第 49 卷 第 2 期：682-691 高电压技术 Vol.49, No.2: 682-691
2023 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20212029

采用三阶模型的虚拟同步发电机功率振荡特性分析及附加阻尼控制

陈　谦，周文海，何承树，王晨晟
（河海大学能源与电气学院，南京 211100）

摘　要：虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)为电力电子化电力系统所存在的惯量不足等问题提供了新的解决方案，但 VSG 是基于同步发电机的数学模型设计的，因此也存在传统同步电机的功率振荡问题。采用同步发电机的三阶模型进行 VSG–无穷大系统的小信号模型的构建，并通过复数力矩系数法，分析得出在一定条件下，VSG–无穷大系统在线路阻抗等因素的影响下将产生负阻尼力矩，且线路电阻对负阻尼力矩具有非线性影响，功率振荡的可能性较大。设计一种用于改善系统阻尼特性的附加阻尼力矩补偿器(additional damping torque compensator，ADTC)，通过引入正阻尼力矩抑制功率振荡。最后通过仿真，验证了负阻尼力矩的影响因素及 ADTC 的可行性与有效性。

关键词：电力电子化；虚拟同步发电机；功率振荡；小信号稳定；附加阻尼力矩补偿器

Characteristics Analysis and Suppression of Power Oscillation of Virtual Synchronous Generator Using Three-order Model

CHEN Qian, ZHOU Wenhai, HE Chengshu, WANG Chensheng
(College of Energy and Electrical Energy, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Virtual synchronous generator (VSG) provides a new solution to deal with insufficient inertia in a power-electronic-dominated power system. However, the VSG is derived from the mathematical model of synchronous generator, thus the problem of power oscillation of traditional SG also exists. Consequently, a three-order model of the synchronous generator is used to construct VSG. Based on the small-signal model of the VSG under the connection to infinite bus system, analysis by a complex torque coefficient method shows that, in certain conditions, the system may produce negative damping torque under the influences of line impedance and other factors. Meanwhile, the line resistance will introduce nonlinear effects into the negative damping torque, which has the risk of power oscillation. The additional damping torque compensator (ADTC) is designed to improve the damping characteristics of the system, in which a positive damping torque is introduced to suppress the power oscillation. Finally, the simulation is built to verify the influencing factors of negative damping torque and the feasibility and effectiveness of ADTC.

Key words: power electronics dominated; virtual synchronous generator; power oscillation; small signal stability; additional damping torque compensator

0　引言

随着现代电力电子技术的发展，基于可再生能源的分布式发电技术得以大规模应用，大大增强了电力系统运行的经济性与灵活性[1-5]，但可再生能源渗透率的提高也导致同步发电机在电力系统中的容量占比逐渐降低，导致电力系统的整体惯量大为减少，降低了电力系统的鲁棒性[6-10]。虚拟同步发电机(virtual synchronous generator，VSG)控制策略为解决上述问题提供了较好的解决方案[5-6]，国内外大量学者从 VSG 控制器的结构设计[11-15]、参数设置原则[16-17]等方面入手，展开了深入研究。文献[18]将 VSG 并网后的安全稳定运行问题总结为并网稳定、故障穿越和惯量支撑等问题。

虽然 VSG 有利于缓解电力系统中阻尼、惯量不足等问题[19]，但由于其控制策略本质上源于同步发电机的数学模型，因此也会引入传统电力系统中的功率振荡等问题[20]。文献[20]指出，线路电感及

基金资助项目：国家自然科学基金(51837004)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51837004).

VSG 控制器虚拟励磁调节器均会在系统中引入负阻尼力矩，同时提出了用于抑制功率振荡的虚拟电力系统稳定器设计方法，但是未能指出线路参数对负阻尼力矩的非线性影响。文献[21]通过建立微电网完整的小信号模型，对比分析了 VSG 控制器参数、线路参数对 VSG 同步转矩系数和阻尼转矩系数、微电网系统稳定性的影响，并提出在下垂控制中引入功率微分项以抑制系统功率振荡，然而其数学模型复杂，不利于实际应用。文献[22]建立了 VSG 并网系统的降阶模型，并利用复数力矩系数法，针对 VSG 虚拟转矩与系统振荡失稳进行机理分析，但并未提出具体的功率振荡抑制策略。

针对 VSG 并网系统的功率振荡问题，现有文献中所建立小信号模型的阶数普遍较高，并且对于抑制功率振荡的附加控制器仍有待进一步深入研究。此外，采用二阶模型设计的 VSG 在外特性上与同步发电机仍存在一定的差距，在电力系统稳定分析中也存在精确度不足等问题。

相比于二阶模型，三阶模型既能够较为准确地反映有功功率与无功功率之间的耦合关系，也能够在电力系统稳定分析中具备较高的精确性，在模型结构上相对于其他高阶模型也更加简单[23-24]，因此，本文采用三阶模型构建 VSG 控制器，并建立兼顾精确性与简洁性的 VSG–无穷大系统的小信号模型，同时利用复数力矩系数法，详细分析系统中负阻尼力矩的来源。最终借鉴电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)的原理，设计附加阻尼力矩补偿器(additional damping torque compensator, ADTC)来抑制 VSG 接入系统后的功率振荡，并通过仿真验证其有效性。

1　采用三阶模型的 VSG 控制器

1.1　采用三阶模型的 VSG 控制器原理

从外特性上，可以将虚拟同步发电机分为电流型 VSG 与电压型 VSG。其中，电流型 VSG 以欧洲 VSYNC 项目[25-27]以及德国克劳斯塔尔工业大学的 VISMA 方案[26,28]为代表，虽然能够使逆变器在外特性上表现出同步发电机的转子运动方程的效果，但其本质上属于电流源，难以支撑系统的电压和频率，因此针对电流型 VSG 的上述不足，已有诸多的研究团体提出了多种电压型 VSG，目前电压型 VSG 得到了广泛的研究与应用，其基本拓扑如图 1 所示[29]。

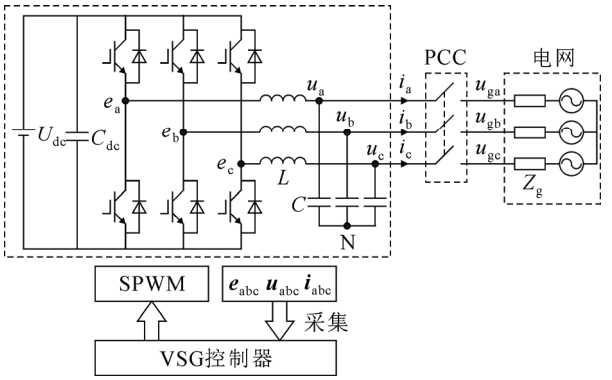


图 1　基于 VSG 控制器的逆变器拓扑结构

Fig.1　Topology of VSG-based inverter

图 1 中，U_{dc} 为逆变器直流电压源电压，C_{dc} 为直流电压源并联电容，电感 L 及电容 C 共同构成 LC 滤波器，其中电感 L 包括 VSG 控制器提供的虚拟电感，N 为系统中性点，Z_g 为电网侧等值阻抗；u_{ga}、u_{gb}、u_{gc} 分别为电网三相电压；$\boldsymbol{e}_{abc}$、$\boldsymbol{u}_{abc}$、$\boldsymbol{i}_{abc}$ 分别为虚拟同步发动机电势、输出电压、输出电流；SPWM 为正弦脉宽调制；PCC 为公共连接点。

