基于二极管整流单元的海上风电柔性低频送出 系统黑启动策略

黄 莹¹,黄小威²,肖晃庆²,刘 涛³

(1. 浙江大学电气工程学院,杭州 310027; 2. 华南理工大学电力学院,广州 510641;3. 直流输电技术全国重点实验室(中国南方电网科学研究院有限责任公司),广州 510663)

摘 要:在基于二极管整流单元(diode rectifier unit, DRU)的海上风电柔性低频送出系统中,DRU无法向海上风电 场传输有功功率,需要额外的黑启动电源为风电机组提供启动所需的初始能量。为此,提出了一种采用辅助换流 器作为黑启动电源的海上风电柔性低频送出系统黑启动策略。首先,介绍了基于 DRU 的海上风电柔性低频送出 系统的拓扑结构与风电机组稳态时的构网型控制策略。然后,基于上述控制策略设计了辅助换流器与风电机组的 黑启动策略。在此基础上,分析了辅助换流器容量的选择方法。最后,在时域仿真软件 PSCAD/EMTDC 上搭建了 相应的仿真模型,对系统的黑启动过程进行仿真,仿真中海上风电场所有电气量均能平稳达到正常运行前的状态。 仿真结果表明,所提黑启动策略可以实现基于 DRU 的海上风电柔性低频送出系统的平滑启动。 关键词:海上风电;低频交流输电;二极管整流单元;辅助换流器;构网型风电机组;黑启动

Black Start Strategy of Diode Rectifier Unit Based Flexible Low-frequency Transmission System for Offshore Wind Power

HUANG Ying¹, HUANG Xiaowei², XIAO Huangqing², LIU Tao³

(1. Department of Electric Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 3. State Key Laboratory of HVDC, Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid Company Limited, Guangzhou 510663, China)

Abstract: In a DRU(diode rectifier unit)-based flexible low-frequency AC transmission system of offshore wind power, DRU cannot transmit active power to the offshore wind farm, and the system requires an additional black start power source to provide initial start-up energy for wind turbines. For this reason, a black start strategy using auxiliary converter as black start power source for the above system is proposed. Firstly, the topology structure of DRU-based flexible low-frequency AC transmission system and the grid forming control strategy adopted by wind turbines are introduced. Then, based on the above control strategy, the black start strategy of auxiliary converter and wind turbines are designed. On the basis of the above strategies, the selection method for auxiliary converter capacity is analyzed. Finally, a corresponding simulation model is built on the PSCAD/EMTDC software to simulate the black start process of the system, and all electrical quantities can smoothly reach the normal operation state. The simulation results show that the black start strategy proposed in this paper can realize the smooth start of the DRU-based flexible low-frequency AC transmission system of offshore wind power.

Key words: offshore wind farm; low-frequency AC transmission; diode rectifier unit; auxiliary converter; gird forming wind turbine; black start

0 引言

我国沿海地区拥有丰富的海上风电资源。在实

现"双碳"目标的大背景下,大力发展海上风电将 成为我国电网未来发展的重要方向之一^[1]。

目前,海上风电场一般采用高压交流输电(high voltage alternating current, HVAC)或高压直流输电 (high voltage direct current, HVDC)与陆地电网连 接。传统的工频 HVAC 方案受到海缆容性电流及同 步稳定运行极限的约束,输电距离受限,因此不适

基金资助项目: 广州市科技计划项目(202201010694); 中央高校基本科 研业务费专项资金(2022ZYGXZR050)。

Project supported by Science and Technology Projects in Guangzhou (202201010694), Fundamental Research Funds for the Central Universities (2022ZYGXZR050).

用于远距离海上风电并网^[2]。而基于模块化多电平 换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性 直流输电需要安装体积巨大的海上换流站平台,其 建设难度与投资成本较高^[3]。为了解决现有方案的 不足,文献[4]提出了使用低频交流输电技术连接海 上风电场的方案。与工频交流输电相比,低频输电 技术可以降低输电线路的阻抗和海缆容性电流,从 而增加海上风电送出的距离^[5]。同时,原先的海上 换流站可以移到岸上,从而消除海上换流平台,降 低系统建设、维护的难度。而在众多低频交流输电 方案中^[6-9],基于二极管整流单元的柔性低频方案能 够进一步降低造价,提升系统的经济性,因此得到 了业界的广泛关注^[10]。

由于 DRU 为不可控换流器,无法建立海上低 频交流系统的交流电压。因此风机需要采用构网型 控制,以此提供海上交流系统的电压支撑。目前, DRU 场景下的构网型控制策略大体上可以概括为 以下 3 类:基于通信系统的构网型控制^[9,11-12]、基于 分布式锁相环(phase-locked loop, PLL)的构网型控 制^[13-14]和基于无功功率同步控制的构网型控 制^[15-16]。与前 2 类构网型控制相比,基于无功功率 同步控制的构网型控制摆脱了对通信系统的依赖, 也避免了 PLL 对系统稳定性产生的负面影响,具有 明显的优势。

