

考虑不对称转速边界约束的变速抽蓄机组综合惯量调频控制

成昕雨^{1,2}, 王丹^{1,2}, 李文浩^{1,2}, 毛承雄^{1,2}

(1. 强电磁技术全国重点实验室(华中科技大学), 湖北省武汉市 430074;

2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省武汉市 430074)

摘要: 当系统出现频率跌落时,变速抽蓄机组可大幅降低转速、迅速释放转子动能,从而为系统提供惯量支撑,但目前已有的调频方案未能有效发挥变速抽蓄机组的这一优势。为充分利用转子动能,提出一种考虑不对称转速边界约束的变速抽蓄机组综合惯量调频控制策略。首先,从变速抽蓄机组的有功支撑特性和不对称转速约束条件出发,得出适用于变速抽蓄机组的最优频率控制结构,该结构中包含两个时间常数不同的虚拟惯量控制环节。然后,分析各惯量控制环节的作用并整理相关参数。在此基础上,计及变速抽蓄机组运行特性与电力系统调频需求,设计了变速抽蓄机组不对称综合惯量控制策略,使得机组转速降低时可以为系统提供更大的惯量支撑。仿真结果表明,所提调频策略能够充分发挥变速抽蓄机组的优势,维持系统频率稳定。

关键词: 变速抽蓄机组; 综合惯量控制; 频率调节; 惯量支撑; 转子动能

0 引言

构建以新能源为主体的新型电力系统是中国推动能源绿色转型、实现“双碳”目标的主要措施之一。随着大量可再生能源机组并网,系统的频率安全面临着严峻挑战^[1-4]。变速抽蓄(variable-speed pumped storage, VSPS)机组具有调节速度快、暂态储能容量大等特点,在解决新型电力系统面临的频率安全问题方面具有显著优势^[5-7]。

双馈式 VSPS 机组采用双馈感应电机作为发电/电动机,在发电/抽水工况下均可以实现变转速运行。VSPS 机组基本控制方式有两种:功率优先控制和转速优先控制^[8-9]。采用功率优先控制时,VSPS 机组励磁系统控制的功率闭环是一个独立环节,其控制特性不受水轮机/水泵导叶调节系统的影响,通过储存/释放转子动能可以实现功率的毫秒级调节。转速优先控制下,VSPS 机组转速响应时间较快,但机组有功出力调节较慢,且会出现水锤效应导致功率负调,威胁到电力系统的稳定运行^[9]。综合而言,VSPS 机组采用功率优先控制更有利于参与系统调频,本文对此进行了研究。

由于机组转速与系统频率耦合较弱,当系统内出现频率波动时,VSPS 机组不能及时感知并调整

出力。现有的 VSPS 机组调频方案主要依靠辅助频率控制模块使机组参与调频,具体的控制策略有:下垂控制、虚拟惯量控制以及二者结合的综合惯量控制^[10-13]。上述调频策略的主要目的是使可再生能源机组模拟同步机出力,但电力电子器件的可控性非常强。文献[14]指出,强迫电力电子变换器表现得像同步机一样而不利用变换器的优势是一种浪费。

为此,文献[15]建立风机调频输出电功率曲线优化模型,求解得到风机最优频率控制结构,并认为风机的虚拟惯量控制环节可能导致系统频率二次跌落;文献[16]研究了能量约束下电力电子并网装备的最优频率控制方案,得出虚拟惯量加下垂控制近似于最优频率控制结构的结论。上述文献从风机运行特性、设备能量约束等角度开展研究。由于原动机不同,VSPS 机组与风机的调频特性存在显著区别,例如:1)风机一般需运行在最大功率点跟踪模式,而 VSPS 机组原动机功率灵活可控、调频能量较为充足,可以为系统提供较长时间的功率支撑;2)VSPS 机组释放的转子动能可由原动机补偿,转速恢复时不会对系统频率造成二次冲击;3)在 VSPS 机组转速升降过程中,水泵水轮机的运行特性不同,调节机组转速需计及水力系统的约束变化^[17-20]。因此,根据 VSPS 机组运行特性设计频率控制策略具有重要意义。

此外,现有的 VSPS 机组变转速调频策略通常选取了对称转速边界约束条件,当系统发生相同大小的功率扰动时,同一发电/抽水运行工况下机组升

收稿日期: 2023-06-27; 修回日期: 2023-12-06。

上网日期: 2024-03-06。

国家电网公司总部科技项目(5100-202419021A-1-1-ZN)。

降转速所提供的惯量支撑大小也基本相同^[5,10-12]。考虑到电力系统常发生的频率波动是由有功缺额引起的频率跌落,而VSPS机组刚好具有能大幅降低转速、迅速释放转子动能的优点,仅根据对称转速约束条件设计调频策略,不能充分发挥VSPS机组的调频优势。

本文基于VSPS机组运行特性与电力系统调频需求,从频率控制结构和不对称惯量支撑模式两个方面对VSPS机组调频策略作出改进,提出了一种考虑不对称转速边界约束的VSPS机组综合惯量调频控制方案。首先,构建最优调频模型,分析得到VSPS机组最优频率控制结构,该结构中包含两个时间常数不同的虚拟惯量控制环节。然后,研究各控制环节的作用并给出了相关参数的整定方法。进一步,为充分发挥VSPS机组优势,在暂态工况下适当放宽VSPS机组降转速边界约束,设计了VSPS机组不对称综合惯量控制策略。最后,通过仿真验证了本文所提VSPS机组调频控制策略的有效性。

1 VSPS机组不对称调频能力分析建模

1.1 VSPS机组有功支撑特性分析

VSPS机组是一个由水力、机械和电气子系统组成的非线性耦合系统。可逆式水泵水轮机和双馈感应电机通过转子转轴相连;双馈感应电机的定子绕组与电网直接相连,而转子绕组与背靠背变流器相连并经隔离变压器接到电网,实现交流励磁。当功率参考值发生变化时,励磁系统快速响应,VSPS机组输出的电磁功率快速跟踪参考值。同时,转速寻优模块根据水泵水轮机综合特性曲线计算得到最优效率对应的转速,并传递给调速控制系统,实现对机组转速的控制^[18]。

为设计调频策略,先对VSPS机组输出功率进行分析。VSPS机组采用功率优先控制方式时,励磁系统可以迅速调整输出功率到指定值,有功功率来源于转子动能和水泵水轮机。因此,可将VSPS机组参与调频的出力分为两部分:一是机组释放转子动能进行暂时的功率支撑;二是水泵水轮机有功出力增加,补偿功率缺额,同时使转子转速恢复到最优值。

图1所示为系统发生功率缺额时,VSPS机组输出功率和转速变化曲线示意图。图中: ΔP_j 为改变转子动能输出功率变化量, ΔP_m 为水泵水轮机输出有功变化量, ΔP_e 为VSPS机组输入电网功率变化量, ΔP_{ref} 为功率指令变化量; ω 为VSPS机组实时转速, ω_0 为初始转速, ω_{opt} 为最优转速; t_0 为扰动发生时

刻, t_1 为释放转子动能结束时刻, t_2 为转子转速恢复到最优值时刻;面积 S_1 为转子转速下降释放的能量, S_2 为转子转速恢复到最优值吸收的能量, S_3 为水泵水轮机补偿转子动能输出的能量。转速寻优模块的存在使得在功率指令改变后,最优转速与初始转速不同,因而 $S_1 \neq S_2 = S_3$ 。

