第 49 卷 第 1 期：342-353　　高电压技术　　Vol.49, No.1: 342-353
2023 年 1 月 31 日　　High Voltage Engineering　　January 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211165

光储发电系统的虚拟轴系耦合与同步控制

张祥宇，王志伟，付　媛
（华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室，保定 071003）

摘　要：储能装置可利用虚拟惯量控制技术为系统提供动态稳定支撑，但其与同步发电机组间的耦合关系仍需讨论。为了提高暂态能量传递效率，改善其同步并网友好性，首先建立光储发电系统的 VSG 模型，分析静止储能与旋转动能间的能量转化关系，阐述混合储能的虚拟惯量定义。其次，通过分析虚拟同步控制下的光储发电系统的功率传递，建立其与同步机间的虚拟轴系耦合关系，并利用哈密顿能量函数，获得提升光储发电系统暂态能量传递效率的必要条件，进而改进 VSG 控制策略。最后，搭建含光伏高渗透区域电网仿真系统进行验证。结果表明：所提控制同时具备频率支撑和抑制功率振荡功能，可显著提升光储系统的并网友好性。
关键词：混合储能；虚拟惯量；频率稳定；功率振荡；虚拟轴系耦合；能量传递

Virtual Shafting Coupling and Synchronous Control for Photovoltaic Energy Storage System

ZHANG Xiangyu, WANG Zhiwei, FU Yuan
(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The energy storage device can provide dynamic stability support for the system by using virtual inertia control technology, but its coupling relationship with the synchronous unit still needs to be discussed. In order to improve the transient energy transfer efficiency and the grid connection stability, the VSG model of the photovoltaic energy storage system is firstly established, the energy conversion relationship between static energy storage and rotational kinetic energy is analyzed, and the definition of virtual inertia of hybrid energy storage is described. Secondly, by analyzing the power transfer of the photovoltaic energy storage system under the virtual synchronous control, the virtual shafting coupling relationship between the photovoltaic energy storage system and the synchronous machine is established, and the necessary conditions for improving the transient energy transfer efficiency of the photovoltaic energy storage system are obtained by using the Hamilton energy function, and then the control strategy of the virtual synchronous machine is improved. Finally, a regional power grid simulation system with photovoltaic high permeability is built to verify that the proposed control. The results show that the proposed control has both frequency support and power oscillation suppression functions, which can significantly improve the grid-connection friendliness of the photovoltaic energy storage system.
Key words: hybrid energy storage system; virtual inertia; frequency stability; power oscillation; virtual shafting coupling; energy transfer

0　引言

为解决大规模新能源缺乏并网主动支撑能力的问题，虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制技术备受关注。风电、光储可通过虚拟惯量和阻尼，参与系统调频及抑制功率振荡[1-3]。然而，随着 VSG 控制技术的不断深入，系统惯量和阻尼特性之间存在相互影响[4]，导致了引入 VSG 后系统的动态稳定性分析较为复杂，不易实现控制参数的优化设计。

目前，VSG 控制虽然尚未进入工程实用阶段，但同步并网支撑时，风电、光伏及储能的功能分配已设计完成。如文献[5-6]探讨了光伏发电系统中增设储能辅助完成虚拟同步控制的方案设计，将频率调整需要的减载备用容量交由蓄电池承担。为提升新能源利用率，相似的功能分配方案，在风电、储

基金资助项目：河北省自然科学基金(E2018502108)；中央高校基本科研业务费专项(2020MS087)。
Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province (E2018502108), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2020MS087).

能并网控制系统中同样存在[7-9]。在 VSG 控制策略中，虚拟惯量和阻尼的参数设计被普遍关注，而影响其融入电网及主动支撑潜力发挥程度的虚拟轴系耦合关系尚未得到充分重视。如文献[10-11]分析了惯量对两区域系统的影响，提出了变惯量分区协同控制策略，抑制了区域间的功率振荡。但是单一的惯量调节难以协调系统阻尼，易造成功率超调，甚至影响频率恢复特性。文献[12]通过最优阻尼比约束，提出了一种虚拟惯量自适应控制策略，可有效抑制系统波动，但同时削弱了部分阻尼特性。为解决虚拟惯量与阻尼调节存在的矛盾，文献[13]通过系统主导振荡模式辨识和粒子群优化算法，提出了一种以最大频率偏差值最小为目标的惯量与阻尼参数协调策略，但需要附加控制算法及监测信号。尽管上述研究方法具有改善系统动态稳定的效果，但是由于忽略了 VSG 的轴系耦合问题，控制器设计时惯量与阻尼之间始终存在削弱问题[14-16]，在调频和抑振功能的折中处理过程中，优化效果仍有提升空间。风电、光伏及储能引入虚拟同步机控制后，已经与常规发电机组之间建立了新的虚拟轴系耦合关系，电力系统的稳定特性将随之发生显著变化。显然，基于虚拟轴系耦合的功率传递将使系统暂态能量具有向新能源发电设备转移的新路径，这将是优化虚拟同步控制性能须要考虑的关键因素。

虚拟同步控制具备远高于常规发电机组的调节潜力，若不考虑轴系联动，可近似认为刚性连接，则虚拟机功角与并网点功角被限定为同步变化。虽然同步发电机的动态特性可被模拟，但刚性连接下的同步运行方式并未充分发挥新能源具有的调节潜力。为优化虚拟同步机的控制效果，须借鉴电力系统暂态稳定分析方法，建立哈密顿能量函数，研究机组间轴系耦合对暂态能量传递的影响，探讨虚拟同步系统的暂态稳定机理。目前，广义哈密顿理论在电力系统中已用于发电机励磁和稳定控制器的设计[17-19]，尚未应用于虚拟同步机控制。利用哈密顿能量函数可分析系统内能量的交换与转移，具有清晰的物理意义[20]。若将虚拟同步的控制目标转为暂态能量转移，不仅可以使虚拟惯量和阻尼间的设计矛盾得以整合，并且能够为优化虚拟同步机控制参数提供设计依据。

本文将虚拟轴系耦合关系引入光储并网发电系统，通过分析系统暂态能量的转移机理，优化虚拟同步机的控制器结构。首先，建立了虚拟同步机的数学模型，定义了储能装置的虚拟惯量。其次，建立了虚拟同步机与同步发电机的功角耦合关系，通过推导虚拟轴系耦合下系统的小信号模型，分析了虚拟联轴刚度对系统特征值的影响。采用哈密顿能量分析方法，对比研究了引入虚拟轴系耦合前后，系统暂态过程中的能量传递情况，并在此基础上，提出了光储同步并网系统的虚拟轴系控制策略。最后，搭建高比例光伏并网仿真系统，验证所提控制策略的有效性。

1　光储发电系统的同步并网模型

光储并网系统结构如图 1 所示，其中光伏单元采用最大功率跟踪(MPPT)控制，储能单元采用 VSG 控制，两者并联于直流母线，后经 DC/AC 逆变器并入电网。其中，ω_N 与 ω_{ref} 分别为虚拟同步机转子角速度的额定值和参考值。

为发挥蓄电池高能量密度和超级电容器高功率密度的特点，建立了能量分配控制策略。根据文献[21]建立了静止能量与旋转动能间的转化关系，推导了基于混合储能的虚拟惯量表达式，具体为

$$J_{vir}=J_B+J_C=-J_s\frac{W_Bk_B+W_Ck_C}{2E_k} \tag{1}$$

式中：J_{vir} 为光储系统 VSG 的等效惯量；J_B、J_C 分别为蓄电池和超级电容器的虚拟惯量；J_s 为同步发电机固有惯量；W_B、W_C 分别为蓄电池和超级电容器的能量；k_B、k_C 分别为蓄电池和超级电容器荷电状态变化率与发电机转速变化率的比值；E_k 为同步发电机机械动能。

