

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190356

应用开环补偿原理整定 PSS 参数的准确性分析

刘翔宇¹, 李晓明¹, 李世辉², 鲁鹏², 程伦², 何玉灵³, 王一峰²

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021; 2. 国网河北省电力有限公司, 河北 石家庄 050000; 3. 华北电力大学设备故障诊断与检测技术研究所, 河北 保定 071003)

摘要: 通过开环条件和闭环条件的对比, 研究了应用开环补偿原理进行 PSS 参数整定方法的准确性。首先通过简化得到单一电功率输入信号的 PSS 模型。应用开环补偿理论分析方式研究了控制参数变化对幅频特性、相频特性的影响。然后采用实际电网仿真方式, 闭环条件下研究了参数变化对临界增益和阻尼效果的影响。通过对比开环和闭环的结果, 发现了开环补偿理论不能精确分析 PSS 阻尼效果。分析结果表明 PSS 参数整定需考虑幅频特性、相频特性协调配合。仿真结果发现了隔直环节参数对临界增益参数、阻尼效果存在影响, 临界增益未受幅频增益最大值影响。最后通过对比分析, 给出了参数整定工作的改进建议。该成果对于 PSS 参数的优化配置具有参考价值。
关键词: PSS; 临界增益; 相位补偿; 幅频特性; 开环补偿

Accuracy analysis of using the open-loop compensation principle for PSS parameter setting

LIU Xiangyu¹, LI Xiaoming¹, LI Shihui², LU Peng², CHENG Lun², HE Yuling³, WANG Yifeng²

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China; 2. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China; 3. Institute of Equipment Fault Diagnosis and Testing Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: By comparing the open-loop condition and closed-loop condition, the accuracy of PSS parameter setting method using open-loop compensation principle is studied. Firstly, the PSS model which has one single electric power input signal is acquired by simplification. The influence of control parameters on amplitude-frequency characteristics and phase-frequency characteristics is studied by using open-loop compensation theory. Then the influence of parameter variation on critical gain and damping effect is studied under closed-loop condition by means of real power grid simulation. By comparing the open-loop condition and closed-loop condition results, it is found that the open-loop compensation theory cannot accurately analyze the PSS damping effect. The results show that the coordination of amplitude-frequency and phase-frequency characteristics is needed in PSS parameter setting. The simulation results show that the critical gain and damping effect is influenced by the parameters of the DC block link, and the critical gain is not affected by the maximum amplitude-frequency gain. Finally, some suggestions for improving parameter setting are given through comparative analysis, the achievements obtained in this paper can be used as a reference for the optimal configuration of PSS parameters.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777074 and No. 51307058), the Chinese Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2018YQ03), and the Hebei Provincial Top Youth Talent Support Program (No. [2018]-27).

Key words: power system stabilizer (PSS); critical gain; phase compensation; amplitude-frequency characteristics; open-loop compensation

0 引言

随着远距离互联电网的发展, 提高电网的动态

稳定特性成为保障电网安全的重要研究内容^[1-3]。世界各国普遍采用 PSS(电力系统稳定器)提高电力系统动态稳定特性^[4-7]。PSS 产生于工程实际, 原理简单清晰^[8], 对于提高电网动态稳定特性具有重要作用。其控制参数的选取直接决定了 PSS 的效果和电网的安全稳定水平, 分析 PSS 参数对阻尼效果的影响, 研究和完善参数整定方法具有重要意义。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777074, 51307058); 中央高校基本科研业务费专项基金资助(2018YQ03); 河北省青年拔尖人才支持计划项目资助([2018]-27)

工程应用中,一般按照技术标准^[9]规定流程进行 PSS 参数整定,依据既定 PSS 模型和典型参数,凭借工程经验试凑满足要求的参数。采用相位补偿理论^[10-12]进行 PSS 参数设计时,可将优化目标转换为数学问题进行求解^[13-16],获得的参数鲁棒性强。但相位补偿方法^[17]依据开环传递函数计算补偿效果,与实际运行时的闭环控制存在差异^[18]。PSS 参数的改变同时影响 PSS 传函的幅频、相频特性,主要考虑相频补偿效果,可能会导致 PSS 在低频^[19]、高频^[20]出现幅频增益过大的问题。另外,电力系统运行状态变化会影响 PSS 性能^[21],依靠单机无穷大系统进行理论推导^[18]或对 PSS 模型进行理论分析^[20,22],均有可能存在偏差。实际中也出现了应用该方法获得 PSS 参数提供负阻尼的案例^[23]。因此,通过实际电网仿真方式研究开环补偿原理计算实际闭环运行特性的效果,检验现有 PSS 参数整定方法的准确性是十分必要的。

