



## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104467586 A

(43) 申请公布日 2015. 03. 25

(21) 申请号 201310421626. 5

(22) 申请日 2013. 09. 12

(71) 申请人 中国计量学院

地址 310018 浙江省杭州市下沙高教园区学  
源街 258 号(72) 发明人 孙冠群 陈卫民 蔡慧 李刚  
郭永洪

(51) Int. Cl.

H02P 9/14(2006. 01)

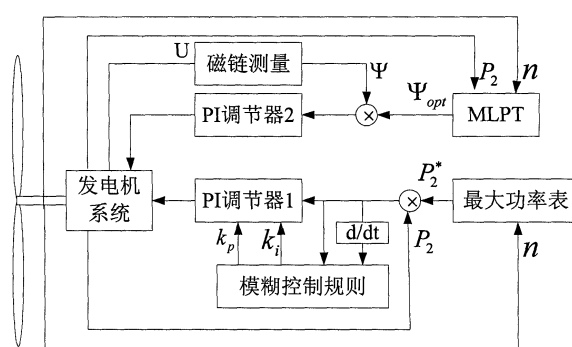
权利要求书1页 说明书6页 附图6页

## (54) 发明名称

一种变速双馈异步风力发电系统最大功率输出跟踪控制方法

## (57) 摘要

一种变速双馈异步风力发电系统最大功率输出跟踪控制方法,包括基于动态PI模糊控制的MPPT,和针对双馈异步发电机的MLPT两大部分;MPPT部分,发电机系统经由最大功率表查询获得的功率与实测的输出电功率比较,它们的误差经过动态模糊PI复合调节算法,产生控制信号给发电机系统;MLPT部分,经过MLPT数学模型分析获取的发电机最小损耗时磁链与实时磁链测量值比较,经由PI调节器2控制发电机系统。模糊算法的引入增强了系统MPPT的快速反应能力,增强了最大功率跟踪精度,MLPT从异步发电机本身角度的降损从而间接提高效率,提高功率输出能力。



1. 一种变速双馈异步风力发电系统最大功率输出跟踪控制方法,包括基于动态模糊PI控制的最大功率点跟踪方法,和针对双馈异步发电机的最小损耗点跟踪方法两大部分;其特征是,最大功率点跟踪方法部分,根据事先的大量试验数据,绘制出最大功率曲线后,编程实现最大功率表,从而任意不同发电机系统速度  $n$  对应不同的最大功率  $P_2^*$ ,实测的输出电功率  $P_2$  与  $P_2^*$  比较,它们的误差经过动态模糊PI复合调节算法,即由PI调节器1和模糊控制规则为主组成,产生控制信号给发电机系统;最小损耗点跟踪方法部分,经过最小损耗点跟踪方法的数学模型分析,结合发电机系统速度  $n$  与功率测量值  $P_2$  等实时参数和已知的参数,获取发电机最小损耗时的磁链  $\Psi_{opt}$ ,根据电压值  $U$  及其他所需已知参数获取实时磁链测量值  $\Psi$ ,然后二个磁链比较产生的误差经由PI调节器2控制发电机系统中的双馈异步发电机的影响到磁链的参数。

## 一种变速双馈异步风力发电系统最大功率输出跟踪控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及风力发电系统最大功率输出控制领域,具体涉及一种变速异步风力发电系统的最大功率输出跟踪控制方法。

### 背景技术

[0002] 最大功率点跟踪,简称:MPPT;最小损耗点跟踪,简称 MLPT。

[0003] 变速双馈异步风力发电系统是当前陆地风电场大中型发电装置的重要型式。不同风速下,风力机转速与功率(或转矩)特性上具备最大功率(或转矩)点,也就是说任意风速下,存在最大功率(转矩)输出点。使用一定的方法寻求运行中最大功率点的方法有很多种,比较成熟的有最佳叶尖速比法、爬山搜索法、功率信号反馈法。最佳叶尖速比法是最直接的控制方法,但也是最不准确的方法,实际中采用较少;爬山搜索法虽然无需测量风速、也无需事先测绘功率曲线,但跟踪时间长、扰动问题始终无法克服,尤其风速变化较快时,会引起系统震荡。功率信号反馈法需要事先试验获得最大功率曲线,并编程做成查询表,根据实时的风力机的速度查出对应的最大输出功率作为给定值,然后与发电机实际输出功率反馈值比较得到误差量,经过调节器对风力机进行控制,从而实现对最大功率点的捕获。

