

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191278

虚拟稳态同步负阻抗的 VSG 功率解耦策略

颜湘武, 崔森, 贾焦心

(河北省分布式储能与微网重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

摘要: 伴随着分布式能源渗透率的逐渐提高, 电力系统中的转动惯量相对减小, 严重影响到系统安全稳定运行。其中虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)因具备同步发电机的相关特性而备受关注。针对 VSG 实际输出端口点到并网点的传输功率过程中存在耦合而引起 VSG 功率控制产生稳态误差和动态振荡, 从而引起下垂特性的变化的情况, 在对动静态功率耦合机理分析的基础上, 提出基于虚拟稳态同步负阻抗的功率解耦策略, 更好地消除了功率环间的耦合作用。通过建立基于所提出的 VSG 新型功率解耦策略的全局状态空间小信号模型, 证明了该解耦策略的有效性。最后, 搭建了基于解耦策略的 VSG 实验平台。通过实验结果验证了所提解耦策略的有效性, 消除了功率环间的耦合作用, 增强了 VSG 有功功率和无功功率的动静态响应性能。

关键词: VSG; 下垂控制; 功率解耦; 动静态耦合; 虚拟稳态同步负阻抗

Virtual steady state synchronous negative impedance of a VSG power decoupling strategy

YAN Xiangwu, CUI Sen, JIA Jiaoxin

(Hebei Provincial Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid
(North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

Abstract: With the gradual increase of the rate of distributed energy penetration, the moment of inertia in the power system is relatively reduced. This seriously affects the safe and stable operation of the system. The Virtual Synchronous Generator (VSG) has attracted attention because of the related characteristics of synchronous generators. Coupling in the transmission power of the VSG actual output port point to the grid-connected point causes the VSG power control to generate steady-state error and dynamic oscillation, thereby causing a change in the droop characteristic. Based on the analysis of the dynamic and static power coupling mechanism, this paper proposes a power decoupling strategy based on virtual steady-state synchronous negative impedance, which better eliminates the coupling effect between power loops. The global state space small-signal model based on the new VSG power decoupling strategy is established, and the effectiveness of the decoupling strategy is proved. Finally, the VSG experimental platform based on the decoupling strategy is built. The experimental results verify the effectiveness of the strategy, and show the elimination of the coupling between power loops, and the enhancement of the dynamic and static response of VSG active power and reactive power.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. SGTYHT/18-JS-206).

Key words: virtual synchronous generator; droop control; power decoupling; dynamic static coupling; virtual steady state synchronous negative impedance

0 引言

目前, 大多数的分布式电源均通过并网逆变器
等电力电子设备接入到传统电力系统中, 虽具备响

应快、效率高等优点, 但会使得系统转动惯量降低,
严重限制了分布式电源的并网容量^[1-3]。其中虚拟同
步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)技术
因具备同步发电机的相关特性而在电力系统中的应
用日益广泛^[4-9]。

VSG 可通过下垂控制自动独立调节频率和电

基金项目: 国家电网总部科技项目资助 (SGTYHT/18-JS-206)

压, 但存在有功与无功功率耦合问题^[10-11]。分布式电源通常连接在中低压线路中, 其中阻抗比 R/X 较大。并且虚拟惯量控制应用在 VSG 上, 可知 VSG 会存在有功功率振荡^[12]。若有功功率环与无功功率环之间存在耦合, 则振荡现象在两个环路之间交互影响, 增加其动态恢复过程和振荡幅值。严重时会导致振荡发散致使系统失稳, 故需重点解决功率耦合问题。

为了解决低压线路阻抗比较大引起的功率耦合问题, 国内外专家相继提出了众多解决方案, 主要有以下四类方法: 基于虚拟有功和无功功率坐标变换^[13]、基于虚拟频率和电压坐标变换^[14]、基于电压前馈补偿^[15-16]和基于虚拟阻抗控制解耦控制^[17-18]方案。但虚拟有功和无功功率坐标变换与虚拟频率和电压坐标变换均没有从根本上解除有功功率和无功功率控制环之间的耦合, 由功率耦合本身引起的稳态误差和稳定裕度降低等问题依然存在, 文献[16]所提出的基于电压前馈补偿解耦方案通过修改励磁电压调节器实现对公共耦合点电压的精确跟踪来满足功率解耦的需求, 但这种方法对线路阻抗参数辨识的精确度要求较高。

文献[17-18]提出了虚拟阻抗控制技术, 通过设置虚拟阻抗使得逆变器的输出阻抗表现为纯感性或纯阻性, 实现有功功率和无功功率之间的解耦, 从而应用下垂或反下垂控制以平衡压降, 减少环流。文献[18]提出基于虚拟阻抗的功率解耦方式, 虽然在一定程度上减弱了高线路阻抗比对功率耦合的影响, 但其解耦方法使得线路电阻增加而造成系统电压降落, 并且仅对动态功率耦合问题进行研究, 缺少静态功率耦合机理分析; 文献[19-20]提出了基于虚拟负阻抗的功率解耦策略, 虚拟负电阻用于抵消线路电阻以减小系统的电阻分量, 虚拟电感用于提高线路的感抗来增加系统的感性成分, 最后使 DG 总的输出阻抗呈感性, 而实际线路电阻分量受所在地区环境因素与自身温度的影响, 设置虚拟负电阻与线路电阻相等, 会使系统处于临界稳定状态, 尤其在线路电阻漂移小于虚拟负电阻时, 系统就会运行于不稳定的状态。文献[21]提出了一种改进的虚拟负电阻, 使“虚拟负电阻”在基频处不变, 而在非基频段降低, 增大了非基频频段的系统阻尼, 扩大了系统稳定范围, 但上述虚拟负阻抗技术并没有在虚拟同步机的应用场景下分析, 缺少虚拟负阻抗接入后 VSG 对整个微电网稳定性影响的研究; 以上研究的虚拟阻抗技术皆为动态虚拟阻抗技术, 随着

研究的进一步深入, 文献[22]提出了在 VSG 应用场景下, 通过建立小信号模型得到稳态虚拟阻抗相对于动态虚拟阻抗的稳定性高, 可减小有功功率与无功功率之间的耦合; 文献[23-24]提出的虚拟稳态同步阻抗方案是一种可通过调整逆变器输出阻抗特性, 抑制功率振荡的典型阻抗技术方案, 相比于常规解耦方案提高了 VSG 抗高频扰动能力和系统稳定性。以上研究为解决因低压线路阻抗比较大引起的功率耦合问题提供了条件。

综上所述, 本文首先从研究 VSG 的静态功率耦合特性出发, 在本质上分析了线路阻抗对 VSG 静态功率耦合作用的影响。接着, 首次通过对 VSG 的内电势点、机端电压点和电网并网点引入, 采用更精确的相对增益法对其动态功率耦合特性进行分析, 然后为提高抗电网谐波和非线性负载扰动能力, 本文提出了一种基于虚拟稳态同步负阻抗的新型 VSG 功率解耦方案, 通过对比分析, 证明了本文所提出的解耦方法可以更有效地解决功率耦合问题。最后通过实验验证了本文所提出功率解耦策略的有效性。

1 VSG 传统控制策略

图 1 为 VSG 模型的主电路与控制框图。一台三相电压源型逆变器将分布式电源并入交流电网中, 可知参考输出电压的幅值与频率由功率控制环给定。图中, VSG 的三相输出电压和输出电流的 dq 轴分量分别为 V_{dq} 和 i_{dq} , P_{ref} 和 Q_{ref} 分别为有功功率与无功功率参考值, E 是 VSG 的虚拟内电势, ω 为其角频率。