本文将在参考文献[17-21]的基础上,研究 PSS 参数在常规可行区间变化对 PSS 性能的影响,对比开环补偿理论分析的结果和实际电网闭环仿真结果的异同,研究各个控制环节参数、PSS 幅频特性对临界增益、阻尼效果的影响,总结理论分析和仿真验证的结果,为 PSS 参数工程整定提供经验和依据。

1 PSS 开环控制模型分析

1.1 PSS2A 模型的工程整定

目前我国电网中应用最为广泛的加速功率型 PSS 如图 1 所示。转速差、功率差信号通过测量装置引入 PSS 的控制模型,经过隔直环节滤除直流信号后,转速信号、功率信号合成加速功率信号。合成信号最后经过移相环节作用得到合适的相位角度,然后将输出信号 V_s 作用于励磁系统,实现附加励磁控制。PSS 的模型结构主要考虑了相位的控制,未将 PSS 的幅频增益作为重点控制内容。如图 2 所示,技术标准^[9]规定的 PSS 参数整定流程中,也主要考虑了相位补偿及增益系数 K_p 的确定。

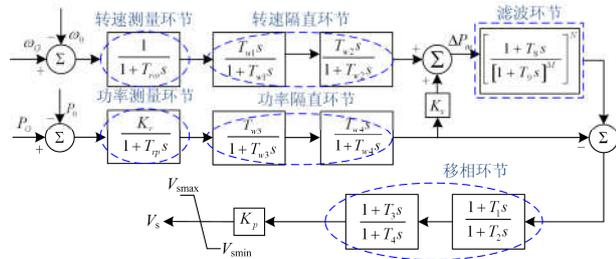


图 1 PSS2A 型电力系统稳定器的模型框图

Fig. 1 Model block diagram of PSS2A power system stabilizer

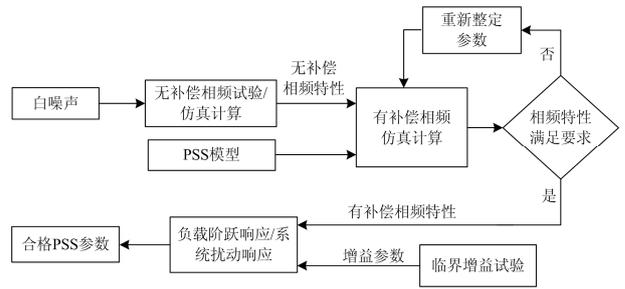


图 2 PSS 参数整定流程

Fig. 2 Flow chart of PSS parameter modification

根据工程经验^[24], K_r 和 K_s 的整定主要为了保证合成信号 ΔP_m 为零,该参数的整定与发电机转动惯量相关。测量环节参数 T_{rp} 、 T_{rw} 、 K_r 决定于测量环节的物理特性。因此 PSS 参数的工程整定主要在于配置隔直环节参数、移相环节参数以及增益系数 K_p 大小。

1.2 PSS 的幅相频特性

考虑到图 1 中合成信号 ΔP_m 为零,则图 1 所示模型可以简化成如图 3 所示的单一电功率输入信号的 PSS。PSS 传递函数可列写为

$$G(s) = K_p \frac{K_r}{1+T_{rp}s} \cdot \frac{T_{w3}}{1+T_{w3}s} \cdot \frac{T_{w4}s}{1+T_{w4}s} \cdot \frac{1+T_1s}{1+T_2s} \cdot \frac{1+T_3s}{1+T_4s} \quad (1)$$

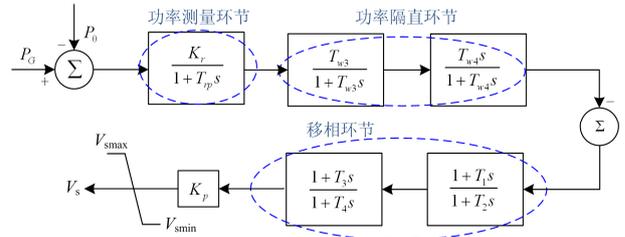


图 3 简化后的 PSS 模型

Fig. 3 Model block diagram of simplified PSS

根据式(1)可得到 PSS 相频特性为

$$\phi_p = -\arctan(\omega T_{rp}) - \arctan(\omega T_{w3}) + \pi/2 - \arctan(\omega T_{w4}) + \arctan(\omega T_1) - \arctan(\omega T_2) + \arctan(\omega T_3) - \arctan(\omega T_4) \quad (2)$$

其幅频特性为

$$f_p = \frac{K_p K_r}{\sqrt{1+(T_{rp} \cdot \omega)^2}} \frac{T_{w3}}{\sqrt{1+(T_{w3} \cdot \omega)^2}} \cdot \frac{T_{w4} \omega}{\sqrt{1+(T_{w4} \cdot \omega)^2}} \cdot \frac{\sqrt{1+(T_1 \cdot \omega)^2}}{\sqrt{1+(T_2 \cdot \omega)^2}} \cdot \frac{\sqrt{1+(T_3 \cdot \omega)^2}}{\sqrt{1+(T_4 \cdot \omega)^2}} \quad (3)$$

