

电力与传动控制

基于状态反馈的船舶供电变流器
柔性并 / 离网控制策略研究

吴 奕, 王 跃, 周振邦, 彭 赟, 胡景瑜
(中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 为实现船舶用供电变流器与岸电并 / 离网的柔性切换和可控功率转移等功能, 文章提出了一种根据并 / 离网状态反馈分别进行电压控制和电流给定模式切换控制的方法, 其实现了离网模式下输出电压快速响应以及并网模式下与电网交互功率的可控转移, 并基于调幅、调频的预同步控制以及给定电流指令与电压控制 PI 调节器平滑过渡实现了供电变流器柔性并 / 离网。对采用该控制策略的某型船舶供电变流器进行仿真, 结果显示, 所研究的并 / 离网控制方法能够很好地抑制振荡、平滑输出, 使负载电流不平衡度小于 5%。

关键词: 船舶供电变流器; 并 / 离网柔性切换; 预同步控制; 岸电

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2021)03-0070-06

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2021.03.012

Research on the Flexible Grid-connected / Islanded Control Strategy of Ship
Power Supply Converter Based on State Feedback

WU Yi, WANG Yue, ZHOU Zhenbang, PENG Yun, HU Jingyu
(CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: In order to realize the flexible switching and controllable power transfer between the ship power supply converter and shore power, this paper proposes a mode switching control method based on grid-connected/islanded control state feedback, which realizes the fast response of output voltage in off-grid mode and controllable transfer of interaction power in grid-connected mode. Secondly, based on the presynchronous control of amplitude modulation and frequency modulation, the smooth transition between given current command and voltage control PI regulator is realized. The flexible grid-connected/islanded control of power supply converter is realized. Finally, the simulation results of a ship power converter verify that the proposed control method can suppress the oscillation and smooth output, and make the specific unbalance of current less than 5%.

Keywords: ship power supply converter; grid-connected/islanded seamless transfer; presynchronous control; shore power

0 引言

随着电力电子以及数字控制技术的发展, 新能源或者混合动力推进船舶的日用负载设备, 如散热风机、水泵、照明负载、空调、厨房电器、娱乐电器等,

越来越多地采用基于有源开关器件的变流器进行供电^[1]。新能源船舶在航行阶段通过柴油发电机或动力电池经供电变流器为船载负荷供电; 但在船舶停泊阶段, 为降低噪声和减少污染, 柴油发电机会停止工作, 需要由岸上交流电网直接为船载负荷供电(因动力电池续航时间有限)。因此, 船舶供电变流器与岸电并 / 离网的柔性切换和功率转移等控制性能将直接影响船舶系统供电的连续性和可靠性^[2]。

收稿日期: 2020-12-12

作者简介: 吴奕(1992—), 男, 硕士, 主要从事变流器控制技术研究工作。

目前，针对变流器在线并 / 离网柔性切换、功率转移控制的研究和应用主要集中在 UPS、微电网以及新能源发电并网等领域^[3-4]。文献 [5-7] 基于虚拟同步机原理进行并网控制，但由于变流器容量与电网供电容量有较大差异，功率转移控制精确度欠佳。文献 [8] 给出一种储能逆变器 and 发电机间无缝切换的控制方法，但其需要为本地控制器增加上层控制单元，控制系统结构复杂。文献 [9-10] 采用的控制方式需要预估调节器的输出状态或假设电流参考在控制模式切换前后保持不变，以避免切换过程中调节器超调和电流出现大幅振荡现象，因而其无法适应切换过程中存在的负载突变工况。

针对船舶直流组网电力推进系统中供电变流器在与岸电并 / 离网柔性切换和功率可控转移中存在的困难，本文提出一种根据并 / 离网状态反馈分别进行电压控制、电流给定模式切换控制的方法。其在离网模式下，采用输出电压闭环控制保证输出电压快速响应；在并网模式下，采用电流给定跟踪控制实现供电变流器与电网交互功率的可控转移。最后，在某型混合动力船舶供电变流器上进行仿真试验，结果证明了本文所提柔性并 / 离网控制方法的正确性和有效性。

