

计及网侧变流器的双馈感应发电机稳态短路电流 实用计算方法研究

任蔷¹, 陈洁羽¹, 邓俊¹, 段建东²

(1. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 西安 710100; 2. 西安理工大学电气工程学院, 西安 710048)

摘要:双馈感应发电机组(DFIG)的大规模并网使得电网的故障特征发生变化,进而影响了继电保护装置的动作特性评估,故研究 DFIG 的低电压穿越(LVRT)特性有重要意义。然而目前的研究尚未全面考虑最新风机并网要求、实际 LVRT 控制策略以及网侧变流器(GSC)3大因素对 DFIG 稳态短路电流的影响。基于主流厂家 DFIG 的 LVRT 控制策略以及我国最新风机并网要求,分别建立了 LVRT 期间定子和 GSC 的稳态模型,提出了 DFIG 稳态短路电流的实用计算方法。并进一步在 RTLAB 上搭建了含 DFIG 实际控制器的半实物仿真平台,验证了实用计算方法对于短路电流有效值的计算误差小于 3%,短路电流相角的计算误差小于 2.5%。本文的研究成果对 DFIG 接入系统的继电保护整定等方向有重要意义。

关键词:双馈感应发电机;网侧变流器;低电压穿越;短路电流;实用计算

Research on Practical Calculation Method of Steady-state Short Circuit Current of Doubly Fed Induction Generator Considering Grid Side Converter

REN Qiang¹, CHEN Jieyu¹, DENG Jun¹, DUAN Jiandong²

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The large-scale grid-connection of doubly fed induction generator (DFIG) has changed the fault characteristics of the power grid, and then affected the operation characteristic assessment of the relay protection devices. Therefore, it is very important to study the lower voltage ride through (LVRT) characteristics of DFIG. However, the current researches haven't fully considered the influences of the latest wind turbine grid-connection requirements, the actual LVRT control strategy and the grid-side converter (GSC) on the steady-state short-circuit current of DFIG. In this paper, the steady-state models of stator and GSC during LVRT period is set up respectively on the basis of the LVRT strategy of DFIG of mainstream factories and the latest wind turbine grid-connection requirements in China, and a practical calculation method for the steady-state short-circuit current of DFIG is proposed. Furthermore, a semi-physical simulation platform including actual controller of DFIG is set up on RTLAB further. It is verified that the calculation error of the effective value of short-circuit current by the practical calculation method is less than 3%, and the calculation error of the short-circuit current phase angle is less than 2.5%. The research results in this paper are of great significance to the relay protection setting of DFIG access system.

Keywords: doubly fed induction generator; grid side converter; low voltage ride through; short-circuit current; practical calculation

0 引言

双馈风力发电机组(doubly fed induction gener-

ator, DFIG)由于风能转化效率高、运行风速范围广、功率控制灵活以及变流器造价低等优点,尤其在大功率风力发电领域占据了很大的市场份额^[1-7]。DFIG

收稿日期:2023-05-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877174);国网陕西省电力有限公司科技项目(5226KY230005)。

依靠变流器提供励磁控制和并网接口,电网发生故障时风电机组可出现脱网运行的状况,导致电网发生大范围功率扰动^[8-11]。为了解决这一问题,我国电网要求风电机组具备低电压穿越(lower voltage ride through, LVRT)能力,并在 LVRT 期间通过向电网注入无功电流来支撑电网电压恢复^[12-17]。

随着 DFIG 大规模并网,其 LVRT 期间提供的短路电流对继电保护整定等的影响不可忽略,但传统的同步发电机短路电流计算方法不适用于 DFIG^[18-19]。DFIG 在 LVRT 期间提供的短路电流为定子和网侧变流器(grid side converter, GSC)提供的短路电流之和。首先是文献[20]认为在缺少 LVRT 控制策略的情况下,DFIG 提供的短路电流无法通过直接计算得到,并提出了一种 DFIG 接入系统的等效建模方法来仿真计算 LVRT 期间定子提供的稳态短路电流。文献[21]则在未考虑 LVRT 控制策略的前提下,通过分析 DFIG 的电磁暂态模型推导了对称故障下普适性的定子短路电流表达式,并针对短路故障发生瞬间无法确定定子电压稳态幅值的问题提出了定子电压跌落系数的修正方法。文献[22]首次结合定子电压定向的矢量控制方式提出了不对称故障下定子的初始短路电流和稳态短路电流表达式。而后文献[23]首次考虑了我国风机并网要求中对 LVRT 期间 DFIG 所发动态无功电流的要求,在此基础上优化了定子短路电流表达式。文献[24]进一步研究了转子 crowbar 保护投入对定子短路电流的影响。文献[25]首次搭建了含实际控制器的半实物仿真平台来研究 LVRT 期间定子的初始短路电流和稳态短路电流表达式,但未考虑 GSC 对短路电流的影响。文献[26]则计及 GSC 提供的短路电流,进一步推导了 crowbar 投入和无功控制阶段 DFIG 的 LVRT 全过程短路电流表达式,但未结合我国风机并网要求和实际 LVRT 控制策略。

