

文章编号: 1000-8152(2011)07-0999-06

电网故障下双馈风力发电机网侧变换器的高阶滑模控制

郑雪梅, 徐殿国, 王卫, 李巍

(哈尔滨工业大学 电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对电网故障下对双馈风力发电机网侧变换器的影响, 本文采用滑模变结构控制方法, 提出了采用增加瞬时功率前馈补偿的高阶滑模变结构控制策略, 为此首先简要的分析了双馈风力发电机中双脉宽调制(PWM)型变换器的结构和控制原理, 然后根据网侧变换器的数学模型, 提出对网侧变换器采用电网电压定向矢量控制, 以实现交流侧单位功率因数和直流环节电压控制。提出的方法提高了系统响应速度, 克服参数变化和外电压波动的影响。仿真结果表明了该策略的有效性。

关键词: 双馈风力发电机; 变换器控制; 前馈控制; 滑模变结构控制

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Higher-order sliding mode control for grid side converter in double-fed induction generator under grid failure

ZHENG Xue-mei, XU Dian-guo, WANG Wei, LI Wei

(Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: For the grid side converter, this paper proposes a higher-order sliding mode control(SMC) plus a transient power feedforward PI control to deal with the grid failure and to keep the direct current(DC) voltage stable. Firstly, we analyze the structure and control principle of the double pulse width module(PWM) converter in double-fed induction generator(DFIG). According to the mathematical model of the grid side converter, the paper adopts the voltage orientation vector control principle to realize the unity-power-factor for the alternating current(AC) side and the voltage control in the DC loop. The proposed method speeds up the system tracking, and stabilizes the system under the influence of the external disturbances. Simulation results validate the accuracy and effectiveness of the control strategy proposed in this paper.

Key words: double-fed induction generator(DFIG); converter control; forward feedback control; sliding mode control

1 引言(Introduction)

目前, 风电领域研究的热点集中在风机大型化、近海风机、风机运行控制策略和优化等方面^[1,2]。随着风电机组单机容量和风电场规模的增大, 风力发电机与电网之间的相互影响越来越大。为了保证并网后电网和风电机组的运行效率、安全性和稳定性, 风电机组与电网之间的控制问题显得尤为重要。双馈风力发电技术是目前具有前景的风力发电技术之一, 已成为国内外该领域的研究热点^[3,4]。由两个背靠背的PWM变换器组成的双PWM型变换器^[5~7]由于其无需增加附加电路就能实现能量的双向流动, 得到了越来越广泛的应用。文献[4]介绍了带有双PWM的背靠背前馈控制的双馈风力发电系统, 但是这种方法不具有很好的鲁棒性; 文献[8]介绍了一种新颖的转子电流控制器, 同时采用比例-谐振(proportional-resonant, P-R)互补控制, 得到了很好的控制效果。本文分析了双PWM型变换器的结构

和控制原理, 提出网侧变换器采用电网电压定向矢量控制, 以实现交流侧单位功率因数和直流环节电压控制。然后分析了在电网电压出现故障时传统的PI控制的局限性, 从而提出采用增加瞬时功率前馈补偿的高阶滑模变结构控制策略, 提高了系统响应速度, 克服参数变化和外电压波动的影响。仿真结果表明了该策略的有效性。

2 网侧变换器数学模型(Mathematic model of grid side converter)

双PWM型变换器的主电路如图1所示, 其中: u_a , u_b , u_c 为网侧变换器交流侧三相电网相电压, i_a , i_b , i_c 为网侧变换器交流侧三相流入电流; C 为直流环节的储能电容; u_{dc} , i_{dc} 分别是电容电压和电容电流; R , L 是进线电抗器的等效电阻和电感; i_d , i_{load} 分别是流经网侧变换器和机侧变换器直流母线的电流; $L_{2\sigma}$, R_2 是DFIG转子绕组的漏感和等效电阻; e_{a2} , e_{b2} , e_{c2} 是DFIG转子三相绕组感应电动势。

