

海上双馈电机开路故障容错性能评估*

冯煜尧¹, 张开华², 诸浩君², 王健³, 魏书荣³, 符杨³

(1. 国家电网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437;

2. 上海绿色环保能源有限公司, 上海 200433;

3. 上海电力学院 电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 海上风电机组面临故障率高、停运损失大等问题, 迫切需要及早发现运行故障、及时提供容错机制。构建基于西蒙决策理论的双馈风力发电机开路故障容错设计方案, 选取电能质量和风力发电机组可靠性作为典型评估指标。结合双馈风力发电机组机侧变流器单相开路故障容错案例, 给出量化的容错性能指标。结果表明及时有效的故障容错机制能够提高海上风电场的可用率, 避免故障恶化, 降低故障带来的经济损失。

关键词: 海上风电; 双馈电机; 开路故障; 容错评估

中图分类号: TM 307⁺.1 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)11-0111-07

The Performance Evaluation of Open-Circuit Fault Tolerance Offshore Wind DFIGs*

FENG Yuyao¹, ZHANG Kaihua², ZHU Haojun², WANG Jian³, WEI Shurong³, FU Yang³

(1. State Grid Electric Power Research Institute, SMEPC, Shanghai 200437, China;

2. Shanghai Green Environmental Protection Energy Co., Ltd., Shanghai 200433, China;

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

Abstract: Faced with high failure rate and large outage losses, offshore wind farms needed to find operation faults and provided fault-tolerant mechanism as soon as possible doubly-fed wind generators (DFIGs) open-circuit fault-tolerant projects were built based on simon decision theory, which took power quality and wind turbine reliability as typical evaluation standards. The tolerant effect was evaluated combining the example that was doubly-fed wind generators rotor side converter single phase open circuit fault. The results showed that timely and effective fault-tolerant mechanism could raise availability, avoid fault deterioration and reduce economic losses caused by faults in offshore wind farms.

Key words: offshore wind power; doubly-fed wind generator; open-circuit fault; tolerance evaluation

0 引言

风力发电已经成为新能源应用的主要方式, 其规模化发展已经成为我国当前风电发展的重要任务^[1-2]。海上风力发电系统由于受到海洋环境的影响, 风力发电机组极易发生故障, 相比陆上风电场, 海上风机故障率更高, 维护成本大大增

加^[3-4];而且, 海上风电场的可进入性差, 一旦发生故障, 受天气等因素影响, 无法对其及时维修, 风机容量大, 风速稳定, 风机停运造成的经济损失巨大^[5]。在故障产生时, 需要一种新型的控制方法来满足系统的稳定可靠运行。容错控制为提高复杂控制系统的可靠性和安全性开辟了一条新的道路。为了降低海上风电场的维护成本, 以及提

* 基金项目: 上海市绿色能源并网工程技术研究中心基金项目(13DZ2251900); 上海市科委科技创新项目(14DZ1200905); “电气工程”上海市 II 类高原学科; 上海市电站自动化技术重点实验室基金项目

作者简介: 冯煜尧(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制研究。

张开华(1963—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为海上风电场规划、建设与运行等。

高风机的平均可用率,近年来对于海上风力发电的故障容错研究开始引起关注^[6-8]。但是目前的海上风电容错技术仅是针对某个或某类问题的简单技术性容错,鲜有系统的容错方案设计过程和量化的系统的容错评估指标。

本文提出了关于海上风力发电开路故障容错方案的设计过程,包括方案的拟定、优化、验证以及方案系统性评估指标等。最终结合案例双馈风力发电机组侧变流器开路故障容错控制来分析方案设计的合理性和评估指标的适用性。

1 基于西蒙决策理论的双馈风力发电机组开路故障容错方案

西蒙决策理论^[9]是从认知科学的角度把决策程序划分为信息活动、设计活动、选择活动、审查活动4个阶段。西蒙四步走的决策过程划分,是一种多层次的循环,整个程序的总体逻辑始终是明确的,即提出问题→给出解决问题的方案→选择备选方案中的优选方案→对选定方案进行可能的修正。正是这一点使这一程序同决策科学化高度关联。西蒙四步走的决策过程应用在容错运行研究中的具体实现流程如图1所示。

