

面向电力供应系统的新能源电能质量评估研究

曹世鹏 匡洪海

湖南工业大学, 湖南省株洲市, 412007;

摘要: 风力发电机和光伏系统对电力网络运行和电能质量(谐波、电压波动)有着重要影响。本文针对新能源系统中的电能质量问题, 分析了 0.65 MVA 风力涡轮机确定的电压波动, 并研究了光伏系统对稳态电压变化和电流谐波的影响, 最后得出发电量与主要电能质量指标之间的相关性。

关键词: 新能源, 电能质量; 电压波动; 谐波

Research on New Energy Power Quality Evaluation for Power Supply Systems

Cao Shipeng, Kuang Honghai

Hunan University of Technology, Zhuzhou City, Hunan Province, 412007, China

Abstract: Wind turbines and photovoltaic systems have a significant impact on the operation of power networks and power quality (harmonics, voltage fluctuations). This paper addresses power quality issues in renewable energy systems by analyzing voltage fluctuations determined from a 0.65MVA wind turbine and investigating the influence of photovoltaic systems on steady-state voltage variations and current harmonics. Finally, the correlation between power generation levels and key power quality indicators is derived.

Keywords: New energy grid connection; Power quality; Voltage fluctuations; harmonic

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 08. 049

引言

近几年, 新能源越来越多地出现在电网中, 其功率从数百 kW 到数 MW 不等。经济发展、电力公用事业的潜在利益(调峰、支持配电和输电网络)正在推动现有趋势, 导致能源市场更加分散^[1]。而新能源型在电力系统中的渗透率不断提高, 会导致一些技术问题, 由于新能源与现有的配电系统互连, 公用网络需要利用新能源系统来维持和改善向客户提供的供电连续性和电能质量^[2]。

目前, 随着这些新能源越来越多地渗透到电力系统中, 风力涡轮机对网络运行和电能质量的影响变得越来越重要^[3]。另一方面, 与市电互连的光伏(PV)装置所产生的电力具有高随机性, 随着光伏装机容量的增加, 电磁干扰的影响逐渐变大。在这种情况下, PCC 处可能会出现显著的电压变化, 从而导致电能质量问题^[4]。

本文研究了新能源对电能质量的影响, 分析了风力涡轮机在连续运行期间以及发电机互连期间产生的电压波动, 分析了晴天和阴天由于光伏系统连接导致的公共耦合点的稳态电压变化, 借助逆变器连接到主电网的光伏系统向 50Hz 电网注入谐波, 给出了光伏发电功率与主要谐波畸变指数之间的相关性。

1 新能源电网系统中的电能质量问题

1.1 稳态电压波动

太阳辐射的变化性质、天气变化或经过的云层都会

导致光伏输出功率的变化^[7]。30kW 光伏系统产生的功率变化如图 1 所示。图 2 为晴天/阴天时的发电功率。通常情况下, 安装在房车上的光伏板发电量高达 5 kW。这些电源通常通过单相逆变器连接到低压供电系统^[8]。

