



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102280896 A

(43) 申请公布日 2011. 12. 14

(21) 申请号 201110231951. 6

(22) 申请日 2011. 08. 15

(71) 申请人 沈阳工业大学

地址 110870 辽宁省沈阳市经济技术开发区  
沈辽西路 111 号

(72) 发明人 卢芸

(74) 专利代理机构 沈阳智龙专利事务所 (普通  
合伙) 21115

代理人 宋铁军

(51) Int. Cl.

H02J 3/28(2006. 01)

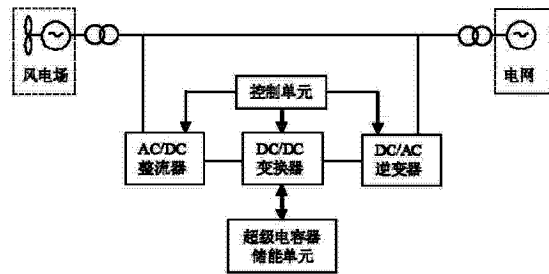
权利要求书 3 页 说明书 7 页 附图 3 页

(54) 发明名称

基于灰色模型控制的风力发电储能装置及方法

(57) 摘要

本发明涉及一种基于灰色模型控制的风力发电储能装置及方法,该储能装置主要由控制单元、AC/DC 整流器、DC/AC 逆变器、双向 DC/DC 变换器及储能用的超级电容器储能单元构成;控制单元分别连接 AC/DC 整流器、DC/AC 逆变器和双向 DC/DC 变换器,AC/DC 整流器与 DC/AC 逆变器之间连接有双向 DC/DC 变换器,双向 DC/DC 变换器与超级电容器储能单元相连接;本发明基于灰色模型控制提出了采用储能装置来稳定控制输出功率的控制策略,减少了电力系统的不确定性,增强了电力系统的安全性和可靠性,为风电并网而带来的电力系统不稳定提供有效的解决方法。



1. 一种基于灰色模型控制的风力发电储能装置,建立在风电场与电网之间,其特征在于:该储能装置主要由控制单元、AC/DC 整流器、DC/AC 逆变器、双向 DC/DC 变换器及储能用的超级电容器储能单元构成;控制单元分别连接 AC/DC 整流器、DC/AC 逆变器和双向 DC/DC 变换器,AC/DC 整流器与 DC/AC 逆变器之间连接有双向 DC/DC 变换器,双向 DC/DC 变换器与超级电容器储能单元(1)相连接。

2. 根据权利要求 1 所述的基于灰色模型控制的风力发电储能装置,其特征在于:所述 DC/DC 变换器的低压端连接超级电容器储能单元(1),DC/DC 变换器的高压端连接 AC/DC 整流器和 DC/AC 逆变器。

3. 根据权利要求 1 所述的基于灰色模型控制的风力发电储能装置,其特征在于:所述双向 DC/DC 变换器用于实现直流低压侧超级电容器储能单元与直流高压侧之间的能量转换,其电路结构为:超级电容器储能单元(1)一端连接电感 L 的一端,电感 L 的另一端分别连接绝缘栅双极晶体管  $S_1$  的发射极、绝缘栅双极晶体管  $S_2$  的集电极、二极管  $D_1$  的正极、二极管  $D_2$  的负极,绝缘栅双极晶体管  $S_1$  的集电极与二极管  $D_1$  的负极连接电容 C 的一端,电容 C 的另一端连接绝缘栅双极晶体管  $S_2$  的发射极、二极管  $D_2$  的正极和超级电容器储能单元(1)的另一端。

4. 根据权利要求 1、2 或 3 所述的基于灰色模型控制的风力发电储能装置,其特征在于:所述的超级电容器储能单元(1)为超级电容器的串联、并联或串并联组合。

5. 一种如权利要求 1 所述基于灰色模型控制的风力发电储能装置储能方法,其特征在于:为了充分利用风能,风电场以最大运行方式运行,采用改进的灰色模型根据风电场前若干时刻的输出功率预测出未来时刻的输出功率,将  $\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(0)}(k+1) - \hat{x}^{(0)}(k)$  与电网需要风电场提供的功率进行比较,超出电网所需提供的功率部分进行储存,当风速下降后,风电场的输出功率达不到电网所需提供功率时,低于电网所需提供的功率将由储能装置补充,仍以电网所需功率输出;具体步骤如下:

首先针对风力发电的特点,建立改进的灰色模型对风力发电输出功率进行预测:

1)、在建立 GM(1,1) 模型中,令  $X^{(0)}$  为 GM(1,1) 建模序列,

$$X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$$

其中,  $X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)$  分别为预测前  $n$  个等时间间隔的风力发电输出功率数值;

2)、为了随时追踪前若干时刻的输出功率状况,每次将预测时刻前的等时间间隔的风电输出功率送入数据序列中的同时,去除一个最陈旧的数据,即

$$X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$$

当新得到数据  $X^{(0)}(n+1)$  后,则将其置入  $X^{(0)}$  同时去除  $X^{(0)}(1)$ ,此时  $X^{(0)}$  为

$$X^{(0)} = \{X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(n), X^{(0)}(n+1)\}$$

即进行等维新息处理;由于该灰色模型输入量为待预测风力发电输出功率的前若干时刻实际输出功率序列,能够随时追踪前若干时刻的输出功率,使得预测结果更加接近实际输出功率;

3)、将  $X^{(0)} = \{X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(n), X^{(0)}(n+1)\}$  以  $X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$  的形式进行以下计算： $X^{(0)}$  进行一次累加生成序列，得到

$$X^{(1)} = \{X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), \dots, X^{(1)}(n)\}$$

其中， $X^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k X^{(0)}(i), k=1, 2, \dots, n$ ；

4)、对  $X^{(1)}$  再做邻均值处理，得到背景值序列：

$$Z^{(1)} = \{Z^{(1)}(1), Z^{(1)}(2), \dots, Z^{(1)}(n)\}$$

一般情况下， $Z^{(1)}(k) = 0.5X^{(1)}(k-1) + 0.5X^{(1)}(k)$ ；

为了提高预测精度，进行背景值  $Z^{(1)}(k)$  的修正，取  $Z^{(1)}(k) = \alpha X^{(1)}(k-1) + (1-\alpha)X^{(1)}(k)$  ( $k=1, 2, \dots, n$ )；

第一次计算时取  $\alpha=0.5$ ，构造 GM(1,1) 灰微分方程如下：

$$X^{(1)}(k) + aZ^{(1)}(k) = b$$

灰微分方程的白化微分方程为：

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = b$$

用最小二乘法来求解参数  $a, b$ ，则

$$P = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B'B)^{-1} B'Y_n$$

$$B = \begin{bmatrix} -Z_2^{(1)} & 1 \\ -Z_3^{(1)} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -Z_{n-1}^{(1)} & 1 \\ -Z_n^{(1)} & 1 \end{bmatrix} \quad Y_n = \begin{bmatrix} X_2^{(0)} \\ X_3^{(0)} \\ \vdots \\ X_{n-1}^{(0)} \\ X_n^{(0)} \end{bmatrix}$$

$X^{(0)}$  的灰色预测模型为：

$$\hat{X}^{(0)}(k+1) = (X^{(0)}(1) - \frac{b}{a})e^{-ak} + \frac{b}{a}$$

$X^{(0)}$  的灰色预测模型为：

$$\hat{X}^{(0)}(k+1) = \hat{X}^{(0)}(k+1) - \hat{X}^{(0)}(k)$$

其中  $k=1, 2, \dots, n$ ；

将解得的参数  $a$  带入  $\alpha = \frac{1}{a} - \frac{1}{e^a - 1}$ ，重新计算  $\alpha$ ，记为  $\alpha(m+1)$ ；将  $\alpha(m+1)$  与上一次计算所用的  $\alpha(m)$  进行比较；如果  $|\alpha(m+1) - \alpha(m)|$  大于给定的阈值，表明还有可能大幅度

的提高精度,将 $\alpha(m+1)$ 代入

$$Z^{(0)}(k) = \alpha X^{(0)}(k-1) + (1-\alpha)X^{(0)}(k) \quad (k=1,2,\dots,n)$$

计算背景值 $Z^{(0)}(k+1)$ ,再一次进行建模和预测运算;否则,迭代结束,输出预测结果;

预测结果 $\hat{X}^{(0)}(k+1)$ 即为预测出的未来时刻的风电输出功率。

6. 根据权利要求5所述的基于灰色模型控制的风力发电储能方法,其特征在于:采用风电场交流侧并联功率转换系统方式,当风电场以最大运行方式运行,将风电场输出功率高于电网需要风电场提供功率部分的三相交流电能经AC/DC整流器变为直流电能,进行储能;当需要储能装置进行能量释放时,通过DC/AC逆变器将直流逆变成可控的三相交流;该储能装置的储能元件采用超级电容器储能单元(1),将灰色模型预测后得到的超出电网所需提供功率的储存能量部分通过超级电容器储能单元进行风力发电储能,或将低于电网所需提供功率的能量部分由风力发电储能装置进行能量释放,采用并联补偿平滑风力发电系统出力,以风力发电输出功率和电网所需提供功率作为控制信号,对风力发电储能装置进行控制。