首先确定双馈风力发电机组的容错目标;然后分析评估容错的可行性,并拟定容错方案,分析方案的优缺点,并针对不同故障择优选择容错方案;最后对方案进行验证反馈,对存在的问题进行修正改进,以达到容错目标。

1.1 制定容错目标

先在不同的运行环境下分析不同类型的故障容错运行的可行性,并确定目标层次。容错运行主要目标是故障容错后在可接受的性能指标变化

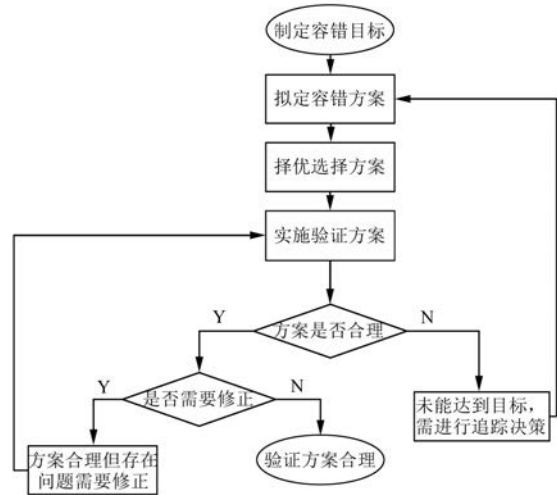


图1 容错决策流程

下,继续稳定可靠运行。第二位目标是尽可能实现功率的最大输出。因此具体的容错目标为:当检测到双馈风力发电机组故障后,在故障保护动作时间内,将发生故障的部件从系统中隔离开,并采取合理有效的容错方案维持其规定功能,或在可接受的性能指标变化下,继续稳定可靠运行。

1.2 择优选取容错方案

本文针对风力发电机组的单相开路故障,引入了一种具有容错能力的双馈风力发电机组拓扑结构,如图2所示。本文在图2的电路拓扑基础上侧重研究双馈风力发电机组的轻微故障及其容错方案^[6]。

根据实际运行环境和客观条件,择优选择硬件容错重组方案以及软件优化算法。

双馈发电机的转子绕组故障会给风力发电系统的正常运行带来极大危害。现有研究主要针对

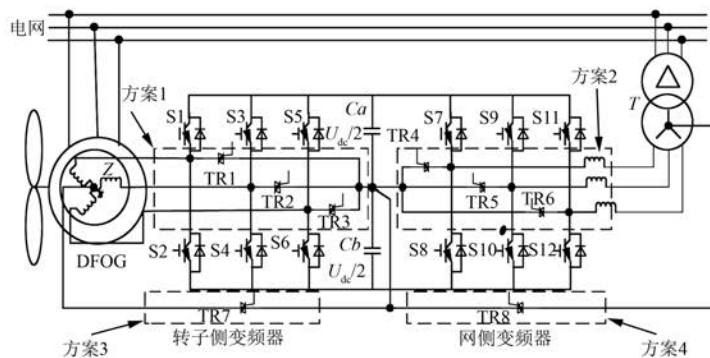


图2 双馈风力发电机组硬件容错拓扑

双馈风力发电系统变流器 IGBT 故障,通过增加冗余桥臂来实现容错运行;而增加一组 IGBT 桥臂既增加机舱空间又增加成本投入。在实际应用中,针对变流器的单相故障,选择方案 1,即直流环节串联两个相等的电容,发电机的绕组通过 3 个双向晶闸管 (TRIAC) 与串联电容的中点相连。本方案可用于机侧变流器的故障容错研究,在硬件结构和软件优化算法上相比其他方案都更易实现。因此,本文重点评估非冗余备份式双馈风力发电机组开路故障的容错性能。

