

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.01.004

风电机组的开放移动控制结构和主控系统设计

杨建成,傅兴华

(贵州大学 电子科学系,贵阳 550025)

摘要:针对风电机组点对点封闭结构和随机非线性问题,提出了风电机组的开放移动控制结构和功率曲线 LUT 线性化方法。在风电机组的线性化转矩和变桨开放移动控制结构框架里,采用 PLCopen 移动控制系统设计标准设计风电机组主控系统。基于 PLCopen 标准的风机主控系统设计方法明确了风机转矩和变桨控制器的设计依据和开发标准,对风电机组的主控系统设计和风机整机控制系统集成有指导意义。

关键词:主控系统;执行控制系统;查表法;转矩表;桨距角表

中图分类号:TH132

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2015)01-0027-10

Open motion control architecture of wind turbine and main controller design

YANG Jiancheng, FU Xinghua

(Department of Electronics, Guizhou University, Guiyang 550025, P.R.China)

Abstract: In this paper, we propose a method to solve the problems with stochastic nonlinear and point to point architecture of the wind turbines. The proposed method presents an open motion control architecture and a linearized torque control system based on power curve LUT. We reference the PLCopen motion control standard that is used to design the linearized torque and pitch systems of the wind turbines. This proposes a new methodology for the main controller design and the system integration of wind turbines.

Key words: main control system; actuator control system; look up Tab.(LUT); torque table; pitch table

从 80 年代 kW 级“丹麦概念风车”到现在的 MW 级风机,风电机组经历了恒速定桨感应式风机、变桨阻抗变速风机、功率电子变流器替代转子阻抗变速的双馈(DFIG)风机、及全功率直驱变速风机四代风机概念的发展变化。风机的控制依据均来自空气动力学理论,但其控制系统结构和相应的控制器设计方法却是多种多样的。IEC 61400-25 是关于风电场监测和控制的国际标准,而风电机组控制系统目前还没有可供参考的设计依据和开发标准。

受大功率半导体器件技术的限制,90 年代初的 OptiSlip 型变速风机采用点对点连接的可变阻抗进行变速调节,通过软启动装置直接接入电网。该类控制系统结构简单但控制算法复杂计算量大。文献[1-2]介绍了叶尖速比(TSR)和功率信号反馈(PSF)变速控制。这两种控制方法要用到复杂的优化算法和实时功率曲线追踪来确定优化叶尖速比和最大功率值。文献[3-4]讨论了爬山搜索(HCS)及其改进的变速控制方法。HCS 方法不需要风速测量值和功率曲线追踪,是一种基于模式训练的控制方法。HCS 控制方法计算量大,追踪速度慢。文献[5-7]提出了基于风速测量的最大功率点跟踪(MPPT)方法。该方法需要用风电机组正前方的风速值作为输入变量,但用风速传感器方法很难得到正确的测量值。直到最近开发的激光雷达

收稿日期:2014-09-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61464002)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(61464002).

作者简介:杨建成(1954-),男,贵州大学博士,研究方向为电子科学与技术、控制理论与控制工程。

傅兴华(联系人),男,贵州大学教授,研究方向为微电子科学与工程、超导电子学,(E-mail)fxh@gzu.edu.cn。

(LIDAR)方法可以解决实时前行风速测量问题^[8],但计算量很大。针对风电机组非线性动力学特性,文献[9-10]提出了相应的智能控制算法,但这些方法很难在基于 PLC 主控制器环境里得到应用。早期的风电机组采用基于 C 语言编程的点对点结构控制系统来解决这些复杂建模算法和计算量大的问题。Mita 公司的控制器是典型的 C 语言编程风机主控制器产品。此类主控制器的风电机组控制系统存在输入/输出结构繁杂、开放互联性差、难以实现标准化、跟踪控制速度慢等缺陷,已逐步被基于 PLC 的风电机组主控系统所替代。

PLC 始于 60 年代末。进入 90 年代,随着高速大规模集成器件和嵌入式控制器结构的发展使 PLC 控制器功能有了很大的改进。现在可以使用“FOR”和“WHILE”等循环控制语句来编程 PLC 控制器。尽管如此,PLC 控制器的基本特性并没有改变。即要求 PLC 的实时响应速度要与机电系统的继电器开关速度相匹配,PLC 仍然是针对顺序控制和简单线性系统的控制器。从理论上讲,智能人工神经网络的自组织、自学习功能可解决风电机组的随机非线性控制问题。然而,这些基于分析模型的非线性控制方法在基于语义规则的 PLC 编程环境下应用还有一定困难。

