



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102017392 B

(45) 授权公告日 2014. 06. 25

(21) 申请号 200880129023. 5

(22) 申请日 2008. 10. 16

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2010. 11. 04

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/JP2008/068764 2008. 10. 16

(87) PCT国际申请的公布数据
W02010/044163 JA 2010. 04. 22

(73) 专利权人 三菱重工业株式会社
地址 日本东京都

(72) 发明人 有永真司 若狭强志 松下崇俊

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所
11105

代理人 胡金珑

(51) Int. Cl.

H02P 9/00 (2006. 01)

(56) 对比文件

CN 101054951 A, 2007. 10. 17,

CN 101196165 A, 2008. 06. 11,

US 4700081 A, 1987. 10. 13,

WO 2007099936 A1, 2007. 09. 07,

舒进, 张保会等. 变速恒频风电机组运行控制. 《电力系统自动化》. 2008, 89-93.

郎斌斌等. 联网风电机组风速-功率特性曲线的研究. 《电网技术》. 2008, 70-74.

审查员 刘江

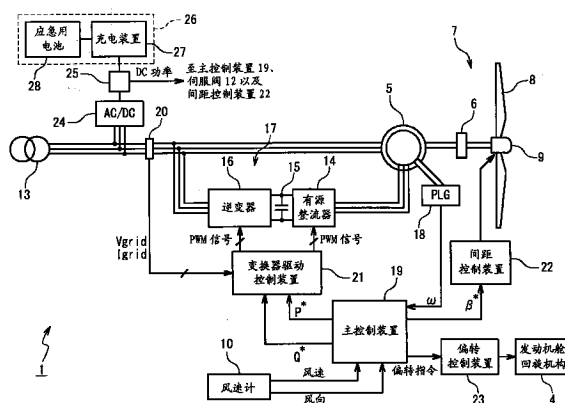
权利要求书2页 说明书10页 附图12页

(54) 发明名称

风力发电系统及其控制方法

(57) 摘要

风力发电系统包括: 风车转子, 具有间距角可变的叶片; 发电机, 由风车转子所驱动; 以及控制装置, 响应于风车转子或者发电机的转速, 控制发电机的输出功率和叶片的间距角。控制装置在转速增大而达到规定的额定转速之前的期间, 进行按照规定的功率-转速曲线而控制输出功率的第1控制, 在转速超过了额定转速时, 进行将输出功率控制为规定的额定功率的第2控制。一旦在被设定为进行第2控制的状态之后, 转速成为比额定转速小时, 控制装置响应于间距角而维持进行第2控制的状态, 或者转移到进行第1控制的状态。



1. 一种风力发电系统,包括:

风车转子,具有间距角可变的叶片;

发电机,由所述风车转子所驱动;以及

控制装置,响应于所述风车转子或者所述发电机的转速,控制所述发电机的输出功率和所述叶片的所述间距角,

所述控制装置在所述转速增大而达到规定的额定转速之前的期间,进行按照规定的功率-转速曲线而控制所述输出功率的第1控制,在所述转速超过了所述额定转速时,进行将所述输出功率控制为规定的额定功率的第2控制,

当一旦在被设定为进行所述第2控制的状态之后所述转速成为比所述额定转速小之后,所述转速处于比所述额定转速小且比小于所述额定转速的规定的阈值转速大的范围的情况下,所述控制装置在所述间距角大于规定的间距角的情况下维持进行所述第2控制的状态,在所述间距角达到所述规定的间距角之后才转移到进行所述第1控制的状态,

并且,当一旦在被设定为进行所述第2控制的状态之后所述转速成为比所述额定转速小之后,所述转速小于所述阈值转速时,所述控制装置与所述间距角无关地转移到进行所述第1控制的状态,

所述阈值转速被设定在中间转速与所述额定转速之间,所述中间转速为通过所述发电机进行发电的最小的转速即最小转速与所述额定转速之和的2分之1。

2. 如权利要求1所述的风力发电系统,其中,

所述控制装置响应于所述转速和规定的额定转速之差、以及所述输出功率和所述额定功率之差而控制所述间距角。

3. 如权利要求2所述的风力发电系统,其中,

所述控制装置在所述输出功率小于所述额定功率时,控制所述间距角以减小所述间距角。

4. 如权利要求1所述的风力发电系统,其中,

所述控制装置在检测出了骤风时,响应于所述转速而增大所述发电机的输出功率。

5. 如权利要求1所述的风力发电系统,还包括:

回旋机构,回旋风车转子的旋转面的朝向;以及

风向检测器,检测出上风方向,

所述风车转子包括用于驱动所述叶片的间距驱动机构,

所述控制装置在检测出了所述间距驱动机构的故障时,控制所述回旋机构使得所述风车转子的旋转面从所述上风方向退避。

6. 如权利要求1所述的风力发电系统,其中,

所述控制装置响应于连接到所述发电机的电力系统的电压而控制从所述发电机输出到所述电力系统的无效功率,并且根据所述无效功率而控制所述间距角。

7. 如权利要求1所述的风力发电系统,还包括:

应急用电池;以及

充电装置,通过从连接到所述发电机的电力系统获取的功率对所述应急用电池进行充电,

所述风车转子包括用于驱动所述叶片的间距驱动机构,

所述应急用电池在所述电力系统的电压下降时,对所述间距驱动机构和所述控制装置提供功率,

所述控制装置在所述应急用电池被充电的期间,控制所述输出功率以增加所述输出功率。

8. 一种风力发电系统的控制方法,其中,

该风力发电系统包括:

风车转子,具有间距角可变的叶片;以及

发电机,由所述风车转子所驱动,

所述控制方法包括:

响应于所述风车转子或者所述发电机的转速,控制所述发电机的输出功率和所述叶片的所述间距角的步骤,

其中,所述进行控制的步骤包括:

(A) 在所述转速增大而达到规定的额定转速之前的期间,进行按照规定的功率-转速曲线而控制所述输出功率的第1控制的步骤;

(B) 在所述转速超过了所述额定转速时,进行将所述输出功率控制为规定的额定功率的第2控制的步骤;

(C) 当一旦在被设定为进行所述第2控制的状态之后所述转速成为比所述额定转速小之后,所述转速处于比所述额定转速小且比小于所述额定转速的规定的阈值转速大的范围的情况下,在所述间距角大于规定的间距角的情况下维持进行所述第2控制的状态,在所述间距角达到所述规定的间距角之后才转移到进行所述第1控制的状态的步骤;以及

(D) 当一旦在被设定为进行所述第2控制的状态之后所述转速成为比所述额定转速小之后,所述转速小于所述阈值转速时,与所述间距角无关地转移到进行所述第1控制的状态的步骤,

所述阈值转速被设定在中间转速与所述额定转速之间,所述中间转速为通过所述发电机进行发电的最小的转速即最小转速与所述额定转速之和的2分之1。

风力发电系统及其控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及风力发电系统及其控制方法,特别涉及采用可变速可变间距控制方式的风力发电系统的输出功率以及间距角的控制。

背景技术

[0002] 风力发电系统的有力的控制方式之一是,风车转子的转速(即,发电机的转速)可变,并且叶片的间距(pitch)角可变的可变速可变间距控制方式。可变速可变间距控制方式具有能够从风获取更多的能量,并且输出变动较小的优点。

[0003] 在可变速可变间距控制方式中,重要的是发电机的输出功率以及叶片的间距角的控制的最佳化。特表 2001-512804 号公报中公开了一边通过磁场定向(orientation)控制来控制发电机的转矩,一边与发电机的转矩相独立地控制间距角的控制方法。在所公开的控制方法中,响应于发电机的转速,使用一览表来决定发电机的目标输出功率,并根据该目标输出功率来决定发电机的转矩指令。响应于该转矩指令,通过磁场定向控制来控制发电机的转矩。另一方面,叶片的间距角通过对应于发电机的转速和目标转速的偏差的 PID 控制、PI 控制或者 PD 控制来控制。

[0004] 风力发电系统的控制中的一个问题是,对发生了短暂的无风(transient wind null)的情况,即风速只在短时间下降的情况的对应。风力发电系统一般被设计为在风车转子的转速为额定转速以上时产生额定功率。在这样的风力发电系统中,若发生短暂的无风而风车转子的转速成为小于额定转速,则输出功率也将变得小于额定功率。这将导致输出功率的变动或发电效率的下降。

发明内容

[0005] 因此,本发明的目的在于提供一种即使发生短暂的无风也不易引起输出功率的变动或发电效率的下降的风力发电系统。

[0006] 在本发明的一个观点中,风力发电系统包括:风车转子,具有间距角可变的叶片;发电机,由风车转子所驱动;以及控制装置,响应于风车转子或者发电机的转速,控制发电机的输出功率和叶片的间距角。控制装置在转速增大而达到规定的额定转速之前的期间,进行按照规定的功率-转速曲线而控制输出功率的第 1 控制,在转速超过了额定转速时,进行将输出功率控制为规定的额定功率的第 2 控制,一旦在被设定为进行第 2 控制的状态之后,转速成为比额定转速小时,控制装置响应于间距角而维持进行第 2 控制的状态,或者转移到进行第 1 控制的状态。这里,间距角是叶片的翼弦(chord)和转子旋转面所构成的角度。即,若间距角小,则风车转子从风获取更多的能量,若间距角大,则风车转子从风获取更少的能量。

[0007] 在这样的结构的风力发电系统中,只在短时间内风速下降的情况下,通过利用风车转子的旋转能量,能够抑制输出功率的变动。这是因为在本发明的风力发电系统中,在所述转速成为比所述额定转速小时,输出功率根据叶片的间距角而被维持为规定的额定功

率。在根据叶片的间距角而判定为是能够将输出功率维持为规定的额定功率的状态时,将输出功率维持为额定功率,从而有效地获取风车转子的旋转能量,能够抑制输出功率的变动和发电效率的下降。

[0008] 优选的是,一旦在被设定为进行第 2 控制的状态之后,转速成为比额定转速小时,控制装置在间距角大于规定的间距角的情况下维持进行第 2 控制的状态,在间距角达到所述规定的间距角之后才转移到进行第 1 控制的状态。这时,期望一旦在被设定为进行所述第 2 控制的状态之后,所述转速成为比小于所述额定转速的规定的阈值转速还要小时,所述控制装置与所述间距角无关地转移到进行所述第 1 控制的状态。