目前 VSG 控制器大多基于同步发电机的二阶模型进行设计，更侧重于转子运动方程，与实用同步发电机模型相比存在较大差异，难以准确反映同步发电机的动态特性。文献[25]指出，区别于二阶模型，同步发电机的三阶实用模型既能够计及励磁系统动态，又可以避免高阶模型的复杂性带来的分析、计算的困难。因此，采用同步发电机的三阶模型构建电压型 VSG 控制器[30]，其数学模型包含转子运动方程、电磁方程 2 部分，如式(1)、(2)所示。

$$\begin{cases} J\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\dfrac{P_{\mathrm{m}}}{\omega_0}-\dfrac{P_{\mathrm{e}}}{\omega_0}-D\left(\omega-\omega_0\right) \\ \dfrac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}t}=\omega-\omega_0 \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} T'_{d0}\dfrac{\mathrm{d}E'_q}{\mathrm{d}t}=E_{\mathrm{f}}-\left(E'_q+\left(X_d-X'_d\right)I_d\right) \\ U_d=-R_{\mathrm{a}}I_d+X_qI_q \\ U_q=E'_q-R_{\mathrm{a}}I_q-X'_dI_d \end{cases} \tag{2}$$

式中：J、D 分别为转动惯量、阻尼系数；P_{m}、P_{e} 分别为原动机输入功率、输出电磁功率；ω、ω_0 分别为实际角频率、额定角频率；δ为功角；X_d、X'_d 分别为 d 轴电抗、d 轴暂态电抗；E'_q、E_{f}分别为 q 轴暂态电动势、定子励磁电动势；T'_{d0} 为 d 轴开路暂态时间常数；U_d、U_q 分别为端电压相量的 d 轴分量、q 轴分量；I_d、I_q 分别为电流相量的 d 轴分量、q 轴

分量；R_a、X_q 分别对应于同步发电机定子绕组的电阻、q 轴电抗。

1.2 采用三阶模型的 VSG 控制器设计

VSG 控制器在结构上可以分为外层控制器与内层控制器。其中，外层控制器包括：有功–频率控制器、无功–电压控制器、电气方程部分。其中，采用三阶模型的 VSG 控制器的有功–频率控制器包含 f–P 下垂控制器与转子运动方程，f–P 下垂控制器对应于同步发电机的调速器；无功–电压控制器对应于同步发电机的励磁系统。

VSG 控制器的外层控制框图如附录 A 图 A1 所示。其中，附录 A 图 A1(a)对应于式(1)，定义 k_P 为有功调频系数，θ为相角，ΔP_m、$\Delta\omega$分别为输入功率变化量、实际角频率变化量。图 A1(b)、(c)则对应于式(2)，定义 Q、Q_N 分别为无功功率实际值、额定值，k_Q 为下垂系数，U_N、U_m 分别为端电压额定值、实际测量值，k_{Qp}、k_{Qi} 分别为 PI 控制器的比例系数、积分系数，R_V 为虚拟定子绕组的虚拟电阻，U_{d_ref}、U_{q_ref} 分别为 VSG 输出端电压相量的 d 轴、q 轴分量参考值。

为了实现 VSG 输出电压、电流对参考值的无差跟踪，内环控制器往往采用电压电流内环控制器，分别利用电压环、电流环的 PI 控制来实现电压、电流值的无差跟踪。内环控制器的输出为 $U_{d_control}$、$U_{q_control}$，该信号将送至 SPWM 发生器，用于生成满足控制需要的触发脉冲。综上所述，采用三阶模型的 VSG 控制器如图 2 所示。

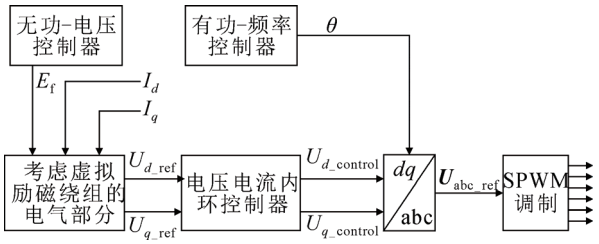


图 2 采用三阶模型的 VSG 控制器

Fig.2 VSG controller using three-order model

2 VSG–无穷大系统小信号分析

2.1 VSG 控制器的小信号模型建立

对于输出电磁功率 P_e、q 轴空载电动势 E_q、端电压幅值 U_T，需满足[30]

$$\begin{cases} P_e = 1.5\left(U_d I_d + U_q I_q\right) \\ E_q = E'_q + \left(X_d - X'_d\right) I_d \\ U_T = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} \end{cases} \tag{3}$$

逆变器存在并网、孤网 2 种运行工况，孤网工况下，控制目的为向微电网提供电压及频率支撑，其输出功率由负载决定；而在并网工况下，控制目的为向电网传输指定的有功功率和无功功率。因此当逆变器工作在并网模式时，无需逆变器承担调频调压任务[31]。因此在进行小信号分析时，将忽略有功–频率控制器(即 ΔP_m=0)和无功–电压控制器的下垂控制。在 $dq0$ 坐标下，端电压、电流相量满足

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} - U \begin{bmatrix} \sin\delta \\ \cos\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_L & -X_L \\ X_L & R_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E'_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_V & -X_q \\ X'_d & R_V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \end{cases} \tag{4}$$

式中：U 为无穷大电网电压幅值，其值恒定且相角为 0；R_L、X_L 分别为线路电阻、线路电抗。

对式(1)—式(4)作小信号分析，并引入中间变量 α、β表征虚拟励磁系统的 PI 控制器。在并网模式下，对励磁系统有：

$$\Delta E_f = \Delta\alpha + \Delta\beta = -k_{Qp}\Delta U_T + \Delta\beta \tag{5}$$

$$\begin{cases} \Delta\alpha = -k_{Qp}\Delta U_T = -k_{Qp}\left(K_5\Delta\delta + K_6\Delta E'_q\right) \\ \dfrac{\mathrm{d}\Delta\beta}{\mathrm{d}t} = -k_{Qi}\Delta U_T = -k_{Qi}\left(K_5\Delta\delta + K_6\Delta E'_q\right) \end{cases} \tag{6}$$

式中：ΔE_f、$\Delta\alpha$、$\Delta\beta$、ΔU_T 分别为励磁电动势变化量、α的变化量、β的变化量、端电压幅值变化量；系数 K_5、K_6 是如附录 B 式(B1)—式(B4)所示的常数。因此，得到 VSG–无穷大系统的状态方程如式(7)、(8)所示。

$$\dot{\boldsymbol{X}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{X} \tag{7}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} \Delta\omega & \Delta\delta & \Delta\beta & \Delta E'_q \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} -\dfrac{D}{J} & -\dfrac{K_1}{J\omega_0} & 0 & -\dfrac{K_2}{J\omega_0} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_{Qi}K_5 & 0 & -k_{Qi}K_6 \\ 0 & -\dfrac{K_3 + k_{Qp}K_5}{T'_{d0}} & \dfrac{1}{T'_{d0}} & -\dfrac{K_4 + k_{Qp}K_6}{T'_{d0}} \end{bmatrix} \end{cases} \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{X}$、$\dot{\boldsymbol{X}}$ 分别为状态方程系数矩阵、状态变量向量及其对应的微分向量；$\Delta\omega$、$\Delta\delta$、$\Delta E'_q$ 分别为角频率变化量、功角变化量、q 轴暂态电动势变化量；系数 K_1—K_4 为常数，如附录 B 式(B1)—式(B4)所示。其对应的传递函数框图如图 3 所示。

