

并网变流器阻抗建模与仿真研究

汪徐阳

上海理工大学, 上海

收稿日期: 2021年8月6日; 录用日期: 2021年10月26日; 发布日期: 2021年11月2日

摘要

分布式新能源经过并网变流器接入弱电网时, 使得电网系统趋于复杂, 引发了许多新型次/超同步振荡问题。该问题是由变流器侧的阻抗和网侧阻抗的交互作用所造成的, 因此, 通过变流器阻抗建模来分析该交互系统能否稳定运行。所以本文旨在建立并网变流器的阻抗模型, 并通过仿真验证阻抗建模的正确性。并考虑延时环节对并网变流器阻抗模型的影响。最终本论文实现了并网变流器阻抗建模与仿真模型得出的变流器阻抗模型对应一致, 论证了研究内容的正确性。

关键词

并网变流器, 仿真分析, PR控制, 阻抗建模

Modeling and Simulation of Impedance of Grid-Connected Converter

Xuyang Wang

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Aug. 6th, 2021; accepted: Oct. 26th, 2021; published: Nov. 2nd, 2021

Abstract

When the distributed new energy is connected to the weak power grid through the grid-connected converter, the power grid system tends to be complicated, which leads to many new sub-synchronous/super-synchronous oscillation problems. This problem is caused by the interaction between the impedance on the converter side and the impedance on the grid side. Therefore, the converter impedance modeling is used to analyze whether the interactive system can operate stably. Therefore, this paper aims to establish the impedance model of the grid-connected conver-

ter and verify the correctness of the impedance modeling through simulation. The influence of delay on the impedance model of grid-connected converter is considered. Finally, this paper realizes the matching of the impedance model of the grid-connected converter and the impedance model of the simulation model, which proves the correctness of the research content.

Keywords

Grid-Connected Converter, Simulation Analysis, PR Control, Impedance Modeling

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

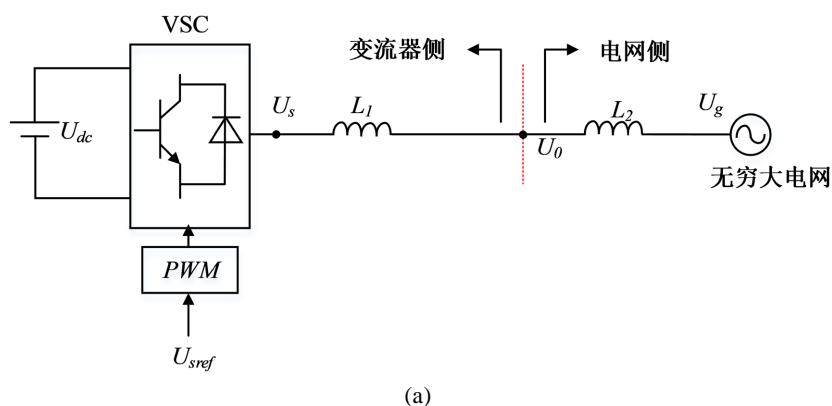
1. 引言

能源是人类文明进步的基础和动力，攸关国计民生和国家安全，关系人类生存和发展，对于促进经济社会发展、增进人民福祉至关重要。面对气候变化、环境风险挑战、能源资源约束等日益严峻的全球问题[1]，风、光等可再生能源发电技术的发展中，电压源型变流器(Voltage Source Converter, VSC)等电力电子设备在电力系统中得到了广泛的应用。然而，并网变流器设备之间的耦合作用和电网与变流器之间的交互作用给并网系统带来了新的振荡问题[2] [3] [4]。近年来，各地发生了多起与新能源并网相关的次超同步振荡问题，如德州某双馈风电场与串补线路的次同步振荡，造成大量风机电路损坏，带来巨大的经济损失[5]。在我国某地区海上风电柔直示范工程调试中，双馈风电场曾多次发生过不明原因的振荡[6]。新疆哈密电网也多次出现过新能源并网的振荡问题，造成大量直流系统配套的同步发电机脱网[7] [8]等，对电力行业提出了严峻的挑战。

