

张翔,余凌,张强,等.计及SOC约束的构网型混合储能系统惯量自适应及二次调整控制[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(2):211-218.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240195

ZHANG Xiang, YU Lin, ZHANG Qiang, et al. Inertia adaptive control and secondary adjustment control of grid forming hybrid energy storage system considering SOC constraints[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(2): 211-218. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20240195

计及SOC约束的构网型混合储能系统惯量自适应及二次调整控制

张翔^{1,2}, 余凌^{1,3}, 张强¹, 刘文豪¹

(1. 广东电网有限责任公司 东莞供电局, 广东 东莞 523000; 2. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006;
3. 上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 针对虚拟同步发电机控制的构网型储能变流器难以随意改变虚拟惯量、暂态支撑系统频率能力不足的问题, 在传统构网型储能变流器惯量自适应控制的基础上, 提出一种计及混合储能系统中超级电容器荷电状态的惯量二次调整方法, 通过控制不同类型电池出力以响应频率扰动信号中的高、低频分量, 实现对系统的有功支撑。构建了RTLAB硬件在环实验平台, 对比分析不同惯量控制策略。结果表明, 所提策略既能防止超级电容器过充、过放, 又能改善超级电容器瞬态过程的输出特性, 有效提升构网型储能变流器暂态支撑能力。

关键词: 虚拟同步发电机; 荷电状态; 惯量自适应控制; 构网型变流器; 混合储能; Philips-Heffron模型; SOC
中图分类号: TM76 文献标志码: A 文章编号: 1008-0562(2025)02-0211-08

Inertia adaptive control and secondary adjustment control of grid forming hybrid energy storage system considering SOC constraints

ZHANG Xiang^{1,2}, YU Lin^{1,3}, ZHANG Qiang¹, LIU Wenhao¹

(1. Dongguan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Limited Liability Company, Dongguan 523000, China; 2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou, 510006, China; 3. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Aiming at the problem that the grid-structured energy storage converter controlled by virtual synchronous generator is difficult to change the virtual inertia at will and the frequency capability of the transient support system is insufficient, an inertia secondary adjustment method considering the state of charge of the supercapacitor in the hybrid energy storage system is proposed based on the inertia adaptive control of the traditional grid-structured energy storage converter. By controlling the output of different types of batteries to respond to the high-frequency and low-frequency components in the frequency disturbance signal, the active support of the system is realized. The RTLAB hardware-in-the-loop experimental platform is constructed, and different inertia control strategies are compared and analyzed. The results show that the proposed strategy can not only prevent the super capacitor from overcharging and over-discharging, but also improve the output characteristics of the transient process of the super capacitor, and effectively improve the transient support ability of the grid-structured energy storage converter.

Keywords: virtual synchronous generator; state of charge; inertia adaptive control; grid forming converter; hybrid energy storage; Philips-Heffron model; SOC

0 引言

随着大规模高比例新能源广泛接入, 以同步发

电机(synchronous generator, SG)主导的传统电力系统正面临“惯量空心化”等问题^[1]。新能源发电的随机性与强不确定性运行特征, 导致低惯量新能源

收稿日期: 2024-07-13 修回日期: 2024-08-08 接受日期: 2024-08-20 责任编辑: 焦丽

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目(031900KK52220045)

作者简介: 张翔(1982-), 男, 广东东莞人, 硕士, 高级工程师, 主要从事新能源并网控制技术、电力系统运行与电网规划技术方面的研究。E-mail: cknjut@163.com

电力系统面临日益严峻的电力安全保供挑战^[2-3]。

英国“8·9”大停电、澳大利亚“9·28”大停电等事件的发生,使更多的研究机构关注低惯量电力系统的频率稳定性。以虚拟同步机(virtual synchronous generators, VSG)控制技术为核心构建的构网型变流器(grid forming converter, GFMC)^[4-5],能够使采用电力电子装置为接口的新能源并网系统具备类似同步发电机的机械惯量特性,并可向电网提供频率支撑功能,在相关领域具有广泛的应用前景。新能源发电系统为追求最大发电效益,一般工作在最大功率点,为构网型变流器参与电网惯量支撑时提供相应的能量来源^[6-8],通常在变流器直流侧配置一定容量的储能系统。GFMC受自身控制指令变化和接入电网频率扰动等因素的影响,在提供有功任务时,其输出功率易产生振荡现象^[9-11]。为增强小扰动工况下装置的动态响应效能和系统的稳定性,自适应调整GFMC虚拟惯量参数控制方法受到学者广泛关注。文献[12]提出,在动态响应过程中引入附加有功功率补偿控制,实现等效惯量的自适应调整。文献[13]提出一种模糊控制器,在动态过程中,通过该控制器为固定惯量参数增设实时修正项,实现虚拟惯量参数自适应调整。文献[14]提出一种交替惯量的bang-bang策略,在不同功角振荡阶段选择不同的固定惯量,改善GFMC的动态响应特性。文献[15]、文献[16]提出一种双自适应惯量控制来优化功率和频率响应,提高了控制系统的整体性能。文献[17]、文献[18]提出将自适应惯量和自适应阻尼相互配合,优化了系统的动态输出特性。综上,目前针对GFMC自适应惯量控制的研究中,多以直流侧作为恒压源为前提,忽略了直流侧能量来源的物理约束,未能充分考虑直流侧储能单元荷电状态对GFMC惯量支撑效果的约束影响,降低了GFMC技术的工程适用性。

