DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.1.124 **中图分类号**：TM464 **文献标志码**：A

构网型级联 H 桥储能变流器自适应功率解耦策略

胡顺全[1]，刘 通[2]，王明月[1]，陈阿莲[1](中国电源学会高级会员)
(1.山东大学控制科学与工程学院，济南 250061；2.山东大学电气工程学院，济南 250061)

摘要：构网型级联 H 桥储能系统是平抑大规模新能源发电功率波动、提供电网支撑的优选方案，但其功率控制与线路阻抗存在耦合关系，弱电网下耦合效应加剧，导致输出功率失准，失稳风险增大。为此，提出了 1 种基于无功电压补偿的自适应功率解耦控制策略。首先，基于虚拟同步机小信号模型，通过引入考虑闭环回路的功率耦合系数，定量分析线路阻抗角与功角的功率耦合效应，揭示有功功率对无功功率控制的影响机理。其次，构建无功自适应补偿通道，在无功功率控制中设计比例积分补偿环节，动态修正输出电压参考值以抑制功率耦合，无需辨识线路参数，可在宽阻抗角范围内实现动态解耦控制，适应性强。最后，在仿真平台和 RT-LAB 平台验证了该方法的正确性。

关键词：功率耦合；自适应解耦控制；无功电压补偿；虚拟同步机

Adaptive Power Decoupling Strategy for Grid-forming Cascaded H-bridge Energy Storage Converters

HU Shunquan[1], LIU Tong[2], WANG Mingyue[1], CHEN Alian[1], *Senior Member*, *CPSS*
(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The grid-forming cascaded H-bridge energy storage system is an optimal solution for mitigating large-scale renewable energy power fluctuations and providing grid support. However, the power control of the system is coupled with line impedance, and the coupling effect intensifies under weak grid, leading to output power inaccuracy and increasing risk of instability. To solve this problem, an adaptive power decoupling control strategy based on reactive voltage compensation is proposed. First, based on the small-signal model of a virtual synchronous generator and through the introduction of power coupling coefficients which take into account closed-loop feedback, a quantitative analysis is conducted on the power coupling effects between line impedance angle and power angle, revealing the mechanism of effect of active power on reactive power control. Second, an adaptive reactive power compensation channel is constructed, and a proportional-integral voltage compensation link in the reactive power control is designed, which dynamically modifies the output voltage references to mitigate the power coupling without the identification of line parameters. As a result, dynamic decoupling control is realized in a wide range of impedance angle with strong adaptability. Finally, validation tests based on a simulation platform and an RT-LAB platform verified the proposed method.

Keywords: Power coupling; adaptive decoupling control; reactive voltage compensation; virtual synchronous generator

收稿日期：2025-02-20；**修回日期**：2025-03-03；**录用日期**：2025-03-04；**网络首发日期**：2025-03-26
基金项目：国家自然科学基金资助项目(U2006222, 62403278)；山东省重点研发计划资助项目(2024CXGC010307)；山东省青年基金项目(ZR2024QE180)；博士后面上基金项目(2024M751808)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grants U2006222 and 62403278; Shandong Province Key Research and Development Plan under the grant 2024CXGC010307; Youth Foundation of Shandong Province under the grant ZR2024QE180; Postdoctoral Science Foundation of China under the grant 2024M751808

在“双碳”战略目标驱动下，以风电、光伏为主导的新能源装机规模急剧增长，其固有的波动性

与间歇性特征导致电网出现功率波动、宽频振荡等问题，威胁电力系统的稳定运行[1-2]。而储能技术可平抑功率波动、提高电网系统的灵活性和稳定性，已成为助力新型电力系统发展的“压舱石”。其中，级联 H 桥储能变流器具有模块化多电平、无需升压变压器即可实现高效率和低成本运行的优点，成为大容量储能的代表性方案。然而，随着新能源发电渗透率增大，电网惯性逐渐降低，而依赖电网电压相位(锁相)的跟网型级联 H 桥储能变流器难以提供有效电网支撑，使系统失稳风险增大[3-4]。为此，以虚拟同步发电机 VSG(virtual synchronous generator)技术为代表的构网型 GFM(grid-forming)储能系统，因具有惯量支撑、主动频率/电压调节及多场景适应的优势，已成为提高并网稳定性的关键技术，得到广泛关注[5-6]。

构网型储能系统大规模应用时，电网线路阻抗变化将影响储能变流器的动态特性和控制精度。若线路阻抗为纯感性或纯阻性，则 VSG 控制可以呈现有功功率–功角、无功功率–电压的各自独立的调节关系。然而，实际线路阻抗多为阻感特性，会引起有功功率与无功功率控制之间的耦合，进而影响并网质量和系统稳定性[7]。因此，如何有效解决并网功率耦合问题是构网型储能发展面临的关键问题之一。

近年来，有功功率和无功功率的解耦控制得到广泛研究，主要分为 3 类：虚拟功率法[8-9]、反馈补偿法[10-12]和虚拟阻抗法[13-16]。虚拟功率法通常采用与阻抗角相关的相对增益矩阵来构建虚拟功率[8]、虚拟电压频率[9]从而实现解耦。然而，这类坐标变换方法仅考虑了线路阻抗的阻感比 R/X，解耦效果不佳。反馈补偿法借助变量反馈实现解耦控制。其中，文献[10]提出了 1 种通过估算公共连接点电压并跟踪其参考值的解耦方法，但该方法的实际效果严重依赖于线路阻抗参数辨识的准确性。文献[11]提出了 1 种基于 d 轴电流补偿的功率解耦方法，但该方法的物理意义不明确，限制了其在工程中的应用。文献[12]利用并网输出电流作为反馈校正电压参考，使系统输出阻抗呈现感性，但仅考虑了阻感特性的影响。另外，还有文献通过引入虚拟阻抗来解决线路阻抗引起的功率耦合问题，因其物理意义明确而广泛应用[13-17]。文献[13]引入虚拟电感以补偿线路电感特性，但仍无法完全消除功率耦合。文献[14]和[15]指出，功率耦合不仅与阻感特性相关，较大的功角也会加剧耦合现象，导致虚拟电感方法下依旧存在较大的耦合问题。文献[16]提出了 1 种去掉 d 轴虚拟电感的方法，通过补偿虚拟电感引起的输出电压降来弥补线路阻抗特性、功角带来的功率耦合。文献[17]提出了 1 种虚拟功角功率控制的解耦方法，但该方法的效果依赖于平衡点的计算，动态功率解耦效果差。综上，虚拟阻抗适应范围有限、虚拟功率和反馈补偿的效果依赖准确的线路阻抗参数，3 类功率解耦方法存在解耦因素考虑不全面、实际应用局限性大的问题。

