

考虑转子励磁控制的双馈风机故障特性分析

柳鑫¹, 廖茜², 邹景澍³, 王远波³

(1. 中铁电气化勘测设计研究院有限公司, 天津 300250; 2. 国网重庆万州供电公司, 重庆 万州 404100;
3. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 双馈风机大量并网后, 电网故障特性发生明显变化, 给电网设备选型及电网继电保护问题带来挑战。非严重故障情况下, 撬棒保护未达到动作阈值时, 转子侧变换器继续投入运行, 转子变换器励磁控制很大程度上改变双馈风机的故障特性。通过建立双馈风电机组数学模型, 理论分析了转子侧变换器控制下双馈风电机组的磁链变化、转子电流和定子电流的暂态特性。并通过 PSCAD/MATLAB 仿真软件对 DFIG 磁链和定转子电流进行了仿真分析, 验证了理论分析的正确性。

关键词: 双馈感应风力发电机; 转子励磁控制; 故障电流

Abstract: High penetration of double-fed induction generator (DFIG) will obviously change the fault characteristics of power grid, which brings the challenge to the equipment type selection and relay protection of power grid. For non-severe fault conditions, the crowbar protection does not reach the action threshold and the rotor side keeps operating, and the excitation control of rotor converter will greatly change the fault characteristics of double-fed induction generator. Based on the mathematical model of double-fed wind generating unit, the flux variation and rotor/stator current transient characteristics of double-fed induction generator under the control of rotor side converter are analyzed theoretically. The simulation of DFIG flux and stator/rotor current is carried out by PSCAD/MATLAB simulation software, which verifies the correctness of the theoretical analysis.

Key words: double-fed induction generator; rotor excitation control; fault current

中图分类号: TM315 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)06-0010-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.06.003

0 引言

目前, 风力发电类型和风机型号多样化, 而双馈风电机组由于其经济和技术上的优点成为国际上应用最为广泛的机型。根据双馈风电机组的运行特性, 其转速与由电网运行频率决定的同步发电机不同, 即具有异步电动机的特点; 另一方面, 双馈风电机组具有独立的可调节功率因数的励磁绕组, 又具备同步电动机的特点。考虑到电机本身的结构和变换器复杂的控制策略, 电网故障下双馈风电机组提供的短路电流明显异于传统同步发电机^[1-2], 其规模化并网下提供的短路电流对电网的电气量变化特征产生复杂的影响, 因此双馈风电机组故障电流特性的分析对以故障特征为基础的继电保护研究具有重要意义。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(SWJTU12CX031)

针对电网远端非严重故障时, 双馈风电机组转子侧变换器继续进行励磁, 双 PWM 变换器的动态响应将对双馈风电机组的故障电流特性造成较大影响。文献[3-4]考虑了转子侧变换器的励磁控制对双馈风电机组的暂态特性的影响, 建立了转子侧变换器控制下的转子回路动态模型; 分析了转子侧变换器与双馈电机的耦合特征, 通过时域仿真验证了转子侧变换器控制方式对双馈风电机组暂态行为的影响。文献[5-6]按照功率外环闭锁的思想, 故障暂态过程分析中只考虑了转子电流内环控制器的影响。按典型的 I 型和 II 型系统设计了转子电流内环控制器, 并分析了转子侧变换器的动态响应特性及双馈风电机组的故障电流特性。文献[7-9]采用数字仿真定性分析了远端故障下考虑 DFIG 转子励磁调节动态特性下的故障电流特征, 但缺少定量分析且并未推导出双馈风机故障电流的表达式。

1 双馈风电机组建模

双馈风电机组模型主要分为变流器部分、异步电动机部分以及机械部分。由图 1 可知,双馈风机定子侧与电网连接,转子侧通过背靠背 PWM 变换器与电网相连,机械部分通过齿轮箱连接异步电动机。双馈风机通过升压变压器并入电网。

