提高储能 VSG 并网有功响应性能的暂态阻尼策略

石荣亮^{1,2,3},张群英¹,王国斌¹,兰才华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:储能虚拟同步发电机(VSG)的并网有功在有功指令与电网频率2种扰动下存在动态超调与稳态偏差。 提出有功微分反馈补偿(ADFBC)和有功微分前馈补偿(ADFFC)2种暂态阻尼策略,并在分别建立典型VSG、 ADFBC和ADFFC3种策略并网有功闭环小信号模型的基础上,给出了相应的参数设计方法。仿真和实验对 比结果均验证了所提ADFBC和ADFFC暂态阻尼策略可有效提高储能VSG并网有功响应,在2种扰动下其并 网有功既无动态超调又无稳态偏差。

 关键词:虚拟同步发电机;动态超调;稳态偏差;有功微分反馈;有功微分前馈;小信号模型

 中图分类号:TM712
 文献标志码:A
 DOI:10.16081

DOI:10.16081/j.epae.202303015

0 引言

"双碳"目标的提出,推动了光伏、风电等绿色可 再生能源在电网中的规模化应用。光伏与风电通常 将电力电子变换器作为自身与电网友好交互的接 口,使得以同步发电机(synchronous generator,SG) 为主的传统电力系统呈现出弱电压支撑与低惯量的 弱电网特征^[1]。储能变换器在能量存储与释放方面 具有快速且灵活的特征,是保证电力电子化电力系 统稳定运行的有效手段之一^[2]。虚拟同步发电机 (virtual SG,VSG)通过模拟SG的定子电气方程与转 子运动方程,具有与SG相当的电压支撑与惯量模拟 能力,受到了国内外学者的广泛关注^[34]。

VSG的虚拟惯量环节使得其有功-频率控制环 由一阶系统升级为典型二阶系统,造成VSG并网有 功在有功指令与电网频率2种扰动下存在动态振荡 问题^[56]。通过增大VSG转子运动方程中的虚拟阻 尼参数,一方面能有效地抑制虚拟惯量所引入的并 网有功超调与动态振荡^[7];另一方面由于增大虚拟 阻尼参数等效于增加一次调频参数,故依据VSG的 一次调频特性,增大一次调频参数,故依据VSG的 一次调频特性,增大一次调频参数将使得其并网 有功在电网频率不等于额定频率的情况下产生更 大的稳态偏差^[8]。鉴于此,典型VSG(typical VSG, TVSG)的并网有功在动态特性与稳态特性2个方面 存在着一定的矛盾,即其虚拟阻尼参数和一次调频 参数相互耦合,通过直接设计TVSG控制参数的方 式是难以同时解决其并网有功所存在的动态振荡与

收稿日期:2022-07-12;修回日期:2023-02-24 在线出版日期:2023-03-10

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

Project supported by Guangxi Natural Science Foundation (2020GXNSFBA297124,2021GXNSFAA220038)

稳态偏差问题^[9]。

为此,基于暂态阻尼的TVSG并网有功动态特 性与稳态性能优化策略顺势而生,主要包括自适应 虚拟惯量阻尼方法[10-13]和等效阻尼比方法[14-21]两大 类。文献[10]提出了虚拟惯量断续交替变化的 Bang-Bang 控制方案,但虚拟惯量非线性变化易影响 并网系统的运行稳定性。文献[11]提出了一种虚拟 惯量连续自适应调节的控制方案,解决了虚拟惯量 断续变化所带来的不利影响。文献[12-13]提出了 一种虚拟惯量参数与虚拟阻尼参数均连续自适应调 节的控制方案,进一步优化了TVSG并网有功的响 应性能。值得指出的是,自适应虚拟惯量阻尼方法 的虚拟惯量和虚拟阻尼参数在稳态条件下均保持恒 定,故无法解决虚拟阻尼参数与一次调频参数相互 耦合所带来的并网有功稳态偏差问题,且若参数自 适应变化范围选择不适当,则还会影响TVSG并网 系统的运行稳定性^[14]。

等效阻尼比方法则是在保持TVSG 虚拟惯量参数不变且不影响其并网有功稳态偏差的条件下,通过改进TVSG算法增加并网有功动态响应过程中的等效阻尼,以消除其并网有功的动态振荡。文献 [15-16]通过在TVSG有功-频率控制环中增加一阶微分补偿环节的方式提升系统的等效阻尼,实现了 TVSG并网有功动态振荡的有效抑制,但对微分运算 所带来的高频干扰信号未作考虑。文献[17-18]提 出了基于超前滞后补偿环节的暂态阻尼控制方法, 可对微分运算所带来的高频干扰信号实现有效抑 制,但所引入的滤波环节增加了有功-频率闭环系统 的阶数与控制参数整定的难度。文献[19-20]在无 需进行微分运算的条件下,直接通过一阶滞后环节 作差的方式构建出与文献[17-18]类似的暂态阻尼 方案,但对于有功-频率闭环系统的主导极点配置过 程并未明确给出。文献[21-22]依据文献[19-20]暂态阻尼方法的构建理念,提出了基于暂态电磁功率补偿的TVSG暂态阻尼控制策略,明确给出了有功-频率闭环系统的参数设计方法,但TVSG的频率响应存在一定的过冲风险。

