

基于暂态阻尼特性的虚拟同步发电机 控制策略研究

李翀¹,陶鹏¹,申洪涛¹,邓风平²,李兵¹,刘林青¹

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院,河北 石家庄 050011;

2. 国电南瑞南京控制系统有限公司,江苏 南京 211106)

摘要:针对分布式能源系统的出力变化所引起的系统频率和功率波动甚至越限的问题,在对虚拟同步发电机(VSG)的暂态运行特性进行分析基础之上,结合VSG的虚拟惯量和阻尼系数可控优势,以系统暂态过程的响应时间为优化目标,并建立了以系统频率及其变化率不超过阈值作为约束边界的优化系统模型,并进一步地设计了VSG的虚拟惯量和阻尼系数的协调自适应控制策略。通过仿真算例结果可知,设计的模型和控制策略能有效抑制VSG系统暂态过程中的频率和功率波动的缺陷,极大地改善了系统的暂态响应时间,从而验证了所设计模型和控制策略的合理性和有效性。

关键词:虚拟同步发电机;虚拟惯量;阻尼系数;协调自适应优化策略;暂态响应

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed21743

Research on Control Strategy of Virtual Synchronous Generator Based on Transient Damping Characteristics

LI Chong¹, TAO Peng¹, SHEN Hongtao¹, DENG Fengping², LI Bing¹, LIU Linqing¹

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050011, Hebei, China; 2. NARI-TECH Nanjing Control Systems Ltd., Nanjing 211106, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming at the problem of system frequency and power fluctuations even exceeding the limit caused by the output change of the distributed energy system, based on the analysis of the transient operating characteristics of the virtual synchronous generator (VSG), the controllable advantages of the virtual inertia and damping coefficient of VSG were combined, and the transient response time of the system was regarded as the optimization goal, an optimized system model was established with the frequency and its rate of change not exceeding the threshold as a constraint boundary, and the coordinated adaptive control strategy of the virtual inertia and damping coefficient of VSG was further designed. It can be seen from the results of simulation example that the model and control strategy designed can effectively suppress the defects of frequency and power fluctuations during the transient process of VSG system, and greatly improve the transient response time of the system, which greatly verify the rationality and effectiveness of model and the control strategy.

Key words: virtual synchronous generator (VSG); virtual inertia; damping coefficient; coordinated adaptive optimization strategy; transient response

近年来,随着传统能源结构不断优化调整,分布式能源占能源消费的比重也得到了大幅提高^[1]。但分布式能源消纳过程主要通过并网逆变装置等设备予以实现,相对于同步发电机控制原理而言,分布式系统逆变器的控制模式更加灵活、响应更迅速,然而,其具有弱惯性和阻尼特征

等缺点。为此,很多学者对虚拟同步发电机的控制模式进行了大量研究。但从本质上来说,该系统仍可归类为非线性系统。因此,对于虚拟同步发电机系统,其自身稳定性对系统网络的平稳运行产生着重大影响。文献[2-3]深入分析了在交流系统发生电压跌落时,三相整流器可能会产生

不可逆的失稳现象,当系统故障解除后无法恢复到稳定状态,并结合混合电势法对换流器故障前后进行了稳定性分析。文献[4]提出了系统暂稳环境下基于分析时间尺度的全功率机组降维模型,并结合等面积法分析了全功率机组的暂态稳定性。文献[5-6]深入阐述了逆变器的虚拟功角,且在逆变器电流未达到/达到饱和状态时,得出其虚拟功角特性,并在此基础上重点探讨了逆变器的虚拟功角稳定原理。文献[7-8]探讨了由多数量换流器建立的微网模型的暂态稳定性。

总体来说,如何保证虚拟同步发电机系统的稳定运行问题已成为研究的热、难点^[9]。文献[10]探讨了在并网和孤网两种运行模式下的VSG控制原理,并利用该方法对SG转子和一次调频特性进行建模控制来提高系统的频率稳定性,但该方法淡化了SG无功调节过程的延迟特性,电压电流不能全程做到解耦控制,参数设计难度大,易产生谐波。文献[11]通过对李雅普诺夫稳定性原理进行详细分析后,得出了利用自适应虚拟惯性控制方法可大幅地提高系统的运行稳定性。文献[12]结合系统时域仿真下的降阶模型来分析逆变器设备的暂态稳定性,但该方法计算量过大,降低了系统评估效率。因此寻求高效的计算方法将对整个系统的全局性分析至关重要。文献[13]通过对VSG系统的虚拟惯量和频率之间的数值关系进行详细分析后,提出了VSG系统虚拟惯量的定量计算方法,最后结合小信号理论给出了系统相应参数的量化规则。上述文献研究主要集中在利用VSG系统的虚拟惯量来探讨分布式能源系统的暂态过程。事实上,分布式能源系统的阻尼因素也会很大程度上改善系统的暂态响应时间。

