DOI:10.14188/j.1671-8844.2025.0099　　文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-09

基于多模块并联的宽频阻抗测量装置拓扑及控制方法研究

梁阳豆[1],梁振成[1],凌武能[1],熊莉[1],邓秋荃[1],武登科[2],钟佩军[3]

(1. 广西电网有限责任公司,广西 南宁 530000; 2. 武汉大学电气与自动化学院,湖北 武汉 430072; 3. 长沙理工大学电气与信息工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:柔性直流输电系统存在着宽频振荡问题,传统阻抗测量方法存在模型依赖性强、单频注入耗时及高压大电流场景适应性差等局限。为此,提出一种多模块并联宽频阻抗测量装置及其控制方法。该装置由多个并联可控扰动注入单元与基波分流单元组成,前者通过模块化设计提升扰动输出能力,后者利用电容电感谐振分流基波电流,显著降低扰动模块的电流应力,适应高压大电流工况。控制策略采用比例谐振(PR)闭环控制,实现10Hz至1000Hz宽频扰动电压的精准跟踪;基波分流单元通过可调电感参数动态匹配电网频率波动,保障测量精度。仿真结果表明:装置可输出额定电压1%~5%的宽频扰动,基波分流单元使工频电流幅值降低约94%,且电网阻抗测量结果与理论值高度吻合。本文所提方案为柔直系统宽频阻抗测量提供了高精度、高适应性的解决方案。

关键词:多模块并联;阻抗测量;柔性直流输电;宽频振荡

中图分类号:TM 457　**文献标志码:**A

A multi module parallel broadband impedance measurement device and its control method

LIANG YangDou[1], LIANG ZhenCheng[1], LING WuNeng[1], XIONG Li[1], DENG QiuQuan[1], WU DengKe[2], ZHONG PeiJun[3]

(1. Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530000, China;
2. School of Electrical and Automation, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;
3. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: The flexible DC transmission system suffers from broadband oscillation, and traditional impedance measurement methods have limitations such as strong model dependence, time-consuming single frequency injection, and poor adaptability to high voltage and high current scenarios. Therefore, this article proposes a multi module parallel broadband impedance measurement device and its control method. The device consists of multiple parallel controllable disturbance injection units and fundamental current shunt units. The former enhances disturbance output capability through modular design, while the latter utilizes capacitive inductive

收稿日期:2023-03-15
作者简介:梁阳豆(1986-),女,高级工程师,硕士,主要从事电力系统调度与控制,E-mail: 474043150@qq.com。
通信作者:武登科(2002-),男,学士,主要从事柔直阻抗建模及阻抗测量,E-mail: 1239390286@qq.com。
基金项目:多馈入柔性直流输电系统宽频振荡分析及抑制(编号:046000KK52222037/0400002024030101DD00029)。

本文引用格式:梁阳豆,梁振成,凌武能,等.基于多模块并联的宽频阻抗测量装置拓扑及控制方法研究[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-9.

Citation: LIANG YangDou, LIANG ZhenCheng, LING WuNeng, et al. A multi module parallel broadband impedance measurement device and its control method[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX):1-9.

resonance to shunt fundamental current, significantly reducing the current stress of the disturbance module and adapting to high voltage and high current operating conditions. The control strategy adopts proportional resonance (PR) closed-loop control to achieve precise tracking of wideband disturbance voltage from 10Hz to 1000Hz; The fundamental shunt unit dynamically matches the frequency fluctuations of the power grid through adjustable inductance parameters to ensure measurement accuracy. The simulation results show that the device can output wideband disturbances of 1% to 5% of the rated voltage, and the fundamental shunt unit reduces the amplitude of the power frequency current by about 94%. The measured impedance of the power grid is highly consistent with the theoretical value. The proposed solution in this article provides a high-precision and highly adaptable solution for broadband impedance measurement in flexible straight systems.

Key words: Multi module parallel connection; Impedance measurement; Flexible direct current transmission; Wideband oscillation

近年来,光伏、风电等新能源由于资源丰富、清洁、可再生等优点,被各国做为应对传统化石能源短缺问题的重要手段,受到全世界范围内的广泛关注[1]。在新能源开发需求的推动下,远距离、大容量的电力输送技术得到了快速发展。我国能源资源与负荷极不均衡的分布态势决定了需要建设大规模远距离的电能输送通道[3]。传统的高压交流输电方案在输电距离过长时存在电压降落大、线路成本高等问题。高压直流输电技术(High voltage direct current, HVDC)具备输送容量大、输电距离远且输电损耗小等特点,在远距离输电方面具有明显的优势[4]。

