



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114944649 A

(43) 申请公布日 2022. 08. 26

(21) 申请号 202210659949.7

(22) 申请日 2022.06.10

(71) 申请人 合肥工业大学

地址 230009 安徽省合肥市包河区屯溪路  
193号

(72) 发明人 张兴 巫宇航 陈思宇 战祥对  
朱乔华 吴孟泽 付新鑫

(74) 专利代理机构 合肥和瑞知识产权代理事务  
所(普通合伙) 34118

专利代理师 王挺

(51) Int. Cl.

H02J 3/00 (2006.01)

H02J 3/38 (2006.01)

G01R 31/00 (2006.01)

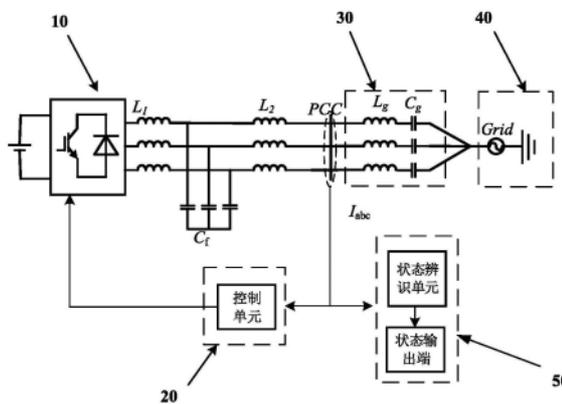
权利要求书3页 说明书7页 附图2页

## (54) 发明名称

基于电量频谱的电网状态辨识方法

## (57) 摘要

本发明公开了一种基于电量频谱的电网状态辨识方法,属于电能质量分析及信号分析领域。具体地,该方法是基于递归离散傅里叶变换的信号处理的电网状态在线辨识方法,该方法辨识所研究的系统包括逆变器主电路(直流侧电压源,三相桥路逆变电路,三相LCL滤波器),控制单元,三相线路阻抗(三项线路电感,三相线路电容),交流侧电网(三相电网,接地模块)和电网状态辨识单元(状态辨识单元和状态输出端)。该方法不需要向电网中注入扰动,仅通过对交流并网侧的电流进行递归离散傅里叶变换,根据其谐波频率的分布规律,判断电网的状态。



1. 一种基于电量频谱的电网状态辨识方法,应用该方法的系统包括逆变器主电路(10),控制单元(20),三相线路阻抗(30),交流侧电网(40)和电网状态辨识单元(50);所述逆变器主电路(10)包括依次串联的直流电源、三相全桥逆变电路和三相LCL滤波器,所述三相线路阻抗(30)包括三相线路电感和三相线路电容,所述交流侧电网(40)包括三相电网和接地模块,所述电网状态辨识单元(50)包括状态辨识单元和状态输出端;所述逆变器主电路(10)的输出端与三相线路阻抗(30)的一端相连,其连接点为公共耦合点PCC,三相线路阻抗(30)的另一端接入三相电网,三相电网的另一侧与接地模块相连;所述控制单元(20)的输入端与公共耦合点PCC相连、输出端与逆变器主电路(10)中的三相全桥逆变电路相连,所述电网状态辨识单元(50)的输入端与公共耦合点PCC相连、输出端与状态输出端相连;

其特征在于,所述辨识方法通过分析并网电流谐波频率分布规律,对电网状态进行辨识,具体的,本辨识方法的步骤如下:

步骤1,参数的设定

记电网基频为 $f_g$ 、采样频率为 $f_s$ ,在一个电网基波周期内按照等时采样间隔 $\tau$ 进行采样,且在初始采样中共采样 $N$ 次, $N$ 为正整数,且 $N=f_s/f_g$ ;

选取包含基波在内的一个频段作为频率区间,以1Hz为间隔均分该频率区间,并将均分后的区间简化成 $N\_Har$ 个频率点,将 $N\_Har$ 个频率点中的任一个记为频率点 $\Gamma_k$ ,其中 $k$ 为 $N\_Har$ 个频率点按照频率值由小到大顺序排列的序号, $k=1,2,3,\dots,N\_Har$ , $N\_Har$ 为正整数;

引入数组 $X$ , $X=\{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N\}$ ,其中, $x_i$ 为该数组中的任意一个元素,记为元素 $x_i$ , $i=1,2,\dots,N$ ;设定数组 $X$ 中的所有元素的初始值均为0;

步骤2,初始采样及计算

在频率点 $\Gamma_k$ 处采样逆变器主电路(10)输出的A相电流 $N$ 次,得到 $N$ 个初始A相电流采样值 $I_{01}, I_{02}, \dots, I_{0N}$ ,将该 $N$ 个初始A相电流采样值 $I_{01}, I_{02}, \dots, I_{0N}$ 组成一个初始电流值队列 $E_0$ , $E_0=\{I_{01}, I_{02}, \dots, I_{0N}\}$ ;

将初始电流值队列 $E_0$ 中的 $N$ 个初始A相电流采样值按照排列顺序填充进数组 $X$ ,并输入到电网状态辨识单元(50),进行辨识及离散傅里叶变换,得到频率点 $\Gamma_k$ 处的余弦分量和频率点 $\Gamma_k$ 处的正弦分量,并记为初始余弦分量 $A_{k0}$ 和初始正弦分量 $B_{k0}$ ,所述离散傅里叶变换公式为:

$$\begin{cases} A_{k0} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N-1} x_i \cos(2\pi k i \tau) \\ B_{k0} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N-1} x_i \sin(2\pi k i \tau) \end{cases}$$

步骤3,递归采样及递归计算

步骤3.1,给定仿真时长 $T_m$ ,且在仿真时长中按照等时采样间隔 $\tau$ 共进行递归采样 $N_c$ 次, $N_c$ 为正整数, $N_c=T_m/\tau$ ;

