海上风电场升压站电气设备可靠性建模

杨苹[1,2]，尹旭[1,2]，陈楠[3]
（1. 华南理工大学 广东省绿色能源技术重点实验室，广州 511458；
2. 华南理工大学 电力学院，广州 510640；3. 广东省电力设计研究院，广州 510663）

摘要：海上升压站是风电场电能传输的关键环节。针对海上升压站电气设备的可靠性研究，提出了一种新颖的基于马尔可夫过程的建模方法。首先对升压站电气设备的运行状态进行划分，确定其二状态马尔可夫模型，其次分析基本元件的连接形式，建立其状态转移概率矩阵和转移概率密度矩阵。在此基础上根据马尔可夫方程建立海上风电场升压站内主要设备变压器、母线、电缆等的可靠性模型，并分析了升压站系统的可靠性指标，最后根据某海上风电场的具体数据，结合所建立的升压站电气设备的可靠性模型，对此风电场的升压站系统的可靠性指标进行计算分析。

关键词：海上升压站；马尔可夫过程；可靠性模型
DOI：10.7643/issn.1672-9242.2013.05.003
中图分类号：TM732　　**文献标识码：**A
文章编号：1672－9242(2013)05－0011－06

Modeling of Equipment Reliability for Offshore Wind Farm Substation

YANG Ping[1,2], *YIN Xu*[1,2], *CHEN Nan*[3]
(1. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, Guangzhou 511458, China;
2. School of Electricity Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
3. Guangdong Electric Power Design Institute, China Energy Engineering Group Co., Ltd, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Offshore substation is the key to offshore wind farm power energy transmission. A novel modeling method based on Markov process was put forward for reliability research of offshore substation electrical equipment. Firstly, operation condition of electrical equipment was divided in order to determine the two state Markov model. Secondly, through analysis of connection form of basic electrical element, its state transition probability matrix and a transition probability density matrix were established. The reliability model of major offshore wind farm substation equipment such as transformers, bus-bar, and cable was established based on Markov equation. The reliability index of the offshore wind farm substation systems was analyzed. Finally, on the basis of some offshore wind farm specific data, combining with the reliability model, the reliability index of the offshore wind farm substation system was analyzed.

Key words: offshore substation; Markov process; reliability modeling

收稿日期：2013-06-22
基金项目：国家自然科学基金项目(61273172)
作者简介：杨苹(1967—)，女，博士生导师，研究方向为新能源发电并网与控制技术。

海上风电场由于丰富的资源优势，目前得到了广泛的开发利用，但因其地处海洋环境，设备的使用寿命、可靠性及日常运行维护任务相比陆地风电场而言，有很大不同[1]。目前，随着海上风力发电的蓬勃发展，其电气设备的可靠性研究变得越来越紧迫。风电场的电气设备及系统结构可靠性高，有助于减少检修频率，降低运行维护费用，提高系统的经济效益。海上升压站作为风电场电能传输的关键环节，其可靠性研究是海上风电场正常运行的重要部分[2]。

目前，很多学者从风电场本身受影响的角度研究海上风电场设备的可靠性。Takoudis根据蒙特卡洛方法模拟了3种不同的集电系统接线方式对风电场可靠性的影响，从而说明了冗余设计可实现集电系统的优化[3]；文献[4]则对3个不同风电场的集电系统进行可靠性评估和比较[4]。Underbrink等人对海上风电场的集电系统中各设备元件对于系统可靠性的影响进行了分析评估[5]，而目前国内外研究者对海上风电场升压站的电气设备本身的可靠性研究甚少。基于马尔可夫过程的电气设备可靠性建模方法，因其物理概念清晰、计算方便，在传统的电力系统可靠性研究中获得了广泛的应用[6]。文中通过对升压站电气设备的运行状态进行分析，确定其二状态马尔可夫模型，在此基础上根据马尔可夫方程建立海上风电场升压站内主要设备的可靠性模型，并求解设备可靠性指标。