1 船舶直流组网变流系统

1.1 直流组网变流系统拓扑

本文所用某型号混合动力船舶直流组网变流系统拓扑如图 1 所示，该系统包括柴油发电机整流器（标号①）以及蓄电池储能 DC-DC 变流器（标号②）、

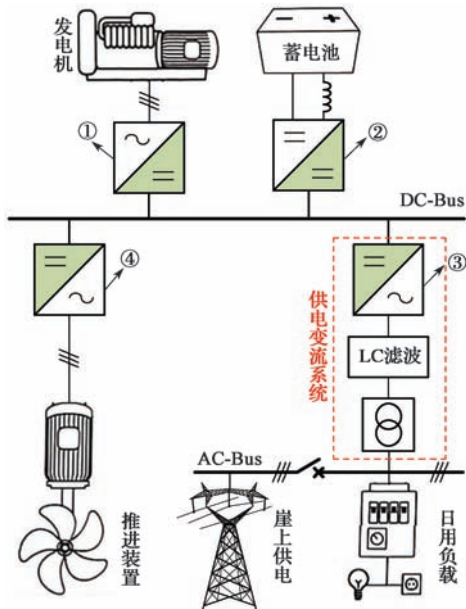


图 1 混合动力船舶直流组网变流系统拓扑
Fig. 1 Topology of DC-grid converter system for hybrid electric ship

日用负载供电变流器（标号③）、推进电机逆变器（标号④）等不同类型变流器。各变流器直流侧以直流母线（DC-Bus）作为公共连接点，发电机整流器和 DC-DC 变流器可根据系统负荷需求实现单独柴油发电机供电、纯电池供电、岸电供电以及混合动力供电。

1.2 日用负载供电变流器拓扑

日用负载供电变流器主电路拓扑如图 2 所示，包括三相桥式逆变器、滤波电感、滤波电容以及隔离变压器。日用负载三相供电变流器将直流母线电压转换成幅值、频率可控的交流电压，通过隔离变压器输出三相 380 V 工频交流电给船舶日用负荷供电，通过隔离开关 K 实现与三相交流母线（AC-Bus）的连接与分断。

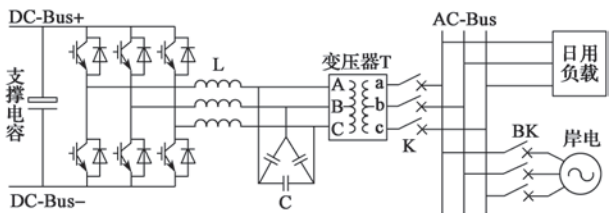


图 2 船舶日用负载供电变流器拓扑
Fig. 2 Topology of power supply converter for ship load

此外，供电变流系统可通过三相接线器（并网断路器 BK）与岸电交流电网并网，结合供电变流器并 / 离网控制策略，实现船舶靠岸期间日用负载在变流器供电和岸电电网供电之间的柔性切换以及不间断供电。

2 供电变流器柔性并 / 离网控制

船舶日用负载供电变流器正常运行包括 3 种工作模式：离网模式、预同步模式以及并网模式。适用于不同工作模式下的整体控制策略原理如图 3(a) 所示，其采用 dq 同步坐标系下电压外环 - 电流内环的双闭环控制策略。其中 v_a, v_b, v_c 为 abc 三相静止坐标系下供电变流器输出三相电压； V_d, V_q 分别为输出电压在 dq 同步坐标系下 d 轴、 q 轴分量（经坐标变换后得到，下同）； i_a, i_b, i_c 为 abc 三相静止坐标系下供电变流器输出三相电流， I_d, I_q 分别为供电变流器输出电流在 dq 同步坐标系下 d 轴、 q 轴分量； V_{Gd}, V_{Gq} 分别为岸电电网电压在 dq 同步坐标系下 d 轴、 q 轴分量； θ_c, f_c 分别为经数字锁相得到的岸电电压相位及频率； θ^*_c, f^*_0 分别为供电变流器离网运行时的电压相位及频率给定值； T_s 为数字控制周期； θ^*_{ctrl} 为用于数字控制、坐标变换的实际相位角度； V_{dref}, V_{qref} 分别为供电变流器在 dq 同步坐标系下输出电压参考指令的 d 轴、

