DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.6.208 **中图分类号**：TM614 **文献标志码**：A

不控整流中压直流并网型双馈风电系统宽频率运行控制方法

崔学深(中国电源学会会员)，刘勇鑫，仉琪炜，罗慧达，刘其辉
(华北电力大学电气与电子工程学院，北京 102206)

摘要：分布式电源接入直流电网可提高新能源的消纳水平。针对双馈风力发电机组通过二极管不控整流接入中压直流电网拓扑，提出了在全风速范围都能限制转子侧馈送功率，进而大幅度降低转子侧换流器成本的宽频率运行控制方法。在风速和转速较高时适当增大定子频率，以一定的负转差将转子侧功率限制在较小的恒定功率下运行；风速转速较低时以低于工频的恒定子频率运行，使转差率在较小范围内正负变化，从而限制转子侧功率的绝对值。以全风速范围内将1.5 MW双馈风电机组转子侧功率的绝对值限制在140 kW内为例，仿真验证了所提宽频率运行控制方法降低转子侧变流器容量的有效性。最后通过实验室5.5 kW双馈机组不控整流直流并网实验平台验证了本文宽频率运行控制技术的可行性。

关键词：分布式发电；双馈风力发电；不控整流；中压直流并网；宽频率运行控制

Wide-frequency Operation Control Method for Double-fed Wind Power Generation System Connected to Medium-voltage DC Grid with Uncontrolled Rectifier

CUI Xueshen, *Member*, *CPSS*, LIU Yongxin, ZHANG Qiwei, LUO Huida, LIU Qihui
(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The connection of distributed generations to DC grid can improve the consumption level of new energy. In view of the fact that the doubly-fed wind turbine is connected to medium-voltage DC grid through a diode uncontrolled rectifier, a wide-frequency operation control method is proposed, which can limit the rotor-side feed power in the whole wind speed range and further greatly reduce the cost of a rotor-side converter. When the wind speed and rotational speed are high, the stator frequency is properly increased, and the rotor-side power is limited to a small constant power with a certain negative slip. When the wind speed is low, the rotor-side power is operated at a constant stator frequency lower than the power frequency, so as to make the slip rate change positively or negatively in a small range and limit the absolute value of rotor-side power accordingly. A simulation example is taken, in which the absolute value of rotor-side power of a 1.5 MW doubly-fed wind turbine is limited within 140 kW in the full wind speed range, and results verify the effectiveness of the proposed wide-frequency operation control method in reducing the capacity of the rotor-side converter. Finally, the feasibility of the proposed wide-frequency operation control technology was verified through a laboratory-scale experimental platform of 5.5 kW doubly-fed unit connected to DC grid with uncontrolled rectifier.

Keywords: Distributed power generation; doubly-fed wind power generation; uncontrolled rectifier; connection to medium-voltage DC grid; wide-frequency operation control

收稿日期：2022-12-02；**修回日期**：2023-01-02，2023-02-09；
录用日期：2023-03-02；**网络首发日期**：2023-03-09
基金项目：华能集团总部科技项目“海上风电与智慧能源系统科技专项(一期)”(HNKJ20-H88)
This work is supported by Huaneng Group Headquarters Technology Project “Offshore Wind Power and Smart Energy System Technology Special Project (Phase I)” under the grant HNKJ20-H88

随着分布式能源并网容量的增加，直流电网因具有没有无功潮流、并网过程简单、适合大规模新能源消纳的优点，成为新能源并网发电的重要形

式[1-3]，具有广阔的发展前景。相比于直流微网，中压直流配电网具有更大范围优化电力分配的能力，可以充分消纳大量接入的分布式能源[4-7]。风力发电作为新能源开发利用的重要形式具有广阔的应用前景，其中双馈感应电机 DFIG(doubly-fed induction generator)由于具有灵活的有功和无功解耦控制及变流器容量小的优点，已被广泛应用于交流风力发电系统中。当风力发电机组接入直流电网时，机组定子频率不受大电网频率的刚性约束，可以灵活调节以满足风力发电系统的高效运行[8-11]。因此，需要提出适用于接入直流电网的双馈风力发电系统拓扑，并在此基础上进一步提出 1 种宽范围的频率运行控制方法。

借鉴接入低压直流微网的 DFIG 直流接入拓扑[4,12]，如果将 DFIG 接入中压直流配电网，则可以采用不控整流直流接入的双馈风电系统拓扑和全控整流直流接入的双馈风电系统拓扑，2 种拓扑均在传统 DFIG 系统交流出口采用交直流变流器实现直流接入。不同之处在于不控整流直流接入的双馈风电系统拓扑采用二极管不控整流器实现中压直流接入，此时由于二极管的工作特性，定子电压会产生高度畸变[13]，因此导致定转子电流也产生畸变，最终表现为转矩脉动增加，针对这一问题可以采取在控制策略中加入一致转矩脉动的前馈环节来实现[13]；其次定子电压被中压直流电网电压钳制为恒定值，因此为避免铁心磁饱和且充分利用铁心，宽频率运行时定子频率调节有限[14]。全控整流直流接入的双馈风电系统拓扑采用全控整流器实现中压直流接入，不仅大大降低了定子电压谐波含量[15]，且可以根据 DFIG 的运行情况对定子电压进行适当调节以充分利用铁心实现更宽范围的频率调节。

