

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.02.003

高比例光伏与配电网超高次谐波交互影响研究

阮正鑫¹, 张逸¹, 张嫣¹, 林芳², 方键¹, 陈育欣³

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350116;

2. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007;

3. 国网福建省电力有限公司石狮市供电公司, 福建 石狮 362300)

摘要:高比例光伏并网显著增加了配电网超高次谐波含量,高比例光伏与配电网之间的交互影响相较于单台光伏并网更加复杂,电网安全运行稳定性降低。为揭示高比例光伏并网下的超高次谐波特性,文中对高比例光伏并网与配电网超高次谐波交互影响进行了分析。首先,针对高比例光伏接入配电网的超高次谐波传播特点进行理论研究,并综合电网背景谐波、光伏控制电路影响建立可准确反映分布式光伏超高次谐波电流的动态数学模型。在此基础上,搭建PSCAD仿真模型,重点分析多台光伏逆变器间以及电网背景与光伏逆变器间的超高次谐波交互影响。最后,通过福建泉州某集中接入的屋顶光伏超高次谐波实测数据验证了分析结果的正确性。

关键词:配电网;超高次谐波;高比例;光伏并网;电能质量

中图分类号:TM721

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)02-0018-08

0 引言

20世纪80年代,众学者开始对超高次谐波进行探讨,自21世纪起,将超高次谐波频率定义为2~150 kHz^[1]。近年来,高比例光伏并网使配电网的超高次谐波问题愈演愈烈。逆变器作为光伏并网及直交流变换的中间环节,其输出的谐波具有宽频域、高频次等特征,是一类重要的超高次谐波源。过高的谐波含量严重威胁电网的安全稳定运行^[2-6]。当多台光伏同时工作时,产生的超高次谐波间的交互影响更加复杂且危害更大^[7-8]。除此之外,配电网背景谐波与光伏之间的交互影响也将导致并网超高次谐波电流畸变愈发严重^[9]。

现有针对光伏超高次谐波的研究大多集中于测试方面,涉及到多点接入光伏与配电网交互影响的研究较少。近几年,众多学者对光伏发射的超高次谐波进行测试^[10-12],并探究超高次谐波的传递特性。结果显示:光伏发射的谐波电流大多集中于2~20 kHz(40~400次谐波),开关频率附近的谐波电流局部范围内最大,且整数倍的开关频率附近出现谐波电流升高现象^[2]。在谐波交互影响方面,文献[13]分析了光伏与电网之间的交互影响特性;文献[14]研究了多台光伏接入时发射的谐波对配电网的影响。但上述研究均未涉及超高次谐波范围。

收稿日期:2020-09-21;修回日期:2020-10-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777035);国家电网有限公司总部科技项目“电力电子化配电网超高次谐波检测关键技术及传播特性研究”

文献[15]分析了逆变器阻抗与线路阻抗的交互影响;文献[16]研究了逆变器并网的谐振问题。但上述研究均未涉及多逆变器构成的系统与配电网间的谐波交互影响分析。在光伏模型方面,文献[17]考虑了几种典型接入情况下分布式电源(distributed generation, DG)发射的谐波含量对配电网的影响;文献[18]分析了背景谐波、光伏并网位置对配电网谐波的影响。上述文献均利用逆变器来等效DG,但光伏发电系统的电气特性受光照、温度等因素的影响,用逆变器等效过于简化,分析结果不可信。

针对以上问题,文中首先建立分布式光伏并网的超高次谐波仿真模型,充分考虑光伏阵列输出特性、最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)、逆变器开关频率等因素,可精确反映分布式光伏的实际工况。在此基础上,引入简易配电网模型定量分析光伏之间、光伏与配电网之间的超高次谐波交互影响。最后,通过实测结果验证仿真模型以及结论的正确性。

1 多光伏超高次谐波交互影响分析

1.1 单光伏接入系统超高次谐波交互影响分析

在文献[1]提及的超高次谐波交互影响模型基础上,考虑线路及负荷影响,见图1。将含滤波环节的光伏整体等效为内阻无穷大的谐波电流源^[18],见图2。其中 $Z_i(i=1,2,\dots,n)$ 为线路阻抗; $Z_{L_i}(i=1,2,\dots,n)$ 为负荷阻抗; $Z_{L,h}$ 为光伏接入点后的电网等效 h 次谐波阻抗; $Z_{s,h}$ 为系统等效 h 次谐波阻抗; $i_{pv,h}$ 为光伏发射的 h 次谐波电流; R 为系统阻抗。

