

DOI: 10.7667/PSPC151108

海上风电机组故障容错运行研究现状分析

魏书荣^{1,2}, 何之倬², 符杨², 黄苏融¹, 张路²

(1. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072; 2. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 海上风电场可及性差, 运行条件恶劣。风电机组故障率高, 故障修复时间长且维护困难, 一旦故障停运, 经济损失巨大。统计并对比分析海上风电机组和陆上风电机组的历史运行数据, 归纳海上风电机组关键部件的故障特点, 分析风力发电机组常见的电气类故障及其对系统的影响。分别从软件容错、硬件容错两个方面总结现有海上风电机组容错运行的研究现状, 归纳目前海上风电机组的容错方案, 分析现有容错方案的应用可行性。进一步指出现阶段海上风电机组故障容错存在的主要问题, 并对将来的研究热点进行了展望。

关键词: 海上风电; 海上风电机组; 电气故障; 硬件容错; 软件容错

Research status and prospect of offshore wind turbine fault tolerance

WEI Shurong^{1,2}, HE Zhizhuo², FU Yang², HUANG Surong¹, ZHANG Lu²

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Offshore wind farms have poor accessibility and bad operation conditions. Offshore wind turbines have high failure rate, long repair time and it is difficult to maintain. It will cause huge economic loss once wind turbines fail to shutdown. The history operating data of offshore and onshore wind turbines are counted and deeply analyzed, fault characteristics of key components in the offshore wind turbine are generalized. The electric faults in wind turbines and its influence on the system are analyzed. The research status of existing fault-tolerant operation in offshore wind turbines are summarized from two aspects of hardware and software fault tolerance respectively, fault-tolerant schemes of offshore wind turbines are concluded, and the application feasibility of existing fault-tolerant schemes is analyzed. The main problems of offshore wind power fault tolerance at the present stage are pointed out and the research focus in the future is prospected.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177098).

Key words: offshore wind power; offshore wind turbines; electrical fault; hardware fault-tolerance; software fault-tolerance

0 引言

海上风电具有风速高、风资源持续稳定、单机容量大、无噪声限制、不占用土地、更接近电网负荷中心便于并网与利用等巨大优势, 其规模化发展已经成为我国当前风电发展的重要任务^[1-3]。中国海上风电发展潜力巨大, 根据最新的海上风能资源普查结果, 30m 水深以内的海域风能资源约 4.9 亿 kW。

除了丰富的海上风能资源外, 中国东部沿海地区经济发达, 能源需求大; 电网结构强, 风电并网条件好。为促进海上风电产业的发展, “十二五”能源发展规划和可再生能源专项规划中提出了海上风电的发展目标, 即到 2020 年建成装机容量为 3 000×104 kW 的目标。国家能源局在发布的《全国海上风电开发建设方案(2014-2016)》中布局 44 个海上风电项目, 共计 1 053 万 kW 装机容量。随着技术瓶颈和电价政策的逐一突破, 我国海上风电将迎来井喷式增长, 正面临黄金发展十年。

随着海上风电的迅猛发展, 作为与影响风电全寿命周期度电成本的 4 项关键要素(项目投资、运维

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177098); 上海市绿色能源并网工程技术研究中心(13DZ2251900); 上海市科委科技创新项目(14DZ1200905)

成本、发电量和财务成本)息息相关的主要因素^[4], 风力发电机组在海洋恶劣环境下的安全稳定运行问题越发受到关注。海上风力发电机组具有以下特点: ①故障率高。受海洋高湿度、强腐蚀运行环境的影响, 发电机组各部件故障率高。海上风力发电机组故障表现出故障部件集中、小部件可能导致大停运的特点。②故障维修困难。海上风电场可进入性差, 维护要通过船舶或直升飞机才能靠近, 有时甚至2~3个月根本无法进行维护。如需更换大型设备, 须租用逾1000万/次的船只, 受船只数量限制, 修护极其困难。③故障停运损失巨大。以东海大桥海上风电场一期示范项目为例, 一台3 MW的海上双馈风电机组停机一个月的发电量损失达58万 kWh。由于海上风力机单机容量越来越大, 随着6 MW、10 MW等更大机型投入运行, 在丰富的海上风能资源下, 长时间的故障停运将会造成严重的经济损失。

上述因素的影响使得海上风电机组的故障容错运行受到国内外工业界和学术界的广泛关注。目前国内有关风力发电故障研究主要集中在电网故障下提高风电机组的故障穿越能力^[5-7]。如何能有效降低风电机组内部故障带来的损失, 避免重大事故发生是风电机组安全可靠运行的重要保证。迫切需要及早发现海上风电机组的电气缺陷, 通过故障辨识及预警, 及时提供有效的容错机制以优化运行情况, 使其在无法维修时还能继续发电, 尽量减少停机损失。

本文结合海上风电机组的故障特点, 主要针对风力发电机组的定、转子绕组开路, 轻微短路故障以及变流器故障, 分析其容错运行现状并比较不同容错方案的可行性, 进一步讨论了目前海上风电机组容错研究存在的主要问题和发展前景。

1 海上风电机组的故障特点

1.1 海上风电机组的故障统计与分析

欧洲地区是海上风电发展最早, 也是海上风电发展最成熟的地区。本文收集了荷兰滨海埃赫蒙德海上风电场^[8-9]的运行资料, 对欧洲地区海上风电场的运行情况进行分析。

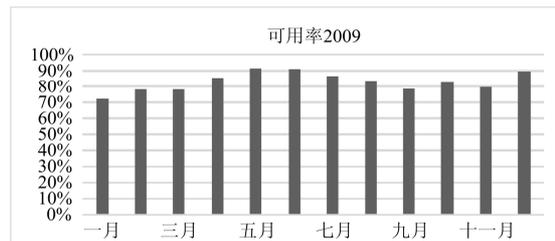
荷兰滨海埃赫蒙德(Egmond aan Zee)海上风电场(OWEZ)是荷兰第一个大型海上风力发电场。该风电场于2006年建成, 坐落在荷兰北海岸, 拥有36台3 MW Vestas海上风电机组, 总装机容量108 MW, 距离海岸线10~18 km, 可以向当地10万多户家庭用户供电。

