

GFM下垂与虚拟阻抗耦合的小信号稳定性解析及解耦控制

周文清

江苏堂宇建设工程有限公司, 中国·江苏 徐州 221200

摘要: 本文针对 GFM 下垂控制中虚拟阻抗与外网阻抗耦合引起的功率耦合和稳定性问题, 建立了包含下垂控制、功率滤波、虚拟阻抗和外网阻抗的统一小信号模型, 分析了总等效阻抗比 R_{Σ}/X_{Σ} 对系统稳定裕度的影响, 并提出了静态解耦补偿与虚拟阻抗整形相结合的控制方法。研究表明, 所提方法能够显著抑制功率串扰, 提升系统阻尼比, 同时改善暂态过程的动态响应速度与稳定裕度。

关键词: 构网型变流器; 下垂控制; 虚拟阻抗; 小信号稳定性; 功率解耦

Small-Signal Stability Analysis and Decoupling Control of GFM Droop Coupled with Virtual Impedance

Zhou Wenqing

Jiangsu Tangyu Construction Engineering Co., Ltd., China Jiangsu Xuzhou 221200

Abstract: Aiming at the power coupling and stability issues caused by the coupling between virtual impedance and grid impedance in GFM droop control, this paper establishes a unified small-signal model incorporating droop control, power filtering, virtual impedance and external grid impedance. The influence of the total equivalent impedance ratio R_{Σ}/X_{Σ} on the system stability margin is analyzed, and a control strategy combining static decoupling compensation and virtual impedance shaping is proposed. The research results show that the proposed method can effectively suppress power crosstalk, improve the system damping ratio, and optimize the dynamic response speed and stability margin of transient processes.

Keywords: Grid-forming converter (GFM); Droop control; Virtual impedance; Small-signal stability; Power decoupling

0 引言

随着新能源占比不断提高, 具备自主支撑电压和频率能力的构网型变流器已成为低惯量电力系统稳定运行的重要技术基础, 相关研究也逐步由经验整定转向面向机理的建模与解析设计^[1-2]。针对下垂控制并网变流器, 已有研究从阻抗建模角度揭示了功率环节与外部网络之间的动态耦合关系, 并指出虚拟阻抗会显著影响并网系统稳定特性^[3]。在虚拟同步发电机场景下, 序阻抗分析进一步表明, 虚拟阻抗与并网阻抗共同决定系统的低频稳定边界和阻尼水平, 而同步频率谐振及频率耦合效应的存在也说明, 忽略交叉项的简化模型已难以准确刻画弱电网条件下的动态特性^[4-6]。在控制改进方面, 已有研究从虚拟阻抗整形和解耦控制角度讨论了参数优化问题, 指出等效阻抗角及补偿策略对系统阻尼和功率解耦能力具有重要影响^[7-8]。因此, 针对下垂系数、功率测量滤波、虚拟阻抗与外网阻抗比 R_{Σ}/X_{Σ} 共同作用下的小信号耦合机理及解析稳定边界, 有必要建立一套紧凑的统一分析与解耦设计框架, 为弱电

网下 GFM 变流器的参数整定与稳定控制提供直接的理论依据。

1 GFM 下垂与虚拟阻抗统一建模

为突出下垂参数、虚拟阻抗与外网阻抗对小信号稳定性的影响, 忽略快速内环和开关暂态, 将 GFM 等效为内部电势 $E \angle \delta$ 经总阻抗 Z_{Σ} 接入无限大母线 $V \angle 0$ 的电压源模型。设外网阻抗为 $Z_g=R_g+jX_g$, 虚拟阻抗为 $Z_v=R_v+jX_v$, 则总阻抗为

$$Z_{\Sigma}=Z_g+Z_v=R_{\Sigma}+jX_{\Sigma} \quad (1)$$

其中,

$$R_{\Sigma}=R_g+R_v, \quad X_{\Sigma}=X_g+X_v \quad (2)$$

在此基础上, GFM 输出有功功率和无功功率分别表示为公式 (3)、公式 (4)

$$P=\frac{R_{\Sigma}(E^2-EV\cos\delta)+X_{\Sigma}EV\sin\delta}{R_{\Sigma}^2+X_{\Sigma}^2} \quad (3)$$

$$Q=\frac{X_{\Sigma}(E^2-EV\cos\delta)-R_{\Sigma}EV\sin\delta}{R_{\Sigma}^2+X_{\Sigma}^2} \quad (4)$$