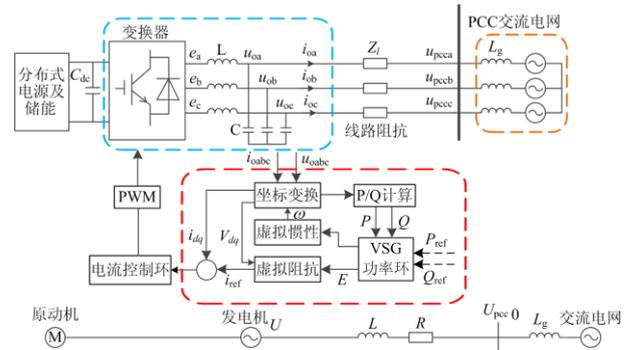


图 1 单台 VSG 控制框图

Fig. 1 Control block diagram of VSG

功率控制环是 VSG 的核心部分。其中, 有功功率控制环如图 2 (a)所示。传统同步发电机的一次调频功能可由有功功率控制环通过 $P-\omega$ 下垂控制模拟实现。

$$P_m = P_{ref} - K_\omega(\omega - \omega_s) \quad (1)$$

式中： P_{ref} 为有功功率控制环的参考功率值； P_m 为下垂控制输出的虚拟机械功率； K_ω 为 $P-\omega$ 下垂系数； ω 为 VSG 输出电压角频率； ω_s 是额定角频率。

模拟同步发电机的转子惯性公式为

$$J\omega_s \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - D(\omega - \omega_s) \quad (2)$$

式中： P_e 为输出有功功率； J 为虚拟转动惯量； D 为阻尼系数。

因此，综合式(1)、式(2)，有功功率控制环可以表示为

$$P_e = P_{ref} - (D + K_\omega)(\omega - \omega_s) - J\omega_s \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

无功功率控制环如图 2(b)所示。其中电压调节特性可由 $Q-E$ 下垂控制模拟，故无功功率控制环可用式(4)表达。

$$Q = Q_{ref} - n_q(E - E_{ref}) \quad (4)$$

式中： n_q 为 $Q-E$ 下垂系数； E_{ref} 为输出电压额定幅值； Q 为输出无功功率。

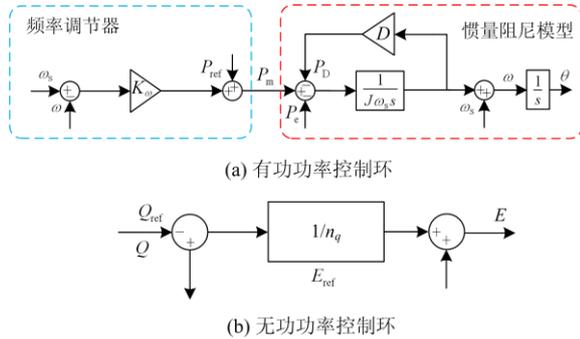


图 2 功率控制框图

Fig. 2 Power control block diagram

2 VSG 控制的功率耦合问题

2.1 VSG 控制的稳态功率耦合

已知 VSG 所存在的稳态功率耦合问题由线路阻抗造成，图 3 为其接到交流电网的等效电路图。

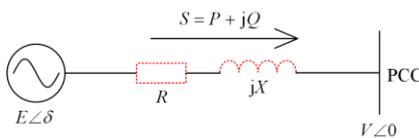


图 3 VSG 连接到交流电网的等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of a VSG connected to an AC bus

如图 3 所示，若仅考虑线路阻抗影响时，逆变器传输的有功功率和无功功率分别为

$$P = \frac{(EV\cos\delta - V^2)\cos\alpha + EV\sin\delta\sin\alpha}{Z} \quad (5)$$

$$Q = \frac{(EV\cos\delta - V^2)\sin\alpha - EV\sin\delta\cos\alpha}{Z} \quad (6)$$

式中： δ 为 VSG 内电势 E 与交流母线 PCC 处线电压 V 的相角差，线路阻抗为 $Z_L = R_L + jX_L$ ； α 为线路阻抗的阻抗角。

当线路阻抗为阻感性时采用传统下垂控制会产生功率耦合，将 VSG 输出电压与相角作为自变量，分别分析其对系统有功功率与无功功率的耦合影响程度；如图 4 所示，在线路阻抗呈阻感性时，输出电压和相角的变化都会影响到有功功率和无功功率的输出值大小，此时存在功率耦合问题。

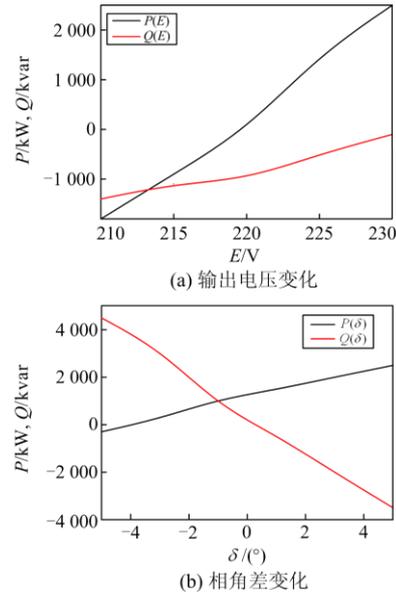


图 4 阻感条件下输出功率变化曲线

Fig. 4 Output power curve under resistive conditions

在实际中负载阻抗远远大于线路阻抗，即 δ 很小，可近似取 $\sin\delta = \delta$ ， $\cos\delta = 1$ ，则

$$P = \frac{V[(E - V)\cos\alpha + E\delta\sin\alpha]}{Z} \quad (7)$$

$$Q = \frac{V[(E - V)\sin\alpha - E\delta\cos\alpha]}{Z} \quad (8)$$

在线路阻抗呈感性时($X \gg R$)， α 近似为 90° ，式(7)与式(8)可简化为

$$P = \frac{E}{X}V\delta \quad (9)$$

$$Q = \frac{V}{X}(E - V) \quad (10)$$

结合式(9)与式(10)得到图 5，表示线路在纯感性条件下输出功率变化曲线。当逆变器的输出电压

发生变化时, 该逆变器输出的有功功率基本不变, 而无功功率与输出电压呈正相关。当逆变器输出端电压与电网点电压之间的相角差发生变化时, 其逆变器输出的无功功率基本不变, 而有功功率与其相角差 δ 呈正相关。

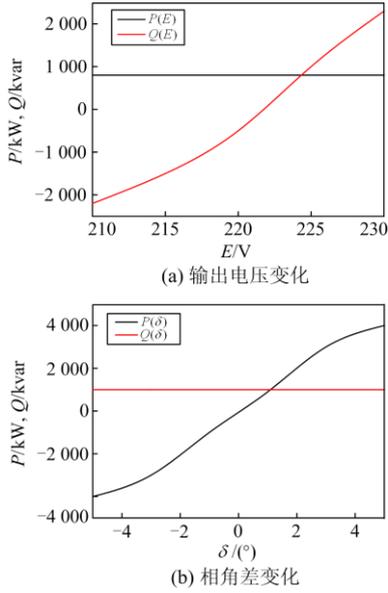


图 5 纯感性条件下输出功率变化曲线

Fig. 5 Output power curve under purely inductive conditions

由图 5(a)可知, 有功功率不随输出电压的幅值变化而改变, 故可通过调节输出电压来控制其无功功率的大小。同理, 由图 5(b)可知, 当逆变器输出电压和 PCC 点电压相角差变化时, 无功功率的输出几乎不变, 而有功功率的输出与相角差呈正比例关系, 因此可以通过调节相位差, 即频率来调节输出有功功率。

