

不对称电网故障下双馈风力发电机的比例-积分-谐振滑模控制器设计*

王艾萌¹, 张佳¹, 郝文远²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003;

2. 国网冀北电力有限公司 检修分公司, 北京 102488)

摘要: 针对不对称电网故障下, 双馈风力发电机的控制策略进行了研究。讨论了电网故障时转子侧变流器(RSC)和网侧变流器(GSC)的控制目标, 合理安排了电网严重故障时的控制优先级。基于比例-积分-谐振滑模控制原理设计了机侧和网侧变流器协同控制方案。通过 MATLAB/Simulink 仿真软件搭建了所设计控制方案的仿真模型。仿真结果表明, 在电网正常运行的情况下, 与传统的矢量控制策略相比, 比例-积分-谐振滑模控制策略对输出功率、电流变化的响应更迅速, 具有更好的动态性能和抗扰动能力; 在电网不对称故障下, 能够有效地抑制电磁转矩振荡和直流母线电压波动, 提高了双馈式风力发电机的低电压穿越能力。

关键词: 双馈风力发电机; 协调控制; 不对称电网故障; 比例-积分-谐振滑模控制器

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)09-0110-08

A Proportional-Integral-Resonant Sliding Mode Control Method to Improve Control Performance of Doubly Fed Induction Generator Under Asymmetric Grid Faults*

WANG Aimeng¹, ZHANG Jia¹, XI Wenyuan²

(1. Electrical & Electronic Engineering Department, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Maintenance Branch, State Grid North Hebei Electric Power Incorporated Company, Beijing 102488, China)

Abstract: A coordinated control strategy of rotor side converter (RSC) and grid side converter (GSC) based on proportional-integral-resonant sliding mode controller (SMC) was presented. First, the control objectives and priority of RSC and GSC were analyzed under different levels of grid faults. Then, the proportional-integral-resonant sliding mode controllers of RSC and GSC were respectively designed to eliminate the tracking error of ac component and improve the dynamic performance and disturbance resisting ability. At last, a simulation was conducted to verify the effectiveness of the designed control scheme under different asymmetrical grid faults.

Key words: doubly fed induction generator (DFIG); coordinate control; asymmetric grid faults; proportional-integral-resonant sliding mode control

0 引言

双馈风力发电机 (Doubly Fed Induction

Generator, DFIG) 可以控制机组的功率因数, 具有效率高和经济性好等优点, 现已得到广泛应用。通常, DFIG 定子侧与电网直接相连, 转子侧连接

* 基金项目: 新能源电力系统国家重点实验室开放课题 (LAPS16023)

作者简介: 王艾萌 (1963—), 女, 博士研究生, 教授, 研究方向为电机设计及其控制技术。

张佳 (1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电及微电网控制技术。

郝文远 (1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为可再生能源并网继电保护。

小容量的电力电子变流器,能够实现机组的变速恒频运行与有功、无功的解耦。DFIG 对电网非正常运行状态的异常敏感性是由其特殊的拓扑结构造成的。当电网发生电压跌落时,会引起 DFIG 严重的电磁暂态过程,造成定、转子的过流和直流母线电压泵升^[1-2]。过大的浪涌电流将严重威胁变流器的安全。如果没有合适的控制策略和保护措施,DFIG 机组将不能在电网故障时保持不脱网运行。

对于三相对称故障,低电压穿越方案的重点在于抑制转子侧过大的浪涌电流以及直流母线侧的过电压,现有的各类保护方案^[3-7]也大都针对三相对称电压跌落进行研究。对于电网电压三相不平衡或不对称故障,由于电压负序分量的存在,其保护和控制问题更为复杂。对于电网电压小值不平衡下 DFIG 的稳态控制已有相关的研究。文献[8]提出了双 d - q 、PI 电流控制方案,可以减小定子不平衡电流、输出功率和电磁转矩等的振荡,该方案中需要在正向和反向同步旋转坐标系中对正、负序分量分别进行控制,控制较为复杂。文献[9-11]基于比例-谐振(P-R)控制器,比例-积分-谐振(PI-R)控制器,降阶广义积分器(ROGI)对电压不平衡控制方法进行了改进和简化,提高了控制性能;但这一类方法在电网扰动及发电机参数变化时控制性能下降。文献[12]采用积分滑模控制原理设计了电压不平衡下 DFIG 的控制方案,但这种方案需要独立控制正、负序电流分量,比较复杂。文献[13]在 $\alpha\beta$ 坐标系下基于积分滑模控制原理设计了 DFIG 的功率控制方案,但该方案需要提高滑模控制器的稳态宽度来提高对交流量的控制精度。文献[14]应用滑模控制原理设计了双馈风力发电机组的控制策略,并显示出了良好的动态性能,但并没有考虑电网不对称故障时机组的运行特性。

本文针对不对称电网故障下双馈式风力发电机的转子侧变流器(Rotor side Converter, RSC)和网侧变流器(Grid Side Converter, GSC)控制目标进行了分析,并合理安排了严重电网故障时 RSC 和 GSC 的控制优先级。之后,基于比例-积分-谐振滑模控制原理设计了 RSC 和 GSC 的滑模控制器。最后,利用仿真验证了本文所设计的控制策略。仿真结果表明,基于比例-积分-谐振滑模控

制器的 RSC 和 GSC 协同控制方案具有良好的动态响应,能够有效地抑制电磁转矩振荡和直流母线电压波动。

1 RSC 和 GSC 谐振滑模控制器设计

1.1 DFIG 数学模型

Park 模型通常用于分析 DFIG 的运行特性。选择电动机惯例,则在同步旋转坐标系中 DFIG 的定、转子电压方程和磁链方程可表示为^[13]