引入虚拟惯量后，光储发电系统可以利用储能装置中的电容和电池能量，通过模拟发电机转子动能释放的方式，为系统提供惯性响应，支持频率动态稳定。在虚拟同步控制下的储能装置动态方程可表示为

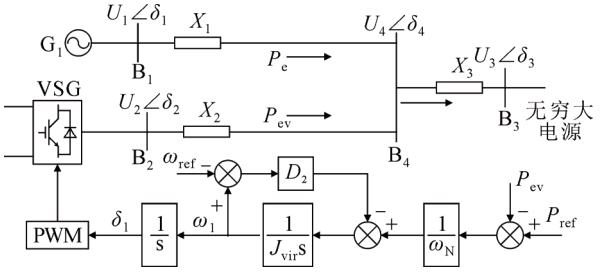


图 1　基于 VSG 的光储并网系统等效电路图

Fig.1　Equivalent circuit diagram of optical storage grid-connected system based on VSG

$$\begin{cases} J_{\text{vir}}\dfrac{\mathrm{d}\omega_2}{\mathrm{d}t}=P_{\text{mv}}-P_{\text{ev}}-D_2\left(\omega_2-\omega_0\right) \\ \dfrac{\mathrm{d}\delta_2}{\mathrm{d}t}=\omega_2-\omega_0 \end{cases} \tag{2}$$

式中：P_{mv}和 P_{ev}分别为 VSG 的等效机械功率和电磁功率；ω_2和ω_0分别为 VSG 电角速度和同步角速度；δ_2为 VSG 功角；D_2为 VSG 阻尼系数。

如图 1 所示，VSG 需要检测并网点处的频率信号，将其转化为角频率，并经过虚拟惯量和阻尼控制环节，生成功角信号，从而实现跟踪系统同步角速度，完成功率支持的预期目标。因此，在动态过程中，VSG 与 G_1 具有相似的功角变化特性，即$\Delta\delta_1=\Delta\delta_2$。在此模式下，可认为 VSG 与 G_1 是同调机组，彼此之间无动态能量交换。由于虚拟机与同步机功角无相对位移，两机组轴系间可认为是刚性连接。同步机与 VSG 的电磁功率分别表示为

$$\begin{cases} P_{\text{e}}=\dfrac{U_1U_4}{x_{\Sigma 14}}\sin\left(\delta_1-\delta_4\right) \\ P_{\text{ev}}=\dfrac{U_2U_4}{x_{\Sigma 24}}\sin\left(\delta_2-\delta_4\right) \end{cases} \tag{3}$$

式中：$U_i(i=1,2,4)$为各节点电压；δ_1为同步发电机功角；δ_4为母线 B_4 的相角；$x_{\Sigma ij}(i,j=1,2,4)$为 i 节点到 j 节点的阻抗。

综合式(2)、式(3)，在不考虑无穷大母线功角变化的情况下，刚性轴系耦合系统的小信号方程为

$$\begin{cases} J_{\text{s}}\dfrac{\mathrm{d}^2\Delta\delta_1}{\mathrm{d}t^2}+D_1\dfrac{\mathrm{d}\Delta\delta_1}{\mathrm{d}t}+K_{\text{s}}\Delta\delta_1=0 \\ J_{\text{vir}}\dfrac{\mathrm{d}^2\Delta\delta_2}{\mathrm{d}t^2}+D_2\dfrac{\mathrm{d}\Delta\delta_2}{\mathrm{d}t}+K_{\text{v}}\Delta\delta_2=0 \end{cases} \tag{4}$$

式中：$K_{\text{s}}=U_1U_4\cos(\delta_{10}-\delta_{40})/x_{\Sigma 14}$为同步机的同步力矩系数；$K_{\text{v}}=U_2U_4\cos(\delta_{20}-\delta_{40})/x_{\Sigma 24}$为 VSG 的同步力矩系数；$\delta_{i0}(i=1,2,4)$对应为角$\delta_i$ $(i=1,2,4)$的初始值；D_1为同步发电机阻尼系数。

若 VSG 与 G_1 间处于刚性连接状态，则$\Delta\delta_1=\Delta\delta_2$。式(4)中的两类机组将具有相似的惯量和阻尼特性，将其叠加，可得等值系统的动态方程为

$$J_{\text{t}}\frac{\mathrm{d}^2\Delta\delta_1}{\mathrm{d}t^2}+D_{\text{t}}\frac{\mathrm{d}\Delta\delta_1}{\mathrm{d}t}+\left(K_{\text{s}}+K_{\text{v}}\right)\Delta\delta_1=0 \tag{5}$$

式中：$J_{\text{t}}=J_{\text{s}}+J_{\text{vir}}$；$D_{\text{t}}=D_1+D_2$。

由式(5)可以看出，光储系统在虚拟同步运行时，具有增加系统惯量和阻尼的能力，此时，系统特征根实部可表示为

$$\sigma_\lambda=-\frac{D_{\text{t}}}{2J_{\text{t}}}=-\frac{D_1+D_2}{2\left(J_{\text{s}}+J_{\text{vir}}\right)} \tag{6}$$

由式(6)可知，虚拟同步控制中惯量与阻尼系数的大小与系统动态稳定性直接相关。当惯量控制系数 J_{vir} 增大时，系统的总惯量 J_{t} 增大，特征根实部σ_λ向状态平面的虚轴靠近，削弱了系统的振荡衰减特性，系统抑制功率振荡的能力降低。显然，惯量与阻尼之间仍然存在矛盾。

2 光储并网系统的虚拟轴系耦合

光储并网系统在虚拟同步控制下，虽然能够模拟常规同步发电机组的惯性及阻尼特性，但在刚性连接下功角信号仍不具备独立性，将影响其与系统间暂态能量的转移。为进一步发挥光储系统的友好并网潜力，需要对 VSG 功角进行独立控制，即$\Delta\delta_1\neq\Delta\delta_2$。此时，可认为在 VSG 与同步机之间形成了刚度可变的虚拟联轴，两者间的功率耦合关系如图 2 中虚线所示。

与传统虚拟同步控制相比，虚拟轴系耦合控制下的 VSG 与系统中的同步机之间能量交换更加灵活，可充分发挥 VSG 的并网支撑潜力，两者电磁功率可表示为

$$\begin{cases} P'_{\text{e}}=P_{\text{e}}+\dfrac{U_1U_2}{x_{\Sigma 12}}\sin(\delta_1-\delta_2) \\ P'_{\text{ev}}=P_{\text{ev}}+\dfrac{U_2U_1}{x_{\Sigma 12}}\sin(\delta_2-\delta_1) \end{cases} \tag{7}$$