在现有的众多高压直流输电技术中,基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流输电技术因其具备谐波含量少、结构灵活、可控性强、无换相失败等优点,在新能源发电联网、高压大容量输电等领域具有很好的应用前景[5]。然而随着柔直工程的不断发展,相关的稳定性问题也逐渐凸显其中最为突出的就是宽频振荡问题[6]。舟山五端柔直工程某换流站切换孤岛运行时,系统出现谐波电流,最终产生高频振荡导致跳闸[7]。广东南澳柔直工程在风场外送出力增大过程中有次同步振荡情况发生,其振荡频率为21Hz,最终导致该柔直系统停运[8]。张北柔直工程在康保站对交流侧充电过程中也观测到1500Hz左右的高频振荡[10]。

上述宽频振荡情况可以归结为谐振稳定性问题,相应的分析方法可以分为特征值法和阻抗分析法[11]。特征值法需要获取系统的全部参数构建全局状态空间模型,依赖于模型的完整性和确定性,不能适应系统结构的变化。而基于端口的阻抗分析法由于具备可测量特性,在评估柔直系统的谐振稳定性方面得到了大量应用[12]。文献[14]-[15]考虑电网背景谐波的影响提出一种向系统注入75Hz非特征正弦扰动并通过测得的电网阻抗参数换算获得电网电感和电阻的方法;文献[16]针对单频正弦扰动注入在宽频带阻抗测量中耗时较长的问题,提出一种基于多频正弦扰动注入的阻抗测量方法,并成功应用于并网变流器阻抗测量。

在阻抗测量装置方面,湖南大学研制了一台380V/100kVA低压宽频带阻抗测量装置,测量频率范围为10-1000Hz[17]。西安交通大学为测量实际三相交流系统的阻抗,研制了一台基于并联H桥的交流阻抗测量装置[18]。中国电力科学研究院为分析直驱风电场宽频振荡机理,搭建了CHIL实时仿真平台,能够实现电力电子装置的单频测量[19]。然而,由于柔性直流馈入系统呈现高电压、大电流特性,常规的阻抗装置难以适用。

本文提出了一种多模块并联宽频阻抗测量装置及其控制方法,测量装置由多个并联的可控扰动注入单元以及一个基波分流单元组成。其中单个可控扰动注入单元可实现宽频段的扰动电压输出,多个单元并联可以提升装置扰动注入的能力。基波分流单元通过电容电感串联谐振实现对基波电流的分流,降低了流经扰动注入模块的电流幅值。本文所提的多模块并联宽频阻抗测量装置可以适用于高压、大电流柔直馈入系统的阻抗测量,且具有一定的经济性。最后,通过仿真验证了多模块并联宽频阻抗测量装置的准确性。

1 装置拓扑结构与控制策略

多模块并联宽频阻抗测量装置拓扑结构如图1所示,其由N个可控扰动注入单元以及一个基波分流单元并联组成。多个可控扰动注入单元结构相同,包含了储能电池、单相桥式逆变电路以及输出

滤波器。基波分流单元由电阻器、可调电感器、电容器以及投切开关组成。

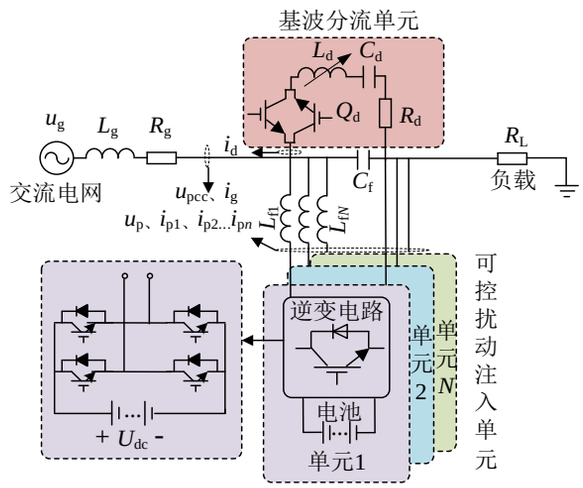


图1 多模块并联宽频阻抗测量装置拓扑结构

Fig.1 Topology structure of multi module parallel broadband impedance measurement device

图1中，u_g为交流电网电压，L_g、R_g表示等效电网阻抗，R_L为负载电阻；u_{pcc}为电网公共连接点(point of common coupling，PCC)电压，，i_g为电网基波电流；u_p为扰动电压，i_{pn}为流经第N个可控扰动注入单元的扰动电流，L_{fN}为第N个可控扰动注入单元的输出滤波电感，C_f为输出滤波电容；Q_d为基波分流单元投切开关，L_d为可调谐振电感，C_d为谐振电容，R_d为电阻器；U_{dc}为储能电池电压。