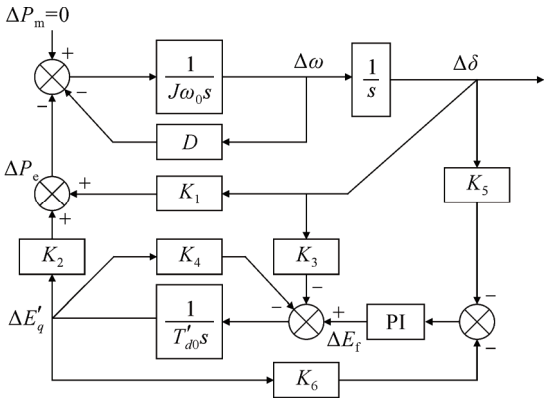


图 3　VSG–无穷大系统传递函数

Fig.3　Transfer function of VSG under the connection to infinite bus system

2.2　不考虑虚拟励磁系统调节

首先忽略虚拟励磁调节器，即设 ΔE_{f}=0，则

$$\begin{cases} T'_{d0}\dfrac{\mathrm{d}\Delta E'_q}{\mathrm{d}t}=-\Delta E'_q-\left(X_d-X'_d\right)\Delta I_d \\ \Delta I_d=\dfrac{U}{Z}\left(X_{q\Sigma}\sin\delta_0-R_\Sigma\cos\delta_0\right)\Delta\delta+\dfrac{X_{q\Sigma}}{Z}\Delta E'_q \end{cases} \tag{9}$$

式中：ΔI_d、δ_0 分别为 d 轴电流变化量、系统初始运行点对应的功角；Z、$X_{q\Sigma}$、R_Σ分别为阻抗、q 轴全电抗、全电阻，见附录 B 式(B3)。

而在稳态工作点附近，满足

$$\Delta T_{\mathrm{e1}}=\frac{\Delta P_{\mathrm{e}}}{\omega_0}=\left(\frac{K_1}{\omega_0}-\frac{K_2K_3}{\left(sT'_{d0}+K_4\right)\omega_0}\right)\Delta\delta \tag{10}$$

式中：ΔT_{e1}、ΔP_{e} 分别为输出电磁力矩的变化量及输出电磁功率的变化量。

根据复数力矩系数法，设正弦摄动 $\Delta\delta$的角速度为Ω，则有

$$\Delta\omega=s\Delta\delta=\mathrm{j}\Omega\Delta\delta \tag{11}$$

式中，算子 j 表示 $\Delta\omega$比 $\Delta\delta$的相位超前 90°，此时有：

$$\Delta T_{\mathrm{e1}}=K_{\mathrm{e1}}\Delta\delta+D_{\mathrm{e1}}\Delta\omega \tag{12}$$

$$\begin{cases} K_{\mathrm{e1}}=\dfrac{K_1}{\omega_0}-\dfrac{K_2K_3K_4}{\left(\Omega^2\left(T'_{d0}\right)^2+K_4^2\right)\omega_0} \\ D_{\mathrm{e1}}=\dfrac{K_2K_3T'_{d0}}{\left(\Omega^2\left(T'_{d0}\right)^2+K_4^2\right)\omega_0} \end{cases} \tag{13}$$

式中：K_{e1}、D_{e1} 分别为同步力矩系数、电气阻尼力矩系数。由于 VSG 一般接入在配电网中，系统电抗 X_Σ与系统电阻 R_Σ之间并不满足输电网中 X_Σ>>R_Σ的假设，有必要分析考虑 R_Σ后的影响。而无论是否考虑 R_Σ，均满足 K_1>0、K_2>0、K_4>0，因此 D_{e1}的正负性与 K_3 密切相关：

$$K_3=-\frac{UZ_q}{Z}\left(X_d-X'_d\right)\cos\left(\delta_0+\theta_q\right) \tag{14}$$

$$\begin{cases} Z_q=\sqrt{X_{q\Sigma}^2+R_\Sigma^2} \\ \theta_q=\arctan\dfrac{X_{q\Sigma}}{R_\Sigma} \\ X_{q\Sigma}=Z_q\sin\theta_q \\ R_\Sigma=Z_q\cos\theta_q \end{cases} \tag{15}$$

式中：Z_q、θ_q 分别为 q 轴阻抗和阻抗角。

在输电网中电抗占主导，因此θ_q≈90°，而配电网中的 X_Σ与 R_Σ之间并不存在量级差异，故而配电网中的θ_q较小。因此当δ_0较小时，易出现(θ_q+δ_0)<90°的情况，导致 K_3<0 及 D_{e1}<0。

2.3　考虑虚拟励磁系统调节

由于逆变器输出的有功功率、无功功率之间存在耦合关系[23]，励磁电动势 E_{f}的变化同样会对 VSG 的输出有功功率产生影响，令 $\Delta E_{\mathrm{f}}\neq$0，则有

$$\begin{cases} T'_{d0}\dfrac{\mathrm{d}\Delta E'_q}{\mathrm{d}t}=\left(-k_{\mathrm{Qp}}\Delta U_{\mathrm{T}}+\Delta\beta\right)-\Delta E'_q-\left(X_d-X'_d\right)\Delta I_d \\ \Delta I_d=\dfrac{U}{Z}\left(X_{q\Sigma}\sin\delta_0-R_\Sigma\cos\delta_0\right)\Delta\delta+\dfrac{X_{q\Sigma}}{Z}\Delta E'_q \end{cases} \tag{16}$$

为了分析虚拟励磁系统的影响，此时断开图 4 中 K_3所在支路，则电磁力矩变化量 ΔT_{e}表达式为：

$$\Delta T_{\mathrm{e}}=\Delta T_{\mathrm{e0}}+\Delta T_{\mathrm{e2}} \tag{17}$$

$$\begin{cases} \Delta T_{\mathrm{e0}}=\dfrac{K_1}{\omega_0}\Delta\delta \\ \Delta T_{\mathrm{e2}}=\dfrac{-K_2K_5\left(sk_{\mathrm{Qp}}+k_{\mathrm{Qi}}\right)}{\left(T'_{d0}s^2+\left(K_4+k_{\mathrm{Qp}}K_6\right)s+k_{\mathrm{Qi}}K_6\right)\omega_0}\Delta\delta \end{cases} \tag{18}$$

