

利用移相变压器提高川渝断面输电能力的研究

陈刚, 丁理杰, 汤凡, 滕予非, 魏巍

(国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川成都 610072)

摘要: 川渝断面的洪板双回和黄万双回潮流分布不均, 极大地限制了四川电网交流外送能力。对利用加装移相变压器(简称移相器)改善洪板双回和黄万双回的潮流分布, 从而提高川渝断面输电极限的可行性进行了初步分析。首先, 调研了移相器在国内外的应用与研究情况。其次, 简要介绍移相器的分类和基本原理、选址原则以及容量设计方法。最后, 利用 PSASP 软件, 对移相器在川渝断面应用的可行性进行了分析。研究表明, 移相器能够显著提高川渝断面的输电极限, 同时对改善 500 kV 站点的短路电流也有一定的作用。

关键词: 移相变压器; 川渝断面; 潮流; 输电极限

Abstract: The power flow between Hong - Ban lines and Huang - Wang lines in tie - line between Sichuan and Chongqing power grids is uneven , which extremely limits the transmission capability of Sichuan power grid. The feasibility of changing power flow distribution and improving the transmission capability of the tie - line by utilizing phase - shifting transformers (PSTs) is analyzed. Firstly , the applications and researches of PST at home and abroad are presented. Then , the working principle , rules of location selection and capacity design method are introduced briefly. Finally , the application of PST is analyzed by PSASP. Simulations results show that the PST can significantly improve the transmission capability of tie - line between Sichuan and Chongqing power grids. At the same time , the short - circuit current of 500 kV buses is also reduced.

Key words: phase - shifting transformer; tie - line of Sichuan - Chongqing power grid; power flow; transmission limit

中图分类号: TM713 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2014)05 - 0049 - 06

0 引言

四川电网仅通过由 500 kV 洪沟—板桥双回(简称洪板双回)和 500 kV 黄岩—万县双回(简称黄万双回)构成的川渝断面与华中电网交流互联。“十二五”期间, 随着以向家坝、溪洛渡等为代表的大型水电站的投运, 川渝断面输电极限极大地限制了四川水电的送出。提高川渝断面的输电极限已经成为四川电网甚至华中电网重点关注的问题之一。

移相变压器(phase - shifting transformer , PST) , 简称移相器, 可以实现按照一定方向和一定功率的潮流控制, 改变环网潮流分布, 进而达到避免输电线路或变压器主设备过负荷的情况, 提高供电可靠性, 并实现合理分配线路潮流以提高输电断面功率的目的^[1]。此外, 文献[2]指出, 移相器对于降低短路电流也有一定的作用, 文献[3]指出基于晶闸管技术的静止移相器还能提高系统稳定性, 通过恰当的控制手段实现对系统振荡的抑制。

川渝断面输电能力受限的根本原因是洪板双回和黄万双回潮流分布不均, 潮流不均导致洪板双回过早达到稳定极限, 而黄万双回潮流很小得不到充分利用, 极大地限制了川渝断面的输电能力。雅安—武汉 1 000 kV 交流特高压建成后, 将缓解川电外送的压力, 然而, 受施工难度和其他不可抗拒因数的影响, 工程进度存在较大的不确定性。因此, 从充分利用现有网架资源的角度出发, 研究配置移相器改善潮流分布, 进而提高川渝断面的输电能力具有重要意义。

首先对移相器在世界各地的应用与研究情况进行调研, 并简单介绍移相器的基本原理、选址原则以及设计方法, 最后对移相器在川渝断面应用的可行性进行了分析。基于 PSASP 的仿真研究结果表明, 移相器能够显著提高川渝断面的输电能力; 同时, 对改善 500 kV 洪沟站的短路电流也有一定的作用。

1 移相器的应用与研究现状

有关移相器的认知最早始于 20 世纪 30 年代。

之后的若干年间,北美、日本以及欧洲多个国家如瑞典、荷兰、德国等的学者和工程师们进行了大量研究,并实现了移相器在电网中的实际应用。截止到目前,世界上已有几十台移相器应用的记录。典型的移相器应用记录可归纳如表 1 所示。

