

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.08.026

基于马尔可夫模型的风力发电系统可靠性分析

秦 洋, 马慧民*, 陈玉晶
(上海电机学院 电气学院, 上海 200240)

摘要:针对风力发电系统可靠性评估及运行维护存在的问题,对双馈风力发电系统运行原理、故障机制进行了研究,对部件主要故障类型进行了归纳,提出了一种基于可靠性理论的风力发电系统有向网络的马尔可夫维修模型,利用系统的状态转移关系建立了风力发电系统的状态转移图,进而运用马尔可夫过程方法对系统的可靠性进行分析,给出了系统各种瞬态和稳态指标的表达式并借助 Matlab 对其进行求解,在此基础上,深入探讨了部件的故障率、修复率变化对系统可用度的影响。研究表明,发电系统的稳态可用度由故障率、修复率因素共同决定,修复率对该系统达到平稳状态所需时间的贡献度较大,为风机制定可靠性最优的维护策略提供了理论支持。

关键词:风力发电系统;马尔可夫过程;故障机制;可靠性;维护策略

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2015)08-1136-05

Reliability analysis of wind power generation system based on Markov model

QIN Yang, MA Hui-min, CHEN Yu-jing

(School of Electric Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Aiming at the problems of reliability evaluation and operational maintenance for the wind power generation system, the operation principle and fault mechanism of the doubly-fed induction wind turbines were studied, the main failure types of key components were summarized, the Markov repair model of directed-network based on reliability theory for wind power generation system was proposed, the state transition diagram was established by using the relationship of the state transition, then the reliability of the system was analyzed by using Markov process method, the expressions of various transient and steady state index were given, with the help of matlab software to solve, on this basis, the relationship between component failure rate and repair rate changes on the availability of the system was discussed deeply. The results indicate that the stable availability of system can be decided by the failure rate and the repair rate, the repair rate contributes the most in the length of time the system needed to reaches a steady state the time, thus to provide the theory support for the establishment of the optimal maintenance strategy of wind turbine.

Key words: wind power generation system; Markov process; failure mechanism; reliability; maintenance strategy

0 引 言

近年来,世界风电产业迅速发展,已成为可再生能源发电行业中不可或缺的重要力量,正朝着大容量、高质量的海上风电方向发展。随着装机容量的不断提高,风电机组的结构也越来越复杂,伴随着机组运行环境的恶劣,致使风电机组的故障率居高不下,风力发电

系统作为风机最为关键的系统,其性能直接影响到机组运行的可靠性和稳定性,因此,在追求发电容量的同时,必须考虑其可靠性^[1]。

目前,国内外学者研究工作主要集中于风电机组的状态监测与故障诊断上^[2-5],大多是通过神经网络、支持向量机、小波分析等诊断方法,结合机组的运行状态,建立相应的风机故障诊断或状态评估模型,理论上

收稿日期:2015-03-16

作者简介:秦 洋(1989),男,安徽六安人,主要从事风电机组的可靠性建模、维修策略优化方面的研究. E-mail: qinxueyang1989@163.com

通信联系人:马慧民,男,副教授,硕士生导师. E-mail: mahm81@163.com

较为成熟,而对风机可靠性及运行维护策略研究尚处于起步阶段,国内外都鲜见报道。

马尔可夫过程是一种基于概率统计的特殊随机过程,是可靠性工程中极为重要的理论工具,它对系统的可靠性分析已被用于多个领域,但研究对象主要集中于单部件、多部件的串联、并联及冗余系统等^[6-7]。

笔者在研究风力发电系统关键部件故障机制的基础上,考虑到系统中部件之间的运行是不完全独立的情况,把马尔可夫过程理论应用到风机发电机-变流器系统可靠性分析中,建立基于有向网络的马尔可夫过程^[8]的风机发电系统可靠性模型,为科学制定发电系统维护策略提供理论支持。

