

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190590

基于低频电流注入的船舶直流微电网线路阻抗检测

张勤进¹, 张博¹, 刘彦呈¹, 庄绪州¹, 刘洪亮², 刘强¹

(1. 大连海事大学轮机工程学院, 辽宁 大连 116026; 2. 上海船舶研究设计院, 上海 201203)

摘要: 下垂控制是船舶直流微电网中一种实现系统能量分配的有效方法。在传统下垂控制中, 系统内各微源之间线路阻抗不一致, 导致各分布式微源承担的功率也不一致, 严重时微源直流变换器甚至出现过载故障。为了解决船舶直流微电网中由线路阻抗引起的负载均流精度问题, 提出利用低频注入来检测线路阻抗的方法。通过在电感电流上注入低频交流信号, 检测注入后的变换器电压、电流信息, 利用傅里叶变换求得线路阻抗值, 进一步补偿下垂系数。该方法可以提高微电网系统直流母线电压质量, 改善直流变换器并联均流时的负载均分效果, 对系统稳定运行影响小。最后仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词: 直流微电网; 负载均分; 线路阻抗检测; 低频注入

A line impedance detection of a ship DC microgrid based on low frequency current injection

ZHANG Qinjin¹, ZHANG Bo¹, LIU Yancheng¹, ZHUANG Xuzhou¹, LIU Hongliang², LIU Qiang¹

(1. Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. Shanghai Merchant Ship Design and Research Institute, Shanghai 201203, China)

Abstract: Droop control is an effective method for realizing system energy distribution of a ship DC microgrid. In traditional droop control, the line impedance between the micro-sources in the system is inconsistent, which leads to inconsistency of the power of the distributed micro-sources. In serious cases, the micro-source DC converter even can suffer overload failure. To solve the problem of load current sharing accuracy caused by line impedance in a marine DC microgrid, a method of detecting line impedance by low frequency injection is proposed. This is achieved by injecting low-frequency AC signals into the inductance current, detecting the converter voltage and current information after injection, and obtaining line impedance by Fourier Transform. Then the droop gains can be compensated. This method can enhance the voltage quality of the DC bus in a microgrid system, improve the load sharing effect of a DC converter in parallel current sharing, and exert little influence on the stable operation of the system. Finally, the simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51709028 and No. 51979021), Natural Science Foundation of Liaoning Province (No. 20170540082), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 3132019317).

Key words: DC microgrid; load sharing; line impedance detection; low frequency injection

0 引言

近年来, 微电网技术成为智能电网研究的重要方向。作为微电网研究的新兴分支, 直流组网技术具有能量转换次数少、结构简单、无需考虑频率稳

定及无功波动等优点^[1-5]。与交流组网技术相比, 直流组网技术能更高效地接纳可再生能源, 在飞机和船舶等领域受到广泛关注^[6-10]。

船舶直流微电网中, 能够保证自身稳定运行需要满足两个重要指标^[11]: (1) 维持直流母线电压稳定; (2) 实现分布式电源功率合理分配和均功过程的动态稳定。目前在多个微源并联运行时采用的控制策略主要有主从控制^[12-14]和对等控制^[15-18]。主从控制策略指定其中一个微源变换器为主模块, 采用电

基金项目: 国家自然科学基金项目(51709028, 51979021); 辽宁省自然科学基金项目(20170540082); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(3132019317)

压控制, 其余变换器为从模块, 采用电流控制, 该策略对主模块要求较高, 一旦主模块出现问题, 整个系统将会失去控制。对等控制策略中分布式微源都有各自的底层控制器, 相互之间无需通信, 微电网系统可靠性高, 成本低^[19-20]。现有对等控制策略多采用下垂控制, 文献[21]利用提高变换器初始电压值的方法调整下垂系数, 能够实现直流母线电压调整, 但负载均流效果较差。为了解决线路阻抗不一致导致电流均分精度不高的问题, 目前多采用基于虚拟阻抗的下垂控制。文献[22]采用交流小信号注入法, 得到当前变换器负载均分情况, 从而调整各分布式微源的输出电压值, 此种方法在实际应用中比较复杂, 对硬件要求较高; 文献[23]则在并网模式下预测线路阻抗值, 利用补偿后的虚拟阻抗抵消线路阻抗的影响, 然而在初始工作时微电网不能工作在离网模式, 工作方式受到限制。因此为了能够有效提高直流微电网下垂控制效率和直流微电网运行稳定性, 准确检测线路阻抗值成为下垂控制的关键。

