

考虑单台机组调节性能的GPSS机理分析及多机参数优化

叶鹏举¹,许昊¹,杨明亮²,罗尧²,李劲秋²,赵勇³,江出阳³,陈刚³,甘德强¹

(1. 浙江大学电气工程学院,浙江杭州 310027;

2. 云南电网有限责任公司,云南昆明 650011;

3. 南方电网科学研究院有限责任公司,广东广州 510663)

摘要:随着电力系统中新能源的渗透率日渐提高,系统整体惯量降低,频率稳定问题逐渐成为云南电网安全稳定运行的主要问题。传统调节比例-积分-微分参数的方法无法兼顾系统的稳定性能和调节速度,从频域角度分析该方法的局限性,并采用调速器侧电力系统稳定器(GPSS)来改善系统的稳定性能和机组调节速度。从传递函数角度对GPSS进行机理性分析,并分析GPSS参数对电力系统调节性能和稳定性能的影响;基于GPSS的性质,从频域角度提出一种综合考虑稳定裕度及单台机组调节性能的GPSS参数优化整定方法,该方法能同时提升安装GPSS的每台机组和整体系统的调节性能,并优化稳定裕度。云南电网的算例仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词:GPSS;频率稳定;调节性能;稳定性分析;参数优化设计

中图分类号:TM73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202501023

0 引言

随着新能源发电大规模并网,风电、光伏等可再生能源逐渐代替传统火力发电,现代电力系统朝着实现“双碳”目标的方向逐步前进。云南电网作为典型的水电占优型送端电网,自2016年异步联网以来,多次发生与调速器、原动机参数等强相关的超低频振荡^[1-3]。与低频振荡不同的是,超低频振荡并不是发电机转子之间的相对摇摆引发的功率振荡,而是由水轮机一次调频过程中的不稳定引发的频率振荡^[4-5]。超低频振荡的频率通常低于0.1 Hz,且全系统的频率同调振荡。近年来,频率稳定问题逐渐成为云南电网安全稳定运行的主要风险,这一风险在新能源比例逐渐上升的水电占优型送端电网中愈加明显。

现代电力系统是一个庞大的多机多控制器分布式网络,其状态空间模型是高维、多重耦合的,其多项式模型是高阶、复杂的^[6]。而电力系统的频域模型更简洁且紧凑,往往只包含几个回路,因此频域方法天然地适用于对现代电力系统进行动态分析^[7]。

为了抑制超低频振荡,国内外学者提出了在同步机、新能源机组中安装各种超低频振荡抑制装置

的方法^[8]。电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)是一种通过超前相位环节补偿励磁系统的滞后相位,从而向系统提供正阻尼转矩、增大系统阻尼并抑制系统低频振荡的装置^[9]。但PSS抑制超低频振荡的效果会受到负荷组成的影响,整定其参数时具有一定的复杂性。而调速器侧电力系统稳定器(governor-side power system stabilizer, GPSS)可以直接补偿调速器-原动机的滞后相位,对于抑制由调速器动态引发的超低频振荡具有天然优势。文献[10-12]提出了一种与PSS的结构和设计原理具有一定的相似性的新型GPSS,指出调速器时间常数和间隙死区不影响GPSS的功能,且GPSS对运行条件和负荷组成具有更强的鲁棒性。文献[13]提出了一种水轮发电机组模糊PSS,增加了模糊比例-积分-微分(proportional integral differential, PID)控制,进一步提高了GPSS的鲁棒性。文献[14]采用状态空间模型和阻尼转矩法对GPSS的参数进行整定,并将其用于抑制电力系统的低频振荡,但并未将其应用于超低频振荡抑制领域。文献[15]采用状态空间极点配置方法设计了GPSS的参数,指出GPSS对抑制超低频振荡的具体重要作用。文献[16]根据水电单机带载系统的Philips-Heffron模型,指出PSS在超低频段提供的负阻尼有限,并进行半物理仿真,验证了GPSS对超低频振荡的抑制效果。文献[17]指出GPSS在超低频段具有抑制效果,也不会恶化本机振荡频率附近的阻尼,但可能会恶化云南电网地区间低频振荡模式的阻尼,且其抑制效果还存在拐点。在机组调速器的PID控制器参数为云南电网异步运

收稿日期:2024-06-13;修回日期:2024-11-26

在线出版日期:2025-02-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U2166601);南方电网有限责任公司科技项目(YNKJXM20220025)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(U2166601) and the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co.,Ltd.(YNKJXM20220025)

行前参数的情况下,GPSS提高超低频振荡阻尼的能力有限。但上述研究并未说明GPSS抑制超低频振荡的补偿尖峰位于何处、抑制效果随GPSS参数变化是如何变化的、如何整定得到最大负阻尼点从而使抑制效果最好等问题。

目前云南电网通过优化水电机组调速器PID参数的方式来抑制超低频振荡,但调节PID参数会导致系统调节性能变差,调节速度减慢,且实际运行中会出现频率频繁波动、稳定性变差的情况^[18-20]。因此,需要综合考虑系统的稳定性能及调节性能,考虑增设GPSS装置以达到该目的,进一步丰富和扩大改善系统稳定性能和调节性能的技术手段。

针对上述问题,本文综合考虑稳定性能和水轮发电机组的出力速度,从频域角度出发,推导验证了频域系统的统一频域模型,并提出了一种考虑单台机组频域调节性能的多机GPSS参数整定方法。利用云南电网的等值模型,从频域角度完整分析了调速器参数的性质,指出了调节PID参数方法对于云南电网超低频振荡的抑制效果不佳,导致调节速度减慢、诱发频率波动的原因。同时,以传递函数的形式,机理性地分析了GPSS参数的性质及作用,验证和解释了GPSS会引入其他模式的原因,并根据调速器和GPSS的性质,提出了一种考虑单台机组调节性能的多机GPSS参数优化整定方法。

1 频率动态模型推导

本章建立了频率参考值与机组机械功率之间的频域关系,并给出了简化计算方法,为后续进一步建立频域优化模型奠定基础。

1.1 频率-机械功率传递函数推导

南方电网对单台机组的响应时间有明确要求,当机组处于稳定运行工况时,对于不低于0.1 Hz的频率阶跃扰动,调频响应的开度或输出功率需要满足一定的上升时间和调节时间的指标要求。由于水电机组和火电机组的开度-功率输出环节不一致,为了方便统一处理水电机组和火电机组,将开度-功率输出环节并入一起考虑,统一使用机械功率 ΔP_m 作为目标输出。下面建立输入参考角频率 ω_{ref} 和输出机械功率 ΔP_m 之间的传递函数矩阵,如式(1)所示。

$$\Delta\omega = (sM + D)^{-1} (\Delta P_m - \Delta P_e) = (sM + D)^{-1} \Delta P_m - (sM + D)^{-1} \frac{\omega_0}{s} (K_1 + G_Q) \Delta\omega \quad (1)$$

