

文章编号: 1672 - 058X(2011)02 - 0182 - 04

基于 DFIG(双馈感应电机)的风力发电系统的研究

马玉娟¹, 李海锋¹, 严学书^{1,2}

(1. 重庆工商大学 机械工程学院, 重庆 400067;

2. 重庆工商大学 废油资源化技术与装备教育部工程研究中心, 重庆 400067)

摘要: 用 DFIG 建立一种风力发电系统的模型, 研究系统受到大的扰动时, 风力发电机在恒功率因数和恒电压运行方式下, 风力发电系统的暂态电压特性和发电机的动态特性。

关键词: DFIG、风力发电系统、建模与仿真

中图分类号: TH765

文献标志码: A

由于 DFIG 控制灵活、变流器容量仅为发电机容量的 1/3, 而成为目前风力发电系统的主流机型。将建立 DFIG 风力发电系统的数学模型和简单的风力发电系统仿真模型, 研究系统受到大的扰动时, 风力发电机在恒功率因数和恒电压运行方式下, 发电机的动态行为特性和风电场的暂态电压稳定性^[1]。最后, 将总结影响风力发电系统暂态稳定性的因素和可能的改进措施。

1 DFIG 风力发电系统的数学模型

1.1 DFIG 风力发电系统

DFIG 风力发电系统主要由风力机、齿轮箱、双馈感应发电机、变流器等组成, 见图 1。双馈感应发电机的结构与一般发电机类似, 定子绕组接电网, 转子绕组外接转差频率电源实现交流励磁^[3]。当发电机转子转速变化时, 可通过调整转子励磁电流频率使得气隙合成磁场相对于定子磁场转速不变, 从而实现 DFIG 的变速恒频运行。

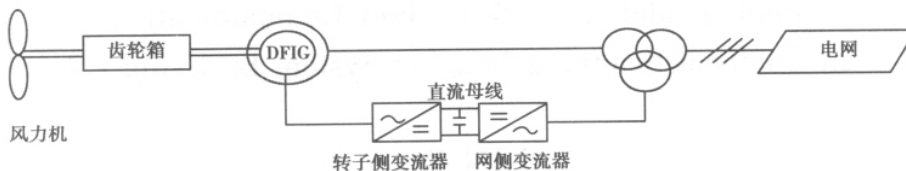


图 1 DFIG 风力发电系统

1.2 风力机的功率特性

风力机捕获的风能与风速的立方成比例关系, 同时还与风力机叶片的转速及结构参数有关。根据风力机功率特性方程^[3], 对于变桨距风力机, 它从风能中获得的机械功率为:

$$P_w = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho A v^3 \quad (1)$$

从风力机轴输入发电机的机械转矩为:

收稿日期: 2010 - 07 - 18; 修回日期: 2010 - 10 - 07.

作者简介: 马玉娟(1989 -), 女, 青海西宁人, 在读本科生, 从事风力发电系统的研究.

$$T_m = \frac{P_w}{\omega} = \frac{\rho}{2} \pi C_p(\lambda, \beta) R^3 v^2 \quad (2)$$

式(1)中 $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能的利用系数, λ 是风力机的叶尖速比, β 为风力机的桨距角, ρ 为空气密度, A 为风力机的扫风面积, v 为风速。式(2)中 R 为风力机叶片的半径, ω 为风力机的转速。

1.3 轴系模型

风力发电系统的机械传动链由 5 部分组成: 风力机、低速传动轴、齿轮箱、高速传动轴和发电机。轴系模型的研究有很多方法, 现采用简化的动态模型, 即将风力机、齿轮箱和发电机等效为一个集中质量块进行研究。模型的动态方程可以表示为:

$$\frac{J}{p} \frac{dw_r}{dt} = T_m - T_e \quad (3)$$

式中 w_r 为发电机转子的转速, J 为总体转动惯量(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^2$), p 为发电机的极对数, 下式(6)、(10)同; T_m 为从风力机输入发电机的机械转矩, T_e 为风力发电机输出的电磁转矩。所列方程采用有名值系统, 下同。

