

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181522

一种电网强度在线感知的自适应虚拟同步控制策略

张骞¹, 李征², 蔡旭¹, 饶芳权¹

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 东华大学信息科学与技术学院, 上海 201620)

摘要: 微电网中的储能虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)需在并网和微电网等不同强度电网工况下切换运行。为提高 VSG 在工况切换前后的一次调频特性与动态响应特性, 采用小信号建模与广义根轨迹分析的方法, 通过向阻尼环节引入微分, 提高 VSG 一次调频响应的准确性。建立了 VSG 参数与电网强度的关系, 基于对电网强度的在线感知, 设计自适应优化虚拟阻尼的方法, 使得 VSG 在电网强度变化前后均具有良好的二次调频特性与动态响应特性。在 RTDS-DSP 硬件在环半实物仿真实验平台上构建了光-储-柴微电网模型, 通过相关实验验证了所提方法的有效性。

关键词: 虚拟同步控制; 一次调频; 电网强度; 自适应; 硬件在环

An adaptive VSG control strategy based on online grid impedance measurements

ZHANG Qian¹, LI Zheng², CAI Xu¹, RAO Fangquan¹

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. School of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Virtual Synchronous Generator (VSG) requires to be shifted between grid-connected state and micro-grid state, which have different grid strength. Aiming to keep precise Primary Frequency Regulation (PFR) ability and dynamic response characteristics of VSG, a modification of VSG control loop is proposed based on the small signal analysis and generalized root locus analysis to improve the precision of PRF by introducing differential element to the virtual damping, and an adaptive virtual damping optimization method is proposed to keep the dynamic response characteristics constant under different grid conditions. A micro-grid model is established on the Real Time Digital System (RTDS) and DSP united hardware-in-the-loop (HIL) platform, which contains PV, BESS and the diesel generator, experiment results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904005).

Key words: virtual synchronous generator; primary frequency regulation; power grid strength; adaptive control; hardware-in-the-loop

0 引言

新能源发电经过电力电子变换器并网, 由于缺乏同步机类似的阻尼和惯量, 不能自主响应电力系统的变化, 使得新能源高比例并网对电力系统安全稳定运行造成负面影响。因此有学者提出用逆变器模拟同步电机特性的控制方法, 通过增加阻尼、惯量和调频调压特性, 提高运行稳定性, 这一控制被称为虚拟同步发电机控制^[1-7]。

虚拟同步控制最早由欧洲 VSYNC 项目提出,

通过在恒功率控制的基础上增加转子运动方程来模拟同步电机的外特性^[3], 但没有解决电流源型逆变器大规模并网产生的问题^[4], 因而有学者提出了可模拟同步电机机电暂态和电磁暂态特性的电压源型 VSG 控制方法, 实现分布式电源的自同步运行^[5]。然而, 该方法直接将电网频率检测值接入 VSG 阻尼环, 对其稳定性造成负面影响。后续学者直接通过计算得到阻尼环节的频率差^[6], 提高了其稳定性, 但此时阻尼与调差系数存在相互影响, 使 VSG 参与一次调频的实际输出与设定值产生稳态误差, 从而影响了其参与一次调频的响应性能。

虚拟同步机参与一次调频能力对电力系统有着

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0904005)

重要的支撑作用^[7]。针对 VSG 参与一次调频问题,文献[8]提到可通过减小阻尼系数来减弱对调差系数的影响,但是并未展开具体研究;文献[9]研究了多台 VSG 并联运行时的功率分配,但未研究因调差系数不匹配而导致功率分配不均的问题;文献[10]将阻尼环节改造为带通,文献[11]将阻尼环节改造为高通,从而消除阻尼对调差系数的影响,但主要从稳态特性角度考虑,并未进一步考虑在不同运行状态下 VSG 的动态响应特性与参数优化。

为达到最优响应特性, VSG 的参数需要根据运行条件来整定,因此 VSG 的参数自适应也是一项重要研究内容。文献[12-13]根据母线频率变化量和变化率对 VSG 的虚拟惯量和阻尼进行自适应控制;文献[14]通过以暂态响应时间最短为目标进行最优化求解进行自适应控制。以上文献希望充分发挥电力电子变换器响应速度快的优势,提高其暂态响应特性,降低母线频率波动,但响应速度过快意味着 VSG 的惯量小,对电网的惯量支撑不足,无法充分体现虚拟同步控制的优越性,另一方面,这些自适应控制也没有针对电网强度来进行,按照强网整定的参数在弱电网下运行时, VSG 的动态响应性能往往会变差。在 VSG 的弱电网适应性研究方面,文献[15]建立了 VSG 在弱电网条件下的阻抗模型,得出 VSG 在弱电网条件下易失稳的结论,并提出通过增大有功环参数可解决其稳定性问题,但该论文没有进一步讨论 VSG 在面对不同电网强度时,参数对动态响应特性的影响及其自适应问题。

本文在对比分析两种常见 VSG 控制策略的基础上,针对一次调频与功率分配性能,提出一种改进的 VSG 控制策略,通过在阻尼环节中引入微分来消除阻尼对调差系数的影响,提高控制环响应的精度;同时,考虑 VSG 需要在微电网与大电网之间切换运行,针对电网强度变化造成的 VSG 电源动态特性变差的问题,提出一种可在线感知电网强弱并自适应调节参数的控制方法,以满足不同电网强度下运行的需要;最后在 RTDS-DSP 硬件在环实时仿真平台上进行了半实物仿真实验验证。

