

风力发电机组可靠性建模与维修策略优化

李大宇¹, 冯园园¹, 刘展², 楚纪正¹, 靳其兵¹

(1. 北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京市 朝阳区 100029;

2. 北京市能高自动化技术有限公司, 北京市 海淀区 100081)

Reliability Modeling and Maintenance Strategy Optimization for Wind Power Generation Sets

LI Dazi¹, FENG Yuanyuan¹, LIU Zhan², CHU Jizheng¹, JIN Qibing¹

(1. College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Chaoyang District, Beijing 100029, China; 2. Beijing Nego Automation Technology Co. Ltd., Haidian District, Beijing 100081, China)

ABSTRACT: The rapid development of wind power generation makes the structure of wind power generation sets more and more complex, correspondingly the failure rate of the sets increases. To improve the reliability of wind power generation sets, a reliability optimization strategy of wind power generation sets is proposed. Taking doubly fed wind power generator for example, based on mathematical model of Markov process and reliability theory a reliability model of wind power generation set is built. On this basis, a structure chart of ageing, faults and maintenance for wind power generation sets is constructed to obtain the maintenance strategy of wind power generation set under its optimal reliability.

KEY WORDS: wind power generation sets; reliability model; reliability optimization; maintenance strategy; Markov process

摘要: 风力发电的快速发展使得风电机组结构越来越复杂, 故障率也随之提高。为了提高风力发电机组的可靠性, 提出了一种风力发电机组的可靠性优化策略。以双馈风力发电机为例, 运用马尔可夫过程数学模型和可靠性理论建立风力发电机组的可靠性模型, 在此基础上构造风电机组老化、故障和维修的网络结构图, 从而得到风电机组可靠性最优时的维修策略。

关键词: 风力发电机组; 可靠性模型; 可靠性优化; 维修策略; 马尔可夫过程

0 引言

风能是一种不污染环境且可再生的自然资源, 可开发利用的潜力巨大, 积极发展风力发电对增加能源供应、缓解环境污染和促进经济发展, 都能起到十分重要的作用。随着风电机组容量的增加, 为

实现其性能最优化, 风机结构越来越复杂^[1], 风机故障率提高, 因此在追求风力发电机组发电量的同时, 必须考虑其可靠性。

目前, 对风力发电的研究工作主要集中在风力发电机组的控制技术上^[2-5], 而对风力发电整机系统的可靠性研究以及装置的运行维护优化策略研究较少。随着现代可靠性科学和技术的发展, 量化工业装置的运行可靠性成为可能^[6-7]。基于对装置可靠性的量化评估, 优化装置的运行维护策略对于装置安全、稳定运行, 进而实现生产效益的最大化, 有着重要意义。

文献[8]通过对风力发电机组的电气部件拆分以及计算各部分的故障率和修复率, 建立了基于马尔可夫过程的风力发电机组电气组件的可靠性模型。文献[9]利用德国和丹麦风电场的历史运行数据建立了风机可靠性模型, 实现了风力发电机组可靠性预测。文献[10]从风力发电机组的功率、负荷关系这个角度研究了风力发电系统的可靠性。文献[11]通过绘制风电机组各个控制环节的可靠性网络图, 并对系统薄弱环节备份, 提高了风电机组可靠性。文献[12]提出一种基于蒙特卡罗仿真建立风力发电机组可靠性模型的方法。文献[13-14]对风电场运行和维修费用进行了研究。

本文以水平轴双馈型风力发电机为例研究风力发电装置运行可靠性的计算方法, 在此基础上进行风电装置维修策略的优化。根据机组各子系统之间的功能关系进行拆分, 分析各子系统之间故障状态和运行状态以及相关可靠性理论, 建立基于马尔可夫转移过程理论的可靠性数学模型, 构造包含机组

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2009BAA22B04)。

Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China (2009BAA22B04).