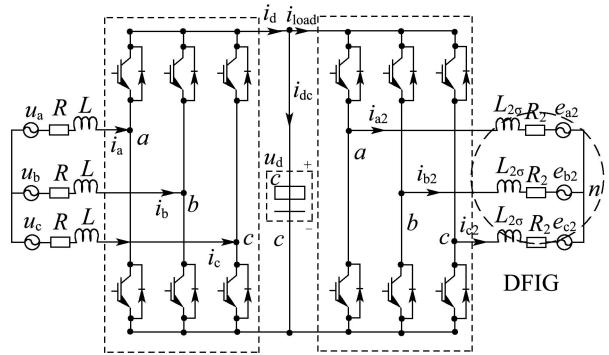


图1 双PWM型变换器主电路结构图

Fig. 1 Dual PWM converter circuit structure

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \\ \frac{du_{dc}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & w_1 & -\frac{S_d}{L} \\ -w_1 & -\frac{R}{L} & -\frac{S_q}{L} \\ \frac{S_d}{C} & \frac{S_q}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ i_{load} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

ω_1 为电网电压角频率. 输入电流为

$$\begin{cases} Ldi_d = -Ri_d + \omega_1 Li_q + u_d - u_{dr}, \\ Ldi_q = -Ri_q - \omega_1 Li_d + u_q - u_{qr}. \end{cases} \quad (2)$$

采用电网电压定向矢量控制. 将同步速旋转内坐标系的d轴定向于电网电压矢量 u_s 方向上, 则电网电压的d, q分量分别为

$$\begin{aligned} u_d &= u_s, \\ u_q &= 0. \end{aligned}$$

其中: u_s 为电网电压相量的幅值, 则式(2)可写为

$$\begin{cases} u_{dr} = -u'_{dr} + \Delta u_{dr} + u_s, \\ u_{qr} = -u'_{qr} - \Delta u_{qr}. \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$$\begin{aligned} u'_{dr} &= Ldi_d + Ri_d, \quad u'_{qr} = Ldi_q + Ri_q, \\ \Delta u_{dr} &= \omega_1 Li_q, \quad \Delta u_{qr} = \omega_1 Li_d. \end{aligned}$$

网侧变换器从电网吸收的有功和无功功率分别为

$$\begin{cases} P_r = u_d i_d + u_q i_q = u_s i_d, \\ Q_r = u_q i_d - u_d i_q = -u_s i_q. \end{cases} \quad (4)$$

从上式可以看出, d, q轴电流分量 i_d, i_q 实际上就是变换器的有功电流、无功电流分量, 实现了有功功率和无功功率的解耦, 调节 i_d, i_q 就可以分别对网侧变换器的有功和无功功率进行控制. 网侧变换器的控制目标是: 1) 保持输出直流电压恒定且有良好的动态响应能力, 为机侧变换器提供稳定的电压; 2) 确

保交流侧输入电流正弦. 所以对输入电流的有效控制是网侧变换器控制的关键.

3 功率前馈补偿的高阶滑模控制(Power feedforward higher-sliding mode control)

从双PWM型变换器主电路结构图可知, 可通过 i_d 对直流环节电压进行控制, d轴电流分量参考值 i_d^* 反映了直流环节电压的大小. 当输入、输出功率达到平衡时, i_d^* 趋于稳定. 而网侧变换器吸收的无功功率可通过控制q轴电流分量 i_d 进行控制, 从而可以控制其交流输入侧的功率因数. 因此, 可以根据需要的功率因数可确定q轴参考电流 i_q^* .

3.1 瞬时功率前馈控制(Transient power feedforward control)

当电网正常运行时交流励磁发电机的定子电压保持稳定, 电网侧变换器输入电压正常, 这时采用传统PI控制策略来实现网侧变换器的控制, 就可以达到控制的目的[7]. 当出现电网电压骤降故障时, 转子电流会出现瞬间的变化, 根据文献[8]的分析可知, 直流电容是一个大惯性环节, 网侧变换器直流电压调节环的调节速度较慢, 造成电流内环d轴电流给定量 i_d^* 在交流励磁发电机运行状态突变时变化缓慢, 使得采用传统PI控制方案的网侧变换器无法及时输入所需的瞬时功率来平衡转子侧变换器所需的励磁功率, 直流侧电容将释放或吸收部分能量进而造成直流母线电压波动较大. 这将影响发电机正常励磁控制的效果.

