

(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102332727 B

(45) 授权公告日 2013. 12. 04

(21) 申请号 201110289529. 6

(22) 申请日 2011. 09. 26

(73) 专利权人 重庆大学

地址 400044 重庆市沙坪坝区沙正街 174 号

(72) 发明人 姚骏 熊倩 廖勇 陈西寅

夏先锋

(74) 专利代理机构 重庆博凯知识产权代理有限公司

公司 50212

代理人 李海华

(51) Int. Cl.

H02J 3/38(2006. 01)

H02J 3/28(2006. 01)

H02P 21/14(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 101090201 A, 2007. 12. 19, 全文.

WO 2011/063582 A1, 2011. 06. 03, 全文.

王成亮等. 飞轮储能电机在风力发电系统中

的应用. 《新能源与可再生能源发电》. 2009, 全文.

姚骏等. 电网电压不平衡时永磁直驱风电机组的控制策略. 《电力系统保护与控制》. 2011, 第 39 卷 (第 14 期), 全文.

陈习坤等. 新型飞轮储能电池在独立运行式风力发电系统中的应用研究. 《节能》. 2005, 全文.

审查员 张震

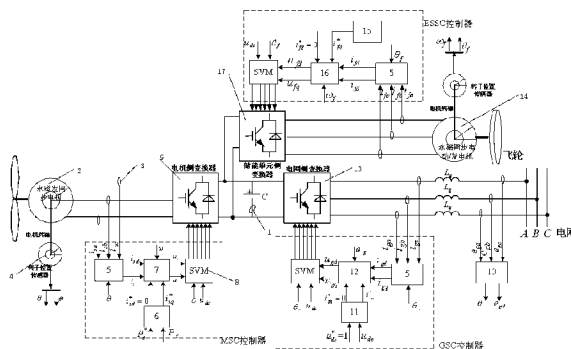
权利要求书3页 说明书8页 附图6页

(54) 发明名称

一种利用直流侧飞轮储能单元平滑永磁直驱风力发电系统输出有功功率的方法

(57) 摘要

本发明公开了一种利用直流侧飞轮储能单元平滑永磁直驱风力发电系统输出有功功率的方法, 本方法同时包含对电机侧变换器的控制、电网侧变换器的控制以及储能单元侧变换器的控制. 通过对电机侧变换器、电网侧变换器以及储能单元侧变换器的协调控制, 使风电机组能够在风速波动情况下亦能产生较为平滑的有功输出, 满足系统调频和调压等运行需求. 其效果主要有: 1. 在功率平滑控制的要求下, 亦实现了最大风能跟踪控制. 2. 平滑了网侧有功功率, 提高了电能质量, 改善了风电系统并网运行特性.



1. 一种利用直流侧飞轮储能单元平滑永磁直驱风力发电系统输出有功功率的方法,其特征在于,本方法同时包含对电机侧变换器的控制、电网侧变换器的控制以及储能单元侧变换器的控制,各变换器的控制分别为:

(A) 电机侧变换器的控制步骤为:

A1) 利用电压霍尔传感器测量直流链电容电压 u_{dc} ;

A2) 利用电流霍尔传感器采集永磁同步发电机的定子电流信号,永磁同步发电机的三相定子电流信号分别为 i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} ;

A3) 利用转子位置传感器检测发电机转子位置 θ 及转速 ω ,根据 θ 和 ω 计算得到永磁同步发电机转子电角速度 $\omega_s = p_s \omega$ 及转子电角度 $\theta_s = p_s \theta$; p_s 为发电机极对数;

A4) 利用采集的三相定子电流和转子位置 θ 实现坐标变换,将静止的三相 abc 坐标系变换到 dq 同步旋转坐标轴系,采用恒功率变换,变换式为:

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos(\theta_s - 120^\circ) & \cos(\theta_s - 240^\circ) \\ \sin \theta_s & \sin(\theta_s - 120^\circ) & \sin(\theta_s - 240^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}$$

A5) 采用功率外环的闭环控制方式,控制发电机实现最大风能跟踪;

A6) 采用转子磁场定向的矢量控制方式,通过 d、q 轴给定电流 i_{sd}^* 、 i_{sq}^* 和恒功率变换所得的 d、q 轴实际电流 i_{sd} 、 i_{sq} ,采用交叉耦合控制方式得到 d、q 轴控制电压 u_{sd} 和 u_{sq} ,其控制方程为:

$$\begin{cases} u_{sd} = [K_{p1}(\tau_{i1}s + 1) / \tau_{i1}s](i_{sd}^* - i_{sd}) - p_s \omega L_{sq} i_{sq} \\ u_{sq} = [K_{p2}(\tau_{i2}s + 1) / \tau_{i2}s](i_{sq}^* - i_{sq}) + p_s \omega L_{sd} i_{sd} + \omega \psi_s \end{cases}$$

其中: K_{p1} 、 τ_{i1} 、 K_{p2} 、 τ_{i2} 分别为定子 d、q 轴电流调节环的 PI 参数; L_{sd} 、 L_{sq} 分别为定子 d、q 轴电感; ψ_s 为转子永磁体磁链;

A7) 通过电压和电流计算发电机输出有功功率 P_e , $P_e = u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}$;

A8) 通过控制电压再结合转子位置角 θ 和直流链电压 u_{dc} 经空间矢量调制 SVPWM,得到电机侧变换器的 PWM 驱动信号以控制发电机;

(B) 电网侧变换器的控制步骤为:

B1) 利用电压霍尔传感器测量三相电网电压 e_{ga}, e_{gb}, e_{gc} ;

B2) 利用电流霍尔传感器采集三相电网电流信号 i_{ga}, i_{gb}, i_{gc} ;

B3) 利用采集的三相电网电压信号,将静止三相 abc 坐标系变换到静止两相 $\alpha\beta$ 坐标轴系,采用恒功率变换得到 $\alpha\beta$ 轴系下的电压 e_α, e_β ,变换式为:

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{4}} & -\sqrt{\frac{3}{4}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{ga} \\ e_{gb} \\ e_{gc} \end{bmatrix}$$

采用电网电压定向得到电网电压 d 轴分量 e_{gd} 和电网电角度 θ_g ,此时电网电压 q 轴分量 e_{gq} 为零,其计算式为:

$$e_{gd} = \sqrt{e_{\alpha}^2 + e_{\beta}^2}, \quad \theta_g = \arctan \frac{e_{\beta}}{e_{\alpha}}$$

B4) 利用采集的三相电网电流和计算的电网电角度 θ_g 实现坐标变换, 将静止三相 abc 坐标系变换到 dq 同步旋转坐标轴系, 采用恒功率变换的变换式为:

$$\begin{bmatrix} i_{gd} \\ i_{gq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_g & \cos(\theta_g - 120^\circ) & \cos(\theta_g - 240^\circ) \\ -\sin \theta_g & -\sin(\theta_g - 120^\circ) & -\sin(\theta_g - 240^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix}$$

B5) 采用电压外环的闭环控制方式稳定直流链电压; 以反映变换器瞬时功率变化情况的 $P_e/e_{gd} + P_f/e_{gd}$ 作为前馈补偿量, 与以额定直流链电压 u_{dc}^* 为给定值的电压 PI 控制, 一起构成电网侧变换器的 d 轴电流给定值; P_f 为储能单元功率;