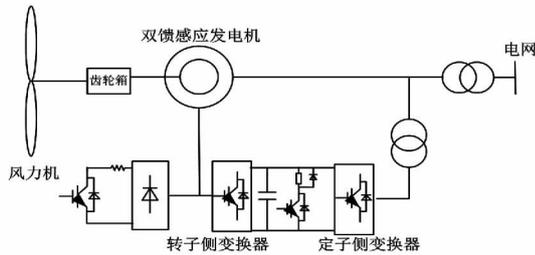


图 1 双馈风机的结构

1.1 双馈风机网侧变换器控制模型

网侧变换器通常采用电网电压定向的控制策略,同步旋转坐标系下的数学公式可表示为

$$\begin{cases} L di_{sd}/dt = -Ri_{sd} + \omega_1 Li_{sq} + u_s - u_{sd} \\ L di_{sq}/dt = -Ri_{sq} + \omega_1 Li_{sd} - u_{sq} \end{cases} \quad (1)$$

式中: L 为网侧变换器电感; R 为回路电阻; i_{sd} 、 i_{sq} 为变流器交流侧电流的 d 、 q 轴分量; u_{sd} 、 u_{sq} 为变流器交流侧电压的 d 、 q 轴分量; ω_1 为同步转速。具体控制结构见图 2 所示。

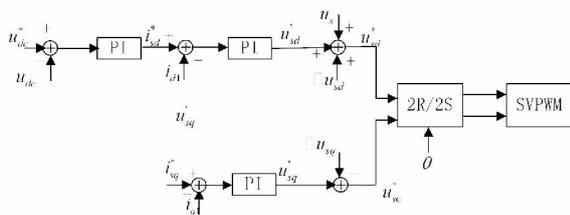


图 2 DFIG 网侧变换器控制模型

1.2 双馈风机转子侧变换器控制模型

将同步旋转坐标系的 d 轴定向于定子磁链矢量,可以将转子电压的 d 轴和 q 轴分量表示为

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r di_{rd}/dt - \omega_s \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r di_{rq}/dt + \omega_s \psi_{rd} \end{cases} \quad (2)$$

式中 i_{rd} 、 i_{rq} 为转子电流的 d 、 q 轴分量; u_{rd} 、 u_{rp} 为转子电压的 d 、 q 轴分量; $\sigma = 1 - L_m^2/L_s L_r$, L_s 、 L_r 、 L_m 分别为定子电感、转子电感及定转子互感。

转子磁链 ψ_{rd} 和 ψ_{rq} 可以表示为

$$\begin{cases} \psi_{rd} = L_m/L_s \psi_s + \sigma L_r i_{rd} \\ \psi_{rq} = \sigma L_r i_{rq} \end{cases} \quad (3)$$

将式 (3) 代入式 (2) 可得

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r di_{rd}/dt - \omega_s \sigma L_r i_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r di_{rq}/dt + \omega_s (L_m/L_s \psi_s + \sigma L_r i_{rd}) \end{cases} \quad (4)$$

通过前馈环节消除耦合项之后,转子电压分量可用转子电流分量表示。转子侧变流器的参考电压指令值可以表示为

$$\begin{cases} u_{rd}^* = K_p (i_{rd}^* - i_{rd}) + K_T \int (i_{rd}^* - i_{rd}) dt - \omega_s \sigma L_r i_{rq} \\ u_{rq}^* = K_p (i_{rq}^* - i_{rq}) + K_T \int (i_{rq}^* - i_{rq}) dt + \omega_s \sigma L_r i_{rd} \end{cases} \quad (5)$$

式中: u_{rd}^* 和 u_{rq}^* 分别为转子侧变换器电压参考值的 d 、 q 轴分量; i_{rd}^* 和 i_{rq}^* 分别为转子侧变换器电流参考值的 d 、 q 轴分量; K_p 为比例积分增益; K_T 为积分环节增益。通过引入前馈补偿项后, d 、 q 轴电流就实现了解耦控制。

