

双馈异步风电系统的动态级联模型预测控制

田家彬¹,杨传江¹,李俊达²,谷加腾²,张祯滨²

(1.中车山东风电有限公司 风电装备研究所,山东 济南 250022;

2.山东大学 电气工程学院,山东 济南 250061)

摘要:双馈异步风机(DFIG)是目前风电市场的主流机型。由于风机需优化不同时间尺度的多个控制目标,传统线性控制难以满足其需求。模型预测控制(MPC)因其优秀的动态性能和多目标优化能力,成为控制风机的有效方法。然而模型预测控制通过单一代价函数实现多目标优化,这导致控制目标相互耦合,使控制优先级混乱、权系数设计复杂。为此,提出一种动态级联模型预测控制策略。所提方法采用多个代价函数级联的结构,通过计算每个控制目标所有代价函数的平均值来对控制目标排序,动态调整优先级。此外,所提方法使用控制阈值调整控制前级进入后级的候选开关矢量数量。所提方法无需使用权系数即可实现对多个目标的总体最优控制。硬件在环结果证明了所提方法的有效性。

关键词:双馈异步风机;动态级联模型预测控制;动态优先级;控制阈值

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed24849

Dynamic Cascade Model Predictive Control of Doubly Fed Asynchronous Wind Power System

TIAN Jiabin¹, YANG Chuanjiang¹, LI Junda², GU Jiateng², ZHANG Zhenbin²

(1. Wind Power Equipment Research Institute, CRRC Shandong Wind Power Co., Ltd., Jinan 250022, Shandong, China; 2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: The doubly-fed induction generator (DFIG) is the mainstream model in the wind power market. Since there are multiple time-scale control objectives in the wind turbine, it is difficult for conventional linear control methods to optimize the multi-objective. Model predictive control (MPC) is an effective method for wind turbine control due to the high dynamic response performance and multi-objective optimization capacity. However, model predictive control achieves multi-objective optimization through a single cost function, which leads to the coupling of the control objectives, making it difficult to design the weight factors and determine the control priority. Therefore, a dynamic sequential model predictive control (DSMPC) strategy was proposed, which a single cost function was replaced by an optimization structure composed of multiple cascade cost functions. The control objectives were ranked according to the average value of all cost functions of each control objective, and the priority was dynamically adjusted. In addition, the control threshold was used to adjust the number of candidate switch vectors from the control pre-stage to the control post-stage. This method realized the overall optimal control of multiple objectives without using weight factors. The effectiveness of the proposed method was proved by the hardware-in-the-loop results.

Key words: doubly-fed induction generator (DFIG); dynamic sequential model predictive control (DSMPC); dynamic priority; control threshold

随着“双碳”目标的提出,国家不断重视对清洁能源的开发和利用,其中风能是清洁能源的重要组成部分,目前风力发电机主要有永磁同步发电机和双馈发电机两种形式^[1]。双馈异步发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)因其具有变

流器容量小、灵活的功率调节能力等特性,成为风电场的主流机型^[2]。

DFIG的功率水平多年来一直在提高,研发目标是超过10 MW。这种功率水平将要求多电平变流器在较低的开关频率下工作,以减少总谐波

作者简介:田家彬(1986—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为新能源发电及电气设计,Email:tianjiabin1986@126.com

通讯作者:张祯滨(1984—),男,博士,教授,主要研究方向为预测控制在新能源变流器与电驱系统中的应用,Email:zbz@sdu.edu.cn

失真(total harmonic distortion, THD)和开关损耗^[3]。三电平中性点钳位(three-level neutral point clamping, 3L-NPC)背靠背变流器能够输出多个电压电平,且相比其他多电平变流器所用开关器件数量较少,因此,它是一种适用于大功率DFIG的拓扑结构。

基于3L-NPC背靠背变流器的DFIG风力发电系统的控制目标是:1)最小化电流偏差以控制直流母线电压和无功电流;2)平衡三电平变流器的中性电压以确保变流器的稳定运行;3)降低开关频率以减少开关损耗。对于具有多个非线性控制目标的变换器,有效进行快速多目标控制至关重要。模型预测控制(model predictive control, MPC)能够在单个代价函数中同时包括具有不同时间尺度的多个目标。这些控制目标的优先级使用权系数^[4]来分配。

传统模型预测控制通过一个代价函数包含多个控制目标,分别设置不同的权系数以确定目标的优先级。但系统的诸多控制目标相互耦合,且跨多时间尺度、多数量级,难以设置最优的权系数来权衡各控制目标的优先级,因此难以保证较好的控制效果。为了解决这个问题,有两种常见的解决方案:对权系数进行计算和使用没有权系数的级联结构MPC。

文献[5]引入了一个新的镜像转矩变量替代磁链,利用电磁转矩和镜像转矩构造代价函数,消除量纲影响,然而这种方法只能用于感应电机。研究人员还提出了一些基于人工智能的方法来计算权系数,如遗传算法^[6]、模糊逻辑控制^[7]等。然而,这些方法计算量大,只能离线计算权系数。因此,当环境变化时,权系数可能不适合当前工况。

