

多并网逆变器系统灰箱阻抗辨识与阻抗聚合分析方法

刘淇玉¹,李永刚¹,王月²,吴滨源¹,黄齐林¹,王鸥³

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,河北 保定 071003;

2. 国网江苏省电力有限公司南通供电分公司,江苏 南通 226006;

3. 国网辽宁省电力有限公司 信息通信分公司,辽宁 沈阳 110002)

摘要:新能源发电网络谐波振荡问题凸显,阻抗分析法分析该问题的关键是聚合路径的正确选择。对此,提出了一种考虑零极点对消现象的多并网逆变器系统阻抗聚合方法。说明新能源发电网络及其对应阻抗网络的建立过程,并对新能源发电阻抗网络的聚合过程进行展现;基于“灰箱”背景利用矢量匹配算法对并网逆变器、电抗器和电容器的阻抗模型进行获取;对阻抗聚合路径中可能存在的零极点对消现象进行理论基础分析。在MATLAB/Simulink中搭建多并网逆变器系统进行仿真,分别选择不同的阻抗聚合路径,利用阻抗分析法进行系统稳定性分析,进一步验证所提聚合方法的有效性和实用性。

关键词:并网逆变器;阻抗分析法;灰箱;矢量匹配算法;阻抗聚合路径;零极点对消

中图分类号:TM 464;TM 712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202208021

0 引言

随着“30·60碳达峰、碳中和”构想的提出与逐步实施,以风电、光伏为代表的新能源大量接入弱电网,形成复杂的新能源发电网络^[1]。新能源发电并网广泛采用以并网逆变器GCI(Grid-Connected Inverters)为代表的电力电子器件,这些器件的多尺度动态控制与弱电网间形成复杂交互,次/超同步振荡、谐波谐振等谐波振荡问题频发,严重影响新能源电力系统安全稳定运行^[2]。为进一步提升新能源消纳率,提高新能源接入电能质量,需要对新能源电力系统进行稳定性分析,以保证电网运行安全^[3]。

现有常用的稳定性分析方法包括基于状态空间模型的特征值分析和阻抗分析法^[4]。基于状态空间模型的特征值分析通过计算系统状态矩阵特征值和各状态变量参与因子评估系统稳定性。然而,建立一个完整的模型也会使稳定性问题的分析变得更加繁琐,产生“维数灾”的问题,同时,若已建立的状态空间模型中结构或参数发生变化,则需要重新建立状态空间模型,大幅增加分析的复杂程度^[5]。阻抗分析法^[6]解决了参数变化后的模型重建问题,其系统稳定性分析可依靠增益裕量和相位裕量判据。

目前阻抗的获取主要有以下2种形式^[7]。①逆变器具体参数已知,直接列写该逆变器的传递函数公式,国内外学者利用阻抗建模方式来获得逆变器阻抗传递函数,即 dq 轴线性化建模和谐波线性化建

模,这种已知逆变器具体参数直接列写逆变器传递函数的方法称为“白箱”方法。然而,工程现场中电气设备内部结构或参数的保密要求会导致“白箱”方法的失效^[8]。②逆变器具体参数未知,在特定节点进行频率扫描获得系统阻抗传递函数,这种方法称为“黑箱”方法。“黑箱”方法虽然克服了“白箱”方法中必须获取逆变器内部参数这一问题,但是存在计算结果随机且一般无物理意义的缺点。针对2种建模思想存在的缺陷,本文拟采用“灰箱”方法,即以“白箱”建模结果——阻抗传递函数为求解目标,以“黑箱”角度的数值算法为求解途径,由频率扫描得到单个逆变器的电压、电流获得阻抗计算结果,通过拟合算法得到灰箱阻抗辨识结果,“灰箱”方法不仅不需要获取GCI的内部信息,而且保证求解的结果具有实际物理意义^[9-10]。

对于多逆变器系统,则是在得到单个逆变器阻抗结果后进行聚合。文献[11]给出了GCI在电网电压、电网阻抗和逆变器滤波电感均不平衡的复杂工况下的阻抗模型及其和电网互联系统稳定性判定方法。建立阻抗模型后,为了简化分析,文献[12]提出聚合阻抗网络方法,将高维度的阻抗网络简化为一个聚合阻抗,使其保留系统全部振荡模式的信息。文献[13]将复杂的网络组件表示为一个较小的子网,简化了复杂网络的分析难度,减少了仿真计算时间。文献[14]立足直流配电网,根据网络节点属性(是否连接到转换器或在新的拓扑结构中作用)将网络节点分为4种类型,提出一种新的区域聚合方法。文献[15]在将系统部件建模为可反映其内在动态的外特性频域阻抗模型,形成阻抗网络,进而通过阻抗聚合量化分析系统的振荡特性,适用于“黑箱”、“灰箱”背景。

收稿日期:2022-05-29;修回日期:2022-08-10

在线出版日期:2022-08-17

基金项目:国家电网公司科技项目(SGJBTS00FZJS2100341)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(SGJBTS00FZJS2100341)

然而,笔者研究中发现:聚合路径选择中存在零极点对消现象,对于系统稳定性易导致错误的分析结果。针对这一缺陷,本文提出一种考虑零极点对消现象的多GCI系统阻抗聚合方法。基于“灰箱”背景,阐述逆变器等主要电气设备的阻抗获取方法;重点对聚合路径如何正确选择进行详细探讨,给出了聚合路径选择的依据并由此开展实验验证,复现了路径选择错误导致分析结论不一致的现象,进一步验证了本文所提方法的有效性和实用性。与现有文献相比,本文方法适用于工程现场发电设备内部信息保密的实际情况。

1 问题的提出

1.1 阻抗聚合

图 1 为新能源接入弱电网典型示意图。该系统中包括风电场、光伏电站和等效交流电网。

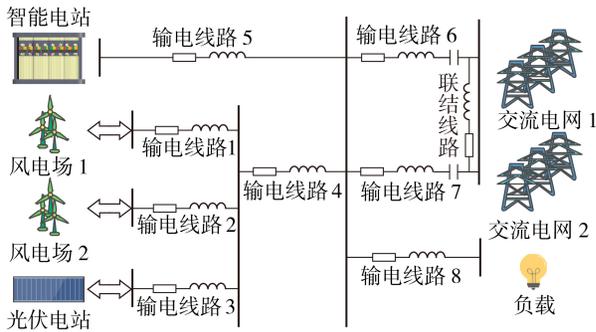


图 1 分布式光伏接入电网模型

Fig.1 Model of distributed photovoltaic access to grid

图 1 所示新能源发电网络中的每一个部件本质上是一个阻抗模型,将各部件阻抗按系统拓扑进行连接,可形成完整的新能源发电阻抗网络,如图 2 所示。图中: $Z_{S1}(s)$ 为智能电站等效阻抗; $Z_{S2}(s)$ 、 $Z_{S3}(s)$ 分别为交流电网 1、交流电网 2 等效阻抗; $Z_{Wind1}(s)$ 、 $Z_{Wind2}(s)$ 分别为风电场 1、风电场 2 等效阻抗; $Z_{Pv}(s)$ 为光伏电站等效阻抗; $Z_{Line m}(s)$ 为输电线路 m ($m=1, 2, \dots, 8$) 等效阻抗; $Z_{Link}(s)$ 为联结线路等效阻抗; $Z_{load}(s)$ 为负载等效阻抗。

