

一种适用于永磁直驱风力发电系统的改进 无模型预测控制

李胜男¹,何廷一¹,何鑫¹,和鹏¹,张永昌²,张晟铨²

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650200;

2. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 永磁直驱风力发电系统运行过程中, 机侧的参数变化可能引起控制精度降低、稳定性变差等问题, 进而影响变换器的直流母线电压, 导致网侧功率波动, 对电力系统的稳定性产生危害。机侧采用传统单矢量无模型预测控制时, 尽管有效提升了系统鲁棒性, 但仍存在控制效果差的问题。为此, 提出了一种适用于永磁直驱风力发电系统的改进无模型预测控制, 可以保持系统鲁棒性的同时改善稳态控制性能。首先, 对系统联合运行时的机侧和网侧模型进行了分析; 其次, 通过拓展电压矢量的方法对传统有限控制集进行优化, 结合传统电流差分无模型预测控制的思想, 改善了原有控制方法的预测精度, 进一步降低了电流和功率纹波; 最后, 通过实验对所提方法的有效性和优异性进行了验证。

关键词: 永磁直驱; 无模型预测控制; 有限控制集

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed25836

An Improved Model Free Predictive Control Suitable for Permanent Magnet Direct Drive Wind Power Generation Systems

LI Shengnan¹, HE Tingyi¹, HE Xin¹, HE Peng¹, ZHANG Yongchang², ZHANG Shengnan²

(1. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650200, Yunnan, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: During the joint operation of permanent magnet direct drive wind power generation systems, the changes in motor side parameters may cause problems such as reduce control accuracy and stability on the machine side, which in turn affects the DC bus voltage of the converter, leading to power fluctuations on the grid side and posing a threat to the stability of the power system. When using traditional single vector model free predictive control on the machine side, although it effectively improves system robustness, there is still a problem of poor control effect. Therefore, an improved model free predictive control suitable for permanent magnet direct drive wind power generation systems was proposed to maintain system robustness while improving steady-state control performance. Firstly, the machine side and grid side models during the joint operation of the system were analyzed. Secondly, through the method of the extended finite control set, the traditional finite control set was optimized. Combined with the model free predictive control concept of traditional current difference, the proposed method improves the prediction accuracy of the control method and reduces current and power ripple. Finally, the effectiveness and superiority of the proposed method were verified through experiments.

Key words: permanent magnet direct drive; model free predictive control(MFPC); finite control set

现代新型电力系统中, 永磁直驱风力发电系统正蓬勃发展, 其对高比例新能源的消纳作用正日益提升, 符合我国“碳中和”与“碳达峰”的目标要求^[1]。当永磁直驱风力发电系统在运行过程中

受到外界环境的影响或电机出现故障时, 会导致系统参数的变化, 进而使系统控制精度降低、效果变差, 可能对系统的稳定运行和寿命带来严重的影响。

基金项目: 国家自然科学基金(52077002)

作者简介: 李胜男(1971—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为新能源并网运行控制和电能质量, Email: lsn788@sina.com

对于永磁直驱风力发电机来说,发生变化的主要参数为:定子电阻、电感、转子磁链等。当系统的机侧采用模型预测控制(model predictive control, MPC),若电机参数与实际值产生偏差,会导致系统的稳态性能变差,无法满足参考目标的要求^[2-4];当系统的机侧采用传统矢量控制(vector control, VC),参数不准确情况下的系统动态响应速度降低,可能难以精准定向^[5-7]。

目前已有诸多学者从观测器的角度出发,通过观测并补偿由系统参数误差引起的扰动项,并结合其他控制策略以获得更好的参数鲁棒性与稳定性。文献[8]在级联无刷双馈电机中采用扩张状态观测器(extended state observer, ESO)来估计系统的动态部分和总扰动,结合预测控制,精准地实现了绕组电流的控制,且避免了参数变化的影响。文献[9]引入自适应律以观测多种扰动项,并通过ESO与滑模观测器结合,实现了参数鲁棒自适应并改善了系统性能。

