

汽轮机中不同扰动源对共振机理低频振荡的影响

冯双¹, 孔珍宝², 徐钢², 高爱民²

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏南京 210096; 2. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏南京 211102)

摘要: 汽轮机输出的功率扰动可能引发共振机理的低频振荡, 威胁电力系统的安全稳定运行。文中比较了扰动位于汽轮机本身机械部分和位于调速器部分对共振机理低频振荡的影响。首先介绍了共振机理的基本原理, 在此基础上推导证明了汽轮机对其调速器内扰动信号具有较强地抑制作用。然后在单机无穷大系统中分别对扰动位于汽轮机本身机械部分和位于调速器部分时对低频振荡的影响进行仿真, 仿真结果表明相同幅值和频率的扰动信号分别位于上述2种位置时, 后者比前者产生更大的低频振荡幅值, 验证了理论分析的有效性, 为实际应用中共振机理低频振荡的抑制措施提供了参考。

关键词: 汽轮机; 低频振荡; 调速器; 共振机理

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2013)06-0001-04

随着我国电力系统的规模越来越大, 电网互联在带来错峰、水火电互补、极大提高发电和输电的经济性和可靠性的同时, 也使得电力系统的振荡失稳问题变得越来越严重。对于大规模互联系统, 最有可能发生的稳定性问题之一是低频振荡问题^[1-3]。在这方面, 世界各国都有过惨痛教训^[4,5], 因此对低频振荡机理进行研究并采取相应的抑制措施具有非常重要的意义。负阻尼机理是目前理论证明并被广泛接受的低频振荡机理^[6], 即发电机组的快速高倍数励磁调节器在系统中产生了负阻尼, 使得系统的总阻尼很小甚至为负, 当系统受到扰动时, 容易引起功率的增幅振荡。基于负阻尼机理设计的电力系统稳定器 PSS, 可以很好地抑制系统低频振荡。然而现实中电力系统的有些低频振荡现象无法通过负阻尼机理解释, 按照负阻尼机理设计并安装了 PSS, 振荡依然发生^[7]。针对这些现象, 国内外学者从振荡机理上展开研究, 共振机理是研究的热点之一。

对于共振机理, 文献[8]最早研究电机自振角速度与外加机械转矩角速度相接近所造成的振荡。文献[9]从频率角度分析了强制功率振荡在单机和多机系统中的振荡情况。文献[10]认为汽轮机压力脉动可能引起电力系统共振机理低频振荡。文献[11]研究了汽轮机调速系统摆动对电力系统低频振荡的影响。这些已有研究成果表明, 当汽轮机及其调速系统中存在机械功率扰动, 若扰动量中包含频率与电力系统自然振荡频率相同的正弦分量, 电力系统就会发生低频振荡。这说明可从汽轮机及其调速系统的角度抑制电力系统共振机理低频振荡^[12]。为了找出最易引起低频振荡的机械功率扰动源, 以便有针对性的采取抑制措施, 有必要对比研究汽轮机的机械功率扰动及其调速

系统的机械功率扰动对电力系统低频振荡的影响。

本文首先介绍了共振机理的低频振荡原理, 随后推导出汽轮机数学模型的传递函数, 从理论上比较了在共振频率点汽轮机对不同扰动的作用, 证明了汽轮机对位于调速器内的扰动信号有较强抑制作用。然后在 Matlab 中建立包含汽轮机及调速器的单机无穷大系统仿真模型, 通过仿真验证不同机械扰动源产生的功率扰动对共振机理的低频振荡的影响。仿真结果与理论分析一致, 可以对进一步的研究提供理论支持。

1 共振机理的基本原理

典型的单机无穷大系统的结构如图1所示。

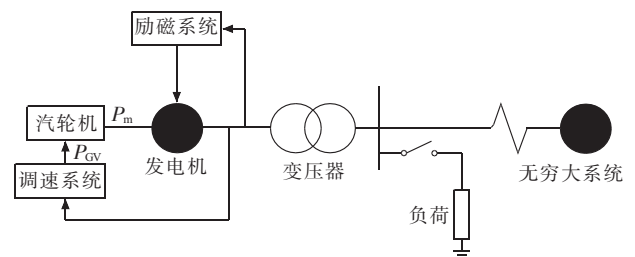


图1 典型的单机无穷大系统

发电机采用二阶经典模型, 转子运动方程为:

$$M \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - D(\omega - 1) \quad (1)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - 1 \quad (2)$$

