

抑制虚拟同步发电机低频振荡的自适应阻尼控制算法策略

马成松¹, 赵耀^{1,2}, 刘庆飞³, 杨帆^{1,2}

(1. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海高校高效电能应用工程研究中心, 上海 200090;
3. 上海国际机场股份有限公司, 上海 201202)

摘要: 随着电力系统电力电子化的发展, 以虚拟同步发电机 (Virtual Synchronous Generator, VSG) 控制策略为主的逆变器在电网中渗透率将越来越大。然而, 传统电力系统中出现的低频振荡现象在虚拟同步发电机系统中未得到相应的研究。为了研究低频振荡对虚拟同步发电机系统的影响, 在详细分析 VSG 控制策略的基础上, 对虚拟同步发电机系统中出现低频振荡的原因进行分析研究。通过分析低频振荡时功角特性的关系, 提出一种自适应阻尼控制算法, 能够自适应控制系统阻尼系数, 抑制低频振荡。最后, 以 Matlab/Simulink 为仿真实验平台, 验证了 VSG 系统中低频振荡现象和所提算法的有效性。

关键词: 虚拟同步发电机; 低频振荡; 功角特性; 阻尼系数; 自适应阻尼

Adaptive damping control algorithm strategy for suppressing low-frequency oscillation of virtual synchronous generator

MA Chengsong¹, ZHAO Yao^{1,2}, LIU Qingfei³, YANG Fan^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. Shanghai University High-efficiency Electric Energy Application Engineering Research Center, Shanghai 200090, China; 3. Shanghai International Airport Co., Ltd., Shanghai 201202, China)

Abstract: With the development of power system electronic power, inverters based on virtual synchronous generator (VSG) control strategies will have greater penetration in the power grid. However, the phenomenon of low frequency oscillations occurring in conventional power systems has not been studied in the virtual synchronous generator system. In order to study the influence of low-frequency oscillation on the virtual synchronous generator system, the causes of low-frequency oscillation in the virtual synchronous generator system based on the detailed analysis of the VSG control strategy are analyzed, and the relationship of the power angle characteristics during low-frequency oscillation are analyzed. An adaptive damping control algorithm is proposed to adaptively control the damping coefficient of the system and suppress low-frequency oscillation. Finally, Matlab/Simulink is used as the simulation platform to verify the low frequency oscillation phenomenon and the effectiveness of the proposed algorithm in VSG system.

Key words: virtual synchronous generator; low frequency oscillation; power angle characteristics; damping coefficient; adaptive damping

上海市科学技术委员会项目 (18DZ1202302); 上海市教育委员会和上海市教育发展基金会“晨光计划” (17CG56); 广东电网有限责任公司科技项目资助 (031800KK52170056)

0 引言

随着化石能源问题的日益加剧,以新能源为主体的分布式发电(Distributed Generation, DG)开始引起人们的重视^[1-3]。光伏、风电为主的分布式能源在接入电网时以电力电子逆变器为接口,与传统的同步发电机相比,具有暂态响应快速的特点。但由于电力电子器件缺少惯性^[4],并且往往存在着过载能力差、输出阻抗小等特性^[5],导致系统在发生扰动或故障时各电能参数响应过快,不利于系统的稳定性。

传统电力系统多由大型同步发电机来提供电力。由于同步发电机的转子具有机械转动惯量,因此当电网中发生负荷突变或发电机跳闸时,能够利用转子的动能与电网进行能量交换,来维持电网稳定性。如果能够使并网逆变器模拟同步发电机的外特性,具有同步发电机的“惯性量”,则可以大幅提高系统稳定性。

基于上述考虑,国内外学者提出了虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)的概念^[6-9],它借鉴了同步发电机的电磁与机械方程,从外特性上成功等效了同步发电机的模型,为逆变器增加了惯性支撑。文献[10]提出了一种VSG控制策略,将同步发电机的局部线性化模型引入到有功-频率下垂控制中,有效地模拟了同步发电机的惯性、阻尼以及一次调频特性。文献[11-12]根据VSG虚拟角速度的变化,提出了一种自适应惯量控制策略,通过自适应改变虚拟转子惯量,来改善并网情况下频率的稳定性。在此基础上,文献[13]提出了一种自适应惯量阻尼综合控制算法,改变惯量的同时,阻尼也随之改变,进一步提高了并网时系统频率的稳定性。从上述文献可以看出,对于虚拟同步发电机中的惯量和阻尼已经有了很多研究,但大多集中在如何通过调控惯量和阻尼来提高频率稳定性上。且在

VSG领域中,对于阻尼的研究大多集中在动态响应过程中振荡衰减的速率上,并没有从电力系统的角度去考虑阻尼在VSG系统中的作用。

虽然由于惯性量和阻尼特性的引入,虚拟同步发电机的输出有功功率和无功功率在动态过程中可能出现与传统同步发电机相似的振荡特性,但是现有文献对其缺乏必要的研究。基于此,本文在详细分析VSG控制策略的基础上,通过对转子运动方程的分析,探讨了虚拟同步发电机系统中的出现低频振荡的原因,结合低频振荡时功角特性的关系,从电力系统的角度,研究了阻尼量对功率稳定性的影响,并提出了一种基于自适应阻尼的控制策略(Self-Adaptive Damping Control, SADC),在抑制系统低频振荡的同时,能够根据系统不同时刻所需阻尼的大小提供适应的阻尼,有效地抑制了系统的低频振荡。最后,以Matlab/Simulink为仿真实验平台,对虚拟同步发电机系统中的低频振荡现象进行仿真分析,同时验证了所提控制策略的有效性。