由于变换器进线电抗器的等效电阻和电感非常小, 忽略电抗器的损耗以及系统中功率开关器件的损耗, 可认为电容的瞬时功率等于电网输入变换器的功率减去DFIG转子吸收的瞬时功率^[6,7]. 即

$$Cu_{dc} du_{dc} = P_r - P_2 = P_r - (u_{d2} i_{d2} + u_{q2} i_{q2}). \quad (5)$$

由式(4), 式(5)可变为

$$\frac{Cu_{dc} du_{dc}}{u_s} = i_d - \frac{u_{d2} i_{d2} + u_{q2} i_{q2}}{u_s} = i_d - \frac{P_2}{u_s}. \quad (6)$$

由式(6)可知, 直流电容电压的变化除了受网侧变换器d轴电流影响外, 还受转子侧变换器输出瞬时功率的影响. 因此, 当电网发生故障或发电机运行状态发生突变时, 若能够及时地改变网侧变换器的输入电流, 满足转子侧变换器瞬时功率的需求, 则可抑制直流母线电压的变化. 式(6)中的 $\frac{P_2}{u_s}$ 项反映了转子侧变换器瞬时功率的变化情况, 若将此项作为一个前馈补偿量与网侧变换器直流电压比例积分调节器的输出一起作为网侧变换器电流内环的d轴电流给定值 i_d^* , 则 i_d^* 可及时反映转子侧能量的变化, 减小直流母线电压的波动.

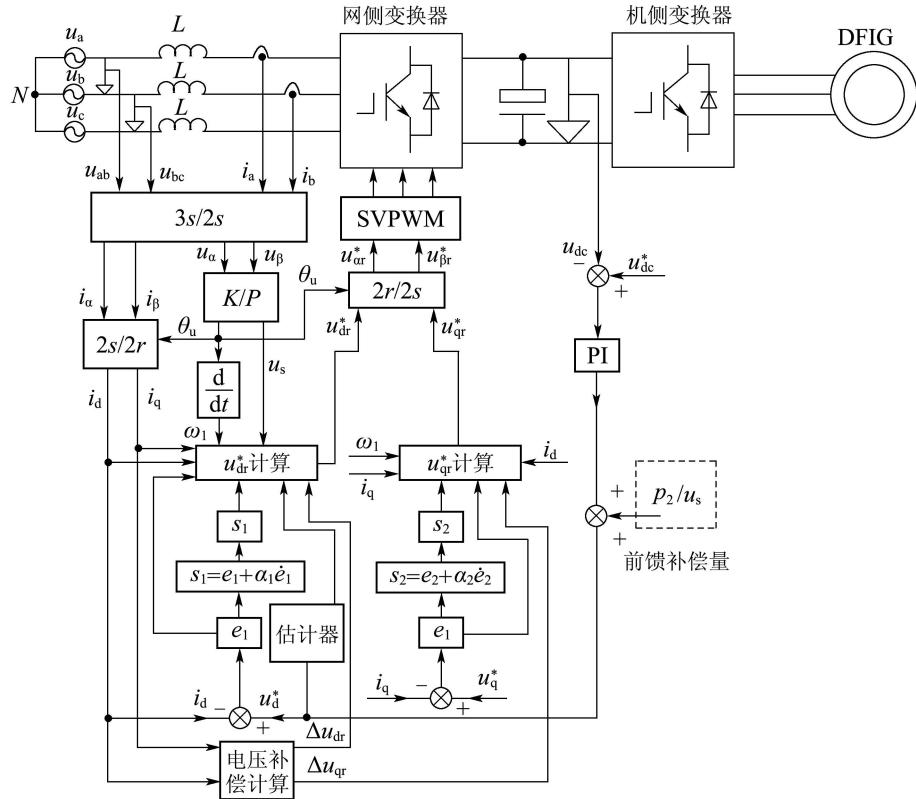


图2 网侧变换器滑模变结构控制框图

Fig. 2 Block diagram of grid side converter sliding mode control

3.2 高阶滑模控制器设计(Design higher-order sliding mode controller)

