

考虑频率模态特性的虚拟同步机惯量与 阻尼分析和控制设计

陶俊¹,高晖胜²,辛焕海^{1,2},王子骏¹,杨永恒^{1,2},吴英姿³

(1. 浙江大学 工程师学院,浙江 杭州 310027;2. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027;

3. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院,湖北 武汉 430070)

摘要:随着新能源渗透率的不断提高,系统调频资源不足且分布不均特性明显,节点频率响应之间差异大。设备的调频控制设计不仅需要考虑到系统频率响应中的全局分量,也需要考虑非全局分量。为此,提出兼顾频率多模态分量的虚拟同步机惯量与阻尼设计方法。首先,分析了虚拟惯量与阻尼控制对不同频率模态分量的影响;其次,利用调频统一结构模型,揭示了高阶调频动态对不同频率分量可表现不同惯量与阻尼的特性,进而基于此特性提出多模态惯量和阻尼控制设计方法;最后,仿真验证了提出的多模态调频控制策略的有效性,可同时改善多频率分量响应特性。

关键词:频率响应差异;多模态特性;统一结构模型;模态惯量和阻尼;调频控制策略

中图分类号:TM761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202308017

0 引言

为落实“双碳”战略目标,近年来新能源设备大量接入电网。在此背景下,以同步机为主导的传统电力系统正在逐渐转变为以新能源为主体的新型电力系统^[1]。新能源在常规控制下惯量低、调频能力弱,其大量接入导致系统中同步机占比减少,频率支撑强度降低,频率稳定性面临挑战,这逐渐成为制约新能源健康发展的关键因素之一^[2-3]。因此,为保障新能源的安全并网,有必要深入研究电力系统频率响应特性,优化新能源的调频控制。

传统电力系统中,各节点频率响应由其全局分量(即系统频率,或称全局频率)主导,节点差异较小,故传统频率稳定分析与控制通常仅针对系统频率。在这方面,沿用平均系统频率、系统频率响应等经典模型^[4-5]的分析思路,学者们开展了大量研究。例如文献[6]建立了光伏电站参与一次调频的系统频率响应模型,通过粒子群优化算法改进控制策略,提升系统稳定性。文献[7]基于频率等效聚合模型提出了一种与双馈电机控制相协调的控制策略,以提高一次调频控制的性能。

事实上,随着新能源设备渗透率不断提高,电力系统调频资源分布的不均匀程度和不同设备调频动态的异质程度逐渐增大,节点频率响应的差异性也

随之增大^[8-9]。这意味着频率响应中非全局分量的重要性逐渐上升,甚至可能主导频率稳定问题。此时,频率稳定分析和控制中不仅需要考虑到系统频率(全局分量),也需兼顾节点频率(非全局分量)。对此,文献[10]提出了节点惯量指标,用以量化分析节点频率特性。文献[11]推导了风电接入点频率与非全局频率分量间的关系,分析了双馈风机附加下垂控制对系统振荡模式阻尼的影响。

在新能源调频控制方面,基于虚拟同步机的控制是一种典型的控制方案,可为系统提供惯量与快速一次调频。然而,现有虚拟同步机调频控制设计通常仅针对某一分量(全局分量/非全局分量),即改善某一分量响应的同时可能恶化另一分量响应。例如:面向系统频率全局分量整定的虚拟惯量、阻尼等调频控制参数可能对非全局分量抑制效果不佳;针对非全局分量设计的控制可以较好抑制局部频率波动,但会对全局分量产生较大影响,使得全局分量偏离期望值。

由于不同频率分量的优化目标存在一定差异,考虑多分量的调频控制设计存在挑战。具体地,对于全局分量,调频设计目标一般为使扰动下的频率最低点、准稳态偏差等指标满足给定的要求,同时考虑设备调频容量等约束^[12];对于非全局分量,其通常呈现为不同节点间的频率相对振荡,故使频率振荡快速收敛是控制设计的目标^[9]。然而,这2类目标对应的调频参数设计思路并不完全一致。以惯量参数为例,增大惯量通常可提升系统频率最低点,但可能降低频率振荡的阻尼比^[13-14]。

为此,本文基于频率响应的多模态特性及分量,提出兼顾频率多模态分量的虚拟同步机惯量与阻尼

收稿日期:2023-05-29;修回日期:2023-08-09

在线出版日期:2023-08-17

基金项目:国家电网有限公司科技项目(4000-2022-22070A-1-1-ZN)

Project supported by the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(4000-2022-22070A-1-1-ZN)

设计方法。首先,讨论了针对不同频率分量时,虚拟惯量与阻尼控制设计策略的思路及差异。其次,基于调频统一结构模型,揭示了高阶调频模型实际体现惯量与阻尼参数的模态性,即对不同频率分量表现出不同的惯量与阻尼。进而基于此提出多模态惯量和阻尼设计方法,以同时改善多频率分量响应特性。最后,通过仿真分析验证了提出的多模态调频控制策略的有效性以及对各种场景的适应性。

1 面向不同频率分量的调频控制设计需求

电力系统扰动下各节点频率响应存在一致趋势,同时具有空间分布差异^[15]。为深入分析系统频率动态过程,文献[16-17]提出了模态频率分解方法,指出频率响应可分解为共模频率和差模频率,分别表征频率响应的全局分量与非全局分量,如式(1)所示。

$$\Delta\omega(s) = \Delta\omega_1(s) + \sum_{k=2}^n \Delta\omega_k(s) \quad (1)$$

式中: n 为差模频率序数; $\Delta\omega(s)$ 为节点频率响应; $\Delta\omega_1(s)$ 为共模频率; $\Delta\omega_k(s)$ ($k=2, 3, \dots, n$)为差模频率。

共模与差模频率分别反映了电力系统频率响应的不同方面,因此,针对共模或差模频率的调频设计思路也存在一定差异。

对于共模频率,由文献[4]和文献[16]可知,其可由等效单机带负荷系统获得。对于此类系统,在设计调频控制时,通常期望能改善频率动态过程中的最大频率偏差等指标。以图1所示单机系统为例说明调频参数对系统共模频率的影响(其中开关关闭时,系统为单机带负荷系统)。该系统中发电设备为具有二次调频功能的虚拟同步机。在频率响应秒级的时间尺度下,虚拟同步机频率-有功传递函数 $G(s)$ 可近似如式(2)所示。

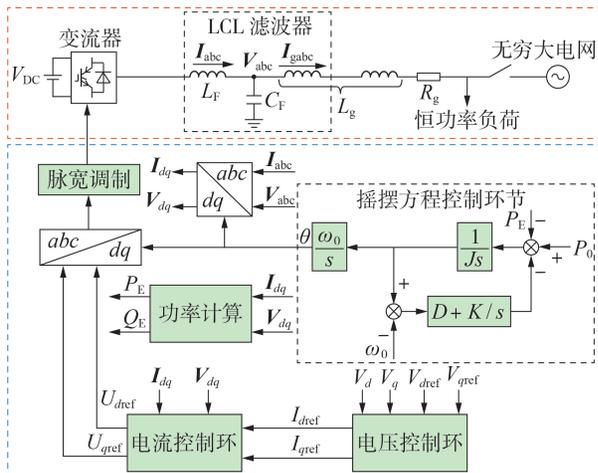


图1 单机系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of single-machine system

$$G(s) = Js + D + K/s \quad (2)$$

式中: J 为虚拟惯量; D 为阻尼系数; K 为调差系数。该系统扰动下的频率响应可表示为:

$$\Delta\omega(s) = \frac{\omega_0 s \Delta P_D(s)}{Js^2 + Ds + K} \quad (3)$$

式中: $\Delta P_D(s)$ 为负荷功率扰动; ω_0 为系统标称频率。

由式(3)易知,增大虚拟同步机的惯量及阻尼参数有助于减小扰动下的共模频率波动。为直观理解,取 $J=10$ p.u.、 $D=10$ p.u.、 $K=0.5$ p.u.,并在此基础上改变 J 及 D ,得到单机系统频率响应如图2所示。由图2(a)、(b)可知,增大惯量及阻尼参数,系统中频率最低点得到提升,共模频率响应特性得到改善。

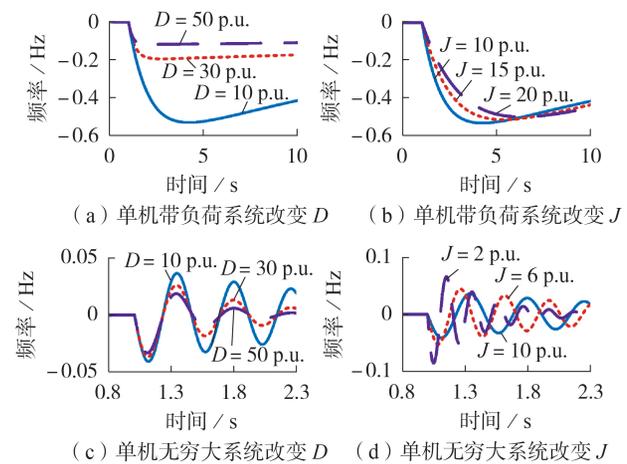


图2 单机系统频率响应

Fig.2 Frequency response of single-machine system

另一方面,对于频率响应的非全局分量(差模频率),其呈现振荡形式,一般可近似由单机无穷大系统表示。仍以图1所示系统为例(开关闭合时,系统为单机无穷大系统)进行说明,易知该系统频率响应可近似表示为:

$$\Delta\omega(s) = \frac{\omega_0 s \Delta P_D(s)}{Js^2 + Ds + K + \omega_0 X^{-1}} \quad (4)$$