本文通过仿真模型与数学模型阻抗对比，验证数学模型与仿真模型的一致性，从而证明本文的仿真模型控制方法以及阻抗数学模型推导的正确性，为下一步验证并网变流器稳定性奠定基础。

2. 变流器并网系统模型

本文采用单相电压源型(VSC)并网变流器，如图 1 所示， U_{sref} 为控制环节参数的调制信号； L_1 为变流器侧滤波器， L_2 为网侧滤波器； U_s 为变流器输出端口电压， U_0 为公共连接点(PCC)处电压， U_g 为电网电压。



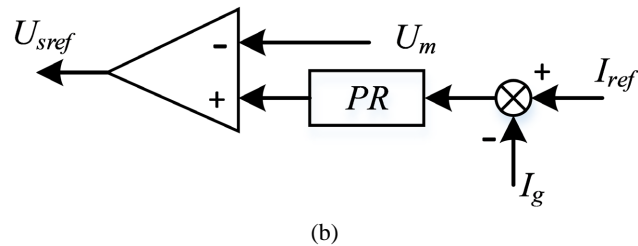


Figure 1. (a) Grid-connected converter system; (b) Control link
图 1. (a) 并网变流器系统; (b) 控制环节

图 1 中红色虚线将并网系统分为变流器侧和电网侧，在进行阻抗建模时，变流器侧建模时考虑控制环动态和滤波电感动态，网侧建模时考虑网侧电感和网侧电阻动态。不失一般性，本文假设变流器侧模型在接入无穷大电网时是稳定的，电网侧不接入变流器时也是稳定的。另外，本文不计变流器的损耗。

