

# 电网中非线性负荷谐波功率方向的确定

赵贺, 林海雪

(中国电力科学研究院, 北京市海淀区 100085)

## Determining Harmonic Power Flow Direction of Nonlinear Load in Power Network

ZHAO He, LIN Hai-xue

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100085, China)

**ABSTRACT:** The direction of harmonic power flow should be understood and the position of harmonic source can be determined according to the direction of harmonic power while harmonics exist in power network. Stating from the simplest nonlinear circuit and by means of comparing the calculation results of conventional circuit and analysis results in frequency domain, the features of forming harmonic power by nonlinear load are summarized, the method to determine the direction of harmonic power is proposed and electric energy metering of nonlinear power loads is dissertated. These works provide foundation for further improvement of electric energy metering in engineering.

**KEY WORDS:** nonlinear load; power flow direction; harmonic power; fundamental power; frequency domain

**摘要:** 电力系统中有谐波存在时, 应该了解谐波功率的方向, 并按谐波功率的方向确定谐波源的位置。作者从最简单的非线性电路出发, 通过比较常规电路的计算结果和频域分析结果, 总结了非线性负荷形成谐波功率的特点, 提出了确定谐波功率方向的方法, 论述了非线性用户的电能计量问题, 为进一步完善电能计量工作提供了依据。

**关键词:** 非线性负荷; 功率方向; 谐波功率; 基波功率; 频域

### 0 引言

谐波功率方向的确定是谐波研究中的一个难点。工程实际中, 一般认为谐波功率由非线性负荷发出, 这种说法虽符合实际情况, 但不能真正解释同一电流产生不同方向的谐波有功功率的原因。在对实际电网进行谐波治理时, 往往由于没有弄清谐波功率的方向而使谐波治理工作出现失误。针对这种问题, 文献[1-2]论述了非线性负荷形成的谐波功率与基波功率的关系, 但缺少实例佐证和深入分析, 其中文献[1]虽给出了谐波功率方向的示意图,

但没有对不同方向的谐波有功功率进行解释。

本文将从最简单的非线性电路出发, 通过比较常规电路的计算结果和频域分析结果, 总结非线性负荷形成的谐波功率的特点, 提出确定谐波功率方向的方法, 并根据电能计量仪表的谐波响应特性论述非线性用户的电能计量问题。

### 1 非线性电路及其谐波功率

半波整流电路及其电流波形见图1。图1(a)中: 电源电阻  $R_{AB}$  为  $1\Omega$ ; 负载电阻  $R_{CD}$  为  $9\Omega$ 。假设图1(a)的整流二极管为理想元件, 电源电压为理想的正弦波, 其峰值  $U_m$  为  $100V$ , 则回路电流的半波峰值  $I_m$  为  $10A$ , 回路电流波形如图1(b)所示。由此可知, 从电源发出的有功功率  $P_A = (U_m / \sqrt{2})(I_m / \sqrt{2}) / 2 = 250W$ , 流过二极管的有功功率  $P_B = (I_m / \sqrt{2})^2 R_{CD} / 2 = 225W$ 。

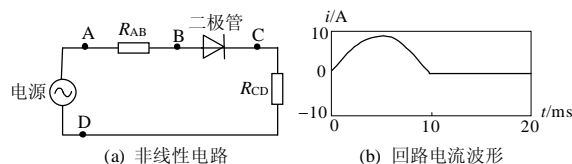


图1 非线性电路及其回路电流

Fig. 1 Nonlinear circuit and its current

对图1(b)中的电流进行傅里叶变换<sup>[2-4]</sup>, 即

$$i(t) = \frac{2I_m}{\pi} \left[ \frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \sin \omega t + \sum_{n=2k}^N \frac{\sin(n\omega t - \frac{\pi}{2})}{(n-1)(n+1)} \right] \quad (1)$$

式中:  $n$  为谐波次数(偶数);  $K$  为自然数。通过控制式(1)中  $N$  的大小可以将回路电流的精度控制在允许范围内。取  $N=8$  进行计算, 则

$$i(t) = 3.183 + 5 \sin \omega t + 2.122 \sin(2\omega t - \pi/2) + 0.424 \sin(4\omega t - \pi/2) + 0.182 \sin(6\omega t - \pi/2) + 0.101 \sin(8\omega t - \pi/2) \quad (2)$$