在步骤2的初始采样完成后,间隔一个采样间隔 $\tau$ 进行第1次递归采样及计算,具体的,在频率点 $\Gamma_k$ 处采样逆变器主电路(10)输出的A相电流1次得到第1次递归A相电流采样值 $I_{A1}$ ,将该第1次递归A相电流采样值 $I_{A1}$ 和初始电流值队列 $E_0$ 中的第2个~第 $N$ 个初始A相电流采样值合并,且该第1次递归A相电流采样值 $I_{A1}$ 为队尾,组成一个由 $N$ 个A相电流采样值组成的第1次递归电流值队列 $E_1$ , $E_1=\{I_{02}, I_{03}, \dots, I_{0N+1}\}$ ,其中, $I_{0N+1}=I_{A1}$ ;将该第1次递归电流

值队列 $E_1$ 中的 $N$ 个A相电流采样值按照排列顺序填充进数组 $X$ ,并根据递归公式得到第1次递归采样时刻频率点 $\Gamma_k$ 处的余弦分量和第1次递归采样时刻频率点 $\Gamma_k$ 处的正弦分量,并分别记为第1次递归采样时刻余弦分量 $A_{k1}$ 和第1次递归采样时刻正弦分量 $B_{k1}$ ;

在第1次递归采样完成后,间隔一个采样间隔 $\tau$ 进行第2次递归采样及计算,具体的,在频率点 $\Gamma_k$ 处采样逆变器主电路(10)输出的A相电流1次得到第2次递归A相电流采样值 $I_{A2}$ ,将该第2次递归A相电流采样值 $I_{A2}$ 和第1次递归电流值队列 $E_1$ 中的第2个~第 $N$ 个A相电流采样值合并,且该第2次递归A相电流采样值 $I_{A2}$ 为队尾,组成一个由 $N$ 个A相电流采样值组成的第2次递归电流值队列 $E_2$ ,将该第2次递归电流值队列 $E_2$ 中的 $N$ 个A相电流采样值按照排列顺序填充进数组 $X$ ,并根据递归公式得到第2次递归采样时刻频率点 $\Gamma_k$ 处的余弦分量和第2次递归采样时刻频率点 $\Gamma_k$ 处的正弦分量,并分别记为第2次递归采样时刻余弦分量 $A_{k2}$ 和第2次递归采样时刻正弦分量 $B_{k2}$ ;

依次类推,第 $n$ 次递归采样得到一个第 $n$ 次递归A相电流采样值 $I_{An}$ 和一个由 $N$ 个A相电流采样值组成的第 $n$ 次递归电流值队列 $E_n$ , $n$ 为 $N_c$ 次递归采样中的任意一次, $n=1,2,\dots,N_c$ ;将该第 $n$ 次递归电流值队列 $E_n$ 中的 $N$ 个A相电流采样值按照排列顺序填充进数组 $X$ ,并根据递归公式得到第 $n$ 次递归采样时刻频率点 $\Gamma_k$ 处的余弦分量和第 $n$ 次递归采样时刻频率点 $\Gamma_k$ 处的正弦分量,并分别记为当前时刻余弦分量 $A_{kn}$ 和当前时刻正弦分量 $B_{kn}$ ;

所述递归公式的表达式如下:

$$\begin{cases} A_{kn} = A'_k + \frac{2}{N}(I_{An} - x_i) \cos[2\pi k(N+1)\tau] \\ B_{kn} = B'_k + \frac{2}{N}(I_{An} - x_i) \sin[2\pi k(N+1)\tau] \end{cases}$$

式中, $A'_k$ 为当前时刻的上一采样时刻得到的余弦分量, $B'_k$ 为当前时刻的上一采样时刻得到的正弦分量,具体的:

当 $n=1$ 时, $A'_k = A_{k0}$ , $B'_k = B_{k0}$ ;

当 $n>1$ 时, $A'_k = A_{kn-1}$ 即第 $n-1$ 次递归采样时刻得到的余弦分量, $B'_k = B_{kn-1}$ ,即为第 $n-1$ 次递归采样时刻得到的正弦分量;

步骤3.2,在仿真时长内,按照步骤3.1的方法,每隔一个采样间隔 $\tau$ 采样一次,并进行一次递归计算,最后得到第 $N_c$ 次采样时刻的余弦分量和正弦分量,并分别记为仿真余弦分量 $A_k$ 和仿真正弦分量 $B_k$ ;

将A相电流在频率点 $\Gamma_k$ 处的谐波幅值记为谐波幅值 $\text{Amp\_I}_k$ , $\text{Amp\_I}_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}$ ;

步骤4,寻找低频谐波峰值 $g$ 和高频谐波峰值 $h$

将 $k=1,2,3,\dots,N_{\text{Har}}$ 分别代入步骤2、步骤3进行计算,得到 $N_{\text{Har}}$ 个频率点对应的谐波幅值 $\text{Amp\_I}_k$ ,该 $N_{\text{Har}}$ 个频率点对应的谐波幅值 $\text{Amp\_I}_k$ 组成一个谐波幅值序列 $\text{Amp\_I}$ , $\text{Amp\_I} = \{\text{Amp\_I}_1, \text{Amp\_I}_2, \dots, \text{Amp\_I}_k, \dots, \text{Amp\_I}_{N_{\text{Har}}}\}$ ;

将该谐波幅值序列 $\text{Amp\_I}$ 分成 $k<50$ 的谐波幅值区段和 $k\geq 50$ 的谐波幅值区段,在 $k<50$ 的谐波幅值区段中,取谐波幅值 $\text{Amp\_I}_k$ 的最大值记为低频最大值 $\text{Amp\_I}_g$ ,其中, $g$ 为与低频最大值 $\text{Amp\_I}_g$ 对应的频率值,并记为低频谐波峰值 $g$ ;在 $k\geq 50$ 的谐波幅值区段中,取谐波幅值 $\text{Amp\_I}_k$ 的最大值记为高频最大值 $\text{Amp\_I}_h$ ,其中, $h$ 为与高频最大值 $\text{Amp\_I}_h$ 对应的频率值,记为高频谐波峰值 $h$ ;