本文针对采用传统下垂控制调整负载功率均分时精度低的问题, 分析线路阻抗对直流微电网中负载均分的影响。结合船舶直流微电网系统, 提出基于低频电感电流注入的船舶直流微电网线路阻抗检测方法。该方法利用傅里叶变换得到较精确的线路阻抗值, 通过反向补偿线路阻抗造成的直流变换器负载不均分, 有效解决了线路阻抗带来的负载均流精度低的问题。该方法的优点是易于实现, 不需要附加检测设备。最后通过仿真验证了所提方法的可行性。

1 船舶直流微电网结构

1.1 船舶直流微电网典型结构及特点

图 1 所示为典型的船舶直流微电网结构, 主要包含光伏发电单元、电池储能单元和负载单元, 各个单元都是通过对应的变换器连接到直流母线上。光伏发电单元作为产生能量的微源, 经过单向直流变换器连接到直流母线上; 电池储能单元既可以作为产生能量的微源, 也可以作为储存能量的负载, 采用双向直流变换器连接到直流母线上, 实现功率双向传输; 负载单元如螺旋桨推进系统、驾驶室通导系统、照明系统, 消耗微网中的能量, 只可以利用单向直流变换器获取微网能量。各单元直流变换器的控制器可以准确获得当前系统运行的状态信息(电压、电流值), 确保系统运行状态良好。

针对上述船舶直流微电网结构, 本文考虑两种工作模式: (1) 光伏变换器稳定直流母线电压, 储能变换器工作在恒流模式, 此时采用本文方法检测各

变换器线路阻抗值; (2) 储能变换器稳定直流母线电压, 此时各变换器采用下垂控制实现负载均流, 利用在第一个模式检测到的线路阻抗值, 补偿下垂系数, 修正变换器负载功率均分效果。

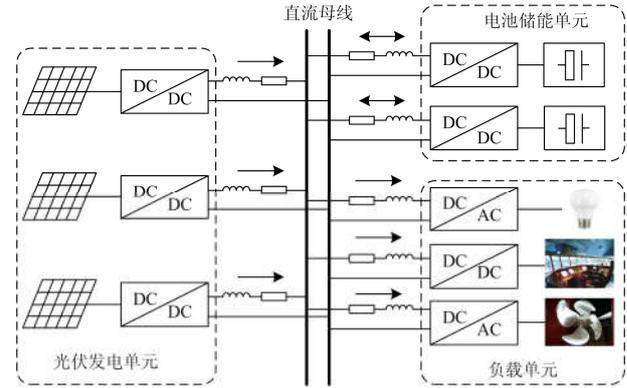


图 1 典型船舶直流微电网结构

Fig. 1 Typical structure of a ship DC microgrid

1.2 传统下垂控制及其特点

图 2 所示为简化后的两个储能变换器(Energy Storage Converter, ESC)并联运行时的等效电路图。其中: U_{bus} 为母线电压; U_{o1} 和 U_{o2} 表示变换器 1 和变换器 2 的输出电压; r_{line1} 和 r_{line2} 表示变换器输出端到负载端之间的线路阻抗。

对该电路应用基尔霍夫定律可以得到传统下垂控制表达式为

$$U_{oi} = U_{refi} - r_{di} I_{oi} \quad (1)$$

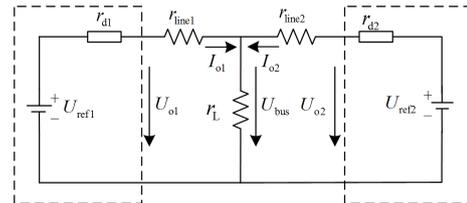


图 2 两台 ESC 并联运行简化电路图

Fig. 2 Simplified circuit of two parallel ESC

式中: U_{oi} 为每个变换器的输出电压; I_{oi} 为每个变换器的输出电流; r_{di} 为下垂系数, 图 2 中戴维宁等效电路的输出阻抗即为下垂系数; U_{refi} 为变换器给定电压值, 其中 $i=1,2$ 。变换器输出电压 U_{oi} 与母线电压 U_{bus} 关系如下:

$$U_{bus} = U_{oi} - r_{linei} I_{oi} \quad (2)$$

在此并联模式中, 母线各处的电压值一致, 变换器给定电压值 $U_{ref1} = U_{ref2}$, 联立式(1)、式(2)可得

$$\frac{I_{o1}}{I_{o2}} = \frac{r_{d2} + r_{line2}}{r_{d1} + r_{line1}} \quad (3)$$

