海上风电经 DRU 与辅助 VSC 并联送出系统研究

董常成[1]，程志江[1]，艾斯卡尔[2]，王维庆[1]，于 笑[2]，杨天翔[1]
(1.新疆大学 可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心，新疆 乌鲁木齐 830047；2.新疆金风科技股份有限公司，新疆 乌鲁木齐 830026)

摘 要：基于二极管整流单元的海上风电送出方案能够降低海上平台的体积和重量，节省了大量运维成本。但二极管整流单元不具有换相可控性，当风电场出现功率波动时，其灵活性较差。文章首先建立了以三相永磁同步电机构成的风电场经二极管整流单元与辅助电压源型换流器(Voltage-Source Converter，VSC)并联送出系统的拓扑模型；其次，分别对网侧变流器采用了构网型控制策略和对 VSC 采用了跟网型控制策略；最后，基于 Matlab/Simulink 搭建 RT-LAB 半实物仿真系统。结果表明，文章所提控制策略提高了风电机组 VSC 的无功功率，实现了二极管整流单元输出功率的控制。

关键词：二极管整流单元；海上风电；电压源型换流器；网侧变流器
中图分类号：TK51 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5292(2025)12-1655-09

0 引言

随着“双碳”目标的提出，我国风力发电规模迅速扩大，与陆上风电相比，深远海具有更丰富、更优质的风力资源[1,2]。

近年来，模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter，MMC) 已成功应用于国内外多个海上风电并网工程[3]。由于 MMC 子模块数量众多、体积和重量庞大、运维成本高等因素，限制了其发展[4]。文献[5]最早提出基于二极管整流器(Diode Rectifier Unit，DRU) 的高压直流送出方案，使海上换流器的体积、重量及运维成本大幅降低，但 DRU 存在无法主动建立风场电压、功率无法返送、稳定性差、无法黑启动等问题。因此国内外对海上风电机组构网控制展开研究，其主要包含电压和频率控制，其中电压控制主要采用电压、电流双闭环的控制方式建立系统电压，频率控制则分为开环频率控制[6,7]和基于锁相环的闭环频率控制[8,9]。闭环频率控制使用锁相环和频率控制环动态调整系统的频率，且能够避免并网、离网控制策略的切换，具有“即插即用”的优势[10]。然而，当风电机组有功功率波动时，由于耦合性使其无功功率波动，导致频率在额定频率附近波动。

为了结合 VSC 与 DRU 的优势，文献[11]提出基于 DRU 与辅助电流源换流器 (Current Source Converter，CSC)级联的混合直流输电系统，并进行轻量化与经济性分析，实现了海上平台的轻型化。该方案需要大容量无功功率和谐波电流补偿元件，导致高压直流电站占地面积大。文献[12]提出基于 DRU，MMC 并联的海上风电并网拓扑结构，通过大容量 MMC 建立风电场内网电压和频率，风机则采用传统跟网控制，但 MMC 建立电压后，有功功率全部由 DRU 送出，MMC 无法调控 DRU 输出功率，造成对大容量 MMC 的浪费。文献[13] 提出基于 DRU 与辅助 VSC 并联的海上风电并网拓扑结构，通过辅助 VSC 建立风电场内网电压并实现了黑启动，但辅助 VSC 仍存在体积和质量过大的问题，且辅助 VSC 完成系统黑启动后，功率全部由 DRU 送出。当风电场功率发生变化时，辅助 VSC 无法协助构建系统无功功率平衡和调控 DRU 的输出功率。文献[14]采用 DRU-MMC 并联系统拓扑，设计了有功功率分配策略，并对 MMC 最小容量选取和 DRU-MMC 并联系统经济性进行分析，该系统控制策略采用传统跟网型风机的控制策略，MMC 采用构网型控制策略，在该控制策略下 DRU 及整个风电场无法脱离 MMC 运行。

本文建立 DRU 与辅助 VSC 并联送出系统的拓扑结构，在风机侧采用构网控制，小容量VSC

收稿日期：2024-11-17。
基金项目：新疆维吾尔自治区重大专项(2022A01004-1)；新疆维吾尔自治区重大专项横向课题(202208140017)；新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2021D01C046)；新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题(2021D04011)。
通信作者：程志江(1977-)，男，博士，副教授，研究方向为可再生能源发电及控制技术。E-mail：chengzhijiang@xju.edu.cn

采用跟网控制,这样 DRU 可以脱离 VSC 运行。对控制策略进行改进,由 VSC 调整系统的无功平衡及调节 DRU 输出的有功功率,使风电机组在正常运行时减少传输无功功率,以充分利用其额定容量。最后基于 Matlab/Simulink 搭建的 RT-LAB 半实物仿真平台对所提方法进行验证。