因此，本文首先基于级联 H 桥储能变流器的 VSG 控制系统建立了功率控制的小信号模型，提出了考虑闭环回路的功率耦合系数，并分析了有功功率对无功功率耦合的主导作用。进一步，针对现有功率解耦控制策略依赖线路阻抗参数的不足，提出了基于无功电压补偿的自适应功率解耦控制方法，通过动态补偿输出电压来实现功率解耦，并通过推导证明了所提方法的强鲁棒解耦效果。最后，在 MATLAB/Simulink 和 RT-LAB 平台上验证了所提控制策略的正确性。

1　构网型级联 H 桥储能变流器的 VSG 控制及小信号模型

本节以级联 H 桥储能变流器的典型 VSG 控制为例，构建小信号模型揭示系统动态响应机理，具体如下。

1.1　虚拟同步机控制

基于虚拟同步机的级联 H 桥储能变流器并网拓扑及典型控制框图如图 1 所示。其中：v_i 为电网电压 (i=a, b, c)；R_{g} 和 L_{g} 为并网线路电阻和电感；L 为滤波电感；L_{v} 为虚拟电感；e_i 为公共耦合点处的输出电压；i_{a}，i_{b}，i_{c} 为三相输出电流。级联 H 桥

储能变流器的控制包含 3 部分：虚拟同步机控制、虚拟阻抗控制和电流内环控制。其中，虚拟同步机是功率控制的核心部分，其转子机械方程和转子电压方程可以表示为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{r}} - P - D_P(\omega - \omega_{\mathrm{r}}) = J_P \dfrac{\mathrm{d}(\omega - \omega_{\mathrm{r}})}{\mathrm{d}t} \\ Q_{\mathrm{r}} - Q - D_Q(E - E_{\mathrm{r}}) = J_Q \dfrac{\mathrm{d}(E - E_{\mathrm{r}})}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{1}$$

式中：P_{r}为有功功率参考；Q_{r}为无功功率参考；P为虚拟同步机有功输出功率；Q为虚拟同步机无功输出功率；D_P为有功调频系数；D_Q为无功调压系数；J_P为有功虚拟转动惯量；J_Q为无功虚拟转动惯量；ω为输出角频率；E为虚拟同步机的电动势给定值；ω_{r}为额定角频率；E_{r}为参考电动势。

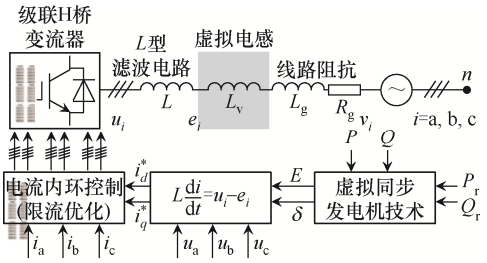


图 1 基于虚拟同步机的级联 H 桥储能变流器控制框图

Fig. 1 Control block diagram of cascaded H-bridge energy storage converter based on VSG

虚拟同步机通过有功-频率和无功-电压的逻辑关系实现变流器的功率控制。如图 2 所示，储能变流器可等效为电压源。图中：$E\angle\delta$ 为储能变流器输出电压；$V\angle 0$ 为电网电压；i为输出电流；R_{g}和 L_{g}为线路电阻与电感；z_{g}为线路阻抗；θ_{zg}为阻抗角。变流器的输出功率可表示为

$$\begin{cases} P = \dfrac{E^2}{z_{\mathrm{g}}}\cos\theta_{\mathrm{zg}} - \dfrac{EV}{z_{\mathrm{g}}}\cos(\theta_{\mathrm{zg}} + \delta) \\ Q = \dfrac{E^2}{z_{\mathrm{g}}}\sin\theta_{\mathrm{zg}} - \dfrac{EV}{z_{\mathrm{g}}}\sin(\theta_{\mathrm{zg}} + \delta) \end{cases} \tag{2}$$

1.2 虚拟同步机功率控制的小信号模型

为分析功率耦合的特性及其内在机理，需建立平衡点处的频域线性化小信号模型。在式(1)中注入小扰动并忽略高频分量后，其小信号模型可表示为

$$\begin{cases} K_{\omega P} = \dfrac{1}{J_P s + D_P} \\ K_{EQ} = \dfrac{1}{J_Q s + D_Q} \end{cases} \tag{3}$$

式中：$K_{\omega P}$为 VSG 有功功率控制的开环传递函数；K_{EQ}为 VSG 无功功率控制的开环传递函数；s为复频域的复数变量。

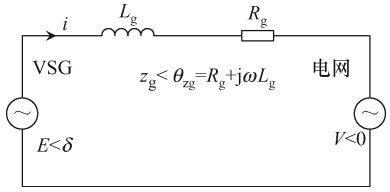


图 2 储能变流器连接到电网的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of energy storage converter connected to grid

虚拟同步机的功角δ由输出电压角频率ω和电网电压的角频率 ω_{g}计算得到，表达式为$\delta = \int(\omega - \omega_{\mathrm{g}})\mathrm{d}t$。虚拟同步机的小信号模型包含稳态部分和动态部分。然而，在研究功率耦合问题时，重点关注的是稳态下的功率耦合特性。因此，忽略动态过程，并结合功角与角频率的关系，虚拟同步机在控制回路中的稳态小信号模型可表示为

$$\begin{cases} K_{\delta P} = \dfrac{1}{D_P s} \\ K_{EQ} = \dfrac{1}{D_Q} \end{cases} \tag{4}$$

式中，$K_{\delta P}$为 VSG 有功-功角开环传递函数。

功率潮流方程小信号模型通过控制逻辑求解，输出变量为有功功率 P 和无功功率 Q，输入变量为虚拟同步机的功角 δ 及电动势给定值 E。通过偏导计算可得到有功功率增量 ΔP 和无功功率增量 ΔQ，即线性化的储能变流器小信号模型，其表达式为

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta E \end{bmatrix} = \boldsymbol{M} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta E \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{M}$为转换矩阵；M_{11}、M_{12}、M_{21}、M_{22}为转换矩阵 $\boldsymbol{M}$ 的转换系数。

在工作点 x_0 处，$\boldsymbol{M}$ 的表达式可以展开为

$$\begin{cases} M_{11}=\dfrac{VE_0}{z_{\mathrm{g}}}\sin(\theta_{\mathrm{zg}}+\delta_0) \\ M_{12}=\dfrac{2E_0}{z_{\mathrm{g}}}\cos\theta_{\mathrm{zg}}-\dfrac{V}{z_{\mathrm{g}}}\cos(\theta_{\mathrm{zg}}+\delta_0) \\ M_{21}=-\dfrac{VE_0}{z_{\mathrm{g}}}\cos(\theta_{\mathrm{zg}}+\delta_0) \\ M_{22}=\dfrac{2E_0}{z_{\mathrm{g}}}\sin\theta_{\mathrm{zg}}-\dfrac{V}{z_{\mathrm{g}}}\sin(\theta_{\mathrm{zg}}+\delta_0) \end{cases} \tag{6}$$