在已提出的众多鲁棒预测控制中,无模型预测控制(model free predictive control, MFPC)及其改进方法备受关注^[10-13],并且已经在不同的控制对象上得到了验证。基于电流差分的MFPC仅需对电流进行采样,并依靠对应电压矢量在一个采样周期内得到的电流差值预测电流的未来值,且计算过程不需要使用参数,大大提高了系统的鲁棒性。在文献[10]中,每个时刻电压矢量对应的电流差值是由最近相邻的3个电流差值中重新构建的,该方法虽然有效解决了电流差值计算停滞更新的问题,但增加了计算负担。文献[11]通过建立拉格朗日插值多项式来改进传统方法中的成本函数以获得最优向量,尽管提升了控制效果,但受限于基本电压向量的数量,使得精度提升有限。文献[12]借助改进的超螺旋算法改进超局部模型算法以获取优异的控制效果,同时采用ESO实现前馈补偿,提升了系统控制的精度,但算法较为复杂。

文献[14]将每个采样周期分成3个相等的部分,通过在每个小周期内执行控制算法以提升预测精度,提高了传统MFPC的性能,但却额外增加了3倍的计算量。文献[15]采用了两步更新法以解决电流梯度更新停滞问题,并将二阶广义积分器引入无模型预测控制中,进一步减弱采样噪声带来的纹波影响,实现了控制精度的提升。在文献[16]中,电流梯度更新停滞问题则通过超局部

模型的在线辨识方法进行解决,实现了同步磁阻电机全速范围内的稳态/动态性能的提升。

为了在提高永磁直驱系统参数鲁棒性的同时,不过度增加算法的复杂度,本文提出了一种基于拓展有限控制集的改进无模型预测控制,通过增添额外的调制电压矢量,进一步提升预测精度,从而提升永磁直驱风力发电系统机网联合运行下的稳态性能,并降低机侧电流和功率纹波。同时,与传统无模型预测控制相比,所提方法依旧能实现系统机侧在电机参数变化时的鲁棒性能,保证系统的稳定运行状态,其有效性在永磁直驱风力发电实验平台中得到了验证。

1 永磁直驱风力发电系统模型及其控制系统

永磁直驱风力发电系统的整体框图如图1所示。整体系统由传动装置、永磁直驱风力发电机、背靠背双向变流器等部分组成。在实际运行中,首先通过网侧变换器将网侧三相电整流为直流电并稳定直流母线电压,然后控制永磁直驱发电机运行,最后启动机侧变换器与电机相连,以实现功率控制。

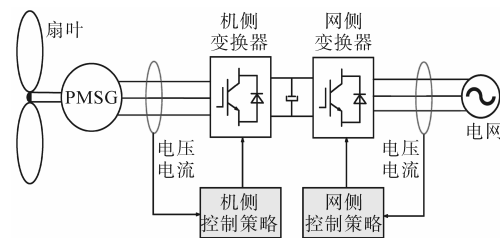


图1 永磁直驱风力发电系统整体框架

Fig.1 Framework of permanent magnet direct drive wind power generation system

1.1 系统的机侧数学模型

根据永磁电机的转子磁场定向原理,将转子磁场与d轴定向重合,可以得到永磁电机在d-q坐标系下的数学模型:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + L_d \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_r L_q i_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + L_q \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_r L_d i_{sd} + \omega_r \Psi_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{sd} , u_{sq} , i_{sd} , i_{sq} , L_d , L_q 分别为d, q轴下的定子电压、定子电流和电感; ω_r 为转子的电角速度; Ψ_f 为永磁体磁链。

在d-q坐标系下的定子侧有功功率与电流的关系为

$$P_s = \frac{3}{2} N_p \omega_m [\Psi_f i_{sq} + (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}] \quad (2)$$

式中: N_p 为电机的极对数; ω_m 为电机的机械角速度。

因本文所用永磁电机为表贴式,即 d, q 轴电感相同,式(2)可改写为

$$P_s = \frac{3}{2} N_p \omega_m \Psi_f i_{sq} \quad (3)$$

由式(3)可知,此时定子有功功率只和 q 轴电流有关,通过调节 q 轴电流即可改变电机发出的有功功率。

1.2 系统的网侧数学模型

通过将电网电压与 d 轴重合进行定向,网侧在 $d-q$ 坐标系下的数学模型可表示为

$$\begin{cases} e_d = L_g \frac{di_d}{dt} + R_g i_d - \omega_g L_g i_q + u_d \\ e_q = L_g \frac{di_q}{dt} + R_g i_q + \omega_g L_g i_d + u_q \end{cases} \quad (4)$$