1.4 风力发电机的动态模型

按照电动机正方向的规定^[4], 不计零轴分量, 双馈感应发电机 dc-qc 旋转坐标系中的动态电压方程和磁链方程分别为:

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix} = p \begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_s & -w_1 L_s & 0 & -w_1 L_m \\ w_1 L_s & r_s & w_1 L_m & 0 \\ 0 & -sw_1 L_m & r_r & -sw_1 L_r \\ sw_1 L_m & 0 & sw_1 L_r & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (5)$$

发电机输出的电磁转矩方程为:

$$T_{em} = \frac{3}{2} p L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (6)$$

式(5)、(6)中 i_{ds} , i_{qs} , i_{dr} , i_{qr} —一定、转子电压的 dc、qc 轴分量; ψ_{ds} , ψ_{qs} , ψ_{dr} , ψ_{qr} —一定、转子合成磁链的 dc、qc 轴分量; r_s , r_r —一定、转子电阻; L_s , L_r , L_m —dc-qc 坐标系中定子自感、转子自感和定转子互感; s —转差率; p —微分算子; w_1 —一定子磁场同步转速。

1.5 DFIG 风力发电系统的保护方案

模型中, 设定了风电场低电压保护和直流母线过电压保护。这是因为: 一方面, 系统电压过低时, 发电机转子电流过高将威胁发电机的安全运行。另一方面, DFIG 的转子通过背靠背式变流器直接和电网相连, 在系统电压突然下降时, 转子电流可达额定电流的 5~8 倍, 变流器输入输出功率的不匹配将导致直流母线电压上升, 容易使变流器过载而影响其正常工作。风电场低电压保护和直流母线过电压保护的设定值分别为 0.7 p. u. 和 1 900 V, 保护动作时限分别为 0.1 s 和 0.001 s。

2 建模与仿真

使用 Matlab 仿真软件对 DFIG 风力发电系统的暂态电压特性和发电机的动态稳定性展开仿真研究, 为下一步制定控制策略提供理论支持。

2.1 仿真系统

所采用的仿真系统为一个等值风电场经过两级变压器向 120 kV 电网输送功率, 如图 2 所示。

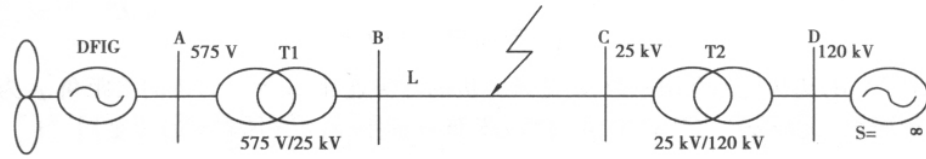


图 2 风力发电系统单线图

系统中,风电场由 6 个 1.5 MW 的 DFIG 风力发电机组成,风电场首先连接到 25 kV 配电系统,并在 25 kV 处通过一个 30 km 长的馈线接入 120 kV 电网。稳态时,风速为 8 m/s,风力发电机组运行在恒功率因数方式,功率因数为 1.0,风电场出力为 1.86 MW。

2.2 并网风电场的暂态稳定特性——线路 BC 中点发生瞬时性单相接地故障

$t = 5 \text{ s}$ 时,线路 BC 中点发生瞬时性 a 相接地故障,历时 0.15 s,之后短路故障清除,系统恢复。恒功率因数运行方式和恒电压运行方式下,风电场的运行参数分别如图 3(a)、(b) 所示。

