Vol.40 No.9 Sept. 2020

溪洛渡直流送端系统中PSS 对次同步振荡的 影响及应对措施

刘昕宇,徐 政,邢法财,张哲任 (浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要:为了探究溪洛渡直流送端系统曾出现次同步振荡现象的原因并提出相应的改进措施,首先采用复转矩系数法、测试信号法分析了威信电厂发电机组在投入电力系统稳定器(PSS)前后的阻尼特性。分析结果表明由于直流输电的接入削弱了电网次同步阻尼,PSS的投入引发了系统次同步振荡。在分析现有问题的基础上,通过对电磁功率偏差反馈型和加速功率偏差反馈型PSS进行改进,提出了新型可切换式PSS。最后基于PSCAD/EMTDC仿真平台,验证了新型可切换式PSS可提高系统次同步阻尼特性并对次同步振荡有良好的抑制效果。

关键词:次同步振荡;复转矩系数法;测试信号法;阻尼特性;可切换;PSS 中图分类号:TM 44;TM 721.1 文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202009028

0 引言

随着云南电网"两渡"直流投产,电网总体呈现 "强直弱交"的特性。在3回已投运的直流系统中, 溪洛渡直流送端系统与交流电网的联系最为薄弱, 快速励磁控制系统的普遍应用导致系统阻尼被削 弱,电网极易出现低频振荡现象[1]。因此为提高系 统低频段的电气阻尼,在威信和镇雄电厂中均投入 了电力系统稳定器(PSS)。PSS附加在发电机的励 磁控制系统中,通过相位补偿原理使合成阻尼转矩 与转速偏差信号相位接近从而向发电机提供正阻尼 转矩,以抑制低频振荡现象。然而对于传统的PSS 而言,其输入信号通常包含角速度偏差信号,当系统 发生次同步振荡时,角速度偏差信号中含有次同步 扭振信号。当以角速度偏差信号作为输入信号时, 为满足抑制低频振荡条件,即合成阻尼转矩与角速 度偏差信号相位接近,PSS必须采用对高频段信号 增益较大的超前环节作为其相位补偿环节。因此角 速度偏差信号中的次同步扭振信号被放大从而导致 PSS可能引发次同步振荡现象。

文献[2]指出威信和镇雄电厂汽轮发电机组与 交流电网的联系较弱且大部分功率由溪洛渡直流系 统送出,因此附近的牛寨整流站对其提供一定的次 同步电气负阻尼^[2-3]。此时PSS进一步提供次同步电

收稿日期:2020-04-03;修回日期:2020-07-13

基金项目:云南电网有限责任公司科技项目(电力系统电力电 子化对云南电网的影响及应对策略研究)

Project supported by the Science and Technology Project of Yunnan Power Grid Co., Ltd. (Study on the Influence of Power System Power Electronics on Yunnan Power Grid and Its Response Strategies) 气负阻尼,这导致系统在次同步频段的机械正阻尼 无法抵消较大的电气负阻尼从而引发次同步振荡 现象。

近年来许多研究分别围绕直流输电系统或PSS 所引发的次同步振荡现象进行分析,并给出相应的 抑制方法^[2,4-15]。然而针对直流输电系统中整流站附 近机组附加PSS的情况,相关文献论及甚少,该情况 的振荡机理与应对措施还有待进一步研究。文献 [2,4-6]分析了直流输电系统接入后引发次同步振 荡的原因并设计了次同步阻尼控制器,但当系统的 次同步电气负阻尼较小时,所发生的次同步振荡现 象持续时间短且可自行收敛,投入额外装置增加了 投资成本。文献[7-9]从不同角度分析了PSS投入 前后对系统低频和次同步阻尼的影响,但所得结论 并不统一。文献[10]基于不同系统分别从PSS的输 入、增益和相位补偿特性方面分析了其对次同步振 荡的影响,但并未考虑实际系统中PSS对功率反调 现象的抑制作用。文献「11-15]从不同的角度对PSS 的结构和参数进行改进和优化,提高了其在低频段 和次同步频段的稳定性,但由于所提供的正阻尼有 限,当PSS参数均为最优时,无论结构如何改进都不 能同时增大其在低频段和次同步频段的电气阻尼, 只能在保证对低频段提供足够阻尼的情况下改善次 同步频段的阻尼特性或尽可能减少对次同步频段的 影响。文献[16]提出采用协调控制的PSS为本文 PSS的设计思路提供参考,但其设计目的在于提高 多机系统的同步稳定性。

针对整流站附近机组附加PSS的情况,本文基 于溪洛渡直流送端系统网架,对交直流输电系统次 同步振荡机理进行分析并提出相应改进措施。首先 利用测试信号法分析了 PSS 投入前后系统全频段的 阻尼特性,从而得到电网出现次同步振荡现象的理 论依据;然后分别对电磁功率偏差反馈型和加速功 率偏差反馈型 PSS 的结构和参数进行改进,并通过 适当的协调控制策略构成新型可切换式电力系统稳 定器(SPSS);最后基于 PSCAD / EMTDC 仿真平台验 证了 SPSS 的 2 种切换状态对提高系统次同步阻尼的 有效性。

