

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240270

交流变速抽蓄机组单通道电力系统稳定器设计研究

郑盛诚¹, 章广清¹, 赵文彬¹, 吴文军¹, 魏书荣¹, 施宏亮²

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海明华电力科技有限公司, 上海 200090)

摘要: 为了弥补交流变速抽蓄机组涉网环节的不足, 依据我国对大型发电机组并网的技术要求, 提出了一种适用于交流变速抽蓄机组的单通道电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)设计方法, 同时还给出了变速机组与定速机组的协同响应策略。在励磁系统特性方面, 对比分析了变速机组与定速机组的差异, 改进了 PSS 的传递函数结构, 提出了相关参数的估算方法, 能够适应交流变速抽蓄机组的并网要求。在厂内协调方面, 针对变速机组与定速机组的协同控制需求, 研究了基于变模态分解技术的协同响应方案, 并对比了抽蓄电厂的整体反应效果, 能够用于指导首台变速机组投产的工程实际。为了进行仿真分析, 搭建了 IEEE 9 节点系统, 并利用真实风电场数据, 构建了电网功率扰动场景, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 新型电力系统; 交流变速抽蓄机组; 单通道电力系统稳定器; 参数辨识; 动态调节; 厂内协同

A single channel power system stabilizer for AC variable speed pumped storage units

ZHENG Shengcheng¹, ZHANG Guangqing¹, ZHAO Wenbin¹, WU Wenjun¹, WEI Shurong¹, SHI Hongliang²

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai Electric Power University, Shanghai 200090, China;

2. Shanghai Minghua Electric Power Science & Technology Co., Ltd., Shanghai 200090, China)

Abstract: To compensate for the shortcomings in the grid-rated aspects of AC variable-speed pumped storage units, and given China's technical requirements for the grid connection of large-scale generators, a design approach for a single-channel power system stabilizer (PSS) suitable for AC variable-speed pumped storage units is proposed. A collaborative response strategy between variable-speed and constant-speed units is also provided. On excitation system characteristics, the differences between variable- and fixed-speed units are compared and analyzed, and the transfer function structure of the PSS is improved. An estimation method for relevant parameters is proposed, one which can adapt to the grid connection requirements of AC variable-speed pumped storage units. For in-plant coordination, a collaborative response scheme based on variable modal decomposition technology is studied for the collaborative control requirements of variable- and fixed-speed units, and the overall response effects of pumped storage power plants are compared. These can be used to guide practical engineering of the first variable-speed unit. To conduct simulation analysis, an IEEE 9-node system is built, and real wind farm data is used to construct a power grid disturbance scenario. This verifies the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52377063).

Key words: new power system; AC variable speed pumping and storage unit; single channel power system stabilizer; parameter identification; dynamic adjustment; in-plant collaboration

0 引言

我国正朝着“双碳”目标大跨步前进, 加速构建适应新能源占比逐渐提高的新型电力系统^[1-3]。当前, 如何有效提高新型电力系统的动态调节能力是目前广泛关注的问题^[4-6]。大规模储能技术是稳定新能源发电和电力系统的关键^[7-9]。抽水蓄能作为成熟、

经济、可大规模开发的调节电源, 是新型电力系统建设的重要技术^[10-12]。我国目前规划建设的抽水蓄能装机容量远超其他国家, 投产规模与目标存在巨大空间, 建设需求巨大。各国抽水蓄能建设计划见图 1^[13]。

交流变速抽蓄机组是目前建设抽水蓄能电站新机组的一个新方向, 文献[14-15]深入探讨了交流励磁变速的技术原理、特性以及性能上的优势。文献[16-18]研究了交流变速抽蓄机组的控制策略, 从多

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52377063)

个视角优化其对电网频率变化的迅速反应能力。文献[19]提出一种转子动能与导叶开度协调的控制策略来提高双馈抽蓄机组的调频能力。文献[20]基于多目标樽海鞘算法优化电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)参数, 以抑制低频振荡现象。文献[21]基于系统识别技术为监测和重新设计 PSS 提供了一种有效的替代方案, 该方法无需电力系统仿真模型, 但需要在实时环境中进行, 要求较高的计算能力。文献[22]基于经典转矩分析方法设计 PSS, 并使用相位补偿法调整相关参数。文献[23]基于蚁狮优化算法对 PSS 进行优化设计, 但在实际电力系统应用中, 存在一些约束条件, 可能会限制优化效果。文献[24]基于火电机组与抽水蓄能不同的运行特性, 提出了一种风电与抽水蓄能合作方式。

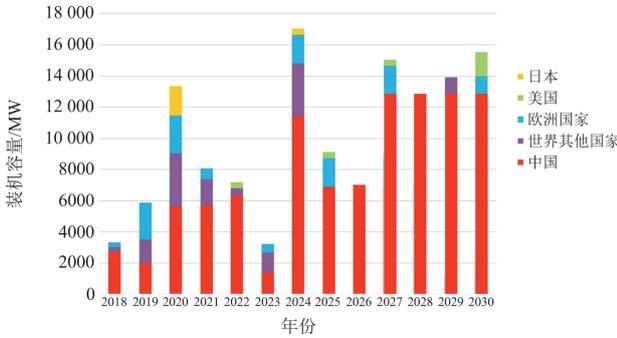


图 1 各国抽水蓄能建设计划

Fig. 1 Pumped storage construction plans by country

自 20 世纪 90 年代起, 日本便开始采用变速抽水蓄能技术来对电网频率进行控制。与此同时, 欧洲也广泛应用这一技术来维持电网功率的稳定, 国内已在广东、河北等地投入建设^[25-26]。在 20 世纪 90 年代, 我国就已经有部分学者对交流励磁电机用于抽水蓄能电站的可行性展开了研究, 交流变速抽蓄机组能够通过调整转速来提高水泵水轮机的运行效率和调节范围, 还能通过改变转子励磁电流迅速响应电网中功率和电压的波动, 实现有功和无功功率的动态调整。因此使用交流变速抽蓄机组来增加电力系统的动态调节能力是一种可行的方法。若能高效协调变速机组和定速机组, 就能提升抽蓄电厂整体调节效果。