装置拓扑采用多模块并联的连接方式，一方面通过模块化使得装置具有较好的可扩展性，另一方面相较于单个扰动注入单元提高了扰动输出的能力。基波分流单元可以通过电感电容串联谐振实现对系统中基波电流的分流，使得流入可控扰动注入的电流减小，使得装置可以适用于高电压、大电流的场合。此外，考虑到电网实际运行频率存在小幅波动的情况，基波分流单元的可调谐振电感采用可变抽头的电抗器来实现，使得基波分流单元谐振频率跟随电网实际运行频率改变。

基波分流单元中的投切开关由多个反并联IGBT并联组成，其中反并联IGBT是为了实现基波分流单元的接入与移除并在接入状态下实现电流的双向流通，多个反并联IGBT并联是为了进行电流的分流防止IGBT被烧坏。电阻器则是用于避免基波分流单元与多可控扰动注入单元在基频等效电路中短路，从而引起多可控扰动注入单元电流越限。

为实现可控扰动注入单元的宽频扰动输出能力，装置采用了基于比例谐振(Proportional Resonance，PR)控制的闭环控制，其相应的控制框图如图2所示。

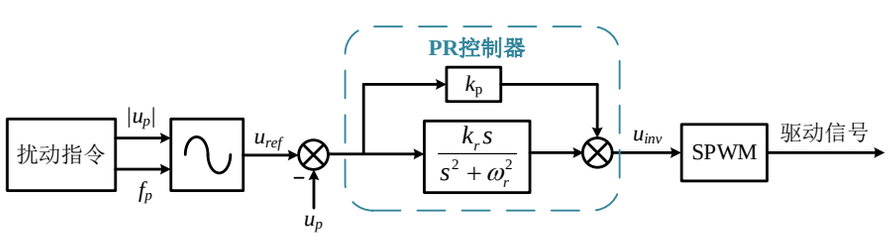


图2 宽频阻抗测量装置控制框图

Fig.2 Control Block Diagram of Broadband Impedance Measurement Device

由图2可知，扰动指令给出了扰动电压的幅值$|u_p|$与频率f_p，经过波形发生器得到扰动电压波形信号u_{ref}，扰动电压波形信号u_{ref}与采样得到的输出电压u_p进行比较后误差输入到PR控制器中输出为调制信号u_{inv}，经过SPWM调制后得到各开关管的驱动信号，从而驱动可控扰动注入单元输出相应的扰动电压波形。PR控制器的传递函数如式(1)所示，相应的伯德图如图3所示。

$$G_{PR}(s)=k_p+\frac{k_r s}{s^2+\omega_r^2} \tag{1}$$

式中：k_p、k_r分别为比例增益系数和谐振增益系数，ω_r为谐振频率。

由图3可知，PR控制器在给定的扰动频率f_r=250Hz处有很大的增益，而在其他频率下增益很小，因此理想的PR控制器可以实现对扰动电压交流信号的无静差跟踪，从而实现可控扰动注入单元宽频扰动电压的生成。

2 装置阻抗测量原理及测量流程

采用基于比例谐振控制的闭环控制的可控扰动注入单元可以等效为一个输出扰动频率电压波形的谐波电压源，投切开关Q_d开通，基波分流单元

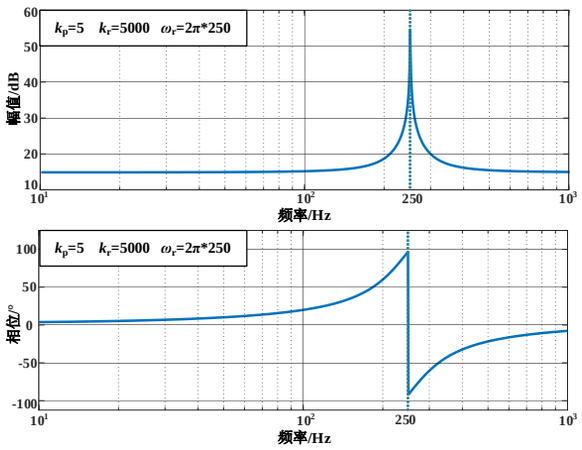


图3 PR控制器传递函数伯德图

Fig.3 Bode plot of PR controller transfer function

接入系统,则整个系统的等效电路图如图4所示。

图4(a)给出了阻抗测量装置等效电路图的基频回路示意图,i_d表示基频电流。可见由于基波分流单元的作用,基频电流不会流经可控扰动注入单元,仅流过电网阻抗、基波分流单元以及负载。将回路中各变量写为相量形式,则基频电流$I_d(j\omega_0)$的表达式如式(2)所示。

$$I_d(j\omega_0)=\frac{U_g(j\omega_0)}{R_g+R_d+R_L+j\omega_0(L_d+L_g)+\dfrac{1}{j\omega_0 C_d}} \tag{2}$$

