

用户侧谐波源对 PCC 谐波水平的影响与区分

田立亭, 程林, 孙元章, 贾学东

(清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 按照谐波源定位理论判断的结果, 主要谐波源消失后反而可能加剧公共耦合点(PCC)处的谐波水平。从用户侧谐波源对 PCC 谐波电压、谐波电流的影响着手, 提出了助增/助减谐波源的概念, 并定义了区分助增/助减谐波源的综合判据, 通过算例和 IEEE 测试系统进行了计算和仿真。所提出的助增/助减谐波源的概念和综合判据弥补了目前谐波定位理论的不足, 对谐波治理方案的制订具有重要意义。

关键词: 助增谐波源; 助减谐波源; 谐波源定位

Effect of custom harmonic sources on PCC harmonic level

TIAN Li-ting, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang, JIA Xue-dong

(State Key Laboratory of Power Systems of Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Harmonic pollution is one of the problems of power quality. Considering the point of common coupling (PCC), harmonic sources can exist in both the utility side and the custom side. And the study about harmonic management mostly focuses on the localization of harmonic source. This paper derives the condition in which the contributions of custom harmonic sources decrease the harmonic level at PCC. And it testifies the distortion could be worse after the custom harmonic source is eliminated, even if the custom side is judged as the main pollution source. The definition of strengthening/weakening harmonic source is proposed on the study of both voltage and current distortion. An index is suggested to determine whether the custom harmonic sources weaken the harmonic pollution. The result performs on an IEEE industrial test system is reported. The concept and method proposed in this paper reinforces the harmonic source localization principle.

Key words: strengthening harmonic source; weakening harmonic source; localization

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)21-0059-05

0 引言

公共电网中的谐波污染带来各种问题, 畸变的电压危害设备正常使用, 畸变的电流在造成线损增加的同时引起谐波在网络中扩散。为了控制公共电网的谐波污染, 国际国内都制定了相应标准以限定用户的谐波发射水平。其中, GB/T 14549-93 规定了各电压等级的总谐波畸变率限值, 各单次谐波电压含有率限值, 以及公共点注入谐波电流的允许值^[1]。虽然国标中对电压、电流限值都有规定, 对于单个畸变设备, 只对其谐波电流发射水平进行评估^[2]。

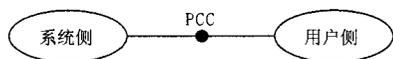


图 1 公共耦合点 (PCC)

Fig.1 Point of Common Coupling (PCC)

由于谐波源的广泛分布, 系统侧往往存在背景谐波。在这种情况下, 并不是所有谐波源的投入都会危害到 PCC (图 1) 的电能质量。两侧谐波源相

互影响, 相互作用, 用户谐波源可能抵消系统谐波源在 PCC 造成的污染, 盲目地对用户进行惩罚和治理, 往往不能达到理想效果甚至适得其反。

目前, 国内外关于谐波管理的研究主要集中在谐波的定位和检测, 即区分并量化系统侧和用户侧对 PCC 谐波污染的责任^[3]。事实上, PCC 处的谐波电压、电流为两侧谐波源各自作用的矢量叠加的结果, 谐波定位和检测只是从幅值上考察了两侧谐波源的发射水平, 而忽略了两者的相位关系。文献[4]通过相量图分析, 指出了两侧谐波电流互相削弱现象, 但没有给出定量的方法来确定这种相位关系。

论文从用户侧谐波源对 PCC 谐波水平的影响出发, 指出谐波定位理论的缺陷, 进而提出助增谐波源和助减谐波源的概念和定义, 从谐波电压和谐波电流两方面对助增和助减谐波源做出评定, 并提出综合定量指标来进行判别。论文指出当判断用户侧为助减谐波源时, 其对 PCC 处的电能质量起到有益

