

不同出力下双馈风力发电机谐波特性

针对双馈风力发电机谐波与风机出力的关联特性,依据IEC标准对实际双馈风力发电机不同出力下的谐波电流进行测量,基于PSCAD/EMTDC软件平台构建含双馈风力发电机的电路模型,获得不同出力下双馈风力发电机各次谐波电流。为便于直观分析谐波电流特性,引入谐波电流含有量的概念,用于反映谐波电流与双馈风力发电机出力之间的关系。试验及仿真结果表明:在风机较低出力下,谐波电流含有量较低,而5次谐波电流较高;随着风机输出功率的增加,谐波电流含有量也不断增加。当风机输出功率增加至额定功率的50%时,输出谐波电流含有量基本不变,且额定工况下风机电流谐波含有量较高,其中以5次、7次谐波电流为主。不同出力下的风机谐波特性研究可为治理并网造成的谐波污染提供一定的参考价值。

陈耀红 陈仲伟 陈 剑/国网湖南省电力公司经济技术研究院
程梦凌 刘 毅/强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学)



陈耀红/工程师

关键词/Keywords

双馈风力发电机·
谐波电流·
出力·
谐波特性·

近年来风电装机容量逐渐增加,大规模风电并网对电力系统造成的影响越来越大,双馈风力发电机(以下简称“双馈风机”)已经成为目前风力发电系统领域研究的热点。由于风电能的时变性和随机性,风力发电系统采取了一系列控制策略,包括最大风能追踪策略^[1]、并网控制策略^[2]等,实现了风能的高效利用,减小了风电并网对电力系统的影响。文献[3]综述了风电的不确定性对系统频率、电压和电能质量的影响;文献[4]对风电场并网运行引起闪变和谐波问题的原因进行分析,并根据IEC和国家相关标准给出闪变和谐波的计算方法,结合某风电场工程实例,对该电能质量分析方法进行说明;文献[5]通过分析双馈风机各模块的数学模型,并基于Matlab软件搭建了适于谐波分析的双馈风机仿真模型,分析结果表明采用PWM技术可以

减小谐波污染;文献[6]基于EMPT-RV的仿真软件,对某实际的双馈风机风电场进行建模,并充分考虑不同风况、有无系统背景谐波以及系统三相不平衡电压等情况,仿真分析了风电机组并网的公共连接点处谐波电压情况,为风电接入系统的谐波问题的分析计算提供了方法和思路。目前对双馈风机并网造成的谐波污染研究大多集中在额定工况下,而并网公共连接点处谐波电压情况对双馈风机在不同出力下谐波电流影响的研究较少。

本文基于不同出力下风机(型号为WT2000)的谐波电流含有量数据,利用PSCAD/EMTDC中已有模块搭建相应的双馈风机模型,通过实测数据与仿真结果进行对比,分析双馈风机在不同出力情况下的谐波电流特性,建立较为准确的双馈风机谐波源模型,为研究谐波源对电网电能质量的影响提供模型支撑,并为双馈风机在非额定功率运行情况下的滤波方法提供参考性建议。

不同出力下风机谐波电流特性的试验测试

双馈风力发电系统主要由风力机、传动齿轮箱、双馈感应发电机、变换器、变压器和控制系统组成。在双馈式风力发电系统中,风力机通过齿轮箱驱动双馈感应发电机,双馈感应发电机的定子侧直接与电网相连,转子通过交—直—交双向变换器与电网相连接,可实现功率的双向流动。由于电动机气隙和绕组分布不均匀以及变换器不断工作,

双馈风机通过定转子向电网中注入大量的谐波。因风能具有不确定性,因此风机在不同出力情况下向电网中输送的谐波电流含量不同。

依据GB/T 14549—1993标准,对风机连续运行时的谐波电流含有率 HRI_h 进行测量。谐波电流含有率计算式为

$$\text{HRI}_h = \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中, I_h 为第 h 次谐波电流; I_1 为基波电流。

