

国产200 MW汽轮机功频电液调节系统 并网运行特性的理论分析

于达仁(哈尔滨工业大学)

〔摘要〕用频域方法对汽轮机功频系统并网运行特性进行分析,找出了产生反调的频域条件。通过对各种克服反调方法的比较证明,用 $1/(T_n S + 1)$ 对电功率进行校正是较好的方法。

关键词 汽轮机 功率调节 频率控制 控制系统 反调

一、概 述

国内,有关汽轮机调节的文献对纯速度系统与功频系统在并网运行状态下动态特性的分析,有的不确切,有的还不够深刻。本文作为文献〔3〕的补充,从控制原理的角度对所谓“反调”现象作更进一步的论述。

采用功频调节系统的主要目的,是为了提高再热机组的一次调频能力。为了避免汽轮机功率难以测量的困难,汽机功率信号用发电机功率代替。电功率 P_e 与汽机功率 P_m 在平衡状态下是相同的,但动态过程中有差别,这就造成了一次调频和甩负荷时的反调现象。目前对反调现象是从物理概念上来解释的,并且从这种解释中演绎出了三种克服反调的办法:a)速度微分校正,b)电功率延迟,c)负功率微分校正。这三种方法在实践中都有效果。本文引入了并网运行的汽轮机模型,从控制原理角度很好地解释了产生反调的原因,也说明了克服反调的三种方法的机理,为合理地选择克服反调办法及整定校正参数提供了更有力的手段。

本文还研究了功频系统PI调节器参数的整定问题。

二、并网运行汽轮机的数学模型

根据文献〔1,4〕的推荐,研究汽轮——发电机的转速控制过程时,采用低阶的同步发电机模型和无穷大电网假设是足够精确的。高阶同步发电机模型主要在研究电机电磁过程时使用;电网的多机模型主要在分析电网稳定性时使用。由于目前电网的容量与单机功率相比大很多,电网频率对机组功率的影响是主要的,而单机的功率变化对电网频率的影响很小,所以无穷大电网假设是合乎实际情况的。

这时汽轮——发电机的转子方程如下:

$$\begin{cases} T_a \frac{d\varphi}{dt} = P_M - P_e - C_D(\varphi - \varphi_d) \\ P_e = \sin\theta / \sin\theta_0 \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega_0(\varphi - \varphi_d) \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_M ——蒸汽功率, P_e ——电功率, T_a ——转子时间常数, C_D 电磁阻尼系数,一般为4~25; θ ——功角, θ_0 为额定功角, φ ——转速, φ_d ——电网频率, ω_0 ——额定转速对应的角速度,我国电频率50Hz, ω_0 为314.16 rad/s。式(1)是非线性的,为便于进行领域分析,将其在额定工作点线性化得:

$$\begin{cases} T_a \frac{d\varphi}{dt} = P_m - P_e - C_D(\varphi - \varphi_d) \\ T_R \frac{dP_e}{dt} = \varphi - \varphi_d, T_R = \text{tg}\theta_0 / \omega_0 \end{cases} \quad (2)$$

根据式(2), 综合再热机组其他动态环节的传递函数^[1], 可得再热机组额定工况附近的总传递函数框图如下:

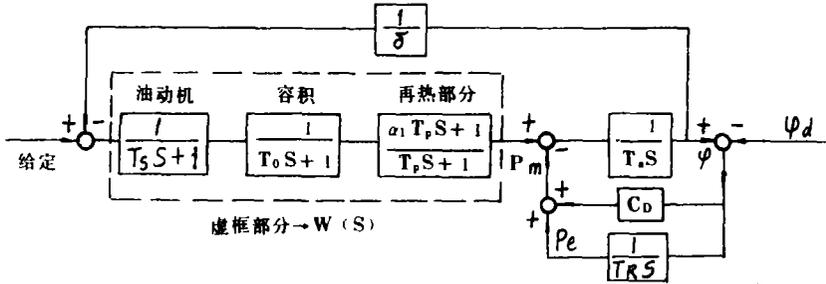


图1 再热机组纯速度系统并网模型

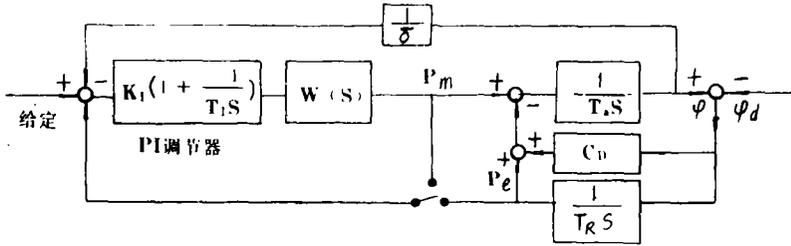


图2 再热机组功频系统并网模型

三、并网运行汽轮机一次调频性能的频域分析

在图1所示传递函数中, 取200MW机组的典型参数: $T_a = 6.5s$, $T_s = 0.2$, $T_0 = 0.24$, $T_p = 9$, $\alpha_1 = 0.31$, $\delta = 5\%$, $C_D = 10$, $\theta_0 = 45^\circ$, PI调节器参数采用工程整定值 $K_I = 1$, $T_I = 2$ 。为研究系统的一次调频性能, 以 P_m 为输出量绘制系统的频率特性如图3。

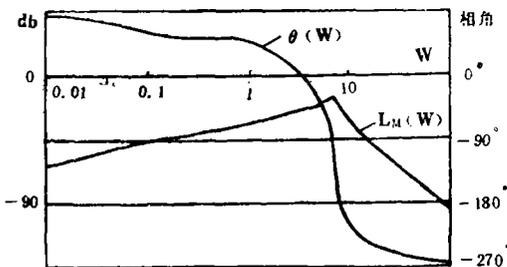


图3 纯速度系统并网特性

从图3可以看出, 纯速度系统并网运行时回路增益很低, 最高增益也只有~15dB, 由此可以说明两点: (1) 幅频特性与零分贝线不相交, 系统绝对稳定; (2) 系统对被调量 P_m 的控制能力很差, 动态响应速度和稳态精度都很低。所以纯速度系统的特点是稳定性有余而控制精度、响应速度不足。人们为克服其缺点而提出了功频系统。

最初构想的功频系统是以 P_m 为功率反馈信号的, 系统并网的频率特性如图4。

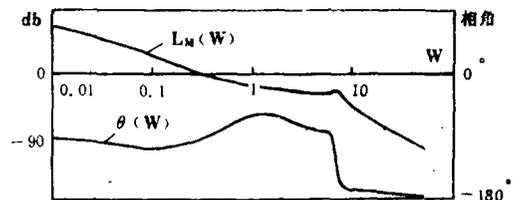


图4 反馈 P_m 功频系统并网特性

由图4可见, 测 P_m 的功频系统稳定性很

好，具有至少80度的相角裕量和无穷大增益裕量，同时稳态精度得到保证（低频增益高），动态响应速度大大提高（频带加宽），与纯速度系统相比有很多优点。但由于 P_m 很难测量，实践中用 P_e 代替 P_m ，由此产生了一些新问题。测 P_e 的功频系统频率特性如图5。