从表 1 可以看到,国外的移相器应用已经相当成熟,各个电压等级均有了应用的记录。基于这些工程应用经验,IEEE 已经形成了移相器的标准^[10],为移相器的应用技术条件、设备规范和现场试验要求等提供了指导。

表 1 移相器的应用情况

年代	国家	电压 /kV	容量 /MVA	工程简介
1930	美国	66	30	解决 66 kV 和 132 kV 电磁环网潮流分布问题 ^[4]
1984	日本	275	—	控制环网潮流,降低网损,消除过负荷 ^[5]
1995	美国	525	650	控制线路潮流,充分利用线路输电能力 ^[6]
2003	意大利	400	1 630	优化从法国到意大利的输电潮流 ^[7]
2003	荷兰	380	1 000	荷兰到德国和比利时的联络线潮流分布 ^[8]
2009	英国	400	2 000	提高北部到南部的输电能力 ^[9]

目前,生产移相器的厂家主要有西门子、ABB、依林、Alstom、Cooper 等。在国内,保定天威保变电气股份有限公司是唯一拥有自主知识产权和供货经验的厂家,主要供货美国、加拿大等海外国家^[11-12]。然而,保定天威保变电气目前的供货记录最高电压等级为 220 kV,不确定是否有生产 500 kV 等级移相器的能力。

2 移相器的基本原理

2.1 移相器的移相原理

根据对电压幅值和相角的调节效果不同,移相器可分为纵向、横向和斜向三种^[3]。纵向移相器在线路中串入与输入电压相同或反相的附加电势,以改变电压幅值,而不能改变相位。横向移相器在线路中串入与输入电压正交的附加电势,可同时实现对幅值和相位的调节。横向移相器虽然既可以调节电压的大小也可以调节电压的相位,但其补偿电压只有一个自由度,调节方式不够灵活。为此,斜向移

相器应运而生,它可以灵活地调节电压的幅值和相位,得到了广泛的应用。下面以斜向移相器为例对移相器的基本原理进行简单说明。

如图 1 所示,移相器一般由串联变压器和并联变压器两部分组成^[2]。串联变压器为 Y/Δ 联接,并联变压器为 Y/Y 联接,且中性点接地。串联变压器的原边绕组与线路串联,中间抽头连接到并联变压器的原边绕组。并联变压器与线路并联,副边绕组带有极性选择器 K_{ZF} 并具有分接头控制,与串联变压器的副边绕组相连,连接的相序对应关系为 A→C、B→A、C→B。

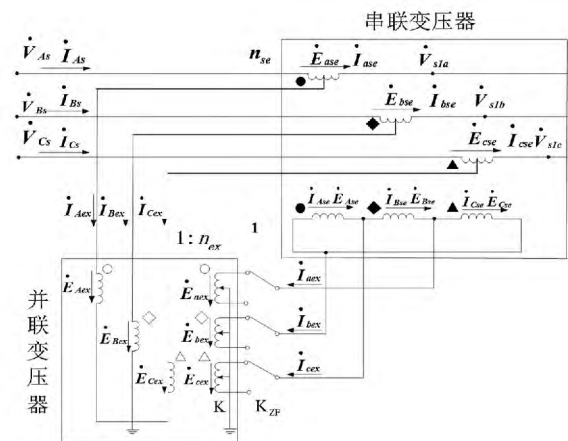


图 1 典型移相器的原理接线图

移相器运行时,并联变压器为串联变压器提供励磁,在串联变压器的原边绕组提供了一个相比移相器接入点送端系统侧相电压 \dot{V}_{AS} 超前或滞后 90° (由极性选择器 K_{ZF} 控制) 的附加电压 \dot{E}_{ase} ,如图 2 所示。