7. 根据权利要求5所述的基于灰色模型控制的风力发电储能方法,其特征在于:采用该灰色模型除直接得到预测结果外,还可通过输入数据的处理和输出结果的残差处理,以减小误差。

## 基于灰色模型控制的风力发电储能装置及方法

### 技术领域

[0001] 本发明主要涉及一种风力发电储能装置及方法,特别是涉及一种基于灰色模型控制的风力发电储能装置及方法。

### 背景技术

[0002] 随着世界能源消耗的加快,传统能源储量的减少,风力发电这种绿色能源越来越得到重视,并具有取之不尽用之不竭的优势。世界各国都出台各项政策大力扶持风电产业,近几年我国的风电产业也得到了飞速发展,从引进技术,到自主研发,国产化率得到大幅提高,国产风电机已占主导地位。在风力发电发展的同时,由于大量间隙性和随机性风电能源注入电网,风电机的稳定性、安全性以及电网的调度管理将面临新的挑战。

[0003] 大规模风电接入使电力系统面临若干挑战,为了把握风电出力变化规律,减少电力系统的不确定性,增强电力系统的安全性和可靠性,提出了采用储能装置来稳定控制输出功率的控制策略。这将为风电并网而带来的电力系统不稳定提供有效的解决方法,对于电力系统经济、安全、可靠地运行以及提高其运行效益具有特别重要的意义。

### 发明内容

[0004] 发明目的:

本发明提出了一种基于灰色模型控制的风力发电储能装置及方法,其目的是为了减少电力系统的不确定性,增强电力系统的安全性和可靠性。

[0005] 技术方案:

一种基于灰色模型控制的风力发电储能装置,建立在风电场与电网之间,其特征在于:该储能装置主要由控制单元、AC/DC 整流器、DC/AC 逆变器、双向 DC/DC 变换器及储能用的超级电容器储能单元构成;控制单元分别连接 AC/DC 整流器、DC/AC 逆变器和双向 DC/DC 变换器,AC/DC 整流器与 DC/AC 逆变器之间连接有双向 DC/DC 变换器,双向 DC/DC 变换器与超级电容器储能单元相连接。

[0006] 所述 DC/DC 变换器的低压端连接超级电容器储能单元,DC/DC 变换器的高压端连接 AC/DC 整流器和 DC/AC 逆变器。

[0007] 所述双向 DC/DC 变换器用于实现直流低压侧超级电容器储能单元与直流高压侧之间的能量转换,其电路结构为:超级电容器储能单元一端连接电感 L 的一端,电感 L 的另一端分别连接绝缘栅双极晶体管  $S_1$  的发射极、绝缘栅双极晶体管  $S_2$  的集电极、二极管  $D_1$  的正极、二极管  $D_2$  的负极,绝缘栅双极晶体管  $S_1$  的集电极与二极管  $D_1$  的负极连接电容 C 的一端,电容 C 的另一端连接绝缘栅双极晶体管  $S_2$  的发射极、二极管  $D_2$  的正极和超级电容器储能单元的另一端。

[0008] 所述的超级电容器储能单元为超级电容器的串联、并联或串并联组合。

[0009] 一种如上所述基于灰色模型控制的风力发电储能装置的储能方法,其特征在于:为了充分利用风能,风电场以最大运行方式运行,采用改进的

灰色模型针对风电场前若干时刻的输出功率预测出未来时刻的输出功率, 将  $\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(0)}(k+1) - \hat{x}^{(0)}(k)$  与电网需要风电场提供的功率进行比较, 超出电网所需提供的功率部分进行储存, 当风速下降后, 风电场的输出功率达不到电网所需提供功率时, 低于电网所需提供的功率将由储能装置补充, 仍以电网所需功率输出; 具体步骤如下:

首先针对风力发电的特点, 建立改进的灰色模型对风力发电输出功率进行预测:

1)、在建立 GM(1, 1) 模型中, 令  $X^{(0)}$  为 GM(1, 1) 建模序列,

$$X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$$

其中,  $X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)$  分别为预测前  $n$  个等时间间隔(该时间间隔可根据具体情况设定)的风力发电输出功率数值。

