

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221643

基于有功前馈补偿的储能 VSG 并网有功振荡抑制策略

石荣亮^{1,2,3}, 兰才华¹, 王国斌¹, 刘维莎¹, 黄冀², 王斌³

(1. 桂林理工大学机械与控制工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 广西壮族自治区特种设备检验研究院, 广西 南宁 530200; 3. 武汉科技大学信息科学与工程学院, 湖北 武汉 430081)

摘要: 为解决传统储能虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)的并网有功由于其一次调频系数与虚拟阻尼系数相互耦合而存在稳态偏差与动态振荡难以兼顾的问题, 提出一种基于有功前馈补偿的储能 VSG 并网有功动态振荡抑制策略。该策略利用有功经一阶低通滤波器后前馈至并网有功闭环控制回路, 通过调节前馈系数优化储能 VSG 并网有功的动态性能且无需进行微分运算, 同时不影响储能 VSG 的一次调频特性。然后, 建立基于有功前馈补偿的储能 VSG 并网有功闭环的小信号模型, 并给出前馈系数的整定方法。最后, 利用仿真与实验测试对比结果共同验证了所述策略在有功指令与电网频率 2 种阶跃扰动下可有效消除储能 VSG 并网有功的稳态偏差及其动态振荡, 且不存在频率过冲的风险。

关键词: 虚拟同步机; 稳态偏差; 动态振荡; 有功前馈补偿; 小信号模型; 频率过冲

Grid-connected active power oscillation suppression strategy of an energy storage VSG based on active power feed-forward compensation

SHI Rongliang^{1,2,3}, LAN Caihua¹, WANG Guobin¹, LIU Weisha¹, HUANG Ji², WANG Bin³

(1. College of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Guangxi Special Equipment Inspection and Research Institute, Nanning 530200, China; 3. School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: In a traditional energy storage virtual synchronous generator (VSG) with grid-connected active power (GCAP) it is difficult to balance the steady-state deviation and dynamic oscillation, because of the coupling of its primary frequency modulation coefficient and virtual damping coefficient. Thus a GCAP dynamic oscillation suppression strategy for an energy storage VSG based on active power feed-forward compensation is proposed. The active power is fed-forward to the GCAP closed control loop through the first-order low-pass filter, and the GCAP dynamic performance for energy storage VSG is optimized by adjusting the feed-forward parameter without using the differential operation. The VSG primary frequency modulation characteristic is not affected. Then a small signal model of GCAP closed-loop for the energy storage VSG based on active power feed-forward compensation is established, and the setting method of the feed-forward coefficient is given. Finally, comparison of simulation and experimental test is used to verify that the proposed strategy can effectively eliminate the steady-state deviation, and dynamic oscillation of GCAP of the energy storage VSG under two-step disturbances of active power command as well as grid frequency, and there is no risk of frequency overshoot.

This work is supported by the Guangxi Natural Science Foundation (No. 2020GXNSFBA297124 and No. 2021GXNSFAA220038).

Key words: virtual synchronous generator; steady-state deviation; dynamic oscillation; active power feed-forward compensation; small-signal model; frequency overshoot

0 引言

当前, 推动能源结构转型以构建新型电力系统

是实现“碳达峰与碳中和”这一“双碳”发展战略目标的重要举措, 提高可再生能源的并网规模刻不容缓^[1-2]。以光伏、风电为主的可再生能源通常将零惯量电力电子设备作为并网接口, 使得传统电力系统逐渐呈现出高电力电子化、弱电压与低惯量的新特征^[3]。储能虚拟同步机(virtual synchronous generator,

基金项目: 广西自然科学基金项目资助(2020GXNSFBA297124, 2021GXNSFAA220038)

VSG)通过模拟传统同步机(synchronous generator, SG)的定子电气方程与转子运动方程,使其具有与真实 SG 类似的电压支撑、惯量模拟与阻尼响应能力,能够为电力电子化电力系统提供一定的电压支持与惯量支撑,以利于规模化可再生能源在电网中的安全消纳^[4-5]。

值得指出的是,虚拟惯量控制环节使得储能 VSG 的有功-频率闭环控制系统变成一个典型二阶振荡系统,故其并网有功在有功指令和电网频率 2 种常规扰动下易出现动态振荡与功率超调^[6-7]。此外,储能 VSG 可直接通过增加自身虚拟阻尼参数的方式,抑制其并网有功在上述 2 种扰动下的动态振荡与功率超调,但由于虚拟阻尼参数与一次调频参数相互耦合,导致其阻尼响应性能与一次调频特性无法单独调节^[8]。具体而言,增加储能 VSG 的虚拟阻尼参数可增强其并网有功振荡的抑制能力,但等效于增大了一次调频参数,导致并网有功在电网频率偏离额定频率时出现稳态偏差,而储能 VSG 的一次调频参数需根据国标 GB/T38983.1-2020《虚拟同步机第 1 部分:总则》进行整定而不能大幅变动^[9]。

为了解决上述问题,利用暂态阻尼控制策略优化储能 VSG 并网有功响应特性的研究得到了国内外学者的广泛关注。文献[10-11]在传统储能 VSG 有功-频率控制环的前向通道上加入有功、频率一阶微分前馈补偿环节,增加 VSG 并网有功闭环系统的暂态阻尼,以抑制其并网有功的功率超调,但未考虑微分运算所产生的高频谐波对系统的影响。文献[12]将带通滤波器引入到 VSG 并网有功一阶微分反馈环节中,以消除微分运算所引入的高频谐波,但使得 VSG 并网有功闭环系统的阶数变成四阶,增加了系统控制参数设计的难度。文献[13]将一阶低通滤波器引入到 VSG 并网有功电流一阶微分前馈环节中,在消除微分运算所带来的高频谐波的同时,将 VSG 并网有功闭环系统的阶数降为三阶。文献[14-15]通过 VSG 电磁功率一阶滞后环节作差的方式构建了基于有功暂态前馈、反馈补偿的暂态阻尼方案,该方案具有无需进行微分运算,但未详细给出系统主导极点的优化设计过程。文献[16]沿用文献[14-15]中的暂态阻尼设计方案,构建出基于 VSG 角频率一阶滞后环节作差的暂态阻尼方案,并获得相似的控制效果,但 VSG 有功闭环系统的阶数仍为三阶。文献[17-18]同样沿用文献[14-16]中的暂态阻尼设计思路,设计出基于 VSG 电磁功率、角频率暂态补偿的阻尼改进方案,给出了将 VSG 有功闭环系统等效转换为典型二阶系统的降阶过程及其参数整定方法。文献[19]以将 VSG 有功闭环系统设计成典