1 工程概况及系统结构

1.1 工程概况

溪洛渡直流输电工程是南方电网"十二五"规划 中重要的西电东送建设项目,其送端为云南省昭通 市的牛寨换流站,受端为广州市从化区的从化换 流站,采用双回双极单12脉动接线方式^[2]。作为我 国第一条也是世界上唯一的±500 kV同塔双回直流 输电工程,其额定功率为2×3200 MW,输电线路全 长1223 km。

溪洛渡直流送端系统位于云南电网东北部的末端,网架结构较为薄弱。其中威信和镇雄电厂分别 通过单回线与1座变电站相连且与牛寨换流站间的 电气距离较近。除直流输电以外,如今电力系统装 设很多在次同步频率范围内对功率和速度变化响应 较为灵敏的装置,如PSS、静止无功补偿器、汽轮机 高速电液调速系统等,而这些装置均有可能成为次 同步振荡的激发源^[3,17]。威信和镇雄电厂为改善低 频段的阻尼特性而增设PSS,但增加了系统发生次同 步振荡风险。鉴于该工程投运期间曾出现次同步振 荡现象,有必要对其振荡机理和应对措施进行研究。

1.2 系统结构

溪洛渡直流送端系统的结构如图1所示,其电 源由4个电厂组成,具体如下:威信和镇雄电厂分 别装有2台600 MW汽轮发电机组: 宣威电厂装有1 台300 MW 汽轮发电机组;溪洛渡水电厂装有9台 770 MW 水轮发电机组。由于宣威电厂机组装机容 量较小且与整流站间的电气距离较远,溪洛渡水电 厂与整流站间的电气距离较近但水电机组模态阻尼 和水轮机黏性阻尼较大,均不必分析其次同步振荡 稳定性,只需将其等效为次暂态电抗和固定频率电 源[3]。本文针对威信和镇雄电厂的发电机组展开研 究,为详细分析其次同步振荡特性,将发电机轴系采 用四质量块弹簧模型进行等效,即高压缸(HP)、低 压缸 A(LPA)、低压缸 B(LPB)和发电机(G),机组的 电气和轴系参数见附录表A1-A3。线路模型为π 型等效电路,溪洛渡直流送端系统采用详细的电磁 暂态模型,机组励磁控制系统采用IEEE ST1A型高 起始响应的励磁系统和双输入型PSS,其参数见附 录表A4和表A5。



◦ 500 kV 节点, ○ 固定频率电源, □ 等值次暂态电抗

图1 系统结构图

Fig.1 Diagram of system structure

2 PSS对系统次同步振荡风险影响的分析

本文采用复转矩系数法^[3]对PSS投入前后系统 全频段的阻尼特性进行分析。文献[3]所提出的复 转矩系数法不适用于多机系统,因此本文将多机系 统等效为单机固定频率电源,选择距离牛寨换流站 更近的威信电厂,分析机组的次同步阻尼特性。首 先将镇雄电厂机组等效为固定频率电源,并将威信 电厂的2台发电机等效为1台发电机。然后根据复 转矩系数法的分析步骤,依次在威信电厂的发电机 转子上施加频率变化范围为[0.1,2] Hz的低频段 (频率增量为0.1 Hz)、[2.5,49.5] Hz的次同步频段 (频率增量为0.5 Hz)扰动信号,且2个频段的扰动信 号幅值很小。则设所施加的扰动信号频率为 $f=\lambda f_0$ (λ 为频率间隔变量,在不同频段根据其频率增量以 整数倍等间隔取值,在低频段可取0.002、0.004、…、 0.04(20个频率点),在次同步频段可取0.05、0.06、…、 0.99(95个频率点);f₀=50 Hz)。

由复转矩系数法可知,对于单机对固定频率电源系统,小扰动信号下发电机的电磁转矩增量 ΔT_e 由同步电磁转矩 $K_e\Delta\delta$ 和电磁阻尼转矩 $D_e\Delta\omega$ 构成,即:

$$\Delta T_e = K_e \Delta \delta + D_e \Delta \omega \tag{1}$$

其中, $\Delta\delta$ 、 $\Delta\omega$ 分别为相对于同步旋转坐标系的功角 增量、角频率增量; K_e 、 D_e 分别为同步电磁转矩系数、 电磁阻尼转矩系数。 ΔT_e 、 K_e 、 D_e 、 $\Delta\omega$ 均为标幺值, $\Delta\delta$ 的单位为rad。 $\Delta\delta$ 和 $\Delta\omega$ 间的关系为:

$$\Delta \omega = \frac{\mathrm{d}\Delta\delta}{\omega_0 \mathrm{d}t} \tag{2}$$

其中, ω_0 为同步角频率;t为时间,单位为s。当发电 机施加频率为f的小幅振荡扰动信号时,可得如式 (2)所示的相量形式。

$$\begin{cases} \Delta \boldsymbol{\omega} = \Delta \boldsymbol{\delta} \times j 2\pi \lambda f_0 / \boldsymbol{\omega}_0 = j \lambda \Delta \boldsymbol{\delta} \\ \boldsymbol{\omega}_0 = 2\pi f_0 \end{cases}$$
(3)

此时式(1)的相量形式为:

$$\Delta T_{e}(f) = K_{e}(f) \Delta \delta(f) + D_{e}(f) \Delta \omega(f)$$
(4)
由式(3)和式(4)可得:

 $\Delta T_{e}(f)/\Delta \omega(f) = D_{e}(f) - jK_{e}(f)/\lambda$ (5) 由式(5)可得发电机的电磁阻尼转矩系数为:

$$D_{e}(f) = \operatorname{Re}\left(\Delta T_{e}(f) / \Delta \omega(f)\right)$$
(6)

图2为投入PSS前、后系统阻尼(标幺值)的计算 结果。由图2可知,投入PSS前,低频段系统阻尼较 弱且出现负值,存在低频振荡风险;次同步频段系统 阻尼受直流输电的影响也较弱但仍为正值,且一般 情况下系统都具有一定的机械阻尼,因此不会出现 次同步振荡现象。投入PSS后,虽然PSS为低频段 提供足够的正阻尼,抑制了系统的低频振荡,但次同 步频段系统阻尼有所减弱。根据威信电厂发电机组 轴系参数可得,其次同步扭振模态*j*(*j*=1,2,3)下对 应的频率*f_j*分别为13.02、22.77、28.16 Hz。在接近 次同步扭振模态频率附近扰动分量所引起的扭振幅 度较大,此时系统容易形成次同步振荡现象。对比 各次同步扭振模态频率处的系统阻尼可知,次同步 扭振模态3附近频段的电气阻尼下降最为严重,此 时系统易于发生次同步振荡现象。



图 2 投入 PSS 前、后系统电气阻尼特性 Fig.2 Electrical damping characteristic of system

with and without PSS

本文研究考虑最严重的次同步振荡条件,即 机组均采用空载机械阻尼衰减因数 σ_{mj} ,通常取 0.03 s⁻¹。由此计算出威信电厂发电机组在次同步扭 振模态j下的机械阻尼转矩系数 D_{mj} 和综合阻尼转矩 系数 D_i 为:

$$D_{\rm mj} = 2M_{\rm mj}\sigma_{\rm mj} \tag{7}$$

$$D_i = D_{\mathrm{m}i} + D_{\mathrm{e}i} \tag{8}$$

$$M_{\rm m} = J\omega^2 / S_{\rm B} \tag{9}$$

其中, M_{mj} 为次同步扭振模态惯性时间常数,单位为 MW·s/(MV·A);J为转动惯量,单位为kg·m²,其取 值见表A2; $S_{\rm B}$ 为基准容量; ω 为发电机组角频率。

由式(7)一(9)可得投入PSS前、后的阻尼转矩 系数和稳定情况如表1所示。表中,D_{mj}、D_{ej}、D_j均为 标幺值。由表1可知,投入PSS前发电机轴系各次同 步扭振模态下的D_j为正值,即不存在次同步振荡风 险;而投入PSS后,D₃出现负值,即此时系统存在次 同步振荡风险。由此可进一步判定PSS的投入是激 发次同步振荡的原因。

3 PSS的相位补偿原理与现存问题

为了使PSS在抑制低频振荡的同时不会激发次

表1 投入PSS前、后发电机阻尼转矩系数

Table 1 Damping torque coefficient of generators with and without PSS

PSS投入情况	模态 j	$D_{\mathrm{m}j}$	D_{ej}	D_j	是否稳定
	1	0.252	0.541	0.793	是
投入前	2	0.545	0.417	0.962	是
	3	0.328	0.365	0.693	是
	1	0.252	0.812	1.064	是
投入后	2	0.545	0.418	0.963	是
	3	0.328	-0.986	-0.658	否

同步振荡并改善系统的次同步阻尼特性,本文通过 分析其相位补偿原理以及现存问题对 PSS 进行 改进。

通常 PSS 的输入信号可分为角频率偏差 $\Delta \omega$ 、电磁功率偏差 ΔP_a 和加速功率偏差 ΔP_a ,其中 ΔP_a 等于机械功率偏差 ΔP_m 与电磁功率偏差的相量差。由文献[8]可知,当3种输入信号对低频段提供相同的正阻尼时,角频率偏差反馈型 PSS 对次同步频段提供的负阻尼最大,加速功率偏差反馈型 PSS(由于此类型 PSS 双馈入型,以下简称 PSS2B)次之,而电磁功率偏差反馈型 PSS 最小。然而当输入信号为电磁功率偏差时,由其引发的反调现象不被机械功率频繁变化的机组所采用^[18],其原理如下。

由 PSS 的相位补偿原理可知,当 PSS 给系统提供适当的正阻尼转矩(最理想的情况为提供与Δω同相位的正阻尼转矩)时,发电机电磁转矩偏差与 PSS 所提供系统阻尼转矩的合成阻尼转矩处于第一 象限,有利于提高系统的稳定性。PSS 相位补偿原 理的转矩矢量关系见图3。



图 3 PSS相位补偿原理的转矩矢量图 Fig.3 Torque vector diagram for phase compensation principle of PSS

本文分别对角频率偏差反馈型PSS、PSS2B、电磁功率偏差反馈型PSS的相位补偿原理进行分析。

(1)对于角频率偏差反馈型PSS,其输入信号为 $\Delta \omega$,在不提供相位补偿时的附加电磁转矩增量相量 为 ΔT_{e1} ,此时需超前补偿相位 ϕ_1 使 ΔT_{e1} 与 $\Delta \omega$ 同相位。

