



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 105986961 A

(43)申请公布日 2016. 10. 05

(21)申请号 201610274408.7

(22)申请日 2016.04.28

(71)申请人 华北电力大学

地址 102206 北京市昌平区朱辛庄北农路2号

(72)发明人 张文广 李腾飞 韩越 刘吉臻 曾德良 牛玉广 杨婷婷 胡阳

(74)专利代理机构 北京众合诚成知识产权代理有限公司 11246

代理人 陈波

(51)Int. Cl.

F03D 7/04(2006.01)

F03D 17/00(2016.01)

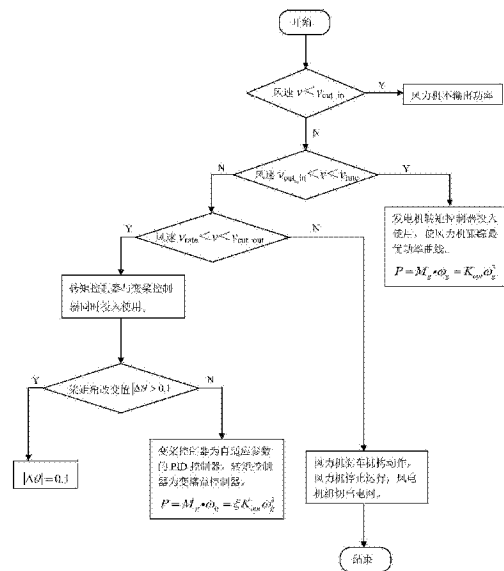
权利要求书2页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称

一种变速变桨风力机功率优化控制方法

(57)摘要

本发明涉及一种变速变桨风力机功率优化控制方法。其是在整个设计风速范围内对变速变桨风力机进行控制,当风力机在切入风速与额定风速之间运行时,采用变速控制方式,此时通过调整发电机电磁转矩,使风力机在最佳效率Cp max下运行。当风力机在高于额定风速之上运行时,变桨控制器投入使用,通过调节桨距角使最大功率输出限制在额定值;此时的转矩控制器为变增益控制器,其根据不同风况对应的转速值,设置不同的增益;极大减弱了由于阵风等的影响使风力机在短时间内产生很大功率输出的现象;其次在额定风附近对变桨控制器设置切换规则,避免了变桨控制器在额定风附近的频繁切换。本发明延长了齿轮箱的寿命,保证了风力机在恶劣环境下的运行。



CN 105986961 A

1. 一种变速变桨风力机功率优化控制方法,其特征在于,具体步骤如下:

步骤1:当风力机组投入使用后,初始化控制系统,开始检测机前风速大小;

步骤2:当风力机运行时的风速未达到切入风速时,发电机转矩为0,风力机不输出功率;

步骤3:当风力机运行时的风速在切入风速与额定风速之间变化时,转矩控制器投入运行,其中转矩控制器为变速控制器;变桨角 $\theta$ 保持不变,转矩控制器应使得功率输出 $P$ 跟踪上最大功率输出 $P_{\max}$ ,风力机在切入风速与额定风速之间变化时的最大功率输出 $P_{\max}$ 为:

$$P_{\max} = \frac{1}{2} C_{P_{\max}}(\theta, \lambda) \rho \pi r^2 v^3 = M_g \omega_g \quad (1)$$

$P_{\max}$ 表示风力机的最大功率输出,W; $\rho$ 为空气密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $r$ 为风轮半径,m; $v$ 为风速, $\text{m}/\text{s}$ ;  $\theta$ 为变桨角度,rad; $M_g$ 为发电机转矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$ ;  $\omega_g$ 为发电机转速,rad/s;  $\omega_g = n \omega_t$ ,  $\omega_t$ 为风轮角速度,rad/s;  $C_{P_{\max}}(\theta, \lambda)$ 为风能利用系数; $\lambda$ 为叶尖速比,  $\lambda = \frac{\omega_t r}{v}$ ;

