

[微网]

直流微电网母线电压纹波小波检测方法研究

文/国网长沙供电公司 许 健

长沙理工大学电气与信息工程学院 刘香银 罗雪莲

研究了利用小波变换方法检测直流微电网母线上产生的电压纹波，并对直流电压纹波的小波检测进行了Matlab仿真。仿真结果表明，该方法能够实现对直流电压纹波的频率、幅值、实时值和有效值等快速又准确的检测，为直流微电网电压纹波的评估和抑制提供了依据。

直流微电网作为未来微电网发展的趋势，近年来得到了越来越多的关注，其出现的电能质量问题也吸引了众多学者进行研究。而在直流微电网中，若母线中的功率瞬时值中掺杂有非直流量时，直流母线电压就会出现纹波分量，出现电压纹波现象，造成电压失稳。电压纹波会使得装置出现不稳定谐波、降低电源出力效率、对数字设备造成信号干扰，严重的情况下会使得继电保护装置误动作，影响外部的大电网的正常运行，最终导致系统供电电能质量和可靠性降低。

近年来，对纹波的研究一直在进行，检测和抑制纹波主要是基于电力电子技术的硬件开发上，如采用基于变流器与储能、降压变压器或逆变器的多模块化电力电子装置，通过调控电力电子器件的组合方式及相关参数，或通过控制储能元件的供电方式，去抑制纹波的产生。这种方法在抑制纹波产生上起到了一定的效果，但却不能反映纹波具体特性，而且这种情况下的纹波电压一般都是该装置系统内部的固有扰动，不能够让人们认识到该装置在抑制纹波过程的一些非线性特性。另外，在含有滤波器的组合装置中，用得较多的就是无源滤波和有源滤波2种，无源滤波抑制纹波的方法是通过串联大电容或引发LC谐振，这对LC的参数要求很高，可能会引起系统的谐

振。有源滤波通过滤波器来检测、消除纹波，这种方法有效、简单，但是设备投资较大，灵活性不够。这些方法在纹波检测和抑制的实现过程中往往是基于固定系数的设计上，不能显示出纹波的一些动态特性，检测误差较大。

针对直流微电网中产生的电压纹波的检测，本文提出了一种小波变换检测的方法，小波变换具有良好的时域—频域局部化特点，对不稳定成分很敏感，能够有效地将交流成分从直流电压中分离出来，并可以分析交流成分的特性，实现对电压纹波的检测。

直流微电网母线电压纹波的形成及其特征

与交流微网相比，直流微网在运行过程中没有无功功率的波动，减少了很多电能转换环节，也不需要考虑系统电压的频率与相位、线路吸收无功等问题，因此直流母线电压稳定性就成为了衡量直流微电网平衡性和可靠性的唯一标准。

图1为一简化的直流微电网示意图，直流微电网系统有功功率的平衡性以及和母线相连的变换器、整流器会直接影响到母线电压稳定性；其中，如果电网、负载谐波出现不平衡，或电力电子装置交直流逆变不彻底、滤波不完全以及级联、并联时相互影响，就会导致电网、负载故

障,使系统出现不稳定的现象,而上述故障现象在母线电压上的表现就是出现纹波。

纹波是指直流中叠加了交流分量,这里就是指直流母线输出电压中含有交流电压成分。电压纹波本质上是频率超过工频的谐波或宽度很窄的脉冲波,其波形接近于正弦波。一般用下列三个特征量加以描述。

