

电力系统谐波电压标准的研讨

林海雪

(中国电力科学研究院,北京 100192)

摘要: 配合谐波国标 GB/T 14549-1993 的修订,介绍了国际电工委员会(IEC) 美国、英国、俄罗斯和其他一些欧洲国家新近出版的相关标准,以新老标准对比的方法,结合国内谐波状况调研,进行一些分析,提出国标中谐波电压限值修订的建议。

关键词: 谐波电压;标准;电能质量;限值;总谐波畸变率(THD)

中图分类号:TM714

文献标识码:A

文章编号:1671-8410(2011)04-0001-08

Investigation on Harmonic Voltage Standard in Power System

LIN Hai-xue

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: For cooperating the revising of national harmonic standard GB/T 14549-1993, this paper introduces the corresponding present standards of IEC, USA, UK, Russia, and some other European countries. By analysis and comparison combined investigating for harmonics of internal power networks, some suggestions for revising national harmonic voltage standard are presented.

Key words: harmonic voltage; standard; power quality; limits; Total Harmonic Distortion (THD)

0 引言

随着国民经济的快速发展,电力系统中非线性负荷越来越多,电网谐波“污染”导致的电能质量问题仍很普遍。由国家技术监督局颁布的国标《电能质量 公用电网谐波》(GB/T 14549—1993)正在修订。标准修订涉及国外相关标准和执行国标存在问题的调研,其中谐波电压的确定具有根本意义。为此,本文首先介绍了国际电工委员会(IEC)相关标准,然后在美国电气电子工程师学会(IEEE)以及英国、俄罗斯和其他一些欧洲国家新老版本的谐波标准中摘取了有关电网谐波电压方面的规定,对此作了对比介绍;结合国内谐波调研状况,进行了一些分析;并对国标中谐波电压限值提

出修订建议,可供标准修订人员以及对此问题有兴趣的专业人员参考。

1 IEC 谐波电压标准

国际电工委员会(IEC)是国际电气标准权威机构,为了统一各国电气标准和规范,陆续制定了电磁兼容(EMC)61000系列标准,其中相当部分已被我国采用为国标或指导性技术文件。IEC 61000系列标准文件分为国际标准和报告两大类文件。至今已出版的与谐波电压关系密切的标准文件有:

(1) IEC 61000-2-2《公用低压供电系统低频传导骚扰和信号传输的兼容水平》(国际标准,2002-03)^[1]。

该标准中规定了低压(LV)电网中单次谐波电压兼容值(表1,对应于长期值),短时兼容值的修正因子为:

$$k = 1.3 + \frac{0.7}{45}(h-5) \quad (1)$$

收稿日期:2011-05-20

作者简介:林海雪(1940-),男,教授级高工,全国电压电流等级和频率标准化技术委员会顾问,从事电能质量标准及补偿措施的研究、开发和工程应用工作。

表1 LV(低压)和MV(中压)系统中谐波电压兼容值(相对于基波分量的百分数)

Tab.1 Compatibility levels for harmonic voltages in low and medium voltage networks (percent of fundamental component)

奇次谐波(非3的倍数)		奇次谐波(3的倍数)		偶次谐波	
谐波次数 h	谐波电压 / %	谐波次数 h	谐波电压 / %	谐波次数 h	谐波电压 / %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3	21	0.3	8	0.5
17 h 49	$2.27 \times (17/h) - 0.27$	21 h 45	0.2	10 h 50	$0.25 \times (10/h) + 0.25$

注:总谐波畸变率(THD)为8%,THD是指各次谐波含量平方和开方,以基波分量为基值的百分数,对于非常短的时间(3 s以内)的影响,THD为11%,而各单次谐波电压含有率需用因子k乘以表中值。

(2) IEC 61000-2-4《工厂低频传导骚扰的兼容水平》 (国标GB/T 18039.4-2003)^[2]

该标准适用于低压和中压(MV)工业设备,标准中将电磁环境分为3类,其中第2类适用于一般工业环境下电网的公共连接点(PCC)和系统或装置内部的连接点(IPC),其兼容性标准等同于公用电网的标准(表1)

各类电磁环境下电压总谐波畸变率的兼容值如表2所列。第2类各单次谐波电压限值如表1所列,第1、3类的大致随THD值做相应变化(本文限于篇幅从略)。

表2 谐波电压兼容值

Tab.2 Compatibility levels for harmonic voltages

电磁环境	第1类	第2类	第3类
总谐波畸变率(THD) / %	5	8	10

(3) IEC 61000-2-12《公用中压供电系统低频传导骚扰和信号传输的兼容水平》(国际标准,2003-04)^[3]

该标准规定的中压谐波电压兼容值如同IEC 61000-2-2规定一样,已一并列入表1中。

(4) IEC 61000-3-6《对于连接到中压、高压和超高压电力系统的畸变设施发射限值的评估》(技术报告,2008-02)^[4]

该文件和国标《电能质量 公用电网谐波》(GB/T 14549-1993)关系比较密切,等同于国标GB/Z 17625.4,下面详细介绍:

表3 MV、HV和EHV系统中谐波电压规划值

Tab.3 Indicative planning levels for harmonic voltages in MV, HV and EHV power systems