从成本与控制系统复杂程度出发，采用不控整流中压直流接入的 DFIG 系统具有明显优势，因此本文采用此拓扑进行研究，提出 1 种在全风速范围内有效限制转子功率的宽频率运行方法，从而进一步降低转子侧换流器 RSC(rotor-side converter)的成本。在 RSC 现有控制策略方面，文献[10,16]针对 DFIG 接入直流微网提出了通过磁链间接控制定子频率的方法，以及在弱磁运行中优化系统的效率[17]，但却没有从降低系统成本的角度研究频率调节的方法；文献[18]提出了 1 种在宽风速运行范围下的恒转差频率调节控制方法，DFIG 始终以恒定的负转差率跟随转子转速的变化，避免了次同步发电运行时造成的功率环流，此方法将转差率限制为 1 个较小的恒定值，但转子功率在风速较高时导致转子馈出较大功率，无法最大程度地降低转子侧换流器的容量和成本；文献[14]通过采用直接磁链控制实现宽风速范围的限转子功率控制，但未从直接频率控制与实验角度进行研究。

本文针对以上问题，充分考虑 DFIG 经不控整流中压直流接入时系统的工作原理及定子频率可灵活调节的特点，提出全风速范围内基于直接频率控制的限制转子功率的双模式控制方法，在低风速范围时随着风速增大控制定子频率使磁链保持为额定值，此时转子吸收功率由正转负；达到临界风速后进入高风速范围，此时随着风速增加适当增加定子频率使 DFIG 弱磁运行以保证转子馈送功率为限定值，最终实现全风速下的限转子功率宽频率运行控制，达到降低转子侧换流器容量和系统成本的目标。

1　不控整流接入的 DFIG 系统宽频率运行控制方法

1.1　DFIG 数学模型

DFIG 接入中压直流配电网的双馈风电系统拓扑如图 1 所示，本文采用图 1(a)的不控整流直流接入的双馈风电系统拓扑进行研究。

双馈电机定转子绕组均采用电动机惯例，即电流和功率流入电机选取为正方向，则在 dq 同步旋转坐标系下的定转子电压和磁链方程可表示为

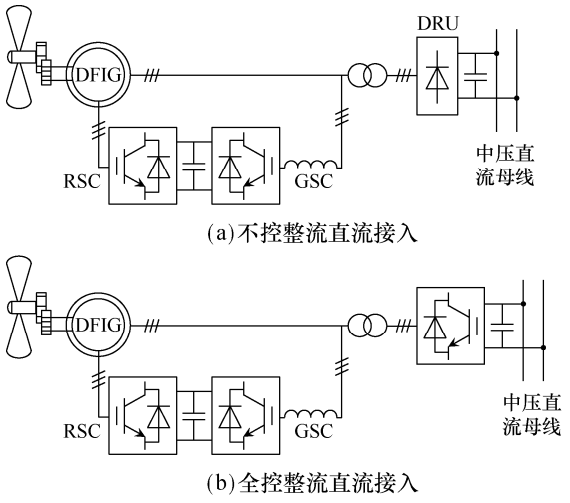
$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + p\psi_{sd} - \omega_s \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p\psi_{sq} + \omega_s \psi_{sd} \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + p\psi_{rd} - \omega_{s1} \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + p\psi_{rq} + \omega_{s1} \psi_{rd} \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases}\psi_{sd}=L_{\mathrm{s}}i_{sd}+L_{\mathrm{m}}i_{rd}\\ \psi_{sq}=L_{\mathrm{s}}i_{sq}+L_{\mathrm{s}}i_{sq}\end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases}\psi_{rd}=L_{\mathrm{m}}i_{sd}+L_{\mathrm{r}}i_{rd}\\ \psi_{rq}=L_{\mathrm{m}}i_{sq}+L_{\mathrm{r}}i_{rq}\end{cases} \tag{4}$$

式中：u_{sd}、u_{sq}、u_{rd}、u_{rq}分别为定子、转子在 d 轴、q 轴的电压；i_{sd}、i_{sq}、i_{rd}、i_{rq}分别为定子、转子在 d 轴、q 轴的励磁电流；R_{s}、R_{r}分别为定子、转子的电阻；p 为微分算子；ψ_{sd}、ψ_{sq}、ψ_{rd}、ψ_{rq}分别为定子、转子在 d 轴、q 轴的磁链；ω_{s}为定子角频率；ω_{sl}为转差角频率，$\omega_{\mathrm{sl}}=\omega_{\mathrm{s}}-\omega_{\mathrm{r}}$，$\omega_{\mathrm{r}}$为转子角频率；$L_{\mathrm{s}}$、$L_{\mathrm{r}}$、$L_{\mathrm{m}}$分别为定子自感、转子自感、互感。



(a)不控整流直流接入

(b)全控整流直流接入

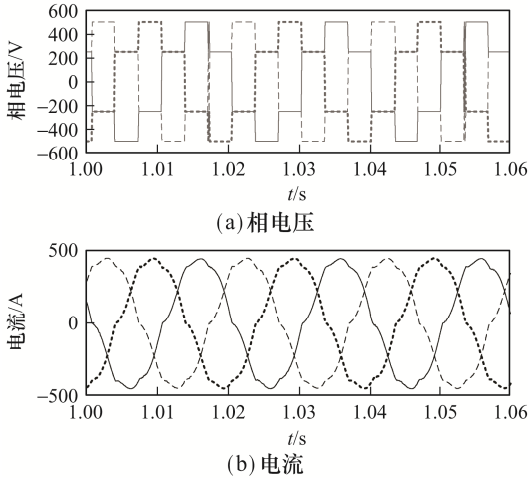
图 1 中压直流接入的双馈风电系统拓扑

Fig. 1 Topology of doubly-fed wind power system connected to medium-voltage DC grid

