

引用格式:李慧,李珠林,刘思嘉,等.基于双补偿下垂—MQPR 的直驱式风电机组并网控制[J].电力科学与技术学报,2024,39(3):142-149.

Citation: LI Hui, LI Zhulin, LIU Sijia, et al. Grid-connected control of direct-driven permanent magnet wind turbine based on dual compensation droop and multiple quasi-proportional-resonances[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 142-149.

基于双补偿下垂—MQPR 的直驱式风电机组并网控制

李 慧, 李珠林, 刘思嘉, 范新桥, 祁 鲲

(北京信息科技大学自动化学院, 北京 100192)

摘 要: 为了实现直驱式永磁风力发电系统安全稳定并网, 提出一种基于双补偿下垂与多重准比例谐振(multiple quasi proportional resonance, MQPR)相结合的并网控制策略。该策略源于传统下垂控制, 在电压控制环节引入直流电压补偿量, 能快速调节直流母线电压达到稳定; 在电流控制环节引入电容电流补偿量, 能有效减小滤波电容造成的电流误差影响; 同时, 设计出 MQPR 控制器替代内环电流的 PI 控制器, 可以滤除系统中多次谐波电流。通过建立仿真模型, 与双闭环 PI 和传统下垂控制策略进行对比, 验证所提控制策略的有效性。

关 键 词: 风力发电; 下垂控制; 电压补偿; 电流补偿; 多重准比例谐振控制

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.03.016 中图分类号: TM614 文章编号: 1673-9140(2024)03-0142-08

Grid-connected control of direct-driven permanent magnet wind turbine based on dual compensation droop and multiple quasi-proportional-resonances

LI Hui, LI Zhulin, LIU Sijia, FAN Xinqiao, QI Kun

(School of Automation, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: To achieve safe and stable grid connection of the direct-driven permanent magnet wind power generation system, a grid-connection control strategy combining dual compensation droop with multiple quasi-proportional-resonances (MQPR) is proposed. This strategy originates from traditional droop control, introduces DC voltage compensation in the voltage control loop to quickly adjust and stabilize the DC bus voltage, and introduces capacitive current compensation in the current control loop to effectively reduce the impact of current errors caused by filter capacitors. Meanwhile, a MQPR controller is designed to replace the PI controller of the inner-loop current, which can filter out multiple harmonic currents in the system. By establishing a simulation model and comparing it with the double closed-loop PI and traditional droop control strategies, the effectiveness of the proposed control strategy is verified.

Key words: wind power generation; droop control; voltage compensation; current compensation; multiple quasi proportional resonances control

伴随着技术革命和产业革命的发展,人类正向以新能源为主体的绿色低碳、安全高效的绿色智慧能源体系演化^[1]。为了达到2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和的目标,采用新能源发电是必经之路^[2-5],比如风能、太阳能、潮汐能、生物质能、地热能等。由于风力发电具有成本低、技术成熟、清洁无污染等优点,其已成为新型电力系统中电源的

重要角色^[6-8]。然而,风力资源本身存在随机性、间歇性和不稳定性的特点,使得风电机组的输出功率呈波动性变化,进而影响电网的电能质量,比如引起电压偏差、电压波动和谐波等问题^[9]。因此,一个好的并网控制技术对电能转化效率、电能输出质量和系统稳定运行起到至关重要的作用^[10-12]。

直驱式永磁风力发电机组具有高效率、高功率

收稿日期:2023-06-30;修回日期:2023-08-30

基金项目:北京市自然科学基金(3232045)

通信作者:李 慧(1976—),女,博士,教授,主要从事柔性直流输电稳定与控制、新能源发电技术等研究;E-mail:lhbxy@bistu.edu.cn

密度和低维护成本等优点,在风力发电系统中越来越占据主导地位^[13-14],并且在背靠背变流器作用下风能的转换性能明显优于双馈异步发电机组。目前,针对直驱永磁风力发电系统并网控制策略的研究已经成为当下热点。

文献[15-16]基于虚拟磁链的控制方法提出不同改进思路,有效抑制了磁链观测器存在的相位偏差问题,提高了控制精度,但是计算难度偏大。文献[17]通过优化PI控制器参数,在一定程度上抑制了并网过程中的振荡现象,但是没有考虑PI控制器的超调问题。文献[18]将滞环PI电流控制及传统的PI控制相结合,能实时调节电流参考值,有效抑制了直流母线电压的波动,但是此控制设计较复杂。文献[19]在电压控制环节中引入一种模糊自抗扰控制器,简化了控制结构,提高了系统抗干扰性能,稳定了直流电压和输出功率的波形。文献[20]采用有限集模型预测功率控制方式,通过代价函数评估,找出最优开关组合作用于网侧变流器,虽然控制器结构简单,动态响应良好,但它存在开关频率不固定、谐波电流分布无序、采样频率要求高等缺点。

文献[21]提出一种基于重复控制与准比例谐振控制组合的直驱风机网侧变流器控制策略,实现了基频电流的无静差跟踪,抑制了交流电网谐波干扰,提高了系统的动稳态特性。文献[22]提出一种附加比例谐振的控制方法,具有原理清晰、设计过程简单、电网适应性强等优点,对系统中可能产生的次同步振荡起到了较好的抑制效果。文献[23]引入有源低通滤波器设计了一种频率变化率下垂控制方法,在受扰动时电容能快速释放能量补偿系统的缺额功率,提高了频率的响应速度,改善了暂态特性。

