基于多尺度形态学滤波的火电机组一次调频控制方法

盛 举1,贾庆岩2,孙建军1,查晓明1

(1. 武汉大学 电气与自动化学院,湖北 武汉 430072;2. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院,湖北 武汉 430077)

摘要:高比例新能源并网给电力系统的频率稳定带来了严峻的挑战。相比风光储等并网新能源,火电机组惯 量更大,一次调频可挖掘潜力更大。根据机组惯性作用、一次调频、二次调频的不同响应时间尺度,基于多尺度 形态学滤波方法对火电机组一次调频负反馈通道的频率信号进行快速分解,通过对各频段信号设置合理的调 差系数,实现分频段调频控制,并有效提高机组对全频段功率波动的频率调节能力。在MATLAB/Simulink 中搭建含风、水、火电的电力系统调频模型,多场景下仿真结果表明该方法可以明显提高系统一次调频能力, 改善系统频率概率分布,从而促进风电消纳。

关键词:一次调频;火电机组;负荷波动;风电波动;多尺度形态学滤波器 中图分类号:TM 761⁺.2

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202111002

0 引言

电力系统频率是衡量电能质量的重要指标之 一^[1]。随着新能源并网发电渗透率的不断提高,常 规传统机组占比逐渐减小,电力系统的转动惯量下 降,惯性支撑能力和频率调节能力不足[2-3],各类突 发功率扰动引起的电网频率异常波动频繁,对电网 的一次调频控制水平和控制效果提出了新的要求。

现有的研究工作大多集中在新能源、储能侧的 参数优化与控制方法改进。文献[4]分析了新能源 占比提高对系统频率的影响,提出了新能源调频参 数优化方案;文献[5]提出了增大等效转动惯量的虚 拟同步机自适应控制策略:文献[6-7]通过改进的控 制手段让新能源参与电网频率调节。上述方法固然 有效,但相比同步机组,提供的惯量支撑有限,且会 牺牲新能源的能量转换效率。文献[8-9]考虑了储 能充放电特性,提出了储能辅助电网的调频控制策 略。但储能等电力电子设备存在安装、运行、维护, 材料回收成本较高的问题。从中国的电源结构来 看[2],火电装机占比超过六成,但机组调频资源的利 用率较低,挖掘现有火电机组的一次调频潜力更加 灵活、经济且方便。

新常态下,传统火电机组依然是电力系统中调 频、调峰的主力,火电机组灵活运行和控制策略优化 显得格外重要。文献[10]指出电力系统发电侧传统 火电机组的调频能力还有较大的挖掘空间。文献 [11]研究了火电机组的灵活运行模式,提出改进的

收稿日期:2021-03-06;修回日期:2021-09-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777145);国网湖北 省电力有限公司科技项目(52153218003J)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51777145) and the Science and Technology Program of State Grid Hubei Electric Power Company Limited (52153218003J)

协调优化控制策略,以提高机组应对快速负荷变 化这一短时间尺度下的响应速度。文献[12]通过改 进自动发电控制AGC(Automatic Generation Control) 机组的控制方式以增强电力系统在二次调频这一长 时间尺度下的频率调节能力。但实际系统中,AGC 机组数量有限,非AGC机组的一次调频能力尚未得 到有效挖掘。上述研究均存在仅考虑单一时间尺度 下的机组调频能力提升的问题。

电力系统中的功率波动主要由负荷波动和新能 源出力波动引起^[13]。功率波动的不同时间尺度又与 火电机组调频的不同时段与频段相对应。为了提高 系统在多频段的频率调节能力,文献[13]考虑了电 力系统中的风电出力波动特性,对频率信号采用简 单的一阶惯性滤波器进行分频滤波。该分频滤波器 的实时性较好,但滤波效果较差,且只能针对单一的 风电功率波动。文献[14]分析了风储火调频特性, 提出了风储火联合调频策略。但基于低通滤波器的 分频器的分频效果一般。文献[15]中所提出的小波 分频的滤波算法的分频效果较好,但存在滤波延时 较长等问题。如何兼顾分频滤波的快速性、准确性 和自适应性,现有研究尚无定论。