1 VSG控制策略基本原理

由于VSG通过用逆变器做载体来实现对同步发电机的模拟,因此VSG具有并网逆变器的拓扑结构。典型的VSG拓扑结构如图1所示^[14]。图1中,DC为直流侧电压; e_a 、 e_b 和 e_c 为逆变器三相输出端电压; u_a 、 u_b 和 u_c 为三相电网电压; i_a 、 i_b 和 i_c 为逆变器输出的三相并网电流; L 、 C 分别为LC滤波器的电感和电容。

通过对比图1可以看出,并网逆变器的输出滤波电感可以等效为同步发电机的同步电感,滤波电感和功率器件的等效电阻可以视为同步发电机的同步电阻,三相输出端电压可以等效为同步发电机的暂态电动势。

根据VSG的拓扑结构,结合传统的同步发电机转子机械方程,再根据牛顿第二定律,可

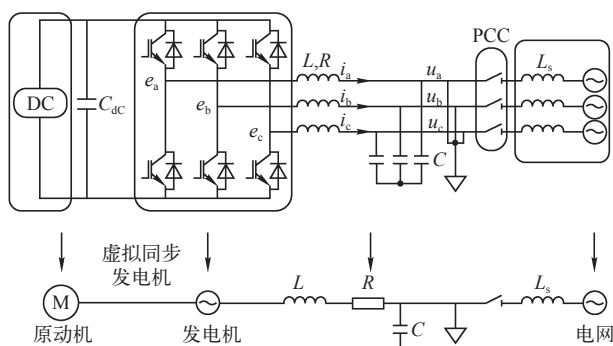


图1 虚拟同步发电机拓扑结构

Fig 1 Topology of the VSG

知虚拟同步发电机的转子运动方程为^[15-16]

$$\begin{cases} P_m - P_e - P_D = P_m - P_e - D\Delta\omega = J\omega_0 \frac{d\Delta\omega}{dt} \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中， P_m 、 P_e 和 P_D 分别为同步发电机机械功率、电磁功率和阻尼功率； ω 为同步发电机电角速度； ω_0 为额定电角速度； $\Delta\omega$ 为同步电角速度与额定电角速度之差； J 、 D 分别为同步发电机转动惯量和阻尼系数； θ 为电角度。

由式（1）可以看出，转子机械方程中存在惯量 J 和阻尼 D ，使并网逆变器在功率和频率动态过程中具有惯性，同时也使得逆变器型并网发电装置存在阻尼电网功率振荡的能力。可见这两个变量对电网运行性能的改善具有重要意义^[17]。

VSG整体控制框图如图2所示。其中，为

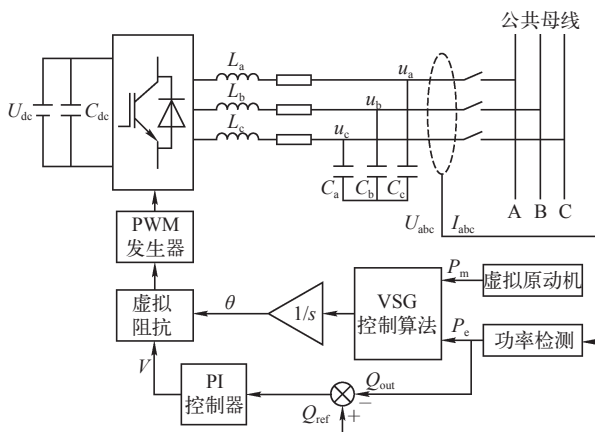


图2 VSG整体控制框图

Fig. 2 The overall control chart of the VSG

了简化系统，本文忽略了储能及分布式能源的动态响应特性，直接用直流电压源替代。

在VSG整体控制策略中，输入机械功率与电磁功率 P_m 、 P_e ，分别由虚拟原动机控制器和VSG实际输出有功功率提供。虚拟原动机控制器通过引入下垂特性，可模拟同步发电机的一次调频作用。VSG控制算法输出的电角度 θ 与经过PI控制器输出的虚拟励磁电动势幅值 V 通过虚拟阻抗输出三相调制波电流，经PWM发生器产生脉冲以控制开关管的开断，最终实现对VSG系统的控制。

2 VSG低频振荡问题分析

2.1 低频振荡发生机理研究

传统的电力系统低频振荡是指系统受到扰动后，并列运行的同步发电机转子之间的相对摇摆导致系统中出现功率等电能参量不同程度振荡的现象^[18]，一般振荡频率在0.1~2.5 Hz之间。根据振荡发生范围的不同，又有地区振荡和区域振荡之分。其产生低频振荡的原因是由于励磁系统放大倍数的增加产生了负阻尼作用，抵消了系统固有的正阻尼，使得系统的总阻尼很小甚至为负。