型二阶系统为目标,提出一种基于 VSG 有功指令复合微分前馈补偿的暂态阻尼策略,其控制参数整定具有直观且简单的优点,但不适用于电网频率扰动的工况。值得指出的是,上述暂态阻尼算法均可有效抑制储能 VSG 并网有功的动态振荡,且均可作为进一步研究储能 VSG 并网有功响应优化控制策略的有益参考,但鲜有考虑储能 VSG 输出频率存在过冲的问题。

为此,本文提出一种基于有功前馈补偿(active power feedforward compensation, APFC)的储能 VSG 并网有功动态振荡抑制策略,而下文将引入所述 APFC 控制策略的储能 VSG 简称为 APFC-VSG。APFC-VSG 利用有功经一阶低通滤波器后前馈至并网有功闭环控制回路,并通过调节前馈系数优化自身并网有功的动态性能,具有不影响一次调频特性、无需进行微分运算和不存在频率过冲风险的优势,可适用于直流侧配置铅酸、锂电等的储能变换器并网运行场景以及包含此类储能变换器的微电网接入配网场景。然后,在建立 APFC-VSG 并网有功闭环系统小信号模型的基础上,详细给出相应前馈系数的整定过程。最后,利用仿真与实验对比结果共同验证所述 APFC-VSG 策略的有效性与优越性。

1 储能 VSG 的控制原理与特性分析

1.1 储能 TVSG 的电路拓扑与控制原理

储能变换器电路拓扑及其典型 VSG(typical vsq, TVSG)控制原理如图 1 所示。

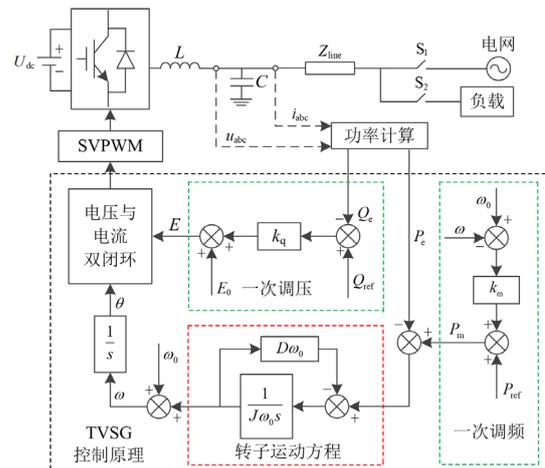


图 1 储能 TVSG 电路拓扑及其控制原理图

Fig. 1 Circuit topology and its control block diagram of energy storage TVSG

图 1 中: u_{abc} 、 i_{abc} 分别为储能 TVSG 三相输出电压与电流; L 、 C 与 Z_{line} 分别为滤波电感、滤波电容与线路等效阻抗; S_1 、 S_2 分别为并网开关、负载

开关； P_{ref} 、 P_c 与 P_m 分别为有功指令、并网有功与机械功率； Q_{ref} 、 Q_c 分别为无功指令、并网无功； ω_0 、 ω 、 E_0 与 E 分别为额定角频率、输出角频率、额定电压幅值与输出电压幅值； J 、 D 、 k_ω 与 k_q 分别为虚拟惯量、虚拟阻尼、一次调频与一次调压参数； U_{dc} 为直流电压。通常，直接用 U_{dc} 来表示具有稳压能力的储能电池，以简化理论分析过程^[17]。

储能 TVSG 的转子运动方程、一次调频方程与一次调压方程分别如式(1)一式(3)所示。

$$P_m - P_c - D\omega_0(\omega - \omega_0) = J\omega_0 \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

$$P_m = P_{ref} + k_\omega(\omega_0 - \omega) \quad (2)$$

$$E = E_0 + k_q(Q_{ref} - Q_c) \quad (3)$$

值得指出的是，储能 TVSG 的有功-频率与无功-电压的调节特性在系统线路阻抗呈感性时可进行解耦控制，而文中将优化其并网有功-频率的动态响应性能作为研究的重点，故对于无功-电压调节、底层电压与电流双闭环控制等内容可直接参考文献[13,20]，后续章节将不再赘述。

1.2 储能 TVSG 并网有功的响应特性分析

将式(2)代入式(1)，可得储能 TVSG 的有功-频率调节方程，如式(4)所示。

$$P_{ref} - P_c - (k_\omega + D\omega_0)(\omega - \omega_0) = J\omega_0 \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

由式(4)不难发现，储能 TVSG 中的一次调频与虚拟阻尼控制环节在数学表达形式上等效，即 k_ω 与 D 相互耦合，造成其一次调频特性与阻尼响应性能无法单独调节。此外，根据图 1 给出的电路拓扑和电路功率传输理论，储能 TVSG 的 P_c 可描述为

$$P_c = \frac{3U_g E}{2X} \sin \delta \approx \frac{3U_g E}{2X} \delta = K\delta = K \frac{\omega - \omega_g}{s} \quad (5)$$

式中： U_g 为电网电压幅值； X 为线路等效感抗； δ 、 ω_g 分别为 TVSG 的功率因数角、电网角频率； $K = 1.5U_g E / X$ 为同步电压系数。对于储能 TVSG 而言，其底层电压与电流双环相较于有功-频率外环具有更高的控制带宽，即可忽略前者动态响应性能对后者的影响。鉴于此，结合式(4)与式(5)，可得到如图 2 所示的储能 TVSG 并网有功闭环等效控制结构。

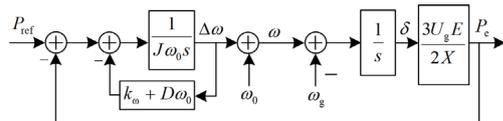


图 2 储能 TVSG 并网有功闭环等效控制结构图

Fig. 2 Equivalent control structure diagram of grid-connected active power closed-loop for energy storage TVSG

