

DOI: 10.7667/PSPC171499

现代水平轴三叶片风力发电机转速控制的优化

马锁明

(协合新能源集团有限公司, 北京 100048)

摘要: 提供一种选择适合项目风况下的风力机, 并找到风力机运行在最佳性能的方法, 通过此方法提高风能的利用效率, 实现风电厂投资收益最大化。通过研究风力机发电机转速、风速、最佳叶尖速比和发电机功率之间的关系, 使用实际运行数据推算在运风机最佳叶尖速比, 找到使风力机运行在该最佳叶尖速比的发电机转速-功率控制曲线。使用该曲线对风力机的发电机转速控制器进行优化, 从而使风力机在更宽的发电机转速范围内, 运行在最佳叶尖速比下, 获取最大风能。使用该方法, 结合真实风力发电厂案例, 通过对在运机组的运行数据的分析, 优化其发电机转速控制策略, 最终达到了提升风力机发电量的目的, 验证了该方法的可行性。该方法也可作为对风力机选型评估的参考。

关键词: 风力机控制; 双馈; 最佳叶尖速比; 发电机转速控制; 发电机转矩控制

Optimization of generator speed controller used for the modern horizontal shaft three blades wind turbines

MA Suoming

(Concord New Energy Limited, Beijing 100048, China)

Abstract: A wind turbine suitable for project wind condition is provided, and a method to find the best performance of wind turbine is found out. Using this method, the utilization efficiency of wind energy can be increased, and the investment profit of wind power plant can be maximized. By studying the relationship between the wind turbine generator speed, wind speed, optimal tip speed and generator power, this paper uses the actual data to calculate optimal tip speed ratio of running fan, and find the generator speed-power control curve which makes the wind turbine run on the optimal tip speed ratio. This curve is used to optimize the speed controller of the wind turbine generator, so that the maximum wind energy can be obtained in a wider generator speed range at the optimal tip speed ratio. By using this method, combined with the real wind power plant case, and by optimizing the generator speed control strategy by analyzing the running data of the operation unit, it finally achieves the purpose of improving the power generation capacity of the wind turbine, and verifies the feasibility of the method. This method can also be used as a reference for the assessment of type selection of wind turbines.

Key words: wind turbine control; double-fed; the best tip ratio; generator speed control; generator torque control

0 引言

本文基于三叶片水平轴变速恒频风力机进行论述。该型风力机通过风轮将风能转化为旋转机械能, 再通过发电机将机械能转化为电能, 最终通过变频器与电网相连。该型风力机输出机械功率(或吸收风功率) P 遵守式(1)。

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (1)$$

式中: ρ 指空气密度; A 为扫风面积; V 为风速,

C_p 代表风能利用系数。风能利用系数描述了风力机将风能转化为机械电能的转换效率, 直接影响风力机的发电性能^[1]。

C_p 存在理论最大值 0.59, 被称为贝兹极限, 代表风力机吸收风能转化为电能的最大效率。现代三叶片变速恒频风力机运行时, 最大 C_p 可达 0.45~0.52^[1-8]。

1 风力发电机转速控制方式

C_p 是风力机桨距角(β)和叶尖速比(λ)的函数。其

中叶尖速比指叶片叶尖线速度与风速的比值，即

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} = \frac{\pi n R}{30v} \quad (2)$$

式中： ω 代表叶轮角速度； n 代表叶轮转速； R 指叶轮半径^[2-10]。

当桨距角为固定值时， C_p 与叶尖速比 λ 的关系典型曲线如图1所示。最佳叶尖速比在叶型设计定型后为某一固定值。从图1看，最佳叶尖速比取在8~13左右， C_p 值最大都可达到0.45以上。现代风力机的叶型设计，最佳叶尖速比一般都在8~13左右。