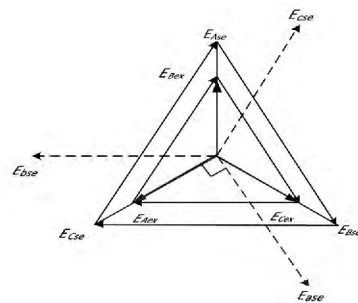


图 2 移相器各变压器绕组电压相位关系图

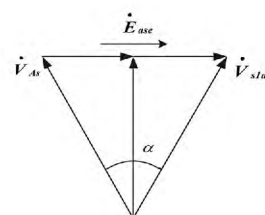


图 3 移相原理图

从而,使移相器的输出电压 \dot{V}_{sla} 与输入电压 \dot{V}_{As} 之间产生了相位差 α (大小由并联单元副边分接头控制),如图3所示^[11],达到改变电压相位的目的。

2.2 移相器的等值模型

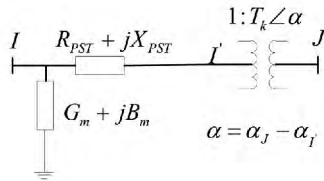


图4 PSASP中移相器仿真等值模型示意图

在进行仿真时,移相器可用漏抗 Z_{PST} 串联一个变比为复数的理想变压器来模拟,其等值图如图4所示^[15]。在仿真时,通常设置 G_m 和 B_m 为无穷大, R_{PST} 为0,即忽略激磁电导、激磁电纳以及漏电阻,变比通常设置为1,输入的控制角 α 为不考虑损耗时的理想值 $\alpha = \alpha_J - \alpha_I$,考虑漏抗 $Z_{PST} = jX_{PST}$ 后,移相器实际的调整角度 $\alpha' = \alpha_J - \alpha_I$ 跟仿真输入的 α 会有一定的差异。

2.3 移相器控制线路潮流

对于两端输电系统,设受端母线的电压相角为0,则线路传输功率为

$$P = \frac{U_1 U_2}{X_L} \sin \delta \quad (1)$$

式中, U_1 、 U_2 分别为送、受端的电压幅值; δ 为送端电压相角; X_L 为线路阻抗。

当线路中串联有如图4所示的移相器时,线路传输的功率为

$$P = \frac{U_1 U_2}{X_L + X_{PST}} \sin(\delta + \alpha) \quad (2)$$

从式(2)可知:1) 移相器的串入,改变了线路传输功率的大小,若送端和受端还有其他线路相连,则移相器改变了潮流在两回线路上的分布;2) 移相器使得送受电两端能够用更小的相角差传输相同的功率,并且两端传送功率的最大值降低;3) 移相器引入的漏电抗 X_{pst} 相当于在线路中串联了一个电抗,增大了移相器安装母线与系统的电气距离,可以降低安装位置的短路电流。

3 移相器的设计

3.1 移相器的选址

文献[13]、[14]对移相器的选址问题进行了研究,综合分析可知,在进行移相器的选址时,需要考

虑如下几个指标:1) 安装移相器后潮流的改变量;2) 线路潮流变化关于移相器调节幅度的灵敏度。其中指标1直接体现了移相器的效果,指标2则体现了移相器的效率,对于改变相同的潮流,需要移相的角度越小,移相器的损耗越小。

当然,在实际应用时,还需要综合考虑出线间隔、变电站建设场地等因素,需要针对实际问题进行具体分析。

3.2 移相器容量的选择

移相器的容量即为所在线路的极限传输容量,根据文献[3]的分析结论,串联变压器和并联变压器的容量相同。设配置移相器的线路极限传输容量为移相器的空载移相角调节范围为 $\pm \alpha$,则并联和串联变压器的容量为^[3]