1.2 转子侧变流器宽频率运行控制策略

传统交流并网型双馈风力发电系统背靠背变流器的经典控制策略为：网侧变流器 GSC(grid-side converter)采用基于电网电压定向的矢量控制方法，实现背靠背变流器直流电压与 GSC 的交流侧无功功率的控制；机侧转子变流器 RSC 一般采用基于定子磁链定向的矢量控制方法实现有功和无功的解耦控制，通过定子有功功率外环和转子 q 轴电流内环实现电磁转矩的调节，以实现最大功率点追踪 MPPT(maximum power point tracking)，通过定子无功功率外环和转子 d 轴电流内环实现 DFIG 无功功率的调节。对于直流并网型双馈风电系统，网侧变流器 GSC 仍采用与传统 DFIG 相同的控制策略实现转子侧直流母线电压的恒定，机侧变流器 RSC 通过有功功率外环实现 MPPT 的控制策略也不变，而 RSC 原无功功率外环则需要用频率外环来替代才能实现 DFIG 的宽频率运行控制策略。

在 DFIG 经二极管不控整流接入中压直流电网的拓扑下，考虑由储能系统实现中压直流配电网的直流稳压功能，此时二极管不控整流桥工作在电流连续模式(每个时刻都有 3 个二极管同时处于导通状态，并且交流侧电流与直流侧电流均处于连续状态)，整流桥交流侧相电压幅值与中压直流电网电压具有固定等式约束关系，且定子基波相电压与电流几乎同相位(电流略落后于电压 1 个固定的小角度)，如图 2 所示。此时交流侧无功功率由整流桥结构及电压水平决定，是不可控的，因此原有的无功功率外环必然要被替代。



(a)相电压

(b)电流

图 2 电流连续模式下不控整流桥交流侧相电压和电流波形

Fig. 2 Waveforms of phase voltage and current on AC side of uncontrolled rectifier bridge in continuous current mode

因 DFIG 失去交流大电网的频率刚性约束，定子频率可以不必限制为工频[14]，为灵活调节定子频率实现 DFIG 既定的运行目标提供了可能，本文采用频率外环替代无功外环，由转子 d 轴电流内环实现对 DFIG 频率的直接调控，其具体原理和结合功率外环的 MPPT 控制实现描述如下。

1.2.1 定子磁链定向矢量控制的频率外环

采用定子磁链定向后，式(1)和式(3)可简化为

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + p\psi_s \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \psi_s \end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases} \psi_s = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ 0 = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \end{cases} \tag{6}$$

因定子电阻较小，可以忽略不计，所以式(5)可进一步简化为

$$\begin{cases} u_{sd} = 0 \\ u_{s1} = u_{sq} \approx \omega_s \psi_s \end{cases} \tag{7}$$

式中，u_{s1} 为定子侧相电压幅值。

又由于 DFIG 经不控整流接入中压直流电网后定子电压与定子电流几乎同相位[19]，定子侧无功电流 $i_{sd} \approx 0$，所以式(6)可进一步简化为

$$\begin{cases} \psi_s = \psi_{sd} \approx L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = 0 \end{cases} \tag{8}$$

在二极管连续工作模式下，定子侧相电压的幅值 u_{s1} 与直流侧电压 u_{dc} 的关系[14,19]为

$$u_{s1} = 2/\pi \cdot u_{dc} \tag{9}$$

进一步整理式(7)、式(8)和式(9)可得到定子频率参考值的计算式为

$$f_s^* = \frac{\omega_s^*}{2\pi} = \frac{u_{dc}}{k\pi^2 \psi_s^*} = \frac{u_{dc}}{k\pi^2 L_m i_{rd}^*} \tag{10}$$

式中：k 为双绕组变压器的变比；u_{dc} 为由储能系统控制的 1 个恒定值；上标“*”表示各量的参考值。式(10)建立了中压直流电压 u_{dc}、定子频率 f_s、定子磁链 ψ_s 与转子励磁电流 i_{rd} 的关系，从中可知频率作为外环控制目标的实质是通过转子励磁电流 i_{rd} 对 ψ_s 进行调控，替代了交流并网条件下无功功率作为外环的控制目标，成为本文直流并网下 DFIG 宽频率运行控制的理论基础。

1.2.2　面向最大风能追踪的功率外环

当 DFIG 并网发电时，在切入风速至 DFIG 达到额定转速所对应的风速的区间内，双馈风力发电系统将运行于 MPPT 工作模式下，此时风力机输出的最大功率 P_{max}[20]可表示为

$$P_{max} = k_w \omega_w^3 \tag{11}$$

式中：k_w 为 1 个与风力机特性相关的常数，$k_w = 0.5\rho S_w (R_w/\lambda_{opt})^3 C_{pmax}$，$\rho$ 为空气密度，S_w 为风力机转差率，R_w 为风力机叶片半经，λ_{opt} 为风力机的最佳叶尖速比，C_{pmax} 为风能利用系数最大值；ω_w 为风力机角速度。

考虑杂散损耗、机械损耗 P_{ms} 与定子铜耗 P_{sCu} 后，定子功率参考值 P_s^* 为

$$P_s^* = \frac{1}{1-s}(P_{max} - P_{ms}) - P_{sCu} \tag{12}$$

于是，RSC 可以通过矢量控制实现频率与最大风能追踪的控制目标，再结合 GSC 的经典矢量控制方法，DFIG 经二极管不控整流接入中压直流电网时背靠背变流器的具体控制框图如图 3 所示。

