

考虑多因素影响的风电机组故障率计算方法

在传统的停运模型中,风电机组的故障率大多采用长期统计的平均值,即一个风机只涉及一个固定的故障率,不能体现实时的可靠性水平。结合历史故障数据,把影响风电机组停运的因素分成若干类,基于马尔可夫过程分别给出单因素和多因素影响下的故障率计算方法。使用此方法计算的故障率可以随外界因素(风机运行条件、外部环境等)的变化而改变,从而可体现风机的可靠性水平。应用此方法对某实际风电场进行仿真计算,结果表明此方法的有效性。

燕妮 齐蓓 蒋程/新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学)



燕妮/硕士研究生

风力发电被公认为是一种最理想的可再生能源发电方式之一,大规模发展风电,不仅是能源开发的需要,也是环境保护的需要。但由于风电出力具有随机性、间歇性等特点,大规模风电并网将对电网电压、系统稳定性和调度产生深远的影响^[1-3]。这迫切需要对风电的可靠性进行评估,而风电机组停运模型是进行此项评估的基础。

在传统停运模型中,一般认为故障率是固定值。基于此方法,文献[4-5]考虑了风机的强迫停运建立风电机组的两状态模型,即停运和运行两个状态,这种建模方法在常规电力系统元件的建模中是适用的,但由于风机一般处于环境和气候比较恶劣的地方,其运行状态极易受到外界环境的影响,因此基于固定故障率的建模方法将会带来较大的误差;文献[6-10]分析了线路潮流、母线电压和系统频率等实时运行条件对元件停

运概率的影响,建立了基于实时运行条件的元件可靠性模型,仿真结果显示了该可靠性模型能反映系统实时运行的可靠性水平,但此模型中的部分参数需要通过一些很难得到的历史运行和故障数据辨识,因此不是很实用;文献[11-15]考虑气候条件、天气情况,根据风力载荷和冰力载荷等影响建立了元件的停运模型,但对运行工况的处理较简单,而且这两种方法仅针对传统电力系统元件,很少涉及风电机组。

针对上述问题,本文根据风机的历史故障数据,把影响风机停运的因素分成若干类,首先给出单因素影响的故障率计算方法,在此基础上推导出多因素影响下的计算方法。以某实际风电场为算例,结合风机历史运行数据、历史故障数据和天气等外界环境数据,把故障因素分为外界环境、运行工况和自然灾害3个方面,应用所提出的方法对每个因素影响下的故障率进行仿真计算,计算结果显示,不同因素、同一因素的不同等级和不同因素的组合同时对应不同的故障率。

马尔可夫过程简介

由于自身因素或外界环境的影响,任何元件都可能发生失效停运。可修复强迫失效可以通过稳态“运行—停运—运行”的循环过程来模拟,如图1所示。



图1 可修复元件运行和停运的循环过程

关键词/Keywords

多因素·
风电机组·
故障率·
停运模型·
实时可靠性·

国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目
(2012AA050201)。

图1中, d 为故障前平均运行时间 (MTTF), h ; r 为平均停运时间 (MTTR), h 。

为了方便计算元件的不可利用率, 引入故障率和修复率的概念, 图1可转换为图2。

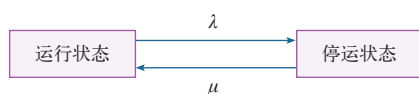


图2 可修复元件状态空间图

根据图2, 基于马尔可夫过程, 元件在长期循环过程中的平均不可用率可表示为

$$U = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{r}{d + r} = \frac{fr}{8760} \quad (1)$$

根据定义, 各个变量之间的关系为

$$\begin{cases} \lambda = 8760/d, & \mu = 8760/r \\ f = 8760/(d+r) = \lambda/(1+\lambda r/8760) \\ \lambda = f/(1-fr/8760) \end{cases} \quad (2)$$

式中, λ 为故障率, 次数/年; μ 为修复率, 次数/年; f 为故障频率, 次数/年。

单因素影响的风电机组故障率

风电机组一般地处比较恶劣的环境中, 很容易受到多种故障因素的影响, 为了便于理解多因素影响下的故障率计算方法, 首先介绍单个因素影响的风电机组故障率计算方法。

1. 未考虑因素等级

根据式 (2), 单个因素影响的风电机组故障率可表示为

$$\lambda_i = \frac{8760 f_i}{8760 - f_i r_i} \quad i=1,2,\dots,m \quad (3)$$

式中, λ_i 为由第*i*个因素引起的元件故障率; f_i 为由第*i*种因素引起风机停运的频率, 次/年/台; r_i 为由第*i*个因素引起的平均停运时间。