式中: $e_d, e_q, i_d, i_q, u_d, u_q$ 分别为 d, q 轴下的电网电压、电网电流和变换器侧电压; R_g 为网侧电阻; L_g 为网侧电感; ω_g 为电网电压的角频率。

1.3 系统的机侧控制系统

本文所提方法的机侧控制框图如图2所示。首先,根据功率参考值与零 d 轴控制原理进行定子电流参考值的计算;其次,将拓展有限控制集理论应用于传统单矢量电流差分无模型预测控制中,对所需电流值进行预测,最后结合目标函数筛选出最优电压矢量。网侧控制则采用传统的无差拍预测控制与电网进行功率交换,同时稳定直流母线电压。

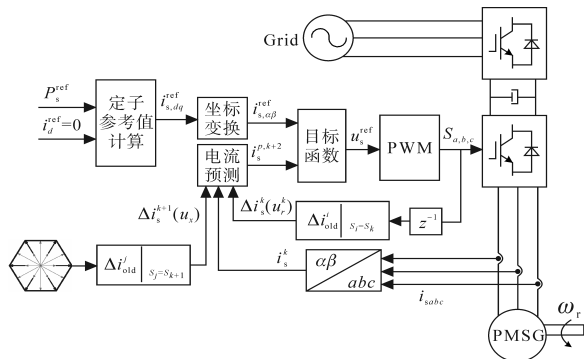


图2 改进无模型预测控制框图

Fig.2 Improved model free predictive control diagram

2 拓展有限控制集

在传统的有限控制集中,以两电平变换器为例,最优电压矢量是通过代价函数从每个采样周

期的8个基本电压矢量中进行选择。但是,仅依靠8个基本电压矢量模拟实际电压的方法在预测过程是导致控制存在较大误差的主要因素,这将导致控制中的功率和电流出现较大纹波,降低系统的控制精度。

拓展电压矢量如图3所示,拓展有限控制集整个坐标系由6个扇区组成,包含零矢量在内共有20个电压矢量^[17]。在这20个电压矢量中, $V_0, V_1, V_2, \dots, V_7$ 是传统的8个基本电压矢量; V_8, V_9, \dots, V_{13} 是由1个基本电压矢量和1个零矢量调制而成的矢量, $V_{14}, V_{15}, \dots, V_{19}$ 是由2个相邻的有效基本电压矢量调制而成。以电压矢量 V_8, V_{14} 为例,对矢量的调制进行举例说明。电压矢量 V_8 由基本电压矢量 V_1 和 V_0 调制而成,计算公式为

$$V_8 = 0.5(V_1 + V_0) \quad (5)$$

该调制电压矢量的占空比为0.5、幅值为基本电压矢量的1/2,与基本电压矢量位置一致。

电压矢量 V_{14} 由相邻基本电压矢量 V_1 和 V_2 调制而成,计算公式为

$$V_{14} = 0.5(V_1 + V_2) \quad (6)$$

该调制电压矢量的占空比为0.5、幅值为基本电压矢量的 $\sqrt{3}/2$,位于两个基本电压矢量的中间,将 V_1 和 V_2 包围的整个扇区均匀分成两份。

由示例可知,新增电压矢量的每个占空比均设定为0.5,因此无需对其占空比的分配进行额外的计算,降低了算法复杂程度。

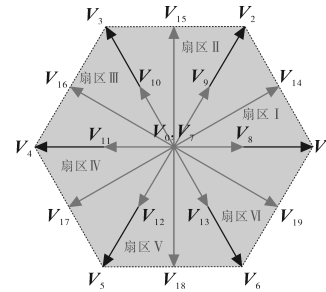


图3 拓展电压矢量

Fig.3 Expand voltage vectors

在原有电压矢量表的基础上,通过添加由8个基本电压矢量调制而成的12个电压矢量,在一个采样周期内,将通过代价函数从20个电压矢量中选出最优矢量,电压矢量的数量优化可以降低电流和功率的纹波,改善系统稳态性能。

3 改进的无模型预测电流控制

3.1 定子电流参考值计算

根据式(3)可计算得到 q 轴电流参考值:

$$i_{sq}^{ref} = \frac{2P_s^{ref}}{3N_p \omega_m \Psi_f} \quad (7)$$

为了消除参数不准确对 q 轴电流参考值的影响,故将有功功率通过 PI 控制器以得到 q 轴电流参考值:

$$i_{sq}^{ref} = \frac{2}{3} (P_s^{ref} - P_s) \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \quad (8)$$

