

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

杨 赞¹, 梅 飞², 张宸宇³, 缪惠宇¹, 陈虹妃¹, 郑建勇¹

(1. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096;

2. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100;

3. 国网江苏省电力有限公司 电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:虚拟同步发电机(VSG)控制将同步电机的转动惯量和阻尼系数引入到逆变器的控制中,改善了系统频率响应特性,增强了微电网抗干扰的能力,但是牺牲了一定的动态调节性能。在此基础上,提出了一种VSG转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略。建立VSG的数学模型,分析各参数对系统输出特性的影响;在VSG控制的基础上引入转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略,并给出相应参数变化情况下的稳定性分析;通过MATLAB/Simulink仿真对比定参数VSG控制与转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略的控制效果,验证了所提控制策略的可行性和有效性。

关键词:虚拟同步发电机;频率响应;转动惯量;阻尼系数;自适应控制策略

中图分类号:TM 71

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.020

0 引言

随着能源问题和环境污染问题的日益突出,传统化石能源已经逐渐无法满足人类可持续发展的目标,以可再生能源为主要能量来源的微电网受到了广泛而持续的关注^[1-3]。微电网中大部分的分布式电源需要通过逆变器等电力电子器件接入到电网中,因此逆变器具有控制灵活、暂态时间短的特点,但由于不具有惯性和阻尼,其抑制干扰和波动的能力较弱^[4]。为此,国内外学者们提出采用虚拟同步发电机(VSG),通过控制方法模拟同步发电机转子特性,使得并网逆变器也具有阻尼和惯性,从而提升逆变器抑制自身输出频率和功率波动的能力,同时也提升了抑制干扰波动的能力,增强了系统的稳定性^[5-6]。

文献[7]针对配备储能装置的分布式电源提出了一种虚拟惯性频率控制策略,使微电网既具有下垂特性又具有同步发电机的惯性特性,从而提高微电网的稳定性,抑制微电网多机并联时的功率、频率振荡。但是该控制策略下的转动惯量是恒定值,当负荷波动时,会出现频率的暂态过程过长的问题。文献[8]结合同步发电机的功角曲线,提出了一种自适应虚拟转动惯量控制策略,通过合理选取虚拟转动惯量来满足有功和频率超调小、动态响应速度

快的要求,但是没有给出虚拟转动惯量以及系数的选取原则。文献[9]提出在自适应控制策略中设定3种工作模式,在不同的工作模式下选取不同的转动惯量,优化了频率波动恢复曲线,但是并未给出3种工作模式下的转动惯量取值以及工作模式区分原则。文献[10]提出基于乒乓控制的转动惯量可调节控制策略,转动惯量根据实际情况取不同的值,从而抑制角速度的偏离并加快角速度的恢复,但是并未给出2种取值的选取原则。文献[11]提出了一种交错控制策略,转动惯量和阻尼系数在不同的时间区间内单独变化,能够减小转子角速度的变化率和角速度的偏移量,但是并未给出相应参数具体的选取原则。

本文提出了一种应用于虚拟同步发电机的转动惯量和阻尼系数协调自适应控制策略,当虚拟同步发电机转子角速度的变化率较大时,增大转动惯量;当角速度偏离量较大时,增大阻尼系数,2个变量协调控制从而抑制频率的过快变化和过大偏移,保证系统的稳定性。利用根轨迹的方法分析转动惯量、阻尼系数和调差系数对稳定性的影响。最后通过MATLAB/Simulink仿真分析了调节系数对系统性能的影响,并验证了转动惯量和阻尼系数协调自适应控制策略的可行性,其可有效缩短系统暂态过程、保证系统稳定性。

1 虚拟同步发电机的基本原理

图1为虚拟同步发电机结构示意图,虚拟同步发电机的硬件拓扑和典型的并网逆变器的结构相同,考虑同步发电机的机械方程和电磁方程,可以通过控制方法将并网逆变器模拟成传统的同步发电机。

根据传统的同步发电机的两阶模型,等效的虚

收稿日期:2018-03-23;修回日期:2018-12-15

基金项目:江苏省科技成果转化专项项目(BA2015086);江苏省重点研发计划(BE2017030);国网江苏省电力有限公司科技项目(J2018056)

Project supported by the Science and Technology Transformation Project of Jiangsu Province(BA2015086), the Key Research and Development Program of Jiangsu Province(BE2017030) and the State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Science and Technology Project(J2018056)