本文采用标准 P - f 与 Q - V 下垂控制, 并考虑功率测量

低通滤波环节,即

$$\omega = \omega_0 - m_p(P_f - P^*) \quad (5)$$

$$E = E_0 - m_q(Q_f - Q^*) \quad (6)$$

$$\tau_p \dot{P}_f = P - P_f, \quad \tau_q \dot{Q}_f = Q - Q_f \quad (7)$$

由公式(3)、公式(4)可知,当 $R_\Sigma \neq 0$ 时, P 与 Q 不再完全对应于相角和电压两个独立通道,而会受到总阻抗特性的共同影响,因此下垂控制与虚拟阻抗之间存在天然耦合关系。

为刻画这种耦合程度,在稳态工作点附近对公式(3)、公式(4)线性化,有

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{p\delta} & K_{pE} \\ K_{q\delta} & K_{qE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta E \end{bmatrix} \quad (8)$$

在稳态工作点附近,系统满足小扰动假设,即 $\delta \approx 0$ 、 $E_0 \approx V$ 条件下,可近似为

$$K_{p\delta} \approx \frac{E_0 V X_\Sigma}{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}, \quad K_{pE} \approx \frac{V R_\Sigma}{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2} \quad (9)$$

$$K_{q\delta} \approx -\frac{E_0 V R_\Sigma}{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}, \quad K_{qE} \approx \frac{V X_\Sigma}{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2} \quad (10)$$

可见交叉耦合项 K_{pE} 与 $K_{q\delta}$ 均与 R_Σ/X_Σ 直接相关。定义耦合指标

$$\mu = \left| \frac{K_{pE}}{K_{p\delta}} \right| + \left| \frac{K_{q\delta}}{K_{qE}} \right| \quad (11)$$

将公式(9)、公式(10)代入公式(11),可得

$$\mu \approx 2 \frac{R_\Sigma}{X_\Sigma} \quad (12)$$

公式(12)表明,随着 R_Σ/X_Σ 增大,系统有功、无功通道之间的交叉耦合将明显增强。图1给出 μ 随 R_Σ/X_Σ 的变化关系,可以看出两者近似呈线性正相关。

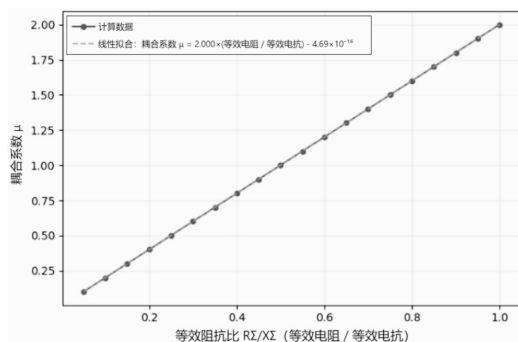


图1 耦合指标 μ 随 R_Σ/X_Σ 变化曲线

下垂与功率滤波环节取状态变量 $x = [\Delta \delta, \Delta P_f, \Delta Q_f]^T$, 得系统慢变量小信号模型为

$$\dot{x} = Ax \quad (13)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -m_p & 0 \\ K_{p\delta}/\tau_p & -1/\tau_p & -m_q K_{pE}/\tau_p \\ K_{q\delta}/\tau_q & 0 & -(1 + m_q K_{qE})/\tau_q \end{bmatrix} \quad (14)$$

