



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104074679 B

(45)授权公告日 2017.02.22

(21)申请号 201410312567.2

(22)申请日 2014.07.02

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 104074679 A

(43)申请公布日 2014.10.01

(73)专利权人 国电联合动力技术有限公司  
地址 100000 北京市海淀区中关村南大街  
乙56号方圆大厦16层

(72)发明人 周志超 许伟 刘峻岐 潘磊  
潘海宁

(74)专利代理机构 北京方韬法业专利代理事务  
所 11303  
代理人 马丽莲

(51)Int.Cl.  
F03D 7/00(2006.01)

(56)对比文件

JP 特开平10-339259 A,1998.12.22,  
EP 0112792 A1,1984.07.04,  
CN 102017392 A,2011.04.13,  
CN 103615356 A,2014.03.05,

审查员 韩亚楠

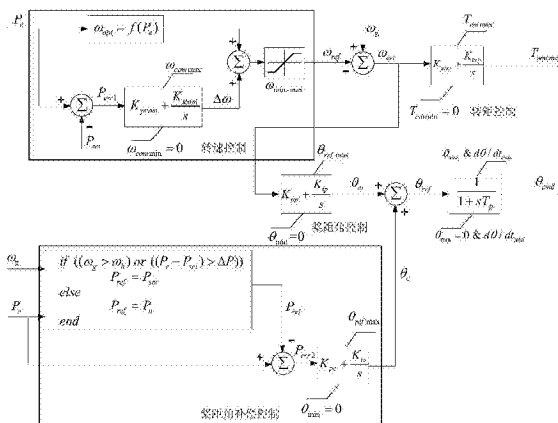
权利要求书1页 说明书5页 附图3页

(54)发明名称

一种变速变桨距风电机组全风速限功率优化控制方法

(57)摘要

本发明公开了一种变速变桨距风电机组全风速限功率优化控制方法,将机组实时输出电功率和发电机转速作为控制输入,优先通过电磁转矩主动控制发电机转速,后启动桨距角控制。该方法以通过电磁转矩主动控制发电机转速优先,必要时再启动桨距角控制,在实现限功率控制功能的同时,尽量优化了变桨系统的运行工况,并能充分利用机组转动惯量,在一定程度上提高发电量。该方法的控制输入为机组实时输出电功率和发电机转速,不依赖于具体的风力机气动特性及可靠性不高的实时测风数据,可用于双馈、直驱和定桨距等变速类风电机组,且无需增加额外的硬件设备,具有很好的通用性,工程实用价值较高。



1. 一种变速变桨距风电机组全风速限功率优化控制方法, 其特征在于, 将机组实时输出电功率和发电机转速作为控制输入, 优先通过电磁转矩主动控制发电机转速, 后启动桨距角控制;

具体包括如下步骤:

(1) 通过比较机组实时输出电功率 $P_e$ 与限功率设定值 $P_{set}$ 的相对大小来判断是否进入限功率控制模式;

(2) 当进入限功率控制模式时, 优先控制电磁转矩, 主动增加发电机转速, 使风力机偏移最大功率运行点;

(3) 然后当发电机转速接近额定转速 $\omega_n$ 时, 及时触发桨距角补偿控制器, 使变桨系统动作;

所述步骤(1)、(2)中:

当 $P_e \leq P_{set}$ 时, 不进入限功率控制模式, 按照正常功率控制进行, 转速指令输出 $\omega_{ref}$ 等于正常功率控制时的最佳转速参考 $\omega_{opt}$ ;

当 $P_e > P_{set}$ 时进入限功率控制模式, 转速指令输出 $\omega_{ref}$ 取最佳转速参考 $\omega_{opt}$ 上叠加一附加转速 $\Delta\omega$ 或额定转速 $\omega_n$ 中相对较小值;

即如下式所示:

$$\begin{cases} \omega_{ref} = \omega_{opt} = f(P_e) & P_e \leq P_{set} \\ \omega_{ref} = \min(\omega_{opt} + \Delta\omega, \omega_n) & P_e > P_{set} \end{cases} .$$

2. 根据权利要求1所述的变速变桨距风电机组全风速限功率优化控制方法, 其特征在于, 所述步骤(3)中, 桨距角补偿控制器确保机组实时输出电功率 $P_e$ 不超过功率参考值 $P_{ref}$ ,  $P_{ref}$ 的切换规则为:

```

if (( $\omega_g > \omega_h$ ) or (( $P_{elec} - P_{set}$ ) >  $\Delta P$ ))
     $P_{ref} = P_{set}$ ;
else
     $P_{ref} = P_n$ ;
end