[0004] 基于功率信号反馈法最大功率点跟踪中,单独的 PI 调节器即常规的调节方法应用较多,毋庸置疑,PI 调节方法简单、稳定性好。但是,当外界风速变化过大过快时,单纯采用固定增益参数的 PI 调节则显得比较费劲,主要表现为反应慢、时间长,从而会有较大超调,稳定性也受到挑战,最终在快速变化的风速面前跟踪效果不佳。

[0005] 异步发电机的可变损耗主要包含定转子铜耗与铁耗,根据等效电路及其数学模型,可变损耗存在最小损耗点。电机损耗的降低,势必也会增强电机功率的输出能力。

### 发明内容

[0006] 根据以上提出的问题及背景趋势,本发明提出了一种动态模糊 PI 调节的 MPPT 技术,加上一种 MLPT 技术的综合提高变速双馈异步风力发电系统最大功率输出能力的方法。其技术方案为:

[0007] 一种变速双馈异步风力发电系统最大功率输出跟踪控制方法,包括基于动态模糊 PI 控制的 MPPT,和针对双馈异步发电机的 MLPT 两大部分;MPPT 部分,根据事先的大量试验数据,绘制出最大功率曲线后,编程实现最大功率表,从而任意不同发电机系统速度  $n$  对应不同的最大功率  $P_2^*$ ,实测的输出电功率  $P_2$  与  $P_2^*$  比较,它们的误差经过动态模糊 PI 复合调节算法,即由 PI 调节器 1 和模糊控制规则为主组成,产生控制信号给发电机系统;MLPT 与 MPPT 相对独立,经过 MLPT 数学模型分析,结合发电机系统速度  $n$  与功率测量值  $P_2$  等实时参数和已知的参数,获取发电机最小损耗时的磁链  $\Psi_{opt}$ ,根据电压值  $U$  及其他所需已知参数获取实时磁链测量值  $\Psi$ ,然后二个磁链比较产生的误差经由 PI 调节器 2 控制发电机系统中的双馈异步发电机的影响到磁链的参数。

[0008] 本发明的技术效果主要有：

变速风力发电系统的 MPPT 方法在其系统运行中具有重要意义,可明显增强电能输出量。本发明针对增强电能输出能力,从两个方面采取措施,一则在传统功率信号反馈法的 MPPT 基础上,提出采用模糊 PI 算法处理功率反馈值与给定值的误差,根据功率的实测值与给定最大值比较得到的误差大小,利用模糊算法调整 PI 的增益参数,在保证稳定性前提下,增强调节的快速性,尤其是在两个功率误差较大时,引入模糊算法能加快 MPPT 追踪速度;二则根据异步风力发电机损耗数学模型进行 MLPT,最小损耗点磁链与实时计算磁链比较,误差信号经 PI 调节控制发电机系统。

风速往往是不稳定的、善变的,尤其快速的风速变化,势必要求能快速的调整,引入模糊算法后,当外界风速变化越大时,通过模糊在线调整 PI 参数,加大调整力度和速度,而外界风速变化不大时,则调整 PI 参数较小。而模糊算法整定 PI 增益参数的效果颇好,快速反应的动态特性也保证了功率跟踪的精确性。MLPT 的引入从发电机本身角度提高了它的效率,从而增加了功率输出能力。

## 附图说明

[0009] 图 1 所示为本发明的输出功率-转速曲线图。

[0010] 图 2 所示为本发明的控制原理图。

[0011] 图 3 所示为本发明的模糊控制隶属度函数图。

[0012] 图 4 所示为本发明的变速双馈异步风力发电机等效电路。

[0013] 图 5 所示为本发明的现有技术与模糊 PI 控制下的输出功率变化。

[0014] 图 6 所示为本发明的基于模糊 PI 的 MPPT 与 MLPT 下的几个参量变化。其中:图 6(a) 风速变化;图 6(b) 为发电机转速变化;图 6(c) 为 MLPT 实施后转子磁链变化;图 6(d) 为发电机输出功率变化。

[0015] 图 7 所示为本发明在阶跃风速情况下主要输出参量的变化。

[0016] 图 8 所示为本发明在正弦风速情况下主要输出参量的变化。

## 具体实施方式

[0017] 下面结合附图对本发明的技术方案进行详细说明：

[0018] 风力发电系统中存在如附图 1 所示的功率-转速曲线,图中  $v_1-v_4$  为风速,在不同风速下有不同的曲线,但共同点是都存在最大功率点,将这些不同风速的最大功率点连起来,就绘制出了一条最大功率曲线,如附图 1 中的虚线所示,附图 1 中横坐标为风力(发电)机转速,如果采集到风力机的速度,则根据该曲线就可以查到对应的最大功率点。

