

大型风电机组电力电缆选型方法研究

Research on Power Cable Selection Method of Large Wind Turbine

杨飞 张晨阳 赵泽中

Fei Yang Chenyang Zhang Zezhong Zhao

许昌许继风电科技有限公司 中国·河南 许昌 461000

Xuchang Xuji Wind Power Technology Co., Ltd., Xuchang, Henan, 461000, China

摘要: 电力电缆承担着风电机组电能传输的重任, 直接影响机组电能传输的安全和效率。风电机组在向大型化发展的过程中, 电缆的用量越来越大, 在保证电力传输安全性的基础上, 经济性也不容忽视。论文结合大型风电机组的环境温度、运行条件以及电缆敷设方式, 给出了风电机组电力电缆的精确选型计算方法。

Abstract: Power cable is responsible for power transmission of wind turbine, which directly affects the safety and efficiency of power transmission. In the process of the development of wind turbines to large scale, the consumption of cables is increasing. On the basis of ensuring the safety of power transmission, the economy can not be ignored. In this paper, the accurate calculation method of power cable type selection for large-scale wind turbine is given based on the environmental temperature, operating conditions and cable laying mode.

关键词: 风电机组; 动力电缆; 选型方法; 精确计算

Keywords: wind turbine; power cable; selection method; accurate calculation

DOI: 10.12346/etr.v6i3.9257

1 引言

风电平价时代遇上“碳达峰、碳中和”的双碳目标, 风力发电的战略地位凸显, 但也面临着巨大的成本压力^[1]。出于充分利用风能资源和降低度电成本的目的, 风电机组需不断向大型化方向发展。随着单机容量不断增大, 机组内用以电力传输的电缆数量也越来越多, 电缆的用量需根据机组的实际运行工况进行详细的计算, 在满足机组运行安全前提下, 实现电缆成本的最低化^[2]。论文以大型双馈风力发电机组为例, 结合风机的运行环境和接入电网的相关要求, 多因素考虑计算风机最大持续运行电流和电缆最大承载电流, 在此基础上完成电缆的选型及用量计算。

2 风电机组电力传输

风能作为一种清洁、可再生新能源已受到世界各国的广泛关注。风能取之不尽用之不竭, 风电是干净的能源, 可以

减少传统石化能源消耗, 减少二氧化碳的排放。风力发电机组是将风能转换为电能, 典型的电能传输结构如图 1 所示。

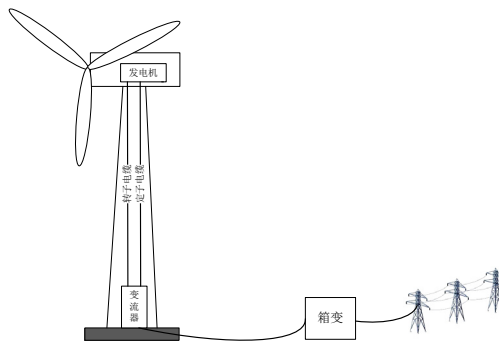


图 1 风力发电机组电能传输

风机叶片捕获风能, 带动风轮旋转, 驱动发电机发电, 发电机将发出的电能通过电缆传输至塔底的变流器, 经整定后变成工频 50Hz 的电能并入电网。

【作者简介】杨飞 (1988-), 男, 中国河南许昌人, 硕士, 工程师, 从事风电电气系统设计研究。

3 风电机组运行电流计算

电力电缆的实际载流量因敷设方式、运行条件和周围环境等因素的影响而不易确定。电缆的载流量偏大，会造成缆芯工作温度超过允许值，绝缘的寿命就会比预期值缩短；载流量偏小，则电缆芯铜材或铝材就不能得到充分的利用，导致不必要成本上升和资源浪费。随着风力发电技术的进一步发展，风电机组越来越被应用于更加恶劣的环境中（高严寒、高辐射、高腐蚀、高海拔等环境），环境条件的变化必然会影响到电力电缆的载流量。一个科学、准确的电力电缆载流量计算，才能既保证风电机组电气系统安全可靠运行，又节约成本。论文以双馈风力发电机组为例，考虑机组运行工况及电网接入要求等多因素条件，分别对双馈发电机定子侧和转子侧输出电流进行推算。双馈发电机电能传输分为两个通道，发电机定子输出 50Hz 工频电能直接并入电网，发电机转子输出变频电能经变流器整定后并入电网，如图 2 所示。