1 发电系统故障机制分析

风力发电机组通常安装在偏远的郊外,在运行过程中内部疲劳累积与外部环境等多种因素相互作用,致使风机关键部件的故障率高居不下,根据瑞典风场 2000 年~2004 年间故障数据的统计表明^[9],发电系统是机组中最常发生故障的系统,也是引起风机停机时间的主要原因,其故障率高达 23%,其中故障最为频繁的是发电机和变流器故障。

现国内采用最多的是双馈异步风力发电机,其原理如图 1 所示。

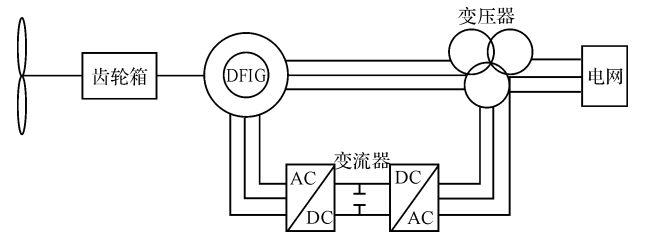


图 1 双馈异步风力发电机原理图

风机运行工况复杂、电网负荷持续变化,易使发电机温度过高、振动过大而损坏发电机的轴承及绕组的绝缘性能,因此双馈异步发电机的故障率明显高于其他发电机,据统计异步发电机中最常发生故障的部位是轴承、定子、转子,三者的故障率分别为 40%、38%、10%^[10]。

变流器是发电系统中实施能量转换的关键部件,其采用变速恒频技术,把风力机发出的电能转换为电压和频率都稳定的电能送入电网。变流器工作环境恶劣,高温发热、电磁干扰、油液腐蚀等都极易影响变流器的性能而导致变流器发生故障,且故障主要发生在控制驱动单元、直流母线环节、逆变器等组件中^[11],这些组件均是由各类电力电子器件构成的,其中使用较

多的是绝缘栅双极晶体管,当其两端过压、过流时都可能使晶体管超过耐受温度而击穿或烧毁,造成风机变流器发生故障。

2 发电系统可靠性建模

2.1 马尔可夫过程

马尔可夫过程^[12]是一种基于概率统计的随机过程,它能够描述系统在投入运行后状态之间相互转移的过程,该过程具备无后效性。通常只要系统中某个状态一经决定,则系统下一个状态的概率即可确定,并且与系统之前的状态无关,是对可修复系统进行可靠性分析的有力工具。

应用马尔可夫过程建立风电发电机-变流器系统的可靠性分析模型,需要作出如下假设:

- (1)系统中部件只有正常和故障 2 种状态,并且状态可以相互转换;
- (2)系统中部件处于正常或故障状态是相互独立的;
- (3)系统中部件失效分布和维修分布均服从指数分布,即各部件的故障率和修复率均为常数;
- (4)系统投入运行时是新的且处于工作状态,发生故障后立刻进入维修状态。

2.2 部件的可靠性模型

发电系统的故障主要分为电气故障和机械故障,笔者研究主要针对电气故障。依据风机发电系统故障机制分析,发电机故障主要包括定子绕组故障、转子绕组故障、轴承故障,变流器故障主要包括机侧及网侧变换器故障、控制单元故障、直流环节故障等,这些组件的可靠性参数如表 1 所示。

表 1 发电机、变流器可靠性参数

变量符号	变量含义
λ_s, μ_s	发电机定子绕组的故障率和修复率
λ_r, μ_r	发电机转子绕组的故障率和修复率
λ_b, μ_b	发电机轴承的故障率和修复率
λ_m, μ_m	机侧变换器的故障率和修复率
λ_g, μ_g	网侧变换器的故障率和修复率
λ_{cu}, μ_{cu}	变流器控制单元的故障率和修复率
λ_{dc}, μ_{dc}	变流器直流环节的故障率和修复率

