基于内模原理的海上风电机群干扰抑制研究

唐 桢[1],王 冰[1],刘维扬[1],曹智杰[2]
(1. 河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100;2. 南京豪庆信息科技有限公司,江苏 南京 210006)

摘要:海上风力发电系统在运行中,因非线性电力电子设备使用等受到非谐波干扰的影响,对风电机组受非谐波干扰问题进行控制研究。首先,基于Hamilton能量理论,对单机系统进行Hamilton实现;其次,针对单机系统模型,设计内模控制器,使得风电机组在输入扰动的情况下能够稳定运行;然后,考虑受扰风电机群的网络化模型,在内模控制的基础上,设计分布式控制策略,调节系统稳定输出,保证整个风电机群在受非谐波干扰情况下,能够保持稳定运行。最后,通过仿真验证了基于内模的分布式协同控制策略能够有效地抑制干扰,提高风电机群的稳定性及可靠性。

关键词:海上风电;双馈风电机群;分布式控制;内模控制;Hamilton能量理论
中图分类号:TM 614 **文献标志码**:A DOI:10.16081/j.epae.202002013

0 引言

海上风电作为拥有巨大潜力的大规模可再生能源,已经成为未来风能利用的必然趋势[1-2]。由于海上环境恶劣,条件特殊,在建设和控制上相对于陆上系统更为艰难;在实际运行中,风电机组也可能会受到交直流转换、整流等非线性器件产生的非谐波扰动的影响,在这种干扰影响下,闭环系统容易偏离平衡状态,对风电场以及电网的稳定都造成了较大的威胁[3-4]。随着大规模远距离海上风电场的发展,为满足更多数量和更远距离的电能传输要求,亟待提出新的设计思路和控制方法。因此,设计良好的控制方法来调节发电机组,使得海上风电系统能够抑制干扰并稳定工作,实现海上风电场的可靠并网运行,具有重要的实际意义。

随着分布式控制系统发展逐渐趋向于网络化、智能化以及综合化[5-6],对海上风电场采用分布式控制成为重要趋势。将海上风电场看作一个分布式网络,风电场中的每台机组就是网络中的一个节点,机组之间通过通信线路相互交换信息,设计相应的分布式控制策略,调节机组同步输出,使得风电系统稳定运行[7]。与传统的集中控制方法相比,分布式控制思想更适用于网络化控制问题,当局部系统故障时,无故障部分仍然能保持稳定运行,分散了故障风险,增加了系统的可靠性,提高了风电场的运行效率。

海上环境复杂多变,大型双馈风力发电机组的协调控制系统是一个复杂的多输入多输出非线性控制系统。风力发电机也容易受到电力电子装置产生的非谐波扰动的影响,造成整个闭环系统不稳定,降低了系统的稳定性以及靠性[8-9],因此减少甚至消除由非谐波扰动产生的有害影响对于系统的稳定性至关重要。传统的控制方法在处理复杂干扰抑制问题上具有一定局限性,为进一步改善控制品质,采用内模控制IMC(Internal Model Control)方法[10],实现对非谐波扰动的渐近抑制,以保证整个系统全局稳定。由于内模控制方法具有良好的跟踪性能和抗干扰能力,当海上风电机组受到非谐波扰动时,将内模控制嵌入分布式控制策略中,可使得风电机群在抑制扰动的同时,保持系统稳定运行和有功功率稳定输出。

风力发电机组是典型的非线性系统,Hamilton能量理论是处理非线性系统的一个重要工具,具有明确的物理意义和应用背景[11-12]。为实现双馈风力发电机群的控制,先对单台双馈发电机组进行Hamilton实现,得到风力发电机组控制的端口受控耗散Hamilton PCH-D(Port-Controlled Hamilton with Dissipation)系统模型,由于其良好的结构和清晰的物理意义,继而扩展获得双馈风电机群PCH-D模型,为后续干扰抑制和协同控制分析提供了模型。

本文首先基于Hamilton能量方法,对单台机组进行Hamilton实现,得到后续分析设计的PCH-D模型;然后,针对风电机群中的单机系统受到的一类具有非谐波的周期性扰动,利用内模原理设计非线性内部模型,抵消扰动的影响,保持系统的稳定运行;接着,将单机干扰抑制扩展到有多台机组的风电机群系统,引入图论的基本概念,得到风电机群的扰动PCH-D模型,同时在整个系统网络拓扑中存在至少1条有向生成树结构的假设条件下,将内模控制与分布式控制相结合,设计基于内模原理的分布式协同控制策略,使得整个风电机群在受到非谐波干扰时能够有效地抑制干扰,并通过分布式控制相互协调,保证整个风电机群达到全局稳定、有功功率输出同步的控制效果,提高了风电场的稳定性和抗干扰性。最后,通过仿真验证了在受扰动情况下,风电机

收稿日期:2019-08-05;**修回日期**:2019-12-09
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777058)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777058)

群采用基于内模原理的分布式协同控制策略的有效性。

1 双馈风电机组Hamilton模型和图论基础

1.1 双馈风电机组的Hamilton实现

双馈风力发电机组包括传动机构和双馈感应发电机，其中传动机构表示为一阶模型，双馈感应发电机忽略定子的电磁瞬态得到二阶模型，则双馈风力发电机组三阶模型为[13]：

$$\begin{cases}2H_{\mathrm{tot}}\dfrac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}=P_{\mathrm{s}}-P_{\mathrm{m}}=-E_d'i_{ds}-E_q'i_{qs}-P_{\mathrm{m}}\\ \dfrac{\mathrm{d}E_q'}{\mathrm{d}t}=-s\omega_{\mathrm{s}}E_d'-\dfrac{E_q'-\left(X_{\mathrm{s}}-X_{\mathrm{s}}'\right)i_{ds}}{T_0'}+\omega_{\mathrm{s}}\dfrac{L_{\mathrm{m}}}{L_{\mathrm{rr}}}u_{dr}\\ \dfrac{\mathrm{d}E_d'}{\mathrm{d}t}=s\omega_{\mathrm{s}}E_q'-\dfrac{E_d'+\left(X_{\mathrm{s}}-X_{\mathrm{s}}'\right)i_{qs}}{T_0'}-\omega_{\mathrm{s}}\dfrac{L_{\mathrm{m}}}{L_{\mathrm{rr}}}u_{qr}\end{cases}\tag{1}$$

其中，H_{tot}为惯性常数；s为转子转差率；$P_{\mathrm{s}}=-E_d'i_{ds}-E_q'i_{qs}$为有功功率；$P_{\mathrm{m}}$为输入机械功率；$E_d'$、$E_q'$分别为$d$轴、$q$轴瞬态电压；$i_{ds}$、$i_{qs}$分别为$d$轴、$q$轴定子电流；$\omega_{\mathrm{s}}$为同步角速度；$L_{\mathrm{m}}$为互感；$L_{\mathrm{rr}}=L_{\mathrm{m}}+L_{\mathrm{r}}$为转子自感；$X_{\mathrm{s}}=\omega_{\mathrm{s}}L_{\mathrm{ss}}$为定子电抗，$L_{\mathrm{ss}}=L_{\mathrm{m}}+L_{\mathrm{s}}$为定子自感；$X_{\mathrm{s}}'=\omega_{\mathrm{s}}(L_{\mathrm{ss}}-L_{\mathrm{m}}^2/L_{\mathrm{rr}})$为定子瞬态电抗；$T_0'=L_{\mathrm{rr}}/R_{\mathrm{r}}$，$R_{\mathrm{r}}$为转子电阻；$u_{dr}$、$u_{qr}$分别为$d$轴、$q$轴转子电压。式(1)为风电机组在$dq$坐标系下的双输入三阶模型，其中$s$、$E_d'$和$E_q'$是状态，$u_{dr}$和$u_{qr}$是输入。

将式(1)改写成如下矩阵形式：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix}s\\E_q'\\E_d'\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\dfrac{i_{qs}}{2H_{\mathrm{tot}}}E_q'-\dfrac{i_{ds}}{2H_{\mathrm{tot}}}E_d'-\dfrac{P_{\mathrm{m}}}{2H_{\mathrm{tot}}}\\ -\dfrac{1}{T_0'}E_q'-s\omega_{\mathrm{s}}E_d'+\dfrac{i_{ds}}{T_0'}\left(X_{\mathrm{s}}-X_{\mathrm{s}}'\right)\\ s\omega_{\mathrm{s}}E_q'-\dfrac{1}{T_0'}E_d'-\dfrac{i_{qs}}{T_0'}\left(X_{\mathrm{s}}-X_{\mathrm{s}}'\right)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0&0\\ \omega_{\mathrm{s}}L_{\mathrm{m}}/L_{\mathrm{rr}}&0\\0&-\omega_{\mathrm{s}}L_{\mathrm{m}}/L_{\mathrm{rr}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_{dr}\\u_{qr}\end{bmatrix}\tag{2}$$