[0010] 2)、为了随时追踪前若干时刻的输出功率状况, 每次将预测时刻前的等时间间隔的风电输出功率送入数据序列中的同时, 去除一个最陈旧的数据, 即

$$X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$$

当新得到数据  $X^{(0)}(n+1)$  后, 则将其置入  $X^{(0)}$  同时去除  $X^{(0)}(1)$ , 此时  $X^{(0)}$  为

$$X^{(0)} = \{X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(n), X^{(0)}(n+1)\}$$

即进行等维新息处理; 由于该灰色模型输入量为待预测风力发电输出功率的前若干时刻实际输出功率序列, 能够随时追踪前若干时刻的输出功率, 使得预测结果更加接近实际输出功率。

[0011] 3)、将  $X^{(0)} = \{X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(n), X^{(0)}(n+1)\}$  以

$X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$  的形式进行以下计算:  $X^{(0)}$  进行一次累加生成序列, 得到

$$X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$$

$$\text{其中, } X^{(0)}(k) = \sum_{i=1}^k X^{(0)}(i), \quad k=1, 2, \dots, n。$$

[0012] 4)、对  $X^{(0)}$  再做邻均值处理, 得到背景值序列:

$$Z^{(0)} = \{Z^{(0)}(1), Z^{(0)}(2), \dots, Z^{(0)}(n)\}$$

一般情况下,  $Z^{(0)}(k) = 0.5X^{(0)}(k-1) + 0.5X^{(0)}(k)$ ;

为了提高预测精度, 进行背景值  $Z^{(0)}(k)$  的修正, 取

$$Z^{(0)}(k) = \alpha X^{(0)}(k-1) + (1-\alpha)X^{(0)}(k) \quad (k=1, 2, \dots, n);$$

第一次计算时取  $\alpha=0.5$ , 构造 GM(1, 1) 灰微分方程如下:

$$X^{(0)}(k) + \alpha Z^{(0)}(k) = b$$

灰微分方程的白化微分方程为:

$$\frac{dX^{(0)}}{dt} + \alpha X^{(0)} = b$$

用最小二乘法来求解参数  $\alpha, b$ , 则

$$P = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B'B)^{-1} B' Y_n$$

$$B = \begin{bmatrix} -Z_2^{(0)} & 1 \\ -Z_3^{(0)} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -Z_{n-1}^{(0)} & 1 \\ -Z_n^{(0)} & 1 \end{bmatrix} \quad Y_n = \begin{bmatrix} X_2^{(0)} \\ X_3^{(0)} \\ \vdots \\ X_{n-1}^{(0)} \\ X_n^{(0)} \end{bmatrix}$$

$X^{(0)}$  的灰色预测模型为:

$$\hat{X}^{(0)}(k+1) = (X^{(0)}(1) - \frac{b}{\alpha})e^{-\alpha k} + \frac{b}{\alpha}$$

$X^{(0)}$  的灰色预测模型为:

$$\hat{X}^{(0)}(k+1) = \hat{X}^{(0)}(k+1) - \hat{X}^{(0)}(k)$$

其中  $k=1, 2, \dots, n$ ;

将解得的参数  $\alpha$  代入  $\alpha = \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{e^\alpha - 1}$ , 重新计算  $\alpha$ , 记为  $\alpha(m+1)$ ; 将  $\alpha(m+1)$  与上一次计算所用的  $\alpha(m)$  进行比较; 如果  $|\alpha(m+1) - \alpha(m)|$  大于给定的阈值, 表明还有可能大幅度的提高精度, 将  $\alpha(m+1)$  代入

$$Z^{(0)}(k) = \alpha X^{(0)}(k-1) + (1-\alpha)X^{(0)}(k) \quad (k=1, 2, \dots, n)$$

计算背景值  $Z^{(0)}(k+1)$ , 再一次进行建模和预测运算; 否则, 迭代结束, 输出预测结果;

预测结果  $\hat{X}^{(0)}(k+1)$  即为预测出的未来时刻的风电输出功率。

[0013] 采用风电场交流侧并联功率转换系统方式, 当风电场以最大运行方式运行, 将风电场输出功率高于电网需要风电场提供功率部分的三相交流电能经 AC/DC 整流器变为直流电能, 进行储能; 当需要储能装置进行能量释放时, 通过 DC/AC 逆变器将直流逆变成可控的三相交流; 该储能装置的储能元件采用超级电容器储能单元, 将灰色模型预测后得到的超出电网所需提供功率的储存能量部分通过超级电容器储能单元进行风力发电储能, 或将低于电网所需提供功率的能量部分由风力发电储能装置进行能量释放, 采用并联补偿平滑风力发电系统出力, 以风电发电输出功率和电网所需提供功率作为控制信号, 对风力发电储能装置进行控制。