由式(3)可以看出, 变换器的输出电流与变换器输出阻抗和线路阻抗之和成反比, 同时由于线路阻抗的存在, 母线电压会进一步下降。

下垂系数一般依据允许的电压变化范围来设置, 需满足

$$r_{di} \leq \frac{\Delta U_{refmax}}{I_{Ni}} \quad (4)$$

式中: ΔU_{refmax} 为允许的最大电压变化范围; I_{Ni} 为储能单元额定电流。下垂系数的选择取决于线路阻抗的大小, 由式(2)、式(3)可以看出, 线路阻抗的存在使得负载功率不能均分, 并且会对母线电压产生较大的影响, 因此为了实现较好的负载功率均分, 精确的检测线路阻抗是十分有必要的。

2 基于低频电流注入的阻抗检测方法

实现该方法的系统主要包括: ① 储能变换器, 储能变换器两端分别连接直流母线和蓄电池; ② 储能变换器控制模块, 控制模块可以实现下垂控制、稳定直流母线电压; ③ 线路阻抗检测模块, 完成低频注入和线路阻抗计算。基于图 1 所示的船舶直流微电网, 提出一种基于低频交流电流注入的阻抗检测方法, 在变换器电感电流上注入低频交流信号, 进而通过检测注入低频信号后的变换器输入电压、电流计算出线路阻抗。

2.1 阻抗检测方法

该方法的具体实现过程如图 3 所示, 其中直流母线与变换器之间有等效线路阻抗为 r_{line1} , 变换器输出端为储能电池 E_1 。

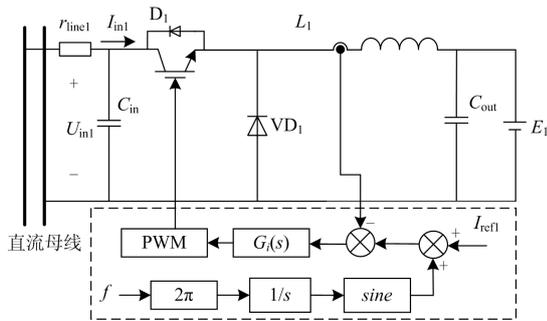


图 3 频率注入方法图

Fig. 3 Frequency injection method diagram

储能变换器工作在 Buck 模式, 采用电流单闭环控制, 检测变换器的输入电压、电流和母线电压值, 在 t_1 时刻测得的变换器输入电压为 U_{in1} , 输入电流为 I_{in1} , 由此可以得到

$$U_{bus} = U_{in1} + r_{line1} I_{in1} \quad (5)$$

t_2 时刻在电感电流上注入频率为 f 的交流小信号, 测得的输入电压、输入电流、母线电压分别为 $U_{in1} + \hat{u}_{in1}$ 、 $I_{in1} + \hat{i}_{in1}$ 、 $U_{bus} + \hat{u}_{bus}$, 由此可以得到式(6)。

$$U_{bus} + \hat{u}_{bus} = U_{in1} + \hat{u}_{in1} + r_{line1} (I_{in1} + \hat{i}_{in1}) \quad (6)$$

由式(5)、式(6)可得到线路阻抗表达式为

$$r_{line1} = \frac{\hat{u}_{bus} - \hat{u}_{in1}}{\hat{i}_{in1}} \quad (7)$$

式(7)中, 假设 \hat{u}_{bus} 为零, 即注入低频信号对直流母线电压影响很小, 母线电压未发生变化, 则 r_{line1} 值仅由变换器输入电压和输入电流决定。因此可得到系统中各变换器与母线之间的线路阻抗 r_{linei} , 该值可较精确地补偿下垂系数, 从而解决传统下垂控制带来的负载均分精度低的问题。