针对以上问题,本文提出一种考虑负荷和风电 出力波动特性以及基于多尺度形态学滤波的火电机 组一次调频控制方法。该方法将原一次调频负反馈 通道的频率信号通过多尺度形态学自适应滤波算法 快速分解成高、中、低频3个频段的信号,在不同频 段信号内设置合理的调差系数,可在全频段内有效 地降低负荷和风电出力波动对系统频率波动的影 响,从而提高机组全频段的一次调频能力。

1 电力系统调频过程分析建模

电力系统的调频过程主要由一、二次调频组成。 其中一次调频主要利用火电机组的锅炉蓄热蓄能对 频率进行有差调节^[16]。为了消除一次调频造成的频 率偏差,二次调频主要通过改变机组原动机出力设 定值,从而将系统频率恢复到标准值。

1.1 电力系统频率响应模型

研究电力系统频率的长时间尺度行为(一、二次 调频)时,基本可以忽略发电机之间的相对摇摆,认 为发电机之间严格地保持同步运行,系统中的任意 节点和机组都会有相同频率动态变化的过程;负荷 波动和风电出力波动范围通常较小,可以进一步忽 略电压变化的动态过程。因此可以使用等值的单机 模型来进行计算分析^[17],该系统频率响应模型含有 一、二次调频通道,具体模型控制框图见附录A图 A1,参数设置见附录A表A1。

1.2 系统频率响应动态过程

当负荷发生功率扰动时,系统频率响应的动态过程如图1所示。发生负荷扰动前,系统频率在标准频率f,附近上下波动。若频率偏差在死区范围±f,向,则主要通过机组的惯性作用吸收这部分频率波动;若频率偏差越过死区,则一次调频开始作用,将频率偏差恢复到死区范围内。发生较大的功率扰动后,系统频率恢复到标准范围的过程主要经历以下3个阶段^[18]。





Fig.1 Dynamic process of system frequency response

第一阶段,[0,5)s内,因为系统存在发电缺额, 系统频率开始衰减,发电机的转子释放能量,限制频 率的衰减速度。这个阶段主要通过机组的惯性作用 (动力蓄能特性)进行系统频率调节。

第二阶段,[5,30)s内,在机组惯性作用发生的 2~3s后,机组的调速器逐渐响应并改变原动机输出 功率,增加发电机的输出功率。这个阶段主要通过 机组的一次调频作用进行系统频率调节。

第三阶段,[30,80]s内,AGC机组在可以控制的旋转发电备用容量范围内,恢复系统联络线功率和系统频率,主要通过运维调度人员手动调节。这个阶段主要通过机组的二次调频作用进行系统频率调节。

上述3个阶段的调频作用示意图见附录B图 B1。常规电力系统中,一般绝大多数的机组都承担 一次调频任务,少部分机组被安排进行二次调频任 务。一次调频是电力系统中最频繁也是最重要的频 率调节过程。如何挖掘火电机组一次调频能力,使 一次调频在惯性作用和二次调频的时间尺度上也 "发挥余热",对增强系统频率的安全稳定,提高机组 的灵活性具有一定意义。

1.3 电力系统调频参数的影响

调差系数R是汽轮机控制系统静态特性曲线的 斜率,通常以对应空负荷与满负荷的转速差值与额 定转速比值的百分数来表示¹⁶。

当本文系统频率响应模型的负荷端出现0.05 p.u. 的阶跃扰动时,不同调差系数下系统频率的响应曲 线如图2所示。图中,调差系数越小,机组出力的调 节能力越大,但是会导致闭环控制系统的不稳定,出 现系统频率振荡甚至发散的情况;调差系数越大,机 组出力的能力越小,一次调频的能力越弱。因此,机 组调差系数的设置不宜过小也不宜过大。



一次调频控制系统的开环对数特性图见附录 B 图 B2。作为控制系统的频域性能指标,剪切频率 ω_{c} 相位裕度 γ 和增益裕量K越大,则系统越稳定,但 控制系统的响应速度也会变慢。工程设计一般要求 ω_{c} <0.04 Hz, γ 的取值范围为[5°,30°],K>5 dB。