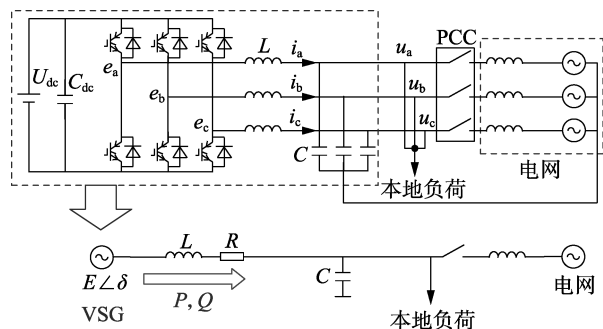


图 1 虚拟同步发电机结构

Fig.1 Structure of VSG

拟同步发电机的转子运动方程如式(1)所示。为了便于分析,假设同步发电机的极对数为 1,则同步发电机的机械角速度 ω 和电气角速度相同。

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - T_D = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

其中, J 为同步发电机的转动惯量,单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; D 为阻尼转矩所对应的同步发电机的阻尼系数,单位为 $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}$; ω_0 为电网同步角速度,即为同步发电机的额定角速度,单位为 rad / s ; T_m 、 T_e 和 T_D 分别为同步发电机的机械转矩、电磁转矩和阻尼转矩,单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$; δ 为同步发电机的功角。电磁转矩和虚拟同步发电机输出的电磁功率 P_e 之间的关系如式(2)所示。

$$T_e = \frac{P_e}{\omega} = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega} \quad (2)$$

其中, e_{abc} 和 i_{abc} 分别为虚拟同步发电机的输出电势和输出电流,单位分别为 V 和 A。

同步发电机通过控制原动机的机械转矩调节发电机输出的有功功率,在此基础上通过调速器实现对电网频率偏差的响应,从而维持系统的频率稳定。借鉴该原理,在虚拟同步发电机中通过调节给定机械转矩 T_{ref} 和频率偏差反馈指令 ΔT 实现对虚拟同步发电机的有功指令的调节。由此得到虚拟机械转矩 T_m 是由 T_{ref} 和 ΔT 组成:

$$T_m = T_{\text{ref}} + \Delta T \quad (3)$$

$$T_{\text{ref}} = \frac{P_{\text{ref}}}{\omega} \quad (4)$$

$$\Delta T = -K_\omega (\omega - \omega_0) \quad (5)$$

其中, P_{ref} 为给定有功功率,单位为 W; K_ω 为调差系数。

频率偏差反馈实际上是模拟自动频率调节器 (AFR) 的功能,取 AFR 为比例调节环节,得到如式(5)所示的机械功率偏差指令。联立式(1)~(5),并做相应变换可以得到^[12]:

$$\frac{\Delta \omega}{\Delta P} = \frac{\omega_0 - \omega}{P_{\text{ref}} - P} = -\frac{1}{J\omega_0 s + D\omega_0 + K_\omega} = -\frac{K_p}{1 + \tau s} \quad (6)$$

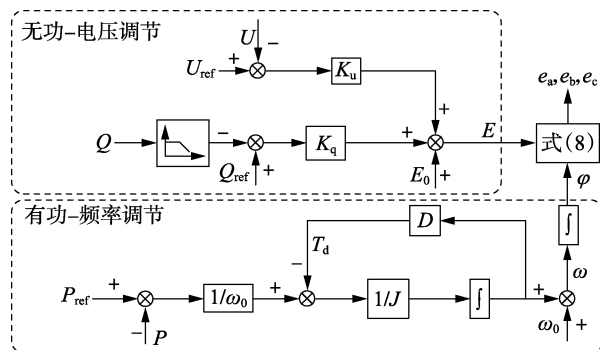
$$\begin{cases} K_p = \frac{1}{D\omega_0 + K_\omega} \\ \tau = \frac{J\omega_0}{D\omega_0 + K_\omega} \end{cases} \quad (7)$$

其中, P 为虚拟同步发电机输出的有功功率,单位为 W; K_p 、 τ 分别为有功频率下垂系数和惯性时间常数。

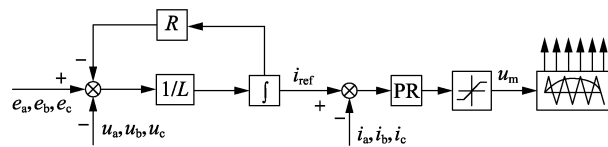
通过式(6)、(7)可以看出,与传统有功频率控制相比,采用虚拟同步发电机有功控制增加了惯性环节,从而除了模拟一次调频特性实现多微源间的功率均分^[12]之外,还实现了转动惯量控制。

无功电压控制利用了同步发电机中的自动电压调节器 (AVR) 的原理,自动电压调节器仅取为比例环节,并引入无功功率控制,此部分与本文研究内容相关性不大,不再赘述。虚拟同步发电机的控制框图如图 2 所示。图中式(8)具体如下:

$$E = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \sin \varphi \\ E \sin(\varphi - 2\pi/3) \\ E \sin(\varphi + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (8)$$



