

双馈异步发电机单相接地故障瞬态特性研究

沈浩然, 张建华, 丁磊, 戴春蕾

(扬州大学水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘要: 为了便于研究 DFIG 在不对称电压跌落下低电压穿越运行的控制策略, 有必要对不对称电压跌落时 DFIG 的瞬态特性进行研究。基于 DFIG 定、转子磁链的瞬态变化机理, 对 DFIG 单相接地故障瞬态特性进行研究, 推导出了 DFIG 在发生单相接地故障时的定、转子电流, 电磁转矩, 输出有功功率与无功功率的解析表达式, 并分析得到影响单相接地故障时电磁过渡过程的主要因素。在 Matlab/Simulink 中搭建了 1.5 MW 双馈异步发电机单相接地故障仿真模型。仿真结果和解析计算结果高度吻合, 证明了推导的解析表达式的正确性和有效性, 为双馈异步发电机不对称 LVRT 控制策略提供了理论基础。

关键词: 风力发电; 双馈发电机; 单相接地故障; 数学模型; 瞬态特性

Transient characteristic research of doubly-fed induction generator during single-phase grounding fault

SHEN Haoran, ZHANG Jianhua, DING Lei, DAI Chunlei

(College of Water Conservancy and Energy Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: In order to research the control strategy of low voltage ride through (LVRT) of DFIG during the asymmetric voltage sag, it is necessary to research the transient characteristic of DFIG during the asymmetric voltage sag. This paper utilizes the transient change mechanism of DFIG stator and rotor flux in the case of single-phase grounding fault, deduces and obtains analytical expressions about stator transient current, electromagnetic torque, output active power and reactive power of DFIG. On the basis of above, the main factors are got which affect single-phase grounding fault electromagnetic transient process. And simulation model of 1.5 MW DFIG during single-phase grounding fault is built on MATLAB/Simulink, the simulation results are closely consistent with the analytical calculation results, which shows the correctness and effectiveness of the analytical expressions derived. Analysis of this paper can provide theoretical basis for control strategy of asymmetric LVRT.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (No. 2012AA050214).

Key words: wind power generation; doubly-fed generator; single-phase grounding fault; mathematical model; transient characteristic

中图分类号: TM71

文章编号: 1674-3415(2015)18-0006-06

0 引言

近年来,随着风电场接入电网的容量不断增大,风电场跟电网之间的彼此影响日益明显,特别是电网发生电压跌落时。为了规范接入电力系统的风电,世界各国都依据各自情况制定了与风电机组有关的输电网技术规范。这些电网运行规范都规定风电场在电网电压发生电压跌落时能够继续保持并网,并

能对电网提供无功功率来维持电网电压,即要求风电机组具备低电压穿越(LVRT)能力^[1-4]。

如今,国内外的大部分机型是 MW 级容量的双馈异步发电机(DFIG),其定子端与电网相连,更容易受电压波动影响。目前对双馈异步发电机 LVRT 技术的研究主要集中在电网对称故障中,但实际运行中,电网不对称故障发生的几率更加大(单相接地故障为 70%,两相接地故障为 15%,相间故障为 10%,三相故障为 5%)^[5],由不对称故障产生的二倍频分量会使 DFIG 定子与转子绕组过热,发

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) (2012AA050214)

电机的转矩发生脉动,使输出功率产生周期性波动,从而大大降低了系统的稳定性^[6]。所以,分析双馈发电机在电网电压不对称跌落时的LVRT控制策略更具有实际效用。而不对称电压跌落的瞬态特性分析是研究LVRT控制策略的前提。因此,为确保风电场在电网发生不对称故障时保持并网且为电网提供无功补偿等研究必须以双馈异步发电机在不对称电压跌落时的精确瞬态特性分析为基础。

描述双馈异步发电机动态特性的数学模型为dq坐标系下的5阶模型,但由于阶数高,并不能进行解析求解,再加上不对称电压跌落运行的复杂性,导致目前大多文献对双馈异步发电机不对称电压跌落的分析,都是以正负序分量分离的数学模型为基础进行的定性及仿真分析,对其瞬态特性的理论分析并没有具体的解析表达式^[7-15]。而本文通过拉普拉斯变换及其逆变换推导出了单相接地故障时双馈异步发电机定、转子电流、电磁转矩和输出有功功率、无功功率的解析表达式。通过对电磁过渡过程解析表达式的分析,得到影响双馈异步发电机发生单相接地故障时电磁过渡过程的本质因素。