当调差系数从 0.050 减小到 0.015 时,系统的剪 切频率 ω_{c} 不断右移,由 0.028 Hz 增大至 0.056 Hz;系 统的相位裕度 γ 不断减小,由初始的 32.43°减小至 -2.65°;系统的增益裕量 K不断减小,由初始的 9.5 dB 减小至 -1.27 dB。在此变化过程中,一次调频闭环 控制系统由稳定变成失稳状态,故调差系数的设置 存在下限。参考国家电网公司标准 Q / GDW 669—2011《火力发电机组一次调频试验导则》给出的大功 率机组调差系数设置范围 4%~5%,在满足系统稳定 性的前提下,本文的调差系数范围设置为 3%~5%。

2 多尺度一次调频控制方法

传统的一次调频控制方法通过负反馈通道将频率信号转化阀门动作指令信号^[16],进而改变原动机的出力,一般设置固定的调差系数。随着电力系统中的功率波动组成愈加复杂,常规一次调频方法对系统中各个频段的功率波动的调频控制能力逐渐

下降。

196

2.1 系统频率响应特性分析

根据1.1节建立的电力系统频率响应模型,系统的频率响应传递函数*H*(*s*)表达式如式(1)所示。

$$H(s) = \frac{\Delta f(s)}{\Delta P_{\rm L}(s)} \tag{1}$$

式中: $\Delta f(s)$ 为系统频率偏差; $\Delta P_{L}(s)$ 为系统负荷功率偏差。

系统的频率响应传递函数 H(s)的物理含义为 系统对功率波动的调节能力,当系统对功率波动的 调节能力越强时,H(s)越小。H(s)的闭环幅频特性 和相频特性见附录 B图 B3。图中,对比仅靠机组惯 性、仅靠一次调频作用、仅靠二次调频和机组惯性以 及一、二次调频共同作用这4种情况下的幅频特性 曲线。在大于0.38 Hz的频段内,仅靠机组惯性作用 的调节能力是大于一、二次调频共同作用的。对于 这个频段的功率波动,调速器的死区需要合理设置, 以最大化利用机组的惯性作用;在[0.03,0.38] Hz的 频段内,系统一次调频的作用则显著大于二次调频 和机组惯性作用;在小于0.03 Hz的频段内,显然二 次调频的作用最强。

从频域的尺度内分析,上述3个频率尺度的调频作用示意图如图3所示。多尺度一次调频控制方法将一次调频负反馈通道的频率信号通过多尺度滤波器分成高、中、低3个频段,分别对应机组惯性作用、一次调频、二次调频的频段。再通过对3个频段的信号合理地设置调差系数,即可增强系统对全频域的功率波动的频率调节能力。





Fig.3 Frequency scale of frequency regulation in frequency domain

2.2 多尺度形态学滤波器的分解算法

常用的分频滤波方法有一阶惯性滤波法、卡尔 曼滤波法、小波分析WA(Wavelet Analysis)、傅里叶 变换FT(Fourier Transform)等。

数学形态学 MM (Mathematical Morphology)是 一种非线性信号处理方法。不同于 WA 方法、FT 方 法等频域分析方法, MM 方法提供了直接在时域进 行的多时间尺度分解算法。作为一种启发式算法, 通过对原信号进行填充计算,可以很好地保持原信 号的信息,具有运算量小、滤波精度高、滤波延时低 的优点,因此很适合作为信号的多时间尺度分解 算法。 设输入信号为 $x(n), n \in \{0, 1, \dots, N-1\}$;结构元 素为 $\gamma(m), m \in \{0, 1, \dots, M-1\}$ 。函数的膨胀与腐蚀 运算分别为:

$$(x \oplus \gamma)(n) = \max[x(n-m) + \gamma(m)]$$
 (2)

$$(x\Theta\gamma)(n) = \min[x(n+m)-\gamma(m)]$$
 (3)

式中:⊕为膨胀运算符;Θ为腐蚀运算符。

选取不同时间尺度的结构元素,通过开、闭运 算,即可实现多尺度滤波。其中开、闭运算分别为:

$$(x \circ \gamma)(n) = \left(\underbrace{x \Theta \gamma \Theta \cdots \Theta \gamma}_{s_{i}} \underbrace{\oplus \gamma \oplus \cdots \oplus \gamma}_{s_{i}}\right) (n) \quad (4)$$

$$(x \bullet \gamma)(n) = \left(\underbrace{x \oplus \gamma \oplus \dots \oplus \gamma}_{s_{i}} \underbrace{\Theta \gamma \oplus \dots \oplus \gamma}_{s_{i}} \right) (n) \quad (5)$$