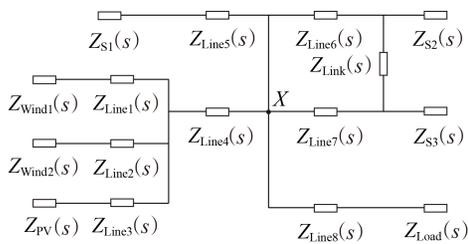
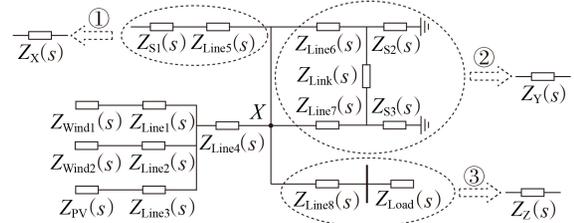


图 2 新能源发电阻抗网络

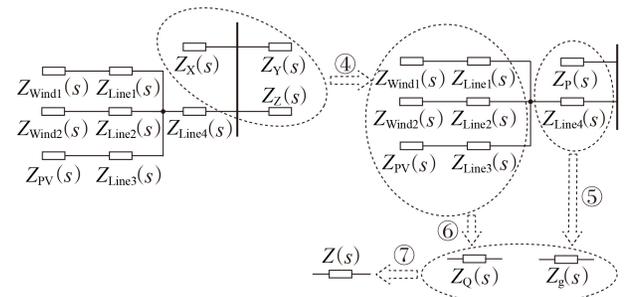
Fig.2 New energy power generation impedance network

本文在采用阻抗分析法对图 2 所示新能源发电阻抗网络进行谐波振荡分析时,假设锁相环带宽较低,可忽略频率耦合特性^[16]。首先通过阻抗聚合确

定待分析节点的“源侧”及“负荷侧”阻抗;其次以图 2 中节点 X 为例,详细展示了各部分阻抗聚合过程及最终的聚合结果,如图 3 所示。图中: $Z_X(s)$ 、 $Z_Y(s)$ 、 $Z_Z(s)$ 分别为经聚合过程①、②、③形成的聚合阻抗; $Z_p(s)$ 、 $Z_q(s)$ 分别为经聚合过程④、⑥形成的聚合阻抗; $Z_g(s)$ 为经聚合过程⑤形成的聚合阻抗; $Z(s)$ 为经聚合过程⑦形成的系统等效阻抗。



(a) 阻抗聚合原理图



(b) 聚合结果

图 3 新能源发电阻抗网络聚合过程

Fig.3 Aggregation process of new energy power generation impedance network

1.2 问题分析

阻抗分析法因其采用“等效阻抗”思想,易于建模,且可通过空间和频域聚合来降低系统阶数,因此阻抗分析法是建立阻抗网络并进行聚合的基础,在工程实践中得到广泛应用^[17],而阻抗分析法稳定性判定方法应用于判断阻抗网络聚合路径选择正误,是判定多GCI系统稳定性的重要方法。

根据阻抗分析法原理,基于图 3 获取的聚合阻抗,可进行谐波振荡分析。阻抗分析法在研究 GCI 与电网交互系统全局稳定性时,将两者视为 2 个独立的子系统,根据各自的控制结构和参数特征分别建立阻抗模型,任何一方组成单元的结构和参数特征变化都不会影响到对方,故无需重新建立阻抗模型,降低了系统分析的难度,在获取阻抗模型后,用线性网络结构表示该交互系统的等效电路,再采用阻抗稳定性判据来分析系统稳定性。

从上述分析中可以看出,在新能源发电网络中应用阻抗分析法依赖于阻抗网络的建立以及聚合阻抗的准确形成,然而二者面临以下挑战。

1) 阻抗网络的建立需以网络所有元件的阻抗模型为基础。然而,目前装置供应商存在技术保密要

求,使得电力电子器件内部控制结构或参数呈“黑箱化”或“灰箱化”,难以建立详细的状态空间模型或电磁模型。“灰箱”方法可以在满足GCI内部保密信息未知的前提下,仅依赖端口电压、电流数据获取GCI的宽频阻抗特性。

2)聚合阻抗的形成需考虑聚合路径。一般默认电力系统兼具能控性和能观性,因此在聚合阻抗时,不考虑阻抗传递函数中零极点对消现象。但实际上仍存在着少量不可控或不可观的电力系统在聚合过程中可能发生零极点对消现象,因此需要更换聚合路径,否则会遗漏该系统的模式信息,从而产生误判。

2 基于矢量匹配法的阻抗模型辨识

2.1 离散阻抗数据

对于GCI、电抗器和电容器的阻抗模型获取方法,拟采用算法拟合传递函数研究思路,本文以GCI为例进行算法拟合传递函数的详细阐述,电抗器和电容器的阻抗模型获取可参考文献[18]。首先,参考文献[19],对扰动注入信号进行选择;其次,参考文献[20],在串联侧注入电压扰动、并联侧注入电流扰动,以稳定直流侧电压。扰动注入设备向待测GCI注入特定谐波下的电压/电流扰动,经GCI回路后产生电流/电压响应,经计算获得该谐波下的阻抗数据,扰动注入过程如附录A图A1所示,图中 U_b 、 I_b 分别为注入的串联电压、并联电流,其基本原理如式(1)所示。

$$Z_f = \frac{U_f}{I_f} \quad (1)$$

式中: Z_f 为频率 f 时GCI的阻抗值; U_f 、 I_f 分别为GCI端口电压 \mathbf{u}_{abc} 、电流 \mathbf{i}_{abc} 通过快速傅里叶变换得到的频率 f 下电压、电流分量。

2.2 灰箱阻抗拟合

基于2.1节方法获取的离散阻抗数据,本节借助有理函数逼近算法对GCI等电气元件阻抗进行灰箱拟合,矢量匹配VF(Vector Fitting)算法具有拟合误差小、拟合效果好的特点^[21],因此本文选取的有理函数逼近算法为VF算法,即一组离散阻抗频率响应可以使用VF算法以部分分数展开表示或多项式表示的形式拟合为连续传递函数^[22]。

VF算法的基本思想是任何有理函数 $f(s)$ 均可表示为分式累和形式,如式(2)所示。

$$f(s) = \sum_{m=1}^N \frac{r_m}{s-a_m} + d + se \quad (2)$$

式中: N 为初始阶数,可以通过试错法来确定,也可通过矩阵束计算确定^[23]; r_m 为留数; a_m 为初始极点,通过最小二乘法确定; d 、 e 均为有理数。

线性问题如式(3)~(6)所示。

$$\sigma(s)f(s) = p(s) \quad (3)$$

$$\sigma(s) = \sum_{m=1}^N \frac{r_m}{s-q_m} + 1 \quad (4)$$

$$p(s) = \sum_{m=1}^N \frac{r_m}{s-q_m} + d + se \quad (5)$$

$$\{a_m\} \in \text{eig}[A - \mathbf{bc}^T] \quad (6)$$

式中: $\sigma(s)$ 为辅助函数; $p(s)$ 为关于 s 的多项式; q_m 为初始零点集合; $f(s)$ 的极点即为 $\sigma(s)$ 的零点,也可以表示为一个特定矩阵的特征值; $\text{eig}[\cdot]$ 为矩阵特征值集合; A 为 $\{q_m\}$ 组成的对角矩阵; \mathbf{b} 为单位列向量; \mathbf{c}^T 为留数 $\{r_m\}$ 构成的行向量。

