

适应分布式光伏动态特性的改进电能计量模型

窦晓波¹, 杨磊¹, 马建², 陈克绪², 全相军¹

(1. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 国网江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330019)

摘要: 针对分布式光伏发电模型, 建立了分布式光伏并网信号数学表征式; 基于时分割乘法器(TDM)电能计量模型, 分析电能计量算法在谐波和电压波动条件下的误差产生理论, 设计适应分布式光伏动态特性的有功计量修正模块, 给出基于 Hilbert 变换的无功功率计量方法; 将光伏并网信号数学表征式与改进的电能计量模型结合, 提出了适应分布式光伏动态特性的改进电能计量模型, 通过仿真验证了所提模型的有效性。

关键词: 分布式光伏发电; 谐波分析; 电压波动; 有功计量; 无功计量

中图分类号: TM 615; TB 971

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.10.006

0 引言

近年来, 大规模分布式光伏发电在国内得到了快速的发展, 但大量分布式光伏的并网也给电网的稳定运行带来了挑战。与传统发电方式不同, 由于光照资源的随机性, 分布式光伏发电输出功率具有波动性的特点^[1], 会造成并网点处电压的波动。同时, 光伏并网逆变器会向电网注入大量的宽频域及高频次的谐波成分^[2], 造成电网信号发生畸变。电压电流信号畸变和波动会使得电能计量误差增大。为了解决分布式光伏并网后的电能精确计量问题, 推动分布式光伏的进一步发展, 研究适应分布式光伏动态特性的电能计量模型具有重要的现实意义和实用价值。

乘法器是电能计量模型中不可或缺的组成部分。目前电能计量模型多使用时分割乘法器(TDM)^[3-5], 通过对输入信号进行调制完成瞬时功率的计算并积分。然而, 分布式光伏并网造成的大量谐波会使得电压电流信号发生畸变, 当谐波次数较高时, 相对于高频调制信号将不能视其为直流信号, TDM 计量方法产生原理性误差; 分布式光伏造成的电压不稳定也会导致瞬时功率产生相应的波动, 造成积分窗口内功率累计产生误差。

针对上述问题, 国内外学者已经开展了一定的研究, 主要包括以下 3 个方面。

a. 分布式光伏发电系统谐波电能计量。文献[6-8]以光伏电站逆变器为核心, 将光伏组件、滤波

器、升压变压器等器件进行简化, 得到等值数学模型, 进而分析谐波扰动的影响, 但缺乏对谐波信号成分的分析; 文献[9]提出了基于小波包分解与重构的谐波电能计量算法, 但在谐波信号提取过程中需要大量滤波器的参与, 实际电能计量装置较为复杂。

b. 分布式光伏发电系统电压波动电能计量。文献[10]将波动负荷动态信号抽象为幅度调制波和相位调制波, 但该动态信号特征数学模型是为了解决动态电能计量的溯源问题, 并不适用于分布式光伏电压波动信号的表征; 文献[11]提出了一种动态电能功率表的设计方法, 但该方法主要针对系统的增益误差和温度误差, 从硬件结构角度出发进行动态电能计量误差的修正。

c. 分布式光伏发电系统无功电能计量。文献[12]从理论上分析了谐波对现有无功电能表的幅值误差和相位误差的影响; 文献[13]研究了非正弦无功对无功计量的影响, 但是涉及现有测量技术下无功功率的定义问题。

尽管上述文献已开展了分布式光伏动态特性对电能计量影响的相关研究, 但是在谐波电能计量方面, 现有文献主要研究的是谐波信号的精确提取, 在谐波对 TDM 电能计量信号调制过程造成的定量误差方面研究有所不足; 在电压波动电能计量方面, 缺少从计量模型原理角度出发减小分布式光伏电压波动对功率积分造成的误差影响研究; 在无功电能计量方面, 尚没有针对谐波和电压波动的无功功率计量算法进行改进。

本文针对适应分布式光伏动态特性的改进电能计量模型, 进行了以下研究工作:

a. 基于光伏模型分析了分布式光伏并网造成谐波和电压波动的特性,总结了适用于电能计量模型仿真的分布式光伏并网信号的数学表征式;

b. 在文献[3]基础上分析了 TDM 的误差产生原理,针对谐波调制和电压波动功率积分误差, 搭建了

收稿日期: 2017-01-13; 修回日期: 2017-09-22

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900404); 国家自然科学基金资助项目(51777031); 江苏省重点研究计划资助项目(BE2015012-1); 国家电网公司科技项目(521820150005)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0900404), the National Natural Science Foundation of China(51777031), the Key Research Program of Jiangsu Province(BE2015012-1) and Science and Technology Program of SGCC(521820150005)

适应分布式光伏动态特性的改进有功电能计量模型,并在此模型基础上优化了基于 Hilbert 变换的无功电能计量算法;

c. 在 MATLAB/Simulink 仿真环境下分别对谐波和电压波动工况下有功功率、无功功率的计量进行了仿真分析,结果验证了所提的改进电能计量模型的有效性。

1 分布式光伏动态特性

由于分布式光伏并网逆变器会向电网注入多次谐波成分,且由于光照强度变化,分布式光伏并网点会发生电压波动进而导致功率积分产生误差^[14]。为了进行针对性的计量算法改进,需要先对分布式光伏的谐波以及电压波动特性进行分析总结。

1.1 分布式光伏发电系统模型

分布式光伏输出直流电通过并网逆变器生成三相正弦交流电,经滤波后接入电网。本文所建分布式光伏发电系统模型包括:基于输出外特性的光伏电池工程数学模型、基于扰动观察法的最大功率点跟踪(MPPT)模型和三相 PWM 并网逆变器模型。分布式光伏发电系统模型具体如图 1 所示。

