

DOI: 10.7667/PSPC150009

基于故障等值网络的双馈风电机组三相短路电流计算方法研究

盛万兴¹, 马静², 张瑜¹, 项晓强²

(1. 中国电力科学研究院配电网研究所, 北京 100192;

2. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 目前关于双馈风电机组短路电流的研究主要基于传统磁链分析方法。提出一种计算双馈风电机组定子三相短路电流的新方法。首先将发生三相对称短路的故障网络分解为无故障网络和故障附加网络, 在此基础上, 考虑机端电压相位跳变以及转子侧变流器调控的影响, 从功能解耦的角度出发, 进一步将故障附加网络分解为定子侧故障附加网络和转子侧故障附加网络。然后利用 Laplace 变换方法计算两组故障附加网络下的定子侧短路电流增量, 并推导全电流解析式。仿真及动模实验结果均验证了定子侧短路电流表达式的正确性, 对于含双馈风电机组的电力系统短路电流计算和继电保护整定意义重大。

关键词: 双馈风电机组; 功能解耦; 定子侧故障附加网络; 转子侧故障附加网络; Laplace 变换

Research on calculation method of three-phase short circuit current for doubly-fed wind power generator based on the fault equivalent network

SHENG Wanxing¹, MA Jing², ZHANG Yu¹, XIANG Xiaoqiang²

(1. Power Distribution Department, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources

(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: Nowadays research of short-circuit current for doubly-fed wind generation is mainly based on the method of the traditional flux linkage analysis. A novel calculation method of stator and rotor short-circuit current is proposed. The method deals with fault network following a three-phase symmetrical short-circuit fault as superposition of normal operation network and fault superimposed network. On this basis, the influence of the terminal phase jump and the rotor side converter control is considered. And from the perspective of function decoupling, fault superimposed network is further decomposed into the stator side fault superimposed network and the rotor side fault superimposed network. Then the increment of stator and rotor short circuit currents of fault superimposed network is calculated by using Laplace transform method. And the analytical expression of the total current is deduced. Finally, the effectiveness of the expression is proved by the simulation and dynamic model experiment results. It is of great significance for the short circuit current calculation and relay protection setting of the power system with doubly-fed wind power generator.

This work is supported by Science and Technology Project of SGCC (No. PD71-15-043), National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2012CB215206), and Fundamental Research Funds for the Chinese Universities (No. 2014ZZD02).

Key words: doubly-fed induction generator; function decoupling; stator side fault superimposed network; rotor side fault superimposed network; Laplace transform

0 引言

双馈风力发电机(Doubly-fed Induction Generator,

DFIG)作为一种重要的风电机型, 具有励磁变频装置容量小、有功和无功率可解耦控制、风能利用率高特点, 是目前广泛应用的主流机型^[1-3]。然而, 在电网发生短路故障的情况下, DFIG 的定子过电流、转子过电流以及直流母线过电压等一系列暂态过程^[3-6], 将严重威胁 DFIG 的故障穿越能力以及电力电子变流器的安全运行^[7-9]。因此研究并网 DFIG

基金项目: 国家电网公司科技项目 (PD71-15-043); 国家重点基础研究发展计划项目 (973 项目) (2012CB215206); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2014ZZD02)

的故障特性，并建立相应的保护方案对电网的安全稳定运行具有十分重要的意义。

电网发生故障时，DFIG 定转子短路电流受到电机暂态过程和电力电子变流器调控的耦合影响，使得定转子电流暂态过程的准确分析与评估变得非常复杂^[4]。目前已有很多学者推导了 DFIG 短路电流表达式^[10-15]：文献[10]对电网电压跌落所引起的 DFIG 电机电磁过渡过程进行了定性和定量分析，但是未得到定转子暂态电流的解析式；文献[11]推导了电网故障下定转子暂态电流的表达式，但未对转子暂态电流进行分析；文献[12-14]在考虑撬棒保护动作的基础上，推导了定转子短路电流近似解析式，但未考虑变流器调控的影响；文献[15]考虑了转子侧变流器的调控作用，推导了撬棒保护未投入情况下，电网对称短路故障转子电流的表达式，但未给出定子短路电流表达式。

上述方法均基于磁链分析理论推导 DFIG 定转子短路电流表达式，本文则基于故障等值网络提出一种计算 DFIG 定转子短路电流的新方法。首先将发生三相对称短路的故障网络分解为无故障网络和故障附加网络。在此基础上，考虑机端电压相位跳变以及转子侧变流器调控的影响，从功能解耦的角度出发，进一步将故障附加网络分解为定子侧故障附加网络和转子侧故障附加网络。然后利用 Laplace 变换方法计算两组故障附加网络下的定转子短路电流增量，并推导全电流解析式。最后，仿真及动模实验结果均验证了本方法的正确性及有效性。