为了提高网侧电流的响应速度, 以减小直流母线电压的波动, 本文在传统PI控制的基础上, 采用高阶滑模变结构控制策略。控制系统如图2所示。

在双PWM型变换器作为DFIG的励磁电源时实行单位功率因数控制, 即参考无功分量 $i_q^* = 0$ 。

取电流的有功和无功分量为误差:

$$\begin{cases} e_1 = i_d^* - i_d, \\ e_2 = i_q^* - i_q. \end{cases} \quad (7)$$

定义如下切换函数:

$$\begin{cases} s_1 = e_1 + \alpha_1 \dot{e}_1, \\ s_2 = e_2 + \alpha_2 \dot{e}_2. \end{cases} \quad (8)$$

式中: $0 < \alpha_1 < 1$, $0 < \alpha_2 < 1$. 对上式求导:

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = \dot{e}_1 + \alpha_1 \ddot{e}_1, \\ \dot{s}_2 = \dot{e}_2 + \alpha_2 \ddot{e}_2. \end{cases} \quad (9)$$

选取指数趋近律:

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = -k_1 s_1 - k_2 \operatorname{sgn} s_1, \\ \dot{s}_2 = -k_3 s_2 - k_4 \operatorname{sgn} s_2. \end{cases} \quad (10)$$

式中: $0 < k_1, 0 < k_2, 0 < k_3, 0 < k_4$. 则由式(9)和(10)可得

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \frac{1}{\alpha_1} \int_0^t (-k_1 s_1 - k_2 \operatorname{sgn} s_1 - \dot{e}_1) d\tau, \\ \dot{e}_2 = \frac{1}{\alpha_2} \int_0^t (-k_3 s_2 - k_4 \operatorname{sgn} s_2 - \dot{e}_2) d\tau. \end{cases} \quad (11)$$

可得系统的控制律为

$$\begin{cases} u_{dr} = u_{dreq} + u_{drn}, \\ u_{qr} = u_{qreq} + u_{qrn}. \end{cases} \quad (12)$$

式中:

$$\begin{cases} u_{dreq} = -R_1 i_d + \omega_1 L i_q + u_s, \\ u_{drn} = L \left(\frac{1}{\alpha_1} \int_0^t (-k_1 s_1 - k_2 \operatorname{sgn} s_1 - \dot{e}_1) d\tau - i_d^* \right). \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_{qreq} = R_1 i_q - \omega_1 L i_d, \\ u_{qrn} = L \left(\frac{1}{\alpha_2} \int_0^t (-k_3 s_2 - k_4 \operatorname{sgn} s_2 - \dot{e}_2) d\tau - i_q^* \right). \end{cases}$$

为了证明所设计的控制器具有渐进稳定性, 选取李雅普诺夫函数进行证明。

首先, 先证明有功电流控制器 s_1 的稳定性, 选取下面的李雅普诺夫函数:

$$v_1 = \frac{1}{2} s_1^2, \quad (13)$$

并对时间求导:

$$\begin{aligned} \dot{v}_1 &= s_1 \dot{s}_1 = s_1 (\dot{e}_1 + \alpha_1 \ddot{e}_1) = s_1 (\dot{e}_1 + \alpha_1 (i_d^* - \dot{i}_d)) = \\ &= s_1 (\dot{e}_1 + \alpha_1 (i_d^* - \frac{1}{L} (-R i_d + \omega_1 L i_q + \dot{u}_d - \dot{u}_{dr}))) = \end{aligned}$$

$s_1(-k_1s_1 - k_2 \operatorname{sgn} s_1)$.