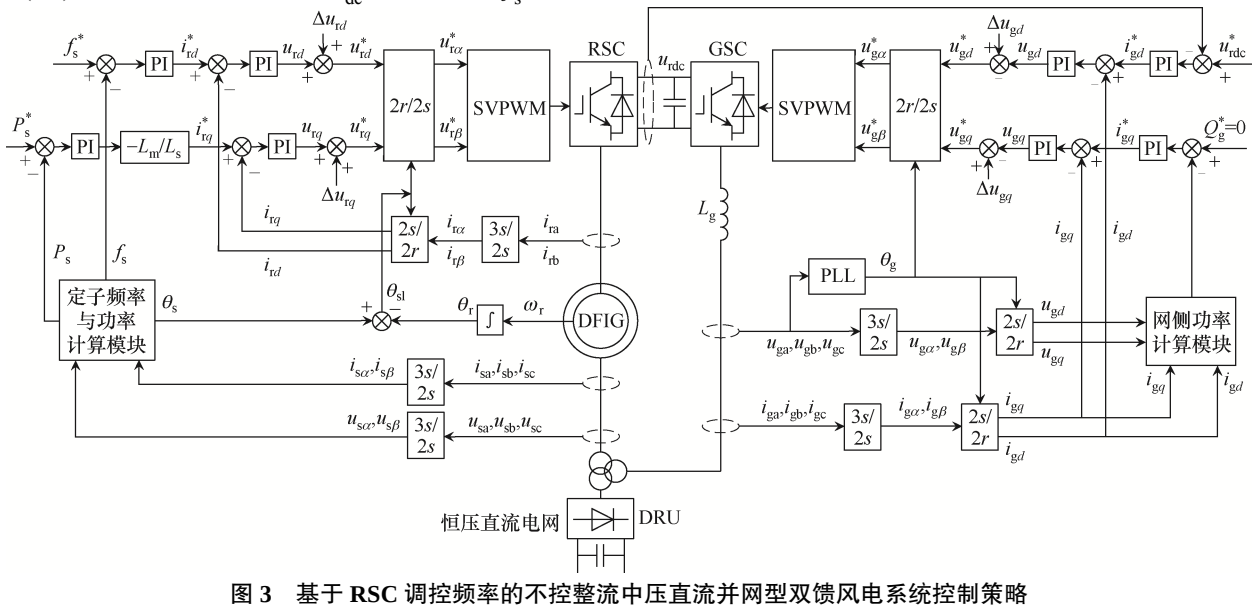


图 3　基于 RSC 调控频率的不控整流中压直流并网型双馈风电系统控制策略

Fig. 3 Control strategy for DFIG connected to medium-voltage DC grid with uncontrolled rectifier based on RSC regulation frequency

采用图 3 所示的 RSC 频率外环矢量控制策略后，频率参考值的设定方式需要进一步讨论和实践。本文针对全风速范围都能限制转子侧馈送功率，进而大幅度降低转子侧换流器成本这一控制目标，提出了 1 种限转子功率的宽频率控制方法，来决定什么样的风速和转速下如何设定频率参考值。

2 限转子功率的宽频率运行控制方法

双馈电机的额定转速一般按照同步速的 1.2 倍以上进行设计，而转子侧变流器按照转差率在−0.3~+0.3 之间设计。以 1.5 MW 双馈风力发电系统为例，变流器容量至少需要配置 350 kW，如果能够缩小 DFIG 运行时的转差范围即可进一步减小转子侧变流器的容量配置[14]。借助 DFIG 经不控整流接入中压直流电网时定子频率可灵活调节的优点，在转速较高时适当抬高定子频率，使 DFIG 以较小的负转差率运行于超同步状态，此时大部分功率从定子侧馈入中压直流电网，保证转子侧功率限制在给定值 P_{rc} 范围内，实现“恒转子功率控制模式”(本文针对 1.5 MW 双馈电机，转子侧功率在整个风速范围内限制为 P_{rc}=140 kW)，从而在配置转子侧变流器时可以大幅度地降低成本。在转速较低时由于风力机捕获功率相对较小，转子吸收功率容易处于限定值 P_{rc} 内，此时重点避免 DFIG 磁链饱和带来的电机运行性能下降，因此可将电机磁链饱和时的定子频率作为临界频率 f_c，在低风速转速时保持 $f_s^*=f_c$，实现“恒定子频率控制模式”，此时只需确保最低转速时转子功率处于限定值范围内，在全风速范围内即可实现限转子功率运行，本文将这 2 种控制模式统称为限转子功率运行控制方法。

2.1 恒转子功率控制模式

依据 DFIG 的功率转化关系及风力机在 MPPT 运行下的约束关系，得出 MPPT 下定子频率与转子有功功率的等式关系，进而得出高风速范围内为实现恒转子功率控制模式时定子频率外环参考值的设定依据。

在忽略定转子铜耗时，由式(11)和式(12)及风力机的运行约束关系[14]，可得到 MPPT 下转子功率 P_r 与风速、转速和定子频率之间的关系式为

$$P_r=\frac{\pi\rho SC_{pmax}v^3f_s}{2\omega_r}\left(1-\frac{Nv\lambda_{opt}}{\pi R_w f_s}\right) \tag{13}$$

