

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102723727 A

(43) 申请公布日 2012. 10. 10

(21) 申请号 201210127558. 7

(22) 申请日 2012. 04. 27

(71) 申请人 江苏吉泰科电气股份有限公司

地址 518108 广东省深圳市宝安区石岩塘头
一路中运泰科技园 10 栋 9 楼

(72) 发明人 王宏胜

(74) 专利代理机构 广州市越秀区哲力专利商标
事务所 (普通合伙) 44288

代理人 李悦

(51) Int. Cl.

H02J 3/38 (2006. 01)

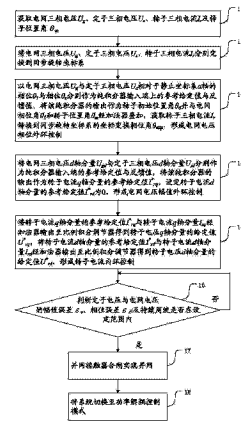
权利要求书 1 页 说明书 7 页 附图 3 页

(54) 发明名称

双馈风力发电机并网控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种双馈风力发电机并网控制方法,包括步骤:获取电网电压 U_g 、定子三相电压 U_s 、转子三相电流 I_r 及转子位置角 θ_m ;变换到同步旋转坐标系;电网电压相位外环控制;电网电压幅值外环控制;转子电流内环控制;判断定子电压与电网电压的幅值误差 ε_v 、相位误差 ε_θ 及持续周波是否在设定范围内,如果是,则并网接触器合闸实现并网。本发明实施例的控制方法简单易行,稳定可靠。简化了控制器的结构,易于实现。在实现同步并网的同时,也实现了转子电流的解耦控制,为并网后切换至有功、无功功率的解耦控制模式提供了便利性。在并网后模式切换时,采用了状态参数传递的方式,实现了功率模式的平滑切换。



1. 双馈风力发电机并网控制方法,其特征在于,包括步骤:

A:获取电网电压 U_g 、定子三相电压 U_s 、转子三相电流 I_r 及转子位置角 θ_m ;

B:将电网电压 U_g 、定子三相电压 U_s 、转子三相电流 I_r 分别变换到同步旋转坐标系;

C:以电网电压 U_g 与定子三相电压 U_s 相对于静止坐标系 α 轴的相位 θ_1 与相位 θ_s 分别作为纯积分器输入端上的参考给定值与反馈值,将该纯积分器的输出作为转子初始位置角 θ_0 并与电网相位角 θ_1 和转子位置角 θ_m 经加法器叠加,获取转子三相电流 I_r 转换到同步旋转坐标系的坐标变换相位角 θ_{slip} ,形成电网电压相位外环控制;

D:将电网电压 d 轴分量 U_{gd} 与定子三相电压 d 轴分量 U_{sd} 分别作为纯积分器输入端的参考给定值与反馈值,将该纯积分器的输出作为转子电流 q 轴分量的参考给定值 I_{rq}^* ,设定转子电流 d 轴分量的参考给定值 I_{rd}^* 为 0,形成电网电压幅值外环控制;

E:将转子电流 q 轴分量的参考给定值 I_{rq}^* 与转子电流 q 轴分量反馈值 I_{rq} 经加法器输出至比例积分调节器得到转子电压 q 轴分量的给定值 U_{rq}^* ,将转子电流 d 轴分量的参考给定值 I_{rd}^* 与转子电流 d 轴分量反馈值 I_{rd} 经加法器输出至比例积分调节器得到转子电压 d 轴分量的给定值 U_{rd}^* ,形成转子电流内环控制;

F:判断定子电压与电网电压的幅值误差 ε_v 、相位误差 ε_θ 及持续周波是否在设定范围内,如果是,则并网接触器合闸实现并网。

2. 如权利要求 1 所述的双馈风力发电机并网控制方法,其特征在于,所述步骤 F 中并网接触器合闸实现并网后还包括步骤:

将系统切换至功率解耦控制模式。

3. 如权利要求 1 或 2 所述的双馈风力发电机并网控制方法,其特征在于:所述步骤 F 中幅值误差 ε_v 小于 10V,相位误差 ε_θ 小于 5° ,持续周波大于 5 周。

双馈风力发电机并网控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及风力发电技术领域,具体涉及一种双馈风力发电机并网控制方法。

背景技术

[0002] 并网型变速恒频双馈感应风力发电机是一种应用最为广泛的风力发电机组,与其配套的背靠背式双 PWM 交直交转子励磁技术也是目前应用于风力发电机组中最成熟的技术之一。

[0003] 风能的高效利用已经成为目前研究的热点,在风速达到切入风速时,如何快速可靠的实现风力发电机组的同步并网,如何减小并网冲击电流,也已有不少研究。针对并网型变速恒频双馈感应风力发电机,目前应用比较广泛的有两种并网技术,一种为定子并网技术,一种为转子软并网技术。定子并网技术通常应用于理想电网条件下的风电机组并网;而转子软并网技术通常应用于在运行过程中发生低电压跌落,风力发电机组变流器实现重启的过程中。

