

# 液压型风力发电机组调速系统的DMC预测控制方法研究

刘微容<sup>1</sup>, 魏域林<sup>1</sup>, 刘 婕<sup>2</sup>, 刘朝荣<sup>3</sup>, 任成文<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学电气与控制工程国家级实验教学示范中心, 兰州 730050;  
3. 甘肃省工业过程重点实验室, 兰州 730050)

**摘要:** 以液压型风力发电机组调速系统为研究对象, 针对变量马达的恒转速控制问题, 结合动态矩阵控制(DMC)原理, 提出一种基于DMC的液压型风力发电机组调速系统预测控制方法, 并通过Simulink-AMESim联合仿真技术分析预测步长与控制步长对转速控制的影响规律。研究表明, 与经典PID控制方法相比, 基于DMC的预测控制方法提升了液压型风力发电机组调速系统的控制性能, 可为后续工程实际应用提供理论指导。

**关键词:** 预测控制; 动态矩阵控制算法; 液压型风力发电机组; 调速系统

**中图分类号:** TK83

**文献标志码:** A

## 0 引言

近年来, 液压型风力发电机组作为新一代风力发电机组, 具有负载转矩低、电能质量高、低电压穿越能力强、机舱重量轻等优点<sup>[1]</sup>, 引起全球风电行业的广泛关注, 促使国内外的研究学者相继展开研究<sup>[2-5]</sup>。

液压型风力发电机组中变量马达的恒转速控制是液压型风力发电机组设计研发的重点与难点问题。基于经典比例-积分-微分(proportion-integral-differential, PID)控制方法<sup>[6]</sup>在工况稳定的情况下实现变量马达恒转速输出控制。但是当风力机工况随风速不断变化时, 控制效果显著下降。为提升液压型风力发电机组中变量马达转速的控制性能, 研究人员将各类先进的控制方法引入调速系统。如Hoang等<sup>[7]</sup>将原有的流量耦合原理转换为压力耦合原理, 通过该原理采用自适应模糊滑模控制与PID控制相结合的方式, 调节变量马达工作于恒转速, 提高调速系统的抗干扰能力; 高文增等<sup>[8]</sup>通过选取Lyapunov函数, 提出一种基于扩张状态观测器的并网转速系统自适应反演控制, 以改善系统的稳态跟踪精度和快速性能; 王岩等<sup>[9]</sup>提出一种基于自适应控制算法的变量马达恒转速控制方法, 以提高系统的动态性能。上述先进控制方法能有效提高变量马达恒转速控制效果, 但其优越的性能依赖于系统精确的数学模型。然而, 目前液压型风力发电机组多处于原型机研发与测试阶段, 系统整体或局部的数学模型难以精确建立。此外, 先进的变量马达恒

转速控制方法一般需要进行较为复杂的计算, 难以在当前主流的可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)或微处理器中有效实现, 因而制约了其在实际工程中的广泛应用。

动态矩阵控制算法(dynamic matrix control, DMC)是一种对模型精度要求低、计算复杂度不高的预测控制方法, 该方法汲取现代控制理论中滚动优化的思想, 并采用反馈校正克服控制过程中的不确定性以及非线性因素<sup>[10]</sup>, 具有算法简单、计算量较少、鲁棒性强等优点<sup>[11]</sup>。因此, 针对实际液压型风力发电机组现场工况多变、系统复杂、变量马达精确数学模型难以建立等因素而导致PID控制方法性能不佳的问题, 本文提出一种基于DMC的液压型风力发电机组调速系统预测控制方法, 以提高调速系统的控制效果, 并为后续工程实际现场应用提供理论指导。

## 1 液压型风力发电机组

### 1.1 机组原理与实现

如图1所示, 液压型风力发电机组由风力机、调速系统和发电系统3部分组成。其工作原理为: 风力机(W)吸收风能并将其转换为动能推动定量泵(P1), 定量泵(P1)将动能转换为液压能经管道传递至变量马达(MD), 变量马达(MD)将液压能转换为机械能驱动发电机(G)工作于同步转速, 从而形成封闭式容积调速系统。