[0014] 采用该灰色模型除直接得到预测结果外, 根据具体实际情况还可通过输入数据的处理(如指数平滑法)和输出结果的残差处理(残差 GM(1,1) 模型修正), 以减小误差。

[0015] 优点及效果:

本发明提出了基于灰色模型控制的风力发电储能装置及方法,具有如下优点:

在灰色模型控制中,通过对风电输出功率进行等维新息处理,能够不断获得最新风电输出功率,解决风电随机性大、预测精度难以提高的问题;同时,为了进一步提高预测精度,针对每一次风电输出功率预测,都将对灰色模型背景值进行修正,进一步提高了预测精度;由预测出的风电输出功率与电网所需提供功率比较的结果来控制超级电容器储能装置充电及放电,使得风力发电储能装置得到合理的利用,极大地提高电力系统的稳定性、安全性及其运行效益。

[0016] 附图说明:

图 1 为本发明风力发电储能装置的结构示意图;

图 2 为本发明双向 DC/DC 变换器的电路结构图;

图 3 为灰色模型预测流程图;

图 4 为风力发电输出功率预测误差图。

[0017] 具体实施方式:

下面结合附图对本发明做进一步的说明:

为了充分利用风能,风电场以最大运行方式运行,将风力发电输出功率超出电网所需提供功率的部分储存起来;当风速下降后,风电场的输出功率达不到电网所需提供功率时,由储能设备补充,仍以电网所需功率输出,据此提高电力系统的稳定性。

[0018] 如何正确把握风力发电储能控制是非常重要的,如何认定在何时开始储能及何时开始释放对储能系统起着至关重要的作用。自然界风的变化是很难预测的,风速和风向的变化影响着风力发电机的出力。在灰色模型控制中,通过对风电输出功率进行等维新息处理,能够不断获得最新风电输出功率,解决风电随机性大、预测精度难以提高的问题。同时,为了进一步提高预测精度,针对每一次风电输出功率预测,都将对灰色模型背景值进行修正,进一步提高了预测精度。

[0019] 本发明采用灰色模型针对风电场前若干时刻的输出功率预测出未来时刻的输出功率,将未来时刻的输出功率与电网需要风电场提供的功率进行比较,超出所需提供的功率部分进行储存,低于所需提供的功率将由储能设备补充。

[0020] 本发明提供了一种基于灰色模型控制的风力发电储能装置,如图 1 中所示,建立在风电场与电网之间,其特征在于:该储能装置主要由控制单元、AC/DC 整流器、DC/AC 逆变器、双向 DC/DC 变换器及储能用的超级电容器储能单元构成;控制单元分别连接 AC/DC 整流器、DC/AC 逆变器和双向 DC/DC 变换器,AC/DC 整流器与 DC/AC 逆变器之间连接有双向 DC/DC 变换器,双向 DC/DC 变换器与超级电容器储能单元 1 相连接。

[0021] 所述 DC/DC 变换器的低压端连接超级电容器储能单元,DC/DC 变换器的高压端连接 AC/DC 整流器和 DC/AC 逆变器。

[0022] 所述双向 DC/DC 变换器用于实现直流低压侧超级电容器单元与直流高压侧之间的能量转换,如图 2 中所示,其电路结构为:超级电容器储能单元 1 一端连接电感 L 的一端,电感 L 的另一端分别连接绝缘栅双极晶体管  $S_1$  的发射极、绝缘栅双极晶体管  $S_2$  的集电极、二极管  $D_1$  的正极、二极管  $D_2$  的负极,绝缘栅双极晶体管  $S_1$  的集电极与二极管  $D_1$  的负极连接电容 C 的一端,电容 C 的另一端连接绝缘栅双极晶体管  $S_2$  的发射极、二极管  $D_2$  的正极和超级电容器储能单元 1 的另一端。



