

基于 MMC 的虚拟同步发电机技术在船舶与岸电无缝并网中的应用

解文祥¹, 周昊², 郭焱¹, 王超¹

(1. 上海海事大学物流工程学院, 上海 201306; 2. 中国船舶集团第七〇四研究所, 上海 200031)

摘要: 鉴于船舶与岸电在并网时存在较大冲击电流, 以及模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)控制的岸电离网运行时对突发状况响应速度较慢的问题, 采用改进的虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)技术结合模型预测控制(model predictive control, MPC)算法, 对岸电电源输出电流、环流、子模块电容电压进行分层预测控制, 实现船舶与岸电的无缝并网。采用 MATLAB/Simulink 建立 MMC-VSG 并网仿真模型, 模拟船舶与岸电并网及突加负载等工况。对所提出的控制策略和算法的有效性进行验证, 结果表明, 利用所提出的控制策略能实现 VSG 离网与并网的无缝切换; 与经典控制方法相比, 所提出的控制策略的动态响应速度提升了 5 倍。

关键词: 船舶; 岸电; 虚拟同步发电机(VSG); 模型预测控制(MPC); 模块化多电平换流器(MMC); 无缝切换

中图分类号: U665.12

文献标志码: A

Application of MMC-based virtual synchronous generator technology in seamless grid-connection of ships and shore power

XIE Wenxiang¹, ZHOU Hao², GUO Yi¹, WANG Chao¹

(1. Logistics Engineering College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;
2. No. 704 Research Institute, China Shipbuilding Industry Corporation, Shanghai 200031, China)

Abstract: There exist the large impulse current when a ship connects to shore power, and the slow response speed to emergencies when shore power is in off-grid operation (where shore power is controlled by the modular multilevel converter (MMC)). To solve the problems, the improved virtual synchronous generator (VSG) technology and the model predictive control (MPC) algorithm are adopted to carry out the hierarchical predictive control of the output current, the circulating current and the sub module capacitor voltage of shore power supply, so as to realize seamless grid-connection of ships and shore power. By MATLAB/Simulink, the MMC-VSG grid-connection simulation model is built to simulate the

收稿日期: 2020-08-20 修回日期: 2021-02-01

基金项目: 上海市科技计划(20040501200); 上海市科学技术委员会项目(19040501700)

作者简介: 解文祥(1993—), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 研究方向为船舶中压直流电力系统, (E-mail)2602247213@qq.com;

周昊(1987—), 男, 上海人, 工程师, 研究方向为船舶工程、海洋工程、工程管理、项目管理、财务管理, (E-mail)zhou704@163.com;

郭焱(1971—), 男, 安徽安庆人, 副教授, 博士, 研究方向为船舶电力推进系统、船舶中压直流电力系统,

(E-mail)yiguo@shmtu.edu.cn

working conditions such as the grid-connection of ships and shore power and the sudden loading. The effectiveness verification results of the proposed control strategy and algorithm show that the proposed control strategy can achieve seamless switching between VSG off-grid and grid-connection, and the dynamic response speed of the proposed control strategy is 5 times faster than that of the classical control method.

Key words: ship; shore power; virtual synchronous generator (VSG); model predictive control (MPC); modular multilevel converter (MMC); seamless switching

0 引言

船舶靠港时停止所有的船舶柴油机运转,使用陆地电源供电,可有效降低港区污染废气的排放^[1]。目前常用的岸电与船电的切换方式主要有两种,即离网切换和并网切换^[2]。离网切换必须先停止船电再接入岸电或先断开岸电再开启船电。为保证船舶供电的连续性与稳定性^[3],岸电与船电的切换通常采用无间断式并网切换^[4]。由于岸电电源与柴油发电机两者的特性不同,若仍对岸电电源逆变器侧采用常规的下垂控制策略^[5],则很难让两者并网,且并网逆变器系统很可能因下垂系数设计不当而不稳定^[6]。虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)具有同步发电机的外特性^[7],能够弥补传统控制策略的缺点,实现电网的调压、调频、均匀分布功率等功能。在中高压柔性直流输电系统中,模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)因其可扩展性强、导通损耗低、对滤波器要求较低等特点已得到了广泛应用。当前已有许多有关 VSG 的研究:文献[8]提出一种 VSG 控制策略,并在不同电网条件下进行测试,实验结果表明 VSG 可以很好地模拟传统同步发电机的部分特性;文献[9]通过分析发现基于 MMC 的 VSG(MMC-VSG)模型确实显现出与同步发电机模型类似的功角特性,并用实验验证了 MMC 与 VSG 结合的可行性及优势;文献[10]建立了基于 VSG 的船舶无缝并网仿真模型,并着重研究了实现船舶无缝并网与离网的岸电电源控制策略;文献[11]提出了基于虚拟阻抗的预同步控制,但由于只将桥臂输出电压与电网同步,未考虑 LC 滤波器的存在导致桥臂输出电压与滤波后电压存在相位偏差,采用这种方法同步效果较差。文献[12]提出了 MMC-VSG 控制技术,使 MMC 在进行能量变换的同时兼具对中高压系统频率和电压的支撑能力,但其采用传统的电压-电流双闭环控制,系统的动态响应慢,且并非应用于船舶岸电的并网。