当线路阻抗为纯阻性时, 其功率表达式可简化为

$$P = \frac{V(E-V)}{R} \quad (11)$$

$$Q = -\frac{EV\delta}{R} \quad (12)$$

图 6 为系统阻抗为纯阻性条件下, 输出电压幅值和相角差作为变量, 对应逆变器的输出功率变化曲线。由上图可知, 逆变器输出有功功率和无功功率分别与输出端电压 E 和相角差 δ 呈正相关关系。

为分析 VSG 控制下的稳态功率耦合问题, 故以传统 $P-f$ 下垂控制为例分析不同线路阻感比时有功功率和无功功率的稳态耦合度, 其中功率稳态耦合程度采用式(13)、式(14)。

$$P_{\text{coupling}} = \left| \frac{P_{\text{real}} - P_{\text{pf}}}{P_{\text{real}}} \right| \quad (13)$$

$$Q_{\text{coupling}} = \left| \frac{Q_{\text{real}} - Q_{\text{pf}}}{Q_{\text{real}}} \right| \quad (14)$$

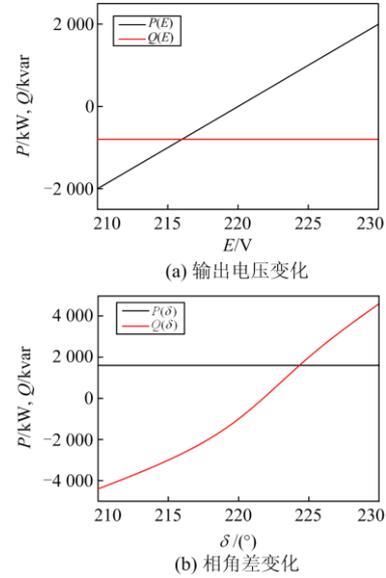


图 6 纯阻性条件下输出功率变化曲线

Fig. 6 Output power curve under purely resistive conditions

式中: P_{coupling} 和 Q_{coupling} 分别表示有功和无功功率的稳态耦合程度; P_{real} 、 P_{pf} 、 Q_{real} 和 Q_{pf} 分别为线路阻抗为阻感性和感性时的有功功率值和无功功率值。其中 P_{coupling} 和 Q_{coupling} 的数值大小与有功功率和无功功率的稳态耦合程度成正比。图 7(a)为不同电压下阻感比变化的有功功率耦合程度, 图 7(b)为不同相角差时阻感比变化的无功功率耦合程度, 由图可知, 阻感比较大时, 功率耦合比较严重, 甚至导致系统失稳。

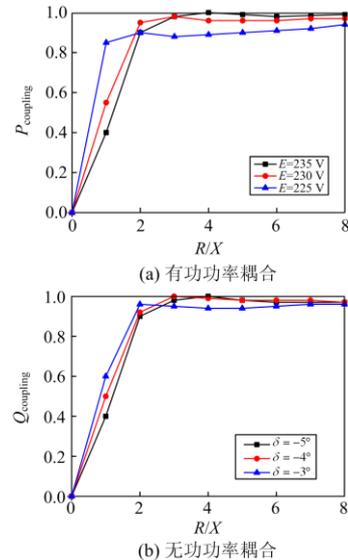


图 7 不同线路阻感比时功率耦合程度

Fig. 7 Degree of power coupling between different lines

2.2 VSG 的动态功率耦合问题

VSG 线路阻抗原理图如图 8 所示, E 为 VSG 内电势, δ 为 VSG 内电势 E 与交流母线 PCC 处线电压 V 的相角差, R_v 与 X_v 分别为虚拟电阻和虚拟电感, R_L 和 X_L 分别为线路等效电阻和电感。多输入多输出系统的耦合程度, 即 VSG 的动态功率耦合问题可通过相对增益分析。其中传统的相对增益矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} \frac{(R \sin \delta - X \cos \delta)^2}{R^2 + X^2} & \frac{(R \cos \delta + X \sin \delta)^2}{R^2 + X^2} \\ \frac{(R \cos \delta + X \sin \delta)^2}{R^2 + X^2} & \frac{(R \sin \delta - X \cos \delta)^2}{R^2 + X^2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

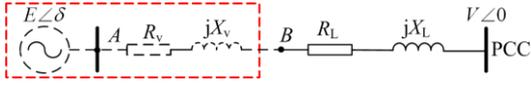


图 8 VSG 线路阻抗原理图

Fig. 8 Circuit impedance schematic of VSG

传统相对增益推导方法仅考虑虚拟同步机内电势点与电网并网点两点, 从而分析虚拟同步机内电势点的有功与无功功率的耦合程度, 不够精确, 无法表征虚拟同步机实际输出的有功与无功功率的动态耦合程度。本文在上述计算基础上, 采用虚拟同步机端电压点即逆变器实际输出的有功功率 P' 与无功功率 Q' 来作为功率点解耦, 如式(16)、式(17)。

$$P' = \frac{E^2(R_v + R_L) - EV(R_v + R_L)\cos\delta + EV(X_v + X_L)\sin\delta}{(R_v + R_L)^2 + (X_v + X_L)^2} - \frac{(E^2 + V^2 - 2EV\cos\delta)R_v}{(R_v + R_L)^2 + (X_v + X_L)^2} \quad (16)$$

$$Q' = \frac{E^2(X_v + X_L) - EV(X_v + X_L)\cos\delta - EV(R_v + R_L)\sin\delta}{(R_v + R_L)^2 + (X_v + X_L)^2} - \frac{(E^2 + V^2 - 2EV\cos\delta)X_v}{(R_v + R_L)^2 + (X_v + X_L)^2} \quad (17)$$

其中: R_v 与 X_v 分别为虚拟电阻和虚拟电感; R_L 和 X_L 分别为线路等效电阻和电感。通过相同的方法计算得到的相对增益为

$$\lambda_{12} = \lambda_{21} = \frac{k_{11}k_{22}}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}} = \frac{M}{N} \quad (18)$$

式中: $k_{11} = \frac{\partial P'}{\partial \delta}$; $k_{12} = \frac{\partial P'}{\partial E}$; $k_{21} = \frac{\partial Q'}{\partial \delta}$; $k_{22} = \frac{\partial Q'}{\partial E}$;

$$M = 2E^2VR_LX_L \sin\delta - EV^2R_L^2 \sin^2\delta - 2E^2VR_vX_L \sin\delta - 2EV^2X_vR_v \sin\delta \cos\delta + EV^2R_v^2 \sin^2\delta + 2E^2VX_vX_L \cos\delta + EV^2X_v^2 \cos^2\delta + 2E^2VX_L^2 \cos\delta + EV^2X_L^2 \cos^2\delta$$

$$N = -EV^2R_L^2 + 2E^2VR_LX_L \sin\delta + 4EV^2R_LX_v \sin\delta \cos\delta + EV^2R_L^2 \sin^2\delta + 2E^2VX_vX_L \cos\delta + EV^2X_v^2 + 2E^2VX_L^2 \cos\delta + EV^2X_L^2(\cos^2\delta - \sin^2\delta) - 2EV^2R_LX_L \cos\delta \sin\delta + 2EV^2R_LX_L \sin\delta \cos\delta + 2E^2VR_LX_v \sin\delta - 2E^2VR_L^2 \cos\delta - 3EV^2R_L^2 \cos^2\delta - 4EV^2R_L^2 \cos^2\delta + 2E^2VR_L^2 \cos\delta$$