式中:。为开运算符;•为闭运算符;s,为时间尺度。

参照文献[19]的方法,多尺度形态学滤波器 MMF(Multi-scale Morphological Filter)由不同尺度 的混合形态学滤波器加权求和而得,如式(6)所示。

$$h_{\rm MMF}(x)_{s_i}(n) = \sum_{i=1}^k \lambda_{s_i} h(x)_{s_i}(n)$$
(6)

$$h(x)_{s_i}(n) = \frac{1}{2} \left\{ \left[\left(x \circ \gamma \right)_{s_i} \bullet \gamma \right](n) + \left[\left(x \bullet \gamma \right)_{s_i} \bullet \gamma \right](n) \right\}$$
(7)

式中: γ 为结构元素;k为时间尺度的数量; λ ,为各尺 度结构元素权重值,其表达式如式(8)所示。

$$\lambda_{s_{i}} = \frac{E\left(x^{2}(n)_{s_{i}}\right)}{\sum_{i=1}^{k} E\left(x^{2}(n)_{s_{i}}\right)}$$
(8)

式中: $E\left(x^{2}(n)_{s_{i}}\right)$ 为滤波均方误差,其表达式如式(9) 所示。

$$E\left(x^{2}(n)_{s_{i}}\right) = E\left[\left|x(n)_{s_{i}} - h(x)_{s_{i}}(n)\right|^{2}\right]$$
(9)

参考文献[20]中改进的自适应广义形态滤波器 的方法,自适应选择不同尺度下的结构元素γ。

为了将系统频率响应模型一次调频反馈通道的 频率信号分解成高、中、低3个频段,设计了2个串联 的MMF,对输入信号进行多尺度分解。输入的信号 先经前级MMF分解得出高频信号和中低频信号;后 者再经过后级MMF分别得到低频和中频信号。

2.3 多尺度一次调频控制方法实施方法

结合2.1节的分析,将附录A图A1系统频率响 应模型中一次调频通道上的框图替换为如图4所示 的控制框图。

图4所示的一次调频控制方法将负反馈通道的 频率信号 Δf 通过2.2节的MMF分解为高、中、低3 个信号 $\Delta f_1 - \Delta f_3$ 。对于高频信号 Δf_1 ,这部分信号 主要由机组惯性作用吸收掉,并在高频通道内加上



图 4 多尺度一次调频控制方法 Fig.4 Control method of multi-scale primary frequency regulation

了死区环节,滤除一部分高频波动,调差系数 R_1 设为0.05;对于中频信号 Δf_2 ,此信号的频段是一次调频主要工作的频段,为了增加一次调频能力,调差系数 R_2 的范围设置为(0.04,0.05);对于低频信号 Δf_3 ,这个信号的频段对应二次调频作用,需要进一步增加一次调频能力,调差系数 R_3 的范围设置为[0.03,0.04]。

为了实现信号的实时分解,本文采用滑窗滤波 算法,通过一个周期内固定采样频率信号值,在每个 采样点时刻都可以更新反馈通道的指令值。由于 MM方法没有乘除操作,且在时域操作不需要复杂 的积分变换,因此计算量较小,一个滑窗周期造成的 延时小于0.3 s,可以满足信号快速分解的要求。

3 仿真实验

3.1 仿真条件

为验证本文所提多尺度一次调频控制方法对火 电机组调频能力的提高作用,在MATLAB/Simulink 环境搭建如图5所示的含风、水、火电的4机10节点 电力系统。该系统包含2台火电机组G₁与G₂、1台水 电机组G₃、1台风电机组。其中,风电机组不参与电 力系统调频,火电机组G₂与水电机组G₃不参与二次 调频。