由于双馈风机在不同出力情况下基波电流不同,为统一起见,引入谐波电流含有量 HI_h 概念,其计算式为

$$\text{HI}_h = \frac{I_h}{I_N} \times 100\% \quad (2)$$

式中, I_N 为风机的额定电流。

为反映双馈风机输送到电网的电流畸变情况,根据IEC标准测量总谐波电流畸变率 $\text{THC}^{[8]}$,其计算式为

$$\text{THC} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_N} \times 100\% \quad (3)$$

双馈风机的感应电动机参数如表1所示,风轮叶片和升压变压器参数如表2所示。

表1 感应电动机参数

风机类型	三叶片、水平轴、变桨、变速和双馈异步
额定功率 P_N/kW	2 000
额定电压 U_N/V	690
额定电流 I_N/A	1 673.5
基波角频率/(rad/s)	314.15
定转子匝数比	0.3
定子电抗(pu)	0.005 4
绕线转子电抗(pu)	0.006 07
定子漏电抗(pu)	0.1
转子漏电抗(pu)	0.1
磁化电抗(pu)	4.5

具体测试方法为:基于单位功率因数的情况下,无功功率输出为零,通过调节三叶片风机所受风速,将双馈风机从 $5\%P_N \sim 105\%P_N$ 等分成10个有功功率测量区间,即 $5\%P_N \sim 15\%P_N$ 、 $15\%P_N \sim 25\%P_N$ 和 $25\%P_N \sim 35\%P_N$ 等,在电网畸变

表2 风轮叶片、升压变压器参数

叶片类型	三叶片、水平轴
风轮半径/m	55
轮毂高度/m	80
额定风速/(m/s)	9.5
额定容量/kW	2 500
短路损耗/kW	23
短路电压百分比(%)	6.5
空载损耗/kW	3.5
空载电流百分比(%)	0.75

最小的情况下,对双馈风机的三相电流分别进行3次测量,每个测量区间至少观测10 min。将测得的谐波电流进行傅里叶分析,得出各次谐波电流的含有量。将每个测量区间的9组测试数据取平均值,任何次谐波电流含有量如果小于0.1%,则无须记录。对于明显被电网背景噪声所影响的测量应当排除。

