

基于自抗扰的变速恒频双馈风力发电机并网控制研究

田永贵, 王 奔, 李小明, 吴桂良, 李 慧
(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 将矢量控制技术、非线性函数和自抗扰技术相结合, 提出了一种新型的变速恒频双馈风力发电机空载并网控制策略。双馈异步发电机在 dq 坐标系下的数学模型是非线性耦合系统。采用把系统分成“动态耦合”部分加上“静态耦合”部分的方法, 并且在控制量和输出量之间并行地嵌入自抗扰控制器来实现转子电压线性化解耦。利用 Matlab 软件搭建变速恒频双馈风力发电系统的仿真模型, 进行仿真分析。仿真结果表明, 所采用的控制策略能够完成双馈异步发电机的柔性接入电网, 并网运行效果理想, 实现了定子输出有功功率与无功功率的解耦控制。与 PI 控制策略相比, 自抗扰控制方案具有更好的动态响应性能。

关键词: 风力发电机; 矢量控制; 自抗扰控制; 解耦控制; 并网

Abstract: A control strategy is presented for no-load cutting-in of VSCF doubly-fed wind power generator, which combines the vector control, nonlinear function and auto/active disturbances rejection control (ADRC). The mathematic model of doubly-fed wind power generator is a nonlinear coupling system in $d-q$ coordinates. The system is divided into two parts, "dynamic coupling" and "static coupling", and embedded auto/active disturbances rejection controller in parallel between the input vector and the output vector to realize the linearized decoupling of rotor voltage. The simulation model of VSCF doubly-fed wind power generation system is established with Matlab. The simulation results show that the generator can be flexibly connected with power grid under the proposed control strategy. The proposed control strategy realizes the decoupling control of active and reactive power of stator output and has a good performance. Compared with PI control strategy, ADRC controller shows a better dynamic response performance.

Key words: wind turbine; vector control; ADRC control; decoupling control; cutting-in

中图分类号: TM734 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)02-0067-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.02.016

0 引言

近年来, 采用变速恒频双馈电机的风力发电系统成为国内外电力科研的一个热门方向。国内外许多学者对这种变速恒频双馈电机并网发电系统的数学模型及控制策略进行了深入研究。文献 [1-4] 建立了风力发电系统基于同步旋转坐标系下的数学模型, 并用反馈线性化理论、变结构控制理论、鲁棒控制理论、逆系统等多种控制方法设计了转子侧控制器。文献 [5] 设计出一种基于指数趋近率的积分变结构控制策略, 并分别在理想情况和电网电压波动情况下的双馈风力发电系统空载并网过程进行仿真分析, 改善了系统在电压波动时的运行特性。由于双馈风力发电机数学模型本身的复杂性, 这里将自抗扰技术(auto/active disturbances rejection con-

troller, ADRC) 引入双馈电机并网发电系统中, 避免了控制系统对复杂数学模型的过度依赖, 具有很强的鲁棒性。

ADRC 理论是 20 世纪 90 年代提出的一种控制策略。该方法吸收了现代控制的理论成果, 继承并发扬了 PID 思想的精髓, 融合了非线性控制的理念, 却又消除了 PID、非线性 PID 控制所固有的一些缺点。ADRC 技术已经在航空、航天、电力、化工、生物等领域得到广泛应用。这种控制方法对被控对象的数学模型依赖低, 具有响应速度快、控制精度高、超调量小和鲁棒性强等优点。文献 [6] 将 ADRC 引入到风力发电变桨系统中, 结果表明自抗扰控制具有良好的动态性能及对风速扰动的鲁棒性。文献 [7] 将自抗扰技术引用到三相电压型整流器中, 并优化了一阶自抗扰控制器进行控制, 实验结果证明了一阶自抗扰控制器在三相 PWM 整流器中具有优良的

控制性能及良好的鲁棒性。

在简要介绍风力发电系统并网原理的基础上，建立了基于同步旋转坐标系下 DFIG 的数学模型。为实现转子侧有功功率、无功功率的独立解耦控制，利用 ADRC 方法设计了应用于 DFIG 转子侧有功、无功双环控制器。利用 Matlab/Simulink 软件建立双馈风力发电机并网仿真模型，最后，研究了基于 ADRC 变速恒频双馈风力发电机的空载运行及并网全过程的动态性能。