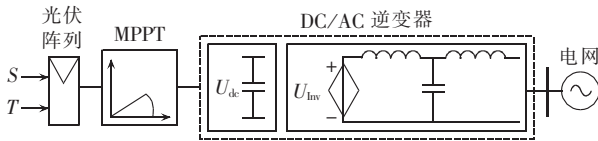


图 1 分布式光伏发电系统模型

Fig.1 Model of distributed PV power generation system

1.1.1 光伏电池工程数学模型

在实际温度 T_{act} 和光照强度 S_{act} 条件下,基于设定的标准温度 T_{ref} 和标准光照强度 S_{ref} ,光伏电池工程数学模型仅需要开路电压 U_{oc} 、短路电流 I_{sc} 、最大功率点电压 U_m 、最大功率点电流 I_m 这些重要参数就可以描述光伏阵列实际参数特性。

$$I'_{sc} = I_{sc} \frac{S_{act}}{S_{ref}} [1 + a(T_{act} - T_{ref})] \quad (1)$$

$$U'_{oc} = U_{oc} [1 - a(T_{act} - T_{ref})] \ln[e + b(S_{act} - S_{ref})] \quad (2)$$

$$I'_m = I_m \frac{S_{act}}{S_{ref}} [1 + a(T_{act} - T_{ref})] \quad (3)$$

$$U'_m = U_m [1 - a(T_{act} - T_{ref})] \ln[e + b(S_{act} - S_{ref})] \quad (4)$$

其中, a 为温度补偿系数; b 为光照强度补偿系数。

进而可得光伏阵列输出特性如下:

$$I_{PV} = I'_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[\exp\left(\frac{U_{PV}}{C_2 U'_{oc}}\right) - 1 \right] \right\} \quad (5)$$

其中, I_{PV} 、 U_{PV} 分别为光伏阵列实际输出电流、电压; C_1 、 C_2 分别由式(6)、(7)计算得到。

$$C_1 = \left(1 - \frac{I'_m}{I'_{sc}} \right) \exp\left(\frac{-U'_m}{C_2 U'_{oc}}\right) \quad (6)$$

$$C_2 = \left(\frac{U'_m}{U'_{oc}} - 1 \right) \left[\ln\left(1 - \frac{I'_m}{I'_{sc}} \right) \right]^{-1} \quad (7)$$

1.1.2 MPPT 模型

寻找最大功率点指寻找光伏阵列的实际工作电压 U_{PVm} ,在该电压下,光伏阵列输出功率即为最大极值点。所以最大功率点电压 U_{PVm} 可根据式(8)的根求得。

$$\frac{dP_{PV}}{dU_{PV}} = \frac{d(U_{PV} I_{PV})}{dU_{PV}} = 0 \quad (8)$$

其中, P_{PV} 为光伏阵列实际输出功率。

将式(5)代入式(8)化简后,可得:

$$I'_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[\exp\left(\frac{U_{PV}}{C_2 U'_{oc}}\right) - 1 \right] \right\} + \frac{U_{PV} I'_{sc} C_1 \exp\left(\frac{U_{PV}}{C_2 U'_{oc}}\right)}{C_2 U'_{oc}} = 0 \quad (9)$$

式(9)的解即为光伏阵列最大功率点电压 U_{PVm} 。

1.1.3 逆变器模型

光伏输出直流电需经逆变器并网,本文采用三相 PWM 并网逆变器模型,控制策略采用功率外环、电流内环的双环控制。其电路拓扑结构如图 2 所示。

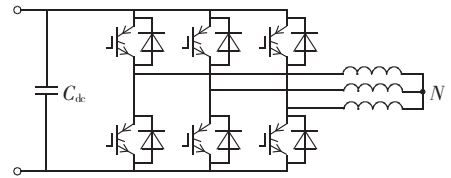


图 2 光伏并网逆变器模型

Fig.2 Model of PV grid-connected inverter

基于典型分布式光伏数据,本文所建分布式光伏发电系统模型参数如下:标准温度 $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$,标准光照强度 $S_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$,开路电压 $U_{oc} = 45.2 \text{ V}$,短路电流 $I_{sc} = 5.62 \text{ A}$,最大功率点电压 $U_m = 36.5 \text{ V}$,最大功率点电流 $I_m = 5.20 \text{ A}$,温度补偿系数 $a = 0.037$,光照强度补偿系数 $b = 0.304$ 。

1.2 分布式光伏并网系统谐波特性

由于逆变器的调制特性,其输出电压电流中包含大量固有谐波成分,注入电网的电压电流信号畸变率与滤波效果相关^[15]。本文从以下 2 个方面分析分布式光伏并网系统的谐波特性。

1.2.1 仿真模型分析

所建分布式光伏模型采用滤波电感滤除逆变器输出谐波成分,设定滤波电感值为 50 mH ,谐波分析结果如下:5 次、7 次、11 次、13 次谐波的含有率分别为 4.69%、3.52%、0.98%、1.18%。

由谐波仿真结果分析可知,逆变器输出谐波成分次数为 5、7、11、13、...,即 $6k \pm 1 (k=1, 2, \dots)$ 次谐波。

1.2.2 理论分析

三相逆变电路在正弦波调制下,逆变电路 A 相

的输出电压为:

$$U_A = \frac{E_d}{2} \times \left\{ m \sin(\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{n\pi} \sin\left[\frac{n\pi}{2} [m \sin(\omega t) + 1]\right] \cos(n\omega_s t) \right\} \quad (10)$$

其中, m 为调制度; ω_s 为载波角频率; E_d 为直流侧电压。

A 相输出电流为:

$$I_A = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[\cos(\omega t) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t) + \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) - \dots \right] \quad (11)$$

其中, I_d 为直流侧电流。

综上可知, 3 倍次的谐波消失, 存在大量 $6k \pm 1$ 次谐波, 与仿真分析结果一致。

1.3 分布式光伏并网系统电压波动特性

由光伏阵列数学模型可知, 分布式光伏输出功率取决于实际的光照强度和温度。由于光伏阵列温度变化较为缓慢, 对电压波动影响比光照强度小很多^[16], 所以本文主要针对光照强度变化条件下并网点电压波动情况进行仿真, 选取光照强度 S_{act} 变化曲线如图 3 所示, 代入分布式光伏发电系统仿真模型进行分析。

