



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 1732617 B

(45) 授权公告日 2010.04.28

(21) 申请号 200380107385.1

(22) 申请日 2003.12.25

(30) 优先权数据

379675/2002 2002.12.27 JP

(85) PCT申请进入国家阶段日

2005.06.23

(86) PCT申请的申请数据

PCT/JP2003/016749 2003.12.25

(87) PCT申请的公布数据

W02004/062080 JA 2004.07.22

(73) 专利权人 株式会社安川电机

地址 日本福冈县

(72) 发明人 姜俊求 林赞惠光 森本进也

(74) 专利代理机构 北京三友知识产权代理有限公司

11127

代理人 李辉

(51) Int. Cl.

H02P 9/04 (2006.01)

(56) 对比文件

JP 平 9-191698 A, 1997.07.22, 全文.

JP 2002-34298 A, 2002.01.31, 全文.

US 5083039 A, 1992.01.21, 全文.

CN 1270659 A, 2000.10.18, 全文.

审查员 夏涛

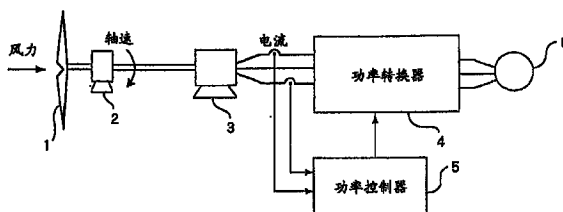
权利要求书 4 页 说明书 10 页 附图 6 页

(54) 发明名称

发电系统及其控制方法

(57) 摘要

功率控制器 (5) 根据发电机 (3) 的输出电压和输出电流计算感应电压或转子磁通量、根据感应电压的相位或转子磁通量的相位估计发电机 (3) 的轴速并且根据轴速的估计值和发电机 (3) 的输出计算风车 (1) 的输出。结果, 由于不需要用于检测发电机 (3) 的轴速的速度传感器就能够计算出风车 (1) 的输出, 因此能够简化电路、降低成本和提高稳定性。



1. 一种发电系统,所述发电系统包括:

涡轮,用于将动能转换为旋转能,

发电机,用于将所述涡轮的旋转能转换为电能,

功率控制器,用于对所述发电机获得的电能进行功率控制,和

功率转换器,用于依据来自所述功率控制器的指令控制所述发电机的输出功率,

其中所述功率控制器包括:

三相-二相转换器,用于通过将所述发电机的输出电压和输出电流变换到静止 d-q 坐标系中来计算二相电流和二相电压;

发电机输出计算器,用于根据由所述三相-二相转换器计算出的二相电流和二相电压计算所述发电机的功率输出;

感应电压检测器,用于根据由所述三相-二相转换器计算出的二相电流和二相电压来检测感应电压;

相位检测器,用于根据由所述感应电压检测器检测到的所述感应电压来检测感应电压的相位;

微分器,用于通过对由所述相位检测器检测到的感应电压的相位进行微分来计算所述感应电压的旋转速度并且估计发电机的轴速;和

涡轮输出计算器,用于通过使用由所述微分器估计的估计轴速值和由所述发电机输出计算器计算出的发电机的功率输出来计算所述涡轮的功率输出。

2. 一种发电系统,所述发电系统包括:

涡轮,用于将动能转换为旋转能,

发电机,用于将所述涡轮的旋转能转换为电能,

功率控制器,用于对通过发电机获得的电能进行功率控制,和

功率转换器,用于依据来自所述功率控制器的指令控制所述发电机的输出功率,

其中所述功率控制器包括:

三相-二相转换器,用于通过将所述发电机的输出电压和输出电流变换到静止 d-q 坐标系中来计算二相电流和二相电压;

发电机输出计算器,用于根据由所述三相-二相转换器计算出的二相电流和二相电压计算所述发电机的功率输出;

转子磁通量检测器,用于根据由所述三相-二相转换器计算出的二相电流和二相电压来检测转子磁通量;

相位检测器,用于根据由所述转子磁通量检测器检测到的转子磁通量来检测转子磁通量的相位;

微分器,用于通过对由所述相位检测器检测到的转子磁通量的相位进行微分来计算所述转子磁通量的旋转速度并且估计所述发电机的轴速;和

涡轮输出计算器,用于通过使用由所述微分器估计的估计轴速值和由所述发电机输出计算器计算出的发电机的功率输出来计算所述涡轮的功率输出。

3. 根据权利要求 1 所述的发电系统,

其中所述功率控制器还包括:

涡轮转矩估计器,用于根据由所述涡轮输出计算器计算出的涡轮功率输出和估计轴速

值来计算所述涡轮的转矩 ;和

最大效率工作控制器,用于根据由涡轮转矩估计器计算出的涡轮的转矩来计算轴速指令值。

4. 根据权利要求 3 所述的发电系统,

其中所述最大效率工作控制器包括 :

转矩变化计算器,用于以恒定时间间隔对由所述涡轮转矩估计器计算出的涡轮的转矩进行采样,并且计算 $(T_{tur}(n)-T_{tur}(n-1))/t_s$,以计算出转矩变化 $\Delta T_{tur}(n)/t_s$,其中 $T_{tur}(n)$ 是当前涡轮转矩, $T_{tur}(n-1)$ 是前次涡轮转矩,而 t_s 是采样时间间隔 ;

输出系数微分方程计算器,用于计算依涡轮特性和所述转矩变化 $\Delta T_{tur}(n)/t_s$ 决定的输出系数的关系式的解 ;和

发电速度指令单元,用于根据由所述输出系数微分方程计算器得出的解计算轴速指令值。

5. 根据权利要求 2 所述的发电系统,

其中所述功率控制器还包括 :

涡轮转矩估计器,用于根据由所述涡轮输出计算器计算出的所述涡轮的功率输出和所述估计轴速值来计算所述涡轮的转矩 ;和

最大效率工作控制器,用于根据由所述涡轮转矩估计器计算出的所述涡轮的转矩来计算轴速指令值。

6. 根据权利要求 5 所述的发电系统,

其中所述最大效率工作控制器包括 :

转矩变化计算器,用于以恒定时间间隔对由所述涡轮转矩估计器计算出的涡轮的转矩进行采样,并且计算 $(T_{tur}(n)-T_{tur}(n-1))/t_s$,以计算出转矩变化 $\Delta T_{tur}(n)/t_s$,其中 $T_{tur}(n)$ 是当前涡轮转矩, $T_{tur}(n-1)$ 是前次涡轮转矩,而 t_s 是采样时间间隔 ;

输出系数微分方程计算器,用于计算依涡轮特性和转矩变化 $\Delta T_{tur}(n)/t_s$ 决定的输出系数的关系式的解 ;和

发电速度指令单元,用于根据由所述输出系数微分方程计算器得出的解计算所述轴速指令值。

7. 根据权利要求 3 到 6 中任一项所述的发电系统,

其中所述功率控制器还包括 :

微校正控制器,包括 :输出变化计算器,用于以恒定时间间隔对由所述涡轮输出计算器计算出的所述涡轮的功率输出进行采样,并且计算当前涡轮功率输出 $P_{tur}(n)$ 与前次涡轮功率输出 $P_{tur}(n-1)$ 之间的差 $\Delta P(n)$;比例增益乘法器,用于通过将由所述输出变化计算器计算出的 $\Delta P(n)$ 乘以比例增益来计算微速度指令值 ;和限制器,用于将由所述比例增益乘法器计算出的所述微速度指令值的绝对值限制为等于或小于预定极限值 ;和

加法器,用于将由所述微校正控制器计算出的微速度指令值与由所述最大效率工作控制器计算出的轴速指令值相加,并且输出相加值,作为新的轴速指令值。

8. 一种发电系统的控制方法,该发电系统包括 :

涡轮,用于将动能转换为旋转能,

发电机,用于将所述涡轮的旋转能转换为电能,

功率控制器,用于对通过发电机获得的电能进行功率控制,和
功率转换器,用于按照来自所述功率控制器的指令控制所述发电机的输出功率,
该控制方法包括下述步骤:

通过将所述发电机的输出电压和输出电流变换到静止 d-q 坐标系中来计算二相电流和二相电压,并且根据该二相电流和二相电压计算所述发电机的功率输出;

根据所述二相电流和二相电压检测感应电压;

根据检测到的感应电压检测所述感应电压的相位;

通过对所述感应电压的检测到的相位进行微分来计算所述感应电压的旋转速度,并且估计所述发电机的轴速;和

使用所述估计轴速值和所计算出的发电机的功率输出来计算所述涡轮的功率输出。

9. 一种发电系统的控制方法,该发电系统包括:

涡轮,用于将动能转换为旋转能,

发电机,用于将所述涡轮的旋转能转换为电能,

功率控制器,用于对所述发电机获得的电能进行功率控制,和

功率转换器,用于根据来自功率控制器的指令控制所述发电机的输出功率,

该控制方法包括下述步骤:

通过将所述发电机的输出电压和输出电流变换到静止 d-q 坐标系中计算二相电流和二相电压,根据所述二相电流和二相电压计算所述发电机的功率输出;

根据二相电流和二相电压来检测转子磁通量;

根据检测到的转子磁通量来检测转子磁通量的相位;

通过对检测到的所述转子磁通量的相位进行微分来计算转子磁通量的旋转速度,并且估计所述发电机的轴速;和

使用所估计的轴速值和所计算出的发电机的功率输出来计算所述涡轮的功率输出。

10. 根据权利要求 8 所述的发电系统的控制方法,还包括以下步骤:

根据所计算出的涡轮的功率输出和所估计的轴速值来计算涡轮的转矩;和

根据所计算出的涡轮的转矩来计算轴速指令值。

11. 根据权利要求 10 所述的发电系统的控制方法,其中

所述根据所计算出的涡轮的转矩计算轴速指令值的步骤包括下述步骤:

以恒定时间间隔对所计算出的涡轮的转矩进行采样,并且计算 $(T_{\text{tur}}(n) - T_{\text{tur}}(n-1))/t_s$,以计算出转矩变化 $\Delta T_{\text{tur}}(n)/t_s$,其中 $T_{\text{tur}}(n)$ 是当前涡轮转矩, $T_{\text{tur}}(n-1)$ 是前次涡轮转矩,而 t_s 是采样时间间隔;

计算依涡轮特性和转矩变化 $\Delta T_{\text{tur}}(n)/t_s$ 决定的输出系数的关系式的解;和

根据所计算出的解计算所述轴速指令值。

12. 根据权利要求 9 所述的发电系统的控制方法,还包括以下步骤:

根据所计算出的涡轮的功率输出和所估计的轴速值来计算涡轮的转矩;和

根据所计算出的涡轮的转矩来计算轴速指令值。

13. 根据权利要求 12 所述的发电系统的控制方法,其中

根据所计算出的涡轮的转矩计算轴速指令值的步骤包括下述步骤:

以恒定时间间隔对所计算出的涡轮的转矩进行采样,并且计算 $(T_{\text{tur}}(n) - T_{\text{tur}}(n-1))/t_s$,

以计算出转矩变化 $\Delta T_{\text{tur}}(n)/t_s$, 其中 $T_{\text{tur}}(n)$ 是当前涡轮转矩, $T_{\text{tur}}(n-1)$ 是前次涡轮转矩, 而 t_s 是采样时间间隔;

计算依涡轮特性和转矩变化 $\Delta T_{\text{tur}}(n)/t_s$ 决定的输出系数的关系式的解; 和
根据所计算出的解计算轴速指令值。

14. 根据权利要求 10 到 13 中任一项所述的发电系统的控制方法, 还包括以下步骤:

以恒定时间间隔对所计算出的涡轮的功率输出进行采样, 并且计算当前涡轮功率输出 $P_{\text{tur}}(n)$ 与前次涡轮功率输出 $P_{\text{tur}}(n-1)$ 之间的差 $\Delta P(n)$;

通过将所计算出的差 $\Delta P(n)$ 乘以比例增益来计算微速度指令值;

将所计算出的微速度指令值的绝对值限制为等于或小于预定极限值; 和

将所计算出的微速度指令值与所计算出的轴速指令值相加, 并且输出相加值, 作为新的轴速指令值。

发电系统及其控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种发电系统的控制方法,该发电系统用于通过将诸如风力或水力之类的动能转换为旋转能来产生电力,其中发电机能够以最高的效率工作。

背景技术

[0002] 作为传统发电系统的例子,附图 1 中示出了传统风力发电系统的例子。传统风力发电系统包括风车 1、用于改变和传送风车的轴转速的齿轮 / 联轴器 2、发电机 3、功率转换器 4、功率控制器 95 和速度传感器 8,并且将所产生的电能供应给负载 6。

[0003] 下面,介绍传统风力发电系统的工作过程。风车旋转获取的风能被齿轮 / 离合器 2 改变了轴速之后输送给发电机 3。发电机 3 将风能转换成电能。由发电机 3 获得的电能受到功率转换器 4 的控制并且随后传送给负载 6。功率控制器 95 从速度传感器 8 接收风车 1 的轴速的信息并且控制功率转换器 4。除了同步发电机之外,诸如感应发电机之类的 AC 发电机和 IPM(内置永磁铁)发电机可以用作发电机 3。

[0004] 在这样的风力发电系统中,所获得的电力受到风速的影响。风速不是恒定的,而是总是在改变的。结果,在这样的风力发电系统中,为了提高发电效率,需要在依据风速计算的最佳轴速下操作发电机。具体来说,通过功率控制器 95 进行恒定轴速控制(发电机 3 的轴速不随风速改变)或者可变轴速控制(通过依照风速改变发电机的轴速来提高能量效率,即,发电效率)。

[0005] 由于要进行恒定轴速控制或可变轴速控制,需要检测轴的速度,因此在传统的风力发电系统中使用了用于检测轴速的速度传感器 8(比如编码器)。例如,在日本未审查专利申请公开第 2002-84797 中公开了一种采用编码器来检测风车的轴速的风力发电系统。

[0006] 不过,在配备有用来检测风车的转速的速度传感器 8(比如编码器)的传统风力发电系统中,需要提供从速度传感器 8 到功率控制器 95 的连线。结果,当从速度传感器 8 到功率控制器 95 的距离增大时,就要延长该连线,从而引发了由于断线等原因造成的可靠性降低等问题。此外,由于速度传感器在风车旋转期间总是进行旋转,因此速度传感器本身的寿命造成了可靠性降低的问题。安装速度传感器也带来了成本增加的问题。

[0007] 虽然这里介绍了采用风车作为涡轮的风力发电系统,但是在使用风车之外的其它涡轮将动能转换为旋转能来产生电力的发电系统中,也会引起同样的问题。

发明内容

[0008] 本发明的目的是提供一种发电系统及其控制方法,通过在不使用用于检测涡轮的轴速的速度传感器的情况下从发电机中获取速度信息,能够实现可靠性的提高、电路的简化和成本的降低。本发明的另一个目的是在不使用用于检测动能源的能量量的装置(比如风速传感器)的情况下实现高效率工作。

[0009] 为了实现上述目的,按照本发明的一个方面,提供了一种发电系统,该系统具有:涡轮,用于将动能转换为旋转能;发电机,用于将涡轮的旋转能转换为电能;功率控制器,

用于对通过发电机获得的电能进行功率控制；和功率转换器，用于按照来自功率控制器的指令控制输入功率和输出功率，其中功率控制器包括：三相-二相转换器，用于通过将发电机的输出电压和输出电流变换到静止 d-q 坐标系中来计算二相电流和二相电压；发电机输出计算器，用于根据所述三相-二相转换器计算出的二相电流和二相电压计算所述发电机的输出；感应电压检测器，用于根据由三相-二相转换器计算出的二相电流和二相电压检测感应电压；相位检测器，用于根据由感应电压检测器检测到的感应电压检测感应电压的相位；微分器，用于通过对由相位检测器检测到的感应电压的相位进行微分来计算感应电压的旋转速度并且估计发电机的轴速；和涡轮输出计算器，用于通过使用由微分器估计的估计轴速值和由发电机输出计算器计算出的发电机的输出来计算涡轮的输出。

[0010] 根据本发明的另一方面，提供了一种发电系统，该发电系统具有：涡轮，用于将动能转换为旋转能；发电机，用于将涡轮的旋转能转换为电能；功率控制器，用于对发电机获得的电能进行功率控制；和功率转换器，用于根据来自功率控制器的指令控制输入功率和输出功率，其中功率控制器包括：三相-二相转换器，用于通过将发电机的输出电压和输出电流变换到静止 d-q 坐标系中计算二相电流和二相电压；发电机输出计算器，用于根据由三相-二相转换器计算出的二相电流和二相电压计算发电机的输出；转子磁通量检测器，用于根据三相-二相转换器计算出的二相电流和二相电压来检测转子磁通量；相位检测器，用于根据由转子磁通量检测器检测到的转子磁通量来检测转子磁通量的相位；微分器，用于通过对由相位检测器检测到的转子磁通量的相位进行微分来计算转子磁通量的旋转速度并且估计发电机的轴速；和涡轮输出计算器，用于通过使用由微分器估计的估计轴速值和由发电机输出计算器计算出的发电机的输出来计算涡轮的输出。