1 系统概述

1.1 系统拓扑结构

海上风电经 DRU 与辅助 VSC 并联送出系统拓扑如图 1 所示。

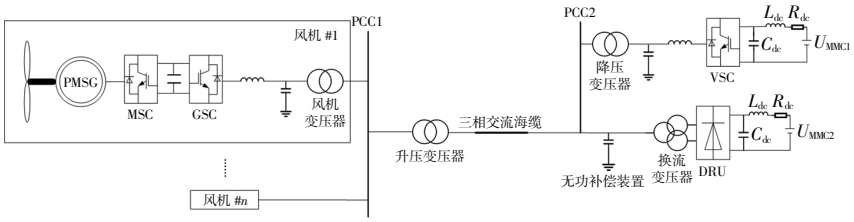


图 1 海上风电经 DRU 与辅助 VSC 并联送出系统拓扑

Fig.1 Topology of offshore wind power system sent in parallel by DRU and auxiliary VSC

三相永磁同步发电机(Permanent Magnet Synchronous Generator,PMSG)产生的电能经机侧变流器(Machine Side Converter,MSC)和网侧变流器(GridSide Converter,GSC)组成的背靠背换流器,再经 LC 滤波器、风机变压器后与具有相同结构的 $n-1$ 台风机并联到公共连接点(Point of Common Coupling,PCC),通过海上升压变压器与三相交流海缆连接至 VSC 和 12 脉冲 DRU。DRU 与 VSC 直流侧分别连接 MMC,MMC 的控制策略使得直流侧电压不变[15],故在设计中将 DRU 与 VSC 的直流侧电压分别等效为 U_{MMC1},U_{MMC2} 的直流电压源。

文献[16]和文献[17]对风机中的 MSC 和 GSC 进行了解耦,证明了 MSC 的状态不主动参与影响 GSC 的控制模式。MSC 与 GSC 有两种工作模式,一种是 MSC 控制背靠背直流侧电压稳定,GSC 控制逆变器功率;另一种是 MSC 控制逆变器功率,GSC 控制背靠背直流侧电压稳定。MSC 采用定直流电压控制和零 d 轴电流控制,GSC 采用定有功功率、无功功率控制,则 GSC 可简化为电压源型逆变器,GSC 直流侧可简化为直流电压源[18]。

1.2 DRU 运行特性

DRU 的外特性与触发角为 0°的电网换相换流器(Line Commutated Converter,LCC)相同,即:

$$U_{dc_DRU}=\frac{6\sqrt{2}}{\pi}U_L-\left(\frac{6}{\pi}X_r+R_{dc}+\omega_0 L_{dc}\right)I_{dc_DRU} \quad (1)$$

$$P_{DRU}=U_{dc_DRU}I_{dc_DRU} \quad (2)$$

$$Q_{DRU}=P_{DRU}\tan\varphi \quad (3)$$

$$\cos\varphi=0.5(1+\cos\mu) \quad (4)$$

式中:U_{dc_DRU} 和 I_{dc_DRU} 分别为 DRU 直流侧电容 C_{dc} 两端的电压和通过电感 L_{dc} 的电流;U_L 为交流母线的电压幅值;X_r 为换流变压器漏抗;R_{dc} 为直流输电线路的电阻;P_{DRU} 和 Q_{DRU} 分别为 DRU 交流侧的有功功率和无功功率;μ 和 φ 分别为 DRU 的换相重叠角和功率因数角。

联立式(1),(2)得 DRU 的有功功率 P_{DRU} 为

$$P_{DRU}=\frac{U_{dc_DRU}\left(\frac{6\sqrt{2}}{\pi}U_L-U_{dc_DRU}\right)}{\frac{6}{\pi}X_r+R_{dc}+\omega_0 L_{dc}} \quad (5)$$

由于 MMC 控制策略使 DRU 直流侧电压恒定,由式(5)可知,当 R_{dc} 为定值时,P_{DRU} 由交流母线电压幅值 U_L 决定。由式(3)可知,P_{DRU} 与 Q_{DRU} 存在耦合关系,则当风机输出有功功率发生变化时,P_{DRU} 与 Q_{DRU} 均会发生变化,功率变化前构建的系统无功平衡关系将被破坏,若要保持 GSC 发出的无功功率为 0,则需要 VSC 参与。

2 系统控制策略

2.1 GSC 控制策略

为了弥补文献[8]和文献[9]所提控制方式中系统频率易受无功功率影响的缺陷,本文对其控制策略进行了改进,去除了无功功率控制环路,只进行频率控制。由于在 PCC2 点接入 VSC,因此可以由 VSC 完成对 GSC 的无功功率的控制。GSC 控制策略如图 2 所示。

图 2 中 GSC 采用自锁相的构网控制,在频率控制中给定旋转角速率 ω_0 与基于锁相环所得到的旋转角速率 ω_{wt} 相减,经比例控制 k_f 得到 u_{fq} 的参考值 u_{fq}^*,频率控制与锁相环形成闭环动态调整