[0004] 而关于定子并网技术,由于应用最为广泛,也已有不少专利申请做出了详细介绍,例如公开号为 CN102005782A 的专利文件中公开了一种双馈风力发电机的并网控制方法,该申请提供了一种通过电网外环和电流内环的双闭环控制方式实现定子电压幅值对电网电压幅值的跟踪,但该申请是在假设转子初始位置已知的情况下实现的,此外电压幅值外环采用了比例积分调节器 (PI 调节器) 加前馈项的控制方式,这样将引起电流给定在起步阶段的阶跃冲击,此外,在跟踪的过程中,由于 PI 调节器中比例系数 K_p 的存在,将增加跟踪的调节过程,不利于柔性并网。同样,公开号为 CN101499665A 的专利文件也是在转子初始位置已知的情况下实现并网,均未考虑到转子初始位置未知的情景。

[0005] 再例如,公开号为 CN101267117A 的中国专利文件中公开了一种变速恒频双馈风力发电系统及其并网控制方法,该申请提供了一种基于电压幅值补偿器和转子位置角补偿器的并网技术实现风力发电机组的同步并网。其电压幅值补偿器以电网电压和定子电压幅值分别作为 PI 调节器的参考值和反馈值进行调节控制,输出作为励磁电流的幅值;而转子位置角补偿器以转矩电流作为控制对象,通过 PI 调节器将转矩电流控制为 0,以确保转子位置角正确。采用了双外环、双内环的控制策略,实现了对电网电压幅值和相位的跟踪,但是,由于其在通过转子位置角补偿进行电网电压相位跟踪时,未有定子电压相位和电网电压相位的对比反馈,存在一定的风险,尤其在定子相序错误的时候,有可能在并网过程中,由于冲击电流过大而引起并网失败。

[0006] 由于并网失败或并网时间过长而造成的风电机组利用效率低下,已经成为风电场越来越不容忽视的问题。缩短并网同步时间,减小并网冲击电流,提高并网可靠性,保证风力发电机组的安全运行已成为并网技术的重要议题。

发明内容

[0007] 本发明提供一种双馈风力发电机并网控制方法,能够解决在转子初始位置未知的

情况下实现电网电压幅值、相位外环控制以及实现转子电流的内环控制。

[0008] 本发明提供一种双馈风力发电机并网控制方法,包括步骤:

[0009] A:获取电网电压 U_g 、定子三相电压 U_s 、转子三相电流 I_r 及转子位置角 θ_m ;

[0010] B:将电网电压 U_g 、定子三相电压 U_s 、转子三相电流 I_r 分别变换到同步旋转坐标系;

[0011] C:以电网电压 U_g 与定子三相电压 U_s 相对于静止坐标系 α 轴的相位 θ_1 与相位 θ_s 分别作为纯积分器输入端上的参考给定值与反馈值,将该纯积分器的输出作为转子初始位置角 θ_0 并与电网相位角 θ_1 和转子位置角 θ_m 经加法器叠加,获取转子三相电流 I_r 转换到同步旋转坐标系的坐标变换相位角 θ_{s1ip} ,形成电网电压相位外环控制;

[0012] D:将电网电压 d 轴分量 U_{gd} 与定子三相电压 d 轴分量 U_{sd} 分别作为纯积分器输入端的参考给定值与反馈值,将该纯积分器的输出作为转子电流 q 轴分量的参考给定值 I_{rq}^* ,设定转子电流 d 轴分量的参考给定值 I_{rd}^* 为 0,形成电网电压幅值外环控制;

[0013] E:将转子电流 q 轴分量的参考给定值 I_{rq}^* 与转子电流 q 轴分量反馈值 I_{rq} 经加法器输出至比例积分调节器得到转子电压 q 轴分量的给定值 U_{rq}^* ,将转子电流 d 轴分量的参考给定值 I_{rd}^* 与转子电流 d 轴分量反馈值 I_{rd} 经加法器输出至比例积分调节器得到转子电压 d 轴分量的给定值 U_{rd}^* ,形成转子电流内环控制;

[0014] F:判断定子电压与电网电压的幅值误差 ε_v 、相位误差 ε_θ 及持续周波是否在设定范围内,如果是,则并网接触器合闸实现并网。

[0015] 优选地,所述步骤 F 中并网接触器合闸实现并网后还包括步骤:

[0016] 将系统切换至功率解耦控制模式。

[0017] 优选地,所述步骤 F 中幅值误差 ε_v 小于 10V,相位误差 ε_θ 小于 5° ,持续周波大于 5 周。

[0018] 上述技术方案可以看出,由于本发明实施例采用双外环单内环的控制方式,实现对电网电压幅值与相位的外环控制,因此本发明实施例的控制方法与传统的控制方法相比,简单易行,稳定可靠。在外环控制器上,采用了纯积分控制器,简化了控制器的结构,易于实现。在实现同步并网的同时,也实现了转子电流的解耦控制,为并网后切换至有功、无功功率的解耦控制模式提供了便利性。在并网后模式切换时,采用了状态参数传递的方式,实现了功率模式的平滑切换。

附图说明

[0019] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其它的附图。

[0020] 图 1 为本发明实施例中双馈风力发电机并网控制方法的流程图;

[0021] 图 2 为本发明实施例中双馈风力发电机并网控制的原理框图;

[0022] 图 3 为本发明实施例中电网电压幅值跟踪外环的控制原理框图;

[0023] 图 4 为本发明实施例中电网电压相位跟踪外环的控制原理框图;