1 数学模型

1.1 风力发电系统空载并网原理

双馈风力发电系统并网条件是发电机定子的输出电压与电网电压在幅值、频率及相位上一致。空载并网具体步骤为：当风速达到切入风速后，风力机带动双馈发电机升速；当发电机达到最小运行速度且满足转子励磁变流器容许范围时，交流励磁系统投入工作；控制定子空载电压跟随电网电压，当发电机定子输出电压与电网电压在幅值、相位、频率满足并网条件时，进行并网操作，并网完成后，发电机转入发电机运行控制。

为了实现双馈风力发电机组并网前的端电压准确调节，并网后输出的有功、无功功率的解耦控制，采用了定子磁场定向的矢量控制策略。

1.2 DFIG 数学模型

定子侧电压、电流的正方向取发电机惯例，转子侧电压、电流正方向取电动机惯例，可得到 DFIG 在定子同步转速 $d-q$ 坐标系下的数学模型^[8,9]。

定、转子电压方程为

$$\begin{cases} u_{ds} = -R_s i_{ds} - p\psi_{ds} + \omega_1 \psi_{qs} \\ u_{qs} = -R_s i_{qs} - p\psi_{qs} - \omega_1 \psi_{ds} \\ u_{dr} = R_r i_{dr} + p\psi_{dr} - \omega_s \psi_{qr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + p\psi_{qr} + \omega_s \psi_{dr} \end{cases} \quad (1)$$

定、转子磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} - L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} - L_m i_{qr} \\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} - L_m i_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} - L_m i_{qs} \end{cases} \quad (2)$$

电磁转矩、运动方程为

$$\begin{cases} T_e = \frac{3}{2} n_p L_m (i_{ds} i_{qr} - i_{qs} i_{dr}) \\ T_m - T_e = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_m}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

式中 R_s, R_r 分别为定、转子绕组的等效电阻； L_s, L_r, L_m 分别为 $d-q$ 轴定、转子绕组自感及互感； $i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, u_{ds}, u_{qs}, u_{dr}, u_{qr}$ 分别为 $d-q$ 轴定、转子电流和电压； $\psi_{ds}, \psi_{qs}, \psi_{dr}, \psi_{qr}$ 分别为 $d-q$ 定、转子磁链； ω_1 为同步角速度； ω_2 为转子角速度； $\omega_s = \omega_1 - \omega_2$ 为转差角速度； p 为微分算子； J 为转动惯量； n_p 为电机极对数； T_e, T_m 分别为电磁转矩和机械转矩。

将式(2)带入式(1)整理得

$$\begin{cases} u_{ds} = -(R_s + pL_s) i_{ds} + \omega_1 L_s i_{qs} + pL_m i_{dr} - \omega_1 L_m i_{qr} \\ u_{qs} = -\omega_1 L_s i_{ds} - (R_s + pL_s) i_{qs} + \omega_1 L_m i_{dr} + pL_m i_{qr} \\ u_{dr} = -pL_m i_{ds} + \omega_s L_m i_{qs} + (R_r + pL_r) i_{dr} - \omega_s L_r i_{qr} \\ u_{qr} = -\omega_s L_m i_{ds} - pL_m i_{qs} + \omega_s L_r i_{dr} + (R_r + pL_r) i_{qr} \end{cases} \quad (4)$$

空载时将 $i_{ds} = i_{qs} = 0$ 带入式(4)简化得

$$\begin{cases} u_{ds} = pL_m i_{dr} - \omega_1 L_m i_{qr} \\ u_{qs} = \omega_1 L_m i_{dr} + pL_m i_{qr} \\ u_{dr} = (R_r + pL_r) i_{dr} - \omega_s L_r i_{qr} \\ u_{qr} = \omega_s L_r i_{dr} + (R_r + pL_r) i_{qr} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)即为发电机空载时的数学模型。