式中 P'_{e} 和 P'_{ev} 分别为虚拟轴系耦合后同步机与 VSG 的电磁功率。

将式(7)在工作点处线性化得

$$\begin{cases} \Delta P'_{\text{e}}=\dfrac{U_1U_4}{x_{\Sigma 14}}\cos\left(\delta_{10}-\delta_{40}\right)+\dfrac{U_2U_1}{x_{\Sigma 12}}\cos(\delta_{10}-\delta_{20})\Delta\delta_{12} \\ \quad =K_{\text{s}}\Delta\delta_1+K_{\text{t}}\Delta\delta_{12} \\ \Delta P'_{\text{ev}}=\dfrac{U_2U_4}{x_{\Sigma 24}}\cos\left(\delta_{20}-\delta_{40}\right)\Delta\delta_2-\dfrac{U_2U_1}{x_{\Sigma 12}}\cos(\delta_{10}-\delta_{20})\Delta\delta_{12} \\ \quad =K_{\text{v}}\Delta\delta_2-K_{\text{t}}\Delta\delta_{12} \end{cases} \tag{8}$$

式中：$\Delta\delta_{12}=\Delta\delta_1-\Delta\delta_2$；$K_{\text{t}}=U_1U_2\cos(\delta_{10}-\delta_{20})/x_{\Sigma 12}$。

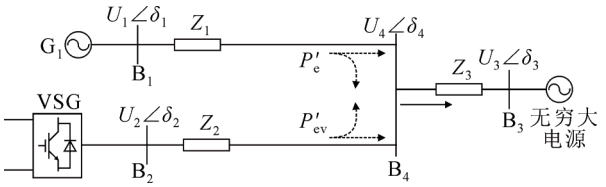


图 2 轴系耦合并网系统的等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit diagram of shaft coupling grid-connected system

由上式可以看出，VSG 与 G_1 之间形成动态功率耦合，需要满足的条件为两机组的功角变化量不等，即$\Delta\delta_1\neq\Delta\delta_2$。由于系数 K_t 可以体现出 VSG 与同步机之间功角变化的相对位移量$\Delta\delta_{12}$，符合机械振动力学中的刚度定义，故将系数 K_t 定义为 VSG 的虚拟联轴刚度。

虚拟联轴刚度 K_t 反映出了同步机与光储发电系统之间的轴系耦合关系。根据虚拟联轴刚度 K_t 的定义，若 VSG 与同步机功角间没有相对位移，则机组间没有动态功率传输，两者同频振荡，此时可认为机组间轴系处于刚性连接状态；若 VSG 独立控制功角变化，与同步机间出现了功角相对位移，则引入虚拟联轴 K_t 后，可认为通过柔性轴系耦合，使机组间出现了动态功率交互。由于 VSG 具备独立调节功角变化的控制潜力，可以灵活调节虚拟联轴刚度，使其与并网同步发电机之间动态功率交互可控。此时，VSG 通过柔性轴系耦合，已经脱离了同频振荡状态，而非同步运行状态也是后续理论分析保障机组间高效转移暂态能量的必备条件。

综合式(2)、式(7)，在不考虑无穷大母线功角变化的情况下，虚拟轴系耦合系统的小信号方程可表示为

$$\begin{cases} J_s\dfrac{\mathrm{d}^2\Delta\delta_1}{\mathrm{d}t^2}+D_1\dfrac{\mathrm{d}\Delta\delta_1}{\mathrm{d}t}+K_s\Delta\delta_1+K_t\Delta\delta_{12}=0 \\ J_{vir}\dfrac{\mathrm{d}^2\Delta\delta_2}{\mathrm{d}t^2}+D_2\dfrac{\mathrm{d}\Delta\delta_2}{\mathrm{d}t}-K_t\Delta\delta_{12}+K_v\Delta\delta_2=0 \end{cases} \tag{9}$$

为进一步分析虚拟轴系耦合对系统稳定性的影响，联立式(4)、式(9)，得到虚拟轴系耦合下光储并网系统的小信号模型，其特征矩阵可表示为式(10)。令虚拟联轴刚度 K_t 在区间[0,10]内变化，绘制特征根根轨迹，如图 3 所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\delta}_1 \\ \Delta\dot{\omega}_1 \\ \Delta\dot{\delta}_2 \\ \Delta\dot{\omega}_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{41} & 0 & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \Delta\delta_1 \\ \Delta\omega_1 \\ \Delta\delta_2 \\ \Delta\omega_2 \end{bmatrix} \tag{10}$$

矩阵中部分非零元素如下

$$a_{21}=-\frac{K_s+K_t}{J_s},a_{22}=-\frac{D_1}{J_s},a_{23}=\frac{K_t}{J_s}$$

$$a_{41}=\frac{K_t}{J_{vir}},a_{43}=-\frac{K_t+K_v}{J_{vir}},a_{44}=-\frac{D_2}{J_{vir}}$$

由图 3 可知，所有的特征根均在系统的左半平面，根据李雅普诺夫稳定性判据，系统处于稳定状态。其中，对系统稳定性影响较大的是距离虚轴较近的一组共轭特征根，随着虚拟联轴刚度 K_t 的增大，特征根不断远离虚轴，系统稳定性有所增强。因此，采用虚拟轴系耦合后，合理增加联轴刚度 K_t 可以增强系统的稳定性。

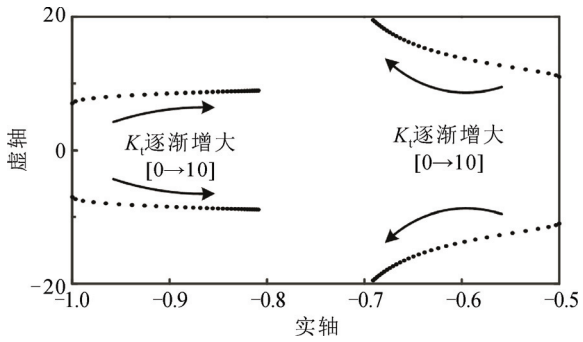


图 3　虚拟联轴刚度改变对应特征根的根轨迹

Fig.3　Root locus of the eigenvalues corresponding to the change of the virtual coupling stiffness

此外，由图 3 中的根轨迹可以看出，随着 K_t 的增加，两组特征根的变化趋势渐缓，K_t 应存在最优取值，最大限度提高系统稳定性。下面将通过分析引入虚拟轴系后的系统暂态能量传递过程，为虚拟同步控制的优化设计提供理论依据。

3　虚拟轴系耦合下的系统能量传递

本文采用广义哈密顿系统，分析引入虚拟轴系耦合后 VSG 与同步发电机组之间的暂态能量传递过程。引入虚拟轴系后，系统将由单自由度转为二自由度，在扰动能量初期暂态能量从同步机转移到 VSG 的过程中，采用复变量−平均法和多尺度法求解系统运动方程[22]。

对式(4)进行化简，并引入新的时间尺度 $\tau=t\sqrt{K_s/J_s}$，则两自由度运动系统的动态模型可表示为

$$\begin{cases} \Delta\ddot{\delta}_1+\Delta\delta_1=0 \\ \varepsilon\Delta\ddot{\delta}_2+K\Delta\delta_2=0 \end{cases} \tag{11}$$

式中：$\varepsilon=J_s/J_{vir}$；$K=K_v/K_s$。

通过式(12)对式(11)进行复变量替换

$$\begin{cases} w_1=\varepsilon^{-1/2}\Delta\delta_1,\ \ w_2=\varepsilon^{-1/2}\left(\Delta\delta_2-\Delta\delta_1\right) \\ \dot{w}_j+\mathrm{i}\omega_t w_j=\varphi_j\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega_t\tau},\ \ \dot{w}_j-\mathrm{i}\omega_t w_j=\varphi_j^*\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega_t\tau} \end{cases} \tag{12}$$