式中，下标“0”代表平衡点处的数值。

结合式(4)和式(5)，整体小信号模型如图 3 所示。

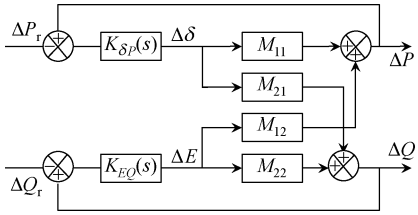


图 3　基于虚拟同步机的储能变流器小信号模型

Fig. 3 Small-signal model of energy storage converter based on VSG

2　构网型储能变流器功率耦合机理分析及自适应功率解耦控制策略

2.1　构网型储能变流器的功率耦合机理分析

在理想条件下，功率控制回路可以近似认为是解耦的。而在实际系统中，线路阻抗通常呈现阻感特性，且功角无法保证足够小，导致功率耦合问题十分严重。即使通过虚拟电感补偿使线路阻抗接近纯电感，功角也无法一直近似为 0。

纯电感条件下的相量图如图 4 所示，假设只有有功功率输出，则电动势给定值 E 与虚拟同步机的功角 δ 的关系可表示为

$$\frac{V}{\sin\theta_{\mathrm{zg}}}=\frac{E}{\sin(180^\circ-\theta_{\mathrm{zg}}-\delta)} \tag{7}$$

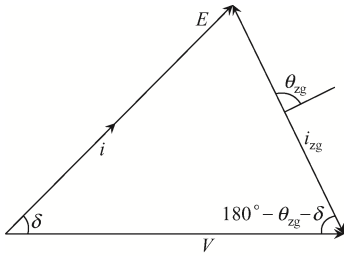


图 4　储能变流器的相量图

Fig. 4 Phasor diagram of energy storage converter

基于功角关系公式与有功功率潮流方程，P 与 δ 的关系可进一步简化为

$$P=\frac{V^2\sin^2(\theta_{\mathrm{zg}}+\delta)\cos\theta_{\mathrm{zg}}}{z_{\mathrm{g}}\sin^2\theta_{\mathrm{zg}}}-\frac{V^2\sin(\theta_{\mathrm{zg}}+\delta)\cos(\theta_{\mathrm{zg}}+\delta)}{z_{\mathrm{g}}\sin\theta_{\mathrm{zg}}} \tag{8}$$

如图 5 所示，当阻抗角和有功功率等级变化时，δ 从 0° 变化至 45°。特别地，当阻抗角 θ_{zg} 为 90°(即线路为纯电感特性)时，功角仍可能达到 45°。此时，小信号模型中的非对角矩阵可表示为

$$\begin{cases} M_{12}=\dfrac{V}{z_{\mathrm{g}}}\sin\delta_0 \\ M_{21}=\dfrac{EV}{z_{\mathrm{g}}}\sin\delta_0 \end{cases} \tag{9}$$

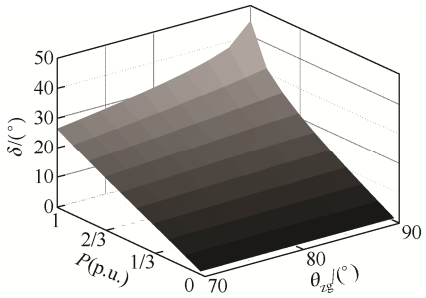


图 5　不同阻抗角和有功功率等级下的功角

Fig. 5 Power angle under different impedance angles and active power levels

综合上述分析可知，功率耦合问题与线路阻抗特性及功角密切相关。传统的虚拟电感方法仅能补偿线路阻感特性对耦合的影响，而难以完全消除功角变化引起的耦合效应。此外，功率耦合问题涉及 2 个方面：一是有功功率对无功功率的耦合，二是无功功率对有功功率的耦合。储能变流器的功率控制小信号模型是 1 个两输入两输出的模型，仅分析 M_{12} 或者 M_{21} 的影响往往不够全面。

在文献[18]基础上，本文扩展了 1 种考虑闭环回路的功率耦合系数矩阵，用于分析功率耦合的特性。在功率耦合分析过程中，将反馈回路的影响纳入功率耦合系数中。为此，需要构建 2 个反馈回路，即虚拟同步机的无功功率环和虚拟同步机的有功功率环。该反馈回路的表达式可表示为

$$\begin{cases}\Delta E=-\dfrac{1}{D_Q}\Delta Q\\ \Delta\delta=-\dfrac{1}{D_P s}\Delta P\end{cases}\tag{10}$$

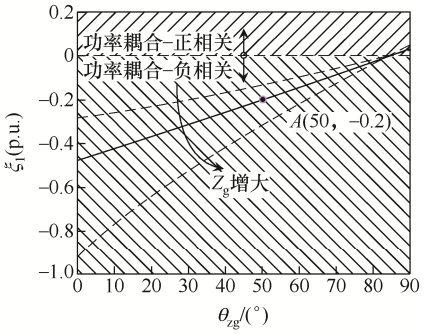
基于反馈回路的公式，当功率参考发生扰动时，结合电压-无功功率、功角-有功功率的反馈回路，将式(10)代入式(5)，功率潮流方程扰动模型可通过小信号模型近似表示为 2 种形式，具体为

$$\begin{cases}\begin{cases}\Delta P=M_{11}\Delta\delta-\dfrac{M_{12}}{D_Q}\Delta Q\\ \Delta Q=M_{21}\Delta\delta-\dfrac{M_{22}}{D_Q}\Delta Q\end{cases}\\ \begin{cases}\Delta P=-\dfrac{M_{11}}{D_P s}\Delta P+M_{12}\Delta E\\ \Delta Q=-\dfrac{M_{21}}{D_P s}\Delta P+M_{22}\Delta E\end{cases}\end{cases}\tag{11}$$

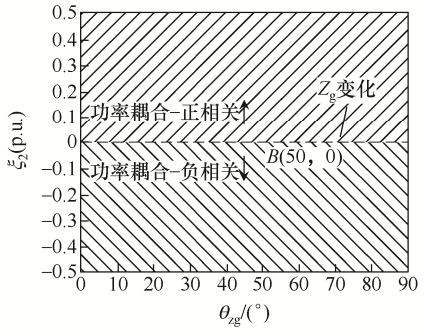
对式(11)进行简化，当功率参考值发生变化时，功率耦合度系数的表达式为

$$\begin{bmatrix}\xi_1 & \xi_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{\Delta Q}{\Delta P} & \dfrac{\Delta P}{\Delta Q}\end{bmatrix}=\frac{1}{\begin{bmatrix}\dfrac{M_{11}}{M_{21}}\left(1+\dfrac{M_{22}}{D_Q}\right)-\dfrac{M_{12}}{D_Q} & \dfrac{M_{22}}{M_{12}}\left(1+\dfrac{M_{11}}{D_P s}\right)-\dfrac{M_{21}}{D_P s}\end{bmatrix}}\tag{12}$$

