

用户谐波电流发射限值计算

贺建闽, 黄治清

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:畸变负荷谐波电流发射限值计算不论对于供电部门还是电力用户都是十分重要的, 详细介绍谐波国标 GB/T 14549-1993 和 IEC 技术文件 61000-3-6 中相关的用户谐波限值确定方法, 讨论了二者的主要不同之处。建议谐波国标在用户谐波电流限值算法中应用负荷同时系数, 重点介绍高压畸变负荷同时系数 F_{th} 的确定方法, 特别是同时系数最小值的计算方法。通过理论分析和结合我国电气化铁路谐波测量统计数据, 说明了引入同时系数 F_{th} 的必要性和其取值方法的合理性。

关键词: 用户; 谐波电流限值; 同时系数

Determination of emission limit of customer's harmonic current

HE Jian-min, HUANG Zhi-qing

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The harmonic current emission limits index distribution for distorting loads is very important for both power supply department and consumer. In this paper, the consumer's harmonic limit determination methods proposed by GB/T 14549-1993 and IEC 61000-3-6 are introduced, and their major differences are detailed as well. The paper suggests the national harmonics standard to apply coincidence factor in consumer's harmonic limit calculation and mainly describes a method of determining the coincidence factor, particularly for the minimal coincidence factor of high-voltage distorting loads. With the results of theoretical analysis and statistic based on harmonic measurement data of electric railway, the necessity and reasonableness of this method is further confirmed.

Key words: customers; limit value of harmonic current; coincidence factor

中图分类号: TM714

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)01-0042-05

0 引言

谐波国家标准 GB/T 14549-93 《电能质量 公用电网谐波》对电力用户主要考核谐波电流并制定了用户谐波电流限值计算方法^[1]。基于 IEC 61000-3-6 的国家标准化指导性技术文件 GB/Z 17625.4-2000 《电磁兼容 限值 中、高压电力系统中畸变负荷发射限值的评估》则较多讨论谐波电压限值制定和考核方法。尽管如此, 其在第 8 章“HV 电力系统中畸变负荷的发射限值”中, 谈到单个畸变设备的发射限值时指出“即使其目的在于限制网络中的谐波电压, 最好是对畸变设备规定谐波电流限值”, 并给出相关算法^[2]。

由于谐波国标和 IEC 61000-3-6 技术文件相关算法的表达形式和参数取值有所不同, 尤其是后者在计算中引入负荷同时系数, 使这两个文件相关内容存在较大差异。本文主要讨论以上问题, 重点讨

论负荷同时系数的取值范围和适于工程应用的计算方法。通过我国电气化铁路工程实例, 验证了使用高压畸变负荷同时系数的必要性和合理性。

1 谐波国标的用户谐波电流限值算法

用户谐波电流发射限值问题可用随机矢量加法进行研究^[3, 4], 若电网公共连接点 (PCC) 上接有 n 个畸变负荷, 则总负荷 S_{Σ} 为

$$S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n S_i \quad (1)$$

对应的注入 PCC 总谐波电流矢量为

$$I_{ht} = \sum_{i=1}^n I_{hi} \quad (2)$$

当 S_{Σ} 等于公共连接点供电设备容量 S 时, PCC 的谐波限值 I_h 与总谐波注入水平 I_m 相等。设 I_{hi} 为

随机统计矢量,若中心极限定理成立,且 I_{hi} 在正交分量有零均值, I_h 和 I_{hi} 大小均服从瑞利分布, I_h 和 I_{hi} 的方差分别与 S_i 和 S_i 的平方成正比,可导出用户谐波电流限值为^[3, 4]

$$I_{hi} = I_h \sqrt{S_i / S_t} \quad (3)$$

PCC 的谐波限值 I_h 与各用户谐波电流限值 I_{hi} 关系用式(4)描述,当 $\sum S_i$ 等于 S_t 时, I_h 等于各 I_{hi} 的平方和求开方根。

$$I_h^2 = \sum_{i=1}^n I_{hi}^2 / (\sum_{i=1}^n S_i / S_t) \quad (4)$$

考虑 I_{hi} 更一般的分布特征,使用 Monte-Carlo 模拟可得用户谐波电流限值另一个表达式^[3, 4]

$$I_{hi} = I_h (S_i / S_t)^{1/\alpha} \quad (5)$$

式中: h 为谐波次数; I_h 为 PCC 的谐波电流限值; S_i 为第 i 个用户的供电协议容量, MVA; S_t 为公共连接点的供电设备容量, MVA; α 为谐波叠加指数,如表 1 所示^[1]。式(5)与谐波国标所给用户谐波电流限值算法一致。