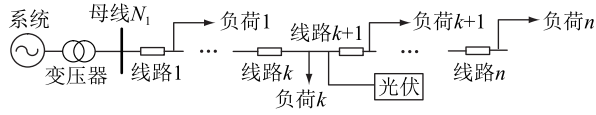


图1 光伏接入配电网结构

Fig.1 Structure of photovoltaic access to the distribution network

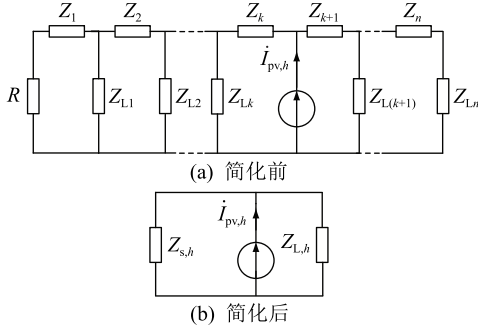


图2 含单个光伏的配电网等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of distribution network with single photovoltaic

定义 $Z_{i,h}$ 为 Z_i 等效 h 次谐波线路阻抗; $Z_{L_i,h}$ 为 Z_{L_i} 等效 h 次谐波负荷阻抗。由于 $Z_{i,h} \ll Z_{L_i,h}$, 则:

$$Z_{s,h} = R + Z_{1,h} + Z_{2,h} + \dots + Z_{k,h} \quad (1)$$

$$Z_{L,h} = Z_{L_{(k+1),h}} // \dots // Z_{L_{n,h}} \quad (2)$$

可得 $Z_{L,h} \gg Z_{s,h}$ 。因此, 光伏产生的超高次谐波电流大部分流向系统, 较少部分流向负荷。

1.2 多光伏接入系统超高次谐波交互影响分析

文献[19]对用户之间以及用户与配电网之间的交互影响进行了深入研究。文中在此基础上, 考虑线路阻抗以及负荷因素, 构建如图3所示的模型。

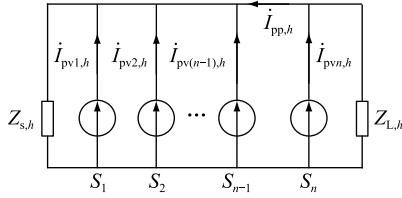


图3 含多个光伏的配电网等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of distribution network with multiple photovoltaics

由叠加定理可得, 多光伏接入时流入系统的超高次谐波电流为:

$$i_{g,h} = \frac{Z_{L,h}}{Z_{s,h} + Z_{L,h}} \sum_{i=1}^n i_{pvi,h} \quad (3)$$

式中: $i_{pvi,h}$ 为第 i 个接入光伏发射的 h 次超高次谐波电流。

进一步可得:

$$i_{pp,h} = \left(Z_{L,h} i_{pvn,h} - Z_{s,h} \sum_{i=1}^{n-1} i_{pvi,h} \right) / (Z_{s,h} + Z_{L,h}) \quad (4)$$

式中: $i_{pp,h}$ 为用户间流动的 h 次超高次谐波电流。

由式(3)可知, 流入系统的超高次谐波电流几乎只与接入光伏发射的超高次谐波电流幅值及相位相关, 即流入系统的超高次谐波电流的叠加是矢量相加, 叠加结果受相位影响, 可能相互助增, 也可能相互助减。由式(4)可知, 光伏间流动的总超高次谐波电流随光伏并网数量增加呈减小趋势。

1.3 系统背景谐波对多光伏接入的影响

基于文献[20]的网侧变流器单相电路简化模型和光伏控制策略, 研究电网背景谐波对光伏网侧变流器输出超高次谐波电流的影响。光伏逆变器控制模型如图4所示。

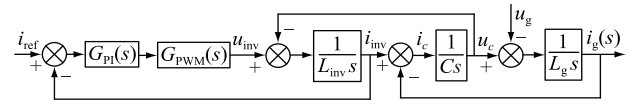


图4 光伏逆变器控制模型

Fig.4 Control model of photovoltaics inverter

图4中, $G_{PI}(s)$ 为比例积分 (proportional integral, PI) 控制器的传递函数; $G_{PWM}(s)$ 为脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 逆变器增益的传递函数; i_{ref} 为参考电流; u_{inv} , i_{inv} 分别为并网逆变器的输出电压、电流; u_c , i_c 分别为滤波电容 C 的电压、电流; u_g , i_g 分别为并网电压、电流; L_g , L_{inv} 分别为网侧和变流器侧电感。则有:

$$G_{PI}(s) = k_p [1 + 1/(k_i s)] \quad (5)$$

$$G_{PWM}(s) = U_{dc} / (1 + T_s s) \quad (6)$$

式中: U_{dc} 为直流侧电压; T_s 为逆变器的开关周期; k_p, k_i 均为 PI 控制器参数。

为方便后续分析, 定义:

$$G_c(s) = 1/(Cs) \quad (7)$$

$$G_d(s) = 1/(L_{inv}s) \quad (8)$$

$$G_i(s) = 1/(L_g s) \quad (9)$$

$$G_p(s) = G_{PI}(s) G_{PWM}(s) \quad (10)$$

因逆变器采用 dq 解耦控制, 结合图4可得逆变器输出电压 u_{inv} 在 dq 坐标系下的表达式为:

$$u_{inv,dq} = \left[G_p(s) i_{ref,dq} + \frac{G_p(s) G_d(s) G_c(s) i_{inv,dq}}{1 + G_c(s) G_i(s)} + \frac{G_p(s) G_d(s) G_c(s) G_i(s) u_{g,dq}}{1 + G_c(s) G_i(s)} \right] / [1 + G_p(s) G_d(s)] \quad (11)$$

