

# 基于设备可靠性的风电场预防性机会维修策略

张峻豪 张则言 傅 钰

(华北电力大学电气工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 风电场电气设备如变压器、开关柜等均需定期进行停电检修或预试,会造成与其电气连接的风电机组陪停。考虑电气设备及风电机组各主要部件的故障概率和维修机会,提出了基于可靠性的风电场预防性机会维修策略。该策略在风电场电气设备实施预防性维修的基础上,对与待修电气设备直接相连的风电机组关键部件实施机会维修。即当某电气设备可靠性降低到预防性维修阈值时,对其实施预防性维修,并核验与之直接相连的风电机组的关键部件的可靠性,若某部件的可靠性达到机会维修阈值,则对其实施机会维修。通过对预防性维修阈值与机会维修阈值的优化,使风电场发电损失和维修费用最小。最后,通过对风电场系统进行仿真,验证了所提出策略的有效性,该策略可降低风电机组因不同原因造成的重复停运时间,为实现风电场智能化维护提供新的方法。

**关键词:** 预防性维修; 机会维修; 风电场; 可靠性

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)06-0036-05

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.06.008

## Preventive Opportunistic Maintenance Strategy for Wind Farm Based on Reliability of Electrical Equipment

Zhang Junhao, Zhang Zeyan, Fu Yu

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China)

**Abstract:** All of electrical equipment in wind farms, such as transformer and switchgear, need regular maintenance or pre-test, and then the wind turbines which connect with the electrical equipment have to stop. Considering the failure probability and maintenance opportunity of the main components of electrical equipment and wind turbines in wind farms, a preventive opportunistic maintenance strategy is proposed for wind farms based on reliability. On the basis of preventive maintenance of electrical equipment in wind farm, the strategy implements opportunistic maintenance for key components of the wind turbine which directly connects with the electrical equipment which need to be repaired. When the reliability of electrical equipment reduces to the preventive threshold, the preventive maintenance is implemented. Then, the reliability of components of the wind turbines which connect with the repaired equipment directly is checked. If the opportunity threshold is larger than the reliability, the opportunistic maintenance is implemented. Through the optimization of the preventive threshold and opportunity threshold, the power loss and maintenance cost of wind farm are minimized. Finally, the wind farm system is simulated to verify the effectiveness of the proposed strategy, which can reduce the repeated outage time of wind turbines, and provide a new means for the intelligent maintenance of wind farms.

**Key words:** preventive maintenance; opportunistic maintenance; wind farm; reliability

## 0 引 言

风电作为一种清洁能源,近年来其装机容量迅猛增长。据全球风能理事会统计,截至 2016 年底,全球风电装机容量已高达 486.749 GW<sup>[1]</sup>。风电机组工作环境恶劣,故障频繁发生,由此产生的维修成

本占风电总成本的比例高达 15%~20%<sup>[2]</sup>。通过对风电场的维修策略进行优化,可减少风电场发电损失及维修费用,有效降低风电成本。目前研究人员对单一风电机组及海上风电场的维修策略有较多探讨<sup>[3-7]</sup>。

风电机组是由传动系统、偏航系统、变桨系统等多个部件构成的典型的串联可修系统,其中任一关

键部件发生故障均会导致风电机组故障停机<sup>[8]</sup>。而风电场通常包含数十至数百台风电机组,各风电机组通过汇集线、母线等相互连接,通过升压变压器与电网相连。当一次电气设备发生故障或进行停电检修时,其下游的风电机组均会被迫停机。

下面以总维修费用最低为目标,提出了针对风电场的基于设备可靠性的预防性机会维修策略。基本原理是利用风电场电气设备定期检修为其下游风电机组提供维修所需机会,减少了风电机组的停机时间和维修费用。

## 2 风电场的预防性机会维修策略

### 2.1 电气设备预防性维修模型

风电场的主要电气设备包括主变压器、母线和汇集线等。若风电场电气设备*i*的故障率为 $\lambda_i$ ,则该电气设备在*t*时刻的可靠性为<sup>[9]</sup>

$$R_{ei}(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda_i dx\right) \quad (1)$$