目前国内大容量交流变速抽蓄机组正处于投产前期, 缺乏实际运行的经验, 但是必须适应新能源大规模并网的需求^[27-28]。在新型电力系统建设过程当中, 新能源出力波动是引发系统失稳, 造成系统稳定性下降的主要原因, 小干扰稳定是其中主要的表现形式, 可以考虑使用交流变速抽蓄机组 PSS 进行抑制。

但是我国电力系统对大型机组并网有非常严格的规定, 根据 GB 38755-2019 要求, PSS 已经成为大型机组并网强制规定必须具备的功能。目前大型交流变速抽蓄机组已经引入国内, 但是由于国内外设计理念的不同, 并没有对 PSS 进行设计, 不满足国标要求, 给机组的投产造成了障碍, 因此急需对交流变速抽蓄机组 PSS 展开研究, 来满足现场实际生产的要求。同时由于交流变速抽蓄机组的控制相对复杂, 导致 PSS 的研究相对滞后, 目前鲜有关于交流变速抽蓄机组 PSS 设计方法的研究。

本文提出一种利用交流变速抽蓄机组提高抽水蓄能电站动态调节能力的方法。首先分析了变速机组与定速机组励磁系统的区别。其次, 对 PSS1A 输入、输出端进行优化, 以满足变速机组励磁系统要求。然后, 使用参数辨识方法对 PSS1A 参数和输入输出影响系数进行求解。此外, 本课题组前期已对变速抽蓄机组间的协同展开了相关研究, 本文除了设计单机 PSS, 还研究了 PSS 对小干扰稳定的多机协同效果。最后, 在 IEEE 9 节点系统中进行仿真验证。

1 交流变速抽蓄机组 PSS 的基本原理

1.1 交流变速抽蓄机组工作原理

交流变速抽蓄机组结构示意图如图 2 所示。双馈感应电机的定子与电网相连, 电机的转子侧通过交-直-交变频器与电网相连, 同时变频器与调速系统之间通过机电协调控制策略实现协调配合。

设 n_1 为电机定子旋转磁场转速, n_r 为转子的实际转速, n_2 为交流励磁电流产生的旋转磁场转速。为了确保气隙中定、转子电流产生的旋转磁场保持同步, 三者之间关系如式(1)所示。

$$n_1 = n_r \pm n_2 \quad (1)$$

1.2 交流励磁发电机数学模型

变速抽蓄机组采用的双馈电机在三相静止坐标系下的数学模型具有非线性、强耦合的特点, 将其转换到 $d-q$ 旋转坐标系下得到定子绕组电压方程式(2)、转子绕组电压方程式(3)、定子磁链方程式(4)和转子磁链方程式(5)。

$$\begin{cases} u_{sd} = p\psi_{sd} - \omega_s\psi_{sq} - R_s i_{sd} \\ u_{sq} = p\psi_{sq} + \omega_s\psi_{sd} - R_s i_{sq} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} u_{rd} = p\psi_{rd} + R_r i_{rd} - \omega_r\psi_{rq} \\ u_{rq} = p\psi_{rq} + R_r i_{rq} + \omega_r\psi_{rd} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \psi_{sd} = -L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = -L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \end{cases} \quad (4)$$

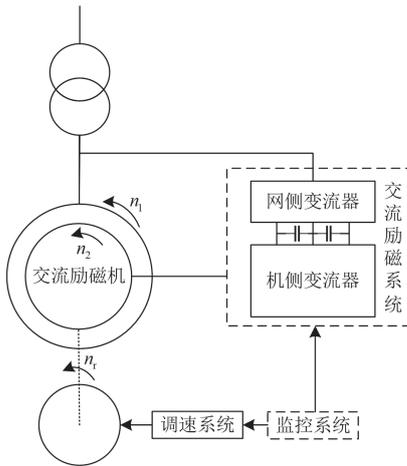


图2 交流变速抽水机组结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of AC variable speed pumped storage unit structure

$$\begin{cases} \psi_{rd} = L_r i_{rd} - L_m i_{sd} \\ \psi_{rq} = L_r i_{rq} - L_m i_{sq} \end{cases} \quad (5)$$

式中： u 、 i 、 ψ 、 ω 、 R 、 L 分别为电压、电流、磁链、电角速度、电阻、电感；下标中的s、r、d、q分别代表定子、转子、直轴分量、交轴分量； p 为微分算子； L_m 为定转子绕组互感。

1.3 PSS 的工作原理

PSS 是一种附加励磁装置，在电压调节器中加入控制环节，通过引入附加信号，如电功率偏差、频率偏差、转速偏差的单一信号或者是组合信号，经过适当的相位补偿和放大后，输入到电压调节器中，产生正阻尼转矩 ΔM_p ，与电压调节器原有转矩 ΔM_{e2} 的合成转矩 ΔM_e 位于第一象限，使得同步转矩和阻尼转矩都为正，如图 3 所示。这种正阻尼类似于发电机阻尼绕组的功能，用来抵消电压调节过程中可能产生的负阻尼，从而抑制低频振荡的发生，