式中: $i_{ref,dq}$, $i_{inv,dq}$ 分别为 dq 坐标系下逆变器的输出参考电流和输出电流; $u_{g,dq}$ 为 dq 坐标系下逆变器网侧电压。

将式(11)变换到两相静止坐标系 $\alpha\beta$ 中。

$$u_{inv,\alpha\beta} = [G_p(s)i_{ref,\alpha\beta} + H_0i_{inv,\alpha\beta}/H_3 + H_1u_{g,\alpha\beta}/H_3]/H_2 \quad (12)$$

其中:

$$H_0 = G_p(s \mp j\omega_0)G_d(s \mp j\omega_0)G_c(s \mp j\omega_0) \quad (13)$$

$$H_1 = G_p(s \mp j\omega_0)G_d(s \mp j\omega_0) \times G_c(s \mp j\omega_0)G_i(s \mp j\omega_0) \quad (14)$$

$$H_2 = 1 + G_p(s \mp j\omega_0)G_d(s \mp j\omega_0) \quad (15)$$

$$H_3 = 1 + G_i(s \mp j\omega_0)G_c(s \mp j\omega_0) \quad (16)$$

式中: ω_0 为同步角速度; $s \mp j\omega_0$ 为 dq 坐标系的拉普拉斯算子 s 变换到 $\alpha\beta$ 坐标系的表达式。

由坐标变换理论可得,两相静止坐标系 $\alpha\beta$ 变换为三相静止坐标系 abc 时,频率不会发生改变,且 α 轴与 a 轴重合。因篇幅有限,文中仅对 a 相电流进行分析。光伏并网的简易电路拓扑如图 5 所示。图中 u_m , Z_o 分别为变流器的戴维南等效电压和阻抗。

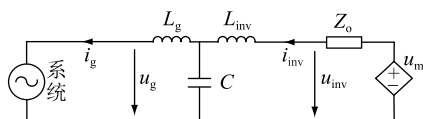


图 5 网侧变流器 a 相电路简化模型
Fig.5 Simplified a-phase circuit of grid-side power converter

根据坐标系理论与等效电路,式(12)可改写为:

$$u_{inv} = u_m - i_{inv}Z_o = [G_p(s)i_{ref} + H_0i_{inv}/H_3 + H_1u_g/H_3]/H_2 \quad (17)$$

其中:

$$u_m = [G_p(s)i_{ref} + H_1u_g/H_3]/H_2 \quad (18)$$

$$Z_o = -H_0/(H_2H_3) \quad (19)$$

根据图 5 等效电路,利用基尔霍夫电压及电流定律可得:

$$u_{inv} - u_g = i_g sL_g + sL_{inv}i_{inv} \quad (20)$$

$$i_c = (u_g + i_g sL_g) sC \quad (21)$$

$$i_{inv} = i_g + i_c \quad (22)$$

联立式(17)一式(18)、式(20)一式(21)得:

$$u_g = G_p(s)i_{ref}/H_3 - H_4i_g/H_3 \quad (23)$$

其中:

$$H_4 = sL_g H_2 + H_2 sL_{inv}(sL_g C + 1) - H_0(sL_g C + 1)/H_3 \quad (24)$$

$$H_5 = H_2 sL_{inv} - H_0 sC/H_3 - H_1/H_3 + H_2 \quad (25)$$

由图 5 模型可得:

$$u_g = u_{oc} - i_g Z_{oc} \quad (26)$$

式中: u_{oc} , Z_{oc} 分别为图 5 中除系统外的电路戴维南等效电压和阻抗。

联立式(14)一式(15)可得:

$$u_{oc} = G_p(s)i_{ref}/(H_2 sL_{inv} - H_0 sC/H_3 - H_1/H_3 + H_2) \quad (27)$$

$$Z_{oc} = [sL_g H_2 + H_2 sL_{inv}(sL_g C + 1) - H_0(sL_g C + 1)/H_3]/(H_2 sL_{inv} - H_0 sC/H_3 - H_1/H_3 + H_2) \quad (28)$$

因光伏逆变器采用直流电压与参考电压进行 PI 控制获取参考电流,可近似认为参考电流 i_{ref} 不受电网背景谐波影响。则 u_{oc} 与背景谐波无关,式(26)可改写为:

$$i_{gh}(j\omega_h) = -\frac{u_{gh}(j\omega_h)}{Z_{och}(j\omega_h)} \quad (29)$$

式中: $\omega_h = 2\pi f$ 为角频率; u_{gh} 为并网节点处 h 次背景谐波电压; i_{gh} 为由 u_{gh} 引起的 h 次谐波电流; Z_{och} 为除系统外的电路戴维南等效模型下 h 次谐波对应的等效阻抗。