鉴于此,为了提高TVSG并网有功响应性能,本 文参考已有等效阻尼比方法,提出2种暂态阻尼策 略:有功微分反馈补偿(active differential feedback compensation, ADFBC)和有功微分前馈补偿(active differential feedforward compensation, ADFFC)策略。 然后,分别建立TVSG、ADFBC和ADFFC 3种策略的 并网有功闭环小信号模型,并给出相应的参数设计 方法。最后,利用仿真和实验对比结果共同验证了 所提 ADFBC 与 ADFFC 暂态阻尼策略在提高储能 TVSG并网有功响应性能方面的可行性与优越性。

1 TVSG的模型与并网有功响应特性分析

1.1 TVSG的控制结构

基于 TVSG 控制的储能变换器系统结构见附录 A 图 A1^[3,22]。储能电池通常具有分钟级甚至小时级 以上的备电时间与稳压能力,而本文所关注的 TVSG 并网有功响应性能优化问题属于秒级时间尺度,故 能够忽略储能电池充放电过程及其荷电状态的影 响,且可直接用储能电池端电压 U_{de} 进行描述^[21-22]。

TVSG的转子运动方程可描述为:

$$P_{\rm m} - P_{\rm e} - D\omega_0(\omega - \omega_0) = J\omega_0 d\omega/dt \qquad (1)$$

式中:P_m和P_e分别为机械功率和并网有功功率;ω₀和 ω分别为额定角频率和输出角频率;D和J分别为虚 拟阻尼参数和虚拟惯量参数。同时,TVSG的一次调 频和一次调压控制方程可分别描述为:

$$P_{\rm m} = P_{\rm ref} + k_{\omega} (\omega_0 - \omega) \tag{2}$$

$$E = E_0 + k_a (Q_{ref} - Q_a) \tag{3}$$

式中:*P*_{ref}、*Q*_{ref}和*Q*。分别为有功给定、无功给定和并网 无功;*k*。和*k*。分别为一次调频参数与一次调压参数; *E*₀和*E*分别为额定电压幅值和输出电压幅值。值得 指出的是,本文主要聚焦于TVSG并网有功响应性 能优化策略的研究,且其并网有功和并网无功在包 含隔离变压器的线路等效阻抗*Z*_{line}为感性的情况下 可实现解耦,故不再对一次调压、电压与电流双闭环 等相关控制内容进行阐述,具体可参考文献[23]。

1.2 TVSG并网有功的小信号模型与响应特性

根据图A1可得TVSG输出并网有功为:

$$P_{e} = \frac{U_{g}E}{X} \delta = K\delta = K \frac{\omega - \omega_{g}}{s}$$
(4)

式中: U_{g} 和 ω_{g} 分别为电网电压幅值和角频率;X为线路等效电抗;K= $U_{g}E/X$ 为同步电压系数; δ 为功角。 在忽略响应速度较快的电压与电流双闭环对TVSG功率外环影响的条件下,根据式(1)、(2)、(4),可得 到TVSG并网有功闭环控制结构,见附录A图A2^[14]。 根据图A2,TVSG的 P_e 应对 P_{ref} 和 ω_g 这2种扰动

时的并网有功闭环小信号模型可分别表示为:

$$\begin{cases} G_{P} = \frac{\Delta P_{e}}{\Delta P_{ref}} \Big|_{\Delta \omega_{g}=0} = \frac{K}{J\omega_{0}s^{2} + (D\omega_{0} + k_{\omega})s + K} \\ G_{\omega} = \frac{\Delta P_{e}}{\Delta \omega_{g}} \Big|_{\Delta P_{of}=0} = -\frac{(J\omega_{0}s + D\omega_{0} + k_{\omega})K}{J\omega_{0}s^{2} + (D\omega_{0} + k_{\omega})s + K} \end{cases}$$
(5)

式中: G_P 为 P_{ref} 至 P_e 的传递函数; G_{ω} 为 ω_g 至 P_e 的传 递函数; $\Delta P_e = P_e - P_{ref}$; $\Delta \omega_g = \omega_g - \omega_0$; ΔP_{ref} 为有功给定阶 跃量。存在 $\Delta \omega_g$ 时,TVSG的有功稳态偏差 ΔP_{e0} 可表 示为:

$$\Delta P_{e0} = \lim_{s \to 0} G_{\omega} \Delta \omega_{g} = -(D\omega_{0} + k_{\omega}) \Delta \omega_{g}$$
(6)