对于含VSG的电网系统来说，当系统参数一定时，虽然VSG通过引入同步发电机的转子运动方程使其含有一定的惯量和阻尼，但由于其引入的惯量和阻尼相对于整个系统来说比较小，当系统出现弱电网状态从而导致系统需要更大的阻尼时，VSG不能适时提供系统所需阻尼。另外，系统中其他部分的变化可能会导致虚拟同步发电机中阻尼减少，从而抵消系统中原有的正阻尼，使系统总的阻尼很小甚至为负，从而导致系统产生低频振荡，对系统的稳定性产生影响。

虽然其他电力电子逆变器也存在类似现象，但其产生原因是由于其逆变器中PI控制器的调节参数改变而发生了Hopf分岔^[19]，其

逆变器中的低频振荡现象实际上是一种自激振荡。区分VSG低频振荡和其他电力电子逆变器振荡的关键在于VSG低频振荡是由于电力系统中外部运行条件发生变化导致VSG发生低频振荡，即当系统处于弱电网状态时，由外部变化导致内部发生振荡。

2.2 VSG低频振荡分析

由图1可知，虚拟同步发电机的电磁功率为

$$P_e = \frac{3EU}{Z} \sin \theta \quad (2)$$

式中， E 为VSG的输出电压； U 为电网电压； Z 为系统阻抗； θ 为阻抗角。

且有

$$\begin{cases} Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \\ \theta = \arctan \frac{\omega L}{R} \end{cases} \quad (3)$$

虚拟同步发电机在稳态工作状态下发生小扰动时，可以认为 $\sin \theta \approx \theta$ ，则电磁功率的小信号表达式为

$$P_e = \frac{3EU}{Z} \theta \quad (4)$$

由式(1)以及图2可以得到有功控制环的小信号控制框图，如图3所示。

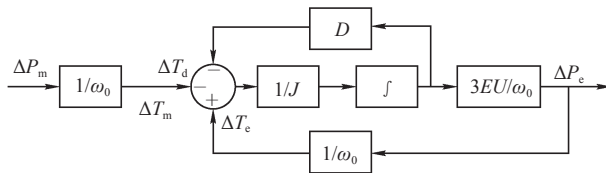


图3 有功控制环的小信号控制框图

Fig. 3 Small signal control block diagram of active control loop

由功率守恒定律可知，忽略逆变器内部功率损耗时，逆变器直流侧功率应与交流侧功率相等，再由基尔霍夫定律得

$$\begin{cases} EI = U_{dc} I_{dc} \\ I_{dc} = C \frac{dU_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc}}{R} \end{cases} \quad (5)$$

又由虚拟同步发电机电磁功率 $P_e = EI$ ，可有电磁功率 P_e 与直流侧电压 U_{dc} 的小信号模型，即

$$\begin{cases} P_e = U_{dc} C \frac{d\Delta U_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc} \Delta U_{dc}}{R} \\ \frac{\Delta U_{dc}}{\Delta P_e} = \frac{R}{1 + CRs} \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)以及图3可以得到虚拟同步发电机的小信号控制框图，如图4所示。

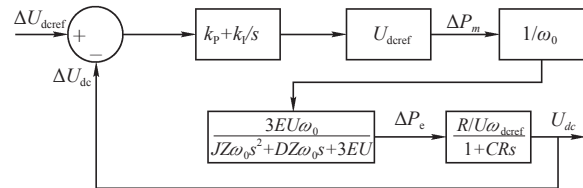


图4 虚拟同步发电机小信号控制框图

Fig. 4 Small signal control block diagram of the VSG

由图4可以得到虚拟同步发电机的开环传递函数为

$$G(s) = U_{dc} \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \frac{1}{\omega_0} \times \frac{3EU\omega_0}{JZ\omega_0s^2 + DZ\omega_0s + 3EU} \times \frac{1}{1 + RCs} \times \frac{R}{U_{dc}} \quad (7)$$

经过变换后有

$$G(s) = \frac{3EU\omega_0 R (k_p s + k_i)}{(1 + RCs)(JZ\omega_0s^2 + DZ\omega_0s + 3EU)s} \quad (8)$$

将式(8)简化后有

$$G(s) = \frac{R(k_p s + k_i)\omega_n^2}{(1 + RCs)(s^2 + 2\zeta\omega_n^2 s + \omega_n^2)s} \quad (9)$$

其中

$$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n^2 s + \omega_n^2} = \frac{3EU}{JZ\omega_0s^2 + DZ\omega_0s + 3EU}, \quad \omega_n$$

和 ζ 分别为二阶惯性环节的自然振荡频率和阻尼比。

故有自然振荡频率 ω_n 和阻尼比 ζ 分别为

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{3EU}{JZ\omega_0}} \\ \zeta = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{Z\omega_0}{3EUJ}} \end{cases} \quad (10)$$

可有

$$\begin{cases} J = \frac{3EU}{Z\omega_0\omega_n^2} \\ D = 2\zeta \sqrt{\frac{3EUJ}{Z\omega_0}} \end{cases} \quad (11)$$