3. 并网变流器阻抗仿真研究

根据图 1 搭建并网变流器仿真模型，如图 2 所示，上半部分为系统主回路，下半部分为控制回路。注入扰动源为电网电压幅值的 1%，相位与电网电压一致。

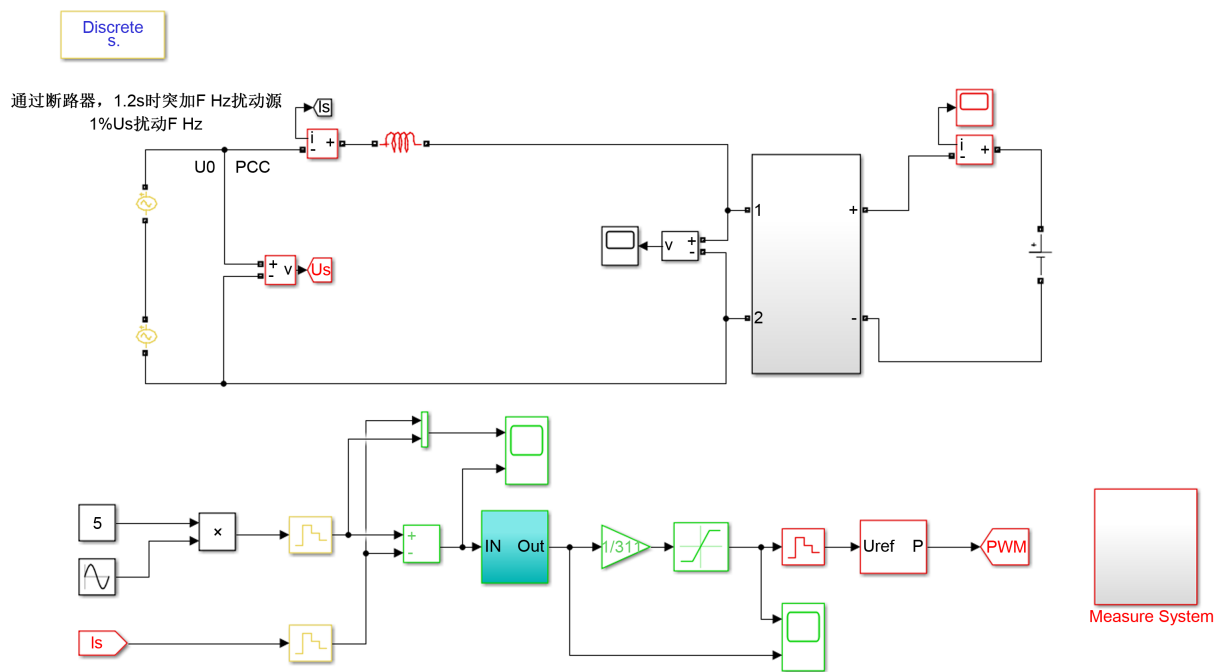


Figure 2. The simulation circuit
图 2. 仿真电路

本系统通过 PR 控制器对电流进行跟踪，此时，通过电流突增、突减观测电网电流与实际电流的值，验证控制器的工作效果。

根据图 3 和图 4 可得，在电流突变时，系统仍能稳定运行，验证了该控制策略的正确性与可行性。此时电流电压波形如图 5 所示。

通过以上分析可得，电网电流在 PR 控制下，系统可以稳定运行，并且此时建立的数学模型也与搭建的仿真电路对应一致，从而验证了该方案的可行性。

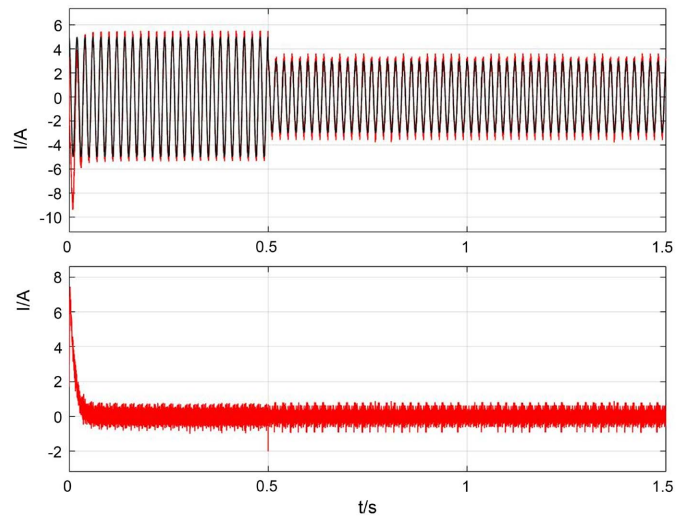


Figure 3. Control effect of sudden current reduction when the current is 0.5 s
图 3. 电流 0.5 s 时突减电流控制效果

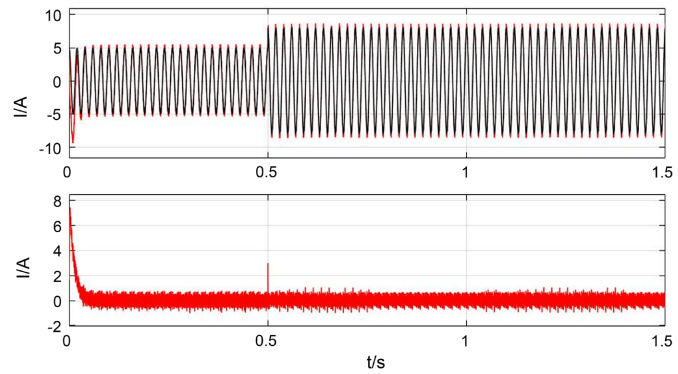


Figure 4. Control effect of surge current when current is 0.5 s
图 4. 电流 0.5 s 时突增电流控制效果