考虑到 K_p 、 K_r 为常数,经过简化的幅频特性可

表示为(下文幅频特性指 F_p)

$$F_p = \frac{1}{\sqrt{1+(T_{rp} \cdot \omega)^2}} \cdot \frac{T_{w3}}{\sqrt{1+(T_{w3} \cdot \omega)^2}} \cdot \frac{T_{w4} \omega}{\sqrt{1+(T_{w4} \cdot \omega)^2}} \cdot \frac{\sqrt{1+(T_1 \cdot \omega)^2}}{\sqrt{1+(T_2 \cdot \omega)^2}} \cdot \frac{\sqrt{1+(T_3 \cdot \omega)^2}}{\sqrt{1+(T_4 \cdot \omega)^2}} \quad (4)$$

实际上参数的整定同时影响 PSS 的相频、幅频特性, 相频特性 ϕ_p 、幅频特性 F_p 、增益系数 K_p 共同决定了 PSS 的效果。对参数整定效果的分析也应该针对 ϕ_p 、 F_p 和 K_p 同时进行。

2 开环模型下参数补偿效果分析

采用某典型火电机组作为实例, 该机组采用了图 1 所示的电力系统稳定器, 其配置的典型工程参数如表 1 所示。利用实际电网数据, 仿真获得该机组励磁系统无补偿相频特性 ϕ_c 如图 4 所示。

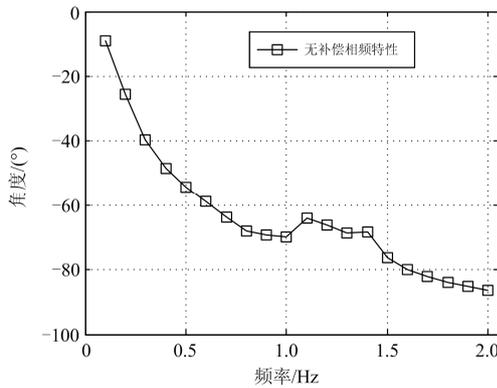


图 4 某机组无补偿相频特性

Fig. 4 Uncompensated phase-frequency characteristics of a unit

表 1 某机组 PSS 工程参数

Table 1 PSS engineering parameters of a unit

参数	T_1	T_2	T_3	T_4
整定值	0.22	0.02	0.22	0.02
参数	T_{w3}	T_{w4}	K_p	T_{rp}
整定值	5	5	4	0.02

以该机组为例, 依据 PSS 开环补偿原理, 计算理论上隔直环节、移相环节控制参数变化时 PSS 的相频特性和幅频特性变化。

2.1 隔直环节

以表 1 典型参数为基础, 同步调整隔直环节参数 T_{w3} 、 T_{w4} 大小, 在隔直参数常用取值区间[4,7]发生变化时, 机组有补偿相频特性 ϕ_c ($\phi_c + \phi_p$)、PSS 幅频特性 F_p 如图 5、图 6 所示。

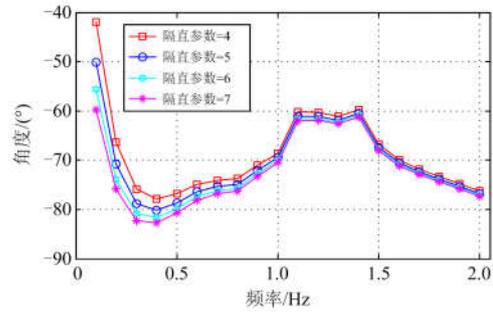
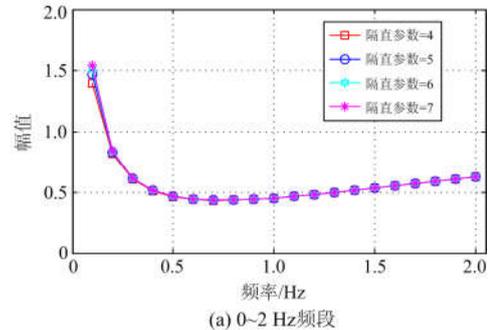
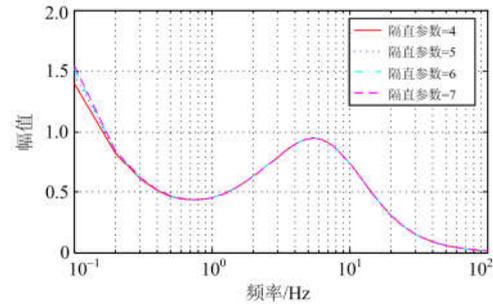


图 5 不同隔直参数下的有补偿相频特性

Fig. 5 Compensated phase-frequency characteristics when different blocking parameters are used