[0011] 根据本发明的又一方面，提供了一种发电系统的控制方法，该发电系统包括：涡轮，用于将动能转换为旋转能，发电机，用于将所述涡轮的旋转能转换为电能，功率控制器，用于对通过发电机获得的电能进行功率控制，和功率转换器，用于按照来自所述功率控制器的指令控制所述发电机的输入功率和输出功率，该控制方法包括下述步骤：通过将所述发电机的输出电压和输出电流变换到静止 d-q 坐标系中来计算二相电流和二相电压，并且根据该二相电流和二相电压计算所述发电机的功率输出；根据所述二相电流和二相电压检测感应电压；根据检测到的感应电压检测所述感应电压的相位；通过对所述感应电压的检测到的相位进行微分来计算所述感应电压的旋转速度，并且估计所述发电机的轴速；和使用所述估计轴速值和所计算出的发电机的功率输出来计算所述涡轮的功率输出。

[0012] 根据本发明的再一方面，提供了一种发电系统的控制方法，该发电系统包括：涡轮，用于将动能转换为旋转能，发电机，用于将所述涡轮的旋转能转换为电能，功率控制器，用于对所述发电机获得的电能进行功率控制，和功率转换器，用于根据来自功率控制器的指令控制所述发电机的输入功率和输出功率，该控制方法包括下述步骤：通过将所述发电机的输出电压和输出电流变换到静止 d-q 坐标系中计算二相电流和二相电压，根据所述二相电流和二相电压计算所述发电机的功率输出；根据二相电流和二相电压来检测转子磁通量；根据检测到的转子磁通量来检测转子磁通量的相位；通过对检测到的所述转子磁通量的相位进行微分来计算转子磁通量的旋转速度，并且估计所述发电机的轴速；和使用所估计的轴速值和所计算出的发电机的功率输出来计算所述涡轮的功率输出。

[0013] 按照本发明，由于感应电压或转子磁通量是根据发电机的输出电压和输出电流计

算出来的,所以发电机的轴速是根据感应电压的相位或转子磁通量的相位估计出来的,并且涡轮的输出是根据所估计的轴速和发电机的输出计算出来的,因此能够在不使用用于检测发电机的轴速的速度传感器的情况下计算出涡轮的输出,并且因此能够简化电路、降低成本和提高可靠性。

[0014] 在根据本发明的发电系统中,功率控制器还可以包括:涡轮转矩估计器,用于根据由涡轮输出计算器计算出的涡轮的输出和所估计的轴速值来计算涡轮的转矩;和最大效率工作控制器,用于根据由涡轮转矩估计器计算出的涡轮的转矩来计算轴速指令值。

[0015] 依据本发明,由于输入到发电机的功率和涡轮的转矩是根据涡轮的输出和所估计的轴速值计算出来的,能够使发电机效率最大的轴速指令是使用计算出来的涡轮转矩、所估计的轴速值和涡轮的输出系数计算出来的,并且该轴速指令受到了控制,以使得发电机轴速等于轴速指令,因此能够总是实现输入能量的最大效率的工作。

[0016] 此外,最大效率工作控制器可以包括:转矩变化计算器,用于以恒定时间间隔对由涡轮转矩估计器计算出的涡轮的转矩进行采样,并且计算 $(T_{\text{tur}}(n)-T_{\text{tur}}(n-1))/t_s$,以计算出转矩变化 $\Delta T_{\text{tur}}(n)/t_s$,其中 $T_{\text{tur}}(n)$ 是当前涡轮转矩, $T_{\text{tur}}(n-1)$ 是前次涡轮转矩,而 t_s 是采样时间间隔;输出系数微分方程计算器,用于计算依涡轮特性和转矩变化 $\Delta T_{\text{tur}}(n)/t_s$ 决定的输出系数的关系式的解;和发电速度指令单元,用于根据由输出系数微分方程计算器得出的解计算轴速指令值。

[0017] 在依据本发明的发电系统中,功率控制器还可以包括:微校正控制器,具有:输出变化计算器,用于以恒定时间间隔对由涡轮输出计算器计算出的涡轮的输出进行采样,并且计算当前涡轮输出 $P_{\text{tur}}(n)$ 与前次涡轮输出 $P_{\text{tur}}(n-1)$ 之间的差 $\Delta P(n)$;比例增益乘法器,用于通过将由输出变化计算器计算出的 $\Delta P(n)$ 乘以比例增益来计算微速度指令值;和限制器,用于将由比例增益计算器计算出的微速度指令值的绝对值限制为预定极限值;和加法器,用于将由微校正控制器计算出的微速度指令值与由最大效率工作控制器计算出的轴速指令值相加,并且输出相加值,作为新的轴速指令值。

[0018] 根据本发明,由于微速度指令是根据涡轮的输出变化计算出来的,并且加到了轴速指令上,因此能够同时获得快速瞬时响应特性和稳定微调,并且因此能够在设计值与实际值彼此不同时总是获得最大效率。

附图说明

[0019] 附图 1 是示出了传统风力发电系统的结构的框图;

[0020] 附图 2 是示出了输出系数与速度比的关系的曲线图;

[0021] 附图 3 是示出了风车的输出、发电机的轴速以及风速的关系的曲线图;

[0022] 附图 4 是示出了按照本发明的实施例的风力发电系统的结构的示意图;

[0023] 附图 5 的框图示出了附图 4 中的功率控制器 5 中的用于实现根据发电机 3 的电流值和电压值计算进行最大效率工作控制的轴速指令 W_{gen}^* 的功能的组成单元;

[0024] 附图 6 是示出了附图 5 中的发电机轴速计算器的结构示例的框图;

[0025] 附图 7 是示出了附图 5 中的发电机轴速计算器 901 的结构另一示例的框图;

[0026] 附图 8 是示出了附图 5 中的瞬时响应控制器 903 的结构框图;

[0027] 附图 9 是示出了附图 8 中的最大效率工作控制器 603 的结构框图;

[0028] 附图 10 是示出了附图 5 中的微校正控制器 904 的结构的框图。

具体实施方式

[0029] 下面,将参照附图详细介绍本发明的实施例。

[0030] 首先,介绍在本发明中用来使发电机的效率最大化的风速与轴速的关系。

[0031] <通用风车的输出特性>

[0032] 风车的输出 P_{tur} 一般可由下面描述的公式 1 表示。

$$[0033] \quad P_{tur} = c_p k_{sys} V_{wind}^3 \quad \dots (1)$$

[0034] 在公式 1 中,风车常数 k_{sys} 是由风车翼 (flier) 的面积和空气密度确定的常数,而不是在控制时突变的参数。风速 V_{wind} 是不受控制的参数。风速 V_{wind} 和轴速 W_{gen} 的圆周速度比 λ 可以由使用发电机与风车的齿轮比 k_c 和风车的半径 R_v 的下面描述的公式 2 表示。

$$[0035] \quad \lambda = R_v k_c \frac{W_{gen}}{V_{wind}} \quad \dots (2)$$

[0036] 如附图 2 所示,动能系数 C_p 是随圆周速度比 λ 变化的参数。因此,由于通过在发电期间控制 λ 以维持最大效率速度比 λ_{op} 能够使得动能系数 C_p 变为最大值 $C_p(\max)$,因此能够使系统以最大效率工作。 λ_{op} 是通过风车的设计确定的常数。为了保持最大效率工作,由下面描述的公式 3 获得并输出发电机的轴速指令 W_{gen}^* 。

$$[0037] \quad W_{gen}^* = \left(\frac{\lambda_{op}}{R_v k_c} \right) V_{wind} \quad \dots (3)$$

[0038] 在公式 3 中, λ_{op} 、 R_v 和 k_c 是已知的,因为它们都是风车设计值的一部分,但风速 V_{wind} 是未知值。因此,实现最大效率工作需要风速 V_{wind} 的瞬时值。

[0039] 发电机的功率 P_{gen} 可以表达为下面介绍的使用发电机的轴速 W_{gen} 和发电机的转矩 T_{gen} 表示的公式 4。

$$[0040] \quad P_{gen} = W_{gen} T_{gen} \quad \dots (4)$$

[0041] 另选地,发电机的功率 P_{gen} 可以使用发电机的静止 d-q 坐标系中的二相电压和二相电流通过公式 5 来计算。

$$[0042] \quad P_{gen} = \frac{3}{2} (V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) \quad \dots (5)$$