1 电气设备元件的马尔可夫模型

电力系统中电气设备的寿命是工作、故障、修复、再工作和故障停运的交替过程。各电气元件的工作状态如图1所示。

在电力系统电气设备元件的可靠性分析中，元件的寿命是非负的随机变量，其性质可由概率分布来描述。用指数分布来近似描述设备的工作时间和修复时间，则可修复元件的使用寿命 α 可视为服从指数分布[6]：

$$g_\alpha(x)=\begin{cases}\beta e^{-\beta x} & (x>0)\\ 0 & (x\leqslant 0)\end{cases} \tag{1}$$

设备故障特性服从指数分布特性，而指数分布是唯一一种具无记忆性特征的分布形式，因此设备

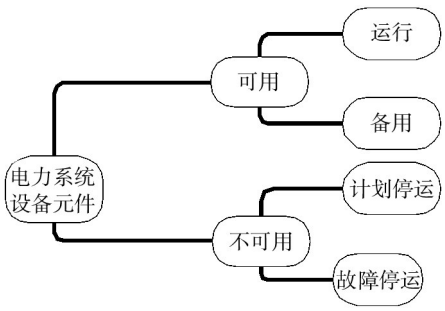


图1 电力系统元件设备状态划分

Fig. 1 Power system components and equipment state division diagram

故障特性是不受设备在修复之前的故障经历影响的。即呈指数分布的元件设备的工作寿命，在其寿命范围内，故障率不受运行时间影响，而为一常数。因此这种性质称为无记忆性。

若元件的修复时间呈指数分布，其修复率也为一常数 μ。

随机变量分布的无记忆过程就是所谓的马尔可夫过程。采用一个简单的二状态模型来论述马尔可夫过程当中的一些概念，模型表示一个二状态的元件，如图2所示。

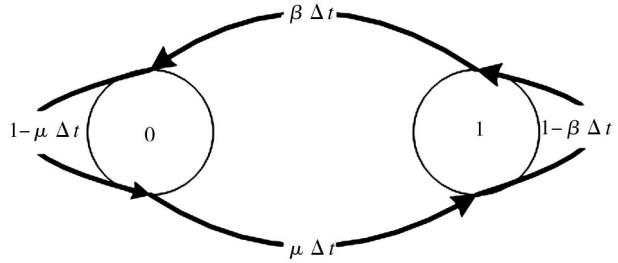


图2 二状态马尔可夫模型

Fig. 2 Two state Markov model

图2中："1" 为工作状态；"0" 为故障状态；λ 为故障率；μ 为修复率。

2 基本元件组合的马尔可夫模型

在可靠性分析中，元件的组合（子系统）有两种基本形式：串联系统和并联系统。

N个不同元件串联系统状态空间如图3所示。

图3中：0表示全部元件正常工作；1表示第1个

元件故障,其余正常;2表示第2个元件故障,其余正常;…;N表示第N个元件故障,其余正常。

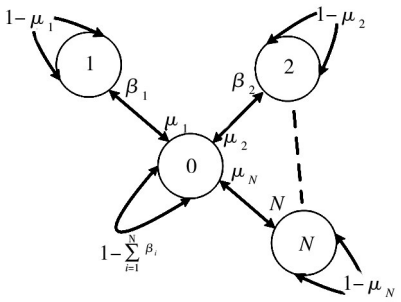


图3 串联系统的马尔可夫模型

Fig. 3 Markov model of series system

假设每个部件的可靠度为$Q_i(t)$(i=1,2,3,…,n),故障率为$\beta_i(t)$(i=1,2,3,…,n),那么,元件组可靠度为:

$$Q_s(t) = \prod_{t-1}^{n} Q_t(t) \tag{2}$$

串联系统修复率β_s及修复时间t_{MTTR}的求解,需列写状态方程。

其中,状态转移概率矩阵$\boldsymbol{P}$和转移概率密度矩阵$\boldsymbol{D}$分别为:

$$\boldsymbol{P}=\begin{pmatrix} 1-\sum_{i=1}^{N}\lambda_i\Delta t & \lambda_1\Delta t & \cdots & \lambda_N\Delta t \\ \mu_1\Delta t & 1-\mu_1\Delta t & \cdots & 0 \\ \mu_2\Delta t & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ \mu_N\Delta t & 0 & \cdots & 1-\mu_N\Delta t \end{pmatrix}$$

