

风电系统中机侧整流器故障仿真与特性分析

徐 壮, 杨晓冬, 刘谢玉, 张俊皓

盐城工学院电气工程学院, 江苏 盐城

收稿日期: 2023年3月27日; 录用日期: 2023年5月18日; 发布日期: 2023年5月25日

摘 要

本文以风力发电控制系统中变流器开关管为研究对象, 对其开路故障进行特性分析。首先对风电系统中机侧整流器进行数学建模分析, 并介绍了主要控制策略; 然后以此为基础建立了直驱式永磁风力发电系统机侧变流器MATLAB仿真模型; 分析了整流器功率开关管开路故障的作用原理; 最后分别模拟了单管和双管在不同桥臂上的开路故障, 并分析了各类型开路故障对系统关键参数的影响。分析结果表明风力发电系统中变流器开路故障对系统影响较大, 必须采取一定的措施进行防止。

关键词

机侧变流器, 开路故障, 故障仿真, 故障特性

Fault Simulation and Characteristic Analysis of Machine-Side Rectifier in Wind Power System

Zhuang Xu, Xiaodong Yang, Xieyu Liu, Junhao Zhang

School of Electrical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu

Received: Mar. 27th, 2023; accepted: May 18th, 2023; published: May 25th, 2023

Abstract

This article takes the switching device of the inverter in the wind power control system as the research object and conducts characteristic analysis on its open-circuit fault. Firstly, the mathematical modeling and analysis of the machine-side rectifier in the wind power system are carried out, and the main control strategies are introduced. Then, based on this, a direct-drive permanent magnet wind power generation system machine -side inverter MATLAB simulation model is established. The principle of the open-circuit fault of the power switch of the rectifier is analyzed. Finally, the open-circuit faults of single and double switches on different bridge arms are simulated respectively,

and the influence of each type of open-circuit fault on the key parameters of the system is analyzed. The analysis results show that the open-circuit fault of the inverter in the wind power generation system has a significant impact on the system and certain measures must be taken to prevent it.

Keywords

Machine-Side Inverter, Open-Circuit Fault, Fault Simulation, Fault Characteristic

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

长期以来,化石能源的使用导致环境污染和能源安全问题日益严重。相比之下,风能作为一种清洁的可再生能源,具有广阔的商业化前景[1][2]。永磁直驱型风力发电机组使用电力电子全功率变流器进行电能传输,在实际运行中,变流器系统往往是最容易出现故障的部分,尤其是整流模块和逆变模块中的IGBT元件出现故障的频率最高,故障后的运行特性直接影响着系统的稳定运行和电网安全。

针对变流器故障问题,国内外学者做了大量研究。文献[3]以变流器单管故障为研究对象,初步分析了电流运行特性,并得到电流曲线,验证了单管故障时变流器对系统运行特性的影响。文献[4]提出定子电流分析法,并通过建立混合逻辑动态健康模型,分析了变流器开路故障时定子电流的动态变化特性。文献[5]利用逆变器开路时电流有效值与瞬时值变化特性用以判断逆变器单双管开路故障的定位。文献[6]首先分析了变流器开路故障后的系统运行特性,提出基于电流信号与总谐波畸变率分层针对方法,最后运用BP神经网络对故障分离。

本文主要对风力发电控制系统中的整流器进行了建模,并对功率开关管开路故障的作用原理进行了深入分析。通过在MATLAB软件中对PWM整流器的多种典型故障进行仿真,并对其特性进行分析。研究结果将为之后的故障诊断和容错控制研究提供基础和参考。

2. 风力发电控制系统建模

当前,永磁直驱同步发电机因其独特的优点已成为风力发电领域最具前景的发电机型之一。相较于传统的双馈风电系统,它避免了齿轮传动机构所带来的高故障率以及强噪声的缺陷,同时也提高了发电效率。永磁直驱风力发电系统主要由风轮机、永磁同步发电机(Permanent Magnet Synchronous Generator,简称PMSG)、变流器以及控制系统组成[7]。下图1是典型的直驱式风电系统结构图。

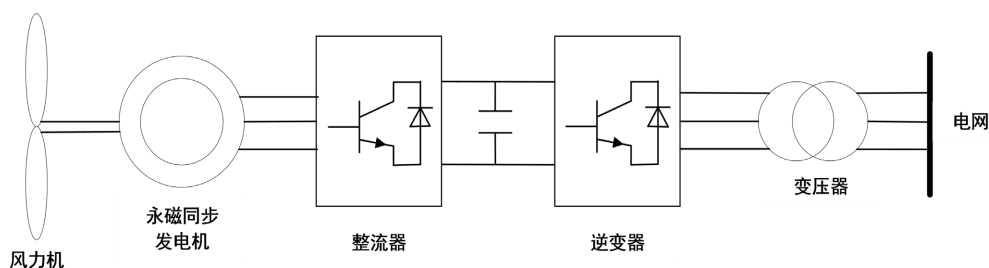


Figure 1. Structure diagram of permanent magnet direct-drive wind power generation system

图 1. 永磁直驱风力发电系统结构图

2.1. 机侧变流器拓扑结构及数学模型

在直驱风力发电系统中与永磁同步发电机定子相连的 PWM 变换器以整流状态工作(称为整流器), 连接电网的 PWM 变换器以逆变状态工作(称为逆变器)。虽然整流器与逆变器在结构上一样, 但在工作状态上却有所不同。下图 2 是机侧三相桥式 PWM 整流器拓扑结构图。