奇次谐波(非3的倍数)			奇次谐波(3的倍数)			偶次谐波		
谐波次数 h	谐波电压 / %		谐波次数 h	谐波电压 / %		谐波次数 h	谐波电压 / %	
	MV	HV-EHV		MV	HV-EHV		MV	HV-EHV
5	5	2	3	4	2	2	1.8	1.4
7	4	2	9	1.2	1	4	1	0.8
11	3	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.4
13	2.5	1.5	21	0.2	0.2	8	0.5	0.4
17 h 49	$1.9 \times (17/h) - 0.2$	$1.2 \times (17/h)$	21 h 45	0.2	0.2	10 h 50	$0.25 \times (10/h) + 0.22$	$0.19 \times (10/h) + 0.16$

注:规划值和电能质量标准中限值基本上等同,对于总谐波畸变率,中压为6.5%、高压和超高压为3%;当计及EHV扰动设施对HV系统作用时,EHV规划值也许有必要取得比表3中规划值更低些;每天99%概率大值(3 s时段各次谐波分量的有效值)不应超过规划值乘以式(1)决定的系数k;每星期各次谐波有效值10 min的95%值不应超过规划值;谐波一般测量到40次或50次,但更高次(直到100次)谐波在某些情况(例如有换相缺口的大型换流器;高脉波数的大型换流器设施;有PWM换流器的电力电子设备和电力系统的相互作用产生的谐波)下也可能很重要。

1) 系统电压等级

该文件对系统电压 U_n 等级划分作了如下规定:

低压(LV)	$U_n < 1 \text{ kV}$
中压(MV)	$1 \text{ kV} < U_n < 35 \text{ kV}$
高压(HV)	$35 \text{ kV} < U_n < 230 \text{ kV}$
超高压(EHV)	$U_n > 230 \text{ kV}$

2) 谐波电压兼容值

谐波电压兼容值与表1列出的LV和MV系统中谐波电压兼容值相同。此外,文件中提出了“规划水平”或“规划值”概念。“规划值”等于或低于兼容值,由电力企业根据电网结构和其他条件来确定,作为企业内部质量目标值。表3为谐波电压规划值。

需要注意的是,本文件是2008年新版本,较1996年原版主要有下列变化:(1)文件名称由《中压和高压电力系统中畸变负荷发射限值的评估》变为《对于连接到中压、高压和超高压电力系统的畸变设施发射限值的评估》,这意味着限值适用范围扩大到超高压(230-500 kV),而不是仅用于公用电网(220 kV及以下)的畸变负荷;(2)谐波电压的“规划值”由例子变为正式推荐值且涵盖了中、高和超高压范围,而IEC尚无高压和超高压电网的谐波电压兼容值;(3)取消了技术报告的分类(原来分3类),本技术报告属EMC基础出版物。

2 美国 IEEE 谐波标准

美国 IEEE Std. 519—2005 对公用电网谐波电压允许值的规定如表 4 所列^[7]。

此标准和 1992 版的标准比较,只多了低压($V_n < 1$ kV)的规定。

表 4 电压畸变限值(标称电压的百分数)

Tab.4 Voltage distortion limits (percent of nominal voltage)

PCC 母线电压 V_n / kV	单次谐波电压畸变率 / %	总电压畸变率(THD) V_n / %
$V_n < 1$	5.0	8.0
$1 < V_n < 69$	3.0	5.0
$69 < V_n < 161$	1.5	2.5
$V_n > 161$	1.0	1.5

注:对于高压直流输电末端,THD 可达 2.0%。

表 4 中总谐波畸变的定义和常规的定义略有不同,此表中 THD 值是系统标称电压的百分数,而不是测量时的基波电压的百分数。这里所用的定义使电压畸变评估的基值不变(不随系统运行电压高低而变)。

表 4 中的限值为正常方式下一星期短时(10 min)值的 95% 概率大值。对于很短持续时间(3 s)的情况,限值可以放宽到 1.5 倍(一天 99% 概率大值)。

美国于 1981 年颁布的标准为《静止电力变流器的谐波控制和无功补偿 IEEE 导则》(ANSI/IEEE Std 519-1981)^[8],该标准中规定的电力系统谐波电压总畸变率如表 5 所列。

表 5 谐波电压总畸变率(美国 1981 年标准)

Tab.5 Total harmonic distortion of voltages (American standards in 1981)

电压等级	谐波电压总畸变率(THD _u) / %	
	一般电力系统	专用系统
低压 460 V	5	10
中压 2.4~69 kV	5	8
高压 115 kV 及以上	1.5	1.5

注:专用系统是指仅供变流器负载或不受谐波电压影响负荷的系统。

对比表 4 和表 5,可以看出 2005 年标准中将 1~69 kV 算为一级,1 kV 及以下又算一级。与 1981 年标准相比,前一级 THD 值维持不变(5%),后一级 THD 增加到 8%,并增加了 69~161 kV 电压级 THD 为 2.5% 的规定。该级涵盖了 1981 年标准中 115 kV 级,也就是 2005 年标准放宽了 115 kV 和低压级 THD 限值。

3 英国 G5/4 工程导则

英国 G5/4 工程导则是英国电气协会(EA)于 2001 年 2 月正式颁布的,称为《英国谐波电压畸变和非线性设

备接入输电系统和配电网的规划值》^[5]。

英国 G5/4 工程导则的主要内容有^[11]:(1)谐波畸变的系统规划值,其电压范围包括从 400 V~400 kV 各个电压等级;(2)非线性设备接入电网的三级评估程序及相应的限值;(3)非连续谐波畸变的限值;(4)规划水平可能被超过的处理原则。

