

# 直驱永磁风力发电系统可靠性技术综述

邓秋玲<sup>1</sup>, 姚建刚<sup>1</sup>, 黄守道<sup>1</sup>, 吴蓉<sup>2</sup>, 王良之<sup>2</sup>, 王卿明<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082; 2. 西昌电业局, 四川省 西昌市 615000)

## An Overview on Reliability Technology for Direct Drive Permanent Magnet Wind Power Generation System

DENG Qiuling<sup>1</sup>, YAO Jiangan<sup>1</sup>, HUANG Shoudao<sup>1</sup>, WU Rong<sup>2</sup>, WANG Liangzhi<sup>2</sup>, WANG Qingming<sup>2</sup>

(1. Institute of Electric and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China;

2. Xichang Power Supply Company, Xichang 615000, Sichuan Province, China)

**ABSTRACT:** With the increase of wind-generated electricity injected into power grid, the interaction between wind power generation sets and power grid becomes more and more evident, therefore power grid makes a higher requirement for the uninterrupted operation ability of wind power generation sets under external faults occurred in power grid and internal faults occurred in wind power generation sets. The basic theory of reliability is presented and the possible faults occurred in wind power generation sets, converters and power grid are analyzed; the measures to improve the reliability of direct drive permanent magnet wind power generation system are summarized and evaluated; the main development trend of reliability technology for wind power generation system in future is discussed to offer theoretical basis for the development of direct drive permanent magnet wind power generation system with fault-tolerant ability and high reliability.

**KEY WORDS:** direct drive permanent magnet wind power generator; reliability; fault tolerance; redundancy

**摘要:** 随着电力系统中风电量的增加, 发电机组与电网之间的相互影响越来越大, 电力系统对并网风力发电机组在外部电网故障和机组内部故障下的不间断运行能力提出了更高的要求。介绍了可靠性基本理论, 分析了电机、变流器和电网的可能故障, 总结和评价了各种提高直驱永磁风电系统可靠性技术的措施, 讨论了未来风力发电系统可靠性技术发展的主要方向, 为研究具有故障容错能力和高可靠性的直驱永磁风力发电系统提供了理论基础。

**关键词:** 直驱永磁风力发电机; 可靠性; 故障容错; 冗余

## 0 引言

随着风电机组容量的快速提高, 发电机组与电网之间的相互影响也越来越大, 它直接影响到所并

电网的运行稳定性和电能质量<sup>[1]</sup>。实际运行中, 电网故障又会导致风电机组端电压降低, 引起机组电流增加、直流母线电压快速升高、电机转子加速等, 这有可能损坏机组元器件, 进而导致风电机组的保护性切机, 引起电网的扩大化故障, 给电网的恢复稳定运行造成严重的负面影响。我国大型风电技术刚刚起步, 风电场所联电网多为弱电网, 因发电机组故障而引起的停机将对电网造成极大的影响。因此, 从电网的安全角度考虑要求风电机组应能在电网故障下持续运行而不退出电网, 同时考虑到可靠性和运行效率、维护成本, 对机组的容错能力也提出了很高的要求<sup>[2-3]</sup>。

近年来国际上直驱永磁同步风电技术发展的主要趋势是从正常运行控制转向电网故障下的运行控制, 其中较为关注的技术内容有: 电网故障对永磁同步发电机组的影响和相应的保护策略; 永磁同步发电机的低电压穿越技术和适应电网故障的永磁同步风力发电机控制模型与控制策略等技术<sup>[4-5]</sup>。这些研究主要集中在电网故障方面, 对永磁同步发电机和交流系统本身的故障情况研究还很少。

本文将风力发电系统可靠运行的概念从外部电网故障下的低电压穿越运行拓展到内部故障(发电机和变流器故障)下的机组容错运行, 以期研究具有故障容错能力和高可靠性的直驱永磁风力发电系统提供理论基础。

## 1 可靠性基本理论

通常的冗余技术主要有 2 种: 贮备冗余和工作冗余。前者是系统的冗余元件处于备用状态; 后者是系统的冗余元件处于运行状态。在电机驱动系统

中,通常将储备冗余简称为冗余,而将工作冗余称为容错。因此可将可靠性技术归纳为冗余和容错2种方法,容错是指系统在其中的一个元件出现故障后还能连续运行的能力,但运行的质量可能下降<sup>[6]</sup>。因此,在故障容错系统中,系统中的一个故障并不会引起整个系统的故障。故障容错系统减少了停机时间,提高了系统的可用率。

获得高可靠性的措施<sup>[3]</sup>有:

1) 故障预防和故障排除。避免使用可靠性低的元件和技术,在系统建成后进入正常运行之前进行严格的测试,以便发现制造缺陷并及早排除。

2) 故障预测和故障避免。在系统正常运行期间,通过诊断可以预测故障的存在。若诊断系统检测到某些元件的功能出现下降时,应在系统出现故障前的正常维护期间进行更换,也可以改变系统运行状态,减轻该元件的负荷,延长其使用寿命。

