

一种无锁相环动态阻尼的虚拟同步发电机

杜 燕^{1,2}, 赵韩广^{1,2}, 张显创^{1,2}, 苏建徽^{1,2}, 杨向真^{1,2}, 赖纪东^{1,2}

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009;
2. 教育部光伏系统工程中心, 合肥工业大学, 安徽 合肥 230009)

摘要: 虚拟同步发电机(VSG)算法是一种新型并网逆变器控制方案,可使得逆变器具有虚拟的惯性和阻尼,更适用于大规模分布式发电,具有更好的电网兼容性。针对多种虚拟阻尼的实现方案,本文通过小信号模型对比分析了不同形式虚拟阻尼环节对系统性能的影响,指出基于电网电压反馈的动态阻尼项虽可改善 VSG 的动态性能,但不合理的锁相环参数影响 VSG 的动态特性,甚至会破坏系统稳定性。在上述分析的基础上,本文提出了一种无锁相环的 VSG 算法,设计了基于功率超前反馈的动态阻尼环节,并给出了一种基于相位裕度的动态阻尼参数设计方法。最后,利用 5kW 功率硬件在环半实物实验平台验证了所提出的控制策略的可行性和正确性。

关键词: 虚拟同步发电机; 锁相环; 动态阻尼; 相位裕度

DOI: 10. 12067/ATEEE1904052 **文章编号:** 1003-3076(2019)07-0010-10 **中图分类号:** TM464

1 引言

新能源并网发电是新能源利用的主要形式,其通过并网逆变器将新能源产生的电能输送到电网,具有清洁高效的优点,成为减少环境污染、提高能源利用率的有效途径^[1,2]。基于输出电流控制的控制方案具有高质量电能输送能力,因而在并网逆变器中得到了广泛应用。然而与电力系统的常规发电单元同步发电机相比,基于电流控制的并网逆变器缺乏转动惯量^[3],无法在电网波动时提供有功支持,无法为含分布式电源的配电网系统提供电压和频率支撑,随着分布式发电渗透率的升高,会导致电网的惯量降低,使得电网频率波动加剧,严重影响电力系统动态稳定性^[4,5]。

因此有学者提出虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)的控制策略解决大规模分布式发电接入电网造成的低惯量问题^[6-8]。VSG 不仅模拟了同步发电机一次调频、调压能力,使得并网逆变器可以参与电网调节,还模拟了同步发电机特有的惯量和阻尼,增强频率抗干扰能力。与常规同步发电机相比,VSG 的转动惯量和阻尼不受自身物

理条件的约束,可以根据不同工作需求自发调节能^[9,10],具有更加灵活的工作模式和运行状态,成为一种新型的分布式发电控制方案。

为了抑制惯量产生的有功功率振荡^[11,12],常在 VSG 中模拟同步发电机的阻尼项来改善系统的动态性能^[13]。同步发电机的阻尼项包含了机械阻尼和电气阻尼等多方面阻尼因素,可等效为 $(\omega-\omega_g)$ 的阻尼环节^[14],当频率或功角发生振荡时,可产生阻尼转矩,抑制功率振荡。然而考虑到 VSG 并网时,电网的频率波动通常都是低于 0.02Hz,因此虚拟同步发电机中通常用额定角频率 ω_0 代替电网真实角频率 ω_g ^[15],获得基于 $(\omega-\omega_0)$ 的阻尼项^[16,17]。这虽简化了阻尼的设计,但 $(\omega-\omega_0)$ 的阻尼项等效为调速器^[18],缺乏控制自由度,无法兼顾动稳态特性。特别在孤岛运行时,系统频率波动频繁,上述阻尼方案无法反映电网频率扰动信息,系统动态性能变差。相比于基于 $(\omega-\omega_0)$ 的阻尼项,基于 $(\omega-\omega_g)$ 的阻尼项可真实反映同步发电机的阻尼特征,但并网逆变器需要在控制策略中引入锁相环(Phase-Locked Loop, PLL)检测电网频率^[19],获取频率差值信息,

收稿日期: 2019-04-18
基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0904100)、国家电网公司科技项目(SGHB0000KXJS1800685)
作者简介: 杜 燕(1978-),女,安徽籍,副教授,博士,研究方向为新能源与分布式发电;
赵韩广(1996-),男,河南籍,硕士研究生,研究方向为分布式发电技术(通讯作者)。

才能实现 $(\omega - \omega_g)$ 的阻尼项。由于锁相环为闭环控制环节,具有非线性,电网波动会影响锁相环动态跟踪性能^[20],进而影响获取电网频率信息,削弱或恶化阻尼项的作用效果,甚至影响系统的稳定性。

为了详细分析上述两类阻尼形式对系统性能的影响,本文建立包含两种阻尼形式的 VSG 小信号模型,详细分析不同形式的阻尼方式对系统动态性能的影响,揭示锁相环对系统稳定性的影响。在此基础上,利用等效变换消除了锁相环,提出一种基于功率超前反馈的阻尼环节和基于相位裕度的阻尼环节参数整定法。最终在 5kW 功率硬件在环逆变器半实物实验平台验证了所提出的阻尼方案能改善系统在功率扰动和电网扰动时的动态性能。