可变新能源的连接可能会导致 PCC 和电网中的电压升高。 V_{max} 和 V_{min} 之间的电压变化 ΔV 可能会在短时间内出现。

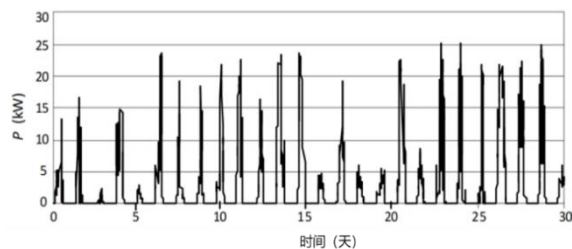


图 1 一个月内光伏系统输出功率的变化情况

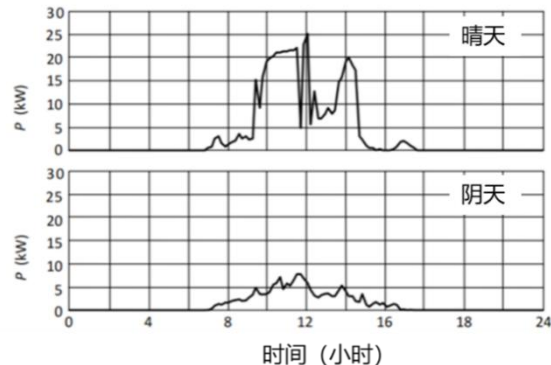


图 2 在运行期间光伏系统输出功率的变化

1.2 电流谐波扰动

大型光伏系统通常通过配备网侧滤波器的脉宽调制三相逆变器与主电网连接^[9],其电流谐波畸变率较低,对公共连接点(PCC)电压波形的影响可忽略。而小容量光伏系统多采用简单单相逆变器并网,可能产生显著电流谐波。谐波频谱特征取决于逆变器拓扑、开关频率及控制策略等因素。现有测量多针对特定配置(如经6脉冲换流器接入电网的光伏电站),尚未系统分析换流器结构对谐波的影响。实验表明,尽管总谐波畸变率(THDI)数值较高,但其实际影响并不明确。因此,有必要构建更有效的电能质量指标,以评估新能源运行期间PCC处的扰动特性。

2 评估模型构建

根据第2节的分析,电压波动、稳态电压变化、电流谐波扰动是衡量新能源电能质量主要指标,本文以电压波动、稳态电压变化、电流谐波扰动3个方面所涉及的指标来构建新能源电能质量评估模型,通过定性定量相结合的方式分析指标并构建评估模型。

2.1 电压波动评价指标分析

电压波动的量化指标如式(1)所示。

$$\begin{cases} P_{120}^{120} = \frac{8}{S_{SC}} N_{120}^{0.31} k_f \Psi_{sc} S_r \\ P_{10}^{10} = \frac{18}{S_{SC}} N_{10}^{0.31} k_f \Psi_{sc} S_r \\ P_{st} = P_{lt} = c(\Psi_{sc}, v_a) \frac{S_r}{S_{SC}} \end{cases} \quad (1)$$

其中, P_{120}^{120} 表示由于换向而产生的120分钟间隔的波动系数, N_{120} 是120分钟间隔内可能的换向次数, $k_f \Psi_{sc}$ 是针对角度 $\Psi_{sc} = \arctan(X_{SC}/R_{SC})$ 定义的波动因子, X_{SC} 是短路网络的电抗阻抗, R_{SC} 是短路网络阻抗的电阻, S_r 是装置的额定功率, S_{SC} 是公共耦合点(PCC)处的故障等级。本文通过 S_{SC} 和 Ψ_{sc} 来模拟远接风的电力系统; P_{10}^{10} 表示由于换向而产生的10分钟间隔的波动系数;由于正常运行,风力涡轮机的波动指标值可以使用波动系数 $c(\Psi_{sc}, v_a)$ 进行评估,取决于风力涡轮机安装点的年平均风速 v_a , 以及短路阻抗的相位角

Ψ_{sc} 。

2.2 稳态电压变化评价指标分析

电压变化会影响电气设备和家用电器的特性(保证性能的损失、效率的改变),在某些情况下甚至导致运行中断。PCC处的电压变化如式(2)所示。

$$\Delta V = \frac{S_{PV}}{S_{SC}} \cos(\Psi_{sc} - \varphi) \quad (2)$$

其中, S_{PV} 是光伏发电产生的功率, S_{SC} 是PCC

处的短路功率, $\Psi_{sc} = \arctan(X/R)$ 是网络短路阻抗的角度, φ 是光伏输出电流的相位角^[12]。在现有的电力系统中,有一些措施使线电压呈正弦波。式(2)中未

考虑系统谐波,限制电压变化 ΔV 需要仔细分析光伏装置所连接的电网。以高短路电流(高短路功率)和小角度 Ψ 为特征的电力系统的特征在于PCC处的电压变化减小。对于中压网络($\Psi \cong 50^\circ$)和低压网络($\Psi \cong 30^\circ$),短路功率较小,特别是PCC距离变电站点较远时,大容量光伏安装可能会导致较大的电压变化。