```

式中,  $\omega_g$ 为发电机转速,  $\omega_h$ 为略小于 $\omega_n$ 的一高定值,  $\Delta P$ 为功率控制误差限值,  $P_n$ 为机组额定功率。

## 一种变速变桨距风电机组全风速限功率优化控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及风力发电技术领域,特别是涉及全风速情况下变速变桨距风电机组的限功率优化控制方法。

### 背景技术

[0002] 由于风速的随机性和间歇性,而电力系统中风电比重又不断攀升,使大规模风电难以完全消纳,经常需要在预测计算电网消纳风电的能力基础上对风场出力进行调度控制。相关研究方法主要是基于风电出力和负荷的预测基础上,实时算出电网接纳风电的能力,从而获知风电场的安全出力最大值及当前受限容量,通过调度指令下发给风电场,然后由风场级的能量管理系统将总的功率目标合理分配给各台风机去完成。近年,风电被大规模限电弃风已呈常态化,据统计,全国风电弃风率在2011年约12%,2012年则高达17%,在弃风现象严重的蒙东和吉林地区,弃风率连续两年超过20%。

[0003] 同时,在广大的海岛或偏远地区的独立供电系统(SAPS)中,风电已得到普遍的应用。考虑到偏远地区的燃料运输和运行维护费用,风能是相较于太阳能、生物质能等更为经济可行的可再生能源,高的风电渗透率是SAPS供电经济性的重要保障,但这也意味着较高的风电弃能量。进一步,SAPS中的电源建设一般一次建设完成,而系统负荷需求随着生活水平的提高会不断增长,所以在整个系统寿命周期内,风电的限功率控制(WPCC)将是风电机组的常态运行方式,尤其在系统运营前期。

[0004] 目前,变速恒频风电机组(WTG)的传统限功率控制策略(T-WPCC)一般均通过调节变桨机构,降低风轮叶片捕获的机械功率来实现,风轮转速由固定的功率-转速特性曲线确定。显然,T-WPCC需不断调整叶片桨距角,风轮机转速与功率输出严格对应,或保持额定转速不变,或下调至输出功率的对应转速,其关注的重点是在较高风速情况下,如何使风机输出精确的控制限功率设定值之下,而没有考虑在全风速范围内,尤其是中低风速情况下,如何尽量优化变桨距系统的运行工况,如何在WPCC时尽量提高机组发电量。

[0005] 事实上,根据风速的Weibull分布曲线,风力机对应的功率输出大部分时间都处于较低水平,根据现有风电场的实测数据显示,年平均风速基本不会高于8m/s,大致对应0.4倍机组额定功率;对内蒙古电网2年内风电运行的实时数据的分析结果亦显示全网风电出力高于额定功率50%的概率相对较低,对高于50%概率最大的某具体风场,其值为23%。所以,对全风速范围内,尤其中低风速下的风机WPCC进行研究探讨是十分必要的。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的是克服上述现有技术的不足,提出一种变速变桨距风电机组的限功率优化控制方法,即全风速优化限功率控制策略(N-WPCC),使其在实现WPCC的同时,尽量优化变桨系统的运行工况,并一定程度上提高发电量。

[0007] 为实现上述目的,本发明采用如下技术方案:

[0008] 一种变速变桨距风电机组的限功率优化控制方法,将机组实时输出功率和发电

机转速作为控制输入,优先通过电磁转矩主动控制发电机转速,后启动桨距角控制。

[0009] 作为本发明的进一步改进:

[0010] 上述的变速变桨距风电机组的限功率优化控制方法,具体包括如下步骤:

[0011] (1) 通过比较机组实时输出电功率 $P_e$ 与限功率设定值 $P_{set}$ 的相对大小来判断是否进入限功率控制模式;

[0012] (2) 当进入限功率控制模式时,优先通过电磁转矩主动增加发电机转速,使风力机偏移最大功率运行点;

[0013] (3) 然后当发电机转速接近额定转速 $\omega_n$ 时,及时触发桨距角补偿控制器,使变桨系统动作。

[0014] 所述步骤(1)、(2)中:

[0015] 当 $P_e \leq P_{set}$ 时,不进入限功率控制模式,按照正常功率控制进行,转速指令输出 $\omega_{ref}$ 等于正常功率控制时的最佳转速参考 $\omega_{opt}$ ;

[0016] 当 $P_e > P_{set}$ 时进入限功率控制模式,转速指令输出 $\omega_{ref}$ 取最佳转速参考 $\omega_{opt}$ 上叠加一附加转速 $\Delta\omega$ 或额定转速 $\omega_n$ 中相对较小值;

[0017] 即如下式所示:

$$[0018] \quad \begin{cases} \omega_{ref} = \omega_{opt} = f(P_e) & P_e \leq P_{set} \\ \omega_{ref} = \min(\omega_{opt} + \Delta\omega, \omega_n) & P_{set} < P_e \end{cases}$$

[0019] 所述步骤(3)中,桨距角补偿控制器确保机组实时输出电功率 $P_e$ 不超过功率参考值 $P_{ref}$ , $P_{ref}$ 的切换规则为:

[0020] if (( $\omega_g > \omega_h$ ) or (( $P_{elec} - P_{set}$ ) >  $\Delta P$ ))

[0021]  $P_{ref} = P_{set}$ ;

[0022] else

[0023]  $P_{ref} = P_n$ ;

[0024] end

[0025] 式中, $\omega_g$ 为发电机转速, $\omega_h$ 为略小于 $\omega_n$ 的一高定值, $\Delta P$ 为功率控制误差限值, $P_n$ 为机组额定功率。

[0026] 通过采用上述技术方案,本发明具有如下有益效果:

[0027] 本发明采用风电机组主动变速和桨距角控制相结合的全风速优化限功率控制策略(N-WPCC),N-WPCC优先通过电磁转矩控制发电机转速,能有效减少变桨系统的动作频率和动作幅度,提高变桨系统的使用寿命,并能充分利用机组转动惯量,在一定程度上提高发电量。同时,N-WPCC的控制输入为机组实时输出电功率和发电机转速,不依赖于具体的风力机气动特性及可靠性不高的实时测风数据,可用于双馈、直驱和定桨距等变速类风电机组,且无需增加额外的硬件设备,具有很好的通用性,工程实用价值较高。

[0028] 下面通过附图和实施例,对本发明的技术方案做进一步的详细描述。

## 附图说明

[0029] 图1为本发明实施案例中全风速N-WPCC控制器原理框图;

[0030] 图2为本发明实施案例中全风速情况下的风力机功率特性;

- [0031] 图3为本发明实施案例中中低风速下WPCC原理图；  
 [0032] 图4为本发明实施案例中全范围阶梯风速下各功率控制策略的行为对比图；  
 [0033] 图5为本发明实施案例中特定风速范围内各功率控制策略的行为对比图。

### 具体实施方式

[0034] 以下结合附图对本发明的优选实施例进行说明,应当理解,此处所描述的优选实施例仅用于说明和解释本发明,并不用于限定本发明。

[0035] 本发明的一种变速变桨距风电机组的限功率优化控制方法,无需精度和可靠性不高的现场实时测风数据,仅通过比较机组实时输出电功率 $P_e$  ( $P_{elec}$ ) 与限功率设定值 $P_{set}$ 的相对大小来判断是否进入WPCC模式。

[0036] WPCC时,N-WPCC优先控制电磁转矩,主动增加发电机转速,使风力机偏移最大功率运行点,降低风能利用系数 $C_p$ ,从而降低风力机捕获的机械功率 $P_r$ ,同时也将全部或部分弃风能量转变为风力机的旋转动能,进一步减小后级电功率输出,以实现限功率的目的。

[0037] 当发电机转速接近额定转速 $\omega_n$ 时,及时触发桨距角补偿控制器,使变桨系统动作,以达到限功率目的。

[0038] N-WPCC过程中,通过主动增加风力机转速而储存的全部或部分弃风能量,能在限功率工况得到改善时(风速下降或限功率设定值提升)再转换为电能,意味着N-WPCC能在WPCC时适当提高机组发电量。

[0039] 当限功率状况得到解除或改善时,由于大型风电机组的惯性时间常数显著高于风轮叶片的惯性时间常数,桨距角迅速动作,达到最小桨距角后风机转速才开始明显调整,其动作行为与限功率时相反,说明N-WPCC在反向控制时,先桨距角,后转速,效果可逆。