图 4 为阻抗检测方法原理图, 将低频正弦信号注入到电感电流上, 测量注入信号后变换器的输入电压、电流值。

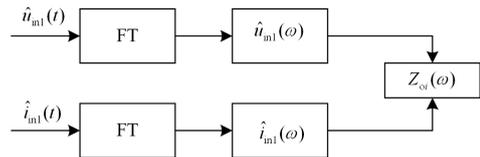


图 4 阻抗检测原理

Fig. 4 Principle of impedance detection

图中: $\hat{u}_{in1}(t)$ 为注入低频交流信号后的输入电压; $\hat{i}_{in1}(t)$ 为注入低频交流信号后的输入电流, 响应信号通过傅里叶变换(Fourier Transform, FT)由时域信号转换为频域信号, 电压响应频域与电流响应频域为 $\hat{u}_{in1}(\omega)$ 和 $\hat{i}_{in1}(\omega)$, 响应电压、电流信号可分别写为

$$\hat{u}_{in1}(\omega) = |\hat{u}_{in1}(\omega)| e^{j\phi_u(\omega)} \quad (8)$$

$$\hat{i}_{in1}(\omega) = |\hat{i}_{in1}(\omega)| e^{j\phi_i(\omega)} \quad (9)$$

式中: $|\hat{u}_{in1}(\omega)|$ 、 $|\hat{i}_{in1}(\omega)|$ 为振幅频谱; $\phi_u(\omega)$ 、 $\phi_i(\omega)$ 为相位频谱。在该方法中, 感性阻抗可以忽略, 所以可得线路阻抗表达式如式(10)。

$$r_{linei} = \frac{|\hat{u}_{in1}(\omega)|}{|\hat{i}_{in1}(\omega)|} \quad (10)$$

2.2 阻抗检测精度分析

由上节分析可以看出, 线路阻抗的测量精度受直流母线电压的影响较大。由图 1 可知, 与微源连接的直流变换器, 均接在同一直流母线上, 而直流母线两侧变换器的输出波动会影响母线电压的稳定。当光伏发电单元变换器工作在恒压模式时, 此时由光伏发电单元调整母线电压保持稳定, 分析负载波动对光伏发电单元侧变换器输出电压的影响。

图 5 为光伏发电单元变换器控制框图, 采用电压、电流双闭环控制来实现直流母线电压的稳定。

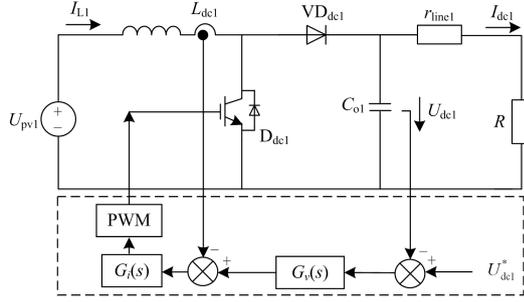


图 5 变换器控制框图

Fig. 5 Boost converter control block diagram

为了分析系统阻抗特性, 确定负载波动对系统的影响, 建立 Boost 变换器模型如下。

$$L_{dc1} \frac{dI_{L1}}{dt} = U_{pv1} - (1-d_1)U_{dc1} \quad (11)$$

$$C_{o1} \frac{dU_{dc1}}{dt} = (1-d_1)I_{L1} - I_{dc1} \quad (12)$$

式中: U_{pv1} 、 U_{dc1} 为变换器输入和输出电压; U_{dc1}^* 为参考电压, I_{L1} 、 I_{dc1} 为变换器电感电流和输出电流; d_1 为变换器工作占空比。图 5 中 $G_v(s)$ 、 $G_i(s)$ 分别为变换器控制电压环、电流环, 由此得到变换器控制到输出的传递函数 $G_{vd}(s)$ 、电感电流到输出的传递函数 $G_{vi}(s)$ 以及开环输出阻抗 $Z_o(s)$ 。

$$G_{vd}(s) = \frac{d_1' U_{pv1} (1 - \frac{sL_{dc1}}{d_1'^2 R})}{L_{dc1} C_{o1} s^2 + \frac{L_{dc1}}{R} s + d_1'^2} \quad (13)$$

$$G_{vi}(s) = \frac{d_1' U_{dc1} - I_{L1} L_{dc1} s}{C_{o1} U_{dc} s + d_1' I_{L1} + \frac{U_{dc}}{R}} \quad (14)$$

$$Z_o(s) = \frac{sRL_{dc1}}{s^2 L_{dc1} C_{o1} + s \frac{L_{dc1}}{R} + d_1'^2} \quad (15)$$

