

基于区间约束的主谐波电流来源判别方法

袁 林¹, 杨洪耕¹, 王智琦¹, 肖楚鹏^{2,3}

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106; 3. 南瑞(武汉)电气设备与工程能效测评中心, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对流过线路元件的谐波电流难以明确来源的问题, 提出一种基于区间约束的公共连接点(PCC)主谐波电流来源判别方法。在谐波诺顿等效电路的基础上, 分析得出谐波有功功率方向法在一定的区间内是可以完全正确有效的。通过 PCC 处测量的谐波电压和电流信息, 利用电路基本原理和严格不等式约束条件及谐波电流指标基本准则, 讨论系统侧和用户侧谐波阻抗基本性质的各类情况, 推导得出: 主谐波电流来源为用户侧的情况仅根据谐波电压和电流的相角差就可直接判别; 主谐波电流来源为系统侧的情况, 将两者相角差和简单阻抗条件相结合进行判别。通过多种实际工程场景的测量数据验证了所提方法是正确和有效的。

关键词: 区间约束; 功率方向法; 主谐波电流来源; 判别方法

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.01.021

0 引言

流过线路元件(如变压器)的谐波电流是造成其损耗增大、运行效率降低等不良影响的主要因素之一, 不利于电网经济高效运行, 更使得供电部门承受巨大的经济损失^[1-6]。目前, 少有文献从机理上研究判别流过元件的谐波电流主要来源是系统侧还是用户侧的方法, 且工程中也时常关注该问题^[4-5, 7]。基于此, 本文从机理出发, 结合基本电路定律推导出能直接通过简单条件定性判别流过线路元件主谐波电流来源的方法, 为进一步量化两侧贡献的谐波电流提供理论基础。

主谐波电流来源判别的核心是比较系统侧或用户侧各自发射谐波电流在公共连接点(PCC)的贡献度大小, 即以谐波电流指标为基本准则^[2, 8-9]。相关的判别方法多数先估计系统侧或用户侧谐波阻抗^[10-15], 然后进行判别。主要方法有波动量法^[10-12]、门限电压法^[13]、独立随机矢量协方差法^[14]和快速独立分量分析法^[15]等。波动量法根据 PCC 测量的谐波电压和电流信息变化估计谐波阻抗, 根据电网阻抗的基本属性区分估计结果是系统侧还是用户侧。独立随机矢量协方差法利用电网中谐波电压和电流近似独立、协方差为 0 的基本属性, 估计得到谐波阻抗值, 在一定程度上削弱背景谐波的影响。门限电压法是利用估计的谐波阻抗值来判断的方法。快速独立分量分析法是盲源分离方法的一种, 此方法应用于谐波阻抗的估计, 相比前述的方法有更好的效果。主谐波电流来源判别的本质是得到定性结论, 但上述方

法无论判断系统侧还是用户侧为主谐波电流来源均需先对历史数据进行计算估计, 无法通过测量的谐波电压和电流信息直接得出判别结论。

谐波有功功率方向法是在谐波状态估计的基础上提出的, 该方法简单易用, 曾在实际电网中广泛使用^[2, 8, 16], 但有相关文献指出, 该方法判断结果受系统侧和用户侧谐波源相角差影响严重, 并且两侧谐波源相角差可在整个圆周区间任意变化且无法直接测量, 因此该方法的使用受到限制^[16]。对于该方法能完全正确适用的广泛区间, 尚未有文献进行研究。

基于此, 本文基于谐波有功功率方向法的思路, 在电网物理条件限制的基础上讨论系统侧和用户侧谐波阻抗性质的各种情况, 理论分析并得到了对应情况下的区间约束判别方法。对于主谐波电流来源为用户侧的情况, 仅根据谐波电压和电流的相角差就可直接判别; 而对于主谐波电流来源为系统侧的情况, 在谐波电压和电流的相角差的基础上结合相关文献的方法大致估计用户侧阻抗范围后进行综合判别。最后, 利用多个工程场景的实测数据对本文方法进行了验证分析, 结果表明本文方法能有效地进行判别。

1 谐波有功功率方向法及分析

1.1 谐波有功功率方向法

图 1 为诺顿等效电路模型, 是有功功率方向法的基础。图中, I_s 和 I_c 分别为系统侧和用户侧谐波源电流, I_s 和 I_c 分别为两者模值大小; Z_s 和 Z_c 分别为系统侧和用户侧谐波阻抗; U_{pcc} 和 I_{pcc} 分别为监测点 PCC 处测得的谐波电压和电流, U_{pcc} 和 I_{pcc} 分别为两者模值大小。