2 VSG 基本原理

2.1 拓扑结构

VSG 的本质是通过控制算法模拟同步发电机本体模型以及调频调压环节,使得逆变器具有同步发电机特征。本文所采用的 VSG 系统框图如图 1 所示。

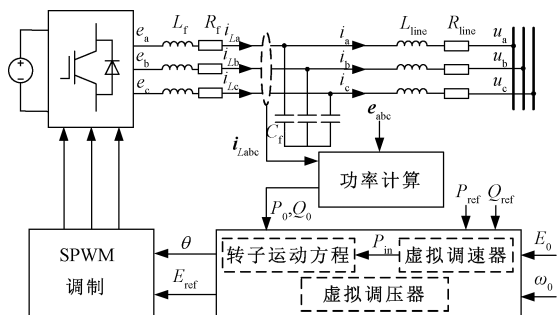


图 1 VSG 主电路拓扑及控制结构

Fig. 1 Main circuit topology and control structure of VSG

图 1 中, $\mathbf{u}_{abc} = [u_a, u_b, u_c]^T$ 为电网电压, $\mathbf{i}_{abc} = [i_a, i_b, i_c]^T$ 为并网电流, $\mathbf{e}_{abc} = [e_a, e_b, e_c]^T$ 为逆变器输出电压, L_f 为滤波电感, R_f 为与滤波电感串联的电阻, C_f 为滤波电容, L_{line} 为线路电感, R_{line} 为线路电阻; P_{ref} 、 Q_{ref} 、 E_0 、 ω_0 为上层控制单元给定值,其中 P_{ref} 为有功功率给定值, Q_{ref} 为无功功率给定值, E_0 为 VSG 空载电势, ω_0 为额定角频率; P_0 和 Q_0 分别为 VSG 输出的有功功率和无功功率。VSG 控制器主要包括转子运动方程以及调频调压算法,模拟了同步发电机的一次调频和一次调压特性,使得 VSG 参与电网频率及电压的调节。

2.2 VSG 定子电压方程

考虑到实用性以及实现的复杂性,本文采用同

步发电机经典二阶模型^[21],主要包括电磁部分和机械部分。

电磁部分仅考虑定子电压方程,表达式为:

$$L_o \frac{d\mathbf{i}_{oabc}}{dt} = \mathbf{e}_{oabc} - \mathbf{u}_{oabc} - R_o \mathbf{i}_{oabc} \quad (1)$$

式中, L_o 为同步发电机的同步电感; R_o 为同步发电机的电枢电阻; \mathbf{e}_{oabc} 为同步发电机的内电势; \mathbf{i}_{oabc} 为同步发电机转子电流; \mathbf{u}_{oabc} 为同步发电机端电压。

对比图 1 的主电路,可认为逆变桥的输出 \mathbf{e}_{abc} 为同步发电机的内电势;电网电压 \mathbf{u}_{abc} 为同步发电机端电压;逆变器注入电网电流 \mathbf{i}_{abc} 为同步发电机转子电流;忽略电容的高频容抗, L 为滤波电感与线路电感之和,视为同步电抗; R 为滤波电阻与线路电阻之和,视为同步发电机电枢电阻。这样从逆变桥的端口看去,建立 VSG 的定子电压方程。

2.3 VSG 控制器

2.3.1 转子运动方程

同步发电机的机械部分主要是转子运动方程,反映了同步发电机特有的惯量以及阻尼特性,具体表达式为:

$$\begin{cases} P_m - P_e - D(\omega - \omega_g) = J\omega \frac{d\omega}{dt} \\ \frac{d\theta_0}{dt} = \omega \end{cases} \quad (2)$$

式中, P_m 为机械功率; P_e 为电磁功率; ω 为同步发电机输出角频率; ω_g 为电网角频率; J 为转动惯量; D 为阻尼系数; θ_0 为同步发电机的电角度。

考虑到转速波动很小,近似认为 $\omega_0 \approx \omega$;保留基于 $(\omega - \omega_g)$ 的阻尼形式, VSG 的虚拟转子运动方程为:

$$P_{in} - P_0 - D(\omega - \omega_g) = J\omega_0 \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

式中, P_{in} 为 VSG 的有功功率指令值。

进一步认为电网频率波动很小, $\omega_g \approx \omega_0$;阻尼项可简化为 $(\omega - \omega_0)$,此时 VSG 转子运动方程为:

$$P_{in} - P_0 - D(\omega - \omega_0) = J\omega_0 \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

式(3)和式(4)给出了 VSG 中常用的两种转子运动方程形式,可以看出两者的阻尼设计方法略有不同,对系统性能影响也不同,这一问题将在后续章节详细讨论。

2.3.2 虚拟调速器

在转速波动时,同步发电机通过调速器检测转

速变化,调整机械功率输出,进而改变发电机电磁功率,实现一次调频。类比这一原理,可得含虚拟调速器时,有功功率指令值 P_{in} 为:

$$P_{in} = P_{ref} + \Delta P = P_{ref} + k_{\omega}(\omega_0 - \omega) \quad (5)$$

式中, k_{ω} 为 VSG 的一次调频系数。可以看出,加入调频器后,有功功率指令值 P_{in} 由两部分组成,即有功功率给定值 P_{ref} 和调频输出功率增量 ΔP 。其中 ΔP 和输出角速度变化量相关,因此可在转速变化时提供额外功率,起到一次调频作用。

2.3.3 虚拟调压器

同理,在电压波动时,同步发电机的调压器通过调节无功功率改变内电势,支持电网电压,实现一次调压。借鉴该原理,可设计含下垂特征的 VSG 输出虚拟指令电势幅值 E_{ref} :

$$E_{ref} = E_0 + k_Q(Q_{ref} - Q_0) \quad (6)$$

式中, k_Q 为无功调压系数。可以看出, E_{ref} 中含有 E_0 以及无功功率下垂控制环路,从而实现一次调压功能。

结合转子运动方程、虚拟调速器和虚拟调压器,可得 VSG 内电势向量 \mathbf{E}_{ref} 为:

$$\mathbf{E}_{ref} = \begin{bmatrix} E_{refa} \\ E_{refb} \\ E_{refc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{ref} \sin \theta \\ E_{ref} \sin \left(\theta - \frac{2}{3}\pi \right) \\ E_{ref} \sin \left(\theta + \frac{2}{3}\pi \right) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, θ 为虚拟同步发电机的电角度, $\theta = \int \omega dt$ 。忽略 SPWM 调制的高频分量, \mathbf{E}_{ref} 等于逆变桥的输出 \mathbf{e}_{abc} , 因此可认为逆变桥输出为 VSG 的内电势。