式中：ΔT_{e0}、ΔT_{e2} 是构成 ΔT_{e} 的 2 个分量。忽略 ΔT_{e0}的影响，仍对 ΔT_{e2} 采用如式(11)所示的复数力矩系数法，可得

$$\begin{cases} K_{\mathrm{e2}}=\dfrac{-K_2K_5}{Y\omega_0}(k_{\mathrm{Qi}}(K_6k_{\mathrm{Qi}}-\Omega^2T'_{d0})+ \\ \qquad\Omega^2k_{\mathrm{Qp}}(K_4+k_{\mathrm{Qp}}K_6)) \\ D_{\mathrm{e2}}=\dfrac{K_2K_5}{Y\omega_0}(k_{\mathrm{Qp}}T'_{d0}\Omega^2+k_{\mathrm{Qi}}K_4) \end{cases} \tag{19}$$

式中：K_{e2}、D_{e2} 分别为虚拟励磁系统的同步力矩系数、电气阻尼力矩系数；Y为中间变量，其计算式为

$$Y=\left(K_6k_{\mathrm{Qi}}-\Omega^2T'_{d0}\right)^2+\Omega^2\left(K_4+K_6k_{\mathrm{Qp}}\right)^2 \tag{20}$$

由附录 B 式(B3)可知，始终满足 K_2>0、K_4≈1、K_6>0。当系统轻载时，K_5>0；当系统重载时，K_5<0。

由于 PI 参数均大于 0，因此虚拟励磁系统在系统轻载时提供正阻尼力矩，而在系统重载运行时提供负阻尼力矩。

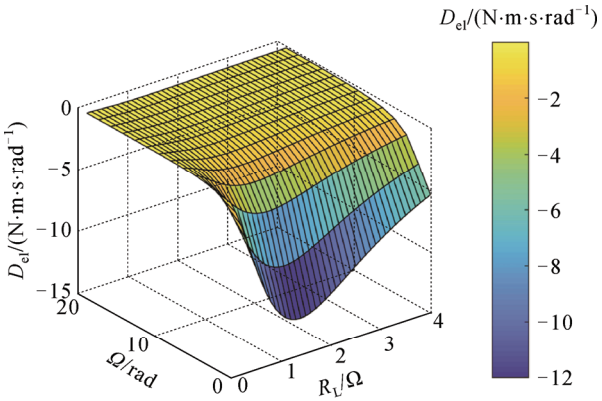
2.4 合成电气阻尼力矩分析

令合成电气阻尼力矩系数 $D_e=D_{e1}+D_{e2}$，则 VSG–无穷大系统在受到小扰动后，系统实际阻尼力矩系数 D_Σ的正负、大小取决于 D、D_e 之和。同时选择参数设置为：U_{PCC}=311 V、δ_0=0.01 rad、X_L=0.4 W，D_{e1}、D_{e2} 及 D_e 关于线路电阻 R_L 及正弦摄的取值情况如图 4 所示。观察图 4 可以发现：

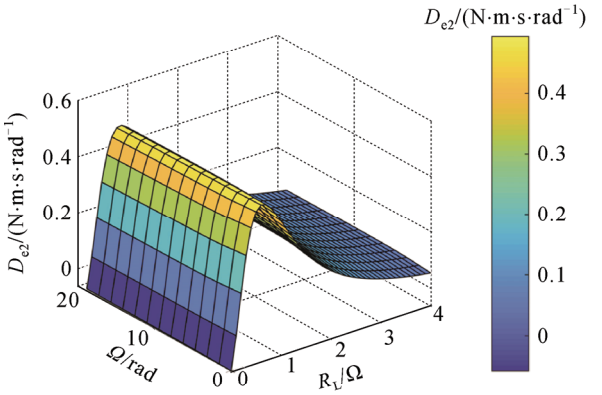
1）当线路电阻 R_L 恒定时，若正弦摄动近似为系统振荡角频率(在低频段范围内)，由图 4(a)、4(b)可知，D_{e1} 始终为负值，且其绝对值远远大于 D_{e2}，合成电气阻尼力矩系数 D_e 的取值取决于 D_{e1}，故始终取负值，对应于负阻尼；而在高频段范围内，D_e 的取值状况则将取决于 D_{e2}。

2）由图 4(a)、4(c)可知，在同一较低频段内，D_e 的取值取决于 D_{e1}，随着 R_L 的增大，D_e 呈现出先减小后增大的趋势，而非单调递增或单调递减，即 R_L 对 D_e 的影响是非线性的。

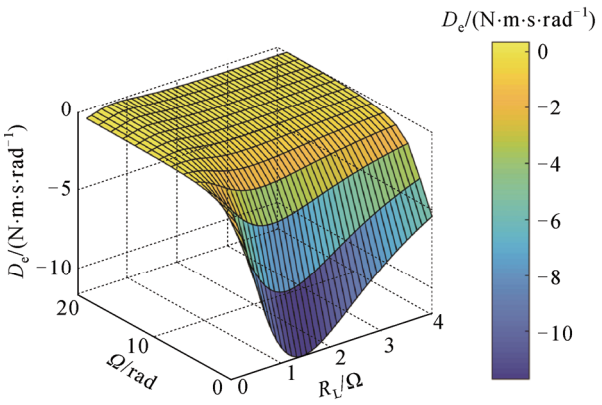
在配电网的某些应用场景中，出于兼顾系统动态性能及稳定性的考虑，阻尼系数的 D 取值不可太大，而 D_e 在低频扰动下取值为负，阻尼系数 D 将难以抵消 D_e 的负阻尼特性，造成 D_Σ为负，此时将在外部扰动下引发系统的功率振荡。而随着线路电阻 R_L 的增大，D_e 呈现出先减小后增大的趋势，因此在某些取值区间内选择较大的线路电阻，不仅不能为系统提供正阻尼，反而会进一步减小 D_e 及 D_Σ，增大负阻尼，进而助增系统功率振荡。



(a) 电气阻尼力矩系数D_{e1}的取值



(b) 电气阻尼力矩系数D_{e2}的取值



(c) 合成电气阻尼力矩系数D_{e1}的取值

图 4 电气阻尼力矩系数 D_{e1}、D_{e2} 及 D_e 的取值

Fig.4 Value of electric damping torque coefficient D_{e1}, D_{e2} and D_e

3 附加阻尼力矩补偿与功率振荡抑制

3.1 附加阻尼力矩补偿器(ADTC)结构设计

传统电力系统中，应对低频振荡最根本的解决方案是利用 PSS 装置引入附加正阻尼力矩[30,32-33]。因此针对 VSG–无穷大系统中的功率振荡问题，本文提出为 VSG 设计附加阻尼力矩补偿器(ADTC)，通过引入正阻尼力矩，抑制系统功率振荡。设 ADTC 的传递函数为 $G_{ADTC}(s)$，其输入信号为$\Delta\omega$，输出信号为 U_{ADTC}，作为虚拟励磁系统的附加输入信号。则 ADTC 的附加正阻尼力矩为

$$\Delta T_{ADTC}=\frac{sK_2\left(sk_{Qp}+k_{Qi}\right)G_{ADTC}(s)}{\left(s^2T'_{d0}+\left(K_4+K_6k_{Qp}\right)s+K_6k_{Qi}\right)\omega_0}\Delta\delta \quad (21)$$