步骤5,电网状态的辨识

给定阈值 $\epsilon$ ,给定第一常数 $a$ 、第二常数 $b$ 、第三常数 $c$ 、第四常数 $d$ ,并设 $[a,b]$ 为串补电网的特征频段, $[c,d]$ 为弱电网的特征频段;

判断低频谐波峰值 $g$ 和高频谐波峰值 $h$ 所处的频率是否在特征频段内,且谐波幅值是否达到给定的阈值 $\epsilon$ ,具体判断如下:

当 $a \leq g \leq b$ 且 $\text{Amp\_I}_g / \text{Amp\_I}_{50} > \epsilon$ 时,认定此时的电网状态为串补电网,输出状态标志位 $\text{Flag}=2$ ;其中, $\text{Amp\_I}_{50}$ 为基波幅值 $\text{Amp\_I}_{50}$ ;

当 $c \leq h \leq d$ 且 $\text{Amp\_I}_h / \text{Amp\_I}_{50} > \epsilon$ 时,认定此时的电网状态为弱电网,输出状态标志位 $\text{Flag}=1$ ;

电网状态辨识单元(50)中的状态输出端输出状态标志位 $\text{Flag}$ ,辨识结束。

## 基于电量频谱的电网状态辨识方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及电能质量分析及信号分析领域,涉及一种基于电量频谱的电网状态辨识方法。

### 背景技术

[0002] 随着新能源在电网中渗透率的增加,新能源电站的占有率甚至与传统的火力发电相持平,但是新能源的投入会降低电网的强度;同时由于天然资源的分配不均衡,长距离的输电也会造成电网强度变弱。此时为了提升远距离输电能力,会在输电线路中接入串补设备,来抵消弱电网。也因此线路会出现弱电网和串补状态

[0003] 由于弱电网和串补电网是两种不同的电网状态,对于逆变器控制所采取的控制也是不同类型。当电网在两种状态中切换时,并网系统的稳定裕度也会有所变化,所以需要辨识电网的两种状态,来自适应的选择控制策略。

[0004] 目前,对于纯粹的电网状态辨识的研究不多,更多的是对电网阻抗测量的研究,例如:

[0005] 文献1、题为“Alves D K,Ribeiro R,Costa F B,et al.Wavelet-Based Monitor for Grid Impedance Estimation of Three-Phase Networks”,IEEE Transactions on Industrial Electronics,2020,PP(99):1-1。(基于小波的三相电网阻抗估计,《IEEE Transactions on Industrial Electronics》,2020年网络发表)的文章,通过采用小波系数能量分析来检测电网阻抗变化时,通过使用与信号注入方案相关联的实时平稳离散小波包变换来估计电网阻抗。虽然这种方法间歇性的注入谐波,但仍然影响了电网的电能质量。

[0006] 文献2、题为“基于伪随机二进制序列的宽频带电网阻抗在线测量”在2017年中国高校电力电子与电力传动学术年会中发表的文章。也是通过注入谐波来测量电网阻抗,但是它的创新在于提出了一种新型的dq轴正交信号注入法,在测量精度不变的基础上能够一定程度上减少电网谐波幅值,从而有效提高谐波注入期间的电能质量。虽然这种方法能够一定程度上减少对电网电能质量的影响,但是本质上仍然属于主动测量方法

[0007] 文献3、题为“基于同步挤压变换的电力系统谐波分析”《太阳能学报》,2021年第8期的文章。文章提出用于谐波分析的傅里叶同步挤压变换和同步挤压小波变换方法。这2种方法分别对电力谐波信号进行时频分析,并对谐波瞬时频率同步挤压锐化,得到更精细的谐波时频曲线,然后利用其可逆性将电力谐波分解为一组内蕴模态类函数分量,完成谐波各分量的提取。文章仅对谐波进行提取,并未进行后续的状态辨识分析。

[0008] 综合以上文献,现有的技术存在以下不足:

[0009] 1、现有的辨识方法主要研究重点放在阻抗测量上面,对于直接的电网状态辨识的研究少有研究;

[0010] 2、现有通过阻抗来辨识电网状态的方法,通常是注入扰动实现的,会影响电网的电能质量,同时,对于弱电网和串补电网的辨识少有存在;

[0011] 3、现有的状态辨识方法通常是加了硬件外设的,增加了成本。因此有必要研究基

于被动测量的弱电网和串补电网辨识方法。

### 发明内容

[0012] 本发明提出了一种基于电量频谱的电网状态辨识方法,无需注入扰动,无需增加额外设备,仅通过测量公共耦合点PCC点自身电流谐波来辨识弱电网与串补电网,进而进行下一步的逆变器自适应的控制,提高并网系统稳定性。

[0013] 本发明的目的是这样实现的。本发明提供了一种基于电量频谱的电网状态辨识方法,应用该方法的系统包括逆变器主电路,控制单元,三相线路阻抗,交流侧电网和电网状态辨识单元;所述逆变器主电路包括依次串联的直流电源、三相全桥逆变电路和三相LCL滤波器,所述三相线路阻抗包括三相线路电感和三相线路电容,所述交流侧电包括三相电网和接地模块,所述电网状态辨识单元包括状态辨识单元和状态输出端;所述逆变器主电路的输出端与三相线路阻抗的一端相连,其连接点为公共耦合点PCC,三相线路阻抗的另一端接入三相电网,三相电网的另一侧与接地模块相连;所述控制单元的输入端与公共耦合点PCC相连、输出端与逆变器主电路中的三相全桥逆变电路相连,所述电网状态辨识单元的输入端与公共耦合点PCC相连、输出端与状态输出端相连;