根据上述公式可以得到基于定子磁链定向的矢量控制框图,具体详见图 3。

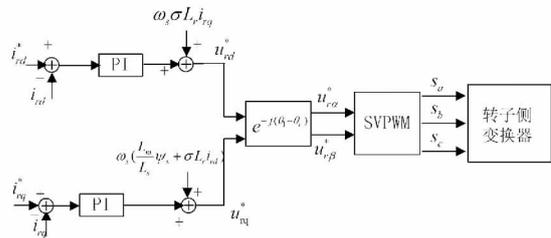


图 3 DFIG 转子侧变换器控制模型

2 双馈风机定子磁链暂态特性分析

理想对称电网条件下双馈风电机组正常运行时,三相静止坐标系下空间矢量形式的定子电压 \vec{u}_s 可以表示为

$$\vec{u}_s = U_s E^{j\alpha_A} e^{j\omega_1 t} = \dot{U}_s e^{j\omega_1 t} \quad (6)$$

式中: α_A 为 A 相电压的初始相角; \dot{U}_s 为稳态运行时候的定子机端电压相量。假设在 $t = t_0$ 时刻电网发生三相永久性故障,机端电压对称跌落。不考虑机端电压相位跳变的情况下,故障后的定子电压可以表示为

$$\vec{u}_s (t \geq 0) = (1 - k) U_s e^{j\alpha_A} e^{j\omega_1 t} = (1 - k) \dot{U}_s e^{j\omega_1 t} \quad (7)$$

式中 k 为电压跌落系数,可以定义为

$$k = (U_s - U_{sf}) / U_s \quad (8)$$

式中 U_{sf} 为短路故障后定子电压跌落的稳态值。

电网发生故障以前,定子磁链的值可以表示为

$$\vec{\psi}_s (t < t_0) = (\vec{u}_s - R_s \vec{i}_s) / j\omega_1 = (\dot{U}_s e^{j\omega_1 t} - R_s \vec{i}_s) / j\omega_1 \quad (9)$$

定子电阻值比较小,通常情况下可以忽略,式(9)可以表示为

$$\vec{\psi}_s(t < t_0) = \dot{U}_s e^{j\omega_1 t} / j\omega_1 \quad (10)$$

电网发生故障时,双馈风电机组定子侧电压瞬时跌落,定子磁链稳态分量减少。依据磁链守恒规律,即故障瞬时磁链不能发生突变,定子磁链将感应出暂态直流分量磁链。电网故障愈严重,定子磁链感应出来的直流磁链就越大。可以得出

$$\vec{\psi}_s(t \geq t_0) = \vec{\psi}_{sf}(\infty) + \vec{\psi}_{sn} e^{-t/\tau_1} \quad (11)$$

式中: $\vec{\psi}_{sf}(\infty)$ 为定子磁链的强制分量, $\vec{\psi}_{sn}(\infty) = (1-k) \dot{U}_s e^{j\omega_1 t} / j\omega_1$; $\vec{\psi}_{sn}$ 为定子磁链的自然分量, $\vec{\psi}_{sn} = k U_s e^{\omega_1 t_0} / j\omega_1$; $\tau_1 = R_s / L_s$ 是定子磁链的自然分量的衰减时间常数值。

3 DFIG 转子短路电流分析

双馈风电机组故障暂态特性比较复杂,有必要分析转子电流的动态特性。转子磁链用定子磁链和转子电流可以表示为

$$\vec{\psi}_r = L_m \vec{\psi}_s / L_s + (L_r - L_m^2 / L_s) \vec{i}_r \quad (12)$$

将式(12)代入式(4)可得

$$\vec{u}_r = R_r \vec{i}_r + (L_m / L_s) d \vec{\psi}_s / dt + (L_r - L_m^2 / L_s) d \vec{i}_r / dt + j\omega_s (L_m \vec{\psi}_s / L_s + (L_r - L_m^2 / L_s) \vec{i}_r) \quad (13)$$

式(13)可以表示为

$$\sigma L_r d \vec{i}_r / dt + (R_r + j\omega_s \sigma L_r) \vec{i}_r = \vec{u}_r + \vec{e} \quad (14)$$