式中, $d_1' = 1 - d_1$, 由式(11)~式(15)以及图 5 控制框图可以得到双闭环控制下的输出阻抗小信号数学模型如图 6 所示。

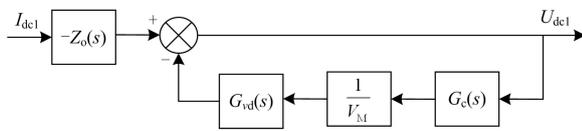


图 6 变换器输出阻抗传递函数

Fig. 6 Transfer function of output impedance

图 6 中 $G_c(s)$ 为补偿环节, 可以表示为

$$G_c(s) = G_i(s)(G_v(s) + Y_r(s)) \quad (16)$$

式中, $Y_r(s) = 1/G_{vr}(s)$, $G_i(s)$ 、 $G_v(s)$ 都采用 PI 控制, 进一步可得双闭环控制下变换器输出阻抗为

$$Z_{co}(s) = -\frac{Z_o(s)}{1 + G_{vd}(s) \frac{1}{V_M} G_c(s)} \quad (17)$$

式中, $1/V_M$ 为 PWM 传递函数。基于上述分析可得负载扰动频率特性如图 7 所示, 其中参数设定为: $U_{pv1} = 540$ V, $U_{dc1} = 700$ V, $L_1 = 2$ mH, $C = 500$ μ F, $R = 100$ Ω , $d_1 = 0.77$, $V_M = 1$ 。

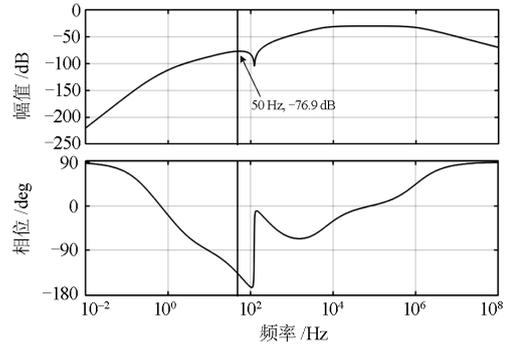


图 7 负载扰动特性图

Fig. 7 Load disturbance characteristic diagram

由图 7 可以看出, 随着频率的增大, 响应幅值逐渐增大, 但不超过 -20 dB; 在较宽的频率范围内, 输出阻抗值非常小, 对低频、高频干扰有较好的抑制能力, 即很小的负载扰动对母线电压影响不大。基于上述分析, 本文选择注入 50 Hz 交流电流信号, 图中 50 Hz 处的增益约为 -76.9 dB, 变换器输出阻抗非常小, 约为 0.14 m Ω , 即负载扰动对母线电压的影响非常小, 此时线路阻抗的测量值也较精确。

2.3 负载均流调整策略

由式(1)、式(2)可以看出, 通过调节下垂系数, 可以改善变换器负载均流精度, 较小的下垂系数可以使得母线电压跌落值小, 但是会降低负载功率均分精度; 较大的下垂系数可以提高负载功率均分精度, 却会增加母线电压跌落值。

图 8 为负载均流调整策略框图。采用本文方法计算出线路阻抗 r_{line1} 值后, 更新下垂系数 r_{di} , 将线路阻抗 r_{line1} 和下垂系数 r_{di} 引起的母线电压跌落进行

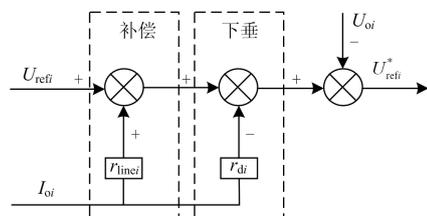


图 8 负载均流调整策略

Fig. 8 Strategy of current sharing regulation

修正, 修正原理可以表示为式(18)。

$$U_{refi}^* = U_{refi} - I_{oi} \times (r_{di} - r_{linei}) - U_{oi} \quad (18)$$

式中, U_{refi}^* 为更新的变换器电压给定值, 需要注意的是下垂系数 r_{di} 的取值不能过大, 过大的下垂系数会影响直流变换器的稳定性^[24-25]。

3 仿真实验

为验证该方法的有效性, 分别进行了线路阻抗测量仿真实验和多变换器并联均流实验。

3.1 线路阻抗测量仿真实验

该实验在 Matlab/Simulink 软件中搭建了包含光伏发电单元和三台储能 DC-DC 变换器的船舶直流微电网仿真模型, 工作在模式(1), 系统参数如表 1 所示。该模式下光伏发电单元处于恒压模式, 维持母线电压稳定, 储能变换器处于恒流控制模式, 并通过注入电感电流扰动检测线路阻抗大小。