1 DFIG 单相接地故障瞬态特性分析

1.1 DFIG 单相接地故障的数学模型

由于电压跌落时间很短,故在建立DFIG不对称电压跌落的数学模型时可不考虑转速变化^[16],利用暂态微分方程和叠加原理进行分析,将不对称电压跌落的暂态过程等效成跌落前稳定运行工况和定子侧加不对称反向电压运行时的叠加。根据文献^[17-19]可以得到按照电动机惯例的定、转子电压与磁链方程分别如式(1)、式(2)所示。

$$\begin{cases} u_{ds} = r_1 \times i_{ds} + p\psi_{ds} - \omega_1 \times \psi_{qs} \\ u_{qs} = r_1 \times i_{qs} + p\psi_{qs} + \omega_1 \times \psi_{ds} \\ u_{dr} = r_2 \times i_{dr} + p\psi_{dr} - (\omega_1 - \omega_r) \times \psi_{qr} \\ u_{qr} = r_2 \times i_{qr} + p\psi_{qr} + (\omega_1 - \omega_r) \times \psi_{dr} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s \times i_{ds} + L_m \times i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s \times i_{qs} + L_m \times i_{qr} \\ \psi_{dr} = L_r \times i_{dr} + L_m \times i_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r \times i_{qr} + L_m \times i_{qs} \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_{ds} 、 u_{qs} 、 u_{dr} 、 u_{qr} 分别是定、转子电压 d 轴分量与 q 轴分量; i_{ds} 、 i_{qs} 、 i_{dr} 、 i_{qr} 分别是定、转子绕组中电流 d 轴分量与 q 轴分量; ψ_{ds} 、 ψ_{qs} 、 ψ_{dr} 、 ψ_{qr} 分别是定、转子磁链 d 轴分量与 q 轴分量; ω_1 是同步角速度; ω_r 是转子角速度; p 是微分算子; $L_s = L_1 + L_m$, $L_r = L_2 + L_m$, 依次是定子、转子绕组的自

感; L_1 是定子漏感, L_2 是转子漏感, L_m 是定子与转子绕组的互感。

将式(2)代入式(1)消去磁链,可以得到以电流为变量,描述DFIG电磁暂态过程的状态空间方程,如式(3)所示。

$$\frac{dI}{dt} = AI + BU \quad (3)$$

式中, A 、 B 分别为电流与电压的系数矩阵。

$$A = \frac{1}{L} \times \begin{bmatrix} -L_r r_1 & L_r L_s - sL_m^2 & L_m r_2 & L_r L_m - sL_r L_m \\ sL_m^2 - L_r L_s & -L_r r_1 & sL_r L_m - L_r L_m & L_m r_2 \\ L_m r_1 & sL_s L_m - L_s L_m & -L_s r_2 & sL_s L_r - L_m^2 \\ L_s L_m - sL_s L_m & L_m r_1 & L_m^2 - sL_s L_r & -L_s r_2 \end{bmatrix}$$

$$B = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} L_r & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_s \end{bmatrix}$$

$$L = L_s L_r - L_m^2, s = \omega_1 - \omega_r$$

1.2 DFIG 单相接地故障电流分析

本文研究单相接地故障为A相接地故障。由于定子电阻阻值很小,故分析时不考虑定子电阻。电压跌落前,DFIG电压列向量为

$$U = [0 \quad 1 \quad u_{dr} \quad u_{qr}]^T$$

上式中电压列向量是当功率因数为1时,定、转子的 d 、 q 轴电压分量标么值。在标么值计算下,定、转子电流幅值相等,相位相差 180° ^[20],所以本文仅分析定子电流,对转子电流的表达式不再说明。

当DFIG发生A相接地故障,即加反向不对称电压时,在dq坐标系下,DFIG电压列向量变为

$$U = [2/3 \sin(t) \cos(t) \quad -2/3 \sin^2(t) \quad u_{dr} \quad u_{qr}]^T$$

经过拉普拉斯变换与拉普拉斯反变换,求得时域内定、转子电流在dq坐标系的解如下:

$$i_{ds}(t) = [A_{ds} \sin(st) + B_{ds} \cos(st)]e^{-at} + [C_{ds} \sin(t) + D_{ds} \cos(t)] + [E_{ds} \sin(2t) + F_{ds} \cos(2t)] + G_{ds} \quad (4)$$

$$i_{qs}(t) = [A_{qs} \sin(st) + B_{qs} \cos(st)]e^{-at} + [C_{qs} \sin(t) + D_{qs} \cos(t)] + [E_{qs} \sin(2t) + F_{qs} \cos(2t)] + G_{qs} \quad (5)$$