[0024] 图 5 为本发明实施例中定子 $\alpha_s \beta_s$ 坐标系、转子 $\alpha_r \beta_r$ 坐标系与同步旋转 dq 坐标

系的关系图；

[0025] 图 6 为本发明实施例并网后系统由电网电压同步跟踪模式切换至有功、无功功率解耦控制的原理框图。

具体实施方式

[0026] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有作出创造性劳动前提下所获得的所有其它实施例,都属于本发明保护的范围。

[0027] 本发明实施例提供一种双馈风力发电机并网控制方法,如图 1 所示,该方法包括:

[0028] 步骤 11:获取电网电压 U_g 、定子三相电压 U_s 、转子三相电流 I_r 及转子位置角 θ_m 。

[0029] 本步骤中,利用两组两个电流传感器采集两相转子电流信号 I_{ra} 、 I_{rb} 和两相定子电流信号 I_{sa} 、 I_{sb} ,并通过计算获得第三相转子电流信号 I_{rc} 和第三相定子电流信号 I_{sc} ,两组 4 个电压传感器采集电网线电压信号 U_{gab} 、 U_{gbc} 和定子线电压信号 U_{sab} 、 U_{sbc} ,并通过计算获得三相电网电压信号 U_{ga} 、 U_{gb} 、 U_{gc} 和定子电压信号 U_{sa} 、 U_{sb} 、 U_{sc} ;利用一个增量式光电码盘获得转子位置角 θ_m 信号。

[0030] 步骤 12:将电网电压 U_g 、定子三相电压 U_s 、转子三相电流 I_r 分别变换到同步旋转坐标系。

[0031] 本步骤中,在二维三轴坐标系下电网电压 U_g 、定子三相电压 U_s 、转子三相电流 I_r 经过 clarke 变换得到静止坐标系 ($\alpha \beta$ 坐标系)下的各电压、电流值;在静止坐标系下,电网电压 U_g 、定子电压 U_s 、转子电流 I_r 经过 park 变换得到同步旋转坐标系 (dq 坐标系)下的各电压、电流值。

[0032] 步骤 13:以电网电压 U_g 与定子三相电压 U_s 相对于静止坐标系 α 轴的相位 θ_1 与相位 θ_s 分别作为纯积分器输入端上的参考给定值与反馈值,将该纯积分器的输出作为转子初始位置角 θ_0 并与电网相位角 θ_1 和转子位置角 θ_m 经加法器叠加,获取转子三相电流 I_r 转换到同步旋转坐标系的坐标变换相位角 θ_{slip} ,形成电网电压相位外环控制。所谓纯积分器即为比例系数为 0 的积分器。

[0033] 如图 2、图 4 所示,本步骤中,电网电压信号 U_g 经锁相环运算,获得电网电压向量在其静止 $\alpha \beta$ 坐标系下相对于 α 轴的相位 θ_1 ,根据电网电压定向矢量控制原理,将同步旋转坐标系的 d 轴定向在电网电压向量上,并随其同步旋转;与此同时,将定子电压信号 U_s 通过锁相环运算,获得定子电压向量在其静止 $\alpha \beta$ 坐标系下相对于 α 轴的位置角 θ_s ;光电码盘信号经 DSP(图 2 中 $\int dt$ 模块)获得转子的位置角 θ_m ,而转子相对于电网电压 α 轴的实际位置角为 $\theta_r = \theta_0 + \theta_m$;从而可得用于坐标变换的滑差角度 $\theta_{slip} = \theta_1 - \theta_r$ 。此处的滑差相位角即为坐标变换相位角。图 2 中滑差角计算模块即为图 4 中的结构所示。

[0034] 步骤 14:将电网电压 d 轴分量 U_{gd} 与定子三相电压 d 轴分量 U_{sd} 分别作为纯积分器输入端的参考给定值与反馈值,将该纯积分器的输出作为转子电流 q 轴分量的参考给定值 I_{rq}^* ,设定转子电流 d 轴分量的参考给定值 I_{rd}^* 为 0,形成电网电压幅值外环控制;

[0035] 结合图 2 及图 3 所示,将三相电网电压、定子电压、转子电流通过帕克坐标变换,转换至同步旋转坐标系下,于是有 dq 轴电网电压 U_{gdq} , dq 轴定子电压 U_{sdq} , dq 轴转子电流 I_{rdq} ;

将电网电压 d 轴分量 U_{gd} 信号作为参考给定值, 定子三相电压 d 轴分量 U_{sd} 信号作为反馈值, 通过纯积分调节器, 调节器输出作为转子电流 q 轴分量的参考给定值, 设定转子电流 d 分量的流参考给定值设为 0, 并通过电流内环的 PI 调节器实现对转子励磁电流幅值的控制, 从而实现定子电压对电网电压幅值的同步跟踪。

[0036] 步骤 15: 将转子电流 q 轴分量的参考给定值 I_{rq}^* 与转子电流 q 轴分量反馈值 I_{rq} 经加法器输出至比例积分调节器得到转子电压 q 轴分量的给定值 U_{rq}^* , 将转子电流 d 轴分量的参考给定值 I_{rd}^* 与转子电流 d 轴分量反馈值 I_{rd} 经加法器输出至比例积分调节器得到转子电压 d 轴分量的给定值 U_{rd}^* , 形成转子电流内环控制;

