

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.01.016

## 动态矩阵预测控制在微型燃气轮机中的应用

耿健<sup>1,2</sup>, 杜炜<sup>1,2</sup>, 杨冬梅<sup>1,2</sup>, 陈永华<sup>1,2</sup>, 张筱辰<sup>1,2</sup>, 何国鑫<sup>1,2</sup>

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106;

2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106)

**摘要:**可调回热式微型燃气轮机具有多变量、强耦合、非线性、参数时变等诸多复杂的特性,常规控制方法难以满足控制要求。对于两输入两输出的微型燃气轮机控制系统设计,如何准确快速地实现扰动下的稳定输出,是设计控制系统的核心。首先文中基于动态矩阵预测算法设计出预测控制器,并给出误差校正矩阵、误差权矩阵、控制权矩阵和柔化系数矩阵关键控制参数分析;接着在稳定工况点下,设计了转速给定值扰动、燃料量内扰下的预测控制策略;最后基于传递函数模型进行仿真控制分析,结果验证了该控制方法能够更好地符合快速性、鲁棒性和抗扰动的控制要求,并且超调量比常规PID控制方法要小。

**关键词:**可调回热;微型燃气轮机;动态矩阵;预测控制;鲁棒性

中图分类号:TM61

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)01-0118-06

### 0 引言

能源是人们赖以生存的物质基础,也是国家经济发展重要资源保障,更是国内外重点关注的战略发展方向<sup>[1-4]</sup>。新一代能源发展方向是绿色环保可持续、动力设施微型化、人工友好化、燃料种类多样化,而相应的能源技术和设备都要改良发展和升级换代<sup>[5-6]</sup>。近年来,随着光伏、风力发电以及微型燃气轮机等分布式发电(distributed generation, DG)技术<sup>[7]</sup>的兴起发展, DG已成为人们关注的热点,是各国政府和学者应对能源与环境危机的主要举措之一。以微型燃气轮机发电系统为代表的燃气类DG,是较为成熟和应用相对广泛的微小型发电动力系统<sup>[8]</sup>,相较于燃油内燃发电机组,具有方便控制、输出电功率稳定、燃气种类要求低、运行工作时长、排放污染物少<sup>[9-10]</sup>等优势,能够符合并贴近用户多样的发电需要<sup>[11]</sup>。

目前,针对微燃机控制的相关研究主要针对传统比例积分微分(proportion integral derivative, PID)控制方法的改进、单一输出量的控制以及对光伏等和微燃机混合微网协调控制策略,但都缺乏对微燃机给定值、内部扰动控制策略和耦合特性的考虑。文献[12]采用可变论域自适应模糊PID控制方法,研究了燃气轮机的转速、燃料量、排气温度和机械转矩等动态特性。文献[13]将自适应径向基函数

(radial basis function, RBF)神经网络PID控制方法,应用于微燃机排烟温度控制中。文献[14]采用差分进化算法的模糊PID控制方法,并应用于电站燃气轮机转速控制中。文献[15]通过对燃气轮机的控制系统研究分析,提出对燃气轮机多变量系统进行基于对角递归神经网络和神经元补偿器的解耦控制方法。文献[16]针对DG系统存在的功率和电压波动,提出了光伏/微型燃气轮机混合微电网协调控制策略。文献[17]建立了由微型燃气轮机等组成的微电网模型,并用改进粒子群算法进行求解,实现微电网的优化运行。

上述成果对扩大微燃机控制研究方向和应用有重要参考价值,但对微燃机本体的控制策略设计应考虑其多变量、强耦合、非线性等特性,并满足抗干扰的控制要求。文中首先介绍了微型燃气轮机的基本工作原理,接着对动态矩阵预测控制算法原理进行阐述,然后给出了微型燃气轮机控制系统策略设计图,最后通过仿真对比动态矩阵预测控制和传统PID控制效果,验证文中控制方法的有效性。

### 1 微型燃气轮机工作原理

以燃气轮机为主的联合循环发电动力设备已逐渐成为现阶段国际上主流发电动力装置,而微型燃气轮机是其中的典型代表,具备结构紧凑、质量轻、操作简单、稳定性高、安装方便、运行噪声小、寿命长、维护费用低等优点。功率为20~500 kW的微型燃气轮机在DG中应用最为广泛,是较为常见的DG动力设备。