风力机在风速为切入风速与额定风速之间变化时,维持最大功率时的发电机转矩 $M_g$ 为:

$$M_g = K_{opt} \omega_g^2 \quad (2)$$

$$\text{其中, } K_{opt} = \frac{\rho \pi r^5 C_{P_{\max}}(\theta, \lambda)}{\lambda^3 n^3};$$

步骤4:当风力机运行时的风速在大于额定风速小于切出风速时,转矩控制器与变桨控制器同时投入使用,其中转矩控制器为变增益控制器,变桨控制器为PID控制器;对于相应的发电机转矩对应一个修正因子 $\xi$ :

$$\xi = \left( 1 + \frac{0.9 \cdot \omega_r}{\omega_{\max} - \omega_r} \right) - \frac{0.9}{\omega_{\max} - \omega_r} \cdot \omega;$$

其中,  $\omega$ 为发电机实际转速,  $\omega_r$ 为发电机的额定转速,  $\omega_{\max}$ 为发电机的最大转速;此时的发电机转矩 $M_g$ 为:

$$M_g = \xi K_{opt} \omega_g^2 \quad (3)$$

最大功率输出表达式为:

$$P_{\max} = M_g \cdot \omega_g = \xi K_{opt} \omega_g^3 \quad (4)$$

步骤5:当风力机运行时的风速大于切出风速时,风力机刹车机构开始动作,风力机停止运行,风电机组切出电网。

2. 根据权利要求1所述一种变速变桨风力机功率优化控制方法,其特征在于,当风力机运行时的风速在大于额定风速小于切出风速时,变桨控制器为自适应参数的PID控制器,其控制方法如下:

步骤1:初始化PID控制器参数 $K_p(\theta(k))$ ,  $K_i(\theta(k))$ ;

步骤2:根据上一时刻桨距角改变值,计算当前PID控制器的参数值:

$$K_p(\theta(k)) = k_p / (G + \Delta \theta(k-1)) \quad (5)$$

$$K_i(\theta(k)) = k_i / (G + \Delta \theta(k-1)) \quad (6)$$

式中,  $k_p, k_i$  分别为PID控制器比例项和积分项在系统稳态时的值,  $K_p(\theta(k)), K_i(\theta(k))$  为PID控制器在系统动态时的自适应值,  $\Delta\theta(k-1)$  为上一时刻桨距角的改变值,  $G$  为常数, 通常取7-8之间;

步骤3: 计算当前时刻变桨控制器的桨距角改变值:

$$\Delta\theta = K_p(\theta(k)) \cdot (\omega_g(k-1) - \omega_g(k)) + K_i(\theta(k)) \cdot (\omega_g(k-1) - \omega_{rate}) \quad (7)$$

式中,  $\Delta\theta$  为当前时刻变桨控制器的桨距角改变值;  $K_p(\theta(k))$  和  $K_i(\theta(k))$  分别为PID控制器在系统动态时的自适应值;  $\omega_g(k-1)$  为上一时刻发电机转速值;  $\omega_g(k)$  为当前时刻发电机转速值;  $\omega_{rate}$  为发电机额定转速;

步骤4: 计算变桨控制器的输出桨距角:

$$\theta(k) = \theta(k-1) + \Delta\theta \quad (8)$$

式中,  $\theta(k)$  为当前时刻变桨控制器输出值;  $\theta(k-1)$  为上一时刻变桨控制器输出值;  $\Delta\theta$  为当前时刻变桨控制器的桨距角改变值。

3. 根据权利要求2所述一种变速变桨风力机功率优化控制方法, 其特征在于, 为了防止变桨控制器在额定风速附近频繁切换, 对其设置切换规则为: 当变桨控制器上一时刻桨距角变化值  $\Delta\theta(k-1)$  小于  $-0.1^\circ$  时, 令当前时刻变桨控制器的桨距角改变值  $\Delta\theta = -0.1^\circ$ ; 当变桨控制器上一时刻桨距角变化值  $\Delta\theta(k-1)$  大于  $0.1^\circ$  时, 令当前时刻变桨控制器的桨距角改变值  $\Delta\theta = 0.1^\circ$ 。