该导则明确指出,“规划水平”是非线性设备接入电网时用的,此值以 IEC 关于谐波电磁兼容值为依据。规划水平不超过相应的兼容值。而对于 35 kV 及以下的系统,电磁兼容值是国际标准;35 kV 以上系统,兼容值只适用于英国。谐波电压总畸变率(THD_u)的兼容值如表 6 所列。

不同电压等级的谐波电压规划水平(摘录)如表 7 所列。可见该导则对各种谐波现象均有规定,不仅适用于供配电系统,也适用于输电系统。

表 6 谐波电压兼容值(THD_u)

Tab.6 Compatibility level for harmonic voltages (THD_u)

系统电压 / kV	0.4	36.5	66, 132	275, 400
THD _u / %	8	8	5	3.5

表 7 谐波电压规划水平(摘录)

Tab.7 Indicative planning levels for harmonic voltages (abstract)

系统电压	奇次谐波 (非 3 倍数)		奇次谐波 (3 的倍数)		偶次谐波		THD _u / %
	h	HR / %	h	HR / %	h	HR / %	
400 V	5	4.0	3	4.0	2	1.6	5
	7	4.0	9	1.2	4	1.0	
	11	3.0	15	0.3	6	0.5	
6.6 kV, 11 kV 和 20 kV	5	3.0	3	3.0	2	1.5	4
	7	3.0	9	1.2	4	1.0	
	11	2.0	15	0.3	6	0.5	
20 kV~ 145 kV	5	2.0	3	2.0	2	1.0	3
	7	2.0	9	1.0	4	0.8	
	11	1.5	15	0.3	6	0.5	
275 kV, 400 kV	5	2.0	3	1.5	2	1.0	3
	7	1.5	9	0.5	4	0.8	
	11	1.0	15	0.3	6	0.5	

注:HR 为谐波含有率。

英国于 1976 年颁布的工程导则 G5/3(“英国供电系统中谐波的限值”)^[6]曾在世界上产生很大影响,我国曾专门组团赴英考察学习。英国工程导则由 G5/3 到 G5/4 历经 25 年,这两个标准的对比对我国谐波标准的修订很有参考价值。英国工程导则 G5/3 关于供电系统谐波电压限值规定列于表 8。

对比表 7 和表 8,可以看出:(1)英国工程导则 G5/4

表8 供电系统谐波电压允许值(G5/3规定)

Tab.8 Admissible levels for harmonic voltages in electricity supply system (from G5/3)

系统电压 / kV	THD _u / %	HR / %	
		奇次	偶次
0.415	5	4	2
6.6, 11	4	3	1.75
33, 66	3	2	1
132	1.5	1	0.5

关于单次谐波电压含有率的规定比G5/3要细得多,这种细化规定源于IEC61000-3-6;(2)英国工程导则G5/4对于66 kV及以下谐波电压总畸变率(THD_u)的规定大体上和G5/3一样,66 kV以上谐波电压允许值(规划值)的规定大大放宽了(例如132 kV THD_u由1.5%变为3%);(3)英国工程导则G5/4还包括了275 kV与400 kV输电系统的谐波电压规划值,这为发电厂、直流换流站接网条件在谐波方面作了基本规定。

英国工程导则G5/4中还考虑了短时谐波畸变的冲击,这种冲击一般由晶闸管驱动的电动机启动过程引起,冲击持续时间一般小于3 s,可以执行IEC61000-2-2和IEC61000-2-12标准中对暂时(极短时)谐波电压畸变的兼容值规定(即将相应限值乘以式(1)决定的因子k)。

4 俄罗斯谐波电压标准

俄罗斯1997年颁布的《公用供电系统中电能质量限值》(OCT 13109-97)中规定的各级电网谐波电压总畸变率如表9所列^[9]。

表9 电网电压波形正弦畸变率(1997年)

Tab.9 Sine wave distortion for power network voltages (1997)

电压等级 / kV	谐波电压总畸变率 / %	
	正常允许值	最大允许值
0.38	8.0	12.0
6~20	5.0	8.0
35	4.0	6.0
110~330	2.0	3.0

注:正常允许值是指测量时段(推荐为7天)95%概率大值,最大允许值是指测量时段不许超过的值。

表11 中、低压供电端单次谐波电压限值(基波电压U₁的百分数,取至25次)Tab.11 Limits for individual harmonic voltages in low and medium voltage supply terminals (percent of U₁, up to 25)

奇次谐波				偶次谐波		说 明
非3的倍数次		3的倍数次		谐波次数 h	谐波电压 U _n / %	
谐波次数 h	谐波电压 U _n / %	谐波次数 h	谐波电压 U _n / %			
5	6.0	3	5.0	2	2.0	25次以上各次谐波电压通常很小,且由于谐振效应还很难预测,因此未给出限值。
7	5.0	9	1.5	4	1.0	
11	3.5	15, 21	0.5	6~24	0.5	
13	3.0					
17	2.0					
19, 23, 25	1.5					

