电压跌落至不同程度时双馈风力发电机内部电磁场分析

赵　昂，张新燕，尹　勋，赵理威
(新疆大学 电气工程学院,新疆 乌鲁木齐　830047)

摘　要：随着风电规模的日趋庞大和低电压穿越技术的日趋成熟,人们迫切需要知道电机内部在低电压穿越工况下的电磁场变化,为电机的故障诊断提供依据。求出了双馈风力发电机在电网电压跌落至不同程度时的电机内部的电磁场,并在此基础上分析了电机内部电磁场的不同和变化趋势,为分析风机的早期故障诊断及其演化趋势做基础工作。

关键词：双馈风力发电机;电磁场分析;电压跌落
中图分类号：TM 315　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673-6540(2017)06-0109-04

Internal Electromagnetic Field Analysis of Doubly-Fed Induction Generator with Voltage Drop to Different Degree

ZHAO Ang, *ZHANG Xinyan*, *YIN Xun*, *ZHAO Liwei*
(College of Electric Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: The increasingly large scale of wind power and low voltage ride through technology is becoming mature, there is an urgent need to know the motor inside the low voltage ride through the conditions of the electromagnetic field changes, to provide the basis for the motor fault diagnosis. Electromagnetic field of doubly-fed induction generator (DFIG) during the grid voltage drop to different extent of the motor were analyzed, and on this basis, analysis the different and changing trends of the electromagnetic field inside the motor, was used as the basis for the doubly fed wind turbine fault diagnosis.

Key words: **doubly-fed induction generator (DFIG)**; **electromagnetic field**; **voltage drop**

0　引　言

随着国家大力提倡新能源,风电厂大规模建立,风机使用越来越多,双馈风力发电机(Doubly-Fed Induction Generator,DFIG)依靠其本身变流器容量较小(占系统总容量的1/3左右),能够独立解耦有功控制和无功控制等特点,使其被大规模的应用,因此人们迫切的希望能够在电机发生故障时第一时间知道电机的故障类型及其早期故障的演化趋势;同时由于在DFIG中低电压穿越技术的广泛应用,也使DFIG在风机低电压穿越工况下发生故障可能性大为提高[1]。

本文利用Ansys软件建立DFIG的二维模型,并将电机在不同情况下的电流加入其中进行计算,得出电机内部的电磁场情况,并对电机的磁场进行分析,从而为电机故障诊断做前期工作。

1　建立有限元模型

1.1　有限元计算原理

有限元法是一种离散数学方法,通过区域划分和按单元插值,把连续求解的问题转化为求解各单元值,从而求出整体值[2]。

1.2　DFIG二维有限元模型的建立

本文所使用的DFIG,基本参数如表1所示。

作者简介：赵　昂(1988—),男,硕士研究生,研究方向为电机故障诊断。
张新燕(1964—),女,教授,博士生导师,研究方向为电力系统及其自动化及可再生能源并网技术。

表 1　DFIG 参数

参数名称	参数值
额定电压/V	690
额定功率/Hz	50
极对数	4
定子槽数	72
转子槽数	60
定子槽深/mm	70
转子槽深/mm	69.3

根据 DFIG 的内部结构做出以下假设[3-4]：

（1）忽略电机内部电磁场纵向变化及漏磁；

（2）材料属性各向同性；

（3）材料磁导率不随温度变化而变化；

（4）忽略位移电流的影响；

（5）电机内部电磁场具有对称性，故只取电机的 1/4 进行分析；

（6）定、转子每相线圈作为一个整体元件建模；

（7）在网格划分时将定、转子绕组外部的绝缘层作为整体考虑；

（8）电机的齿槽结构及定、转子铁心作为一个整体进行建模。

1.3　电机电磁场理论

对电磁场的求解计算就是对麦克斯韦方程组的求解计算。麦克斯韦方程组的微分形式[5]为

$$\begin{cases}\nabla\times H = J + \dfrac{\partial D}{\partial t}\\ \nabla\times E = -\dfrac{\partial B}{\partial t}\\ \nabla\cdot B = 0\\ \nabla\cdot D = \rho\end{cases} \quad (1)$$