在这些相互独立的组件中,任意组件发生故障都将影响到发电机、变流器的正常工作,因此,可以把这些组件看成串联系统,根据串联系统的可靠性分析,发电机子系统 1 和变流器的子系统 2 的可靠性模型为:

$$\lambda_1 = \lambda_s + \lambda_r + \lambda_b \tag{1}$$

$$\mu_1 = \frac{\lambda_s + \lambda_r + \lambda_b}{\frac{\lambda_s}{\mu_s} + \frac{\lambda_r}{\mu_r} + \frac{\lambda_b}{\mu_b}} \tag{2}$$

$$\lambda_2 = \lambda_m + \lambda_g + \lambda_{cu} + \lambda_{dc} \quad (3)$$

$$\mu_2 = \frac{\lambda_m + \lambda_g + \lambda_{cu} + \lambda_{dc}}{\frac{\lambda_m}{\mu_m} + \frac{\lambda_g}{\mu_g} + \frac{\lambda_{cu}}{\mu_{cu}} + \frac{\lambda_{dc}}{\mu_{dc}}} \quad (4)$$

2.3 发电系统的可靠性模型

双馈异步风力发电机^[13]的变流器和发电机的连接方式不是简单的串联关系,感应电动机的定子端直接接入电网,而转子端通过变流器接入电网,只有 20%~30% 的功率通过变流器经稳压后传入电网,所以发电机子系统 1 和变流器子系统 2 不再是串联系统,需要通过运用马尔可夫过程对系统进行可靠性建模。

首先需要定义一个随机过程 $\{\bar{X}(t), t \geq 0\}$, 该随机过程共有 4 中不同的状态:①状态 0:发电机处于工作状态,变流器处于工作状态;②状态 1:发电机处于工作状态,变流器故障处于维修状态;③状态 2:发电机故障处于维修状态,变流器处于停机状态;④状态 3:变流器故障处于维修状态,发电机故障也处于维修状态。

从发电系统的运行状态可以看出,系统的状态集 $S = \{0, 1, 2, 3\}$, 系统正常状态集 $W = \{0\}$, 系统的故障状态集 $F = \{1, 2, 3\}$, 由于分布为指数分布,随机过程 $\{\bar{X}(t), t \geq 0\}$ 为有限齐次马尔可夫链。

根据发电系统的模型,得出系统在 Δt 时间内状态转移图,如图 2 所示:

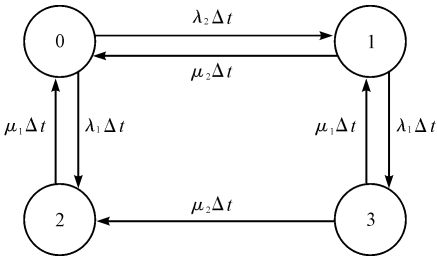


图 2 马尔可夫发电系统状态转移图

根据图 2 得到转移概率矩阵为:

$$Q = \begin{bmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & \lambda_2 & \lambda_1 & 0 \\ \mu_2 & -(\lambda_1 + \mu_2) & 0 & \lambda_1 \\ \mu_1 & 0 & -\mu_1 & 0 \\ 0 & \mu_1 & \mu_2 & -(\mu_1 + \mu_2) \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.3.1 系统的瞬时可用度

系统的瞬时可用度是在 t 时刻发电机、变流器都处于正常工作状态的概率为:

$$A(t) = P(\bar{X}(t) = 0) = P(x_1(t) = 1, x_2(t) = 1) \quad (6)$$

可令状态概率 $P_j(t) = P(\bar{X}(t) = j), j = 0, 1, 2, 3$, $P(t) = [P_0(t) \ P_1(t) \ P_2(t) \ P_3(t)]$, 假设时刻 $t = 0$, 系统正常工作并且处于状态 0, 即 $P(0) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$, 则 $P(t)$ 满足下列微分方程:

$$dP(t)/dt = P(t)Q \quad (7)$$

对该式作拉普拉氏变换、再进行拉普拉氏逆变换, 得到系统的可用度为:

$$A(t) = P(\bar{X}(t) = 0) = P_0(t) = L^{-1}(P_0^*(s)) \quad (8)$$

2.3.2 系统可靠性的稳态指标

根据式(5)的状态转移矩阵 Q , 可得到系统的可靠性的稳态指标和平均指标, 令系统的稳态概率值分别为 $\pi_0, \pi_1, \pi_2, \pi_3$, 得到系统稳态方程组:

$$\begin{cases} [\pi_0 \ \pi_1 \ \pi_2 \ \pi_3]Q = [0 \ 0 \ 0 \ 0] \\ \pi_0 + \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 = 1 \end{cases} \quad (9)$$

可将矩阵 Q 的表达式带入式(9), 即可求得系统各状态的稳态概率。系统的稳态可用度、系统的稳态故障频度、系统平均工作时间、系统平均维修时间分别为:

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \sum_{k \in W} \pi_k = \pi_0 \quad (10)$$

$$M = \sum_{k \in W} \pi_k \sum_{j \in F} \alpha_{kj} = \pi_0(\lambda_1 + \lambda_2) \quad (11)$$

$$t_{MUT} = \frac{A}{M} = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (12)$$

$$t_{MDT} = \frac{\bar{A}}{M} = \frac{1 - \pi_0}{(\lambda_1 + \lambda_2) \pi_0} \quad (13)$$

3 实例计算及影响因素分析

3.1 原始数据及计算结果

由于风电机组历史故障数据资料还比较少, 这使得风力发电系统的可靠性参数很难准确获得, 鉴于此, 本研究参考有关文献的可靠性参数对风力发电系统进行可靠性分析^[14]。

发电机、变流器各组件的故障率和修复率如表 2 所示。

表 2 发电机、变流器各组件的故障率和修复率

组件参数	故障率/(1/a)	组件参数	修复率/(1/a)
λ_s	0.02	μ_s	36.50
λ_r	0.02	μ_r	36.50
λ_b	0.08	μ_b	60.00
λ_m	0.40	μ_m	73.00
λ_g	0.40	μ_g	73.00
λ_{cu}	0.01	μ_{cu}	4 380.00
λ_{du}	0.04	μ_{du}	73.00

由表 2 可靠性数据, 根据式(1~4)计算子系统的

模型参数,可得到发电机和变流器的子系统的可靠性参数。

子系统的故障率和修复率如表 3 所示。

表 3 子系统的故障率和修复率

子系统	故障率/(1/a)	修复率/(1/a)
发电机	0.12	49.40
变流器	0.85	73.86

根据上述表格中可靠性数据,利用 Matlab 编程软件进行编程分析可得到系统的瞬时可用度。

发电系统和子系统的瞬时可用度对比图如图 3 所示。

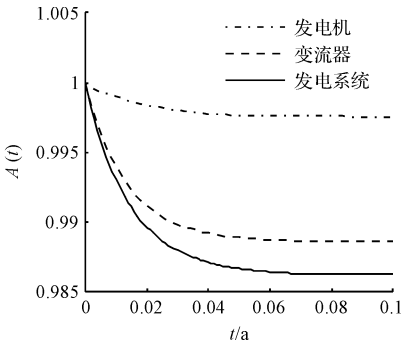


图 3 发电系统和子系统的瞬时可用度对比图

从图 3 可以看出,如果仅从单部件考虑,发电机子系统、变流器子系统的稳态可用度分别为 0.998、0.989,而整个系统的稳态可用度为 0.986,显然整个系统的稳态可用度要小于单部件的稳态可用度,且系统到达稳态的时间要大于其发电机、变流器子系统到达稳态的时间,验证了该模型的有效性。整个系统中发电机的运行状态是独立,它的可用度与单部件可用度相同,而变流器的运行状态则要受到系统发电机的影响,因而它的可用度与系统的可用度保持一致。