[0037] 如图 2 所示, 本步骤中, 内环为转子 dq 电流内环, 采用了传统比例积分调节器。电网电压幅值跟踪外环的输出作为内环 q 轴电流的参考给定值, 用于控制励磁电流的幅值, 而转子 d 轴电流参考给定值保持为 0, 即保证转矩电流为 0; 电网电压相位跟踪外环的输出作为转子初始位置角信号, 一方面作为内环电流反馈信号的帕克坐标变换相位角, 另一方面作为内环输出电压的反帕克坐标变换相位角, 从而实现定子电压相位的调整。

[0038] 步骤 16: 判断定子电压与电网电压的幅值误差 ε_v 、相位误差 ε_θ 及持续周波是否在设定范围内, 所述幅值误差 ε_v 小于 10V, 相位误差 ε_θ 小于 5° , 持续周波大于 5 周。如果是, 则执行步骤 17: 并网接触器合闸实现并网。如果不是, 则重新判断。

[0039] 步骤 18: 将系统切换至功率解耦控制模式。

[0040] 下面将结合公式对本发明实施例中的控制方法做出具体介绍。

[0041] 如图 2 所示, 本发明以电网电压定向矢量控制为例介绍转子侧励磁电源的数学模型, 采用电动机惯例, 于是, 如式 1、式 2 所示为 DFIG 在同步旋转坐标系下的定子、转子磁链和定子、转子电压数学模型:

$$[0042] \quad \begin{cases} \psi_{sdq} = I_{sdq} L_s + I_{rdq} L_m \\ \psi_{rdq} = I_{sdq} L_m + I_{rdq} L_r \end{cases} \text{式 1}$$

$$[0043] \quad \begin{cases} V_{sdq} = I_{sdq} R_s + \frac{d}{dt} \psi_{sdq} + j\omega_1 \psi_{sdq} \\ V_{rdq} = I_{rdq} R_r + \frac{d}{dt} \psi_{rdq} + j\omega_{slip} \psi_{rdq} \end{cases} \text{式 2}$$

[0044] 由式 1 和式 2 可得用于矢量控制的转子电压方程, 如式 3 所示:

$$[0045] \quad \begin{cases} V_{rd} = I_{rd} R_r + \sigma L_r \frac{d}{dt} I_{rd} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d}{dt} \psi_{sd} - \omega_{slip} \sigma L_r I_{rq} - \omega_{slip} \frac{L_m}{L_s} \psi_{sq} \\ V_{rq} = I_{rq} R_r + \sigma L_r \frac{d}{dt} I_{rq} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d}{dt} \psi_{sq} + \omega_{slip} \sigma L_r I_{rd} + \omega_{slip} \frac{L_m}{L_s} \psi_{sd} \end{cases} \text{式 3}$$

[0046] 在系统稳态运行时:

$$[0047] \quad \frac{d}{dt} \psi_{sd} = 0, \frac{d}{dt} \psi_{sq} = 0 \text{式 4}$$

[0048] 于是, 式 3 可简化为:

$$[0049] \quad \begin{cases} V_{rd} = I_{rd} R_r + \sigma L_r \frac{d}{dt} I_{rd} - \omega_{slip} \sigma L_r I_{rq} - \omega_{slip} \frac{L_m}{L_s} \psi_{sq} \\ V_{rq} = I_{rq} R_r + \sigma L_r \frac{d}{dt} I_{rq} + \omega_{slip} \sigma L_r I_{rd} + \omega_{slip} \frac{L_m}{L_s} \psi_{sd} \end{cases} \quad \text{式 5}$$

[0050] 在发电机并网稳态运行时, 定子电阻可忽略不计, 定子磁链幅值恒定, 因此:

$$[0051] \quad V_{sdq} = I_{sdq} R_s + \frac{d}{dt} \psi_{sdq} + j\omega_1 \psi_{sdq} \approx j\omega_1 \psi_{sdq} \quad \text{式 6}$$

[0052] 同时, 根据基于电网电压 d 轴定向的矢量控制原理得 $V_{sq} = 0$, 因此可得:

$$[0053] \quad \begin{cases} \psi_{sd} = \frac{V_{sq}}{\omega_1} = 0 \\ \psi_{sq} = -\frac{V_{sd}}{\omega_1} \end{cases} \quad \text{式 7}$$

[0054] 由式 7 可将式 5 进一步简化为:

$$[0055] \quad \begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \sigma L_r \frac{dI_{rd}}{dt} + \frac{\omega_{slip} L_m}{\omega_1 L_s} V_{sd} - \omega_{slip} \sigma L_r I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \sigma L_r \frac{dI_{rq}}{dt} + \omega_{slip} \sigma L_r I_{rd} \end{cases} \quad \text{式 8}$$

$$[0056] \quad \text{其中: } \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}, \quad \omega_{slip} = \omega_1 - \omega_r;$$

[0057] V_{sd} 、 V_{sq} 、 V_{rd} 、 V_{rq} 分别为定子电压的 d、q 轴分量, 转子电压 d、q 轴分量;

[0058] Ψ_{sd} 、 Ψ_{sq} 、 Ψ_{rd} 、 Ψ_{rq} 分别为定子磁链的 d、q 轴分量, 转子磁链 d、q 轴分量;

[0059] I_{sd} 、 I_{sq} 、 I_{rd} 、 I_{rq} 分别为定子电流 d、q 轴分量, 转子电流 d、q 轴分量;