式中:反电动势 \vec{e} 为定子磁对转子电流的激励; \vec{u}_r 为转子侧变流器的输出电压,反映转子变流器性能对转子电流的影响。

可以得到反电动势具体值为

$$\vec{e} = \vec{e}_p + \vec{e}_d e^{\tau_1 t_0} e^{-\tau_1 t} \quad (15)$$

$$\vec{e}_p = -j\omega_s / L_m / L_s (1-k) / \omega_1 \vec{u}_s \quad (16)$$

$$\vec{e}_d = k\omega_r / \omega_1 L_m / L_s \vec{u}_s \quad (17)$$

式中: \vec{e}_p 为稳态分量; \vec{e}_d 为直流分量。

同步旋转坐标系下DFIG转子电压矢量可通过转子侧变换器控制回路推导。转子电压控制公式的矢量模型可以表示为

$$\vec{u}_r^* = k_p (\vec{i}_r^* - \vec{i}_r) + k_i \int (\vec{i}_r^* - \vec{i}_r) dt - j\omega_s \sigma L_r \vec{i}_r \quad (18)$$

式中: k_p 和 k_i 分别为转子变换器的比例和积分增益常数。

转子参考分量矢量 \vec{i}_r^* 的值为

$$\vec{i}_r^* = \vec{i}_{rd}^* + j\vec{i}_{rq}^* \quad (19)$$

$$\vec{i}_{rd}^* = \psi_{sm} / L_m - 2L_s Q_s^* / (3L_m (1-k) U_s) \quad (20)$$

$$\vec{i}_{rq}^* = -2L_s P_s^* / 3L_m (1-k) U_s \quad (21)$$

式中: ψ_{sm} 为定子磁链的幅值; P_s^* 和 Q_s^* 分别为有功功率和无功功率的参考值,由风机的控制策略决定。

可以得出转子电流的二阶微分方程。

$$d^2 \vec{i}_r / dt^2 + \eta d \vec{i}_r / dt + \lambda \vec{i}_r = \lambda \vec{i}_r^* + \tau_1 \vec{e}_d e^{\tau_1 t_0} e^{-\tau_1 t} / \sigma L_r \quad (22)$$

式中: $\eta = R_r + k_p / \sigma L_r$; $\lambda = k_i / \sigma L_r$ 。

求解微分方程可以得到对称短路故障情况下双馈风电机组的转子电流表达式如下:

$$\vec{i}_r = \vec{i}_{r1} + \vec{i}_{r2} + \vec{i}_{rm} \quad (23)$$

式中: \vec{i}_{r1} 和 \vec{i}_{r2} 为转子电流的强制分量, \vec{i}_{r1} 为转子电流对分量 $\lambda \vec{i}_r^*$ 的响应; \vec{i}_{r2} 为转子电流对反电动势 $\tau_1 \vec{e}_d e^{\tau_1 t_0} e^{-\tau_1 t} / \sigma L_r$ 的响应; \vec{i}_{rm} 为转子电流的自然分量。

$$\vec{i}_{r1} = \vec{i}_r^* \quad (24)$$

$$\vec{i}_{r2} = \tau_1 \vec{e}_d e^{\tau_1 t_0} e^{-\tau_1 t} / (\sigma L_r (\tau_1^2 - \tau_1 \eta + \lambda)) \quad (25)$$

$$\vec{i}_{rm} = -\alpha_2 \vec{i}_r^* e^{\alpha_1 t} + \alpha_1 \vec{i}_r^* e^{\alpha_2 t} / (\alpha_1 - \alpha_2) \quad (26)$$

式中: $\alpha_1 = (-\eta + \sqrt{\eta^2 - 4\lambda}) / 2$; $\alpha_2 = (-\eta - \sqrt{\eta^2 - 4\lambda}) / 2$ 。