表 1 GB/T 14549-1993 推荐的谐波叠加指数

Tab.1 Harmonic superposition exponent proposed by GB/T

14549-1993							
h	3	5	7	9	11	13	>13
α	1.1	1.2	1.4	2.0	1.8	1.9	2.0

为了分析以上 2 种算法的差异,令 k 为式(3)与式(5)之比,则有

$$k = (S_i / S_t)^{1/2} / (S_i / S_t)^{1/\alpha} = (S_i / S_t)^{(1/2-1/\alpha)} \quad (6)$$

对应 3、5、7、11、13 次谐波,当 S_i/S_t 在 0.2~1 变化,作出 $k \sim S_i/S_t$ 关系曲线如图 1 所示。

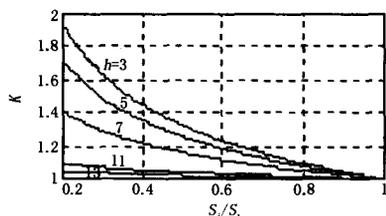


图 1 $k \sim S_i/S_t$ 关系曲线

Fig.1 Relation between k and S_i/S_t

对于 9 次和大于 13 次的谐波,2 个算法结果一致;对于 3、5、7 次谐波和较小的 S_i/S_t 值, k 值较大,式(3)计算结果比式(5)偏大较多;对于 11、13

次谐波,二者计算结果在较大程度上接近,可见这 2 个算法的差异主要反映在 3、5、7 次谐波限值计算上。从图 1 可以看到,谐波次数越低或 S_i/S_t 值越小, k 值越大,即式(3)计算结果较式(5)偏大越多。

尽管专家们在式(5)中的 S_i 和 S_t 取值方法上还存在一些不同观点,例如作为冷备用的变压器是否应计入用户供电协议容量 S_i ,但式(5)给出的谐波国标关于用户谐波限值计算概念不难理解,在可操作性方面也是明确的。该算法包含了以下思想:当 PCC 所有畸变负荷同时向电网发射各自谐波电流限值时,PCC 总谐波电流的 95% 概率大值不应超过其规划水平。

但是电力用户会很自然地提问,对于 h 次谐波,“各谐波源同时发射各自谐波电流限值”是一个怎样的概率事件,它与 PCC 谐波电流的 95% 概率大值能否对应?对于负荷波动较大的用户,如电气化铁路,在分配谐波电流限值时不考虑各用户尖峰负荷的同时出现概率,是否会造成 PCC 点谐波电流预计值偏大?谐波国标关于用户谐波电流限值算法固然有其对电网安全性方面考虑的原因,但过于严格的规定是否有利于国家标准的执行?

2 IEC 建议的用户谐波电流限值算法

IEC 61000-3-6 技术文件注意到这一现象,尽管该文件在第 4 章“基本原则”中,解释对用户第 2 级评估的原理是“在系统满负荷下,所有用户都注入各自限值的骚扰,总的骚扰水平将等于规划水平”,但该文件在实际计算中还是考虑了各谐波源的同时性。参照该文件式(18')或式(26')描述的用户谐波电压限值计算,可以写出谐波电流限值 I_{hi} 的计算公式。

$$I_{hi} = I_h [S_i / (F_{HV} S_t)]^{1/\alpha} \quad (7)$$

式中: I_h 为 PCC 的 h 次谐波电流限值, A; S_i 为第 i 个用户的供电协议容量, MVA; S_t 为 PCC 修正的网络可用功率, MVA; α 为谐波叠加指数,按表 2 选取^[2]; F_{HV} 为 PCC 点高压谐波源的同时系数,典型值为 0.4~1。