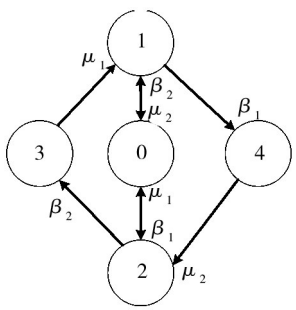
$$\boldsymbol{D}=\begin{pmatrix} -\sum_{i=1}^{N}\lambda_i & \lambda_1 & \cdots & \lambda_N \\ \mu_1 & -\mu_1 & \cdots & 0 \\ \mu_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ \mu_N & 0 & \cdots & -\mu_N \end{pmatrix}$$

则可列写状态方程并展开后得:

$$\begin{cases} \dot{p}_0(t) = -\sum_{i=1}^{N}\lambda_i p_0(t) + \sum_{i=1}^{N}\mu_i p_i(t) \\ \dot{p}_i(t) = \lambda_i p_0(t) - \mu_i p_i(t) \end{cases}$$

在串联系统中,由于只有一个可用状态,若其稳定状态概率为p_0,则:$A=p_0$

并联系统的修复率μ_s和t_{MTTR}的求取比较复杂,现只考虑较简单的情况:系统中有两个不同的元件而且同时只能有一个进行维修。其状态空间如图4所示。



0:两个元件均正常工作
1:元件1正常,元件2故障
2:元件2正常,元件1故障
3:元件1故障修理,元件2待修
4:元件1待修,元件2故障修理

图4 两个不同元件并联系统马尔可夫模型

Fig. 4 Markov model of two different element parallel system

则有:

$$\boldsymbol{P}=\begin{pmatrix} 1-(\lambda_1+\lambda_2)\Delta t & \lambda_2\Delta t & \lambda_1\Delta t & 0 & 0 \\ \mu_2\Delta t & 1-(\lambda_1+\mu_2)\Delta t & 0 & 0 & \lambda_1\Delta t \\ \mu_1\Delta t & 0 & 1-(\mu_1+\lambda_2)\Delta t & \lambda_2\Delta t & 0 \\ 0 & \mu_1\Delta t & 0 & 1-\mu_1\Delta t & 0 \\ 0 & 0 & \mu_2\Delta t & 0 & 1-\mu_2\Delta t \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{D}=\begin{pmatrix} -(\lambda_1+\lambda_2) & \lambda_2 & \lambda_1 & 0 & 0 \\ \mu_2 & -(\lambda_1+\mu_2) & 0 & 0 & \lambda_1 \\ \mu_1 & 0 & -(\mu_1+\lambda_2) & \lambda_2 & 0 \\ 0 & \mu_1 & 0 & -\mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_2 & 0 & -\mu_2 \end{pmatrix}$$

根据稳定状态概率的马尔可夫方程，有：

$$\begin{cases} p_0(\lambda_1+\lambda_2) = p_1\mu_2 + p_2\mu_1 \\ p_1(\lambda_1+\mu_2) = p_0\lambda_2 + p_3\mu_1 \\ p_2(\lambda_2+\mu_1) = p_0\lambda_1 + p_4\mu_2 \\ p_3\mu_1 = p_2\lambda_2 \\ p_4\mu_2 = p_1\lambda_1 \\ p_0+p_1+p_2+p_3+p_4 = 1 \end{cases}$$

3 海上风电场升压站电气设备元件的可靠性模型

3.1 变压器、母线的可靠性模型

变压器、母线发生故障后无法自行退出运行，需要与之相连的断路器动作，以使其退出运行并检修。因此，其故障是扩大型故障，且没有扩大型故障向非扩大型故障切换的可能，只有在检修完毕之后，才能重合断路器，将其投入运行。因此，变压器及母线的工作状态可以归结为正常运行状态、扩大型故障状态和计划检修状态。