[0009] 优选的是,控制装置响应于风车转子或发电机的转速与规定的额定转速之差、以及输出功率和额定功率之差而控制所述间距角。

[0010] 这时,优选的是,控制装置在输出功率小于额定功率时,控制间距角以减小间距角。

[0011] 优选的是,控制装置在检测出了骤风时,响应于所述转速而增大发电机的输出功率。

[0012] 此外,该风力发电系统还包括:回旋机构,回旋风车转子的旋转面的朝向;以及风向检测器,检测出上风方向,在风车转子包括用于驱动叶片的间距驱动机构的情况下,优选控制装置在检测出了间距角驱动机构的故障时,控制回旋机构使得风车转子的旋转面从上风方向退避。

[0013] 优选的是,控制装置响应于连接到发电机的电力系统的电压而控制从发电机输出到电力系统的无效功率,并且根据所述无效功率而控制所述间距角。

[0014] 该风力发电系统还包括:应急用电池;以及充电装置,通过从电力系统获取的功率对应急用电池进行充电,风车转子包括用于驱动叶片的间距驱动机构,当应急用电池在连接到发电机的电力系统的电压下降时,对间距驱动机构和控制装置提供功率的情况下,优选控制装置在应急用电池被充电的期间,控制输出功率以增加输出功率。

[0015] 本发明的风力发电系统的控制方法中,风力发电系统包括:风车转子,具有间距角可变的叶片;以及发电机,由风车转子所驱动。该控制方法包括:响应于风车转子或者发电机的转速,控制发电机的输出功率和所述叶片的间距角的步骤。所述进行控制的步骤包括:(A) 在所述转速增大而达到规定的额定转速之前的期间,进行按照规定的功率-转速曲线而控制所述输出功率的第 1 控制的步骤;(B) 在所述转速超过了所述额定转速时,进行将所述输出功率控制为规定的额定功率的第 2 控制的步骤;以及(C) 一旦在被设定为进行所述第 2 控制的状态之后,所述转速成为比所述额定转速小时,响应于所述间距角而维持进行所述第 2 控制的状态,或者转移到进行所述第 1 控制的状态的步骤。

[0016] 通过本发明,提供即使发生短暂的无风也不易引起输出功率的变动或发电效率的下降的风力发电系统。

附图说明

[0017] 图 1 是表示本发明一实施方式的风力发电系统的结构的侧面图。

[0018] 图 2 是表示本实施方式的风力发电系统的间距驱动机构的结构的方框图。

[0019] 图 3 是表示本实施方式的风力发电系统的结构的方框图。

- [0020] 图 4 是表示在本实施方式的风力发电系统中进行的功率控制的方法的曲线。
- [0021] 图 5 是表示本实施方式的风力发电系统的主控制装置的结构的一例的方框图。
- [0022] 图 6 是说明本实施方式的风力发电系统的功率控制单元以及间距控制单元的动作的表。
- [0023] 图 7 是表示本实施方式的风力发电系统的动作的一例的曲线。
- [0024] 图 8 是表示本实施方式的风力发电系统的其他结构的方框图。
- [0025] 图 9 是在本实施方式的风力发电系统中进行的优选控制的流程图。
- [0026] 图 10 是在本实施方式的风力发电系统中进行的其他优选控制的流程图。
- [0027] 图 11 是在本实施方式的风力发电系统中进行的又一其他优选控制的流程图。
- [0028] 图 12 是在本实施方式的风力发电系统中进行的又一其他优选控制的流程图。

具体实施方式

[0029] 图 1 是表示本发明一实施方式的风力发电系统 1 的结构的侧面图。风力发电系统 1 包括塔 (tower) 2 和设置在塔 2 的上端的发动机舱 (nacelle) 3。发动机舱 3 能够在偏转 (yaw) 方向上回旋,通过发动机舱回旋机构 4 而朝向所期望的方向。发动机舱 3 中搭载了线圈感应发电机 5 和齿轮 (gear) 6。线圈感应发电机 5 的转子经由齿轮 6 与风车转子 7 接合。

[0030] 风车转子 7 包括叶片 8 和支承叶片 8 的中枢 (hub) 9。叶片 8 被设置为其间距角可变。详细的说,如图 2 所示那样,中枢 9 中容纳了用于驱动叶片 8 的油压气缸 (cylinder) 11、对油压气缸 11 提供油压的伺服阀 (servo valve) 12。根据伺服阀 12 的开度而控制提供给油压气缸 11 的油压,由此,叶片 8 被控制为期望的间距角。

[0031] 返回到图 1,发动机舱 3 中还设置了风速计 10。风速计 10 测定风速和风向。如后述那样,发动机舱 3 响应于由风速计 10 所测定的风速和风向而回旋。

[0032] 图 3 是表示风力发电系统 1 的结构的细节的方框图。本实施方式的风力发电系统 1 是双重供应可变速风力涡轮系统 (doubly-fed variable speed wind turbine system) 的一种。即,本实施方式的风力发电系统 1 构成为线圈感应发电机 5 产生的功率能够从定子线圈以及转子线圈的双方输出到电力系统 13。具体地说,线圈感应发电机 5 的定子线圈直接连接到电力系统 13,转子线圈经由 AC-DC-AC 变换器 17 而连接到电力系统 13。

[0033] AC-DC-AC 变换器 (converter) 17 由有源整流器 14、DC 总线 15 以及逆变器 (inverter) 16 构成,将从转子线圈获取的交流功率变换为适合电力系统 13 的频率的交流功率。有源整流器 14 将转子线圈上所产生的交流功率变换为直流功率,并将该直流功率输出到 DC 总线 15。逆变器 16 将从 DC 总线 15 获取的直流功率变换为与电力系统 13 相同频率的交流功率,并将该交流功率输出到电力系统 13。线圈感应发电机 5 输出到电力系统 13 的输出功率由有源整流器 14 以及逆变器 16 控制。

[0034] AC-DC-AC 变换器 17 还具有将从电力系统 13 获取的交流功率变换为适合转子线圈的频率的交流功率的功能,根据风力发电系统 1 的运行状况,还用于激发转子线圈。这时,逆变器 16 将交流功率变换为直流功率,并将该直流功率输出到 DC 总线 15。有源整流器 14 将从 DC 总线 15 获取的直流功率变换为适合转子线圈的频率的交流功率,并将该交流功率提供给线圈感应发电机 5 的转子线圈。

[0035] 风力发电系统 1 的控制系统由 PLG(pulse logic generator;脉冲逻辑发生器)18、主控制装置 19、电压 / 电流传感器 20、变换器驱动控制装置 21、间距控制装置 22 和偏转控制装置 23 构成。

[0036] PLG18 测定线圈感应发电机 5 的转速 ω (以下称为“发电机转速 ω ”)。

[0037] 主控制装置 19 响应于由 PLG18 测定的发电机转速 ω 而生成有效功率指令 P^* 、无效功率指令 Q^* 以及间距指令 β^* ,进而响应于由风速计 10 测定的风速以及风向而生成偏转指令。如后面详细记述的那样,本实施方式的风力发电系统 1 的特征之一在于,用于生成有效功率指令 P^* 以及间距指令 β^* 的控制算法。

[0038] 电压 / 电流传感器 20 被设置在用于将线圈感应发电机 5 连接到电力系统 13 的电力线上,测定电力系统 13 的电压 V_{grid} (系统电压) 和从线圈感应发电机 5 输出到电力系统 13 的输出电流 I_{grid} 。

[0039] 变换器驱动控制装置 21 响应于有效功率指令 P^* 、无效功率指令 Q^* 而控制输出到电力系统 13 的有效功率 P 和无效功率 Q 。控制有源整流器 14 以及逆变器 16 的功率晶体管的导通截止。具体地说,变换器驱动控制装置 21 根据由电压 / 电流传感器 20 测定的电力系统 13 的电压 V_{grid} 以及输出电流 I_{grid} ,计算出输出到电力系统 13 的有效功率 P 和无效功率 Q 。进而,变换器驱动控制装置 21 响应于有效功率 P 和有效功率指令 P^* 之差、以及无效功率 Q 和无效功率指令 Q^* 之差而进行 PWM 控制,从而生成 PWM 信号,并将生成的 PWM 信号提供给有源整流器 14 以及逆变器 16。由此,控制输出到电力系统 13 的有效功率 P 和无效功率 Q 。

[0040] 间距控制装置 22 响应于从主控制装置 19 送来的间距指令 β^* 而控制叶片 8 的间距角 β 。叶片 8 的间距角 β 被控制为与间距指令 β^* 一致。

[0041] 偏转控制装置 23 响应于从主控制装置 19 送来的偏转指令而控制发动机舱回旋机构 4。发动机舱 3 朝向由偏转指令所指示的方向。

[0042] 在连接电力系统 13 和线圈感应发电机 5 的电力线上,连接了 AC/DC 变换器 24。该 AC/DC 变换器 24 根据从电力系统 13 获取的交流功率而生成直流功率,并将该直流功率提供给风力发电系统 1 的控制系统、尤其是用于控制叶片 8 的间距角 β 的伺服阀 12、主控制装置 19 以及间距控制装置 22。

[0043] 进而,为了对伺服阀 12、主控制装置 19 以及间距控制装置 22 稳定地提供直流功率,风力发电系统 1 中设置了包括充电装置 27 和应急用电池 28 的无停电电源系统 26。根据风力发电系统的标准的要求,即使系统电压 V_{grid} 下降了的情况下,也需要维持线圈感应发电机 5 连接到电力系统 13 的状态。为此,即使在电力系统 13 的电压下降了的情况下,也需要叶片 8 的间距角被适当地控制,由此线圈感应发电机 5 的转速被维持为期望值。为了满足这样的要求,在系统电压 V_{grid} 下降至规定的电压时,无停电电源系统 26 由开关 25 而连接到伺服阀 12、主控制装置 19 以及间距控制装置 22,功率从应急用电池 28 被提供给伺服阀 12、主控制装置 19 以及间距控制装置 22。由此,叶片 8 的间距角的控制被维持。应急用电池 28 与充电装置 27 连接。充电装置 27 通过从 AC/DC 变换器 24 提供的直流功率对应急用电池 28 进行充电。