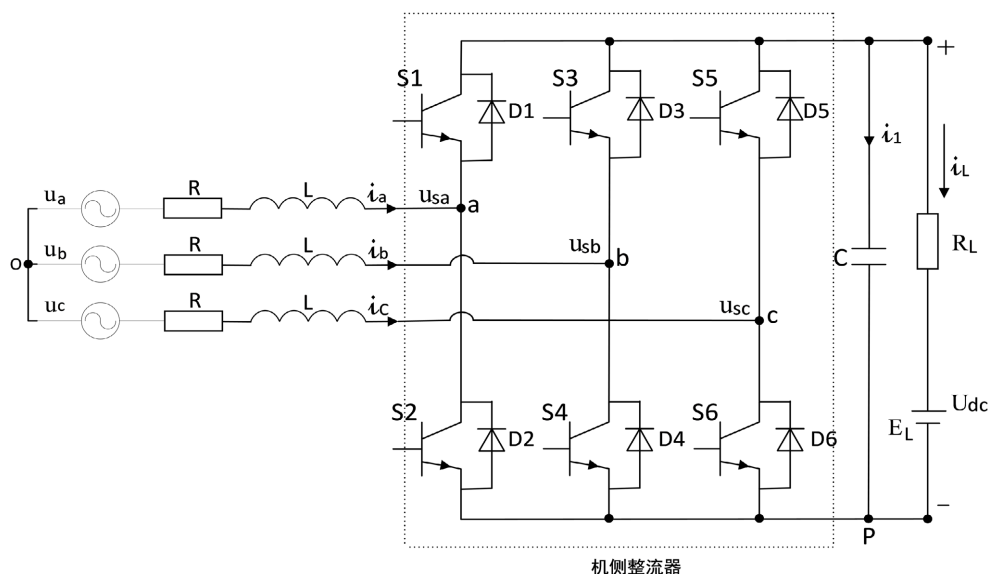


Figure 2. Three-phase bridge PWM rectifier topology structure

图 2. 三相桥式 PWM 整流器拓扑结构

在进行分析之前, 需要对变流器进行一些假设: 发电机的三相电动势为三相平衡的正弦波; 三相绕组完全对称; 电路中所有 IGBT 器件被视为理想的功率器件, 通断状态可以用开关函数描述[8]。

结合图 2 根据电路原理的基尔霍夫电压定律, 可以得到三相电压的回路方程:

$$\begin{cases} u_a = -Ri_a - L \frac{di_a}{dt} + u_{sa} \\ u_b = -Ri_b - L \frac{di_b}{dt} + u_{sb} \\ u_c = -Ri_c - L \frac{di_c}{dt} + u_{sc} \end{cases} \quad (1)$$

式中,

$$\begin{cases} u_{sa} = u_{aP} + u_{PO} \\ u_{sb} = u_{bP} + u_{PO} \\ u_{sc} = u_{cP} + u_{PO} \end{cases} \quad (2)$$

式中, u_{aP} 、 u_{bP} 、 u_{cP} 分别表示图 2 中 a、b、c 三个节点与 P 点之间的电压, 而 u_{PO} 则表示 P 点与参考点 O 之间的电压。同时, u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 表示参考点 O 处的电压值。

为方便分析, 设各桥臂开关函数 S_K 为:

$$S_K = \begin{cases} 1 & \text{上桥臂导通, 下桥臂关断} \\ 0 & \text{上桥臂关断, 下桥臂导通} \end{cases} \quad (K = a, b, c) \quad (3)$$

将式(3)带入式(2)、式(1)中可得

$$\begin{cases} Ri_a + L \frac{di_a}{dt} = S_a U_{dc} + u_{PO} - u_a \\ Ri_b + L \frac{di_b}{dt} = S_b U_{dc} + u_{PO} - u_b \\ Ri_c + L \frac{di_c}{dt} = S_c U_{dc} + u_{PO} - u_c \end{cases} \quad (4)$$

对于直流电流有

$$S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c = i_1 + i_L \quad (5)$$

由式(5), 可知

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = (S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c) - i_L \quad (6)$$

式中, $i_L = -(U_{dc} - E_L)/R_L$, 负号说明电流与参考方向相反。

由于系统中的整流器输出的三相电压、三相电流为三相对称, 因此:

$$\begin{cases} u_a + u_b + u_c = 0 \\ i_a + i_b + i_c = 0 \end{cases} \quad (7)$$

联立式(4)、式(7)可得:

$$u_{PO} = -\frac{S_a + S_b + S_c}{3} U_{dc} \quad (8)$$

2.2. 系统控制策略

直驱风力发电系统采用的是背靠背式变流器的控制策略。该策略采用双闭环控制, 其中外环控制直流母线电压和无功功率, 内环控制电流。通过调节 d、q 轴电流分量, 可以分别控制有功和无功功率的大小。当使用并网 PWM 变换器来控制直流母线电压时, 定子 PWM 变换器需要承担最大风能跟踪的任务[9]。通常情况下, 根据当前的风速, 控制永磁同步发电机(PMSG)的转速达到最佳值。机侧变流器采用转速 - 电流双闭环控制方法, 以实现风力发电机的最大功率点跟踪和转矩控制。外环控制电机转速跟踪给定值, 电流环给定参考电流 $i_d = 0$ 。通过转子磁场定向控制策略, 实现永磁同步发电机(PMSG)的有功功率和无功功率的解耦控制, 如下图 3 所示是直驱式 PMSG 机侧整流器的控制框图。