由图 2 可知， P_c 易受 P_{ref} 与 ω_g 两种扰动的影响，相应的 P_{ref} 至 P_c 的小信号模型 G_p 、 ω_g 至 P_c 的小信号模型 G_ω 可分别表示为

$$\begin{cases} G_p = \left. \frac{\Delta P_c}{\Delta P_{ref}} \right|_{\Delta \omega_g = 0} = \frac{K}{J\omega_0 s^2 + (k_\omega + D\omega_0)s + K} \\ G_\omega = \left. \frac{\Delta P_c}{\Delta \omega_g} \right|_{\Delta P_{ref} = 0} = \frac{-K(J\omega_0 s + D\omega_0 + k_\omega)}{J\omega_0 s^2 + (k_\omega + D\omega_0)s + K} \end{cases} \quad (6)$$

式中， $\Delta \omega_g = (\omega_g - \omega_0)$ 。由式(6)可知，由于引入虚拟惯量参数 J ，储能 TVSG 并网有功闭环系统变成一个二阶振荡系统，故其 P_c 在 P_{ref} 与 ω_g 发生扰动时，易出现动态振荡和功率超调的现象。此外，式(6)所表示的二阶振荡系统的自然振荡角频率 ω_n 、阻尼比 ξ 可用式(7)进行描述。

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{K/(J\omega_0)} \\ \xi = \frac{k_\omega + D\omega_0}{2} \sqrt{1/(KJ\omega_0)} \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7)可以发现， ω_n 、 ξ 均随着 J 取值的增大而减小，对应的储能 TVSG 并网有功闭环系统的动态响应速度越慢，动态振荡也越大；反之，亦然。此外， ξ 随着 D 取值的增大而增大，对应的储能 TVSG 并网有功闭环系统的动态振荡随之减小，但由于 D 与 k_ω 相互耦合，调整 D 的取值将影响其一次调频特性。又根据式(6)可得，储能 TVSG 并网有功在 $\Delta \omega_g \neq 0$ 时的稳态偏差 ΔP_{e0} 可表示为

$$\Delta P_{e0} = \lim_{s \rightarrow 0} G_\omega \Delta \omega_g = -(k_\omega + D\omega_0) \Delta \omega_g \quad (8)$$

由式(8)可知，稳态偏差 ΔP_{e0} 的取值由 D 与 k_ω 共同决定，故增大 D 相当于增加 k_ω ，随即 ΔP_{e0} 随着 D 取值的增大而增大，进而影响了储能 TVSG 的一次调频特性。

将表 1 所列出的储能 100 kVA-TVSG 的主要参数依次代入式(6)，可分别得到图 3(a)所示的储能 100 kVA-TVSG 的 P_c 在 P_{ref} 阶跃扰动下的动态响应结果与图 3(b)所示的储能 100 kVA-TVSG 并网有功闭环系统的根轨迹图。图 3(a)中，设置 $D = 51.4$ 保持不变，而 $J = 4、6、8 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ；图 3(b)中，设置 D 由 0 增至 360 且步长为 3，而 $J = 4、6、8 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

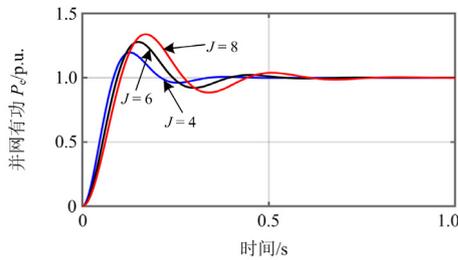
根据图 3(a)可看出，当 D 保持不变时， J 的取值越大，储能 100 kVA-TVSG 的 P_c 在 P_{ref} 阶跃扰动下的动态振荡幅度与功率超调量也越大。又由图 3(b)可看出，一方面 J 的取值越大，储能 100 kVA-TVSG 并网有功闭环系统的极点越靠近虚轴，使得其 P_c 在 P_{ref} 、 ω_g 发生扰动时的动态振荡幅值与功率超调也越大，与图 3(a)保持一致；另一方面随着 D 的取值

增大, 储能 100 kVA-TVSG 并网有功闭环系统的一对共轭极点 s_1 、 s_2 接近实轴并最终落在负实轴上, 随即对其 P_e 在 P_{ref} 、 ω_g 发生扰动时的动态振荡与功率超调的抑制效果也越显著。具体而言, 当 $J = 6 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 时, 需要设置 $D \geq 284.5$, 以保证 $\xi \geq 1$ 。

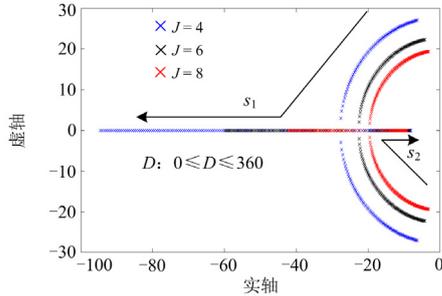
表 1 储能 100 kVA-TVSG 的主要参数

Table 1 Key parameters of energy storage 100 kVA-TVSG

| 参数名称 | 数值 | 参数名称 | 数值 |
|----------------------|---------|-------------------|----------------------|
| 隔离变压器变比/V | 270:400 | 一次调频系数 k_ω | 15 915.5 |
| 额定电压/V | 380 | 一次调压系数 k_q | 1.4×10^{-4} |
| 额定频率/Hz | 50 | 电压环比例系数 | 750 |
| 采样频率/kHz | 5 | 电压环积分系数 | 50.6 |
| 滤波电感/mH | 0.56 | 电流环比例系数 | 0.93 |
| 滤波电容 $C/\mu\text{F}$ | 270 | 线路阻抗 X/Ω | 0.1 |



(a) $D = 51.4$ 不变, $J = 4, 6, 8 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$