为了消除权系数,已有文献提出了一些级联MPC方法。在文献[8-9]中,提出了一种级联模型预测控制(sequential model predictive control, SMPC)方法,把多个控制目标排列成级联结构的代价函数,这些控制目标根据其优先级排序,通过最小化具有较高优先级的控制目标的代价函数,将选择一些最优和次优开关矢量作为下一目标的候选。然而,每个阶段所选开关矢量的数量是固定的,只能根据工程经验确定。文献[10]提出了一种动态级联模型预测控制(dynamic sequential model predictive control, DSMPC),它通过基于控制阈值的控制器调整送

到下一个阶段中的开关矢量的数量,其电流误差可以控制在一定阈值内,然而,这些目标的控制优先级也是固定的。在上述方法中,固定的开关矢量选择数量和固定的控制优先级都将导致这些目标的非最优总体控制,并且难以适应不同的工况。

为解决该问题,本文提出了一种新的DSMPC方法。在该方法中,通过控制目标的相对偏差确定多个控制目标的优先级,偏差最大的控制目标优先控制。因此,保证了低优先级目标的控制性能,实现了对多个目标的总体最优控制。此外,提出基于最小代价函数的控制阈值、基于目标的控制阈值来调整下一阶段的候选开关矢量的数量。因此,该方法能够满足不同操作条件下的不同控制要求。

本文的主要工作如下:对DFIG风力发电系统进行数学建模;指出现有MPC存在的问题,提出动态级联模型预测控制策略;通过硬件在环仿真,验证了所提控制方法的有效性。

1 系统模型

本节简要介绍了三电平背靠背双馈异步风力发电系统的数学模型,如图1所示。图中,电机侧、风机转子侧、风机定子侧和电网侧的变量分别用下标m, r, s和g表示; i, e, v, R, L 分别表示电流、电网电压、变流器电压、电阻和电感; V_{c1}, V_{c2} 和 ω_m 分别为直流母线两个电容的电压和发电机的转速; P, Q 分别为电网侧有功功率和无功功率。在本节中,我们将为3L-NPC背靠背变流器、双馈异步发电机以及电网侧变流器建模。

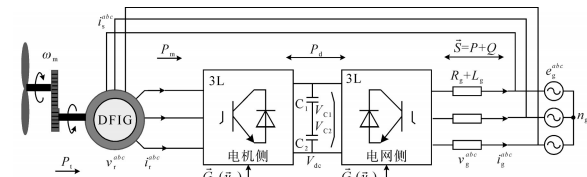


图1 基于3L-NPC变流器的DFIG风电系统的简化拓扑
Fig.1 Simplified topology of 3L-NPC converter based DFIG wind turbine system

1.1 3L-NPC背靠背变流器

三电平背靠背变流器由一对通过直流母线连接的三电平中性点钳位变流器组成。变流器的一侧与风机相连,另一侧与交流电网相连,这两个变流器共用一组均压电容器。变流器的输出电压表示为

$$\mathbf{v}_g^{abc} = \begin{bmatrix} v_g^a \\ v_g^b \\ v_g^c \end{bmatrix} = \frac{V_{C1} + V_{C2}}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \mathbf{u}_y + \frac{V_{C1} - V_{C2}}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \mathbf{u}_y \quad (1)$$

其中 $\mathbf{u}_y = [u_y^a \ u_y^b \ u_y^c]^T$
式中: \mathbf{u}_y 为变流器开关矢量; \mathbf{v}_g^{abc} 为变流器输出电网的三相电压。

为了使变流器正常工作,直流母线电压应保持恒定。然而,考虑到均压电容的影响,直流母线电压的动态方程为

$$\frac{dV_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{C} I_{dc}(t) = \frac{1}{C} [I_g(t) - I_r(t)] \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} I_g(t) &= \mathbf{i}_g^{abc}(t) \cdot \mathbf{w}_g^{abc}(t) \\ I_r(t) &= \mathbf{i}_r^{abc}(t) \cdot \mathbf{w}_r^{abc}(t) \end{aligned}$$

式中: C 为直流母线电容; I_{dc} 为流经直流母线电容的电流; $I_g(t)$, $I_r(t)$ 分别为电网侧和电机侧的有功电流成分; $\mathbf{w}_r^{abc}(t)$, $\mathbf{w}_g^{abc}(t)$ 分别为变流器机侧或网侧与电压同向的单位矢量; V_{dc} 为变流器直流母线上两个均压电容器的电压之和。

中点电压偏置 V_o 的动态方程为

$$\begin{aligned} \frac{dV_o}{dt} &= \frac{dV_{C1}}{dt} - \frac{dV_{C2}}{dt} \\ &= \frac{1}{C} (\mathbf{w}_r^{abc} \mathbf{i}_r^{abcT} - \mathbf{w}_g^{abc} \mathbf{i}_g^{abcT}) \end{aligned} \quad (3)$$

1.2 双馈异步发电机

本文的研究对象是一台 3 MW 双馈异步发电机,其在 $d-q$ 坐标系中的转子电流模型为

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_r^d(t) \\ i_r^q(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{R_r}{\sigma L_r} & \omega_s - \omega_r \\ -\omega_s - \omega_r & -\frac{R_r}{\sigma L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r^d(t) \\ i_r^q(t) \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r^d(t) \\ v_r^q(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{L_m U_s (\omega_s - \omega_r)}{\sigma L_r L_s \omega_s} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (5)$$