B6) 采用电网电压定向的矢量控制方式, 通过 d、q 轴电流给定 i_{gd}^* 、 i_{gq}^* 以及恒功率变换所得的 d、q 轴实际电流 i_{gd} 、 i_{gq} , 采用交叉耦合控制方式得 d、q 轴控制电压 u_{gd} 和 u_{gq} , 其控制方程为:

$$\begin{cases} u_{gd} = [K_{p3}(\tau_{i3}s + 1) / \tau_{i3}s](i_{gd}^* - i_{gd}) + \omega_g L_g i_{gq} + e_{gd} \\ u_{gq} = [K_{p4}(\tau_{i4}s + 1) / \tau_{i4}s](i_{gq}^* - i_{gq}) - \omega_g L_g i_{gd} \end{cases}$$

其中: K_{p3} 、 τ_{i3} 、 K_{p4} 、 τ_{i4} 分别为 d、q 轴电流的 PI 参数; L_g 为网侧变换器进线电感;

B7) 通过坐标变换所得的电压和电流计算并网功率 P_g , $P_g = e_{gd}i_{gd} + e_{gq}i_{gq}$;

B8) 通过控制电压结合电网电角度 θ_g 和直流链电压 u_{dc} 经空间矢量调制 SVPWM 得到电网侧变换器的 PWM 驱动信号;

(C) 储能单元变换器的控制步骤为:

C1) 利用电流霍尔传感器采集永磁同步发电 / 电动机的定子电流信号, 三相定子电流信号为 i_{fa} , i_{fb} , i_{fc} ;

C2) 利用转子位置传感器检测电机转子位置 θ_f^* 及转速 ω_f , 根据 θ_f^* 和 ω_f 计算得到永磁同步电机转子电角速度 $p_f \omega_f$ 及转子电角度 $\theta_f = p_f \theta_f^*$; p_f 为永磁同步飞轮驱动电机极对数;

C3) 利用采集的三相定子电流和转子位置 θ_f^* 实现坐标变换, 将静止三相 abc 坐标系变换到 dq 同步旋转坐标轴系, 采用恒功率变换的变换式为:

$$\begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_f & \cos(\theta_f - 120^\circ) & \cos(\theta_f - 240^\circ) \\ \sin \theta_f & \sin(\theta_f - 120^\circ) & \sin(\theta_f - 240^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix}$$

C4) 利用具有不同截止频率的低通滤波环节来构造功率平滑指令, 将电网侧输出有功功率 P_g 分别经两个一阶低通滤波器滤波后作差作为飞轮电机的功率给定, 表示为:

$$P_f^* = P_g \left(\frac{\omega_1}{s + \omega_1} - \frac{\omega_2}{s + \omega_2} \right);$$

其中: ω_1 、 ω_2 分别为两一阶低通滤波器的截止角频率; P_f^* 为飞轮电机的功率给定;

C5) 采用转子磁场定向的矢量控制方式, 通过 d、q 轴电流给定 i_{fd}^* 、 i_{fq}^* 以及恒功率变换所

得的 d、q 轴实际电流 i_{fd} 、 i_{fq} ，采用交叉耦合控制方式得 d、q 轴控制电压 u_{fd} 和 u_{fq} ，控制方程为：

$$\begin{cases} u_{fd} = [K_{p5}(\tau_{i5}s + 1) / \tau_{i5}s](i_{fd}^* - i_{fd}) - p_f \omega_f L_{fq} i_{fq} \\ u_{fq} = [K_{p6}(\tau_{i6}s + 1) / \tau_{i6}s](i_{fq}^* - i_{fq}) + p_f \omega_f L_{fd} i_{fd} + \omega_f \psi_f \end{cases}$$

其中： K_{p5} 、 τ_{i5} 、 K_{p6} 、 τ_{i6} 分别为定子 d、q 轴电流的 PI 输出； L_{fd} 、 L_{fq} 分别为定子 d、q 轴电感； ψ_f 为转子永磁体磁链；

C6) 通过电压和电流计算储能单元功率 P_f ， $P_f = u_{fd} i_{fd} + u_{fq} i_{fq}$ ；

C7) 通过控制电压再结合转子位置角 θ_f 和直流链电压 u_{dc} 经空间矢量调制 SVPWM 得储能单元侧变换器的 PWM 驱动信号以控制电机；

C8) 在电机加速到最高转速时，切换电机的外环工作模式，将功率 / 电流闭环控制模式切换为转速 / 电流闭环控制模式，转速给定为飞轮电机额定转速；该过程持续至飞轮电机获得减速信号时，重新切换为功率 / 电流闭环控制模式；

C9) 在飞轮电机连续减速至零时，将转速外环给定值设定为零，控制电机转速为零，采用转速 / 电流闭环控制实现飞轮电机在零速下运行，直至要求飞轮电机重新进入加速状态，切换为功率 / 电流闭环控制模式。

一种利用直流侧飞轮储能单元平滑永磁直驱风力发电系统 输出有功功率的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及风能发电技术,具体涉及一种利用直流侧飞轮储能单元平滑永磁直驱风力发电系统输出有功功率的方法,属于新能源发电领域。

背景技术

[0002] 采用无刷永磁同步发电机的直驱风力发电系统省去了电刷、滑环和齿轮箱,因此减少了系统的维护费用并提高了系统的可靠性。基于双 PWM 变换器的永磁同步发电系统能实现变速恒频发电运行和有功无功独立控制,发电效率高,结构较为简单,运行稳定性好。由于风能为不稳定能源,风速具有不可控性、不可准确预期性和随机波动等特性,使得风力发电机组输出有功功率随风速的变化而波动。随着风电容量在电网中所占比重的增加,大规模并网风电功率的波动将会对电网电压和频率产生显著影响,会带来诸如系统电压波动、频率波动以及闪变等一系列电能质量问题,这无疑会恶化电网的运行特性,增加电力系统运行与控制的难度。为改善风电接入电网的电能质量,希望风电机组能够在风速波动情况下亦能产生较为平滑的有功输出,满足系统调频和调压等运行需求。目前,国内外学者对风电机组输出功率平滑控制已开展了相关研究工作。如已公开的下列文献:

[0003] (1) 集成嵌入式储能的双馈风力发电系统功率控制. 电力系统自动化,2010,34(15):80-86.

[0004] (2) Application of STATCOM/BESS for wind power smoothening and hydrogen generation. Electric Power Systems Research,2009,79(5):365-373.

[0005] (3) 飞轮辅助的风力发电系统功率和频率综合控制. 中国电机工程学报,2008,28(29):111-116.

[0006] 文献(1)、文献(2)以电池储能系统与风电机组相结合实现风电系统输出功率平滑,虽然电池储能系统具有技术较为成熟的优势,但其也存在成本高、需定期维护以及具有环境污染性等缺点。

[0007] 文献(3)采用飞轮储能系统辅助风电机组实现有功功率平滑控制,在很大程度上提高了风电系统的并网电能质量。但所提控制方案需利用或预测风速来形成功率平滑指令信号,由于风速的不确定性,将会使得该指令信号难以准确获取,从而限制其在实际系统中的应用。

[0008] 在工程实际运用中,考虑到功率波动产生的因素较多,因此,迫切需要一种新的、简单实用的功率平滑方式,以提高风电机组输出电能质量,对于增强电网消纳大规模风电的能力、改善风电系统并网运行特性以及有效利用风能资源而言就具有重要的现实意义。

发明内容

[0009] 本发明目的是为了解决风力发电机组输出有功功率随风速的变化而波动的问题,提供了一种利用直流侧飞轮储能单元平滑永磁直驱风力发电系统输出有功功率的方法。

[0010] 本发明的技术方案是这样实现的：

[0011] 一种利用直流侧飞轮储能单元平滑永磁直驱风力发电系统输出有功功率的方法，本方法同时包含对电机侧变换器的控制、电网侧变换器的控制以及储能单元侧变换器的控制，各变换器的控制分别为：

