

基于 PI 参数优化的风电系统变流器的研究

党存禄¹, 张磊^{1,2}, 宫有民¹, 周明星¹

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 通过风电系统变流器的模型, 提出在机侧和网侧采用 PWM 控制。机侧采用速度外环和电流内环的双闭环控制策略; 网侧采用直流电压外环和电流内环的双闭环控制策略。对 PI 控制器的参数进行整定, 通过 ITAE 寻找最优参数, 使得系统实现优化控制及单位功率因数传递电能。仿真和实验表明, 整定的 PI 控制器参数可使系统达到很好的控制效果。

关键词: 风力发电; PI 控制器; 最优控制; 解耦控制

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)15-0071-03

The research of wind power generation converter based on the parameters optimization of PI controller

Dang Cunlu¹, Zhang Lei^{1,2}, Gong Youmin¹, Zhou Mingxing¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Key Laboratory of Gansu Advanced Control for Industrial Processes, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Based on the wind power generation system's converter model, this article adopts the PWM control on both the generator side and the grid-side, and the use of double loop control on the generator side's speed outer loop and the current inner loop; but adopts the strategy of double loop control of the direct current voltage's outer-loop and the electric current's inner-loop on the grid-side. Through the setting of PI controller's parameters, this article adopts the use of ITAE to look for the optimal parameters, so that the system can realize good optimization control thus to realize the transfer of electricity through high power factor. The results of simulations and experimental show that the setting of PI controller's parameters can make the system reach good effect of control.

Key words: wind power generation; PI-controller; optimal control; decoupling control

直驱型风力发电系统是一种新型的风力发电系统, 它采用风轮直接驱动多极低速永磁同步发电机发电, 通过功率变换电路将电能转换后并入电网, 省去了传统双馈式风力发电系统中的齿轮箱, 系统效率大为提高, 有效抑制了噪声干扰^[1]。

目前风力发电系统通常采用不控整流或二电平 PWM 整流电路, 导致交流侧电压电流波形较差, 功率因数不高, 尤其对于交流侧发电机的稳定正常运行极为不利。因此, 本文介绍了采用双 PWM 控制, 机侧和网侧都采用双闭环的控制策略, 并对内环和外环的 PI 控制器进行设计, 通过 ITAE 寻找最优的比例系数和积分系数, 使得系统达到很好的解耦效果, 实现了高功率因

数传递。

1 直驱风力发电系统电压源型基本结构

电压源型的永磁电机直驱风力发电系统的电路拓扑结构^[2], 采用大功率的电力电子器件绝缘双极型晶体管(IGBT), 是一种结合大功率晶体管及功率场效应晶体管两者特点的复合型电力电子器件, 既具有工作速度快, 驱动功率小的优点, 又兼有大功率晶体管的电流大, 导通压降低的优点。因此在系统中采用基于 IGBT 的整流器和逆变器, 其拓扑结构为普通的三相桥式结构。直流环节并联大电容, 可维持电压恒定。电网侧串联电感可用于滤波。通过系统的控制, 将永磁电机发出的变频变幅值电压转化为可用的恒频电压, 达到了俘获最大风

技术与方法 Technique and Method

能的目的。

电压源型变流器主电路的拓扑结构^[3]如图 1 所示。设风力发电系统电机侧三相电压和电流分别为 u_{ga} 、 u_{gb} 、 u_{gc} 与 i_{ra} 、 i_{rb} 、 i_{rc} ，回路电阻和电感 R_g 、 L_g 、 i_{dk} 、 i_L 分别为整流侧的输出电流和逆变侧的输入电流， C 为直流环节的并联电容； u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 和 i_{ia} 、 i_{ib} 、 i_{ic} 分别为电网侧的三相相电压和相电流， i_{dk} 、 i_L 分别为整流侧输出电流和逆变侧输入电流， L_0 为网侧导线上电感与变压器漏感之和， R_0 为导线上电阻与变压器绕组电阻之和。

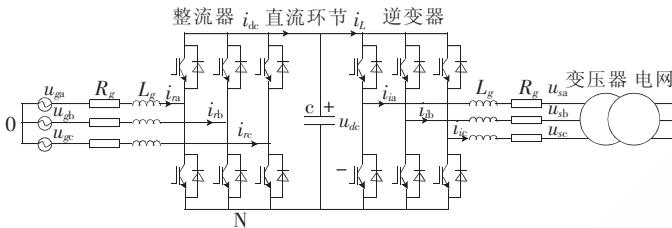


图 1 电压源型变流器主电路的拓扑结构

电压型整流器的 d-q 数学模型如下：

$$\begin{cases} L_g \frac{di_{rq}}{dt} = -\omega_g L_g i_{rd} - R_g i_{rq} + u_{gr} - H_q u_{dk} \\ L_g \frac{di_{rd}}{dt} = \omega_g L_g i_{rq} - R_g i_{rd} + u_{gr} - H_d u_{dk} \\ C \frac{du_{dk}}{dt} = \frac{3}{2} (i_{rq} H_q + i_{rd} H_d) - i_L \end{cases} \quad (1)$$