(2)对于PSS2B,其输入信号为加速功率偏差信 号 ΔP_a ,由于其相位与 $\Delta \omega$ 接近,当机械功率变化时 电磁功率偏差信号 ΔP_e 与转速偏差信号 $\Delta \omega$ 对PSS 输出的影响相抵消来抑制反调现象,PSS2B在不提 供相位补偿时的附加电磁转矩为 ΔT_{e2} 或 $\Delta T'_{e2}$,此时 需滞后补偿相位 ϕ_2 或超前补偿相位 ϕ'_2 使附加电磁 转矩与 $\Delta \omega$ 同相位。

(3)对于电磁功率偏差反馈型PSS,其输入信号 为 $-\Delta P_{e}$,PSS在不提供相位补偿时的附加电磁转矩 为 ΔT_{e3} ,此时需滞后补偿相位 ϕ_{3} 使附加电磁转矩 与 $\Delta \omega$ 同相位。由于 $-\Delta P_{e}$ 相位超前 $\Delta \omega$ 相位90°, ϕ_{3} = 90°- ϕ_{10}

由于超前环节会放大 $\Delta \omega$ 中的次同步扭振信号,而 $\Delta P_{\rm e}$ 中并不包含次同步扭振分量,角频率偏差反馈型PSS对次同步频段的阻尼影响最大,PSS2B次之,电磁功率偏差反馈型PSS最小。

目前,相比于角频率偏差反馈型PSS,以加速功 率偏差信号为输入的PSS2B对系统次同步阻尼的影 响更小;相比于电磁功率偏差反馈型PSS,PSS2B不 会出现反调现象;相比于复杂且难以调试的多频段 PSS(PSS4B),PSS2B具有现场整定原理清晰的优点。 因此,PSS2B得到了广泛应用。但是PSS2B的3级相 位补偿环节中至少有2级为超前补偿环节,这不仅 会因为高低频段增益冲突而限制低频段增益,还会 放大次同步扭振信号从而加剧对次同步阻尼的削 弱。因此,为了减小PSS2B对系统次同步阻尼的影 响,应尽量避免使用超前补偿环节。

4 SPSS设计

180

由于不同类型的PSS各有优缺点,若能针对不同情况切换使用不同类型的PSS,充分利用各自优 点并规避缺点则会极大提高其作用效果。目前PSS 大多已设置于微机式励磁控制系统中,不需要附加 硬件装置即可修改其类型。根据不同类型PSS对系 统次同步阻尼的影响程度,本文对加速功率偏差反 馈型和电磁功率偏差反馈型PSS进行改进,得到改 进型PSS2B和双隔直并联型PSS,并对上述2种类型 的PSS设计合理的切换过程,进而设计出SPSS。

4.1 PSS的改进措施

根据测试信号法分别得到投入 PSS 前威信电厂 发电机组励磁系统的滞后相位和投入 PSS2B 后 ΔP_a 超前 $\Delta \omega$ 的相位。

将威信电厂发电机组等效为1台发电机并采用 单刚体模型,在电压调节器附加信号输入端加入与 第2节中类似的正弦扰动信号相量,其角频率以整 数倍(k和m)等间隔取值变化:

$$\begin{cases} \Delta U_{s} = \sum_{k=1}^{20} U_{sk} \cos \left(\lambda_{k} \omega_{0} t + \varphi_{k}\right) + \\ \sum_{m=1}^{95} U_{sm} \cos \left(\lambda_{m} \omega_{0} t + \varphi_{m}\right) \\ \lambda_{k} = 0.002k \quad k = 1, 2, \cdots, 20 \\ \lambda_{m} = 0.01m + 0.04 \quad m = 1, 2, \cdots, 95 \end{cases}$$
(10)

其中, U_{sk} 、 U_{sm} 和 φ_k 、 φ_m 分别为频率是 $\lambda_k f_0$ 、 $\lambda_m f_0$ 的脉动 转矩的幅值和初相位。系统稳态运行后,在公共周 期内对 ΔT_e 和 ΔU_s 进行傅里叶分解,得到上述 2 个量 的相位差,即为所求励磁系统的滞后相位,同理可得 ΔP_a 超前 $\Delta \omega$ 的相位。然后根据相位之间的关系, PSS2B相位补偿环节的待补偿相位可由 ΔP_a 超前 $\Delta \omega$ 的相位加上励磁系统的滞后相位得到;电磁功率偏 差反馈型 PSS 的待补偿相位可由励磁系统的滞后相 位加 90°得到。各系统的相位结果见附录图 A1。

由图 A1可知,若要将 PSS2B 相位补偿至 0°,对 于低频段则需要超前补偿相位 50°~90°;对于次同步 频段则需要超前补偿相位 105°~230°。为了减少超 前补偿环节,可采用滞后环节补偿再反相的方式改 进 PSS2B,如图 3 所示先将 Δ**T**[']_{c2}滞后补偿相位 φ₄再 反相,这样既可保留其无反调特性的优点,也可以防 止出现高频段增益过大的现象并改善系统次同步阻 尼特性。综上分析并结合图 A1,可在 0.5 Hz 用 2 个 滞后环节分别滞后 60°,在 5 Hz 用 1 个滞后环节滞后 35°,在 11 Hz 用 1 个滞后环节滞后 40°。

PSS2B单个相位补偿环节的传递函数 $\frac{1+sT_a}{1+sT_b}$ 可采用式(11)确定其时间常数 T_sT_b 即:

$$\begin{cases} \xi = T_b/T_a = (1 - \sin \phi)/(1 + \sin \phi) \\ T_a = 1/(\omega_x \sqrt{\xi}) \\ T_b = \xi T_a \end{cases}$$
(11)