式中: ω_s 为双馈异步发电机的定子角频率; ω_r 为发电机转子角频率; U_s 为定子电压(即电网电压); L_m 为励磁电感; L_s 为定子电感; L_r 为转子电感。

1.3 电网侧变流器

电网侧变流器通过 RL 滤波器连接到交流电网。 $d-q$ 坐标系下的电网侧变流器模型可以表示为

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_g^d(t) \\ i_g^q(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -R_s & -\omega_g L_g \\ \omega_g L_g & -R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_g^d(t) \\ i_g^q(t) \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} \frac{1}{L_g} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_g^d(t) - v_g^d(t) \\ e_g^q(t) - v_g^q(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

2 所提 DSMPC 控制策略

2.1 传统模型预测控制和级联模型预测控制的问题

MPC 将多个控制目标杂糅在一个目标函数中,分别设置不同的权系数以确定目标的优先级,各控制目标的权系数采用离线试凑法来选择。然而,该系统的诸多控制目标相互耦合,且跨多时间尺度、多数量级,难以设置最优的权系数来权衡各控制目标的优先级,难以保证较好的控制效果,增加了重要控制目标的实现难度。

为此,有学者提出了 SMPC^[9],通过将不同的控制目标根据重要程度进行优先级排序,然后按照优先级的顺序筛选开关矢量的方式实现多目标控制。然而,SMPC 每一层筛选的开关数量是固定的,牺牲了优先级较低目标的控制性能。固定的优先级顺序也难以适应所有工况下的控制要求,所以,SMPC 难以达到全局最优的效果。

以两级控制目标为例进行分析。设 $S_i(a,b)$ 为第 i 个开关矢量的第 1 优先级和第 2 优先级的控制目标 a, b 的代价函数。假设第 1 优先级控制器筛选出 2 个第 1 优先级的代价函数 a 最小的开关矢量 $S_1(12,4)$ 和 $S_2(2,5)$,它们是 27 个开关矢量中最小的开关矢量,被送入第 2 级控制器。第 2 级控制器比较代价函数 b 的大小,选出 b 最小的为最优开关矢量输出。 $S_1(12,4)$ 被选为最优开关矢量,但是第 1 优先级代价函数 a 远大于 $S_2(2,5)$,导致 SMPC 最优先控制的控制目标控制效果反而更差,难以全局最优。

2.2 所提动态级联模型预测控制策略

本文提出了一种基于动态优先级和控制阈值的动态级联模型预测控制方法。该方法使用级联结构代价函数,根据优先级对代价函数进行排序。每个阶段的代价函数中只有一个控制目

标,根据控制目标的相对偏差对代价函数进行排序。相对偏差较大的控制目标被认为具有优先权,因此在级联控制中需要首先对其进行控制。控制目标的参考状态和当前状态之间的相对偏差由每个阶段中所有开关矢量的最小代价函数和该阶段中控制目标的基准值确定。该方法可以改变级联控制顺序以适应不同的工作条件。

为了确定级联结构的代价函数的级联顺序,按照偏离参考值较大的控制目标优先控制的原则,对控制目标进行排序。比较控制目标的相对偏差 R_i 以对级联控制目标进行排序。控制目标的相对偏差 R_i 计算如下:

$$R_i = \frac{\sum_{j=1}^{27} J_x^j}{27 \cdot x_i^*} \quad (7)$$

式中: J_x^j 为控制目标 x 第 j 个候选开关矢量的代价函数; x_i^* 为控制目标的参考值。

电流偏差参考值为PI控制器输出参考值,中性点电压偏差参考值是直流母线电压的10%,开关频率偏差参考值设为1 200 Hz。根据对相对偏差较大的控制目标进行优先控制的原则,对控制目标进行排序。

通过可变优先级,所提方法可根据不同工况下控制目标的相对偏差不同,通过相对偏差的大小对比调整级联控制的顺序,自适应地调整控制目标优先级,以保证满足各种工况下对控制目标的性能需求。

与在每个阶段具有固定数量的开关矢量的SMPC不同,动态级联MPC每一级选择的开关矢量数量是可变的。在动态级联MPC的每个阶段的控制器中设置控制阈值 H ,通过控制阈值来控制该控制阶段选择的开关矢量数量。控制阈值 H 的计算公式如下:

$$H_x = P_x \cdot J_{\min}^x \quad (8)$$

式中: H_x 为每个级联控制器的控制阈值,在此阶段只能选择代价函数小于 H_x 的开关矢量; P_x 为系数,设置为1.05; J_{\min}^x 为该控制阶段所有候选开关矢量的最小代价函数。

阈值 H 与每一级的最小代价函数成比例。只有代价函数小于 H 的开关矢量才能被选择并送到下一控制阶段。在最后阶段,将选择最佳开关矢量。该控制方法确保在该阶段所选开关矢量的代价函数小于控制阈值 H ,从而改善所选开关矢量的稳态性能。此外,当该级的目标控制执

行良好时,在相同的控制阈值 H 下,选择更多的开关矢量以进入下一级的控制,使得下一级控制器具有更多的可选开关矢量。在保证本阶段控制性能的前提下,可以提高其他控制目标的控制性能。