式中：N 是齿轮箱升速比；S 为转差率；v 为风速。

考虑到 DFIG 运行在最佳叶尖速比时才处于 MPPT 模式，故进一步得到由转子功率给定值得出的定子频率参考值为

$$f_s^*=\frac{2N^3\lambda_{opt}{}^3P_r^*}{\pi\rho SR_w{}^3C_{pmax}\omega_r{}^2}+\frac{\omega_r}{\pi} \tag{14}$$

由定子频率参考值的计算式可以看出，在给定转子功率限定值 P_r^* 及获得实时转速 ω_r 后，便可计算出定子频率参考值 f_s^*，进而通过图 3 所示的频率外环矢量控制框图实现 DFIG 在高风速转速下的恒转子功率控制。考虑到本文定转子均采用电动机惯例，因此将转子功率给定值 P_r^* 设置为负的限定值 $(-P_{rc})$，在此控制模式下 DFIG 定转子均向外馈出功率且转子侧功率不超出限定值，取得较高发电效率与高风速下限转子功率的运行目标。

2.2 恒定子频率控制模式

在图 1(a)所示拓扑中定子电压被中压直流电网电压钳制为 1 个恒定值，且由式(10)可知定子频率和定子磁链成反比，因此为避免定子磁链饱和，在 2.1 节所述的恒转子功率控制模式下计算得到的定子频率 f_s^* 不能小于临界频率 f_c，否则切换为恒定子频率控制模式，即定子频率参考值恒为临界频率 f_c。

由式(13)可知，在转速变化范围内 P_r 随转速单调变化，因此当在临界频率 f_c 及切入风速在 MPPT 下所对应的转速计算得到的转子吸收功率在限定范围内，则整个恒定子频率控制模式期间转子吸收功率随风速变化而在 $-P_{rc}$ 和 $+P_{rc}$ 之间变化。再考虑高风速转速区域采用的恒转子功率控制模式，转子功率恒保持为 $-P_{rc}$，不控整流接入中压直流电网的双馈风电系统就在整个风速范围内都达到了限制转子功率的目的，在配置转子侧变流器时就可以降低容量，从而降低系统的成本。

3　仿真与实验

3.1 仿真实现及分析

基于 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建图 1(a)所示的不控整流接入直流电网的双馈风力发电系统模型，采用额定功率为 1.5 MW、额定线电压为 690 V、额定磁链为 1.794 Wb 的双馈风电机组。当中压直流配电网电压 U_{dc} 为±10 kV，变压器高低压变比 k 取为 26.6:1 时，定子基波相电压幅值为 477 V，由式(7)和式(10)可得在该额定磁链下临界频率为 f_c=42.4 Hz，进一步得出临界风速为 8.61 m/s 且转速临界值为 1 520 r/min。

在低风速转速范围内采用定子频率为 f_c 的恒定子频率控制方法，在高风速转速切换为转子馈出功率为限定值 P_{rc}=140 kW 的恒转子功率控制方法，这样在整个全风速范围下实现了限转子功率的宽频率运行控制。为了直观看到各物理量全风速范围变化的控制效果，本文选取风速作为横坐标进行制图，如图 4 所示。可以看出，以定子频率和有功功率为控制目标的双闭环矢量控制策略成功的实现了频率、转矩解耦控制，且取得了无静差跟踪控制效果。同时在全风速范围下，随着风速的增大，风力机的机械转矩与 DFIG 电磁转矩同步增大，实现了 MPPT 的运行目标。在全风速范围内以风速 8.61 m/s 且转速为 1 520 r/min 为分界线在低风速转速和高风速转速范围内分别采用的恒定子频率控制模式和恒转子功率模式也实现了平滑过渡。从图 4 还可以看出，在全风速范围内控制定子磁链均低于 1.794 Wb，双馈电机磁路并没有过饱和运行，仅在少部分风速段有一定程度的弱磁运行。

图 5(a)为传统工频控制下全风速范围的定转子功率，因定子频率恒为 50 Hz，此时在全风速范围内转子功率变化非常大，尤其在高风速段转子馈出功率更大，要求转子侧换流器需配置较大容量致使变流器的成本大大增加。在 DFIG 经不控整流接入中压直流电网拓扑中可通过在全风速范围内适当调节定子频率达到限制转子功率的目标以降低

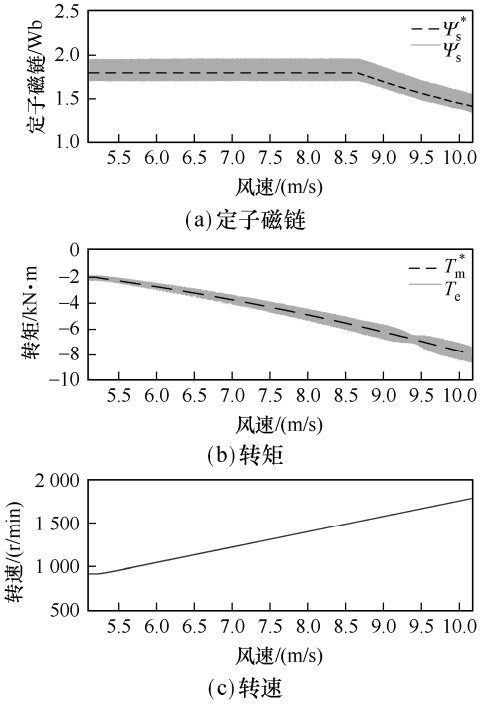


图 4　限转子功率的宽频率控制在全风速范围下的定子磁链、转矩和转速变化

Fig. 4 Changes in stator flux, torque and rotational speed under wide-frequency control of limited rotor power in full wind speed range