2 容错性能评估指标

在评估容错方案之前首先需要有不同的准则对容错决策进行约束,以实现容错方案的最优化。因此,容错评估指标的选取至关重要。本文选取容错后的电能质量和可靠性评估海上双馈电机的容错性能。

2.1 电能质量

风电场并网发电过程中,在与系统的公共连接点处,容易发生如下 4 类常见的电能质量污染^[10]:电压偏差、电压波动、谐波、三相电压不平衡。

(1) 电压偏差。由电力系统的知识可知,系统无功功率的不平衡是引起系统电压偏离标称值的根本原因。其数学表达式为

$$\delta_U = \frac{U_{re} - U_N}{U_N} \times 100\% \quad (1)$$

式中: δ_U ——电压偏差;

U_{re} ——电压测量值;

U_N ——系统标称电压。

风电场的运行状况不同,会对并网点的电压偏差程度产生直接影响。

(2) 电压波动和闪变。本文主要考虑单台风电机组输出功率的变化对电压波动和闪变的影响。电压波动常用相对电压变动量来描述,电压波动取值为一系列电压方均根值变化中的相邻两个极值之差与系统标称电压的相对百分数,即:

$$d = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_N} \times 100\% \quad (2)$$

(3) 谐波。对于海上风电机组来说,风力发电并网过程中会产生谐波,其中对于发电机本身而言,其产生的谐波是可以忽略的。需要考虑的

是双馈风力发电机组的谐波注入问题以及风电机组输出谐波变化情况。

因谐波引起的偏离正弦波的畸变波形程度,以总谐波畸变率 THD 表示:

$$\text{THD}_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^M U_h^2}}{U_1} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^M I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (4)$$

式中: h ——谐波次数;

U_1 ——基波电压;

I_1 ——基波电流。

(4) 三相不平衡度。系统不平衡分两大类:事故性不平衡和正常性不平衡。由于三相系统中的一相(或两相)发生故障所导致的不平衡称为事故性不平衡,这种不平衡是电力系统所不允许的运行状态。正常性不平衡是由于系统三相元器件或负荷不对称导致的,因此可以作为衡量故障容错运行的一项指标。

系统正常运行时,电量的负序分量方均根值与正序分量方均根值之比定义为该电量的三相不平衡度,用 ε 表示,即:

$$\begin{cases} \varepsilon_U = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \\ \varepsilon_I = \frac{I_2}{I_1} \times 100\% \end{cases} \quad (5)$$

式中: U_1 ——电压正序分量方均根值;

U_2 ——电压负序分量方均根值;

I_1 ——电流正序分量方均根值;

I_2 ——电流负序分量方均根值。

2.2 可靠性

可靠性指标从定义上讲是一个统计值,从本质上说,可靠性指标不是一个可以通过数学方法精确计算的数值,并且机组故障、维护管理等都是随机的。海上风电场设备一旦故障,受到海上风浪的影响,工作人员有时不可立即赴现场勘察维修。这使得海上风电场故障停运时间大大增长,系统可靠性降低。考虑到风能特性和电气设备故障的影响,拟选取以下可靠性指标评估容错性能。

(1) 海上风力发电机组全年可利用率 A 。风

力发电机组可靠性量化指标以机组运行可利用率来度量^[11]。电力行业标准 DL/T793—2001《发电设备可靠性评价规程》给出了机组可用率的定义如下：

$$\text{可用率} = \frac{\text{可用小时数}}{\text{统计期间小时数}} \times 100\%$$

通常在工程应用中风力发电机组的可用率可定义为在评估期间内,风电机组处于能够运行(发电、起动、停车)或能够发电的待机状态的时间与这一期间内总时间的比值。通常风力发电机组的年可用率用百分比表示为

$$A = \left(1 - \frac{T_f}{8\ 760}\right) \times 100\% \quad (6)$$

式中: 8 760——全年小时数;