由式(6)可以看出:一方面,当 ω_{e} 偏离 ω_{0} 时,D和 k_{ω} 相互耦合共同决定TVSG跟踪 P_{ref} 的稳态偏差值, 即引入或增加D等效于增大 k_{ω} ,使得 ΔP_{e0} 亦变大;另 一方面,引入J使得TVSG并网有功闭环系统升级为 一个二阶振荡系统,2种扰动均易引起 P_{e} 出现动态 振荡。该二阶振荡系统的阻尼比 ξ 与自然振荡角频 率 ω_{n} 可分别表示为:

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

将附录A表A1给出的100 kV·A TVSG 主要参数代入式(5),得到TVSG并网有功闭环系统的根轨 迹图和有功阶跃响应结果,分别见附录A图A3(a)、 (b)。由图可知:一方面随着J增大,TVSG并网有功 闭环系统的极点离虚轴越近,意味着 P_e 出现动态振 荡与功率超调的现象越明显;另一方面随着D增 大,系统的共轭极点 s_1 、 s_2 越靠近实轴,意味着 ξ 越大, 则抑制 P_e 动态振荡的效果将越显著,与式(7)对应。

综上,TVSG引入的J越大则可为电网提供更多的惯量支撑,但导致 P_e 动态振荡的幅度越大;而引入的D越大则对 P_e 动态振荡的抑制效果越好,但D与 k_a 相互耦合会相应增大 ΔP_{e0} ;故直接整定TVSG的J与D参数无法确保 P_e 兼具优良的动态和稳态性能。

2 ADFBC与ADFFC暂态阻尼策略

为了消除TVSG并网有功的稳态偏差,并抑制 其动态振荡,本章重点阐述ADFBC与ADFFC这2种 暂态阻尼策略,并在建立两者并网有功闭环小信号 模型的基础上,详细给出参数设计方法。

2.1 ADFBC与ADFFC算法

图 1(a)给出了基于 ADFBC(见蓝色方框)与 ADFFC(见红色方框)暂态阻尼算法的 TVSG 有功闭 环控制结构。图中: $k_{\rm F}$ 和 $k_{\rm B}$ 分别为 ADFFC 和 ADFBC 的微分补偿系数; $\omega_{\rm c}$ 和Q分别为二阶低通滤波器的 截止角频率和品质因数。引入二阶低通滤波器一方 面是为了避免有功微分运算所引入的高频干扰信号 对TVSG并网稳定性产生不利影响,另一方面是为 了改善文献[21-22]中基于暂态电磁功率补偿的 TVSG暂态阻尼控制策略所存在的频率过冲问题。



(b) 引入暂态阻尼算法的 TVSG 有功闭环等效控制结构

图 1 基于 ADFBC和 ADFFC的 TVSG 有功闭环控制结构 Fig.1 Structure diagram of TVSG active power closed-loop control based on ADFBC and ADFFC

值得指出的是,一阶低通滤波器与二阶低通滤 波器的主要区别在于两者过渡带不同,若令前者的 滤波时间常数 $\tau=1/\omega_e$,则二阶低通滤波器可近似看 成一个一阶低通滤波器,即可实现基于 ADFBC 和 ADFFC 算法的 TVSG 有功闭环控制系统的有效降 阶,并简化参数设计过程。

基于上述等效降阶原则,ADFBC和ADFFC算法 可分别等效于文献[21-22]所提出的电磁功率暂态 反馈补偿(feedback compensation,FBC)(见图1(b) 中蓝色方框)和电磁功率暂态前馈补偿(feedforward compensation,FFC)(见图1(b)中红色方框)算法,且 在控制实质上均等效于文献[19-20]提出的直接通 过一阶滞后环节作差的方式所构建的暂态阻尼方 案,等效控制结构见图1(b)。不失一般性,本文借 鉴上述文献的参数设计方法,完成所述 ADFBC和 ADFFC算法的参数整定,以简化理论分析过程。

由图1(b)可以得到,ADFBC和ADFFC算法的 并网有功闭环简化小信号模型可分别表示为:

$$\begin{cases} G_{PB} = \frac{\Delta P_{e}}{\Delta P_{ref}} \Big|_{\Delta \omega_{g}=0} = \frac{K(\tau s+1)}{\tau J \omega_{0} s^{3} + m_{b} s^{2} + n_{b} s + K} \\ G_{\omega B} = \frac{\Delta P_{e}}{\Delta \omega_{g}} \Big|_{\Delta P_{ref}=0} = \frac{-K(J \omega_{0} s + D \omega_{0} + k_{\omega})(\tau s+1)}{\tau J \omega_{0} s^{3} + m_{b} s^{2} + n_{b} s + K} \end{cases}$$

$$\begin{cases} G_{PF} = \frac{\Delta P_{e}}{\Delta P_{ref}} \Big|_{\Delta \omega_{g}=0} = \frac{K(\tau s+1)}{\tau J \omega_{0} s^{3} + m_{f} s^{2} + n_{f} s + K} \\ G_{\omega F} = \frac{\Delta P_{e}}{\Delta \omega_{g}} \Big|_{\Delta P_{wef}=0} = \frac{-K(J \omega_{0} s + D \omega_{0} + k_{\omega})(\tau s+1)}{\tau J \omega_{0} s^{3} + m_{f} s^{2} + n_{f} s + K} \end{cases}$$