2 自抗扰控制器

2.1 自抗扰控制器算法

自抗扰控制器是基于状态观测及其扰动补偿的非线性控制器。它对受控对象数学模型的依赖低，结构和算法简单，且响应速度快，控制精度高。所建立的自抗扰控制器主要由两部分构成：非线性状态反馈控制律(NLSEF)和扩张状态观测器(ESO)。非线性反馈控制律(NLSEF)为误差反馈环节；扩张状态观测器(ESO)通过输入的运算可以实时估计系统内、外部干扰以及由于模型不确定所引起的扰动，并对其进行补偿。通过优化后的控制器即为一阶自抗扰控制器，其原理图如图1所示。图中 v_{ref} 为被控输出量参考值； v 为被控输出量； z_1 为输出 v 的跟踪信号； z_2 为扰动观测值； u 为控制量； b 为补偿因子。

2.2 ESO

ESO 是一个动态系统，其输入为被控对象的输入-输出信息。它能对受干扰的系统进行自动补偿，

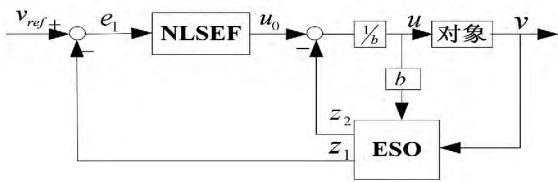


图 1 一阶自抗扰控制器原理图

从而实现精确跟踪参考值,最终达到预期设定目标值。ESO 的算法如式(6)、式(7)所示。

$$\begin{cases} e = v - z_1 \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e + bu \\ \dot{z}_2 = \beta_2 Fal(e, \alpha, \delta) \end{cases} \quad (6)$$

$$Fal(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sgn}(e) & |e| > \delta \\ e/\delta^{1-\alpha} & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (7)$$

式中 β_1, β_2 为输出误差校正系数,选择合适的值即可实现很好的状态估计; $Fal(e, \alpha, \delta)$ 为最优控制函数,是 ESO 控制核心部分,具有滤波功能^[10,11]; δ 为滤波因子; α 为非线性因子,其值对系统的低频振荡有影响,甚至可以起到消除振荡的作用。

2.3 NLSEF

一阶自抗扰控制器中的非线性 NLSEF 采用比例环节控制。

$$\begin{cases} e = v - z_1 \\ u_0 = ke \end{cases} \quad (8)$$

式中 k 为反馈控制率的比例系数,可影响系统电压及电流跟踪参考值的逼近程度。

3 定子磁场定向发电机空载运行自抗扰控制策略

3.1 定子磁场定向发电机空载并网控制策略

为了使定子电压的相位、幅值、频率同网侧电网电压保持一致,满足并网发电的要求,需要根据电网电压的信息对转子励磁电流进行控制。由于大容量发电机在工频下电感远大于电阻,所以电阻可以忽略不计。这里选取轴 d 方向与定子磁链方向重合,定子端电压 u 滞后定子磁链 $\psi_1 90^\circ$, u_m 为三相系统相电压的幅值, ψ_1 为定子磁链幅值,如图 2 所示。

当双馈发电机处于空载状态时,定子侧和电网脱离,定子电流 d, q 轴分量都为 0,在定子磁链定向和忽略定子绕组电阻的情况下,有

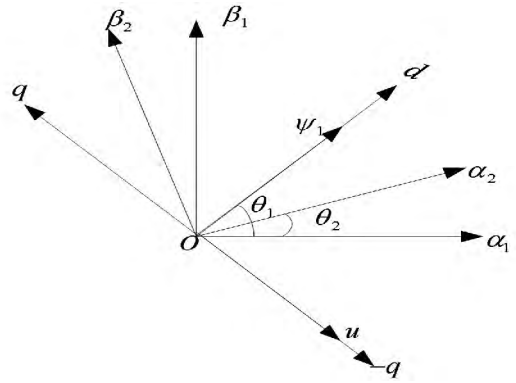


图 2 定子磁场定向示意图

$$\begin{cases} \psi_{ds} = \psi_1 \\ \psi_{qs} = 0 \\ u_{ds} = 0 \\ u_{qs} = -u_1 \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)代入式(1),并略去定子电阻可简化为

$$\begin{cases} p\psi_1 = 0 \\ u_1 = \omega_1 \psi_1 \end{cases} \quad (10)$$

即空载运行时,DFIG 定子磁链保持恒定,其值为定子电压与同步角速度之比。

同理,可将式(2)简化为

$$\begin{cases} \psi_1 = -L_m i_{dr} \quad i_{qr} = 0 \\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} \quad \psi_{qr} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)代入式(5)中可得

$$\begin{cases} u_{dr} = (R_r + L_r p) i_{dr} \\ u_{qr} = \omega_s L_r i_{dr} \end{cases} \quad (12)$$

