

并联型风电变流器机侧外管开路故障的容错控制

吕伟^{1,2,3}, 王晗^{1,2,3}, 张建文^{1,2,3}, 陈根^{1,2,3}, 蔡旭^{1,2,3}

(1. 上海交通大学 风力发电研究中心, 上海 200240;

2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院电气工程系, 上海 200240;

3. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要:海上风电相比于陆上风电, 自然环境恶劣, 且交通不便, 运维可及性差, 要求变流器具有高可靠性。采用容错控制则能有效提升系统可靠性。针对并联型三电平变流器外管开路故障, 提出了一种无功环流注入的容错控制策略。通过对故障变流器注入无功环流, 使得变流器运行在单位功率因数, 从而使故障相电流绕开故障外管, 有效容错运行。相比于 d 轴电流注入的容错方式, 无功环流注入能有效降低发电机铜耗, 并且不改变整个系统的功率因数。通过仿真验证了无功环流注入的容错控制的有效性和可行性。

关键词:并联风电变流器; 三电平; 故障容错; 无功环流注入; 可靠性

中图分类号: TM72 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed22268

Fault-tolerant Control of Machine Side Parallel Wind Power Converter After Open Circuit Fault of Outer IGBT

LÜ Wei^{1,2,3}, WANG Han^{1,2,3}, ZHANG Jianwen^{1,2,3}, CHEN Gen^{1,2,3}, CAI Xu^{1,2,3}

(1. Wind Power Research Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Department of Electrical Engineering, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion (SJTU), Ministry of Education, Shanghai 200240, China)

Abstract: Compared with onshore wind power, the natural conditions at sea are bad and the traffic is inconvenient to maintain the wind power system, so wind power system needs to be highly reliable. The system reliability can be effectively improved by using fault-tolerant control. A fault-tolerant control strategy by injecting reactive circulating current was proposed for open circuit fault of the parallel three-level converter outer IGBT. By injecting reactive circulating current into the faulty converter, the converter operates at unity power factor, so that the faulty phase current bypasses the faulty outer IGBT, and the system can operate in a fault-tolerant state effectively. Compared with the fault-tolerant method of injecting d -axis current, injecting reactive circulating current can effectively reduce the copper consumption of the generator without changing the power factor of the entire system. The effectiveness and feasibility of the fault-tolerant control strategy were verified by simulation.

Key words: parallel wind power converter; three-level; fault tolerant; reactive circulating current injection; reliability

目前,海上风电单机容量日趋增大,已逐渐接近 10 MW 功率等级。然而不同于陆上风电,海上自然条件恶劣,并且交通不便,一旦机组发生故障,短时间内无法维护,因此,这就要求海上风

电机组有较高的可靠性^[1]。相比于两电平拓扑,中点钳位型三电平拓扑具有电压应力低、谐波小等优势,更适用于海上大功率风电变流器。另一方面,为提高系统的可靠性、进一步提升系统的

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB1501303-01)

作者简介:吕伟(1995—),男,硕士,Email:lvwei0815@sjtu.edu.cn

通讯作者:蔡旭(1964—),男,教授,博士生导师,Email:xucui@sjtu.edu.cn

功率,海上风电变流器多采用并联的拓扑结构^[2],例如西门子、禾望电气、阳光电源等厂家采用并联拓扑作为主要方案。根据海上风电机组故障停运统计数据分析,故障率最高的为电气系统中IGBT功率器件。海上风电具有波动且随机的特性,导致IGBT热应力剧烈变化,从而发生开路故障^[3-4]。而IGBT短路故障则可以利用快速熔断器的熔断特性,通过串联熔断器转化为开路故障^[5],因此本文仅对开路故障展开容错控制研究。

最简单的容错控制策略是将故障变流器切除,正常变流器继续运行,但这样系统必须降功率运行,严重时将导致系统停机。因此,采用容错控制,增加系统的可用度,提升系统可靠性是海上风电研究的热点之一。文献[6-7]在系统中设置冗余桥臂,当系统发生IGBT功率器件故障时,切除故障桥臂,投入冗余桥臂即可实现容错,但该方法增加了系统的初期硬件成本。文献[8-9]采用虚拟桥臂重构控制,连接直流母线中点与故障桥臂,形成虚拟桥臂,进而容错运行,该方法也存在增加硬件成本的问题。相对地,软件优化层面上的容错控制更受业界欢迎。文献[10-13]对多相电机的容错控制进行了研究,并以谐波畸变率、铜耗、转矩等为优化目标,提出了相应的容错控制策略,但不适用于传统的三相电机。文献[14]提出了一种软件层面上的重构控制策略,该方法具有一定的通用性,不受拓扑类型限制,但电流指令重构的方式使得各相电流幅值差异较大,加剧了功率器件的热应力。