4 DFIG 定子短路电流分析

DFIG定子短路电流可以表示为

$$\vec{i}_s = -L_m / L_s \vec{i}_r + 1 / L_s \vec{\psi}_s \quad (27)$$

根据短路故障下的转子电流 \vec{i}_r 和定子磁链 $\vec{\psi}_s$ 可以得到DFIG的定子短路电流。将定子磁链公式代入式(27)可以得到

$$\vec{i}_s = \vec{i}_{sf} + \vec{i}_{sn} + \vec{i}_{sr} \quad (28)$$

式中: \vec{i}_{sf} 由定子磁链的强制分量决定, $\vec{i}_{sf} = (1-k) \vec{u}_s / j\omega_1 L_s$; \vec{i}_{sn} 由定子磁链的自由分量决定, $\vec{i}_{sn} = k \vec{u}_s / (j\omega_1 L_s) e^{\omega_1 t_0} e^{-t/\tau_1}$ 。

将转子电流公式(23)代入式(28)中即可以得到电网发生对称故障时的DFIG定子短路电流的表达式为

$$\vec{i}_s = \vec{i}_{sf} + \vec{i}_{sn} + \vec{i}_{sr1} + \vec{i}_{sr2} + \vec{i}_{sr3} \quad (29)$$

式中, \vec{i}_{sr1} 为转子励磁产生的强制分量,其大小与转子稳态电流有关。

$$\vec{i}_{sr1} = -L_m/L_s \vec{i}_{r1} = -L_m/L_s \vec{i}_r \quad (30)$$

式(29)中 \vec{i}_{sr2} 为转子励磁产生的暂态直流分量,其大小不仅与机端电压有关,还取决于转子侧变换器的控制回路的参数。

$$\vec{i}_{sr2} = -L_m/L_s \tau_1 \vec{e}_d e^{\tau_1 t_0} e^{-\tau_1 t} / \sigma L_r (\tau_1^2 - \tau_1 \eta + \lambda) \quad (31)$$

式(29)中 \vec{i}_{sr3} 为变流器控制产生的转子暂态分量通过励磁生成的衰减的谐波分量,其大小与转子稳态电流值和变换器参数有关。

$$\vec{i}_{sr3} = L_m/L_s \alpha_2 \vec{i}_{r0} e^{\alpha_1 t} + \alpha_1 \vec{i}_{r0} e^{\alpha_2 t} / (\alpha_1 - \alpha_2) \quad (32)$$

5 仿真分析

为了验证故障情况下双馈风电机组的定子磁链暂态过程,利用 EMTDC/PSCAD 仿真软件搭建风电机组并网暂态模型平台,对电网机端电压跌落 60% 情况下的定子磁链变化过程进行了仿真,详见图 4。

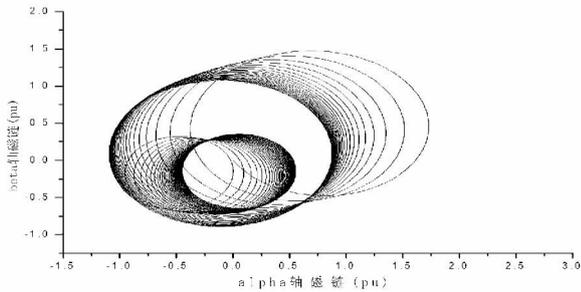


图4 DFIG 定子侧电压跌落 50% 的定子磁链变化过程

由图 4 可以看出,外面直径较大的圆为故障前的稳态磁链,里面较小的圆为故障后的稳态磁链。定子磁链由故障发生前的稳态过渡到故障发生后的稳态有一个衰减的过程,并没有发生突变,过程中会产生一个暂态的直流分量从而使磁链守恒。

