

多喷嘴冲击式大型水轮机组的调速器控制与特殊工况运行问题研究

涂振祥

(武汉理工大学工程训练中心, 湖北 武汉 430063)

摘要: 随着国内冲击式机组单机容量的不断增大, 对冲击式机组的稳定、安全运行要求更加严格, 为了满足大型冲击式机组运行的要求, 论文设计了控制偏差和偏差变化率为坐标的控制平面, 提出了基于9区图的增益自适应调节的PID控制方法, 提高了冲击式水轮机组空载并网以及小电网运行时的控制品质。在此基础上, 研究了在冲击式机组的负载运行和小网运行的特殊工况问题, 并提出了相应的解决办法。所提的方法已经应用于实际的冲击式机组调速器系统, 并通过了实验室验证, 即将投入现场试运行。

关键词: 冲击式水轮机; 调速器; 多喷嘴; 控制策略; 九区图

Study on the speed governor control and special operation issues of large-size multi-jet projectile hydro-turbine unit

TU Zhen-xiang

(Training Center of Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: The raising size of single-unit of the domestic projectile hydro-turbine makes the requirements on the stable and safe operation of projectile unit become higher. To meet the demand of the operation of the large-size projectile unit, a plane with respect to the coordination, where the control deviation acts as horizontal axis and the derivative of the control deviation acts as vertical axis, is designed. Based on the above plane, a nine region based adaptive gain regulation of PID control strategy is proposed. This method improves the control quality on no-load connecting-to-grid and the operation in a small grid. Furthermore, the special issues on the loaded operation and operation in a small grid of the projectile unit are studied, and the corresponding solutions are given. The proposed scheme is applied on the speed governor system of the projectile hydro-turbine unit, which is verified by the lab tests. The implemented control system will be put into service recently.

Key words: projectile hydro-turbine; speed governor; multi-jets; control strategy; nine-region control

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)16-0016-04

0 引言

随着冲击式机组制造水平的提高, 国内外开始出现大容量的冲击式水轮发电机组, 单机容量已达到 120 MW^[1]。目前国内正在建设的冲击式水电站的机组采用了六喷针结构^[2], 比过去的同类机组无论是机组容量和复杂程度都有了较大提高。

冲击式水轮发电机组的核心是冲击式水轮机(水斗式和斜击式水轮机), 这种水轮机利用高速水流(射流)冲击转轮叶片作功, 其射流中心线与转轮节圆相切(水斗式)或与转轮平面呈斜射角度(斜击

式)。水斗式水轮机的最高效率稍低于混流式水轮机, 但机组负荷变化时效率曲线平坦, 采用多喷嘴结构时更为突出; 这一机型适用于高水头小流量电站, 与混流式水轮机相比结构简单, 检修维护方便, 而且空蚀和磨损小; 机组甩负荷时折向器(偏流器)快速切断射流, 喷针可缓慢关闭, 这样既可减小机组的转动惯量和避免过高的机组速率上升, 又可降低引水管道的压力上升^[3]。当甩满负荷折向器切断射流或喷针完全关闭时, 与混流式水轮机相比, 机组的阻力矩甚小, 机组转速至最高瞬态转速后, 机组减速缓慢导致机组从甩负荷开始到转速稳定的调节时间较长, 这会导致特殊的控制问题^[4]。

大型冲击式机组多采用立式多喷嘴结构^[5]。冲击

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2008AA05Z214)

式水轮机采用折向器及喷针的双重调节,其控制包括折向器控制、喷针控制、机组启动时喷嘴数及动作方式的选择、机组带负荷时喷嘴数的选择及切换。

除满足常规水轮机调速器的相同技术要求外,冲击式水轮机组还应满足一些特殊技术要求^[6]:如在稳定工况下,多喷嘴冲击式水轮机的对称两喷针的位置偏差,在整个范围内均不大于 2%;冲击式水轮机喷针和折向器控制机构应使喷针和折向器在整个运行范围内,任何两个喷针或两个折向器之间的偏差应小于全行程的 1%;等等。