3) 故障容错。对于具有故障容错的系统,当系统中出现一个故障后,该系统还能继续运行。这对于那些在很短时间和瞬时发生的故障来讲是特别重要的,如许多电力电子故障。

4) 故障修理和故障维护。当一个元件出现故障时,重要的是能够进行修理,而不是把整个系统废弃。这意味着要设计出维护性良好的系统。

为了使系统具有故障容错能力,需要注意以下几个方面:

1) 分区和冗余。当一个部分出现故障时,另一部分应能继续运行。

2) 故障检测、诊断。当故障出现时,系统要能快速检测到故障,以便采取适当措施使系统继续运行。

3) 控制策略调整。检测到一个故障后,应能调整系统的控制策略,以使系统继续运行。

4) 故障隔离和抑制。出现故障后,为确保系统能够连续运行,必须对故障进行隔离,抑制故障扩大,尽量降低故障对系统中其它元件的影响。

5) 故障报告。当检测到故障后应能及时报告,以便在合适的时候替换掉故障元件。

具有高可靠性的故障容错系统有很大的吸引力,但它也会增加系统额外的投入,因此要根据系统应用的需要来确定。

## 2 风力发电系统的主要故障

### 2.1 电机中出现的故障

文献<sup>[7]</sup>对瑞典2000—2004年期间风电场的故

障情况进行了统计,其中变流器故障占17.5%,传感器故障占14.1%,控制系统故障占12.9%,发电机故障占5.5%。可以看出,这些和电气控制相关的故障占了一半。齿轮箱故障、变桨系统故障和偏航系统故障等占了另一半。与双馈异步风力发电机组相比,直驱风力发电机组因取消了容易出故障的齿轮箱和滑环,故提高了系统的可靠性<sup>[8]</sup>。

同步电机通常存在2套绕组:励磁绕组和电枢绕组,因此电机本体内的主要电气故障就表现为这2套绕组的短路和断路故障。而永磁电机的励磁磁场由永磁体提供,所以电机内只存在电枢绕组,而无励磁绕组,因此在同等条件下发生绕组故障的可能性有所降低。当然永磁电机也存在永磁体高温退磁故障的可能。

风力发电机的故障率显著地高于其它领域中电机的故障率,理由是负荷的连续变化引起热循环不良而损坏绝缘,因此电机绕组的故障是电机故障的主要部分。永磁电机本体的电气故障有:绕组开路;绕组相间短路;绕组出线端短路;绕组匝间短路;绕组接地短路;永磁体退磁。

### 2.2 功率变流器的故障

永磁直驱风电系统采用的是全功率变流器,机组发出的电能全部通过变流器传送到电网,因此该变流器是系统的核心部件和脆弱环节。一些文献就变流器各个部分的故障分别进行了讨论,得出了一些结论<sup>[3]</sup>:电力电子元件的可靠性与控制系统的可靠性接近,变流器的可靠性明显低于电机的可靠性。功率变换器的故障形式有:电力器件开路;电力器件短路;直流链电容故障。

### 2.3 电网故障

从电网故障对风力发电机组的影响来区分,电网故障可以分2种:一种为电网三相短路造成的电网电压对称跌落或相位突变;另一种是由于单相短路、两相短路或其他原因造成的三相电压不平衡。相位突变对风电机组的影响与电网电压跌落的影响比较类似,其中三相短路造成的电网电压跌落对电网及风电机组的影响最大。

## 3 提高直驱风电系统可靠性的技术

### 3.1 风力发电机组的故障容错运行技术

#### 3.1.1 采用多相电机结构

整个风电系统的故障包括电网故障和机组内发电机和变流器的故障,因此风力发电机组的可靠运

行技术包括电网故障下的低电压穿越运行技术和机组内发电机和变流器内部故障下的容错运行技术。

目前针对风电机组电气部分(主要是发电机和变流器)的容错控制,国外学者提出了5种主要措施<sup>[9]</sup>:1)采用多相电机;2)采用具有容错结构的变流器拓扑结构;3)采用具有冗余开关器件的变流器;4)采用开关磁阻发电机,但还未在大功率风电系统中得到应用;5)设计特殊结构的容错永磁电机和变流器,此方式还处于论证阶段。

从实现简单和经济性角度出发,采用多相电机结构的方案容易实现,目前,直驱永磁发电机绕组大多设计成2套三相绕组,即双Y绕组。双Y结构具有比传统三相电机结构更高的效率和母线电压利用率,转矩脉动的幅值较小,而且可以通过选择更靠近期望轨迹的矢量来得到尽可能低的谐波。更重要的是,该结构比传统三相电机具有更高的容错性:当系统失去一个或几个桥臂时,可利用其相冗余的特点,在供电不平衡的情况下,通过采用电流预测控制和电流滞环控制等抗扰容错控制策略对剩余相的电流幅值和相位进行调整以维持电机磁势不变,从而保持系统的性能不变,提高系统可靠性<sup>[10]</sup>。