通过对阻尼 D 的表达式进行分析可以得到,对阻尼的影响主要有两部分构成:一是虚拟同步发电机内部参数的影响,如虚拟同步发电机的输出电压 E 、电网电压 U 和惯量 J 等;二是虚拟同步发电机外部参数的影响,如系统阻抗 Z 的大小。一般来说,虚拟同步发电机的内部参数一般也都是固定的,因此,对阻尼 D 的影响最不确定的因素就是虚拟同步发电机外部条件。当系统出现弱电网状态时,会导致虚拟同步发电机中阻尼 D 的减小,使得VSG不能适时提供系统所需阻尼,而此时系统正需要更大的阻尼,使系统总的阻尼很小甚至为负,从而导致系统产生低频振荡,对系统的稳定性产生影响。

另外,通过阻尼 D 的表达式也可以看出,当发生低频振荡时,由于阻尼较低,只要在虚拟同步发电机上增加阻尼,则能显著增加系统阻尼。因此,增加逆变器阻尼系数可以在一定程度上解决低频振荡问题,但是随着低频振荡的发生,不同时刻所需要的抑制低频振荡的正阻尼不一定相同,所以机械地增加阻尼系数并不能完全解决低频振荡发生后不同时刻所需阻尼不同的问题。

3 抑制VSG低频振荡的自适应阻尼控制算法

3.1 阻尼作用对功角振荡的影响

首先,从物理上来理解阻尼 D 对系统的阻尼作用。当 $D \geq 0$, $\Delta\omega > 0$ 时,转子转速高于同步转速,阻尼功率 P_D 为正,发电机多送出电磁功率,阻止转速升高;反之, $\Delta\omega < 0$ 时,转子转速低于同步转速,阻尼功率 P_D 为负,阻止转速进一步降低。当 $D < 0$ 时,则与上述情况相反,从而会导致系统振荡失稳^[21]。系统的功角振荡轨迹如图5所示。

由图5可知,当 $D > 0$ 时,系统发生扰动后,运行点偏移到 b 点,机械功率 P_m 大于电磁功率 P_e ,转子加速, $\Delta\omega$ 为正值,阻尼功率 P_D

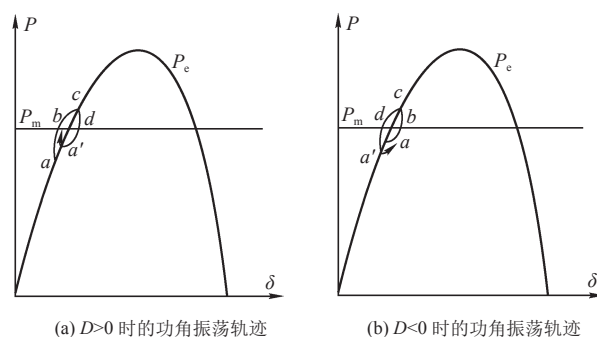


图5 功角振荡轨迹图

Fig. 5 Power-angle oscillatory trajectory

也是正值,运行点的轨迹将沿着弧线 ab 从 a 点向 b 点移动,转子转速逐渐增大, $d\Delta\omega/dt > 0$ 。越过 b 点后,机械功率 P_m 小于电磁功率 P_e ,转子减速。由于转子转速仍高于同步转速,阻尼功率 P_D 和 $\Delta\omega$ 仍为正值,运行点的轨迹将沿着弧线 bc 从 b 点向 c 点移动,转子转速开始逐渐减小, $d\Delta\omega/dt < 0$ 。同理,当运行点从 c 点开始沿着 cd 向 d 点移动时, $\Delta\omega$ 和阻尼功率 P_D 均为负值,转子转速持续减小, $d\Delta\omega/dt < 0$ 。 d 点向 a' 点移动时, $\Delta\omega$ 和阻尼功率 P_D 仍为负值,转子转速开始增大, $d\Delta\omega/dt < 0$ 。由于存在阻尼作用,所以功角的变化量逐渐减少,即形成了衰减振荡。

当 $D < 0$ 时,功角振荡轨迹的分析跟 $D > 0$ 时一致,不同之处在于:当从 a 点向 c 点移动时, $\Delta\omega > 0$,阻尼功率 $P_D < 0$;当从 c 点向 a' 点移动时, $\Delta\omega < 0$,阻尼功率 $P_D > 0$ 。由于不存在阻尼作用,所以功角的变化量逐渐增加,最后形成了发散振荡。

为便于观察与分析, $D > 0$ 时和 $D < 0$ 时系统中各变量的变化趋势如表1所示。

表1 振荡时各变量变化情况

Tab. 1 Conditions of various variables

区间	$D > 0$				$D < 0$			
	$\Delta\omega$	$d\Delta\omega/dt$	Δp	P_D	$\Delta\omega$	$d\Delta\omega/dt$	Δp	P_D
$a-b$	$\Delta\omega > 0$	> 0	> 0	> 0	$\Delta\omega > 0$	> 0	> 0	< 0
$b-c$	$\Delta\omega > 0$	< 0	< 0	> 0	$\Delta\omega > 0$	< 0	< 0	< 0
$c-d$	$\Delta\omega < 0$	< 0	< 0	< 0	$\Delta\omega < 0$	< 0	< 0	> 0
$d-a'$	$\Delta\omega < 0$	> 0	> 0	< 0	$\Delta\omega < 0$	> 0	> 0	> 0