基于此,本文结合VSG虚拟惯量和阻尼系数两因素来综合分析分布式能源系统的暂态响应过程,由此建立以VSG暂态响应时间为目标的控制模型,并结合VSG虚拟惯量和阻尼系数两因素提出了分布式能源协调自适应控制的优化策略。此外,结合相轨迹的稳定评价方法论证了系统的稳定性。最后,利用仿真算例结果来验证本文提出的优化控制策略的合理性。

1 虚拟同步发电机系统建模

1.1 含VSG的微网系统

通常情况下,VSG系统包含储能装置、逆变

器件和控制算法等部分。本文假定系统配置了足够容量的储能装置,且其荷电状态能满足系统所需功率要求,因此,本文重点对VSG系统的控制策略展开研究。含VSG的微网系统见图1。

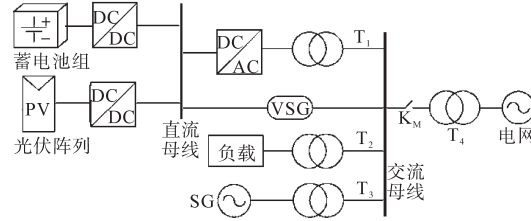


图1 含VSG单元的简单微电网结构

Fig.1 Simple microgrid structure with VSG unit

图1中, $T_1 \sim T_4$ 为交流变压器; K_M 为并网开关。系统大致结构为:储能电池和光伏阵列通过直流升压装置进行升压后汇入直流母线,其后经过含VSG的逆变器和隔离变压器将直流变换为交流,从而与同步发电机和厂用负荷共同组成简单微网系统。该微网系统可通过变压器和主网相连,也可孤网运行。本文重点考虑孤网下弱电网的情况,此时系统依然由同步发电机组来提供频率和电压,检验通过微网系统下穿透功率水平最不利情况,以便系统发生扰动时测试所提控制策略的实用效果。

1.2 VSG控制与频率稳定性

对于传统电源系统,当出现其输出功率和系统负荷消耗功率不平衡时,其所需的功率差额会由同步发电机的转子进行弥补,可采取降低同步发电机的转速,从而提升系统的频率偏差值。而对于分布式逆变电源,其系统本身并不具备旋转惯性,增加穿透功率必然提高频率偏差,因此有必要对VSG控制和系统频率稳定性关系进行分析。

对常规发电机组而言,当其输出和系统消耗的功率处于不平衡状态时,发电机的转动动能 E_k 便会进行频率补偿,其中动能偏差 ΔE_k ^[14]表示如下:

$$\Delta E_k = \int \Delta P dt = \frac{1}{2} J \Delta \omega_m^2 = \frac{1}{2} J \Delta \omega_g^2 \quad (1)$$

式中: ΔP 为发电功率输出和系统消耗功率的差值; J 为同步发电机的转动惯量; ω_m, ω_g 分别为同步发电机的机械角频率和电角频率; Δ 为变量变差。

由式(1)推导可得:

$$\Delta P = J \Delta \omega_g \frac{d\Delta \omega_g}{dt} \quad (2)$$

假定该系统含 n 台同步发电机,则式(2)变换为

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_i = \left(\sum_{i=1}^n J_i \right) \Delta \omega_g \frac{d\Delta \omega_g}{dt} = J_t \Delta \omega_g \frac{d\Delta \omega_g}{dt} \quad (3)$$

式中: J_t 为系统的总转动惯量。

为了使分布式逆变电源系统能够模拟出类似同步发电机所具有的旋转惯量,可将其输出的有功和频率变化建立相应的函数关系,从而使得分布式逆变电源系统具备相应的虚拟惯量功能。因此,计算出 n 个同步发电机和 m 个 VSG 单元的有功功率 P_{SG}, P_{VSG} 与惯量(即实际转动惯量和虚拟惯量之和) J_{SG}, J_{VSG} 间的关系为

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{SG} + \Delta P_{VSG} = \sum_{i=1}^n \Delta P_{SG,i} + \sum_{j=1}^m \Delta P_{VSG,j} \\ &= \left(\sum_{i=1}^n \Delta J_{SG,i} + \sum_{j=1}^m \Delta J_{VSG,j} \right) \Delta \omega_g \frac{d\Delta \omega_g}{dt} \end{aligned} \quad (4)$$

