

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.06.014

计及荷电状态及频率恢复的构网型储能变流器自适应控制

陈兵^{1,2}, 殷嘉³, 张亮³, 王旭^{1,2}, 王方明^{1,2}

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 211100; 2. 江苏省电力试验研究院有限公司, 南京 211100;
3. 南京工程学院, 南京 211167)

摘要: 在“双碳”背景下,以新能源为主体的新型电力系统具有转动惯量、阻尼不足以及频率波动大等问题。为此提出了一种计及储能荷电状态和频率恢复的构网型储能变流器自适应控制策略,文中首先建立构网型储能变流器的小信号模型,开展虚拟惯量和阻尼系数对系统特性影响分析,并利用根轨迹分析和动态响应,对虚拟惯量和阻尼系数进行参数设计。在此基础上,引入回归函数来构建SOC与虚拟惯量和阻尼系数之间的控制因子,将储能荷电状态和频率恢复计入虚拟惯量和阻尼自适应影响因素,确保储能装置安全前提下实时调整惯量和阻尼系数扰动。最后,在MATLAB/Simulink中构建了仿真模型,仿真结果验证了所提策略可行性和有效性。

关键词: 构网型变流器; 虚拟惯量; 虚拟阻尼; 频率支撑

Adaptive Control of Grid-forming Energy Storage Converters Considering SOC and Frequency Recovery

CHEN Bing^{1,2}, YIN Jia³, ZHANG Liang³, WANG Xu^{1,2}, WANG Fangming^{1,2}

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Research Institute, Nanjing 211100, China; 2. Jiangsu Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 3. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Under the backdrop of “dual carbon” goals, the new power system dominated by new energy faces such challenges as insufficient rotational inertia, inadequate damping and significant frequency fluctuations. For this reason, an adaptive control strategy of grid-forming energy storage converter considering the state of charge of energy storage and frequency recovery is proposed. First, the small signal model of grid-forming energy storage converter is set up in this paper, and the influence of virtual inertia and damping coefficient on system characteristics is analyzed. Then, the virtual inertia and damping coefficient are designed using root locus analysis and dynamic response. On this basis, a regression function is introduced to construct a control factor among SOC, virtual inertia and damping coefficient. The energy storage state of charge and frequency recovery are included in the adaptive influencing factors of virtual inertia and damping, ensuring real-time adjustment of inertia and damping coefficient disturbances while ensuring the safety of the energy storage device. Finally, a simulation model is constructed in MATLAB/Simulink and both feasibility and effectiveness of the proposed strategy are verified by the simulation result.

Key words: grid-forming converter; virtual inertia; virtual damping; frequency support

0 引言

随着“双碳”战略的不断推进,以风电、光伏为

代表的新能源发电呈现爆发式增长,同时电力电子变流器在电力系统中的占比也不断增加^[1-7]。电力系统已呈现高比例新能源和高比例电力电子设备

收稿日期:2025-09-16; 修回日期:2025-12-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52377169);国网江苏省电力有限公司科技项目(J2022161)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52377169), Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd.(J2022161).

“双高”特征。

近年来,国内外学者针对构网型变流器^[8-9]的控制开展了大量研究。文[10-13]研究了关键参数转动惯量 J 和阻尼系数 D 与电网特性之间的关系,并分析了储能设备容量不足对输出特性的影响。文[14-16]均提出一种 J 、 D 协同控制策略来抑制频率变化率和频率偏差,有良好的控制效果但均未考虑储能装置安全问题。文[17]根据储能 SOC 与 VSG 的虚拟惯量之间的特性关系,提出了一种改进的虚拟惯性自适应控制策略。文[18]将储能荷电状态(SOC)负反馈加入角频率指令值,使储能系统可以在其储能容量限额范围内自动进行充放电以抑制电网频率波动。文[19]提出了一种考虑储能容量的电网频率响应策略,有效应对电网同步机电源比例降低,保障电网频率稳定。上述变流器自适应控制策略方法虽考虑了储能装置的影响因素,但未将储能装置影响对 J 和 D 进行设计约束。文[20]采用了一种线性函数参数选取方法对 J 和 D 进行设计,从而抑制频率变化率和频率偏差,但该方法 J 和 D 调节范围过大。文[21]在 VSG 频率变化和储能容量的综合优化约束下,采用线性二次型最优控制动态配置 J 和 D ,在优化了储能容量配置的基础上有效的抑制了有功功率和频率振荡。文[22]设计了 ln 基底型自适应控制策略,用 ln 基底型动态配置 J 和 D ,避免了 J 和 D 参数大范围调节。文[23]提出一种计及储能荷电状态(state of charge, SOC)的电池储能系统一次调频综合控制策略,引入 Logistic 回归函数建立电池储能系统 SOC 与下垂控制充放电系数之间的关系曲线。文[24]提出了一种计及储能容量和 SOC 约束采用模糊控制设计 J 、 D 取值,使惯量和阻尼参数在合理范围内根据要求实时地进行调整来应对功率变化、负荷扰动以及频率偏移。

上述研究工作大多集中于不同数学模型构建虚拟惯量和阻尼自适应控制与储能容量对虚拟惯性和阻尼的约束,尚未考虑将储能荷电状态和频率恢复共同计入虚拟惯量和阻尼自适应控制中。针对这一问题,文中一种计及储能荷电状态和频率恢复的构网型储能变流器自适应控制策略,确保储能装置安全前提下实时调整惯量和阻尼系数扰动。该方法通过构建构网型储能变流器的小信号模型,得到虚拟惯量和阻尼与系统特性影响关系,从而构建频率特性与虚拟惯量和阻尼的分段控制函数。此外,引入回归函数来构建 SOC 与虚拟惯量和阻尼系数之间的控制因子,在储能处于极限运行状态时根据其 SOC 自主调节虚拟惯量,以延长其使用寿命。

