



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112734589 A

(43) 申请公布日 2021. 04. 30

(21) 申请号 202011166299.X

G06F 30/27 (2020.01)

(22) 申请日 2020.10.27

H02J 3/00 (2006.01)

(71) 申请人 华能酒泉风电有限责任公司

H02J 3/38 (2006.01)

地址 730070 甘肃省兰州市安宁区通达街3号

H02J 3/46 (2006.01)

G06F 113/06 (2020.01)

申请人 北京金风慧能技术有限公司
西安电子科技大学

(72) 发明人 郝小会 杨正军 郝延 韩自奋
马辉 杨奎 何大鹏 彭艺
苏海晶 王东 张超 章云

(74) 专利代理机构 西安鼎迈知识产权代理事务
所(普通合伙) 61263

代理人 李振瑞

(51) Int.Cl.

G06Q 50/06 (2012.01)

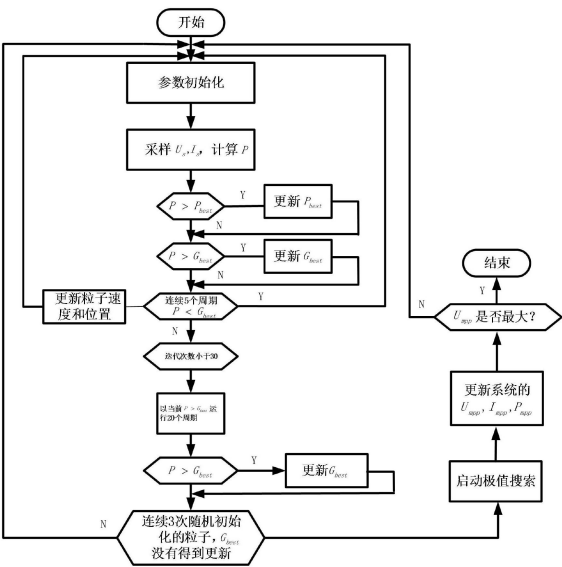
权利要求书2页 说明书7页 附图2页

(54) 发明名称

一种基于自适应极值搜索的风电系统功率寻优控制方法

(57) 摘要

本发明属于风电系统的功率寻优控制技术领域,尤其是一种基于自适应极值搜索的风电系统功率寻优控制方法,针对风电系统存在参数不确定,故障率较高,维修困难等,进而影响风电系统输出功率的寻优性能,降低能源利用率的问题,现提出如下方案,其包括以下步骤:步骤一、通过粒子群迭代计算,将输入位置调整到全局最优附近;步骤二、粒子初始位置选择,将粒子初始位置分散定位在可能的峰值点处。本发明用改进的粒子群优化方法将输入位置调整到全局最优附近,再用极值搜索法得到全局最优解,实现风电系统功率最优输出,提高能源利用率。



1. 一种基于自适应极值搜索的风电系统功率寻优控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤一、通过粒子群迭代计算,将输入位置调整到全局最优附近;

步骤二、粒子初始位置选择,将粒子初始位置分散定位在可能的峰值点处;

步骤三、采用直接占空比控制;在寻优过程中,确定当前粒子不可能处于全局最优区域时,便果断丢弃,重新寻找新的粒子;增加临时全局最优,本次迭代不会对辅助变量进行更新,只有经5个周期的稳定后仍然大于临时全局最优,才对临时全局最优进行更新;

步骤四、以该附近点为极值搜索法的起点,强迫风电阵列尽可能工作在最佳点,确定输入变量和输出变量间的关系,通过给出状态量的反馈,不断地自适应调整风电场风机的利用率,实现系统功率输出与消耗达到最优;

步骤五、快速跟踪风电输出的全局最大功率点,降低有效极值点的振荡现象,减少功率损失。

2. 根据权利要求1所述的一种基于自适应极值搜索的风电系统功率寻优控制方法,其特征在于,所述步骤一中粒子群迭代计算方式:

$$\begin{cases} V_i^{k+1} = \omega V_i^k + c_1 r_1 (P_{best} - X_i^k) + c_2 r_2 (G_{best} - X_i^k) \\ X_i^{k+1} = V_i^{k+1} + X_i^k \end{cases} \quad (1)$$