(a) 虚拟同步发电机的有功和无功控制原理图



(b) 调制信号发生原理

图 2 虚拟同步发电机的控制框图

Fig.2 Control block diagram of VSG

2 改进型自适应控制原理

2.1 转动惯量 J 和阻尼系数 D 对虚拟同步发电机特性的影响

2.1.1 J 和 D 对有功功率 P 输出特性的影响

对于虚拟同步发电机,根据视在功率的计算方法能够得到其输出的有功功率和无功功率如式(9)所示。

$$\begin{cases} P = \frac{EU \cos(\theta - \delta)}{Z} - \frac{U^2 \cos \theta}{Z} \\ Q = \frac{EU \sin(\theta - \delta)}{Z} - \frac{U^2 \sin \theta}{Z} \end{cases} \quad (9)$$

其中, U 为机端电压; δ 为虚拟同步发电机的功角; Z 和 θ 分别为虚拟同步发电机滤波电路的阻抗和阻抗角。 Z 和 θ 的表达式为:

$$\begin{cases} Z = \sqrt{(\omega L)^2 + R^2} \\ \theta = \arctan(\omega L / R) \end{cases} \quad (10)$$

其中, L 为滤波电感; R 为电阻。

根据式(1),同时借鉴传统电力系统中的同步发电机的小信号模型分析方法^[13],假设虚拟同步发电机的输出电阻 $R=0$,并做近似能够得到虚拟同步发电机输入输出有功功率的传递函数如式(11)所示,其为典型的二阶传递函数。

$$G(s) = \frac{P(s)}{P_{\text{ref}}(s)} = \frac{\frac{1}{J\omega_0} \frac{EU}{Z}}{s^2 + \left(\frac{D}{J} + \frac{K_\omega}{J\omega_0}\right)s + \frac{1}{J\omega_0} \frac{EU}{Z}} \quad (11)$$

根据式(11)得到对应的二阶模型的自然振荡角频率 ω_n 和阻尼系数 ξ 为:

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{EU}{J\omega_0 Z}} \\ \xi = D \sqrt{\frac{\omega_0 Z}{4JEU}} + K_\omega \sqrt{\frac{Z}{4J\omega_0 EU}} \end{cases} \quad (12)$$

若取 $0 < \xi < 1$,误差带为 $\pm 5\%$,则二阶系统对应超调量 $\sigma\%$ 和调节时间 t_s 分别为 $\sigma\% = e^{-\pi\xi/\sqrt{1-\xi^2}} \times 100\%$ 、 $t_s = \frac{3.5}{\xi\omega_n} = 3.5 / \left(\frac{D}{2J} + \frac{K_\omega}{2J\omega_0}\right)$ 。

在有功指令和无功指令给定的情况下,二阶系统动态性能由转动惯量 J 、阻尼系数 D 和调差系数 K_ω 决定。一般调差系数恒定,当 D 恒定时, J 越大, ξ 越小,超调量 $\sigma\%$ 越大,调节时间 t_s 越长;当 J 恒定时, D 越大, ξ 越大,超调量 $\sigma\%$ 越小,调节时间 t_s 越短。可以得到结论如下:虚拟同步发电机的转动惯量 J 决定了输出有功功率响应过程中的振荡频率,而阻尼系数 D 决定了有功功率响应振荡衰减速率^[13]。因此虚拟同步发电机的转动惯量 J 不能过大,否则有功阶跃时会导致输出有功波动,不利于系统稳定。

图3为虚拟同步发电机小信号模型的示意图,

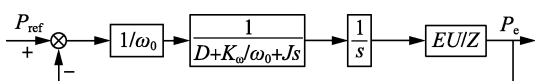


图3 虚拟同步发电机的小信号模型

Fig.3 Small-signal model of VSG

图4为不同转动惯量和阻尼系数下的系统输出有功动态响应。

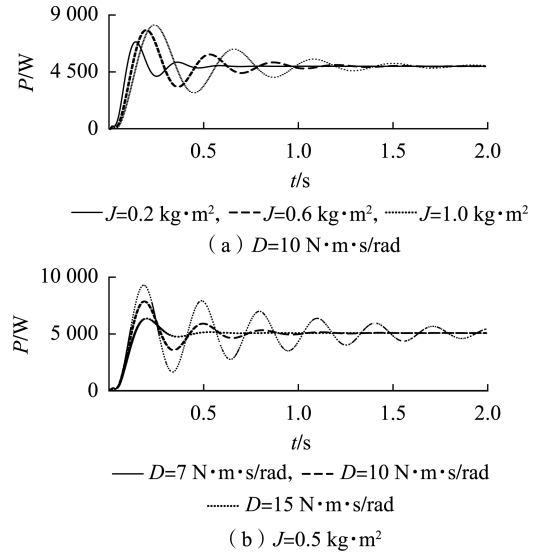


图4 不同转动惯量和阻尼系统下的输出有功动态响应

Fig.4 Dynamic responses of active power output under different rotational inertias and damping coefficients