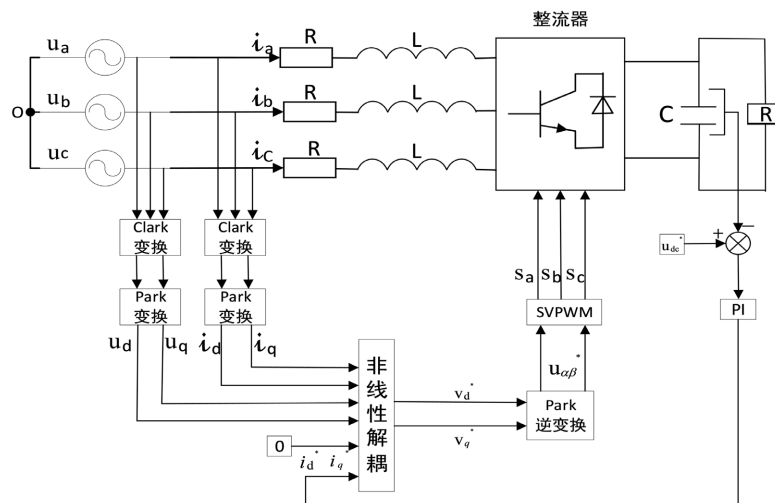


Figure 3. Control block diagram of direct-drive PMSG machine-side rectifier
图 3. 直驱式 PMSG 机侧整流器控制框图

3. 整流器功率开关管开路故障分析

IGBT 作为整流器中重要的组成器件, 在整流器故障发生时, 开关管容易发生故障, 而相应的反并联二极管不易发生故障, 因此本文只考虑对 IGBT 功率元件发生开路故障时进行研究[10]。下面以 A 相桥臂为例, 分析二极管在发生故障和正常模式下的整流器工作状态变化。下图 4 是整流器 A 相的简单结构图。

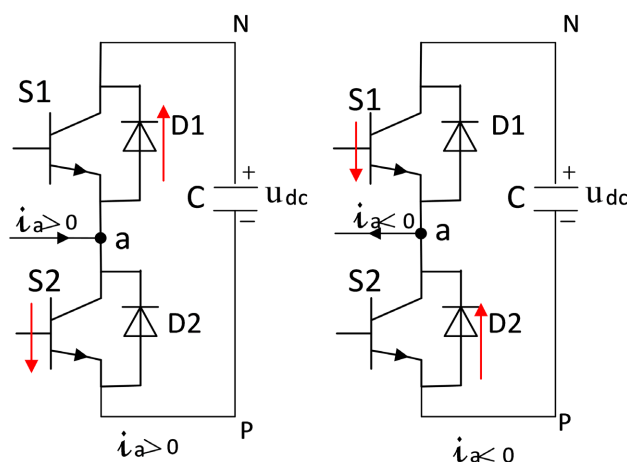


Figure 4. Structure diagram of the operating state of phase A rectifier bridge arm
图 4. 整流器 A 相桥臂工作状态结构图

1) 当 A 相桥臂工作在正常模式时。开关管与反并联二极管共同作用完成 A 相电流在电机与直流端的流动, 当 $i_a > 0$ 时, 电流经 S2、D1 流向直流端; 当 $i_a < 0$ 时, 电流经 S1、D2 流向电机。

2) 当 A 相上桥臂 S1 发生开路故障时。若 $i_a > 0$, 电流可以经过 D1、S2 完成续流; 若 $i_a < 0$ 时, 电流 i_a 只有在满足反并联二极管导通条件时才能续流。因此, A 相正半轴电流波形不受 S1 开路故障的影响, 而负半轴会受到一定的影响, 可以分别得到 u_{aP} 和 u_{sa} 如式(9)和式(10):

$$u_{aP} = \begin{cases} S_a U_{dc}, & i_a > 0 \\ 0, & i_a < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$u_{sa} = \begin{cases} (2S_a - S_b - S_c)U_{dc}/3, & i_a > 0 \\ -(S_b - S_c)U_{dc}/3, & i_a < 0 \end{cases} \quad (10)$$

与正常运行时相比, S1 发生开路故障系统机侧整流器回路方程改变为:

$$\begin{cases} Ri_a + L \frac{di_a}{dt} = -(S_b + S_c)U_{dc}/2 - u_a \\ Ri_a + L \frac{di_a}{dt} = (2S_b - S_c)U_{dc}/3 - u_b \\ Ri_a + L \frac{di_a}{dt} = (-S_b + 2S_c)U_{dc}/3 - u_c \end{cases} \quad (11)$$

3) 当 A 相下桥臂 S2 发生开路故障时。若 $i_a > 0$ 时, 电流只能通过 D1 续流, 同样地, 只有在满足反并联二极管导通条件时电流 i_a 才能续流; 若 $i_a < 0$, 电流可以经过 D2、S1 续流。因此, 在 S2 发生故障时 A 相负半轴电流波形不受 S2 开路故障的影响, 而正半轴会受到一定的影响, 可以分别得到 u_{aP} 和 u_{sa} 如式(12)和式(13):

$$u_{aN} = \begin{cases} U_{dc}, & i_a > 0 \\ S_a U_{dc}, & i_a < 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$u_{sa} = \begin{cases} (2 - S_b - S_c)U_{dc}/3, & i_{sa} > 0 \\ (2S_a - S_b - S_c)U_{dc}/3, & i_{sa} < 0 \end{cases} \quad (13)$$

与正常运行时相比, S1 发生开路故障系统机侧整流器回路方程改变为:

$$\begin{cases} Ri_a + L \frac{di_a}{dt} = (2 - S_b - S_c)U_{dc}/3 - u_a \\ Ri_a + L \frac{di_a}{dt} = (-1 + 2S_b - S_c)U_{dc}/3 - u_b \\ Ri_a + L \frac{di_a}{dt} = (-1 - S_b + 2S_c)U_{dc}/3 - u_c \end{cases} \quad (14)$$

4) 当 A 相上下桥臂 S1、S2 同时发生开路故障时。不管电流正向或者反向流动, 在整个电流周期内都无法通过电路进行流通, 只能依赖二极管 D1、D2 续流。因此, 在 A 相正负半轴电流的波形都会受到影响。根据前面分别分析 A 相上下桥臂故障可知, 当 S1、S2 同时故障, $i_a < 0$ 时机侧整流器回路方程改变与式(11)同式; $i_a > 0$ 时机侧整流器回路方程改变与式(14)同式。