式中: Δ 表示相应变量的变化量; ω 为同步角速度; ω_0 为系统初始角速度; s 为广义频率; M 为发电机组的惯性时间常数矩阵; D 为阻尼系数矩阵; P_e 为电磁功率矩阵; K_1 为系统的线性化系数矩阵; G_Q 为励磁系统的传递函数矩阵。求解可得 ΔP_m 和 $\Delta\omega$ 分别为:

$$\Delta P_m = \left[sM + D + \frac{\omega_0}{s} (K_1 + G_Q) \right] \Delta\omega \quad (2)$$

$$\Delta\omega = \left(sM + D + \frac{\omega_0}{s} K_1 + \frac{\omega_0}{s} G_Q \right)^{-1} \Delta P_m \quad (3)$$

又因为:

$$\Delta P_m = G_M (\omega_{ref} - \Delta\omega) \quad (4)$$

可以推导出参考角频率 ω_{ref} 的表达式为:

$$\omega_{ref} = \left[G_M^{-1} + \left(sM + D + \frac{\omega_0}{s} K_1 + \frac{\omega_0}{s} G_Q \right)^{-1} \right] \Delta P_m \quad (5)$$

故有:

$$\Delta P_m = G_{10} G_M \omega_{ref} \quad (6)$$

式中: G_M 为调速器-原动机系统的传递函数矩阵; G_{10} 为过渡矩阵,如式(7)所示。

$$G_{10} = \left[I + G_M \left(sM + D + \frac{\omega_0}{s} K_1 + \frac{\omega_0}{s} G_Q \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (7)$$

式中: I 为单位矩阵。

为了方便化简,定义转速响应函数矩阵 $X(s)$ 为:

$$X(s) = sM + D + \frac{\omega_0}{s} (K_1 + \omega_0 G_Q) + G_M \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)中,化简可得:

$$G_{10} = [G_M^{-1} + (X(s) - G_M)^{-1}]^{-1} G_M^{-1} \quad (9)$$

又根据Woodbury公式^[21]:

$$(A + UB V)^{-1} = A^{-1} - A^{-1} U B (B + B V A^{-1} U B)^{-1} B V A^{-1} = A^{-1} - A^{-1} U (I + B V A^{-1} U)^{-1} B V A^{-1} \quad (10)$$

式中: A 、 U 、 B 、 V 均为矩阵。

当 U 、 V 为单位矩阵时,可将式(10)化简为:

$$(A + B)^{-1} = A^{-1} - A^{-1} (I + B A^{-1})^{-1} B A^{-1} \quad (11)$$

由式(11)可得:

$$\begin{aligned} [G_M^{-1} + (X(s) - G_M)^{-1}]^{-1} &= G_M - \\ G_M [I + (X(s) - G_M)^{-1} G_M]^{-1} &= (X(s) - G_M)^{-1} G_M \\ [I + (X(s) - G_M)^{-1} G_M]^{-1} &= \{(X(s) - G_M) [I + (X(s) - G_M)^{-1} G_M]\}^{-1} = \\ [(X(s) - G_M) + G_M]^{-1} &= X^{-1}(s) \end{aligned} \quad (12)$$

将式(12)和式(13)代入式(9),化简可得:

$$\begin{aligned} G_{10} &= \{G_M - G_M [I + (X(s) - G_M)^{-1} G_M]^{-1} (X(s) - G_M)^{-1} G_M\} G_M^{-1} = \\ (G_M - G_M X^{-1}(s) G_M) G_M^{-1} &= I - G_M X^{-1}(s) = \\ I - G_M \left(sM + D + \frac{\omega_0}{s} K_1 + \frac{\omega_0}{s} G_Q + G_M \right)^{-1} & \quad (14) \end{aligned}$$

又因为 $sM + D + \frac{\omega_0}{s} K_1 + \frac{\omega_0}{s} G_Q \gg G_M$,因此有:

$$\begin{aligned} G_{10} &= I - G_M \left(sM + D + \frac{\omega_0}{s} K_1 + \frac{\omega_0}{s} G_Q + G_M \right)^{-1} \approx \\ I - G_M \left(sM + D + \frac{\omega_0}{s} K_1 + \frac{\omega_0}{s} G_Q \right)^{-1} & \approx I \end{aligned} \quad (15)$$

因此,由式(6)和式(15)可以推导出上述输入、输出近似为对角关系,如式(16)所示。

$$\Delta P_m \approx G_M \omega_{ref} \quad (16)$$

可以看出,反馈回路对输入 ω_{ref} 和输出 ΔP_m 之间的前馈回路影响很小,基本可以用原动机-调速器环节 G_M 模拟输入 ω_{ref} 和输出 ΔP_m 之间的动态。

更进一步地,可以推导得到系统的简化模型,即统一频域模型,如图 1 所示。图中: ΔP_d 为功率扰动量; N 为机组总数; $G_{M,i}(s)$ 为第 i 台机组调速器-原动机系统的传递函数; M_Σ 、 D_Σ 分别为机组的惯量、阻尼之和。

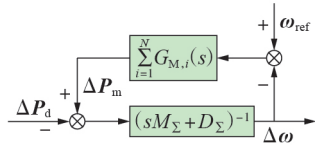


图 1 统一频域模型

Fig.1 Unified frequency domain model

1.2 频率-机械功率传递函数的性质

由式(16)可知, G_M 为角频率-机械功率之间的传递函数矩阵,由于云南电网是水电占优型送端系统,对于水轮发电机组而言,其简化调速器的传递函数 G_M 可表示为:

$$G_M = \frac{K_p s + K_1 + K_D s^2}{b_p K_1 + s} \quad (17)$$

式中: K_p 、 K_1 、 K_D 分别为调速器-原动机系统的比例、积分、微分系数; b_p 为永态转差系数。

令比例-积分(proportional integral, PI)参数对阻尼比 ζ 和上升时间 t_r 的影响函数为:

$$\begin{cases} \zeta = f(K_p, K_1) \\ t_r = f(K_p, K_1) \end{cases} \quad (18)$$

阻尼比 ζ 和上升时间 t_r 在 K_p - K_1 平面的曲线分别如附录 A 图 A1 和图 A2 所示。由图可知,比例系数、积分系数对上升时间和阻尼比的影响效果基本相反,即单纯通过 PI 参数无法同时满足响应速度加快和阻尼增强的效果。在实际工程中,PI 参数无法大幅度调节,而参数微调对阻尼比的影响有限,因此单一通过调节 PI 参数来抑制超低频振荡的抑制效果较差,且有时会导致机组调节速度减慢,甚至可能诱发进一步频率波动。

现代电力系统要求机组既能满足调节性能指标,同时又能兼顾稳定性能,使系统阻尼比为正。基于此,本文引进一种 GPSS,使其在加快响应速度的同时,增强电力系统的超低频稳定性。