T_f ——故障停机小时数。

(2) 风力发电机组年发电量(kW·h)。假设风力发电机组的年发电量只与故障停运率有关,而忽略风能对发电机组输出功率的影响,则单台机组的年发电量为

$$W_G = P_G A \times 8\ 760 \quad (7)$$

式中: P_G ——发电机组的额定输出功率。

(3) 期望电能损失(kW·h)

$$\Delta W_G = P_G (1 - A) \times 8\ 760 \quad (8)$$

(4) 风电场年发电量(kW·h)。若仅考虑风力发电机组的故障,则整个海上风电场的出力为

$$W = \sum_{i=1}^n P_G A_i \times 8\ 760 \quad (9)$$

式中: n ——风电场的风机数;

A_i ——第 i 台风机的可用率。

则海上风电场风电机组年平均功率为

$$\bar{P} = \frac{W}{n \times 8\ 760} \quad (10)$$

3 案例分析

采用双馈风力发电机机侧变流器开路故障作为容错案例分析。

机侧变流器开路故障为海上双馈风力发电机的常见电气故障,已有文章^[6,12]分析研究,在技术上具有可行性。本文采取根据故障特点选取拟定的方案 1,其试验系统总体如图 3 所示。

根据西蒙决策理论制定最终容错目标:在检测到双馈风力发电机组故障后,在故障保护动作时间



图 3 双馈风力发电机组故障容错系统试验装置

内,及时将发生故障的部件从系统中隔离开,并同时采取合理有效的容错方案维持其稳定可靠运行。

先从单台风力发电机组入手,对故障容错状态的电能质量进行评估,再考虑整个风电场在有、无容错机制情况下的电能输出。本文主要对风力发电机组故障容错后一些主要的电气参数的波形进行了分析,使在故障容错后的畸变电流得到补偿。以风力发电机组输出电压和电流为研究对象,采用可行的电能质量指标对输出电压进行评估,采用可靠性指标对容错运行机组进行评估。

3.1 容错后电能质量指标计算分析

设定风力发电机组在 2 s 开始进入故障容错状态,本文分别采集了风力发电机组的输出电压和电流波形以及其正序负序分量进行了分析,如图 4 所示。

图 4 中 2 s 开始容错运行,风机输出电压和电流的正序分量和负序分量基本与正常运行时的值一致,只有在切换容错运行的时刻,系统需要一定的响应时间,电流的负序分量出现了一个峰值,其数值的大小对整个系统正常运行的影响可以忽略。

图 4(a)中可得容错前后电压幅值未出现明显变动,不存在电压偏差和闪变。根据三相不平衡度的计算公式,本节分别计算求得风力发电机组输出电压和电流的正、负序分量方均根值,并根据式(5)计算三相不平衡度,计算结果如表 1 所示。

表 1 风力发电机组容错运行状态下的三相不平衡度

运行参数	输出电压/p.u.	输出电流/p.u.
正序分量方均根值	1	1
负序分量方均根值	3.738e-5	3.109e-3
三相不平衡度/%	0.003 74	0.031 09

从表 1 的计算结果可以看出,故障容错运行中电压和电流的不平衡度在可接受的指标范围内。

由于电力电子元器件的存在,风力发电机组的输出存在谐波分量,本文在开路故障后对原有的电路拓扑结构进行了微小的改动,在这种容错运行方式下,谐波含量可以作为一种评估指标。

分别对风力发电机组输出电压和电流进行了傅里叶分析,正常运行时电压谐波畸变率约为 0.18%, 电流谐波畸变率约为 0.85%, 容错运行后电压谐波畸变率约为 0.38%, 电流谐波畸变率约为 11.98%。图 5 和图 6 分别为正常运行状态和容错运行状态下风力发电机组输出电压和电流的各次谐波所占基波的百分比。

