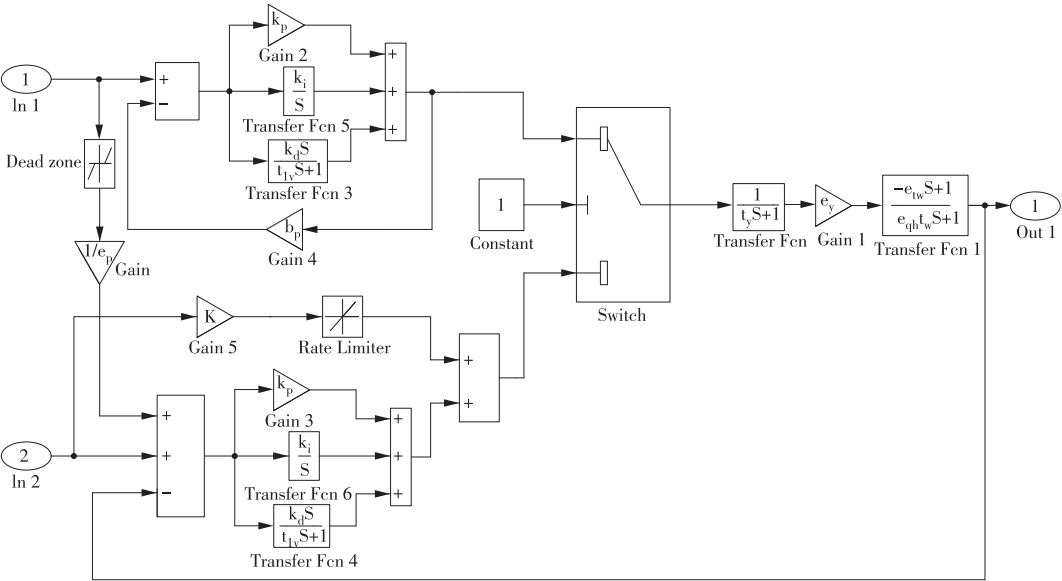


图 4 功率给定前馈控制仿真模型

加入速度的不同进行 PI 参数的合理配置。

研究基础。水轮发电机组的非线性实时仿真建模的基本输入输出关系为如图 5 所示。

(3)在调速器中宜采用功率与频率的选择控制模式。在频率控制时采用 PID 调节;在一次调频和功率控制时采用 PI 调节,并采用前馈控制提高功率控制和一次调频的响应速度。

3 水轮发电机组的非线性仿真模型的建立

在对现有水轮机组的相关资料进行详细分析的基础上,以水轮机模型综合特性曲线及飞逸特性曲线为基础,采用人工神经网络模拟水轮机流量特性和力矩特性,并结合简化的可变采样频率的特征线法模拟引水系统,建立了水轮机调节系统调节对象的非线性模型。此建模更接近于实际调节对象的特性,并以此作为新型调速器及相应调速系统的仿真

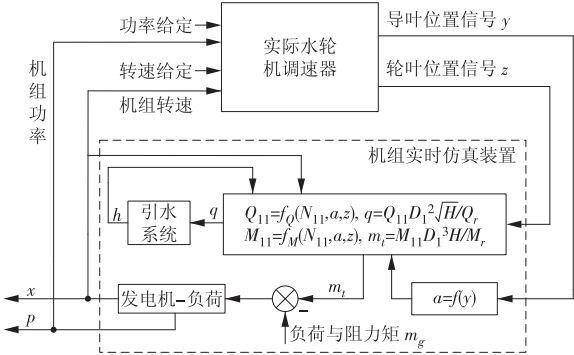


图 5 实时仿真模型示意

图中:虚线框内为机组实时仿真装置的计算模型; $Q_{11} = f_M(N_{11}, a, z)$ 、 $M_{11} = f_M(N_{11}, a, z)$  分别表

示以单位参数表示的水轮机的流量和力矩非线性特性。如果是单调系统,则无需考虑轮叶位置信号 $z$ 。

式中: $Q_{11}$  为单位流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $M_{11}$  为单位转矩,  $\text{N} \cdot \text{m}$ ;  $N$  为出力,  $\text{kW}$ ;  $H$  为水头,  $\text{m}$ ;  $a$  为导叶开度,  $(0 \rightarrow 1)$ 。