作用, 并通过算例和IEEE测试系统加以验证。

1 用户侧谐波源对 PCC 谐波电压和谐波电流的影响

关于谐波定位和检测的方法多建立在诺顿(Norton)或戴维南(Thevenin)等效电路基础上^[5,6], 这些工作的核心在于 PCC 两侧谐波阻抗的测量。本文采取 Norton 等效电路, 将用户和系统分别等效为谐波阻抗与恒定电流源的并联, 假设系统三相对称, PCC 处电压、电流相量及两侧谐波阻抗已知, 应用图 2 所示的电路对 PCC 处的某次谐波电压和谐波电流进行研究。需要指出, 实际非线性负荷的电压电流特性往往比较复杂, 并不能表示成恒流源。该模型只适用于供电电压畸变不是太严重的情形。

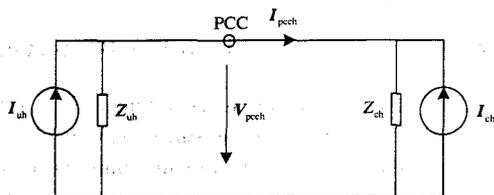


图 2 谐波源分析等效电路

Fig.2 Equivalent circuit for the harmonic analysis

图 2 为 h 次谐波对应的等效电路, Z_{uh} 、 Z_{ch} 为相应的谐波阻抗。简便起见, 若无注明, 以下将省去表示谐波次数的下标 h 。

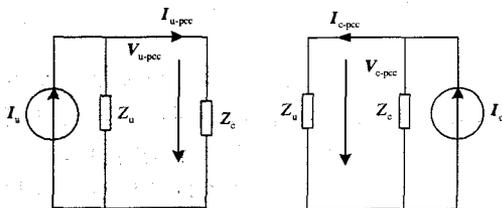


图 3 两侧谐波源贡献的区分

Fig.3 Determination of harmonic source contributions

由于 I_u 、 I_c 是恒流源, 可应用叠加原理对其进行分析, 如图 3 所示。从两侧谐波源对 PCC 处谐波电流的贡献看, 若 $I_{c-pcc}/I_{u-pcc} < 1$, 则系统侧为主要谐波源, 即供电方应对电流畸变负主要责任, 反之用户侧为主要谐波源, 用户应承担主要责任。如果从对 PCC 谐波电压的贡献看, 则有: 若 $V_{c-pcc}/V_{u-pcc} < 1$, 则系统侧为主要谐波源, 反之, 用户侧为主要谐波源。

显然, 在系统无背景谐波的情况下, 用户侧谐波源的投入必定会恶化公共点电能质量。但当系统侧存在谐波源时, 便不能直接判断用户谐波源对公共点电能质量的影响。谐波定位无法表现出用户侧

谐波源对 PCC 谐波水平的实际影响。因此需要比较用户侧谐波电流注入前后 PCC 处的谐波电压和谐波电流的幅值, 便可以得知用户侧谐波源投入后对 PCC 处的谐波水平是助增还是助减。

判定用户侧谐波源为主要/次要谐波源与判断谐波源的助增/助减作用是两个不同的概念。我们分别推导出判定用户侧为次要谐波源的关系式和判断用户侧谐波源起谐波助减作用的关系式。令图 2 电路中, $I_u = I_u \angle 0^\circ$, $I_c = I_c \angle \delta$, $Z_u = |Z_u| \angle \alpha_u$, $Z_c = |Z_c| \angle \alpha_c$, $Z_u // Z_c = Z \angle \alpha$ 。

1) 考察谐波电压水平

$$\frac{V_{c-pcc}}{V_{u-pcc}} = \frac{I_c}{I_u} \quad (1)$$

$$\frac{V_{pcc}}{V_{u-pcc}} = \sqrt{1 + \frac{2I_c}{I_u} \cos \delta + \left(\frac{I_c}{I_u}\right)^2} \quad (2)$$

2) 考察谐波电流水平

$$\frac{I_{c-pcc}}{I_{u-pcc}} = \frac{I_c |Z_c|}{I_u |Z_u|} \quad (3)$$

$$\frac{I_{pcc}}{I_{u-pcc}} = \sqrt{1 - \frac{2I_c |Z_c|}{I_u |Z_u|} \cos(\alpha_c + \delta - \alpha_u) + \left(\frac{I_c |Z_c|}{I_u |Z_u|}\right)^2} \quad (4)$$