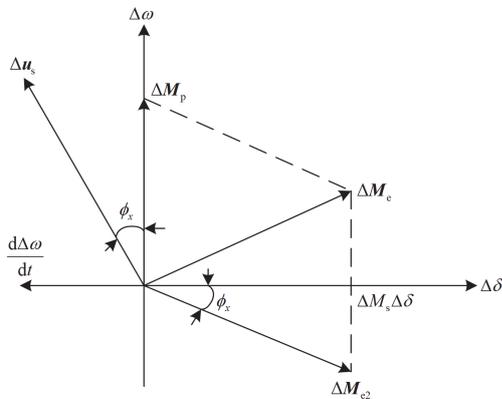


图3 阻尼转矩向量图

Fig. 3 Vector diagram of damping torque

提高了电力系统的运行稳定性^[29-30]。

由于定速机组和变速机组励磁系统在控制目标上存在差异，使得 PSS 在控制环节上也存在不同。在输入量方面，定速机组只输入机械转速，变速机组需要同时考虑机械转速和电转速的影响；在输出量方面，定速机组只需要调节电压幅值，而变速机组需要对电压幅值、频率、相位都进行调节。具体如表 1 所示。

表 1 定速机组和变速机组 PSS 对比

Table 1 Comparison of PSS between constant speed unit and variable speed unit

PSS	输入	输出
定速机组 PSS	机械转速	电压幅值可调
变速机组 PSS	机械转速和电转速	电压幅值、频率、相位可调

2 变速机组励磁系统特性及 PSS 控制模型

对交直流励磁系统特性进行对比，并分析了变速机组机电协调控制逻辑。在此基础上，对交流变速机组单通道 PSS 结构进行优化。最后，基于仿真参数逼近的建模方法，对 PSS 参数进行求解。

2.1 交直流励磁系统特性

同步发电机励磁系统一般采用直流供电，交流励磁系统采用交流供电，两者在控制方式和控制目标上存在巨大差异，总结如表 2 所示。

表 2 直流励磁和变速机组励磁参数差异

Table 2 Differences in excitation parameters between DC excitation and variable speed units

	直流励磁系统	交流励磁系统
控制量	I_{exc}	I_{exc} 、 I_f 、 I_{phi}
励磁电流	直流	交流
控制目标	机端电压	P_{act} 、 Q_{act} 、 ω_{act}
励磁元件	晶闸管换流器	变频器

在控制量方面，直流励磁系统控制直流励磁电流 I_{exc} 的大小，交流励磁系统控制交流励磁电流 I_{exc} 的大小、频率 I_f 、相位 I_{phi} ；在励磁电流方面，直流励磁系统输出直流电流，交流励磁系统输出交流电流；在控制目标方面，直流励磁系统目标是维持机端电压在合格范围内，而交流励磁系统的控制目标相对复杂，共有 3 个控制对象：有功功率 P_{act} 、无功功率 Q_{act} 以及电机转速 ω_{act} ，交流励磁电机输出的 P_{act} 和 Q_{act} 依赖于转子电压和电流的调节，在一定范围内， ω_{act} 也受到励磁电流的控制。

2.2 变速机组机电协调的逻辑分析

在变速机组运行过程中， P_{act} 、 Q_{act} 、 ω_{act} 中任

任何一个运行参数的变化都会导致其余两个参数的变化, 为了保证机组的外特性相同, 在参考值输入部分对其余两个变量进行补偿, 来保证有功、无功、转速的独立性。变速机组机电协调控制如图 4 所示。其中, Q_{ref} 为无功参考值; P_{ref} 为有功参考值; ω_{ref}

为机组转速参考值; $\Delta\omega$ 为转速差; ΔP 为有功功率差; K_1 、 K_2 、 K_3 分别为无功功率对有功参考值影响系数、无功功率对转速参考值影响系数、转速对有功参考值影响系数; μ 为导叶开度。

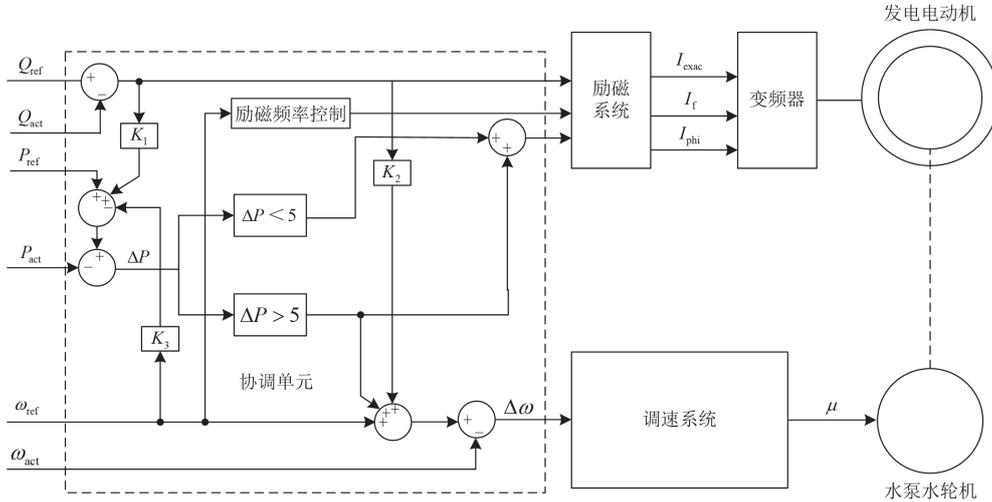


图 4 变速机组机电协调控制

Fig. 4 Electromechanical coordinated control of variable speed unit

励磁系统控制单元主要负责电气量的调节, 依据有功和无功功率调节器输出的控制信号对感应电机的转子电流进行调节, 并将调节后的控制信号转换成调制信号, 调节 I_{exc} 、 I_r 、 I_{phi} ; 调速系统控制单元则通过改变导叶开度来控制机组转速; 协调单元则负责协调上述两个控制单元, 使之能够协同工作, 共同完成对整个系统的控制。