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_s \psi_s \\ U_r = R_r I_r + \frac{d\psi_r}{dt} + j\omega_{sl} \psi_r \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \psi_r = L_m I_s + L_r I_r = \frac{L_m}{L_s} \psi_s + \sigma L_r I_r \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_s 、 U_r ——定、转子电压矢量, $U_s = u_{sd} + ju_{sq}$, $U_r = u_{rd} + ju_{rq}$;

R_s 、 R_r ——定、转子电阻;

I_s 、 I_r ——定、转子电流矢量, $I_s = i_{sd} + ji_{sq}$,

$I_r = i_{rd} + ji_{rq}$;

ψ_s 、 ψ_r ——定、转子磁链矢量, $\psi_s = \psi_{sd} + j\psi_{sq}$, $\psi_r = \psi_{rd} + j\psi_{rq}$ 。

ω_s 、 ω_{sl} 、 ω_r ——同步、转差和转子电角速度, $\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r$;

L_s 、 L_r ——定、转子绕组自感, $L_s = L_m + L_{s\sigma}$, $L_r = L_m + L_{r\sigma}$;

L_m 、 $L_{s\sigma}$ 、 $L_{r\sigma}$ ——定转子间互感、定子漏感、转子漏感, $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r$ 。

DFIG 的电磁转矩和定子侧输出功率方程可以表示为

$$\begin{aligned} T_e = & -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} n_p \operatorname{Im}[\psi_s \cdot i_r^*] = \\ & -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} p (i_{rd} \psi_{sq} - i_{rq} \psi_{sd}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$P_s = -\operatorname{Re}\left[\frac{3}{2} U_s i_s^*\right] = -\frac{3}{2} (u_{sd} i_{sq} + u_{sq} i_{sd}) \quad (4)$$

$$Q_s = -\operatorname{Im}\left[\frac{3}{2} U_s i_s^*\right] = \frac{3}{2} (u_{sd} i_{sq} - u_{sq} i_{sd}) \quad (5)$$

式中: i_r^* 、 i_s^* ——表示 i_r 、 i_s 的共轭。

1.2 RSC 控制目标

电网发生故障时,DFIG 应首先考虑 grid code

的规定,向电网输出正序的无功电流,即实现如下控制目标:

$$\begin{cases} Q_{s0} = Q_{s0}^* \\ P_{s0} = P_{s0}^* \end{cases} \quad (6)$$

式中: Q_{s0}^* ——正序无功功率参考值,电网故障下需根据风电并网规定的要求给出;

P_{s0}^* ——正序有功功率参考值。

由此,可以得到转子侧电流正序分量参考值

$$\begin{bmatrix} i_{rd+}^{**} \\ i_{rq+}^{**} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_m} \begin{bmatrix} \psi_{sd+}^+ \\ \psi_{sq+}^+ \end{bmatrix} - \frac{L_s}{L_m} u_{sd+}^+ \begin{bmatrix} P_{s0}^* \\ Q_{s0}^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

若电网发生不对称故障,此时定子电压包含负序分量,定子磁链亦会感生相应的稳态分量。由于负序分量的存在会造成 DFIG 输出功率的脉动和电磁转矩的振荡。DFIG 电磁转矩表达式变为

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} p \operatorname{Im}[\psi_s \cdot i_r^*] = \\ &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} p (\psi_{sq}^+ i_{rd}^+ - \psi_{sd}^+ i_{rq}^+) = \\ &= T_{e0} + T_{e\sin 2} \sin(2\omega_1 t) + T_{e\cos 2} \cos(2\omega_1 t) \quad (8) \end{aligned}$$

表示成矩阵形式有

$$\begin{bmatrix} T_{e0} \\ T_{e\sin 2} \\ T_{e\cos 2} \end{bmatrix} = -\frac{3}{2} \frac{pL_m}{L_s} \begin{bmatrix} -\psi_{sq+}^+ & \psi_{sd+}^+ & -\psi_{sq-}^- & \psi_{sd-}^- \\ \psi_{sd-}^- & \psi_{sq-}^- & -\psi_{sd+}^+ & -\psi_{sq+}^+ \\ -\psi_{sq-}^- & \psi_{sd-}^- & -\psi_{sq+}^+ & \psi_{sd+}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd+}^+ \\ i_{rq+}^+ \\ i_{rd-}^- \\ i_{rq-}^- \end{bmatrix} \quad (9)$$

较高的转矩振荡可能损害 DFIG 风电系统中的传动系统。电网不对称故障下,DFIG 在控制无功的同时,还需要将减缓电磁转矩的振荡考虑其中,由此可以得到转子侧变流器如下控制目标:

$$\begin{cases} T_{e\cos 2} = 0 \\ T_{e\sin 2} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

结合式(9),可以得到转子电流负序分量参考值

$$i_{rd-}^{*-} = k_{dd} \cdot i_{rd+}^{**} + k_{qd} \cdot i_{rq+}^{**} \quad (11)$$

$$i_{rq-}^{*-} = k_{qd} \cdot i_{rd+}^{**} - k_{dd} \cdot i_{rq+}^{**} \quad (12)$$