$$S_{并} = S_{串} = S \sin \alpha \quad (3)$$

由于通常 α 较小,可知,并联变压器和串联变压器的容量远小于移相器的总容量。

4 移相器在川渝断面的应用分析

川渝断面由南部通道洪板双回和北部通道黄万双回构成,实现四川电网与华中主网的交流互联,如图5所示。

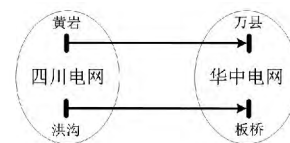


图5 川渝断面输电示意图

由于四川的水电主要集中在西部和南部,重庆的负荷集中在南部,使得四川水电主要通过南部通道送至重庆南部负荷中心。进一步仿真分析表明,在同等负荷条件下,增加川西南水电开机会增加洪板线的潮流,进而增大洪板线和黄万线的潮流;增加渝北火电开机会限制北部通道的潮流,同样会增大洪板线和黄万线的潮流,并且渝北火电对川渝断面的潮流分布的影响更大。其原因是渝北火电的开机相当于在北部通道的受端增加了一个大的电源,从而限制北部通道的潮流传输;川西南水电的开机相当于在南部通道送端增加大电源,从而进一步增大南部通道的潮流水平。最终导致洪板双回严重过载,限制川渝断面的输电极限,给四川水电的送出带来了极大的压力。与此同时,黄万双回潮流过轻,

500 kV 线路得不到充分利用,造成了资源的浪费。以 PSASP 软件为仿真工具,研究通过装配移相器改善潮流分布情况,提高黄万线的利用率,进而提高川渝断面的送出能力。

4.1 移相器安装位置的选择

按照前面给出的移相器安装位置选择原则,分别模拟在洪板双回、黄万双回加装移相器,仿真结果分别如表 2 和表 3 所示。仿真中忽略电阻,漏电抗选择与相邻的 500 kV 主变压器正序电抗一致。

表 2 洪板双回洪沟侧加装移相器

控制角 / (°)	实际移相角 / (°)	潮流 / MW			
		洪板双回	黄万双回	转移量	转移比 / %
无	—	2 677	1 327	—	—
-1	-13.3	2 101	1 873	576	21.5
-3	-14.7	2 034	1 938	643	24.0
-5	-16.3	1 969	2 001	708	26.5

表 3 黄万双回黄岩侧加装移相器

控制角 / (°)	实际移相角 / (°)	潮流 / MW			
		洪板双回	黄万双回	转移量	转移比 / %
无	—	2 677	1 327	—	—
10	1.8	2 602	1 395	75	2.8
15	5.7	2 436	1 556	241	9.0
17	7.3	2 370	1 618	307	11.5
18	8.0	2 338	1 650	339	12.7
19	8.8	2 306	1 681	371	13.9

从表 2 和表 3 可以看到,加装移相器后实际的移相角与设置的控制角不同,这是由于等值漏抗的滞后作用。当洪板线加移相器时,由于移相器移相目标本来就是滞后角度,等值漏抗恰好起正作用,因此移相器仅需要很小的角度就能实现较好的潮流转移结果;而在黄万线安装时,需要移相器移相目标为超前一定角度,这时漏抗起反作用,需要较大的移相角才能实现潮流的转移。洪板线洪沟侧加装移相器时,移相器改变相同角度时引起的潮流转移量远大于在黄万线黄岩侧安装的情况,因此移相器更适合配置在洪板双回洪沟侧。

4.2 移相器的容量设计

按照洪板线单回热稳极限 1 900 MW 设计移相器的容量,移相器的额定功率可选择为 2 000 MVA。根据前面分析,洪沟侧的移相器不需要太大的移相

角就能够取得很好的潮流转移效果,设计移相角为 $\pm 10^\circ$,则串联和并联电压的容量均为 $2\,000 \times \sin 10^\circ = 347$ MVA,可设计为 350 MVA。由于远期洪板线可能更换为耐热导线,单回容量为 3 000 MW,此时按照移相器设计容量 3 200 MVA,串联变压器和并联变压器的容量同理可计算为 555 MVA,可设计为 560 MVA。

4.3 2013 年丰大典型方式数据校核

对加装移相器后的控制效果进行校核,采用 2013 年丰大数据的仿真结果如表 4 所示。

表 4 洪板双回洪沟侧加装移相器热稳定分析(2013)