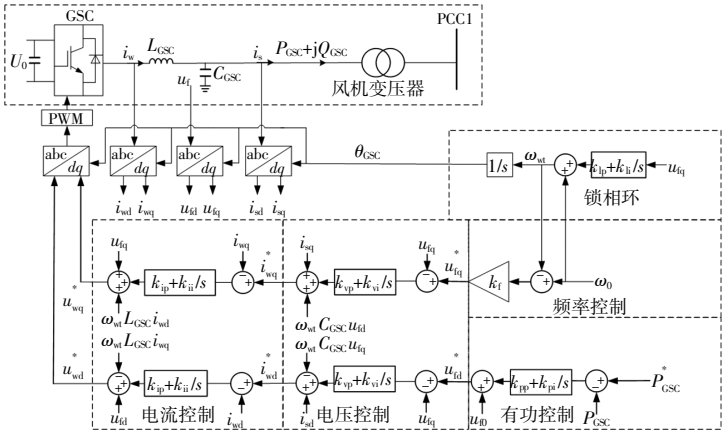


图 2　GSC 控制策略框图

Fig.2 Block diagram of GSC control strategy

系统的频率,避免进行通讯时,自主构建起 PCC1 点处的电压幅值和频率，为海上风电系统提供电压和频率支撑[19]。

2.2　VSC 控制策略

VSC 控制策略如图 3 所示。

VSC 采用跟网的控制策略,包括有功功率控制、无功功率控制和电流控制。取由 VSC 流向 PCC2 的方向为电流和功率的正方向，若忽略 VSC 侧 LC 滤波器消耗的功率，经 VSC 送出的有功功率和无功功率与图 3 所表述的线路上的有功功率、无功功率大小相等,传输方向相反。

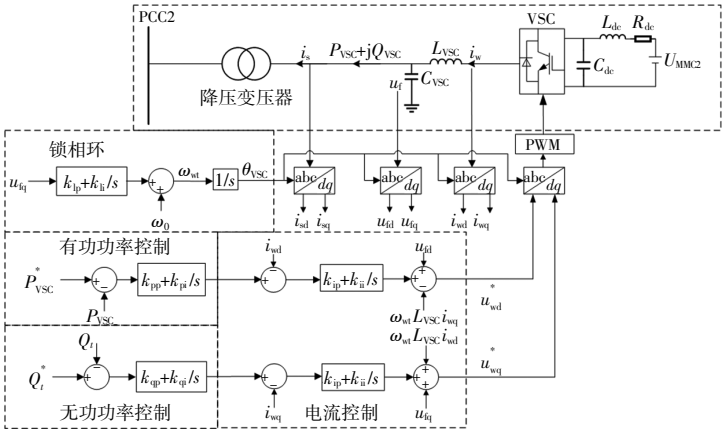


图 3　VSC 控制策略框图

Fig.3 Block diagram of VSC control strategy

由于 PCC1 点到 PCC2 点线路上存在着变压器和线路阻抗,因此在 VSC 控制环路中,相比于根据 PCC1 点电压相位推导出 PCC2 电压相位的方法,VSC 采用锁相环控制的方式更为简单实用。锁相环可以避免与风电机组远距离强通讯，同时通过采集本地信息，构建起 VSC 控制系统的相位。

VSC 跟网控制策略下,有功功率控制为

$$i_{wd}^{*}=\left(P_{VSC}^{*}-P_{VSC}\right)\left(k_{pp}+k_{pi}/s\right) \tag{6}$$

式中:P_{VSC}^{*},P_{VSC} 分别为流经 VSC 的有功功率参考值和实际值;k_{pp},k_{pi} 分别为有功功率控制环路的比例和积分系数。

由于 GSC 控制策略中要保证 GSC 输出无功功率为 0,因此,须由 VSC 进行辅助控制,控制环路为

$$i_{wq}^{*}=\left(Q_t^{*}-Q_t\right)\left(k_{qp}+k_{qi}/s\right) \tag{7}$$

式中:Q_t 为 n 台风机输出的无功功率的平均值,即 $Q_t=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}Q_{GSC}$;$Q_t^{*}$ 为 Q_t 的参考值,设为 0;k_{qp},k_{qi} 分别为无功功率控制环路的比例和积分系数。

由于采用跟网控制,VSC 在系统中表现为可控电流源，因此可以采用电流控制环系统实现对 VSC 入口处电压 u_{wd} 和 u_{wq} 的快速控制。有功功率外环产生的 i_{wd}^{*} 和无功功率外环产生的 i_{wq}^{*} 为电流参考信号,将该信号作为电流控制环的输入,控制环路为

$$\begin{cases} u_{wd}^{*}=\left(i_{wd}^{*}-i_{wd}\right)\left(k_{ip}+k_{ii}/s\right)+u_{fd}-\omega_{wt}L_{VSC}i_{wq} \\ u_{wq}^{*}=\left(i_{wq}^{*}-i_{wq}\right)\left(k_{ip}+k_{ii}/s\right)+u_{fq}+\omega_{wt}L_{VSC}i_{wd} \end{cases} \tag{8}$$