式中：‘*’代表共轭；ω_t 表示系统的高阶振动频率；$\varphi_j(j=1,2)$为快变量ω_t的慢变调制。

消去式(11)中的快变部分和久期项后，系统动态方程可表示为

$$\begin{cases}(1+\varepsilon)\dot{\varphi}_1+\varepsilon\dot{\varphi}_2+\dfrac{(\varepsilon-K)}{2}i(\varphi_1+\varphi_2)=0\\ \dot{\varphi}_1+\dot{\varphi}_2+\dfrac{(\varepsilon-K)}{2\varepsilon}i(\varphi_1+\varphi_2)=0\end{cases}\tag{13}$$

采用多尺度变换法，在保证精度的同时对系统做进一步近似，引入多尺度变换

$$\begin{cases}\varphi_j=\varphi_{j0}+\varepsilon\varphi_{j1}+\varepsilon^2\varphi_{j2}+\cdots, j=1,2\\ \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\tau}=\dfrac{\partial}{\partial\tau_0}+\varepsilon\dfrac{\partial}{\partial\tau_1}+\varepsilon^2\dfrac{\partial}{\partial\tau_2}+\cdots,\tau_j=\varepsilon^j\cdot\tau_0\end{cases}\tag{14}$$

取式(14)的前两阶，对式(13)进行多尺度展开得到式(15)

$$\begin{cases}(1+\varepsilon)a_1+\varepsilon a_2+\dfrac{(\varepsilon-K)}{2\varepsilon}ia_3=0\\ a_1+a_2+\dfrac{(\varepsilon-K)}{2\varepsilon^2}ia_3=0\end{cases}\tag{15}$$

其中，

$$a_1=\frac{\partial\varphi_{10}}{\partial\tau_0}+\varepsilon\frac{\partial\varphi_{10}}{\partial\tau_1}+\varepsilon\frac{\partial\varphi_{11}}{\partial\tau_0}+\varepsilon^2\frac{\partial\varphi_{11}}{\partial\tau_1}$$

$$a_2=\frac{\partial\varphi_{20}}{\partial\tau_0}+\varepsilon\frac{\partial\varphi_{20}}{\partial\tau_1}+\varepsilon\frac{\partial\varphi_{21}}{\partial\tau_0}+\varepsilon^2\frac{\partial\varphi_{21}}{\partial\tau_1}$$

$$a_3=\varepsilon\varphi_{10}+\varepsilon^2\varphi_{11}+\varepsilon\varphi_{20}+\varepsilon^2\varphi_{21}$$

对于式(15)，ε的 0 阶项应满足的条件为

$$\frac{\partial\varphi_{10}}{\partial\tau_0}=\frac{\partial\varphi_{20}}{\partial\tau_0}=0\tag{16}$$

刚性连接下的 VSG 在运行过程中满足条件$\Delta\delta_1=\Delta\delta_2$。因此，系统中有式$\varphi_2=-\varphi_2$成立。由式(16)可知，$\varphi_{10}$和$\varphi_{20}$并不依赖于时间尺度$\tau_0$，因此将式(15)对$\tau_0$积分，可得慢变方程如下

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\varphi_{10}}{\partial\tau_1}+\dfrac{(\varepsilon-K)}{2\varepsilon}i(\varphi_{10}+\varphi_{20})=0\\ \dfrac{\partial\varphi_{20}}{\partial\tau_1}+\dfrac{(\varepsilon-K)}{2\varepsilon^2}i(\varphi_{10}-\varphi_{20})=0\end{cases}\tag{17}$$

对式(17)中的两个式子分别做共轭复变换，将其叠加后可得

$$|\varphi_{10}|^2+\varepsilon|\varphi_{20}|^2=n^2\tag{18}$$

式中 n 为常数。由于φ_{10}和φ_{20}为复数，上式可在复平面展开为

$$\varphi_{10}=n\cos\theta\mathrm{e}^{i\alpha},\varphi_{20}=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}n\sin\theta\mathrm{e}^{i\beta}\tag{19}$$

式中：$n\cos\theta$、$n\sin\theta$为慢变幅值；α、β为慢变相位。

当系统频率发生变化时，同步机吸收的扰动能量ΔP_g可表示为

$$\Delta P_\mathrm{g}=\frac{1}{2}(\Delta\dot{\delta}_1^2+\Delta\delta_1^2)=\frac{\varepsilon}{2}n^2\cos^2\theta(\tau)\tag{20}$$

由式(20)可以看出，能量在同步机和 VSG 之间的传递可以用θ的变化表示。初始时能量全部集中在同步机，此时θ=0，则$\Delta P_\mathrm{g}=\varepsilon n^2/2$；当全部转移到 VSG 后，此时$\theta=\pi/2$，则$\Delta P_\mathrm{g}=0$。

根据哈密顿系统理论[23]，系统总能量 H 可表示为

$$H=\dot{\varphi}_{10}\varphi_{10}^*+\varepsilon\dot{\varphi}_{20}\varphi_{20}^*\tag{21}$$

在分析能量传递过程中未考虑阻尼，因此不存在能量耗散，系统总能量守恒。

将式(19)代入 H 后可得

$$H=\frac{(\varepsilon-K)}{2\varepsilon}n^2\cos^2\theta-\frac{(\varepsilon-K)}{2\varepsilon^2}n^2\sin^2\theta+\frac{(\varepsilon-K)}{\varepsilon\sqrt{\varepsilon}}n^2\sin\theta\cos\theta\cos\eta\tag{22}$$

式中$\eta=\alpha-\beta$。

在初始时刻θ=0 时，系统内的总能量为$H=(\varepsilon-K)n^2/2\varepsilon$，根据能量守恒可知

$$\tan\theta=\frac{2}{1/\sqrt{\varepsilon}+\sqrt{\varepsilon}}\cos\eta\tag{23}$$

由于$\left(1/\sqrt{\varepsilon}+\sqrt{\varepsilon}\right)\geq2$，故$\tan\theta\leq1$，则$\theta$的最大值为$\pi/4$。由式(20)可知，当$\theta=\pi/2$ 时能量才能从同步机完全传递到 VSG 中，因此传统的虚拟同步控制无法实现能量的完全传递。

若 VSG 与同步机之间通过虚拟联轴建立耦合关系，则两者之间有直接的能量交换，对式(9)作同样的处理后得到的系统总能量 H 的表达式为

$$\begin{cases}H=H_1+H_2+H_3\\ H_1=\dfrac{(\varepsilon-K_2)}{2\varepsilon}n^2\cos^2\theta\\ H_2=\dfrac{(\varepsilon-K_2+K_1)}{2\varepsilon^2}n^2\sin^2\theta\\ H_3=\dfrac{(\varepsilon-K_2)}{\varepsilon\sqrt{\varepsilon}}n^2\sin\theta\cos\theta\cos\eta\end{cases}\tag{24}$$

式中：$K_1=K_\mathrm{t}/K_\mathrm{s}$；$K_2=K_\mathrm{v}/K_\mathrm{s}$。

在系统能量变化的初始时刻θ=0 时，系统内的总能量为$H=(\varepsilon-K_2)n^2/2\varepsilon$，由式(24)可得

$$\tan\theta=\frac{2\sqrt{\varepsilon}(\varepsilon-K_2)}{\left(\varepsilon^2-\varepsilon K_2-\varepsilon+K_2-K_1\right)}\cos\eta\tag{25}$$

根据式(25)画出系统的相轨迹曲线，从图 4 可以看出θ取值范围为 0~$\pi/2$ 时，当系统的虚拟联轴刚度 K_t 取得某一值时可以实现能量的完全传递，大幅提高 VSG 与同步机之间的能量转移效率。