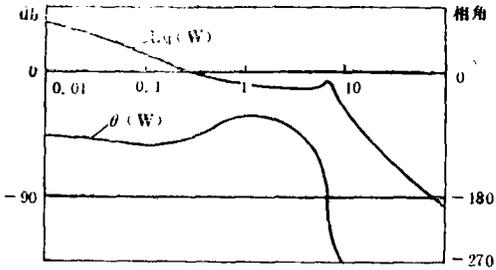


图5 测 P_e 功频系统并网特性

由图可见，与反馈 P_m 的情况相比，低频特性变化很小，这表明系统的静态特性与测 P_m 情况是相同的。差别主要在高频部分，一方面，经过谐振频率后（约1 Hz）相角几乎落到 -360° （超出坐标范围），另外，幅频谐振峰值提高了 5dB。从稳定性角度而言，测 P_e 与测 P_m 的情况尽管具有差不多相同的相角裕量，但增益裕量却从无穷大减少到仅有 7 dB 左右，稳定性大大降低了。这是产生反调（可理解为一定程度上的不稳定）的根本原因。另外从频域和时域特性的对应关系上，也可以解释反调现象。幅频特性表示对某频率信号的响应幅值，相频特性表示响应的方向，相角超过 -180° ，就表示响应是反方向的——不稳定的方向。在高频段，谐振峰处有最高的增益，所以这一频率的信号在时域响应中占有较大比重。会明显表现出来，而谐振处的相角远远超过 -180° ，（注意相频特性在谐振频率后下落很快），反映在输出中就有了反调。由于谐振频率处于高频段，反调必然在过渡过程初期才有表现。

四、克服反调措施的频域分析

由上述的分析可知，产生反调的根本原因就在于系统增益余量太小，并且谐振频率处相角下降太快。如果通过某种校正手段使高频增益降低或提高高频段的相角，将会有效地克服反调。人们在实践中提出了一些克服反调的措施，下面进行分析。

1. 用转速微分信号将 P_e 校正成 P_m

依据反馈 P_m 没有反调的事实，如果将 P_e 校正为 P_m ，一定能克服反调。根据[1]，忽略同步电机的异步功率后，有公式 $P_M = P_e + T_o \cdot d\varphi/dt$ ，所以将 P_e 与转速微分组合后能得到 P_m 。图6给出了采用理想微分校正后系统的频率特性，与反馈 P_m 的情况几乎完全相同，效果很好。但由于理想微分环节抗干扰性能太差，需采用实际微分环节，会降低使用效果。图6中采用的实际微分环节为 $T_o s / (0.05s + 1)$ 。

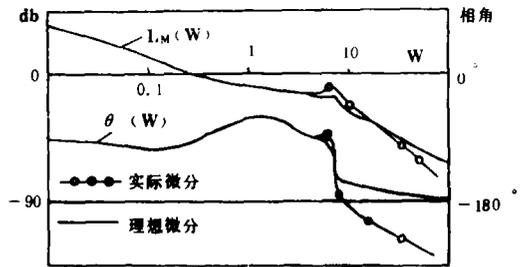


图6 P_e 校正为 P_m 的功频系统特性

2. 在测功 (P_e) 回路中加惯性延迟 $1/(T_N s + 1)$

方法的来历见[1]。针对不同的 T_N ，给了三组曲线以便比较（图7）。

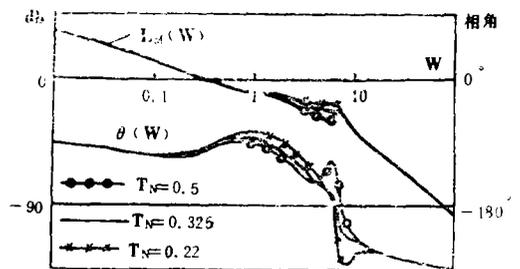


图7 加测功延迟的功频系统特性

从图7可以看出,采用测功延迟也可有效地提高系统的增益裕量,从而克服反调。在 $T_N=0.5$ 的情况下,增益裕量22dB,完全满足要求。

图8给出了电网频率突变0.5%, T_N 等于0,0.22及0.5时系统的响应过程。 $T_N=0$

明显具有反调,且汽门开度大幅度振荡,稳定性不好; $T_N=0.22$ 时虽已克服反调,但汽门动作有些延迟, $T_N=0.5$ 时效果比较理想。经计算表明,继续增大 T_N 反而会一定程度地降低增益裕量。