该海上风电场2007~2009年的运行数据指出, 2007年全年总计发电量为330.06 MWh, 风电机组

每月的平均可用率在65%~95%之间具有较大的波动。具体如图1(a)所示。2007年属于该风电场并网运行的第二年, 风电机组早期故障停运主要是由于风力机变速箱引起的。在2009年, 该风电场的风电机组的34台变速箱全部更换, 并且另有8台发电机组也由于不同的故障而更换。更换后的风电机组运行可用率有了一定的改善, 机组可用率大致可以维持在70%~90%之间, 如图1(b)所示, 全年平均可用率达到83.5%。但是由于受到风速的影响, 2009年全年上网电量为315.211 MWh。



(a) 风电场2007年每月的可用率



(b) 风电场2009年每月的可用率

图1 风电场每月的可用率

Fig. 1 Availability of wind farms per month

文献[8]对该海上风电场2007~2009年三年的运维数据进行了分析, 统计了共13组部件的停运率及停运引起的系统停机时间。从图2可以看出, 该海上风电场运行的早期, 控制系统故障是海上风电机组中停运率最高的设备, 风电机组中33%左右的停运来自于控制系统, 而齿轮箱则是导致风电机组停运的主要原因, 导致机组全年10%左右的时间处于停运状态^[8]。

图3统计了13年间欧洲陆上风电的故障率和停机率^[10]。从图3可以看出, 电气系统、控制系统属于陆上机组的高故障率部件, 而齿轮箱、传动链等则属于故障率相对低的大型部件。但前者故障后造成的停机时间相对较短, 而后者会造成更长时间的停运, 从而表现出对风电场运行更大的影响。

图2统计的是部件的停运率, 图3统计的则是部件的故障率, 因此两组数据不能直接对比。但可以看出, 两者的数据分布大致相似, 都具有如下特

点: ①高故障率或者是高停运率的部件导致的系统停运时间较短, 其中电气系统(接线开关、变流器、控制系统等)的故障率或是停运率较高。②使系统停机时间最长的是齿轮箱和发电机的故障, 这一点在图 2 的海上风电机组故障统计中非常明显。

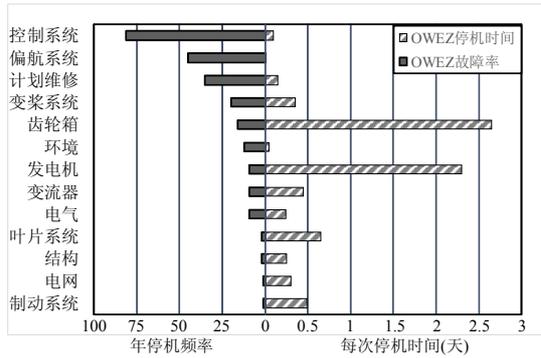


图 2 荷兰滨海埃赫蒙德海上风电场故障统计

Fig. 2 Stop rate and downtime data from OWEZ

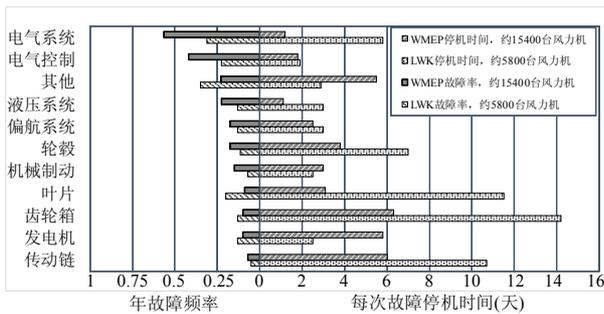


图 3 欧洲陆上风力机故障率和停机时间

Fig. 3 Failure rate and downtime data from European onshore wind turbines

1.2 电力电子变流器故障特点

文献[10]中指出在风力发电系统中, 电力电子变流器的故障占电气故障的15%, 但这个数据是在整个WEPM数据库中(含有直接并网的发电机组)得出的, 因此对于变速风力发电系统, 变流器的故障率要更高。WEPM数据库首次对变流器部件进行了分析, 指出变流器一半的故障是由半导体器件引起的, 然而这个数据是在1997~2005年获得的, 如今其可靠性是有所提高的。所以为了获得更多关于变流器可靠性的数据, 文献[11]统计了其他应用领域中变流器的故障率及故障特点, 得出如下结论: 功率半导体器件和直流电容是变流器最薄弱的环节, 一半以上的故障是由它们引起的。电力电子变流器作为维持风力机运行的最基本部件, 其可靠性就显得尤为重要。

变流器故障主要有变流器误动作、过电压、过

电流、过热、欠电压等。变流器过电压一般是指转换过程中, 中间直流回路过电压, 这将对中间直流回路滤波电容器寿命产生直接影响。变流器负载突降会使负载侧向变流器中间直流回路回馈能量, 造成直流侧短时间内能量的集中回馈, 可能会超过中间直流回路及其能量处理单元的承受能力引发过电压故障。过电流故障是由于变流器负载发生突变, 负荷分配不均, 输出短路等原因引起的。输入电源缺相时, 整流回路故障会导致欠压故障。由于以上原因会引起变流器的开关管断路、短路故障和直流电容的损坏^[12]。

1.3 风力发电机故障特点

海上风力机每年的故障率可达50%, 以发电机、变速箱、变流器的故障为主^[13]。由于长期运行在高湿度、强腐蚀等恶劣环境下, 直接影响了发电机的定、转子绕组绝缘, 加上绝缘体的自然老化和绝缘击穿等原因, 导致了风力发电机故障。常见的故障主要有定、转子绕组开路和短路故障、轴承故障和气隙偏心等故障^[14]。