当$\theta=\pi/2$ 时，系统总能量为$H=(\varepsilon-K_2+K_1)n^2/2\varepsilon^2$，根据系统能量守恒可知，暂态能量完全传递时虚拟联轴的刚度应满足的条件为

$$K_{\mathrm{t}}=\frac{J_{\mathrm{s}}+J_{\mathrm{vir}}}{J_{\mathrm{vir}}^{2}}\left(K_{\mathrm{s}}J_{\mathrm{s}}+K_{\mathrm{v}}J_{\mathrm{vir}}\right) \tag{26}$$

当联轴刚度 K_{t} 满足式(26)时，同步机的暂态能量能够完全转移到 VSG 中。因此，光储并网系统可通过虚拟轴系耦合，调节虚拟联轴刚度 K_{t} 控制 VSG 与系统间的能量传递，更高效的分担同步发电机组的稳定支撑压力。

为更加高效的转移暂态能量，本文针对光储并网系统，提出了 VSG 的虚拟联轴控制策略，控制系统的结构如图 5 所示。改进后的光储并网控制系统包括四个控制模块，分别为虚拟惯量控制模块、虚拟联轴控制模块、阻尼控制模块和混合储能分配模块。其中，阻尼模块仍延用 VSG 的阻尼控制结构；虚拟惯量控制模块则分别采集蓄电池与超级电容器的荷电状态与电压信号，经式(1)计算出两者的虚拟惯量 J_{B}、J_{C}，叠加后得到储能装置的等效惯量 J_{vir}，并将其送至惯性控制环节；虚拟联轴控制模块采集并网点角频率 ω_{l}，通过式(9)建立 VSG 与同步机的功率耦合关系，并根据式(26)对虚拟联轴刚度 K_{t} 进行设计，计算出 VSG 的虚拟功角 δ_2；功角 δ_2 与 VSG 内电势 e 经过虚拟阻抗环节得到电流控制信号，经电流控制器后送入 PWM，其中高频信号送入超级电容器，利用其快速响应能力，完成预期控制目标，若超级电容器的能量存储不足，则由蓄电池补偿功率差额。此外，为避免附加控制频繁启动，可根据电网及设备的实际需求，增设启动阈值。如侧重保障频率稳定时，可采集并网点的频率信号，当频率变化量 $|\Delta f|\le 0.2$ Hz 时，储能无附加控制，开关量 S=0；当频率变化量 $|\Delta f|\ge 0.2$ Hz 时，启动虚拟联轴控制，抑制系统功率振荡，S=1。

图中：u_{pv}、i_{pv} 分别为光伏模块输出的电压与电流；p_{pv} 为其输出功率；在超级电容器模块；$\rho_{\mathrm{SOC_0}}$、ρ_{SOC} 分别为其荷电状态初始值与实时值；i_{C}^{*} 与 i_{C} 分别为其电流控制环节的整定值与反馈的实际值；u_{C} 为其输出电压值；在蓄电池模块；$\gamma_{\mathrm{SOC_0}}$、γ_{SOC} 分别为其荷电状态初始值与实时值；i_{B}^{*} 与 i_{B} 分别为其电流控制环节的整定值与反馈的实际值；u_{B} 为其输出电压值；u_{dc}^{*}、u_{dc} 分别为直流母线电压参考值与实际值；i_d^{*} 与 i_q^{*} 分别为控制电流值的 dq 分量。

4　仿真算例

为验证所提虚拟联轴控制策略的有效性，搭建了如图 6 所示的三机并网系统，包含同步发电机 G_1 和 G_2、光伏电池组件、混合储能设备以及系统负荷 L。其中，同步机 G_1、G_2 的额定容量分别为 160 kW 和 200 kW，光伏组件的额定容量为 100 kW，负荷为 340 kW。综合考虑光伏装机比例、系统运行费用、安装成本及供电可靠性等因素，配置混合储能装置的容量[24-26]，设置混合储能设备中蓄电池组的额定容量为 50 Ah，超级电容器额定容量为 10 F。混合储能装置经双向 DC/DC 变换电流后与光伏阵列并联接入直流母线，再经 DC 逆变器接入电网。仿真过程中，光照强度设为 1000 W/m^2，同步发电机 G_2 运行在恒转矩控制，详细的系统仿真参数见附录 A。

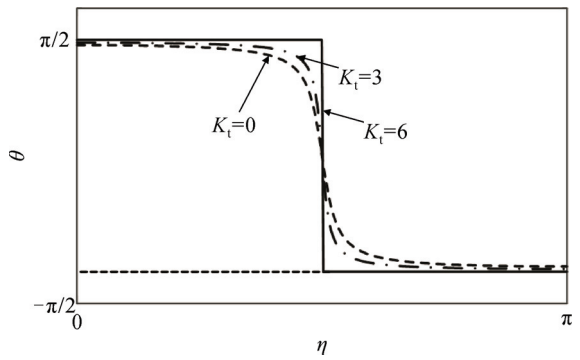


图 4　虚拟联轴刚度变化时的相轨迹曲线

Fig.4　Phase trajectory curve when the stiffness of the virtual coupling changes

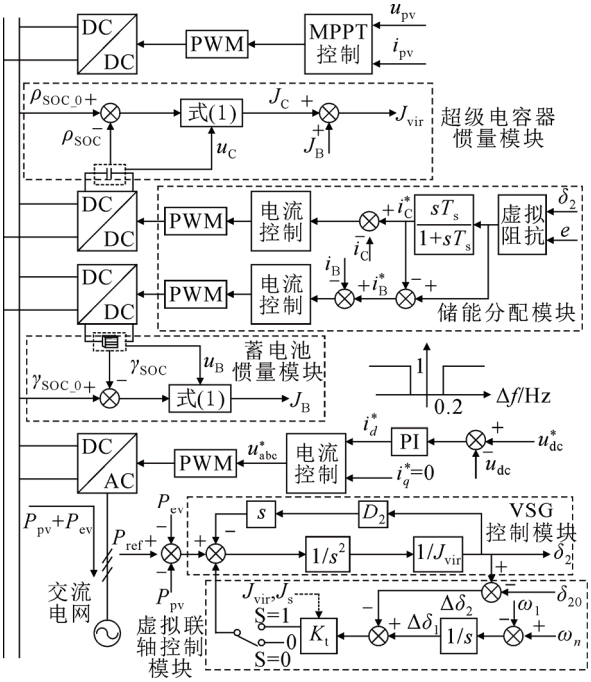


图 5　引入虚拟联轴后的光储同步并网控制结构图

Fig.5　Synchronous grid-connected control structure diagram of photovoltaic energy storage with the introduction of virtual coupling

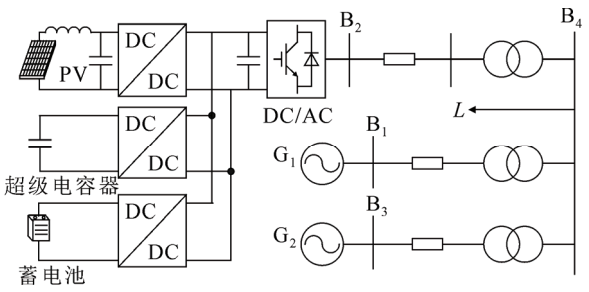


图 6 仿真系统结构图

Fig.6 Structure diagram of simulation system

4.1 负荷突变时的系统响应

为验证所提出的控制策略的频率支持性能，10 s 时，分别设置负荷突增或突减 60 kW，造成系统频率大幅变化。图 7(a)、(b)分别为负荷突增、突减情况下的系统频率 f、发电机 G_1 的有功出力 P_G、超级电容器和蓄电池的荷电状态 ρ_{SOC}、γ_{SOC} 与输出功率 P_{SC}、P_{Bat} 的动态响应曲线。