加入 ADTC 后的 VSG–无穷大系统传递函数框图如图 5 所示。

由于虚拟励磁系统在 ΔT_{ADTC} 的表达式中引入了一个零点，因此在设计 ADTC 时引入一个一阶惯性环节，其参数与虚拟励磁系统的 PI 参数相匹配，用于消除式(21)中的零点项。考虑到系统稳态运行时$\Delta\omega$=0，ADTC 没有输出信号，只有在受到扰动后 ADTC 才发挥作用，故而 ADTC 不需要添加复位环

节；而 ADTC 必须包含系数为 K_{ADTC} 的放大环节，因此，ADTC 在结构上由一阶惯性环节与比例环节串联而成，其传递函数为

$$G_{\mathrm{ADTC}}(s)=\frac{K_{\mathrm{ADTC}}}{k_{\mathrm{Qi}}+sk_{\mathrm{Qp}}} \tag{22}$$

3.2　附加阻尼力矩补偿器(ADTC)参数选取

ADTC 中一阶惯性环节的参数与虚拟励磁系统的 PI 参数相对应即可，将式(22)代入式(21)中可得：

$$\Delta T_{\mathrm{ADTC}}=K_{\mathrm{e_ADTC}}\Delta\delta+D_{\mathrm{e_ADTC}}\Delta\omega \tag{23}$$

$$\begin{cases}K_{\mathrm{e_ADTC}}=\dfrac{\Omega^2K_2K_{\mathrm{ADTC}}\left(K_4+K_6k_{\mathrm{Qp}}\right)}{Y\omega_0}\\ D_{\mathrm{e_ADTC}}=\dfrac{K_2K_{\mathrm{ADTC}}\left(K_6k_{\mathrm{Qi}}-\Omega^2T'_{d0}\right)}{Y\omega_0}\end{cases} \tag{24}$$

式中：$K_{\mathrm{e_ADTC}}$、$D_{\mathrm{e_ADTC}}$ 分别为 ADTC 同步力矩系数、电气阻尼力矩系数。

由于在低频段范围内，D_{e} 的大小主要受 D_{e1} 的影响，是系统中负阻尼的主要来源，因此 ADTC 的放大环节的系数 K_{ADCT} 的选取原则为：使 ADTC 能够消除电气阻尼力矩系数 D_{e1} 带来的负阻尼，即

$$D_{\mathrm{e_ADTC}}+D_{\mathrm{e1}}>0 \tag{25}$$

联立式(13)、(22)、(23)后，可得放大环节的系数 K_{ADTC} 的取值下限为

$$K_{\mathrm{ADTC_min}}=\frac{-K_3T'_{d0}Y}{\left(\Omega^2T'^{\,2}_{d0}+K_4^2\right)\left(K_6k_{\mathrm{Qi}}-\Omega^2T'_{d0}\right)} \tag{26}$$

仍然选择 2.4 节的参数设置，$K_{\mathrm{ADTC_min}}$ 关于线路电阻 R_{L} 及正弦摄动的取值情况如图 6 所示。

分析图 6 可知，$K_{\mathrm{ADTC_min}}$ 的取值情况在空间中近似呈鞍面，并且无论正弦摄动的角频率 Ω 处于低频段内还是高频段内，当线路电阻增大时，$K_{\mathrm{ADTC_min}}$ 的取值都遵循先增大后减小的规律。需要指出的是，$K_{\mathrm{ADTC_min}}$ 的取值受系统参数、外部正弦摄动等多种因素的影响，取值并不固定。

4　仿真验证

为了验证线路电阻 R_{L} 对合成电气阻尼力矩的非线性影响及负阻尼特性，考察 ADTC 对系统功率振荡的抑制效果，基于 Matlab/Simulink 搭建如图 7 所示的 VSG–无穷大系统，系统参数如表 1 所示。

4.1　线路电阻对合成阻尼力矩的非线性影响

为了验证线路电阻 R_{L} 对合成阻尼力矩的非线性影响及负阻尼特性，首先仅使用 VSG 控制器的基本控制，选择如表 2 所示的线路电阻 R_{L} 与虚拟电

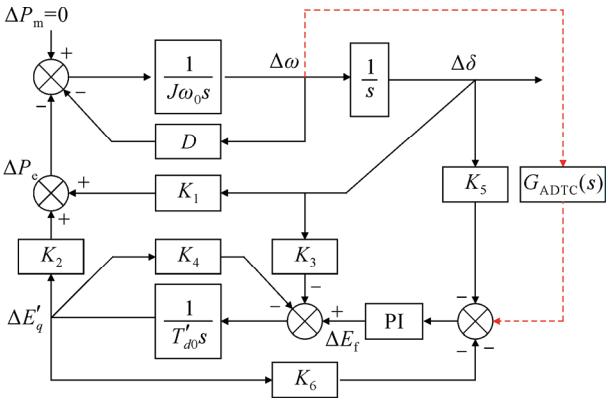


图 5　加入 ADTC 的 VSG–无穷大系统传递函数

Fig.5　Transfer function of VSG with ADTC under the connection to infinite bus system

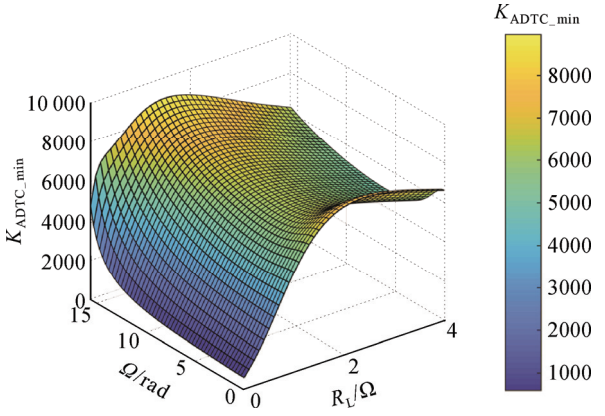


图 6　$K_{\mathrm{ADTC_min}}$ 的取值

Fig.6　Value of $K_{\mathrm{ADTC_min}}$

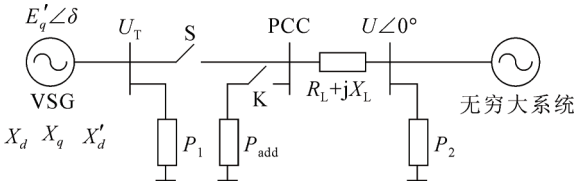


图 7　VSG–无穷大系统网络拓扑

Fig.7　Topology of VSG under the connection to infinite bus system

表 1　系统参数

Table 1　Parameters of system

参数	数值	参数	数值
T'_{d0}/s	0.5	J/(kg·m^2)	10
L_d/mH	4.5	D/(N·m·s·rad^{-1})	0.3
L'_d/mH	3.0	U_{PCC}/V	311
L_q/mH	3.0	X_{L}/Ω	0.4

阻 R_V 组合进行仿真。初始状态下，并网开关 S 断开，VSG 的初始负载 P_1=5 kW，无穷大系统的初始负载 P_2=10 kW；并网完成后，在 PCC 点增加扰动负载 P_{add}=2 kW。在加入扰动后，VSG 输出有功功率、VSG 功角的波形分别如图 8、9 所示。