$$(9)$$

式中: G_{PB} 为 ADFBC的 $P_{ref} \cong P_e$ 的简化传递函数; $G_{\omega B}$ 为 ADFBC的 $\omega_g \cong P_e$ 的简化传递函数; G_{PF} 为 ADFFC的 $P_{ref} \cong P_e$ 的简化传递函数; $G_{\omega F}$ 为 ADFFC的 $\omega_g \cong P_e$ 的简化传递函数; $m_b = m_f = J\omega_0 + \tau (D\omega_0 + k_\omega)$; $n_b = D\omega_0 + k_\omega + K(\tau + k_B)$; $n_f = D\omega_0 + k_\omega + K(\tau + k_F)$ 。

对比式(8)与式(9)可知,虽然 ADFBC 和 ADFFC 这 2种算法的补偿方式与控制结构皆不同,但 2种算 法在有功闭环小信号模型上形式相同,故本文设置 $k_{\rm B}=k_{\rm F}$,即 $n_{\rm b}=n_{\rm f}$,以保证 2种算法具有相同的零极点 与动稳态特性,并沿用相同的参数设计方法。此外, 对比式(5)与式(8)、(9)可发现,引入 ADFBC、ADFFC 算法后 TVSG 并网有功闭环系统的零点和极点均增 加了 1个,故可通过合理配置控制系统的零点与极 点,即合理整定 ADFBC、ADFFC 算法的控制参数,就 能实现 TVSG 并网有功响应性能的有效提升。不失 一般性,由图 1(a)可以得到, ADFBC 和 ADFFC 算法 的并网有功闭环完整小信号模型可分别表示为:

$$\begin{cases} G_{PB1} = \frac{K \left[(\tau s)^2 + \tau s/Q + 1 \right]}{\tau^2 J \omega_0 s^4 + w_{b1} s^3 + m_{b1} s^2 + n_{b1} s + K} \\ G_{\omega B1} = \frac{-K (J \omega_0 s + D \omega_0 + k_\omega) \left[(\tau s)^2 + \tau s/Q + 1 \right]}{\tau^2 J \omega_0 s^4 + w_{b1} s^3 + m_{b1} s^2 + n_{b1} s + K} \\ \begin{cases} G_{PF1} = \frac{K \left[(\tau s)^2 + \tau s/Q + 1 \right]}{\tau^2 J \omega_0 s^4 + w_{f1} s^3 + m_{f1} s^2 + n_{f1} s + K} \\ G_{\omega F1} = \frac{-K (J \omega_0 s + D \omega_0 + k_\omega) \left[(\tau s)^2 + \tau s/Q + 1 \right]}{\tau^2 J \omega_0 s^4 + w_{f1} s^3 + m_{f1} s^2 + n_{f1} s + K} \end{cases}$$
(10)

式中: G_{PB1} 为ADFBC的 $P_{ref} \cong P_e$ 的完整传递函数; $G_{\omega B1}$ 为ADFBC的 $\omega_g \cong P_e$ 的完整传递函数; G_{PF1} 为ADFFC的 $\omega_g \cong P_e$ 的完整传递函数; $G_{\omega F1}$ 为ADFFC的 $\omega_g \cong P_e$ 的完整传递函数; $G_{\omega F1}$ 为ADFFC的 $\omega_g \cong P_e$ 的完整传递函数; $w_{b1}=w_{f1}=\tau^2(D\omega_0+k_\omega)+J\omega_0\tau/Q;m_{b1}=m_{f1}=J\omega_0+\tau(D\omega_0+k_\omega)/Q+K\tau^2;n_{b1}=n_{f1}=D\omega_0+k_\omega+K(\tau/Q+k_B)$ 。由式(10)、(11)可得,ADFBC、ADFFC算法所对应的TVSG并网有功的稳态偏差 ΔP_{eB0} 、 ΔP_{eF0} 为:

 $\Delta P_{\rm eB0} = \lim_{\alpha} G_{\omega B1} \Delta \omega_{\rm g} = (D\omega_0 + k_{\omega})(\omega_0 - \omega_{\rm g}) = \Delta P_{\rm eF0} \quad (12)$

由式(12)可知:一方面可通过设置D=0,以解除 D与k。的相互耦合,并消除D所引入的并网有功稳态偏差;另一方面可利用ADFBC、ADFFC算法提升 TVSG并网系统的暂态阻尼,以抑制其并网有功的动态振荡。基于ADFBC和ADFFC这2种算法在控制 模型与控制参数上的一致性,下面仅对ADFBC算法 的参数设计方法进行详细阐述。