本文研究三电平变流器固有运行特征,利用其外管在单位功率因数整流时没有电流流过的特点,提出了一种基于无功环流注入的容错控制策略。当三电平变流器外管发生开路故障时,通过在并联系统中精确地注入无功环流,使得故障变流器运行在单位功率因数状态,系统得以容错运行。与文献[15]提出的 d 轴电流注入相比,本文提出的无功环流注入容错控制能有效降低发电机铜耗,并且整个系统的功率因数可以保持不变。最后通过仿真验证了所提出的容错控制策略的可行性。

1 系统描述

1.1 系统拓扑结构

以永磁直驱全功率变换风电机组为例,其系统结构示意图如图1所示,风电变流器采用三电

平拓扑并联结构,共直流母线。

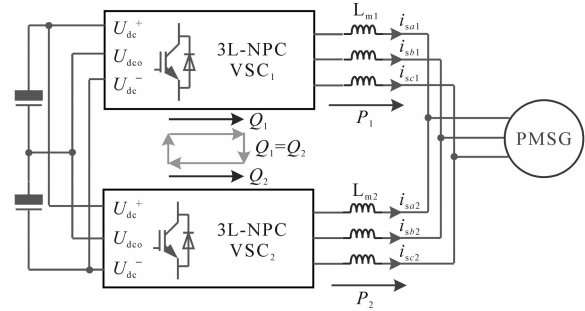


图1 机侧变流器并联三电平拓扑示意图

Fig.1 Parallel three-level topology of machine side wind power converter

1.2 数学模型

同步旋转坐标下,采用发电机惯例,永磁同步发电机的数学模型如下式所示:

$$\begin{cases} u_{sd} = -R_s i_{sd} - L_d \frac{di_{sd}}{dt} + \omega_e L_q i_{sq} \\ u_{sq} = -R_s i_{sq} - L_q \frac{di_{sq}}{dt} - \omega_e L_d i_{sd} + \omega_e \Psi_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{sd}, u_{sq} 分别为定子电压的 d, q 轴分量; i_{sd}, i_{sq} 分别为定子电流的 d, q 轴分量; L_d, L_q 分别为定子 d, q 轴电感; R_s 为定子绕组的电阻; ω_e 为转子电角速度; Ψ_f 为永磁体磁链。

永磁同步发电机的电磁转矩 T_e 为

$$T_e = \frac{3}{2} n_p [(L_q - L_d) i_{sd} i_{sq} + \Psi_f i_{sq}] \quad (2)$$

式中: n_p 为极对数。

2 外管开路故障机理分析

2.1 三电平拓扑电流路径分析

三电平拓扑有P, O, N三种开关状态,开关状态P表示 S_{x1}, S_{x2} 开通, S_{x3}, S_{x4} 关断($x=a, b, c$,下同);开关状态O表示 S_{x2}, S_{x3} 开通, S_{x1}, S_{x4} 关断;开关状态N表示 S_{x3}, S_{x4} 开通, S_{x1}, S_{x2} 关断。根据电流方向和开关状态的不同,三电平拓扑共有六种电流路径,如图2所示。

三电平拓扑的电流路径与其工作模式密切相关,整流模式和逆变模式的电流路径并不相同。当变流器工作在单位功率因数逆变模式,正向电流路径如图2c、图2e所示,负向电流路径如图2b、图2d所示,当 S_{x1} 或 S_{x4} 发生开路故障时,图2b或图2e所示的电流路径将缺失。当变流器工作在单位功率因数整流模式,正向电流路径如图2a、图2c所示,负向电流路径如图2d、图2f所示,由于这些路径均不包含 S_{x1} 或 S_{x4} ,当 S_{x1} 或 S_{x4} 发生