风电机组的启动是海上风电场运行的关键问 题。海上风电场的交流频率低于陆地电网,无法直 接通过交流线路从陆地电网获取启动能量。而 DRU 具有潮流单向性,无法向海上风电场传输有功功率。 因此,海上风电场需要通过额外的黑启动电源提供 风电机组启动所需的能量。文献[17-19]中使用柴油 发电机作为海上风电场的黑启动电源。以上方案中 海上风电场与陆地电网通过工频交流电缆连接,未 考虑接入 DRU 的情况。文献[20-22]在风电场中设 置大容量电池储能系统, 文献[23]在双馈风机的换 流器中设置储能装置,使风电场具备黑启动能力。 上述方案均使用了储能装置,而储能装置的成本较 高,会大幅增加系统的建设成本。文献[24-25]提出 在换流站中设置与 DRU 并联的辅助换流器,以在 风电场启动阶段建立交流电压,从而实现风场的黑 启动。然而,这种方案的辅助换流器除了为海上风 电机组提供启动能量外,还需要在正常工况下传输 部分风电功率,因此辅助换流器的容量较大,不利 于降低系统成本。

本文提出了一种基于二极管整流单元的海上 风电柔性低频送出系统黑启动策略,该策略以小容 量辅助换流器作为黑启动电源。首先介绍了低频交 流海上风电送出系统的拓扑结构和风电机组稳态运 行时用的构网型控制策略。在此基础上提出了柔性 低频送出系统的黑启动策略,包括辅助换流器与风 电机组的黑启动策略,并根据黑启动策略分析了辅 助换流器容量的选择方法。最后在 PSCAD/EMTDC 中搭建了仿真模型,验证了所提黑启动策略的可行性。

1 系统结构与稳态控制

1.1 海上风电柔性低频送出系统的拓扑结构

基于 DRU 的海上风电柔性低频系统结构如图 1 所示。其中,直驱式永磁直驱风电机组发出的功率在 交流母线处汇集,经海上升压变与交流海缆连接,并 通过海缆输送到陆地换流站。陆地换流站采用由 DRU 和 MMC 组成的背靠背换流器,将低频交流系统的功 率传输至陆上工频交流系统。在 DRU 的交流母线上 设置有交流滤波器与感性无功补偿装置。交流滤波器 用于消除 DRU 的特征谐波,而感性无功补偿装置用 于抑制交流海缆充电功率引起的电容效应。

为了使基于 DRU 的海上风电柔性低频送出系 统具备黑启动能力,在陆地换流站中设置了一组与 DRU-MMC 并联的小容量辅助换流器。辅助换流器 采用电压源型换流器 (voltage source converter, VSC),其交流侧与 DRU 交流母线相连,负责建立 海上低频交流系统的交流电压,为风电机组提供启 动能量。为了减少开关器件的数量,本文中的辅助 变流器采用两电平 VSC 拓扑,其直流侧电源由整流 装置提供,从陆地交流系统中获取能量。

1.2 稳态下风电机组构网控制策略

虽然辅助换流器具备构网能力,但其容量较 小,构网能力不足,且海上风电场距离陆地换流站 距离较远。因此,为了增强系统的构网能力与稳定 性,此时的海上风电机组仍需要采用构网型控制。



- 图 1 基于 DRU 的海上风电柔性低频送出系统拓扑结构
- Fig.1 Topology of DRU based flexible low-frequency AC transmission system of offshore wind power

当海上风电通过 DRU 送出时,其功率特性表现为有功-电压(P-U)、无功-频率(Q-f)特性。根据功率特性,文献[15]提出了一种基于无功功率同步控制的风电机组构网型控制策略,其控制框图如图 2 所示。其中,机侧换流器采用零 d 轴电流控制,控制换流器直流电压;而网侧换流器通过交流电压幅值控制风机输出的有功功率,通过交流电压频率控制风机输出的无功功率。

本文中的风电机组在稳定运行状态下均采用 基于无功-频率控制的构网型控制策略,因此本文将 在这一策略的基础上设计海上风电柔性低频送出系 统的黑启动策略。

2 海上风电柔性低频送出系统的黑启动策略

海上风电柔性低频送出系统的启动流程如图 3 所示。

首先,工频侧 MMC 将 DRU-MMC 换流器的直 流电压建立为额定值;之后,辅助换流器启动并建 立低频交流系统的交流电压;建压完成后,风电机 组逐台启动,此时风电机组采用降功率控制;最后, 所有风电机组提升输出的有功功率,进入稳定运行 状态,本章将分别分析辅助换流器和风电机组的黑 启动策略。