2.2 ADFBC算法的小信号模型及其分析

同理,将表A1给出的100 kV·A TVSG主要参数代入式(8),可得TVSG并网有功闭环系统引入ADFBC算法后的根轨迹图,如图2所示。

由图 2(a)可知,随着 k_B的增加,TVSG 并网系统的一对主导极点 s₁与 s₂逐渐向实轴靠近,并变成 2个不同的负实数极点,即系统状态由欠阻尼进入过阻



图 2 加入 ADFBC 后 TVSG 有功闭环系统的根轨迹图 Fig.2 Root locus diagram of TVSG active power

closed-loop system after adding ADFBC

尼,这表明合理设置 ADFBC 算法的 k_a能够对 TVSG 并网有功的动态振荡实现有效抑制。值得指出的 是:一方面 TVSG 并网有功闭环系统加入 ADFBC 算 法后引入了一个负实极点 s₃,其数值始终小于-100, 即 s₃远离虚轴为非主导极点,故可忽略 s₃对系统动态 性能的影响;另一方面在系统状态进入过阻尼后,若 k_a的取值越大,则 s₂越靠近虚轴,将延缓 TVSG 并网有 功的动态响应速度,故建议无须继续增大 k_a的取值。

由图 2(b)可知,随着 τ 的增加,极点 s_1 与 s_2 先远 离虚轴后又在小范围内靠近虚轴,这说明增加 τ 对 系统阻尼及其并网运行稳定性的影响较小;但负实 数极点 s_3 随着 τ 的增加迅速靠近虚轴并逐渐逼近虚 轴,这说明增加 τ 易恶化系统的并网稳定性。因此, τ 建议取较小值,所对应的 s_3 远离虚轴, s_1 与 s_2 变为一 对主导极点决定系统的运行稳定性。而 τ 取值较大 还会带来较长的控制延时,减弱 ADFBC 的阻尼效果。

为了验证引入ADFBC算法后TVSG并网有功闭 环简化小信号模型的可行性, $k_{\rm B}$ 和 τ 取值不同(令 J= 8 kg·m²、D=0、Q=0.5,其他参数见表A1)时, G_{PB} 和 G_{PB1} 的阶跃响应对比结果分别见附录B图B1(a)、 (b)。由图B1(a)可知,当 $k_{\rm B}$ 为0、0.02、0.06、0.1时, G_{PB} 和 G_{PB1} 的阶跃响应曲线几乎重合,故两者具有一 致的动态响应效果,且 $k_{\rm B}$ 的取值越大,抑制TVSG并 网有功动态振荡的效果越明显,但 $k_{\rm B}$ 的取值过大将 延缓其并网有功的响应速度,与图2(a)所示的根轨 迹分析结果相对应。由图B1(b)可知:当 τ 为0.001、 0.007、0.015 s等较小数值时, G_{PB} 和 G_{PB1} 的阶跃响应 曲线亦几乎重合,故两者具有非常相近的动态响应效果;当 τ 为0.1、0.2 s等较大数值时,两者的阶跃响应在动态过程中存在较大差别且均加剧动态振荡过程, G_{PB1} 的振荡幅度大于 G_{PB} ,这是因为 G_{PB} 中的极点 $s_3 \alpha \tau$ 取较大值时离虚轴非常近,所以恶化了TVSG并网系统的动态响应性能与运行稳定性,该结论和图2(b)所示的根轨迹分析结果相对应,且建议 τ 的取值应小于0.015 s。因此,加入ADFBC算法后,利用式(8)所示的TVSG并网有功闭环简化小信号模型去拟合并分析式(10)所示的TVSG并网有功闭环完整小信号模型响应性能的降阶方法是可行的,可通过式(8)中的 G_{PB} 表达式对ADFBC算法的控制参数进行整定。

2.3 ADFBC算法的参数设计方法

基于 2.2 节所得到的加入 ADFBC 算法后 TVSG 并网有功闭环等效模型,本文结合文献[14]所采用 的基于二阶等效降阶模型的参数整定方法,实现所 提 ADFBC 算法控制参数的设计。根据图 2(b)和图 B1(b)可知,当τ取较小值且在较小范围内波动时, 其对 TVSG 并网有功系统动态响应性能及运行稳定 性的影响不大,故可直接将 G_{PB}表达式的分子与分母 中包含τ且阶数高于一阶的参数项移除。

基于上述降阶处理方法,可得到*G*_{PB}降阶后的小信号等效模型*G*_{PBE}为:

$$G_{PBE} = \frac{K}{J\omega_0 s^2 + (D\omega_0 + k_\omega + Kk_B + K\tau)s + K}$$
(13)