电压型逆变器的 d-q 数学模型如下：

$$\begin{cases} L_0 \frac{di_{iq}}{dt} = -R_0 i_{iq} - \omega_s L_0 i_{id} + M_q u_{dq} - u_{sq} \\ L_0 \frac{di_{id}}{dt} = -R_0 i_{id} + \omega_s L_0 i_{iq} + M_q u_{dq} - u_{sd} \\ C \frac{du_{dq}}{dt} = i_{dk} - \frac{3}{2} (M_d i_{sd} + M_q i_{sq}) \end{cases} \quad (2)$$

其中， i_{sq} 、 i_{sd} 为网侧三相电流的 d、q 轴分量； u_{sq} 、 u_{sd} 为网侧三相电压的 d、q 轴分量； ω_s 为网侧电气角频率； M_q 、 M_d 为 g 轴、d 轴开关函数。

2 PI 控制器的参数整定

为了使得系统达到最优，实现控制效果的优化，需对 PI 控制器的参数进行整定。PI 调节的控制规律^[4-5]为：

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt] \quad (3)$$

式(3)中， K_p 为比例系数， T_i 为积分时间常数， $k_{ia} = k_p / T_i$ 为积分系数。

采用周期 T_r 对式(3)作离散化处理，可获得数字 PI 调节器的控制算法。令： $u(kT_r) = u(kT_r)$ ， $e(kT_r) = e(kT_r)$ ，

$$\int_0^t e(t) dt = T_r \sum_{j=1}^k e(jT_r), \quad k_i = k_{ia} T_r \quad (4)$$

$$u(kT_r) = k_p e(kT_r) + k_{ia} T_r \sum_{j=1}^k e(jT_r) = k_p e(kT_r) + k_i \sum_{j=1}^k e(jT_r) \quad (5)$$

从式(5)可以看出 k_p 、 K_i 的确定非常重要。因此 PI 控

制器的参数采用最优控制器设计程序来选择控制器参数。该程序可以用 OCD 同时设计串级控制器的内环和外环，在 Simulink 中建立仿真模型，在该模型中定义内环的两个参数和外环的两个参数，并定义了误差的 ITAE 指标。启动 OCD，在编辑框中写入四个参数，在时间栏写入终止时间 2，然后生成目标函数 Matlab 文件，点击优化按钮，则可以得出 ITAE 最优化设计参数：机侧的内环 ITAE 最优设计参数为 $K_p=1.0079$ ， $K_i=3.9627$ ，外环为 $K_p=0.86352$ ， $K_i=0.4716$ 。网侧的内环 ITAE 最优设计参数为 $K_p=10.8489$ ， $K_i=0.9591$ 。外环为 $K_p=0.3636$ ， $K_i=0.0042$ ，这样即使是控制大时间延迟系统，也可以得到较好的效果。

3 机侧和网侧的控制策略

风力发电系统采用双 PWM 变流器形式的控制器，它由网侧变流器和机侧变流器组成^[6]。机侧采用速度外环和电流内环的双闭环控制策略；而网侧采用直流电压外环和电流内环的双闭环控制策略。

3.1 机侧 PWM 的控制策略

根据永磁电机的矢量控制原理，通过转子磁场定向控制，将定子电流的合成矢量定向在永磁同步电机 dq 坐标系下的 q 轴上，使得 $i_d=0$ ，从而实现发电机的有效控制。其中速度外环的参考转速 ω^* 由最大功率追踪算法(MPPT)给出，根据发电机实际转速和输出有功功率变化得出一个最优 ω^* ，与实际电机转速相比较，经过比例积分调节器得到有功电流的参考值 i_q^* ，无功参考电流 i_d^* 设为零，发电机的电磁转矩 T_e 为：

$$T_e = 1.5 P \lambda i_q \quad (6)$$

从式(6)可以看出，只要调节 i_q 就可以控制发电机的转矩，并改变发电机的转速，从而跟踪最优 ω^* 。此时发电机重新达到稳定，发电机电气转矩等于风机机械转矩。在电流内环控制中，首先检测发电机三相电流(i_a 、 i_b 、 i_c)，对其进行旋转坐标变换(i_d 、 i_q)。