文中所提出的策略能够有效改善系统频率和储能装置的使用寿命,并在仿真中验证了所提方法的有效性。

1 构网型储能变流器拓扑结构与控制策略

1.1 构网型储能变流器拓扑结构

典型的双级构网型储能变流器的拓扑图见图 1,图 1 中: S_1 、 S_2 为功率开关器件; L_{dc} 为双向 DC/DC 变换器的电感; VT_1 - VT_6 为功率开关器件; L_f 、 C_f 分别为滤波器的电感及电容; Z_{load} 为三相负载; Z_g 为并网阻抗; u 为电网电压。

1.2 构网型储能变流器控制策略

采用虚拟同步机策略控制构网型储能变流器,模拟同步发电机输出特性,使构网型储能变流器具备向电网提供惯量和阻尼的能力。虚拟同步机变流器与传统同步机特性对比见图 2。

在传统虚拟同步机控制的基础上,计及 SOC、 Δf 和 df/dt 等影响因子,确保储能装置安全前提下自适应调节虚拟惯量和阻尼,其控制方式见图 3。

根据图 3,构网型储能变流器控制策略数学模型为

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_{ref}}{\omega_s} - \frac{P}{\omega_s} - D(\omega_o - \omega_s) \\ \frac{d\varphi}{dt} = \omega_o - \omega_s \\ E = \frac{K}{s} [K_u(U_n - U) + (Q_{ref} - Q)] \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: ω_o 和 ω_s 分别为变流器的输出角频率和同步角频率; J 和 D 分别为虚拟惯量和虚拟阻尼系数; P_{ref} 和 P 分别为参考有功功率和实际输出有功功率; φ 为系统功角; E 为虚拟同步机虚拟内电势相电压有效值; K 为无功功率积分系数; Q_{ref} 为无功功率给定值; U_n 为额定相电压有效值; U 为电容相电压有效值; K_u 为无功—电压下垂调差系数。

2 虚拟惯量和阻尼系数的影响分析

2.1 构网型储能变流器的小信号模型

构网型储能变流器并网的等效电路模型见图 4,图 4 中: $U_o \angle \delta$ 为逆变器桥臂中点电压; $U_g \angle 0$ 为电网电压向量; i 为逆变器输出电压; Z_o 为逆变器输出阻抗; Z_g 为电网阻抗; δ 为两个电压相量之间的相位差,见式(2)。

$$\delta = \int (\omega - \omega_g) dt \quad (2)$$

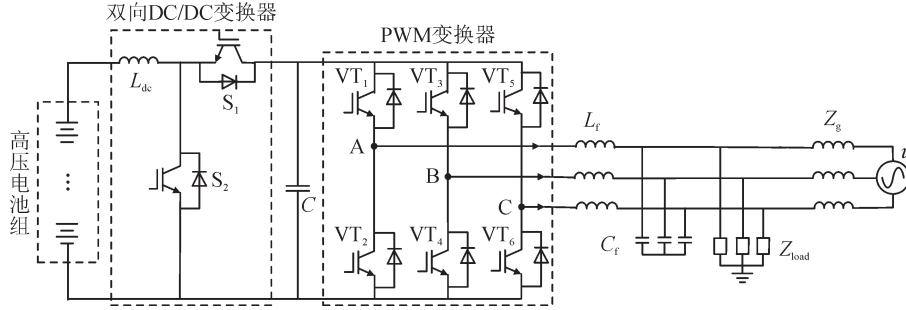


图1 构网型储能变流器拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of grid type energy storage converter

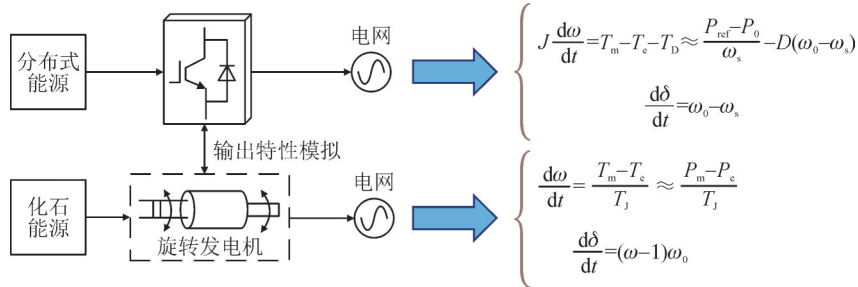


图2 虚拟同步机变流器与传统同步机特性对比

Fig. 2 Comparison of characteristics between virtual synchronous machine converter and traditional synchronous machine

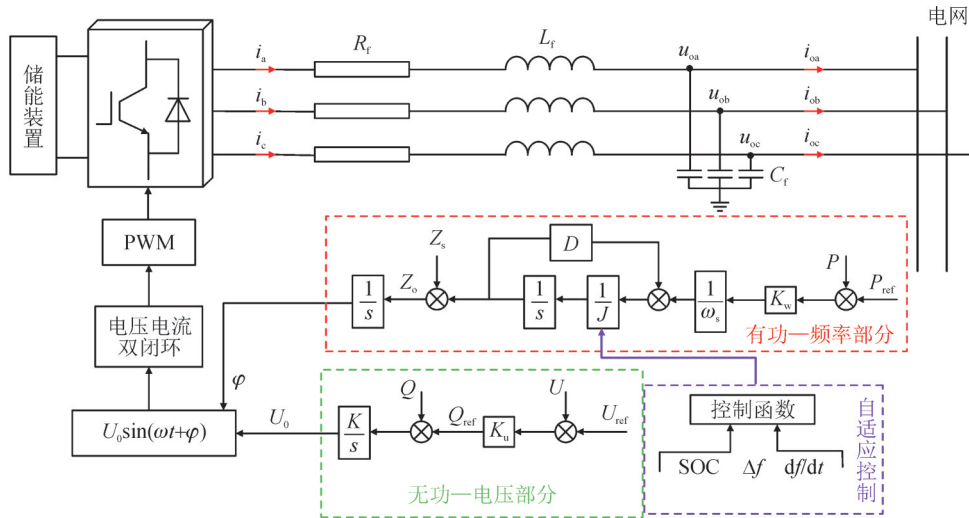


图3 构网型储能系统虚拟同步机自适应控制策略图

Fig. 3 Comparison of characteristics between virtual synchronous machine converter and traditional synchronous machine