[0014] 所述辨识方法通过分析并网电流谐波频率分布规律,对电网状态进行辨识,具体的,本辨识方法的步骤如下:

[0015] 步骤1,参数的设定

[0016] 记电网基频为 $f_g$ 、采样频率为 $f_s$ ,在一个电网基波周期内按照等时采样间隔 $\tau$ 进行采样,且在初始采样中共采样 $N$ 次, $N$ 为正整数,且 $N=f_s/f_g$ ;

[0017] 选取包含基波在内的一个频段作为频率区间,以1Hz为间隔均分该频率区间,并将均分后的区间简化成 $N\_Har$ 个频率点,将 $N\_Har$ 个频率点中的任一个记为频率点 $\Gamma_k$ ,其中 $k$ 为 $N\_Har$ 个频率点按照频率值由小到大顺序排列的序号, $k=1,2,3,\dots,N\_Har$ , $N\_Har$ 为正整数;

[0018] 引入数组 $X$ , $X=\{x_1,x_2,\dots,x_i,\dots,x_N\}$ ,其中, $x_i$ 为该数组中的任意一个元素,记为元素 $x_i$ , $i=1,2,\dots,N$ ;设定数组 $X$ 中的所有元素的初始值均为0;

[0019] 步骤2,初始采样及计算

[0020] 在频率点 $\Gamma_k$ 处采样逆变器主电路输出的A相电流 $N$ 次,得到 $N$ 个初始A相电流采样值 $I_{01},I_{02},\dots,I_{0N}$ ,将该 $N$ 个初始A相电流采样值 $I_{01},I_{02},\dots,I_{0N}$ 组成一个初始电流值队列 $E_0$ , $E_0=\{I_{01},I_{02},\dots,I_{0N}\}$ ;

[0021] 将初始电流值队列 $E_0$ 中的 $N$ 个初始A相电流采样值按照排列顺序填充进数组 $X$ ,并输入到电网状态辨识单元,进行辨识及离散傅里叶变换,得到频率点 $\Gamma_k$ 处的余弦分量和频率点 $\Gamma_k$ 处的正弦分量,并记为初始余弦分量 $A_{k0}$ 和初始正弦分量 $B_{k0}$ ,所述离散傅里叶变换公式为:

$$[0022] \quad \begin{cases} A_{k0} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N-1} x_i \cos(2\pi k i \tau) \\ B_{k0} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N-1} x_i \sin(2\pi k i \tau) \end{cases}$$

[0023] 步骤3,递归采样及递归计算

[0024] 步骤3.1,给定仿真时长 $T_m$ ,且在仿真时长中按照等时采样间隔 $\tau$ 共进行递归采样 $N_c$ 次, $N_c$ 为正整数, $N_c = T_m/\tau$ ;

[0025] 在步骤2的初始采样完成后,间隔一个采样间隔 $\tau$ 进行第1次递归采样及计算,具体的,在频率点 $\Gamma_k$ 处采样逆变器主电路输出的A相电流1次得到第1次递归A相电流采样值 $I_{A1}$ ,将该第1次递归A相电流采样值 $I_{A1}$ 和初始电流值队列 $E_0$ 中的第2个~第N个初始A相电流采样值合并,且该第1次递归A相电流采样值 $I_{A1}$ 为队尾,组成一个由N个A相电流采样值组成的第1次递归电流值队列 $E_1$ , $E_1 = \{I_{02}, I_{03}, \dots, I_{0N+1}\}$ ,其中, $I_{0N+1} = I_{A1}$ ;将该第1次递归电流值队列 $E_1$ 中的N个A相电流采样值按照排列顺序填充进数组X,并根据递归公式得到第1次递归采样时刻频率点 $\Gamma_k$ 处的余弦分量和第1次递归采样时刻频率点 $\Gamma_k$ 处的正弦分量,并分别记为第1次递归采样时刻余弦分量 $A_{k1}$ 和第1次递归采样时刻正弦分量 $B_{k1}$ ;

[0026] 在第1次递归采样完成后,间隔一个采样间隔 $\tau$ 进行第2次递归采样及计算,具体的,在频率点 $\Gamma_k$ 处采样逆变器主电路输出的A相电流1次得到第2次递归A相电流采样值 $I_{A2}$ ,将该第2次递归A相电流采样值 $I_{A2}$ 和第1次递归电流值队列 $E_1$ 中的第2个~第N个A相电流采样值合并,且该第2次递归A相电流采样值 $I_{A2}$ 为队尾,组成一个由N个A相电流采样值组成的第2次递归电流值队列 $E_2$ ,将该第2次递归电流值队列 $E_2$ 中的N个A相电流采样值按照排列顺序填充进数组X,并根据递归公式得到第2次递归采样时刻频率点 $\Gamma_k$ 处的余弦分量和第2次递归采样时刻频率点 $\Gamma_k$ 处的正弦分量,并分别记为第2次递归采样时刻余弦分量 $A_{k2}$ 和第2次递归采样时刻正弦分量 $B_{k2}$ ;

[0027] 依次类推,第n次递归采样得到一个第n次递归A相电流采样值 $I_{An}$ 和一个由N个A相电流采样值组成的第n次递归电流值队列 $E_n$ ,n为 $N_c$ 次递归采样中的任意一次, $n=1,2,\dots,N_c$ ;将该第n次递归电流值队列 $E_n$ 中的N个A相电流采样值按照排列顺序填充进数组X,并根据递归公式得到第n次递归采样时刻频率点 $\Gamma_k$ 处的余弦分量和第n次递归采样时刻频率点 $\Gamma_k$ 处的正弦分量,并分别记为当前时刻余弦分量 $A_{kn}$ 和当前时刻正弦分量 $B_{kn}$ ;