上述文献主要解决直驱式风机在电网电压不平衡条件下的运行性能提升、次同步振荡以及电网频率变化大等问题。其实,风速的变化还会影响直流母线电压稳定,造成输出功率波动,此外,电流控制环节也存在不同频次的交流谐波分量,影响风力发电并网质量。针对此类问题,本文提出一种基于双补偿下垂—多重准比例谐振(multiple quasi proportional resonance, MQPR)的直驱式风电机组并网控制策略。引入电压、电流双补偿的思想,加快系统调节功能,以提高系统直流母线电压和输出功率的稳定性;并设计MQPR控制器替代传统PI控制器,有效滤除多次谐波电流,实现高质量并网。

1 直驱式永磁风电机组网侧逆变器数学模型

图 1 是直驱式永磁风电机组并网系统结构图,文献[24]详细给出了直驱永磁同步发电机的数学模型和机侧控制策略,本文主要针对其并网系统的网侧控制策略展开研究。

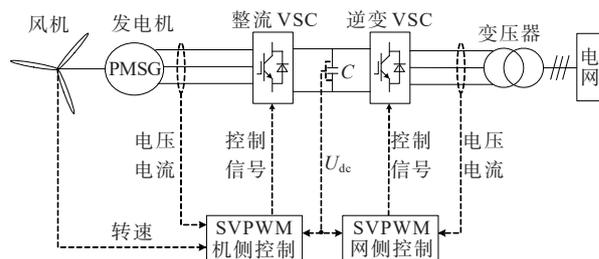


图 1 直驱式永磁风电机组并网系统

Figure 1 Grid-connected system of direct-driven permanent magnet wind turbine

图 2 是采用 LC 型滤波方式的逆变器并网结构图,其中 U_{dc} 等效为机侧整流器输出电压,此部分电路可参考文献[24]; v_{ga} 、 v_{gb} 和 v_{gc} 分别为网侧逆变器的三相输出电压; L_f 、 C_f 和 R_f 分别为滤波电感、滤波电容和滤波电阻; i_{La} 、 i_{Lb} 和 i_{Lc} 分别为网侧三相电流; i_{Ca} 、 i_{Cb} 和 i_{Cc} 分别为滤波电容上流过的三相电流; u_{Ca} 、 u_{Cb} 和 u_{Cc} 分别为滤波电容上的三相电压; u_{ga} 、 u_{gb} 和 u_{gc} 分别为交流系统的三相电压; i_{ga} 、 i_{gb} 和 i_{gc} 分别为交流系统的三相电流; R_g 、 L_g 分别为交流系统的等效电阻和电感。

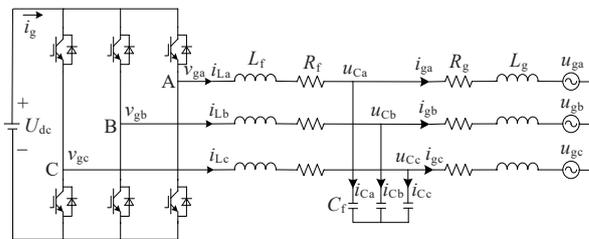


图 2 LC 型滤波方式的逆变器并网结构

Figure 2 Structure of grid-connected inverter with LC filter

由图 2 可知,网侧逆变器的交流部分在 dq 旋转坐标系下的状态方程分别为

$$\begin{cases} v_{gd} = (sL_f + R_f)i_{Ld} - \omega_g L_f i_{Lq} + u_{Cd} \\ v_{gq} = (sL_f + R_f)i_{Lq} + \omega_g L_f i_{Ld} + u_{Cq} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} i_{Ld} - i_{gd} = sC_f u_{Cd} - \omega_g C_f u_{Cq} \\ i_{Lq} - i_{gq} = sC_f u_{Cq} + \omega_g C_f u_{Cd} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} u_{Cd} = (sL_g + R_g)i_{gd} - \omega_g L_g i_{gq} + u_{gd} \\ u_{Cq} = (sL_g + R_g)i_{gq} + \omega_g L_g i_{gd} + u_{gq} \end{cases} \quad (3)$$

式(1)、(2)中, v_{gd} 、 v_{gq} 分别为 v_{ga} 、 v_{gb} 和 v_{gc} 的 dq 分量; u_{Cd} 、 u_{Cq} 分别为 u_{Ca} 、 u_{Cb} 和 u_{Cc} 的 dq 分量; u_{gd} 、 u_{gq} 分别为 u_{ga} 、 u_{gb} 和 u_{gc} 的 dq 分量; i_{Ld} 、 i_{Lq} 分别为 i_{La} 、 i_{Lb} 和 i_{Lc} 的 dq 分量; i_{gd} 、 i_{gq} 分别为 i_{ga} 、 i_{gb} 和 i_{gc} 的 dq 分量。

2 双补偿下垂—MQPR控制的数学模型

本文提出的直驱永磁风电机组网侧逆变器采用双补偿下垂—MQPR控制策略,它是由功率控制、电压控制和电流控制3部分构成,其中功率控制环节采用下垂控制输出电压控制环节的给定参考量,电压控制环节引入直流电压补偿量后输出电流控制环节的给定参考量,电流控制环节引入电容电流前馈补偿量后输出作用于空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)的电压控制矢量,同时设计MQPR控制器代替内环电流PI控制器。