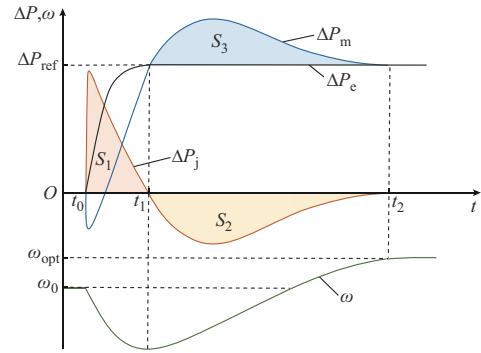


图1 VSPS机组输出功率和转速变化曲线示意图
Fig. 1 Schematic diagram of output power and speed variation curves of VSPS unit

各变量之间的关系如式(1)所示。

$$\begin{cases} \Delta P_e = \Delta P_m + \Delta P_j \\ \Delta P_j = \frac{d\Delta E_k}{dt} = \frac{dJ(\omega_0^2 - \omega^2)/2}{dt} = -J\omega \frac{d\Delta\omega}{dt} \\ \Delta\omega = \omega - \omega_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ΔE_k 为VSPS机组释放的转子动能; J 为机组转动惯量; $\Delta\omega$ 为转子转速变化量。

由式(1)可知,VSPS机组释放转子动能输出的功率与转子转速变化密切相关。当系统发生频率缺额需要VSPS机组输出有功功率时,在励磁系统控制下,VSPS机组输出的电功率迅速增加,由于输出功率大于输入机械功率,VSPS机组转子减速;同理,当VSPS机组输出有功功率减少时,转子加速。研究VSPS机组调频策略需要考虑转子转速的约束。根据已建、在建抽水蓄能电站变速机组容量与变速范围参数可知,稳态工况下VSPS机组的转速调节范围一般为 $\pm 10\%$,允许的最大转速调节范围为 $-30\% \sim +20\%$ ^[7,19]。

1.2 不对称转速边界约束下VSPS机组最优调频模型

文献[20]研究指出,当VSPS机组转速升高时,水泵水轮机压力脉动较大,机组容易发生失稳;而在低转速下,水泵水轮机最大压力和压力脉动均较小,VSPS机组在转速降低过程中可以保持较好的稳定性,降低转速不会威胁到设备的安全运行。从机组运行特性出发,VSPS机组降低转速所受到的约束更少,在变流器功率允许范围内,暂态工况下可以适

当放宽转速边界约束,使VSPS机组迅速降低转速、释放转子动能为系统提供功率支撑。为有效发挥VSPS机组这一优势,机组在转速升高与转速降低两种情况下,应采用不同的调频策略,即转速升降不对称调频策略。

通过设计VSPS机组调频出力 ΔP_m 和 ΔP_j ,进而设计调频策略。由于 ΔP_m 受调速器、引水系统以及水泵水轮机本身的限制,不易采取复杂的控制策略,可以使其与常规水电机组一样采用下垂控制,并通过下垂系数的设置实现系统内机组一次调频有功功率的合理分配。VSPS机组改变转子动能输出的功率 ΔP_j 非常灵活,功率曲线轨迹、释放动能的时长均可通过电力电子器件控制,可塑性较强,故本文主要针对 ΔP_j 进行优化。基于最优控制理论思想,先不预设 ΔP_j 曲线轨迹,通过VSPS机组最优调频模型求解 ΔP_j 的理想曲线,然后对功率曲线和系统频率曲线进行拟合,得到最优调频控制结构。

构建电力系统如附录A图A1所示^[2],包含负荷、火电机组、VSPS机组、风电机组。设定火电机组发电功率占比50%、VSPS机组发电功率占比40%、风机发电占比10%。将VSPS机组的装机容量设置为系统负荷总功率,模型中暂不考虑风电机组的频率控制能力,将风机功率波动等效转换为系统负荷扰动。

模型的优化变量为:VSPS机组改变转子动能输出功率变化量 ΔP_j 。

通过VSPS机组的频率调节,希望使得系统频率偏差尽可能小,且频率尽可能快速恢复到稳定值。此外,考虑到VSPS机组改变转子动能进行功率支撑只是一个暂态过程,最终能量还需要水轮机补偿/消纳,在满足调频需求的情况下,转子动能的变化量也需要适当小一些。因此,采用式(2)作为目标函数。

$$\min \left(A_1 \int \Delta f^2 dt + A_2 \int \Delta P_j^2 dt \right) \quad (2)$$

式中: Δf 为系统频率偏差; A_1 、 A_2 为权重系数,权重系数的基本选取思想是优先保证系统频率偏差较小,其次考虑使得VSPS机组转子动能变化较小,且满足 $A_1 > A_2 > 0$ 。模型约束条件如下。

1)系统频率动态方程:

$$\frac{d\Delta f}{dt} = \frac{1}{2H} (-\Delta P_{d0} - \Delta P_L + \Delta P_g + \Delta P_m + \Delta P_j) \quad (3)$$

式中: H 为系统等效惯性时间常数; ΔP_{d0} 为系统初始功率扰动; ΔP_L 为负荷吸收功率的变化量; ΔP_g 为火电机组出力变化量。

2)负荷频率效应:

$$\Delta P_L = D\Delta f \quad (4)$$

式中: D 为负荷有功频率响应系数。

3)火电机组功率动态方程:

$$\frac{d\Delta P_g}{dt} = -\frac{1}{T_g} (\Delta P_g + K_{pg}\Delta f) \quad (5)$$

式中: T_g 为火电机组综合时间常数; K_{pg} 为火电机组功率频率特性系数。

4)水泵水轮机出力动态方程。水泵水轮机有功调节的传递函数如式(6)所示。

$$\Delta P_m = -\frac{1}{1 + T_y s} \frac{1 + T_1 s}{1 + T_2 s} \frac{1 - T_w s}{1 + 0.5 T_w s} K_{ph} \Delta f \quad (6)$$

式中: T_y 为接力器响应时间常数; T_1 、 T_2 为暂态斜率补偿系数; T_w 为水流惯性时间常数; K_{ph} 为VSPS机组功率频率特性系数。

由于式(6)不便于写成微分方程的形式,将其降阶近似转换为式(7),推导过程见附录A。

$$\Delta P_m = -\left(\frac{h_2}{1 + T_{h2}s} - \frac{h_1}{1 + T_{h1}s} \right) K_{ph} \Delta f \quad (7)$$

式中: T_{h1} 、 T_{h2} 为水泵水轮机调节时间常数,典型参数下 $T_{h2} \approx 120T_{h1}$; h_1 、 h_2 为比例系数,满足 $h_2 - h_1 = 1$ 。

基于以上等效简化,水泵水轮机出力动态方程如式(8)所示。

$$\begin{cases} \Delta P_m = \Delta P_{m1} + \Delta P_{m2} \\ \frac{d\Delta P_{m1}}{dt} = -\frac{1}{T_{h1}} (\Delta P_{m1} - h_1 K_{ph} \Delta f) \\ \frac{d\Delta P_{m2}}{dt} = -\frac{1}{T_{h2}} (\Delta P_{m2} + h_2 K_{ph} \Delta f) \end{cases} \quad (8)$$