[0044] 本实施方式的风力发电系统 1 的特征之一在于,线圈感应发电机 5 的输出功率 P 的控制的最佳化。图 4 是表示有效功率指令 P^* 和线圈感应发电机 5 的转速 ω 之间的关系

的曲线,表示在本实施方式的风力发电系统 1 中进行的输出功率 P 的控制方法。

[0045] 发电机转速 ω 小于最小转速 $\omega_{\min}$ 时,线圈感应发电机 5 的有效功率指令 P^* 被控制为 0。最小转速 $\omega_{\min}$ 是指由线圈感应发电机 5 进行发电的最小的转速,其根据风力发电系统 1 的特性而决定。

[0046] 发电机转速 ω 大于最小转速 $\omega_{\min}$ 时,有效功率指令 P^* 通过从最佳曲线 (curve) 控制模式和额定值控制模式的两个控制模式中选择的一个控制模式来控制。

[0047] 在最佳曲线控制模式中,有效功率指令 P^* 被控制为与由下述式:

$$P_{\text{opt}} = K \omega^3, \dots (1)$$

[0049] 所定义的最佳化功率值 P_{opt} 一致。K 是规定的常数。在风力发电系统 1 中,已知与发电机的转速的三次方成比例地控制输出功率为最佳,在第 1 控制模式中,控制为输出功率 P 与线圈感应发电机 5 的发电机转速 ω 的三次方成比例。

[0050] 最佳曲线控制模式主要在发电机转速 ω 大于最小转速 $\omega_{\min}$,且小于额定转速 $\omega_{\max}$ 的范围内使用。这里,额定转速 $\omega_{\max}$ 是指线圈感应发电机 5 稳定运行的转速。发电机转速 ω 通过叶片 8 的间距角的控制,(只要可能的话)被控制为额定转速 $\omega_{\max}$ 。

[0051] 另一方面,在额定值控制模式中,输出功率 P 与额定功率 P_{rated} 一致。额定值控制模式主要在发电机转速 ω 为额定转速 $\omega_{\max}$ 以上的范围内使用。在以额定风速吹风的稳定状态下,发电机转速 ω 被控制成为额定转速 $\omega_{\max}$,另一方面,输出功率 P 被控制成为额定功率 P_{rated} 。

[0052] 本实施方式的风力发电系统 1 的重要的特性在于,从额定值控制模式到最佳曲线控制模式的转移是根据叶片 8 的间距角 β 而进行。当发电机转速 ω 增加而达到了额定转速 $\omega_{\max}$ 时,功率控制从最佳曲线控制模式转移到额定值控制模式。其另一方面,当发电机转速 ω 减少而小于额定转速 $\omega_{\max}$ 时,首先间距角 β 减少,进而间距角 β 成为最小值 $\beta_{\min}$ 之后,功率控制才会从额定值控制模式转移到最佳曲线控制模式。即,有效功率指令 P^* 从额定功率 P_{rated} 被切换为最佳化功率值 P_{opt} 。换言之,只要间距角 β 没有达到最小值 $\beta_{\min}$ (即,只要间距指令 β^* 没有达到最小值 $\beta_{\min}$),有效功率指令 P^* 就会被维持为额定功率 P_{rated} 。由于间距角是叶片 8 的翼弦和转子旋转面所构成的角度,因此需要注意的是,间距角 β 为最小值 $\beta_{\min}$ 的情况意味着,间距角 β 被设定为精细 (fine) 侧的临界值,风车转子 7 的输出系数最大的情况。

[0053] 在间距角 β 达到最小值 $\beta_{\min}$ 之前将输出功率 P 维持为额定功率 P_{rated} 的控制,有利于抑制在发生了短暂的无风时的输出功率的变动,进而防止发电效率的下降。在上述那样的控制中,即使发电机转速 ω 成为小于额定转速 $\omega_{\max}$,只要其只持续短时间,有效功率指令 P^* 就会被维持为额定功率 P_{rated} ,由此,输出功率 P 的变动被抑制。除此之外,在本实施方式的风力发电系统 1 中,在发电机转速 ω 成为小于额定转速 $\omega_{\max}$ 时,在风车转速 7 的输出系数无法因间距角 β 的减少而再增加之后,输出功率 P 才会从额定功率 P_{rated} 减少,因此风车转子 7 的旋转能量被有效地活用,能够有效地提高发电效率。

[0054] 但是,当发电机转速 ω 成为比小于额定转速 $\omega_{\max}$ 的规定的阈值转速 ω'_M 还要小时,与间距角 β (或者间距指令 β^*) 无关地,功率控制从额定值控制模式被切换为最佳曲线控制模式。在发电机转速 ω 过小时想要将输出功率 P 维持为额定功率 P_{rated} 对于保持控制的稳定性并不理想。优选,阈值转速 ω'_M 是由下述式:

[0055] $\omega'_M = (\omega_M + \omega_{\max})/2$,

[0056] 所确定的转速。这里, ω_M 是中间转速, 定义为

[0057] $\omega_M = (\omega_{\min} + \omega_{\max})/2$ 。

[0058] 图 5 是表示用于实现图 4 所示那样的控制的主控制装置 19 的结构的例子 of 的方框图。需要注意的是, 图 5 只不过是表示主控制装置 19 的结构的一例, 主控制装置 19 也可以由硬件、软件、以及硬件和软件的组合的任一个来实现。主控制装置 19 包括用于生成有效功率指令 P^* 以及无效功率指令 Q^* 的功率控制单元 31、生成间距指令 β^* 的间距控制单元 32。

[0059] 功率控制单元 31 包括选择器 33、减法器 34、PI 控制单元 35、功率限制单元 36、功率设定计算单元 37。另一方面, 间距控制单元 32 包括减法器 38、PI 控制单元 39、减法器 40、PI 控制单元 41 和加法器 42。选择器 33、减法器 34、PI 控制单元 35、功率限制单元 36、功率设定计算单元 37、减法器 38、PI 控制单元 39、减法器 40、PI 控制单元 41 以及加法器 42 与在主控制装置 19 中使用的时钟同步地分别执行运算步骤, 由此, 生成有效功率指令 P^* 、无效功率指令 Q^* 、以及间距指令 β^* 。

[0060] 详细地说, 选择器 33 响应于发电机转速 ω , 选择发电机转速 ω 和额定转速 $\omega_{\max}$ 中的一个作为功率控制转速指令 ω_{p^*} 。更具体地说, 选择器 33 在发电机转速 ω 为中间转速 ω_M 以下时, 将功率控制转速指令 ω_{p^*} 设定为最小转速 $\omega_{\min}$, 在发电机转速 ω 大于中间转速 ω_M 时, 将功率控制转速指令 ω_{p^*} 设定为额定转速 $\omega_{\max}$ 。

[0061] 减法器 34 从发电机转速 ω 减去功率控制转速指令 ω_{p^*} , 从而计算出偏差 $\Delta\omega_p$ 。

[0062] PI 控制单元 35 响应于偏差 $\Delta\omega_p$ 而生成有效功率指令 P^* 。但是, 所生成的有效功率指令 P^* 的范围根据从功率限制单元 36 提供的功率指令下限 $P_{\min}$ 和功率指令上限 $P_{\max}$ 而被限制。即, 有效功率指令 P^* 被限制为功率指令下限 $P_{\min}$ 以上且功率指令上限 $P_{\max}$ 以下。

[0063] 功率限制单元 36 响应于发电机转速 ω 和间距指令 β^* , 决定要提供给 PI 控制单元 35 的功率指令下限 $P_{\min}$ 以及功率指令上限 $P_{\max}$ 。功率限制单元 36 还将额定功率 P_{rated} 提供给间距控制单元 32 的减法器 40。如后述那样, 通过适当地决定由功率限制单元 36 生成的功率指令下限 $P_{\min}$ 、功率指令上限 $P_{\max}$ 、以及由上述的选择器 33 决定的功率控制转速指令 ω_{p^*} , 从而进行如图 4 所示那样的功率控制。

[0064] 功率设定计算单元 37 根据由 PI 控制单元 35 生成的有效功率指令 P^* 、和用于指定从风力发电系统 1 输出的交流功率的功率因数的功率因数指令来生成无效功率指令 Q^* , 并输出有效功率指令 P^* 和无效功率指令 Q^* 。如上所述那样, 有效功率指令 P^* 和无效功率指令 Q^* 用于从风力发电系统 1 输出的有效功率 P 以及无效功率 Q 的控制。

[0065] 另一方面, 间距控制单元 32 的减法器 38 从发电机转速 ω 中减去间距控制转速指令 ω_{β^*} , 从而计算出偏差 $\Delta\omega_{\beta}$ 。间距控制转速指令 ω_{β^*} 与额定转速 $\omega_{\max}$ 一致, 从而, $\Delta\omega_{\beta}$ 表示发电机转速 ω 和额定转速 $\omega_{\max}$ 之差。

[0066] PI 控制单元 39 响应于偏差 $\Delta\omega_{\beta}$ 而进行 PI 控制, 生成间距指令基础值 β_{in}^* 。间距指令基础值 β_{in}^* 主要支配最终生成的间距指令 β^* , 但并非要与间距指令 β^* 完全一致。决定间距指令基础值 β_{in}^* , 使得发电机转速 ω 被控制为额定转速 $\omega_{\max}$ 。

[0067] 减法器 40 从有效功率指令 P^* 中减去额定功率 P_{rated} 而生成偏差 ΔP , PI 控制单元 41 响应于偏差 ΔP 而进行 PI 控制, 生成校正值 $\Delta\beta^*$ 。加法器 42 相加间距指令基础值