控制角 / (°)	潮流 / MW		洪板线 N-1		川渝断面外送能力 / MW
	洪板双回	黄万双回	洪板线 / MW	潮流转移比 / %	
无	2 677	1 327	2 305	86.1	3 300
-1	2 101	1 873	1 564	74.4	4 830
-3	2 034	1 938	1 521	74.8	4 960
-5	1 969	2 001	1 481	75.2	5 094

表 4 中,双回线路的潮流转移比按式(4)计算为

$$\lambda = \frac{P'_1}{P_1 + P_2} \times 100\% \quad (4)$$

式中 P_1 和 P_2 分别为两条线路传输的功率; P'_1 为双回线路中一回线路 N-1 后,另一回线路传输的功率(假设第二回线路 N-1)。

根据式(4)得到双回线路 N-1 后的潮流转移比,若已知单回线路的传输极限,可得到双回线路满足 N-1 后不超过热稳极限的传输能力 $P_1 + P_2 = \lambda P'_1$,进而根据构成输电断面的线路间的潮流比得到整个断面的输电能力。

从表 4 可以看到,不加移相器时,洪板线 N-1 后的潮流转移比达到 86.1%;洪板线与黄万线的潮流比为 2:1。按照洪板线单回 1 900 MW 的能力计算,川渝断面的外送能力仅为 $1\,900 \div 86.1\% \times (1/2 + 1) = 3\,310$ MW。加装移相器后,洪板线 N-1 后潮流转移比显著降低,川渝断面外送能力提升至 5 090 MW。因此,移相器能够显著改善断面的潮流分布,提高断面的输电能力。

“十二五”期间,随着四川电网网架结构不断加强,以及以锦屏、向家坝、溪洛渡为代表的大型电站的投运,导致四川电网 500 kV 母线的短路电流急剧增加,部分母线 500 kV 开关已经逼近遮断容量,威胁电网安全运行。根据电网发展规划,未来 5 年四

川电网抑制短路电流的工作将十分紧迫。

从图 4 所示的移相器等值电路可以看到,移相器可视为在线路中串联了一个电抗 X_{PST} (忽略 R_{PST}) 和只改变相位的变压器。电抗 X_{PST} 的接入将改善系统的短路电流。基于 PSASP 的仿真结果表明,洪板双回有无移相器时四川电网短路电流超过 45 kA 的 500 kV 站点如图 6 所示。可以看到,加装移相器后,洪沟站的短路电流有明显下降,其他站点短路电流也有一定程度的降低。

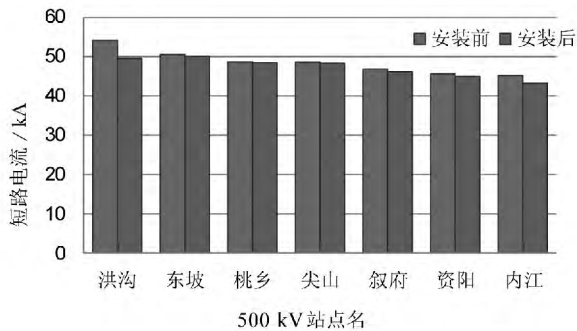


图 6 洪板双回洪沟侧加装移相器前后短路电流对比(2013)

4.4 2015 年丰大方式数据校核

随着重庆负荷增加,重庆北部大型火电机组的投运,洪板双回和黄万双回的潮流比呈现逐渐拉大的趋势,2015 年丰大方式计算仿真结果如表 5 所示。

从表 5 可以看到,2015 年洪板双回和黄万双回的潮流比达到 5:1,洪板线输电压力更大,同时黄万线利用率更低,造成川渝断面的外送静稳极限仅有 2 641 MW。配置移相器后,洪板双回和黄万双回的潮流比降为约 1.6:1,川渝断面的外送能力可提高至 4 167 MW,较未加装移相器提高约 1 500 MW,很好的改善了川渝断面的潮流分布不均问题,提高了外送能力。

表 5 洪板双回洪沟侧加装移相器热稳定分析(2015)