式中:u_{wd}^{*} 和 u_{wq}^{*} 经 Park 反变换为 PWM 发生器提供调制信号;k_{ip},k_{ii} 分别为电压控制环路的比例和积分系数;L_{VSC} 为 LC 滤波器的电感值;ω_{wt} 为锁相环得到的角速度。

3 实验验证

3.1 仿真算例介绍

为验证本文所提海上风电经 DRU 与辅助 VSC 级联送出方案的有效性，基于 Matlab/Simulink 搭建了如图 1 所示的拓扑模型,海上风电场包括 10 台等值 PMSG,MSC 采用定直流电压控制和零 d 轴电流控制,GSC 直流侧等效为一个额定电压为 u_0 的直流电源。10 台 PMSG 的 GSC 经风机变压器并联至 PCC1 点,经升压变压器和低频交流输电系统连接至 PCC2 点,由 DRU 与辅助 VSC 并联送出。为节约成本,VSC 采用额定容量为 15 MVA 的小容量变流器。GSC 控制参数、VSC 控制参数和系统模型参数分别如表 1~3 所示。

实验首先由 10 台构网型 PMSG 率先启动,以构建系统的电压和频率,而后接入 VSC,系统进入稳态后,模拟风电场有功功率阶跃工况和经 VSC送出有功功率阶跃工况,以验证 VSC 平衡系统无功、尽可能保证 GSC 无功功率为 0 和调控 DRU 输出功率的作用，并基于 RT-Lab 半实物仿真平台进行验证,RT-Lab 联合仿真平台如图 4 所示。实验过程如表 4 所示。

表 1 GSC 控制参数

Table 1 Control parameters of GSC

参数	数值
给定角速度 ω_0	40π
锁相环比例增益 k_{lp}	0.05
锁相环积分增益 k_{li}	0.1
有功控制比例增益 k_{pp}	2.25×10^{-4}
有功控制积分增益 k_{pi}	4.5×10^{-4}
频率控制比例增益 k_f	10
电压控制积分增益 k_{vp}	13.33
电压控制积分增益 k_{vi}	133.3
电流控制比例增益 k_{ip}	30
电流控制积分增益 k_{ii}	300

表 2 VSC 控制参数

Table 2 VSC control parameters

参数	数值
锁相环比例增益 k_{lp}	0.001
锁相环积分增益 k_{li}	0.002
有功控制比例增益 k_{pp}	5×10^{-6}
有功控制积分增益 k_{pi}	2.5×10^{-5}
无功控制比例增益 k_{qp}	2×10^{-5}
无功控制积分增益 k_{qi}	1×10^{-4}
电流控制比例增益 k_{ip}	5.6×10^{4}
电流控制积分增益 k_{ii}	1.12×10^{5}

表 3 系统模型参数

Table 3 System model parameters

参数	数值
PMSG 额定容量 P_S/MVA	4.5
GSC 直流侧电压 U_O/V	1 500
U_{MMC1}/kV	250
U_{MMC2}/kV	500
额定交流频率/Hz	20
GSC 滤波电感 L_{GSC}/μH	100
GSC 滤波电容 C_{GSC}/mF	0.4
VSC 滤波电感 L_{VSC}/H	0.07
VSC 滤波电容 c_{VSC}/μF	2.26
风机变压器变比△/Y	690 V/35 kV
风机变压器漏抗/p.u.	0.04
升压变压器变比△/Y	35 kV/220 kV
升压变压器漏抗/p.u.	0.008
换流变压器变比 Y/△/Y	220 kV/194 kV
换流变压器漏抗/p.u.	0.36
降压变压器变比△/Y	220 kV/135 kV
降压变压器漏抗/p.u.	0.007
DRU 直流侧电压 U_{DRU}/kV	500
VSC 直流侧电压 U_{VSC}/kV	250
海缆长度/km	100
单位长度电阻/Ω·km^{-1}	0.012 8
单位长度电感/mH·km^{-1}	0.437
单位长度电容/μF·km^{-1}	0.023 3
PWM 开关频率	3 000

3.2 构网型 GSC 控制与跟网型 VSC 控制验证

PCC1 点电压 u_{PCC1} 和 VSC 控制中 C_{VSC} 两端电压 u_f,Matlab/Simulink 和 RT-LAB 半实物仿真结果如图 5 所示。

