



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107524563 A

(43)申请公布日 2017.12.29

(21)申请号 201710716384.0

(22)申请日 2017.08.21

(71)申请人 华南理工大学

地址 510640 广东省广州市天河区五山路  
381号

(72)发明人 耿魁伟 朱嘉祺 姚若河

(74)专利代理机构 广州市华学知识产权代理有限公司 44245

代理人 许菲菲

(51)Int.Cl.

F03D 7/00(2006.01)

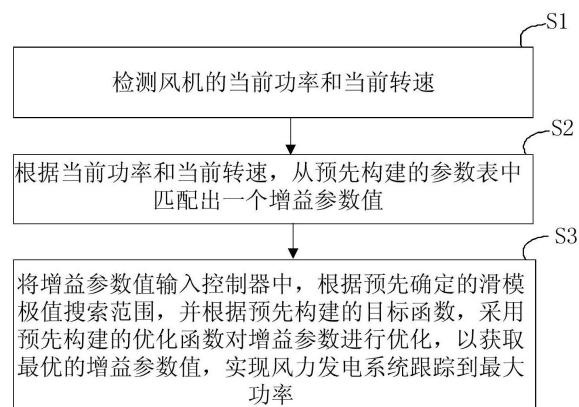
权利要求书1页 说明书5页 附图3页

(54)发明名称

一种基于滑模极值搜索的控制方法

(57)摘要

本发明提供一种基于滑模极值搜索的控制方法,应用于控制风力发电系统实现最大功率跟踪,包括,当前状态检测步骤,检测风机的当前功率和当前转速;参数匹配步骤,根据当前功率和当前转速,从预先构建的参数表中匹配出一个增益参数值;最大功率跟踪步骤,将增益参数值输入控制器中,根据预先确定的滑模极值搜索范围,并根据预先构建的目标函数,采用预先构建的优化函数对增益参数进行优化,以获取最优的增益参数值,实现风力发电系统跟踪到最大功率。本发明提供的控制方法,先从预先构建的参数表中匹配出增益参数值,再采用优化函数对增益参数值进行优化,实现风力发电系统跟踪到最大功率,且能够对风力发电系统进行实时控制,响应速度快。



1. 一种基于滑模极值搜索的控制方法, 应用于控制风力发电系统实现最大功率跟踪, 其特征在于包括如下步骤:

1) 当前状态检测: 检测风机的当前功率和当前转速;

2) 参数匹配: 根据所述当前功率和所述当前转速, 从预先构建的参数表中匹配出一个增益参数值;

3) 最大功率跟踪步骤: 将所述增益参数值输入控制器中, 根据预先确定的滑模极值搜索范围, 并根据预先构建的目标函数, 采用预先构建的优化函数对增益参数进行优化, 以获取最优的增益参数值, 实现风力发电系统跟踪到最大功率;

所述优化函数为萤火虫算法函数:

$$x_i^t = x_i^{t-1} + \beta(x_j^{t-1} - x_i^{t-1}) + \alpha(\text{rand}() - 1/2)$$

$$I = I_0 \exp(-\gamma r_{ij})$$

$$\beta = \beta_0 \exp(-\gamma r_{ij}^2)$$

其中,  $I$  为萤火虫亮度,  $I_0$  为萤火虫的最大亮度,  $\gamma$  为光强的吸收系数,  $r_{ij}$  为萤火虫  $i$  与萤火虫  $j$  之间的距离,  $x_j^{t-1}$  为萤火虫  $j$  在  $t-1$  时刻所处的空间位置,  $x_i^{t-1}$  为萤火虫  $i$  在  $t-1$  时刻所处的空间位置;  $\alpha$  为步长因子;  $\text{rand}()$  为随机数生成函数,  $\beta$  为萤火虫间的吸引度,  $\beta_0$  为最大吸引度。

2. 根据权利要求1所述的基于滑模极值搜索的控制方法, 其特征在于, 所述滑模极值搜索范围为:  $0 \leq k \leq 2\rho \Delta / \beta$ ; 其中,  $k$  为增益参数,  $\rho$  为积分增益,  $\Delta$  为滑模极值搜索算法的稳态振幅,  $\beta$  换成  $\alpha$  为滑模面距离。