在非线性建模中,按照以满足仿真精度和计算量为前提,确定合理的水轮机流量和力矩非线性特性的神经网络模拟方法,研发软件 GraphRead,用于自动处理和读取水轮机模型综合特性曲线和飞逸特性曲线,所获取的数据将作为神经网络训练样本;研发软件 GraphProc,用于扩展模型综合特性曲线的范围,延拓相应的神经网络训练样本,进而对固定结构的 BP 神经网络进行训练,最后形成文件形式表达的神经网络模型(主要是神经网络的各权值和阈值)。并采用简化的、可变采样周期的特征线法,形成引水系统计算模型。最终给出了可用于实时仿真装置的两种调节对象数学模型(即基于线性传递函数的水轮发电机组模型和基于神经网络的非线性水轮机数学模型及改进的特征线法引水系统模型)及其实时仿真计算方法,完整地模拟了水轮发电机组及引水系统。

在水轮机调速系统多功能试验装置上建立的非线性模型和算法,不仅可以对水轮机调速系统进行全面的测试,更重要的功能在于可对调速系统中的调节对象—水轮发电机组进行非线性实时仿真,即可以验证各种新型控制规律、调试调速器软件,也可以在不接入原型机的情况下,辅助帮助选择调速器参数,测试调节系统的动态特性以及各参数指标,克服了原型机试验的缺点以及现场调试的盲目性。

## 4 新型调速器系统结构、调节模式确定

对原有进口调速器的调节模式及控制策略进行了详细的研究、分析和仿真,确定了新型调速器的系统结构和调节模式。

### 4.1 整体结构

综合考虑使用方便、性能优良、可靠性满足要求及备品备件充足的基础之上,新型调速器的主控机采用当今流行的施耐德新型可编程控制器,添加了独立的、基于相同可编程控制器的转速信号测量装置,并设置了相应的操控触摸屏。

### 4.2 设备运行可靠性和稳定性设置

为保证功率反馈闭环调节的稳定性,建立一种依机组的导叶开度,调整功率调节器 PI 参数的适应式变参数功率调节模式,并以仿真为基础,进行参数

寻优,给出典型导叶开度下的优化调节参数。首先在机组多工况点下建立线性化的传递函数模型,并以此为基础,根据闭环系统的数学模型及特点,给出大范围工况变化情形下调节器参数的稳定域。然后,以常规计算机仿真为工具,分别在典型工况点下搜寻调节器的最优参数,并作为适应式变参数功率调节器在不同工作点下调节参数的选择依据。

### 4.3 运行反应快速性配置

采用按工况变功率前馈参数的前馈控制模式,提高功率闭环调节和一次调频的快速性。即在反馈控制的基础上,根据机组的给定功率、电站水头,调整功率调节器前馈参数的适应式变参数,实现功率闭环调节控制模式。其关键点在于确定准确的前馈控制输出,在前馈控制输出准确的前提下(无失调),引入合理、协调的变参数功率前馈控制的功率闭环调节系统,可显著提高功率调节的快速性,大大改善机组一次调频的响应特性。

## 5 实时仿真试验

应用实时仿真试验研究手段,检验和优化新型调速器的控制规律及调节参数。

(1)在调速器生产厂内,利用已建立的水轮机调节系统调节对象的非线性模型,运行于带有转速和功率输出的基于新型 DSP 的实时仿真装置,并与所研制的新型调速器(电气部分)一起构成功率(或速度)闭环控制系统,检验和优化新型调速器的控制规律、控制算法和调节参数。

(2)在实时仿真的支持下,反复完善和优化调速器软件,修正缺陷,直至各项功能和性能满足要求并出厂。

(3)调速器在现场安装完成后,在带有电液随动系统的条件下,根据现场运行的进一步需求,重复上述过程,直至各项功能和性能满足要求。

## 6 新型调速器进行现场试验检测

对新型调速器与真实机组一起构成的功率或速度闭环系统,进行了静态特性、动态特性(包括机组启动、负荷扰动、甩负荷和一次调频等)试验,以检验调速系统的各项性能指标,检测结果:新研制的调速器静、动态特性好,品质优,其构成的调节系统调节稳定、快速,一次调频响应迅速,调节速度快,各项性能指标均优于国家标准 GB/T 9652.1—2007《水轮机控制系统技术条件》规定和华东电网要求的响应性能的要求。现场测试结果见表 1~3。