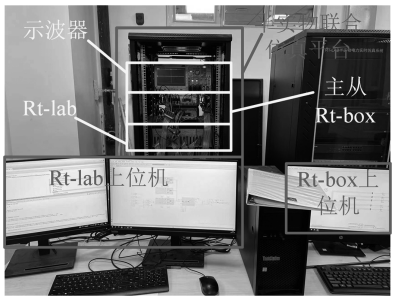


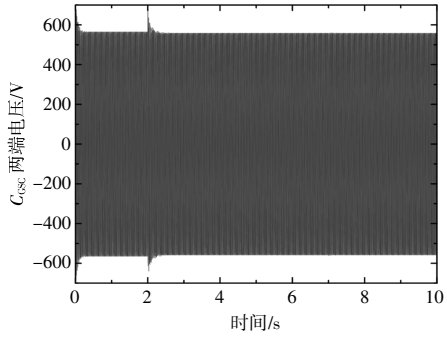
图 4　RT-Lab 半实物联合仿真平台

Fig.4 RT-Lab semi-physical co-simulation platform

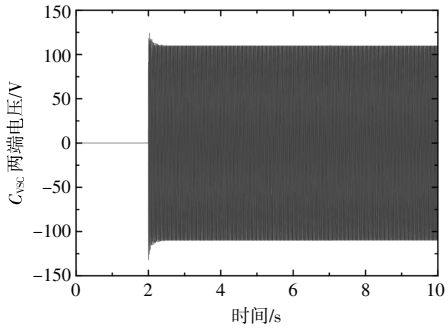
表 4　实验过程

Table 4 Experimental process

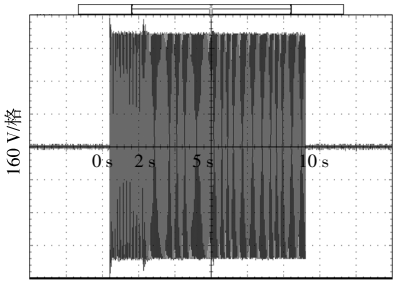
时间/s	事件
0	PMSG 启动并建立系统电压和频率
2	接入 VSC
5	PMSG 有功功率阶跃为 3 MW
7	经 VSC 送出的有功功率阶跃为 2 MW
10	实验结束



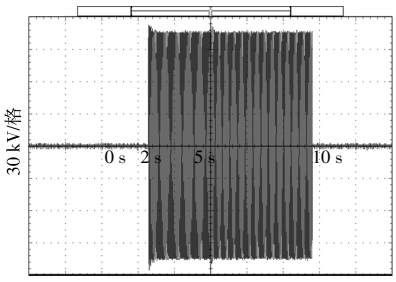
(a)基于 Simulink 测得 PCC1 点电压



(b)基于 Simulink 测得两端电压



(c)基于 RT-LAB 测得 PCC1 点电压



(d)基于 RT-LAB 测得两端电压

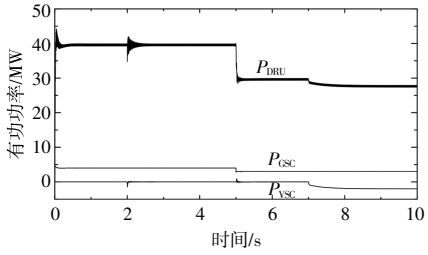
图 5　PCC1 点电压和 C_{VSC} 两端电压

Fig.5 PCC1 point voltage and the voltage at both ends of C_{VSC}

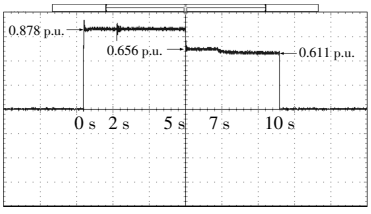
由图 5 可知,GSC 在 0 s 时构建起 PCC1 点额定电压,体现了 GSC 控制的构网特性。0~2 s,两端电压为 0,2~10 s 内两端电压为额定电压,这是因为 2 s 时 VSC 接入系统,由于 VSC 控制系统中不具备电压环,而 VSC 接入时能迅速构建起额定电压,体现了 VSC 控制的跟网特性。

3.3　VSC 补偿系统无功和控制 DRU 输出功率

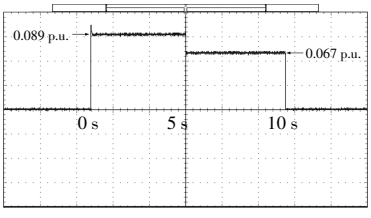
基于 Matlab/Simulink 搭建的仿真模型,按照表 4 所示的实验过程,对 VSC 平衡系统无功和控制 DRU 输出功率的可行性进行了验证,并在 RT-Lab 半实物仿真平台进行实验。系统的有功功率、无功功率、GSC 的频率及 VSC 的频率见图 6~9。