式(2)中: ω 为逆变器的角频率; ω_g 为电网电压的角频率。

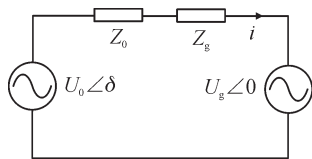


图4 SG并网的等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit for VSG grid connection

当逆变器接入电网时,此时电压相位差 $\delta \approx 0$, 由三角函数可知, $\sin \delta \approx \delta$, $\cos \delta \approx 1$, 则虚拟同步机输出的有功功率、无功功率为

$$\begin{cases} P_e = \frac{3U_o U_g}{X_s} \delta \\ Q_e = \frac{3U_o (U_o - U_g)}{X} \end{cases} \quad (3)$$

将虚拟同步机转子运动方程式(1), 以及式(2)、(3)进行联立, 得到虚拟同步机转子运动方程的小信号模型为

$$\begin{cases} J\omega_n \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta P_{ref} - \Delta P_e - D\omega_n \Delta\omega - K_\omega \Delta\omega \\ \Delta\delta = \int (\Delta\omega) dt \\ \Delta P = \frac{3U_o U_g}{X_s} \Delta\delta \end{cases} \quad (4)$$

对式(4)进行拉普拉斯变换,得到虚拟同步机复频域惯量支撑的动态小信号模型为

$$\begin{cases} \Delta\omega(s) = \frac{P_{ref}(s) - P_c(s)}{J\omega_0 s + D\omega_0 + K_p} \\ \Delta\delta(s) = \frac{\Delta\omega(s)}{s} \\ \Delta P(s) = \frac{3U_0 U}{X_s} \Delta\delta(s) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)建立的小信号模型,见图5。

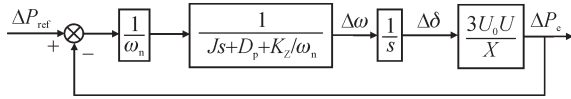


图5 虚拟同步机转子运动方程小信号模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of small-signal model for equations of motion of virtual synchronous machine rotor

2.2 虚拟惯量和阻尼系数的影响特性分析

2.2.1 虚拟惯量和阻尼系数对系统稳定性影响

由图5推导出VSG转子运动方程传递函数,见式(6),绘制关键参数虚拟惯量J变化时的极点图,分析其对系统稳定的影响特性,见图6、7。

$$G_p(s) = \frac{3U_0 U}{J\omega_n X_s s^2 + (D\omega_n + K_\omega)X_s s + 3U_0 U} \quad (6)$$