随着风力发电机单机容量的增大和电压等级的提高, 同时风力发电机在电网中的比重也越来越大, 发电机的安全运行直接影响着电网的稳定性。图 4 统计了发电机的故障分布, 其中轴承的故障率为40%, 定子的故障率为38%, 转子的故障率为10%, 其他故障占12%^[15]。目前国内外学者对发电机定子、转子绕组故障及其诊断方法也有较多的研究^[16-19]。

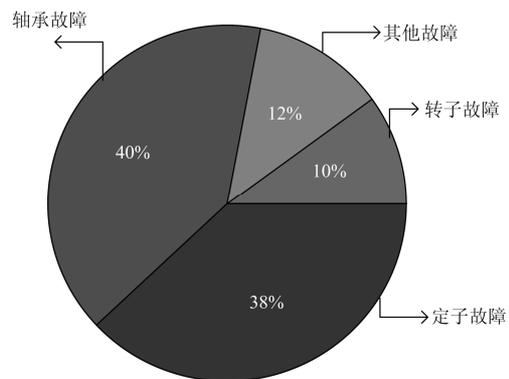


图 4 发电机故障分布

Fig. 4 Distribution of generator fault

在工程上机械故障通常是难以修复的, 只能根据机械损坏的状态来评估机械部件还能持续使用多长时间。而轻微电气故障可以通过优化控制算法和硬件重构等方式实现容错运行。

2 海上风电机组容错技术

容错, 顾名思义就是允许出错, 工程上指在系

统中，当一个或多个关键部件出现故障时，系统必须将发生故障的部件从系统中隔离开，然后采取相应措施维持其规定功能，或在可接受的性能指标变化下，继续稳定可靠运行。

故障容错可以从硬件容错、软件容错两方面考虑。硬件容错主要指故障后的硬件系统重构，着眼于风力发电机本体的容错设计和变流器的结构容错等。软件容错主要考虑故障容错控制，着眼于故障后的控制策略与算法优化。

2.1 硬件容错

2.1.1 备份式冗余设计

备份式冗余设计是在原来的系统设计中加入冗余硬件开关代替故障开关，实现容错控制。文献[20]提出了一种应用在双馈感应发电机中带有冗余桥臂的变流器拓扑。当检测到开路故障时，立即移除故障开关的门极信号实现隔离故障；当短路故障时，快速熔断器断开实现故障桥臂的隔离，触发导通对应的双向晶闸管(TRIAC)将冗余开关连接到电路中，如图5所示。图中直流母线的两个电容器可用于测量极电压，进行故障诊断。文献[21]通过FPGA实现故障检测和容错控制。

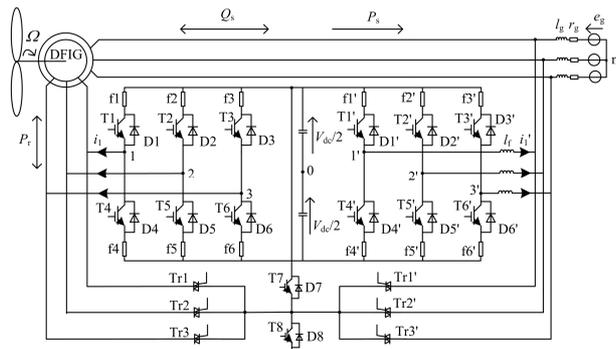


图5 带有冗余桥臂的变流器拓扑

Fig. 5 Fault-tolerant converter topologies with redundant leg

在故障的情况下，这种冗余拓扑能够保证系统性能不受影响。文献[20]基于马尔可夫链模型来判断所提出的容错拓扑结构相对故障的脱机效率。根据可靠性分析，这种方法能在不停机的情况下保证系统的最佳性能，尤其适合海上风力发电。然而，冗余备份增加了开关器件数量，电路拓扑复杂，器件相对故障率也会增加，同时成本提高。并且这种拓扑只适用于变流器故障，并不能解决电机绕组的开路、短路故障。

2.1.2 变流器的拓扑结构设计

变流器的拓扑结构设计，是在故障后改变原来的拓扑结构，配合适当的控制策略实现容错运行。

在风力发电系统中，工程中应用最多的是背靠背PWM功率变流器组成的双PWM变流器。由于永磁同步发电系统和双馈感应发电系统的拓扑结构不同，以下分别总结了两种系统的拓扑结构容错设计。

(1) 永磁同步风力发电系统容错拓扑

文献[22-24]对永磁同步风力发电机组(PMSG)的变流器容错进行了详细的研究。在永磁同步风力发电系统中，功率是单方向全功率流通，因此，IGBT开路故障后，机侧容错可以通过IGBT反并联二极管构成的整流电路实现。网侧逆变器容错更加复杂多变，需要配合有效的控制策略，因此对网侧逆变器的容错做了更多深入的研究。

网侧逆变器容错拓扑方案主要由以下几种：①将网侧变压器的星形中点通过TRIAC与直流母线电容中点相连，如图6所示。TRIAC在系统正常运行时是关断状态，当检测到网侧变流器某相故障后，隔离故障桥臂，导通TRIAC。这种方案只需增加一个硬件开关就实现了故障容错，可以有效降低系统的容错成本。②网侧变流器故障后，触发TRIAC导通，将变压器星形连接的中性点和发电机的一相连接，即五桥臂结构。这种方案的缺点是不适用两侧变流器同时故障，优点在于减少了冗余开关，在不增加直流电压等级的情况下，可以在有限的运行范围内保持良好的驱动操作。这也使得它成为提高PMSG驱动器可靠性方案中极有吸引力的方案。③三相四开关电路拓扑。与前两种方案相比，这种方案减少了电力变压器，增加了两个TRIAC。当监测到某相故障并隔离故障桥臂后，触发该相TRIAC导通直接与直流母线中点连接。方案①③由于与电容中点相连，故障相电流流过电容，会引起电容电压的波动，因此需要配合适当的电压补偿策略。