通过耦合度系数 ξ_1 和 ξ_2，可有效分析有功功率耦合和无功功率耦合的特性。耦合度系数与耦合程度密切相关：系数值越接近于 0，表明耦合程度越低；当耦合系数大于 0 时，表示功率耦合的影响为正方向；当耦合系数小于 0 时，表示功率耦合的影响为负方向。基于此，绘制了线路阻抗变化时的耦合度系数 ξ_1 和 ξ_2 的曲线，如图 6 所示。图中横坐标为线路阻抗角，纵坐标为功率耦合度系数。以 *A* 点为例，在阻抗角为 50°时，无功功率耦合系数 ξ_1 为−0.2 p.u.。此时，若储能变流器的有功功率输出为 3 MW，则会吸收约 0.6 Mvar 的无功功率。相似的，以 *B* 点为例，在阻抗角为 50°时，有功功率耦合系数 ξ_2 为 0 p.u.，此时若储能变流器的无功功率输出为 3 Mvar，则不会产生耦合的有功功率(0 W)。当阻抗角增大时，无功功率的耦合系数 ξ_1 逐渐减小。当阻抗角接近 90°时，有功功率控制对无功功率的耦合影响接近于 0，可以忽略不计。此外，当 Z_g 增加时，无功功率耦合系数 ξ_1 降低，功率耦合程度进一步增大，但是无论 Z_g 如何变化，有功功率对无功功率的耦合影响始终存在。然而，无论阻抗条件如何变化，有功功率的耦合系数始终为 0(ξ_2=0)，表明无功功率控制对有功功率几乎没有影响，这与有功功率控制回路中的积分项有关。



(a) ξ_1变化



(b) ξ_2变化

图 6 不同线路阻抗条件的功率耦合系数

Fig. 6 Power coupling coefficient under conditions of different line impedances

上述分析表明，功率耦合的主要影响因素是有功功率控制对无功功率的影响，而无功功率对有功功率的影响较小，可忽略。此外，分析还揭示了功率耦合问题易受线路阻抗的阻感特性和功角的影响。

2.2 构网型储能变流器的自适应功率解耦方法

虚拟电感方法的核心在于补偿线路阻抗的阻感特性，参考输出电压($E_{d\text{ref}}$、$E_{q\text{ref}}$)的表达式为

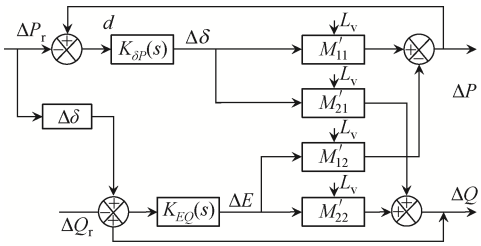
$$\begin{cases}E_{d\text{ref}}=E-\Delta v_d=E+i_q L_\text{v}\omega\\ E_{q\text{ref}}=0-\Delta v_q=0-i_d L_\text{v}\omega\end{cases}\tag{13}$$

虚拟阻抗值的增加会导致一定程度的电压降，假设输出电压为 1 p.u.，则增加虚拟电感后电压的变化可表示为

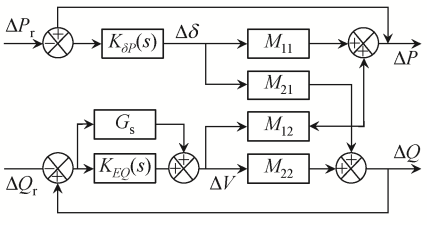
$$\Delta E=\sqrt{\Delta v_d^2+\Delta v_q^2-2\Delta v_d} \tag{14}$$

随着虚拟电感增加，ΔE 逐渐降低，限制了虚拟电感的功率解耦能力。因此，如图 7(a)所示，在虚拟电感基础上联合动态功率解耦法，即虚拟电感和动态解耦法。该方法通过引入有功功率反馈来补偿大功角条件下的功率耦合问题。当有功功率发生扰动时，受到功角波动的无功功率 ΔQ_{d} 可表示为

$$\Delta Q_{\mathrm{d}}=\frac{E^2}{z_{\mathrm{g}}}\sin\theta_{\mathrm{zg}}-\frac{EV}{z_{\mathrm{g}}}\sin(\theta_{\mathrm{zg}}+\delta)-\frac{E^2}{z_{\mathrm{g}}}\sin\theta_{\mathrm{zg}}-\frac{EV}{z_{\mathrm{g}}}\sin(\theta_{\mathrm{zg}}+\delta+\Delta\delta) \tag{15}$$



(a) 虚拟电感和动态解耦法



(b) 自适应功率解耦法

图 7　功率解耦方法示意

Fig. 7 Schematic of power decoupling method

当阻抗角为 90°时，小信号模型可以简化为

$$\Delta Q_{\mathrm{d}}=-\frac{EV}{z_{\mathrm{g}}}\sin\delta\Delta\delta=-P\Delta\delta \tag{16}$$

由于有功功率不受功率耦合影响，因此采用有功功率参考值 P_{r} 替代有功功率输出 P，以提高功率的调节速度，具体为

$$\Delta Q=-P_{\mathrm{r}}\Delta\delta \tag{17}$$

然而，$\Delta\delta$ 通过 dq 轴的电压电流关系及功率关系表示为

$$\begin{cases}\Delta\delta=\dfrac{R_{\mathrm{g}}\Delta i_q+\omega_{\mathrm{r}}(L_{\mathrm{g}}+L_{\mathrm{v}})\Delta i_d}{E\cos\delta_0}\\ \Delta P=v_{d0}\Delta i_d+v_{q0}\Delta i_q\\ \Delta Q=v_{q0}\Delta i_d-v_{d0}\Delta i_q\end{cases} \tag{18}$$

将式(18)代入式(16)化简之后，得到虚拟电感基础上的无功功率波动为

$$\Delta Q_{\mathrm{d}}=-P_{\mathrm{r}}\frac{(R_{\mathrm{g}}v_{q0}+X_{\mathrm{t}}v_{d0})\Delta P+(X_{\mathrm{t}}v_{q0}-R_{\mathrm{g}}v_{d0})\Delta Q}{(v_{d0}^2+v_{q0}^2)E\cos\delta_0} \tag{19}$$

式中，$X_{\mathrm{t}}=\omega_{\mathrm{r}}(L_{\mathrm{g}}+L_{\mathrm{v}})$。

然而，该方法在不同虚拟电感值和有功功率参考条件下的解耦能力有限，并且在抑制无功功率波动方面存在局限性。因此，本文提出了 1 种易于工程应用的自适应功率解耦方法，该方法基于输出电压补偿能力不足所引起的功率耦合机理，实现了高效的自适应功率解耦控制。