其中: $k_{dd} = u_{sd-}^- / u_{sd+}^+$;

$$k_{qd} = u_{sq-}^- / u_{sd+}^+$$

受到 RSC 容量的限制,当电压负序分量较大时,无法同时满足上述的控制要求,因此,合理安排控制目标的优先顺序十分必要。RSC 的控制首先需要实现对无功的控制,以便得到满足风电并网规定要求的正序无功电流;然后设定 $P_{s0}^* = 0$,一方面可以通过风机升速来疏导、储存 DFIG 内部过剩的能量,另一方面可以最大限度地减缓电磁转矩的振荡。

1.3 RSC 谐振滑模控制器的设计

由式(1)、式(2)可得转子电压方程:

$$\begin{aligned} U_r &= \frac{L_m}{L_s} \left(\frac{d}{dt} \psi_s + j\omega_{sl} \psi_s \right) + \\ &= \left(R_r + \sigma L_r \frac{d}{dt} + j\sigma L_r \omega_{sl} \right) i_r \quad (13) \end{aligned}$$

定义如下状态变量:

$$e_r = I_r^* - I_r \quad (14)$$

其中:

$$\begin{aligned} e_r &= [e_{rd} \quad e_{rq}]^T, \quad I_r^* = [i_{rd}^* \quad i_{rq}^*]^T, \\ I_r &= [i_{rd} \quad i_{rq}]^T. \end{aligned}$$

对式(14)求导,并将式(1)、式(13)代入,则可得 DFIG 的状态方程为

$$\frac{de_r}{dt} = A_r e_r - \frac{1}{\sigma L_r} U_r + \frac{1}{\sigma L_r} B_r I_r + \frac{L_m}{\sigma L_r L_s} D_r \quad (15)$$

其中: $A_r = \begin{bmatrix} di_{rd}^*/dt \\ di_{rq}^*/dt \end{bmatrix}, U_r = \begin{bmatrix} u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix},$

$$B_r = \begin{bmatrix} R_r & -\sigma L_r \omega_{sl} \\ R_r & \sigma L_r \omega_{sl} \end{bmatrix}, D_r = \begin{bmatrix} -\omega_{sl} \psi_{sq} & d\psi_{sd}/dt \\ \omega_{sl} \psi_{sd} & d\psi_{sq}/dt \end{bmatrix}.$$

为了在同步旋转 dq 轴系中实现对电流负序分量的无静差控制,在比例积分滑模面方程中加入谐振项^[16],得到如下滑模面方程:

$$S_r = \left[1 + \frac{k_{ir}}{s} + \frac{k_{rr} \omega_c}{s^2 + 2\omega_c + (2\omega_s)^2} \right] e_r = G_r(s) e_r \quad (16)$$

式中: k_{ir} ——滑模面积分增益;

k_{rr} ——滑模面谐振增益;

ω_c ——谐振项的截止频率;

$G_r(s)$ ——传递函数。

采用指数趋近律^[15],可以减小抖振和提高趋近运动的暂态响应能力,此时滑动面方程变为

$$\frac{dS_r}{dt} = -k_{r1}S_r - k_{r2}\text{sat}(S_r) \quad (17)$$

式中: k_{r1} 、 k_{r2} ——趋近律参数;
 $\text{sat}(S_r)$ ——饱和函数。

$$\text{sat}(S_r) = \begin{cases} S_r/\xi & \text{if } |S_r| \leq \xi \\ \text{sign}(S_r) & \text{if } |S_r| > \xi \end{cases} \quad (18)$$

将式(16)代入式(17),可得

$$sG_r(s)e_r = -k_{r1}G_r(s)e_r - k_{r2}\text{sat}[G_r(s)e_r] \quad (19)$$

则根据式(17)、式(19)可得 RSC 比例-积分-谐振滑模控制系统的等效控制为

$$U_{req} = \sigma L_r A_r + B_r I_r + \frac{L_m}{L_s} D_r \quad (20)$$

在 DFIG 参数变动和外部扰动下,为使系统仍在滑模面运动,需加入开关控制,如式(21)所示。

$$\Delta U_r = \sigma L_r [k_{it}e_r + k_{r1}S_r + k_{r2}\text{sat}(S_r)] \quad (21)$$

由式(21)、式(22)可得最终滑模控制器输出的参考电压为

$$U_r = U_{req} + \Delta U_r \quad (22)$$

综合以上分析,可得 RSC 控制原理图,如图 1 所示。

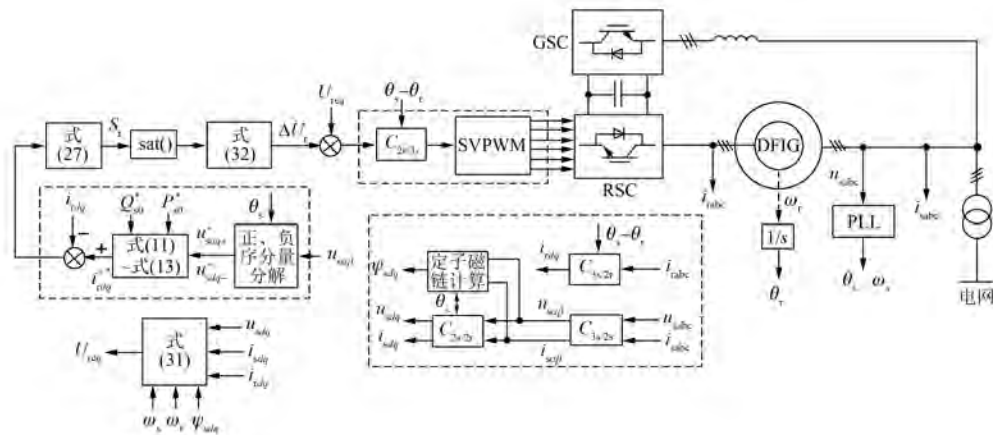


图 1 基于谐振滑模控制器的 RSC 控制电路图

2 GSC 谐振滑模控制器设计

2.1 GSC 数学模型

网侧变流器在同步旋转 dq 坐标系中的电压、电流方程为

$$U_g = R_g I_g + L_g \frac{dI_g}{dt} + j\omega_s L_g I_g + U_g \quad (23)$$

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{P_g}{U_{dc}} - \frac{P_r}{U_{dc}} \quad (24)$$