过去,国内没有与这样的大型冲击式机组配套生产调速器的经验,对于此类机组的运行控制问题,也没有较为深入的研究。本文针对多喷嘴冲击式水轮机组的控制策略与特殊工况运行问题,提出了基于 9 区图的 PID 控制增益自适应调节方法,解决其空载并网问题,并研究了冲击式机组的负载运行和小网运行时的特殊工况问题,为冲击式机组运行品质的提高提供了新的技术手段。

1 适应多喷嘴冲击式机组运行特性的 PID 控制增益自适应调节方法

1.1 PID 控制及其应用于水轮机调速时的局限性

在工业过程控制中,目前采用最多的控制方式依然是 PID 方式。一方面是由于 PID 控制器具有简单固定的形式,在很宽的操作条件范围内,都能保持较好的鲁棒性;另一方面是因为 PID 控制器允许工程技术人员以一种简单而直接的方式来调节系统。现今的绝大多数水轮机调速器采用的都是 PID 控制规律^[7]。常规的 PID 控制系统原理框图如图 1 所示。

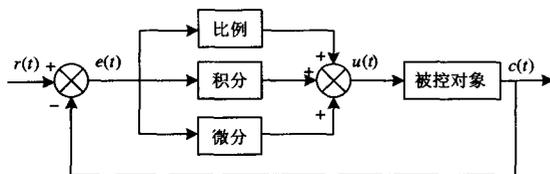


图 1 常规的 PID 控制系统原理框图

Fig.1 Principle block diagram of conventional PID control system

PID 控制器是一种线性控制器,它根据给定值 $r(t)$ 与实际输 $c(t)$ 构成控制偏差: $e(t) = r(t) - c(t)$, 将偏差的比例 (P)、积分 (I)、和微分 (D) 通过线性组合构成控制量,对被控对象进行控制,故称 PID。控制器其控制规律写成传递函数形式为:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left[1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right] \quad (1)$$

式中: K_P 为比例增益; $K_I = \frac{K_P}{T_I}$ 为积分增益;

$K_D = K_P T_D$, T_D 为微分增益。

从上面的分析中可看出,当水轮机调节系统一旦产生误差,控制器立即就发挥控制作用,使被控制量朝着减少误差方向变化。PID 控制的作用是通过 K_P 、 K_I 、 K_D 这三个系数起作用的。这三个系数取值的大小不同,就是比例、积分、微分作用强弱的变化。

根据不同的被控对象适当地整定 PID 的三个参数,可以获得比较满意的控制效果。这种整定参数的过程实际上是对比例、积分、微分三部分控制作用的折衷。

同时,不难发现, PID 控制系统的稳定性和准确性之间存在着矛盾,加大控制作用可使误差减少,准确性得以提高,但降低了系统的稳定性。反之,为保证系统的稳定性,限制控制的作用,又降低了控制的准确性。

对于大容量水电机组,水流惯性时间常数,水头的变化、尾水的波动以及蜗壳中不均匀流场引起的脉动,都是影响机组稳定的重要因素。

水电机组在空载或负载,小负荷或大负荷等运行工况,由于引水管的水压、流向及尾水的波动等因素会造成蜗壳压力大幅度或不规则周期变化,机组的空载自平衡能力非常差,当接力器开度不变的情况下,机组频率摆动有时高达 2 Hz 以上^[8]。如果采用一般的 PID 算法是不可能满足空载快速同期并网的要求,也就是为了解决机组的稳定问题,本文对 PID 算法进行了优化,提出适应系统运行特性的 PID 增益自适应调节方法,以解决机组的空载稳定性或小电网的调节品质。

1.2 基于 9 区图的 PID 增益自适应调节

该方法的基本原理是根据系统状态和某些预先确定的超平面之间的关系来改变系统控制结构,当系统(受控对象)状态穿越系统状态方向空间的预先设定的切换超平面时,控制系统从一个结构自动转向另外一个确定的结构,以保证系统状态变量达到并约束在给定的滑模流形上,并使之自始至终沿着滑模流形滑行至系统状态空间的平衡点,从而使系统达到某个期望的指标。

