

基于自适应电流补偿的 VSG 增强功率解耦控制策略研究

李劲松¹, 许新雨¹, 李国锋¹, 陈超², 王书征³, 刘健桦⁴

(1. 大连理工大学 电气工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 四川帝威能源技术有限公司 四川省氢能源与多能互补微电网工程技术研究中心, 四川 绵阳 621000; 3. 南京工程学院 江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心, 江苏 南京 211167; 4. 中国电力科学研究院有限公司 电网环境保护全国重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:针对虚拟同步发电机(VSG)运行于中低压线路时产生功率耦合,导致变流器输出能力受限的问题。首先探究VSG功率耦合机理,得出其致因在于中低压情况的功角 θ 和阻抗角 θ_{eq} 不能满足理论假设条件,导致功率输出中存在耦合项。然后分析并改进虚拟电感(VI)控制缺陷,同时考虑功角扰动和电压变化,推导出所需功率补偿量大小对功率环路加以修正,以消除系统发生扰动时VSG输出无功功率波动,最终提出基于自适应电流补偿(ACC)的VSG增强功率解耦策略,显著提高解耦程度,且进一步提升控制系统在非理想电网下的稳定性。最终在多种工况下进行仿真,证明所提方法可更好地应对功率耦合问题。

关键词:虚拟同步发电机;虚拟电感;功率解耦;功角补偿;电压补偿

DOI:10.15938/j.emc.2025.04.008

中图分类号:TM46;TK513.5

文献标志码:A

文章编号:1007-449X(2025)04-0073-14

Research on enhanced power decoupling control strategy for VSG based on adaptive current compensation

LI Jingsong¹, XU Xinyu¹, LI Guofeng¹, CHEN Chao², WANG Shuzheng³, LIU Jianben⁴

(1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Hydrogen Energy and Multi-energy Complementary Microgrid Engineering Technology Research Center of Sichuan Province, Sichuan DIWEI Energy Technology Co., Ltd., Mianyang 621000, China; 3. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Smart Distribution Network, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 4. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Aiming at the problem that when the virtual synchronous generator (VSG) operates on medium and low voltage lines, power coupling occurs, resulting in the limitation of the output capacity of the converter. Firstly, the power coupling mechanism of the VSG was explored, and it is concluded that the

收稿日期: 2024-07-03

基金项目: 四川省氢能源与多能互补微电网工程技术研究中心开放基金(2024DWN005); 教育部新能源系统高端装备和智慧运行工程研究中心(青海大学)开放基金(KFKT-25ERC-06); 新能源装备检测福建省高校重点实验室(莆田学院)开放课题项目(XNY202403); 江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心开放基金(XTCX202305); 电网环境保护全国重点实验室开放基金(GYW51202301436); 大连市科技创新基金(应用基础研究)(2022JJ12GX020)

作者简介: 李劲松(1987—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源储能并网控制与电工装备先进制造;

许新雨(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为储能系统解耦控制;

李国锋(1968—2024), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电气设备状态检测与诊断及特种功率变换技术;

陈超(1974—), 男, 硕士, 特约研究员, 研究方向为风光水电氢耦合制储用装备在线能量调控策略;

王书征(1983—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源发电及并网技术、电能变换技术及在配用电系统中的应用等;

刘健桦(1985—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力电子技术、电力系统的电能质量和电磁环境等。

通信作者: 李劲松

cause lies in that the power angle θ and the impedance angle θ_{zg} under medium and low voltage conditions cannot meet the theoretical assumption conditions, leading to the existence of a coupling term in the output power. Then, the control defects of the virtual inductance (VI) were analyzed and improved. Meanwhile, considering the power angle disturbance and voltage changes, the magnitude of the required power compensation was derived to correct the power loop, so as to eliminate the fluctuation of the reactive power output by the VSG when the system was disturbed. Finally, an enhanced power decoupling strategy of the VSG based on adaptive current compensation (ACC) was proposed, which significantly improves the degree of decoupling and further enhances the stability of the control system under non-ideal power grids. Finally, simulations were carried out under various working conditions, demonstrating that the proposed method can better deal with the power coupling problem.

Keywords: virtual synchronous generator; virtual inductance; power decoupling; power angle compensation; voltage compensation

0 引言

随着“双碳”目标提出,基于电力电子设备接入电网的风光等可再生能源迅速发展,且渗透率不断提升^[1]。电力电子变换控制方法实质上减小了电网的总转动惯量,使得其在面对频率和电压变化时支撑能力减弱,导致新型电力系统呈现低惯量和低阻尼特性。因此,模拟同步发电机(synchronous generator, SG)运行特性的虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)技术^[2]得到广泛应用。早在2016年,我国张北风光储工程就应用VSG技术,以支撑分布式电源的惯量和调频调压需求^[3]。VSG本身具备频率支撑功能,且可在发生波动时为电网提供惯性^[4]。一般情况下,对VSG建模与分析存在2个基本假设:小功角假设及小线路阻抗比假设^[5]。这在高压线路中很容易被满足,但在有大量分布式电源接入的中低压线路中,通常却是难以实现的,易出现功角大幅度变化和线路不完全呈感性等情况,从而导致本应单独调节的有功环和无功环相互影响,即产生功率耦合现象。当VSG输出的有功功率变化时,其向电网输出或吸收的无功功率也随之变化,将改变电力系统的潮流分布,进而影响发电端的电能输出能力^[6-7]。因此,如何解决这一制约VSG系统调节问题,实现输出功率有效控制,正是分布式电源可靠并网运行的必由之路^[8]。

VSG技术理念于2007年最早在德国被提出,直至2010年,钟庆昌教授首次全面模拟了同步发电机的所有机电和电磁特性才基本趋于完善,国内外针对VSG功率解耦的研究起步均较晚^[9]。现有功率解耦方法大致分为2类:其一,利用坐标变换方法,

在VSG控制回路中引入电压、电流或功率补偿。正如文献[2]采用功率补偿以减小耦合,看似耦合现象得到缓解,实际上导致功率耦合的症结依然存在,并未改变VSG系统运行环境,且在极端条件下因设备限制,解耦性能也可能不可靠。文献[10]从幅相图出发,突破性提出解耦的关键在于一定的电压补偿,具体补偿量却难以准确计算。文献[11]通过引入虚拟电压实现解耦,但因控制策略过于复杂,工程实际应用受限。文献[12]提出一种基于虚拟阻抗和电流补偿的解耦方法,利用虚拟阻抗补偿消除高阻抗比(R/X)影响,并通过修改电流参考值进行功角修正,最终实现功率解耦,但解耦程度有待进一步提高。

当前研究热点多集中于第二类方法,即利用虚拟电感(virtual inductance, VI)进行功率解耦。通过引入VI,改变VSG运行状态,使其处于弱耦合情况,本质是在VSG出口处添加适当或自适应大小的虚拟阻抗环节,以消除功率耦合现象。文献[13]基于VI使系统等效输出呈感性,即利用输出电流值作为反馈,对无功-电压环路电压参考值进行修正以解决功率耦合问题。但VSG动态性能并不能满足实际需求。文献[10]同时从电压补偿角度探究不能实现完全解耦的原因在于补偿能力不足,因此采取仅q轴电压补偿方式对传统VI方法进行改进,显著提高解耦程度。但对运行过程中出现的电压波动并不能很好地抑制。文献[14]通过引入虚拟电容环节,实现良好解耦的同时调节系统动态性能,提升动态解耦能力。但正是虚拟电容环节的加入,使其对运行工况的参数识别能力要求极高,不适于规模化应用。文献[15]针对功角和电压偏差带来的无功

功率波动,采用自适应虚拟阻抗解耦策略进行偏离控制。所使用的虚拟阻抗方法值得借鉴,却依旧存在工程计算量较大的弊端。综上,1个好的VSG系统解耦策略应包括有效的电压抬升方法(直接电压补偿或VI补偿等),这也是实现功率解耦的关键^[10],同时还需可行的动态性能提升手段。

本文首先基于VSG控制系统拓扑,通过小信号模型对有功和无功耦合机制进行分析,进而深入探究功率耦合机理。然后针对传统VI控制策略中存在的2个不足,在小信号功率环中利用dq轴电流加以补偿以消除功率耦合影响,提出一种基于自适应电流补偿(adaptive current compensation, ACC)的VSG增强功率解耦策略。再次回归小信号模型分别求得功角扰动补偿和电压扰动补偿的计算表达式,并对比改进前后系统的稳定性和动态性能,证明所提改进策略的优越性,为解耦控制模型建立提供理论依据。最终利用MATLAB平台搭建仿真模型,验证所提控制策略的有效性与可行性。