由式(13)可知,降阶后的小信号等效模型 G_{PBE} 是一个典型的二阶振荡系统,则可利用典型二阶系 统的相角裕度与阻尼比择优选取的方法对 ADFBC 算法的控制参数进行设计。一方面,TVSG并网有功 闭环系统降阶等效模型 G_{PBE}所对应的阻尼比ξ₁以 及自然振荡角频率ω_{n1}的数学表达式可分别表示为:

$$\xi_1 = \frac{k_\omega + D\omega_0 + Kk_{\rm B} + K\tau}{2\sqrt{KJ\omega_0}}, \quad \omega_{\rm n1} = \sqrt{\frac{K}{J\omega_0}} \qquad (14)$$

另一方面, G_{PBE} 所对应的相角裕度 γ 以及截止角频率 ω_{el} 的数学表达式可分别表示为:

$$\begin{cases} \gamma = \arctan \frac{2\xi_1}{\sqrt{\sqrt{1+4\xi_1^4 - 2\xi_1^2}}} \\ \omega_{e1} = \omega_{n1} \sqrt{\sqrt{1+4\xi_1^4 - 2\xi_1^2}} \end{cases}$$
(15)

根据自动控制理论,为了保证 TVSG 并网有功 闭环系统具有优良的运行稳定性, ξ_1 的取值不能太 小,通常选为0.707< ξ_1 <1,并设置相角裕度为 γ >45°。 因此,直接将根据上述参数选取方法所获得的特征 参数值代入式(14)、(15),即可完成 ADFBC 算法控 制参数 k_B 与 τ 的合理性设计,且有 $k_B=k_F, \omega_c=1/\tau$ 。

3 仿真对比结果和分析

3.1 仿真模型及其仿真工况

本文利用 MATLAB / Simulink 软件搭建了如附 录A图 A1 所示的 100 kV·A TVSG 并网仿真模型,以 验证所提 ADFBC 和 ADFFC 暂态阻尼算法的可行性 与优越性。仿真中,设置 100 kV·A TVSG 的 P_{ref} = 20 kW、J=8 kg·m²、 τ =0.007 s(以保证 G_{PB} 和 G_{PB1} 的阶 跃响应曲线重合)、 ω_c =1/ τ ≈142.86 rad / s、Q=0.5,其 他参数见附录A表A1。

设置仿真工况为:初始时刻100 kV·A TVSG并入50 Hz电网并保持稳定运行;在*t*=4 s时刻,设置 *P*_{ref}由20 kW阶跃至60 kW;在*t*=5 s时刻,设置电网频率*f*由50 Hz阶跃至49.95 Hz。

3.2 TVSG并网有功的仿真对比结果和分析

100 kV·A TVSG 并网有功与频率动态响应的 仿真结果如附录C图C1(a)所示。由图可知:当D=0时,在有功指令与电网频率2种扰动下TVSG并网有 功均存在动态振荡和功率超调;而当D为51.4、 102.8、154.2时,随着D的取值增大,抑制并网有功动 态振荡的效果越显著,但在电网频率扰动下造成 ΔP_{e0} 的数值也越大,分别约为5.08、10.14、15.22 kW, ΔP_{e0} 值与式(6)的理论计算结果近似相等,这说明了 TVSG 的并网有功在2种扰动下存在动态超调与稳 态偏差难以兼顾的问题。

加入ADFBC算法后TVSG并网有功与频率的动态响应仿真结果如附录C图C1(b)所示。由图可知:当 $k_{\rm B}$ 为0.04、0.08、0.12时,随着 $k_{\rm B}$ 的取值增大,抑制并网有功动态振荡的效果越显著且无稳态偏差, TVSG并网系统在 $k_{\rm B}$ =0.12时已进入过阻尼状态,其响应速度相对变慢。

加入ADFFC算法后TVSG并网有功与频率的动态响应仿真结果如附录C图C1(c)所示。由图可知:由于ADFFC与ADFBC算法具有相同的控制参数,故两者的并网有功具有类似的动态与稳态响应效果。加入FBC、ADFBC、FFC与ADFFC4种算法(选取相同控制参数)后TVSG并网有功与频率的动态响应仿真结果如附录C图C1(d)所示。由图可知:一方面在P_{ref}阶跃扰动下,由于ADFBC和FBC算法、ADFFC和FFC算法进行暂态功率补偿的位置与原理均相同,故所对应的并网有功与频率的动态响应性能相近,且后2种算法相较于前2种算法的有功动态响应速度更快,但造成后2种算法存在较大的频率过冲;另一方面在电网频率阶跃扰动下,4种算法所对应的并网有功与频率的动态响应性能均相近。

在 P_{ref} 阶跃扰动下,当ADFBC和FBC算法具有相同控制参数时,前者相较于后者具有更小的频率偏差值 Δf ;而当ADFFC和FFC算法具有相同控制参

数时,前者相较于后者具有更小的频率偏差值及频率变化率df/dt,见图3(a)。此外,在电网频率阶跃扰动下,ADFBC和FBC算法具有非常相似的频率响应性能;而ADFFC相较于FFC算法具有更小的频率变化率,见图3(b)。图3的仿真结果说明了所提ADFBC比FBC算法、所提ADFFC比FFC算法在应对有功指令与电网频率2种扰动时均具有更为优越的频率响应性能。