其中, ϕ 为PSS2B需要在任意角频率 ω_x 处补偿的相位。由式(11)可得改进型PSS2B相位补偿环节的时间常数见附录表A6。

对于电磁功率偏差反馈型 PSS,为减少其反调 所带来的负面影响,在信号输入端采用具有内限幅 的双隔直环节且时间常数 *T_{wb}*取较小值,为改善其次 同步阻尼特性,可采用并联结构的相位补偿方式^[19]。 结合图 A1 和式(11)对双隔直并联型 PSS 的相位补 偿环节进行设计,参数设计结果见附录表 A7。

利用测试信号法分别得到威信电厂发电机组投入2种改进型PSS的阻尼特性并与改进前和未投入 PSS时的系统阻尼进行对比,结果见附录图A2。由 图A2可知,改进前和改进后的PSS2B以及双隔直并 联型PSS均可满足系统低频段的阻尼需求从而抑制 了低频振荡。然而3种PSS对系统次同步频段阻尼 的影响差别较大。其中,改进型PSS2B的投入对系 统次同步频段阻尼无较大影响,甚至在很多频率下 系统阻尼较投入PSS前更弱,但相比于投入原有 PSS2B的系统,尤其是在扭振模式3(28.16 Hz)附近 频段的阻尼,则有了较大的提升;双隔直并联型PSS 的投入使系统次同步频段的阻尼明显增强。综上所 述,双隔直并联型PSS可为系统提供最多的阻尼,改 进PSS2B次之,原有PSS2B最少。

4.2 SPSS的设计

电磁功率偏差反馈型PSS在为系统提供较大正 阻尼的同时会引起反调现象,虽然加入双隔直环节 可减小反调,但是当系统受到某些扰动导致原动机 机械功率频繁变化时,PSS反调现象引起的发电机 电压和无功波动超过了用户可接受的范围,此时相 应的机组将对PSS发出闭锁信号^[18]。

改进型PSS2B既不会出现反调也能为机组提供 较大的正阻尼,但其对于系统次同步频段的阻尼影 响很小,其接入后系统阻尼甚至比没有加入PSS时 更低,这无疑增加了系统次同步振荡的风险。鉴于 此,应该针对不同情况切换投入上述2种优势互补 的PSS并应用于日常运行时反调量较小的系统中, 相应的控制信号Γ可由监测发电机电压和无功的装 置提供。具体的协调控制策略如下。

当系统并未监测到低频振荡时,应闭锁 SPSS, 此时 Γ =-1;当系统有低频振荡风险但是并无次同 步振荡现象时可投入 SPSS并选择"改进型 PSS2B" 在抑制低频振荡的同时也防止反调现象的发生,即 Γ 的初始值为1;当系统有低频振荡风险且次同步阻 尼较弱时可投入 SPSS并选择"双隔直并联型 PSS"以 提供较大的正阻尼,即 Γ 的初始值为0;当系统受到 较大扰动致使反调量变大时, Γ 由0跳变至1,使 SPSS 切换至"改进型 PSS2B";待系统稳定后, Γ 又从 1跳变为0,即此时 SPSS 切换至"双隔直并联型 PSS" 使系统的稳定性更高。由于反调量一般指无功功率 和电压的变化量,控制信号 Γ 的跳变法则为;

其中, Q_{N} 和 U_{N} 分别为发电机额定无功功率和额定机 端电压; k_{qo} 、 k_{uo} 和 k_{qi} 、 k_{ui} 分别为 Γ 取0和1时发电机 无功、电压的反调系数,其值可根据不同的发电机组 和当地对电能质量的要求进行整定,且应避免 Γ 在 0和1之间频繁跳变,一般情况下 k_{qo} =0.29, k_{uo} = 0.03, k_{qi} =0.31, k_{ui} =0.05; ΔQ 和 ΔU 分别为不同有功 输出阶段发电机无功功率和机端电压变化量的最大 值。 ΔQ 和 ΔU 的具体表达式为:

$$\begin{cases} \Delta U = \max \{ U_{\text{starti}} - U_{\text{endi}} \} \\ \Delta Q = \max \{ Q_{\text{starti}} - Q_{\text{endi}} \} \end{cases}$$
(13)

其中,max{·}为取最大值函数;U_{starti}和Q_{starti}分别为第*i* 段有功功率输出阶段机端电压和无功功率的起始 值;U_{endi}和Q_{endi}分别为第*i*段有功功率输出阶段机端

电压和无功功率的终点值。

综上, SPSS的控制流程如附录图 A3 所示, 所设 计的控制原理如附录图 A4 所示。

4.3 SPSS 状态切换过程的动态特性

为了研究 SPSS 的切换对系统是否会造成较大 扰动,本文在 PSCAD / EMTDC 中搭建图 1 所示系统 并进行时域仿真。在 20 s 时将"改进型 PSS2B"切换 为"隔直并联型 PSS",威信电厂发电机组输出的有 功功率 P_{c} 、无功功率 Q_{c} 和机端电压 U_{t} 、机端电流 I_{t} 如 图 4 所示。



图4 SPSS切换过程对发电机造成的扰动 Fig.4 Disturbance to generator caused by SPSS switching process