此时,系统的总惯量为

$$J_t = \sum_{i=1}^n J_{SG,i} + \sum_{j=1}^m J_{VSG,j} \quad (5)$$

从式(5)可以看出,在包含同步发电机和 VSG 的微网系统中,其总旋转惯量由两者共同决定。当分布式系统大量并入系统网络时,同步发电机对应的总旋转惯量会相对减小。而此时接入的分布式逆变电源系统假定不具备旋转惯量,则电源系统的总旋转惯量会减小,电力系统的频率稳定性会降低,从而进一步地影响分布式系统并入到电力系统的穿透功率。然而,采用对应的控制方法,将接入的分布式逆变电源转换成 VSG 系统,其具备的虚拟旋转惯量可增加电源系统的总旋转惯量,从而提高电力系统的频率稳定性,进而提高分布式系统并入大系统后的功率穿透水平。

2 暂态响应优化分析

2.1 系统暂态过程

在系统暂态运行中,需对 VSG 系统直流端输出功率的波动性问题予以重视。本文假定 VSG 系统的有功输出由 P_0 波动至 P_1 ,经暂态过程后进入新的平衡态。结合式(1),对其暂态过程的描述如图2所示,其中, P 为系统传输功率, δ 为系统暂态功角。

图2中, P_{em} 为系统传输的极限功率, c 为系统暂态响应的最大功角点, d 为系统允许的最大功角点。另外,VSG系统的角频率、振荡功率和功

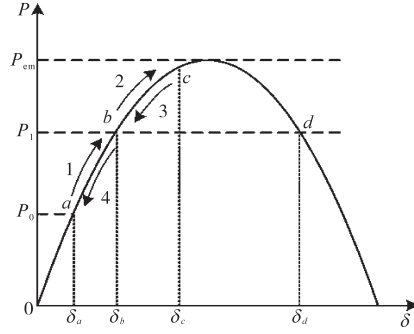


图2 虚拟同步发电机的功角轨迹

Fig.2 The power trajectory of virtual synchronous generator

率输入变化、系统控制参数等因素均密切相关。当系统输入的功率大幅波动时会引起频率越限。为此,可结合暂态过程的角频率和功角变化,可对 VSG 的虚拟惯量 J 、阻尼系数 D 进行相应实时控制,以此来抑制系统频率波动和振荡功率变化的影响,详细分析如下。

依据文献[15]所述原理,当系统的参数 D 取值较小时,图2中的 $a \rightarrow b$ 为加速过程,且在 b 处时 VSG 系统角频率高于设定的额定值,由于惯性的作用,随后 VSG 系统将跨越 b 点移动到 c 点处,从而会引发出系统频率越线和功率失稳的状态。因此,合理地对系统暂态过程中的虚拟惯量和阻尼系数进行协调控制,保证 VSG 系统在 $a \rightarrow b$ 过程中其角频率呈先增后减的趋势,从而抑制系统的频率和功率出现振荡局面。

2.2 系统暂态响应模型

为了规避系统在暂态过程中可能出现频率和功率振荡的风险,本文设计了系统相应的虚拟惯量和阻尼系数的控制原则,并以系统暂态的响应时间作为本文优化控制的目标,结合频率阈值、功率平衡为限制条件,可建立优化控制 F 的表达式:

$$F = \min T \quad (6)$$

$$s.t. \quad \Delta \delta = \int_0^T [\omega(t) - \omega_0] dt$$

$$\omega(t)_{t=0} = \omega(t)_{t=T} = \omega_0 \quad (7)$$

$$|\omega(t) - \omega_0| \leq 2\pi \Delta f_{\max}$$

$$|\omega'(t)| \leq 2\pi k$$

式中: T 为系统的暂态响应时间; δ 为同系统扰动相应的功角差; $\omega(t)$ 为随时间变化的角频率; ω_0 为初始角频率; f_{\max} 为频差上限; k 为系统频率的变化率上限。

在优化模型中,选择 VSG 系统的两个稳态条件作为优化目标的限制约束。与此同时,由于系

统的频率及其变化量大于阈值后可能引起的VSG失稳风险,本文在优化模型中还增加了系统频率及其变化率的约束措施。

3 协调自适应控制算法

3.1 优化模型求解

为了对本文所构建的模型求解优化,首先对角频率 $\omega(t)$ 进行相应处理,在 $t=0$ 和 $t=T$ 两处利用一阶泰勒函数展开计算,即

$$\omega(t) = \omega(0) + \omega'(\xi)t \quad \xi \in (0, t) \quad (8)$$

$$\omega(t) = \omega(T) + \omega'(\eta)(t - T) \quad \eta \in (t, T) \quad (9)$$

综合式(8)、式(9)可得:

$$\omega(t) \leq \omega_0 + 2\pi kt \quad (10)$$

$$\omega(t) \leq \omega_0 + 2\pi k(T - t) \quad (11)$$

综合式(7)及相关约束条件后最终推导出:

$$\omega(t) - \omega_0 \leq \min[2\pi kt, 2\pi \Delta f_{\max}, 2\pi k(T - t)] \quad (12)$$