开路故障时,不影响其电流路径。表1列出了不同运行模式下三电平NPC变流器的电流路径。

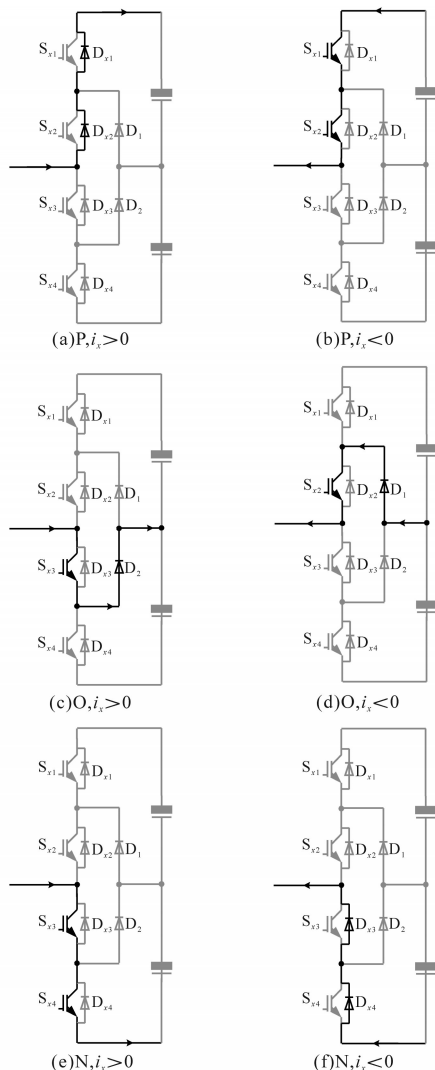


图2 三电平NPC拓扑的电流路径与开关状态

Fig.2 Current paths and switching states of three-level NPC topology

表1 三电平NPC变流器的电流路径

Tab.1 Current paths of three-level NPC converter

	运行模式	
	整流模式	逆变模式
正向电流	图2a、图2c	图2c、图2e
负向电流	图2d、图2f	图2b、图2d

2.2 外管开路故障分析

由于发电机绕组的电感和电阻的作用,发电机端电压 u_s 与转子磁链感应电动势 e_s 之间存在一定的相位差,假设定子电流 i_s 与感应电动势 e_s 同相位,永磁发电机端电压 u_s 与电流 i_s 的相位关系如图3所示,根据电压电流方向,一个基波周期内,输出波形可以分为四个区域。其中,区域I、区域III的时间长度远小于区域II、区域IV,区域

I、区域III的时间间隔的长短与电流幅值、调制度密切相关。由2.1的分析可知,当 S_{x1} 或 S_{x4} 发生开路故障时,会影响区域III或区域I的电流路径,如图4所示。

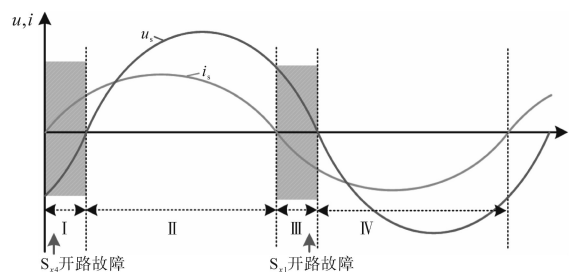


图3 外管开路故障对电流路径的影响

Fig.3 Influence of outer IGBT open-circuit fault on current path

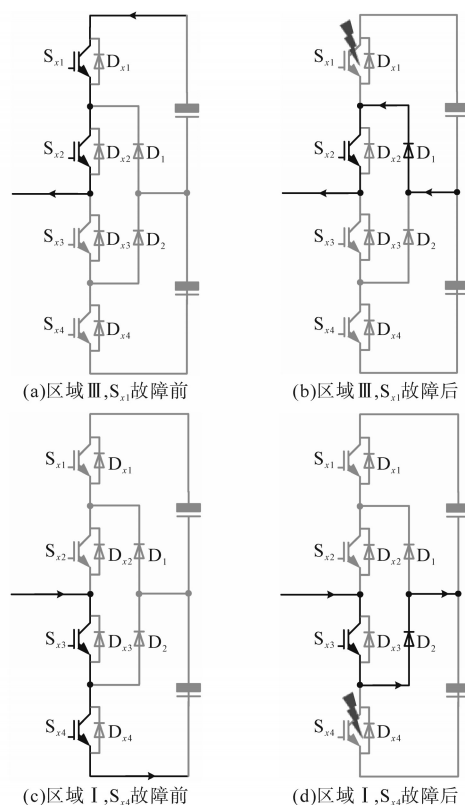


图4 区域I和区域III外管开路故障前后电流通路

Fig.4 Current paths before and after open-circuit faults in zone I and zone III

具体地,区域III在 S_{x1} 故障前电流流通过程如图4a深色部分所示,而故障后,电流经过二极管 D_1 续流,如图4b深色部分所示。故障前变流器输出电压为0电平和正电平的PWM波,而故障后,由于电流路径的缺失,变流器输出电压始终为0电平, u_s 将在区域III产生畸变,进而影响到对应相电流。由于采用三相三线制,畸变的故障相电流也会影响另外两相。对于区域I外管开路故障的分析同理可得。

3 无功环流注入容错控制

3.1 外管开路故障容错控制策略

S_{x1}, S_{x4} 开路故障下会造成区域 I、区域 III 内电流路径的缺失从而导致输出电流畸变。因此,只要避免故障变流器运行在区域 I、区域 III 内,就可以实现外管开路故障的容错控制。

两台变流器的并联系统如图 1 所示,本文以机侧变流器 1 的外管开路故障为例,展开容错控制研究。变流器 1 S_{x1}, S_{x4} 开路故障指的是 a, b, c 三相中任意一相,即所提控制策略对于变流器三相桥臂外管开路故障均适用。由于无功环流注入容错控制本质上是使故障变流器运行在单位功率因数整流状态,故该容错控制策略不适用于网侧变流器。对于内管开路故障,无功环流注入容错控制不再适用。内管开路同时阻断了外管的电流路径,常规的软件策略较难实现故障容错,一般采用冗余桥臂的方式。由于内管开路故障不是本文研究重点,这里不予讨论。