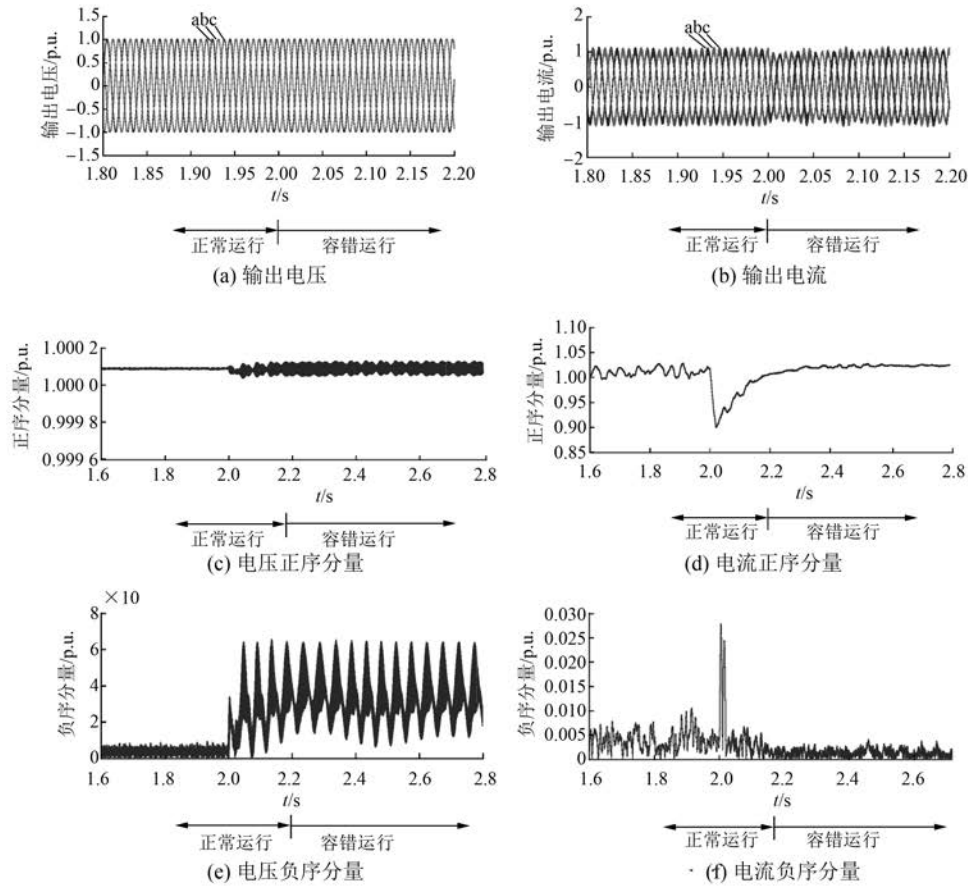


图 4 双馈风力发电机组容错运行前后输出电压、电流及其正序负序分量波形

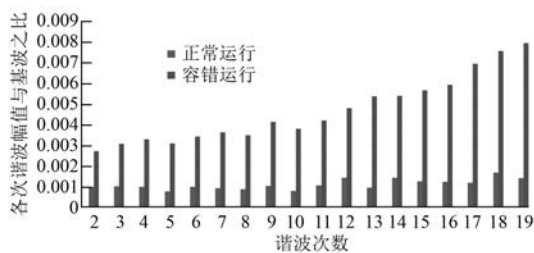


图 5 双馈风力发电机组容错运行前后输出电压谐波

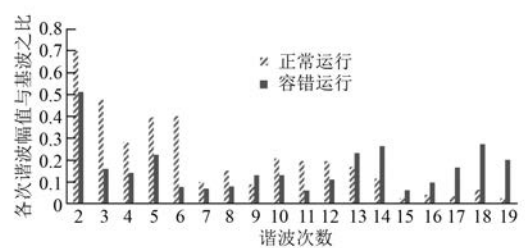


图 6 双馈风力发电机组容错运行前后输出电流谐波

从图 5 可得,正常和容错运行状态下的电压谐波变化规律相似,输出电压低次谐波所占的百

分比有所降低,高次谐波所占的百分比有所升高,总谐波畸变率较大。图 6 中,正常运行下,电流含

有较高的低次谐波。由于变流器结构的改变,谐波含量和各次谐波所占比重在容错运行下可能会与正常运行下有所不同,但总的波形畸变率远小于最大允许值,对系统的影响较小。

3.2 容错能力分析

假设全年内仅发生机侧变流器单相开路故障,且故障前后风速不变,正常全年发电时间为 8 760 h,单台机组的额定输出功率为 P ,设因故障停机时间为 T (其中 90% T 是因天气等因素导致的等待时间,7% T 是备件时间,仅 3% T 为部件维修时间),计划维修导致的停机时间为 T_m ,则无故障容错运行下机组的年可用率为