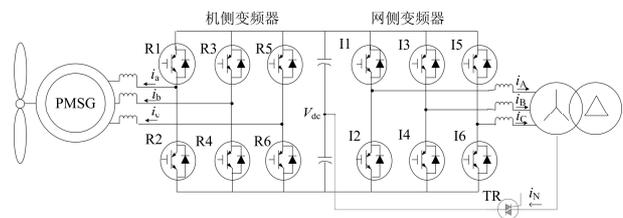


图6 带有容错变流器的永磁同步发电系统

Fig. 6 Fault-tolerant converter topologies in PMSG

文献[25]在研究变流器故障容错的基础上，考虑到电机和变压器绕组故障，提出了一种拓扑结构，如图7。在这个系统中仅需要增加两个开关SW1、SW2。系统中某相故障后，隔离故障相，触发SW1、SW2导通，将电机与变压器的中性点相连接，形成五桥臂拓扑结构。由于引出了电机和变压器的中性

点, SW1、SW2 导通后, 会出现零序电流, 因此需要考虑消除零序分量。这种方案减少了冗余开关数量, 既适用于两侧变流器一相桥臂故障, 也适用于发电机和变压器一相绕组故障。

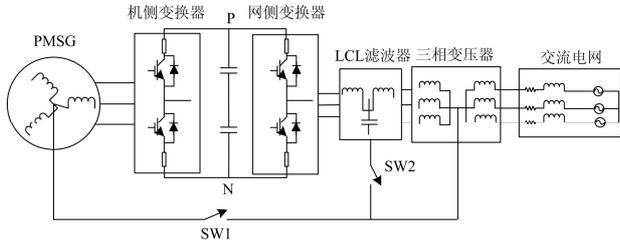


图 7 故障容错拓扑结构

Fig. 7 Fault-tolerant converter topologies

(2) 双馈异步风力发电系统容错拓扑

文献[26-28]将 6/5 桥变流器结构应用在双馈风力发电机(DFIG)中, 如图 8 所示。系统中增加三个 TRIAC(Ta、Tb、Tc)。当机侧 a 相发生故障, 隔离故障桥臂, 触发该相的 Ta 导通, 则网侧变流器的 a 相桥臂作为两侧变流器的共享桥臂, 通过适当的控制策略实现理想输出。这种方案与前文图 6 所示的拓扑相类似, 仍不适用于两侧变流器同时故障, 且增加了开关的使用频率, 潜在地提高了功率开关的故障率。

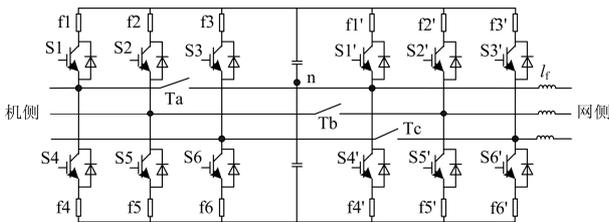


图 8 6/5 桥臂容错变流器

Fig. 8 6/5-leg fault-tolerant converter

文献[29]将三相四开关电路拓扑应用于双馈风力发电系统中的容错运行中, 如图 9 所示。通过 TRIAC 将故障相与直流中点相连并对双馈风力发电机的机侧和网侧变流器的单相开路故障容错分别进行了仿真验证。

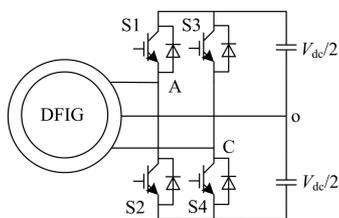


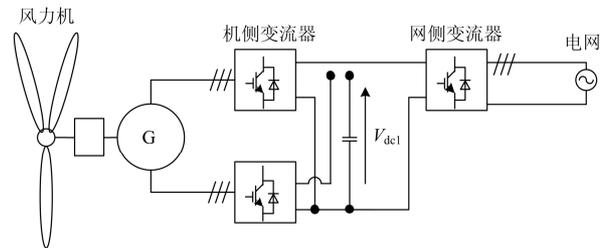
图 9 与直流中点相连的四开关变流器

Fig. 9 Four-switch topology with dc-link midpoint connection

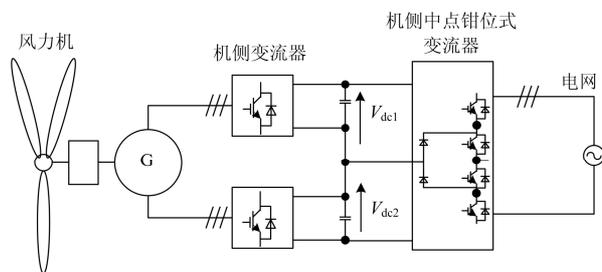
2.1.3 多相电机

多相电机具有较低的转矩脉动, 更高的容错性能和较小的单相额定功率^[30]。这些理想的特性使多相电机在大功率和高可靠性的系统中具有很大的发展潜力。包括五相电机^[31]、六相电机^[32-34]、九相电机^[35]、十二相电机^[36]、甚至十八相电机^[37], 其中的大多数都和风力发电系统相关。由于近年来风力机容量的不断增加和可靠性要求的提高(尤其是海上风电场), 使得多相电机的优势更加突出。大功率变流器常常是由许多单元级联而成, 大功率电机的绕组通常也由许多并联的线圈组成。因此, 电机和电力电子电路可以通过重新配置应用在多相发电系统中, 并且不需要增加硬件。当一相故障或缺失, 功率损失比一般电机小的多。

具有背靠背结构变流器的多相变速驱动系统中, 机侧通常是两电平或三电平的电压源变流器(VSCs)^[30]。多相发电机的研究也集中于 n 相 VSCs 或二极管整流器的应用, 这完全取决于电机的类型。一种六相多级感应发电机^[34]如图 10 所示。图 10(a)中是两个并联三相 VSCs 驱动的六相风力发电系统, 这是一种典型的非对称六相电机变速驱动的拓扑。图 10(b)则是对称六相发电系统(永磁同步电机), 机侧是两个串联的三相变流器, 网侧是三电平中点嵌位变流器, 并与直流环节的中点相连, 这种结构既可以用于永磁同步电机也可以用于感应电机。然而直流环节与网侧变流器的三线连接时需要慎重考虑其经济性, 尤其是在网侧变流器放置较远的情况