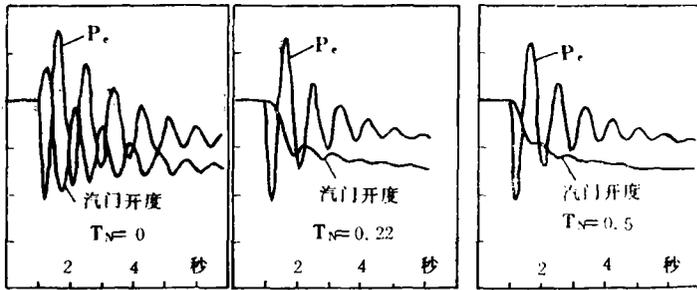


图8 电网频率突变0.5%时系统响应

文献[1]提到负功率微分信号也可克服反调;文献[3]指出 P_c 加惯性延迟是负功率微分校正的特例。负功率微分校正,相当于在测功回路中加入 $[1 - (K_N T_N^S) / (T_N^S + 1)]$ 环节(从工程角度出发,微分采用实际微分)。文献[3]的研究结果表明,当 $K_N < 1$ 时补偿不足, $K_N > 1$ 时补偿过份,只有 $K_N = 1$ 时才适当,这时负功率微分校正退化为惯性延迟校正。据此,我们对负功率微分校正不再进一步研究。

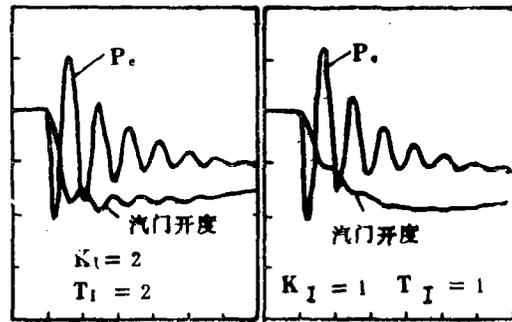


图9

根据以上的分析可以看出,速度微分校正在采用理想微分器时校正效果很好,但从工程角度出发,必须使用实际微分器,对其效果有很大影响; P_c 惯性延迟的方法也是很有有效的,只要合理选择 T_N 值,可以完全克服调频过程中的反调现象。目前工程中采用的是以上两种方法相结合的方法,如图9。本文选择了几组比较好的参数绘制了采用图9方案系统的频率特性,从图10可以看出,与纯粹采用惯性校正的方案相比,并无太大的优越性。

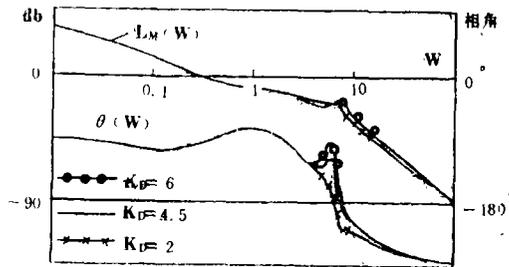


图10 $T_D=0.05$, $T_N=0.1$ 时系统特性中,电磁噪声非常强,因而对控制系统的噪声抑制能力要求很高。从此要求出发,再考虑到测功加惯性延迟校正具有足够好的效果,且抗干扰性好。在以上各方案的基础上,提出一个更妥善的方案如图11。在正常调频中,只有 $1/(T_N^S + 1)$ 起校正作用,转

从提高系统抗干扰性的角度出发,应避免使用微分环节,即使采用实际微分环节,其通频带内的噪声也总会被放大。在发电厂

速微分信号被死区隔离，噪声不能通过微分环节进入系统；只有在甩负荷时，转速微分信号才大于死区，参与克服反调，加快汽门关闭速度。此方案从结构上与图9区别不大，但由于指导思想不同，因而校正参数的整定是大不相同的。本文推荐 T_N 取 0.5 s ， T_D 取 0.05 s ， K_D 和死区 Δ 可根据实际要求（如甩 $>20\%$ 负荷能够动作，等）具体整定。