针对上述问题,本文建立 MMC-VSG 船舶并网

仿真模型,通过仿真验证该模型的可行性。结合改进的模型预测控制(model predictive control, MPC)^[13]算法对输出电流、环流、子模块电容电压进行分层预测控制,进一步研究 MMC-VSG 模型在并网与离网切换及突加负载等工况下的性能,并验证所提出的控制策略与算法的有效性。

1 基于 MPC 的 MMC-VSG 控制方案

MMC 仅可简单模拟同步发电机下垂特性,忽略了同步发电机所具有的阻尼特性和励磁控制环节^[14]。为解决这些问题,钟庆昌^[15]提出同步逆变器(synchronverter),其能够模拟同步发电机转动惯量、阻尼特性、下垂特性、励磁特性,实现电网的调压、调频、均匀分布功率等功能。

基于 MPC 的 MMC-VSG 岸电电源拓扑结构如图 1 所示。为便于分析,本文将岸电电源整流侧等效为恒压源 U_{dc} ,着重分析采用 VSG 技术的逆变侧。主电路采用 LC 滤波的 MMC, L_s 为滤波电感, C 为滤波电容, Z_s 为线路的等效阻抗;PCC 表示并网继电器。控制方法为:①在主电路测量采集机端三相输出电压 u_{abc} 、电流 i_{abc} 以及船电三相电压值 $u_{g,abc}$;②将采集所得数据通过幅值计算得到输出电压幅值 U_m ,通过功率计算得到有功功率 P_e 和无功功率 Q ,通过预同步控制得到同步电压 U_{syn} 、同步角频率 ω_{syn} ;③结合有功功率和无功功率设定参考值,通过

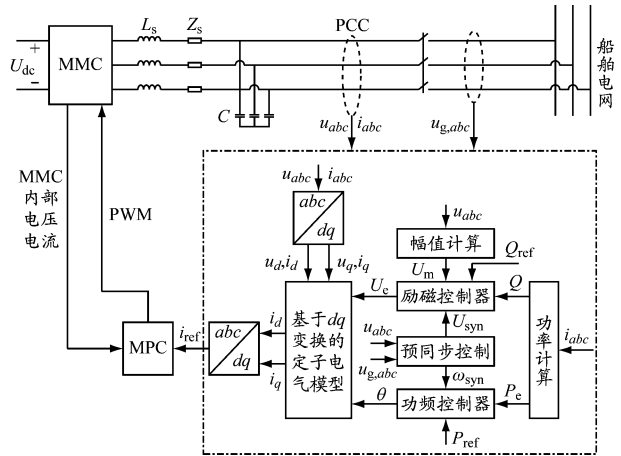
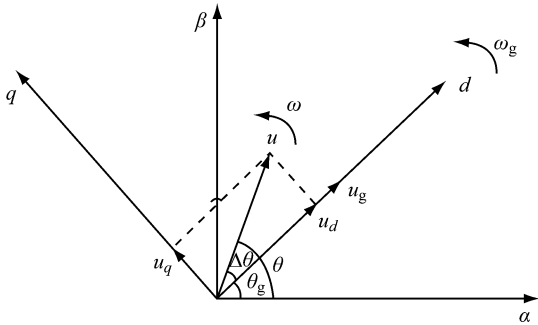
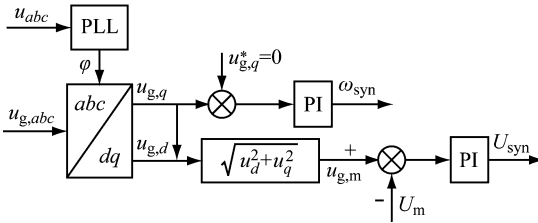


图 1 基于 MPC 的 MMC-VSG 岸电电源拓扑结构

的是,坐标变换使用的参考相位为机端三相输出电压相位,而非由 VSG 的功频控制器生成,与传统的预同步方法^[19]相比,对由 LC 滤波器所导致的相位偏差进行自适应补偿,可以消除并网瞬间的电流冲击,实现岸电输出电压与船舶电网电压的完全同步。



a) 相位预同步过程矢量图



b) 预同步控制框图

图 4 预同步控制框图与相位矢量图

LC 滤波器的截止频率应在基波频率的 10 倍以上,本文中输出基波频率为 50 Hz。在确定截止频率后即可根据式(4)和(5)计算出滤波电感 L_s 和滤波电容 C 的取值,本文取 $L_s = 80 \text{ mH}$, $C = 47.5 \text{ } \mu\text{F}$ 。

$$L_s = \frac{U_0}{\omega_L^2 I_0} \sqrt{\omega_0^2 + \omega_L^2} \quad (4)$$

$$C = \frac{I_0}{U_0 \sqrt{\omega_L^2 + \omega_0^2}} \quad (5)$$

式中: ω_L 为截止角频率; U_0 为输出相电压有效值; I_0 为输出相电流有效值。

3 MMC 逆变侧 MPC 策略

3.1 MMC 交流侧电流数学模型

三相 MMC 的单相等效电路^[20]如图 5 所示,其中: $u_j (j = a, b, c)$ 为网侧电压; l 和 r 分别为线路等效电感和等效电阻; L 和 R 分别为桥臂电感和桥臂等效电阻; $i_{p,j}$ 和 $i_{n,j}$ 分别为 j 相上桥臂和下桥臂电流; $u_{p,j}$ 和 $u_{n,j}$ 分别为 j 相上桥臂和下桥臂电压; $i_{\text{diff},j} (j = a, b, c)$ 为 j 相内部不平衡电流。