q 轴分量, V_{derr} , V_{qerr} 为其相应的误差; I_{dref} , I_{qref} 分别为供电变流器在 dq 同步坐标系下电流参考指令的 d 轴、 q 轴分量, I_{derr} , I_{qerr} 为其相应的误差; I_{Ld} , I_{Lq} 分别为负载电流在 dq 同步坐标系下的 d 轴、 q 轴分量。Flag 为并/离网状态信号, 开关 K 和 BK 均闭合时为并网状态, Flag 置 1; 否则为离网状态, Flag 置 0。 u_d , u_q 分别为 dq 同步坐标系下 d 轴、 q 轴双闭环控制的输出结果, 其经电压前馈后得到 d 轴、 q 轴的控制量 u_d^* , u_q^* , 再经坐标变换得到 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系下 α 轴、 β 轴的控制量 u_α^* , u_β^* 。 u_α^* 和 u_β^* 被送入 SVPWM 环节, 得到供电变流器的 PWM 驱动脉冲, 以控制供电变流器按照期望目标运行。

图 3(b) 中, 左图所示用于生成图 3(a) 中的有功电压参考幅值 V_{dref} , 右图策略用于生成图 3(a) 中 dq 变换的锁相角 θ_{ctrl}^* 。

图 3(c) 中的有功、无功电流参考值用于图 3(a) 中功率转移环节的有功、无功电流给定。

2.1 离网控制

离网模式下供电变流器为日用负载提供三相交

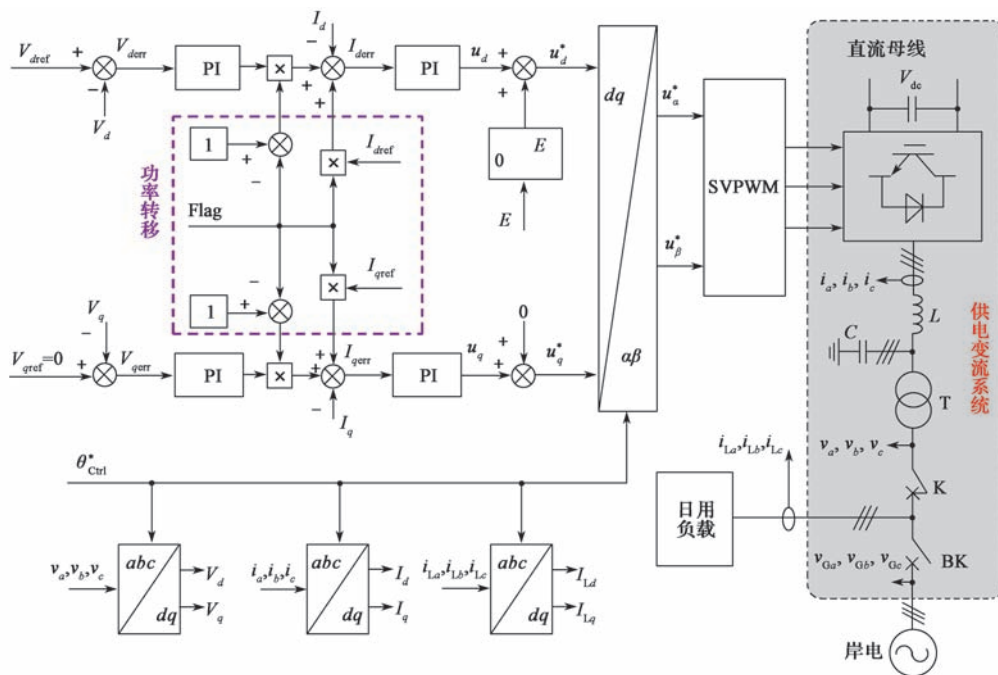
流电压, 其中 E 和 f_0 分别为供电变流器输出交流母线的额定幅值和频率, 电压相位通过对固定频率的积分得到, 见式 (1)。离网模式下供电变流器采用恒压恒频 (constant voltage and constant frequency, CVCF) 控制, 其原理见图 3(b)。