[0012] (A) 电机侧变换器的控制步骤为：

[0013] A1) 利用电压霍尔传感器测量直流链电容电压 u_{dc} ；

[0014] A2) 利用电流霍尔传感器采集永磁同步发电机的定子电流信号，永磁同步发电机的三相定子电流信号分别为 i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} ；

[0015] A3) 利用转子位置传感器检测发电机转子位置 θ 及转速 ω ，根据 θ 和 ω 计算得到永磁同步发电机转子电角速度 $\omega_s = p_s \omega$ 及转子电角度 $\theta_s = p_s \theta$ ； p_s 为发电机极对数；

[0016] A4) 利用采集的三相定子电流和转子位置 θ 实现坐标变换，将静止的三相 abc 坐标系变换到 dq 同步旋转坐标轴系，采用恒功率变换，变换式为：

[0017]

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos(\theta_s - 120^\circ) & \cos(\theta_s - 240^\circ) \\ \sin \theta_s & \sin(\theta_s - 120^\circ) & \sin(\theta_s - 240^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}$$

[0018] A5) 采用功率外环的闭环控制方式，控制发电机实现最大风能跟踪；

[0019] A6) 采用转子磁场定向的矢量控制方式，通过 d、q 轴给定电流 i_{sd}^* 、 i_{sq}^* 和恒功率变换所得的 d、q 轴实际电流 i_{sd} 、 i_{sq} ，采用交叉耦合控制方式得到 d、q 轴控制电压 u_{sd} 和 u_{sq} ，其控制方程为：

$$[0020] \begin{cases} u_{sd} = [K_{p1}(\tau_{i1}s + 1) / \tau_{i1}s](i_{sd}^* - i_{sd}) - p_s \omega L_{sq} i_{sq} \\ u_{sq} = [K_{p2}(\tau_{i2}s + 1) / \tau_{i2}s](i_{sq}^* - i_{sq}) + p_s \omega L_{sd} i_{sd} + \omega \psi_s \end{cases}$$

[0021] 其中： K_{p1} 、 τ_{i1} 、 K_{p2} 、 τ_{i2} 分别为定子 d、q 轴电流调节环的 PI 参数； L_{sd} 、 L_{sq} 分别为定子 d、q 轴电感； ψ_s 为转子永磁体磁链；

[0022] A7) 通过电压和电流计算发电机输出有功功率 P_e ， $P_e = u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}$ ；

[0023] A8) 通过控制电压再结合转子位置角 θ 和直流链电压 u_{dc} 经空间矢量调制 SVM，得到电机侧变换器的 PWM 驱动信号以控制发电机；

[0024] (B) 电网侧变换器的控制步骤为：

[0025] B1) 利用电压霍尔传感器测量三相电网电压 e_{ga}, e_{gb}, e_{gc} ；

[0026] B2) 利用电流霍尔传感器采集三相电网电流信号 i_{ga}, i_{gb}, i_{gc} ；

[0027] B3) 利用采集的三相电网电压信号，将静止三相 abc 坐标系变换到静止两相 $\alpha \beta$ 坐标轴系，采用恒功率变换得到 $\alpha \beta$ 轴系下的电压 e_α, e_β ，变换式为：

$$[0028] \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{4}} & -\sqrt{\frac{3}{4}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{ga} \\ e_{gb} \\ e_{gc} \end{bmatrix}$$

[0029] 采用电网电压定向得到电网电压 d 轴分量 e_{gd} 和电网电角度 θ_g ，此时电网电压 q 轴分量 e_{gq} 为零，其计算式为：

$$[0030] \quad e_{gd} = \sqrt{e_{\alpha}^2 + e_{\beta}^2}, \theta_g = \arctan \frac{e_{\beta}}{e_{\alpha}}$$

[0031] B4) 利用采集的三相电网电流和计算的电网电角度 θ_g 实现坐标变换, 将静止三相 abc 坐标系变换到 dq 同步旋转坐标轴系, 采用恒功率变换的变换式为:

[0032]

$$\begin{bmatrix} i_{gd} \\ i_{gq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_g & \cos(\theta_g - 120^\circ) & \cos(\theta_g - 240^\circ) \\ -\sin \theta_g & -\sin(\theta_g - 120^\circ) & -\sin(\theta_g - 240^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix}$$

[0033] B5) 采用电压外环的闭环控制方式稳定直流链电压; 以反映变换器瞬时功率变化情况的 $P_e/e_{gd} + P_f/e_{gd}$ 作为前馈补偿量, 与以额定直流链电压 u_{dc}^* 为给定值的电压 PI 控制, 一起构成电网侧变换器的 d 轴电流给定值; P_f 为储能单元功率;

[0034] B6) 采用电网电压定向的矢量控制方式, 通过 d、q 轴电流给定 i_{gd}^* 、 i_{gq}^* 以及恒功率变换所得的 d、q 轴实际电流 i_{gd} 、 i_{gq} , 采用交叉耦合控制方式得 d、q 轴控制电压 u_{gd} 和 u_{gq} , 其控制方程为:

$$[0035] \quad \begin{cases} u_{gd} = [K_{p3}(\tau_{i3}s + 1) / \tau_{i3}s](i_{gd}^* - i_{gd}) + \omega_g L_g i_{gq} + e_{gd} \\ u_{gq} = [K_{p4}(\tau_{i4}s + 1) / \tau_{i4}s](i_{gq}^* - i_{gq}) - \omega_g L_g i_{gd} \end{cases}$$

[0036] 其中: K_{p3} 、 τ_{i3} 、 K_{p4} 、 τ_{i4} 分别为 d、q 轴电流的 PI 参数; L_g 为网侧变换器进线电感;

[0037] B7) 通过坐标变换所得的电压和电流计算并网功率 P_g , $P_g = e_{gd}i_{gd} + e_{gq}i_{gq}$;

[0038] B8) 通过控制电压结合转子位置 θ_g 和直流链电压 u_{dc} 经空间矢量调制 SVM 得到电网侧变换器的 PWM 驱动信号;

[0039] (C) 储能单元变换器的控制步骤为:

[0040] C1) 利用电流霍尔传感器采集永磁同步发电 / 电动机的定子电流信号, 三相定子电流信号为 i_{fa} 、 i_{fb} 、 i_{fc} ;

[0041] C2) 利用转子位置传感器检测电机转子位置 θ_f^* 及转速 ω_f , 根据 θ_f^* 和 ω_f 计算得到永磁同步电机转子电角速度 $p_f \omega_f$ 及转子电角度 $\theta_f = p_f \theta_f^*$; p_f 为永磁同步飞轮驱动电机极对数;

[0042] C3) 利用采集的三相定子电流和转子位置 θ_f^* 实现坐标变换, 将静止三相 abc 坐标系变换到 dq 同步旋转坐标轴系, 采用恒功率变换的变换式为:

[0043]

$$\begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_f & \cos(\theta_f - 120^\circ) & \cos(\theta_f - 240^\circ) \\ \sin \theta_f & \sin(\theta_f - 120^\circ) & \sin(\theta_f - 240^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix}$$

[0044] C4) 利用具有不同截止频率的低通滤波环节来构造功率平滑指令, 将电网侧输出有功功率 P_g 分别经两个一阶低通滤波器滤波后作差作为飞轮电机的功率给定, 表示为:

$$P_f^* = P_g \left(\frac{\omega_1}{s + \omega_1} - \frac{\omega_2}{s + \omega_2} \right);$$