1) 最大电压纹波。很多时候直流电压掺杂有多种频率的交流量,最大电压纹波就是指这些交流量混合之后幅值的绝对值最大的电压大小,往往使用峰-峰值或有效值表示。

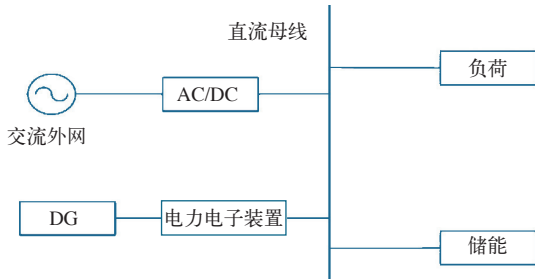


图1 直流微网简化图

2) 电压纹波系数。指在电网额定电流下,电压纹波有效值 U_{rms} 与该直流流量 U_0 大小的百分比,即

$$Y = \frac{U_{rms}}{U_0} \times 100\% \quad (1)$$

3) 电压纹波抑制比。指在工频(50 Hz)下,输入电压中的电压纹波有效值 U_i 与输出电压中的电压纹波有效值 U_0 之比,即

$$\lambda = \frac{U_i}{U_0} \quad (2)$$

电压纹波小波检测原理分析

1. 小波变换及其Mallat算法

1987年, Mallat and Meyer提出了多分辨分析(Multiresolution Analysis), 从而成功地统一了在此之前的Stromberg、Meyer、Lemarie和Battle提出的具体小波函数的构造, 研究了小波变换的离散化情形。并且Mallat在图像的分解与重构的塔式算法的启发下, 根据多分辨率理论, 提出小波分解与重构的快速算法,

简单表示如下, 设尺度函数与小波的双尺度方程为

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) \phi(2t - k) \quad (3)$$

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k) \phi(2t - k) \quad (4)$$

显然, 由于此时的小波函数直接可以通过平移或者伸缩组合得到, 从而可以避免尺度a值越

大, 对信息 $\Psi(t)$ 的采样就越密的缺点, 这一算法在小波分析中地位很重要。

2. 小波基的选择

小波变换的种类有很多, 根据小波母函数选择上的不同, 小波变换的结果一般也就不同。一般考虑其紧支撑性、正则性、对称性、可变换性、消失矩几个方面。

综合这些性质, Daubechies (dbN) 小波函数 $\Psi(t)$ 和尺度函数 $\phi(t)$ 中的支撑区为 $2N-1$, $\Psi(t)$ 的消失矩为N。dbN小波具有较好的正则性, 即该小波作为稀疏基所引入的光滑误差不容易被察觉, 使得信号重构过程比较光滑。dbN小波的特点是随着阶次(序列N)的增大消失矩阶数越大, 其中消失矩越高光滑性就越好, 频域的局部化能力就越强, 频带的划分效果越好。故本文将选用Daubechies小波进行仿真。

3. 噪声与纹波的辨识

在直流微网中, 母线电压本应是一个固定的值, 由于叠加了交流成分而出现纹波。纹波来自于微网系统内部故障, 为系统内部电力电子装置逆变、滤波所残留的交流量, 其频率为开关频率或输入交流电压频率的整数倍并与之保持同步, 所以纹波波形呈现一定的周期性, 且不受负载、外部非线性器件的波动影响。纹波的峰-峰值一般小于该直流电压的0.5%。而噪声是一系列的不规则的信号, 其一般为呈高斯分布的白噪声, 可能由直流微网内部引起, 也可能由外部干扰引起, 且会随着外部环境变化而改变; 噪声波形一般不具有周期性, 其峰-峰值占该直流母线电压的1%左右。