(b) D 变化, $J = 4, 6, 8 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

图 3 储能 100 kVA-TVSG 的动态响应特性

Fig. 3 Dynamic response characteristic of energy storage 100 kVA-TVSG

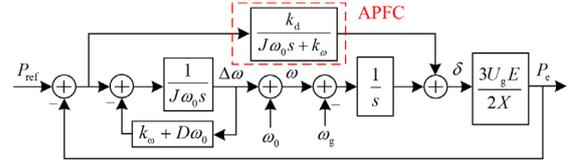
综上, 储能 TVSG 的 D 与 k_ω 相互耦合, 导致其 P_e 在 P_{ref} 、 ω_g 发生扰动时存在动态振荡和稳态偏差难以兼顾的问题, 即 P_e 的动态振荡与功率超调虽然可通过增加 D 的取值得到有效抑制, 但 ΔP_{e0} 在 $\Delta \omega_g \neq 0$ 时随着 D 的取值增大而加大, 即直接设计或调整 J 、 D 参数难以保证储能 TVSG 的 P_e 在 P_{ref} 、 ω_g 发生扰动时兼具良好的动态与稳态响应特性。

2 APFC-VSG 的控制原理与参数整定

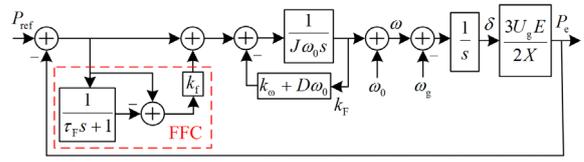
2.1 APFC-VSG 的控制原理

图 4 给出了 2 种不同改进型的储能 TVSG 并网

有功闭环等效控制结构图。为了保证储能 TVSG 的 P_e 在 P_{ref} 、 ω_g 发生扰动时既能具备良好的动态响应性能, 又能实现一次调频特性与阻尼响应之间的解耦, 以消除 P_e 的稳态误差, 本文提出 APFC-VSG 控制策略, 其并网有功闭环等效控制结构如图 4(a)所示, k_d 为 APFC-VSG 的并网有功前馈系数。



(a) 储能 APFC-VSG 并网有功闭环等效控制结构图



(b) 储能 FFC-VSG 并网有功闭环等效控制结构图^[15]

图 4 改进的储能 TVSG 并网有功闭环等效控制结构图

Fig. 4 Improved control structure diagram of grid-connected active power closed-loop for energy storage TVSG

借鉴文献[18]中所提出的一种采用前馈补偿 (feedforward compensation, FFC) 的 VSG 控制策略 (文中简称 FFC-VSG), APFC-VSG 也直接设置 $D = 0$, 以消除一次调频特性与虚拟阻尼控制之间的耦合关系, 并利用 APFC 弥补 $D = 0$ 所造成的阻尼缺失。为了不失一般性, 图 4(b) 给出了储能 FFC-VSG 并网有功闭环等效控制结构图, k_f 、 τ_f 分别为 FFC-VSG 的暂态补偿系数、一阶低通滤波时间常数。根据图 4(a) 可得到 APFC-VSG ($D = 0$) 的 P_{ref} 至 P_e 的小信号模型 G_{P1} 、 ω_g 至 P_e 的小信号模型 $G_{\omega 1}$, 分别如式(9)所示。

$$\begin{cases} G_{P1} = \frac{\Delta P_e}{\Delta P_{ref}} \Big|_{\Delta \omega_g = 0} = \frac{K(1 + k_d s)}{J\omega_0 s^2 + (k_\omega + k_d K)s + K} \\ G_{\omega 1} = \frac{\Delta P_e}{\Delta \omega_g} \Big|_{\Delta P_{ref} = 0} = \frac{-K(J\omega_0 s + k_\omega)}{J\omega_0 s^2 + (k_\omega + k_d K)s + K} \end{cases} \quad (9)$$

根据图 4(b) 可得到 FFC-VSG ($D = 0$) 的 P_{ref} 至 P_e 的小信号模型 G_{P2} 、 ω_g 至 P_e 的小信号模型 $G_{\omega 2}$, 分别如式(10)所示。

$$\begin{cases} G_{P2} = \frac{\Delta P_e}{\Delta P_{ref}} \Big|_{\Delta \omega_g = 0} = \frac{K[(\tau_f + k_f)s + 1]}{\tau_f J\omega_0 s^3 + m_f s^2 + n_f s + K} \\ G_{\omega 2} = \frac{\Delta P_e}{\Delta \omega_g} \Big|_{\Delta P_{ref} = 0} = \frac{-K(J\omega_0 s + k_\omega)(\tau_f s + 1)}{\tau_f J\omega_0 s^3 + m_f s^2 + n_f s + K} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中: $m_f = J\omega_0 + \tau_f k_\omega$; $n_f = k_\omega + K(\tau_f + k_f)$; $k_f = \tau_f k_f$ 。对比式(9)与式(10)可以发现, FFC-VSG 并网有功闭环控制系统的阶数比所述 APFC-VSG 高一阶, 且前者需要整定的参数为 k_f 、 τ_f , 而后者只需整定 k_d 一个参数, 故 FFC-VSG 比 APFC-VSG 具有更为复杂的并网有功闭环控制系统与参数设计过程。

此外, 将式(9)、式(10)分别与式(6)进行对比可以发现, 引入的 APFC、FFC 控制环节, 能够改变原有储能 TVSG 并网有功闭环控制系统的零、极点分布情况, 也相应地改变了 P_e 在 P_{ref} 、 ω_g 发生扰动下的动态响应性能, 故对式(9)、式(10)所描述的并网有功闭环系统的零、极点进行优化配置, 即可提升储能 TVSG 并网有功的动态响应性能。

2.2 FFC-VSG 的参数整定

根据文献[14]可将式(10)等效整理为

$$\begin{cases} G_{P2} = \frac{\Delta P_e}{\Delta P_{ref}} \Big|_{\Delta \omega_g = 0} = \frac{K(\tau_f s + 1)}{a(\tau_f s + 1) + K\tau_f k_f s} \\ G_{\omega2} = \frac{\Delta P_e}{\Delta \omega_g} \Big|_{\Delta P_{ref} = 0} = \frac{-K(J\omega_0 s + k_\omega)(\tau_f s + 1)}{a(\tau_f s + 1) + K\tau_f k_f s} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $a = J\omega_0 s^2 + k_\omega s + K$ 。在此, 借鉴文献[17]中所提出的将三阶闭环系统降为二阶系统的降阶方法, 该方法直接将 G_{P2} 分子、分母中仅包含 τ_f 但不包含 k_f 的参数项直接省略。基于上述三阶系统降阶的方法并结合式(11), 可得到如式(12)所示的 G_{P2} 等效降为二阶后的小信号模型 G_{P2E} 。

$$G_{P2E} = \frac{K}{J\omega_0 s^2 + (k_\omega + K\tau_f k_f)s + K} \quad (12)$$

因此, 可直接将典型二阶系统的相角裕度、系统阻尼比优化选择的参数设计方法, 应用至式(12)所示的简化后 FFC-VSG 并网有功闭环控制系统的参数设计过程中。此时, 式(12)所对应系统的自然振荡角频率 ω_{n2} 、阻尼比 ξ_2 可用式(13)进行描述。

$$\begin{cases} \omega_{n2} = \sqrt{K/(J\omega_0)} \\ \xi_2 = \frac{k_\omega + \tau_f k_f K}{2\sqrt{KJ\omega_0}} = \frac{k_\omega + k_f K}{2\sqrt{KJ\omega_0}} \end{cases} \quad (13)$$