β_{in}^* 和校正值 $\Delta\beta^*$, 从而生成间距指令 β^* 。

[0068] 间距控制单元 32 的减法器 40 以及 PI 控制单元 41 具有, 在发电机转速 ω 增加至额定转速 ω_{max} 而功率控制从最佳曲线控制模式被切换到额定值控制模式时, 抑制间距控制单元 32 对功率控制产生不期望的干扰的作用。间距控制单元 32 的 PI 控制单元 39 想要将发电机转速 ω 调整为额定转速 ω_{max} 。因此, 应作为功率而取出的空气动力能量有时被不期望地舍弃掉。因此, 在本实施方式中, 响应于额定功率 P_{rated} 和有效功率指令 P^* 之差而由 PI 控制单元 41 生成校正值 $\Delta\beta^*$, 并通过该校正值 $\Delta\beta^*$ 来校正间距指令 β^* 。校正值 $\Delta\beta^*$ 在有效功率指令 P^* 小于额定功率 P_{rated} 时, 即, 偏差 $\Delta P (= P^* - P_{rated})$ 为负时, 决定使得间距指令 β^* 成为比间距指令基础值 β_{in}^* 小, 即, 间距角 β 成为精细侧。通过这样的控制, 在有效功率指令 P^* 即将达到额定功率 P_{rated} 之前, 抑制间距角 β 成为精细侧。在有效功率指令 P^* 已达到额定功率 P_{rated} 之后, 偏差 ΔP 成为 0, 校正值 $\Delta\beta^*$ 也成为 0。

[0069] 图 6 是表示主控制装置 19 的功率控制单元 31 以及间距控制单元 32 的动作用的表。以下, 功率控制单元 31 以及间距控制单元 32 的动作分为以下的 5 个情况来说明。

[0070] 情况 (1): 发电机转速 ω 为最小转速 ω_{min} 以上且中间转速 $\omega_M (= (\omega_{min} + \omega_{max})/2)$ 以下的情况

[0071] 这时, 功率控制转速指令 ω_p^* 由选择器 33 设定为最小转速 ω_{min} , 进而, 功率指令下限 P_{min} 以及功率指令上限 P_{max} 分别被设定为 0、 $P_{opt} (= K\omega^3)$ 。除此之外, 偏差 $\Delta\omega_p (= \omega - \omega_{min})$ 为正, 并且发电机转速 ω 被控制成为额定转速 ω_{max} , 因此, 有效功率指令 P^* 始终贴近功率指令上限 P_{max} 。由于功率指令上限 P_{max} 是 P_{opt} , 因此作为其结果, 有效功率指令 P^* 被设定为最佳化功率值 P_{opt} 。换言之, 功率控制被设定为最佳曲线控制模式。

[0072] 这时, 间距指令 β^* 由间距控制单元 32 控制为使发电机转速 ω 成为额定转速 ω_{max} , 因此作为其结果, 间距指令 β^* 被设定为精细侧的临界值, 即最小间距角 β_{min} 。

[0073] 情况 (2): 发电机转速 ω 超过中间转速 ω_M 而处于大于中间转速 ω_M 且小于转速 ω'_M 的范围内情况

[0074] 这时, 功率控制转速指令 ω_p^* 由选择器 33 设定为额定转速 ω_{max} , 进而, 功率指令下限 P_{min} 以及功率指令上限 P_{max} 分别被设定为 P_{opt} 、 P_{rated} 。这时, 偏差 $\Delta\omega_p (= \omega - \omega_{max})$ 为负, 并且发电机转速 ω 通过间距控制单元 32 被控制成为额定转速 ω_{max} , 因此, 有效功率指令 P^* 始终贴近功率指令下限 P_{min} 。由于功率指令下限 P_{min} 是 P_{opt} , 因此作为其结果, 有效功率指令 P^* 被设定为最佳化功率值 P_{opt} 。换言之, 功率控制被设定为最佳曲线控制模式。

[0075] 上述的基于校正值 $\Delta\beta^*$ 的间距指令 β^* 的校正, 在情况 (2) 中有效地发挥作用。在情况 (2) 中, 由于有效功率指令 P^* 小于额定功率 P_{rated} , 因此偏差 ΔP 成为负, 从而校正值 $\Delta\beta^*$ 也成为负。因此, 间距指令 β^* 成为比间距指令基础值 β_{in}^* 还要小, 即, 间距角 β 更靠近精细侧。由此, 空气动力能量被更加有效地变换为功率。

[0076] 情况 (3): 发电机转速 ω 为阈值转速 ω'_M 以上, 且间距角 β 达到最小间距角 β_{min} 的情况

[0077] 这时, 功率控制转速指令 ω_p^* 由选择器 33 设定为额定转速 ω_{max} , 功率指令下限 P_{min} 以及功率指令上限 P_{max} 分别被设定为 P_{opt} 、额定功率 P_{rated} 。

[0078] 当发电机转速 ω 为阈值转速 ω'_M 以上, 且处于比额定转速 ω_{max} 小的范围内时, 偏差 $\Delta\omega_p (= \omega - \omega_{max})$ 为负, 有效功率指令 P^* 始终贴近功率指令下限 P_{min} 。由于功率指

令下限 $P_{\min}$ 是 P_{opt} , 因此作为其结果, 有效功率指令 P^* 被设定为最佳化功率值 P_{opt} 。

[0079] 若发电机转速 ω 成为比额定转速 $\omega_{\max}$ 大, 则偏差 $\Delta\omega_p (= \omega - \omega_{\max})$ 为正, 有效功率指令 P^* 始终贴近功率指令上限 $P_{\max}$ 。从而, 有效功率指令 P^* 被设定为额定功率 P_{rated} 。换言之, 功率控制被设定为额定值控制模式。

[0080] 另一方面, 当发电机转速 ω 为阈值转速 ω'_M 以上, 且处于比额定转速 $\omega_{\max}$ 小的范围内时, 通过 PI 控制, 发电机转速 ω 被控制成为额定转速 $\omega_{\max}$, 因此作为其结果, 间距指令 β^* 被设定为精细侧的临界值, 即最小间距角 $\beta_{\min}$ 。

[0081] 发电机转速 ω 成为比额定转速 $\omega_{\max}$ 大, 并且有效功率指令 P^* 没有达到额定功率 P_{rated} 时, 上述的基于校正值 $\Delta\beta^*$ 的间距指令 β^* 的校正有效地发挥作用。由于有效功率指令 P^* 小于额定功率 P_{rated} , 因此偏差 ΔP 成为负, 从而校正值 $\Delta\beta^*$ 也成为负。因此, 间距指令 β^* 成为比间距指令基础值 β_{in} 还要小, 即, 间距角 β 更靠近精细侧。由此, 空气动力能量被更加有效地变换为功率。若有效功率指令 P^* 达到额定功率 P_{rated} , 则通过 PI 控制, 发电机转速 ω 被控制成为额定转速 $\omega_{\max}$ 。

[0082] 情况 (4): 发电机转速 ω 为阈值转速 ω'_M 以上, 且间距角 β 没有达到最小间距角 $\beta_{\min}$ 的情况

[0083] 这时, 功率控制转速指令 ω_p^* 由选择器 33 设定为额定转速 $\omega_{\max}$ 。进而, 功率指令下限 $P_{\min}$ 被设定为一个运算步骤之前的有效功率指令 P^* 和当前运算步骤的功率指令上限 $P_{\max}$ 中较小的一方, 功率指令上限 $P_{\max}$ 被设定为额定功率 P_{rated} 。其结果, 有效功率指令 P^* 被设定为额定功率 P_{rated} 。换言之, 即使变得小于额定转速 $\omega_{\max}$, 功率控制也被维持为额定值控制模式。间距角 β 是否已达到最小间距角 $\beta_{\min}$, 是基于间距指令 β^* 是否与最小间距角 $\beta_{\min}$ 一致来判断。

[0084] 另一方面, 当发电机转速 ω 为阈值转速 ω'_M 以上, 且处于比额定转速 $\omega_{\max}$ 小的范围内时, 间距指令 β^* 通过 PI 控制而控制为使发电机转速 ω 成为额定转速 $\omega_{\max}$, 因此作为其结果, 间距指令 β^* 被设定为精细侧的临界值, 即最小间距角 $\beta_{\min}$ 。

[0085] 发电机转速 ω 成为比额定转速 $\omega_{\max}$ 大, 并且有效功率指令 P^* 没有达到额定功率 P_{rated} 时, 上述的基于校正值 $\Delta\beta^*$ 的间距指令 β^* 的校正有效地发挥作用。由于有效功率指令 P^* 小于额定功率 P_{rated} , 因此偏差 ΔP 成为负, 从而校正值 $\Delta\beta^*$ 也成为负。因此, 间距指令 β^* 成为比间距指令基础值 β_{in} 还要小, 即, 间距角 β 更靠近精细侧。由此, 空气动力能量被更加有效地变换为功率。若有效功率指令 P^* 达到额定功率 P_{rated} , 则通过 PI 控制, 发电机转速 ω 被控制成为额定转速 $\omega_{\max}$ 。

[0086] (5) 发电机转速 ω 成为比阈值转速 ω'_M 小, 且处于大于中间转速 ω_M 的范围内的情况

[0087] 这时, 功率控制转速指令 ω_p^* 由选择器 33 设定为额定转速 $\omega_{\max}$, 进而, 功率指令下限 $P_{\min}$ 以及功率指令上限 $P_{\max}$ 分别被设定为 P_{opt} 、 P_{rated} 。这时, 偏差 $\Delta\omega_p (= \omega - \omega_{\max})$ 为负, 并且发电机转速 ω 通过间距控制单元 32 被控制成为额定转速 $\omega_{\max}$, 因此, 有效功率指令 P^* 始终贴近功率指令下限 $P_{\min}$ 。由于功率指令下限 $P_{\min}$ 是 P_{opt} , 因此作为其结果, 有效功率指令 P^* 被设定为最佳化功率值 P_{opt} 。换言之, 功率控制从额定值控制模式被设定为最佳曲线控制模式。

[0088] 图 7 是表示本实施方式中的风力发电系统 1 的动作的一例的曲线。在风力发电系

统 1 的动作开始后,发电机转速 ω 达到额定转速 $\omega_{\max}$ 之前,有效功率指令 P^* 被设定为最佳化功率值 P_{opt} (上述的情况 (2))。由此,输出的有效功率 P 随发电机转速 ω 的增加而一同增加。为了使发电机转速 ω 达到额定转速 $\omega_{\max}$,间距指令 β^* 被设定为最小间距角 $\beta_{\min}$ 。