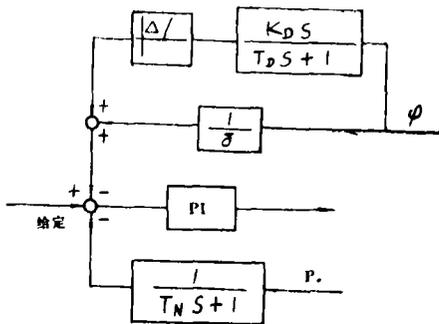


图 11 改进方案

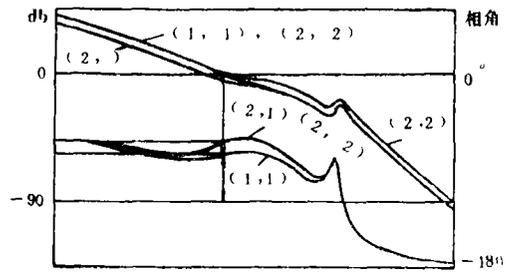


图 12 PI调节器性能对比

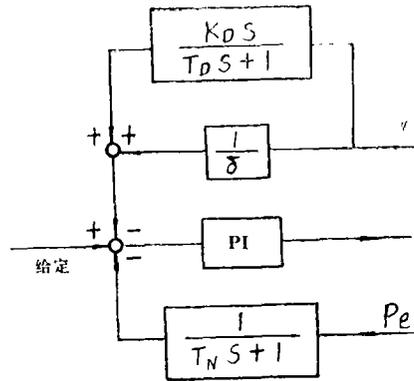


图 13 调频过程对比

五、关于PI参数的整定

通过分析功频系统的频率特性，比较深刻地解释了产生反调的原因，同时也揭露了功频系统增益余量不足的弱点。这就提示我们PI调节器的放大倍数 K_I 不能取得过大。为了加宽系统频带，可以适当减小 T_I ，由于系统有较大的相角裕量，不会影响稳定性。

图12给出了 $(T_I, K_I) = (1,1), (2,1), (2,2)$ 三组参数下 ($T_N = 0.5$) 的频率特性， $(2,1)$ 参数为对比组， $(1,1), (2,2)$ 参数将频带加宽了同样的数值，但 $(1,1)$ 组的增益裕量为 24 dB ，相角裕量 68° ， $(2,2)$ 组的增益裕量 17 dB ，相角裕量 87° ，相比而言， $(1,1)$ 组参数更合理。图13为两组参数下的调频过程。

六、结 语

本文引用并网状态下的汽轮机模型，以频率特性分析为主要手段，从控制理论的角度解释了功频系统产生反调的机理，从而为克服反调方法的研究提供了一个明确的着眼点。通过对各种克服反调方法的分析比较，本文认为测功惯性延迟是比较实用的方法。从功频系统的特点考虑，PI调节器参数应采取小 K_I 小 T_I 方案，大的放大倍数对稳定性不利。

最后，对徐基豫教授给予的指导表示谢意。

参 考 文 献

- [1] 倪维斗, 徐基豫. 自动调节原理与透平机械自动调节. 机械工业出版社, 第一版, 1981年9月
[2] 哈尔滨汽轮机厂. 汽轮机调节系统设计. 水力电

- 力工业出版社, 第一版, 1980年1月
[3] 上海汽轮机厂. 汽轮机电液调节. 水利电力工业出版社, 第一版, 1985年
[4] 余耀南(加拿大). 动态电力系统. 水利电力工业出版社, 第一版, 1985年3月

Theoretical Analysis of the Parallel-in Operating Characteristics of a Home-made 200 MW Steam Turbine Control System Based on the Use of Load-Frequency Electronic-Hydraulic Regulation

Yu Daren

(Harbin Institute of Technology)

Abstract

The parallel-in operating characteristics of a steam turbine load-frequency control system are analyzed by using frequency domain method. The frequency domain conditions for producing reverse regulation have been obtained. Through a comparison of various method of overcoming reverse regulating phenomena, it is demonstrated to be a better method to use a factor $1/[T_n s + 1]$ for correcting electrical power.

Key Words: *steam turbine power conditioning, frequency control, control system, reverse regulation*