$$\theta_c^* = \int_0^t (2\pi T_s f_0) dt \quad (1)$$

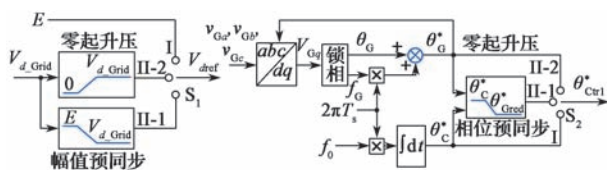
2.2 预同步控制

预同步模式是指在并网前调节供电变流器的输出电压使之与岸电网电压同步, 包括幅值同步和相位同步, 以避免并网瞬间的电压冲击。预同步模式分为船舶靠岸和船舶离岸两种情况。

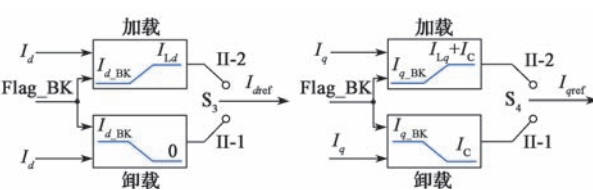
(1) 船舶靠岸。此时供电变流器处于正常运行状态, 但其输出电压幅值、相位与岸电网的幅值、相位均可能存在差异。预同步就是使供电变流器输出电压 (包括幅值和相位) 与岸电电压逐渐逼近直至相同的过程, 对应图 3(b)、图 3(c) 中模式 II-1。以电压幅值的逼近为例 (电压相位的逼近方法与电压幅值逼近类似, 不再叙述) 说明其执行过程, 电压幅值逼近



(a) 总体控制框图



(b) 交流母线电压幅值、频率参考指令计算



(c) 功率转移电流参考指令计算

图 3 船舶日用负荷供电变流器控制策略原理框图

Fig. 3 Block diagram of the control strategy for ship power supply converter

的控制原理为

$$V_{dref} = E + \Delta E_{syn} = E + \frac{k_E}{s}(V_{Gd} - E)$$

(2)

式中： ΔE_{syn} ——叠加在 E 上的电压幅值同步信号；
 k_E ——电压幅值逼近的积分系数； s ——积分算子。

（2）船舶离岸。船舶离岸前，供电变流器处于停机状态，此时的预同步是指供电变流器启动，交流母线电压幅值从零渐增至与岸电电压幅值相同（也称零起升压，对应图 3(b)、图 3(c) 中模式 II-2），电压相位则直接与岸电电压相位保持同步。

2.3 柔性并 / 离网控制

船舶日用负载供电变流器在离网模式和并网模式间的切换需要做到无电压 / 电流冲击的柔性切换（也称无缝切换），以避免对元器件的损伤。供电变流器与岸电电网的柔性切换包括船舶靠岸时“带载并网—卸载—离网—停机”以及船舶离岸时“零起升压—空载并网—加载—离网带载”两种工况。