现代微型燃气轮机通常由离心式压气机、燃烧

收稿日期:2019-08-14;修回日期:2019-09-20

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0905000);  
国家电网有限公司科技项目“省级电网公司建设能源互联网企业的关键决策支撑技术研究”(1300-201918281A-0-0-00)

室和透平三大部件相构成,可调回热式微型燃气轮机只是在其基础上增加了一个回热器,进行余热回收,将来自空气压缩机的高压空气进行预热,提高能源利用效率,其组成结构如图1所示<sup>[18]</sup>。从透平元件出来的高温排烟一部分进入到回热器模块和空气进行换热,对压缩后的空气预热;另外一部分由热旁路管道和换热后的排烟汇总,之后进入到吸收式制冷机进行余热回收再利用,或直接排到大气中。

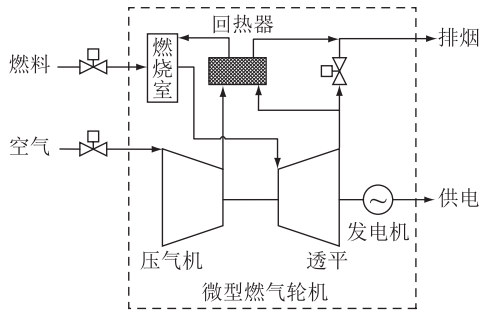


图1 可调回热式微型燃气轮机的结构

Fig.1 Structure of adjustable regenerative micro-turbine

## 2 动态矩阵预测控制算法

动态矩阵预测控制(dynamic matrix control, DMC)采用集中式控制策略,将所有的控制量集中统一处理,对多输入多输出耦合系统无需进行解耦,其基本工作流程如下:利用过程模型,预测对象在一定控制作用下的系统未来动态行为,在给定约束条件和性能要求的基础上,滚动优化求出最优控制量,并且作用在被控对象上。在滚动优化每一步进程中,都会监测对象实时信息,用以修正调整未来对象的动态行为预测。因此,DMC预测控制分为预测模型、滚动优化和反馈校正3个主要步骤,控制算法结构如图2所示<sup>[19]</sup>。

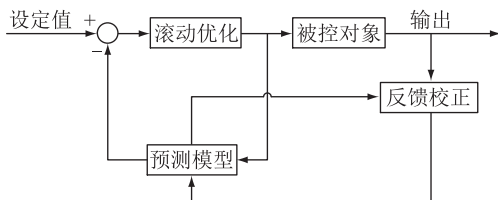


图2 预测控制算法结构

Fig.2 Structure of predictive control algorithmic

### 2.1 预测模型

如果被控对象有 $m$ 个控制输入量, $p$ 个输出量,并已测得每一个输出 $y_i$ 对每一个输入 $u_j$ 的阶跃响应 $a_{ij}(t)$ ,则可由其在采样点上的值组成模型向量 $\mathbf{a}_y = [a_{i1}(t) \cdots a_{ij}(t)]^T (i=1, \cdots, p; j=1, \cdots, m)$ ,即DMC预测控制算法的出发点。 $T$ 为采样周期。

$$\hat{y}_{i,N1}(k) = \hat{y}_{i,N0}(k) + a_{ij}(t) \Delta u_j(k) \quad (1)$$

式中: $\hat{y}_{i,N1}(k)$ 为输出 $y_i$ 在将来 $N$ 个时刻输出预测值; $\Delta u_j(k)$ , $a_{ij}(t)$ 分别为控制时域控制增量、阶跃响应变化量; $\hat{y}_{i,N0}(k)$ 为当前控制时域预测值。

在 $u_j$ 依次有 $M$ 个增量变化 $\Delta u_j(k), \cdots, \Delta u_j(k+M-1)$ 时,可得<sup>[20]</sup>:

$$\hat{y}_{i,pM}(k) = \hat{y}_{i,p0}(k) + A_{ij}(t) \Delta u_{j,M}(k) \quad (2)$$

式中: $\hat{y}_{i,pM}(k)$ 为输出 $y_i$ 在未来 $P$ 个时刻的预测值; $\Delta u_{j,M}(k)$ , $A_{ij}(t)$ 分别为预测时域控制增量、阶跃响应变化量。