在工作点处线性化, 并改写为只含有发电机转子角 $\Delta\delta$ 变量的二阶系统:

$$M \Delta \ddot{\delta} + D \Delta \dot{\delta} + K \Delta \delta = \Delta P_m \quad (3)$$

$$\Delta \ddot{\delta} + 2\beta \Delta \dot{\delta} + \omega_0^2 \Delta \delta = \Delta P'_m \quad (4)$$

式(3,4)中: $\Delta P'_m = \frac{\Delta P_m}{M}$; $K = \frac{E'U}{X_\Sigma} \cos \delta_0$ 为同步力矩系数;

$\beta = \frac{D}{2M}$ 为阻尼系数; $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{M}}$ 为自然振荡频率。

研究负阻尼机理时忽略机械功率 P_m 的变化, 研究共振机理时, 就要考虑 P_m 的变化, 假设机械功率 $\Delta P_m \neq 0$, 其形式为:

$$\Delta P_m = r \cos \omega t \quad (5)$$

则式(4)变为非齐次常系数二次微分方程:

$$\Delta \ddot{\delta} + 2\beta \Delta \dot{\delta} + \omega_0^2 \Delta \delta = h \cos \omega t \quad (6)$$

式(6)中: $h = \frac{r}{M}$ 。

该微分方程的解为通解和特解之和, 可写成 $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$ 。当 $\beta < \omega_0$ 时, 它的解为:

$$x_1(t) = A_0 e^{-\beta t} \cos(\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} t + \varphi_0) \quad (7)$$

$$x_2(t) = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

通解 $x_1(t)$ 是一个减幅振荡, 经过一段时间后, 这部分振荡就衰减到可以忽略不计的程度。余下的就只有特解 $x_2(t)$, 它表现为振幅不变的振荡, 这就是共振达到稳定状态时的振荡。经计算, 可得出特解 $x_2(t)$ 的 A 和 φ 的值:

$$A = \frac{h}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}} \quad (9)$$

$$\varphi = \arctan \frac{-2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (10)$$

由此可见, 振幅与 ΔP_m 的 ω 有关, 当 ω 为某一值时, 振幅达到最大值。用求极值的方法可得到使振幅达到极大值的 ω 为:

$$\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} \quad (11)$$

相应的最大振幅为:

$$A_r = \frac{h}{2\beta\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} \quad (12)$$

在弱阻尼 $\beta \ll \omega_0$ 的情况下, 式(11, 12)中近似为

$$\omega_r = \omega_0, A_r = \frac{h}{2\beta\omega_0}。$$

由此可以看出, 系统原动机功率若存在一种扰动, 当这种扰动的频率与系统的自然频率一致或接近时, 就可能引起系统发生共振的低频振荡现象。

根据上面的推理可知, 共振机理低频振荡的频率, 即系统的自然振荡频率:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (13)$$

共振振荡的最大幅值:

$$A_{m_{\max}} = \frac{r}{|D| \sqrt{\frac{K}{M}}} \quad (14)$$

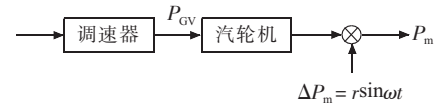
共振振荡的阻尼比为:

$$\xi = \frac{D}{2M\omega_0} \quad (15)$$

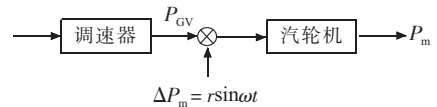
由此可以看出, 决定振荡的频率、幅值和阻尼比等振荡特性的相关系统参数主要包括同步力矩系数 K 、阻尼转矩系数 D 、机组惯性时间常数 M 和扰动输入量的幅值 r 。