3. 根据权利要求1所述的基于滑模极值搜索的控制方法, 其特征在于, 所述滑模极值搜索算法的稳态振幅  $\Delta$  为 0.3; 所述积分增益  $\rho$  为 9; 所述增益参数  $k$  的取值范围为 (0, 1.08]。

4. 根据权利要求1所述的基于滑模极值搜索的控制方法, 其特征在于, 所述目标函数为:  $ITAE = \int_0^{T_s} t \left( |P_m - P_m^*| + |\omega_m - \omega_m^*| \right) dt$ ;

其中,  $P_m$  为风机的实际功率,  $P_m^*$  为风机的参考功率,  $\omega_m$  为风机的机械转速,  $\omega_m^*$  为风机的参考转速; ITAE 为功率误差与转速误差的和在时间上的积分。

5. 根据权利要求1所述的基于滑模极值搜索的控制方法, 其特征在于, 所述从预先构建的参数表中匹配出一个增益参数值是根据永磁风力发电系统和控制系统的各项参数搭在 matlab 中搭建滑模极值搜索控制仿真模型, 其中风力发电系统参数包括: 永磁同步电机额定功率、额定转速、极对数、额定电压、Boost 电路的电容、电感值、负载电阻、风力机的最大风能利用系数; 根据多组风机特性曲线构造风机模型, 其中风机特性曲线为相同风速下不同风机转速对应的机械功率变化曲线。

6. 根据权利要求1所述的基于滑模极值搜索的控制方法, 其特征在于, 所述萤火虫间的吸引度  $\beta$  为 5; 所述光强的吸收系数  $\gamma$  为 0.3; 所述步长因子  $\alpha$  为 0.02; 所述最大吸引度  $\beta_0$  为 0.6。

7. 根据权利要求1所述的基于滑模极值搜索的控制方法, 其特征在于, 所述控制器为型号为 TMS320F28335 的 DSP 处理器。

## 一种基于滑模极值搜索的控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及风力发电控制技术领域，尤其涉及一种基于滑模极值搜索的控制方法。

### 背景技术

[0002] 化石能源的使用对自然环境造成了巨大的压力，各国都十分重视可再生能源并推出了鼓励可再生能源开发使用的系列政策，促进了风力发电技术的发展。

[0003] 风力发电系统的最大功率跟踪是指：在风力发电系统运行在其额定功率之下时，采用控制系统对风力发电系统进行调节，使得风力发电系统的工作点运行在最大功率点附近，进而实现最大功率的捕获，以充分利用风能。

[0004] 扰动观察法，是一种常用的控制风力发电系统实现最大功率跟踪的控制方法，该方法通过增加或者减少风力发电机的转速，观察功率的增减进而对扰动方向的正确与否得出判断。但转速扰动往往不能在瞬间得到响应，而且风速变化急促时也容易使得该方法产生误判，无法追踪到最大功率点。

### 发明内容

[0005] 本发明要解决的技术问题是提供一种基于滑模极值搜索的控制方法，先从预先构建的参数表中匹配出增益参数值，再采用优化函数对增益参数值进行优化，实现风力发电系统跟踪到最大功率，且能够对风力发电系统进行实时控制，响应速度快。

[0006] 为解决上述技术问题，本发明提供一种基于滑模极值搜索的控制方法，应用于控制风力发电系统实现最大功率跟踪，包括，

[0007] 一种基于滑模极值搜索的控制方法，应用于控制风力发电系统实现最大功率跟踪，包括如下步骤：

[0008] 1) 当前状态检测：检测风机的当前功率和当前转速；

[0009] 2) 参数匹配：根据所述当前功率和所述当前转速，从预先构建的参数表中匹配出一个增益参数值；

[0010] 3) 最大功率跟踪步骤：将所述增益参数值输入控制器中，根据预先确定的滑模极值搜索范围，并根据预先构建的目标函数，采用预先构建的优化函数对增益参数进行优化，以获取最优的增益参数值，实现风力发电系统跟踪到最大功率；