通过对历史故障数据的分析和归纳, 假设影响某风机停运的因素有*m*个, 例如天气因素、外界环境、运行工况和自然灾害等, 则每种因素引起风机停运的频率可表示为

$$f_i = \frac{8760 N_i}{n T_i} \quad i=1,2,\dots,m \quad (4)$$

式中, N_i 为统计时间内由第*i*种因素引起的停运次

数, 次; n 为统计的机组个数, 台; T_i 为统计时间内第*i*个因素持续的时间, h 。

在风机的长期运行中, 由于单个因素可能引起元件多次故障, 而且每次故障持续的时间可能不一样, 则单个因素作用下风机的平均停运时间 (故障持续时间) 可表示为

$$r_i = \left(\sum_{j=1}^{N_i} R_{ij} \right) / N_i \quad i=1,2,\dots,m \quad (5)$$

式中, R_{ij} 为由第*i*个因素引起的第*j*次停运时间, h 。

将式 (4)、式 (5) 代入式 (3) 中, 可得由第*i*个因素引起的元件故障率计算公式为

$$\lambda_i = \frac{8760 N_i}{n T_i - \left(\sum_{j=1}^{N_i} R_{ij} \right)} \quad i=1,2,\dots,m \quad (6)$$

2. 考虑因素等级

上述研究中只考虑故障因素的有无对风机停运的影响, 即认为故障因素只有一个等级, 但当其具有多个等级时, 上述方法具有较大的误差, 例如: 考虑台风因素对风机停运的影响时, 上述方法只能给出台风下的故障率, 而未考虑台风等级的影响, 但经过对实际风电机组的历史故障数据分析和研究表明, 台风的不同等级对风机故障率的影响是不同的。因此需要研究考虑故障因素等级的故障率计算方法。

假设第*i*个因素可分成*g*个等级, 每个等级的故障率用 $\lambda_{ij}(j=1,2,\dots,g)$ 表示, 则第*i*个因素影响下的故障率数学期望, 即平均故障率可表示为

$$\bar{\lambda}_i = \sum_{j=1}^g \lambda_{ij} P_{ij} \quad (7)$$

根据式 (11), 结合全概率公式, 即 $\sum_{j=1}^g P_{ij} = 1$,

可以推导出不同等级对应的故障率计算公式, 具体计算过程请见文献[16], 由于篇幅原因, 此处不再赘述。

$$\lambda_{ij} = \bar{\lambda}_i (F_{ij} / P_{ij}) \quad j=1,2,\dots,g \quad (8)$$

式中, $\bar{\lambda}_i$ 为第*i*个因素影响的风机故障率, 其可由式

(6) 计算出; $F_{ij}(j=1,2,\dots,g)$ 为因素*i*在第*j*个等级下故障的次数与总故障次数的比值; $P_{ij}(j=1,2,\dots,g)$ 为第*j*个等级出现的概率, 可由历史数据统计出来; 如

果历史故障数据足够多,一种实用的公式可表示为

$$F_{ij} = N_{ij} / N_i \quad j=1,2,\dots,g \quad (9)$$

$$P_{ij} = T_{ij} / T_i \quad j=1,2,\dots,g \quad (10)$$

式中, $T_{ij}(j=1,2,\dots,g)$ 为第 j 个等级持续的时间; T_i 为第 i 个因素持续的总时间; $N_{ij}(j=1,2,\dots,g)$ 为第 j 个等级下故障的次数; N_i 为因素 i 引起故障的总次数。

多因素影响的风电机故障率

1. 未考虑因素等级

假设同时受到 k 种故障因素的影响,其故障率可表示为

$$\lambda_k = \frac{8\,760 f_k}{8\,760 - f_k r_k} \quad (11)$$

式中, λ_k 为 k 种因素同时作用下风电机组的故障率; f_k 为同时由 k 种故障因素影响下的风机停运的频率; r_k 为由 k 种故障因素同时影响下风机的平均停运时间。