此外, G_{P2E} 所对应系统的相角裕度 γ 、截止角频率 ω_{c2} 可用式(14)进行描述。

$$\begin{cases} \gamma = \arctan \frac{2\xi_2}{\sqrt{\sqrt{1+4\xi_2^4} - 2\xi_2^2}} \\ \omega_{c2} = \omega_{n2} \sqrt{\sqrt{1+4\xi_2^4} - 2\xi_2^2} \end{cases} \quad (14)$$

为了保证 FFC-VSG 并网有功闭环系统兼具良好的动态性能与运行稳定性, 可根据自动控制理论并结合式(13)与式(14), 将典型二阶闭环系统的 ξ_2 、 γ 分别设置为 $\xi_2 \geq 0.707$, $\gamma \geq 45^\circ$, 随即完成 FFC-VSG 参数 k_f 与 τ_f 的整定^[21]。具体而言, 当 $J = 6 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 时, 需要设置 $\tau_f = 0.008 \text{ s}$, $k_f \geq 7.7$, 即 $k_f \geq 0.0616$, 以保证 $\xi_2 \geq 1$, $\gamma \geq 76.5^\circ$ 。

2.3 APFC-VSG 的参数整定

根据式(9)可知, 所述 APFC-VSG 的 G_{P1} 为一个带有负实数零点 ($k_d > 0$) 的二阶系统, 其表达式可以等效整理为

$$G_{P1} = \frac{\omega_{n1}^2}{s^2 + 2\xi_1 \omega_{n1} s + \omega_{n1}^2} + \frac{k_d s \omega_{n1}^2}{s^2 + 2\xi_1 \omega_{n1} s + \omega_{n1}^2} \quad (15)$$

式中, ω_{n1} 、 ξ_1 分别为 APFC-VSG 的自然振荡角频率、阻尼比, 可用式(16)进行描述。

$$\begin{cases} \omega_{n1} = \sqrt{K/(J\omega_0)} \\ \xi_1 = \frac{k_\omega + k_d K}{2\sqrt{1/(KJ\omega_0)}} \end{cases} \quad (16)$$

根据式(15)可以发现, APFC-VSG 并网有功闭环系统的 P_e 由无零点典型二阶系统响应及其微分运算响应两部分叠加而成, 且 k_d 的取值越大, 对应的负实数零点距离原点越近, 微分运算响应对系统的影响也越显著^[22]。此外, 将式(16)、式(13)分别与式(7)进行对比可以发现, APFC-VSG 与 FFC-VSG 类似在保持 $\omega_{n1} = \omega_{n2} = \omega_n$ 的条件下, 分别通过引入的 $k_d K$ 、 $k_f K$ 控制项代替阻尼比 ξ 中的 $D\omega_0$ 虚拟阻尼项, 且保证 ξ_1 、 ξ_2 与 ξ 的取值均需大于等于 1, 以达到与储能 TVSG 虚拟阻尼环节相类似的消除并网有功动态振荡的控制效果。

对于带有负实数零点的二阶系统而言, 若设置 $0 < \xi_1 < 1$, 其中的无零点典型二阶系统的输出响应存在动态振荡, 且其微分运算响应也伴随着动态振荡, 故无论 k_d 取任何数值, 无零点典型二阶系统的输出响应叠加其微分运算响应后将加剧系统的动态振荡幅度并延长调节时间。因此, 需要设置 $\xi_1 \geq 1$ (与消除 APFC-VSG 并网有功动态振荡的需求保持一致), 以保证其中的无零点典型二阶系统的输出响应无超调。鉴于此, 根据式(16)可得, k_d 的取值范围首先需要满足:

$$\xi_1 = \frac{k_\omega + k_d K}{2\sqrt{1/(KJ\omega_0)}} \geq 1 \Rightarrow k_d \geq \frac{2\sqrt{KJ\omega_0} - k_\omega}{K} \quad (17)$$

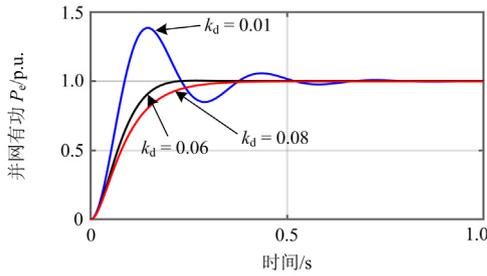
此外, 在设置 $\xi_1 \geq 1$ 与 k_d 满足式(17)的前提下, 无论带有负实数零点二阶系统的一对负实数极点相

同或互异, 若其零点在极点的右端即比极点更靠近原点, 此时若 k_d 的取值过大将使得叠加的微分项也过大, 易造成系统的总输出响应仍出现超调且超调量随 k_d 的增大而增加。因此, 还需设置系统的负实数零点 ($z = -1/k_d$) 位于两个负实数极点 s_1 与 s_2 之间, 则有

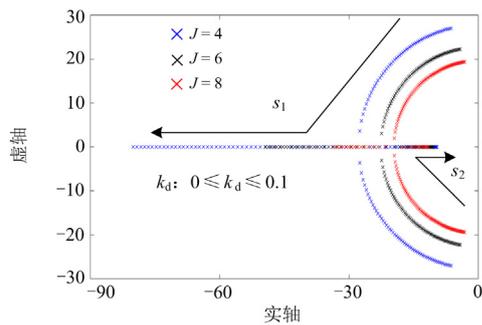
$$\underbrace{(-\xi_1 - \sqrt{\xi_1^2 - 1})\omega_{n1}}_{s_1} < \underbrace{\frac{-1}{k_d}}_z < \underbrace{(-\xi_1 + \sqrt{\xi_1^2 - 1})\omega_{n1}}_{s_2} \quad (18)$$