[0089] 若发电机转速 ω 超过额定转速 $\omega_{\max}$,则有效功率指令 P^* 被设定为额定功率 P_{rated} (上述的情况 (3))。由此,输出的有效功率 P 被维持为额定功率 P_{rated} 。由于发电机转速 ω 超过额定转速 $\omega_{\max}$,因此间距指令 β^* 增加,间距角 β 移动到顺桨 (feather) 侧。

[0090] 若发生短暂的无风,则发电机转速 ω 将骤减。间距控制单元 32 为了将发电机转速 ω 维持为额定转速 $\omega_{\max}$ 而减少间距指令 β^* ,由此,移动到用于减小间距指令 β^* 的、即精细侧。即使是发电机转速 ω 成为比额定转速 $\omega_{\max}$ 小,但只要间距角 β 没有达到最小间距角 $\beta_{\min}$,有效功率指令 P^* 就会被维持为额定功率 P_{rated} 。从而,输出的有效功率 P 也被维持为额定功率 P_{rated} 。

[0091] 在图 7 的动作中,在间距角 β 达到最小间距角 $\beta_{\min}$ 之前,发电机转速 ω 再次恢复为额定转速 $\omega_{\max}$,从而有效功率 P 被维持为额定功率 P_{rated} 。这样,在本实施方式的风力发电系统 1 中,发生了短暂的无风时的输出功率的变动被抑制。进而,在本实施方式的风力发电系统 1 中,在发电机转速 ω 成为比额定转速 $\omega_{\max}$ 小时,在风车转子 7 的输出系数无法因间距角 β 的减少而再增加之后,输出功率 P 才会从额定功率 P_{rated} 减少,因此风车转子 7 的旋转能量被有效地活用,能够有效地提高发电效率。

[0092] 本实施方式的风力发电系统 1 还优选构成为执行与各种运行状况对应的各种控制方法。图 8 表示进行与各种运行状况对应的控制的风力发电系统 1 的优选结构。

[0093] 第 1,在图 8 的风力发电系统 1 中,主控制装置 19 根据由风速计 10 计测的风速以及风向来检测骤风 (突然刮起的风) 的发生。也可以代替风速以及风向,而基于发电机转速来检测骤风的发生。在检测到了骤风的发生时,控制有效功率指令 P^* ,使得风车转子 7 的转速不会增大过多。具体地说,如图 9 所示那样,若根据风速以及风向而检测到骤风的发生 (步骤 S01),则风车转子 7 的加速度 (转子加速度) 或者风车转子 7 的转速 (转子转速) 被监视。若转子加速度或者转子转速超过规定的限制值 (步骤 S02),则有效功率指令 P^* 增大 (步骤 S03)。在有效功率指令 P^* 迄今为止被控制为额定功率 P_{rated} 的情况下,有效功率指令 P^* 被控制成为比额定功率 P_{rated} 还要大。由此,风车转子 7 的旋转能量被变换为电能而由电力系统 13 消耗。由此,风车转子 7 减速。

[0094] 此外,图 8 的风力发电系统 1 构成为,在驱动叶片 8 的间距驱动机构中检测到了故障时,通过发动机舱回旋机构 4 使风车转子 7 的旋转面从上风方向上退避,由此停止风车转子 7。为了达到该目的,间距控制装置 22 构成为能够检测出图 2 的油压气缸 11 和 / 或伺服阀 12 的故障。主控制装置 19 若检测出油压气缸 11 和 / 或伺服阀 12 的故障,则响应于此而生成偏转指令。

[0095] 图 10 表示风车转子 7 的旋转面从上风方向上退避的步骤。若由间距控制装置 22 检测出油压气缸 11 和 / 或伺服阀 12 的故障 (步骤 S06),则间距故障信号被激活。主控制装置 19 响应于间距故障信号的激活而生成偏转指令,并控制发动机舱 3 的偏转角,由此,使风车转子 7 的旋转面从上风方向上退避 (步骤 S07)。上风方向可根据由风速计 10 计测的风向而判断。通过风车转子 7 的旋转面从上风方向上退避,从而流入风车转子 7 的风的风速减少,旋转转矩减少 (步骤 S08)。其结果,风车转子 7 减速而停止。

[0096] 除此之外,图8的风力发电系统1构成为,控制在发生了系统电压 V_{grid} 的过多的增加和减少时提供给电力系统13的无效功率 Q ,进而进行与该无效功率 Q 对应的间距控制。图11是表示这样的控制步骤的流程图。

[0097] 在系统电压 V_{grid} 超过了规定的额定电压 V_{rated} 的 $X\%$ 时(X 是大于100的规定值),或者成为比规定的额定电压 V_{rated} 的 $Y\%$ 小时(Y 是小于100的规定值)(步骤S11),提供给功率控制单元31的功率因数指令被修正(步骤S12)。修正后的功率因数指令可以从电力系统13的控制系统提供,此外,也可以是主控制装置19本身根据系统电压 V_{grid} 而修正功率因数指令。由此,在系统电压 V_{grid} 超过了规定的额定电压 V_{rated} 的 $X\%$ 时,无效功率指令 Q^* 减少,在系统电压 V_{grid} 成为小于规定的额定电压 V_{rated} 的 $Y\%$ 时,无效功率指令 Q^* 增加。由于从风力发电系统1提供给电力系统13的视在功率 S 为一定,因此在无效功率指令 Q^* 减少时有效功率指令 P^* 增加,在无效功率指令 Q^* 增加时有效功率指令 P^* 减少。通过AC-DC-AC变换器17响应于有效功率指令 P^* 以及无效功率指令 Q^* 而被控制,从而提供给电力系统13的无效功率 Q 被控制(步骤S13)。

[0098] 在无效功率指令 Q^* 大大增大时,有效功率指令 P^* 将减少,这会使风力发电系统1的输出降低。为了避免这样的不妥,通过在无效功率指令 Q^* 的增大比规定的增大量大时,减少间距指令 β^* (即,间距指令 β^* 移动到精细侧),从而有效功率 P 增大(步骤S15)。

[0099] 在无效功率指令 Q^* 大大减少时,有效功率指令 P^* 将增加,这会使风力发电系统1的输出不必要地增加。为了避免这样的不妥,通过在无效功率指令 Q^* 的减少比规定的减少量大时,增加间距指令 β^* (即,间距指令 β^* 移动到顺桨侧),从而有效功率 P 减少。

[0100] 进而,图8的风力发电系统1构成为,在应急蓄电池28充电的期间,增大要输出的有效功率 P 。这是为了补偿在应急蓄电池28的充电中使用的功率。具体地说,如图12所示那样,若充电装置27开始应急蓄电池28的充电(步骤S21),则充电装置27将激活充电开始信号。主控制装置19响应于充电开始信号的激活而增加有效功率指令 P^* (步骤S22)。有效功率指令 P^* 的增加量被设定为与在应急蓄电池28的充电中使用的功率的量相同。在不进行充电的情况下,由PI控制单元35生成的有效功率指令 P^* 用于AC-DC-AC变换器17的控制。

[0101] 另外,本发明不应被限定在上述的实施方式而解释。例如,本实施方式的风力发电系统1是双重供应可变速风力涡轮系统,但本发明也可以应用于风车转子的转速和间距角的双方都可变的其他形式的风力发电系统中。例如,本发明可应用于由发电机发电的交流功率的全部,通过AC-DC-AC变换器而被变换为符合电力系统的频率的交流功率那样的风力发电系统。

[0102] 此外,应急蓄电池28的充电不仅可以通过从电力系统获取的功率而进行,也可以通过从发电机输出的功率而进行。

[0103] 进而,由于风车转子7的转速依赖于发电机转速 ω ,因此本领域的技术人员应当清楚可以代替发电机转速 ω 而使用风车转子7的转速。例如,如本实施方式那样,风车转子7经由齿轮(gear)6而连接到线圈感应发电机5时,风车转子7的转速与发电机转速 ω 一对一对应。此外,在代替齿轮6而使用环形(toroidal)变速器那样的无级变速器时,发电机转速 ω 也会伴随风车转子7的转速的增大而增大,因此可以代替发电机转速 ω 而使用风车转子7的转速。