老化、故障和维修等环节的马尔可夫过程模型，以维修间隔为优化变量，对机组可靠性实施优化。

1 大型风力发电机组基本结构

本文以目前世界各国使用较多的水平轴双馈型风力发电机^[15-16]为例进行可靠性分析。水平轴风力发电机主要由风轮、风轮轴、低速联轴器、增速器、高速轴联轴器、发电机、塔架、调速装置、调向装置、制动器等组成^[17]。

由于整机结构复杂，为便于分析与建模，首先对风力发电装置的构成部件进行系统拆分，使之成为一个由子系统或部件构成的对象系统。根据风力发电机常见故障可将整个风电机组分成图 1 所示的几个模块：叶片、轮毂、低速轴、变桨机构、齿轮箱(增速器)、高速轴、偏航系统、发电机、变流器。

整机系统拆分为以下子系统：叶片子系统 A；轮毂子系统 B；低速轴(含机械制动)、齿轮箱、高速轴(含机械制动)子系统 C；发电机子系统 D；变流器子系统 E；桨距调节和变桨距控制子系统 F；偏航子系统 G；子系统 C、D、E 进一步归成子系统 H；子系统 A、B、F、H、G 构成整机系统。

2 风力发电机组可靠性建模

2.1 马尔可夫过程

马尔可夫过程(Markov process, MP)是一种随机过程，研究的是“状态”与“状态”之间相互转移的关系。一步马尔可夫过程是指只要前一个状态 $X(t_{n-1})$ 一经决定，下一个状态 $X(t_n)$ 的概率即可确定，并与之前的状态无关。对于某一可修复设备系统，即可分为正常状态 S 和故障状态 F。处于 S 状态的系统，由于故障会转移到 F 状态。相反，处于 F 状态的系统经过修复又可转移到 S 状态。这种状态转移过程完全是随机的，也就是说，它不能以确定的规律转移，而只能按照某种概率转移。可修复单元故障状态和修复状态之间的转移就是典型的马尔可

夫过程^[18]。

基于马尔可夫过程建立风力发电机组的可靠性模型时需基于以下假设：1) 系统零部件只有正常和故障 2 种状态；2) 各部件之间正常或故障状态是相互独立的；3) 风力发电机组各零部件的失效分布和维修度分布均服从指数分布，即各部件的状态转移概率(失效率 λ 和修复率 μ)均为常数；4) 只对硬件进行可靠性分析，软件人员默认为是可靠的。

2.2 风力发电机组可靠性数学模型

依据可靠性理论和马尔可夫过程，由于低速轴(含机械制动)、齿轮箱、高速轴(含机械制动)是串联关系，以及桨距调节和变桨距控制系统也是串联关系，根据串联系统可靠性分析^[19]可知，子系统 C 和子系统 F 的可靠性模型为

$$\lambda_C = \lambda_l + \lambda_g + \lambda_h \tag{1}$$

$$\mu_C = \frac{\lambda_l + \lambda_g + \lambda_h}{\frac{\lambda_l}{\mu_l} + \frac{\lambda_g}{\mu_g} + \frac{\lambda_h}{\mu_h}} = \frac{(\lambda_l + \lambda_g + \lambda_h)\mu_l\mu_g\mu_h}{\lambda_l\mu_g\mu_h + \lambda_g\mu_l\mu_h + \lambda_h\mu_l\mu_g} \tag{2}$$

$$\lambda_F = \lambda_p + \lambda_{\beta} \tag{3}$$

$$\mu_F = \frac{\lambda_p + \lambda_{\beta}}{\frac{\lambda_p}{\mu_p} + \frac{\lambda_{\beta}}{\mu_{\beta}}} = \frac{(\lambda_p + \lambda_{\beta})\mu_p\mu_{\beta}}{\lambda_p\mu_{\beta} + \lambda_{\beta}\mu_p} \tag{4}$$

式中： λ_l 为低速轴(含机械制动)的故障率； μ_l 为低速轴(含机械制动)的修复率； λ_g 为齿轮箱的故障率； μ_g 为齿轮箱的修复率； λ_h 为高速轴(含机械制动)的故障率； μ_h 为高速轴(含机械制动)的修复率； λ_p 为桨距调节的故障率； μ_p 为桨距调节的修复率； λ_{β} 为变桨距控制系统的故障率； μ_{β} 为变桨距控制系统的修复率。

双馈异步风力发电机^[20]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(子系统 D)定子直接并网，而转子侧连接变流器(子系统 E)，即只有 20%~30%的功率连接变流器经控制系统稳定电压，所以子系统 C、D、E 之间不再是简单的串联系统，但可通过分析马尔可夫过程对子系统 H 的可靠性进行建模。根据风力发电机运行原