其中, V 为粒子的速度向量, X 为粒子位置向量, ω 代表惯性权重, c_1 和 c_2 分别用于调节粒子飞向自身最好位置和全局最好位置的步长, r_1 和 r_2 是(0,1)之间均匀分布的相互独立的随机数序列。

3. 根据权利要求1所述的一种基于自适应极值搜索的风电系统功率寻优控制方法,其特征在于,所述步骤二中粒子初始位置分散定位在可能的峰值点处:

$$\begin{aligned} D &= 1 - (U_{in} / U_{out}) \\ D &= 1 - \sqrt{(U_{in} / U_{out} / R_{out})} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, U_{in} 和 U_{out} 为电路输入端、输出端的电压, I_{in} 表示Boost电路输入端的电流, R_{out} 表示负载电阻,占空比的关系和占空比的变化范围为:

$$\begin{aligned} D &= 1 - \sqrt{R_{in, \max} / U_{out, \min}} \\ D &= 1 - \sqrt{R_{in, \min} / U_{out, \max}} \end{aligned} \quad (3)$$

粒子初始化位置随机均匀分布于区间 $[D_{\min}, D_{\max}]$,粒子的最大速度设置为 $0.1 [D_{\min}, D_{\max}]$ 。

4. 根据权利要求1所述的一种基于自适应极值搜索的风电系统功率寻优控制方法,其特征在于,所述步骤四中最大功率点跟踪可以转化为追踪风电阵列输出电压 U 的最优值 U^* 使得输出的功率 P_s 最大,即

$$U^* = \arg \max P_s \quad (4)$$

极值搜索控制策略无需对系统进行详细的建模,只需监测某些状态量,其输入量为风电发电系统输出的功率 P_s ,输出量为风电发电系统直流侧的参考电压值 U_{dcref} ;

自适应极值搜索控制的风电发电系统功率寻优方法原理:

ρ, Z_0 和 U_0 的约束条件:

$$\begin{cases} Z_0 & U_0 \\ Z_0 & \rho \end{cases} \quad (5)$$

在整个调节过程中,具有很高控制频率的 $\text{sgn}(\delta)$ 开关函数控制是关键,很大的开关频率的实际实现比较困难;且进行大的开关频率控制除了会引入开关噪声外,会引起额外的功率损耗。

5.根据权利要求1所述的一种基于自适应极值搜索的风电系统功率寻优控制方法,其特征在于,所述步骤五中,引入滑模层函数来代替开关函数 $\text{sgn}(\delta)$ 的功能,其函数关系如下所示:

$$\text{sat}(\delta, \beta) = \begin{cases} 1 & \delta > \beta \\ \frac{\delta}{\beta} & \delta \leq |\beta| \\ -1 & \delta < -\beta \end{cases} \quad (6)$$

其中 β 为阈值;

该函数讲空间区域分成3个部分,分别是 $\delta > \beta$, $\delta < -\beta$ 和 $\delta \leq |\beta|$,这里 $\delta \leq |\beta|$ 称作滑模层。

一种基于自适应极值搜索的风电系统功率寻优控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及风电系统的功率寻优控制技术领域,尤其涉及一种基于自适应极值搜索的风电系统功率寻优控制方法。

背景技术

[0002] 化石能源将在不远的未来枯竭,人们即将会陷入能源危机。且化石能源的过度使用直接导致了环境问题。太阳能作为一种再生清洁能源,被认为是未来能源的主要组成部分,所以风电系统功率控制在近年被广泛关注。然而,风电系统面临参数不确定,故障率较高,随机性强等问题,从而影响风电系统输出功率的寻优性能,降低能源利用率。

[0003] 当风电阵列参数发生变化,导致故障出现时,会导致旁路二极管导通,其输出特性将发生很大变化,呈现出多峰值特性。在这种情况下,采用传统单峰值功率寻优方法对全局寻优会产生影响甚至失效,从而使太阳能转换效率大幅下降。因此,如何设计不依赖系统精确模型的功率寻优控制器,在确保风电系统功率稳定下,快速准确地跟踪输出多峰值的全局最优功率,提高分布式能源利用率,是本发明需要解决的关键科学问题。