1 VSG 控制结构改进

1.1 常规 VSG 控制策略分析

VSG 控制由两部分组成,即无功-电压控制和有功-频率控制。图 1 为典型储能并网逆变器的结构,其中 P_{ref} 、 Q_{ref} 为指令功率, P_e 、 Q_e 为 VSG 实际输出功率, P_M 为原动机有功功率, U_{ref} 、 ω 、 φ 为 VSG

控制环节输出的指令电压、角频率和相位。其无功-电压控制模拟励磁机特性,有功-频率控制模拟调速器以及转子运动特性,控制原理图如图 1 所示。

图中所示 VSG 虚拟调速器的有功-频率下垂方程如式(1)所示,转子运动方程如式(2)所示。其中 m 为虚拟调差系数, H 为虚拟惯性时间常数, D 为虚拟阻尼。

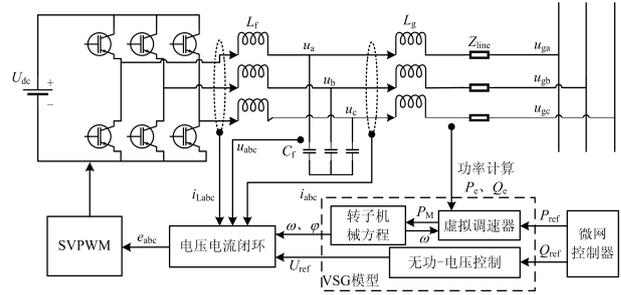


图 1 储能并网变换器结构

Fig. 1 Topology of BESS converter

$$P_M^* = P_{ref}^* + \frac{1 - \omega^*}{m} \quad (1)$$

$$H \frac{d\Delta\omega^*}{dt} = P_M^* - P_e^* - D\Delta\omega^* \quad (2)$$

VSG 控制的转子机械方程的实现通常有两种方式,如图 2、图 3 所示。

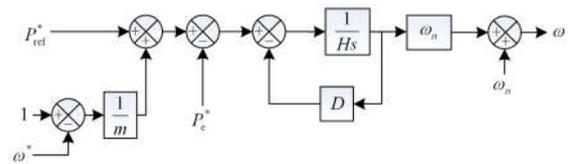


图 2 基于差值控制的 VSG 有功-频率环

Fig. 2 Active power-frequency topology of VSG based on difference control

图 2 所示的控制策略中,先由有功-频率环计算出频率差值,再与额定转速叠加后得到 VSG 的输出角频率,因而可将其称为基于差值控制的 VSG 控制策略。其阻尼反馈与惯量积分环节形成了一阶惯性环节,结构较为简单,易于控制与分析。若记: $\Delta P^* = P_{ref}^* - P_e^*$, $\Delta\omega^* = \omega^* - 1$ 且稳态时 VSG 角频率恒定,将式(1)代入式(2)可得

$$\Delta P^* - \frac{\Delta\omega^*}{m} - D\Delta\omega^* = H \frac{d\Delta\omega^*}{dt} = 0 \quad (3)$$

令 $m_{eq} = \Delta\omega^* / \Delta P^*$, 为实际调差系数,则

$$m_{eq} = \frac{m}{1 + Dm} \quad (4)$$

可见在阻尼作用下,实际调差系数 m_{eq} 明显小

于设计值 m , 且随着阻尼的增大而减小。然而, 阻尼参数设计的需要根据系统的稳定性来考虑, 通常取值较大, 导致实际调差系数过小, 因而 VSG 参与系统一次调频时过量响应, 甚至超出其有功调节范围, 使得 VSG 与电网频率滑差, 进一步与电网失步解列。

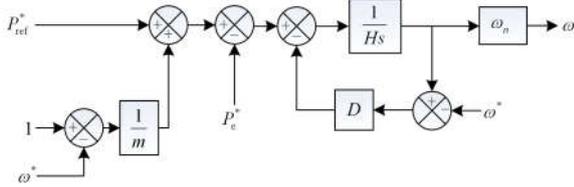


图 3 基于位置控制的 VSG 有功-频率环

Fig. 3 Active power-frequency topology of VSG based on position control

图 3 所示的控制策略通过有功环节直接计算出目标转速, 因而可将其称为基于位置控制的 VSG 控制策略。其中, 阻尼环节的频率差由计算值和检测值作差得到。在与式(3)相同的条件下, 由式(1)、式(2)可得

$$\Delta P^* - \frac{\Delta \omega^*}{m} = H \frac{d\Delta \omega^*}{dt} = 0 \quad (5)$$

可见, 其实际调差系数即为设计值 m , 即该控制策略的一次调频特性与设计目标一致。然而, 阻尼环节需要对母线频率进行实时检测, 检测环节对 VSG 的性能影响较大, 开关频率、死区时间、滤波器参数和 PLL 性能都会对 VSG 的稳定性造成显著影响。通常基于位置控制的 VSG 系统呈欠阻尼状态, 超调较大, 动态性响应特性较差。

综上所述可见, 基于差值控制的 VSG 动态性能好, 但存在稳态误差; 基于位置控制的 VSG 稳态响应精确, 但动态性能欠佳。因此可考虑对 VSG 控制策略进行优化改造, 在保证 VSG 能够正确响应一次调频的前提下, 提高其动态响应特性。