为解决上述问题,本文提出一种考虑直流侧储能系统荷电状态(stage of charge, SOC)约束条件下,基于混合储能(hybrid energy storage system, HESS)的构网型变流器惯量自适应及其二次控制策略。该策略构建以VSG控制为内核的构网型变流器 Philips-Heffron模型,分析由储能电池与超级电容构成的HESS惯量控制和SOC关系。在传统自适应惯量的基础上,根据SOC自适应调整GFMC惯量释放能力。通过硬件在环实验验证

所提控制方法的正确性和有效性。

1 系统控制策略

1.1 GFMC交流侧控制策略

GFMC与SG的关系见图1,整体系统控制框图见图2。图1中,直流侧储能系统等效于同步发电机的原动机,为系统提供能量来源;交流侧采用VSG控制策略以模拟同步发电机转子、定子等关键组成部分的运行特性。其中, i_{bat} 、 i_{sc} 分别为储能电池、超级电容的电流; u_{bat} 、 u_{sc} 分别为储能电池、超级电容的电压; S_1 、 S_{2b} , S_{1sc} 、 S_{2sc} 分别为储能电池与超级电容变换器功率开关; S_1 ~ S_6 为GFMC功率开关; $i_{k=a-c}$ 分别为三相入网电流; $u_{k=a-c}$ 分别为交流滤波电容电压。其他参数见后文。

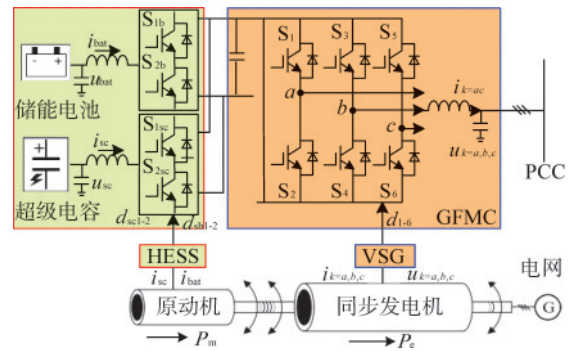


图1 三相GFMC与SG等效模型

Fig.1 three-phase GFMC and SG equivalent model

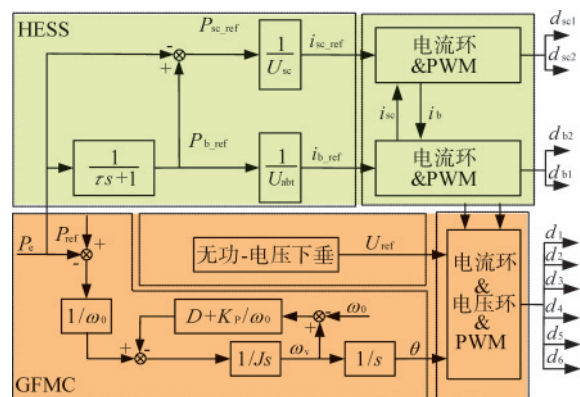


图2 系统整体控制框图

Fig.2 control block diagram of system

为了降低算法的复杂度,采用同步发电机的二阶模型对GFMC交流侧进行等效研究。根据SG的二阶模型,GFMC的等效转子运动方程为

$$\begin{cases} J \frac{d\omega_v}{dt} = \frac{P_m - P_e}{\omega_0} - D(\omega_v - \omega_0) \\ \theta - \theta_n = \int (\omega_v - \omega_0) dt \end{cases}, \quad (1)$$

式中: P_m 和 P_e 分别为 GFMC 的机械功率和电磁功率; J 和 D 分别为 GFMC 的虚拟惯量系数和阻尼系数; ω_v 和 ω_0 分别为系统工作角频率和额定角频率; θ 为系统当前工作相位角; θ_n 为额定相位角。

为了更加精确描述同步发电机有功/频率特性,在 GFMC 转子运动方程中引入调速器以实现一次调频功能,其表达式为

$$P_m = P_{\text{ref}} - K_p(\omega_v - \omega_0), \quad (2)$$

式中: P_{ref} 为 GFMC 参考功率; K_p 为调速器的下垂系数。

结合式 (1)、式 (2) 可得 GFMC 有功功率控制的表达式为

$$J \frac{d\omega_v}{dt} = \frac{P_{\text{ref}} - P_e}{\omega_0} - \left(\frac{K_p}{\omega_0} + D \right) (\omega_0 - \omega_v). \quad (3)$$