2.3.1 靠岸离 / 并网控制

船舶靠岸时供电变流器先处于带载运行状态，即输出开关 K 为闭合状态，并网开关 BK 为断开状态，如图 3(a) 所示；经过同步控制后，其输出电压与岸电网电压同步，具备无冲击并网条件，此时闭合并网开关 BK ，完成与岸电并网。

并网瞬间， $Flag$ 置 1，电流指令由电压闭环控制电路计算值切换为给定电流值；锁定并网前输出电流并将其作为并网后给定电流指令初始值（ I_{d_BK} ， I_{q_BK} ），然后将有功电流指令渐变到零、无功电流指令渐变到滤波电容电流值（ I_C ），即完成卸载（负载电流基本由岸电电网提供），具备无冲击离网条件。

之后，断开开关 K ，完成供电变流器与岸电电网分离。离网瞬间， $Flag$ 置 0，电流指令由给定值（ $I_{dref}=0$ ， $I_{qref}=I_C$ ）切换为电压闭环控制计算值（ d 轴、 q 轴电压环 PI 积分值分别初始化为 0 和 I_C ）。供电变流器停机，完成船舶靠岸“带载并网—卸载—离网—停机”的全过程。

2.3.2 离岸并 / 离网控制

船舶离岸时，供电变流器先处于停机状态（输出开关 K 断开、并网开关 BK 闭合），经过零起升压后，其电压与岸电电网电压同步，供电变流器处于空载状态，具备无冲击并网条件，此后闭合开关 K ，即完成与岸电并网。

并网瞬间 $Flag$ 置 1，电流指令由电压闭环控制

计算值切换为给定电流值，锁定并网前输出电流作为并网后给定电流指令初始值（ I_{d_BK} ， I_{q_BK} ），此后将有功电流指令渐变到负载有功电流（ I_{Ld} ）、无功电流指令渐变到滤波电容电流值和负载无功电流之和（相量和）。至此，完成加载（负载电流基本由供电变流器提供），具备无冲击离网条件。

此后，断开并网开关 BK ，完成供电变流器与岸电电网离网。离网瞬间 $Flag$ 置 0，电流指令由给定值（ $I_{dref}=I_{Ld}$ ， $I_{qref}=I_C+I_{Lq}$ ）切换为电压闭环控制计算值（ d 轴、 q 轴电压环 PI 积分值分别初始化为 I_{Lq} 和 I_C+I_{Lq} ）。至此，完成船舶离岸时“零起升压—空载并网—加载—离网带载”的全过程。

3 仿真实验验证

基于某型混合动力推进船舶供电变流器平台对本文所设计控制策略进行仿真实验验证，系统结构如图 4 所示，其主要参数如表 1 所示。采用 10 kV 配电网经降压变压器后的三相 400 V 电网模拟岸电交流电网，交流母线负载为三相阻感负载。

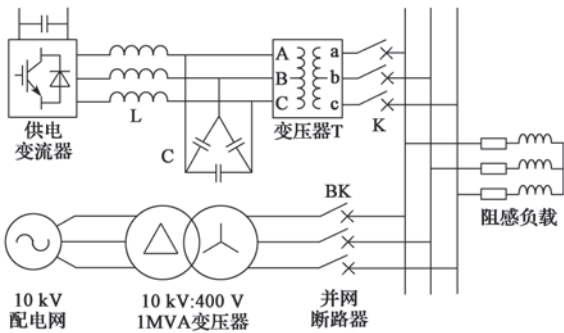


图 4 船舶供电变流器测试系统结构
Fig. 4 Structure of the experimental test system for ship power supply converter

表 1 船舶供电变流器系统关键参数
Tab. 1 Key parameters of the ship power supply converter system

参数	数值
额定容量 /kVA	750
额定输出线电压 /V	400
额定输出频率 /Hz	50
滤波电感 /mH	0.4
滤波电容 (三角形连接) /μF	180
隔离变压器变比	500:400
直流母线额定电压 /V	1 050
开关频率 /kHz	2.5
系统采样频率 /kHz	10