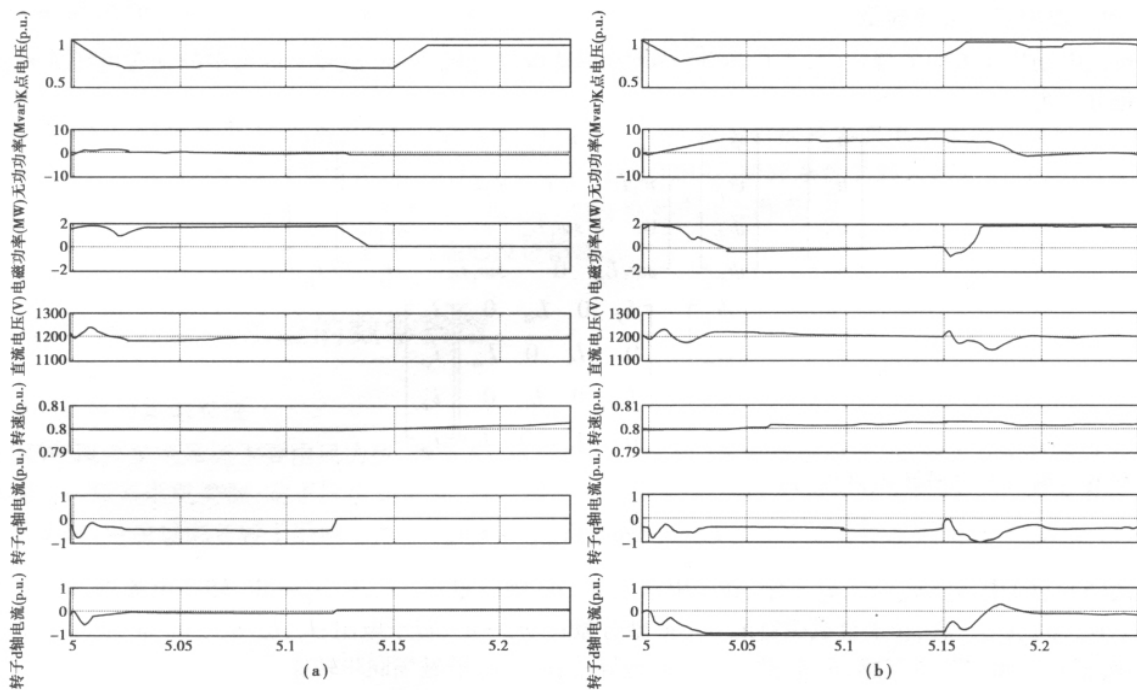


图 3 风电场的运行参数——单相接地故障

根据图 3(a),风电场运行在恒功率因数方式下,电网发生瞬时性单相短路故障,风电场出口处电压跌落至低压限值 0.7 p. u. 以下,风力发电机发出 0 Mvar 无功;同时,风电场输出电磁功率下降,直流侧母线电压从 1 200 V 升高至 1 250 V,未达到高压限值 1 900 V。根据公式(3),发电机将加速运行,转速上升;5.115 s 时,风电场欠压保护启动,风电场从电网中脱离。

根据图 3(b),与恒功率因数方式不同的是,风电场出口处电压仅降到 0.8 p. u. 左右,高于定子端低压保护设定值,风电场无功功率输出增加;直流侧母线电压发生振荡,但低于高压限值 1 900 V,风电场继续并网运行。故障清除后,风电场在 0.07 s 内(即 5.22 s)恢复稳定运行。

对比图 3(a)、(b),风力发电机恒电压运行方式下,系统的暂态电压稳定性较恒功率因数运行方式有所提高。值得一提的是,虽然双馈感应发电机具有无功功率输出和控制的能力,但由于受到电机稳定性的约束,双馈感应发电机的转子为定子电流所提供的功率因数补偿有限,所以,现有的 DFIG 风电场一般采用恒功率因数运行,要实现 DFIG 风力发电系统的恒电压运行,还需要增设无功补偿设备。

2.3 并网风电场的暂态稳定特性——线路 BC 中点发生瞬时性三相短路故障

在 5 s 时, 线路 BC 中点发生瞬时性三相短路故障, 历时 0.15 s, 之后短路故障清除, 系统恢复。恒功率运行方式和恒电压运行方式下, 风电场的运行参数分别如图 4(a)、(b) 所示。