[0043] 风车系统的损耗 P_{loss} 由电损耗和机械损耗组成。电损耗是通过发电机功率 P_{gen} 乘以电损耗常数 k_1 得到的,电损耗常数 k_1 是利用发电机的等效电阻和用于控制发电机的倒相器 (inverter) 中的功率半导体的开关频率确定的。机械损耗是通过发电机轴速的平方 W_{gen}^2 乘以机械摩擦常数 B_{sys} 得到的。如下面描述的公式 6 所示,通过将机械损耗与电损耗相加获得风车系统的损耗 P_{loss} 。

$$[0044] \quad P_{loss} = k_1 P_{gen} + B_{sys} W_{gen}^2 \quad \dots (6)$$

[0045] 风车的输出 P_{tur} 是根据下面介绍的公式 7 通过将输出损耗 P_{loss} 与所获得的发电机功率 P_{gen} 相加得到的。

$$[0046] \quad P_{tur} = P_{gen} + P_{loss} \quad \dots (7)$$

[0047] 风速可以通过所得到的风车输出 P_{tur} 、发电机轴速和风车数据获得。在本发明中,

使用估计轴速

[0048]

$$\widehat{W}_{gen}$$

[0049] 作为发电机轴速,得到风车的输出 P_{tur} 。

[0050] < 风车的最大输出点 >

[0051] 一般来说,最大输出点存在于发电机的轴速与风速之间。例如,如附图 3 所示,当发电机轴速 W_{gen} 是 $W_r(A)$ 并且风速 V_{wind} 是 V_{w1} 时,风车的最大输出点是 $P_{tur}(A)$ 。当发电机轴速 W_{gen} 是 $W_r(B)$ 并且风速 V_{wind} 是 V_{w2} 时,风车的最大输出点是 $P_{tur}(B)$ 。

[0052] < 瞬时响应控制的原理 >

[0053] 下面,将介绍瞬时响应控制的原理。

[0054] 一般来说,风车的转矩 T_{tur} 可由下面介绍的公式 8 表示。

$$[0055] \quad T_{tur} = P_{tur}/k_c W_{gen} \quad \dots (8)$$

[0056] 在具有控制速度的功能(使发电机轴速遵从发电机轴速指令)的结构中,当轴速指令恒定时,转矩对时间的微分值可以由下面介绍的公式 9 表示。

$$[0057] \quad \frac{dT_{tur}}{dt} = \frac{\pi}{2k_c} \rho R_v^5 W_{gen}^2 \frac{d}{dt} \left(\frac{c_p}{\lambda^3} \right) \quad \dots (9)$$

[0058] 在公式 9 中, ρ 表示空气密度。当速度控制器的控制周期 t_s 较小时,公式 9 可以使用转矩变化量 ΔT_{tur} (速度控制器的输出)由下面介绍的公式 10 表示。

$$[0059] \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{c_p}{\lambda^3} \right) = \frac{2k_c}{\pi \rho R_v^5 W_{gen}^2} \frac{\Delta T_{tur}}{t_s} \quad \dots (10)$$

[0060] 一般来说,风车的输出系数 C_p 是 λ 的 m 阶多项式,并且可由公式 11 表示。

$$[0061] \quad c_p(\lambda) = c_0 + c_1 \lambda + c_2 \lambda^2 + \dots + c_m \lambda^m \quad \dots (11)$$

[0062] 公式 11 的 c_0 到 c_n 是通过风车设计确定的已知常数。通过将公式 11 的 $C_p(\lambda)$ 代入到公式 10 中并且对公式 10 进行整理,可以得到下面介绍的公式 12。

$$[0063] \quad \frac{d}{dt} \{c_0 \lambda^{-3} + c_1 \lambda^{-2} + c_2 \lambda^{-1} + \dots + c_m \lambda^{m-3}\} - \frac{2k_c}{\pi \rho R_v^5 W_{gen}^2} \frac{\Delta T_{tur}}{t_s} = 0 \quad \dots (12)$$

[0064] 这里,通过用 x 置换 $\lambda - 1$ 并且对公式 12 进行整理,可以得到公式 13。

$$[0065] \quad 3c_0 x^2 + 2c_1 x + \left(c_2 - \frac{2k_c}{\pi \rho R_v^5 W_{gen}^2} \frac{\Delta T_{tur}}{t_s} \right) + \dots + c_m \frac{d}{dt} (x^{3-m}) = 0 \quad \dots (13)$$

[0066] 当公式 13 的解是 \hat{x} 时,可以如下面介绍的公式 14 所示来估计风速。

[0067]

$$\widehat{V}_{wind} = R_v k_c \widehat{W}_{gen} \hat{x} \quad \dots (14)$$

[0068] 最后,通过使用估计出轴速值 \widehat{W}_{gen} 代替发电机轴速,发电机轴速指令可由公式 15 表示。

[0069]

$$W_{g1}^* = \lambda_p \widehat{W}_{gen} \hat{x} \quad \dots (15)$$

[0070] 因此,根据风车的输出系数 C_p 和发电机的轴速及转矩,可以得到由方程 10 到 15 表

示的微分方程的解,从而计算出发电机的轴速指令 W_{g1}^* 。

[0071] < 微校正控制原理 >

[0072] 在上述的说明中,对通过转矩变化检测风速、计算轴速指令和控制发电机效率进行了解释说明。下面,将参照附图 3 介绍微校正控制方法的原理,该方法用于提高高效工作控制的精度,而不改变风力发电系统中的常数,比如动能系数 C_p 的误差。

[0073] 最初,假设风车在附图 3 中的点 A 处工作。由于即使当风速从 V_{w1} 改变到 V_{w2} 时轴速指令仍然是恒定不变的,轴速并没有从 $W_r(A)$ 改变,而仅仅转矩发生变化,从而工作点从 A 移动到了 a1。按照公式 11 到 15,通过根据转矩的变化确定风速的变化来进行瞬时响应控制,并且输出发电机的轴速指令 W_{g1}^* 。不过,即使当发电机的轴速服从轴速指令 W_{g1}^* 时,因为发电系统的常数出现了变化和误差,实际的工作点 a2 也可能不与新的最大效率工作点 B 相对应。为了解决这一问题,在本发明中进行微修正控制。假设当前检测到的电力是 $P_{tur}(n)$ 并且之前检测到的电力为 $P_{tur}(n-1)$,则得到了下面介绍的公式 16。

$$[0074] \quad \Delta P(n) = P_{tur}(n) - P_{tur}(n-1)$$

$$[0075] \quad \Delta W_1^*(n) = k_{pw} * \Delta P(n) \cdots (16)$$

[0076] 这里 k_{pw} 是比例增益。为了限制已校正值的最大值,将 $\Delta W_1^*(n)$ 的绝对值限制为小于或等于极限值 W_c_lim 的值,如下面介绍的公式 17 所表示的。微校正控制可以通过校正发电机轴速来进行。

$$[0077] \quad \text{如果 } \Delta W_1^*(n) > W_c_lim, \text{ 则 } \Delta W_c^* = W_c_lim$$

$$[0078] \quad \text{如果 } \Delta W_1^*(n) < -W_c_lim, \text{ 则 } \Delta W_c^* = -W_c_lim$$

$$[0079] \quad \text{否则 } \Delta W_c^* = \Delta W_1^*(n) \cdots (17)$$

[0080] 因此,发电机轴速指令可以由公式 18 表示。

$$[0081] \quad W_{gen}^* = W_{g1}^* + \Delta W_c^* \cdots (18)$$

[0082] < 速度估计方法 >

[0083] 下面,将介绍轴速估计方法的原理。

[0084] 通过将所检测到的发电机的输出电流值 \hat{I}_u 、 \hat{I}_w 和通过直接检测三相输出电压或电压指令值得到的发电机的检测相电压 \hat{V}_u 、 \hat{V}_w 从三相坐标系中变换到在定子的位置上建立的静止 d-q 坐标系中,由下面介绍的公式 19 得到了二相电流 \hat{I}_{ds} 、 \hat{I}_{qs} , 并且由下面介绍的公式 20 得到了二相电压 \hat{V}_{ds} 、 \hat{V}_{qs} 。这里, C_0 是常数。

[0085]

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_{ds} \\ \hat{I}_{qs} \end{bmatrix} = C_0 \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_u \\ -(\hat{I}_u + \hat{I}_w) \\ \hat{I}_w \end{bmatrix} \cdots (19)$$

[0086]

$$\begin{bmatrix} \widehat{V}_{ds} \\ \widehat{V}_{qs} \end{bmatrix} = c_0 \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{V}_u \\ -(\widehat{V}_u + \widehat{V}_w) \\ \widehat{V}_w \end{bmatrix} \quad \dots (20)$$