1 VSG控制策略与耦合机理分析

1.1 VSG控制基本原理

图1所示为典型的VSG系统应用场景图。 V_{dc} 代表直流形式的储能模块或分布式电源,本研究中不考虑其出现波动的情况。VSG功率控制部分用于

模拟SG的励磁控制器和调速器。其中: L_f 、 C_f 和 L_g 分别为变流器侧电感、滤波电容和线路电感; R_f 和 R_g 分别为变流器侧滤波电阻和线路电阻。由于 L_f 和 R_f 主要起滤波作用,对计算结果影响较小,为简化计算通常被省略。 I_{abc} 为变流器桥臂侧滤波电流; I_{gabc} 为VSG并网电流; U_{abc} 为电网电压; V_{abc} 为滤波电容电压(VSG输出电压)。

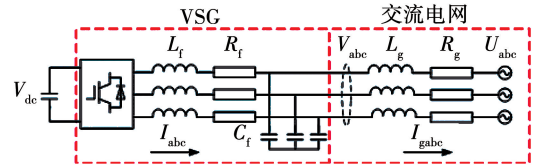


图1 典型VSG系统应用场景

Fig. 1 Typical VSG system application scenarios

图2所示为传统的VSG控制方案。其中: Q_{ref} 和 P_{ref} 分别为设定的有功功率和无功功率参考值; D_p 、 D_q 、 J_p 和 J_q 分别为有功和无功回路的下垂系数和虚拟惯性系数; U 和 V_c 分别为额定电压和实际输出电压值; ω_n 和 ω 分别为额定角频率和实际角频率。利用并网点的电压和电流计算VSG系统输出的复功率,通过虚拟转子方程将有功功率和电压相角、无功功率与电压幅值联系起来,经过电压电流双闭环追踪后,作为电压参考值输送到变流器进行控制^[16]。

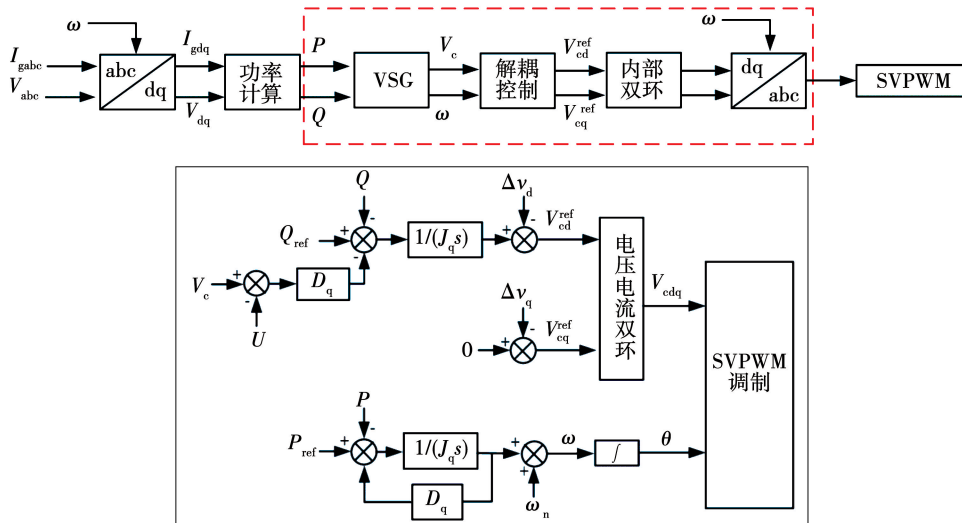


图2 传统VSG控制策略及电压计算模块

Fig. 2 Traditional VSG control strategy and voltage calculation module

对于单相三电平逆变器载波层叠技术,空间矢量脉冲宽度调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)可通过计算合成电压矢量的宽度和频

率实现对输出电压控制。其优点是输出电压波形更接近正弦波,且具有较低的谐波含量。而正弦脉冲宽度调制(sinusoidal pulse width modulation, SPWM)

则是通过调整脉冲宽度的方式实现对输出电压的控制。考虑到 SPWM 输出电压波形存在一定的谐波成分,而 SVPWM 虽相对复杂,但其输出电压质量更高,更适用于对电压质量要求较高的应用场景。因此,选择 SVPWM 技术对输出电压进行控制。

SG 的一次调频与调压特性可表示为:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{ref}} &= P + D_p(\omega - \omega_n); \\ Q_{\text{ref}} &= Q + D_q(\sqrt{2}V_c - \sqrt{2}U) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

SG 一次调频通过角频率偏差 $(\omega - \omega_n)$ 和下垂系数 D_p 实现对有功功率输出的调整,可很好地体现其下垂特性,实现频率控制。还须通过引入转子运动方程以模拟惯性特性,建模中可忽略发电机的阻尼绕组,根据 SG 转矩方程得到 VSG 有功-频率环模型为

$$P_{\text{ref}} - P - D_p \omega_n (\omega - \omega_n) = J_p \omega_n \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

同理,利用 SG 一次调压特性可得到 VSG 无功-电压环模型为

$$Q_{\text{ref}} - Q - D_q (V_c - U) = J_q \frac{dE}{dt} \quad (3)$$

VSG 技术一大突出优势即通过式(2)和式(3)构成频率和幅值 2 个通道。在考虑锁相环产生的不稳定问题时,可经构建的通道计算得到幅值和相位用于坐标变换。基于此,通过改进传统 PLL,以使 VSG 输出功率不受电网电压和频率的影响^[17-19]。

据图 2 可知,通常会在无功-电压控制环后加入电压电流双闭环控制,实现变流器输出电压电流的快速跟踪。环路内部则采用传统 PI 控制,最终将计算结果经反变换后送入 PWM 调制,以控制 VSG 系统运行。

1.2 VSG 耦合机理分析

为解决 VSG 系统功率耦合问题,首先需要探究其功率耦合机理。简化后的虚拟阻抗补偿 VSG 系统电路图如图 3 所示。变流器通过给定指令经由线路阻抗向电网输送功率,计算过程中电网可视为无穷大且三相对称系统。

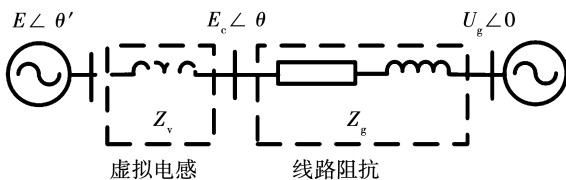


图 3 VSG 并网系统等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of VSG grid-connected system

图 3 中: U_g 为电网电压; E_c 为 VSG 系统输出电压。不考虑虚拟阻抗时, VSG 内电动势与电网电压相位差为功角 θ , 为便于计算将线路阻抗采用幅角形式表示, 即 $Z_g = R_g + j\omega L_g = Z_g \angle \theta_{zg}$, 其中 R_g 、 L_g 和 θ_{zg} 分别表示线路阻抗的阻性分量、感性分量和阻抗角。则 VSG 输出功率可表示为:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{vsg}} &= \frac{E_c^2}{Z_g} \cos \theta_{zg} - \frac{E_c U_g}{Z_g} \cos(\theta_{zg} + \theta); \\ Q_{\text{vsg}} &= \frac{E_c^2}{Z_g} \sin \theta_{zg} - \frac{E_c U_g}{Z_g} \sin(\theta_{zg} + \theta) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其小信号模型为

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{\text{vsg}} \\ \Delta Q_{\text{vsg}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{p1} & K_{p2} \\ K_{q2} & K_{q1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta E_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} K_{p1} &= \frac{E_c U_g}{Z_g} \sin(\theta_{zg} + \theta); \\ K_{p2} &= \frac{2E_c}{Z_g} \cos \theta_{zg} - \frac{U_g}{Z_g} \cos(\theta_{zg} + \theta); \\ K_{q1} &= \frac{2E_c}{Z_g} \sin \theta_{zg} - \frac{U_g}{Z_g} \sin(\theta_{zg} + \theta); \\ K_{q2} &= -\frac{E_c U_g}{Z_g} \cos(\theta_{zg} + \theta) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