(a) 并联机侧变流器



(b) 串联机侧变流器

图 10 六相感应电机系统

Fig. 10 Six-phase generator system

下^[28]，当然，在高压直流输电的海上风电场中可以考虑这种拓扑结构。随着海上风电场装机容量的增加，大功率高可靠性的需求日益增强，高压直流输电的优势不断凸显。文献[38]详细研究了基于无变压器概念的永磁同步风力发电系统，并可以实现100 kV的直流输出。该系统中每三相绕组组成一个三相发电机模块，且每组的三相定子绕组之间电气隔离。三相定子绕组连接到一个VSC模块。VSC模块串联到直流侧，即在没有变压器的情况下，定子绕组上有较小的交流电压而变流器将会输出很高的直流电压。这种拓扑非常适合直流并网的远距离海上风力发电^[38]。

2.2 软件容错

2.2.1 脉宽调制算法改进

脉宽调制(PWM)技术是变流器控制的核心技术，而空间矢量脉宽调制(SVPWM)具有电压利用率高，易于数字化实现和优化等优点而广泛应用于电力电子变换和交流传动领域。SVPWM是在矢量空间用有限的静止矢量去合成和跟踪调制波的空间旋转矢量，使合成的空间矢量含有调制波的信息。传统的六开关PWM变流器的8个静止矢量按一定的规律切换可以在矢量空间用合成旋转的电压空间矢量来逼近电压矢量圆，从而形成SVPWM波形。

当监测到变流器某一个开关器件短路或断路后，短时间内并不会对系统造成严重的影响，只是会降低系统的性能和可靠性。变流器中某一个IGBT故障后，由于其反并联的二极管仍是完好的，变流器仍可以在三相条件下运行，但电压矢量会产生畸变。

文献[39]对不同扇区正常和故障后的电压矢量进行了分析，得出合成电压矢量畸变原因，最终给出了发生畸变的两种情况：一种由零矢量引起的畸变，另一种是由零矢量和有效矢量共同引起的畸变。因此可用一个正常矢量来补偿代替发生畸变的矢量。这种单纯使用软件容错的方法只适用于变流器的单个IGBT故障。

2.2.2 矢量控制

在风力发电系统中，矢量控制是把电流分解为*d*轴电流和*q*轴电流，分别加以控制。通过前馈解耦控制得到*d-q*坐标系下电压参考值，再经过坐标变换得到电压指令信号，进行PWM调制。因此在运用矢量控制的容错系统中，一般是对PWM调制方法进行改进，使系统良好稳定运行。

(1) 四开关PWM调制

前文四开关三相电路拓扑中，由于一相电流流过直流电容中点，将引起直流电压波动和输出电流畸变。而导致母线电容中点电压波动的最主要原因

则是故障相电流对母线电容的充放电，由式(1)可以看出，波动电压与电流幅值成正比，与电容值*C*和电流频率 ω 成反比，这也是四开关三相系统低频特性差的原因^[40]。因此可以通过加大电容值或加大增加电机运行频率来减小直流电压的波动。

$$\Delta U = \frac{I_a}{j2\omega C} \quad (1)$$

在实际系统中电容容量是有限的，为了减小或消除不平衡电压对逆变器输出电压的影响，最好在程序中对基本电压矢量的作用时间进行修正，对不平衡电压进行补偿。

四开关SVPWM也是在矢量空间上用静止的矢量合成电压矢量圆，但四开关变流器只有四个开关矢量，且没有零矢量。一般用两个相反矢量或采用有效矢量来等效零矢量的作用^[41-42]。文献[43]提出了一种自适应的空间矢量调制方法，可以补偿直流电压波动和转矩脉动，但也需要复杂的计算和高频开关转换。文献[44-45]提出的四开关SVPWM控制策略在一个开关周期内只需要三个开关状态，是一种简捷有效的补偿策略。文献[46]揭示了四开关逆变器SVPWM控制的实质是以两路相位相差 $\pi/3$ 角度的正弦波为隐含调制函数的SPWM控制，并提出了七段式实现方法和过调制方法，以减少开关频率和提高直流电压的利用率。

(2) 五桥臂变流器PWM调制

文献[26]提出了两种五桥臂变流器的PWM控制策略，即双零序信号注入法。将零序信号分别加入五个参考电压矢量，零序信号不会改变输出的线电压和相电压，只是作为一个自由度减少电流谐波和提高直流电压的利用率。

2.2.3 直接功率控制与直接转矩控制

双馈电机的直接转矩控制(DTC)是通过电压矢量来控制转子磁链矢量，使电机转矩和磁链同时按要求快速变化，从而控制电机转速。因此直接转矩控制的关键就是建立磁链和逆变器开关模式之间的关系。直接功率控制(DPC)的控制思想源自于电动机的直接转矩控制策略^[39]，在电网电压发生不平衡故障时，DPC仍然能够保持有功、无功功率(电磁转矩)恒定。大型发电机系统中，这两种控制方法存在很多缺点，例如直接转矩控制低速性能差，转矩脉动大；直接功率控制在电网不平衡的情况下会造成电流畸变严重、谐波大等问题，很多文献都对这两种方法进行了优化^[47-48]。DTC和DPC避免了复杂的解耦运算，对电机参数不敏感，简单易行。

文献[23]将DTC和DPC分别应用在永磁同步发电机机侧变流器和网侧变流器的故障容错控制

中, 并重新制定开关表, 从而稳定直流电压, 减小转矩脉动, 降低谐波。其中 DTC 和 DPC 的控制核心仍是对四开关拓扑的电压矢量控制进行合理的改进。

2.2.4 滞环电流控制

电流滞环跟踪控制是将三相电流给定信号和检测到的三相电流信号比较, 若实际电流大于给定值, 则通过变流器使之减小, 反之增大, 电流波形围绕给定值变化, 并将偏差限制在一定范围内。