直驱永磁同步风力发电系统网侧脉宽调制(pulse width modulation, PWM)变流器采用电网电压定向,以控制直流母线电压恒定,并实现功率因数调节。这些传统意义上的磁场定向控制方式均假设电机、变流器内部工作于正常的三相对称状态。当电机出现一相或二相绕组开路故障后,剩余各相绕组将形成不对称分布状态。此时,如仍按正常情况时的电流给定进行跟踪调制,将出现2倍或4倍频的转矩波动。因为定子电流产生的合成磁势中不仅存在正序分量,而且还存在负序分量。因此必须研究出基于绕组不对称结构的磁场定向控制,以在不对称绕组结构情形下实现电流、磁链的解耦控制。有的学者针对多相永磁同步电动机推进系统提出了综合矢量的电压定向控制方式。根据综合矢量理论,提出故障状态下形成磁场的电流幅值和相位条件,即将剩余的多相绕组看作一个新系统,应用综合矢量方法进行独立分析<sup>[11]</sup>。综合矢量的电压定向控制方式已用于永磁电机驱动系统,但在风力发电系统中的应用还未见报道。

已有研究表明:如果电机的转速足够低,轴向长度与外径的比率足够小,轴向磁场电机比传统径向磁场电机在转矩和功率密度方面有较大的优势。

除此之外,还有以下优点:结构紧凑;转动惯量小;定子绕组散热条件良好;还可以做成多定子、多转子的多模块结构。各个定子模块之间互相隔离,采用多个定子与多个变流器连接并联运行,如图1所示,提高了系统的容错能力。多模块系统的优点是:1)若一个逆变器模块出现故障,可将它从系统中隔离开来,发电机还能继续运行,直到故障得到修复,只是发电机发出的功率会减少。2)增加定子模块的数量可以增加系统的输出功率,因此没必要增加单个逆变器的容量。但是变频单元并联会产生环流,对变流器产生危害,如何消除和抑制环流是保证变流器安全运行的关键。另外,轴向磁场电机存在电机电枢铁心制造困难的问题,也限制了它的应用。目前正在研究采用软磁粉末复合材料通过加工处理进行三维定型或直接通过压制过程来制造定子铁心;或者采用高性能的永磁体和具有良好热性能和机械性能的塑性材料来减小或取消铁磁材料的使用以摆脱叠片铁心的困扰<sup>[12]</sup>。

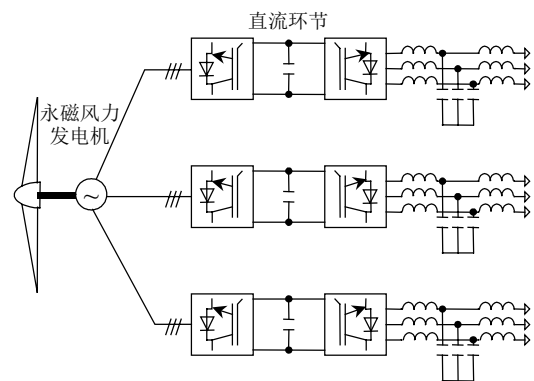


图1 多个定子模块永磁风力发电机系统  
Fig. 1 Permanent magnet wind power system with multiple stator modules

### 3.1.2 采用容错逆变器拓扑结构

通常情况下,高可靠性的电路拓扑结构可以通过并联冗余相和提高缺相容错能力的方法来实现,但由于并联冗余相增加了备用相的驱动电路,整个系统的成本相对较高,这造成了一定程度的浪费和累赘。并且在风力发电系统中,发电机的电压一般不太高,这个方法在风力发电系统中不太适用。

文献[13]提出了一种提高缺相容错能力的容错逆变器的拓扑结构,可采用最小开关容错逆变器替代常规6开关逆变器,以便获得系统在故障下连续运行的能力,如图2所示。它在常规电压型三相6开关逆变器的基础上,增加了4个双向晶闸管( $TR_a$ 、 $TR_b$ 、 $TR_c$ 、 $TR_n$ )、3个快速熔断丝( $F_a$ 、 $F_b$ 、 $F_c$ )和一