式中: X 为发电设备和无穷大电网之间的电抗。该系统阻尼比 ζ 为:

$$\zeta = \frac{D}{2\sqrt{J(K + \omega_0 X^{-1})}} \quad (5)$$

对于频率振荡,通常期望采用优化控制后能使其振荡分量快速衰减。由式(4)可知,减小虚拟惯量、增大阻尼系数有利于增大频率振荡阻尼比,使其快速衰减,如图2(c)、(d)所示(其中 $X=0.2$ p.u.)。需要说明的是,实际多机系统频率振荡的动态过程受节点调频资源分布影响,远比式(4)复杂,上述分析旨在为惯量、阻尼参数对频率振荡的影响趋势提供直观的认知。

增大惯量参数对共模、差模频率的影响相反,增

大阻尼有助于同时改善共模、差模频率。需要注意的是,阻尼在参与调频过程中消耗的能量与频率偏移量的积分成正比,在考虑容量约束、调频经济性时^[18],调节共模频率的阻尼不可过大,而差模频率受该影响较小(频率振荡的积分接近于0)。当惯量、阻尼参数共同变化时,其作用效果将叠加,具体见附录A。

综合上述分析,当考虑共模频率、差模频率时,虚拟同步机的惯量、阻尼参数改进方向存在差异。1组惯量、阻尼参数可能难以满足不同频率分量的需求,故有必要研究兼顾多频率分量的控制策略。

2 考虑惯量、阻尼模态特性的调频控制策略

针对同一组惯量、阻尼参数难以适应多频率分量的问题,首先基于统一结构模型指出高阶调频模型可对不同频率分量呈现不同的惯量、阻尼特性。然后,基于此提出模态惯量和阻尼设计方法并给出控制参数整定方法,同时改善多频率分量响应特性。最后,将本文所提控制与现有虚拟同步机调频控制进行对比以展示本文所提控制的优势。

2.1 惯量、阻尼参数的模态特性

实际系统中发电设备的调频动态通常具有高阶特征。由于系统频率响应与其中所有设备调频动态均相关,大量异质调频动态的叠加将导致系统频率响应阶数过高,进而难以进行分析,也不利于理解各类型设备对频率响应的作用。事实上,大量研究及工程经验表明,虽然准确的系统频率响应阶数较高,但其动态可由低阶模型很好地近似。

需要指出的是,简化的模型结构必然无法全面、准确地反映原复杂模型的特性^[19]。为了保障分析结果的准确性,在模型简化过程中通常仅针对其部分特性。例如,考虑具有较小延时环节(百毫秒级时间常数)的新能源虚拟惯量,在分析其对较慢动态系统频率的作用时,通常可近似将其视为等数值、无延时的惯量。不难理解,该简化模型可能无法准确反映原模型在较高频段(如频率振荡等)的响应特性,此时忽略延时的影响可能带来较大误差。

文献[19-20]对简化模型的上述性质开展了研究。采用如式(6)所示的统一结构近似各类型设备的调频动态。文献[20]指出如果系统工况变化(共模频率变化),则设备统一结构模型的参数也会变化,其即为参数的模态性。

$$G(s) = J_u s + D_u + \frac{K_u}{s} \quad (6)$$

式中: J_u 、 D_u 和 K_u 分别为模态惯量、模态阻尼和模态调频系数。

事实上,由阻尼转矩法等电力系统经典分析方法可知,式(6)所示的统一结构也可以近似用于分析

系统中的振荡过程,其与阻尼转矩法中模型的结构是一致的。此时,可采用文献[20]类似的方法将设备简化为统一结构,具体如下:

$$\begin{cases} \min_{J_{uk,i}, D_{uk,i}, K_{uk,i}} \int_{t_0}^{t_f} (\Delta P_{ik}(t) - \Delta P'_{ik}(t))^2 dt \\ \text{s.t. } \Delta P_{ik}(s) = G_i(s) \Delta \omega_k(s) \\ \Delta P'_{ik}(s) = \left(J_{uk,i} s + D_{uk,i} + \frac{K_{uk,i}}{s} \right) \Delta \omega_k(s) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $J_{uk,i}$ 、 $D_{uk,i}$ 和 $K_{uk,i}$ 为优化所得各设备第 k 个模态的统一结构参数; $\Delta P_{ik}(t)$ 和 $\Delta P'_{ik}(t)$ 分别为 t 时刻第 i 个发电设备对第 k 个模态频率的实际功率响应和统一结构近似的功率响应; t_f 和 t_0 分别为定积分的上限和下限, t_0 可取扰动初始时刻,对于共模频率, t_f 可取1.5倍频率响应最低点对应的时刻,而对于差模频率, t_f 可取2~3倍振荡周期; $\Delta \omega_k(s)$ 为系统频率响应的第 k 个分量; $G_i(s)$ 为第 i 个发电设备频率-有功传递函数。当仅区分共模/差模而不区分模态的具体序数时,可将 $J_{uk,i}$ 、 $D_{uk,i}$ 、 $K_{uk,i}$ 分别称为(共模/差模)惯量、阻尼、调频系数,记为 $J_{ucm,i}$ / $J_{udm,i}$ 、 $D_{ucm,i}$ / $D_{udm,i}$ 、 $K_{ucm,i}$ / $K_{udm,i}$ 。

由以上分析可知,简化模型的参数具有模态性,该性质使分析更为复杂,但也为针对不同频率分量单独设计惯量、阻尼的调频参数提供了可能性。2.2节将基于此提出一种考虑多频率分量的调频控制设计方法。

2.2 考虑惯量、阻尼参数模态特性的调频控制设计

利用将高阶调频动态简化为统一结构后参数的模态性,提出一种虚拟同步机模态惯量、阻尼设计方法,其调频环节如图3所示。

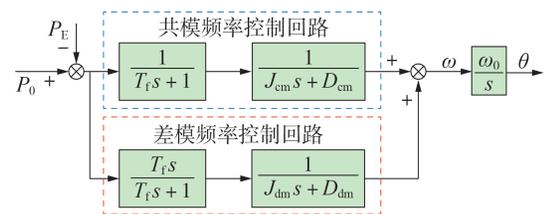


图3 考虑频率模态特性的调频控制框图

Fig.3 Control block diagram of frequency modulation considering frequency modal characteristics

该控制环节的有功-频率传递函数如下:

$$\frac{\Delta \omega}{\Delta P} = - \frac{1}{\underbrace{(J_{cm} s + D_{cm})(T_f s + 1)}_{\text{共模部分}}} + \frac{T_f s}{\underbrace{(J_{dm} s + D_{dm})(T_f s + 1)}_{\text{差模部分}}} \quad (8)$$

式中:与式(7)所示优化问题求解得到的共模/差模惯量等参数区分,将 J_{cm} / J_{dm} 、 D_{cm} / D_{dm} 分别称为共模/差模回路惯量、阻尼控制参数; T_f 为滤波时间常数; $\Delta P = P_E - P_0$ 为功率偏差, P_E 为虚拟同步机有功功率, P_0 为功率给定值。

该调频控制由共模频率控制回路与差模频率控制回路构成。对于共模频率,其动态及对应的功率响应动态较缓慢,故该分量进入差模控制回路时将被高通滤波器阻断。进而可知,理想情况下,设备对共模频率的控制作用主要由共模回路决定,即共模惯量 J_{cm} 与阻尼 D_{cm} 分别近似等同于共模回路控制参数 J_{cm} 、 D_{cm} 。类似地,对于差模频率,其响应则主要受差模回路的 J_{dm} 、 D_{dm} 等参数影响。由于该控制近似对不同模态频率分量呈现不同的惯量和阻尼特性,故将其称为多模态惯量和阻尼控制。

为更直观地说明所提控制效果,将其应用到第1章中的2种典型单机系统进行对比分析,如附录A图A2和图4所示。初始情况下 $J_{cm}=J_{dm}=10$ p.u., $D_{cm}=D_{dm}=10$ p.u., $T_f=0.16$ s。