1 DFIG 故障暂态理论

1.1 DFIG 数学模型

双馈风力发电机组基本结构与绕线转子异步发电机相似，其数学模型是一个高阶、非线性、强耦合的多变量系统^[16-19]。为便于分析，忽略空间谐波，假设三相绕组对称，所产生的磁动势沿气隙周围按正弦规律分布。定转子侧均采用电动机惯例，同步旋转坐标系下 DFIG 数学模型可表示为

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + p\psi_{sd} - \omega_1 \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p\psi_{sq} + \omega_1 \psi_{sd} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + p\psi_{rd} - \omega \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + p\psi_{rq} + \omega \psi_{rd} \end{cases} \quad (1)$$

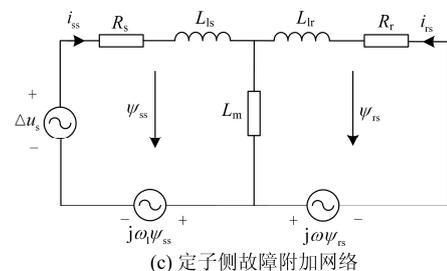
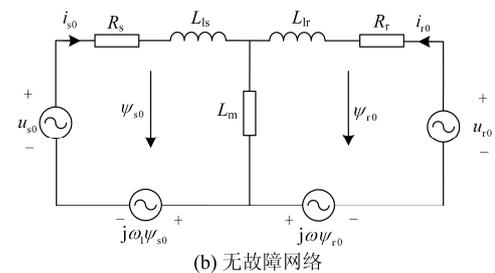
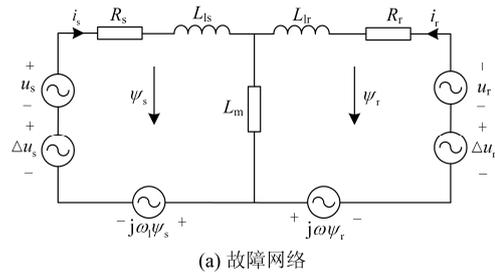
$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (2)$$

式中： u, i, ψ, R, L 分别为电压、电流、磁链、电阻和电感；下标 s 和 r 分别代表定子和转子量；下标 d 和 q 分别代表 d 轴和 q 轴分量； ω_1 为同步角速度， $\omega = \omega_1 - \omega_r$ 为转差角速度，即同步角速度与转子角速度的差值；式中所有参数均折算到定子侧，且用标么值表示。

1.2 DFIG 故障暂态过程分析

电网发生对称短路故障时，为便于分析故障后 DFIG 暂态过程，假设如下^[20]：(1) 暂态过程持续时间较短，近似认为电机转速不变；(2) 变流器容量足够大，转子撬棒保护未动作。由此可得，电网电压跌落瞬间，在转子侧变流器保持运行状态下，DFIG 故障等值网络如图1(a)所示。

设电网电压跌落率为 A ，则电网电压发生跌落过程相当于在定子侧突然串入反向电压，转子侧产生暂态电压的过程。为此，本文首先将故障网络分解为无故障网络(如图1(b)所示)和故障附加网络，在此基础上，考虑机端电压相位跳变以及转子侧变流器调控的影响，从功能解耦角度出发，进一步将故障附加网络分解为定子侧故障附加网络和转子侧故障附加网络，分别如图1(c)和图1(d)所示。



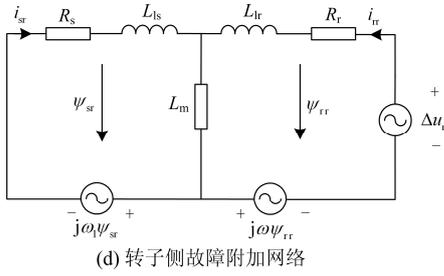


图 1 电网三相短路故障等值网络

Fig. 1 Fault equivalent network of the three-phase short circuit fault

2 电网对称短路下 DFIG 定转子电流分析

2.1 无故障网络分析

故障前DFIG处于稳态运行, 其等效电路如图1(b)所示, 同步旋转坐标下其复矢量模型为

$$\begin{cases} u_{s0} = R_s i_{s0} + p\psi_{s0} + j\omega_1 \psi_{s0} \\ u_{r0} = R_r i_{r0} + p\psi_{r0} + j\omega \psi_{r0} \\ \psi_{s0} = L_s i_{s0} + L_m i_{r0} \\ \psi_{r0} = L_m i_s + L_r i_{r0} \end{cases} \quad (3)$$

式中, u_{s0} , u_{r0} , i_{s0} , i_{r0} , ψ_{s0} , ψ_{r0} 分别为发电机定、转子电压、电流和磁链矢量。

为了实现DFIG的有功、无功解耦控制, DFIG转子侧变流器采用定子磁链定向矢量控制策略, 则有 $\psi_{ds} = \psi_{s0}$, $\psi_{qs} = 0$, 可得定转子磁链表达式为

$$\begin{cases} \psi_{s0} = U_{s0} / \omega_1 \\ \psi_{r0} = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s} i_{r0} + \frac{L_m}{L_s} \psi_{s0} \end{cases} \quad (4)$$