式中:$\omega_0=2\pi f_0$,$f_0=50$Hz为基波频率。

由于基波分流单元的谐振频率等于基频,因此其在回路中的等效阻抗即为R_d。则式(2)可化简为式(3)。

$$I_d(j\omega_0)=\frac{U_g(j\omega_0)}{R_g+R_d+R_L+j\omega_0 L_g} \tag{3}$$

图4(b)给出了阻抗测量装置等效电路图的扰动频率回路示意图,i_p表示扰动电流。扰动电流i_p由流经基波分流单元的电流与流过电网的电流共同组成,将回路中各变量转变至频域,电网可视为短路,则扰动电流$I_p(j\omega_p)$的表达式如式(4)所示。

$$I_p(j\omega_p)=\frac{U_p(j\omega_p)}{R_d+j\omega_p L_d+\dfrac{1}{j\omega_p C_d}}+\frac{U_p(j\omega_p)}{R_g+R_L+j\omega_p L_g} \tag{4}$$

式中:$\omega_P=2\pi f_P$,f_P为扰动频率。

基波分流单元在扰动频率处的阻抗相对较大,因此其上流过的扰动电流可以近似忽略,不会影响阻抗测量的精度,于是流过电网支路的扰动电流$I_{pg}(j\omega_p)$可用式(5)表示。

$$I_p(j\omega_p)\approx I_{pg}(j\omega_p)=\frac{U_p(j\omega_p)}{R_g+R_L+j\omega_p L_g} \tag{5}$$

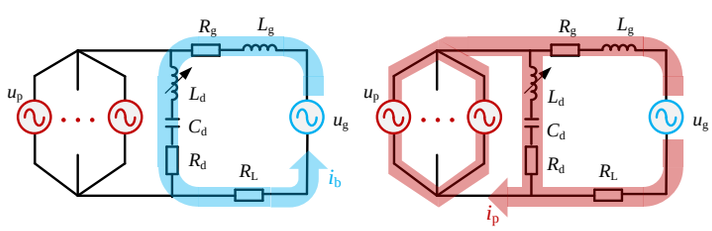
可控扰动注入装置通过向电网注入扰动电压,作用于电网阻抗后得到相应的扰动电流响应。通过测量可控扰动注入单元输出的扰动电压以及流经电网的扰动响应电流,并利用快速傅里叶变换算法将时域采样数据变换至频域,获得扰动电压与响应电流的相量表达式,即可通过二者的比值计算得到扰动频率处的电网阻抗,其表达式如式(6)所示。

$$Z_g(j\omega)=\frac{U_p(j\omega)}{I_p(j\omega)}-R_L \tag{6}$$

在实际的应用场景中,可以通过布置电压、电流传感器采集大量装置本身及被测系统的电压和电流信息,包括并网点电压u_{pcc}、被测系统电流i_g、可控扰动注入单元输出扰动电压u_p以及被测系统的扰动响应电流i_p等信息,经过滤波处理后上传至中央控制器。中央控制器形成两套控制指令,即控制指令1与控制指令2。其中控制指令1用于控制基波分流单元,控制指令2用于控制可控扰动注入单元。则测量装置的阻抗测量流程图如图5所示。

3 仿真验证

为验证所提多模块并联的柔性直流馈入系统宽频带阻抗测量装置及其控制方法的正确性,基于MATLAB/Simulink仿真实验平台搭建了装置的仿真模型。仿真模型仿真运行步长为1e-6s,模型各参数信息如表1所示。



(a)基频回路 (b)扰动频率回路

图4 阻抗测量装置等效电路图

Fig.4 Equivalent circuit diagram of impedance measurement device

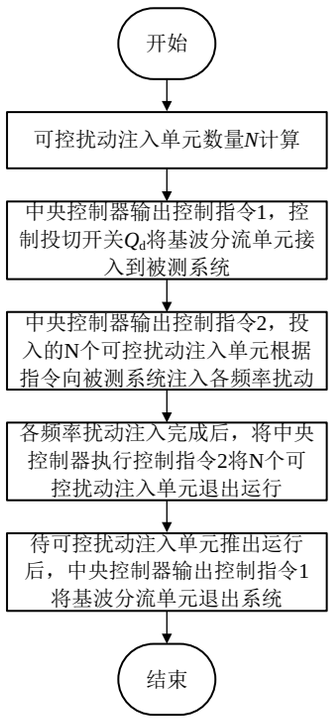


图5 阻抗装置阻抗测量流程图

Fig.5 Impedance Measurement Flowchart of Impedance Device

表1 多模块并联阻抗测量装置仿真参数表

Table 1 Simulation parameter table for multi module parallel impedance measurement device