在无附加控制时，仅由同步发电机提供惯性响应，在光伏高比例接入电网后，系统的整体惯量不足。由图 7(a)所示，为满足负荷需求，同步机出力迅速增加，系统频率出现了大幅下降。

在虚拟同步控制下，负荷突变后，超级电容器与蓄电池迅速响应，为系统提供了有效的惯量支撑，系统频率的下跌幅值为 0.26 Hz，发电机 G_1 输出功率的最大值由 188.6 kW 下降至 169.6 kW。但是，由系统频率响应曲线可以看出，引入虚拟惯量虽然会减小频率变化率，但在频率恢复过程中，惯性控制从电网吸收功率也导致了系统频率的恢复速度减缓。

在增设了虚拟联轴控制后，系统频率下降幅度约为 0.23 Hz。与虚拟同步控制相比，频率变化率同样显著减小。值得注意的是，由储能装置的功率响应可以看出，引入的虚拟联轴控制延长了功率支持时间。在更加持久的功率支撑作用下，系统频率恢复速度得到了改善，与虚拟同步控制相比，频率恢复时间缩短了 3.4 s。

如图 7(b)所示，10 s 时，负荷突减 60 kW，造成频率抬升。无附加控制时，同步机的输出功率迅速降低，系统频率大幅上升。施加虚拟同步控制后，储能装置能够响应系统频率变化，等效出虚拟惯量，参与系统调频，频率波动幅值以及同步机出力变化较之前均有所降低，但仍存在频率恢复速度较慢的问题。

由 7(b)可知，施加虚拟联轴控制的系统在负荷突然减少后，超级电容器与蓄电池的荷电状态迅速上升，高效吸收系统中的多余能量，分担同步机的调频压力，G_1 的有功出力减小了 21.4 kW，频率的波动幅值 0.21 Hz，频率的恢复时间较虚拟同步控制缩短了 2.3 s。在此期间，超级电容器的荷电状态由初始的 75%升至 90%后，考虑到其使用寿命，停止超级电容器继续充电，由蓄电池继续进一步为系统提供功率支持。

4.2 短路故障时的系统响应

为验证虚拟联轴控制对功率振荡的抑制效果，10 s 时，在母线 B_4 处设置持续时间为 0.01 s 的三相短路故障。图 8 对比了在无附加控制、虚拟同步控制、虚拟轴系控制下，系统频率 f、发电机 G_1 的有功输出 P_G、系统功角 δ、超级电容器的荷电状态与输出功率 ρ_{SOC}、P_{SC} 以及蓄电池荷电状态与输出功率 γ_{SOC}、P_{Bat} 的动态响应。

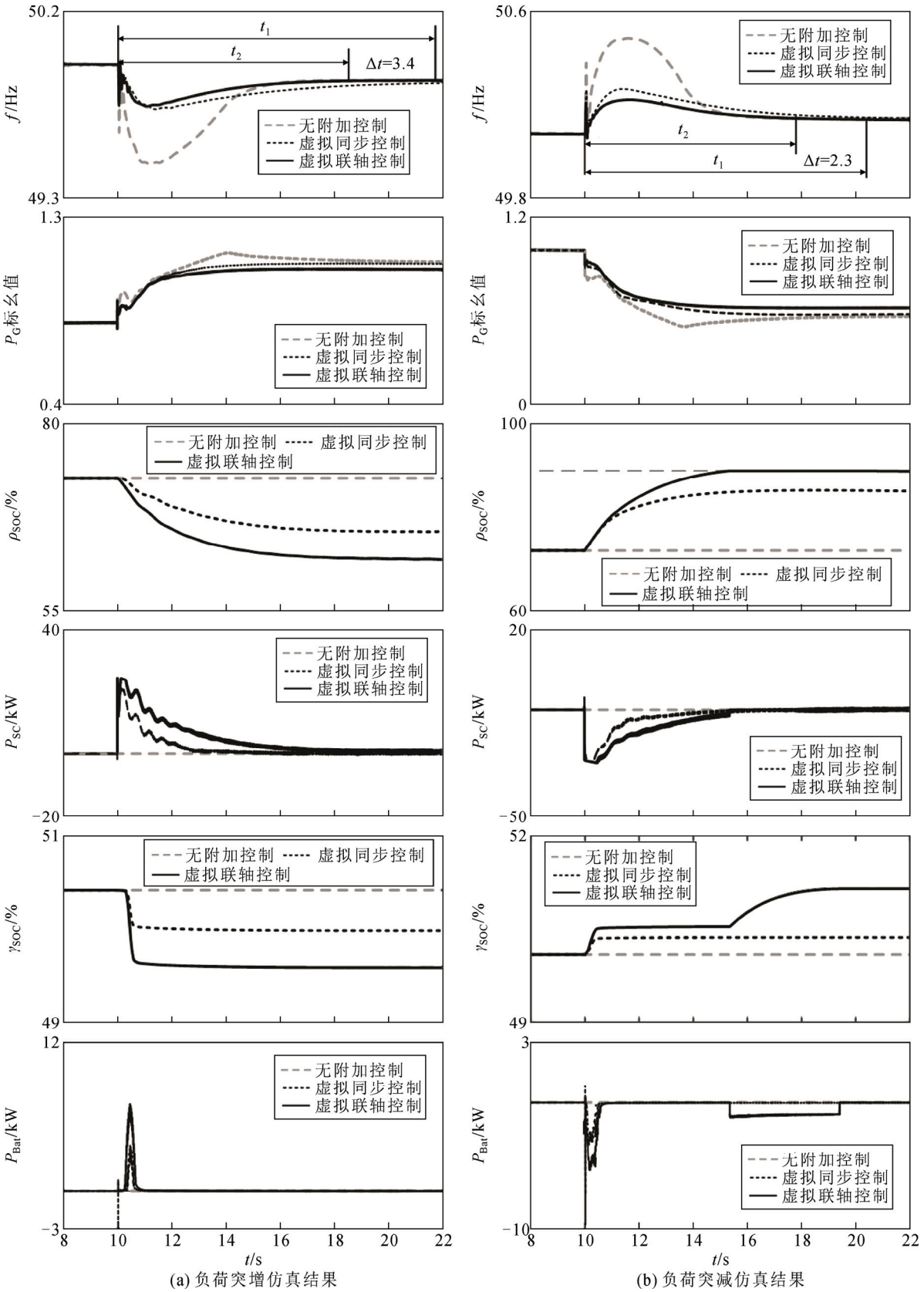
如图 8(a)—(c)所示，无附加控制时，由于高比例接入的光伏组件缺乏频率、阻尼控制能力，发生三相短路故障后，系统频率、功角和同步机的输出功率均出现了大幅度波动和持续性振荡。

当系统施加虚拟同步控制时，混合储能根据系统频率变化调整出力，在惯性和阻尼控制下，系统频率波动幅度和振荡持续时间均有所减小。如图 8(d)—(g)所示，在控制过程中，两种储能元件均处于安全充放电区，超级电容器充放电速度较快，即时响应了系统的频率变化，蓄电池则在初始阶段，因振荡剧烈被短时调用。