若 $y_i$ 受到 $u_1, \cdots, u_m$ 的共同作用,能够根据对象特性来进行相加。若各 $u_j$ 只有即时变化,则有:

$$\hat{y}_{i,M1}(k) = \hat{y}_{i,M0}(k) + a_{ij}(t) \Delta u_j(k) \quad (3)$$

若各 $u_j$ 从 $k$ 时刻起均变化 $M$ 次,即有控制增量, $\Delta u_j(k), \cdots, \Delta u_j(k+M-1)$ ,其中 $j=1, \cdots, m$ ,则有:

$$\hat{y}_{i,pM}(k) = \hat{y}_{i,p0}(k) + A_{ij}(t) \Delta u_{j,M}(k) \quad (4)$$

把所有 $y_i$ 合并在一个向量中,得:

$$\hat{\mathbf{y}}_{N1}(k) = \hat{\mathbf{y}}_{N0}(k) + \bar{\mathbf{A}}(t) \Delta \mathbf{U}(k) \quad (5)$$

式中: $\hat{\mathbf{y}}_{N1}(k)$ 为每个输出 $y_i$ 在将来 $N$ 个时刻输出组成的向量; $\Delta \mathbf{U}(k)$ , $\bar{\mathbf{A}}(t)$ 分别为每个控制时域控制增量、阶跃响应变化量组成的矩阵; $\hat{\mathbf{y}}_{N0}(k)$ 为每个当前控制时域预测值组成的向量。

$$\hat{\mathbf{y}}_{PM}(k) = \hat{\mathbf{y}}_{P0}(k) + \mathbf{A}(t) \Delta \mathbf{U}_M(k) \quad (6)$$

式中: $\hat{\mathbf{y}}_{PM}(k)$ 为每个输出 $y_i$ 在将来 $P$ 个时刻输出组成的向量; $\Delta \mathbf{U}_M(k)$ , $\mathbf{A}(t)$ 分别为每个预测时域控制增量、阶跃响应变化量组成的矩阵; $\hat{\mathbf{y}}_{P0}(k)$ 为每个当前预测时域预测值组成的向量。

### 2.2 滚动优化

每一输出量 $y_i$ ,在未来 $P$ 个时刻,其相应期望输出量为 $w_i$ ,同时将 $M$ 个控制增量 $\Delta \mathbf{U}_M(k)$ 都相应加上合适约束条件<sup>[21]</sup>,则如下:

$$\min J(k) = \|\mathbf{W}(k) - \hat{\mathbf{y}}_{PM}(k)\|_{\mathbf{Q}}^2 + \|\Delta \mathbf{U}_M(k)\|_{\mathbf{R}}^2 \quad (7)$$

式中: $\min J(k)$ 为优化目标; $\mathbf{W}(k)$ 为每个输出量期望输出组成的向量; $\mathbf{Q}$ 为误差权矩阵; $\mathbf{R}$ 为控制权矩阵。

在无约束条件时,由对象预测结构模型(6),可以求解性能指标(7)最优控制增量表达式为:

$$\Delta \mathbf{U}_M(k) = (\mathbf{A}^T \mathbf{Q} \mathbf{A} + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Q} [\mathbf{W}(k) - \hat{\mathbf{y}}_{P0}(k)] \quad (8)$$

式中: $\mathbf{A}$ 为动态矩阵。

然而即时控制增量可根据下式求出:

$$\Delta \mathbf{U}_M(k) = \mathbf{D} [\mathbf{W}(k) - \hat{\mathbf{y}}_{P0}(k)] \quad (9)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{L} (\mathbf{A}^T \mathbf{Q} \mathbf{A} + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Q} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{L}$ 为控制系数矩阵。