[0087] <速度估计的实施例 1>

[0088] 永磁铁型同步发电机的感应电压可以由下面介绍的公式 21 得出。

[0089]

$$\widehat{E}_{ds} = \widehat{V}_{ds} + (R_{ds} + pL_{ds})\widehat{I}_{ds}$$

[0090]

$$\widehat{E}_{qs} = \widehat{V}_{qs} + (R_{qs} + pL_{qs})\widehat{I}_{qs} \quad \dots (21)$$

[0091] 这里, R_{ds} 和 R_{qs} 表示定子 in d 轴和 q 轴上的定子侧的等效电阻, p 表示微分算子, 而 L_{ds} 和 L_{qs} 表示 d 轴和 q 轴的电感。一般来说, 在三相对称 AC 发电机中, d 轴和 q 轴的感应电压 E_{ds} 和 E_{qs} 具有下面介绍的公式 22 中表示的特征。

$$[0092] \quad E_{ds} = K_e W_e \sin \theta_e$$

$$[0093] \quad E_{qs} = K_e W_e \cos \theta_e \quad \dots (22)$$

[0094] 这里, K_e 是根据发电机的额定电压确定的电压系数, W_e 是发电机的电角速度, 而 θ_e 是感应电压的相位。因此, 发电机的感应电压的估计相位值可以由下面介绍的公式 23 得出。

[0095]

$$\widehat{\theta}_e = \tan^{-1} \left(\frac{\widehat{E}_{ds}}{\widehat{E}_{qs}} \right) \quad \dots (23)$$

[0096] 发电机的轴速可以通过对磁通量的估计相位值进行微分由下面介绍的公式 24 得出。

[0097]

$$\widehat{W}_{gen} = \frac{2}{\text{Pole}} \frac{d\widehat{\theta}_e}{dt} \quad \dots (24)$$

[0098] 这里 Pole 是发电机的极数。

[0099] <速度估计的实施例 2>

[0100] 在永磁铁型同步发电机中, 在静止 d-q 坐标系中的转子侧磁通量可由下面介绍的公式 25 得出。

[0101]

$$\widehat{\Phi}_d = \int (\widehat{V}_{ds} + (R_{ds} + pL_{ds})\widehat{I}_{ds}) dt$$

[0102]

$$\widehat{\Phi}_q = \int (\widehat{V}_{qs} + (R_{qs} + pL_{qs})\widehat{I}_{qs}) dt \quad \dots (25)$$

[0103] 一般来说, 三相对称 AC 发电机的转子磁通量 Φ_d 和 Φ_q 具有公式 26 中给出的特征。

[0104]

$$\widehat{\Phi}_d = k_\Phi \sin \theta_\Phi$$

[0105]

$$\hat{\Phi}_q = k_\Phi \cos \theta_\Phi \quad \dots (26)$$

[0106] 这里, k_Φ 是磁通量系数, 而 θ_Φ 是磁通量的相位。因此, 发电机磁通量的估计相位值可由下面介绍的公式 27 获得。

[0107]

$$\hat{\theta}_\Phi = \tan^{-1} \left(\frac{\hat{\Phi}_{ds}}{\hat{\Phi}_{qs}} \right) \quad \dots (27)$$

[0108] 可以根据下面介绍的公式 28 通过对磁通量的估计相位值进行微分得出发电机的轴速。

[0109]

$$\hat{W}_{gen} = \frac{2}{\text{Pole}} \frac{d\hat{\theta}_\Phi}{dt} \quad \dots (28)$$

[0110] 接下来, 在附图 4 中给出了依据本发明的实施例的发电系统的具体结构, 该发电系统具体实现了上面介绍的控制方法。

[0111] 附图 4 示出了将本发明应用于风力发电系统的实施例。在附图 4 中, 与附图 1 中相同的单元由相同的附图标记标注, 并且省略了对它们的介绍。

[0112] 依据本实施例的风力发电系统具有这样的结构: 从附图 1 所示的传统风力发电系统中, 除去了用于检测轴速的速度传感器 8, 并且用功率控制器 5 取代了附图 1 中的功率控制器 95。本实施例中的功率控制器 5 具有控制发电机的功率和轴速的功能以及检测发电机的电流值和电压值并且根据该电流值和电压值估计发电机轴速的发电机轴速估计功能。

[0113] 附图 5 中示出了附图 4 中所示的功率控制器 5 中用于实现根据发电机的电流值和电压值得到用于给出最大效率工作控制的轴速指令 W_{gen}^* 的功能的组成部分。

[0114] 如附图 5 所示, 给出最大效率工作控制的功能是由三相-二相转换器 906、发电机轴速计算器 901、发电机输出计算机 902、瞬时响应控制器 903、微校正控制器 904 和加法器 905 实现的。

[0115] 三相-二相转换器 906 将发电机 3 的输出电压和输出电流变换到静止 d-q 坐标系中, 并且使用上面介绍的公式 19 和 20 计算二相电流 \hat{I}_{ds} 、 \hat{I}_{qs} 和二相电压 \hat{V}_{ds} 、 \hat{V}_{qs} 。

[0116] 发电机输出计算机 902 根据三相-二相转换器 906 计算出来的二相电流和二相电压计算发电机 3 的输出 P_{gen} 。

[0117] 接下来, 在附图 6 中给出了发电机轴速计算机 901 的具体结构的示例。在附图 6 所示的例子中, 发电机轴速计算器 901 包括感应电压检测器 402、相位检测器 403 和微分器 404。这个例子相当于上面介绍的速度估计的实施例 1。

[0118] 感应电压检测器 402 使用上面介绍的公式 21 根据来自于三相-二相转换器 906 的二相电流和二相电压检测感应电压 \hat{E}_{ds} 、 \hat{E}_{qs} 。

[0119] 相位检测器 403 使用上面介绍的公式 23 根据由感应电压检测器 402 检测到的感应电压来检测感应电压的相位 $\hat{\theta}_e$ 。

[0120] 微分器 404 通过使用上面介绍的公式 24 对由相位检测器检测到的感应电压的估计相位值进行微分, 计算估计轴速值, 该估计轴速值为感应电压的旋转速度, 即, 发电机 3

的估计轴速值。

[0121] 在附图 7 中给出了附图 5 中所示的发电机轴速计算器 901 的具体结构的另一个示例。在附图 7 所示的例子中,发电机轴速计算器 901 包括转子磁通量检测器 502、相位检测器 503 和微分器 504。这个例子对应于上面介绍的速度估计的实施例 2。

[0122] 转子磁通量检测器 502 使用上面介绍的公式 25 根据二相电流 \hat{I}_{ds} 、 \hat{I}_{qs} 和二相电压 \hat{V}_{ds} 、 \hat{V}_{qs} 检测转子磁通量 $\hat{\Phi}_d$ 、 $\hat{\Phi}_q$,其中所述的二相电流和二相电压是由附图 5 中所示的三相-二相转换器 906 变换到静止 d-q 坐标系中的。

[0123] 相位检测器 503 根据由转子磁通量检测器 502 检测到的转子磁通量检测转子磁通量的相位 $\hat{\theta}_\phi$ 。

[0124] 微分器 504 使用上面介绍的公式 28 通过由相位检测器 503 检测到的转子磁通量的相位计算转子磁通量的估计旋转速度,即,发电机 3 的估计轴速。

[0125] 接下来,在附图 8 中给出了附图 5 的瞬时响应控制器 903 的具体结构。如附图 8 所示,瞬时响应控制器 903 包括风车输出计算器 601、风车转矩估计器 602 和最大效率工作控制器 603。

[0126] 风车输出计算器 601 起到涡轮输出计算器的作用,并且使用由附图 6 或 7 中所示的发电机轴速计算器 901 计算出的发电机 3 的估计轴速值 \hat{W}_{gen} 和由发电机输出计算器 902 计算出的发电机输出 P_{gen} 根据公式 7 计算风车输出 P_{tur} 。

[0127] 风车转矩估计器 602 起到涡轮转矩估计器的作用,并且使用由风车输出计算器 601 计算出的风车输出 P_{tur} 和由发电机轴速计算器 901 计算出的估计轴速值 \hat{W}_{gen} 根据公式 8 计算风车转矩 T_{tur} 。

[0128] 最大效率工作控制器 603 根据由风车转矩估计器 602 计算出风车转矩 T_{tur} 计算轴速指令值 W_{g1}^* 。附图 9 中示出了最大效率工作控制器 603 的具体结构。如附图 9 所示,最大效率工作控制器 603 包括风车转矩变化计算器 701、输出系数微分方程计算器 702 和发电速度指令单元 703。