[0019] 附图 2 所示为本发明的总控制原理简图,附图 2 中的最大功率表,是根据事先的大量试验数据,绘制出如附图 1 所示的最大功率曲线后,再编程实现最大功率表,任意不同速度  $n$  对应不同的最大功率  $P_2^*$ ,然后实测的输出电功率  $P_2$  与  $P_2^*$  比较,它们的误差经过模糊 PI 复合调节算法,即如附图 2 所示的 PI 调节器 1 和模糊控制规则为主组成,最后产生控制信号给发电机系统,以上为 MPPT 过程。发电机系统中包含变速异步发电机、控制器、检测传感装置、变速齿轮装置等。

[0020] MLPT 与 MPPT 相对独立,首先需要进行 MLPT 数学模型分析,再根据发电机速度  $n$  与

功率测量值  $P_2$  等实时参数和已知的发电机参数, 获取发电机最小损耗时的磁链  $\Psi_{opt}$ , 根据电压值  $U$  及其他所需已知参数获取实时磁链测量值  $\Psi$ , 然后二者比较产生的误差经由 PI 调节器 2 控制发电机系统。

[0021] MLPT 与 MPPT 的运算控制信号均给发电机系统中的控制器, 在实施中, 当以上二者发生冲突时, 如不得不调节电流改变磁链以满足 MLPT 时, 若同时反向影响到 MPPT 的实现, 则控制器自动对 MPPT 优先。

[0022] 基于模糊 PI 调节器的 MPPT 设计:

[0023] 虽然比例 + 积分 (PI) 控制器可以使系统在进入稳态后无稳态误差, 但传统的 PI 不能根据负载变化和系统特性变化调节控制器参数, 因此本文提出采用模糊 PI 来满足系统的要求, 模糊 PI 是在 PI 算法的基础上, 通过计算当前的系统误差和误差变化率, 利用模糊规则进行模糊推理, 查询模糊规则对 PI 参数进行在线调整。

[0024] 模糊 PI 参数的在线调整克服了参数在跟踪的整个过程固定不变的特点, 适应性更强, 其算法为:  $\Delta k_p = f_1(e, ec)$ ;  $\Delta k_i = f_2(e, ec)$ ;  $k_p = k_{p0} + \Delta k_p$ ;  $k_i = k_{i0} + \Delta k_i$ 。其中:  $\Delta k_p$  和  $\Delta k_i$  分别为偏差  $e$  和偏差变化率  $ec$  对应于模糊规则表中的输出值;  $k_{p0}$  和  $k_{i0}$  分别为比例系数和积分系数的初始值。

[0025] 模糊规则:

[0026] 从系统的稳定性、超调量和稳态精度等方面考虑, 综合  $\Delta k_p$  和  $\Delta k_i$  对系统的不同作用以及二者之间的相互作用关系建立的模糊规则如表 1 和表 2。

[0027] 表 1  $\Delta k_i$  模糊规则表

[0028]

$\Delta k_i$ ec e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PN
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	PS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	NB
PN	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

[0029] 表 2  $\Delta k_p$  模糊规则表

[0030]

$\Delta k_i$ \ $ec$ $e$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PN
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PN	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

[0031] 隶属度函数：

[0032] 系统的误差  $e$  和误差变化率  $ec$  变化范围定义为模糊集上的论域  $e, ec = [-5 \ 5]$ ，其模糊子集  $e, ec = \{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ ； $\Delta k_i$  和  $\Delta k_p$  的论域分别为  $[-2 \ 2], [-4.5 \ 4.5]$ ，两者的模糊子集均为  $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ 。 $e$  与  $ec$ 、 $\Delta k_i$  和  $\Delta k_p$  的隶属度函数如附图 3 所示。

[0033] 下面进行基于解析方法的 MLPT 设计：

[0034] 根据附图 2 所示，MLPT 方法涉及两部分内容，即损耗最小化的给定值，以及实时的测量值，参数的测量基础上进行解析计算获得测量值。

[0035] 首先分析异步发电机损耗最小化数学模型：

[0036] 异步发电机的损耗最小化即为其可变损耗的最小化，即定转子的铜耗和铁耗之和，异步发电机的总损耗为输入机械功率减去输出电功率，除可变损耗之外的空载损耗、杂散损耗等近似为不变损耗，可变损耗加不变损耗为总损耗。附图 4 为异步发电机等效电路。

[0037] 总损耗：

$$[0038] \quad P_{LOSS} = P_1 - P_2 \quad (1)$$

[0039] 式 (1) 中  $P_1$  为输入发电机的机械功率， $P_2$  为发电机的输出电功率，总损耗主要由可变损耗即铜耗和铁耗决定，损耗的降低自然是通过降低可变损耗实现。