取 $H=\dfrac{s^2}{2}+\dfrac{1}{2}\left(E_q'+\dfrac{P_{\mathrm{m}}}{2i_{qs}}\right)^2+\dfrac{1}{2}\left(E_d'+\dfrac{P_{\mathrm{m}}}{2i_{ds}}\right)^2$ 作为系统的Hamilton能量函数，再设计控制率$\boldsymbol{u}=\begin{bmatrix}u_{dr}\\u_{qr}\end{bmatrix}=\boldsymbol{K}+\boldsymbol{\mu}$，其中$\boldsymbol{K}$为预反馈，$\boldsymbol{\mu}$为输出反馈，取：

$$\boldsymbol{K}=\begin{bmatrix}-\dfrac{L_{\mathrm{rr}}}{\omega_{\mathrm{s}}L_{\mathrm{m}}}\left[\dfrac{i_{ds}}{T_0'}\left(X_{\mathrm{s}}-X_{\mathrm{s}}'\right)+\dfrac{P_{\mathrm{m}}}{2T_0'i_{qs}}+\left(\dfrac{\omega_{\mathrm{s}}P_{\mathrm{m}}}{2i_{ds}}-\dfrac{i_{qs}}{2H_{\mathrm{tot}}}\right)s\right]\\ \dfrac{L_{\mathrm{rr}}}{\omega_{\mathrm{s}}L_{\mathrm{m}}}\left[\dfrac{i_{qs}}{T_0'}\left(X_{\mathrm{s}}-X_{\mathrm{s}}'\right)+\dfrac{P_{\mathrm{m}}}{2T_0'i_{ds}}-\left(\dfrac{\omega_{\mathrm{s}}P_{\mathrm{m}}}{2i_{qs}}+\dfrac{i_{ds}}{2H_{\mathrm{tot}}}\right)s\right]\end{bmatrix}\tag{3}$$

则式(2)可表示为如下PCH-D形式[14]：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix}s\\E_q'\\E_d'\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0&-\dfrac{i_{qs}}{2H_{\mathrm{tot}}}&-\dfrac{i_{ds}}{2H_{\mathrm{tot}}}\\ \dfrac{i_{qs}}{2H_{\mathrm{tot}}}&-\dfrac{1}{T_0'}&-s\omega_{\mathrm{s}}\\ \dfrac{i_{ds}}{2H_{\mathrm{tot}}}&s\omega_{\mathrm{s}}&-\dfrac{1}{T_0'}\end{bmatrix}\nabla\boldsymbol{H}+\begin{bmatrix}0&0\\ \omega_{\mathrm{s}}L_{\mathrm{m}}/L_{\mathrm{rr}}&0\\0&-\omega_{\mathrm{s}}L_{\mathrm{m}}/L_{\mathrm{rr}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mu_{dr}\\\mu_{qr}\end{bmatrix}\triangleq(\boldsymbol{J}-\boldsymbol{R})\nabla\boldsymbol{H}+\boldsymbol{G}\boldsymbol{\mu}\tag{4}$$

$$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\nabla\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}\dfrac{\omega_{\mathrm{s}}L_{\mathrm{m}}}{L_{\mathrm{rr}}}\left(E_q'+\dfrac{P_{\mathrm{m}}}{2i_{qs}}\right)\\ -\dfrac{\omega_{\mathrm{s}}L_{\mathrm{m}}}{L_{\mathrm{rr}}}\left(E_d'+\dfrac{P_{\mathrm{m}}}{2i_{ds}}\right)\end{bmatrix}\tag{5}$$

其中，$\boldsymbol{J}$为满足$\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}=-\boldsymbol{J}$的斜对称矩阵；$\boldsymbol{R}$为非负对称矩阵；$\nabla\boldsymbol{H}$为Hamilton函数$\boldsymbol{H}$的偏导数；$\boldsymbol{G}$为系统控制矩阵；$\boldsymbol{y}$为系统输出。

1.2 图论基础

海上风电场可看作一个网络拓扑，机组之间通过通信连接相互协调，本文引入一些图论的基本概念，为后文分布式控制设计提供理论基础[15]。

考虑系统中包含n个节点，节点之间主要通过图来表示相互通信的关系，通常将通信拓扑图记为$G(V,E)$，其中$V=\{v_1,v_2,\dots,v_n\}$为节点的集合，$E\subseteq V\times V$为边集，每条边代表2个节点存在信息交流。若连接两节点间的边是有向的，则称$G(V,E)$为有向图，否则称为无向图。边(v_i,v_j)表示节点j能够获得节点i的信息，每张图的邻接矩阵$\boldsymbol{A}=(a_{ij})\in\mathbf{R}^{n\times n}$，当$(v_i,v_j)\in E$时，$a_{ij}>0$，否则$a_{ij}=0$。为便于分析，本文对于$a_{ij}\neq0$的情况，皆取$a_{ij}=1$。

2 双馈风电机群的非谐波干扰抑制设计

干扰抑制是控制理论中一个非常重要的课题，随着电力电子设备的普及，在整个风力发电系统运行过程中，不可避免地存在由非线性负载等产生的非谐波类干扰，对系统的稳定运行造成了较大的影响，降低了电能质量。该类干扰属于已知的一类信号即周期性非谐波干扰，而其参数(周期信号的幅值、相位和频率)是未知的[16]。对于具有多台风力发电机组的海上风电场，每台机组都有可能受到非线性干扰，为满足整个风电场的稳定运行要求，对双馈风电机群进行网络化控制，设计基于扰动抑制的分布式控制策略，使得各机组在受到输入干扰的情况下，发电机群仍然能够保持稳定运行，达到有功功率输出同步的效果，以满足数量和距离上的传输要求，

提高整个海上风电场的运行效率和经济效益。

本文针对风力发电机群受输入干扰的情况,基于系统PCH-D模型,提出基于内部模型设计分布式输出反馈控制器$\boldsymbol{\mu}$,使得机组抵消非谐波扰动的影响,进而,机组之间通过网络化相互调节,使得整个海上双馈风电机群在非谐波干扰的情况下,能够达到输出稳定同步的控制效果。

2.1　单机非谐波输入干扰抑制设计

2.1.1　问题描述

考虑海上风电机群,将单机PCH-D模型扩展,得到考虑风力发电机群的PCH-D模型为:

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}_i=\left(\boldsymbol{J}_i-\boldsymbol{R}_i\right)\nabla\boldsymbol{H}_i+\boldsymbol{G}_i\boldsymbol{\mu}_i\\ \boldsymbol{y}_i=\boldsymbol{G}_i^{\mathrm{T}}\nabla\boldsymbol{H}_i\end{cases}\tag{6}$$

其中,下标i表示在整个风电网络拓扑中的第i台单机的参数。

本节首先分析风电机群中的单机系统受到非谐波干扰时,该扰动可以被建模为信号叠加到输入通道的情况。其中建模为时间函数的外部扰动通过输入通道作用于风力发电机组的PCH-D模型,即扰动Hamilton系统如下:

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}_i=\left(\boldsymbol{J}_i-\boldsymbol{R}_i\right)\dfrac{\partial\boldsymbol{H}_i}{\partial\boldsymbol{x}_i}+\boldsymbol{G}_i\left(\boldsymbol{\mu}_i-\boldsymbol{\delta}_i(t)\right)\\ \boldsymbol{y}_i=\boldsymbol{G}_i^{\mathrm{T}}\nabla\boldsymbol{H}_i\end{cases}\tag{7}$$

其中,这一类非谐波干扰信号$\boldsymbol{\delta}_i(t)$通过一类非线性外部系统(式(8))产生,用于模拟实际系统中的扰动信号作用于被控系统,进而对受扰动系统通过内部模型的方法抑制干扰[16]。

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{w}}_i=\boldsymbol{s}\left(\boldsymbol{w}_i\right)\\ \boldsymbol{\delta}_i(t)=\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{w}_i\right)\end{cases}\tag{8}$$

其中,$\boldsymbol{s}$为对角函数阵;$\boldsymbol{w}_i$为未知频率;$\boldsymbol{\gamma}$为函数阵。

这类非线性外部系统的周期解包括调和函数和非线性函数如极限环等,同时向量场$\boldsymbol{s}\left(\boldsymbol{w}_i\right)$的流是有界的,并且收敛于周期解。

2.1.2　非线性内模设计

非线性系统的输入干扰在电力电子应用中很常见,如交流/直流转换过程、电机转速波动、同步整流系统和开关电源。干扰通常是由一个自治的外部系统产生,为不失一般性,本文设机组受到的非谐波周期扰动是由经典的Van der Pol电路模拟产生的[17],具体形式如下:

$$\begin{cases}\dot{w}_{i1}=w_{i2}-\varsigma_i\left(\dfrac{1}{3}w_{i1}^3-w_{i1}\right)\\ \dot{w}_{i2}=-w_{i1}\end{cases}\tag{9}$$

其中,$\varsigma_i>0$为一个调节电流或者电压周期的参数;w_{i1}、w_{i2}为$\boldsymbol{w}_i$的2个元素。

本文设计的内部模型需要嵌入摄动系统中,通过控制输入以抵消外部系统产生的干扰,下面给出了这种沉浸系统的相关假设[18]。

定义1　存在一个浸入系统:

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{\eta}}_i=\boldsymbol{F}_i\boldsymbol{\eta}_i+\boldsymbol{G}_i'\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\boldsymbol{\eta}_i\right)\\ \boldsymbol{\delta}_i(t)=\boldsymbol{T}_i\boldsymbol{\eta}_i\end{cases}\tag{10}$$