其中, 相对增益 $\lambda_{12}=\lambda_{21}=1-\lambda_{11}$ 表征了系统有功功率与无功功率间的耦合作用强弱。而实际电源相角 δ 很小, 令 $\cos\delta \approx 1$, $\sin\delta \approx 0$, 经过化简得到相对增益为

$$\lambda_{12} = \lambda_{21} = \frac{2E^2V(X_vX_L + X_L^2) + EV^2(X_v^2 + X_L^2)}{2E^2VX_vX_L - EV^2R_L^2 + EV^2X_v^2 + 2E^2VX_L^2 + EV^2X_L^2 + 2E^2VR_vR_L - 3EV^2R_v^2 - 4EV^2R_vR_L + 2E^2VR_L^2} \quad (19)$$

通过分析得到上述的相对增益能更准确地表征其实际输出有功功率和无功功率的耦合程度。

3 虚拟稳态同步负阻抗的功率解耦策略

3.1 线路阻抗测量

1) 电阻测量

本文采用的中央控制器(MGCC)可读取逆变器端口功率值和电压值, 同样智能断路器也存在上述功能, 可读取端口功率和电压值大小。选定本文需要测量的 VSG 的馈线阻抗, 使得该系统在单位功率因数下运行, 即系统纯有功输出, 此时逆变器输出电流与电压同相位, 逆变器输出电压矢量、电阻和电感电压矢量、电网电压矢量如图 9 所示。

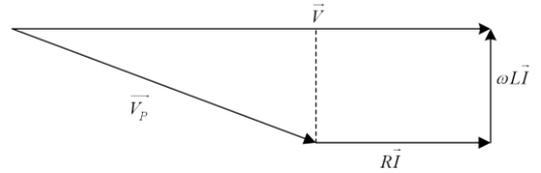


图 9 电压电流关系相量图

Fig. 9 Vector diagram of voltage and current

图中: V 和 I 分别为逆变器输出电压和输出电流; V_p 为并网点电压。根据图 9, 可得以下关系式。

$$V_p^2 = (\omega LI)^2 + (V - RI)^2 \quad (20)$$

其中 $\omega \approx 100\pi$, 进一步推导得:

$$R = \left(V - \sqrt{V_p^2 - (100\pi LI)^2} \right) / I \quad (21)$$

2) 电感测量

通过 MGCC 调节待测线路上 VSG 的输出功率为纯无功输出模式, 得到 VSG 的输出电压和输出电流, 通过智能断路器得到并网点的电压, 从而可绘制如图 10 所示的电压电流关系矢量图。

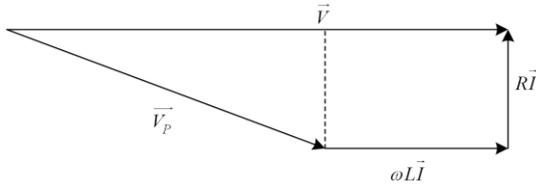


图 10 电压电流关系相量图

Fig. 10 Vector diagram of voltage and current

可推得线路电感计算公式为

$$L = \left(V - \sqrt{V_p^2 - (RI)^2} \right) / 100\pi I \quad (22)$$

3.2 虚拟稳态同步负阻抗策略

已知虚拟稳态同步复阻抗控制策略相较于动态虚拟复阻抗技术降低了 VSG 在高频处的输出阻抗, 当系统发生非线性负载或电网扰动时, 虚拟稳态同步复阻抗上的谐波压降会更小^[22], 故本文为了提高系统稳定性, 在不增加系统线路压降的基础上解决中低压线路中存在的高阻抗比而引起的功率耦合问题, 提出了基于虚拟稳态同步负阻抗的功率解耦控制方法, 如图 11 所示。

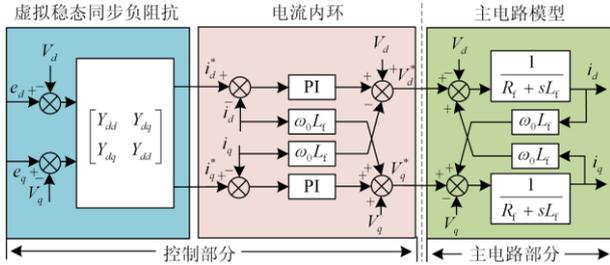


图 11 虚拟稳态同步负阻抗的功率解耦策略控制框图

Fig. 11 Power decoupling strategy control block diagram of virtual steady-state synchronous negative impedance

由 3.1 节得到 VSG 与交流母线之间的线路阻抗为 $Z_L = R_L + jX_L$, 本文采用虚拟负电阻来抵消线路电阻, 并加入虚拟电感使系统等效阻抗呈感性, 虚拟负阻抗如下为

$$Z_v = -R_v + jX_v \quad (23)$$

如图 8 所示, 引入虚拟负阻抗使得 VSG 等效输出阻抗与线路阻抗 $Z_v + Z_L$ 呈感性, 符合下垂控制要求, 故采用本文所提出的加入虚拟负阻抗解耦控制方法可实现对内电势 A 点有功与无功的解耦, 但为掌握 VSG 实际输出端电压 B 点的功率解耦情况, 需验证 VSG 端电压 B 点的输出功率能否通过其内电势 A 点的电压与频率幅值来进行解耦控制。PCC 点是电网并网点, B 点和 A 点分别是 VSG 的实际出口和虚拟出口点。

当引入虚拟负电阻, 即 $Z_v = -R_v$, 若 $R_v = R_L$, 抵

消线路电阻并使其等效输出阻抗呈感性, 进而使 B 点功率实现解耦。在 B 点无功功率 $Q_A = Q_B$, 其有功功率 P_B 如下式:

$$P_B = P_A - I^2(-R_v) = \frac{E(-R_v + R_L)(E - V\cos\theta) + VX_L}{X_L^2 + (-R_v + R_L)^2} - \frac{[E_v^2 + V^2 - 2EV\cos\delta](-R_v)}{(-R_v + R)^2 + X_L^2} + \frac{[E^2 R_L + V^2 R_v] - EV(R_v + R_L) + EVX_L \sin\delta}{(-R_v + R_L)^2 + X_L^2} \quad (24)$$

其中 $E \approx V$, $\cos\delta \approx 1$, 上式可化简为

$$P_B \approx [E(ER_L - VR_v) + V(VR_v - ER_L) + EVX_L \sin\delta] / [(-R_v + R_L)^2 + X_L^2] \approx EV\sin\delta / X_L \quad (25)$$

通过上述分析可得, 虚拟负电阻与线路电阻抵消后, 便可通过调节 VSG 内电势 A 点输出的电压相角来对端电压 B 点有功功率进行独立控制^[25]。

同理, 当引入虚拟电感时, 即 $Z_v = X_v$, 若 $X_v + X_L \gg R$, 从而使 B 点功率实现解耦。在 B 点的有功功率 $P_B = P_A$, 其无功功率 Q_B 为

$$Q_B = Q_A - I^2 X_v = \frac{E[(X_v + X_L)(E - V\cos\delta) - \sin\delta]}{R_L^2 + (X_v + X_L)^2} - \frac{(E^2 + V^2 - 2EV\cos\delta)X_v}{R_L^2 + (X_v + X_L)^2} = \frac{EX(E - V\cos\delta) - VX_v(E\cos\delta - V)}{R_L^2 + (X_v + X_L)^2} - \frac{EVR_L \sin\delta}{R^2 + (X_v + X_L)^2} \approx \frac{(EX_L + VX_v)(E - V)}{R_L^2 + (X_v + X_L)^2} \quad (26)$$

由上式可得, 加入虚拟电感, 即可通过调节 VSG 内电势 A 点输出的电压 E 来对其机端电压 B 点输出的无功功率进行独立控制。

通过上述分析, 为减弱线路阻抗比过高而产生的功率耦合, 本文通过虚拟同步负电阻和虚拟同步电感相结合, 提出虚拟稳态同步负阻抗的功率解耦控制策略, 如图 11 所示。利用调整 VSG 内电势 A 点的电压相角和幅值来对 VSG 端电压 B 点进行有功和无功的独立解耦 Droop 控制。在 $d-q$ 坐标系下, 通过虚拟稳态同步负阻抗控制得到电流参考值, 再经过电流内环控制后经 PI 调节器得到逆变器的控制信号。