矩阵  $\mathbf{A}, \mathbf{Q}, \mathbf{R}, \mathbf{L}$  都是基于被控对象采用适当形式,矩阵  $\mathbf{D}$  中每个元素可以由式(10)离线算出,在线计算时就只能由下式求解:

$$\Delta u_j(k) = d_{ji} [w_i(k) - \hat{y}_{i,p0}(k)] \quad (11)$$

$$u_j(k) = u_j(k-1) + \Delta u_j(k) \quad (12)$$

式中:  $d_{ji}$  为控制系数矩阵的元素。

### 2.3 反馈校正

DMC 预测控制在  $k$  时刻对被控对象实施作用之后,可以根据对象预测结构模型式(6)求解未来每一个输出量,同时也包含在  $k+1$  时刻输出的预测量  $\hat{y}_{i,1}(k+1), i=1, \dots, P$ 。  $k+1$  时刻实际输出量  $y_i(k+1)$  由实测得到,随后与预测量相减,由此求得  $k+1$  时刻误差表达为<sup>[22]</sup>:

$$\mathbf{e}(k+1) = \begin{bmatrix} e_1(k+1) \\ \vdots \\ e_p(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1(k+1) - \hat{y}_{1,1}(k+1) \\ \vdots \\ y_p(k+1) - \hat{y}_{p,1}(k+1) \end{bmatrix} \quad (13)$$

由误差表达式(13),可以采取加权的方式来预测未来时刻误差量,根据模型预测方法的次补偿,就可以得到校正后预测值向量  $\hat{\mathbf{y}}_{\text{cor}}(k+1)$  表达式为:

$$\hat{\mathbf{y}}_{\text{cor}}(k+1) = \hat{\mathbf{y}}_{N1}(k) + \mathbf{H}\mathbf{e}(k+1) \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{H}$  为误差校正矩阵。

在 DMC 预测控制算法迭代优化过程中,由于从  $k$  时刻转变为  $k+1$  时刻,  $\hat{\mathbf{y}}_{\text{cor}}(k+1)$  可用顺序转变的途径求出  $k+1$  时刻的预测量  $\hat{\mathbf{y}}_{N0}(k+1)$ , 如下:

$$\hat{\mathbf{y}}_{N0}(k+1) = \mathbf{S}_0 \hat{\mathbf{y}}_{\text{cor}}(k+1) \quad (15)$$

式中:  $\mathbf{S}_0$  为柔化系数矩阵。

## 3 微型燃气轮机控制系统设计

微燃机控制系统的主要功能是通过系统实际输出值和设定值作反馈比较,来调节微燃机的燃料量和回热阀开度大小,从而实现整个设备系统安全稳定运行。其控制系统设计要具备快速调节性、强鲁棒性、小超调性、小波动性和可操作性。

### 3.1 给定值扰动下的控制策略

当微燃机输出转速或排烟温度需求发生改变时,即输出给定值发生变化时,要求控制器能够快速、准确地做出响应,调整控制输入量<sup>[23]</sup>,达到输出设定值。文中以微燃机转速给定值阶跃降低 5% 为例,DMC 预测控制策略如图 3 所示。

### 3.2 内扰下的控制策略

控制系统的控制量可能因为某些因素而发生波动,产生内扰。内扰会干扰控制器的作用,使得控制器的控制性能降低<sup>[24]</sup>,对控制系统的稳定性影响较大,但在微燃机实际应用中,一直都存在着内

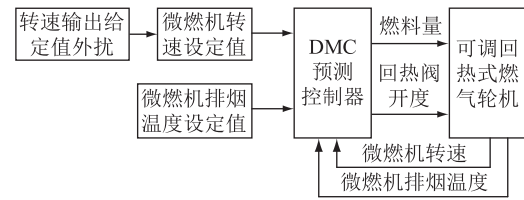


图 3 给定值扰动下的 DMC 预测控制策略

Fig.3 DMC predictive control strategy chart with given disturbance

扰,这是一个不可忽视的因素。文中以燃料量发生阶跃内扰减少 5% 为例,DMC 预测控制策略如图 4 所示。

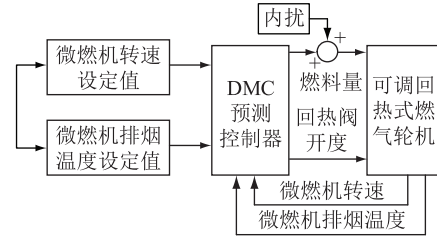


图 4 内扰下的 DMC 预测控制策略

Fig.4 DMC predictive control strategy chart with internal disturbance

## 4 仿真实验

某可调回热式微型燃气轮机的额定功率为 80 kW,输入输出结构如图 5 所示。其中,  $u_m$  为燃料量, kg/s;  $u_{re}$  为回热阀开度, %;  $y_n$  为微燃机转速, r/min;  $y_T$  为微燃机排烟温度, °C。在额定工况下,稳定工况点如下:  $u_m = 0.0085$  kg/s,  $u_{re} = 15\%$ ,  $y_n = 68000$  r/min,  $y_T = 443.9$  °C。