由式(4)、式(5)可见,在加反向不对称电压的过渡过程中,定子电流的dq分量中存在衰减的s倍频分量、基波分量、直流分量以及二倍频分量。由于

真结果进行比较, 其结果如图 2 所示。

当电网电压不对称跌落时, 定转子会出现过电流^[5], 由图 2 可见, 定子三相电流为不对称电流, 且均出现过电流。这说明, 不对称电压跌落下, 涉及到 DFIG 过电流保护时, 必须对三相同步进行保护, 这与对称跌落时仅对一相提出保护即可相异。从图中解析表达式绘制曲线与仿真曲线比较可见, 解析分析结果与仿真计算结果相吻合。因而可以说本章中电压跌落的分析方法及其解析解能够正确地反映不对称电压跌落过程中的电磁现象。

对电磁转矩的分析结果如图 3 所示。由图 3 可见, DFIG 电磁转矩出现较大波动, 且出现二倍频的周期性振荡, 存在过渡过程。

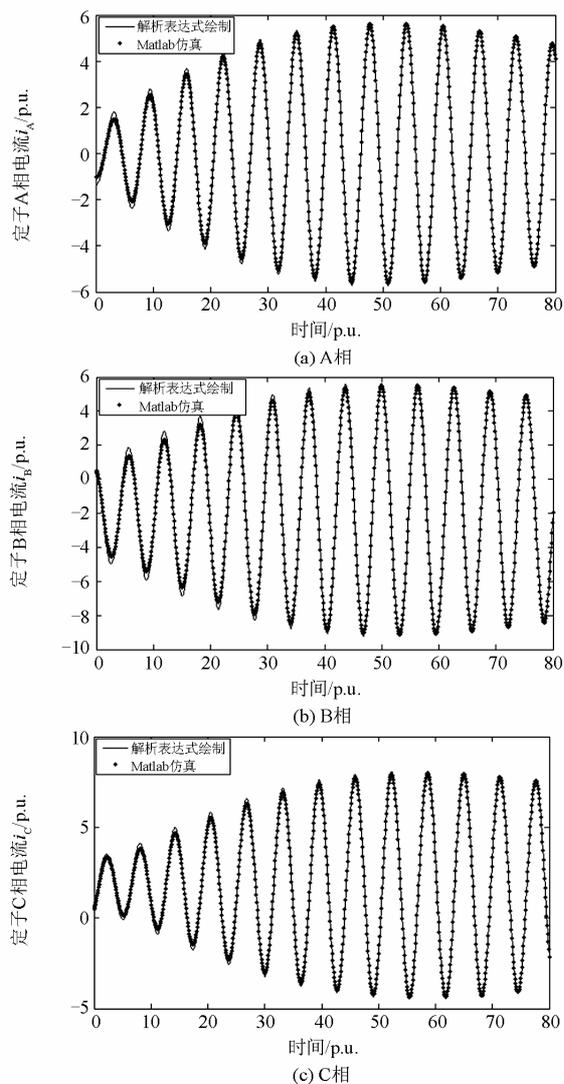


图 2 定子电流三相波形图

Fig. 2 Three-phase waveform of stator current

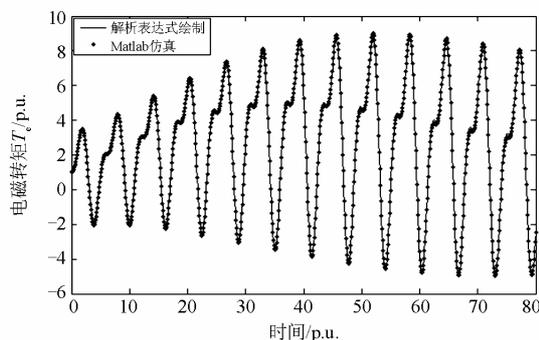


图 3 电磁转矩 T_e 波形图

Fig. 3 Waveform of electromagnetic torque

对输出有功功率与无功功率的分析结果如图 4 和图 5 所示。有功功率与无功功率均出现较大波动, 而本文的双馈异步发电机模型是按照电动机惯例建立的, 从图 5 可见无功功率 Q 为正, 会从电网吸收无功功率, 将影响电网电压恢复。