考虑到实际调节过程中磁场定向的误差, i_{qr} 不可能为 0,更为适用的转子电压方程应为

$$\begin{cases} u_{dr} = (R_r + L_r p) i_{dr} - \omega_s L_r i_{qr} \\ u_{qr} = \omega_s L_r i_{dr} + (R_r + L_r p) i_{qr} \end{cases} \quad (13)$$

根据式(9)~式(13)可得到交流励磁双馈发电机空载并网控制策略。空载时,由三相电网电压得到电网电压的幅值和相角,从而计算出定子磁链和相角,然后将磁链的相角和转子位置相角一起用于矢量控制中的坐标变换。由式(13)可知,转子电压、电流除了一阶微分关系外,还存在交叉耦合。传统 PI 控制是根据式(13)设计 PI 调节器,将转子电流经闭环调节后加上耦合补偿项得到转子电压,很难做到精确解耦控制。这里采用多输入-多输出系统的解耦控制方法,然后设计系统的自抗扰控制器完成控制。

3.2 转子电流自抗扰控制器设计

对于转子电压方程

$$\begin{cases} u_{dr} = (R_r + L_r p) i_{dr} - \omega_s L_r i_{qr} \\ u_{qr} = \omega_s L_r i_{dr} + (R_r + L_r p) i_{qr} \end{cases} \quad (14)$$

选取状态变量 $[x_1 \ x_2] = [i_{dr} \ i_{qr}]$, 选取输入变量 $[u_1 \ u_2] = [u_{dr} \ u_{qr}]$, 选取输出变量 $[y_1 \ y_2] = [x_1 \ x_2]$, 得到状态变量的表达式为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = (-R_r x_1 + \omega_s L_r x_2 + u_1) / L_r \\ \dot{x}_2 = (-R_r x_2 - \omega_s L_r x_1 + u_2) / L_r \\ y_1 = x_1 \\ y_2 = x_2 \end{cases} \quad (15)$$

根据多输入-多输出系统解耦方法^[12]对式(15)系统进行线性化解耦, 然后, 设计出 $d-q$ 轴转子电流自抗扰控制器。ADRC1、ADRC2 算法如式(16)、式(17)。

$$\begin{cases} e = i_{dr}^* - z_1 \quad fe = Fal(e \ \alpha \ \delta) \\ \dot{z}_1 = z_1 + \beta_1 e + bu_{dr} \\ \dot{z}_2 = \beta_2 Fal(e \ \alpha \ \delta) \\ u_0 = ke \\ u_{dr} = (u_0 - z_2) / b \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} e = i_{qr}^* - z_1 \quad fe = Fal(e \ \alpha \ \delta) \\ \dot{z}_1 = z_1 + \beta_1 e + bu_{qr} \\ \dot{z}_2 = \beta_2 Fal(e \ \alpha \ \delta) \\ u_0 = ke \\ u_{qr} = (u_0 - z_2) / b \end{cases} \quad (17)$$

综上所述, 双馈风力发电机空载并网控制器控制框图如图3所示。 $i_{dr}^*、i_{qr}^*$ 为 $d-q$ 轴转子电流参考值; $i_{dr}、i_{qr}$ 为 $d-q$ 轴转子电流; $u_{dr}、u_{qr}$ 为转子 $d-q$ 轴电流误差经自抗扰控制器调节后的输出电压控制量; $\Delta u_{dr} = \omega_s L_r i_{qr}^*, \Delta u_{qr} = \omega_s L_r i_{dr}^*$ 为前馈补偿量; $u_{dr}^*、u_{qr}^*$ 为同步旋转坐标系中的转子电压控制量。