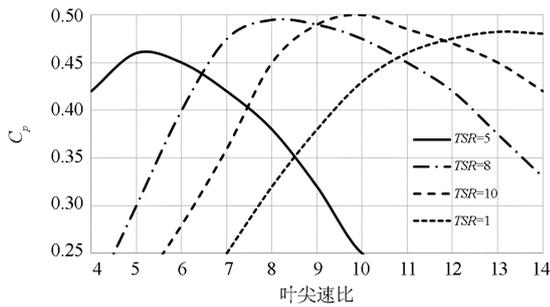


图1 叶尖速比与 C_p 的关系曲线
Fig. 1 Relationship of tip ratio and C_p

在风力机实际运行过程中，转速的控制如图2所示，分为两种控制方式。第一种控制方式称为“转矩控制”：该控制方式在风力机功率达到额定功率前生效，此时桨距角保持恒定 0° ，风力机的转速通过控制输入发电机转矩期望值来进行调节。该控制方式通过给定控制器某一特定发电机转速-功率关系曲线来实现^[8-13]。

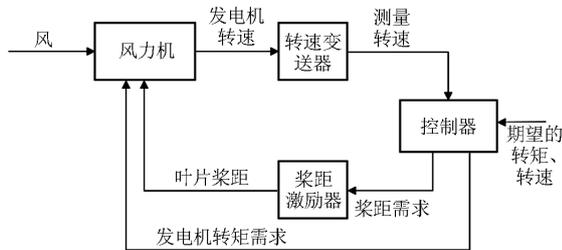


图2 风力机转速控制策略图
Fig. 2 Generator speed control strategy

第二种控制方式称为“桨距控制”：该控制方式发生在风力机功率达到额定功率后，通过调节叶片桨距角度，使风力机保持以恒定转速及恒定功率运行。此时，风力机转矩达到最大值并保持恒定。为使转速恒定，该控制方式使用PI控制器，将风力机转速作为输入变量，通过输出桨距角期望值到变桨控制器来调节桨距角，以达到风力机保持在期望恒

定转速下运行的目的。

风力机达到额定功率后，因保持恒转速、恒功率运行， C_p 将随着风速的升高持续下降，因此没有可以优化提升的空间。但在风力机达到额定功率前，桨距角为 0° ，通过控制转矩和转速的关系，可以使风力机转速运行在最佳叶尖速比下，进而使风力机 C_p 值达到最佳^[12-16]。

本文重点讨论“转矩控制”的优化方式，因在特定转速下发电机转矩和发电机功率为线性关系，为使结果更加直观，以下讨论转速-转矩关系时，均使用转速-功率的关系代替。

实际运行中，为使风力机运行在最佳叶尖速比下，需要使风力机在运行过程中转速跟踪风速变化。由于实际风速变化太快，无法作为控制量参与转速的控制。

理想情况下，假设风速恒定，风力机 C_p 达到最大设计值，此时风力机吸收功率可通过式(1)得到，风力机转速则可以通过式(2)代入最佳叶尖速比得到。即在某一特定风速下，存在唯一的一对最佳转速、功率点，使风力机在此风速下在最佳叶尖速比下运行，并获得最大 C_p 。在全风速段下，即存在着一条转速-功率关系曲线，使风力机始终运行在最佳叶尖速比下和最大 C_p 值下。

风力机运行过程中，将转速作为控制器输入量，按上述转速-功率关系曲线给定发电机功率(或转矩)需求，理论上可使风力机按照给定的关系曲线运行在最佳叶尖速比下，并获取到最大 C_p 。该曲线的推导过程举例说明如下：

以设计最佳叶尖速比(λ)为11、风轮半径(R)为105 m、齿轮箱传动比(i)为118的某双馈风力机为例。根据式(1)可得到期望 C_p 为0.5时的风速-功率曲线。由式(2)可知，在最佳叶尖速比下，风速 V (单位：m/s)与齿轮箱输出转速(或发电机转速) n (单位：rpm)的关系为

$$V = \frac{\pi n R}{30i\lambda} \quad (3)$$

代入式(1)可得，风力机吸收功率与齿轮箱输出转速的关系为

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A \left(\frac{\pi n R}{30i\lambda} \right)^3 \quad (4)$$

$$P = \frac{C_p \rho A \pi^2 R^3}{2 \times (30i)^3} \left(\frac{n}{\lambda} \right)^3 \quad (5)$$