收稿日期: 2018-10-18

基金项目: 甘肃省科技重大专项(17ZD2GA010)

通信作者: 刘微容(1976—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事工业过程先进控制理论与应用、图像处理与模式识别等方面的研究。  
liu\_weirong@163.com

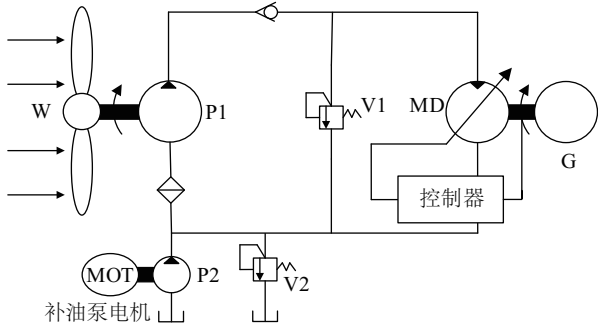


图1 新型液压型风力发电机组原理  
Fig. 1 New hydraulic turbine system schematic

与传统风力机型相比,液压型风力发电机组具有以下优点:采用双叶片机型,风力机旋转速度高,在输出功率相同时,具有更低的负载转矩;省去变频逆变设备,不产生谐波分量,既降低对电网的冲击,又提高电能质量;在风力发电机组中可直接采用励磁同步发电机,提高机组的低电压穿越能力;移除箱式变压器、齿轮箱等设备,减轻机舱的重量。

依据图 1,本设计研发的 600 kW 液压型风力发电试验机组如图 2a 所示。该试验机组由地面部分、机舱部分和塔筒部分构成,其中机舱部分仅有定量泵,其余设备包括变量马达(如图 2b 所示)、溢流阀(V1 和 V2)、补油泵(P2)和同步发电机位于地面部分。



a. 试验机组                      b. 变量马达  
图2 600 kW 液压型风力发电试验机组  
Fig. 2 600 kW hydraulic turbine system

### 1.2 机组仿真模型建立

本文利用 AMESim R15 软件无需繁琐数学建模即可表达对象特性的优点,从液压元件库中选取对应的液压元件,依据图 1 和图 2 在 AMESim R15 软件工作区进行连接。进而,分别为工作区中的液压元件分配子模型和设置具体参数。最终建立的液压型风力发电机组仿真模型(如图 3 所示)准确描述了图 2 中 600 kW 液压型风力发电试验机组的对象特性。

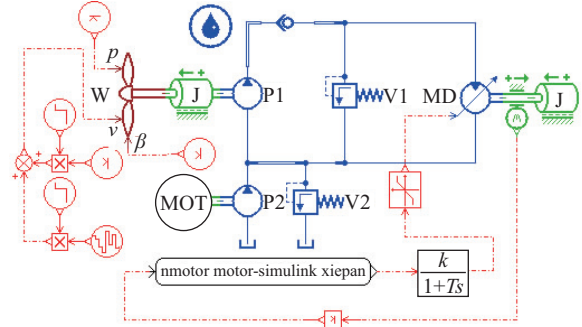


图3 液压型风电试验机组的仿真模型  
Fig. 3 Simulation model of hydraulic turbine system

## 2 基于 DMC 的液压型风力发电机组调速系统预测控制方法

基于 DMC 的液压型风力发电机组调速系统预测控制方法由变量马达转速的预测模型、滚动优化和反馈校正 3 部分组成,其控制结构框图如图 4 所示。

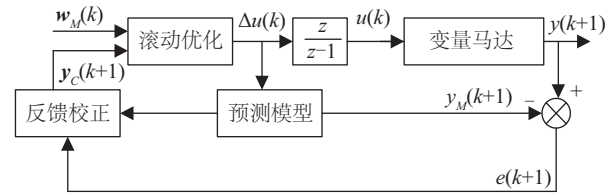


图4 变量马达转速的 DMC 算法结构框图

Fig. 4 DMC algorithm structure on variable motor speed

### 2.1 预测模型

针对液压型风力发电机组调速系统,首先测定变量马达转速阶跃响应的序列  $a_i = a(iT)$ , 其中  $T$  为变量马达转速的采样周期,取向量  $a = [a_1, a_2, \dots, a_N]^T$  为模型向量,  $N$  为变量马达转速阶跃响应的模型长度。根据比例和叠加原理<sup>[12]</sup>,可求得变量马达的预测模型为:

$$y_M(k) = y_0(k) + A\Delta u(k) \quad (1)$$

式中,  $y_M(k)$  ——在控制增量  $\Delta u(k)$  的作用下,变量马达转速的预测输出值,  $y_M(k) = [y(k+1), y(k+2), \dots, y(k+M)]^T$ ; 其中  $M$  为预测步长;  $y_0(k)$  ——当控制增量  $\Delta u(k) = 0$  时,变量马达转速的初始预测输出值,  $y_0(k) = [y_0(k+1), y_0(k+2), \dots, y_0(k+M)]^T$ ;  $\Delta u(k)$  ——变量 MD 转速的控制增量,  $\Delta u(k) = [u(k+1), u(k+2), \dots, u(k+P-1)]^T$ ;  $P$  ——控制步长;  $A$  ——动态矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_p & \dots & a_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_M & \dots & a_{M-p+1} \end{bmatrix}$$

### 2.2 滚动优化

为保证变量马达转速的预测输出值  $y_M(k)$  跟踪设定值,同

时抑制控制增量  $\Delta u(k)$  变化过于剧烈,在优化性能指标中应分别施加跟踪误差约束和控制约束,因此设计控制性能指标  $J(k)$  为:

$$\min J(k) = \|\mathbf{w}_m(k) - \mathbf{y}_m(k)\|_Q^2 + \|\Delta \mathbf{u}\|_R^2 \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{w}_m(k)$  —— 变量马达转速的设定值,  $\mathbf{w}_m(k) = [w(k+1), w(k+2), \dots, w(k+M)]^T$ ;  $Q$  —— 误差约束权矩阵,  $Q = \text{diag}(q_1, q_2, \dots, q_M)$ ;  $R$  —— 控制约束权矩阵,  $R = \text{diag}(r_1, r_2, \dots, r_p)$ 。

因式(2)是典型的二次型优化问题<sup>[13]</sup>,可将性能指标  $J(k)$  关于  $\Delta u(k)$  求导,并令其导数为0,可得到最优控制增量  $\Delta u(k)$  为:

$$\Delta \mathbf{u}_m(k) = (\mathbf{A}^T \mathbf{Q} \mathbf{A} + \mathbf{R})^{-1} (\mathbf{Q}(\mathbf{w}_m(k) - \mathbf{y}_0(k))) \quad (3)$$

### 2.3 反馈校正

由于实际风电现场中存在模型失配、环境干扰等不确定性因素,将导致变量马达转速的实际值与预测值出现偏差,若不及时对偏差进行校正,会导致变量马达转速的控制效果变差。因此需要构建反馈调节机制校正变量马达的转速预测输出值  $\mathbf{y}_m(k)$ ,消除实际值与预测值出现的偏差。校正后的预测输出值  $\mathbf{y}_c(k)$  为:

$$\mathbf{y}_c(k) = \mathbf{y}_m(k) + \mathbf{h}e(k-1) \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{y}_c(k)$  —— 变量马达转速校正后的预测输出值,  $\mathbf{y}_c(k) = [y(k+1), y(k+2), \dots, y(k+M)]^T$ ;  $\mathbf{h}$  —— 预测模型的校正向量,  $\mathbf{h} = [h_1, h_2, \dots, h_M]^T$ ;  $e(k-1)$  —— 变量马达转速预测误差,  $e(k-1) = y(k) - y_m(k)$ 。

初始预测值为:

$$\mathbf{y}_0(k) = \mathbf{S} \mathbf{y}_c(k) \quad (5)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \\ \vdots & & 0 & 1 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中,  $\mathbf{S}$  —— 移位矩阵。