[0129] 最大效率工作控制器 603 以恒定时间间隔对风车转矩 T_{tur} 进行采样,并且进行计算。这里,假设采样间隔由 t_s 表示,当前采样时的转矩由 $T_{tur}(n)$ 表示,并且前一次采样时的转矩由 $T_{tur}(n-1)$ 表示。

[0130] 风车转矩变化计算器 701 通过计算 $(T_{tur}(n)-T_{tur}(n-1))/t_s$ 得到转矩变化 $\Delta T_{tur}(n)/t_s$ 。输出系数微分方程计算器 702 计算依风车特性和 $\Delta T_{tur}(n)$ 决定的公式 13 中的输出系数 $C_p(\lambda)$ 的关系式的解,而发电速度指令单元 703 根据公式 15 计算轴速指令值 W_{g1}^* 。

[0131] 接下来,在附图 10 中给出了附图 5 中的微校正控制器 904 的具体结构。如附图 10 所示,微校正控制器 904 包括输出变化计算器 801、比例增益乘法器 802 和限制器 803。

[0132] 输出变化计算器 801 以恒定时间间隔对由风车输出计算器 601 计算出的风车输出 P_{tur} 进行采样,并且使用公式 16 中上侧的公式计算当前风车输出 $P_{tur}(n)$ 与前次风车输出 $P_{tur}(n-1)$ 之间的差 $\Delta P(n)$ 。比例增益乘法器 802 通过使用公式 16 中下侧的公式用比例增益 k_{pw} 乘以由输出变化计算器 801 的计算出的 $\Delta P(n)$ 得到 $\Delta W_1^*(n)$ 。限制器 803 输出将微速度指令值 $\Delta W_1^*(n)$ 的绝对值限制为极限值 W_{c_lim} 而获得的微速度指令值 $\Delta W_c^*(n)$ 。

[0133] 加法器 905 通过将微校正控制器 904 的限制器 803 限制了的微速度指令 ΔW_c^* 与由瞬时响应控制器 903 的最大效率工作控制器 603 计算出的轴速指令值 W_{gl}^* 相加输出新的轴速值 W_{gen}^* 。

[0134] 依据本实施例的发电系统,由于微速度指令 ΔW_c^* 是根据风车输出 P_{tur} 的变化计算出来的,并且加到了轴速指令 W_{gl}^* 上,因此能够计算出能够同时获得最快瞬时响应特性和稳定微调的轴速指令 W_{gen}^* ,并且因此能够在设计值与实际值彼此不同时总是获得最大效率。

[0135] 依据本实施例的发电系统,由于输入到发电机中的功率和风车转矩是由风车输出和估计轴速值计算出来的,能够使发电机效率最大的轴速指令是使用计算出来的风车转矩、估计轴速值和风车输出系数计算出来的,并且该轴速指令受到了控制,以使得发电机轴速等于轴速指令,因此能够总是实现对于输入能量具有最大效率的工作。

[0136] 依据本实施例的风力发电系统和控制方法,能够提高发电机 3 的效率,并且除此之外还能够根据外部动能控制电力,而不使用通常比较昂贵的发电机 3 的速度传感器和风速传感器,从而简化了电路、降低了成本和提高了可靠性。

[0137] 在本实施例中,虽然介绍了将本发明应用于使用风力发电的风力发电系统的情况,但是本发明并不局限于此,而是可以应用于将动能转换为旋转能的涡轮和流体之间具有附图 3 所示的关系的系统,例如,水力发电系统之类的系统。