式中， ρ 取标准空气密度 1.225 kg/m^3 ，取 $C_p=0.5$ ， $i=118$ ， $R=105 \text{ m}$ ， $\lambda=11$ ，可得

$$P = 10573n^3 \quad (6)$$

式(6)即使该风力机运行在最佳叶尖速比下，

使风力机 C_p 值达到 0.5 的风力机吸收功率与发电机转速的关系曲线,如图 3 曲线 1 所示。实际情况下,由于受到发电机额定功率和额定转速的限制,是无法在发电机全转速范围内按照曲线 1 运行的。假如,风力机配备的是一台额定 2000 kW, 转速范围为 1000~1800 rpm 的双馈发电机,则理论上该发电机只能以最贴近“曲线 1”的“曲线 2”方式运行。“曲线 2”即可用做风力机的转速控制曲线。

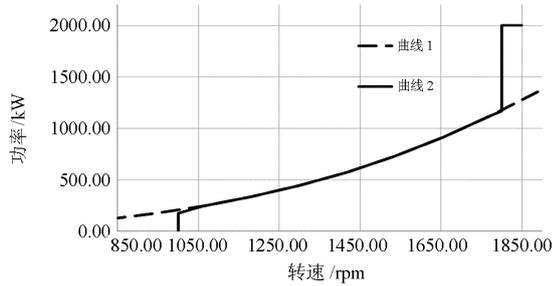


图 3 最佳叶尖速比下的风力机发电机转速-功率控制典型曲线

Fig. 3 Typical curve of the generator speed and power control of wind turbine in the best tip ratio

为使风力机按照图 3 “曲线 2”运行,在 1000~1800 rpm 转速范围内,将实测转速输入控制器,控制器通过查找“曲线 2”即可得到需求功率(及对应转矩),并通过变频器输出相应转矩。该控制方式的难点在于,在 1000 rpm 和 1800 rpm 两端需要使发电机保持恒定转速运行,此时无法通过查找曲线来确定期望功率或转矩。因此需要引入 PI 控制器,当发电机转速在“曲线 2”两端时,控制器切换为 PI 控制方式,将两端转速作为控制目标值,通过 PI 控制器输出给定调节转矩值,以达到恒定转速运行的目的^[12-20]。

通过上述推导,一台设计指标为:最佳叶尖速比(λ)为 11、风轮半径(R)为 105 m、齿轮箱传动比(i)为 118、发电机额定功率 2000 kW、转速范围为 1000~1800 rpm 的双馈风力机,在额定功率前,发电机转速按照图 3 “曲线 2”控制,即可使风力机运行在最佳 C_p 值下。

2 理论应用

应用上述理论,通过调用实际机组运行过程中的转速-功率曲线,可评估和优化机组的发电性能。下面以某实际在运风电厂所运行的双馈 2 MW 机型作为案例,通过运行数据分析,找到最佳控制曲线,并使用该曲线优化风力机转速控制,最终达到提升机组发电量的目的。

2.1 案例风电厂情况及机型简介

该应用选取的风电厂建于 2012 年,2013 年初正式投入运行,位于安徽省东部,海拔 5~15 m,年均空气密度为 1.223 kg/m^3 , 80 m 高度年均风速为 5.48 m/s。据项目可行性研究报告评估 70% 的风能集中在 5~9 m/s 风速段内,具有较好的开发价值。