表 1 新型调速器现场测试成果与国家标准对照

| 技术指标                                     | 国家标准                                      | 实测结果                                         |
|------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 静特性转速死区 ix                               | ≤0.020%                                   | 0.002%                                       |
| 自动开机过程 t <sub>SR</sub> /t <sub>0.8</sub> | ≤5.00                                     | 1.63                                         |
| 空载频率摆动值                                  | 在手动小于 -0.20% ~ +20% 时 ≤<br>-0.15% ~ 0.15% | 手动为 -0.74% ~ +0.1% , 自动<br>为 -0.14% ~ +0.12% |
| 接力器不动时间 Tq                               | ≤0.20 s                                   | 0.08 s                                       |
| t <sub>E</sub> /t <sub>M</sub>           | ≤8.00                                     | 4.27                                         |
| 甩 100% 负荷                                | 波峰数                                       | 1                                            |
| n <sub>min</sub> /n <sub>r</sub>         | 0.900                                     | 0.998                                        |

表 2 新型调速器现场测试与华东电网要求的响应性能比较

| 一次调频响应性能技术指标                                                                 | 华东电网一次调频响应性能要求 | 实测结果 |
|------------------------------------------------------------------------------|----------------|------|
| 一次调频负荷响应滞后时间(即额定水头在 50 m 及以上的水电机组,其一次调频负荷响应滞后时间)                             | ≤4.0           | 1.9  |
| 一次调频负荷达到规定调整幅值时间,机组一次调频的负荷调整幅度应在此时间内达到一次调频的最大负荷调整幅度的 100%                    | ≤15.0          | 2.8  |
| 一次调频负荷稳定时间(在电网频率变化超过机组一次调频死区时开始,此时间内,机组实际出力与机组响应目标偏差的平均值应在机组额定有功出力的 ±3% 以内)。 | ≤45.0          | 2.4  |

表 3 新、老调速器甩 100% 负荷特性比较

| 技术指标                                                                          | 国家标准   | 新调速器实测结果 | 原进口调速器实测结果 |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------|----------|------------|
| 调节时间 t <sub>E</sub> 与转速升速时间 t <sub>M</sub> 的比值 t <sub>E</sub> /t <sub>M</sub> | ≤8.00  | 4.27     | 7.48       |
| 超过稳态转速 3% 额定转速值以上的波峰数                                                         | ≤2     | 1        | 2          |
| 甩负荷后机组的最低相对转速 n <sub>min</sub> /n <sub>r</sub>                                | ≥0.900 | 0.998    | 0.960      |

7 结束语

棉花滩水电站是国家九五重点工程,建设时调速器采用德国 VOITH 公司的 VGC211 型微机调速器,该调速器性能高、运行稳定。但由于技术上的封锁,调速器的维修、部件更换、软件的升级等均需由厂家从德国派专人到现场进行,成本高、耗时长,且一旦出现故障将直接影响电站和电网的安全运行。研制具有国产化技术的产品成为解决行业发展瓶颈的迫切需求。本文介绍了调速器一次调频调节新型

模式、关键技术、协调控制策略以及新型调速器建模、研制、试验的方法和步骤,从另一侧面提出水电厂一次调频技术和调速器制造方法,希望在推动水力机械、动力机械、机电一体化、自动调节系统等领域的科技创新和技术进步有一定的参考价值。  
(本文责编:齐琳)

作者简介:

杨炳良(1967—),男,福建仙游人,工学硕士,高级工程师,从事水力发电行业生产技术和生产管理方面的工作(E-mail:yangbingliang3202@126.com)。

(上接第 13 页)

4 结束语

通过对以上筒仓常用布料设备的介绍以及对其卸煤沟槽密封装置的研究分析,解决了以往困扰筒仓顶部各种形式布料机设备卸煤沟槽密封的问题,以上研究分析方案都已经在工程上应用,达到了预期的抑尘效果,满足了国家环保要求,具有很好的推广价值。

参考文献:

[1]钱锡铭.大型筒仓布料与给料设施的应用现状与选型研

究[J].浙江电力,2016,35(7):57-60,76.  
[2]机械工业部北京起重运输机械研究所.DTⅡ型固定式带式输送机设计选用手册[M].北京:冶金工业出版社,1994.  
[3]宋伟刚.散状物料带式输送机设计[M].沈阳:东北大学出版社,2000.  
[4]刘艳,贺小飞.新型密封防尘式卸料车设计应用研究[J].绿色科技,2016(22):153-154.  
[5]应美珏,梁庚煌.机械化运输工艺设计手册[M].北京:化学工业出版社,1998.

(本文责编:白银雷)

作者简介:

程文光(1978—),男,河南邓州人,工程师,从事电厂辅机设备的设计工作(E-mail:chengwenguang01@163.com)。