[0045] 其中: ω_1 、 ω_2 分别为两一阶低通滤波器的截止角频率; P_f^* 为飞轮电机的功率给定;

[0046] C5) 采用转子磁场定向的矢量控制方式, 通过 d、q 轴电流给定 i_{fd}^* 、 i_{fq}^* 以及恒功率变换所得的 d、q 轴实际电流 i_{fd} 、 i_{fq} , 采用交叉耦合控制方式得 d、q 轴控制电压 u_{fd} 和 u_{fq} , 控制

方程为：

$$[0047] \quad \begin{cases} u_{fd} = [K_{p5}(\tau_{i5}s + 1) / \tau_{i5}s](i_{fd}^* - i_{fd}) - p_f \omega_f L_{fq} i_{fq} \\ u_{fq} = [K_{p6}(\tau_{i6}s + 1) / \tau_{i6}s](i_{fq}^* - i_{fq}) + p_f \omega_f L_{fd} i_{fd} + \omega_f \psi_f \end{cases}$$

[0048] 其中： K_{p5} 、 τ_{i5} 、 K_{p6} 、 τ_{i6} 分别为定子 d、q 轴电流的 PI 输出； L_{fd} 、 L_{fq} 分别为定子 d、q 轴电感； ψ_f 为转子永磁体磁链；

[0049] C6) 通过电压和电流计算发电机输出电磁功率 P_f ， $P_f = u_{fd}i_{fd} + u_{fq}i_{fq}$ ；

[0050] C7) 通过控制电压再结合转子位置角 θ_f 和直流链电压 u_{dc} 经空间矢量调制 SVM 得储能单元侧变换器的 PWM 驱动信号以控制电机；

[0051] C8) 在电机加速到最高转速时，切换电机的外环工作模式，将功率 / 电流闭环控制模式切换为转速 / 电流闭环控制模式，转速给定为飞轮电机额定转速；该过程持续至飞轮电机获得减速信号时，重新切换为功率 / 电流闭环控制模式；

[0052] C9) 在飞轮电机连续减速至零时，将转速外环给定值设定为零，控制电机转速为零，采用转速 / 电流闭环控制实现飞轮电机在零速下运行，直至要求飞轮电机重新进入加速状态，切换为功率 / 电流闭环控制模式。

[0053] 相比现有技术，本发明具有如下有益效果：

[0054] 1. 在功率平滑控制的要求下，亦实现了最大风能跟踪控制。飞轮系统根据功率平滑需求进行加 / 减速运行，飞轮电机定子电流 d 轴分量控制在零左右，q 轴电流则根据功率环的调节输出在驱动 / 制动状态之间变化，飞轮电机以驱动状态运行时，吸收发电机输出的多余功率；反之，驱动电机以制动状态运行时，向电网侧变换器输出补充功率，飞轮减速释放能量。

[0055] 2. 平滑了网侧有功功率，提高了电能质量，改善了风电系统并网运行特性。

[0056] 风速变化时电网侧变换器可实现稳定的直流链电压控制，电流解耦控制效果好，在含飞轮单元的系统中国网侧变换器 d 轴电流的波动较小，整个系统输出有功功率的波动也得到有效抑制，在一定程度上可改善该系统的并网电能质量。

[0057] 总之，本方法通过对电机侧变换器、电网侧变换器以及储能单元侧变换器的协调控制，使风电机组能够在风速波动情况下亦能产生较为平滑的有功输出，满足系统调频和调压等运行需求。

附图说明

[0058] 图 1 是含飞轮储能单元的永磁直驱风力发电系统图；

[0059] 图 2 是整体系统的控制框图；

[0060] 图 3 是电机侧电流内环控制图；

[0061] 图 4 是电网侧电压外环控制图；

[0062] 图 5 是电网侧电流内环控制图；

[0063] 图 6 是飞轮驱动电机侧 q 轴电流给定控制图；

[0064] 图 7 是风机系统波形图；

[0065] 图 8 是发电机系统波形图；

[0066] 图 9 是飞轮系统波形图；

[0067] 图 10 是含直流侧飞轮储能与不含直流侧飞轮储能的网侧对比波形图。

具体实施方式

[0068] 以下结合附图和具体实施方式对本发明作进一步说明。

[0069] 参见图 1、图 2 和图 6, 本发明利用直流侧飞轮储能单元平滑永磁直驱风力发电系统输出有功功率的方法, 它涉及的控制对象有: 电压霍尔传感器 1, 永磁同步发电机 2, 电流霍尔传感器 3, 转子位置传感器 4, abc/dq 坐标变换模块 5, 功率外环控制模块 6, 发电机侧电流内环模块 7, 空间矢量调制器 8, 电机侧变换器 9, abc/αβ 坐标变换模块 10, 电压外环控制模块 11, 电网侧电流内环控制模块 12, 电网侧变换器 13, 永磁同步电动机 / 发电机 14, 永磁同步电动机 / 发电机 q 轴电流给定模块 15, 储能单元电流内环控制模块 16, 储能单元侧变换器 17, 一阶低通滤波器 18。

[0070] 本方法包括电机侧变换器控制、电网侧变换器控制、储能单元侧变换器控制三个方面, 其具体实施步骤如下 (可同时参见图 2):

[0071] A) 电机侧变换器的控制, 它包括以下步骤:

[0072] A1) 利用电压霍尔传感器 1 测量直流链电容电压 u_{dc} ;

[0073] A2) 利用电流霍尔传感器 3 采集以永磁同步发电机 2 的定子电流信号, 其三相定子电流信号为 i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} ;

[0074] A3) 利用转子位置传感器 4 检测永磁同步发电机 2 转子位置 θ 及转速 ω , 根据 θ 和 ω 计算得到其转子电角速度 $\omega_s = p_s \omega$ 及转子电角度 $\theta_s = p_s \theta$; p_s 为发电机极对数;

[0075] A4) 利用采集的三相定子电流和转子位置 θ 实现坐标变换, 通过 abc/dq 坐标变换模块 5, 采用恒功率变换, 其变换式为:

[0076]

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos(\theta_s - 120^\circ) & \cos(\theta_s - 240^\circ) \\ \sin \theta_s & \sin(\theta_s - 120^\circ) & \sin(\theta_s - 240^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}$$

[0077] A5) 采用功率外环控制器 6, 控制发电机实现最大风能跟踪;

[0078] A6) 采用转子磁场定向的矢量控制方式, 通过发电机侧电流内环控制模块 7 得 d、q 轴控制电压 u_{sd} 和 u_{sq} , 参照附图 3, 其控制方程为:

$$[0079] \begin{cases} u_{sd} = [K_{p1}(\tau_{i1}s + 1) / \tau_{i1}s](i_{sd}^* - i_{sd}) - p_s \omega L_{sq} i_{sq} \\ u_{sq} = [K_{p2}(\tau_{i2}s + 1) / \tau_{i2}s](i_{sq}^* - i_{sq}) + p_s \omega L_{sd} i_{sd} + \omega \psi_s \end{cases}$$

[0080] 其中: K_{p1} 、 τ_{i1} 、 K_{p2} 、 τ_{i2} 分别为定子 d、q 轴电流的 PI 参数; L_{sd} 、 L_{sq} 分别为定子 d、q 轴电感; ψ_s 为转子永磁体磁链。

[0081] A7) 通过电压和电流计算发电机输出有功功率 P_e , $P_e = u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}$;

[0082] A8) 通过控制电压再结合转子位置角 θ 和直流链电压 u_{dc} 经空间矢量调制 8, 得到电机侧变换器 9 的 PWM 驱动信号以控制永磁同步发电机 2。