控制角 / (°)	潮流 / MW		洪板线 N-1		川渝断面外送能力 / MW
	洪板双回	黄万双回	洪板线 / MW	潮流转移比 / %	
无	3 204	642	2 765	86.3	2 641
-1	2 504	1 307	1 862	76.4	3 785
-3	2 450	1 383	1 817	74.2	4 005
-5	2 382	1 500	1 772	74.3	4 167

同时,四川电网短路电流超过 45 kA 的 500 kV 站点在加装移相器前后的短路电流变化情况如图 7 所示。可以看到,洪沟站短路电流依然有 1.5 kA 的下降,其他站点的短路电流都有一定程度的降低。

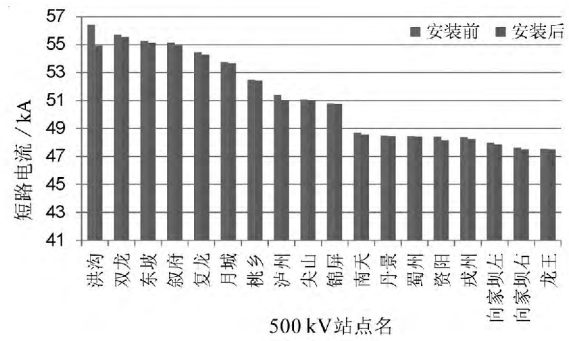


图 7 洪板双回洪沟侧加装移相器后短路电流对比(2015)

5 结 论

前面概述了移相器在世界各地的应用与研究情况,分析了移相器的基本原理,给出了移相器的选址以及容量设计方法。最后,对移相器应用于川渝断面以改善四川电网的外送能力的可行性进行了分析,有以下几点结论。

- (1) 移相器在国外已经有较多的应用,但 500 kV 应用实例不多,且国内厂商未见有生产 500 kV 等级移相器的能力;
- (2) 移相器能够显著改变线路潮流分布,并且装在洪板线效果优于装在黄万线;
- (3) 线路加装移相器后,洪板双回 N-1 后潮流转移比降低,在不改变开机方式的条件下,川渝断面输电能力可提高至 5 090 MW,提升约 1 800 MW;
- (4) 线路加装移相器后,由于移相器漏抗在一定程度上可视为串抗,系统短路电流水平降低。

参考文献

- [1] 徐征雄,张文涛,王刚,等. 利用移相器控制东北电网并行线路潮流的研究[J]. 电网技术,1996,20(4): 6-10.
- [2] 赵学强,郭明星. 华东电网安装移相变压器的研究[J]. 华东电力,2006,34(11): 32-34.
- [3] 倪尚谦. 特高压静止移相器的基本设计与电磁暂态研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院,2013.
- [4] LYMAN W. J., NORTH J. R. Application of Large Phase-shifting Transformer on an Interconnected System Loop[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1938, 57(10): 579-588.
- [5] OGAHARA, R., KAWAURA, Y., IWAMOTO, S. Using Phase Shifters for Power Flow Adjustment Following Large-scale Generation Loss [C]. IEEE PES General Meeting, Canada, 2013: 1-5.

[6] LEE R. L. , BESHIR M. J. Planning Aspects of 525 kV Phase Shifters and Static var Compensators for the Mead - Phoenix and Mead - Adelanto Transmission Projects in the Southwestern U. S. [C]. ICPST'94 , Beijing ,China , 1994: 970 - 978.

[7] CARLINI E. M. , MANDUZIO G. , BONMANN D. Power Flow Control on the Italian Network by Means of Phase - shifting Transformers [C]. CIGRE Session 2006 ,C2 - 206 Paris: CIGRE 2006: 1 - 12.

[8] VERBOOMEN J. , VAN H. D. , SCHAVEMAKER P. H. , et al. Phase Shifting Transformers: Principles and Applications [C]. 2005 International Conference on Future Power Systems , Amsterdam , 2005: 1 - 6.

[9] BELIVANIS M. , BELL K. R. W. Use of Phase - shifting Transformers on the Transmission Network in Great Britain [C]. 45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC) , Cardiff , Wales , 2010: 1 - 5.