同步导纳可表示为

$$Y_{vdq} = \begin{bmatrix} Y_{dd} & Y_{dq} \\ -Y_{dq} & Y_{dd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_v}{(\omega_0 L_v)^2 + R_v^2} & \frac{\omega_0 L_v}{(\omega_0 L_v)^2 + R_v^2} \\ -\frac{\omega_0 L_v}{(\omega_0 L_v)^2 + R_v^2} & \frac{-R_v}{(\omega_0 L_v)^2 + R_v^2} \end{bmatrix} \quad (27)$$

式中： L_v 为虚拟同步电感； $-R_v$ 为虚拟同步负电阻， ω_0 为电网额定频率。

虚拟稳态同步负阻抗部分方程如式(28)和(29)所示。

$$i_d^* = Y_{dd}(e_d - v_d) + Y_{dq}(e_q - v_q) \quad (28)$$

$$i_q^* = -Y_{dq}(e_d - v_d) + Y_{dd}(e_q - v_q) \quad (29)$$

电流环与主电路部分方程如式(30)和(31)所示。

$$i_d = (i_d^* - i_d)(k_{cp} + k_{ci}/s)/(R_f + sL_f) \quad (30)$$

$$i_q = (i_q^* - i_q)(k_{cp} + k_{ci}/s)/(R_f + sL_f) \quad (31)$$

式中， k_{cp} 和 k_{ci} 分别是电流环 PI 调节器的比例系数和积分系数。

基于虚拟稳态同步负阻抗方案无需 PI 调节器，直接通过电压和虚拟负阻抗计算得到电流参考值，具有更好的调节性能，且降低了 VSG 高频处输出阻抗，提高了抗电网谐波与非线性负载扰动能力，较电压电流双闭环控制具有强稳定性。

4 稳定性和功率耦合特性分析

4.1 状态空间全局小信号模型

通过建立 VSG 状态空间小信号模型来分析本文所提出的控制解耦策略对其特性所产生的影响，其中 VSG 具体参数如表 1 所示。

表 1 VSG 主要参数

Table 1 Main parameters of VSG

参数	数值
容量/kW	3
额定相电压/V	110
直流电压/V	400
额定频率/Hz	50
开关频率/kHz	5
转动惯量	0.3
阻尼系数	5.066 ω_0
Q-E 下垂系数	0.01
虚拟同步负阻抗	$R_v: -0.6 \Omega, L_v: 4 \text{ mH}$
虚拟同步复阻抗	$R_v: 0.1 \Omega, L_v: 4 \text{ mH}$
线路阻抗	$R_L: 0.6 \Omega, L_L: 4 \text{ mH}$
滤波参数	$L_f: 4 \text{ mH}, C_f: 10 \mu\text{f}$
滤波电抗寄生电阻	0.2 Ω

已知逆变器处于稳定运行阶段，其额定功率 P_0 、 Q_0 ，存在变量分别为 ω_s 、 δ_s 、 E_s 、 P_{0s} 、 Q_{0s} 、 P_s 和 Q_s ，且处于稳定运行阶段时有 $\omega_s = \omega_{gs}$ 。加入小扰动量 $\Delta\omega$ 、 $\Delta\delta$ 、 ΔE 、 ΔP_0 、 ΔQ_0 、 ΔP 和 ΔQ ，通过简化等式并拉普拉斯变换得到式(32)。

$$\begin{cases} J\omega_s \Delta\omega = \Delta P_0 - D_p \Delta\omega - \Delta P \\ \Delta E = \frac{1}{n_q}(Q_0 - Q) \\ \Delta\delta = \frac{\Delta\omega}{s} \\ \Delta P = \frac{EVR \sin \delta + EVX \cos \delta}{R^2 + X^2} \Delta\delta + \frac{VR \cos \delta + VX \sin \delta}{R^2 + X^2} \Delta E \\ \Delta Q = \frac{-EVX \sin \delta - EVR \cos \delta}{R^2 + X^2} \Delta\delta + \frac{VX \cos \delta - VR \sin \delta}{R^2 + X^2} \Delta E \end{cases} \quad (32)$$

由上式可以得到 s 域小信号模型如图 12 所示。

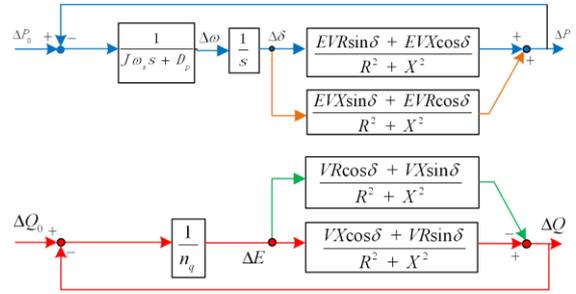


图 12 小信号模型图

Fig. 12 Small signal model diagram

由图 12 所示，消去中间变量 $\Delta\omega$ 、 $\Delta\delta$ 和 ΔE 后得：

$$\begin{cases} \Delta P = A \cdot \Delta P_0 + B \cdot \Delta Q_0 \\ \Delta Q = C \cdot \Delta P_0 + D \cdot \Delta Q_0 \end{cases} \quad (33)$$

式中，VSG 的功率耦合作用可用无功变化对有功参考功率的影响 $\Delta Q(s)/\Delta P_{ref}(s)$ 和有功变化对无功参考功率的影响 $\Delta P(s)/\Delta Q_{ref}(s)$ 表述，其分别对应 C 和 B 两个闭环传递函数。

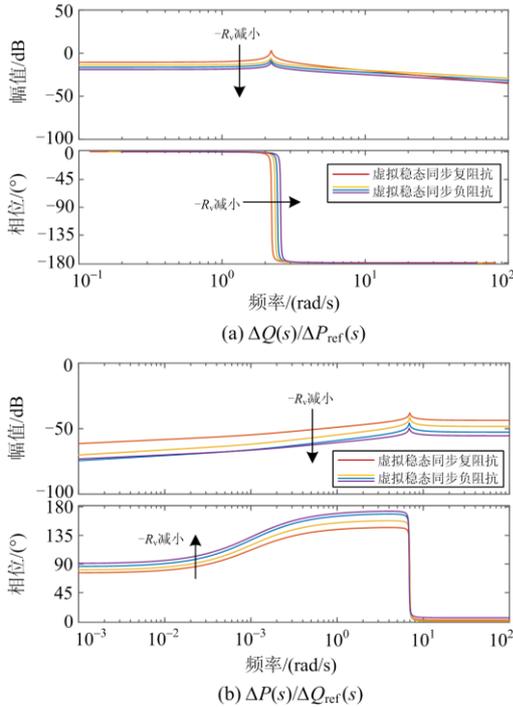
4.2 功率解耦策略的耦合特性对比分析

为着重分析虚拟稳态同步负阻抗的功率解耦效果，设定 VSG 所处的馈线阻抗近似为定值，其有功功率变化时对无功功率的耦合影响如图 13 所示，分别得到了采用虚拟稳态同步复阻抗方法^[23]以及本文所提出的解耦控制策略时传递函数 $\Delta Q(s)/\Delta P_{ref}(s)$ 和 $\Delta P_{ref}(s)/\Delta Q(s)$ 的波德图，其耦合作用与增益大小成正比。