收稿日期: 2016-10-17; 修回日期: 2017-08-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51477105)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477105)

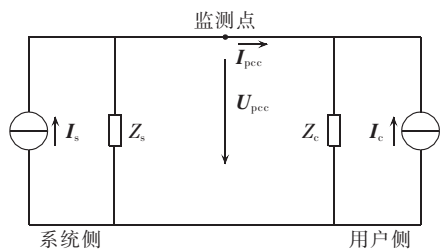


图 1 诺顿等效电路模型
Fig.1 Norton equivalent circuit model

式(1)为谐波有功功率的计算公式,可以看出,谐波有功功率方向法的本质是根据监测点(一般为PCC)谐波电压 U_{pcc} 和电流 I_{pcc} 的相角差 φ 的余弦值正负来判断哪一侧的谐波电流贡献大。

$$P = U_{pcc} I_{pcc} \cos \varphi \quad (1)$$

谐波有功功率方向法认为,谐波的有功功率由系统侧流向用户侧,即 $P > 0$ 时,系统侧谐波电流贡献大;当谐波的有功功率由用户侧流向系统侧,即 $P < 0$ 时,用户侧谐波电流贡献大^[2,16]。

1.2 谐波电流指标

根据电路的叠加定理,PCC处的谐波电流 I_{pcc} 是由系统侧贡献谐波电流 I_{spcc} 和用户侧贡献谐波电流 I_{cpcc} 两部分叠加而成,如式(2)所示。

$$I_{pcc} = I_{spcc} - I_{cpcc} = \frac{Z_c I_s - Z_s I_c}{Z_s + Z_c} \quad (2)$$

谐波电流 I_{pcc} 相量分解如图2所示, I_{sf} 和 I_{cf} 分别为 I_{spcc} 和 I_{cpcc} 在 I_{pcc} 方向的投影大小,其各自与 I_{pcc} 的比值为谐波电流指标。由余弦定理可得:

$$I_{sf} - I_{cf} = \frac{I_{spcc}^2 - I_{cpcc}^2}{I_{pcc}} = \frac{(|Z_s| I_s)^2 - (|Z_c| I_c)^2}{|Z_s + Z_c|^2 I_{pcc}} \quad (3)$$

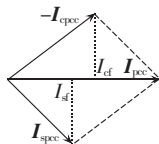


图 2 电流相量分解
Fig.2 Decomposition of current phasor

由上式可以得出,谐波电流指标的本质是判断 $|Z_s| I_s$ 和 $|Z_c| I_c$ 的大小。

1.3 谐波有功功率方向法适用分析

文献[16]指出,谐波有功功率方向法并不完全有效,存在判断误区。实际电网能得到PCC处测量的各次谐波电压和电流大小及相角差,且相角差可在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 区间变化。以表1实验参数为例,以PCC处谐波电压 U_{pcc} 和电流 I_{pcc} 的相角差 φ 为变化量,步长取 1° ,得到的实验结果如图3所示。

从图中结果可以看出,区间1中, $|Z_s| I_s > |Z_c| I_c$ 且 $P > 0$; 区间2内, $|Z_c| I_c > |Z_s| I_s$ 且 $P < 0$,符合谐波有功功率方向法的判断。即谐波有功功率方向法在

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

| 阻抗性质 | U_{pcc}/V | I_{pcc}/A | Z_s/Ω | Z_c/Ω |
|--------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| 两侧同为感性 | 15 | 1 | $1+j8$ | $5+j25$ |

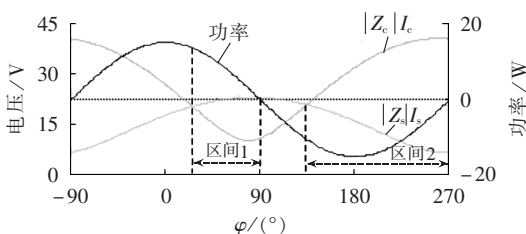


图 3 谐波有功功率方向法判断条件
Fig.3 Judgment conditions of harmonic active power direction method