2 汽轮机对不同扰动作用的理论分析

上述分析表明, 汽轮机输出的机械功率若存在频率与电力系统自然振荡频率相同的正弦分量, 电力系统就容易发生增幅的低频振荡。汽轮机输出的机械功率中扰动信号的源头可能位于汽轮机本身的机械部分, 也可能位于调速器部分。有必要比较这 2 种扰动源对电力系统低频振荡的影响, 以便有针对性的采取抑制措施。本文在汽轮机的输出功率中直接添加功率扰动信号 $\Delta P_m = r \sin \omega t$, 表示扰动源位于汽轮机本身的机械部分, 如图 2(a) 所示; 在调速器的输出中添加功率扰动信号 $\Delta P_{GV} = r \sin \omega t$, 表示扰动源位于调速器中, 如图 2(b) 所示。



(a) 扰动源位于汽轮机中



(b) 扰动源位于调速器中

图 2 不同位置的机械功率扰动源

由于调速器的扰动信号要经过汽轮机转化为输出机械功率扰动, 因此, 为比较 ΔP_m 和 ΔP_{GV} 的影响, 只需要考虑汽轮机对调速器扰动信号的作用, 即只需要将图 2(b) 经过等效变换成图 2(a) 的形式, 如图 3 所示。 ΔP_{GV} 经过汽轮机转化为幅值为 r_1 、频率为 ω_1 的信号 ΔP_{m1} , 比较 ΔP_{GV} 和 ΔP_{m1} 即可。

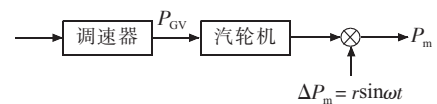


图 3 图 2(b) 的等效图

串联组合的单再热器汽轮机的简单结构如图 4 所示^[13, 14], 由线性环节组成, 不改变信号的频率, 因此 $\omega_1 = \omega$ 。其中各参数的典型值如表 1 所示。

表 1 中, T_{CH} 为蒸汽容积时间常数; T_{RH} 为再热器时间常数; T_{CO} 为交叉管时间常数; F_{HP} 为高压缸功率比例; F_{IP} 为中压缸功率比例; F_{LP} 为低压缸功率比例。则汽

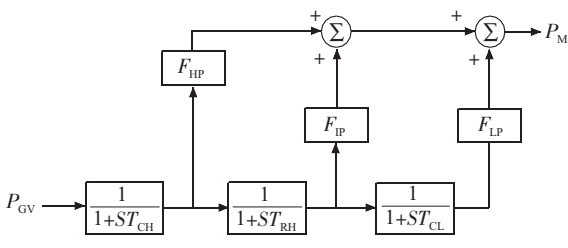


图4 串联组合的单再热器汽轮机简化模型

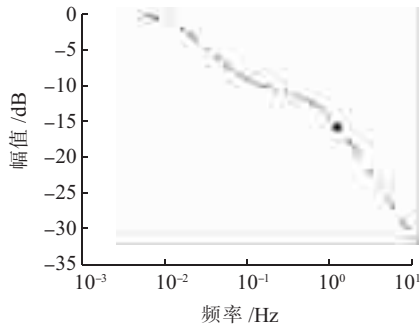
表1 汽轮机模型的典型参数值

T_{CH}/s	T_{RH}/s	T_{CO}/s	F_{HP}	F_{IP}	F_{LP}
0.2	7	0.4	0.3	0.4	0.3

轮机的输出功率 P_m 与输入量 P_{GV} 的关系式为:

$$\frac{P_m}{P_{GV}} = \frac{F_{HP}}{1+sT_{CH}} + \frac{F_{IP}}{(1+sT_{CH})(1+sT_{RH})} + \frac{F_{LP}}{(1+sT_{CH})(1+sT_{RH})(1+sT_{CO})} \quad (16)$$

代入各参数的典型值,做出 P_{GV} 到 P_m 的传递函数的伯德图,如图5所示。

图5 P_{GV} 到 P_m 的传递函数的伯德图

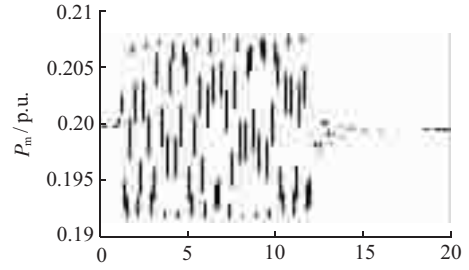
由图5可知,扰动信号的频率位于低频振荡频率区间(0.2~2.5 Hz)^[14]时,伯德图纵坐标小于-10 dB,在频率为1.34 Hz时,信号衰减了16.34 dB,即经过汽轮机后,扰动信号幅值 r_1 约为原幅值 r 的1/6。