(a) 0~2 Hz频段



(b) 0~100 Hz频段

图 6 不同隔直参数下的幅频特性

Fig. 6 Amplitude-frequency curves when different blocking parameters are used

由图 5、图 6 可知, 在 0~2 Hz, 隔直环节参数的改变主要对低频段产生影响。随着隔直环节参数的增大, 0~1 Hz 频段相频补偿的滞后角度增加, 0.1~0.2 Hz 频段幅频增益略微增大。由图 6 可知, 除了 0.1~0.2 Hz 频段, 在 0~100 Hz 幅频特性几乎不受隔直参数变化的影响。

2.2 移相环节参数 T_1

以表 1 参数为基础, 调整移相环节参数 T_1 大小, T_1 在常用取值区间[0.15,0.3]发生变化时, 有补偿相频特性 ϕ_c 、幅频特性 F_p 如图 7、图 8 所示。

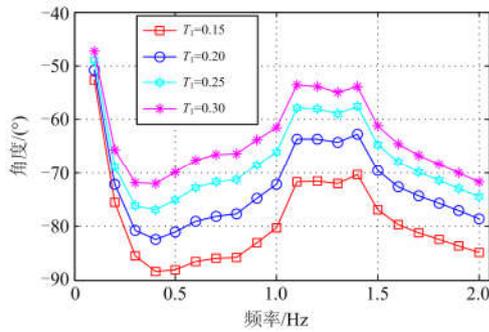


图 7 T_1 取值变化时的有补偿相频特性
Fig. 7 Compensated phase-frequency characteristics when the value of T_1 changes

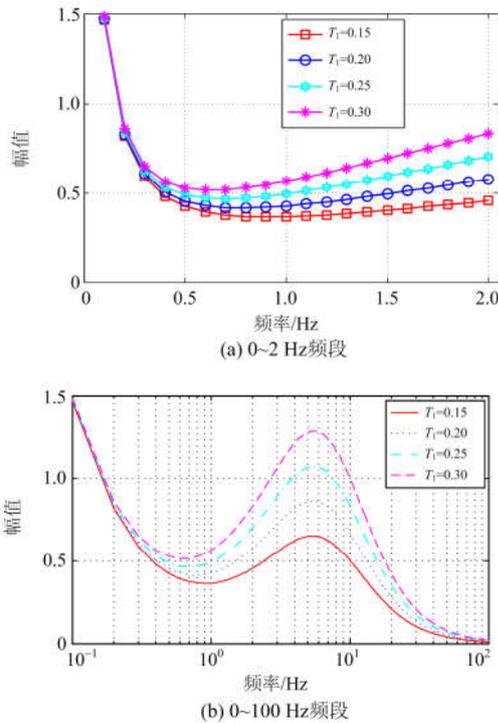


图 8 T_1 取值变化时的的幅频特性
Fig. 8 Amplitude-frequency curves when the value of T_1 changes

由图 7 可知，在 0~2 Hz 范围内，移相环节参数 T_1 的增大，将使有补偿相频特性 ϕ_c 整体滞后角度减小。由图 8 可知，在 0~100 Hz 频段范围内，幅频增益随着 T_1 的增大而增大，在增益的极值点增大幅度最为显著。极值点对应的频率未受移相环节参数 T_1 取值变化的影响。

2.3 移相环节参数 T_2

以表 1 参数为基础，调整移相环节参数 T_2 大小， T_2 在常用取值区间[0.01,0.04]发生变化时，有补偿相频特性 ϕ_c 、幅频特性 F_p 如图 9、图 10 所示。

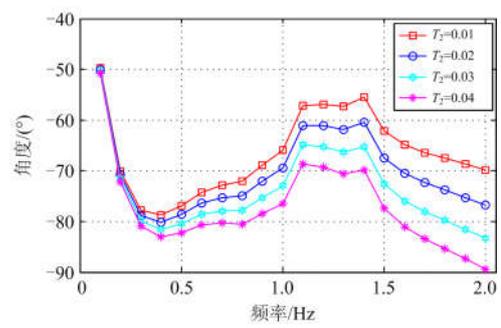


图 9 T_2 取值变化时的有补偿相频特性
Fig. 9 Compensated phase-frequency characteristics when the value of T_2 changes

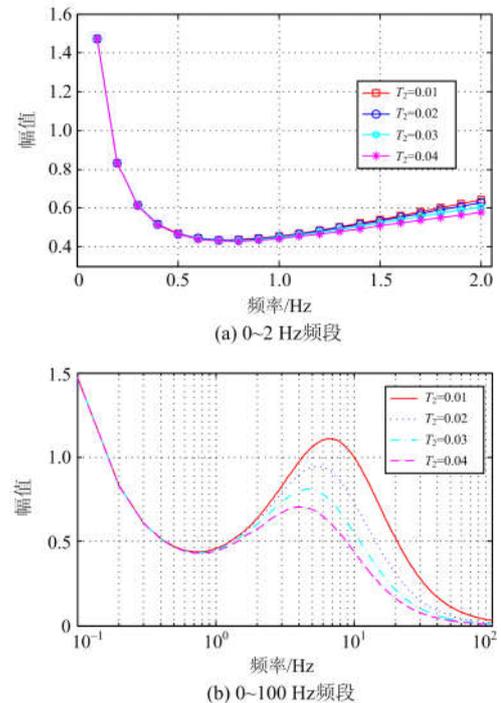


图 10 T_2 取值变化时的的幅频特性
Fig. 10 Amplitude-frequency curves when the value of T_2 changes