变流器配置容量和成本。从图 5(b)限转子功率策略下的宽频率运行控制可以看出，在风速高于 8.61 m/s 时适当增加定子频率可使转子功率基本控制在−P_{rc}，此时转子向电网馈电也避免了功率的环流，提高机组发电效率。在风速低于 8.61 m/s 时，采用恒定子频率控制(42.4 Hz)使转子功率随着风速的增加从小于 P_{rc} 的正值逐渐变化到−P_{rc}，在低风速范围内既充分利用了转子侧变流器的容量又避免了铁心磁饱和。通过 2 种控制模式的自然切换，在全风速范围下，转子功率的绝对值都限制在 P_{rc} 内，所以为了降低转子侧变流器的配置容量，在全风速范围下采取恒频率控制(42.4 Hz)和恒转子功率控制来限制转子功率是很有必要的。

图 6 对比了 P_{rc} 分别取 70 kW 和 140 kW 时的定转子电流变化情况。可以看出，随着风速的增大，定转子电流也随之增大。P_{rc}=140 kW 时，在风速 10.2 m/s 时定子电流峰值为 1 900 A，转子电流峰值为 630 A；而 P_{rc}=70 kW 时，在风速 10.2 m/s 时定

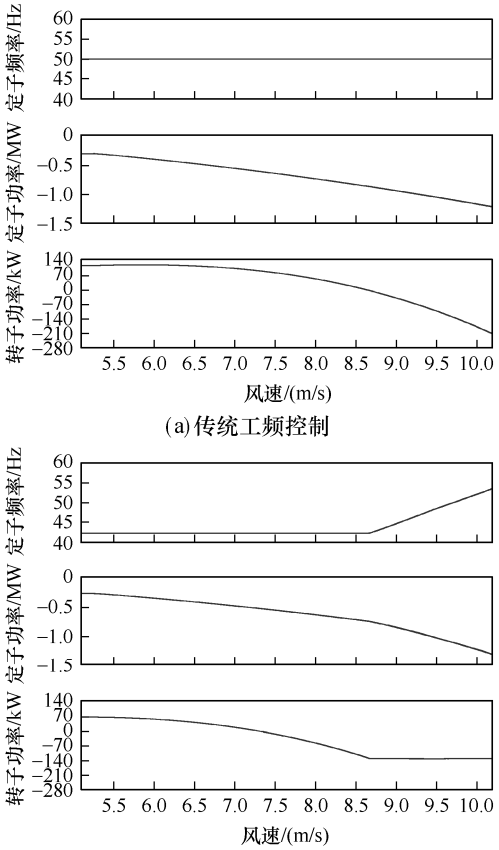


图 5 传统工频控制与限转子功率宽频率控制在全风速范围定转子功率变化的对比

Fig. 5 Comparison of stator and rotor power variations between traditional power frequency control and limited rotor power wide-frequency control in full wind speed range

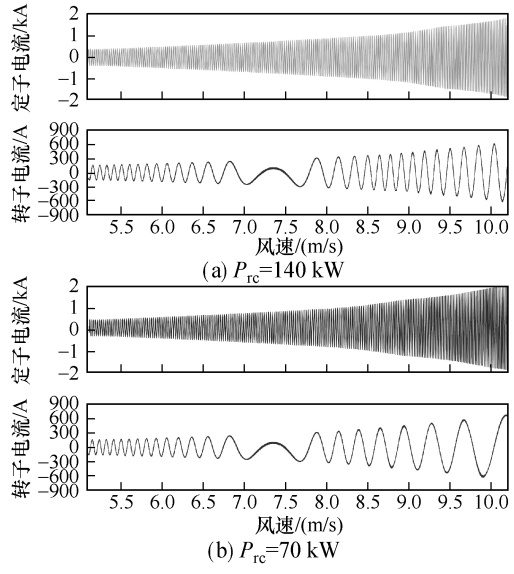


图 6 不同限转子功率值宽频率控制定转子电流的对比

Fig. 6 Comparison of stator and rotor current under wide-frequency control at different limited rotor power values

子电流峰值将近 2 000 A，转子电流峰值将近 670 A，这是由于将转子功率限制后，定子将承受更大的功率输出，所以电流会相应增大，因此恒转子功率控制模式的 P_{rc} 不宜取的过小。

由于随着风速的增大，DFIG 馈出功率逐渐增加，则系统的损耗也随之增大。图 7 为宽频率控制在全风速范围的总损耗和效率，可以看出，随着风速的增大，系统的总损耗(定子铁耗和定转子铜耗)逐渐增大，但系统的发电效率却存在 1 个最高点并且全风速范围运行下系统的效率都处于 90%以上。这对于基于不控整流接入中压直流电网的 DFIG 系统的实际运行具有重要指导意义。