结合式(5)可绘制 VSG 控制有功、无功回路耦合的小信号控制框图,如图 4 所示。

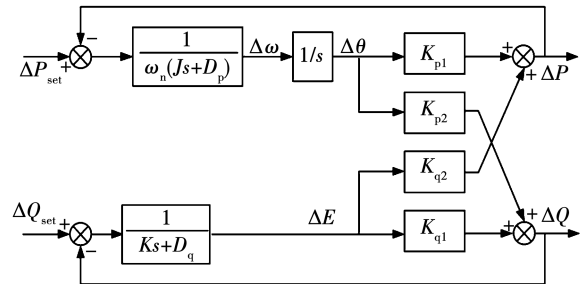


图 4 VSG 控制的小信号控制框图

Fig. 4 Small signal control block diagram of VSG control

理想情况 VSG 功率控制,是利用功角控制有功功率,利用电压幅值控制无功功率。但若不能满足小功角假设和小阻抗比 (R/X) 假设,将导致有功和无功功率同时受到功角和电压幅值影响。进一步,功率控制之间也将相互影响,难以实现精确输出,即产生功率耦合现象。

对功率耦合现象成因分析后,还需验证 VI 补偿对耦合的影响。由图 4 可以看出,有功功率变化时,

因 K_{p2} 的存在,无功功率也随之发生变化。且通过功率回路,耦合项不仅对输出功率产生影响,还将影响输出角频率和电压幅值,进而在一定程度上恶化 VSG 系统运行状态。此外,考虑到具体运行条件,由于功率耦合,通常会导致无功-电压环不能准确跟踪给定值,以致产生较大的无功偏差和功率波动,导致 VSG 系统的大量功率输出能力被无功所占用,降低变流器有功传输能力的同时加重电网无功负担。

1.3 虚拟电感(VI)解耦法

由于中低压线路难以满足小功角假设和小阻抗比(R/X)假设,通常引入 VI 的概念,即引入电流或电压反馈环节,以矫正输出阻抗,降低 R/X ,使其满足小阻抗比假设,减小功率耦合。

VI 解耦法表达式为:

$$\left. \begin{aligned} V_{cd}^{\text{ref}} &= E - \Delta v_d = E + X_v i_{gq}; \\ V_{cq}^{\text{ref}} &= 0 - \Delta v_q = 0 - X_v i_{gd} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中: V_{cd}^{ref} 和 V_{cq}^{ref} 分别为经过 VI 补偿后的 dq 轴电压参考值; E 为根据无功-电压环路的计算电压参考值; i_{gq} 和 i_{gd} 分别为变流器输出电流的 dq 轴分量。

采用的 VI 解耦法如图 5 所示。由电压差值和无功差值共同实现对系统电压的下垂控制,经过惯性环节后可得电压调节量,只须对计算所得 dq 轴电压进行补偿即可实现 VI 解耦。换言之,所采用的 VI 解耦法本质是通过引入电流或电压补偿,以达到抬升输出电压的目的。

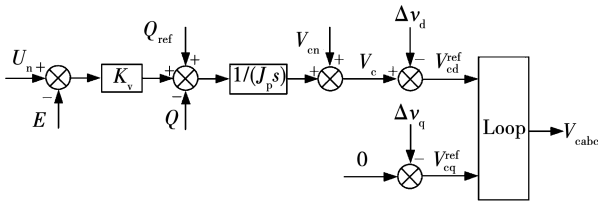


图 5 VI 解耦控制策略

Fig. 5 VI decoupling control strategy

2 VI 解耦控制缺陷分析

设定线路电阻 R_g 为 0.75Ω , 线路电感 1.39 mH , 有功功率设定值从 50 W 阶跃至 200 W , 无功功率设定为 0 不变。绘制不同 VI 补偿下有功功率和无功功率波形图, 如图 6 所示。为表示方便, 采用标么值形式, VI 补偿量 x_v 基准值选取 3.2 mH 。

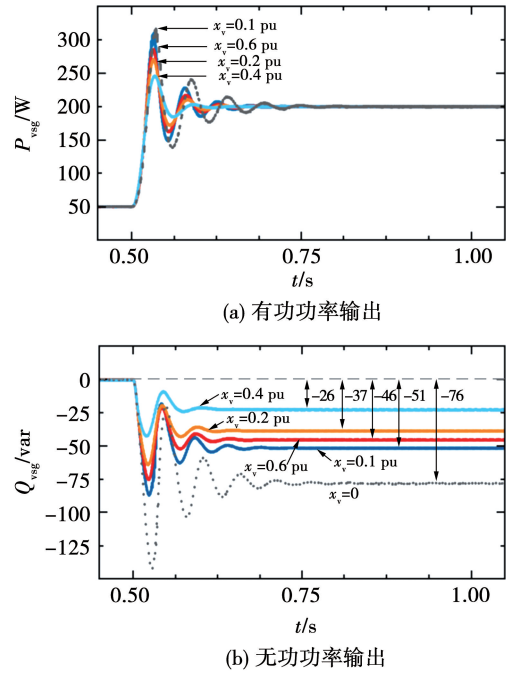


图 6 不同 VI 补偿下的功率输出曲线

Fig. 6 Power output curves under different VI compensations

由图 6 中曲线变化可知, 随 x_v 增加, 功率波形的超调量、波动时间以及无功功率稳态值均呈先上升后下降的趋势。这种变化趋势说明 x_v 对功率耦合程度存在显著影响, VI 解耦能力与 x_v 的选取密切相关, 且理论上存在一个最优 x_v 值以实现最大程度的解耦。因此, 需要探究在最优补偿量下, 能够达到何种程度的解耦。但采用更改 x_v 大小, 逐步逼近最优值的方法, 难以获得准确的最优值及其对应的耦合程度。

由于运行条件不同和变流器容量等因素, 无功变化量可能存在较大的偏差, 因此需要一种量化体现 VSG 系统耦合程度的表征方法。

相对增益分析法是解耦控制领域的重要分析方法, 可揭示多输入多输出系统中各元素间的定性关系。因此采用相对增益法探究最佳 VI 补偿时的相对解耦程度。

相对增益法的关键在于求取放大系数, 定义相对增益为第一放大系数和第二放大系数之比, 则相对增益系数计算表达式为

$$\lambda_{ij} = \frac{p_{ij}}{q_{ij}} = \frac{\frac{\partial y_i}{\partial u_j} \Big|_{u_k = \text{constant}, k \neq j}}{\frac{\partial y_i}{\partial u_j} \Big|_{y_k = \text{constant}, k \neq j}} \quad (8)$$

式中: y_i 为被控变量; u_j 为控制变量。

将相对增益系数排列为矩阵形式, 即可得到相对增益矩阵。结合图 4, 针对前述讨论的双输入双输出系统, 其相对增益矩阵可表示为

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \delta & \sin^2 \delta \\ \sin^2 \delta & \cos^2 \delta \end{bmatrix}. \quad (9)$$

其中 $\delta = 90^\circ - \theta - \theta_{zg}$ 。

式(9)的二阶方阵中每一项元素的大小均代表其他变量对这一变量的影响。对角元素距离 1 越近, 表示变量间关联性越弱, 其解耦效果越好。

对照上文, 当 λ_{11} 在 1 附近时, 所选取的 VI 补偿量解耦效果较好。不同 VI 补偿下相对增益系数 λ_{11} 与 VSG 系统有功输出 P_{vsg} 的关系如图 7 所示。

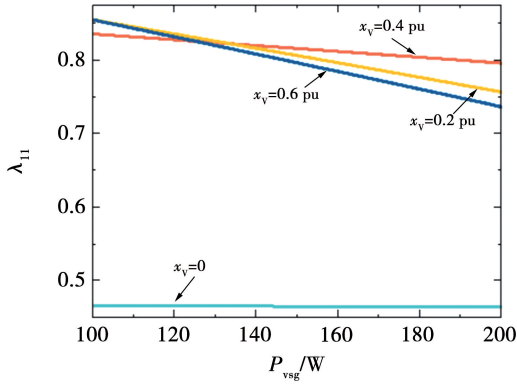


图 7 λ_{11} 随 P_{vsg} 的变化关系曲线

Fig. 7 Relationship between λ_{11} and P_{vsg}

由图 7 可以看出, 所选取 VI 补偿量的大小对 VSG 系统耦合程度影响很大, 但即使相对解耦效果最好的情况 ($x_v = 0.4$ pu), 其相对增益系数 λ_{11} 也仅为 0.8 左右, 并不能实现完全解耦。且之后随 VI 补偿量的增加, 只会使相对增益系数下降, 甚至因电压回路的容量限制, 还可能导致系统的稳定性问题。由此得出传统 VI 解耦法的第 1 个缺陷, 即难以实现完全程度的解耦, 须对其进一步加以改进。

