

有功型 PSS 抑制低频振荡机理及反调特性

张仰飞^{1, 2}, 袁越¹, 陈小虎², 查卫华³

(1. 河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210024; 2. 南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167;
3. 核电泰山联营有限公司, 浙江 海盐 314300)

摘要: 介绍了 MEC5220 型励磁调节器的原理及系统产生低频振荡的原因, 分析了励磁调节器的阻尼特性。通过对有功型电力系统稳定器 (PSS) 的研究发现, PSS 虽能抑制振荡, 但有功型 PSS 使用的前提是机械功率变化相对电气功率变化近似不变, 当调节发电机原动机出力时, PSS 得到的信号远大于需要的信号, 就会造成励磁电压和无功功率大幅变化, 即反调。通过实例证实了有功型 PSS 反调特性, 并提出了防止其危害的对策。

关键词: PSS; 低频振荡; 反调; 有功功率; 无功功率

Mechanism of active-power PSS low-frequency oscillation suppression and characteristic of anti-regulation

ZHANG Yang-fei^{1,2}, YUAN Yue¹, CHEN Xiao-hu², ZHA Wei-hua³

(1. Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;
3. Nuclear Power Qinshan Joint Venture Co., Ltd, Haiyan 314300, China)

Abstract: This paper introduces the principle of MEC5220-type exciter regulator, elaborates the reasons of producing low-frequency oscillation in system, and describes the damping characteristics of excitation regulator. By studying the active-type power system stabilizer (PSS), it finds that although PSS can inhibit the oscillations, the merit-based PSS is used on the premise that mechanical power changes much slower than the electrical power changes. When the adjustment is made in generating the original motivation, signal power of PSS received is much larger than that of its required, resulting in excitation voltage and reactive power substantially change, that is anti-regulation. Anti-regulation characteristics of active-power PSS is demonstrated with an example and countermeasures to prevent the harm are proposed.

Key words: PSS; low-frequency oscillation; anti-regulation; active power; reactive power

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)03-0077-04

0 引言

2006年8月31日21点33分07秒,某核电厂#1机组因外电网扰动导致发电机#10瓦振动超标,机组打闸(关闭主汽门),按程序跳闸停机停堆。对事后录波图中发现,在有功降低的同时,无功功率出现脉冲波(即无功功率迅速增大)。本文从PSS的原理及其抑制低频振荡的机理着手分析了有功型PSS的反调现象。并针对有功型PSS的设置提出了改进建议。

1 励磁调节器及PSS简介

某核电厂励磁调节器采用 MITSUBISHI ELECTIC MEC5220 型数字式励磁调节器, PSS 采用有功信号。图 1、图 2 为其传递函数。

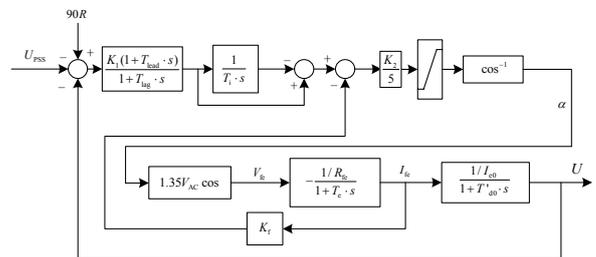


图 1 AVR 及励磁机传递函数

Fig.1 AVR and exciter transfer function

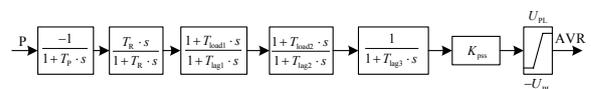


图 2 PSS 传递函数

Fig.2 PSS transfer function

分析一下 PSS 传递函数的环节, 其主要由隔直环节、二级相位补偿环节以及增益和限幅环节组成。也就是在输入的有功信号发生变化时, PSS 才有输出, 才会通过励磁系统对发电机的阻尼转矩施加影响。PSS 在有功功率为额定功率的 30% 以下时, PSS 自动退出。

采用高起始快速励磁调节器, 其调节性能好; 采用有功型 PSS, 与转速信号相比, 其优点是有功功率信号具有信号强、不易引入干扰、不会激发轴系扭振。

2 低频振荡的产生

大型发电机组普遍采用数字电路和可控硅组成的励磁调节器, 使自动励磁调节器 AVR 的时间常数大大缩短, 增益大大提高, 使得电力系统的阻尼大大恶化, 这是造成低频振荡的直接原因。以单机无穷大系统小干扰线性化模型为例分析讨论, 单机无穷大系统分别如图 3、图 4 所示。