## 一种变速变桨风力机功率优化控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于风力发电技术领域,特别涉及一种变速变桨风力机功率优化控制方法。

### 背景技术

[0002] 最近十几年来由于能源危机、环境污染等现实问题,人们逐渐进行可再生能源的开发及利用。风能作为一种地球上广泛存在的清洁能源,在最近几年来利用风能发电的风电行业得到了迅速的发展。随着风力发电装机容量的增加,机组性能和发电质量备受关注,并对风力机组的控制系统及方法提出了更高的要求。

[0003] 目前大型变桨变速风力机的控制方法主要采用转矩控制和变桨控制相结合的控制方法,在低于额定风速时,风力机主要采用转矩控制,根据风速控制风轮转速,使风力机基本在最优叶尖速比下运行,尽量增加风能捕获;当风速超过额定风速时,变桨控制器投入使用保持风轮转速不变,增加叶片桨距角,使输出功率基本在额定功率附近变化,并减小来流对风力机的冲击。

[0004] 然而在极端阵风的影响下,风力机组会在很短的时间内产生很大的功率输出,如果使用现有的控制系统,由于变桨系统具有较大的延迟特性,变桨的速度跟不上风速的变化,会使系统产生很大的超调震荡,进而会引发风轮超速现象,也会使风力机在很短的时间内产生极大的载荷。此外,当风速处在额定风速附近不断变化时,风力机将会在变桨控制器的投入与切出之间频繁的切换,这样将会严重影响风力机相关部件的使用寿命。

### 发明内容

[0005] 针对现有技术不足,本发明提供了一种变速变桨风力机功率优化控制方法。

[0006] 一种变速变桨风力机功率优化控制方法,具体步骤如下:

[0007] 步骤1:当风力机组投入使用后,初始化控制系统,开始检测机前风速大小;

[0008] 步骤2:当风力机运行时的风速未达到切入风速时,发电机转矩为0,风力机不输出功率;

[0009] 步骤3:当风力机运行时的风速在切入风速与额定风速之间变化时,转矩控制器投入运行,变桨角 $\theta$ 保持不变,转矩控制器应使得功率输出 $P$ 跟踪上最大功率输出 $P_{\max}$ ,风力机在切入风速与额定风速之间变化时的最大功率输出 $P_{\max}$ 为:

$$[0010] \quad P_{\max} = \frac{1}{2} C_{P_{\max}}(\theta, \lambda) \rho \pi r^2 v^3 = M_g \omega_g \quad (1)$$

[0011]  $P_{\max}$ 表示风力机的最大功率输出,  $W$ ;  $\rho$ 为空气密度,  $kg/m^3$ ;  $r$ 为风轮半径,  $m$ ;  $v$ 为风速,  $m/s$ ;  $\theta$ 为变桨角度,  $rad$ ;  $M_g$ 为发电机转矩,  $kN \cdot m$ ;  $\omega_g$ 为发电机转速,  $rad/s$ ;  $\omega_g = n \omega_t$ ,  $\omega_t$ 为风轮角速度,  $rad/s$ ;  $C_{P_{\max}}(\theta, \lambda)$ 为风能利用系数;  $\lambda$ 为叶尖速比,  $\lambda = \frac{\omega_t r}{v}$ ;

[0012] 风力机在风速为切入风速与额定风速之间变化时,维持最大功率时的发电机转矩

$M_g$ 为:

$$[0013] \quad M_g = K_{opt} \omega_g^2 \quad (2)$$

[0014] 其中,  $K_{opt}$ 是一个常值,由风力机的类型确定:  $K_{opt} = \frac{\rho \pi r^5 C_{p_{max}}(\theta, \lambda)}{\lambda^3 n^3}$ ;

[0015] 步骤4:当风力机运行时的风速在大于额定风速小于切出风速时,转矩控制器与变桨控制器同时投入使用,对于相应的发电机转矩对应一个修正因子 $\xi$ :

$$[0016] \quad \xi = \left( 1 + \frac{0.9 \cdot \omega_r}{\omega_{max} - \omega_r} \right) - \frac{0.9}{\omega_{max} - \omega_r} \cdot \omega;$$