由上可知,位于调速器内的机械功率扰动信号经过汽轮机后,其幅值比原值小得多,即汽轮机本身的特性使其对调速器内的扰动信号具有较强的抑制作用。因此汽轮机本身的机械功率扰动对电力系统共振机理低频振荡的影响更大,在研究抑制措施时,应着重考虑汽轮机本身的扰动。

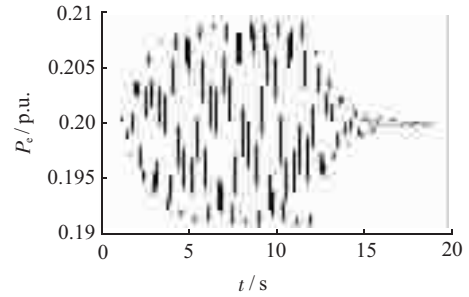
3 仿真分析

在 Matlab 中建立上述单机无穷大系统仿真模型,包含调速器、汽轮机、励磁控制器,系统参数见文献[14]。首先在较轻负载情况下进行突加负载实验,可以确定系统的自然振荡频率。测得自然振荡频率为1.34 Hz,角频率为8.42 rad/s。在调速器的输出信号中添加扰动信号 $\Delta P_{GV} = 0.05\sin 8.42t$,其中信号幅值为标么值,

在1 s时投入扰动,在12 s时切出扰动。汽轮机的输出信号 P_m 、发电机的输出有功功率 P_e 波形如图7所示。



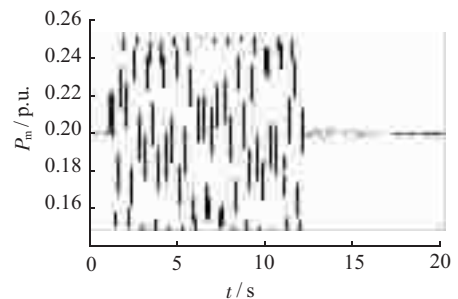
(a) 汽轮机输出信号



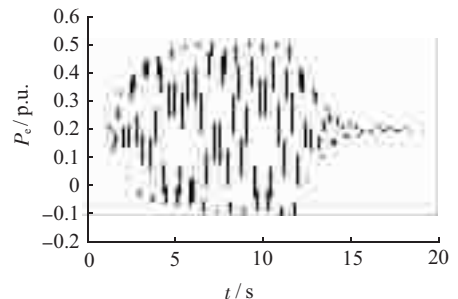
(b) 发电机输出有功功率

图7 扰动信号位于调速器时系统仿真波形

由图7(a)可知,调速器中的扰动信号经过汽轮机后,汽轮机输出信号振荡幅值为0.008 p.u.,约为原扰动幅值的1/6,该扰动信号引发了系统共振机理的低频振荡,发电机的输出有功功率振荡幅值为0.05 p.u.。将同样的扰动信号直接添加到汽轮机的输出信号中,模仿汽轮机本身机械部分产生的功率扰动,即 $\Delta P_m = \Delta P_{GV} = 0.05\sin 8.42t$,进行相同的扰动投切实验,对应的仿真结果如图8所示。



(a) 汽轮机输出信号



(b) 发电机输出有功功率

图8 扰动信号位于汽轮机本身机械部分时系统仿真波形

由图 8(b)可知,汽轮机本身机械部分产生的扰动信号经过共振后,发电机中的振荡幅值达到 0.31 p.u.。

根据图 7 和图 8 的比较可知,扰动信号位于调速器的时候,汽轮机对其具有较强抑制作用,产生的低频振荡幅值较小,而扰动信号位于汽轮机本身机械部分的时候,产生的低频振荡幅值较大,这与第 2 节的理论分析一致。