[0040] 利用异步电机 dq 模型，列写出异步发电机总损耗公式为：

$$P_{LOSS} = \frac{R_1 + R_m}{L_m^2 + a^2} \Psi^2 + \left\{ \frac{2aR_1}{L_m^2 + a^2} \right\} \frac{T_e}{P}$$

$$+ \left\{ \frac{R_1(L_2'^2 + a^2) + L_2'^2 R_m}{M^2 + a^2} + R_2' / s \right\} \frac{T_e^2}{P^2} \Psi^{-2} \quad (2)$$

[0042] 式 (2) 中  $a = R_m / \Omega$ ， $\Omega$  为发电机转子角速度， $\text{rad} / \text{s}$ ； $L_m$  为励磁电感，H； $\Psi$  为发电机转子磁链，Wb； $T_e$  为发电机输入机械转矩，N·m； $L_2'$  为发电机转子漏感，H； $M$  为发电机相数； $P$  为电磁功率，W。

[0043] 式 (2) 中各参量可根据系统反馈的参量信息进行解析计算得到，现假设转子磁链  $\Psi$  相对独立，让总损耗对转子磁链求导，即可得到发电机最小损耗（最大效率）条件为：

$$[0044] \quad \Psi_{opt} = \sqrt{\frac{R_1(L_2'^2 + a^2) + R_m L_2'^2 + R_2' / s(L_m^2 + a^2)}{R_1 + R_m}} \sqrt{\frac{T_e}{P}} \quad (3)$$

[0045] 异步发电机磁链检测数学模型：

[0046] 上面进行了 MLPT 方法的给定磁链推导，根据相关参数测量，实时的转子磁链测算应用到如下的数学模型：

[0047] 异步发电机定转子均取电动机惯例，可得双馈异步风力发电机相关的数学模型：

$$[0048] \quad \dot{U}_1 = R_1 \dot{I}_1 + p\dot{\Psi}_1 + j\omega_e \dot{\Psi}_1 \quad (4)$$

$$[0049] \quad \dot{U}_2 = R_2 \dot{I}_2 + p\dot{\Psi} + j\omega_d \dot{\Psi} \quad (5)$$

[0050] 式 (4) 和式 (5) 中： $\dot{U}_1$  和  $\dot{U}_2$  为定转子电压矢量； $p$  为微分算子； $\omega_e$  和  $\omega_d$  分别为同步角频率和滑差频率； $\dot{\Psi}_1$  和  $\dot{\Psi}$  为定转子磁链矢量。

[0051] 本实施例实验对象的额定电压 160V，额定电流 14A，极对数 2， $R_1=1.1 \Omega$ ， $R_2=0.8 \Omega$ ， $L_m=0.08\text{mH}$ ， $L_1=0.09\text{mH}$ ， $L_2=0.09\text{mH}$  等。

[0052] 利用 MATLAB / SIMULINK 及控制系统工具箱进行仿真分析。首先仿真比较了定参数常规 PI 调节与模糊 PI 调节两种方式下的输出功率情况，如附图 5 所示。表 3 比较了相同前提下的动态与稳态性能数据。

[0053] 表 3 不同控制模式控制性能对比

控制方式	最大偏差量	调整时间	稳态精度
	$C_{\max} / \%$	$t_c / s$	$\sigma / \%$
常规 PI	20.6	2.08	99.20
模糊 PI	3.4	0.57	99.75

[0055] 可见，模糊 PI 较常规 PI 具有能明显改善系统的动态性能和稳态特性，尤其是动态特性，大幅度减小了系统超调量和系统的调节时间。在风速频繁变化工况下，模糊 PI 的快速收敛性更能胜任，否则快速的风速变化会使得尚未调控到位就又要进入新的调节中，系统控制精度会明显降低。

[0056] 接下来进行正弦风速变化趋势下的 MPPT 和 MLPT 跟踪控制仿真分析，如附图 6 所示为仿真结果。

[0057] 根据附图 6 所示，在第 6 秒时，进入基于模糊 PI 的 MPPT 控制，附图 6(b) 的发电机速度跟随风速做正弦变化，从附图 6(d) 可见发电机输出功率的最大值也增大，最小值几乎未变，意味着平均功率增加。接着当第 11 秒增加本文所述 MLPT 调节方法时，如附图 6(c) 所示，转子磁链跟随风速、发电机转速变化并做正弦波动，在切入 MLPT 瞬间由于冲击，发电机输出功率也有冲击，随后稳定，从附图 6(d) 可见，此时除保持 MPPT 的效果外，输出功率最小值增大、最大值略有增加，从而平均输出功率进一步增加。仿真结果非常明显的得到了在 MPPT 和 MLPT 基础上，输出功率明显增加，在单独投入模糊 PI 调节的 MPPT 时，输出功率增幅为 31%，投入所述 MLPT 算法后，增幅则超过 35%。