控制系统工作时, 协调单元先从电网中得到需要输出的 P_{ref} 和 Q_{ref} 。协调单元根据 P_{ref} 和 P_{act} 形成有功功率闭环控制, 使感应电机输出的 P_{act} 始终跟踪 P_{ref} 。与此同时, 协调单元根据当前的有功功率差值和转速差值得出最优的转子转速, 输出给调速器, 以对导叶开度进行调节, 在此基础上, 通过比较 ω_{ref} 和 ω_{act} 形成转速闭环控制, 并对导叶进一步微调。

2.3 交流变速机组单通道 PSS 控制模型分析

2.3.1 单通道 PSS 控制环节功能分析

PSS1A 作为单输入单输出型 PSS, 输入信号可以是转速 n , 频率 f 、加速功率 ΔP_a 。PSS1A 型传递函数如图 5 所示。其中输入信号测量时间常数 T_6 用来模拟信号测量中的惯性; 放大倍数 K_s 为 PSS 提供足够的转矩阻尼; $K_s s T_5 / (1 + s T_5)$ 为隔直环节, 其中 T_5 为隔直时间常数; $1 / (1 + A_1 s + A_2 s^2)$ 用来过滤掉轴扭转振荡的成分, 也可用来改变稳定器的频率

特性, 其中 A_1 、 A_2 为扭振滤波系数; 两级领先滞后环节 $(1 + s T_1) / (1 + s T_2)$ 、 $(1 + s T_3) / (1 + s T_4)$ 用来调整稳定器的领先滞后角度, 其中, T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 为超前滞后环节时间常数。

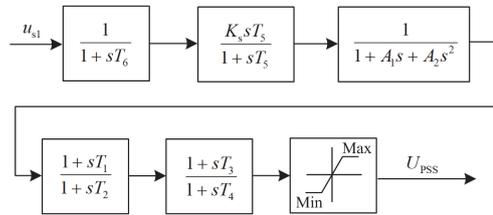


图 5 PSS1A 传递函数

Fig. 5 PSS1A transfer functions

2.3.2 变速机组单通道 PSS 模型

在 PSS 的输入结构上, 由于变速机组转子中存在 n_2 和 n_r 两个转速, 因此在设计 PSS 时需要同时考虑 n_2 、 n_r 对机组快速响应能力的影响, 同时机组调速器在响应上存在延迟, 为保持对应, 在 n_r 的输入端加入水轮机响应时间常数 Δt 。把输入到 PSS 中的 n_2 和 n_r 用 K_1 、 K_2 两个系数组成合成转速输入到 PSS 中, 与变速机组 2% 阶跃响应时转速变化进行对应, 使用 Matlab 曲线拟合工具确定 K_1 、 K_2 。

在 PSS 的输出结构上, 定速机组 PSS 只输出电

压信号, 而变速机组 PSS 需要同时输出 I_{exac} 、 I_f 、 I_{phi} 这 3 个控制信号给变频器, 因此需要将 PSS 输出信号 U_{PSS} 转化为 I_{exac} 、 I_f 、 I_{phi} 这 3 个控制信号。分别观测 I_{exac} 、 I_f 、 I_{phi} 这 3 个信号变化对机组有功出力的影响, 与变速机组 2% 电压阶跃响应相对比, 使用 Matlab 曲线拟合工具计算出影响系数 K_3 、 K_4 、 K_5 。变速机组 PSS 输入输出结构如图 6 所示。

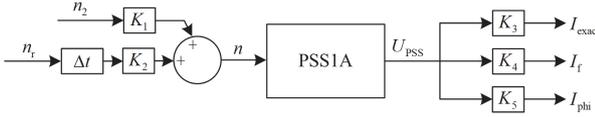


图 6 变速机组 PSS 输入输出结构

Fig. 6 PSS input and output structure of variable speed unit

2.3.3 基于仿真参数逼近的建模方法

对定速机组和变速机组进行 2% 的电压阶跃响应仿真, 结果如图 7、图 8 所示。

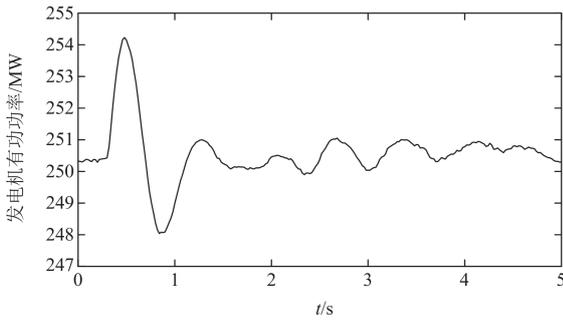


图 7 定速机组 2% 电压阶跃响应

Fig. 7 The 2% voltage step response of constant speed unit

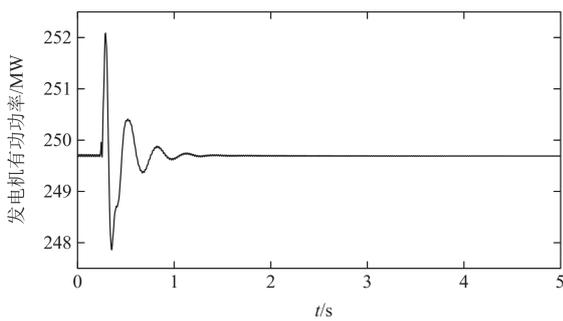


图 8 变速机组 2% 电压阶跃响应

Fig. 8 The 2% voltage step response of variable speed unit

对机组阶跃试验数据进行参数辨识, 通过观察系统响应情况, 设置零极点, 就能得到 IEEE PSS1A 的传递函数。把参数代入到实际控制系统中, 再根据 PSS 整定试验导则和经验数据, 对参数进行微调, 就能得到合理的 PSS 参数, 如表 3 所示。