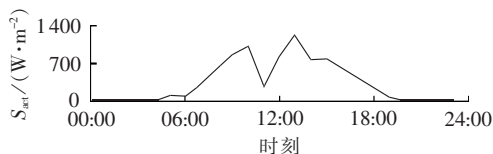


图 3 某地一天光照强度

Fig.3 Daily light intensity in a place

1.3.1 仿真模型分析

根据图 3 某地区 8 月 10 日多云天气条件下实际光照强度变化曲线, 选取图中 10:00—13:00 的光照强度变化情况, 设定仿真条件。取光照强度在 0.1 s 时由 1000 W/m^2 降为 200 W/m^2 , 0.2 s 时上升到 800 W/m^2 , 光伏出力 P_{PV} 、并网点电压 U 和系统频率 f 仿真结果如图 4 所示。

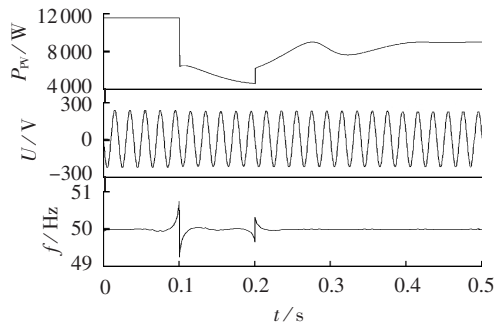


图 4 光照强度变化条件下的光伏波动特性

Fig.4 PV fluctuation characteristics under the condition of light intensity changes

1.3.2 理论分析

由图 4 可知, 由于光照强度波动, 光伏输出功率发生剧烈波动。0.1 s 时随着光照强度降低, 光伏输出功率由 11500 W 跌落至 6500 W , 跌落幅度达 44%, 0.2 s 后光伏输出功率回升至 9000 W 左右。负荷容量不变条件下, 由于光伏输出功率的大幅波动, 电网线路潮流发生变化, 因而并网点电压发生波动。0.1 s 时随着光照强度降低, 光伏输出功率减少, 电网输出功率增加, 导致连接电网与光伏并网点的线路压降增大, 进而使得并网点电压下降, 0.2 s 时则与之相反, 并网点电压回升。随着光伏输出功率的变化, 并网点处频率在 0.1 s 和 0.2 s 时也有相应的波动。

1.4 分布式光伏并网信号数学表征式

由分布式光伏并网模型输出特性的仿真结果分析可知, 并网逆变器的调制特性和光照强度波动是造成分布式光伏对电网电能计量影响的主要原因。本文总结分布式光伏动态特性如下。

1.4.1 谐波特性

由于并网逆变器的输出特性, 分布式光伏的接入向电网注入了大量的高次谐波, 以 $6k \pm 1$ 次谐波为主, 因此本文将分布式光伏接入电网的谐波特性表达如下:

$$U_h/I_h = \sqrt{2} A_1 \cos(100\pi t) + \sqrt{2} A_5 \cos(500\pi t) + \sqrt{2} A_7 \cos(700\pi t) + \sqrt{2} A_{11} \cos(1100\pi t) + \sqrt{2} A_{13} \cos(1300\pi t) + \dots \quad (12)$$

其中, $A_1, A_5, A_7, \dots$ 分别为 $6k \pm 1$ 次谐波电压 U_h /电流 I_h 的有效值; 符号“/”代表“或者”的含义。由于 U 和 I 的数值表达式结构相同, 因此做了简化处理, 下文式 (22)—(25)、(26)—(28) 中的符号“/”均表示“或者”的含义。

1.4.2 电压波动特性

分布式光伏电站的接入导致并网点电压发生暂升和暂降等稳定性问题, 因此本文将分布式光伏电压波动特性表达为如下形式:

$$u'(t) = \sqrt{2} U_N (1 + a'(t)) \cos(\omega t) \quad (13)$$

$$a'(t) = \begin{cases} K & t_0 < t < t_0 + \Delta t \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

其中, U_N 为额定电压有效值; K 为电压波动幅度, $K > 0$ 时表示电压上升, $K < 0$ 时表示电压下降; t_0 为电压波动起始时刻; Δt 为电压波动持续时间。

2 TDM 电子式电能表计量模型

TDM 是电子式电能表电能计量的核心部分, 也是电能表计量误差的主要来源。本文采用三角波电压比较型 TDM 模型进行电能计量误差分析。

2.1 三角波比较型 TDM 工作原理

TDM 电路由脉冲宽度调制、脉冲幅度调制和低通滤波器 3 个部分组成。不同类型 TDM 的主要区别在于脉宽调制信号,一般有方波叠加法和三角波比较法,后者由于电路中的调制信号不进入积分器计算,有利于提高运算精度,目前在国内外得到广泛运用。三角波比较型 TDM 的基本工作原理如图 5 所示。 X 和 Y 为输入信号, M 为三角波调制信号。

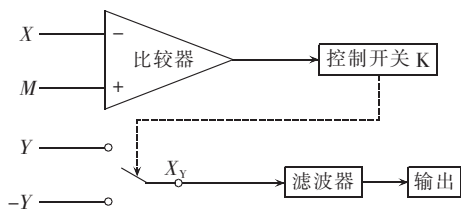


图 5 三角波比较型 TDM 电路图

Fig.5 Circuit diagram of triangle-wave-comparison TDM

将输入信号 X 与三角波调制信号 M 进行比较,用比较结果控制开关 K 的输出,当 $X > M$ 时,控制开关输出高电平,反之则输出低电平;控制开关输出周期性脉冲信号,当脉冲信号为高电平时,输入另一信号 Y ,反之则输入反相信号 $-Y$,当 X 和 Y 均为正弦波时,得到的最终脉冲幅度调制信号为正弦包络信号 X_Y ;最后通过低通滤波器获取直流量。