在容错系统中, 若没有零序通路, 即系统与网侧不共地, 由于此时只需控制正常的两相桥臂就可间接地控制第三相。A 相故障隔离后的三相电流如式(2), B、C 相电流相位位移 $\pi/3$, 幅值为原来的 $\sqrt{3}$ 倍。因此只要控制两相电流相位相差即可。文献[22]和文献[24]重新对参考电流进行计算, 并引入直流

电压波动反馈, 将参考电流和测量的实际电流差值进行滞环比较, 产生 PWM 信号。

$$\begin{aligned} i_B &= \sqrt{3}I_m \cos\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{6}\right) \\ i_C &= \sqrt{3}I_m \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{6}\right) \\ i_N &= i_B + i_C = 3I_m \cos(\omega t + \varphi + \pi) \end{aligned} \quad (2)$$

滞环电流控制通过控制环宽可使电流快速跟踪, 而且对电路参数依赖性小, 系统鲁棒性好, 受电容电压波动影响小。然而, 该控制方法不能做到开关频率恒定, 且存在稳态误差^[49]。

表 1 系统地总结了风力发电发电机组的容错现状, 在如今风力发电技术研究的基础上分析指出容错方案的应用可行性。

表 1 故障容错方法

Table 1 Fault tolerance methods

容错方法	电路拓扑		控制方法		是否增加硬件开关	应用可行性	
	故障前	故障后	故障前	故障后			
软件容错	背靠背 PWM 变流器	背靠背 PWM 变流器	基于 SVPWM 矢量控制	改进 SVPWM 矢量控制	否	0	
硬件容错结合软件优化	备份式冗余设计	背靠背 PWM 变流器	冗余桥臂代替故障桥臂	矢量控制	矢量控制	是	0
	变流器结构冗余型	背靠背 PWM 变流器	故障侧三相四开关变流器	矢量控制	基于四开关 SVPWM 矢量控制; 直接转矩控制; 直接功率控制; 滞环电流控制	是	+
	6/5 桥臂型	背靠背 PWM 变流器	五桥臂变流器	矢量控制	基于零序分量注入法的矢量控制	是	+
多相电机	串联或并联的多电平变流器	故障相隔离, 系统缺相运行	多相电机 SVPWM 矢量控制	缺相改进 SVPWM 矢量控制	否	-	

注: + 强化研究工程应用; - 弱化研究工程应用; 0 维持现状

从表 1 中可以看出: 备份式冗余设计在硬件上增加冗余桥臂, 代替故障桥臂, 无论是在硬件还是在软件上不会有太大的改变。多相电机虽然是现在海上风电机组的研究热点, 但现在还处在实验研究阶段, 未能大范围的应用。大量文献集中研究风电机组软件容错和变流器容错拓扑结构的设计^[20-29], 这些方法也可以运用在现阶段海上风力发电机组的轻微故障容错中。

3 热点与展望

3.1 容错技术研究热点

从国内外研究可以看出, 现阶段风力发电机组

容错研究主要集中在以下两个方面:

(1) 容错拓扑结构的改进。在海上风力发电中, 主要采用的是双 PWM 变流器。其中开关器件的高故障引起很多学者的关注, 因此发电机组故障容错更是成为研究的热点问题。

(2) 控制算法的优化。许多文献将三相四开关电路拓扑应用在故障容错中, 并对其控制算法进行了大量的总结研究, 集中研究优化四个开关电压矢量及其在每个周期内作用时间的分配, 使这种方案更好地应用在风力发电系统中。

3.2 海上风力发电机组容错研究展望

结合本文对风力发电机组故障容错技术的总结

分析,目前海上风力发电机组容错在以下方面还面临巨大挑战:

(1)精确的电机故障模型。现阶段对海上风力发电机组故障容错研究主要集中在永磁风力发电机组,只有少数文献关注于双馈风力发电机组的容错。而双馈风力发电机已成为海上发电机的主流机型。由于缺乏精确的便于与变流器及控制系统连接的故障模型,导致目前对DFIG容错运行的研究主要针对变流器故障。事实上DFIG绕组开路、短路故障的容错研究同样重要,精确的故障模型是一个有效的突破口,虽有文献建立了双馈电机的故障模型,但是只考虑了电机本体,没有与变流器及其控制系统连接后综合考虑其并网运行状态下的故障及容错运行特性。

(2)量化的故障预警门槛。目前对于风电机组故障诊断的方法较多,但是缺乏故障预警量化的参照标准。为及时提供有效的容错机制,必须量化故障预警门槛以保证故障辨识的准确性、及时性及有效性。

(3)挖掘现有系统的容错潜力。目前故障容错大多采用冗余备份(多相电机也属于冗余的一种情况)措施来解决,除结构复杂、成本高昂以外,还受风力机舱空间体积的限制,因此需要深度挖掘现有系统的容错潜力,在现有硬件结构的微小改变的基础上大大提高机组的容错能力。

(4)缺乏评估容错能力的指标体系。目前仍没有一套完整的容错指标来评价一个系统的容错运行能力,而更多的是采用可靠性来评估。而提高系统可靠性的一个基本方法就是使用容错技术,即一个系统在出现运行性故障时能够依靠系统内在的能力保持系统连续正常的运行。现阶段大多数容错性能研究是将故障前和故障容错后的一些性能进行对比分析,例如,对比故障前后电流电压幅值,转矩、直流电压的脉动以及功率输出等。而对于大型海上风力发电机组来说,更要考虑故障容错后系统的等效停运率是否能降低,容错拓扑所增加的硬件成本能否在计及电能损失后仍具有良好的经济效益,风电机组能否安全可靠持续运行。这些方面都是减少故障率,降低维修成本的关键,因此,很有必要建立一套以耐久性为导向的故障容错指标体系。这也将是今后容错研究的一个方向。

4 结论

本文首先对比分析了陆上与海上风电机组的故障数据,总结了海上风电的故障特点及容错技术的必要性。结合国内外学者的研究现状,总结了适用

于海上风力发电机组的容错方法,并对现有的硬件容错和软件容错方案的优缺点及可行性进行了归纳总结。最后,指出现阶段海上风力发电机组容错技术所面临的挑战及未来的发展方向,为今后海上风力发电故障容错研究提供参考。

致谢

本文的研究得到了“电气工程”上海市II类高原学科和上海市电站自动化技术重点实验室资助,谨此致谢!