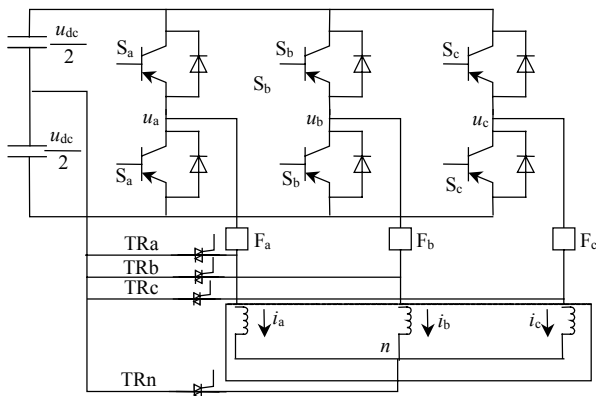


图2 故障容错逆变器的拓扑结构

Fig. 2 Topology construction of fault-tolerant inverter

个与常规系统中母线电容值相同的电容。这种结构的三相变频器在一相断路后，其它两相通过电机的中性点和直流回路的中性点构成中线，形成独立回路。通过改变控制方式，可使剩余两相合成旋转的定子磁势。它在没有过多的增加开关器件及控制电路的情况下，具有常规三相六开关逆变器的全部功能，并在逆变器某相发生故障后重构成三相四开关拓扑结构，在电机某相绕组故障后切换为两相四开关结构<sup>[14-15]</sup>。这种方法的缺点是必须人为地提供一条中线，且中线上有较大的电流流过，直流侧的2个串联电容的瞬时电压不平衡，需要考虑动态电压均衡的问题。因此，有学者提出了运用双向晶闸管对中线电流进行控制，在非故障状态下，晶闸管断开，没有中线电流；当系统中某一相发生故障时，晶闸管导通，系统工作在容错状态下。但是这2种容错式半桥拓扑结构都是建立在电机绕组中有中性点的前提条件下，对于采用三角形连接的电机则不适用。因此，有国外学者提出了容错式全桥驱动电路拓扑结构，它与传统的三相驱动电路有些相似，但对电机的每一相都设计了单相桥，从而使一相的故障不会影响其他相的正常工作，实现了电路的各相独立。上述结构从理论上讲具有故障容错的功能，但在实际中却很少应用，在永磁同步风力发电系统中的应用还有待验证。

### 3.1.3 采用容错无位置传感器

在风能转换系统中，需要电机的转子位置和速度信息，这可通过机械位置传感器来实现，但这种传感器有安装、连接、维护等缺点，降低了系统可靠性，增加了系统成本。为了解决使用机械传感器的缺陷，许多学者开展了无位置传感器控制技术的研究和应用。其根本思想是利用电机绕组中的有关电信号，通过适当的方法计算出转子的位置和速度信息，

但一般在低速时难以实现并且不太可靠<sup>[16]</sup>。无位置传感器矢量控制最适宜应用于风能转换系统中，这是因为：1) 风力发电机不需要运行在很低速度区域，通常风力发电机在高于额定转速15%才开始启动和运行；2) 在低速运行区域不需要输出大转矩。无论转矩多大，在高速区域识别转子位置和速度都没有问题。

实际运行的永磁同步风力发电机轴上都是采用无位置传感器。无位置传感器的矢量控制需要准确估算转子磁极位置。目前，最常用的转子磁极位置是根据电机的基本方程利用电压、电流的信号进行估算的，但一旦电机发生一相或多相绕组故障时，电机绕组的对称结构受到破坏，原来的位置估算法不再适用，因此需要研究一种新的容错无位置传感器。文献[17]采用一种基于多相电机滑模观测器的无位置传感器，无论在正常的三相六开关还是在故障容错的三相四开关状态下，基于滑模观测器的无位置传感器控制算法都能有效估算出电机的转子位置和转速，实现无位置传感器控制。

### 3.2 风力发电机组的故障诊断技术

由于风电场的工况非常恶劣，许多风力发电机组出现不同形式的故障，在这些故障中，许多是可以通过状态监测和故障诊断的技术来避免或减少的。故障检测和故障诊断是实现容错的前提。

目前，对变速风力发电机组的故障监测与诊断的方法有2大类：一是基于硬件的故障监测与诊断，用专用的监控传感器监测硬件状态，这种方法直接可靠，但会使发电机组的硬件设备变得更加复杂，增加了系统成本；二是基于软件的故障监测与诊断，利用观测器检测风力发电机组是否处于故障状态，它是通过比较状态估算值和实际测量值来实现故障检测与诊断的，不需要增加系统的硬件设备，在成本方面具有优势。

文献[18]设计了基于 $H_\infty$ 方法的变速风力发电机故障检测系统，保证变速风力发电机存在建模不确定情况下仍能有良好的检测性能。然而，文献[18]仅研究了变速风力发电机故障检测问题，而未能拟合出故障函数的具体形式，即没有实现风力发电机故障诊断。近年来，神经网络故障观测器发展非常迅速<sup>[19]</sup>，该故障观测器能够实现故障函数的估计，并已初步应用到发电机的故障诊断中。但是，由于神经网络自身的特点，容易导致神经网络故障观测器陷入局部最优和速度相对较慢的缺点，不能满足

风力发电机快速精确诊断的要求。文献[20]提出了非线性比例高阶积分微分观测器，该观测器避免了神经网络的缺点，实现了任意有界和无界故障函数的快速精确诊断，为建立变速风力发电机故障观测器提供了理论基础。但是没有进一步讨论系统包含未知非线性项情况下的故障诊断情况，同时引入的微分环节，增加了系统的复杂性。由于系统的复杂性，变速风力发电机精确数学模型难以建立，目前常用的数学模型是在线性化模型基础上增加未知非线性函数，该函数用于弥补线性化带来的建模偏差。

小波变换可以实现多分辨率下局部特征频率的识别，它可以通过改变频率窗口轻易实现某一局部频率条件下特征信号的挑拣和识别，因此也可以用来进行故障信息提取。由于故障频率总是淹没在大量正常运行频率的噪声之内，这使得小波分析在故障频率识别中有些优越性。

### 3.3 直驱永磁风力发电系统的低电压穿越技术

#### 3.3.1 风电并网后电网电压的稳定性

随着风电机组大型化趋势和海上风电场的开启，低电压穿越技术已经成为制约多兆瓦级风力发电机组大规模并网的主要技术瓶颈。提高风电并网后电压的稳定性和提高风电机组的低电压穿越能力，可以极大地提高电网的安全稳定性<sup>[21]</sup>。