5) 当 A 相上桥臂 S1 和 B 相上桥臂 S3 同时发生开路故障时, 根据相电流流向, 机侧整流器回路方程改变如下表 1 所示:

Table 1. Rectifier circuit equation in case of open circuit fault in S1 and S3 simultaneously
表 1. S1 和 S3 同时发生开路故障时整流器回路方程

分类	回路方程	$Ri_a + L \frac{di_a}{dt}$	$Ri_a + L \frac{di_a}{dt}$	$Ri_a + L \frac{di_a}{dt}$
$i_a < 0, i_b < 0$		$\frac{-S_c U_{dc}}{3} - u_a$	$\frac{-S_c U_{dc}}{3} - u_b$	$\frac{2S_c U_{dc}}{3} - u_c$
$i_a < 0, i_b > 0$		$\frac{-S_b - S_c}{3} U_{dc} - u_a$	$\frac{2S_b - S_c}{3} U_{dc} - u_b$	$\frac{-S_b + 2S_c}{3} U_{dc} - u_c$
$i_a > 0, i_b < 0$		$\frac{2S_a - S_c}{3} U_{dc} - u_a$	$\frac{-S_a - S_c}{3} U_{dc} - u_b$	$\frac{-S_a + 2S_c}{3} U_{dc} - u_c$
$i_a > 0, i_b > 0$		$\frac{2S_a - S_b - S_c}{3} U_{dc} - u_a$	$\frac{-S_a + 2S_b - S_c}{3} U_{dc} - u_b$	$\frac{-S_a - S_b + 2S_c}{3} U_{dc} - u_c$

6) 当 A 相上桥臂 S1 和 C 相下桥臂 S6 同时发生开路故障时, 根据相电流流向, 机侧整流器回路方程改变如下表 2 所示。

根据变流器实际运行故障数据可知, 单个或两个 IGBT 元器件同时出现开路故障是最为普遍的故障模式, 当发生三个或更多的 IGBT 元器件开路时, 变流器将会完全停止运行, 从而导致设备失效。因此本文只针对前面两种情况进行故障分类, 大致分为七大类。具体如下表 3 所示。

第 1 大类: 仅上桥臂中一个开关管出现开路故障, 包含 3 个子类。

第 2 大类: 仅下桥臂中一个开关管出现开路故障, 包含 3 个子类。

第 3 大类: 同一相桥臂上下两个开关管同时故障, 细化分为 3 个子类。

第 4 大类：任意两相上桥臂各有一个开关管同时故障，包含 3 个子类。

第 5 大类：任意两相下桥臂各有一个开关管同时故障，包含 3 个子类。

第 6 大类：任意两相中上下桥臂各有一个开关管同时故障，包含 6 个子类。

第 7 大类：整流器正常运行，无开关管出现故障。

Table 2. Rectifier circuit equation in case of open circuit fault in S1 and S6 simultaneously

表 2. S1 和 S6 同时发生开路故障时整流器回路方程

分类 \ 回路方程	$Ri_a + L \frac{di_a}{dt}$	$Ri_a + L \frac{di_a}{dt}$	$Ri_a + L \frac{di_a}{dt}$
$i_a < 0, i_b < 0$	$\frac{-S_b - S_c}{3} U_{dc} - u_a$	$\frac{2S_b - S_c}{3} U_{dc} - u_b$	$\frac{-S_b + 2S_c}{3} U_{dc} - u_c$
$i_a < 0, i_b > 0$	$\frac{-S_b - 1}{3} U_{dc} - u_a$	$\frac{2S_b - 1}{3} U_{dc} - u_b$	$\frac{-S_b + 2}{3} U_{dc} - u_c$
$i_a > 0, i_b < 0$	$\frac{2S_a - S_b - S_c}{3} U_{dc} - u_a$	$\frac{-S_a + 2S_b - S_c}{3} U_{dc} - u_b$	$\frac{-S_a - S_b + 2S_c}{3} U_{dc} - u_c$
$i_a > 0, i_b > 0$	$\frac{2S_a - S_b - 1}{3} U_{dc} - u_a$	$\frac{-S_a + 2S_b - 1}{3} U_{dc} - u_b$	$\frac{-S_a - S_b + 2}{3} U_{dc} - u_c$

Table 3. Classification of open circuit faults in three-phase rectifier circuits

表 3. 三相整流电路开路故障分类

故障类别	故障标号	故障元件	故障类别	故障标号	故障元件
第 1 类	1	S1	第 5 类	13	S2、S4
	2	S3		14	S2、S6
	3	S5		15	S4、S6
	4	S2	16	S1、S4	
第 2 类	5	S4	17	S1、S5	
	6	S6	第 6 类	18	S3、S2
7	S1、S2	19		S3、S6	
第 3 类	8	S3、S4		20	S5、S2
	9	S5、S6	21	S5、S4	
第 4 类	10	S1、S3	第 7 类	22	无故障
	11	S1、S5			
	12	S3、S5			

4. 故障仿真与特性分析

4.1. 机侧整流器仿真模型

本文利用 MATLAB/Simulink 工具搭建了直驱式 PMSG 风力发电系统机侧整流器的仿真模型如图 5 所示，并以此为研究对象分析功率开关管开路故障的运行特性。