该风电厂安装运行额定功率为 2 MW,风轮直径为 105 m 的双馈风力发电机 25 台。机型主要参数如表 1 所示。

表 1 案例风电厂风力机主要性能参数

Table 1 Main parameters of the example wind turbine

序号	部件	单位	数值
1	机组数据		
1.2	额定功率	kW	2000
1.3	转轮直径	m	105
1.4	轮毂高度(推荐方案)	m	80
1.5	切入风速	m/s	3
1.6	额定风速	m/s	10
1.7	切出风速		20
1.9	设计寿命	Y	20
1.10	设备平均可利用率	%	大于 95%
2	叶片		
2.2	叶片材料		GFRP
2.3	叶片端线速度		82.47
3	齿轮箱		
3.2	齿轮极数		一级行星两级平行轴
3.3	齿轮传动比率		118
3.4	额定转矩		1390
4	发电机		
4.2	额定功率	kW	2100
4.3	额定电压	V	690
4.4	额定转速及其转速范围	rpm	1812

该机型设计功率曲线见图 4,可以看到该风力机设计 C_p 在 5~9 m/s 范围内可达 0.4 以上,8.5 m/s 附近风速时 C_p 接近 0.45,与项目可行性研究报告中的风能分布范围相符。该风电厂于 2013 年正式投运,经过 1 年的运行,发现 2013 年实测功率曲线及 C_p 较设计值均偏差较大,显示仅在 4~5 m/s 风速区间内,实测 C_p 值较高;在 5~10 m/s 风速区间内实测 C_p 值仅为 0.3~0.4 之间,未能有效吸收利用风能。推测该风力机在 5~10 m/s 风速段内并未运行在最佳叶尖速比下,进而造成风力机在设计满发风速下未达到满发运行。

2.2 风力机发电性能分析评估

通过风力机 SCADA 系统调出实际运行的发电机转速-功率关系曲线,见图 5。直观看该风力机转速功率曲线,在运行转速范围内,与图 3 “曲线 2”

差异较大, 曲线两端均未使用恒定转速控制, 存在较大的改进空间。

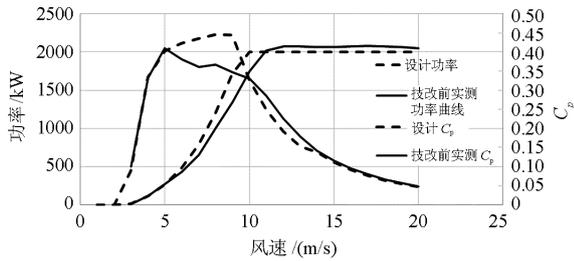


图 4 案例风电厂风力机设计功率曲线与实测功率曲线对比图

Fig. 4 Comparison of the designed power curve and the active power curve of example wind turbine

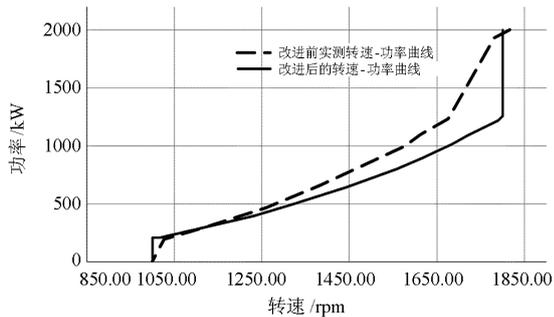


图 5 技改前后发电机转速-功率关系曲线

Fig. 5 Comparison of the speed-power curve before and after the technical modification

由于在该曲线控制下, 低风速段时 C_p 较高, 考虑该段控制较接近最佳叶尖速比控制, 通过该曲线可找到机组的最佳叶尖速比。结合实测功率曲线, 5 m/s 风速附近内的 C_p 值约 0.4, 此时对应的实测功率为 157 kW, 从转速-功率曲线上找到对应的转速为 1000 rpm, 根据式(2), 可推导得出该机型最佳叶尖速比约为 11.6。将该值代入式(4)可得到最佳叶尖速比为 11.6 时的的发电机转速-功率关系。与实测转速-功率曲线对比如图 5 所示。从图 5 中可看出, 当风力机出力高于 450 kW(对应风速 5.5 m/s)时, 随着功率(或风速)的不断升高, 实测转速-功率曲线与最佳叶尖速比下的转速-功率曲线偏差逐渐加大, 这就会造成整机 C_p 在 5.5 m/s 后不断下降, 并造成机组在原设计额定风速下, 无法达到额定功率运行, 印证了之前关于机组不能在额定风速下不能满发的原因的推测。