风资源的不确定性和风电机组本身的运行特性使风电机组的输出功率发生波动，这将影响到电网的电能质量，如电压偏差、电压波动、闪变和谐波等<sup>[22]</sup>。根据工程经验，要使风电场正常运行，首先要保证电网电压在合理的范围内，其次功率因数也要合理<sup>[23]</sup>。

图3表示一个通过短路阻抗 $Z_k$ 连接到电网的等

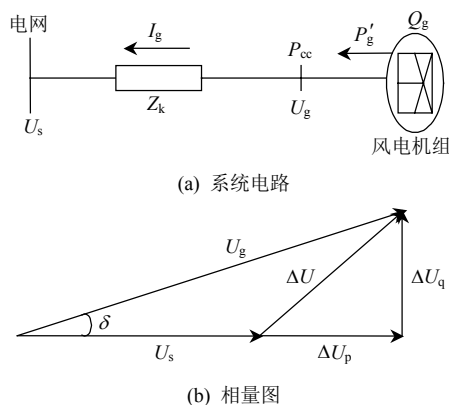


图3 风力发电机组并网后的等效系统图和相量图

Fig. 3 A equivalent system with an wind power generator set connected to the network

效风力发电机组。假定远处母线的电压和公共连接点(point of common coupling, PCC)的电压分别为 $U_s$ 和 $U_g$ ，发电机组输出的有功功率和无功功率分别为 $P_g$ 和 $Q_g$ ，视在容量为 $S_g$ ，对应的电流 $I_g$ 为

$$I_g = \left(\frac{S_g}{U_g}\right)^* = \frac{P_g - jQ_g}{U_g} \quad (1)$$

系统和连接点的电压差为

$$U_g - U_s = \Delta U = Z_k I_g = (R_k + jX_k) \left(\frac{P_g - jQ_g}{U_g}\right) = \frac{R_k P_g + X_k Q_g}{U_g} + j \frac{P_g X_k - Q_g R_k}{U_g} = \Delta U_p + j \Delta U_q \quad (2)$$

式(2)表示了系统和连接点之间的电压差 $\Delta U$ 与传递到系统的功率之间的关系，可采用负载潮流方法和其它的仿真技术来计算 $\Delta U$ 。可以看出： $\Delta U$ 与短路阻抗、风力发电机组输出的有功和无功功率有关。很明显，发电机组发出的功率若发生变化将导致PCC点电压的变化。无论风电场装机容量大小，采用何种风力发电机组技术，由于风电的随机性，将其接入电网后都会对所接电网的电压稳定性带来不同程度的影响。在风电穿透功率较大的电网中，由于风电接入改变了电网原有的潮流分布、线路传输功率与整个系统的惯量，因此风电接入后除了会产生电压稳定问题外，还会对暂态稳定性及频率稳定性带来影响<sup>[24-25]</sup>。

常使用柔性交流输电系统(flexible AC transmission systems, ACTS)装置如静态无功补偿器(static var compensator, SVC)和静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)作为电力电子开关去控制PCC的无功输入，以调节母线电压。SVC和逆变器都能改善电力系统的电压波形，若对它们进行适当的协调控制，可获得更好的性能，并且能避免一些负面效果<sup>[26]</sup>。

#### 3.3.2 直驱风力发电机组低电压穿越技术

直驱永磁风力发电系统中，由于风力发电机组与电网之间通过背靠背全功率变流器实现了隔离，在发生电网电压跌落时，如果在网侧变流器部分采取相应的措施，可使风力机与发电机的运行基本不受电网故障的影响，从而使直驱型风力发电系统在故障消除后能迅速的恢复正常工作，因此直驱永磁同步风力发电机组在低电压运行能力上相对于双馈风力发电机组具有一定的优势，但是其直流侧也存在过电压的问题。因为当电网电压跌落时，变流器将增加电流，以便提供同样大小的功率给电网，由

于变流器热容量有限,因此必须对输入电流进行限制;当电压跌落幅度较大时,直流侧电容的输入和输出功率会发生不平衡,输入功率大于输出功率,如果直流侧不采取措施,直流侧电压将会升高,损坏变流器。

低电压穿越技术不仅包含对上述过电流、过电压进行抑制的技术,同时还包含电网故障排除后向电网输出无功、支持电网恢复的技术。

文献[27]对直驱风力发电机组低电压穿越技术进行了研究,概括起来主要有以下方案:1)在直流母线上接耗能单元,当检测母线电压过高时消耗掉多余的能量。2)在直流母线上接额外的储能单元,当检测直流母线电压过高时转移多余的能量,故障恢复后将所存储的能量馈入电网。3)在网侧并联一套基于低成本电力电子器件辅助网侧变流器,当检测到电网发生跌落故障时,启用辅助变流器转移多余能量。