式中, U_{s0} 为DFIG稳态运行时机端电压幅值。

由定转子磁链方程可得定子电流为

$$i_{s0} = \frac{1}{L_s - \frac{L_m^2}{L_r}} \psi_{s0} - \frac{L_m}{L_s} \frac{1}{L_s - \frac{L_m^2}{L_r}} \psi_{r0} \quad (5)$$

将式(4)代入式(5), 可得定子稳态电流为

$$i_{s0} = k_1 \frac{U_{s0}}{\omega_1} + k_2 i_{r0} \quad (6)$$

$$\begin{cases} k_1 = \frac{1}{\sigma L_r} - \frac{L_m^2}{L_s^2} \frac{1}{\sigma L_r} \\ k_2 = -\frac{L_m L_r}{L_s^2} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} i_{td.ref} = \frac{U_{s0}}{L_m \omega_1} - \frac{2Q_N L_s}{3U_{s0} L_m} \\ i_{tq.ref} = \frac{2P_N L_s}{3U_{s0} L_m} \\ i_{r0} = i_{r.ref} = i_{td.ref} + j i_{tq.ref} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $i_{r.ref}$ 是转子电流的参考值矢量, DFIG稳态运行时, 转子电流值 i_{r0} 能够准确跟踪参考值 $i_{r.ref}$; P_N 和 Q_N 分别是有功和无功功率的参考值, 对于转子变流器恒功率控制的DFIG, 可直接设为定值。

2.2 定子侧故障附加网络分析

如图1(c)所示, 定子侧故障附加网络中仅含一个故障点处的故障附加电源 Δu_s , 该网络的复矢量模型可表示为

$$\begin{cases} \Delta u_s = R_s i_{ss} + d\psi_{ss} / dt + j\omega_1 \psi_{ss} \\ 0 = R_r i_{rs} + d\psi_{rs} / dt + j\omega \psi_{rs} \\ \psi_{ss} = L_s i_{ss} + L_m i_{rs} \\ \psi_{rs} = L_m i_{ss} + L_r i_{rs} \end{cases} \quad (9)$$

式中, i_{rs} 和 i_{ss} 分别是定子侧故障附加网络产生的转子和定子电流增量。

假设电网在 $t=t_1$ 时刻发生三相对称短路, 机端电压幅值瞬间跌落, 相位也发生跳变, 而且机端电压相位跳变角度越大, 越容易造成定转子过电流, 对变流器危险越大^[21-22]。由此可知, 忽略机端电压相位跳变角度将影响短路电流表达式的计算精度, 无法准确分析和评估短路电流的暂态过程。因此, 本文将对机端电压相位跳变机理进行分析, 并推导出考虑机端电压相位跳变的短路电流表达式。

图2是电网发生短路前的系统等效网络图。图中 U_0 是无穷大系统的电压, 其值恒定; U_s 是机端电压; Z_0 是DFIG与系统联络线的等效电抗。

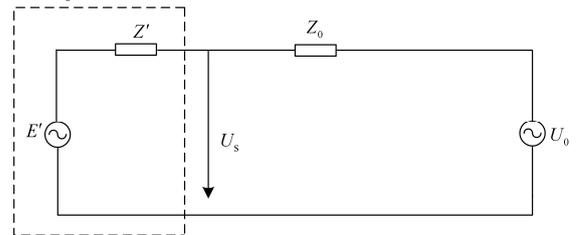


图 2 电网发生短路前的系统侧等效网络图

Fig. 2 System side equivalent network diagram before the short circuit fault of the grid

电网发生短路前的机端电压可表示为

$$U_s = \frac{Z'}{Z' + Z_{01} + Z_{02}} U_0 + \frac{Z_{01} + Z_{02}}{Z' + Z_{01} + Z_{02}} E' \quad (10)$$

电网发生三相对称短路时, 系统侧故障等效网络如图3所示。图中 Z_{o1} 和 Z_{o2} 分别为短路点至无穷大系统以及短路点至DFIG的输电线路等效电抗; Z_f 为系统短路故障时的接地电抗; f 是短路点。

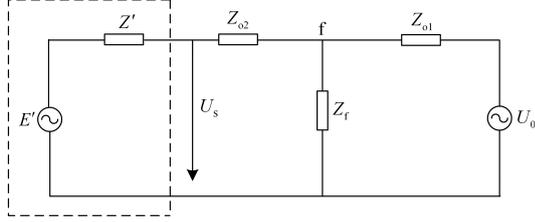


图3 发生三相对称短路故障时系统侧等效网络

Fig. 3 System side equivalent network diagram of the three phase short circuit fault