式中: U_g ——电网电压矢量,有 $U_g = u_{gd} + ju_{gq}$;
 R_g ——电网侧电阻;
 I_g ——输入电流矢量,有 $I_g = i_{gd} + ji_{gq}$;
 U_g ——网侧变换器交流侧输出电压矢量,
 且有 $U_g = u_{gd} + ju_{gq}$;
 P_g 、 P_r ——网侧、转子侧变换器功率。

则由式(23)、式(24)可以得到如图 2 所示的网侧等效电路。

网侧输出的有功、无功功率为

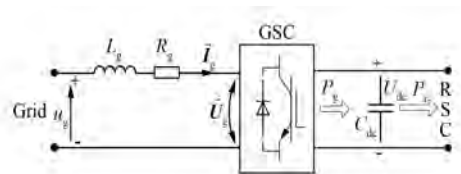


图 2 GSC 等效电路

$$P_g = -\text{Re} \left[\frac{3}{2} U_g I_g^* \right] = -\frac{3}{2} (u_{gd} i_{gq} + u_{gq} i_{gd}) \quad (25)$$

$$Q_g = -\text{Im} \left[\frac{3}{2} U_g I_g^* \right] = \frac{3}{2} (u_{gd} i_{gq} - u_{gq} i_{gd}) \quad (26)$$

式中: I_g^* —— I_g 的共轭。

2.2 GSC 控制目标

电网发生故障时,GSC 首先需要实现对有功的控制,即将直流母线电压 U_{dc} 维持在一个特定范围,然后再考虑正序无功电流的输出。由此可以得到如下控制目标:

$$\begin{cases} P_{g0} = P_{g0}^* \\ Q_{g0} = Q_{g0}^* \end{cases} \quad (27)$$

式中: P_{g0}^* ——网侧变换器的有功参考值,与直流母线电压有关;

Q_{g0}^* ——GSC 的正序无功参考分量,电网故障下需根据风电并网要求给出。

由此,可以得到转子和网侧电流正序分量参考值:

$$\begin{bmatrix} i_{gd+}^{+*} \\ i_{gq+}^{+*} \end{bmatrix} = \frac{1}{u_{sd+}^+} \begin{bmatrix} P_{g0}^* \\ Q_{g0}^* \end{bmatrix} \quad (28)$$

电网不对称故障时,由于电压、电流负序分量的存在,网侧变流器向电网输出的瞬时有功、无功功率可以表示为:

$$\begin{aligned} P_g + jQ_g &= -U_{gdq} \times I_{gdq}^* = \\ &= -(U_{gdq+}^+ + U_{gdq-}^- e^{-j2\omega_s t}) (I_{gdq+}^+ + I_{gdq-}^- e^{-j2\omega_s t}) = \\ &= [P_{g0} + P_{g\sin 2} \sin(2\omega_1 t) + P_{g\cos 2} \cos(2\omega_1 t)] + \\ &+ j[Q_{g0} + Q_{g\sin 2} \sin(2\omega_1 t) + Q_{g\cos 2} \cos(2\omega_1 t)] \end{aligned} \quad (29)$$

其中:

$$\begin{bmatrix} P_{g0} \\ Q_{g0} \\ P_{g\sin 2} \\ P_{g\cos 2} \\ Q_{g\sin 2} \\ Q_{g\cos 2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{sd+}^+ & u_{sq+}^+ & u_{sd-}^- & u_{sq-}^- \\ u_{sq+}^+ & -u_{sd+}^+ & u_{sq-}^- & -u_{sd-}^- \\ u_{sq-}^- & -u_{sd-}^- & -u_{sq+}^+ & u_{sd+}^+ \\ u_{sd-}^- & u_{sq-}^- & u_{sd+}^+ & u_{sq+}^+ \\ -u_{sd-}^- & -u_{sq-}^- & u_{sd+}^+ & u_{sq+}^+ \\ u_{sq-}^- & -u_{sd-}^- & u_{sq+}^+ & -u_{sd+}^+ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{gd+}^+ \\ i_{gq+}^+ \\ i_{gd-}^- \\ i_{gq-}^- \end{bmatrix} \quad (30)$$

忽略输入电阻 R_g 的影响,则 GSC 的三相交流侧瞬时有功 P_c 如下:

$$\begin{bmatrix} P_{c0} \\ P_{c\sin 2} \\ P_{c\cos 2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{g0} \\ P_{g\sin 2} \\ P_{g\cos 2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{X0} \\ P_{X\sin 2} \\ P_{X\cos 2} \end{bmatrix} \quad (31)$$

其中:

$$\begin{bmatrix} P_{X0} \\ P_{X\sin 2} \\ P_{X\cos 2} \end{bmatrix} = 2\omega_s L_g \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -i_{gd+}^+ & -i_{gq+}^+ \\ -i_{gq+}^+ & i_{gd+}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{gd-}^- \\ i_{gq-}^- \end{bmatrix} \quad (32)$$