图 5 修改的 4 机 10 节点电力系统 Fig.5 Modified 4-machine 10-bus power system

根据华中某省实际电力系统 2018年的数据,模 拟该省电力系统的实际运行状态,对本文的多尺 度一次调频控制方法进行分析。系统总装机容量为 2850 MW,火电总装机容量为1600 MW,AGC 机组 G₁总装机容量为1000 MW,非AGC 机组G₂总装机容 量为600 MW。水电机组装机容量为800 MW,风电 装机容量为450 MW。 根据国家电网标准Q/GDW 669—2011《火力 发电机组一次调频试验导则》,仿真中加入了火电机 组出力限制,其中,1000 MW火电机组G₁出力限制 为5%,600 MW火电机组G₂出力限制为6%。

多尺度一次调频策略中,调差系数*R*₁设为0.05, *R*₂设为0.045,*R*₃设为0.035。

3.2 仿真结果分析

3.2.1 场景1

调频机组只启用一次调频,二次调频不动作,负 荷L₁、L₂采用阶跃扰动的形式,负荷阶跃扰动见附录 C图C1,图中负荷波动为标幺值。火电机组G₁与G₂ 均采用多尺度动态一次调频方法,对比常规一次调 频控制方法,系统频率偏差曲线如图6所示,图中系 统频率偏差为标幺值,后同。由图可知,相比常规一 次调频控制方法,本文的控制方法有效地减小了频 率稳态值,一次调频的动态过程也得到极大改善,这 是因为当负荷为低频高幅值波动时,机组负反馈通 道的频率信号多集中在为低频段,此频段信号对应 的调差系数*R*,设置为0.035,因此整个系统的一次调 频能力较强。



图6 阶跃扰动下电网频率偏差曲线



3.2.2 场景2

采用实际负荷波动数据与风电出力数据,采样时间为12000s,采样间隔均为1s,负荷预测采用基于实际负荷波动数据的趋势预测值并加上5%的预测误差;风电预测采用对历史数据的滑窗平均值,并加上10%的预测误差。对火电机组G₁与G₂均采用多尺度一次调频控制方法。负荷随机波动的最大幅值为0.01 p.u.,风电的渗透率为10%。

观察火电机组G₁,该机组的一次调频负反馈通 道的频率信号通过MMF分成高、中、低3个频段,分 解效果图见附录C图C2(a)。分解后的高、中、低3 个频段信号相加,即为原信号,因此一次调频反馈通 道的控制信息没有损失;MMF有效且实时地将原信 号分解成3个频段的信号,对比原信号和低频分量 信号,滤波延时仅为0.21 s,满足信号快速分解要求。 为了体现 MMF 算法的快速性、准确性, 附录 C 图 C2 对比了本文所提 MMF 算法、一阶惯性滤波算 法、卡尔曼滤波算法和 WA 算法的信号分解效果。 图 C2(a)中,本文的 MMF 有效且实时地将原信号分 解成 3 个频段的信号。图 C2(b)中采用一阶惯性滤 波方法,可以看出此方法对于高频分量的分解效果 尚可, 但对中低频信号, 因为算法本身具有局限性, 分解效果较差。图 C2(c)中采用卡尔曼滤波算法, 与一阶惯性滤波算法类似, 卡尔曼滤波算法的快速 性尚可, 但是滤波准确度较低, 分解效果很差。 图 C2(d)中采用 WA 算法, WA 算法本身的运算量较大, 耗时较长, 不能满足信号快速分解要求。可以看出, 由于滤波延时长, 不仅信号分解效果很差, 还造成了 信号混叠, 控制系统失稳, 造成原信号的振荡严重。

198

综上,正是因为本文的滤波算法本身具有滤波 精度高、滤波延时较低的特点,才可以正确地将原信 号分解出如图C2(a)中所示的高、中、低3个分量,而 其他滤波算法如一阶惯性滤波算法、卡尔曼滤波算 法和WA算法等,都不能兼顾滤波的"准、快"的要 求,因此会造成控制反馈通道的控制信息丢失,系统 频率出现严重振荡现象。

对比常规一次调频控制方法,系统频率偏差曲 线如图7所示。相比常规一次调频控制方法,多尺度 一次调频控制方法显著改善了系统频率偏差的波动 情况,频率偏差的最大值由0.065 Hz减小到0.041 Hz, 频率偏差波动的方差由2.41×10⁻⁴ p.u.减小为1.95× 10⁻⁴ p.u.,系统的一次调频能力得到了显著提高。





