

并网双馈发电机电网电压定向励磁控制的研究

李 辉, 杨顺昌, 廖 勇

(重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

STUDIES ON EXCITATION CONTROL OF POWER SYSTEM VOLTAGE ORIENTED FOR DOUBLY FED GENERATORS CONNECTED TO AN INFINITE BUS

LI Hui, YANG Shun-chang, LIAO Yong

(College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: Based on the analyses of the classical vector control of doubly fed generators connected to an infinite bus, a excitation control strategy of the power system voltage oriented is presented in this paper. Using with the control strategy, the stator currents, power system voltage and rotor position signals are only required. It is unnecessary to get the precision and real-time and coherence of measurement between the stator and rotor electric values, so that the practical control system of doubly fed generators can be simplified. The steady state regulation characteristics among the stator active power and reactive power as well as the rotor speed, and the transient characteristics of a suddenly three phase shorted circuit of stator terminals to the grand for doubly fed generators are simulated by using this control strategy. It is shown that active power, reactive power and speed are controlled separately and the doubly fed generator appears good in stability and dynamic performances with this control strategy.

KEY WORDS: Power system voltage oriented; Doubly fed generator; Control strategy; Variable speed constant frequency

摘要: 在分析并网双馈发电机传统矢量控制策略的基础上, 提出了一种基于电网电压定向的励磁控制策略。该控制策略仅需要定子侧电流、电网电压和转子位置角信号, 避免了矢量控制系统中对定、转子量测量精度、实时性和一致性的严格要求, 使控制系统得到了简化。利用该文提出的控制策略对双馈发电机有功、无功和转速稳态调节特性及机端三相对地突然短路的过渡过程进行了仿真研究, 结果表明该控制策略能实现双馈发电机有功、无功和转速的解耦控制及短路故障切除后其有功、无功和转速都能回到原来的设定值稳定运行。

关键词: 电网电压定向; 双馈发电机; 控制策略; 变速恒频

1 引言

双馈发电机也称交流励磁发电机, 它在结构上

类似于绕线式感应电机, 定子三相绕组接工频电网, 通过静止变频器给转子绕组提供低频交流励磁, 可实现发电机有功、无功和转速的独立调节。该发电机具有良好的稳定性和较强的进相运行能力; 具有原动机转速变化情况下实现定子恒频的特性, 即变速恒频的发电能力, 在风力发电、抽水蓄能, 提高电力系统稳定性等领域有着广泛的应用前景, 正逐步受到人们的关注和重视^[1]。

目前已有不少文献应用矢量控制技术研究了双馈发电机的有功和无功的解耦控制。文献[1]采用基于气隙磁场定向的矢量控制技术, 推导了双馈发电机稳态下的有功、无功解耦励磁控制模型, 但由于在推导中忽略了定子漏阻抗和转子漏感的影响, 往往带来励磁控制模型精度下降。文献[2-6]采用基于定子磁场或定子电压定向的矢量控制技术, 仿真表明该励磁控制模型精度较高, 但也存在动态响应较差的缺陷。然而上述文献无论是采用气隙磁场定向、定子磁场定向或定子电压定向的矢量控制技术, 其共同特点都是基于传统的矢量控制技术概念, 即需要测量定、转子电流和转速作为励磁控制器的反馈信号, 并且其测量精度、实时性很大程度上决定了双馈发电机的动态响应性能和控制精度^[5]。文献[7]在双通道下建立了动态同步轴系的控制方程, 实现了稳态解耦控制, 但在有功通道的反馈信号中还是需要定子量、转子电压和转速量的检测。尽管文献[8]提出了一种基于定子电压定向的不需要测量转子电流的双馈发电机有功、无功的鲁棒控制策略, 但该算法仅仅适用于定子有功、无功的稳态调节, 并不能进行转速的独立调节, 甚至很难进行短路故障等问题的研究。

本文从电机运动方程出发，针对并网双馈发电机提出一种基于无穷大电网电压定向的新颖控制策略，建立了相应的励磁控制方程。对双馈发电机有功、无功和转速稳态调节特性以及考虑电机运行中转子参数变化的影响进行了仿真，最后对其三相机端对地突然短路的过渡过程也进行了研究。