Fig.3 Simulative comparison results of TVSG grid-connected active power and frequency dynamic response

4 实验对比结果与分析

为验证所提 ADFBC 与 ADFFC 算法的可行性, 在如附录 D图 D1(a)所示的储能微电网系统平台上 进行实验验证。该平台主要由 2 台 100 kV·A 双向 可控整流器(用作蓄电池模拟器)、2 台 100 kV·A TVSG(图 D1(b)示意了 1 台 100 kV·A TVSG 的并网 测试过程)、1 套 250 kW 纯阻性负载等构成^[23]。实 验过程中设置 100 kV·A TVSG 的 J = 8 kg·m²、 P_{ref} = 20 kW、 k_B = k_F =0.12,其他参数和仿真保持相同。测试 工况 1 设置为 P_{ref} 由 20 kW 阶跃至 60 kW,测试工况 2 设置为电网频率由 50 Hz 阶跃至 49.95 Hz。

图 4(a)、(b)分别为 100 kV·A TVSG 应对测试 工况 1、2时的并网有功与频率动态响应的实验对比 结果。可以看出,100 kV·A TVSG 在 2种测试工况 下的并网有功与频率动态响应实验结果和附录 C 图 C1中的仿真结果——对应。一方面 TVSG 的虚拟阻 尼 D 在电网频率扰动下能够对其并网有功动态振荡 实现有效抑制,但使得 ΔP_{e0} =15.16 kW,与式(6)的计 算结果近似相等;另一方面加入所提 ADFBC、ADFFC 算法后,TVSG 并 网有功动态振荡在 2种测试工况 下均得到有效抑制且均能保证 ΔP_{e0} =0。

138



图4 实验对比结果 Fig.4 Experimental comparison results

加入FBC、ADFBC、FFC与ADFFC4种算法(控制参数相同)后TVSG并网有功与频率在测试工况1下的动态响应实验对比结果如附录D图D2所示。 由图可知,在P_{ref}阶跃扰动下,所提ADFBC比FBC算法、所提ADFFC比FFC算法均具有更优的频率响应性能。此外,在电网频率阶跃扰动下,加入4种算法后并网有功与频率的动态响应测试结果相近,限于文章篇幅,不再给出。

5 结论

为了解决TVSG并网有功在有功指令和电网频率2种不同扰动下存在动态超调与稳态偏差的问题,提出基于ADFBC与ADFFC算法的2种暂态阻尼策略。本文通过小信号建模、参数设计、仿真与实验对比验证,得出以下结论:

1)TVSG的并网有功在2种扰动下存在动态超 调与稳态偏差难以兼顾的问题,即加入虚拟阻尼可 抑制并网有功的动态振荡,但在电网频率扰动下会 增加并网有功的稳态偏差;

2)利用100 kV·A TVSG并网系统的仿真和实验对比结果,共同验证了所提ADFBC与ADFFC算法均能保证TVSG并网有功在2种扰动下的动态振荡得到有效抑制,且不存在稳态偏差;

3) 所提 ADFBC 相比现有 FBC 算法、所提 ADFFC 相比现有 FFC 算法在应对 2 种扰动时的频率动态响 应性能均可得到改善,但效果不够显著。

值得指出的是,所提ADFBC、ADFFC算法在 TVSG并联组网运行工况下的有功响应性能优化问题还有待进一步研究。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 石荣亮,张烈平,王文成,等. 基于频率微分原理的储能变换器 虚拟惯量控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2021,41(6): 2088-2101.

SHI Rongliang, ZHANG Lieping, WANG Wencheng, et al. Research on virtual inertia control strategy for energy storage converters based on a frequency derivative scheme [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6):2088-2101.

- [2]张巍,黄文,帅智康,等.虚拟调速器对VSG暂态功角稳定影响 机理分析[J].电力自动化设备,2022,42(8):55-62,71.
 ZHANG Wei,HUANG Wen,SHUAI Zhikang, et al. Impact mechanism analysis of virtual governor on transient power angle stability of VSG[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(8):55-62,71.
- [3] 李翼翔,田震,唐英杰,等.考虑构网型与跟网型逆变器交互的 孤岛微电网小信号稳定性分析[J].电力自动化设备,2022,42 (8):11-18.

LI Jixiang, TIAN Zhen, TANG Yingjie, et al. Small-signal stability analysis of island microgrid considering interaction between grid-forming converter and grid-following converter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8):11-18.

- [4] 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, 2020,8(2):377-386.
- [5] 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.
- [6] FANG J, LIN P, LI H, et al. An improved virtual inertia control for three-phase voltage source converters connected to a weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(9):8660-8670.
- [7] LONG B, LIAO Y, CHONG K T, et al. MPC-controlled virtual synchronous generator to enhance frequency and voltage dynamic performance in islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2):953-964.
- [8] 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.
- [9] YU Y, SANJAY K C, GIBRAN D A, et al. A referencefeedforward-based damping method for virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022,37(7):7566-7571.
- [10] 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.
- [11] THOMAS V, ASHOK K S. Fuzzy controller-based self-adaptive virtual synchronous machine for microgrid application[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3):2427-2437.