如图 7(b)所示，本文提出在无功功率控制回路中引入比例积分 PI(proportional-integral)控制器，将无功功率误差叠加至参考电压输出，从而有效解决无功功率补偿不准确的问题。此外，该方法还能在大范围有功功率变化条件下实现功率耦合问题的有效抑制。该控制器的传递函数 G_{s} 可表示为

$$G_{\mathrm{s}}=\frac{k_{\mathrm{p}}s+k_{\mathrm{i}}}{s} \tag{20}$$

式中：k_{p} 为比例系数；k_{i} 为积分系数。

因此，无功功率控制回路可以表示为

$$Q_{\mathrm{r}}-Q-\left(D_Q+\frac{1}{k_{\mathrm{p}}}\right)(E-E_{\mathrm{r}})=\left(J_Q+\frac{1}{k_{\mathrm{i}}}\right)\frac{\mathrm{d}(E-E_{\mathrm{r}})}{\mathrm{d}t} \tag{21}$$

2.3 功率解耦效果分析

本文提出的自适应功率解耦方法保持虚拟同步机的无功功率回路不变，增加 1 个电压补偿回路，该 PI 控制器的参数选取为 k_{p}=0.0001、k_{i}=0.1。如图 7(b)所示，加入自适应无功功率控制之后的电压无功功率反馈公式为

$$\Delta E=-\left(\frac{1}{D_Q}+G_{\mathrm{s}}\right)\Delta Q \tag{22}$$

此时，当功率参考发生扰动时，结合反馈回路，功率的潮流方程扰动模型可以借助小信号模型 $\boldsymbol{M}$ 近似表示为

$$\begin{cases}\Delta P = M_{11}\Delta\delta - M_{12}\left(\dfrac{1}{D_Q}+G_s\right)\Delta Q \\ \Delta Q = M_{21}\Delta\delta - M_{22}\left(\dfrac{1}{D_Q}+G_s\right)\Delta Q\end{cases} \tag{23}$$

自适应功率解耦方法下的无功功率耦合度系数 ξ_1' 可以由式(23)计算得到

$$\xi_1' = \frac{1}{\dfrac{M_{11}}{M_{21}}+\dfrac{M_{11}M_{22}}{M_{21}}\left(\dfrac{1}{D_Q}+G_s\right)-M_{12}\left(\dfrac{1}{D_Q}+G_s\right)} \tag{24}$$

借助式(12)和式(24)绘制在不同有功功率等级与不同阻抗条件下的功率耦合系数，如图 8 所示。当有功功率参考和线路阻抗条件变化时，功率耦合程度也发生了变化，在阻抗角较低、线路阻抗较大时耦合无功功率甚至能达到−0.76 p.u.。当采用自适应功率解耦控制方法时能够保证在有功功率参考与线路阻抗变化条件下耦合无功功率始终为 0，解耦效果良好。由于该方法不依赖于工作点及线路阻抗参数的估算，因此具有极高的工程实际应用价值。

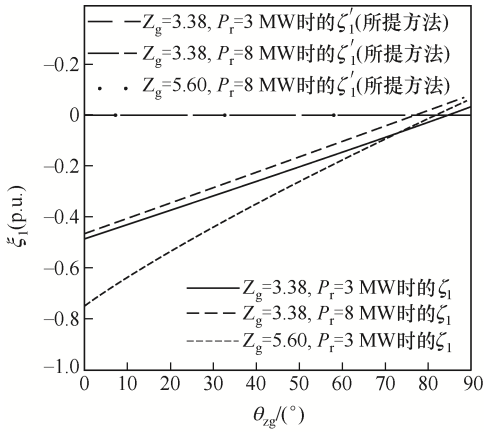


图 8 自适应功率解耦效果对比

Fig. 8 Comparison of adaptive power decoupling effect

2.4 自适应功率解耦方法的整体控制结构

本文所提方法的整体控制框图如图 9 所示。所提方法的功率环引入无功功率解耦补偿环节，即采用并联结构的 PI 控制器实现电压幅值的闭环调节，通过补偿电压幅值以修正无功输出偏差，使构网型级联 H 桥储能变流器在阻感比较大的并网条件下，仍能有效维持功率解耦的特性，从而增强变流器的稳定性。同时，由于所提功率解耦方法无需线路参数和复杂数学计算，因此计算负担较小、工程实现简单。此外，所提方法与跟网型储能变流器控制方法的电流内环控制、调制策略相似，本文采用通用的调制和 SOC 均衡策略方法[19-20]，不再赘述。

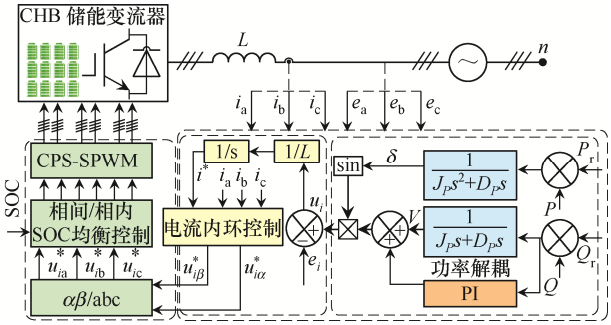


图 9 所提方法的整体控制框图

Fig. 9 Overall control block diagram of proposed method

3 仿真与实验验证

3.1 仿真设计

为了验证方法的有效性，在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型，主电路和控制参数选取见表 1。本节中，将所提自适应功率解耦方法与无功率解耦方法、虚拟电感和动态补偿法进行对比分析。

表 1 仿真参数

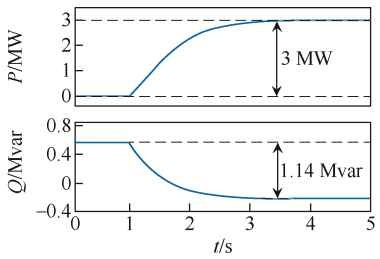
Tab. 1 Simulation parameters

参数	数值
额定功率/MW	3
滤波器电感/mH	8
电网频率/Hz	50
额定电压/kV	6
线路电阻/Ω	3.325
开关频率/ kHz	10
无功调压系数	1 531
线路电感/mH	2
每相子模块个数	8
有功调频系数	23 872
电池簇标称电压/V	768

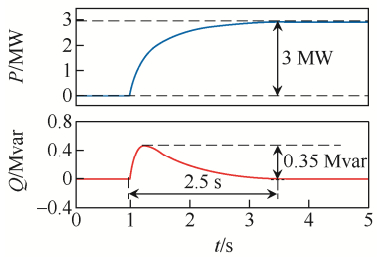
3.2 仿真结果分析

级联 H 桥储能变流器有功功率参考 P_r 从 0 增至 3 MW 的仿真结果如图 10 所示。

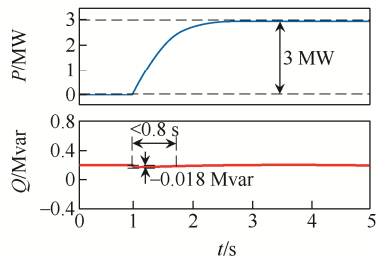
当未采用功率解耦方法时，无功功率受功率控制回路耦合影响严重，如图 10(a)所示，产生 1.14 Mvar 的无功误差，验证了功率耦合分析理论的正确性。当采用虚拟电感与动态解耦方法时，调整虚拟电感为 3.65 mH，并增加无功功率补偿环节，其响应效果如图 10(b)所示。稳态下，储能变流器无功功率实现完全解耦，保持 0。而在动态响应过程中，无功功率扰动达 0.35 Mvar，响应时间约 2.5 s，存在较大波动，动态性能仍需优化。有功功率 P=3 MW 下，采用所提方法的功率响应如图 10(c)所示。该方法不影响有功功率跟踪特性，无功功率响应更快(<0.8 s)，功率扰动为 −0.018 Mvar。因此，所提方法的无功功率扰动抑制