由式 (3) 可知, K_p 和 D 的数学意义相似。因此,定义阻尼下垂系数 $D_1 = D + K_p/\omega_0$, 简称阻尼系数。

由于本文关注的是系统的频率稳定性, 主要涉及有功功率控制, 为了简化分析, 无功功率控制只采用传统的下垂控制, 不再详细阐述。变流器通过电压电流双闭环控制和 PWM 调制后, 跟踪电源外环产生的参考电压, 进而参与电网电压的构建^[19]。根据以上分析, 可以得到图 1 中 GFMC 交流侧控制框图, 如图 2 中橙色部分所示。

1.2 直流侧混合储能系统控制策略

由于电子元件不具备吸收或产生能量的功能, GFMC 需要额外配备储能装置^[20]。因此, 选用由储能电池和超级电容组成的混合储能系统为系统提供电力支撑。为了充分发挥各自的优势, 采用低通滤波器对 GFMC 交流侧的输出功率进行分解处理。利用能量密度高的储能电池来响应暂态过程中变化缓慢的低频功率 (即用于一次调频的功率), 储能电池的参考功率可表示为

$$P_{\text{bref}} = \frac{1}{\tau s + 1} P_e \approx P_{\text{ref}} + (K_p + D\omega_0)(\omega_0 - \omega_v), \quad (4)$$

式中, τ 为低通滤波器的时间常数。

为应对瞬态过程中频繁变化的高频功率 (即用于提供惯量支持的功率), 采用具有高功率密度和高循环寿命的超级电容, 超级电容的参考功率可表示为

$$P_{\text{scref}} = \frac{\tau s}{\tau s + 1} P_e \approx -J\omega_0 \frac{d\omega_v}{dt}. \quad (5)$$

由于 DC/DC 变换器的开关频率高, 在一个开关周期内储能电池和超级电容的端电压几乎不变, 因此可以将两者的功率控制转换为电流控制^[21]。通过功率外环产生基准电流并经过电流闭环控制和 PWM 调制, DC/DC 变换器即可实现对参考功率指令信号的闭环跟踪控制。根据以上分析, 可以得到图 1 中直流侧 HESS 的控制框图, 如图 2 中绿色部分所示。

2 惯量自适应及其二次控制

2.1 传统惯量自适应控制策略

GFMC 并网功率传输简化模型见图 3。图 3 中, U_g 为 GFMC 输出电压有效值; U 为电网电压有效值; Z_g 为线路阻抗; I_g 为电网侧电流; δ 为 GFMC 输出电压与电网电压之间的相位角差 (即功角)。

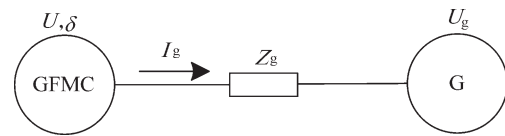


图3 GFMC并网功率传输简化模型

Fig.3 simplified model of GFMC grid-connected power transmission

根据潮流计算可得

$$P_e = \frac{3U_g}{Z_g} [U \cos(\theta - \delta) - U_g \cos\theta]. \quad (6)$$

为了简化分析, 假设 Z_g 近似为纯电感, 且 δ 足够小。此假设忽略了无功控制回路对有功控制回路的耦合效应, 则式 (6) 可简化为

$$P_e \approx \frac{3U_g U}{Z_g} \sin\delta \approx K_{ps} \delta. \quad (7)$$

考虑变流器的内环控制带宽是功率外环的 10 倍以上, 因此在研究功率外环的稳定性时, 可忽略内环特性响应特性^[22]。故而 GFMC 可以等效为理想受控电压源。将式 (3)、式 (7) 组合并线性化得到 GFMC 的 Phillips-Heffron 模型, 见图 4。

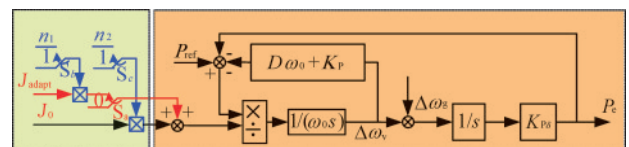


图4 GFMC的Phillips-Heffron模型

Fig.4 Phillips-Heffron model of GFMC

由图 4 可得 GFMC 有功功率输出和频率输出相对于参考功率变化的闭环传递函数为

$$\begin{cases} G_{PP}(s) = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_{ref}} = \frac{K_{P\delta}}{J\omega_0 s^2 + D_1\omega_0 s + K_{P\delta}} \\ G_{P\omega}(s) = \frac{\Delta\omega_v}{\Delta P_{ref}} = \frac{s}{J\omega_0 s^2 + D_1\omega_0 s + K_{P\delta}} \end{cases} \quad (8)$$

由式 (8) 可以看出, 当 ΔP_{ref} 发生阶跃变化时, GFMC 的输出有功功率 ΔP_c 和角频率 $\Delta\omega_v$ 将呈现出二阶振荡特征, 且每个振荡周期可分为 4 个阶段, 如图 5 (a) 所示。结合图 5 (b) 和图 5 (c) 可以看出, 根据 $\Delta\omega_v$ ($d\omega_v/dt$) 的正负, 可以将 4 个阶段