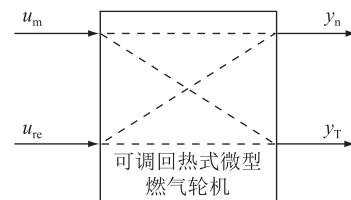


图 5 可调回热式微型燃气轮机的输入输出结构

Fig.5 Input and output structural diagram of adjustable regenerative micro-turbine

### 4.1 控制系统参数设置

可调回热式微型燃气轮机传递函数模型来自文献[18],在 Matlab/Simulink 里面的 S 函数模块中编写 DMC 预测控制算法进行控制<sup>[25]</sup>,选取控制参数建模时域  $N=50$ ,预测时域  $P=40$ ,控制时域  $M=40$ ,采样周期  $T=2$ 。

误差校正矩阵  $\mathbf{H}$  元素值越大,反馈校正越强,对扰动的敏感程度上升,抗干扰性较好,但鲁棒性会有所减弱,选取元素值为 1,在超调相差不大时,

达到稳定用时较少,即:

$$\begin{cases} \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{11} & 0 \\ 0 & \mathbf{h}_{22} \end{bmatrix} \\ \mathbf{h}_{11} = \mathbf{h}_{22} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (16)$$

误差权矩阵  $\mathbf{Q}$  元素值越大,对输出的跟踪误差越强,控制作用越迅速;但也更容易超调,超调也越明显。选取元素值为 0.055 时,兼顾控制速度与超调,即:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0.055 & 0 \\ 0 & 0.055 \end{bmatrix} \quad (17)$$

控制权矩阵  $\mathbf{R}$  元素值越大,对控制量的增量抑制作用越强,控制量变化越平缓,选取元素值为 4.4 时,控制速度较快,超调较小,即:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 4.4 & 0 \\ 0 & 4.4 \end{bmatrix} \quad (18)$$

柔化系数矩阵  $\mathbf{S}_0$  元素值越大,系统的鲁棒性就越强,让控制系统的快速性下降,选取元素值为 0.7,可兼顾鲁棒性和快速性,即:

$$\mathbf{S}_0 = \begin{bmatrix} 0.7 & 0 \\ 0 & 0.7 \end{bmatrix} \quad (19)$$

考虑微型燃气轮机工作情况,燃料量  $u_m > 0$ ,回热阀开度  $u_{re} \in [0, 1]$ ,分别对 2 个归一化输入加约束范围<sup>[26]</sup>,  $\bar{u}_1 \in [-1, +\infty]$ ,  $\bar{u}_2 \in [-1, 17/3]$ ,搭建 Simulink 模块,进行仿真控制研究。

#### 4.2 给定值扰动下的控制仿真验证

当微燃机转速给定值阶跃降低 5%,即输出转速变为 64 600 r/min 时,输出设定值为  $[-0.05, 0]$ ,就可以分别得到在 DMC 预测控制作用下微燃机转速、微燃机排烟温度的响应曲线,具体曲线如图 6 和图 7 所示。

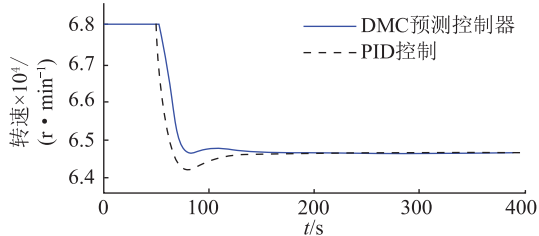


图 6 给定值扰动下微燃机转速响应曲线

Fig.6 Micro-turbine speed response curve with given disturbance

由于微型燃气轮机的惯性较小,微燃机转速在受到给定值扰动的时候,在 DMC 预测控制作用下,能够很快就达到稳定状态。开始阶段,为了快速达到降低微燃机转速的目的,燃料量和回热阀同时减小,以致微燃机转速和排烟温度都降低。随后,为