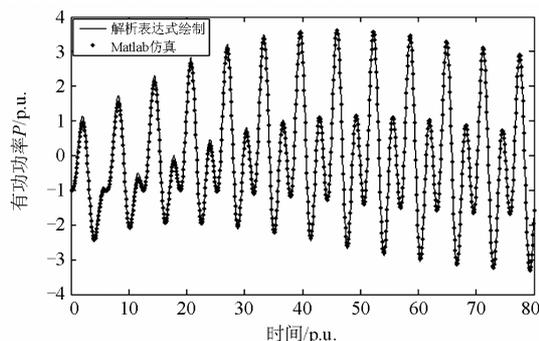


图 4 有功功率 P 波形图

Fig. 4 Waveform of active power

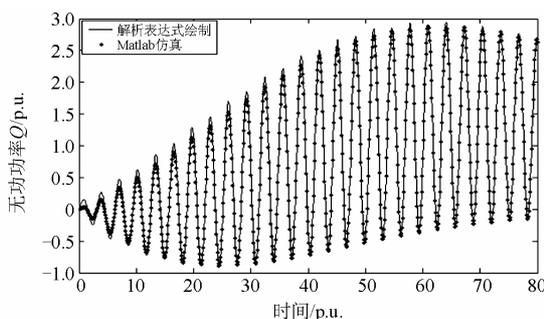


图 5 无功功率 Q 波形图

Fig. 5 Waveform of reactive power

由本文分析得到的解析表达式与仿真的比较可见: 当电网电压发生单相接地故障时, 转子励磁电压对电磁过渡过程的影响很大, 在研究 LVRT 控制策略时可以通过控制转子励磁电压分别实现定转子电流、电磁转矩、功率幅值的限制以及对风力机的传动系统的保护等。

3 结论

本文通过叠加原理建立了 DFIG 单相接地故障的数学模型, 通过对建立模型的定量解析分析得出了单相电压跌落时双馈异步发电机的定转子电流与转子侧励磁电压的关系。并由双馈异步发电机的定子三相电流、电磁转矩、有功功率与无功功率的数学模型, 推导得到影响电磁波动的本质因素。最后通过在 Matlab/Simulink 平台上对一台 1.5 MW 的 DFIG 进行了建模仿真。由仿真可以看出, 在发生单相跌落的不平衡电网电压下定转子会产生过电流、电磁转矩会出现二倍频波动、会产生较大的瞬时有功、无功功率波动, 并且二倍频分量的存在将会严重影响 DFIG 风电系统的运行性能并降低整个并网系统的运转稳定性。同时仿真结果和解析结果高度吻合, 显示由本文建立的 DFIG 单相接地故障数学模型和解析表达式可以准确呈现单相接地故障的瞬态特性, 说明了本文单相接地故障瞬态特性分析的准确性。