根据上述公式,笔者计算得到发电系统的稳态可靠性参数,如表 4 所示。

表 4 发电系统的稳态可靠性参数

类别	A	$M/(1/a)$	t_{MUT}/a	t_{MDT}/a
系统	0.986	0.956	1.031	0.015

3.2 相关因素分析

风力发电系统上升到稳态所需要的时间与系统部件的故障率及修复率有关系,而系统部件的故障率与部件自身的性能及运行环境有关,因此,本研究探讨发电机、变流器的修复率分别取不同数值时,对系统稳态可用度及到达稳态所需时间的影响^[15]。

从图 4 与图 5 可以看出,系统达到稳态的时间 t 与部件的修复率 μ 密切相关,系统到达稳态所需要的

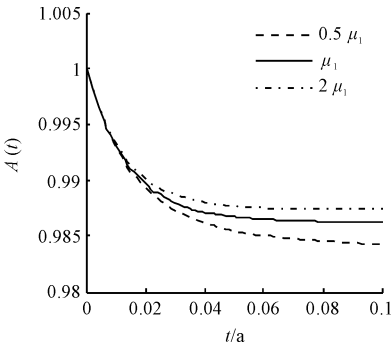


图 4 发电机的修复率与系统可用度的关系

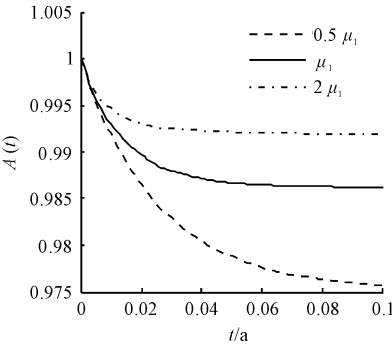


图 5 变流器的修复率与系统可用度的关系

时间随 μ 的增大而减少,因此,提高部件的修复率是使发电系统尽快到达稳态的有效途径,并且可以提高系统的稳态可用度。

与系统的瞬时可用度相比,工程技术人员往往更加关注系统的稳态可用度^[16],它是系统可靠性评估的重要数据,通过对系统可用度的分析,可以采用最有效、经济的方式保证设备随时处于工作状态,使其充分发挥系统的性能。

发电系统稳态可用度随部件的故障率与修复率的变化规律如图 6、图 7 所示。

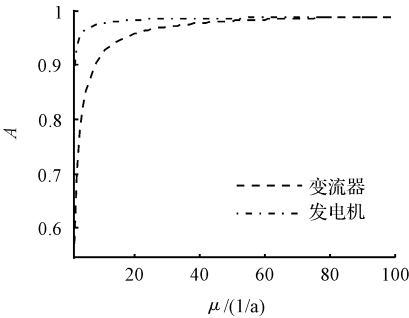


图 6 系统稳态可用度与部件修复率的关系

从图 6 可以看出,发电系统的稳态可用度与发电机、变流器的修复率均密切相关,发电系统的稳态可用度随部件的修复率增大而提高,当部件的修复率达到 30 次以后,系统的稳态可用度上升的比较缓慢,所以单纯地提高部件的修复率对提高整个发电系统的可用

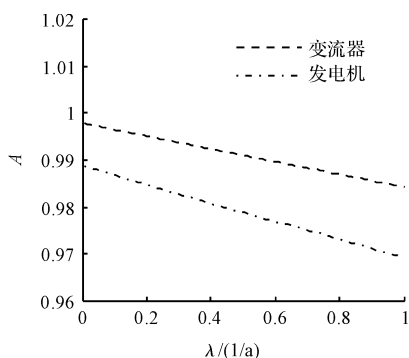


图 7 系统稳态可用度与部件故障率的关系

度效果并不明显。从图 7 可知,整个发电系统的稳态可用度随部件的故障率减少而缓慢上升,但上升到一定数值时,系统的可用度将达到定值,即要想提高发电系统的可用度不能仅仅只重视部件的故障率或修复率的大小,而应将两者综合起来进行考虑。