可以看出,目前国内外的研究主要围绕定子在 LVRT 期间提供的短路电流,尚未全面考虑风机并网要求、DFIG 低穿控制策略以及 GSC 提供的短路电流对 DFIG 故障电流的影响,难以进行工程实际应用。且绝大多数研究采用数字模型仿真的方式验证理论分析的结果^[27-30],无法验证仿真结果与实际风机的外特性是否一致。本文结合主流厂家的 LVRT 控制策略和我国最新风机并网分别研究了对称故障下定子和 GSC 的稳态模型,并进一步提出 DFIG 短路电流的实用计算方法。其次在 RTLAB 上搭建了含 DFIG 实际控制器的半实物仿真平台,在不同工况、不同故障条件下验证短路电流实用计

算方法的准确性。本文的研究成果具有工程实用价值,对于高比例新能源并网下的继电保护整定等研究有重要意义。

1 计及 LVRT 控制策略的定子稳态模型

DFIG 电气部分由 GSC、机侧变流器(rotor side converter, RSC)和异步发电机构成,其中 RSC 通常采用 d 轴定子电压定向或磁链定向的矢量控制方式^[31]。本文采用 d 轴定子电压定向的矢量控制方式,即将定子的电压矢量与 dq 坐标系的 d 轴重合可得:

$$\begin{cases} u_{sd} = u_s \\ u_{sq} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_s 、 u_{sd} 和 u_{sq} 分别为定子电压、定子电压 d 轴分量和定子电压 q 轴分量。此时 dq 坐标系下定子侧瞬时有功功率 P_s 和无功功率 Q_s 为

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} u_s i_{sd} \\ Q_s = \frac{3}{2} u_s i_{sq} \end{cases} \quad (2)$$

式中: i_{sd} 和 i_{sq} 为定子电流 d 轴分量和 q 轴分量。定、转子电压电流按照电动机惯例,将式(1)代入定子电压方程可得公式

$$\begin{cases} u_s = R_s i_{sd} - \omega_s \psi_{sq} + D\psi_{sd} \\ 0 = R_s i_{sq} + \omega_s \psi_{sd} + D\psi_{sq} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ψ_{sd} 、 ψ_{sq} 为定子磁链 d 轴分量和 q 轴分量; R_s 为定子相电阻; ω_s 为同步角速度, D 为微分算子 d/dt 。通常 R_s 数值较小可忽略不计,可得到稳态下定子磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_{sd} = 0 \\ \psi_{sq} = -\frac{u_s}{\omega_s} \end{cases} \quad (4)$$

将式(3)代入定子磁链方程可得

$$\begin{cases} L_s i_{sd} + L_m i_{rd} = 0 \\ L_s i_{sq} + L_m i_{rq} = -\frac{u_s}{\omega_s} \end{cases} \quad (5)$$

式中: i_{rd} 、 i_{rq} 为转子电流 d 轴分量和 q 轴分量; L_s 、 L_m 为定子等效自感和激磁电感。假设 DFIG 并网点发生三相非金属性短路故障,我国风电场接入电力系统技术规定 DFIG 在对称故障期间应具有动态无功支撑能力,且满足形式 $i_q = K(0.9 - u_s)I_N$,由此可知定子电流 q 轴分量 i_{sq} 为

$$i_{sq} = K(0.9 - u_s)I_N, \quad 0.2 \leq u_s \leq 0.9 \quad (6)$$

式中: K_1 为定子无功支撑系数; I_N 为风电机组额定电流。将式(6)带入式(5)可以得到转子电流 q 轴分量 i_{rq} 公式为

$$i_{rq} = \left[-\frac{u_s}{\omega_s L_m} - \frac{L_s K_1}{L_m} (0.9 - u_s) \right] I_{rN}, \quad 0.2 \leq u_s \leq 0.9 \quad (7)$$

式中: I_{rN} 为 RSC 额定电流。由于我国电网要求 LVRT 期间 DFIG 优先满足无功电流要求,故 LVRT 期间转子电流 d 轴分量 i_{rd} 公式为

$$i_{rd} = \min \left(i_{rd \max}, \sqrt{i_{r \max}^2 - i_{rq}^2} \right) I_{rN}, \quad 0.2 \leq u_s \leq 0.9 \quad (8)$$

式中: $i_{r \max}$ 和 $i_{rd \max}$ 分别为 RSC 最大限制电流和 RSC 最大有功限制电流。为了避免变流器因电网电压大幅跌落引起过电流,保证 DFIG 满足 LVRT 要求,一部分 DFIG 在 LVRT 期间通过设定 RSC 最大有功限制电流来限制 GSC 有功电流,其可随 u_s 变化发生改变。将式(8)带入式(5)可得定子电流 d 轴分量 i_{sd} 为

$$i_{sd} = -\frac{L_m}{L_s} \min \left\{ i_{rd \max}, \sqrt{i_{r \max}^2 - \left[\frac{u_s}{\omega_s L_m} + \frac{L_s K_1}{L_m} (0.9 - u_s) \right]^2} \right\} I_N, \quad 0.2 \leq u_s \leq 0.9 \quad (9)$$