[0017] 其中,  $\omega$ 为发电机实际转速,  $\omega_r$ 为发电机的额定转速,  $\omega_{max}$ 为发电机的最大转速;

[0018] 此时的发电机转矩 $M_g$ 为:

$$[0019] \quad M_g = \xi K_{opt} \omega_g^2 \quad (3)$$

[0020] 最大功率输出表达式为:

$$[0021] \quad P_{max} = M_g \cdot \omega_g = \xi K_{opt} \omega_g^3 \quad (4)$$

[0022] 步骤5:当风力机运行时的风速大于切出风速时,风力机刹车机构开始动作,风力机停止运行,风电机组切出电网;

其中转矩控制器为变增益控制器,变桨控制器为PID控制器。

[0023] 当风力机运行时的风速在大于额定风速小于切出风速时,变桨控制器为自适应参数的PID控制器,其控制方法如下:

[0024] 步骤1:初始化PID控制器参数 $K_p(\theta(k)), K_i(\theta(k))$ ;

[0025] 步骤2:根据上一时刻桨距角改变值,计算当前PID控制器的参数值:

$$[0026] \quad K_p(\theta(k)) = k_p / (G + \Delta \theta(k-1)) \quad (5)$$

$$[0027] \quad K_i(\theta(k)) = k_i / (G + \Delta \theta(k-1)) \quad (6)$$

[0028] 式中,  $k_p, k_i$ 分别为PID控制器比例项和积分项在系统稳态时的值,  $K_p(\theta(k)), K_i(\theta(k))$ 为PID控制器在系统动态时的自适应值,  $\Delta \theta(k-1)$ 为上一时刻桨距角的改变值,  $G$ 为常数,通常取7-8之间;

[0029] 步骤3:计算当前时刻变桨控制器的桨距角改变值:

$$[0030] \quad \Delta \theta = K_p(\theta(k)) (\omega_g(k-1) - \omega_g(k)) + K_i(\theta(k)) \cdot (\omega_g(k-1) - \omega_{rate}) \quad (7)$$

[0031] 式中,  $\Delta \theta$ 为当前时刻变桨控制器的桨距角改变值;  $K_p(\theta(k))$ 和  $K_i(\theta(k))$ 分别为PID控制器在系统动态时的自适应值;  $\omega_g(k-1)$ 为上一时刻发电机转速值;  $\omega_g(k)$ 为当前时刻发电机转速值;  $\omega_{rate}$ 为发电机额定转速;

[0032] 步骤4:计算变桨控制器的输出桨距角:

$$[0033] \quad \theta(k) = \theta(k-1) + \Delta \theta \quad (8)$$

[0034] 式中,  $\theta(k)$ 为当前时刻变桨控制器输出值;  $\theta(k-1)$ 为上一时刻变桨控制器输出值;  $\Delta \theta$ 为当前时刻变桨控制器的桨距角改变值。

[0035] 为了防止变桨控制器在额定风速附近频繁切换,对其设置切换规则为:当变桨控制器上一时刻桨距角变化值  $\Delta \theta(k-1)$  小于  $-0.1^\circ$  时,令当前时刻变桨控制器的桨距角改变

值  $\Delta\theta = -0.1^\circ$ ；当变桨控制器上一时刻桨距角变化值  $\Delta\theta(k-1)$  大于  $0.1^\circ$  时，令当前时刻变桨控制器的桨距角改变值  $\Delta\theta = 0.1^\circ$ 。