图 5 为无功环流注入容错控制下的电压电流示意图。

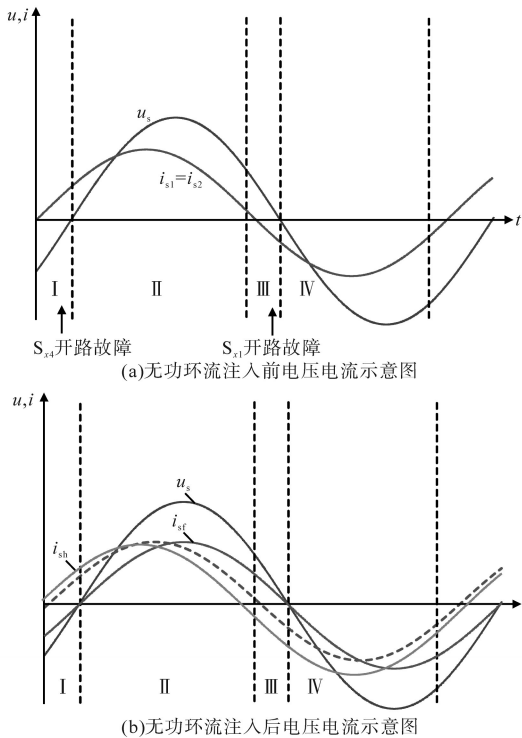


图 5 无功环流注入容错控制下的电压电流示意图

Fig.5 Diagram of voltage and current after fault tolerant control with reactive circulating current injection

并联型三电平变流器,电流 $i_{s1}=i_{s2}$,其电压、电流示意图如图 5a 所示。

假设变流器 1 的 S_{x1} 发生开路故障,在并联变流器内部注入无功环流 $i_{sd1}=-i_{sd2}$,则故障变流器 1、正常变流器 2 的电流分别变为 i_{sf}, i_{sh} ,无功环流注入容错控制的电压电流示意图如图 5b 所示。通过在并联变流器内部注入无功环流,故障变流器 1 的运行区域 I、区域 III 消除了,正常变流器 2 的运行区域 I、区域 III 扩展了。

由图 5b 可知,为了消除故障变流器 1 的运行区域 I、区域 III,需要精确注入无功环流,过多或过少的无功环流都会使得运行区域 I、区域 III 继续存在,这样就不能消除外管开路故障导致的电流畸变。

假设永磁发电机反电动势 e_s 、定子电流 i_s 相位角为零,其幅值分别为 E_s, I_s ,发电机端电压 u_s 的相位角为 θ ,幅值为 U_s ,则

$$\frac{e_s - u_s}{Z_s} = \frac{E_s \angle 0 - U_s \angle \theta}{R_s + j\omega_s L_s} = I_s \angle 0 \quad (3)$$

式中: Z_s 为永磁发电机的定子阻抗; L_s, R_s 分别为发电机定子绕组的电感和电阻; ω_s 为转子电气角频率。

由式(3)可得 θ 为

$$\theta = \arctan\left(-\frac{\omega_s L_s I_s}{E_s - I_s R_s}\right) \quad (4)$$

则并联变流器内部注入的无功环流分别为

$$i_{sd1}^* = \frac{1}{2} i_{sq}^* \tan \theta \quad (5)$$

$$i_{sd2}^* = -\frac{1}{2} i_{sq}^* \tan \theta \quad (6)$$

式中:上标“*”表示控制给定值。

此时, $i_{sd}^* = i_{sd1}^* + i_{sd2}^* = 0$,并联系统的总 d 轴电流为 0。无功环流注入容错控制并不改变故障前后系统功率因数。

3.2 无功环流注入容错控制功率约束条件

注入无功环流的大小需要考虑变流器的系统容量约束条件:

$$i_{sd1} < i_{d,max} = \sqrt{i_{rated}^2 - i_{sq1}^2} \quad (7)$$

式中: i_{sq1} 为变流器的 q 轴电流; i_{rated} 为单个变流器的额定电流。

式(7)的含义为不降低系统有功输出的情况下,变流器所能承受的最大无功环流。

考虑外管开路故障后,当有功电流受到器件额定电流限制时,降低有功电流,优先满足容错运行时无功环流的需求。因此变流器故障前后输出最大有功功率之比为

$$\frac{i_{qf}}{i_{qh}} = \begin{cases} 1 & \sqrt{i_{sq}^2 + i_{sd}^2} \leq i_{rated} \\ \frac{\sqrt{i_{rated}^2 - i_{sd}^2}}{i_{sq}} & \sqrt{i_{sq}^2 + i_{sd}^2} > i_{rated} \end{cases} \quad (8)$$

式中: i_{qf} 为故障后的输出有功电流; i_{qh} 为故障前的输出有功电流。

式(8)的含义为: 风速波动造成风电机组功率波动时, 当机侧输出功率满足变流器电流幅值小于其额定电流值, 无功环流注入容错控制无需降低故障前的变流器输出有功能力; 当电流幅值超过功率器件额定电流值时, 为满足变流器故障容错运行, 必须降低其有功出力。即在低风速运行区, 由于变流器桥臂电流未达到其电流极限值, 能够满足最大功率跟踪和故障容错的要求; 而当风速增大, 桥臂电流达到电流极限值, 此时为了满足容错运行, 需降低系统有功出力。