2.1.2 J 和 D 对频率 f 输出特性的影响

根据式(1)可得:

$$\Delta\omega = \frac{T_m - T_e - Jd\omega/dt}{D} \quad (13)$$

$$\frac{T_m - T_e - T_D}{J} = \frac{d\omega}{dt} \quad (14)$$

式(13)中假设 $T_m - T_e - Jd\omega/dt$ 恒定,那么 D 越大,频率偏差 $\Delta\omega$ 越小;式(14)中假设 $T_m - T_e - T_D$ 恒定,那么 J 越大,角速度变化率 $d\omega/dt$ 越小。为了保证频率的稳定性,通过调整转动惯量 J 和阻尼系数 D 来抑制 $d\omega/dt$ 和 $\Delta\omega$ 。这与同步发电机的转动惯量和由阻尼绕组、转子损耗以及物理摩擦引起的阻尼特性维持电网稳定性类似。

2.2 改进型自适应控制原理

同步发电机的功角曲线、频率振荡曲线如图5所示。图5(a)中,当同步发电机的给定有功功率从 P_1 增加到 P_2 时,系统稳定运行点从点 A 切换到点 B ,切换过程中功率变化和频率变化均为衰减振荡,虚拟同步发电机的振荡过程与此类似。为了便于分析,在转动惯量和阻尼系数均恒定的情况下,将一个典型的振荡过程分为4个区间:① $t_1 - t_2$, ② $t_2 - t_3$, ③ $t_3 - t_4$, ④ $t_4 - t_5$ 。在区间①内,虚拟同步发电机的虚拟转子角速度大于电网角速度且逐渐增加,角速度的变化率 $d\omega/dt$ 先突增再逐渐减小,因此在区间①内需增大转动惯量 J 和阻尼系数 D 来防止 $d\omega/dt$ 和 $\Delta\omega$ 过大,从而约束转子角速度的增加;在区间②内,虚拟转子角速度的变化率 $d\omega/dt < 0$,进入到减速阶段, ω 从极大值逐渐减小,但是 $\omega > \omega_0$,即虚拟转子

角速度仍然大于电网角速度,该阶段宜采用较小的转动惯量,加快角速度恢复到额定值的过程,同时在 $|\Delta\omega|$ 较大时增大阻尼系数以进一步抑制角速度的偏移;在区间③和④内,转动惯量和阻尼系数的选取原则和区间①和②类似,不再赘述。

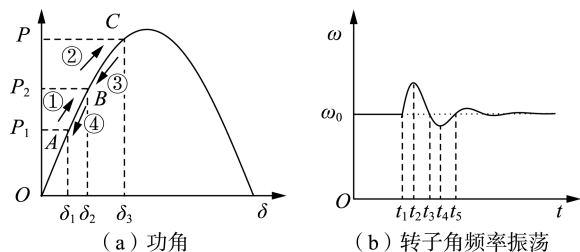


图 5 同步发电机功角和频率振荡曲线

Fig.5 Power angle and frequency oscillation curve of synchronous generator

综上所述,转动惯量的选取是由虚拟转子角速度变化量和变化率同时决定的,而阻尼系数的选取只由虚拟转子角速度变化量决定。在不同条件下,转动惯量和阻尼系数的选取原则如表 1 所示。

表 1 不同情况下转动惯量 J 和阻尼系数 D 的选取原则

Table 1 Selecting principle of J and D under different conditions

区间	$\Delta\omega$	$d\omega/dt$	$\Delta\omega(d\omega/dt)$	J 的变化情况	D 的变化情况
①	大于 0	大于 0	大于 0	增加	适当增加
②	大于 0	小于 0	小于 0	减小	适当增加
③	小于 0	小于 0	大于 0	增加	适当增加
④	小于 0	大于 0	小于 0	减小	适当增加