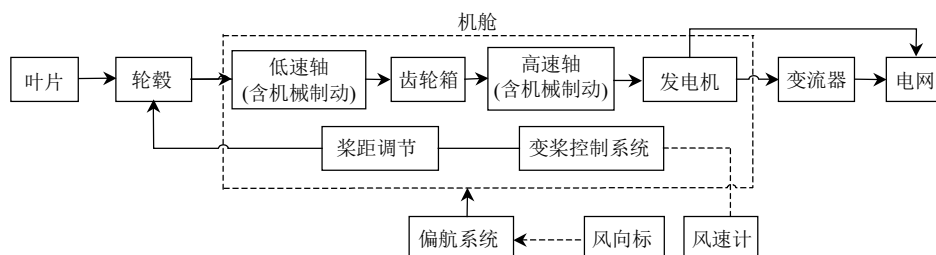


图 1 双馈风力发电机组结构
Fig. 1 Structure of double-fed wind generator

理与故障机理，可以得出图 2 所示的马尔可夫状态转移过程。

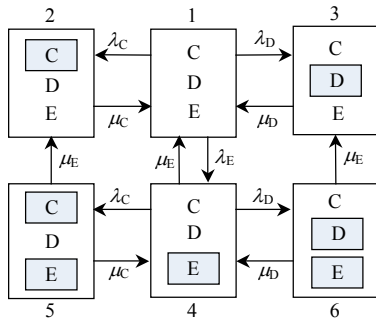


图 2 系统 H 的可靠性模型
Fig. 2 Reliability model of system H

图 2 中带矩形框的子系统表示该部件处于故障状态，否则为正常状态。根据频率平衡法有

$$\begin{cases} P_1(\lambda_C + \lambda_D + \lambda_E) = P_2\mu_C + P_3\mu_D + P_4\mu_E \\ P_2\mu_C = P_1\lambda_C + P_5\mu_E \\ P_3\mu_D = P_1\lambda_D + P_6\mu_E \\ P_4(\lambda_C + \lambda_D + \mu_E) = P_1\lambda_E + P_5\mu_C + P_6\mu_D \\ P_5(\mu_C + \mu_E) = P_4\lambda_C \\ P_6(\mu_D + \mu_E) = P_4\lambda_D \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 = 1 \end{cases} \quad (5)$$

若只强调子系统运行和故障 2 种状态，根据式(5)可得简化的可靠性模型，如图 3 所示。

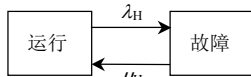


图 3 系统 H 简化后的可靠性模型
Fig. 3 Reduced reliability model of system H

当变流器故障时，风力发电机仍能运行，所以运行状态包括图 2 中的状态 1 和状态 4，其余状态均为故障状态。

设下标 Up 和 Dn 分别表示图 3 中的运行状态和故障状态，其故障率和修复率计算如下：

$$P_{Up} = P_1 + P_4 \quad (6)$$

$$P_{Dn} = P_2 + P_3 + P_5 + P_6 \quad (7)$$

$$f_{Up} = f_1 + f_4 \quad (8)$$

$$P_{Up}\lambda_H = P_1(\lambda_C + \lambda_D) + P_4(\lambda_C + \lambda_D) \quad (9)$$