由图 9 可知，在 0~2 Hz 范围内，移相环节参数 T_2 的增大，将使有补偿相频特性 ϕ_c 整体滞后角度增大。由图 10 可知，在 0~1 Hz 频段内增益变化不显著，在 0~100 Hz 其他频段范围内，幅频增益随着 T_2 的增大而减小，增益极值点对应的频率随着 T_2 增大而减小。

3 闭环模型下参数对临界增益影响分析

依据试验导则^[9]的要求，参考文献[20]的方法，采用实际电网离线数据进行仿真，不断增大 K_p 大小，至发电机电压出现持续振荡时，即获得对应参

数的临界增益系数 K_{pmax} 。经仿真发现, 采用不同参数时, 该机组由于增益过大发生电压振荡的频率均为 1.5 Hz 左右。

3.1 隔直环节对临界增益的影响

以表 1 参数为基础, 仅更改隔直环节参数大小, 在不同隔直参数下得到机组的临界增益系数如图 11 所示。

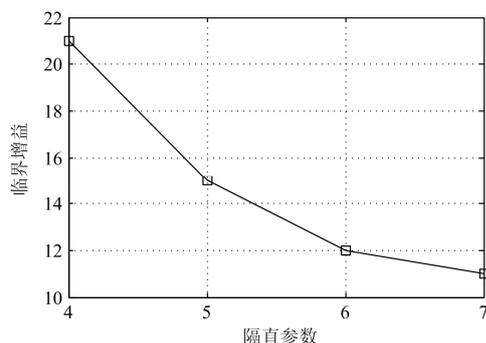


图 11 采用不同隔直参数时的临界增益

Fig. 11 Critical gain with different blocking parameters

由图 11 可知, 随着隔直环节参数由 4 增大到 7, 临界增益系数由 21 下降到 11, 即随着隔直环节参数的增大, 该机组 PSS 临界增益系数 K_{pmax} 将降低。

3.2 移相参数 T_1 对临界增益的影响

以表 1 参数为基础, 仅更改 T_1 大小, T_1 取不同值时, 得到机组的临界增益系数如图 12 所示。

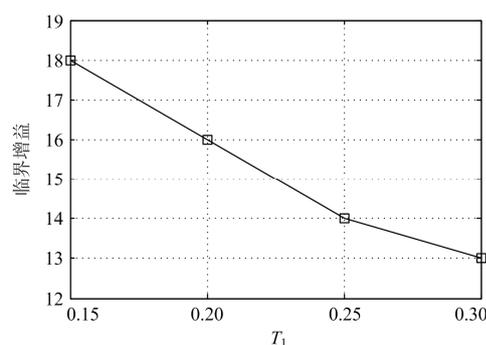


图 12 T_1 取值不同时的临界增益

Fig. 12 Critical gain with different values of T_1

由图 12 可知, 随着移相环节参数 T_1 由 0.15 增大到 0.3, 临界增益系数由 18 下降到 13, 即随着移相参数 T_1 的增大, 该机组 PSS 临界增益系数 K_{pmax} 将降低。

3.3 移相参数 T_2 对临界增益的影响

以表 1 参数为基础, 仅更改 T_2 大小, T_2 取不同值时, 得到机组的临界增益系数如图 13 所示。

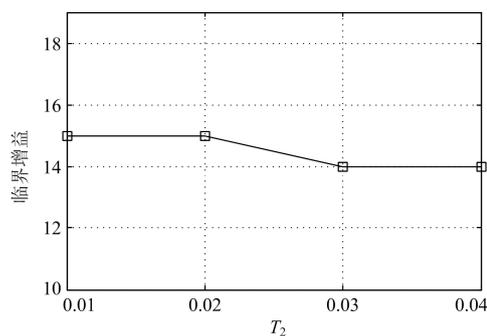


图 13 T_1 取值不同时的临界增益

Fig. 13 Critical gain with different values of T_1

由图 13 可知, 随着移相参数 T_2 由 0.01 增大到 0.04, 临界增益系数为 14~15, 即随着移相参数 T_2 的增大, PSS 临界增益系数 K_{pmax} 变化不显著。