2 计及 LVRT 控制策略的 GSC 稳态模型

DFIG 提供的短路电流由定子和 GSC 提供的短路电流两部分组成,GSC 大多采用并网点电压定向的控制方式^[31]。本文假设 GSC 采用 d 轴并网点电压定向的控制方式,当 DFIG 并网点发生三相非金属性短路故障时,由上节中提到的我国风电场接入电力系统技术规定对于 DFIG 在对称故障期间的动态无功支撑要求可知 GSC 电流 q 轴分量 i_{gq} 公式为

$$i_{gq} = K_2 (0.9 - u_s) I_{gN}, \quad 0.2 \leq u_s \leq 0.9 \quad (10)$$

式中: K_2 为网侧无功支撑系数; I_{gN} 为 GSC 额定电流。根据异步发电机功率方程,忽略定转子铜耗定转子的有功功率关系为^[32-33]

$$\begin{cases} P_r = -s P_s \\ s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \end{cases} \quad (11)$$

式中: P_r 为转子侧瞬时有功功率; s 为转差率; ω_r 为转子角速度。在 LVRT 期间 GSC 有功电流的主要作用为维持直流母线电压稳定,当直流母线电压达到稳态值时根据有功功率平衡可知 $P_g = P_r = -s P_s$, 其

中 P_g 为 GSC 有功功率。由此可知 GSC 电流 d 轴分量 i_{gd} 公式为

$$i_{gd} = -s i_{sd} = \frac{s L_m}{L_s} \min \left\{ i_{rd \max}, \sqrt{i_{r \max}^2 - \left[\frac{u_s}{\omega_s L_m} + \frac{L_s K_1}{L_m} (0.9 - u_s) \right]^2} \right\} I_N, \quad 0.2 \leq u_s \leq 0.9 \quad (12)$$

将所有有名值以机组额定电流 I_N 为基准值归算至标么值,定、转子电压电流按照电动机惯例 DFIG 在对称故障期间的稳态电流解析表达式为

$$\begin{cases} i = \sqrt{(i_{sd} + i_{gd})^2 + (i_{sq} + i_{gq})^2} \\ \theta = \arctan \frac{i_{sq} + i_{gq}}{i_{sd} + i_{gd}} + \theta_u \\ i_{sd} = -\frac{L_m}{L_s} \min \left\{ i_{rd \max}, \sqrt{i_{r \max}^2 - \left[\frac{u_s}{\omega_s L_m} + \frac{L_s K_1}{L_m} (0.9 - u_s) \right]^2} \right\} \\ i_{sq} = K_1 (0.9 - u_s) \\ i_{gd} = \frac{s L_m}{L_s} \min \left\{ i_{rd \max}, \sqrt{i_{r \max}^2 - \left[\frac{u_s}{\omega_s L_m} + \frac{L_s K_1}{L_m} (0.9 - u_s) \right]^2} \right\} \\ i_{gq} = K_2 (0.9 - u_s) \frac{I_{gN}}{I_N} \end{cases} \quad 0.2 \leq u_s \leq 0.9 \quad (13)$$

式中: θ 、 θ_u 为短路电流相角和电压相角; i 为短路电流有效值。

3 仿真实验

在系统实时仿真设备 RTLAB 上搭建了含某主流厂家实际控制器的半实物仿真平台,见图 1。

控制数据的实时传输由并行通信接口实现,本算例中主回路及控制参数均为某一使用该型号控制器的已投运 DFIG 实际参数。为了避免 DFIG 在 LVRT 期间发出的无功电流造成机端电压抬升,令 DFIG 机端直接与电网相连。DFIG 主要参数为:机组额定容量为 2 MVA;定子等效自感和激磁电感分别为 10.315 p.u. 和 10.122 p.u.;RSC 最大限制电流为 1.05 p.u.;RSC 最大有功限制电流在 $u_s \leq 0.35$ 时为 0,在 $u_s > 0.35$ 时为 0.1 p.u.;定子无功支撑系数和网侧无功支撑系数分别为 1.57 和 1.5;RSC 额定电流和 GSC 额定电流分别为 600 A 和 401.635 A。

设置故障前机组有功功率为 1 p.u., $s = -0.2$,令机端电压分别对称跌落至 0.2 p.u. 和 0.4 p.u.,持续

0.625 s 来模拟大风条件下 DFIG 机端发生三相非金属性短路故障的短路电流特性,结果见图 2。为了方便分析,本文所有波形设置定子和 GSC 电流的 d 、 q 轴分量以流向电网为正方向,转子电流的 d 、 q 轴分量以流向 RSC 为正方向。

由图 2 可以看出, $s<0$ 时有功电流流向为转子-RSC-GSC-电网。根据风电机组电气仿真模型验证规程,以短路电流 d 、 q 轴分量的波动进入 ± 0.1 p.u. 范围内时刻的后 20 ms 为暂态过程的结束时刻,则机端电压分别跌落至 0.2 p.u. 和 0.4 p.u. 时短路电