[0060] R_s 、 R_r 为定、转子电阻;

[0061] L_s 、 L_r 分别为同步旋转 dq 坐标系下定、转子等效两相绕组自感;

[0062] L_m 为同步旋转 dq 坐标系下定子与转子同轴等效绕组间的互感;

[0063] ω_1 、 ω_r 为电网电压矢量的同步旋转角频率、发电机转子的电角频率。

[0064] DFIG 定子输出的视在功率 S_s 为:

$$[0065] \quad S_s = P_s + jQ_s = \frac{3}{2} V_{sdq} \hat{\mathbf{I}}_{sdq} = \frac{3}{2} V_{sdq} \frac{1}{L_s} (\hat{\psi}_{sdq} - L_m \hat{\mathbf{I}}_{rdq}) \quad \text{式 9}$$

[0066] 在 d 轴定子电压定向下, DFIG 定子输出有功功率 P_s 、无功功率 Q_s 分别为:

$$[0067] \quad \begin{cases} P_s = \frac{3L_m}{2L_s} V_{sd} I_{rd} \\ Q_s = -\frac{3V_{sd}}{2L_s} \left(\frac{V_{sd}}{\omega_1} + L_m I_{rq} \right) \end{cases} \quad \text{式 10}$$

[0068] 由式 10 可知, 当采用 d 轴定子电压定向控制策略时, 转子电流 d、q 轴分量分别成为有功 (转矩)、无功 (励磁) 电流分量, 即可通过对转子电流 d 轴分量 (转矩电流分量)、

转子电流 q 轴分量（励磁电流分量）的独立调节控制以实现 DFIG 定子输出有功、无功功率的解耦控制。为避免并网冲击电流，本发明采用了空载并网方式，这就必须保证定子的有功、无功功率均为 0，也就是在转子电流内环中必须保证参考给定值 $I_{rd} = 0$ ， $I_{rq} = V_{sd}/(\omega_1 \times L_m)$ 。然而，励磁电流分量 I_{rq} 的参考给定值对发电机参数敏感，容易由于参数计算的误差引起定子电压幅值与电网电压幅值相差较大，进而引起并网冲击电流过大，导致并网失败。因此，本发明采用了电网电压幅值跟踪外环的闭环控制方式，以确保并网时刻定子电压幅值与电网电压幅值相近，从而实现空载并网。

[0069] 如图 3 所示，由于采用了电网电压定向矢量控制方式，因此电网电压的 d 轴分量即为电网电压的相电压幅值。空载并网的必要条件之一即定子电压幅值和电网电压幅值相同，本发明通过电网电压幅值跟踪闭环控制的方式，来实现这一必要条件。为保证空载并网，转子电流内环的转矩电流参考给定值 I_{rd}^* 必须保持为 0。由于定子电压幅值跟踪外环的输出即为 q 轴电流内环的给定，并由式 10 可知，励磁电流参考给定值 I_{rq}^* 与定子电压 d 轴分量 V_{sd} 之间为零阶传递函数关系，因此，仅需一个纯积分调节器即可实现闭环补偿控制。

[0070] 图 5 所示为定子 $\alpha_s \beta_s$ 坐标系、转子 $\alpha_r \beta_r$ 坐标系与同步旋转 dq 坐标系的关系图。

[0071] 由图可知，转子坐标系下的矢量转换至定子坐标系的关系如下：

$$[0072] \quad F_{r\alpha\beta} e^{j(\theta_m + \theta_0)} = F_{s\alpha\beta} \text{ 式 11}$$

[0073] 由图 2 所示控制框图可知，系统通过控制输出至转子绕组的转子电压向量的幅值和相位来实现对转子电流的控制，进而实现有功、无功功率的解耦控制。由于控制的是输出至转子绕组的电压向量，因此，转子坐标系下的控制向量的空间位置直接影响着定子坐标下感应出来的定子电压空间向量的相位。

[0074] 如附图 4 所示，电网电压经锁相环计算输出的电网电压空间向量位置角 θ_1 作为参考给定值，定子电压锁相环计算得出的定子电压控制矢量位置角 θ_s 作为反馈信号，通过一个纯积分调节补偿器进行控制，输出为转子的初始位置角 θ_0 。通过转子初始位置角 θ_0 的补偿控制，使转子电压控制向量的位置角随之改变，从而在定子侧感应的定子电压向量的空间位置角也随之改变，进而实现对电网电压空间向量位置角的跟踪，实现电网电压相位跟踪控制。

[0075] 只要在定子电压和电网电压幅值的误差小于 ε_v （通常 ε_v 取 10 伏以下），同时定子电压和电网电压相位误差小于 ε_θ （通常取 5 度以内），并持续 n 个周波以上时（通常取 5 个周波以上），控制器即可发出并网合闸指令，完成发电机组并网。

[0076] 如图 6 所示为发电机并网后系统由电网电压同步跟踪模式切换至有功、无功功率解耦控制的原理框图。在控制器接收到并网合闸状态反馈信号时，将电网电压幅值跟踪外环的最终输出状态，作为有功、无功功率外环的初始状态，并将运行模式由电网电压同步跟踪外环平滑切换至有功、无功功率外环；在双馈感应风力发电机的同步过程中，电网电压幅值跟踪外环的最终输出状态 Y_{final} 作为有功、无功功率外环的初始状态 X_{PQinit} ，如式 12 所示：

$$[0077] \quad X_{PQinit} = Y_{final} = \begin{bmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_{rq}^* \end{bmatrix} \text{ 式 12}$$