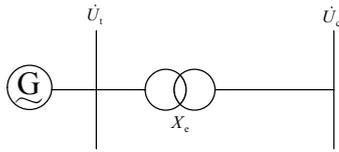


图 3 单机无穷大系统图

Fig.3 A single machine infinite system diagram

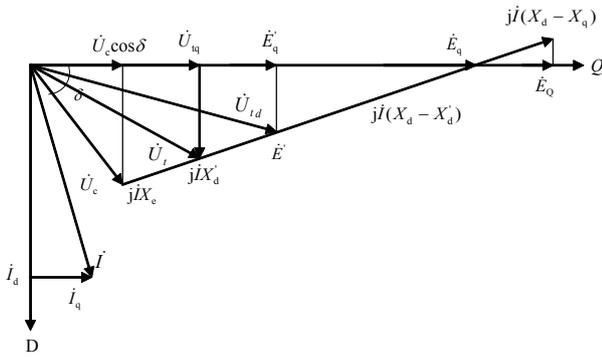


图 4 单机无穷大系统相量图

Fig.4 A single machine infinite system phasor diagram

2.1 未考虑励磁调节器作用

在未考虑励磁调节系统作用时, 发电机电磁转矩 (在标么值的情况下, 有功功率与电磁转矩等价) 为^[1]:

$$\Delta M_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q \quad (1)$$

式 (1) 中:

$$K_1 = \frac{X_q - X'_d}{X'_d + X_e} I_{q0} U_c \sin \delta_0 + \frac{E_{q0} U_c \cos \delta_0}{X_q + X_e}$$

$$K_2 = \frac{X_q + X_e}{X'_d + X_e} I_{q0}$$

$$\Delta E'_q = \frac{K_3}{1 + K_3 T'_{d0} s} \Delta E_{fd} - \frac{K_3 K_4}{1 + K_3 T'_{d0} s} \quad (2)$$

$$\Delta \delta = \frac{K_3}{1 + K_3 T'_{d0} s} (\Delta E_{fd} - K_4 \Delta \delta) \quad (3)$$

式 (2)、(3) 中:

$$K_3 = \frac{(X'_d + X_e)}{(X_d + X_e)}$$

$$K_4 = \left[\frac{(X_d - X'_d)}{(X'_d + X_e)} \right] U_c \sin \delta_0$$

$$\Delta U_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q \quad (4)$$

式 (4) 中:

$$K_5 = \frac{U_{td0}}{U_{t0}} \frac{X_q}{X_q + X_e} U_c \cos \delta_0 - \frac{U_{tq0}}{U_{t0}} \frac{X'_d}{X'_d + X_e} U_c \sin \delta_0$$

$$K_6 = \frac{U_{tq0}}{U_{t0}} \frac{X_e}{X'_d + X_e}$$

$$\Delta P_D = D \Delta \omega \quad (5)$$

$$\Delta \omega = \left(\frac{1}{\omega_0} \right) \left(\frac{d\Delta \delta}{dt} \right) \quad (6)$$

$K_1 \sim K_6$ 为运行工况的函数, 在一定运行方式下为常数, K_5 在发电机负荷较小时为正值, 在负荷较大时因 δ_0 增大, 变为负值, 其它 5 个参数一般为正值。在不考虑励磁调节的作用下, 则 $\Delta E_{fd} = 0$, 则电磁转矩为:

$$\Delta M_e = K_1 \Delta \delta - \frac{K_2 K_3 K_4}{1 + K_3 T'^2_{d0} s} \Delta \delta \quad (7)$$

令 $s = j\omega$, 电磁转矩 ΔM_e 可整理为:

$$\Delta M_e = \left(K_1 - \frac{K_2 K_3 K_4}{1 + K_3^2 T'^2_{d0} \omega^2} \right) \Delta \delta + j \frac{K_2 K_3 K_4 T'_{d0} \omega}{1 + K_3^2 T'^2_{d0} \omega^2} \Delta \delta = \quad (8)$$

$$\Delta M_{e1} + \Delta M_{e2}$$

电磁转矩 ΔM_e 由同步转矩 ΔM_{e1} 与超前 $\Delta \delta$ 90° 的正的阻尼转矩 ΔM_{e2} 的合成, 如图 5 所示。

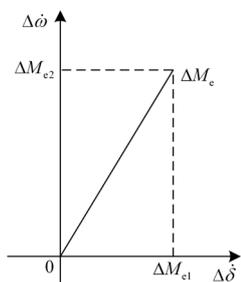


图5 电磁转矩矢量图

Fig.5 Electromagnetic torque vector diagram

说明在没有励磁调节器的作用下, 阻尼转矩为正。

2.2 考虑励磁调节器的作用

设励磁系统为高起始快速响应系统, 以简单的比例调节器为例, 传递函数为

$$G_e(s) = \frac{K_e}{(1+T_e s)} \quad (9)$$

增益 K_e 很大, T_e 很小, 励磁系统的输入为

$$-\Delta U_t = -(K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q) \quad (10)$$