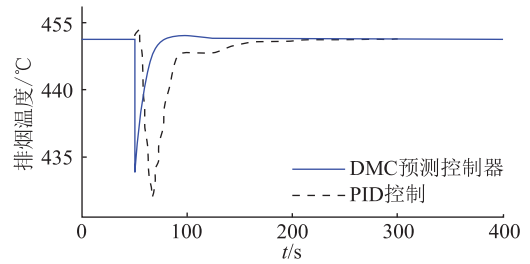


图 7 给定值扰动下微燃机排烟温度响应曲线

Fig.7 Micro-turbine exhaust smoke temperature response curve with given disturbance

了维持排烟温度不变,燃料量进行回升,但最终稳定值比初始阶段要低。在受到转速给定值扰动时,DMC 预测控制能够快速跟随输出设定值,具有强鲁棒性。

#### 4.3 内扰下的控制仿真验证

当微燃机的燃料量发生阶跃内扰减少 5%时,即燃料量输入在稳定工况点下突变为 0.008 1kg/s 时,此时输出设定值为  $[0, 0]$ ,就可以分别得到在 DMC 预测控制作用下微燃机转速、微燃机排烟温度的响应曲线,如图 8 和图 9 所示。

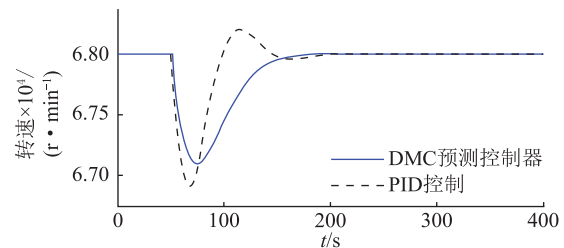


图 8 内扰下微燃机转速响应曲线

Fig.8 Micro-turbine speed response curve with internal disturbance

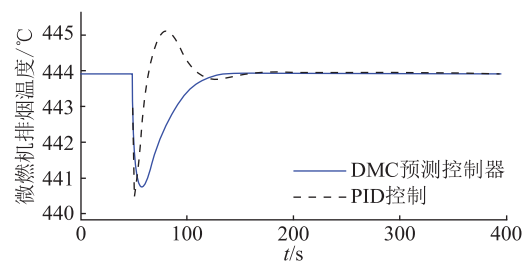


图 9 内扰下微燃机排烟温度响应曲线

Fig.9 Micro-turbine exhaust smoke temperature response curve with internal disturbance

由于受到燃料量阶跃降低 5%内扰作用,微燃机转速和排烟温度在起始阶段都立即下降,DMC 预测控制器快速调节输出控制量,燃料量急剧上升,而回热阀开度却在减小,防止微燃机转速和排烟温度变化速度过快。随后,燃料量轻微降低,回热阀开度也稍作增大,二者变化相反,维持了微燃机转速和排烟温度输出工况稳定。在受到燃料量内扰

时,DMC 预测控制实现了微燃机转速和排烟温度工况点稳定,超调量比常规控制方法小,满足微燃机控制系统抗内扰的要求。

## 5 结语

文中主要研究可调回热式微型燃气轮机控制方法,建立了基于 DMC 预测控制方法的控制器和控制策略设计,并给出了关键控制参数矩阵选取原则。分别从微燃机转速输出给定值扰动、燃料量内扰 2 个算例,对传递函数模型进行控制仿真分析,得到如下结论:

(1) 在微燃机转速给定值阶跃扰动时,DMC 预测控制器在保证快速跟随转速设定值的前提下,排烟温度变化较小,兼顾控制系统鲁棒性;

(2) 在燃料量阶跃内扰时,DMC 预测控制器在短时间内调节了微燃机转速和排烟温度在稳定工况下工作,超调量较小,动态过程波动少;