由式 (1)、(2) 可以得出, I_c 对谐波电压、电流的贡献为次要的条件分别为:

$$\frac{I_c}{I_u} < 1 \quad (5)$$

$$\frac{I_c}{I_u} < \left| \frac{Z_u}{Z_c} \right| \quad (6)$$

由式 (3)、(4) 可以得出, I_c 对 PCC 电压、电流波形畸变起助减作用的条件分别为:

$$\frac{I_c}{I_u} < -2 \cos \delta \quad (7)$$

$$\frac{I_c}{I_u} < 2 \left| \frac{Z_u}{Z_c} \right| \cos(\alpha_c + \delta - \alpha_u) \quad (8)$$

从式 (5) ~ (8) 可以看出, 主次谐波源的判定与两侧注入谐波电流的相位差 δ 无关, 而 δ 却决定了用户侧谐波源对 PCC 处的电能质量的影响。无论主次谐波源的区分, 还是助增/助减作用的判别, 其电压方面判据只与两侧谐波源发出的电流大小有关, 而电流方面指标还涉及到系统的谐波阻抗参数。

谐波阻抗影响谐波电流在网络中的传播和分布,在一定条件下还会引起谐振和谐波放大^[7],系统侧或用户侧要为其各自谐波阻抗的变化负责^[3]。

2 助增谐波源和助减谐波源的定义及判据

在系统存在背景谐波的前提下,针对用户侧,定义助增谐波源和助减谐波源如下:

- 1) 若用户侧谐波源的投入加剧了 PCC 处的谐波污染,则认为用户侧的谐波源为助增谐波源;
- 2) 若用户侧谐波源的投入改善了 PCC 处的谐波污染,则认为用户侧的谐波源为助减谐波源。

上节中通过单次谐波电路分析,分别从电压和电流的角度推导出助增/减谐波源的判定标准。实际上,按照国标, PCC 处的谐波水平应当从电压和电流两方面进行评估。因此,需要建立一个综合各次谐波电压、电流的指标,对用户侧谐波源的作用做出评定。本文采用加权求和的形式,定义判据:

$$J = \lambda_1 \sqrt{\frac{\sum_{h>1} (V_{\text{pcch}})^2}{\sum_{h>1} (V_{\text{u-pcch}})^2}} + \lambda_2 \sqrt{\frac{\sum_{h>1} (I_{\text{pcch}})^2}{\sum_{h>1} (I_{\text{u-pcch}})^2}} \quad (9)$$

式(9)左边的根式实际为用户谐波电流投入前后 PCC 电压 THD 的比值,右边根号为电流 THD 的比值。

类似地可以定义主次谐波源的综合判据:

$$L = \lambda_1 \sqrt{\frac{\sum_{h>1} (V_{\text{c-pcch}})^2}{\sum_{h>1} (V_{\text{u-pcch}})^2}} + \lambda_2 \sqrt{\frac{\sum_{h>1} (I_{\text{c-pcch}})^2}{\sum_{h>1} (I_{\text{u-pcch}})^2}} \quad (10)$$

式(9)、(10)中, $\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0$ 为规定的权重, $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。权重系数的取值依赖于公共节点处的电能质量要求,如若更注重电压波形,则 λ_1 可取的大一些。

综上所述,可得到判据如下:

- 1) 若 $J > 1$, 则用户侧为助增谐波源, J 越大说明用户对 PCC 电能质量危害越大;
- 2) 若 $J < 1$, 则用户侧为助减谐波源, J 越小说明用户对 PCC 电能质量的改善越明显;
- 3) 若 $L > 1$, 则用户侧为主要谐波源, L 越大说明用户对 PCC 谐波污染所负的责任越多;
- 4) 若 $L < 1$, 则用户侧为次要谐波源, L 越小说明用户对 PCC 谐波污染所负的责任越少,相应地系统侧需承担的责任越多。