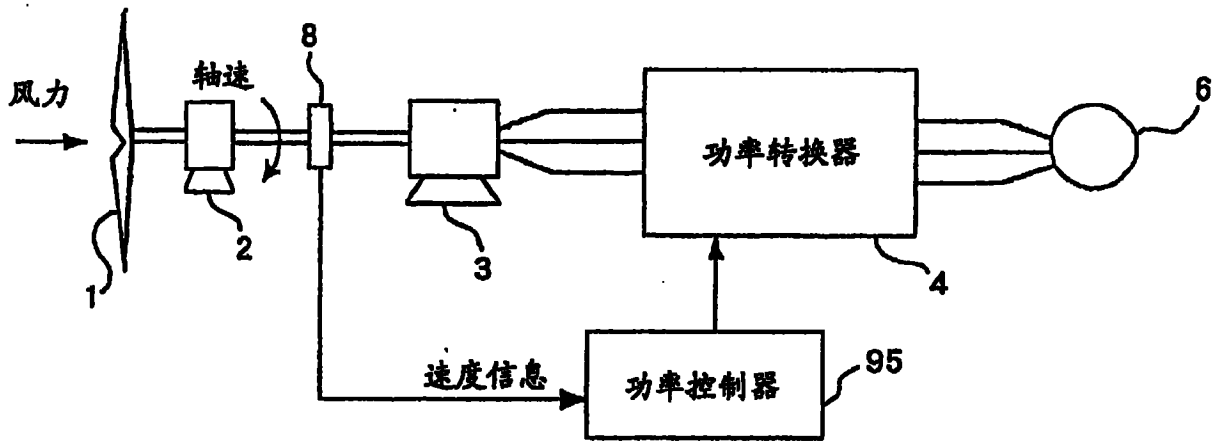


图 1

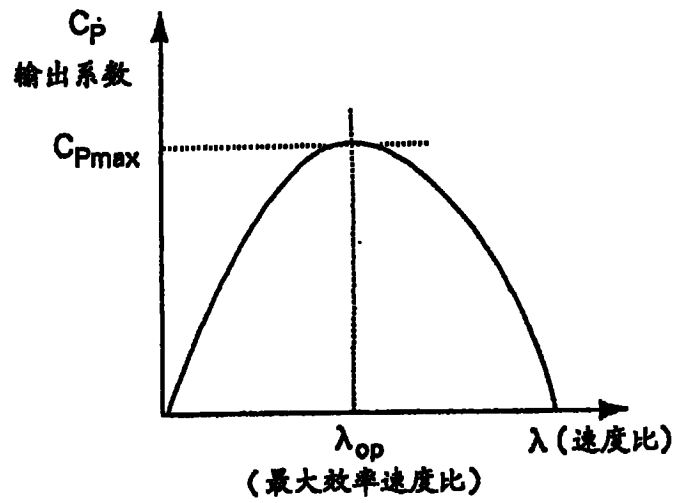


图 2

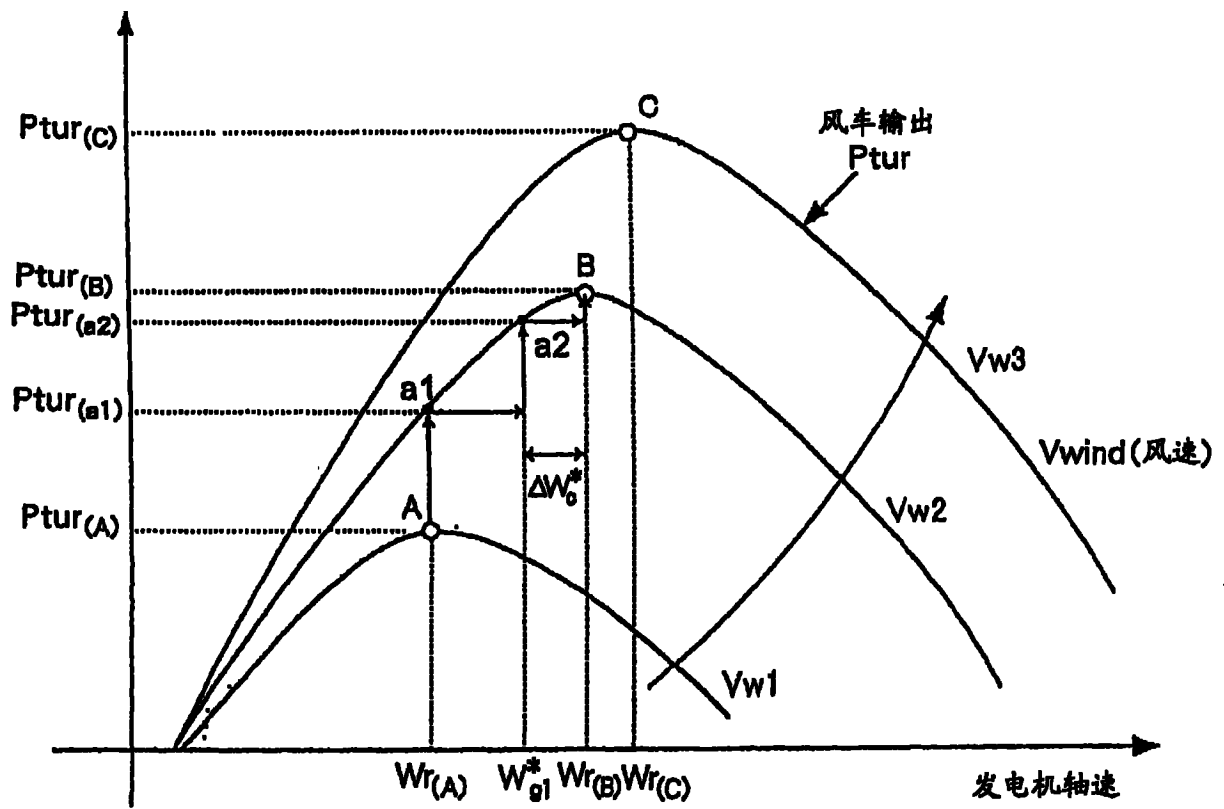


图 3

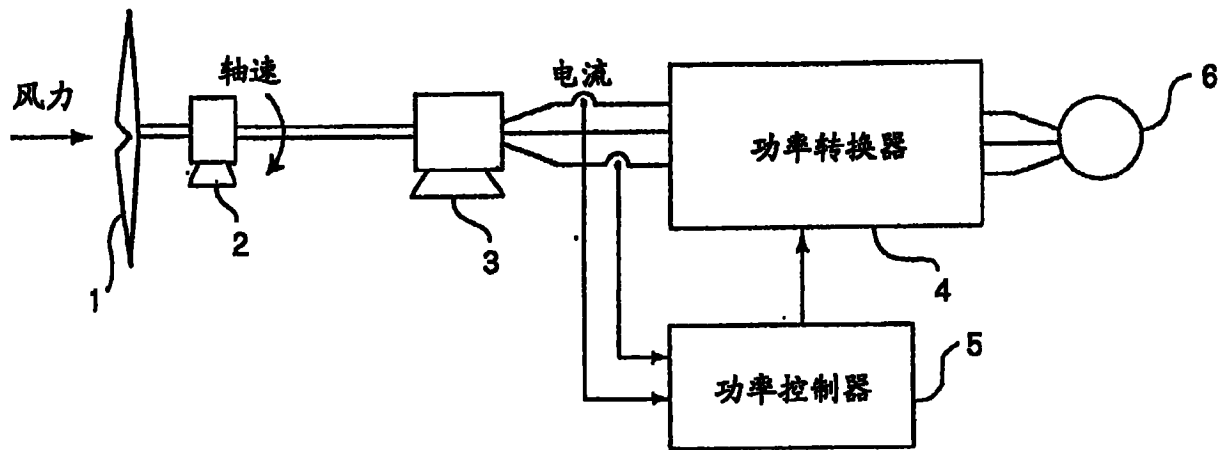


图 4

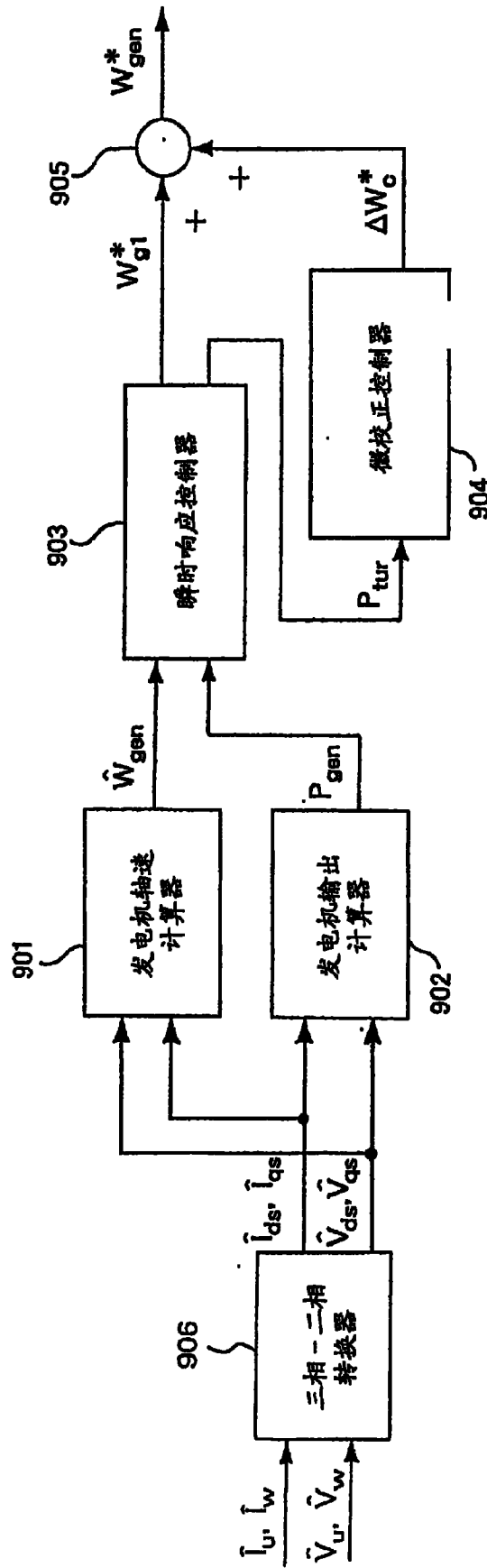


图 5