3.3 无功环流注入容错与 d 轴电流注入容错损耗对比分析

根据文献[16]的研究, 功率器件损耗主要包括开关损耗和导通损耗。开关损耗中 IGBT 主要包含开通损耗和关断损耗, 二极管开通损耗相比反向恢复损耗可以忽略不计, 因此只考虑反向恢复损耗。开关损耗一般用 E-switch 特性^[17]进行估算, 导通损耗则是对导通时间内的损耗进行积分。对于三电平变流器 a 相上桥臂与下桥臂损耗相等, b, c 相损耗与 a 相相等, 故仅对 a 相上桥臂损耗进行分析即可。根据文献[16], 中点钳位型三电平变流器有如下式所示的实用计算公式:

$$P_{switch} = \frac{f_c}{4\pi} \cdot \frac{U_{dc}}{U_{base}} [2I_m(b_T + b_D) + \pi(a_T + a_D + \frac{c_T}{2}I_m^2 + \frac{c_D}{2}I_m^2)] \quad (9)$$

式中: P_{switch} 为开关损耗; f_c 为开关频率; U_{dc} 为直流母线电压; I_m 为相电流幅值; U_{base} 为测试基准电压; a_T, b_T, c_T 为 IGBT 损耗特性拟合系数; a_D, b_D, c_D 为二极管损耗特性拟合系数。

将 IGBT 开关损耗求和可得器件总开关损耗。

IGBT 与二极管导通损耗计算过程可参考文献[16], 这里只给出总损耗:

$$P_{con_D_i} = \frac{2U_{sat}I_m}{\pi} + \frac{R_{con}I_m^2}{2} \quad (10)$$

式中: U_{sat} , R_{con} 分别为器件的饱和压降与导通电阻。

根据式(9)和式(10), 功率器件的总开关损

耗与总导通损耗与功率因数角无关, 功率因数角只影响损耗在变流器内部各器件之间的分布。

无功环流注入与 d 轴电流注入系统功率流动示意图如图1所示, d 轴电流注入容错控制下, 两变流器均发出无功, 无功电流流经发电机绕组, 改变了发电机的功率因数; 无功环流注入容错控制下, 故障变流器发出无功, 健康变流器吸收无功, 无功电流仅在变流器内部流动, 不流进发电机绕组, 因此, 发电机绕组功率因数不改变, 即发电机反电动势与绕组电流相位差可由变流器端电压控制, 故障前后不改变。无功环流注入仅改变了健康变流器的功率因数角, 使得其功率器件损耗分布与故障变流器不一致, 但由前述分析所得结论, 功率器件总损耗与功率因数角无关, 因此 d 轴电流注入与无功环流注入容错控制策略下, 忽略电容电感损耗、传导损耗等次要损耗的差异, 两者变流器总功率损耗一致。

永磁同步发电机定子绕组的功率损耗为

$$p_{cu} = \frac{3}{2} R_s (i_{sd}^2 + i_{sq}^2) \quad (11)$$

由式(11)可得, 无功环流注入容错控制并不会额外增加发电机定子绕组的功率损耗。

无功环流注入容错控制下永磁同步发电机定子绕组的功率损耗为

$$\begin{aligned} p_{cu1} &= \frac{3}{2} R_s [(i_{sd1} + i_{sd2})^2 + (i_{sq1} + i_{sq2})^2] \\ &= \frac{3}{2} R_s [0 + 4i_{sq1}^2] \end{aligned} \quad (12)$$

d 轴电流注入容错控制^[15]下, 永磁电机绕组的功率损耗为

$$\begin{aligned} p_{cu2} &= \frac{3}{2} R_s [(i_{sd1} + i_{sd2})^2 + (i_{sq1} + i_{sq2})^2] \\ &= \frac{3}{2} R_s [4i_{sd1}^2 + 4i_{sq1}^2] \end{aligned} \quad (13)$$

式(12)减去式(13)得:

$$\Delta p_{cu} = p_{cu1} - p_{cu2} = -\frac{3}{2} R_s (4i_{sd1}^2) \quad (14)$$

由式(14)可得, 与 d 轴电流注入容错控制相比, 无功环流注入容错控制可以减少发电机定子绕组的铜损。而两种容错控制变流器功率器件损耗一致, 忽略电感电容损耗、传导损耗等次要损耗的差异, 无功环流注入容错控制相比 d 轴电流注入容错控制降低了总损耗, 提升了发电效率。

4 仿真验证

为了验证提出的基于无功环流注入的三电平变流器外管开路故障容错控制策略,在Matlab/PLECS中搭建仿真系统,系统结构如图1所示,系统主要参数为:额定功率 2 MW;额定频率 14.4 Hz;额定转速 18 r/min;额定线电压 690 V;极对数 40;定子相电阻 $0.007\ 3\ \Omega$; d/q 轴电感 1.3/2.3 mH;磁链 6 Wb。以变流器1外管 S_{a1} 开路故障为例进行仿真验证,并对比 d 轴电流注入容错控制与无功环流注入容错控制的性能。仿真工况为:永磁发电机转速 18 r/min,发电功率 1 MW。