[0036] 本发明的有益效果为：相对于传统的功率优化跟踪方法，本发明在风速低于额定风速时，采用变速控制方式，此时通过调整发电机电磁转矩，使风力机在最佳效率  $C_{P_{max}}$  下运行；风速高于额定风速时，变桨控制器投入使用，通过调节桨距角使最大功率输出限制在额定值；通过引入修正因子  $\xi$ ，极大减弱了由于阵风等的影响使风力机在短时间内产生很大功率输出的现象，其次在额定风附近对变桨控制器设置切换规则，避免了变桨控制器在额定风附近的频繁切换，延长了风力机变桨机构的使用寿命。通过本发明控制方法的改进，优化了变速变桨风力机的控制系统，大大减小了齿轮箱的扭矩波动，提高风电品质，延长了齿轮箱的寿命，保证风力机在恶劣环境下的运行情况，降低了风力机组的使用成本。

### 附图说明

[0037] 图1为一种变速变桨风力机功率优化控制方法的控制流程图。

[0038] 图2为一种变速变桨风力机功率优化控制方法的功率跟踪图。

[0039] 图3为5MW参考风力机在风况为  $11.4\text{m/s}$  的湍流风下，采用本发明优化控制方法的模拟仿真结果。

### 具体实施方式

[0040] 下面结合附图和具体实施方式对本发明做进一步说明。应该强调的是，下述说明仅仅是示例性的，而不是为了限制本发明的范围及其应用。

[0041] 如图1所示一种变速变桨风力机功率优化控制方法，具体步骤如下：

[0042] 步骤1：当风力机组投入使用后，初始化控制系统，开始检测机前风速大小；

[0043] 步骤2：当风力机运行时的风速未达到切入风速时，发电机转矩为0，风力机不输出功率；

[0044] 步骤3：当风力机运行时的风速在切入风速与额定风速之间变化时，转矩控制器投入运行；变桨角  $\theta$  保持不变，转矩控制器应使得功率输出  $P$  跟踪上最大功率输出  $P_{max}$ ，风力机在切入风速与额定风速之间变化时的最大功率输出  $P_{max}$  为：

$$[0045] \quad P_{max} = \frac{1}{2} C_{P_{max}}(\theta, \lambda) \rho \pi r^2 v^3 = M_g \omega_g \quad (1)$$

[0046]  $P_{max}$  表示风力机的最大功率输出， $W$ ； $\rho$  为空气密度， $\text{kg/m}^3$ ； $r$  为风轮半径， $m$ ； $v$  为风速， $m/s$ ； $\theta$  为变桨角度， $\text{rad}$ ； $M_g$  为发电机转矩， $\text{kN} \cdot m$ ； $\omega_g$  为发电机转速， $\text{rad/s}$ ； $\omega_g = n \omega_t$ ， $\omega_t$  为风轮角速度， $\text{rad/s}$ ； $C_{P_{max}}(\theta, \lambda)$  为风能利用系数； $\lambda$  为叶尖速比， $\lambda = \frac{\omega_t r}{v}$ ；

[0047] 风力机在风速为切入风速与额定风速之间变化时，维持最大功率时的发电机转矩  $M_g$  为：

$$[0048] \quad M_g = K_{opt} \omega_g^2 \quad (2)$$

[0049] 其中， $K_{opt} = \frac{\rho \pi r^5 C_{P_{max}}(\theta, \lambda)}{\lambda^3 n^3}$ ；

[0050] 步骤4:当风力机运行时的风速在大于额定风速小于切出风速时,转矩控制器与变桨控制器同时投入使用,其中转矩控制器为变增益控制器,变桨控制器为自适应参数的PID控制器,其控制方法如下:

[0051] 步骤1:初始化PID控制器参数 $K_p(\theta(k)), K_i(\theta(k))$ ;

[0052] 步骤2:根据上一时刻桨距角改变值,计算当前PID控制器的参数值:

$$[0053] \quad K_p(\theta(k)) = k_p / (G + \Delta \theta(k-1)) \quad (5)$$

$$[0054] \quad K_i(\theta(k)) = k_i / (G + \Delta \theta(k-1)) \quad (6)$$

[0055] 式中, $k_p, k_i$ 分别为PID控制器比例项和积分项在系统稳态时的值, $K_p(\theta(k)), K_i(\theta(k))$ 为PID控制器在系统动态时的自适应值, $\Delta \theta(k-1)$ 为上一时刻桨距角的改变值, $G$ 为常数,通常取7-8之间;