3 两种阻尼方法比较

3.1 两种阻尼实现形式

为了对比分析不同形式阻尼对系统稳定性以及动态性能的影响,建立了包括 $(\omega - \omega_0)$ 和 $(\omega - \omega_g)$ 两种阻尼形式的 VSG 有功控制统一模型,如图 2 所示。

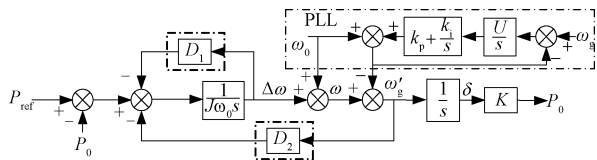


图2 VSG有功控制统一模型

Fig. 2 Unified active power control model of VSG

在图2中, ω_g 为电网角频率,通过锁相环环节

获取电网相位信息 ω'_g 。根据图2,可写出统一的VSG转子运动方程:

$$P_{ref} - P_0 - D_1(\omega - \omega_0) - D_2(\omega - G_{pll}\omega_g) = J\omega_0 \frac{d\omega}{dt} \quad (8)$$

式中, G_{pll} 为锁相环传递函数。

可以看出,忽略锁相环即 $G_{pll}=1$ 时,式(8)中包含式(3)和式(4)所示的两种阻尼项。

(1) 基于 $(\omega - \omega_g)$ 的动态阻尼项

式(3)阻尼项的表现形式为 $D(\omega - \omega_g)$, 其中 ω_g 需要利用锁相环测量获取。显然该阻尼项包含了电网频率变化信息,根据电网频率波动提供额外功率,平抑 ω 扰动而导致的功率波动。因为VSG的输出角频率 ω 在稳态情况下等于 ω_g , 基于 $D_2(\omega - \omega_g)$ 的阻尼项仅在动态情况下起作用,因此被定义为动态阻尼。

(2) 基于 $(\omega - \omega_0)$ 的稳态阻尼项

当VSG阻尼项采用 $D(\omega - \omega_0)$ 时,对比式(4)和式(5)可知,转子运动方程和虚拟调速器都含有 $(\omega - \omega_0)$, 合并式(4)和式(5)可得:

$$P_{ref} - P_0 - D_1(\omega - \omega_0) = J\omega_0 \frac{d\omega}{dt} \quad (9)$$

式中, $D_1 = D + k_{\omega}$ 。由式(9)可知, D_1 包含式(4)中的阻尼项 D , 又包含式(5)中VSG的一次调频系数 k_{ω} , 因此式(9)中的阻尼项 $D_1(\omega - \omega_0)$ 既有阻尼的作用,可抑制功率振荡;又具有有功下垂的作用,参与系统一次调频。定义 $D_1(\omega - \omega_0)$ 为稳态阻尼。

3.2 基于小信号模型的稳态、动态阻尼对比分析

3.2.1 小信号建模

为了定量分析两种阻尼形式对系统动态性能的影响,建立了图2所示系统的小信号模型。考虑到系统的扰动来源一般为给定功率扰动 ΔP_{ref} 和电网频率扰动 $\Delta \omega_g$, 建立的VSG输出功率 ΔP_0 小信号模型为:

$$\Delta P_0 = G_1(s) \cdot \Delta P_{ref} + G_2(s) \cdot \Delta \omega_g \quad (10)$$

为了获取完整的小信号模型,首先根据图2建立VSG功角小扰动下功角特性^[19]:

$$\Delta P_0 = K \Delta \delta = K \frac{\Delta \omega - \Delta \omega'_g}{s} \quad (11)$$

式中, δ 为虚拟功角; K 为功角关系系数,不考虑功率耦合的情况下, K 具体表达式为:

$$K = \frac{U^2}{\sqrt{R^2 + (\omega_0 L)^2}} \sin \alpha \quad (12)$$

式中, α 为 VSG 的阻抗角, $\alpha = \arctan \frac{\omega_0 L}{R}$ 。

图 3(a) 为锁相环线性控制模型^[22], 通过等效变换使得图 3(a) 中基于 θ 的输入输出变为基于 ω_g 的输入输出, 如图 3(b) 所示。根据图 3(b) 可以得到形如 $\Delta\omega'_g/\Delta\omega_g$ 的锁相环小信号模型:

$$G_{pll} = \frac{\Delta\omega'_g}{\Delta\omega_g} = \frac{U(k_p s + k_i)}{s^2 + Uk_p s + Uk_i} \quad (13)$$

式中, PLL 环节采用 PI 调节器, k_p 为 PI 调节器比例系数; k_i 为 PI 调节器积分系数。

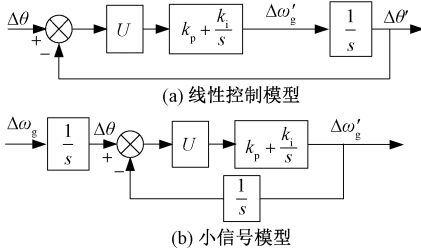


图 3 锁相环小信号模型

Fig. 3 Small signal model of PLL

同时, 根据式 (8) 可得转子运动方程的小信号模型:

$$\Delta\omega = \frac{\Delta P_{ref} - \Delta P_0 + D_2 G_{pll} \Delta\omega_g}{J\omega_0 s + (D_1 + D_2)} \quad (14)$$

综合式 (11)、式 (13)、式 (14) 可得 VSG 输出功率 P_0 关于 P_{ref} 和 ω_g 扰动的小信号模型:

$$\Delta P_0 = \frac{K}{J\omega_0 s^2 + (D_1 + D_2)s + K} \Delta P_{ref} - \frac{K(J\omega_0 s + D_1)}{J\omega_0 s^2 + (D_1 + D_2)s + K} \frac{U(k_p s + k_i)}{s^2 + Uk_p s + Uk_i} \Delta\omega_g \quad (15)$$