[0011] 所述优化函数为萤火虫算法函数：

$$x_i^t = x_i^{t-1} + \beta(x_j^{t-1} - x_i^{t-1}) + \alpha(\text{rand}() - 1/2)$$

$$I = I_0 \exp(-\gamma r_{ij})$$

$$\beta = \beta_0 \exp(-\gamma r_{ij}^2)$$

[0015] 其中， $I$ 为萤火虫亮度， $I_0$ 为萤火虫的最大亮度， $\gamma$ 为光强的吸收系数， $r_{ij}$ 为萤火虫i与萤火虫j之间的距离， $x_j^{t-1}$ 为萤火虫j在t-1时刻所处的空间位置， $x_i^{t-1}$ 为萤火虫i在t-1时

刻所处的空间位置; $\alpha$ 为步长因子;rand()为随机数生成函数, $\beta$ 为萤火虫间的吸引度, $\beta_0$ 为最大吸引度。

[0016] 优选地,所述滑模极值搜索范围为: $0 \leq k \leq 2\rho \Delta / \beta$ ;其中,k为增益参数, $\rho$ 为积分增益, $\Delta$ 为滑模极值搜索算法的稳态振幅, $\beta$ 换成 $\alpha$ 为滑模面距离。

[0017] 优选地,所述滑模极值搜索算法的稳态振幅 $\Delta$ 为0.3;所述积分增益 $\rho$ 为9;所述增益参数k的取值范围为(0,1.08]。

[0018] 优选地,所述目标函数为:ITAE =  $\int_0^{T_s} t \left( |P_m - P_m^*| + |\omega_m - \omega_m^*| \right) dt$ ;

[0019] 其中, $P_m$ 为风机的实际功率, $P_m^*$ 为风机的参考功率, $\omega_m$ 为风机的机械转速, $\omega_m^*$ 为风机的参考转速;ITAE为功率误差与转速误差的和在时间上的积分。

[0020] 优选地,所述从预先构建的参数表中匹配出一个增益参数值是根据永磁风力发电系统和控制系统的各项参数搭在matlab中搭建滑模极值搜索控制仿真模型,其中风力发电系统参数包括:永磁同步电机额定功率、额定转速、极对数、额定电压、Boost电路的电容、电感值、负载电阻、风力机的最大风能利用系数;根据多组风机特性曲线构造风机模型,其中风机特性曲线为相同风速下不同风机转速对应的机械功率变化曲线。

[0021] 优选地,所述萤火虫间的吸引度 $\beta$ 为5;所述光强的吸收系数 $\gamma$ 为0.3;所述步长因子 $\alpha$ 为0.02;所述最大吸引度 $\beta_0$ 为0.6。

[0022] 优选地,所述控制器为型号为TMS320F28335的DSP处理器。

[0023] 所述参数表通过大量的实验数据获得。将本发明所提出的算法,以.m脚本文件形式存在,通过.m脚本文件调用simulink模型,将需要搜索的k赋值给simulink模型中的k,然后仿真预设的时间t,simulink模型返回系统的性能指标(ITAE里的参数),指标返回给.m脚本,代回算法函数中继续,完成迭代x次。然后.m脚本就会产生最优化。

[0024] 所述优化函数的工作原理为,优化函数对增益参数进行优化,直到目标函数收敛到预先设定的收敛区间。某个风速下对应存在一个k使得系统的误差指标最小。本专利的算法就是为了找出最小误差指标所对应的k值。我们的评估标准为ITAE,因为ITAE是系统工作点与理论最优点之间的差在时间上的积分(k的左邻域中和右邻域中没有找到比此值要小)。

[0025] 相对于现有技术,本发明具有如下优点和有益效果:

[0026] 本发明提供的基于滑模极值搜索的控制方法,先从预先构建的参数表中匹配出增益参数值,再采用优化函数对增益参数值进行优化,实现风力发电系统跟踪到最大功率,且能够对风力发电系统进行实时控制,响应速度快。

## 附图说明

[0027] 图1是本发明实施例提供的基于滑模极值搜索的控制方法;

[0028] 图2是本发明实施例提供的增益参数优化流程图;

[0029] 图3是本发明实施例提供的控制器的原理结构图。

## 具体实施方式

[0030] 下面通过具体的实施例进一步说明本发明,但是,应当理解为,这些实施例仅仅是

用于更详细具体地说明之用,而不应理解为用于以任何形式限制本发明。

[0031] 在某个风速下,滑模极值搜索算法的积分增益k选择不当会导致输出功率稳态震荡甚至无法追踪到最大功率点,会导致功率损失进而影响风力发电系统的稳定性,使得整个系统始终以低功率形式运行,导致风力资源极大的浪费。