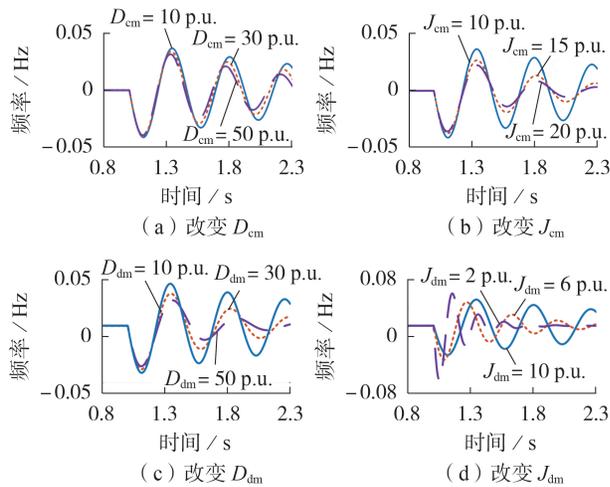


图4 单机无穷大系统中控制参数变化的影响

Fig.4 Influence of control parameter variation in single-machine infinite-bus system

由图A2可知,对于单机带负荷系统,改变共模回路控制参数对共模频率的影响与第1章中类似,而改变差模回路控制参数对该系统频率响应几乎没有影响。类似地,对于单机无穷大系统,改变差模回路控制参数对频率振荡的影响与第1章中类似,而改变共模参数对频率振荡的影响相对较小。1个例外是图4(b)、(d)中,增大共模惯量时,振荡也得到较明显的抑制;减小差模惯量时,对振荡阻尼比的提升也优于图2(d),原因在于无法做到各模态控制的完全解耦,具体作用机理见附录B。不过这种耦合给所提控制带来了好的影响,这是因为设计的差模惯量一定小于等于共模惯量,此时振荡抑制效果更好,而引入差模回路时,对共模回路控制影响较小,可达到控制目标。

由以上分析可知,所提控制近似实现了共模、差模控制的解耦,可对共模、差模频率呈现所需的惯量、阻尼特性,以改善多频率分量响应,减小频率空

间分布差异,进而改善频率空间分布特性。还需要说明的是,多机系统存在不只一个差模频率分量。对于不同的差模频率分量,振荡频率并不相同。理论上可以针对不同频率分量进行精细化设计,这将是未来的研究内容。

2.3 调频控制参数整定

接下来讨论该控制器中参数整定方法。首先需要说明的是,如图4所示,所提控制可对不同分量近似解耦,但不是完全解耦。各模态分量控制之间存在一定耦合。考虑到参与调频是虚拟同步机的基本功能之一,而提供额外的振荡阻尼可视为一个辅助功能。故在设计时可优先保证共模控制效果,并在此基础上设计差模控制参数。参数整定方法具体包含如下4个步骤,如附录C图C1所示。

1)设计共模回路控制参数 J_{cm} 、 D_{cm} 。

对于共模回路控制参数 J_{cm} 、 D_{cm} ,其设计目标是减小系统最大频率偏差、频率变化率。为此,可以在电网导则对虚拟惯量等调频参数要求的基础上^[21],结合实际经验进行设计。

若追求更好的共模控制效果,则还可根据实际需求选择优化目标并考虑系统运行时存在的约束建立优化问题,通过求解优化问题来设计参数。例如,式(9)为以频率最大偏移量最小为目标,考虑能量约束的优化问题。

$$\begin{cases} \min_{J_{cm}, D_{cm}} \Delta\omega_{cm_max} \\ \text{s.t. } \Delta P_{VSG}(s) = (J_{cm}s + D_{cm})\Delta\omega_{cm}(s) \\ \int_{t_0}^{t_f} \Delta P_{VSG}(t)dt \leq E_{lim} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\Delta P_{VSG}(s)$ 为虚拟同步机调频功率; E_{lim} 为能量约束; $\Delta\omega_{cm}(s)$ 和 $\Delta\omega_{cm_max}$ 分别为共模频率响应和共模频率最大偏移量。

2)设计滤波时间常数 T_f 。

选择滤波时间常数 T_f 时,应尽可能将共模、差模频率分量筛选开来。为此,参考滤波时间常数设计方法, T_f 可按如下公式确定:

$$T_f = \frac{1}{2\pi f_c} \quad (10)$$

式中: f_c 为截止频率。在实际工程应用中,可根据经验预估共模频率与关心的差模振荡频率,取 f_c 为两者中间值。

3)设计差模回路控制参数 J_{dm} 、 D_{dm} 。

由第1章可知,减小惯量、增大阻尼有助于抑制振荡。因此,可令 J_{dm} 在 J_{cm} 的基础上适当减小,如取 $0.3J_{cm} \sim 0.5J_{cm}$;而 D_{dm} 可在 D_{cm} 的基础上适当增大,如取 $10D_{cm} \sim 20D_{cm}$,差模控制惯量、阻尼并无固定选择方式,上述仅是给出一种参考,实际工程应用中,可根据系统需求灵活设定。需要指出的是,差模控制

惯量不可过小,否则初始时刻对应节点在自身扰动下会有较大的频率波动。而差模控制阻尼可取较大值,其在抑制差模振荡时消耗的能量接近于0,受限制较小。

4) 差模控制参数校验。

考虑到本文控制对不同分量并未完全解耦,引入差模控制回路后难免会与共模参数的设计产生冲突。由于优先保证共模,在设计完 J_{dm} 、 D_{dm} 后应分析引入差模控制回路后对共模回路参数的影响,在没有差模回路时,将控制传递函数式(8)代入式(7)进行求解,得到的共模参数 J_u 、 D_u 严格等于所设计的控制参数 J_{cm} 、 D_{cm} ,而引入差模回路可能导致 J_u 、 D_u 发生一定偏移。由于优先保证共模,在设计完 J_{dm} 、 D_{dm} 后应校验其对共模控制的影响,若 J_u 、 D_u 与 J_{cm} 、 D_{cm} 偏差达到一定阈值(例如10%,可根据实际需求确定),则改变 J_{dm} 、 D_{dm} ,使其靠近 J_{cm} 、 D_{cm} ,直至共模参数偏移在给定范围之内。

2.4 与现有虚拟同步机调频控制对比

已有的虚拟同步机优化策略与本文所提控制策略目标一致,均是聚焦于频率响应特性的改善,但通常只是针对某一频率分量(共模或差模),即改善某一频率分量响应特性的同时可能会恶化其他频率分量响应特性。

1) 改善共模频率最低点、准稳态偏差等指标。

在改善共模频率响应特性方面,文献[22-23]基于大电网进行仿真,指出增大虚拟同步机的惯量有利于改善频率响应最低点及频率变化率等特征。然而,由第1章分析可知,较大的惯量会恶化系统差模频率响应特性,减小频率振荡阻尼比,严重时会造成频率振荡失稳。

考虑到单独改变惯量对共模频率响应改善效果未必理想以及引发差模频率振荡失稳等问题,文献[24]提出自适应惯量与阻尼协同控制策略,在频率响应动态过程中频率偏差与频率变化率乘积为正时增大惯量并保持阻尼恒定,频率偏差与频率变化率乘积为负时增大阻尼并保持惯量恒定。

以系统受到扰动后,频率跌落至最低点后频率恢复过程为例。当忽略差模频率动态时,对于从扰动开始至频率达到最低点的过程,由于频率偏差为负,频率变化率为负,二者乘积为正,根据文献[24]所提的控制,该过程保持阻尼恒定并增大惯量;对于从频率最低点恢复至初始频率的过程,由于频率偏差为负,频率变化率为正,二者乘积为负,该过程保持惯量恒定并增大阻尼。该控制策略对于共模频率有着较好的改善效果。然而,当系统差模频率不可忽略时,共模频率动态叠加差模频率振荡,从扰动开始时刻,频率偏差恒为负,频率变化率随着差模频率振荡而正负交替变化,从而导致系统周期性增大惯

量和阻尼。一方面可能会影响共模频率的控制效果,使得共模频率偏离控制期望;另一方面,由于增大惯量及阻尼对差模频率影响相反,这种周期变化可能会恶化差模频率响应。因此,文献[24]所提控制在差模频率动态无法忽略的系统中可能不适用。

与此类控制相比,本文所提多模态惯量和阻尼控制既可改善共模频率最低点等指标,亦可有效控制差模频率振荡。

2) 抑制差模频率振荡。

在改善差模频率响应特性方面,由上文分析可知,适合共模/差模频率的惯量、阻尼参数并不一致。若直接通过改变惯量与阻尼参数来抑制振荡,则难以兼顾共模频率的需求。因此,文献[25]不直接调节虚拟同步机的惯量、阻尼参数,而借鉴同步机电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)的设计思路,通过改变无功/电压控制来抑制振荡。其提出一种虚拟PSS控制方法,控制框图如附录C图C2所示。

此类控制通过改变电压来抑制频率振荡,依赖于系统中有功-无功、频率-电压之间的耦合。为使控制达到理想的效果,需要对整个系统的有功、无功动态过程进行详细建模,控制设计较为复杂。此外,由于控制效果与外界电网相关,此类控制在不同系统中的效果可能有较大差别。例如,当系统中负荷主要为恒阻抗时,由于其可对电压动态进行有功响应,增加了系统中的频率-电压耦合,故虚拟PSS控制的效果可能较好。而当系统中负荷主要为恒功率时,其不响应电压波动,则虚拟PSS的效果可能减弱。虚拟PSS在抑制振荡过程中带来了额外的电压波动,考虑到暂态过程中电网电压不可波动过大,虚拟PSS可能达不到理想的振荡抑制效果。