[0058] 实施例根据常见的两种风速变化情况（风速瞬变即阶跃情况、类似正弦变化情况两种），也分别进行了实验验证，测试记录的输出结果为发电机转速和电磁转矩两个参数。基于模糊 PI 的 MPPT 与 MLPT 的共同作用。附图 7 为风速阶跃变化的结果，附图 8 为风速正

弦变化时的结果。

[0059] 附图 7 所示为风速阶跃工况下的发电机转速  $n$  和电磁转矩  $T_e$  的跟踪结果, 图中  $n_1$ 、 $T_{e1}$  为常规方法的结果,  $n_2$ 、 $T_{e2}$  为新方案之后的结果。风速先从  $7\text{m/s}$  阶跃到  $10\text{m/s}$ , 之后再由  $10\text{m/s}$  阶跃回  $7\text{m/s}$ 。由附图 7 中可见, 当风速阶跃上升时, 采用新方案之后的电磁转矩动态性能提高, 甚至出现掉落, 相比常规 MPPT 方法时加速将更快, 需要更短的时间就能达到新的功率运行点; 当风速阶跃下降时, 电磁转矩的动态响应同样迅速, 它使得系统加快减速, 以便更短时间内达到新的运行点。此外, 从附图 7 中也可以看出各处跟踪时间上, 新方案所需时间更短, 从大约  $2\text{s}$  缩短为不到  $1\text{s}$ 。

[0060] 附图 8 所示为风速近似正弦工况下的发电机转速  $n$  和电磁转矩  $T_e$  的跟踪结果, 图内各参数与附图 7 意义相同。从附图 8 中依然可见与附图 7 同样的跟踪效果, 新方案跟踪动态反应快, 更短时间到达新运行点, 从而新方案得到的平均功率值相对更大, 实时的运行点平均更靠近跟踪的最大功率点。