为保证风电场输出功率顺利输送给电网,对风电场的电气设备采用预防性维修策略。当电气设备*i*的可靠性降低至预防性维修阈值 $R_p$ 时,对该电气设备实施预防性维修。同时,该电气设备下游的风电机组均被迫停机,使下游风电机组获得了实施机会维修策略所需的维修机会。

### 2.2 风机部件机会维修模型

风电机组由众多部件构成,考虑其中 4 个主要部件:齿轮箱、主轴承、发电机和主轴。风电机组的故障统计表明,风电机组关键部件的故障一般服从威布尔分布,则部件*i*的故障率为

$$h_i(t) = \frac{\beta_i}{\theta_i} \left(\frac{t}{\theta_i}\right)^{\beta_i-1} \quad (2)$$

式中: $h_i(t)$ 为部件*i*的故障率; $\beta_i$ 为部件*i*的形状参数; $\theta_i$ 为部件*i*的尺度参数。部件*i*的可靠性由式(3)计算得出。

$$R_{wi}(t) = \exp\left[-\int_0^t h_i(x) dx\right] \quad (3)$$

当风电机组某部件的可靠性低于机会维修阈值 $R_o$ ,且该部件所在风电机组获得维修机会时,对其实施机会维修。

### 2.3 维修费用及可用率分析

风电场的一次预防性机会维修过程包含对风电场电气设备实施的预防性维修及对电气设备下游风电机组实施的机会维修。在*T*时刻实施的一次预

防性维修过程产生的维修费用包含电气设备的维修费用、风电机组的维修费用及风电场的准备费用,如式(4)。

$$C(T) = \sum_{i=1}^{N_e} C_{ei}(T) + \sum_{i=1}^{N_w} C_{wi}(T) + C_0 \quad (4)$$

式中: $N_e$ 为风电场电气设备数; $C_{ei}$ 为第*i*台电气设备*T*时刻维修费用; $N_w$ 为风电场风电机组数; $C_{wi}$ 为第*i*台风电机组*T*时刻维修费用; $C_0$ 为风电场维修固定费用。

电气设备的维修费用包含预防性维修费用及上一次预防性维修到本次预防性维修期间的预期故障维修费用,而预期故障维修费用包含故障维修实施费用及因维修而造成的下游风电机组停机损失。

$$C_{ei}(T) = \omega_{ei}(T) [P_{pei} + C_{cei}(T)] \quad (5)$$

$$C_{cei}(T) = P_{cei} \int_{T_{ei}}^T \lambda_i dt + P_s ET_{ei}(T) \quad (6)$$

$$ET_{ei}(T) = \omega_{ei}(T) N_{wdi} T_{cei} \int_{T_{ei}}^{T_{ei}} \lambda_i dt \quad (7)$$

式中: $\omega_{ei}(T)$ 为*T*时刻第*i*台电气设备的预防性维修标志; $P_{pei}$ 为第*i*台电气设备的单次预防性维修费用; $C_{cei}(T)$ 为预期故障维修费用; $P_{cei}$ 为单次故障维修实施费用; $T_{ei}$ 为本次预防性维修时刻; $T_{ei}'$ 为上一次预防性维修时刻; $P_s$ 为风电机组单机单位时间停机损失费用; $T_{cei}$ 为单次故障维修耗时; $ET_{ei}(T)$ 为下游风电机组预期故障停机总时间; $N_{wdi}$ 为下游风电机组数。