一定的区间内是能完全正确判断哪一侧谐波电流指标更大,存在一定的适用区间。

2 基于区间约束的主谐波电流来源判别

2.1 基本原理

主谐波电流来源判别的目的是比较两侧谐波电流指标的大小,实质是比较 $|Z_s| I_s$ 和 $|Z_c| I_c$ 的大小。根据基本电路原理,从图1可以得出:

$$\begin{cases} I_s Z_s = U_{pcc} + I_{pcc} Z_s \\ I_c Z_c = U_{pcc} - I_{pcc} Z_c \end{cases} \quad (4)$$

上式两边同时取模值,并平方可得:

$$E_s^2 = U_{pcc}^2 + 2U_{pcc} I_{pcc} |Z_c| \frac{\cos(\varphi - \theta_s)}{k} + I_{pcc}^2 \frac{|Z_c|^2}{k^2} \quad (5)$$

$$E_c^2 = U_{pcc}^2 + 2U_{pcc} I_{pcc} |Z_c| \cos(\varphi - \theta_c) + I_{pcc}^2 |Z_c|^2 \quad (6)$$

$$E_s = |I_s Z_s|, E_c = |I_c Z_c|, k = |Z_c| / |Z_s| \quad (7)$$

其中, θ_s 和 θ_c 分别为系统侧和用户侧谐波阻抗角; k 为用户侧与系统侧谐波阻抗模值的比值,一般 $k > 1$ 。

实际电网物理限制使得谐波阻抗的实部一定为正值,也就是谐波阻抗角 θ_s 和 θ_c 介于 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 之间,理论上,阻抗角介于 $[0^\circ, 90^\circ]$ 为感性,介于 $[-90^\circ, 0^\circ]$ 为容性^[10]。而电网中元件和负荷大多呈感性,对于系统侧阻抗而言,其性质通常也为感性且感抗分量与电阻分量的比值大于1,并且电压等级越高这个比值越大^[17],易得出其阻抗角介于 $[45^\circ, 90^\circ]$ 区间。对于用户侧阻抗而言,文献[18-19]给出了负荷的谐波阻抗模型及其计算方法,在不考虑无功补偿装置和城市配电网大量电缆的情况下,配电网负荷的功率因数大多数小于等于0.85^[20],取负荷功率因数为0.85,各次谐波的阻抗角如图4所示。可以看出,各次谐波的阻抗角均介于 $[45^\circ, 90^\circ]$ 区间且阻抗性质为感性,在功率因数小于0.85的其他情况也能得到相同的结论。据文献[21-22],在大量使用电缆和中低压电容器等无

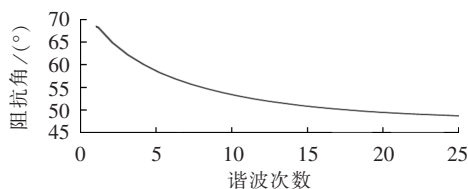


图 4 各次谐波阻抗相角
Fig.4 Phase angle of each harmonic impedance

功补偿装置的城市配电网中,谐振点仅可能出现在高次谐波,而导致中低次谐波的阻抗性质为容性,但此时一般容抗分量小于电阻分量,因此谐波阻抗角介于 $[-45^\circ, 0^\circ]$ 区间。

综上,为考虑两侧谐波阻抗特性,满足电网中常见的工程场景,且使得方法在使用过程中简单易行,在本文的分析研究中,谐波阻抗性质为感性时,视作其阻抗角介于 $[45^\circ, 90^\circ]$ 区间;谐波阻抗性质为容性时,视作其阻抗角介于 $[-45^\circ, 0^\circ]$ 区间。

2.2 主谐波电流来源为用户侧的约束条件

为得到主谐波电流来源为用户侧的约束条件,将式(6)与式(5)作差可得式(8),若其等号右边部分大于0成立,则 $E_c^2 > E_s^2$,即主谐波电流来源为用户侧。以谐波阻抗性质相同和不同讨论以下4种情况。

$$E_c^2 - E_s^2 = I_{\text{pcc}}^2 |Z_c|^2 \left(1 - \frac{1}{k^2} \right) -$$

$$2I_{\text{pcc}}U_{\text{pcc}}|Z_c| \left[\frac{1}{k} \cos(\varphi - \theta_s) + \cos(\varphi - \theta_c) \right] \quad (8)$$