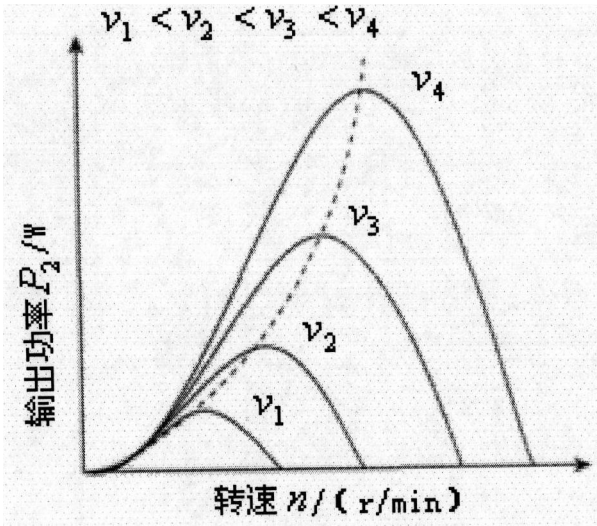


图 1

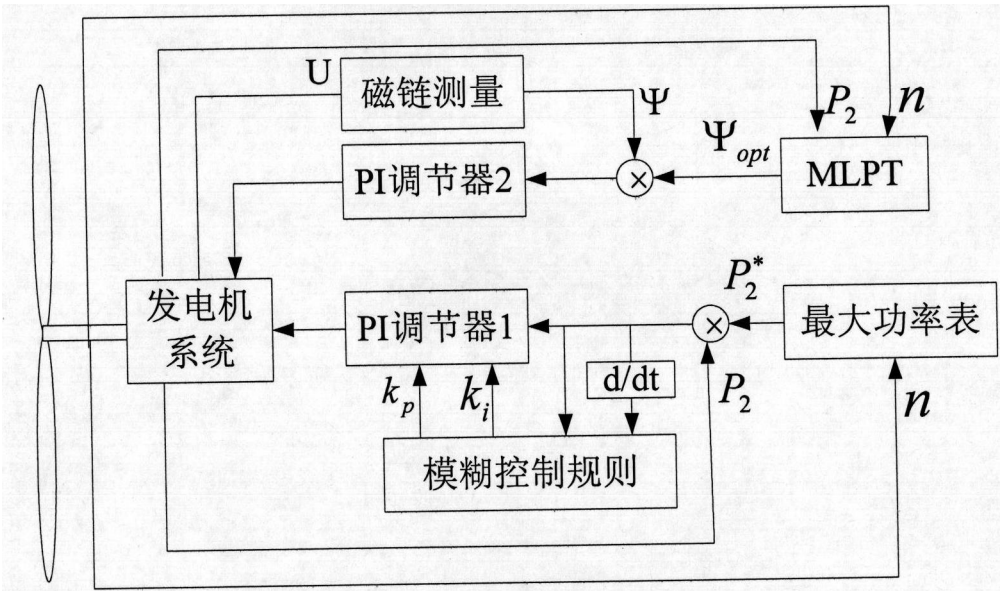
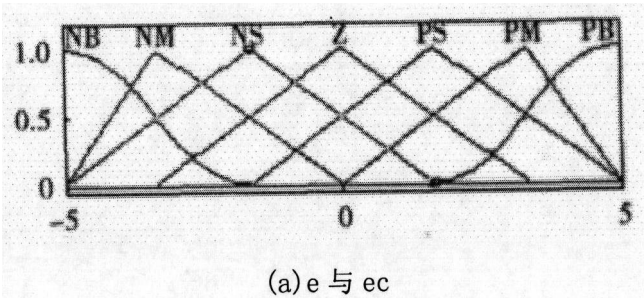