表 3 定速机组与变速机组 PSS 参数对比

Table 3 Parameters comparison of PSS between constant speed unit and variable speed unit

PSS 参数	A_1	A_2	T_1, T_3	T_2, T_4	T_5	T_6	K_s
定速机组	0.061	0.0017	0.3	0.03	10	0.02	5
变速机组	0.052	0.001	0.41	0.01	3.62	0.02	6.2

3 变速机组、定速机组厂内协同策略

首先, 鉴于定速机组和变速机组在功率调节速度上的差异, 将原始调频信号通过频域分解为高频和低频信号, 定速抽蓄机群以低频信号为输出功率参考, 变速抽蓄机群以高频信号为输出功率参考。其次, 为了确保调频信号不超过各机组的调频容量, 对于超出容量的部分, 需要进行二次分配^[31]。

在任意时刻 t , 定速抽蓄机群和变速抽蓄机群分别有着不同的最大增、减发功率, 定义如式(6)所示。

$$\begin{cases} \sum P_{c_max}^+(t) = \sum (P_{c_max}(t) - P_c(t)) \\ \sum P_{c_max}^-(t) = \sum (P_{c_min}(t) - P_c(t)) \\ \sum P_{v_max}^+(t) = \sum (P_{v_max}(t) - P_v(t)) \\ \sum P_{v_max}^-(t) = \sum (P_{v_min}(t) - P_v(t)) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\sum P_{c_max}(t)$ 和 $\sum P_{v_max}(t)$ 分别为定速机群和变速机群最大调频容量, 右上角正、负号分别代表增、减发功率; $P_v(t)$ 和 $P_c(t)$ 分别为变速、定速机组在 t 时刻的功率输出情况; $P_{v_max}(t)$ 和 $P_{v_min}(t)$ 分别为 t 时刻变速机组调频功率的上下限; $P_{c_max}(t)$ 和 $P_{c_min}(t)$ 分别为 t 时刻定速机组调频功率的上下限。

在对调频信号进行初次分配后, 会出现以下 3 种情况: 两种机群均不越限、两种机群均越限、只有一种机群越限。

当机群均不越限时, 无需进行二次分配; 当所有机组均越限时, 各机组出力受限于各自的调频容量; 当只有一种机群越限时, 需要进行二次分配。变速抽蓄机组和定速抽蓄机组二次分配后的调频信号分别定义为 $\Delta P'_v(t)$ 和 $\Delta P'_c(t)$ 。

当定速机组调频信号越限时

$$\Delta P'_v(t) = \begin{cases} -\min \left\{ \left| \Delta P(t) - \sum P_{c_max}^-(t) \right|, \left| \sum P_{v_max}^-(t) \right| \right\}, \\ \Delta P_c(t) \leq \sum P_{c_max}^-(t) \\ \min \left\{ \left| \Delta P(t) - \sum P_{c_max}^+(t) \right|, \left| \sum P_{v_max}^+(t) \right| \right\}, \\ \Delta P_c(t) \geq \sum P_{c_max}^+(t) \end{cases} \quad (7)$$

当变速机组调频信号越限时

$$\Delta P'_c(t) = \begin{cases} -\min\left\{\left|\Delta P(t) - \sum P_{v_max}^-(t)\right|, \left|\sum P_{c_max}^-(t)\right|\right\}, \\ \Delta P_v(t) \leq \sum P_{v_max}^-(t) \\ \min\left\{\left|\Delta P(t) - \sum P_{v_max}^+(t)\right|, \left|\sum P_{c_max}^+(t)\right|\right\}, \\ \Delta P_v(t) \geq \sum P_{v_max}^+(t) \end{cases} \quad (8)$$

$$\Delta P(t) = \Delta P_v(t) + \Delta P_c(t) \quad (9)$$

式中: $\Delta P(t)$ 为总调频功率; $\Delta P_v(t)$ 和 $\Delta P_c(t)$ 分别为变速、定速机组在 t 时刻的调频功率参考。

4 系统仿真验证

为了验证本文所提出的运用交流变速抽蓄机组提高抽水蓄能电站动态调节能力方法的有效性, 搭建如图 9 所示 IEEE 9 节点系统仿真模型。其中负荷 P_{L1} 、 P_{L2} 、 P_{L3} 均采用恒阻抗模型; 电网采用无穷大电源等效; IM 为交流变速抽蓄机组; SM 为定速抽蓄机组; 风电场中含 100 台单台容量为 4 MW 的 SCIG 机组, 采用单机倍乘法建模^[32-33]。架空输电线路电阻率为 $1.8 \times 10^{-5} \Omega/\text{m}$, 感抗率为 $2.7 \times 10^{-4} \Omega/\text{m}$, 容抗率为 $1.3 \times 10^{-5} \mu\text{F}/\text{m}$ 。