2.2 TDM 计量误差原理

由 TDM 的计量原理可知,当输入信号为正弦基波稳定信号时,由于调制波频率远高于输入信号频率,输入信号可视为直流信号,此时 TDM 的功率计量误差接近于 0^[17]。但是在高次谐波波下,TDM 输入信号已不能视为直流信号,计量结果不再准确;电压的不稳定性会造成瞬时功率的波动,在一定长度的功率积分窗口内,电能累计结果也会受到相应的影响。

3 改进的 TDM 电子式电能表计量模型

分布式光伏并网会带来谐波和电压波动的影响,常规的 TDM 电能计量模型在高次谐波功率计量和波动功率积分方面存在一定误差,本文建立了针对谐波和电压波动误差特性的计量修正模块,并在此基础上优化了基于 Hilbert 变换的无功功率计量算法。

3.1 谐波计量误差改进

3.1.1 谐波条件下误差特性分析

基于文献[3]对谐波条件下 TDM 计量误差进行量化分析,设三角波比较型 TDM 两输入量均为 h 次谐波,即 $u = \sqrt{2} A \sin(\omega_h t)$, $i = \sqrt{2} B \sin(\omega_h t + \theta)$ 。其中, A 和 B 为两输入信号有效值; $\omega_h = 2\pi h f$, f 为基波频率; θ 为 h 次谐波相位差。设三角波调制信号频率为 F ,取 $n_1 = F/f$ 为基波在一个工频周期内被分

割的份数,则 $n_h = n_1/h$ 为 h 次谐波被分割次数。

a. h 次谐波功率计量值。

对 h 次谐波而言,取其中第 k 份时有:

$$U_k = \frac{n_h}{2\pi} \int_{\frac{2(k-1)\pi}{n_h}}^{\frac{2k\pi}{n_h}} u d(\omega_h t) = \frac{n_h A}{\sqrt{2}\pi} \left\{ \cos\left[\frac{2(k-1)\pi}{n_h}\right] - \cos\left(\frac{2k\pi}{n_h}\right) \right\} \quad (15)$$

$I_k =$

$$\frac{n_h B}{\sqrt{2}\pi} \left\{ \cos\left[\frac{2(k-1)\pi}{n_h} + \theta\right] - \cos\left(\frac{2k\pi}{n_h} + \theta\right) \right\} \quad (16)$$

第 k 份功率为 $P_k = U_k I_k$,则在 2π 周期内瞬时功率的平均值为:

$$P = \frac{1}{n_h} \sum_{k=1}^{n_h} P_k = \frac{n_h A B}{2\pi^2} \times \sum_{k=1}^{n_h} \left\{ \cos\left[\frac{2(k-1)\pi}{n_h}\right] - \cos\left(\frac{2k\pi}{n_h}\right) \right\} \times \cos\left[\frac{2(k-1)\pi}{n_h} + \theta\right] - \cos\left(\frac{2k\pi}{n_h} + \theta\right) =$$

$$\frac{n_1 A B \cos\theta}{2 h^2 \pi^2} \sum_{k=1}^{n_1} \left\{ \cos\left[\frac{2(k-1)h\pi}{n_1}\right] - \cos\left(\frac{2kh\pi}{n_1}\right) \right\}^2 \quad (17)$$

b. h 次谐波功率计量误差。

$P_s = AB \cos\theta$ 为 h 次谐波功率的理论值,记:

$$K_h = \frac{n_1}{2 h^2 \pi^2} \sum_{k=1}^{n_1} \left\{ \cos\left[\frac{2(k-1)h\pi}{n_1}\right] - \cos\left(\frac{2kh\pi}{n_1}\right) \right\}^2 \quad (18)$$

所以 h 次谐波条件下功率计量误差为:

$$e_h = \frac{P - P_s}{P_s} = \frac{P}{P_s} - 1 = K_h - 1 \quad (19)$$

其中, K_h 为 h 次谐波功率计量值与理论值的误差比例系数,其值仅与谐波次数与调制波频率有关。

由式(18)可知,在同一谐波信号下,调制波频率越高,谐波相对于调制波越接近于直流信号^[18],误差越小,即 K_h 越接近于 1;在同一调制波频率下,谐波次数越高,TDM 计量误差越大。图 6 为调制波频率取 10 kHz 情况下, K_h 与谐波次数 h 之间的关系曲线。

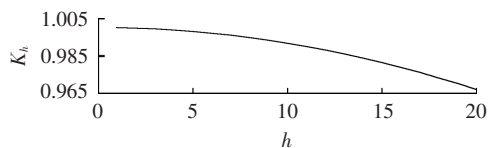


图 6 误差比例系数 K_h 与谐波次数 h 关系图

Fig.6 Curve of error ratio coefficient K_h vs. harmonic order h

3.1.2 基于谐波次数检测的计量误差修正模块

基于高次谐波信号下 TDM 的电能计量误差特性^[3],本文提出一种基于谐波次数的计量误差修正模块,包括信号频率检测环节和误差系数修正环节,谐波误差修正原理如图 7 所示。

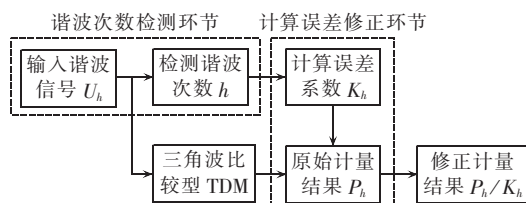


图 7 谐波计量误差修正原理

Fig.7 Error correction principle of harmonic measurement

输入高次谐波信号 U_h 后,检测谐波信号的频率 f_h ,确定谐波次数 h ;根据式(18)、(19)结合调制三角波频率 F ,计算该次谐波下的功率计量误差系数 K_h ;对有功功率的原始计量结果 P_h 进行修正,改进后得计量值 $P=P_h/K_h$ 。