2.1 辅助换流器的黑启动策略

海上风电场启动时,辅助换流器作为黑启动电 源,负责建立海上风电场的交流电压,因此辅助换 流器应采用构网型控制,其控制框图如图4所示。

辅助换流器可以控制 DRU 交流母线的电压, 而 DRU 传输的有功功率与交流母线电压幅值密切 相关,其表达式为:

$$P_{\rm DRU} = \frac{\sqrt{2}T_{\rm DRU}}{X_{\rm T}} U_{\rm dcDRU} U_{\rm g} - \frac{\pi}{6X_{\rm T}} U_{\rm dcDRU}^2 \qquad (1)$$

式中: *T*_{DRU} 为换流变压器变比; *X*_T 为换流变压器漏 抗; *U*_{dcDRU} 为 DRU-MMC 直流电压; *U*_g 为 DRU 交 流母线电压幅值。工程中希望辅助换流器在建压时 的交流电压幅值能够接近额定电压。根据式(1),若 辅助换流器直接将 DRU 交流母线电压幅值控制为 额定值,则 DRU 将流过较大的有功功率,此时风 电机组尚未启动,这部分有功功率全部由辅助换流 器提供,可能会超出辅助换流器的容量。

由式(1)可以得到,交流电压幅值与 DRU 有功 功率的关系为:

$$U_{\rm g} = \frac{6X_{\rm T}P_{\rm DRU} + \pi U_{\rm dcDRU}^2}{\sqrt{2}T_{\rm DRU}U_{\rm dcDRU}}$$
(2)

根据式(2),辅助换流器只需要控制 DRU 导通 并流过少量的有功功率,就可以将交流电压幅值维













Fig.4 Control diagram of auxiliary converter

持为接近额定值。为了限制辅助换流器的有功功率, 本文在辅助换流器中设置了有功-电压控制环,其表 达式为:

$$\begin{cases} u_{gd}^{*} = (P_{DRU}^{*} - P_{DRU})(k_{pD} + \frac{k_{iD}}{s}) + u_{gd0} \\ u_{gd}^{*} = 0 \end{cases}$$
(3)

式中: u_{gd}^* 和 u_{gq}^* 分别为 DRU 交流母线电压的 d 轴 和 q 轴分量参考值; u_{gd0} 为 d 轴电压的初始值; P_{DRU}^* 和 P_{DRU} 分别为 DRU 有功功率的参考值和实际值; k_{pD} 和 k_{iD} 分别为 PI 控制器的比例参数和积分参数。 有功-电压控制环根据 P_{DRU}^* 动态调节 DRU 交流母 线电压幅值。

根据有功功率平衡,辅助换流器发出的有功功 率为:

 $P_{a} = P_{DRU} - \sum P_{WT} = P_{DRU}^{*} - \sum P_{WT}$ (4) 式中: P_{WT} 为风电机组发出的有功功率。当风电机 组启动完成时,风电机组发出的有功功率增加,根 据式(4),辅助换流器发出的有功功率将逐渐减小。

为了使风电机组的有功功率全部经 DRU 送出, 当辅助换流器发出的有功功率降为 0 时,辅助换流 器切换为控制自身传输的有功功率,将有功功率控 制为 0,此时的有功-电压控制环表达式为:

$$\begin{cases} u_{gd}^{*} = -P_{a}(k_{pa} + \frac{k_{ia}}{s}) + u_{gd0}^{*} \\ u_{gq}^{*} = 0 \end{cases}$$
(5)

式中: u_{gd0}^* 为 d 轴电压的初始值,为了使切换过程 平滑, u_{gd0}^* 取为切换时有功-电压控制环输出的 d 轴 电压参考值; P_a 是辅助换流器的有功功率; k_{pa} 和 k_{ia} 分别是 PI 控制器的比例参数和积分参数。

为了使辅助换流器能够与构网型风电机组同 步运行,本文为辅助换流器设计了与风电机组相同 的无功-频率控制环,其表达式为:

$$\omega_{a}^{*} = \omega_{0} + \frac{k_{q}}{1 + sk_{t}}(Q_{a} - Q_{0})$$
(6)

式中: $\omega_a^* \pi \omega_0$ 分别是低频交流系统频率的参考值 和初始值; $Q_0 \pi Q_a$ 分别是辅助换流器的无功功率 参考值和实际值; $k_q \pi k_t$ 为一阶惯性环节的比例参 数和时间参数。

辅助换流器有功-电压控制环输出的是 DRU 交流母线的电压参考值。为了获得换流器的调制信号,本文采用 V/f 控制中的电压内环和电流内环^[26],通过双内环控制产生辅助换流器的阀侧电压参考值,在满足构网型控制的同时,对电流进行快速调节和限幅。

辅助换流器启动前,DRU-MMC 的直流电压已 经建立为额定值。图 4 所示控制框图中,S1、S2 位 于位置 1。辅助换流器按照以下步骤启动:

1) 辅助换流器启动, 控制 DRU 交流母线电压 幅值从 0 开始线性缓慢上升至电压参考值 ugo。ugo 应使 DRU 保持关断, 即 DRU 阀侧交流线电压幅值 小于二极管整流器的直流电压。