值得注意的是, 随着有功功率增加, 相对增益系数呈下降趋势。就本研究而言, 仅存在功角和阻抗角两者会影响相对增益系数, 且其中的功角随有功功率增加而增加, 这一点在下述公式和图中还将继续分析。因此可认为相对增益系数的下降是有功功率通过影响功角间接造成的。

基于 VI 补偿的 VSG 系统幅相图如图 8 所示。

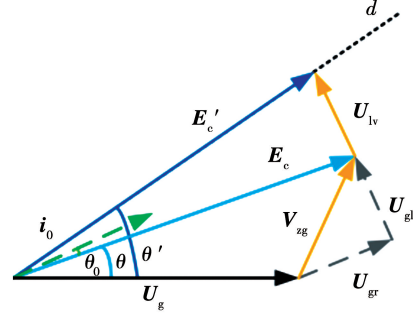


图 8 基于 VI 解耦法的 VSG 系统幅相图

Fig. 8 Amplitude-phase diagram of VSG system based on VI decoupling method

根据图 8, 利用正弦定理可列写电压与相角正弦值的关系式为

$$\frac{E_c}{\sin(180^\circ - \theta - \theta_{zg} + \theta_0)} = \frac{U_g}{\sin(\theta_{zg} - \theta_0)}. \quad (10)$$

将式(10)代入式(4), 可得功角 θ 与有功输出 P_{vsg} 和线路阻抗 Z_g 的关系, 如图 9 所示。

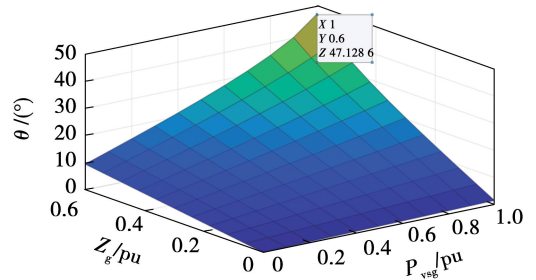


图 9 θ 随 P_{vsg} 与 Z_g 变化图

Fig. 9 Illustration of θ along with various P_{vsg} and Z_g

由图 9 可以看出, 随有功功率增加, 在特定线路阻抗条件下, 功角甚至增至 40° 以上, 而此时利用相对增益法计算的耦合系数将降至 0.3 以下。此时可认为解耦策略已失效, 有必要在 VI 解耦法基础上考虑功角变化对功率耦合的影响。

由图 4 可以看出, VSG 系统是一个多输入多输出且带有耦合现象的控制系统^[20]。为验证非小功角情况下功角对系统稳定性的影响, 结合 VSG 系统一般运行方式, 以有功控制回路为例, 对图 4 进行重构, 重构后的单输入单输出控制回路如图 10 所示。并利用 Nyquist 稳定性判据判断当功角发生变化时的系统稳定性问题。

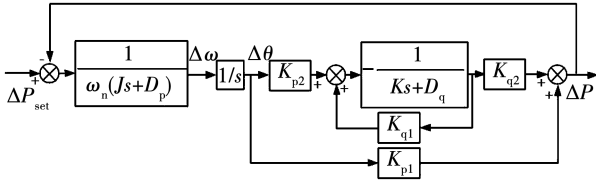


图 10 重构后有功控制回路

Fig. 10 Reconfigured active power control circuit

为简化传递函数计算,设:

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= \frac{1}{\omega_n (Js + D_p)s}; \\ G_2 &= -\frac{1}{Ks + D_q} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

则可根据图 10 计算重构后有功控制回路传递函数为

$$G_{APC}(s) = \frac{G_1 K_{p1} + G_1 \frac{G_2 K_{p2} K_{q2}}{1 - G_2 K_{q1}}}{1 + G_1 K_{p1} + G_1 \frac{G_2 K_{p2} K_{q2}}{1 - G_2 K_{q1}}} = \frac{G_1 K_{p1} - G_1 G_2 K_{p1} K_{q1} + G_1 G_2 K_{p2} K_{q2}}{1 + G_1 K_{p1} - G_2 K_{q1} - G_1 G_2 K_{p1} K_{q1} + G_1 G_2 K_{p2} K_{q2}} \quad (12)$$

据式(12)可得到有功控制的动态响应特性。由于 VI 解耦方法已被证明可有效应对 R/X 问题,对功角问题却无能为力^[20-21],因此默认 VI 解耦方法可解决好 R/X 问题,仅针对功角导致的系统稳定性问题展开分析。

选取功角依次为 18° 、 22° 直至 38° 的运行情况,绘制其 Bode 图如图 11 所示。根据 Nyquist 判据,当幅频增益曲线最大值小于 0 时,系统即可保持稳定运行。

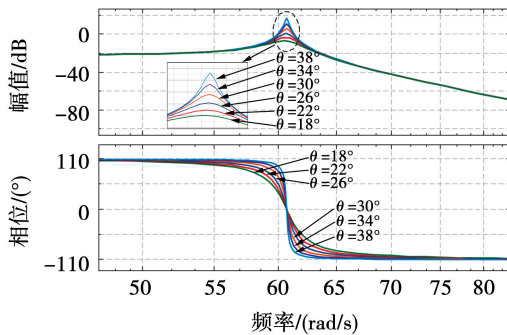


图 11 不同功角时的 Bode 图

Fig. 11 Bode diagram with different power angles

由图 11 可以看出,随着功角逐渐增大,系统稳

定裕度不断降低,当功角为 26° 左右时已突破临界状态,且当功角继续增大时幅频增益最大值将远超 0。此时,因功率耦合将导致部分功率在有功回路和无功回路之间作用,系统处于不稳定状态,即过大的功角严重降低 VSG 系统运行稳定性,这正是传统 VI 解耦法的第 2 个缺陷。

综上所述,VI 解耦法不失为一种可行的解耦方案,但仍存在解耦效果有限且难以针对性的解决功角问题。经前述分析可知,在 VSG 系统不能满足小功角假设情况下,基于 VI 补偿方法的解耦程度将显著降低,并导致稳定性问题。因此,后续将就 VI 解耦法的缺陷进行针对性改进。

3 自适应电流补偿功率解耦

借鉴利用修改功率参考值以减小 R/X 对输出功率影响的思想,在原有 VI 控制基础上叠加功率修正控制,且为计算与测量方便,利用 dq 轴电流来表示功率修正值,以消除有功和无功功率之间的耦合影响。

3.1 功角影响消除

根据式(5)的对应关系可知,有功功率对无功功率的影响通过功角构成的环路完成^[12]。则根据式(4)无功计算,可得发生功角扰动时 VSG 系统无功功率变化为

$$\begin{aligned} \Delta Q_c &= Q_0 - Q_{\Delta\theta} = \\ &= \frac{E_c^2}{Z_g} \sin\theta_{zg} - \frac{E_c U_g}{Z_g} \sin(\theta_{zg} + \theta) - \\ &= \left[\frac{E_c^2}{Z_g} \sin\theta_{zg} - \frac{E_c U_g}{Z_g} \sin(\theta_{zg} + \theta + \Delta\theta) \right] = \\ &= \frac{E_c U_g}{Z_g} [\sin(\theta_{zg} + \theta + \Delta\theta) - \sin(\theta_{zg} + \theta)]. \end{aligned} \quad (13)$$

VI 解耦方法对于线路阻抗比引起的功率耦合是卓有成效的,可很好地解决阻抗角不处于 90° 附近的问题。因此,基于这一前提,当忽略阻抗比影响时,则式(4)中功率计算式可简化为:

$$\left. \begin{aligned} P_{vsg} &= \frac{E_c U_g}{Z_g} \sin\theta; \\ Q_{vsg} &= \frac{E_c^2}{Z_g} - \frac{E_c U_g}{Z_g} \cos\theta. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式(13)又可继续简写为

$$\Delta Q_c = -\frac{E_c U_g}{Z_g} \sin\theta \Delta\theta = -P_{vsg} \Delta\theta. \quad (15)$$

根据图8基于VI解耦法的VSG系统幅相图,可写出dq坐标系下电流的小信号表达式为

$$E'_c \cos \theta_0 \Delta \theta = r_g \Delta i_q + (x_g + x_v) \Delta i_d \quad (16)$$

对式(16)进一步变换,可得利用dq轴电流表示的功角变化量为

$$\Delta \theta = \frac{r_g \Delta i_q + X \Delta i_d}{E'_c \cos \theta_0} \quad (17)$$