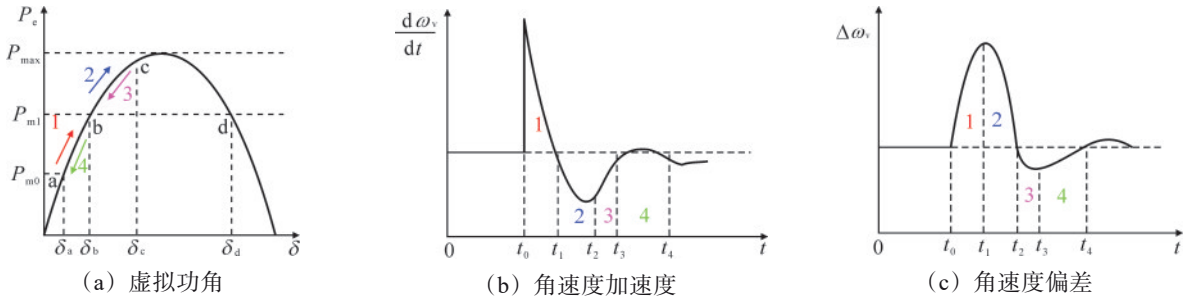


图 5 GFMC 输出功角特性

Fig.5 GFMC output power angle characteristic

为了改善 GFMC 在调度指令 (参考功率) 变化时的振荡性能, 在不同阶段应当采用不同的转动惯量 J 。各阶段的虚拟转动惯量 J 的特征见表 1。

表 1 不同阶段下的虚拟转动惯量 J 特征

Tab.1 virtual moment of inertia J at different stages

振荡阶段	$\Delta\omega_v$	$d\omega_v/dt$	$\Delta\omega_v \cdot (d\omega_v/dt)$	J
1	>0	>0	>0	增加
2	>0	<0	<0	减小
3	<0	<0	>0	增加
4	<0	>0	<0	减小

根据表 1 的虚拟转动惯量 J 特征, 自适应控制虚拟惯量如式 (9)、式 (10) 所示, 对应图 4 中红色部分开关 S_a 闭合的情况。

$$J_{tra} = J_0 + J_{adapt}, \quad (9)$$

$$J_{adapt} = \begin{cases} k \arctan \left(\left| \frac{d\omega}{dt} \right| \right) \left| \frac{d\omega}{dt} \right| > T_j \cap \Delta\omega \cdot \frac{d\omega}{dt} > 0 \\ 0 & \left| \frac{d\omega}{dt} \right| > T_j \cap \Delta\omega \cdot \frac{d\omega}{dt} < 0 \end{cases}, \quad (10)$$

式中: J_{tra} 为总惯量; J_0 为稳态惯量; J_{adapt} 为暂态惯量 (稳态时为 0); k 为惯量调整系数; T_j 为角加速度阈

划分为 2 个区间, 即增加惯量区间和减小惯量区间。

在阶段 1 和阶段 3, 虚拟转子加速运动, 但加速度呈现减小趋势, 并趋向于平衡点 b , 容易导致 $\Delta\omega_v$ 过度超调。为抑制 $\Delta\omega_v$ 的变化, 此时应增大 J (相当于增大转子质量)。对于相同的能量增量, 转子质量越大, $\Delta\omega_v$ 的变化越小。

在阶段 2 和阶段 4, 随加速度的增加, 虚拟转子进行减速运动, 并偏离平衡点 b , 容易导致 ΔP_c 过冲。为抑制 ΔP_c 的变化, 提高动态响应时间, 此时应减小 J (相当于减小转子质量)。对于相同的 $\Delta\omega_v$, 转子质量越小, 所需的缓冲能量和减速时间越小。

值, 用于避免因角速度检测误差带来的惯量误调整。

2.2 基于 SOC 状态约束的惯量自适应及其二次控制

SOC 是反映储能系统剩余容量以及使用寿命的重要参数^[23]。根据其荷电状态可分为 3 个阶段: 正常运行、过放、过充, 即

$$S_{OC} = \begin{cases} [0, S_{OCmin}) & \text{过放} \\ [S_{OCmin}, S_{OCmax}) & \text{正常} \\ [S_{OCmax}, 1] & \text{过充} \end{cases} \quad (11)$$

式中, S_{OCmin} (取 0.1)、 S_{OCmax} (取 0.9) 分别为储能系统过放电和过充电时的临界值。

考虑到超级电容由于其特殊的电学材料特性, 在瞬态过程中更容易发生过充电或过放电的情况。结合 GFMC 动态过程中响应特性优化需求, 还需进一步考虑其与超级电容 SOC 的协调控制。由式 (2) 可知, GFMC 动态调节过程中超级电容输出能量表达式为

$$\Delta E_{sc} = \int P_{sc} dt = -\int J\omega_0 \frac{d\omega_v}{dt} = -J\omega_0 \Delta\omega_v \quad (12)$$