2 双馈发电机模型和励磁控制模型

2.1 双馈发电机数学模型

假设双馈发电机定子电压、电流正方向按发电机惯例，转子电压电流的正方向按电动机惯例时，可以写出同步旋转 $d-q$ 轴系下三相对称系统的双馈发电机的电压和磁链方程为

$$u_s = Dy_s + jw_1y_s - R_s i_s \quad (1)$$

$$u_r = Dy_r + jw_2y_r + R_r i_r \quad (2)$$

$$y_s = -L_s i_s + L_m i_r \quad (3)$$

$$y_r = L_r i_r - L_m i_s \quad (4)$$

式中 下标 s 和 r 分别代表定子量和转子量； u 为电压矢量； i 为电流矢量； y 表示磁链； R 为电阻； L 为电感； L_m 为定转子之间的互感； $D=d/dt$ 为微分算子；(其中 R_s 和 L_s 包含了电网线路电阻和电感) w 、 w_2 分别为电机同步角速度和转差角速度，且满足式(5)。

$$w_2 = w_1 - w_r = s w_1 \quad (5)$$

式中 w_r 为电机转子角速度； s 为转差率。

以定子电流和转子磁链为状态变量，联立式(1)~(4)，可得双馈发电机为

$$D i_{sd} = -g_{sd} + w_1 i_{sq} - a b y_{rd} - b w_2 y_{rq} - u_{sd} / s + b u_{rd} \quad (6)$$

$$D i_{sq} = -g_{sq} - w_1 i_{sd} - a b y_{rq} + b w_2 y_{rd} - u_{sq} / s + b u_{rq} \quad (7)$$

$$D y_{rd} = -a y_{rd} + w_2 y_{rq} - a L_m i_{sd} + u_{rd} \quad (8)$$

$$D y_{rq} = -a y_{rq} - w_2 y_{rd} - a L_m i_{sq} + u_{rq} \quad (9)$$

$$D w_r = N_p / J (T_L - T_{em}) \quad (10)$$

$$T_{em} = m (i_{sq} y_{rd} - i_{sd} y_{rq}) \quad (11)$$

式中 N_p 为极对数； J 为转动惯量； T_L 为原动机提供的机械转矩； T_{em} 为电磁转矩； $s = L_s (1 - L_m^2 / (L_s L_r))$ ； $b = L_m / (s L_r)$ ； $a = R_r / L_r$ ； $g = (R_s / s + a L_m b)$ ； $m = 3 N_p L_m / (2 L_r)$ 。

2.2 基于无穷大电网电压定向的控制模型

取无穷大电网电压矢量的方向为 d 轴，可得约束条件为

$$\begin{cases} u_{sd} = U_s \\ u_{sq} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

双馈发电机定子端向系统输出的有功、无功计算表达式为

$$\begin{cases} P_s = 1.5(u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}) = 1.5 U_s i_{sd} \\ Q_s = 1.5(u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq}) = -1.5 U_s i_{sq} \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可知，当要求双馈发电机输出一定的有功、无功时，定子电流同步轴系 $d-q$ 轴分量的指令值(用*表示)则为

$$\begin{cases} i_{sd}^* = 2 P_s^* / 3 U_s \\ i_{sq}^* = -2 Q_s^* / 3 U_s \end{cases} \quad (14)$$

因此，对双馈发电机有功、无功的调节即可通过对转子励磁电压控制，实现定子电流 $d-q$ 轴分量的调节。转子励磁电压在动态调节过程中的关系如下

$$\begin{cases} u_{rd} = u_{rd}^* + \Delta u_{rd} \\ u_{rq} = u_{rq}^* + \Delta u_{rq} \end{cases} \quad (15)$$

其中励磁电压的指令值可由电机状态方程式(8)(9)得到

$$\begin{cases} u_{rd}^* = a y_{rd}^* - w_2 y_{rq}^* + a L_m i_{sd}^* + D y_{rd}^* \\ u_{rq}^* = a y_{rq}^* + w_2 y_{rd}^* + a L_m i_{sq}^* + D y_{rq}^* \end{cases} \quad (16)$$