[0056] 步骤3:计算当前时刻变桨控制器的桨距角改变值:

$$[0057] \quad \Delta \theta = K_p(\theta(k)) \cdot (\omega_g(k-1) - \omega_g(k)) + K_i(\theta(k)) \cdot (\omega_g(k-1) - \omega_{rate}) \quad (7)$$

[0058] 式中, $\Delta \theta$ 为当前时刻变桨控制器的桨距角改变值; $K_p(\theta(k))$ 和 $K_i(\theta(k))$ 分别为PID控制器在系统动态时的自适应值; $\omega_g(k-1)$ 为上一时刻发电机转速值; $\omega_g(k)$ 为当前时刻发电机转速值; $\omega_{rate}$ 为发电机额定转速;

[0059] 步骤4:计算变桨控制器的输出桨距角:

$$[0060] \quad \theta(k) = \theta(k-1) + \Delta \theta \quad (8)$$

[0061] 式中, $\theta(k)$ 为当前时刻变桨控制器输出值; $\theta(k-1)$ 为上一时刻变桨控制器输出值; $\Delta \theta$ 为当前时刻变桨控制器的桨距角改变值。

[0062] 为了防止变桨控制器在额定风速附近频繁切换,对其设置切换规则为:当变桨控制器上一时刻桨距角变化值 $\Delta \theta(k-1)$ 小于 $-0.1^\circ$ 时,令当前时刻变桨控制器的桨距角改变值 $\Delta \theta = -0.1^\circ$ ;当变桨控制器上一时刻桨距角变化值 $\Delta \theta(k-1)$ 大于 $0.1^\circ$ 时,令当前时刻变桨控制器的桨距角改变值 $\Delta \theta = 0.1^\circ$ 。

[0063] 对于相应的发电机转矩对应一个修正因子 $\xi$ :

$$[0064] \quad \xi = \left( 1 + \frac{0.9 \cdot \omega_r}{\omega_{max} - \omega_r} \right) - \frac{0.9}{\omega_{max} - \omega_r} \cdot \omega; \text{其中, } \omega \text{ 为发电机实际转速, } \omega_r \text{ 为发电机的}$$

额定转速, $\omega_{max}$ 为发电机的最大转速;

[0065] 此时的发电机转矩 $M_g$ 为:

$$[0066] \quad M_g = \xi K_{opt} \omega_g^2 \quad (3)$$

[0067] 最大功率输出表达式为:

$$[0068] \quad P_{max} = M_g \cdot \omega_g = \xi K_{opt} \omega_g^3 \quad (4)$$

[0069] 步骤5:当风力机运行时的风速大于切出风速时,风力机刹车机构开始动作,风力机停止运行,风电机组切出电网。

[0070] 如图2所示一种变速变桨风力机功率优化控制方法的功率跟踪图。在风速低于额定风速时,采用变速控制方式,通过调整发电机电磁转矩,使风力机在最佳效率 $C_{pmax}$ 下运行;在风速高于额定风速时,变桨控制器投入使用,通过调节桨距角使最大功率输出限制在额定值。图3为5WM参考风力机在风况为 11.4m/s的湍流风下,采用本发明优化控制方法的

模拟仿真结果,由图可见通过此优化方法,使得功率的动态超调明显降低(如图中150s附近),极大减弱了由于阵风等的影响使风力机在短时间内产生很大功率输出的现象,功率输出趋于稳定。

[0071] 以上所述,仅是本发明的较佳实施例,但本发明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发明揭露的技术范围内,可轻易想到的简单修改、等同变化,都应涵盖在本发明的保护范围之内。因此,本发明的保护范围应该以权利要求的保护范围为准。