2) 开关 S1 切换到位置 2, 投入有功-电压控制 环, 使 DRU 开始导通,此时交流电压幅值接近额 定值,交流电压建立完成。

3)当辅助换流器发出的有功功率降为 0 时, 开关 S2 切换到位置 2,将辅助换流器有功功率控制 为 0。为了使 DRU 交流母线电压不出现大幅波动, 将该时刻的 *d* 轴电压参考值作为有功-电压控制环 的电压初值 *u*go^{*}。

2.2 风电机组的黑启动策略

在辅助换流器建立交流电压后,风电机组逐台 启动。单台风机的启动顺序如下:首先,闭合网侧 交流断路器,通过网侧换流器中的二极管对换流器 直流电容预充电;之后,网侧换流器启动,将换流 器直流电压控制为额定值;最后,机侧换流器启动, 将网侧换流器转换为控制风机的有功功率。下面以 风机 *i* 为例分析单台风电机组的黑启动策略。

为了使网侧换流器能够控制换流器直流电压, 本文根据 DRU 的有功-电压(*P-V*)特性设计了直流电 压控制环,如图 5 所示。直流电压控制环通过控制 风机连接点的交流电压幅值控制换流器直流电压, 其表达式为:

$$u_{fdi}^{*} = (U_{dci} - U_{dci}^{*})(k_{pdc} + \frac{k_{idc}}{s}) + u_{fd0}$$

$$u_{fai}^{*} = 0$$
(7)

式中: u_{tdi}^* 和 u_{tqi}^* 分别为风机连接点交流电压的d轴和q轴分量参考值; u_{td0} 为d轴电压的初始值; U_{dci} 和 U_{dci}^* 分别为风电机组直流电压参考值和实际值; k_{pdc} 和 k_{idc} 分别为 PI 控制器的比例参数和积分参数。

风电机组的启动过程应尽可能平滑。在风电机 组启动时,低频交流系统的交流电压已经建立完成。 图 6 表示了风机 *i* 网侧换流器的坐标轴,其中 abc 坐标系为静止坐标系, *dq* 坐标系为旋转坐标系, a 轴与 *d* 轴之间的夹角为 θ_i 。在网侧换流器启动时刻, $\theta_i=0$,网侧换流器电压向量 U_{f0} 与 *d* 轴重合,电网电 压向量 U_s 与换流器 a 轴的夹角为 δ_0 。

为了使风电机组不出现大幅度的功率波动,网 侧换流器启动时的电压幅值及相位应与电网电压相 同,即电压向量 Uno与 Us重合。本文采取以下策略 选取网侧换流器电压幅值和相位的初始值:在网侧 换流器中设置 PLL, PLL 在网侧换流器启动前激活, 观测电网电压 Us 的相位。同时对 Us 进行 Park 变换, 测量 Us 的 d 轴分量 Usd。将网侧换流器启动时 PLL 输出的相位 δ₀ 作为无功-频率控制环的相位初始值, 此时网侧换流器的电压相位将变为:

$$\theta_i = \frac{\omega_i}{s} + \delta_0 \tag{8}$$

式中: ω_i^* 为网侧换流器的频率参考值。通过相位初 值的选取, 网侧换流器的 d 轴将与 Us 重合。同时将 启动时的 Usd 作为直流电压控制环中 d 轴电压的初 始值 utdo, 这样 Uto 将与 Us 重合, 网侧换流器在启 动时不会出现大幅功率波动。而 PLL 在网侧换流器 启动后退出运行,不会对系统的稳定运行造成影响。

风机 *i* 启动前,图 5 所示的网侧交流断路器断 开,选通开关 S1、S2 均位于位置 1。风机 *i* 按照以 下步骤启动:

1)闭合网侧交流断路器,通过网侧换流器二 极管对直流电容预充电。为了抑制预充电过程中的







充电电流, 网侧换流器交流侧配置有充电电阻, 充 电电阻在预充电阶段投入,在预充电结束后被旁路。

2) 网侧交流断路器闭合后, 网侧换流器激活 PLL, 观测电网电压相位, 同时测量风机连接点的 *d* 轴电压。

3) 网侧换流器启动,对直流电容进行可控充 电。开关 S1 切换到位置 2,将此时电网电压的相位 δ₀作为无功-频率控制环的相位初值,此时将风机连 接点的 *d* 轴电压 *uta*⁰ 作为直流电压控制环中 *d* 轴电 压参考值的初值。之后 PLL 退出运行,网侧换流器 将直流电压控制为额定值。

4) 机侧换流器启动。开关 S2 切换到位置 2, 网侧换流器将直流电压控制环切换为有功-电压控 制环,风电机组开始输出有功功率。此时,风电机 组采用降功率控制。