由图 13 可得，当采用虚拟稳态同步复阻抗(R_v 取 0.2 Ω ，电抗 L_v 取 4 mH)的功率解耦控制时，其低中频增益都较大，由于增益和耦合作用成正比，故无功受有功功率耦合影响较大。而稳态增益不为零(-10.94 dB)则说明了有功功率变化导致无功功率存在稳态误差。幅频曲线在 2.2 Hz 处存在的谐振峰则体现了有功功率变化时无功功率出现了振荡现象。当采用本文提出的虚拟稳态同步负阻抗的功率

解耦策略后, 随着其负电阻值的逐渐减小, 其稳态增益和谐振峰的幅值随之减小。当采用虚拟稳态同步负阻抗(R_V 取 -0.6Ω , L_V 取 4 mH)时, 显著降低了其稳态增益和谐振峰幅值(分别为 -19.37 dB 和 -10.4 dB), 大大减弱了功率环间的耦合作用程度。

同理分析无功功率变化时对有功功率的耦合影响作用。图 13(b)分别给出了采用虚拟稳态同步复阻抗的功率解耦方法以及采用本文所提出的解耦策略($R_V=-0.6 \Omega$, -0.4Ω , -0.2Ω ; $L_V=4 \text{ mH}$)时传递函数 $\Delta P(s)/\Delta Q_{\text{ref}}(s)$ 的波德图。由图可得, 幅频曲线在低频段对应的稳态增益为零。即无功变化不会导致有功功率存在稳态误差。同时在 6.95 Hz 处存在谐振峰值, 表示无功功率的变化使得有功功率产生振荡现象。采用相同的分析方法对以上两种解耦控制策略下幅频曲线的增益与谐振峰值进行分析, 得到采用本文所提出的虚拟稳态同步负阻抗的 VSG 功率解耦效果更佳。



注: 虚拟稳态同步负阻抗 $R_V=-0.6 \Omega$, $L_V=4 \text{ mH}$ (紫线), $R_V=-0.4 \Omega$, $L_V=4 \text{ mH}$ (蓝线), $R_V=-0.2 \Omega$, $L_V=4 \text{ mH}$ (黄线), 虚拟稳态同步复阻抗 $R_V=0.2 \Omega$, $L_V=4 \text{ mH}$

图 13 $\Delta Q(s)/\Delta P_{\text{ref}}(s)$ 和 $\Delta P(s)/\Delta Q_{\text{ref}}(s)$ 的波德图

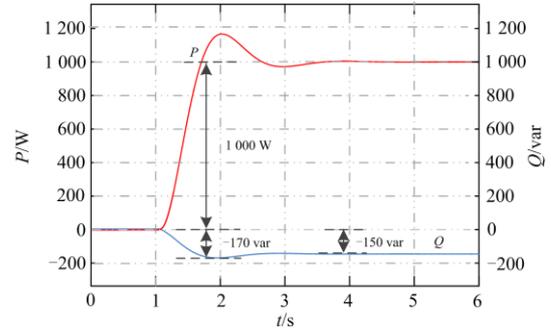
Fig. 13 Bode plot of $\Delta Q(s)/\Delta P_{\text{ref}}(s)$ and $\Delta P(s)/\Delta Q_{\text{ref}}(s)$

5 仿真及实验验证

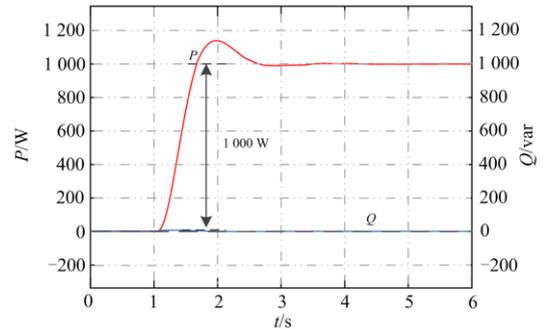
5.1 仿真分析

为验证所提功率解耦方法的有效性, 利用 Matlab/Simulink 仿真平台搭建了如图 1 所示的 VSG 并网系统模型。图 14 所示为采用虚拟稳态同

步复阻抗方法以及采用本文所提出的虚拟稳态同步负阻抗的解耦控制策略下有功功率变化后的 VSG 输出功率仿真图。



(a) 虚拟稳态同步复阻抗



(b) 虚拟稳态同步负阻抗

图 14 给定有功功率增加时不同解耦控制功率输出仿真图

Fig. 14 Simulation diagram of power output of different decoupling controls with given active power increase

VSG 起始运行在输出功率为零的稳态情况下, 在 $t=1 \text{ s}$ 时, 仅给定有功功率 1000 W , 从图 14(a) 的波形可得到系统在欠阻尼下运行。若采用本文所提出的虚拟稳态同步负阻抗功率解耦方法后, 由图 14(b) 可得系统阻尼比稍有增加, 故系统振荡有所缓解。并且可明显看出采用本文所提出的解耦方法有效地减弱了有功功率变化对无功功率的影响。由于线路阻抗比较高($R/X=0.289$), 当加入虚拟稳态同步复阻抗策略时, 采用传统相对增益方法求得的相对增益矩阵为 $\begin{bmatrix} 0.9764 & 0.0236 \\ 0.0236 & 0.9764 \end{bmatrix}$, 而通过式(25), 即采用本文所提出结合端电压点进行三点分析的相对增益矩阵为 $\begin{bmatrix} 0.9920 & 0.008 \\ 0.008 & 0.9920 \end{bmatrix}$, 其精度更高, 更能反映出虚拟同步机实际输出 B 点的动态耦合情况。可知依然存在有功阶跃对无功功率的影响。具体的功率响应性能指标如表 2 所示, 其中动态过程中最大偏差为 170 var , 调节时间约为 2.5 s 。当系统稳定后, 无功功率产生了 150 var 的稳态误差。当采用本文所提出的虚拟稳态同步负阻抗功率解耦方法后, 其无功功率动态过程的最大偏差量降为 5 var , 且 VSG

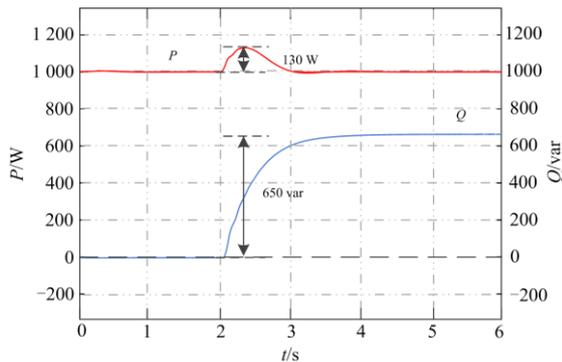
系统的调节时间缩短为 2 s, 并无稳态误差。说明本文提出的方法有效地解决了有功控制环对无功环自身控制的影响。

同样, 为分析无功功率阶跃变化对有功功率的影响, 图 15 给出了采用虚拟稳态同步复阻抗方法以及采用本文提出的虚拟稳态同步负阻抗的解耦策略下无功功率变化后的 VSG 的功率输出仿真图。当

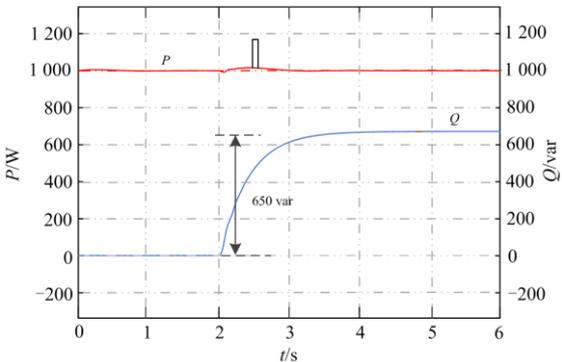
表 2 有功指令阶跃时无功功率响应性能指标

Table 2 Performance indices of reactive power response under active power reference step change