根据表 1 的选取原则以及转动惯量 J 和转子角速度变化率 $d\omega/dt$ 之间的相关性、阻尼系数 D 和转子角速度偏移量 $\Delta\omega$ 之间的相关性,设计自适应控制策略如下:

$$J = \begin{cases} J_0 & \Delta\omega(d\omega/dt) \leq 0 \\ J_0 & |d\omega/dt| \leq T_j \\ J_0 + K_j |d\omega/dt| & \Delta\omega(d\omega/dt) > 0 \cap |d\omega/dt| > T_j \end{cases} \quad (15)$$

$$D = \begin{cases} D_0 & |\Delta\omega| \leq T_d \\ D_0 + K_d |\Delta\omega| & |\Delta\omega| > T_d \end{cases} \quad (16)$$

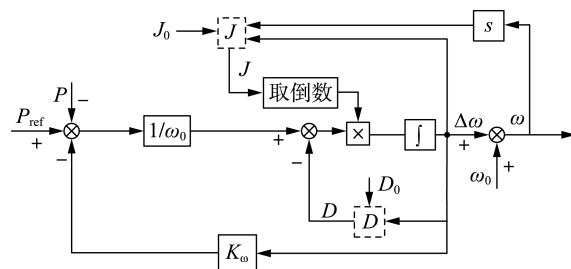
其中, J_0 和 D_0 分别为虚拟同步发电机稳定运行时的转动惯量值和阻尼系数; K_j 和 K_d 分别为转动惯量和阻尼系数的调节系数; T_j 和 T_d 为变化阈值。转动惯量和阻尼系数协同自适应控制原理图如图 6 所示。

2.3 参数整定

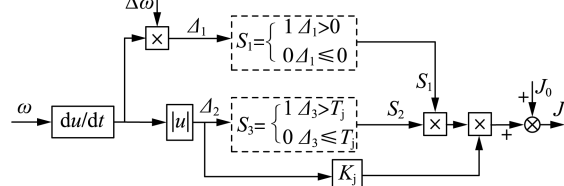
对于虚拟同步发电机稳定运行时的转动惯量 J_0 和阻尼系数 D_0 ,按照“最优二阶系统”的方法整定^[14],从而获得较快的响应速度和较小的超调量。

调差系数 K_ω 满足^[13]:

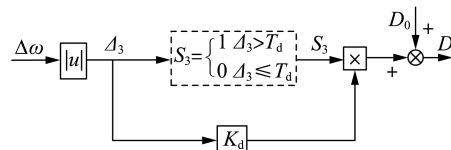
$$K_\omega \leq P_{\max} / \Delta\omega_{\max} \quad (17)$$



(a) 自适应控制原理



(b) 转动惯量自适应控制原理



(c) 阻尼系数自适应控制原理

图 6 转动惯量和阻尼系数协同自适应控制原理图

Fig.6 Principle diagram of coordinate adaptive control of rotational inertia and damping coefficient

从等效二阶系统传递函数式(11)中可以得到其特征根为:

$$G_o(s) = \frac{EU/Z}{s \left(D + \frac{K_\omega}{\omega_0} + Js \right) \omega_0} \quad (18)$$

从图 3 可以得到开环传递函数为:

$$s^2 + \left(\frac{D}{J} + \frac{K_\omega}{J\omega_0} \right) s + \frac{1}{J\omega_0} \frac{EU}{Z} = 0 \quad (19)$$

由此画出不同参数变化下的根轨迹如图 7 所示。

从图 7(b)、(c)中可以看出,当 J 为恒定值时, D 或 K_ω 越大,极点的实部的绝对值越大,调节时间越短,衰减速度越快;从图 7(a)中可以看出,如果 D 和 K_ω 恒定, J 越大,开环极点越接近坐标原点,系统稳定性变差,因此转动惯量的选取不能过大,同时参考鲁汶大学提出的虚拟同步发电机方案,为了充分利用逆变器的输出功率的能力^[14],虚拟转动惯量 J 应该满足以下条件:

$$J \leq \frac{P_{\max}}{\max \{ \omega(d\omega/dt) \}} \quad (20)$$

随着阻尼系数 D 的增大,系统稳定性逐渐增强,本文选取 $D > 0$,以满足系统稳定性的要求。调节系数 K_j 和 K_d ,阈值的选取对系统频率稳定的快速性和准确性有一定影响,需要根据实际需求做出选择。