式中: ΔP_{m1} 、 ΔP_{m2} 为水泵水轮机的部分出力,其中, ΔP_{m1} 反映了由水锤效应导致的功率负调。

5)VSPS机组转子运动方程:

$$T_J \omega \frac{d\Delta \omega}{dt} + B\Delta \omega = -\Delta P_j \quad (9)$$

式中: T_J 为VSPS机组转子惯性时间常数; B 为转矩阻尼系数。

6)转子不对称转速边界约束。根据1.1节分析可知,当VSPS机组转速升高时,机组稳定性变差,故取转子最大转速边界 ω_{max} 为1.08 p.u.;降低转速不会影响设备的安全稳定性,考虑到系统发生故障时需要充分发挥VSPS机组的支撑作用,对于暂态工况,最小转速边界 ω_{min} 可以降低为0.85 p.u.。转速边界约束如式(10)所示。

$$0.85 \text{ p.u.} \leq \omega \leq 1.08 \text{ p.u.} \quad (10)$$

7)变流器功率约束。变流器容量与VSPS机组

容量有关,模型中取功率约束为 $\pm 20\%$ ^[21],即

$$-0.2 \text{ p.u.} \leq \Delta P_j \leq 0.2 \text{ p.u.} \quad (11)$$

1.3 理想输出功率曲线求解及拟合

采用改进粒子群算法对1.2节中式(2)一式(11)的模型进行求解。参数取值如下^[22-23]: $H=5 \text{ s}$, $D=0.8$, $K_{pg}=10$, $K_{ph}=8.25$, $T_g=8 \text{ s}$, $T_{h1}=0.07 \text{ s}$, $T_{h2}=8.5 \text{ s}$, $h_1=0.15$, $h_2=1.15$, $T_J=5.5 \text{ s}$, $B=0.02$, $\omega_0=1.0 \text{ p.u.}$, $A_1=40$, $A_2=1$ 。

由于VSPS机组转速恢复主要受转速寻优模块的控制,而最优转速的选取与水轮机工况密切相关,在此暂不考虑转速恢复阶段,仅对励磁系统控制下VSPS机组释放转子动能阶段进行分析,即图1中 $[t_0, t_1]$ 时段。

分别在以下3种工况下,求解 ΔP_j 理想功率曲线。工况1:功率扰动 $\Delta P_{d01}=0.1 \text{ p.u.}$,VSPS机组转速降低,转速调节下限 $\Delta\omega_{\min}=-0.15 \text{ p.u.}$ 。工况2:功率扰动 $\Delta P_{d02}=-0.1 \text{ p.u.}$,VSPS机组转速升高,转速调节上限 $\Delta\omega_{\max}=0.08 \text{ p.u.}$ 。工况3:功率扰动 $\Delta P_{d03}=0.1 \text{ p.u.}$,VSPS机组转速降低,转速调节下限 $\Delta\omega_{\min}=-0.08 \text{ p.u.}$ 。其中,工况1和2构成不对称转速约束场景,工况2和3构成对称转速约束场景。将求解数据点用平滑曲线连接,如图2所示。

改变模型参数,其他求解结果见附录A图A2。对比多组求解结果可知,VSPS机组为系统提供的最优功率支撑曲线形状基本相同,但在不对称转速约束下,VSPS机组可更大幅度降低转速,为系统提供更充足的功率支撑,有效提升频率跌落最低点。

通过改进粒子群算法得到了VSPS机组释放转子动能的理想输出功率曲线。为设计辅助频率控制器,还需要对功率变化量和系统频率相关量进行拟合。由于VSPS机组释放转子动能输出功率曲线呈现近似于频率微分响应的形式,可采用两个时间常数不同的频率微分环节之和进行表示,即

$$\Delta P_j = -\left(\frac{K_d}{1+T_d s} + \frac{K_1}{1+K_2 s} \right) s \Delta f \quad (12)$$

式中: K_d 、 K_1 为频率微分系数; T_d 、 K_2 为虚拟惯量控制环节时间常数。

采用式(12)的结构对图2(a)中曲线进行拟合,可得:工况1下VSPS机组降低转速释放动能对应 $K_d=9.6$ 、 $T_d=0.01 \text{ s}$ 、 $K_1=134$ 、 $K_2=8 \text{ s}$;工况2下VSPS机组升高转速对应 $K_d=7$ 、 $T_d=0.01 \text{ s}$ 、 $K_1=77$ 、 $K_2=8 \text{ s}$ 。由此可以初步认为,改变频率微分环节的相关参数是实现VSPS机组不对称调频的一种方式。

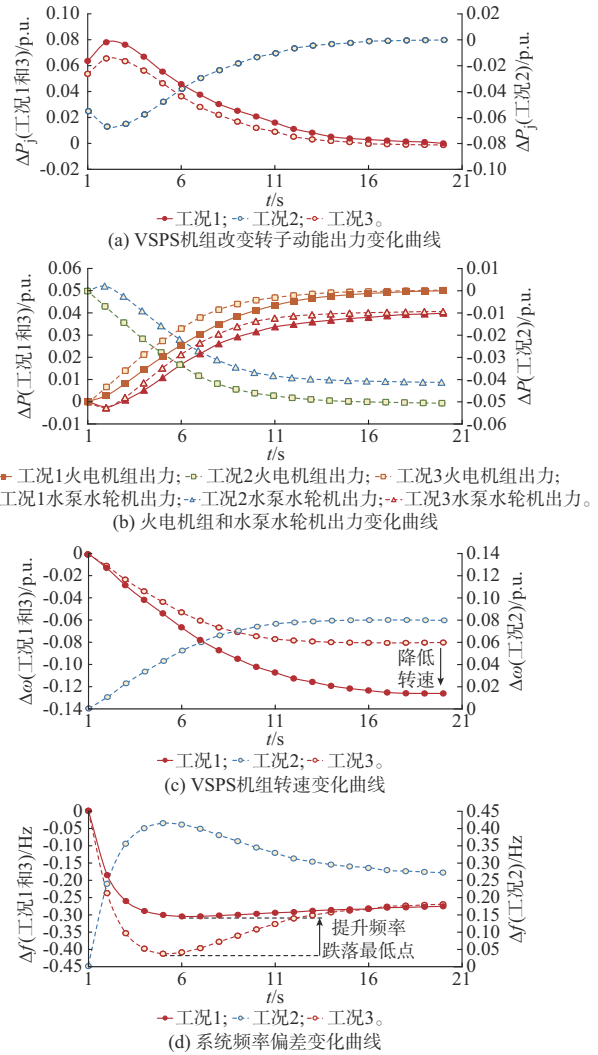


图2 不对称和对称转速约束下最优调频模型输出结果
Fig. 2 Output results of optimal frequency regulation model under asymmetric and symmetrical speed constraints

2 VSPS机组调频控制策略

2.1 最优频率控制结构分析

2.1.1 最优调频表达式

VSPS机组接收到调频指令 ΔP_{ref} 后,在励磁系统的控制下,机组输出的电磁功率迅速达到参考功率。因此,认为前文中所求得的 ΔP_m 与 ΔP_j 之和即为最优调频功率指令 $\Delta P_{\text{ref, opt}}$:

$$\Delta P_{\text{ref, opt}} = \Delta P_m + \Delta P_j = -\left[\frac{h_2}{1+T_{h2}s} - \frac{h_1}{1+T_{h1}s} \right] K_{ph} + \left(\frac{K_d s}{1+T_d s} + \frac{K_1 s}{1+K_2 s} \right) \Delta f \quad (13)$$