由图3可知, 电网发生三相对称短路后机端电压可表示为

$$U' = \frac{Z'}{Z' + Z_{o2}} \cdot \frac{Z_f // (Z' + Z_{o2})}{Z_{o1} + Z_f // (Z' + Z_{o2})} U_0 + \frac{Z_{o1} // Z_f + Z_{o2}}{Z_{o1} // Z_f + Z_{o2} + Z'} E' \quad (11)$$

由式(10)与式(11), 可得机端电压变化量为 $\Delta U_s = U_s - U' =$

$$\left(\frac{Z'}{Z' + Z_{o1} + Z_{o2}} - \frac{Z'}{Z' + Z_{o2}} \cdot \frac{Z_f // (Z' + Z_{o2})}{Z_{o1} + Z_f // (Z' + Z_{o2})} \right) U_0 + \left(\frac{Z_{o1} + Z_{o2}}{Z' + Z_{o1} + Z_{o2}} - \frac{Z_{o1} // Z_f + Z_{o2}}{Z_{o1} // Z_f + Z_{o2} + Z'} \right) E' \quad (12)$$

由于式(12)中等式右侧第二项远小于第一项, 故可忽略不计, 则机端电压变化量为

$$\Delta U_s = U_s - U' \approx \left(\frac{Z'}{Z' + Z_{o1} + Z_{o2}} - \frac{Z'}{Z' + Z_{o2}} \cdot \frac{Z_f // (Z' + Z_{o2})}{Z_{o1} + Z_f // (Z' + Z_{o2})} \right) U_0 = \Delta Z \cdot U_0 \quad (13)$$

根据式(13), 可计算出机端电压的相位变化角度为

$$\Delta \varphi = \arg\left(\frac{\Delta U_s}{U_0}\right) = \arg(\Delta Z) \quad (14)$$

由式(14)可知, 机端电压的相位变化只与网络拓扑结构有关, 与短路发生时刻无关。

综上, 在考虑机端电压相位跳变后的故障附加稳态电源可表示为

$$\begin{cases} \Delta u_s = -k u_{s0} \\ k = 1 - (1 - A) e^{j\Delta \varphi} \end{cases} \quad (15)$$

利用Laplace变换方法求解式(9), 可得定子侧故障附加网络产生的转子电流增量为

$$i_{rs} = i_{rs1} + i_{rs2} e^{-(j\omega_1 + 1/\tau'_s)t} + i_{rs3} e^{-(j\omega + 1/\tau'_s)t} \quad (16)$$

$$i_{rs1} = \frac{k L_m u_{s0}}{\sigma L_r L_s} \frac{j\omega}{(j\omega + 1/\tau'_r)(j\omega_1 + 1/\tau'_s)} \quad (17)$$

$$i_{rs2} = \frac{k L_m u_{s0}}{\sigma L_r L_s} \left[\frac{1}{\tau'_r (j\omega + 1/\tau'_r)(j\omega + 1/\tau'_r - j\omega_1 - 1/\tau'_s)} - \frac{j\omega}{(j\omega + 1/\tau'_r)(j\omega_1 + 1/\tau'_s)} \right] \quad (18)$$

$$i_{rs3} = \frac{k L_m u_{s0}}{\sigma L_r L_s} \frac{1}{\tau'_r (j\omega + 1/\tau'_r)(j\omega_1 + 1/\tau'_s - j\omega - 1/\tau'_r)} \quad (19)$$

式中: $\tau'_s = \sigma L_s / R_s$ 和 $\tau'_r = \sigma L_r / R_r$ 分别是定转子暂态时间常数; $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$ 是发电机漏感系数。

同样采用Laplace变换方法求解式(9), 可得定子侧故障附加网络产生的定子电流增量为

$$i_{ss} = i_{ss1} + i_{ss2} e^{-(j\omega_1 + 1/\tau'_s)t} + i_{ss3} e^{-(j\omega + 1/\tau'_s)t} \quad (20)$$

$$i_{ss1} = -\frac{k u_{s0}}{\sigma L_s} \frac{(j\omega + 1/\tau_r)}{(j\omega + 1/\tau'_r)(j\omega_1 + 1/\tau'_s)} \quad (21)$$

$$i_{ss2} = -\frac{k u_{s0}}{\sigma L_s} \left[\frac{(1/\tau'_r - 1/\tau_r)}{(j\omega + 1/\tau'_r)(j\omega + 1/\tau'_r - j\omega_1 - 1/\tau'_s)} - \frac{(j\omega + 1/\tau_r)}{(j\omega + 1/\tau'_r)(j\omega_1 + 1/\tau'_s)} \right] \quad (22)$$

$$i_{ss3} = -\frac{k u_{s0}}{\sigma L_s} \frac{(1/\tau'_r - 1/\tau_r)}{(j\omega + 1/\tau'_r)(j\omega_1 + 1/\tau'_s - j\omega - 1/\tau'_r)} \quad (23)$$