公式(14)表明,下垂系数、滤波时间常数以及总等效阻抗参数共同决定系统特征值分布。

2 耦合机理与小信号稳定性解析

由建立的小信号模型可知,系统稳定性受有功一电

压、无功一相角交叉耦合项的影响。当线路呈纯感性时,有功受相角影响、无功受电压影响,系统近似解耦;而随着总等效阻抗中电阻成分增加,交叉耦合增强,下垂控制的两个通道将不再独立,系统阻尼和稳定裕度随之下降。在额定工作点附近,耦合指标 μ 表明,功率通道的动态串扰随总阻抗比 R_Σ/X_Σ 增大而近似线性增强,因此虚拟阻抗对系统稳定性的作用并不只是附加阻尼,而是通过改变总等效阻抗角进一步影响下垂控制通道之间的耦合关系。虚拟阻抗参数与下垂系数共同决定系统主导模态的位置。进一步对第二章状态方程求特征方程,可得系统为三阶小信号模型,其稳定性可由 Routh-Hurwitz 条件判定,即

$$s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3 = 0 \quad (15)$$

当满足

$$a_1 > 0, \quad a_2 > 0, \quad a_3 > 0, \quad a_1 a_2 > a_3 \quad (16)$$

时,系统保持小信号稳定。对于本文研究对象,前两项通常较易满足,稳定性约束主要体现为常数项和耦合项对主导极点的影响。当 m_p 或 m_q 取值过大时,系统动态增益提高,主导极点趋向虚轴右移;当 R_Σ/X_Σ 增大时,交叉耦合增强,同样会导致稳定区域收缩。由此可见,下垂参数的选取不能脱离网络阻抗条件单独进行,而应与虚拟阻抗参数协同设计。

3 解耦控制与虚拟阻抗整形设计

针对下垂控制中有功、无功通道的交叉耦合,本文采用静态解耦补偿与虚拟阻抗整形的联合设计思路。前者用于削弱功率串扰,后者用于调整总等效阻抗特性,从而提升系统阻尼与稳定裕度。

在额定工作点附近,有

$$\Delta P = K_{p\delta} \Delta \delta + K_{pE} \Delta E, \quad \Delta Q = K_{q\delta} \Delta \delta + K_{qE} \Delta E \quad (17)$$

因此,在传统下垂律基础上引入交叉补偿项,得到

$$\delta^* = -m_p(P_f - P^*) + k_{dq}(Q_f - Q^*) \quad (18)$$

$$E^* = E_0 - m_q(Q_f - Q^*) + k_{qp}(P_f - P^*) \quad (19)$$

其中, k_{dq} 和 k_{qp} 分别为无功到相角、有功到电压的补偿系数,可按工作点雅可比近似选取。该方法能够在一阶近似意义下减弱 P/Q 通道耦合。

同时,考虑到系统耦合强度主要受总阻抗比 R_Σ/X_Σ 影响,虚拟阻抗设计目标可写为

$$\frac{R_\Sigma}{X_\Sigma} = \frac{R_g + R_v}{X_g + X_v} \leq \varepsilon \quad (20)$$

虚拟阻抗设计应优先增强总阻抗感性特征,而不是单纯增加虚拟电阻。本文通过交叉补偿削弱功率串扰,并通过虚拟阻抗整形减小总阻抗比,最终实现解耦与稳定裕度

提升。

4 实验验证

4.1 稳定区域验证

对不同 R_S/X_S 条件下的系统进行 $m_p - m_q$ 参数扫描，得到稳定区域如图 2。当 R_S/X_S 较小时，系统稳定区域较大，下垂参数具有较好的可调范围；随着 R_S/X_S 增大，稳定边界逐渐收缩，说明总阻抗中电阻成分增加会增强功率通道耦合，并降低系统小信号稳定裕度。