2.3 电流谐波扰动评价指标分析

对于高可变性安装,总谐波失真因数(THDI)值过大可能会导致不适当的结论。总谐波因数与电流 I_1 的基波分量有关,在低辐照时段,注入电网的电流基波分量减少,导致畸变系数较高。由于电流值较小,电力系统中的电压降可以忽略不计,因此PCC处的电压波形不受影响。为了根据PCC注入的谐波干扰评估光伏装置的运行情况,可使用新的发电机总失真指数(TGDI)指标。该指标与光伏系统的额定基波电流 I_r 有关,如式(3)所示。

$$\begin{cases} THDI = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \\ (TGDI)_1 = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_r} \\ (TGDI)_2 = \frac{THDI}{\sqrt{1+(THDI)^2}} \cdot \frac{I}{I_r} \end{cases} \quad (3)$$

其中,额定电流 I_r 是针对纯正弦测量(装置的恒定

电流值)建立和指示的。由设备制造商确定的额定电流 I_r 对于纯正弦测量具有恒定值, 电流 I 是测量的电流(包括所有谐波)。谐波是由与主电源互连点的变流器决定的, 当发电功率较高(RMS 电流值较大)时, 基波电流较高, THDI 值较小。

3 仿真验证

3.1 实验数据

本实验结果基于某地区在 a 月份和 b 月份中 0.65 MVA 风力发电机组的波动评估。该风力发电机塔高 80 m, 风轮直径 4 m, 扫风面积 1735 m²。a 月和 b 月的发电量分别为 127095 千瓦时和 192782 千瓦时。a 月份在 60 m 高度测量的平均风速为 6.37 m/s, b 月份为 7.32 m/s。

3.2 仿真结果分析

通过对本文描述的风力涡轮机系统进行测量, 监测期内风速变化情况如图 1 所示。汽轮机输出功率的变化如图 2 所示。所产生电力的间歇性特征清晰可见。

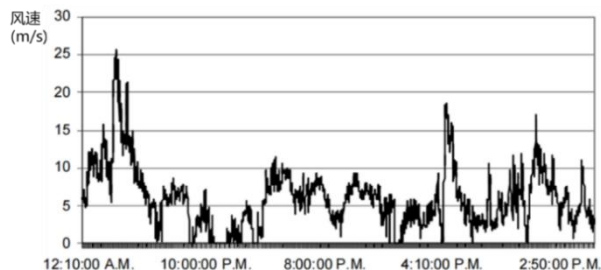


图 1 一个月监测期间的风速变化情况

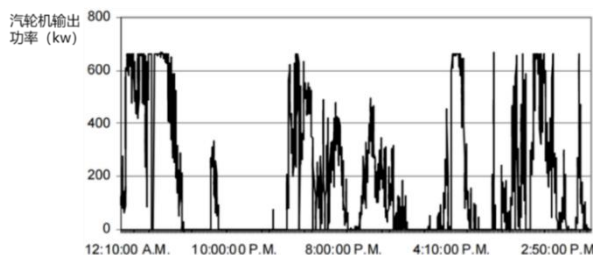


图 2 一个月监测期间涡轮输出功率变化

不同年平均风速 v_a 值和不同网络阻抗角 Ψ_{sc} 的波动系数 $c(\Psi_{sc}, v_a)$ 的测量值如表 1 所示; 同一风力发电机电压阶跃变化的波动系数 k_f 值如表 2 所示。

表 1 不同风速、角度下的波动值

年均风速 v_a (m/s)	网络阻抗角 Ψ_{sc}			
	30°	50°	70°	85°
6	3.1	2.9	3.6	4.0
7.5	3.1	3.0	3.8	4.2
8.5	3.1	3.0	3.8	4.2
10	3.1	3.1	3.8	4.2

表 2 不同波动因子的 k_f

运行条件	网络阻抗角 Ψ_{sc}			
	30°	50°	70°	85°
最小速度启动	0.02	0.02	0.01	0.01
定速启动	0.12	0.09	0.06	0.06