风电机组的维修费用包含各部件的预防性维修、各部件预期故障维修费用和风电机组维修停机损失费用。

$$C_{wi}(T) = \sum_{j=1}^N \omega_{wij} [P_{pwj} + C_{cwij}(T)] + P_s T_{si}(T) \quad (8)$$

$$C_{cwij}(T) = P_{cwj} \int_{T_{wij}}^T h_j(t) dt + P_s \cdot ET_{wij}(T) \quad (9)$$

$$ET_{wij}(T) = \omega_{wij}(T) T_{cwj} \int_{T_{wij}}^T h_j(t) dt \quad (10)$$

式中: $\omega_{wij}(T)$ 表示*T*时刻第*i*台风电机组的第*j*个部件的机会维修标志; $P_{pwj}$ 为第*j*个部件的单次预防性维修费用; $C_{cwij}(T)$ 表示预期故障维修费用; $T_{si}$ 为第*i*台风电机组维修停机时间; $P_{cwj}$ 为单次故障维修实施费用; $ET_{wij}(T)$ 表示由于该部件故障导致的风电机组预期停机时间; $T_{wij}$ 为该部件上一次维修时刻; $T_{cwj}$ 为单次故障维修耗时; $N$ 为风电机组部件数。

当电气设备的可靠性低于预防性维修阈值时,该电器设备的维修标志 $\omega_{ei}(T)$ 置为 1,否则为 0;当某风电机组的某部件的可靠性低于机会维修阈值

时,该部件的维修标志置  $\omega_{wij}(T)$  为 1,否则为 0,如式(11)、式(12)所示。

$$\omega_{ei}(T) = \begin{cases} 0, & R_{ei}(T - T'_{ei}) > R_p \\ 1 & R_{ei}(T - T'_{ei}) \leq R_p \end{cases} \quad (11)$$

$$\omega_{wij}(T) = \begin{cases} 0 & R_{wij}(T - T'_{wij}) > R_o \\ 1 & R_{wij}(T - T'_{wij}) \leq R_o \end{cases} \quad (12)$$

第  $i$  台风电机组的维修停机时间  $T_{si}$  为上游待修电气设备的维修耗时和本风机组各待修部件的维修耗时中最长的时间,如式(13)。

$$T_{si}(T) = \max[\max_j(\omega_{ej}(T) T_{pej}), \max_k(\omega_{wik}(T) T_{pwk})] \quad (13)$$

$$j = 1 \cdots N_{eui}, k = 1 \cdots N$$

式中:  $T_{pej}$  为第  $i$  台风电机组上游的第  $j$  台电气设备预防性维修耗时;  $T_{pwk}$  为风电机组第  $k$  个关键部件预防性维修耗时;  $N_{eui}$  为第  $i$  台风电机组上游电气设备数。

综上得出风电场全寿命周期  $T_L$  维修费用  $C_t$  最小的风电场的预防性机会维修优化模型如下:

$$\min C_t = \sum C(T) \quad (14)$$

$$T = n T_{mei}$$

$$n = 1, 2, \dots, N_{mei}$$

$$i = 1, 2, \dots, N_e$$

$$T_{mei} = -\frac{1}{\lambda} \ln(R_p) \quad (15)$$

$$N_{mei} = \text{INT}(T_L / T_{mei}) \quad (16)$$

式中:  $T_{mei}$  为第  $i$  台电气设备的维修周期;  $N_{mei}$  为第  $i$  台电气设备的总维修次数。

### 2.4 风电场预防性维修策略实施流程

风电场的预防性机会维修策略的实施流程如图 1 所示。

### 2.5 优化阈值求解算法

上述预防性机会维修模型为非线性优化问题,优化目标为总维修费用最小,优化参数为预防性维修阈值  $R_p$  和机会维修阈值  $R_o$ 。由于该目标函数的梯度和 Hessian 矩阵难以得到,这里采用循环坐标法对维修阈值进行寻优。该方法的基本思想是当对一个参数通过黄金分割法<sup>[10]</sup>进行寻优时,其余参数保持为常数。循环坐标法的数值求解流程如图 2 所示。

## 3 算例分析

算例采用包含 1 台主变压器、2 条母线、3 条汇

集线及 21 台风电机组的某风电场进行仿真,其拓扑结构如图 3 所示。风电场规划运行时间为 40 年。考虑风电机组的齿轮箱、主轴承、发电机及主轴等 4 个关键部件。