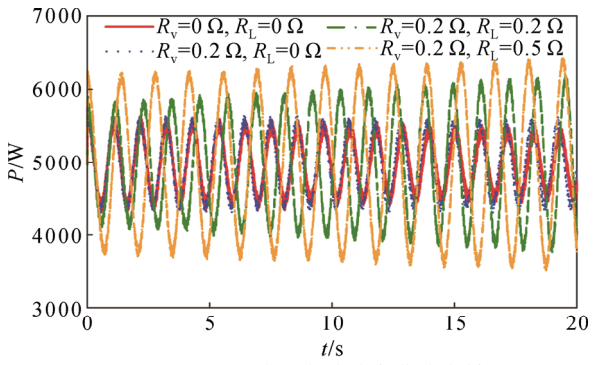
从图 8(a)、9(a)可知，随着线路电阻 R_L 的增大，VSG 输出有功功率 P 及功角波形呈现发散状态，系统逐渐趋于失稳，且振荡的幅值随着 R_L 的增大而增大；而由图 8(b)、9(b)可知，当 R_L 增大到一定数值后，VSG 输出有功功率 P 及功角的波形趋于收敛状态，系统逐渐趋于稳定，并且随着线路电阻 R_L 取值的增大，振荡的衰减速率也在加快。

上述仿真结果表明：由于配电网中线路电阻等电阻性成分不可忽略，因此系统阻抗，尤其是配电网中的线路阻抗 R_L 是影响 VSG 控制效果的重要因素之一，并且线路电阻 R_L 对电气阻尼力矩系数 D_e 的影响是非线性的，在一定条件下，线路电阻 R_L 将为系统引入负阻尼力矩，反而会有助于系统的功率振荡，影响系统安全稳定运行。

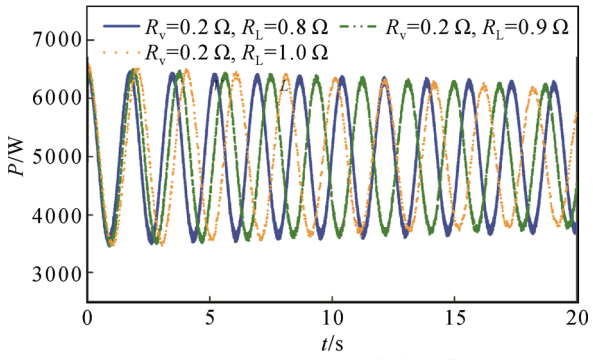
表 2 线路电阻 R_L 与虚拟电阻 R_V 的取值

Table 2 Values of R_L and R_V

编号	1	2	3	4	5	6	7
R_L/Ω	0	0	0.2	0.5	0.8	0.9	1.0
R_V/Ω	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2



(a) VSG输出有功功率曲线发散



(b) VSG输出有功功率曲线收敛

图 8 改变 R_L 与 R_V 时的 VSG 输出有功功率

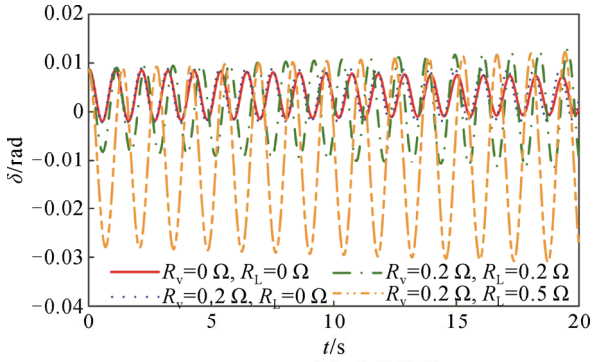
Fig.8 Active power of VSG with changing R_L and R_V

4.2 采用 ADTC 抑制系统功率振荡

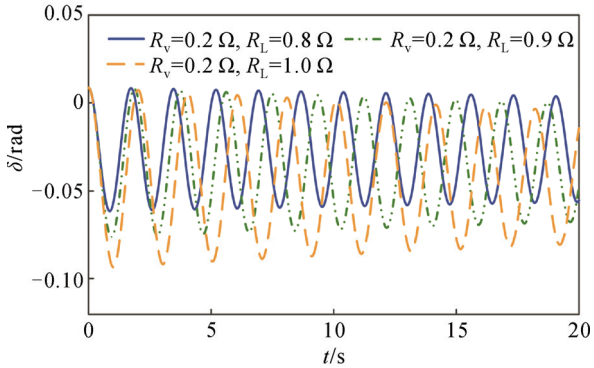
为了验证ADTC结构及其参数选取方法的合理性与可行性，考察ADTC抑制系统功率振荡的效果，选取线路电阻 R_L=0.5 Ω，虚拟电阻 R_V=0.2 Ω，系统参数仍如表 1 所示。

同样设定在初始状态，并网开关 S 断开，VSG 的初始负载 P_1=5 kW，无穷大系统的初始负载 P_2=10 kW；在并网完成后，在 PCC 点增加扰动负载 P_{add}=2 kW。在扰动发生 4.5 s 后投入 ADTC，直至仿真结束，对比添加 ADTC 前后以及不同 ADTC 放大环节系数 K_{ADTC} 下，VSG 输出有功功率、VSG 功角的波形，如图 10 所示。

从图 10 中可以看出，在投入 ADTC 之前，VSG 的输出有功功率、功角对应的波形呈现增幅振荡模式，对应于失稳状态；而在 4.5 s 投入 ADTC 之后，VSG 的输出有功功率、功角对应的波形均由原先的增幅振荡模式转变为减幅振荡模式，可见系统转变为稳定状态；此外，ADTC 的放大环节系数 K_{ADTC} 取值越大，ADTC 抑制功率振荡的能力越强，系统重新恢复稳定所需时间也越短。



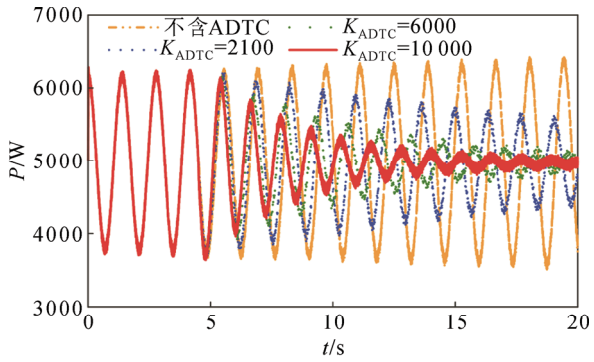
(a) VSG功角曲线发散



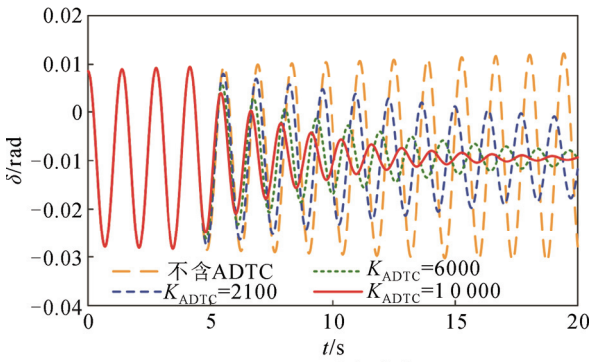
(b) VSG功角曲线收敛

图 9 改变 R_L 与 R_V 时的 VSG 功角

Fig.9 Power angel of VSG with changing R_L and R_V



(a) VSG的输出有功功率曲线



(b) VSG功角曲线

图 10　ADTC 控制效果

Fig.10　Control effect of ADTC

5　结论

由于 VSG 控制是针对同步发电机的数学模型设计的，因此也将传统同步电机的功率振荡等动态稳定问题一并引入。本文针对 VSG 接入后的功率振荡问题及其抑制方法进行了研究，结论如下：