2 GPSS 原理及性质分析

本章简要介绍 GPSS 的基本结构,给出 GPSS 的参数计算方法,并分析 GPSS 的作用机理。

2.1 GPSS 结构及原理

GPSS 是一种调速器侧的 PSS,其可以加快系统

的响应速度,并增强电力系统的稳定性。在忽略滤波器及限幅环节,GPSS 取二阶超前滞后环节的情况下,带 GPSS 水轮机原动机-调速器的传递函数框图如图 2 所示。图中: $\Delta\omega$ 为同步角速度变化量; ΔP_m 为机械功率变化量; T_c 为伺服系统的时间常数; T_w 为水锤的时间常数; T_{a1} 、 T_{b1} 、 T_{a2} 、 T_{b2} 为 GPSS 超前滞后时间常数; K_{GP} 为 GPSS 的增益系数。

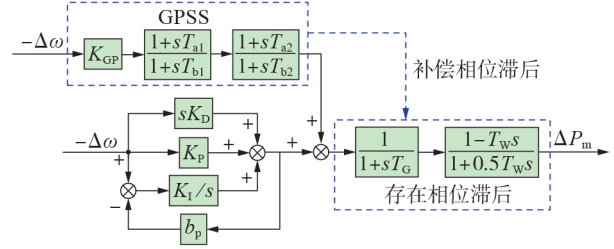


图 2 带 GPSS 水轮机原动机-调速器的传递函数框图

Fig.2 Transfer function block diagram of prime mover of water turbine with GPSS and governor

带 GPSS 的调速器的传递函数 $G_{M-GPSS}(s)$ 为:

$$G_{M-GPSS}(s) = \frac{\Delta P_m}{-\Delta\omega} = \left[\frac{K_p s + K_1 + K_D s^2}{b_p K_1 + s} + \frac{K_{GP} (1+sT_{a1})(1+sT_{a2})}{(1+sT_{b1})(1+sT_{b2})} \right] \times \frac{1}{1+sT_c} \frac{1-T_w s}{1+0.5T_w s} \quad (19)$$

在超低频段,调速器环节可以近似为:

$$G_M = \frac{K_p s + K_1 + K_D s^2}{b_p K_1 + s} \approx \frac{K_p s + K_1}{b_p K_1 + s} = \frac{1 + K_p s / K_1}{b_p [1 + s / (b_p K_1)]} \quad (20)$$

永态转差系数 b_p 一般取值为 0.05。可见,只要 $K_p < 20$, PID 控制器就是一个滞后环节,这是水电占优型系统稳定裕度矢量模值低的原因之一。因此,本文中的 GPSS 取二阶超前环节以补偿原动机-调速器系统的相位滞后。

2.2 GPSS 的参数及其性质

对于本文研究的水电占优型系统,GPSS 取二阶超前环节,其中超前环节一般可以表示为:

$$G_c(s) = \frac{1+T_a s}{1+T_b s} = \frac{1+aTs}{1+Ts} \quad a > 1 \quad (21)$$

式中: $G_c(s)$ 为超前环节的传递函数; T_a 、 T_b 为一阶超前环节中的超前时间常数; a 为极点和零点分离点的频率之比; $1/T$ 为分离点频率。

对于一阶超前环节,超前补偿角度 ϕ 的最大值及最大补偿角度对应的频率为:

$$\begin{cases} \phi_m = \arcsin \frac{a-1}{a+1} \\ f_m = \frac{1}{2\pi T \sqrt{a}} \end{cases} \quad (22)$$

式中: ϕ_m 为最大超前相位; f_m 为补偿中心频率。

本文引入超前滞后环节的目的之一是通过 GPSS 的超前环节抑制超低频振荡,故需要将最大角频率整定至超低频段区间。

以典型超低频振荡模式 0.05 Hz 为例,因为:

$$T = \frac{1}{2\pi f_m \sqrt{a}} \quad (23)$$

不妨取 $a=15$,则可取 $T_{a1}=0.7$, $T_{a2}=1.3$ 。此时最大补偿角度恰好补偿至振荡模式处或振荡模式附近,如图 3 所示。图中: ϕ_{m1} 、 ϕ_{m2} 分别为超前环节 1、2 的最大超前相位; f_{m1} 、 f_{m2} 分别为超前环节 1、2 的补偿中心频率。

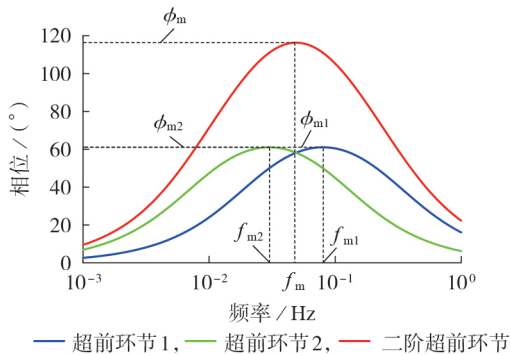


图3 GPSS超前环节补偿中心示意图

Fig.3 Schematic diagram of GPSS lead link compensation center

因此, T_{a1} 、 T_{a2} 与 T_{b1} 、 T_{b2} 之间存在定量关系,且二阶超前滞后环节需要设计为相同或相近参数。若 GPSS 的补偿中心频率确定,则 GPSS 参数变量可以由 K_{GP} 、 T_{a1} 、 T_{b1} 、 T_{a2} 、 T_{b2} 简化为二阶相位参数指标 a_1 、 a_2 和增益参数指标 K_{GP} 。

2.3 GPSS 的参数对稳定性和响应性能的影响

由 2.2 节可知,GPSS 参数可以简化为相位参数指标和增益参数指标。不妨令 T_{a1} 与 T_{a2} 相等, T_{b1} 与 T_{b2} 相等,GPSS 的补偿中心频率 f_m 取典型超低频振荡模式,则 GPSS 变成相位参数指标 a 和增益参数指标 K_{GP} 的函数。分析相位参数指标和增益参数指标对阻尼比的影响,结果如图 4 所示。由图可知,随着 a 逐渐增大,系统弱阻尼模式的阻尼比先增大后减小,GPSS 对稳定性的补偿效果存在补偿尖峰,达到补偿尖峰后,随着 a 继续增大,系统阻尼比逐渐减小,稳定性反而减弱,直至跨越稳定边界后,系统失稳。增益参数指标 K_{GP} 对系统稳定性的影响与相位参数指标 a 相同。

上述影响在奈奎斯特曲线中表现得更为明显。GPSS 增益参数指标对系统奈奎斯特曲线的影响如图 5 所示。由图可知,当无 GPSS 作用,即 $K_{GP}=0$ 时,稳定裕度矢量 $V_M=V_{M1}$,不妨称此时存在的弱阻尼模式为固有模式。在超低频段,随着 K_{GP} 逐渐增大, V_{M1}