其中为表述方便,记 $X = x_g + x_v$ 。

有功功率又可表示为

$$P_{\text{vsg}} = v_d i_d + v_q i_q \quad (18)$$

因此,结合式(15)、式(17)和式(18),可得需要补偿的无功功率为

$$\Delta Q_c = -P_{\text{vsg}} \Delta \theta = a_1 \Delta i_d + a_2 \Delta i_q \quad (19)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= -\frac{(v_d i_d + v_q i_q) X}{E'_c \cos \theta_0} \\ a_2 &= -\frac{(v_d i_d + v_q i_q) r_g}{E'_c \cos \theta_0} \end{aligned} \right\}$$

3.2 电压影响消除

传统基于VI补偿的功率解耦控制对于输出电压变化敏感,易受其影响进而使得输出功率发生波动。此时,电压变化有2方面原因:一是无功参考值变化引起,二是电网电压波动引起。考虑到VSG系统实际运行情况,前者需要通过调节解耦控制的响应速度改善,后者则可通过对功率控制回路进行结构优化,以消除电压对于输出功率的影响。

结合式(4)和式(14),可得发生电压扰动时VSG系统有功功率变化为

$$\begin{aligned} \Delta P_c &= P_0 - P_{\Delta E} = \\ &= -\frac{E_c U_g}{Z_g} \cos(\theta_{zg} + \theta) + \\ &= \frac{(E_c + \Delta E) U_g}{Z_g} \cos(\theta_{zg} + \theta) = \\ &= \frac{U_g}{Z_g} \sin \theta \Delta E = \frac{P_{\text{vsg}}}{E} \Delta E \end{aligned} \quad (20)$$

因式(20)采用电压幅值作为小信号变量,需增加一个采集量,但可通过电压电流关系进行转化。

同理,根据图8的幅相图,可写出dq坐标系下电流的小信号表达式为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta E + E'_c \sin \theta_0 \Delta \theta &= r_g \Delta i_d - X \Delta i_q \\ E'_c \cos \theta_0 \Delta \theta &= r_g \Delta i_q + X \Delta i_d \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

对式(21)进一步变换,可得基于电压幅值变化量的小信号表达式为

$$\Delta E = \frac{(\cos \theta_0 r_g - \sin \theta_0 X) \Delta i_d - (\cos \theta_0 X - \sin \theta_0 r_g) \Delta i_q}{\cos \theta_0} \quad (22)$$

因式(21)中包含 ΔE , 则式(22)无法呈现如式(17)的简洁形式,但对最终计算结果并不影响。

因此,结合式(18)、式(20)和式(22),可得需要补偿的有功功率为

$$\Delta P_c = \frac{P_{\text{vsg}}}{E} \Delta E = b_1 \Delta i_q + b_2 \Delta i_d \quad (23)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= \frac{(v_d i_d + v_q i_q) (\cos \theta_0 r_g - \sin \theta_0 X)}{E \cos \theta_0} \\ b_2 &= -\frac{(v_d i_d + v_q i_q) (\cos \theta_0 X - \sin \theta_0 r_g)}{E \cos \theta_0} \end{aligned} \right\}$$

结合式(19)和式(23),可得基于ACC的解耦控制策略框图,如图12所示。相比于传统VI控制策略,利用dq轴电流对VSG系统功率控制回路进行改进。因电流补偿量的计算基于功率动态模型,使得此方法能够兼顾消除动态过程中功率间的耦合效应,且具备良好的动态解耦能力。

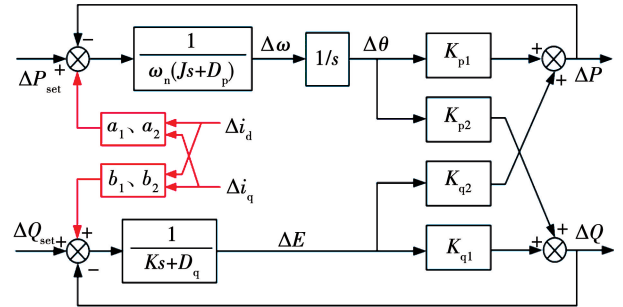


图12 VSG增强解耦的小信号控制框图

Fig. 12 Small signal control block diagram of VSG enhanced decoupling

为分析改进后系统的稳定性,对改进后的VSG系统功率回路进行重构,重构后的有功控制回路如图13所示。

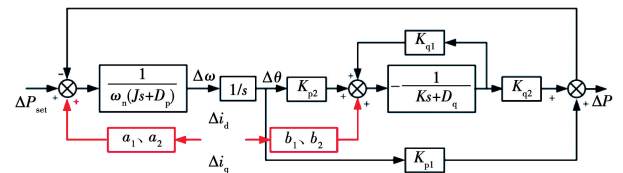


图13 改进后的有功控制回路重构

Fig. 13 Reconfiguration of the improved active power control circuit

根据图 13,有功变化量 ΔP 可表示为

$$\Delta P = G_{APC}(s) \Delta P_{set} + G_{APC}(s) (a_1 \Delta i_d + a_2 \Delta i_q) + G'_{APC}(s) (b_1 \Delta i_d + b_2 \Delta i_q) \quad (24)$$

其中

$$G'_{APC}(s) = \frac{G_2 K_{q2}}{1 - G_2 K_{q1}} + \frac{G_1 G_2 K_{p1} K_{q2}}{1 - G_2 K_{q1}}$$

此时可通过建立 VSG 系统状态矩阵,计算得到传递函数。也可利用有功功率变化量与电流变化量间的关系简化系统输入量,得到其传递函数。

通过有功功率与电流之间的变化关系,综合考虑有功和无功功率的变化情况,求解如下功率方程即可获得电流变化量:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= v_d \Delta i_d + v_q \Delta i_q; \\ \Delta Q &= v_q \Delta i_d + v_d \Delta i_q \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

经上述简化后,即可建立输出功率 ΔP 与 dq 轴电流变化量间的量化关系。

选取功角依次为 10° 、 20° 、 30° 直至 40° 的运行情况,绘制其 Bode 图如图 14 所示。

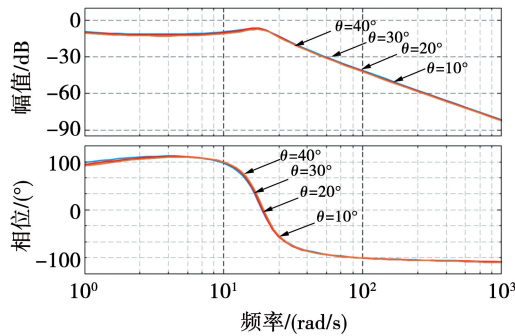


图 14 改进后系统 Bode 图

Fig. 14 Bode diagram of the improved system

由图 14 可以看出,基于 ACC 解耦策略改进后系统具有较大的稳定裕度,且功角变化对其影响很小,可认为对系统稳定性有积极作用。

为更全面验证系统动态性能,同时绘制随转动惯量变化的根轨迹,如图 15 所示。

据图 15 可知,在相同的转动惯量下,相比 VI 解耦策略,采用 ACC 解耦策略的特征根在复平面内的位置更靠近实轴,且与虚轴的距离几乎不变。特征根的分布及随转动惯量的变化趋势表明,改进后 VSG 的性能更符合期望的动态性能,即 ACC 解耦策略相比于 VI 解耦策略,具有更好的动态响应能力。

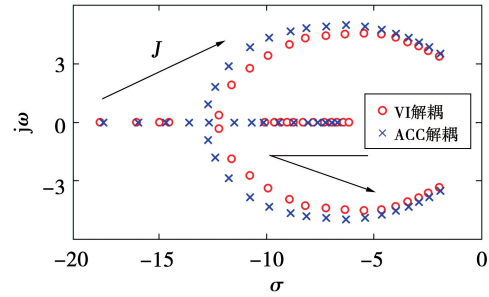


图 15 改进后的根轨迹图

Fig. 15 Root trajectories of the improved system

4 仿真实验

为验证所提控制策略的有效性与其可行性,基于 MATLAB/Simulink 平台搭建仿真模型,主电路和控制参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
额定功率/kW	3	额定电压/V	380
直流电压/V	800	直流电容/mF	1
滤波寄生电阻/ Ω	0.03	滤波电感/mH	0.8
滤波电容/ μ F	10	线路电感/mH	3.6
电网频率/Hz	50	开关频率/kHz	10
无功下垂系数	348	有功下垂系数	1
无功阻尼系数	126	有功阻尼系数	50
虚拟惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.01	标称角频率/ (rad/s)	100π