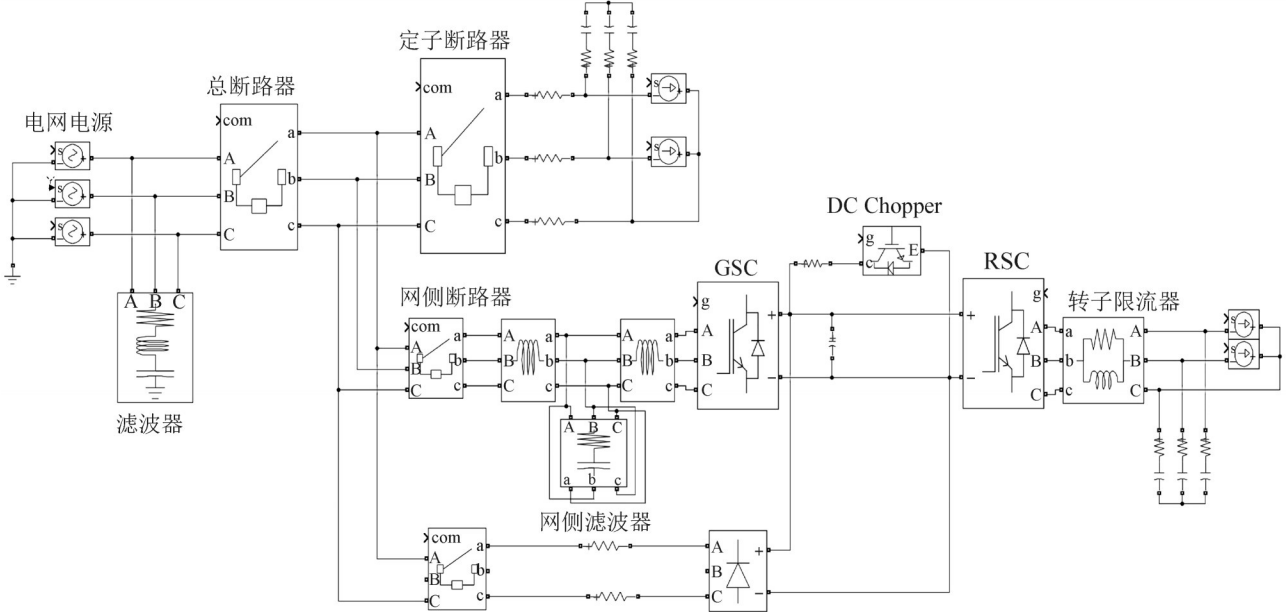


图1 半实物仿真平台示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the semi-physical simulation platform

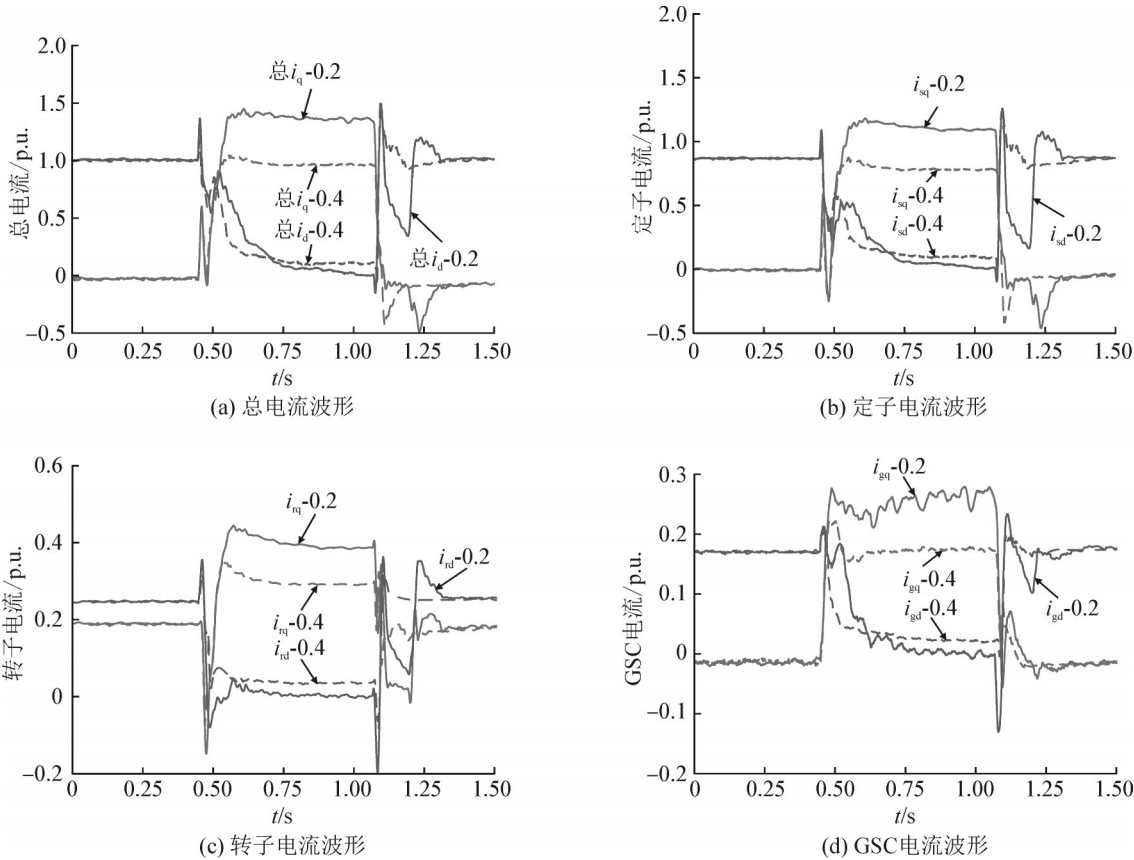


图2 大风条件下DFIG机端三相短路电流波形
Fig. 2 Waveform of three-phase short-circuit currents of DFIG terminal under strong wind conditions