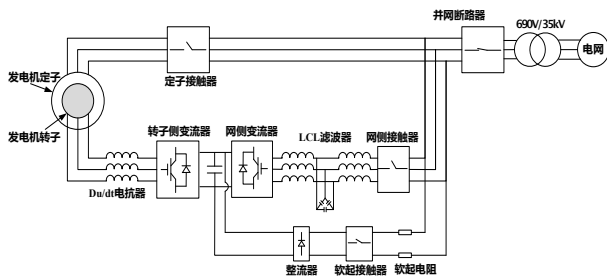


图 2 双馈风力发电机组并网原理图

3.1 定子电流计算

风电机组定子侧有功功率计算公式如下：

$$\begin{cases} P_1 = \frac{P}{1+s} \\ s = \frac{n_0 - n_r}{n_0} \end{cases} \quad (1)$$

其中， P 为机组额定有功功率； P_1 为定子额定有功功率； s 为转差率； n_r 为发电机额定转速； n_0 为发电机同步转速。

根据风电机组接入电网要求，功率因数 $\cos \phi$ 范围为 $\pm 0.95^{[3]}$ 。电网电压在 $\pm 10\%$ 范围内波动机组应该能连续稳定运行，故电流计算过程中应考虑电压校正系数 λ ，取值为 0.9。

双馈风电机组定子侧输出总电流为：

$$I_1 = \frac{P_1 - n_r}{\sqrt{3}U_n \lambda \cos \phi} \quad (2)$$

将式 (1) 代入后：

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3}U_n \lambda \cos \phi (1 + \frac{n_0 - n_r}{n_0})} \quad (3)$$

3.2 转子电流计算

风电机组转子侧输出总电流计算如下：

$$\begin{cases} I_2 = \sqrt{(\frac{I_{1p}}{K})^2 + (I_j + \frac{I_{1Q}}{K})^2} \\ I_j = \frac{\lambda U_n}{\sqrt{3} \frac{X_h f_1}{K f_n}} \\ I_{1p} = \frac{P_1}{\sqrt{3} \lambda U_n} \\ I_{1Q} = \sqrt{I_1^2 - I_{1p}^2} \\ K = \frac{U_{\text{开}}}{U_n} \end{cases} \quad (4)$$

其中， I_2 为转子输出电流； I_{1p} 为定子侧有功电流^[4]； I_{1Q} 为定子侧无功电流； I_j 为转子激磁电流； K 为发电机变比； $U_{\text{开}}$ 为发电机开口电压； U_n 为额定电压； f_1 为电网频率下限； f_n 为电网额定频率； X_h 为发电机激磁电抗。

4 风电机组电缆载流量选型

大型风电机组内动力电缆一般采用 5 类裸铜导体，绝缘材料采用橡胶（EPR）材质，在塔筒中采用垂直敷设的方式，电缆排列方式包括电缆敷设桥架形式、电缆之间的敷设距离等因素。这些因素通过不同方式影响电缆区域的温度场分布，从而对电缆载流量产生影响。风电机组的电缆敷设往往是几种方式的组合，在机舱中一般是水平三角形敷设，塔筒扭缆处为垂直接触式敷设，塔筒内为 U、V、W 三相电缆为一组成品字形固定^[5]。一般大型风电机组需要多组电缆才能满足电能传输的需要。电缆载流量计算依据 IEC60364-5-523 标准，分别从电缆的敷设方式、电缆的运行环境温度、电缆的成组夹层数等综合考虑确定单根电缆的载流量^[6]。

环境温度是影响电缆载流量的一个重要因素。环境温度主要是指电缆敷设区域的空气温度。空气温度的高低对电缆产生热量散发能力具有直接影响。空气温度越高，则它与电缆的对流换热速度就越慢，不利于电缆产生热量的散发，使得载流量变小，相反，当空气温度越低时，电缆产生的热量散发越快，载流量就越大。风电机组中电缆选型设计中，需要充分考虑发电机、齿轮箱的部件发热，塔筒的热效应等对电缆实际运行环境的影响。U、V、W 三相电缆为一组成三叶型排列紧靠垂直敷设在塔筒内，在 30℃ 温度条件下电缆的载流量单回路额定值如表 1 所示。