2.3 风机变流器机侧的控制策略

对于三电平DFIG风力发电系统,所提DSMPC策略电机侧控制方案如图2所示。

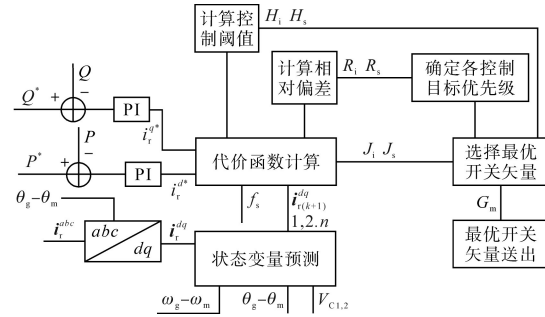


图2 所提方法的机侧控制方案

Fig.2 Machine side control scheme of the proposed method

传感器采样电机侧转子电流 i_r^{abc} 、电机转子磁链角 θ_r 、电机定子磁链角 θ_s 以及直流母线电压 V_{dc} ,通过锁相环得到电网相位角 θ_g 。进行 park 变换的相位角为

$$\theta_p = \theta_s - \theta_r \quad (9)$$

将 i_r^{abc} 经过 park 变换,转化成定子电流 d, q 轴分量 i_r^d, i_r^q 。将风机有功、无功功率 P, Q 和参考 P^*, Q^* 送入PI控制器,得到 i_r^d, i_r^q 的参考 i_r^{d*} 和 i_r^{q*} 。电机侧模型预测控制的控制目标如下:

1) 转子电流。转子电流控制是 $d-q$ 坐标系下,下一时刻的转子电流预测值 $i_r^d(k+1), i_r^q(k+1)$ 和电流参考值 i_r^{d*} 和 i_r^{q*} 差的平方。这两个控制目标合为一项,优先级最高,其代价函数为

$$J_{mi} = [i_r^d(k+1) - i_r^{d*}]^2 + [i_r^q(k+1) - i_r^{q*}]^2 \quad (10)$$

2) 电机侧变流器的开关频率。在大功率风电系统中,低开关频率可以降低功率损耗,从而降低设备的散热要求。因此可以通过在代价函数中添加对开关动作的惩罚项,在保证系统性能的前提下尽可能降低开关频率,为此优先级控制目标,则代价函数为

$$J_{ms} = |S_a^{k+1} - S_a^k| + |S_b^{k+1} - S_b^k| + |S_c^{k+1} - S_c^k| \quad (11)$$

式中: S_a^k, S_b^k, S_c^k 为电机侧变流器每一相桥臂的当前开关状态; $S_a^{k+1}, S_b^{k+1}, S_c^{k+1}$ 为电机侧变流器每一相桥臂经过预测之后下一时刻的开关状态。

2.4 风机变流器网侧的控制策略

所提动态级联模型预测控制策略网侧控制方案如图3所示。

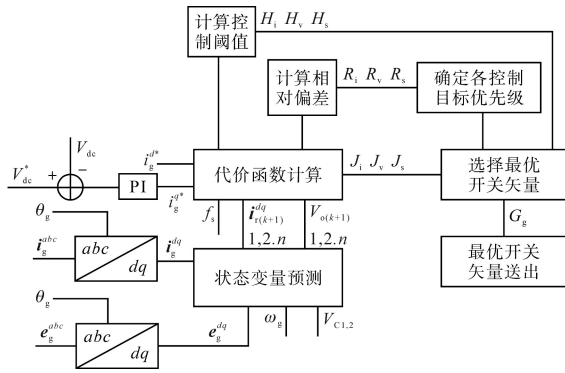


图3 所提方法的网侧控制方案

Fig.3 Grid side control scheme of the proposed method

采集电网侧电压和电流 v_g^{abc}, i_g^{abc} 、背靠背变流器直流母线电压 V_{dc} 、两个直流母线电容的电压值 V_{C1} 和 V_{C2} 。将电网侧电流和电压经过 park 变换, 转化到 $d-q$ 轴坐标系, 得到 v_g^d, v_g^q 和 i_g^d, i_g^q 。将直流母线电压 V_{dc} 和参考 V_{dc}^* 进行比较送入 PI 控制器, 得到 d 轴电流参考 i_g^{d*}, q 轴电流参考 i_g^{q*} 设为 0。电网侧模型预测控制的控制目标如下:

1) 电网电流。电网控制是 $d-q$ 坐标系下, 下一时刻的电网电流预测值 i_g^d, i_g^q 和电流参考值 i_g^{d*}, i_g^{q*} 差的平方。通过控制 i_g^d , 可以实现对直流母线电压的控制。 i_g^q 设定为 0, 保证电网侧功率因数为 1。这两个控制目标合为一项, 优先级最高, 其代价函数为

$$J_{gi} = [i_g^d(k+1) - i_g^{d*}]^2 + [i_g^q(k+1) - i_g^{q*}]^2 \quad (12)$$

2) 电网侧变流器的开关频率。在大功率风电系统中, 低开关频率可以降低功率损耗, 从而降低设备的散热要求。因此可以通过在代价函数中添加对开关动作的惩罚项, 在保证系统性能的前提下尽可能降低开关频率, 为此优先级控制目标, 则第二阶段控制目标的代价函数为

$$J_{gs} = |S_{ga}^{k+1} - S_{ga}^k| + |S_{gb}^{k+1} - S_{gb}^k| + |S_{gc}^{k+1} - S_{gc}^k| \quad (13)$$