流 q 轴分量均需要 145 ms 左右达到稳态,而其 d 轴分量则分别需要 317 ms 和 165 ms 达到稳态。这是由于 LVRT 期间大量功率聚集在直流母线电容上,导致短路电流 d 轴分量需要较长的时间达到稳态,且随着电压跌落深度增加直流母线电压恢复时长随之增大。从图中可以看出机端电压跌落至 0.4 p.u. 较跌落至 0.2 p.u. 时 DFIG 短路电流 d 轴分量增大, q 轴分量减少,且短路电流 d 轴分量受限于 RSC 最大有功限制电流,满足 DFIG 稳态模型。仿真结果显示机端电压分别对称跌落至 0.2 p.u. 和 0.4 p.u. 时,DFIG 稳态短路电流的有效值、相角分别为 1.35 p.u.、 -89.79° 和 0.952 p.u.、 -83.06° ,与式(13)的计算结果 1.351 p.u.、 -90° 和 0.972 p.u.、 -83.03° 误差分别为 0.074%、0.234%和 2.101%、0.036%。

设置故障前机组有功功率为 0.1 p.u., $s=0.2$, 令机端电压分别对称跌落至 0.2 p.u. 和 0.4 p.u., 持续 0.625 s 来模拟小风条件下 DFIG 机端发生三相非金属性短路故障的短路电流特性,结果见图 3。由图 3 可以看出,当 $s>0$ 时有功电流流向变为电网-GSC-RSC-转子,导致短路电流相角绝对值较大风工况下略微增大,除此之外,DFIG 的外特性与大风工况下十分接近。仿真结果显示机端电压分别对

称跌落至 0.2 p.u. 和 0.4 p.u. 时,DFIG 稳态短路电流的有效值、相角分别为 1.359 p.u.、 -89.75° 和 0.956 p.u.、 -84.96° ,与式(13)的计算结果 1.351 p.u.、 -90° 和 0.968 p.u.、 -85.38° 误差分别为 0.589%、0.279% 和 1.255%、0.494%。

为了进一步验证本文所提短路电流实用计算方法的准确度,分别在大风(故障前机组有功功率为 1 p.u., $s=-0.2$)和小风(故障前机组有功功率为 0.1 p.u., $s=0.2$)工况、不同机端电压跌落深度的条件下进行了多组仿真测试,并计算了短路电流仿真结果与计算结果的误差,见表 1。

由表 1 可知,GSC 在故障期间提供的短路电流占总短路电流的比重最高可达 19.851%,在实用计算中不可忽略。本文提出的 DFIG 稳态短路电流实用计算方法针对不同工况、不同机端电压跌落深度下短路电流有效值的计算误差小于 3%,短路电流相角的计算误差小于 2.5%,可以满足继电保护整定计算及特性评估的要求。由仿真结果可知,可将 DFIG 等效为压控电流源,在本文提出的实用计算方法基础上建立含 DFIG 接入的电力系统模型,为 DFIG 接入系统的故障特征分析与保护整定研究打下坚实的理论基础。