图 2



(a) e 与 ec

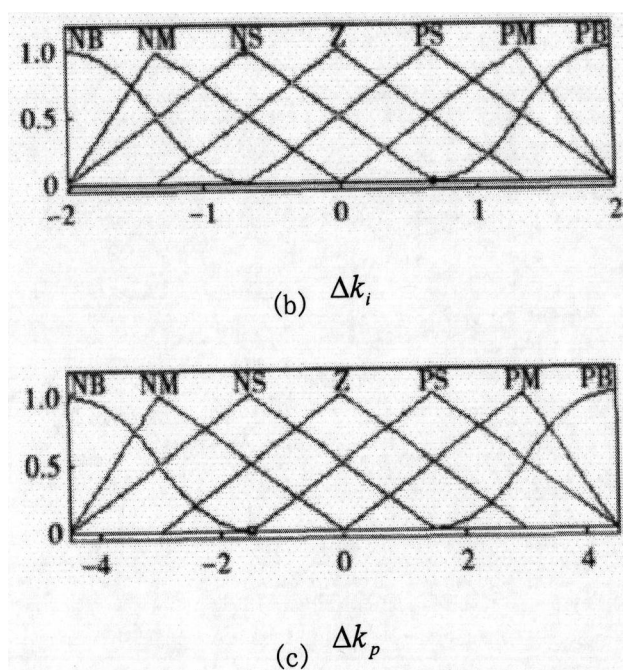


图 3

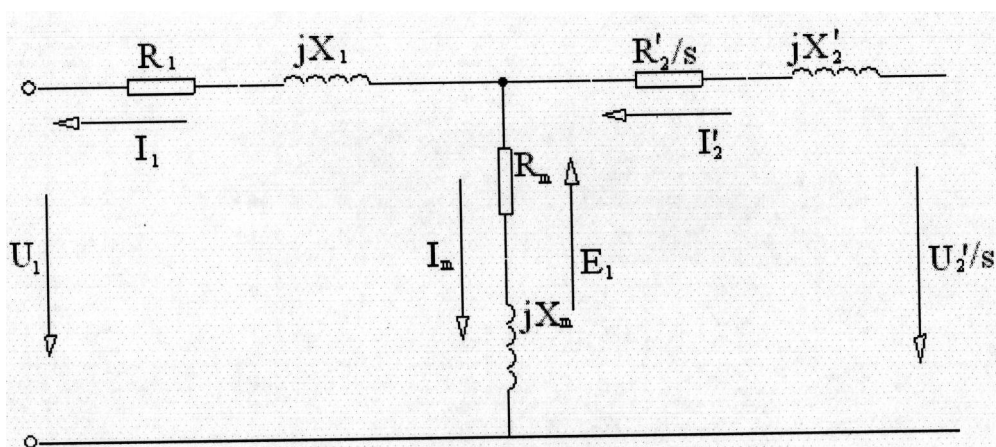


图 4

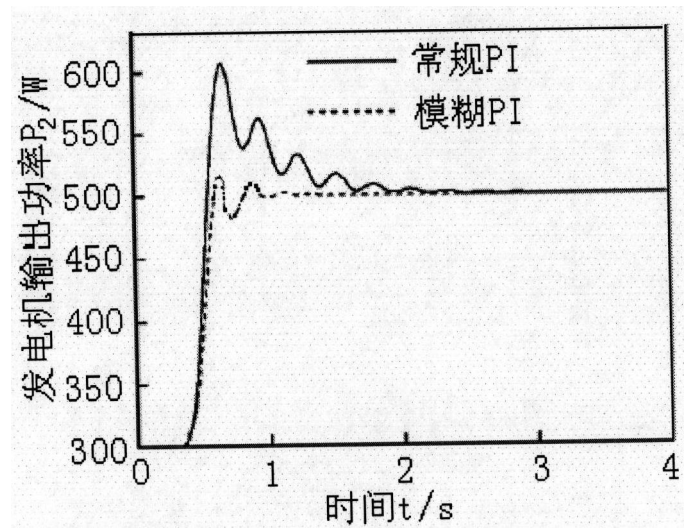
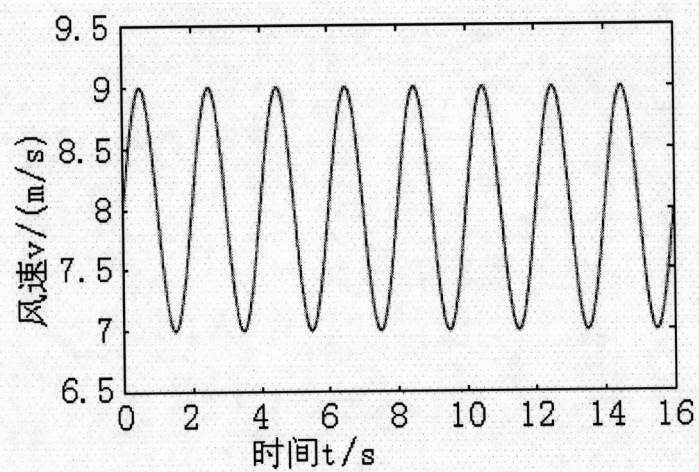
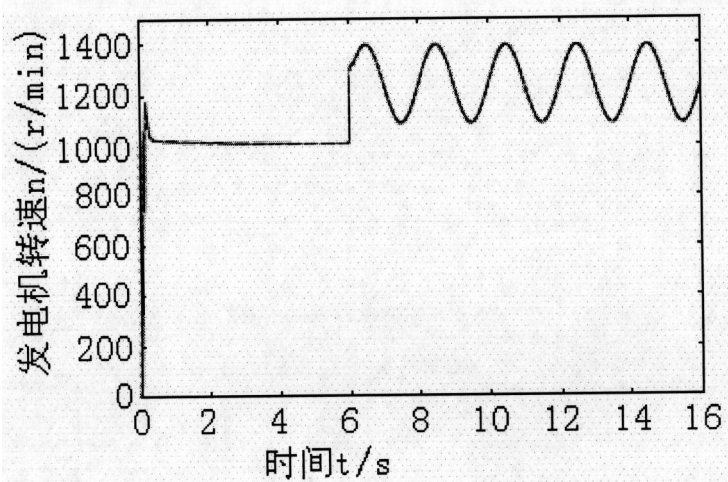


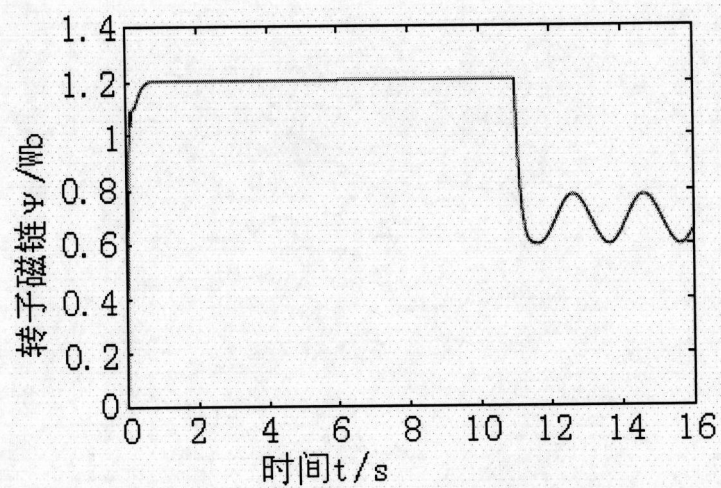
图 5



(a)



(b)



(c)