依据偏差和偏差变化率来调整输出的多点偏差增益控制法; $r(t)$ 定为系统给定的偏差输入, $c(t)$ 为其输出响应,则定义偏差 $e = r(t) - c(t)$, 偏差变

化率为 $e' = (e_i - e_{i-1}) / \Delta t$ ， Δt 为采样周期， i 和 $i-1$ 分别为本次的采样和上次的采样的偏差值，设 $\pm e_0$ 为系统允许偏差（其中： $+e_0$ 为误差上限， $-e_0$ 为误差下限，限内为零带）， $\pm e'_0$ 为系统允许偏差变化率（其中： $+e'_0$ 为误差上限， $-e'_0$ 为误差下限，限内为零带）。

系统的运行特性表征为系统偏差及偏差变化率的大小。将系统偏差及偏差变化率的大小各自分类为 3 种情况。这样的组合变化就有多种情况，每种情况都代表系统的一种工况。根据工况的不同采用相应的控制策略。根据这些由偏差、偏差变化率的组合而形成的多种工况采取相应的控制策略，及时向控制对象进行增益增加或减少，从而达到控制目的和跟踪性能要求。而每一时刻仅对应一种控制策略，因此根据偏差和偏差率实时变化所确定的工况，不断在多种控制策略中切换，直至系统的偏差被控制在预定的范围内。

本文将不同的工况根据偏差及偏差变化率的大小及组合分为 9 个区，类比电压无功控制的 9 区图法，提出下列控制策略，见图 2。

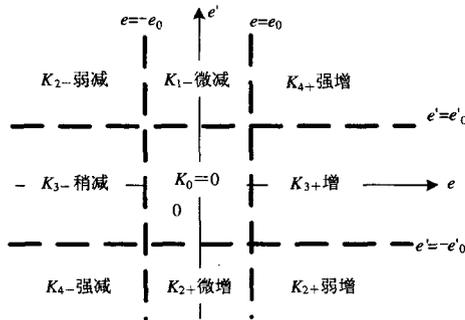


图 2 PID 控制增益自适应调节的 9 区图

Fig.2 Nine region control for the adaptive regulation of the gain of PID control

其中， K_{4+} 到 K_{1-} 等带下标的 K_i 将影响比例增益的大小。即利用它们对比例增益进行修正，达到根据不同工况进行调节的目的。 K_{4+} 代表很大的正向修正量， K_{1-} 代表微小的反向修正量，其余 K_i 的含义类似。

$\pm e_0$ 、 $\pm e'_0$ 为系统允许的偏差及偏差变化率，它们取决于系统精度，要求根据具体调节过程决定。系统动态响应时， K_{3+} 影响系统的延迟时间， K_{2+} 影响系统的上升时间， K_{4-} 影响系统超调， K_{2-} 影响系统的振荡次数，一般在确定了 K_{2+} ， K_{2-} ， K_{4-} 之后， K_{4+} 来调节的值达到减小调整时间的目的。在 K_i 均满足运行条件的情况下， K_0 与

系统的稳态误差有关。一般情况下， $K_{4+} \geq K_{3+} \geq K_{2+} \geq K_{1+}$ ， $K_{4-} \geq K_{3-} \geq K_{2-} \geq K_{1-}$ ， K_0 取较小值使得系统稳态时的振荡频率较小。