1.2 改进型 VSG 控制结构

考虑到位置控制的 VSG 在参与一次调频响应时无稳态误差, 可考虑在此基础上进行改进, 通过结构改造和参数设计, 提高其动态响应特性。

位置控制的 VSG 阻尼反馈环节包含 VSG 频率的 PLL 检测值, 而 PLL 中包含谐振环节与一阶低通滤波器, 记 PLL 的一阶低通滤波器时间常数为 t_d , 若不考虑开关频率、死区时间和谐振环跟踪速度等因素的影响, VSG 的频率检测值 ω_{PLL} 与 VSG 输出频率 ω 近似满足以下关系:

$$\omega_{PLL} = \frac{1}{t_d s + 1} \omega \quad (6)$$

依此关系对 VSG 的控制模型进行改造, 将位置控制的 VSG 中阻尼环节的检测频率, 由 PLL 检测频率, 替换为 VSG 输出频率直接经过一阶低通滤波环节所得到的值, 同时考虑阻尼系数, 从而得到一种带微分的阻尼环节形式。具体控制框图如图 4 所示。

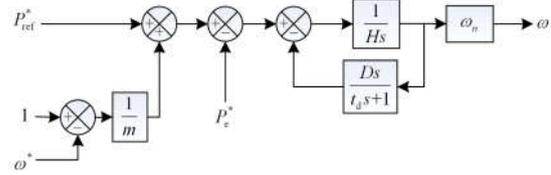


图 4 改进型 VSG 有功-频率环

Fig. 4 Active power-frequency topology of modified VSG

此种控制策略中, 阻尼环节含微分项, 阻尼与调差系数解耦, 因此对 VSG 的参与一次调频的稳态响应无影响, 其实际调差系数即为设计值 m 。而对于其动态性能, 可以通过对惯量 H 、阻尼 D 和时间常数 t_d 的参数设计来提高系统稳定性和响应特性。

2 改进型 VSG 自适应优化方法

2.1 改进型 VSG 电网强度适应性分析

考虑到 VSG 需要在微电网与大电网之间切换运行, 需要适应不同的电网强度。电网强度以电网短路比衡量, 指 PCC 点发生三相短路故障时, 电网短路容量与接入设备额定容量之比, 通常短路比小于 6~10 时为弱电网, 大于 20~25 时为强电网。

对系统有功回路进行小信号分析, 根据式(2)构造小信号模型, 并通过有功功率与相位差的关系构造闭环系统, 小信号模型如图 5 所示, 传递函数如式(7)所示。

$$G_p(s) = \frac{\Delta P_e^*}{\Delta P_M^*} = \frac{S_E \omega_n (1 + t_d s)}{H t_d s^3 + (H + D) s^2 + S_E \omega_n t_d s + S_E \omega_n} \quad (7)$$

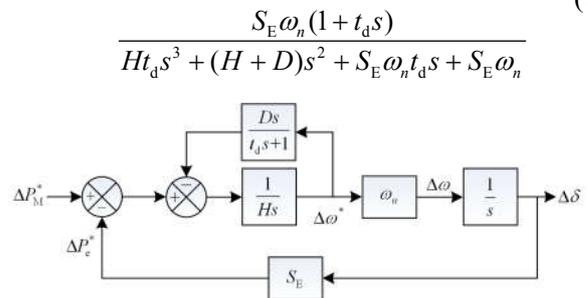


图 5 改进型 VSG 小信号模型

Fig. 5 Small signal model of modified VSG

其中, S_E 为 VSG 的整步功率系数, 与 VSG 电压 U_g 、电网电压 U_g 和总阻抗 Z 满足如下关系:

$$S_E = \frac{U^* U_g^*}{Z^*} \quad (8)$$

将系统闭环传递函数进行形式变换得到:

$$G_p(s) = \frac{\Delta P_c^*}{\Delta P_M^*} = \frac{S_E \omega_n (1 + t_d s)}{k(Ts + 1)(s^2 + 2\xi \omega_s s + 1)} \quad (9)$$

其中分母各项参数 k 、 T 、 ω_s 和 ξ 满足:

$$\begin{cases} T = Ht_d / k \\ \omega_s = \sqrt{S_E \omega_n / k} \\ \xi = \frac{kt_d - Ht_d S_E \omega_n}{2k\sqrt{k S_E \omega_n}} \\ k^3 - (H + D)k^2 + Ht_d^2 k - H^2 t_d^2 S_E \omega_n = 0 \end{cases} \quad (10)$$

VSG 参数见表 1, 设计惯性时间常数 $H=5$ s, 以电网短路比为 25, $S_E=10.64$ 为例, 考虑一定裕度设计 $t_d=0.3$ s, 以 D 为参数进行广义根轨迹分析得到。

表 1 VSG 参数

Table 1 Parameters of VSG

参数	数值	参数	数值
额定容量 S_n	250 kW	额定线电压 U_n	380 V
直流母线电压 U_{dc}	640 V	开关频率 f_s	5 kHz
LC 滤波电感 L_f	0.1 mH	LC 滤波电容 C_f	120 μ F

如图 6 所示, 关于 D 的根轨迹有三条, 系统有一对共轭复根和一个负实根, 且使系统阻尼比为 0.707 时 D 有两个取值 50.2 和 146。若取 $D=146$, 负实根超过共轭复根实部十倍范围, 因此共轭复根为主导极点, 但此时系统的自然频率远小于文献[6]中分析得到的差值控制 VSG 的自然频率, 响应速度过慢, 因此不予考虑; 若取 $D=50.2$, 负实根与共轭复根实部接近, 会使得系统衰减加快, 系统的自然