[0032] 如图1,本实施例提供的基于滑模极值搜索的控制方法,应用于控制风力发电系统实现最大功率跟踪,包括,

[0033] 当前状态检测步骤S1,检测风机的当前功率和当前转速;在某一风速下,风机不同的转速所捕获的风能不同,存在某个特定风速下捕获的最大风能,控制系统通过改变负载输入电阻的大小从而改变永磁同步发电机的定子电流大小,进而控制永磁同步电机的机械转矩,通过机械转矩和风力机的相互作用,达到调节风力机的转速的目的。

[0034] 参数匹配步骤S2,根据当前功率和当前转速,从预先构建的参数表中匹配出一个增益参数值;

[0035] 最大功率跟踪步骤S3,将增益参数值输入控制器中,根据预先确定的滑模极值搜索范围,并根据预先构建的目标函数,采用预先构建的优化函数对增益参数进行优化,以获取最优的增益参数值,实现风力发电系统跟踪到最大功率。

[0036] 本实施例提供的基于滑模极值搜索的控制方法,先从预先构建的参数表中匹配出增益参数值,再采用优化函数对增益参数值进行优化,实现风力发电系统跟踪到最大功率,且能够对风力发电系统进行实时控制,响应速度快。

[0037] 优选地,滑模极值搜索范围为,

$$0 \leq k \leq 2\rho \Delta / \beta$$

[0039] 其中,k为增益参数,ρ为积分增益,Δ为滑模极值搜索算法的稳态振幅,β为滑模面距离。

[0040] 本实施例中,由于滑模极值搜索算法的稳态振幅Δ满足如下公式:

$$\Delta = \beta k / 2\rho$$

[0042] 如此,可推理得 $k \leq 2\rho \Delta / \beta$ ,又由于增益参数应为正常数,故可获知增益参数的取值范围表达式为 $0 \leq k \leq 2\rho \Delta / \beta$ 。

[0043] 进一步优选地,目标函数为,

$$ITAE = \int_0^{T_s} t \left( |P_m - P_m^*| + |\omega_m - \omega_m^*| \right) dt$$

[0045] 其中, $P_m$ 为风机的实际功率, $P_m^*$ 为风机的参考功率, $\omega_m$ 为风机的机械转速, $\omega_m^*$ 为风机的参考转速;ITAE为功率误差与转速误差的和在时间上的积分。

[0046] 本实施例中,ITAE可同时描述功率与转速的误差,并综合反映系统在功率与转速两方面的控制效果,当ITAE值越小时系统的控制效果越好。

[0047] 进一步优选地,优化函数为萤火虫算法函数,且其中的核心优化子函数为,

$$x_i^t = x_i^{t-1} + \beta (x_j^{t-1} - x_i^{t-1}) + \alpha (\text{rand}() - 1/2)$$

$$I = I_0 \exp(-\gamma r_{ij})$$

$$\beta = \beta_0 \exp(-\gamma r_{ij}^2)$$

[0051] 其中,I为萤火虫亮度, $I_0$ 为萤火虫的最大亮度, $\gamma$ 为光强的吸收系数, $r_{ij}$ 为萤火虫

$i$ 与萤火虫 $j$ 之间的距离,  $x_j^{t-1}$ 为萤火虫 $j$ 在 $t-1$ 时刻所处的空间位置,  $x_i^{t-1}$ 为萤火虫 $i$ 在 $t-1$ 时刻所处的空间位置;  $\alpha$ 为步长因子;  $\text{rand}()$ 为随机数生成函数,  $\beta$ 为萤火虫间的吸引度,  $\beta_0$ 为最大吸引度。

[0052] 本实施例中, 萤火虫算法最早是由学者X.S.Yang在2008年提出, 该算法比同类的算法如粒子群算法具有更快的收敛性, 更强大的全局追踪能力。

[0053] 本实施例中, 采用萤火虫算法进行优化时, 目标函数ITAE取得最小值时, 所对应的最佳增益 $k$ 即为滑模极值搜索的最优解。需要说明的是, 萤火虫算法是一种新型的进化算法, 通过人为地模仿萤火虫的群体行为进行搜索。每只萤火虫所处位置的优劣决定了萤火虫的移动方向, 吸引度决定了在单次迭代中萤火虫的飞行距离。通过亮度和吸引度不断更新种群里每一只萤火虫的位置进行搜索。