由于采用零 d 轴控制原理,则有:

$$i_{sd}^{ref} = 0 \quad (9)$$

进而定子电流参考值即为

$$\mathbf{i}_s^{ref} = i_{sd}^{ref} + \mathbf{j}i_{sq}^{ref} \quad (10)$$

3.2 定子电流预测

由式(1)可以得到永磁直驱电机的复矢量数学模型:

$$\mathbf{u}_s = R_s \mathbf{i}_s + L_s \frac{d\mathbf{i}_s}{dt} + \mathbf{e} \quad (11)$$

式中: \mathbf{e} 为电机反电动势。

将式(11)在时域下的一个控制周期 T_{sc} 内离散化可得电流差值和定子电压矢量的对应关系:

$$\mathbf{i}_s(k+1) - \mathbf{i}_s(k) = \frac{T_{sc}}{L_s} [\mathbf{u}_s(k) - R_s \mathbf{i}_s(k) - \mathbf{e}(k)] \quad (12)$$

由式(12)可知,不同的电压矢量对应不同的电流差值,因此,在改进无模型预测控制中,通过在每个采样周期内对电流差值进行检测,可以对定子电流进行预测。

第 k 时刻和第 $k+1$ 时刻下的电流差值计算公式如下所示:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{i}_s^k(\mathbf{u}_s^k) = \mathbf{i}_s^k - \mathbf{i}_s^{k-1} \\ \Delta \mathbf{i}_s^{k+1}(\mathbf{u}_s^{k+1}) \approx \Delta \mathbf{i}_s^{old} | S_k \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\mathbf{i}_s^{k-1}, \mathbf{i}_s^k, \mathbf{i}_s^{k+1}$ 分别为第 $k-1$ 时刻、第 k 时刻和第 $k+1$ 时刻的电流值; S_k 为控制周期内已施加的开关信号;上标 old 表示该差值为过去时刻相同电压矢量对应的电流差值。

由式(13)可知,第 k 时刻的电流差值直接通过采样值计算得到,且不同电压矢量对应的电流差值均被存储;第 $k+1$ 时刻的电流差值无法直接通过采样值计算得到,但是在较高的采样频率下,通过判断第 $k+1$ 时刻即将使用的电压矢量,可以采用已存储的与之相同的电压矢量在过去时刻产生的电流差值来代替第 $k+1$ 时刻的电流差值。

图4是基于拓展有限控制集的改进无模型预测电流方法下的定子电流预测值示意图。与传

统单矢量电流差分无模型预测控制方法不同,由于拓展有限控制集的引入,使得所提方法的电流预测值的数量从8个增加到了20个,提升了预测的准确性。

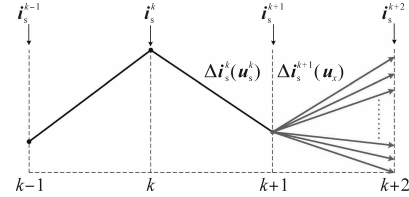


图4 电流预测示意图

Fig.4 Diagram of current prediction

根据图4,将第 k 时刻的定子电流采样值与存储的过去时刻电流差值相结合,即可得到未来时刻的定子电流预测值,具体公式如下:

$$\begin{cases} \mathbf{i}_s^{k+1} = \mathbf{i}_s^k + \Delta \mathbf{i}_s^k(\mathbf{u}_s^k) \\ \mathbf{i}_s^{k+2} = \mathbf{i}_s^{k+1} + \Delta \mathbf{i}_s^{k+1}(\mathbf{u}_s^{k+1}) \end{cases} \quad (14)$$

为了获得第 $k+2$ 时刻的最优定子电流预测值, $\Delta \mathbf{i}_s^{k+1}(\mathbf{u}_s^{k+1})$ 需要从总数为20的电压矢量作用下的所有定子电流差值中选取最合适值。因此,通过将 $\Delta \mathbf{i}_s^{k+1}(\mathbf{u}_s^{k+1})$ 遍历20个不同的差值,根据式(14)可以计算获得20个不同定子电流差值对应的预测值 \mathbf{i}_s^{k+2} 。