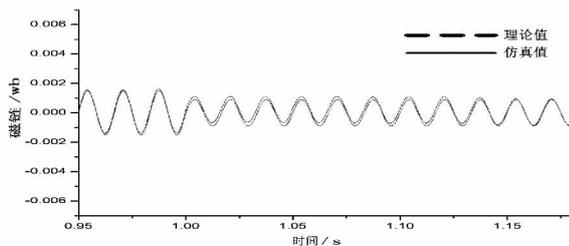


图5 DFIG 定子 α 轴磁链分量故障暂态特性

为了对比分析定子磁链暂态过程的计算结果与仿真结果,通过 EMTDC/PSCAD 软件对双馈风力发电系统进行仿真分析,算例设定故障电压跌落值为 60%,故障发生时刻为 1.0 s,故障前额定功率为 0.5

p.u.。仿真结果给 α 、 β 出轴磁链分量的暂态过程及与理论计算结果的对比分析。结果详见图 5 及图 6 所示。

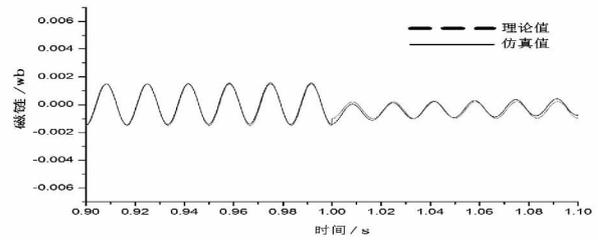


图6 DFIG 定子 β 轴磁链分量故障暂态特性

由图 5 和图 6 可以看出,定子 α 轴磁链和 β 轴磁链仿真结果与理论计算结果基本匹配,验证了理论计算结果的正确性。对机端三相定子电压 40% 和 60% 跌落深度情况下的故障进行了仿真分析,DFIG 转子短路电流波形见图 7 所示,DFIG 定子短路电流波形见图 8 所示。

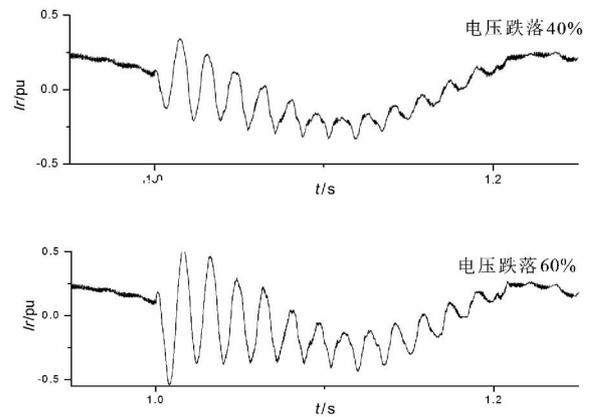


图7 电网故障下的转子短路电流仿真

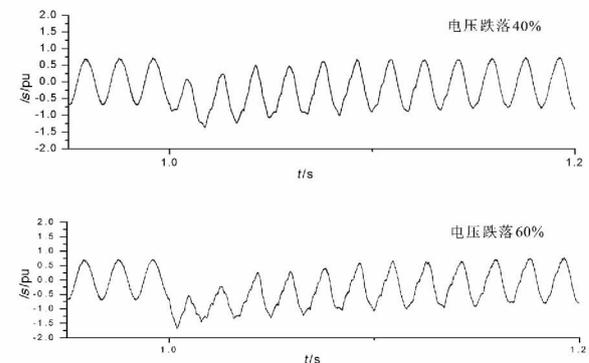


图8 电网故障下的定子短路电流仿真

图 7 和图 8 仿真结果反映了不同电压跌落情况下,双馈风电机组表现出的故障电流特性。由理论分析可知,双馈风电机组故障电流受电机气隙磁链的暂态变化过程以及双馈风电机组网侧和转子侧变流器的控制作用的影响。

(下转第 22 页)

[8] 孙国强, 卫志农, 翟玮星. 基于 RVM 与 ARMA 误差校正的短期风速预测[J]. 电工技术学报, 2012(8): 187-193.

[9] Joaquin Quinonero - Candela, Lars Kai Hansen. Time Series Prediction Based on the Relevance Vector Machine with Adaptive Kernels[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Hong Kong, China, 2002: 985-988.