图6分别给出了变流器1外管 S_{a1} 开路故障后 d 轴电流注入容错控制下故障变流器1的三相电流波形,故障桥臂 a_1 的相电压、电流波形,变流器1、变流器2的 d 轴电流和发电机电磁转矩波形。

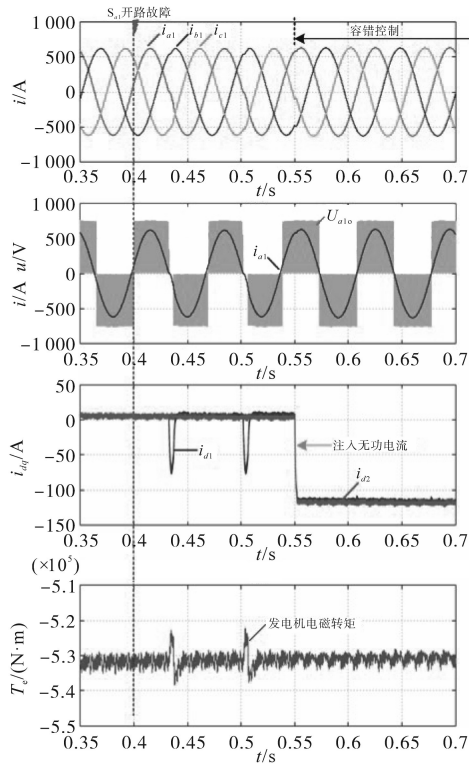


图6 S_{a1} 开路故障后 d 轴电流注入容错控制下并联系统的相关波形

Fig.6 Waveforms of parallel system after open-circuit fault S_{a1} under d -axis current injection fault-tolerant control

由图6可知,0.4 s时变流器1外管 S_{a1} 发生开路故障, a_1 相输出电流发生畸变,导致变流器1的 d 轴电流、发电机的电磁转矩发生脉动。0.55 s时开始 d 轴电流注入容错控制,并联系统中注入 d 轴电流,消除了 a_1 相电流由正到负过零点后的电流畸变,此时变流器1、变流器2的 d 轴电流均为-

121 A。并联系统注入的总 d 轴电流为单个变流器的两倍。通过注入 d 轴电流,消除了外管 S_{a1} 开路故障导致的电流畸变和发电机电磁转矩脉动。

图7分别给出了变流器1外管 S_{a1} 开路故障后无功环流注入容错控制下故障变流器1的三相电流波形,故障桥臂 a_1 的相电压、电流波形,变流器1、变流器2的 d 轴电流和发电机电磁转矩波形。

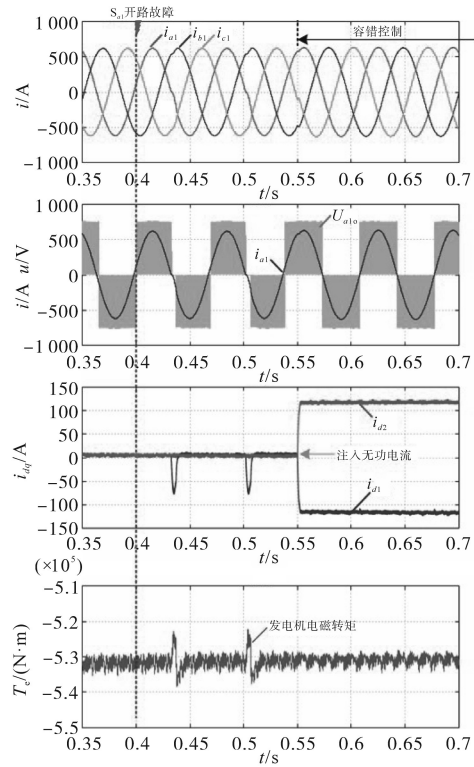


图7 S_{a1} 开路故障后无功环流注入容错控制下并联系统的相关波形

Fig.7 Waveforms of parallel system after open-circuit fault of S_{a1} under proposed reactive circulating current injection fault-tolerant control

由图7可知,0.4 s时变流器1外管 S_{a1} 发生开路故障, a_1 相输出电流发生畸变,导致变流器1的 d 轴电流、发电机的电磁转矩发生脉动。0.55 s时开始无功环流注入容错控制,并联变流器内部注入无功环流,消除了 a_1 相电流由正到负过零点后的电流畸变。此时变流器1、变流器2的 d 轴电流分别为-121 A和121 A。并联系统的总 d 轴电流为0。通过注入无功环流,消除了外管 S_{a1} 开路故障导致的电流畸变和发电机电磁转矩脉动。