电压不平衡条件下,式(24)给出的 U_{dc} 方程变为如下形式

$$\begin{aligned} CU_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} &= P_g - P_r = (P_{e0} - P_{s0} - P_{g0} - P_{X0}) + \\ &+ (P_{e\sin 2} - P_{s\sin 2} - P_{g\sin 2} - P_{X\sin 2}) \sin(2\omega_s t) + \\ &+ (P_{e\cos 2} - P_{s\cos 2} - P_{g\cos 2} - P_{X\cos 2}) \cos(2\omega_s t) \end{aligned} \quad (33)$$

由式(33)可知, U_{dc} 的电压水平与从 GSC 流出的功率 P_g 和向 RSC 注入的功率 P_r 有关。DFIG 正常运行时,直流母线流入和流出的功率处于平衡状态, U_{dc} 保持不变。在电网电压不平衡状态下,考虑到 P_g 和 P_r 包含二倍频分量,若不采取任何措施,两者将不再保持平衡, U_{dc} 相应产生二倍频的波动。在电网不对称运行状态下,为了防止直流母线电容受损,需要考虑抑制 U_{dc} 的波动。由此可得网侧变换器的控制目标如下:

$$P_{e\sin 2} - P_{s\sin 2} - P_{g\sin 2} - P_{X\sin 2} = 0 \quad (34)$$

$$P_{e\cos 2} - P_{s\cos 2} - P_{g\cos 2} - P_{X\cos 2} = 0 \quad (35)$$

当 RSC 实现消除电磁转矩振荡的控制目标时,有 $P_{e\sin 2} = P_{e\cos 2} = 0$ 。因此,可得网侧电流负序分量参考值:

$$\begin{bmatrix} i_{gd-}^{-*} \\ i_{gq-}^{-*} \end{bmatrix} = \frac{1}{u_{sd+}^+} \left\{ \begin{bmatrix} P_{s\cos 2} + P_{X\cos 2} \\ P_{s\sin 2} + P_{X\sin 2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{dd} & k_{qd} \\ k_{qd} & -k_{dd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{gd+}^{+*} \\ i_{gq+}^{+*} \end{bmatrix} \right\} \quad (36)$$

与 RSC 类似,由于 GSC 的容量是有限的,其控制优先级也需要合理安排。首先,GSC 应该保证对有功的控制,即将 U_{dc} 维持在一个恒定的水平;其次,需要考虑正序无功电流的输出。在满足以上要求之后,再考虑抑制 U_{dc} 的波动。

2.3 GSC 谐振滑模控制器的设计

定义状态变量:

$$e_g = I_g^* - I_g \quad (37)$$

其中: $e_g = [e_{gd} \ e_{gq}]^T, I_g^* = [i_{gd}^* \ i_{gq}^*]^T, I_g = [i_{gd} \ i_{gq}]^T$ 。

对式(37)求导,并将式(23)代入,则可得

DFIG 的状态方程为

$$\frac{de_g}{dt} = A_g - \frac{1}{L_g}U_g + \frac{1}{L_g}B_g I_g + \frac{1}{L_g}U_g \quad (38)$$

$$\text{其中: } A_g = \begin{bmatrix} di_{gd}^*/dt \\ di_{gq}^*/dt \end{bmatrix}, U_g = \begin{bmatrix} u_{gd} \\ u_{gq} \end{bmatrix}, B_r = \begin{bmatrix} R_g & -L_g\omega_s \\ R_g & L_g\omega_s \end{bmatrix}, U_g = \begin{bmatrix} u_{gd} \\ u_{gq} \end{bmatrix}。$$

与转子侧滑模控制器相似,引入谐振环节,可得到滑模面方程:

$$S_g = \left[1 + \frac{k_{ig}}{s} + \frac{k_{rg}\omega_c}{s^2 + 2\omega_c + (2\omega_s)^2} \right] e_g = G_g(s) e_g \quad (39)$$

式中: k_{ig} ——滑模面积分增益;

k_{rg} ——滑模面谐振增益;

$G_g(s)$ ——传递函数。

根据指数趋近律,则滑模面方程变为

$$\frac{dS_g}{dt} = -k_{g1}S_g - k_{g2}\text{sat}(S_g) \quad (40)$$

式中: k_{g1}, k_{g2} ——趋近律参数。

将式(39)代入到式(40),可得

$$sG_g(s) e_g = -k_{g1}G_g(s) e_g - k_{g2}\text{sat}[G_g(s) e_g] \quad (41)$$

则根据式(40)、式(41)可得 GSC 比例-积分-谐振滑模控制控制系统的等效控制为

$$U_{geq} = U_g - B_g I_g - L_g A_g \quad (42)$$

在 DFIG 参数变化和外部扰动的情况下,为使系统仍能在滑模面运动,需加入开关控制:

$$\Delta U_g = -L_g [k_{ig} e_g + k_{g1} S_g + k_{g2} \text{sat}(S_g)] \quad (43)$$