按照上述测量方法对该型号的双馈风机进行不同出力情况下的谐波电流测量,具体测试结果如图1、图2所示。

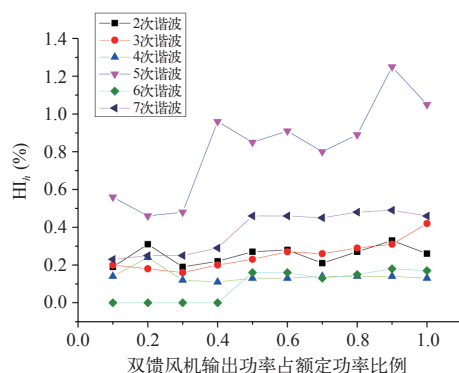


图1 谐波电流含有量实测数据

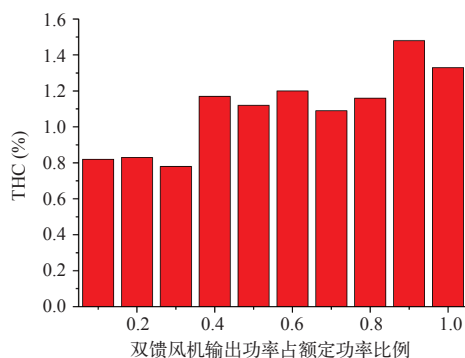


图2 双馈风机总谐波电流畸变率

由于7次以上谐波电流含有量较低,为直观显示不同风力情况下的谐波电流情况,测试结果仅体现2~7次谐波电流含有量在风机不同出力情况下的数据。通过横向比较,当风力机所受风速较小时,双馈风机由于偏离额定工况程度较高,因此其输出电能质量较低,电压电流谐波含量较高,双馈风机输出有功功率较小。在输出电压大致不变的情况下,输出较小电流,谐波电流含有量也相对较低。随着风速的增加。双馈风机输出的有功功率和电流不断增加,当双馈风机输出功率接近 $50\%P_N$ 时,各次谐波含有率呈现较为明显的增长趋势。若风速继续增加,除5次谐波电流含有量有较为明显的波动外,其他各次谐波电流含有量均呈现微弱的增长趋势。通过纵向比较,当风机处于较低出力状态时,5次谐波电流含有量较高,其他各次谐波电流含有量较低。随着双馈风机输出有功功率的不断增加,5、7次谐波电流含有量增长幅度较大,2、3次谐波电流增长幅度次之,4、6次谐波电流含有量增长幅度最低。

仿真实验研究

1. 模块搭建

双馈风机由风力机、变换器、感应电动机和升压变压器等组成^[7]。根据PSCAD/EMTDC平台中自带的模块,感应电动机、风力机和升压变压器直接选用平台提供的模块,输入相应的参数,PWM变换器由平台中各元器件组成。目前主流变换器采用交—直—交变换器和交—交变换器。交—交变换器存在低次谐波含量较高、结构比较复杂以及控制方法不够成熟等缺陷,本仿真模型采用较为成熟的电压源型交—直—交变换器^[8-10]。交—直—交变换器包含网侧变换器、中间直流环节以及转子侧变换器3个模块。双PWM变换器拓扑结构如图3所示。

网侧变换器采用电网电压定向的矢量控制策略^[11-12]，主要功能是实现网侧功率因数调节控制和直流环节的电压稳定，且保证并网稳定。直流环节电压是否稳定，取决于交直流侧的有功功率是否平衡，通过控制交流侧流入的有功功率，保证

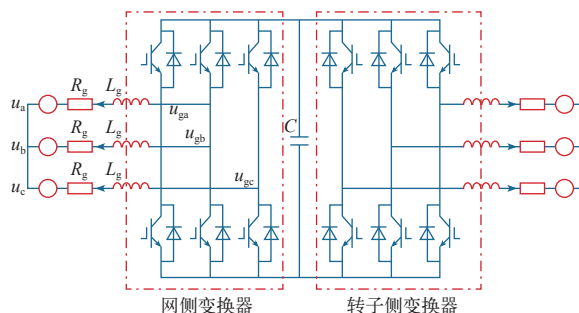


图3 变换器拓扑结构

直流环节的电压稳定。电网电压基本保持恒定，对交流侧有功功率的控制需要通过控制输入电流的有功分量进行控制来满足，对功率因数的控制需要通过控制输入电流的无功分量进行控制来满足。经过坐标变换得出在旋转坐标系下的电压方程为

$$\begin{cases} u_d = R_g i_{gd} + L_g \frac{di_{gd}}{dt} - \omega_l L_g i_{gq} + u_{gd} \\ u_q = R_g i_{gq} + L_g \frac{di_{gq}}{dt} + \omega_l L_g i_{gd} + u_{gq} \end{cases} \quad (4)$$

为简化控制算法,应用空间坐标变换将同步旋转 d 、 q 坐标系的 d 轴定向于电网电压矢量 u_s 的方向上,即

$$\begin{cases} u_d = u_s \\ u_g = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, 下标 d 、 q 分别为相应的电压和电流的直轴分量和交轴分量; L_g 、 R_g 为电网侧入端电感和电阻; u 为网侧电压; u_g 为变换器交流侧电压, 基于上述方程可得变换器交流侧参考电压。

转子侧变换器采用滞环电流控制,通过控制转子的励磁电流来使定子输出的频率稳定,通过独立地控制转子的有功、无功电流分量实现有功功率、无功功率的解耦控制^[13-14]。中间直流稳压环节主要包含起隔离作用的稳压电容,使两个变换器可以独立地分开控制而不会相互干扰^[15]。

