

一种评估风电场电压闪变的实用方法

游沛羽, 徐 政*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为解决风电场并网引起的并网点电压闪变评估问题,将风电机组出力曲线拟合和电网络理论应用到其中。风电场根据电网络理论可以等效为一台风力发电机及其相关阻抗。在分析相关文献的基础上,探讨了风电场网络的建模和等效问题,从理论上证明了容量较小的风电场不会引起较大的电压闪变;详细地描述了IEC61400-21风电场电能质量评估标准,该标准包括在运行时和切换操作时对电压闪变的评估;同时简略描述了相关国家标准中对电压闪变限值的要求;通过使用IEC61400-21和IEC61000-4-15对之开展了分析,提出了一种评估风电场电压闪变的实用方法。最后,以某风电场为例,使用该方法进行了电能质量评估;并基于国家标准,对评估值作出了评价。研究表明,该风场运行时短时电压闪变值只有0.009 185,切换操作时产生的短时电压闪变值更小,远远低于限值0.8。

关键词: 风电场; 电压闪变评估; IEC61400-21

中图分类号: TM614 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2012)10-1209-04

Practical method for evaluation of voltage flicker from wind farms

YOU Pei-yu, XU Zheng

(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to solve the problems of evaluating voltage flicker from wind farms, fitting the active power output curve of the wind turbines and the electric network theory were investigated. According to the electric network theory, an equivalent model of a wind farm could be founded to substitute the wind farm with impedances and a simplified wind turbine. After analyzing several references, modeling and equalizing of the network of a wind farm were discussed. It was proved theoretically that giant flicker could not be caused by wind farms with a relatively tiny capacity. IEC 61400-21 criteria to evaluate power quality problem triggered by wind farms was also mentioned in detail. The standard included the evaluation of voltage flicker during switching mode and the normal operation mode. Relevant national standard for voltage flicker was also reviewed briefly. After the analysis with IEC 61400-21 and IEC 61000-4-15, a feasible and portable method to evaluate voltage flicker from wind farms was presented. Then, the fundamental condition of one wind farm, was portrayed and studied for the target. According to the national standard, the outcomes were commented. The experimental results show that during normal operation the short-time flicker is 0.009 185. By transients the levels tended to be lower, which are far below the limit of 0.8.

Key words: wind farm; voltage flicker evaluation; IEC61400-21

0 引 言

由于风电场风速的不确定性和随机性,电网中接入风电场的变电站母线会存在电压波动,电压波动的严重程度用电压闪变来衡量。

关于风电场引起的电压波动和闪变问题,以往已有过较多的研究。文献[1-2]给出了风电场电压波动

和闪变产生的原因,其中文献[2]描述得更清楚;文献[3-6]介绍了IEC61000-4-15模型,该模型可用于评估一般情况下的电压闪变;文献[7]给出了国家标准规定的闪变限值;文献[8]介绍了风电场电压闪变评估的特殊性;文献[9-10]给出了风电场在切换过程中产生的闪变计算公式;文献[11]提出了一种有效的波形对照检测手段;文献[12]给出了评估单台风力发电

收稿日期: 2012-03-21

作者简介: 游沛羽(1987-),男,天津人,主要从事风电场并网技术的研究工作。E-mail: youpeiyu8888@sina.com

通信联系人: 徐 政,男,教授,博士生导师。E-mail: xuzheng007@zju.edu.cn

机正常运行时和切换时的电压闪变的步骤;文献[13]提出了国家标准中规定的自检方法。文献[14-15]是一个基于电磁暂态仿真软件PSCAD的实际风电场仿真的具体算例,不过它基于双馈风力发电机(DFIG)的具体机组模型,仿真速度受到了苛刻的限制。

本研究结合小窑山风电场的实际情况,提出一种基于简单仿真计算评估风电场电压闪变的方法。

1 风电场电压闪变的理论

典型的风电场结构如图1所示。

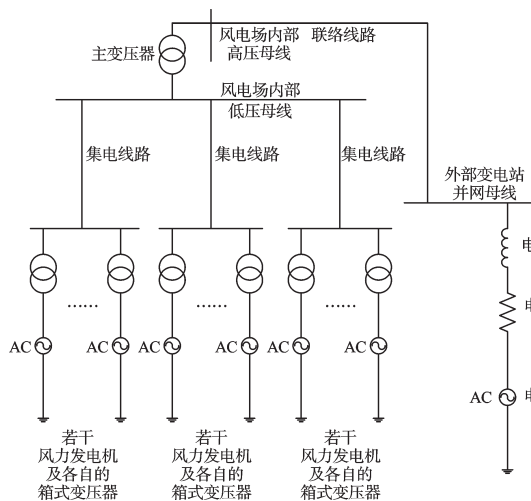


图1 一个典型的风电场基本结构

根据风电场的内部接线和电网络理论的相关知识,本研究将风电场等效为一台考虑风电场内部箱式变压器、集电线路、主变压器、联络线阻抗和电网等值阻抗的风力发电机,再评估这台等效风力发电机的闪变因数等有关参数。最终该系统可以等值为如图2所示的电路。