- [12] 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.
- [13] LI D, ZHU Q, LIN S, et al. A self-adaptive inertia and damping combination control of VSG to support frequency stability [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(1):397-398.
- [14] 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. VSG control strategy introducing transient electromagnetic power compensation[J]. Power System Technology,2022,46(4):1421-1429.
- [15] 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.
- [16] 徐海珍,张兴,刘芳,等.基于微分补偿环节虚拟惯性的虚拟同步发电机控制策略[J].电力系统自动化,2017,41(3):96-102.
 XU Haizhen,ZHANG Xing,LIU Fang, et al. Virtual synchronous generator control strategy based on virtual inertia of differential compensation link[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(3):96-102.
- [17] 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):4127-4142.
- [18] 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.
- [19] 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 fre-

quency regulation and rotational speed damping of VSG[J].

Power System Technology, 2019, 43(5): 1566-1574.

 [20] 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.

- [21] 兰征,刘祖潭,何东,等.基于暂态电磁功率补偿的VSG并联系 统有功振荡抑制策略[J]. 电网技术,2023,47(1):23-33.
 LAN Zheng, LIU Zutan, HE Dong, et al. Active oscillation suppression strategy of paralleled virtual synchronous generators based on transient electromagnetic power compe- nsation [J]. Power System Technology,2023,47(1):23-33.
- [22] 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.
- [23] 石荣亮,张烈平,于雁南,等. 基于改进嵌入式 SOGI-FLL 的储 能变换器虚拟惯量控制策略[J]. 电力自动化设备,2021,41
 (2):118-123.
 SHI Rongliang, ZHANG Lieping, YU Yannan, et al. Virtual inertia control strategy of energy storage converter based on improved embedded SOGI-FLL[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(2):118-123.

作者简介:

石荣亮(1987—),男,副教授,博士,主要研究方向为分布 式发电技术、虚拟同步机应用与控制技术(E-mail:shirl163@ 163.com);

张群英(1970—), 女, 副教授, 主要研究方向为电气自动 化应用技术(E-mail:zhangqy@126.com);

王国斌(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分布 式发电技术(E-mail: wang_guob@163.com)。

(编辑 李莉)

Transient damping strategies to improve grid-connected active response performance of energy storage VSG

SHI Rongliang^{1,2,3}, ZHANG Qunying¹, WANG Guobin¹, LAN Caihua¹, 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: The grid-connected active power of the energy storage virtual synchronous generator (VSG) has the problems of dynamic overshoot and steady-state deviation under the two disturbances of active power command and grid frequency. Two transient damping strategies of active differential feedback compensation (ADFBC) and active differential feedforward compensation(ADFFC) are proposed. Based on the established grid-connected active closed-loop small-signal models of three strategies of typical VSG(TVSG), ADFBC and ADFFC, the corresponding parameter design methods are given. The simulative and experimental comparison results are used to verify that the ADFBC and ADFFC transient damping strategies can effectively improve the grid-connected active power response performance of the energy storage VSG, that is, its grid-connected active power has neither dynamic overshoot nor steady-state deviation under the two disturbances.

Key words:virtual synchronous generator;dynamic overshoot;steady-state deviation;active differential feedback; active differential feedforward;small-signal model



附录 A



图 A1 储能 TVSG 的电路拓扑与控制结构





图 A2 TVSG 的有功闭环控制结构

Fig.A2 Active power closed-loop control structure of TVSG

Table AT Key parameters of 100 KV A TVSG			
参数名称	数值	参数名称	数值
隔离变压器/V	270:400	一次调频系数 k _o	15 915.5
额定电压/V	380	无功下垂系数 kq	1.4×10 ⁻⁴
额定频率 f/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 L/mH	0.56	电流环比例系数	0.93
滤波电容 C/µF	270	线路阻抗 X/Ω	0.1

表 A1 储能 100 kV·A TVSG 的主要参数



图 A3 TVSG 的并网有功闭环系统响应特性

Fig.A3 Response characteristics of grid-connected active power closed-loop system for TVSG







Fig.B1 Comparison of step response of G_{PB} and G_{PB1} before and after order reduction



附录 C

图 C1 不同控制算法下 TVSG 并网有功动态响应的仿真对比结果

Fig.C1 Simulative comparison results of TVSG grid-connected active power dynamic response under different control methods





(a) 储能微电网系统实验平台



(b) 100 kV·A TVSG 测试平台



(b) 100 kV·A TVSG 的输出频率动态响应实验对比结果

图 D2 测试工况 1 下的实验对比结果 Fig.D2 Experimental comparison results under test condition 1