为了求得转子磁链指令值和定子电流指令值之间的关系，现将调节过程中定子电流、转子磁链和转子角速度的动态关系表示如下

$$\begin{cases} \Delta i_{sd} = i_{sd} - i_{sd}^* \\ \Delta i_{sq} = i_{sq} - i_{sq}^* \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \Delta y_{rd} = y_{rd} - y_{rd}^* \\ \Delta y_{rq} = y_{rq} - y_{rq}^* \end{cases} \quad (18)$$

$$\Delta w_r = w_r - w_r^* \quad (19)$$

将式(15)~(19)代入电机状态方程式(6)、(7)可以得到定子电流动态变化量为

$$\begin{cases} D \Delta i_{sd} = -g \Delta i_{sd} + w_1 \Delta i_{sq} - a b \Delta y_{rd} - b w_r^* \Delta y_{rq} - b y_{rq}^* \Delta w_r + b \Delta u_{rd} + (-D i_{sd}^* + b D y_{rd}^* - R_s i_{sd}^* / s + w_1 i_{sq}^* - U_s / s - b w_2 y_{rq}^*) \\ D \Delta i_{sq} = -g \Delta i_{sq} - w_1 \Delta i_{sd} - a b \Delta y_{rq} + b w_r^* \Delta y_{rd} + b y_{rd}^* \Delta w_r + b \Delta u_{rq} + (-D i_{sq}^* + b D y_{rq}^* - R_s i_{sq}^* / s - w_1 i_{sd}^* + b w_2 y_{rd}^*) \end{cases} \quad (20)$$

因此，从式(20)中可以得出转子磁链指令值为

$$\begin{cases} \mathbf{y}_{rq}^* = \frac{1}{\mathbf{bw}_1} \left(-\frac{R_s}{\mathbf{s}} i_{sd}^* + \mathbf{w}_1 i_{sq}^* - \frac{1}{\mathbf{s}} U_s \right) \\ \mathbf{y}_{rd}^* = \frac{1}{\mathbf{bw}_1} \left(\frac{R_s}{\mathbf{s}} i_{sq}^* + \mathbf{w}_1 i_{sd}^* \right) \end{cases} \quad (21)$$

在调节过程中转子励磁电压的动态变化量可以按下式求得^[8]。其中，比例调节系数 $K_p > 0$ 。

$$\begin{cases} \Delta u_{rd} = \frac{1}{\mathbf{b}} K_p \Delta i_{sd} \\ \Delta u_{rq} = \frac{1}{\mathbf{b}} K_p \Delta i_{sq} \end{cases} \quad (22)$$

由此，式(15)~(17)、(21)、(22)共同构成了基于无穷大电网电压定向的励磁控制模型。

为了便于研究系统的短路故障，并网双馈发电机定子端电压和无穷大母线电压之间的电路方程为式(23)所示

$$\begin{cases} u_{td} = u_{sd} - R_w i_{sd} - L_w D i_{sd} + \mathbf{w}_1 L_w i_{sq} \\ u_{tq} = u_{sq} - R_w i_{sq} - L_w D i_{sq} - \mathbf{w}_1 L_w i_{sd} \end{cases} \quad (23)$$

式中 u_{td} 、 u_{tq} 为电机机端电压的同步轴系 d - q 轴分量； R_w 、 L_w 为线路的电阻和电感。

3 仿真结果

3.1 概述

本文以一台应用于变速恒频风力发电用的双馈发电机为例^[9]，其额定功率为 600kW，电机主要参数为 $R_s = 0.036\Omega$ ， $R_r = 0.043\Omega$ ， $L_{s\sigma} = 0.68\text{mH}$ ， $L_{r\sigma} = 0.865\text{mH}$ ， $L_m = 5.4\text{mH}$ ， $U_{1N} = 380\text{V}$ ，极对数 $N_p = 2$ ；线路参数为：电阻 $0.131\Omega/\text{km}$ ，电抗 $0.394\Omega/\text{km}$ ，双回路出线，电厂与无穷大母线的线路长度为 100km。

3.2 稳态调节特性的仿真研究

对该双馈发电机实施上述提出的励磁控制策略进行定子有功、无功和转速调节的仿真研究。图 1~图 4 分别给出了具体仿真结果。其中，图 1 是有功从 0.8 调到 0.9，维持无功 0.5，转差率 0.05 不变的仿真结果；图 2 是无功从 0.4 调到 0.5，维持有功 0.9，转差率 0.05 不变的仿真结果；图 3 是转差率从 0.05 调到 0.055，维持有功 0.9，无功 0.5 不变的仿真结果；图 4 是有功从 0.8 调到 0.9，转差率从 0.05 调到 0.055，维持无功 0.5 不变的仿真结果。另外，为了考虑电机转子参数变化对稳态调节特性的影响，在图 4 中增加了发电机运行中转子电阻和转子漏抗值出现误差时的仿真结果。图中，曲线“1”表示电机运行参数没有发生变化时的仿真