## 3 仿真结果

### 3.1 实验设置

为验证基于 DMC 的液压型风力发电机组调速系统预测控制方法的控制效果,通过 Matlab 2014a 软件的 Simulink 工具设计基于 DMC 的变量马达转速预测控制算法,并通过仿真接口与图 3 所示液压型风力发电机组仿真模型共同构成 Simulink-AMESim 联合仿真模型。该仿真实验平台为配置 i5-3230(2.6 GHz)CPU、4 GB 内存、Windows 7 操作系统的计算机。

### 3.2 仿真参数设置

图 3 中所有参数均采用 600 kW 液压型风力发电试验机组现场实际设备数据,其中主要液压元件定量泵 P1 和变量马

达型号分别是 CB1120-880 和 A6VM500,详细参数可分别参见 HAGGLUNDS 产品样本手册<sup>[14]</sup>和 Rexroth 产品样本手册<sup>[15]</sup>。液压型风力发电试验机组仿真模型中主要液压元件仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 液压元件仿真参数设置

设备代号	参数	数值
P1	定量泵排量/mL·r <sup>-1</sup>	55300
	定量泵转速/r·min <sup>-1</sup>	25
P2	补油泵排量/mL·r <sup>-1</sup>	150
	补油泵转速/r·min <sup>-1</sup>	1500
MD	变量马达排量/mL·r <sup>-1</sup>	500
	变量马达转速/r·min <sup>-1</sup>	1500
V1	高压溢流压力/MPa	25
V2	补油压力/MPa	1
MOT	补油泵电机转速/r·min <sup>-1</sup>	1500
J	发电机负载/kg·m <sup>2</sup>	40

### 3.3 仿真实验结果分析

#### 3.3.1 预测步长(M)

预测步长  $M$  对系统的稳定性和快速性具有重要影响。当  $M$  变小时,系统的快速性提高,但系统的稳定性降低;  $M$  变大时,系统的稳定性提高,但响应时间变长,导致系统的实时性变差<sup>[16]</sup>。为寻找最佳  $M$ ,本实验分别设置  $M=140, 160, 180, 220$ 。不同预测步长下变量马达转速响应曲线如图 5 所示。

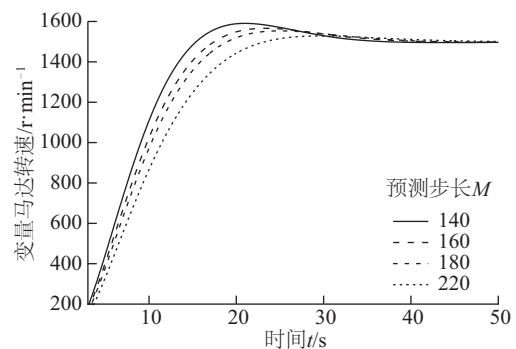


图 5 不同预测步长下变量马达转速响应

Fig. 5 Motor speed response with different predicted steps

由图 5 可知,当  $M$  从 140 到 220 逐渐增加时,变量马达转速输出曲线的超调量逐步降低,系统的稳定性变好,但系统的响应时间变长。综合考虑系统性能指标,选取  $M=180$  时作为最佳预测步长。

#### 3.3.2 控制步长(P)

当  $P$  变小时,系统的输出值跟踪期望值的准确性提高,响应时间变长,系统的鲁棒性和稳定性越好;当  $P$  变大时,系

统的动态响应越快,灵敏性增强,但其稳定性变差。因此, $P$ 的值决定系统的稳定性和快速性<sup>[17]</sup>。为寻找最佳 $P$ ,本实验分别设置 $P=1,2,3$ ,设置最优预测步长 $M=180$ 。不同控制步长 $P$ 下变量马达转速响应曲线如图6所示。

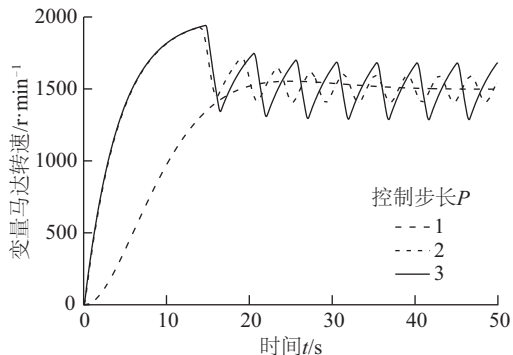


图6 不同控制步长下变量马达转速响应

Fig. 6 Motor speed response with different control steps

由图6可知,随着 $P$ 逐步增加,变量马达转速输出曲线的振荡愈加剧烈,调速系统的准确性和稳定性显著下降,变量马达工作于非恒转速状态。因此,最终选择最佳控制步长 $P=1$ 。