其中,$\boldsymbol{\eta}_i\in\mathbf{R}^{n_{\eta_i}}$;矩阵$\boldsymbol{F}_i$、$\boldsymbol{G}_i'$、$\boldsymbol{T}_i$、$\boldsymbol{M}_i$已知,矩阵对$\left(\boldsymbol{F}_i,\boldsymbol{T}_i\right)$是可观测的非线性函数。

$$\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\boldsymbol{\eta}_i\right)=\begin{bmatrix}\gamma_1\sum\limits_{i=1}^{n_{\eta_i}}\boldsymbol{M}_{1i}\boldsymbol{\eta}_i\\ \vdots\\ \gamma_m\sum\limits_{i=1}^{n_{\eta_i}}\boldsymbol{M}_{mi}\boldsymbol{\eta}_i\end{bmatrix}\tag{11}$$

该函数阵满足$\left(\boldsymbol{s}_1-\boldsymbol{s}_2\right)^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{s}_1\right)-\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{s}_2\right)\right)\geqslant 0$。同时选择具有适当维数的矩阵$\boldsymbol{K}_i'$,使得$\boldsymbol{F}_i-\boldsymbol{K}_i'\boldsymbol{T}_i$满足Hurwitz要求。此外,必须存在正定矩阵$\boldsymbol{P}_{i\hat{\eta}}$和$\boldsymbol{Q}_{i\hat{\eta}}$满足:

$$\begin{cases}\boldsymbol{P}_{i\hat{\eta}}\boldsymbol{F}_{i0}+\boldsymbol{F}_{i0}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{i\hat{\eta}}=-\boldsymbol{Q}_{i\hat{\eta}}\\ \boldsymbol{P}_{i\hat{\eta}}\boldsymbol{G}_i'+\boldsymbol{M}_i^{\mathrm{T}}=0\end{cases}\tag{12}$$

其中,$\boldsymbol{F}_{i0}=\boldsymbol{F}_i-\boldsymbol{K}_i'\boldsymbol{T}_i$。

同时,考虑向量函数$\boldsymbol{L}_i(\boldsymbol{x})$满足:

$$\frac{\partial\boldsymbol{L}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)}{\partial\boldsymbol{x}_i}\boldsymbol{G}_i'\left(\boldsymbol{x}_i\right)=\boldsymbol{K}_i'\tag{13}$$

存在2个数$\alpha_1\in\mathbf{R}^-$和$\alpha_2\in\mathbf{R}$,及矩阵$\boldsymbol{Q}\in\mathbf{R}^{n\times n}$,对于所有的$\boldsymbol{\chi}$,式(14)成立。

$$\begin{aligned}-\nabla\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x})\boldsymbol{R}\nabla\boldsymbol{H}(\boldsymbol{x})-\nabla\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x})\boldsymbol{G}(\boldsymbol{x})\boldsymbol{T}\boldsymbol{\chi}\leqslant\\ \alpha_1\left\|\boldsymbol{Q}\boldsymbol{x}\right\|^2+\alpha_2\left\|\boldsymbol{Q}\boldsymbol{x}\right\|\left\|\boldsymbol{\chi}\right\|\end{aligned}\tag{14}$$

基于上述定义,为使得系统在非线性外部干扰下保持稳定,设计基于内部模型的风电机组单机控制策略,具体定理如下。

定理1　考虑海上风电场中的双馈风电机组(式(1)),其受到的非谐波周期性扰动由非线性外部系统(式(8))产生,设计内部模型控制器为:

$$\begin{cases}\dot{\hat{\boldsymbol{\eta}}}_i=\left(\boldsymbol{F}_i-\boldsymbol{K}_i'\boldsymbol{T}_i\right)\left(\hat{\boldsymbol{\eta}}_i-\boldsymbol{L}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\right)+\\ \qquad\boldsymbol{G}_i'\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\left(\hat{\boldsymbol{\eta}}_i-\boldsymbol{L}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\right)\right)+\boldsymbol{N}_i\left(\boldsymbol{x}_i,\boldsymbol{\mu}_i\right)\\ \boldsymbol{\mu}_i=\boldsymbol{T}_i\left(\hat{\boldsymbol{\eta}}_i-\boldsymbol{L}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\right)\end{cases}\tag{15}$$

其中,$\boldsymbol{N}_i\left(\boldsymbol{x}_i,\boldsymbol{\mu}_i\right)=\dfrac{\partial\boldsymbol{L}_i}{\partial\boldsymbol{x}_i}\left(\boldsymbol{J}_i-\boldsymbol{R}_i\right)\dfrac{\partial\boldsymbol{H}_i}{\partial\boldsymbol{x}_i}+\dfrac{\partial\boldsymbol{L}_i}{\partial\boldsymbol{x}_i}\boldsymbol{G}_i'\boldsymbol{\mu}_i$。

在满足以上假设的情况下,能够使得单机闭环系统保持稳定。证明过程见附录A。

由以上分析可知,针对风电机组受到的非谐波干扰,本文给出了产生非谐波信号的非线性外部系

统的明确条件，对双馈机组单机PCH-D模型进行内部模型设计，使得所提出的内模控制器通过输出反馈调节输出，抵消扰动对系统的影响，保持系统的全局稳定性。

2.2 多机非谐波输入干扰抑制设计

风电场一般拥有多台发电机组，为使得整个风电机群系统在受非谐波扰动情况下也能够保持稳定，本节通过设计分布式控制策略，使得风电场内机组在抑制非谐波干扰的同时，机组之间能够实现分布式控制，使得整个受扰动风电机群从单机到机群都能够保持正常运行，提高运行效益。具体设计如下。

假设1 海上风电机群构成的网络拓扑中，至少存在1簇有向生成树。

定理2 考虑含有N台机组的海上风力发电机群，在机组受非谐波干扰情况下，设计风电机群的干扰抑制策略如下：

$$\boldsymbol{\mu}_i=\boldsymbol{T}_i\left(\hat{\boldsymbol{\eta}}_i-\boldsymbol{L}\left(\boldsymbol{x}_i\right)\right)-\sum_{j=1}^{N}a_{ij}\left(\boldsymbol{y}_i-\boldsymbol{y}_j\right)\quad \forall i,j=1,2,\cdots,N \tag{16}$$

$$\begin{cases}\dot{\hat{\boldsymbol{\eta}}}_i=\left(\boldsymbol{F}_i-\boldsymbol{K}_i'\boldsymbol{T}_i\right)\left(\hat{\boldsymbol{\eta}}_i-\boldsymbol{L}_i(\boldsymbol{x})\right)+\\ \qquad \boldsymbol{G}_i'\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\left(\hat{\boldsymbol{\eta}}_i-\boldsymbol{L}_i(\boldsymbol{x})\right)\right)+\boldsymbol{N}_i\left(\boldsymbol{x}_i,\tilde{\boldsymbol{\mu}}_i\right)\\ \tilde{\boldsymbol{\mu}}_i=\boldsymbol{T}_i\left(\hat{\boldsymbol{\eta}}_i-\boldsymbol{L}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\right)\end{cases} \tag{17}$$

其中，$a_{ij}=1$，在该控制策略下，各风电机组能够抑制非谐波扰动，整个闭环机群系统全局稳定。证明过程见附录B。

考虑集合：

$$\boldsymbol{S}=\left\{\boldsymbol{x}\,\middle|\,\dot{\boldsymbol{V}}=0\right\}=\left\{\boldsymbol{x}\,\middle|\,\nabla\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\nabla\boldsymbol{H}=0,\left(\boldsymbol{L}_N\otimes\boldsymbol{I}_3\right)\boldsymbol{y}=0\right\} \tag{18}$$

依据LaSalle不变集原理[19]，当$t\to\infty$时，系统稳定运行的解全部收敛到集合$\boldsymbol{S}$中，此时输出满足$\boldsymbol{y}_1=\boldsymbol{y}_2=\cdots=\boldsymbol{y}_N$，当风电机组输出一致时，由式(18)可知$\nabla\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\nabla\boldsymbol{H}=0$，则有：

$$\frac{1}{T_{0i}'}\left(E_{qi}'+\frac{P_{\mathrm{m}i}}{2i_{qsi}}\right)^2+\frac{1}{T_{0i}'}\left(E_{di}'+\frac{P_{\mathrm{m}i}}{2i_{dsi}}\right)^2=0 \tag{19}$$

可得$P_{\mathrm{s}i}=-E_{qi}'i_{qsi}-E_{di}'i_{dsi}=P_{\mathrm{m}i}$，系统全局稳定时，风力机的有功功率输出等于其输入机械功率。可知，当风电机群在输入扰动下，设计基于内部模型的分布式协同控制策略，使得各机组在抑制干扰的同时相互协调输出，能够保持闭环系统稳定运行。

综上分析，当海上风电机群存在输入扰动时，对风电场内受扰动的单台机组设计内部模型控制器，其能够抵消外部系统扰动对风电机组的不利影响；在此基础上对多台机组进行网络化控制，得到基于内部模型的分布式控制策略，使得各机组相互调节输出，保持整个风电机群在非谐波干扰下的稳定运行，大幅提高了海上双馈风电场的可靠性和稳定性。