式(2)还可以表示为式(7),两式所表达意义和设置参数不同。式(2)主要用来分析稳定性的右半平面极点,式(7)主要用于识别GCI电路控制参数。

$$f(s) = \left(\sum_{j=0}^M \mathbf{B}_j s^j \right) / \left(\sum_{j=0}^M \mathbf{A}_j s^j \right) \quad (7)$$

式中: M 为传递函数阶数; j 为逆变器标号; \mathbf{A}_j 为第 j 个逆变器状态变量表达式对角矩阵; \mathbf{B}_j 为第 j 个逆变器状态变量表达式行向量。

VF算法具体流程如附录A图A2所示。

3 阻抗聚合原则与方法

在通过拟合离散阻抗值,获得阻抗传递函数后,可以获得各个设备的阻抗模型。大量电力电子设备接入、电力系统规模扩大等使得电力系统尤其是新能源电力系统的网架结构更加复杂。因此,在利用阻抗模型分析相关问题前,应首先根据各部分阻抗模型间的互联结构进行简化,保留其动态特性,在不使分析结果产生错误和较大误差的情况下简化分析过程,提高分析效率。

目前,文献[12-13]对阻抗网络进行简化并用于新能源电力系统频率稳定性分析。文献[24]定义了节点(支路)对模式的可观度,提出阻抗网络的聚合判据和聚合指标,从“可观端口”层面聚合阻抗网络。本文对阻抗聚合路径选择讨论的基础是阻抗分析法,阻抗分析法将GCI和电网分别划分为源侧和负荷侧,并视作2个独立的系统(以系统A、系统B表示),分别获取其等效阻抗。但现有对阻抗网络的聚合研究中,默认聚合后的系统兼备可观性与可控性,暂未有文献考虑到聚合过程中传递函数的零极点对消而造成的系统不可观不可控现象。基于阻抗分析法得到的等效阻抗未必能够准确地反映系统稳定性,如当系统发生零极点对消现象时,聚合后网络会丢失掉部分原始信息,基于可观可控性的分析方法失效,为保证后续分析的可靠性,应改选聚合路径。

对于独立阻抗网络并联聚合,在聚合后阻抗值不变的情况下,聚合前、后的传递函数可分别用式

(8)和式(9)表示。

$$Z_C = \frac{N_A N_B}{N_A D_B + N_B D_A} \quad (8)$$

$$Z_C = \frac{(s - \lambda_0) N'_A N'_B}{N'_A D_B + N'_B D_A} \quad (9)$$

式中: Z_C 为并联聚合网络等效阻抗; N_A 、 N_B 和 D_A 、 D_B 分别为聚合前系统 A、B 零极点组成的多项式; $N'_A = N_A / (s - \lambda_0)$, $N'_B = N_B / (s - \lambda_0)$, λ_0 为系统 A、B 共有的右半平面零点。

同理,对于独立阻抗网络串联聚合,在聚合后阻抗数值不变的情况下,聚合前、后的传递函数可分别用式(10)和式(11)表示。

$$Z_D = \frac{N_A D_B + N_B D_A}{D_A D_B} \quad (10)$$

$$Z_D = \frac{N_A D'_B + N_B D'_A}{(s - \gamma_0) D'_A D'_B} \quad (11)$$

式中: Z_D 为串联聚合网络等效阻抗; $D'_A = D_A / (s - \gamma_0)$, $D'_B = D_B / (s - \gamma_0)$, γ_0 为系统 A、B 共有的右半平面极点。

系统 A 等效阻抗 Z_A 和系统 B 等效阻抗 Z_B 的每对共轭复极点对应于幅频响应曲线中的一个峰值,每对共轭复零点对应于一个谷值。对于并联连接,如果 Z_A 和 Z_B 的幅频响应曲线具有相同的谷值频率,则系统 A 和系统 B 聚合后的子系统幅频响应曲线在同频率处没有峰值,即聚合过程中发生了零极点对消现象。对于串联连接,如果 Z_A 和 Z_B 的幅频响应曲线在同一频率处具有相同峰值频率,则系统 A 和系统 B 聚合后的子系统幅频响应曲线在同频率处没有谷值,即聚合过程中发生了零极点对消现象。

根据上述分析,为避免阻抗聚合期间存在零极点对消现象,应避免聚合 2 个具有相同幅频响应曲线谷值的并联子系统或 2 个具有相同幅频响应曲线峰值的串联子系统,换言之,在并联聚合过程中选择不具有相同零点的子系统,在串联聚合过程中选择不具有相同极点的子系统,即改变阻抗聚合路径。

4 仿真结果分析

4.1 实验平台概述

本文以图 1 所示的多 GCI 复杂系统为算例,将其完整的阻抗网络进行绘制,如附录 B 图 B1 所示。在 MATLAB / Simulink 中搭建该系统实时仿真模型,系统具体参数如附录 B 表 B1 所示。GCI 控制系统拓扑结构如图 4 所示。图中: V_{dc} 为直流侧电压; V_c 为调制电压; I_{Cr} 为经滤波器电容 C_f 前流出电压; L_{f1} 、 L_{f2} 为滤波器电感; K_p 为电流控制器比例增益系数; K_i 为电流控制器积分增益系数; K_{cp} 为电容电流反馈系数; L_g 、 V_g 、 I_g 和 θ_g 分别为网侧电感、网侧电压、网侧电流和网侧电压相位; $I_{g,ref}$ 为网侧电流参考值; V_{PCC} 为

耦合点电压。

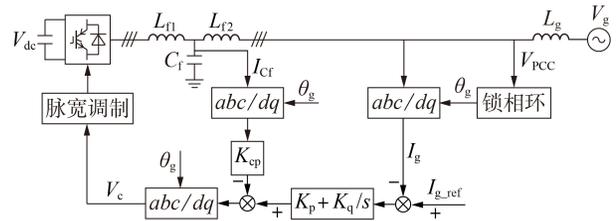


图 4 GCI 控制系统拓扑结构

Fig.4 Topology structure of GCI control system

算例仿真时间为 3 s。上位机处理器参数为 2.5 GHz Intel Core i5。本文实验过程主要通过实验一(不考虑零极点对消,直接选择阻抗聚合路径并进行稳定性分析)和实验二(考虑零极点对消情况后重新选择聚合路径并对多 GCI 系统进行稳定性分析)共同验证。

4.2 GCI 灰箱阻抗辨识结果

本实验首先利用 VF 算法得到“灰箱”背景下逆变器系统的阻抗模型,并与扫频获得离散数据后得到的系统阻抗模型(计算参数见附录 B 表 B1)进行对比,其次分析系统在是否考虑零极点对消情况下,不同聚合路径下的伯德图,最后对系统稳定性进行判定。