[0004] 针对这些问题,本发明一种基于自适应极值搜索的风电系统功率寻优控制方法,用改进的粒子群优化方法将输入位置调整到全局最优附近,再用极值搜索法得到全局最优解,实现风电系统功率最优输出,提高能源利用率。

发明内容

[0005] 本发明的目的是为了解决风电系统系统存在参数不确定,故障率较高,维修困难等,进而影响风电系统输出功率的寻优性能,降低能源利用率的缺点,而提出的一种基于自适应极值搜索的风电系统功率寻优控制方法。

[0006] 为了实现上述目的,本发明采用了如下技术方案:

[0007] 一种基于自适应极值搜索的风电系统功率寻优控制方法,结合风电阵列输出特性规律,分析风电系统的模型参数不确定和输出功率多峰值问题,提出自适应极值搜索的风电系统功率寻优控制系统,该方法采用改进的粒子群优化方法将输入位置快速调整到全局最优位置附近:包括以下步骤:其特征在于,包括以下步骤:

[0008] 步骤一、通过粒子群迭代计算,将输入位置调整到全局最优附近;

[0009] 步骤二、粒子初始位置选择,将粒子初始位置分散定位在可能的峰值点处,有助于提高跟踪速度;

[0010] 步骤三、采用直接占空比控制;在寻优过程中,确定当前粒子不可能处于全局最优区域时,便果断丢弃,重新寻找新的粒子;增加临时全局最优,本次迭代不会对辅助变量进行更新,只有经5个周期的稳定后仍然大于临时全局最优,才对临时全局最优进行更新;

[0011] 步骤四、以该附近点为极值搜索法的起点,强迫风电阵列尽可能工作在最佳点,确定输入变量和输出变量间的关系,通过给出状态量的反馈,不断地自适应调整风电场风机的利用率,实现系统功率输出与消耗达到最优;

[0012] 步骤五、快速跟踪风电输出的全局最大功率点,降低有效极值点的振荡现象,减少功率损失,提高风电场风机的转换效率。

[0013] 优选的,所述步骤一中粒子群迭代计算方式:

$$[0014] \quad \begin{cases} V_i^{k+1} = \omega V_i^k + c_1 r_1 (P_{best} - X_i^k) + c_2 r_2 (G_{best} - X_i^k) \\ X_i^{k+1} = V_i^{k+1} + X_i^k \end{cases} \quad (1)$$

[0015] 其中, V 为粒子的速度向量, X 为粒子位置向量, ω 代表惯性权重, c_1 和 c_2 分别用于调节粒子飞向自身最好位置和全局最好位置的步长, r_1 和 r_2 是(0,1)之间均匀分布的相互独立的随机数序列。

[0016] 优选的,所述步骤二中粒子初始位置分散定位在可能的峰值点处:

$$[0017] \quad \begin{aligned} D &= 1 - (U_{in} / U_{out}) \\ D &= 1 - \sqrt{(U_{in} / U_{out} / R_{out})} \end{aligned} \quad (2)$$

[0018] 其中, U_{in} 和 U_{out} 为电路输入端、输出端的电压, I_{in} 表示Boost电路输入端的电流, R_{out} 表示负载电阻,那么它们和占空比的关系为

[0019] 占空比的变化范围为

$$[0020] \quad \begin{aligned} D &= 1 - \sqrt{R_{in, \max} / U_{out, \min}} \\ D &= 1 - \sqrt{R_{in, \min} / U_{out, \max}} \end{aligned} \quad (3)$$

[0021] 粒子初始化位置随机均匀分布于区间 $[D_{\min}, D_{\max}]$,粒子的最大速度设置为 $0.1 [D_{\min}, D_{\max}]$ 。

[0022] 优选的,所述步骤四中最大功率点跟踪可以转化为追踪风电阵列输出电压 U 的最优值 U^* 使得输出的功率 P_s 最大,即

$$[0023] \quad U^* = \arg \max P_s \quad (4)$$

[0024] 极值搜索控制策略无需对系统进行详细的建模,只需监测某些状态量,通过反馈给控制系统就能实现对系统的精确控制。此处采用自适应极值搜索控制的策略,其输入量为风电发电系统输出的功率 P_s ,输出量为风电发电系统直流侧的参考电压值 U_{dcref} 。