假设每个影响因素是不相关的,则 k 种故障因素影响下的风机停运的频率为单个因素影响下的代数,其可表示为

$$f_k = \sum_{j=1}^k f_j \quad k=2,3,\dots,m \quad (12)$$

式中, f_j 为由第 j 种故障因素引起的平均停运频率,次/(年·台)。

由于每种因素引起风机停运的时间不完全一样,则在 k 种故障因素同时影响下,风机的平均停运时间为每个因素单独影响下的停运时间的平均值,可表示为

$$r_k = \sum_{j=1}^k r_j N_j / \sum_{j=1}^k N_j \quad k=2,3,\dots,m \quad (13)$$

式中, r_j 为第 j 个因素影响的平均停运时间; N_j 为第 j 个因素引起的停运次数。

将式(8)、式(9)代入式(7),整理可得 k 种因素引起的元件故障率为

$$\lambda_k = \frac{\sum_{j=1}^k N_j \sum_{j=1}^k f_j}{\sum_{j=1}^k N_j - \frac{\sum_{j=1}^k f_j \sum_{j=1}^k r_j N_j}{8\,760}} \quad k=2,3,\dots,m \quad (14)$$

2. 考虑因素等级

当考虑多个因素同时作用风机的故障率时,为了确定多个因素的等级,定义因素组的概念,此因素组的等级不仅与所包含因素的种类有关,还与各因素的等级有关。

假设风电机组同时受到 k 种故障因素的影响,其中第 i 个因素可分成 g_i 个等级,根据每个因素的重要程度及其划分的等级数可以确定该因素组的等级。假设第 i 个因素的等级用 D_{si} 表示,即

$$D_{si} \in \{1 \ 2 \ 3 \ \dots \ g_i - 1 \ g_i\} \quad i=1,2,\dots,k$$

则 k 个因素组成的因素组的等级可表示为

$$D_{mk} = \text{Round} \left(\sum_{i=1}^k \alpha_i D_{si} / k \right) \quad (15)$$

式中, D_{mk} 为因素组的等级; Round为四舍五入算子; α_i 为第 i 个因素的权重 ($0 < \alpha_i \leq 1$)。

基于上述方法,假设因素组的等级用 h 表示,则每个等级下的故障率可表示为

$$\lambda_{mh} = \bar{\lambda}_m (F_{mh} / P_{mh}) \quad (16)$$

式中, λ_{mh} 为因素组第 h 个等级下风机的故障率; $\bar{\lambda}_m$ 为因素组影响下风机故障率的平均值; F_{mh} 为因素组第 h 个等级下故障的次数与总故障次数的比值; P_{mh} 为因素组第 h 个等级出现的概率,它们都可由历史数据统计出来,可表示为

$$F_{mh} = N_{mh} / N_m \quad (17)$$

$$P_{mh} = T_{mh} / T_m \quad (18)$$

式中, T_{mh} 为因素组第 h 个等级持续的时间; T_m 为该因素组持续的总时间; N_{mh} 为第 h 个等级下故障的次数; N_m 为该因素组引起故障的总次数。

算例分析

1. 算例描述

以某实际风电场为算例进行分析计算,该风电场包含33台1.5 MW的双馈风机,总装机容量为49.5 MW,采集风电场近6年(2007年1月~2012年12月)的历史故障数据,经过整理(消缺、补漏)得出1 216条可用的历史故障记录。

对风机每次故障的原因进行具体分析和研究,把1 216条故障记录按照引发的因素不同大致分成4

类，分别为由外界环境引起的故障、由运行工况引起的故障、由自然灾害引起的故障和由其他因素引起的故障，每个故障因素包含多个故障原因。

外界环境。主要考虑外界的温度、湿度，如风机机组外部环境影响停机、风机机舱外温度1 s平均值和风机机舱温度1 s平均值等。

运行工况。主要考虑电网和风机运行状态的变量，如风机电网频率小于49.5 Hz、24 h内允许出现10次、风机液压系统压力过小停机、风机齿轮箱油压过低停机和风机液压系统油温高报警等。

自然灾害。主要考虑台风、暴雨和雷电等，如风机发电机雷电保护失效等。

其他因素。不属于上述因素的故障原因，如风机机组停机、风机变频器其他转子侧变流器故障、风机变桨通信重复性故障和风机230 V UPS故障等。

根据上述分类情况对历史故障数据进行统计，结果如表1所示。

表1 单因素影响的风电机组停运信息

故障因素	因素持续时间/h	停运次数/次	停运总时间/h
外界环境	3 120	637	9 780
运行工况	560	102	1 261
自然灾害	100	25	510

根据因素的严重程度把其分成不同的等级，比如外界环境分成1级、2级和3级；运行工况分成1级、2级和3级；自然灾害分成1级、2级、3级和4级。根据上述分级结果对历史故障数据进行统计，结果如表2所示。

表2 单因素不同等级影响的风电机组停运信息

故障因素	因素等级	因素持续时间/h	停运次数/次
外界环境	1	2 000	300
	2	700	180
	3	420	157
运行工况	1	300	50
	2	160	30
	3	100	22
自然灾害	1	60	10
	2	25	6
	3	10	5
	4	5	4