由式(42)、式(43)可得最终滑模控制器输出的参考电压为

$$U_g = U_{geq} + \Delta U_g \quad (44)$$

综合以上分析,可得如图 3 所示的 GSC 控制原理图。

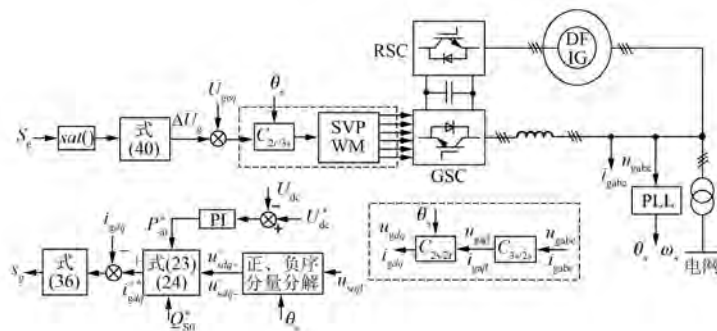


图 3 基于谐振滑模控制器的 GSC 控制电路

3 MATLAB 仿真验证

为了验证本文所设计控制方案的正确性,采用 MATLAB/Simulink 进行仿真研究。以一台 1.5 MW 的 DFIG 机组为例,其主要参数如表 1 所示。电网电压产生跌落之前,DFIG 工作在单位功率因数状态,转差率 $s = -0.2$ 。

3.1 电网正常运行状况下 DFIG 的动态响应

图 4、图 5 表示采用两种控制方案,即基于 PI 调节的传统矢量控制和基于谐振滑模控制器的协同控制下的仿真结果。在两种控制方案下,将双馈风电系统的初始有功和无功分别设定为 $P_s = 0.4, Q_s = 0$; $t = 0.2$ s 时有功功率给定值从 $P_s^* = 0.4$ 变为 $P_s^* = 0.73$,无功的给定值保持不变; $t = 0.4$ s

表 1 DFIG 机组的主要参数

参数名称	数值	参数名称	数值
额定电压/V	575	额定频率/Hz	60
极对数	2	定转子绕组杂数比	1:3
定子电阻/p.u.	0.023	转子电阻/p.u.	0.016
定子漏感/p.u.	0.18	转子漏感/p.u.	0.16
直流母线电压/V	1 150	滑模控制器参数	$k_p = 1; k_i = 10;$ $k_1 = 1; K_2 = 78.$

时有功功率给定从 $P_s^* = 0.73$ 变成 $P_s^* = 0$,而无功给定值从 $Q_s^* = 0$ 变成 $Q_s^* = 0.5$; $t = 0.6$ s 时功率参考值恢复到初始值。比较图 4 和图 5 可知,两种控制策略均能实现对功率值给定的跟随,并且保证输出功率的无静差调节。从图 4 可以看出,在传统的矢量控制下,当功率设定值发生变化时,约

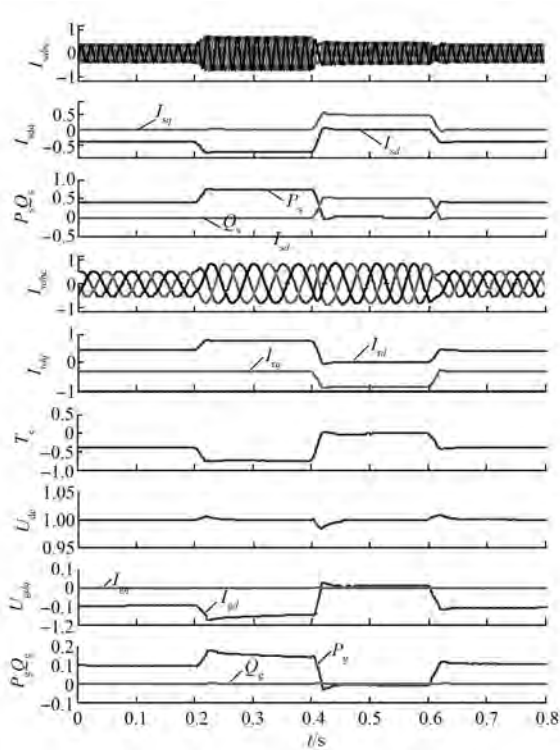


图4 DFIG 在传统的矢量控制策略下的动态响应

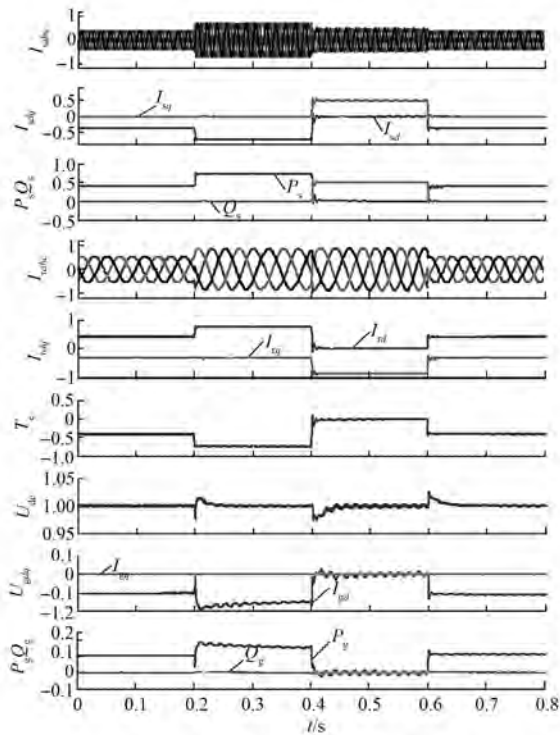


图5 基于滑模控制器的协同控制方案下 DFIG 系统的动态响应

需要 0.02 s 的时间才能达到一个新的稳定运行状态。此时功率和电流的波形变化存在明显的过渡过程。根据图 5 所示的仿真结果可知,在基于谐振滑模控制器的协同控制方案下,当功率给定值发生改变时,发电机和电网侧变流器输出的功率,以及流过的电流暂态响应时间极短,表明该控制方案具有良好的暂态性能。