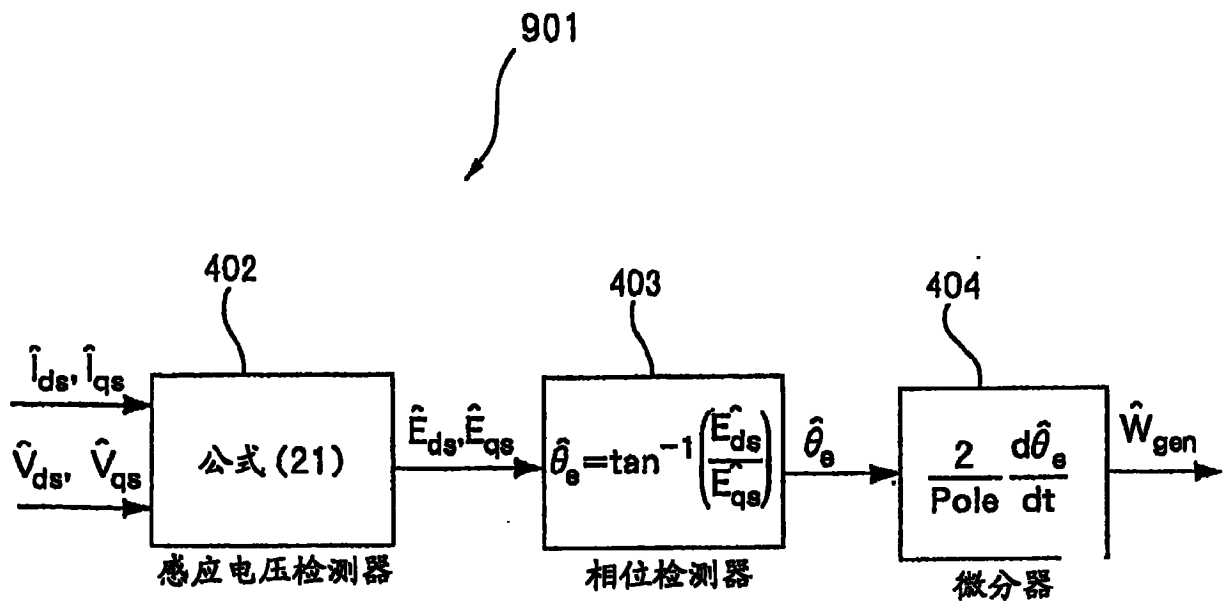


图 6

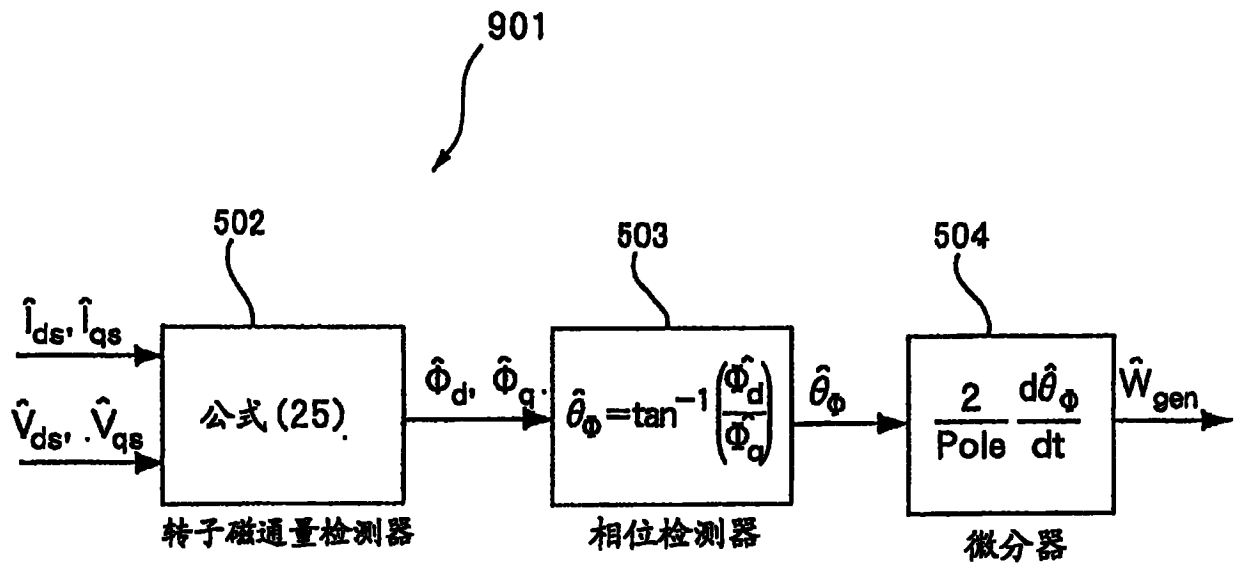


图 7

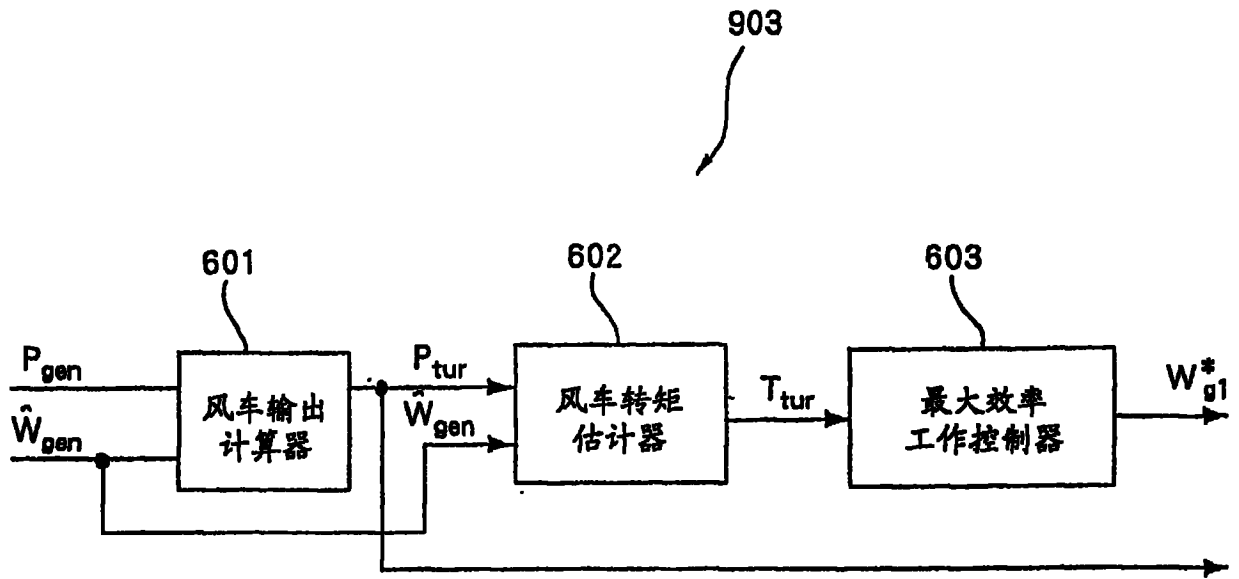


图 8

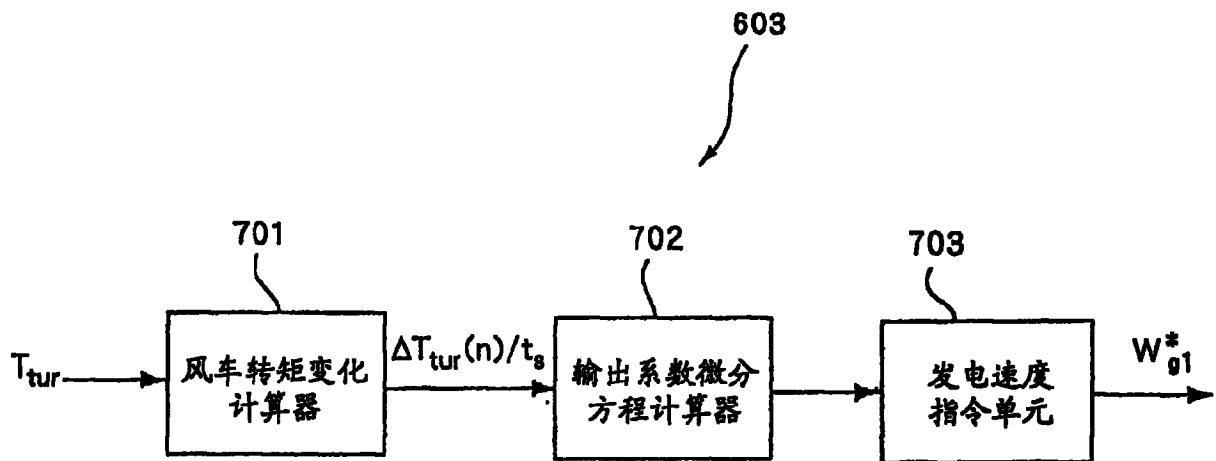


图 9

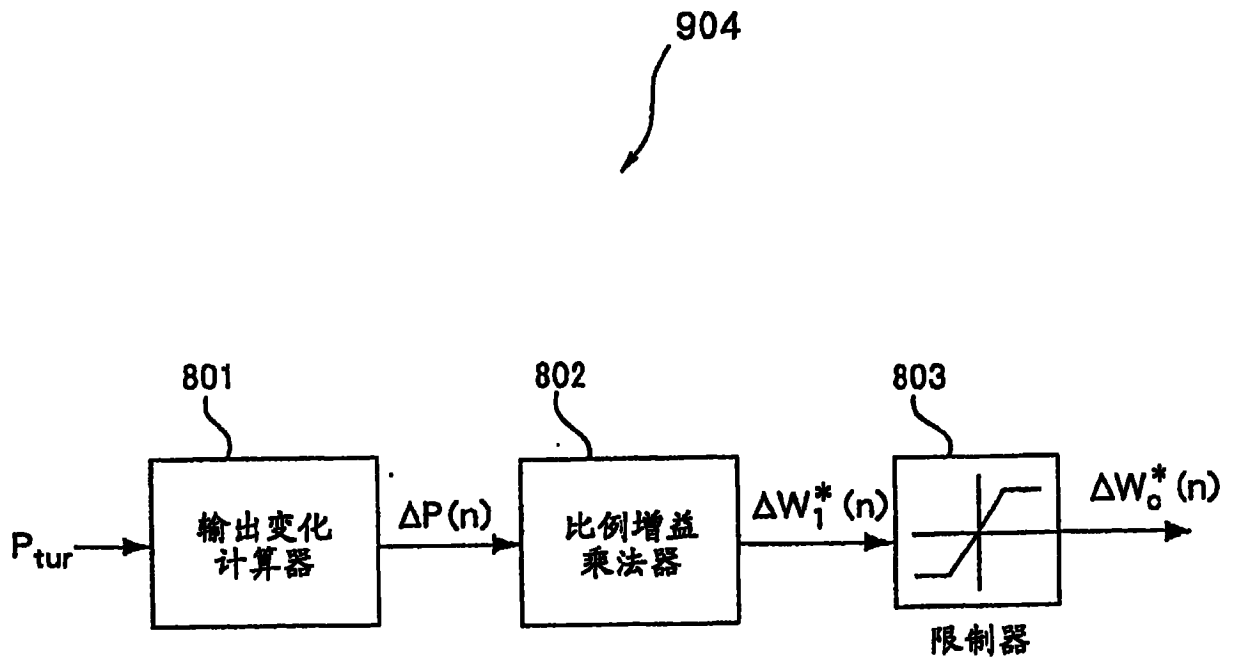


图 10