发电机的电压方程为：

$$\begin{cases} u_d = R_g i_d - \omega \psi_d + p \psi_d \\ u_q = R_g i_q - \omega \psi_q + p \psi_q \end{cases} \quad (7)$$

从式(7)可知，d、q 轴坐标系下的状态变量存在着耦合关系，即 u_q 不仅依赖于 i_q ，而且也与 i_d 有关系。为了方便控制系统的设计，需通过安全去耦控制实现精确的线性化控制。对于永磁电机，不需要提供励磁电流，定子电流只产生转矩，因此设置 d 轴电流 i_d 为 0，从而在最小电流的情况下得到最大的电磁转矩。电流环采用比例积分调节器，根据解耦控制得到所要调制的电压 u_d 、 u_q 。即：

$$\begin{cases} u_d = \left(K_{ip} + \frac{K_{id}}{S} \right) (i_d^* - i_d) - \omega L_q i_q \\ u_q = \left(K_{ip} + \frac{K_{id}}{S} \right) (i_q^* - i_q) - \omega L_d i_d + \omega \psi_f \end{cases} \quad (8)$$

3.2 网侧控制策略

对电网的控制目标有两个：(1) 保持恒定的直流电

技术与方法

Technique and Method

压;(2)单位功率因数并网。为了实现上述控制目标,网侧控制策略为外环直流电压和无功电流 i_q 的给定值,内环为电流环的双闭环控制策略。网侧输入有功功率和无功功率分别为:

$$\begin{cases} P=u_{sd}i_{sd}+u_{sq}i_{sq} \\ Q=u_{sd}i_{sq}-u_{sq}i_{sd} \end{cases} \quad (9)$$

由上面的分析可以看出,经过坐标变换,实现了整流器输入有功和无功的解耦,把三相坐标系中的交流量变成了同步旋转坐标系中的直流量,为实现高性能的控制提供了条件。

电流内环依然采用基于旋转坐标轴的解耦控制。由于 dq 轴变量相互耦合,为此电流调节器采用 PI 调节器,前馈解耦为:

$$\begin{cases} u_{sd}^*=u_{sd}+i_d(\omega_g L_0 - G_c(s))(i_{sd}^*-i_{sd}) \\ i_{sd}^*=G_c(s)(u_{dc}^*-u_{dc}) \\ u_{sq}^*=u_{sq}-i_q(\omega_g L_0 + G_c(s))(i_{sq}^*-i_{sq}) \end{cases} \quad (10)$$

各电流、电压的输出值与指令值作差,通过 PI 调节后,在经过旋转地两相坐标变成静止的两相坐标,进入 SVPWM 形成各自的 PWM 控制信号。由于采用了 SVPWM 提高了直流电压的利用率。

4 仿真和实验结果

利用前述的电压型背靠背变流器的数学模型和机侧、网侧的控制策略,很容易建立仿真模型,仿真模块主要有风力机和主回路负载模块、机侧变流器控制模块、网侧变流器控制模块、电压电流采样模块、坐标变换模块、电压电流 PI 调节模块和 PWM 波发生模块。

在交直交变频器运行时,由于给定直流母线电压为 400 V,从图 2 可以看出,在风速变化时,电压都基本上能较好地稳定在 400 V,保持了直流连接电压为恒定值。由于采用了直流电压 PI 调节,克服负载扰动,实现了稳态无静差,系统响应速度快。图 3 为机侧三相交流电流波形,机侧三相交流电流基本上是正弦波。图 4 为机侧 dq 轴电流波形,可以看出机侧 i_d 基本维持在零附近,从而验证了 $i_d=0$ 的控制策略,而 i_q 随指令值的变化而变化。图 5 为网侧 dq 轴电流波形,网侧 i_q 基本为零,从而验证了 $i_q=0$ 的控制策略,而 i_d 随指令值的变化而变化。图 6 为网侧 a 相电压电流波形,可以看出电压与电流频率为 50 Hz,与电网频率完全同步,且它们的相位正好相差 180° ,且电流为正弦波形,由此可以得出系统向电网输送功率,实现了单位功率因数。