解耦策略	动态响应 最大偏差/var	动态响应 调节时间/s	稳态 偏差量/var
虚拟稳态同步复阻抗	170	2.5	150
虚拟稳态同步负阻抗	5	2	0



(a) 虚拟稳态同步复阻抗



(b) 虚拟稳态同步负阻抗

图 15 给定无功功率增加时不同解耦控制功率输出仿真图

Fig. 15 Simulation diagram of power output of different decoupling controls with given reactive power increase

VSG 起始运行于有功输出功率为 1 000 W, 无功输出功率为 0 var 的稳态情况下, 在 $t=2$ s 时, 分别在虚拟稳态同步复阻抗的解耦控制和本文所提出的功率解耦策略下给定无功功率 650 var, 观察有功功率响应变化, 具体的有功响应性能指标如表 3 所示。当采用虚拟稳态同步复阻抗策略时, 无功功率的变化依然对系统输出的有功功率存在影响, 其有功功

率动态过程中最大偏差为 130 W, 调节时间约为 1 s。由于本文所研究的 VSG 解耦控制策略运行在并网情况下, 故频率值不会改变, 因此无功功率变化不会引起有功功率的稳态偏差。当采用本文提出的功率解耦策略后, 大大减弱了无功功率控制环对有功功率控制环的耦合影响程度, 其中有功功率在动态过程中最大偏差降为 10 W, 且调节时间缩短为 0.8 s, 提高了有功功率的动态响应特性。

表 3 无功功率阶跃变化时有功功率响应性能指标

Table 3 Performance indices of active power response under reactive power step change

解耦策略	动态响应 最大偏差/W	动态响应 调节时间/s	稳态 偏差量/W
虚拟稳态同步复阻抗	130	1	0
虚拟稳态同步负阻抗	10	0.8	0

5.2 实验验证

为验证本文所提出的基于虚拟稳态同步负阻抗的 VSG 功率解耦控制策略, 搭建了如图 16 所示的 VSG 并网装置实验平台, 电路主要参数与表 1 中的仿真参数一致, 但为考虑到实际电路系统稳定性, 其中的虚拟稳态同步负阻抗的大小稍有差别, 具体见表 4 所示。实验线路采用型号 LJ-70(7.5 m)导线, 故依据此导线对线路阻抗参数进行选取。

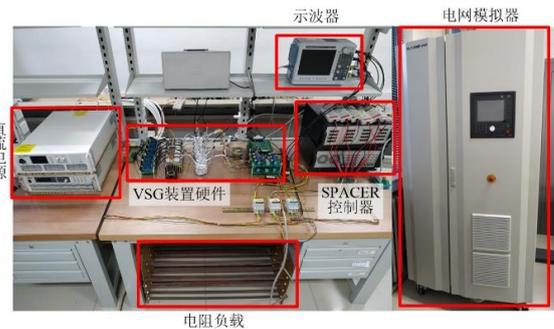


图 16 VSG 实验平台

Fig. 16 Experiment platform of VSG

表 4 实验参数

Table 4 Experimental parameters

参数	数值
虚拟同步负阻抗	$R: -0.55 \Omega, L: 4 \text{ mH}$
虚拟同步复阻抗	$R: 0.1 \Omega, L: 4 \text{ mH}$
线路阻抗	$R: 0.6 \Omega, L: 4 \text{ mH}$

注: 线路阻抗测量存在较小误差, 为防止虚拟同步负电阻设计过大而导致系统呈负阻性, 故选择虚拟负电阻为 -0.55Ω 。

VSG 具备有功功率调节和无功下垂作用, 在初始运行状态下运行于有功功率 1 000 W 和无功功率

-50 var。并设置 $t=4$ s 时, 给定有功功率(CH12)增加 1 000 W, 图 17 所示分别为不同解耦方法下功率输出效果。

如图 17(a)所示, 在虚拟稳态同步复阻抗解耦控制下, 无功功率(CH14)受到有功功率控制的影响, 加入虚拟复阻抗解耦控制并不能实现无功功率与有功功率的完全解耦, 无功功率仍然受到有功功率影响而下降 200 var; 将本文所提出虚拟稳态同步负阻抗解耦控制策略加入至控制环路, 得到如图 17(b)所示实验功率输出效果, 可看出此时大大降低了有功功率的变化对无功功率产生的耦合影响, 其无功功率仅下降了 70 var。一方面为了考虑到系统稳定性, 由于实验装置测量误差的影响故虚拟稳态同步复阻抗的电阻值选取为 -0.55Ω , 没有实现对线路阻抗的完全抵消。另一方面也由于实际电网频率变化对电压产生了影响, 而通过 VSG 的电压下垂控制使得其无功功率产生了较小的变化, 故可认为本文所提出的虚拟稳态同步负阻抗控制保证了无功功率始终保持在稳定工作点, 达到了解耦的目的。

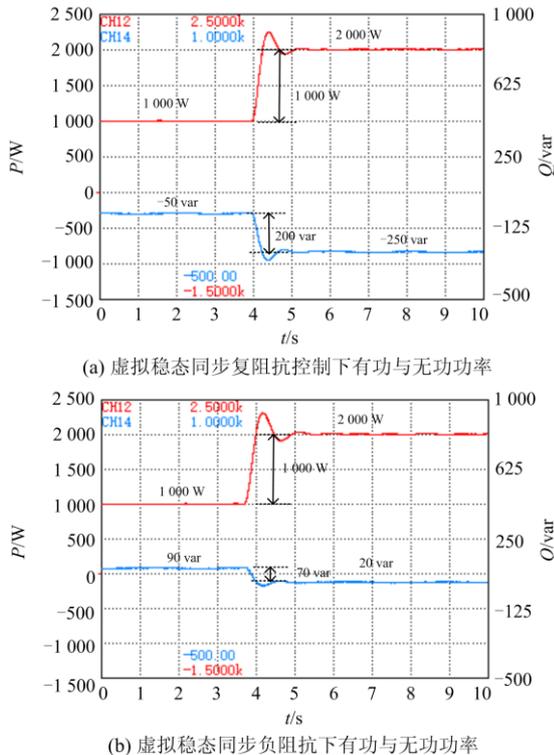


图 17 给定有功功率增加时不同解耦控制功率输出实验图
Fig. 17 Experiment figure of power output of different decoupling controls with given active power increase

同样, 为分析不同解耦控制下无功功率变化对有功功率的耦合影响, 在 $t=4$ s 时, 给定无功功率(CH14)增加 650 var, 图 18 所示为相应的不同解耦

方法下功率输出效果。由于 VSG 并网运行, 频率恒定, 故无功功率变化不会引起有功功率的稳态偏差。但如图 18(a)所示虚拟稳态同步复阻抗下无功功率变化对有功功率产生的动态响应最大偏差量为 240 W, 而采用本文所提出的虚拟稳态同步负阻抗控制策略, 其有功功率动态响应偏差量降为 140 W, 提高了有功功率的动态响应特性。综上, 本文所提出的虚拟稳态同步负阻抗解耦控制方法能很好地消除 VSG 功率环间的耦合影响问题, 改善了其动态响应性能。