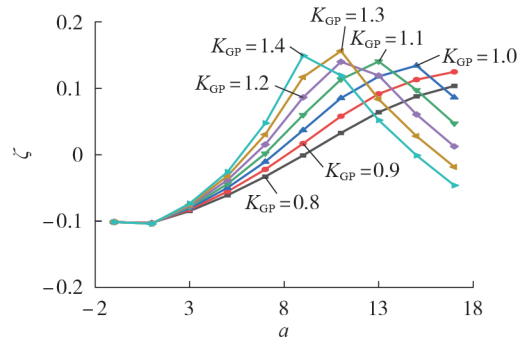


图4 GPSS相位参数指标和增益参数指标对系统稳定性的影响

Fig.4 Influence of phase parameter index and gain parameter index of GPSS on system stability performance

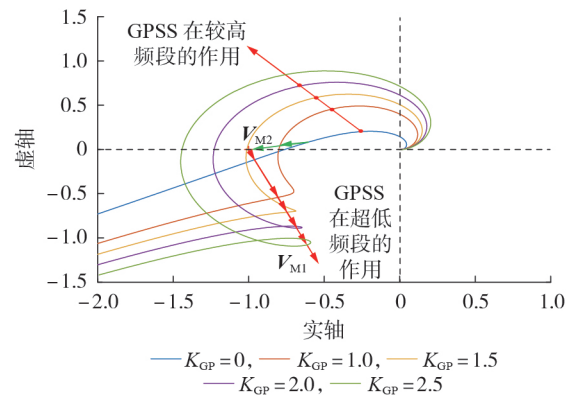


图5 GPSS增益参数指标对系统奈奎斯特曲线的影响

Fig.5 Influence of gain parameter index of GPSS on Nyquist curve of system

逐渐增大, V_{M2} 逐渐减小,此时稳定裕度 $V_M=V_{M1}$, GPSS 的作用是增大系统的稳定裕度;在较高频段,稳定裕度 $V_M=V_{M2}$,稳定裕度随着 K_{GP} 增大而减小,此时阻尼比最弱的模式由固有模式转变为新的超低频振荡模式,这种新的超低频振荡模式会降低系统的稳定裕度,不妨称之为 GPSS 模式。随着 K_{GP} 继续增大,系统逐渐达到临界稳定,奈奎斯特曲线越过点 $(-1,0)$,系统失稳。

GPSS 相位参数指标 a 和增益参数指标 K_{GP} 对上升时间的影响分别如附录 A 图 A3 和图 A4 所示。从图中可以看出,随着 K_{GP} 增大,系统的上升时间和调节时间均减小,系统的响应速度得到加快。相位参数指标对系统响应性能的影响与增益参数指标基本相同。

3 GPSS 参数整定

由第 2 章可知,GPSS 可以增强系统稳定裕度,并加快系统响应速度,其稳定裕度的提升与其相位参数和增益参数有关,因此需要对 GPSS 参数进行整定。文献[20]提出了一种多机 GPSS 参数整定方法,

但多机统一优化存在物理意义不清晰、各台机组的贡献不明确的问题。为了确保每台机组都满足调节性能要求,并最大限度地补偿超低频振荡模式引发的振荡,本章综合考虑GPSS的增益参数 K_{GP} 和相位参数 T_{a1} 、 T_{a2} 、 T_{b1} 、 T_{b2} ,提出一种物理意义明晰,各台机组调节性能均符合要求,且稳定性最优的多机GPSS综合参数整定方法。

对于水电占优型系统,一般认为火电机组参数固定。因此,问题的关键在于水电机组含GPSS的调速器传递函数的频率响应。给定角频率 ω ,系统转子环节的特性近似滞后 90° 。基于统一频域模型,可以令:

$$L(j\omega) = \sum_{i=1}^{N'} G_{M,i}(j\omega) + \sum_{i=1}^{N'} G_{GPSS,i}(j\omega) + \sum_{k=1}^M G_{M,k}(j\omega) = \sum_{i=1}^{N'} A_i e^{j\alpha_i} + \sum_{k=1}^M G_{M,k}(j\omega) \approx e^{j\alpha} \sum_{i=1}^{N'} A_i + \sum_{k=1}^M G_{M,k}(j\omega) \quad (24)$$

式中: $L(j\omega)$ 为系统各机组调速器-原动机系统与GPSS的总传递函数; N' 为水电机组数量; M 为火电机组数量; $G_{M,i}(j\omega)$ 、 $G_{M,k}(j\omega)$ 分别为第 i 台水电机组、第 k 台火电机组的传递函数; $G_{GPSS,i}(j\omega)$ 为第 i 台水电机组GPSS的传递函数; A_i 、 α_i 分别为第 i 台水电机组传递函数的模值、相位; α 为水电机组模块的综合相位。

进一步地,在水电占优型系统中,有:

$$e^{j\alpha} \sum_{i=1}^{N'} A_i + \sum_{k=1}^M G_{M,k}(j\omega) \approx e^{j\alpha} \sum_{i=1}^{N'} A_i \quad (25)$$

将式(25)代入式(24),有:

$$L(j\omega) = \sum_{i=1}^{N'} A_i e^{j\alpha_i} + \sum_{k=1}^M G_{M,k}(j\omega) \approx \sum_{i=1}^{N'} A_i e^{j\alpha} \quad (26)$$

由第1章中 G_M 的PI参数性质可以知道,PI参数有利于加快系统响应速度,但是会导致系统阻尼大幅度削弱,使系统失稳;同时由第2章中GPSS的传递函数和性质可以知道,GPSS可以适当消除由PI参数增大引起的弱阻尼效应,并适当加快机组响应速度。为了使阻尼增强效果最优,本章提出一种综合考虑稳定裕度及单台机组响应时间的多机GPSS参数优化整定方法。该方法在多种运行方式下均可以提高系统超低频振荡的稳定性,同时保证系统的频率调节性能。

3.1 目标函数

该参数整定方法的目的是抑制水电占优型系统中固有的超低频振荡模式,并提升该系统的响应性能指标。由于电力系统一般没有开环不稳定极点,由多输入多输出系统的广义奈奎斯特稳定判据^[22]可知,广义奈奎斯特曲线 $|1+L(j\omega)|$ 距离原点的最近点的矢量可以看作闭环系统的稳定裕度矢量,其模值 V_M 如式(27)所示。

$$V_M = \min \left\{ |1+L(j\omega)| \right\} = \min \left\{ \left| 1 + \sum_{i=1}^{N'} A_i e^{j\alpha_i} + \sum_{k=1}^M G_{M,k}(j\omega) \right| \right\} \approx \min \left\{ \left| 1 + \sum_{i=1}^{N'} A_i e^{j\alpha} \right| \right\} \quad (27)$$

将系统超低频振荡下的稳定裕度作为GPSS参数设计的目标函数,如式(28)所示。

$$\max V_M = \min \left\{ \left| 1 + \sum_{i=1}^{N'} A_i e^{j\alpha} \right| \right\} \quad (28)$$