[10] 王有禄, 李淑华, 宋飞. 风电场测风数据的验证和处理方法[J]. 电力勘测设计, 2009(1): 60-66.

[11] 张国强, 张伯明. 基于组合预测的风电场风速及风电

机功率预测[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18): 92-95.

[12] 卿湘运, 杨富文, 王行愚. 采用贝叶斯-克里金-卡尔曼模型的多风电场风速短期预测[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(35): 107-114.

[13] 杜颖, 卢继平, 李青, 等. 基于最小二乘支持向量机的风电场短期风速预测[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 62-66.

[14] 邵璠, 孙育河, 梁岚珍. 基于 ARMA 模型的风电场风速短期预测[J]. 电网与清洁能源, 2008(7): 52-55.

(收稿日期: 2016-08-20)

(上接第 13 页)

参考文献

6 结 论

1) 电网故障下, 由于定子磁链不能突变, 产生由定子电阻和电感决定的时间常数衰减的暂态直流分量, 并在最后衰减到 0。该分量会在转子中感应转子反电动势, 影响转子的暂态特性。

2) 考虑电机的暂态过程及变换器控制作用下的转子短路电流成份, 其中转子电流分量分别为转子电流参考值决定的周期分量; 转子电流对反电动势的响应, 大小由反电动势的值决定, 即受到电压跌落程度的影响; 转子电流的自然分量与变换器的控制参数有关。

3) 双馈风电机组定子短路电流分量可以通过定子磁链及转子电流表示, 其中周期分量与定子磁链的周期分量相对应, 与 DFIG 初始状态无关; 直流暂态分量与定子磁链的直流暂态分量相对应, DFIG 故障下定子电压跌落越严重, 该直流暂态分量越大; 转子电流分量暂态特性受转子侧变换器控制影响, 若转子侧变换器的闭环控制带宽足够大, 转子侧变换器提供的励磁电压能够很好地跟随指令值, 在变换器响应时间足够快的情况下, 转子电流周期分量可以近似地认为是参考值。

4) 考虑到双馈风机自身结构及变换器复杂的控制策略问题, DFIG 在电网发生故障的情况下提供的故障电流明显异于同步发电机, 其大规模并网的情况下, 提供的短路电流会对电网的电气量变化特性产生较为复杂的影响, 因此双馈风机故障电流特性的分析对以故障特征为基础的继电保护研究具有重要的现实意义。

[1] 欧阳金鑫, 熊小伏. 计及转子励磁控制的双馈感应发电机短路电流研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6083-6092.

[2] Ouyang J, Xiong X, Zeng X X. Analysis and Evaluation of Short-circuit Current of Doubly Fed Induction Generation under Rotor Excitation Control[J]. Journal of Renewable & Sustainable Energy, 2014, 6(5): 158-166.

[3] 金晶. 双馈风电机组转子变流器对短路特性的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.

[4] Kong X, Zhang Z, Yin X, et al. Study of Fault Current Characteristics of the DFIG Considering Dynamic Response of the RSC[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(2): 278-287.

[5] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 计及励磁调节特性影响的双馈风力发电机组故障电流特性[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 256-265.

[6] X Kong, Z Zhang, X Yin, et al. Study on Fault Current of DFIG during Slight Fault Condition[J]. Telkomnika Indonesian Journal of Electrical Engineering, 2013, 11(4): 2221-2230.

[7] 熊小伏, 欧阳金鑫. 电网短路时双馈感应发电机转子电流的分析与计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 114-121.

[8] 郑涛, 魏占朋, 迟永宁, 等. 考虑撬棒保护动作时间的双馈式风电机组短路电流特性[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 25-30.

[9] 柳鑫, 刘晓华, 吕文芳, 等. 考虑撬棒保护动作的双馈风机故障暂态特性分析[J]. 电力科学与工程, 2016, 32(1): 49-52.

作者简介:

柳鑫(1984), 研究生, 研究方向为风电在电力系统中的应用。

(收稿日期: 2016-09-05)