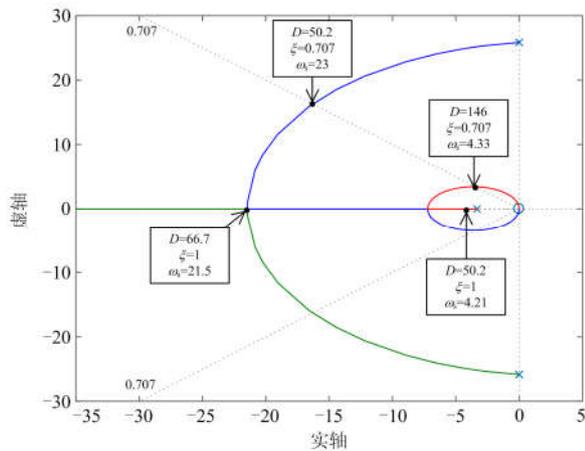


图 6 以 D 为参数的根轨迹图
Fig. 6 Generalized root loci on D

频率与差值控制 VSG 的自然频率接近, 在 $D \in (0, 66.7)$ 范围内, 系统阻尼比随 D 的增大而增大。综合考虑后采用 $D=50.2$ 所对应的设计方案。

由式(9)可知 VSG 系统阻尼比不仅与惯性时间常数和阻尼系数有关, 还与电网的整步系数 S_E 有关, 而整步系数与电网强度成正相关。按照强电网的整步系数设计的阻尼环节参数, 随着电网强度下降, 控制回路将表现出过阻尼特性或欠阻尼特性, 影响 VSG 的调节性能。图 7 为上述按照电网短路比为 25 设计的 VSG, 以 S_E 为参数的广义根轨迹, 可以看出, 当 $S_E > 6.69$ 时, 系统阻尼比随 S_E 减小而增大; 在 $S_E \in [6.29, 6.69]$ 范围内, 系统呈过阻尼; 当 $S_E < 6.29$ 时, 系统阻尼比随 S_E 减小而减小。图 8 为上述按照电网短路比为 25 设计的 VSG, 当电网短路比降为 4, $S_E=3.29$, H 和 t_d 取值不变时, 以 D 为

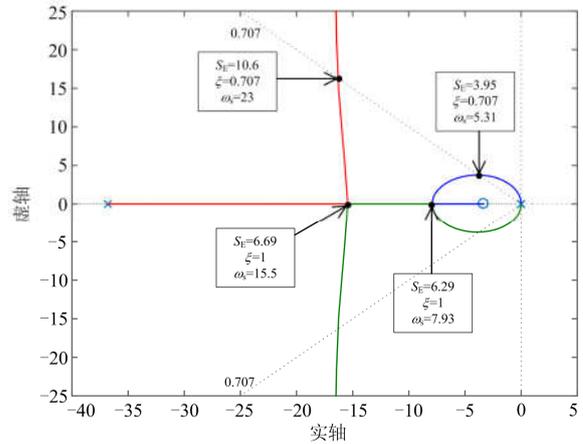


图 7 以 S_E 为参数的根轨迹图
Fig. 7 Generalized root loci on S_E

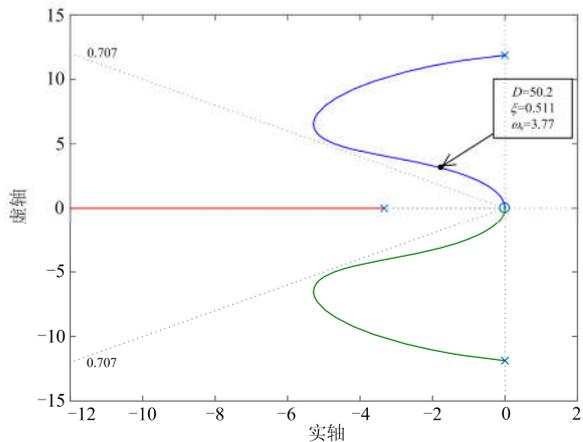


图 8 按短路比为 25 设计的 VSG 在短路比为 4 时, 以 D 为参数的根轨迹图

Fig. 8 Generalized root loci on D of the VSG designed by SCR=25 while working in SCR=4

参数的广义根轨迹,可以看出,对应 $D=50.2$,系统阻尼比仅为0.511,且无论如何调节阻尼 D 的值,阻尼比均小于0.707,始终呈现明显的欠阻尼特性,VSG的动态稳定性下降。

由上述分析可知,改进型VSG按照某一电网强度设计参数,当实际运行电网强度发生变化后,VSG的动态响应特性变差。而实际运行时,VSG需要在大电网和微电网之间切换运行,实际运行的电网强度会产生变化。因此,能够根据并网运行的电网阻抗来调节VSG阻尼环节参数,对于保证VSG的良好运行性能是重要的。

2.2 基于电网强度在线感知的自适应优化方法

根据以上分析,当电网强度变化时,VSG的响应特性随之变化,且系统阻尼比随电网强度变化非单调,故难以通过VSG的响应波形分析得到电网阻抗。因此,为了在线感知电网的阻抗,可采用谐波注入法^[20]。该方法通过在一段较短的时间内向电网注入非特征频率电压信号,通过提取该频率下的电网响应,计算出该谐波频率下的电网阻抗再换算为工频的方法,获取电网阻抗。为了降低电网特征次谐波对注入谐波的影响,同时减小滤波器对注入谐波的衰减,本文采用75 Hz作为注入谐波,采用25 Hz作为傅里叶检测基波,使得电网基波及其特征谐波均为傅里叶检测基波的偶次谐波,而注入谐波为其三次谐波,消除两者之间的相互影响。同时75 Hz接近工频,通过滤波器后衰减减小,易于检测。