针对风电机组的控制结构和非线性问题,笔者提出了风机的开放移动结构和线性化功率曲线查表方法。在对风电机组转矩和变桨控制系统线性化改造的基础性上,直接按照 PLEopen 标准设计、编程风电机组主控制器。笔者所提出的风电机组开放移动结构和基于 PLCopen 标准的风机主控系统设计方法是一种设计思想明确,设计方法简便的标准化风电机组主控系统设计开发方法,对风电机组研发设计阶段少走弯路和避免不必要的浪费具有重要的指导意义。

1 风电机组的开放移动控制结构

风电机组有三个基本的控制单元,即转矩执行控制器单元,变桨执行控制器单元和主控制器单元。位于主控制器的转矩控制器和变桨控制器向执行控制器发送控制指令,共同执行转矩控制和变桨控制任务。本节在讨论执行控制问题的基础上,提出风电机组的开放移动控制结构。

1.1 转矩执行控制系统

风电机组的转矩执行系统主要是指发电机侧变流器及其控制器。随着大功率半导体器件技术的发展,现在的大功率风电机组可采用基于中压 IGBT、IGCT 功率器件的大功率变流器。由于中压功率器件的传动损耗在变流器传动损耗中占有相当大的比率,因此中压变流器的控制问题比低压变流器控制问题要复杂得多。

1.1.1 大功率电子器件特性

为了方便理解变流器执行控制器的控制问题,先对风电机组变流器的大功率器件做简单介绍。在功率 MOSFET 器件里,主载流子漂移电流是受静电场驱动的。静电场是无旋、有散场,其旋度积分为零,散度值满足高斯定理。因此,功率 MOSFET 器件体内的漂移电流可用静电场高斯定理来表征,即满足

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{q(N_d - N_a + n - p)}{\epsilon_s} \quad (1)$$

基于“场调制”的 MOSFET 功率器件线性特性好,可控性高。但其“硅限”制约了大功率 MOSFET 器件的发展。

IGBT 等大功率器件是以扩散电流为主载流子的半导体器件,载流子运动需要用扩散方程来描述,即

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_p = q \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2)$$

基于“导通调制”的大功率器件大大降低了器件的导通电阻提高了反向击穿电压的承受能力,是现在大功率半导体器件应用的主流产品。但由于 IGBT 的非平衡态输运扩散电流导致了器件的非线性和系统结构不确定特性,使变流器稳定性和可控性问题变得艰难。

1.1.2 变流器执行控制系统

变流器执行控制系统由发电机侧变流器的转矩执行控制部分和电网连接控制部分组成。风电机组变流器通过中间电容(DC-LINK)将其解耦成两个具有独立操作功能的发电机侧变流器和电网侧变流器。发电机侧变流器根据主控制器的转矩控制指令执行对发电机的转矩控制。目前市场上大部分商业化风机变流器均采用矢量控制方法,其控制系统结构如图 1 所示。

矢量控制是一种小信号线性化控制方法,其反馈稳定范围很小。由 Lipschitz 不确定关系式,

$$L + 1/2 \geq \sqrt[1+p]{pL} (1 + 1/p), \quad pL > 1, \quad (3)$$

如果 p 和 L 满足式(3)的条件,则无法使用反馈控制来保持系统的全局稳定。后来,中科院郭磊院士又给出

了准确的线性反馈稳定半径^[11]。能够使大功率变流器稳定工作的最大线性反馈控制限制半径为

$$r = 3/2 + \sqrt{2}, \quad (4)$$

大功率变流器的结构不确定性是导致系统不稳定的关键因素。文献[12]报道了当风速超过 9 m/s 时其双馈风电机组变流器平均寿命低于一年的应用案例。

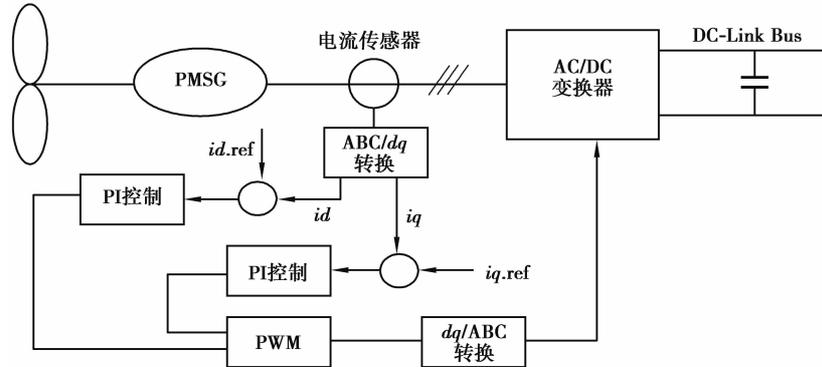


图 1 电机侧变流器控制结构示意图

Fig.1 Control structure schematic diagram of generator-side converter

有两种方法可改善大功率变流器结构不稳定控制问题,即采用更好的变流器控制算法和使主控制器产生更稳定转矩输出的方法。鲁棒和自适应控制是两个有效的结构不确定系统控制方算法。自适应控制使用非线性反馈方法来跟踪系统大的不确定域,鲁棒控制是一类优化控制方算法。最近,一种基于窗口优化策略的预测控制方算法正在变流器控制研究领域引起普遍的关注和兴趣^[13]。