3.2 电压波动计量误差改进

3.2.1 电压波动条件下误差特性分析

TDM 按照固定时间间隔对电压和电流信号进行调制,得到瞬时功率,并接入电能累计模块进行瞬时功率的积分。为达到较好的功率稳定性,一般选取较长的功率积分时间窗口,如 1~2 s。在稳态条件下,这种积分时间窗口一般可以达到较好的误差稳定性。但当输入信号快速波动时,瞬时功率相应的波动会导致在较长的功率积分时间窗口内,电能计量不能及时响应瞬时功率的变化,从而导致积分时间内的功率累计产生误差。

3.2.2 基于电压波动检测的时间窗积分修正模块

基于电压波动条件下 TDM 的电能计量误差特性,通过对波动起始时刻的检测调整积分时间窗口长度可减小功率积分的误差。希尔伯特-黄变换 (HHT) 方法通过对信号瞬时频率变化的检测可有效识别电压波动情况^[19]。

本文提出一种基于输入信号电压波动检测的自适应时间窗积分模块,包括信号频率检测环节和自适应功率积分环节。波动误差修正原理如图 8 所示。

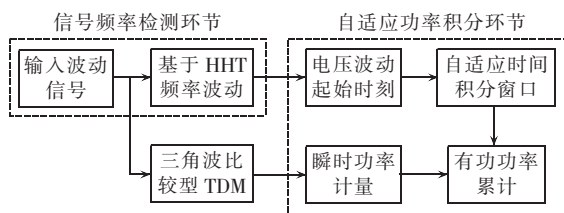


图 8 电压波动计量误差修正原理

Fig.8 Error correction principle of voltage fluctuation measurement

基于 HHT 检测输入信号的瞬时频率波动,确定电压波动的起始时刻;当输入信号频率稳定时,设置积分时间窗口长度为 0.5 s;当检测到输入信号频率波动时,自适应调整相应的积分时间窗口长度为一个工频周期,即 0.02 s。即使在输入信号波动期间内

瞬时功率发生快速波动,功率累计的误差量最多也只有一个工频周期的电能,从而保证瞬时功率的积分误差达到最小。

3.3 无功计量误差改进

3.3.1 无功计量误差特性分析

分布式光伏的稳定运行涉及无功功率的补偿问题^[20],因此适应分布式光伏动态特性的无功计量方法也有重要的实用价值。与有功计量相比,目前对无功计量方式的研究还不够深入。一般的电子式无功电能表主要基于功率三角公式和采样点平移的移相法计量无功功率。

a. 基于功率三角公式的无功计量方法。

基于功率三角公式计量无功主要依据无功功率、视在功率和有功功率的关系计量无功。只要得到电压、电流有效值和功率因数,就能计算无功功率。但是由于谐波的存在以及电压波动的影响,电压、电流以及功率因数的获取较为困难,相应的无功功率的计量误差精度也难以保障。

b. 基于采样点平移的移相法的无功计量方法。

基于采样点平移的移相法计量无功功率是通过电压延时 $\pi/2$ 来计算无功,其延时时间是基于基波的。但是由于移相法针对的是基波频率,在谐波环境下, h 次谐波电压将被移相 $-h \times (\pi/2)$,故只有 5、9、... 次谐波才能得到正确的移相结果,其他次谐波将会产生相应的移相误差。

3.3.2 基于 Hilbert 变换的无功功率计量

本文结合上文给出的有功功率计量改进方法提出一种基于 Hilbert 变换的无功功率计量方法。

a. Hilbert 变换法。

对于任一连续的时间信号 $X(t)$,其 Hilbert 变换为:

$$Y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{X(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (20)$$

其 Hilbert 反变换为:

$$X(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{Y(\tau)}{\tau-t} d\tau \quad (21)$$

可得解析信号为:

$$Z(t) = X(t) + jY(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (22)$$

其中, $a(t)$ 为瞬时幅值; $\theta(t)$ 为相位。

由上式可知,信号经 Hilbert 变换后,在频域内各频率分量的幅值保持不变,相位将出现 90° 相移,且不丢失任何信息。

b. 基于 Hilbert 变换的无功计量方法。

本文在改进的有功计量模型基础上提出无功计量方法如图 9 所示。

对输入端电压、电流信号进行瞬时值采样;采样

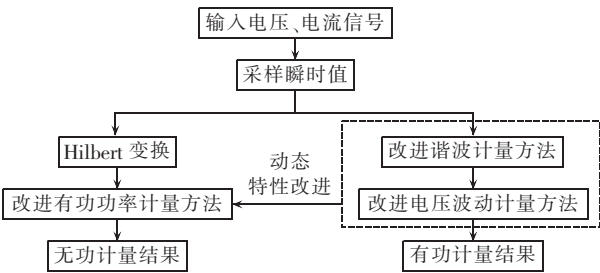


图 9 改进有功、无功计量方法
Fig.9 Improved measurement method for active and reactive power

信号通过谐波和电压波动计量修正模块,获得有功计量结果;采样电流或电压信号通过 Hilbert 变换进行各次谐波移相操作;对移相信号采用改进的有功功率计量方法,获得无功功率计量结果。

4 仿真验证

本文在 MATLAB/Simulink 环境下搭建了适应分布式光伏动态特性的改进电能计量模型,包括基于谐波和电压波动误差特性的改进模型和基于 Hilbert 变换的无功计量模型。

4.1 基于谐波误差特性改进仿真结果

基于 1.4 节分布式光伏并网谐波特性的数学表征式,本节分别取单次谐波信号、基波叠加单次谐波信号作为输入信号,与改进电能计量模型相结合进行电能计量仿真。

4.1.1 基于单次谐波误差特性改进仿真结果

基于 1.4 节分布式光伏并网谐波特性的数学表征式,取单次谐波信号为输入信号进行仿真。为便于分析误差特性,各次谐波有效值均作归一化处理,有功功率理论值为 1 p.u.。由于谐波误差主要取决于输入信号频率与调制波频率,故分别取 $6k \pm 1$ 次的单次谐波为输入信号,即电压、电流信号分别取为:

$$u(t)/i(t)=\sqrt{2} \cos(100\pi t) \tag{23}$$

$$u(t)/i(t)=\sqrt{2} \cos(500\pi t) \tag{24}$$

$$u(t)/i(t)=\sqrt{2} \cos(700\pi t) \tag{25}$$

⋮

三角波调制频率取 10 kHz,幅值取 2。仿真结果与理论值比较见表 1。

表 1 单次谐波计量仿真误差
Table 1 Simulation error of single harmonic measurement

单次谐波次数	理论误差/%	改进前误差/%	改进后误差/%
5	-0.2055	-0.2452	-0.0499
7	-0.4024	-0.4773	-0.0752
11	-0.9912	-1.0913	-0.1011
13	-1.3823	-1.5032	-0.1226
17	-2.3545	-2.5744	-0.2252
19	-2.9341	-3.1774	-0.2507