下面通过具体算例,对所提出的判据进行应用。为了计算简便,假设系统侧和用户侧谐波源只含有 3 次谐波,应用图 2 中的电路,设 $I_u = 1.0 \angle 0^\circ \text{ pu}$, $I_c = I \angle \delta$, δ 从 0° 到 360° 变化,取权重为: $\lambda_1 = 0.8, \lambda_2 = 0.2$ 。

Case1: $I = 0.6 \text{ pu}, Z_u = 1.0 + j8.0 \text{ pu}, Z_c = 5.0 + j25.0 \text{ pu}$

Case2: $I = 1.1 \text{ pu}, Z_u = 1.0 + j8.0 \text{ pu}, Z_c = 5.0 - j10.0 \text{ pu}$

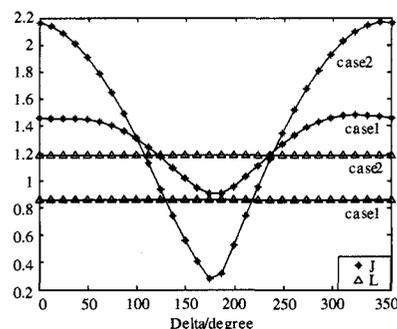


图 4 δ 变化时, J 和 L 的值

Fig.4 The value of J and L with varied δ

由图 4 可以看出 L 不随 δ 变化,而 J 在 δ 变化下发生质的改变。Case1 中,系统侧为主要谐波源, δ 在 150° 到 200° 之间时,用户侧谐波源为助减谐波源,此时若关闭用户侧谐波源将使 PCC 电能质量变差。Case2 中,用户侧为主要谐波源, δ 在 120° 到 220° 之间时,用户侧谐波源为助减谐波源,用户侧谐波源的投入同样有益于 PCC 处电能质量。可以看出, L 、 J 之间没有直接联系,用户侧为主要谐波源时也可能起助减作用。

总结前面的分析,判断用户谐波源对公共点谐波水平的影响时,应采取以下步骤:

- 1) 测量 PCC 各次谐波电压和谐波电流的幅值、相位;
- 2) 估计 PCC 两侧谐波阻抗 Z_u 、 Z_c ;
- 3) 计算背景谐波电压和电流;
- 4) 计算判据 J ,判断用户侧谐波源对 PCC 谐波水平的影响;
- 5) 计算判据 L ,判断用户侧谐波源是否为主要谐波源。

实际上,系统侧和用户侧的谐波发射水平在不断地波动。由图 4 可以看出,用户侧谐波源的助增/助减作用可能在不断地转化。在实际应用中,应当通过统计方法,对用户侧谐波源的影响做出综合评估。

需要指出是否吸收谐波功率不能作为助增/助减谐波源的判据, 如 case1 中, 令 $\delta = 10^\circ$, 用户谐波源的投入使 PCC 谐波电流从 0.2404 pu 下降到 0.218 3 pu, 即用户侧谐波源减少了 PCC 处电流波形但 I_c 发出了 1.456 2 pu 的有功谐波功率。因此, 在存在背景谐波的前提下, 对于吸收谐波功率的谐波源不能认为其对 PCC 处的电能质量起到改善作用, 同样发出谐波功率的谐波源也不一定危害 PCC 处的电能质量。

可以看出, 本判据的计算依赖于公共点测量数据以及两侧谐波阻抗的准确性。目前的测量分析方法可以对公共点的电压电流谐波进行实时测量, 估计出系统谐波阻抗和用户谐波阻抗, 并可保证一定的精度^[8,9]。

3 实例仿真

采用 IEEE 提供的测试系统^[10]对论文提出的判据做出验证 (图 5)。该系统的频率为 60 Hz, 电压等级为 69 kV、13.8 kV、4.16 kV、2.4 kV、480 V, 负荷三相对称。忽略变压器的励磁支路, 考虑发电机、系统的等值电抗以及线路电抗的频率效应^[11]。