通过马尔可夫方程求解变压器各工作状态概率：

$$\lambda_{MTF}P_{NTF}=\mu_{MTF}P_{MTF}$$

$$\lambda_{STF}P_{NTF}=\mu_{STF}P_{STF}$$

$$P_{NTF}+P_{MTF}+P_{STF}=1$$

同理可求母线各工作状态概率：

$$\lambda_{MB}P_{NB}=\mu_{MB}P_{MB}$$

$$\lambda_{SB}P_{NB}=\mu_{SB}P_{SB}$$

$$P_{NB}+P_{MB}+P_{SB}=1$$

式中：P_{NTF}，P_{NB}为变压器、母线的正常状态概率；P_{MTF}，P_{MB}为变压器、母线的计划检修概率；P_{STF}，P_{SB}为变压器、母线的扩大型故障状态概率；λ_{MTF}，λ_{MB}为变压器、母线正常运行状态到计划检修状态的概率；λ_{STF}，λ_{SB}为变压器、母线正常运行状态到扩大型故障状态的故障率；μ_{MTF}，μ_{MB}为变压器、母线计划检修状态到正常运行状态的概率；μ_{STF}，μ_{SB}为变压器、母线扩大型故障状态到正常运行状态的修复率。

因变压器、母线只有扩大型故障，因此综合故障率λ_{TTF}，λ_{TB}以及综合故障修复率μ_{TTF}，μ_{TB}分别为：

$$\lambda_{TTF}=\lambda_{STF}$$

$$\mu_{TTF}=\mu_{STF}$$

$$\lambda_{TB}=\lambda_{SB}$$

$$\mu_{TB}=\mu_{SB}$$

3.2 断路器的可靠性模型

非扩大型故障（如漏油、漏气、误动等）只影响本设备，发生后可直接进入修复状态。扩大型故障（如接地）会引起相邻的断路器动作，由保护范围内的断路器切除故障后，再使故障断路器退出进入修复状态。

断路器的运行状态可分为非扩大型故障停运状态RCB、扩大型故障停运状态SCB状态、计划检修状态MCB状态和正常运行状态NCB状态等4种。

断路器平稳状态概率的马尔可夫方程如下：

$$(\lambda_{RCB}+\lambda_{SCB}+\lambda_{MCB})P_{NCB}=\mu_{RCB}P_{RCB}+\mu_{SCB}P_{SCB}+\mu_{MCB}P_{MCB}$$

$$\lambda_{SCB}P_{NCB}=\mu_{SCB}P_{SCB}$$

$$\lambda_{MCB}P_{NCB}=\mu_{MCB}P_{MCB}$$

$$\lambda_{RCB}P_{NCB}=\mu_{RCB}P_{RCB}$$

P_{NCB}，P_{MCB}，P_{RCB}，P_{SCB}分别为断路器正常状态、计划检修、非扩大型故障状态、扩大型故障状态的概率。由于元件在某一时刻只能处于某一状态，断路器的4种故障事件是互斥的，即4种故障状态相互独立，不可能重叠发生。因此求解断路器的故障率λ_{CB}、修复率μ_{CB}、平均无故障运行时间w_{CB}和平均修复时间r_{CB}时可将断路器看成一个串联系统。

根据同一元件不同故障间的串联特性，可得出断路器的简化模型如图5所示。

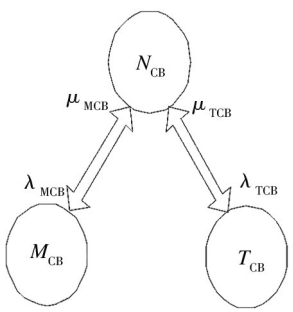


图5 断路器简化状态模型

Fig. 5 Simplified state model of circuit breaker

根据图5，有：

$$P_{TCB}=\frac{\lambda_{TCB}}{\mu_{TCB}}P_{NCB}$$

$$P_{TCB}=\frac{(\lambda_{SCB}+\lambda_{RCB})P_{NCB}}{\left(\frac{\lambda_{SCB}}{\mu_{SCB}}+\frac{\lambda_{RCB}}{\mu_{RCB}}\right)}=\frac{\lambda_{SCB}+\lambda_{RCB}}{\left(\frac{\lambda_{SCB}}{\mu_{SCB}}+\frac{\lambda_{RCB}}{\mu_{RCB}}\right)}$$