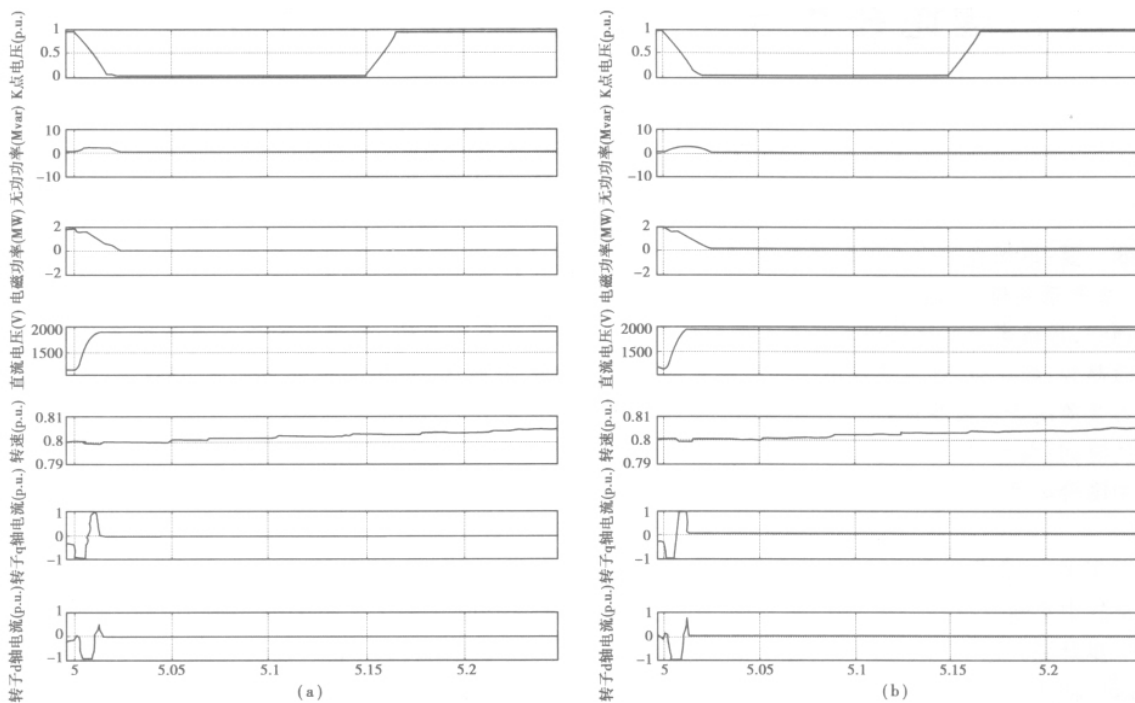


图 4 风电场的运行参数——三相短路故障

根据图 4(a)、(b), 系统发生三相短路故障期间, 在恒功率因数方式和恒电压方式下, 风电场直流侧母线电压均从 1 200 V 迅速升高至 2 000 V, 超过高压限值 1 900 V; 直流侧过压保护启动, 5.01 s 时, 风电场从电网中脱离、风力发电机无法向系统提供无功支持, 风电场出口处电压急速下降。

产生上述结果的原因在于, 三相短路故障期间, 风力发电机定子端电压发生突变, 而根据磁链守恒定律, 发电机的定子磁链不能突变, 此时定子磁链会产生一个直流分量, 这个分量与转子相互作用, 导致转子上的输出功率急剧上升, 直流母线两侧功率的不平衡引起直流母线电压迅速升高, 超过限值, 保护装置启动, 风电场从电网脱离。

目前, 针对系统故障期间直流侧母线过压现象, DFIG 风力发电系统通常在转子电路中加入一个保护电路。在电网波动很大时, 保护电路可以为转子侧大电流提供旁路, 达到限制转子电流、保护变流器的作用, 使风力发电机能够在电网受到扰动期间不脱网并向电网注入无功功率, 提高全系统的暂态电压稳定性水平。