图2为一典型的纹波波形, 图3为一噪声信号。可见纹波有着一定的周期性, 而噪声则不具有。

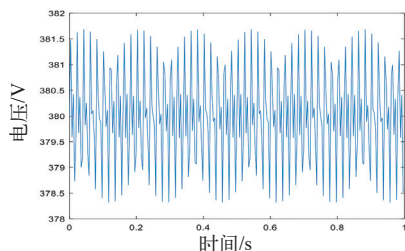


图2 纹波波形

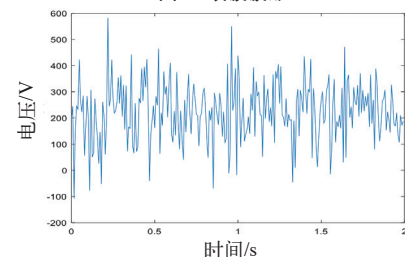


图3 噪声信号波形

为了便于观察与对比频谱特性,对图2纹波的幅值进行放大,得到的频谱图如图4所示。图5为图3噪声信号的频谱图。

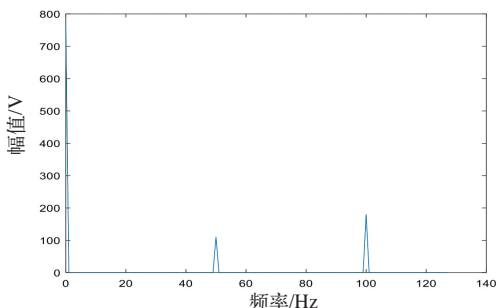


图4 纹波波形频谱图

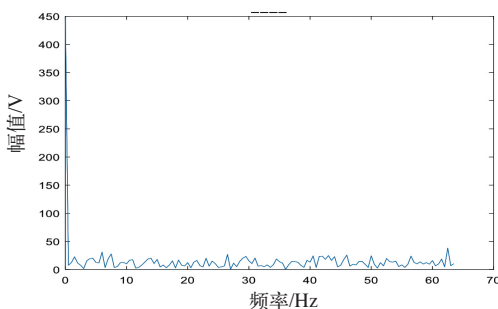


图5 噪声信号频谱图

从两者频谱图可以更直观地观察到,纹波频谱仅在0 Hz、50 Hz、100 Hz处出现尖波,这说明纹波其实是由某些一定频率的交流量混合而成,而含有噪声的信号幅值与频率则具有很大的随机性。

4. 纹波实时值检测

纹波实时值是指构成纹波的交流量的一系列特性值,包括其频率、幅值、有效值以及对应的波形。在进行实时值检测之前,需要对信号进行小波变换,将交流量从信号中分离出来。

纹波里往往含有多种频率的交流量,实时值的检测也需要针对不同频率的波形进行,所以需要以频率作为检测的分界点,得到对应频率交流量波形之后,有多种方法对其实时值进行计算,如利用仿真软件里的工具箱直接得出。在求解幅值以及频率时,为了快速、直观,本文使用傅里叶快速变换(FFT)求出消噪后的频谱图,通过频谱图可以直接看出纹波中含有几个不同频率的交流量,并可以直接读出其频率以及对应的幅值,而纹波自身的幅值可由检测结果直接读取。对于幅值稳定的交流量,利用RMS算法得出有效值波形,求出有效值;如果幅值具有波动性,则利用小波工具箱实现有效值检测。

5. 电压纹波小波检测的实现

在纹波检测过程中,如果一个直流信号既有纹波又有噪声,那么其波形会呈现一定的不规则的波动性,且幅值波动较大,没有规律性;其频谱图既会出现尖顶波又会出现随机波。需要注意的是,由于纹波幅值往往很小,频谱图如果是如图5所示的随机波,可以确定该信号有噪声,但不能表明其一定就不包含有纹波量,有可能纹波幅值过小而被噪声覆盖。

所以在获得原始信号波形之后,先通过频谱图分析其幅频特性,判断该信号是否参杂噪声,如果有,利用小波进行消噪;然后对消噪后的波形进行小波变换,得到其分解量,除去信号中的直流量,提取分解得到的交流量进行实时值计算,实现对纹波检测。具体流程如图6所示。

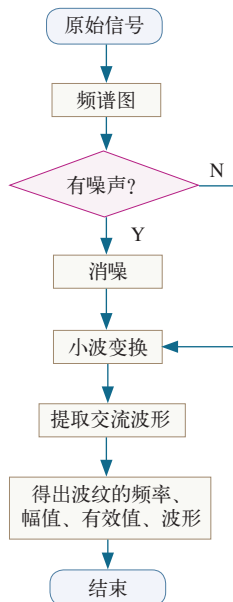


图6 直流纹波小波检测流程

仿真及其结果分析

1. 仿真电网模型及参数

为验证本文检测算法的有效性,在额定情况下,对一简单的辐射式直流微电网进行了建模、仿真。

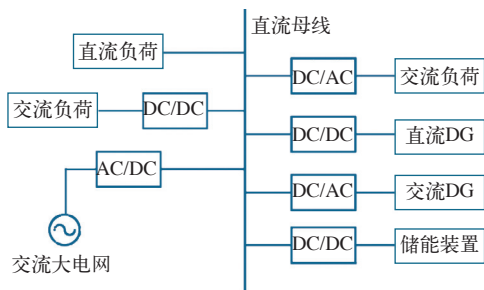


图7 直流微电网模型

(下转第79页)