3 仿真分析

为了验证本文理论分析及提出的改进型自适应

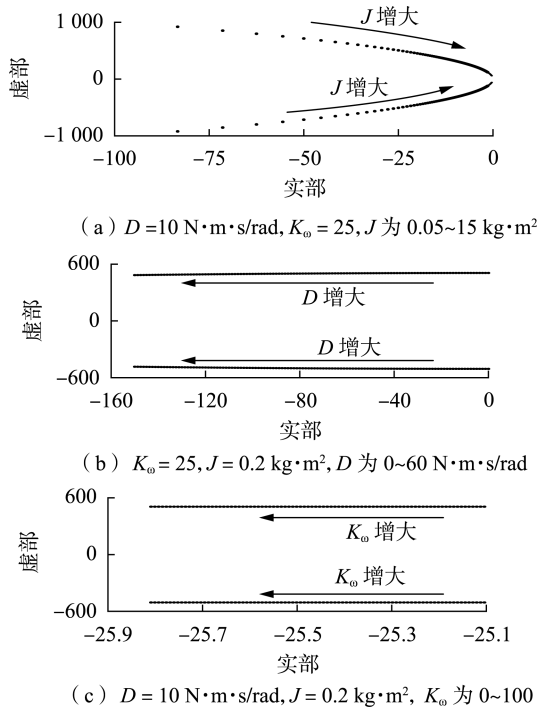


图7 不同参数变化下的根轨迹

Fig.7 Root locus under variation of different parameters

控制策略的有效性,在 MATLAB/Simulink 软件中搭建了单机虚拟同步发电机的模型,进行仿真实验分析。仿真参数如表 2 所示。表中, C 为滤波电容; U_{dc} 为直流母线电压; U_N 为交流额定电压。

表2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

参数类型	参数	参数值	参数类型	参数	参数值
主电路参数	L/mH	6	控制参数	K_ω	25
主电路参数	$C/\mu\text{F}$	20	控制参数	K_j	0.2
主电路参数	U_{dc}/V	700	控制参数	T_j	2.5
主电路参数	U_N/V	220	控制参数	K_d	10
控制参数	$J_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.2	控制参数	T_d	0.1
控制参数	$D_0/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1})$	10			

3.1 调节系数对频率波动的影响

对于式(15)、(16)中的参数整定,调节系数 K_j 、 K_d 的大小会对频率波动抑制性能有较大的影响,图 8 为调节系数变化对系统转子频率的影响。为了分析不同调节系数对频率稳定的影响,虚拟同步发电机给定有功功率为 5 kW, K_j 变化时取 $K_d = 0$, K_d 变化时取 $K_j = 0$,频率波动情况如图 8 所示。

由图 8 可知,当调节系数 K_j 分别为 0.05、0.1、0.2 时,到达第一次振荡峰值的时间分别为 0.08 s、0.1 s、0.12 s;随着 K_j 的增大,虚拟同步发电机的转子频率的变化速率逐渐减小;当调节系数 K_d 分别为 5、10、20 时,超调量分别约为 0.175 Hz、0.15 Hz、0.12 Hz;随着 K_d 的增大,转子频率的超调量逐渐减小。

3.2 转动惯量和阻尼系数协同自适应控制

采用单机虚拟同步发电机并入电网,仿真时长

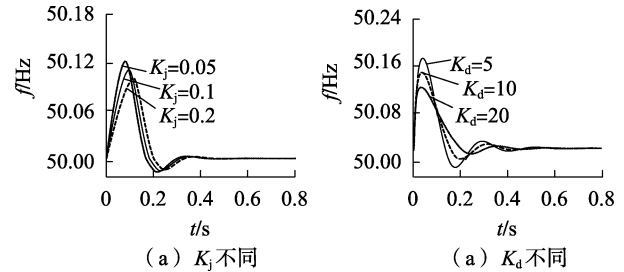


图8 不同调节系数下的频率波动

Fig.8 Frequency fluctuation under different adjustment coefficients

为 1.6 s,负载有功功率为 12 kW,无功功率为 2 kvar,初始时虚拟同步发电机的给定输出有功功率为 2 kW,在 0.15 s 时有功功率突增为 12 kW,在 0.9 s 时又突降为 2 kW,无功功率恒定为 2 kvar。

图 9 为不同控制策略下的虚拟同步发电机输出有功的阶跃响应曲线,当输入功率突然增大时,采用恒定参数虚拟同步发电机控制、转动惯量自适应控制和转动惯量和阻尼系数协调自适应控制的有功超调量分别为 33%、17%、5%,调节时间分别约为 0.55 s、0.55 s、0.3 s。