3 仿真验证

本文利用MATLAB软件进行仿真，验证控制策略的有效性。首先，研究双馈风电机组单机受非谐波扰动下，引入内部模型来消除扰动的影响，通过对比，验证内模控制原理对干扰的抑制作用；其次，针对含多机的双馈风电机群，在其受非谐波扰动下，风电机群不能做到稳定运行，对整个风电机群系统具有较大影响，说明扰动抑制在风电机群控制中的必要性；最后针对受非谐波扰动的风电机群，运用基于内模的分布式控制策略，验证风电机群内部机组能够抑制干扰，且保持同步输出，整个风电机群系统稳定运行。本节将选取6台双馈风力发电机组成风电机群，主要参数如附录C中表C1所示。

3.1 单机非谐波干扰抑制设计

对于双馈风力发电机单机，考虑非谐波扰动是由著名的Van der Pol 电路产生，其中取$\varsigma=2$，则：

$$\begin{cases}\dot{w}_1=w_2-2\left(w_1^3/3-w_1\right)\\ \dot{w}_2=-w_1\end{cases} \tag{20}$$

为满足假设要求，取适当维数的矩阵和参数如下：

$$\begin{cases}\boldsymbol{F}=\begin{bmatrix}2&1\\-1&0\end{bmatrix},\ \boldsymbol{G}'=\begin{bmatrix}-2&0\\0&0\end{bmatrix},\ \boldsymbol{M}=\begin{bmatrix}1&0\\0&0\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}2&-2\\-1&1\end{bmatrix},\ \gamma_1(s)=\dfrac{1}{3}s^3,\ \gamma_2(s)=0\end{cases} \tag{21}$$

针对多输入多输出系统，矩阵$\boldsymbol{T}$维数应适当选取，使得叠加到输入通道的扰动$\boldsymbol{\delta}(t)$在维数上与输入维数相同，则有：

$$\begin{cases}\delta_{d\mathrm{r}}(t)=2w_1-2w_2\\ \delta_{q\mathrm{r}}(t)=-w_1+w_2\end{cases} \tag{22}$$

则扰动PCH-D系统为：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix}s\\E_q'\\E_d'\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0&-\dfrac{i_{q\mathrm{s}}}{2H_{\mathrm{tot}}}&-\dfrac{i_{d\mathrm{s}}}{2H_{\mathrm{tot}}}\\ \dfrac{i_{q\mathrm{s}}}{2H_{\mathrm{tot}}}&-\dfrac{1}{T_0'}&-s\omega_{\mathrm{s}}\\ \dfrac{i_{d\mathrm{s}}}{2H_{\mathrm{tot}}}&s\omega_{\mathrm{s}}&-\dfrac{1}{T_0'}\end{bmatrix}\nabla\boldsymbol{H}+\begin{bmatrix}0&0\\ \omega_{\mathrm{s}}\dfrac{L_{\mathrm{m}}}{L_{\mathrm{rr}}}&0\\ 0&-\omega_{\mathrm{s}}\dfrac{L_{\mathrm{m}}}{L_{\mathrm{rr}}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mu_{d\mathrm{r}}-\delta_{d\mathrm{r}}(t)\\ \mu_{q\mathrm{r}}-\delta_{q\mathrm{r}}(t)\end{bmatrix} \tag{23}$$

选取$\boldsymbol{K}'=\begin{bmatrix}4&4\\-1&-1\end{bmatrix}$，代入式(12)和式(13)，

可得:

$$\boldsymbol{F}_0=\begin{bmatrix}-2 & 5\\ 0 & -1\end{bmatrix},\ \boldsymbol{P}_{\hat{\eta}}=\begin{bmatrix}\frac{1}{2} & 0\\ 0 & 2\end{bmatrix},\ \boldsymbol{Q}_{\hat{\eta}}=\begin{bmatrix}2 & -\frac{5}{2}\\ -\frac{5}{2} & 4\end{bmatrix} \tag{24}$$

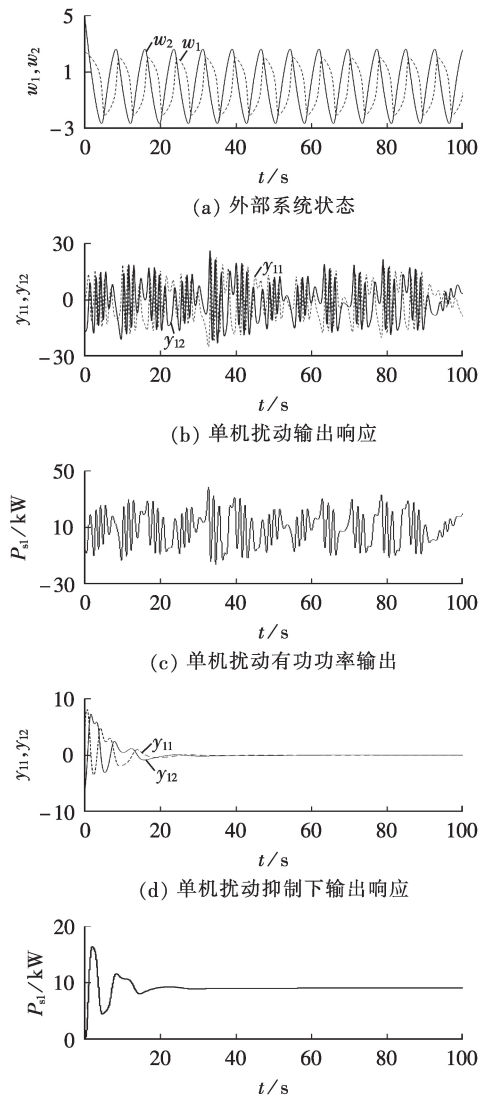
设函数矩阵 $\boldsymbol{L}(\boldsymbol{x})=\begin{bmatrix}4(x_2+x_3)\\ -(x_2+x_3)\end{bmatrix}$,将上述矩阵代入式(15),计算可得:

$$\begin{bmatrix}\dot{\hat{\eta}}_1\\ \dot{\hat{\eta}}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-2 & 5\\ 0 & -1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\hat{\eta}_1-4(x_2+x_3)\\ \hat{\eta}_2+(x_2+x_3)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}-\frac{2}{3}\left[\hat{\eta}_1-4(x_2+x_3)\right]^3\\ 0\end{bmatrix}+$$
$$\begin{bmatrix}4\left[\left(\frac{i_{qs}}{2H_{\mathrm{tot}}}+\frac{i_{ds}}{2H_{\mathrm{tot}}}\right)x_1+\left(-\frac{1}{T_0'}+s\omega_{\mathrm{s}}\right)\left(x_2+\frac{P_{\mathrm{m}}}{2i_{qs}}\right)\right]\\ -\left[\left(\frac{i_{qs}}{2H_{\mathrm{tot}}}+\frac{i_{ds}}{2H_{\mathrm{tot}}}\right)x_1+\left(-\frac{1}{T_0'}+s\omega_{\mathrm{s}}\right)\left(x_2+\frac{P_{\mathrm{m}}}{2i_{qs}}\right)\right]\end{bmatrix}+$$
$$\begin{bmatrix}4\left(-s\omega_{\mathrm{s}}-\frac{1}{T_0'}\right)\left(x_3+\frac{P_{\mathrm{m}}}{2i_{qs}}\right)\\ -\left(-s\omega_{\mathrm{s}}-\frac{1}{T_0'}\right)\left(x_3+\frac{P_{\mathrm{m}}}{2i_{ds}}\right)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}4 & 4\\ -1 & -1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mu_{dr}\\ \mu_{qr}\end{bmatrix} \tag{25}$$

$$\begin{bmatrix}\mu_{dr}\\ \mu_{qr}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}2 & -2\\ -1 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\hat{\eta}_1-4(x_2+x_3)\\ \hat{\eta}_2+(x_2+x_3)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}2\hat{\eta}_1-2\hat{\eta}_2-10(x_2+x_3)\\ -\hat{\eta}_1+\hat{\eta}_2+5(x_2+x_3)\end{bmatrix} \tag{26}$$

由于风速具有不可预测性,为使得设计更为严谨,采用随机风速变化来研究该方法的控制性能,随机风速图如附录D中图D1所示。

选取适当的初始值,双馈风电机组单机仿真结果如图1所示。由图1(b)、(c)可知,在系统受到非谐波扰动 $\boldsymbol{\delta}(t)$ 时,系统趋于不稳定状态,发电机组的输出及功率呈现振荡波动形式,非谐波扰动对系统的稳定性影响较大。由图1(d)、(e)可知,在系统加入内模控制器后,风电机组的输出和有功功率在经过20 s的调节,波动减小,在约30 s后,系统趋于稳定,系统输出收敛于0。同时,系统的有功功率输出稳定在输入机械功率值9 kW。因此,在系统受到输入扰动时,加入内部模型,能够有效地消除扰动对系统的影响,提高了系统的抗干扰性。



(a) 外部系统状态

(b) 单机扰动输出响应

(c) 单机扰动有功功率输出

(d) 单机扰动抑制下输出响应

(e) 单机扰动抑制下有功功率输出

图1　双馈风电机组单机仿真结果

Fig.1　Simulative results of doubly-fed wind turbine single system

3.2　风电机群受非谐波干扰

选取6台双馈风力发电机组组成的风电机群系统,风电机组通过通信网络连接,相互交换信息,其网络模型如附录D中图D2所示。考虑各机组连接方式,6台风电机组的网络拓扑如图2所示,其为含有有向生成树的连通图。