3.4 开环模型与闭环模型仿真结果对比

对比图 6(b)、图 8(b)、图 10(b) 所示幅频增益 F_p 变化趋势, 3 图中最大增益值对应频率明显高于仿真结果 1.5 Hz。 F_p 随着参数的增加分别呈现无明显变化、变大、变小趋势。由式 (3) 可知, 幅频增益 F_p 与增益 K_p 的乘积决定了 PSS 实际输出增益 f_p 大小。由文献 [20] 可知, 理论上临界增益应呈现, 无明显变化、变小、变大趋势。

随着参数的增加, 开环与闭环情况下临界增益值变化趋势如表 2 所示。由表 2 可知, 闭环仿真所得结果与开环结果存在差异, 所得结果与文献 [20] 不一致。

表 2 参数增大时临界增益变化趋势

Table 2 Variation trend of critical gain with parameters increasing

参数	隔直环节参数	T_1	T_2
开环理论趋势	变化不明显	变小	变大
闭环仿真趋势	变小	变小	变化不明显

4 闭环模型下参数对阻尼效果影响分析

4.1 阻尼效果仿真分析

采用实际电网数据仿真, 获得该机组并网点附近发生某断线故障时该机组的功率波动曲线, 采用 Prony 分析法获得该曲线阻尼比和振荡频率, 曲线的振荡频率为 1.4 Hz 左右。

以表 1 参数为基础, 改变隔直环节参数、移相环节参数大小, 获得不同参数下功率曲线的阻尼比如如图 14—图 16 所示。

由图 14—图 16 可知, 随着隔直环节、移相环节参数的增大, 该机组在相同扰动下, 功率振荡曲线阻尼比均呈现降低趋势。

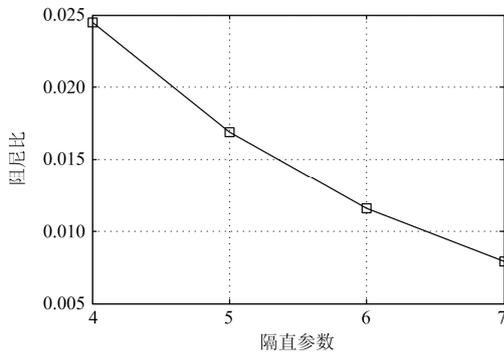


图 14 采用不同隔直参数时的阻尼比

Fig. 14 Damping ratio with different blocking parameters

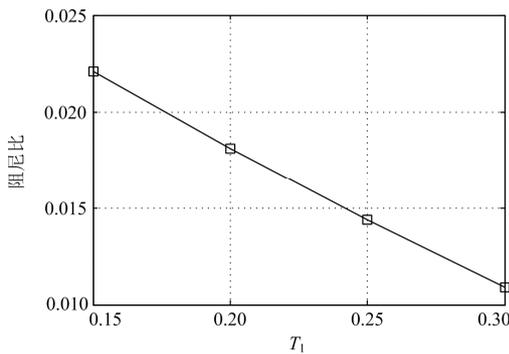


图 15 T1 取值不同时的阻尼比

Fig. 15 Damping ratio with different values of T1

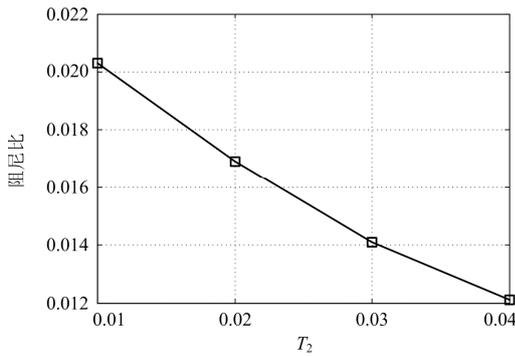


图 16 T2 取值不同时的阻尼比

Fig. 16 Damping ratio with different values of T2

4.2 开环模型与闭环模型仿真结果对比

由 2.1 节可知, 1.4 Hz 频点附近 PSS 的幅频增益 F_p 几乎不受隔直参数变化的影响, 有补偿相频特性 ϕ_c 也变化较小。理论上隔直参数的改变在 1.4 Hz 附近, 不应影响功率振荡的阻尼比。由图 14 可知, 闭环模型下随着隔直参数增大, 该机组振荡功率的阻尼比逐渐减小。开环模型与闭环模型下, 改变 PSS 参数产生的效果存在差异。

由 2.2 节可知, 1.4 Hz 频点附近随着 T_1 的增大, PSS 的幅频增益 F_p 逐渐增大, 起到增加阻尼的作用; PSS 的相频特性逐渐远离 -90° , 起到减少阻尼的作用。由图 15 可知随着 T_1 的增大, 振荡功率的阻尼比逐渐减小。由 2.2 节可知, 1.4 Hz 频点附近随着 T_2 的增大, PSS 的幅频增益 F_p 逐渐减小, 起到减小阻尼的作用, PSS 的相频特性逐渐接近 -90° , 起到增加阻尼的作用。由图 16 可知随着 T_2 的增大, 振荡功率的阻尼比逐渐减小。综合以上变化, 可知相频特性并不能单独决定 PSS 的阻尼效果, 而是幅频特性、相频特性共同决定了阻尼效果。