3.3 目标函数设计

进一步的,为了确保定子电流能精准地跟踪其参考,本文将目标函数定义如下:

$$\mathbf{g} = |\mathbf{i}_s^{ref} - \mathbf{i}_s^{k+2}|^2 \quad (15)$$

将获得的20个不同定子电压矢量对应的第 $k+2$ 时刻的定子电流预测值代入目标函数的公式中,可以筛选得到最小目标函数值对应的电流预测值,该值对应的电压矢量即最优电压矢量,最后,通过 PWM 将定子电压参考值转化为变换器侧的开关信号进行机侧变流器的控制。

4 实验结果与分析

4.1 实验平台与系统参数

为了验证所提方法在理论和实践中的正确性和有效性,本文在基于背靠背变换器的永磁直驱风力发电系统实验平台中进行了实验验证,实验平台如图5所示。

实验平台采用异步电机模拟风机叶片运转,拖动永磁直驱发电机进行发电,同时依靠电网模拟器产生所需电网电压。永磁直驱风力发电系统中的发电机参数如下:额定功率 $P_N=5.5$ kW,额定电流 $I_N=12$ A,额定转速 $n_N=1500$ r/min,极对数

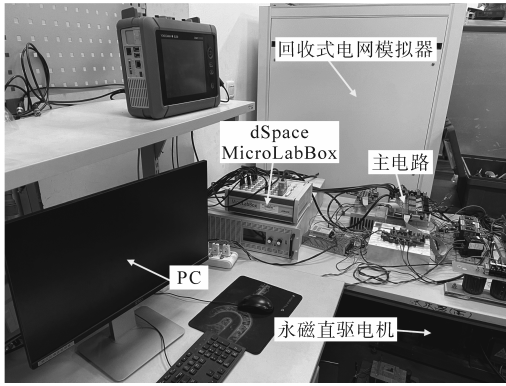


图5 实验平台

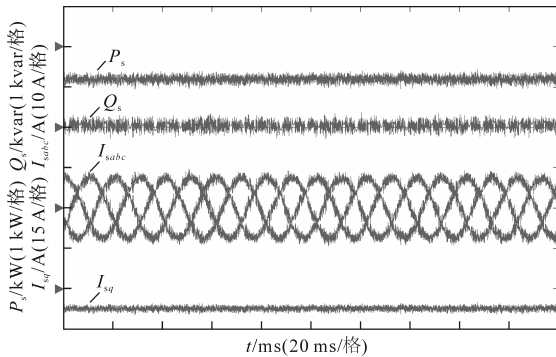
Fig.5 Experimental platform

$N_p=4$, 定子电阻 $R_N=0.62 \Omega$, d 轴电感 $L_d=2.0 \text{ mH}$, q 轴电感 $L_q=2.0 \text{ mH}$, 永磁体磁链 $\Psi_f=0.35 \text{ Wb}$ 。

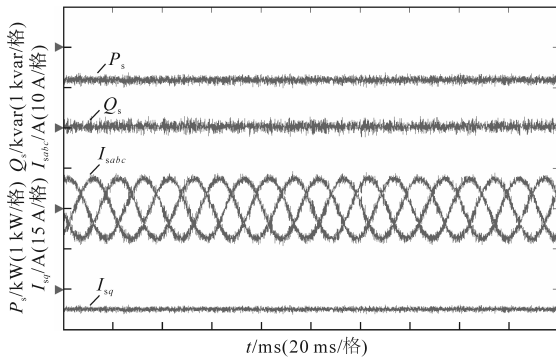
本文在上述实验平台中进行了传统单矢量无模型预测控制和所提方法的实验对比,采样频率均设定为 30 kHz ,永磁直驱电机初始转速均设定为 500 r/min 。

4.2 稳态实验结果

图6a和图6b分别是传统单矢量无模型预测控制和改进无模型预测控制在电机发出功率为 800 W 时的稳态对比实验波形。实验波形图中的通道从上到下依次为有功功率、无功功率、定子三相电流、定子 q 轴电流。可以看出,所提方法在



(a)传统单矢量无模型预测控制



(b)改进无模型预测控制

图6 传统方法和所提方法的稳态对比实验波形

Fig.6 Comparison of steady state experimental waveforms between traditional and proposed methods