当 $s_1 > 0$ 时,

$$\dot{v}_1 = -(k_1 s_1^2 + k_2 s_1) < 0;$$

当 $s_1 < 0$ 时,

$$\dot{v}_1 = -(k_1 s_1^2 - k_2 s_1) < 0.$$

因此, 对于任意的 $s_1 \neq 0$ 时, 总有 $\dot{v}_1 < 0$. 根据 Lyapunov 稳定性定理^[9], 系统将在有限时间内到达滑模面, 当系统达到滑模面时, 有 $s_1 = 0$, 进而 $e_1 = i_d^* - i_d = 0$ 系统稳定在参考点.

再证明无功电流控制器 s_2 的稳定性, 选取下面的李雅普诺夫函数:

$$v_2 = \frac{1}{2}s_2^2, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \dot{v}_2 &= s_2 \dot{s}_2 = s_2(\dot{e}_2 + \alpha_2 \ddot{e}_2) = \\ &s_2(\dot{e}_2 + \alpha_2(i_q^* - \dot{i}_q)) = \\ &s_2(\dot{e}_2 + \alpha_2(i_q^* - \frac{1}{L}(-R\dot{i}_q - \\ &\omega_1 L i_d + \dot{u}_q - \dot{u}_{qr}))) = \\ &s_2(-k_3 s_2 - k_4 \operatorname{sgn} s_2). \end{aligned}$$

当 $s_2 > 0$ 时, $\dot{v}_2 = -(k_3 s_2^2 + k_4 s_2) < 0$; 当 $s_2 < 0$ 时, $\dot{v}_2 = -(k_3 s_2^2 - k_4 s_2) < 0$. 因此, 对于任意的 $s_2 \neq 0$ 时, 总有 $\dot{v}_2 < 0$. 系统将在有限时间内到达滑模面, 当系统达到滑模面时, 有 $s_2 = 0$, 进而 $e_2 = i_q^* - i_q = 0$ 系统稳定在参考点. 采用式(18)对网侧变换器进行控制, 就可以维持直流母线电压的稳定. 在变换器的设计过程中, 补偿的微分采用文献[9]中采用的 n 微分估计器进行设计. 微分估计器的设计为如下形式:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{z}_0 = v_0 = \\ -\alpha_0 |z_0 - \frac{P_2}{u_s}|^{n/n+1} \operatorname{sgn}(z_0 - i(t)) + z_1, \\ \dot{z}_i = v_i = \\ -\alpha_i |z_i - v_{i-1}(t)|^{n-i/n-i+1} \times \\ \operatorname{sgn}(z_i - v_{i-1}(t)) + z_{i+1}, \\ \vdots \\ \dot{z}_n = -\alpha_n \operatorname{sgn}(z_n - v_{n-1}). \end{array} \right. \quad (15)$$

式中: $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n$ 为设计参数, z_0, z_1, \dots, z_n 为各阶参考电流微分的估计值.

4 仿真算例(Simulation example)

本文分别对网侧变换器的整流和逆变状态进行了仿真, DFIG 的参数如表 1 所示.

实验条件为: 在 0.5 s 时由于负载运行状态的变

化, 变换器由整流状态变为逆变状态. 本文采用二阶微分估计器, 参数为: $\alpha_0 = 8, \alpha_1 = 5, \alpha_2 = 3$. 仿真结果如图 3, 4 所示. 图 3 为交流侧 a 相电压和电流曲线, 从图中可以看出当变换器处于整流状态时, 电压和电流同相位, 当变换器处于逆变状态时, 电压和电流反相位, 实现了单位功率因数. 图 4 为直流母线电压的变化曲线, 从图中可以看出, 在变换器状态发生变化时, 采用高阶滑模变结构控制比 PI 控制有明显的效果, 直流母线电压的波动幅值比 PI 控制要小, 恢复时间也快. 图 5 为 d 轴电压的变化曲线.