a. 系统侧和用户侧谐波阻抗性质同为感性,即 θ_s 和 θ_c 均位于 $[45^\circ, 90^\circ]$,且相角差 φ 位于 $[180^\circ, 270^\circ]$ 区间,则可得 $\cos(\varphi - \theta_s) < 0$ 且 $\cos(\varphi - \theta_c) < 0$;由 $k > 1$ 可得 $1 - 1/k^2 > 0$ 。因此,式(8)等号右边部分大于0恒成立,得到主谐波电流来源为用户侧的结论。

b. 系统侧和用户侧谐波阻抗性质均为容性,即 θ_s 和 θ_c 均位于 $[-45^\circ, 0^\circ]$,主谐波电流来源为用户侧的区间约束为相角差 φ 位于 $(90^\circ, 225^\circ]$ 区间。

c. 系统侧谐波阻抗性质为感性和用户侧为容性,即 θ_s 介于 $[45^\circ, 90^\circ]$, θ_c 介于 $[-45^\circ, 0^\circ]$,相角差 φ 介于 $[180^\circ, 225^\circ]$ 区间,得 $\cos(\varphi - \theta_c) < 0$, $\cos(\varphi - \theta_s) < 0$;由 $k > 1$ 可得 $1 - 1/k^2 > 0$ 。故式(8)等号右边部分大于0恒成立。所以,主谐波电流来源为用户侧的区间约束为相角差 φ 位于 $[180^\circ, 225^\circ]$ 区间。

d. 系统侧谐波阻抗性质为容性和用户侧为感性,即 θ_s 位于 $[-45^\circ, 0^\circ]$, θ_c 位于 $[45^\circ, 90^\circ]$,主谐波电流来源为用户侧区间约束为相角差 φ 位于 $[180^\circ, 225^\circ]$ 区间。

综上,基于图1所示的参考方向和两侧各种阻抗性质的各类情况,得到主谐波电流来源为用户侧的区间约束条件,如表2所示。

表2 主谐波电流来源为用户侧的约束条件
Table 2 Restrictions of harmonic current mainly origins from user side

| 阻抗性质 | | 相角差 φ 范围 |
|-------|-------|--------------------------|
| Z_s | Z_c | |
| 感性 | 感性 | $[180^\circ, 270^\circ)$ |
| 感性 | 容性 | $[180^\circ, 225^\circ]$ |
| 容性 | 容性 | $(90^\circ, 225^\circ]$ |
| 容性 | 感性 | $[180^\circ, 225^\circ]$ |

2.3 主谐波电流来源为系统侧的约束条件

为得到主谐波电流来源为系统侧的约束条件,

将式(5)与式(6)作差可得:

$$E_s^2 - E_c^2 = I_{\text{pcc}}^2 |Z_c|^2 \left(\frac{1}{k^2} - 1 \right) +$$

$$2I_{\text{pcc}}U_{\text{pcc}}|Z_c| \left[\frac{1}{k} \cos(\varphi - \theta_s) + \cos(\varphi - \theta_c) \right] \quad (9)$$

若式(9)等号右边部分大于0成立,则 $E_s^2 > E_c^2$,即主谐波电流来源为系统侧。以谐波阻抗性质相同和不同讨论以下4种情况。

a. 系统侧和用户侧谐波阻抗性质同为感性,即 θ_s 和 θ_c 均位于 $[45^\circ, 90^\circ]$,相角差 φ 位于 $[0^\circ, 90^\circ)$ 区间,易得 $\cos(\varphi - \theta_s) > 0$ 且 $\cos(\varphi - \theta_c) > 0$ 但 $1/k^2 - 1 < 0$,因此无法直接得出结论。

根据余弦相关知识易得 θ_s 在式(10)条件下, E_s^2 取最小值 $E_{s\text{min}}^2$;同理, θ_c 在式(11)条件下, E_c^2 取最大值 $E_{c\text{max}}^2$ 。只要满足条件 $E_{s\text{min}}^2 > E_{c\text{max}}^2$ 就可得到结论。

$$\theta_s = \begin{cases} 90^\circ & \varphi \in [0^\circ, 67.5^\circ) \\ 45^\circ & \varphi \in [67.5^\circ, 90^\circ) \end{cases} \quad (10)$$

$$\theta_c = \begin{cases} 90^\circ & \varphi \in [0^\circ, 67.5^\circ) \\ 45^\circ & \varphi \in [67.5^\circ, 90^\circ) \end{cases} \quad (11)$$