(a) 无解耦方法



(b) 虚拟电感和动态解耦方法



(c) 所提方法

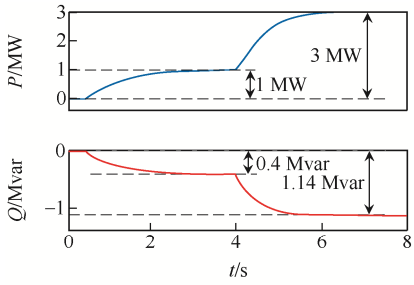
图 10　有功功率 3 MW 时的仿真输出功率波形

Fig. 10 Waveforms of simulated output power at active power 3 MW

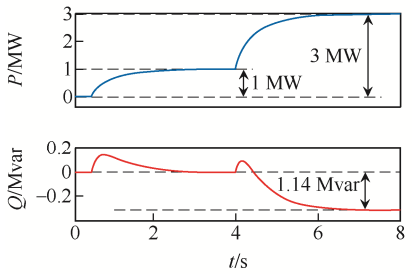
效果更佳。

为验证所提方法对功率指令变化的自适应，有功功率参考变化从 0 到 1 MW 再到 3 MW 的功率输出波形如图 11 所示。

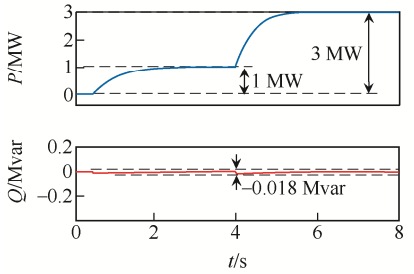
由图 11 可知，未采用解耦控制方法时无功功率耦合从 0.4 Mvar 增大到 1.14 Mvar，如图 11(a)所示。采用虚拟电感与动态解耦方法时，保持虚拟



(a) 无解耦方法



(b) 虚拟电感和动态解耦方法



(c) 所提方法

图 11　有功功率变化时的仿真输出功率波形

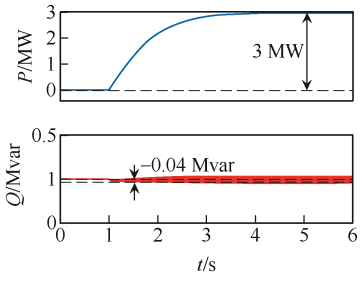
Fig. 11 Waveforms of simulated output power when active power changes

电感为 2.4 mH 不变，并增加无功功率补偿环节。如图 11(b)所示，1 MW 时稳态无功功率趋于 0，但是 3 MW 时，无功功率 Q=−0.31 Mvar，表明该方法无法适应有功功率指令的变化，且该方法的无功功率扰动较大(ΔQ>0.1 Mvar)，动态性能差。当采用所提方法时，功率波形如图 11(c)所示，有功功率在变化的过程中，所提方法的无功功率响应不受

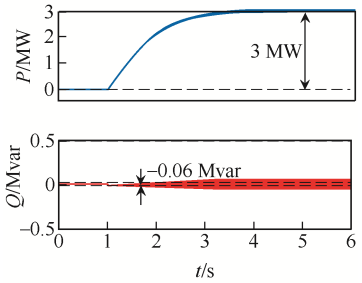
影响，且无功功率响应速度较快，功率扰动 $\Delta Q<$ 0.02 Mvar。

此外，所提方法在线路阻抗变化、负载突增/突减、电网电压波动等工况下的功率波形分别如图 12~图 14 所示。

(1)线路阻抗变化：由图 12(a)可知，所提方法在线路阻抗的电感为 0.008 H、电阻为 3.8 Ω 时，有功功率 3 MW 下对应的无功功率扰动为 0.04 Mvar，功率扰动较大，但稳态时依旧能实现功率解耦。另外，当电感为 0.01 H、电阻为 5.7 Ω 时，有功功率变化 3 MW 时无功功率扰动为 0.06 Mvar，稳态时功率可以实现解耦控制，如图 12(b)所示。因此，所提方法能够适应不同线路阻抗条件，鲁棒性较好。



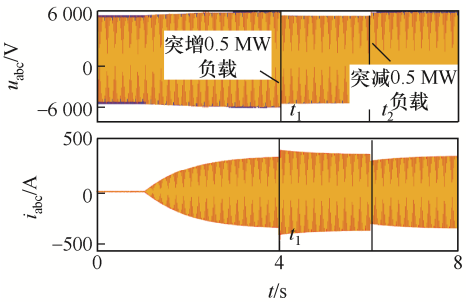
(a) 电感为0.008 H、电阻为3.8 Ω



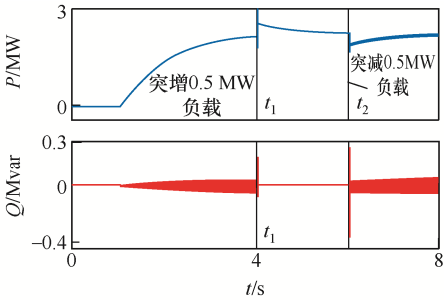
(b) 电感为0.01 H、电阻为5.7 Ω

图 12 线路阻抗条件变化时的功率波形

Fig. 12 Power waveforms when line impedance conditions change



(a) 电压和电流响应



(b) 功率响应

图 13 负载突增突减时的电压、电流及功率波形

Fig. 13 Power waveforms under sudden increase or decrease in load

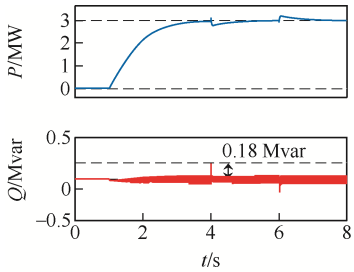


图 14 电网电压变化时的功率波形

Fig. 14 Power waveforms under changes in grid voltage

(2)负载突增/突减：当负载在 t_1 时刻从 0 突增至 0.5 MW，在 t_2 时刻从 0.5 MW 突减至 0 时，电压和电流及功率波形如图 13 所示。在未加限流控制基础上，所提方法的电压电流和功率响应在负载投切过程中经过小幅振荡后很快恢复稳定，且在此过程中依旧实现了功率解耦控制，说明所提方法不受负载突增突减的影响。

(3)电网电压波动：当电网电压从 6 kV 跌落至 5.8 kV，2 s 后恢复 6 kV 时，所提方法的最大无功功率扰动为 0.18 Mvar，且所提方法在电网电压波动时仍能够保持良好的功率解耦效果。