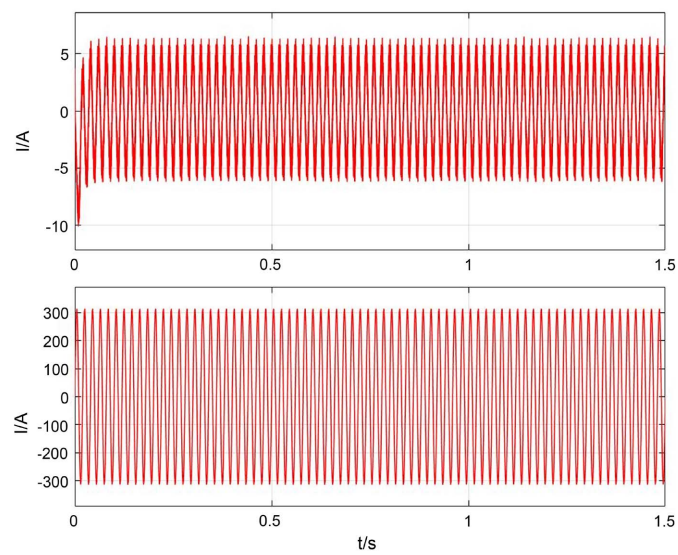


Figure 5. Waveform of current and voltage
图 5. 电流电压波形

4. 并网变流器阻抗分析

图 6 为系统的简化框图, 其中, K_{pwm} 定义为桥臂输出电压相对占空比信号的放大增益。设开关频率远大于电网电压频率, U_m 为调制波峰值, U_{in} 为输入直流电压, 则 K_{pwm} 可表示为:

$$K_{pwm} = \frac{U_{in}}{U_m} \quad (1)$$

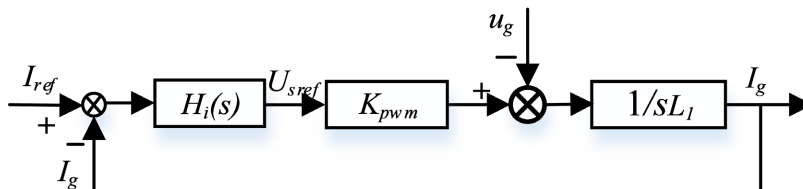


Figure 6. System simplified block diagram

图 6. 系统简化框图

根据图 6 可求出变流器的输出阻抗, 可推导出变流器输出阻抗的表达式:

$$Z_{inv}(s) = -\frac{U_o(s)}{I_g(s)} = sL_l + H_i K_{pwm} \quad (2)$$

图 7 为该并网变流器输出阻抗伯德图, 其中实线对应变流器输出阻抗的数学模型。此外, 搭建 MATLAB/Simulink 仿真电路, 通过谐波小信号注入法获取开关电路的实际输出阻抗特性(图中以 O 表示)。从图中可以看出, 并网变流器输出阻抗的数学模型与开关电路的仿真结果吻合, 验证了输出阻抗数学模型的正确性。

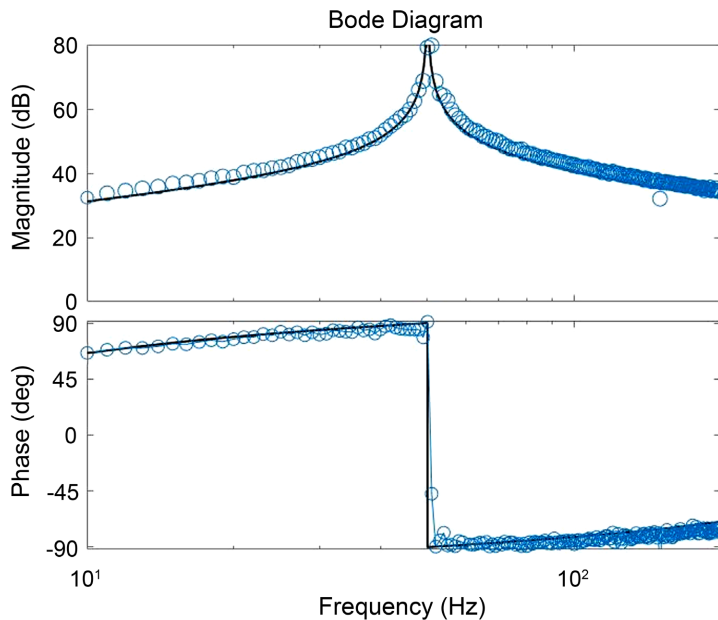


Figure 7. Bode diagram of output impedance of grid-connected converter without considering delay link

图 7. 未考虑延时环节并网变流器输出阻抗伯德图

图 7 所示的并网变流器阻抗建模时, 未考虑采样与 PWM 调制延时环节。延时环节对阻抗模型是否有影响? 要通过对比较验证。在考虑演示环节后, 并网变流器输出阻抗伯德图如图 8 所示。