由图 4 可知, SPSS 在 t = 20 s从"改进型 PSS2B" 切换为"双隔直并联型 PSS"所产生的扰动量大小 分别为: $\Delta P = 30$ MW, $\Delta Q = 40$ Mvar, $\Delta U = 2.7$ kV, $\Delta I =$ 0.022 kA。然而由于影响 SPSS 控制策略的参数 $|\Delta U|/|U_{\text{N}}|\pi|\Delta Q|/|Q_{\text{N}}|$ 分别为 0.006 8 和 0.086, 各扰 动量相对于其稳态运行量则较小。由于 k_{u0} 和 k_{00} 分 别远大于 0.006 8 和 0.086, SPSS 的切换不会对系统 造成较大扰动,其切换过程所引起的扰动量不足以 影响其控制策略。

5 仿真分析

为验证 SPSS 对系统次同步阻尼改善的有效性, 将原有 PSS2B、改进型 PSS2B 和双隔直并联型 PSS分 别投入系统,在电磁暂态仿真软件 PSCAD / EMTDC 中搭建图 1 所示系统并进行仿真分析。在 t=5 s 时, 威信电厂发电机组机端发生持续时间为 75 ms 的三 相短路接地故障。PSS2B 和改进型 PSS2B、双隔直 并联型 PSS 作用下发电机组四质量块间的轴系转矩 (标幺值)分别见附录图 A5 和图 5。溪洛渡直流送端 系统有功功率的变化情况见图 6。

由图 A5 可知,投入原有 PSS2B 时,系统受到大 扰动后,机组轴系间的扭振出现等幅或衰减极慢的 次同步振荡,这无疑会造成发电机组轴系的严重破



182

图 5 改进型 PSS2B、双隔直并联型 PSS 投入后发电机组 四质量块间的轴系转矩





图 6 投入不同 PSS 时直流系统有功功率 Fig.6 Active power of HVDC system with

different PSSs

坏。由图5可知,投入改进型PSS2B和双隔直并联型PSS时,机组轴系间扭振衰减速度明显加快,其中采用双隔直并联型PSS的机组轴系振荡衰减速度最快,表明所提SPSS可提高系统阻尼。

由图 6 可知,系统稳定运行后输送的有功功 率约为5700 MW(0.89 p.u.)。由于威信和镇雄电厂 发电机组与交流系统连接较弱且额定出力均为 1 200 MW,因此其大部分有功功率均通过直流系统 输送,这就使得溪洛渡直流送端系统次同步频段阻 尼较弱。投入 PSS 前系统存在低频振荡,投入原有 PSS2B 后系统低频振荡被抑制,但次同步阻尼进一 步变弱。因此当系统受到大扰动后便出现了衰减极 为缓慢的次同步振荡现象。投入 SPSS 后,系统次同 步阻尼较投入原有 PSS2B 时有所增强,功率振荡衰 减速度加快。综上所述通过仿真分析再次印证了溪 洛渡直流送端系统次同步振荡的原因和 SPSS 对系 统次同步阻尼的改善情况。

6 结论

本文通过分析 PSS 引发次同步振荡的机理,并 对现有的电磁功率偏差反馈型和加速功率偏差反馈 型 PSS 进行改进,设计出适用于溪洛渡直流送端系 统的 SPSS。通过仿真验证所得结论如下:

(1)溪洛渡直流送端系统曾出现次同步振荡的

潜在原因为直流输电系统并网导致系统次同步阻尼 较弱,在此情况下投入PSS进一步削弱了系统的次 同步阻尼,进而引发次同步振荡现象,因此对于距离 整流站较近且与电网联系较为薄弱的机组应着重考 虑其 PSS 的设计对系统次同步频段电气阻尼的 影响;

(2)分析2种对次同步阻尼影响较小的PSS的优缺点,并分别改进其输入侧结构和相位补偿方式以减小其缺点所带来的负面影响;

(3)对改进后 PSS 设计合适的协调控制策略,所 构成的 SPSS 在保证抑制低频振荡的同时,进一步改 善系统次同步阻尼特性并减小反调量所带来的 影响。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- 梁洪波,王邦一,剡文林,等."两渡"直流投产对云南电网的影响[J]. 云南电力技术,2014,42(1):32-34.
 LIANG Hongbo, WANG Bangyi, YAN Wenlin, et al. Impact analysis and recommended measures on commissioning of "Liang Du" HVDC project in Yunnan Power Grid[J]. Yunnan Electric Power,2014,42(1):32-34.
- [2] 邱伟,杨煜,王西田,等. 溪洛渡直流送端系统与邻近火电厂汽 轮机组次同步振荡研究[J]. 南方电网技术,2012,6(5):13-17.
 QIU Wei,YANG Yu,WANG Xitian, et al. Study on the subsynchronous oscillation between the Xiluodu DC sending end system and the nearby thermal power plant turbine units[J].
 Southern Power System Technology,2012,6(5):13-17.
- [3] 徐政.交直流电力系统动态特性行为分析[M]. 北京:机械工 业出版社,2005:164-167.
- [4] 王晓宇,杨杰,吴亚楠,等. 渝鄂背靠背柔性直流对系统次同步振荡特性的影响分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(7): 188-194,202.
 WANG Xiaoyu,YANG Jie,WU Yanan, et al. Effect analysis of back-to-back flexible HVDC connecting Chongqing and Hubble Context and the second se

bei Power Grid on sub-synchronous oscillation characteristics [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7):188-194,202.