[0083] B) 电网侧变换器的控制, 其控制步骤为:

[0084] B1) 利用电压霍尔传感器 1 测量三相电网电压 e_{ga}, e_{gb}, e_{gc} ;

[0085] B2) 利用电流霍尔传感器 3 采集三相电网电流信号 i_{ga}, i_{gb}, i_{gc} ;

[0086] B3) 利用采集的三相电网电压信号, 通过 abc/αβ 坐标变换模块 10, 采用恒功率变换得到 αβ 轴系下的电压 e_α, e_β , 其变换式表示为:

$$[0087] \quad \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{4}} & -\sqrt{\frac{3}{4}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{ga} \\ e_{gb} \\ e_{gc} \end{bmatrix}$$

[0088] 采用电网电压定向得到电网电压 d 轴分量 e_{gd} 和电网电角度 θ_g , 此时电网电压 q 轴分量 e_{gq} 为零, 其计算式为:

$$[0089] \quad e_{gd} = \sqrt{e_\alpha^2 + e_\beta^2}, \theta_g = \arctan \frac{e_\beta}{e_\alpha}$$

[0090] B4) 利用采集的三相电网电流和计算的电网电角度 θ_g 实现坐标变换, 通过 abc/dq 坐标变换模块 5, 采用恒功率变换其变换式为:

[0091]

$$\begin{bmatrix} i_{gd} \\ i_{gq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_g & \cos(\theta_g - 120^\circ) & \cos(\theta_g - 240^\circ) \\ -\sin \theta_g & -\sin(\theta_g - 120^\circ) & -\sin(\theta_g - 240^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix}$$

[0092] B5) 采用电压外环控制模块 11 稳定直流链电压, 参照附图 4, 以反映变换器瞬时功率变化情况的 $P_e/e_{gd} + P_f/e_{gd}$ 作为前馈补偿量, 与以额定直流链电压 u_{dc}^* 为给定值的电压 PI 控制, 一起构成网侧变换器的 d 轴电流给定值; P_f 为储能单元功率;

[0093] B6) 采用电网电压定向的矢量控制方式, 通过电网侧电流内环控制模块 12, 得到 d、q 轴控制电压 u_{gd} 和 u_{gq} , 参照附图 5, 其控制方程为:

$$[0094] \quad \begin{cases} u_{gd} = [K_{p3}(\tau_{i3}s + 1) / \tau_{i3}s](i_{gd}^* - i_{gd}) + \omega_g L_g i_{gq} + e_{gd} \\ u_{gq} = [K_{p4}(\tau_{i4}s + 1) / \tau_{i4}s](i_{gq}^* - i_{gq}) - \omega_g L_g i_{gd} \end{cases}$$

[0095] 其中: K_{p3} 、 τ_{i3} 、 K_{p4} 、 τ_{i4} 分别为 d、q 轴电流的 PI 参数; L_g 为网侧变换器进线电感。

[0096] B7) 通过坐标变换所得的电压和电流计算并网功率 P_g , $P_g = e_{gd}i_{gd} + e_{gq}i_{gq}$;

[0097] B8) 通过控制电压结合转子位置 ω_g 和直流链电压 u_{dc} 经空间矢量调制 8 得电网侧变换器 13 的 PWM 驱动信号。

[0098] C) 储能单元变换器的控制, 其控制步骤为:

[0099] C1) 利用电流霍尔传感器 3 采集永磁同步发电 / 电动机 14 的定子电流信号, 其三相定子电流信号为 i_{fa} , i_{fb} , i_{fc} ;

[0100] C2) 利用转子位置传感器 4 检测永磁同步发电 / 电动机 14 的位置 θ_f^* 及转速 ω_f , 根据 θ_f^* 和 ω_f 计算得到永磁同步电机转子电角速度 $p_f \omega_f$ 及转子电角度 $\theta_f = p_f \theta_f^*$; p_f 为永磁同步飞轮驱动电机极对数;

[0101] C3) 利用采集的三相定子电流和转子位置 θ_f^* 实现坐标变换, 通过 abc/dq 坐标变换模块 5, 采用恒功率变换其变换式为:

[0102]

$$\begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_f & \cos(\theta_f - 120^\circ) & \cos(\theta_f - 240^\circ) \\ \sin \theta_f & \sin(\theta_f - 120^\circ) & \sin(\theta_f - 240^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix}$$

[0103] C4) 电机 q 轴电流给定根据永磁同步电动 / 发电机 q 轴电流给定模块 15 进行选

取,参照附图 6,根据转速选取不同的通道。电机转速在 0 到额定转速之间时,q 轴电流给定选取通道 1,利用具有不同截止频率的低通滤波环节来构造功率平滑指令,将网侧输出有功功率分别经两个一阶低通滤波器 18 滤波后作差作为永磁同步发电 / 电动机 14 的功率给定,可表示为:
$$P_f^* = P_g \left(\frac{\omega_1}{s + \omega_1} - \frac{\omega_2}{s + \omega_2} \right);$$

[0104] 其中: ω_1 、 ω_2 分别为两一阶低通滤波器的截止角频率; P_f^* 为电机的功率给定。

[0105] C5) 采用转子磁场定向的矢量控制方式,通过储能单元侧电流内环控制模块 16 得控制电压 u_{fd} 和 u_{fq} ,其控制方程为:

$$[0106] \quad \begin{cases} u_{fd} = [K_{p5}(\tau_{i5}s + 1) / \tau_{i5}s](i_{fd}^* - i_{fd}) - p_f \omega_f L_{fq} i_{fq} \\ u_{fq} = [K_{p6}(\tau_{i6}s + 1) / \tau_{i6}s](i_{fq}^* - i_{fq}) + p_f \omega_f L_{fd} i_{fd} + \omega_f \psi_f \end{cases}$$

[0107] 其中: K_{p5} 、 τ_{i5} 、 K_{p6} 、 τ_{i6} 分别为定子 d、q 轴电流的 PI 输出; L_{fd} 、 L_{fq} 分别为定子 d、q 轴电感; ψ_f 为转子永磁体磁链。

[0108] C6) 通过电压和电流计算发电机输出电磁功率 P_f , $P_f = u_{fd}i_{fd} + u_{fq}i_{fq}$;

[0109] C7) 通过控制电压结合转子位置角 θ_f 和直流链电压 u_{dc} 经空间矢量调制 8,得到储能单元侧变换器 17 的 PWM 驱动信号以控制电机。

[0110] C8) 根据永磁同步电动 / 发电机 q 轴电流给定模块 15,参照附图 6,电机加速到最高转速时,切换电机的外环工作模式,将功率 / 电流闭环控制模式切换为转速 / 电流闭环控制模式,将通道 1 切换为通道 2,转速给定设定为飞轮电机额定转速。该过程持续至飞轮电机获得减速信号时,重新切换回通道 1。

[0111] C9) 根据永磁同步电动 / 发电机 q 轴电流给定模块 15,参照附图 6,在飞轮电机连续减速至零时,将转速外环给定值设定为零,控制电机转速为零,采用转速 / 电流闭环控制实现飞轮电机在零速下运行,将通道 1 切换为通道 3,直至要求飞轮电机重新进入加速状态,切换回通道 1。

[0112] 下面结合附图对本发明的有益效果进行说明:

[0113] 1. 实现了最大风能跟踪控制。如附图 7(a)、(b)、(c) 所示,在风速范围内波动,在额定风速以下,风能利用系数基本保持在最佳值 0.4382 附近,变桨系统不动作。在额定风速以上,变桨系统启动,桨距角迅速增大,风机风能利用系数大幅下降。如附图 8(a)、(b)、(c) 所示,发电机转速跟随风速变化而变化,发电机定子 d、q 轴电流可实现良好的电流解耦控制。风力发电机在额定转速下实现最大风能跟踪,额定转速以上以满功率运行,在功率平滑控制的要求下,亦实现了最大风能跟踪控制。如附图 9(a)、(b)、(c) 所示,飞轮系统根据功率平滑需求进行加 / 减速运行,飞轮电机定子电流 d 轴分量控制在零左右,q 轴电流则根据功率环的调节输出在驱动 / 制动状态之间变化,飞轮电机以驱动状态运行时,吸收发电机输出的多余功率;反之,驱动电机以制动状态运行时,向电网侧变换器输出补充功率,飞轮减速释放能量。

[0114] 2. 平滑了网侧有功功率,提高了电能质量,改善了风电系统并网运行特性。定义网

侧有功功率平滑度系数 $P_{glevel} = \frac{\int_0^t \left| \frac{dP_g}{dt} \right| dt}{P_s}$ 来评估并网有功功率的平滑程度, P_s 为发电机额

定功率。 P_{glevel} 越小,输入到电网的有功功率越平滑。

[0115] 如附图 10(a)、(b)、(c)、(d) 所示, 风速变化时电网侧变换器可实现稳定的直流链电压控制, 电流解耦控制效果良好, 在含飞轮单元的系统中网侧变换器 d 轴电流的波动较小, 整个系统输出有功功率的波动也得到有效抑制, 在一定程度上可改善该系统的并网电能质量。通过两种情况下系统功率平滑程度的对比可知, 含飞轮储能单元的发电系统输出功率平滑程度更优, 电能质量更高。