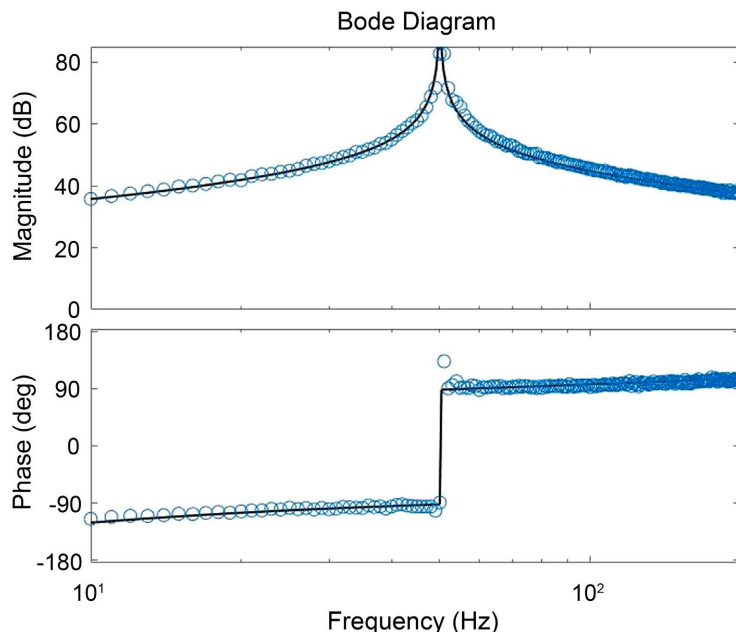


Figure 8. Bode diagram of output impedance of grid-connected converter considering delay link
图 8. 考虑延时环节并网变流器输出阻抗伯德图

由图 8 可得，延时环节对并网变流器阻抗的幅值影响较小，对阻抗的相角影响比较大，但也能一一对应。验证了在考虑延时环节后，阻抗建模依旧正确。根据图 7 和图 8，并网变流器的输出阻抗的数学模型与仿真实际输出阻抗能够一一对应，验证了数学建模的正确性。

通过上述的并网变流器阻抗建模，可得出正确的变流器侧阻抗模型，为变流器稳定性分析奠定了基础。下一步，可以考虑更加复杂的控制系统与控制策略，继续进行研究。

5. 结论

本文通过 MATLAB/Simulink 仿真模型与数学模型的对比，验证了本文所使用方法的正确性与可行性，论文中建立的仿真模型的阻抗能够与建立的数学模型阻抗完美对应。并且在 PR 控制下，电流能够正确稳定跟随指令，电流电压波形呈现标准的正弦波，与仿真预期一致。通过本文的工作，为并网变流器稳定性研究奠定了坚实的基础。

参考文献

- [1] 《新时代的中国能源发展》白皮书[EB/OL]. <http://www.scio.gov.cn/>, 2020-12.
- [2] 王杨, 宋子宏, 占颖, 等. 风电并网系统次同步振荡监测装置优化配置方法[J/OL]. 电力系统自动化: 1-13[2021-03-26].
- [3] 朱林, 钟丹婷, 王贝, 等. 含转子侧控制器的双馈风机建模与次同步振荡机理分析[J/OL]. 电力系统自动化: 1-13[2021-03-26].
- [4] 邵冰冰, 赵书强, 高本锋, 等. 基于反馈线性化滑模控制的直驱风电场经柔直并网系统次同步振荡抑制策略[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-18[2021-03-26].
- [5] Adams, J., Carter, C. and Huang, S.H. (2012) ERCOT Experience with Sub-Synchronous Control Interaction and Proposed Remediation. *Proceedings of the 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Orlando, FL, 7-10 May 2012*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/TDC.2012.6281678>
- [6] 王赞程, 陈新, 张旻, 等. 三相并网逆变器锁相环频率特性分析及其稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3843-3853.

- [7] Wang, Y., Wang, X., Blaabjerg, F., *et al.* (2017) Harmonic Instability Assessment Using State-Space Modeling and Participation Analysis in Inverter-Fed Power Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **64**, 806-816. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2588458>
- [8] Kroutikova, N., Hernandez-Aramburo, C.A. and Green, T.C. (2007) State-Space Model of Grid-Connected Inverters under Current Control Mode. *IET Electric Power Applications*, **1**, 329-338. <https://doi.org/10.1049/iet-epa:20060276>