$$A_m = \left(1 - \frac{T + T_m}{8\,760}\right) \times 100\% \quad (11)$$

单台机组全年发电量(kW·h)为

$$W_G = P \times (8\,760 - T - T_m) \quad (12)$$

期望电能损失(kW·h)为

$$\Delta W = P \times (T - T_m) \quad (13)$$

根据式(9)可计算整个风电场的年发电量(kW·h)为

$$W = \sum_{i=1}^n P_i A_i \times 8\,760 = (P_1 A_1 + P_2 A_2 + P_3 A_3 + \dots + P_n A_n) \times 8\,760 \quad (14)$$

式中: P_i ——第 i 台风机的额定输出功率。

根据式(10),海上风电场风电机组年平均功率为

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i A_i}{n} = \frac{P_1 A_1 + P_2 A_2 + P_3 A_3 + \dots + P_n A_n}{n} \quad (15)$$

若故障发生后及时进行故障隔离和容错运行,则带有故障容错运行机制的风电机组年可用率为

$$A_t = \left(1 - \frac{T_m}{8\,760}\right) \times 100\% \quad (16)$$

单台机组全年发电量(kW·h)为

$$W_G = P \times (8\,760 - T_m) \quad (17)$$

期望电能损失(kW·h)为

$$\Delta W = P \times T_m \quad (18)$$

根据式(9)可计算整个风电场的年发电量(kW·h)为

$$W = \sum_{i=1}^n P_i A_i \times 8\,760 = (P_1 A_1 + P_2 A_2 + P_3 A_3 + \dots + P_n A_n) \times 8\,760 \quad (19)$$

根据式(10)可计算海上风电场风电机组年平均功率为

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i A_i}{n} = \frac{P_1 A_1 + P_2 A_2 + P_3 A_3 + \dots + P_n A_n}{n} \quad (20)$$

设某海上风电场每台机组的额定输出功率为 1.5 MW,共有 N 台机组。风电机组中变流器在某一时刻发生开路故障,导致风机停运,需要立即对其进行维修,忽略其他因素导致的停机时间。假设风电机组无故障状态下,该风电场风机的平均修复时间为 490 h,则平均备件时间为 35.28 h,因为天气因素无法出海维修的等待时间为 441 h,维修故障部件所需的时间为 1.47 h。若故障发生后及时进行故障隔离和容错运行,则在出海维修部件前,系统都能持续可靠运行。有、无容错机制下所生成的风机的随机故障时序图如图 7 所示。

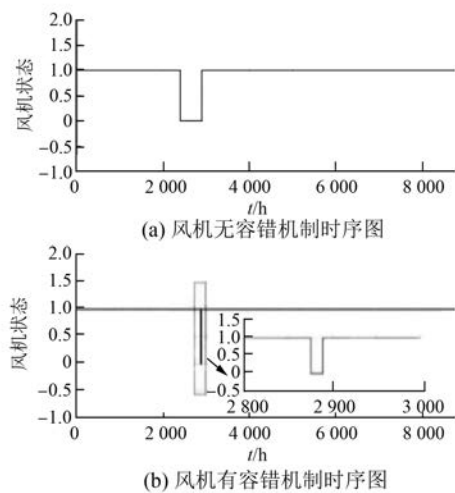


图 7 海上双馈风机时序图

图 7 中,风机状态为两种,状态 1 为正常工作,状态 0 为故障。具有容错机制的风电机组的全年故障停机时间大大减少。

若该海上风电场中,风电机组中变流器在某一时刻发生开路故障后,能及时进行容错运行,直至下次人为计划维修,可提高风电机组的利用率。该海上风电场的有无容错方案的可靠性计算和电