### 3.3.3 控制性能对比分析

基于DMC的液压型风力发电机组调速系统预测控制方法的参数取上述实验参数。而经典PID控制方法采用ZN法整定其参数,并经现场调试优化得出最佳参数设置。

图7为不同控制方式下变量马达斜盘角响应曲线。如图7所示,与经典PID控制方法相比,基于DMC预测控制方法的变量马达斜盘角变化更平缓,稳定性更好。

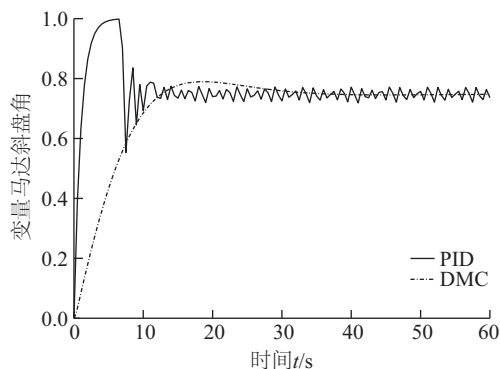


图7 不同控制方式下变量马达斜盘角响应

Fig. 7 Response of swash with different control methods

如图8所示,基于经典PID控制的变量马达转速调节时间为32 s,峰值为1595 r/min;基于DMC控制的变量马达转速调节时间为28 s,峰值为1553 r/min,变量马达转速稳态输出值为1500 r/min。与经典PID控制方法相比,基于DMC预测控制方法的变量马达转速调节时间缩短12.5%,超调量降低2.8%。因此,基于DMC的变量马达转速预测控制方法具

有更好的动态性能和稳态性能。

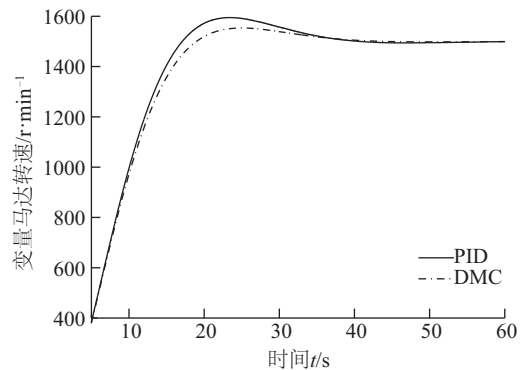


图8 DMC与PID控制效果

Fig. 8 Performance comparison of DMC and PID

## 4 结 论

针对液压型风力发电机组中变量马达的恒转速控制问题,研究并提出基于DMC的液压型风力发电机组调速系统预测控制方法。仿真实验结果表明,相较于经典PID控制方法,该方法提升了变量马达恒转速的控制效果,且具有不依赖精确数学模型和计算复杂度低等优点。在后续的研究过程中,该方法将为600 kW液压型风力发电试验机组现场测试应用提供理论指导。

### [参考文献]

- [1] 孔祥东,艾超,王静. 液压型风力发电机组主传动控制系统综述[J]. 液压与气动, 2013(1): 1-7.  
KONG X D, AI C, WANG J. A summary on the control system of hydrostatic drive train for wind turbines[J]. Hydraulics & pneumatics, 2013(1): 1-7.
- [2] 艾超,陈丽娟,孔祥东,等. 液压型风力发电机组低电压穿越双变量协调控制研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(5): 1408-1417.  
AI C, CHEN L J, KONG X D, et al. Research on double variables coordination control of low voltage ride through in hydraulic wind turbine[J]. Acta energiae solaris sinica, 2018, 39(5): 1408-1417.
- [3] PUSHA A, IZADIAN A, HAMZEHLIOUA S, et al. Modeling of gearless wind power transfer[C]//37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Melbourne, VIC, Australia, 2011, 3176-3179.
- [4] SCHMITZ J, VATHEUER N, MURRENHOF H. Dynamic analysis and measurement of a hydrostatic transmission for wind turbines[R]. RWTH Aachen University, Institute for Fluid Power Drives and Controls (IFAS), 2012.
- [5] SELWYN T S, KESAVAN R. Reliability analysis of sub assemblies for wind turbine at high uncertain wind[J]. Materials science and information technology, 2012, 433:



- 1121-1125.
- [6] 艾超. 液压型风力发电机组转速控制和功率控制研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.  
AI C. Research on speed control and power control of hydraulic type wind turbine [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.
- [7] DO H T, DANG T D, TRUONG H V A, et al. Maximum power point tracking and output power control on pressure coupling wind energy conversion system [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2018, 65(2): 1316-1324.
- [8] 高文增. 风力发电油液驱动系统控制策略的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.  
GAO W Z. Research on wind power with hydraulic transmission control strategy [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.
- [9] 王岩, 付永领, 牛建军. 变量泵-变量马达自适应控制算法研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(10): 1173-1179.  
WANG Y, FU Y L, NIU J J. Research on variable pump-variable motor adaptive control algorithm [J]. China mechanical engineering, 2009, 20(10): 1173-1179.
- [10] 赵曜. 动态矩阵控制的稳定性和鲁棒性分析[C]//中国控制与决策学术年会, 厦门, 福建, 1994.  
ZHAO Y. The stability and robustness analysis of dynamic matrix control [C]//China Annual Conference on Control and Decision-making, Xiamen, Fujian, 1994.
- [11] CUTLER C R, RAMARK B L. Dynamic matrix control-a computer control algorithm [C]//Proceedings of Joint Automatic control conference, San Francisco, USA, 1980.
- [12] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 10-12.  
XI Y G. Predictive control [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 10-12.
- [13] 王进华. 二次型最优控制问题中的权矩阵与最优控制律[J]. 控制与决策, 2007, 22(8): 943-950.  
WANG J H. Relation of weight matrices to optimal control laws in linear quadratic optimal [J]. Control and decision, 2007, 22(8): 943-950.
- [14] BOSCH R AG. Radial piston motors [EB/OL]. <https://www.boschrexroth.com/com/product-link?cat=Industrial-Hydraulics-Catalog&p=g257639&c=XC&lang=en>, 2016.
- [15] BOSCH R AG. Variable pumps [EB/OL]. <https://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/industrial-hydraulics/pumps/axial-piston-pumps/variable-pumps-open-circuit>, 2009.
- [16] 吴海中, 田沛. 动态矩阵控制算法的仿真研究及PLC应用[J]. 自动化仪表, 2018, 39(3): 31-38.  
WU H Z, TIAN P. Simulation research and PLC application of dynamic matrix control algorithm [J]. Process automation instrumentation, 2018, 39(3): 31-38.
- [17] 肖淑斌, 潘维加. 吸收塔浆液pH值动态矩阵控制仿真研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2017(4): 10-15.  
XIAO S B, PAN W J. Simulation study on dynamic matrix control of pH value of absorption tower slurry [J]. Automation and instrumentation, 2017(4): 10-15.

## DMC PREDICTIVE CONTROL METHOD FOR HYDRAULIC WIND TURBINE SYSTEM SPEED REGULATION

Liu Weirong<sup>1</sup>, Wei Yulin<sup>1</sup>, Liu Jie<sup>2</sup>, Liu Chaorong<sup>3</sup>, Ren Chengwen<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. National Demonstration Center for Experimental Electrical and Control Engineering Education,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

3. Key Laboratory of Gansu Advanced Control for Industrial Processes, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** In view of the constant speed control problem of variable displacement motor, this paper proposes a hydraulic wind turbine speed control method based on the dynamic matrix control (DMC) prediction control, and analyzes influence of predicted horizon and control horizon on the speed control using the Simulink-AMESim. The simulation experimental results show that the DMC-based predictive control method improves the performance of the hydraulic turbine system speed control and provides theoretical guidance for subsequent engineering application.

**Keywords:** predictive control; dynamic matrix control; hydraulic wind turbine; speed control system