式(13)中下垂控制含延时,但在设计调频功率

指令时,下垂控制一般直接设置为 $K_{ph}\Delta f$,需消去下垂控制的延时。分析附录A表A1中多组不同参数的模型求解结果发现,调频表达式中虚拟惯量控制环节时间常数 K_2 的大小与水泵水轮机等效综合时间常数 T_{h2} 以及火电机组综合时间常数 T_g 比较接近。因此,取 $K_2 \approx T_{h2}$,对式(13)进行化简得到式(14),推导过程见附录A。

$$\Delta P_{ref,opt} = -\left(\frac{K_{ph}}{1+K_2s} - \frac{K_{ph}K_2h_1s}{1+K_2s} + \frac{K_1s}{1+K_2s} + \frac{K_d s}{1+T_d s}\right)\Delta f = -\left(K_{ph} + \frac{K_d s}{1+T_d s} + \frac{K_{dw} s}{1+T_{dw} s}\right)\Delta f \quad (14)$$

式中: $K_{dw} = K_1 - K_{ph}K_2h_2$; $T_{dw} = K_2$ 。

分析上述表达式可知,本文得出的适用于VSPS机组的最优频率控制结构与风机等最优频率控制结构存在区别^[15-16]。式(14)相比于传统综合惯量控制增加了一个含延时的惯量环节 $-\left[\frac{K_{dw} s}{1+T_{dw} s}\right]\Delta f$,当 $K_d K_1 = K_{ph}K_2h_2$ 即 $K_{dw} = 0$ 时,即为传统综合惯量控制。对于含延时的虚拟惯量控制,文献[14]已开展了初步研究,但其所选取的延时响应时间常数为3 s左右,与本文所选取的时间常数($T_{dw} = 8$ s)存在较大的差距。关于虚拟惯量控制环节的延时响应时间常数的选取方法,目前仍有待探索。

延时响应时间常数 T_{dw} 及对应微分系数 K_{dw} 的取值对于能否充分发挥VSPS机组转子动能的作用有着重要影响,接下来对 T_{dw} 和 K_{dw} 的取值做进一步研究。

2.1.2 控制参数整定

参考文献[11]中频率微分系数 K_d 的选取方式,将机组转速和系统频率转换为标么值,并考虑动能转换为电能的效率,结合智能算法得出的结果,针对本文提出的控制策略取 $K_d = cT_g$,其中, c 为常数且满足 $c \in [1.27, 1.75]$ 。

由于 T_d 值很小,忽略 T_d 响应延时,附录B图B1所示的系统频率响应(system frequency response, SFR)模型可以等效转换为图3(a)。图中: K_E, C_E 为等效同步机特征系数; T_E 为等效同步机响应时间常数。满足下式:

$$\begin{cases} K_E = K_{pg} + K_{ph} \\ C_E = K_{ph} T_g \\ T_E = T_g \end{cases} \quad (15)$$

推导并绘制 K_{dw} 和 T_{dw} 的广义根轨迹,见附录B图B2(a)、(b)。由此可知, K_{dw} 在 $[0, 150]$ 范围内、 T_{dw} 在 $[0, 8.96]$ s范围内时系统稳定性较好。图3(b)、(c)为0.1 p.u.功率扰动下,频率跌落最低点和调节时间随 K_{dw} 和 T_{dw} 的变化图。由图3(b)可知, T_{dw} 在

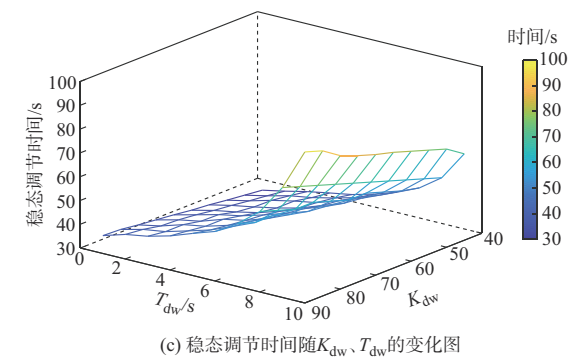
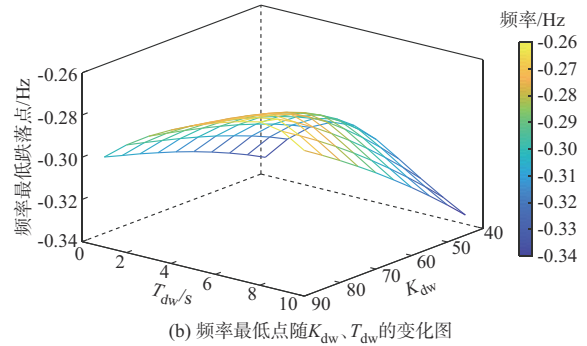
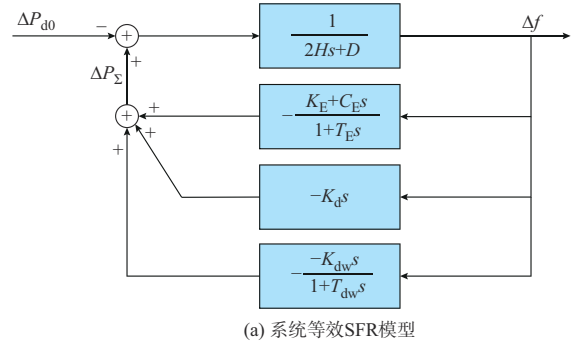


图3 VSPS机组综合惯量控制分析
Fig. 3 Analysis of comprehensive inertia control of VSPS unit

[6, 8] s范围内时,频率跌落最低点较高,且随着 K_{dw} 的取值增大而升高;由图3(c)可知,稳态调节时间随 K_{dw}, T_{dw} 取值增大而增大。综合频率跌落最低点与稳态调节时间两个因素考虑,取 $T_{dw} = 8$ s、 $K_{dw} \in [55, 85]$ 较为理想,该取值范围也与1.3节利用智能算法求出的结果相吻合。

参考上述参数范围,可将 T_{dw} 的值依据等效同步机响应时间常数 T_E 来整定,取 $T_{dw} = T_E$ 。此时,系统总调频功率 ΔP_{Σ} 为:

$$\Delta P_{\Sigma} = -\left(\frac{K_E + C_E s}{1 + T_E s} + \frac{K_{dw} s}{1 + T_{dw} s} + K_d s\right)\Delta f = -\left[K_E + \frac{(C_E + K_{dw} - K_E T_E) s}{1 + T_E s} + K_d s\right]\Delta f \quad (16)$$

当 $K_{dw} = K_E T_E - C_E$ 时, $\Delta P_{\Sigma} = -(K_E + K_d s) \Delta f$ 。由此可知,取 $T_{dw} = T_E$ 较为合理,可以实现 VSPS 机组与系统内同步机组的协调配合,弥补同步机一次调频出力响应延时。

功率扰动发生瞬间 $K_{dw} s / (1 + T_{dw} s) \approx K_{dw} / T_{dw}$ 。因此,可以通过调节 K_{dw} / T_{dw} 改变 VSPS 机组的出力峰值。考虑到 $-[K_{dw} s / (1 + T_{dw} s)] \Delta f$ 也起到虚拟惯量的作用,结合前文得出参数的合理范围,取 $K_{dw} / T_{dw} = K_d$,则有 $K_{dw} = K_d T_{dw}$ 。