由表 1 可知,在调制波频率不变情况下,随着单次谐波次数上升,改进前仿真计量误差逐渐增大,且均与理论误差值接近;基于理论误差系数修正后,计量误差均有较大改善,19 次谐波条件下仍满足 0.3% 以内的误差要求,表明基于谐波次数的改进计量模型对单次谐波信号而言是有效的。误差为负值表明计量结果比实际功率值小。

4.1.2 基于基波叠加单次谐波误差特性改进仿真结果

基于 1.4 节分布式光伏并网谐波特性的数学表征式,取基波叠加单次谐波信号为输入信号进行仿真实验。为便于分析误差特性,基波与谐波信号有效值均取 1 p.u.,即分别取式(26)、(27)、⋯为输入信号,有功功率理论值为 2 p.u.。仿真结果与理论值比较见表 2。

$$u(t)/i(t)=\sqrt{2} \cos(100\pi t)+\sqrt{2} \cos(500\pi t) \tag{26}$$

$$u(t)/i(t)=\sqrt{2} \cos(100\pi t)+\sqrt{2} \cos(700\pi t) \tag{27}$$

$$u(t)/i(t)=\sqrt{2} \cos(100\pi t)+\sqrt{2} \cos(1100\pi t) \tag{28}$$

⋮

表 2 基波叠加单次谐波计量仿真误差
Table 2 Simulation error of fundamental added single harmonic measurement

叠加谐波次数	理论误差/%	改进前误差/%	改进后误差/%
5	-0.2055	-0.4977	-0.2928
7	-0.4024	-0.7328	-0.3317
11	-0.9912	-1.4131	-0.4261
13	-1.3823	-1.8364	-0.4605
17	-2.3545	-3.0115	-0.6729
19	-2.9341	-3.6350	-0.7221

由表 2 可知,与输入单次谐波计量仿真结果类似,随着叠加的单次谐波次数上升,改进前仿真计量误差逐渐增大,改进后误差均减小至 1% 以下,改善效果良好。

但是与单次谐波误差相比,改进电能计量模型对基波叠加单次谐波信号的计量误差有所增加,这是由于理论误差修正系数是基于单次谐波频率计算得到的,而原始计量结果是对基波叠加单次谐波的输入信号的电能计量,与理论误差并不完全一致,所以改进电能计量模型对基波叠加单次谐波信号的计量误差的改善效果有所减小。

因此对包含谐波的电网信号进行电能计量之前,先对输入信号进行基波与谐波信号的分解,再通过谐波电能改进计量模型可获得更高精度的电能计量结果。

4.2 基于电压波动误差特性改进仿真结果

基于 1.4 节分布式光伏并网电压波动特性的数学表征式,本节设置基于电压波动过程检测的功率积

分自适应窗口,与改进电能计量模型相结合进行电能计量仿真。

设定仿真时间为 2 s,电流有效值为 1 p.u.,电压有效值 0.5 s 时由 1 p.u. 升高至 2 p.u.,1.5 s 时下降至 1.5 p.u.。所以输入电流信号为 $\sqrt{2}\cos(100\pi t)$,输入电压信号为先暂升后暂降的波动信号:

$$u(t)=\begin{cases} \sqrt{2}\cos(100\pi t) & 0\leq t<0.5 \\ 2\sqrt{2}\cos(100\pi t) & 0.5\leq t<1.5 \\ \frac{3\sqrt{2}}{2}\cos(100\pi t) & 1.5\leq t\leq 2 \end{cases} \quad (29)$$

设置频率未波动情况下积分窗口长度为 0.5 s,波动情况下积分窗口长度取一个工频周期长度为 0.02 s。仿真结果如图 10 和表 3 所示,图中 P、U 均为标幺值。

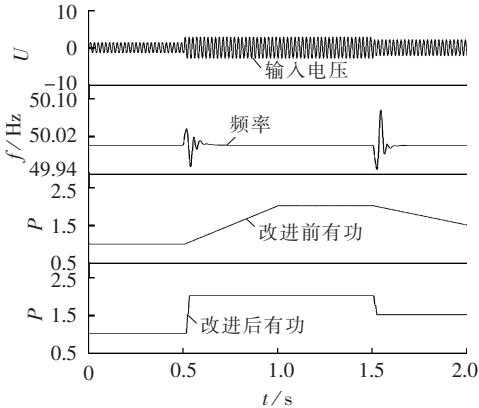


图 10 仿真波形

Fig.10 Simulative waveforms

表 3 自适应功率积分窗口仿真结果

Table 3 Simulative results with adaptive window of power integration

积分方法	未波动时 窗口长度/s	波动时 窗口长度/s	电能计 量结果	仿真 误差/%
固定窗口功率积分	0.5	0.5	3.124	3.88
自适应功率积分	0.5	0.02	3.233	0.52

由表 3 可知,当输入电压波动时,频率也发生相应波动。固定窗口下电能累计仿真结果为 3.124 p.u.,电压波动改进计量模型自适应窗口下电能累计仿真结果为 3.233 p.u.,电能累计理论值为 3.25 p.u.,所以采用改进计量模型后计量误差由 3.88% 减小为 0.52%,有较大幅度的改善,表明基于电压波动检测的改进电能计量模型是有效的。