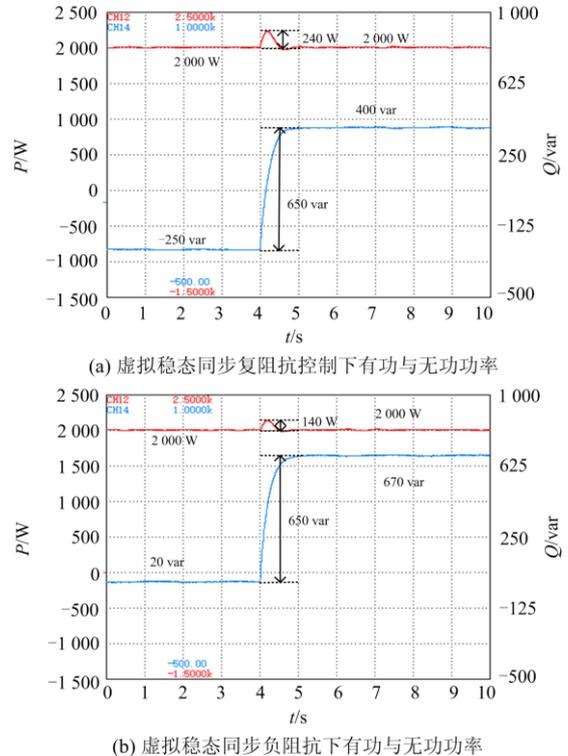


图 18 给定无功功率增加时不同解耦控制功率输出实验图
Fig. 18 Experiment figure of power output of different decoupling controls with given active power increase

6 结论

针对目前低压线路阻抗呈阻感性, VSG 在传输功率过程中存在耦合而引起其功率控制产生稳态误差和动态振荡的问题, 本文所提出的虚拟稳态同步负阻抗下的 VSG 功率解耦策略, 有效地抵消了线路阻抗, 实现了更加精确的解耦。

1) 本文分析了静态功率耦合机理, 得到了线路阻抗对 VSG 静态功率耦合作用的影响。

2) 在动态功率耦合机理分析上, 本文在传统相对增益法的基础上, 结合 VSG 的内电势, 端电压与并网点三点, 提出更加精确的相对增益矩阵, 更易体现 VSG 实际输出点的功率解耦情况。

3) 本文所提出的虚拟稳态同步负阻抗功率解耦策略用于电流单环控制下, 参考电流直接通过计算得到, 无需 PI 调节器, 具有更高的调节性能, 较电压电流双闭环控制具有强稳定性。

4) 搭建了本文所提出的解耦控制策略下的实验平台, 通过实验结果验证了本文所提出的解耦控制策略的有效性, 很好地消除了 VSG 功率环间的耦合影响问题, 改善了其动静态响应性能。

参考文献

- [1] 帅智康, 邹福筱, 涂春鸣, 等. 微网暂态稳定性研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 151-159.
SHUAI Zhikang, ZOU Fuxiao, TU Chunming, et al. Review on transient stability of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 151-159.
- [2] 全锐, 潘文霞. 考虑惯性动能的风电场旋转备用容量优化方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 23-28.
QUAN Rui, PAN Wenxia. Optimization of wind farm spinning reserve capacity considering rotor inertia kinetic energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(24): 23-28.
- [3] LIU Ju, YANG Dongjun, YAO Wei. PV-based virtual synchronous generator with variable inertia to enhance power system transient stability utilizing the energy storage system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(4): 429-437. DOI: 10.1186/s41601-017-0070-0.
- [4] 晁凯云, 苗世洪, 刘子文, 等. 基于虚拟同步电机控制的微电网稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 9-16.
CHAO Kaiyun, MIAO Shihong, LIU Ziwen, et al. Stability analysis of microgrid based on virtual synchronous generator control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 9-16.
- [5] SALVATORE D, JON A S, OLAV B F. A virtual synchronous machine implementation for distributed control of power converters in smart grids[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 122: 180-197.
- [6] 漆万壁, 李媛, 方番, 等. 基于储能型准 Z 源逆变器的 VSG 并网控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 124-133.
QI Wanbi, LI Yuan, FANG Fan, et al. Research on VSG grid-controlled strategy based on energy-stored quasi-Z-source inverter[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 124-133.
- [7] LIU J, MIURA Y, ISE T. Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(5): 3600-3611.
- [8] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591-2603.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [9] 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.
- [10] 李鹏, 杨世旺, 王阳, 等. 基于相对增益分析的目标函数对角化微网功率解耦控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2039-2046.
LI Peng, YANG Shiwang, WANG Yang, et al. Objective function diagonalization decoupling control of microgrid power based on relative gain analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2039-2046.
- [11] 袁健, 杨伟. 独立微网中多虚拟同步机功率精确分配控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 35-41.
YUAN Jian, YANG Wei. Accurate power sharing control strategy of multiple virtual synchronous generators in independent micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 35-41.
- [12] GAO F, IRAVANI M R. A control strategy for a distributed generation unit in grid-connected and autonomous modes of operation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 850-859.
- [13] KAREL D B, BRUNO B, JEROEN V K, et al. A voltage and frequency droop control method for Parallel inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(4): 1107-1115.
- [14] LI Y, LI Y W. Power management of inverter interfaced autonomous microgrid based on virtual frequency-voltage frame[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 30-40.
- [15] 张也, 颜湘武. 微网功率耦合特性分析及解耦控制[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 812-818.
ZHANG Ye, YAN Xiangwu. Coupling analysis and decoupling control of microgrid power[J]. Power System

- Technology, 2016, 40(3): 812-818.
- [16] 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.
- [17] GUERRERO J M, GARCIA D V L, 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.
- [18] 李武华, 王金华, 杨贺雅, 等. 虚拟同步发电机的功率动态耦合机理及同步频率谐振抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 27(2): 381-391.
LI Wuhua, WANG Jinhua, YANG Heya, et al. Power dynamic coupling mechanism and resonance suppression of synchronous frequency for virtual synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 27(2): 381-391.
- [19] HOU Guolian, XING Fulin, YANG Yu, et al. Virtual negative impedance droop method for parallel inverters in microgrids[C] // 2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), June 15-17, 2015, Auckland, New Zealand: 1009-1013.
- [20] 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.
- [21] 张平, 石健将, 李荣贵, 等. 低压微网逆变器的“虚拟负阻抗”控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1844-1852.
ZHANG Ping, SHI Jianjiang, LI Ronggui, et al. A control strategy of ‘virtual negative’ impedance for inverters in low-voltage microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(12): 1844-1852.
- [22] MO O, S D'ARCO, SUUL J A. Evaluation of virtual synchronous machines with dynamic or quasi-stationary machine models[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 46(7): 5952-5962.
- [23] 李明, 张兴, 张行, 等. 基于稳态虚拟同步阻抗的 VSG 输出阻抗与小信号建模分析[J]. 电源学报, 2018, 16(6): 11-17.
LI Ming, ZHANG Xing, ZHANG Xing, et al. Modeling and analysis of VSG output impedance and small-signal based on virtual steady-state synchronous impedance[J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(6): 11-17.
- [24] 李明烜, 王跃, 徐宁一, 等. 松弛小功角约束条件的虚拟同步发电机功率解耦策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 59-68.
LI Mingxuan, WANG Yue, XU Ningyi, et al. Power decoupling strategy for virtual synchronous generator relaxing condition of small power angle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 59-68.
- [25] 邱同耿日. 基于虚拟负阻抗的微电网改进下垂控制策略的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
QIU Tonggengri. Research on improved drooping control strategy of microgrid based on virtual negative impedance[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.

收稿日期: 2019-10-17; 修回日期: 2020-01-09

作者简介:

颜湘武(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源电力系统分析与控制、现代电力变换、新型储能与节能等; E-mail: xiangwuy@ncepu.edu.cn

崔森(1992—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为新能源电力变换技术; E-mail: cuisen@ncepu.edu.cn

贾焦心(1991—), 男, 博士研究生, 研究方向为微网运行及接口变换器控制。E-mail: jjiajx33@163.com

(编辑 葛艳娜)