2.1.3 惯量控制环节对系统频率的影响

记 $-[K_d s / (1 + T_d s)] \Delta f$ 为惯量控制环节 1, $-[K_{dw} s / (1 + T_{dw} s)] \Delta f$ 为惯量控制环节 2,分析两个环节对系统频率的影响。依据 2.1.2 节的结论取 $T_{dw} = T_E$,则图 3(a) 系统的闭环传递函数 $G_{sys}(s)$ 为:

$$\begin{cases} G_{sys}(s) = \frac{\Delta f}{\Delta P} = \frac{1}{(2H + K_d) T_E} \frac{T_E s + 1}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \\ \omega_n^2 = \frac{D + K_E}{(2H + K_d) T_E} \\ \zeta = \frac{1}{2\omega_n} \frac{2H + K_d + D T_E + C_E + K_{dw}}{(2H + K_d) T_E} \end{cases} \quad (17)$$

式中: ω_n 为无阻尼自然频率; ζ 为阻尼比。

1) 基于频域的稳态特性分析

阶跃响应下的稳态频率误差为:

$$\Delta f|_{t \rightarrow \infty} = \frac{-\Delta P_{d0}}{D + K_E} \quad (18)$$

式(18)中不含 K_d 、 K_{dw} 、 T_{dw} 项,即 VSPS 机组惯量控制环节不会影响稳态频率误差。

2) 基于时域的动态特性分析

经计算得 $\zeta > 1$,反拉式变换后频率的时域表达式为^[22]:

$$\begin{cases} \Delta f(t) = -\frac{\Delta P_{d0} T_E}{D + K_E} \left[a_0 - \frac{b(a_0 - a)}{b - a} e^{-at} + \frac{a(a_0 - b)}{b - a} e^{-bt} \right] \\ a_0 = \frac{1}{T_E} \\ a = (\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n \\ b = (\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n \end{cases} \quad (19)$$

对式(19)求导可得频率变化率。扰动发生时刻系统的频率变化率最大,为

$$\Delta f'_{max} = -\frac{\Delta P_{d0}}{2H + K_d} \quad (20)$$

由式(20)可知,惯量控制环节 1 可以有效抑制系统频率最大变化率,而环节 2 对系统频率最大变化率无影响。

当 $t = \ln[(a_0 - a)/(a_0 - b)]/(a - b)$ 时,频率偏差达到最大值,为

$$\Delta f_m = -\frac{\Delta P_{d0} T_E}{D + K_E} \left[a_0 + \frac{(a - a_0)^{b/(b-a)}}{(b - a_0)^{a/(b-a)}} \right] \quad (21)$$

依据式(21)分别刻画出频率跌落最低点随 K_d 和 K_{dw} / T_{dw} 变化的曲线,见附录 B 图 B2(c)、(d)。对比图 B2(c)、(d) 可知,惯量控制环节 1 可以略微提升频率跌落最低点,但作用很小,仅增大环节 1 的频率微分系数难以达到与环节 2 延时控制相同的效果。

综上,本文认为 VSPS 机组的最优频率控制结构中的惯量控制部分应由两个时间常数不同的频率微分环节构成。其中,环节 1 的时间常数为毫秒级,响应速度较快,可在扰动发生时快速支撑,减小系统频率变化率;环节 2 的时间常数为秒级,可以延长 VSPS 机组释放转子动能出力的持续时长,弥补同步机一次调频出力的延时响应,对系统频率最大偏差进行有效抑制。两者共同作用可以更好地发挥 VSPS 机组的调频能力,维持系统频率稳定。

2.2 计及机组变转速运行特性的不对称综合惯量控制

2.2.1 动态综合惯量系数

前文已得到适用于 VSPS 机组的最优频率控制结构,并且根据 1.3 节的分析认为,改变频率微分环节的控制参数 K_d 和 K_{dw} 是实现 VSPS 机组不对称调频的一种方式。

采用不对称调频策略的主要目的是充分发挥 VSPS 机组的优势,在暂态工况下适当放宽 VSPS 机组降转速边界约束,并通过控制使得机组迅速降低转速、释放转子动能,为系统提供更大的惯量支撑。定义随机组转速动态变化的综合惯量系数 K_c ,并制定 VSPS 机组不对称综合惯量控制策略如式(22)所示,机组简化控制框图见附录 C 图 C1。

$$\begin{cases} \Delta P_{ref} = -\left(K_{ph} + \frac{K_{d\omega} s}{1 + T_d s} + \frac{K_{d\omega\omega} s}{1 + T_{d\omega} s} \right) \Delta f \\ K_c = K_{c1} + K_{c2} \frac{e^{\lambda} \omega_{min} + e^{-\lambda} (\omega_{max} + \omega_{min})}{e^{-\lambda} \omega_{min} + e^{\lambda} (\omega_{max} + \omega_{min})} \\ K_{c1} + K_{c2} = c T_J \\ \lambda = 20 (\omega_{max} - \omega_{min}) \Delta \omega \\ K_{d\omega} = K_c \\ K_{d\omega\omega} = K_c T_{d\omega} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $K_{d\omega}$ 、 $K_{d\omega\omega}$ 为动态频率微分系数; K_c 为机组综合

惯量系数; K_{c1} 、 K_{c2} 为机组惯量相关系数; λ 为与 VSPS 机组转速偏差相关的变量。由于 VSPS 机组在发电和抽水工况下的变转速特性不同, K_{c1} 、 K_{c2} 和 ω_{\max} 、 ω_{\min} 可以依据实际需求来选取。

取 $K_{c1} = 6.5$ 与 $K_{c2} = 2.5$, 在不同 ω_{\max} 、 ω_{\min} 约束下, K_c 与转速变化关系如图 4 所示。图中: ΔK_1 、 ΔK_2 、 ΔK_3 为综合惯量系数最大差值; K_{c0} 为 VSPS 机组初始综合惯量系数。

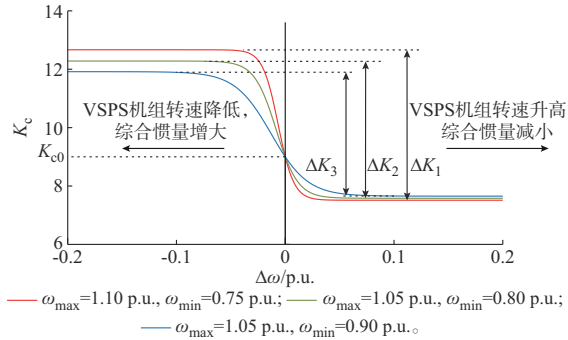


图 4 VSPS 机组不对称综合惯量示意图
Fig. 4 Schematic diagram of asymmetric comprehensive inertia of VSPS unit

对于 VSPS 机组而言, 机组转速升高受到的限制较多, 而转速降低不会影响机组的稳定运行, 相对而言降低转速更容易。通过式 (22) 所示的控制策略可以实现, 当需要 VSPS 机组降低转速时, K_c 值随转速降低而逐步增大到最大值, VSPS 机组为系统提供的惯量也随之增加; 转速升高时, K_c 值随转速升高而减小到最小值, VSPS 机组为系统提供的惯量随之减小, 以防转速升得过高影响机组稳定运行。