综合对比可见，在阻感特性影响下，功率耦合问题始终存在，影响无功功率控制，限制功率输出能力及电压支撑能力。在特定工况下，虚拟电感与动态解耦方法和所提方法均可实现稳态无功功率的解耦。然而，虚拟电感与动态解耦方法的实际应用需要迭代计算，应用复杂，难以适应有功功率指令的变化。但是，所提方法在多种工况下具有良好的适应性和鲁棒性，解耦响应速度快，对功率变化的自适应效果显著，且无需线路阻抗参数，实际应

用较简单，利于工程应用。

3.3 实验结果验证

为了进一步验证所提方法的有效性，基于 RT-LAB 平台开展了级联 H 桥储能变流器的硬件在环实验，如图 15 所示。针对不同有功功率指令变化条件，分别测试 3 种功率解耦方法的功率耦合情况。

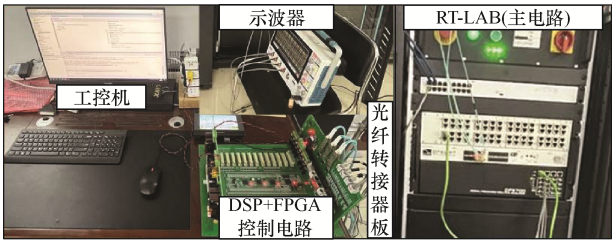
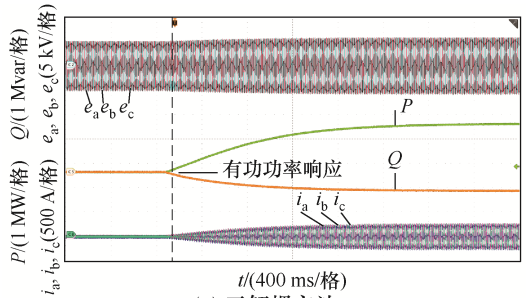


图 15　级联 H 桥储能变流器系统的硬件在环实验平台

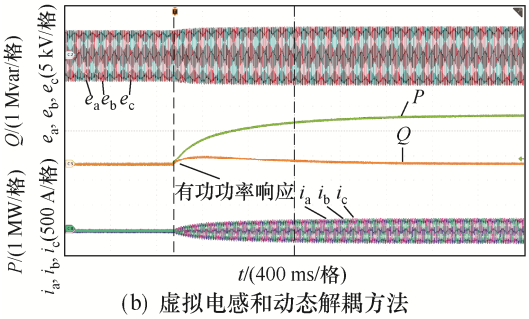
Fig. 15 Hardware-in-the-loop experimental platform of cascaded H-bridge energy storage converter system

3.3.1　有功功率为 2 MW 时的功率解耦效果分析

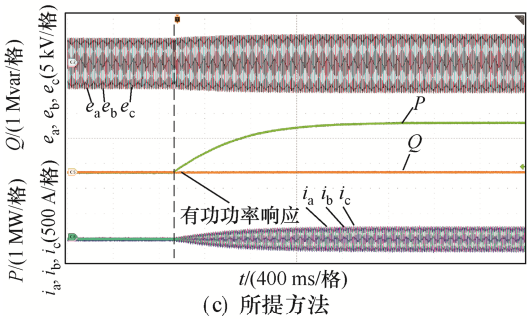
当输出有功功率为 2 MW 时，储能变流器输出电压、输出电流及功率响应波形如图 16 所示。当未采用解耦控制时，三相输出电压与电流波形保持良好，但无功功率受功率耦合影响较大，约为 0.81 Mvar，这一结果与仿真分析结论相近。当采用虚拟电感(L_v=3.1 mH)并结合有功功率反馈补偿时，响应波形如图 16(b)所示。该方法在稳态时可补偿由功角和线路阻抗角引起的功率耦合，Q=0。然而，该方法的无功功率波动较大，ΔQ=0.34 Mvar，



(a) 无解耦方法



(b) 虚拟电感和动态解耦方法



(c) 所提方法

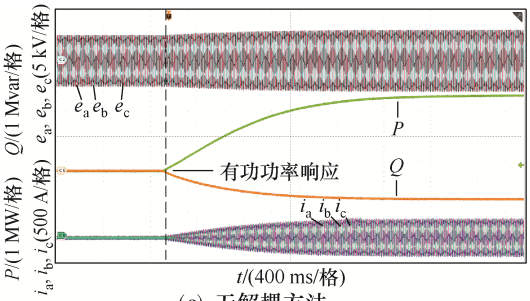
图 16　有功功率 2 MW 时的实验输出波形

Fig. 16 Experimental waveforms of output at active power 2 MW

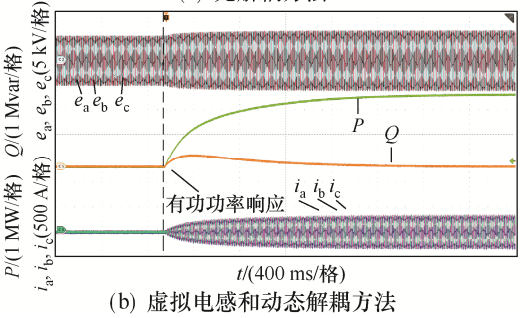
响应时间约为 0.5 s。采用所提方法时，有功功率指令为 2 MW 条件下，响应波形如图 16(c)所示。该方法同样具备良好的稳态功率解耦能力，无功功率稳态值接近 0，同时无功功率波动较小(ΔQ= 0.016 Mvar)，响应速度更快(<10 ms)。

3.3.2　有功功率为 3 MW 时的功率解耦效果分析

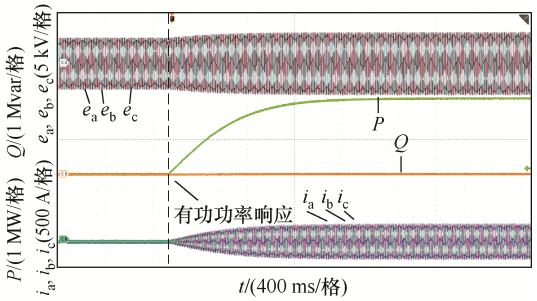
当输出有功功率为 3 MW 时，储能变流器输出电压、输出电流及功率响应波形如图 17 所示。3 种方法的三相输出电压和电流波形保持良好，但功率耦合效果不同。当未采用解耦控制时，无功功率耦合 Q=1.15 Mvar，与理论分析一致。当采用虚拟电感法(L_v=3.6 mH)并联合动态解耦方法时，响应波形如图 17(b)所示。该方法可在稳态时使无功功率趋于 0，实现稳态功率解耦。但该方法在 3 MW 有功功率 P 响应过程中，无功功率波动 ΔQ=