1）推导出了采用三阶模型的 VSG–无穷大系统的小信号模型，得到对应的状态方程及传递函数框图，分析指出系统阻抗，尤其线路电阻 R_L 对系统合成阻尼力矩存在非线性影响。随着未来配电网中分布式电源渗透率不断提高，系统运行工况将更加灵活多变，为了保证系统的稳定运行，此时不仅需要及时调整 VSG 控制器的各项参数，同时也应认识到，诸如线路阻抗等因素对系统稳定性的影响，仿真实验证明了本文分析及其结论的正确性。

2）借鉴传统电力系统中利用 PSS 装置抑制低频振荡的原理，设计了附加阻尼力矩补偿器(ADTC)，并给出了 ADTC 中一阶惯性环节、放大环节系数的取值方法。仿真对比实验表明，添加了 ADTC 后，VSG–无穷大系统由原先的失稳状态重新进入了稳定状态，验证了本文所设计的 ADTC 结构及其参数选取方法的合理性与可行性。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献　References

[1] 夏杨红，韦　巍. 电力电子化电力系统暂态稳定分析新框架：基于耦合因子的非线性解耦方法[J]. 中国电机工程学报，2020，40(16)：5102-5112.
XIA Yanghong, WEI Wei. New analysis framework for transient stability evaluation of power electronics dominated power system: coupling factors based nonlinear decoupling method[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5102-5112.

[2] 李彧野，刘开培，朱　蜀，等. VSC-MTDC 系统直流侧阻抗建模及稳定性分析[J]. 高电压技术，2021，47(2)：627-636.
LI Yuye, LIU Kaipei, ZHU Shu, et al. DC side impedance modeling and stability analysis of VSC-MTDC system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 627-636.

[3] 姜齐荣，王　亮，谢小荣. 电力电子化电力系统的振荡问题及其抑制措施研究[J]. 高电压技术，2017，43(4)：1057-1066.
JIANG Qirong, WANG Liang, XIE Xiaorong. Study on oscillations of power-electronized power system and their mitigation schemes[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1057-1066.

[4] 孙伟卿，刘　唯，裴　亮，等. 高比例可再生能源背景下考虑储能系统价值的储–输多阶段联合规划[J]. 高电压技术，2021，47(3)：983-992.
SUN Weiqing, LIU Wei, PEI Liang, et al. Multistage energy storage-transmission network joint planning considering the system value of energy storage under the background of high penetration renewable energy[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 983-992.

[5] 苑文凯，郑天文，陈来军，等. 基于耗散理论的分布式发电组网系统小干扰稳定性分析方法[J]. 高电压技术，2021，47(10)：3497-3504.
YUAN Wenkai, ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, et al. Small-signal stability analysis method of grid-forming distributed generation system based on the dissipation theory[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3497-3504.

[6] 李笑竹，王维庆，王海云，等. 虚拟电厂参与的交直流混合微网双层多目标鲁棒优化调度[J]. 高电压技术，2020，46(7)：2350-2358.
LI Xiaozhu, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Bi-level and multi-objective robust optimal dispatching of AC/DC hybrid microgrid with virtual power plant participation[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2350-2358.

[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. Robust droop controller for accurate proportional load sharing among inverters operated in parallel[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1281-1290.

[9] 洪灏灏，顾　伟，黄　强，等. 微电网中多虚拟同步机并联运行有功振荡阻尼控制[J]. 中国电机工程学报，2019，39(21)：6247-6254.
HONG Haohao, GU Wei, HUANG Qiang, et al. Power oscillation damping control for microgrid with multiple VSG units[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6247-6254.

[10] 魏亚龙，张　辉，孙　凯，等. 基于虚拟功率的虚拟同步发电机预同步方法[J]. 电力系统自动化，2016，40(12)：124-129，178.
WEI Yalong, ZHANG Hui, SUN Kai, et al. Pre-synchronization method of virtual synchronous generator using virtual power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 124-129, 178.

[11] 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)：26-31，36.
DU Wei, JIANG Qirong, CHEN Jiaorui. Design and application of reactive power control system for wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 26-31, 36.

[12] 秦本双，徐永海，袁　敞，等. 多 VSG 并网系统的 P/ω 导纳建模及功频振荡分析[J]. 中国电机工程学报，2020，40(9)：2932-2941.
QIN Benshuang, XU Yonghai, YUAN Chang, et al. The P/ω admittance modeling and power-frequency oscillation analysis of

multi-VSGs grid-connected systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2932-2941.

[13] 李帅虎，向丽珍，向振宇，等. 用于改善 VSG 频率响应的模型预测控制方法[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2856-2864.
LI Shuaihu, XIANG Lizhen, XIANG Zhenyu, et al. MPC control method for improving VSG frequency response[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2856-2864.

[14] 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.

[15] 张宇华，赵晓轲，方艺翔. 独立微网中虚拟同步发电机的频率自恢复控制策略[J]. 电网技术，2019，43(6)：2125-2131.
ZHANG Yuhua, ZHAO Xiaoke, FANG Yixiang. Research on frequency self-recovery control for virtual synchronous generator in island microgrid[J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2125-2131.

[16] 颜湘武，王俣珂，贾焦心，等. 基于非线性最小二乘曲线拟合的虚拟同步发电机惯量与阻尼系数测量方法[J]. 电工技术学报，2019，34(7)：1516-1526.
YAN Xiangwu, WU Yuke, JIA Jiaoxin, et al. A VSG inertia and damping measurement method based on nonlinear least-squares curve fitting[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(7): 1516-1526.

[17] 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 inertia matching method of multi-parallel virtual synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 42-52.

[18] 葛　俊，刘　辉，江　浩，等. 虚拟同步发电机并网运行适应性分析及探讨[J]. 电力系统自动化，2018，42(9)：26-35.
GE Jun, LIU Hui, JIANG Hao, et al. Analysis and investigation on grid-connected operation adaptability of virtual synchronous generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 26-35.

[19] SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 668-676.

[20] 马铱林，杨　欢，屈子森，等. 改善虚拟同步发电机阻尼特性的设计方法[J]. 电网技术，2021，45(1)：269-275.
MA Yilin, YANG Huan, QU Zisen, et al. Design method for improving damping characteristics of virtual synchronous generator[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 269-275.

[21] 陈　昕. 基于小信号模型的虚拟同步发电机稳定性分析与设计研究[D]. 成都：电子科技大学，2017.
CHEN Xin. Small Signal modeling based virtual synchronous generator stability analysis and design[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.