由式(20)可知, 定子侧故障附加网络产生的定转子短路电流增量包含2个分量: (1) 稳态分量 i_{ss1} 和 i_{rs1} ; (2) 衰减直流分量 i_{ss2} 、 i_{rs2} 与 i_{ss3} 、 i_{rs3} , 分别按 τ'_s 和 τ'_r 时间常数衰减, 这些分量产生的原因是由于定子磁链不能突变, 其值仅与电机参数有关。

2.3 转子侧故障附加网络分析

转子侧故障附加网络中仅含一个故障附加电源 Δu_r , 如图1(d)所示, 该网络的复矢量模型可表示为

$$\begin{cases} 0 = R_s i_{sr} + d\psi_{sr} / dt + j\omega \psi_{sr} \\ \Delta u_r = R_r i_{rr} + d\psi_{rr} / dt + j\omega \psi_{rr} \\ \psi_{sr} = L_s i_{sr} + L_m i_{rr} \\ \psi_{rr} = L_m i_{sr} + L_r i_{rr} \end{cases} \quad (24)$$

式中, i_{sr} 和 i_{rr} 分别是转子侧故障附加网络产生的定子和转子电流增量。

电网发生三相对称短路故障时, 短路瞬间转子绕组磁链保持不变, 将在转子侧产生暂态电势, 即故障附加电源 Δu_r , 它受到电机暂态过程及转子侧变流器调控的综合影响。

DFIG转子侧变流器通常采用定子磁链定向矢量控制方式, 利用耦合前馈补偿方式实现有功、无功功率的解耦控制。图4为转子侧变流器电流内环控制回路, 可得电压控制方程为

$$\begin{cases} u_{rd.ref} = k_p(i_{rd.ref} - i_{rd}) + k_i \int (i_{rd.ref} - i_{rd}) dt - \omega \sigma L_r i_{rq} \\ u_{rq.ref} = k_p(i_{rq.ref} - i_{rq}) + k_i \int (i_{rq.ref} - i_{rq}) dt + \omega \sigma L_r i_{rd} \\ u_r = u_{rd.ref} + j u_{rq.ref} \\ u_r = k_p(i_{ref} - i_r) + k_i \int (i_{ref} - i_r) dt + j \omega \sigma L_r i_r \end{cases} \quad (25)$$

式中: $i_{rd.ref}$ 和 $i_{rq.ref}$ 分别为转子 d 、 q 轴电流分量的参考值; $u_{rd.ref}$ 和 $u_{rq.ref}$ 分别为跟踪转子电流所需要的转子电压参考值; k_p 和 k_i 分别为 PI 控制器的比例和积分常数。

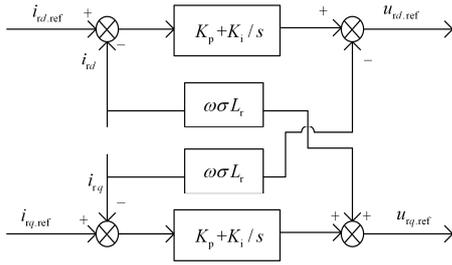


图 4 转子变流器电流内环控制框图

Fig. 4 Control of current inner-loop diagram of rotor-side converter

假设电流控制回路闭环带宽足够大, 变流器交流侧电压无差跟踪参考值, 忽略开关暂态, 电网电压发生对称跌落时同步旋转坐标系下的转子电压可表示为

$$u_r' = k_p(i_{ref}' - i_r') + k_i \int (i_{ref}' - i_r') dt + j \omega \sigma L_r i_r' \quad (26)$$

$$\begin{cases} i_{rd.ref}' = \frac{u_{s0}}{L_m \omega_1} - \frac{2Q_N L_s}{3L_m u_s'} \\ i_{rq.ref}' = \frac{2P_N L_s}{3u_s' L_m} \\ i_{ref}' = i_{rd.ref}' + j i_{rq.ref}' \\ u_s' = (1 - A) u_{s0} e^{j\Delta\varphi} \end{cases} \quad (27)$$

式中: $i_{rd.ref}'$ 和 $i_{rq.ref}'$ 分别是电网发生短路后转子侧变流器内环电流参考值; u_s' 是电网发生三相短路后的机端电压。

综上, 考虑转子变流器调控影响下的转子暂态电势可表示为

$$\Delta u_r = k_p(\Delta i_{ref}' - \Delta i_r') + k_i \int (\Delta i_{ref}' - \Delta i_r') dt + j \omega \sigma L_r \Delta i_r' \quad (28)$$

式中: $\Delta i_{ref}' = i_{ref}' - i_{ref}$ 是转子侧变流器电流内环参考值偏差; $\Delta i_r' = i_r' - i_r$ 是转子侧变流器电流内环瞬时值偏差, 即为转子暂态电势引起的转子电流增量 i_{rr} 。