采用 4 种方法(即利用离散阻抗数据获得逆变器阻抗传递函数的计算方法以及 VF 算法一阶拟合、二阶拟合、三阶拟合方法)得到的逆变器阻抗频率响应伯德图如附录 B 图 B2 所示。由图可知,VF 算法一阶拟合得到的阻抗传递函数曲线和二阶拟合得到的阻抗传递函数曲线在阻抗幅值和相位上都与利用离散阻抗数据计算得到的阻抗传递函数曲线存在较大误差,而 VF 三阶拟合与利用离散阻抗数据得到的阻抗曲线基本重合,证明了阻抗拟合能够完整保存阻抗零极点信息,与文献[25]观点一致,即在本算例中,“灰箱”模型采用 VF 算法三阶拟合得到的阻抗拟合曲线误差在允许范围内,可用来进行进一步实验。

4.3 算例分析及简化

对图 B1 所示的多 GCI 复杂系统阻抗网络进行如图 3 中①—⑤过程的聚合,聚合结果如附录 B 图 B3 所示,图中 Z_{is} 、 Z_{il} ($i=1,2,3,4$) 分别为节点 i 源侧、负荷侧阻抗。

利用 VF 算法拟合得到的图 3 中聚合阻抗 Z_g 伯德图如附录 B 图 B4 所示,其幅值和相位情况已在图中标出。经聚合得到的阻抗 Z_g ,其谐波频率为 1527 Hz,相位角的最大值和最小值的绝对值均大于 90° ,表明形成 Z_g 后,该多 GCI 系统处于失稳状态。

对图 B1 所示的简化前的多 GCI 复杂系统阻抗网络节点④电压波形进行观察并绘制,如附录 B 图 B5 所示。由图可知,随着时间的变化,节点④输出

电压的幅值和波动频率也发生改变,在1 s左右时,电压波形开始发生振荡,逐渐失控,这说明多GCI复杂系统阻抗网络是不稳定的。

由图B4、B5可知理论分析和图像分析结果一致,表明将图1所示的复杂阻抗网络进行部分聚合,对系统稳定性分析没有造成影响,即本实验可以先将复杂阻抗网络简化,再进行聚合路径选择的进一步分析。

4.4 实验一

为简化多GCI系统稳定性分析,需要对多GCI简化系统等效阻抗网络进行聚合。图B3所示多GCI简化系统有4个节点,为将该多GCI简化系统聚合成一个等效阻抗网络(本文中聚合节点的选择对分析结果不产生影响,可以根据需要研究的节点进行阻抗聚合),本文首先从节点④出发获取系统阻抗聚合路径,阻抗聚合过程如图5所示,其中源侧阻抗与 Z_g 均接地, $Z_1=Z_{1S}+Z_{Line1}$, $Z_2=Z_{2S}+Z_{Line2}$, $Z_3=Z_{3S}+Z_{Line3}$ 。

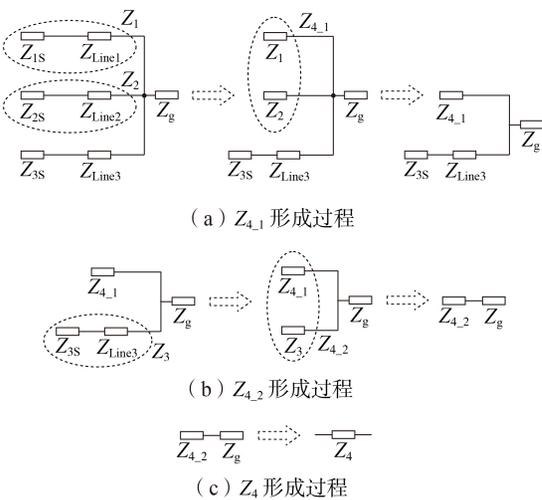


图5 多GCI系统聚合路径

Fig.5 Aggregation path of multi-GCI system

图5中对等效阻抗网络的聚合过程可以由式(12)~(14)表示。

$$Z_{4,1} = (Z_{1S} + Z_{Line1}) // (Z_{2S} + Z_{Line2}) \quad (12)$$

$$Z_{4,2} = Z_{4,1} // (Z_{3S} + Z_{Line3}) \quad (13)$$

$$Z_4 = Z_g + Z_{4,2} \quad (14)$$

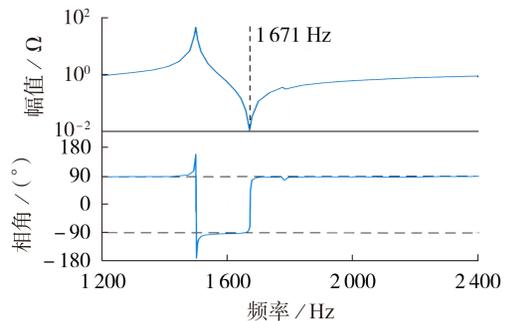
式中: $Z_{4,1}$ 、 $Z_{4,2}$ 分别为从节点④进行阻抗聚合第一步、第二步得到的聚合阻抗; Z_4 为从节点④出发获取的系统聚合阻抗。

利用VF算法拟合得到的 Z_4 伯德图如附录B图B6所示,其幅值和相位情况已在图中标出。经过聚合得到阻抗 Z_4 ,其谐波频率为1702 Hz,其相角均在 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 间,这表明形成 Z_4 后,该多GCI系统是稳定的。

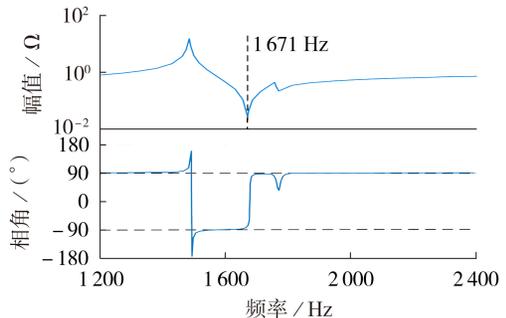
观察并绘制节点④输出电压(标幺值)波形如附

录B图B7所示。由图可知,随着时间的变化,节点④输出电压的幅值和波动频率也发生改变,在1.5 s左右时,电压波形开始发生振荡,逐渐失控,这说明经过聚合的多GCI系统是不稳定的,该现象与前述理论分析结果不一致,需对不一致的原因进行分析。

图6(a)、(b)分别为 Z_1 、 Z_2 经过VF算法拟合后得到的伯德图。由图可知, Z_1 和 Z_2 具有共同的谷值频率,其值为1671 Hz,且此时的相角并不在 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 间,表明经过简单串联后形成的 Z_1 小系统和 Z_2 小系统并不稳定。这可能对于系统稳定性的判定产生影响。



(a) 基于VF算法拟合的 Z_1 伯德图



(b) 基于VF算法拟合的 Z_2 伯德图

图6 基于VF算法拟合的 Z_1 、 Z_2 伯德图

Fig.6 Bode diagram of Z_1 and Z_2 fit by VF algorithm

实验一将 Z_1 和 Z_2 进行并联处理,图7为利用VF算法拟合得到的 $Z_{4,1}$ 伯德图。由图可知,在 $Z_{4,1}$ 的形成过程中, Z_1 和 Z_2 共有谷值频率(1671 Hz)处不存在峰值,且其相角处于 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 间,与 Z_1 和 Z_2 稳定性有所出入,说明阻抗传递函数具有相同零点的情况不可以进行并联处理。