令式(9)大于0,结合式(10)、(11),可得到化简后附加约束条件:

$$\begin{cases} \cos(\varphi - 90^\circ) > \frac{I_{\text{pcc}}|Z_c|}{2U_{\text{pcc}}} & \varphi \in [0^\circ, 67.5^\circ) \\ \cos(\varphi - 45^\circ) > \frac{I_{\text{pcc}}|Z_c|}{2U_{\text{pcc}}} & \varphi \in [67.5^\circ, 90^\circ) \end{cases} \quad (12)$$

b. 系统侧和用户侧谐波阻抗性质同为容性,即 θ_s 和 θ_c 均在 $[-45^\circ, 0^\circ]$,主谐波电流来源为系统侧的约束是相角差 φ 位于 $(-90^\circ, -22.5^\circ]$ 区间且满足式(13)所示附加约束条件。

$$\cos \varphi > \frac{I_{\text{pcc}}|Z_c|}{2U_{\text{pcc}}} \quad (13)$$

c. 系统侧谐波阻抗性质为感性和用户侧为容性,即 θ_s 位于 $[45^\circ, 90^\circ]$, θ_c 位于 $[-45^\circ, 0^\circ]$,且相角差 φ 位于 $[0^\circ, 45^\circ]$ 区间。易得 θ_s 为 90° 时, E_s^2 取 $E_{s\text{min}}^2$; θ_c 为 -45° 时, E_c^2 取 $E_{c\text{max}}^2$ 。令式(9)大于0可得到化简后附加约束条件如式(14)所示。

$$\cos(\varphi + 45^\circ) > \frac{I_{\text{pcc}}|Z_c|}{2U_{\text{pcc}}} \quad (14)$$

d. 系统侧谐波阻抗性质为容性和用户侧为感性,即 θ_s 在 $[-45^\circ, 0^\circ]$, θ_c 在 $[45^\circ, 90^\circ]$,主谐波电流来源为系统侧的约束是相角差 φ 介于 $[0^\circ, 45^\circ]$ 区间且满足式(15)所示附加约束条件。

$$\cos(\varphi - 90^\circ) > \frac{I_{\text{pcc}}|Z_c|}{2U_{\text{pcc}}} \quad (15)$$

通过上文的分析可知,在主谐波电流来源为系统侧的约束的附加条件中含有用户侧谐波阻抗模值,仅在用户侧谐波源波动较小时,可以得到较好的阻抗估计结果^[10-11,13]。因此,本文仅利用相关方法估

计用户侧谐波阻抗模值范围进行辅助判断。

实际中低压配电网的电压波形通常为平顶波,因此可以用谐波诺顿电路来等效用户侧模型。文献[14-15,23]是近年来新提出的谐波阻抗计算的方法,在测得的谐波电压和电流的相角差 φ 满足区间约束条件,且用户侧谐波波动较小时,可以较精确地计算用户侧谐波阻抗模值。同时为尽量使本文方法在应用中简单易行,本文采用文献[15]方法对用户侧谐波阻抗的模值进行计算。

综上所述,根据图 1 所示的参考方向和两侧各种阻抗性质分类,得到主谐波电流来源为系统侧的区间约束条件,如表 3 所示。

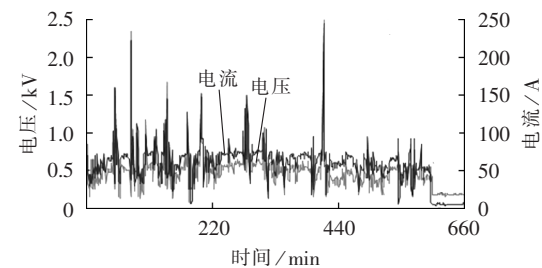
表 3 主谐波电流来源为系统侧的约束条件
Table 3 Restrictions of harmonic current mainly origins from system side

| 阻抗性质 | | 相角差 φ 范围 | 附加条件 |
|-------|-------|----------------------------|-------|
| Z_s | Z_c | | |
| 感性 | 感性 | $[0^\circ, 90^\circ)$ | 式(12) |
| 感性 | 容性 | $[0^\circ, 45^\circ)$ | 式(14) |
| 容性 | 容性 | $(-90^\circ, -22.5^\circ]$ | 式(13) |
| 容性 | 感性 | $[0^\circ, 45^\circ]$ | 式(15) |