表 1 仿真 1 参数

Table 1 Parameters of system 1

参数	数值
直流母线电压/V	700
储能单元变换器充电电流/A	10
注入交流信号幅值/A	0.1
储能单元变换器电感 L/mH	1
储能单元变换器输入侧电容 C_{in} /μF	1 000
储能单元变换器输出侧电容 C_{out} /μF	500
光伏单元变换器电感 L_1 /mH	2
光伏单元输出侧电容 C_{o1} /μF	500
光伏单元输出侧负载电阻/Ω	400
线路阻抗 r_{line1} /Ω	0.15
线路阻抗 r_{line2} /Ω	0.25
线路阻抗 r_{line3} /Ω	0.35

图 9 为系统中直流母线电压仿真波形, 此时光伏发电单元储能变换器能够将直流母线电压稳定在 700 V 左右, $t=1$ s 时刻分别在 3 台储能单元变换器电感上注入幅值为 0.1 A、频率为 50 Hz 的交流电流后, 从放大窗口可以看出, 注入交流信号前后母线电压波动不大, 小于 0.3%, 满足前文理论分析要求。

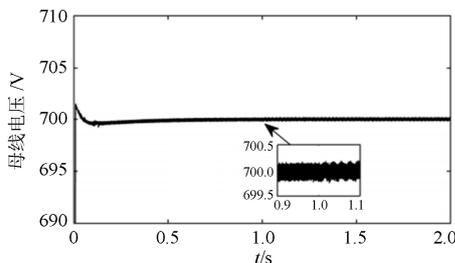


图 9 直流母线电压波形
Fig. 9 Voltage of DC bus

图 10 为系统储能单元变换器输入侧电压仿真波形, 在 1 s 之前, 由于线路阻抗的存在, 变换器输入电压略低于直流母线电压为 699 V; 在 $t=1$ s 时刻, 系统中电感电流上注入交流信号后, 输入电压同时获得了注入交流信号的信息, 输入电压幅值约有 1 V 的波动, 但是输入电压稳定性并未受到影响。

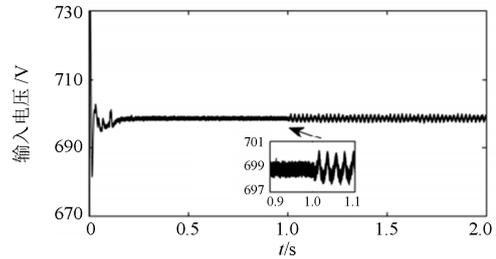


图 10 储能单元变换器输入电压波形
Fig. 10 Simulation results of ESC input voltage

图 11 为线路阻抗测量仿真结果, 分别显示了三个线路阻抗的测量值。前两个周期的数据由于线路阻抗值计算过程没有完成, 所以该数据不能表示真正的线路阻抗值, 在 1.04 s 后得到的阻抗值较为准确, 线路阻抗 r_{line1} 约为 0.150 1 Ω, 线路阻抗 r_{line2} 约为 0.250 2 Ω, 线路阻抗 r_{line3} 约为 0.350 3 Ω, 由此可以看出测量精度比较高。

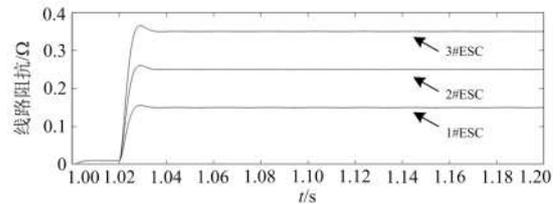


图 11 阻抗检测仿真结果

Fig. 11 Impedance detection simulation results

3.2 多变换器并联均流仿真实验

该实验在 Matlab/Simulink 软件中搭建了三台储能 DC-DC 变换器的船舶直流微电网仿真模型, 工作在模式(2), 系统参数如表 2 所示。该实验中储能单元变换器采用图 5 所示控制策略, 通过更新下垂系数 r_{di} 实现直流变换器负载均分。