2. 仿真实验结果

经过上述的理论指导建立相应的仿真模型,双馈风机基本框架如图4所示。

由图4可知,不断改变风机的输入风速,并对升压变压器低压侧进行谐波电流检测,将测量的谐波电流进行快速傅里叶变换,通过额定电流转

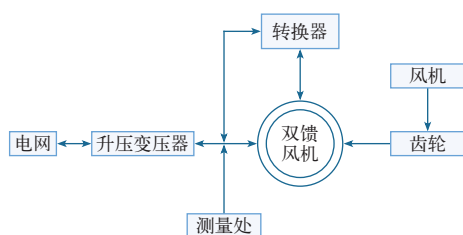


图4 双馈风机测量结构

换得出各次谐波电流含有量。额定工况下,当风速为9.5 m/s时,双馈风机输出的电流和电压波形如图5和图6所示。

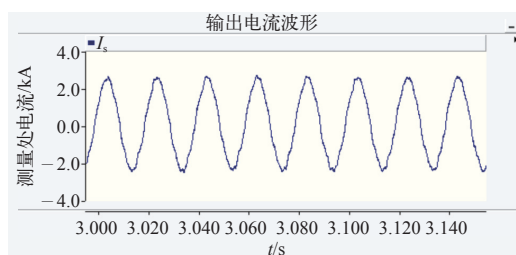


图5 额定工况下输出电流波形

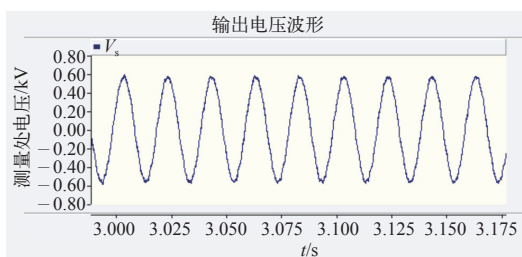


图6 额定工况下输出电压波形

由于谐波电流处在变化过程中,测量处谐波电流的有效值随时间的变化而变化。为尽量准确地得出各次谐波电流含有量,在双馈风机的不同出力下,分别对其三相电流进行3次测量,在每次测量过程中,取谐波含量稳定后随机0.1 s内各次谐波的平均值。最终取3次测量数据的平均值,得到谐波电流含有量的仿真数据如图7所示。

由图7可知,随着风力机所受风速的增加,各次谐波电流含有率呈现增长态势。当双馈风机输出有功功率接近额定功率的50%时,继续增加风力机所受风速,各次谐波电流含有量增长幅度减小。在任何出力情况下,双馈风机5次谐波电流含有量最高,且明显高于其他各次谐波,4、6次谐波含有量明显低于其他各次谐波。当风机出力较小时,2、5和7次谐波电流含有量较高,随着风速

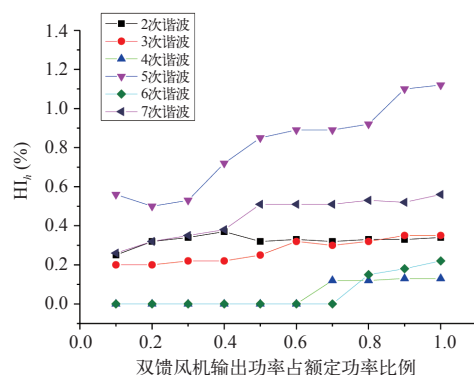


图7 谐波电流含有量仿真数据

的增加,双馈风机在接近额定工况下,5、7次谐波含有量较高。

实测数据与仿真结果讨论

双馈风机实际工作状态偏离额定工况程度越高,其输出电流的畸变程度也越高。随着风速的增加,当双馈风机实际输出有功功率低于 $50\%P_N$ 时,输出电流增加造成的谐波电流含有量增加程度高于谐波电流畸变减小造成的谐波电流含有量的降低程度,谐波电流含有量呈现增长态势。当双馈风机输出有功功率超过 $50\%P_N$ 时,上述两种因素对谐波电流含有量的影响大致相同,除5次谐波外,其他各次谐波电流含量基本不变。在不同出力情况下,双馈风机输出电流中5次谐波含量最高,变化幅度最大,且明显高于其他各次谐波,5次谐波含有量最高可达1.25%。综上所述,该型号双馈风机向电力系统中输送大量的5次谐波电流,且5次谐波电流含有量随着有功功率的增加波动较大。当双馈风机输出有功功率接近额定功率时,7次谐波电流含有量高于除5次谐波外的其他各次谐波。