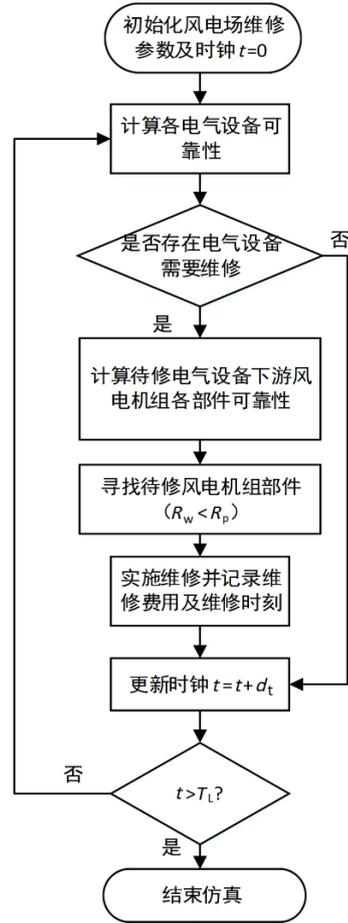


图 1 风电场预防性机会维修策略实施流程

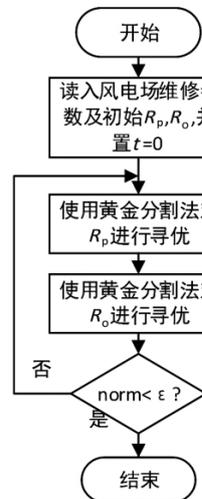


图 2 维修阈值优化过程

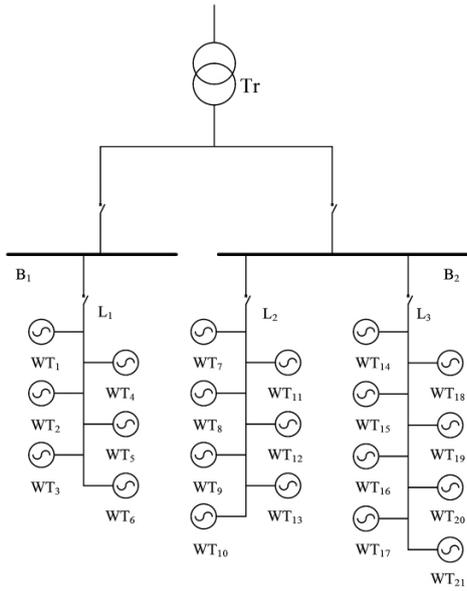


图 3 风电场拓扑结构

风电场电气设备及风电机组各部件的故障和维修参数如表 1、表 2 所示<sup>[11-14]</sup>。

表 1 风电机组关键部件维修参数

部件	$\theta_i/a$	$\beta_i$	$P_{pwj}/$ /万元	$P_{cwj}/$ /万元	$T_{pwj}/h$	$T_{cwj}/h$
齿轮箱	79.60	1.05	3.8	15.2	32	76
主轴承	10.51	1.09	1.5	6.1	18	32
发电机	48.06	1.11	2.5	10.3	24	51
主轴	17.50	1.43	2.8	11.2	18	39

表 2 风电场电气设备维修参数

部件	$\lambda_i$ /(次·a <sup>-1</sup> )	$P_{pei}/$ /万元	$P_{cei}/$ /万元	$T_{pei}/h$	$T_{cei}/h$
主变压器	0.016 9	3.0	13	24	38
母线	0.010 0	0.5	1	10	14
汇集线	0.013 0	0.5	1	12	18

为研究预防性维修阈值  $R_p$  和机会维修阈值  $R_o$  对总维修费用的影响,分别绘制了当  $R_p = 0.8$  时维修费用随  $R_o$  变化的曲线及当  $R_o$  分别为 0.9 和 0.5 时维修费用随  $R_p$  变化的曲线,见图 4 至图 6。

图 4 至图 6 中,电气设备维修费用为电气设备因预防性维修及故障维修而产生的维修费用总和;风电机组维修费用包含风电机组各部件因预防性维修、故障维修而产生的维修费用以及预防性维修导致的停机费用;电气设备预期停机费用为因电气设备的预防性维修或故障维修产生的停机费用;风电机组预期停机费用为风电机组各部件预期故障停机费用之和;风电场总维修费用为上述 4 种费用之和。