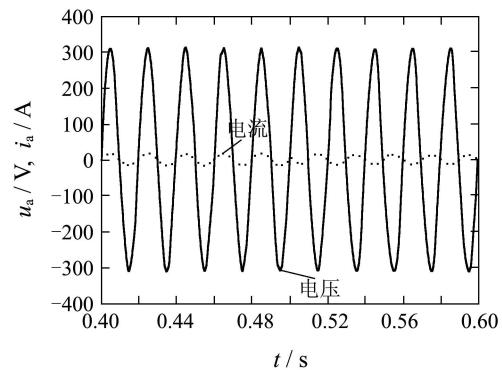


图 3 交流侧电网电压与电流曲线图

Fig. 3 Grid voltage and current of AC side

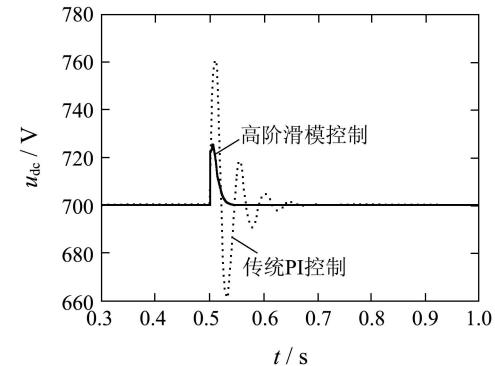


图 4 直流母线电压变化曲线

Fig. 4 DC line voltage curve

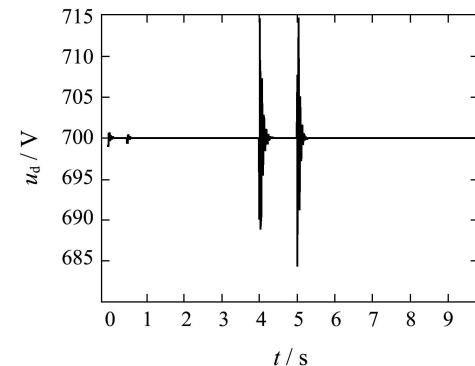


图 5 d 轴电压变化曲线

Fig. 5 d axis voltage curve

表 1 DFIG参数

Table 1 Coefficients of the DFIG

DFIG参数(绕组折算后)	数值
额定功率/kW	1 000
定子额定电压	690 V/50 Hz
同步转速/(r·min ⁻¹)	1 000
极对数 P_n	3
R_1/Ω	0.38
R_2/Ω	0.3
L_1/H	0.04
L_2/H	0.039
L_m/H	0.038
转动惯量/(kg·m ²)	0.4

为了验证高阶滑模控制对外部输入电压扰动具有鲁棒性, 本文进行了如下仿真: 开始时系统稳定运行, 在0.5 s时交流侧输入电压出现变化跌落了15%, 在0.6 s时又恢复到原状。仿真曲线如图6, 7所示。从图中可以看出, 采用高阶滑模控制比传统PI控制的效果要好, 很好的抑制了直流母线电压的波动, 电流的调节速度非常快。

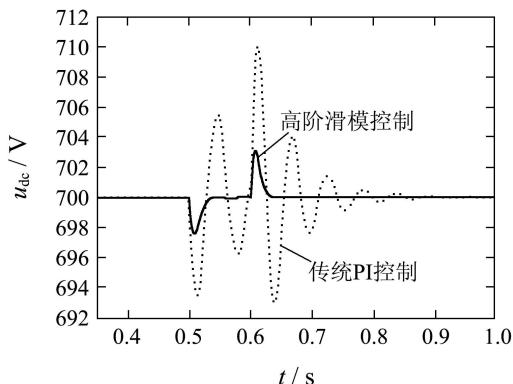


图 6 电压扰动时直流母线电压曲线

Fig. 6 DC line voltage curve when voltage change

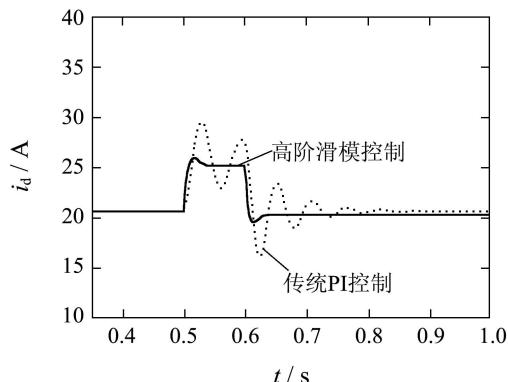


图 7 电压扰动时有功电流变化曲线

Fig. 7 Active current curve when voltage change

为了验证高阶滑模控制对内部参数摄动的鲁棒性, 本文进行了如下仿真: 开始时系统稳定运行, 在0.5 s时进线电抗器等效电阻出现了变化, 由 2Ω 变为 1.8Ω 。仿真曲线如图8, 9所示。从图中可以看出, 采用高阶滑模控制方案明显比传统PI控制时对于内部参数的突变有较强的抗扰动能力, 直流侧电压波动较小, 电流调节较快。