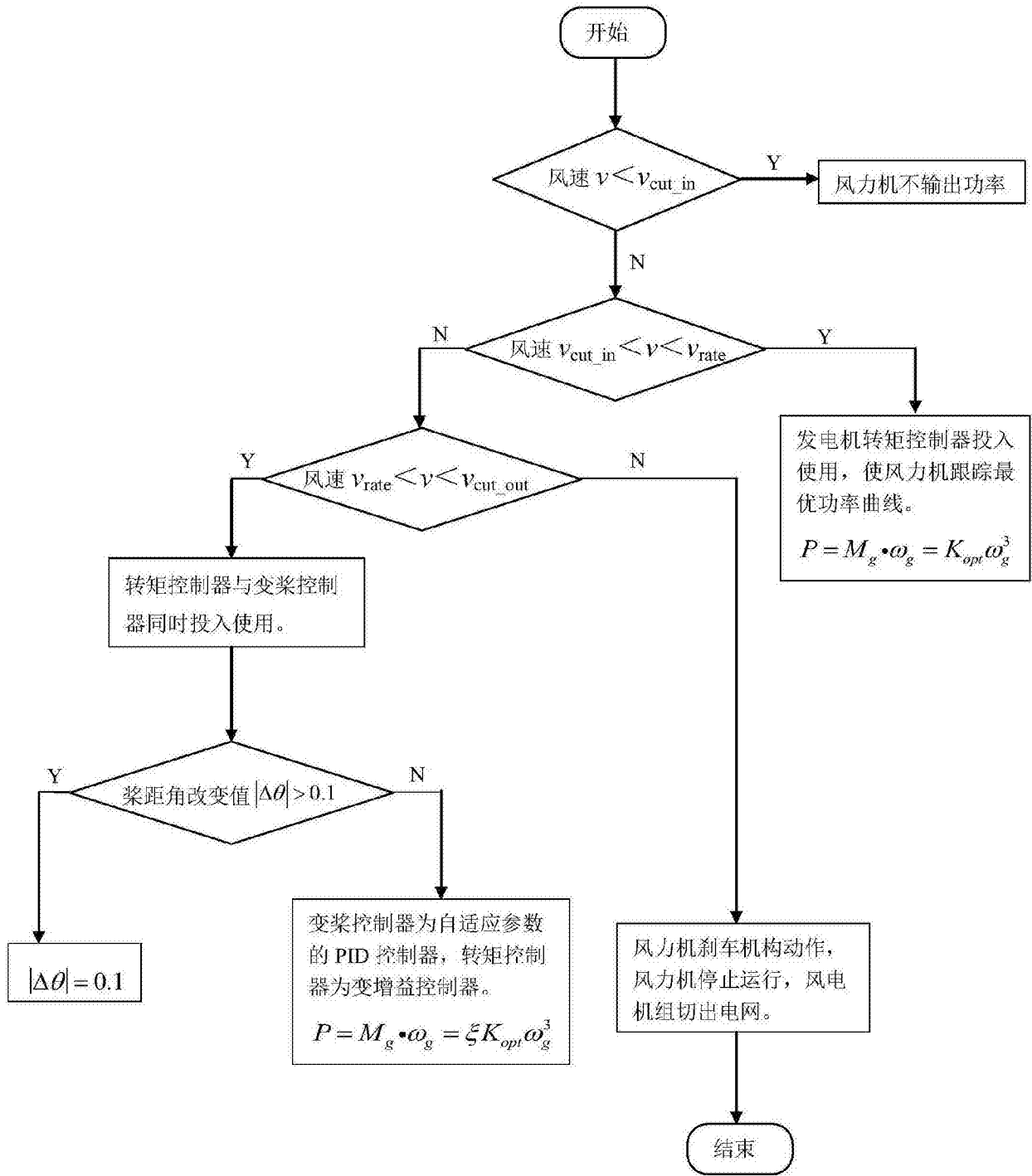


图1

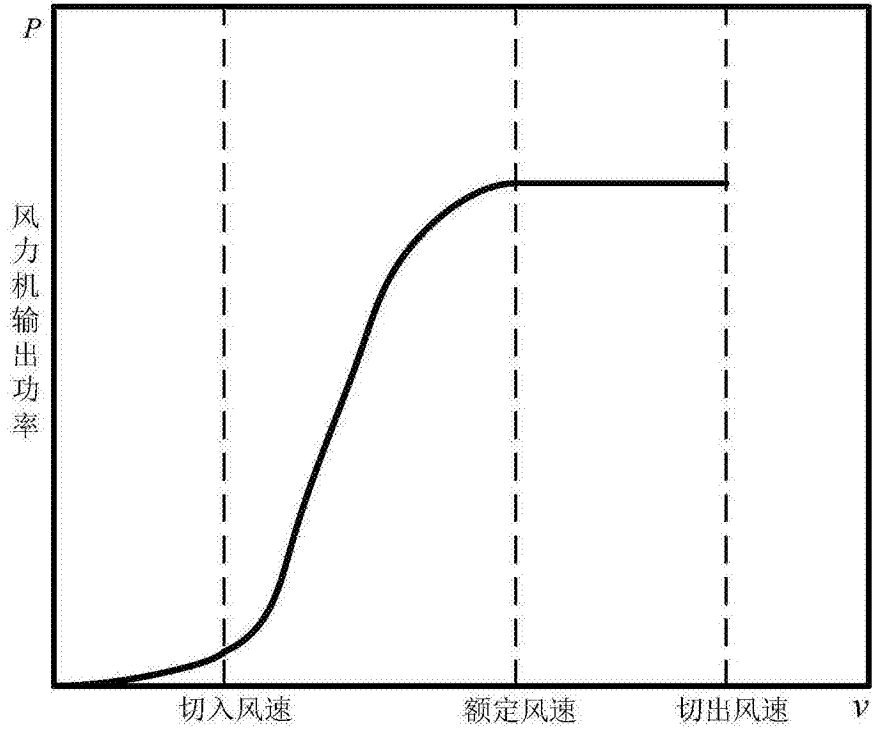