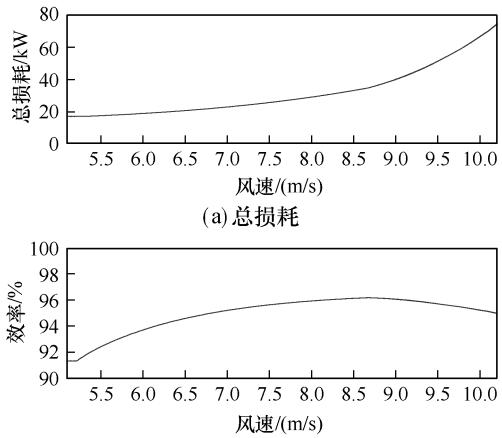
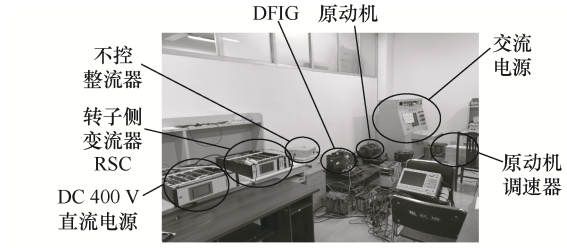


图 7 宽频率控制在全风速范围的总损耗和效率

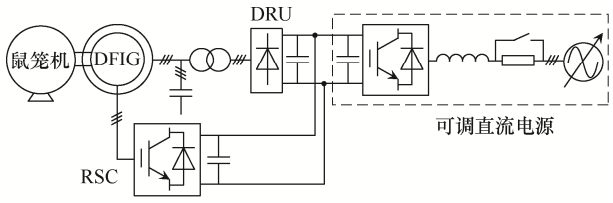
Fig. 7 Total loss and efficiency under wide-frequency control in full wind speed range

3.2 实验验证

为进一步验证本文所提出的限转子功率控制方法的可行性与正确性，在实验室搭建了图 8 所示的 5.5 kW 双馈电机通过定子侧不控整流接入 400 V 直流网的实验平台，实验电机及系统的主要参数见表 1。交流电源通过调压器后经过整流器输出 400 V 直流作为稳压直流电源。原动机与双馈电机同轴相连，通过变频器可以调整电机转速，模拟不同风速下的风力机。双馈电机转子侧经 RSC 与 400 V 直流电网相连，定子侧经不控整流与 400 V 直流电网相连。控制器采用 TI 公司的 DSP TMS320F28335 芯片，系统采样频率和开关频率均为 10 kHz。



(a)实验平台



(b)实验平台拓扑

图 8　不控整流接入直流电网的 DFIG 系统宽频率运行控制实验平台

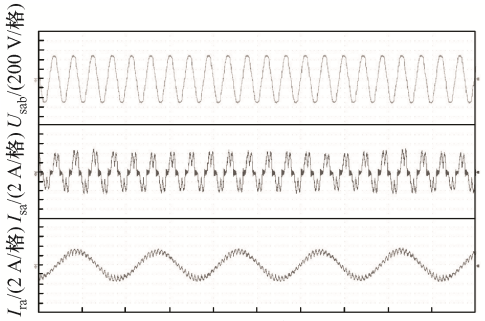
Fig. 8 Experimental platform for wide-frequency operation control of DFIG system connected to DC grid with uncontrolled rectifier

表 1　实验电机与系统参数

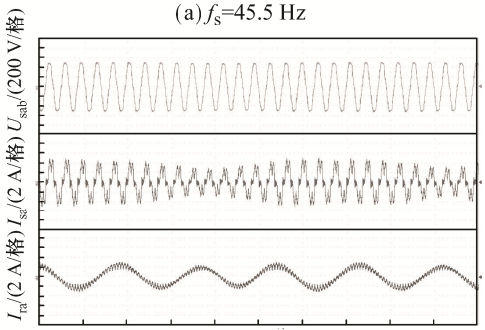
Tab. 1 Parameters of experimental motor and system

电机/系统参数	数值	电机/系统参数	数值
极对数 p	2	直流电网电压/V	400
定子电阻/Ω	1.072 7	d 轴电流环比例系数 k_{dp}	0.8
定子漏感/mH	4.284 8	d 轴电流环积分系数 k_{di}	6.0
转子电阻/Ω	1.232 7	q 轴电流环比例系数 k_{qp}	0.8
转子漏感/mH	4.284 8	q 轴电流环积分系数 k_{qi}	6.0
定转子互感/mH	150.891	频率环比例系数 k_p	2.0
定转子匝比 n	0.35	频率环积分系数 k_i	5.0

受限于没有真实风力机的实验条件，在实验室不能验证全风速范围的 MPPT 控制，但能够通过变频控制使原动机运行于不同的转速，进而设置 DFIG 特定的定子频率给定值实现本文的宽频率运行控制，实验结果如图 9 所示，图中 U_{sab} 为定子线电压、I_{sa} 为定子电流、I_{ra} 为转子电流。图 9(a)为在电机转速为 1 050 r/min 时将定子频率控制为 45.5 Hz 的实验波形，图 9(b)为在电机转速为 1 350 r/min 时将定子频率控制为 55.5 Hz 的实验波形。由图 9(b)可以看出，当控制的频率较高时存在一定程度的电流和功率的振荡，这是由于电压恒定的条件下双馈发电机定子频率较高时处于弱磁状态，实验室被测电机在轴系缺乏惯量的条件下，转矩电流在 PI 调节时引起的电磁转矩波动更容易被放大，导致 DFIG 定子功率出现了低频振荡的问题，但并不影响本文实现的定子频率宽范围调控方法的正确性。



(a) f_s=45.5 Hz



(b) f_s=55.5 Hz

图 9　不同运行频率下的定子电压、定转子电流波形

Fig. 9 Waveforms of stator voltage, stator current and rotor current at different operating frequencies