式中：E——磁场强度，V/m；

B——磁感应强度，T；

D——电位移矢量，C/m^2；

H——磁场强度，A/m；

ρ——电荷密度，C/m^2。

由于是对电机在发生电网电压降低使转子电流达到最大值时进行静态分析，所以可采用磁失位 A 描述，表达式[6]为

$$\begin{cases}\Omega: \dfrac{\partial}{\partial x}\left(\dfrac{1}{\mu}\dfrac{\partial A_z}{\partial x}\right) + \dfrac{\partial}{\partial y}\left(\dfrac{1}{\mu}\dfrac{\partial A_z}{\partial y}\right) = -\dfrac{J_z}{\nu},\\ \Gamma_1: A_n = 0,\end{cases} \quad (2)$$

式中：A_z——矢量磁位的轴向分量；

J_z——励磁电流源密度；

μ——磁导率；

Γ_1——定子内表面和转子外表面边界。

DFIG 电机模型如图 1 所示，气隙的路径是由 A 点到 B 点。

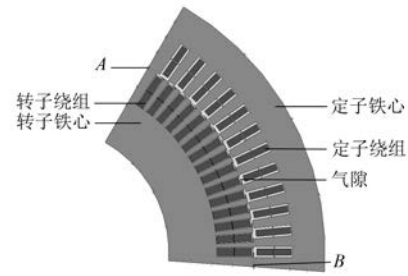


图 1　双馈风力发电机 3 维模型

2　电网电压降低 40% 时电机内部电磁场变化

利用 PSCAD 仿真软件，选用额定功率为 2.5 MW 的 DFIG，工作状态下风速为 5 ~ 30 m/s[7]。

将 DFIG 在正常状态下 0.6 s 和电网电压降低 40% 情况下在低穿开始时 1.0 s 的电流相同相位的电流加入 Ansys 模型中进行仿真计算[8]，得到电机内部磁密云图、磁力线分布图、气隙磁密度，如图 2~图 5 所示。

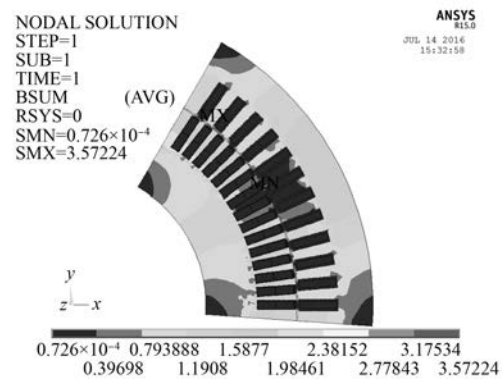


图 2　0.6 s 电机内部电磁场云图

由图 2 可以看出磁密的分布情况，颜色越深说明磁通量越大，越浅说明磁通量越小。由图 4 可以看出，电机内部磁力线路径：转子侧由转子齿到转子铁轭，再由转子齿进入电机气隙；定子侧由气隙进入定子齿，再由定子齿进入定子铁轭，进而