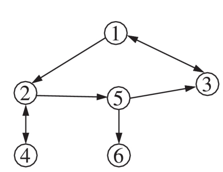


图2　风电机组网络拓扑图

Fig.2　Network topology of wind turbines

为使得机组之间能够交换信息,相互协调,保持整个风电机群的稳定输出,对6台机组设计分布式控制策略为:

$$\begin{cases}\boldsymbol{\mu}_1=\boldsymbol{y}_3-\boldsymbol{y}_1\\ \boldsymbol{\mu}_2=\boldsymbol{y}_1+\boldsymbol{y}_4-2\boldsymbol{y}_2\\ \boldsymbol{\mu}_3=\boldsymbol{y}_1+\boldsymbol{y}_5-2\boldsymbol{y}_3\\ \boldsymbol{\mu}_4=\boldsymbol{y}_2-\boldsymbol{y}_4\\ \boldsymbol{\mu}_5=\boldsymbol{y}_2-\boldsymbol{y}_5\\ \boldsymbol{\mu}_6=\boldsymbol{y}_5-\boldsymbol{y}_6\end{cases}\tag{27}$$

风电机群系统中的机组在非谐波扰动的影响下,采用分布式控制策略,系统的仿真波形如附录D中图D3所示。由图可知,整个风电机群系统由于扰动的影响,输出波动幅度较大,系统处于不稳定状态,扰动对系统造成了不利的影响,因此要保持整个风电机群稳定运行,依靠分布式控制策略是不够的,抑制扰动十分有必要。

3.3 风电机群非谐波干扰抑制设计

利用基于内模控制的分布式协同控制策略$\boldsymbol{\mu}_i$,对含有6台机组的风电机群加以控制,不妨假设每个机组受到的非谐波扰动相同,得到6个机组的分布式控制策略分别为:

$$\begin{cases}\boldsymbol{\mu}_1=\boldsymbol{\mu}_{11}+\boldsymbol{y}_3-\boldsymbol{y}_1\\ \boldsymbol{\mu}_2=\boldsymbol{\mu}_{21}+\boldsymbol{y}_4+\boldsymbol{y}_1-2\boldsymbol{y}_2\\ \boldsymbol{\mu}_3=\boldsymbol{\mu}_{31}+\boldsymbol{y}_1+\boldsymbol{y}_5-2\boldsymbol{y}_3\\ \boldsymbol{\mu}_4=\boldsymbol{\mu}_{41}+\boldsymbol{y}_2-\boldsymbol{y}_4\\ \boldsymbol{\mu}_5=\boldsymbol{\mu}_{51}+\boldsymbol{y}_2-\boldsymbol{y}_5\\ \boldsymbol{\mu}_6=\boldsymbol{\mu}_{61}+\boldsymbol{y}_5-\boldsymbol{y}_6\end{cases}\tag{28}$$

双馈风电机群受扰动下加入内模控制的仿真图如附录D中图D4所示。由图可知,在35 s时,各机组输出曲线和有功功率曲线波动幅度减小,在约45 s后,输出曲线收敛至0,有功功率曲线收敛至一定数值,各机组在不同风速下输出同步且整个机群系统稳定运行。因此,在系统受到外部系统产生的非谐波干扰时,通过引入基于内部模型的分布式协同控制策略,系统能够保持稳定且输出同步,证明了基于内部模型的分布式协同控制策略的有效性。

4 结论

本文针对海上双馈风电场在运行过程中,风电机群受到非谐波扰动的情况,在Hamilton能量模型的基础上,提出基于内部模型的控制策略,抵消非谐波扰动对风电机群的影响,使得机群系统稳定运行。本文主要创新点主要体现在以下2个方面:①对于双馈风力发电机组受非谐波扰动情况,在单机系统PCH-D模型的基础上,引入内部模型方法设计内模控制器,消除非谐波扰动对单机系统的影响,保持单机系统的稳定;②针对海上双馈风电机群受到一类非谐波扰动的情况,将单机系统扩展到机群系统的PCH-D模型,进一步设计基于内部模型的分布式输出反馈控制律,在消除扰动对机组影响的同时,对其进行分布式控制,使得整个机群系统在扰动下也能够保持稳定运行、输出同步,显著提高了系统的可靠性和稳定性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] WU Qiuwei,SUN Yuanzhang. Modeling and modern control of wind power[M]. Piscataway,USA:Wiley-IEEE Press,2018:151-173.

[2] LIU Yushan,ABU-RUB H,GE Baoming,et al. Impedance source power electronic converters[M]. Piscataway,USA:Wiley-IEEE Press,2016:256-265.

[3] 樊熠,张金平,谢健,等. 风电场谐波谐振测试与分析[J]. 电力系统自动化,2016,40(2):147-151.
FAN Yi,ZHANG Jinping,XIE Jian,et al. Testing and analysis for harmonic resonance of wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(2):147-151.

[4] 贺益康,徐海亮. 双馈风电机组电网适应性问题及其谐振控制解决方案[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5188-5202.
HE Yikang,XU Hailiang. The grid adaptability problem of DFIG-based wind turbines and its solution by resonant control scheme[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(29):5188-5202.

[5] CADY S T,DOMÍNGUEZ-GARCÍA A D,HADJICOSTIS C N. A distributed generation control architecture for islanded AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2015,23(5):1717-1735.

[6] CHEN Gang,LEWIS F L,FENG Ening,et al. Distributed optimal active power control of multiple generation systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2015,62(11):7079-7090.

[7] 王冰,窦玉,王宏华. 海上风电场双馈风电机群分布式协同控制研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(19):5279-5287.
WANG Bing,DOU Yu,WANG Honghua. Distributed cooperative control research of doubly fed wind turbine groups in offshore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(19):5279-5287.

[8] DING Zhengtao. Output regulation of uncertain nonlinear systems with nonlinear exosystems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control,2006,51(3):498-503.

[9] DONG Yi,CHEN Jie,HUANG Jie. Cooperative robust output regulation for second-order nonlinear multiagent systems with an unknown exosystem[J]. IEEE Transactions on Automatic Control,2018,63(10):3418-3425.

[10] ANIRUDDHA D. Adaptive internal model control[M]. London,UK:Springer,1998:55-97.

[11] 王玉振. 广义Hamilton控制系统理论、实现、控制与应用[M]. 北京:科学出版社,2007:103-145.

[12] VAN DER SCHAFT A,JELTSEMA D. Port-Hamiltonian systems theory:an introductory overview[M]. Indiana,USA:Now Publishers Inc,2014:65-112.

[13] WU Feng,ZHANG Xiaoping,JU Ping,et al. Decentralized nonlinear control of wind turbine with doubly fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2008,23(2):613-621.

[14] 王冰,田敏,王宏华. 基于Hamilton能量理论的海上风电场双馈机群分布式互补控制[J]. 电力自动化设备,2018,38(2):58-66.
WANG Bing,TIAN Min,WANG Honghua. Distributed complementary control of doubly-fed wind turbine group in offshore

wind farm based on Hamiltonian energy theory[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(2):58-66.

[15] MESBAHI M,EGERSTEDT M. Graph theoretic methods in multiagent networks[M]. Princeton,USA:Princeton University Press,2010:14-33.

[16] GENTILI L,PAOLI A,BONIVENTO C. Input disturbance suppression for port-Hamiltonian systems:an internal model approach[J]. Lecture Notes in Control and Information Sciences,2007,353:85-98.

[17] XI Zairong,DING Zhengtao. Global decentralised output regulation for a class of large-scale nonlinear systems with nonlinear exosystem[J]. IET Control Theory & Applications,2007,1(5):1504-1511.

[18] CHEN Cailian,DING Zhengtao,LENNOX B. Rejection of nonharmonic disturbances in donlinear systems with semi-global stability[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems Ⅱ:Express Briefs,2008,55(12):1289-1293.

[19] KHALIL H K. Nonlinear systems[M]. Upper Saddle River,USA:Prentice Hall,2002:111-181.

作者简介:

唐　桢

唐　桢(1995—),女,广西桂林人,硕士研究生,主要研究方向为海上风电机群控制(**E-mail**:2932441894@qq.com);

王　冰(1975—),男,江苏扬州人,教授,博士,主要研究方向为风电机组控制、网络化系统协调与控制(**E-mail**:icekingking@hhu.edu.cn)。

(编辑 李莉)

Interference suppression of offshore wind turbine cluster based on internal model theory

TANG Zhen[1],WANG Bing[1],LIU Weiyang[1],CAO Zhijie[2]

(1. College of Energy and Electrical Engineering,Hohai University,Nanjing 211100,China;

2. Nanjing Howard Technology Science and Technology Company,Nanjing 210006,China)

Abstract:In the operation of offshore wind power generation system,the nonlinear power electronic equipments produce non-harmonic interference,so the control of non-harmonic interference on wind turbine is studied. Firstly,based on Hamilton energy theory,the Hamilton realization for a stand-alone system is achieved. Then,the internal model controller is designed for the single system model,so that the wind turbine can operate stably under input disturbance. Furthermore,considering the networked model of the disturbed wind turbine group,on the basis of internal model control,the distributed control strategy is designed to adjust the stable output of the system and ensure the stable operation of the whole wind turbine group under the condition of non-harmonic interference. Finally,the simulation verifies that the distributed cooperative control strategy based on the principle of internal model can effectively suppress interference and improve the stability and reliability of wind turbine group.