将机组的转速和喷嘴反馈的变化速率用一个函数来描述，作为 PID 的被调节量进行运算，达到超前控制机组转速的目的。

本方法具有控制结构自适应和参数自适应的调节功能，自动按工况改变运行参数、PID 调节参数及整机放大系数，使调速系统始终工作在较佳的工况点。

2 冲击式机组的运行问题

2.1 冲击式机组的负载运行

冲击式机组调速器具有负载频率调节模式、负载定开度运行模式和负载恒功率运行模式，负载频率调节模式包括一次调频和小电网运行模式。

2.1.1 负载频率控制

在频率控制状况时采用并联 PID 调节模式，其 PID 调节原理框图如图 3 所示。被调节的信号为频率偏差：

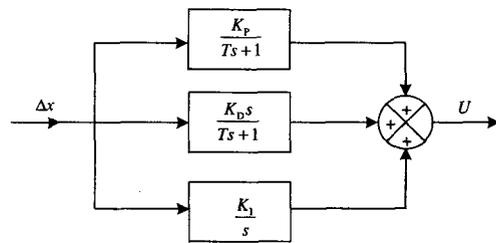


图 3 并联 PID 调节

Fig.3 Regulation based on PID in parallel

$$\Delta x = f_g - f_j \quad (2)$$

或者

$$\Delta x = f_g - f_w \quad (3)$$

其中： f_g 为频率给定（一般为 50 Hz）； f_j 为机组频率， f_w 为电网频率。

2.1.2 负载恒功率运行模式

如图 4 所示，在负载恒功率运行模式下，有功功率给定信号与机组的实际功率信号的偏差值并且

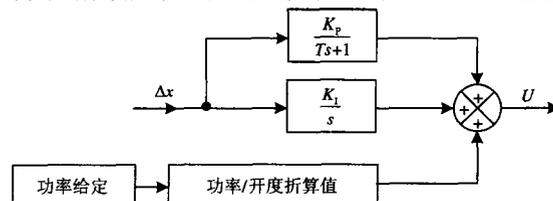


图 4 负载恒功率调节

Fig.4 Regulation based on fixed power of load

叠加频率偏差信号作为被调节信号进行比例积分 PI 运算。另外,有功功率给定信号经功率/开度折算后直接开环作用到输出环节:

$$\Delta x = P_g - P_a \quad (\text{当频率偏差} < E) \quad (4)$$

其中: P_g 为有功功率给定; P_a 为机组实际功率; E 为频率人工失灵区。

2.1.3 负载定开度运行模式

如图 5 所示,在负载定开度运行模式下,开度给定信号与机组喷嘴接力器的实际开度信号的偏差值并且叠加频率偏差信号作为被调节信号进行比例积分 PI 运算。另外,开度给定值直接开环作用到输出环节:

$$\Delta x = Y_g - Y_a \quad (\text{当频率偏差} < E) \quad (5)$$

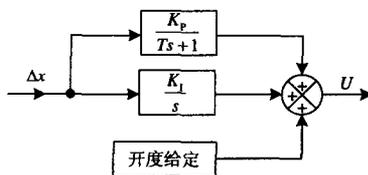


图 5 负载定开度调节

Fig. 5 Regulation of fixed rolling degree of load

其中: Y_g 为开度给定值; Y_a 为机组喷嘴实际开度; E 为频率人工失灵区。

2.1.4 负载运行模式切换及大小网、孤网判定

在这种运行模式下,可通过转速的变化率为依据准确判断机组在大、小电网中运行,并且自动切换运行工况和调节参数,当线路故障或线路开关跳闸,能自动平稳地运行在大、小电网,孤网,厂用电及空载工况。

判断方法是:负载运行时,根据频率的变化以及负荷或开度的调整对频率引起的变化作为判断大小电网的依据,自动改变运行模式:在开度调节或功率调节模式下,当判断为小电网或电网故障自动切换到频率调节模式运行。

当转速变化率超过频率失灵区 N 个周期后,自动切入频率调节模式,并转至小网运行。当频率变化率在频率失灵区范围内,一段时间后(可设定)自动切入开度调节或者功率调节模式,并转至大电网运行。

2.2 冲击式机组的小网运行

由于冲击式机组在运行过程中在不同的负荷下投入的喷嘴数不同,而喷嘴的投切是根据主机厂家或设计院的要求在程序中设定好,而且喷嘴开关机速度非常慢,所以一般冲击式机组不适应小电网运行。冲击式机组在小网运行时必须采用以下两种方法。