从表1中可以看出,当系统正常运行,即 $D>0$ 时, $P_D\Delta\omega>0$;当发生低频振荡,即 $D<0$ 时, $P_D\Delta\omega<0$ 。

因此可以把 $P_D\Delta\omega$ 是否大于零作为系统是否发生低频振荡的判据。

定义判定值 ε 的表达式为

$$\varepsilon = P_D \Delta\omega \quad (12)$$

则当 $\varepsilon>0$ 时,系统正常运行;当 $\varepsilon<0$ 时,系统发生低频振荡。

3.2 自适应阻尼控制策略

根据表1的分析可知,由于阻尼 D 的大小不同,系统的运行状态也不一样,由此可以判断系统是否发生低频振荡。

另外从表1中还可以发现,无论 $D>0$ 还是 $D<0$ 时, $\Delta p(d\Delta\omega/dt)$ 一直为正。因此为了增加阻尼功率,为系统提供正阻尼,可以将 $\Delta p(d\Delta\omega/dt)$ 作为输入信号,在发生低频振荡时,通过提供正阻尼来抑制低频振荡。并且在不同时刻, Δp 与 $d\Delta\omega/dt$ 均会随功角的变化而变化,因此可以自适应地提供不同的正阻尼来抑制不同时刻的振荡。但是由于 Δp 与 $d\Delta\omega/dt$ 均是正弦变化,其乘积仍是以正弦变化,为了能够提供更加稳定的正阻尼,将 Δp 与 $d\Delta\omega/dt$ 的乘积移相 90° ,再与 Δp 和 $d\Delta\omega/dt$ 的乘积相加,从而得到更加稳定的正阻尼。

综上,提出的控制策略可表示为

$$D = \begin{cases} D_0 & \varepsilon \geq 0 \\ D_0 + kD_{in} & \varepsilon < 0 \cap |\Delta\omega| > M \\ D_0 & |\Delta\omega| < M \end{cases} \quad (13)$$

式中, D_0 为虚拟阻尼稳态值; k 为虚拟阻尼自适应系数; D_{in} 为 Δp 与 $d\Delta\omega/dt$ 的乘积移相 90° ,再与 Δp 和 $d\Delta\omega/dt$ 的乘积相加后得到的输入信号; M 为自适应阻尼控制算法中虚拟转子角速度变化率的阈值。

其中,自适应系数 k 的取值应根据系统性能调节的需要来自适应确定,其取值应满足 $k \in [0,1]$ 。由于算法以 ε 是否大于零为判定条件,设定阈值 M 以滤除 $\Delta\omega$ 接近零时产生的微

小波动,避免 ε 判定值因正负判断紊乱而失效,从而保证系统的稳定运行。由式(14)可以看出,当系统发生低频振荡导致判据小于零且 $\Delta\omega$ 大于阈值时,系统会自适应地增加所需的正阻尼来抑制低频振荡。

4 仿真分析

为验证所提控制策略的有效性,以Matlab/Simulink为平台搭建了一个含VSG的微网系统仿真系统。仿真所采用的微网系统结构如图6所示。图中,VSG和DG系统分别运行在并网模式下,仿真参数设置如表2所示。

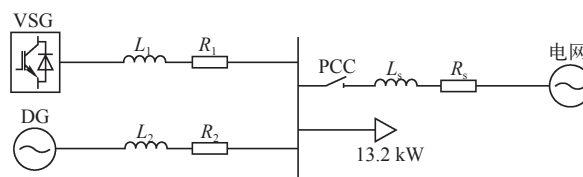


图6 含VSG的微网系统结构

Fig. 6 Microgrid system structure diagram with VSG

表2 VSG仿真参数

Tab. 2 Parameters of the VSG

参数	数值	参数	数值
f_0/Hz	50	U_{dc}/V	650
$L_{1,2}/\text{mH}$	2.7	$\omega_0/(\text{rad/s})$	314
$R_{1,2}/\Omega$	5	$J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1
$C/\mu\text{F}$	30	D	20
L_s/mH	9	R_s/Ω	1
M	0.001	k	0.3

算例设置如下:初始运行时,VSG的有功功率输出为2.2 kW,DG的有功功率输出为11 kW,3.98 s时在公共连接点PCC处发生三相短路接地故障,持续时间为0.02 s。在上述仿真条件不变的情况下,本文分别对以下四种情况时系统的频率变化、有功功率变化与阻尼变化进行详细的对比分析。