在VSG出口检测75 Hz谐波对应的电压幅值 U_H 、电压相位 θ_u 、电流幅值 I_H 、电流相位 θ_i ,得到该谐波频率 ω_H 下的电网阻抗为

$$\begin{cases} Z_H = R + j\omega_H L \\ R = U_H \cos(\theta_u - \theta_i) / I_H \\ L = U_H \sin(\theta_u - \theta_i) / \omega_H I_H \end{cases} \quad (11)$$

从而得到工频下的电网阻抗为

$$\begin{aligned} \dot{Z}_g &= R + j\omega_g L = \\ &\frac{U_H}{I_H} \cos(\theta_u - \theta_i) + j \frac{\omega_g U_H}{\omega_H I_H} \sin(\theta_u - \theta_i) \end{aligned} \quad (12)$$

根据式(7)中闭环传递函数以及式(8)中整步系数与总阻抗的关系,在恒定阻尼比的条件下,可以建立阻尼 D 、电网阻抗 Z_g 和时间常数 t_d 的函数关系。

由于时间常数 t_d 的整定较为复杂,因此考虑固定 t_d 的值,通过检测电网阻抗 Z_g 对阻尼 D 进行自适应参数变换来实现控制策略优化。关于时间常数 t_d 的选取,考虑以整步系数 S_E 为参量进行可行域分析。由式(10)可知,系统阻尼比与 H 、 D 、 t_d 和 S_E

相关,且随参数变化存在最大值。取惯性时间常数 $H=5$ s, t_d 关于 S_E 的可行域满足,当 D 任意取值时,系统阻尼比最大值可取到1。

图9中黄色区域即为可行域。通常电网短路比为20~25以上为强电网,6~10以下为弱电网,充分考虑裕度,使得电网短路比为2, $S_E=1.81$ 的极端条件下,VSG仍可通过调节阻尼 D 实现性能优化,因此选择 $t_d=0.6$ s。

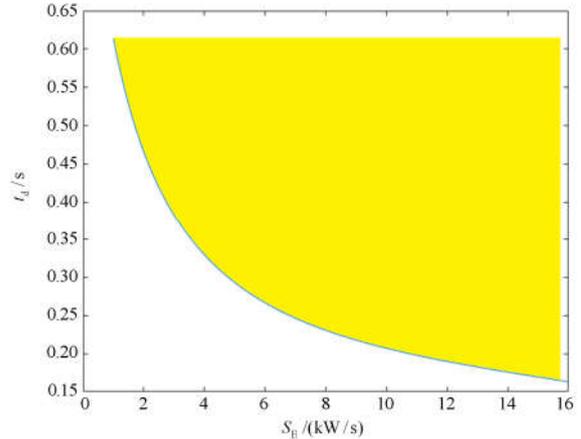


图9 时间常数 t_d 关于整步系数 S_E 的可行域

Fig. 9 Feasible region of t_d about S_E

由式(10)可知,高阶系统阻尼比计算较为复杂,根据公式计算会使得系统的控制器运算量过大,对于系统造成不利影响。因此可先固定时间常数 t_d ,计算在不同总阻抗 Z 下,使得系统阻尼比为0.707时阻尼 D 的值,最后进行回归分析得到合理范围内 D 与 Z 的近似函数关系。

取电网短路比范围为2~50,VSG惯性时间常数 $H=5$ s、 $t_d=0.6$ s,计算使得VSG阻尼比为0.707时阻尼 D 的值,并进行三次样条回归分析,最终得到阻尼 D 与总阻抗 Z 的关系为

$$D = \frac{1}{0.004 + 0.106Z - 0.220Z^2 + 0.260Z^3} \quad (13)$$

按式(13)在线调节 D ,可使VSG在不同电网强度下保持良好的动态响应特性和频率调节特性。

3 硬件在环半实物仿真实验验证

本文搭建了基于RTDS实时数字仿真平台的硬件在环平台,如图10,其中,VSG的控制算法部分通过TMS320F28335的DSP实现,DSP通过光纤与RTDS中的电力设备模型进行通信,实现对仿真平台中变频器的控制。硬件在环半实物仿真实验系统原理接线图如图11所示,由于本文主要针对VSG进行讨论,对光伏和柴油机不做赘述。VSG参数见表1。



图 10 RTDS-DSP 硬件在环仿真实验平台
Fig. 10 RTDS-DSP HIL research platform

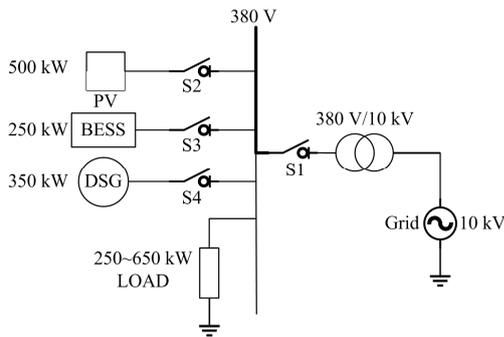


图 11 系统原理接线图
Fig. 11 Structure of research model

3.1 不同 VSG 控制策略有功-频率响应对比

在电网短路比为 25, $S_E=10.64$ 的强网条件下进行差值控制、位置控制和改进型三种 VSG 控制策略的对比实验,观察其有功阶跃响应与一次调频响应。

设计三种 VSG 的惯性时间常数 $H=5s$, 调差系数 $m=5\%$ 。针对差值控制的 VSG, 根据最优二阶系统设计得到 $D=183.2$; 针对位置控制的 VSG, 从系统稳定性角度设计 $D=206.5$; 针对改进型 VSG, 根据图 8 根轨迹分析得到 $t_d=0.3s$, $D=50.2$ 。