- [5] 毛雨亭. HVDC引发的次同步振荡原因分析及综合阻尼抑制 策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.
 MAO Yuting. Study on cause of subsynchronous oscillation caused by HVDC and the integrated damping control strategy
 [D]. Beijing:North China Electric Power University,2014.
- [6]李佳琪.常规直流引发次同步振荡的机理及抑制措施分析
 [D].北京:华北电力大学,2019.
 LI Jiaqi. Research on mechanism and countermeasures to SSO caused by LCC-HVDC transmission systems[D]. Beijing: North China Electric Power University,2019.
- [7]张帆,徐政.励磁系统及电力系统稳定器对发电机组次同步谐振阻尼特性的影响[J].电网技术,2006,30(18):14-19.
 ZHANG Fan,XU Zheng. Effect of exciter and power system stabilizer on subsynchronous resonance damping[J]. Power System Technology,2006,30(18):14-19.
- [8] 吴俊勇,程时杰,陈德树.电力系统稳定器对轴系扭振影响的研究[J]. 华中理工大学学报,1993,21(1):130-136.
 WU Junyong, CHENG Shijie, CHEN Deshu. The effects of power system stabilizers on the shaft torsional vibration of large turboalternators[J]. Journal of Huazhong University of

Science and Technology, 1993, 21(1):130-136.

- [9] 胡云花,赵书强,马燕峰,等.电力系统低频振荡和次同步振荡 统一模型阻尼分析[J].电力自动化设备,2005,25(7):6-11.
 HU Yunhua,ZHAO Shuqiang,MA Yanfeng,et al. Damping analysis of unified LFO & SSO model in power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(7):6-11.
- [10] 吴熙,蒋平,胡弢. 电力系统稳定器对次同步振荡的影响及其机制研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(22):56-63.
 WU Xi, JIANG Ping, HU Tao. Impact of power system stabilizer on subsynchronous oscillation and its mechanism[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(22):56-63.
- [11] 杨琳,肖湘宁. 电力系统稳定器相位补偿方式对次同步振荡的 影响[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(12):1-7.
 YANG Lin,XIAO Xiangning. Impact of phase compensation methods of power system stabilizer on subsynchronous oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2014,42(12): 1-7.
- [12] 吴俊勇,程时杰,陈德树.抑制轴系扭振的改进型电力系统稳定器[J].华中理工大学学报,1996,24(增刊2):50-52.
 WU Junyong, CHENG Shijie, CHEN Deshu. An improved power system stabilizer for suppressing shaft torsional vibration [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1996,24(Supplement 2):50-52.
- [13] 胡晓波,杨利民,陈中,等.基于人工鱼群算法的PSS参数优化
 [J].电力自动化设备,2009,29(2):47-50.
 HU Xiaobo,YANG Limin,CHEN Zhong, et al. PSS parameter optimization based on artificial fish-swarm algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(2):47-50.
- [14] 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.
- [15] 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 dou-

ble-signal input and its simulation research [J]. Power System Technology, 2016, 40(5) : 1462-1468.

- [16] LIU Y, WU Q, KANG H T, et al. Switching power system stabilizer and its coordination for enhancement of multi-machine power system stability[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2016, 2(2):98-106.
- [17] 孙昕炜,史华勃,倪江,等.弱联系电网中SVC引起的次同步振 荡分析及其抑制措施研究[J].电力系统保护与控制,2019,47 (21):171-178.
 SUN Xinwei,SHI Huabo,NI Jiang, et al. Study of the sub-synchronous oscillation caused by SVC in weak-link power grids and its suppressing method[J]. Power System Protection and Control,2019,47(21):171-178.
- [18] 竺士章,陈皓. 汽轮发电机组电力系统稳定器的反调[J]. 浙 江电力,2006,25(5):9-11.
 ZHU Shizhang,CHEN Hao. Reverse action of power system stabilizer at turbine generator unit[J]. Zhejiang Electric Power, 2006,25(5):9-11.
- [19] 张帆.电力系统次同步振荡抑制技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.

ZHANG Fan. Research on the countermeasures to subsynchronous oscillation of power systems[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2007.

作者简介:



刘昕宇(1998—),男,陕西咸阳人,硕 士研究生,主要研究方向为交直流电力系统 次同步振荡分析(E-mail:liuxinyu_up@163. com);

徐 政(1962—),男,浙江海宁人,教 授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方 向为大规模交直流电力系统分析、直流输 电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量、 风电发电技术与风电场并网技术(E-mail;

xuzheng007@zju.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Impact of PSS on subsynchronous oscillation in Xiluodu DC sending end system and its countermeasures

LIU Xinyu, XU Zheng, XING Facai, ZHANG Zheren

(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to explore the reason of subsynchronous oscillation in Xiluodu DC sending end system and to propose corresponding improvement measures, firstly, by means of complex torque coefficient approach and the test signal method, the damping characteristics of Weixin power plant generators before and after PSS(Power System Stabilizer) integration are analyzed. Research results show that since the subsynchronous damping of the grid is weakened by the access of HVDC, and the input of PSS causes subsynchronous oscillation of the system. Then on the basis of analyzing the existing problems, a novel switchable PSS is proposed by the improvement of electromagnetic power deviation-based type PSS and accelerating power deviation-based type PSS. Finally, based on the PSCAD / EMTDC simulation platform, it is verified that the novel switchable PSS can not only improve the subsynchronous damping but also suppress the subsynchronous oscillation.