4 结束语

汽轮机及其调速器中的扰动信号容易在电力系统中产生共振机理低频振荡,有必要有针对性地采取抑制措施。汽轮机的输入至输出的幅频特性,表明其对调速器中的低频扰动信号具有较强地抑制作用,相同幅值和频率的扰动信号分别位于调速器中和汽轮机中的时候,后者比前者产生更大的低频振荡幅值。因此从汽轮机及其调速器的角度考虑低频振荡抑制措施时,应着重关注汽轮机本身的机械功率扰动。

参考文献:

- [1] 王青,闵勇,张毅威. 低频振荡的功率振荡增量分布计算新方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(6):1-4.
- [2] 叶慧,吴熙,桂国亮. 并联双通道 STATCOM 附加阻尼控制抑制低频振荡研究[J]. 江苏电机工程,2011,30(4):30-33.
- [3] SANCHEZ-GASCA J J, CHOW J J. Performance Comparison of Three Identification Methods for the Analysis of Electromechanical Oscillations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3):995-1002.
- [4] 李丹,苏为民,张晶,等. “9.1”内蒙古西部电网振荡的仿真研究[J]. 电网技术,2006,30(6):41-47.
- [5] 王梅义,吴竟昌,蒙定中. 大电网系统技术[M]. 北京:科学出版社,1995:10-25.
- [6] 刘宪林,柳焯,娄和恭. 考虑阻尼绕组作用的单机无穷大系统线性化模型[J]. 中国电机工程学报,2000,20(10):9-11.
- [7] 中国电力科学研究院. 安保线功率振荡问题研究[R]. 北京:中国电力科学研究院,1999.
- [8] 高景德,张麟征. 电机过渡过程的基本理论及分析方法[M]. 北京:科学出版社,1983:541-571.
- [9] VOURNAS C D, KRASSAS N, PAPADIAS B C. Analysis of Forced Oscillations in a Multimachine Power System [C]//IEEE Conference Publication, British, 1991:443-448.
- [10] 韩志勇,贺仁睦,徐衍会. 由汽轮机压力脉动引发的电力系统共振机理低频振荡[J]. 中国电机工程学报,2005,25(21):14-18.
- [11] 李传彪. 汽轮机调速系统摆动及其对低频振荡影响的研究[D]. 北京:华北电力大学,2006.
- [12] 文贤旭,钟晶亮,钱进. 电网低频振荡时汽轮机控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2009,29(26):107-110.
- [13] 徐高山,龚雪丽. 汽轮机及其调节系统模型参数测试[J]. 热力发电,2009,38(11):39-42,52.
- [14] 姚永灵,徐斌. 江苏省内在役 1000 MW 汽轮机的特点与运行问题[J]. 江苏电机工程,2013,32(3):69-71.

作者简介:

- 冯双(1990),女,江苏南京人,硕士研究生,从事电力系统的运行与控制研究工作;
- 孔珍宝(1962),男,江苏南京人,工程师,从事电网及发电厂技术管理工作;
- 徐钢(1967),男,江苏仪征人,硕士,高级工程师,从事继电保护与励磁试验及研究工作;
- 高爱民(1969),男,江苏宝应人,高级工程师,从事发电厂自动控制技术试验及研究工作。

Influence of Different Mechanical Disturbances on Low Frequency Oscillation of Resonance Mechanism

FENG Shuang¹, KONG Zhenbao², XU Gang², GAO Aimin²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Frontier Electric Technologies Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Output power disturbance of steam turbine could lead to low frequency oscillation of resonance mechanism, threatening the safe and steady operation of the power system. This paper compares the influences of the disturbance of mechanical part of steam turbine with disturbance of governor. The fundamental principles of resonance mechanism are presented in this paper firstly. Then, it will be proved that steam turbine has strong restrain effect on disturbance of governor through mathematical derivation. Influences of disturbance of mechanical part of steam turbine and disturbance of governor on low frequency oscillation are simulated in a single-machine and infinite bus system separately. The simulation results illustrate that disturbance of mechanical part of steam turbine leads to larger amplitude than disturbance of governor when the disturbances are of same amplitude and frequency. The simulation results are in accordance with theoretical analysis, which can provide reference for suppressing low frequency oscillation of resonance mechanism.

Key words: low frequency oscillation; steam turbine; governor; resonance mechanism