当所有的风电机组具备风电功率转换能力后, 提升所有风电机组输出的有功功率,使风电机组进 入稳定运行状态。

3 辅助换流器的容量选取

为了降低系统建设成本,辅助换流器的容量应 尽可能小。由于风电机组逐台启动,因此辅助换流 器在同一时刻只需为1台风电机组提供启动能量; 而当风电机组启动后,辅助换流器将不再传输有功 功率,因此辅助换流器的容量较小,这将降低系统 的建设成本。

在选取辅助换流器的容量时, 需要计算启动过 程中辅助换流器的最大有功功率与最大无功功率。 根据图3所示的启动流程,在低频交流电压建立后, 辅助换流器需要承担 DRU 流过的少量有功功率与 低频交流系统中所有的无功功率。当第1台风电机 组(以下称为风机1)闭合网侧交流断路器后,辅助换 流器需要额外承担直流电容预充电过程中的有功功 率波动与风机网侧 LC 滤波器的无功功率。在风机 1 网侧换流器解锁后的可控充电过程中,通过控制 直流电容的充电速率,可以使风机1吸收较小的有 功功率,此时辅助换流器发出的有功小于风机1预 充电阶段的有功。同时,在无功-频率控制环的作用 下,低频交流系统的无功功率根据容量在辅助换流 器与风机1之间分配[15],使辅助换流器的无功功率 降低。而随着风机1开始发出有功功率,根据式(4), 辅助换流器发出的有功功率将进一步减小。之后, 风电机组逐台启动,辅助换流器的有功功率逐渐降 为0,无功功率也逐渐减小。

综上所述,辅助换流器的最大有功功率出现在 风机1的预充电阶段,此时的低频交流系统拓扑可 以简化为如图7所示。

根据图 7,辅助换流器最大有功功率 Pmax 为:

$$P_{\rm max} = P_{\rm DRU} + P_{\rm WTc} + P_{\rm c} \tag{9}$$

式中: *P*_{DRU} 为 DRU 流过的有功功率,由辅助换流器控制为固定值; *P*_{WTc} 为风机 1 预充电时的最大有功功率波动; *P*_c 为交流海缆的有功损耗。

辅助换流器的最大无功功率出现在风机1预充 电结束至网侧换流器解锁的时间段,此时风机1预 充电完成,网侧 LC 滤波器电感电流为零,低频交 流系统拓扑可以简化为如图8所示。

根据图 8,最大无功功率 Qmax 为:

$$Q_{\rm max} = Q_{\rm c} + Q_{\rm LC} - Q_{\rm f} - Q_{\rm T} - Q_{\rm DRU}$$
 (10)

式中: Q_c 为交流海缆的充电功率; Q_{LC} 为风机网侧 LC 滤波器的无功功率; Q_f 为已投入的交流滤波器 与感性无功补偿装置的无功功率之和; Q_T 为升压变



Fig.7 Topology of low-frequency AC system during the pre-charging stage of wind turbine 1



图 8 风机 1 预充电结束后的低频交流系统拓扑



无功功率; *Q*DRU 为二极管整流器吸收的无功功率, 其表达式为:

$$Q_{\rm DRU} = \frac{2\mu - \sin 2\mu}{1 - \cos 2\mu} P_{\rm DRU} \tag{11}$$

式中: µ为二极管整流器的换相重叠角。

在计算辅助换流器所需容量前,应首先确定 PDRU,由式(2)计算得到 DRU 交流母线电压幅值 Ug, 交流电压频率取低频系统额定频率。之后,根据图 7 所示拓扑及式(9)计算得到辅助换流器最大有功功 率 Pmax,根据图 8 所示拓扑与式(10)计算得到辅助 换流器最大无功功率 Qmax。在得到 Pmax 与 Qmax 后, 即可计算得到辅助换流器的最小容量 Smin满足:

$$S_{\min} \ge \sqrt{P_{\max}^2 + Q_{\max}^2} \tag{12}$$

4 仿真验证

为了验证所提黑启动策略的可行性,在 PSCAD/EMTDC 平台搭建了如图 1 所示的仿真模型。仿真模型包括4台等值风电机组,每台风机的额定功率为100 MW,仿真系统主回路参数与控制参数见附录A。

在仿真系统中,设辅助换流器在建立交流电压 阶段需要控制 DRU 流过 5 MW 的有功功率。为了 消除 DRU 产生的谐波,在仿真开始时投入高通滤 波器。而为了降低系统中的容性无功功率,应同时 投入所有的 4 组并联电抗器。根据第 3 章中辅助换 流器的容量选取方法,计算得到辅助换流器最大有 功功率为 8.9 MW,最大无功功率为 16.6 Mvar。本 算例中将辅助换流器的额定容量设置为 20 MVA。

为了能够更清晰地分析本文所提出的黑启动 策略,加快仿真速度,仿真中跳过了工频侧 MMC 的启动过程,在仿真开始时 DRU-MMC 换流器的直 流电压已经被控制为额定值。仿真模型中系统启动 时序如表1所示。