由图 5 得 MMC 的电压方程:

$$u_j + ri_j + l \frac{di_j}{dt} = \frac{u_{n,j} - u_{p,j}}{2} - \frac{L}{2} \frac{di_j}{dt} - \frac{R}{2} i_j \quad (6)$$

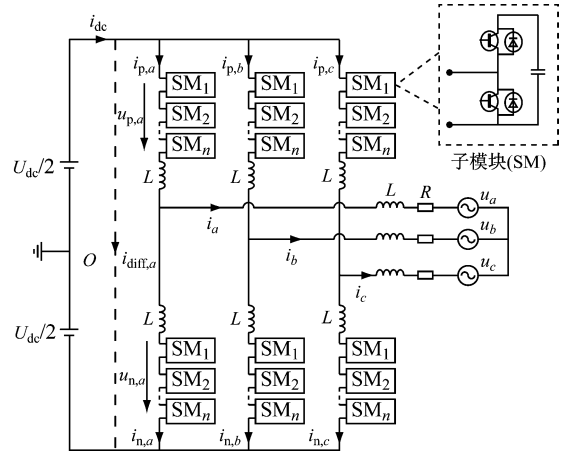


图 5 MMC 三相环流模型

令

$$\begin{cases} e_j = (u_{n,j} - u_{p,j})/2 \\ L' = L/2 + l \\ R' = r + R/2 \end{cases} \quad (7)$$

称 e_j 为 MMC 的虚拟电动势, L' 为等效电感, R' 为等效电阻。式(6)可简化为

$$L' \frac{di_j}{dt} = e_j - u_j - Ri_j \quad (8)$$

对交流侧电流采用欧拉公式离散化得

$$i_j(t+T) = \frac{T}{RT+L'} \left(e_j(t+T) - u_j(t+T) + \frac{L'}{T} i_j(t) \right) \quad (9)$$

式中, T 为采样周期。当 T 足够小时,可近似认为 $u_j(t+T) = u_j(t)$ 。

设交流侧参考电流为 $i_{\text{ref},j}(t+T)$, 若对 MMC 的输出电流进行预测控制,则目标函数定义为

$$J_1 = |i_{\text{ref},j}(t+T) - i_j(t+T)| \quad (10)$$

对于 $N+1$ 电平输出的 MMC 来说,每相所有开关状态的组合为 2^{2N} ,若以开关状态的可用组合进行预测计算则计算量极大。对输出电压电平进行预测控制,使输出电压数量恒为 $N+1$,MPC 的计算量能够大大降低。

设 MMC 上、下桥臂各有 N 个子模块,则上、下桥臂参考电压分别为

$$\begin{cases} e_{p,j}^* = \sum_{i=0}^N \frac{U_{dc}}{N} S_{p,j,i} \\ e_{n,j}^* = \sum_{i=0}^N \frac{U_{dc}}{N} S_{n,j,i} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $S_{p,j,i}$ 和 $S_{n,j,i}$ 分别表示上桥臂和下桥臂第 i 个子模块的导通状态。当子模块投入使用时, $S_{p,j,i}$ 和 $S_{n,j,i}$ 的值为 1; 当子模块切除时, $S_{p,j,i}$ 和 $S_{n,j,i}$ 的值为 0。故逆变器的输出电压参考值 e_j^* 可写为

$$\begin{cases} e_j^* = \frac{e_{n,j}^* - e_{p,j}^*}{2} = \frac{U_{dc}}{2N}(K_n - K_p) \\ K_n + K_p = N \end{cases} \quad (12)$$

式中： K_p 和 K_n 分别表示上桥臂和下桥臂子模块导通数， $K_p, K_n = 0, 1, \dots, N$ 。由式(12)可知，在对输出电流进行预测计算时仅需计算 $N + 1$ 种状态。

3.2 MMC 环流数学模型

三相 MMC 中的相间环流，虽然不影响输出电流波形，但是会叠加在桥臂电流上，增加开关器件的负荷，并使系统能量产生一定的损耗，因此在保证输出电流稳定的情况下，对系统的环流进行抑制^[21]。

由图 5 可得

$$\begin{cases} i_{diff,j} = (i_{p,j} + i_{n,j})/2 \\ \frac{U_{dc}}{2} = Ri_{diff,j} + L \frac{di_{diff,j}}{dt} + \frac{e_{p,j} + e_{n,j}}{2} \end{cases} \quad (13)$$

通过欧拉公式离散化得 MMC 内部不平衡电流预测模型：

$$\begin{aligned} i_{diff,j}(t+T) &= \frac{2T}{RT+L'} \left(U_{dc}(t+T) + \frac{L}{T} i_{diff,j}(t) - \right. \\ &\quad \left. e_{n,j}^*(t+T) - e_{p,j}^*(t+T) \right) \end{aligned} \quad (14)$$

结合输出电流的预测结果，分别从上、下桥臂取出一个子模块用于不平衡电流的预测控制：

$$\begin{cases} i_{diff,j}(t+T) = \frac{2T}{RT+L'} \left(U_{dc}(t+T) + \frac{L}{T} i_{diff,j}(t) - \right. \\ \quad \left. (e_{n,j}^*(t+T) + U_{diff,j}) - (e_{p,j}^*(t+T) + U_{diff,j}) \right) \\ U_{diff,j} = K_{diff,j} \frac{U_{dc}}{N} \end{cases} \quad (15)$$