由式 (12) 可见, 当 J 一定时, ΔE_{sc} 随角频率变化量 $\Delta\omega_v$ 的增大而增大。 $\Delta\omega_v$ 增大可导致超级电

容释放更多的能量。由图5(c)可知, $\Delta\omega_v$ 的超调主要发生在阶段1, 因而使得超级电容在该阶段易发生过充或过放情况。

通过2.1节的分析可以看出, 当采用惯量自适应控制时, 可以有效地降低阶段1的 $\Delta\omega_v$ 。但由于此时 J 的增加, 不能根据式(12)定性判断 ΔE_{sc} 的变化。因此, 需要将式(12)展开, 定量分析 ΔE_{sc} 相对于 J 的变化规律。

由式(8)可知, $\Delta\omega_v$ 阶跃响应的复频域表达式为

$$\Delta\omega_v(s) = \frac{G_{P\omega}(s)}{s} = \frac{1}{J\omega_0 s^2 + D_1\omega_0 s + K_{P\delta}} \quad (13)$$

对式(13)进行拉普拉斯反变换可得

$$\Delta\omega_v(t) = \frac{2e^{-\frac{D_1}{2J}t} \sin\left(\sqrt{\frac{4JK_{P\delta} - \omega_0 D_1^2}{4J^2\omega_0}} t\right)}{\sqrt{4J\omega_0 K_{P\delta} - \omega_0^2 D_1^2}} \quad (14)$$

联立式(12)、式(14)可得

$$\Delta E_{sc} = -J\omega_0 \cdot \frac{2e^{-\frac{D_1}{2J}t} \sin\left(\sqrt{\frac{4JK_{P\delta} - \omega_0 D_1^2}{4J^2\omega_0}} t\right)}{\sqrt{4J\omega_0 K_{P\delta} - \omega_0^2 D_1^2}} \quad (15)$$

为满足工程实际, 默认系统一般工作在欠阻尼状态。由式(15)可知, J 的增大将加剧超级电容的能量释放, 缩短其使用寿命。

综上, 在阶段1、3, 增加GFMC的虚拟惯量 J 可以降低 $\Delta\omega_v$, 改善动态响应能力, 但会增加超级电容的容量需求, 不利于系统经济性。因此, 需优化协调 S_{oc} 和 J 的关系。

超级电容荷电状态可表示为

$$S_{oc} = S_{oc0} + \frac{1}{S_N} \int P_{sc} dt = S_{oc0} + \frac{\Delta E_{sc}}{S_N} \quad (16)$$

式中: S_{oc} 和 S_{oc0} 分别为超级电容当前荷电状态和初始状态; S_N 为额定容量; P_{sc} 为充放电功率。

当计及超级电容荷电状态变化时, GFMC虚拟惯量二次调整可表示为

$$J_{sc} = n_1 J_0 + n_2 J_{adapt} \quad (17)$$

$$n_1 = \begin{cases} 0 & 0 \leq S_{oc} < S_{oc\min} \cap P_{sc_ref} \geq 0 \\ k_1 & 0 \leq S_{oc} < S_{oc\min} \cap P_{sc_ref} < 0 \\ 1 & S_{oc\min} \leq S_{oc} < S_{oc\max} \\ k_2 & S_{oc\max} \leq S_{oc} \leq 1 \cap P_{sc_ref} \geq 0 \\ 0 & S_{oc\max} \leq S_{oc} \leq 1 \cap P_{sc_ref} < 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$n_2 = \begin{cases} 0 & 0 \leq S_{oc} < S_{oc\min} \\ k_3 \frac{S_{oc} - S_{oc\min}}{A - S_{oc\min}} & S_{oc\min} \leq S_{oc} < A \\ 1 & A \leq S_{oc} < B \\ k_4 \frac{S_{oc\max} - S_{oc}}{S_{oc\max} - B} & B \leq S_{oc} < S_{oc\max} \\ 0 & S_{oc\max} \leq S_{oc} \leq 1 \end{cases} \quad (19)$$

式中: J_{sc} 为二次调整惯量; A 和 B 为判断超级电容充放电余量和二次调节是否起作用的阈值; n_1 为 J_0 的二次调节系数; n_2 为 J_{adapt} 的二次调节系数; k_1 、 k_2 为 n_1 的调节系数; k_3 、 k_4 为 n_2 的调节系数。虚拟惯量二次调整控制策略对应图4中蓝色区域所示开关 S_b 与 S_c 的合闸状态。

通过上述提出的自适应算法可知: 当 S_{oc} 接近额定值 S_{ocref} 时, GFMC有足够的充放电裕度, 可更多地参与频率调节, 增强电网频率稳定性; 当 S_{oc} 较低或较高时, GFMC牺牲部分频率调节能力以优化 S_{oc} , 避免超级电容过充或过放; 当 S_{oc} 过低或过高时, GFMC将关闭惯量支撑功能。