1) 未采用控制策略。

2) 通过低频振荡判据 ε 值,判别系统发生低频振荡后即时采取自适应阻尼控制策略(Self-Adaptive Damping Control, SADC)。

3) 检测系统频率变化超过0.1 Hz后,延

时采取自适应阻尼控制策略。

4) 当阻尼系数足够大时, VSG控制与SADC相比较。

四种情况的仿真结果分别如图7~图9所示。

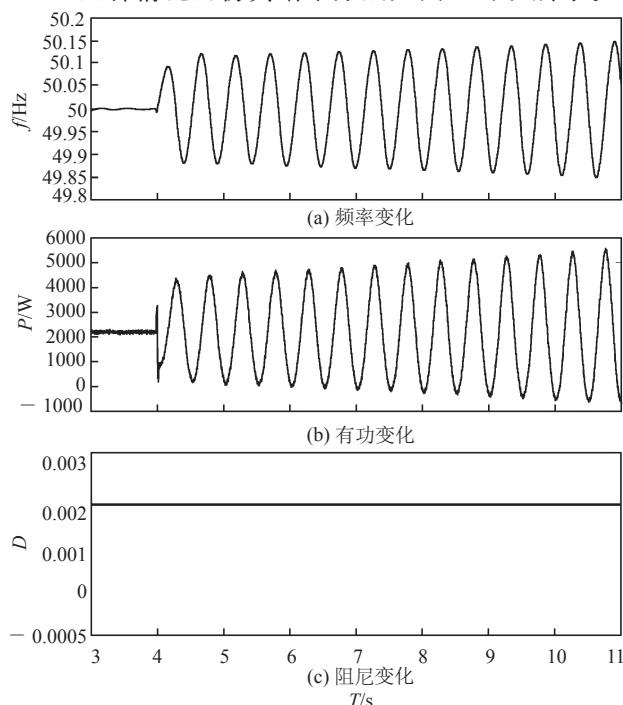


图7 发生低频振荡后系统相关参数曲线

Fig. 7 The system-related parameter curves after low-frequency oscillation

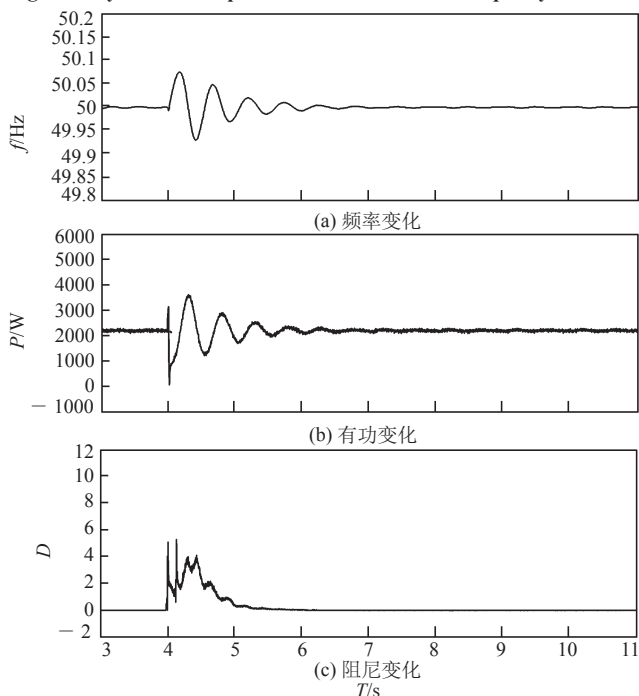


图8 通过低频振荡判断加入SADC时系统相关参数曲线

Fig. 8 The system-related parameter curves with SADC added by the low frequency oscillation criterion

由图7可知, 系统在3.98 s时发生低频振荡, 低频振荡频率约为2 Hz, 其振荡模式为本地振荡, 频率和有功功率的振荡幅值会随着振荡的发生而不断变大。在此过程中, 由于没有加入任何控制策略, 系统阻尼保持不变。

由图8可知, 系统在3.98 s时发生三相短路后, 通过检测 ε 值判别系统发生低频振荡, 加入的SADC策略能够快速地对频率和有功功率的低频振荡进行抑制, 且在抑制过程中阻尼 D 由系统所需阻尼不同而进行自适应变化。随着低频振荡被逐渐抑制, Δp 与 $d\Delta\omega/dt$ 也逐渐趋于零, 阻尼 D 最终恢复到初始值。

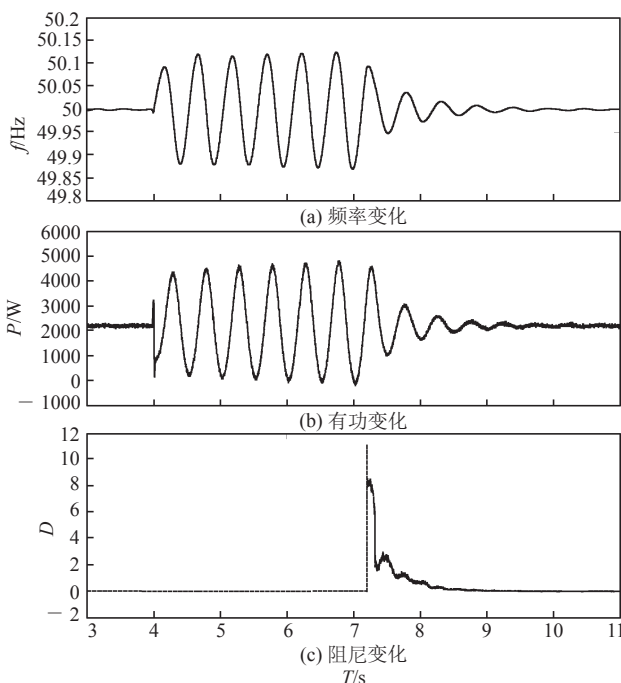


图9 检测频率越限后延时加入SADC时系统相关参数曲线

Fig. 9 The system-related parameter curves with SADC added by detecting the frequency over limit