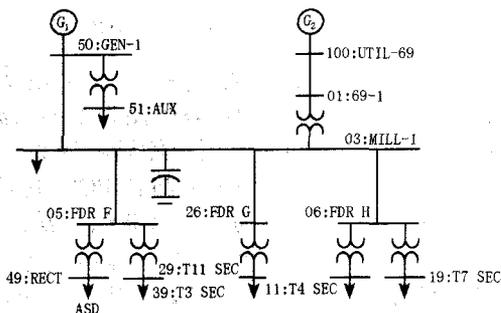


图 5 IEEE 测试系统
Fig.5 The IEEE industrial test system

以 FDR_F 母线为 PCC, 该母线以下的部分为用户侧, 以上的部分为系统侧。设 AUX、RECT、T3_SEC 母线下存在同样类型的谐波源, 此处设定为六脉波变流器, 其 1~13 次谐波构成见表 1。各母线下的基波功率分别为: 375+j331 kVA, 485+j121 kVA, 160+j120 kVA。

表 1 谐波源构成

Tab.1 Harmonic currents of the sources

谐波次数	谐波电流含有率/(%)	相位/degree
1	100	0.0
5	18	180
7	11.8	0.0
11	5.5	180
13	4.0	0.0

用户侧谐波源投入前, 即仅有 AUX 下的变流器开启时, FDR_F 母线的电压总畸变率为 5.04%, MILL-1 至 FDR_F 支路电流总畸变率为 4.09%; 用户侧谐波源投入后, 即 RECT 和 T3_SEC 处的变流器也开启后, 电压、电流总畸变率分别下降至 4.77% 和 3.83%。

设 $\lambda_1 = 0.8$, $\lambda_2 = 0.2$, 由式 (9) 计算得: $J = 0.944 < 1$, 即用户侧谐波源改善了 PCC 处的谐波污染状况。

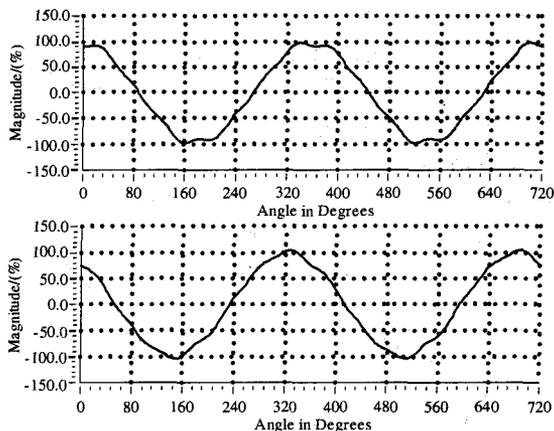


图 6 用户谐波源投入前 PCC 电压、电流波形
Fig.6 Voltage and current curves when custom harmonic source is closed

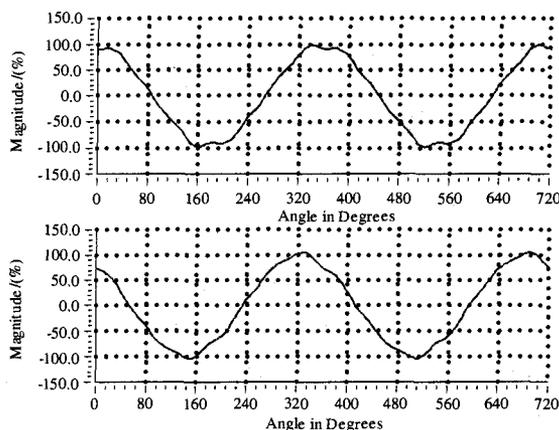


图 7 用户谐波源投入后 PCC 电压、电流波形
Fig.7 Voltage and current curves when custom harmonic source is open

由图 6、7 可以看出, 用户侧谐波源开启后, PCC 电能质量非但没有恶化, 而且有所改善, 用户侧谐波源起到了谐波助减作用。在这种情况下, 不应只对用户侧进行治理, 若判断用户侧谐波源为助增谐波源时, 首先单独对其进行治理是可以的。因此, 电力公司不能简单地按照两侧谐波源贡献的大

小实施治理,应将用户侧谐波源的实际影响考虑在内,否则可能得到与期望相反的结果。

4 结论

在公共电网中,当系统存在背景波源时,论文经过理论推导表明,用户谐波源投入后,可能出现以下情况:

1) 恶化了 PCC 处电压/电流波形,却改善了电流/电压波形;

2) 改善了 PCC 处电压、电流波形;

3) 恶化了 PCC 处电压、电流波形;

当系统存在背景谐波,用户谐波源并不总是危害电网电能质量的,如何正确评价用户侧谐波源对 PCC 谐波水平的影响是谐波治理的关键问题。

论文在 Norton 等效电路的基础上,研究了用户侧谐波源对 PCC 电压、电流的影响,提出助增/助减谐波源的概念,并建立电压、电流综合判据来判定用户谐波源的实际影响,弥补了谐波定位理论的不足。

最后论文通过算例和 IEEE 测试系统的仿真分析,验证了用户侧存在助减谐波源的情况并通过综合判据加以辨别。

参考文献

- [1] 国家技术监督局. GB/T 14549-93 电能质量 公用电网谐波[M]. 北京: 水利水电出版社, 1994.
National Bureau of Standards. GB/T 14549-93 Quality of Electric Energy Supply Harmonics in Public Supply Network[M]. Beijing: China Water Power Press, 1994.
- [2] 贺建闽, 黄治清. 用户谐波电流发射限值计算[J]. 继电器, 2007, 35(1):42-46.
HE Jian-min, HUANG Zhi-qing Determination of Emission Limit of Customer's Harmonic Current[J]. Relay, 2007, 35(1):42-46.
- [3] 张哲, 陈红坤. 谐波源辨识研究的现状和发展[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 37-41.
ZHANG Zhe, CHEN Hong-kun. Status and Development of Harmonic Source Identification[J]. Proceedings of the CSU- EPSA, 2005, 17(5): 37-41.
- [4] 陈彬, 唐云龙,等. PCC 处谐波分析的新方法[J]. 继电器, 2006, 34(9):60-63.
CHEN Bin, TANG Yun-long, et al. New Method for Analysing the Harmonics on PCC[J]. Relay, 2006, 34(9):60-63.
- [5] Xu W, Liu Y. A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(2): 804-811.
- [6] LI Chun, XU Wilsun, Tayjasanant T. A Critical Impedance-based Method for Identifying Harmonic Sources[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19 (2): 671- 678.
- [7] 董国震, 和敬涵. 电力系统局部电路谐振产生原因及对策[J]. 继电器, 2007, 35(1):77-80.
DONG Guo-zhen, HE Jing-han. Causal Analysis and Countermeasure on Harmonic Resonance in Local Circuit of Electric Power Systems[J]. Relay, 2007, 35(1):77-80.
- [8] 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): 84-87.
CHE Quan, YANG Hong-geng. Assessing the Harmonic Emission Level Based on Robust Regression Method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 84-87.
- [9] 程林, 黎雄, 孙元章. 新一代变电站自动化技术——集成变电站自动化系统(ISAS)[J]. 低压电器, 2006, 增刊:45-50.
CHENG Lin, LI Xiong, SUN Yuan-zhang. New Substation Automation Technology — Integrated Substation Automation System[J]. Low Voltage Apparatus, 2006(S): 45-50.
- [10] Task Force on Harmonics Modeling and Simulations: Test Systems for Harmonic Modeling and Simulations[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(2): 579-587.
- [11] 蒋平, 施鸣鹤. 供电系统谐波潮流的仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(7): 51-54.
JIANG Ping, SHI Ming-he. Simulation of Harmonic Load Flow in Power Supply System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(7): 51-54.

收稿日期: 2007-05-10

作者简介:

田立亭(1983-), 女, 硕士研究生, 主要从事工业电力系统安全稳定分析及配电网中谐波问题的研究; E-mail: tlt05@mails.tsinghua.edu.cn

程林(1973-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事电力系统可靠性、电力系统分析与控制等方面的教学和研究;

孙元章(1954-), 男, 教授, 博士生导师, 长江学者特聘教授, 主要从事 FACTS、电力系统非线性控制、电力系统安全经济控制等方面的教学和研究。