3 实验分析

构建基于RTLAB的硬件在环实验平台, 验证所提出的计及荷电状态约束的GFMC惯量自适应控制策略的有效性。在实验中定义了3种控制策略: 控制策略1采用固定惯量控制; 控制策略2为传统的惯量自适应控制; 控制策略3为本文所提改进惯量自适应控制。选取超级电容初始荷电状态 S_{oc} 分别为0.5(正常状态)、0.75(较高)、0.88(过高)进行对比实验。

3.1 实验工况1

实验工况1, 初始时刻超级电容荷电状态 S_{oc} 为0.5, 在0s时, GFMC参考有功功率指令 P_{ref} 增加10kW, 实验结果见图6。

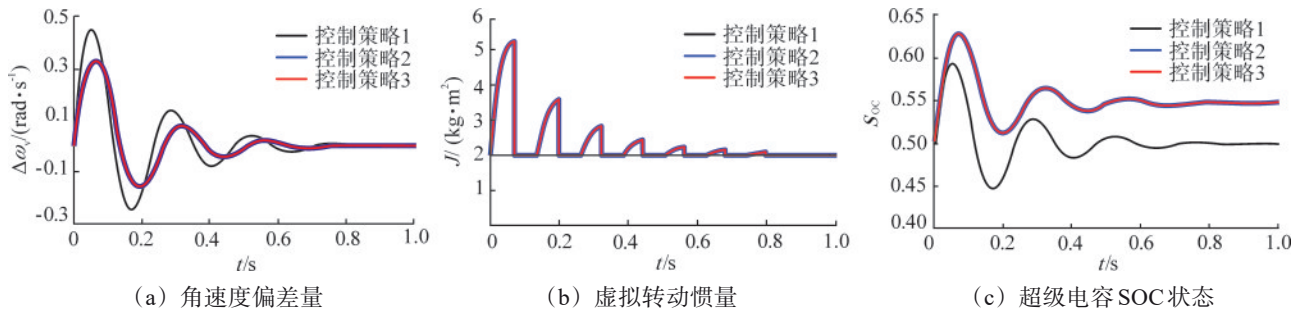


图6 实验工况1实验波形

Fig.6 experimental waveform in operation condition 1

由图6(a)可见,采用控制策略1和控制策略2时,GFMC产生的角速度偏差极为相近,而控制策略3对应的角度偏差量最大。同时,由图6(b)可见,在控制策略2和控制策略3作用下,GFMC能够根据角速度偏差的变化自适应地调整虚拟转动惯量大小。由图6(c)可见,在3种控制策略下, S_{oc} 在动态过程中均处于正常工作范围内。采用控制策略2、控制策略3时,GFMC惯量支撑能力和动态输出特性基本相同,与控制策略1相比,均可有效减小角频率偏差,改善GFMC的动态输

出特性。这说明在采用控制策略3时,如果超级电容具备足够的充放电余量,则不会触发二次调节,此时控制策略3转化为控制策略2,使得GFMC更多地参与频率调节以增强电网的频率稳定性,这与前面的理论分析相吻合。

3.2 实验工况2

实验工况2,初始 S_{oc} 为0.75,处于所提控制策略的上阈值,GFMC有功功率 P_{ref} 同样在0s时增加10kW。实验结果见图7。

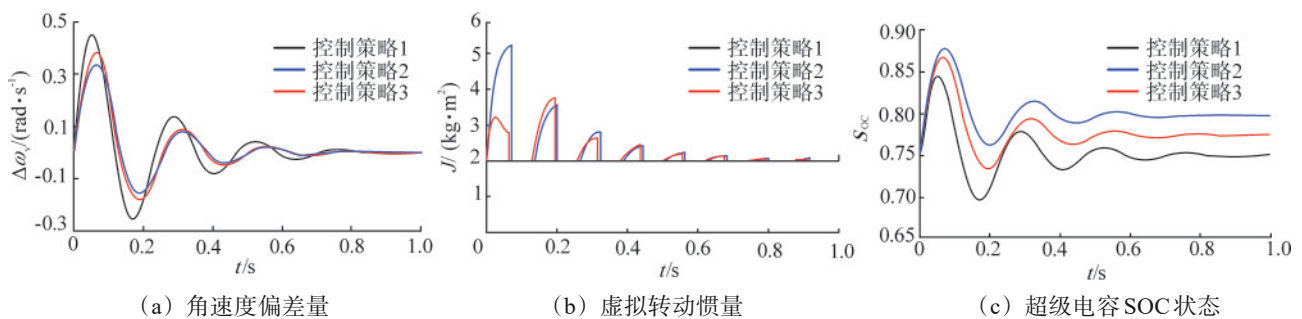


图7 实验工况2实验波形

Fig.7 experimental waveform in operation condition 2

由图7(a)可见,与控制策略1相比,控制策略3有效降低了GFMC的角频率偏差,优化了GFMC的频率输出特性。由图7(b)可见,与控制策略2相比,控制策略3在阶段1、阶段3限制了虚拟惯量,尽管在一定程度上降低了GFMC频率输出特性,但有效避免了因虚拟惯量参数过大导致超级电容 S_{oc} 在惯量支撑时产生的过充现象,如图7(c)所示。