表 2 IEC 推荐的谐波叠加指数

Tab.2 Harmonic superposition exponent proposed by IEC

h	3	$5 \leq h \leq 10$	$h > 10$
α	1.0	1.4	2

式(7)与式(5)的差别除谐波叠加指数 α 取值

不同,用“修正的网络可用功率”替代“公共连接点供电设备容量”外,式(7)还引入了一个“同时发生畸变的高压负荷的同时系数 F_{HV} ”概念。与谐波国标相比,使用 IEC 算法,用户能获得较为宽松合理的谐波电流限值。但是 IEC 没有介绍 F_{HV} 典型值如何导出以及在实际应用中如何正确选取 F_{HV} ,而 F_{HV} 取值 0.4 或 1 可以使计算结果出现较大差异,正是同时系数 F_{HV} 取值的不确定性,给 IEC 算法实际应用带来困难。

3 同时系数确定方法的讨论

IEC 61000-3-6 技术文件没有专门介绍高压负荷同时系数 F_{HV} 的计算方法,但参照该文件第 7 章“MV 电力系统中畸变负荷的发射限值”的 F_{HL} 估算实例,可以理解 F_{HV} 为 PCC 所有高压畸变负荷同时出现负荷尖峰的概率,所以 F_{HV} 应具有如下特点: PCC 的畸变负荷数目越多, F_{HV} 越小;反之,当 PCC 只有 1 个畸变负荷时, F_{HV} 取值为 1,这与我们通常理解的多个事件同时出现概率是一致的。

在长期实践中,电力专家形成一个共识,认为按式(3)计算所得高压用户谐波电流限值可能偏大,对高压畸变负荷的约束偏于宽松。这一认识有助于负荷同时系数 F_{HV} 最小值的确定,即在使用 F_{HV} 后,高压用户谐波电流限值不应超过式(3)计算结果。所以谐波国标引入同时系数,用户谐波电流限值计算应满足以下关系

$$I_{hi} = I_h [S_i / (F_{HV} S_t)]^{1/\alpha} \leq I_h \sqrt{S_i / S_t} \quad (8)$$

由式(8)求得同时系数的最小值 $F_{HV \min}$

$$F_{HV \min} = (S_i / S_t)^{(1-\alpha/2)} \quad (9)$$

对应 3、5、7、9、11、13 次谐波,当 S_i/S_t 在 0.2~1 范围内取值,根据式(9)和表 2 可求得 $F_{HV \min}$ 随 S_i/S_t 的变化关系曲线,如图 2 所示。

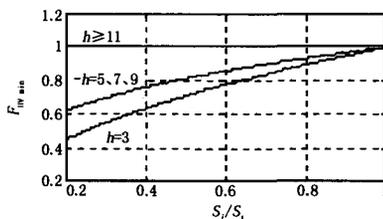


图 2 $F_{HV \min} \sim S_i/S_t$ 关系曲线

Fig.2 Relation between $F_{HV \min}$ and S_i/S_t

为便于定性分析,设 PCC 的 n 个畸变高压负荷

容量相当,即 $S_i/S_t=1/n$,代入式(9),得

$$F_{HV \min} = (S_i / S_t)^{(1-\alpha/2)} = (1/n)^{(1-\alpha/2)} \quad (10)$$

PCC 的畸变高压用户数目 n 取不同数值时,对应不同的谐波次数 h ,根据式(10)和表 2 可求得 $F_{HV \min}$,如表 3 所示。在实际应用中,同时系数 F_{HV} 在最大值 1 和最小值 $F_{HV \min}$ 之间取值。

表 3 $F_{HV \min}$ 与 h 、 n 的关系

Tab.3 Relationship between $F_{HV \min}$ and h , n

h	α		PCC 处容量相当的畸变高压用户数目 n					
			1	2	3	4	5	6
3	1	F_{HV}	1	0.70	0.57	0.50	0.45	0.41
5、7、9	1.4	最小值	1	0.81	0.72	0.66	0.62	0.58
>10	2.0	值	1	1	1	1	1	1