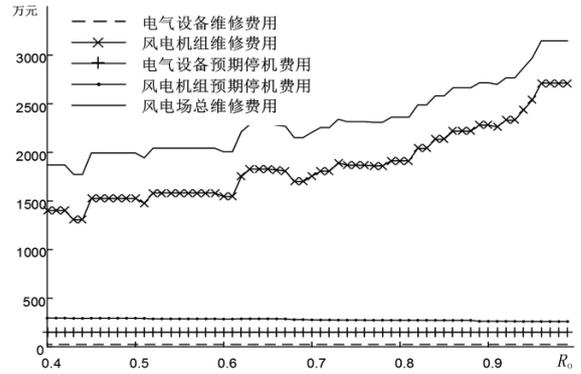


图 4  $R_p = 0.8$  时风电场维修费用随  $R_o$  变化趋势

由图 4 可以看出,当  $R_p$  为定值时,由于风电场电气设备的维修与  $R_o$  无关,所以电气设备维修费用及电气设备预期停机费用也为定值。随  $R_o$  的增大,风电机组各部件机会维修次数有增加的趋势,维修费用同时增加,风电机组预期停机费用有所降低。当  $R_o$  很大时,风电机组维修费用保持不变是因为此时风电机组已经利用了全部维修机会  $R_o$ 。继续增大并不会使风电机组获得更多机会。

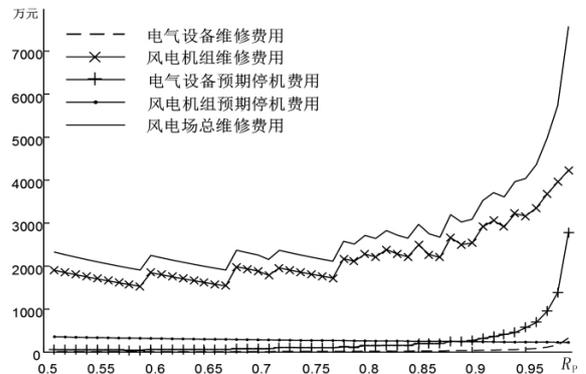


图 5  $R_o = 0.9$  时风电场维修费用随  $R_p$  变化趋势

由图 5 可以看出,当  $R_o = 0.9$  时,随  $R_p$  的增大,除风电机组预期停机费用外的各项费用均有所增大。电气设备维修费用增加是由于  $R_p$  增大缩短了电气设备预防性维修周期,预防性维修实施次数增加;由于电气设备预期停机费用中包含因电气设备预防性维修导致的停机费用,电气设备预防性维修次数的增加同样使该种费用增加;由于  $R_o$  较大,电气设备预防性维修次数的增加,为风电机组提供了更多维修机会,使风电机组预防性维修次数显著增多,风电机组维修费用总体具有增大的趋势。具体到某一区间该费用会有所波动是由于  $R_p$  增大导致电气设备预防性维修周期缩短,风电机组维修周期同样缩短,但风电机组预防性维修次数保持不变,风电机组维修费用中预防性维修费用保持不变,故障维修

费用有所降低,使风电机组维修费用有所降低,电气设备预防性维修周期继续缩短,风电机组各部件获得了新的维修机会,风电机组预防性维修次数增加,预防性维修费用增大,进而导致风电机组维修费用增加;风电机组预期停机费用只包含故障导致的停机费用,所以当风电机组预防性维修周期缩短时,风电机组发生故障的可能性降低,该项费用也有所降低。