[0028] 所述递归公式的表达式如下:

$$[0029] \quad \begin{cases} A_{kn} = A'_k + \frac{2}{N}(I_{An} - x_i) \cos[2\pi k(N+1)\tau] \\ B_{kn} = B'_k + \frac{2}{N}(I_{An} - x_i) \sin[2\pi k(N+1)\tau] \end{cases}$$

[0030] 式中, $A'_k$ 为当前时刻的上一采样时刻得到的余弦分量, $B'_k$ 为当前时刻的上一采样时刻得到的正弦分量,具体的:

[0031] 当 $n=1$ 时, $A'_k = A_{k0}$ , $B'_k = B_{k0}$ ;

[0032] 当 $n>1$ 时, $A'_k = A_{kn-1}$ 即第 $n-1$ 次递归采样时刻得到的余弦分量, $B'_k = B_{kn-1}$ ,即为第 $n-1$ 次递归采样时刻得到的正弦分量;

[0033] 步骤3.2,在仿真时长内,按照步骤3.1的方法,每隔一个采样间隔 $\tau$ 采样一次,并进行一次递归计算,最后得到第 $N_c$ 次采样时刻的余弦分量和正弦分量,并分别记为仿真余弦分量 $A_k$ 和仿真正弦分量 $B_k$ ;

[0034] 将A相电流在频率点 $\Gamma_k$ 处的谐波幅值记为谐波幅值 $\text{Amp\_I}_k$ , $\text{Amp\_I}_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}$ ;

[0035] 步骤4,寻找低频谐波峰值g和高频谐波峰值h

[0036] 将 $k=1,2,3,\dots,N\_Har$ 分别代入步骤2、步骤3进行计算,得到 $N\_Har$ 个频率点对应

的谐波幅值 $Amp_{I_k}$ ,该 $N_{Har}$ 个频率点对应的谐波幅值 $Amp_{I_k}$ 组成一个谐波幅值序列 $Amp_I$ ,  
 $Amp_I = \{Amp_{I_1}, Amp_{I_2}, \dots, Amp_{I_k}, \dots, Amp_{I_{N_{Har}}}\}$ ;

[0037] 将该谐波幅值序列 $Amp_I$ 分成 $k < 50$ 的谐波幅值区段和 $k \geq 50$ 的谐波幅值区段,在 $k < 50$ 的谐波幅值区段中,取谐波幅值 $Amp_{I_k}$ 的最大值记为低频最大值 $Amp_{I_g}$ ,其中, $g$ 为与低频最大值 $Amp_{I_g}$ 对应的频率值,并记为低频谐波峰值 $g$ ;在 $k \geq 50$ 的谐波幅值区段中,取谐波幅值 $Amp_{I_k}$ 的最大值记为高频最大值 $Amp_{I_h}$ ,其中, $h$ 为与高频最大值 $Amp_{I_h}$ 对应的频率值,记为高频谐波峰值 $h$ ;

[0038] 步骤5,电网状态的辨识

[0039] 给定阈值 $\epsilon$ ,给定第一常数 $a$ 、第二常数 $b$ 、第三常数 $c$ 、第四常数 $d$ ,并设 $[a, b]$ 为串补电网的特征频段, $[c, d]$ 为弱电网的特征频段;

[0040] 判断低频谐波峰值 $g$ 和低频谐波峰值 $h$ 所处的频率是否在特征频段内,且谐波幅值是否达到给定的阈值 $\epsilon$ ,具体判断如下:

[0041] 当 $a \leq g \leq b$ 且 $Amp_{I_g}/Amp_{I_{50}} > \epsilon$ 时,认定此时的电网状态为串补电网,输出状态标志位 $Flag = 2$ ;其中, $Amp_{I_{50}}$ 为基波幅值 $Amp_{I_{50}}$ ;

[0042] 当 $c \leq h \leq d$ 且 $Amp_{I_h}/Amp_{I_{50}} > \epsilon$ 时,认定此时的电网状态为弱电网,输出状态标志位 $Flag = 1$ ;

[0043] 电网状态辨识单元中的状态输出端输出状态标志位 $Flag$ ,辨识结束。

[0044] 相对于现有的技术,本发明的有益效果为:

[0045] 1、本发明辨识方法,无需注入扰动,仅通过测量PCC点自身电流谐波来辨识弱电网与串补电网,进而进行下一步的逆变器自适应的控制,提高并网系统稳定性;

[0046] 2、本发明辨识方法仅通过分析PCC点电流波形,无需分析电压的波形,判断电流谐波分布情况,就能够判断电网状态;

[0047] 3、本发明辨识方法仅通过方法改进,无需增加外设硬件设备,无需增加硬件成本。

## 附图说明

[0048] 图1为应用本发明辨识方法的系统结构图。

[0049] 图2为本发明实施例中强电网-弱电网-串补电网的辨识波形。

[0050] 图3为本发明实施例中的串补电网-弱电网-强电网的辨识波形。

## 具体实施方式

[0051] 下面结合附图对本实施例进行具体的描述。

[0052] 图1是应用本发明辨识方法的系统结构图,由图1可见,应用该方法的系统包括逆变器主电路10,控制单元20,三相线路阻抗30,交流侧电网40和电网状态辨识单元50。所述逆变器主电路10包括依次串联的直流电源、三相全桥逆变电路和三相LCL滤波器,所述三相线路阻抗30包括三相线路电感和三相线路电容,所述交流侧电网40包括三相电网和接地模块,所述电网状态辨识单元50包括状态辨识单元和状态输出端。所述逆变器主电路10的输出端与三相线路阻抗30的一端相连,其连接点为公共耦合点PCC,三相线路阻抗30的另一端接入三相电网,三相电网的另一侧与接地模块相连。所述控制单元20的输入端与公共耦合点PCC相连、输出端与逆变器主电路10中的三相全桥逆变电路相连,所述电网状态辨识单元