Key words:offshore wind power;doubly-fed wind turbine cluster;distributed control;internal model control;Hamilton energy theory

附录 A

先将内模控制策略$\boldsymbol{\mu}_i=\boldsymbol{T}_i\left(\hat{\boldsymbol{\eta}}_i-\boldsymbol{L}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\right)$ 代入系统的扰动 PCH-D 模型（式（7））中，可得：

$$\dot{\boldsymbol{x}}_i=\left(\boldsymbol{J}_i-\boldsymbol{R}_i\right)\frac{\partial \boldsymbol{H}_i}{\partial \boldsymbol{x}_i}+\boldsymbol{G}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\boldsymbol{T}_i\left(\hat{\boldsymbol{\eta}}_i-\boldsymbol{L}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\right)-\boldsymbol{G}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\boldsymbol{\delta}_i\left(t\right)=\left(\boldsymbol{J}_i-\boldsymbol{R}_i\right)\frac{\partial \boldsymbol{H}_i}{\partial \boldsymbol{x}_i}-\boldsymbol{G}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\boldsymbol{T}_i\left(\hat{\boldsymbol{\eta}}_i-\boldsymbol{L}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)-\boldsymbol{\eta}_i\right) \tag{A1}$$

设$\boldsymbol{\chi}_i=\boldsymbol{\eta}_i-\hat{\boldsymbol{\eta}}_i+\boldsymbol{L}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)$，则有：

$$\dot{\boldsymbol{x}}_i=\left(\boldsymbol{J}_i-\boldsymbol{R}_i\right)\frac{\partial \boldsymbol{H}_i}{\partial \boldsymbol{x}_i}-\boldsymbol{G}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\boldsymbol{T}_i\boldsymbol{\chi}_i \tag{A2}$$

将$\boldsymbol{\chi}_i$对时间求导，可得：

$$\dot{\boldsymbol{\chi}}_i=\dot{\boldsymbol{\eta}}_i-\dot{\hat{\boldsymbol{\eta}}}_i+\frac{\partial \boldsymbol{L}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)}{\partial t} \tag{A3}$$

再将式(10)—(12)代入式（A3），可得：

$$\dot{\boldsymbol{\chi}}_i=\boldsymbol{F}_i\boldsymbol{\eta}_i+\boldsymbol{G}_i\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\boldsymbol{\eta}_i\right)-\left(\boldsymbol{F}_i-\boldsymbol{K}_i'\boldsymbol{T}_i\right)\left(\hat{\boldsymbol{\eta}}_i-\boldsymbol{L}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\right)-\boldsymbol{G}_i\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\left(\hat{\boldsymbol{\eta}}_i-\boldsymbol{L}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\right)\right)-\boldsymbol{N}_i\left(\boldsymbol{x}_i,\boldsymbol{\mu}_i\right)+\frac{\partial \boldsymbol{L}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)}{\partial \boldsymbol{x}_i}\dot{\boldsymbol{x}}_i \tag{A4}$$

进一步计算可得：

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{\chi}}_i&=\boldsymbol{F}_i\boldsymbol{\eta}_i+\boldsymbol{G}_i\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\boldsymbol{\eta}_i\right)-\left(\boldsymbol{F}_i-\boldsymbol{K}_i'\boldsymbol{T}_i\right)\left(\hat{\boldsymbol{\eta}}_i-\boldsymbol{L}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\right)-\boldsymbol{G}_i\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\left(\hat{\boldsymbol{\eta}}_i-\boldsymbol{L}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\right)\right)-\boldsymbol{N}_i\left(\boldsymbol{x}_i,\boldsymbol{\mu}_i\right)+\frac{\partial \boldsymbol{L}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)}{\partial \boldsymbol{x}_i}\dot{\boldsymbol{x}}_i=\\&\left[\boldsymbol{F}_i\boldsymbol{\eta}_i-\boldsymbol{K}_i'\boldsymbol{T}_i\boldsymbol{\eta}_i-\boldsymbol{F}_{i0}\left(\hat{\boldsymbol{\eta}}_i-\boldsymbol{L}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\right)\right]+\boldsymbol{G}_i\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\boldsymbol{\eta}_i\right)-\boldsymbol{G}_i\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\left(\hat{\boldsymbol{\eta}}_i-\boldsymbol{L}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\right)\right)=\\&\boldsymbol{F}_{i0}\boldsymbol{\chi}_i+\boldsymbol{G}_i\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\boldsymbol{\eta}_i\right)-\boldsymbol{G}_i\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\left(\hat{\boldsymbol{\eta}}_i-\boldsymbol{L}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\right)\right)\end{aligned} \tag{A5}$$

则整个系统可表示为：

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}_i=\left(\boldsymbol{J}_i-\boldsymbol{R}_i\right)\dfrac{\partial \boldsymbol{H}_i}{\partial \boldsymbol{x}_i}-\boldsymbol{G}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\boldsymbol{T}_i\boldsymbol{\chi}_i\\ \dot{\boldsymbol{\chi}}_i=\boldsymbol{F}_{i0}\boldsymbol{\chi}_i+\boldsymbol{G}_i\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\boldsymbol{\eta}_i\right)-\boldsymbol{G}_i\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\left(\hat{\boldsymbol{\eta}}_i-\boldsymbol{\chi}_i\right)\right)\end{cases} \tag{A6}$$

取单机系统 Lyapunov 函数为：

$$\boldsymbol{V}_i=\boldsymbol{H}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)+\boldsymbol{\chi}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{i\hat{\eta}}\boldsymbol{\chi}_i \tag{A7}$$

将$\dot{\boldsymbol{\chi}}_i$代入式（A7），并对其求导，可得：

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{V}}_i&=\nabla^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\dot{\boldsymbol{x}}_i+\boldsymbol{\chi}_i^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{F}_{i0}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{i\hat{\eta}}+\boldsymbol{P}_{i\hat{\eta}}\boldsymbol{F}_{i0}\right)\boldsymbol{\chi}_i+2\boldsymbol{\chi}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{i\hat{\eta}}\boldsymbol{G}_i\left(\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\boldsymbol{\eta}_i\right)-\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\left(\boldsymbol{\eta}_i-\boldsymbol{\chi}_i\right)\right)\right)=\\&-\nabla^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\boldsymbol{R}_i\nabla\boldsymbol{H}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)-\nabla^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\boldsymbol{G}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\boldsymbol{T}_i\boldsymbol{\chi}_i-\boldsymbol{\chi}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_{i\hat{\eta}}\boldsymbol{\chi}_i+2\boldsymbol{\chi}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{i\hat{\eta}}\boldsymbol{G}_i\left(\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\boldsymbol{\eta}_i\right)-\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\left(\boldsymbol{\eta}_i-\boldsymbol{\chi}_i\right)\right)\right)\end{aligned} \tag{A8}$$

设$\dot{\boldsymbol{V}}_{i1}=2\boldsymbol{\chi}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{i\hat{\eta}}\boldsymbol{G}_i\left(\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\boldsymbol{\eta}_i\right)-\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\left(\boldsymbol{\eta}_i-\boldsymbol{\chi}_i\right)\right)\right)$，因为其满足式(12)，即：

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{V}}_{i1}&=2\boldsymbol{\chi}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{i\hat{\eta}}\boldsymbol{G}_i\left(\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\boldsymbol{\eta}_i\right)-\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\left(\boldsymbol{\eta}_i-\boldsymbol{\chi}_i\right)\right)\right)=-2\boldsymbol{\chi}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}_i^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\boldsymbol{\eta}_i\right)-\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\left(\boldsymbol{\eta}_i-\boldsymbol{\chi}_i\right)\right)\right)=\\&-2\left\{\boldsymbol{M}_i\left[\boldsymbol{\eta}_i-\left(\boldsymbol{\eta}_i-\boldsymbol{\chi}_i\right)\right]\right\}^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\boldsymbol{\eta}_i\right)-\boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{M}_i\left(\boldsymbol{\eta}_i-\boldsymbol{\chi}_i\right)\right)\right)\le 0\end{aligned} \tag{A9}$$

则有：

$$\dot{\boldsymbol{V}}_i=-\nabla^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\boldsymbol{R}_i\nabla\boldsymbol{H}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)-\nabla^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\boldsymbol{G}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\boldsymbol{T}_i\boldsymbol{\chi}_i-\boldsymbol{\chi}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_{i\hat{\eta}}\boldsymbol{\chi}_i+\dot{\boldsymbol{V}}_{i1} \tag{A10}$$

则可得：

$$\dot{\boldsymbol{V}}_i \le \alpha_{i1}\|\boldsymbol{Q}_i\boldsymbol{x}_i\|^2 + \alpha_{i2}\|\boldsymbol{Q}_i\boldsymbol{x}_i\|\|\boldsymbol{\chi}_i\| - \boldsymbol{\chi}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_{i\eta}\boldsymbol{\chi}_i + \dot{\boldsymbol{V}}_{i1} \tag{A11}$$