输出为:

$$E_{fd} = \frac{-K_e \Delta U_t}{(1+T_e s)} \quad (11)$$

令 $s = j\omega$, 电磁转矩 $\Delta M'_e$ 可整理为:

$$\Delta M'_e = \left(K_1 - \frac{K_2 K_3 K_6 K_c^2}{K_6^2 K_c^2 + T_{d0}^2 \omega^2} \right) \Delta \delta + j \frac{K_2 K_3 K_c T_{d0}^2 \omega}{K_6^2 K_c^2 + T_{d0}^2 \omega^2} \Delta \delta = \Delta M'_{e1} + \Delta M'_{e2} \quad (12)$$

当发电机负荷较大, K_5 为负值, 所以电磁转矩 $\Delta M'_e$ 由同步转矩 $\Delta M'_{e1}$ 与滞后 $\Delta \delta$ 90° 的负阻尼转矩 $\Delta M'_{e2}$ 的合成, 如图 6 所示; 又由于励磁系统的增益 K_e 很大, 使得系统的负阻尼增大, 当外电网有扰动时, 就会发生低频振荡。

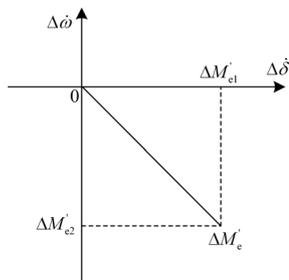


图6 电磁转矩矢量图

Fig.6 Electromagnetic torque vector

说明重负荷时, 在励磁调节器的作用下, 电磁阻尼转矩为负阻尼, 而且快速励磁调节器使这种负阻尼增大。

3 电力系统稳定器 (Power system stabilizer) 抑制低频振荡的原理^[2]

励磁系统是一个滞后单元, 它由励磁滞后角 θ_{g1} 和发电机磁场滞后角 θ_{g2} 构成, 系统传递函数为:

$$G_{EC}(s) = \frac{K_2 K_5 K_3 K_c}{(1+K_3 K_{d0} s)(1+T_e s) + K_3 K_6 K_c} \quad (13)$$

总滞后角 $\theta_g < \theta_{g1} + \theta_{g2}$

当 K_5 为负时, 电压调节器产生负阻尼, 由电压调节器产生的电磁转矩 ΔM_e 在 $\Delta \dot{\omega}$ 轴上的投影为负, 如图 7 所示。

当 PSS 输入信号为反映系统振荡的可测量, 当其为 $\Delta \dot{\omega}$ 时, 为使 PSS 的附加力矩与 $\Delta \dot{\omega}$ 同相位, PSS 应为超前相位补偿, 相位角 θ_d , 由 PSS 的附加力矩 ΔM_{PSS} 所产生的正阻尼大于由电压调节器的电磁转矩 ΔM_e 的负阻尼, 从而使励磁调节器提供正阻尼, 抑制系统的低频振荡, 如图 8 所示。

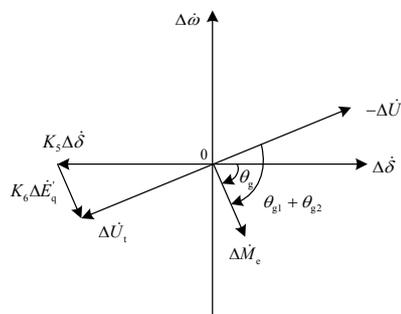


图7 AVR产生的负阻尼

Fig.7 The negative damping produced by AVR

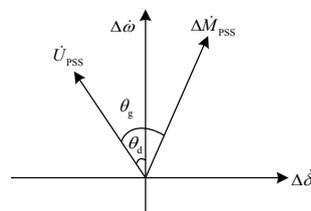


图8 PSS产生的阻尼力矩

Fig.8 The damping torque produced by PSS

4 有功型电力系统稳定器 (Power system stabilizer) 反调现象分析

PSS 将反映电力系统振荡的可测量适当变换后

反馈到励磁调节器，使之产生附加阻尼力矩，达到抑制振荡的目的。PSS 需要测量与振荡有关的量，如加速功率、转速（频率），但是转速和加速功率测量困难。加速功率（ P_a ）等于机械功率（ P_m ）减去电气功率（ P_e ），当机械功率变化比电气功率慢得多时近似认为 $\Delta P_a \approx -\Delta P_e$ 。电气功率容易测量，因此常用的 PSS 采用发电机有功功率作为 PSS 信号，称有功 PSS。与转速信号相比，有功功率信号具有信号强、不易引入干扰、不会激发轴系扭振的特点。