50的输入端与公共耦合点PCC相连、输出端与状态输出端相连。

[0053] 在图1中, $L_1$ 、 $L_2$ 为三相LCL滤波器中的滤波电感、 $C_f$ 为三相LCL滤波器中的滤波电容, $L_g$ 为三相线路阻抗中的线路电感, $C_g$ 为线路电容,Grid为三相电网, $V_{dc}$ 为直流电源处的直流侧电压。

[0054] 本实施例中主电路参数为: $V_{dc}=770V$ ,逆变器额定输出线电压为380V/50Hz,逆变器额定功率为20kW,滤波电感 $L_1$ 的值为1.832mH,滤波电感 $L_2$ 的值为0.7mH,滤波电容 $C_f$ 的值为16.4uF/1.5 $\Omega$ ,强电网时线路电感 $L_g$ 的值为4.6mH,弱电网时线路电感 $L_g$ 的值为7mH,串补电网时线路电容 $C_g$ 的值为16.4uF。

[0055] 本发明提供了一种基于电量频谱的电网状态辨识方法,所述辨识方法通过分析并网电流谐波频率分布规律,对电网状态进行辨识,具体的,本辨识方法的步骤如下:

[0056] 步骤1,参数的设定

[0057] 记电网基频为 $f_g$ 、采样频率为 $f_s$ ,在一个电网基波周期内按照等时采样间隔 $\tau$ 进行采样,共采样N次,N为正整数,且 $N=f_s/f_g$ ;

[0058] 选取包含基波在内的一个频段作为频率区间,以1Hz为间隔均分该频率区间,并将均分后的区间简化成 $N\_Har$ 个频率点,将 $N\_Har$ 个频率点中的任一个记为频率点 $\Gamma_k$ ,其中k为 $N\_Har$ 个频率点按照频率值由小到大顺序排列的序号, $k=1,2,3,\dots,N\_Har$ , $N\_Har$ 为正整数;

[0059] 引入数组 $X$ , $X=\{x_1,x_2,\dots,x_i,\dots,x_N\}$ ,其中, $x_i$ 为该数组中的任意一个元素,记为元素 $x_i$ , $i=1,2,\dots,N$ ;设定数组 $X$ 中的所有元素的初始值均为0。

[0060] 在本实施例中, $N=150$ , $N\_Har=50$ 。

[0061] 步骤2,初始采样及计算

[0062] 在频率点 $\Gamma_k$ 处采样逆变器主电路10输出的A相电流N次,得到N个初始A相电流采样值 $I_{01},I_{02},\dots,I_{0N}$ ,将该N个初始A相电流采样值 $I_{01},I_{02},\dots,I_{0N}$ 组成一个初始电流值队列 $E_0$ , $E_0=\{I_{01},I_{02},\dots,I_{0N}\}$ ;

[0063] 将初始电流值队列 $E_0$ 中的N个初始A相电流采样值按照排列顺序填充进数组 $X$ ,并输入到电网状态辨识单元50,进行辨识及离散傅里叶变换,得到频率点 $\Gamma_k$ 处的余弦分量和频率点 $\Gamma_k$ 处的正弦分量,并记为初始余弦分量 $A_{k0}$ 和初始正弦分量 $B_{k0}$ ,所述离散傅里叶变换公式为:

$$[0064] \begin{cases} A_{k0} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N-1} x_i \cos(2\pi k i \tau) \\ B_{k0} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N-1} x_i \sin(2\pi k i \tau) \end{cases}$$

[0065] 步骤3,递归采样及递归计算

[0066] 步骤3.1,给定仿真时长 $T_m$ ,且在仿真时长中按照等时采样间隔 $\tau$ 共进行递归采样 $N_c$ 次, $N_c$ 为正整数, $N_c=T_m/\tau$ ;

[0067] 在步骤2的初始采样完成后,间隔一个采样间隔 $\tau$ 进行第1次递归采样及计算,具体的,在频率点 $\Gamma_k$ 处采样逆变器主电路10输出的A相电流1次得到第1次递归A相电流采样值 $I_{A1}$ ,将该第1次递归A相电流采样值 $I_{A1}$ 和初始电流值队列 $E_0$ 中的第2个~第N个初始A相电流采样值合并,且该第1次递归A相电流采样值 $I_{A1}$ 为队尾,组成一个由N个A相电流采样值组成

的第1次递归电流值队列 $E_1$ ,  $E_1 = \{I_{02}, I_{03}, \dots, I_{0N+1}\}$ , 其中,  $I_{0N+1} = I_{A1}$ ; 将该第1次递归电流值队列 $E_1$ 中的 $N$ 个A相电流采样值按照排列顺序填充进数组 $X$ , 并根据递归公式得到第1次递归采样时刻频率点 $\Gamma_k$ 处的余弦分量和第1次递归采样时刻频率点 $\Gamma_k$ 处的正弦分量, 并分别记为第1次递归采样时刻余弦分量 $A_{k1}$ 和第1次递归采样时刻正弦分量 $B_{k1}$ ;

[0068] 在第1次递归采样完成后, 间隔一个采样间隔 $\tau$ 进行第2次递归采样及计算, 具体的, 在频率点 $\Gamma_k$ 处采样逆变器主电路10输出的A相电流1次得到第2次递归A相电流采样值 $I_{A2}$ , 将该第2次递归A相电流采样值 $I_{A2}$ 和第1次递归电流值队列 $E_1$ 中的第2个~第 $N$ 个A相电流采样值合并, 且该第2次递归A相电流采样值 $I_{A2}$ 为队尾, 组成一个由 $N$ 个A相电流采样值组成的第2次递归电流值队列 $E_2$ , 将该第2次递归电流值队列 $E_2$ 中的 $N$ 个A相电流采样值按照排列顺序填充进数组 $X$ , 并根据递归公式得到第2次递归采样时刻频率点 $\Gamma_k$ 处的余弦分量和第2次递归采样时刻频率点 $\Gamma_k$ 处的正弦分量, 并分别记为第2次递归采样时刻余弦分量 $A_{k2}$ 和第2次递归采样时刻正弦分量 $B_{k2}$ ;