式中: $S_{ga}^k, S_{gb}^k, S_{gc}^k$ 为电网侧变流器每一相桥臂的当前开关状态; $S_{ga}^{k+1}, S_{gb}^{k+1}, S_{gc}^{k+1}$ 为电网侧变流器每相桥臂经过预测之后下一时刻的开关状态。

3) 电容中性点电压差。中性点电压差是背靠背变流器的两个直流母线电容的电压差。针对中性点钳位式三电平变流器, 正常工作情况下, 上、下两个均压电容 C_1, C_2 的电压应相等, 上、下桥臂的开关管所承受的最大电压为直流母线电压 V_{dc} 的 1/2。然而在某些工况下, 中性点电压会发生偏离, 从而导致输出电压波形畸变, 偏离严重时会导致开关管击穿, 因此需要通过控制算法

来保证电容电压平衡, 其代价函数为

$$J_{gv} = (V_{C1} - V_{C2})^2 \quad (14)$$

3 实验验证

3.1 实验平台及参数

为对比 MPC, SMPC 和 DSMPC 三种方法的控制性能, 进行硬件在环实验验证。硬件在环实验在两个独立的 RT-Box 硬件在环测试平台上完成, 它们配备了丰富的数字模拟接口和集成运算模块。其中一个 RT-Box 用于模拟风电系统主电路, 另一个作为实时控制器运行所提控制方法。具体实验平台展示如图 4 所示 (实验测试中仅用到图示平台中的上位机和 RT-Box)。其中, 主电路系统与控制器系统之间通过模拟通道传输数据。硬件在环实验中考虑到了数据的采样、传输和计算时间、通信延时等方面, 相较于离线仿真更接近于真实物理系统。在难以进行实物实验时, 硬件在环可以提供更接近实物试验的结果。使用中车永济电机有限公司 YJ328C1 型双馈风机进行硬件在环, DFIG 风电系统的参数如表 1 所示。

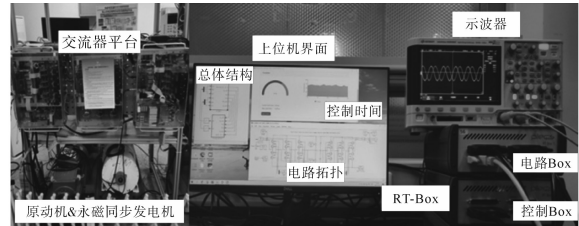


图4 硬件在环测试平台

Fig.4 Hardware-in-the-loop testing platform

表1 实验测试参数

Tab.1 Experimental parameters

参数	符号	数值	参数	符号	数值
采样周期	T_s	20 kHz	定子电阻	R_s	$0.88e-2 \Omega$
风机功率	P_m	3.45 MW	直流母线电压	V_{dc}	1 800 V
极对数	N_p	2	直流母线电容	$C_1(C_2)$	8.40 mF
额定转速	ω_m^*	1 470 r/min	电网电压	e_g	1 140 V
转子漏感	L_{lr}	0.18 mH	电网频率	ω_g	100π rad/s
转子电阻	R_s	$0.98e-2 \Omega$	网侧电感	L_g	1.55 mH
励磁电感	L_m	5.10 mH	网侧电阻	R_g	$1.56e-3 \Omega$
定子漏感	L_{ls}	0.11 mH			

在 Plexim Plecs 软件中, 控制周期为 $5e-5$ s, 开关频率大致稳定在 1 300 Hz。风机初始转速为 1 176 r/min。实验流程如下:

- 1) 0.05 s—0.15 s, 给直流母线电容充电。
- 2) 0.15 s—0.4 s, 软启动变流器。
- 3) 0.4 s—1.05 s, 给 DFIG 加励磁。
- 4) 1.05 s—1.5 s, DFIG 并网, 功率输出为 0。

5)1.5 s—1.7 s,有功功率由0增加至1.5 MW,无功功率为0 var,维持0.7 s。

6)2.4 s—2.6 s,加有功,有功功率由1.5 MW增加至3 MW,无功功率0 var,维持0.7 s。

7)3.3 s—3.8 s,转子转速增加,由次同步1 176 r/min增加至超同步1 764 r/min。

8)3.8 s—4 s,有功功率由3 MW降至2 MW,无功功率由0 var增加至0.5 Mvar,机组超同步运行,维持0.5 s。

三种方法使用的功率和直流母线电压控制策略是相同的。PI控制器的参数通过经验获得,无功功率参考设为0以实现单位功率因数。但MPC, SMPC和DSMPC的内部预测控制原理是不同的。对于MPC,电机侧电流控制和开关频率控制的权系数分别为1和5e-7;电网侧电流控制、中性点电压控制和开关频率控制的权系数分别为1,5e-5和5e-9。对于SMPC,电机侧电流和开关频率控制器选择的开关矢量的数量分别为2和1;电网侧电流、中性点电压差和开关频率控制器选择的开关矢量的数量分别为3,2和1。对于所提DSMPC,在电机侧和电网侧选择与SMPC相同的控制目标。

3.2 实验结果分析

图5显示了所提控制方法的总体控制效果。从上到下分别是风机转速、转子电流、定子电流、直流母线电压、电网电流和输出功率。可见所提控制方法适用于DFIG风电系统的各种工况。