2.2.1 喷嘴小网运行

当小网的负荷 $< 30\%$ 时,调速器程序中自动将全喷嘴投入,闭锁喷嘴的切换,以避免由于喷嘴的切换引起负荷的波动,导致小网运行不稳定,折向器设置为最大,并且将喷嘴的最大开度进行限制,小网 PID 的调节参数选择应该使被控机组的频率控制在 50 ± 0.5 Hz 以内。

2.2.2 折向器弃水控制

当小网的负荷较大时,并且负荷突变频繁,负荷经常大幅度变化,由于喷嘴接力器开、关动作较慢,喷嘴接力器不可能跟随负荷的大幅度变化,所以,一般将所有喷嘴投入并固定在某一较大的开度运行,依靠折向器接力器开、关动作快的条件,当小网负荷大幅度变化时,折向器接力器能快速跟随,从而使折向器起到调节负荷的作用。

闭锁喷嘴的切换,全部喷嘴开启到某一较大的开度,将小网 PID 的计算值来控制折向器的开度,小网 PID 的调节参数应该选择使被控机组的频率控制在 50 ± 1 Hz 以内。

3 结论

论文研究了多喷嘴冲击式机组的 PID 控制规律,从提高并网及小网运行的稳定性出发,提出了基于 9 区图增益自适应调节的 PID 控制策略。并针对冲击式机组在运行时需要注意的问题进行了分析,并针对性地提出了解决方法。目前,所提的方法已经在实际的调速器得到实现,并通过了静模测试,在近期即将投入现场试运行。需要指出,相关定值的整定需要在现场根据实际工况完成,才能达到最佳的控制性能。

参考文献

- [1] 姚德孚,杨远生. CJT-2 型冲击式水轮机调速器[A]. 中国动力工程学会第六届学术年会论文集[C]. 1992.223-226
YAO De-fu, YANG Yuan-sheng. CJT-2 Speed Governor for Projectile Hydro-turbine[A].in: Proceedings of the Sixth Annual Conference of China Dynamic Engineering Society[C]. 1992.223-226.
- [2] 潘熙和,王丽娟,齐耀华,等. 多喷嘴冲击式水轮机调速器在阿坞田水电站的应用[J]. 水力发电, 2006, 32(2):45-48.
PAN Xi-he, WANG Li-juan, QI Yao-hua, et al. The Application of the Speed Governor of the Multi-jet Projectile Hydro-turbine in the Ajiutian Hydro Power Station[J]. Hydro Power Generation, 2006, 32(2):45-48.
- [3] 刘昌玉,傅维圣,李朝晖. 智能式水轮机调速器研究[J]. 水电能源科学, 2001, 19(1):66-67.

(下转第 34 页 continued on page 34)

出具有闪变特征的低频闪变信号的参数。仿真和实际信号均证明该方法的可行性和有效性。

参考文献

[1] 陈祥训. 实时跟踪电压闪变幅度的移动不变小波分析方法[J].中国电机工程学报, 2004,24(10):1-7.
CHEN Xiang-xun.A Shift-invariant Wavelet-based Method for Tracking Voltage Flicker Level [J].Proceedings of the CSEE,2004, 24(10):1-7.

[2] 王志祥,朱守真,周双喜.Hilbert 变换求取电压闪有关参数[J].电力系统自动化,2004,28(5):34-38.
WANG Zhi-xiang, ZHU Shou-zhen, ZHOU Shuang-xi.Parameter Estimation of Voltage Flicker Through Hilbert Transform[J].Automation of Electric Power Systems, 2004,28(5):34-38.

[3] 同向前,余健明.电网电压中波动信号检出方法的研[J].仪器仪表学报, 1998, 19 (3): 234-238.
TONG Xiang-qian, YU Jian-ming.Study on the Detection of Voltage Flicker[J].Chinses Journal of Scientific Instrument,1998,19(3): 234-238.