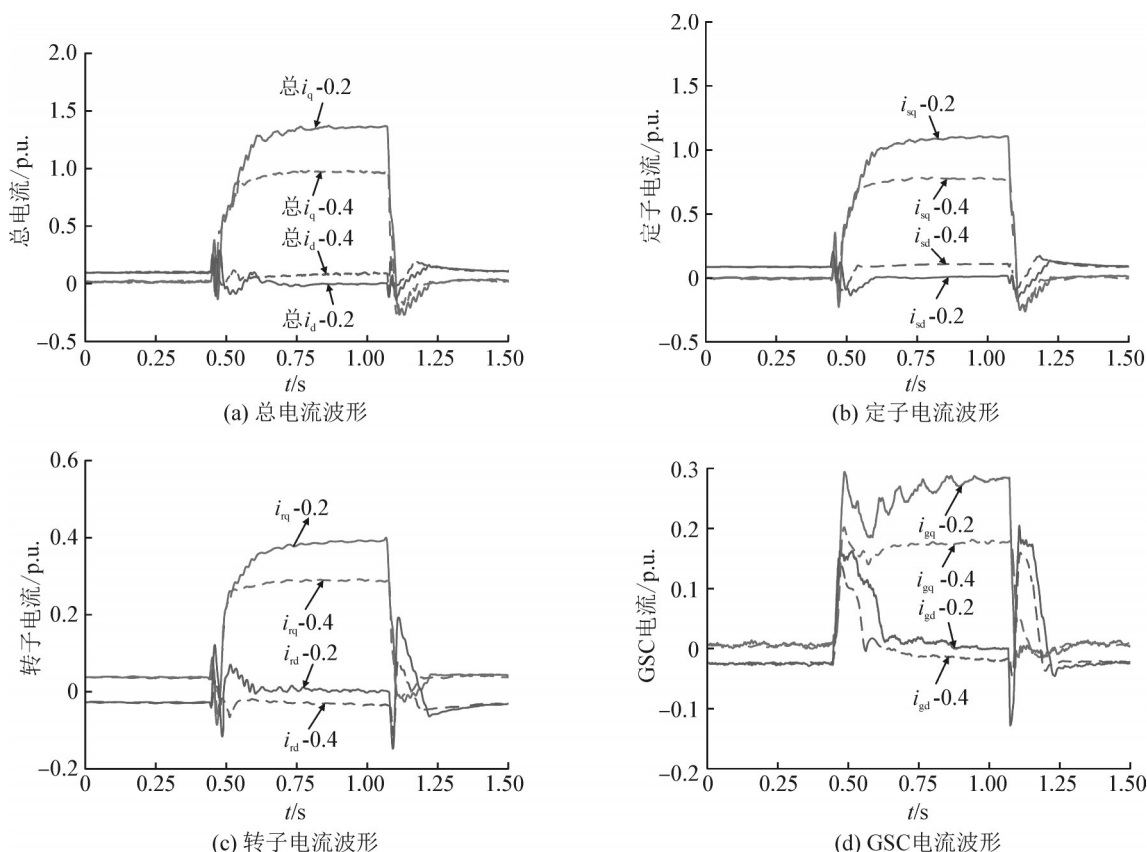


图3 小风条件下DFIG机端三相短路电流波形

Fig. 3 Waveform of three-phase short-circuit currents of DFIG under weak wind conditions

表1 对称故障下DFIG稳态短路电流仿真测试值与
计算值对比表

Table 1 Comparison between DFIG steady-state short-circuit current simulation results and calculation results under symmetric faults

$u_s/p.u.$	类型	$i_{sd}/p.u.$		$i_{sq}/p.u.$		$i_{gd}/p.u.$		$i_{gq}/p.u.$		$i/p.u.$		$\theta/(^{\circ})$	
		$s=-0.2$	$s=0.2$	$s=-0.2$	$s=0.2$	$s=-0.2$	$s=0.2$	$s=-0.2$	$s=0.2$	$s=-0.2$	$s=0.2$	$s=-0.2$	$s=0.2$
0.2	仿真值	-0.007	-0.014	1.092	1.098	0.002	0.008	0.258	0.261	1.350	1.359	-89.790	-89.750
	计算值	0.000	0.000	1.099	1.099	0.000	0.000	0.252	0.252	1.351	1.351	-90.000	-90.000
	百分误差	—	—	0.641	0.091	—	—	2.326	3.448	0.074	0.589	0.234	0.279
0.3	仿真值	-0.010	-0.011	0.939	0.943	-0.001	0.007	0.211	0.223	1.150	1.166	-89.450	-89.800
	计算值	0.000	0.000	0.942	0.942	0.000	0.000	0.216	0.216	1.158	1.158	-90.000	-90.000
	百分误差	—	—	0.319	0.106	—	—	2.370	3.139	0.696	0.686	0.615	0.223
0.4	仿真值	-0.097	-0.107	0.777	0.776	-0.018	0.023	0.168	0.176	0.952	0.956	-83.060	-84.960
	计算值	-0.098	-0.098	0.785	0.785	-0.020	0.020	0.180	0.180	0.972	0.968	-83.030	-85.380
	百分误差	1.031	8.411	1.030	1.160	11.111	13.043	7.143	2.273	2.101	1.255	0.036	0.494
0.5	仿真值	-0.092	-0.107	0.622	0.623	-0.018	0.023	0.135	0.139	0.765	0.767	-81.730	-83.710
	计算值	-0.098	-0.098	0.628	0.628	-0.020	0.020	0.144	0.144	0.781	0.776	-81.310	-84.230
	百分误差	6.522	8.411	0.965	0.803	11.111	13.043	6.667	3.597	2.092	1.173	0.514	0.621
0.6	仿真值	-0.092	-0.104	0.468	0.466	-0.018	0.022	0.102	0.103	0.581	0.575	-79.080	-81.800
	计算值	-0.098	-0.098	0.471	0.471	-0.020	0.020	0.108	0.108	0.591	0.584	-78.480	-82.330
	百分误差	6.522	5.769	0.641	1.073	11.111	9.091	5.882	4.854	1.721	1.565	0.759	0.648
0.7	仿真值	-0.093	-0.099	0.313	0.311	-0.018	0.022	0.067	0.069	0.396	0.388	-73.720	-78.550
	计算值	-0.098	-0.098	0.314	0.314	-0.020	0.020	0.072	0.072	0.404	0.394	-73.000	-78.580
	百分误差	5.376	1.010	0.319	0.965	11.111	9.091	7.463	4.348	2.020	1.546	0.977	0.038

4 结语

本文基于 DFIG 低穿控制策略和我国最新风机并网要求,分别建立了定子和 GSC 的稳态模型,分析了其短路电流特性,并进一步提出了计及 DFIG 无功控制策略和 RSC 有功电流限制的机组稳态短路电流实用计算方法。通过在 RTLAB 上进行半实物仿真测试,在不同工况、不同机端电压跌落深度下验证了短路电流实用计算公式具有较高的计算精度,并证明了 GSC 在故障期间提供的短路电流在实用计算中不可忽略。提出的计算方法过程简单、准确度高,对 DFIG 接入系统的故障特性分析与保护整定研究有重要理论价值。

参考文献

[1] 杨琦,李岚,赵荣理,等. 基于模糊控制虚拟电阻的双馈风力发电机低电压穿越励磁控制[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(2):158-163.
YANG Qi, LI Lan, ZHAO Rongli, et al. Low voltage ride through excitation control for doubly-fed wind generator based on fuzzy control virtual resistance[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2): 158-163.