2.3 技改和效果评价

按照新的发电机转速-功率控制曲线对机组转矩控制器进行升级, 改进后半年再次提取风力机实际运行功率曲线, 与技改前的功率曲线对比如图 6

所示。可以看到技改后的功率曲线在 5 m/s 以上风速下功率得到显著提高, 并且在 10 m/s 时基本达到满功率运行。 C_p 值在满功率运行前达到 0.4 以上。按照项目可行性研究报告中的风频分布, 测算后功率曲线下的理论发电量较技改前功率曲线下的理论年度发电量提升达 11.2%, 计算过程见表 2。由于推导上述转速控制曲线所用最佳叶尖速比是由实测数据评估得到的, 可能与设计值有微小偏差。如能得到叶片最佳叶尖速比设计值, 则推算得到的控制曲线将更加精确, 提升发电量的效果也会更好。

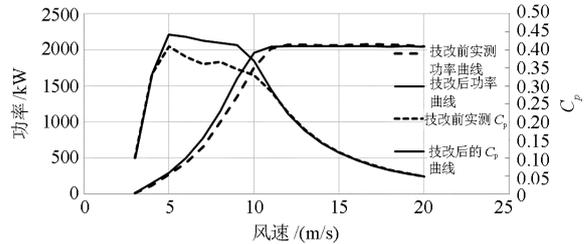


图 6 技改前后风速功率曲线对比

Fig. 6 Comparison of the power curve after the technical modification

表 2 技改前后的理论年发电量测算对比

Table 2 Comparison of the production after the technical modification

风速	风频	技改前功率曲线	技改后功率曲线	技改前理论电量	技改后的理论电量
1.00	4.73	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	7.32	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	12.55	90.44	63.61	1135.02	798.24
4.00	16.91	156.45	155.27	2645.54	2625.53
5.00	18.11	271.83	293.11	4922.90	5308.28
6.00	15.55	435.69	500.11	6774.98	7776.65
7.00	11.14	656.62	773.03	7314.72	8611.51
8.00	6.55	996.22	1138.14	6525.21	7454.82
9.00	3.61	1343.43	1598.40	4849.78	5770.22
10.00	1.86	1750.06	1958.71	3255.11	3643.20
11.00	0.92	2015.92	2041.72	1854.65	1878.38
12.00	0.42	2072.79	2051.97	870.57	861.83
13.00	0.19	2070.41	2052.41	393.38	389.96
14.00	0.08	2065.04	2051.47	165.20	164.12
15.00	0.04	2060.58	2051.35	82.42	82.05
16.00	0.01	2069.76	2049.75	20.70	20.50
17.00	0.01	2075.31	2048.35	20.75	20.48
18.00	0.00	2069.41	2043.59	0.00	0.00
19.00	0.00	2060.03	2048.54	0.00	0.00
20.00	0.00	2045.58	2045.44	0.00	0.00
理论电量				40 830.94	45 405.77
电量比较				11.2%	

2.4 对进一步优化机型设计的一些思考

从上面的技改评估效果看,通过找到机组最佳叶尖速比并改进转速控制策略,可以很好地改善功率曲线,提升发电量。但是技改后的功率曲线与设计功率曲线还是存在一定的差距,从改进后的转速-功率曲线来看,使用技改后的发电机转速-功率曲线对风力机进行转速控制,可以使机组在功率为200~1250 kW之间均能按照最佳叶尖速比运行。但是在功率达到1250 kW后,受到发电机额定转速1800 rpm的限制,转速只能保持1800 rpm运行,这将导致风力机的 C_p 在发电机功率达到1250 kW后就开始逐步下降。该风力机发电机转速范围为1000~1800 rpm,按照齿轮箱118:1的变比,对应风轮侧转速范围为:8.5~15.25 rpm,按照最佳叶尖速比11.6推算能够跟踪最佳叶尖速比的风速范围为4~7.3 m/s。因此,7.3 m/s后机组 C_p 将逐步降低并低于0.4,明显达不到其设计功率曲线所示8.5 m/s风速下 C_p 达到最大值0.45的效果。