[0023] 所述的超级电容器储能单元 1 为超级电容器的串联、并联或串并联组合,可以根据实际情况将大量的超级电容经过串联、并联或者串并联的组合达到所需的容量。

[0024] 本发明这种基于灰色模型控制的风力发电储能装置的工作原理是:控制单元是以风力发电输出功率和电网所需提供功率作为控制信号,对风力发电储能装置进行控制。将灰色模型预测后得到的超出电网所需提供功率的储存能量部分通过超级电容器储能单元 1 进行风力发电储能,或将低于电网所需提供功率的能量部分由风力发电储能装置进行能量释放,以风电发电输出功率和电网所需提供功率作为控制信号,进行风力发电储能装置的控制。AC/DC 整流器采用三相全桥整流器,将三相交流电能变为直流电能;DC/AC 逆变器采用三相电压型逆变器,将直流逆变成可控的三相交流;双向 DC/DC 变换器电路结构如图 2 所示。

[0025] 采用风电场交流侧并联功率转换系统方式,当风电场以最大运行方式运行,将风电场输出功率高于电网需要风电场提供功率部分的三相交流电能经 AC/DC 整流器变为直流电能,进行储能;当需要储能装置进行能量释放时,通过 DC/AC 逆变器将直流逆变成可控的三相交流;采用并联补偿平滑风力发电系统出力,以风电发电输出功率和电网所需提供功率作为控制信号,对风力发电储能装置进行控制。

[0026] 一种基于灰色模型控制的风力发电储能方法,为了充分利用风能,风电场以最大运行方式运行,采用灰色模型针对风电场前若干时刻的输出功率预测出未来时刻的输出功率,将未来时刻的输出功率与电网需要风电场提供的功率进行比较,超出电网所需提供的功率部分进行储存,当风速下降后,风电场的输出功率达不到电网所需提供功率时,低于电网所需提供的功率将由储能装置补充,仍以电网所需功率输出;具体步骤如下:

首先针对风力发电的特点,建立改进的灰色模型对风力发电输出功率进行预测:

1)、在建立 GM(1,1) 模型中,令  $X^{(0)}$  为 GM(1,1) 建模序列,

$$X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$$

其中,  $X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)$  分别为预测前  $n$  个等时间间隔(该时间间隔可根据具体情况设定)的风力发电输出功率数值。

[0027] 2)、为了随时追踪前若干时刻的输出功率状况,每次将预测时刻前的等时间间隔的风电输出功率送入数据序列中的同时,去除一个最陈旧的数据。即

$$X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$$

当新得到数据  $X^{(0)}(n+1)$  后,则将其置入  $X^{(0)}$  同时去除  $X^{(0)}(1)$ ,此时  $X^{(0)}$  为

$$X^{(0)} = \{X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(n), X^{(0)}(n+1)\}$$

即进行等维新息处理;由于该灰色模型输入量为待预测风力发电输出功率的前若干时刻实际输出功率序列,能够随时追踪前若干时刻的输出功率,使得预测结果更加接近实际输出功率。

[0028] 3)、将  $X^{(0)} = \{X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(n), X^{(0)}(n+1)\}$  以

$X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$  的形式进行以下计算: $X^{(0)}$  进行一次累加生成序列,得到

$$X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$$

$$\text{其中, } X^{(0)}(k) = \sum_{i=1}^k X^{(0)}(i), \quad k=1, 2, \dots, n。$$

[0029] 4)、对  $X^{(0)}$  再做邻均值处理, 得到背景值序列:

$$Z^{(0)} = \{Z^{(0)}(1), Z^{(0)}(2), \dots, Z^{(0)}(n)\}$$

一般情况下,  $Z^{(0)}(k) = 0.5X^{(0)}(k-1) + 0.5X^{(0)}(k)$ ;

为了提高预测精度, 进行背景值  $Z^{(0)}(k)$  的修正, 取  $Z^{(0)}(k) = \alpha X^{(0)}(k-1) + (1-\alpha)X^{(0)}(k)$  ( $k=1, 2, \dots, n$ );

第一次计算时取  $\alpha=0.5$ , 构造 GM(1,1) 灰微分方程如下:

$$X^{(0)}(k) + aZ^{(0)}(k) = b$$

灰微分方程的白化微分方程为:

$$\frac{dX^{(0)}}{dt} + aX^{(0)} = b$$

用最小二乘法来求解参数  $a, b$ , 则

$$P = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B'B)^{-1} B' Y_n$$

$$B = \begin{bmatrix} -Z_2^{(0)} & 1 \\ -Z_3^{(0)} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -Z_{n-1}^{(0)} & 1 \\ -Z_n^{(0)} & 1 \end{bmatrix} \quad Y_n = \begin{bmatrix} X_2^{(0)} \\ X_3^{(0)} \\ \vdots \\ X_{n-1}^{(0)} \\ X_n^{(0)} \end{bmatrix}$$