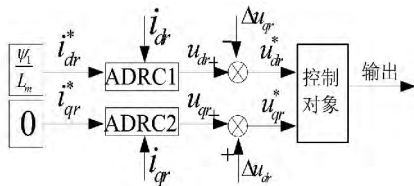


图3 双馈风力发电空载并网控制器

4 建模仿真

4.1 系统仿真建模

为了验证所建模型和控制器的正确性, 在 Matlab/Simulink 搭建了变速恒频双馈风力发电系统的仿真模型。所用参数见表1, 均已折算到定子侧。

表1 双馈风力发电系统仿真参数

名称	仿真参数		
风机(水平轴, 水平轴上风向)			
风 机	$\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$	$D = 5 \text{ m}$	$K = 5.289$
	$C_{pmax} = 0.48$	$\lambda_m = 8.2$	
双馈风电机(Y/Δ 联接 两对极)			
双 馈 风 电 机	$p = 3000 \text{ W}$	$U = 300 \text{ V}/50 \text{ Hz}$	$n = 1200 \text{ r/min}$
	$R_s = 0.1978 \ \Omega$	$R_r = 2.5312 \ \Omega$	$J = 0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
	$L_s = 0.2413 \text{ H}$	$L_r = 0.2413 \text{ H}$	$L_m = 0.2440 \text{ H}$

发电机空载时定子电压为输出量, 并网时定子电压受电网电压制约, 为输入量, 因此建立了空载和并网两个模型。仿真时, 空载模型首先运行, 然后, 进行并网控制过程仿真; 并网完成后, 将并网运行最后数据转移到并网模型, 转入并网运行, 实施最大风能追踪控制^[13, 14], 实现有功、无功功率的独立调节。

4.2 系统仿真结果

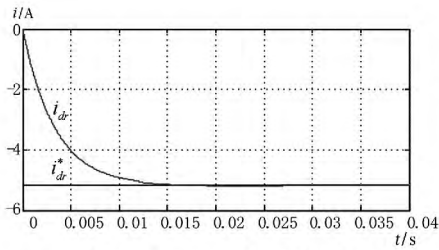
在 Matlab 仿真模型基础上, 对系统空载、并网过渡过程进行仿真研究。并网前, 取电网电压幅值、频率、相位信息作为控制依据, 经过控制系统调节发电机的转子励磁电压, 控制发电机的输出定子电压, 满足并网条件后进行并网。并网成功后切换为发电控制模式, 实施最大风能追踪控制, 实现有功、无功功率的独立调节。

4.2.1 理想情况下系统空载并网控制仿真

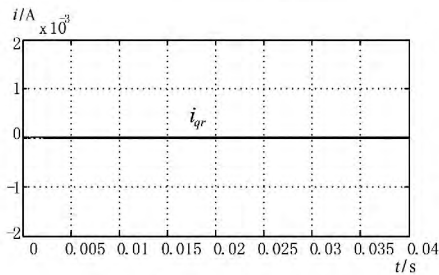
图4为理想情况下, 并网前空载运行的变速恒频风力发电系统分别采用 ADRC 控制和矢量控制相结合时转子电流、定子电压波形。如图4(a)、(b)所示, i_{dr} 很快跟踪上 i_{dr}^*, i_{qr} 很快稳定且几乎为0, 这与前面的控制策略是相符合的。如图4(c)、(d)所示, 定子 a 相输出电压 u_{as} 与电网电压 u_{gd} 绝对误差在半个周期内就达到了并网需要的精度, 且稳态误差近似为0。可见, 在理想情况下系统空载并网 ADRC 控制的动态性能和稳态性能都很优越, 对电网冲击不会太大, 符合并网发电的要求。

4.2.2 电压波动时系统空载并网控制仿真

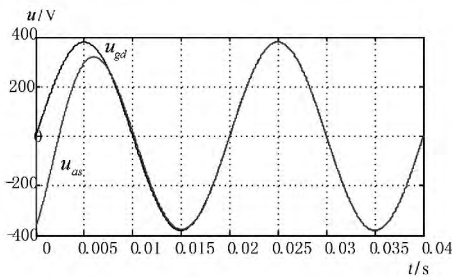
图5(a)、(b)分别为发电机在额定转速下和电网电压稳定在 300 V 时, 自抗扰控制与 PI 控制下输出定子电压波形图。可见, 采用自抗扰控制比采用