能质量评估指标计算如表 2 所示。

表 2 海上风力发电故障容错性能评估结果

评估指标	无容错方案	有容错方案
风力发电机组 可用率/%	$\left(1 - \frac{T + T_m}{8760}\right) \times 100$	$\left(1 - \frac{T_m}{8760}\right) \times 100$
风力发电机组 年发电量/(kW·h)	$1500 \times (8760 - T - T_m)$	$1500 \times (8760 - T_m)$
期望电能损失	$1500 \times (T + T_m)$	$1500 \times T_m$
风电场年发 电量/(kW·h)	$1500 \times (8760 - T - T_m) \times N$	$1500 \times (8760 - T_m) \times N$

从表 2 可以明显看出,有容错机制单台机组的可用率有所提高,期望电能损失降低了 $1500 \times T$ kW·h,风电场的年发电量提高了 $1500 \times T \times N$ kW·h。由上述分析可知,有容错机制的海上风力发电机组可明显提高机组的可用率,减少故障停机损失。

4 结 语

本文结合西蒙决策理论对双馈风力发电机组的容错决策设计过程进行了探究,制定了一般容错方案的容错设计流程,并选取了电能质量和可靠性作为容错评估指标,以双馈风力发电机组机侧变流器开路故障容错控制作为分析案例,验证了决策过程和评估指标的合理性,为海上风力发电的容错决策和评估体系提供了量化的数据支撑。

【参 考 文 献】

[1] 迟永宁,梁伟,张占奎,等.大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述[J].中国电机工程学报,2016,36(14): 3758-3770.
[2] 刘振亚,张启平,董存,等.通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送

研究[J].中国电机工程学报,2014,34(16): 2513-2522.

- [3] KAIDIS C, UZUNOGLU B, AMOIRALIS F. Wind turbine reliability estimation for different assemblies and failure severity categories [J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9(8): 892-899.
[4] 魏书荣,张路,符杨,等.基于拟序阻抗的海上双馈电机定子绕组匝间短路早期故障辨识[J].中国电机工程学报,2017,37(1): 273-281.
[5] CHEN B, MATTHEWS P C, TAVNER P J. Automated on-line fault prognosis for wind turbine pitch systems using supervisory control and data acquisition [J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9(5): 503-513.
[6] 魏书荣,何之倬,黄苏融,等.海上双馈风力发电机组开路故障容错重构技术[J].电力系统自动化,2016,40(16): 83-89.
[7] 魏书荣,何之倬,符杨,等.海上风电机组故障容错运行研究现状分析[J].电力系统保护与控制,2016,44(9): 145-154.
[8] 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.
[9] 刘丽丽,闫永新.西蒙决策理论研究综述[J].商业时代,2013(17): 116-117.
[10] 肖湘宁,韩民晓,徐永海,等.电能质量分析与控制[M].北京:中国电力出版社,2004.
[11] BUSSEL G J W V, ZAAIJER M B. Reliability, Availability and Maintenance aspects of large-scale offshore wind farms [C] // Marine Renewable Energies Conference, 2001: 119-126.
[12] 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, 2011, 49(4): 1539-1547.

收稿日期: 2017 -03 -13

(上接第 110 页)

[13] 李永刚,宋欣羽,武玉才.基于多回路理论的转子匝间短路时定子并联支路环流分析[J].电力系统自动化,2009,33(17): 71-75.
[14] 孙宇光,郝亮亮,王祥珩.同步发电机励磁绕组匝间短路的数学模型与故障特征[J].电力系统自动化,2011,35(6): 45-50.

- [15] 武玉才,李永刚.基于端部漏磁特征频率的汽轮发电机转子匝间短路故障诊断实验研究[J].电工技术学报,2014,29(11): 107-115.
[16] 高景德,王祥珩,李发海.交流电机及其系统分析[M].北京:清华大学出版社,1993.

收稿日期: 2016 -12 -14