参数	取值	参数	取值
U_g/kV	10	C_f/ uF	50
U_{dc}/V	800	C_d/ mF	3.18
L_f/mH	5	R_g/ Ω	0.89
L_d/ mH	3.12～3.25	R_L/ Ω	20
L_g/ mH	1	f_c/kHz	20

首先,对多模块并联阻抗测量装置的宽频扰动注入能力进行验证,验证方式如下:仿真工况1,将参考电压幅值设定为300V,更改参考电压的频率分别设置为10Hz、250Hz以及1000Hz,相应的仿真结果如图6所示;仿真工况2,将参考电压的频率设定为250Hz,更改参考电压的幅值分别设置为150V、300V以及450V,相应的仿真结果如图7所示。

由图6与图7可知,多模块并联阻抗测量装置可以实现低频(10Hz)、中频(250Hz)以及高频(1000Hz)的扰动电压输出,且输出扰动电压幅值满足额定电压1%～5%的幅值范围,验证了多模块并联阻抗测量装置及控制方法的准确性,证实了装置具有宽频阻抗测量的能力。

为验证多可控扰动注入单元与基波分流单元的作用,设置阻抗测量装置输出扰动电压幅值为300V,频率为250Hz。分别测量以下三种工况下流经阻抗测量装置的电流波形及其频谱图。三种工况分别为:(1)测量装置仅含有单个可控扰动注入单元且未投入基波分流单元;(2)测量装置含有三个可控扰动注入单元且未投入基波分流单元;(3)测量装置含有三个可控扰动注入单元且投入基波分流单元。所得结果如图8所示。相应的数据对比如表2所示。

由图8和表2可知,仅含有单个可控扰动注入单元时,流经测量装置的电流高达812.3A,而对于多模块并联阻抗测量装置,在未投入基波分流单元时,测量装置电流中既含有工频电流分量也含有扰动频率的电流分量,其电流幅值约为244.6A。而在投入基波分流单元后,测量装置电流中几乎没有工频电流分量,仅流通扰动频率电流分量,其电流幅值约为13.96A。由此可见,多个可控扰动注入单元的并联以及基波分流单元的投入显著减小了流经测量装置的电流幅值,减低了装置中开关器件所需的耐流能力,有利于节约成本。

此外,为应对电网频率波动,基波分流单元中电感采用可变抽头的电抗器来实现,通过调整电感参数来实现基波分流单元谐振频率对电网实际运行频率的跟随。图9给出了当电网运行在频率49.5Hz和50.5Hz,基波分流单元不调整电感参数与调整电感参数时流经测量装置的电流波形及频谱图,其中频谱图内的数字代表各个频率分量的有名值。

根据图9分析可知,当电网实际运行频率波动而基波分流单元谐振频率不变时,会有部分基频电流流经测量装置,使得电流波形畸变,幅值增大,降低阻抗测量的精度。而采用可变抽头的电抗器来改变电感参数实现基波分流单元谐振频率与电网实际运行频率的匹配,可以有效降低流过测量装置的基频电流分量,有利于阻抗测量。

最后,通过扫频的方法对电网阻抗进行测量,扫频区间为15～965Hz,扫频步长为50Hz,测量结果与电网阻抗理论值如图10所示,可见测量结果与理论值基本吻合,验证了多模块并联阻抗测量装置的有效性。