3.2 约束条件

1) 性能约束。

为了保证调整PI参数后,含GPSS的系统在各运行方式下的功率响应速度能达到工程要求的性能指标,需要满足参数的时域性能约束,如式(29)所示。

$$\begin{cases} t_{r,i} \leq t_{rmax} \\ t_{s,i} \leq t_{smax} \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, N' \quad (29)$$

式中: $t_{r,i}$ 、 $t_{s,i}$ 分别为安装GPSS的第 i 台水电机组的上升时间、调节时间; t_{rmax} 、 t_{smax} 分别为上升时间上限、调节时间上限。

优化模型中的其他指标均为频域指标,因此将其转化为频域约束^[23],其中,将上升时间指标转化为调速器-原动机闭环传递函数的带宽指标 ω_B ,将调节时间指标转化为相位裕度 $\gamma_{PM,i}$ 以及穿越频率指标 $\omega_{c,i}$,如式(30)所示。

$$\begin{cases} t_{r,i} \omega_B \approx 1.8 \\ t_{s,i} = \frac{K_{0,i} \pi}{\omega_{c,i}} \\ K_{0,i} = 2 + 1.5(1/\sin \gamma_{PM,i} - 1) + 2.5(1/\sin \gamma_{PM,i} - 1)^2 \end{cases} \quad (30)$$

从而可以将时域调节性能约束式(29)转化为频域调节性能约束^[17],如式(31)所示。

$$\begin{cases} |T_{p,i}(j\omega_B)| \geq 0.707 \\ \frac{K_{0,i} \pi}{\omega_{c,i}} \leq t_{smax} \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, N' \quad (31)$$

式中: $T_{p,i}(j\omega_B)$ 为第 i 台水电机组在带宽频率下的闭环传递函数。

2) 稳定约束。

稳定裕度矢量示意图如附录A图A5所示。由图可知,稳定裕度矢量 V_M 是指广义奈奎斯特曲线距离 $(-1,0)$ 点最近的矢量,并且广义奈奎斯特曲线 $|1+L(j\omega)|$ 须满足2个条件:①逆时针围绕原点 ρ_0 周;②不穿越原点时,系统才是稳定的。即稳定裕度矢量相位 θ 需要处于 $0^\circ \sim 180^\circ$ 内,故需要满足如下所示稳定约束:

$$\theta \approx \arg \left(1 + \sum_{i=1}^{N'} A_i e^{j\alpha_i} \right) \quad (32)$$

$$0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \quad (33)$$

3) 相位约束。

GPSS 利用二阶超前环节来补偿水电机组原动机-调速器环节的相位滞后,从而达到增强阻尼的效果。由前文可知,开环传递函数为:

$$L(j\omega) = (j\omega M_\Sigma + D_\Sigma)^{-1} \left(e^{j\alpha} \sum_{i=1}^{N'} A_i + \sum_{k=1}^M G_{M,k}(j\omega) \right) \approx (j\omega M_\Sigma + D_\Sigma)^{-1} e^{j\alpha} \sum_{i=1}^{N'} A_i \quad (34)$$

超低频扫频的频率为 f_1, f_2, \dots, f_{N_0} , 则安装 GPSS 的第 i 台水电机组原动机-调速器的传递函数 $L_i(j\omega_\kappa)$ 需要满足:

$$|\arg [L_i(j\omega_\kappa)]| \leq e_{p,i} \quad (35)$$

式中: $\kappa = 1, 2, \dots, N_0$; $\omega_\kappa = 2\pi f_\kappa$; $e_{p,i}$ 为第 i 台水电机组的相位误差上界。

4) 补偿中心频率约束。

为了使 GPSS 补偿频段最优,其补偿中心频率需要满足:

$$f_{\min} \leq f_m \leq f_{\max} \quad (36)$$

式中: f_{\max}, f_{\min} 分别为补偿中心频率上、下限。

5) 其他约束。

对于不同机组的 GPSS,设计时还需要根据实际情况、典型参数等给出所设计参数的上、下界约束,如式(37)所示。

$$\begin{cases} K_{GP,i,\min} \leq K_{GP,i} \leq K_{GP,i,\max} \\ T_{a1,i,\min} \leq T_{a1,i} \leq T_{a1,i,\max} \\ T_{a2,i,\min} \leq T_{a2,i} \leq T_{a2,i,\max} \\ T_{b1,i,\min} \leq T_{b1,i} \leq T_{b1,i,\max} \\ T_{b2,i,\min} \leq T_{b2,i} \leq T_{b2,i,\max} \end{cases} \quad (37)$$

式中:下标 i 表示第 i 台水电机组;下标 \max, \min 分别表示参数取值上、下限。

3.3 求解流程

本文所提多机 GPSS 参数优化整定方法的实现步骤如下:

1) 在 MATLAB 中建立电力系统的等值统一频域模型;

2) 在弱阻尼模式频率下扫频计算式(27),得到多机 GPSS 对稳定性贡献的矢量和,取最小稳定裕度为优化目标;

3) 设置 GPSS 各参数的上、下界,得到参数界限约束式(31)~(37);

4) 在 MATLAB 中利用遗传算法求解优化模型式(27)~(37)。

4 算例分析

以云南电网等值模型的夏大典型运行方式对系统 GPSS 展开参数整定,利用 MATLAB 进行求解。其中,模型为云南电网等值统一频域模型^[20],见附录 B 式(B1)。其不同运行方式下的系统参数如附录 B 表 B1 所示。

为了更好地激发系统超低频振荡,设定糯扎渡、鲁地拉、小湾机组的调速器的比例系数 $K_p=5$ 、积分系数 $K_i=2$ 、微分系数 $K_d=1$ 。此时由于 PI 参数增大,系统调节性能得到提升,稳定性能下降,可见夏大运行方式下系统已处于负阻尼区间。因此,需要整定合适的 GPSS 参数使得系统由负阻尼变为正阻尼,并同时提升调节性能。

根据第 3 章所提 GPSS 参数整定方法,整定得到夏大运行方式下小湾、鲁地拉、糯扎渡的 GPSS 参数,如表 1 所示。

表 1 各机组的 GPSS 参数

Table 1 Parameters of GPSS for each unit

机组	K_{GP}	T_{a1}/s	T_{b1}/s	T_{a2}/s	T_{b2}/s
小湾	0.2216	29.34	2.11	14.52	0.7266
鲁地拉	0.2222	25.32	1.67	14.49	0.7280
糯扎渡	0.1762	29.89	2.44	14.29	0.7383

夏大运行方式下,安装 GPSS 前、后系统的奈奎斯特曲线如图 6 所示。由图可知,安装 GPSS 可对系统稳定性起到正向作用,且可以将大 PI 参数下的负阻尼失稳系统拉回至正阻尼。但由 2.2 节可知,GPSS 的补偿稳定性存在上限,不能无限度地补偿其因 PI 参数增大带来的负阻尼。