由上述分析可知, 图 1(a)中 AD 之间的电压  $u_{AD}(t) = 100 \sin \omega t$ , 其傅里叶级数的各个分量分别为  $u_{AD1} = 100 \sin \omega t$  且  $u_{AD0} = u_{AD2} = \dots = u_{AD8} = 0$ , 则 BD 之间的电压为

$$u_{BD}(t) = u_{AD}(t) - R_L i(t) = -3.183 + 95 \sin \omega t - 2.122 \sin(2\omega t - \pi/2) - 0.424 \sin(4\omega t - \pi/2) - 0.182 \sin(6\omega t - \pi/2) - 0.101 \sin(8\omega t - \pi/2) \quad (3)$$

忽略二极管的电压降, 在回路电流的正半周, CD 之间的电压与 DB 之间的电压相同, 在回路电流的负半周, CD 之间的电压为 0, 因此 CD 之间的电压表达式为

$$u_{CD}(t) = R_{CD} i(t) = 28.65 + 45 \sin \omega t + 19.1 \sin(2\omega t - \pi/2) + 3.82 \sin(4\omega t - \pi/2) + 1.638 \sin(6\omega t - \pi/2) + 0.909 \sin(8\omega t - \pi/2) \quad (4)$$

对于相同次数的谐波电压和谐波电流, 除了完全同相或完全反相的情况, 很难直观地判定它们的相角差, 而谐波功率只有正负之分, 因此可通过判断谐波功率的方向得到潮流的方向。为便于分析, 图 1 中电压和电流的频域分量见表 1。

表 1 图 1 中电压和电流的频域分量  
Tab. 1 Frequency domain components of voltages and currents in Fig.1

频域分量	i		$u_{AD}$		$u_{BD}$		$u_{CD}$	
	幅值/ A	相角/ rad	幅值/ V	相角/ rad	幅值/ V	相角/ rad	幅值/ V	相角/ rad
直流分量	3.183	—	0	—	-3.183	—	28.650	—
基波	5.000	0	100.000	0	95.000	0	45.000	0
2 次谐波	2.122	$-\pi/2$	0	—	-2.122	$-\pi/2$	19.100	$-\pi/2$
4 次谐波	0.424	$-\pi/2$	0	—	-0.424	$-\pi/2$	3.820	$-\pi/2$
6 次谐波	0.182	$-\pi/2$	0	—	-0.182	$-\pi/2$	1.638	$-\pi/2$
8 次谐波	0.101	$-\pi/2$	0	—	-0.101	$-\pi/2$	0.909	$-\pi/2$

由表 1 可知: 回路电流基波分量的相角与  $u_{AD}$ 、 $u_{BD}$  和  $u_{CD}$  基波分量的相角相同, 回路电流基波分量与  $u_{AD}$ 、 $u_{BD}$  和  $u_{CD}$  的乘积为正值, 基波功率的方向为从电源流向负载;  $u_{BD}$  各次谐波分量(包括直流分量)与回路电流之积为负值, 谐波功率的方向与基波功率的方向相反;  $u_{CD}$  各次谐波分量(包括直流分量)与回路电流之积为正值, 谐波功率的方向与基波功率的方向相同。

文献[1-2]指明了谐波源的谐波功率和基波功率的潮流方向, 但根据本文分析可知, 基波和谐波功率的方向由各次谐波电压和谐波电流的夹角  $f_n$  来确定: 当  $-90^\circ < f_n < 90^\circ$  时, 谐波功率的方向与基波功率的方向一致; 当  $90^\circ < f_n < 270^\circ$  时, 谐波功率的方向与基波功率的方向相反。次数不同的谐波电压和谐波电流之间没有稳定的相角差, 因此不产生有功

功率, 图 1(a)中各点的潮流可以用各次谐波功率表示, 由于只有次数相同的谐波电压和谐波电流才能产生有功功率, 因此图 1 中回路的有功功率为

$$P = U_0 I_0 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N U_n I_n \cos f_n \quad (5)$$