式中： $K_{diff,j}$ 为抑制不平衡电流的上、下桥臂导通子模块数， $K_{diff,j} = -1, 0, 1$ 。 e_j 由上、下桥臂电压差决定，因此上、下桥臂同时加上相同的 $U_{diff,j}$ 对 MMC 的输出电流没有影响。

式(14)可化简为

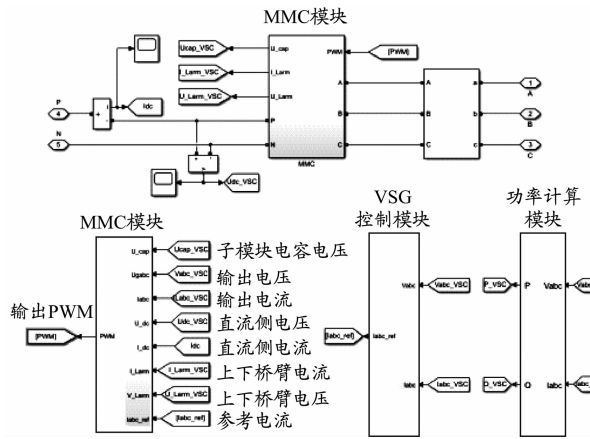
$$i_{diff,j}(t+T) = \frac{2T}{RT+L'} \left(U_{dc} + \frac{L}{T} i_{diff,j}(t) - \frac{U_{dc}}{N} (K_p + K_n + 2K_{diff,j}) \right) \quad (16)$$

式中： $K_p + K_n = N - 1$ ； $K_p, K_n = 0, 1, \dots, N - 1$ 。

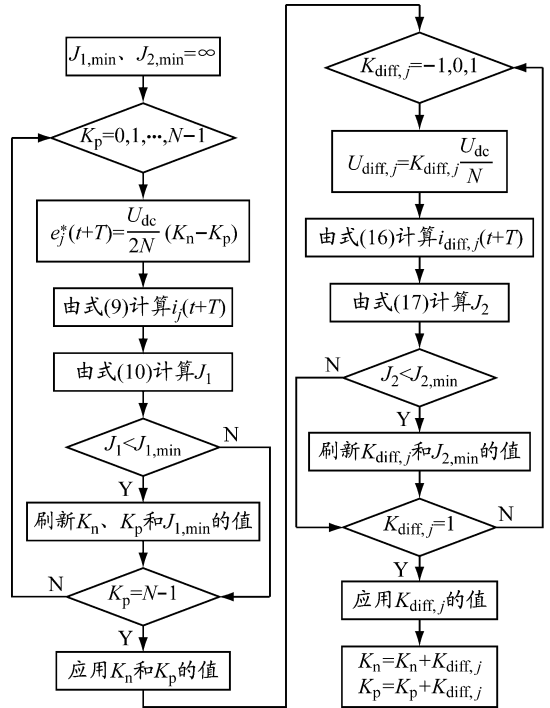
设 $i_{cir,j}$ 为环流， $i_{diff,j} = i_{dc}/3 + i_{cir,j}$ ，则对 MMC 环流进行控制的目标函数为

$$J_2 = |i_{dc}(t+T)/3 - i_{diff,j}(t+T)| \quad (17)$$

图 6 为 MPC 仿真模型以及系统交流侧输出电流和环流的 MPC 策略的详细控制流程。



a) MPC 仿真模型



b) MPC 控制流程

图 6 MPC 仿真模型与控制流程

如图 6a 将 MMC 上、下桥臂的电压、电流以及子模块电容电压导入 MPC 算法中，根据式(12)逐个计算子模块不同的导通数所对应的逆变器输出电压参考值，将其代入式(9)计算出每种情况下的下一时刻交流输出电流值，再将 $i_j(t+T)$ 与 VSG 控制环节得到的电流给定值 i_{ref} 做比较，取目标函数 J_1 ，根据 J_1 最小情况下的上、下子模块导通数 K_p, K_n 控制子模块导通，即可达到使逆变器输出理想电流的效果。

考虑到 MMC 内部环流的存在，结合输出电流的预测控制结果，分别从上、下桥臂取出一个子模块用于不平衡电流的预测控制。根据式(16)计算 $K_{diff,j}$ 分别取 $-1, 0, 1$ 时 MMC 内部不平衡电流的大小，再通过式(17)得到环流控制的目标函数 J_2 ，取

J_2 最小情况下的子模块导通数 $K_{\text{diff},j}$ 。由 K_p 、 K_n 和 $K_{\text{diff},j}$,即可得出在保证输出电流稳定的情况下对系统的环流抑制效果达到最佳的子模块导通数。

详细 MPC 的控制流程见图 6b。此时若将上述流程得到的上、下桥臂的子模块导通数直接驱动子模块投切将会导致子模块电容电压波动^[22],因此再对上、下桥臂子模块电容电压进行排序,根据桥臂电流的正负确定子模块的开关状态。如果桥臂电流大于 0,则投入电容电压较小的子模块进行充电;如果桥臂电流小于 0,则投入电容电压较大的子模块进行放电。