参考文献

- [1] WANG Zhixin, JIANG Chuanwen, AI Qian, et al. The key technology of offshore wind farm and its new development in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(1): 216-222.
- [2] YANG Xia, SONG Yonghua, WANG Guanhui, et al. A comprehensive review on the development of sustainable energy strategy and implementation in China[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2010, 1(2): 57-65.
- [3] 尹明,葛旭波,王成山,等.我国风电大规模开发相关问题探讨[J].*中国电力*, 2010, 43(3): 59-62.
YIN Ming, GE Xubo, WANG Chengshan, et al. analysis of issues about China's large-scale wind power development[J]. *Electric Power*, 2010, 43(3): 59-62.
- [4] 时轶,崔新维,李春兰,等.在线监测系统在风力发电机上的应用[J].*风机技术*, 2007(4): 74-76.
SHI Yi, CUI Xinwei, LI Chunlan, et al. The application of on-line monitor system on anemo-electric generator[J]. *Compressor, Blower & Fan Technology*, 2007(4): 74-76.
- [5] 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定子电流分析[J].*电力系统保护与控制*, 2015, 43(1): 81-87.
ZHENG Tao, LI Juan, YANG Guosheng. Stator current analysis of doubly-fed induction generators considering different grid voltage dip levels[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(1): 81-87.
- [6] 赵霞,王倩,邵彬,等.双馈感应风力发电系统低电压穿越控制策略研究及其分析[J].*电力系统保护与控制*, 2015, 43(16): 57-64.
ZHAO Xia, WANG Qian, SHAO Bin, et al. Low voltage ride through control strategy and its analysis of doubly fed induction generator[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(16): 57-64.
- [7] 沈浩然,张建华,丁磊,等.双馈异步发电机单相接地故障瞬态特性研究[J].*电力系统保护与控制*, 2015, 43(18): 6-11.
SHEN Haoran, ZHANG Jianhua, DING Lei, et al. Transient characteristic research of doubly-fed induction generator during single-phase grounding fault[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(18): 6-11.

- [8] NordzeeWind. Offshore wind farm Egmond AAN Zee general report[EB/OL]. [2008]. <http://www.noordzeewind.nl/en/knowledge/reportsdata/>.
- [9] NordzeeWind. Wind farm Egmond AAN Zee operations reports[EB/OL]. [2007-2008]. <http://www.noordzeewind.nl/en/knowledge/reportsdata/>.
- [10] BOETTCHER M, FUCHS F. Power electronic converters in wind energy systems — considerations of reliability and strategies for increasing availability[C] // Proceedings of the European Conference on Power Electronics and Applications, Birmingham, August 30-September 1, 2011: 1-10.
- [11] ZHU P, LIU Y, ROBERT R, et al. Offshore wind converter reliability evaluation[C] // IEEE International Conference on Power Electronics and ECCE Asia in Korea, Jeju, May 30-June 3, 2011: 966-971.
- [12] DINWOODIE I, MCMILLAN D, QUAIL F. Analysis of offshore wind turbine operation & maintenance using a novel time domain meteo-ocean modeling approach[C] // Proceedings of ASME Turbo Expo, 2012: 1-11.
- [13] SPAHI E, UNDERBRINK A, BUCHERT V, et al. Reliability model of large offshore wind farms[C] // IEEE Bucharest Power Tech Conference, Bucharest, June 28-July 2, 2009: 1-6.
- [14] CRABTREE C. Operational and reliability analysis of offshore wind farms[C] // European Wind Energy Conference, Copenhagen, 2012.
- [15] POPA L M, JENSEN B B, RITCHIE E, et al. Condition monitoring of wind generators[C] // IEEE Conference Record of the Industry Applications, October 12-16, 2003, 3: 1839-1846.
- [16] GRITLI Y, STEFANI A, FILIPPETTI F, et al. Stator fault analysis based on wavelet technique for wind turbines equipped with DFIG[C] // IEEE International Conference on Clean Electrical Power in Italy, Capri, June 9-11, 2009: 485-491.
- [17] 李俊卿, 王栋. 双馈感应发电机转子匝间短路时定子电流谐波分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 71-76.
LI Junqing, WANG Dong. Analysis on stator current harmonics characteristics with rotor winding inter-turn short circuit fault in DFIG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 71-76.
- [18] 魏书荣, 符杨, 马宏忠. 双馈风力发电机定子绕组匝间短路诊断与实验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 25-28.
WEI Shurong, FU Yang, MA Hongzhong. Stator winding inter-turn short-circuit diagnosis and experimental research on doubly-fed wind generator[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 25-28.
- [19] 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, 41(12): 41-46.
HE Shan, WANG Weiqing, ZHANG Xinyan, et al. Simulation study of multiple short-circuit fault electromagnetic field about DFIG in wind power[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 41-46.
- [20] WEBER P, POURE P, THEILLIOL D, et al. Design of hardware fault tolerant control architecture for wind energy conversion system with DFIG based on reliability analysis[C] // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge, 2008: 2323-2328.
- [21] SHAHBAZI M, ZOLGHADRI M R, POURE P, et al. Wind energy conversion system based on DFIG with open switch fault tolerant six-legs AC-DC-AC converter[C] // IEEE International Conference on Industrial Technology, Cape Town, 2013: 1656-1661.
- [22] FREIRE N M A, CARDOSO A J M. A fault-tolerant PMSG drive for wind turbine applications with minimal increase of the hardware requirements[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 50(3): 2039-2049.
- [23] FREIRE N M A, CARDOSO A J M. A fault-tolerant direct controlled PMSG drive for wind energy conversion systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(2): 821-834.
- [24] FREIRE N M A, CARDOSO A J M. Fault-tolerant PMSG drive with reduced DC-link ratings for wind turbine applications[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(1): 26-34.
- [25] SCARCELL G, SCELBA G, PULVIRENTI M, et al. A fault-tolerant power conversion topology for PMSG based wind power systems[C] // International Conference on Electrical Machines, Berlin, 2014: 1688-1696.
- [26] SHAHBAZI M, POURE P, SAADATE S, et al. Five-leg converter topology for wind energy conversion system with doubly-fed induction generator[J]. Renewable Energy, 2011, 36(11): 3187-3194.
- [27] SHAHBAZI M, POURE P, SAADATE S, et al. FPGA-based reconfigurable control for fault-tolerant back-to-back converter without redundancy[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 60(8): 3360-3371.
- [28] SHAHBAZI M, POURE P, SAADATE S, et al. Fault-tolerant five-leg converter topology with FPGA-based reconfigurable control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(6): 2284-2294.
- [29] SAE-KOK W, GRANT D M, WILLIAMS B W. System reconfiguration under open-switch faults in a doubly fed induction machine[J]. IET Renewable Power Generation, 2010, 4(5): 458-470.
- [30] LEVI E, BOJOI R, PROFUMO F, et al. Multiphase induction motor drives — a technology status review[J]. IET Electronics Power Application, 2007, 1(4): 489-516.
- [31] HASSANAIN N E A M, FLETCHER J E. Steady-state performance assessment of three-and five-phase permanent magnet generators connected to a diode bridge