[0069] 依次类推, 第 $n$ 次递归采样得到一个第 $n$ 次递归A相电流采样值 $I_{An}$ 和一个由 $N$ 个A相电流采样值组成的第 $n$ 次递归电流值队列 $E_n$ ,  $n$ 为 $N_c$ 次递归采样中的任意一次,  $n=1, 2, \dots, N_c$ ; 将该第 $n$ 次递归电流值队列 $E_n$ 中的 $N$ 个A相电流采样值按照排列顺序填充进数组 $X$ , 并根据递归公式得到第 $n$ 次递归采样时刻频率点 $\Gamma_k$ 处的余弦分量和第 $n$ 次递归采样时刻频率点 $\Gamma_k$ 处的正弦分量, 并分别记为当前时刻余弦分量 $A_{kn}$ 和当前时刻正弦分量 $B_{kn}$ ;

[0070] 所述递归公式的表达式如下:

$$[0071] \quad \begin{cases} A_{kn} = A'_k + \frac{2}{N}(I_{An} - x_i) \cos[2\pi k(N+1)\tau] \\ B_{kn} = B'_k + \frac{2}{N}(I_{An} - x_i) \sin[2\pi k(N+1)\tau] \end{cases}$$

[0072] 式中,  $A'_k$ 为当前时刻的上一采样时刻得到的余弦分量,  $B'_k$ 为当前时刻的上一采样时刻得到的正弦分量, 具体的:

[0073] 当 $n=1$ 时,  $A'_k = A_{k0}$ ,  $B'_k = B_{k0}$ ;

[0074] 当 $n>1$ 时,  $A'_k = A_{kn-1}$ 即第 $n-1$ 次递归采样时刻得到的余弦分量,  $B'_k = B_{kn-1}$ , 即为第 $n-1$ 次递归采样时刻得到的正弦分量;

[0075] 步骤3.2, 在仿真时长内, 按照步骤3.1的方法, 每隔一个采样间隔 $\tau$ 采样一次, 并进行一次递归计算, 最后得到第 $N_c$ 次采样时刻的余弦分量和正弦分量, 并分别记为仿真余弦分量 $A_k$ 和仿真正弦分量 $B_k$ ;

[0076] 将A相电流在频率点 $\Gamma_k$ 处的谐波幅值记为谐波幅值 $\text{Amp\_I}_k$ ,  $\text{Amp\_I}_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}$ ;

[0077] 步骤4, 寻找低频谐波峰值 $g$ 和高频谐波峰值 $h$

[0078] 将 $k=1, 2, 3, \dots, N_{\text{Har}}$ 分别代入步骤2、步骤3进行计算, 得到 $N_{\text{Har}}$ 个频率点对应的谐波幅值 $\text{Amp\_I}_k$ , 该 $N_{\text{Har}}$ 个频率点对应的谐波幅值 $\text{Amp\_I}_k$ 组成一个谐波幅值序列 $\text{Amp\_I}$ ,  $\text{Amp\_I} = \{\text{Amp\_I}_1, \text{Amp\_I}_2, \dots, \text{Amp\_I}_k, \dots, \text{Amp\_I}_{N_{\text{Har}}}\}$ ;

[0079] 将该谐波幅值序列 $\text{Amp\_I}$ 分成 $k < 50$ 的谐波幅值区段和 $k \geq 50$ 的谐波幅值区段, 在 $k < 50$ 的谐波幅值区段中, 取谐波幅值 $\text{Amp\_I}_k$ 的最大值记为低频最大值 $\text{Amp\_I}_g$ , 其中,  $g$ 为与低频最大值 $\text{Amp\_I}_g$ 对应的频率值, 并记为低频谐波峰值 $g$ ; 在 $k \geq 50$ 的谐波幅值区段中, 取谐波幅值 $\text{Amp\_I}_k$ 的最大值记为高频最大值 $\text{Amp\_I}_h$ , 其中,  $h$ 为与高频最大值 $\text{Amp\_I}_h$ 对应的频率值,

记为高频谐波峰值 $h$ ;

[0080] 步骤5,电网状态的辨识

[0081] 给定阈值 $\epsilon$ ,给定第一常数 $a$ 、第二常数 $b$ 、第三常数 $c$ 、第四常数 $d$ ,并设 $[a,b]$ 为串补电网的特征频段, $[c,d]$ 为弱电网的特征频段;

[0082] 判断低频谐波峰值 $g$ 和高频谐波峰值 $h$ 所处的频率是否在特征频段内,且谐波幅值是否达到给定的阈值 $\epsilon$ ,具体判断如下:

[0083] 当 $a \leq g \leq b$ 且 $\text{Amp\_I}_g / \text{Amp\_I}_{50} > \epsilon$ 时,认定此时的电网状态为串补电网,输出状态标志位 $\text{Flag}=2$ ;其中, $\text{Amp\_I}_{50}$ 为基波幅值 $\text{Amp\_I}_{50}$ ;

[0084] 当 $c \leq h \leq d$ 且 $\text{Amp\_I}_h / \text{Amp\_I}_{50} > \epsilon$ 时,认定此时的电网状态为弱电网,输出状态标志位 $\text{Flag}=1$ ;