$$P_{Up}\lambda_H = P_{Dn}\mu_H \quad (10)$$

同理，可根据子系统 A、B、D、G、H 的马尔可夫过程得到整机的可靠性模型，如图 4 所示。

当偏航系统故障时，风力发电机仍能运行，所以运行状态包括图 4 中的状态 1 和状态 6，其余状态均为故障状态。根据频率平衡法有

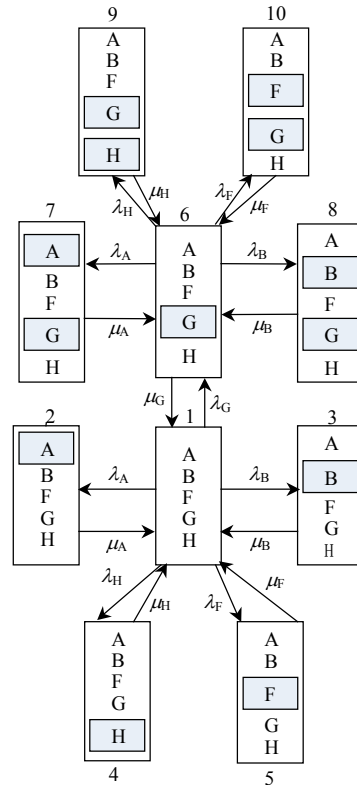


图 4 风力发电机整机可靠性模型
Fig. 4 Reliability model of wind turbine

$$\begin{cases} P_1(\lambda_A + \lambda_B + \lambda_G + \lambda_H + \lambda_F) = P_2\mu_A + P_3\mu_B + P_4\mu_H + P_5\mu_F + P_6\mu_G \\ P_2\mu_A = P_1\lambda_A \\ P_3\mu_B = P_1\lambda_B \\ P_4\mu_H = P_1\lambda_H \\ P_5\mu_F = P_1\lambda_F \\ P_6(\lambda_A + \lambda_B + \lambda_H + \lambda_F + \mu_G) = P_1\lambda_G + P_7\mu_A + P_8\mu_B + P_9\mu_H + P_{10}\mu_F \\ P_7\mu_A = P_6\lambda_A \\ P_8\mu_B = P_6\lambda_B \\ P_9\mu_H = P_6\lambda_H \\ P_{10}\mu_F = P_6\lambda_F \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10} = 1 \end{cases} \quad (11)$$

将整机系统简化成图 3 所示的模型，其故障率和修复率计算如下：

$$P_{Up} = P_1 + P_6 \quad (12)$$

$$P_{Dn} = P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10} \quad (13)$$

$$f_{Up} = f_1 + f_6 \quad (14)$$

$$P_{Up}\lambda = P_1(\lambda_A + \lambda_B + \lambda_H + \lambda_F) + P_6(\lambda_A + \lambda_B + \lambda_H + \lambda_F) \quad (15)$$

$$P_{Up}\lambda = P_{Dn}\mu \quad (16)$$

3 风力发电机组可靠性优化策略

维修一般分为 2 类：故障后维修和预防性维修。

预防性维修又分成定期计划维修和视情维修，计划维修是根据给定的时间对正常运行的系统进行的维修，如给转动零件补充润滑油、加固螺栓等；视情维修是根据系统使用的健康水平安排的维修工作。计划维修安排不妥当，会造成盲目维修、维修过剩或者不足。本文主要优化定期计划的维修间隔，同时将视情维修视为故障后维修。

整机老化和随机故障后全面修复的维修模型^[21-24]如图 5 所示。

图 5 中：根据机组的使用情况定义，D₁、D₂和 D₃ 分别代表系统的 3 个老化阶段，但是未发生明显故障；M₁、M₂和 M₃ 代表预防性维修状态；状态 F₁ 代表可以随时发生的偶然故障状态，但是不会在维修期间发生；状态 F₀ 代表老化故障状态；并假设每一阶段老化的时间服从均值为 1/λ₀ 的指数分布，λ₁和 μ₁ 分别表示整机系统在规定的第 1 老化阶段内总的失效率和修复率，类似的，λ₂、λ₃和 μ₂、μ₃ 分别

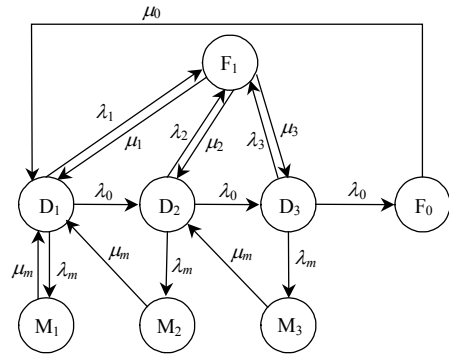


图 5 机组老化和随机故障后全面修复的维修模型

Fig. 5 Maintenance model with deterioration and full repair after random failure for wind turbine

表示整机系统在规定的第 2 老化阶段、第 3 老化阶段内总的失效率和修复率；假设由于老化出现的故障在维修以后会恢复初始状态；μ₀ 是老化故障后的维修率；1/λ_m 是预防性维修平均时间间隔；1/μ_m 是平均预防性维修时间。