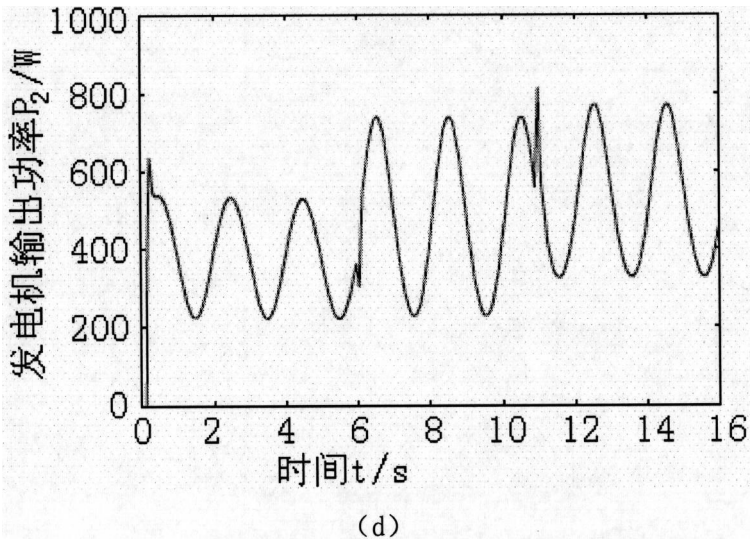


图 6

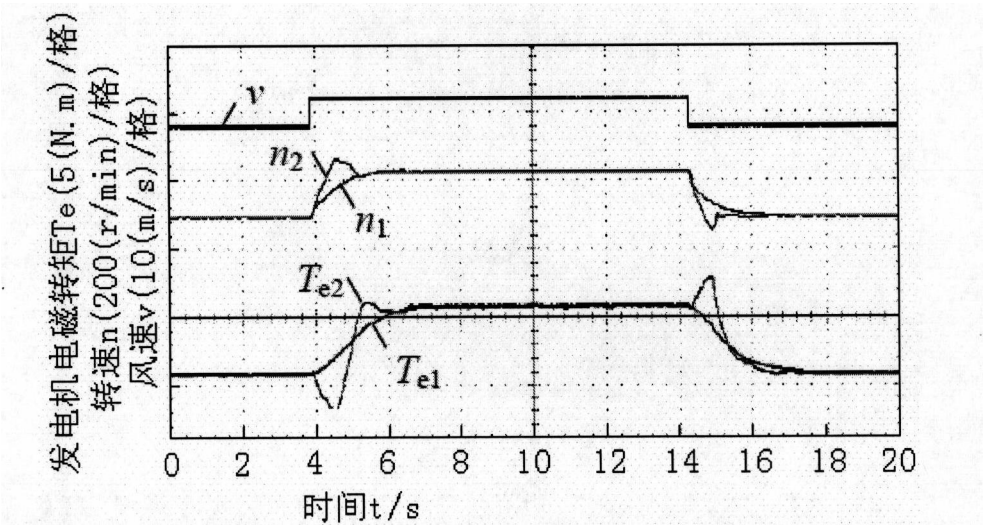


图 7

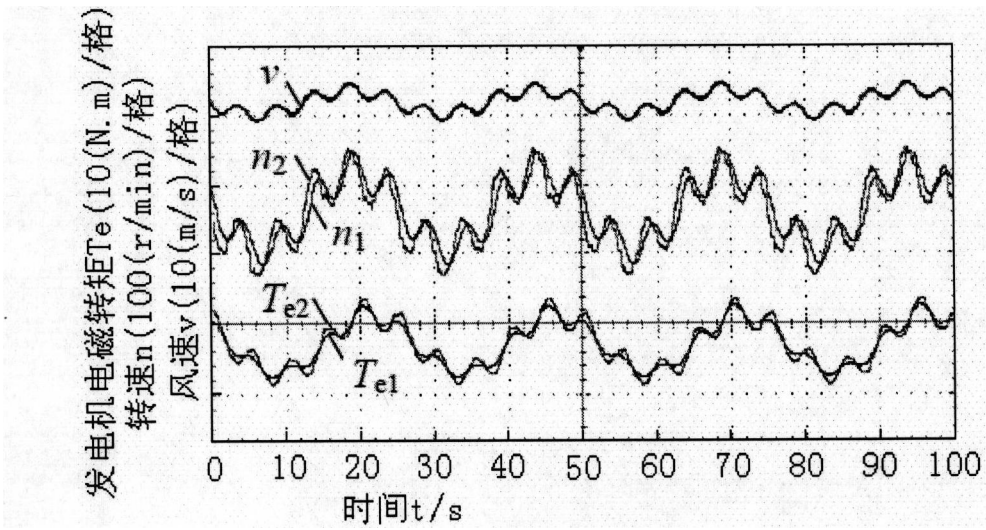


图 8