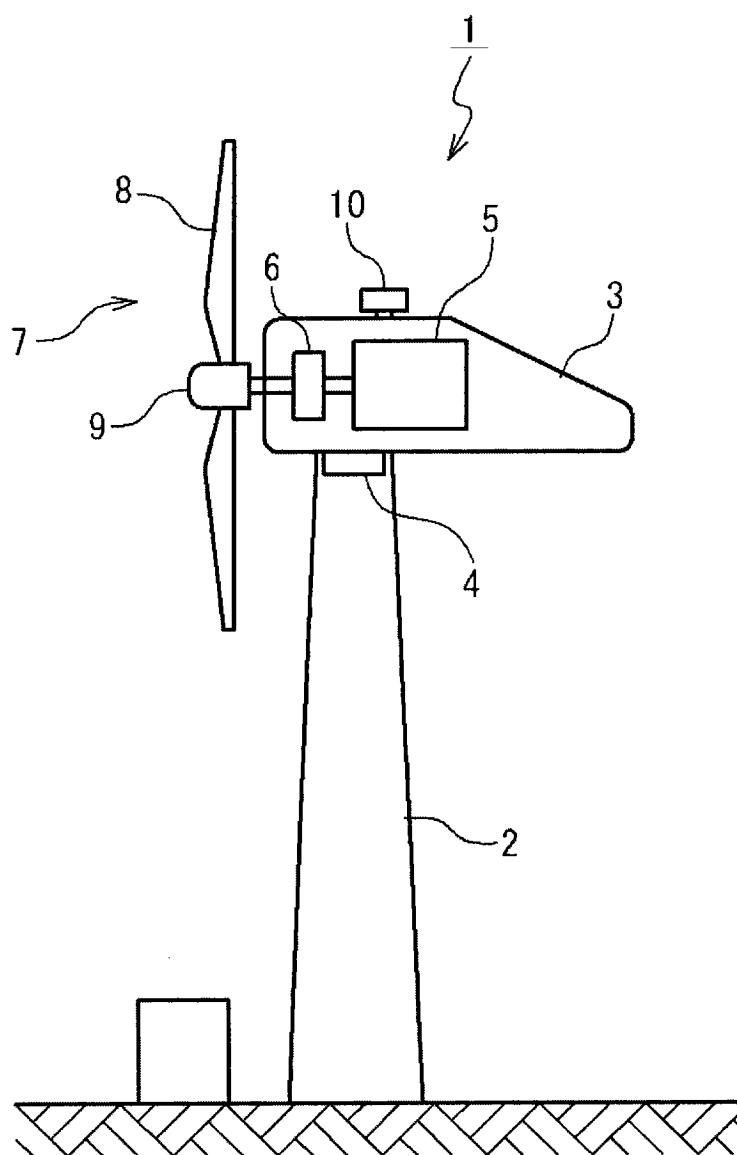


图 1

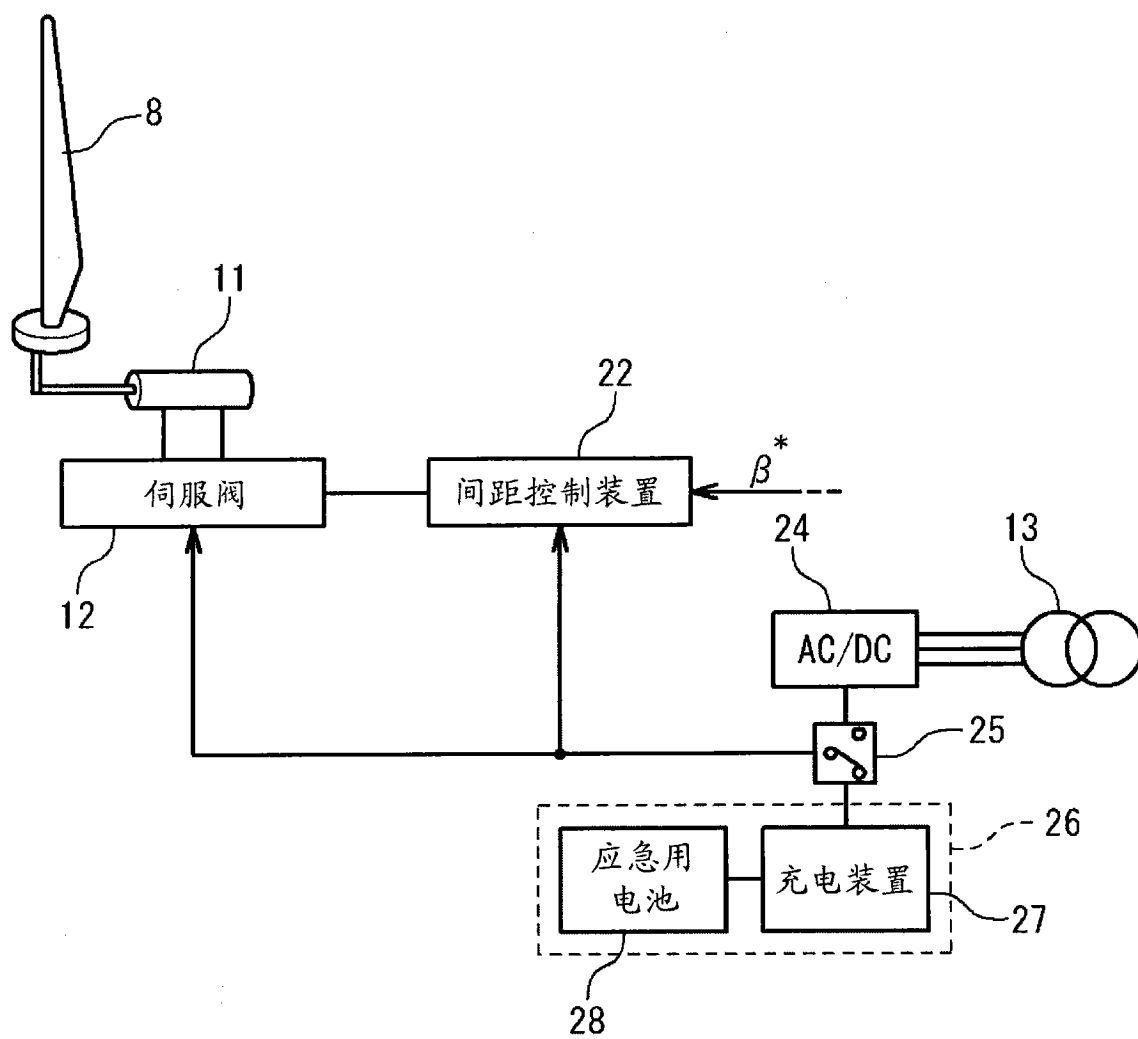


图 2

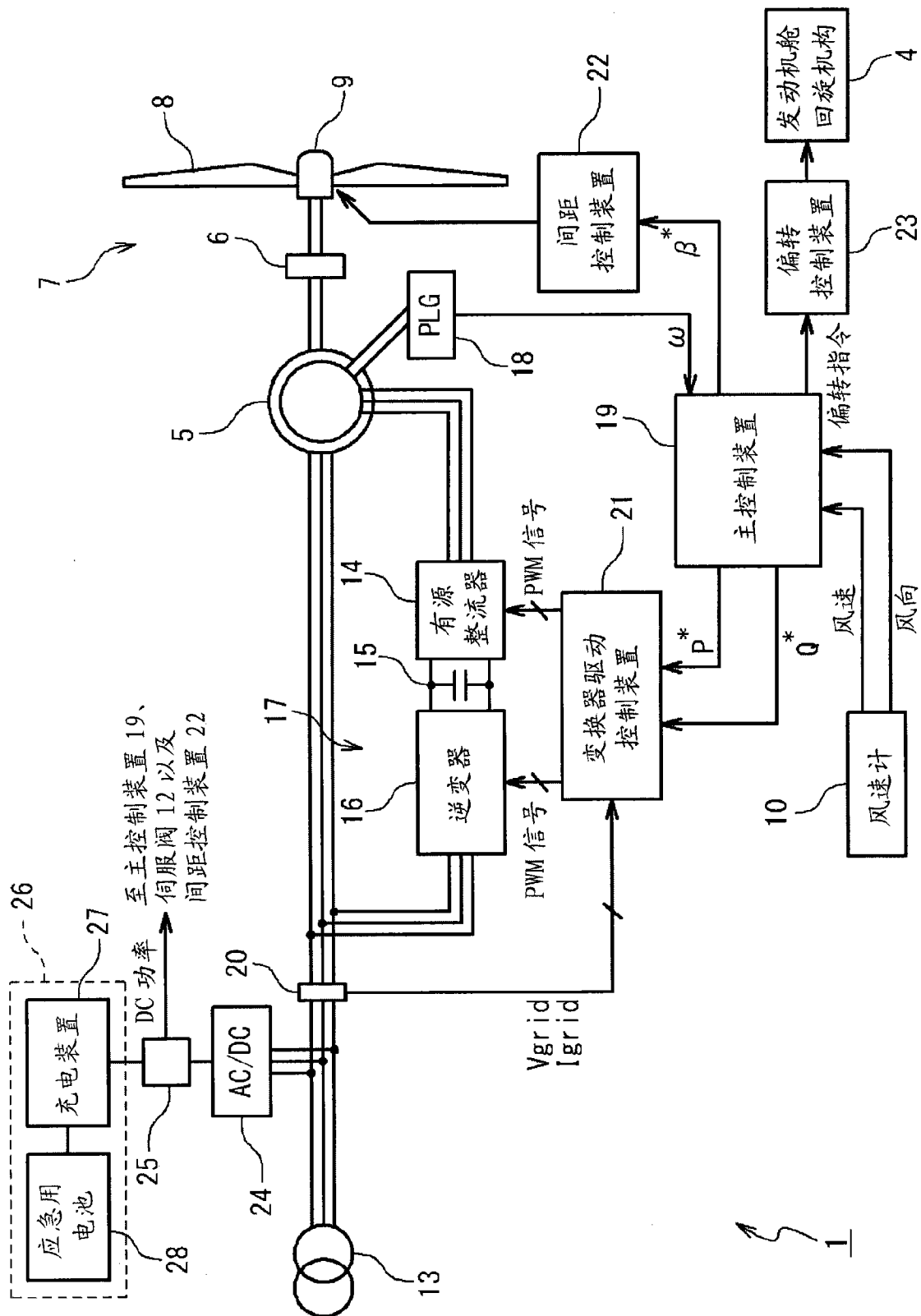


图 3

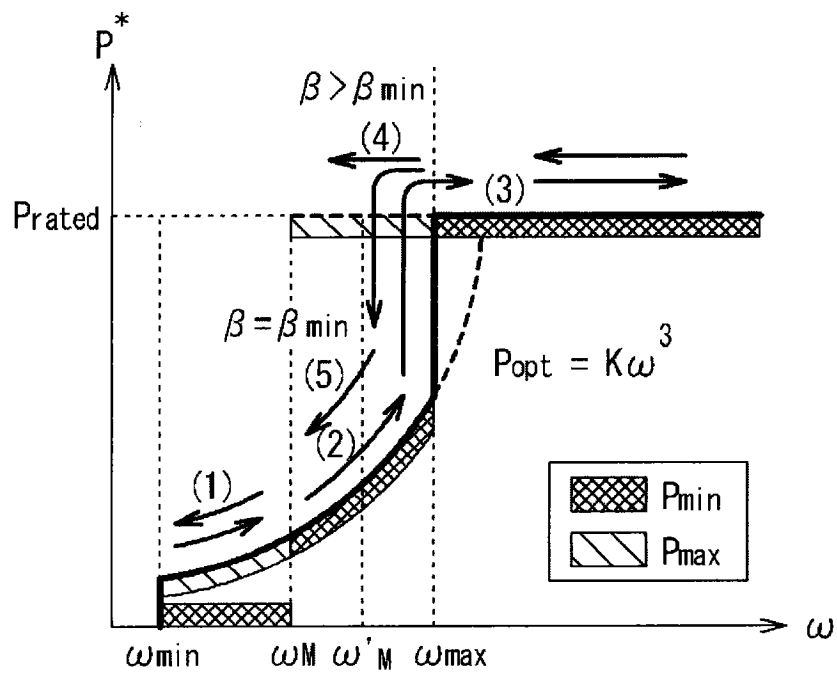


图 4

风车运行状态			功率控制				间距控制	
转速 ω	转速的 变化	间距角 β	转速指令 ω_p^*	功率指令 下限 $P_{\min}$	功率指令 上限 $P_{\max}$	有效功率 指令 P^*	转速指令 ω_β^*	间距指令 β^*
(1) $\omega \leq \omega_M$	加速 / 减速	—	$\omega_{\min}$	0	P_{opt_3} ($=K\omega^3$)	PI 控制	$\omega_{\max}$	PI 控制
(2) $\omega_M < \omega < \omega'_M$	加速 $\omega_{\min} \rightarrow \omega_M \rightarrow \omega$	—	$\omega_{\max}$	P_{opt_3} ($=K\omega^3$)	P_{rated}	PI 控制	$\omega_{\max}$	干扰抑制 控制
(3) $\omega \geq \omega'_M$	加速 / 减速	$\beta = \beta_{\min}$ 没有向精细侧 张开的余地	$\omega_{\max}$	P_{opt}	P_{rated}	PI 控制	$\omega_{\max}$	干扰抑制 控制
(4)		$\beta > \beta_{\min}$ 有向精细侧 张开的余地	$\omega_{\max}$	比较一个步 骤前的 P^* 和 当前的 $P_{\max}$ 较小的一方	P_{rated}	PI 控制	$\omega_{\max}$	干扰抑制 控制
(5) $\omega_M < \omega < \omega'_M$	减速 $\omega_{\max} \rightarrow \omega$	—	$\omega_{\max}$	P_{opt_3} ($=K\omega^3$)	P_{rated}	PI 控制	$\omega_{\max}$	PI 控制