假设该机型设计阶段,将齿轮箱变比降低至100,对应风轮转速范围将达到10~18 rpm,能够跟踪最佳叶尖速比的风速范围将达到4.8~8.6 m/s。这将使项目所在地区的最大风能分布范围(5~9 m/s)内的风速得到更好的利用。

此外,该机型设计最佳叶尖速比在11.6左右,如设计叶型时将最佳叶尖速比降低为10,风轮转速范围8.5~15.25 rpm所对应最佳叶尖速比的风速范围将变为:4.7~8.5 m/s,也优于现有机型的风速适应范围,实际功率将更有可能达到设计功率曲线指标。

可以看到,该机型的叶尖速比和齿轮箱变比的设计取值不佳,导致该机型出力不可能达到其设计理论功率曲线和 C_p 值。

另外,通过叶片叶形改造,降低该机型的最佳叶尖速比值,也是该机型未来继续技改提升的一种方法。

3 结论

通过调取风力发电机实际运行过程的转速-功率曲线,结合风力机实际风速-功率曲线,可推导得到机型最佳叶尖速比。再使用该最佳叶尖速比,反推出该叶尖速比下的风力机转速-功率的关系曲线,并使用该曲线为目标值进行转速控制。可以使风力机的发电效率得到很好的提升。

通过以上论述可得到以下结论:

1) 通过风力机转矩控制使风力机转速运行在最佳叶尖速比下,可较大地提升风力机吸收利用风

能的效率。

2) 风力机在设计或选型时,应充分考虑项目所在地区的风能分布情况。为使风力机在风能分布最大的风速范围内得到最大的风能利用效率(C_p),设计时就应优化好最佳叶尖速比和齿轮箱变比的设计值。

3) 风力机转速-功率曲线的优劣才是影响风力机发电性能的关键因素。当风力机实际功率曲线低于设计功率曲线5%以上时,应考虑优化转速-功率曲线来提升风力机的发电效率。

参考文献

- [1] BUTON T, JENKINS N, SHARPE D, et al. 风能技术[M]. 2版. 武鑫,译. 北京: 科学出版社, 2014.
- [2] 杨睿茜, 陈红坤, 陶玉波, 等. 双馈式风力机控制器参数整定的实用方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 63-69.
YANG Ruixi, CHEN Hongkun, TAO Yubo, et al. A practical method on doubly-fed induction generator controller parameter determination[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 63-69.
- [3] 程辉, 杨克立, 王克军, 等. PMSG 风力发电系统转速估计算法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 24-29.
CHENG Hui, YANG Keli, WANG Kejun, et al. Study on a rotor speed estimation algorithm of PMSG wind power system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 24-29.
- [4] 赵祖熠, 刘李勃, 解大, 等. 基于阻尼器的双馈风力发电系统扭振抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 8-14.
ZHAO Zuyi, LIU Libo, XIE Da, et al. A novel torsional vibration damping method for a DFIG-based system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 8-14.
- [5] 李岚, 王颖. 双馈风力发电系统PI自适应速度估计[J]. 微特电机, 2007, 35(3): 8-10.
LI Lan, WANG Ying. PI adaptive speed estimate of doubly-fed wind generator system[J]. Small & Special Electrical Machines, 2007, 35(3): 8-10.
- [6] 王君瑞. 双馈风力发电机的无速度传感器控制[J]. 大电机技术, 2012(4): 9-12.
WANG Junrui. Speed sensor less control of the doubly-fed wind power generator[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2012(4): 9-12.
- [7] 周腊吾, 邓宁峰, 陈浩, 等. 基于ACA-PID算法的风力机独立变桨控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 99-105.
ZHOU Lawu, DENG Ningfeng, CHEN Hao, et al.