与此类控制相比,所提多模态惯量和阻尼控制仅涉及频率-有功回路,通过改变惯量、阻尼特性来抑制振荡,物理意义清晰、设计简单、易于指导工程实践,而且适用性强,在不同系统中的振荡抑制效果均是可以预期的。本文算例中将对所提控制与虚拟PSS进行对比验证。

还值得一提的是,同步机控制主要有如下2个自由度:通过励磁环节调节电压,通过原动机控制调节频率。由于原动机响应较慢,而系统中振荡较快,因此只能通过电压控制中叠加PSS来抑制振荡。与之不同的是,虚拟同步机控制灵活且快速,通过频率控制来抑制振荡可能是更直接、更符合常理的。如上文所述,通过电压控制抑制振荡,设计较为复杂,且不同系统中效果存在差异。

3 算例分析

下面基于MATLAB/Simulink仿真平台,采用

两机系统、IEEE 39 节点系统和单机无穷大系统,对所提多模态惯量和阻尼控制的有效性、适应性和在电网电压跌落过程中的暂态稳定性进行验证。

3.1 两机系统

两机系统拓扑图如附录 D 图 D1 所示。在负荷为恒阻抗负荷与恒功率负荷 2 种场景下,将所提多模态惯量和阻尼控制(图 1 中摇摆方程控制环节替换为图 3)与常规虚拟同步控制(图 1)以及文献[25]中虚拟 PSS 控制(附录 C 图 C2)进行对比,说明所提控制的有效性和适应性。其中,假设共模控制参数已为较优值,主要对比不同控制对差模频率的抑制效果。

该系统中,节点 1、2 为设备节点,节点 3 为两设备间的负荷节点。节点 1、3 以及节点 2、3 之间的线路电抗分别为 $X_1=0.1$ p.u. 和 $X_2=0.6$ p.u.。恒阻抗负荷为 $R_{Load}=0.625$ p.u.、 $X_{Load}=5$ p.u.。恒功率负荷为 $P_{Load}=1.40$ p.u.、 $Q_{Load}=0.175$ p.u.。2 种负荷场景在稳态下的潮流基本一致。

附录 D 表 D1 给出了 3 个算例中虚拟同步机控制参数。表中:算例 1 采用常规控制,算例 2 采用多模态惯量和阻尼控制,算例 3 采用虚拟 PSS 控制;a、b 分别表示负荷类型为恒阻抗负荷、恒功率负荷。算例 2 的控制参数是基于 2.3 节多模态控制参数整定方法设计的,具体如下。首先,对于共模回路控制参数 J_{cm} 与 D_{cm} ,根据经验均取为 10 p.u.。当然可以通过建立优化问题进行更精细的设计,但所提控制的关键在于对不同模态体现不同的惯量和阻尼,故不详细讨论共模参数的设计。然后,设计滤波时间常数,该系统中差模振荡频率接近于 2 Hz。共模频率大约在 4 s 达到最低点,近似视振荡周期为 12 s,即振荡频率为 0.1 Hz 左右,为区分 2 种模态,取 $f_c=1$ Hz。其次,设计差模回路控制参数。差模回路控制惯量/阻尼在共模回路控制惯量/阻尼的基础上,分别适当减小/增大,取 $J_{dm}=5$ p.u. 与 $D_{dm}=100$ p.u.。最后,校验差模回路控制对共模参数的影响。表 1 给出了采用 2.1 节方法所得该系统中两机的模态惯量与阻尼参数。表中, J_{ucm} 、 D_{ucm} 、 J_{udm} 、 D_{udm} 均为标么值。由算例 2-a 对应参数可知,采用所提控制后,虚拟同步机的共模惯量与阻尼变化较小,而差模惯量、阻尼分别显著变小、增大,满足需求。还需要说明的是,由于虚拟 PSS 通过改变电压抑制振荡,无法通过设备的频

表 1 两机系统中各设备模态惯量和阻尼

Table 1 Modal inertia and damping of each device in two-machine system

设备	模态惯量、阻尼	
	算例 1-a	算例 2-a
虚拟同步机	$[J_{ucm}, D_{ucm}] = [10, 10]$	$[J_{ucm}, D_{ucm}] = [9.89, 10.48]$
	$[J_{udm}, D_{udm}] = [10, 10]$	$[J_{udm}, D_{udm}] = [5.18, 122.2]$
同步机	$[J_{ucm}, D_{ucm}] = [9.62, 1.15]$	$[J_{ucm}, D_{ucm}] = [9.51, 1.68]$
	$[J_{udm}, D_{udm}] = [9.37, 0.39]$	$[J_{udm}, D_{udm}] = [9.98, 0.51]$

率-有功传递函数反应其阻尼特性,表中未给出其对应参数。

下面基于算例 1-a、2-a 与 3-a 仿真分析 3 种控制对差模振荡的抑制情况。考虑 $t=1$ s 时负荷功率突增 0.1 p.u.,图 5 对比了这 3 个算例中各发电设备频率轨迹以及其中的差模分量。

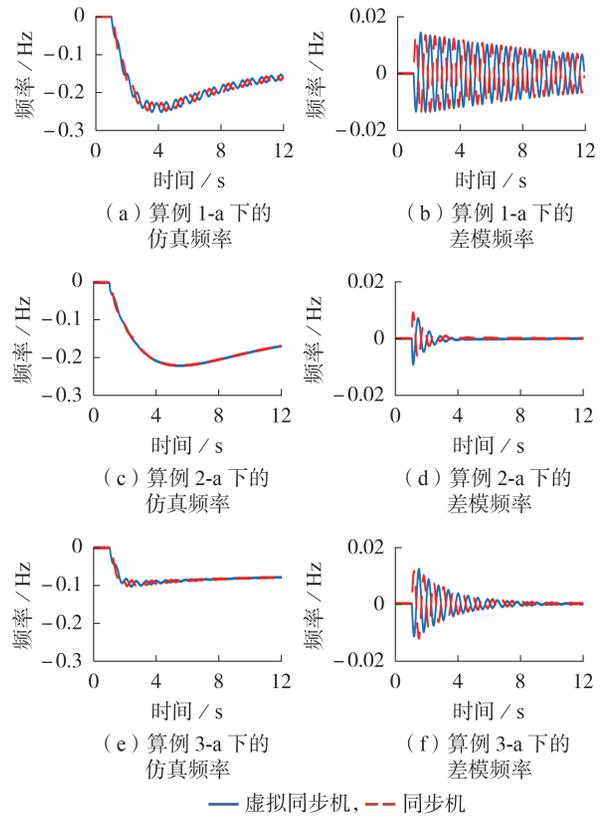


图 5 3 种控制差模振荡对比

Fig.5 Comparison of differential mode oscillation among three kinds of control

由图 5 可知:采用常规控制(算例 1-a)时,差模频率阻尼比较小($\zeta=0.7\%$),频率振荡衰减较慢,频率空间分布差异较大;采用所提控制(算例 2-a)后,阻尼比得到提升($\zeta=14.7\%$),差模振荡衰减较快,频率空间分布差异减小,这与表 1 中的结论相符;采用虚拟 PSS 控制(算例 3-a)时,阻尼比 $\zeta=4.6\%$, ζ 也得到提升,但小于所提控制,虽然可通过增大虚拟 PSS 的增益来进一步增强该控制效果,但代价是更大的电压偏移,这将在后续分析中进一步说明。

通过 3 个算例的恒阻抗负荷、恒功率负荷 2 种场景来对比分析所提控制与虚拟 PSS 控制的适应性。

3 种控制在恒阻抗与恒功率负荷场景下的对比如附录 D 图 D3 所示。由图可知:常规虚拟同步控制下,2 种负荷场景均有一定程度的差模振荡;虚拟 PSS 控制下,负荷为恒阻抗负荷时差模振荡抑制效果较好,而负荷为恒功率时效果较差,这是因为采用恒阻抗负荷可增强频率-电压之间的耦合,有利于虚

拟 PSS 控制发挥作用,恒功率负荷则不然;所提多模态惯量和阻尼控制下,无论负荷是恒阻抗还是恒功率,振荡均得到较好的抑制,这说明了所提控制具有较强适应性,各种场景下均能较好地抑制振荡。还值得指出的是,在常规控制下,相对恒功率负荷,恒阻抗负荷下频率轨迹偏移更小。这是因为受扰后潮流变化引起负荷电压降低,恒阻抗负荷消耗的有功功率减少,而恒功率负荷不受此影响。采用本文所提控制,系统共模频率及电压响应与常规控制下基本一致。而采用虚拟 PSS 时,其在频率受扰过程中降低了设备和负荷电压,特别是在负荷为恒功率时,由于振荡抑制效果较差,PSS 持续有较大输出。由此可见,虚拟 PSS 在抑制振荡过程中带来了额外的电压波动,且不一定较好地抑制振荡。此外,在恒功率负荷场景下负荷电压跌落到 0.9 p.u. 左右,已为较低值,难以进一步通过增大 PSS 增益来增强其效果。