有功 PSS 使用的前提是机械功率变化比电气功率变化慢得多时近似认为 $\Delta P_a \approx -\Delta P_e$ 。当调节发电机原动机出力时，如 $\Delta P_m \gg \Delta P_a$ ， $\Delta P_e \gg \Delta P_a$ ，有功 PSS 得到的信号远大于需要的信号 ΔP_a ，造成不必要的励磁电压和无功功率大幅变化。这种因采用有功 PSS 及原动机出力变化引起励磁电压和无功功率大幅变化的现象称为反调。

对于有功型 PSS，从图 1 我们不难看出，当有功功率迅速减小时，励磁系统感受到的是端电压下降，因励磁系统是负反馈，立即作出调节，增加励磁电流，进而无功增加。因我们的励磁系统是高起始快速励磁系统，因此，有功变化越快，无功的变化也越快，反调现象也越严重。这也就是我们在汽轮机打闸有功迅速降低时出现无功阶跃的直接原因。

我们再来看一个例子，2005 年 8 月 19 日 14 时 57 分 22 秒，2RCP 033 MT 接线松动，出现 C22 信号，汽机 RUNBACK 到 387MWe，其录波图如图 9 所示。

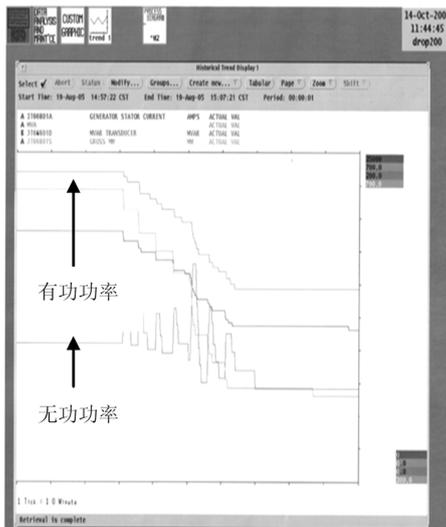


图 9 无功反调的典型录波图（PSS 投入）

Fig.9 Wave map of reactive power anti-regulation

从录波图上我们明显可以看出，汽机 RUNBACK 使

有功呈阶梯状降负荷，无功则对应呈阶跃式突升，而且是有功下降的幅度越大，速率越快，相应的无功上升的斜率越大，幅值越大；这是 PSS 传递函数当中隔直环节（微分环节）起作用的结果。

我们再从另外一个方面来探讨这个问题，PSS 未投时，当原动机负荷发生变化时，无功变化情况怎样？我们看一下下面的例子，2004 年 3 月 18 日 0 时 50 分，汽机做负荷阶跃试验，160 MW 降到 90 MW 其录波如图 10 所示。

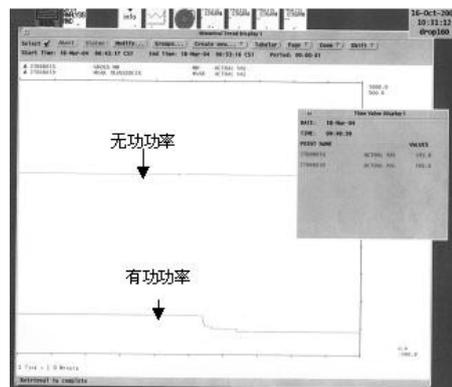


图 10 PSS 未投时有功变化时录波

Fig.10 PSS cast change is recorded when the active wave

从图 10 我们可以看出，在 PSS 未投入时，原动机的功率虽然发生跃变，但无功没有发生变化。

无功的呈阶跃式增加，对转子绕组及励磁回路是不利的，因此应采取对策。

5 结论与对策

通过以上对 PSS 的传递函数结构及其抑制低频振荡的机理分析，我们不难看出以下结论：

1) 2006 年 8 月 31 日 21 点 33 分 07 秒，在手动打闸之后出现的无功突升是 PSS 作用的结果，是典型的有功型 PSS 无功反调现象；这种现象与早在 2005 年 8 月 19 日 14 时 57 分 22 秒#2 汽机出现 RUNBACK 现象降负荷时无功变化情况一致，反调现象更加清楚的展现我们面前。