Fig.7 Frequency deviation curves of power grid with actual continuous load disturbance and wind power disturbance

系统频率偏差波动的功率谱如图8所示。采用 多尺度一次调频控制方法后,系统频率偏差波动的 功率谱在全频段均有所改善,系统对全频段负荷波 动的调节能力均得到了一定提高。

另外,改善前后的电网频率概率分布统计情况 如图9所示。由于常规一次调频方法中调速器死区



非线性环节的存在,系统频率概率分布呈现双峰分 布的情况。本文控制方法仅在高频通道内加上了死 区环节,有效地将双峰分布改善为正态分布。 3.2.3 场景3

为了验证本文的控制方法对高频负荷随机波动 的调节能力,改变负荷波动中的高频随机波动幅 值,当负荷随机波动的最大幅值ΔP_{Lmax}分别为0.02、 0.03、0.04 p.u.时,3种情况下系统频率偏差曲线图见 附录C图C3,3种情况下的频率偏差数据如表1所 示,表中频率偏差波动方差为标幺值,后同。由图 C3和表1可知:3种情况下,相比常规方法,改进的 多尺度一次调频控制方法都有效地减小了系统频率 偏差波动方差;且随着高频负荷随机波动幅值的增 加,频率偏差波动方差的改善率不断增加,进一步证 明了本文方法的有效性。

表1 3种情况下频率偏差数据

Table 1 Frequency deviation data in three cases

	1 1		
	频率偏差波动方差		
$\Delta P_{\rm Lmax}$	常规一次调频	多尺度一次调频	改善率 / %
	控制方法	控制方法	
0.02	2.53×10 ⁻⁴	1.95×10^{-4}	20.3
0.03	3.17×10 ⁻⁴	2.57×10 ⁻⁴	22.8
0.04	3.71×10 ⁻⁴	3.03×10 ⁻⁴	25.1

为了验证多尺度一次调频控制方法对低频风电 出力波动的调节能力,减小系统中火电机组容量,增 加风电机组容量,将风电出力功率等比例增大或减 小,以改变风电在系统中的渗透率。当风电的渗透



率分别为20%、30%、40%时,3种情况下系统频率 偏差数据如表2所示。由表2可知,不同风电渗透率 下,多尺度一次调频控制方法对系统频率偏差波动 方差的改善作用明显,进而可以说明多尺度一次调 频控制方法一定程度上促进了风电的发电消纳。

表2 不同风电渗透率的频率偏差数据

Table 2 Frequency deviation data of different

wind power permeabilities

र्घ क	频率偏差波动方差		
八电 送添速 / 0/	常规一次调频	多尺度一次调频	改善率 / %
修选举 / %	控制方法	控制方法	
20	2.41×10 ⁻⁴	1.96×10 ⁻⁴	19.1
30	3.02×10 ⁻⁴	2.49×10 ⁻⁴	17.5
40	3.57×10 ⁻⁴	2.98×10 ⁻⁴	16.3

随着系统中风电渗透率的不断提高,频率偏差 波动方差的改善率随之减小,这是因为风电机组不 参与调频,系统的调频能力随着系统中火电机组容 量的减小而变弱。火电机组的频率支撑能力显著, 为了最大化挖掘火电机组乃至整个系统的一次调频 能力,电网中的火电机组装机容量必须有所保证。

4 结论

为了挖掘火电机组的一次调频能力,本文提出 一种火电机组多尺度一次调频控制方法。该方法将 原一次调频负反馈通道的频率信号通过多尺度形态 学自适应滤波算法快速分解成3个频段的信号,在 不同频段信号内设置合理的调差系数,从而提高机 组全频段的一次调频能力。根据电网调频模型的仿 真结果,结论如下。

 1)本文控制方法可以改善系统频率偏差波动在 全频段的功率谱,提高机组全频段的调频能力;可以 改善系统的频率概率分布。随着高频负荷随机波动 幅值的增加,频率偏差波动方差的改善率不断增加。

2)本文控制方法可以一定程度上促进风电发电 消纳,但随着系统中风电渗透率的不断提高,频率偏 差波动方差的改善率随之减小,因此电网中的火电 机组装机容量必须有所保证。