3.2 十机系统

采用 10 机 39 节点系统,其拓扑如附录 D 图 D4 所示,验证所提调频控制策略在更大规模系统中的适用性。系统中发电设备 G_4 、 G_6 、 G_{10} 为同步机,其余均为虚拟同步机。在节点 8 处施加 0.6 p.u. 有功阶跃扰动,并通过改进控制以改善系统中的差模频率分量响应特性。设置如下 3 个算例:算例 4 为常规控制;算例 5 中改进控制设置在 G_8 处;算例 6 中改进控制设置在 G_9 处。3 个算例的控制参数如附录 D 表 D2 所示。

图 6 给出了 G_8 、 G_9 这 2 个发电设备节点的仿真频率轨迹及差模频率轨迹。由图可知,算例 4 中系统差模频率阻尼比较小,系统稳定性较弱。而算例 5 及算例 6 中差模频率振荡快速衰减,系统稳定性提升。相较于常规控制,采用多模态控制后,频率空间分布差异减小,频率空间分布特性得到改善。与此同时,2 个算例中共模频率并未有明显变化。综合上述分析,所提控制策略适用于大系统。

附录 D 图 D5 给出了十机系统中随参数 J_{dm} 、 D_{dm} 变化的主导特征值轨迹。由图可知,随着 J_{dm} 的减小、 D_{dm} 的增大,系统主导特征值左移,阻尼比增大,振荡分量衰减加快,系统稳定性增强,进一步验证了所提控制的有效性。

3.3 单机无穷大系统

大扰动下暂态稳定性是虚拟同步机控制设计中所关注的关键性能之一。由于差模频率本质上表征了设备间达到同步的过程(各设备频率收敛于共模频率),增大差模阻尼也就是增强了设备同步过程的阻尼,故所提控制也可提升设备的暂态稳定性。下面通过单机无穷大系统进行具体说明。

由于在低电压过程中设备有可能达到电流饱和,所以分变流器饱和与变流器未饱和 2 种情况讨

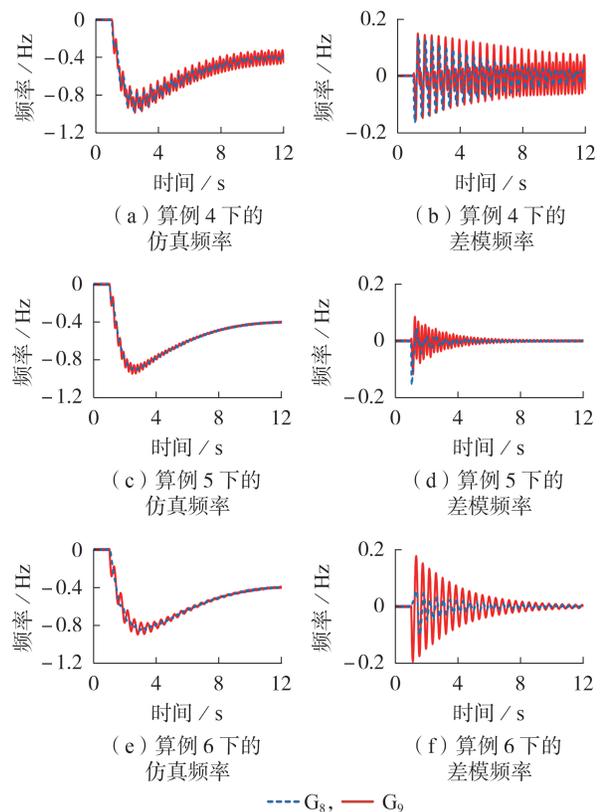


图 6 十机系统中频率响应对比

Fig.6 Comparison of frequency response in ten-machine system

论^[26]。考虑以下 2 种情况:情况 1,电网电压跌落幅度较小(电网电压 $U_f = 0.8$ p.u.),变流器未饱和;情况 2,电网电压跌落幅度较大($U_f = 0.4$ p.u.),变流器饱和。另外,设电流限幅 $I_{max} = 1.15$ p.u.。

对于以上 2 种情况,令 $t=4$ s 时电网电压跌落,并在 $t=7$ s 时恢复。设置如下 2 个算例:算例 7 中设备采用常规控制,算例 8 中设备采用本文所提控制,参数与两机算例中相同。设备稳态功率 $P_s = 0.5$ p.u.。图 7 及附录 D 图 D6 分别给出了 2 种情况下时域仿真轨迹,图中功率 P 、电压 U 、电流 I 和功角 δ 均为标幺值。

由图 7 可以看出:在变流器未饱和,采用本文所提控制方法时设备能够很快进入稳定平衡点,并在故障切除后恢复至初始运行点;而传统虚拟同步机控制在故障时及故障切除后均需要更长的时间进入稳态,频率、功率振荡时间较长。

由图 D6 可以看出:在电网电压跌落更严重时,变流器饱和,若发电设备采用所提控制方法,则功角增大缓慢,并在故障切除后可以恢复到初始运行点。而传统虚拟同步机控制在故障后发生暂态失稳,故障切除后无法恢复至初始运行点。值得指出的是,在电网电压跌落至 0.4 p.u. 时,由于 $P_s > I_{max} U_f$,故障期间系统没有平衡点^[26]。综合以上分析,相较于常规虚拟同步控制,本文所提控制具有较好的暂态性能。

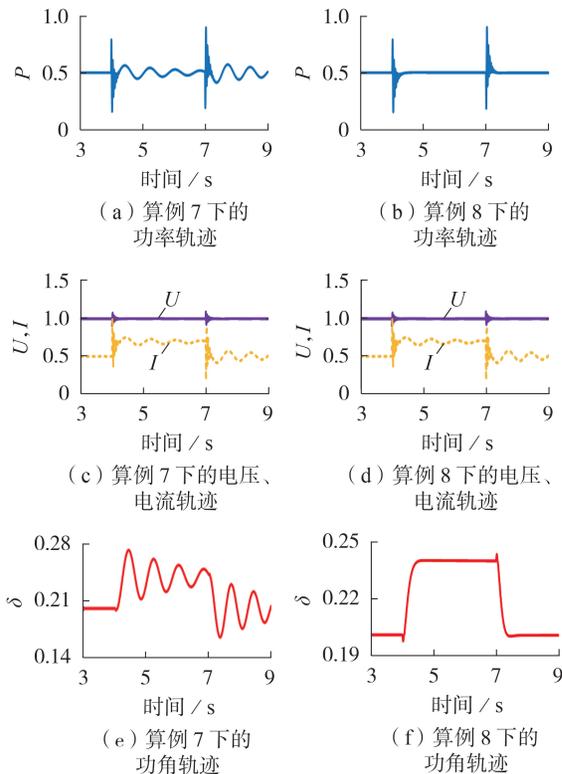


图7 变流器未饱和情况下的暂态仿真对比

Fig.7 Comparison of transient simulation under unsaturated condition of converter

4 结论

针对不同频率分量对设备惯量和阻尼需求不同的问题,提出考虑惯量和阻尼模态特性的新能源调频控制策略,主要结论如下。

1)对于共模频率,增大虚拟惯量、阻尼可减小频率最大偏差、频率变化率等指标,但考虑调频容量限制、调频经济性等因素,惯量、阻尼参数也不能过大。对于差模频率,减小虚拟惯量、增大阻尼系数可增大其阻尼比,加快频率振荡衰减。

2)基于将高阶调频动态简化为惯量和阻尼参数的模态特性,所提出的多模态惯量和阻尼控制可满足不同频率分量的调节需求。其中,在差模振荡抑制方面,相比于基于无功/电压控制的振荡抑制方法,本文所提方法物理意义清晰、设计简单,在恒阻抗、恒功率负荷等不同场景下均有良好效果。

本文以虚拟同步机为对象开展研究,但基于模态特性的调频控制方法也适用于跟网型设备,这将是未来的研究内容之一。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 张栋凯,陈羽飞,姜婷玉,等. 电力系统的电力电子化趋势分析与探讨[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(4):377-384.
ZHANG Dongkai, CHEN Yufei, JIANG Tingyu, et al. Analysis

and discussion of electrification trend of power system[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(4): 377-384.