4 结束语

笔者研究了双馈异步风力发电系统关键部件的故障机制,建立了有向网络的马尔可夫可修模型,利用状态空间法对发电机-变流器系统进行可靠性分析,将复杂的结果用清晰明了的图形进行分析,达到了很好的效果。分析表明,发电系统的可用度由故障率、修复率共同决定,修复率对系统达到稳态所需时间的贡献度较大,对开展风机的可靠性研究和评估具有一定的参考价值,同时也为研究多阶段有向网络系统提供了铺垫作用。

风电机组是集机械、电气多部件的复杂系统,故障模式及运行状态复杂多样,考虑多种失效因子的影响,利用马尔可夫过程建立涵盖整个机组综合状态的可靠性模型,还有待进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] TAVNER P J, XIANG J, SPINATO F. Reliability analysis for windturbines[J]. *Wind Energy*, 2007, 10(1): 1-18.
- [2] 孟恩隆,郭东杰,王灵梅,等. 风力发电机组状态监测与智能故障诊断系统的设计与实现[J]. *华东电力*, 2012, 40(3): 507-510.

- [3] 梁伟宸,许湘莲,庞可,等. 风电机组故障诊断实现方法探讨[J]. *高压电器*, 2011, 47(8): 57-62.
- [4] 王占霞,张晓波. 基于 SOM 网的风电变流器故障诊断[J]. *电网与清洁能源*, 2011, 27(4): 35-38.
- [5] 安学利,赵明浩,蒋东翔,等. 基于支持向量机和多源信息的直驱风力发电机组故障诊断[J]. *电网技术*, 2011, 35(4): 117-122.
- [6] 吴志良,郭晨,赵红. 基于马尔柯夫过程的可修系统可靠性建模[J]. *大连海事大学学报*, 2007, 33(1): 13-16.
- [7] 王贤林,张华. 基于马尔可夫过程的机电设备有效性模型[J]. *机电工程*, 2008, 25(6): 5-7.
- [8] 于明丽,崔利荣. 两阶段有向网络马尔可夫系统维修模型与分析[J]. *北京理工大学学报*, 2011, 31(6): 753-756.
- [9] RIBRANT J, BERTLING LM. Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997-2005 [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, 22(1): 167-173.
- [10] POPA L M, JENSEN B-B, RITCHIE E, et al. Condition monitoring of wind generators[J]. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2003, 3: 1839-1846.
- [11] YANG S, BRYANT A, MAWBY P, et al. An industry - based survey of reliability in power electronic converters [J]. *IEEE Transaction on Industry Applications*, 2011, 47(3): 1441-1451.
- [12] 曹晋华,程侃. 可靠性数学引论[M]. 2 版,北京:高等教育出版社,2012.
- [13] 沙非,马成廉,刘闯,等. 变速恒频风力发电系统及其控制技术研究[J]. *电网与清洁能源*, 2009, 25(1): 44-47.
- [14] ARABIAN H H, ORAEE H, TAVNER P J. Wind turbine productivity considering electrical subassembly reliability [J]. *Renewable Energy*, 2010(35): 190-197.
- [15] 于敏,何正友,钱清泉. 基于 Markov 模型的可维修双机热备系统可靠性分析[J]. *计算机工程与设计*, 2009, 30(8): 2040-2042.
- [16] 欧健,李艾华,徐斌,等. 基于 Markov 过程的柴油机监控系统可靠性评估[J]. *机电工程*, 2011, 28(11): 1319-1323.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

秦洋,马慧民,陈玉晶. 基于马尔可夫模型的风力发电系统可靠性分析[J]. *机电工程*, 2015, 32(8): 1136 - 1140.

QIN Yang, MA Hui-min, CHEN Yu-jing. Reliability analysis of wind power generation system based on Markov model[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(8): 1136 - 1140.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>