系统启动仿真结果如图 9 所示。首先,辅助换 流器建立低频交流系统的交流电压。*t*=1.0 s 时辅助 换流器开始建立交流电压,控制海上交流电压从零 线性增加到 0.9(标幺值,基准值为风机公共连接点 电压额定值 66 kV,后文电压值均为标幺值),上升 速度为 0.3 每秒,这段时间内 DRU 不导通。*t*=4.0 s 时,辅助换流器投入有功-电压控制环,控制 DRU 传输有功功率为 5 MW。此时,交流电压幅值增加 至 0.97,接近额定值,海上交流电压建立完成。

之后风机开始逐台启动: t=5.0 s 时,风机1闭 合网侧交流断路器,对换流器直流电容进行预充电, 直流电压提升至 0.69。t=8.8 s 时,将充电电阻旁路, 这一过程中由于网侧 LC 滤波器的存在,风机1将 发出无功功率,使辅助换流器吸收的无功功率上升。 t=9s时,风机1网侧换流器启动,将风机1的直流 电压控制到1。由图8可见,通过电压幅值和相位 初始值的选取,网侧换流器解锁时风机的电压、功 率变化较为平滑,没有出现大的冲击和不稳定现象。 t=13 s时,机侧换流器解锁,网侧换流器将直流电 压控制环切换为有功-电压控制环,有功功率参考值 由 0 上升为 10 MW。这一过程中,在 t=13.2 s 时, 辅助换流器发出有功功率降为 0, 之后辅助换流器 控制自身发出有功功率为 0, 使风机发出的有功功 率全部经过 DRU 送出。在 t=15 s, t=25 s, t=35 s 时,风机2、3、4依次启动,将输出的有功功率控 制为10MW。

从上述仿真结果可以看出,采用本文所提的黑 启动策略后,系统在启动过程中的电压和功率波动 较小,不会对系统产生大的冲击,所有电气量都能平

寿 1	仿直系统启动时序
<u> </u>	

Table 1 Time sequence of system startup in simulation system

	1	
扂	时间/s	
辅助换流	1~5	
	风机1启动	5~15
回扣户升	风机2启动	15~25
12(1)[1] 20]	风机3启动	25~35
	风机4启动	35~45
所有风机提	45~49	





稳达到正常运行前的状态,整个启动过程较为平滑。

5 黑启动策略对比

与辅助换流器相比,采用小容量柴油发电机建 立海上风电场的交流电压,为风电机组提供启动所 需的功率,是海上风电场更加常用的黑启动策 略^[17-19]。在基于 DRU 的海上风电柔性低频送出系 统中,构网型风电机组的频率参考值由无功功率计 算得到,而柴油发电机的频率根据转子运动方程得 出。两者间的差异会导致柴油发电机的频率与构网 型风机的频率不同,最终失去同步。因此,柴油发 电机不适合作为构网型风电机组的黑启动电源。

最后,在 t=45 s 时,所有风机线性增加发出的 有功功率,上升速度为 22.5 MW/s。此时,DRU 吸 收的无功功率随着传输有功功率的上升而上升。为 了补偿这部分无功功率,在 t=45.8 s 时投入双调谐 滤波器,t=46.6 s,t=47.4 s,t=48.2 s 时,分别退出 1 组并联电抗器。在 t=49.0 s,所有风机输出的有功 功率增加至额定值 100 MW,系统启动完成,进入 稳定运行状态。

构网型风电机组具有建压能力。通过在风机换流 器中设置储能装置,使部分风电机组具备自启动能 力,并带动其他风电机组启动,可以避免设置辅助换 流器所需的成本。但当单台风电机组容量较小,不足 以承担低频交流系统的无功功率时,需要对多台风电 机组进行改造,这同样会增大系统的投资成本。而为 了避免无功越限,这部分风电机组的网侧换流器必须 同时启动并建立低频交流系统的交流电压。在这一过 程中,当多台风电机组通过定交流电压幅值控制逐步 提升交流电压幅值时,有功功率不受控制,风电机组 之间会出现有功功率流动。本文通过对构网型风机的 建压过程进行仿真说明这一现象。

在原有仿真模型的基础上,使辅助换流器保持 闭锁。假设在 t=3.0 s前,DRU-MMC 换流器的直流 电压已经被控制为额定值,风机 1 与风机 2 的机侧 换流器已经启动并将换流器直流电压控制为额定 值。t=3.0 s时,解锁风机 1 与风机 2 的网侧换流器, 将风机连接点电压幅值从 0 线性增加到 0.9,上升速 率为 0.3 每秒,这一过程中有功-电压控制环不投入。 仿真结果如图 10 所示。

根据图 10,在交流电压幅值提升的过程中,风 机 1 与风机 2 的有功功率在小范围内波动,且都短 暂出现了吸收有功功率的现象。这说明风机间存在 有功功率流动,但该现象不明显。