3.2 电网不平衡故障时 DFIG 机组的动态响应

图 6 所示为 0.2~0.5 s 时间内机端电压出现轻度不平衡故障时的仿真结果。此时电压的正序分量幅值约为 0.91 p.u., 负序分量幅值约为 0.06 p.u.。考虑到电压的正序分量幅值变化很小,无需向电网提供无功功率,故 DFIG 可以继续保持故障前的运行状态。结合上文分析可知,电压不平衡时 DFIG 转子侧的控制目标设定为消除电磁转矩 T_e 的振荡,网侧的控制目标设定为消除 U_{dc} 的波动。由图 6 可知,经过电网故障初期的短时间波动之后, T_e 迅速达到不包含二倍频分量的稳定状态,振荡得到了有效的消除;虽然定子侧输出有功仍然存在波动,但无功的振荡得到了有效的抑制。根据图 6 可知, GSC 的控制有效地消除了 U_{dc} 的波动。由于电压不平衡度较小,在有限的容量下, RSC 和 GSC 能够达到 DFIG 系统设定的协同控制要求。

如图 7 所示为 0.2~0.5 s 时间内 DFIG 机端电压出现较严重不对称故障时的仿真结果。此时电压正序分量和负序分量幅值分别为 0.67 p.u. 和 0.16 p.u.。考虑到此时电压正序分量幅值下降较大,故需要 DFIG 向电网提供无功。设转子侧和网侧给定的无功参考值分别为 0.3 p.u. 和 0.1 p.u.。为了最大限度地消除 T_e 的振荡,将有功的给定值设定为零。从图 7 可以看到,经过电网故障初期的过渡过程之后, T_e 跟随设定值变为零,并且有效地消除了二倍频振荡;定子侧输出有功呈二倍频波动,其波动范围为 -0.1 p.u. ~ 0.1 p.u., 定子侧输出的无功功率不存在二倍频波动,其值约为 0.3 p.u.。从图 7 可知, GSC 向电网输出约为 0.1 p.u. 的平均无功,受到 GSC 容量的限制, U_{dc} 的波动有所减小,但并未完全消除。这与上文 RSC 和 GSC 的协同控制目标一致。

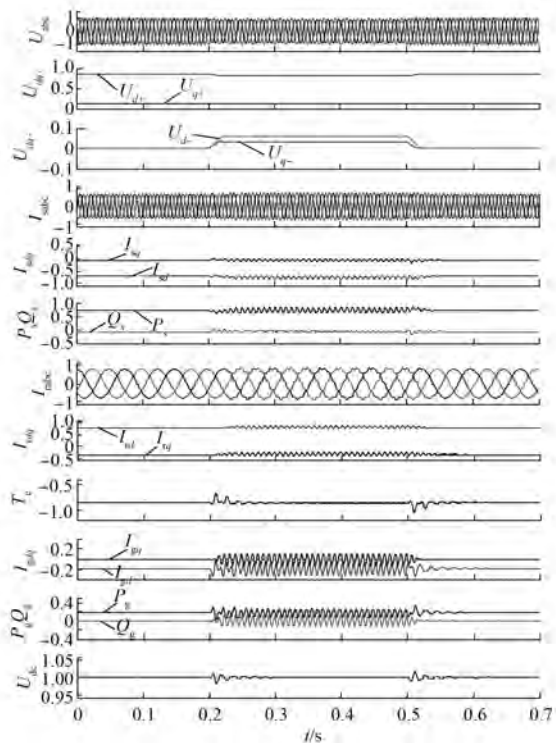


图6 电压轻度不平衡时DFIG系统仿真结果

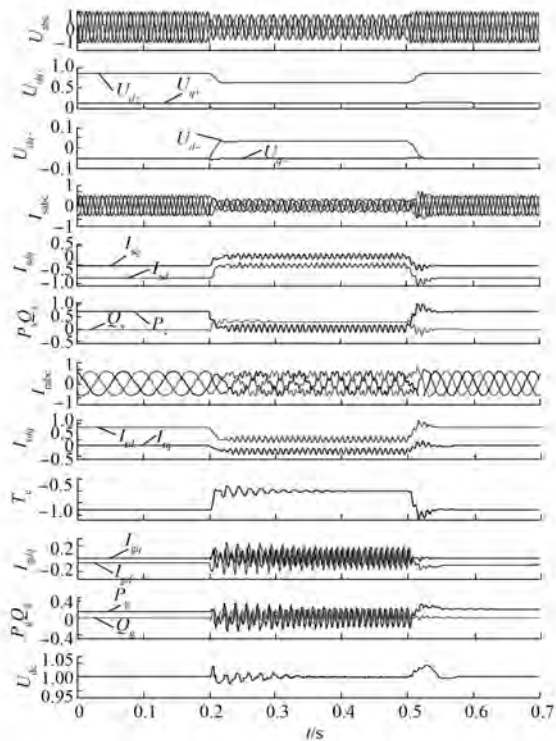


图7 电压严重不平衡时DFIG系统仿真结果

4 结 语

本文针对不对称电网故障下DFIG的RSC和GSC的协同控制方案展开了研究,并在电网严重不对称故障时,合理地安排了RSC和GSC控制目标的优先顺序。本文在比例-积分-谐振滑模控制原理的基础上设计了RSC和GSC滑模控制器以获得更好的控制性能和抗扰动能力。基于MATLAB/Simulink软件搭建了本文所提控制策略的仿真模型,得出下列结论:(1)与使用PI调节器的传统矢量控制策略相比,本文所设计的比例-积分-谐振滑模控制器的动态性能更好,抗扰动能力更强。(2)在轻度电网故障下,所设计的控制方案能消除电磁转矩振荡和直流母线电压波动。在严重电网不对称故障下,可以满足向电网输出无功电流的要求并能有效的抑制电磁转矩和直流母线电压的振荡。(3)所设计的方案有效地提高了电网不对称故障下DFIG的控制性能。