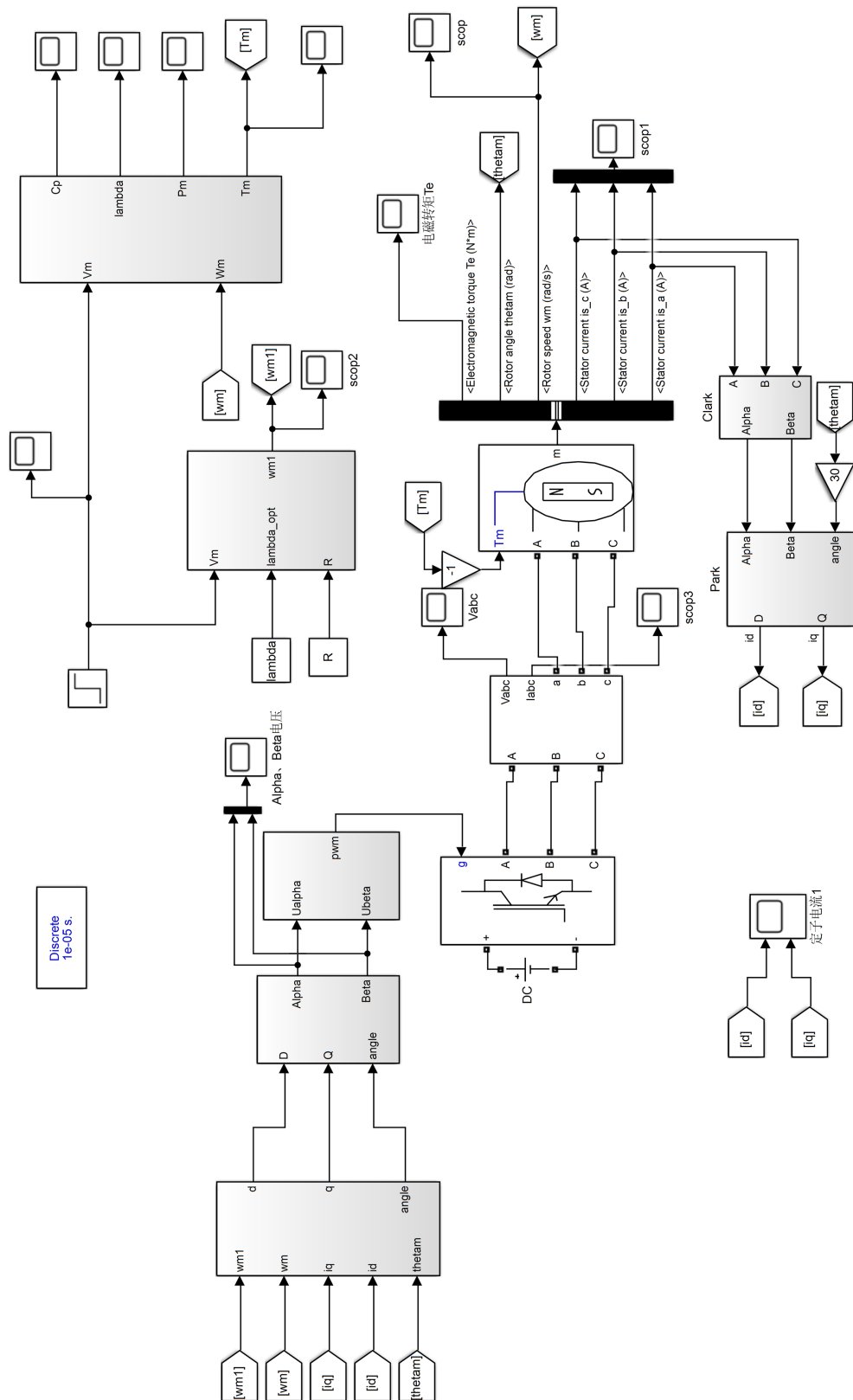


Figure 5. Direct-drive PMSG wind power generation system rectifier Simulink simulation model
 图 5. 直驱式 PMSG 风力发电系统整流器 Simulink 仿真模型

仿真模型和实验系统中主要参数如下表 4 所示:

Table 4. Simulation model main parameters

表 4. 仿真模型主要参数

参数名称	数值	PMSG 参数名称	数值
额定风速	12 m/s	定子电阻	0.0055 Ω
风轮半径	35.4 m	电枢电感	0.00125 H
风密度	1.225 $\text{kg}\cdot\text{m}^3$	d 轴电感	0.00125 H
直流参考电压	1000 V	q 轴电感	0.00125 H
电网电压频率	50 Hz	永磁体磁链	7.5 V·s
电网电压	690 V	极对数	30
风电机组	2 MW	电机转动惯量	8759 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$

下面是正常状态下的仿真运行结果,在仿真模型中设置风速从 0 时刻 8 m/s 突变到 1 s 时刻额定风速 12 m/s。图 6 是发电机输出三相定子电流变化情况,从图中可以看出发电机输出的波形是标准正弦波,电流幅值随着风速变化,电能输出稳定。

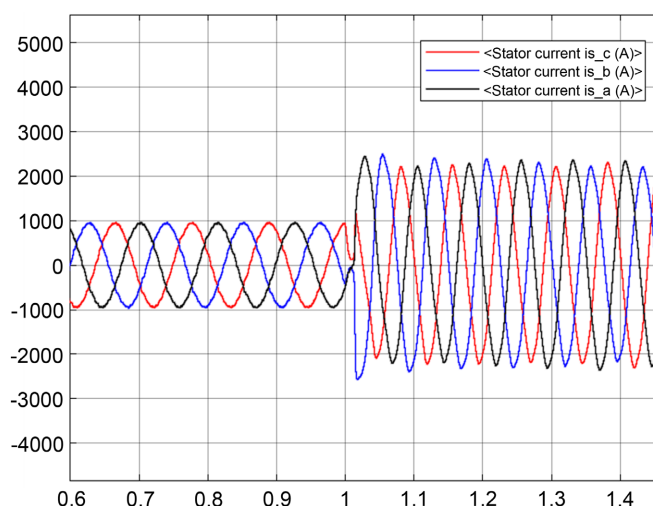


Figure 6. Three-phase current output from the generator

图 6. 发电机输出的三相电流

从图 7 中看出,发电机的机械转矩和输出功率跟随风速变化而改变,在风速为 8 m/s 时发电机输出功率约为 0.592 MW,转矩约为 -3.15×10^5 N/m;在风速跃变为额定风速时发电机输出功率约为 1.992 MW,转矩约为 -7.05×10^5 N/m,符合理论值。