联立式(16)一式(18)并结合表 1 所给出的主要参数, 即可完成 APFC-VSG 在 J 取不同数值时参数 k_d 取值范围的合理化整定。具体而言, 当 $J = 6 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 时, 需要设置 $k_d \geq 0.0612$, 以保证 $\xi_1 \geq 1$ 。

同理, 将表 1 所列出的主要参数依次代入式(9), 可分别得到如图 5(a)所示的储能 APFC-VSG 的 P_c 在 P_{ref} 发生阶跃扰动下的动态响应结果与如图 5(b)所示的储能 APFC-VSG 并网有功闭环系统的根轨迹图。图 5(a)中, 设置 $J = 6 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 保持不变, 而 $k_d = 0.01$ 、0.06、0.08; 图 5(b)中, 设置 k_d 由 0 增至 0.1, 其变化步长为 0.001, 且 $J = 4$ 、6、8 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。



(a) $J = 6 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 不变, $k_d = 0.01$ 、0.06、0.08



(b) k_d 变化, $J = 4$ 、6、8 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$

图 5 储能 APFC-VSG 的动态响应特性

Fig. 5 Dynamic response characteristics of energy storage APFC-VSG

根据图 5(a)可看出, 当 $J = 6 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 保持不变时, APFC-VSG 的 P_c 在 P_{ref} 发生阶跃扰动下的动态振荡幅度与功率超调量随着 k_d 的增加而逐渐减小, 并最

终得以消除。又根据图 5(b)不难发现, APFC-VSG 并网有功闭环系统的一对共轭极点 s_1 与 s_2 随着 k_d 的取值增大而逐渐接近实轴, 并最终落在负实轴上, 随即抑制其 P_c 在 P_{ref} 、 ω_g 发生扰动时的动态振荡与功率超调的效果也越显著, 可与图 5(a)保持一致。

3 仿真与实验验证对比结果

3.1 仿真系统及其工况

为了对比验证所述 APFC-VSG、FFC-VSG 与 TVSG 三者抑制自身的 P_c 在 P_{ref} 、 ω_g 发生扰动工况下的动态、稳态响应性能, 文中在 Matlab/Simulink 软件中搭建了仿真实验平台。其中, 设置 100 kVA-TVSG 的 $P_{ref} = 20 \text{ kW}$, $J = 6 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $D = 284.5$, $\tau_r = 0.008 \text{ s}$, $k_r = 12.5$, $k_d = 0.1$, 且有 $k_d = k_r = k_r \tau_r = 0.1$, 以保证 APFC-VSG 与 FFC-VSG 具有相同的系统阻尼比, 其他仿真参数与表 1 所给参数保持一致。

设置工况 1: 初始时刻 100 kVA-TVSG 输出 20 kW 并网有功并保持稳定运行, 且电网频率 f_g 维持 50 Hz 不变, 3 s 时刻 P_{ref} 从 20 kW 阶跃至 60 kW; 设置工况 2: 初始时刻 f_g 维持 50 Hz 不变, 100 kVA-TVSG 输出 20 kW 并网有功并保持稳定运行, 3 s 时刻 f_g 从 50 Hz 阶跃下降至 49.95 Hz。

3.2 仿真实验验证对比结果及其分析

100 kVA-TVSG 的仿真实验验证对比结果如图 6 所示。其中, 图 6(a)给出了 TVSG ($D = 0$)、TVSG ($D = 284.5$)、FFC-VSG 与 APFC-VSG 四者在应对仿真工况 1 时储能 100 kVA-TVSG 的 P_c 及其输出频率 f 的验证对比结果。根据图 6(a)可以看出: 当设置储能 TVSG 的 $D = 0$ 时, 此时 $\xi = 0.15$, 故 P_c 与 f 在 P_{ref} 发生 40 kW 阶跃扰动时均存在较大的动态振荡与超调; 而在加入虚拟阻尼 $D = 284.5$ 后, 此时 $\xi = 1.006$, 其并网有功闭环控制系统进入过阻尼状态, 故 P_c 与 f 在 P_{ref} 发生 40 kW 阶跃扰动时均不存在动态振荡; FFC-VSG、APFC-VSG 在 P_{ref} 发生 40 kW 阶跃扰动时均能保证 P_c 不出现动态振荡与功率超调, 两者的 P_c 相较于 TVSG ($D = 284.5$) 均具有更快的动态响应速度, 但此时 FFC-VSG 的 f 存在 0.23 Hz 的频率过冲幅值, 且其频率过冲幅值近似为所述 APFC-VSG 的 7.6 倍 (0.03 Hz), 故已有 FFC-VSG 在实现 P_c 动态振荡抑制的同时还存在输出频率过冲的风险。

图 6(b)给出了 TVSG ($D = 0$)、TVSG ($D =$

284.5)、FFC-VSG 与 APFC-VSG 四者在应对工况 2 时 P_e 与 f 的验证对比结果。由图 6(b)可知, 当储能 TVSG 的 $D=0$ 时, 系统 $\xi=0.15$, 故其 P_e 与 f 在 f_g 阶跃扰动下均存在动态振荡与超调; 而设置 $D=2.845$ 后, $\xi=1.006$ 为过阻尼系统, 故 P_e 与 f 在 f_g 发生阶跃扰动时均不存在动态振荡与超调, 但 D 的引入使得 P_e 存在 28.1 kW 的误差; 而 FFC-VSG、APFC-VSG 在 f_g 发生阶跃扰动时均能保证 P_e 与 f 不出现动态振荡与超调, 两者的 P_e 相较于 TVSG ($D=284.5$) 均不会引入稳态误差, 且 APFC-VSG 的频率变化率最小, 故所述 APFC-VSG 在 f_g 阶跃扰动下还具有最优的频率动态响应性能。综上, 可得到表 2 所列出的 TVSG、FFC-VSG 与所述 APFC-VSG 的 P_e 与 f 在 P_{ref} 、 f_g 两种阶跃扰动下的主要响应特征。