Key words:subsynchronous oscillation;complex torque coefficient method;test signal method;damping characteristics;switchable;PSS

附录

表 A1 威信和镇雄电厂发电机组电气参数

Table A1 Electrical parameters of generators in Weixin and Zhenxiong power plant

参数	数值	参数	数值
X_d	2.269 6	$X_q^{\prime\prime}$	0.215 6
X_d'	0.303 5	T_{d0}'/s	8.724 0
X_d "	0.221 5	T_{d0}''/s	0.045 0
X_q	2.209 3	T_{q0}' /s	0.969 0
X_q'	0.445 4	$T_{q0}''/{ m s}$	0.069 0

注: X_d 、 X_d' 、 X_d'' 、 X_q 、 X_q' 、 X_q "为标幺值

表 A2 发电机组轴系参数

Table A2 Shafting parameters of generators

集中质量模块	转动惯量/(kg m ²)	功率分配/%	集中质量模块	转动惯量/(kg m ²)	功率分配/%
HP	5 322	51.81	LPB	11 530	24.10
LPA	11 532	24.10	G	9 533	-100

表 A3 块间等效弹簧弹性常数

Table A3 Elastic constant of equivalent spring between blocks

	集中质量模块	块间等效弹簧弹性常数/($N m rad^{-1}$)		
HP-LPA		$6.815\ 985\ 6 imes 10^7$		
LPA-LPB		$8.696~764~2 \times 10^7$		
	LPB-G 1.287 327 39×10 ⁸			
表 A4 威信和镇雄电厂发电机组励磁参数				

Table A4 Excitation parameters of generators in Weixin and Zhenxiong power plant

参数	数值	参数	数值
$K_{ m A}$	21	K _C	0.038
$T_{\rm A}/{ m s}$	0.01	$K_{ m F}$	0
$T_{\rm B}=T_{\rm C}/{\rm s}$	1	$T_{ m F}/ m s$	0
$T_{\rm B1}=T_{\rm C1}/{ m s}$	0	$K_{ m LR}$	4.54
$U_{ m RMAX}$	8.435	$I_{\rm LR}$	4.4
$U_{ m RMIN}$	-7.924		

注: USIkMAX、USIkMIN(k=1,2,3)分别为 PSS 输入电压的上、下限值,为标幺值。

表 A5 威信和镇雄电厂发电机组 PSS2B 参数

Table A5 PSS2B	parameters of	generators in	Weixin and	Zhenxiong	power p	olant
----------------	---------------	---------------	------------	-----------	---------	-------

参数	数值	参数	数值	参数	数值
$T_{w1} = T_{w2} = T_{w3} = T_{w4} = T_7/s$	5	T_9/s	0.12	T_{10}/s	0.012
$K_{ m s1}$	20	T_1/s	0.101 9	T_{11}/s	0.06
$K_{ m s2}$	0.6	T_2/s	0.027 6	M:N	5:1
$K_{ m s3}$	1	T_3/s	0.3	U_{STMAX}	0.1
T_8/s	0.6	$T_4/ m s$	0.1	$U_{\rm STMIN}$	-0.1

注: M、N 分别为陷波滤波器滞后环节和整体的阶数; U_{STMAX}、U_{STMIN}分别为 PSS 输出电压的上、下限值,为标幺值; T_{w1}—T_{w4}为改进型 PSS2B 隔直环节的时间常数; T_{wb1}和 T_{wb2}为双隔直并联型 PSS 具有内限幅的隔直环节的时间常数; T₁—T₄、T₁₀、T₁₁为 PSS2B 相位补偿环节参数时间常数; T₇为滞后环节时间常数; T₈、T₉为陷波滤波器环节时间常数; K_{s1}、K_{s2}和 K_{s3}分别为 PSS2B 的比例放大倍数、功率偏差放大倍数以及功率偏差补偿系数。





Fig.A1 Phase lags of excitation system and needed compensation characteristic provided by PSS

Table A6 Phase compensation block parameters for improved PSS2B 参数 数值 参数 数值 T_1/s 0.085 29 T_5/s 0.016 57 T_2/s 1.187 90 T_6/s 0.061 10 0.006 75 T_3/s 0.085 29 T_{10}/s T_4/s 1.187 9 T_{11}/s 0.031 03

表 A6 改进型 PSS2B 相位补偿环节参数

表 A7 并联型 PSS	相位补偿环节参数
--------------	----------

Table A7 Phase compensation block parameters for parallel input PSS

参数	数值	参数	数值
$T_{\rm bl}/{\rm s}$	0.247 40	$T_{\rm b5}/{ m s}$	0.014 58
$T_{\rm b2}/{\rm s}$	1.137 70	$T_{ m b6}/ m s$	0.001 93
$T_{\rm b3}/{ m s}$	0.087 45	$T_{ m b7}/ m s$	0.014 58
$T_{\rm b4}/{ m s}$	0.011 59	$T_{\rm b8}/ m s$	0.001 93

注: Tbl-Tb8为相位补偿环节的时间常数。







图 A3 SPSS 控制策略图

Fig.A3 Control strategy of SPSS





Fig.A4 Control principle of SPSS