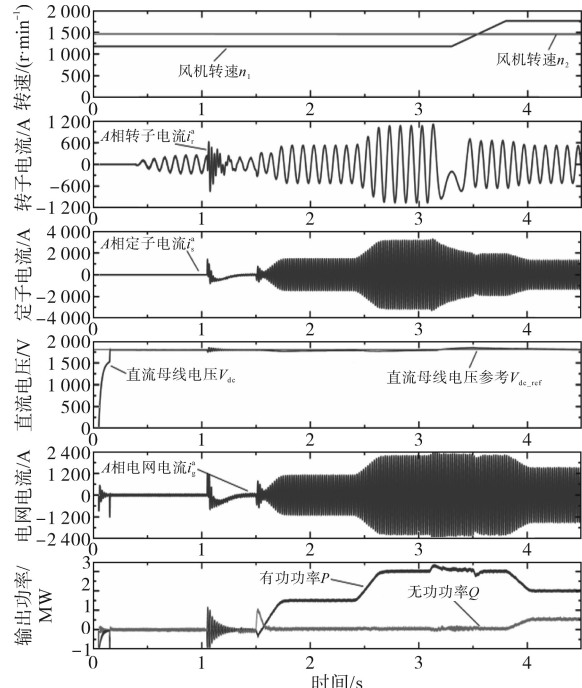


图5 所提方法的总体控制效果

Fig.5 Overall control performance of the proposed method

图6和图7分别显示了在2.3 s—2.8 s时间内,大功率背靠背DFIG风力发电系统使用MPC和SMPC方法的暂态和稳态控制性能。从上到下分别是电磁转矩、直流母线电压、电网电流、输出功率和中性点电压差。

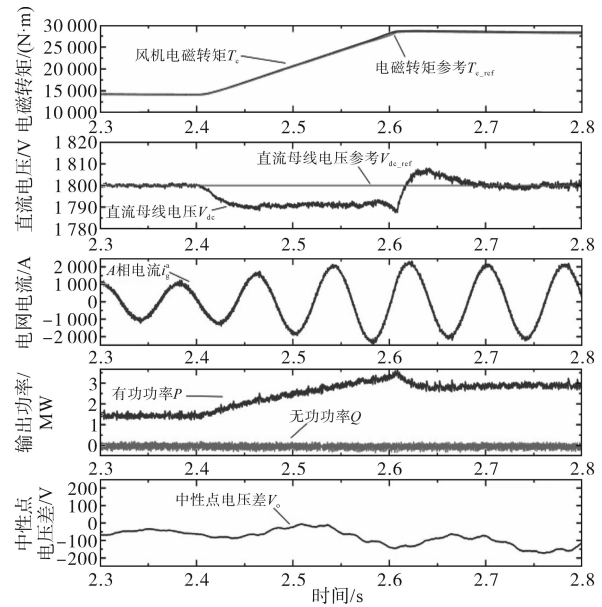


图6 模型预测控制的控制效果

Fig.6 Control performance of MPC

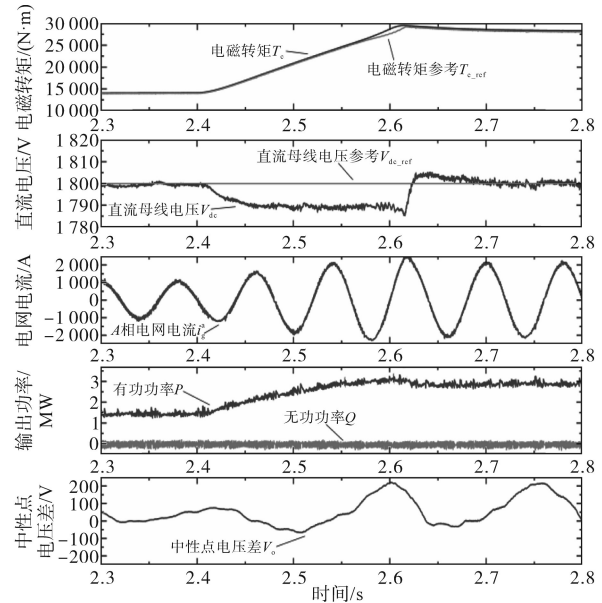


图7 级联模型预测控制的控制效果

Fig.7 Control performance of SMPC

图8显示了在2.3 s—2.8 s时间内,大功率背靠背DFIG风力发电系统使用DSMPC方法的暂态和稳态控制性能。从上到下波形分别是电磁转矩、直流母线电压、电网电流、输出功率、中性点电压差、机侧和网侧控制优先级、机侧进入第二优先级控制器的开关矢量个数、网侧进入第二和第三优先级的开关矢量个数。网侧控制优先级

设为 $p_g, p_g=1$ 则优先级为电流偏差(简称 i)、开关频率(简称 f)、中性点电压差(简称 v), $p_g=2$ 则优先级为 ivf , $p_g=3$ 则优先级为 vif , $p_g=4$ 则优先级为 vfi , $p_g=5$ 则优先级为 fi , $p_g=6$ 则优先级为 fvi 。机侧控制优先级设为 $p_m, p_m=1$ 则优先级为 if , $p_m=0$ 则优先级为 fi 。