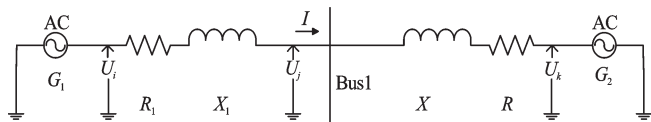


图2 风电场并网等值示意图

$R_1 + jX_1$ —风电场内部各部分总等效阻抗; G_1 —所有风力发电机合并在一起的电源,注入功率 $P + jQ$; Bus1—外部变电所110 kV母线或者是220 kV母线; $R_1 + jX$ —电网等效阻抗; G_2 —外部等效电源

下面从理论上证明:容量很小的风电场的接入在强电网连接点不可能引起严重电压闪变。

如图2所示,在并网母线电压保持一定或者波动很小的前提下,并网点的短路容量越大,允许通过的短路电流越大,因此 R 、 X 越小。在 G_1 发出的 $P + jQ$ 的波动方式和 U_k 不变的情形下,随着 $R + jX$ 的减小, U_j 的波动也会减小。当短路容量足够大的时候,闪变值不可能超越限值。

2 IEC推荐的风电场运行时电压闪变评估流程

IEC61000-4-15提出了评估一般电压闪变的模拟滤波器模型。在风电场的并网点,应考虑到电网中其他因素可能也会引起电压波动。文献[12]使用风电场在并网点注入电流的波形、并网点的电压波形,在虚拟电网中仿真风电场并网点的虚拟电压波动。仿真电压波动的虚拟电网如图3所示,虚拟电网中除了风电场并网点的电压、电流之外,没有其他波动源。

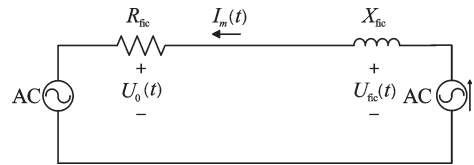


图3 仿真电压波动的虚拟电网(单相电路图)

R_{fic} —虚拟电网电阻; X_{fic} —虚拟电网电抗; $I_m(t)$ —风电场注入电流; $U_m(t)$ —风电场接入点电压; $U_{fic}(t)$ —虚拟电压

本研究使用该模型产生的虚拟电压输入IEC61000-4-15模型。风电场正常运行时的电压闪变评定过程要求:电网的阻抗角取值分别为 $\psi_k = 30^\circ$ 、 50° 、 70° 、 85° 。风速平均值要分别取 $v_a = 6.0$ 、 7.5 、 8.5 、 10.0 (单位:m/s)。

本研究根据文献[12]中公式,可以算出 R_{fic} 、 X_{fic} ,并将图2中 $I = I_m(t)$ 、 $U_j = U_m(t)$ 代入,得到 $U_{fic}(t)$ 。

本研究使用文献[12]的风力发电机闪变因数评估方式,可以得到风电场等效风力发电机的平均风速、虚拟网络阻抗角不同情况下的闪变因数 $c(\psi_k, v_a)$,即:

$$P_{st} = P_{lt} = c(\psi_k, v_a) \cdot \frac{S_n}{S_k} \quad (1)$$

式中: P_{st} —等效风力发电机在并网母线上的短时间闪变值, P_{lt} —等效风力发电机在并网母线上的长时间闪变值, $c(\psi_k, v_a)$ —等效风力发电机的闪变因数, S_n —等效风力发电机的容量, S_k —公共连接点处的短路容量。

3 IEC推荐的风电场切换操作时电压闪变评估流程

本研究在评估切换操作过程中的电压波动和闪变时,要分别考虑上面4种不同的虚拟电网阻抗角的情况,还有3种切换操作的情况:切入风速下风电场启动、额定风速下风电场启动和正常运行时一台机切出。

文献[12]规定,评估暂态电压闪变和电压波动,应根据如下公式,执行如下操作规程:

$$k_f(\psi_k) = \frac{1}{130} \cdot \frac{S_{k, \text{fic}}}{S_n} \cdot P_{st, \text{fic}} \cdot T_p^{0.31} \quad (2)$$

$$k_u(\varphi_k) = \sqrt{3} \frac{U_{\text{fic, max}} - U_{\text{fic, min}}}{U_n} \frac{S_{k, \text{fic}}}{S_n} \quad (3)$$