从便于实现和经济性的角度考虑,方案 1) 比较适用,具体的做法是在直流侧增加过压保护(Crowbar)电路,故障期间由 Crowbar 吸收多余的能量,并通过与网侧变换器的配合,保持直流侧的功率平衡,使直驱风电系统可以继续安全的并网运行。方案 2) 由于能量的回馈作用,减少了能量的损耗。但储能有效保护是建立在具有足够容量的储能元件的基础上,随着电网跌落程度的加深和持续时间的拉长,其经济性会显著降低。方案 3) 必须根据电网电压允许跌落的深度,确定辅助变流器的电流等级,当电压跌落较多时,需要辅助变流器的容量也较大,经济性较差,且由于可关断晶闸管(gate turn-off thyristor, GTO)等器件开关频率较低,在故障期间会产生一定的谐波注入电网。

除了前述几种方案外,还可以采用桨距角控制和叶尖速比控制来实现低电压穿越运行<sup>[28]</sup>。当发生电网电压跌落故障时,引用紧急变桨控制,使风力机的桨距角迅速增加,从而使风力机捕获的功率迅速减小,机侧变流器的输出功率减少,直流侧与电网侧的功率不平衡得到缓解。当电网电压跌落故障持续时间较长时,桨距角调节能够有效保护风力发电系统安全。

调整发电机的转速,让风力机的叶尖速比脱离最佳叶尖速比,减少机侧变流器的输出功率,亦能有效缓解风力发电系统在低电压运行时直流侧与电网侧的功率不平衡,实现低电压穿越运行。

文献[28]针对直驱风电系统提出了一种新的控制策略,即用机侧变流器控制发电机定子电压  $U_s$  和直流母线电压,而网侧变流器通过矢量变换控制分别对流向电网的有功和无功进行解耦控制,如图 4 所示。当发生电压跌落时,机侧变流器可以继续对直流母线电压和发电机定子电压进行控制,以维持直流母线电压恒定和降低发电机发出的功率以及流向直流母线的功率。因此采用这种新的控制策略,不需要采用其它措施就可以使直驱风电系统具有一定的电网故障穿越能力。然而,也可以使用斩波器(由斩波电阻和电力电子开关组成)在故障期间吸收多余的能量来进一步提高系统的故障穿越能力。使用斩波器可以降低驱动链在电网故障期间所受到的机械应力。

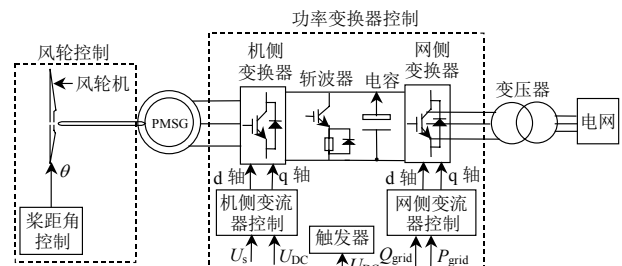


图 4 直驱风电系统新的控制结构

Fig. 4 An new control configuration of direct drive wind generation system

### 3.4 网侧变流器电网同步化技术

永磁直驱风电机组通过全功率变流器接入电网,变流器的非正弦供电会带来谐波问题,而且当电机或变流器发生故障时,谐波问题更为突出。对控制系统来讲,谐波还会影响控制信号的采集,进而影响控制系统的性能,因此电网故障下的网侧变流器控制和机组容错控制策略中都包含了对谐波环境下信号的提取和处理,特别是电网电压同步信号的处理。文献[29]提出了用于 FACTS 技术的谐波干扰条件下电压源型逆变器运行与控制的新方案,其基本方法是将不对称系统分解成对称分量,再实现 d、q 轴解耦控制,即所谓的正、负序双 d-q 控制技术。该方案采用 1/4 周期延时的最小延时正、负序分解技术,最大限度地消除了对动态性能大有影响的分解时延问题。文献[30]提出了基于对称分量法的单同步坐标软件锁相法,将不平衡电压中的正序分量分解出来,然后将正序分量作为传统单同步坐标系软件锁相环的输入,从而抑制了电压中的负序分量所导致的 2 次谐波分量的影响。文献[31]提出了一种适合于电网不对称故障时电压检测的新型双

d-q 锁相环技术, 可对包含负序、谐波的对称或不对称三相电网电压的频率、幅值等各种信息实现快速、准确检测和稳定跟踪, 能满足并网风电机组在不对称电网条件下运行控制的需要。文献[32]提出双同步坐标系解耦锁相法是电网故障下网侧变流器电网同步化的一个有效的方法。它使用一个解耦的同步坐标系和一个解耦网络快速而准确地将正、负序电压分量分离开来; 然后在风力发电系统控制中使用双电流控制环策略, 即对正序电流和负序电流进行独立控制。

风力发电系统中网侧变流器同步化要求锁相环既要具有快速的动态响应速度, 又要能准确地检测出正负序电压分量的幅值和相位, 上述锁相方法都存在动态响应速度和精度之间的矛盾, 因此必须研究出适合于风力发电系统的锁相方法。

#### 4 结论

我国大型风电技术刚刚起步, 风电场所联电网又多为弱电网, 风力发电系统可靠性技术将成为风电机组设备中非常重要的技术环节。

通过以上对直驱永磁同步风电系统可靠性技术进行研究, 预计今后的研究应致力于以下几个方面: 1) 研究适合于直驱风力发电系统的故障检测和故障诊断技术; 2) 研究高功率密度、高可靠性的电机结构; 3) 研究新的容错变流器拓扑结构, 研究容错控制策略; 4) 研究适应电网故障和机组内故障的永磁同步发电机组控制模型和控制策略; 5) 建立适合我国电网实际情况的低电压穿越技术标准; 6) 对含有正负序分量及谐波成分的复杂电网条件下的快速锁相检测技术进行研究; 7) 研究电网故障下的快速无功补偿装置和相关的电力稳压装置。