电机侧变流器的执行控制部分通过控制 q 轴电流 i_q 实现发电机的转矩控制,而将其磁通 d 轴分量设置为零或常量。风电机组将机械能通过发电机转换成电能送入电网。这个过程主要是有功功率的转换过程。从动力学角度考虑,有功功率转换是一个慢速动力学问题。因此,风电机组的转矩和变桨控制是慢速动力学控制系统。风电机组还要与电网交换无功功率和进行低电压穿越控制,这部分的控制主要通过对电机侧变流器 d 轴气隙磁通控制,DC-Link 和电网侧变流器控制来实现的,是快速动力学控制问题。文献[22]的特征值与模态参数分析结果显示,风电机组定子磁链和与快速动力学无功功率控制有关的 d 轴分量干扰是导致电力系统不稳定的主要原因之一。

1.1.3 变流器执行控制器设计原则

与风电机组的主控系统不同,风电机组的转矩执行控制系统是变流器生产厂家设计开发的产品。兆瓦级风机系统集成商可根据需要选择不同厂家的变流器产品进行风电机组整机的系统集成。

采用何种软、硬件设计变流器执行控制器是变流器厂家的商业秘密。因此,变流器控制器本身是一个封闭的系统。但是,要使风电机组集成商能够依照开放标准建立系统间连接和编制主控制器软件,则要求变流器控制器与上位机通信连接方式满足开放系统的互连标准。

1.2 变桨执行控制系统

变桨执行控制系统由执行装置和执行控制器组成。常见的执行装置有液压变桨装置和电变桨装置,这里仅讨论电变桨执行系统。电变桨执行系统的执行装置通常采用伺服电动机。由于桨距角微小的变化都会影响到风机从风场获取能量的效率,因此高精度桨距角控制通常采用位置伺服控制方法。风机变桨伺服控制系统根据位置精度控制要求不同,又分为半闭环伺服控制或全闭环伺服控制。

1.2.1 半闭环伺服执行控制系统

半闭环伺服控制系统由控制调节器、智能功率模块、伺服电动机、编码器传感装置组成。伺服控制系统接受主控制器发出的桨距角位置指令通过智能功率模块驱动伺服电动机来执行平滑、精确的桨距角控制任务。

伺服控制的基本原则是,内环的反应速度最快,中间环节的反应速度必须高于最外环。

1.2.2 全闭环伺服执行控制系统

半闭环控制的光电编码器测定电机转子角度,将经过处理的速度及位置量反馈到伺服控制器的各环路。光电编码器每产生一个输出脉冲就对应一个位移增量。这个增量及位移变化是相对位置增量,不能直接反映旋转轴的绝对位置。

另外,当出现来自传动链的误差时,通常采用位置补偿的方式进行更正。这种方式很难真正消除实际的位置误差。因此,要得到高精度角度位置控制,还需要一个真实的位置反馈量来做差值比较。这可以通过在桨板上安装一个位置传感器来监测桨叶轮在轮毂里的实际转动位移的方法来解决。该编码器将直接测量到的叶轮转动位移反馈到伺服控制器里,组成具有两个位置反馈回路的全闭环变桨伺服控制系统。

全闭环伺服控制采用了两层叠加的位置调节环,如图 2 所示。其闭环反馈回路的一路来自伺服电机,一路来自非线性驱动链负载(叶轮)。

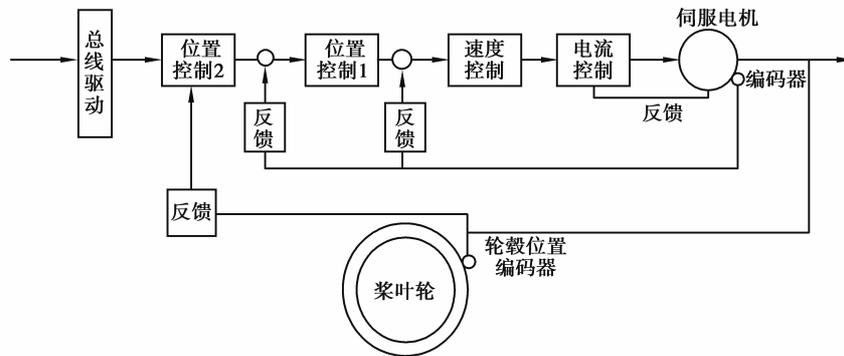


图 2 全闭环变桨执行控制结构示意图

Fig.2 Structural schematic diagram of full-closed loop pitch control

与转矩执行控制器一样,风电机组的变桨执行控制系统是生产厂家自行设计开发的产品。其变桨执行控制器本身是一个封闭的系统。要建立转矩执行控制器与上位机双向通信,变桨执行控制器需按照开放系统互连标准设计总线驱动界面。