$X^{(0)}$  的灰色预测模型为:

$$\hat{X}^{(0)}(k+1) = (X^{(0)}(1) - \frac{b}{a})e^{-\alpha k} + \frac{b}{a}$$

$X^{(0)}$  的灰色预测模型为:

$$\hat{X}^{(0)}(k+1) = \hat{X}^{(0)}(k+1) - \hat{X}^{(0)}(k)$$

其中  $k=1, 2, \dots, n$ ;

将解得的参数  $a$  带入  $\alpha = \frac{1}{a} - \frac{1}{e^a - 1}$ , 重新计算  $\alpha$ , 记为  $\alpha(m+1)$ ; 将  $\alpha(m+1)$  与上一次计算所用的  $\alpha(m)$  进行比较; 如果  $|\alpha(m+1) - \alpha(m)|$  大于给定的阈值, 表明还有可能大幅度的提高精度, 将  $\alpha(m+1)$  代入

$$Z^{(0)}(k) = \alpha X^{(0)}(k-1) + (1-\alpha)X^{(0)}(k) \quad (k=1, 2, \dots, n)$$

计算背景值  $Z^{(0)}(k+1)$ , 再一次进行建模和预测运算; 否则, 迭代结束, 输出预测结果; 预测结果  $X^{(0)}(k+1)$  即为预测出的未来时刻的风电输出功率。

灰色模型预测流程如图 3 中所示。以某风电场日 24 小时风电输出功率为例, 取预测时刻前 10 个小时的风电输出功率作为建模序列, 首先利用上述灰色模型进行预测, 输出预测结果; 再进行下一时刻预测时, 为了随时追踪前若干时刻的输出功率, 下一个时刻预测前进行等维新息处理, 在等维新息处理后, 利用上述灰色模型进行下一个时刻预测, 输出预测结果; 如此反复, 得到未来时刻的预测结果。图 4 为采用该预测模型预测的某日 24 小时的风电输出功率预测误差图, 实例证明该方法具有可行性和有效性。

[0030] 在采用该灰色模型进行风电输出功率预测过程中, 根据具体情况还可通过输入数据的处理(如指数平滑法)和输出结果的残差处理(如残差 GM(1,1) 模型修正)等, 达到减小误差的效果。