[0040] 如图1所示为本发明实施案例一种变速风电机组全风速限功率综合控制方法的控制原理图,包含转速控制、转矩控制、桨距角控制和桨距角补偿控制4个控制器。其中,转速控制由基础转速和附加转速控制两部分组成,关系表达式为:

$$[0041] \quad \begin{cases} \omega_{ref} = \omega_{opt} = f(P_e) & P_e \leq P_{set} \\ \omega_{ref} = \min(\omega_{opt} + \Delta\omega, \omega_n) & P_{set} < P_e \end{cases} \quad (1)$$

[0042] 式中, $\omega_{ref}$ 为转速指令输出,在正常功率控制(OPC)时等于最佳转速参考 $\omega_{opt}$ ,WPCC时,为基础转速值(相当于最佳转速参考 $\omega_{opt}$ )上叠加一附加转速 $\Delta\omega$ 或 $\omega_n$ 中的相对较小值。

[0043] OPC时的转速参考 $\omega_{ref}$ 即为WTG正常功率控制时的全风速功率特性曲线,对应图2中曲折线ABCD,其输出功率和转速的关系为:

$$[0044] \quad \begin{cases} \omega = \omega_{min} & P_e < P_B \\ \omega = \omega_{opt} = f(P_e) & P_B \leq P_e < P_C \\ \omega = \omega_n & P_C \leq P_e \end{cases} \quad (2)$$

[0045] 桨距角补偿控制器确保机组输出功率 $P_e$ 不超过功率参考值 $P_{ref}$ , $P_{ref}$ 的切换规则为:

[0046] if ( $(\omega_g > \omega_n)$  or  $((P_{elec} - P_{set}) > \Delta P)$ )

[0047]  $P_{ref} = P_{set}$ ;

[0048] else (3)

[0049]  $P_{ref} = P_n$ ;

[0050] end

[0051] 式中,  $\omega_g$ 为发电机转速,  $\omega_h$ 为略小于 $\omega_n$ 的一高定值,  $\Delta P$ 为功率控制误差限值,  $P_n$ 为机组额定功率,  $\omega_g > \omega_h$ 和 $(P_{elec} - P_{set}) > \Delta P$ 一起,保证了只有当风力机转速已接近高速限值,或 $C_p$ 值随转速 $\omega_w$ 的上升而并不明显减小时(即 $\omega_{opt}$ 已接近额定转速 $\omega_n$ 时,风力机功率随转速的变化十分平坦),才及时触发桨距角补偿控制器,使变桨系统动作,否则,优先通过附加转速控制,达到限功率目的。同时,触发逻辑中设置一定滞回区间,防止PI调节器输出的抖动。

[0052] 附加转速控制和 $P_{ref}$ 切换控制的设计,确保了N-WPCC在T-WPCC的基础上,优化了变桨系统运行工况,并适当提高了发电量。

[0053] 结合图2和图3来具体说明。

[0054]  $P_{set} > P_{elec}$ 时,N-WPCC附加转速控制器反向截止,  $\Delta \omega = 0$ ,  $\omega_{ref} = \omega_{opt}$ ;同时,  $P_{ref} = P_n$ ,  $\theta_c = 0$ ,此时处于整个控制系统前级的转速控制器和桨距角补偿控制器控制效果与风机OPC控制时完全相同,该工况下N-WPCC控制行为与OPC控制完全相同,其全风速功率特性曲线即为图2中的ABCD曲线。

[0055] 中低风速区域,  $P_{set} < P_{elec} < P_c$ ,且 $\omega_g < \omega_n$ 时,  $\Delta \omega > 0$ ,  $\omega_{ref} > \omega_{opt}$ ,此时 $\omega_g < \omega_{ref}$ ,转差信号 $\omega_{err} < 0$ ,使转矩控制器下调转矩指令 $T_{emcmd}$ ,进而调整输出功率 $P_e$ ,而 $P_e$ 又实时反馈给转速控制器,形成一个完整的功率闭环控制系统,实现功率的准确控制;此时,桨距角控制器反向截止,  $\theta_w = 0$ ;同时,  $P_{ref} = P_n$ ,  $P_{err2} < 0$ ,  $\theta_c = 0$ ,最终的转矩角指令 $\theta_{ref} = 0$ ,变桨系统不动作。若 $P_{err1}$ 持续大于0,  $\omega_{ref}$ 将不断增大,直至达到 $\omega_n$ 的高限值,桨距角补偿控制器中的 $P_{ref} = P_{set}$ ,  $P_{err2} > 0$ ,  $\theta_c > 0$ ,  $\theta_{ref}$ 经过伺服控制系统给出实际的桨距角指令 $\theta_{cmd}$ ,最终通过转速和桨距角的共同控制将输出功率限制到指定值;此工况下的N-WPCC运行轨迹如图3中A-B-C-D所示,即先主动转速控制,然后才是桨距角控制;A-B1-C1-D1对应为T-WPCC的运行轨迹,即先桨距角控制,转速沿 $P_{opt}$ 曲线被动拉低。