由式(29)可知,光伏输出的谐波电流不仅受自身系统参数的影响,还受系统背景谐波的影响。除此之外,系统背景谐波电压的存在导致光伏额外产生频率与背景谐波电压频率相同、幅值与背景谐波电压幅值成正比的谐波电流。

2 仿真系统搭建与结果分析

2.1 仿真模型

2.1.1 多光伏并网仿真模型

为验证文中所提模型及分析结论的正确性,搭建多光伏并网仿真模型。为模拟背景谐波对分布式光伏的影响,加入其他 DG 模型(仅在考虑超高次背景谐波时接入),均使用常见三相电压型 SPWM 逆变器进行等效,整体结构见图 6。图中,共接入 4 个光伏发电系统,均采用有功无功(PQ)控制,并网点和接入点均标于图 6 中。主要参数见表 1。

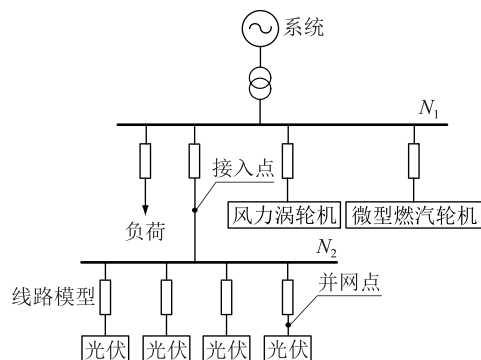


图 6 含多个光伏的配电网结构

Fig.6 Structure of distribution network with multiple photovoltaics

2.1.2 光伏系统模型

光伏所处环境是影响光伏输出功率的重要因

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters		
元件	参数名称	参数取值
变压器	变比	0.4 kV/20 kV
	容量/(MV·A)	1
	开关频率/kHz	3.6
光伏发电系统	台数	4
	控制方法	PQ 控制
	容量/kW	15,15,45,45
风力涡轮机	容量/kW	10
微型燃气轮机	容量/kW	30

素。光伏电池板呈非线性,需利用 MPPT 控制器确保光伏电压始终为最大输出功率对应的电压^[21]。光伏电池将光能转化为直流电,通过变流器转换为交流。逆变器作为中间环节,输入输出均要满足一定条件^[22]。因此,对光伏进行精确建模,研究其与配电网之间的交互影响具有重要意义。

光伏主要由光伏电池模块、DC/DC 功率变换模块、DC/AC 逆变器模块组成。采用典型的两级拓扑光伏并网发电系统进行建模,如图 7 所示。

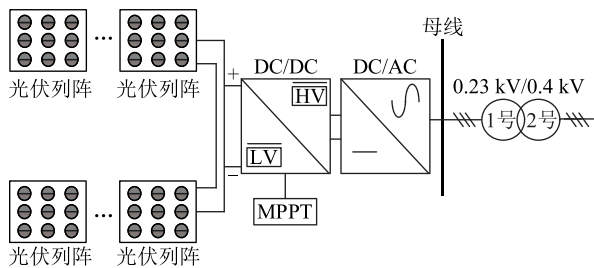


图 7 光伏内部电气结构

Fig.7 Electrical structure of photovoltaic internal

通过单台光伏仿真可得光伏输出侧超高次谐波发射特性及其与光照、温度的关系。光伏超高次谐波电流发射特征如图 8 所示。由图 8 可知,光伏在开关频率附近发射的超高次谐波电流幅值最大,且整数倍开关频率附近出现电流幅值变高的现象;光伏发射的超高次谐波电流随着光照强度降低而减小,随着温度升高而增大,该结论与文献[13]所述基本相符。

2.2 多光伏接入系统的超高次谐波影响

分析光伏运行对电网产生的超高次谐波影响随光伏台数增长的变化关系,分别仿真实接入配电网的光伏台数为 1~4 台时(型号相同),图 6 中的接入点和并网点处的超高次谐波情况。仿真结果分别如图 9、图 10 所示。