5 结论与建议

本文应用开环模型和闭环模型, 分析和对比了控制参数变化对 PSS 性能的影响。通过仿真结论检验了采用开环增益理论分析 PSS 参数补偿效果的准确性, 研究了现有技术标准主要考虑相频特性补偿是否能够得到理想的阻尼效果, 验证了临界增益与幅频增益最大值是否存在相关关系。通过研究分析得到的结论和建议如下。

5.1 结论

- 1) 应用开环模型进行参数整定时, 0~2 Hz 频段内, 增大隔直环节参数, 将使低频段滞后角度增加; 增大 T_1 , 将使整个频段滞后角度减小; 增大 T_2 , 将使整个频段滞后角度增大。
- 2) 应用开环模型进行参数整定时, 0~2 Hz 频段内, 理论上增大隔直环节参数, 对 PSS 幅频特性影响较小; 增大 T_1 , 将使增益变大; 增大 T_2 , 将使增益减小。
- 3) 应用开环补偿原理, 对 PSS 传递函数进行理论分析, 隔直环节参数变化对 PSS 幅频特性无明显影响。但闭环仿真结果显示临界增益、阻尼效果均受隔直环节参数的影响。开环特性与闭环特性存在差异, 应用开环补偿原理分析 PSS 效果存在一定不足。
- 4) 移相参数的改变不仅影响 PSS 相频特性, 也影响幅频特性。第 4 节的仿真结果也表明, 阻尼效果不仅仅受相频特性影响, 而是相频特性、幅频特性综合作用的结果。

5) 未发现临界增益 K_{pmax} 和 PSS 幅频增益高频段最大值存在关联, 也未发现临界增益受低频段增益较高的影响。这一结果与文献[19-20]阐述存在一定差异。本文实际电网仿真与文献理论分析有所不同, 该差异是否由于理论分析中采用开环特性代替闭环特性尚需进一步研究。

5.2 建议

- 1) 在整定 PSS 参数时, 应同时考虑隔直环节参

数的隔直效果及其对 PSS 阻尼效果的影响, 应将隔直参数的选定作为 PSS 参数整定的一项重要内容。

2) 在参数整定时仅考虑相频特性最优并不能得到良好的阻尼效果, PSS 参数整定时考虑幅频特性、相频特性协调配合是必要的。

3) 开环相位补偿理论不能精确分析实际电网多机系统中, PSS 控制参数的效果。需精准控制阻尼效果的机组, 应采用仿真分析方式进行检验。

参考文献

- [1] 潘志豪, 王德林, 孙博, 等. 异步联网后的云南电网中 PSS2B 增益改进[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 71-76.
PAN Zhihao, WANG Delin, SUN Bo, et al. Gain improvement of PSS2B in Yunnan Power Grid after asynchronous connection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 71-76.
- [2] 孙博, 康积涛, 潘志豪. 基于频率响应法的发电机励磁限制与 PSS 协调控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 105-110.
SUN Bo, KANG Jitao, PAN Zhihao. Coordinated control between under-excitation limiter and power system stabilizer of generator based on frequency response method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 105-110.
- [3] 沈鑫, 束洪春, 曹敏, 等. 大区互联电网的动态稳定风险评估研究与应用[J]. 电工技术学报, 2016, 31(增刊 1): 230-238.
SHEN Xin, SHU Hongchun, CAO Min, et al. Risk assessment and research of dynamic stability for large-scale interconnected grids and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(S1): 230-238.
- [4] 郭思源, 李理, 李振文, 等. 电力系统稳定器 PSS4B 参数优化的研究[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(4): 107-113.
GUO Siyuan, LI Li, LI Zhenwen, et al. Research on the PSS4B parameters optimization of power stabilizer[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(4): 107-113.
- [5] 仲启树, 唐志军, 金涛. 基于部分左特征结构配置的电力系统优化阻尼控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(13): 3012-3022.
ZHONG Qishu, TANG Zhijun, JIN Tao. Optimized damping control of power system using partial left eigenstructure assignment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(13): 3012-3022.
- [6] SURINKAEW T, NGAMROO I. Hierarchical co-ordinated wide area and local controls of DFIG wind turbine and PSS for robust power oscillation damping[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 943-955.
- [7] JALAYER R, OOI B T. Co-ordinated PSS tuning of large power systems by combining transfer function-eigenfunction analysis (TFEA), optimization, and eigenvalue sensitivity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 2672-2680.
- [8] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [9] 国家能源局. 电力系统稳定器整定试验导则: DL/T 1231—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
National Energy Bureau. Experiment principles of PSS setting: DL/T 1231—2013[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [10] LIU Xiangyu, HE Yuling, YAO Jian. A new hybrid PSS optimization method based on improved active set algorithm[J/OL]. Mathematical Problems in Engineering, 2018[2018]. <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2018/4348257/>.
- [11] 刘少博, 王德林, 马宁宁, 等. 水电机组引起的超低频振荡特性及抑制措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5354-5362, 5582.
LIU Shaobo, WANG Delin, MA Ningning, et al. Study on characteristics and suppressing countermeasures of ultra-low frequency oscillation caused by hydropower units[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5354-5362, 5582.
- [12] 刘翔宇, 孟杰, 何玉灵, 等. 考虑电网动态稳定特性的 PSS 相频特性优化[J]. 华北电力大学学报, 2018, 45(6): 35-43.
LIU Xiangyu, MENG Jie, HE Yuling, et al. PSS phase-frequency characteristic optimization considering dynamic stability of the grid[J]. Journal of North China Electric Power University, 2018, 45(6): 35-43.
- [13] 张国洲, 易建波, 滕予非, 等. 多运行方式下多机 PSS 的协调优化方法[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2797-2805.
ZHANG Guozhou, YI Jianbo, TENG Yufei, et al. Coordinated optimization of multi-machine power system stabilizers under multiple operating conditions[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2797-2805.
- [14] SHAHGOLIAN G, MOVAHEDI A. Power system stabiliser and flexible alternating current transmission systems controller coordinated design using adaptive velocity update relaxation particle swarm optimisation algorithm in multi-machine power system[J]. IET

- Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(8): 1860-1868.
- [15] CLOUGHLEY M, MUTTAQI K M, DU Haiping. Damping of low-inertia machine oscillations using Takagi-Sugeno fuzzy stabiliser tuned by genetic algorithm optimization to improve system stability[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(2): 339-352.
- [16] 孙宁杰, 王德林, 魏久林, 等. 基于SDM-Prony和改进GWO算法的多机PSS参数最优设计[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 44(10): 88-95.
SUN Ningjie, WANG Delin, WEI Jiulin, et al. Optimal design of multi-machine PSS parameters based on SDM-Prony and improved GWO algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 44(10): 88-95.
- [17] 刘翔宇, 鲁鹏, 陈大军, 等. 运行方式及工程等效对PSS试验的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 96-103.
LIU Xiangyu, LU Peng, CHEN Dajun, et al. Impact of operation conditions and engineering equivalent on PSS test[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 96-103.
- [18] 霍承祥, 刘增煌, 朱方. 运用电力系统稳定器对励磁系统进行相位补偿的理论与实践[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 2989-2997.
HUO Chengxiang, LIU Zenghuang, ZHU Fang. Theory and field practice of phase compensation on generator excitation system by utilizing power system stabilizer[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 2989-2997.
- [19] 夏潮, 刘增煌, 朱方, 等. 两分支分段补偿的并行电力系统稳定器[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 20-25.
XIA Chao, LIU Zenghuang, ZHU Fang, et al. Sectional compensation parallel power system stabilizer with two independent channels[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 20-25.
- [20] 吴跨宇, 卢岑岑, 吴龙, 等. 一种新型双信号电力系统稳定器及其仿真研究[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1462-1468.
WU Kuayu, LU Cencen, WU Long, et al. A new PSS with double-signal input and its simulation research[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1462-1468.
- [21] 刘翔宇, 何玉灵, 孟凡超, 等. 既定PSS在不同运行状态下的适应性分析[J]. 电测与仪表, 2016, 53(15): 95-100.
LIU Xiangyu, HE Yuling, MENG Fanchao, et al. Adaptation analysis on fixed PSS under different performing conditions[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(15): 95-100.
- [22] 周年光, 王钦, 姚伟, 等. 发电机励磁辅环控制参数对电力系统阻尼的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 12-22.
ZHOU Nianguang, WANG Qin, YAO Wei, et al. Influence analysis of generator excitation auxiliary control parameters on power system damping[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 12-22.
- [23] 张俊峰, 李鹏, 郭琦. PSS2A模型的负阻尼案例分析及检测方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 127-130.
ZHANG Junfeng, LI Peng, GUO Qi. Negative damping case analysis and detection method of PSS2A model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 127-130.
- [24] 李莹, 朱方. PSS2A中加速功率合成环节的原理分析及现场参数整定原则方法[C] // 2013年中国电机工程学会年会论文集, 2013年11月20日, 中国, 成都.
LI Ying, ZHU Fang. The principle of parameter settings on the part of accelerating power composed in PSS2A model of IEEE[C] // 2013 Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, November 20, 2013, Chengdu, China.

收稿日期: 2019-03-29; 修回日期: 2019-06-05

作者简介:

刘翔宇(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统动态仿真、分析与控制, 电力系统网源协调. E-mail: liuxiangyu1234@163.com

(编辑 周金梅)