2) 从图 11 我们可以看出，在 PSS 未投入时，虽然有功发生跃变，但是无功没有变化。

3) 无功反调，使励磁电流出现突升或突降现象，将会对转子造成冲击。

4) 快速励磁调节器（快速励磁调节器的优点是可以改善系统的暂态稳定与静态稳定）的应用使系统阻尼恶化，是造成低频振荡的重要原因，因此将

（下转第 109 页 continued on page 109）

- Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [2] 刘凤君. 市电电能质量补偿技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- LIU Feng-jun. The Compensator Technology of Power Energy Quality[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [3] Ming Tsung Tsai. Design of a Compact Series-Connected AC Voltage Regulator with an Improved Control Algorithm[J]. Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(4): 933-936.
- [4] Faiz J, Siahkolah B. New Solid-state on Load Tap-changers Topology for Distribution Transformers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(1): 136-141.
- [5] 陈将. 无触点大功率补偿式交流稳压电源的研究(硕士学位论文)[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- CHEN Jiang. The Research of No-contact High Power Compensator AC Stabilized Voltage Supply, Thesis[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [6] 李晓明, 黄俊杰, 尹项根, 等. 平滑无冲击电力电子有载调压装置[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 45-48.
- LI Xiao-ming, HUANG Jun-jie, YIN Xiang-gen, et al. Smooth and Impactive Power Electric On-load Voltage Regulator Device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 45-48.
- [7] 刘世琦, 皮伟才, 李晓明, 等. 互斥晶闸管组通断控制方法在OLTC中的应用[J]. 高压电器, 2005, 41(5): 360-362.
- LIU Shi-qi, PI Wei-cai, LI Xiao-ming, et al. The Make-and-break Control Method of Mutually Exclusive SCR in OLTC[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(5): 360-362.

收稿日期: 2009-03-06; 修回日期: 2009-04-01

作者简介:

江友华(1974-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子技术及其在电力系统中的应用. E-mail: jyhua0306@sina.com

(上接第 80 页 continued from page 80)

PSS 投入以抑制机组在扰动后的低频振荡是必要的。

5) 从图 3 所示的 PSS 传递函数的构造当中, 我们不难可以分析看出, 这种有功型 PSS 存在反调(无功及励磁随原动机功率变化) 是不可避免的现象。

针对有功型 PSS 无功反调现象, 提出以下对策:

- 1) 在机组启动程序跳闸时, 自动将 PSS 退出运行。
- 2) 在出现 RUNBACK 时, 将 PSS 退出。
- 3) 考虑采用加速功率型 PSS。

(上接第 103 页 continued from page 103)

- [16] 马以春. 蓄电池综合性能测试系统的研制[J]. 电源技术, 2005, 29(1): 46-48.
- MA Yi-chun. Develop Test System of Comprehensive Performance or Storage Battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2005, 29(1): 46-48.
- [17] 陈朋朋, 郭忠文, 潘洪华, 等. 电力监测软件系统核心构件设计与实现[J]. 计算机应用, 2008, 28(6): 366-368.
- CHEN Peng-peng, GUO Zhong-wen, PAN Hong-hua, et al. The Design and Application of Software to Monitor Power System[J]. Computer Application, 2008, 28(6):

参考文献

- [1] 倪以信. 动态电力系统理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [2] 方思立, 朱方. 电力系统稳定器的原理及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.

收稿日期: 2009-12-01; 修回日期: 2010-01-18

作者简介:

张仰飞(1970-), 男, 副教授, 博士研究生, 研究方向为电力系统建模与控制; E-mail: zhangyf@njit.edu.cn

袁越(1966-), 男, 教授, 博士, 研究方向为电力系统优化与控制。

陈小虎(1962-), 男, 教授, 博士, 研究方向为电力系统运行与控制。

366-368.

- [18] 周立功, 等. ARM 嵌入式系统基础教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [19] 周旭. 电子设备防干扰原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [20] 何宏, 张宝峰, 张大建, 等. 电磁兼容与电磁干扰[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.

收稿日期: 2009-03-05; 修回日期: 2009-05-13

作者简介:

邓可(1974-), 男, 研究生, 实验师, 从事计算机领域教学和研究. E-mail: dk2156@163.com