维修模型的状态转移矩阵如式(17)所示：

$$M = \begin{bmatrix} -(\lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_m) & \lambda_0 & 0 & \lambda_m & 0 & 0 & 0 & \lambda_1 \\ 0 & -(\lambda_0 + \lambda_2 + \lambda_m) & \lambda_0 & 0 & \lambda_m & 0 & 0 & \lambda_2 \\ 0 & 0 & -(\lambda_0 + \lambda_3 + \lambda_m) & 0 & 0 & \lambda_m & \lambda_0 & \lambda_3 \\ \mu_m & 0 & 0 & -\mu_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_m & 0 & 0 & 0 & -\mu_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_m & 0 & 0 & 0 & -\mu_m & 0 & 0 \\ \mu_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_0 & 0 \\ \mu_1 & \mu_2 & \mu_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(\mu_1 + \mu_2 + \mu_3) \end{bmatrix} \quad (17)$$

根据状态转移矩阵可列出各状态的稳态方程：

$$\begin{cases} PM = 0 \\ P_{D1} + P_{D2} + P_{D3} + P_{M1} + P_{M2} + P_{M3} + P_{F0} + P_{F1} = 1 \end{cases} \quad (18)$$

式中 P=[P_{D1} P_{D2} P_{D3} P_{M1} P_{M2} P_{M3} P_{F0} P_{F1}]，P 中各元素分别为状态 D₁、D₂、D₃、M₁、M₂、M₃、F₀和 F₁ 的稳态概率。

风力发电机组正常工作的概率(可用度)为

$$A(\lambda_m) = P_{D1} + P_{D2} + P_{D3} \quad (19)$$

当可用度最大时，可靠性最高^[21]。通过可用度可以计算出风力发电机组可靠度最优时的预防性维修平均间隔时间。

4 算例结果分析

本文参考文献[9]和 Windstats Newsletter 中的德国风电场数据，计算出 3 个老化阶段风电机组各部件故障率和修复率，如表 1 所示。根据表 1 数据计算简化后模型参数，如表 2 所示，进而求出 3 个阶段整机的故障率和修复率，即 λ₁、μ₁、λ₂、μ₂、λ₃、

表 1 风电机组各部件 3 个老化阶段的可靠性数据

Tab. 1 Reliability data in the three deterioration stages for wind turbine subassemblies

风机组件	故障率/(次/a)			修复率/(次/a)		
	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 1	阶段 2	阶段 3
叶片	0.223	0.233	0.253	34.790	32.610	29.720
轮毂	0.010	0.020	0.040	36.500	34.221	31.312
低速轴	0.063	0.073	0.093	16.133	14.112	11.034
齿轮箱	0.100	0.110	0.130	139.048	137.123	134.214
高速轴	0.063	0.073	0.093	16.133	14.112	11.034
发电机	0.120	0.130	0.140	36.058	34.058	31.378
变流器	0.341	0.351	0.361	242.265	240.345	237.345
桨距调节	0.097	0.107	0.127	367.856	365.923	362.650
变桨距控制	0.010	0.020	0.040	315.108	313.210	310.100
偏航系统	0.126	0.136	0.156	210.935	208.945	205.800

μ₃。λ₀ 通过定义的老化阶段时间间隔得到，μ_m 通过采集风机部件维护活动时间和维护次数得到，参考 Windstats Newsletter，取 μ_m⁻¹=8 h。

根据表 2 得到的 3 个阶段整机的故障率和修复率，结合图 5 可以得到预防维修平均间隔时间(1/λ_m)对可用度的影响结果，如图 6 所示。

表 2 简化后模型参数
Tab. 2 Reduced model parameters

风机组件	故障率/(次/a)			修复率/(次/a)		
	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 1	阶段 2	阶段 3
子系统 C	0.226	0.256	0.316	26.497	22.964	17.727
子系统 F	0.107	0.127	0.167	362.190	356.475	348.504
子系统 H	0.346	0.386	0.456	29.181	25.794	20.460
整机	0.673	0.749	0.887	35.161	32.055	27.003