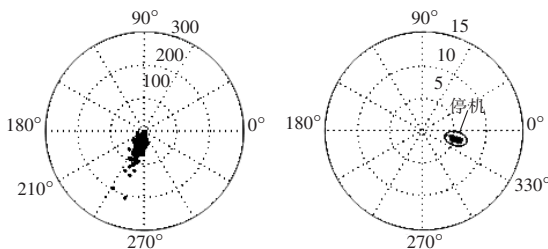
3 实例验证

3.1 电弧炉负荷算例

图 5 为来自某工业电弧炉厂 150 kV 母线(PCC)的 3 次谐波电压和电流实测数据,这一段时间内有约 1 h 的停机时段,且已知 PCC 两侧的该次谐波阻抗性质均呈感性。



(a) 3 次谐波电压和电流幅值



(b) 3 次谐波电压和电流相角差

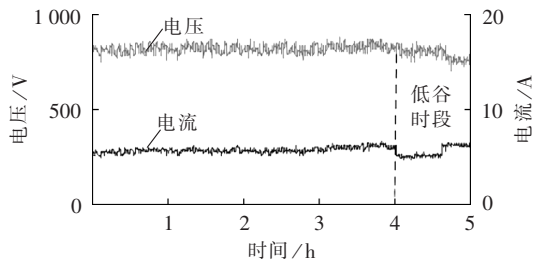
图 5 3 次谐波电压和电流实测数据
Fig.5 Measured data of 3rd harmonic voltage and current

图 5 中,由于电弧炉在点弧和熄弧工作状态频繁变化,0~600 min 工作时间段谐波电压和电流幅值波动十分明显,但谐波电压和电流的相角差几乎全集中

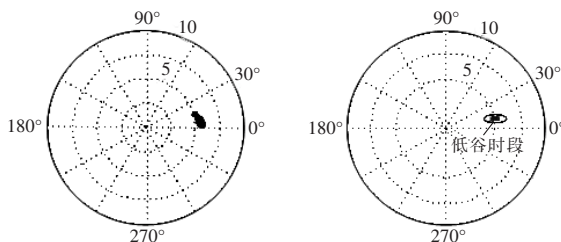
在 $[210^\circ, 270^\circ]$ 的 60° 区间。根据表 2 的约束条件,可得用户侧在 PCC 贡献的谐波电流更大,主谐波电流来源为用户侧的结论。众所周知,采用晶闸管整流电弧炉负荷在工作时会发射大量的谐波电流,特别是中低次谐波^[6]。同时在 600~660 min 的停机时段,PCC 处的谐波电压和电流幅值急剧减小且两者相角差集中在 $[330^\circ, 360^\circ]$ 区间,不在表 2 的约束条件内,也可得到用户侧对 PCC 处该次谐波电流指标贡献更大;并且文献[11]的评估结果显示用户侧发射的谐波水平更大。所以,以上的分析与结果验证了本文方法的正确性与有效性。

3.2 城市配电网算例

图 6 为某城市电网临近直流落点的 66 kV 母线(PCC)11 次谐波电压和电流某天的 5 h 实测数据,整个数据区间有约 1 h 的低谷用电时段。已知 PCC 等效的系统侧谐波阻抗性质为感性,由于该城市电网大量使用地下电缆,同时为保证用户电能质量装有大量的电容器等装置,而导致用户侧该次谐波阻抗性质为容性^[17]。



(a) 11 次谐波电压和电流幅值



(b) 11 次谐波电压和电流相角差

图 6 11 次谐波电压和电流实测数据

Fig.6 Measured data of 11th harmonic voltage and current

从图 6 中可以看出,0~4 h 时间段的正常用电时段,谐波电压和电流幅值变化很小,这也是用户侧谐波阻抗估计的基本条件,同时可知谐波电压和电流的相角差集中在 $[0^\circ, 30^\circ]$ 区间。利用表 3 的约束条件,可知当前情况满足主谐波电流来源为系统侧的相角差 φ 的范围,还需要满足式(14)所示附加条件。采用文献[15]的方法对用户侧谐波阻抗模值进行计算,得到该时间段内 95% 概率大值的 PCC 相关参数如表 4 所示,代入式(14),易知满足此附加约束条件,因此可以判断当前情况下主谐波电流来源为系统侧。

表 4 PCC 相关参数
Table 4 Relative parameters of PCC

| $ Z_c /\Omega$ | U_{pcc}/V | I_{pcc}/A | $\varphi/(\circ)$ |
|----------------|-------------|-------------|-------------------|
| 103.7 | 781 | 5.3 | 15.2 |