[2] 竺兴妹,刘琳琳. DFIG 三相四开关网侧变流器预测功率控制策略[J]. 电网与清洁能源,2022,38(3):24-31.

ZHU Xingmei, LIU Linlin. Predictive power control strategy for three-phase four-switch grid-side converter of the DFIG[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(3): 24-31.

[3] 欧阳金鑫. 变速恒频风电机组并网故障机理与分析模型研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.

[4] 李立,郑天悦,黄世楼,等. 基于扩展卡尔曼滤波的 DFIG 变流器控制系统参数辨识方法[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(12): 50-60.

LI Li, ZHENG Tianyue, HUANG Shilou, et al. A parameters identification method of DFIG converter control system based on extended Kalman filter[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(12): 50-60.

[5] 令狐桐雯,韩民晓,霍启迪,等. 考虑不同故障穿越模式的双馈风电场短路电流计算等值建模[J]. 南方电网技术,2022,16(10):28-37.

LINGHU Tongwen, HAN Minxiao, HUO Qidi, et al. Equivalent modeling of doubly-fed wind farms short-circuit current calculation considering different fault ride-through modes[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(10): 28-37.

[6] 裴兆芹,荆海城,郭晓东. 基于双馈风力发电机组轴电流抑制与释放的研究[J]. 东北电力技术,2021,42(4):6-10.

PEI Zhaoqin, JING Haicheng, GUO Xiaodong. Research on suppression and release of shaft current based on doubly fed wind turbine[J]. Northeast Electric Power Technology

- gy, 2021, 42(4): 6-10.
- [7] 孙丽玲, 尹思杰, 王艳娟. 电网电压骤升时DFIG定子磁链暂态全过程及其影响因素研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(8): 86-91.
- SUN Liling, YIN Sijie, WANG Yanjuan. Study on transient whole process and influencing factors stator flux in grid voltageswell of DFIG[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(8): 86-91.
- [8] 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.
- 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): 114-121.
- [9] 欧阳金鑫, 唐挺, 郑迪, 等. 低电压穿越控制下双馈风电机组短路电流特性与计算方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 216-224.
- OUYANG Jinxin, TANG Ting, ZHENG Di, et al. Characteristics and calculation method of short-circuit current of doubly fed wind generator under lower voltage ride through[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 216-224.
- [10] 杨国生, 王增平, 欧阳金鑫, 等. 考虑低电压穿越全过程的双馈风电机组短路电流计算方法[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2185-2193.
- YANG Guosheng, WANG Zengping, OUYANG Jinxin, et al. Short-circuit current calculation method of DFIGWT considering entire LVRT process[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2185-2193.
- [11] 刘洪金, 杨炳元, 梁佳宇, 等. 一种提升LVRT能力的DFIG控制策略及故障特征分析[J]. 太阳能学报, 2021, 42(4): 445-453.
- LIU Hongjin, YANG Bingyuan, LIANG Jiayu, et al. A DFIG control strategy and fault characteristic analysis for improving LVRT capability[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(4): 445-453.
- [12] 马永翔, 孙荔伟, 闫群民, 等. 基于双馈风力发电系统的无功补偿优化研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(4): 152-156.
- MA Yongxiang, SUN Liwei, YAN Qunmin, et al. Study on reactive power compensation optimization based on doubly-fed wind power generation system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(4): 152-156.
- [13] 王雨欣, 王思怡, 杨黎晖, 等. 超级电容储能和卸荷电路协调控制的永磁同步风电机组低电压穿越策略[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 177-185.
- WANG Yuxin, WANG Siyi, YANG Lihui, et al. Low-voltage ride-through control strategy of permanent magnetic synchronous wind turbine with coordination of super capacitor energy storage and chopper circuit[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 177-185.
- [14] 凌禹. 对称电压故障下双馈风力发电机瞬态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6871-6880.
- LIN Yu. Transient characteristics analysis of DFIG-based wind turbine under symmetrical voltage fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6871-6880.
- [15] 苏立, 谢文经, 刘卓娅, 等. 基于转子储能的全功率变速水电机组低电压穿越控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(7): 141-148.
- SU Li, XIE Wenjing, LIU Zhuoya, et al. Research on low voltage through control strategy for full power variable-speed operation hydro-generator units based on rotor energy storage[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(7): 141-148.
- [16] 孙铁超, 赵青春, 黄涛, 等. 一种计及低电压穿越的有源配电网继电保护方案[J]. 电测与仪表, 2022, 59(6): 76-84.
- SUN Yichao, ZHAO Qingchun, HUANG Tao, et al. A relay protection scheme of active distribution network with LVRT[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(5): 76-84.
- [17] 董广凯, 黄嵩, 董佳林, 等. 定功率跟踪控制的光伏并网低电压穿越策略[J]. 高压电器, 2023, 59(3): 93-98.
- DONG Guangkai, HUANG Song, DONG Jialin, et al. Low voltage ride-through strategy of grid-connected photovoltaic generation with constant power tracking control[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(3): 93-98.
- [18] SULLA F, SVENSSON J, SAMUELSSON O. Symmetrical and unsymmetrical short-circuit current of squirrel-cage and doubly-fed induction generators[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(7): 1610-1618.
- [19] 贺好艳. 风电场集中并网对电网短路电流的影响研究[J]. 电工电气, 2022, 300(12): 19-24.
- HE Haoyan. Research on the influence of wind farm centralized grid-connection on short-circuit current of power grid[J]. Electrotechnics Electric, 2022, 300(12): 19-24.
- [20] XIONG Xiaofu, OUYANG Jinxin, JIN Jing. Calculation of steady-state short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator[C]//2011 The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection. [s.l.]: IEEE, 2011: 1782-1788.
- [21] 邢鲁华, 陈青, 吴长静, 等. 含双馈风电机组的电力系统短路电流实用计算方法[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1121-1127.
- XING Luhua, CHEN Qing, WU Changjing, et al. A practical method to calculate short-circuit current in power system connected with doubly fed induction generators[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1121-1127.