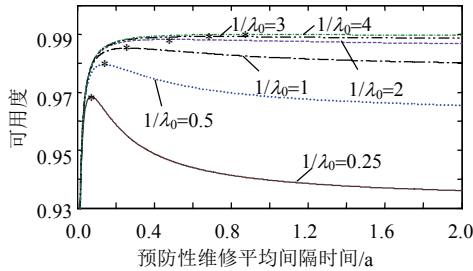


图 6 预防性维修平均间隔时间对可用度的影响
Fig. 6 The effect of mean interval time to preventive maintenance on availability

结果表明，风电机组老化阶段间隔时间($1/\lambda_0$)越长，表明机组运行性能越好，机组可用度提高，并且最佳预防性维修平均间隔时间也变长。当老化阶段间隔时间已知时，可用度随着机组的使用会下降，如果预防维修平均间隔时间不合理，机组可用度会很小，从而影响机组可靠性。可靠度最优的维修策略(图 6 中*号标记)如表 3 所示。由优化结果可知，维修策略制定不当会导致机组可靠性下降。

表 3 可靠度最优的维修策略
Tab. 3 Maintenance strategy for optimal reliability

最优预防 维修时间间隔/a	最优可用度	机组老化阶段 时间间隔/a
0.072	0.969	0.25
0.139	0.980	0.5
0.262	0.985	1
0.482	0.988	2
0.684	0.989	3
0.877	0.990	4

5 结论

本文实现了一种新的优化风力发电机组可靠性的维修策略。基于马尔可夫过程对风力发电机组可靠性进行分析，以德国风电场部分数据为依据计算了各部件可靠性模型参数。在考虑老化故障和偶然故障的情况下建立维修策略，通过对预防性维修平均间隔时间的优化，得出了最优维修策略。由于数据来源较少以及可靠性数据随机性较大，所得结果会与实际情况有所偏差。如果具备详尽的风电机组故障维修记录数据，即可通过本文的策略较准确地实现系统可靠性优化。

参考文献

- [1] 施跃文, 高辉, 陈钟. 国外特大型风力发电机组技术综述[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 87-91.
Shi Yuewen, Gao Hui, Chen Zhong. A summary on technical features of overseas multi-MW wind turbines[J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 87-91(in Chinese).
- [2] 姚骏, 廖勇, 瞿兴鸿, 等. 直驱永磁同步风力发电机的最佳风能跟踪控制[J]. 电网技术, 2008, 32(10): 11-15.
Yao Jun, Liao Yong, Qu Xinghong, et al. Optimal wind-energy tracking control of direct-driven permanent magnet synchronous generators for wind turbines[J]. Power System Technology, 2008, 32(10): 11-15(in Chinese).
- [3] 凌禹, 张同庄. 变速风力发电系统控制技术综述[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(3): 122-125.
Ling Yu, Zhang Tongzhuang. Summary of control algorithms for variable-speed wind power generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(3): 122-125(in Chinese).
- [4] Boukhezzer B, Lupu L, Siguerdidjane H, et al. Multivariable control strategy for variable speed, variable pitch wind turbines[J]. Renewable Energy, 2007(32): 1273-1287.
- [5] 赵仁德, 王永军, 张加胜. 直驱永磁同步风力发电系统最大功率追踪控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 106-112.
Zhao Rende, Wang Yongjun, Zhang Jiasheng. Maximum power point tracking control of the wind energy generation system with direct-driven permanent magnet synchronous generators [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 106-112(in Chinese).
- [6] 石文辉, 别朝红, 王锡凡. 大型电力系统可靠性评估中的马尔可夫链蒙特卡洛方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 9-15.
Shi Wenhui, Bie Zhaohong, Wang Xifan. Applications of Markov Chain Monte Carlo in large-scale system reliability evaluation [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 9-15(in Chinese).
- [7] 何剑, 程林, 孙元章. 电力系统运行可靠性最优控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 15-21.
He Jian, Cheng Lin, Sun Yuanzhang. Optimal control of power system's operational reliability[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 15-21(in Chinese).
- [8] Arabian H H, Oraee H, Tavner P J. Wind turbine productivity considering electrical subassembly reliability[J]. Renewable Energy, 2010(35): 190-197.
- [9] Tavner P J, Xiang J, Spinato F. Reliability analysis for wind turbines[J]. Wind Energy, 2007(10): 1-18.
- [10] 孔屹刚, 王志新. 风电机组可靠性建模和动态过程分析[J]. 太阳能学报, 2008, 29(6): 652-656.
Kong Yigang, Wang Zhixin. Reliability modeling and dynamic process analysis for wind turbine[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2008, 29(6): 652-656(in Chinese).
- [11] 王湘明, 王晓东, 邓英. 变速恒频风电机组控制系统可靠性分析[J]. 可再生能源, 2006(1): 66-68.
Wang Xiangming, Wang Xiaodong, Deng Ying. Dependability analysis of the control system of variable speed constant frequency wind turbine[J]. Renewable Energy, 2006(1): 66-68(in Chinese).
- [12] 吴义纯, 丁明. 基于蒙特卡罗仿真的风力发电系统可靠性评价[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(12): 70-73.
Wu Yichun, Ding Ming. Reliability assessment of wind power generation system based on Monte-Carlo simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(12): 70-73(in Chinese).
- [13] Krokoszinski H J. Efficiency and effectiveness of wind farms-keys to cost optimized operation and maintenance[J]. Renewable Energy,