因为 $\boldsymbol{Q}_{i\eta}$ 为正定矩阵，存在常数 $\beta_{\mathbf{Q}_{i\eta}} < 0$，使得 $-\boldsymbol{\chi}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_{i\eta}\boldsymbol{\chi}_i \le \beta_{\mathbf{Q}_{i\eta}}\|\boldsymbol{\chi}_i\|^2$，则

$$\dot{\boldsymbol{V}}_i \le \alpha_{i1}\|\boldsymbol{Q}_i\boldsymbol{x}_i\|^2 + \alpha_{i2}\|\boldsymbol{Q}_i\boldsymbol{x}_i\|\|\boldsymbol{\chi}_i\| + \beta_{\mathbf{Q}_{i\eta}}\|\boldsymbol{\chi}_i\|^2 + \dot{\boldsymbol{V}}_{i1} \tag{A12}$$

根据杨氏不等式，可知：

$$\|\boldsymbol{Q}_i\boldsymbol{x}_i\|\|\boldsymbol{\chi}_i\| \le \varepsilon\|\boldsymbol{Q}_i\boldsymbol{x}_i\|^2 + C_\varepsilon\|\boldsymbol{\chi}_i\|^2 \tag{A13}$$

其中，ε 取任意小，C_ε 取任意大，本文取 $\varepsilon=\dfrac{\lambda}{2}$，$C_\varepsilon=\dfrac{1}{2\lambda}$ 。

可得：

$$\dot{\boldsymbol{V}}_i \le \alpha_{i1}\|\boldsymbol{Q}_i\boldsymbol{x}_i\|^2 + \frac{\alpha_{i2}}{2}\lambda\|\boldsymbol{Q}_i\boldsymbol{x}_i\|^2 + \frac{\alpha_{i2}}{2\lambda}\|\boldsymbol{\chi}_i\|^2 + \beta_{\mathbf{Q}_{i\eta}}\|\boldsymbol{\chi}_i\|^2 + \dot{\boldsymbol{V}}_{i1} \tag{A14}$$

又取 $\lambda=-\dfrac{\alpha_{i1}}{\alpha_{i2}}$ ，可得：

$$\dot{\boldsymbol{V}}_i \le \frac{1}{2}\alpha_{i1}\|\boldsymbol{Q}_i\boldsymbol{x}_i\|^2 + \dot{\boldsymbol{V}}_{i1} \le 0 \tag{A15}$$

所以，单机系统中存在一类非谐波输入干扰时，引入内模控制器可以抵消扰动的影响，使得闭环系统趋于稳定，证明完毕。

附录 B

设 $\boldsymbol{\mu}_i = \boldsymbol{\mu}_{i1} + \boldsymbol{\mu}_{i2}$，可将其分为两部分：

$$\begin{cases} \boldsymbol{\mu}_{i1} = \boldsymbol{T}_i\left(\hat{\boldsymbol{\eta}}_i - \boldsymbol{L}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\right) \\ \boldsymbol{\mu}_{i2} = -\sum_{j=1}^{N} a_{ij}\left(\boldsymbol{y}_i - \boldsymbol{y}_j\right) \end{cases} \tag{B1}$$

其中，$\boldsymbol{\mu}_{i1}$ 的作用是消除扰动对每台机组的影响；$\boldsymbol{\mu}_{i2}$ 则调节多台机组之间的输出，实现多台机组的输出同步。

将控制策略 $\boldsymbol{\mu}_i$ 代入风电机群的扰动 PCH-D 模型（式（7））中，可得：

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{x}}_i &= \left(\boldsymbol{J}_i - \boldsymbol{R}_i\right)\frac{\partial \boldsymbol{H}_i}{\partial \boldsymbol{x}_i} - \boldsymbol{G}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\boldsymbol{T}_i\left(\hat{\boldsymbol{\eta}}_i - \boldsymbol{L}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\right) + \boldsymbol{G}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\sum_{j=1}^{N} a_{ij}\left(\boldsymbol{y}_i - \boldsymbol{y}_j\right) - \boldsymbol{G}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\boldsymbol{\delta}_i\left(t\right) = \\ &\left(\boldsymbol{J}_i - \boldsymbol{R}_i\right)\frac{\partial \boldsymbol{H}_i}{\partial \boldsymbol{x}_i} - \boldsymbol{G}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\boldsymbol{T}_i\boldsymbol{\chi}_i - \boldsymbol{G}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\sum_{j=1}^{N} a_{ij}\left(\boldsymbol{y}_i - \boldsymbol{y}_j\right) \end{aligned} \tag{B2}$$

整个系统为：

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}_i = \left(\boldsymbol{J}_i - \boldsymbol{R}_i\right)\frac{\partial \boldsymbol{H}_i}{\partial \boldsymbol{x}_i} - \boldsymbol{G}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\boldsymbol{T}_i\boldsymbol{\chi}_i - \boldsymbol{G}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\sum_{j=1}^{N} a_{ij}\left(\boldsymbol{y}_i - \boldsymbol{y}_j\right) \\ \dot{\boldsymbol{\chi}}_i = \boldsymbol{F}_{i0}\boldsymbol{\chi}_i + \boldsymbol{G}_i'\gamma\left(\boldsymbol{M}_i\boldsymbol{\eta}_i\right) - \boldsymbol{G}_i'\gamma\left(\boldsymbol{M}_i\left(\hat{\boldsymbol{\eta}}_i - \boldsymbol{\chi}_i\right)\right) \end{cases} \tag{B3}$$

取系统的 Lyapunov 函数为：

$$\boldsymbol{V} = 2\sum_{i=1}^{N}\boldsymbol{H}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right) + \sum_{i=1}^{N}\boldsymbol{\chi}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{\hat{\eta}_i}\boldsymbol{\chi}_i \tag{B4}$$

对式（B4）求导，并将 $\dot{\boldsymbol{\chi}}$ 代入，可得：

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{V}} &= 2\sum_{i=1}^{N}\boldsymbol{H}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\nabla^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}\left(\boldsymbol{x}\right)\dot{\boldsymbol{x}} + \sum_{i=1}^{N}\left[\boldsymbol{\chi}^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{F}_0^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{\hat{\eta}} + \boldsymbol{P}_{\hat{\eta}}\boldsymbol{F}_0\right)\boldsymbol{\chi} + 2\boldsymbol{\chi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{\hat{\eta}}\boldsymbol{G}'\left(\gamma\left(\boldsymbol{M}\boldsymbol{\eta}\right) - \gamma\left(\boldsymbol{M}\left(\boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\chi}\right)\right)\right)\right] = \\ &-2\sum_{i=1}^{N}\nabla^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\boldsymbol{R}_i\nabla\boldsymbol{H}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right) - 2\sum_{i=1}^{N}\nabla^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\boldsymbol{G}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\boldsymbol{T}_i\boldsymbol{\chi}_i - 2\sum_{i=1}^{N}\nabla^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\boldsymbol{G}_i\left(\boldsymbol{x}_i\right)\sum_{j=1}^{N} a_{ij}\left(\boldsymbol{y}_i - \boldsymbol{y}_j\right) + \\ &\sum_{i=1}^{N}\left[-\boldsymbol{\chi}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_{\hat{\eta}_i}\boldsymbol{\chi}_i + 2\boldsymbol{\chi}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{\hat{\eta}_i}\boldsymbol{G}_i'\left(\gamma\left(\boldsymbol{M}_i\boldsymbol{\eta}_i\right) - \gamma\left(\boldsymbol{M}_i\left(\boldsymbol{\eta}_i - \boldsymbol{\chi}_i\right)\right)\right)\right] \end{aligned} \tag{B5}$$

将 $\dot{\boldsymbol{V}}$ 写成如下向量形式：

$$\dot{\boldsymbol{V}} = -2\nabla^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}\left(\boldsymbol{x}\right)\boldsymbol{R}\nabla\boldsymbol{H}\left(\boldsymbol{x}\right) - 2\nabla^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}\left(\boldsymbol{x}\right)\boldsymbol{G}\left(\boldsymbol{x}\right)\boldsymbol{T}\boldsymbol{\chi} - 2\boldsymbol{y}^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{L}_N \otimes \boldsymbol{I}_3\right)\boldsymbol{y} - \boldsymbol{\chi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_{\hat{\eta}}\boldsymbol{\chi} + \dot{\boldsymbol{V}}_1 \tag{B6}$$

其中，$\boldsymbol{L}_N$ 为 N 个机组系统的 Laplacian 矩阵；输出 $\boldsymbol{y} = \left[\boldsymbol{y}_1, \boldsymbol{y}_2, \ldots, \boldsymbol{y}_N\right]^{\mathrm{T}}$。同理存在 $\alpha_1 \in \mathbf{R}^-$ 和 $\alpha_2 \in \mathbf{R}$，$\beta_{\mathbf{Q}_{\hat{\eta}}} < 0$ 以及矩阵 $\boldsymbol{Q} \in \mathbf{R}^{n \times n}$，使得：

$$\dot{\boldsymbol{V}} \le 2\alpha_1\left\|\boldsymbol{Q}\boldsymbol{x}\right\|^2 + 2\alpha_2\left\|\boldsymbol{Q}\boldsymbol{x}\right\|\left\|\boldsymbol{\chi}\right\| + \beta_{\mathbf{Q}_{\hat{\eta}}}\left\|\boldsymbol{\chi}\right\|^2 + \dot{\boldsymbol{V}}_1 - 2\boldsymbol{y}^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{L}_N \otimes \boldsymbol{I}_3\right)\boldsymbol{y} \tag{B7}$$