3 结 论

建立了含风电场的简单电力系统模型, 研究了系统受到大的扰动时, 风力发电机在恒功率因数和恒电压运行方式下, 风力发电系统的暂态电压特性和发电机的动态特性, 得出以下结论:

(1) 在恒电压运行方式下, 风力发电机系统可利用发电机的无功功率控制能力, 增加无功功率输出, 提高了风电场出口处的电压水平, 因此, 系统的暂态电压稳定性较恒功率因数运行方式有所提高。

(2) 在电网波动很大时, 转子侧电流突然增大使变流器直流侧母线电压的迅速升高并达到过压限值, 导致风力发电系统无法保持并网并向系统输送无功功率。因此, 在电网故障期间, 限制转子电流、保护变流器, 从而保证发电机在电网电压故障期间能够保持并网状态, 对提高风电场的故障穿越能力以及整个系统的暂态稳定性具有积极意义。

(下转第 198 页)

2. Environmental Protection Bureau of Nan'an District ,Chongqing 400060 ,China)

Abstract: Because self-purification ability is decreasing while the water level of the Three Gorges Reservoir is rising to 175 meters , there is a eutrophication trend in Yangtze River branches. In order to prevent water eutrophication ,sewage treatment in small towns is necessary. Constructed wetland is an effective , cheap and simple method for sewage treatment and can realize sewage recovery. The constructed wetland in the Three Gorges Reservoir area is constructed by taking advantage of the characteristics of the hills and will not occupy arable land and can have ecological effect on preventing hill slide ,water and soil erosion.

Key words: constructed wetland; Three Gorges Reservoir area; sewage treatment; small town

责任编辑:田 静

(上接第 185 页)

参考文献:

- [1] 杨叔子 杨克冲. 机械工程控制基础 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社 2000
- [2] 董渝涛. 配电变压器节能措施的研究 [J]. 重庆工商大学学报 2009 26(2): 186-189
- [3] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社 2006
- [4] 王成元 夏加宽 杨俊友, 等. 电机现代控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社 2006
- [5] 于汀 胡林献 姜志勇, 多端直流系统接线和控制方式对暂态稳定性的影响 [J]. 电网技术 2010 34(2): 87-89
- [6] 王 俊 蔡兴国. 基于差分进化算法的动态可用输电能力计算研究 [J]. 电力系统保护与控制 2010 38(4): 39-44
- [7] 韩绪鹏, 李志民, 孙 勇, 等. 基于反馈线性化的 TCSC 滑模控制 [J]. 控制工程 2010 17(1): 51-54
- [8] 孙 闻 房大中 袁世强, 等. 基于轨迹灵敏度的暂态稳定预防控制方法 [J]. 天津大学学报 2010 43(2): 109-114
- [9] 林 俐, 杨以涵. 基于绕线式异步发电机的风电场并网暂态稳定机理分析 [J]. 电力系统自动化 2010 34(5): 102-106
- [10] 王维俭 王祥珩 王赞, 大型发电机变压器内部故障分析与继电保护 [M]. 北京: 中国电力出版社
- [11] 武建文 李德成. 电机现代测试技术 [M]. 北京: 机械工业出版社 2006

Research into Wind Power Generation System Based on DFIG(Doubly Fed Induction Generator)

MA Yu-juan¹ , LI Hai-feng¹ , YAN Xue-shu^{1 2}

- (1. School of Mechanical Engineering ,Chongqing Technology and Business University ,Chongqing 400067 , China;
2. Engineering Research Center for Waste Oil Resources Technology and Equipment
of Education Ministry ,Chongqing Technology and Business University ,Chongqing 400067 , China)

Abstract: A kind of model for wind power generation system is set up based on DFIG to study the transient voltage characteristics of wind power generation system and dynamic characteristics of a generator under the operating condition of constant power factor and constant voltage of a wind power generator when the system is heavily disturbed.

Key words: DFIG (doubly fed induction generator) ; wind power generation system; modeling and simulation

责任编辑:田 静