[0025] 自适应极值搜索控制的风电发电系统功率寻优方法原理:

[0026] ρ, Z_0 和 U_0 的约束条件:

$$[0027] \quad \begin{cases} Z_0 & U_0 \\ Z_0 & \rho \end{cases} \quad (5)$$

[0028] 在整个调节过程中,具有很高控制频率的 $\text{sgn}(\delta)$ 开关函数控制是关键,很大的开关频率的实际实现比较困难;且进行大的开关频率控制除了会引入开关噪声外,会引起额外的功率损耗。

[0029] 优选的,所述步骤五中为了克服这个缺点,引入滑模层函数来代替开关函数 $\text{sgn}(\delta)$ 的功能,其函数关系如下所示:

$$[0030] \quad sat(\delta, \beta) = \begin{cases} 1 & \delta > \beta \\ \frac{\delta}{\beta} & \delta \leq |\beta| \\ -1 & \delta < -\beta \end{cases} \quad (6)$$

[0031] 其中 β 为阈值。

[0032] 该函数讲空间区域分成3个部分,分别是 $\delta > \beta$, $\delta < -\beta$ 和 $\delta \leq |\beta|$,这里 $\delta \leq |\beta|$ 称作滑模层。由此可以看出相当加厚了滑模面,选定合适的可以使系统快速地 进入稳定状态,并相应地减少振荡。

[0033] 与现有技术相比,本发明的优点在于:

[0034] (1)减轻系统振荡,采用直接占空比控制,相对于应用广泛的针对阵列输 出电压的控制,简化了中间控制环,有助于减轻系统振荡;

[0035] (2)增加系统响应速度和系统稳定性,在寻优过程中,确定当前粒子不可 能处于全局最优区域时,便果断丢弃,重新寻找新的粒子;

[0036] (3)增加辅助变量,防止误判,为了确保获得真正的全局最优,增加了临 时全局最优,本次迭代不会对辅助变量进行更新,只有经5个周期的稳定后仍 然大于临时全局最优,才对临时全局最优进行更新,减少误判的概率;

[0037] (4)本发明通过在极值搜索结构中引入滑模思想,构成自适应极值搜索方 法,则可避免微分环节的出现。滑模极值搜索的核心是两个开关函数,其中一 个用来生成函数输出的参考值,根据参考输出与实际输出的误差构造滑模面; 另外一个用来生成函数的输入变量。当函数对应的系统在输入变量的作用下切 入滑模面时,输出跟踪给定,系统稳定在当前平衡点;当系统受到负载变化等 干扰时,当前平衡遭到破坏,切出滑模面,通过改变输入变量来控制系统运动 到新的平衡点附近,再次切入滑模面。

[0038] 本发明用改进的粒子群优化方法将输入位置调整到全局最优附近,再用极 值搜索法得到全局最优解,实现风电系统功率最优输出,提高能源利用率。

附图说明

[0039] 图1为本发明基于自适应极值搜索的风电系统功率寻优控制流程图;

[0040] 图2为本发明风电系统功率寻优控制系统模块图。

具体实施方式

[0041] 下面将结合本实施例中的附图,对本实施例中的技术方案进行清楚、完整 地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本实施例一部分实施例,而不是全部的 实施例。

[0042] 实施例一

[0043] 参照图1-2,一种基于自适应极值搜索的风电系统功率寻优控制方法,结合 风电阵列输出特性规律,分析风电系统的模型参数不确定和输出功率多峰值问 题,提出自适应极值搜索的风电系统功率寻优控制系统,该方法采用改进的粒 子群优化方法将输入位置快速调整到全局最优位置附近:包括以下步骤:步骤 一、通过粒子群迭代计算,将输入位置调整到全局最优附近。

$$[0044] \quad \begin{cases} V_i^{k+1} = \omega V_i^k + c_1 r_1 (P_{best} - X_i^k) + c_2 r_2 (G_{best} - X_i^k) \\ X_i^{k+1} = V_i^{k+1} + X_i^k \end{cases}$$