3.3 实验验证对比结果及其分析

与此同时, 文中利用图 7 所示的储能微网系统实验平台进行实验对比验证^[23]。该平台主要包括 2 台储

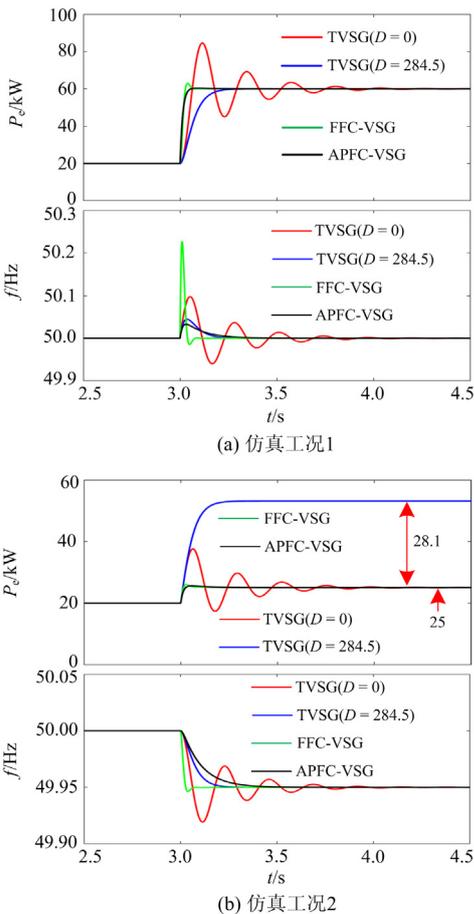


图 6 100 kVA-TVSG 的仿真验证对比结果

Fig. 6 Comparative simulation results of 100 kVA-TVSG

表 2 TVSG、FFC-VSG 与 APFC-VSG 的主要响应特征

Table 2 Main response characteristics of TVSG, FFC-VSG and APFC-VSG

| 控制策略 | 系统阶数 | 系统阻尼 | 稳态误差 | 功率振荡 | 频率过冲 | 频率变化率 |
|---------------------|------|------|------|------|------|-------|
| TVSG ($D=0$) | 2 | 欠 | 0 | 剧烈 | 0.10 | 第三 |
| TVSG ($D \neq 0$) | 2 | 过 | 28.1 | 无 | 0.05 | 次之 |
| FFC-VSG | 3 | 过 | 0 | 无 | 0.23 | 最大 |
| APFC-VSG | 2 | 过 | 0 | 无 | 0.03 | 最小 |



图 7 储能微网系统实验平台

Fig. 7 Energy storage microgrid system platform

能 100 kVA-TVSG、2 台用于模拟储能电池的 100 kVA 双向可控整流器以给 2 台 100 kVA-TVSG 提供稳定的直流电压、一套 250 kW 电阻负载箱等。

储能 100 kVA-TVSG 的主要实验参数如表 1 所示, 其他实验参数与 3.1 节中的仿真参数保持一致。实验工况设置为储能 100 kVA-TVSG 的 P_{ref} 从 20 kW 阶跃至 60 kW 和 f_g 从 50 Hz 阶跃至 49.95 Hz 两种。图 8(a)、图 8(b)分别给出了 TVSG ($D=0$)、TVSG ($D=284.5$)、FFC-VSG 与 APFC-VSG 四者在 P_{ref} 、 f_g 扰动下 P_e 与 f 的实验对比结果。

根据图 8(a)、图 8(b)不难发现, P_{ref} 、 f_g 阶跃扰动下的实验验证对比结果均能够与图 6(a)、图 6(b)中的仿真验证对比结果保持一致。具体而言, TVSG 加入 $D=284.5$ 后其 P_e 在 P_{ref} 、 f_g 阶跃扰动下均不存在功率超调, 但在 f_g 阶跃扰动后存在 28.3 kW 的稳态偏差, 而 FFC-VSG 与 APFC-VSG 在 P_{ref} 、 f_g 扰动下均能有效消除 P_e 的动态振荡且不引入稳态偏差。然而, FFC-VSG 的频率过冲幅值在 P_{ref} 扰动下为 0.35 Hz, 远高于所述 APFC-VSG 的 0.044 Hz, 且 FFC-VSG 的 f 在 f_g 扰动下还具有最大的频率变化率, 而此时 APFC-VSG 的 f 具有最小的频率变化率。

值得指出的是, 已有 FFC-VSG 在物理本质上是基于有功微分运算实现的, 故其 f 的实验波形相较于 TVSG、APFC-VSG 的 f 波形由于微分运算所

带来的谐波放大而存在更多的毛刺,一方面增加 τ_F 可抑制微分运算带来的谐波放大,但会引入更大的控制延时;另一方面较大的 k_f 可有效抑制 P_e 的动态振荡,但伴随着较大的频率过冲及其频率变化率,而 APFC-VSG 可直接规避 FFC-VSG 的上述缺陷。

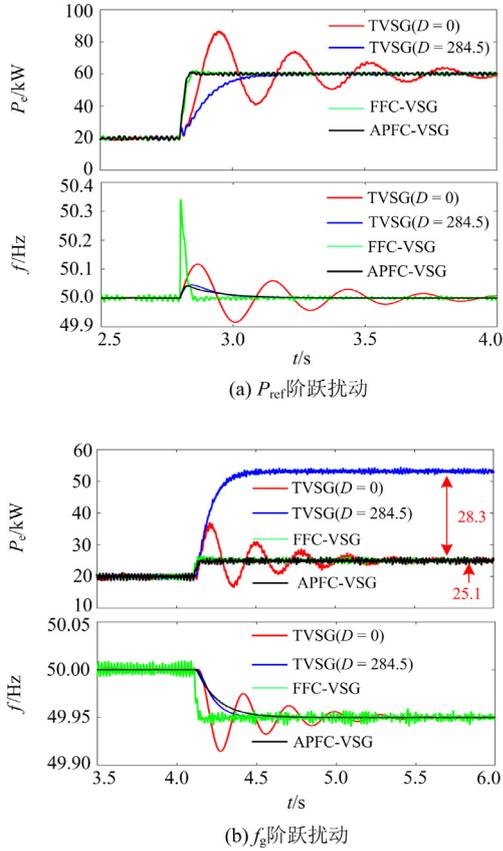


图 8 实验对比结果

Fig. 8 Comparative experimental results

4 结论

本文针对储能 TVSG 由于 D 与 k_ω 相互耦合导致其 P_e 在 P_{ref} 、 ω_g 扰动下存在稳态偏差与动态振荡的问题,提出一种 APFC-VSG 控制策略,并给出其前馈系数的整定方法。通过理论分析、数学建模、仿真与实验对比验证,得出如下结论。