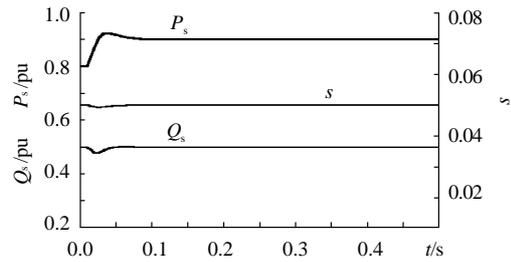


图 1 有功调节仿真曲线

Fig.1 The regulation curves of active power

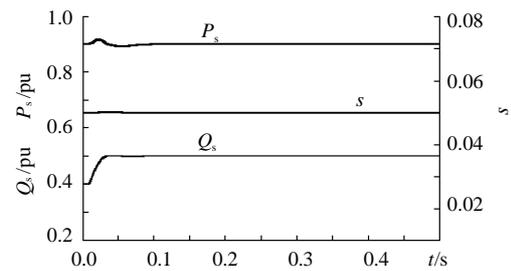


图 2 无功调节仿真曲线

Fig.2 The regulation curves of reactive power

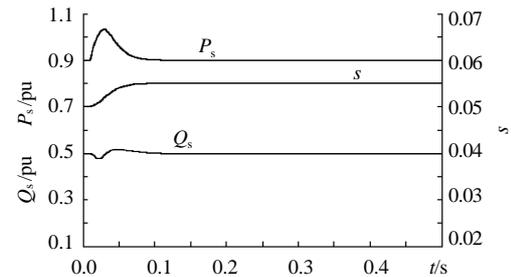


图 3 转速调节仿真曲线

Fig.3 The regulation curves of speed

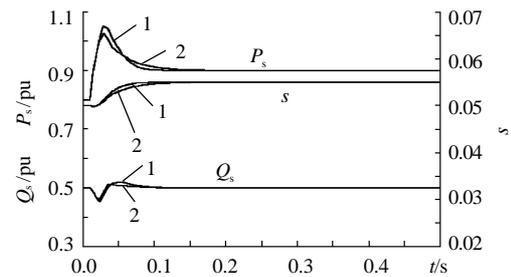


图 4 有功、转速调节仿真曲线

Fig.4 The regulation curves of active power and speed

结果，曲线“2”表示电机运行转子电阻、漏抗值增加 10% 的仿真结果。比较曲线“1”与“2”可以看出，电机运行时如转子参数变化后，励磁控制模型还是有效的，仍可达到有功、无功功率和转速的解耦控制效果。

3.3 暂态特性的仿真分析

双馈发电机在理论上具有良好的暂态稳定性，其前提是励磁电压的频率、幅值和相位能够快速准

确地跟踪电机转速的变化,在系统短路及恢复正常后可以得到很大的电磁转矩,以最大程度地限制转子转速的上升。为研究本文所提出的励磁控制策略能否满足这一要求,本文就并网双馈发电机三相机端对地突然短路进行仿真研究。图 5 和图 6 分别给出了双馈发电机在发无功和吸无功两种状态下,三相机端短路后,双馈发电机的有功、无功和转差率过渡过程的仿真曲线,短路故障发生在 0.1s,短路持续时间设为 0.25s(假定短路过渡过程原动机的输入功率保持不变)。其中图 5 为短路故障前有功 $P_s=0.9$,无功 $Q_s=0.5$, $s=-0.05$ 的暂态仿真结果;图 6 为短路故障前有功 $P_s=0.9$,无功 $Q_s=-0.5$, $s=-0.05$ 的暂态仿真结果。