1.2.3 其他执行装置

变桨控制系统和转矩控制系统是风电机组两个主要的控制系统。除此之外,风机的主控制器还要控制风机的其它执行机构来完成风机正常工作所需要的各种控制任务。如液压制动控制、偏航控制以及一些低压电器控制等。

以偏航控制为例,主控制器根据风向传感器的信息通过继电器直接控制偏航电机的旋转并通过编码器确定偏航角度。这些控制系统的特点是执行机构没有自己的执行控制器。与传统的集中式 PLC 控制系统一样,主控制器通过直接控制继电器等电器执行元件来实现对这些设备的控制。

1.3 开放移动控制结构

移动控制从工业革命开始,经历了 100 多年的发展历程。从电机、反馈控制、数字移动控制,到基于 PC 的 PLC、现场总线、工业网络、SCADA 等技术的发展,现在的移动控制系统已成为从设计到编程均遵循 IEC (PLCopen, IEC 61131-3)工业标准的开放系统。移动控制系统主要由主控制器、驱动和执行装置、执行控制器、传感器、机械部件等组成。从风电机组的系统结构上看,风电机组的控制系统是移动控制系统。

点对点控制系统的每个执行终端与主控系统的连接是按照某种确定的模式“量身定做”的,因此不同厂家的系统之间不能随意连接。此外,主控制器只是单方向的发送控制指令给最靠近的环路,如变桨伺服控制器的位置环。位置环通过自身的封闭系统将控制信息传送给速度环、电流环,最终通过编码器反馈实现电机的执行控制。相比而言,开放系统按照通信标准设计控制器,可实现不同系统间的开放性互连。开放系统的主控制器通过双向通信总线将控制命令同时发送到控制器的各位置环、速度环、和电流流环。与此同时,主控制器通过总线驱动界面同时收到来自各执行控制器的转矩、位置、速度和加速度等信息。这种双向通信方式大大减轻了主控制器的信息处理压力,并可高速、同步地传递和反馈控制信息。文献[14-15]介绍了开放系统的相关研究结果。

为了促进开放系统互连的标准化进程,国际工业控制通信联盟 OPC 基金会发布了一系列开放系统通信标准^[16]。2010 年,OPC 与 PLCopen 联合推出了针对 PLC 工业移动控制开放系统的“OPC UA for IEC 61131”标准。该标准的通信结构是一个由装置层、控制层、MES 层和 ERP 层组成的 4 层次结构通信系统。其横向功能是控制器之间通过现场总线双向交换复杂数据,纵向可通过 MES 和 ERP 采集数据^[17]。

参照“OPC UA for IEC 61131”标准^[17],笔者提出了风电机组转矩和变桨控制系统的“开放移动控制结构”,如图 3 所示。

满足移动控制系统的各种功能和特性。在确认经过改造的风电机组变桨控制系统线性化行为的基础上,我们可以直接参照 PLCopen 移动控制系统设计标准来设计风电机组主控系统软件。

在移动控制系统里,桨距角位置控制属轮廓控制问题。PLCopen 单轴移动功能块库里提供了基于时间_位置的轮廓控制功能块界面。由于桨距角变化速度不能太快(最大 $8 \sim 10^\circ/s$),须考虑系统的加速度限制问题。轮廓控制功能块没有加速度限制输入,笔者取“绝对移动控制功能块”作为风电机组变桨控制功能块设计参考标准。参照 PLCopen“绝对移动控制功能块”设计标准^[18],可以得到风电机组的“变桨控制功能块”,如图 4 所示。

2.1.3 变桨控制功能块编程

基于 C、C++ 语言的面向过程和面向对象的分析设计方法是我们熟悉的软件开发方法。IEC61131-3 的 ST 语言是一种类 PASCAL 高级语言,这种高级语言应使用哪种设计方法常常会使 PLC 软件开发工程师们感到困惑。图 5 展示了 PLC 软件开发和 PC 机软件开发在分析、设计和编程方法上的区别。

PLCopen 最新版本明确提出了基于自动机的 PLC 软件设计方法^[19]。自动机编程是基于状态转换的编程,其编码特征是尽可能使用切换指令(如 Switch 和 If_ Then 指令)。使用自动机编程方法,可以得到稳定和高质量的 PLC 执行程序。以下“样例程序”是德国倍福公司提供的部分“绝对移动控制功能块”自动机编程样例。