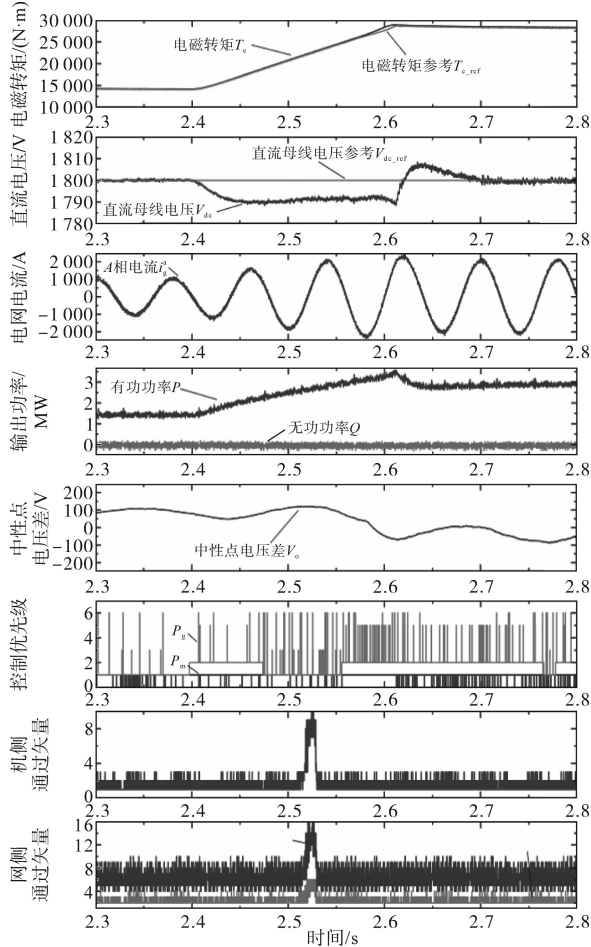


图8 所提动态级联模型预测控制的控制效果

Fig.8 Control performance of the proposed DSMPC

从图6~图8可以看出,在开关频率相似的前提下,三种方法都有较强的动态性能,都可以紧跟功率参考,并且保证直流母线电压平衡。MPC在使用合适权系数的前提下,具有较好的稳态性能,但是由于难以区分优先级,对于中性点电压差和开关频率等次要控制目标的控制效果不佳,如表2所示。SMPC由于使用了级联结构的

表2 稳态控制效果对比

Tab.2 Steady state control performance comparison

	机侧开关频率/Hz	网侧开关频率/Hz	最大中性点电压差/V	电网电流THD/%
MPC	1 316	1 305	169	4.10
SMPC	1 310	1 373	216	4.30
所提DSMPC	1 209	1 213	124	3.70

模型预测控制代价函数,难以全局最优控制,电磁转矩跟参考的速度变慢,有功功率的跟踪存在一定的波动。在稳态的控制质量方面,SMPC比起 MPC 和 DSMPC 具有更大的电网电流纹波,对于开关频率和中性点电压差这两个次要控制目标的控制效果也并不出色。所提 DSMPC 方法由于使用了控制阈值,只有代价函数小于控制阈值的开关矢量才能被选出,提高了系统的动态性能和稳态性能。所以电磁转矩能够紧跟参考转矩,转矩响应效果较好,机侧动态性能好于 SMPC,接近 MPC。DSMPC 的网侧电流纹波和中性点电压差比 SMPC 和 MPC 小,稳态性能优于 SMPC 和 MPC,同时,具有更低的开关频率以减少能量损失。

所提 DSMPC 可以根据不同的操作条件调整其级联控制优先级。在电流偏移过大的状态下,控制目标是优先让电流紧跟参考,保证系统的正常运行和动态响应,因此优先控制电流偏差。在稳态工况下,电流偏差已经降低到可接受的范围内时,在电能质量能够保证的前提下,最优先控制目标被转移到次级目标(例如开关频率和中性点电压差),以提高其他控制目标的控制性能。与 MPC 和 SMPC 相比,所提出的 DSMPC 具有更好的控制性能。此外,所提 DSMPC 可以清楚地区分优先级,并且不需要调整权系数,调节简单,适应更多工况。

4 结论

尽管 MPC 可以实现多目标非线性控制,但仍然难以调整权系数。最新的 SMPC 通过级联控制架构,避免单一的耦合代价函数,简化了设计过程,但每个控制阶段中选择的开关矢量的数量是固定的,因此产生的控制是次优的。

本文提出的 DSMPC 基于动态优先级,通过避免权系数简化了设计过程,并具有明确的优先级,克服了传统模型预测控制的缺点。同时,该方法可以根据控制目标相对偏差调整优先级,提高低优先级目标的控制性能,适应多种工况,在保证稳态性能的情况下增强其他性能,提高多工况适应性。通过控制阈值来控制进入下一阶段控制的开关矢量数量,保证系统的稳态性能。

参考文献

[1] 袁遇龙. 无刷双馈电机模型预测直接功率控制研究[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2022.

YUAN Yulong. Research on model predictive direct power control of brushless doubly-fed generator[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2022.

[2] 杨旭. 电网电压不平衡下双馈风力发电机的模型预测控制[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.

YANG Xu. Model predictive control of DFIG under unbalanced grid voltage conditions[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.