2. 单个因素影响的故障率计算

根据表1，应用未考虑因素等级的方法，可得不同故障因素下风电机组的故障率，如表3所示。

表3 单因素影响的风电机组故障率计算结果

故障原因	停运频率f /[次/(年·台)]	平均修复时间 /(h/次)	故障率λ /[次/(年·台)]
外界环境	54.197 0	15.353 2	59.885 4
运行工况	48.350 6	12.362 7	51.891 5
自然灾害	66.363 6	20.400 0	78.494 6

从表1中可以看出，虽然自然灾害因素引起风机故障的次数较少（仅为25次），但由于其持续的时间较短（大约为100 h），所以其对风机故障率的影响较大，即自然灾害发生时，风机故障的可能性要比另外两个因素高。

根据表2，应用考虑因素等级的方法，可得不同因素等级下风机的故障率，如表4所示。

表4 单因素不同等级影响的风电机组故障率计算结果

故障因素	平均故障率λ /[次/(年·台)]	因素等级	不同等级故障率 /[次/(年·台)]
外界环境	59.885 4	1	43.997 4
		2	75.424 2
		3	109.644 4
运行工况	51.891 5	1	47.482 4
		2	53.417 7
		3	94.809 2
自然灾害	78.494 6	1	52.329 7
		2	75.354 8
		3	156.989 2
		4	251.182 7

从表4中可以看出，同一因素不同等级之间的故障率相差较大，而且与其对应的平均故障率也有较大差别，因此不考虑因素的等级，用单一的故障率（平均故障率）来衡量风机的可靠性水平，不是很准确，与实际相差较大。

3. 多个因素影响的故障率计算

根据表1，应用未考虑因素等级的方法，可得多种因素同时作用下风机的故障率，如表5所示。

从表5中可以看出，多因素同时影响的风电机组故障率比单个因素大的多，特别是3个因素同时影响时，其故障率高达238.435 1次/(年·台)，虽然

表5 多因素同时影响的风电机组故障率计算结果

场景	故障因素	停运频率 f /[次/(年·台)]	平均修复时间 /(h/次)	故障率 λ /[次/(年·台)]
1	外界环境	102.547 6	14.942	124.287 5
	运行工况			
2	外界环境	120.560 6	14.774	151.330 5
	自然灾害			
3	运行工况	114.714 3	13.955	140.365 2
	自然灾害			
4	外界环境	168.911 3	15.122	238.435 1
	运行工况			
	自然灾害			

实际中多因素同时作用于风机的概率较小，但一旦出现这种情况，它对风机故障的影响会很大。

参考单个因素的分级情况，根据式（15）把因素组分成若干等级，在此基础上对历史故障数据进行统计，结果如表6所示。

表6 多因素不同等级影响的风电机组停运信息

因素数组	因素组等级	因素组持续时间/h	停运次数/次
外界环境	1	100	30
	2	35	18
运行工况	3	21	15
	4		
外界环境 自然灾害	1	15	5
	2	8	3
	3	5	2
	4	3	2
运行工况 自然灾害	1	12	4
	2	10	3
	3	4	2
	4	3	2
外界环境 运行工况 自然灾害	1	8	8
	2	6	6
	3	4	5
	4	2	4

根据表6，应用考虑因素等级的方法，可得不同等级下风机的故障率，如表7所示。

表7 因素组不同等级影响的风电机组故障率计算结果

因素组	平均故障率 λ /[次/(年·台)]	因素组等级	不同等级故障率 /[次/(年·台)]
外界环境 运行工况	124.287 5	1	92.327 9
		2	158.276 3
		3	219.828 2

(续)

因素组	平均故障率 λ /[次/(年·台)]	因素组等级	不同等级故障率 /[次/(年·台)]
外界环境 自然灾害	151.330 5	1	130.312 4
		2	146.601 4
		3	156.374 9
		4	260.624 8
运行工况 自然灾害	140.365 2	1	113.072 0
		2	135.686 4
		3	169.608 0
		4	226.143 9
外界环境 运行工况 自然灾害	238.435 1	1	207.334 9
		2	207.334 9
		3	259.168 6
		4	414.669 7

从表7中可以看出，多因素作用下风机的故障率比单个因素作用下大的多，同时作用的因素数越多其故障率越大，而且随着多因素等级的增加，其故障率呈上升趋势。

结束语

基于马尔可夫过程并结合历史统计数据建立了考虑单因素、多因素影响的风电机组停运模型，此模型能够反映电网运行条件和外界天气、环境等因素对风电机组故障率的影响，能够表征风电机组实时运行的安全可靠水平。应用此模型对含风电的电力系统进行可靠性评估的准确度和可信性更高。另外，所提的建模方法不仅适用于风电机组，而且适用于受外界环境或运行工况影响较大的其他电力系统元件。