【参 考 文 献】

- [1] 徐海亮,章玮,贺益康,等.双馈型风电机组低电压穿越技术要点及展望[J].电力系统自动化,2013,37(20):8-15.
- [2] 贺益康,周鹏.变速恒频双馈异步风力发电系统低电压穿越技术综述[J].电工技术学报,2009,24(9):140-146.
- [3] MORREN J, HAAN S W H D. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator [J]. IEEE Trans on Energy Convers, 2007, 22(1): 174-180.
- [4] LIANG J Q, QIAO W, HARLEY R G. Feed-forward transient current control for low-voltage ride-through enhancement of DFIG wind turbines [J]. IEEE Trans on Energy Convers, 2010, 25(3): 836-843.
- [5] XIANG D W, RAN L, TAVNER P J, et al. Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through [J]. IEEE Trans on Energy Convers, 2006, 21(3): 652-662.
- [6] XIAO S, YANG G, ZHOU H L, et al. An LVRT control strategy based on flux linkage tracking for DFIG-based WECS [J]. IEEE Trans on Ind Electron, 2013, 60(7): 2820-2832.

(下转第124页)

- 35(17): 20-25.
- [12] 赵晶晶,吕雪,符扬,等.基于双馈感应风力发电机虚拟惯量和桨距角联合控制的风光柴微电网动态频率控制[J].中国电机工程学报,2015,35(15): 3815-3822.
- [13] 赵晶晶,吕雪,符扬,等.基于可变系数的双馈风力机虚拟惯量与超速控制协调的风光柴微电网频率调节技术[J].电工技术学报,2015,30(5): 59-68.
- [14] PAHASA J, NGAMROO I. Coordinated control of wind turbine blade pitch angle and PHEVs using MPCs for load frequency control of microgrid [J]. IEEE Systems Journal,2016,10(1): 97-105.
- [15] WANG H, TAN W. Load frequency control of power systems with wind turbine through flywheels [C] // Control and Decision Conference IEEE, 2015: 3495-3499.
- [16] MIAO L, WEN J, XIE H, et al. Coordinated control strategy of wind turbine generator and energy storage equipment for frequency support [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(4): 2732-2742.
- [17] 李芸.大规模风电场参与系统调频的控制策略研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [18] WU Z P, GAO W Z, WANG J H, et al. Acoordinated primary frequency regulation from permanent magnet synchronous wind turbine generation [C] // IEEE in Power Electronics and Machines in Wind Applications (PEMWA), Denver, Co, USA: IEEE, 2012: 1-6.
- [19] ENERGINET D. Wind turbines connected to grid with high vottage above 100 kV[M]. Denmark: Energinet, 2004.
- [20] 电力工业部.供电营业规则[G].1996.
- [21] 张同军.高渗透风机并网对电力系统暂态频率响应影响研究[D].济南:山东大学,2015.
- [22] 曹张洁.双馈感应风电机组参与系统一次调频的控制策略研究[D].成都:西南交通大学,2012.
- [23] 潘文霞,全锐,王飞.基于双馈风电机组的变下垂系数控制策略[J].电力系统自动化,2015,39(11): 126-131.

收稿日期: 2017 -02 -07

(上接第 117 页)

- [7] LIANG J Q, HOWARD D F, RESTREPO J A, et al. Feed forward transient compensation control for DFIG wind turbines during both balanced and unbalanced grid disturbances[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(3): 1452-1463.
- [8] XU L, WANG Y. Dynamic modeling and control of DFIG-based wind turbines under unbalanced network conditions[J]. IEEE Trans on Power System, 2007, 22(1): 314-323.
- [9] 胡家兵,贺益康,王宏胜.不平衡电网电压下双馈感应发电机转子侧变换器的比例-谐振电流控制策略[J].中国电机工程学报,2010,30(6): 48-56.
- [10] 胡家兵.双馈异步风力发电机系统电网故障穿越(不间断运行)研究[D].杭州:浙江大学,2009.
- [11] CHENG P, NIAN H. Collaborative control of DFIG system during network unbalance using reduced-order generalized integrator [J]. IEEE Trans on Energy Convers, 2015, 30(2): 453-464.
- [12] CHEN S Z, CHEUNG N, WONG K C, et al. Integral sliding-mode direct torque control of doubly-fed induction generators under unbalanced grid voltage [J]. IEEE Trans on Energy Convers, 2010, 25(2): 356-368.
- [13] HU J B, NIAN H, HU B, et al. Direct active and reactive power regulation of DFIG using sliding-mode control approach[J]. IEEE Trans on Energy Convers, 2010, 25(4): 1028-1039.
- [14] 胡家兵,孙丹,贺益康,等.电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制[J].电力系统自动化,2006,30(8): 21-26.
- [15] 郑雪梅,李琳,徐殿国.双馈风力发电系统低电压过渡的高阶滑模控制仿真研究[J].中国电机工程学报,2009,29: 178-183.
- [16] 全宇.适应畸变电网的双馈风力发电系统控制策略研究[D].杭州:浙江大学,2014.

收稿日期: 2016 -11 -29