[0078] 从而避免了切换过程中，由于电网电压幅值跟踪外环输出的内环电流参考给定值

与功率外环的输出参考给定值的差异而引起切换过程中的电流冲击 ;最终实现双馈感应风力发电机的柔性并网。

[0079] 采用上述方案后,本发明采用双外环、单内环的级联矢量控制同步跟踪策略 ;以及在并网后的平滑运行模式切换策略。双外环即电网电压幅值跟踪控制外环和电网电压相位跟踪控制外环,两个环路均采用了纯积分控制器,这样减小了定子电压同步过程中的震荡 ;内环为转子 dq 电流内环,采用了传统 PI 调节器。电网电压幅值跟踪外环的输出作为内环 q 轴电流的参考给定值,用于控制励磁电流的幅值,而转子 d 轴电流参考给定值保持为 0,即保证转矩电流为 0 ;电网电压相位跟踪外环的输出作为转子初始位置角信号,加入内环反馈信号以及输出转子控制向量的坐标变换中,从而实现定子电压相位的调整。平滑运行模式切换是将切换前的电网电压幅值跟踪外环的最终输出状态,即 dq 轴电流参考给定值,作为功率外环积分器的初始值,以防止功率外环切入后,由于参考值给定值的差异引起给定阶跃,从而造成切换过程中的电流冲击。整个柔性同步并网过程避免了转子初始位置角的检测,缩短了柔性并网过程的时间,提高了柔性并网的稳定性,减小了并网瞬间的冲击电流。

[0080] 本发明的控制方法与传统的控制方法相比,简单易行,稳定可靠。在外环控制器上,采用了纯积分控制器,简化了控制器的结构,易于实现。在实现同步并网的同时,也实现了转子电流的解耦控制,为并网后切换至有功、无功功率的解耦控制模式提供了便利性。在并网后模式切换时,采用了状态参数传递的方式,实现了功率模式的平滑切换。

[0081] 本发明方法除适用于并网型变速恒频双馈感应风力发电系统外,还能适用于各种三相并网逆变装置,如太阳能、电池储能发电系统的并网逆变装置。需要说明的是,上述装置和系统内的各单元之间的信息交互、执行过程等内容,由于与本发明方法实施例基于同一构思,具体内容可参见本发明方法实施例中的叙述,此处不再赘述。

[0082] 本领域普通技术人员可以理解上述实施例的各种方法中的全部或部分步骤是可以通程序来指令相关的硬件来完成,该程序可以存储于一计算机可读存储介质中,存储介质可以包括 :闪存 (Flash Memory)、只读存储器 (ROM, ReadOnly Memory)、随机存取存储器 (RAM, Random Access Memory)、磁盘或光盘等。

[0083] 以上对本发明实施例所提供的双馈风力发电机并网控制方法,进行了详细介绍,本文中应用了具体个例对本发明的原理及实施方式进行了阐述,以上实施例的说明只是用于帮助理解本发明的方法及其核心思想 ;同时,对于本领域的一般技术人员,依据本发明的思想,在具体实施方式及应用范围上均会有改变之处,综上所述,本说明书内容不应理解为对本发明的限制。