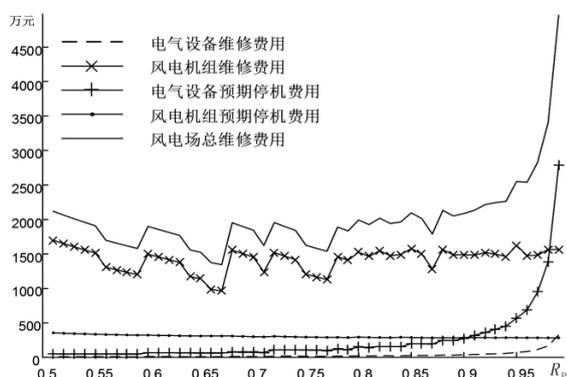


图 6  $R_0 = 0.5$  时风电场维修费用随  $R_p$  变化趋势

图 6 中,与电气设备相关的两项维修费用与图 5 中对应费用一致;风电机组维修费用总体保持稳定,这是由于  $R_0$  较小时,电气设备预防性维修次数的增加并不会显著提高风电机组的维修次数,该费用波动的产生原因与图 5 相同。

采用黄金分割法循环搜索  $R_p$  和  $R_0$ 。得出风电场总维修费用最小时  $R_p$  为 0.67  $R_0$  为 0.52,最小总维修费用为 1 344.4 万元。相同阈值仅采用预防性维修策略,即当电气设备的可靠性降低至 0.67 时,对其实施维修;当风电机组部件可靠性降低至 0.52 时,对其实施维修,则风电场总维修费用为 1 650.9 万元。采用预防性机会维修策略,风电场总维修费用降低了 18.6%。

## 4 结 语

前面提出的风电场预防性机会维修策略主要考虑由于风电场电气设备与风电机组拓扑联系一般为辐射型,当上游某电气设备发生故障或实施定检时,下游风电机组需陪停。这种陪停为风电机组提供了维修机会。利用机会维修策略可降低风电场的维修费用,提高风电机组可用率。算例仿真验证了该策略的有效性。

### 参考文献

[1] 中国风能协会. 2016 年全球风电装机统计 [J]. 风能,

2017(2): 52-57.

[2] Wiggelinkhuizen E, Braam H, Rademakers L, et al. CON-MOW: Condition Monitoring for Offshore Wind Farms [J]. Wind Energy Report Ecn, 2003.

[3] Sinha Y, Steel J A. A Progressive Study into Offshore Wind Farm Maintenance Optimisation Using Risk Based Failure Analysis [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 735-742.

[4] Orosa J A, Oliveira A C, Martín Costa A. New Procedure for Wind Farm Maintenance [J]. Industrial Management & Data Systems 2010, 110(6): 861-882.

[5] 刘佳,王敏,顾煜炯,等. 基于 TOPSIS 重要度分析的风电场设备维修方式逻辑决策 [J]. 可再生能源, 2012, 30(12): 29-34.

[6] 杜勉,易俊,郭剑波,等. 以可靠性为中心的维修策略综述及其在海上风电场运维中的应用探讨 [J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2247-2251.

[7] 刘璐洁,符杨,马世伟,等. 基于可靠性和维修优先级的海上风电机组预防性维护策略优化 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5732-5740.

[8] 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.

[9] Rausand M. Reliability Centered Maintenance [J]. Reliability Engineering & System Safety, 1998, 60(2): 121-132.

[10] 郭科,陈聆,魏友华. 最优化方法及其应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.

[11] Nilsson J, Bertling L. Maintenance Management of Wind Power Systems Using Condition Monitoring Systems—Life Cycle Cost Analysis for Two Case Studies [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 223-229.

[12] 孙鹏,陈绍辉,张彩庆. 基于 Marquardt 法参数估计的变电设备寿命周期故障率评估 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 85-90.

[13] 赵洪山,张路朋. 基于可靠度的风电机组预防性机会维修策略 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3777-3783.

[14] 王航,付光攀,杨斌,等. 基于 Cox 比例风险模型的电力电缆故障影响因素分析 [J]. 高电压技术, 2016, 42(8): 2442-2450.

### 作者简介:

张峻豪(1995), 硕士研究生, 从事电力系统配电自动化专业研究;

张则言(1996), 硕士研究生, 从事电力系统配网自动化专业研究;

傅钰(1996), 硕士研究生, 从事电力系统规划与可靠性研究。  
(收稿日期: 2019-08-02)