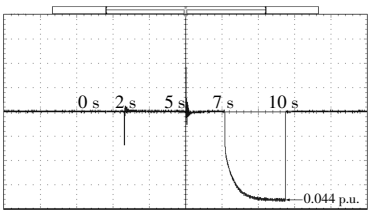
(a)基于 Simulink 测得系统的有功功率



(b)基于 RT-LAB 测得 DRU 的有功功率



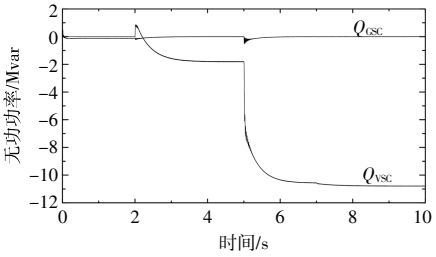
(c)基于 RT-LAB 测得 GSC 的有功功率



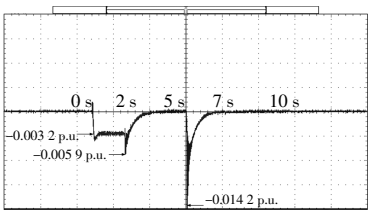
(d)基于 RT-LAB 测得 VSC 的有功功率

图 6 系统的有功功率

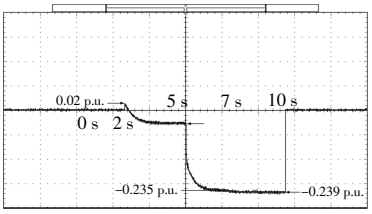
Fig.6 Active power of the system



(a)基于 Simulink 测得系统无功功率



(b)基于 RT-LAB 测得 GSC 无功功率



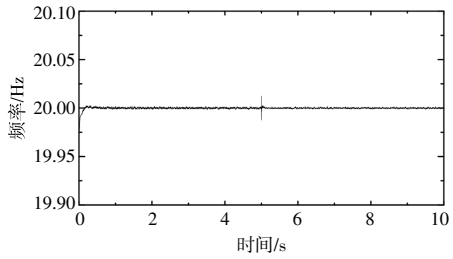
(c)基于 RT-LAB 测得 VSC 的无功功率

图 7 系统的无功功率

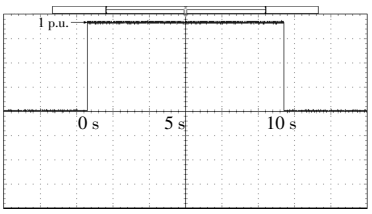
Fig.7 Reactive power of the system

由图 6,7 可知，在 0~2 s 内,VSC 未导通,每台 GSC 输出的有功功率为 4 MW,全部由 DRU 送出,此时 GSC 无功功率不为 0。2 s 时接入 VSC,经 VSC 送出有功功率为 0,经 DRU 送出的有功功率 P_{DRU} 在小范围波动后重新达到稳态，这是因为并入 VSC 使交流母线的电压发生变化。VSC 控制的无功环路下 GSC 无功功率 Q_{GSC} 收敛至 0。5 s 时，每台 GSC 输出的有功功率 P_{GSC} 变为 3 MW，此时经 VSC 送出的有功功率仍然为 0,P_{DRU} 下降。由式(3),(5)可知,系统原来的无功平衡状态被打破,因此 Q_{GSC} 出现小范围波动,系统须建立新的无功平衡，此时由 VSC 补偿系统无功功率,Q_{GSC} 逐渐收敛至 0,体现了在 GSC 控制环路中不含无功功率控制的情况下,VSC 补偿系统无功功率，维持 GSC 的无功功率尽可能为 0 的作用。7 s 时经 VSC 送出的有功功率发生变化，阶跃至 2 MW，此时 P_{GSC} 未发生明显变化,P_{DRU} 减少,体现了 VSC 对于辅助控制 DRU 送出功率的作用。RT-LAB 以 10 台 PMSG 的总额定功率 45 MV·A 为基准值,可见与 Matlab/Simulink 仿真结果一致。

基于 Matlab/Simulink 和 RT-LAB 半实物系统对 GSC 频率 f_{GSC} 仿真结果如图 8 所示。



(a)基于 Simulink 测得 GSC 频率



(b)基于 RT-LAB 测得 GSC 频率

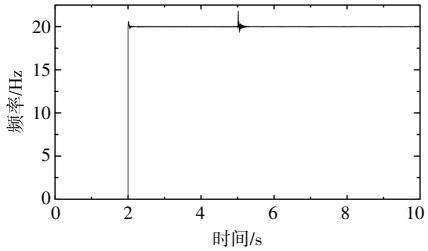
图 8 GSC 频率

Fig.8 Frequency of GSC

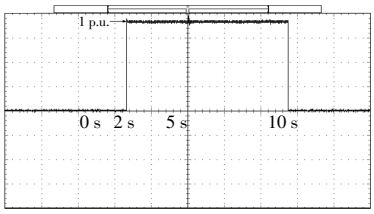
由图 8 可见,在 GSC 控制中不含无功环的情况下，系统频率不受 Q_{GSC} 的影响，在 Q_{GSC} 不为 0 时,其频率依然稳定在 20 Hz。其 RT-LAB 半实物仿真结果与 Matlab/Simulink 仿真结果一致。

基于 Matlab/Simulink 和 RT-LAB 半实物系统对 VSC 频率 f_{VSC} 仿真结果如图 9 所示。

由图 9 可见,f_{VSC} 在 0~2 s 时为 0,2 s 时阶跃为 20 Hz,VSC 频率具有良好的稳定性,体现了其跟网特性。RT-LAB 半实物仿真结果与Matlab/Simulink 仿真结果一致。