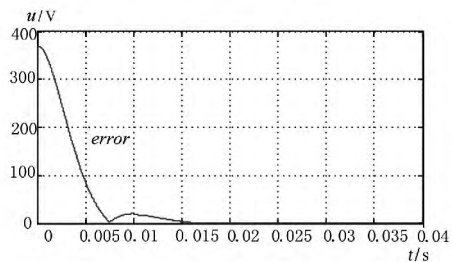
(a) 转子电流 i_{dr} 跟踪 i_{dr}^* 的波形



(b) 转子电流 i_{qr} 波形



(c) 定子电压 u_{as} 跟踪 u_{gd} 的波形



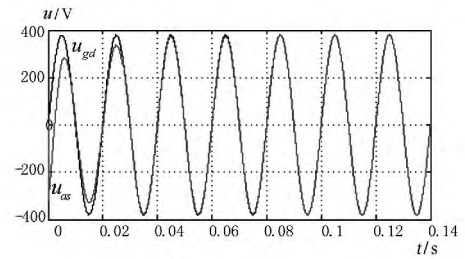
(d) 定子电压和电网电压误差绝对值波形

图 4 并网前过渡过程的仿真波形

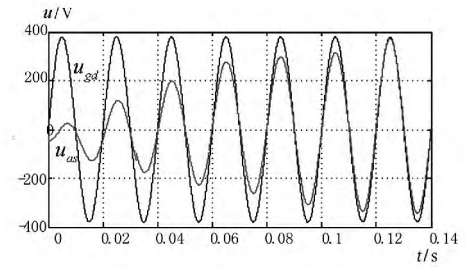
PI 控制的响应速度要快, 输出定子电压能迅速跟踪电网电压。考虑到实际电压波动频繁, 图 5(c)、(d) 分别为电压突变时, 采用自抗扰控制与 PI 控制的输出定子电压波形图。电网电压在 0.15 s 突降到额定值的 40%, 0.3 s 时恢复, 0.45 s 时仿真结束。由图中可以看出, PI 控制对电压波动调节比较缓慢, 跟踪效果较差; 而 ADRC 控制动态调节快, 定子电压完全跟踪上电网电压波动, 系统并网动态响应对电网电压等外部扰动具有较强的鲁棒性。

4.2.3 ADRC 控制下系统空载并网全过程仿真

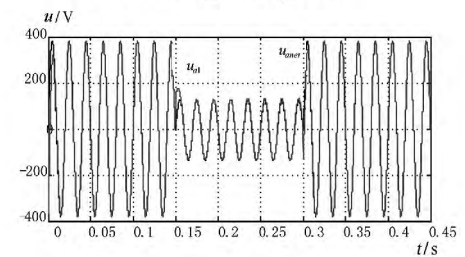
基于以上仿真结果, 可假设 ADRC 控制下的风力发电系统满足并网条件, 并于 1 s 时实施并网操作; 此时风速为 7 m/s, 10 s 时阶跃至 8 m/s, 20 s 时又变回 7 m/s, 30 s 时仿真结束; 并网过程中保持无功功率为 600 var 不变。对理想情况下系统从并网前空载运行到并网后最大风能追踪运行全过程进行仿真, 仿真结果如图 6 所示。