- [2] 韩泽雷,鞠平,秦川,等. 面向新型电力系统的频率安全研究综述与展望[J/OL]. 电力自动化设备. [2023-05-29]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202303007>.
- [3] 贺海磊,张彦涛,孙晓强,等. 考虑频率安全约束的西北电网新能源开发及直流外送规模评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2021,41(14):4753-4762.
HE Hailei, ZHANG Yantao, SUN Xiaoqiang, et al. Evaluation method renewable energy development scale and DC transmission scale of China northwest power grid by considering frequency security constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2021,41(14):4753-4762.
- [4] CHAN M L, DUNLOP R D, SCHWEPPE F. Dynamic equivalents for average system frequency behavior following major disturbances[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1972(4):1637-1642.
- [5] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990,5(3):720-729.
- [6] 赵大伟,马进,钱敏慧,等. 光伏电站参与大电网一次调频的控制增益研究[J]. 电网技术, 2019,43(2):425-435.
ZHAO Dawei, MA Jin, QIAN Minhui, et al. Research on control gain for photovoltaic power plants participating in primary frequency regulation of large power grid[J]. Power System Technology, 2019,43(2):425-435.
- [7] WANG Siqi, TOMSOVIC K. Fast frequency support from wind turbine generators with auxiliary dynamic demand control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019,34(5):3340-3348.
- [8] QI Yang, DENG Han, LIU Xiong, et al. Synthetic inertia control of grid-connected inverter considering the synchronization dynamics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022,37(2):1411-1421.
- [9] CARLOS C R, MARC C M, EDUARDO P A, et al. Stability analysis of systems with high VSC penetration: where is the limit[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 2021-2031.
- [10] GAO Huisheng, YUAN Hui, XIN Huanhai, et al. Nodal frequency performance of power networks[C]//2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection. Xi'an, China: IEEE, 2019:1838-1842.
- [11] 王清,薛安成,张晓佳,等. 双馈风机下垂控制对系统小扰动功角稳定的影响机理分析[J]. 电网技术, 2017,41(4):1091-1099.
WANG Qing, XUE Ancheng, ZHANG Xiaojia, et al. Mechanism analysis of droop control of DFIG influence on system small-signal dynamic stability based on damping torque analysis[J]. Power System Technology, 2017,41(4):1091-1099.
- [12] 汪梦军,郭剑波,马士聪,等. 新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2023,43(5): 1672-1694.
WANG Mengjun, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Review of transient frequency stability analysis and frequency regulation control methods for renewable power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023,43(5):1672-1694.
- [13] 陈润泽,吴文传,孙宏斌,等. 双馈风电机组惯量控制对系统小干扰稳定的影响[J]. 电力系统自动化, 2014,38(23):6-12.
CHEN Runze, WU Wenchuan, SUN Hongbin, et al. Impact of control of DFIG wind turbines on system small-signal stability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014,38(23):6-12.
- [14] 兰征,龙阳,曾进辉,等. 考虑超调的虚拟同步发电机暂态功率

- 振荡抑制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(11): 131-141.
LAN Zheng, LONG Yang, ZENG Jinhui, et al. Transient power oscillation suppression strategy of virtual synchronous generator considering overshoot[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(11): 131-141.
- [15] SHEN Jiakai, LI Weidong, LIU Liu, et al. Frequency response model and its closed-form solution of two-machine equivalent power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2162-2173.
- [16] GAO Huisheng, XIN Huanhai, HUANG Linbin, et al. Common-mode frequency in converter-integrated power systems: definition, analysis, and quantitative evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(6): 4846-4860.
- [17] 高晖胜. 新能源电力系统模态频率: 定义、分析与控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
GAO Huisheng. Modal frequency in renewable-integrated power systems: definition, analysis and control [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [18] 刘德伟, 郭剑波, 黄越辉, 等. 基于风电功率概率预测和运行风险约束的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 9-15.
LIU Dewei, GUO Jianbo, HUANG Yuehui, et al. Dynamic economic dispatch of wind integrated power system based on wind power probabilistic forecasting and operation risk constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 9-15.
- [19] 胡光, 高晖胜, 辛焕海, 等. 考虑惯量模态特征的电力系统频率性能量化方法[J/OL]. 中国电机工程学报. [2023-08-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20230310.0935.002.html>.
- [20] 高晖胜, 辛焕海, 黄林彬, 等. 新能源电力系统的共模频率分析及其特征量化[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 890-900.
GAO Huisheng, XIN Huanhai, HUANG Linbin, et al. Characteristic analysis and quantification of common mode frequency in power systems with high penetration of renewable resources [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 890-900.
- [21] 风电场接入电力系统技术规定 第1部分 陆上风电: GB/T 19963.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [22] 秦晓辉, 苏丽宁, 迟永宁, 等. 大电网中虚拟同步发电机惯量支撑与一次调频功能定位辨析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 36-43.
QIN Xiaohui, SU Lining, CHI Yongning, et al. Functional orientation discrimination of inertia support and primary frequency regulation of virtual synchronous generator in large power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 36-43.
- [23] 张峰, 李柏慷, 丁磊. 考虑风电调频能量联动分配的时变调频参数设定方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 188-197.
ZHANG Feng, LI Baikang, DING Lei. Parameter setting method of time-varying frequency regulation considering linked energy distribution of wind power for frequency regulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 188-197.
- [24] LI Dongdong, ZHU Qianwei, LIN Shunfu, et al. A self-adaptive inertia and damping combination control of VSG to support frequency stability [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(1): 397-398.
- [25] 马钦林, 杨欢, 屈子森, 等. 改善虚拟同步发电机阻尼特性的设计方法[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 269-275.
MA Yilin, YANG Huan, QU Zisen, et al. Design method for improving damping characteristics of virtual synchronous generator [J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 269-275.
- [26] 黄林彬. 高比例电力电子装备电力系统的同步稳定分析与控制设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
HUANG Linbin. Synchronization stability and control of power systems with high-penetration power electronics [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.

作者简介:

陶俊(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源并网稳定性分析与控制(**E-mail**: 22160187@zju.edu.cn);
高晖胜(1995—), 男, 博士, 通信作者, 主要研究方向为电力系统频率稳定分析与控制(**E-mail**: gaohuisheng@zju.edu.cn);
辛焕海(1981—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为新能源电力系统稳定性分析与控制(**E-mail**: xinhh@zju.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Analysis and control design of inertia and damping of VSG considering frequency modal characteristics

TAO Jun¹, GAO Huisheng², XIN Huanhai^{1,2}, WANG Zijun¹, YANG Yongheng^{1,2}, WU Yingzi³

(1. Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

Abstract: With the increasing penetration rate of renewable energy, the system frequency modulation resources are insufficient and unevenly distributed, and the difference between node frequency response is large. The frequency modulation control design of the equipment needs to consider not only the global component in the system frequency response, but also the non-global component. Therefore, an inertia and damping design method of virtual synchronous machine considering frequency multi-modal components is proposed. Firstly, the influence of virtual inertia and damping control on different frequency modal components is analyzed. Secondly, based on the unified structure model of frequency modulation, the high-order frequency regulation dynamics can exhibit different inertia and damping characteristics for different frequency components, and then a multi-modal inertia damping control design method is proposed based on this characteristic. Finally, the effectiveness of the proposed multi-modal frequency control strategy is verified by simulation, which can improve the response characteristics of multi-frequency components at the same time.

Key words: frequency response difference; multi-modal characteristics; unified structure model; modal inertia and damping; frequency modulation control strategy

附录 A

表 A1 同时改变 J 及 D 对共模/差模频率的影响

Table A1 Influence of changing J and D on common mode/differential mode frequency at same time

频率响应特性	增大 J , 增大 D	减小 J , 减小 D	减小 J , 增大 D	增大 J , 减小 D
共模频率最低点	提升	降低	提升 (增大 D 产生的正面效果大于减小 J 产生的负面效果) 降低 (增大 D 产生的正面效果小于减小 J 产生的负面效果)	提升 (增大 J 产生的正面效果大于减小 D 产生的负面效果) 降低 (增大 J 产生的正面效果小于减小 D 产生的负面效果)
差模频率振荡收敛	加快 (增大 D 产生的正面效果大于增大 J 产生的负面效果) 减缓 (增大 D 产生的正面效果小于增大 J 产生的负面效果)	加快 (减小 J 产生的正面效果大于减小 D 产生的负面效果) 减缓 (减小 J 产生的正面效果小于减小 D 产生的负面效果)	加快	减缓

表 A1 给出了同时改变 J 及 D 对共模频率、差模频率影响。针对共模频率，由第 2 节的分析可知，增大惯量以及阻尼系数将减小扰动下的共模频率波动。同时改变 J 和 D 可分为以下 2 种情况讨论。第 1 种情况：增大 J ，增大 D （减小 J ，减小 D ）。第 2 种情况：增大 J ，减小 D （减小 J ，增大 D ）。对于第 1 种情况，同时增大 J 及 D 可以提升频率最低点，且相比于只增大某一参数，其提升效果更为显著，如图 A1 (a) 所示；同时减小 J ，减小 D 的情况本质上与同时增大 J ，增大 D 一致，不予详细讨论。对于第 2 种情况，当增大 J 产生的正面效果大于减小 D 产生的负面效果时，频率最低点提升；反之，频率最低点降低，如图 A1 (b) 所示。同时减小 J ，增大 D 情况本质上与同时增大 J ，减小 D 一致，不予详细讨论。

针对差模频率，由第 2 节分析可知，减小 J ，增大 D 可以增大频率振荡阻尼比。同时改变 J 和 D 也可分为以下 2 种情况讨论。第 1 种情况：减小 J ，增大 D （增大 J ，减小 D ）。第 2 种情况：增大 J ，增大 D （减小 J ，减小 D ）。对于第 1 种情况，相较于只减小 J 或只增大 D ，同时减小 J 并增大 D 对频率振荡抑制效果更明显，可以使得频率振荡收敛更快，如图 A1 (c) 所示。同时增大 J 及减小 D 情况本质上与同时减小 J ，增大 D 一致，不予详细讨论。对于第 2 种情况，当增大 D 产生的正面效果大于增大 J 产生的负面效果时，系统阻尼比增大，频率振荡收敛加快；反之，系统阻尼比减小，频率振荡收敛减缓，如图 A1 (d) 所示。同时减小 J 及 D 情况本质上与同时增大 J 及 D 一致，不予详细讨论。