3)本文的多尺度形态学自适应滤波算法本身具 有滤波精度高、滤波延时较低的优点,可以灵活应对 各种场景下的负荷功率波动情况,通过分频控制,挖 掘机组的调频潜力。

本文控制方法旨在以更加经济有效的方式改善 当前火电机组一次调频方法的不足。理论与仿真虽 能说明控制方法的有效性,但未考虑调频模型中的 一些非线性环节,最终仍需要落地的工程实践来 验证。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1]付学谦,孙宏斌,郭庆来,等. 能源互联网供能质量综合评估
 [J]. 电力自动化设备,2016,36(10):1-7.
 FU Xueqian, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. Comprehensive evaluation of energy quality for energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(10):1-7.
- [2] 王博,杨德友,蔡国伟.高比例新能源接入下电力系统惯量相 关问题研究综述[J].电网技术,2020,44(8):2998-3007.
 WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Review of research on power system inertia related issues in the context of high penetration of renewable power generation[J]. Power System Technology,2020,44(8):2998-3007.
- [3] 文云峰,杨伟峰,林晓煌.低惯量电力系统频率稳定分析与控制研究综述及展望[J].电力自动化设备,2020,40(9):211-222.
 WEN Yunfeng,YANG Weifeng,LIN Xiaohuang. Review and prospect of frequency stability analysis and control of low-inertia power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020,40(9):211-222.
- [4] 刘洋,邵广惠,张弘鹏,等.新能源参与系统一次调频分析及参数设置[J]. 电网技术,2020,44(2):683-689.
 LIU Yang,SHAO Guanghui,ZHANG Hongpeng, et al. Analysis of renewable energy participation in primary frequency regulation and parameter setting scheme of power grid[J].
 Power System Technology,2020,44(2):683-689.
- [5]杨赟,梅飞,张宸宇,等.虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略[J].电力自动化设备,2019,39(3): 125-131.

YANG Yun, MEI Fei, ZHANG Chenyu, et al. Coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 125-131.

- [6]黄伟,陈炜,吴军,等.基于功率平衡控制原理的双馈风电机组 辅助调频方法[J].电力自动化设备,2019,39(1):66-72.
 HUANG Wei, CHEN Wei, WU Jun, et al. Auxiliary frequency modulation method of DFIG-based wind turbine based on principle of power balance control[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(1):66-72.
- [7] 贾祺, 严干贵, 张善峰, 等. 多光伏发电参与电网频率调节的动态协调机理[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24):59-66.
 JIA Qi, YAN Gangui, ZHANG Shanfeng, et al. Dynamic coordination mechanism of grid frequency regulation with multiple photovoltaic generation units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24):59-66.
- [8]张圣祺,袁蓓,徐青山,等.规模化储能参与下的电网二次调频 优化控制策略[J].电力自动化设备,2019,39(5):82-88,95.
 ZHANG Shengqi,YUAN Bei,XU Qingshan, et al. Optimal control strategy of secondary frequency regulation for power grid with large-scale energy storages[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(5):82-88,95.
- [9]赵源筱,耿光超,江全元,等.考虑功率变化速率的储能辅助单 机调频控制策略[J].电力自动化设备,2020,40(1):141-147. ZHAO Yuanxiao,GENG Guangchao,JIANG Quanyuan, et al. Frequency control strategy of single-generator supporting by energy storage considering power change rate[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(1):141-147.
- [10] 张显,史连军.中国电力市场未来研究方向及关键技术[J]. 电力系统自动化,2020,44(16):1-11.
 ZHANG Xian,SHI Lianjun. Future research areas and key technologies of electricity market in China[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(16):1-11.
- [11] 谢春甫. 提升火电机组灵活性的机炉协调控制优化研究[D].

200

XIE Chunfu. Study on optimization of coordinated control of boiler and steam turbine to improve the flexibility of the thermal power units[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2018.

[12] 翁毅选,邓长虹,黄文涛,等. 基于最优动态闭环控制的水火电 互联大电网自动发电控制策略[J]. 电力自动化设备,2013,33 (3):66-71.

WENG Yixuan, DENG Changhong, HUANG Wentao, et al. AGC based on optimal dynamic closed-loop control for interconnected power grid of hydro and thermal power plants[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3):66-71.