注:本表数据引自EN 50160:2007

本标准是OCT 13109-87的修订版,1987年标准的相应规定见表10^[10]。

表10 电网电压波形正弦畸变率(1987年)

Tab.10 Sine wave distortion for power network voltages (1987)

电压等级 / kV	谐波电压总畸变率 / %	
	正常允许值	最大允许值
1	5.0	10
6~20	4.0	8
35	3.0	6
110	2.0	4

对比表9和表10,可以看出以下区别:

(1)1997年标准比1987年标准在中、低压限值上有明显放宽,特别是低压,直接采用了IEC电磁兼容值,而没有留裕度。

(2)无论哪个版本,除了规定正常允许值外,还规定了最大允许值,但最大允许值比正常值放宽程度不同,1987年版本是2倍,而1997年版本则基本上变为1.5倍。

(3)对于单次谐波电压允许值的规定,1987年版本只按奇次和偶次区分(奇次谐波允许值是偶次的1倍),而1997年版本则按IEC电磁兼容标准对不同类别和不同次数谐波电压作了详细规定(本文从略)。例如,低压的各次谐波规定完全等同于IEC表1规定。

5 其他一些欧洲国家谐波电压标准

早在1994年,欧洲电工标准化委员会(CENELEC)就颁布了《公共配电系统供电电压特性》,针对低压(1 kV)和中压(1kV~35 kV)配电系统供电端(即合同双方电能交接点)的一系列电能质量指标限值作了规定,其谐波电压限值见表11^[12]。表中的限值是指正常运行条件下,持续一星期、每次谐波电压10 min平均有效值的95%概率大值。其总谐波电压畸变率(THD)包括谐波次数40次及以下)应不大于8%。某些欧洲国家在配电网基本上执行此规定的同时,又补充制定高压(35 kV至230 kV)和超高压(230 kV以上)电网的谐波电压限值(表12~表14)^[13]。

表12 法国高压(HV)电网谐波电压限值

Tab.12 Limits for harmonic voltages in French HV power networks

奇次谐波				偶次谐波		总谐波畸变率 / %
非3的倍数次		3的倍数次		谐波次数 h	谐波电压 U_h / %	
谐波次数 h	谐波电压 U_h / %	谐波次数 h	谐波电压 U_h / %			
5, 7	2.0	3	2.0	2	1.5	3
11, 13	1.5	9	1.0	4	1.0	
17, 19	1.0	15, 21	0.5	6~24	0.5	
23, 25	0.7					

表13 葡萄牙高压(HV)及超高压(EHV)电网谐波电压限值

Tab.13 Limits for harmonic voltages in Portugal HV and EHV power networks

奇次谐波					偶次谐波			总谐波畸变率 / %	
非3的倍数次			3的倍数次		谐波次数 / h	谐波电压 U_h / %			
谐波次数 h	谐波电压 U_h / %		谐波次数 h	谐波电压 U_h / %		HV	EHV		
5	4.5	3.0	3	3.0	2.0	2	1.6	1.5	THD _{HV} 8 THD _{EHV} 4
7	3.0	2.0	9	1.1	1.0	4	1.0	1.0	
11	2.5	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.5	
13	2.0	1.5	21	0.2	0.2	8	0.4	0.4	
17	1.3	1.0	>21	0.2	0.2	10	0.4	0.4	
19	1.1	1.0				12	0.2	0.2	
23,25	1.0	0.7							
>25	25/h	0.2+12.5/h							

表14 挪威高压(HV)及超高压(EHV)电网谐波电压限值

Tab.14 Limits for harmonic voltages in Norway HV and EHV power networks

奇次谐波					偶次谐波			总谐波畸变率 / %	
非3的倍数次			3的倍数次		谐波次数 h	谐波电压 U_h / %			
谐波次数 h	谐波电压 U_h / %		谐波次数 h	谐波电压 U_h / %		HV	EHV		
5	3.0	2.0	3	3.0	2.0	2	1.5	1.0	HV, EHV的THD 均为3%(10 min值)
7	2.5	2.0	9	1.5	1.0	4	1.0	0.5	
11	2.5	1.5	15, 21	0.5	0.5	6	0.5	0.5	
13, 17	2.0	1.5	>21	0.3	0.3	>6	0.3	0.3	
19	1.5	1.5							
23	1.5	1.0							
25	1.0	1.0							
>25	0.5	0.5							

从表12~表14可以看出,欧洲一些国家对高压和超高压电网的限值目前基本上采用THD为3%的限值(过去老标准为1%~1.6%不等)。文献[14]介绍了法国供电公司和用户间电能质量的承诺,其中谐波电压限值如表12所述,同时也规定了用户谐波电流(以额定电流的百分数表示)限值。

6 我国各电压等级谐波电压的基本状况

国标GB/T 14549-1993自颁布以来,得到除铁路以外的绝大多数行业认可,对公用电网谐波水平的控制和管理起到了重要作用。通过对现有部分资料整理,表15列出了国内各电压等级电网谐波电压大致状况^[15-39]。

由表15可见:

(1)各类非线性负荷的数量是影响其电压等级谐波水平的主要因素,而非线性负荷的数量又与地区经济发展水平密切相关。如文献[17]的数据是1994年左右统计得出的(GB/T 14549-1993颁布不久),当时浙江的经济规模和发展阶段使非线性负荷的数量不断增加,在其接入公用电网时又基本上无章可循,因此谐波水平较高。云南、贵州2006年的经济发展水平与浙江1994年的相当,虽有GB/T 14549-1993提供限制谐波水平的依据,但对电能质量的要求管理不严,在非线性负荷接入时没有进行必要的电能质量评估及限制,因此文献[20-22]中给定的谐波水平较高;当然,某些电压等级(例如

表15 国内各地区各电压等级THD 普查结果

Tab.15 General investigation results for THD of voltage classes in different districts

电压等级 / kV	GB/T 14549-1993 的 THD 限值 / %	文献	测试时间与地区	超标率 / %
110	2.0	[15]	河北、石德电气化铁路	16.7
		[16]	1987-1994 年, 福建	电铁投入前 12.5, 投入后 75
		[17]	1994 年, 浙江	46.1
		[18]	2004 年, 浙江(电铁)	0
		[19]	2005 年, 宁夏固原(电铁)	100
		[20-21]	2002~2004 年, 贵州都匀供电局、贵阳市南供电局	50
		[22]	2006 年 1~6 月, 云南版纳地区	100
		[23]	2006 年 1~6 月, 云南玉溪地区	0
66	3.0	[24]	2006 年 6 月, 云南内昆电铁	100
		[25]	1998 年, 吉林	20
35	3.0	[26]	徐州	0
		[20]	2002~2004 年, 贵州都匀供电局	80
		[27]	2006 年, 广东部分变电站母线	0
		[23,28-30]	多地点(山西、云南、广西)	33.3
10	4.0	[25]	1998 年, 吉林	0
		[26]	徐州	29.2
		[21,31]	2002~2004 年, 贵州都匀供电局、贵阳市南供电局	23.5
		[32]	2006 年, 广东部分用户	0
		[27]	2006 年, 广东部分变电站母线	40.5
6	4.0	[26]	徐州	0
		[32]	2006 年, 广东部分用户	0
		[33-37]	2004~2007 年, 油田、石化、工业多地点	30
		[38]	2005 年, 埕岛海上配电系统	0
0.38	5.0	[39]	1998~2000 年, 北京 20 个居民配电小区和 3 座居民楼	60
		[25]	1998 年, 吉林	0
		[17]	1994 年, 浙江	33.3
220	2.0(参考 110 kV)	[18]	2004 年, 浙江(电铁)	0
		[20]	2006 年, 贵州	0

110 kV, 0.38 kV)标准可能限制过严也是应考虑的因素。

(2)随着供、用电双方对电能质量的认识和要求不断提高,各类电能质量治理的手段也日益完善。在这种情况下尽管非线性负荷不断增多,但谐波水平仍有可能降低,问题在于从整体技术经济效益出发制定一个恰当的谐波标准。文献[18]反映电铁在采用220 kV供电后,110 kV谐波水平并没有超标。

(3)目前我国电铁负荷大多由110 kV电网供电(东北及赣、浙部分地区以及京沪高铁由220 kV电网供电),因此电铁对该电压等级的谐波水平影响很大,如不予以治理,与之相关的公用电网谐波水平大多超标(文献[16][19][24])当然相关的标准是否适当放宽也是可以讨论的。

(4)低压0.38 kV对城镇居民区的谐波电压水平值得关注,从文献[39]对多个居民区长期监测结果可以看出,超标还是相当严重的。

7 关于电网各级谐波电压限值的分析计算

现行国标GB/T 14549-1993在确定各级谐波电压限值时曾做过一个专题研究^[40]。该研究取电网“典型”参数,构建了一个从0.38 kV至220 kV的“典型”供电网,由低压0.38 kV总畸变率5%出发,往上推算至110 kV,求得各级谐波电压总畸变率(THD)。现将推算的THD和标准中采用的THD限值列于表16中,两者看似十分接近。

表16 谐波电压总畸变率(THD)的比较

Tab.16 Comparison of THD

电压等级 / kV	谐波电压总畸变率 / %	
	文献[40]推算的	现行标准采用的
110	1.57	2.0
35	3.10	3.0
10	4.08	4.0
0.38	5.0	

众所周知,电网的实际结构形式多种多样,各级设备参数很难“典型”化。例如10 kV配电变压器容量范围为20~1 600 kVA;35 kV变压器的为160~6 300 kVA;110 kV变压器的为6 300~150 000 kVA;220 kV变压器为40 000~400 000 kVA。也就是说,各级变压器容量约有十至几十倍差,而高压线路短至几公里,长至几百公里,同一电压等级母线的短路容量可以相差十几倍或几十倍,负载情况(容量大小、谐波特性等)也各异。在众多网络结构形式和十分分散的参数组合情况下,选定任何“典型网络”作计算,只能称为“算例”,其量化的有效性(即适用范围)是十分有限的。当然某些定性结果还是可信的,例如谐波电压限值应随电压等级提高而减小等。至于表16的结果,笔者认为是一种人为巧合,因为这个结果与当时英国工程导则G5/3中限值很接近^[6],正好用这个算例作为佐证,选取标准限值。但决不能说,各级谐波电压限值就凭此例计算确定。实际上这类计算很多方面也是经不住严格推敲的。目前在修订国标中,有人也利用这个“典型网络”进行谐波电流电压限值和谐波阻抗的验证^[41]或做高压交流系统谐波限值研究^[42]。笔者认为,对这类工作成果的局限性要有清醒的认识。各国制定的新标准在电压等级上有简化的趋势,例如IEC 61000-3-6提出的“规划水平”,只分高、中、低三大电压等级;英国将20 kV~145 kV合为一级(过去是两级)。