(a) 无解耦方法



(b) 虚拟电感和动态解耦方法



(c) 所提方法

图 17 有功功率 3 MW 时的实验输出波形

Fig. 17 Experimental waveforms of output at active power 3 MW

0.5 Mvar，且响应时间较长(>800 ms)。采用所提方法时，在 3 MW 有功功率 P 响应条件下，响应波形如图 17(c)所示。该方法同样可实现良好的稳态功率解耦，无功功率稳态值接近 0，同时无功功率波动 ΔQ<0.017 Mvar，且响应速度更快(<10 ms)。因此，自适应功率解耦方法的无功功率响应时间较短，解耦效果优于虚拟电感法和动态解耦控制方法，进一步验证了其有效性。

4 结语

本文针对储能变流器的功率耦合问题，提出了 1 种不依赖线路阻抗参数的自适应功率解耦控制策略。通过分析线路阻抗的阻感特性和功角对功率耦合的影响，揭示了有功功率对无功功率的主导耦合作用。借鉴无功功率动态补偿思想，所提策略通过引入无功功率误差的比例积分电压补偿环节，动态修正输出电压参考值，具有不依赖线路参数的鲁棒优势。在宽阻抗角范围内实现了动态功率解耦，有效解决了传统功率解耦策略适应性不足、动态响应慢的问题。仿真与实验结果表明，在 1~3 MW 功率指令变化时，所提方法使无功功率波动降低至 0.02 Mvar 以内，响应时间降低一个数量级，显著提升了功率控制的动态性能与稳态精度。此外，所提方法易于实现且不局限于特定拓扑，普适性强，应用潜力较大。

参考文献：

[1] 张泽, 赵西贝, 赵成勇. 储能变流器主导构网的大规模光伏经 LCC 送出方案 [J/OL]. 中国电机工程学报, 1-14. (2024-10-11) [2025-02-25]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241512.
Zhang Ze, Zhao Xibei, Zhao Chengyong. Large-scale photovoltaic power transmission scheme via LCC with energy storage converters leading the grid formation [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-14. (2024-10-11) [2025-02-25]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241512. (in Chinese)

[2] 徐德鸿, 陈文杰, 何国锋, 等. 新能源对电力电子提出的新课题[J]. 电源学报, 2014, 12(6): 4-9, 30.
Xu Dehong, Chen Wenjie, He Guofeng, et al. New power electronics topics brought by the development of renewable energy [J]. Journal of Power Supply, 2014, 12(6): 4-9, 30. (in Chinese)

[3] 王冠淇, 裴玮, 熊佳旺, 等. 跟网型和构网型变流器混合系统稳定性分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 25-38.
Wang Guanqi, Pei Wei, Xiong Jiawang, et al. Stability analysis method for hybrid systems of grid-following and grid-forming inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 25-38. (in Chinese)

[4] 卢军, 杨沛豪, 何凯琳. 新能源储能微电网惯量支撑性能研究[J]. 电源学报, 2024, 22(4): 182-191.
Lu Jun, Yang Peihao, He Kailin. Research on inertia support performance of new energy storage microgrid [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(4): 182-191. (in Chinese)

[5] Mourouvin R, Nurminen T, Hinkkanen M, et al. Direct DC-bus control for grid-forming converters: Toward the concept of dual-voltage-forming converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(6): 7789-7799.

[6] Me S P, Ravanji M H, Leonardi B, et al. Transient stability analysis of virtual synchronous generator equipped with quadrature-prioritized current limiter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(9): 10547-10553.

[7] Li Mingxuan, Wang Yue, Hu Weihao, et al. Unified modeling and analysis of dynamic power coupling for grid-forming converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(2): 2321-2337.

[8] de Brabandere K, Bolsens B, van den Keybus J, et al. A

voltage and frequency droop control method for parallel inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(4): 1107-1115.

[9] Li Yan, Li Yunwei. Power management of inverter interfaced autonomous microgrid based on virtual frequency-voltage frame [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 30-40.

[10] Li Bin, Zhou Lin, Yu Xirui, et al. Improved power decoupling control strategy based on virtual synchronous generator [J]. IET Power Electronics, 2017, 10(4): 462-470.

[11] 姜静雅, 王玮, 吴学智, 等. 基于自适应无功功率补偿的虚拟同步机功率解耦策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13): 2747-2756.
Jiang Jingya, Wang Wei, Wu Xuezhi, et al. Power decoupling strategy in virtual synchronous generator based on adaptive reactive power compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13): 2747-2756. (in Chinese)

[12] Li Mingxuan, Wang Yue, Xu Ningyi, et al. A novel virtual synchronous generator control strategy based on improved swing equation emulating and power decoupling method [C]// 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE). Milwaukee, WI, USA, 2017: 1-7.

[13] Guerrero J M, de Vicuna L G, Matas J, et al. Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(4): 1126-1135.

[14] 屈子森, 蔡云旖, 杨欢, 等. 基于自适应虚拟阻抗的虚拟同步机功率解耦控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 58-66.
Qu Zisen, Cai Yunyi, Yang Huan, et al. Strategy of power decoupling control for virtual synchronous generator based on adaptive virtual impedances [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 58-66. (in Chinese)

[15] Wen Tiliang, Zou Xudong, Zhu Donghai, et al. Comprehensive perspective on virtual inductor for improved power decoupling of virtual synchronous generator control [J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(4): 485-494.

[16] Wen Tiliang, Zhu Donghai, Zou Xudong, et al. Power coupling mechanism analysis and improved decoupling control for virtual synchronous generator [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 3028-3041.

[17] 杜建鹏, 赵晋斌, 曾志伟, 等. 基于虚拟功角功率控制的 VSG 增强功率解耦策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(22): 8808-8819.
Du Jianpeng, Zhao Jinbin, Zeng Zhiwei, et al. Enhanced power decoupling strategy for VSG with power control based on virtual power angle [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(22): 8808-8819. (in Chinese)

[18] 温提亮. 虚拟同步机功率耦合特性与解耦控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
Wen Tiliang. Research on power coupling characteristics and decoupling control of virtual synchronous generator [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)

[19] Maharjan L, Inoue S, Akagi H, et al. State-of-charge (SOC)-balancing control of a battery energy storage system based on a cascade PWM converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(6): 1628-1636.

[20] 蔡旭, 李征, 胡海涛. 级联 H 桥变流器原理、控制与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
Cai Xu, Li Zheng, Hu Haitao. Cascaded H-bridge Converters: Principles, Control and Applications [M]. Beijing: China Machine Press, 2020. (in Chinese)



胡顺全

作者简介：

胡顺全(1976—)，男，博士。研究方向：储能变流器技术。E-mail: hsqlou_1088@163.com。

刘通(1991—)，男，博士。研究方向：新能源与储能技术。E-mail: tong@sdu.edu.cn。

王明月(1999—)，男，博士。研究方向：构网控制技术。E-mail: 2249360103@qq.com。

陈阿莲(1976—)，女，中国电源学会高级会员，通信作者，博士，教授。研究方向：电力电子技术，新能源控制技术。E-mail: chenalian@sdu.edu.cn。

(责任编辑：孙美菊)