2.1 功率下垂控制的数学模型

功率控制环节采集主电路的电压电流信号,经瞬时功率计算、下垂控制和电压合成之后,输出电压控制环节的给定参考量:

$$\begin{cases} P_g = 1.5(u_{gd}i_{gd} + u_{gq}i_{gq}) \\ Q_g = 1.5(u_{gq}i_{gd} - u_{gd}i_{gq}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} f_g = f_g^* - k_p(P_g - P_g^*) \\ V_g = V_g^* - k_Q(Q_g - Q_g^*) \end{cases} \quad (5)$$

其中,式(4)为瞬时功率计算公式,式(5)为下垂控制计算公式; f_g 、 V_g 分别为逆变器输出电压的频率和幅值; f_g^* 、 V_g^* 分别为频率和电压幅值的参考值; k_p 、 k_Q 分别为有功和无功下垂系数; P_g^* 、 Q_g^* 分别为有功和无功的参考值。

根据式(4)、(5)得到功率控制环节的控制框图如图3所示,将输出电压的幅值 V_g 和相角 δ 再经坐标变换得到 dq 旋转坐标系下的电压分量 u_{Cd}^* 和 u_{Cq}^* 。

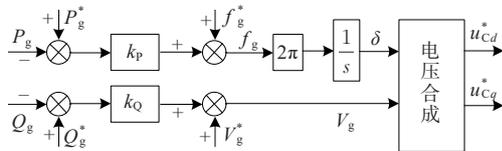


图3 功率控制环节框图

Figure 3 Block diagram of power control

2.2 含补偿量的电压控制数学模型

功率控制环节输出的电压参考量与滤波电容电压取差值作为电压控制环节的输入信号,经过PI

控制器调节后,输出电流控制环节的参考电流,其控制方程为

$$\begin{cases} i_{gd}^* = (u_{Cd}^* - u_{Cd}) \left(k_{up} + \frac{k_{ui}}{s} \right) \\ i_{gq}^* = (u_{Cq}^* - u_{Cq}) \left(k_{up} + \frac{k_{ui}}{s} \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中, i_{gd}^* 、 i_{gq}^* 分别为电流控制参考值的 dq 分量; k_{up} 、 k_{ui} 分别为电压控制中PI控制器的比例和积分系数。

由于式(2)中出现了耦合项,因此需要在式(6)中加入前馈解耦项 $-\omega_g C_f u_{Cq}$ 和 $+\omega_g C_f u_{Cd}$,从而实现 d 轴和 q 轴的独立控制,解决电压控制中的耦合问题,式(6)可改为

$$\begin{cases} i_{gd}^* = (u_{Cd}^* - u_{Cd}) \left(k_{up} + \frac{k_{ui}}{s} \right) - \omega_g C_f u_{Cq} \\ i_{gq}^* = (u_{Cq}^* - u_{Cq}) \left(k_{up} + \frac{k_{ui}}{s} \right) + \omega_g C_f u_{Cd} \end{cases} \quad (7)$$

电压控制环节在设计时,除了要考虑电压的无差调节,还应考虑直流母线电压的稳定。为此,本文在电压控制环节的输入端引入了直流电压补偿量,当直流母线电压波动较大时,可以将信号反馈给控制系统,及时对逆变器进行调节,促使直流母线电压快速恢复稳定。引入直流电压补偿量之后的控制方程为

$$\begin{cases} i_{gd}^* = (u_{Cd}^* - u_{Cd} + u_{dcd}^*) \left(k_{up} + \frac{k_{ui}}{s} \right) - \omega_g C_f u_{Cq} \\ i_{gq}^* = (u_{Cq}^* - u_{Cq} + u_{dcq}^*) \left(k_{up} + \frac{k_{ui}}{s} \right) + \omega_g C_f u_{Cd} \end{cases} \quad (8)$$

式中, u_{dcd}^* 、 u_{dcq}^* 分别为直流电压补偿量的 dq 分量, u_{dcd}^* 可由式(9)得到, u_{dcq}^* 则由控制系统情况设定,在逆变并网控制系统一般取0。

$$u_{dcd}^* = (U_{dc}^* - U_{dc}) \left(k_{dcp} + \frac{k_{dci}}{s} \right) \quad (9)$$

式中, U_{dc}^* 为给定直流电压参考量; k_{dcp} 、 k_{dci} 分别为直流电压补偿环节的比例和积分系数。

根据式(8)、(9)得到含补偿量的电压控制框图如图4所示。

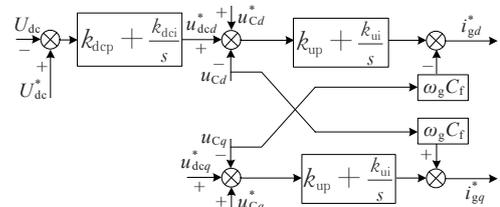


图4 含补偿量的电压控制环节框图

Figure 4 Block diagram of voltage control with compensation

2.3 含补偿量的电流控制数学模型

电压控制环节输出的电流参考量与电网电流取差值作为电流控制环节的输入信号,经过 PI 控制器调节后,输出电压控制矢量作用于 SVPWM 控制器,得到调制信号对逆变器进行调节,其控制方程为

$$\begin{cases} u_{id} = (i_{gd}^* - i_{gd}) \left(k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s} \right) \\ u_{iq} = (i_{gq}^* - i_{gq}) \left(k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s} \right) \end{cases} \quad (10)$$