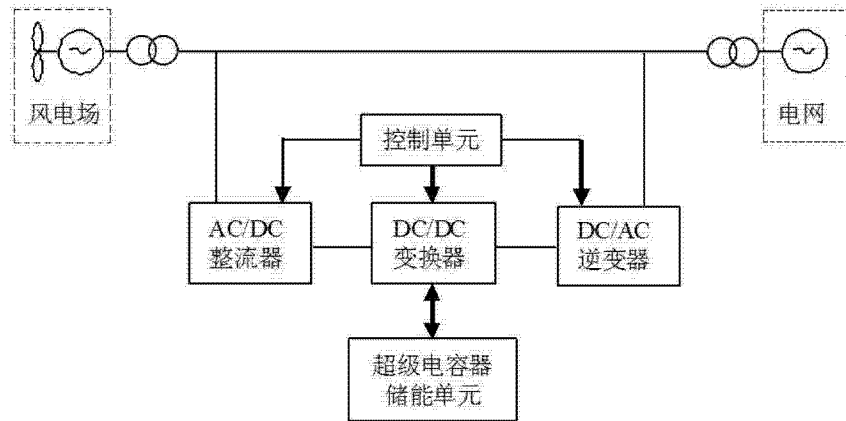


图 1

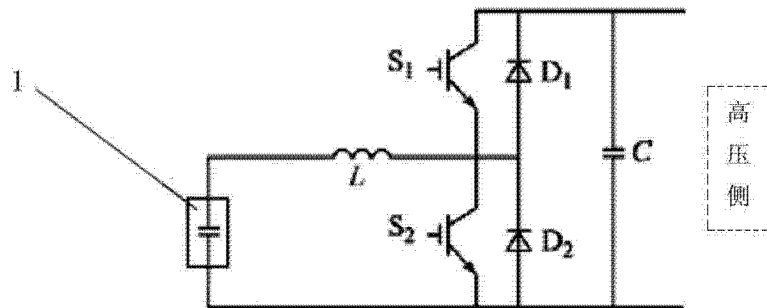


图 2

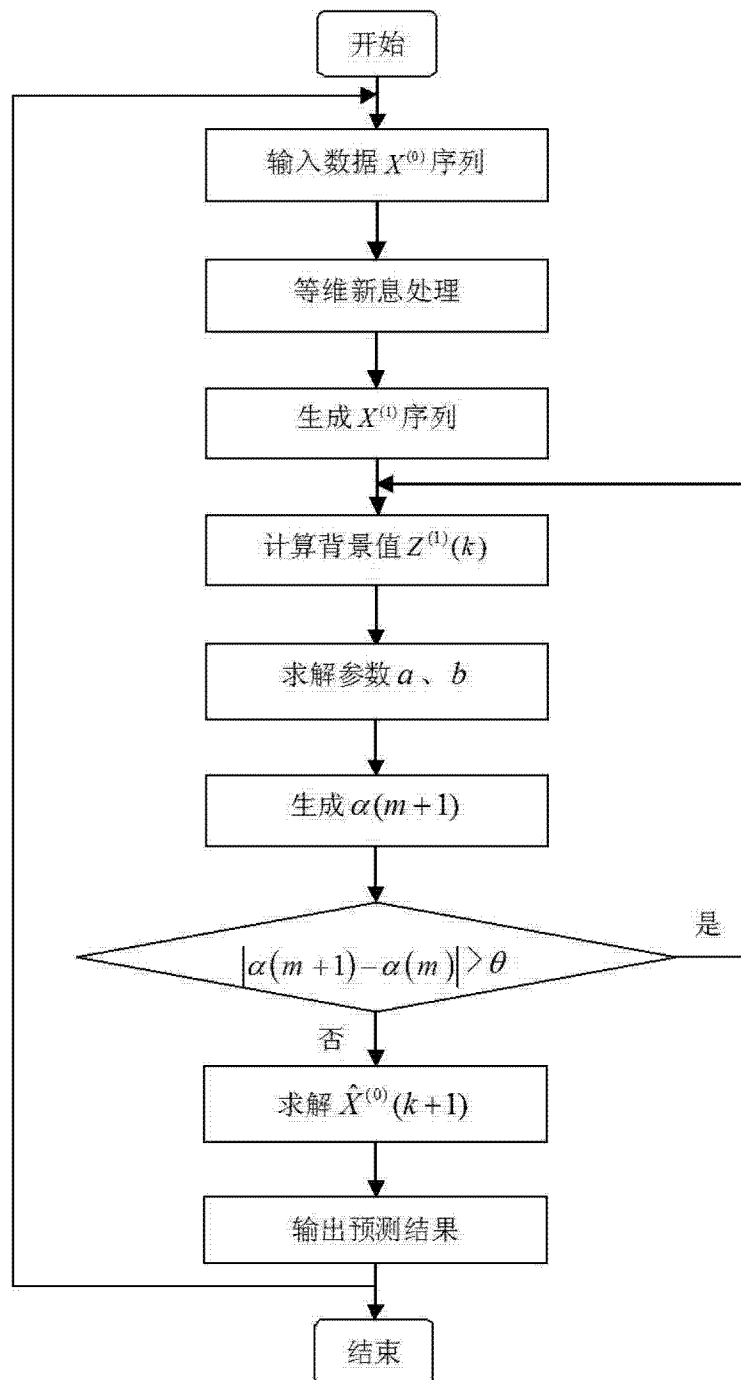


图 3

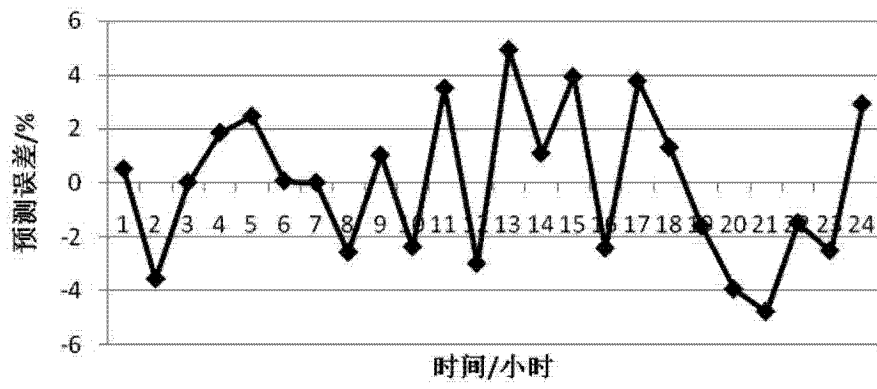


图 4