利用 Laplace 变换方法求解式(24), 可得转子侧

故障附加网络产生的定转子短路电流增量为

$$i_{rr} = i_{rr1} + i_{rr2} e^{-t/\tau_s} + i_{rr3} e^{-t/\tau_r} \quad (29)$$

$$i_{sr} = i_{sr1} + i_{sr2} e^{-t/\tau_s} + i_{sr3} e^{-t/\tau_r} \quad (30)$$

式中, τ_s 和 τ_r 分别为定转子暂态时间衰减常数。

由式(29)与式(30)可知, 转子侧故障附加网络产生的定转子短路电流增量包含 2 个分量: (1) 稳态分量 i_{rr1} 、 i_{sr1} ; (2) 按 τ_s 和 τ_r 时间常数衰减的暂态分量 i_{rr2} 、 i_{sr2} 及 i_{rr3} 、 i_{sr3} 。它们的数值大小不仅与发电机参数、电压降、转速有关, 还与转子侧内环控制器 PI 参数有关。

2.4 电网对称短路下定转子短路全电流

根据上述分析可知, 电网发生三相对称短路时, 定转子短路全电流可表示为

$$i_r = (i_{r0} + i_{rs1} + i_{rr1}) + (i_{rs2} e^{-(j\omega_1 + 1/\tau_s')t} + i_{rs3} e^{-(j\omega + 1/\tau_r')t}) + (i_{rr2} e^{-t/\tau_s} + i_{rr3} e^{-t/\tau_r}) \quad (31)$$

$$i_s = (i_{s0} + i_{ss1} + i_{sr1}) + (i_{ss2} e^{-(j\omega_1 + 1/\tau_s')t} + i_{ss3} e^{-(j\omega + 1/\tau_r')t}) + (i_{sr2} e^{-t/\tau_s} + i_{sr3} e^{-t/\tau_r}) \quad (32)$$

式(31)与式(32)均在同步旋转坐标系下求取, 再将短路电流归算至三相静止坐标系, 可表示为

$$\begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_0) & -\sin(\omega t + \varphi_0) & 1 \\ \cos(\omega t + \varphi_0 + 120^\circ) & -\sin(\omega t + \varphi_0 + 120^\circ) & 1 \\ \cos(\omega t + \varphi_0 - 120^\circ) & \sin(\omega t + \varphi_0 - 120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \\ i_0(t) \end{bmatrix} \quad (33)$$

式中: $i_d(t)$ 、 $i_q(t)$ 、 $i_0(t)$ 分别是短路电流的 d 、 q 、 0 轴分量; φ_0 是短路瞬间电压初相角。

3 理论验证

3.1 仿真及动模实验系统简介

为了验证本文所推导的定转子短路电流表达式, 并进一步分析电网发生故障时 DFIG 定转子电流的暂态特性, 在国家重点实验室中, 搭建了 2 MW 的 DFIG 接入电力系统的动模实验平台, 并仿照该平台在 PSCAD/EMTDC 软件中搭建了系统的仿真模型。仿真及动模实验系统如图 5 所示, 风机主要参数为: 定子额定电压 690 V, 额定频率 50 Hz, 定子电阻 0.005 4 p.u., 转子电阻 0.006 07 p.u., 定子漏感 0.102 p.u., 转子漏感 0.11 p.u., 互感为 4.362 p.u.; DFIG 转子侧变流器电流内环控制器的 PI 参数, 比例参数为 1.8, 积分参数为 0.02。

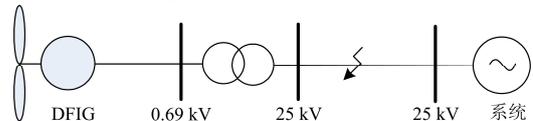


图 5 仿真系统图

Fig. 5 Simulation system diagram

3.2 电网对称短路下转子短路电流分析

假设电网在 $t=2$ s时刻发生三相对称短路故障，DFIG机端电压跌落约45%，转子电流波形如图6所示。由图6可以看出，考虑机端电压相位跳变和转子变流器调控作用时，转子短路电流的计算结果与仿真结果基本一致，而未考虑两者影响下的转子短路电流计算结果与仿真及动模结果偏差较大。这是因为电网发生短路故障时，机端电压瞬间跌落、相位跳变将引起DFIG内部电磁暂态过程，同时转子侧变流器内环控制器进行调控，两者相互耦合产生转子电流谐波分量，所以充分考虑这两种因素下推导的转子短路电流表达式，能更准确地反映故障初始瞬间及第一个周波内的转子电流暂态特性。