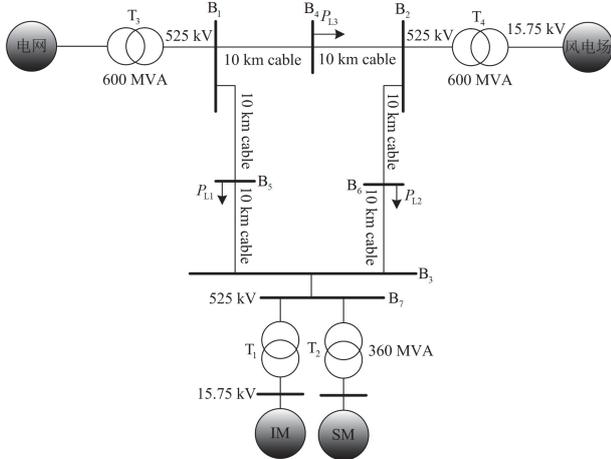


图 9 IEEE 9 节点系统
Fig. 9 IEEE 9-bus system

仿真中所用感应电机和同步电机参数分别如表 4 和表 5 所示。

4.1 双机系统仿真

以发电工况为例, 通过观察节点 B_1 的功率波动情况来验证本文所提方法的有效性。图 10 显示了仿真时间内的风电场输出功率波动情况, 功率数据为江苏某风电场分钟级数据。

通过相关参数设置, 使定速机组和变速机组运行于有功功率输出为 220 MW 的稳定发电工况下。

表 4 感应电机参数

Table 4 Induction motor parameters	
参数	数值
额定功率 P_n/MW	306.1
额定电压 U_n/kV	18
额定频率 f_n/Hz	50
磁极对数	7
定转子互感 L_m/mH	1
定子电感 L_s/mH	1.1
转子电感 L_r/mH	1.1
定子电阻 $R_s/\text{m}\Omega$	4.5
转子电阻 $R_r/\text{m}\Omega$	3

表 5 同步电机参数

Table 5 Synchronous generator parameters	
参数	数值
额定功率 P_n/MW	300
额定容量 S_n/MVA	330
额定电压 U_n/kV	18
额定电流 I_n/A	10 713
额定励磁电流 I_m/A	1600
额定频率 f_n/Hz	50
磁极对数	7
直轴互感 L_d/mH	9.6
交轴电感 L_q/mH	8.6
励磁绕组自感 L_f/H	0.83
定子、励磁绕组互感 M_f/H	0.07
转子电阻 $R_r/\text{m}\Omega$	5
励磁绕组电阻 $R_f/\text{m}\Omega$	0.2

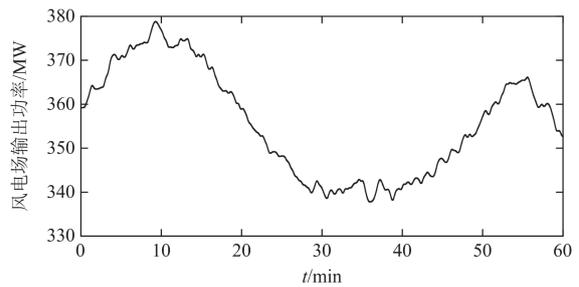


图 10 风电场输出功率
Fig. 10 Wind farm power output

对以下两种场景进行仿真并比较:

场景 1 节点 B_7 接入两台 SM;

场景 2 节点 B_7 接入 IM 和 SM。

仿真结果如图 11 和图 12 所示, 图 11 对比了在场景 1 和场景 2 下电网侧功率的波动情况, 图 12 显示了在场景 2 下, 定速机组和变速机组的出力情

况。从图 11 和图 12 可以观察到交流变速抽蓄机组并入电网后，显著提升了系统对功率波动的调节能力。在相同的功率波动条件下，变速机组能够迅速响应风电场的功率快速变化，有效减轻了系统所受的功率波动冲击，从而增强了整体系统的稳定性。从电网的角度来看，功率输出曲线变得更加平缓，未出现明显的功率振荡现象。从抽蓄电厂的角度来看，定速机组在电网功率快速波动的情况下，功率输出没有明显的变化，保持稳定运行。相比之下，变速机组能够根据系统功率波动的情况进行快速响应。结果表明，交流变速抽蓄机组并网有助于减小风电场功率波动对电网其余部分的影响。

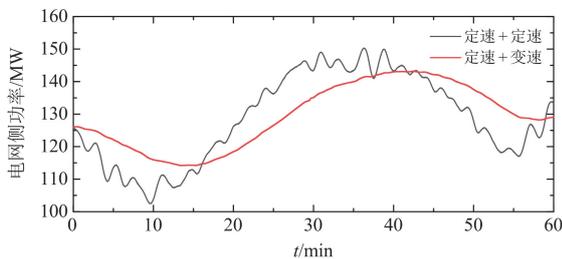


图 11 电网侧功率
Fig. 11 Grid side power

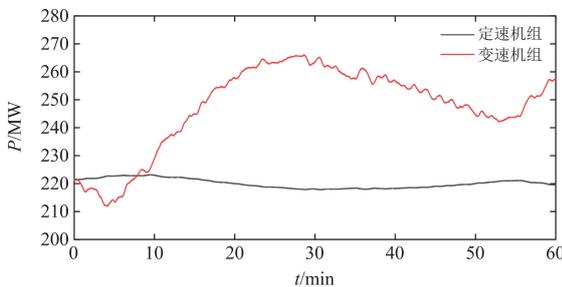


图 12 定速、变速机组出力
Fig. 12 Constant speed and variable speed unit output

4.2 多机系统仿真

本课题组前期在厂内协同方面已经开展了变速抽蓄电站调频策略的研究，采用变分模态分解方法对功率分量进行分配，并取得了一定成果。本文除了设计了单机 PSS，还在原来方法的基础上，研究了交流变速抽蓄机组在多机协同中的作用和效果，进一步完善了前期的研究。仿真结果如图 13 所示。在 $t = 0$ s 时给抽蓄电厂功率增发指令，单传统机组的出力响应较为迟缓，需要大约 10 s 的时间才能达到目标功率。相比之下，加入交流变速抽蓄机组的多机协同将响应速度提高到 5 s。不仅缩短了功率调整的时间，还提高了系统整体的稳定性和调节精度。