功率和电流的纹波问题上得到了明显改善,且功率和电流均能准确地跟踪其参考值,表明所提方法具备优异的稳态控制性能。

图7a和图7b分别是传统单矢量无模型预测控制和改进无模型预测控制下的稳态电流THD值。可以看出,所提方法的定子电流THD从 12.32% 降低至 9.69% ,下降了 21.35% ,表明所提方法的定子电流谐波更少,稳态性能更好。

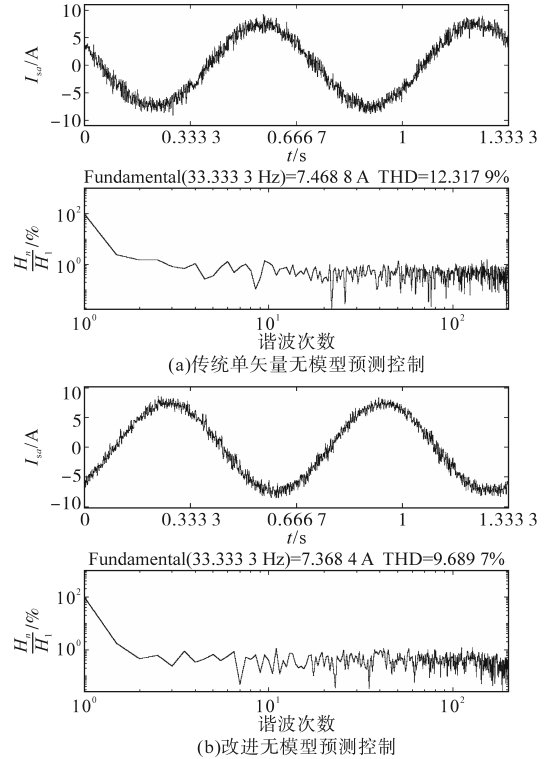


图7 传统方法和所提方法的电流THD

Fig.7 Current THD of traditional and proposed methods

4.3 动态实验结果

图8a和图8b分别是传统单矢量无模型预测控制和改进无模型预测控制下,功率从 0 W 阶跃至 500 W 时的动态实验波形。

通过对比图8a和图8b的波形,可以看到所提方法在功率阶跃时能实现功率跟踪的快速响应,电流跟随功率变化而变化的同时,能准确地跟踪参考值,表明该方法具备优异动态性能。

4.4 参数变化的实验结果

图9a和图9b分别是传统单矢量无模型预测电流控制和改进无模型预测电流控制在电机发出功率为 800 W 时,电机参数发生变化时的实验波形。

图9中第5通道的 k 为变参标志,其中 $k=1$ 表示电机电感不发生变化; $k=2$ 表示电机电感变为原来的 0.5 倍; $k=3$ 表示电机电感变为原来的 1.5

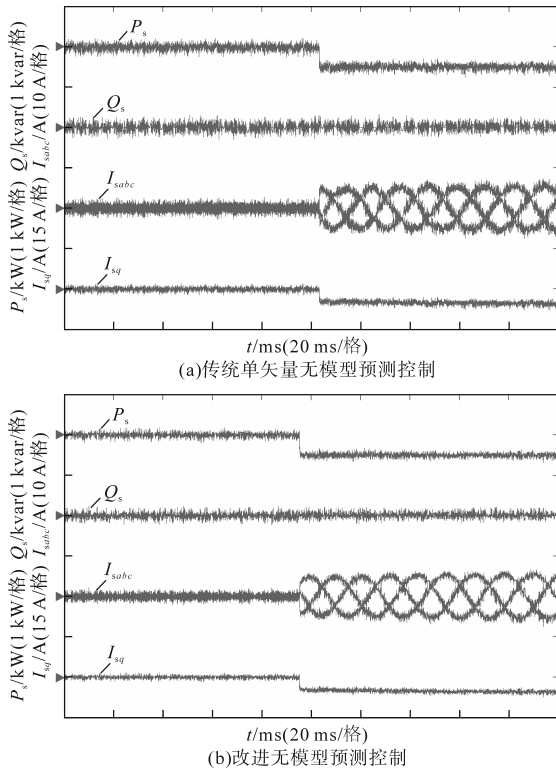


图8 传统方法和所提方法的动态实验波形

Fig.8 Experimental waveforms of dynamic state between traditional and proposed methods