从 4~5 h 的低谷时段可以看出,其相比于正常时段 PCC 处该次谐波电压和电流幅值均没有明显的减小,谐波电压与电流的相角差仍集中在 $[0^\circ, 30^\circ]$ 区间。文献[17]采用 Digsilent 对该城市电网进行仿真计算,得到临近直流落点的各支路母线 11 次谐波电流测量值的约 70% 由 500 kV 直流落点贡献,因此可确定系统侧对 PCC 处 11 次谐波电流贡献更大,主谐波电流来源为系统侧。所以,上述结果验证了本文方法的正确性与有效性。

4 结论

对谐波有功功率方向法进行分析,并从原理上推导得到基于区间约束的主谐波电流来源判别方法,得出以下结论。

a. 分析并得出谐波有功功率方向法在一定区域内可以完全准确地得到结论。结合电路基本原理和严格不等式约束推证得到的区间约束条件,可以有效地解决实际工程中难以判断流过线路元件谐波电流主要来源的问题。

b. 在电网基本特性下,广泛研究了两侧谐波阻抗性质的各类情况,能满足工程使用的大多数场景。最后,使用多个工程场景实测数据分析结果验证了方法的正确性与有效性。

从机理推证的区间约束条件判别主谐波电流来源的方法,为谐波有功功率方向法的使用和定量划分电力设备因谐波电流造成损失提供了理论基础,有较大的理论意义和工程实用价值。

参考文献:

[1] WILSON X, YILU L. A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 804-811.

[2] WILSON X, XIAN L, YILU L. An investigation on the validity of power-direction method for harmonic source determination[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 214-219.

[3] LI C, XU W, TAYJASANANT T. A critical impedance based method for identifying harmonic sources[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 671-678.

[4] 刘华,刘锐,付洋洋,等. 基于阻抗边界法的换流变压器箱壳谐波损耗计算[J]. 高电压技术, 2015, 41(9): 3171-3176.

LIU Hua, LIU Rui, FU Yangyang, et al. Calculation of harmonic loss in converter transformer tank shells based on the impedance boundary condition[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(9): 3171-3176.

[5] 叶建新,黄健豪,张禄亮,等. 东莞配电网谐波对配电变压器危害分析[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 146-149.

YE Jianxin, HUANG Jiaohao, ZHANG Luliang, et al. Analysis of harmonic harm to distribution transformers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 146-149.

[6] 郎维川. 供电系统谐波的产生、危害及其防护对策[J]. 高电压技术, 2002, 28(6): 30-31.

LANG Weichuan. Generation and harm of harmonic in power supply system and the countermeasure[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(6): 30-31.

[7] 张良县,陈模生,彭宗仁,等. 非正弦负载电流下特高压换流变压器绕组的谐波损耗分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2452-2459.

ZHANG Liangxian, CHEN Mosheng, PENG Zongren, et al. Study on the harmonic losses of UHV converter transformer windings subject to non-sinusoidal load current[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2452-2459.

[8] 周林,张凤,栗秋华,等. 配电网中谐波源定位方法综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 103-108.

ZHOU Lin, ZHANG Feng, LI Qiuhua, et al. Methods for localizing the harmonic source in power distribution network [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(5): 103-108.

[9] 华回春,贾秀芳,曹东升,等. 电能质量数据交换格式下的谐波责任估计[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3110-3117.

HUA Huichun, JIA Xiufang, CAO Dongsheng, et al. Harmonic contribution estimation under power quality data interchange format[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3110-3117.

[10] YANG H, PIROTTI P, ROBERT A. Harmonic emission levels of industrial loads statistical assessment[J]. CIGRE, 1996, 96: 1936-1996.

[11] 惠锦,杨洪耕,叶茂清. 基于阻抗归一化趋势判别的谐波发射水平估计[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 73-80.

HUI Jin, YANG Honggeng, YE Maoqing. Assessing harmonic emission level based on the impedance gathering trend discrimination[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 73-80.

[12] 车权,杨洪耕. 基于稳健回归的谐波发射水平估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 39-42.

CHE Quan, YANG Honggeng. Assessing the harmonic emission level based on robust regression method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 39-42.

[13] 孙媛媛,李培鑫,尹志明. 基于门限电压法的谐波源定位[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 145-151.