式中: $k_f(\psi_k)$ —切换操作时的电压闪变因数, $k_u(\varphi_k)$ —切换操作时的电压波动因数, U_n —对应线电压等级, $S_{k, \text{fic}}$ —虚拟电网短路容量, S_n —风力发电机容量, $P_{st, \text{fic}}$ —虚拟电网中评估的闪变值, T_p —评估持续时间。

针对每一种启动情况,研究者至少要在5种风速下对三相电压分别进行电压闪变评估;再对得到的值作平均。求得平均值后,可以算出短时闪变值、长时闪变值、电压波动。

4 国家标准中规定的闪变限值

短时间闪变值、长时间闪变值和电压波动均不能超过电网允许的最大限值。

在电力系统的公共连接点,110 kV级电压下由于波动负荷等原因引起的短时间闪变值应低于0.8^[13]。

5 算例系统介绍

小窑山风电场的情况说明如下(该风电场使用的金风77/1500型交流永磁同步发电机的出力曲线如图4所示):

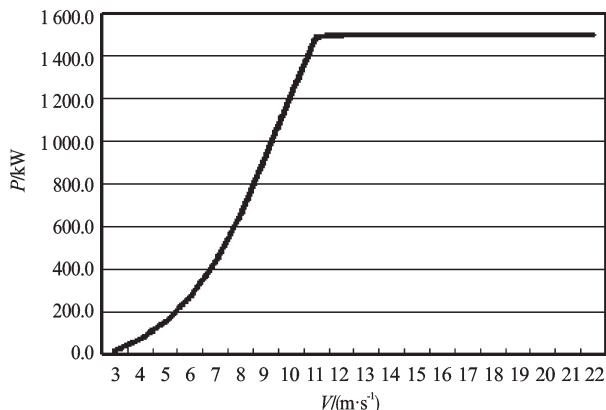


图4 标准空气密度下金风风力发电机组出力曲线

年平均风速为6 m/s。箱式变压器:额定电压38.5/0.69 kV,额定容量1 600 kVA。负载损耗16 833 W,空载损耗1 605 W,短路阻抗为6.63%,空载电流0.17%。

主变压器:额定电压115/38.5 kV,额定容量50 MVA。负载损耗47.76 kW,空载损耗194.4 kW,短路阻抗10.5%,空载电流0.62%。

集电线路I、II、III:均使用LGJ-185型输电线路,长度分别为5.645 km,4.079 km,5.042 km。如图1所示,每11台风电机分别和各自的箱式变压器并联在一

条集电线路路上。

窑北线是该风电场与北郊变电站的联络线,分为两段,第1段为LGJ-240型输电线路,长度9.756 km;第2段为LGJ-300型输电线路,长度1.733 km。小窑山风电场由这条线路并入大同地区电网。

尚未接入小窑山风电场的时候,北郊变电站的并网110 kV母线上的电压为115.9|1.5° kV。这条母线的短路水平为15 kA,可假定X/R=10。

6 闪变评估过程

本研究依据该算例说明该评估方法的使用过程。现在从图4读取相关的数据,并使用Matlab中的cftool功能,拟合该风力发电机出力曲线的曲线部分,同时应考虑实际风电场的空气密度和该图参考的标准空气密度的不同。

基于风电场内部接线方式,可得到风电场内部阻抗和电网等效阻抗之和为 $R_0 = 6.958 \Omega$, $X_0 = 58.815 \Omega$ 。

本研究设等效发电机有功功率P为所有机组额定功率之和49.5 MW, Q设定为0.351 5 P;以此为条件计算 \dot{U}_k 大小,结果为: $\dot{U}_k = 114.910|0.811 7^\circ$ kV,在仿真计算中保持不变。

7 评估结果

正常运行时小窑山风电场的等效风力发电机闪变因数如表1所示。

表1 小窑山风电场等效风力发电机闪变因数

$v_a / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Psi_R / (^\circ)$			
	30	50	70	85
6	1.607	1.238	0.786	0.530
7.5	1.607	1.238	0.786	0.530
8.5	1.607	1.238	0.786	0.530
10	1.607	1.238	0.786	0.530

可求得 $P_{st} = 0.009 185$ 。

短时暂态闪变评估结果和对应情况下的电压波动(%)评估结果如表2、表3所示。

表2 小窑山风电场暂态闪变评估结果

状态	暂态闪变值
切入风速启动	0.002 905
额定风速启动	0.007 392
正常运行时一台机切出	0.002 892

表3 小窑山风电场3种情况电压波动的评估结果

状态	波动值
切入风速启动	0.013 62
额定风速启动	0.237 71
正常运行时一台机切出	0.004 61

8 结束语

电压闪变是评估电能质量的一个重要方面。本研究针对风电场的电压闪变评估问题,提出了实用的分析计算方法,同时结合小窑山风电场的算例作出了详实的说明。小窑山风电场的接入不会在大同电网接入点引起严重电压闪变,闪变值和波动值远远低于国家标准^[13]的限值。因为该方法不涉及风力发电机的内部参数,大大缩短了计算过程需要的时间。