$$\omega_M = (\omega_{\min} + \omega_{\max}) / 2$$

$$\omega'_M = (\omega_M + \omega_{\max}) / 2$$

图 6

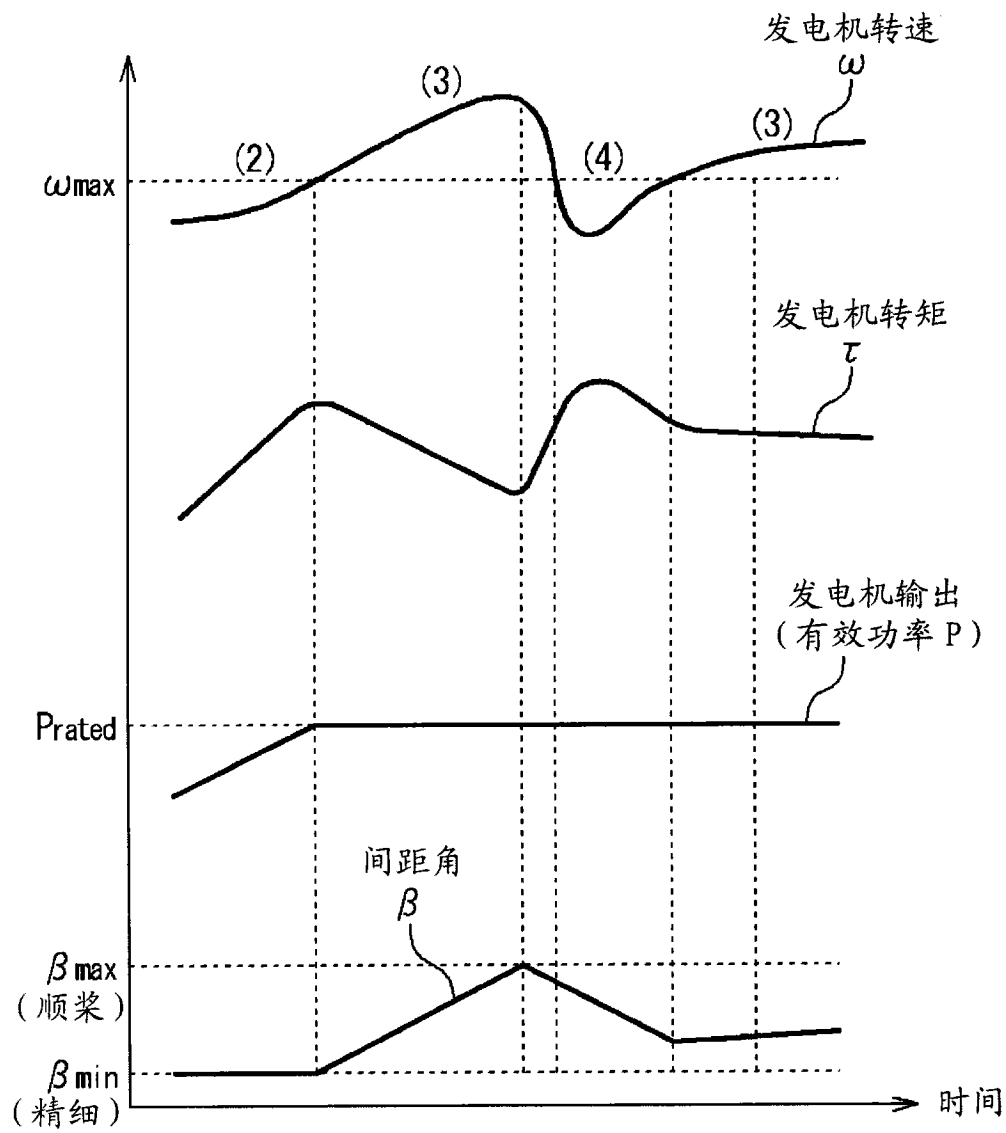


图 7

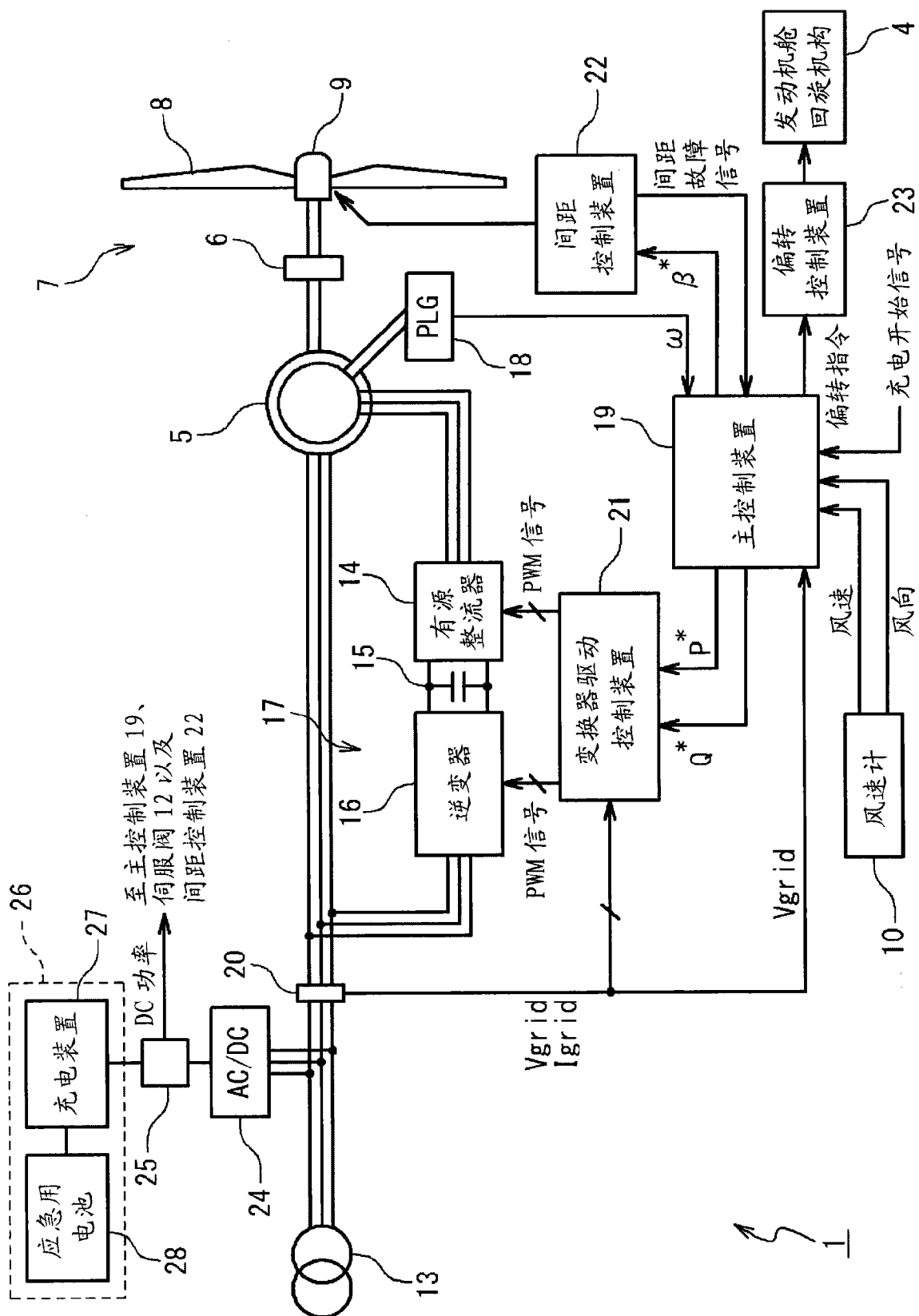