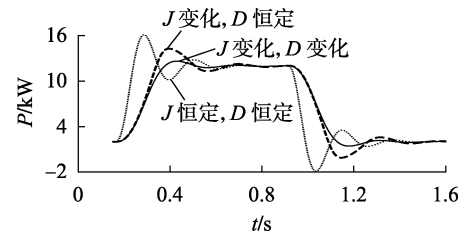


图9 不同控制策略下的有功功率对比

Fig.9 Comparison of active power under different control strategies

图 10 为不同控制策略下的虚拟同步发电机输出频率对比。由图 10(a)可知,转动惯量的自适应变化对频率变化率的影响明显。当输入功率突增

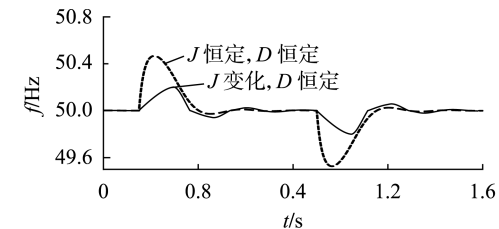
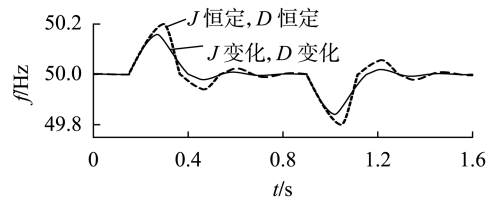
(a) 参数恒定 VSG 控制和 J 自适应 VSG 控制对比(b) J 自适应 VSG 控制和 J 、 D 协调自适应控制对比

图10 不同控制方式下的频率对比

Fig.10 Comparison of frequency under different control strategies

时,定控制参数下的虚拟同步发电机的输出频率频率偏差超过 0.4 Hz,振荡持续时间约为 0.25 s。采用转动惯量自适应控制策略时,频率最大偏差减小为 0.2 Hz,调节时间有所降低但并不明显。图 10(b)对比了 J 自适应虚拟同步发电机控制和 J 、 D 协同自适应控制的输出频率,可见阻尼系数自适应控制的引入进一步减小了频率偏差,当频率偏差超过 0.1 Hz 时, D 自适应增大对频率偏差抑制明显。

图 11 给出了转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略下 J 和 D 的变化情况。转动惯量变化过程中存在尖刺的现象是由虚拟转子频率变化不平滑,在频率拐点处 $d\omega/dt$ 突变导致的。

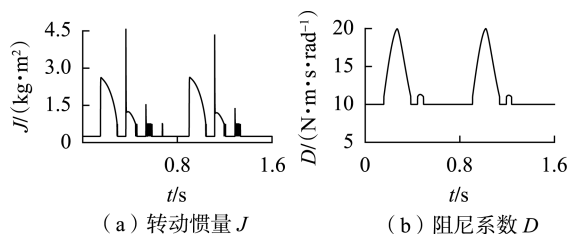


图 11 转动惯量和阻尼系数的变化情况

Fig.11 Variation of rotor inertia and damping factor

综上,相比于转动惯量自适应控制, J 、 D 协同自适应虚拟同步发电机控制有更好的频率波动抑制性能,既能够减小频率波动的变化率,又能够减小频率的偏移量,最终减小频率超调量,缩短恢复时间,提升频率稳定性能,同时也体现了虚拟同步发电机在控制方面的灵活性。

4 结论

接入微电网中的分布式电源的出力波动可能会引起电网频率不稳定以及功率波动的问题,本文通过研究虚拟同步发电机的控制方法,提出一种转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略,得到结论如下:

a. 通过建立虚拟同步发电机模型,分析暂态过程中系统频率和输出功率的变化机理,得出转动惯量和频率变化率、阻尼系数和频率偏移量之间的相关性,并给出转动惯量和阻尼系数的计算表达式和触发条件;

b. 所提控制策略不仅考虑了转动惯量的变化,还考虑了阻尼系数的变化,在抑制频率变化率的同时也抑制了频率的偏差量;

c. 与传统定参数虚拟同步发电机控制和转动惯量自适应控制策略相比,所提控制策略能够进一步改善频率响应特性和输出有功响应特性;