4.2. 开路故障仿真与特性分析

1) 仅有一个 IGBT 发生开路故障时

在仿真时以 A 相为例,风速为 8 m/s,系统在运行到 1 s 时机侧变流器 A 相上/下桥臂开路,可以得到如下图 8 所示的开路故障波形图。

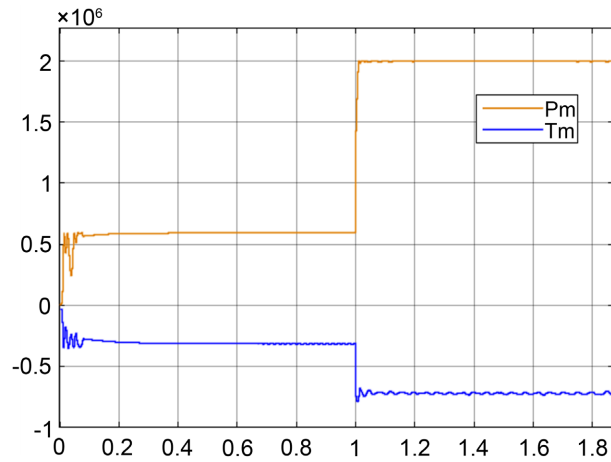


Figure 7. Mechanical torque and power generation

图 7. 机械转矩与发电功率

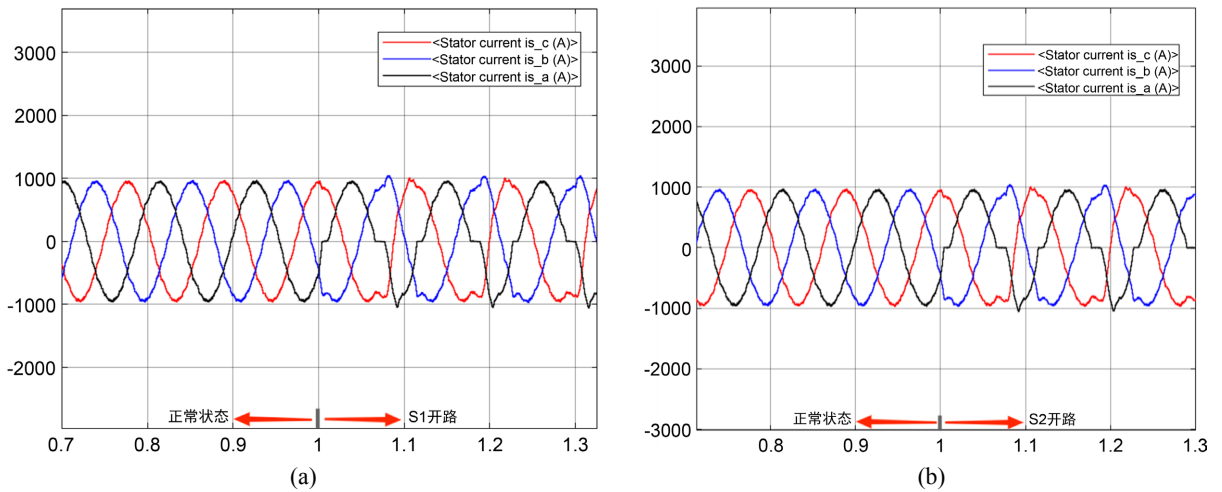


Figure 8. Current waveform under single-tube fault

图 8. 单管故障下的电流波形

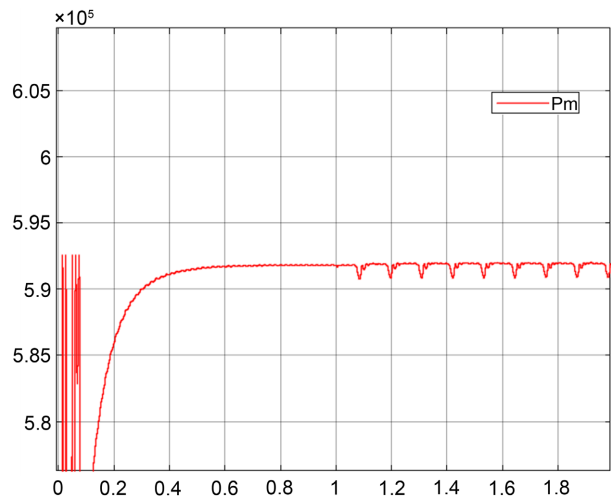


Figure 9. Power generation under single-tube fault

图 9. 单管故障下的发电输出功率

由图 8 可以看出, 当机侧变流器发生单管开路故障时, 机侧三相电流波形会发生畸变。其中以 A 相桥臂(故障相)的电流波形畸变最为严重, 并且周期内还会出现短暂的电流为零的情况, B、C 两相都受到不同程度的影响, 但是受影响相对较小, 电流波形的变化规律符合上述中对故障导通的分析。同时机侧故障时电流谐波含量会明显增加。从图 9 可知, 故障后输出功率相较于故障前出现低频震荡, 但只是略小于正常状态下的输出功率, 说明机侧交流故障时对发电机输出功率影响能力不大。

2) 当两个 IGBT 发生开路故障时

a) 同一相桥臂上两个 IGBT 故障: 以 A 相为例, 系统在运行到 1 s 时机侧变流器 A 相上下两桥臂开路, 可以得到如下图 10 所示的开路故障波形图。