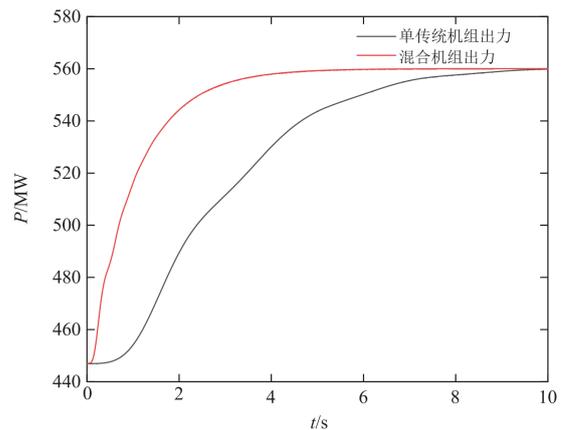


图 13 机群出力
Fig. 13 Motor group output

5 结论

针对当前新型电力系统在动态调节能力方面的不足，本文提出一种通过交流变速抽蓄机组与抽水蓄能电站常规机组厂内协同作业，提高电站整体的动态调节性能，该方法虽然有一定复杂度，但能够优化电站的运行效率，还能为电力系统的稳定运行提供更为可靠的支持。通过仿真验证，可以得到以下结论。

1) 本文设计的交流变速抽蓄机组 PSS 能显著增强机组的快速响应特性，有效缓解风电场功率快速波动对系统其他部分的冲击，从而提高了整个电力系统的动态调节能力。

2) 基于变分模态分解方法将原始功率信号分解为高频和低频两个部分，分别作为交流变速抽蓄机组和定速机组的调频信号，显著提升了抽水蓄能电厂对调频指令的响应速度，从而提高了电厂在电网频率调节中的敏捷性和效率。

参考文献

[1] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6259.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6259.

[2] 谭青博, 潘伟, 王竹宁, 等. 新型电力系统下综合能源系统的投资决策模型[J]. 智慧电力, 2023, 51(8): 46-52.
TAN Qingbo, PAN Wei, WANG Zhuning, et al. Investment decision model for comprehensive energy system under new power system[J]. Smart Power, 2023, 51(8): 46-52.

[3] 任大伟, 侯金鸣, 肖晋宇, 等. 支撑双碳目标的新型储

- 能发展潜力及路径研究[J]. 中国电力, 2023, 56(8): 17-25.
- REN Dawei, HOU Jinming, XIAO Jinyu, et al. Research on development potential and path of new energy storage supporting carbon peak and carbon neutrality[J]. Electric Power, 2023, 56(8): 17-25.
- [4] 舒印彪, 陈国平, 贺静波, 等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 1-9.
- SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 1-9.
- [5] 史玉波, 周孝信, 薛禹胜, 等. 科学构建新型电力系统, 推动能源电力产业链升级[J]. 科技导报, 2021, 39(16): 53-55.
- [6] 周孝信, 赵强, 张玉琼. “双碳”目标下我国能源电力系统发展前景和关键技术[J]. 中国电力企业管理, 2021(31): 14-17.
- [7] 李建林, 李雅欣, 周喜超, 等. 储能商业化应用政策解析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 168-178.
- LI Jianlin, LI Yaxin, ZHOU Xichao, et al. Analysis of energy storage policy in commercial application[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 168-178.
- [8] 李建林, 丁子洋, 游洪灏, 等. 构网型储能支撑新型电力系统稳定运行研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 1-11.
- LI Jianlin, DING Ziyang, YOU Honghao, et al. Research on stable operation of new power system supported by grid-forming energy storage system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 1-11.
- [9] 刘沅昆, 张维静, 张艳, 等. 面向新型电力系统的新能源与储能联合规划方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(10): 1-8.
- LIU Yuankun, ZHANG Weijing, ZHANG Yan, et al. Joint planning method of renewable energy and energy storage for new-type power system[J]. Smart Power, 2022, 50(10): 1-8.
- [10] 文劲宇, 周博, 魏利岫. 中国未来电力系统储电网初探[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 1-10.
- WEN Jinyu, ZHOU Bo, WEI Lishen. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 1-10.
- [11] 尹项根, 乔健, 贺儒飞, 等. 基于 FFT-LSTM 的变速抽蓄机组转子绕组短路故障和偏心故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 73-81.
- YIN Xianggen, QIAO Jian, HE Rufe, et al. FFT-LSTM-based fault diagnosis method for a rotor winding short circuit fault and rotor eccentricity fault of a variable-speed pumped storage unit[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 73-81.
- [12] 黄静梅, 黄景光, 吴巍. 含混合式抽蓄电站的梯级水电站效益问题研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(1): 75-81.
- HUANG Jingmei, HUANG Jingguang, WU Wei. Benefits of cascade hydropower stations with hybrid pumped-storage power stations[J]. Smart Power, 2022, 50(1): 75-81.
- [13] 韩冬, 赵增海, 严秉忠, 等. 2021 年中国抽水蓄能发展现状与展望[J]. 水力发电, 2022, 48(5): 1-4, 104.
- HAN Dong, ZHAO Zenghai, YAN Bingzhong, et al. Status and prospect of China's pumped storage development in 2021[J]. Water Power, 2022, 48(5): 1-4, 104.
- [14] 姜树德, 梁国才, 王纯. 采用双馈电机的抽水蓄能机组技术概述[J]. 水电与抽水蓄能, 2021, 7(4): 20-25.
- JIANG Shude, LIANG Guocai, WANG Chun. A review on the pumped-storage power plants using doubly-fed machines[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2021, 7(4): 20-25.
- [15] 戴理韬, 高剑, 黄守道, 等. 变速恒频水力发电技术及其发展[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(24): 169-177.
- DAI Litao, GAO Jian, HUANG Shoudao, et al. Variable-speed constant-frequency hydropower generation technology and its development[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 169-177.
- [16] 龚国仙, 吕静亮, 姜新建, 等. 参与一次调频的双馈式可变速抽水蓄能机组运行控制[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(6): 1878-1884.
- GONG Guoxian, LÜ Jingliang, JIANG Xinjian, et al. Operation control of doubly fed adjustable speed pumped storage unit for primary frequency modulation[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(6): 1878-1884.
- [17] 李辉, 刘海涛, 宋二兵, 等. 双馈抽水蓄能机组参与电网调频的改进虚拟惯性控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(10): 58-65.
- LI Hui, LIU Haitao, SONG Erbing, et al. Improved virtual inertial control strategy of doubly fed pumped storage units for power network frequency modulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(10): 58-65.
- [18] 陈兴华, 常东旭, 陈锦昌, 等. 基于蓄能切泵的南方电网低频综合稳定控制策略与应用[J]. 南方电网技术, 2022, 16(12): 68-75.
- CHEN Xinghua, CHANG Dongxu, CHEN Jinchang, et al. Low frequency integrated stability control strategy and application of CSG based on pump storage cutting[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(12): 68-75.
- [19] 罗远翔, 李鑫明, 潘超, 等. 含风电的双馈抽水蓄能机组协调调频策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 76-85.
- LUO Yuanxiang, LI Xinming, PAN Chao, et al. Coordinated frequency modulation strategy of doubly fed pumped storage