样例程序绝对移动功能块

```

PROGRAM MAIN
VAR
Axis: AXIS_REF;                (axis reference data structure)
State: MoveState_t;           (state machine state )
MoveAbsoluteOut; ST_McOutputs; (debug function block output data)
Reset; MC_Reset;
END_VAR
(Update the axis status at the beginning of each cycle)
(Move axis using a state machine)
CASE state OF
OVERRIDE_INIT (initialization) and MOVESTATE_ENABLE
MOVESTATE_FORWARD :           (start to first position)
MoveAxis1.Position := 1500;    (start to intermediate tartet position )
MoveAxis1.Velocity := 500;    (medium velocity level)
MoveAxis1.BufferMode := MC_Buffered;
MoveAxis1.Execute := TRUE;
    IF MoveAxis1.Active THEN
        MoveAxis1.Execute := FALSE;
        state := MOVESTATE_NEWTARGETPOSITION;
    ELSE
        IF MoveAxis1.CommandAborted OR MoveAxis1.Error
        THEN state := MOVESTATE_ERROR;
    
```

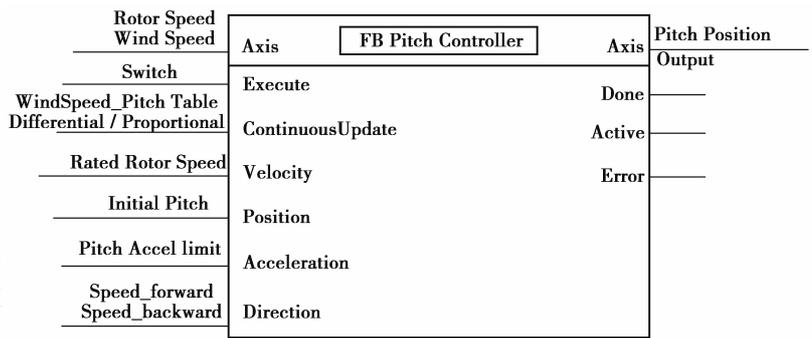


图 4 变桨控制功能块
Fig.4 Function block of pitch control



图 5 PLC 软件开发和 PC 机软件开发对比
Fig.5 Development comparison of PLC and PC

```

END_IF
MOVESTATE_BACKWARDS:(move back to initial position)
IF MoveAxis1.CommandAborted OR MoveAxis1.Error
THEN state:= MOVESTATE_ERROR;
END_IF

```

依照风电机组的“变桨控制功能块”界面设计和 PLCopen 的自动机编程原则,可得到 IEC61131-3 的结构化文本(ST)语言“变桨控制功能块”程序流程图,如图 6 所示。

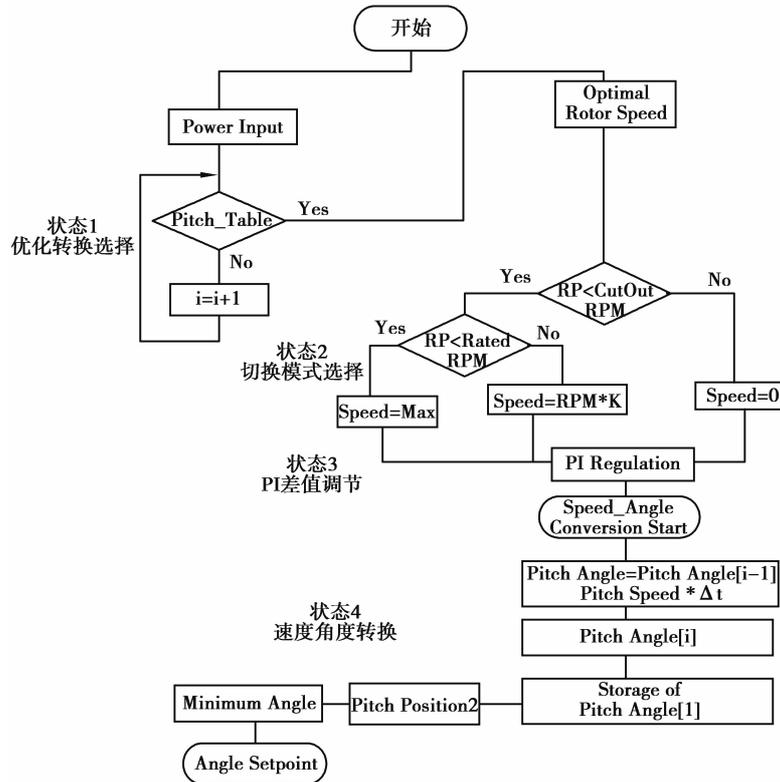


图 6 变桨控制功能块程序流程图

Fig.6 Flow chart of pitch control function block

该程序有 4 个自动机编程状态,状态 1 是控制器根据输入功率在桨距角表里选出优化转速;选出的转速在模式切换状态 2 里进行模式选择;选择出的转速与实际输入转速的差值经 PI 调节(状态 3)后,进入速度-角度变换状态 4,并将选出的角度作为变桨控制指令发送到变桨执行控制器。