(3) DMC 预测控制为微燃机控制系统设计提供了解决方法和策略。但是,文中研究的仅是单台设备的控制,多台组成的联合系统控制将是下阶段研究重点。

### 参考文献:

- [1] 康重庆,姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化,2017,41(9):2-11. KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(9):2-11.
- [2] WANG Dan, LIU Lu, JIA Heyuan, et al. Review of key problems related to integrated energy distribution systems [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems,2018,4(2):130-145.
- [3] 杨经纬,张宁,王毅. 面向可再生能源消纳的多能源系统:述评与展望[J]. 电力系统自动化,2018,42(4):11-24. YANG Jingwei, ZHANG Ning, WANG Yi. Multi-energy system towards renewable energy accommodation: review and prospect [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4):11-24.
- [4] 张世翔,吕帅康. 面向园区微电网的综合能源系统评价方法[J]. 电网技术,2018,42(8):34-41. ZHANG Shixiang, LYU Shuaikang. Evaluation method of park-level integrated energy system for micro-grid[J]. Power System Technology,2018,42(8):34-41.
- [5] 金红光,郑丹星,徐建中. 分布式冷热电联产系统装置及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2010. JIN Hongguang, ZHENG Danxing, XU Jianzhong. Distributed-combined cooling heating and power system device and application[M]. Beijing:China Electric Power Press,2010.
- [6] AHMADIGORJI M, AMJADY N. Optimal dynamic expansion planning of distribution systems considering non-renewable distributed generation using a new heuristic double-stage optimization solution approach [J]. Applied Energy, 2015, 9(156):655-665.
- [7] 殷爽睿,艾芊,曾顺奇,等. 能源互联网多能分布式优化研究挑战与展望[J]. 电网技术,2018,42(5):1359-1370. YIN Shuangrui, AI Qian, ZENG Shunqi, et al. Challenges and prospects of multi-energy distributed optimization for energy internet[J]. Power System Technology,2018,42(5):1359-1370.
- [8] ZHANG Junli, GE Bin, XU Hongsheng. An equivalent marginal cost-pricing model for the district heating market [J]. Energy Policy,2013,13(63):1224-1232.
- [9] 李皓然,丁天宝,李玮薇,等. 某微型燃气轮机适应高原起动的技术方案[J]. 航空动力学报,2018,33(5):35-41. LI Haoran, DING Tianbao, LI Weiwei, et al. Starting technical scheme of a micro gas turbine adapting to plateau[J]. Journal of Aerospace Power,2018,33(5):35-41.
- [10] 易桂平,胡仁杰. 微型燃气轮机发电建模与仿真研究[J]. 电力工程技术,2014,33(4):34-38. YI Guiping, HU Renjie. Modeling and simulation of micro gas turbine generation[J]. Electric Power Engineering Technology,2014,33(4):34-38.
- [11] 刘君,穆世霞,李岩松,等. 微电网中微型燃气轮机发电系统整体建模与仿真[J]. 电力系统自动化,2010,34(7):85-89. LIU Jun, MU Shixia, LI Yansong, et al. Overall modeling and simulation of microturbine generation systems in microgrids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7):85-89.
- [12] 张宏伟,陈洁,孙明,等. 微型燃气轮机可变论域自适应模糊 PID 控制[J]. 热能动力工程,2018,33(1):23-28. ZHANG Hongwei, CHEN Jie, SUN Ming, et al. Variable discourse domain self-adaptive fuzzy PID control over micro gas turbines[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2018,33(1):23-28.
- [13] 冯利,张文涛. 基于自适应 RBF 神经网络 PID 控制微燃机排气温度[J]. 节能,2018,37(2):93-96. FENG Li, ZHANG Wentao. Control of exhaust gas temperature of micro-combustion engine based on adaptive RBF neural network PID[J]. Energy Conservation,2018,37(2):93-96.
- [14] 王顺,智同生,施建强. 基于差分进化算法的燃气轮机转速模糊 PID 复合控制[J]. 热能动力工程,2017,32(10):40-44. WANG Shun, ZHI Tongsheng, SHI Jianqiang. Fuzzy PID control of gas turbine speed based on differential evolution [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2017,32(10):40-44.
- [15] 张剑. 基于解耦控制的燃气轮机的控制系统的研究与仿真[D]. 保定:华北电力大学,2010. ZHANG Jian. Research and simulation of gas-turbine control system based on decoupling control[D]. Baoding: North China Electric Power University,2010.
- [16] 毛万成,李勇,彭衍建,等. 光伏/微型燃气轮机混合微电网