图 2 和表 3 所示的负荷同时系数 F_{HV} 反映出谐波叠加的一些特点:

1) IEC 61000-3-6 技术文件推荐的同时系数 F_{HV} 典型值为 0.4~1 是合理的,但该值选取不是随意的,其与谐波次数 h 及畸变用户供电协议容量占 PCC 修正网络可用功率份额 S_i/S_t 有关。当第 i 个负荷大到能够忽略其他负荷时,该负荷同时系数为 1。

2) 给定谐波次数 h , n 越大, PCC 处容量相当的畸变高压用户越多,用户同时出现负荷尖峰的概率越小,即同时系数越小。

3) 给定 PCC 畸变高压用户数目 n , 谐波次数 h 越高,谐波幅值和相位的分散性越大,谐波越具噪声特征,其同时系数越大,对于 10 次及其以上的谐波源,同时系数为 1。

对于各类非线性负荷,如电气化铁路,同时系数究竟该怎样选取,需要通过长期的负荷测量和统计才能确定。在不了解负荷特性的情况下,为便于工程应用,建议对于干线电气化铁路,负荷同时系数 F_{HV} 取 1 和 $F_{HV \min}$ 的中间值,如式(11)所示;对于运输密度较小的电气化铁路,建议 F_{HV} 按式(9)取最小值 $F_{HV \min}$ 。

$$F_{HV} = [1 + (S_i / S_t)^{(1-\alpha/2)}] / 2 \quad (11)$$

4 工程应用实例

以一个工程实例验证引入负荷同时系数的合理性,所用数据来自成(都)-昆(明)电气化铁路,西昌变电站 110 kV 供电网除西昌卫星发射中心等用户外,还接有德昌、黄联关、西昌北和泸沽等 4

座牵引变电所,各牵引变电所的 α 、 β 供电臂分别安装有2 Mvar~4 Mvar的3次滤波器。按谐波国标计算,西昌变电站110 kV公共点总谐波电流限值和电铁总谐波电流配额以及各牵引变电所谐波电流限值如表4所示。

表4 西昌变110 kV公共连接点和各牵引变技术参数

Tab.4 Technical parameters of each traction substations and Xichang substation 110 kV point of common coupling

PCC 供电设备容量: 180 MVA		PCC 最小短路容量: 613 MVA			
牵引变名	德昌	黄联关	西昌北	泸沽	
供电协议容量	2×16 MVA	2×10 MVA	2×16 MVA	2×20 MVA	
西昌变110 kV公共点及各牵引变谐波电流限值/A					
谐波次数	3	5	7	9	11
PCC的总谐波电流限值	7.85	7.85	5.56	2.62	3.51
PCC给电铁的谐波配额	5.41	6.01	4.26	2.01	2.91
德昌牵引变谐波限值	1.63	1.86	1.62	1.10	1.35
黄联关牵引变谐波限值	1.06	1.26	1.16	0.87	1.04
西昌北牵引变谐波限值	1.63	1.86	1.62	1.10	1.35
泸沽牵引变谐波限值	2.00	2.24	1.90	1.23	1.52

根据2001年8月17日至19日的测量数据,得到德昌、黄联关、西昌北、泸沽等牵引变电所110 kV线路各相谐波电流,用矢量合成算法求得注入西昌变电所110 kV公共点各相的牵引谐波电流,计算中假设各牵引变电所110 kV线路A相基波电压相位角相同。各站点A、B、C相谐波电流95%概率大值统计分别如表5、表6、表7所示。