[3] ZHANG Zhenbin, CUI Zhufeng, ZHANG Zhenkun, et al. Advanced control strategies for back-to-back power converter PMSG wind turbine systems[C]//2019 IEEE International Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE), Quanzhou China: IEEE, 2019: 1-6.

[4] ZHANG Zhenbin. On control of grid-tied back-to-back power converters and PMSG wind turbine systems[D]. Munich: Technical University of Munich, 2016.

[5] 张瑞林, 卢子广, 甘霖, 等. 感应电机无权重系数模型预测转矩控制[J]. 电气传动, 2020, 50(10): 102-106.

ZHANG Ruilin, LU Ziguang, GAN Lin, et al. Model predictive torque control of induction motor without weighting factor[J]. Electric Drive, 2020, 50(10): 102-106.

[6] 付宗见, 马国峰, 姚存治. 基于遗传算法的T型三电平并网逆变器预测控制研究[J]. 电子器件, 2020, 43(5): 1042-1045, 1077.

FU Zongjian, MA Guofeng, YAO Cunzhi. Predictive control of T-type three-level grid-connected inverter based on genetic algorithms[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2020, 43(5): 1042-1045, 1077.

[7] 马红如. 双三相永磁同步电机有限集模型预测转矩控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.

MA Hongru. Research on finite control set model predictive torque control for dual three-phase permanent magnet synchronous motor[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.

[8] NORAMBUENA Margarita, RODRIGUEZ Jose, ZHANG Zhenbin, et al. A very simple strategy for high-quality performance of AC machines using model predictive control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 794-800.

[9] 顾明, 邢勐, 葛贤军. 感应电机无权重分配有限集模型预测控制设计[J]. 电气传动, 2022, 52(7): 3-8.

GU Ming, XING Meng, GE Xianjun. Design of the finite set model predictive control without weight distribution for induction motor[J]. Electric Drive, 2022, 52(7): 3-8.

[10] CUI Zhufeng, ZHANG Zhenbin, DRAGICEVIC Tomislav, et al. Dynamic sequential model predictive control of three-level NPC back-to-back power converter PMSG wind turbine systems[C]//IECON 2020 the 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore: IEEE, 2020: 3206-3211.

收稿日期: 2022-12-11
修改稿日期: 2023-01-16

~~~~~

(上接第79页)

Power Electronics and Applications: 1-10.

[4] 谢仕宏, 孟彦京, 高钰淇, 等. 小电容变频器及感应电机回馈能量分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(4): 734-744.

XIE Shihong, MENG Yanjing, GAO Yuqi, et al. Analysis about small capacitor frequency converter and feedback energy of induction motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(4): 734-744.

[5] VON Jouanne A, ENJETI P, GRAY W. Application issues for PWM adjustable speed AC motor drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 2(5): 10-18.

[6] 陈涛, 刘海涛, 武彬, 等. 变频器输出电压  $du/dt$  对电机的影响及其滤波器的设计[J]. 大功率变流技术, 2012(1): 34-38.

CHEN Tao, LIU Haitao, WU Bin, et al. The influence of inverter's output voltage  $du/dt$  on the motor and its filter design[J]. High Power Converter Technology, 2012(1): 34-38.

[7] 冯志华, 杨永强, 陈慧, 等. 浅谈变频器与长电缆相连时电动机的失效现象[J]. 电工技术杂志, 2002(11): 33-35.

FENG Zhihua, YANG Yongqiang, CHEN Hui, et al. Eliminating motor failures due to drives when connected with long leads[J]. Electric Engineering, 2002(11): 33-35.

[8] 史晗, 蒋德智, 荣相, 等. 矿用变频器LRC滤波器寄生参数影响研究[J]. 工矿自动化, 2020, 46(8): 44-50.

SHI Han, JIANG Dezhi, RONG Xiang, et al. Research on influence of parasitic parameters of LRC filter for mine-used inverter[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(8): 44-50.

[9] 张凯歌, 迟颂, 李尔平. 基于遗传算法的LCL输出滤波器设计与优化[J]. 计算机仿真, 2020, 37(1): 211-216.

ZHANG Kaige, CHI Song, LI Erping. Design and optimization of LCL output filter based on genetic algorithm[J]. Computer Simulation, 2020, 37(1): 211-216.

[10] 钟彦禄. 变频器输出滤波器的影响与使用[J]. 清洗世界, 2020, 36(9): 88-89.

ZHONG Yanlu. The influence of variable frequency with output reactor[J]. Cleaning World, 2020, 36(9): 88-89.

[11] 赵春丽, 王英华, 梁安江, 等. 驱动棒电源整流器同步采样回路有源带通滤波器设计[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(2): 60-66.

ZHAO Chunli, WANG Yinghua, LIANG Anjiang, et al. Design of active band pass filter for synchronous sampling loop of drive rod power rectifier[J]. Electric Machines and Control Application, 2022, 49(2): 60-66.

[12] 贺文军, 何山, 陈小丹, 等. 基于Rd阻尼型LCLLC滤波器的永磁同步发电机绕组谐波抑制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(1): 84-109.

HE Wenjun, HE Shan, CHEN Xiaodan, et al. Harmonic suppression of permanent magnet generator winding based on Rd damped LCLLC filter[J]. Electric Machines and Control Application, 2020, 47(1): 84-109.

收稿日期: 2022-10-28  
修改稿日期: 2023-05-17