4 仿真验证与分析

为验证 MMC-VSG 的岸电电源基本特性及 MPC 策略的效果,在 MATLAB/Simulink 仿真环境下搭建并网仿真模型,相应仿真参数见表 1。根据钢质海船入级及建造规范以及相关资料,船舶中压电力系统交流电压一般为 6 kV/50 Hz 或 6.6 kV/60 Hz,大型港口一般从地区电网接受 35 kV 或 110 kV 高压电能,经降压为 6~10 kV 级再配送到各前沿配电所,因此取交流输出电压为 6 kV/50 Hz。

表 1 MMC-VSG 仿真参数

参数名称	数值
直流侧电压	10 000 V
额定频率	50 Hz
交流侧额定电压	6 000 V
调频系数	5 000
调压系数	0. 001
转动惯量	5 kg·m ²
MMC 单桥臂子模块数	20
子模块电容电压初始值	1 000 V
线路等效阻抗	0.3 Ω/1 mH
桥臂等效电阻	0.02 Ω
桥臂电感	2 mH
子模块电容	10 mF
滤波电感	80 mH
滤波电容	47.5 μF

4.1 船电与岸电电源预同步并网

船电与岸电电源并网时必须保证频率与电压幅值一致,采用改进的 VSG 可实现频率和电压幅值对电网的零偏差跟踪。设定 MMC-VSG 工况:0~0.5 s 内为空载运行;0.1 s 启动预同步单元;0.5 s 并网开关闭合。

图 7 为直接并网和预同步并网三相输出电流波形。由图 7 可知:直接并网时并网瞬间冲击电流可达 2 000 A;经过预同步控制后并网,并网电流仅为 10 A。直接并网时由于岸电与船电电压在幅值、相位上存在差异,并网瞬间产生较大的电流振荡,很可能导致设备损坏或引起继电保护,直接导致并网失败。图 8 为相同条件下,加入预同步环节的岸电电源 a 相输出电压 u_a 与船电 a 相电压 $u_{g,a}$ 波形对比及 VSG 功频控制器输出电压与岸电电源机端输出电压波形对比。由图 8a 可知,经过约 0.3 s 的调节,并网两侧电压相位逐渐减小直至重合,完成同步,验证了预同步并网方法的有效性。由图 8b 可以看出,滤波器的存在导致两者存在一定的相位偏差,若仍采用 VSG 功频控制器输出的电压作为参考电压进行预同步控制,则即便经过预同步环节,岸电电压与船电电压也不能完全同步。

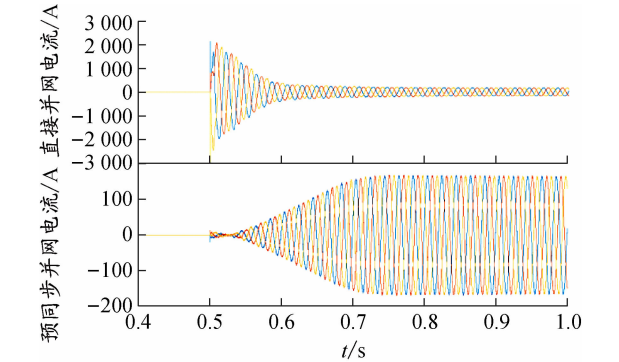


图 7 直接并网与预同步并网三相输出电流波形

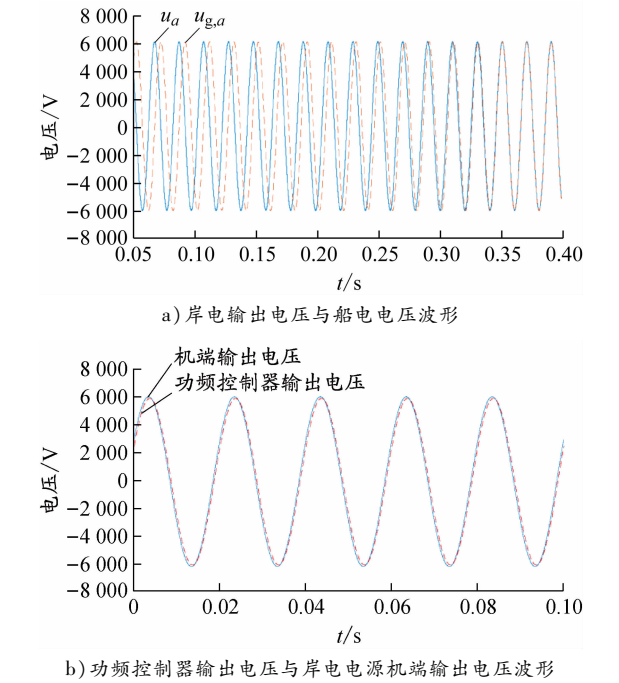


图 8 预同步并网岸电电压与船电电压对比及功频控制器输出电压与岸电电源机端输出电压对比

4.2 岸电电源并网、离网仿真分析

设岸电电源额定容量为 3 MW, 船舶电网带 1 MW 阻性负载和 200 kV·A 感性负载; 在 0~0.5 s 内岸电电源空载运行; 0.1 s 时启动并网预同步单元, 0.28 s 时预同步完成; 0.5 s 时打开并网开关并进行负载转移, 0.8 s 时负载转移完成; 1 s 时断开船电断路器, 由岸电电源独立供电; 1.2 s 时突加 0.5 MW 有功负载, 200 kV·A 无功负载; 1.4 s 时突减 0.5 MW 有功负载, 200 kV·A 无功负载。