与虚拟同步控制策略相比，施加了虚拟联轴控制后，系统频率、同步发电机的功角及输出功率的波动幅值均显著减小，系统振荡持续时间缩短了 2.1 s。测试结果可以证明，引入虚拟联轴控制实现了暂态能量的高效转移。由图 8(d)—(g)还可以看出，虚拟联轴控制更充分的利用了超级电容器的响应速度，其输出功率快速波动，在更具支撑能力的前提下，减少了蓄电池充放电功率，有助于延长其使用寿命。

5 结论

将静止能量扩展为虚拟惯量的来源后，储能装置已具有同步并网能力。本文通过分析混合储能在同步并网动态过程中的虚拟轴系耦合机理，提出了虚拟联轴控制策略，显著改善了大规模光储并网系



(a) 负荷突增仿真结果　　(b) 负荷突减仿真结果

图 7　负荷突变后系统的动态响应曲线

Fig.7　Dynamic responses of the system after a sudden load change

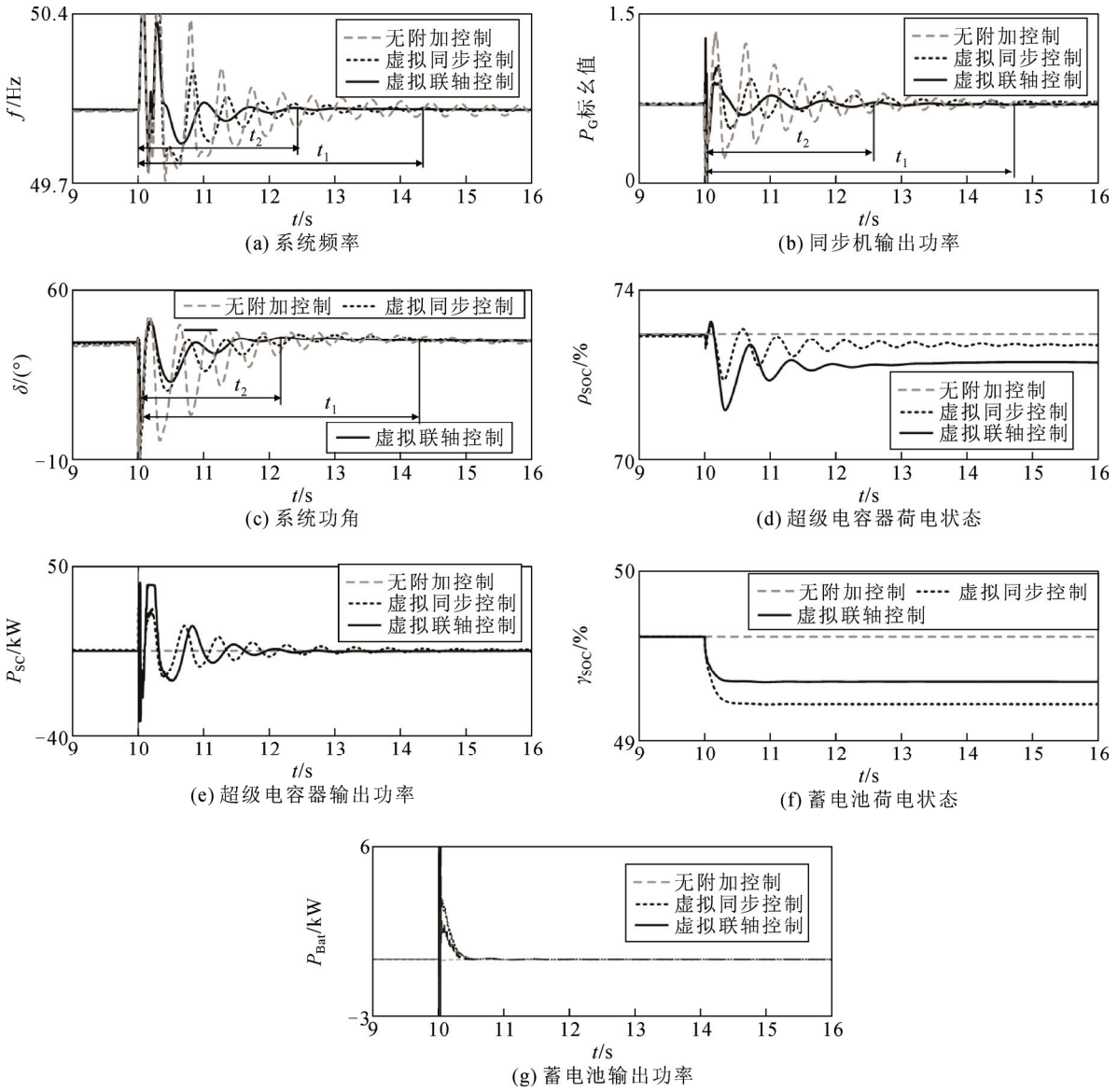


图 8 短路故障后系统的动态响应曲线

Fig.8 Dynamic responses of system after short circuit fault

统的频率、功率振荡特性。通过理论分析和仿真验证，得出以下结论：

1）建立了蓄电池储能、电容储能与同步发电机机械动能 E_k 间的能量转换关系，静止混合储能设备通过虚拟惯量响应具备了同步并网能力。但在虚拟同步控制下，虚拟惯量与阻尼存在设计矛盾，不易实现参数优化。

2）在虚拟同步控制基础上，本文通过引入虚拟联轴，建立了 VSG 与系统间的耦合关系。由系统根轨迹、暂态能量传递分析可知，虚拟联轴引入独立的功角变化后，可与并网同步机产生新的功率动态交互，具有进一步提高光储并网系统动态稳定性的作用。

3）本文利用哈密顿能量函数，获得了虚拟同步机完全转移暂态能量时的虚拟联轴刚度的设计方法。理论和测试结果均表明，光储并网系统可通过引入虚拟轴系，改进虚拟同步机的控制结构，更加高效的转移系统中的暂态能量，显著提升其友好并网支撑效果。

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

参考文献 References

[1] 郑天文，陈来军，陈天一，等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. 电力系统自动化，2015，39(21)：165-175.
ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165-175.

[2] 王素娥，吴永斌，熊连松，等. 光伏并网发电系统的虚拟惯量控制策略[J]. 高电压技术，2020，46(11)：3743-3751.
WANG Su'e, WU Yongbin, XIONG Liansong, et al. Virtual inertia control strategy for grid-tied photovoltaic power generation system[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3743-3751.

[3] 朱慧敏，苑　舜，李春来. 含储能环节的光伏电站虚拟同步发电机控制策略与分析[J/OL]. 电测与仪表，2020：1-6[2021-06-01]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.th.20200521.1125.002. html.

[4] ZHU Huimin, YUAN Shun, LI Chunlai. Control strategy and analysis of virtual synchronous generator of photovoltaic power plant with energy storage link[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020: 1-6[2021-06-01]. http://kns.cnki. net/kcms/detail/23.1202.th.20200521.1125.002.html.

[5] 邹培根，孟建辉，王　毅，等. 灵活虚拟同步机主要控制参数对系统频率稳定性的影响分析[J]. 高电压技术，2018，44(4)：1335-1342.
ZOU Peigen, MENG Jianhui, WANG Yi, et al. Influence analysis of the main control parameters in FVSG on the frequency stability of the system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1335-1342.