4.3 无功功率计量仿真结果

基于 1.4 节分布式光伏并网谐波特性的数学表征式,本节分别取谐波和电压波动信号作为输入信号,在改进的有功电能计量模型基础上进行无功电能计量仿真。

4.3.1 谐波条件下无功计量结果

设定输入电压为基波叠加 5 次谐波信号:

$$u(t)=$$

$$\sqrt{2}\cos\left(100\pi t+\frac{\pi}{6}\right)+\frac{\sqrt{2}}{2}\cos\left(500\pi t+\frac{\pi}{4}\right) \quad (30)$$

设定输入电流为基波叠加 5 次谐波信号:

$$i(t)=\sqrt{2}\cos(100\pi t)+\frac{\sqrt{2}}{5}\cos(500\pi t) \quad (31)$$

基波电压和电流有效值为 1 p.u.,相位差为 $\pi/6$;谐波电压和电流有效值分别为 0.5 p.u. 和 0.2 p.u.,相位差为 $\pi/4$ 。

谐波无功计算用基波无功计算方法,即 $UI\sin\theta$,所以无功功率理论值为:

$$Q=Q_b+Q_h=0.5+0.01\times\frac{\sqrt{2}}{2}=0.5071\text{ p.u.} \quad (32)$$

采用基于 Hilbert 变换的无功计量方法,将输入电压基波谐波信号均移相 90° ,电流信号不做处理。采用改进的有功计量模型,得到无功计量结果为 0.5057 p.u.,与理论无功值相比误差为 0.28%,表明该无功计量模型在谐波条件下是有效的。

4.3.2 电压波动条件下无功计量结果

设定仿真时间为 2 s,频率未波动情况下积分窗口长度取 0.5 s,波动情况下积分窗口长度取 0.02 s。输入电流信号为:

$$i(t)=\sqrt{2}\cos(100\pi t) \quad (33)$$

输入电压信号有效值在 1 s 时由 1 p.u. 上升至 2 p.u.,即暂升的波动信号:

$$u(t)=\begin{cases} \sqrt{2}\cos\left(100\pi t+\frac{\pi}{6}\right) & 0\leq t<1 \\ 2\sqrt{2}\cos\left(100\pi t+\frac{\pi}{6}\right) & 1\leq t\leq 2 \end{cases} \quad (34)$$

所以无功功率计量理论值为:

$$Q=UI\sin\theta=\sin\frac{\pi}{6}+2\sin\frac{\pi}{6}=\frac{3}{2}\text{ p.u.} \quad (35)$$

得到的仿真结果如图 11 所示,图中 U、Q 均为标幺值。

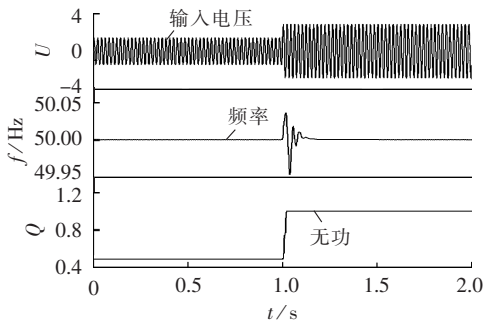


图 11 电压波动下仿真波形

Fig.11 Simulative waveforms under voltage fluctuation

采用基于 Hilbert 变换的无功计量方法,将输入电压信号移相 90° ,电流信号不做处理。采用改进的

有功计量模型,得到无功计量结果为 1.489 p.u.,与理论无功计量值相比误差为 0.73%,表明该无功计量模型在电压波动条件下是有效的。

5 结论

针对适应分布式光伏动态特性的电能计量模型改进问题,本文首先基于分布式光伏发电系统模型,仿真分析了光伏并网造成的谐波与电压波动现象,总结了分布式光伏并网动态特性表征式;然后建立了三角波比较型 TDM 计量模型,在谐波与电压波动误差特性基础上设计了有功电能计量改进模块,给出了基于 Hilbert 变换的无功计量方法;最后,通过仿真验证了本文所提电能计量改进模型的有效性。本文所提方法主要在以下 3 个方面具有创新性:

a. 谐波条件下电能计量方面,现有文献主要对谐波信号的精确提取开展了研究,而本文提出了因谐波对电能计量信号调制过程造成定量误差的改进模型;

b. 电压波动条件下电能计量方面,现有文献主要从硬件架构方面研究了动态功率表的设计,而本文从改进算法角度出发,提出了基于自适应功率积分窗口的改进电能计量模型;

c. 无功计量方面,目前尚未有考虑谐波和电压波动的无功计量算法,本文在有功电能计量改进的基础上,提出了计及谐波和电压波动的无功计量模型,并通过仿真验证了其有效性。

本文对大量分布式光伏和非线性负荷接入条件下电能的准确计量具有参考价值,但是本文对电能计量模型的研究都是建立在经典的有功、无功功率定义的基础上,畸变波形条件下瞬时有功和无功功率目前还没有统一的定义,仍需进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] 李芬,李春阳,闫全全,等. 基于变分贝叶斯学习的光伏功率波动特性研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):99-104,122.
LI Fen,LI Chunyang,YAN Quanquan,et al. Research of photovoltaic power fluctuation based on variational Bayesian learning[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(8): 99-104,122.
- [2] 肖华锋,刘隰蒲,过亮,等. 规模化并网逆变器网侧谐振电流信息的小波包提取方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(1):129-134.
XIAO Huafeng,LIU Xipu,GUO Liang,et al. Grid-side resonant current information extraction by wavelet packet for massive grid-connected inverters[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(1):129-134.
- [3] 汪妮,乐健,梁海涛,等. 谐波条件下时分割乘法器计量误差的量化分析[J]. 电力系统自动化,2014,38(23):71-76.
WANG Ni,LE Jian,LIANG Haitao,et al. Quantitative analysis on measuring errors of time division multiplier under harmonic condition[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38

(23):71-76.