4.2.1 带阻抗负载时 MMC-VSG 仿真分析

岸电并网切离网过程的岸电输出有功功率、无功功率、电流、电压、频率波形见图 9。

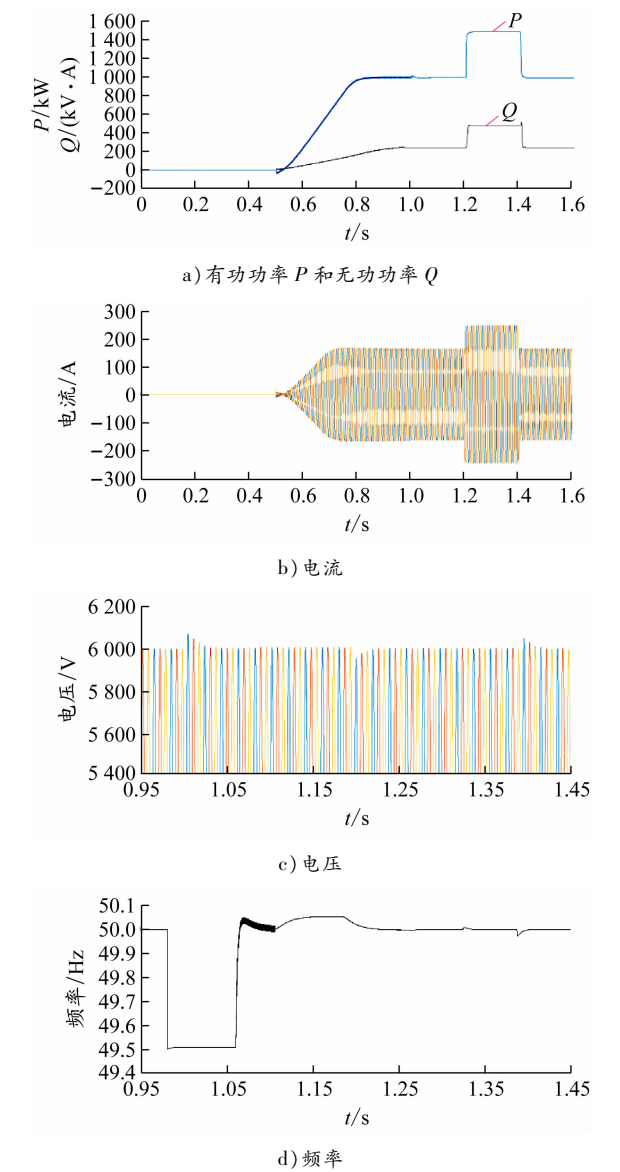


图 9 岸电并网切离网输出波形

由图 9a 可知, VSG 能够按系统调度指令向电网发送有功功率和无功功率。为降低负载突变对电网的冲击, 在负载转移过程中加入限定, 使负载在

0.3 s 内逐渐转移完毕, 在 0.5 s 并网的瞬间切除预同步, 导致 VSG 的电网频率与船舶电网的存在一定的偏差, 此时通过向船舶电网吸收或注入功率使 VSG 侧电网频率与船舶电网频率同步, 造成有功功率在 0.5 s 时出现一个小幅的下挫。图 9b 展示出在负载转移过程中, VSG 的输出电流逐渐增大而非突变, 实现了船电与岸电的平滑过渡。在 1.2 s 和 1.4 s 时分别进行的负载突变测试表明, 所设计的系统对此工况有很好的响应跟踪性能。由图 9c 可知: 三相电压整体输出波形稳定且正弦度良好, 仅在离网和负载突变瞬间电压因无功调压作用而出现小幅波动(约 70 V), 但仅经过 0.03 s 电压就快速恢复稳定。由图 9d 可知: 在 0.1 s 时由于启动预同步单元, VSG 通过调节逆变器输出电压的角频率来追踪电网相位, 引起频率降低; 在 0.5 s 时向电网输出有功功率, 此时 MMC-VSG 输出的三相交流电电压频率上升; 同理, 在 1.2 s 和 1.4 s 时负载突变导致频率波动。

4.2.2 MMC 内部环流均压仿真分析

图 10a 为 MMC a 相环流波形对比: 由无环流抑制的 a 相环流波形可知, 在负载转移完成且稳定后(即在 1 s 时)其波动范围为 15~40 A; 经过 MPC 后的 a 相环流在 1 s 时的波动范围仅为 27~29 A, 系统的环流减小了 92%。可见该方法对系统的环流具有很好的抑制效果。图 10b 为 MMC a 相上桥臂子模块电压, 其电压波动范围为 990~1 010 V, 远低