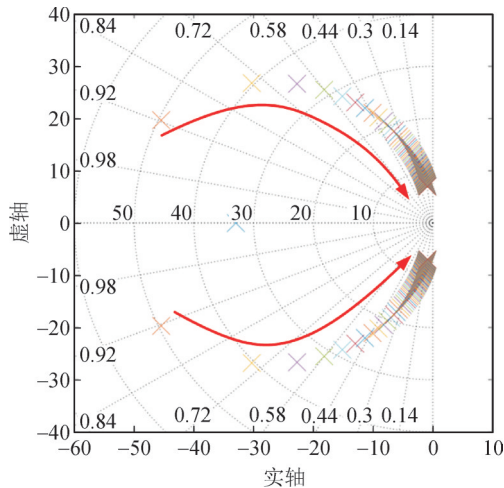


图6 VSG虚拟惯量变化时极点分布图

Fig. 6 Pole distribution map when VSG virtual inertia changes

保持阻尼系数D,惯量J从0.1变化到10,可以看到系统的稳定裕度下降,随着惯量不断变大,根轨迹变得密集,对系统的影响程度逐步减弱。

保持虚拟惯量J保持不变,阻尼系数D从10变化到30,可以看到随着D的增大,系统稳定裕度增大,随着D的增大,稳定性进一步变差。

2.2.2 虚拟惯量和阻尼系数对功率响应特性影响

分析虚拟同步机虚拟惯量和阻尼系数对系统功率响应特性影响^[25],见图8。

如图8所示,当阻尼系数D保持一定时,随着

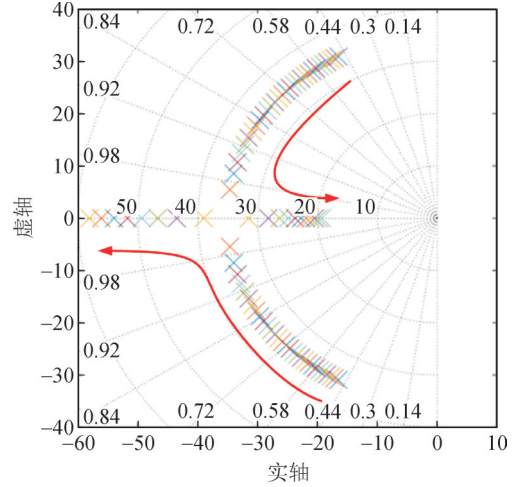
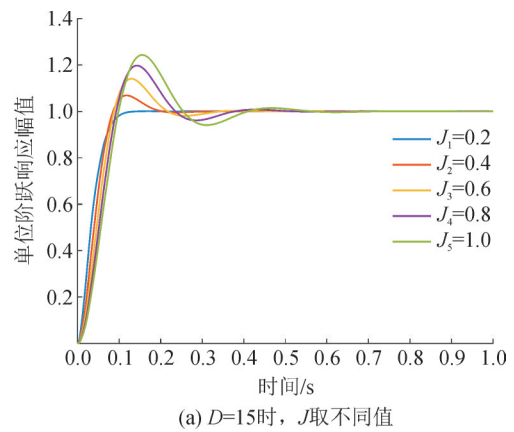
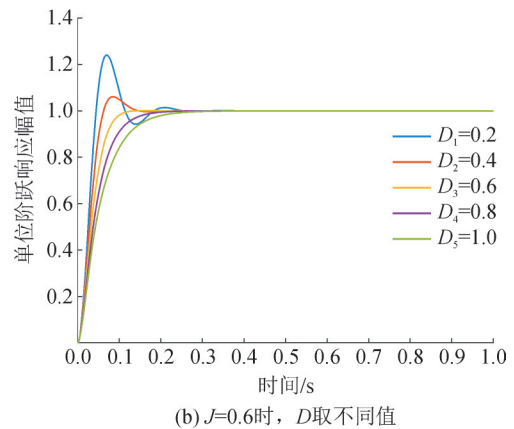


图7 VSG阻尼系数变化时极点分布图

Fig. 7 Pole distribution map when VSG damping coefficient changes



(a) D=15时, J取不同值



(b) J=0.6时, D取不同值

图8 有功功率阶跃响应曲线

Fig. 8 Active power step response curve

虚拟惯量J的增大,有功功率的超调量增大、调节时间变长以及功率变化速率变慢,输出功率出现振荡。当虚拟惯量J保持一定时,随着阻尼系数D的增大,有功功率超调量减小、调节时间增加以及功率变化速率减慢,稳定性变好。

2.2.3 虚拟惯量和阻尼系数对频率响应特性影响

根据图5可以得到参考功率与输出频率之间的

传递函数, 见式(7)

$$G_{\omega}(s) = \frac{s}{J\omega_0 s^2 + (D\omega_0 + K_p)s + \frac{3U_0 U_g}{X_s^2}} \quad (7)$$

VSG输出频率的单位阶跃响应曲线见图9。当阻尼系数 D 保持一定时, 随着虚拟惯量 J 的增大, 系统频率超调量减小、调节时间增加以及频率变化速率减慢, 频率的稳定性变好。当虚拟惯量 J 保持一定时, 随着阻尼系数 D 的增大, 系统频率超调量减小、调节时间变小以及频率变化速率减慢。

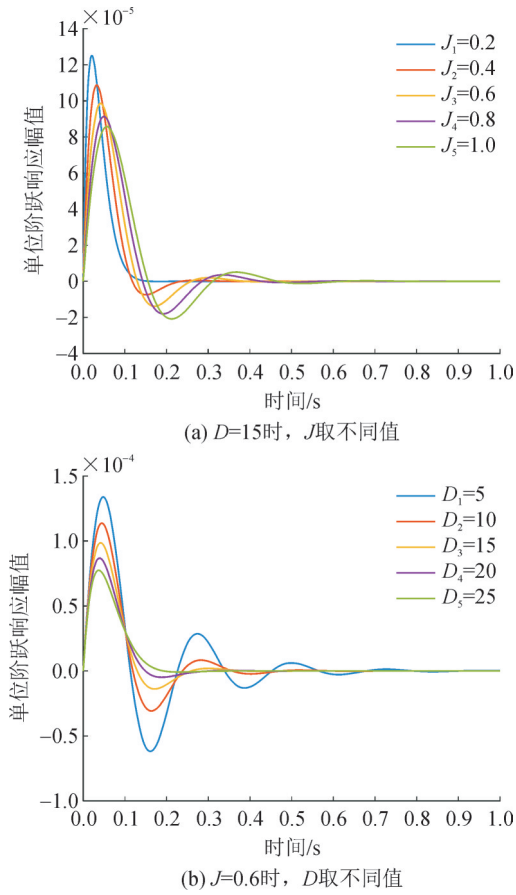


图9 输出频率阶跃响应曲线

Fig. 9 Output frequency step response curve

3 一种计及储能荷电状态和频率恢复的构网型储能变流器自适应控制策略

3.1 基于储能荷电状态的控制因子的建立

由于电池储能系统应用规模相对电力系统容

量非常小, 若一直采用较大充放电系数, 则极易导致其SOC越限。为减少SOC越限对电网频率和储能装置造成的不利影响, 根据储能装置实时的SOC情况对虚拟惯量 J 和阻尼系数 D 进行自适应调节。为此引入 Logistic 回归函数建立电池储能系统SOC与虚拟惯性充放电系数之间的关系曲线见图10, 将储能SOC划分为5个不同的状态区间。

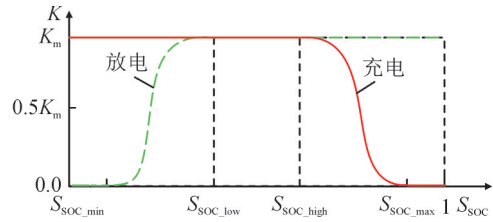


图10 基于回归函数的反馈系数自适应调节

Fig. 10 Adaptive adjustment of feedback coefficients based on regression function

图10中: K_m 为电池储能系统最大充放电系数; S_{SOC_min} 为SOC最低值; S_{SOC_low} 为SOC较低值; S_{SOC_high} 为SOC较高值; S_{SOC_max} 为SOC最高值; S_{SOC} 为SOC值。