(a)基于 Simulink 测得 VSC 频率



(b)基于 RT-LAB 测得 VSC 频率

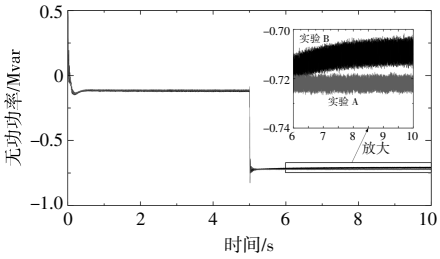
图 9　VSC 频率

Fig.9 Frequency of VSC

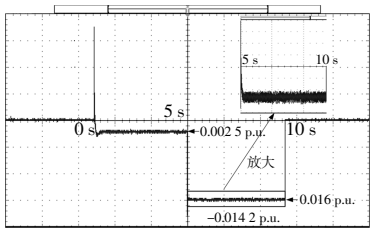
3.4　对照实验

将本文所提控制策略与文献[8]和文献[9]所提的基于 Q-f 下垂控制策略进行对比。其中,实验 A 为在只有 DRU 送出系统下,不使用 Q-f 下垂控制,只进行频率控制,GSC 控制框图如图 2。在 5 s 时每台风机有功功率由 4 MW 阶跃为 3 MW。实验 B 为在只有 DRU 送出系统下，进行 Q-f 下垂控制。Q-f 下垂系数 k_q 为 2.5×10^{-6},在 5 s 时每台风机有功功率由 4 MW 阶跃为 3 MW。

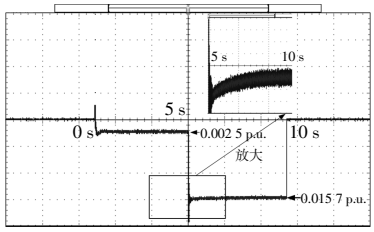
基于 Matlab/Simulink 搭建的仿真模型,不同控制方式下 GSC 的无功功率和频率对比分别如图 10,11 所示。



(a)基于 Simulink 测得 GSC 的无功功率对比



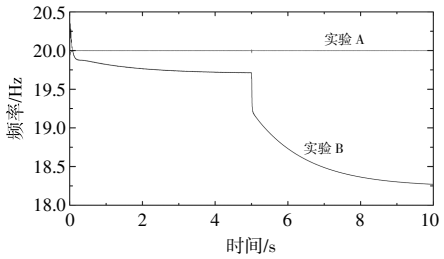
(b)基于 RT-Lab 测得实验 A 时 GSC 的无功功率



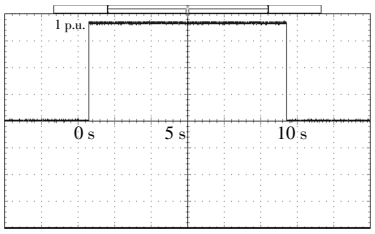
(c)基于 RT-Lab 测得实验 B 时 GSC 的无功功率

图 10　GSC 的无功功率

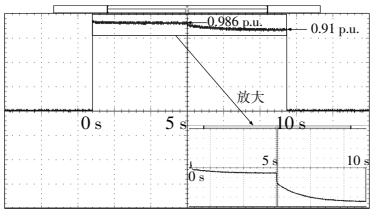
Fig.10 Reactive power of GSC



(a)基于 Simulink 测得 GSC 的频率对比



(b)基于 RT-Lab 测得实验 A 中 GSC 的频率



(c)基于 RT-Lab 测得实验 B 中 GSC 的频率

图 11　GSC 的频率

Fig.11 Frequency of GSC

由图 10,11 可知:实验 A 在去除 GSC 无功控制环路的情况下,虽然频率能稳定在 20 Hz,但当风电场有功功率发生阶跃时，由于没有无功控制环路和 VSC，无法对 GSC 的无功功率进行控制;实验 B 表明，当风电场有功功率发生阶跃时,文献[8]和文献[9]所提控制策略在通过降低频率控制 GSC 无功功率的方法有一定作用,在降低频率的同时，对 GSC 无功功率改善具有一定作用,但不明显。原因是该系统为低频交流系统,可降低的频率裕度有限，因此其在低频交流送出系统中存在一定局限性。GSC 无功功率以 10 台 PMSG 的总额定功率 45 MV·A 为基准值，频率以基频 20 Hz 为基准值。通过与实验 A、实验 B 的对比分析,本文提出的 DRU 与辅助 VSC 并联送出方案能够更有效地将 GSC 无功功率控制接近于 0,并显著提升系统稳定性。

4　结束语

本文针对 DRU 用于海上风电系统的不可控性,采用 DRU 与辅助 VSC 并联送出系统,并采用构网型 GSC 和跟网型 VSC 的控制策略。基于

Matlab/Simulink 和 RT-LAB 半实物仿真结果表明,在自锁相构网型 GSC 控制的基础上,去除无功功率控制环路,使系统频率不受 GSC 无功功率的影响,稳定性得到改善,且 GSC 无须进行无功控制,额定功率最大化地提供有功功率。VSC 尽可能保证 GSC 的无功功率为 0, 且对 DRU 输出的有功功率具有一定的调控作用。

参考文献:

[1] 薄鑫,杨志超,宋杉,等.海上风电经柔直送出系统受端交流故障联合穿越控制策略[J].可再生能源,2022,40(10):1396-1406.