由于三相系统对称性,无功环流注入之后,故障变流器1工作在单位功率因数整流状态,即变流器输出电压 U_{a10} 与电流 i_{a1} , U_{b10} 与 i_{b1} , U_{c10} 与 i_{c1} 均同相位,因此理论上三相桥臂所有外管故障均能容错运行,为验证理论正确性,进行了多个外

管故障时的仿真验证。

由于注入的无功电流只在并联变流器内部流动,并不影响系统的总 d 轴电流大小,此时永磁同步发电机仍然处于零 d 轴电流控制,提出的容错控制策略不改变系统的功率因数,避免了 d 轴电流注入容错控制对系统功率因数的改变与发电机定子绕组额外铜损的增加。

基于无功环流注入的容错控制,相比故障前,虽然不可避免地增加了变流器的功率损耗,但是可以使并联系统继续容错运行,向电网输出功率,避免了风电机组停机导致的巨大经济损失。因此,无功环流注入容错控制实现风电机组故障后容错运行,提高了系统的可用度,提升了风电机组的经济效益。

5 结论

本文针对三电平变流器外管开路故障,提出了一种无功环流注入的故障容错控制策略。注入无功环流后,故障变流器将运行在单位功率因数状态,故障外管不再有电流流过,有效降低了输出电流谐波,并提升了系统的故障运行功率。所提出的容错控制策略较 d 轴电流注入的容错控制策略,降低了发电机绕组铜耗,且不改变整个系统的功率因数。

该控制策略为软件层面上的优化,无需增加硬件成本。仿真结果验证了提出的容错控制策略的可行性,有利于提升海上风电的可靠性、可用度。

参考文献

- [1] 蔡旭,陈根,周党生,等.海上风电变流器研究现状与展望[J].全球能源互联网,2019,2(2):102-115.
Cai Xu, Chen Gen, Zhou Dangsheng, *et al.* Review and prospect on key technologies for offshore wind power converters[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 102-115.
- [2] Chen Gen, Cai Xu. Adaptive control strategy for improving the efficiency and reliability of parallel wind power converters by optimizing power allocation[J]. IEEE ACCESS, 2018, 6: 6138-6148.
- [3] 韩丽,罗朋,汤家升,等.基于H桥变流器的IGBT开路故障诊断[J].电工技术学报,2016,31(16):163-171.
Han Li, Luo Peng, Tang Jiasheng, *et al.* Fault diagnosis research based on the H bridge inverter IGBT open circuit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(16):163-171.
- [4] 杨晓冬,王崇林,史丽萍.H桥逆变器IGBT开路故障诊断方法研究[J].电机与控制学报,2014,18(5):112-118.
Yang Xiaodong, Wang Chonglin, Shi Liping. Study of IGBT open-circuit fault diagnosis method for H-bridge inverter[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(5):112-118.
- [5] 杭俊,张建忠,程明,等.基于线电压误差的永磁直驱风电系统变流器开路故障诊断[J].中国电机工程学报,2017,37(10):178-188.
Hang Jun, Zhang Jianzhong, Cheng Ming, *et al.* Fault diagnosis of open-circuit faults in converters of direct-driven permanent magnet wind power generation systems based on line voltage errors[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 178-188.
- [6] 徐殿国,刘晓峰,于泳.变频器故障诊断及容错控制研究综述[J].电工技术学报,2015,30(21):1-12.
Xu Dianguo, Liu Xiaofeng, Yu Yong. A survey on fault diagnosis and tolerant control of inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21):1-12.
- [7] Zhang W, Xu D, Enjeti P N, *et al.* Survey on fault-tolerant techniques for power electronic converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(12):6319-6331.
- [8] Naidu M, Gopalakrishnan S, Nehl T W. Fault-tolerant permanent magnet motor drive topologies for automotive x-by-wire systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(2): 841-848.
- [9] 年珩,周义杰,曾恒力.开绕组永磁同步发电机的容错控制[J].电工技术学报,2015,30(10):58-67.
Nian Heng, Zhou Yijie, Zeng Hengli. Fault-tolerant control technique of permanent magnet synchronous generator based on open winding configuration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10):58-67.
- [10] 王海兵,赵荣祥,汤胜清,等.一相开路时双三相永磁同步电机简化容错控制策略[J].电力自动化设备,2018,38(1):80-85.
Wang Haibing, Zhao Rongxiang, Tang Shengqing, *et al.* Simple fault tolerant control of dual three-phase PMSM under one phase open-circuited condition[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1):80-85.
- [11] 周长攀,杨贵杰,苏健勇,等.基于正常解耦变换的双三相永磁同步电机缺相容错控制策略[J].电工技术学报,2017,32(3):86-96.
Zhou Changpan, Yang Guijie, Su Jianyong, *et al.* The control strategy for dual three-phase PMSM based on normal decoupling transformation under fault condition due to open phases[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 86-96.
- [12] 白洪芬,朱景伟,孙军浩,等.双绕组永磁容错电机不同故障容错控制策略的比较研究[J].电工技术学报,2016,31(13):189-199.
Bai Hongfen, Zhu Jingwei, Sun Junhao, *et al.* Comparative study of different fault tolerant control strategies for dual-win-