[13] 王琦,郭钰锋,万杰,等.适用于高风电渗透率电力系统的火电 机组一次调频策略[J].中国电机工程学报,2018,38(4):974-984,1274.

WANG Qi, GUO Yufeng, WAN Jie, et al. Primary frequency regulation strategy of thermal units for a power system with high penetration wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4):974-984, 1274.

- [14] 曲彤,苏小林,阎晓霞,等. 基于分频原理和区域控制的风储火 联合调频策略[J]. 电测与仪表,2018,55(20):122-129,147. QU Tong,SU Xiaolin,YAN Xiaoxia,et al. Frequency combination modulation strategy of wind power, energy storage and thermal power unit system based on frequency division and regional control principle[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2018,55(20):122-129,147.
- [15] 吕超贤,李欣然,户龙辉,等. 基于小波分频与双层模糊控制的 多类型储能系统平滑策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(2): 21-29.

LÜ Chaoxian, LI Xinran, HU Longhui, et al. A smoothing strategy for hybrid energy storage system based on wavelet frequency allocation and two-level fuzzy control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2):21-29.

[16] KUNDER P. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1994:131.

- [17] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3):720-729.
- [18] 赵强,王丽敏,刘肇旭,等. 全国电网互联系统频率特性及低频 减载方案[J]. 电网技术,2009,33(8):35-40.
 ZHAO Qiang, WANG Limin, LIU Zhaoxu, et al. Study on dynamic frequency characteristics and coordinative under-frequency load shedding scheme for nationwide interconnected power grid of China[J]. Power System Technology, 2009, 33 (8):35-40.
- [19] 詹勋淞,管霖,卓映君,等.基于形态学分解的大规模风光并
 网电力系统多时间尺度灵活性评估[J].电网技术,2019,43
 (11):3890-3901.

ZHAN Xunsong, GUAN Lin, ZHUO Yingjun, et al. Multi-scale flexibility evaluation of large-scale hybrid wind and solar gridconnected power system based on multi-scale morphology [J]. Power System Technology, 2019, 43(11); 3890-3901.

[20] ZHANG L J, XU J W, YANG J H, et al. Multiscale morphology analysis and its application to fault diagnosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22(3):597-610.

作者简介:



盛 举(1996—), 男, 江苏盐城人, 硕士 研究生, 通信作者, 主要研究方向为电力系 统调频控制(**E-mail**:981329112@qq.com); 贾庆岩(1982—), 男, 河北唐山人, 高 级工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为控 制理论与控制工程、火电厂建模与参数辨识 (**E-mail**:jaaky@foxmail.com);

孙建军(1975—),男,江西九江人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为

电能质量分析及治理、电力电子系统及微电网的建模和分析 (E-mail:jjsun@whu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Primary frequency regulation control method of thermal power unit based on multi-scale morphological filter

SHENG Ju¹, JIA Qingyan², SUN Jianjun¹, ZHA Xiaoming¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China)

Abstract: The high proportion of new energy connected to the grid brings severe challenges to the frequency stability of power systems. Compared with the grid-connected new energy sources such as wind, photovoltaic and energy storage, thermal power unit has larger inertia and can tap more potential of primary frequency regulation. According to the different response time scales of unit inertia, primary frequency regulation and secondary frequency regulation, the frequency signal of negative feedback channel of primary frequency regulation of thermal power unit is decomposed based on multi-scale morphological filtering method. By setting reasonable regulation coefficient for each frequency band signal, the frequency regulation control in different frequency ranges is realized, and the ability of unit to adjust the frequency regulation of power system including wind, water and thermal power is built on MATLAB / Simulink. The simulative results in multiple scenarios show that the method can significantly improve the primary frequency regulation of wind power. **Key words**: primary frequency regulation; thermal power unit; load fluctuation; wind power fluctuation; multi-scale morphological filter









60

时间/s

0

5







Fig.B2 Open-loop amplitude-frequency characteristic and phase-frequency characteristic of primary frequency regulation system



Fig.B3 Amplitude-frequency characteristic and phase-frequency characteristic of transfer function of system



Fig.C2 Decomposition effect diagram of different filters



图 C3 3 种情况下的电网频率偏差曲线 Fig.C3 Deviation curves of power grid frequency under three cases