- units with wind power[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(17): 76-85.
- [20] 和萍, 云磊, 赵琛, 等. 基于 MSSA 的 PSS 与 UPFC-POD 参数和 UPFC 位置协调优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(1): 174-187.
HE Ping, YUN Lei, ZHAO Chen, et al. Coordination of PSS and UPFC-POD parameters and UPFC position based on MSSA[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(1): 174-187.
- [21] XAVIER B, LUIGI V. Performance monitoring and redesign of power system stabilizers based on system identification techniques[J]. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2024, 38: 101278.
- [22] KUMAR R, MOHANTY S R, VERMA M K. Design and optimal location of power system stabilizer in the multi-machine power network[J]. *IETE Journal of Research*, 2023: 1-20.
- [23] SOLOMON E, KHAN B, BOULKAIBET I, et al. Mitigating low-frequency oscillations and enhancing the dynamic stability of power system using optimal coordination of power system stabilizer and unified power flow controller[J]. *Sustainability*, 2023, 15(8).
- [24] 吕翔, 刘国静, 周莹. 含抽水蓄能的风水火联合机组组合研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(12): 35-43.
LÜ Xiang, LIU Guojing, ZHOU Ying. Research on combined unit commitment of wind power-hydro power-thermal power for the power system with pumped hydro storage[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(12): 35-43.
- [25] 费万堂, 衣传宝, 杨梅, 等. 河北丰宁抽水蓄能电站交流励磁变速机组工程设计与认识[J]. *水电与抽水蓄能*, 2020, 6(4): 12-18, 57.
FEI Wantang, YI Chuanbao, YANG Mei, et al. Engineering design and realization of AC excitation variable speed units of Hebei Fengning pumped storage power station[J]. *Hydropower and Pumped Storage*, 2020, 6(4): 12-18, 57.
- [26] MULJADI E, SINGH M, GEVORGIAN V, et al. Dynamic modeling of adjustable-speed pumped storage hydropower plant[C]// 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2015, Denver, CO, USA: 1-5.
- [27] 井然. 周孝信院士: 新型电力系统安全运行须满足五项性能要求[J]. *中国电力企业管理*, 2022(28): 10-13.
- [28] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
- [29] 全国电网运行与控制标准化技术委员会. 电力系统稳定器整定试验导则: DL/T 1231—2018[S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 2018.
- [30] 李青兰, 黄伟, 陈磊, 等. 电力系统稳定器影响频率振荡的机理及阻尼分析方法[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(1): 67-73.
LI Qinglan, HUANG Wei, CHEN Lei, et al. Mechanism and damping analysis method of impact of power system stabilizer on frequency oscillation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(1): 67-73.
- [31] 陈雨潇, 龚锦霞, 赵文彬, 等. 面向新型电力系统的变速抽水蓄能电站调频策略研究[J]. *智慧电力*, 2023, 51(3): 104-110.
CHEN Yuxiao, GONG Jinxia, ZHAO Wenbin, et al. Frequency modulation strategy for variable-speed pumped-storage power station for new power system[J]. *Smart Power*, 2023, 51(3): 104-110.
- [32] 桑丙玉, 王德顺, 杨波, 等. 平滑新能源输出波动的储能优化配置方法[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(22): 3700-3706.
SANG Bingyu, WANG Deshun, YANG Bo, et al. Optimal allocation of energy storage system for smoothing the output fluctuations of new energy[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(22): 3700-3706.
- [33] 陈磊, 郑燊聪, 蒋禹齐, 等. 基于改进混沌布谷鸟算法的风电场多机等值参数辨识方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(20): 99-106.
CHEN Lei, ZHENG Shencong, JIANG Yuqi, et al. Identifying multi-machine equivalent parameters of wind farms based on an improved chaotic cuckoo search algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(20): 99-106.

收稿日期: 2024-03-09; 修回日期: 2024-05-22

作者简介:

郑盛诚(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为交流励磁电机; E-mail: 15058961316@163.com

章广清(1973—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统继电保护、智能电网; E-mail: zgq_shiep@163.com

赵文彬(1977—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为新能源发电、变压器故障诊断. E-mail: wenbinmax@163.com

(编辑 周金梅)