从以上实验结果可以看出,采用策略3时,虚

拟转动惯量将根据超级电容荷电状态进行二次调整,根据 S_{oc} 偏离阈值的程度,GFMC自适应地牺牲一定的频率调节能力,有效地防止电荷状态的进一步恶化,这与前面的理论分析一致。

3.3 实验工况3

实验工况3,初始 S_{oc} 为0.88,这意味着超级电容接近过充。GFMC参考有功功率 P_{ref} 在0s时增加10kW,并在1s时重新降至0kW。实验结果见图8。

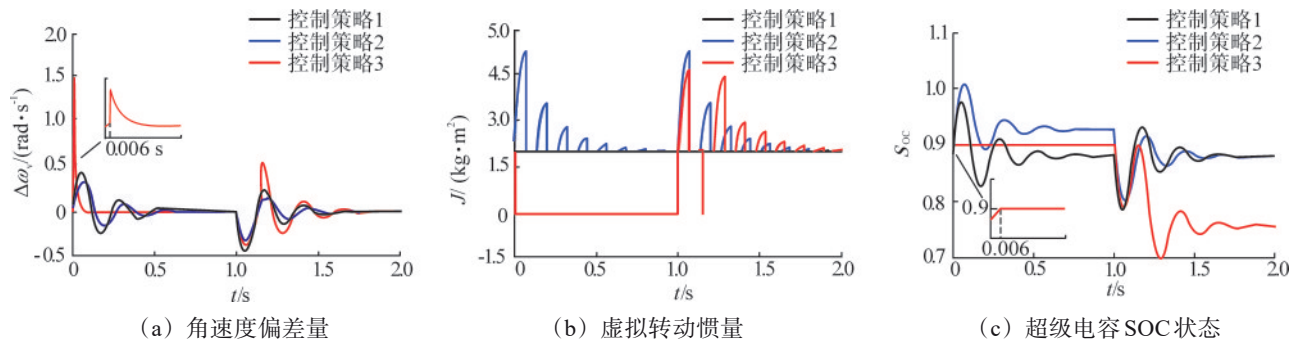


图8 实验工况3实验波形

Fig.8 experimental waveform in operation condition 3

由图8(a)可见,在当前工况下,采用控制策略3时,角速度偏差量最大。为了避免超级电容深度过冲,此时GFMC关闭了惯量支撑功能,仅保留下垂控制环节并通过能量型储能电池提供一次调频功率支撑,如图8(b)所示。由图8(c)可见,采用控制策略1、控制策略2时,由于忽略了直流侧储能电池的物理限制,超级电容发生了深度过充,影响使用寿命。而采用策略3时,一旦超级电容达到过充极限,便会立即停止向系统提供负向惯量支撑功率。因此,如何在超级电容处于过充/过放状态下,优化惯量支撑策略与GFMC动态特性是后续研究重点。在1s时,根据当前系统角速度偏差量,超级电容迅速放电并为系统提供有功功率。与策略2相比,采用本文所提策略时,超级电容在动态过程结束后的 S_{oc} 更低,表明超级电容荷电状态得到良好的管理,没有出现过充/过放现象。

4 结论

(1) 提出了一种基于储能电池与超级电容混合储能的构网型变流器惯量自适应控制策略,通过控制不同类型电池出力以响应频率扰动信号中的高频/低频分量,有效实现对系统的有功支撑。

(2) 推导了构网型变流器Philips-Heffron模型并获得其输出功角特性,分析表明,在面对电网角频率扰动时,过大的虚拟惯量会导致储能电池更易发生过充/过放,影响电池的使用寿命。

(3) 提出一种计及超级电容荷电状态的惯量二次调整方法,在提升构网型变流器动态响应特性的基础上,可有效防止超级电容的过充过放。

(4) 通过RTLAB硬件在环试验平台开展对比

研究,验证了所提控制策略的有效性和可行性。

参考文献(References):