$$\left(\frac{\lambda_{SCB}}{\mu_{SCB}}+\frac{\lambda_{RCB}}{\mu_{RCB}}\right)P_{NCB}=P_{SCB}+P_{RCB}$$

上式表明,虽然R型故障和S型故障的成因、故障后果和修复方式均不相同,在故障认定上不能将二者统一,但在计算中,可用统一的T型故障计算断路器的可靠性指标。

3.3 电缆的可靠性模型

海上风场一般使用海底电缆进行电能输送,电缆的投入、退出都通过与之相连的断路器执行,其发生的故障必然是扩大型故障。同时,电缆一般无法维修,故障损坏就需更换,无计划检修状态,因此,电缆的工作状态便是正常工作状态与扩大型故障状态,其模型为二状态模型。

电缆各工作状态概率为:

$$P_{NC}=\mu_{SC}/(\mu_{SC}+\lambda_{SC})$$

$$P_{SC}=\frac{\lambda_{SC}}{\mu_{SC}+\lambda_{SC}}$$

$$\lambda_{TC}=\lambda_{SC}$$

$$\mu_{TC}=\mu_{SC}$$

式中:P_{NC},P_{SC}分别为电缆正常状态、扩大型故障状态的概率;λ_{SC}为电缆正常运行状态到扩大型故障状态的故障率;μ_{SC}为电缆扩大型故障状态到正常运行状态的修复率;λ_{TC}为电缆综合故障率;μ_{TC}为电缆综合故障修复率。

4 基于马尔可夫模型的电气设备元件的可靠性指标计算

目前,海上风电场建设、运营在全世界范围刚刚起步,还未能得到翔实完善的设备可靠性数据。综合《中国电力可靠性管理年报》和《电力可靠性趋势评估报告》以及国外有关研究的数据资料[4—5],得各设备的可靠性原始数据(见表1)。

根据电气设备的马尔可夫模型及表1的数据,可算出此海上升压站内各设备的可靠性指标,见表2。

表1 升压站设备可靠性原始数据

Table 1 Original reliability data of booster station equipment

设备	风力机	断路器	变压器	母线	中压电缆(1 km)	高压电缆(10 km)
β_S/(次·a^{-1})		0.06	0.0344	0.012	0.015	0.15
t_S/(h·次$^{-1}$)		1	480	96	240	480
μ_S/(次·a^{-1})		8760	18.25	91.25	36.5	18.25
β_R/(次·a^{-1})	1	0.02				
t_R/(h·次$^{-1}$)	146	240				
μ_R/(次·a^{-1})	60	36.5				
β_M/(次·a^{-1})		0.2	1	0.5		
t_M/(h·次$^{-1}$)		175	240	84		
μ_M/(次·a^{-1})		50.1	36.5	104.285		

注:下标S表示扩大型故障;R表示非扩大型故障;M表示计划性检修故障。

表2 升压站设备可靠性指标

Table 2 Reliability index of booster station equipment

设备	风力机	断路器	变压器	母线	中压电缆(1 km)	高压电缆(10 km)
λ_T/(次·a^{-1})	1	0.08	0.0344	0.012	0.015	0.15
t_T/(h·次$^{-1}$)	146	60.75	480	96	240	480
μ_T/(次·a^{-1})	60	144.20	18.25	91.25	36.5	18.25
P_N	0.983 606 6	0.993 862 1	0.971 550 9	0.995 098 1	0.999 589 2	0.991 847 8
P_R	1.639 3E−2	5.445 819 5E−4				
P_S	1.639 344 3E−2	6.807 274 6E−6	1.831 306 8E−3	1.308 622 1E−4	0.000 410 8	0.008 152 2
P_M		3.967 513 4E−3	2.661 783 2E−2	4.771 050 9E−3		