5. 解决输电线路“三跨”在线监测

“三跨”是指跨越高速铁路、高速公路和重要输电通道的架空输电线路区段，在所有的输电线路通道中，三跨地区隐患事故发生尤其频繁，且事故发生后造成的后果更为严重，损失更为巨大。按照国家电网公司统一部署，对不满足“三跨”要求的输电线路区段要逐步在近5年内完成杆塔改造。因此对不能立即纳入整改计划的区段，加强设备巡视显得尤为重要，作为巡视重点区域，传统管理模式下的人工巡视显得力不从心。

在采取新型输电线路可视化运维管理模式后，专业人员提前对承德市输电线路“三跨”问题进行集中隐患排查，针对所有不满足三跨运维要求的杆塔上加装通道可视化在线监测装置，通过设定图像采集频率，实现对“三跨”区段的在线监测。下表是对“三跨”区段应用新型管理模式后与传统管理方式关键数据的对比。

表4 新旧管理模式下隐三跨点关键数据对比

名称	三跨点巡视周期	每人巡视三跨点数
传统管理模式	7天	3个
新型管理模式	1天	20个

新型管理体系下“三跨”隐患点巡视周期大大缩短，由原来的7天缩短到一天，每人的巡视点数也有3个增加到20个，同时巡视质量也由之前的“随走随看”，变成现在的定点观看。

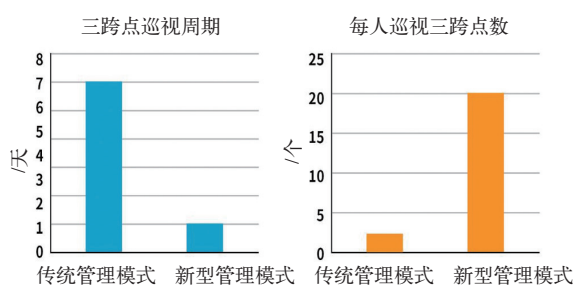


图7 新旧管理模式三跨点关键数据对比

结束语

承德供电公司于2015年初开始实施输电线路通道可视化运维管理体系，在现有人员配置产生巨大缺口的情况下，取得了良好的成效，是电力企业在挖掘自身潜力价值，优化企业管理模式下的成功案例。通过长期的研究与实施，形成了一套全新的、完整的通道可视化运维体系，规范了通道隐患的闭环管理，实现了传统运维方法与现代信息技术的融合，将对电网、设备、人员、隐患的全过程管理以多维度的形式呈现。重点突出，操作规范，具有很强的前瞻性和可操作性，有效地整合各方面资源，降低了企业经营成本，提升了企业经济效益，在解决主要问题的同时，探索出了一条输电线路通道运维管理的新路。EA

(收稿日期：2018.04.24)

(编辑：朱金凤)

(上接第76页)

图7中，直流母线电压通过交流大电网、直流分布式电源以及交流分布式电源逆变、整流所得，系统拓扑结构简单，易于控制。各分布式电源与负荷通过接口直接接入直流母线，然后母线经换流器设备接入电网。直流母线电压为380 V，分布式电源输出功率为0.5 kW，其余参数设置均在允许的范围内。在该直流微网模型中，直流母线与许多电力电子器件直接相连，这些器件之间会相互干扰，影响逆变、整流效率，在母线电压上最易出现纹波和噪声，故仿真原始信号直接从直流母线中采取。

2. 直流电压纹波检测仿真

仿真结果可知，对于直流微网母线电压纹波的检测，小波变换不仅能够准确检测出纹波波形及其相关实时值，结合其频谱图还能分析出其中

流量分布状况，从而实现对纹波的检测。

结束语

直流微电网作为实现多元化新能源利用的有效手段，日益得到社会的重视。本文对直流微电网存在的母线电压纹波问题进行了分析，并采用了小波变换对直流电压纹波进行了检测。并利用该方法对直流微电网中产生的电压纹波问题进行深入的仿真分析。从仿真试验结果可知，该方法能够实现对直流电压纹波的频率、幅值、有效值以及流量分布等快速又准确的检测，为电压纹波的抑制和治理提供了依据。EA

(收稿日期：2018.05.23)

(编辑：朱金凤)