当 VSG 并入强网时, 有功指令从 0 kW 突变为 40 kW, 其有功指令阶跃响应的波形如图 12 所示。可以看出, 差值控制与改进型 VSG 基本符合最优系统阶跃响应, 改进型 VSG 的响应速度略慢于同惯性时间常数的差值控制的 VSG, 但其响应速度仍在合理范围内, 而位置控制的 VSG 超调较大, 系统的动态响应特性欠佳。

若强电网发生了频率偏差, VSG 响应一次调频的波形如图 13 和图 14 所示。可以看出, 当电网频率下跌 0.1 Hz 后, 差值控制的 VSG 有功出力增加了约 101 kW, 即实际调差系数约为 0.495%, 与根据式(4)计算出的等效调差系数 $m_{eq}=0.493\%$ 一致, 实

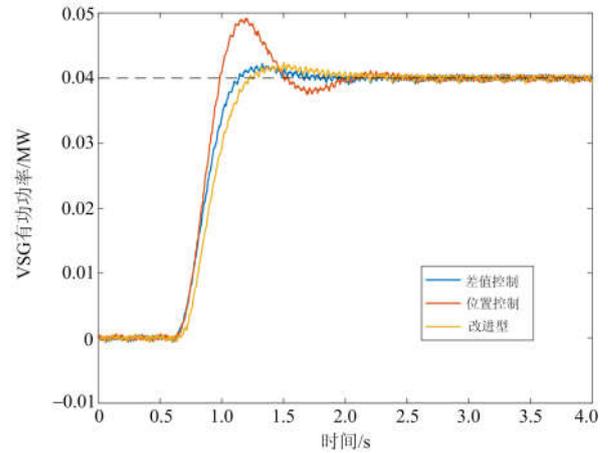


图 12 三种 VSG 有功阶跃响应
Fig. 12 Step response of VSG active power

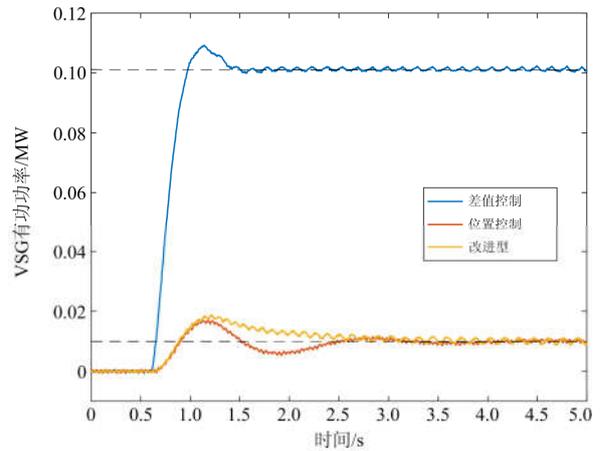


图 13 电网频率下跌 0.1 Hz 时三种 VSG 一次调频响应
Fig. 13 Primary frequency regulation of VSG active power under a 0.1 Hz fall in frequency

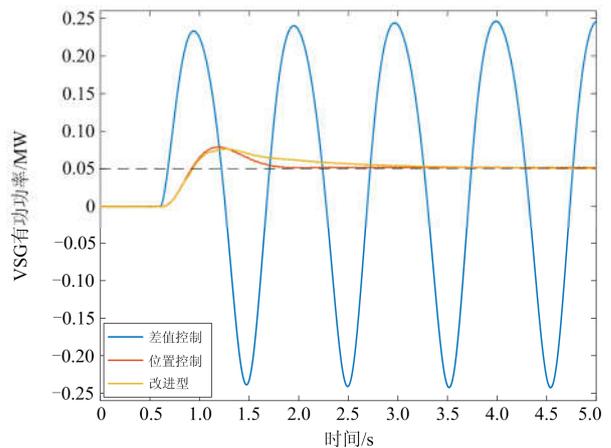


图 14 电网频率下跌 0.5 Hz 时三种 VSG 一次调频响应
Fig. 14 Primary frequency regulation of VSG active power under a 0.5 Hz fall in frequency

验证明, 差值控制的阻尼对于调差系数有较大影响, 且符合式(4)所示关系。而位置控制和改进型 VSG 有功出力增加了约 10 kW, 即实际调差系数约为 5%, 符合设计预期。

由于差值控制的 VSG 中阻尼使得实际调差系数过小, 参与一次调频的频率调节范围不足, 而低压配网的频率波动范围在 ± 0.5 Hz, 极易超出 VSG 的调节范围, 导致 VSG 与电网失步, 从而解列, 造成严重后果。从图 14 可以看出, 当电网频率下跌 0.5 Hz 后, 差值控制的 VSG 发生低频震荡, 而位置控制和改进型 VSG 有功出力增加了约 50 kW。

3.2 不同电网强度下改进型 VSG 的有功阶跃响应

在电网短路比为 25, $S_E=10.64$ 条件下, 对改进型 VSG 进行整定, 取 $t_d=0.3$ s, $D=50.2$ 。当电网强度变为电路比为 10, $S_E=6.45$ 和短路比为 4, $S_E=3.29$ 时, 其有功阶跃响应如图 15 所示。