SUN Yuanyuan, LI Peixin, YIN Zhiming. Harmonic source identification based on threshold voltage method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 145-151.

[14] 惠锦,杨洪耕,林顺富,等. 基于独立随机矢量协方差特性的谐波发射水平评估方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 27-31.

HUI Jin, YANG Honggeng, LIN Shunfu, et al. Assessment method of harmonic emission level based on covariance characteristic of random vectors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7): 27-31.

[15] 赵熙,杨洪耕. 基于快速独立分量分析的系统侧谐波阻抗计算方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 139-144.

ZHAO Xi, YANG Honggeng. Method of calculating system-side harmonic impedance based on FastICA[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 139-144.

[16] XU W. Power direction method cannot be used for harmonic source detection[C]//Power Engineering Society Summer Meeting. [S.l.]: IEEE, 2000: 873-876.

- [17] 李勇,徐友平,肖华,等. 华中电网稳定计算用负荷模型参数仿真研究[J]. 电网技术,2007,31(5):17-20.
LI Yong,XU Youping,XIAO Hua,et al. Simulation study on load model parameters for stability analysis of central china power grid[J]. Power System Technology,2007,31(5):17-20.
- [18] OBERT A,DEFLANDRE T. Guide for assessing the network harmonic impedance[J]. Electra,1996(167):96-131.
- [19] WU X,SADULLAH S,MATTHEWS B,et al. Nodal harmonic impedance derivation of AC network in PSS/E[C]//9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. [S.l.]:IET,2010:1-5.
- [20] 李建超. 配电网谐波调查及谐波网损计算[D]. 济南:山东大学,2008.
LI Jianchao. Investigation of harmonics and calculation of harmonic losses in distribution systems[D]. Ji'nan:Shandong University,2008.
- [21] 陈甜甜,胡蓉,金祖洋,等. 邻近直流输电落点的城市电网谐波传导特性分析[J]. 电网技术,2015,39(10):3000-3004.
CHEN Tiantian,HU Rong,JIN Zuyang,et al. Analysis research on harmonic transmission characteristics of urban power network adjacent to UHVDC terminal location[J]. Power System Technology,2015,39(10):3000-3004.
- [22] 王建勋,刘会金,刘春阳. 基于复合判据的谐波/间谐波源识别方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):63-69.

- WANG Jianxun,LIU Huijin,LIU Chunyang. Identification of harmonic and interharmonic sources based on composite criterion[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(7):63-69.
- [23] 邱思语,杨洪耕. 改进的加权支持向量机回归的谐波发射水平估计方法[J]. 电工技术学报,2016,31(5):85-90.
QIU Siyu,YANG Honggeng. Assessment method of harmonic emission level based on the improved weighted support vector machine regression[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(5):85-90.

作者简介:



袁林

袁林(1992—),男,重庆人,硕士研究生,研究方向为电能质量分析与评估(**E-mail**: starsparkle@126.com);

杨洪耕(1949—),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,博士,长期从事电能质量、无功电压控制、智能电网等方面的教学和科研工作(**E-mail**: pqlab9@163.com);

王智琦(1991—),男,黑龙江佳木斯人,硕士研究生,研究方向为电能质量分析与控制(**E-mail**: pqlab123@163.com)。

Identification method for main source of harmonic current based on boundary restriction

YUAN Lin¹, YANG Honggeng¹, WANG Zhiqi¹, XIAO Chupeng^{2,3}

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. NARI Group Corporation(State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

3. NARI(Wuhan) Equipment & Engineering Efficiency Evaluation Center, Wuhan 430074, China)

Abstract: Since the source of harmonic current flowing through the transmission line is difficult to distinguish, an identification method for main source of harmonic current at the PCC(Point of Common Coupling) is proposed based on boundary restriction. On the basis of Norton equivalent circuit of harmonic, it is deduced that the harmonic active power direction method is completely correct and effective in a certain range. According to the harmonic voltage and current information measured at PCC, various essential properties of harmonic impedance at both system and user sides are discussed by basic circuit principles, strict inequality restrictions and basic rules of harmonic current index, which deduces that, the situation that harmonic current mainly originates from user side can be directly identified by the phase angle difference between harmonic voltage and current, while the situation of the system side can be identified by the combination of the phase angle difference and simple impedance conditions. The correctness and effectiveness of the proposed method are verified by measurement data of several practical engineering scenarios.

Key words: boundary restriction; power direction method; main source of harmonic current; identification method