[0045] 其中, V 为粒子的速度向量, X 为粒子位置向量, ω 代表惯性权重, c_1 和 c_2 分别用于调节粒子飞向自身最好位置和全局最好位置的步长, r_1 和 r_2 是 $(0, 1)$ 之间均匀分布的相互独立的随机数序列。

[0046] 步骤二、粒子初始位置选择, 将粒子初始位置分散定位在可能的峰值点处, 有助于提高跟踪速度:

$$[0047] \quad D = 1 - (U_{in} / U_{out})$$

$$[0048] \quad D = 1 - \sqrt{(U_{in} / U_{out} / R_{out})}$$

[0049] 其中, U_{in} 和 U_{out} 为电路输入端、输出端的电压, I_{in} 表示 Boost 电路输入端的电流, R_{out} 表示负载电阻, 那么它们和占空比的关系为

[0050] 占空比的变化范围为

$$[0051] \quad D = 1 - \sqrt{R_{in, max} / U_{out, min}}$$

$$[0052] \quad D = 1 - \sqrt{R_{in, min} / U_{out, max}}$$

[0053] 粒子初始化位置随机均匀分布于区间 $[D_{min}, D_{max}]$, 粒子的最大速度设置为 $0.1 [D_{min}, D_{max}]$ 。

[0054] 步骤三、采用直接占空比控制; 在寻优过程中, 确定当前粒子不可能处于全局最优区域时, 便果断丢弃, 重新寻找新的粒子; 增加临时全局最优, 本次迭代不会对辅助变量进行更新, 只有经 5 个周期的稳定后仍然大于临时全局最优, 才对临时全局最优进行更新;

[0055] 步骤四、以该附近点为极值搜索法的起点, 强迫风电阵列尽可能工作在最佳点, 确定输入变量和输出变量间的关系, 通过给出状态量的反馈, 不断地自适应调整风电场风机的利用率, 实现系统功率输出与消耗达到最优;

[0056] 最大功率点跟踪可以转化为追踪风电阵列输出电压 U 的最优值 U^* 使得输出的功率 P_s 最大, 即

$$[0057] \quad U^* = \arg \max P_s$$

[0058] 极值搜索控制策略无需对系统进行详细的建模, 只需监测某些状态量, 通过反馈给控制系统就能实现对系统的精确控制。此处采用自适应极值搜索控制的策略, 其输入量为风电发电系统输出的功率 P_s , 输出量为风电发电系统直流侧的参考电压值 U_{dref} 。

[0059] 自适应极值搜索控制的风电发电系统功率寻优方法原理:

[0060] ρ , Z_0 和 U_0 的约束条件:

$$[0061] \quad \begin{cases} Z_0 & U_0 \\ Z_0 & \rho \end{cases}$$

[0062] 在整个调节过程中, 具有很高控制频率的 $\text{sgn}(\delta)$ 开关函数控制是关键, 而很大的开关频率的实际实现是比较困难的; 且进行大的开关频率控制除了会引入开关噪声外, 还会引起额外的功率损耗。

[0063] 步骤五、快速跟踪风电输出的全局最大功率点, 降低有效极值点的振荡现象, 减少功率损失, 提高风电场风机的转换效率。

[0064] 为了克服这个缺点,引入滑模层函数来代替开关函数 $\text{sgn}(\delta)$ 的功能,其函数关系如下所示:

$$[0065] \quad \text{sat}(\delta, \beta) = \begin{cases} 1 & \delta > \beta \\ \frac{\delta}{\beta} & \delta \leq |\beta| \\ -1 & \delta < -\beta \end{cases}$$

[0066] 其中 β 为阈值。

[0067] 该函数讲空间区域分成3个部分,分别是 $\delta > \beta$, $\delta < -\beta$ 和 $\delta \leq |\beta|$,这里 $\delta \leq |\beta|$ 称作滑模层。由此可以看出相当加厚了滑模面,选定合适的可以使系统快速地进入稳定状态,并相应地减少振荡。

[0068] 实施例二

[0069] 参照图1-2,一种基于自适应极值搜索的风电系统功率寻优控制方法,先用改进的粒子群优化方法将输入位置调整到全局最优附近,再用极值搜索法得到全局最优解,图1为风电系统阵列的功率寻优控制原理图。