储能装置SOC处于 $[0, S_{SOC_min}]$ 极限状态时, 由于储能装置电量不足, 继续放电会影响电池的使用寿命, 故设置放电系数 $K_d = 0$, 同时为了尽快摆脱缺电状况, 充电设置充电系数 $K_c = K_m$; 同理可得, 储能装置SOC处于 $[S_{SOC_max}, 1]$ 极限状态时, 放电系数 $K_d = K_m, K_c = 0$ 。储能装置SOC处于 $[S_{SOC_min}, S_{SOC_max}]$ 正常状态时, 充放电系数呈指数方式增长, 随着数值逐渐饱和, 增加速度有所减缓, 达到一定程度时停止增长并稳定于某一数值。采用回归函数建立储能SOC与虚拟惯性充放电系数之间的关系曲线, 优势在于可以有效防止因临界点系数快速变化对系统造成二次扰动。

综上, 储能系统采用虚拟惯性自适应控制时的 K_c 和 K_d 在各SOC区间下的表达式:

$$\begin{cases} K_c = K_m \\ K_d = 0 \end{cases} \quad S_{SOC} \in [0, S_{SOC_min}] \quad (8)$$

$$\begin{cases} K_c = 0 \\ K_d = K_m \end{cases} \quad S_{SOC} \in [S_{SOC_max}, 1] \quad (9)$$

$$\begin{cases} K_c = \frac{0.01K_m \exp[\frac{15(S_{SOC_max} - S_{SOC})}{(S_{SOC_max} - S_{SOC_min})/2}]}{K_m + 0.01 \left\{ \exp[\frac{15(S_{SOC_max} - S_{SOC})}{(S_{SOC_max} - S_{SOC_min})/2}] - 1 \right\}} \\ K_d = \exp\left[\frac{15(S_{SOC} - S_{SOC_min})}{(S_{SOC_max} - S_{SOC_min})/2}\right] - 1 \end{cases} \quad S_{SOC} \in (S_{SOC_min}, S_{SOC_max}) \quad (10)$$

根据一次调频原理,当系统频率大于额定频率时,储能逆变器应减小输出功率进行调频,此时储能电池充电,故影响因子为充电系数;当系统频率小于额定频率时,储能逆变器应增大输出功率进行调频,此时储能电池放电,故影响因子为放电系数。储能电池荷电状态对充放电功率的影响因子 α 表达式为

$$\alpha = \begin{cases} K_c & f \geq f_0 \\ K_d & f < f_0 \end{cases} \quad (11)$$

式(5)中, α 为储能电池荷电状态对充放电功率的影响因子。

3.2 计及储能荷电状态和频率恢复的自适应控制策略

由图 11 和 2.2.3 节分析可知,系统发生扰动后,当角频率处于 $\omega > \omega_0$ 且 $d\omega/dt > 0$ 和 $\omega < \omega_0$ 且 $d\omega/dt < 0$ 这两个阶段时,角频率的偏差 $|\omega - \omega_0|$ 逐渐变大,因此需要增大虚拟惯性和阻尼以减小角频率的偏移量。当角频率处于 $\omega > \omega_0$ 且 $d\omega/dt < 0$ 和 $\omega < \omega_0$ 且 $d\omega/dt > 0$ 这两阶段时,由于角频率的偏差 $|\omega - \omega_0|$ 逐渐变小,需要减小虚拟惯性和阻尼来加快角频率恢复。

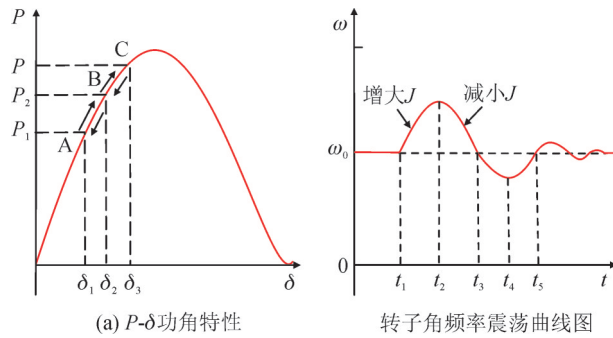


图 11 电力系统功角特性曲线和频率振荡曲线

Fig. 11 Power angle characteristic curve and frequency oscillation curve of power system

传统 VSG 控制策略中由于其惯性和阻尼因子都是定值,无法使得系统的快速性和稳定性皆达到最优。因此,文中提出一种计及储能 SOC 与频率恢复特性的自适应控制方法。

其中,自适应虚拟惯量和频率偏差的关系为

$$J_z = \begin{cases} J_0 + K_J \alpha \left| \frac{df}{dt} \right| & \Delta f \frac{df}{dt} \geq 0 \cap |\Delta f| > K \\ J_0 \alpha & \Delta f \frac{df}{dt} < 0 \cap |\Delta f| > K \\ J_0 & |\Delta f| \leq K \end{cases} \quad (12)$$

自适应阻尼系数表达式为

$$D_z = \begin{cases} D_0(1 + K_D |\Delta f|) & |\Delta f| > K \\ D_0 & |\Delta f| \leq K \end{cases} \quad (13)$$

式(12)、(13)中: J_z 和 D_z 分别为自适应虚拟阻

抗和阻尼系数; J_0 和 D_0 分别为稳态虚拟阻抗和阻尼系数; K 为频率变化量临界值; K_J 和 K_D 分别为惯性调节系数和阻尼系数, $|K_D| = |D_0/J_0|$ 。