(下转第74页)

- 心, 2019.
- Electric power informatization committee of China society of electrical engineering. Papers of 2019 annual meeting of power industry informatization[M]. Beijing: Big Data Center of State Grid Corporation of China, 2019.
- [9] 戴永新, 张紫淇, 欧阳红, 等. 电力业务中台技术标准体系研究[J]. 供用电, 2020, 37(3): 34-38.
- Dai Yongxin, Zhang Zhiqi, Ouyang Hong, *et al.* Research on technical standard system of power business middle-ground[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(3): 34-38.
- [10] 卢丹, 张中青, 余晓鹏, 等. 电网运行风险管控可视化系统架构与功能研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2020, 44(1): 87-93.
- Lu Dan, Zhang Zhongqing, Yu Xiaopeng, *et al.* Research on architecture and function of grid operation risk control visualization system[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2020, 44(1): 87-93.
- [11] 邹鑫, 路建明, 贺鹏程, 等. 智能电网调度可视化系统的设计与实现[J]. 电源技术, 2018, 42(4): 585-587.
- Zou Xin, Lu Jianming, He Pengcheng, *et al.* Design and implementation of smart grid dispatching visualization system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2018, 42(4): 585-587.
- [12] 吕蒙. H 电厂 SAP 系统项目管理模块应用案例研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- Lü Meng. Study on the application of SAP project system in H power plant[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [13] 保积元. 异构云计算平台性能评估模型的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- Bao Jiyuan. Design and implementation of performance evaluation model for heterogeneous cloud computing platform[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [14] 郭凯, 姜立新, 刘晓雨, 等. 地震异构云管理平台的技术架构设计[J]. 中国地震, 2020, 36(1): 153-161.
- Guo Kai, Jiang Lixin, Liu Xiaoyu, *et al.* Designing technical structure of heterogeneous cloud platform for earthquake[J]. Earthquake Research in China, 2020, 36(1): 153-161.
- [15] 蔡寅, 李红, 赵银刚. 基于私有云计算技术的强震预警系统应用研究[J]. 计算机应用与软件, 2016, 33(5): 1-3.
- Cai Yin, Li Hong, Zhao Yingang. Study on application of early warning system for strong earthquake based on private cloud computing technology[J]. Computer Applications and Software, 2016, 33(5): 1-3.
- [16] 王金海, 黄传河, 王晶, 等. 异构云计算体系结构及其多资源联合公平分配策略[J]. 计算机研究与发展, 2015, 52(6): 1288-1302.
- Wang Jinhai, Huang Chuanhe, Wang Jing, *et al.* A heterogeneous cloud computing architecture and multi-resource-joint fairness allocation strategy[J]. Journal of Computer Research and Development, 2015, 52(6): 1288-1302.
- [17] 王毅, 王智微, 何新. 智能电站数据中台建设与应用[J]. 中国电力, 2021, 54(3): 61-67, 176.
- Wang Yi, Wang Zhiwei, He Xin, *et al.* Data middle platform construction and application of intelligent power stations[J]. Electric Power, 2021, 54(3): 61-67, 176.
- [18] 杨敏, 何海涛, 张永强. 基于数据中台的校园数据体系设计与建设[J]. 深圳大学学报(理工版), 2020, 37(S1): 95-100.
- Yang Min, He Haitao, Zhang Yongqiang. Construction of campus global data system based on data middle office[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(S1): 95-100.

收稿日期:2021-04-06

修改稿日期:2021-05-04

(上接第58页)

- ding fault tolerant permanent magnet motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(13): 189-199.
- [13] 刘海涛, 易新强, 王东, 等. 五相感应电机缺相容错运行的全转矩范围效率优化控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1642-1653.
- Liu Haitao, Yi Xinqiang, Wang Dong, *et al.* An efficiency-optimized control strategy in the full torque operation range for five-phase induction motor under open-circuited fault conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1642-1653.
- [14] 陈根, 蔡旭. 并联型风电变流器故障重构控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4339-4349.
- Chen Gen, Cai Xu. Fault reconfigurable control for parallel wind power converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4339-4349.
- [15] Lee J S, Lee K B. Open-circuit fault-tolerant control for outer switches of three-level rectifiers in wind turbine systems[J]. Power Electronics IEEE Transactions on, 2016, 31(5): 3806-3815.
- [16] 黄伟煌, 胡书举, 许洪华. 中点钳位型中压三电平风电变流器的损耗分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 65-70.
- Huang Weihuang, Hu Shuju, Xu Honghua. Power loss analysis of NPC medium-voltage three-level converters for wind power generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 65-70.
- [17] Teichmann R, Bernet S. A comparison of three-level converters versus two-level converters for low-voltage drives, traction, and utility applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(3): 855-865.

收稿日期:2020-08-05

修改稿日期:2020-09-30