3.2.2 不同阻尼形式下 $\Delta P_0/\Delta P_{ref}$ 特性分析

根据式 (15) 可得有/无动态阻尼 D_2 时, P_0 关于 P_{ref} 扰动的小信号模型, 该环节无需用到锁相环, 具体表达式为:

$$\frac{\Delta P_0}{\Delta P_{ref}} = \frac{K}{J\omega_0 s^2 + Ds + K} \quad (16)$$

式 (16) 中, 当系统仅不含动态阻尼 D_2 时, $D = D_1$, 当系统加入动态阻尼 D_2 时, $D = D_1 + D_2$ 。该系统阻尼比 $\xi = D/(2\sqrt{KJ\omega_0})$, 加入动态阻尼后, 系统阻尼比明显增大。图 4 为两种阻尼模式下给定功率 P_{ref} 阶跃时输出功率 P_0 响应, 其中 Mag 为幅值。可以看出, 与只含有稳态阻尼 D_1 相比, 加入动态阻尼

D_2 后, 上升时间略有降低, 但是系统超调和振荡均消失, 调节时间大幅缩短, 系统由欠阻尼状态变为过阻尼状态。

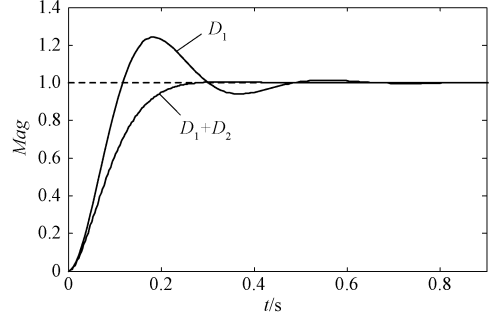


图 4 两种阻尼方式的单位阶跃响应

Fig. 4 Unit step response of two kinds of damping

值注意的是, 改变 D_1 也可以调节系统的动态指标, 但由式 (4) 可知, D_1 同时决定了孤岛运行 VSG 的稳态工作频率, 因此 D_1 的设计范围受到该条件约束, 缺乏足够的自由度兼顾动态性能。与式 (8) 相比, 稳态条件下 VSG 输出角频率 ω 与电网角频率 ω_g 相同, 加入动态阻尼项 D_2 并不会改变稳态工作点的额定角频率, 这样就增大了 $P-\omega$ 控制器的自由度, 并且可以在不牺牲频率调节的情况下提高系统动态性能。

3.2.3 不同阻尼形式下 $\Delta P_0/\Delta\omega_g$ 特性分析

为了分析电网频率 ω_g 扰动时, 不同阻尼情况下 VSG 输出功率的响应, 结合式 (15), 可以得到式 (17) 所示三种情况的小信号模型: ①只含有稳态阻尼 D_1 ; ②含有稳态阻尼 D_1 、动态阻尼 D_2 且有锁相环; ③含有稳态阻尼 D_1 、动态阻尼 D_2 且没有锁相环。

$$\frac{\Delta P_0}{\Delta\omega_g} = \begin{cases} -\frac{K(J\omega_0 s + D_1)}{J\omega_0 s^2 + D_1 s + K} & \text{情况 1} \\ -\frac{K(J\omega_0 s + D_1)}{J\omega_0 s^2 + (D_1 + D_2)s + K} \frac{U(k_p s + k_i)}{s^2 + Uk_p s + Uk_i} & \text{情况 2} \\ -\frac{K(J\omega_0 s + D_1)}{J\omega_0 s^2 + (D_1 + D_2)s + K} & \text{情况 3} \end{cases} \quad (17)$$

图 5 比较了①和③两种情况下的 ΔP_0 关于 $\Delta\omega_g$ 的闭环幅频特性。可以看出, 当 D_1 较小时, 低频段会出现谐振尖峰, 这意味着系统的稳定性较差; 随着 D_1 的增加, 谐振峰值消失, 上升时间和调节时间有所减小, 但是零幅频比增大, 系统带宽减小, 这表明系统稳态精度变差。当系统增加动态阻尼 D_2 并忽略锁相环的动态过程后, 不仅谐振峰值消失, 而且

零幅频比和带宽都保持不变,改善了系统的动态性能。

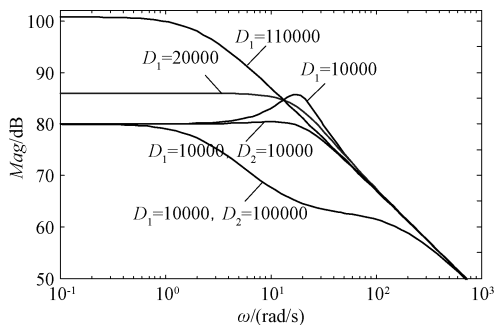


图5 两种阻尼方式幅频特性

Fig. 5 Two kinds of damped amplitude-frequency characteristics

锁相环参数对幅频特性的影响如图6所示。随着 k_p 的增加,谐振峰值消失,但是与不含锁相环情况相比,系统带宽减小。随着 k_i 的增加,谐振峰值随之增大,会威胁到VSG稳定运行。由此可知,锁相环会削弱动态阻尼的效果。

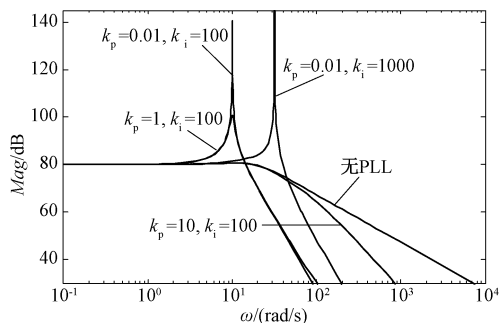


图6 锁相环对闭环系统性能影响

Fig. 6 Influence of PLL on system closed-loop performance

4 含动态阻尼的改进型VSG控制策略

根据第3节的分析可知,引入动态阻尼项后可以改善系统的动态性能,但是同时需要引入的锁相环会降低系统带宽,使系统动态性能变差。为了消除锁相环带来的负效应,本文提出了一种无锁相环的动态阻尼算法,利用等效替代法,设计了一种基于功率超前滞后反馈的动态阻尼环节,在改善系统动态性能的同时,避免了在控制器中引入锁相环。