由此,可构造出函数 $f(\omega)$ 为

$$f(\omega) = \min[2\pi kt, 2\pi \Delta f_{\max}, 2\pi k(T - t)] \quad (13)$$

综合式(7)、式(13)两式可得:

$$\begin{aligned} \Delta\delta &= \int_0^T (\omega - \omega_0) dt \leq \int_0^T f(\omega) dt \\ &= 2\pi \Delta f_{\max} \left(T - \frac{\Delta f_{\max}}{k}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

则推导出系统暂态过程的最小时间 T' 如下:

$$T' = \frac{\Delta\delta}{2\pi \Delta f_{\max}} + \frac{\Delta f_{\max}}{k} \quad (15)$$

相应地瞬态角频率 $\omega^*(t)$ 表达式为

$$\omega^*(t) = \begin{cases} \omega_0 + 2\pi kt & 0 \leq t < T_1 \\ \omega_0 + 2\pi k \Delta f_{\max} & T_1 \leq t < T_2 \\ \omega_0 - 2\pi k(t - T) & T_2 \leq t \leq T \end{cases} \quad (16)$$

式中: T_1 为第一阶段结束时间; T_2 为第二阶段结束时间。

3.2 协调自适应控制策略

结合式(16)可建立以响应时间最短为基础的系统角频率曲线,如图3所示。

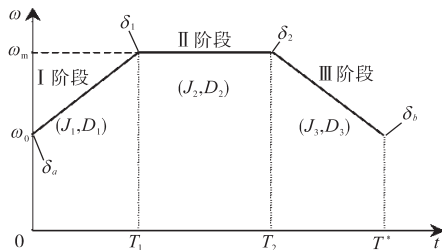


图3 系统角频率的响应曲线

Fig.3 System angular frequency response curve

由图3可知,当系统处于稳态运行状态时,其

虚拟惯量和阻尼系数为恒定值,具体设定方法见文献[16]。若出现功率差值高于设定阈值的情况,虚拟惯量和阻尼系数应采用自适应策略进行调节控制,让系统角频率可依照图3趋势变化,从而达到系统目标优化控制的目的。

同理,结合式(16)可将系统惯量和阻尼系数进行协调自适应优化控制,其控制策略所需要的触发条件和取值方法定义如下:

1)计算VSG的输入和输出的功率差,若 $\Delta P > C$ (C 为阈值)时,系统惯量和阻尼系数的自适应策略进入图3对应的I阶段,此时系统惯量和阻尼系数的设定值需满足:

$$\frac{\Delta P}{\omega} - D\Delta\omega = 2\pi k \quad (17)$$

可以看出,阈值 C 与VSG的容量和承受程度有关。在I阶段中,可将阻尼系数设定为0,以减小系统的暂态过程,则系统惯量的取值为

$$J = \frac{\Delta P}{2\pi k\omega} \quad (18)$$

2)计算VSG的虚拟角频率,当该频率增加到 $2f_{\max}$ 时进入图3对应的II阶段,此时系统惯量和阻尼系数需满足:

$$\frac{\Delta P}{\omega} - D\Delta\omega = 0 \quad (19)$$

鉴于上述过程系统的角频率会保持 $2f_{\max}$,因此式(19)可作变化:

$$\frac{P_m - P_c}{\omega_0 + 2\pi \Delta f_{\max}} - \frac{2\pi D \Delta f_{\max}}{J} = 0 \quad (20)$$

式中: P_m 为电机额定功率; P_c 为计算功率。

为充分保证式(20)具备可行解,设定该方程的分子部分为0,则该阶段的阻尼系数可得:

$$D = \frac{\Delta P}{2\pi \Delta f_{\max} (\omega_0 + 2\pi \Delta f_{\max})} \quad (21)$$

此外,II阶段系统惯性的取值保持暂态前的初始值。

3)计算VSG的功率角,当系统功角增加到 $\delta_b - \pi f_{\max}^2/k$ 时,系统可进入图3对应的III阶段,此阶段的系统惯量和阻尼系数的设定值需满足:

$$\frac{\Delta P}{\omega} - D\Delta\omega = -2\pi k \quad (22)$$

同I阶段类似,系统阻尼系数取值为0,此时系统惯量为

$$J = -\frac{\Delta P}{2\pi k\omega} \quad (23)$$

需说明,Ⅲ阶段系统的输入功率大于输出时,若需让系统减速,需系统虚拟惯量的取值为负值。

综上所述,通过三阶段协调自适应策略调整后,系统的角频率将迅速恢复到额定值,系统将达到新的稳态,其系统的虚拟惯量和阻尼系数将会更新到原始值。

3.3 稳定性分析

为详细分析本文所提的协调自适应控制策略对VSG暂态稳定性的影响,可结合VSG系统的功角及角频差在二维空间上的变化曲线来论证系统的暂态稳定性^[17]。

结合图3、式(16),可建立系统暂态过程对应的三阶段的频差及功角之间的联系:

$$\frac{d\Delta\omega}{d\delta} = \begin{cases} \frac{2\pi k}{\Delta\omega} & \delta_a \leq \delta < \delta_1 \\ 0 & \delta_1 \leq \delta < \delta_2 \\ -\frac{2\pi k}{\Delta\omega} & \delta_2 \leq \delta < \delta_b \end{cases} \quad (24)$$

则求解出 $\Delta\omega$:

$$\Delta\omega = \begin{cases} 2\sqrt{\pi k(\delta - \delta_a)} & \delta_a \leq \delta < \delta_1 \\ 2\pi\Delta f_{\max} & \delta_1 \leq \delta < \delta_2 \\ \sqrt{(2\pi\Delta f_{\max})^2 - 4\pi k(\delta - \delta_2)} & \delta_2 \leq \delta < \delta_b \end{cases} \quad (25)$$

结合文献[17],可得到系统暂态稳定性的评价方程:

$$\Delta\omega = \pm \sqrt{\frac{(P_m - P_{em} \sin\delta)^2}{P_{em} J \omega_0 \cos\delta}} \quad (26)$$

式中: P_{em} 为电机功率幅值。

将式(25)、式(26)中的角频率差和功角变化轨迹绘制在同一相平面上,如图4所示。对于系统暂态过程中VSG的角频差及其功角的变化趋势而言,若其运行曲线始终保持于拐点曲线的左侧时,即可得出本文所提的控制策略能具备让系统运行在稳定区域内的优势。

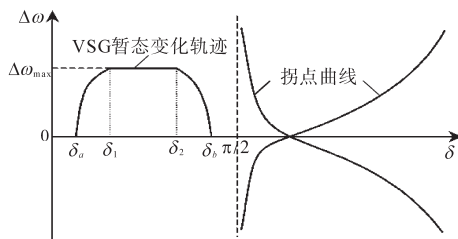


图4 系统的角频率差和功角变化曲线

Fig.4 The system's angular frequency difference and power angle change curves

4 算例分析

本文算例基于Matlab/Simulink的仿真系统开展模型仿真分析,并由此仿真结果来验证所提自适应控制策略的合理性和有效性,其算例系统的模型结构如图5所示。

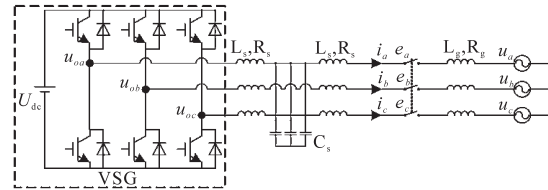


图5 算例VSG的拓扑结构

Fig.5 The topology of the calculation example VSG

算例系统所选的重要参数如下:系统的直流侧电压700 V,系统交流侧的相电压220 V;滤波参数的设置值: $L_s=2$ mH, $C=40$ μ F, $R_s=0.2$ Ω ;线路参数: $L_g=2$ mH, $R_g=0.2$ Ω ;频差门槛值 $\Delta f_{\max}=1$ Hz;频差变化率门槛值 $k=0.1$ Hz;系统虚拟惯量 $J_0=0.2$ kg·m²;系统阻尼系数 $D_0=1$ N·m·s/rad。

4.1 结果分析

本算例仿真的时长设定为2.0 s。在初始时刻 $t=0$ s处,VSG系统输入的有功设定为1 kW,无功设定为4 kvar。在 $t=0.2$ s时将输入的有功功率突增至4 kW,在 $t=1.2$ s时其值将由4 kW突降至1 kW。结合本文所给出的自适应控制策略原理,分别探讨系统恒惯量+恒阻尼控制策略、虚拟惯量自适应策略和本文给出的协调自适应策略三种方式下VSG频率、有功和无功的变化情况。