2.2.2 综合惯量不对称度

为反映 VSPS 机组转速升降所提供惯量支撑的差异程度, 定义机组综合惯量不对称度 p 如式 (23) 所示。

$$p = \frac{K_{c, \max} - K_{c, \min}}{K_{c0}} \times 100\% = \frac{K_{c2}}{K_{c1} + K_{c2}} \left(\frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} + \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\max} + \omega_{\min}} \right) \times 100\% \quad (23)$$

式中: $K_{c, \max}$ 、 $K_{c, \min}$ 分别为综合惯量系数的最大和最小值。若机组不对称度已给定, 则根据式 (22) 和式 (23) 可求解出 K_{c1} 、 K_{c2} 的具体取值。

根据图 4 及式 (23) 可知, 对于相同的 K_{c1} 和 K_{c2} , 不对称度随着转速边界约束的放宽而增大, 且转速降低所对应的综合惯量变化幅度较转速升高而言更大。考虑到系统频率紧急工况主要是由有功缺额过大引起的, 如果频率跌落严重会触发低频减载, 通过不对称调频策略可使 VSPS 机组迅速降低转速, 从

而为系统提供更大的惯量支撑, 满足系统对于抑制频率跌落的调频需求。

3 仿真实验

为验证本文所提考虑不对称转速边界约束的 VSPS 机组综合惯量调频控制策略的有效性, 基于 MATLAB/Simulink 平台搭建含 VSPS 机组的高比例新能源电力系统, 仿真结构见附录 C 图 C2, 机组参数见附录 C 表 C1 至表 C4^[5, 23]。系统中, G_1 为 300 MW 水电机组, G_2 为 500 MW 火电机组, 风电场容量为 900 MW (将 600 台 1.5 MW 的风机等值为单机), VSPS 电站容量为 600 MW (将 2 台 300 MW 的 VSPS 机组等值为单机); L_1 、 L_2 、 L_3 分别为容量为 260、550、430 MW 的集中负荷; 系统额定频率为 50 Hz。在本文算例分析中, 风机不参与系统调频。通过仿真计算得出所搭建系统的等效同步机响应时间常数 T_E 为 8.9 s。

3.1 VSPS 机组最优频率控制结构有效性验证

仿真设定 VSPS 机组处于抽水工况, 初始转速为 0.98 p.u.。 $t=10$ s 时, L_1 有功功率突增 150 MW。惯量控制环节 1 中取 $T_d = 0.01$ s, 环节 2 中取 $T_{dw} = 8.9$ s, 通过修改 K_d 与 K_{dw} 数值对比不同的频率控制结构: 本文所提控制结构对应 $K_d = 9.2$ 、 $K_{dw} = 81.9$; 传统综合惯量控制对应 $K_d = 9.2$ 、 $K_{dw} = 0$; 下垂控制对应 $K_d = 0$ 、 $K_{dw} = 0$ 。仿真结果见图 5(a), 其中, ΔP_j 以 VSPS 机组的额定功率为基准值。

由图 5(a) 系统频率变化曲线可知, 两个虚拟惯量控制环节的作用不同。其中, 环节 1 可以有效减小系统最大频率变化率, 且该环节对于提升频率跌落最低点有一定的作用, 但作用不显著, 达不到与延时控制相同的效果; 环节 2 可以有效抑制系统频率最大偏差, 但由于延时响应时间常数 T_{dw} 较大, 该环节对于扰动发生初期系统的频率变化率几乎无改善作用。对比不同频率控制结构下 VSPS 机组转速变化曲线和释放转子动能出力曲线可知, 本文所提频率控制结构可以有效延长 VSPS 机组降低转速释放转子动能的时长, 同时增大 VSPS 机组的出力峰值。分析系统内各机组出力曲线可知, 在本文所提控制策略下, VSPS 机组释放转子动能输出的功率可以有效弥补同步机出力 (水电和火电机组出力之和) 的延时响应, 迅速补偿系统功率缺额。

综上, 本文所提的适用于 VSPS 机组的频率控制结构可以较好地利用 VSPS 机组转子动能, 维持系统频率稳定。

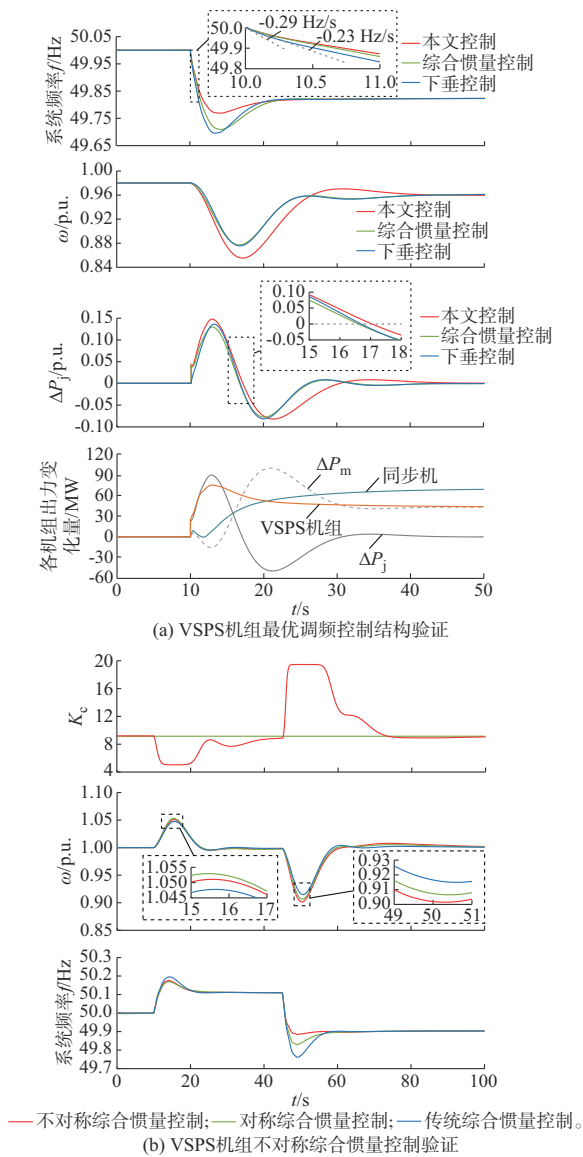


图5 VSPS机组不对称综合惯量调频控制仿真
Fig. 5 Simulation of asymmetric comprehensive inertia frequency regulation control of VSPS unit

3.2 VSPS 机组不对称综合惯量调频策略可行性验证

仿真设定 VSPS 机组处于发电工况,初始转速为 1.0 p.u.,最优转速指令维持不变, $\omega_{\max} = 1.1$ p.u., $\omega_{\min} = 0.75$ p.u.。负荷 L_2 的功率扰动如附录 C 图 C3(a)所示。对比不对称综合惯量控制策略 ($T_d = 0.01$ s, $T_{dw} = 8.9$ s, $K_{c1} = 2.2$, $K_{c2} = 7$, 不对称度为 160%)、对称综合惯量控制策略 ($K_c = 9.2$),以及传统控制策略 ($K_d = 9.2$, $K_{dw} = 0$),仿真结果见图 5(b)。