式中, u_{id} 、 u_{iq} 分别为电流控制输出的 dq 分量; k_{ip} 、 k_{ii} 分别为电流控制中 PI 控制器的比例和积分系数。

由于式(3)中也出现了耦合项,因此需要在式(10)中分别加入前馈解耦项 $-\omega_g L_g i_{gq}$ 和 $+\omega_g L_g i_{gd}$, 即

$$\begin{cases} u_{id} = (i_{gd}^* - i_{gd}) \left(k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s} \right) - \omega_g L_g i_{gq} \\ u_{iq} = (i_{gq}^* - i_{gq}) \left(k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s} \right) + \omega_g L_g i_{gd} \end{cases} \quad (11)$$

实际上,电流控制环节的设计目的主要是为了尽可能地消除系统误差,提高系统的响应能力。因此,本文在其输入端引入电容电流前馈补偿 i_{Cd} 和 i_{Cq} ,可以有效减小滤波电容电流造成的误差影响。引入电容电流前馈补偿的控制方程为

$$\begin{cases} u_{id} = (i_{gd}^* - i_{gd} + i_{Cd}) \left(k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s} \right) - \omega_g L_g i_{gq} \\ u_{iq} = (i_{gq}^* - i_{gq} + i_{Cq}) \left(k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s} \right) + \omega_g L_g i_{gd} \end{cases} \quad (12)$$

于是,根据式(12)得到含补偿量的电流控制框图如图 5 所示。

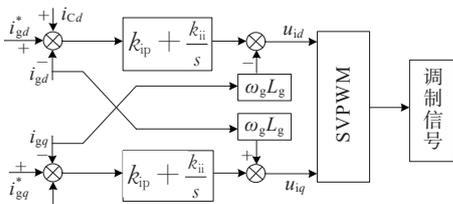


图 5 含补偿量的电流控制框图

Figure 5 Block diagram of current control with compensation

图 5 中, SVPWM 控制器用来接收电流控制环节输出的电压矢量,从而得到调制信号来控制逆变器开关管的通断,实现对逆变器的并网控制。虽然电流控制环节采用 PI 控制器可以无静差跟踪直流信号,却难以做到无静差跟踪交流信号,同时也无法实现对交流电流谐波的完全抑制。为了提高电流控制环节的动态响应和控制性能,本文设计 MQPR 控制器取代原 PI 控制器。

2.4 MQPR 控制器设计

直驱式永磁风电机组并网逆变中会产生多次谐波,但随着谐波次数的增加,谐波的衰减速度会加快,谐波含量随之减小,对系统的影响也逐渐降低。所以,在对谐波电流进行滤除时,一般仅考虑最为常见的 3、5、7、9 和 11 次谐波。本文设计的 MQPR 控制器的结构如图 6 所示,其传递函数为

$$G_{MQPR}(s) = k_{pr} + \sum_{h=1,3,5,7,9,11} \frac{2k_{irh}\omega_{rh}s}{s^2 + 2\omega_{rh}s + (h\omega_0)^2} \quad (13)$$

式中, ω_0 为谐振频率; k_{pr} 为比例系数; h 为谐波次数,分别取 3、5、7、9 和 11; k_{irh} 和 ω_{rh} 分别为各谐振环节对应的积分系数和截止频率。

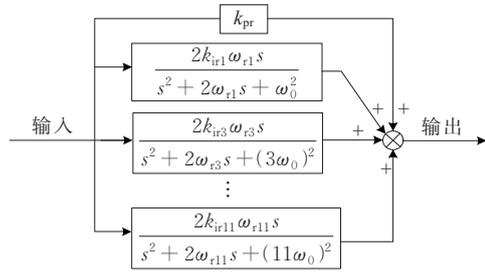


图 6 MQPR 控制器的结构图

Figure 6 Structure of MQPR controller

通过分析各参数对 MQPR 控制器性能的影响,确定出 MQPR 控制器的各个参数。当 $k_{pr}=1$ 、 $k_{irh}=10$ 、 $\omega_{rh}=10$ 和 $\omega_0=100\pi$ 时,得到 MQPR 控制器的波特图如图 7 所示。可以看出, MQPR 控制器在谐振频率 $h\omega_0$ 处的一定带宽范围内表现出较高的增益,而在其他频率下增益很小,可以有效地消除特定次谐波。在实际应用中, MQPR 的各个参数可根据具体情况进行优化调整。

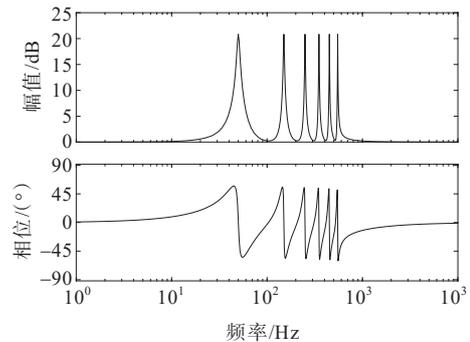


图 7 MQPR 控制器的波特图

Figure 7 Bode diagram of MQPR controller

3 仿真分析

为了验证本文提出的双补偿下垂—MQPR 控

制策略的有效性和优越性,在MATLAB/Simulink仿真平台搭建了直驱式永磁风电机组并网控制模型,采用阶跃变化的风速来模拟实际风速发生突变时的现象,并将本文方法与双闭环PI、传统下垂控制策略进行对比。系统仿真参数如表1所示。