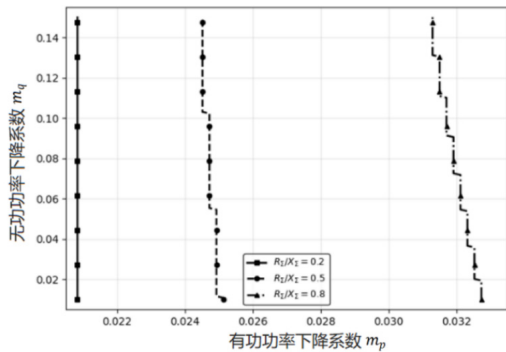


图2 不同 R_S/X_S 条件下的 $m_p - m_q$ 稳定区域

4.2 动态响应验证

$t=1s$ 时施加有功指令阶跃扰动，对比传统下垂控制与所提方法的动态响应，结果如图 3。传统控制下有功变化引起明显无功波动，存在较强 P/Q 串扰；采用所提方法，无功暂态偏移明显减小，功率振荡幅值降低，响应过程更加平稳。

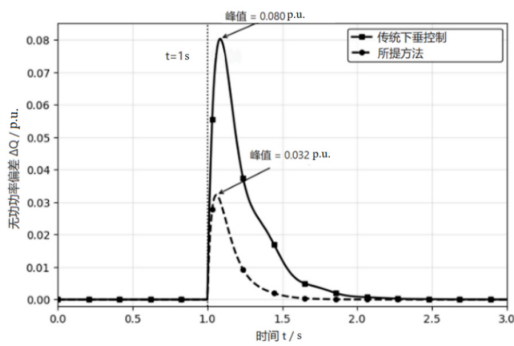


图3 解耦前后系统动态响应对比

为量化不同控制策略的动态性能，表 1 给出典型指标对比结果。所提方法在无功串扰峰值、调节时间和最大超调量等方面均优于传统下垂控制，验证了耦合抑制和稳定裕度提升的有效性。

表1 不同控制策略下的动态性能对比

控制方式	无功串扰峰值 (单位: p.u.)	调节时间 (单位: s)	最大超调量
传统下垂控制	0.083	0.42	12.6%
所提方法	0.031	0.24	4.8%

5 结语

本文围绕 GFM 下垂与虚拟阻抗耦合条件下的小信号稳定性问题，建立统一建模与解析框架，说明总等效阻抗比 R_S/X_S 是影响功率耦合和稳定裕度的关键因素。引入静态交叉补偿并配合虚拟阻抗整形，实现对有功、无功通道耦合的有效抑制。实验结果验证了理论分析的正确性，所提方法能够在扩大参数的稳定运行范围的同时改善系统动态响应，可为 GFM 下垂控制参数整定与虚拟阻抗设计提供参考。

参考文献:

[1] 詹长江, 吴恒, 王雄飞等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2339-2359.

[2] 黄萌, 舒思睿, 李锡林等. 面向同步稳定性的电力电子并网变流器分析与控制研究综述[J]. 电工技术学报, 2024, 39(19): 5978-5994.

[3] 陈杰, 闫震宇, 赵冰等. 下垂控制三相逆变器阻抗建模与并网特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 1721-1739.

[4] 刘欣, 郭志博, 贾焦心等. 基于序阻抗的虚拟同步发电机并网稳定性分析及虚拟阻抗设计[J]. 电工技术学报, 2023, 38(15): 4130-4146.

[5] 于彦雪, 关万琳, 陈晓光等. 基于序阻抗的虚拟同步机同步频率谐振现象[J]. 电工技术学报, 2022, 37(10): 2584-2595.

[6] 杜燕, 赵韩广, 杨向真等. 考虑频率耦合效应的虚拟同步发电机序阻抗建模[J]. 电源学报, 2020, 18(6): 42-49.

[7] 杜燕, 朱轲, 杨向真等. 考虑频率耦合的 VSG 虚拟阻抗优化设计[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 5057-5067.

[8] 王鹏程, 陈敏, 朱冠南等. 基于电压补偿的下垂控制变换器功率解耦策略[J]. 电工技术学报, 2026, 41(3): 821-833.

作者简介: 周文清 (2000.07-), 女, 汉族, 江苏省睢宁县, 本科。