- 协调控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(4):26-33.
- MAO Wancheng, LI Yong, PENG Yanjian, et al. Coordination control strategy for PV/micro-turbine hybrid micro-grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(4):26-33.
- [17] 杨宇昕. 基于粒子群算法微电网优化运行研究[D]. 沈阳: 沈阳工程学院, 2018.
- YANG Yuxin. Research on optimal operation of microgrid based on particle swarm optimization[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Engineering, 2018.
- [18] 张俊礼. 微燃气轮机型冷热电联供系统集成优化与动态运行规律研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- ZHANG Junli. Integrated optimization and dynamic characteristic research on microturbine-based cooling, heating and power system[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [19] 范赫. 超超临界机组建模与非线性预测控制在协调中的应用[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- FAN He. Modeling of ultra supercritical units and application of nonlinear predictive control in coordination[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [20] 席裕庚. 预测控制(第二版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- XI Yugeng. Predictive control(second edition)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [21] LI Yanhao, WANG Guangjun, CHEN Hong. Simultaneously estimation for surface heat fluxes of steel slab in a reheating furnace based on DMC predictive control[J]. Applied Thermal Engineering, 2015(4):396-403.
- [22] FOSCOLIANO C, DEL VIGO S, MULAS M, et al. Predictive control of an activated sludge process for long term operation[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 34(11):1031-1044.
- [23] 耿健, 张雨飞, 范赫, 等. 多变量 DMC 预测控制在 MGT-CCHP 系统中应用[J]. 工业仪表与自动化装置, 2017, 31(5):79-83.
- GENG Jian, ZHANG Yufei, FAN He, et al. Application of multivariable DMC predictive control in MGT-CCHP system[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2017, 31(5):79-83.
- [24] 郑宁. 双电机驱动伺服系统的自抗扰控制策略[J]. 计算机仿真, 2017, 34(6):376-380.
- ZHENG Ning. Active disturbance rejection controller for dual-motor driving servo system[J]. Computer Simulation, 2017, 34(6):376-380.
- [25] 李相俊, 陈金元, 谢巍, 等. 基于  $H_\infty$  混合灵敏度的微型燃气轮机鲁棒控制方法: CN201410241151.6[P]. 2017-7-14.
- LI Xiangjun, CHEN Jinyuan, XIE Wei, et al. Robust control method for micro-turbine based on  $H_\infty$  mixed sensitivity: CN201410241151.6[P]. 2017-7-14.
- [26] 张逸轩. 基于卡尔曼滤波器方法的燃气轮机气路故障诊断研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018.
- ZHANG Yixuan. Research on gas turbine gas circuit fault diagnosis based on kalman filter method[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2018.

#### 作者简介:



耿健

耿健(1991),男,硕士,工程师,从事燃气轮机发电系统建模控制工作(E-mail:gengjian1@sgepri.sgcc.com.cn);

杜炜(1981),男,博士,高级工程师,从事综合能源建模工作;

杨冬梅(1983),女,硕士,高级工程师,从事综合能源运行优化工作。

### Application of dynamic matrix predictive control in micro-turbine

GENG Jian<sup>1,2</sup>, DU Wei<sup>1,2</sup>, YANG Dongmei<sup>1,2</sup>, CHEN Yonghua<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaochen<sup>1,2</sup>, HE Guoxin<sup>1,2</sup>

(1. NARI Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Adjustable regenerative micro-turbine has many complex characteristics, such as multivariable, strong coupling, non-linearity, time-varying parameters and so on, which conventional control methods are difficult to meet the control requirements. For the design of micro-turbine control system with two inputs and two outputs, how to achieve stable output under disturbance accurately and quickly is the key to design control system. Firstly, a predictive controller is designed based on dynamic matrix prediction algorithm, and the key control parameters of error correction matrix, error weight matrix, control matrix and softening coefficient matrix are analyzed. Then, at the stable operating point, the predictive control strategy is designed under the given speed disturbance and the internal fuel disturbance. Finally, the simulation control analysis based on transfer function model shows that the control method can meet the control requirements of rapidity, robustness and anti-disturbance, and the overshoot is smaller than the conventional PID control method.

**Keywords:** adjustable regenerative; micro-turbine; dynamic matrix; predictive control; robustness

(编辑 钱悦)