图 12 为系统均流前后直流母线电压仿真结果, 在使用传统下垂控制方法时, 直流母线电压由于受线路阻抗的影响, 稳定运行时直流母线电压有一些跌落, 其实际值约为 692.55 V; 在 $t=1$ s 时刻, 依据得到的线路阻抗值, 对传统下垂控制系数进行调整, 此时直流母线电压值稳定在 693.12 V, 直流母线电压提高了约 0.6 V, 和传统下垂控制相比, 直流母线电压质量得到改善。

表 2 仿真 2 参数

Table 2 Parameters of system 2

参数	数值
直流母线电压/V	700
负载等效电阻/ Ω	100
储能单元变换器电感 L /mH	2
储能单元变换器电容 C / μ F	500
线路阻抗 r_{line1} / Ω	0.15
线路阻抗 r_{line2} / Ω	0.25
线路阻抗 r_{line3} / Ω	0.35
下垂系数 r_{di}	3

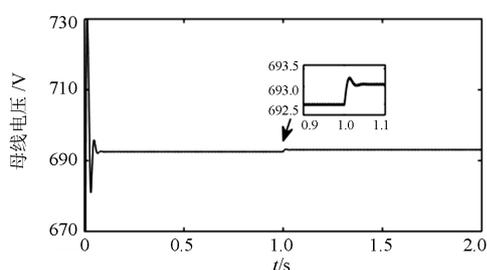


图 12 母线电压波形

Fig. 12 Simulation results of DC bus voltage

图 13 为传统下垂控制输出电流波形, 采用传统下垂控制时, 由于线路阻抗的影响, 各变换器输出电流明显不均分, 此时 1#变换器的输出电流为 2.38 A, 2#变换器的输出电流为 2.30 A, 3#变换器的输出电流为 2.24 A, 并且 1#变换器的线路阻抗最小, 该变换器的输出电流最高, 承担的负载功率最多, 这严重影响了变换器的性能; $t=1$ s 时刻, 在检测线路阻抗、进一步补偿下垂系数后, 各变换器的输出电流明显得到改善, 各变换器实现了负载均分, 保证了系统能够稳定运行, 系统的性能得到明显提高。

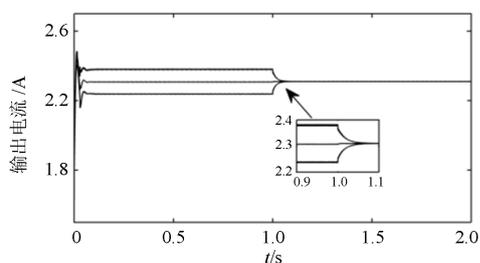


图 13 变换器输出电流波形

Fig. 13 Simulation results of converter output current

4 结论

本文提出一种基于低频信号注入的线路阻抗检测方法。首先在变换器电感电流上注入低频交流信

号, 然后检测注入交流信号后变换器的输入电压、电流, 计算出变换器的线路阻抗值, 并将该值用来补偿下垂系数, 取代传统下垂系数。为了确定注入交流信号的频率, 对光伏发电单元的变换器控制系统进行建模, 确定注入交流信号的频率。该方法能有效提高各变换器在不同线路阻抗下的均流精度, 保证控制系统的稳定性。通过 Matlab/Simuink 的仿真试验验证了该方法的有效性。

参考文献

- [1] GHAREEB A T, MOHAMED A A, MOHAMMED O A. DC microgrids and distribution systems: an overview[C] // 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2013, Vancouver, BC, Canada: 1-5.
- [2] SCHMERDA R, CUZNER R, CLARK R, et al. Shipboard solid-state protection: overview and applications[J]. IEEE Electrification Magazine, 2013, 1(1): 32-39.
- [3] ESTEFANÍA P, ANDREU J, JOSÉ I G, et al. AC and DC technology in microgrids: a review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 43: 726-749.
- [4] BOSE, BIMAL K. Global energy scenario and impact of power electronics in 21st century[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(7): 2638-2651.
- [5] GAO F, KANG R, CAO J, et al. Primary and secondary control in DC microgrids: a review[J]. Modern Power Systems, 2019, 7(2): 227-242.
- [6] KOSTAKIS T, NORMAN P J, GALLOWAY S J, et al. Demonstration of fast-acting protection as a key enabler for more-electric aircraft interconnected architectures[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2017, 7(2): 170-178.
- [7] BADAL F R, DAS P, SARKER S K, et al. A survey on control issues in renewable energy integration and microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 87-113. DOI: 10.1186/s41601-019-0122-8.
- [8] 王宝华, 蒋力. 基于精确反馈线性化的直流微电网双向直流变换器反步滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 44(2): 43-49.
WANG Baohua, JIANG Li. Backstepping sliding mode control based on exact feedback linearization for bi-directional DC converter in DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 44(2): 43-49.
- [9] JIN Z, SULLIGOI G, CUZNER R, et al. Next-generation shipboard DC power system: introduction smart grid and DC microgrid technologies into maritime electrical networks[J]. IEEE Electrification Magazine, 2016, 4(2): 45-57.
- [10] 刘健, 魏昊焜, 张志华, 等. 未来配电网的主要形态—