根据表 1 和表 2 中报告的值进行的计算得出波动指标值, 年平均风速 $v_a = 7.5$ m/s, 与中压电网并网 ($\Psi_{sc} = 50^\circ$, $S_{sc} = 300$ MVA, $S_r = 0.65$ MVA), 如式 (4) 所示:

$$P_{st} = P_{lt} = c(\Psi_{sc}, v_a) \frac{S_r}{S_{sc}} = \frac{0.65}{300} \times 3 = 0.0065 \quad (4)$$

风力机最小转速下的发电机并网, 如式 (5) 所示:

$$\begin{cases} P_{st} = 18 N_{10}^{0.31} k_f \Psi_{sc} \frac{S_r}{S_{sc}} = 18 \times 3^{0.31} \times 0.02 \times \frac{0.65}{300} = 0.00109 \\ P_{lt} = 8 N_{120}^{0.31} k_f \Psi_{sc} \frac{S_r}{S_{sc}} = 8.35^{0.31} \times 0.02 \times \frac{0.65}{300} = 0.00104 \end{cases} \quad (5)$$

风电机组额定转速下的发电机并网, 如式 (6) 所

示:

$$\begin{cases} P_{st} = 18 N_{10}^{0.31} k_f \Psi_{sc} \frac{S_r}{S_{sc}} = 18 \times 3^{0.31} \times 0.09 \times \frac{0.65}{300} = 0.0049 \\ P_{lt} = 8 N_{120}^{0.31} k_f \Psi_{sc} \frac{S_r}{S_{sc}} = 8.35^{0.31} \times 0.09 \times \frac{0.65}{300} = 0.0047 \end{cases} \quad (6)$$

由于风力发电机组输出功率的变化, 会产生电压波动。电压波动是由于风力涡轮机的开关操作(启动或停止)以及连续运行而产生的。

如图 3 所示的波形, TGDI 更好地定义了谐波对电网的影响, 其变化对应于注入网络的功率, 并确定了 PCC

处的电压波形。

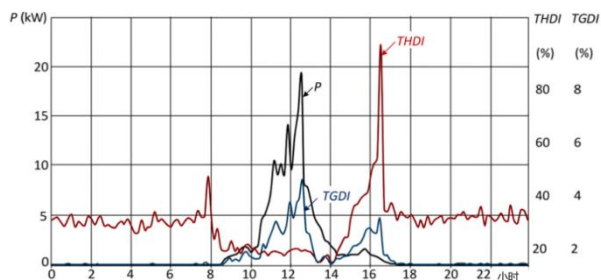


图3 功率、THDI 与 TGDl 之间的相关性

4 结论

本文针对新能源并网引发的电能质量问题,系统分析了风力发电与光伏系统对电网电压波动及谐波特性的影响。通过建立有效的评估模型与控制策略,显著提升了系统在新能源接入条件下的电能质量与运行稳定性。结果表明,所提出的改进控制方法能够有效抑制电压波动与谐波干扰,增强电网对可再生能源的消纳能力。

参考文献

[1]Chen, Shiyu, et al. "Evaluation of power quality and reliability of distributed generation in smart grid." IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 632. No. 4. IOP Publishing, 2021.

[2]Zhang, Aijun, et al. "Research on new energy power grid-integration on grid power quality." International Journal of Grid and Distributed computing 9.4 (2016): 1-12.

[3]Bubshait, Abdullah S., et al. "Power quality enhancement for a grid connected wind turbine energy system." IEEE Transactions on Industry Applications 53.3 (2017): 2495-2505.

[4]Pinzón-Quintero, Oscar, et al. "Assessment of power quality parameters and indicators at the point of common coupling in a low voltage power grid with photovoltaic generation emulated." Electric Power Systems Research 203 (2022): 107679.

作者简介:曹世鹏(1999.01—),男,湖北黄石人,湖南工业大学硕士研究生,研究方向为新能源并网技术研究。

匡洪海(1972.10—),女,湖南娄底人,湖南大学博士,湖南工业大学教授,研究方向为新能源并网技术与风电功率预测。