2.2 转矩控制器设计

转矩控制器工作在额定功率区以下(II区)。追逐最大功率点(MPP)是转矩控制的主要任务。本文前言部分回顾了各种风电机组的 MPPT 控制方法和存在的问题,笔者采用了一种新的、更有效的 MPPT 控制方法:优化功率曲线方法。优化功率曲线方法具有算法简单追踪响应速度快等优点,更适合在 PLC 控制器环境里运行。

2.2.1 线性化转矩控制

这里采用优化功率曲线方法,实现风机的最大功率点追逐控制。风电机组转矩和功率随发电机转子转速的变化是非线性的,随风速变化是随机的,故需考虑优化功率曲线的线性化问题。笔者提出了基于优化功率曲线查表法的线性化方法。

该方法将转速及相应的转矩数据对组成一个两列(转速-转矩)、 N 行(行数由所取风速值的个数决定)分段线性的数据表,不妨将其称为 LUT 转矩表。为了提高控制精度,通常把风速间隔取的尽可能小。落入表中的输入电机转速在 LUT 转矩表里找到相应的最大功率点优化输出转矩值,并将其作为输出控制量给变频器执行控制器,实现风机的线性化 MPPT 控制。使用 LUT 转矩表线性化风电机组的转矩控制系统是一种工程上可行并方便在线更新精度的线性化控制方法。

2.2.2 转矩控制功能块设计

参照 PLCopen 移动控制功能块库里的单轴转矩移动控制功能块界面设计标准[19],我们可以得到风电机组“转矩控制功能块”界面,如图 7 所示。

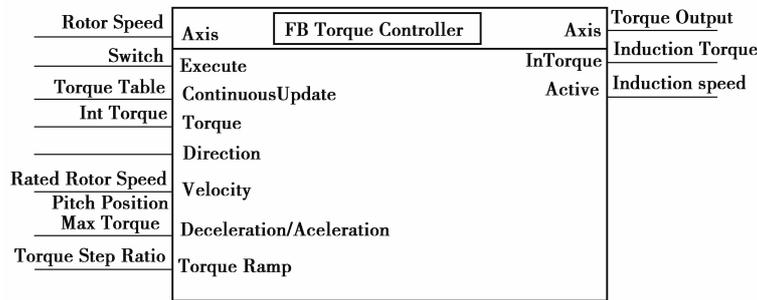


图 7 转矩控制功能块

Fig.7 Function block of torque control

2.2.3 转矩控制功能块编程

依照风电机组的“转矩控制功能块”界面设计和 PLCopen 的自动机编程原则,可得到 IEC61131-3 的结构化文本(ST)语言“转矩控制功能块”程序流程图,如图 8 所示。