将双馈风机实测数据和仿真数据进行对比,双馈风机在不同出力情况下,两者谐波电流含有量变化趋势基本吻合,均呈现增长态势。当双馈风机出力较小时,仿真模型中的2次谐波电流含有量较实测数据高,其他各次谐波电流含有量基本吻合。当双馈风机工作在额定工况下,仿真模型中各次谐波电流含量均略高于实测数据,两者相差0.5%左右。综上所述,随着双馈风机出力增加,其输出的谐波电流含有量不断增加,谐波电

流以5、7次为主。

结束语

随着风机输出功率的增加,谐波电流含有量不断增加。当风机输出功率增加至额定功率的50%时,输出谐波电流含有量基本不变,以5、7次谐波电流为主,5次谐波电流含有量最高,变化幅度最大。

该型号风机谐波电流实测数据与仿真数据基本吻合,可以对该型号风机所在地的风能情况进行分析,将相应数据输入到仿真模型中来模拟当地的风场,从而能够更加准确地分析在特定风场下该型号风机的谐波特性。

参考文献

- [1] Zou Y, Elbuluk M, Sozer Y. Stability analysis of maximum power point tracking (MPPT) method in wind power systems [C]. Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2011 IEEE, 2011: 1-8.
- [2] Li B J, Xu T S, Fang Y J, et al. On-line security assessment and control decision support for large amount wind power integrated power system [C]. International Conference on Derelopments in Power Systems Protection, 2012.
- [3] Xue Yusheng, Lei Xing, Xue Feng. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34 (29): 5029-5040.
- [4] 白鸿斌,王瑞红.风电场并网对电网电能质量的影响分析[J].电力系统及其自动化学报,2012,24(1): 120-124.
- [5] 万航羽,黄梅.双馈风力发电机建模及谐波分析[J].电气应用,2008,27(6): 53-57.
- [6] 肖辉,刘会金,周文杰,等.DFIG风电场接入电网的谐波分析[C].2013年中国智能自动化学术会议论文集(第四分册),2013.
- [7] 刘其辉.变速恒频风力发电系统运行与控制研究[D].杭州:浙江大学,2005.
- [8] 李建林,高志刚,付勋波,等.几种典型的风力发电系统对比分析[J].电源技术应用,2007(9): 42-47.
- [9] 杨淑英.双馈型风力发电变换器及其控制[D].合肥:合肥工业大学,2007.
- [10] 贺益康,胡家兵.双馈异步风力发电机并网运行中的几个热点问题[J].中国电机工程学报,2012(27): 1-15.
- [11] Fan L, Yuvarajan S, Kavasseri R. Harmonic analysis of a DFIG for a wind energy conversion system [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(1): 181-190.
- [12] Fan L, Yuvarajan S, Kavasseri R. Harmonic analysis of a doubly fed induction generator [C]. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES, 2010.
- [13] Li S, Haskew T A. Analysis of decoupled dq vector control in DFIG back-to-back PWM converter [C]. Power Engineering Society General Meeting, 2007.
- [14] 弭勇,李和明,李永刚.含双馈异步风电机组的风电场电能质量分析[J].山西电力,2012(6): 29-31.
- [15] 李岩松,郭世繁,任国威.双馈式风力发电系统的机电暂态建模与运行分析[J].电力系统保护与控制,2013(13): 104-109.

(收稿日期:2015-02-10) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告