参考文献

[1] 张丽英，叶廷路，辛耀中．大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]．中国电机工程学报，2010，30(25)：1-8．
[2] 何世恩，姚旭，徐善飞．大规模风电接入对继电保护的影响与对策[J]．电力系统保护与控制，2013，41(1)：21-27．
[3] 刘文霞，蒋程，张建华．一种用于序贯蒙特卡罗仿真的风电机组多状态可靠性模型[J]．电力系统保护与控制，2013，41(8)：73-80．

- [4] 栗文义, 王银莎, 郭鑫, 等. 基于well-being 模型的风力发电系统可靠性评估 [J]. 华东电力, 2011, 39 (7) : 1062-1065.
- [5] 周明, 冉瑞江, 李庚银, 等. 风电并网系统可用输电能力的评估 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (22) : 14-21.
- [6] 孙元章, 程林, 刘海涛. 基于实时运行状态的电力系统运行可靠性评估 [J]. 电网技术, 2005, 29 (15) : 6-12.
- [7] 汪兴强, 丁明, 韩平平. 互联电力系统可靠性评估的改进等效模型 [J]. 电工技术学报, 2011, 26 (9) : 201-207.
- [8] 何剑, 程林, 孙元章, 等. 条件相依的输变电设备短期可靠性模型 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (7) : 39-46.
- [9] 孙元章, 刘海涛, 程林, 等. 运行可靠性在线短期评估方案 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (3) : 4-8.
- [10] 刘海涛, 程林, 孙元章, 等. 基于实时运行条件的元件停运因素分析与故障率建模 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (7) : 6-11.
- [11] 孙荣富, 程林, 孙元章, 等. 基于恶劣气候条件的故障率建模及电网充裕度评估 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (13) : 7-12.
- [12] 林智敏, 林韩, 温步瀛. 天气条件相依失效模型的电力系统可靠性评估 [J]. 华东电力, 2008, 36 (1) : 81-84.
- [13] 刘洋, 周家启. 计及气候因素的大电力系统可靠性评估 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23 (9) : 60-62.
- [14] 邱威, 张建华, 刘念, 等. 计及运行风险的多目标发电优化调度 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (22) : 64-72.
- [15] 丁明, 戴仁昶. 影响输电网可靠性的气候条件模拟 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21 (1) : 18-20.
- [16] 林韩. 电网防灾减灾应急管理系统建设与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- (收稿日期: 2014-05-14) EA

(上接第78页)

参考文献

- [1] 陈家斌. SF₆断路器实用技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [2] 罗学琛. SF₆气体绝缘金属封闭开关设备 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [3] 谢衍文. SF₆气体绝缘全封闭组合电器事故后的检修 [J]. 电力安全技术, 2003 (6) : 5-6.
- [4] 郭伟. 气体分解产物应用于SF₆电气设备故障查找的分析 [J]. 绝缘材料, 2012, 45 (4) : 69-72.
- [5] 张晓星, 姚尧, 唐炬, 等. SF₆放电分解气体组分分析的现状和发展 [J]. 高电压技术, 2008 (4) : 37-42, 120.
- [6] 葛猛, 陶安培. 一起SF₆封闭式组合电器故障的原因分析 [J]. 高压电器, 2008, 44 (1) : 95-96.
- [7] 季严松, 王承玉, 杨韧, 等. SF₆气体分解产物检测技术及其在GIS设备故障诊断中的应用 [J]. 高压电器, 2011, 47 (2) : 100-103.
- [8] 杨俊坤, 彭詠涛, 谭向宇, 等. GIS设备中通过SF₆气体分解产物检测判定放电类型的研究 [J]. 绝缘材料, 2012, 45 (2) : 61-64.
- [9] 陈文会, 李忠, 景占荣, 等. 基于有限元法的含固定微粒的GIS静电场分析 [J]. 高电压技术, 2006, 32 (1) : 16-17, 31.
- [10] 徐世山, 孟可风, 刘文泉. 一起363 kV GIS充电网络故障的原因分析 [J]. 高压电器, 2007, 43 (1) : 74-76.
- [11] 李国兴, 姜子秋, 王晓丹. SF₆分解产物体积分数检测在SF₆电气设备故障诊断中的应用 [J]. 高压电器, 2011, 7 (12) : 104-107.
- (收稿日期: 2014-05-06) EA