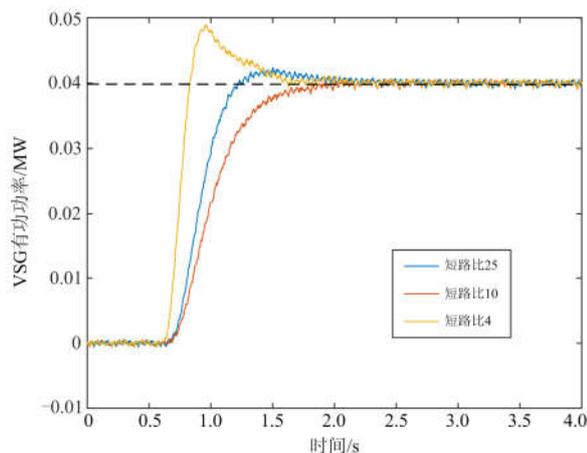


图 15 不同电网强度下 VSG 有功阶跃响应

Fig. 15 Step response of VSG active power

可以看出, 以电网短路比为 25 为前提设计的系统参数, 当电网短路比降为 10 时, VSG 呈过阻尼, 响应速度变慢, 而电网强度进一步减弱, 短路比降为 4 时, VSG 呈明显的欠阻尼, 超调过大, 且响应速度过快, VSG 的动态响应欠佳。

若采用谐波注入法进行自适应控制, 根据图 9 所示可行域分析, 取时间常数 $t_d=0.6$ s, 通过注入幅值为 2 V 的 75 Hz 谐波进行阻抗检测, 进而对虚拟阻尼 D 进行自适应优化。以电网短路比为 4 时为例, 采用 25 Hz 为基频检测 VSG 出口三次谐波的电压和电流的幅值相角, 如图 16 所示。

在采用自适应控制后, 在电网短路比分为 25、10 和 4 时, VSG 的有功阶跃响应如图 17 所示。可以看出, 电网短路比为 25 时, VSG 有功阶跃响应的超调为 4.8%; 电网短路比为 10 时, VSG 有功阶

跃响应的超调为 5.7%; 电网短路比为 4 时, VSG 有功阶跃响应的超调为 5.1%, 均接近最优系统阶跃响应, 较图 15 而言 VSG 的响应特性得到了有效提升, 说明此种自适应控制能有效提升 VSG 的电网强度适应能力, 使得 VSG 在强电网和弱电网之间切换运行状态时仍能保持较好的动态响应特性。

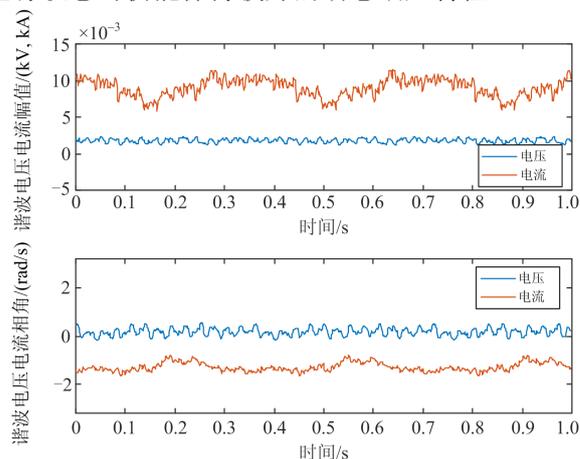


图 16 检测 75 Hz 谐波电压和电流的幅值相角

Fig. 16 Measurement of amplitudes and phases of the voltage and current of the 75 Hz harmonic

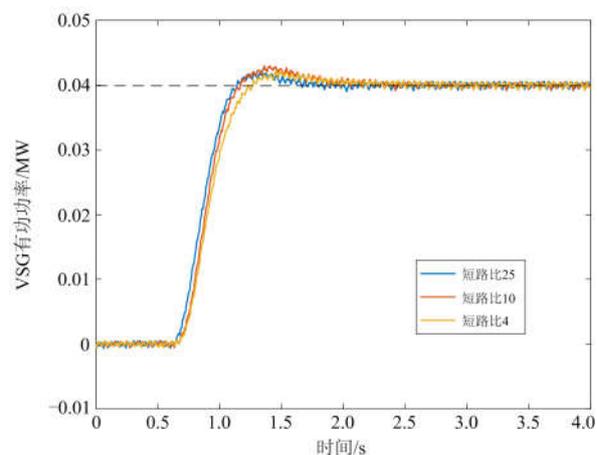


图 17 自适应 VSG 有功阶跃响应

Fig. 17 Step response of adaptive VSG active power

4 结论

本文通过理论分析与硬件在环仿真实验验证, 得到如下结论:

- (1) 传统 VSG 控制策略在响应特性上存在不足。差值控制的 VSG 由于阻尼环节与调差系数耦合, 在一次调频时存在稳态响应误差, 往往会过量响应; 而位置控制的 VSG 阻尼环节与调差系数解耦, 一次调频响应准确, 但动态响应特性欠佳。
- (2) 在位置控制的 VSG 基础上进行改造, 通过