3.1 离网运行

离网运行时，供电变流器应为日用负载提供稳定

可靠的三相交流电压。供电变流器离网运行时,在稳态工况下隔离变压器后端交流母线电压波形如图5所示。谐波分析结果显示,其输出电压总谐波畸变率(THD)小于1.5%,其中5次、7次谐波的含量分别小于0.5%和0.8%,50次附近谐波的含量均小于0.2%,表明该系统离网运行效果良好。

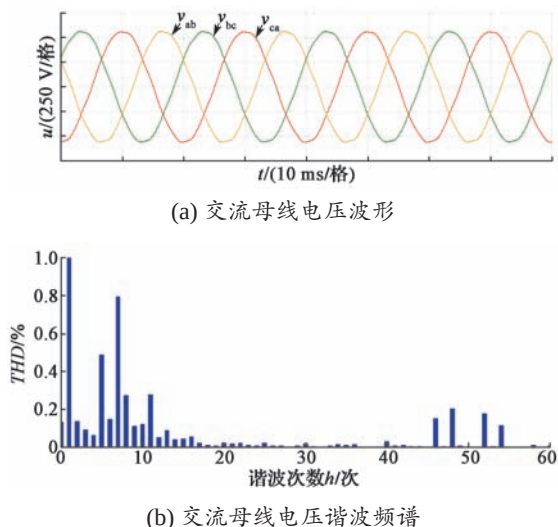


图5 供电变流器交流母线电压及其谐波频谱
Fig. 5 Output voltage of power supply converter and its harmonic spectrum

3.2 与岸电电压预同步

图6给出了供电变流器输出电压与岸电交流电网电压预同步的仿真结果,其中 v_{ab} 为供电变流器隔离变压器后端交流母线线电压, v_{ab_grid} 为交流岸电电网AB相间线电压, Δv_{ab} 为 v_{ab} 与 v_{ab_grid} 之差, θ_{bus} 和 θ_{grid} 分别为交流母线、岸电电网A相电压相位。预同步过程中,交流母线电压相位逐渐向岸电电压相位靠近, Δv_{ab} 逐渐减小,直至 t_0 时刻完成同步(二者电压相位一致、线电压波形基本重合、 Δv_{ab} 近似为0)。整个过程耗时小于100 ms。

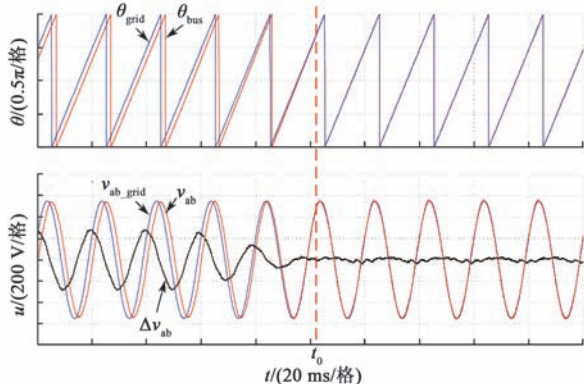


图6 供电变流器与岸电交流电网预同步仿真结果
Fig. 6 Simulation results of power supply converter output voltage presynchronizing with onshore AC grid

3.3 柔性并/离网

图7为供电变流器与岸电交流电网并/离网过程中各电流的仿真结果,图中自上而下分别是供电变流器模块输出电流 i_{con} 、变压器二次侧与电网连接点输出电流 i_{pcc} 、岸电电网电流 i_{grid} 、供电变流器滤波电容电流 i_{fil} 、负载电流 i_{load} 。仿真过程中,负载电流基本稳定,其电流不平衡度小于5%;其他电流,根据并/离网状态以及切换过程呈平滑变化态势。