[10] IEEE Std C57.135 - 2011 , IEEE Guide for the Applica-

tion , Specification , and Testing of Phase - shifting Transformers [S].

[11] 吴增泊 , 郭翠钰. 大容量移相变压器的设计 [J]. 电气制造 , 2013(11) : 26 - 29.

[12] 李文平 , 陈志伟. 出口美国大容量移相变压器的研制 [J]. 电力设备 , 2007 , 8(8) : 21 - 23.

[13] 郝帅 , 高沁翔 , 伏松平 , 等. 合理利用线路的移相变压器选址问题研究 [J]. 微计算机信息 , 2009 , 25(3 - 2) : 305 - 306 , 182.

[14] 曲祖义 , 廖华兴 , 于继来 , 等. 消除线路过载现象的移相变压器选址问题研究 [J]. 电网技术 , 2002 , 26(12) : 30 - 32 , 44.

[15] PSASP 6.282 基础数据库用户手册 [R]. 中国电力科学研究院.

作者简介:

陈刚(1985), 博士, 工程师, 主要从事电力系统稳定分析与控制的研究。

(收稿日期: 2014 - 06 - 09)

(上接第 48 页)

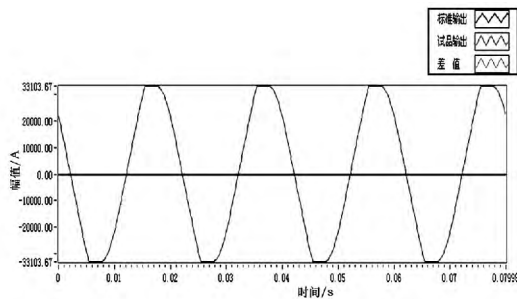


图 11 10% 的基波 45 度角叠加 10% 的 199 次谐波含量

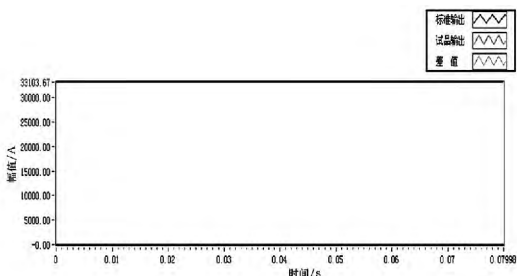


图 12 10% 的基波 0 度角叠加 10% 的 200 次谐波含量

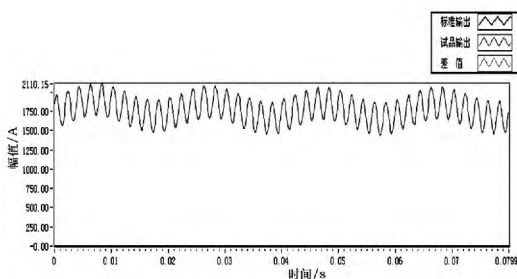


图 13 10% 的基波 60 度角叠加 10% 的 210 次谐波含量

根据测试结果, 在 200 点采样情况下的软件积分, 当频率在 150 次谐波以下时, 对基波基本不产生太大影响, 当频率接近 200 次谐波时开始对基波产生比较大的影响, 199 次谐波由于频率混叠的影响完全变成了基波并且放大的基波, 200 次谐波时, 完全偏向于时间轴一侧并溢出。200 次谐波以上也会偏向时间轴一侧, 但可以与软件积分的衰减回路达到一种稳定状态。

4 结 论

可采用带宽限制与采样速率相配合的办法, 如为保证 13 次谐波的不失真, 带宽至少应放置在 2 kHz, 400 次谐波以上基本已经不可能进入采样了, 所以按照前述仿真参数, 如将采样速率提高至每周波 400 点以上, 再采用软件积分, 应可以很好解决高次谐波的频率混叠所导致的积分后采样失真现象。为防止软件积分所导致的失真现象, 截止频率应与采样速率之间进行配合来实现。如采样速率为 200 点的采样系统, 其带宽截止频率最好不应超过 1 kHz。

(收稿日期: 2014 - 07 - 25)