表1 系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of system

参数	单位	数值
直流母线电压 U_{dc}	V	1 500
直流侧电容 C	F	7.5×10^{-4}
电网电压	V	690
电网频率	Hz	50
滤波电感	H	5.5×10^{-4}
滤波等效电阻	Ω	0.2
滤波电容	F	1×10^{-5}
网侧等效电阻	Ω	0.1
网侧等效电感	H	3.5×10^{-4}
MQPR比例系数 k_{pr}		1.16
MQPR积分系数 k_{ih}		8.5
MQPR截止频率 ω_m	rad/s	10

仿真总时长设为3 s,初始时刻风机在8 m/s的基本风速下运行, $t=1$ s时风速增加为12 m/s,持续1 s,当 $t=2$ s时风速跌落为10 m/s,直至结束,图8为风速输出波形。

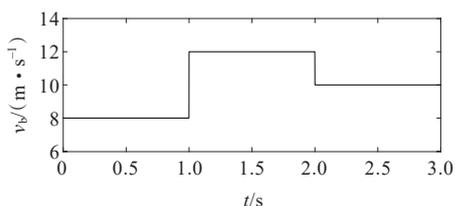


图8 风速输出波形

Figure 8 Waveform of wind speed

3种控制策略中的动态参数均已调整为最优值,下面分别观察各自的直流母线电压波形、网侧有功和无功的输出波形、网侧三相电流的输出波形。图9为直流母线电压的仿真对比,可以看出,无论是初始时刻还是风速变化时刻,双闭环PI、传统下垂和双补偿下垂—MQPR 3种控制策略下的超调量和稳定时间均逐渐减小,以 $t=1$ s风速突增时为例,3种控制策略下直流母线电压的最大超调量分别为60、30、3 V,且分别经过0.210、0.120、0.046 s后恢复稳定。由此可见,本文提出的控制策略引入电压、电流前馈双补偿思想,在快速稳定直流母线电压、提高系统抗干扰性能方面表现突出。图10为3种控制策略下系统网侧有功和无功的输出波形。

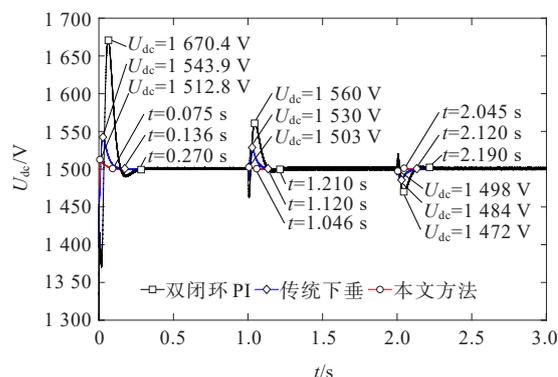
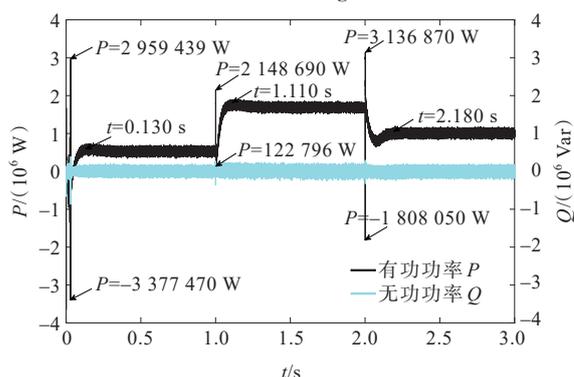
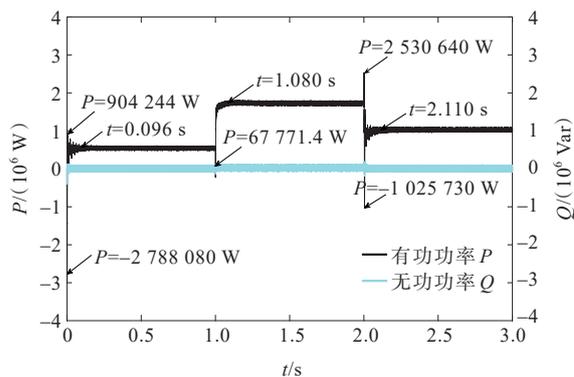


图9 3种控制策略下直流母线电压输出波形

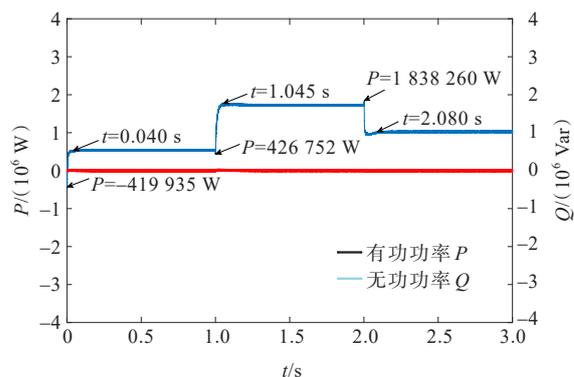
Figure 9 Waveforms of DC-bus voltage under 3 control strategies