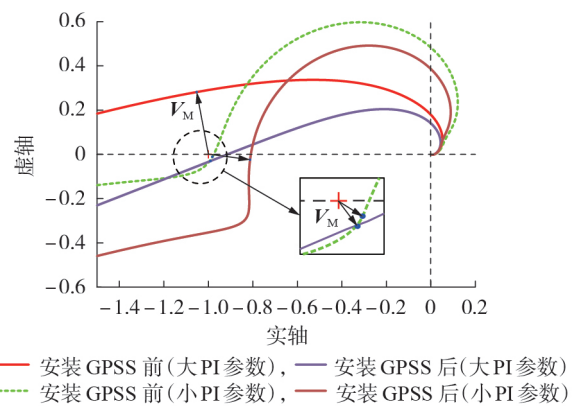


图 6 安装 GPSS 前、后系统的奈奎斯特曲线

Fig.6 Nyquist curves of system before and after GPSS installation

糯扎渡、鲁地拉、小湾安装 GPSS 前、后输出的机械功率 ΔP_m 如图 7 所示。从图中可以明显看出,安装 GPSS 后,机组出力快速提升,能帮助系统快速增发缺额功率,同时提升系统稳定性。夏大运行方式下各机组安装 GPSS 前、后的参数优化结果如表 2 所

示。由表可知:安装 GPSS 后,各机组调速器出力的相位滞后性得到较大的改善,即对稳定性的贡献量有所提升;各机组的带宽有所增大,即机组出力速度有所加快;结合图 6 可知,安装 GPSS 使得系统阻尼比由负转正,具有较为明显的提升。

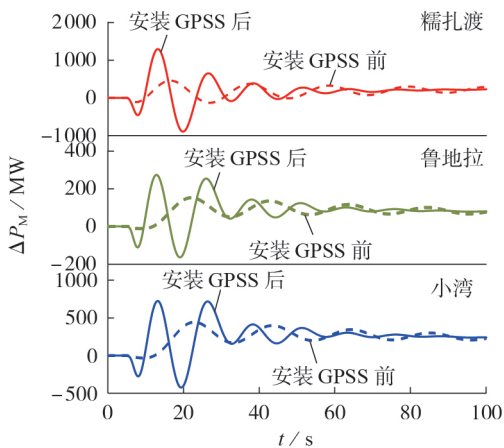


图7 安装 GPSS 前、后输出的机械功率

Fig.7 Output mechanical power before and after GPSS installation

表2 安装 GPSS 前、后的参数优化结果

Table 2 Optimal results of parameters before and after GPSS installation

机组	V_M		$\theta / (^\circ)$		ω_B	
	安装 GPSS 前	安装 GPSS 后	安装 GPSS 前	安装 GPSS 后	安装 GPSS 前	安装 GPSS 后
糯扎渡	0.119	0.155	159.1	-145.2	0.083	0.091
鲁地拉	0.019	0.023	-179.5	-108.4	0.084	0.093
小湾	0.056	0.097	151.2	-102.3	0.083	0.089

系统阻尼情况也有所改善。在大 PI 参数下:安装 GPSS 前,系统存在 0.05 Hz 的振荡模式,对应的阻尼比为 -16.74% ;安装 GPSS 后,系统存在 2 个阻尼相对较弱的模式,频率分别为 0.05、0.08 Hz,其阻尼比分别为 10.98% 、 12.30% ,分别对应固有模式和新增 GPSS 模式。

保持较大的 PI 参数不变,选取冬大、冬小、夏小、夏小大外送 4 种运行方式,按照第 3 章所述方法整定 GPSS 参数,得到 4 种运行方式下系统安装 GPSS 前、后的稳定性指标结果,如表 3 所示,表中 f_{osc} 为不同方式下系统的弱阻尼振荡频率。由表可知,安装 GPSS 后,引入了新的 GPSS 模式,但系统固有模式的阻尼比有一定的提升,且 GPSS 可以在一定限度内将固有模式的正特征根拉回至负半平面。

将简化模型中整定的参数应用到南方电网 2023 年夏大运行方式的实际系统,设置楚穗直流发生单极闭锁故障,在南方电网自主研发的仿真软件 DSP 中测试其振荡模式被激发后系统的频率扰动曲线,如图 8 所示。由图可知,安装 GPSS 后系统稳定

表3 4种运行方式下安装 GPSS 前、后的稳定性指标结果

Table 3 Stability performance index results before and after GPSS installation under four operation modes

运行方式	$\zeta / \%$		f_{osc} / Hz	
	安装 GPSS 前	安装 GPSS 后	安装 GPSS 前	安装 GPSS 后
冬大	-15.37	11.17, 18.48	0.06	0.06, 0.08
冬小	4.31	19.53, 22.86	0.05	0.04, 0.09
夏小	-11.45	11.50, 13.85	0.05	0.05, 0.09
夏小大外送	-12.90	9.83, 12.08	0.05	0.05, 0.09

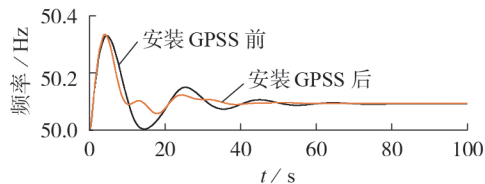


图8 实际系统的频率扰动曲线

Fig.8 Frequency disturbance curves of real system

性能有所提升,且新增了一种新的振荡模式。可见,安装 GPSS 能优化系统的性能指标,助力系统恢复稳定。

5 结论

本文基于频域模型,针对每台机组的上升时间、调节时间及系统的阻尼比要求,提出了一种综合考虑电力系统稳定性和调节性能的 GPSS 参数整定方法,所得结论如下。

1) 推导了频率-机械功率的传递函数模型,该模型简单明晰,可以用于频域动态分析,简单扩展即可得到统一频域模型,基于该模型可以同时实现对电力系统稳定性及调节性能的综合分析。

2) 从频域的角度出发,阐明了调速器和 GPSS 的工作原理及其参数对电力系统稳定性和机组调节性能的影响。揭示了 GPSS 补偿稳定性的补偿尖峰和补偿上限的存在,指出 GPSS 相位参数指标和增益参数指标对固有超低频振荡模式的补偿效果为先增后减的抛物线形式。当进行正向补偿时,GPSS 可以有效优化调节性能和稳定性;但当补偿过度时,新引入的 GPSS 模式会替代原有的固有模式成为系统的主导模式。