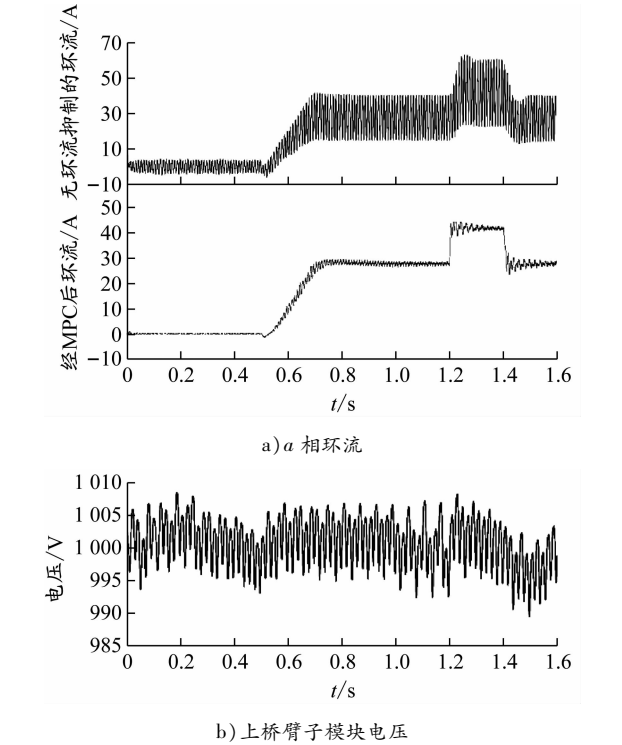


图 10 MMC a 相环流和上桥臂子模块电压波形

于在额定值 $\pm 10\%$ 范围内波动的要求。这说明该控制策略具有很好的电容电压均衡能力。

图 11 为采用改进的 MPC 的 VSG 与传统载波移相 (carrier phase shifted, CPS) 调制策略的 VSG 输出电流对比。由图 11 可知:采用 MPC 的 VSG 在系统负载突变时能够在 0.004 s 内立即响应,而传统的 VSG 则需要约 0.02 s 才能完成对电流的跟踪。

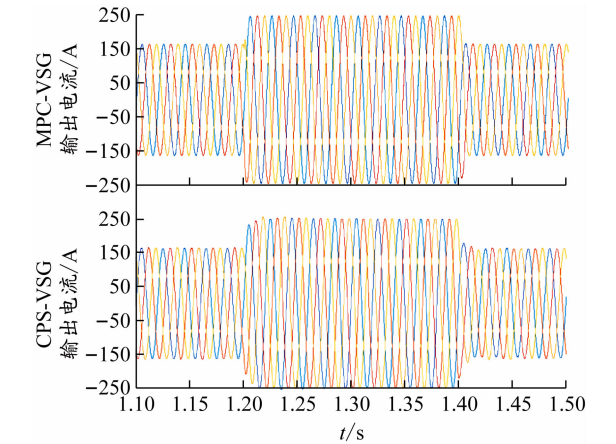


图 11 不同控制策略下 VSG 输出电流对比

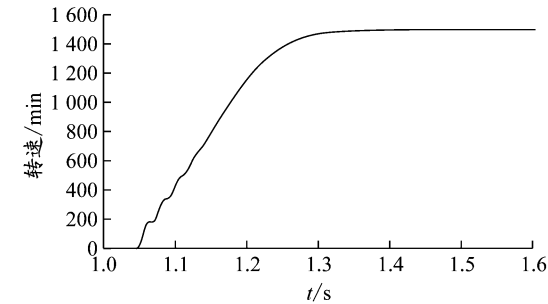
4.2.3 电机启动过程仿真分析

在 0 ~ 1 s 完成负载转移后,断开断路器,由岸电独立供电;在 1.05 s 时启动三相异步鼠笼式电机 (其额定功率为 37 kW,额定电压为 400 V,额定频率为 50 Hz,额定转速为 1 480 r/min),电机的转速、电流和 VSG 输出电流波形见图 12。

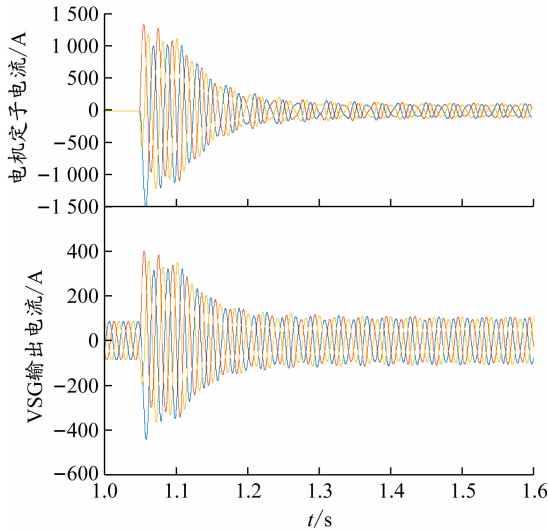
由图 12 可知:在电机启动瞬间产生约 1 400 A 的冲击电流,使电网电流在启动时产生剧烈波动;当电机在 1.35 s 时达到额定转速后,系统逐渐恢复稳态运行。

5 结论

港口岸电系统能够实现稳定平滑的无间断式并网切换,在独立供电应对突发状况时具有优良的动态响应能力,能满足船舶电力系统的稳定运行要求。本文通过 MATLAB/Simulink 平台,对基于模型预测



a) 电机转速



b) 电机定子电流和 VSG 输出电流

图 12 三相异步电机启动过程中转速、定子电流和 VSG 输出电流波形

控制 (MPC) 和模块化多电平换流器 (MMC) 的虚拟同步发电机 (VSG) 系统进行了仿真研究。仿真结果表明:①采用改进的预同步并网,岸电输出电压与船电电压可实现完全同步,使得船电与岸电并网时冲击电流大幅度减小;②改进了 VSG 的控制策略,通过引入 MPC 不仅使得逆变器具有很好的环流抑制能力和电容电压均衡效果,而且在保证电力系统稳定的前提下使岸电网在工况突变时的响应速度较传统的载波移相调制策略提升了约 80%。

参考文献:

[1] 宋新涛. 推行船舶岸电技术发展绿色航运经济: 关于张家港靠港船舶使用岸电思考[J]. 航海, 2015 (1): 68-69. DOI: JournalArticle/5b3b8f8bc095d70f007db4d9.