4.1 无锁相环的动态阻尼算法

锁相环是为了获取动态阻尼项 $(\omega - \omega_g)$ 中的电网角频率 ω_g 。根据等效移动原则,可以把动态阻尼 D_2 的引出点从 $(\omega - \omega_g)$ (如图7中A点所示)改变到输出功率 P_0 处(如图7中B点所示),等效变换后的 $P-\omega$ 控制框图如图7所示。

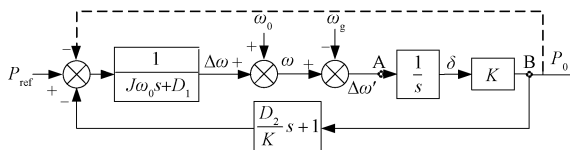


图7 等效变换后的VSG的 $P-\omega$ 控制框图

Fig. 7 $P-\omega$ control diagram of VSG after equivalent transformation

由图7可以看出,输出功率反馈通路由单位负反馈变为—阶微分环节。由于微分环节会放大输出功率的高次谐波,削弱动态阻尼的作用,可以在功率微分反馈通路上加入—阶惯性环节,同时可以滤除输出有功功率的高次谐波,改善系统动态性能。

本文所提的含动态阻尼改进型VSG控制策略的 $P-\omega$ 控制框图如图8所示,输出功率反馈通路由单位负反馈变为超前环节。其中改进型动态阻尼环节传递函数为:

$$G_{\text{damp}}(s) = \frac{aTs + 1}{Ts + 1} \quad (18)$$

式中, T 为惯性时间常数; $a = D_2/(KT) + 1$ 。

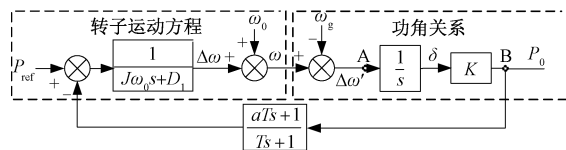


图8 改进VSG的 $P-\omega$ 控制框图

Fig. 8 Improved $P-\omega$ control diagram of VSG

4.2 基于相位裕度的VSG参数设计方法

为了使图8所示系统获得更好的动态性能,本文提出了基于相位裕度的VSG参数设计方法。首先在不考虑动态阻尼的条件下,利用二阶系统最优设计转动惯量 J 和稳态阻尼 D_1 ;针对所提的改进型动态阻尼环节,提出一种基于相位裕度的参数整定法设计该环节参数 a 、 T ,获取最佳的动态性能。

4.2.1 惯量和稳态阻尼参数整定^[23]

大型同步发电机组的阻尼和惯量受自身物理条件的约束,然而VSG的阻尼和惯量可以根据系统需求自适应设计。针对图8所示系统,当系统不含动态阻尼项,即功率为单位负反馈条件下,VSG开环传递函数为:

$$G(s) = \frac{K}{s(J\omega_0s + D_1)} \quad (19)$$

根据式(19)可知,该系统阻尼比 $\xi = D_1/(2\sqrt{KJ\omega_0})$ 。根据3.1节可知 D_1 兼具阻尼和一次

调频作用,由于阻尼系数远小于一次调频系数,故取 D_1 为一次调频系数,有:

$$D_1 \geq \frac{P_{\max}}{f_{\max} - f_{\min}} \tag{20}$$

式中, P_{\max} 为系统允许输出有功功率的最大值; f_{\max} 为系统允许输出最大频率; f_{\min} 为系统允许输出最小频率。

在设计惯量 J 时,兼顾系统响应速度和超调量,可以利用“最佳二阶系统”概念,取 $\xi = 0.707$,根据式(21)计算系统转动惯量:

$$J = \frac{D^2}{4K\omega_0\xi^2} \tag{21}$$

4.2.2 相位裕度法整定改进型动态阻尼环节

在加入动态阻尼项之后,在功率反馈回路上增加超前环节,如图8所示,系统的开环传递函数为:

$$G_d(s) = \frac{K(aTs + 1)}{s(J\omega_0s + D_1)(Ts + 1)} \tag{22}$$

由式(22)可以看出,增加了一对零极点,因此可采用零极点配置的方法,获取最佳的系统性能。本文以相位裕度为约束条件来配置超前环节的最佳超前角。一般来说,系统的相位裕度越大,系统越稳定,起到抑制功率振荡的作用,但是相位裕度过大会减慢系统响应速度^[24]。因此选取相位裕度 $\gamma \in [50^\circ, 70^\circ]$ 。

根据式(22)可得该系统的截止频率和相位裕度表达式为:

$$\begin{cases} \left| \frac{K\sqrt{(aT\omega_c)^2 + 1}}{\sqrt{(J\omega_0\omega_c)^2 + D_1^2}\sqrt{(T\omega_c)^2 + 1}\omega_c} \right| = 1 \\ \gamma = 180^\circ - 90^\circ - \arctan \frac{J\omega_0\omega_c}{D_1} + \varphi(\omega_c) \end{cases} \tag{23}$$

式中, ω_c 为本文所提改进型VSG系统的截止频率; $\varphi(\omega_c)$ 为改进型动态阻尼环节在该截止频率处对应的相角,具体表达式为:

$$\varphi(\omega_c) = \arctan \frac{(a - 1)T\omega_c}{1 + aT^2\omega_c^2} \tag{24}$$

由于改进型动态阻尼环节与超前环节有相同的表达式,利用超前环节特性,可知改进型动态阻尼环节存在式(25)所示特性:

$$\begin{cases} \varphi(\omega_m) = \arctan \frac{a - 1}{2\sqrt{a}} \\ \omega_m = \frac{1}{\sqrt{a}T} \end{cases} \tag{25}$$