[0056] 较高风速区域,  $P_c < P_{set} < P_{elec}$ ,且 $\omega_g = \omega_n$ 时,由于 $\omega_n$ 的转速限制,虽然 $\Delta \omega > 0$ ,  $\omega_{ref}$ 仍旧维持 $\omega_n$ 不变;但 $P_{ref} = P_{set}$ ,第一时间触发变桨机构动作,完成WPCC,此时,控制行为与T-WPCC相同,对应图2中的D-C段。若 $P_{set} < P_c < P_{elec}$ ,即深度限功率时,转速控制器中,虽然 $\omega_{opt} < \omega_n$ ,但由于 $\Delta \omega > 0$ ,  $\omega_{ref}$ 仍将维持 $\omega_n$ 不变,对应图2中的C-F段,而此工况下的T-WPCC运行轨迹则对应图2中D-C-B-A段曲线;可见,N-WPCC与T-WPCC的运行轨迹在 $P_e > P_c$ 时重合,说明在高风速高功率限定值时,两者控制行为完全相同。

[0057] 限功率定值上升,或实际风速下降,使限功率状况得到解除或改善时,  $P_{err1}$ 由正变负,  $\Delta \omega > 0$ 但开始减小,直至到0时截止,  $P_{err2}$ 亦由正变负,  $\theta_c > 0$ 亦开始减小,直至0;但由于大型风电组的惯性时间常数显著高于风轮叶片的惯性时间常数,桨距角迅速动作,达到最小桨距角后风机转速才开始明显调整,其动作行为与N-WPCC相反,系统运行轨迹如图3中D-C-B-A曲线所示,说明N-WPCC在反向控制时,先桨距角,后转速,效果可逆。

[0058] 图2中DC直线及ABCFGA曲线范围即为N-WPCC能实现限功率的能力范围。

[0059] 图4为某1.5MW双馈风电机组风机在OPC、T-WPCC及N-WPCC等三种控制策略下,在不同风速段(6m/s至15m/s),不同限功率设定值(400kW、800kW、1200kW、1500kW)时的行为仿真

对比,包括高中低各风速段下,风速恒定情况下的MPPT和WPCC的来回切换、限功率设定值一定情况下的风速变化等多种工况。由图可见:T-WPCC和N-WPCC均能准确的实现WPCC的功能;中小风速段时,N-WPCC能有效减少变桨机构的动作次数而电机转速却始终维持在合理的较高状态;高风速段时,两种控制策略下的功率、桨距角和转速曲线均重合,说明此时两种控制策略的动作行为完全相同;同时,风机由限功率状态转换至OPC时,N-WPCC下的风机转速逐步下降,将之前以风轮机旋转动能形式存储的一部分弃能量转换为电能输出,所以该时段风机输出功率略大于T-WPCC下的功率输出,直至多余动能释放完毕,两者转速和功率输出曲线重合;同样道理,当限功率设定值由800kW放大至1200kW时,N-WPCC下的风机输出功率能更快速的回复到其最大功率输出。

[0060] 图5为平均风速为7m/s的随机风速范围内3种功率控制策略的行为对比分析。可在,采用本发明所提N-WPCC时,风机变桨机构的动作次数和动作幅度均得到了有效降低(次数从7次下降到2次,降幅为5°至3°左右不等);电机转速普遍较高,但均在额定转速之下;输出功率在一定工况下高于T-WPCC,经测算,该场景下,电量输出能较T-WPCC多出1.6%;在330s及435s时,采用N-WPCC时的功率输出有30kW左右的超调,这是因为N-WPCC优先通过提升风轮转速来限制功率,当风轮转速接近额定值时,再触发桨距角控制,这其中的判断会导致一定量的控制滞后,但相对于1.5MW的风机额定容量而言,这2%左右的超调所带来的影响十分微小,对系统的功率控制无明显影响。