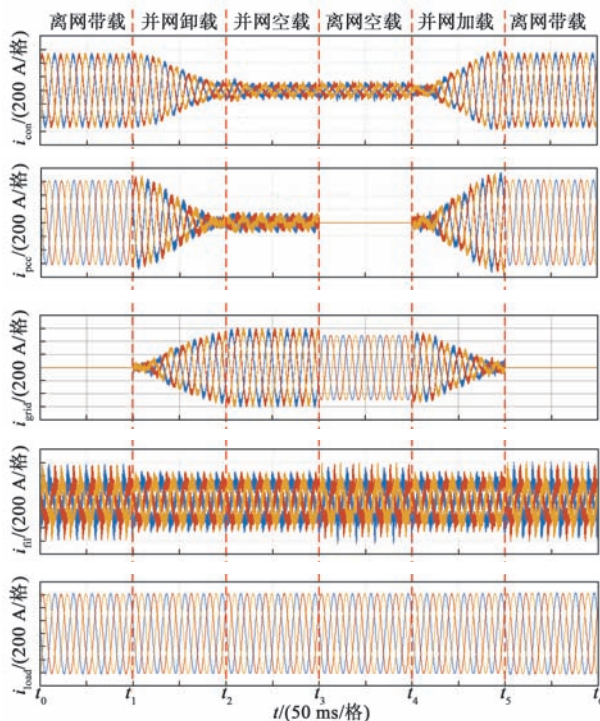
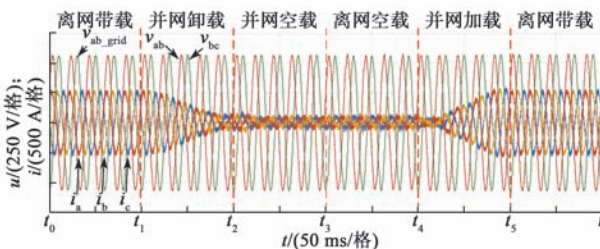


图7 供电变流器与岸电交流电网柔性并/离网过程中各电流波形

Fig. 7 Current waveforms in period of grid-connected/islanded seamless transfer between power supply converter and shore AC grid

岸电电压、供电变流器输出电压/电流波形及其展开结果如图8所示。并/离网全过程供电变流器输出电压无明显波动或振荡,输出电流平滑变化,验证了所研究方法的正确性和可行性。

图8(b)表示图8(a)中的并网加载过程,图8(c)表示图8(a)中的离网空载过程,可以看出,各个过程的切换平稳正常。



(a) 柔性并/离网全过程的电压和电流波形

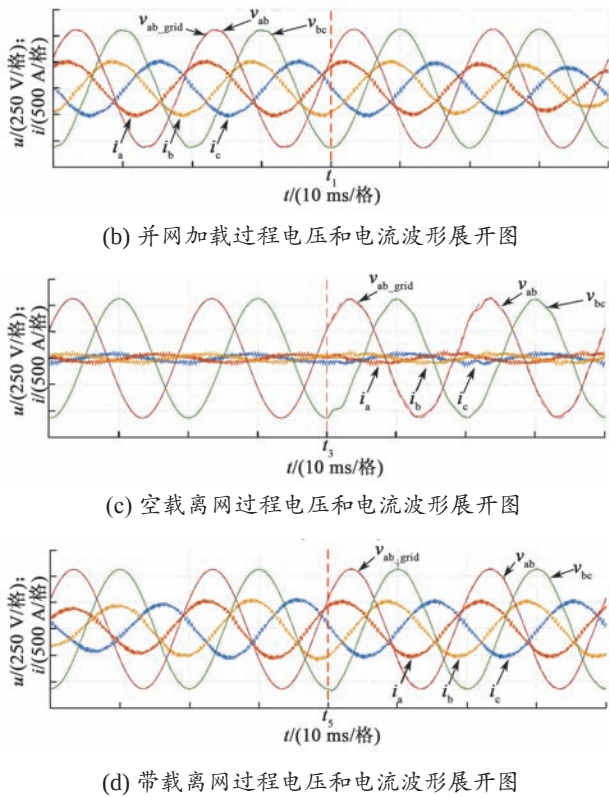


图 8 供电变流器与岸电交流电网柔性并 / 离网仿真结果

Fig. 8 Simulation results of grid-connected/ islanded seamless transfer between power supply converter and shore AC grid