[0070] 第一步:将粒子初始位置分散定位在可能的峰值点处,通过粒子群迭代计算,将输入位置调整到全局最优附近。

[0071] 在全局最优附近改用变步长电导增量法进行局部寻优,由于粒子群算法大幅度随机初始化粒子,易造成系统振荡,所以在全局最大功率点附近,采用传统的单峰寻优算法,有助于增加搜索的快速性和稳定性。

[0072] 在风电阵列最大功率寻优中,目标函数为风电阵列的输出功率,粒子为直流斩波电路中开关元器件的占空比。将粒子初始位置分散定位在可能的峰值点处,有助于提高跟踪速度。如果 U_{in} 和 U_{out} 为Boost电路输入端、输出端的电压, I_{in} 表示Boost电路输入端的电流, R_{out} 表示负载电阻,那么它们和占空比的关系为

$$[0073] \quad D = 1 - (U_{in} / U_{out})$$

$$[0074] \quad D = 1 - \sqrt{(U_{in} / U_{out} / R_{out})}$$

[0075] 占空比的变化范围为

$$[0076] \quad D = 1 - \sqrt{R_{in,max} / U_{out,min}}$$

$$[0077] \quad D = 1 - \sqrt{R_{in,min} / U_{out,max}}$$

[0078] 风电阵列输出P-V特性可能极值点对应的阵列输出电压,近似为0.8倍电池板开路电压的整数倍,所以可能极值点对应的阵列最小和最大电压近似为 $0.8U_{module}$ 和 $0.8U_{array}$ 。这里, U_{module} 和 U_{array} 分别代表风电阵列的开路电压,相应的Boost输入端电阻(等效电阻)为 $R_{in,min}$ 和 $R_{in,max}$ 。负载电阻的大小与具体应用相关,根据负载电阻的大小确定风电阵列的串并联结构,从而间接确定Boost输入端电阻的范围。

[0079] 粒子初始化位置随机均匀分布于区间 $[D_{min}, D_{max}]$,粒子的最大速度设置为 $0.1[D_{min}, D_{max}]$ 。参数的选择对粒子群方法的迭代过程影响很大。在迭代初期阶段,大的惯性权重可使方法不易陷入局部最优解;在迭代后期,小的惯性权重将有助于加快离子的收敛速度。迭代初期个体的认知很重要,而迭代后期粒子的社会认知很重要。

[0080] 然而,大幅度随机初始化粒子位置导致系统振荡,以及实际系统存在控制滞后导

致误判等问题。为了克服,本发明设计方法从以下三个方面进行改进:

[0081] 减轻系统振荡;

[0082] 采用直接占空比控制,相对于应用广泛的针对阵列输出电压的控制,简化了中间控制环,有助于减轻系统振荡;

[0083] 增加系统响应速度和系统稳定性;

[0084] 在寻优过程中,确定当前粒子不可能处于全局最优区域时,便果断丢弃,重新寻找新的粒子;

[0085] 增加辅助变量,防止误判;

[0086] 为了确保获得真正的全局最优,增加了临时全局最优,本次迭代不会对辅助变量进行更新,只有经5个周期的稳定后仍然大于临时全局最优,才对临时全局最优进行更新,减少误判的概率。

[0087] 第二步:根据新搜索点的工作电压,启动极值搜索法,获取全局最大功率点。

[0088] 为了在不同风速下捕获最大风能,风机的速度应随风速同步变化,以维持恒定的最优叶尖速比,极值搜索算法正是实现这个功能。但是,极值搜索方法需要检测输出量的微分作为寻找极值的依据,但是对于多变量非连续功率输出特性曲线,微分器物理不可实现。

[0089] 因此,通过在极值搜索结构中引入滑模思想,构成自适应极值搜索方法,则可避免微分环节的出现。滑模极值搜索的核心是两个开关函数,其中一个用来生成函数输出的参考值,根据参考输出与实际输出的误差构造滑模面;另外一个用来生成函数的输入变量。当函数对应的系统在输入变量的作用下切入滑模面时,输出跟踪给定,系统稳定在当前平衡点;当系统受到负载变化等干扰时,当前平衡遭到破坏,切出滑模面,通过改变输入变量来控制系统运动到新的平衡点附近,再次切入滑模面,其原理如下:

[0090] 最大功率点跟踪可以转化为追踪风电阵列输出电压 U 的最优值 U^* 使得输出的功率 P_s 最大,即

$$[0091] \quad U^* = \operatorname{argmax} P_s$$

[0092] 极值搜索控制策略无需对系统进行详细的建模,只需监测某些状态量,通过反馈给控制系统就能实现对系统的精确控制。此处采用自适应极值搜索控制的策略,其输入量为风电发电系统输出的功率 P_s ,输出量为风电发电系统直流侧的参考电压值 U_{dref} 。

[0093] 自适应极值搜索控制的风电发电系统功率寻优方法原理:

[0094] ρ, Z_0 和 U_0 的约束条件:

$$[0095] \quad \begin{cases} Z_0 & U_0 \\ Z_0 & \rho \end{cases}$$

[0096] 在整个调节过程中,具有很高控制频率的 $\operatorname{sgn}(\delta)$ 开关函数控制是关键,而很大的开关频率的实际实现是比较困难的;且进行大的开关频率控制除了会引入开关噪声外,还会引起额外的功率损耗。

[0097] 为了克服这个缺点,引入滑模层函数来代替开关函数 $\operatorname{sgn}(\delta)$ 的功能,其函数关系如下所示:

$$[0098] \quad sat(\delta, \beta) = \begin{cases} 1 & \delta > \beta \\ \frac{\delta}{\beta} & \delta \leq |\beta| \\ -1 & \delta < -\beta \end{cases}$$

[0099] 其中 β 为阈值。

[0100] 该函数讲空间区域分成3个部分,分别是 $\delta > \beta$, $\delta < -\beta$ 和 $\delta \leq |\beta|$,这里 $\delta \leq |\beta|$ 称作滑模层。由此可以看出相当加厚了滑模面,选定合适的可以使系统快速地进入稳定状态,并相应地减少振荡。图2为有效风速下运行时风电系统功率控制原理图。

[0101] 以上所述,仅为本实施例较佳的具体实施方式,但本实施例的保护范围并不局限于此,任何熟悉本技术领域的技术人员在本实施例揭露的技术范围内,根据本实施例的技术方案及其发明构思加以等同替换或改变,都应涵盖在本实施例的保护范围之内。