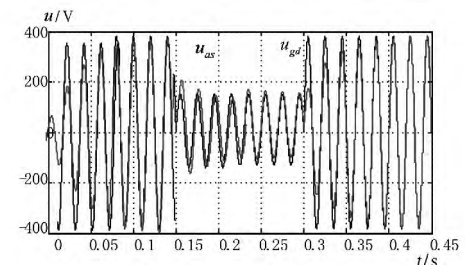
(a) 自抗扰控制下 u_{as} 跟踪 u_{gd} 波形



(b) PI 控制下 u_{as} 跟踪 u_{gd} 波形



(c) 电网电压突变时自抗扰控制下 u_{as} 跟踪 u_{gd} 的波形

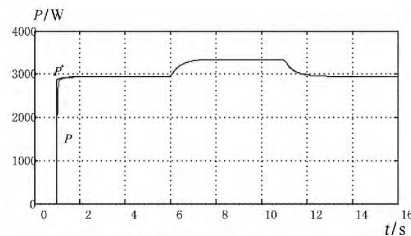


(d) 电网电压突变时 PI 控制下 u_{as} 跟踪 u_{gd} 的波形

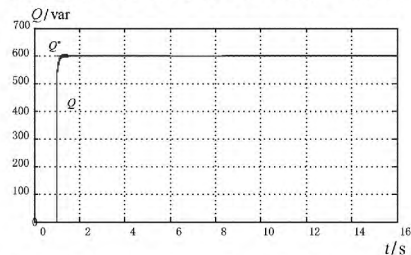
图 5 自抗扰控制与 PI 控制的仿真波形

图 6 为当风速变化时双馈发电机定子侧输出功率曲线。由图可以看出, 并网前由于系统空载, 双馈发电机定子输出有功功率和无功率均为 0; 系统

安全并网后,由图6(a)可见定子侧有功功率 p 随着风速的变化而变化,有功功率 p 能很好地跟踪有功功率指令 p^* 。图6(b)可见,定子侧无功功率 Q 很好地跟踪给定值600 var保持不变,这说明有功功率和无功功率能够实现独立调节。由此可知,自抗扰控制方案很好地实现了系统有功功率与无功功率的解耦,并且响应速度快,在风速变化情况下跟踪效果比较理想。



(a) 风速变化时定子有功 P 跟踪 P^* 的波形



(b) 风速变化时定子侧无功 Q 跟踪 Q^* 的波形

图6 自抗扰控制下空载并网整个过程仿真波形

5 结论

利用 Matlab 建立了变速恒频双馈风力发电系统的完整仿真模型,采用自抗扰控制与矢量控制相结合的控制策略,对发电机空载运行、并网全过程进行了仿真研究。仿真结果证明,该控制策略能够实现发电系统柔性接入电网;系统并网运行时,有功功率与无功功率能够实现独立调节,完成最大风能追踪控制;该控制策略与 PI 控制的策略相比,具有响应速度快、超调量小和跟踪性能好等更好的动态响应性能。

参考文献

[1] 郑雪梅,郭玲,徐殿国,等. 双馈感应发电机空载并网的高阶滑模变结构控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 12-16.
[2] 刘向向,李新宇,王奔,等. 变结构控制策略在直驱永

磁同步发电机中的应用[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 520-525.

[3] 刘其辉,贺益康,张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机运行与建模仿真[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 43-50.
[4] 丁贵立,王奔. 双馈风电机组的非线性变结构功率解耦控制[J]. 中国电力, 2013, 46(8): 64-69.
[5] 夏长亮,王慧敏,宋战峰,等. 变速恒频双馈风力发电系统空载并网积分变结构控制[J]. 天津大学学报, 2008, 41(11): 1282-1286.
[6] 夏长亮,宋战峰. 变速恒频风力发电系统变桨距自抗扰控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(14): 92-95.
[7] Ramadan H S, Siguerdidjane H, Petit M. A Robust Stabilizing Nonlinear Control for VSC-HVDC System: Comparative Study [C]//IEEE International Conference on Industry Technology. Gippsland, Australia: IEEE, 2009: 1-6.
[8] 孙国霞,李啸骢,蔡义明. 大型变速恒频风电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(10): 69-72.
[9] 李晶,王伟胜,宋家骅. 双馈发电机简化动态模型及在风电系统中的应用[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(1): 58-62.
[10] 王宇航,姚郁,马克茂. Fal 函数滤波器的分析及应用[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(11): 88-91.
[11] 范彬,王奔,李新宇. 基于自抗扰控制技术 VSC-HVDC 系统控制器设计[J]. 电力自动化设备, 2013, 5(5): 65-69.
[12] 韩京清. 自抗扰控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
[13] Pena R, Clare J C, Asher G M. Doubly Fed Induction Generator Using Back-to-back PWM Converters and Its Application to Variable-speed Wind-energy Generation [J]. IEEE Proceedings Electric Power Application, 1996, 143(2): 231-241.
[14] Tang Y, Xu L. A Flexible Active and Reactive Power Control Strategy for a Variable Speed Constant Frequency Generating System [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1996, 10(4): 472-478.

作者简介:

田永贵(1988),硕士研究生,研究方向为风力发电、自抗扰控制。

(收稿日期:2014-12-22)