图6为系统分别处于3种控制方式时的频率对比图。

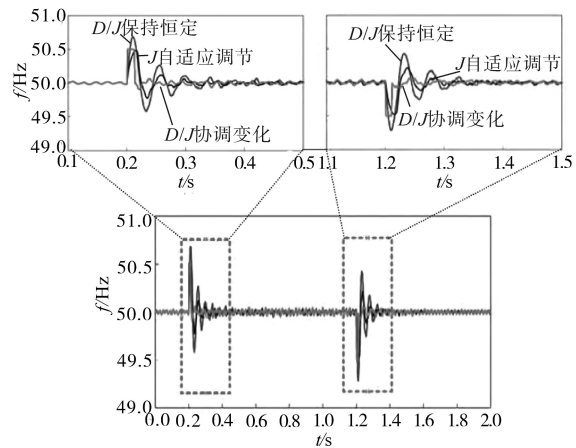


图6 系统处于3种不同控制方式时的频率对比

Fig.6 Frequency comparison when the system is in three different control modes

从图6可知,当VSG系统输入的有功突增时,采用恒惯量+恒阻尼(D/J 保持恒定)的控制策略,系统所对应频率的振荡幅值能高达0.8 Hz,超过系统频率允许控制范围,且需约0.12 s的振荡过程才能恢复;当VSG采用虚拟惯量自适应(J 自适应调节)策略时,对应的频率振荡会有所减弱,但振荡时间持续约0.08 s;当采用本文的协调自适应(D/J 协调变化)控制策略时,系统的频率变化值能够限定在0.5 Hz内,且暂态过程仅为约0.02 s。

图7、图8分别为三种控制策略下,VSG对应的有功和无功的变化图。当VSG采取恒惯量+恒阻尼控制方式时,有功的超调变化量高达24%;采用虚拟惯量自适应策略控制时,有功的暂态响应得到一定的改善,但超调量仍有11%;而采用本文协调自适应控制策略时,VSG系统提供的有功能够保证其自身平稳过渡到新的稳态,而未出现明显的超调量。而对系统的无功变化而言,三种控制策略未明显影响到系统的无功。原因在于系统的虚拟惯量和阻尼系数两项指标主要影响系统的频率和有功,而系统无功主要受制于虚拟励磁系数的影响。

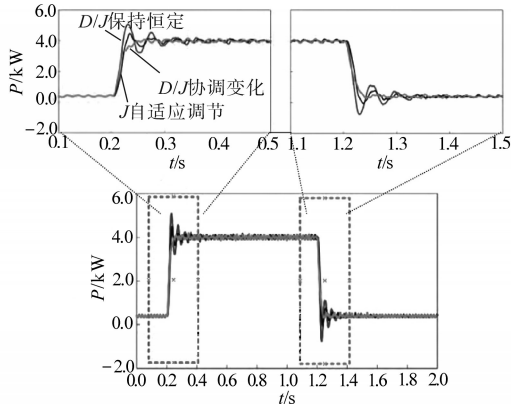


图7 系统处于不同控制方式时的有功对比

Fig.7 Active power comparison when the system is in different control modes

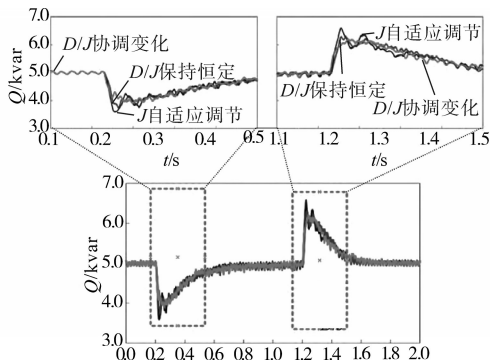


图8 系统处于不同控制方式时的无功对比

Fig.8 Reactive power comparison when the system is in different control modes

4.2 考虑系统受到干扰后系统的运行情况

4.2.1 负荷扰动的影响

增加系统运行时长,当系统负荷发生变化时,考虑到系统本身的惯性程度,其相应的发电量和负荷的不平衡等因素会导致系统的频率发生偏移。在 $t = 2.0$ s时,系统负载由10 kW突降到4 kW。则系统在三种控制策略下对系统的影响如图9~图11所示。