4.1 解耦策略改进前后功率输出对比

当线路电感为 2 mH 时,改变不同的线路电阻,设定有功功率参考值在 0.5 s 时产生 150 W 的阶跃,无功功率参考值始终保持为 0。非理想情况不同线路阻抗下的功率输出曲线如图 16 所示。

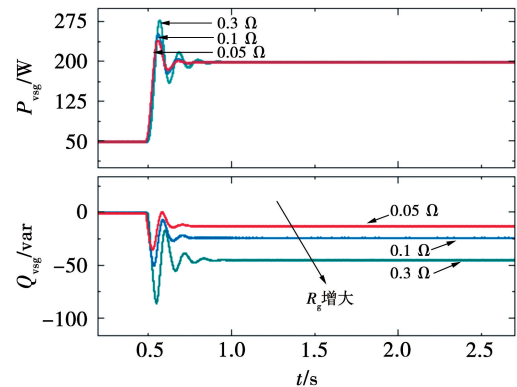


图 16 不同线路阻抗下的功率输出曲线

Fig. 16 Power output curves under different line impedances

由图 16 可以看出,因功率耦合的存在,有功功率阶跃时,无功功率会受其影响,在短时间尺度上产生与有功功率类似的波动;在长时间尺度上,将产生稳定的无功功率偏差,且这种波动与偏差随线路电阻的增加而不断加大^[22]。

仿真结果与前述分析一致,随着线路阻性成分的增加,稳态误差逐渐增大,恢复稳定的时间不断延长,且功率波动也随之加大。这说明随着线路电阻增大,耦合程度不断加深,VSG 系统稳定性不断降低。

针对 VSG 系统的稳定问题,绘制 R_g 为 1.22Ω 时的功率输出曲线和电压电流曲线,如图 17 和图 18 所示。经验证,此种情况的线路电阻处于临界状态,继续增大则系统将失稳。由图 17 可以看出,此时输出功率超调和恢复时间均超出可接受限度。而图 18 中输出电流产生了极大程度的波动,波动量甚至高达 300 A ,这也从侧面证明 VI 解耦的局限性,以及本研究采用输出电流作为补偿量的可行性。

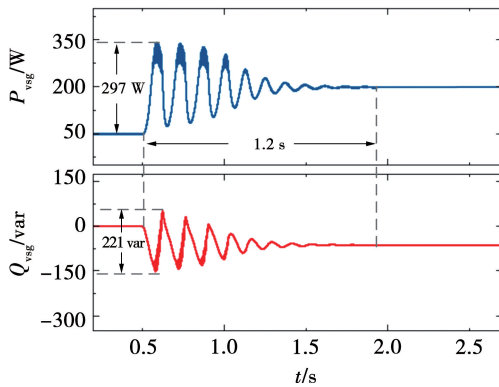


图 17 临界状态下的 VSG 功率输出曲线

Fig. 17 Power output curves of VSG at critical state

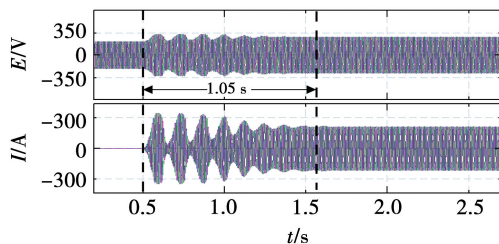


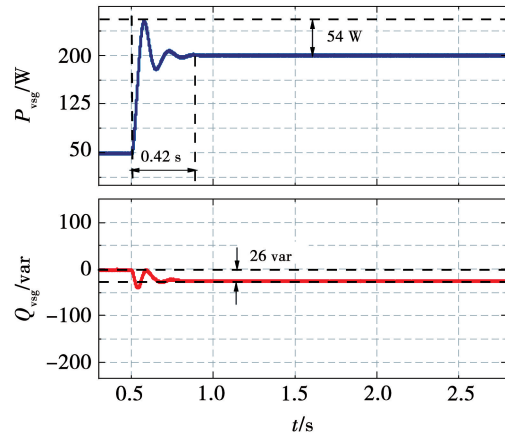
图 18 临界状态下的 VSG 输出电压与电流曲线

Fig. 18 Output voltage and current curves of VSG at critical state

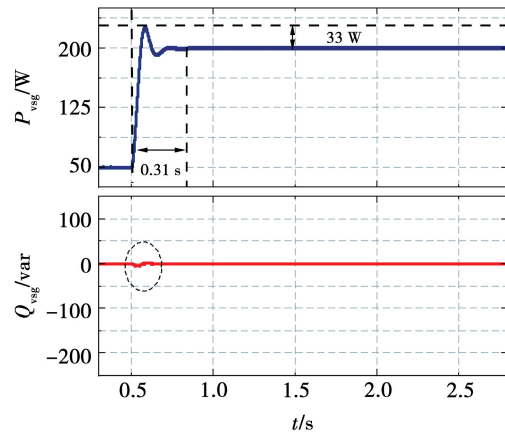
输出电流的变化也可显著体现有功功率参考值变化时无功功率的耦合情况,这也正如文献[11]中

的分析:功率解耦不彻底是因为电压补偿量不足所致。

为进一步验证所提电流补偿策略的有效性,同样设定 R_g 为 0.75Ω 、 X_g 为 2 mH 和 $x_v = 0.4 \text{ pu}$ 不变,绘制解耦策略改进前后的 VSG 功率输出曲线,如图 19 所示。



(a) 基于VI解耦的功率输出曲线



(b) 基于ACC解耦的功率输出曲线

图 19 解耦策略改进前后的 VSG 功率输出曲线

Fig. 19 Power output curves of VSG before and after improving the decoupling strategy

由图 19(a)可以看出,当有功功率阶跃 150 W 时,因线路阻抗比原因,即使采用 VI 解耦控制策略,但从其功率输出曲线可知,经一段时间的波动后,无功功率仍未能恢复到原来状态,存在一定的稳态功率偏差。对比图 19(b),改进后采用 ACC 解耦策略,VSG 无功功率输出曲线虽在有功功率阶跃 150 W 时也出现波动,但相比于改进前采用 VI 解耦策略的无功波动,存在量级上的差距,且短时间内即可恢复稳定,并无稳态偏差,可认为基本消除功率耦合。

因采用电流补偿控制策略,需探究改进前后VSG电流输出情况。同样绘制解耦策略改进前后VSG系统d_q轴电流输出曲线,如图20所示。

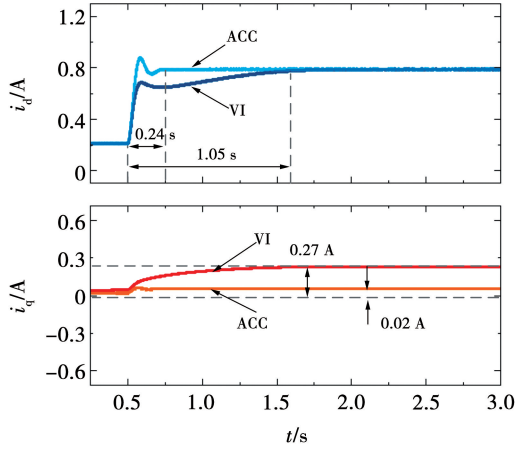


图20 解耦策略改进前后的VSG电流输出曲线

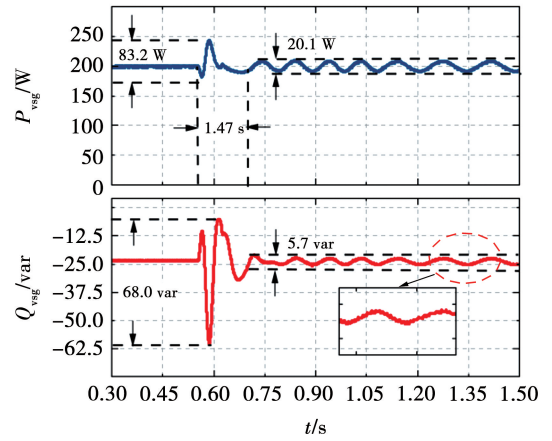
Fig. 20 Current output curves of VSG before and after improving the decoupling strategy