- [22] OUYANG Jinxin, ZHENG Di, XIONG Xiaofu, et al. Short-circuit current of doubly fed induction generator under partial and asymmetrical voltage drop[J]. Renewable Energy, 2016, 88: 1-11.
- [23] 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.
OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu. Research on short-circuit current of doubly-fed induction generators under rotor excitation control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6083-6092.
- [24] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 计及撬棒保护影响的双馈风力发电机组故障电流特性研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 1-10.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study of fault current characteristics of DFIG considering impact of crowbar protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 1-10.
- [25] 尹俊, 毕天姝, 薛安成, 等. 计及低电压穿越控制的双馈风力发电机组短路电流特性与故障分析方法研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 116-125.
YIN Jun, BI Tianshu, XUE Ancheng, et al. Study on short circuit current and fault analysis method of double fed induction generator with low voltage ride-through control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 116-125.
- [26] 甘俊文, 邵能灵. 基于机端电压跌落深度的双馈风机自适应短路电流计算方法[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(3): 3-9.
GAN Junwen, TAI Nengling. Research on adaptive short circuit current calculation of DFIG considering the terminal voltage dip[J]. Electric Power Science and Technology, 2018, 33(3): 3-9.
- [27] MA Jing, KANG Shengyang, THORP J S. Research on transient characteristics of doubly fed wind power generator under symmetrical short-circuit fault considering grid-side converter control[J]. Electric Power Components and Systems, 2016, 11(15): 1-12.
- [28] 陈鹏, 张哲, 尹项根, 等. 计及GSC电流和控制策略的DFIG稳态故障电流计算模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 8-16.
CHEN Peng, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Steady fault calculation model of doubly-fed induction generator considering grid-side converter current and different control strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 8-16.
- [29] 靳现林, 蔡晓宇, 刘其辉, 等. 一种考虑RSC和GSC的双馈风机短路电流实用计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 23-30.
JIN Xianlin, CAI Xiaoyu, LIU Qihui, et al. A practical calculation method for short-circuit current of DFIG considering RSC and GSC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 23-30.
- [30] 范小红, 孙士云, 孙德娟, 等. 双馈风机三相短路电流特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 38-48.
FAN Xiaohong, SUN Shiyun, SUN Dejuan, et al. Analysis of three-phase short-circuit current characteristics of doubly fed induction generator[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 38-48.
- [31] 杨淑英. 双馈型风力发电变流器及其控制[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [32] ABAD GONZALO, JESUS LOPEZ, RODRIGUEZ M A, 等. 双馈感应电机在风力发电中的建模与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [33] 王增平, 李菁, 郑涛, 等. 考虑变流器限流与GSC电流的双馈风力发电机暂态全电流计算与分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(17): 4123-4135.
WANG Zengping, LI Jing, ZHENG Tao, et al. Calculation and analysis of transient short circuit current of doubly-fed induction generator considering converter current limitation and GSC current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(17): 4123-4135.

作者简介:

任蔷(1996—), 女, 助理工程师, 主要研究方向为新能源涉网保护与控制策略。E-mail: 179510125@qq.com。

陈洁羽(1986—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为新型电力系统继电保护技术。

邓俊(1985—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为新型电力系统分析计算。

段建东(1973—), 男, 教授, 主要研究方向为综合能源系统、电力系统继电保护等。

(上接第140页)

作者简介:

徐晓春(1970—), 女, 高级工程师, 从事电力系统自动化工作。

李佑伟(1981—), 男, 高级工程师, 从事电力系统调度自动化工作。

李彦伦(2000—), 男, 硕士研究生, 从事配电网数据挖掘

研究。E-mail: 18952731328@qq.com。

窦晓波(1979—), 男, 教授, 从事分布式电源高渗透率配电网研究。

张岩(1998—), 男, 硕士研究生, 从事配电网光伏感知研究。