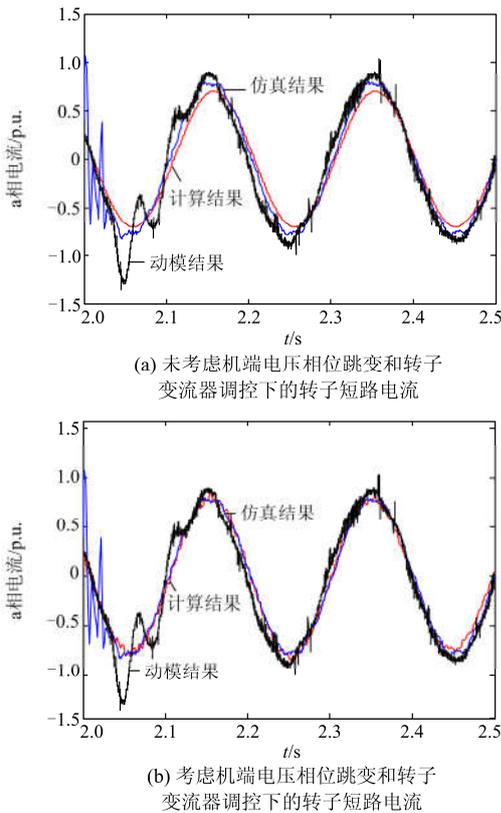


图6 电网三相短路故障下转子短路电流
Fig. 6 Rotor current under three-phase short-circuit of grid

3.3 电网对称短路下定子短路电流分析

电网发生三相对称短路，未考虑机端电压相位跳变和转子变流器调控作用下的定子短路电流如图7(a)所示，两者皆考虑的定子短路电流波形如图7(b)所示。对比图7(a)和图7(b)可以看出，考虑机端电压相位跳变和转子变流器调控下的定子短路电流计算结果更接近于仿真及动模曲线，且暂态衰减明显。这是因为若是忽略这两个因素，相当于忽略了定子短路的暂态过程，直接过渡到定子短路稳态状态，

所以会产生很大误差。特别是定子短路电流的最大幅值在电网发生严重对称短路故障时，可能达到稳态电流的3~4倍。为此，本文在充分考虑两者作用下推导的定子短路电流表达式，能更真实地反映故障时刻及故障过程中的定子短路电流特性，有助于进一步研究所接电网的保护问题。

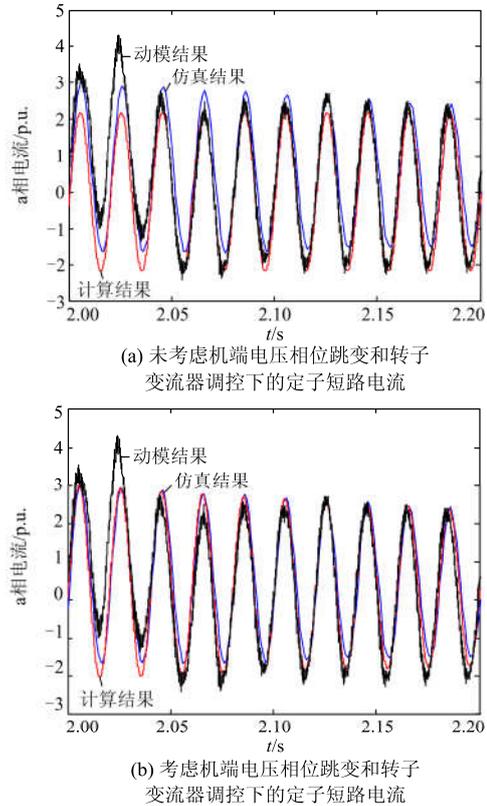


图7 电网三相短路故障下定子短路电流

Fig. 7 Stator current under three-phase short circuit of grid

4 结论

电网发生三相对称短路故障情况下，将引起DFIG电磁暂态过程及变流器控制协调过程，使得DFIG定转子电流的暂态分析过程变得十分复杂。本文提出了基于等值网络的DFIG定转子短路电流计算方法，该方法特点如下：

- (1) 从功能解耦的角度出发，将故障附加网络分解为定子侧故障附加网络和转子侧故障附加网络。
- (2) 不仅考虑机端电压相位跳变，而且充分考虑转子侧变流器的调控作用。
- (3) 利用Laplace变换方法计算两组故障附加网络下的定转子短路电流增量，并推导全电流解析式。
- (4) 计算结果与PSCAD仿真结果及动模实验结果基本一致，验证了本文所提出方法的正确性及有效性。