由图20可以看出,因有功-功角($P-\theta$)环路存在,d轴电流与有功功率输出变化基本一致,q轴电流可清晰显示无功功率变化情况。改进前q轴电流同样存在偏差,证明基于VI解耦策略不能很好地抑制q轴电流波动。改进后电流输出存在2方面优势:一是恢复稳定时间较短,0.2 s左右即可稳定在下一个运行状态;二是电流波动小。证明改进后的ACC解耦策略可更好地抑制电流波动,且基本无稳态偏差,实现更大程度的解耦。这与前述理论分析一致,从侧面证明所提策略的有效性。

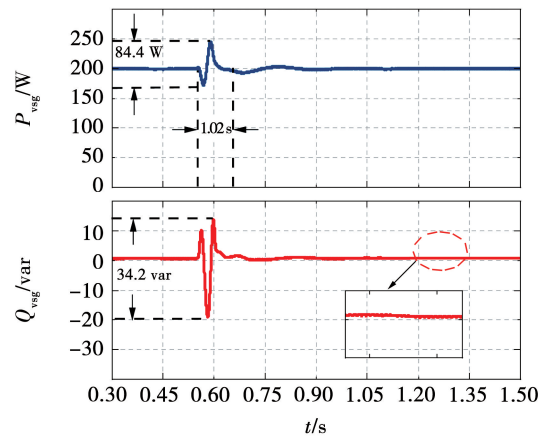
4.2 抗电压扰动能力验证

为验证ACC解耦策略面对电网电压小扰动时的稳定运行能力,在VSG系统输出端施加幅值为30 V的电压扰动,其他线路参数其他线路参数 R_g 为 0.75Ω , X_g 为 2 mH , x_v 为 0.4 pu ,绘制VSG功率输出曲线,如图21所示。

由图21(a)可以看出,基于VI解耦策略,对系统电压波动的抑制能力较弱,易受其电压波动影响。且当并网系统出现故障时,由于VSG系统不能准确跟踪功率参考值,很有可能导致故障扩大。而图21(b)改进后的ACC解耦策略,因电压小扰动补偿环节引入,抗干扰能力较强,无论是有功还是无功功率均未出现较大偏差,不影响系统正常运行,具有更好的支撑能力。证明所提改进控制策略的稳定性和抗电压扰动能力均得到优化。



(a) 基于VI解耦的功率输出波形



(b) 基于ACC解耦的功率输出波形

图21 电压扰动对VSG功率输出影响

Fig. 21 Influence of voltage fluctuation on VSG power output

同时,为全面体现ACC解耦策略抗干扰能力的优越性,绘制不同运行工况下VSG系统功率输出情况,如图22所示。与上图设置的条件相同,均为在VSG系统输出端施加幅值为30 V的电压扰动,并利用误差棒表示无功功率输出波动程度。运行工况参数如表2所示。

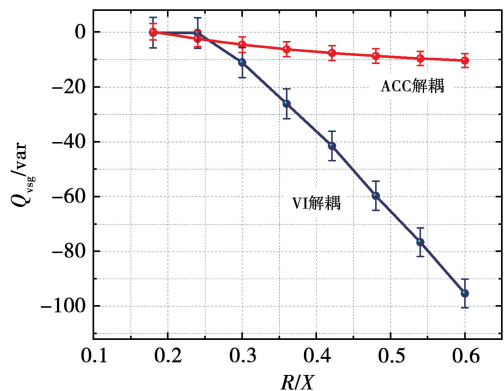


图22 R/X 对无功功率输出影响

Fig. 22 Influence of R/X on reactive power output

表2 运行工况参数

Table 2 Operating condition parameter

工况	R_g/Ω	L_g/mH	R/X
1	0.663	3.68	0.180
2	0.809	3.37	0.240
3	0.921	3.07	0.300
4	1.005	2.79	0.360
5	1.069	2.54	0.421
6	1.116	2.32	0.481
7	1.152	2.13	0.541
8	1.184	1.97	0.601

随着线路阻抗比的增加,理论上系统功率耦合程度也在不断提高。由图22可知,基于VI解耦策略,解耦能力显著受线路阻抗比影响,在 R/X 较低时,无功功率偏差较小,但超过0.5后,无功功率偏差高于70 var。此时可认为基于VI解耦策略已失效。而所提ACC解耦策略在 R/X 升高的情况下,无功功率偏差虽然也出现一定程度增大,但仍处于工程实际可接受的范围内。

观察图22中可知,ACC解耦策略误差棒长度远小于VI解耦策略,证明当系统电压波动时,所提ACC解耦策略在保持功率输出稳定方面存在显著优势,且从曲线下降趋势看,ACC策略对线路 R/X 具有更好的适应能力。同时,基于表2所设置的多种工况,2条曲线的误差棒长度几乎不变,仅出现不超过原值5%的小范围上升,功率偏差的大小几乎不受 R/X 影响。

4.3 控制策略切换时功率输出

为更准确验证ACC解耦策略运行稳定性,设置无功功率参考值始终为0,初始时刻有功功率参考值为0,于0.5 s时阶跃150 W,2.0 s时阶跃变化为250 W。绘制切换控制方式下VSG有功与无功输出波形,如图23和图24所示,VI解耦策略控制参数保持不变。

由图23可以看出,因 R/X 较高,在0.5~1 s时,由于未采用解耦控制策略,此时系统已失稳,产生较大的波动,难以实现可靠的并网运行;1.0~1.5 s,采用VI解耦策略,波动程度逐渐减小并最终趋于稳定,这也与前述分析一致,但仍存在解耦不彻底和恢复稳定时间较长的缺陷。

根据式(10)可知,有功功率与功角正相关,因此有功功率的2次阶跃变化可看作模拟不同功角时

的VSG运行情况。

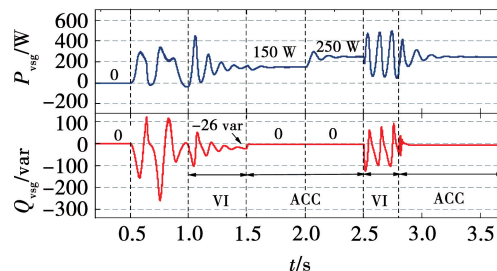


图23 切换控制方式下VSG有功与无功输出波形

Fig. 23 VSG active and reactive power output waveforms under switching control modes

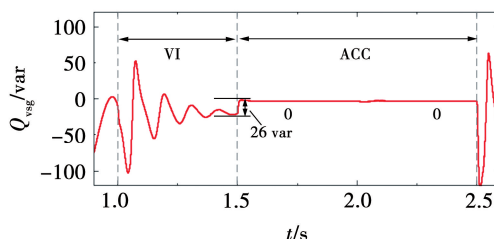


图24 VI切换至ACC时间段无功输出放大图像

Fig. 24 Enlarged graphics of reactive power output under VI switches to ACC time period

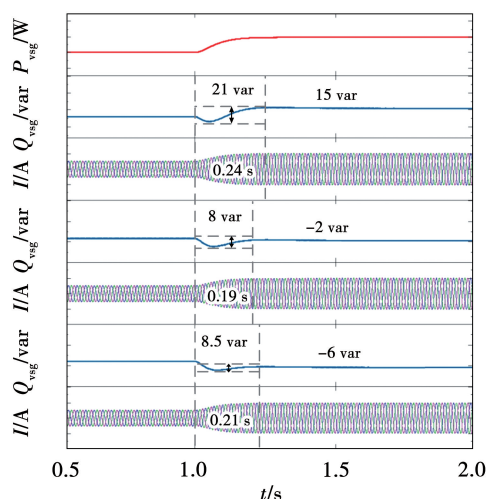
图24所示为由VI控制切换至ACC控制时间段的无功输出放大图像。可以看出,1.5 s时切换ACC解耦策略后,实现无功输出稳态偏差消除。VSG系统有功功率参考值于2.0 s时阶跃变化被用于模拟非小功角时运行情况。相比有功功率,无功输出波动变化小于2%,可认为此时功角变化几乎不影响VSG系统无功输出。2.5 s时又切换为VI解耦策略,系统发生严重波动,运行不稳定,系统已失稳。2.8 s时再次切换回ACC解耦策略,系统波动逐渐平复,并恢复至稳定状态。2次切换,证明所提改进后的解耦控制策略,不仅具有更好的解耦效果,更强的功角稳定裕度,还因引入了电流补偿环节,具有更好的扰动平复效果。