参考文献

- [1] MORREN J, SJOERD 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.
- [2] XIE Bing, FOX B, FLYNN D. Study of fault ride-through for DFIG wind turbines[C] // IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation Restructuring and Power Technologies, Hong Kong, China, 2004.
- [3] ABBEY C, JOOS G. Effect of low voltage ride through (LVRT) characteristic on voltage stability[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(3): 1-7.
- [4] 张兴, 张龙云, 杨淑英, 等. 风力发电低电压穿越技术综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(2): 128-130.
ZHANG Xing, ZHANG Longyun, YANG Shuying, et al. Overview of wind power low voltage ride through technology[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(2): 128-130.
- [5] 马春明, 解大, 张延迟. 双馈感应式风力发电系统低电压穿越技术概述[J]. 电气传动, 2012, 42(5): 3-7.
MA Chunming, XIE Da, ZHANG Yanchi. Overview of DFIG system low voltage ride through technology[J]. Electric Drive, 2012, 42(5): 3-7.
- [6] 贺益康, 胡家兵. 双馈异步风力发电机并网运行中的几个热点问题[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27): 1-15.
HE Yikang, HU Jiabing. Some hot issues of DFIG connected to the grid during operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(27): 1-15.
- [7] 钱艳平, 朱立贵. 电源不对称对双馈风力发电机故障诊断的影响[J]. 可再生能源, 2012, 30(11): 36-40.
QIAN Yanping, ZHU Ligui. Influence of power asymmetry on DFIG fault diagnosis[J]. Renewable Energy, 2012, 30(11): 36-40.
- [8] 张禄, 金新民, 战亮宇. 电网电压不对称跌落下双馈风电机组转子电压分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 136-141.
ZHANG Lu, JIN Xinmin, ZHAN Liangyu. Analysis of DFIG rotor voltage under asymmetric grid voltage drop[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 136-141.
- [9] 孟岩峰, 胡书举, 王玲玲, 等. 电网故障条件下双馈机组运行特性分析及其协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 106-113.
MENG Yanfeng, HU Shuju, WANG Lingling, et al. Operation characteristics analysis and coordinated control of DFIG under power grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 106-113.
- [10] 胡胜, 林新春, 康勇, 等. 一种双馈风力发电机在电网电压不平衡条件下的改进控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 21-29.
HU Sheng, LIN Xinchun, KANG Yong, et al. An improvement control strategy of DFIG under unbalanced grid voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 21-29.
- [11] 郑涛, 魏占明, 李娟, 等. 计及撬棒保护的双馈风电机组不对称短路电流特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 7-12.
ZHENG Tao, WEI Zhanming, LI Juan, et al. Analysis of DFIG asymmetric short-circuit current characteristics contain crowbar protection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 7-12.
- [12] 廖勇, 吴兴旺, 刘刃. 电网不平衡时双馈感应发电机定子负序和谐波电流抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(19): 26-32.
LIAO Yong, WU Xingwang, LIU Ren. The stator negative sequence and harmonic current suppression method of DFIG under unbalanced voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19): 26-32.
- [13] 李辉, 廖勇, 姚骏, 等. 不对称电网故障下双馈风电机组低电压穿越方案比较研究[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(11): 77-86.

- LI Hui, LIAO Yong, YAO Jun, et al. Comparative study on the scheme of DFIG LVRT under unbalanced grid fault[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(11): 77-86.
- [14] 尹涛, 王熠, 聂广和, 等. 不对称故障下双馈感应电机低电压穿越特性研究[J]. 电力系统自动化, 2013, 30(5): 31-34.
- YIN Tao, WANG Yi, NIE Guanghe, et al. Study of the characteristics of DFIG LVRT under unbalanced fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 30(5): 31-34.
- [15] 栗然, 李增辉, 王义贺, 等. 电网短路故障下DFIG的电磁特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 13-19.
- LI Ran, LI Zenghui, WANG Yihe, et al. Study on the electromagnetic characteristics of DFIG under grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 13-19.
- [16] MORREN J, DE HAAN S W H. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 174-180.
- [17] 张建华, 陈星莺, 刘皓明, 等. 双馈风力发电机三相短路分析及断路器最大电阻整定[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(4): 6-10.
- ZHANG Jianhua, CHENG Xingying, LIU Haoming, et al. Analysis of DFIG three-phase short and the maximum resistance setting of circuit breaker[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(4): 6-10.
- [18] 张建华, 王健, 陈星莺, 等. 双馈风机低电压穿越控制策略的分析与研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 28-33.
- ZHANG Jianhua, WANG Jian, CHEN Xingying, et al. Analysis and research on LVRT control strategy of DFIG[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 28-33.
- [19] 陈思哲, 吴捷, 柳明. 双馈感应风力发电系统低电压穿越控制[J]. 太阳能学报, 2009, 30(11): 1528-1534.
- CHEN Sizhe, WU Jie, LIU Ming. The LVRT control of DFIG system[J]. Journal of Solar Energy, 2009, 30(11): 1528-1534.
- [20] 王健, 张建华, 辛付龙. 双馈电机电压跌落暂态过程分析[J]. 大电机技术, 2012(3): 13-16.
- WANG Jian, ZHANG Jianhua, XIN Fulong. Transient analysis of DFIG under voltage drop[J]. Large Electric Machine, 2012(3): 13-16.
- [21] 王宏胜, 章玮, 胡家兵, 等. 电网电压不对称故障条件下DFIG风电机组控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 97-102.
- WANG Hongsheng, ZHANG Wei, HU Jiabing, et al. Control strategy of DFIG wind turbines under unbalanced grid fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 97-102.

收稿日期: 2014-11-25; 修回日期: 2015-01-17

作者简介:

沈浩然(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源与分布式发电技术; E-mail: hammershr2010@163.com

张建华(1960-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为风力发电、电机及其控制等; E-mail: jianhuazhang0508@sina.com

丁磊(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为风力发电及其控制技术。E-mail: dinglei_0909@163.com

(编辑 姜新丽)