[2] 杨仁炘,施刚,蔡旭.海上全直流型风电场的电压源型控制[J].电工技术学报,2018,33(S2):546-557.

[3] 杨悦,李国庆.基于 VSC-HVDC 的海上风电小干扰稳定控制[J].电工技术学报,2016,31(13):101-110.

[4] 袁曼曼,王海云,王维庆,等.低电压调制比 MMC 在海上风电并网中的应用研究 [J]. 可再生能源,2022,40(7):932-937.

[5] Menke P,Zurowski R,Christ T,et al. 2nd generation DC grid access for large scale offshore wind farms[A]. Proceedings of the 14th Wind Integration Workshop[C]. Brussels:CIGRE,2015.1-7.

[6] Tang Y J, Zhang Z R, Xu Z. DRU based low frequency AC transmission scheme for offshore wind farm integration [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2021,12(3):1512-1524.

[7] Zhang Z R, Jin Y Q, Xu Z. Grid-forming control of wind turbines for diode rectifier unit based offshore wind farm integration [J].IEEE Transactions on Power Delivery,2022,38(2):1341-1352.

[8] Lujie Yu,Rui Li,Lie Xu. Distributed PLL-based control of offshore wind turbines connected with diode-rectifier-based HVDC systems[J].IEEE Transactions on Power Delivery,2018,33(3):1328-1336.

[9] Yu L J, Li R, Xu L, et al.Analysis and control of offshore wind farms connected with diode rectifier-based HVDC system [J].IEEE Transactions on Power Delivery,2019,35(4):2049-2059.

[10] 俞露杰,付子玉,朱介北,等.远海风电 DRU-HVDC 送出系统构网控制与启动方法综述[J].电力系统自动化,2023,47(24):63-79.

[11] 夏嘉航,王晨欣,展瑞琦,等.基于电流源换流器的混合型海上风电直流输电系统 [J]. 电力系统自动化,2021,45(21):129-138.

[12] 彭开军,周国梁,李文津,等.采用二极管整流单元和模块化多电平换流器的混合型远海风电送出方案[J].高压电器,2023,59(7):166-175.

[13] Chang Y, Cai X. Hybrid topology of a diode-rectifier-based HVDC system for offshore wind farms [J].IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2018,7(3):2116-2128.

[14] 杨大业,项祖涛,罗煦之,等.永磁型风机海上风电送出系统甩负荷故障暂时过电压影响因素分析[J].发电技术,2022,43(1):111-118.

[15] 唐英杰,张哲任,徐政.基于二极管不控整流单元的远海风电低频交流送出方案[J].中国电力,2020,53(7):44-54,168.

[16] Huang H, Mao C, Lu J, et al. Small-signal modelling and analysis of wind turbine with direct drive permanent magnet synchronous generator connected to power grid[J].IET Renewable Power Generation,2012,6(1):48-58.

[17] Liu H, Sun J. Voltage stability and control of offshore wind farms with AC collection and HVDC transmission [J].IEEE Journal of Emerging and selected topics in Power Electronics,2014,2(4):1181-1189.

[18] 孟沛彧,向往,邸世民,等.大规模海上风电多电压等级混合级联直流送出系统[J].电力系统自动化,2021,45(21):120-128.

[19] 李彬,杜丁香,王兴国,等.基于平均绝对误差的海上风电经柔直送出系统交流海缆纵联保护[J].电测与仪表,2022,59(6):122-129.

Research on parallel transmission system of offshore wind power by DRU and auxiliary VSC

Dong Changcheng[1], Cheng Zhijiang[1], Aisikaer[2], Wang Weiqing[1], Yu Xiao[2], Yang Tianxiang[1]
(1.Engineering Research Center of Renewable Energy Power Generation and Grid-Connection Technology, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2.Xinjiang Goldwind Sci & Tech Co.,Ltd., Urumqi 830026, China)

Abstract: Diode rectifier unit (DRU) based offshore wind power delivery scheme can reduce the volume and weight of offshore platforms and thus save a lot of operation and maintenance costs. However, the DRU does not have commutation controllability, and its flexibility is poor when power fluctuations occur in the wind farm.This paper first establishes a topological model of a wind farm composed of three-phase permanent magnet synchronous generators connected in parallel with a DRU and an auxiliary voltage-source converter (VSC) for power transmission.)Secondly, the grid-froming control strategy of the grid side converter and the grid-following control strategy of VSC are adopted respectively. Finally,a RT-LAB semi-physical simulation system is built based on Matab/simulink. The results show that the proposed control strategy realizes the auxiliary VSC control of reactive power and DRU output power of wind turbines.

Keywords: diode rectifier unit; offshore wind power; voltage-source converter; grid side converter