- rectifier under open-circuit faults[J]. IET Renewable Power Generation, 2010, 4(5): 420-427.
- [32] YUAN X, CHAI J, LI Y. A transformer-less high-power converter for large permanent magnet wind generator systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(3): 318-329.
- [33] BU F, HUANG W, HU Y, et al. An integrated AC and DC hybrid generation system using dual-stator-winding induction generator with static excitation controller[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(3): 810-812.
- [34] CHE H S, LEVI E, JONES M, et al. Operation of a six-phase induction machine using series-connected machine-side converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(1): 164-176.
- [35] BRISSET S, VIZIREANU D, BROCHET P. Design and optimization of a nine-phase axial-flux PM synchronous generator with concentrated winding for direct-drive wind turbine[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(3): 707-715.
- [36] ZHANG Z, YAN Y, YANG S, et al. Development of a new permanent magnet BLDC generator using 12-phase half-wave rectifier[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 2023-2029.
- [37] ANDRESEN B, BIRK J. A high power density converter system for the Gamesa G10x 4,5 MW wind turbine[C] // European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, September 2-5, 2007: 1-8.
- [38] GJERDE S, OLSEN P, LJOKELSOY K, et al. Control and fault handling in a modular series-connected converter for a transformerless 100 kV low-weight offshore wind turbine[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(2): 1094-1105.
- [39] IM W S, KIM J M, LEE D C, et al. Diagnosis and fault-tolerant control of three-phase AC-DC PWM converter systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(4): 1539-1547.
- [40] KIM G T, LIPO T A. VSI-PWM rectifier/inverter system with a reduced switch count[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(6): 1331-1337.
- [41] BLAABJERG F, FREYSSON S, HANSEN H H, et al. A new optimized space-vector modulation strategy for a component-minimized voltage source inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(4): 704-714.
- [42] 孙丹, 何宗元, BLANCO I Y, 等. 四开关逆变器供电永磁同步电机直接转矩控制系统转矩脉动抑制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(21): 47-52.
SUN Dan, HE Zongyuan, BLANCO I Y, et al. Torque ripple reduction for a four switch inverter fed PMSM DTC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(21): 47-52.
- [43] BLAABJERG F, NEACSU D O, PEDERSEN J K. Adaptive SVM to compensate DC-link voltage ripple for four-switch three-phase voltage-source inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1999, 14(4): 743-752.
- [44] PETERS G L, COVIC G A, BOYS J T. Eliminating output distortion in four-switch inverters with three-phase loads[J]. IEEE Proceedings of the Electric Power Applications, 1998, 145(4): 326-332.
- [45] COVIC G A, PETERS G L. DC link imbalance compensation in four-switch inverter AC motor drives[J]. Electronics Letters, 1997, 33(13): 1101-1102.
- [46] 安群涛, 孙醒涛, 赵克, 等. 容错三相四开关逆变器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(3): 14-20.
AN Quntao, SUN Xingtao, ZHAO Ke, et al. Control strategy for fault-tolerant three-phase four-switch inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(3): 14-20.
- [47] 徐艳平, 钟彦儒. 扇区细分和占空比控制相结合的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 102-108.
XU Yanping, ZHONG Yanru. Sectors subdivision and duty ratio control combined direct torque control for permanent magnet synchronous motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(3): 102-108.
- [48] 李生民, 何欢欢, 张玉坤, 等. 基于滑模变结构的双馈风力发电机直接功率控制策略研究[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 2006-2010.
LI Shengmin, HE Huanhuan, ZHANG Yukun, et al. A sliding mode variable structure-based direct power control strategy for doubly fed induction generator[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 2006-2010.
- [49] 杨坤, 赵金, 王瑞, 等. 桥臂损坏下三相 PWM 整流器的容错及其控制策略[J]. 电气传动, 2010, 40(8): 42-45.
YANG Kun, ZHAO Jin, WANG Rui, et al. Tolerance and its control strategies of three phase PWM rectifier after the damage to bridge leg[J]. Electric Drive, 2010, 40(8): 42-45.

收稿日期: 2015-06-30; 修回日期: 2015-08-04

作者简介:

魏书荣(1980-), 女, 博士, 副教授, 主要从事海上风电优化规划与故障容错研究; E-mail: wsrmail@163.com

何之倬(1990-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为海上风力发电机组故障容错; E-mail: carolhecha@sina.com

符杨(1965-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统分析、风力发电并网技术研究及海上风电优化设计研究。
E-mail: fudong@126.com

(编辑 魏小丽)