(a) 双闭环PI



(b) 传统下垂



(c) 双补偿下垂—MQPR

图10 3种控制策略下网侧有功和无功输出波形

Figure 10 Waveforms of grid-side active and reactive power under 3 control strategies

可以看出,虽然 3 种控制策略下系统均可实现全功率并网,但是,图 10(a)、(b)前 2 种策略下系统输出的有功波形会产生较大波动,且谐波含量高,尤其双闭环 PI 控制最为严重,而图 10(c)所示本文方法输出的有功波形波动很小,谐波几乎被抑制,且能快速稳定,响应最为平滑。以 $t=2\text{ s}$ 风速突减时为例,3 种控制策略下系统输出的有功最大值分别为 3.14、2.53、1.84 MW,达到稳定所需时间分别为 0.18、0.11、0.08 s。由此说明,在调节系统网侧功率输出方面,本文提出的控制策略也表现出较好的控制效果和动态响应性能。

图 11 为 3 种控制策略下系统网侧三相电流的输出波形,为了便于分析,仅对部分时段的电流波形进行了放大处理。

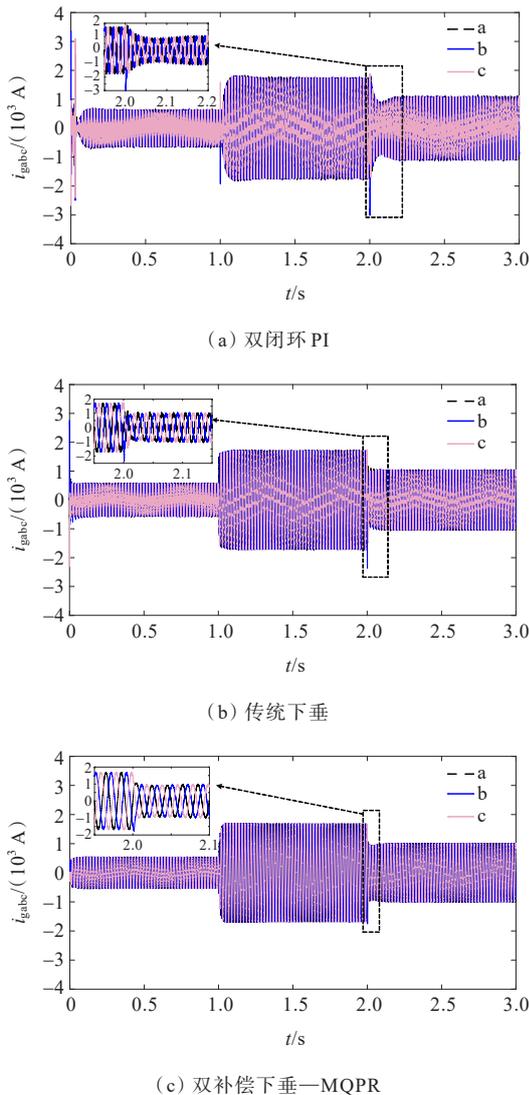


图 11 3 种控制策略下网侧三相电流输出波形
Figure 11 Waveforms of grid-side current under 3 control strategies

可以看出,图 11(a)双闭环 PI 控制下的三相电流输出波形存在很大的电流谐波含量,图 11(b)传统下垂控制稍微有所改善,但仍存在较多的谐波量,而图 11(c)本文方法输出的电流波形几乎不含有谐波。由此可见,本文提出的控制策略在引入 MQPR 控制器之后,能有效滤除多次谐波电流,提高系统并网的稳定性。

为进一步说明本文并网控制策略的优势,图 12 给出了本文方法下网侧 a 相电压和电流的输出波形,可以看出,在并网过程中,相电压和相电流的频率均为 50 Hz,且保持同相位,满足实际情况下频率和单位功率因数的并网要求。

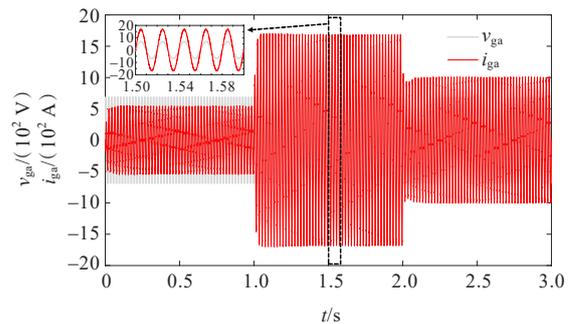


图 12 本文方法下网侧 a 相电压电流输出波形
Figure 12 Waveforms of grid-side a-phase voltage and current under the proposed method

4 结语

为改善风速变化所引起的直流母线电压和输出功率的波动以及不同频次交流谐波分量影响等问题,提出了一种双补偿下垂—MQPR 的直驱式风电系统并网控制策略。基于 MATLAB/Simulink 平台搭建基本风速突变情况下运行的仿真模型,结果表明本文所提控制方法表现出良好的抗干扰和响应性能,具体地说:在传统下垂控制中引入电压、电流前馈双补偿的思想,可以有效地稳定直流母线电压和输出功率,减小滤波电容电流造成的误差影响;采用 MQPR 控制器代替电流内环 PI 控制,可以有效滤除系统中多次谐波电流,提高系统并网质量。