[2] 赵伟. 船舶岸电电源控制策略研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2018.

[3] 侯珏. 船舶与岸电并网控制策略研究[J]. 船舶工程, 2017, 39(1): 86-90. DOI: 10.13788/j.cnki.cbgc.2017.01.086.

[4] 陈枫, 应鸿, 徐鲲鹏, 等. 船舶岸电电源多机并联的并网无缝切换技术的研究[J]. 电气工程学报, 2017, 12(4): 33-37. DOI: 10.11985/2017.04.006.

[5] YU Kai, AI Qian, WANG Shiyi, et al. Analysis and optimization of droop controller for microgrid system based on small-signal dynamic model [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 1-11. DOI: 10.1109/TSG.2015.2501316.

- [6] D'ARCO S, SUUL J A. Equivalence of virtual synchronous machines and frequency-droops for converter-based microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 394-395. DOI: 10.1109/TSG.2013.2288000.
- [7] SHI Kai, YE Haihan, SONG Wentao, *et al.* Virtual inertia control strategy in microgrid based on virtual synchronous generator technology[J]. IEEE Access, 2018, 6: 27949-27957. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2839737.
- [8] ZHONG Qingchang, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267. DOI: 10.1109/TIE.2010.2048839.
- [9] LI Chengyu, XU Jianzhong, ZHAO Chengyong. A coherency-based equivalence method for MMC inverters using virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1369-1378. DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2499262.
- [10] 滕磊. 船舶船岸电无间隙转换系统建模与控制策略研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- [11] ZHONG Qingchang, NGUYEN P L, MA Zhenyu, *et al.* Self-synchronized synchronverters: inverters without a dedicated synchronization unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 29(2): 617-630. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2258684.
- [12] 杜千. 基于 MMC 的虚拟同步发电机控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [13] GUTIERREZ B, KWAK S S. Modular multilevel converters (MMCs) controlled by model predictive control with reduced calculation burden[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9176-9187. DOI: 10.1109/TPEL.2018.2789455.
- [14] LI Yunwei, KAO C N. An accurate power control strategy for inverter based distributed generation units operating in a low voltage microgrid[C]//2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. IEEE, 2009: 3363-3370. DOI: 10.1109/ECCE.2009.5316306.
- [15] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 336-349. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.162325.
- [16] 魏亚龙, 张辉, 孙凯, 等. 基于虚拟功率的虚拟同步发电机预同步方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 124-129, 178. DOI: 10.7500/AEPS20150727006.
- [17] RAJAN E, AMRUTHA S. Synchronverter based HVDC transmission[C]//International Conference on Innovations in Power and Advanced Computing Technologies. IEEE, 2017: 1-6. DOI: 10.1109/IPACT.2017.8245084.
- [18] AOINI R, MARINESCU B, KILANI K, *et al.* Improvement of transient stability in an AC/DC system with synchronverter based HVDC[C]//2015 12th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices. IEEE, 2016: 1-6. DOI: 10.1109/SSD.2015.7348137.
- [19] SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 668-676. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2281359.
- [20] 陈芃. MMC 模型预测控制研究与优化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [21] MOON J W, GWON J S, PARK J W, *et al.* Model predictive control with a reduced number of considered states in a modular multilevel converter for HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 608-617. DOI: 10.1109/TPWRD.2014.2303172.
- [22] 袁小峰. MMC 整流器关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.

(编辑 贾裙平)

(上接第 70 页)

- [32] The European Climate Adaptation Platform Climate. Future cities: urban networks to face climate change[EB/OL]. (2016-06-07)[2021-04-12]. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/projects/urban-networks-to-face-climate-change>.
- [33] The European Climate Adaptation Platform Climate. Future cities: urban networks to face climate change, supplement explore adaptation options[EB/OL]. (2016-06-01)[2021-04-12]. <https://www.eea.europa.eu/publications/sharing-adaptation-information-across-europe/>.
- [34] WANG Tianni, QU Zhuohua, YANG Zaili, *et al.* Chapter 6 - How does the UK transport system respond to the risks posed by climate change? An analysis from the perspective of adaptation planning[M]//Maritime Transport and Regional Sustainability. Elsevier, 2020: 85-106. DOI: 10.1016/B978-0-12-819134-7.00006-X.
- [35] MCLEAN E L, BECKER A. Decision makers' barriers to climate and extreme weather adaptation: a study of North Atlantic high- and medium-use seaports[J]. Sustainability Science, 2020, 15: 835-847. DOI: 10.1007/s11625-019-00741-5.
- [36] WANG Kun, ZHANG Anming. Climate change, natural disasters and adaptation investments: inter- and intra-port competition and cooperation[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 117: 158-189. DOI: 10.1016/j.trb.2018.08.003.
- [37] WANG Tianni, QU Zhuohua, NICHOL T, *et al.* Impacts of climate change on rail systems: a new climate risk analysis model[M]//Safety and Reliability-Safe Societies in a Changing World. London: Taylor & Francis Group, 2018: 2771-2779.

(编辑 贾裙平)