- [4] 王毅. 电能计量装置介绍[J]. 电力自动化设备,2007,27(11):119-121.
WANG Yi. Introduction of electric energy metering device[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(11):119-121.
- [5] 罗亚桥,胡翀. 谐波对电能计量的影响分析[J]. 电力自动化设备,2009,29(5):130-132.
LUO Yaqiao,HU Chong. Influence of harmonics on power energy measurement[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(5):130-132.
- [6] NAIK R,MOHAN N,ROGER S M,et al. A novel grid interface, optimized for utility-scale applications of photovoltaic,wind-electric,and fuel-cell systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1995,10(4):1920-1926.
- [7] WU T,SHEN C,NEIN H,et al. A 1/3W inverter with grid connection and active power filtering based on nonlinear programming and fast-zero-phase detection algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2005,20(1):218-226.
- [8] SAHA S,SUNDARSINGH V P. Novel grid-connected photovoltaic inverter[J]. IEEE Proceedings:Generation,Transmission and Distribution,1996,143(2):219-224.
- [9] 滕召胜,罗志坤,孙传奇,等. 基于小波包分解与重构算法的谐波电能计量[J]. 电工技术学报,2010,25(8):200-206.
TENG Zhaosheng,LUO Zhikun,SUN Chuanqi,et al. Harmonic energy measurement based on wavelet packet decomposition and reconstruction algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(8):200-206.
- [10] 纪峰,徐晴,周超,等. 一种可溯源的电能表动态性能测量方法研究[J]. 电测与仪表,2016,53(5):87-90.
JI Feng,XU Qing,ZHOU Chao,et al. Research of measurement method on dynamic performance for traceable energy meter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2016,53(5):87-90.
- [11] 申莉,叶利,李帆,等. 动态电能功率表的研究[J]. 电测与仪表,2012,49(10A):152-156.
SHEN Li,YE Li,LI Fan,et al. Meter research on dynamic power[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2012,49(10A):152-156.
- [12] 许仪勋,程浩忠,葛乃成,等. 谐波对无功电能表计量特性的影响[J]. 电网技术,2005,29(16):56-60.
XU Yixun,CHENG Haozhong,GE Naicheng,et al. Influence of harmonics on registration of varhour meter[J]. Power System Technology,2005,29(16):56-60.
- [13] 章健,栗鹏辉,贺芳,等. 非正弦电路无功功率及其对无功计量的影响[J]. 电测与仪表,2007,44(4):9-12.
ZHANG Jian,LI Penghui,HE Fang,et al. Reactive power in nonsinusoidal electric circuit and its influence on reactive energy measurement[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2007,44(4):9-12.
- [14] 申展,胡辉勇,雷金勇,等. 分布式电源接入用户及用户侧微电网双向电能计量问题[J]. 南方电网技术,2015,9(4):14-21.
SHEN Zhan,HU Huiyong,LEI Jinyong,et al. Bidirectional metering issues of user-side microgrid and user with distributed generation[J]. Southern Power System Technology,2015,9(4):14-21.
- [15] 申邵东,魏星. 谐波对有功电能计量影响的仿真研究[J]. 电力

- 自动化设备,2008,28(2):54-57.
- SHEN Shadong,WEI Xing. Influence of harmonics on electric energy measurement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008,28(2):54-57.
- [16] 郑晨,周林,张密. 基于导纳重构的大型光伏电站谐波谐振抑制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(8):51-57.
- ZHENG Chen,ZHOU Lin,ZHANG Mi. Harmonic resonance suppression based on admittance reshaping for large-scale PV plant[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(8):51-57.
- [17] 谢鹏,周青山,汪毅,等. 电能计量误差分析软件设计与实现[J]. 电力自动化设备,2006,26(1):76-79.
- XIE Peng,ZHOU Qingshan,WANG Yi,et al. Design and realization of analytic software of energy metering error[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(1):76-79.
- [18] 陈瑶,童亦斌,金新民. 基于 PWM 整流器的 SVPWM 谐波分析新算法[J]. 中国电机工程学报,2007,27(13):76-80.
- CHEN Yao,TONG Yibin,JIN Xinmin. A novel algorithm of SVPWM harmonic analysis based on PWM rectifier[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(13):76-80.
- [19] 江辉,王晓强,彭建春. 基于希尔伯特-黄变换的电压闪变测量方法[J]. 电网技术,2012,36(9):250-256.
- JIANG Hui,WANG Xiaoqiang,PENG Jianchun. Method to measure voltage flicker based on Hilbert-Huang transform[J]. Power System Technology,2012,36(9):250-256.
- [20] 付志红,熊学海,侯兴哲,等. Fryze 时域无功与通用无功定义的一致性条件分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):59-65.
- FU Zhihong,XIONG Xuehai,HOU Xingzhe,et al. Analysis of coherence condition for Fryze time-domain reactive power definition and universal reactive power definition[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(3):59-65.

作者简介:



窦晓波

窦晓波(1979—),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为分布式电源高渗透配电网(E-mail:dx_b_2001@sina.com);

杨磊(1992—),男,江苏连云港人,硕士研究生,主要研究方向为分布式电源电能计量(E-mail:912481341@qq.com)。

Improved model for power metering based on dynamic characteristics of distributed photovoltaic power generation

DOU Xiaobo¹, YANG Lei¹, MA Jian², CHEN Kexu², QUAN Xiangjun¹

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330019, China)

Abstract: Based on distributed PV (PhotoVoltaic) power generation model, the mathematical expressions of distributed PV grid-connected signals are formulated. To analyze theoretical error expressions under harmonic and voltage fluctuation conditions, TDM (Time Division Multiplier) based power metering model is presented. Meanwhile, error correction modules of active power metering based on the harmonic frequency and voltage fluctuation detection are designed, and an improved approach of reactive power metering through Hilbert transform is proposed. An improved model for power metering based on dynamic characteristics of distributed PV power generation is proposed, which is combined with the mathematical models of distributed PV grid-connected signals. Simulative results verify the validity of the proposed model.

Key words: distributed photovoltaic power generation; harmonic analysis; voltage fluctuation; active power metering; reactive power metering