8 关于国标中谐波电压限值的建议

谐波电压限值的考虑应遵循下列原则:

(1)在电力系统中谐波是一种污染源,会造成一系列危害,因此必须严加控制。但控制谐波需要付出相当大的成本代价,尤其是随着电力电子技术普及,谐波源越来越多,控制成本也越来越大,因此过严的要求会导致社会资源的很大浪费。实际上,按目前技术水平,任何谐波畸变都可以解决,只不过有个技术经济比较的问题。

(2)谐波国标(GB/T 14549-1993)已颁布了十几年,由此电网谐波控制取得很大的成绩,但也暴露不少问题,在执行中已积累了大量宝贵的经验,因此必须结合国情,在充分总结经验基础上,对国标作修订。

(3)近年来,国际上一些学术组织(如IEC)以及许多国家对谐波标准均作了修订,我们必须与时俱进,以这些最新版本的标准作为修订的主要参考。

(4)标准是某些领域技术水平的反映,也是各相关部门协调的产物,应尽量兼顾各方意见,协商一致,当

然必须保证标准的科学性、先进性、合理性和可操作性。同时,国家标准必须以国家利益为基本出发点。

兹提出电网各级谐波电压总畸变率THD限值(表17)供讨论。

表17 谐波电压总畸变率(THD)限值
Tab.17 Limits of total harmonic distortion (THD) of voltage

电网标称电压 / kV	谐波电压总畸变率 / %	
	现行标准限值	建议修订值
0.38	5.0	6.0
6, 10	4.0	4.0
35, 36	3.0	4.0
110	2.0	3.0
220~500	(2.0)	2.0

说明:

(1)低压380 V电网用电设备最多也最为复杂。随着电力电子技术及家用电器普及,谐波水平在不断提高。文献[39]表明(表15),城市居民区如按THD为5%控制,将可能有相当高的超标比例,而这种情况的超标基本上应由电力公司负责解决,这是量大面广的事,做起来难度较大,目前实际监管力度不大。参考国外最新标准,大多数直接用IEC 61000-2-2中电磁兼容8%的规定(注:低压的电磁兼容水平和规划值是一样的,例如美国IEEE Std.519-2005中增加了低压THD为8%的规定)我国标准大多采用IEC,也应向该限值过渡。考虑到电容器、电动机(也用IEC标准)等设备耐受谐波能力较差,可以考虑这次修订暂采用THD为6%。还需指出,IEC 61000-2-2早于1990年已将低压THD为8%作为国际标准发布,我国于2003年已等同采用此标准为国标(GB/T 18039.3),因此从标准值协调的角度,采用THD为8%也是可以的。不过作为电能质量标准,为用户设备多留一些谐波耐受裕度,当然更好,但电力公司应加强监管。

(2)中压6 kV~66 kV宜合并采用THD为4%的规定。这是考虑到谐波有高低压渗透作用,高压的谐波限值理应比低压小。同时考虑到电网结构、参数、负荷状况巨大的分散性以及谐波源的发展,为了充分发挥电网容纳谐波源的能力,目前将中压统一采用THD为4%较合适。需要指出的是,IEC 61000-2-12^[3]中规定的中压电网电磁兼容水平完全等同于低压电网,因此欧盟及欧洲一些国家已将中、低压谐波标准等同采用(见本文第5部分);不过从文献[4]来看,IEC仍将中压的THD定为6.5%(规划值),比低压8%要小些。

(3)高压110kV THD限值的确定是目前标准修订工作组中争论焦点之一。实际上分歧不大,无非在2%(个别别人主张)2.5%和3.0%(参与争论的人数较多)之间如

何选择的问题。对于采用2.5%或3.0%限值,笔者认为都是可行的,要在这两个限值之间做技术经济比较几乎是不可能的,而且电网中尚未发现在这样限值水平下运行有明显的问题(当然,谐波标准不能以是否马上出问题为界,谐波造成的许多“慢性病”也应当考虑,从这个角度看,当然是2.5%好,但问题还涉及谐波改善和治理费用,所以不能一概而论)。笔者主张采用3%,补充的理由是:已有许多国家(特别是欧洲国家)和IEC已采用或推荐采用3%。如110 kV采用2.5%,那么220 kV采用多少为宜?如用1.5%,从国内运行实践看,太严了些;如用2.0%,则和110 kV限值太接近;如用2.5%,似无放宽必要。

(4)高压220 kV和超高压330 kV、500 kV的THD限值在现行标准中并不明确或未作规定,从国内对“220 kV参照110 kV执行”实际情况看,基本上令人满意。330 kV是西北电网独有的,500 kV是大多数的主干网,由于近期有用户接入,已成为公用电网。对于220 kV~500 kV的THD取2%,在国际上属于中等水平(美国为1.5%,欧洲为3.0%),目前看是比较合适的。