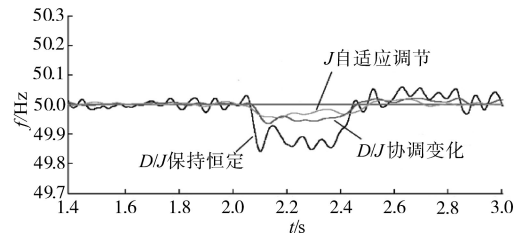


图9 负荷变化对系统频率的影响

Fig.9 Effect of load change on system frequency

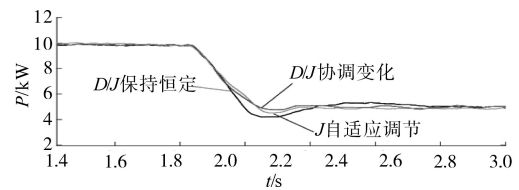


图10 负荷变化对系统有功的影响

Fig.10 Effect of load changes on system active power

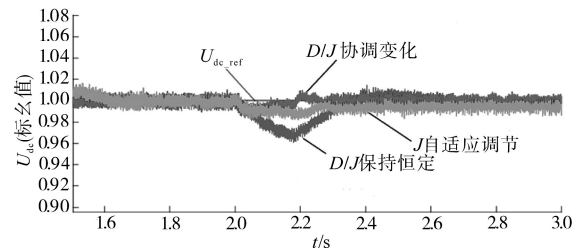


图11 负荷变化对系统直流电压的影响

Fig.11 Effect of load change on system DC voltage

由图9可知,当系统的负荷发生波动时,考虑系统本身的惯性较弱特点,利用协调自适应控制及策略,可提高VSC系统的频率稳定性,且经过负荷波动暂态过程后由图10可知,在利用协调自适应控制策略后,系统的有功输出能够平滑地过渡到新的稳态;由图11可知,在本文所提的协调自适应控制策略之下,系统对应的直流侧电压下降至0.99(标么值)后即开始恢复,而采用恒惯量+恒阻尼控制策略所对应的直流侧电压下降至0.96(标么值)后才开始恢复,采用虚拟惯量自适应策略所对应的直流侧电压也要下降至0.98(标么值)后才能够恢复。由此可总结得到当系统负

荷发生波动之后,采用协调自适应控制策略能够使系统快速地恢复到稳定状态,从而验证了系统负荷扰动下的暂态性能。

4.2.2 系统交流故障的影响

为了研究系统发生交流故障时其应对暂态的能力。本文选取五个周期(0.10 s)内清除故障,通过仿真得到系统三相故障后其系统响应性能如图12~图14所示。

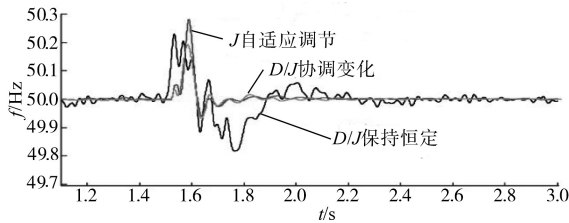


图12 交流故障对系统频率的影响

Fig.12 Impact of AC failure on system frequency

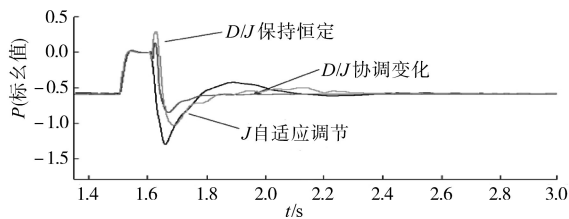


图13 交流故障对系统有功的影响

Fig.13 Influence of AC failure on system active power

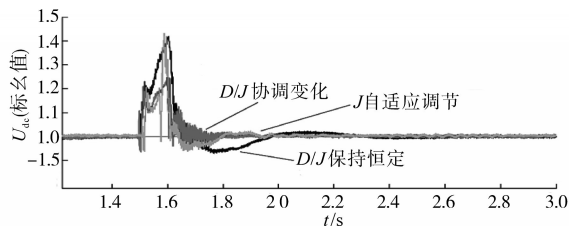


图14 交流故障对系统直流电压的影响

Fig.14 Influence of AC failure on system DC voltage

由图12~图14可知,当系统在 $t = 1.5$ s发生三相短路后,在恒惯量+恒阻尼控制策略、虚拟惯量自适应策略和协调自适应控制策略这三种控制策略下的VSC的有功输出均降低到0。而当VSC的频率突变后,三种控制策略下对应的系统频率分别加速到约50.3 Hz, 50.22 Hz和50.2 Hz,且其直流侧电压分别变化了1.41(标么值),1.42(标么值)和1.2(标么值),由此可以看出,当系统发生故障后,协调自适应控制策略所对应的直流侧电压偏差较小且能很快恢复,从而验证了其在发生三相暂态故障时具有较好的效果。