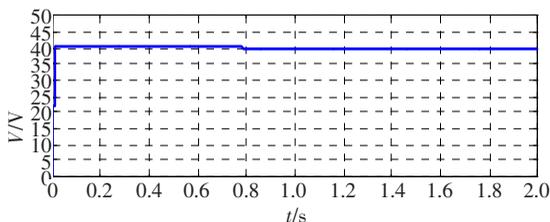


图2 直流侧电压

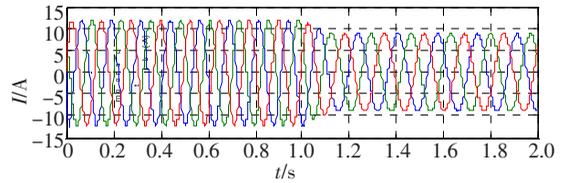


图3 机侧三相交流电流波形

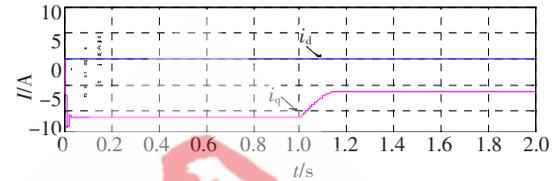


图4 机侧 dq 轴电流波形

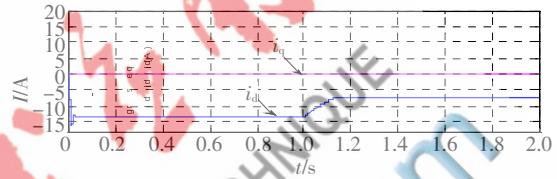


图5 网侧 dq 轴电流波形

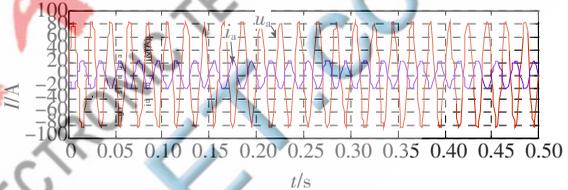


图6 网侧 a 相电压电流波形

在仿真研究的基础上,对系统的控制进行了实验验证。发电机三相交流电源经滤波电感送到整流器的三相桥臂,整流器的直流输出就是逆变器的直流侧输入电源,逆变器的交流侧直接接入电网,光电编码器实时检测永磁同步电机的转速。整流器和逆变器分别由 DSP 芯片 TMS320F2S12(1)与 TMS320F2812(2)控制,电压、电流传感器测出所需各部分的电压、电流值,送入 DSP 芯片,实现系统的控制策略。用两台上位机分别与两块 DSP 芯片进行通信,主要控制系统的启、停、监控,负责实时数据的接收、显示等任务,它是人机交互的中介。

采用主电路和控制策略进行实验,实验参数设置如下:直流电容 C 为 470×10^{-6} F,直流母线电压参考值设置为 400 V,网侧电感 $L_0=4.8 \times 10^{-3}$ H,电阻 $R_0=0.5 \Omega$,机侧电感 $L=0.6 \times 10^{-6}$ H。三相交流输入电压为 100 V,采样频率 $f=2.5$ kHz,由此得出的直流母线实验波形和仿真的直流母线电压的波形一致。而电网侧 a 相电压与逆变器 a 相电流波形也一致,都是反相,这就证明了系统运行单位功率因数,通过谐波电流分析电流 THD 为 4.1%。

本文采用电压型背靠背变流器结构,仿真和实验结果表明,采用双 PWM 控制策略和优化的 PI 参数能够很好地控制网侧和机侧电流,同时有效地控制直流母线

电压,使得输出电压纹波小、响应速度快。实验也表明控制策略和控制电路正确有效,能实现能量的双向传递,因此可运用于兆瓦级变频器的变流器控制研究。

参考文献

- [1] 温春雪,张利宏,李建林,等.三电平 PWM 整流器用于直驱风力发电系统[J].高电压技术,2008(4):191-195.
- [2] 张子皿.直驱型风力发电系统变流控制技术的研究[D].北京:华北电力大学,2010.
- [3] 梁英.风力发电系统中变流技术的研究[D].湖南:湖南大学,2009.
- [4] 李正军.计算机控制系统[M].北京:机械工业出版社,

2005.

- [5] 张雪群,曾岳南,梁锦泽.高功率因数 PWM 整流器 PI 调节器的仿真研究[J].计算机仿真,2008,25(1).
- [6] 李建林,许洪华.风力发电中的电力电子变流技术[M].北京:机械工业出版社,2008.

(收稿日期:2011-04-02)

作者简介:

党存禄,男,1964年生,教授,高级工程师,主要研究方向:电力电子与电力传动。

张磊,男,1985年生,硕士研究生,主要研究方向:电力系统分析与控制。