- 基于储能的低压直流微电网[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 44(18): 11-16.
- LIU Jian, WEI Haokun, ZHANG Zhihua, et al. Future architecture of power distribution network—— low-voltage direct current micro-grids based on energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2018, 44(18): 11-16.
- [11] 杨捷, 金新民, 杨晓亮, 等. 交直流混合微网功率控制技术综述[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 29-39.
- YANG Jie, JIN Xinmin, YANG Xiaoliang, et al. Overview on power control technologies in hybrid AC-DC microgrid[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 29-39.
- [12] ANAND S, FERNANDES B G, GUERRERO J. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage dc microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1900-1913.
- [13] CHEN J, HOU S, CHEN J, et al. On the seamless mode transfer control for a master-slave microgrid[J]. IET Power Electronics, 2019.
- [14] WEI Jiang, FAHIMI B. Active current sharing and source management in fuel cell-battery hybrid power system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(2): 752-761.
- [15] ZHANG Q, ZHUANG X, LIU Y, et al. A novel autonomous current-sharing control strategy for multiple paralleled DC-DC converters in islanded DC microgrid[J]. Energies, 2019, 12: 3951.
- [16] SUN K, ZHANG L, XING Y, et al. A distributed control strategy based on DC bus signaling for modular photovoltaic generation systems with battery energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(10): 3032-3045.
- [17] RASHAD M, RAOOF U, ASHRAF M, et al. Proportional load sharing and stability of DC microgrid with distributed architecture using SM controller[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018: 1-16.
- [18] 刘宁宁, 曹炜, 赵晋斌. 直流微电网的一种增量式下垂控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 44(8): 24-30.
- LIU Ningning, CAO Wei, ZHAO Jinbin. An incremental droop control method for DC micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 44(8): 24-30.
- [19] KHORSANDI A, ASHOURLOO M, MOKHTARI H. An adaptive droop control method for low voltage DC microgrids[C] // 2014 IEEE Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference, 2014, Tehran, Iran, 84-89.
- [20] 杨捷, 金新民, 吴学智, 等. 一种适用于直流微电网的改进型电流负荷分配控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 59-67.
- YANG Jie, JIN Xinmin, WU Xuezhi, et al. An improved load current sharing control method in DC microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 59-67.
- [21] LU Xiaonan, GUERRERO J M, SUN Kai, et al. An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage estimation and enhanced current sharing accuracy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 29(4): 1-12.
- [22] 刘琛, 赵晋斌, 王闪闪, 等. 基于单脉冲注入的直流微电网线路阻抗检测[J]. 电工技术学报, 2018, 33(11): 2584-2591.
- LIU Chen, ZHAO Jinbin, WANG Shanshan, et al. A line impedance identification based on single pulse injection in DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11): 2584-2591.
- [23] KHORSANDI A, ASHOURLOO M, MOKHTARI H. A decentralized control method for a low-voltage DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 793-801.
- [24] 郭力, 冯恽彬, 李霞林, 等. 直流微电网稳定性分析及阻尼控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 927-936.
- GUO Li, FENG Yibin, LI Xialin, et al. Stability analysis and research of active damping method for DC microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 927-936.
- [25] GUO L, ZHANG S, LI X, et al. Stability analysis and damping enhancement based on frequency-dependent virtual impedance for DC microgrids[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 5(1): 338-350.

收稿日期: 2019-05-24; 修回日期: 2019-11-12

作者简介:

张勤进(1986—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为直流综合电力系统、直流微电网; E-mail: zqj18@qq.com

张博(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流微电网控制与优化技术。E-mail: zhangboi35@163.com

(编辑 魏小丽)