#### 参考文献

- [1] Muljadi E, Butterfield C P, Parsons B, et al. Effect of variable speed wind turbine generator on stability of a weak grid[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 29-36.
- [2] Mueen S M, Takahashi R, Murata T, et al. Low voltage ride through capability enhancement of wind turbine generator system during network disturbance[J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(1): 65-74.
- [3] Tavner P J, Xiang J, Spinato F. Reliability analysis for wind turbines[J]. Wind Energy, 2007(10): 1-18.
- [4] Conroy J F, Watson R. Low voltage ride-through of a full converter wind turbine with permanent magnet generator[J]. IET Renew Power Generation, 2007, 1(3): 182-189.
- [5] 张梅, 何国庆. 直驱式永磁同步风力发电机组的建模与仿真[J]. 中国电力, 2008, 41(6): 79-84.
- [6] Zhang Mei, He Guoqing. Modeling and dynamic simulations of a direct driven permanent magnet synchronous generator based wind turbine unit[J]. Electric Power, 2008, 41(6): 79-84(in Chinese).
- [7] 赵文祥, 程明, 朱孝勇, 等. 驱动用微特电机及其控制系统的可靠性技术研究综述[J]. 电工技术学报, 2007, 22(4): 38-46.
- [8] Zhao Wenxiang, Cheng Ming, Zhu Xiaoyong, et al. An overview of reliability of drive system for small and special electric machines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(4): 38-46(in Chinese).
- [9] Johan R, Lina M B. Survey of failures in wine power system with focus on Swedish wind power plants during 1977 — 2005[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2007, 22(1): 167-173.
- [10] 尹明, 李庚银, 张建成, 等. 直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略[J]. 电网技术, 2007, 31(15): 61-65.
- [11] Yun Ming, Li Genyin, Zhang Jiancheng, et al. Modeling and control strategies of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator[J]. Power System Technology, 2007, 31(15): 61-65(in Chinese).
- [12] Polinder H, Lendenmann H, Chin R, et al. Fault tolerant generator systems for wind turbines[C]//IEEE International Electric Machines and Drives Conference. Miami, Florida, USA: IEEE, 2009: 675-681.
- [13] 彭芳彪, 严东超, 王光明, 等. 六相永磁容错电机不对称运行研究 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2009, 10(3): 74-77.
- [14] Peng Fangbiao, Yan Dongchao, Wang Guangming, et al. Research on asymmetrically operation of six-phase permanent magnet fault tolerant motor[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2009, 10(3): 74-77(in Chinese).
- [15] 刘维亭, 庞科旺, 李文秀. 舰船多相永磁同步电机推进系统容错控制研究[J]. 电气传动, 2004, 26(2): 19-22.
- [16] Liu Weiting, Peng Kewang, Li Wenxiu. Research on fault tolerant control of marine multi-phase permanent synchronous motors propulsion system[J]. Electric Drive Automation, 2004, 26(2): 19-22(in Chinese).
- [17] 邓秋玲, 黄守道, 许志伟, 等. 软磁复合(SMC)材料在轴向磁场永磁风力发电机中的应用[J]. 微特电机, 2010, 38(1): 21-23.
- [18] Deng Qiuling, Huang Shoudao, Xu Zhiwei, et al. Application of soft magnetic composites material in axial flux PM wind generator [J]. Small and Special Electrical Machines, 2010, 38(1): 21-23(in Chinese).
- [19] 孙丹, 贺益康, 何宗远. 基于容错逆变器的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2007, 41(7): 1101-1106.
- [20] Sun Dan, He Yikang, He Zongyuan. Fault tolerant inverter based direct torque control for permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41(7): 1101-1106(in Chinese).
- [21] 魏佳丹, 周波. 双凸极电机全桥变换器单相开路故障容错方案[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(24): 88-92.
- [22] Wei Jiadan, Zhou Bo. Project on single phase open-circuit fault tolerance of doubly salient electro-magnet motor driven by full-bridge converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(24): 88-92(in Chinese).
- [23] 孙丹, 何宗元. 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.
- [24] Sun Dan, He Zongyuan. Torque ripple reduction for a four-switch inverter FED PMSM DTC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(21): 47-52(in Chinese).
- [25] Vamsi K, Polisetty S, Jetti R, et al. Intelligent Integration of a wind farm to an utility power network with improved voltage