[0054] 此外,  $I_0$ 为萤火虫的最大亮度, 即观测者距离萤火虫距离为0时的萤火虫亮度, 该亮度取决于目标函数。本实施例中目标函数即为ITAE指标, 当ITAE指标越大时表明控制系统的控制效果越差, 则萤火虫越暗, 对周围个体的吸引度越弱, 反之, 则越强。

[0055]  $\gamma$ 为光强的吸收系数, 萤火虫发出的萤光随着空气等传播介质的传播逐渐减弱;  $\beta_0$ 为最大吸引度, 即距离 $r=0$ 时的吸引度。

[0056] 此外, 算法实现优化的过程是: 先将萤火虫群体随机散布在解空间, 每一只萤火虫因为所处位置不同发出的荧光亮度不同, 通过比较, 亮度较高的萤火虫可以吸引亮度较低的萤火虫向其本身移动。被吸引的萤火虫个体的单次移动距离取决于吸引度的大小。

[0057] 进一步优选地, 优化函数的工作原理为, 优化函数对增益参数进行优化, 直到目标函数收敛到预先设定的收敛区间。也就是说, 当萤火虫种群收敛到一定大小的空间时, 即可认为萤火虫算法已经收敛。且该空间内的最优解为滑模极值搜索算法的最佳增益参数。

[0058] 进一步优选地, 参数表通过大量的实验数据获得。本实施例中, 对应不同风速变化, 分别利用萤火虫算法对滑模极值搜索算法的增益参数 $k$ 进行优化, 优化后构造成参数表。

[0059] 进一步优选地, 滑模极值搜索算法的稳态振幅 $\Delta$ 为0.3; 萤火虫间的吸引度 $\beta$ 为5; 积分增益 $\rho$ 为9; 增益参数 $k$ 的取值范围为(0, 1.08]; 光强的吸收系数 $\gamma$ 为0.3; 步长因子 $\alpha$ 为0.02; 最大吸引度 $\beta_0$ 为0.6。

[0060] 具体地, 对于具有如下参数的永磁风机,

[0061] 风机叶片直径为: 2m

[0062] 电机额定功率为: 200W

[0063] 额定电压为: 32V

[0064] 额定转速为: 900r/min

[0065] 切入风速: 3m/s

[0066] 额定风速: 10m/s

[0067] Boost斩波电路的参数:

[0068] 前置稳压电容 $C_1=2\text{mF}$

[0069] 后置稳压电容 $C_2=1\text{mF}$

[0070] 电感 $L=5\text{mH}$

[0071] 负载电阻 $R_L=200\Omega$

[0072] 参数表的构造方法如下:将风速条件从 $v=4\text{m/s}$ 到 $v=10\text{m/s}$ ,步长间隔 $1\text{m/s}$ 共计7组,对其分别进行仿真实验,采用萤火虫算法优化后得到7组不同风速条件下对应的k值。如下表所示:

[0073] 表1各风速下对应的最优k值

风速	最优 k 值
4m/s	0. 3212
5m/s	0. 3833
6m/s	0. 4485
7m/s	0. 5442

[0074]	8m/s	0. 5585
	9m/s	0. 6738
	10m/s	0. 7677

[0076] 按照表1给出的数据可得到线性拟合后的最优k值与风速表达式:

$$k=0.0725v+0.2381$$

[0077] 继而,可根据需求构建参数表。

[0079] 需要说明的是,本实施例中,采用Simulink软件进行仿真实验,且图2为本实施例提供的增益参数优化流程图,以及图3是本实施例提供的控制器的原理结构图。本实施例中,在获得了参数表后,控制器的输入为瞬时功率和瞬时转速,输出为增益参数值。具体地,控制器为型号为TMS320F28335的DSP处理器。当风力发电系统运行时,检测当前风机的功率和转速,并从预先构建的参数表中匹配出增益参数值,再采用优化函数对增益参数值进行优化。此外,实验证明,本实施例的方法,能在5秒内捕捉到最大功率点,也就是说,基于本实施例提供的方法,能够实现风力发电系统跟踪到最大功率,且能够对风力发电系统进行实时控制,响应速度快。