4 仿真实验

在 MATLAB/Simulink 中搭建构网型储能仿真模型,验证文中所提策略有效性,见图 12。相关仿真参数设置见表 1。

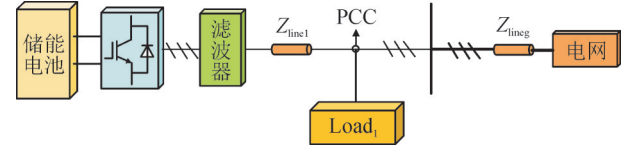


图 12 构网型储能自适应惯量策略仿真结构图

Fig. 12 Simulation structure diagram of network type energy storage adaptive inertia strategy

表 1 构网型储能逆变器的仿真参数

Table 1 Simulation parameters of grid inverter

主电路参数	数值	控制参数	数值
蓄电池电压/V	700	转动惯量	0.6
电网线电压/V	380	阻尼系数	15
滤波电感/mH	2	调差系数	792
滤波电容/F	10^{-6}	无功系数	160
电池容量/Ah	20	调频死区/Hz	0.05

为验证所提方法的有效性,对比验证以下两种工况:

工况① 储能放电,设置储能 SOC 初始值为 20%,负载由储能装置负责供电,0~0.5 s 系统带 5 kW 的负荷启动运行,并在 0.5 s 再次投入 20 kW 的负荷。

工况② 储能充电,设置储能 SOC 初始值为 80%,电网向储能装置和负载共同供电,0.2~0.5 s 系统带 25 kW 的负荷稳定运行,并在 0.5 s 切除 20 kW 的负荷。

上述两种工况同时采用固定参数的传统虚拟同步机控制、不计及 SOC 的自适应控制以及文中所提构网型储能变流器自适应控制进行对比,2 种不同控制方式下的自适应虚拟惯量、自适应虚拟阻抗、荷电状态和输出频率情况见图 13、14。

从图 13 可以看出,工况①情况下带载启动时,文中所提的控制策略适当增大虚拟惯量和阻尼,将频率波动从 50.1 Hz 降到 50.08 Hz 左右,比其他两种控制策略又有更好的频率抑制效果;在 0.5 s 大负荷接入时,传统的虚拟同步机频率波动达到 0.27 Hz,超过正常允许的频率波动 0.2 Hz,采用文本所提策略可以减小频率波动到 0.18 Hz 左右,从而满足系统

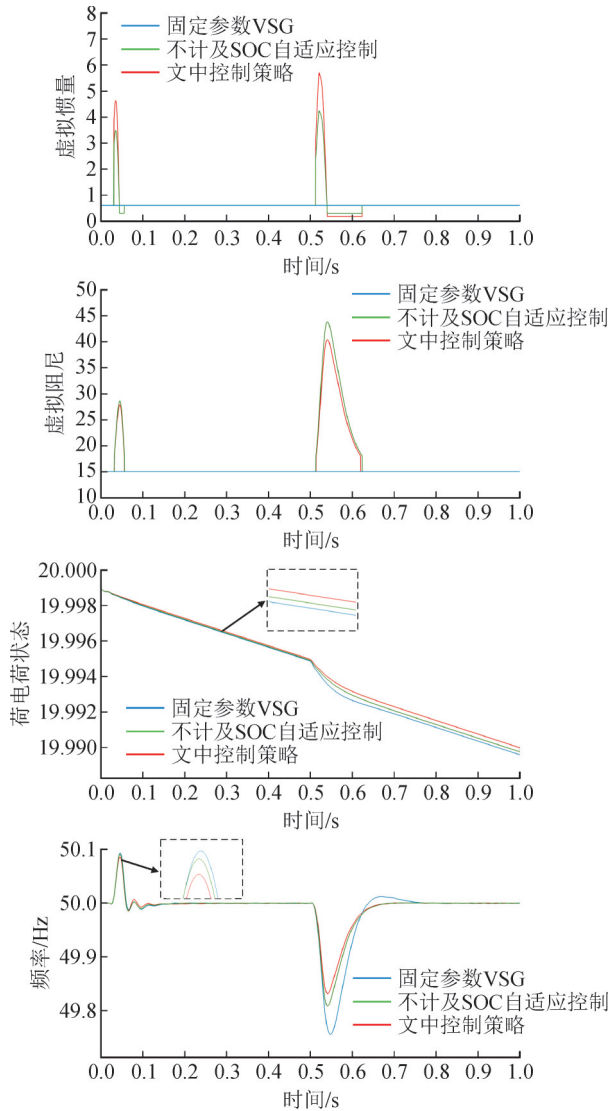


图 13 工况①时不同控制策略对比仿真结果图

Fig. 13 Comparison simulation results of different control strategies under condition ①

要求。由于电池处于过放区,当采用文中所提控制策略时,虚拟惯量考虑了电池SOC的影响,适当增大虚拟惯量,使得放电期间SOC的下降相比于不计及SOC自适应控制明显减小,有效避免了储能装置SOC过低情况的出现,延长设备的使用寿命。

从图 14 可以看出,在工况②储能充电时切除负载,文中所提的控制策略将频率波动从 50.19 Hz 降到 50.15 Hz 左右;并且储能电池电量 SOC 处于过充区,相比于不计及 SOC 自适应控制,适当降低虚拟惯量延缓电池 SOC 过充,改善了电池使用状况。