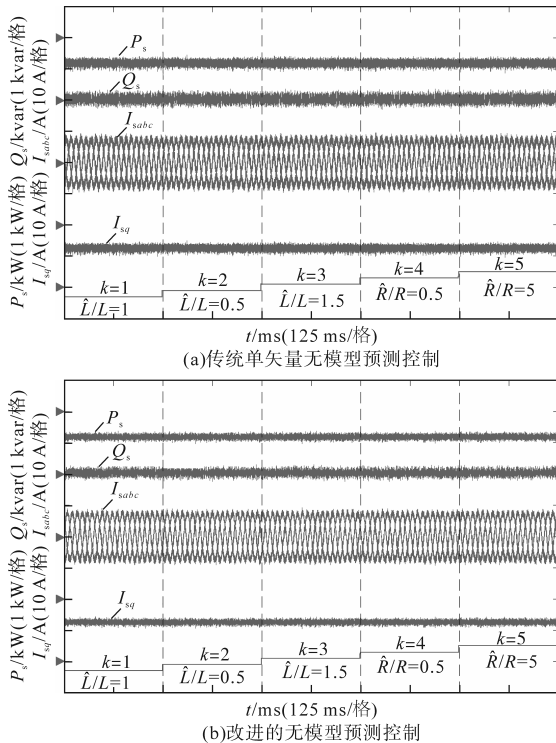


图9 传统方法和所提方法的参数变化实验波形

Fig.9 Experimental waveforms of parameter changes between traditional and proposed methods

倍; $k=4$ 表示电机电阻变为原来的0.5倍; $k=5$ 表示电机电阻变为原来的5倍,电机参数变化均在控

制器内部完成。

电机稳定运行时,定子电感较定子电阻而言更易发生变化,影响系统整体的运行性能。当电机电感参数变化时,会造成电流跟踪出现静差,严重时甚至导致电机控制失稳,另外参数变化可能引起较大的功率纹波,进而影响电能质量^[18]。

相比而言,由图9可以看出,当电机的电感和电阻分别进行增大或减小的变化时,所提方法在稳态下的功率和定子电流依旧能持续准确地跟踪参考值,且电流幅值保持恒定。同时与传统方法相对比,所提方法在具备与传统无模型预测控制相同的鲁棒性能的同时,大大减小了纹波,改善了控制效果。

5 结论

本文针对传统单矢量无模型预测控制稳态效果较差的问题,采用拓展有限控制集的方法进行改善,将传统电压矢量集拓展至含有20个电压矢量的集合,进而提升控制精度,并将所提方法成功应用在永磁直驱风力发电系统的联合运行中。通过对比传统方法和改进的方法的实验波形,验证了所提方法在保证系统的稳定联合运行的同时,具有更好的稳态控制效果。

参考文献

- [1] 宋剑波. 风力发电技术的现状与发展综述[J]. 集成电路应用, 2022, 39(4): 148-149.
SONG Jianbo. Summary of situation and development of wind power generation technology[J]. Applications of IC, 2022, 39(4): 148-149.
- [2] 贺虎成, 邵贺, 桂浩亚, 等. 永磁同步电机改进型鲁棒模型预测转矩控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 155-165.
HE Hucheng, SHAO He, GUI Haoya, et al. Improved robust model predictive torque control of a permanent magnet synchronous motor[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 155-165.
- [3] 夏长亮, 张天一, 周湛清, 等. 结合开关表的三电平逆变器永磁同步电机模型预测转矩控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 83-92, 110.
XIA Changliang, ZHANG Tianyi, ZHOU Zhanqing, et al. Model predictive torque control with switching table for neutral point clamped three-level inverter-fed permanent magnet synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 83-92, 110.
- [4] 郭鑫, 颜黎明, 田顺, 等. 基于自校正模型的永磁同步电机鲁棒预测转矩控制[J]. 电气工程学报, 2021, 16(3): 9-16.