假设其他参数保持不变,风机2的网侧换流器 由于信号延迟推迟至 t=3.02 s 解锁。仿真结果如图 11 所示。



图 10 风机 1 与风机 2 同时建立交流电压的仿真结果

Fig.10 Simulation results of establishing AC voltage simultaneously by wind turbine 1 and wind turbine 2





图 11 中,在 t=3.02 s 后,风机 2 开始吸收有功 功率,且吸收的有功功率约等于风机 1 发出的有功 功率。当交流电压幅值上升至 0.9 之后,风机 2 吸 收的有功功率达到 7 MW。此时风机 1 与风机 2 之 间存在明显的有功功率流动。

根据上述仿真结果,在交流电压幅值抬升的过程中,风电机组的有功功率不受控制。理想条件下,多台风机网侧换流器的启动时间与过程完全相同;此时,风电机组的电压幅值与相位相差较小,风机间有功功率流动较小。假设风电机组间因通信延迟等原因导致启动时间与过程产生差异,使风电机组之间出现相位差,而风机之间线路阻抗又较小,那么将会出现较大的有功功率流动。

本文提出的黑启动策略以辅助换流器为黑启 动电源。通过无功-频率控制环,辅助换流器可以实 现与构网型风电机组的同步运行。而辅助换流器独 立建立低频交流系统的交流电压,避免了多台构网 型风电机组同时启动时有功功率的相互流动,具有 明显的技术优势。

6 结论

1)辅助换流器的作用是建立海上低频交流系统的交流电压,为风电机组提供启动能量。通过逐台启动风电机组,可以使辅助换流器的容量达到最低,进而降低系统建设成本。

2)采用本文提出的黑启动策略,辅助换流器 可以将交流电压控制为接近额定值,控制所有风电 功率通过 DRU 传输,同时与构网型风电机组同步 运行。而风电机组可以通过交流电压幅值控制换流 器的直流电压,并降低启动过程中的功率波动。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

 陶建根,陈 恰,黄博远.海上风电发展现状与趋势分析[J]. 能源 工程,2023,43(4): 1-9.

TAO Jiangen, CHEN Yi, HUANG Boyuan. Current situation and development trend of offshore wind power[J]. Energy Engineering, 2023, 43(4): 1-9.

- [2] 王秀丽,赵勃扬,黄明煌,等. 大规模深远海风电送出方式比较及 集成设计关键技术研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 138-145. WANG Xiuli, ZHAO Boyang, HUANG Minghuang, et al. Research of integration methods comparison and key design technologies for large scale long distance offshore wind power[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 138-145.
- [3] 李 岩,冯俊杰,卢毓欣,等.大容量远海风电柔性直流送出关键 技术与展望[J].高电压技术,2022,48(9):3384-3393.
 LI Yan, FENG Junjie, LU Yuxin, et al. Key technologies and prospects

of VSC-HVDC for large-capacity and long-distance offshore wind power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3384-3393.

- [4] 迟方德,王锡凡,王秀丽.风电经分频输电装置接入系统研究[J].电力系统自动化,2008,32(4):59-63.
 CHI Fangde, WANG Xifan, WANG Xiuli. A new wind power grid connection method based on fractional frequency transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 59-63.
- [5] MAU C N, RUDION K, ORTHS A, et al. Grid connection of offshore wind farm based DFIG with low frequency AC transmission system[C]//Proceedings of 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, USA: IEEE, 2012: 1-7.
- [6] 刘海波,赵 鑫,杨家胜.海上风电场低频+高压直流输电电气接 线方案研究[J].人民长江,2011,42(3):39-42.
 LIU Haibo, ZHAO Xin, YANG Jiasheng. Electrical connection scheme of low frequency and HVDC transmission for offshore wind farm[J]. Yangtze River, 2011, 42(3): 39-42.
- [7] CHO Y, COKKINIDES G J, MELIOPOULOS A P. LFAC-transmission systems for remote wind farms using a three-phase, six-pulse cycloconverter[C]//Proceedings of 2012 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications. Denver, USA: IEEE, 2012: 1-7.
- [8] CHEN H, JOHNSON M H, ALIPRANTIS D C. Low-frequency AC transmission for offshore wind power[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2236-2244.
- [9] 金砚秋,张哲任,吴宏远,等. 基于构网型风电机组和二极管整流 单元的海上风电场黑启动策略[J]. 高电压技术,2023,49(9): 3730-3740.
 JIN Yanqiu, ZHANG Zheren, WU Hongyuan. Black start strategy of offshore wind farm based on grid-forming wind turbines and diode rectifier unit[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3730-3740.
- [10] 杨明扬,杨志千,蔡 旭,等. 基于二极管整流器实现风电机组直流输出的方法[J]. 高电压技术,2021,47(8):2708-2719.
 YANG Mingyang, YANG Zhiqian, CAI Xu, et al. Method for realizing DC output of wind turbine based on diode rectifier[J]. High Voltage Engineering, 2021,47(8):2708-2719.
- [11] BLASCO-GIMENEZ R, AÑÓ-VILLALBA S, RODRÍGUEZ-D'DER-LÉE J, et al. Distributed voltage and frequency control of offshore wind farms connected with a diode-based HVDC link[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 3095-3105.
- [12] PRIGNITZ C, ECKEL H G, RAFOTH A. FixReF sinusoidal control in line side converters for offshore wind power generation[C]//Proceedings of 2015 IEEE 6th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). Aachen, Germany: IEEE, 2015: 1-5.
- [13] YU L J, LI R, XU L. 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.
- [14] BIDADFAR A, SABORIO-ROMANO O, CUTULULIS N A, et al. Control of offshore wind turbines connected to diode-rectifier-based HVdc systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(1): 514-523.
- [15] 肖晃庆,黄小威,李 岩,等. 适用于二极管不控整流送出的海上风电机组无功功率同步控制策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3820-3828.
 XIAO Huangqing, HUANG Xiaowei, LI Yan, et al. Reactive power-synchronization control for offshore wind turbines connected to diode rectifier[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3820-3828.
- [16] 张哲任, 金砚秋, 徐 政. 两种基于构网型风机和二极管整流单元