9 结语

本文在介绍国际电工委员会(IEC)美国、英国、俄罗斯和其他一些欧洲国家新近颁布的谐波电压标准基础上,对新老标准作了对比,结合国内谐波电压状况的调研结果,进行一些分析,提出国标中谐波电压限值的修订建议。

限于篇幅,本文对谐波电压限值的细节规定方面(例如奇次谐波和偶次谐波,短时谐波和长期谐波,限值的测量评估等等)暂不作讨论。显然,在确定了各级谐波电压的THD后,以上细节就不难补充。

参考文献:

- [1] IEC 61000-2-2 EMC Part 2: Environment: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems[S]. 2002.
- [2] IEC 61000-2-4 EMC Part 2: Environment: Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances[S]. 2002.
- [3] IEC 61000-2-12 EMC Part 2: Environment-Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public medium-voltage power supply systems [S]. 2003.
- [4] IEC/TR 61000-3-6 EMC Part 3: Limits-Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems [S]. Basic EMC publication, 2008-02.
- [5] The Engineering Recommendation G5/4—Planning Levels for harmonic voltage distortion and the connection of non-linear equipment to transmission systems and distribution networks in

- the United Kingdom[S]. The Electricity Association, 2001.
- [6] Engineering Recommendation G5/3, Limits for harmonics in the United Kingdom electricity supply system[S]. The Electricity Council chief Engineers Conference, UK, 1976.
- [7] IEEE Std 519-2005 IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems[S].
- [8] ANSI/IEEE Std 519-1981 IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters[S].
- [9] [S]. 13109-97.
- [10] [S]. 13109-87.
- [11] 林海雪. 英国电气协会工程导则G5/4评述[J]. 电网技术, 2006(13): 90-93.
- [12] EN50160: 2007 Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks[S]. CNELEC.
- [13] He Xuenong. 现代电能质量测量技术[M]. 美国福禄克公司, 2010.
- [14] 杨显军. 法国电网电能质量承诺和电能质量评估[J]. 南方电网技术, 2009, 3(3): 7-14.
- [15] 刘勇, 段晓波, 梁智瑞, 等. 电气化铁路V/v牵引变压器接入系统谐波评估[J]. 河北电力技术, 2007, 26(5): 21-24.
- [16] 吴敏辉, 吴丹岳. 电气化铁路对福建电网谐波水平的影响[J]. 福建电力与电工, 1996, 16(1): 17-19.
- [17] 鲍敏铎. 电力系统谐波及其危害[J]. 浙江电力, 1994(4): 18-22.
- [18] 林磊. 电气化铁路对电力系统影响的分析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [19] 姚宗博, 侯世英, 祝石厚. 电气化铁路牵引负荷对固原电网的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(S1): 15-19.
- [20] 贵州电力试研院. 贵州电网谐波等电能质量问题分析、思路及工作汇报[R]. 2006.
- [21] 贵州电力试研院. 都匀供电局谷硐变、沿山变、详寨变、翁北变、碧波变谐波测试报告[R]. 2004.
- [22] 云南版纳供电局. 云南版纳供电局220 kV景洪变2006年报[R]. 2007.
- [23] 云南玉溪供电局. 云南玉溪供电局220 kV九龙变2006年报[R]. 2007.
- [24] 云南电力试验研究所. 云南内昆电铁测试报告[R]. 2002.
- [25] 余培岩, 界金星. 吉林省电网谐波水平分析[J]. 吉林电力技术, 1998(4): 45-46.
- [26] 冯宇. 基于电量参数分析的电能质量评估方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2007: 75-76.
- [27] 广东电网电力科学研究院. 广东电网部分变电站母线电压谐波测试报告[R]. 2006.
- [28] 王金浩, 梅兵. 电铁谐波向中低压侧渗透的分析[J]. 四川电力技术, 2006, 29(S1): 10-13.
- [29] 赵旺初. 电力网的大谐波源及降低谐波的措施[J]. 供用电, 1997, 14(1): 25-28.
- [30] 南宁供电局. 广西电网测试报告[R].
- [31] 贵州电力试研院. 贵阳市南供电局筑东变、站街变、龙岗变、沙冲变谐波测试报告[R]. 2002.
- [32] 广东电力科学研究院. 广东电网部分用户谐波测试报告[R]. 2006.
- [33] 李菁华, 温嘉斌, 宗继东. 大庆油田低压配电网谐波检测与研究[J]. 供用电, 2007, 24(6): 76-78.
- [34] 张军梁, 马皓. 大型石化配电系统谐波分析与治理[J]. 机电工程, 2007, 24(7): 11-14.