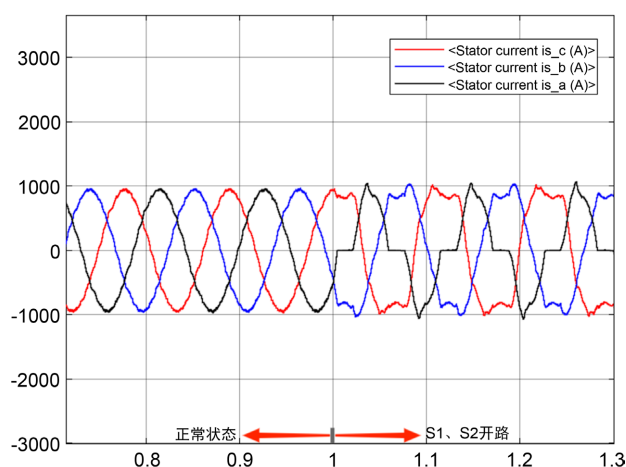


Figure 10. Current waveform under S1, S2 fault

图 10. S1、S2 故障下的电流波形

b) 任意两相上桥臂故障: 以 A 相和 B 相为例, 系统在运行到 1 s 时机侧变流器 A 相上桥臂与 B 相上桥臂开路, 可以得到如下图 11 所示的开路故障波形图。

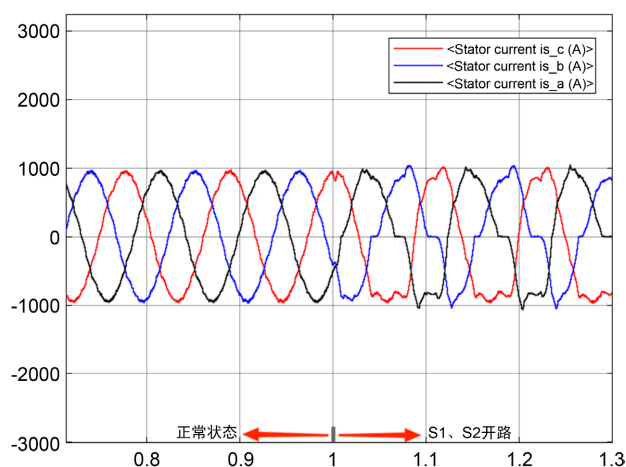


Figure 11. Current waveform under S1, S3 fault

图 11. S1、S3 故障下的电流波形

c) 任意两相上、下桥臂中各有一个故障: 以 A 相和 B 相为例, 系统在运行到 1 s 时机侧变流器 A 相上桥臂与 B 相下桥臂开路, 可以得到如下图 12 所示的开路故障波形图。

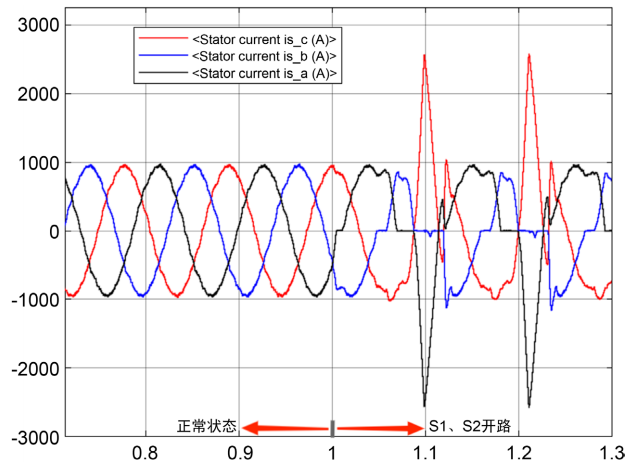


Figure 12. Current waveform under S1, S4 fault

图 12. S1、S4 故障下的电流波形

由图 10~12 可以看出, 当两个 IGBT 出现开路故障时, 在故障区间内, 故障相电流会出现与单管故障类似的表现特征, 即单管故障与双管故障发生时故障相电流都会出现短暂电流为零的情况; 不同的是双管故障时相电流甚至会出现半相缺失现象。同时由于存在重合区间作用, 在故障相电流发生畸变时, 非故障相的电流波形出现畸变的情况更加明显。

由于发生开路故障时开关管无法导通, 这会严重影响电机的运行状态。原本的控制策略在故障区间无法实现既定的目标控制。图 13~15 是仿真过程中开路故障下的运行参数变化。由图 13 可以看出当发生多管故障时, 机械转矩在故障区间内明显降低, 转矩波动剧烈。由于受机械转矩的影响, 发电机输出功率也会明显降低, 相较于单管故障时波动幅度更大。这种情况可能会对发电机的性能产生负面影响。图 14 为风能利用系数 C_p 变化趋势, 当故障发生时, 电机转速波动较大, 导致系统无法保持在最佳叶尖速比的工况下, 从而降低了系统对风能的利用率。开路故障降低了系统运行稳定性和经济性。图 15 为定子电流 dq 轴分量, 当正常运行时系统可以控制 $i_d = 0$ A 保证输出的无功功率为零, 但故障发生时, 由于故障相电流会发生畸变甚至时半相缺失, 引入直流分量后, 导致 i_d 产生剧烈波动, 同时 i_q 也跟着大幅波动。无功功率不能保持为零, 有功功率又受到故障干扰, 影响电机的稳定性。