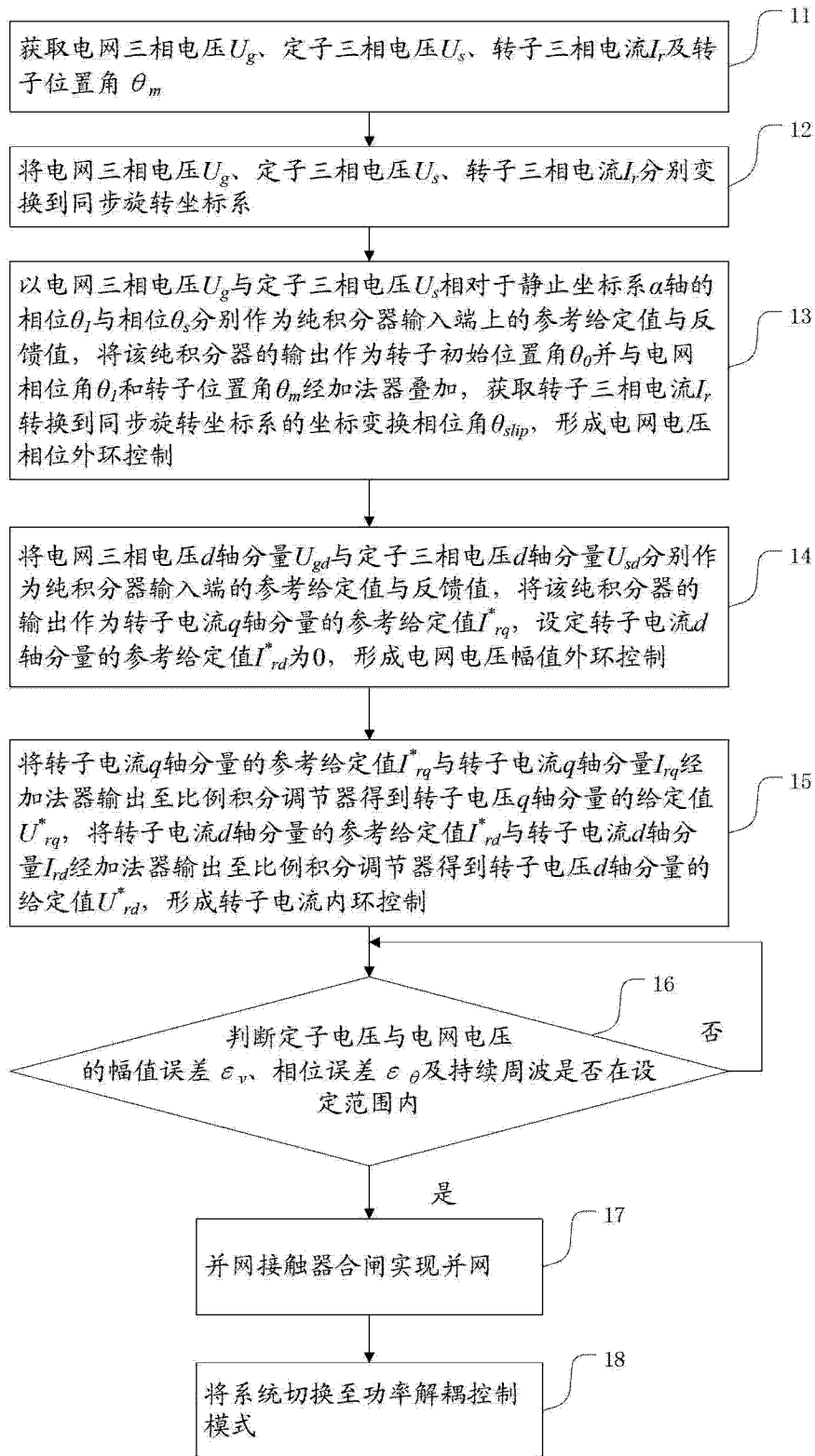


图 1

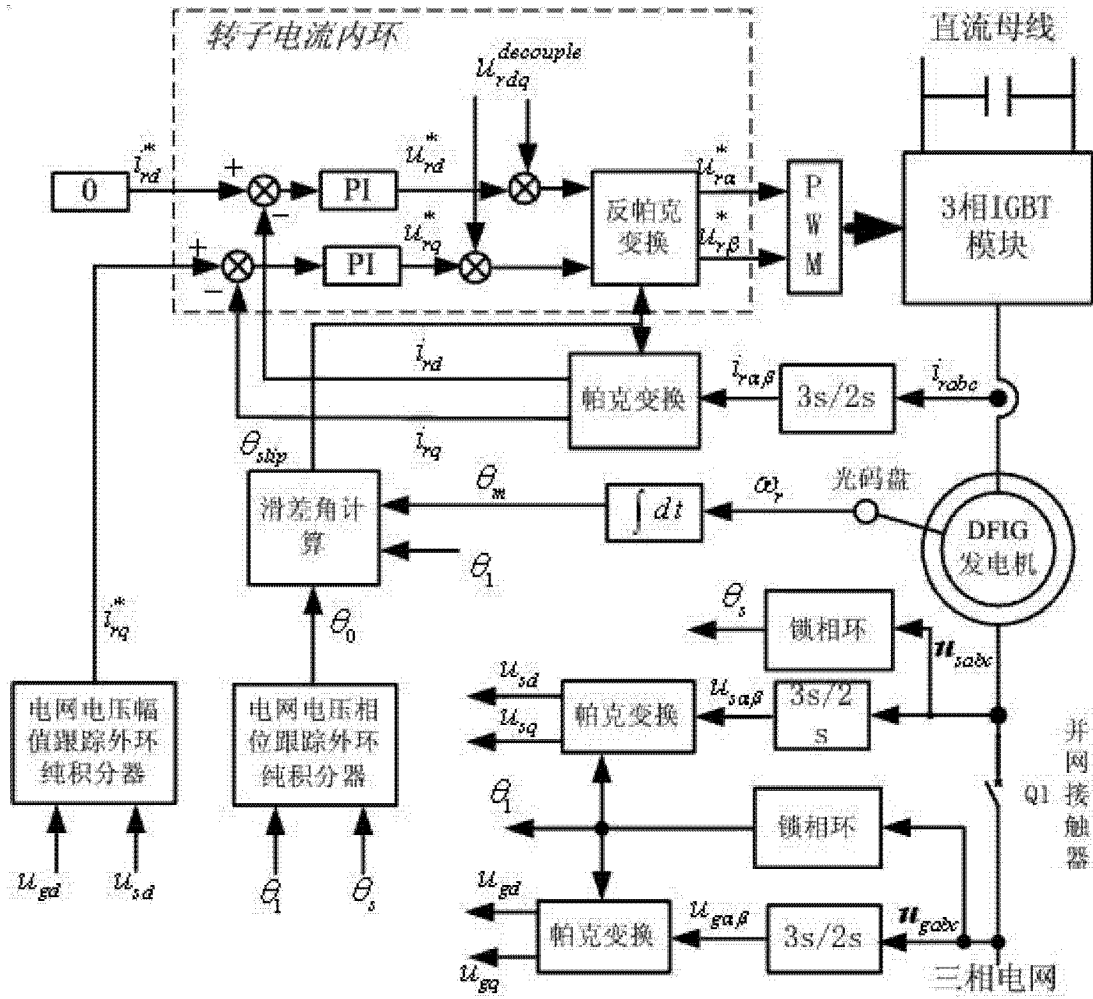


图 2

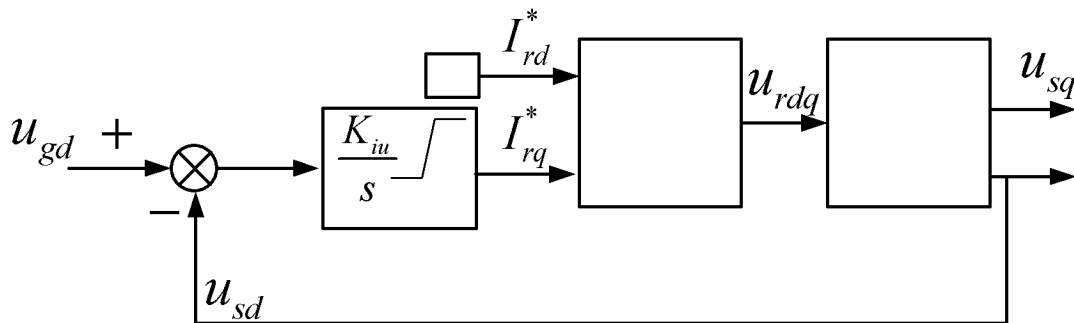


图 3