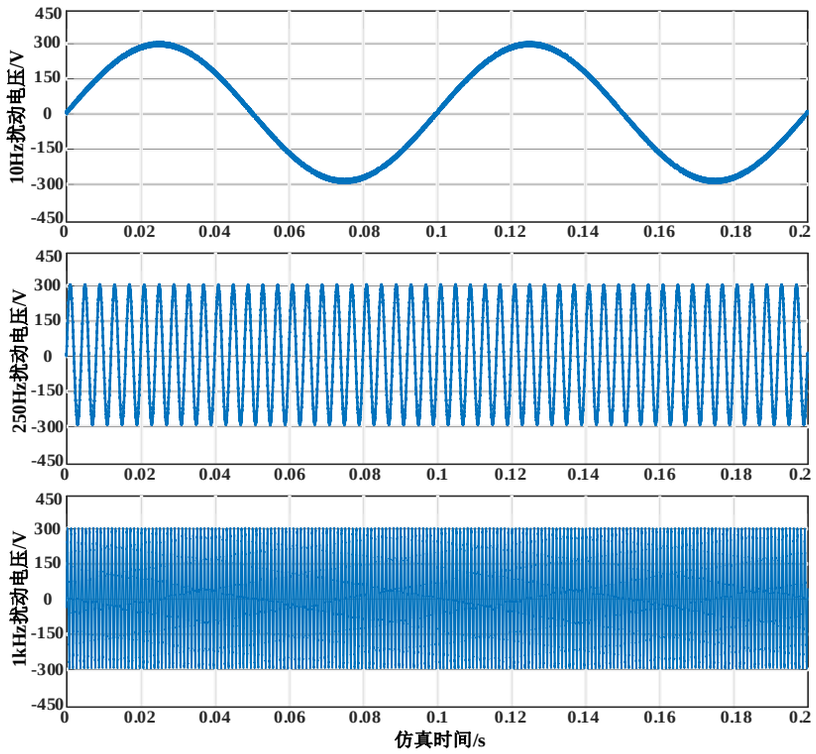


图6 不同频率扰动电压输出波形

Fig.6 Different frequency disturbance voltage output waveform

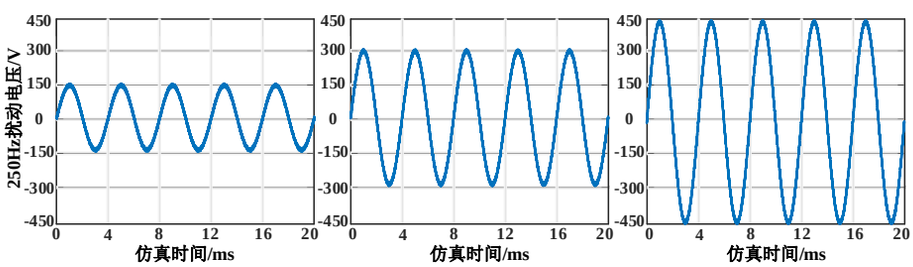


图7 不同幅值扰动电压输出波形

Fig.7 Different amplitude disturbance voltage output waveform

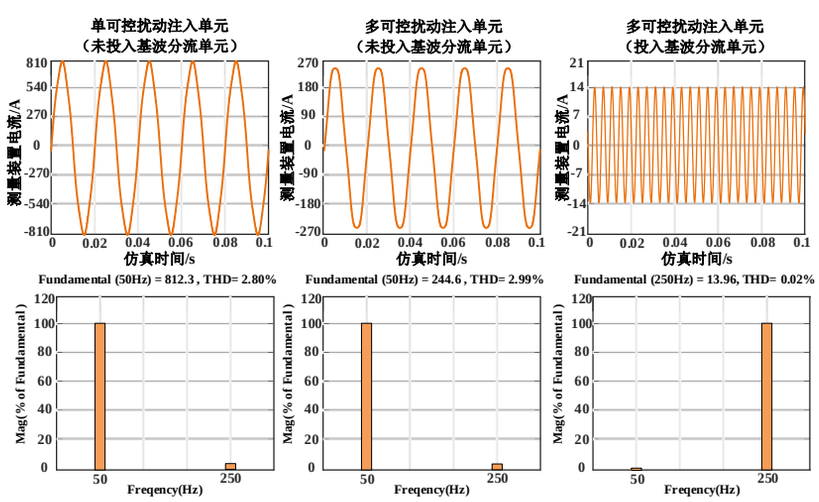


图8 三种工况下测量装置电流波形及频谱图

Fig.8 Current waveform and spectrum diagram of the fundamental shunt unit under switching

表 2 三种工况下电流幅值与总谐波失真

Table 2 Current amplitude and total harmonic distortion under three operating conditions

工况	电流幅值/A	总谐波失真(THD)
(1)	812.3	2.80%
(2)	244.6	2.99%
(3)	13.96	0.02%

4 结论

本文提出了一种多模块并联宽频阻抗测量装置及其控制方法,其具有以下优势:

1)所提多模块并联宽频阻抗测量装置采用多个可控扰动注入单元并联注入扰动的工作模式,可以提高扰动输出的能力,同时通过各个单元之间的分流作用,降低了各个单元中开关器件的电流应力,有利于降低设计成本。

2)所提多模块并联宽频阻抗测量装置引入基波分流单元,通过电感电流串联谐振实现对基频电流的分流,从而有效降低了流经可控注入单元的电流幅值。且考虑电网实际运行频率的波动,基波分流单元中的电感采用可变抽头的电抗器来实现,使得基波分流单元谐振频率可以跟随电网实际运行频率变化。