经过上述分析可知,实验一在聚合路径选择的第一步中,将传递函数具有相同零点的阻抗进行并联处理,这会导致在并联过程中产生零极点对消情况,换言之,两者幅频响应曲线具有相同的谷值频率,而聚合后的幅频响应曲线在同频率处则没有对应峰值,继而对系统稳定性产生误判,即实验一理论分析与实际电压波形不一致。

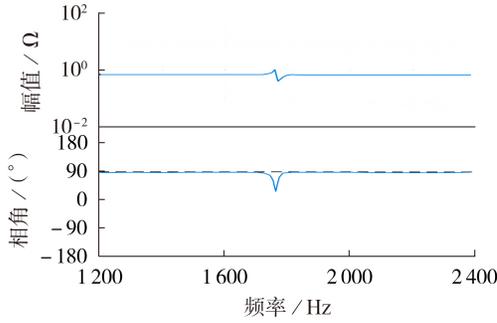


图 7 基于 VF 算法拟合的 $Z_{4,1}$ 伯德图

Fig.7 Bode diagram of $Z_{4,1}$ fit by VF algorithm

4.5 实验二

对于上述这种情况,应改变聚合路径,避免阻抗传递函数具有相同零点的设备进行并联,改进后多 GCI 系统聚合路径如图 8 所示。

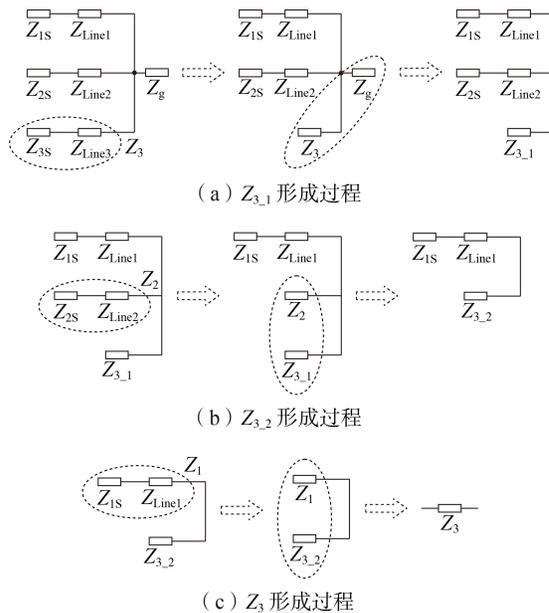


图 8 改进后多 GCI 系统聚合路径

Fig.8 Improved aggregation path of multi-GCI system

图 8 中对等效阻抗网络的聚合过程可由式 (15)~(17) 表示。

$$Z_{3,1} = Z_g + Z_{3S} + Z_{Line3} \quad (15)$$

$$Z_{3,2} = Z_{3,1} // (Z_{2S} + Z_{Line2}) \quad (16)$$

$$Z_3 = (Z_{1S} + Z_{Line1}) // Z_{3,2} \quad (17)$$

式中: $Z_{3,1}$ 、 $Z_{3,2}$ 分别为从节点③出发进行阻抗聚合第一步、第二步得到的等效阻抗; Z_3 为从节点③出发获取的系统聚合阻抗。

利用 VF 算法拟合得到的 Z_3 伯德图如附录 B 图 B8 所示,其幅值和相位情况已在图中标出。经聚合得到阻抗 Z_3 ,其谐波频率为 1506 Hz,其相角并不都在 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 间,在谐波频率附近,相角最大值大于 90° ,最小值小于 -90° ,表明形成 Z_3 后,该多 GCI 系统

是不稳定的。

观察并绘制节点③输出电压(标么值)波形如附录 B 图 B9 所示。由图可知,节点③输出的电压波形也在 1.5 s 处开始出现增幅振荡,说明经过聚合的多 GCI 系统是不稳定的,该现象与前述理论分析结果一致,即避免零极点对消的阻抗聚合路径选择正确。

5 结论

本文探讨了“灰箱”背景下,新能源阻抗网络聚合过程中零极点对消情况对系统稳定性判定的影响,总结如下:

1) 基于“灰箱”背景适用于工程现场发电设备内部信息保密的实际情况,利用 VF 算法对逆变器等主要电气设备的离散阻抗数据进行拟合以获取系统初始阻抗网络;

2) 根据系统初始阻抗网络详细阐述阻抗网络聚合过程,并对聚合后网络的稳定性分析方法进行展现;

3) 重点对阻抗聚合路径如何正确选择进行详细探讨,指出阻抗网络聚合过程中存在的零极点对消现象可能导致系统稳定性误判,并给出正确选择阻抗聚合路径的依据;

4) 在 MATLAB / Simulink 中搭建多 GCI 系统模型,复现了路径选择错误导致分析结论不一致的现象,进一步验证本文所提方法的有效性和实用性。

对于复杂新能源网络计及频率耦合特性的研究将在后续工作中开展。

附录见本刊网络版 (<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 谢典,高亚静,刘天阳,等. “双碳”目标下我国再电气化路径及综合影响研究[J]. 综合智慧能源,2022,44(3):1-8.
XIE Dian, GAO Yajing, LIU Tianyang, et al. Study on the impact of re-electrification on the path to carbon peaking and carbon neutralization in China[J]. Comprehensive Smart Energy, 2022,44(3):1-8.

[2] 李希年,庞清乐,孙静. 计及谐波影响的不对称系统基波序分量快速检测[J]. 电力自动化设备,2021,41(7):182-188.
LI Xinian, PANG Qingle, SUN Jing. Fast detection of fundamental components for unbalanced system considering harmonic distortion[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(7):182-188.

[3] 许津铭,谢少军,张斌峰. 分布式发电系统中 LCL 滤波并网逆变器电流控制研究综述[J]. 中国电机工程学报,2015,35(16):4153-4166.
XU Jinming, XIE Shaojun, ZHANG Binpeng. Overview of current control techniques for grid-connected inverters with LCL filters in distributed power generation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16):4153-4166.