3) 提出了一种以稳定裕度为目标函数,考虑单台机组调节性能的多机 GPSS 参数优化整定方法。算例测试结果表明,所设计的 GPSS 参数不仅能加快机组响应速度,还能增强系统阻尼,在一定限度内可以将负阻尼拉回至正阻尼,合理优化系统的稳定性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 付超,柳勇军,涂亮,等. 云南电网与南方电网主网异步联网系统试验分析[J]. 南方电网技术,2016,10(7):1-5,12.
FU Chao,LIU Yongjun,TU Liang,et al. Experiment and analysis on asynchronously interconnected system of Yunnan Power Grid and main grid of China Southern Power Grid[J]. Southern Power System Technology,2016,10(7):1-5,12.
- [2] 刘志坚,唐灏,郭成,等. 含高比例新能源的异步互联送端系统直流FLC的阶跃死区控制策略及优化[J]. 电力自动化设备,2024,44(10):116-123.
LIU Zhijian,TANG Hao,GUO Cheng,et al. Step dead zone control strategy and optimization of DC FLC for asynchronous interconnected sending system with high proportion of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment,2024,44(10):116-123.
- [3] 蒋容,张英敏,刘凯. 双馈风电机组抑制电力系统低频振荡的鲁棒控制策略[J]. 电力建设,2017,38(10):41-47.
JIANG Rong,ZHANG Yingmin,LIU Kai. Robust control strategy of DFIG suppressing power system low frequency oscillations[J]. Electric Power Construction,2017,38(10):41-47.
- [4] 路晓敏,陈磊,陈亦平,等. 电力系统一次调频过程的超低频振荡分析[J]. 电力系统自动化,2017,41(16):64-70.
LU Xiaomin,CHEN Lei,CHEN Yiping,et al. Ultra-low-frequency oscillation of power system primary frequency regulation[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(16):64-70.
- [5] 付亮,赵志高,杨建东,等. 兼顾超低频振荡阻尼特性的水电机组一次调频多目标优化策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(6):83-91.
FU Liang,ZHAO Zhigao,YANG Jiandong,et al. Multi-objective optimization strategy of primary frequency regulation for hydropower unit considering damping characteristics of ultra-low frequency oscillation[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(6):83-91.
- [6] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2003:240-286.
- [7] 许昊,甘德强,黄润,等. 基于最小特征轨迹的电力系统稳定器参数整定方法[J]. 电力系统自动化,2023,47(5):134-143.
XU Hao,GAN Deqiang,HUANG Run,et al. Parameter tuning method for power system stabilizer based on minimum characteristic locus[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(5):134-143.
- [8] 李生虎,叶剑桥,张浩,等. 基于DFIG功率振荡阻尼器的电力系统低频振荡抑制综述[J]. 电力建设,2022,43(9):25-33.
LI Shenghu,YE Jianqiao,ZHANG Hao,et al. Review on low-frequency oscillation damping in power systems with DFIG-POD[J]. Electric Power Construction,2022,43(9):25-33.
- [9] GRONDIN R,KAMWA I,SOULIERES L,et al. An approach to PSS design for transient stability improvement through supplementary damping of the common low-frequency[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1993,8(3):954-963.
- [10] 黄伟,刘蔚,黄润,等. 利用PSS4B和GPSS附加阻尼控制抑制云南电网超低频振荡的对比分析[J]. 广东电力,2022,35(10):74-82.
HUANG Wei,LIU Wei,HUANG Run,et al. Comparative analysis of suppressing ultra-low frequency oscillation of Yunnan Power Grid by using additional damping control of PSS4B and GPSS[J]. Guangdong Electric Power,2022,35(10):74-82.
- [11] WANG H F,HAO Y S,HOGG B W,et al. Stabilization of power systems by governor-turbine control[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,1993,15(6):351-361.
- [12] 郝玉山,王海风,韩祯祥,等. 电力系统稳定器实现于调速系统之研究:第二部分:多机系统中特性分析[J]. 电力系统自动化,1993,17(3):26-32.
HAO Yushan,WANG Haifeng,HAN Zhenxiang,et al. Power system stabilization by turbine governor control part II: characteristic analysis in multimachine power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,1993,17(3):26-32.
- [13] 王明东,刘宪林. 调速器侧模糊电力系统稳定器改善水电系统稳定性的仿真研究[J]. 电力自动化设备,2003,23(9):36-39.
WANG Mingdong,LIU Xianlin. Research on stability improvement of hydroelectric system using governor fuzzy power system stabilizer[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(9):36-39.
- [14] 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.
- [15] PAN F P,ZHONG M,CHEN Y Z,et al. Research on governor-side power system stabilizer[J]. Advanced Materials Research,2014,960/961:1331-1335.
- [16] SHI X L,RUAN G R,LU H Y,et al. Analysis of ultra-low frequency oscillation in hydro-dominant power system and suppression strategy by GPSS[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2023,59(3):2796-2806.
- [17] 战永胜. 基于西南电网异步联网条件下的水电机组超低频振荡抑制技术研究[J]. 大电机技术,2023(增刊2):6-15.
ZHAN Yongsheng. Research on ultra-low frequency oscillation suppression technology of hydropower unit based on asynchronous network of southwest power grid[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine,2023(Supplement 2):6-15.
- [18] 黄伟,张清波,许昊,等. 电力系统小干扰稳定分析的最小特征轨迹法[J]. 电力自动化设备,2022,42(12):151-156,164.
HUANG Wei,ZHANG Qingbo,XU Hao,et al. Minimum characteristic loci method for power system small disturbance stability analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(12):151-156,164.
- [19] 王渝红,赏成波,廖建权,等. 适应风电接入的异步联网高压直流输电系统自适应调频控制策略[J]. 电力自动化设备,2023,43(9):218-225.
WANG Yuhong,SHANG Chengbo,LIAO Jianquan,et al. Adaptive frequency modulation control strategy for asynchronous connected HVDC transmission system adapted to wind power access[J]. Electric Power Automation Equipment,2023,43(9):218-225.
- [20] XU Hao,GAN Deqiang,ZHANG Qingbo,et al. A small-signal stability analysis method based on minimum characteristic locus and its application in controller parameter tuning[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2023,39(2):3798-3810.
- [21] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004:64-114.
- [22] SKOGESTAD S,POSTLETHWAITE I. Multivariable feedback control: analysis and design[M]. London,UK: John Wiley & Sons, Inc.,1996:113-158.
- [23] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 4版. 北京:科学出版社,2001:170-214.