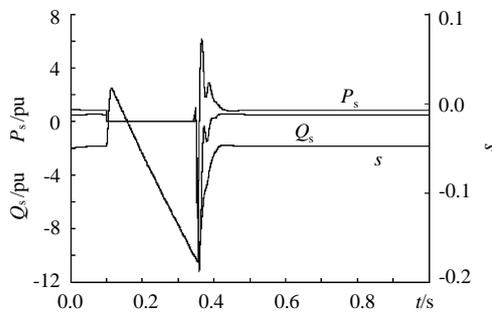


图 5 发无功状态下双馈发电机的暂态特性曲线

Fig.5 Transient characteristics of doubly fed generator at delivering reactive power

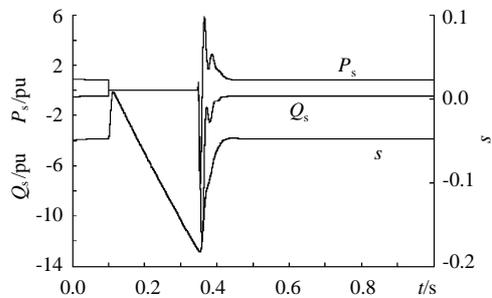


图 6 吸无功状态下双馈发电机的暂态特性曲线

Fig.6 Transient characteristics of doubly fed generator at absorbing reactive power

4 结论

通过建立控制变量的动态方程,本文提出了基于无穷大电网电压定向的双馈发电机励磁控制策略,该励磁控制策略不需要转子电流的测量和转速的反馈信号,一定程度上简化了控制系统的复杂性。另外,本文对并网双馈发电机进行了定子有功、无功和转速稳态调节特性以及考虑电机运行转子参数变化的影响进行了仿真研究,结果表明,运用该控制策略双馈发电机可以实现定子有功、无功及转速

的独立调节或有功和转速的同时调节,具有较好稳定性。从其机端三相突然短路的暂态特性仿真分析表明,在短路故障切除后,无论发电机的初始状态是发无功还是吸无功系统都能迅速趋于稳定,并且在过渡过程结束后其有功、无功及转差率都能回到原来的设定值稳定运行,具有较好的动态品质和动态跟踪能力。总之,从稳态、动态特性的仿真结果表明,本文提出的励磁控制策略是正确的。

参考文献

- [1] Mitsutoshi Yamaoto, Osamu Motoyoshi . Active and reactive power control for doubly-fed wound rotor induction generator[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 1991, 6(4): 624-629 .
- [2] 辜承林,韦忠朝,黄声华,等(Gu Chenglin, Wei Zhengchao, Huang Shenghua). 对转子交流励磁电流实行矢量控制的变速恒频发电机(第一部分:控制模型与数值仿真)(VSCF Generator with vector control for rotor A.C. exciting current Part I - Control model and numerical simulation). 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1996, 16(2): 119-124 .
- [3] Yifan Tang, Longya Xu . A flexible active and reactive power control strategy for a variable speed constant frequency generating system [J] . IEEE Trans. on Power Electronics, 1995, 10(4): 472-478 .
- [4] Hopfensperger B, Lakin R A . Stator flux oriented control of a cascaded doubly-fed induction machine[J]. IEE Proc.-Electr. Power Application, 1999, 146(6): 597-605 .
- [5] Hopfensperger B . Stator-flux oriented control of a doubly-fed induction machine with and without position encoder[J]. IEE Proc. Electr. Power Appl., 2000, 147(4): 241-250 .
- [6] 黄科元,贺益康,卞松江(Huang Keyyuan, He Yikang, Bian Songjiang), 矩阵式变频器交流励磁的变速恒频风力发电系统研究(Investigation of a matrix converter-excited variable-speed constant frequency wind-power generation system) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2002, 22(11): 100-105 .
- [7] 廖勇,杨顺昌(Liao Yong, Yang Shunchang). 交流励磁发电机励磁控制(Excitation control of alternating current excitation generators) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1998, 18(2): 87-90 .
- [8] Peresada S, Tilli A, Tonielli A . Robust active-reactive control of a doubly-fed induction machine[C]. IEEE Proceeding of IECON' 98, Aachen, Germany, 1998 .
- [9] Hofmann W, Thieme A . Control of a double-fed induction generator for wind-power plants[J]. Proceedings of power quality, 1998, (5): 275-282 .

收稿日期: 2003-01-06。

作者简介:

李辉(1974-),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为双馈发电机的励磁控制,智能优化算法等。

杨顺昌(1937-),男,教授,博士生导师,主要从事电机及其控制方面的教学、科研工作。

(责任编辑 丁玉瑜)