5 结语

基于马尔可夫方法，通过对电气设备的工作状态进行分析，建立了电气设备元件的马尔可夫模型，在此基础上，分析了海上风电场升压站电气设备可靠性建模问题。分析了升压站中断路器、变压器、母线及电缆的工作状态，对故障类型进行了分类，列写了各设备可靠性模型。最后结合某海上风电场的具体数据，基于所建立的模型，分析了其海上风电场的升压站系统的可靠性指标。此研究成果对于目前正在建设的海上风电场升压站的建设具有一定的借鉴意义。

参考文献：

[1] 黄玲玲，符杨，郭晓明. 大型海上风电场电气接线方案优化研究[J]. 电网技术，2008(8)：77—81.

[2] 黄玲玲，符杨，郭晓明. 海上风电场集电系统可靠性评估[J]. 电网技术，2010(7)：169—174.

[3] TAKOUDIS G. Development of a Monte Carlo Model for Assessing Offshore Wind Farm Cable Reliability and the Worth of Redundancy—A Comparison of Various Collector Configurations[D]. Glasgow，Scotlabd：Strathclyde University，2004.

[4] SANNINO A，BREDER H，NIELSEN E K. Reliability of Collection Grids for Large Offshore Wind Parks[C]// The 9th Probab-ility Methods Application Power System Conference. Stockholm，Sweden，2006.(余不详)

[5] UNDERBRINK A，Hansen J，OSTERHOLT A，et al. Proba Bilistic Reliability Calculations for the Grid Connection of an Offshore Wind Farm[C]// The 9th Probab-ility Methods Application Power System Conference. Stockholm，Sweden，2006.(余不详)

[6] 杨莳百，戴景宸，孙启宏. 电力系统可靠性分析基础及应用[M]. 北京：水利电力出版社，1986.

Q-Lab 2013上海国际汽车耐候老化技术研讨会成功召开

Q-Lab公司作为行业的领导者，多年来一直坚持不懈地致力于光老化及耐候性的技术推广工作。继2006、2007、2009和2011年举办国际汽车耐候老化技术研讨会，“2013国际汽车耐候老化技术研讨会”于今年9月12日，在上海齐鲁万怡大酒店成功举行，此次会议有近1000家单位，150多位嘉宾与会，是汽车行业的一次盛大而成功的技术交流会。

本次会议共有10位专家做了精彩的演讲，其中Q-Lab副总裁Ron Roberts先生和前巴斯夫专家John Boisseau先生分别介绍了最新发布的ASTM D7869的技术背景和详细内容；Q-Lab的技术经理孙杏蕾女士介绍了汽车老化国家标准的技术背景和应用。其它议题还包括：比亚迪汽车工程院的零部件试验部汪浩主任的如何真实反映汽车使用中腐蚀老化问题探讨；重庆59所自然环境试验中心田月娥研究员的车辆涂层海洋环境腐蚀的快速评估；SGS汽车部辛羽的几种光老化测试方法及典型汽车零部件综合老化测试结果分析；清华大学杨睿教授的聚烯烃复合材料的老化行为和机理研究；BYK仪器部沈恺经理的分光色彩精灵用于耐候性试验试后颜色变化的监测；金发科技技术研发高级经理的车用聚丙烯材料老化的影响因素及解决方案；北京天罡商业发展经理刘罡的汽车用塑料材料的防老化技术发展。这些来自主机厂、测试机构、高校和材料供应商的嘉宾分别结合各自的工作领域和研究成果，从老化问题的提出、发现、研究和解决方面，对材料耐候老化问题多角度地进行了深入的探讨，吸引了众多与会者的极大兴趣和参与。

本次会议受到了参会者的一致好评，如来自上海日之升新技术发展有限公司的娄先生在反馈中所述：“这是一次成功的会议，在行业内的资讯都很前沿，机理和实用性探讨都受益匪浅。”