式中:  $f_n$  为第  $n$  次谐波电压与谐波电流的相角差;  $U_0$  和  $I_0$  分别为电压和电流的直流分量;  $U_n$  和  $I_n$  分别为第  $n$  次谐波电压和谐波电流幅值;  $N$  为自然数。

图 1 中基波和谐波的功率流向如图 2 所示。

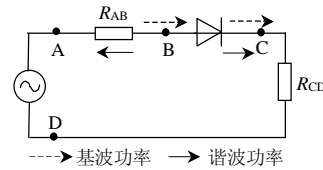


图 2 图 1 中基波和谐波的功率流向

Fig. 2 Direction of fundamental and harmonic power flow

根据式(5)计算出的图 1 中各点的有功功率见表 2。由图 1 和上述分析可知:  $u_{AD}$  没有畸变;  $u_{CD}$  是半波;  $u_{BD}$  是正负不对称的半波; 回路中各点的电流均是半波。表 2 中各点基波功率为正值, 其功率方向是已知的, 所以以基波功率方向为基准, 凡得到的谐波功率为正值, 则认为其方向与基波功率方向一致, 否则与基波功率方向相反。

表 2 图 1 中各点的有功功率  
Tab. 2 Active power of different points in Fig.1

频域分量	有功功率/W		
	A 点	B 点	C 点
直流分量	0	-10.130	91.190
基波分量	250.000	237.500	112.500
2 次谐波	0	-2.250	20.260
4 次谐波	0	-0.090	0.810
6 次谐波	0	-0.017	0.149
8 次谐波	0	-0.005	0.046
总有功功率/W	250.000	225.000	225.000

## 2 谐波功率的特点

电网中全部的功率来自电源的基波功率。当电网中含有非线性负荷时, 部分基波功率将转化为谐波功率, 本文结合第 1 节中简单电路的数字计算结果分析功率的流向, 并对谐波功率的特点<sup>[5-8]</sup>进行总结:

(1) 电源发出的基波功率包含系统消耗的全部有功功率, 其中负荷消耗的有功功率所占比例最大。

(2) 系统损耗由基波功率和谐波功率共同提供。图 1 中  $R_{AB}$  的损耗包括基波损耗和谐波损耗, 其能量全部来自电源基波功率。由图 2 和表 2 可知, 图 2 中流过 A 点的基波功率为 250 W, 流过 B 点的基波功率为 237.5 W, 因此 12.5 W 的基波功率由电阻  $R_{AB}$  消耗。而通过计算,  $R_{AB}$  实际损耗的功率为

25 W, 因此基波功率仅为  $R_{AB}$  提供了一半的功率损耗。分析表 2 的谐波功率可知, 直流分量与其它各次谐波功率之和为 -12.5 W, 因此这部分功率反送给电阻  $R_{AB}$ , 为其提供另一半的功率损耗。

(3) 基波功率流向非线性负荷后, 其中部分功率转化为谐波功率, 部分功率返回系统并构成系统损耗。由同次谐波电流和谐波电压形成的流向负载的有功功率与基波功率被负载吸收, 并在负载中转化为其它功率形式。由表 2 可知, 流过 B 点的基波功率为 237.5 W, 流过 B 点的谐波功率(含直流分量)为 -12.5 W, 这部分功率返回系统并由  $R_{AB}$  消耗, 因此只有 225 W 总功率传送到 C 点。由表 2 还可知, 流过 C 点的谐波功率(含直流分量)和基波功率各为 112.5 W, 这部分功率由  $R_{CD}$  消耗。

(4) 非线性负荷产生的谐波电流贯穿整个电路, 其各次谐波电压与同次谐波电流的相位在非线性质负荷两边完全不同, 非线性负荷实际构成了谐波功率的发生器。图 1 中 B 点和 C 点上功率反向流动的原因是谐波电压反相, 而谐波电压是由谐波电流流经线性元件阻抗产生的。

图 1(a)中各点电势、电流和有功功率的分布示意图见图 3。由图 3(b)可知, 基波电势随  $R_{AB}$  逐点下降; 由图 3(c)可知, 电路各点的电流方向不变; 由图 3(d)可知, 谐波功率的方向与谐波电压的相位有关, 与基波功率方向不同的部分谐波功率返回系统并由  $R_{AB}$  消耗,  $R_{CD}$  消耗的有功功率包括与基波功率方向相同的谐波功率和部分基波功率。