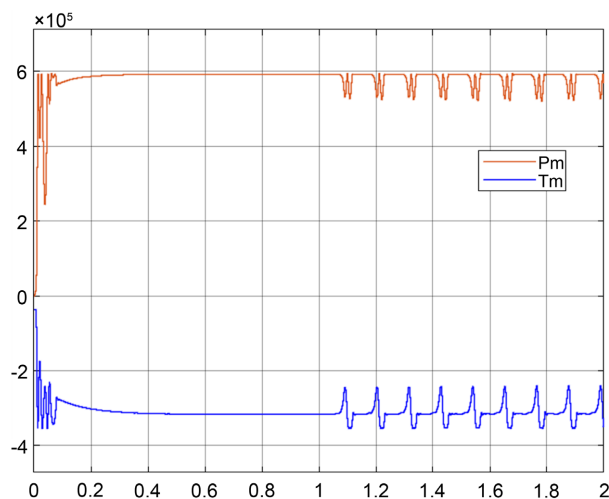


Figure 13. Mechanical torque and generating power under two IGBT failures

图 13. 两个 IGBT 故障下的机械转矩与发电功率

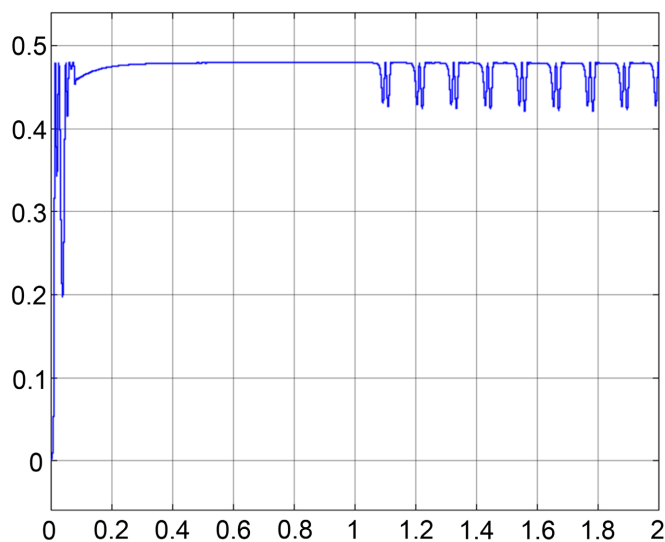


Figure 14. Wind energy utilization when two IGBT faults

图 14. 两个 IGBT 故障时风能利用率

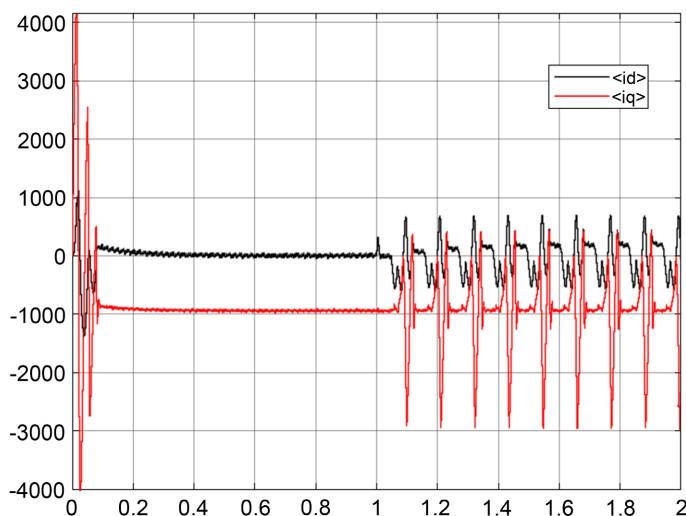


Figure 15. Current change of d and q axis under two IGBT failures

图 15. 两个 IGBT 故障下的 d q 轴电流变化

5. 总结

本文以直驱式风力发电系统仿真模型为研究对象，对其中的机侧整流器单管和双管开路故障进行仿真分析。通过仿真结果可以得出以下结论：

当发生单管开路故障时，会改变故障相桥臂上的电流通路，使得故障开关管在自身作用区间内无法完成电流流通，故障相电流波形畸变严重，而对发电机输出影响不大；当发生双管开路故障时，故障相电流会出现半相缺失和短暂电流为零情况，同时无功功率不能保持为零，发电机输出功率产生很大波动，影响整个系统的风能利用效率。

本文根据仿真实验结果与分析，变流器的开路故障降低了系统运行稳定性和经济性，容易引发其他类型的故障，严重时可能会停机。因此对于变流器开路故障必须要进行相应的故障诊断及故障后的容错控制，提高风力发电系统故障时的运行性能。

基金项目

盐城工学院研究生科研与实践创新计划项目(SJ CX22_XY017)。

参考文献

- [1] 冯毅. 直驱式永磁风力发电系统的 MATLAB/simulink 建模与仿真[J]. 电子测试, 2020(21): 58-59.
- [2] 王林富, 许丹枫, 赵湖珊, 郝露茜, 徐剑冰, 邱方驰, 张斌. 直驱永磁风力发电系统建模与仿真方法研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(20): 44-50.
- [3] 黄科元, 刘静佳, 黄守道, 廖武, 易韵岚. 变流器开路故障下永磁直驱风电系统运行分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 23-29.
- [4] 张海霞, 谭阳红, 周野. 变流器开路故障下永磁同步风力发电系统运行特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 7045-7051+7138.
- [5] 李国军, 袁铁江, 徐立亮. 永磁同步风力发电系统的 PWM 逆变器开路故障特征分析[J]. 可再生能源, 2016, 34(11): 1639-1644.
- [6] 王美, 谭阳红, 何怡刚, 杜培伟. 永磁直驱风电系统变流器开路故障诊断方法[J]. 控制工程, 2018, 25(1): 50-56.
- [7] 袁媛. 基于电流信号的风电变流器开路故障诊断方法研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [8] 张维. 直驱永磁风电变流器故障诊断与容错控制研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湖南科技大学, 2021.
- [9] 臧晨静, 张惠娟, 李玲玲, 孙浩, 赵轩. 永磁直驱风电系统中最大功率点跟踪控制优化的仿真研究[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(11): 118-123.
- [10] 孙桂中. 风电变流器的开路故障特性及诊断方法研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.