3)仿真实验结果表明,本文所提测量装置可以实现宽频段的扰动电压注入,且电压幅值满足额定电压1%~5%的幅值范围,通过基波分流单元可以

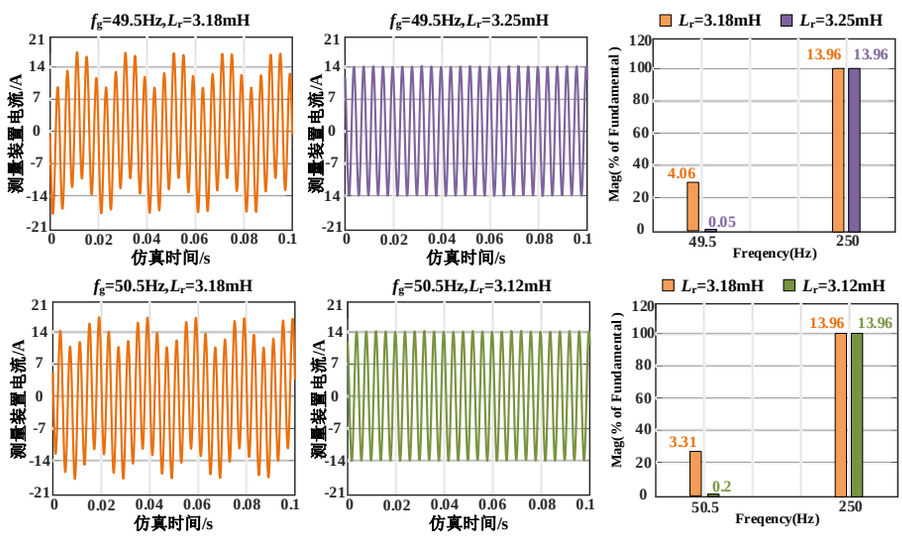


图 9 电网频率波动下的电流波形及频谱图

Fig.9 Current waveform and spectrum diagram under power grid frequency fluctuation

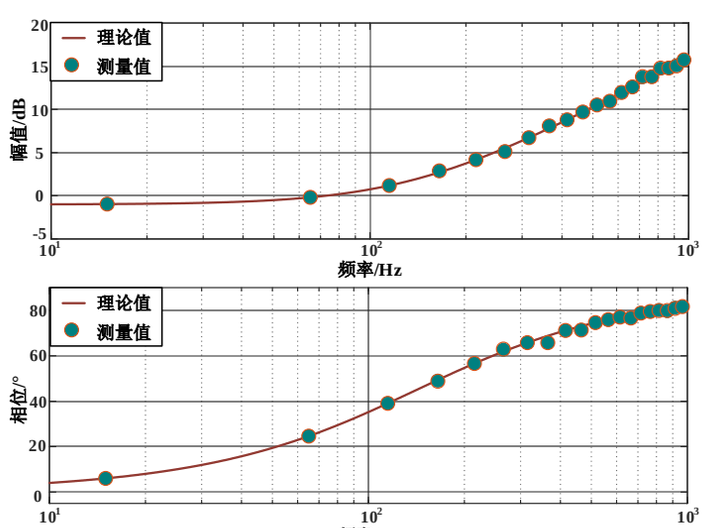


图 10 电网阻抗测量结果

Fig.10 Measurement results of power grid impedance

有效地降低流入可控扰动注入单元的电流幅值,从而使得装置适用于高电压、大电流的场景。最终通过对电网阻抗的测量验证了装置的准确性。

参考文献:

[1] Nguyen, M, Saha K, Eghbal M. Input/output selection for wide-area power oscillation damper of hybrid multi-terminal high-voltage direct current to connect remotely located renewable energy resources[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(5): 483-493.

[2] Hamelinck C, Loveinfosse D, Koper M. Renewable energy progress and biofuels sustainability[J]. Ecofys, London, 2012:450.

[3] 刘振亚,张启平,董存,等.通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J].中国电机工程学报,2014,34(16):2513-2522.DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.16.001.
LIU Zhen-ya, ZHANG Qi-ping, DONG Cun, ZHANG Lin, WANG Zhi-dong. Efficient and Security Transmission of Wind, Photovoltaic and Thermal Power of Large-scale Energy Resource Bases Through UHVDC Projects[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2513-2522. DOI: 10.13334/j. 0258-8013. pcsee. 2014.16.001

[4] 姚良忠,吴婧,王志冰,李琰,鲁宗相.未来高压直流电网发展形态分析[J].中国电机工程学报,2014,34(34): 6007-6020. DOI: 10.13334/j. 0258-8013. pcsee. 2014.34.001
YAO Liang-zhong, WU Jing, WANG Zhi-bing, LI Yan, LU Zong-xiang. Pattern Analysis of Future HVDC Grid Development[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6007-6020. DOI: 10.13334/j. 0258-8013.pcsee.2014.34.001