[4] ZHOU W, TORRES RE, WANG Y, et al. A gray-box hierarchical oscillatory instability source identification method of multiple-inverter-fed power systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(3):

- 3095-3113.
- [5] WANG Y, WANG X, BLAABJERG F, et al. Harmonic instability assessment using state-space modeling and participation analysis in inverter-fed power systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(1): 806-816.
- [6] 吴滨源, 李建文, 李永刚, 等. 并网逆变器dq阻抗灰箱辨识方法与应用[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1534-1546.
WU Binyuan, LI Jianwen, LI Yonggang, et al. Gray-box identification method of grid-connected inverters dq impedance and its applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1534-1546.
- [7] 陈新, 王赞程, 龚春英, 等. 采用阻抗分析方法的并网逆变器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2082-2094.
CHEN Xin, WANG Yuncheng, GONG Chunying, et al. Overview of stability research for grid-connected inverters based on impedance analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2082-2094.
- [8] LIU J, DU X, SHI Y, et al. Impedance measurement of three-phase inverter in the stationary frame using frequency response analyzer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 9390-9401.
- [9] WANG X, BLAABJERG F. Harmonic stability in power electronic-based power systems: concept, modeling, and analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2858-2870.
- [10] 张雯欣, 吴琛, 黄伟, 等. 基于设备模型辨识的新能源电力系统共模频率特征量化[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 96-102.
ZHANG Wenxin, WU Chen, HUANG Wei, et al. Quantization of common mode frequency characteristic in power system with renewable resource based on equipment model identification[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 96-102.
- [11] 年珩, 杨洪雨. 不平衡运行工况下并网逆变器的阻抗建模及稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 76-83.
NIAN Heng, YANG Hongyu. Impedance modeling and stability analysis of grid-connected inverters under unbalanced operation conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 76-83.
- [12] WANG H, VIETO I, SUN J. A method to aggregate turbine and network impedances for wind farm system resonance analysis[C]//2018 IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL). Padua, Italy: IEEE, 2018: 1-8.
- [13] SOUZA B C, AEAUJO L R, PENIDO D R R. Multi-area aggregation of multi-grounded unbalanced distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5120-5130.
- [14] ZHANG H, MEHRABANKHOMARTASH M, SAEEDIFARD M, et al. A new zone aggregation method for impedance-based stability assessment of the expanded DC-distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3): 1281-1292.
- [15] 刘华坤, 谢小荣, 何国庆, 等. 新能源发电并网系统的同步参考坐标系阻抗模型及其稳定性判别方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4002-4008.
LIU Huakun, XIE Xiaorong, HE Guoqing, et al. Synchronous reference frame based impedance model and stability criterion for grid-connected renewable energy generation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4002-4008.
- [16] HUANG T, CHEN X, LI Z. Impacts of coupling effects on stability analysis of PMSG-based wind farm integration through MMC-HVDC[C]//2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia). Nanjing, China: IEEE, 2020: 1918-1923.
- [17] 汪林光, 谢小荣, 许涛, 等. 基于聚合阻抗行列表对数导数计算的振荡稳定性分析方法[J/OL]. 中国电机工程学报. (2022-05-19)[2022-05-29]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.202205-18.1656.004.html>.
- [18] 孙海峰, 崔翔, 齐磊. 基于黑箱理论与传统等效电路的无源元件建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(6): 112-116.
SUN Haifeng, CUI Xiang, QI Lei. Modeling method based on black-box theory and traditional equivalent circuit for passive elements[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(6): 112-116.
- [19] 李萌, 年珩, 胡彬, 等. 应用于新能源发电设备阻抗测量的扰动信号类型综述[J/OL]. 中国电机工程学报. (2022-01-17)[2022-07-12]. <http://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.211467>.
- [20] 谢志为, 陈燕东, 伍文华, 等. 双模式扰动下新能源发电装备的宽频带序阻抗在线精确测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2903-2914.
XIE Zhiwei, CHEN Yandong, WU Wenhua, et al. A wide-bandwidth sequence-impedance online precise measurement method for renewable energy generation equipment with dual-mode disturbance[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2903-2914.
- [21] LI Y, LIU Q, WU B, et al. Impedance transfer functions fitting methods of grid-connected inverters: comparison and application[C]//2022 International Conference on Power Energy Systems and Applications (ICoPESA). Singapore: IEEE, 2022: 331-336.
- [22] BAKSHIZADEHM K, YOON C, HJERRILD J, et al. The application of vector fitting to eigenvalue-based harmonic stability analysis[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1487-1498.
- [23] 吴滨源, 李建文, 李永刚, 等. 用于谐波劣化分析的并网逆变器阻抗灰箱拟合方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(4): 942-953.
WU Binyuan, LI Jianwen, LI Yonggang, et al. A gray-box fitting method of grid-connected inverters impedance for the analysis of harmonic degradation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(4): 942-953.
- [24] 占颖, 谢小荣, 王艳辉, 等. 计及模式可观度的阻抗网络聚合方法[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2328-2334.
ZHAN Ying, XIE Xiaorong, WANG Yanhui, et al. Aggregation of impedance network model considering modal observability[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2328-2334.
- [25] 王哲, 吕敬, 吴林林, 等. 基于Vector Fitting的光伏并网逆变器控制器参数频域辨识方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(5): 118-124.
WANG Zhe, LÜ Jing, WU Linlin, et al. Frequency-domain identification method for controller parameters of photovoltaic grid-connected inverter based on Vector Fitting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(5): 118-124.

作者简介:



刘淇玉

刘淇玉(1997—),女,硕士研究生,主要研究方向为新能源电力系统(**E-mail**: dliuqiuyu@163.com);

李永刚(1967—),男,教授,博士生导师,通信作者,主要研究方向为新能源电力系统和大型电机故障诊断(**E-mail**: lygzxm0@163.com)。

(编辑 李莉)

(下转第105页 continued on page 105)

Novel multiport hybrid DC circuit breaker suitable for flexible DC grid

ZHANG Shuo,ZOU Guibin,WEI Xiuyan,ZHANG Chengquan

(School of Electrical Engineering,Shandong University,Jinan 250061,China)

Abstract: The HCB(Hybrid DC Circuit Breaker) has been considered as an ideal way to isolate the fault on DC-side of flexible DC grid. However,its high cost has seriously limited the feasibility of its large-scale application. In addition,the high fault probability of the overhead lines requires HCBs to have adaptive reclosing capability. Therefore,a novel MHCb(Multiport Hybrid DC Circuit Breaker) suitable for flexible DC grid is proposed,its control strategies in the stages of fault isolation and adaptive reclosing are put forward,its working principle and internal dynamic process are analyzed in detail,and the design method of key parameters is deduced. The electromagnetic transient simulations and physical experiments under different working conditions show that the proposed MHCb greatly reduces the manufacturing cost by sharing the expensive main breaker by multiple DC lines,reduces the energy dissipation time and capacity requirement of the arresters by bypassing the fault line and the current-limiting reactor on it,and has the adaptive reclosing function that is simple to control and easy to implement.

Key words: flexible DC grid;multiport hybrid DC circuit breaker;overhead line;arrester;adaptive reclosing

(上接第98页 continued from page 98)

Grey-box impedance identification and impedance aggregation analysis method for multiple grid-connected inverter system

LIU Qiyu¹,LI Yonggang¹,WANG Yue²,WU Binyuan¹,HUANG Qilin¹,WANG Ou³

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University,Baoding 071003,China;

2. Nantong Power Supply Subsidiary Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co.,Ltd.,Nantong 226006,China;

3. Information and Communication Branch,State Grid Liaoning Electric Power Supply Co.,Ltd.,Shenyang 110002,China)

Abstract: The problem of harmonic oscillation in new energy power generation network is prominent. The key to analyze this problem by impedance analysis method is the correct choice of aggregation path. For this,an impedance aggregation method of multiple grid-connected inverter system considering zero-pole cancellation is proposed. The establishment process of new energy power generation network and its corresponding impedance network is explained,and the aggregation process of new energy power generation impedance network is shown. Based on the gray-box background,the impedance models of grid-connected inverter,reactor and capacitor are obtained by vector fitting algorithm. The possible zero-pole cancellation phenomenon in the impedance aggregation path is analyzed theoretically. A multiple grid-connected inverter system is built in MATLAB/Simulink for simulation,different impedance aggregation paths are selected,and the system stability is analyzed by impedance analysis method to further verify the effectiveness and practicability of the proposed aggregation method.