用一阶惯性环节替代 PLL, 向阻尼环节中引入微分项, 消除阻尼与调差系数的耦合, 并可通过参数整定提高动态响应特性, 这一改造是可行且有效的。

(3) VSG 控制策略存在电网强度适应性问题, 按照某一电网条件整定的 VSG 在电网强度变化后响应特性欠佳, 而改进型 VSG 电网强度适应性问题更为复杂。

(4) 根据电网强度在线感知对 VSG 参数进行优化, 可实现 VSG 对电网强度的自适应, 使得 VSG 在电网强度变化前后均有较好的动态响应特性, VSG 在大电网与微电网工况之间切换前后的运行能力有了显著提升。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 陶亮, 程军照, 王文玺, 等. 虚拟同步发电机参数设计及优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 128-135.
TAO Liang, CHENG Junzhao, WANG Wenxi, et al. Methods of parameter design and optimization in virtual synchronous generator technology[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 128-135.
- [3] LOIX T. Participation of inverter-connected distributed energy resources in grid voltage control[D]. Leuven: Katholieke Universiteit, 2011.
- [4] 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.
ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165-175.
- [5] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [6] 石荣亮, 张兴, 徐海珍, 等. 光储柴独立微电网中的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 127-139.
SHI Rongliang, ZHANG Xing, XU Haizhen, et al. A control strategy for islanded photovoltaic-battery-diesel microgrid based on virtual synchronous generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(23): 127-139.
- [7] 秦晓辉, 苏苏宁, 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.
- [8] 徐海珍, 张兴, 刘芳, 等. 基于超前滞后环节虚拟惯性的 VSG 控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 1918-1926.
XU Haizhen, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. Virtual synchronous generator control strategy based on lead-lag link virtual inertial[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1918-1926.
- [9] 张波, 颜湘武, 黄毅斌, 等. 虚拟同步机多机并联稳定控制及其惯量匹配方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 42-52.
ZHANG Bo, YAN Xiangwu, HUANG Yibin, et al. Stability control and inertial matching method of multi-parallel virtual synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 42-52.
- [10] 李明烜, 王跃, 徐宁一, 等. 基于带通阻尼功率反馈的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(10): 2176-2185.
LI Mingxuan, WANG Yue, XU Ningyi, et al. Virtual synchronous generator control strategy based on bandpass damping power feedback[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(10): 2176-2185.
- [11] 李新, 刘国梁, 杨苒晨, 等. 具有暂态阻尼特性的虚拟同步发电机控制策略及无缝切换方法[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2081-2088.
LI Xin, LIU Guoliang, YANG Ranchen, et al. VSG control strategy with transient damping term and seamless switching control method[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2081-2088.
- [12] 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. Improved adaptive control of inertial for virtual synchronous generators in islanding micro-grid with multiple distributed generation units[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 412-423.
- [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.
CHENG Chong, YANG Huan, ZENG Zheng, et al. Rotor

- inertial adaptive control method of VSG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 82-89.
- [14] 陈来军, 王任, 郑天文, 等. 基于参数自适应调节的虚拟同步发电机暂态响应优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5724-5731.
CHEN Laijun, WANG Ren, ZHENG Tianwen, et al. Optimal control of transient response of virtual synchronous generator based on adaptive parameter adjustment[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5724-5731.
- [15] 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.
- [16] 孔剑虹, 姜学朴, 吴江宁, 等. 梯度因子估计虚拟同步发电机阻尼的配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 103-109.
KONG Jianhong, JIANG Xuepu, WU Jiangning, et al. Damping configuration of the virtual synchronous generator using gradient factor estimation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 103-109.
- [17] 程启明, 张宇, 谭冯忍, 等. 基于 Washout 滤波器的虚拟同步发电机新型控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 51-57.
CHENG Qiming, ZHANG Yu, TAN Fengren, et al. Research on new control method of virtual synchronous generator based on Washout filter[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 51-57.
- [18] LIU Ju, YANG Dongjun, YAO Wei, et al. PV-based virtual synchronous generator with variable inertia to enhance power system transient stability utilizing the energy storage system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 429-437. DOI: 10.1186/s41601-017-0070-0.
- [19] MAGDY G, MOHAMED E A, SHABIB G, et al. Microgrid dynamic security considering high penetration of renewable energy[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 236-246. DOI: 10.1186/s41601-018-0093-1.
- [20] 谢少军, 季林, 许津铭. 并网逆变器电网阻抗检测技术综述[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 320-326.
XIE Shaojun, JI Lin, XU Jinming. Review on grid impedance estimation for grid-connected inverter[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 320-326.
- [21] 牟春华, 兀鹏越, 孙钢虎, 等. 火电机组与储能系统联合自动发电控制调频技术及应用[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 29-34.
MU Chunhua, WU Pengyue, SUN Ganghu, et al. AGC frequency modulation technology and application for combination of thermal power unit and energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 29-34.
- [22] 李辉, 黄瑶妹, 马飞. 基于荷电状态的混合储能系统协调控制策略[J]. 中国电力, 2017, 50(1): 158-163.
LI Hui, HUANG Yaomei, MA Fei. Coordinated control strategy for hybrid energy storage system based on state of charge[J]. Electric Power, 2017, 50(1): 158-163.
- [23] 鲁宗相, 汤海雁, 乔颖, 等. 电力电子接口对电力系统频率控制的影响综述[J]. 中国电力, 2018, 51(1): 51-58.
LU Zongxiang, TANG Haiyan, QIAO Ying, et al. The impact of power electronics interfaces on power system frequency control: a review[J]. Electric Power, 2018, 51(1): 51-58.

收稿日期: 2018-12-05; 修回日期: 2019-04-15

作者简介:

张 骞(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电及并网控制; E-mail: 519289323@qq.com

李 征(1961—), 女, 博士, 教授, 研究方向为风力发电系统控制、分布式发电系统控制及接入、储能系统应用等; E-mail: lizheng@duh.edu.cn

蔡 旭(1964—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为可再生能源功率变换与并网技术、大功率电力电子与电力系统控制。E-mail: xucui@sytu.edu.cn

(编辑 张爱琴)