(5) 图 3 的 AB 之间的电流没有变化, 但基波

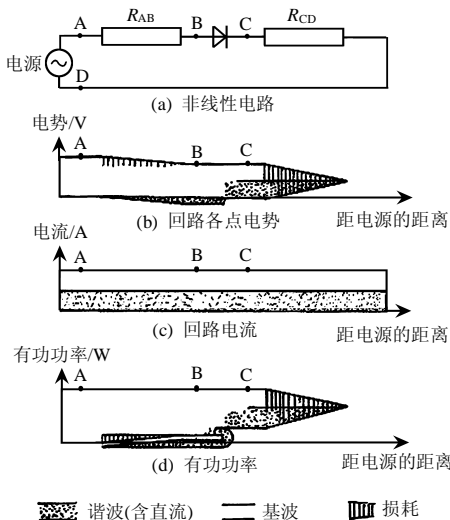


图 3 图 1(a)中各点电势、电流和有功功率的分布示意图  
 Fig. 3 Distribution diagram of potential, current and active power in fig. 1(a)

电势由 A 逐步降到 B, 而谐波电势由 A 升到 B, 其原因是各次电流均在 AB 间产生电压降。B 点电势的计算公式为

$$E_B = E_A - iR_{AB}$$

在频域中 B 点电势可表示为

$$E_{Bn} = E_{An} - i_n R_{AB} \quad (n = 0, 1, 2, L) \quad (6)$$

由于谐波功率方向不同, 电路中不同位置的谐波电势也不同。如果电源不含有谐波或谐波可忽略, 则非线性元件处的谐波电势呈高值。

### 3 非线性用户的电能计量问题

谐波功率的产生及其方向直接影响电网中电能计量的准确性和合理性<sup>[9-10]</sup>。以图 1 为例, 如果电能计量仪表能够正确地反映基波和谐波功率, 则在图 1 中 B 点(非线性负荷的出口)实际计量的电能应包括提供给非线性负荷的基波功率能量、供应负荷谐波的基波能量和供应负荷反送给线路和系统的谐波能量, 其中供应负荷反送给线路和系统的谐波能量是消耗在线路和系统中的能量, 其功率方向和基波功率方向相反, 因此会使电能计量仪表计量的电能减小。

感应式电能表或电子式电能表在非线性质设备端口处计量到的有功电能是基波电能与谐波电能之差, 目前电网中使用的感应式电能表的频率特性较差<sup>[11-14]</sup>, 因此计量到的谐波功率往往小于谐波功率的实际值。而电子式电能表的频率特性较好, 可正确计量基波功率和谐波功率, 因此装在非线性质负荷处的电子式电能表得到的计量结果往往偏小于感应式电能表的计量结果。从控制电网谐波的角度出发, 这种计量结果是不合理的, 因为反送的谐波功率对电网是一种“污染”。为合理地计量电网中非线性用户消耗的电能, 本文建议只计量基波电能, 并将其作为电能计费的基本依据, 同时单独计量非线性负荷向电网反送的谐波电能, 对超标部分收取惩罚性的电费。

需要指出, 解决非线性用户电能计量的问题时, 还应考虑电网背景谐波的影响以及谐波标准限值的多样性、概率性等因素。

### 4 结论

(1) 非线性元件两侧谐波电压和谐波电流的相位是不同的, 因此非线性元件两侧谐波功率的方向也不同。非线性元件将基波有功功率和无功率中的一部分转换成谐波功率, 这部分谐波功率分别

向电源侧和负荷侧传送。

(2) 由于供电系统和负荷都含有电阻, 所以传送给电源侧和负荷侧的部分谐波功率加剧了设备发热, 减少了设备使用寿命, 增加了电网线损。

(3) 从电能计量角度出发, 频率特性越好的计量表获得的基波电能与谐波电能之差越小, 但从控制电网谐波的角度出发, 这种计量结果是不合理的, 因此本文建议将基波电能作为电能计费的基本依据, 并单独计量非线性负荷向电网反送的谐波电能。