式中, $\varphi(\omega_m)$ 为改进型动态阻尼环节最大超前角; ω_m 为最大超前角对应的角频率。为了充分利用改进型动态阻尼环节的最大超前角,设定 $\omega_c = \omega_m$ 。

将式(25)代入式(23)可得到 a 和 T 的二元方程:

$$T = \sqrt{\frac{D_1^2a + \sqrt{D_1^4a^2 + 4K^2a^3J^2\omega_0^2}}{2K^2a^3}} \tag{26}$$

$$T = \frac{J\omega_0}{D_1} \frac{-\cot\gamma + 2a^{\frac{1}{2}} + \cot\gamma}{a^{\frac{3}{2}} + 2\cot\gamma - a^{\frac{1}{2}}} \tag{27}$$

由于联立式(26)和式(27)直接求解不便,可利用数形结合的方法,在特定的相位裕度 γ 条件下给出式(26)和式(27)所示方程的两条曲线,获取两条曲线的交点,进而确定该相位裕度下对应改进型动态阻尼环节的 a 、 T 值,从而避免了重复试凑,提高参数整定的效率。

系统参数见表1。根据表1参数求解 a 、 T 方法如图9所示。根据式(19)给出系统开环波伯德图,如图10中曲线A所示,此时系统相位裕度 $\gamma = 40^\circ$ 。

表1 系统参数

Tab. 1 Experimental parameters	
参数	数值
电网电压 U/V	220
电网频率 f_0/Hz	50
线路电阻 R/Ω	1.57
线路电感 L/mH	5
稳态阻尼 D_1	10^4
稳态阻尼 D_2	12420
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	12.73

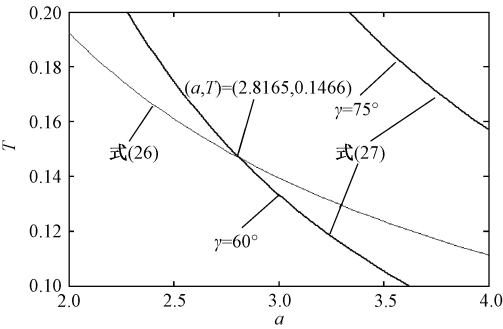


图9 参数 a 、 T 求解方法

Fig. 9 Method for solving paraments a and T

系统加入改进型动态阻尼,当整定后系统相位裕度 $\gamma = 60^\circ$ 时,从图9可得的超前环节参数为 $(a, T) = (2.8165, 0.1446)$;当整定后系统相位裕度 $\gamma =$

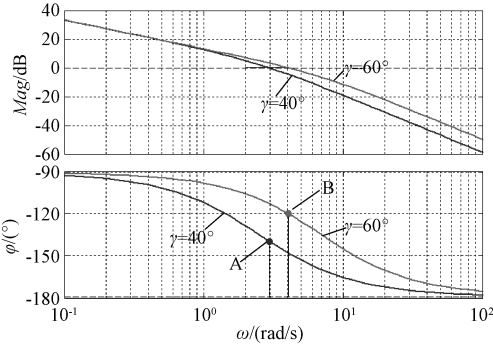


图 10 P - ω 开环传递函数伯德图

Fig. 10 Bode plots of P - ω transfer function

75°时,可以看出式(27)的曲线与式(26)的曲线没有交点,意味着 γ 选取不合理。图 10 的曲线 B 给出了优化设计后的伯德图,所对应的相位裕度与设计指标相同,且与曲线 A 相比,优化设计后的带宽和相角裕度均有提高。由此可以看出基于相位裕度的参数设计可在提高相位裕度的同时,增加系统的带宽,提高系统的稳定性和快速性。

5 实验验证

为了验证本文所提动态阻尼环节的有效性以及参数设计的正确性,搭建 5kW 功率硬件在环逆变器半实物实验平台,如图 11 所示。其中控制器装载控制电路,仿真器装载主电路,在 PC 运行 StarSim 软件使二者形成闭环系统。主要系统参数见表 1。

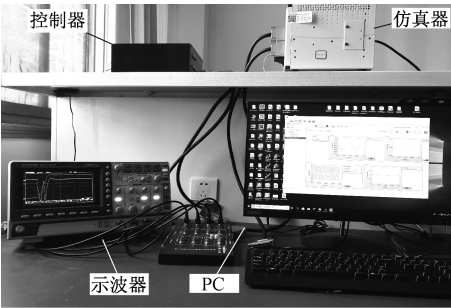


图 11 5kW 功率硬件在环逆变器半实物平台

Fig. 11 5kW hardware-in-loop inverter platform

5.1 给定有功功率阶跃的系统动态性能

当给定有功功率 P_{ref} 波动时,为了验证本文所提方案的正确性,系统给定有功功率从 0 阶跃至 2kW,分析下列三种阻尼配置条件下输出有功功率响应:①只含有稳态阻尼 D_1 ;②含有稳态阻尼 D_1 、动态阻尼 D_2 且有锁相环;③本文所提方案。

图 12 为 VSG 给定功率 P_{ref} 和输出功率 P_o 的波

形图。当 P_{ref} 阶跃时,对比图 12(a)和图 12(c)可以看出,本文所提方案输出有功功率的超调从 40%降为 0,调节时间从 3.5s 减少到 1.5s,反映了本文所提方案中动态阻尼可以改善系统动态性能且没有功率振荡。对比本文所提方案③和阻尼配置条件②可知,图 12(c)和图 12(b)的动态性能几乎相同,这表明锁相环对系统的有功功率阶跃响应没有影响。实验结果和 2.1.2 节理论分析相一致。