[0085] 电网状态辨识单元50中的状态输出端输出状态标志位 $\text{Flag}$ ,辨识结束。

[0086] 在本实施例中, $a=1,b=15,c=110,d=140,\epsilon=0.00167$ 。

[0087] 图2是本发明实施例经强电网电变至弱电网,再变至串补电网的辨识结果波形。由图可见,系统在1.6s时缓起完成,此时是强电网状态;在3s时,电网变为弱电网,经过过渡时间0.2s判断在(110Hz,140Hz)特征频段有符合条件的幅值,标志位 $\text{Flag}=1$ ,辨识为弱电网;在5s时,电网由弱电网变成串补电网,经过过渡时间0.6s判断在(1Hz,15Hz)特征频段由符合条件的幅值,标志位 $\text{Flag}=2$ ,辨识为串补电网。

[0088] 图3是本发明实施例经串补电网变至弱电网,再变至强电网的辨识结果波形。由图可见,在1.6s时缓起完成后,辨识出是串补电网,标志位 $\text{Flag}=2$ ;在5s时,电网变为弱电网,经过过渡时间0.6s判断在(110Hz,140Hz)特征频段有符合条件的幅值,标志位 $\text{Flag}=1$ ,辨识为弱电网;在8s时,电网由弱电网变成强电网,经过过渡时间0.9s判断在(1Hz,15Hz)、(110Hz,140Hz)特征频段均没有符合条件的幅值,标志位 $\text{Flag}=0$ ,辨识为强电网。

[0089] 图2、3证明该发明可以很准确的辨识弱电网和串补电网。

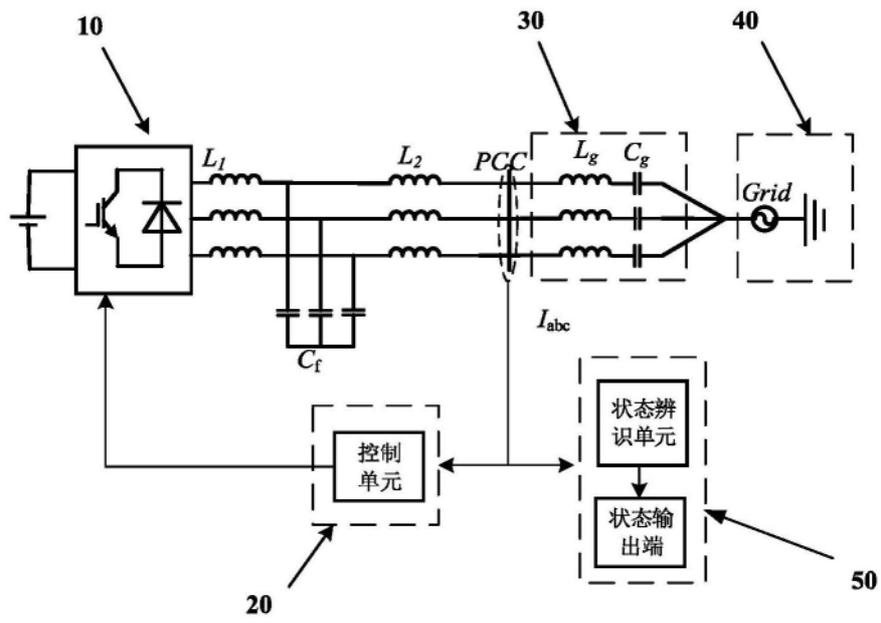


图1

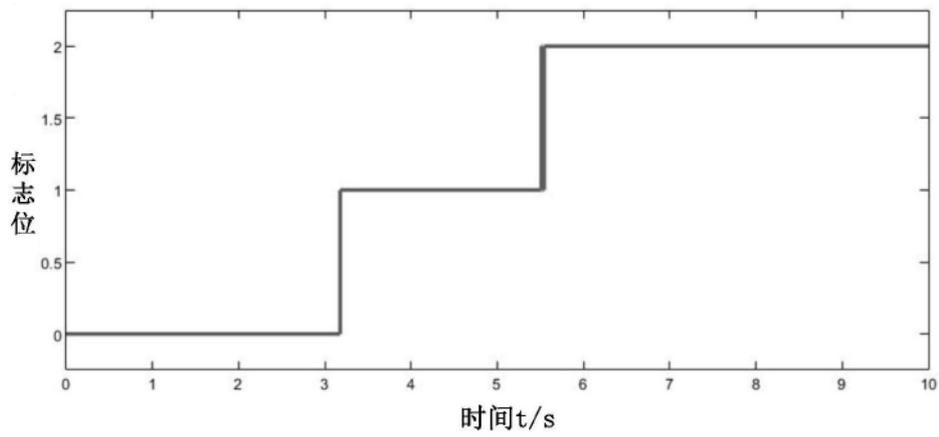


图2

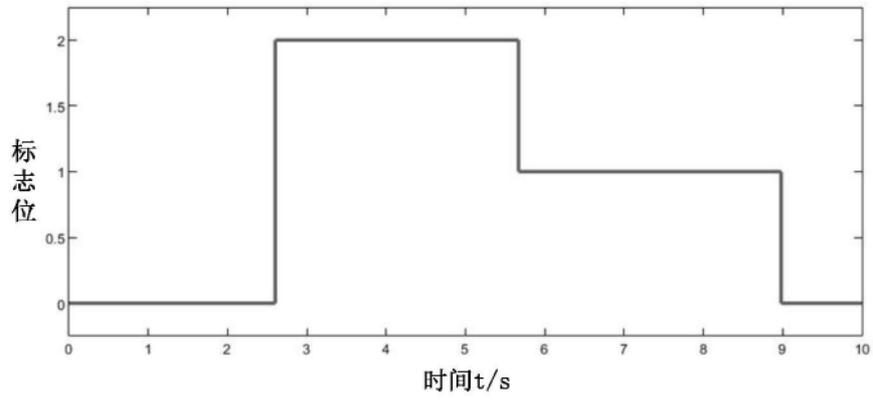


图3