4.4 与其他改进VI解耦策略横向对比

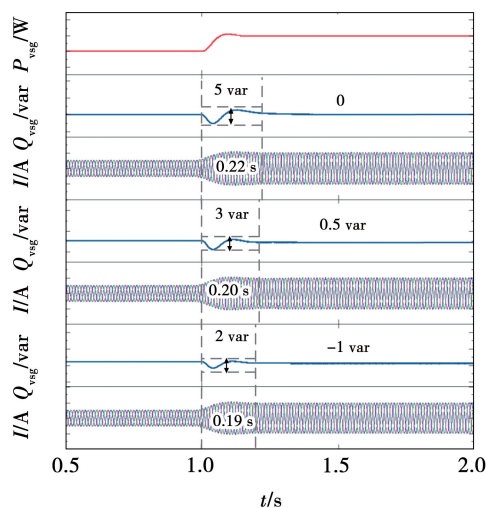
文献[10]提出的QVPDC解耦策略因其控制简单、计算量小和解耦有效等特点,被认为是一种综合性能优异的解耦策略,得到功率解耦领域内诸多学者广泛认同。

为更直观展示所提ACC控制策略解耦能力的有效性,选取工况2、3和4下的无功和电流输出,与QVPDC改进模型解耦效果进行横向对比,如图25

所示。考虑其为一种定参数补偿方法,因此基于上述3种工况线路参数平均值对QVPDC模型参数整定。



(a) 基于QVPDC解耦的VSG输出



(b) 基于ACC解耦的VSG输出

图25 不同解耦策略效果横向对比

Fig.25 Horizontal comparison of effect between different decoupling strategies

据图25,横向对比2种解耦策略,基于ACC控制解耦策略在无功率波动值和稳态偏差2种参数角度,显著优于基于QVPDC解耦策略,在响应时间角度2种解耦策略无较大差距。但纵向对比3种不同线路参数时,2种解耦策略在上述参数下存在显著差异:基于ACC解耦策略的VSG系统功率偏差较小,且在面对3种不同工况时均能保证具有稳定一致的解耦效果;反观基于QVPDC解耦策略,虽也实现较大程度的功率解耦,但仅在工况3情况下解耦较好,其余2种工况解耦效果不够理想,且无功功

率的波动值也出现较大范围变化。

当选取相同阻尼参数时,相较于QVPDC解耦策略,ACC解耦策略响应速度更快,且可在较短时间内平复无功功率的波动和偏差。但鉴于此,使得ACC解耦策略出现相对较大的超调,虽在本文选取的工况下几乎不影响VSG系统稳定运行,却可能是制约ACC解耦策略实现工程实际应用的潜在弱点。总之,在解耦策略应用场景的适用性和响应速度等层面,本文所提ACC解耦策略更具优势。

5 结论

本文针对VSG功率耦合机理进行详细探究与分析,利用小信号方法,找到系统功率耦合成因,并在VI解耦控制基础上,提出基于自适应电流补偿的VSG增强功率解耦控制策略,最后利用仿真验证了所提控制策略具有更好的解耦效果,更强的功角稳定性和更好的扰动平复能力。具体结论如下:

1)通过理论分析VSG输出功率模型和简化条件,找到其功率耦合的成因是功角 θ 和线路阻抗比 R/X ,并量化分析了VI解耦策略的2个缺陷:解耦程度低和稳定性不足。

2)分别针对小功角和电压扰动,计算出发生扰动时VSG系统所需功率补偿量的大小,并建立dq轴电流与补偿量间的转化联系,提出基于自适应电流补偿的VSG增强功率解耦控制策略。

3)仿真结果表明,所提ACC解耦策略能有效消除因有功功率变化导致的无功功率波动,且在功角和电压扰动情况下,系统仍能保持稳定运行,稳定恢复能力也得到显著提升。

参考文献:

- [1] 张赞宁,蔡明磊,向芳洲,等. 基于辅助惯性功率调节的虚拟同步发电机模糊控制策略[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(7): 98.
ZHANG Yunning, CAI Minglei, XIANG Fangzhou, et al. Virtual synchronous generator fuzzy control strategy based on auxiliary power regulation[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(7): 98.
- [2] 郭建伟,樊友平. 基于改进粒子群算法的VSG参数自适应控制策略[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(6): 72.
GUO Jianyi, FAN Youping. Adaptive VSG parameter control strategy based on improved particle swarm optimization[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(6): 72.
- [3] 郭贤珊,周杨,梅念,等. 张北柔直电网的构建与特性分析[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3698.

- GUO Xianshan, ZHOU Yang, MEI Nian, et al. Construction and characteristic analysis of Zhangbei flexible DC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3698.
- [4] 王鑫达, 张澳, 李少林, 等. 电压源型双馈风电机组低压穿越控制策略[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(3): 21.
- WANG Xinda, ZHANG Ao, LI Shaolin, et al. Low voltage ride through control strategy of VSG controlled doubly fed wind turbine[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(3): 21.
- [5] YANG D S, WANG X F, LIU F C, et al. Adaptive reactive power control of PV power plants for improved power transfer capability under ultra-weak grid conditions[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1269.
- [6] SHAO T C, JIA P Y, ZHENG P Q, et al. A robust power regulation controller to enhance dynamic performance of voltage source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 12407.
- [7] 于晶荣, 王益硕, 孙文, 等. 考虑频率响应的虚拟同步发电机暂态同步策略[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(12): 127.
- YU Jingrong, WANG Yishuo, SUN Wen, et al. Transient synchronization strategy of virtual synchronous generator considering frequency response[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(12): 127.
- [8] 程巍, 茆美琴, 汪海军, 等. 新型单相光伏逆变器电流连续控制集模型预测功率解耦控制[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9655.
- CHENG Wei, MAO Meiqin, WANG Haijun, et al. Power decoupling control for a new single-phase photovoltaic inverter based on current continuous control set model prediction[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9655.
- [9] JOAN R, ALVARO L, FRED A B, et al. Control of power converters in AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 27(11): 4734.
- [10] WEN T L, ZHU D H, ZOU X D, et al. Power coupling mechanism analysis and improved decoupling control for virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 3028.
- [11] 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.
- [12] LI M X, WANG W, XU N Y, 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), September 18 - 22, 2016, Milwaukee, WI, USA. 2016: 1 - 7.
- [13] 杨东升, 阮新波, 吴恒. 提高 LCL 型并网逆变器对弱电网适应能力虚拟阻抗方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2327.
- YANG Dongsheng, RUAN Xinbo, WU Heng. A virtual impedance method to improve the performance of LCL-type grid-connected inverters under weak grid conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2327.
- [14] LONG B, ZHU S H, RODRIGUEZ J, et al. Enhancement of power decoupling for virtual synchronous generator: a virtual inductor and virtual capacitor approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(7): 6830.
- [15] 张林, 张海波, 蒋维勇, 等. 基于自适应动态虚拟同步阻抗的虚拟同步机功率解耦策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 6010.
- ZHANG Lin, ZHANG Haibo, JIANG Weiyong, et al. Power decoupling strategy for virtual synchronous generator based on adaptive dynamic virtual synchronous impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 6010.
- [16] 朱军, 袁亚飞, 刘鹏辉, 等. 基于功率微分的双 VSG 有功功率振荡抑制策略[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(1): 177.
- ZHU Jun, YUAN Yafei, LIU Penghui, et al. Active power oscillation suppression strategy for dual-VSG grid based on power differential term[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(1): 177.
- [17] 潘子迅, 杨晓峰, 赵锐, 等. 不平衡电网下虚拟同步机的多模式协调策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(16): 4274.
- PAN Zixun, YANG Xiaofeng, ZHAO Rui, et al. Multi-mode coordination control of virtual synchronous generator under unbalanced power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(16): 4274.
- [18] WEN T L, ZOU X D, ZHU D H, et al. Comprehensive perspective on virtual inductor for improved power decoupling of virtual synchronous generator control[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 14(4): 485.
- [19] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 336.
- ZHONG Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 336.
- [20] 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.
- 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.
- [21] 张祥宇, 罗程远, 付媛, 等. 风储锁相弹性耦合下的系统次同步振荡抑制技术[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(16): 6507.
- ZHANG Xiangyu, LUO Chengyuan, FU Yuan, et al. Sub-synchronous oscillation suppression technology of power system under wind-storage phase-locked elastic coupling[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(16): 6507.
- [22] 张明锐, 杜志超, 王少波. 微网中下垂控制策略及参数选择研究[J]. 电工技术学报, 2019, 29(2): 136.
- ZHANG Mingrui, DU Zhichao, WANG Shaobo. Research on droop control strategy and parameters selection of microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 29(2): 136.

(编辑:刘琳琳)