- Individual pitch control strategy based on ACA-PID controller in wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 99-105.
- [8] 王奇, 张晗, 邓军, 等. 基于状态评价的风力发电设备故障诊断系统的研制[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(11): 103-108.
WANG Qi, ZHANG Han, DENG Jun, et al. Research on fault diagnosis system for wind power equipment based on condition evaluation[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(11): 103-108.
- [9] 季凌燕, 沈艳霞, 吴定会. 基于灰色动态预测的风力发电系统容错控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 37-43.
JI Lingyan, SHEN Yanxia, WU Dinghui. Research of fault-tolerant strategy for wind energy conversion system based on grey prediction model[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 37-43.
- [10] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 计及撬棒保护影响的双馈风力发电机组故障电流特性研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 1-10.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study of fault current characteristics of DFIG considering impact of crowbar protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 1-10.
- [11] 撤奥洋, 张哲, 尹项根, 等. 双馈风力发电系统故障特性及保护方案构建[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 233-239.
HAN Aoyang, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Research on fault characteristic and grid connecting-point protection scheme for wind power generation with doubly-fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 233-239.
- [12] 王新生, 吴吟箫, 何川. 基于风速预测的最大风能追踪控制系统仿真[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(2): 20-24.
WANG Xinsheng, WU Yinxiao, HE Chuan. Simulation of wind speed estimation for MPPT control[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(2): 20-24.
- [13] 韩兵, 周腊吾, 陈浩, 等. 大型风力机的独立变桨控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 1-8.
HAN Bing, ZHOU Lawu, CHEN Hao, et al. Methods of individual pitch control for large wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 1-8.
- [14] 赵冬梅, 许瑞庆, 郑立鑫. 全风况下双馈风力机参与调频的协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 53-59.
ZHAO Dongmei, XU Ruiqing, ZHENG Lixin. Research on coordinated control strategy for DFIGs participating in system frequency regulation with different wind[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 53-59.
- [15] 何玉林, 刘军, 杜静, 等. 大型风力发电机组变桨距控制技术[J]. 计算机仿真, 2010, 27(7): 244-247, 252.
HE Yulin, LIU Jun, DU Jing, et al. Study on adjustable pitch control technology of large scale wind turbine[J]. Computer Simulation, 2010, 27(7): 244-247, 252.
- [16] 曹娜, 黄坤, 于群, 等. 基于动态励磁电流的双馈风力机组控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 29-34.
CAO Na, HUANG Kun, YU Qun, et al. A control strategy of doubly-fed induction generator based on dynamic process of excitation current[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 29-34.
- [17] 侯学勇, 邱巍, 鞠平, 等. 江苏电网低频减载优化研究[J]. 江苏电机工程, 2008, 27(4): 8-11.
HOU Xueyong, QIU Wei, JU Ping, et al. Study of the optimization of under-frequency load shedding in Jiangsu Power Grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2008, 27(4): 8-11.
- [18] 朱兰, 严正, 杨秀, 等. 风光储微网系统蓄电池容量优化配置方法研究[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 26-31.
ZHU Lan, YAN Zheng, YANG Xiu, et al. Optimal configuration of battery capacity in microgrid composed of wind power and photovoltaic generation with energy storage[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 26-31.
- [19] 徐立中, 易永辉, 朱承治, 等. 考虑风电随机性的微网多时间尺度能量优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 1-8.
XU Lizhong, YI Yonghui, ZHU Chengzhi, et al. Multi-time scale optimal energy dispatch of microgrid considering stochastic wind power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 1-8.
- [20] 赵晓星, 王云亮. 风光互补发电系统的能量管理[J]. 电源技术, 2014, 38(9): 1647-1650.
ZHAO Xiaoxing, WANG Yunliang. Energy management of wind-light complementary power system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2014, 38(9): 1647-1650.

收稿日期: 2017-10-10; 修回日期: 2018-02-01

作者简介:

马锁明(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事电网调度、继电保护和新能源专业管理和新能源生产运营管理。E-mail: masm@cnegroup.com

(编辑 周金梅)