[6] 张祥宇，杨　黎，朱晓荣，等. 光储发电系统的虚拟转动惯量控制[J]. 电力自动化设备，2017，37(9)：109-115.
ZHANG Xiangyu, YANG Li, ZHU Xiaorong, et al. Virtual rotational inertia control of PV generation system with energy storage devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9): 109-115.

[7] 张祥宇，李凌斐，付　媛. 基于混合储能的变惯量虚拟同步耦合控制技术[J]. 高电压技术，2021，47(11)：4113-4122.
ZHANG Xiangyu, LI Lingfei, FU Yuan. Virtual synchronous coupling control of hybrid energy storage with variable inertia[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 4113-4122.

[8] 李广阔，陈来军，谢毓广，等. 考虑压缩空气储能变工况特性的风储联合系统运行优化策略[J]. 高电压技术，2020，46(2)：511-518.
LI Guangkuo, CHEN Laijun, XIE Yuguang, et al. Coordinated optimization strategies of wind-storage hybrid system considering off-design characteristics of compressed air energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 511-518.

[9] 梁　恺，彭晓涛，秦世耀，等. 基于协同控制优化风储系统频率响应的策略研究[J]. 中国电机工程学报，2021，41(8)：2628-2640.
LIANG Kai, PENG Xiaotao, QIN Shiyao, et al. Study on synergetic control strategy for optimizing frequency response of wind farm augmented with energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2628-2640.

[10] 邓　霞，孙　威，肖海伟. 储能电池参与一次调频的综合控制方法[J]. 高电压技术，2018，44(4)：1157-1165.
DENG Xia, SUN Wei, XIAO Haiwei. Integrated control strategy of battery energy storage system in primary frequency regulation[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1157-1165.

[11] 张祥宇，朱正振，王　琛，等. 风电高渗透虚拟同步电力系统的功角暂态稳定性分析[J]. 太阳能学报，2021，42(2)：136-143.
ZHANG Xiangyu, ZHU Zhengzhen, WANG Chen, et al. Transient stability analysis of power angle in virtual synchronous system with high wind penetration[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(2): 136-143.

[12] ZHANG X Y, ZHU Z Z, FU Y, et al. Optimized virtual inertia of wind turbine for rotor angle stability in interconnected power systems[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 180: 106157.

[13] 范亚楠，刘天羽，江秀臣，等. 基于最优阻尼比虚拟同步发电机的优化控制策略[J]. 电测与仪表，2020，57(7)：60-67.
FAN Yanan, LIU Tianyu, JIANG Xiuchen, et al. Optimal control strategy of virtual synchronous generator based on optimal damping ratio[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(7): 60-67.

[14] 杨　涛，廖　勇. 含双馈风电场的互联电力系统虚拟惯量与虚拟阻尼协调控制方法[J]. 电力自动化设备，2020，40(11)：92-98.
YANG Tao, LIAO Yong. Coordinated control method of virtual inertia and virtual damping for interconnected power system with doubly-fed wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 92-98.

[15] 黄世楼，王　彤，金铭鑫，等. 多光储虚拟同步发电机接入多机电力系统的动态交互作用机理分析[J/OL]. 高电压技术，2021：1-17[2021-10-24]. https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=GDYJ20210820008.
HUANG Shilou, WANG Tong, JIN Mingxin, et al. Dynamic interaction mechanism analysis of multiple photovoltaic-battery virtual synchronous generators integrated multi-machine power system[J/OL]. High Voltage Engineering, 2021: 1-17[2021-10-24]. https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=GDYJ20210820008.

[16] 陈润泽，吴文传，孙宏斌，等. 双馈风电机组惯量控制对系统小干扰稳定的影响[J]. 电力系统自动化，2014，38(23)：6-12.
CHEN Runze, WU Wenchuan, SUN Hongbin, et al. Impact of inertia control of DFIG wind turbines on system small-signal stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 6-12.

[17] 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.
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.

[18] 王玉振. 广义 Hamilton 控制系统理论：实现、控制与应用[M]. 北京：科学出版社，2007.
WANG Yuzhen. Theory of generalized Hamilton control systems-implementation, control and applications[M]. Beijing, China: Science Press, 2007.

[19] 曾　云，沈祖诒，曹林宁. 发电机单机无穷大系统动力学模型的理论研究[J]. 中国电机工程学报，2008，28(17)：138-143.
ZENG Yun, SHEN Zuyi, CAO Linning. Theoretical study on dynamical model of single-machine-infinite-bus system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(17): 138-143.

[20] 石　访. Hamilton 能量函数方法研究及其在电力系统稳定控制中的应用[D]. 上海：上海交通大学，2013.
SHI Fang. Study on Hamilton energy function method and ITS application in power system stability control[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2013.

[21] 熊　怀，孔宪仁，刘　源. 一类立方非线性吸振器的能量传递和耗散研究及参数设计[J]. 振动工程学报，2015，28(5)：785-792.
XIONG Huai, KONG Xianren, LIU Yuan. Energy transfer and dissipation of a class of nonlinear absorber and its parameter design[J]. Journal of Vibration Engineering, 2015, 28(5): 785-792.

[22] 张祥宇，李凌斐，边子轩. 基于混合静止能量的虚拟转动惯量控制技术[J]. 电力自动化设备，2019，39(11)：50-56.
ZHANG Xiangyu, LI Lingfei, BIAN Zixuan. Virtual moment inertia control based on hybrid static energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 50-56.

[23] 张也弛. 非线性能量阱的力学特性与振动抑制效果研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2012.
ZHANG Yechi. Research on the dynamics and performance of vibration Suppresion of Nonliner energy sink[D]. Harbin, China: Harbin

Institute of Technology, 2012.

[24] 王玉振，程代展，李春文. 广义 Hamilton 实现及其在电力系统中的应用[J]. 自动化学报，2002，28(5)：745-753.
WANG Yuzhen, CHENG Daizhan, LI Chunwen. Generalized Hamiltonian realization and its application to power systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2002, 28(5): 745-753.

[25] 李建林，谭宇良，王　含，等. 配网及光储微网储能系统配置优化策略[J]. 高电压技术，2022，48(5)：1893-1902.
LI Jianlin, TAN Yuliang, WANG Han, et al. Research on configuration optimization of energy storage system in distribution network and optical storage microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1893-1902.

[26] 韩晓娟，程　成，籍天明，等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J]. 中国电机工程学报，2013，33(34)：91-97.
HAN Xiaojuan, CHENG Cheng, JI Tianming, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 91-97.



张祥宇(通信作者)
1984—，男，博士，副教授
主要研究方向为新能源发电与智能电网和电力电子技术及其应用
E-mail: zh.xy.sq@163.com

ZHANG Xiangyu
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2021-07-13　修回日期　2021-11-02　　编辑　陈　蔓

附录 A

表 A1　光储系统参数

Table A1　Photovoltaic energy storage system parameters

参数	数值
额定电压/V	400
额定频率/Hz	50
光伏发电容量/kW	100
蓄电池组容量/Ah	50
蓄电池组初始荷电状态/%	50
超级电容器容量/F	10
超级电容器初始荷电状态/%	75

表 A2　虚拟同步控制器参数

Table A2　Virtual synchronization controller parameters

参数	数值
J_{vir}	15
K_2	\
D_2	20
δ_{10}	38°
δ_{20}	74°

表 A3　虚拟联轴控制器参数

Table A3　Virtual coupling controller parameters

参数	数值
J_{vir}	8
K_2	4
D_2	20
δ_{10}	38°
δ_{20}	74°