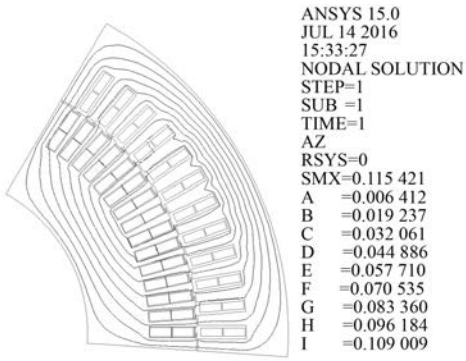


图 3　0.6 s 时磁感线分布图

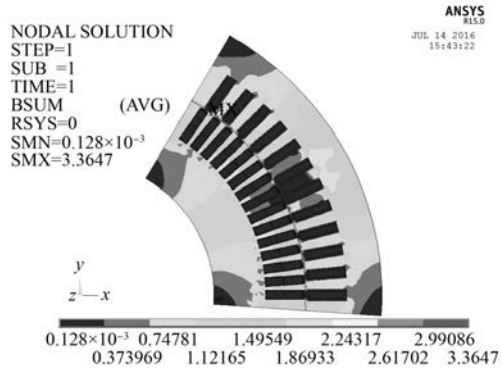


图 4　1.0 s 时电机内部电磁场云图

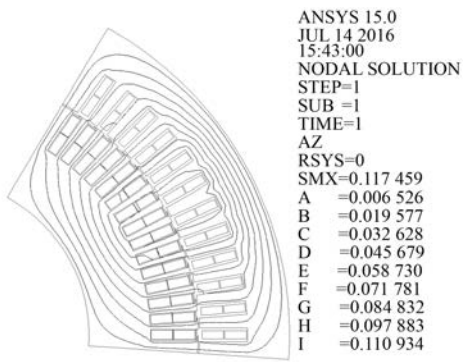


图 5　1.0 s 时电机内部磁感线分布图

由定子齿回到气隙中,进入转子,从而形成回路,且定、转子绕组中基本没有磁力线通过,表明电机内漏磁通极小。由图 3 和图 5 对比可知电机内部电磁场相同位置的磁感应强度高的地方被加强,磁感应强度弱的地方被削弱。

从表 2 可以看出,在 0.6 s 时电机内部气隙磁感应强度的平均值是比 1.0 s 时的小,在磁场强度高的点磁场强度被加强,弱的地方被削弱。

表 2　0.6 s 和 1.0 s 电机内部气隙磁感应强度　T

磁感应强度	最大值	最小值	平均值	方差
0.6 s	1.282 8	0.028 7	0.591 5	0.142 2
1.0 s	1.545 3	0.015 3	0.598 6	0.113 5

3　电压跌落至不同程度时电机内部电磁对比分析

随着近年来风电并网,在电力能源中占的比重越来越大。为了减小在电网电压骤降时对风力发电机的影响,提出了在电网电压骤降时并网运行的要求,即风电场具有低电压穿越能力。要求电网故障电压降低时能够避免风机内部转子过电流和过电压对转子侧变流器造成损坏,减少低电压穿越期间风机机械转矩跃变对机械机构造成的冲击,必须满足电网的低电压穿越标准[9]。

针对电网电压跌落的程度不同有以下几种 DFIG 控制策略:

(1) 电网电压跌落程度较低。可以通过调整风机转子侧控制策略,使风机在电网电压跌落时,转子绕组和定子绕组电流电压保持在可允许限度内。

(2) 电网电压跌落程度较大时。通过改变转子侧控制策略无法较好地完成风机的低电压穿越,因此可以在转子侧添加 Crowbar 电路,来改善风机低电压穿越工况下的定、转子电流和电压情况。Crowbar 电路在转子电流达到限定值时,投入 Crowbar 电路消耗冲击电流,从而避免器件损坏。当电网电压恢复正常后,Crowbar 电路由于转子电流恢复正常而不投入运行,风机控制策略恢复到正常状态。

(3) 电网电压跌落程度超过风机限定最大值时。由于电网电压跌落程度严重,直流侧出现的过电压和过电流超过风机最大限额,风机将脱网,直到风机直流电容电压降低至安全值,随后变换器重新投入工作。