表 1 30℃ 下三叶型排列电缆额定载流量

电缆导体截面积 (mm ²)	载流量 (A)
120	382
150	443
185	509
240	604
300	699
400	839

风电机组设计最高运行环境温度为 40℃，考虑到塔筒为相对密闭空间，不利于散热的情况，塔筒内最高运行温度按照 50℃考虑^[7]。电缆在不同环境温度条件下的校正系数如表 2 所示。

表 2 电缆运行环境温度校正系数

环境温度 (°C)	校正系数
20	1.08
35	0.96
40	0.91
50	0.82
60	0.71

兆瓦级风电机组电缆需要多回路，电缆夹也采用多层设计，综合考虑电缆的成组校正系数取 0.9。

综上，风电机组动力电缆在进行载流量选取时^[8]，环境温度系数推荐为 0.82，成组校正系数推荐为 0.9。

5 风电机组电缆数量计算

根据论文内容得出电缆的额定载流量 $I_{\text{电缆}}$ ，结合机组的额定电流计算所需电缆数量^[9]，具体如下：

双馈发电机定子电缆根数：

$$C_1 = \frac{I_1}{I_{\text{电缆}}} \quad (5)$$

双馈发电机转子电缆根数：

$$C_2 = \frac{I_2}{I_{\text{电缆}}} \quad (6)$$

电缆计算结果遇上小数点应向上取整。

6 3MW 机组电缆计算实例

以 3MW 双馈风电机组为例计算电缆数量，根据第 3 章节中电缆的载流量计算规则，导体截面积为 185mm² 的铜质电缆额定载流量为 375.6A^[10]。

3MW 双馈风力发电机组的额定有功功率 P 为 3000kW，额定电压 U_n 为 690V，额定转速 n_r 为 1750rpm，同步转速 n_0 为 1500rpm，功率因数 $\cos\phi$ 为 0.95，电压校正系数为 0.9，发电机开口电压 $U_{\text{开}}$ 为 3400V，电网频率下限 f_1 为 47.5Hz，电网额定频率 f_n 为 50Hz，发电机激磁电抗 X_b 为 0.67Ω。

分别代入公式 (3) 和 (4) 得出定子侧电流 $I_1=2516\text{A}$ ，转子侧电流为 $I_2=978\text{A}$ 。

定子单相电缆数量为：

$$C_1 = \frac{I_1}{I_{\text{电缆}}} = \frac{2516}{375.6} = 6.7 \approx 7 \text{根} \quad (7)$$

转子单相电缆数量为：

$$C_2 = \frac{I_2}{I_{\text{电缆}}} = \frac{978}{375.6} = 2.6 \approx 3 \text{根} \quad (8)$$

7 结语

随着风电机组需不断向大型化方向发展及单机容量不断增大，在满足机组运行安全前提下，实现电缆成本的最低化。论文结合大型风电机组的环境温度、运行条件以及电缆敷设方式，提供了一种风电机组电力电缆的详细选型计算方法。

通过 3MW 机组实例计算验证电缆选型计算方法，有效为后续风力发电机组的电缆选型，提供了参考与借鉴。

参考文献

- [1] 张丽峰,潘家华.中国区域碳达峰预测与“双碳”目标实现策略研究[J].中国能源,2021(7):54-62+80.
- [2] 秦云普.浅谈我国风电发展现状、问题与对策[J].中国电力教育,2011(3):96-98.
- [3] 何世恩,郑伟,智勇.大规模集群风电接入电网电能质量问题探讨[J].电力系统保护与控制,2013,41(2):2-5.
- [4] 周沈杰.风电场集电线路导线选型分析[J].上海电力,2008(6).
- [5] 乔月纯,李吉浩.电线电缆结构设计[M].北京:中国电力出版社,2011.
- [6] 陈林,王宝归,喻勇.关于风电机组电力电缆载流的研究[J].风能学报,2015,1(55):2-4.
- [7] 杜冰冰.电力电缆的温度场和载流量研究[D].郑州:郑州大学,2016.
- [8] 马国栋.电线电缆载流量[M].北京:中国电力出版社,2003.
- [9] 田漪,孙志明,陈西海.导线经济截面及经济电流密度的优化[J].电力建设,2008,29(2):27-29.
- [10] 于庆魁,陈守娥,王继瑞.同向绞合软铜导体的设计及应用[J].电线电缆,2011(2):30-32.