参考文献:

[1] 冯伟忠,李励.“双碳”目标下煤电机组低碳、零碳和负碳化转型发展路径研究与实践[J].发电技术,2022,43(3):452-461.
FENG Weizhong, LI Li. Research and practice on development path of low-carbon, zero-carbon and

- negative carbon transformation of coal-fired power units under "double carbon" targets[J]. *Power Generation Technology*,2022,43(3):452-461.
- [2] 郭琦,卢远宏.新型电力系统的建模仿真关键技术及展望[J].*电力系统自动化*,2022,46(10):18-32.
GUO Qi,LU Yuanhong.Key technologies and prospects of modeling and simulation of new power system[J].*Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(10): 18-32.
- [3] 吴斌,杨旭红.基于改进遗传PI和重复控制的三相逆变器并网研究[J].*电力科学与技术学报*,2021,36(6):151-156.
WU Bin, YANG Xuhong. Research on grid-connected three-phase inverter based on improved genetic PI and repetitive control[J].*Journal of Electric Power Science and Technology*,2021,36(6):151-156.
- [4] 柯德平,冯帅帅,刘福锁,等.新能源发电调控参与的送端电网直流闭锁紧急频率控制策略快速优化[J].*电工技术学报*,2022,37(5):1204-1218.
KE Deping, FENG Shuaishuai, LIU Fusuo, et al. Rapid optimization for emergent frequency control strategy with the power regulation of renewable energy during the loss of DC connection[J].*Transactions of China Electrotechnical Society*,2022,37(5):1204-1218.
- [5] YUAN Z D, JIA S F, LIANG D L, et al. Research on slot-pole combination in high-power direct-drive PM vernier generator for fractional frequency transmission system [J]. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*,2022,6(4):445-453.
- [6] 赵海岭,王维庆,李笑竹,等.发电侧多主体投资低碳综合微网氢储能的演化策略[J].*电力系统保护与控制*, 2023,51(22):49-62.
ZHAO Hailing, WANG Weiqing, LI Xiaozhu, et al. Evolution strategy of low carbon integrated microgrid hydrogen energy storage with multi-agents investment on the power generation side[J]. *Power System Protection and Control*,2023,51(22):49-62.
- [7] 王金锋,杨宇琦,温栋,等.基于GA-BP和RBF的风力发电时间序列混沌预测组合模型[J].*电网与清洁能源*, 2022,38(11):117-125.
WANG Jinfeng, YANG Yuqi, WEN Dong, et al. A combined model of chaos prediction of wind power generation time series based on GA-BP and RBF[J]. *Power System and Clean Energy*,2022,38(11):117-125.
- [8] 贺之渊,杨杰,吴亚楠,等.能源转型下的未来交流和直流联合运行模式及发展趋势探讨[J].*中国电机工程学报*,2023,43(1):99-114.
HE Zhiyuan, YANG Jie, WU Yanan, et al. Investigation on the future AC and DC combined operation form and development trend under energy transition[J]. *Proceedings of the CSEE*,2023,43(1):99-114.
- [9] 杨光源,周诗嘉,彭光强,等.基于18相风力发电系统的环流抑制策略研究[J].*高压电器*,2023,59(10):190-198.
YANG Guangyuan, ZHOU Shijia, PENG Guangqiang, et al. Research on circulation suppression strategy based on 18-phase wind power system[J].*High Voltage Apparatus*, 2023,59(10):190-198.
- [10] 乔左江,杜欣慧,薛晴.大规模风电参与系统调频研究综述[J].*电测与仪表*,2023,60(7):1-12.
QIAO Zuojiang, DU Xinhui, XUE Qing. Review of large-scale wind power participating in system frequency regulation[J].*Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023,60(7):1-12.
- [11] 黄龔,郝迎鹏,汪慧娟,等.基于二阶统一模型的分布式发电并网同步控制研究[J].*中国电力*,2023,56(12):41-50.
HUANG Yan, HAO Yingpeng, WANG Huixian, et al. Research on synchronization control of distributed generation based on second-order unified model[J]. *Electric Power*,2023,56(12):41-50.
- [12] 康思伟,董文凯,郭诗然,等.基于虚拟同步机控制的新能源发电并网系统小干扰稳定临界短路比[J].*电力建设*,2022,43(3):131-140.
KANG Siwei, DONG Wenkai, GUO Shiran, et al. Critical short-circuit ratio of small-signal stability for a grid-connected renewable power generation system based on virtual synchronous generator control[J]. *Electric Power Construction*,2022,43(3):131-140.
- [13] 李亚楠,杨鹏,王华君.大规模风电并网对电网的影响及解决措施[J].*中南民族大学学报(自然科学版)*,2017,36(3):84-89.
LI Yanan, YANG Peng, WANG Huajun. The impact and solution on a large scale wind power connected to power grid[J]. *Journal of South-central Minzu University (Natural Science Edition)*,2017,36(3):84-89.
- [14] 李雷,杨建林,冯振江,等.基于有效风速估计的永磁直驱风力发电系统鲁棒控制研究[J].*智慧电力*,2023,51(8):82-88.
LI Lei, YANG Jianlin, FENG Zhenjiang, et al. Robust control of wind power system with direct-driven PMSG based on effective wind speed estimation[J]. *Smart Power*, 2023,51(8):82-88.
- [15] 周振雄,刘丙申,王文保,等.基于虚拟磁链DPC的电压型整流器控制系统研究[J].*太阳能学报*,2022,43(2):136-143.
ZHOU Zhenxiong, LIU Bingshen, WANG Wenbao, et al. Research on direct power control of voltage-type rectifier based on virtual magnetic flux model prediction [J].*Acta Energetica Solaris Sinica*,2022,43(2):136-143.
- [16] 荆江平,余小婵,刘元.三相虚拟磁链观测并网逆变器预测技术[J].*电力科学与技术学报*,2022,37(6):157-164.