本文主要对 DFIG 在低电压穿越情况下,选择电机在低穿工况下同一时间点的电机内部电磁场进行分析与对比。

分别在电网正常状态、电压跌落 40% 和 60% 时,选取在电网电压跌落时间段内同一时间点——1.1 s,进行研究对比分析,如图 6、图 7

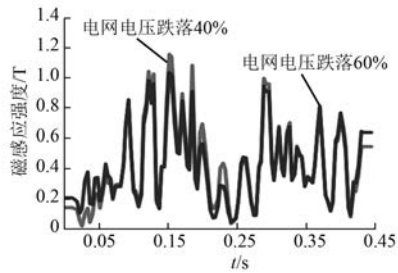


图 6　电压降低时电机内部气隙的磁感应强度

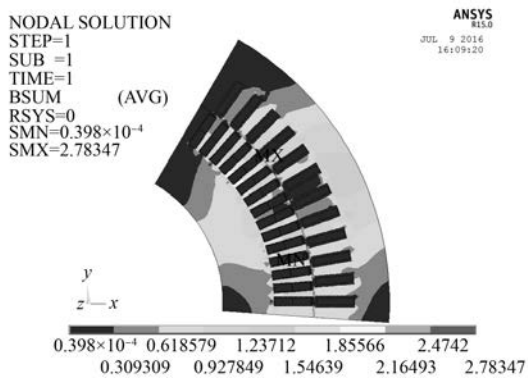


图 7　电压跌落 60% 时电机内部电磁云图

所示。

计算结果如表 3 所示。

表 3　不同情况下电机内部电磁场的计算结果　T

磁感应强度	最大值	最小值	平均值	方差
电压降低 40%	1.156 5	0.018 5	0.419 0	0.074 2
电压降低 60%	1.034 5	0.048 8	0.415 3	0.061 1

从图 6 中可以看出在电压降低 40% 和 60% 时电机内部气隙中磁场强度最强的点是在同一点,而且电压跌落 40% 时的最大值比跌落 60% 时的最大值高了 9%。在气隙中磁场强度当电压降低 40% 时的最小值比电压降低 60% 小了 0.066 05。在气隙中当电压降低 40% 时磁场强度最大值比电压降低 60% 高了 0.089。从总体上看电压降低 40% 时电机气隙内的磁场强度比电压降低 60% 时的磁场强度高了 0.004。

通过以上分析可以得出:在电网电压降低致电机运行在低电压穿越状态时,会导致在电压降低的情况下电机内部的电磁场强度增强,漏磁增加。

4　结　语

本文对 DFIG 在电网电压降低至不同程度时电机内部电磁情况进行分析。通过分析可以看出,在电网电压降低时,电机内部电磁场会比正常情况下磁感应强度降低,同时谐波增多。在降低至不同程度时,电机内部磁场随着电网电压的降低而总体上是变小的。

在电网发生故障导致电机出口电压对称降低时,电机内部的电磁场强度由正常状态会先突然增大,然后降低至正常状态,最后随着电网电压的恢复而达到正常状态。

【参 考 文 献】

[1] 操瑞发,朱武,涂祥存,等.双馈式风力发电系统低电压穿越技术分析[J].电网技术,2009,33(9):72-77.

[2] 胡仁芳.电机磁场的有限元分析法[J].微特电机,1976,(3):48-55.

[3] 何山,王维庆,张新燕,等.双馈风力发电机多种短路故障电磁场仿真研究[J].电力系统保护与控制,2013(12):41-46.

[4] 陈华毅,杨明发.异步电机三维电磁场及温度场耦合仿真分析[J].电机与控制应用,2015,42(1):42-47.

[5] 段晓田,张新燕,张俊,等.基于有限元法的双馈风力发电机电磁场计算与分析[J].电网技术,2012,36(2):231-236.

[6] 门亚萍,张新燕,赵勃遥,等.基于不同运行工况下双馈风力发电机电磁场计算与分析[J].电测与仪表,2016,53(1):50-56.

[7] 郑涛,李娟,杨国生.计及不同电网电压跌落程度的双馈风电机组定子电流分析[J].电力系统保护与控制,2015(1):81-87.

[8] 李梅,李建林,赵斌,等.不同电网故障情况下 DFIG 运行特性比较[J].高电压技术,2008,34(4):777-782.

[9] 胡恩球,张新访,向文,等.有限元网格生成方法发展综述[J].计算机辅助设计与图形学学报,1997(4):91-96.

[10] 陈华毅,杨明发.异步电机三维电磁场及温度场耦合仿真分析[J].电机与控制应用,2015,42(1):42-47.

收稿日期:2016-10-21