4 结语

针对大容量船舶日用负载供电变流器，本文提出一种供电变流器与岸电电网并 / 离网的柔性切换控制方法。其根据并 / 离网状态反馈分别进行电压控制、电流给定的模式切换控制，离网模式下采用输出电压闭环控制，以保证输出电压快速响应；并网模式下采用电流给定跟踪控制，以实现供电变流器与电网交互功率的可控转移。

仿真结果表明：船舶靠岸时，在供电变流器与岸电电网预同步过程中，该控制方法能够较快地使两个电压达到一致；在柔性并 / 离网的过程中也能使供电变流器输出电压无明显波动或振荡，输出电流平滑变化。由此验证了所提控制方法的正确性和有效性。

由于本文所提控制方法有较多的控制参数需要

整定，会对系统的瞬态响应速度造成一定的影响，后续工程应用时需对控制系统进行精简。

参考文献：

[1] FOTIS D K, GEORGE J T, JOHN P. Onboard DC grid employing smart grid technology: challenges, state of the art and future prospects[J]. IET Electrical System in Transportation, 2015(1): 1-11.

[2] UZAIR J, FRANCISCO D F, WIM V M, et al. Stability analysis of multi-port MVDC distribution networks for all-electric ships[J].IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1164-1177.

[3] GUERRERO J M, BLAABJERG F, ZHELEV T, et al. Distributed generation: Toward a new energy paradigm[J].IEEE Industrial Electronics Magazine, 2010, 4(1): 52-64.

[4] HATZIARGYRIOU N D. Microgrids: Architectures and Control [M]. Piscataway, N. J.: Wiley-IEEE Press, 2014.

[5] 石荣亮, 张兴, 徐海珍, 等. 基于虚拟同步发电机的微网运行模式无缝切换控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 16-23.

SHI R L, ZHANG X, XU H Z, et al. Seamless Switching Control Strategy for Microgrid Operation Modes Based on Virtual Synchronous Generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10):16-23.

[6] VASQUEZ J C, GUERRERO J M. Adaptive droop control applied to voltage-source inverters operating in grid-connected and islanded modes[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(10): 4088-4096.

[7] 宋平岗, 周振邦, 董辉, 等. MMC-RPC 的虚拟同步机建模及控制方法 [J]. 控制与信息技术, 2018(1): 26-32.

SONG P G, ZHOU Z B, DONG H, et al. Modeling and Control of Virtual Synchronous Generator Based on MMC-RPC[J]. Control and Information Technology, 2018(1): 26-32.

[8] 郭力, 富晓鹏, 李霞林, 等. 独立交流微网中电池储能与柴油发电机的协调控制 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 70-78.

GUO L, FU X P, LI X L, et al. Coordinated control of battery storage and diesel generators in isolated AC microgrid Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 70-78.

[9] 金祝锋, 阙波, 陈超, 等. 基于电流控制的分时逆变器模式平滑切换策略 [J]. 电力电子技术, 2019, 53(8): 81-83.

JIN Z F, QUE B, CHEN C, et al. A Timesharing Smooth Switching Strategy Based on Current Control for Inverter[J]. Power Electronics, 2019, 53(8): 81-83,

[10] 郑昕昕, 肖岚, 田洋天, 等. 一种半周期 SVPWM 控制的三相双向双 Buck/Boost 变流器 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(15): 19-28.

ZHENG X X, XIAO L, TIAN Y T, et al. Half-cycle SVPWM Controlled Three-phase Bidirectional Dual Buck/Boost Converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(15): 19-28.