参考文献

- [1] 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.
HU Jiabing, SUN Dan, HE Yikang, et al. Modeling and control of DFIG wind energy generator system under grid voltage dip[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 21-26.
- [2] 付文秀, 范春菊. SVG 在双馈风力发电系统电压无功控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 61-68.
FU Wenxiu, FAN Chunju. Application of SVG in voltage and reactive power control of doubly-fed induction generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 61-68.
- [3] 杨之俊, 吴红斌, 丁明. 故障时双馈风力发电系统的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 14-18.
YANG Zhijun, WU Hongbin, DING Ming. Control strategy of doubly-fed wind generation system for power grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 14-18.
- [4] 欧阳金鑫, 熊小伏, 张涵轶. 并网双馈风电机组在电网短路时的特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 17-25.
OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu, ZHANG Hanyi. Characteristics of DFIG-based wind generation under grid short circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 17-25.
- [5] 滕予非, 行武, 张宏图, 等. 风力发电系统短路故障特征分析及对保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 29-36.
TENG Yufei, XING Wu, ZHANG Hongtu, et al. Analysis of characteristics of short circuit fault of wind power system and the impact on the protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 29-36.
- [6] 吕志强, 许国东. 兆瓦级双馈风电机组电网故障时的暂态分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 112-116.
LÜ Zhiqiang, XU Guodong. Transient analysis of grid short circuit fault of megawatt doubly fed wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 112-116.
- [7] 闫鹏强, 王增平, 陈振新. 考虑拓扑影响的风电场无功优化策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 76-82.
YAN Pengqiang, WANG Zengping, CHEN Zhenxin. Reactive power optimization for wind farm considering impact of topology[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 76-82.
- [8] 郭佳虎, 张鲁华, 蔡旭. 双馈风力发电系统在三相短路故障下的响应与保护[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 40-44.
GUO Jiahui, ZHANG Luhua, CAI Xu. Response and protection of DFIG system under three-phase short circuit fault of grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 40-44.
- [9] 苏平, 张靠社. 基于主动式 IGBT 型 Crowbar 的双馈风力发电系统 LVRT 仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 164-171.
SU Ping, ZHANG Kaoshe. Simulation research for LVRT of DFIG with active IGBT Crowbar[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 164-171.
- [10] 杨淑英, 张兴, 张崇巍, 等. 电压跌落激起的双馈型风力发电机电磁过渡过程[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 85-91.
YANG Shuying, ZHANG Xing, ZHANG Chongwei, et al. Electro-magnetic transition of double fed wind turbines initiated by voltage dip[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 85-91.
- [11] 李建林, 许洪华, 胡书举, 等. 风力发电系统低电压运行技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 19-39.
- [12] 李辉, 赵猛, 叶仁杰, 等. 电网故障下双馈风电机组暂态电流评估及分析[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(8): 45-51.
LI Hui, ZHAO Meng, YE Renjie, et al. Evaluation and analysis of transient current of a DFIG wind generation system under grid fault[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(8): 45-51.
- [13] 翟佳俊, 张步涵, 谢光龙, 等. 基于撬棒保护的双馈风电机组三相对称短路电流特性[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 18-23.
ZHAI Jiajun, ZHANG Buhuan, XIE Guanglong, et al. Three-phase symmetrical short-circuit current characteristic analysis of wind turbine driven DFIG with crowbar protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 18-23.

- [14] 张学广, 徐殿国, 李伟伟. 双馈风力发电机三相短路电流分析[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(5): 493-497.
ZHANG Xueguang, XU Dianguo, LI Weiwei. Analysis of three-phase short current of doubly fed induction generator[J]. Electric Machines and Control, 2008, 12(5): 494-497.
- [15] 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): 115-121.
XIONG Xiaofu, OUYANG Jinxin. Analysis and calculation of rotor currents for doubly-fed Induction generators under short circuits in power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 115-121.
- [16] LOPEZ J, SANCHIS P, ROBOAM X, et al. Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three-phase voltage dips[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(3): 709-717.
- [17] PERDANA A, CARLSON O, PERSSON J. Dynamic response of grid-connected wind turbine with doubly fed induction generator during disturbances[C] // Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, Trondheim, Norway, 2004.
- [18] 李辉, 杨顺昌, 廖勇. 并网双馈发电机电网电压定向励磁控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 159-162.
LI Hui, YANG Shunchang, LIAO Yong. Study on excitation control of power system voltage oriented for doubly fed generators connected to an infinite bus[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 159-162.
- [19] 张舒怡, 齐飞. 双馈风力发电系统柔性并网控制策略研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(9): 5-9.
ZHANG Shuyi, QI Fei. Flexible grid-connection control strategy for double-fed wind power generation system[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(9): 5-9.
- [20] MORREN J, HAAN S W H. Ride-through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(2): 435-441.
- [21] 王伟, 陈宁, 朱凌志, 等. 双馈风力发电机低电压过渡的相角补偿控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(21): 62-68.
WANG Wei, CHEN Ning, ZHU Lingzhi, et al. Phase angle compensation control strategy for low-voltage ride through of doubly-fed induction generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(21): 62-68.
- [22] 齐桓若, 刘其辉. 双馈风机低电压穿越的改进技术[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(1): 102-108.
QI Huanruo, LIU Qihui. Improved technology for DFIG's low voltage ride through[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(1): 102-108.

收稿日期: 2015-11-04; 修回日期: 2016-02-05

作者简介:

盛万兴(1965-), 男, 博士, 教授级高工, 研究领域为电力系统自动化、计算机及人工智能等; E-mail: wxsheng@epri.sgcc.com.cn

马静(1981-), 男, 博士后, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: hdmajing@163.com

张瑜(1985-), 女, 硕士, 研究领域为配电网运行、分析与控制。E-mail: zhangyu2010@epri.sgcc.com.cn

(编辑 魏小丽)