4　结语

DFIG 系统定子侧通过不控整流接入中压直流电网时，可通过转子侧变流器实现定子频率与有功功率的解耦控制，并可实现定子频率的宽范围调节。在 MPPT 下的宽频率运行控制中，低风速转速区以 f_c 为给定值通过“恒定子频率”实现转子功率随风速转速在限定值范围内的单调变化；在高风速转速区通过“恒转子功率”模式控制转子馈出功率为限定值，实现了在全风速范围内的限转子功

率宽频率运行控制目标，从而降低了转子侧换流器的容量，并且采用定子侧不控整流拓扑也进一步降低了系统的成本。

参考文献：

[1] 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, 46(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, 46(18): 11- 16. (in Chinese)

[2] 苗晓阳, 李冰然, 傅洪全. 适用于 DFIG 连接到直流微网的双变换器设计与实现[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 170-181.
Miao Xiaoyang, Li Bingran, Fu Hongquan. Design and implementation of dual-converter for connecting DFIG to DC microgrid [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 170-181. (in Chinese)

[3] 董旭, 徐永海, 马宁, 等. 基于自适应特性的直流微电网双因子下垂控制策略研究[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 193-202.
Dong Xu, Xu Yonghai, Ma Ning, et al. Dual-factor droop control strategy for DC microgrid based on adaptive characteristics [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 193-202. (in Chinese)

[4] 郑建平, 陈建福, 刘尧, 等. 基于柔性直流配电网的城市能源互联网[J]. 南方电网技术, 2021, 15(1): 25-32.
Zheng Jianping, Chen Jianfu, Liu Yao, et al. Urban energy Internet based on flexible DC distribution network [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(1): 25-32. (in Chinese)

[5] 吴在军, 谢兴峰, 杨景刚, 等. 直流配电网电压控制技术综述[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 59-67.
Wu Zaijun, Xie Xingfeng, Yang Jinggang, et al. A review on voltage control strategies in DC distribution network [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 59-67. (in Chinese)

[6] Wang Qiu, Wang Chao, Wang Fei, et al. Analysis of transient characteristics in DC distribution network during line faults [C]// 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP). Xi'an, China, 2019: 521-524.

[7] Cui K, Qu L, Yu Z, et al. Resonance characteristic analysis of flexible DC distribution network [C]// The 16th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2020). Online Conference, 2020: 1331-1335.

[8] Feltes C, Erlich I. Variable frequency operation of DFIG based wind farms connected to the grid through VSC-HVDC link [C]// 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa, FL, USA, 2007: 1-7.

[9] Wu Chao, Boldea I, Zhou Dao, et al. Variable stator frequency diode rectifier DFIG for lower cost MVDC interface [C]// 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Detroit, MI, USA, 2020: 4189-4193.

[10] Marques G D, Iacchetti M F. Inner control method and frequency regulation of a DFIG connected to a DC link [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(2): 435-444.

[11] Wen Gang, Chen Yu, Zhang Pengcheng, et al. Nine-switch-converter based DFIG wind power system and its dynamic port-current assigned approach for low voltage riding through (LVRT) [C]// 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Charlotte, NC, USA, 2015: 1324-1330.

[12] Marques G D, Iacchetti M F. DFIG topologies for DC networks: A review on control and design features [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(2): 1299-1316.

[13] Nian Heng, Wu Chao, Cheng Peng. Direct resonant control strategy for torque ripple mitigation of DFIG connected to DC link through diode rectifier on stator [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(9): 6936-6945.

[14] 崔学深, 张恒, 刘其辉, 等. 直流并网型双馈风力发电系统限转子功率运行控制方法[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(12): 8-15.
Cui Xueshen, Zhang Heng, Liu Qihui, et al. Limited rotor power control method of double-fed wind power gene-

ration system connected to DC grid [J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(12): 8-15. (in Chinese)

[15] Marques G D, Iacchetti M F, Cruz S M A. On the stability of a minimum-loss controlled dual-VSI DFIG-DC system [C]// IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Toronto, ON, Canada, 2021: 1-6.

[16] Marques G D, Iacchetti M F. Stator frequency regulation in a field-oriented controlled DFIG connected to a DC link [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(11): 5930-5939.

[17] Marques G D, Iacchetti M F. Field-weakening control for efficiency optimization in a DFIG connected to a DC-link [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3409-3419.

[18] Cui Xueshen, Zhang Heng, Liu Qihui, et al. Wide frequency operation control method of DFIG connected to DC grid with constant slip [C]// 2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Melbourne, Australia, 2019: 568-573.

[19] Bleijs J A M. Continuous conduction mode operation of three-phase diode bridge rectifier with constant load voltage [J]. IEE Proceedings - Electric Power Applications, 2005, 152(2): 359-368.

[20] Wang Xian, Wang Dazhi, Zhu Shiyu, et al. Research on maximum power tracking control method of 10 MW MVSPMSG based on neutral point potential balance [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8): 0604704.



崔学深

作者简介：

崔学深(1973—　)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，副教授。研究方向：风力发电直流并网。E-mail：cxs@ncepu.edu.cn。

刘勇鑫(1998—　)，男，硕士研究生。研究方向：双馈风力发电控制。E-mail：yxl@ncepu.edu.cn。

仉琪炜(1999—　)，男，硕士研究生。研究方向：双馈风力发电控制。E-mail：zqw18813159331@126.com。

罗慧达(1997—　)，男，硕士。研究方向：双馈风力发电控制。E-mail：lhd@ncepu.edu.cn。

刘其辉(1974—　)，男，博士，副教授。研究方向：分布式新能源发电，双馈风力发电系统。E-mail：liuqihuifei@ncepu.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)