[0080] 本发明算法能够使用滑模极值搜索算法中的积分增益k参数,通过在线调节k参数,去适应当前瞬态风速达到最佳的效果,过往其他的研究均没有使用自适应参数式滑模极值搜索算法进行风电系统的最大功率追踪。过往的k不能在线调节大小,进而无法适应不同的风速,而导致输出功率稳态震荡甚至无法追踪到最大功率点,而通过调节k减少了功率损失,极大改善了滑模极值搜索算法控制下风力发电系统的可靠性。

[0081] 尽管本发明已进行了一定程度的描述,明显地,在不脱离本发明的精神和范围的条件下,可进行各个条件的适当变化。可以理解,本发明不限于所述实施方案,而归于权利要求的范围,其包括所述每个因素的等同替换。

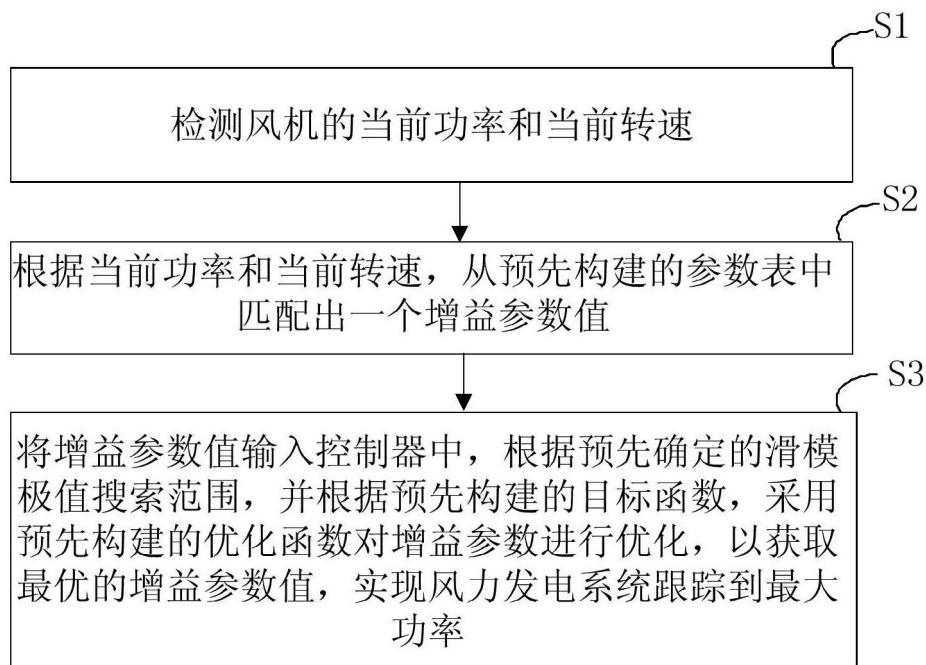


图1

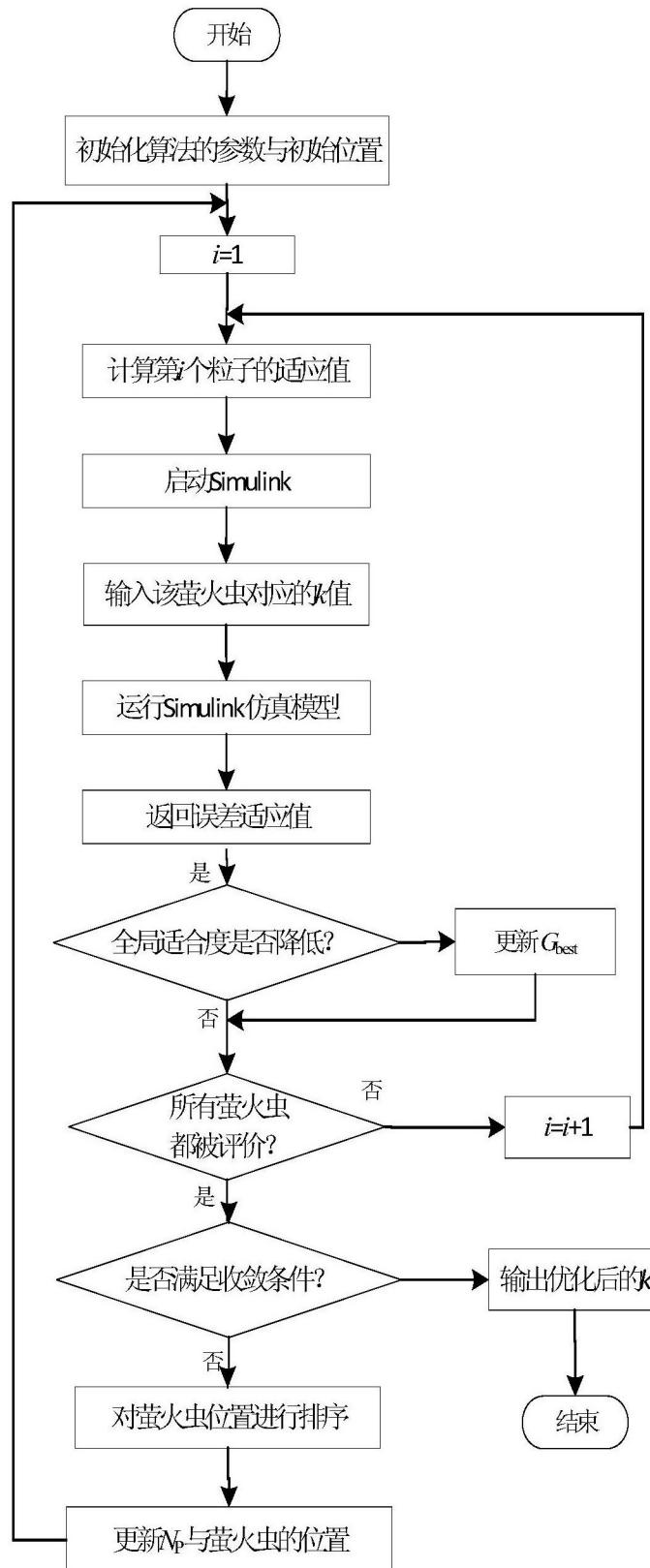


图2

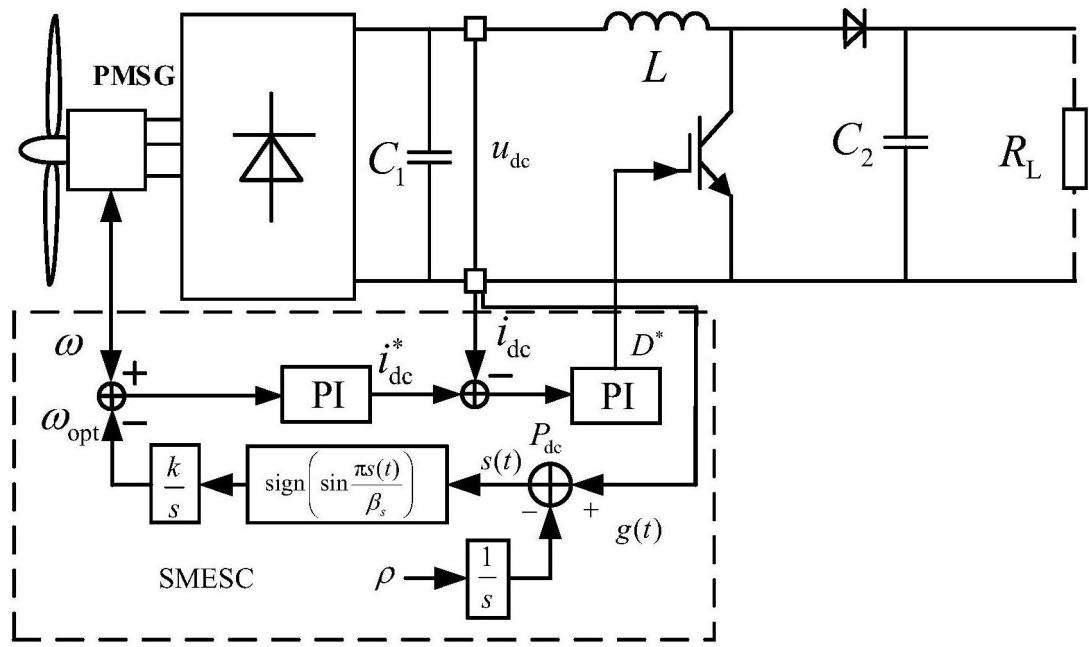


图3