在图9中, 通过检测系统频率, 当频率幅值变化超过0.1 Hz时, 延时3 s加入上述自适应阻尼控制策略, 由图9a可得, 控制策略约在7.2 s发生作用, 此时, 由于低频振荡没有得到及时抑制, 频率最大振幅已增至50.13 Hz; 在7.2 s时加入自适应阻尼控制策略后, 低频振荡迅速得到抑制。对比图8a和图9a、图8b和图9b可以看出, 即使振荡已经发生一段时间, 频率和有功功率已经产生较大变化, 本

文所提的自适应控制策略仍然能在较短时间内对振荡进行抑制；同时，由于采取了低频振荡判据式（12），能够使自适应阻尼控制策略尽早介入振荡的抑制，由图8与图9相比可知，最大频率偏差和最大有功功率振荡分别降低约34%和56%。

根据图9c可得，自适应阻尼控制策略能够自适应增加初始阻尼、加速系统低频振荡抑制过程，因此低频振荡在约2.4 s内迅速得到抑制。且由图8c和图9c比较可得，不同时刻系统提供抑制低频振荡的阻尼不同，验证了所提控制策略可以自适应地提供不同的正阻尼来抑制不同时刻的振荡。

根据系统的初始运行条件，对系统进行小信号分析，得到特征值、参与因子以及系统中的振荡模态，如表3所示。

表3 系统振荡模态分析

Tab. 3 Analysis of oscillation mode of power system

模态类型	特征值	振荡频率/Hz	阻尼比(%)
本地	$-0.0514 \pm j110$	2.11	0.0529

而当运用所提控制策略后，系统的振荡模态分析如表4所示。

表4 加入SADC策略后系统振荡模态分析

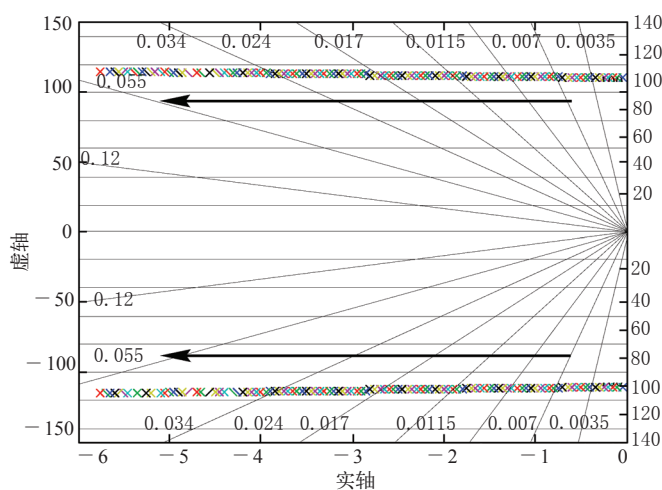
Tab. 4 Analysis of oscillation mode of power system with SADC strategy

模态类型	特征值	振荡频率/Hz	阻尼比(%)
本地	$-3 \pm j110$	2.11	0.0529~0.3174

由于加入所提控制策略后，系统阻尼是自适应变化的，所以阻尼比在0.0529~0.3174之间变化，但从仿真结果可以看出，系统阻尼比是增大的，系统低频振荡也已得到抑制。

为了验证所提控制策略的稳定性，根据前面有关系统小信号稳定性分析理论，对阻尼 D 特征值的根轨迹进行分析，得到阻尼 D 的根轨迹图如图10所示。

从图10可以看出，在阻尼 D 自适应变化过程中，其特征值的根轨迹始终在图的左半平

图10 阻尼 D 的根轨迹图Fig. 10 Root trajectory of damping D

面，由Routh稳定判据可知，系统始终运行在稳定的状态。

阻尼足够大时，VSG控制与SADC的系统相关参数比较如图11所示。根据图11可得，当阻尼系数足够大时，系统在1.9 s发生三相短路，在VSG控制策略下系统发生扰动后可以自行恢复，但系统恢复稳定的周期较长，需2 s的时间，并且系统频率、功率的振幅和振荡频率较大，低频振荡没有得到及时抑制，频率最大振幅已增至50.45 Hz，严重影响了系统的稳定性和安全性。在SADC策略下发生扰动后，系统恢复稳定的时间为0.7 s，频率最大振幅为50.2 Hz，并且系统的振荡频率较低，比VSG控制策略下系统稳定恢复时间和频率最大振幅降低了1.3 s和55%。由此可见，在SADC策略下可以有效地抑制系统的低频振荡，加快系统的快速稳定。

综上分析，可以看出所提控制策略能够在系统发生低频振荡时有效地对振荡进行抑制。此外，对于不同时刻的低频振荡，所提控制策略亦能根据振荡幅度的不同而提供不同的正阻尼，体现了所提控制策略的灵活性。