[5] 汤广福,罗湘,魏晓光.多端直流输电与直流电网技术[J].中国电机工程学报,2013,33(10): 8-17,24. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2013.10.002
TANG Guang-fu, LUO Xiang, WEI Xiao-guang. Multi-terminal HVDC and DC-grid Technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17, 24. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2013.10.002

[6] 陈骁,杜文娟,王海风.开环模式谐振条件下直驱风机接入引发电力系统宽频振荡的研究[J].中国电机工程学报,2019,39(9): 2625-2636. DOI: 10.13334/j. 0258-8013.pcsee.172378
CHEN Xiao, DU Wen-juan, WANG Hai-feng. Analysis on Wide-range-frequency Oscillations of Power Systems Integrated With PMSGs Under the Condition of Open-loop Modal Resonance[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2625-2636. DOI: 10.13334/j. 0258-8013.pcsee.172378

[7] 马玉龙,马为民,陈东,等.舟山多端柔性直流工程系统方案[J].电力建设,2014,35(3): 1-6 .
MA Yulong, MA Weimin, CHEN Dong, et al. System Scheme of Zhoushan Multi-Terminals VSC-HVDC Project[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(3): 1-6.

[8] 赵岩,郑斌毅,贺之渊.南汇柔性直流输电示范工程的控制方式和运行性能[J].南方电网技术,2012,6(6): 6-10.
ZHAO Yan, ZHENG Binyi, HE Zhiyuan. The Control Mode and Operating Performance of Nanhui VSC-HVDC Demonstration Project[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(6):6-10.

[9] 魏伟,许树楷,李岩,黎小林,饶宏,朱喆,冯满盈,陈俊.南澳多端柔性直流输电示范工程系统调试[J].南方电网技术,2015,9(1):73-77.
WEI Wei, XU Shuka, LI Yan, LI Xiaolin, RAO Hong, ZHU Zhe, FENG Manying, CHEN Jun. The System Commissioning of Nan'ao VSC-MTDC Demonstration Project[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1):73-77.

[10] 杜镇宇,阳岳希,季柯,周啸,胡应宏.张北柔直工程高频谐波振荡机理与抑制方法研究[J].电网技术,2022,46(8): 3066-3075.
DU Zhenyu, YANG Yuexi, JI Ke, ZHOU Xiao, HU Yinghong. High Frequency Harmonic Resonance and Suppression in Zhangbei Project[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3066-3075.

[11] MAJUMDER R. Aspect of voltage stability and reactive power support in active distribution[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013, 8(3): 442-450.

[12] C. -S. Chen, C. -H. Lin, W. -L. Hsieh, C. -T. Hsu and T. -T. Ku, "Enhancement of PV Penetration With DSTATCOM in Taipower Distribution System," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 2, pp. 1560-1567, May 2013.

[13] S. -C. Hsieh, "Economic Evaluation of the Hybrid Enhancing Scheme With DSTATCOM and Active Power Curtailment for PV Penetration in Taipower Distribution Systems," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 3, pp. 1953-1961, May-June 2015.

[14] Asiminoaei L, Teodorescu R, Blaabjerg F et al. Implementation and test of an online embedded grid impedance estimation technique for PV inverters[J].

IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(04):1136-1144.

[15] 武文, 吴学智, 赵宇明, 荆龙. 多端口直流潮流控制器抑制次同步振荡阻尼控制策略研究[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1388-1399.
WU Wen, WU Xuezhi, ZHAO Yuming, JING Long. Active Damping Control of Multi-port DC Power Follow Controller for Suppressing Sub-synchronous Oscillation[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1388-1399.

[16] Li M, Nian H, Hu B, et al. An Improved Impedance Measurement Method Based on Multi-Sine Signal Considering the Suppression of Noise Interference[J]. IEEE Access, vol. 9, pp. 34221-34230, 2021.

[17] Wu W, Zhou L, Chen Y, et al. Sequence-Impedance-Based Stability Comparison BetweenVSGs and Traditional Grid-Connected Inverters[J]. IEEE Transactions on PowerElectronics, 2019, 34(1): 46-52.

[18] Shi H, Zhuo F, Zhang D, et al. Modeling, Analysis, and Measurement of Impedance forThree-phase AC Distributed Power System[C]. 2014 IEEE Energy Conversion Congressand Exposition (ECCE), 2014, 4635-4639.

[19] Wu M, Li J, Liu Q, et al. Measurement of Impedance-Frequency Property of TractionNetwork Using Cascaded H-Bridge Converters: Device Design and On-Site Test[J]. IEEETransactions on Energy Conversion, 2020, 35(2): 746-756.