5 结论

1)建立了构网型储能变流器的小信号模型,开展虚拟惯量和阻尼系数对系统特性影响分析,并利用根轨迹分析和动态响应对比虚拟惯量和阻尼系数

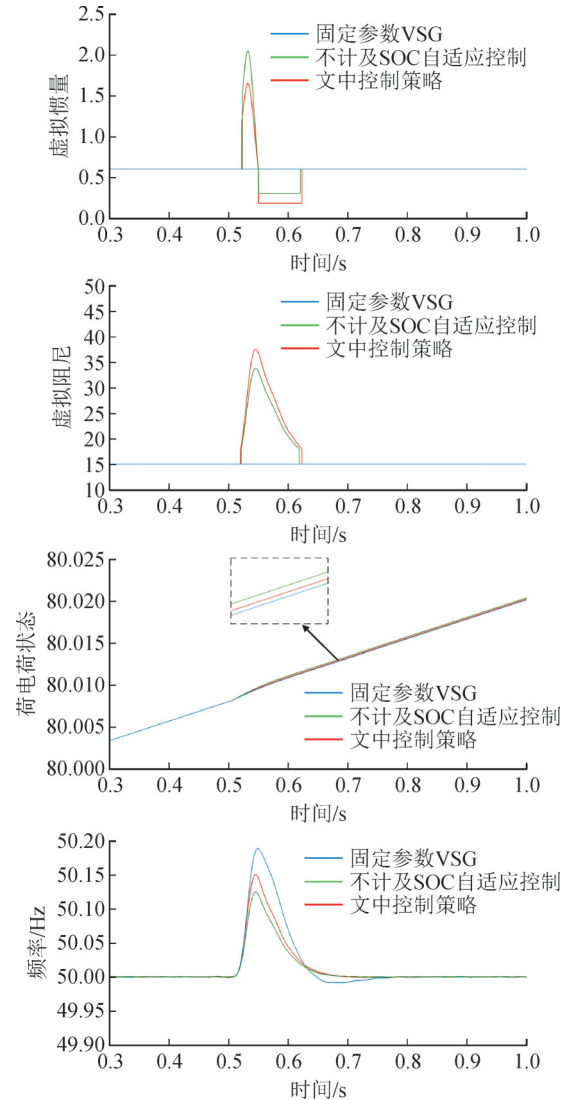


图 14 工况②下构网型储能自适应和固定参数虚拟同步机对比仿真图

Fig. 14 Comparison simulation results of different control strategies under condition ②

进行参数设计,提高了参数设计的准确性,实现了对系统的稳定控制。

2)固定参数的虚拟同步机控制和传统虚拟惯量自适应控制都尚未将储能的SOC计入虚拟惯量和阻尼的控制,文中在此基础上将储能荷电状态和频率恢复计入虚拟惯量和阻尼自适应影响因素,确保储能装置安全前提下实时调整惯量和阻尼系数扰动,从而可有效抑制系统频率波动,延长电池使用寿命。

参考文献:

[1] 许洁翊,刘威,刘树,等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3586-3594.
 XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology

- [J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3586-3594.
- [2] 徐波, 李沛泓, 姚寅, 等. GFM/GFL变流器与同步发电机构成的混合电力系统小信号建模与稳定性分析[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(6): 141-151.
XU Bo, LI Peihong, YAO Yin, et al. Small signal modeling and stability analysis of hybrid power system with GFM and GFL converters and synchronous generator[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 141-151.
- [3] 袁梦瞳, 薄耀龙, 夏杨红, 等. 并网变流器小信号稳定性解析解[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(4): 234-244.
YUAN Mengtong, BO Yaolong, XIA Yanghong, et al. Analytical solution for small signal stability of gridconnected converter[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 234-244.
- [4] 林宇轩, 李威, 朱玲, 等. 电网电压跌落下构网型变流器暂态控制策略综述[J]. 电力工程技术, 2025, 44(2): 55-68.
LIN Yuxuan, LI Wei, ZHU Ling, et al. Review of transient control strategies for grid-forming converters under grid voltage sag conditions[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(2): 55-68.
- [5] 阮亮, 王杨, 肖先勇, 等. 跟网型和构网型变流器动态交互特性分析[J]. 智慧电力, 2024, 52(7): 103-110.
RUAN Liang, WANG Yang, XIAO Xianyong, et al. Dynamic interaction control characteristic analysis of grid-following and grid-forming inverters[J]. Smart Power, 2024, 52(7): 103-110.
- [6] 杨振奥, 陈俊儒, 刘雨珊, 等. 计及暂态响应与动态支撑能力的跟网型变流器容量配比方法[J]. 智慧电力, 2025, 53(12): 123-130.
YANG Zhen'ao, CHEN Junru, LIU Yushan, et al. A capacity allocation method for grid-following/grid-forming converters considering transient response and dynamic support capability[J]. Smart Power, 2025, 53(12): 123-130.
- [7] 黄炳政, 陈俊儒, 刘牧阳, 等. 基于自适应虚拟阻抗的构网型变流器暂态稳定性提升策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(12): 57-68.
HUANG Bingzheng, CHEN Junru, LIU Muyang, et al. Grid-forming converter transient stability enhancement strategy based on adaptive virtual impedance[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(12): 57-68.
- [8] 朱宝宇, 王英, 张子翔, 等. 构网型储能变流器技术研究综述与展望[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(3): 1-12.
ZHU Baoyu, WANG Ying, ZHANG Zixiang, et al. Review and prospects on research of grid-forming energy storage converter technology[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(3): 1-12.
- [9] 于重阳. 基于直觉模糊S-粗决策模型的储能变流器双环控制[J]. 大电机技术, 2025(4): 94-98.
YU Chongyang. Dual loop control of energy storage inverter based on intuitionistic fuzzy S-rough decision model[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2025(4): 94-98.
- [10] 邢东峰, 田铭兴. 虚拟同步发电机频率特性与储能设备容量及充放电特性的关系[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3582-3590.
XING Dongfeng, TIAN Mingxing. Relationship between frequency characteristics of virtual synchronous generator and parameters of energy storage equipment[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3582-3590.
- [11] 许崇福, 李苑茹, 徐宁一, 等. 应用于储能变流器的虚拟同步发电机阻尼特性分析与改进[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1656-1663.
XU Chongfu, LI Wanru, XU Ningyi, et al. Analysis and improvement of damping characteristics of virtual synchronous generator control applied to energy storage converter[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1656-1663.
- [12] 张波, 张晓磊, 贾焦心, 等. 基于惯量支撑和一次调频需求的VSG储能单元配置方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 202-209.
ZHANG Bo, ZHANG Xiaolei, JIA Jiaoxin, et al. Configuration method for energy storage unit of virtual synchronous generator based on requirements of inertia support and primary frequency regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 202-209.
- [13] 胡安平, 杨波, 潘鹏鹏, 等. 基于电力电子接口的储能系统惯性特征研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 4999-5008.
HU Anping, YANG Bo, PAN Pengpeng, et al. Study on inertial characteristics of energy storage system with power electronic interface[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 4999-5008.
- [14] LIANG Shuo, CHEN Weidong, QIN Liwen, et al. Adaptive damping factor control strategy of inverter interfaced distributed generators based on virtual synchronous generator technology[C]//2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON). China: IEEE, 2018: 4202-4207.
- [15] 温春雪, 陈丹, 胡长斌, 等. 微网逆变器的VSG转动惯量和阻尼系数自适应控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 120-126.
WEN Chunxue, CHEN Dan, HU Changbin, et al. Self-adaptive control of rotational inertia and damping coefficient of VSG for converters in microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 120-126.
- [16] 任海鹏, 陈琦, 张亮亮, 等. 虚拟同步发电机参数自适应调节[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(12): 2571-2580.
REN Haipeng, CHEN Qi, ZHANG Liangliang, et al. Parameter adaptive strategy for virtual synchronous generator control[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(12): 2571-2580.
- [17] 李怡, 李永丽, 李松, 等. 基于VSG的光伏及混合储能系统功率分配与虚拟惯性控制[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(7): 27-34.
LI Yi, LI Yongli, LI Song, et al. Power distribution and virtual inertial control of photovoltaic and hybrid energy storage systems based on VSG[J]. Power Automation Equipment, 2023, 43(7): 27-34.
- [18] 管敏渊. 虚拟同步机运行状态下并网储能系统自动能量控制[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 144-150.
GUAN Minyuan. Automatic energy control of grid-connected energy storage system under virtual synchronous generator operation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23): 144-150.
- [19] 孟建辉, 彭嘉琳, 王毅, 等. 考虑储能荷电状态及频率恢复特性的改进型灵活虚拟惯性控制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(6): 100-107.
MENG Jianhui, PENG Jialin, WANG Yi, et al. Improved flexible virtual inertial control considering state of charge and frequency