图2

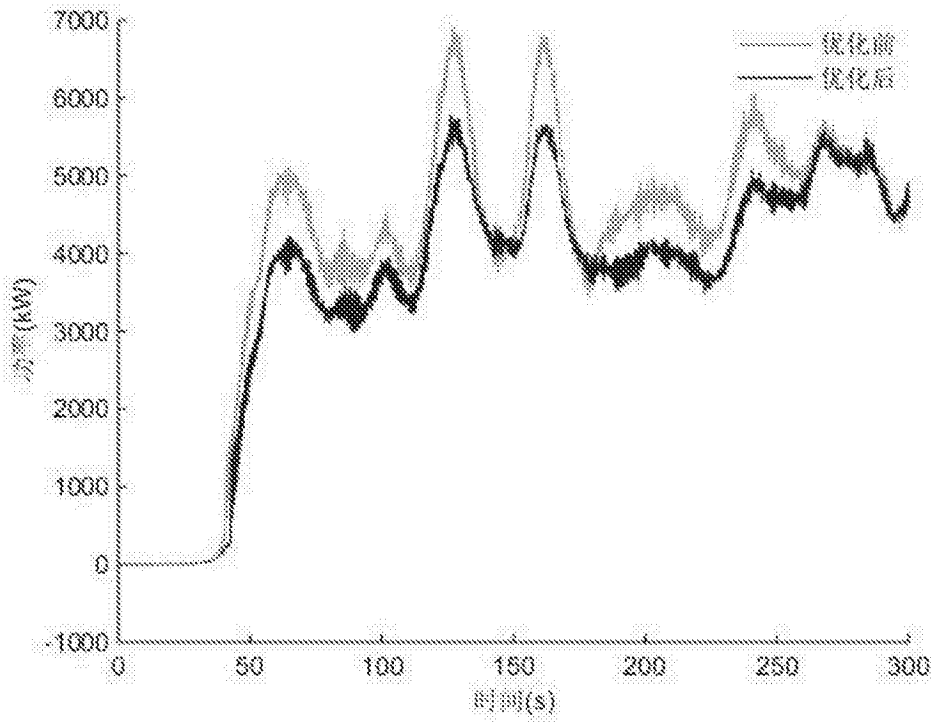


图3