由综合惯量系数变化曲线可知,通过式(22)的调频控制策略,可以使得 VSPS 机组转速降低为系统提供的惯量大于转速升高所提供的惯量。与对称

综合惯量控制相比,不对称调频策略下,VSPS 机组转速降低幅度增大了 4.8%,频率跌落最低点提升了 32.2%;虽然 VSPS 机组转速升高幅度较对称控制而言稍小,但更有利于机组安全稳定运行,且与传统控制相比仍可以很好地抑制系统频率偏差。

3.3 不对称综合惯量控制下 VSPS 机组调频能力验证

仿真设定 VSPS 机组处于发电工况,初始转速为 1.0 p.u., $\omega_{\max} = 1.2$ p.u., $\omega_{\min} = 0.7$ p.u.。不对称综合惯量控制策略 ($T_d = 0.01$ s, $T_{dw} = 8.9$ s, $K_{c1} = 6.1$, $K_{c2} = 3.5$, 不对称度为 85%)、传统控制策略 ($K_d = 9.6$, $K_{dw} = 0$)。

3.3.1 输电线路故障

$t = 10$ s 时,附录 C 图 C2 所示线路发生三相接地短路故障,0.1 s 后将该段线路切除。故障发生后 6 s 内,VSPS 机组转速变化及系统频率偏差如图 6(a)所示。由仿真结果可知,不对称综合惯量控制使得 VSPS 机组在转速偏差允许范围内,能够迅速大幅降低转速、充分释放转子动能,避免系统频率跌落过大触发低频减载。

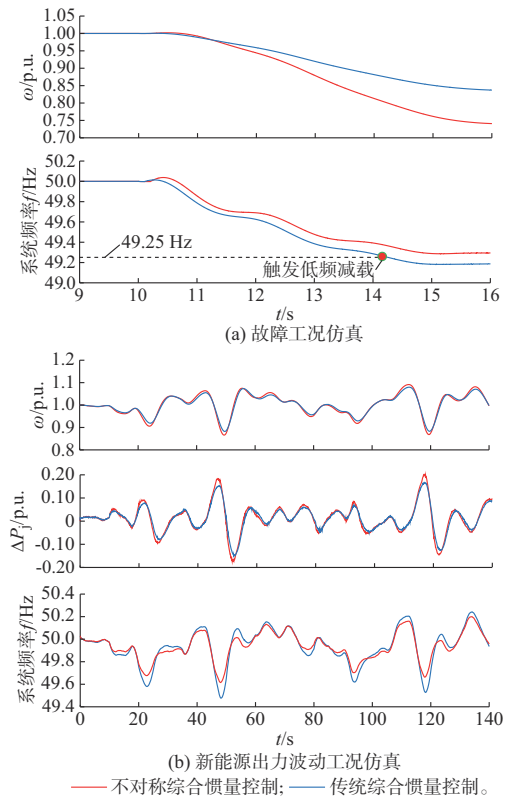


图6 VSPS 机组参与高比例新能源电力系统调频仿真
Fig. 6 Simulation of VSPS unit participating in frequency regulation of power system with high proportion of renewable energy sources

3.3.2 新能源机组出力频繁波动

风电及负荷出力波动见附录 C 图 C3(b)^[24-25],

仿真结果见图6(b)。由仿真结果可知,采用不对称综合惯量调频策略后,VSPS机组转子转速变化更加迅速,机组能够跟随负荷波动迅速调整有功功率。与传统控制策略相比,本文所提控制策略使得系统频率上下波动幅度以及140 s内频率偏差乘以时间积分 $F_{ITAE} = \int t|\Delta f|dt$ 均有效减小,系统频率更加稳定。

改变VSPS机组装机容量占比,在相同的功率扰动下进行仿真,对比本文所提调频策略与传统控制策略,比较指标为最大频率偏差绝对值 $|\Delta F_M|$ 和140 s内频率偏差乘以时间积分 F_{ITAE} ,结果见附录C表C5。由表C5可知,随着VSPS机组占比增高,VSPS机组对系统的支撑作用增大,且本文所提控制策略较传统控制的调频效果更显著。

固定VSPS机组装机比例为25%,改变系统风电机组占比,在新能源渗透率为20%~50%范围内仿真,结果如附录C表C6所示。由表C6可知,当新能源占比不超过50%时,采用本文提出的VSPS机组控制策略可将频率偏差控制在 ± 0.5 Hz以内,且随着新能源渗透率的增加,对频率波动的抑制效果更明显。由此可验证本文所提调频策略可以很好地发挥VSPS机组的频率支撑作用。

4 结语

本文计及VSPS机组运行特性与电力系统调频需求,提出了考虑不对称转速边界约束的VSPS机组综合惯量调频控制策略。通过理论分析与仿真验证得出结论如下:

1) VSPS机组最优频率控制结构中的虚拟惯量控制部分包含两个时间常数不同的频率微分环节。其中,环节1时间常数很小,响应速度非常快,该环节主要作用是抑制系统最大频率变化率;环节2时间常数较大,取值可以与系统等效同步机响应时间常数相等,起到延长VSPS机组惯量支撑时长、弥补同步机一次调频出力延时响应、抑制系统最大频率偏差的作用。两个环节协调配合能够有效利用VSPS机组转子动能,维持系统频率稳定。

2) 不对称综合惯量调频策略可以充分发挥VSPS机组的优势,在暂态工况下适当放宽VSPS机组降转速边界约束,并通过控制使得当系统出现功率缺额时,机组能够大幅降低转速、迅速释放转子动能,从而为系统提供惯量支撑,更好地满足了新型电力系统抑制频率下跌的调频需求。同时,不对称控制策略计及了VSPS机组变转速特性,有利于维持机组安全稳定运行。

需要说明的是,本文针对所提的不对称综合惯

量控制进行了初步构想,验证了其可以发挥VSPS机组的调频优势,但仅将控制策略用在了VSPS机等值单机组上,后续还将进一步对系统内不同VSPS机组的不对称度进行设计,使多台VSPS机组协调配合参与电力系统频率调节。此外,考虑到风光等新能源机组参与调频是新型电力系统的发展趋势,VSPS机组与新能源机组调频配合也值得进一步研究。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [2] 张剑云,李明节.新能源高渗透的电力系统频率特性分析[J].中国电机工程学报,2020,40(11):3498-3507.
ZHANG Jianyun, LI Mingjie. Analysis of the frequency characteristic of the power systems highly penetrated by new energy generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3498-3507.
- [3] 张子扬,张宁,杜尔顺,等.双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J].中国电机工程学报,2022,42(1):1-25.
ZHANG Ziyang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Review and countermeasures on frequency security issues of power systems with high shares of renewables and power electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 1-25.
- [4] 滕贤亮,谈超,昌力,等.高比例新能源电力系统有功功率与频率控制研究综述及展望[J].电力系统自动化,2023,47(15):12-35.
TENG Xianliang, TAN Chao, CHANG Li, et al. Review and prospect of research on active power and frequency control in power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 12-35.
- [5] 陈亚红,邓长虹,刘玉杰,等.抽水工况双馈可变速抽蓄机组机电暂态建模及有功-频率耦合特性[J].中国电机工程学报,2022,42(3):942-957.
CHEN Yahong, DENG Changhong, LIU Yujie, et al. Electromechanical transient modelling and active power-frequency coupling characteristics of doubly-fed variable speed pumped storage under pumping mode [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 942-957.
- [6] 罗胤,常玉红,赵颖,等.计及电网频率稳定的抽水蓄能电站控制策略研究[J].智慧电力,2022,50(11):97-103.
LUO Yin, CHANG Yuhong, ZHAO Ying, et al. Control policy of pumped storage power station based on power grid frequency stability[J]. Smart Power, 2022, 50(11): 97-103.
- [7] 庄凯勋,孙建军,丁理杰,等.提升双馈变速抽水蓄能机组频率响应特性的控制策略[J/OL].电工技术学报[2023-05-19].