[0061] 综上所述,本发明上述各实施例的变速变桨距风电机组的限功率优化控制方法,至少可以达到以下效果:

[0062] (1)能有效减少WPCC时变桨系统的动作频率和动作幅度,提高变桨系统的使用寿命,在中低风速下时效果尤其明显;

[0063] (2)通过电磁转矩主动控制发电机转速,能充分利用机组转动惯量,WPCC时能一定程度提高发电量;

[0064] (3)控制输入为机组实时输出电功率和发电机转速,不依赖于具体的风力机气动特性及可靠性不高的实时测风数据,可用于双馈、直驱和定桨距等变速类风电机组,且无需增加额外的硬件设备,具有很好的通用性,工程实用价值较高;

[0065] (4)能有效丰富WTG的限功率技术手段,可减少限功率时WTG的关停台数和关停频率。

[0066] 最后应说明的是:以上所述仅为本发明的优选实施例而已,并不用于限制本发明,尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明,对于本领域的技术人员来说,其依然可以对前述实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分技术特征进行等同替换。凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

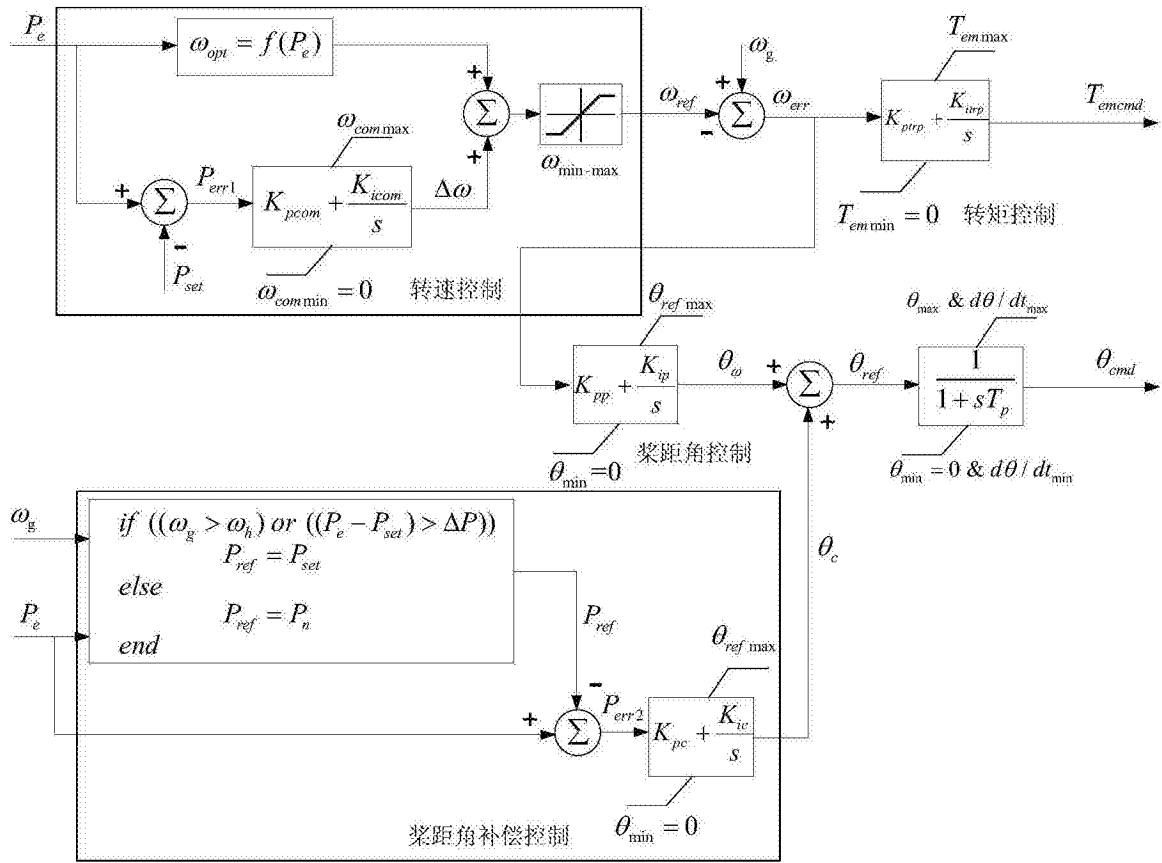


图1

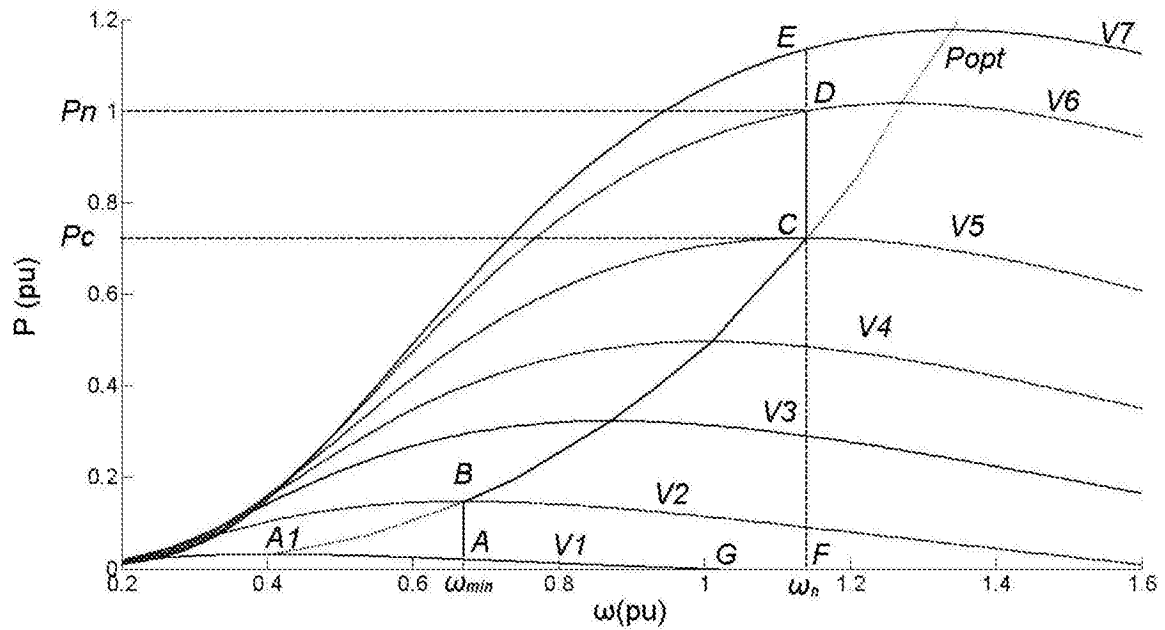


图2



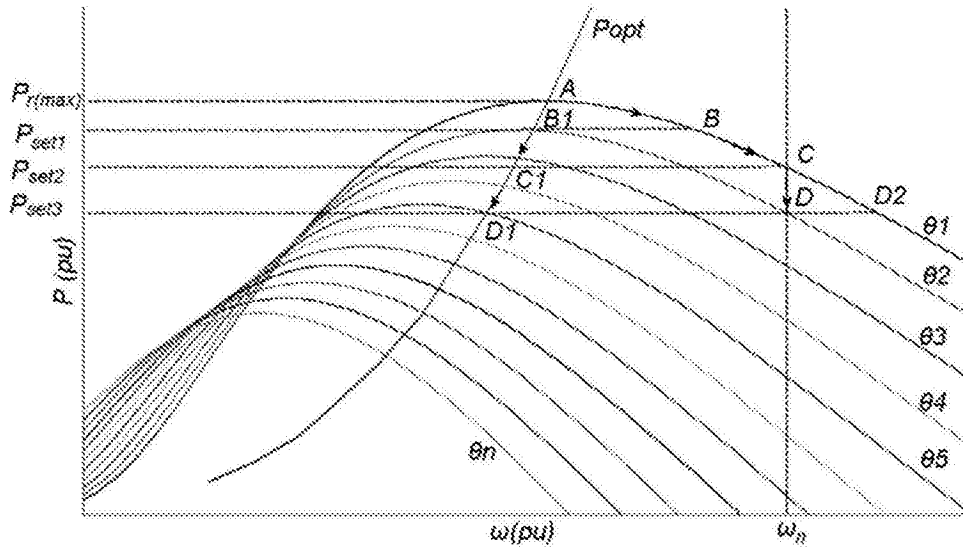


图3

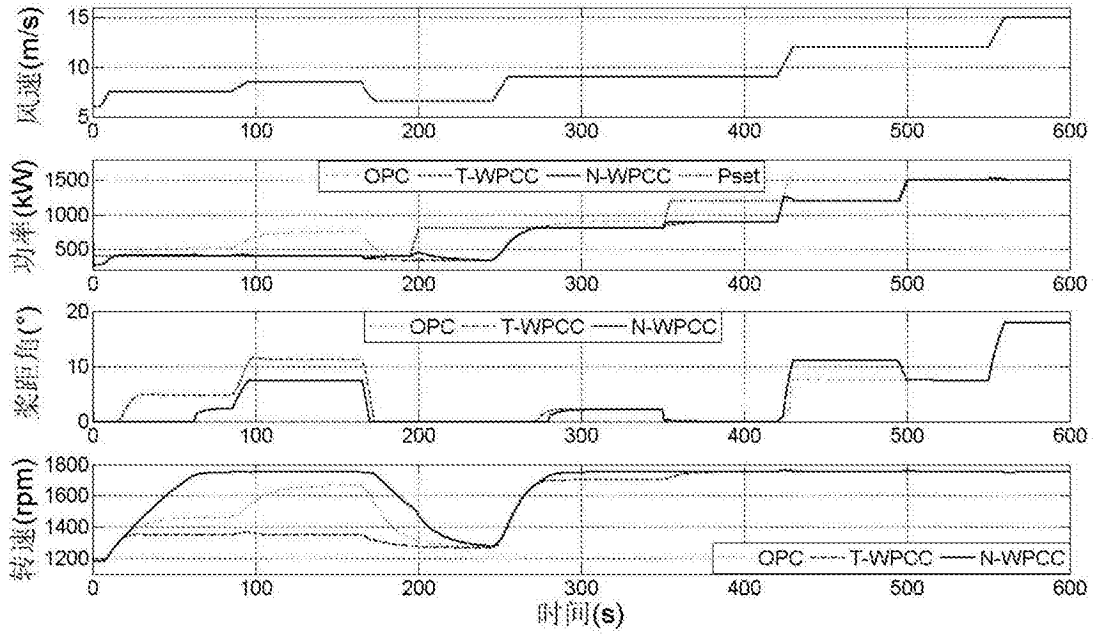


图4

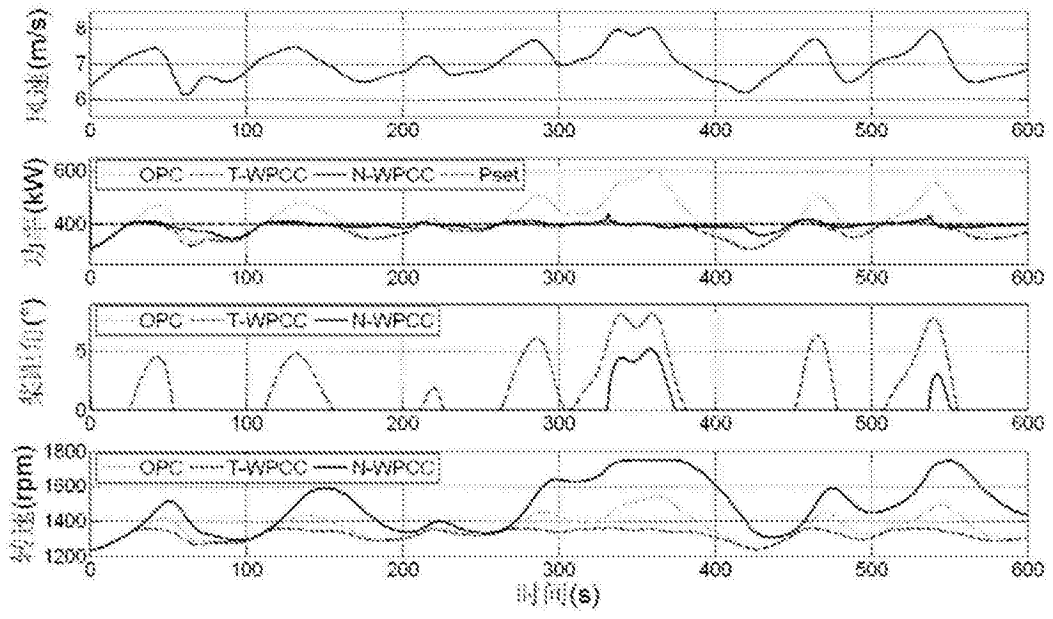


图5