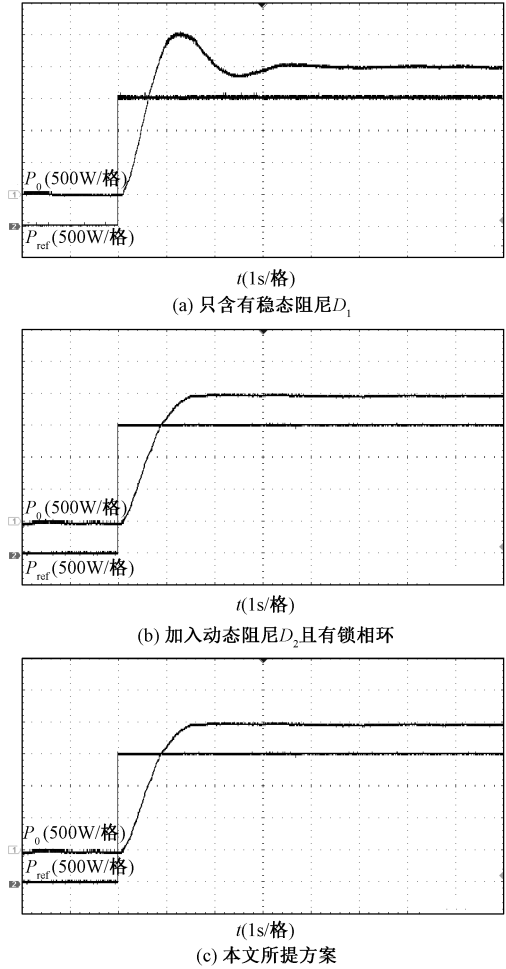


图 12 给定有功功率阶跃时输出有功功率在三种阻尼配置条件下实验结果

Fig. 12 Experiment results of output active power in three cases when P_{ref} stepped

5.2 电网频率波动时系统动态性能

为了模拟电网频率波动,本文使电网频率降低 0.1Hz,即电网电压频率由 50Hz 变为 49.9Hz。图 13 为 VSG 输出功率 P_o 、电网角频率变化量 $\Delta\omega_g$ 以及功角 δ 的波形图。当电网频率下降时,为了抑制 VSG 输出频率进一步降低,逆变器输出功率增加。当电网频率恢复时,通过减少 VSG 输出功率抑制其

输出频率的增加。对比图 13(a)和图 13(c)可以看出,加入动态阻尼 D_2 后,功率超调降低,而且功率振荡消失,调节时间从 5s 缩短至 1.5s,系统动态性能得到改善。

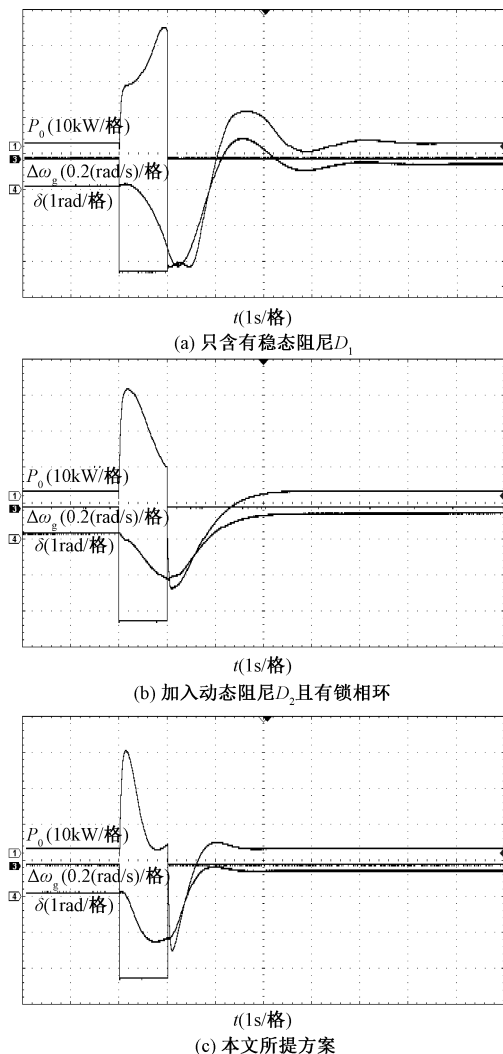


图 13 电网频率波动时输出有功功率及角频率在三种阻尼配置条件下实验结果

Fig. 13 Experiment results of active power and frequency in three cases when ω_g fluctuated

为了分析锁相环对系统动态性能的影响,对比图 13(b)和图 13(c)可以看出,去掉锁相环后,逆变器输出功率超调减小,同时调节时间降低了 40%,由 2.5s 减少到 1.5s,这意味着锁相环在降低功率超调的同时增加了调节时间,危害系统动态性能。

综上所述,本文所提方案的动态性能相对而言是最优的。无论是给定功率阶跃,还是电网频率产生波动,系统的调节时间大幅度缩短,整体动态性能都得到明显改善,证明本文所提出的无锁相环且含

动态阻尼的 VSG 控制方案的有效性。

6 结论

本文首先建立了既包含稳态阻尼 $D_1(\omega-\omega_0)$ 又包含动态阻尼 $D_2(\omega-\omega_g)$ 的 VSG 小信号模型,对比分析了不同形式的阻尼对系统动态性能的影响,指出锁相环的存在会恶化系统动态性能。在上述分析基础上,本文提出一种改进型 VSG 控制策略,设计了基于功率超前反馈的动态阻尼项,给出了基于相位裕度的参数整定流程,在改善系统动态性能的同时,又无需引入锁相环。由于 VSG 常运行在阻感性线路条件下,下一步工作重点为消除功率环的耦合效应,进一步优化控制器参数。

参考文献 (References):