5 结束语

本文对虚拟同步发电机系统中的低频振荡进行了分析，探讨了系统中低频振荡发生

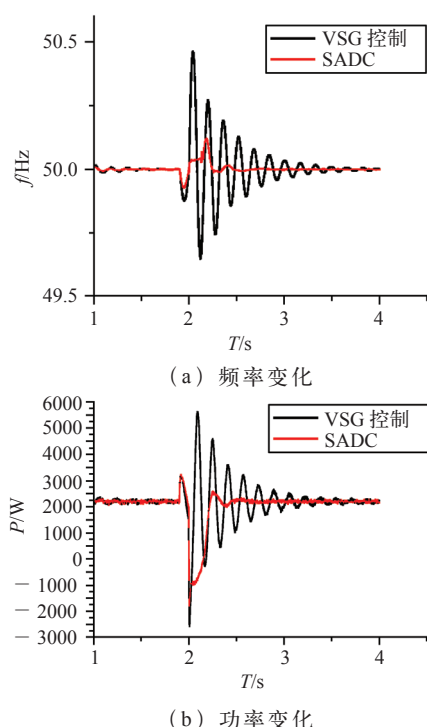


图11 阻尼足够大时VSG控制与SADC的系统相关参数比较图

Fig. 11 Comparison of system-related parameters of VSG control and SADC when the damping is large enough

的原因,通过对阻尼 D 的研究,提出了采用自适应阻尼控制策略来抑制低频振荡。

1) 所提算法基于自适应阻尼控制的原理,通过结合低频振荡时功角振荡轨迹,分析了虚拟阻尼可以自适应变化的可行性。

2) 使用Matlab/Simulink进行模型搭建和仿真,不同控制策略仿真的对比验证了所提控制策略的准确性和快速性。

3) 本文对系统进行小信号模型建立,并对系统稳定性进行分析,证明了所提控制策略的有效性。

参考文献

- [1] 刘琦. 中国新能源发展研究[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(1): 1-2.
- [2] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [3] 曾正, 赵荣祥, 杨欢. 基于奇异熵TLS-ESPRIT算

法的微电网小信号稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 7-12.

- [4] 杨占刚. 微网实验系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [5] 杨向真, 苏建徽, 丁明, 等. 微电网孤岛运行时的频率控制策略[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 164-168.
- [6] CHEN Y, HESSE R, TURSCHNER D, et al. Comparison of methods for implementing virtual synchronous machine on inverters[C]. Proceedings of International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Santiago de Compostela, Spain, 2012: 1-6.
- [7] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [8] ZHONG Q C, NGNYEN P L, MA Z Y, et al. Self-synchronized Synchronverters: inverters without a dedicated synchronization unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 617-630.
- [9] 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.
- [10] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Distributed generation grid integration using virtual synchronous generator with adaptive virtual inertia[C]. Energy Conversion Congress and Exposition, September 15-19, 2013, Denver, CO, USA: 4546-4552.
- [11] ALIPOOR Jaber, MIURA Yushi, ISE Toshifumi. Power system stabilization using virtual synchronous generator with Alternating moment of inertia[J]. IEEE Journal Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 3(2): 451-458.
- [12] 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.

- [13] 陈天一, 陈来军, 汪雨辰, 等. 考虑不平衡电网电压的虚拟同步发电机平衡电流控制方法[J]. 电网技术, 2016, 45(12): 63-65.
- [14] 侍乔明, 王刚, 付立军, 等. 基于虚拟同步发电机原理的模拟同步发电机设计方法[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 783-790.
- [15] 张鸿博, 蔡晓峰, 杨向真. 基于三相四桥臂逆变器的虚拟同步发电机分序控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1291-1299.
- [16] 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.
- [17] FRANCISCO P Demello, CHARLES Concordia. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(4): 316-329.
- [18] 周林, 龙崦平, 张密, 等. 带LCL滤波器的单相并网逆变器低频振荡现象分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 67-71.
- [19] 倪以信. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [20] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

作者简介



马成松

马成松(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向现代电力电子技术。

赵耀(1987-), 男, 博士, 讲师, 研究方向新能源技术。

(收稿日期: 2019-07-16) **EA**

广告 | AD

全新改版

色彩丰富 凸显主题

2020《电气应用》以鲜明色彩和新颖版式呈现精彩内容, 力求赏心悦目。

栏目设置 独具风格

坚持继承与开拓并举, 以丰富内涵充实经典栏目, 持续深化专家访谈、EA经理人等栏目, 密切关注电气技术的发展和运用。

专家点评 精辟深刻

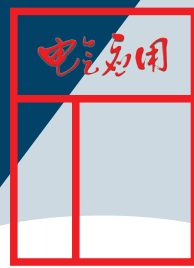
每期都将围绕一个热点话题, 隆重推出一场专题讨论的盛宴, 共邀知名专家、产品用户和生产厂家汇聚一堂, 针对焦点问题作出评析。

行业案例 生动丰富

关注电力、建筑、石化和冶金等电气行业应用, 以典型深刻的案例分析、方案设计构建技术互动的空间, 促进应用经验交流。

国内邮发代号: 82-341 国外发行代号: M1409

每期定价: 25.00元 全年定价: 300.00元



· 电气应用 盛情呈现 ·

2020