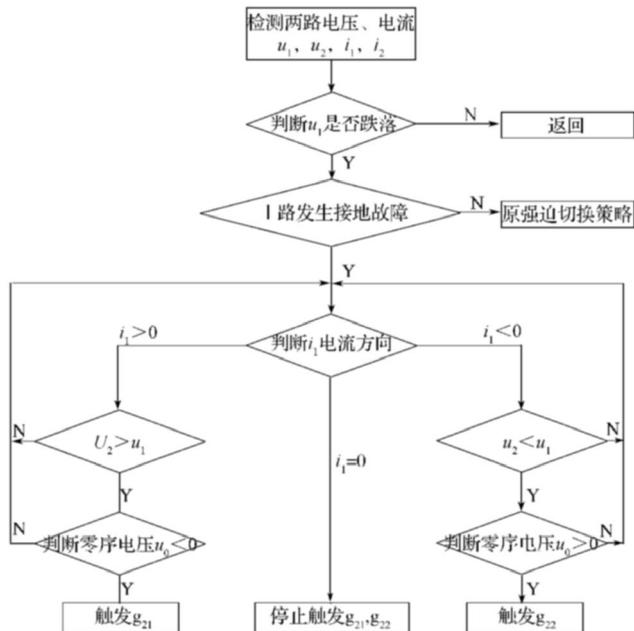


图9 改进后的强迫切换流程图

Fig. 9 Diagram of improved forced-commutation strategy

3 试验

采用改进后的强迫切换策略在10 kV混合式三单元固态切换开关装置上进行了相关试验,取得了很好的效果。试验结果表明,在没有零序电压情况下,切换时间约为3 ms;在存在零序电压的情况下,切换时间为6 ms,切换时间远远小于过零切换策略。图10、图11分别为无零序电压和有零序电压情况下,采用改进后的强迫切换策略时,I路电源和II路电源的电流波形。

4 结语

SSTS本身应用于对供电可靠性有较高要求的场合,切换迅速而且可靠是装置的根本特点。本文提出了一种改进后的强迫切换控制策略并应用到10 kV混合三单

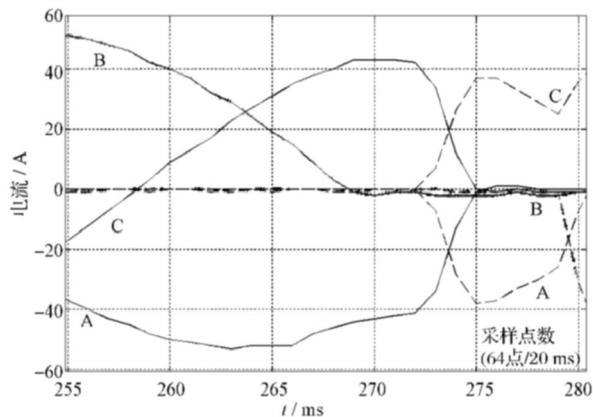


图10 无零序电压情况下I路电源(实线)和II路电源的电流(虚线)

Fig. 10 The current of source I (solid line) and source II (dotted line) without zero-sequence voltage

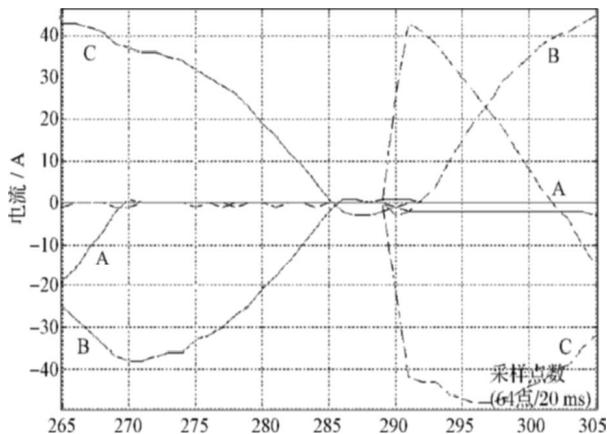


图11 有零序电压情况下I路电源(实线)和II路电源的电流(虚线)

Fig. 11 The current of source I (solid line) and source II (dotted line) under zero-sequence voltage

元式SSTS装置中。试验证明, SSTS装置采用改进后的算法,不仅有效地缩短装置的切换时间,而且明显增强其对电力系统的适应能力和故障应对能力。新算法为装置的产品化奠定了基础。

参考文献:

- [1] 肖遥,李澍森. 供电系统的电压下凹[J]. 电网技术, 2001, 25(1): 73-77.
- [2] 姜齐荣,沈斐,韩英铎. 现代电能质量控制技术[J]. 电力电子技术, 2004, 38(6): 2-7.
- [3] 严干贵,黄亚峰,姜齐荣,等. 未来的用户电力技术[J]. 电站设备自动化, 2006(1): 1-8.
- [4] 王松岑. 固态切换开关的研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2004.
- [5] 王松岑,于坤山,汤广福. 10kV固态切换开关研制[J]. 电力电子技术, 2008, 42(3): 37-39.

.....

(上接第8页)

- [35] 张尊儒,刘旭刚. 某电子铝箔厂的谐波治理与无功补偿[J]. 广西电力, 2004(2): 7-9.
- [36] 雷雯. 浅论烟厂配电系统的谐波问题[J]. 安徽科技, 2006(4): 52-53.
- [37] 李国栋. 天津百思特制管有限公司10 kV配电站谐波治理[J]. 天津电力技术, 2006(1): 44-46.
- [38] 项明. 埕岛海上配电系统谐波分析及治理方案研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005: 50-53.
- [39] 陈斌发. 配电变压器接法对谐波影响的分析[J]. 电网技术, 2001(6): 55.
- [40] 任元,陈宝喜. 电网各电压等级的谐波电压[J]. 中国电力, 1994(8): 38-40.
- [41] 李建华,刘军成. 谐波电流电压限值计算的专题研究[R]. 谐波国标修订工作组, 2010.
- [42] 杨晓妮,韩民晓,陈青. 高压交流系统谐波限值研究[R]. 谐波国标修订工作组, 2009.