表5 各站点A相谐波电流统计值

Tab.5 A phase harmonic current statistical data of each substation A

站名	测量日期	谐波次数				
		3	5	7	9	11
德昌	2001-08-17	3.03	3.14	1.64	1.04	0.74
	2001-08-18	3.22	3.24	1.70	0.98	0.73
	2001-08-19	3.36	3.39	1.69	1.03	0.75
黄联关	2001-08-17	4.53	4.26	2.61	1.53	1.15
	2001-08-18	4.57	4.24	2.59	1.56	1.14
	2001-08-19	4.44	4.18	2.61	1.54	1.12
西昌北	2001-08-17	4.34	5.63	3.28	2.09	1.45
	2001-08-18	4.26	5.47	3.27	1.91	1.36
	2001-08-19	3.78	5.39	2.96	1.83	1.25
泸沽	2001-08-17	5.67	3.02	1.57	1.03	0.67
	2001-08-18	2.02	2.59	1.43	0.87	0.62
	2001-08-19	1.87	2.42	1.34	0.80	0.58
西昌变110 kV公共点	2001-08-17	6.99	7.88	4.16	2.69	1.83
	2001-08-18	6.58	8.06	4.18	2.50	1.74
	2001-08-19	6.38	8.01	3.90	2.34	1.69

表6 各站点B相谐波电流统计值

Tab.6 B phase harmonic current statistical data of each substation A

站名	测量日期	谐波次数				
		3	5	7	9	11
德昌	2001-08-17	2.56	2.84	1.49	1.02	0.76
	2001-08-18	2.71	3.02	1.56	1.02	0.77
	2001-08-19	2.95	2.89	1.68	1.01	0.75
黄联关	2001-08-17	4.68	4.82	2.65	1.72	1.29
	2001-08-18	4.46	4.68	2.54	1.58	1.19
	2001-08-19	4.40	4.82	2.57	1.63	1.18
西昌北	2001-08-17	3.99	5.66	3.26	2.30	1.88
	2001-08-18	3.84	5.40	3.10	2.21	1.80
	2001-08-19	3.65	5.21	3.02	2.09	1.65
泸沽	2001-08-17	14.8	7.61	3.83	2.59	1.82
	2001-08-18	6.33	6.61	3.43	2.37	1.68
	2001-08-19	6.29	6.15	3.37	2.17	1.56
西昌变110 kV公共点	2001-08-17	16.2	8.95	5.34	3.64	2.72
	2001-08-18	7.98	8.27	4.84	3.45	2.55
	2001-08-19	7.61	8.12	4.68	3.28	2.38

表7 各站点C相谐波电流统计值

Tab.7 C phase harmonic current statistical data of each Substation A

站名	测量日期	谐波次数				
		3	5	7	9	11
德昌	2001-08-17	2.49	3.72	1.85	1.21	0.96
	2001-08-18	2.68	3.94	1.89	1.21	0.96
	2001-08-19	2.73	4.06	1.90	1.25	0.94
黄联关	2001-08-17	3.79	4.01	2.09	1.50	1.08
	2001-08-18	3.70	3.78	2.08	1.36	1.00
	2001-08-19	3.73	3.84	2.10	1.42	1.02
西昌北	2001-08-17	5.25	7.48	4.00	2.89	2.44
	2001-08-18	4.87	7.16	3.79	2.74	2.36
	2001-08-19	4.63	6.87	3.62	2.58	2.15
泸沽	2001-08-17	20.2	8.63	4.52	2.70	1.99
	2001-08-18	9.13	7.74	4.44	2.63	1.95
	2001-08-19	8.90	7.53	4.19	2.42	1.80
西昌变110 kV公共点	2001-08-17	19.9	10.7	5.50	3.95	3.12
	2001-08-18	10.4	9.85	5.09	3.78	3.01
	2001-08-19	9.82	9.48	5.05	3.61	2.78

在以上统计数据中,可以看到泸沽牵引变电所8月17日的谐波,尤其是3次谐波,与8月18、19两日差异较大,这是因为8月17日该所 α 、 β 供电臂上的3次滤波器均无投入。

比较表4和表5、表6、表7,发现对于3、5、7次谐波电流,各牵引变电所110 kV线路的谐波超标情况要远大于公共连接点的谐波超标情况。说明在实际运行中,由于各用户谐波电流矢量幅值和相位角存在一定的随机性,可能使得PCC总谐波电流