的海上风电送出方案[J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 2098-2107. ZHANG Zheren, JIN Yanqiu, XU Zheng. Two offshore wind farm integration schemes based on grid forming wind turbines and diode rectifier unit[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2098-2107.

- [17] 陈 夏,辛妍丽,唐文虎,等.海上风电场黑启动系统的风柴协同 控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(13): 98-105. CHEN Xia, XIN Yanli, TANG Wenhu, et al. Coordinated control strategy of wind turbine and diesel generator for black-start system of offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(13): 98-105.
- [18] 袁庆伟,谢晔源,姜田贵,等. 兼容跟网和构网远海风场送出的送端 DRU+MMC 混合换流器控制策略[J]. 电网技术, 2024, 48(11): 4482-4492.

YUAN Qingwei, XIE Yeyuan, JIANG Tiangui, et al. Control strategies of DRU+MMC hybrid converter at the sending end with compatibility of grid-following and grid-forming offshore wind farm transmission[J]. Power System Technology, 2024, 48(11): 4482-4492.

- [19] DAI J F, TANG Y, WANG Q, et al. Black start technology for local power grid via PMSG-based wind power generation[C]//Proceedings of 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and Ecce Asia. Kaohsiung, China: IEEE, 2017: 2025-2030.
- [20] 刘力卿, 杜 平, 万玉良,等. 储能型风电场作为局域电网黑启动 电源的可行性探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 210-216. LIU Liqing, DU Ping, WAN Yuliang, et al. Feasibility discussion on using storage-based wind farm as black-start power source in local power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 210-216.
- [21] LUO F J, MENG K, DONG Z Y, et al. Coordinated operational planning for wind farm with battery energy storage system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(1): 253-262.
- [22] YUAN H, MI Z P, DU P, et al. Research of the transformer energization control strategy applied for storage-based wind farm self-start[C]//Proceedings of 2016 IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference. Chongqing, China: IEEE, 2016: 534-547.
- [23] 何秀强, 耿 华,杨 耕,等. 接入 LCC-HVDC 的双馈风电场孤 岛启动与并网控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 99-107, 124.

HE Xiuqiang, GENG Hua, YANG Geng, et al. Startup and integration control strategy of DFIG based isolated wind farm connected with

LCC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 99-107, 124.

- [24] 常怡然,蔡 旭. 低成本混合型海上风场直流换流器[J]. 中国电机 工程学报, 2018, 38(19): 5821-5828.
 CHANG Yiran, CAI Xu. Cost-effective hybrid HVDC converter for offshore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5821-5828.
- [25] 方梓熙, 艾斯卡尔, 蔡 旭, 等. 基于混合直流换流器的海上风电送出系统的启动策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2698-2707.
 FANG Zixi, AISIKAER, CAI Xu, et al. Startup strategy of transmission system of offshore wind farms based on hybrid DC converter[J].
 High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2698-2707.
- [26] 刘 昇,徐 政,唐 庚,等. MMC-HVDC 联网及孤岛运行状态 转换策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2152-2161.
 LIU Sheng, XU Zheng, TANG Geng, et al. Study on MMC-HVDC switching scheme between grid-connected and passive islanding mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2152-2161.



黄莹

1977一,女,博士,教授,博导 主要从事新型交直流输电技术、新能源发电并网 技术方面的研究工作 E-mail:huangyingzju@zju.edu.cn

HUANG Ying Ph.D., Professor



肖晃庆(通信作者) 1990一,男,博士,副教授 主要从事直流输电与柔性直流电网、新能源并网 和电力系统稳定性分析与控制方面的研究工作 E-mail: xiaohq@scut.edu.cn

XIAO Huangqing Ph.D. Associate professor Corresponding author

收稿日期 2023-07-08 修回日期 2024-12-05 编辑 何秋萍