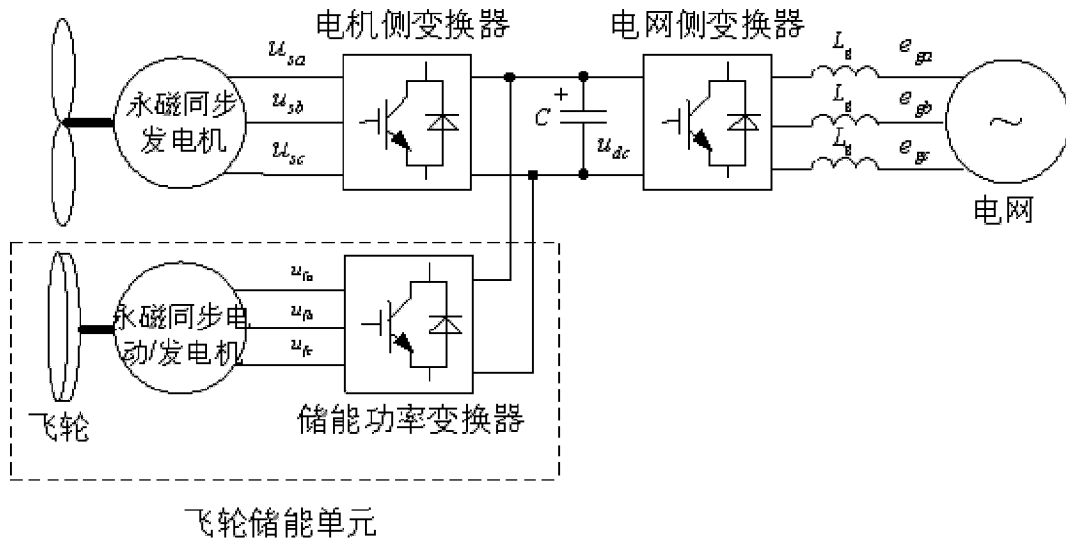


图 1

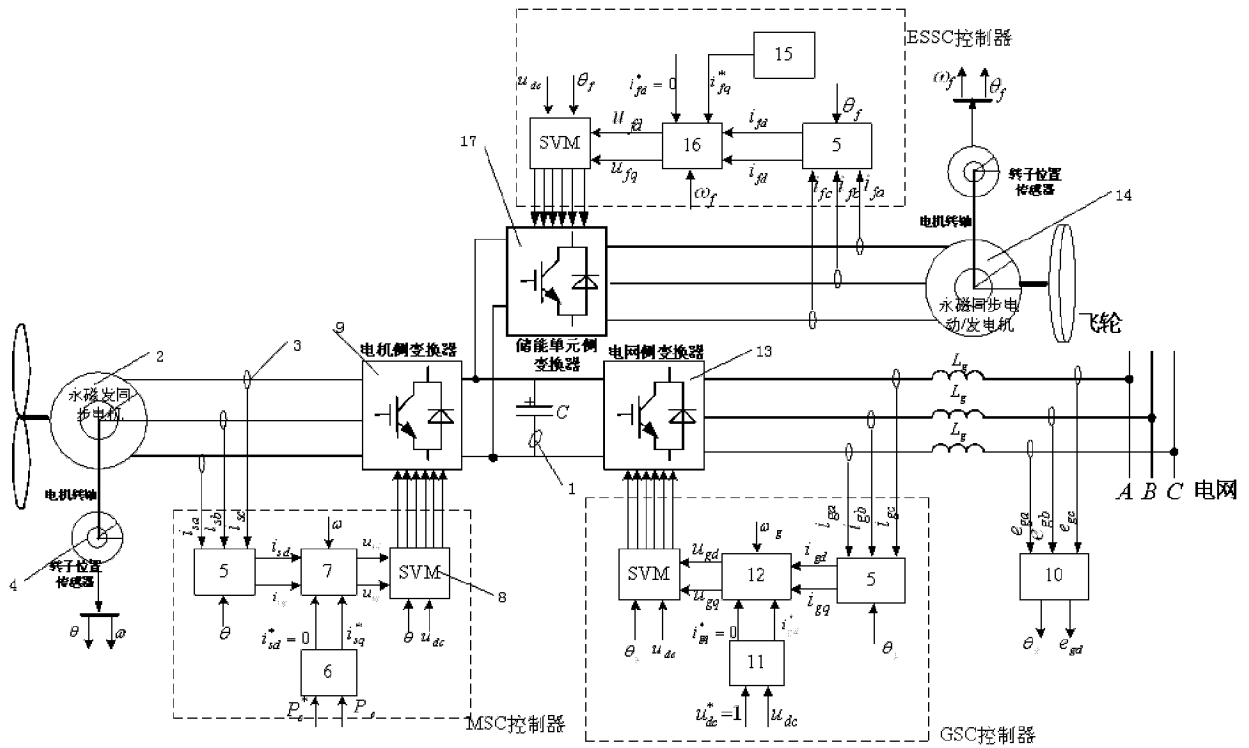


图 2

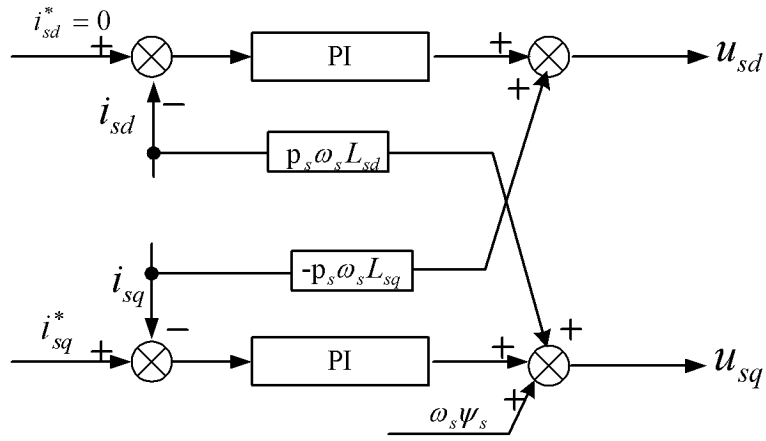


图 3

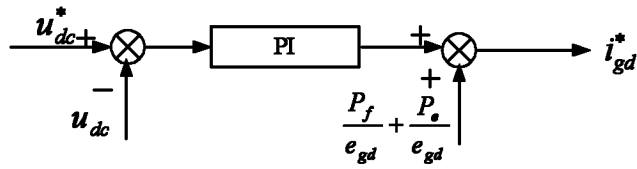


图 4

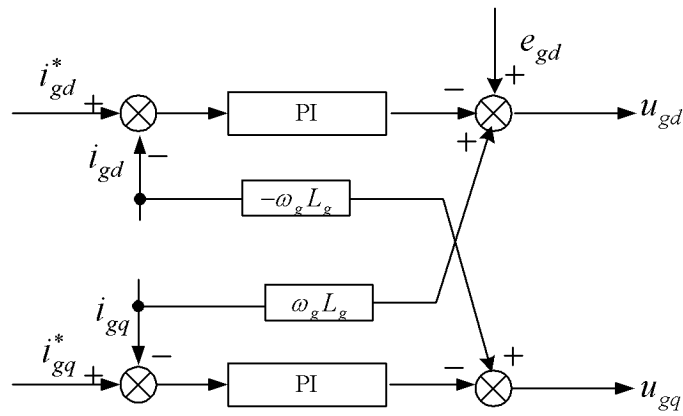


图 5