实际值小于人们的预计。

如果在谐波国标中引入同时系数,考虑到电气化铁路西昌段运输密度较小,2001年度的日平均运量仅为27对车/天,选用 F_{HVmin} ,重新计算各牵引变电所谐波电流限值如表8所示。

表8 重新计算的各牵引变电所谐波电流限值

Tab.8 Recalculated harmonic current emission limits of each traction substation

各牵引变电所谐波电流限值/A					
谐波次数	3	5	7	9	11
德昌牵引变	3.31	3.31	2.34	1.10	1.48
黄联关牵引变	2.61	2.61	1.85	0.87	1.17
西昌北牵引变	3.31	3.31	2.34	1.10	1.48
泸沽牵引变	3.70	3.70	2.62	1.23	1.65

对比以上各表可见,引入同时系数,不论在PCC还是在用户侧都能较为一致地反映谐波电流超标程度。在本例中,如果进一步调整各个牵引变电所的 F_{HV} 取值,可得到更为合理的谐波电流配额。这一实例验证了电力用户谐波电流限值计算引入同时系数 F_{HV} 的必要性和合理性,通过计算机对多个随机矢量叠加仿真,同样能够证实这一点。

5 结束语

本文介绍了谐波国标 GB/T 14549-93 和 IEC 61000-3-6 技术文件关于用户谐波电流限值的算法,着重讨论了二者的主要不同之处。参照 IEC 61000-3-6,作者建议谐波国标在高压用户谐波电流限值算法中引入负荷同时系数 F_{HV} ,并就 F_{HV} 取值进行详细讨论,给出了同时系数最小值的计算方法。对于各类非线性负荷,尤其是非稳定的非线性负荷,如电气化铁路牵引负荷,同时系数的确定需要依据大量的电气化铁路干线和支线的牵引负荷测量统计数据,需要对非稳定的谐波源特性有充分

的了解,这是一项长期细致的工作,我国这方面的工作仍较薄弱。在不了解负荷特性的情况下,为便于工程应用,本文给出了负荷同时系数的一个取值建议,并结合我国电气化铁路谐波测量数据,验证了在电力用户谐波电流限值计算中引入同时系数的合理性。

参考文献

- [1] GB/T14549-93, 电能质量公用电网谐波[S]. GB/T14549-93, Quality of Electric Supply Harmonics in Public Supply Network [S].
- [2] IEC 61000-3-6:1996, Electromagnetic Compatibility Limits Assessment of Emission Limits for Distorting Load in MV and HV Power Systems [S].
- [3] 杨洪耕,张瑾,张一中. 电力用户谐波限值的评估方法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2000, (5):82-85. YANG Hong-geng, ZHANG Jin, ZHANG Yi-zhong. Assessment Approach for Harmonic Emission Limits from Customers in Supply Network [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2000, (5):82-85.
- [4] Kazibwe W E, Ortmeyer T H, Hamman M S A A. Summation of Probabilistic Harmonic vectors [J]. IEEE Trans on PWRD, 1989,4(1):621-628.

收稿日期:2006-03-06; 修回日期:2006-05-30

作者简介:

贺建闽(1955-),男,副教授,硕士,研究方向为电气化铁道供电系统、电网电能质量测控技术,长期从事我国电气化铁道供电系统电能质量监测、评价及谐波治理研究工作;

黄治清(1958-),女,副教授,学士,研究方向为电力系统自动化、电网电能质量测控系统研制及虚拟仪器设计。

(上接第41页 continued from page 41)

- [29] 董新洲,苏斌,施慎行. 二次扰动信息及其在继电保护中的应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 21-25. DONG Xin-zhou, SU Bin, SHI Shen-xing. Secondary Disturbance Information and Its Application in Relay Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(2): 21-25

作者简介:

梁振锋(1974-),男,硕士,讲师,研究方向为电力系统自动化和继电保护技术; E-mail: lzf@xaut.edu.cn

康小宁(1968-),男,副教授,研究方向为电力系统自动化和继电保护技术;

姚李孝(1962-),男,教授,研究方向为电力系统规划等。

收稿日期:2006-02-28; 修回日期:2006-11-02