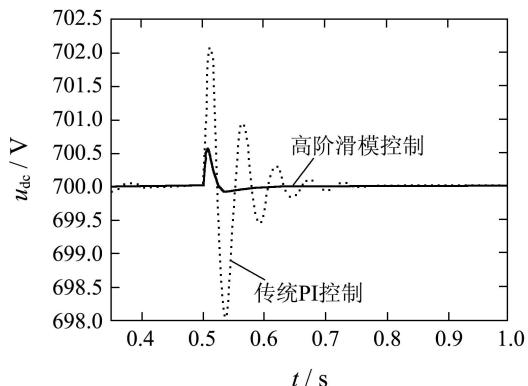


图 8 电阻扰动时直流母线电压曲线

Fig. 8 DC line voltage curve when resistance change

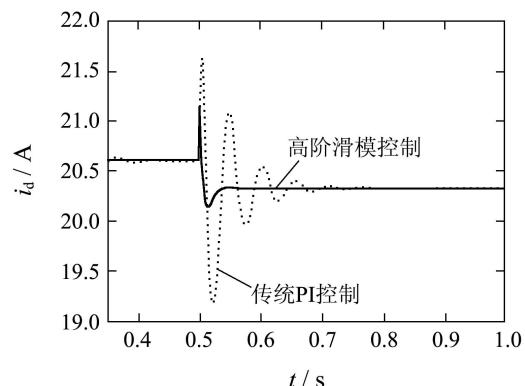


图 9 电阻扰动时有功电流变化曲线

Fig. 9 Active current curve when resistance change

通过前面的分析, 可以看出, 电流调节速度的快慢, 直接关系到直流母线电压的稳定性。本文对无瞬时功率补偿的传统PI控制, 有瞬时补偿的PI控制及瞬时功率补偿的高阶滑模控制进行了对比仿真研究。仿真条件为: 风速为5 m/s, 系统稳定运行在最佳转速下, 在4 s时刻, 电网电压跌落15%, 在5 s时刻又恢复到正常状态。变换器的仿真波形如图10, 11所示。从图中可以看出, 由于电网电压的变化以及转子侧功率的瞬间突变, 引起直流母线电压波动, 虽然加入转子侧瞬时功率补偿的方案可以在一定程度上减小直流母线电压的波动, 但其作用有限, 效果不是很好。采用高阶滑模变结构控制的方案, 可以加快电流的相应速度, 大大减小直流母线电压的波动, 对变换器起到了保护作用。