4.3 系统惯量和阻尼系数的影响

除上述讨论内容外,为了充分探讨系统暂态

过程下虚拟惯量和阻尼系数自适应调节效果,对其分别进行仿真,其变化对系统的影响情况如图15、图16所示。

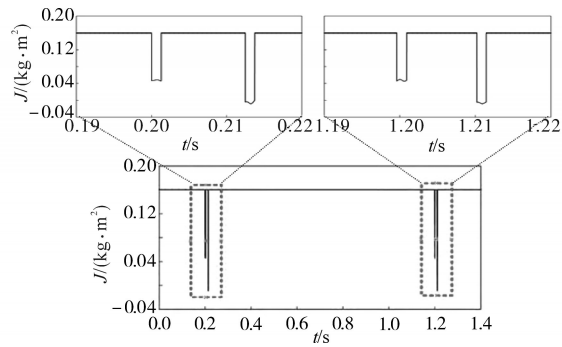


图15 虚拟惯量的变化对系统的影响

Fig.15 Impact of changes in virtual inertia on the system

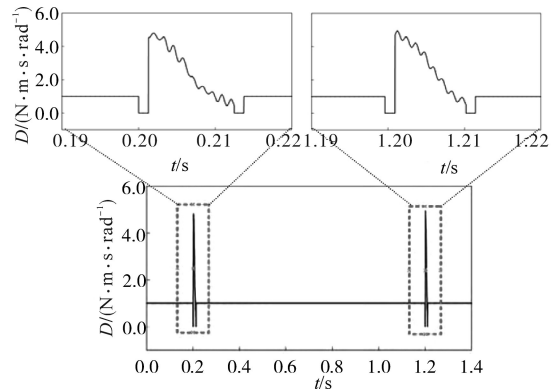


图16 考虑阻尼系数变化对系统的影响

Fig.16 Influence of considering the change of damping coefficient on the system

从图15、图16可知,当系统运行功率产生突变后,VSG系统的虚拟惯量会相应减小,且阻尼系数则降为0,从而提升系统的加速度;当系统频率增到设定阈值时,其阻尼系数会跟随系统的转矩差而相应改变,从而保证系统转子始终呈现出匀速旋转状态,同时该过程中系统的虚拟惯量也逐步恢复到原始值;当系统即将运行在新的稳态时,其虚拟惯量将会变化为负值,意味着系统即将处于减速状态,当系统的阻尼系数为0时,则系统将加速进入稳定状态。即系统在暂态过程中呈现了虚拟惯量和阻尼系数之间的协调控制效果。

5 结论

通过对分布式能源系统的功率特点进行分析后,得出系统频率和输出功率长时处于暂态振荡环境下会增加系统的运行风险。因此,本文提出一种基于VSG系统暂态下的虚拟惯量及阻尼

系数两因素协调自适应响应的控制策略。得出的结论如下:

1)详细分析VSG系统在暂态过程中的频率和功率变化,建立相应的暂态响应模型,优化出系统的角频率曲线,并对各阶段相应的系统虚拟惯量和阻尼系数进行求解,得到了优化模型的触发条件。

2)运用相平面方法得出相关控制参数的活动曲线,并结合拐点曲线判据验证了系统暂态运行的稳定性。

3)通过对比不同的控制策略仿真结果,论证了协调自适应控制策略能合理地控制系统频率和输出功率,缩短了系统暂态过程,减小系统暂态的频差和功率波动,提高了系统的稳定性和可靠性。

参考文献

- [1] 袁小明,程时杰,胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154, 5395.
- [2] 彭宇,黄萌,查晓明,等. 三相电压源型换流器故障耐受能力分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 109-115.
- [3] 朱铭炼,姜田贵,欧阳有鹏,等. 模块化多电平换流器直流双极短路故障耐受能力研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2): 44-48, 60.
- [4] 张琛,蔡旭,李征. 全功率变换风电机组的暂态稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4018-4026.
- [5] 黄林彬,章雷其,辛焕海,等. 下垂控制逆变器的虚拟功角稳定机理分析[J]. 电力系统自动化, 2016(12): 117-123.
- [6] 章雷其,黄林彬,黄伟,等. 提高下垂控制逆变器虚拟功角暂态稳定性的控制方法[J]. 电力系统自动化, 2017(12): 56-62, 99.
- [7] 帅智康,邹福筱,涂春鸣,等. 微网暂态稳定性研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 151-159.
- [8] Zhang Y, Xie L. A transient stability assessment arame work in power electronic-inter faced distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 5106-5114.
- [9] 郑天文,陈来军,陈天一,等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 165-175.
- [10] Gao F, Iravani M R. A control strategy for a distributed generation unit in grid-connected and autonomous modes of operation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 850-859.
- [11] Alipoor J, Miura Y, Ise T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(2): 451-458.
- [12] 叶一达,魏林君,阮佳阳,等. 电力电子接口电源的准功率特性降阶建模体系[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 50-58, 334.
- [13] 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.
- [14] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
- [15] 匡洪海. 分布式风电并网系统的暂态稳定及电能质量改善研究[D]. 长沙:湖南大学, 2013.
- [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] 张保会,杨松浩,王怀远. 电力系统暂态稳定性闭环控制(一):简单电力系统暂态不稳定判别原理[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 1-6.

收稿日期:2020-04-09

修改稿日期:2020-04-23