Key words: grid-connected inverter; impedance-based analysis; grey-box; vector fitting algorithm; impedance aggregation path;zero-pole cancellation

附录 A

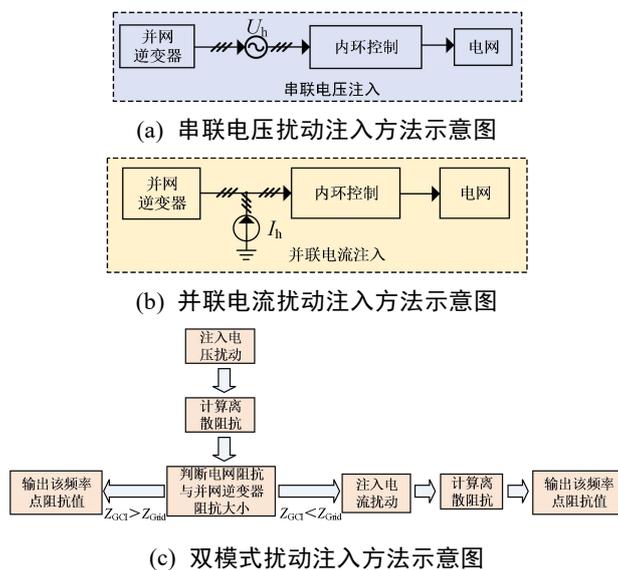


图 A1 离散阻抗数据测量计算原理图

Fig.A1 Schematic diagram of measurement and calculation of discrete impedance data

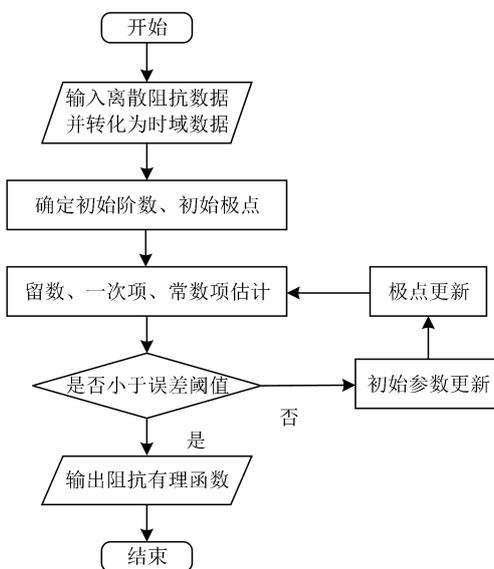


图 A2 VF 算法流程图

Fig.A2 Flowchart of VF algorithm

附录 B

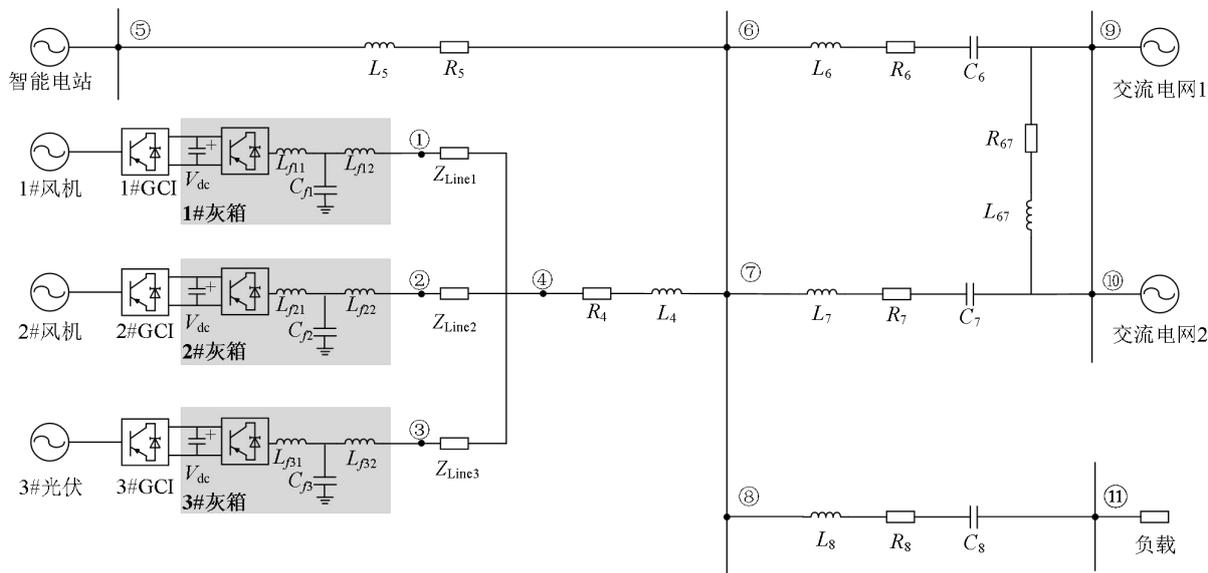


图 B1 多 GCI 复杂系统阻抗网络

Fig.B1 Impedance network of multi-GCI complex system

表 B1 多 GCI 复杂系统参数

Table B1 Parameters of multi-GCI complex system

参数	数值	参数	数值
V_{dc}	400V	L_{f1}	0.5mH
f_s	10kHz	L_{f2}	0.3mH
K_p	1.2Ω	$L_{\beta 1}$	0.2mH
K_q	65Ω/s	$L_{\beta 2}$	0.3mH
K_{cp}	0.6Ω	R_{67}	0.3Ω
C_f	50μF	L_{67}	0.6mH
L_i	1mH		
R_i	0.5Ω		
C_i	30μF		

注： f_s 为采样频率； L_i 、 R_i 、 C_i 分别为节点*i*与下一节点间非母线线路电感、电阻、电容； L_{f1} 、 L_{f2} 与 $L_{\beta 1}$ 为多GCI系统源侧电感； L_{f2} 、 $L_{\beta 2}$ 与 $L_{\beta 2}$ 为多GCI系统负荷侧电感； R_{67} 、 L_{67} 分别为联结线路电阻、电感。