- stability[C]//IEEE Industry Applications Conference, 41st IAS Annual Meeting. Tampa Florida: IEEE, 2006: 1128-1133.
- [17] 赵克, 安群涛. 容错逆变器 PMSM 无位置传感器控制系统[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(4): 25-30.  
Zhao Ke, An Quntao. Fault tolerant inverter permanent magnet synchronous motor position sensorless control system[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(4): 25-30(in Chinese).
- [18] Liu J, Xu D, Yang X. Sensor fault detection in variable speed wind turbine system using H/H<sub>∞</sub> method[C]//Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. Chongqing, China: Chongqing University, 2008: 4265-4269.
- [19] 昌泽慧, 姜斌. 基于神经网络观测器的一类非线性系统的故障调节[J]. 控制与决策, 2007, 22(1): 11-15.  
Mao Zehui, Jiang Bin. Fault accommodation of a class of nonlinear system based on neural network observer[J]. Control and Decision, 2007, 22(1): 11-15(in Chinese).
- [20] Gao Z W, Ding S X. Actuator fault robust estimation and fault tolerant control for a class of nonlinear descriptor systems[J]. Automatica, 2007(43): 912-920.
- [21] 关宏亮, 赵海翔, 迟永宁, 等. 电力系统对并网风电机组承受低电压能力的要求[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 79-82.  
Guan Hongliang, Zhao Haixiang, Chi Yongning, et al. Requirement for LVRT capability of wind turbine generator in power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 79-82(in Chinese).
- [22] 孙涛, 王伟胜, 戴慧珠, 等. 风力发电引起的电压波动和闪变[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 62-66.  
Sun Tao, Wang weisheng, Dai Huizhu, et al. Voltage fluctuation and flicker caused by wind power generation[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 62-66(in Chinese).
- [23] 王伟胜, 范高锋, 赵海翔. 风电场并网技术规定比较及其综合控制系统初探[J]. 电网技术, 2007, 31(18): 73-77.  
Wang Weisheng, Fan Gaofeng, Zhao Haixiang. Comparison of technical regulations for connecting wind farm to power grid and preliminary research on its integrated control system[J]. Power System Technology, 2007, 31(18): 73-77(in Chinese).
- [24] 曹娜, 赵海翔, 戴慧珠. 常用风电机组并网运行时的无功与电压分析[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 91-94.  
Cao Na, Zhao Haixiang, Dai Huizhu, et al. Analysis on reactive power and voltage of commonly used wind turbines interconnected to power Grid[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 91-94(in Chinese).
- [25] 许晓艳, 石文辉, 李岩春. 风电场集中接入对区域电网的影响分析[J]. 中国电力, 2009, 42(1): 93-97.  
Xu Xiaoyan, Shi Wenhui, Li Yanchun. Impacts of wind farm central integration on local power grids[J]. Electric Power, 2009, 42(1): 93-97(in Chinese).
- [26] Salman M, Ganesh K V, Ronald G, et al. Optimal neuro-fuzzy external controller for a STATCOM in the 12-bus benchmark power system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(4): 2548-2558.
- [27] 胡书举, 李建林, 许洪华. 适用于直驱式风电系统的 Crowbar 电路分析[J]. 电力建设, 2007, 28(9): 44-47.  
Fu Shuju, Li Jianlin, Xu Honghua. Analysis of Crowbar circuits used in direct-drive WTG systems[J]. Electric Power Construction, 2007, 28(9): 44-47(in Chinese).
- [28] Hansen A D, Michalke G. Multi-pole permanent magnet synchronous generator wind turbines' grid support capability in uninterrupted operation during grid faults[J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(3): 333-348.
- [29] Xu L, Wang Y. Dynamic modeling and control of DFIG based on wind turbines under unbalanced network conditions[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(1): 314-323.
- [30] 姜燕, 陈顺, 黄守道, 等. 直驱型永磁风力发电系统的电网同步化方法研究[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 182-186.  
Jiang Yan, Cheng Shun, Huang Shoudao, et al. Research on grid synchronization methods of directly-driven PM wind power generation system[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 182-186(in Chinese).
- [31] 周鹏, 贺益康, 胡家兵. 电压不平衡状态下风电机组运行控制中电压同步信号的检测[J]. 电工技术学报, 2008, 23(5): 108-113.  
Zhou Peng, He Yikang, Hu Jiabing. Detection of voltage synchronization signals for a wind energy generation system unbalanced grid conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(5): 108-113(in Chinese).
- [32] 邓秋玲, 黄守道, 肖磊. 电网故障下直驱风电系统网侧变流器控制[J]. 中国电力, 2011, 44(8): 62-67.  
Deng Qiuling, Huang Shoudao, Xiao Lei. Control of grid-side converter of direct drive wind power generation system under grid faults[J]. Electric Power, 2011, 44(8): 62-67(in Chinese).



邓秋玲

收稿日期: 2011-06-20。

作者简介:

邓秋玲(1966), 女, 博士研究生, 副教授, 研究方向为风力发电和特种电机及控制, E-mail: dengqiulin@sohu.com;

姚建刚(1952), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力市场及其技术支持系统、电力系统自动化和高压外绝缘, E-mail: yaojiangang@126.com;

黄守道(1962), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为特种电机及其控制、风力发电, E-mail: shoudaohuang@tom.com;

吴蓉(1975), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统自动化, E-mail: lily\_13@163.com;

王良之(1971), 男, 大学本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化, E-mail: 200813452@qq.com;

王卿明(1976), 男, 大学本科, 工程师, 研究方向为电力系统自动化, E-mail: zqm\_xc@126.com。

(责任编辑 杜宇)