- https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVl2pW9UrhTDCdPD64uketby5x2Url0ipjdVAyUlkHhOpgjhGscQEfy9Foh9UU4raB6Gqy&-uniplatform=NZKPT.
- ZHUANG Kaisun, SUN Jianjun, DING Lijie, et al. A control strategy with improved frequency response characteristics of variable speed DFIM pumped storage [J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society [2023-05-19]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVl2pW9UrhTDCdPD64uketby5x2Url0ipjdVAyUlkHhOpgjhGscQEfy9Foh9UU4raB6Gqy&-uniplatform=NZKPT.
- [8] ZHAO G P, ZHANG Y X, REN J Y. Analysis of control characteristics and design of control system based on internal parameters in doubly fed variable-speed pumped storage unit [J]. Complexity, 2021, 2021: 6697311.
- [9] CHEN Y H, XU W, LIU Y, et al. Small-signal system frequency stability analysis of the power grid integrated with type-II doubly-fed variable speed pumped storage [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(1): 611-623.
- [10] 李辉,王坤,刘海涛,等.交流励磁抽水蓄能机组变下垂系数调频控制策略[J].电力自动化设备,2018,38(7):68-73.
- LI Hui, WANG Kun, LIU Haitao, et al. Variable droop coefficient frequency control strategy of AC excited pumped storage unit [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 68-73.
- [11] 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 inertia control strategy of doubly fed pumped storage unit for power network frequency modulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(10): 58-65.
- [12] 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, LV 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.
- [13] 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.
- [14] 闵勇,陈磊,刘瑞阔,等.电力系统频率动态中惯量与惯量响应特性辨析[J].中国电机工程学报,2023,43(3):855-868.
- MIN Yong, CHEN Lei, LIU Ruikuo, et al. Analysis on characteristics of inertia and inertial response in power system frequency dynamics [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 855-868.
- [15] 孙铭,徐飞,陈磊,等.利用转子动能的风机辅助频率控制最优策略[J].中国电机工程学报,2021,41(2):506-514.
- SUN Ming, XU Fei, CHEN Lei, et al. Optimal auxiliary frequency control strategy of wind turbine generator utilizing rotor kinetic energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 506-514.
- [16] 高晖胜,訾鹏,黄林彬,等.能量约束下电力电子并网装备的最优频率控制[J].电力系统自动化,2020,44(17):9-18.
- GAO Huisheng, ZI Peng, HUANG Linbin, et al. Optimal frequency control of grid-connected power electronic devices with energy constraints [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 9-18.
- [17] 唐玉烽,杨苹,杨义.考虑频率二次跌落的风电机组频率响应控制策略[J].电力系统自动化,2023,47(9):166-174.
- TANG Yufeng, YANG Ping, YANG Yi. Frequency response control strategy of wind turbines considering frequency secondary drop [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 166-174.
- [18] CHEN Y H, XU W, LIU Y, et al. Reduced-order system frequency response modeling for the power grid integrated with the type-II doubly-fed variable speed pumped storage units [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(9): 10994-11006.
- [19] SCHMIDT J, KEMMETMÜLLER W, KUGI A. Modeling and static optimization of a variable speed pumped storage power plant [J]. Renewable Energy, 2017, 111: 38-51.
- [20] SHANG L M, CAO J W, JIA X, et al. Effect of rotational speed on pressure pulsation characteristics of variable-speed pump turbine unit in turbine mode [J]. Water, 2023, 15(3): 609.
- [21] 罗骅,姜建国,刘贺.大功率变换器在可变速抽水蓄能电站中的应用[J].电力电子技术,2017,51(10):109-113.
- LUO Wei, JIANG Jianguo, LIU He. Application of high-power converter in adjustable speed pumped storage hydro station [J]. Power Electronics, 2017, 51(10): 109-113.
- [22] 赵强,张玉琼,陈紫薇,等.计及储能的低惯量电力系统频率特性分析[J].中国电机工程学报,2023,43(3):904-914.
- ZHAO Qiang, ZHANG Yuqiong, CHEN Ziwei, et al. Frequency characteristic analysis of low-inertia power system considering energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 904-914.
- [23] 朱珠,潘文霞,刘铜锤,等.变速抽水机组频率响应机理模型与性能研究[J].电网技术,2023,47(2):463-474.
- ZHU Zhu, PAN Wenxia, LIU Tongchui, et al. Frequency response mechanism modeling and performance analysis of adjustable-speed pumped storage unit [J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 463-474.
- [24] KHOOBAN M H, NIKNAM T, BLAABJERG F, et al. A robust adaptive load frequency control for micro-grids [J]. ISA Transactions, 2016, 65: 220-229.
- [25] TU Z H, FAN B, KHAZAEI J, et al. Optimal reset-control-based load frequency regulation in isolated microgrids [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(4): 2239-2249.

成昕雨(2000—),女,硕士研究生,主要研究方向:电力系统运行与控制。E-mail:xinyucheng@hust.edu.cn

王丹(1977—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统运行与控制、大功率电力电子技术。E-mail:wangdan@mail.hust.edu.cn

李文浩(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力系统优化控制。E-mail:nuclear_li@hust.edu.cn

(编辑 章黎)

Comprehensive Inertia Frequency Regulation Control of Variable-speed Pumped Storage Unit Considering Asymmetric Speed Boundary Constraints

CHENG Xinyu^{1,2}, WANG Dan^{1,2}, LI Wenhao^{1,2}, MAO Chengxiong^{1,2}

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

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: When the frequency of the power system drops, the variable-speed pumped storage (VSPPS) unit can greatly reduce its speed and quickly release the rotor kinetic energy to provide inertia support for the system. However, the existing frequency regulation strategies fail to effectively take the advantage of the VSPPS unit. In order to make full use of the rotor kinetic energy, a comprehensive inertia frequency regulation control strategy of the VSPPS unit is proposed, which takes into account the asymmetric speed boundary constraints. First, based on the active power support characteristics and asymmetric speed constraints of the VSPPS unit, the optimal frequency control structure suitable for the VSPPS unit is derived, which includes two virtual inertia control links with different time constants. Then, the function of each inertia control link is analyzed and the related parameters are set. On this basis, considering the operation characteristics of the VSPPS unit and the frequency regulation demands of the power system, the asymmetric comprehensive inertia control strategy of the VSPPS unit is designed, through which the unit can provide greater inertia support to the system when the speed is reduced. Simulation results show that the proposed frequency regulation strategy can give full play to the advantages of the VSPPS unit and maintain system frequency stability.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. 5100-202419021A-1-1-ZN).

Key words: variable-speed pumped storage unit; comprehensive inertia control; frequency regulation; inertia support; rotor kinetic energy