## 参考文献

- [1] 阿里拉加. 唐统一, 吴震春, 孙树勤, 译. 电力系统谐波[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1991.
- [2] 林海雪, 孙树勤. 电网中的谐波[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [3] 张永生. 电力半导体电路原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.
- [4] Kitchin H H. New method for digital-computer evaluation of converter harmonics in power system using state-variable analysis[J]. IEE Proceedings (part C), 1981, 128(4): 196-207.
- [5] Syed E H. Influence of source impedance on the performance of a fixed fieter-thyristor controlled reactor (FF-TCR) type compensator [J]. Electric Power System Research, 1985, 9(8): 83-91.
- [6] Working group 36-05. Harmonics, characteristic parameters, methods of study[J]. Electra, 1981, (77): 35-54.
- [7] Jos A, Bruce C S N, Watson A R W. Power system harmonic analysis[M]. John Wilcy & Sons, 1997.
- [8] IEEE working group on power system harmonics. Power system harmonics: an overview[J]. IEEE PAS, 1983, 102(8): 2455-2460.
- [9] 张直平, 李芬辰. 城市电网谐波手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [10] 赵文明, 袁茂奎. 谐波对感应式有功电度表计量误差的影响[J]. 电网技术, 1998, 22(4): 69-31.  
Zhao Wenming, Yuan Maokui. Influence of harmonics on metering error of induction watt-hour meter[J]. Power System Technology, 1998, 22(4): 69-31(in Chinese).
- [11] Жежелено И В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий[M]. Москва: Энергоатомиздат, 1984.
- [12] 许仪勋, 程浩忠, 葛乃成, 等. 谐波对无功电度表计量特性的影响[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(in Chinese).
- [13] 徐柏榆, 邓志, 梅桂华, 等. 谐波电流对感应式有功电度表计量的影响[J]. 电网技术, 2002, 26(9): 37-43,50.  
Xu Baiyu, Deng Zhi, Mei Guihua, et al. Influence of harmonic current on metering error of induction phase watt-hour meters [J]. Power System Technology, 2002, 26(9): 37-43,50(in Chinese).
- [14] Marina T, Paule E, Cary B, et al. Effects of voltage distortion on induction wathour meter accuracy[C]. Second International Conference on Harmonics in Power System, Manitoba, 1986.

收稿日期: 2007-04-28。

作者简介:

赵贺(1930—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统分析、电力电子技术在电力系统中的应用;

林海雪(1940—), 男, 教授级高级工程师, 长期从事电能质量标准的制定和谐波治理工程的研究、开发和应用等工作, E-mail: [Linhx@epri.ac.cn](mailto:Linhx@epri.ac.cn)。

(编辑 杜宁)

## 特高压直流试验基地试验线段成功升压至 $\pm 1100$ kV

2007年8月16日, 位于北京中关村科技园区昌平园的国家电网公司特高压直流试验基地试验线段成功升压至 $\pm 1100$  kV并稳定运行数小时。当天前往试验基地参观的国家电网公司安监部燕福龙主任、林荣卫副主任等公司领导, 及中国电力科学研究院张文亮院长, 王力科、于永清副院长, 院长办公室副主任刘建忠、基地综合管理部主任荆永坤、高压研究所(电磁环境研究所)副所长范建斌、李博, 副总工程师宿志一、陆家榆等见证了这一历史过程。在升压期间, 中国电力科学研究院技术人员现场进行了线下合成场强、无线电干扰、可听噪声等电磁环境因子的测量工作, 并获得了宝贵的数据。在国家电网公司特高压直流试验基地建设之初, 国家电网公司党组和刘振亚总经理就将试验基地定位在不仅满足即将建设的中国 $\pm 800$  kV特高压直流输电工程的研究需求, 同时具备更高电压等级输电技术的前瞻性研究能力。试验线段成功升压至 $\pm 1100$  kV标志着特高压直流试验基地完全有能力进行 $\pm 1000$  kV甚至更高电压等级的电磁环境试验研究, 并为新电压等级的工程设计提供宝贵的设计依据和有力的技术支持, 为实现国家电网公司的特高压战略发展规划作坚强的技术后盾!