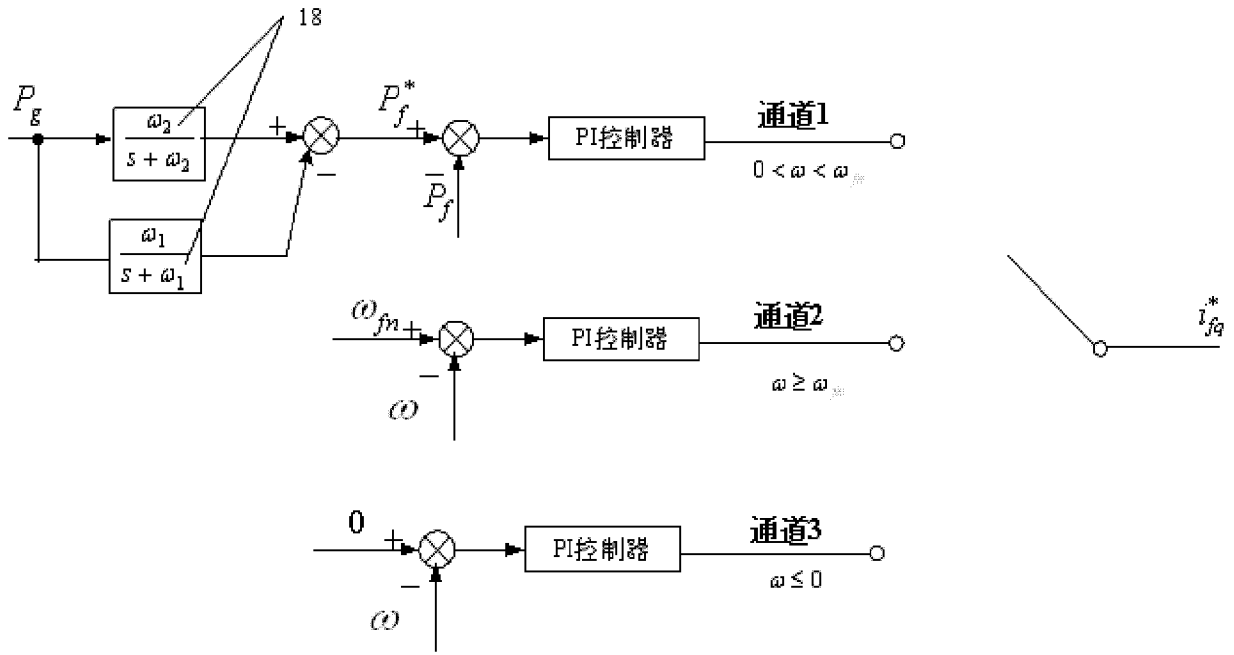


图 6

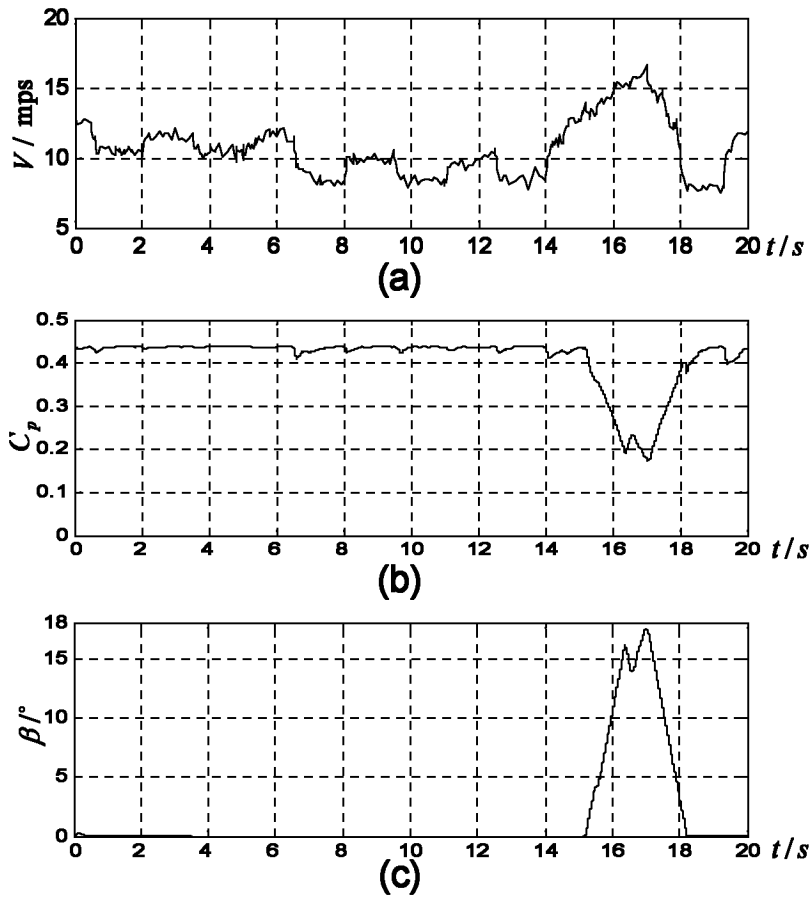


图 7

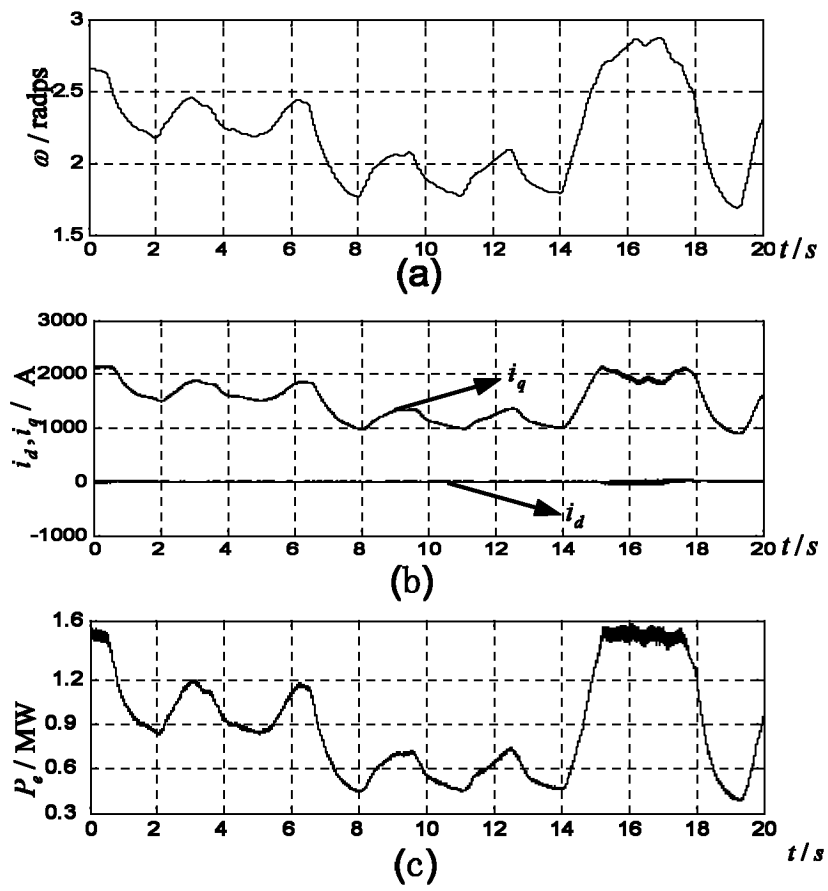


图 8

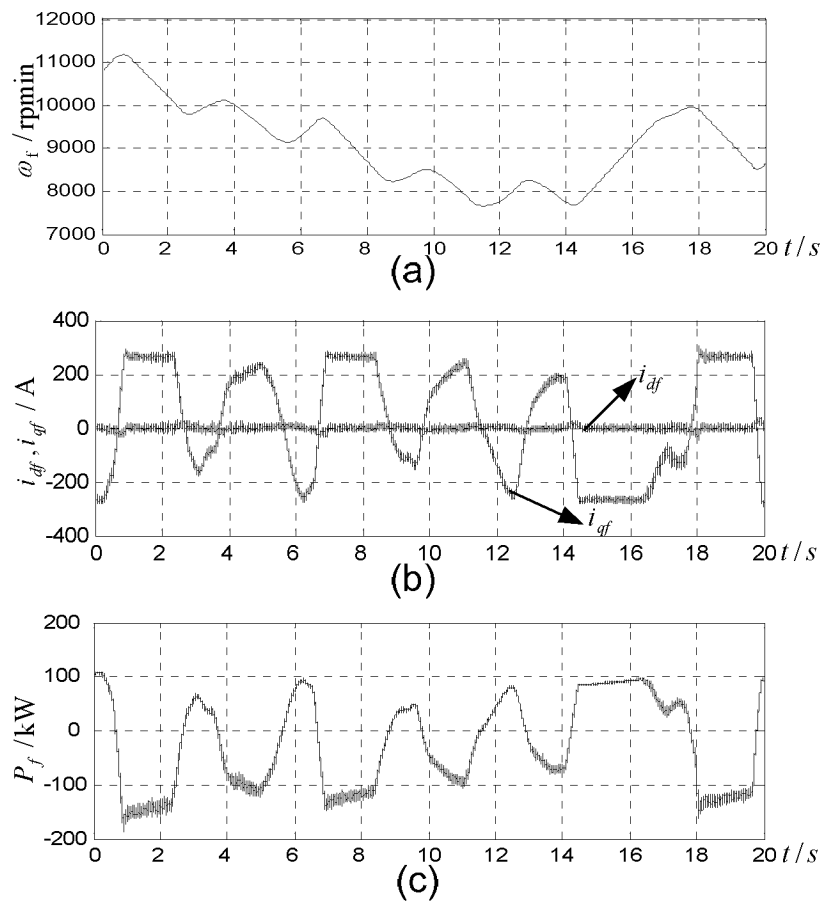


图 9

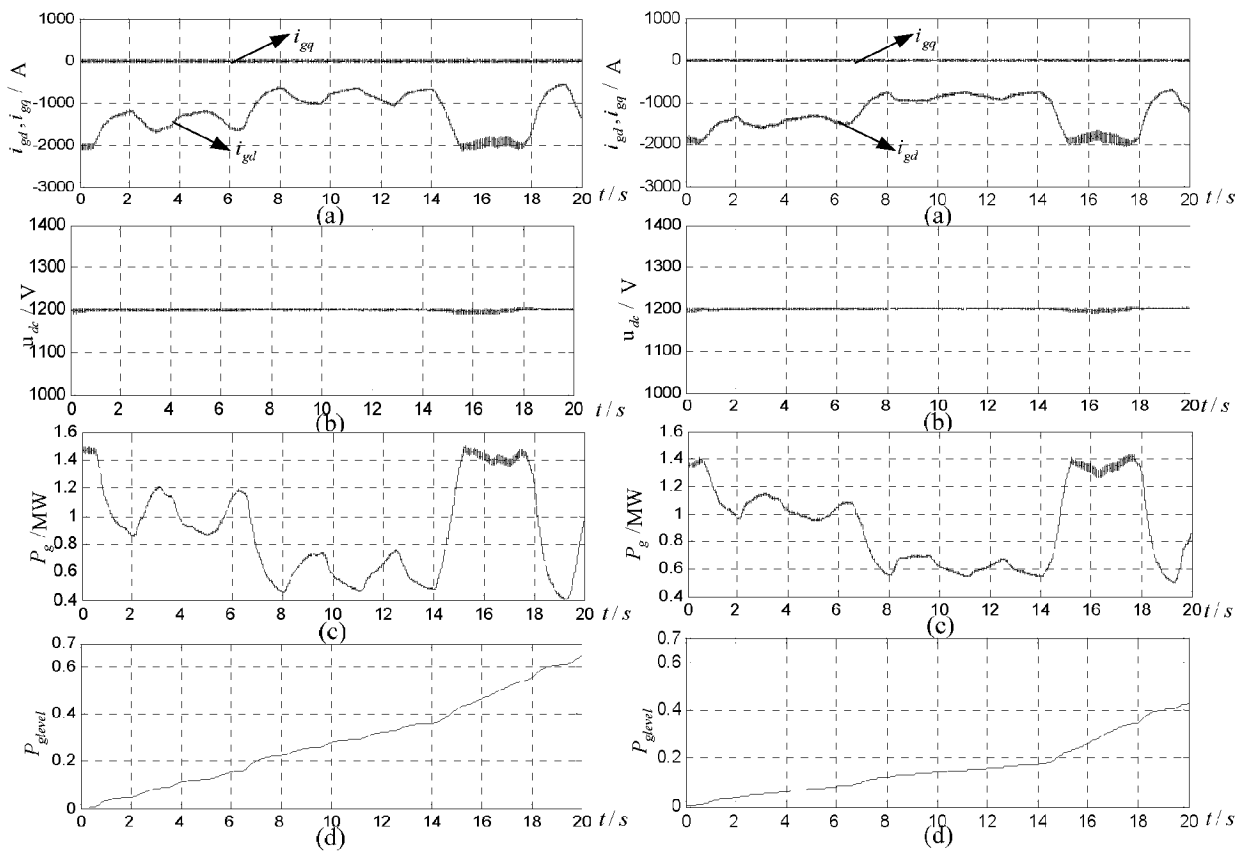


图 10