- [1] 曾正, 赵荣祥, 汤胜清, 等 (Zeng Zheng, Zhao Rongxiang, Tang Shengqing, et al.). 可再生能源分散接入用先进并网逆变器研究综述 (An overview on advanced grid-connected inverters used for decentralized renewable energy resources) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2013, 33 (24): 1-12.
- [2] 徐德鸿, 陈文杰, 何国锋, 等 (Xu Dehong, Chen Wenjie, He Guofeng, et al.). 新能源对电力电子提出的新课题 (New power electronics topics brought by the development of renewable energy) [J]. 电源学报 (Journal of Power Supply), 2014, 12 (6): 4-9.
- [3] Gong Wenming, Hu Shuju, Shan Martin, et al. Robust current control design of a three phase voltage source converter [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2 (1): 16-22.
- [4] 王振浩, 李丹, 贺微, 等 (Wang Zhenhao, Li Dan, He Wei, et al.). LCL 型逆变器接入弱电网下的谐振分析及抑制方法研究 (Analysis of resonant characteristics and resonance suppression strategy of weak grid with LCL-type inverter) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (6): 34-42.
- [5] 王晓寰, 张敏霞, 张纯江, 等 (Wang Xiaohuan, Zhang Minxia, Zhang Chunjiang, et al.). 基于自适应下垂控制的多机逆变器双模式运行及平滑切换研究 (Study on two-modes operation and seamless transfer of multi-inverter based on adaptive droop control strategy) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (3): 17-25.
- [6] Zhong Qingchang, Nguyen Phi-Long, Ma Zhenyu, et al. Self-synchronized synchronverters: Inverters without a

- dedicated synchronization unit [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 29 (2): 617-630.
- [7] Zhong Qingchang, Weiss G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (4): 1259-1267.
- [8] Ashabani M, Mohamed Y A R I. Integrating VSCs to weak grids by nonlinear power damping controller with self-synchronization capability [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29 (2): 805-814.
- [9] 程冲, 杨欢, 曾正, 等 (Cheng Chong, Yang Huan, Zeng Zheng, et al.). 虚拟同步发电机的转子惯量自适应控制方法 (Rotor inertia adaptive control method of VSG) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2015, 39 (19): 82-89.
- [10] 宋琼, 张辉, 孙凯, 等 (Song Qiong, Zhang Hui, Sun Kai, et al.). 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 (Improved adaptive control of inertia for virtual synchronous generators in islanding micro-grid with multiple distributed generation units) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2017, 37 (2): 412-423.
- [11] 杜威, 姜齐荣, 陈蛟瑞 (Du Wei, Jiang Qirong, Chen Jiaorui). 微电网电源的虚拟惯性频率控制策略 (Frequency control strategy of distributed generations based on virtual inertia in a microgrid) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2011, 35 (23): 26-31, 36.
- [12] Salvatore D, Jon A S, Olav B F. A virtual synchronous machine implementation for distributed control of power converters in smart grids [J]. Electric Power Systems Research, 2015, 122 (6): 180-197.
- [13] 李明烜, 王跃, 徐宁一, 等 (Li Mingxuan, Wang Yue, Xu Ningyi, et al.). 基于带通阻尼功率反馈的虚拟同步发电机控制策略 (Virtual synchronous generator control strategy based on bandpass damping power feedback) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2018, 33 (10): 2176-2185.
- [14] Gao F, Irvani 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.
- [15] Meng X, Liu Z, Liu J, et al. Comparison between inverters based on virtual synchronous generator and droop control [A]. 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) [C]. 2017. 4077-4084.
- [16] Liu J, Miura Y, Ise T. Comparison of dynamic characteristic between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31 (5): 3600-3611.
- [17] Du Y, Guerrero J M, Chang L, et al. Modeling, analysis, and design of a frequency droop-based virtual synchronous generator for micro grid applications [A]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) [C]. 2013. 643-649.
- [18] 张波, 颜湘武, 黄毅斌, 等 (Zhang Bo, Yan Xiangwu, Huang Yibin, et al.). 虚拟同步机多机并联稳定控制及其惯量匹配方法 (Stability control and inertia matching method of multi-parallel virtual synchronous generators) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2017, 32 (10): 42-52.
- [19] Kai S, Guanglei Z, Peifeng X, et al. The integrated switching control strategy for grid-connected and islanding operation of micro-grid inverters based on a virtual synchronous generator [J]. Energies, 2018, 11 (6): 1544.
- [20] Dong D, Wen B, Boroyevich D, et al. Analysis of phase-locked loop low-frequency stability in three-phase grid-connected power converters considering impedance interactions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62 (1): 310-321.
- [21] 郑天文, 陈来军, 陈天一, 等 (Zheng Tianwen, Chen Laijun, Chen Tianyi, et al.). 虚拟同步发电机技术及展望 (Review and prospect of virtual synchronous generator technologies) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2015, 39 (21): 165-175.
- [22] 张兴, 张崇魏 (Zhang Xing, Zhang Chongwei). PWM整流器及其控制 (PWM rectifier and its control) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2012.
- [23] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等 (Lv Zhipeng, Sheng Wanxing, Zhong Qingchang, et al.). 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用 (Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (16): 2591-2603.
- [24] 王孝武, 方敏, 葛锁良 (Wang Xiaowu, Fang Min, Ge Suoliang). 自动控制原理 (Principle of automatic control) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2009.

Virtual synchronous generator adopting dynamic damping without frequency detection

DU Yan^{1,2}, ZHAO Han-guang^{1,2}, ZHANG Xian-chuang^{1,2}, SU Jian-hui^{1,2},
YANG Xiang-zhen^{1,2}, LAI Ji-dong^{1,2}

- (1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Research Center for Photovoltaic Systems Engineering of Ministry of Education,
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The grid-connected inverter implementing the virtual synchronous generator (VSG) controller can take advantage of the virtual inertia and damping winding to improve the stability of the frequency and voltage of the power grid. However, phase-locked loop (PLL) in virtual damping winding weakens the damping effect during the transient and increases the complexity of the system. In this paper, a leading-network based damping controller without PLL is proposed after analyzing the inverse effect of PLL on the performance of the damping winding using VSG small-signal models. A phase margin-constrained straightforward parameter setting method for proposed VSG is presented. The correctness of the design is verified by MATLAB/Simulink simulation platform.

Key words: VSG; PLL; dynamic damping; phase margin