该程序有 3 个自动机编程状态,状态 1 是在线性优化转矩表里选择出最大优化转矩。该程序使用了一个执行次数可数的计算器循环指令。其 ST 语言的程序编码如下。

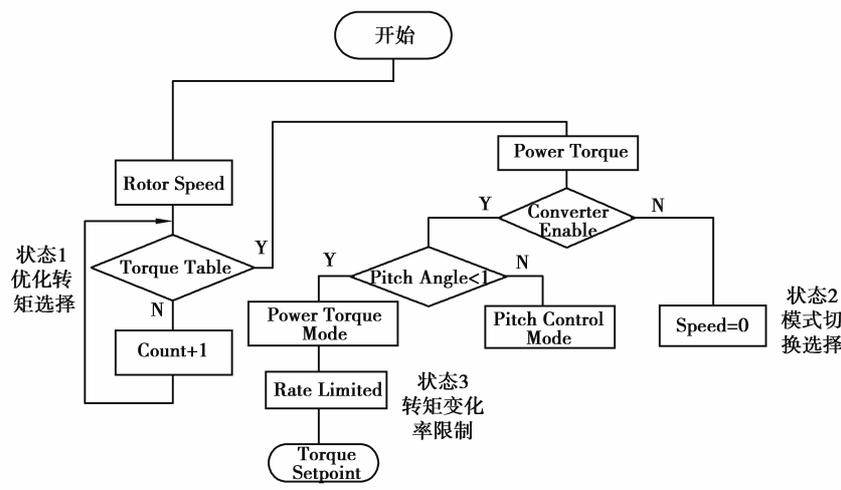


图 8 转矩控制功能块程序流程图

Fig.8 Flow chart of pitch control function block

```

FUNCTION_BLOCK MC Torque Control
VAR_INPUT
RotorSpeed Input:          REAL;
    Power Speed:            REAL;
    Power Torque:           REAL;
    Enable Converter:       BOOL;
    Torque LUT S[i]:        REAL; (* 转矩表矩阵速度列 *)
    Torque LUT P[i]:        REAL; (* 转矩表矩阵转矩列 *)
    Ramp:                   REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
Output Torque:             REAL;
END_VAR
    
```

```

CASE iState OF
0 State: (* 输入转速/输出转矩选择 *)
FOR Counter: =1 To N DO
    IF Count < N THEN
    IF RotorSpeed Input >= Torque LUT S[i] AND < Torque LUT S[i+1] THEN
    Power Speed: = RotorSpeed Input u;
    Power Torque: = Torque LUT P[u];
    Count + 1;
    END_IF;
    END_FOR;

```

选出的优化转矩在模式切换状态 2 里进行模式选择;状态 3 是对进入转矩控制模式的转矩输出值进行转矩变化率限制,以稳定控制输出。我们在变流器控制问题的讨论里曾经提到,主控制器产生更稳定的转矩输出是改善大功率变流器不稳定控制的重要措施之一。

2.3 变桨和转矩控制器功能块网络

变桨和转矩控制功能块是风电机组主控系统的核心模块,而实际的变桨和转矩控制器涉及到其它控制问题,如信号滤波、振动抑制等。这些控制问题不能在 PLCopen 标准功能块库里找到相应的功能块参考标准,系统开发商需要根据风电机组的实际情况来设计开发。

变桨和转矩核心控制功能块和外围控制功能块可组成一个风电机组的主控制器功能块网络。图 9 是风电机组的主控制器功能块网络示意图。风电机组的主控系统软件可参照其功能块网络进行设计和编程。

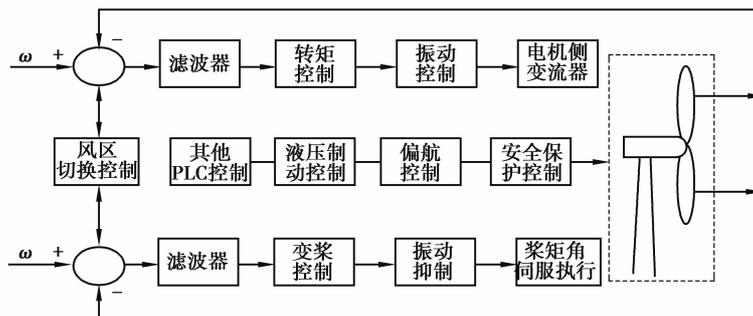


图 9 风电机组主控制器功能块网络

Fig.9 Function block network of wind turbine's main controller

3 精度修正

LUT 表是离线设计的线性近似数据表,而风能变量则是瞬息变化的。因此,对线性近似数据表进行在线精度修正是必要的。最近,业界采用激光雷达(LIDAR)来实时获取风电机组的迎面风速,与前馈调节器一起实现风机的在线控制^[20-21]。但该方法要求快速复杂的数据计算和处理,需要系统自带处理机。另外,风机桨叶切割风场旋转时会产生振动,使风机负载产生周期性震荡。为控制转动轴的振动,需通过分析处理布放在风机上的无线传感器网络信息来得到实时修正的 Ramp 值。

一种发展趋势是,将通过集成处理来自激光雷达、传感器网络、气象卫星图、GPS 等方面的信息和数据发送到底层的 PLC 控制器,实现风机负载特性和转速误差等可修正量的修正和微调节,以期更加有效的控制风电机组获取风场能量的能力。

通常,这些来自不同数据源,不同学科领域的大数据是非结构化的,难以组成统一属性的数组数据。现在,可采用超级计算机和大数据处理方法来处理这些智能信息。如工程上常用的数据挖掘技术等。

4 结论

在风机移动控制开放结构的基础上,通过对风机变桨和转矩控制系统的线性化改造,将风机主控系统设计问题纳入到移动控制系统的框架里来。在移动控制系统框架里,使用基于 PLCopen 移动控制系统设计标准来设计开发风机的主控系统。笔者提出的开放移动控制结构和主控系统设计方法已成功的应用到兆瓦级风电机组的整机系统集成和主控制器软件开发项目中。

该方法可归纳成以下几个要点:

1)明确了风机主控制器和执行控制器之间的通信连接方式和开放系统集成结构。

2)分析了各种 MPPT 控制方法,提出了简单有效的功率曲线线性化查表方法。在确认了风电机组转矩和变桨控制系统线性化行为的基础上,将风机转矩和变桨控制系统的设计问题纳入到基于 PLCopen 的开放移动控制系统设计框架里来。