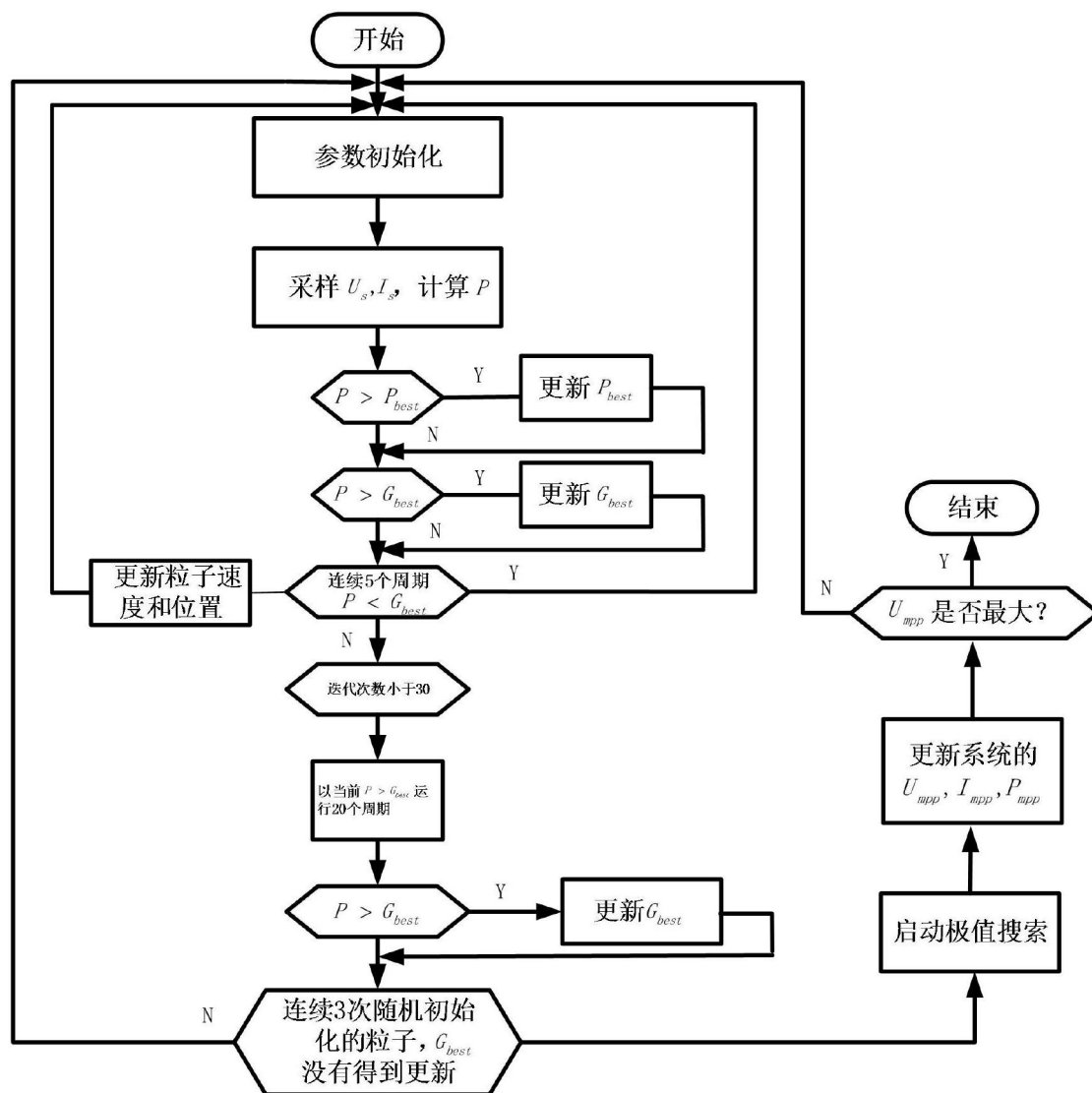


图1

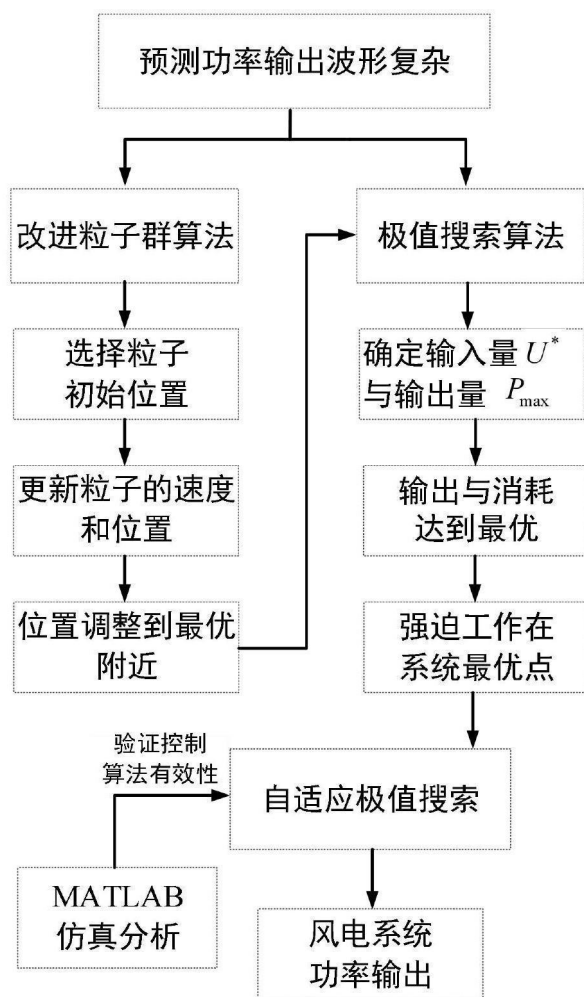


图2