- JING Jiangping, YU Xiaochan, LIU Yuan. Three-phase virtual flux linkage observation grid-connected inverter prediction technology[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 157-164.
- [17] 吴汪平, 楚皓翔, 解大, 等. PI控制器参数对并网永磁直驱型风力发电系统机网相互作用的影响[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 21-28.
- WU Wangping, CHU Haoxiang, XIE Da, et al. Influence of PI controllers' parameters on machine-network interaction of grid-connected PMSG system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 21-28.
- [18] MOHSENI M, MASOUM M A S, ISLAM S M. Low and high voltage ride-through of DFIG wind turbines using hybrid current controlled converters[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(7): 1456-1465.
- [19] 马幼捷, 陶珑, 周雪松, 等. 结合自抗扰的风电系统电压环模糊自适应控制[J]. 太阳能学报, 2020, 41(12): 330-337.
- MA Youjie, TAO Long, ZHOU Xuesong, et al. Fuzzy adaptive control of voltage loop in wind power system combined with linear active disturbance rejection control [J]. Acta Energetica Sinica, 2020, 41(12): 330-337.
- [20] 刘英培, 张腊, 梁海平, 等. 适用于风电并网的 VSC-HVDC 系统模型预测控制[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(6): 102-108+114.
- LIU Yingpei, ZHANG La, LIANG Haiping, et al. Model predictive control of VSC-HVDC system for wind power integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6): 102-108+114.
- [21] 徐红灿, 滕予非, 王晓茹. 基于重复和准比例谐振复合的直驱风机网侧变流器控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 95-102.
- XU Hongcan, TENG Yufei, WANG Xiaoru. A control strategy combining repetitive control and quasi-PR control for PMSG grid-side converter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 95-102.
- [22] 周佩朋, 宋瑞华, 李光范, 等. 基于附加比例谐振控制的风机次同步振荡抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(11): 3797-3807.
- ZHOU Peipeng, SONG Ruihua, LI Guangfan, et al. Subsynchronous oscillation mitigation method for wind turbines based on additional proportional resonance control[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11): 3797-3807.
- [23] 刘毅力, 李丁, 李明贤, 等. RoCoF下垂控制的直驱式风电系统惯量特性分析[J]. 电源学报, 2020, 18(6): 94-104.
- LIU Yili, LI Ding, LI Mingxian, et al. Inertia characteristic analysis of RoCoF droop control based direct-driven wind power system[J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(6): 94-104.
- [24] 李珠林, 李慧, 刘思嘉, 等. 基于 MPCC-PI^D控制的直驱永磁风力发电系统[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(5): 1-10.
- LI Zhulin, LI Hui, LIU Sijia, et al. Direct-driven permanent magnet wind power generation system based on MPCC-PI^D control[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(5): 1-10.

(上接第 141 页 Continued from page 141)

- WANG Zengping, XIANG Yuwei, WANG Tong. Assessment method of tower falling and line disconnection accidents for 110 kV line in typhoon and torrential rain disaster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 59-66.
- [11] MILLS J E, MA X, ZHUGE Y. Experimental study on multi-panel retrofitted steel transmission towers[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 78: 58-67.
- [12] 连继业, 王绪湘, 汪大海, 等. 输电铁塔结构构件夹具式加固性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(12): 42-46.
- LIAN Jiye, WANG Xuxiang, WANG Dahai, et al. Experimental research on mechanical properties of structural members for transmission tower reinforced with clamps[J]. Industrial Construction, 2019, 49(12): 42-46.
- [13] 朱云祥, 张若愚, 曹枚根, 等. 海岛大跨越输电塔线体系风振响应及风振系数[J]. 高压电器, 2022, 58(1): 111-121.
- ZHU Yunxiang, ZHANG Ruoyu, CAO Meigen, et al. Wind induced vibration response and coefficient of large crossing transmission tower line system between islands [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(1): 111-121.
- [14] LU C H, MA X, MILLS J E. The structural effect of bolted splices on retrofitted transmission tower angle members[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 95: 263-278.
- [15] 耿贞伟, 苏文伟, 于凤荣, 等. 基于 Ansys 的高压输电塔风振特性分析[J]. 电测与仪表, 2023, 60(2): 84-90.
- GENG Zhenwei, SU Wenwei, YU Fengrong, et al. Analysis of wind vibration response of high-voltage transmission tower based on Ansys[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(2): 84-90.
- [16] 苏子威. 输电塔主材夹具加固构件的受力性能研究及输电塔抗风分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- SU Ziwei. Study on mechanical behavior of reinforcement of transmission tower leg with fixture and wind resistance analysis of transmission tower[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.