- recovery characteristics of energy storage[J]. Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 100-107.
- [20] 杨 赞, 梅 飞, 张宸宇, 等. 虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 125-131.
- YANG Yun, MEI Fei, ZHANG Chenyu, et al. Coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 125-131.
- [21] ZHANG Xing, MAO Fubin, XU Haizhen, et al. An optimal coordination control strategy of micro-grid inverter and energy storage based on variable virtual inertia and damping of VSG[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2017, 3(3): 25-33.
- [22] 朱 军, 邓寅曦, 杜少通, 等. 优化储能容量配置的 In 基底型 VSG 自适应控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(5): 48-55.
- ZHU Jun, DENG Yinxi, DU Shaotong, et al. Natural - log - type adaptive control strategy for VSG with optimal energy storage capacity configuration[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(5): 48-55.
- [23] 王育飞, 杨铭诚, 薛 花, 等. 计及SOC的电池储能系统一次调频自适应综合控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 192-198.
- WANG Yufei, YANG Mingcheng, XUE Hua, et al. Adaptive integrated control strategy for primary frequency regulation of battery energy storage system considering SOC[J]. Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 192-198.
- [24] 杨 帆, 邵银龙, 李东东, 等. 一种计及储能容量和SOC约束的模糊自适应VSG控制策略[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1869-1876.
- YANG Fan, SHAO Yinlong, LI Dongdong, et al. Fuzzy adaptive VSG control strategy considering energy storage capacity and SOC constraint[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1869-1876.
- [25] 邵 宣. 微网逆变器的虚拟同步发电机控制策略研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- SHAO Xuan. Research on virtual synchronous generator control strategy for microgrid inverters[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- 陈 兵(1977—), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为电力电子技术、柔性输电技术、人工智能技术、新能源并网技术等(E-mail: cbsure@163.com)。
- 殷 嘉(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子技术、新能源并网技术等(通信作者)(E-mail: 383521165@qq.com)。
- 张 亮(1982—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力电子技术、新能源并网技术等。

《高压电器》2026年6期广告单位

封一: 东盟电气集团南京股份有限公司

封二: 新乡市裕诚电气有限公司

封三: 巨邦集团有限公司

封四: 国电南瑞科技股份有限公司南京配电技术分公司

前彩1: 北京京东方真空电器有限责任公司

前彩2: 上海乐研电气有限公司

前彩3: 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司

前彩4: 正泰电器股份有限公司

前彩5: 陕西龙翔电器有限公司

前彩6: 西安高压电器研究院股份有限公司(业务)

前彩7: 广东金晖隆电气股份有限公司

前彩8: 西安华伟电力电子技术有限责任公司

前彩9: 扬州金源机器人自动化设备有限公司

前彩10: 温州昌泰电气有限公司

前彩11: 中国振华电子集团宇光电工有限公司

前彩12: 广州创研智能科技有限公司

中彩1: 山东电工电气日立高压开关有限公司

中彩2: 西安高压电器研究院股份有限公司(认证)

中彩3: 重庆华虹仪表有限公司

中彩4: 深圳市浩达瑞通电气有限公司

后彩1: 泰安盛源电气有限公司

后彩2: 西安西电电工材料有限责任公司

后彩3: 西安向阳航天材料股份有限公司

后彩4: 西安西电高压开关操动机构有限责任公司