- GUO Xin, YAN Liming, TIAN Shun, et al. Robust predictive torque control of PMSM using self-correcting model[J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 16(3): 9-16.
- [5] TRIPATHI S M, TIWARI A N. Real-time evaluation of PMSG-based wind turbine control involving PI controller parameters tuned with explicit damping ratio specification[C]//2020 International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEE3), Gorakhpur, India, 2020: 559-564.
- [6] 曹亚丽, 曹竣奥, 宋昕, 等. 一种改进滑模观测器的PMSM矢量控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 104-111.
- CAO Yali, CAO Jun'ao, SONG Xin, et al. Research on vector control of PMSM based on an improved sliding mode observer[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 104-111.
- [7] 王寅, 赵磊, 曾洁. 基于改进滑模观测器的永磁同步电机矢量控制研究[J]. 大连交通大学学报, 2022, 43(6): 110-115.
- WANG Yin, ZHAO Lei, ZENG Jie. Research on vector control of magnet synchronous motor based on improved sliding mode observer[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2022, 43(6): 110-115.
- [8] 杨长山, 张永昌, 蒋涛. 基于扩张状态观测器的级联无刷双馈电机并网同步和发电鲁棒预测电流控制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(22): 6094-6103.
- YANG Changshan, ZHANG Yongchang, JIANG Tao. Robust predictive current control for grid synchronization and power generation of cascaded brushless doubly-fed generators based on extended state observer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(22): 6094-6103.
- [9] 孙洪博, 张晓宇, 柳向斌. 基于扩张状态观测器的永磁同步电机自适应鲁棒控制[J]. 控制工程, 2024, 31(1): 112-120.
- SUN Hongbo, ZHANG Xiaoyu, LIU Xiangbin. Adaptive robust control for permanent magnet synchronous motor based on extended state observer[J]. Control Engineering of China, 2024, 31(1): 112-120.
- [10] CARLET Paolo Gherardo, TINAZZI Fabio, BOLOGNANI Silverio, et al. An effective model-free predictive current control for synchronous reluctance motor drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4): 3781-3790.
- [11] ZHOU Yanan, LI Hongmei, LIU Rundong, et al. Continuous voltage vector model-free predictive current control of surface mounted permanent magnet synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(2): 899-908.
- [12] 任志玲, 张文凯. 基于ESO的PMSM无模型快速超螺旋滑模预测控制[J]. 电气工程学报, 2024, 19(2): 16-25.
- REN Zhiling, ZHANG Wenkai. ESO-based PMSM modelless fast supercoil sliding mode prediction control[J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 19(2): 16-25.
- [13] 魏尧, 柯栋梁, 黄东晓, 等. 基于时间序列的永磁同步电机连续控制集无模型预测电流控制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(22): 6027-6038.
- WEI Yao, KE Dongliang, HUANG Dongxiao, et al. A continuous-control-set type model-free predictive current control based on time-series for PMSM drives[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(22): 6027-6038.
- [14] WANG Tan, HU Yihua, WU Zuyu, et al. Low-switching-loss finite control set model predictive current control for IMs considering rotor-related inductance mismatch[J]. IEEE Access, 2020, 8: 108928-108941.
- [15] 曹文平, 王尧, 张悦, 等. 计及采样噪声补偿的并网逆变器三矢量无模型预测电流控制方法[J/OL]. 上海交通大学学报: (2024-03-02) [2024-04-14]. <http://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.499>.
- CAO Wenping, WANG Yao, ZHANG Yue, et al. A three-vector model-free predictive current control method for grid-connected inverters with sampling noise compensation[J/OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University: (2024-03-02) [2024-04-14]. <http://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.499>.
- [16] 石国航, 张永昌, 杨海涛. 一种改进的同步磁阻电机无模型预测电流控制[J]. 电气工程学报, 2023, 18(2): 1-8.
- SHI Guohang, ZHANG Yongchang, YANG Haitao. An improved model-free predictive current control for synchronous reluctance motor drives[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(2): 1-8.
- [17] DIAB A A Z, HASSAN M S, SHOYAMA M. Modified adaptive sliding mode control for sensorless direct-drive permanent magnet synchronous generator wind turbines based on fuzzy logic control[C]//Proceedings of 2019 IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference (IFEEC), 2019: 1-8.
- [18] 胡堃, 黄浩, 张洋. 基于扰动观测器的永磁同步电机鲁棒电流预测控制[J]. 电机技术, 2022(4): 10-17.
- HU Kun, HUANG Hao, ZHANG Yang. Robust current predictive control of PM synchronous motor based on disturbance observer[J]. Electrical Machinery Technology, 2022(4): 10-17.

收稿日期: 2024-04-14

修改稿日期: 2024-05-11