由图 9 可知,随着光伏接入台数增加,单台光伏系统输出的超高次谐波电流畸变率减小。超高次谐波的叠加为矢量叠加,叠加结果受相位影响。超

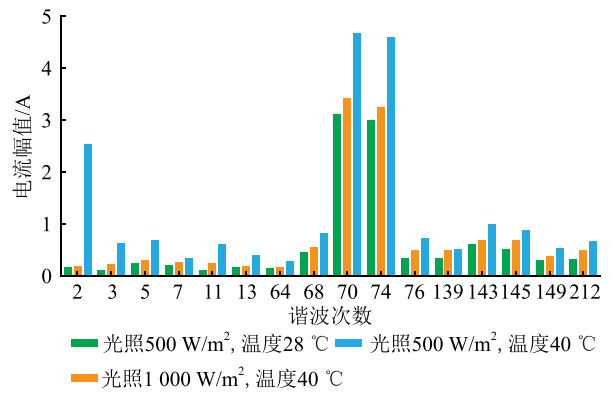


图 8 光伏超高次谐波电流输出特性

Fig.8 Output characteristic of photovoltaic supraharmonic current

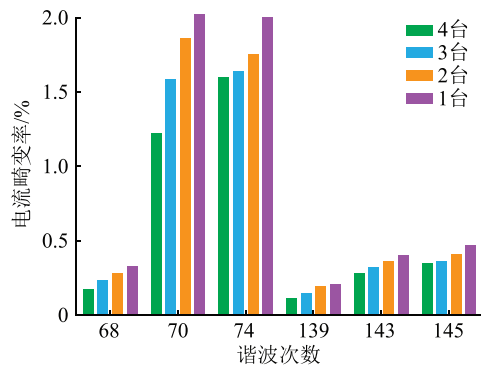


图 9 不同台数光伏接入时并网点处超高次谐波电流畸变率

Fig.9 Supraharmonic current distortion at the grid connection point when different numbers of photovoltaics are connected

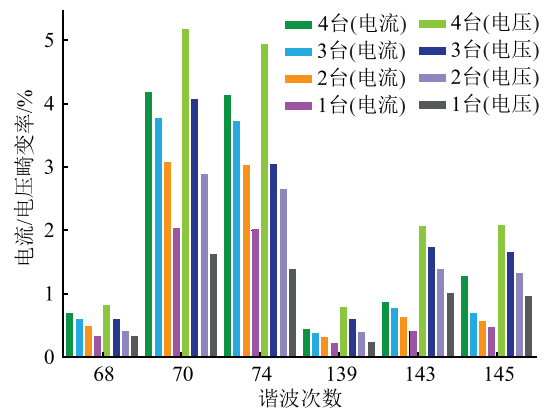


图 10 不同台数光伏接入时接入点处超高次谐波电流/电压畸变率

Fig.10 Supraharmonic current/voltage distortion at the access point when different numbers of photovoltaics are connected

高次谐波电流之间相互助减,即光伏与光伏之间抵消了一部分的超高次谐波电流。此结果与式(4)理论推导相符。

由图 10 可知,随着光伏接入台数增加,汇集母

线上的超高次谐波电流/电压畸变率呈现显著增加趋势。但4台光伏产生的超高次谐波电流/电压并不是1台光伏的4倍而是低于4倍,即接入点处超高次谐波的增长小于直接叠加的结果。接入系统的光伏间超高次谐波相互抵消,超高次谐波并不随设备数的增长而同倍增长。

2.3 系统背景谐波对多光伏接入的影响

对无穷大电源设置除基波外的其他低频谐波,以及改变图6中除光伏外的其他DG的开关频率,实现背景谐波设置,仿真参数如表2所示。

表2 背景谐波仿真参数

Table 2 Simulation parameters of background harmonics

背景谐波		幅值/V
低频	高频	
基波	基波	327
5次	60次	150
7次	100次	100
11次	120次	50

对比分析有无背景谐波时,光伏接入配电网的超高次谐波分布情况,结果如图11所示。图11给出了4台光伏接入时,有无背景谐波情况下单台光伏输出(并网点)超高次谐波电流仿真对比结果。

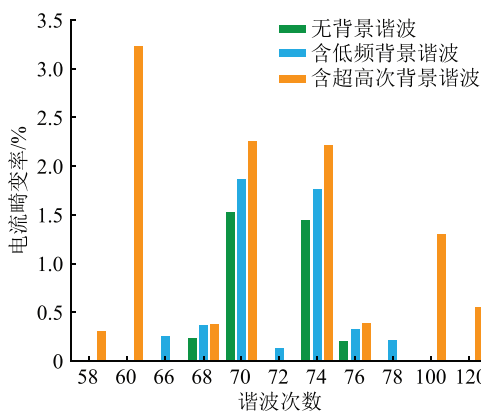


图11 考虑背景谐波时光伏超高次谐波电流输出特性

Fig.11 Output characteristic of photovoltaic supraharmonic current considering grid background harmonics

由图11可知,低频背景谐波改变了单台光伏出口处的超高次谐波分布。对比分析低频背景谐波存在前后光伏输出的超高次谐波分布可知,未考虑低频背景谐波时,超高次谐波分布在开关频率附近(68次,70次,74次,76次);考虑后,在原来的基础上新增了其他次数的超高次谐波(66次,72次,78次)。结合文献[23]可知,背景谐波电压存在时,光伏并网电流无法完全跟踪参考电流,导致并网电流产生除开关频率之外的超高次谐波电流。

超高次背景谐波的存在为光伏额外引入了其

他次数的超高次谐波(60次,100次,120次)。背景谐波电压在光伏出口端产生了同频率的背景谐波电流,使光伏输出出现了其他次数的超高次谐波。这一仿真结果与1.3节中的理论分析相符。