同理，取 $\varepsilon = \dfrac{\hat{\lambda}}{2}$，$C_\varepsilon = \dfrac{1}{2\hat{\lambda}}$，则有：

$$\dot{\boldsymbol{V}} \le 2\alpha_1 \left\|\boldsymbol{Qx}\right\|^2 + \alpha_2 \hat{\lambda} \left\|\boldsymbol{Qx}\right\|^2 + \frac{\alpha_2}{\hat{\lambda}} \left\|\boldsymbol{\chi}\right\|^2 + \beta_{Q_{\tilde{\eta}}} \left\|\boldsymbol{\chi}\right\|^2 + \dot{\boldsymbol{V}}_1 - 2\boldsymbol{y}^{\mathrm{T}} \left(\boldsymbol{L}_N \otimes \boldsymbol{I}_3\right) \boldsymbol{y} \tag{B8}$$

取 $\hat{\lambda} = -\dfrac{\alpha_1}{\alpha_2}$，得：

$$\dot{\boldsymbol{V}} \le \alpha_1 \left\|\boldsymbol{Qx}\right\|^2 + \dot{\boldsymbol{V}}_1 - 2\boldsymbol{y}^{\mathrm{T}} \left(\boldsymbol{L}_N \otimes \boldsymbol{I}_3\right) \boldsymbol{y} \le 0 \tag{B9}$$

可知，当风电机群在输入扰动下，设计基于内部模型的分布式协同控制策略，使得各机组在抑制干扰的同时相互协调输出，能够保持闭环系统稳定运行。证明完毕。

附录 C

表 C1　双馈风电机组主要参数

Table C1　Key parameters of doubly-fed wind turbines

参数	数值					
	1 号机	2 号机	3 号机	4 号机	5 号机	6 号机
H_{tot} / s	6	4	3	5	4	5
L_{m}	2.71	2.56	2.89	3.12	3.27	3.34
L_{s}	0.175	0.168	0.157	0.161	0.164	0.171
L_{r}	0.152	0.165	0.157	0.168	0.162	0.153
R_{r}	0.005	0.007	0.006	0.008	0.007	0.006
I_{qs}	1.72	1.58	1.47	1.78	1.81	1.67
I_{ds}	1.62	1.79	1.58	1.93	1.83	1.72
P_{s} / kW	12	11	10	9	8	7

注：L_{m}、L_{s}、L_{r}、R_{r}、I_{qs}、I_{ds} 均为标幺值。

附录 D

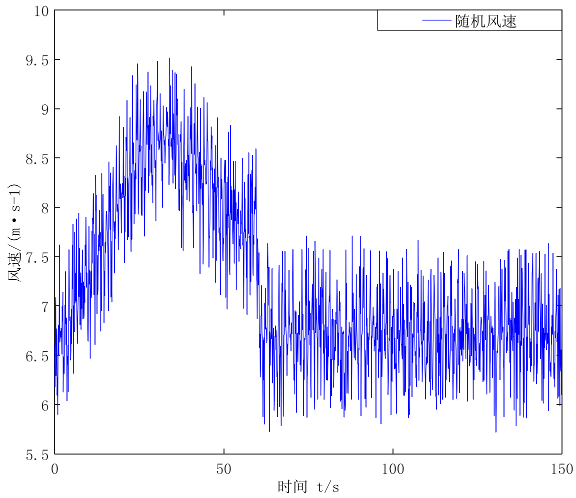


图 D1 随机风速曲线

Fig.D1　Curve of random wind speed

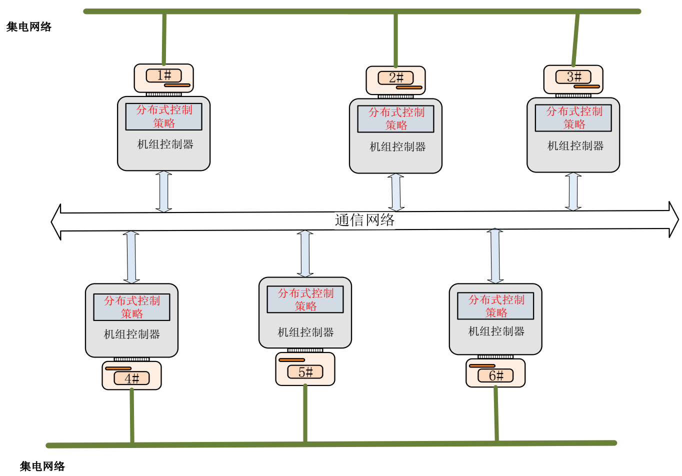
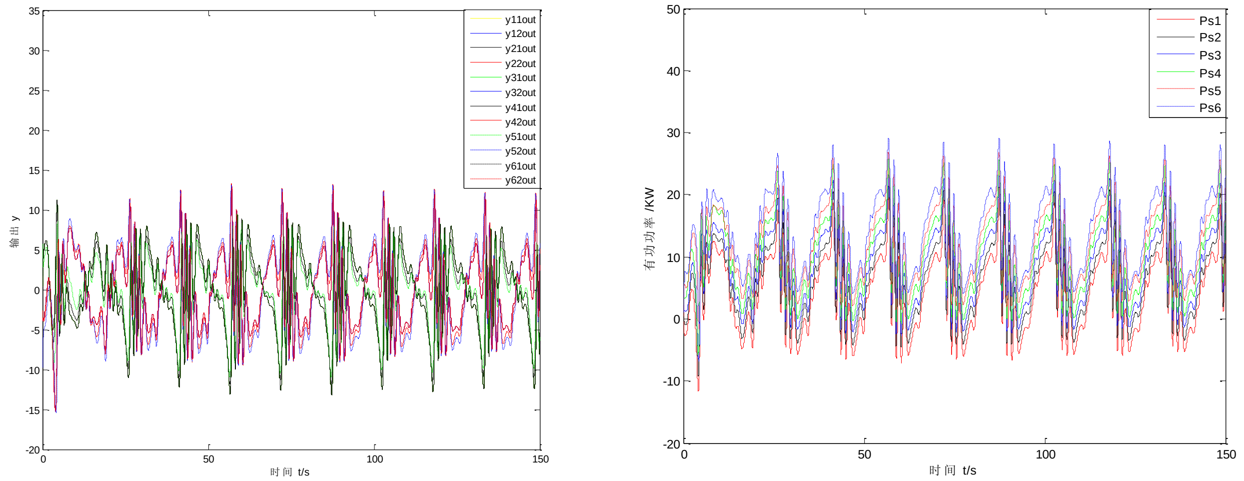


图 D2 海上风电机群分布式控制系统

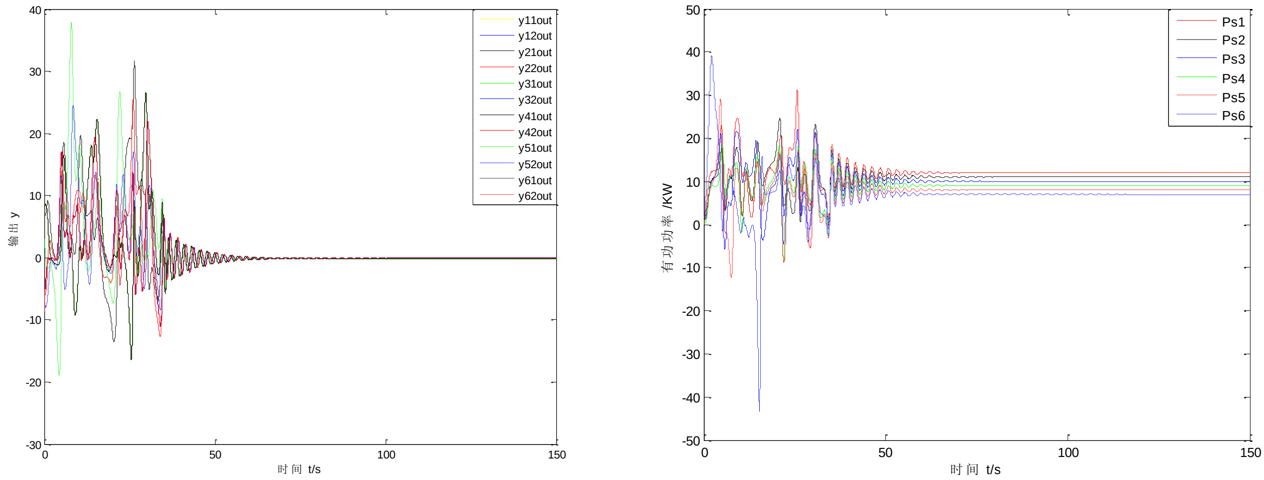
Fig.D2　Distributed control system of offshore wind farm group



（a）风电机群扰动下输出响应　　（b）风电机群扰动下有功功率输出

图 D3 双馈风电机群系统的仿真波形（采用分布式控制）

Fig.D3　Simulative results of doubly-fed wind turbine cluster system with distributed control



（a）　风电机组群扰动抑制下输出响应　　（b）风电机组扰动抑制下有功功率输出

图 D4 双馈风电机群系统的仿真波形（采用内模控制）

Fig.D4　Simulative results of doubly-fed wind turbine cluster system with IMC