参考文献(References):

- [1] 孙 涛,王伟胜,戴慧珠,等. 风力发电引起的电压波动和闪变[J]. 电网技术,2003,27(12):62-70.
- [2] LINH N T. Power Quality Investigation of Grid Connected Wind Turbines [C]// ICIEA 2009. HaNoi: [s.n.], 2009: 2218-2222.
- [3] 李 庆,任普春,赵海翔,等. 针对风电引起闪变的数字化测试系统仿真[J]. 电力自动化设备,2008,28(1):69-72.
- [4] KOSE N, SALOR O. A new frequency domain approach for light flicker evaluation of power systems [C]//Instrumentation and Measurement Technology Conference. Ankara: [s.n.], 2009:618-623.
- [5] AODSUP K, BOONCHIAM P N, SODE-YOME A, et al. Response of DSTATCOM under voltage flicker in farm wind [C]//Power Electronics and Drive Systems (PEDS'07). Thanyabuir: [s.n.], 2007:732-735.
- [6] DRAPELA J. A time domain based flicker meter with re-

- sponse to high frequency inter harmonics [C]//Harmonics and Quality of Power (ICHQP2008). Wollongong: [s.n.], 2008:1-7.
- [7] 王海云,王维庆. 风电场的闪变计算与分析[J]. 可再生能源,2008,26(2):87-89.
- [8] 秦世耀,李 庆,王 伟,等. 基于PC评估仪器的风电机组电能质量测试系统[J]. 电网与清洁能源,2009,25(1):36-39.
- [9] 高玉洁. 风电场接入电网后的电能质量问题分析[J]. 南方电网技术,2009,3(4):68-72.
- [10] 王海云,王维庆,梁 斌. 风电场在公共连接点的闪变[J]. 电力自动化设备,2008,28(12):81-83.
- [11] 赵海翔,陈默子,戴慧珠. 风电并网引起闪变的测试系统仿真[J]. 太阳能学报,2005,26(1):28-33.
- [12] IEC61400-21 Wind Turbine Generator Systems - Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines[S]. International Electrotechnical Commission, 2008.
- [13] 国家标准 12326-2000 电能质量 电压波动和闪变.
- [14] WEI C, HAN M, YAN W. Voltage fluctuation and flicker assessment of a weak system integrated wind farm [C]// Power and Energy Society General Meeting, 2011. Beijing: [s.n.], 2011:1-5.
- [15] FADAEINEDJAD R, MOALLEM M, MOSCHOPOULOS G, et al. Flicker contribution of a wind power plant with single and multiple turbine representations [C]// Electrical Power Conference (EPC2007). London: [s.n.], 2007:74-79.

[编辑:李 辉]

(上接第1204页)

的作业效率,而且减少了1名作业人员,节约了生产成本。随着产品的增多,该装置可以在其他更多的流水线上推广使用。

在3个月的测试试验中,高丝化妆品有限公司共有25个品种的139 318个产品使用自动洁净容器装置,节约了55.993个工时,约9 070.9元的人工费。预计每年可节约资金3万元以上。

参考文献(References):

- [1] 刘胜军. 精益生产-现代IE [M]. 深圳:海天出版社, 2003.
- [2] GIANINA G, DIONAL Z, CORNELIA G, et al. Redundancy method used in PLC related applications [C]//Proceeding-2009 3rd International Workshop on Soft Computing Applications. Portugal:IEEE Computer Society, 2009:119-125.
- [3] 王永建,郭树勤,黄瑞敏. 基于精益生产的现场改善[J]. 机电工程,2011,28(12):1461-1464.
- [4] MAN K. Casimir effect and quantum vacuum generator [J]. **Journal of Soviet Laser Research**, 1997, 12(5):

- 383-385.
- [5] 吴明亮,樊明龙. 自动化生产线技术[M]. 北京:化学工业出版社,2011.
- [6] 曹玉平,阎祥安. 气压传动与控制[M]. 天津:天津大学出版社,2010.
- [7] 董林福. 气动元件与系统识图[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [8] ZHENG Chun-jiao. The application and development of photoelectric sensor [J]. **Energy Procedia**, 2011, 11(1): 1936-1941.
- [9] 戴天翼. 过滤器设计、制造和使用[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [10] 张 政,郭会平,赵春生,等. PLC编程技术与工程应用 [M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [11] 刘美俊. 西门子PLC编程及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- [12] SMC(中国)有限公司. 现代实用气动技术[M]. 3版. 北京:机械工业出版社,2009.

[编辑:李 辉]