[4] Zheng T, Makram E B. Wavelet Representation of Voltage Flicker[J].Electric Power System Research,1998, 48: 133-140.

[5] CHEN Ming-tang, Meliopoulos A P. Wavelet-based Algorithm for Voltage Flicker Analysis[A].in: Proceedings of the Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power[C].2000.

[6] 堵俊,邵振国,郭晓丽,等.用小波分析提取电压闪变的幅值调制信号[J]电力系统及其自动化学报,2006,18(3): 34-37.
DU Jun, SHAO Zhen-guo, GUO Xiao-li, et al. Tracking the Envelope of Voltage Flicker Using Wavelet Analysis[J].Proceedings of the CSU-EPSA ,2006,18(3): 34-37.

[7] 刘阳,杨洪耕.基于独立分量分析的电压闪变检测方法[J].电力自动化设备, 2007,27(11):34-37.
LIU Yang, YANG Hong-geng.Voltage Flicker Detection Based on Independent Component Analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007,27(11):34-37.

[8] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[9] 张静, 徐政, 王峰, 等.TLS-ESPRIT 算法在低频震荡分析中的应用[J].电力系统自动化,2007,31(20):84-88.
ZHANG Jing , XU Zheng , WANG Feng , et al.TLS-ESPRIT based Method for Low Frequency Oscillation Analysis in Power System[J].Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(20): 84-88.

[10] Golub G H, Van Loan C F. An Analysis of the Total Least Squares Problem[J].SIAM J Number Anal, 1980,17:883-893.

[11] 张宇辉, 金国彬, 李天云. 基于自适应最优核时频分布理论的间谐波分析方法[J].中国电机工程学报, 2006,26(18):84-89.
ZHANG Yu-hui, JIN Guo-bin, LI Tian-yun, A Novel Approach to Interharmonics Analysis Based on Adaptive Optimal Kernel Time-frequency Distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2006,26(18): 84-89.

收稿日期: 2008-09-12; 修回日期: 2009-03-18

作者简介:

杨海霞 (1973-), 女, 工程师, 从事电网规划及调度自动化研究及设计工作; E-mail:yhx9413@yahoo.com.cn

王永宏 (1975-), 男, 工程师, 从事电力系统变电工程设计;

曾丰 (1979-), 男, 工程师, 从事电力系统变电工程设计。

(上接第 19 页 continued from page 19)

LIU Chang-yu, FU Wei-sheng, LI Zhao-hui. The Study of Intelligent Speed Governor of Hydro-turbine[J]. Water Resources and Power, 2001,19(1): 66-67.

[4] 魏守平. 水轮机调速器的PLC 测频方法[J].水电能源科学, 2000, 18(4): 12-16.
WEI Shou-ping. Frequency Measurement Method Based on PLC for Hydro-turbine Speed Governor[J].Water Resources and Power, 2000, 18(4): 12-16.

[5] 伍哲身. 新型调速器在小水电站中的应用[J]. 小水电 2003, (6): 34-36.
WU Zhe-shen. Application of the New-type Speed Governor in SHP Station[J]. Small Hydro Power,2003, (6): 34-36.

[6] 沈祖诒.水轮机调节(第二版)[M].北京:水利电力出版社,1988.
SHEN Zu-yi. Regulation of Hydro-turbine, Second

Edition [M]. Beijing: China Water Power Press,1988.

[7] 陶永华, 伊怡欣,葛芦生. 新型PID 控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
TAO Yong-hua, YI Yi-xin, GE Lu-sheng. New Type of PID Control and Its Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2001.

[8] 江涛.国产大型冲击式机组专用调速器的研制[J]. 中国农村水利水电, 2007:25-27.
JIANG Tao . The Development of the Special Speed Governor of Large-scale Projectile Hydro-turbine Unit[J]. China Rural Water and Hydropower,2007:25-27.

收稿日期: 2008-11-18

作者简介:

涂振祥 (1972-), 男, 硕士, 研究方向为控制理论与应用。E-mail: tuzx@whut.edu.cn