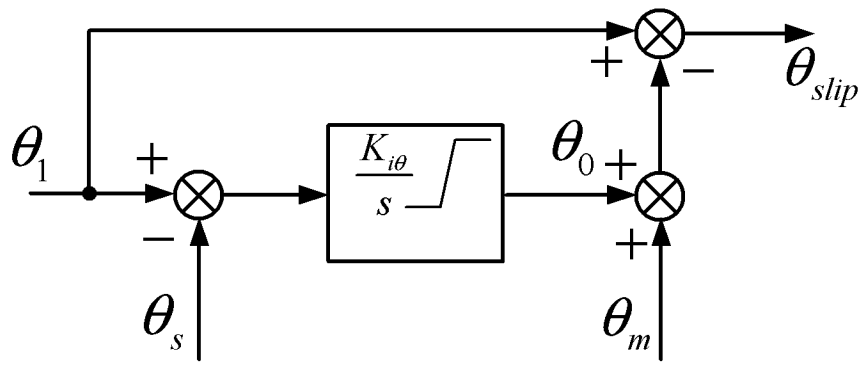


图 4

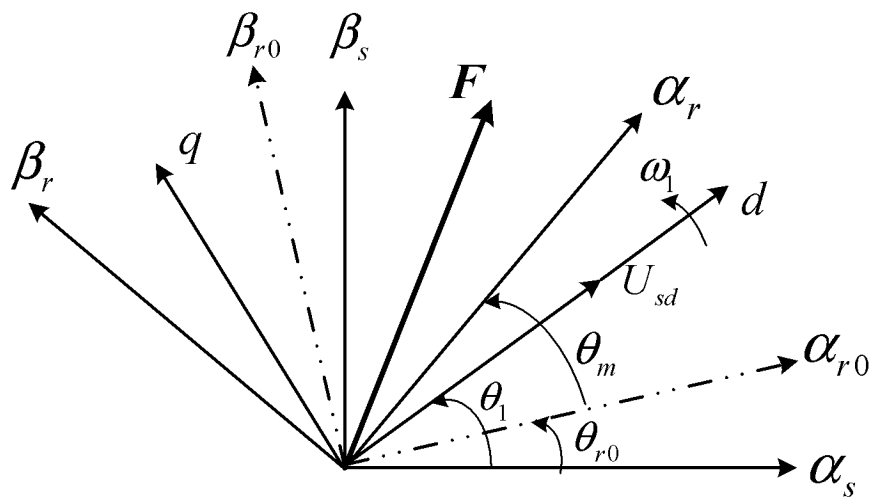


图 5

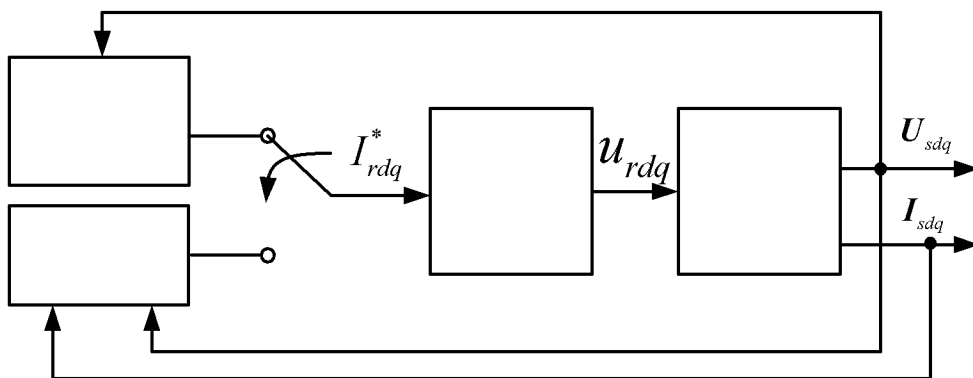


图 6