作者简介:

叶鹏举(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制(**E-mail**:yepengju@zju.edu.cn);
许昊(1997—),男,博士,主要研究方向为电力系统稳

定分析与控制(**E-mail**:eexuhao@zju.edu.cn);

甘德强(1966—),男,教授,博士,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制(**E-mail**:dgan@zju.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

GPSS mechanism analysis and multiple-unit parameter optimization considering regulation performance of single unit

YE Pengju¹, XU Hao¹, YANG Mingliang², LUO Yao², LI Jinqiu², ZHAO Yong³,
JIANG Chuyang³, CHEN Gang³, GAN Deqiang¹

(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Yunnan Power Grid Corporation Limited, Kunming 650011, China;

3. China Southern Power Grid Scientific Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: With the increasing penetration rate of new energy in the power system, the overall inertia of the system decreases and the frequency stability becomes a primary concern in the safe and stable operation of the Yunnan Power Grid. The traditional method of adjusting proportional-integral-differential parameters can not give consideration to both stability performance and adjusting speed. The limitation of this method is analyzed in frequency domain, and the governor-side power system stabilizer (GPSS) is used to improve the system stability performance and the unit adjusting speed. From the perspective of transfer function, the mechanical analysis of GPSS is carried out and the influence of GPSS parameters on the regulation performance and stability of power system is analyzed. Based on the properties of GPSS, a GPSS parameter optimization setting method is proposed from the perspective of frequency domain, which comprehensively considers the stability margin and the regulation performance of a single unit. The method can improve the regulation performance of each unit installed with GPSS and the whole system at the same time and optimize the stability margin. The simulative results of Yunnan Power Grid demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: GPSS; frequency stability; regulation performance; stability analysis; parameter optimization design

(上接第114页 continued from page 114)

Hybrid flexible arc suppression method of generator stator winding grounding fault

WANG Yikai¹, ZHENG Hairan¹, QIAO Jian¹, YIN Xianggen², TANG Chenxiao¹, OU Jie¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071000, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The active arc suppression method can realize reliable arc suppression of generator stator winding fault, but it requires a large-capacity inverter power supply, which is large in size and high in cost, and the engineering application is limited. In order to reduce the capacity of the inverter power supply, a hybrid flexible arc suppression method for generator stator winding grounding fault is proposed, which combines the dual-frequency active arc suppression method with the grounding mode of the arc suppression coil, and uses the arc suppression coil to compensate for most of the fundamental components in the grounding fault current, and the remaining fundamental components and harmonic components are compensated by the active arc suppression device. Under the premise of reliably realizing grounding fault arc suppression, this method can greatly reduce the capacity of the inverter power supply, and has high economy and practicability. Simulation and dynamic model test results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: stator winding grounding fault; hybrid flexible arc suppression; dual-frequency active arc suppression; arc suppression coil; inverter power capacity

附录 A

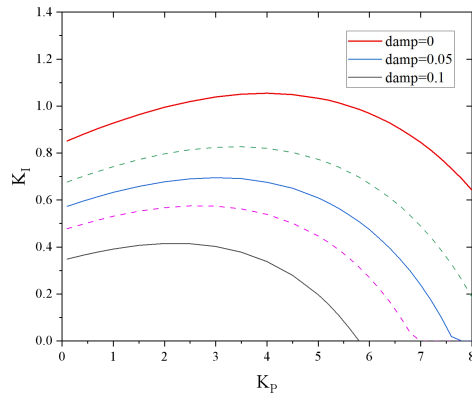


图 A1 K_p - K_I 平面下的系统阻尼比曲线

Fig.A1 System damping ratio projection in K_p - K_I plane

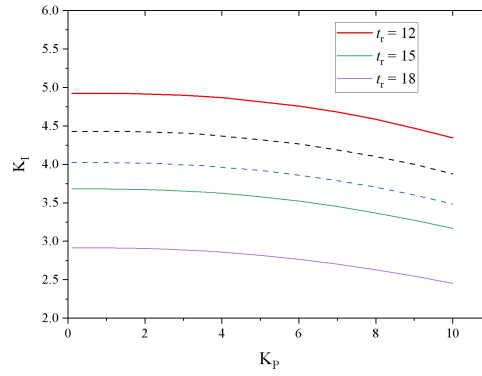


图 A2 K_p - K_I 平面下的上升时间曲线

Fig.A2 Projection of rise time under K_p - K_I plane

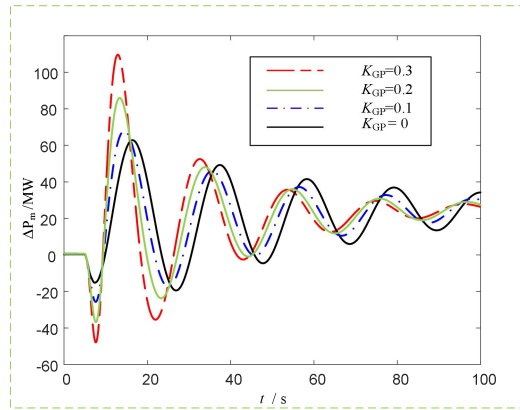


图 A3 GPSS 增益参数对单机上升时间的影响

Fig.A3 Influence of GPSS gain parameters on rise time of a single machine

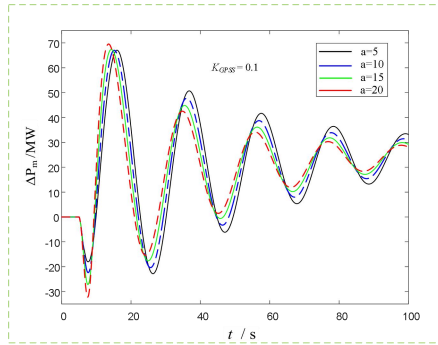


图 A4 GPSS 相位参数对单机上升时间的影响

Fig.A4 Influence of GPSS phase parameters on rise time of a single machine

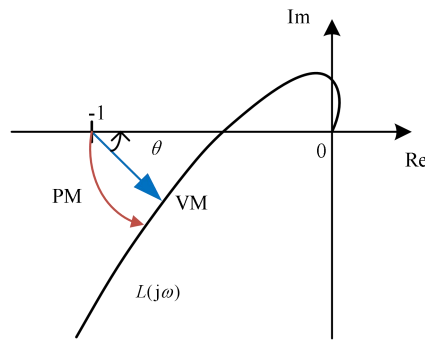


图 A5 稳定裕度矢量的定义

Fig.A5 Definition of stability margin vector

附录 B

云南电网等值统一频率简化分析模型中：

$$\sum_{i=1}^N G_{M,i}(s) = N_s G_{Ms}(s) + N_{hp} G_{Mhp}(s) + N_{hm} G_{Mhm}(s) + N_{XW} G_{M,XW}(s) + N_{LDL} G_{M,LDL}(s) + N_{NZD} G_{M,NZD}(s) \quad (B1)$$

式中： $G_{M,i}(s)$ 为每种类型机组的涡轮调速器传递函数； N 为运行中的机组数量；下标 s 对应汽电当量单位，下标 hp 对应采用 PID 调速器的大水电当量单位，下标 hm 对应采用机械调速器的小水电当量单位，下标 NZD 、 LDL 、 XW 分别代表糯扎渡机组、鲁地拉机组、小湾机组。

不同运行方式下，各类机组的投运数量如表 B1 所示。

表 B1 云南电网不同运行方式下的系统参数

Table B1 Parameters of different operation modes in Yunnan Power Grid

运行方式	N_s	N_{hp}	N_{hm}	N_{XW}	N_{LDL}	N_{NZD}
冬大	17	28	81	4	3	6
冬小	12	8	71	2	1	2
夏小	6	14	94	4	2	6
夏小大外送	6	14	94	4	1	4