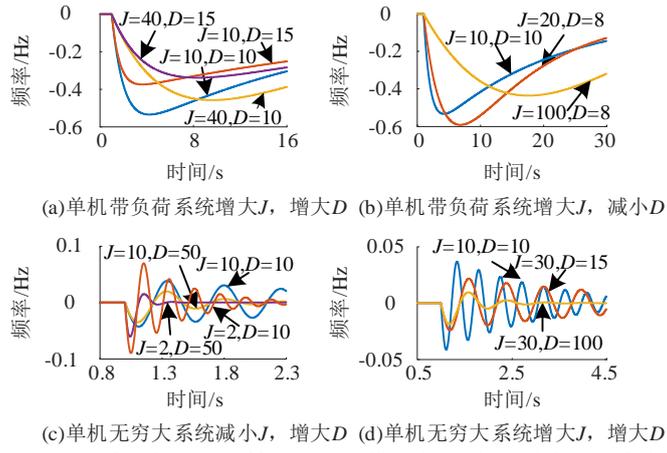


图 A1 同时改变 J 及 D 情况下单机带负荷/无穷大系统频率响应
 Fig.A1 Frequency response of single-machine load/infinite-bus system under condition of changing J and D at same time

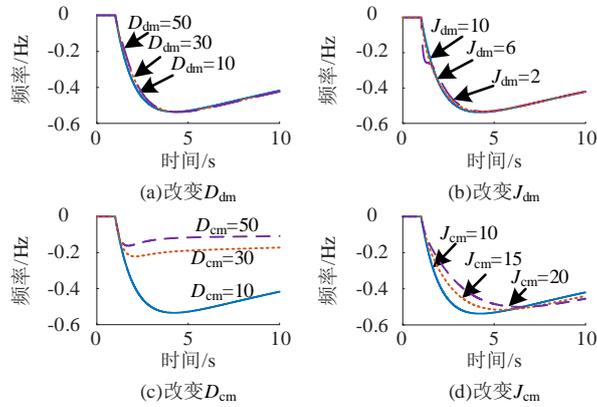


图 A2 单机带负荷系统中控制参数变化影响
 Fig.A2 Influence of control loop parameter variation on common mode frequency

附录 B

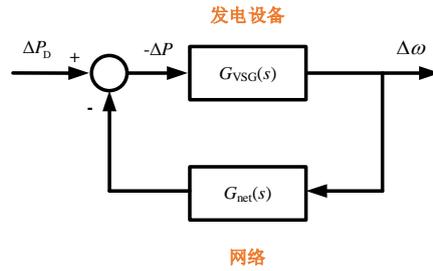


图 B1 单机无穷大系统闭环模型

Fig.B1 Closed-loop model of single-machine infinite-bus system

图 B1 给出了图 1 所示单机无穷大系统的闭环模型。图中： ΔP_D 为负荷功率扰动； ΔP 为发电设备（虚拟同步机）有功功率； $\Delta\omega$ 为虚拟同步机频率； $G_{VSG}(s)$ 为虚拟同步机有功-频率传递函数，如式(8)所示； $G_{net}(s)$ 为网络部分传递函数，其表达式如式 (B1) 所示。

$$G_{net}(s) = \omega_0 / (X s) \quad (B1)$$

式中： X 为发电设备和无穷大电网之间的电抗； ω_0 为系统标称频率（rad/s）。

参考阻抗法类似方法判断闭环系统稳定性^[B1]，当 $G_{VSG}(s)$ 与 $G_{net}^{-1}(s)$ 幅值曲线不相交，或相交交点处相位裕度大于 0° 系统稳定。并且相位裕度越大，系统稳定性越强。

图 B2 给出了网络传递函数和不同 J_{cm} 下本文所提控制策略传递函数（式(8)）波特图。由图可知，不同 J_{cm} 下式(8)幅值曲线与网络传递函数幅值曲线均有交点，且随着 J_{cm} 增大，式(8)与网络传递函数幅值交点处相位差减小，系统稳定性增强。值得注意的是，当 $J_{cm}=5$ 时（小于 $J_{dm}=10$ ），相位裕度小于 0° ，系统不稳定。将 J_{dm} 变小与将 J_{cm} 变大的效果类似。以上分析表明，减小 J_{cm} 、增大 J_{dm} 可为差模振荡提供额外的阻尼。由于所提控制设计中，差模控制惯量一定小于共模控制惯量，故上述差模/共模控制的耦合将对所提控制带来好的影响。

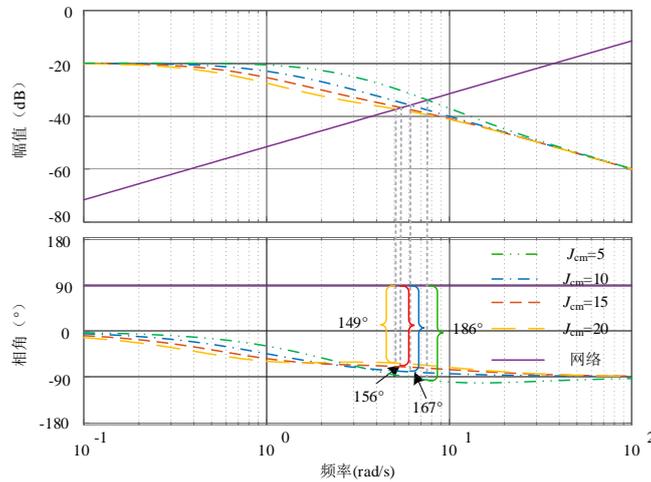


图 B2 共模控制参数 J_{cm} 对稳定性的影响

Fig.B2 Influence of common mode control parameter J_{cm} on stability

参考文献:

[B1]杨超然,宫泽旭,洪敏,等. 外环动态影响下变流器广义阻抗判据的适用性分析[J]. 中国电机工程学报,2021,41(9):3012-3023.

YANG Chaoran,GONG Zexu,HONG Min,et al. Applicability analysis of the generalized-impedance stability criterion for converters considering the outer-loop dynamics[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(9):3012-3023.

附录 C

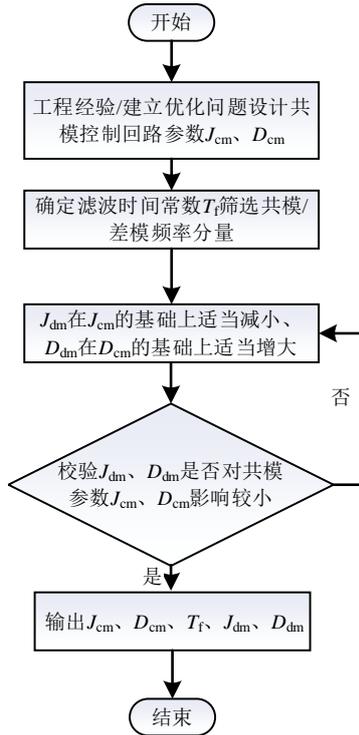


图 C1 控制参数整定流程图

Fig.C1 Control parameter tuning flowchart

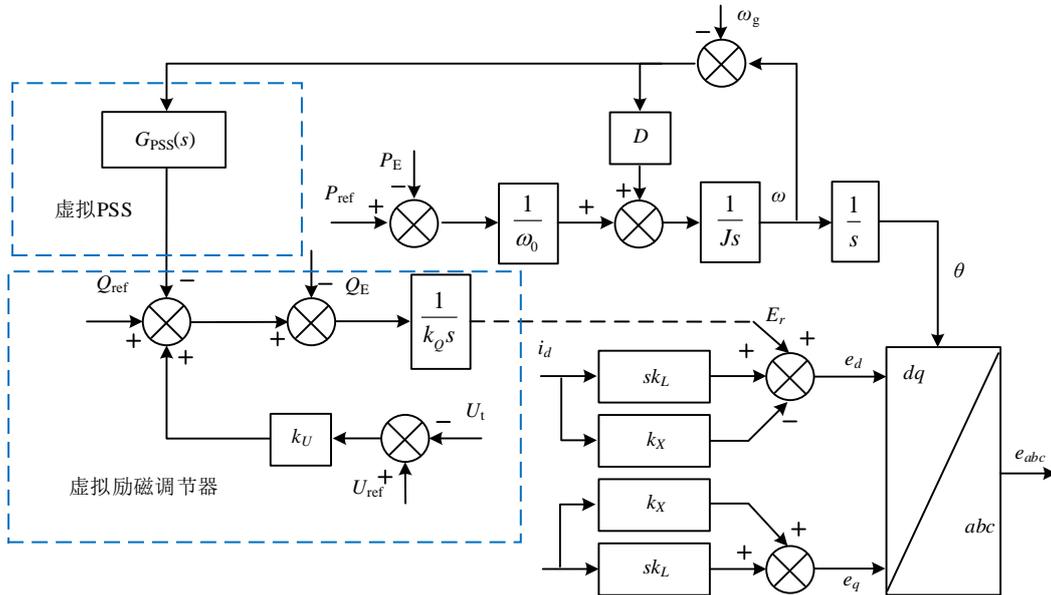


图 C2 虚拟 PSS 控制框图

Fig.C2 Virtual PSS control block diagram

图 C2 中, $G_{PSS}(s)$ 为 PSS 传递函数。文献[23]指出为简化设计, 可取 $G_{PSS}(s)$ 为常系数如下:

$$G_{PSS}(s) = k_{PSS} \quad (C1)$$

附录 D

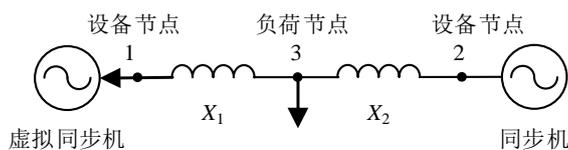


图 D1 两机系统拓扑图

Fig.D1 Two-machine system topology diagram

算例系统中的同步机为汽轮机组，同步机的频率-有功传递函数可表示为：

$$G_{SG}(s) = Js + D + G_T(s) \quad (D1)$$

式中： J 和 D 分别为同步机的惯量和阻尼系数(算例系统中分别取 10 p.u.、1 p.u.)； $G_T(s)$ 为汽轮机调速系统的传递函数(输入为频率 $\Delta\omega$ ，输出为机械功率 ΔP_M)，其模型如图 D2 所示，图中 R 、 T_G 、 T_{CH} 、 T_{RH} 、 F_{HP} 分别为 0.05、0.2、0.3、10、0.3。

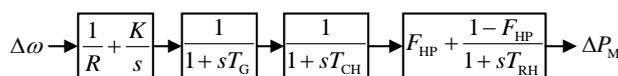


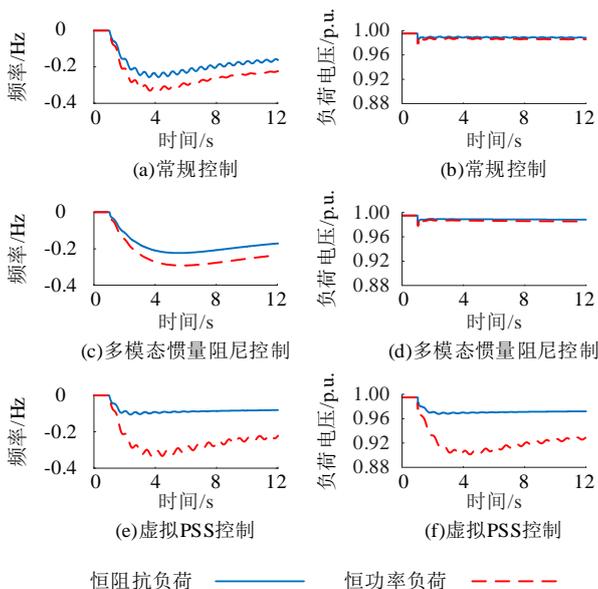
图 D2 汽轮机调速器模型

Fig.D2 Model of turbine-governor

表 D1 两机系统算例介绍

Table D1 Two-machine system example introduction

算例	主要控制参数 (p.u.)	负荷类型
算例 1 (常规控制)	$[J, D] = [10, 10]$	1-a: 恒阻抗
		1-b: 恒功率
算例 2 (多模态)	$[J_{cm}, D_{cm}] = [10, 10]$	2-a: 恒阻抗
	$[J_{dm}, D_{dm}] = [5, 100]$	2-b: 恒功率
	$T_f = 0.16s$	
算例 3 (虚拟 PSS)	$[J, D] = [10, 10]$	3-a: 恒阻抗
		虚拟 PSS 增益 $k_{vpss} = -50$ 3-b: 恒功率



恒阻抗负荷 —— 恒功率负荷 - - - -

图 D3 3 种控制在恒阻抗与恒功率负荷场景对比

Fig.D3 Comparison of three kinds of control in constant impedance and constant power load scenarios

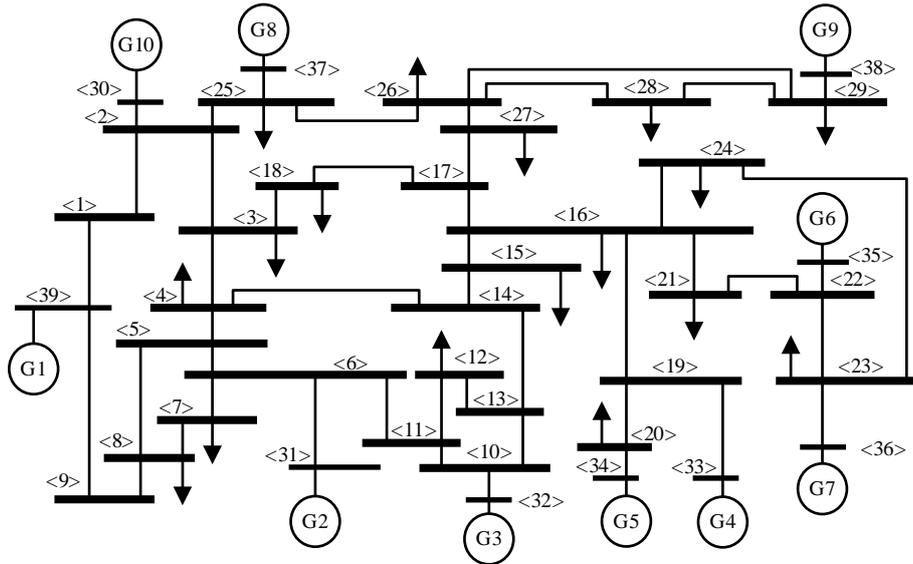


图 D4 10 机 39 节点系统结构
Fig.D4 Sturcture of 10-generator 39-bus system

该系统中， G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_5 、 G_7 、 G_8 、 G_9 为虚拟同步机， G_4 、 G_6 、 G_{10} 为同步机。为使系统中差模频率振荡更为明显，设计各发电设备参数如下： G_2 的虚拟惯量为 8，阻尼系数为 10， G_8 的虚拟惯量为 10，阻尼系数为 10，其余虚拟同步机的虚拟惯量为 1，阻尼系数设置为 0。同步机惯量系数设置为 1，阻尼系数设置为 5，调速器系统与两机算例相同。

表 D2 十机系统算例介绍
Table D2 Ten-machine system example introduction

算例	主要控制参数 (p.u.)
算例 4 (常规控制- G_8)	$[J, D] = [10, 10]$
算例 4 (常规控制- G_9)	$[J, D] = [1, 0]$
算例 5 (改进 G_8 控制)	$[J_{cm}, D_{cm}] = [10, 10]$ $[J_{dm}, D_{dm}] = [5, 150]$ $T_f = 0.16s$
算例 6 (改进 G_9 控制)	$[J_{cm}, D_{cm}] = [1, 0]$ $[J_{dm}, D_{dm}] = [1, 150]$ $T_f = 0.16s$

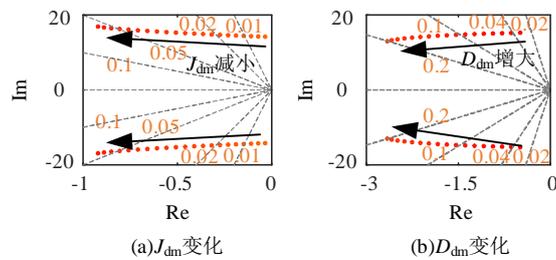


图 D5 十机系统主导特征值变化轨迹

Fig.D5 Trajectory of ten-machine system dominant eigenvalue change

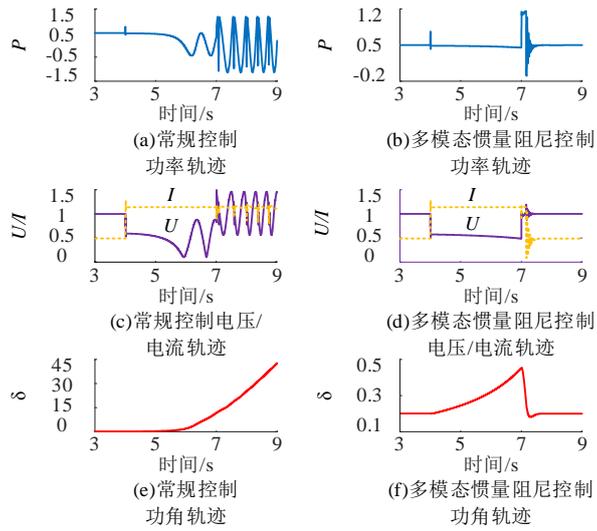


图 D6 变流器饱和情况下暂态仿真对比

Fig.D6 Transient simulation comparison under converter saturation condition