除此之外,对比分析两种背景谐波情况。低频、超高次背景谐波存在时,70次以下的超高次谐波电流畸变率分别为1.857%,2.250%。即超高次背景谐波存在时,光伏发射的超高次谐波电流畸变率高于低频背景谐波存在时的情况。但考虑背景谐波时,单台光伏超高次谐波发射水平比不考虑背景谐波时要高。

3 实测数据验证

为验证文中所提模型及分析结论的正确性,对泉州某屋顶光伏的3台相同型号的光伏逆变器进行为期1d的超高次谐波连续测试,现场接线示意图如图12所示。

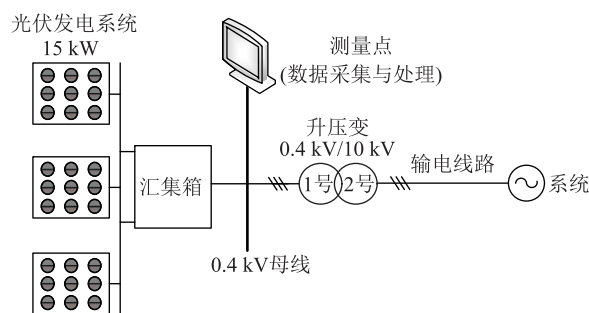


图12 现场接线示意

Fig.12 Schematic diagram of field wiring

图中,3台光伏并联接入汇集箱,由汇集箱汇总光伏输出电流接入母线,再通过变压器接入系统。目前的电压、电流互感器在超高次谐波频率范围内的测量存在局限性^[1],因此文中未获得10kV并网光伏接入电网的准确谐波电压、电流数据。可将测量点选择为汇集箱0.4kV出口处。光伏并网逆变器主要参数如表3所示,3台光伏汇总后接入0.4kV的低压配电网中。

表3 光伏逆变器参数

Table 3 Parameters of photovoltaic inverter

参数	数值
最大输入功率/kW	36
最大直流输入电压/V	1 000
最大输入电流/A	18
额定频率/Hz	50
开关频率/kHz	20

数据采集装置采样频率为409.6 kHz,可用于测量超高次谐波电压。电流探头的带宽为20 kHz,故

只能测到 9 kHz 的超高次谐波电流。选取 3 组不同工况的 a 相实测数据进行对比,测试结果如图 13 所示。为了清晰展示,仅给出开关频率及其整数倍附近幅值较大的超高次谐波数据(16~60 kHz)。

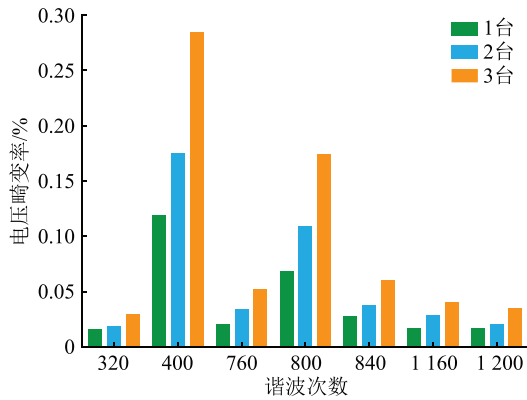


图 13 不同台数光伏接入时接入点处超高次谐波电压畸变率实测结果

Fig.13 Measured results of supraharmonic voltage distortion at the access point when different numbers of photovoltaics are connected

由图 13 可知,随着光伏逆变器接入配电网的数量增多,汇集母线上超高次谐波电压畸变率呈现不同程度的增大。除此之外,3 台光伏产生的谐波电压并不是 1 台光伏的 3 倍而是略低于 3 倍,即汇集母线处超高次谐波电压的增长小于直接叠加的结果。接入系统的光伏之间的超高次谐波相互抵消,超高次谐波并不随设备数的增长而同倍增长。该结论与 1.2 节的理论推导以及 2.2 节的仿真结果均相符。

4 结语

文中通过仿真与实测相结合的方法对多接入光伏与配电网超高次谐波的交互影响进行了分析,得到结论如下:

(1) 仿真和实例表明,高比例光伏并网将产生严重的超高次谐波问题。用户间流动的超高次谐波电流畸变率随着并联用户个数的递增呈递减趋势;汇集母线上的超高次谐波电压/电流畸变率随用户个数的递增呈递增趋势。

(2) 配电网的背景谐波使光伏并网超高次谐波发生更严重、更复杂的畸变。受背景谐波影响,新增的谐波/超高次谐波电流频率与背景谐波电压频率相同,幅值与背景谐波电压幅值成正比。

文中研究成果可为光伏接入规划、配电网光伏接纳能力评估以及超高次谐波治理等提供理论指导。目前电压、电流互感器在超高次谐波频率范围内的测量存在局限性,因此未获得 10 kV 光伏接入

电网的准确数据,下一步将对新型宽频互感器进行研究。

参考文献:

- [1] 汪颖,罗代军,肖先勇,等. 超高次谐波问题及其研究现状与趋势[J]. 电网技术,2018,42(2):353-365.
WANG Ying, LUO Daijun, XIAO Xianyong, et al. Review and development tendency of research on 2 ~ 150 kHz supraharmonics[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 353-365.
- [2] 宋鹏先,李耀华,王平,等. 三相电力电子负载谐波分析与抑制[J]. 电工电能新技术,2015,34(2):25-33.
SONG Pengxian, LI Yaohua, WANG Ping, et al. Harmonic analysis and inhibition of three-phase power electronic loads[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(2): 25-33.
- [3] 董密,欧静,杨建,等. 基于有源阻尼的单相 LCL 光伏并网逆变器优化控制器设计[J]. 电工电能新技术,2019,38(7):1-9.
DONG Mi, OU Jing, YANG Jian, et al. Optimized controller design for single-phase LCL photovoltaic grid-connected inverter based on active damping[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(7): 1-9.
- [4] 王振浩,李丹,贺微,等. LCL 型逆变器接入弱电网下的谐振分析及抑制方法研究[J]. 电工电能新技术,2018,37(6):34-42.
WANG Zhenhao, LI Dan, HE Wei, et al. Analysis of resonant characteristics and resonance suppression strategy of weak grid with LCL-type inverter[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(6): 34-42.
- [5] 许柳,吕智林,孟泽晨,等. 非线性负载下的多变流器谐波电压补偿控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(7):1-11.
XU Liu, LYU Zhilin, MENG Zechen, et al. Multi-converter harmonic voltage compensation control strategy under nonlinear loads[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 1-11.
- [6] 李博,孙建军,王朝亮,等. 考虑高次谐波影响的智能配电合并单元改进采样数据同步方法[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(18):20-27.
LI Bo, SUN Jianjun, WANG Chaoliang, et al. Improved sampling synchronization method used by merging unit in smart distribution network considering higher harmonic effects[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 20-27.
- [7] 孙媛媛,王小宇,尹志明. 多谐波源系统的非迭代式谐波潮流分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(7):83-90,195.
SUN Yuanyuan, WANG Xiaoyu, YIN Zhiming. Non-iterative harmonic power flow analysis for power systems with multiple harmonic sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 83-90, 195.
- [8] 沈阳武,刘佳润,张斌,等. 光伏逆变器动态谐波等效建模及其影响因素研究[J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(8):126-132.
SHEN Yangwu, LIU Jiarun, ZHANG Bin, et al. Research on dy-

- dynamic harmonic equivalent modeling and influencing factors of photovoltaic inverter[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(8):126-132.
- [9] 张劲松,段文燕,孙孝峰,等. 基于长传输线的并网系统谐波谐振抑制策略研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(9):2561-2570.
ZHANG Jinsong, DUAN Wenyan, SUN Xiaofeng, et al. Suppression of harmonic propagation in grid-connected system based on long transmission line[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2019, 40(9):2561-2570.
- [10] CHICCO G, CORONA F, PORUMB R, et al. Experimental indicators of current unbalance in building-integrated photovoltaic systems[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2014, 4(3):924-934.
- [11] JOSHI T, HEYDT G, AYYANAR R. High frequency spectral components in distribution voltages and currents due to photovoltaic resources [C]//2014 North American Power Symposium (NAPS). Pullman, WA, USA. IEEE, 2014:1-6.
- [12] KLATT M, MEYER J, SCHEGNER P, et al. Emission levels above 2 kHz—laboratory results and survey measurements in public low voltage grids [C]//22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013). Stockholm. IET, 6683:1-4.
- [13] 谢宁,罗安,马伏军,等. 大型光伏电站与电网谐波交互影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34):9-16, 4.
XIE Ning, LUO An, MA Fujun, et al. Harmonic interaction between large-scale photovoltaic power stations and grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34):9-16, 4.
- [14] 贺一鸣. 光伏发电并网对配电网谐波特性的影响[J]. 五邑大学学报(自然科学版), 2018, 32(1):67-72.
HE Yiming. Impact on harmonic characteristics of distribution networks with PV power generation[J]. Journal of Wuyi University (Natural Science Edition), 2018, 32(1):67-72.
- [15] 许德志,汪飞,毛华龙,等. 多并网逆变器与电网的谐波交互建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12):64-71, 187.
XU Dezhi, WANG Fei, MAO Hualong, et al. Modeling and analysis of harmonic interaction between multiple grid-connected inverters and the utility grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12):64-71, 187.
- [16] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11):3075-3078.
- [17] 谢秉鑫,王宗,范士林. 分布式电源对于配电网谐波特性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2):116-119, 130.
XIE Bingxin, WANG Zong, FAN Shilin. Influence on harmonic characteristics of distributed network with distributed generations[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2):116-119, 130.
- [18] 崔红芬,汪春,叶季蕾,等. 多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10):91-97.
CUI Hongfen, WANG Chun, YE Jilei, et al. Research of interaction of distributed PV system with multiple access points and distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10):91-97.
- [19] RONNBERG S, LARSSON A, BOLLEN M, et al. A simple model for interaction between equipment at a frequency of some tens of kHz [C]//21st International Conference on Electricity Distribution (CIRED). Frankfurt, Germany, 2011:1-4.
- [20] 李庆,程鹏,王伟胜,等. 考虑电网背景谐波影响的直驱风电机组谐波电流建模与分析[J]. 电网技术, 2018, 42(7):2178-2185.
LI Qing, CHENG Peng, WANG Weisheng, et al. Modeling and analysis of harmonic currents in DDWT considering grid background harmonics [J]. Power System Technology, 2018, 42(7):2178-2185.
- [21] 郝利东,潘尚智,蒋建波,等. 一种适应于两级直流配电系统的光伏直流变换器及控制策略研究[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(8):71-80.
HAO Lidong, PAN Shangzhi, JIANG Jianbo, et al. Research on PV DC-DC converter and control strategy for two-stage DC power distribution system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(8):71-80.
- [22] 李碧君,方勇杰,杨卫东,等. 光伏发电并网大电网面临的问题与对策[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(4):52-59.
LI Bijun, FANG Yongjie, YANG Weidong, et al. Problems and countermeasures for large power grids in connection with photovoltaic power[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(4):52-59.
- [23] 王学华,阮新波,刘尚伟. 抑制电网背景谐波影响的并网逆变器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6):7-14.
WANG Xuehua, RUAN Xinbo, LIU Shangwei. Control strategy for grid-connected inverter to suppress current distortion effected by background harmonics in grid voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6):7-14.