1) TVSG 控制策略可通过增大 D 而有效抑制其 P_e 在 P_{ref} 、 ω_g 扰动下的动态振荡,但由于 D 与 k_ω 相互耦合,导致储能 TVSG 的 P_e 在 ω_g 偏离额定频率时存在较大的稳态偏差。

2) 所述 APFC-VSG 与已有 FFC-VSG 控制策略类似,均能够有效消除自身的 P_e 在 P_{ref} 、 ω_g 扰动下的稳态偏差与动态振荡,且前者还能直接规避后者存在频率过冲、频率变化率过快以及谐波放大的问题。

参考文献

- [1] 彭静, 王军, 亓富军, 等. “双碳”目标下配电网多阶段发展规划[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 153-161. PENG Jing, WANG Jun, QI Fujun, et al. Multi-stage expansion planning of a distribution network with double-carbon policy[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 153-161.
- [2] ZHU W K, WANG C, WANG L, et al. Analysis of energy-saving and environmental benefits from power structure adjustment in China: a comparative study from 2020 to 2060[J]. Sustainable Production and Consumption, 2022, 31: 750-761.
- [3] GABER M, ABUALKSIM B, MOHAMMED A. Superconducting energy storage technology-based synthetic inertia system control to enhance frequency dynamic performance in microgrids with high renewable penetration[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(4): 460-472.
- [4] DU W J, DONG W K, WANG Y, et al. Small-disturbance stability of a wind farm with virtual synchronous generators under the condition of weak grid connection[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5500-5511.
- [5] LIU J, MIURA Y, BEVRANI H, et al. A unified modeling method of virtual synchronous generator for multi-operation-mode analyses[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(2): 2394-2409.
- [6] MENG X, LIU J J, LIU Z. A generalized droop control for grid-supporting inverter based on comparison between traditional droop control and virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5416-5438.
- [7] CHENG H J, SHUAI Z K, SHEN C, et al. Transient angle stability of paralleled synchronous and virtual synchronous generators in islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 8751-8765.
- [8] XU H Z, YU C Z, LIU C, et al. An improved virtual inertia algorithm of virtual synchronous generator[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 8(2): 377-386.
- [9] 虚拟同步机第 1 部分: 总则: GB/T 38983.1—2020[S]. Virtual synchronous machine—part 1: general: GB/T 38983.1—2020[S].
- [10] 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): 1918-1927. XU Haizhen, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. Virtual

synchronous generator control strategy based on lead-lag link virtual inertia[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1918-1927.

[11] 徐海珍, 余畅舟, 毛福斌, 等. 基于频率稳定性提升的虚拟惯性优化控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 126-133.
XU Haizhen, YU Changzhou, MAO Fubin, et al. A virtual inertia optimization control strategy based on frequency stability improvement[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 126-133.

[12] 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. Control strategy of virtual synchronous generator based on band-pass damped power feedback[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(10): 2176-2185.

[13] 姜静雅, 王玮, 唐芬, 等. 优化储能 VSG 动态特性的 d 轴电流微分前馈控制[J]. 电网技术, 2022, 46(7): 2510-2523.
JIANG Jingya, WANG Wei, TANG Fen, et al. d-axis current differential feedforward control for improving the dynamic characteristic of energy storage virtual synchronous generator[J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2510-2523.

[14] 王亚维, 刘邦银, 段善旭, 等. 虚拟同步控制的暂态特性优化策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5885-5893, 6169.
WANG Yawei, LIU Bangyin, DUAN Shanxu, et al. Research on transient characteristic optimization of virtual synchronization generator control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5885-5893, 6169.

[15] 颜湘武, 贾焦心. VSG 一次调频和转速振荡阻尼的解耦控制方案[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1566-1575.
YAN Xiangwu, JIA Jiaoxin. Decoupling control of primary frequency regulation and rotational speed damping of VSG[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1566-1575.

[16] SHUAI Z K, HUANG W, SHEN Z J, et al. Active power oscillation and suppression techniques between two parallel synchronverters during load fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 4127-4145.

[17] 兰征, 龙阳, 曾进辉, 等. 引入暂态电磁功率补偿的 VSG 控制策略[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1421-1429.
LAN Zheng, LONG Yang, ZENG Jinhui, et al. Transient power oscillation suppression strategy of virtual synchronous generator considering overshoot[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 1421-1429.

[18] 兰征, 龙阳, 曾进辉, 等. 考虑超调的虚拟同步发电机暂态功率振荡抑制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(11): 131-141.
LAN Zheng, LONG Yang, ZENG Jinhui, et al. Transient power oscillation suppression strategy of virtual synchronous generator considering overshoot[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(11): 131-141.

[19] YU Y, CHAUDHARY S K, TINAJERO G D A, et al. A reference-feedforward-based damping method for virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(7): 7566-7571.

[20] LI M Y, HUANG W T, TAI N L, et al. A dual-adaptivity inertia control strategy for virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 594-604.

[21] SUN P, YAO J, ZHAO Y, et al. Stability assessment and damping optimization control of multiple grid connected virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(4): 3555-3567.

[22] 黄鹭鹭, 高波, 孙丽敬. 电网支持型变流器输出建模、控制及稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 44-53.
HUANG Lulu, GAO Bo, SUN Lijing. Analysis of modeling, control and stability for grid-supporting power converters[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 44-53.

[23] SHI R L, ZHANG X, HU C, et al. Self-tuning virtual synchronous generator control for improving frequency stability in autonomous photovoltaic-diesel microgrids[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(3): 482-494.

收稿日期: 2022-10-16; 修回日期: 2022-12-15

作者简介:

石荣亮(1987—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源利用与分布式发电技术, 储能 VSG 及其应用控制技术; E-mail: shirl163@163.com

兰才华(1998—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电及其控制技术。Email: lancaihua4@163.com

(编辑 许威)