[22] 刘　倪. 基于小信号模型的虚拟同步机稳定性机理及参数整定研究[D]. 成都：电子科技大学，2019.
LIU Ni. Research on stability mechanism and parameter tuning of virtual synchronizer based on small signal model[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.

[23] LI B, ZHOU L, YU X R, et al. Improved power decoupling control strategy based on virtual synchronous generator[J]. IET Power Electronics, 2017, 10(4): 462-470.

[24] 陈　萌，肖湘宁，袁　敞，等. 基于三阶模型的虚拟同步发电机控制策略[J]. 现代电力，2017，34(5)：57-63.
CHEN Meng, XIAO Xiangning, YUAN Chang, et al. The control strategy of virtual synchronous generator based on three-order model[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(5): 57-63.

[25] 张　兴，朱德斌，徐海珍. 分布式发电中的虚拟同步发电机技术[J]. 电源学报，2012，10(3)：1-6，12.
ZHANG Xing, ZHU Debin, XU Haizhen. Review of virtual synchronous generator technology in distributed generation[J]. Journal of Power Supply, 2012, 10(3): 1-6, 12.

[26] 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.

[27] 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.

[28] BECK H P, HESSE R. Virtual synchronous machine[C]//Proceedings of 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation. Barcelona, Spain: IEEE, 2007: 1-6.

[29] ZHENG T W, CHEN L J, GUO Y, et al. Comprehensive control strategy of virtual synchronous generator under unbalanced voltage conditions[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(7): 1621-1630.

[30] 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.
NI Yixin, CHEN Shousun, ZHANG Baolin. Dynamic theory and analysis of power system[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2002.

[31] 阳　建，刘　勇，盘宏斌，等. 基于虚拟同步机的微网逆变器无频差控制[J]. 电网技术，2016，40(7)：2001-2008.
YANG Jian, LIU Yong, PAN Hongbin, et al. Method of frequent deviation-free control of microgrid inverter based on virtual synchronous generator control[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2001-2008.

[32] 王家驹. 电力系统稳定器及其应用研究[D]. 成都：西南交通大学，2015.
WANG Jiaju. Study and application of power system stabilizer[D]. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University, 2015.

[33] 王铁强，贺仁睦，王卫国，等. 电力系统低频振荡机理的研究[J]. 中国电机工程学报，2002，22(2)：21-25.
WANG Tieqiang, HE Renmu, WANG Weiguo, et al. The mechanism study of low frequency oscillation in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 21-25.



CHEN Qian
Ph.D., Professor
Corresponding author

陈　谦(通信作者)
1972—，男，博士，教授
主要从事电力电子化电力系统建模与分析的研究
E-mail: qchen@hhu.edu.cn

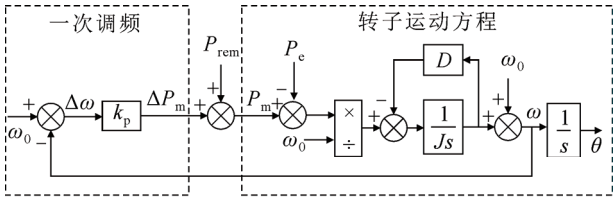


ZHOU Wenhai

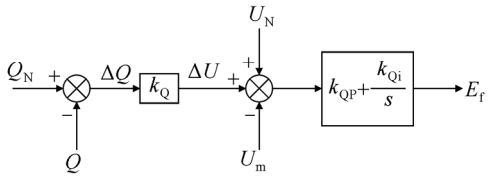
周文海
1995—，男，硕士生
主要从事分布式发电与微电网的研究
E-mail: zhouwenhai1995@163.com

收稿日期　2021-12-22　修回日期　2022-12-28　　编辑　程子丰

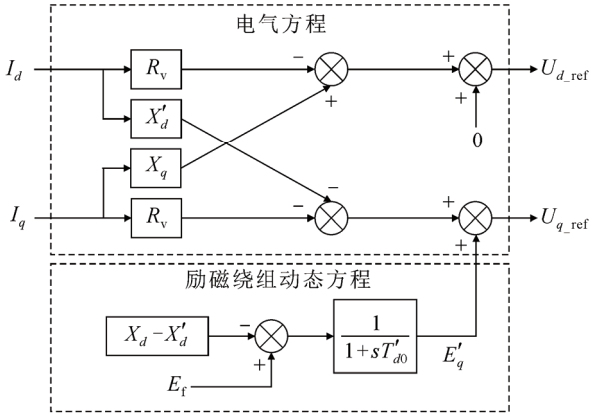
附录 A



(a) 有功-频率控制器



(b) 无功-电压控制器



(c) 考虑虚拟励磁绕组动态的电气部分

图 A1　VSG 控制器各部分控制框图

Fig.A1　Control block of each part of VSG controller

附录 B

$$\begin{cases}\Delta P_e = K_1\Delta\delta + K_2\Delta E'_q \\ \Delta E_q = K_3\Delta\delta + K_4\Delta E'_q \\ \Delta U_T = K_5\Delta\delta + K_6\Delta E'_q\end{cases} \tag{B1}$$

$$\begin{cases}\begin{bmatrix}K_1\\K_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\dfrac{U}{Z}\left(X_{d\Sigma}\cos\delta_0 + R_\Sigma\sin\delta_0\right)\left(1.5E'_{q0}-3R_V I_{q0}\right) - \\ \dfrac{3R_V I_{d0}U}{Z}\left(X_{q\Sigma}\sin\delta_0 - R_\Sigma\cos\delta_0\right) \\ 1.5\left(\dfrac{E'_{q0}R_\Sigma}{Z}+I_{q0}\right) - \dfrac{3R_V}{Z}\left(I_{d0}X_{q\Sigma}+I_{q0}R_\Sigma\right)\end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix}K_3\\K_4\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\dfrac{U}{Z}\left(X_d - X'_d\right)\left(X_{q\Sigma}\sin\delta_0 - R_\Sigma\cos\delta_0\right) \\ 1+\dfrac{X_{q\Sigma}}{Z}\left(X_d - X'_d\right)\end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix}K_5\\K_6\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\dfrac{UU_{d0}M_1 + UU_{q0}M_2}{ZU_{T0}} \\ \dfrac{U_{d0}\left(X_qR_\Sigma - R_VX_{q\Sigma}\right) + U_{q0}\left(R_LR_\Sigma + X_LX_{q\Sigma}\right)}{ZU_{T0}}\end{bmatrix}\end{cases} \tag{B2}$$

$$\begin{cases}R_\Sigma = R_L + R_V \\ X_{d\Sigma} = X'_d + X_L \\ X_{q\Sigma} = X_q + X_L \\ Z = R_\Sigma^2 + X_{d\Sigma}X_{q\Sigma}\end{cases} \tag{B3}$$

$$\begin{cases}M_1 = \left(R_VR_\Sigma + X_qX_{d\Sigma}\right)\cos\delta_0 + \left(X_qR_\Sigma - R_VX_{q\Sigma}\right)\sin\delta_0 \\ M_2 = \left(X'_dR_\Sigma - R_VX_{d\Sigma}\right)\cos\delta_0 - \left(R_VR_\Sigma + X'_dX_{q\Sigma}\right)\sin\delta_0\end{cases} \tag{B4}$$