d. 通过仿真验证了所提控制策略的有效性,但是并未进行实验验证,这是本文的不足之处也是后续研究需要补充之处。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京:中国电力出版社,2012:170-174.
- [2] 吴雄,王秀丽,刘世民,等. 微电网能量管理系统研究综述[J]. 电力自动化设备,2014,34(10):7-14.
WU Xiong, WANG Xiuli, LIU Shimin, et al. Summary of research on microgrid energy management system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10): 7-14.
- [3] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [4] 韩刚,蔡旭. 虚拟同步发电机输出阻抗建模与弱电网适应性研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(12):116-122.
HAN Gang, CAI Xu. Output impedance modeling of virtual synchronous generator and its adaptability study in a weak grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 116-122.
- [5] CHEN Y, HESSE R, TURSCHNER D, et al. Improving the grid power quality using virtual synchronous machines[C]//International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Malaga, Spain: IEEE, 2011: 1-6.
- [6] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [7] 杜威,姜齐荣,陈蛟瑞. 微电网电源的虚拟惯性频率控制策略[J]. 电力系统自动化,2011,35(23):26-31.
DU Wei, JIANG Qirong, CHEN Jiaorui. Frequency control strategy of distributed generations based on virtual inertia in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 26-31.
- [8] 程冲,杨欢,曾正,等. 虚拟同步发电机的转子惯量自适应控制方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(19):82-89.
CHENG Chong, YANG Huan, ZENG Zheng, et al. Rotor inertia adaptive control method of VSG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 82-89.
- [9] 张亚楠,朱森,张建文,等. 基于自适应调节的微源逆变器虚拟同步发电机控制策略[J]. 电源学报,2016,14(3):11-19.
ZHANG Yanan, ZHU Miao, ZHANG Jianwen, et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on adaptive adjusting for distributed inverters[J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(3): 11-19.
- [10] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(2): 451-458.
- [11] 宋琼,张辉,孙凯,等. 多微源独立微网中虚拟同步发电机的改进型转动惯量自适应控制[J]. 中国电机工程学报,2017,37(2):412-423.
SONG Qiong, ZHANG Hui, SUN Kai, et al. Adaptive control of inertia for virtual synchronous generators in islanding micro-grid with multiple distributed generation units[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 412-423.
- [12] DU Y, SU J, MAO M, et al. Autonomous controller based on synchronous generator dq0 model for micro grid inverters[C]//IEEE International Conference on Power Electronics & Ecce Asia. Jeju, Korea: IEEE, 2011: 2645-2649.
- [13] 吕志鹏,盛万兴,钟庆昌,等. 虚拟同步发电机及其在微电网中

的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591-2603.

LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.

- [14] 胡文强, 吴在军, 孙充勃, 等. 基于 VSG 的储能系统并网逆变器建模与参数整定方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 13-23.

HU Wenqiang, WU Zaijun, SUN Chongbo, et al. Modeling and parameter setting method for grid-connected inverter of energy storage system based on VSG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 13-23.

作者简介:



杨 赞

杨 赞(1993—), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要研究方向为虚拟同步发电机及其在微电网中的应用(E-mail: seanyang@163.com);

梅 飞(1982—), 男, 安徽定远人, 讲师, 博士, 主要研究方向为新能源发电技术(E-mail: meifei@hhu.edu.cn);

张宸宇(1989—), 男, 江苏扬州人, 工程师, 博士, 主要研究方向为新能源及电力电子技术(E-mail: yu_z@sina.cn)。

Coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator

YANG Yun¹, MEI Fei², ZHANG Chenyu³, MIAO Huiyu¹, CHEN Hongfei¹, ZHENG Jianyong¹

(1. Electrical Engineering Department, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

3. Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: The control strategy of VSG (Virtual Synchronous Generator) introduces rotational inertia and damping coefficient that are originally from synchronous generators to the inverter control, which improves the frequency response and enhances the anti-disturbance capability. However, the system dynamic adjustment performance may be negatively impacted. Hence, a coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for VSG is proposed. Firstly, the mathematical model of the VSG is established, and the influence of parameters on the system output characteristics are analyzed. Secondly, the proposed control strategy is applied on the VSG, in which the stability analysis under the change of corresponding parameters is performed. Finally, compared with the traditional VSG control strategy, simulative results on MATLAB/Simulink verify the feasibility and effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: virtual synchronous generator; frequency response; rotational inertia; damping coefficient; adaptive control strategy

(上接第 124 页 continued from page 124)

A novel pulse-source-based method for measuring transfer impedance of high frequency current sensor

CHEN Xiaoxin^{1,2}, QIAN Yong¹, XU Yongpeng¹, SHU Bo¹, SHENG Gehao¹, JIANG Xiuchen¹

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of the existing single-point frequency method in measuring the transfer impedance of HFCT (High Frequency Current Transformer) with partial discharge, a novel method based on pulse source is proposed. The proposed method adopts a pulse signal as the injecting source and can obtain the transfer impedance curve within the detection band by measuring only once, it greatly reduces the test time, improves the test efficiency, and has the advantages of simple operation and high resolution. An experimental platform is built, and the transfer impedances of various types of HFCTs are measured. Moreover, the influences of pulse signal source on the measurement results are analyzed. Finally, the pulse injection method and the single-point frequency method have been compared. The results show that Gaussian pulse with a rise time shorter than 10 ns should be used as the signal source. The measured transfer impedance curves of the pulse injection method and the single-point frequency method are highly consistent. The mean difference of the transfer impedance curves obtained by the two methods is at most 0.1 V/A, the root mean square error is less than 0.25 V/A, and the correlation coefficient is larger than 0.85.

Key words: partial discharge; High Frequency Current Transformer (HFCT); transfer impedance; pulse; measurement