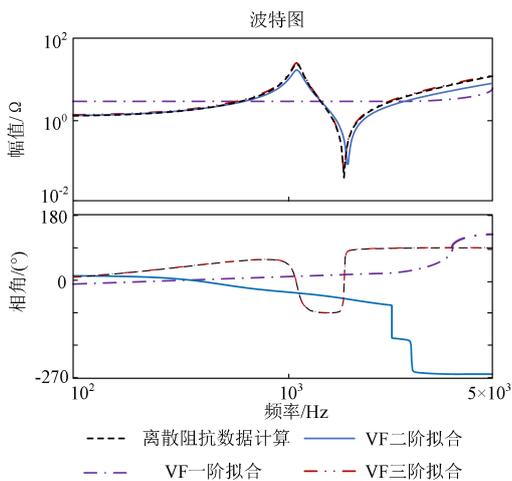


图 B2 逆变器阻抗频率响应伯德图

Fig.B2 Bode diagram of impedance frequency response for inverter

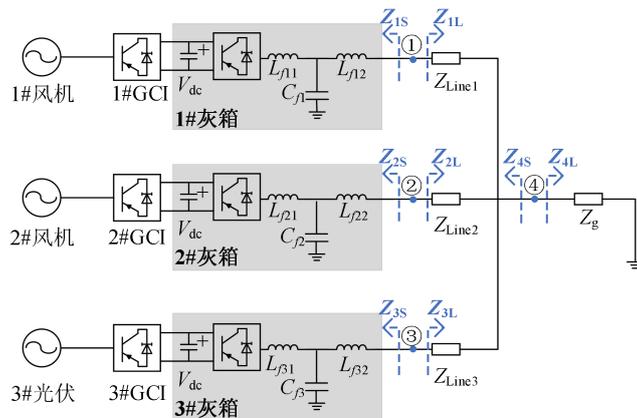


图 B3 多 GCI 简化系统电路结构

Fig.B3 Circuit structure of multi-GCI simplified system

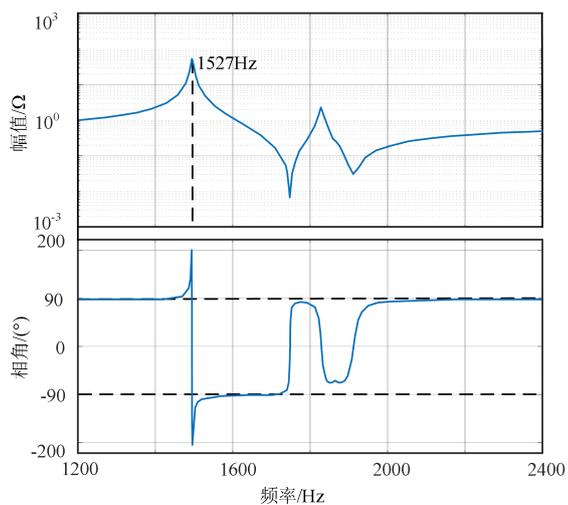


图 B4 基于 VF 算法拟合的 Z_g 伯德图

Fig.B4 Bode diagram of Z_g fit by VF algorithm

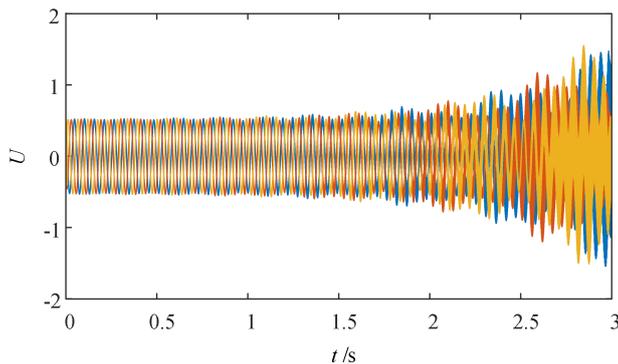


图 B5 多 GCI 复杂系统阻抗网络节点④电压波形

Fig.B5 Voltage waveform of Node ④ in impedance network of multi-GCI complex system

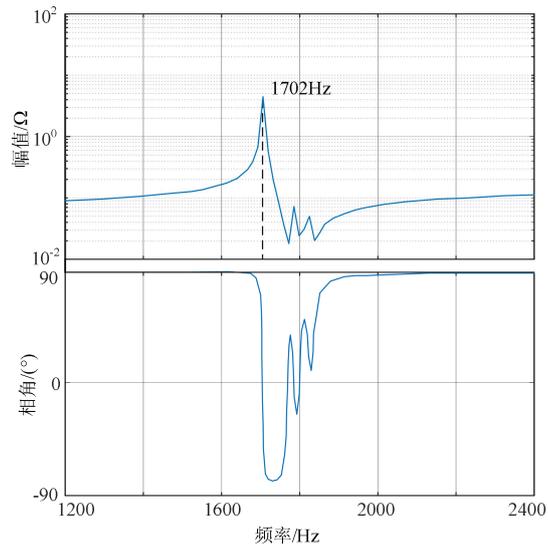


图 B6 基于 VF 算法拟合的 Z_4 伯德图

Fig.B6 Bode diagram of Z_4 fit by VF algorithm

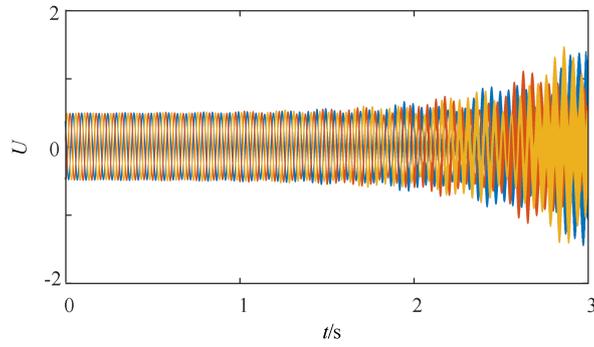


图 B7 聚合后多 GCI 系统节点④电压波形

Fig.B7 Voltage waveform of Node ④ in multi-GCI system after aggregation

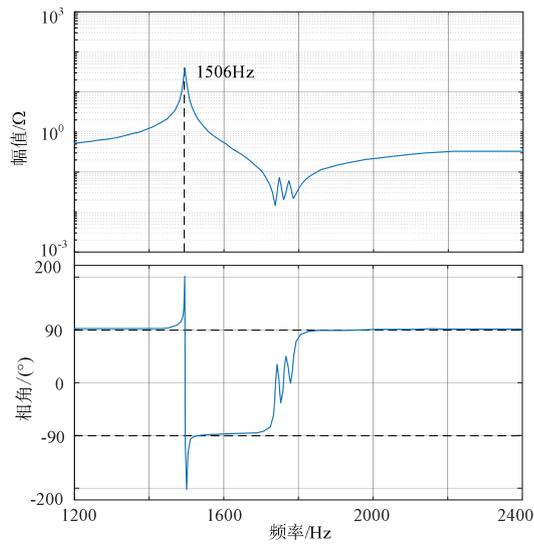


图 B8 基于 VF 算法拟合的 Z_3 伯德图

Fig.B8 Bode diagram of Z_3 fit by VF algorithm

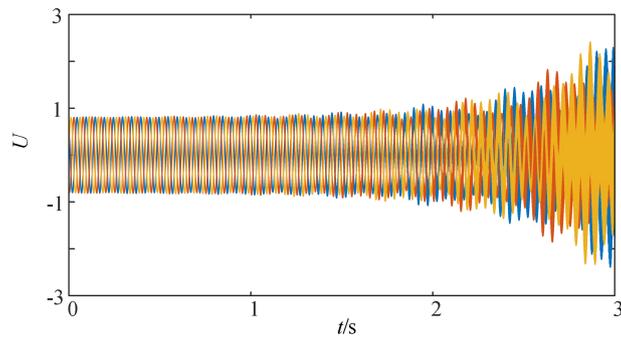


图 B9 改进聚合路径后多 GCI 系统节点③电压波形

Fig.B9 Voltage waveform of Node ③ in multi-GCI system after improving aggregation path