作者简介:



阮正鑫

阮正鑫(1995),女,硕士在读,研究方向为电能质量(E-mail:773793126@qq.com);

张逸(1984),男,博士,副教授,研究方向为电能质量、主动配电网等;

张嫣(1979),女,硕士,讲师,研究方向为电能质量、电力系统稳定与控制等。

Interaction of high proportion photovoltaic and supraharmonic in distribution network

RUAN Zhengxin¹, ZHANG Yi¹, ZHANG Yan¹, LIN Fang², FANG Jian¹, CHEN Yuxin³

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Fuzhou 350007, China;

3. State Grid Shishi Power Supply Company of Fujian Electric Power Co., Ltd., Shishi 362300, China)

Abstract: The high proportion of grid-connected photovoltaics (PVs) leads to a dramatical increase of supraharmonic emissions at distribution network. The influence of supraharmonic interaction between grid-connected PVs and distribution network is much more remarkable than that in single PV grid-connected system. So the high proportion of grid-connected PVs reduces the stability of the grid. In order to reveal the characteristics of supraharmonic emission at high proportion of PVs grid-connected, the effect of PVs connecting to grid on supraharmonic emission is discussed. Firstly, the propagation of supraharmonic current at high proportion of grid-connected PV is described. Considering background harmonic emission of grid and control circuits of PVs, a mathematic model is built to calculate the value of supraharmonic currents and summarize the law of supraharmonic propagation at high proportion of grid-connected PVs. On the basis of the model built by PSCAD simulation platform, the supraharmonic emission from individual PVs is obtained. The model is also used to show the influence of backgrounds and PVs on supraharmonic emission. The last but not the least, the model is verified, based on measured data of concentrated PV access in Quanzhou city, Fujian Province.

Keywords: distribution network; supraharmonic; high proportion; grid-connected photovoltaic (PV); power quality

(编辑 吴楠)

(上接第 17 页)

A typical scene generation method considering output power correlation of photovoltaic power plants

CHEN Haoyuan¹, JIANG Wei¹, HAN Jun²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. State Grid Jiangsu

Electric Power Co., Ltd. Economic and Technological Research Institute, Nanjing 210008, China)

Abstract: Since quintessential probabilistic photovoltaic (PV) models like Weibull and Beta distribution are not able to reflect accurately the changes of PV station's output characteristics in different scenarios, a data-driven scenario generation model for distribution system is proposed. The model which is based on the algorithm of local density clustering (LDC), takes into account the correlation of multiple PV stations and the influence of external conditions, thus realizing the accurate modeling of multiple PV stations' output power. Firstly, LDC is used to classify historical data into several clusters. Secondly, kernel density function and copula function are utilized to build joint probabilistic density functions (PDF) in each cluster, and the data of joint PDF are processed by applying Latin Hypercube Sampling (LHS). Then, the samples are used for probabilistic power flow calculation to set up the model which estimates operational condition of distribution network. Finally, the stability of model is analyzed, and influence of sampling size on model is also discussed. It is shown that the proposed method in the paper improves the accuracy of modelling for PV station's output in distribution network, and it also reduces the error of probabilistic power flow calculation.

Keywords: probabilistic power flow; scenario generation; Monte Carlo; clustering analysis; probabilistic photovoltaic (PV) station modelling

(编辑 李栋)