- 2003(28): 2165-2178.
- [14] Marsh G. What price O&M: operation and maintenance costs need to be factored into the project costs of offshore wind farms at an early stage[J]. Refocus, 2007, 8(3): 22,24,26-27.
- [15] 徐大平, 肖运启, 秦涛, 等. 变桨距型双馈风电机组并网控制及建模仿真[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 100-105.
Xu Daping, Xiao Yunqi, Qin Tao, et al. Cutting-in control of variable-pitch doubly-fed wind power generation system and its modeling and simulation[J]. Power System Technology, 2008, 32(6): 100-105(in Chinese).
- [16] 王晓兰, 孙万义. 双馈风力发电机在不同电网故障下的动态响应仿真研究[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 170-175.
Wang Xiaolan, Sun Wanyi. Simulation study on dynamic response of doubly fed induction generators during system voltage sag caused by power grid faults[J]. Power System Technology, 2010, 34(8): 170-175(in Chinese).
- [17] 苏绍禹. 风力发电机设计与运行维护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 10-27.
- [18] 王贤琳, 张华. 基于马尔柯夫过程的机电设备有效性模型[J]. 机电工程, 2008, 25(6): 5-7.
Wang Xianlin, Zhang Hua. Availability-model for electromechanical equipment based on Markov process[J]. Mechanical & Electrical Engineering, 2008, 25(6): 5-7(in Chinese).
- [19] 宋保维. 系统可靠性设计与分析[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008: 74-77.
- [20] Ko H S, Yoon G G, Kyung N H, et al. Modeling and control of DFIG-based variable-speed wind-turbine[J]. Electric Power Systems Research, 2008(78): 1841-1849.
- [21] Chan G K, Asgarpoor S. Optimum maintenance policy with Markov processes[J]. Electric Power Systems Research, 2006(76): 452-456.
- [22] 龚立秋, 段斌, 颜娜, 等. 基于小脑模型神经网络-比例积分微分控制的异步风力发电机组并网控制系统建模与仿真[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 19-23.
Gong Liqiu, Duan Bin, Yan Na, et al. Modeling and simulation of CMAC-PID control based soft cut-in controlling system for asynchronous wind turbine generators[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 19-23(in Chinese).
- [23] 张江滨, 李华, 谢辉平, 等. 水电机组并网运行频率调节系统的稳定性[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 57-62.
Zhang Jiangbin, Li Hua, Xie Huiping, et al. Stability of frequency regulating system for hydropower units in grid-connected operation[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 57-62(in Chinese).
- [24] 秦涛, 吕跃刚, 徐大平, 等. 采用双馈机组的风电场无功功率控制技术[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 105-110.
Qin Tao, Lü Yuegang, Xu Daping. Reactive power control of wind farm adopting doubly-fed induction generators[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 105-110(in Chinese).



李大字

收稿日期: 2011-02-25。

作者简介:

李大字(1970), 女, 博士, 副教授, 研究方向为人工智能、先进控制、复杂系统建模与优化等,
E-mail: lidz@mail.buct.edu.cn;

冯园园(1985), 女, 硕士研究生, 研究方向为风力发电系统可靠性建模与优化, E-mail: 2008000769@grad.buct.edu.cn。

(责任编辑 杜宁)