图 8

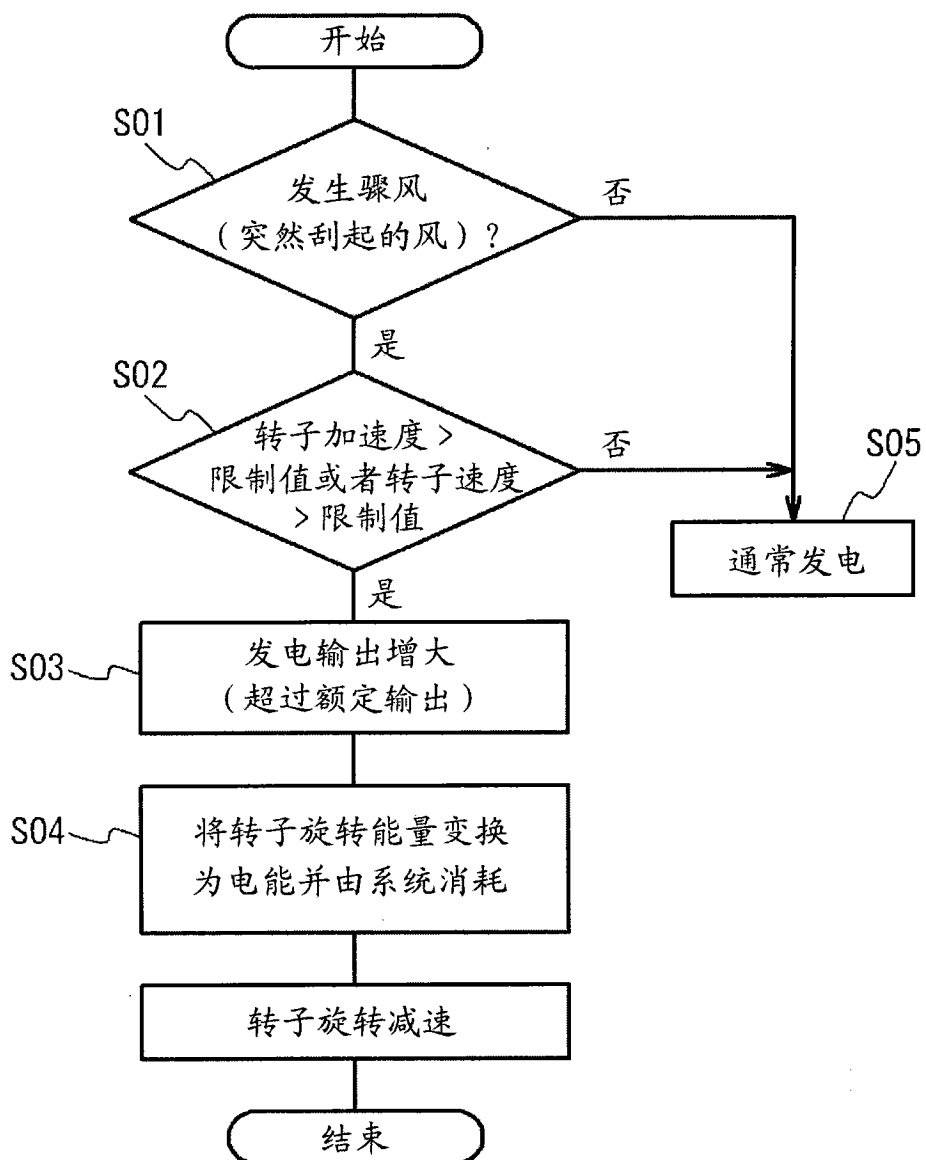


图9

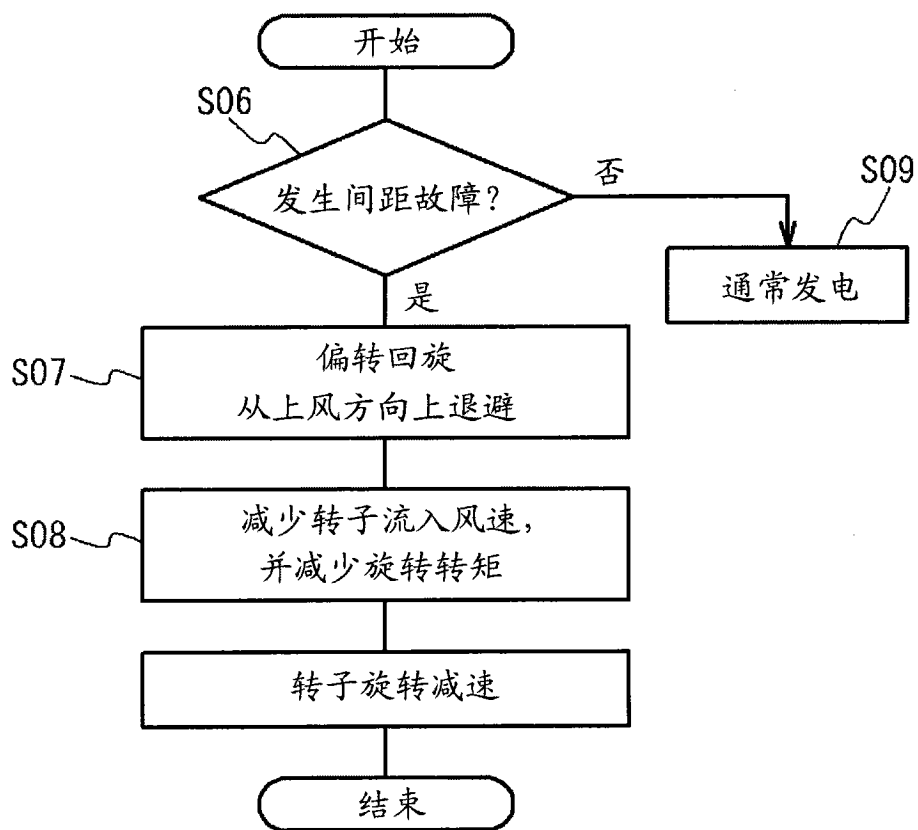


图 10

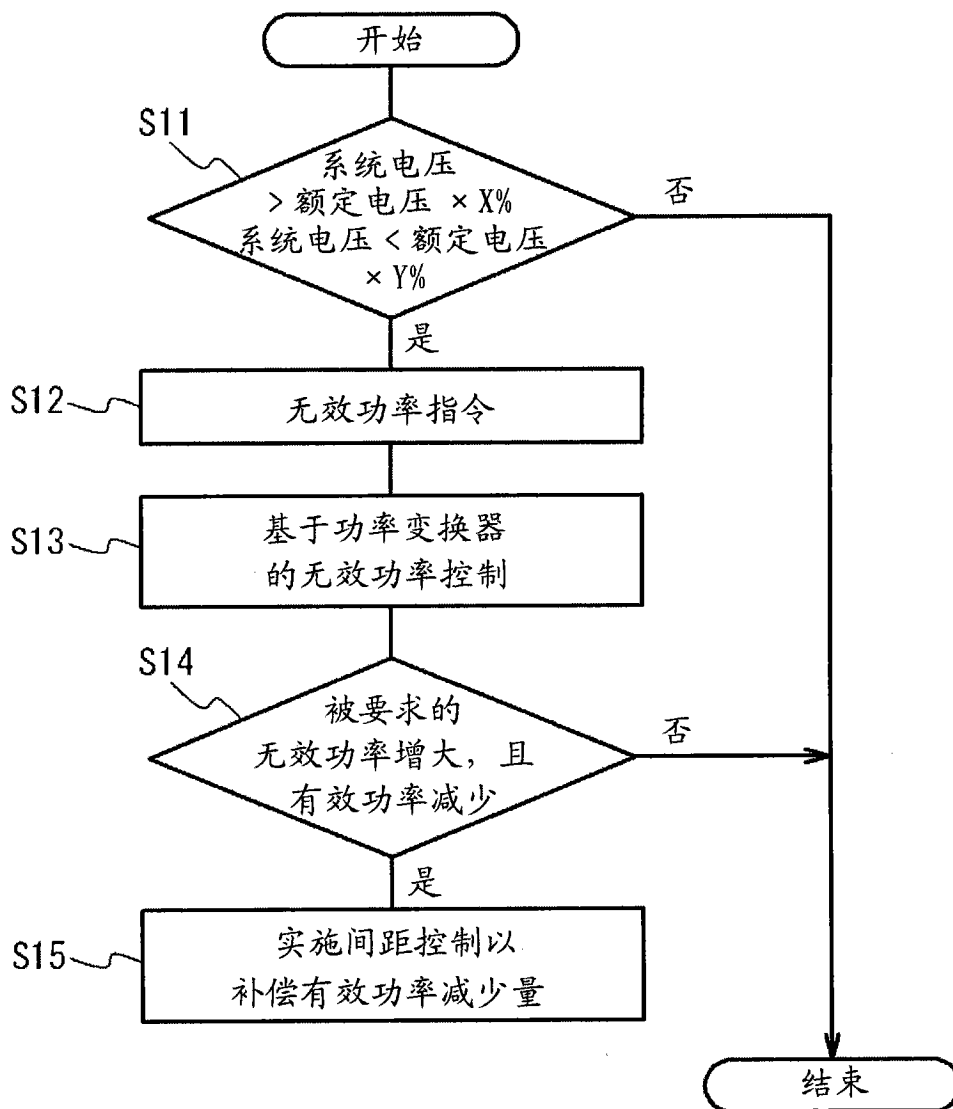


图 11

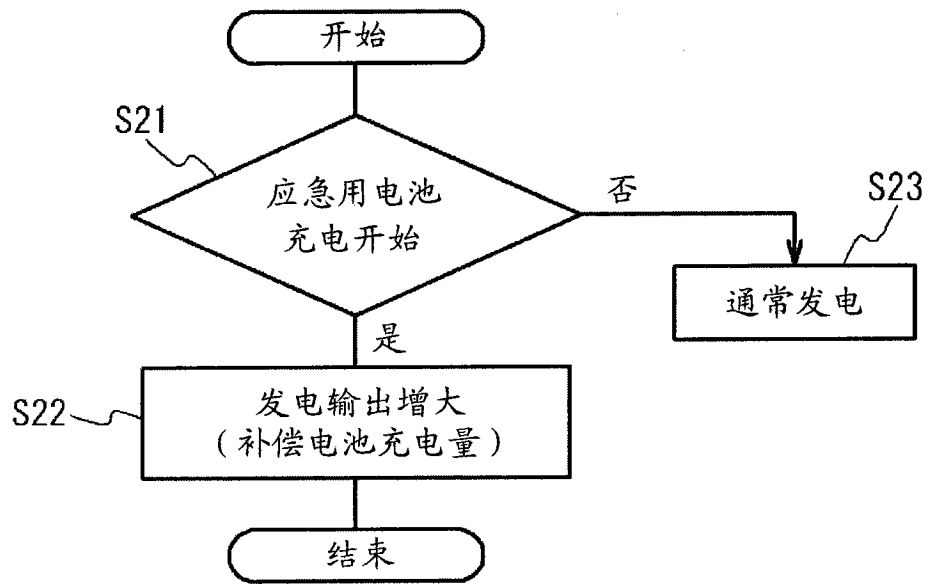


图 12