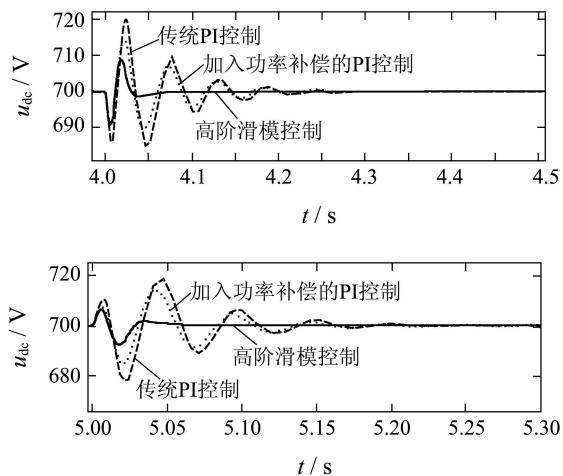


图 10 电网电压故障时直流母线电压曲线

Fig. 10 DC line voltage curve when grid voltage failure

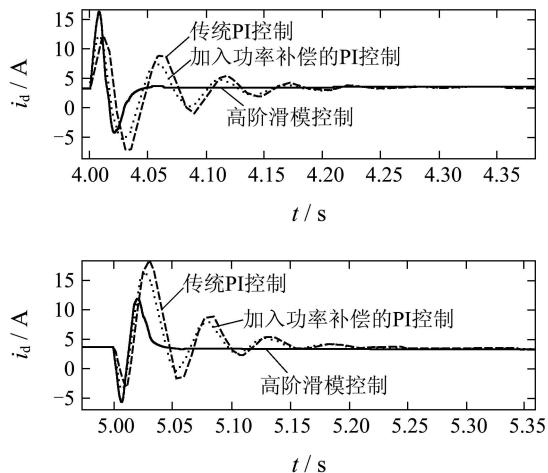


图 11 电网电压故障时有功电流曲线

Fig. 11 Active current curve when grid voltage failure

5 结论(Conclusions)

本文分析了双PWM型变换器的结构和控制原理, 提出网侧变换器采用电网电压定向矢量控制, 以实现交流侧单位功率因数和直流环节电压控制; 在传统的PI控制的基础上, 提出采用增加瞬时功率前馈补偿的高阶滑模变结构控制策略, 提高了系统响应速度, 能克服参数变化和外电压波动的影响。对比仿真结果表明了该策略的有效性。

参考文献(References):

- [1] FERNANDEZ L M, GARCIA C A, JURADO F. Comparative study on the performance of control systems for doubly fed induction generator (DFIG) wind turbines operating with power regulation[J]. *Energy*, 2008, 33(2): 1438 – 1452.
- [2] HOFFMANN R, MUTSCHLER P. The influence of control strategies on the energy capture of wind turbines[C] //The 35th IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy. New York: IEEE, 2000: 886 – 893.
- [3] MIAO Z X, FAN L L. The art modeling and simulation of induction generator in wind generation applications using high-order model[J]. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 2008, 16(2): 1239 – 1253.
- [4] 郎永强, 徐殿国, IANAMERIS H. 三相电压型PWM整流器的一种改进前馈控制策略[J]. 电机与控制学报, 2006, 10(2): 160 – 163.
(LANG Yongqiang, XU Dianguo, IANAMERIS H. Improved feed-forward control of three-phase voltage source PWM rectifier[J]. *Electric Machines and Control*, 2006, 10(2): 160 – 163.)
- [5] 郎永强, 张学广, 徐殿国, 等. 双馈电机风电机场无功功率分析及控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 77 – 82.
(LANG Yongqiang, ZHANG Xueguang, XU Dianguo, et al. Reactive power analysis and control of double fed induction generator wind farm[J]. *Proceeding of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2007, 27(9): 77 – 82.)
- [6] PNEA R, CLEAR 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]. *IEE Proceedings of Electrical Power Application*, 1996, 143(3): 231 – 241.
- [7] 姚骏, 廖勇, 周求宽. 双PWM控制交流励磁电源直流链电压的稳定控制策略[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 63 – 66.
(YAO Jun, LIAO Yong, ZHOU Qiukuan. Stable control strategy on DC-link voltage in a dual pwm control ac excitation power supply[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(21): 63 – 66.)
- [8] HU J B, SUN D, HE Y K, et al. Modeling and control of DFIG wind generation system under grid voltage dip[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(8): 21 – 26.
- [9] LEVANT A. Higher-order sliding modes, differentiation and output-feedback control[J]. *International Journal of Control*, 2003, 76(9): 924 – 941.

作者简介:

郑雪梅 (1969—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为变结构控制、鲁棒控制、风力发电等, E-mail:xmzheng@hit.edu.cn;

徐殿国 (1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子与电力传动、伺服控制、风力发电控制等, E-mail: xudiang@hit.edu.cn;

王卫 (1963—), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子与电力传动、伺服控制、风力发电控制等, E-mail: wangwei602@hit.edu.cn;

李巍 (1984—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动, E-mail: liw.h@163.com.