- [1] 王祺,张泽轲,郭杰帅,等.新型电力系统主动构网机理与技术路径[J].中国电机工程学报,2024,44(2):504-517.
WANG Qi, ZHANG Zeke, GUO Jieshuai, et al. Mechanism and technical path of active grid-forming of new type power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 504-517.
- [2] 王翀,姚宏洋,陆海洋,等.构网型中压直流直挂储能研究[J].电力电子技术,2023,57(12):72-75.
WANG Chong, YAO Hongyang, LU Haiyang, et al. Research on grid-forming medium voltage direct current mounted energy storage[J]. Power Electronics, 2023, 57(12): 72-75.
- [3] 杨力,朱晓纲,李勇,等.规模化储能虚拟同步控制策略及其惯量分析[J].电力科学与技术学报,2024,39(2):190-197.
YANG Li, ZHU Xiaogang, LI Yong, et al. Virtual synchronous control strategy and inertia analysis of large-scale energy storage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 190-197.
- [4] ZHONG Q C, NGUYEN P L, MA Z Y, et al. Self-synchronized synchronverters: inverters without a dedicated synchronization unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 617-630.
- [5] 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.
- [6] GUO J, CHEN Y D, WANG L, et al. Impedance analysis and stabilization of virtual synchronous generators with different DC-link voltage controllers under weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(10): 11397-11408.
- [7] 韦微,姬秋华,王伟,等.适用于电网不对称下的自同步电压源逆变器控制策略[J].电力系统自动化,2021,45(10):124-131.
WEI Zheng, JI Qiuhua, WANG Wei, et al. Control strategy of self-synchronous voltage source inverter for asymmetric power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 124-131.
- [8] DHEER D K, GUPTA Y, DOOLLA S. A self-adjusting droop control strategy to improve reactive power sharing in islanded microgrid[J].

- IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1624-1635.
- [9] REN M W, LI T, SHI K, et al. Coordinated control strategy of virtual synchronous generator based on adaptive moment of inertia and virtual impedance[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2021, 11(1): 99-110.
- [10] ZHANG Q, LI Y, DING Z W, et al. Self-adaptive secondary frequency regulation strategy of micro-grid with multiple virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 6007-6018.
- [11] 许莹,陈卓,郝正航,等.混合微电网并离网切换控制技术研究[J].电网与清洁能源, 2023, 39(4): 137-146.
- XU Ying, CHEN Zhuo, HAO Zhenghang, et al. Research on parallel off-grid switching control technology of hybrid microgrid[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(4): 137-146.
- [12] 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.
- [13] KARIMI A, KHAYAT Y, NADERI M, et al. Inertia response improvement in AC microgrids: a fuzzy-based virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 4321-4331.
- [14] 曹昕鸷,韩珏.新能源虚拟同步机多参量自适应控制策略[J].电力电子技术, 2022, 56(3): 43-46, 50.
- CAO Xinzhi, HAN Jue. Multi-parameter adaptive control strategy for new source virtual synchronous generator[J]. Power Electronics, 2022, 56(3): 43-46, 50.
- [15] 王亚军,杨立波,马斌,等.虚拟同步机惯量及阻尼系数协调优化方法[J].电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 88-98.
- WANG Yajun, YANG Libo, MA Bin, et al. Coordination and optimization strategy of virtual inertia and damping coefficient of a virtual synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 88-98.
- [16] PAWAR B, BATZELIS E I, CHAKRABARTI S, et al. Grid-forming control for solar PV systems with power reserves[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(4): 1947-1959.
- [17] 颜湘武,张伟超,崔森,等.基于虚拟同步机的电压源逆变器频率响应时域特性和自适应参数设计[J].电工技术学报, 2021, 36(增刊1): 241-254.
- YAN Xiangwu, ZHANG Weichao, CUI Sen, et al. Frequency response characteristics and adaptive parameter tuning of voltage-sourced converters under VSG control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(Suppl.1): 241-254.
- [18] 杨旭红,金宏艳,刘众鑫,等.光储逆变器的虚拟同步机自适应控制策略研究[J].电力科学与技术学报, 2024, 39(2): 181-189.
- YANG Xuhong, JIN Hongyan, LIU Zhongxin, et al. Research on adaptive control strategy of virtual synchronous machine applied for the photovoltaic and energy storage inverter[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 181-189.
- [19] 朱作滨,孙树敏,丁月明,等.基于自适应VSG控制策略永磁直驱风电系统研究[J].太阳能学报, 2024, 45(1): 116-124.
- ZHU Zuobin, SUN Shumin, DING Yueming, et al. Research on pmsg wind power system based on adaptive VSG control strategy [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(1): 116-124.
- [20] 乔春雨,易建波,谷宇杰,等.基于虚拟同步机技术的光储协控无功优化策略[J].电网与清洁能源, 2022, 38(6): 129-136.
- QIAO Chunyu, YI Jianbo, GU Yujie, et al. Reactive power optimization strategy of photovoltaic and energy storage co-control based on virtual synchronous generator[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(6): 129-136.
- [21] MOHAMMED N, LASHAB A, CIOBOTARU M, et al. Accurate reactive power sharing strategy for droop-based islanded AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(3): 2696-2707.
- [22] DENG F, YAO W L, ZHANG X B, et al. A decentralized current sharing strategy for islanded resistive microgrids based on iterative virtual impedance regulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(6): 3958-3969.
- [23] 刘光军,吴思齐,张恒,等.基于AFEKF的锂离子电池SOC估算方法[J].沈阳工业大学学报, 2024, 46(3): 318-323.
- LIU Guangjun, WU Siqu, ZHANG Heng, et al. SOC estimation method based on AFEKF for lithium ion battery[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2024, 46(3): 318-323.