3)在 PLCopen 开放移动控制系统设计框架里,强调了 PLCopen 标准自动机状态设计编程方法及其在风机 PLC 主控系统设计编程中的应用,为使用 IEC61131-3 的 ST 语言设计编程稳定可靠的风机 PLC 主控软件提供了一种基本方法。

4)提示了现代移动控制系统的发展趋势,即底层采用直接简单但方便实时修正的算法和快速稳定的 PLC 控制器与上层基于大数据方法的智能处理机相结合的控制方法。

参考文献:

- [1] Abdullah M. A, Yatim AHM, Tan CW, et al. A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems[J]. *Renew Sustain, Energy Rev*, 2012(16): 3220-3227.
- [2] Quincy W, Liuchen C. An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems[J]. *Power Electron*, 2004, 19(5): 1242-1249.
- [3] Kazmi S M R, Goto H, Hai-Jiao G, et al. A novel algorithm for fast and efficient speed-sensorless maximum power point tracking in wind energy conversion systems[J]. *Ind Electron*, 2011, 58(1): 29-36.
- [4] Xia Y Y, Ahmed K H, Williams B W. Wind turbine power coefficient analysis of new maximum power point tracking technique[J]. *Industrial Electronics*, 2012, 60(3): 1122-1132.
- [5] Abo-Khalil A G, Lee D C. MPPT control of wind generation systems based on estimated wind speed using SVR[J]. *Ind Electron*, 2008, 55(3): 1489-1490.
- [6] Guo P. Research of a new MPPT strategy based on gray wind speed prediction[C]// 2nd Int Symp Knowl Acquis Model, Wuhan, China, 2009: 120.
- [7] X Gong, X Yang, W Qiao. Wind speed and rotor position sensorless control for direct-drive PMG wind turbine[J]. *IEEE Transac on Industry Applications*, 2012, 48(1): 3-11.
- [8] Rettenmeier A, Bischoff O, Hofstätter M, et al. Wind field analyses using a nacelle-based lidar system[C]// European Wind Energy Conference, 2010.
- [9] Lin W M, Hong C M. A new Elman neural network-based control algorithm for adjustable-pitch variable-speed wind-energy conversion systems[J]. *IEEE Trans on Power Electronics*, 2011(26): 473-481.
- [10] Jafarnejadsani H, Pieper J, Ehlers J. Adaptive control of a variable-speed variable-pitch wind turbine using radial-basis function neural network[J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2013(21): 2264-2272.
- [11] Xie L L, Guo L. How much uncertainty can be dealt with by feedback? [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000 (45): 2203-2217.
- [12] Wei L, Kerkman R J, Lukaszewski R A, et al. Analysis of IGBT power cycling capabilities used in doubly fed induction generator wind power system[J]. *IEEE Energy Congress and Exposition*, 2010, 47(4): 3076-3083.
- [13] Kouro S, Malinowski M, Gopakumar K, et al. Recent advances and industrial applications of multilevel converters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010(57): 2553-2580.
- [14] Yu D, Lin H, Guo R, et al. The research on realtime middleware for open architecture controller[C]// 11th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Application, 17-19 August, 2005, Hongkong, China. [S.l.]: IEEE, 2005: 80-83.
- [15] Wei H X, Wang S B, Sun K, et al. Research of SoPC-based reconfigurable machine tools controller[C]// 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics, 13-16 July, 2008, Daejeon, Korea. [S.l.]: IEEE, 2008: 117-122.
- [16] OPC Foundation. Unified Architecture[EB/OL]. [2014-09-03] <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua>.
- [17] OPC Foundation. UA information model for IEC 61131-3[EB/OL]. [2014-09-03] http://www.plcopen.org/pages/tc4_communication/
- [18] PLCopen. MC-move continuous absolute of 3. single-axis function blocks[CP/OL]. Version 2. [2014-09-03] http://www.plcopen.org/pages/tc2_motion_control/forms/before_downloading.htm.
- [19] PLCopen. MC-torque control of 3. single-axis function blocks[CP/OL]. Version 2. [2014-09-03] http://www.plcopen.org/pages/tc2_motion_control/forms/before_downloading.htm
- [20] Wang N, Johnson K E, Wright A D. Comparison of strategies for enhancing energy capture and reducing loads using LIDAR and feedforward control[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013(21): 1129-1142.
- [21] Wang N, Johnson K E, Wright A D. FX-RLS based feed forward control for LIDAR enabled wind turbine load mitigation[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012(20): 1212-1222.
- [22] Marija I, Milošević, Kevin B, et al. Toward a systems approach to power-electronically switched T&D equipment at value[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting, 24-29 July, 2011, Detroit, MI, USA. [S.l.]: IEEE, 2011: 1-7.