

# 感应滤波技术应用于工业定制 电力系统的运行经验分析

邵鹏飞<sup>1</sup>,罗隆福<sup>1</sup>,宁志毫<sup>1</sup>,许加柱<sup>1</sup>,李 勇<sup>1,2</sup>,Christian Rehtanz<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082;  
2. 多特蒙德工业大学 电力系统与电力经济研究所,德国 多特蒙德 44227)

**摘要:**介绍了感应滤波技术在实际工业定制电力系统中的运行经验。给出了感应滤波的单相等值电路并介绍了其基本的工作原理和技术特点,分析了感应滤波技术的滤波优势;针对某实际运行的基于感应滤波的工业定制电力系统,给出了一次设备的主电路拓扑以及所采用的主要技术参数和技术特性。对工业定制电力系统的电能质量进行了详细的现场测试。测试结果表明,采用感应滤波的工业定制电力系统能有效抑制电力系统侧的谐波电流,并且减少了定制系统中整流变压器铁心中的交变谐波磁通。同时整流变压器的附加谐波损耗得到了有效降低,功率因数得到提高,改善了系统的电能质量。

**关键词:**感应滤波; 谐波抑制; 谐波磁通

中图分类号: TN 713;TM 714.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)04-0059-05

## 0 引言

近年来,应用于工业定制电力系统中的各种非线性功率器件所引发的谐波、无功等电能质量问题对电网的干扰越来越严重<sup>[1-4]</sup>。传统的无源滤波和有源滤波的方法存在诸多不可忽视的缺点,如在一定程度上改变了电力网络的阻抗结构,又如易受背景谐波的影响而导致滤波阻抗网络与电网阻抗网络之间的串并联谐振<sup>[5-7]</sup>。不仅如此,传统的无源滤波和有源滤波都是在变压器的网侧进行滤波和无功补偿,谐波电流通过变压器的原、副边绕组。这些谐波的存在显著增加了变压器绕组、铁心和钢结构件中的杂散损耗,因此在变压器的设计过程中,必须考虑这些影响并留出相应的安全裕度<sup>[8-10]</sup>。

不同于传统的无源和有源滤波技术,感应滤波技术的提出在很大程度上为这些问题的解决提供了有效途径。感应滤波技术基于电力系统基本的传输器件——变压器,能在工业定制系统、高压直流输电和直流牵引供电系统等含电力电子装置的多种交直流变换场合进行应用,具有很强的普适性。

本文将介绍感应滤波技术的等值电路模型以及基本的运行原理,并结合为某工业电力用户定制的新型工业供电系统,简要分析其谐波抑制和无功补偿的

工作机理。通过详细的现场实测数据分析,对感应滤波技术应用于工业定制系统的谐波抑制与无功功率补偿效果进行分析,揭示感应滤波的特点及优点。

## 1 感应滤波技术的原理

感应滤波技术的特点是发掘供电变压器的电磁潜能,利用内部耦合绕组在谐波频率下的安匝平衡作用,力求把谐波隔离在电力系统二次侧,并使之就近抑制,避免谐波流窜至电网侧而扩大污染和危害,并可有效削弱谐波磁势对供电变压器产生的不良影响<sup>[11-12]</sup>。

图1是二次绕组带抽头的谐波屏蔽单相变压器<sup>[13-15]</sup>,本文以此简要介绍感应滤波技术的原理。引出抽头与串有小值电感的电容支路相连接,在基波频率下,支路呈容性,对负荷无功起补偿作用。而在谐波频率下,使得LC支路的容抗与感抗相抵消,使绕组2形成短路,对负荷电流通过绕组产生谐波磁通交链绕组2时,后者随即产生反向磁通与之相抵消,迫使越过气隙交链绕组1的谐波磁通减少,起到相应的滤波作用。滤波效果不仅决定滤波支路的外部阻抗 $X_F$ ,还与相关绕组的布置及其等值阻抗有关。图1(b)中三绕组同心布置,可按两绕组分别短路测知的短路阻抗并换算到同一电压级的已知值 $Z_{12}$ 、 $Z_{13}$ 、 $Z_{23}$ ,可解得相对各个编号绕组的等值阻抗为

$$\begin{cases} Z_1 = (Z_{12} + Z_{13} - Z_{23}) / 2 = R_1 + jX_1 \\ Z_2 = (Z_{21} + Z_{23} - Z_{13}) / 2 = R_2 + jX_2 \\ Z_3 = (Z_{31} + Z_{32} - Z_{12}) / 2 = R_3 + jX_3 \end{cases} \quad (1)$$

谐波电流通过变压器绕组,同样应保持诸绕组的磁势即其安匝值平衡,而电流分布与其绕组阻抗有

收稿日期:2010-07-03;修回日期:2011-02-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51077045);湖南省“十一五”重大科技专项(06GK1003-1)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51077045) and the Key Science & Technology Project of the Eleventh Five-Year Plan of Hunan Province (06GK1003-1)

关。多绕组的等值阻抗可由相关的短路阻抗求得。后者与两绕组间的中心距离成正比，则  $Z_{12}$ 、 $Z_{13}$  和  $Z_{23}$  分别与其下标符号间的幅向距离  $d_{12}$ 、 $d_{13}$ 、 $d_{23}$  成正比。由图可知， $d_{12} + d_{23} = d_{13}$ ，则知三绕组同心布置在中间层绕组的等值阻抗  $Z_2 = (Z_{12} + Z_{23} - Z_{13}) / 2$  应与  $(d_{12} + d_{23} - d_{13})$  成比例，按图 1 中对应的距离关系，可知  $Z_2 \approx 0$ ，则在出现谐波电流时，该绕组通过谐波电流时不出现压降，故无需相应的谐波电势来维持，则  $W_2$  绕组所感生的谐波安匝值一定与  $W_3$  中谐波安匝值保持平衡，迫使两耦合绕组所交链的谐波磁通自行抵消，使该次谐波磁通不能越过气隙传送到原方绕组，阻止谐波向网侧传递，起到对谐波的屏蔽隔离作用，故称该中间层的绕组为屏蔽绕组。设计中应使绕组 2 与绕组 3 紧密耦合，而绕组 1 接高压电网与绕组 3 相距较远，利于阻止谐波电流源对网侧的窜扰。理论上而言，若设计  $Z_2 = 0$ ，而  $LC$  支路完全调谐且该支路的阻值能忽略不计，则能完全滤除对应的特征次谐波。在实际工程中，由于  $LC$  支路不可能完全调谐，变压器的  $Z_2$  一般也只能制造到接近于 0，且绕组和  $LC$  支路中的线路阻抗也不能忽略，所以在网侧绕组中仍会流通少量特征次谐波。根据不同应用场合的需要，按特征谐波考虑，滤波的次数  $n$  可选为 5、7、11、13 等。正确设计发挥屏蔽绕组的作用，可显著改善滤波效果。

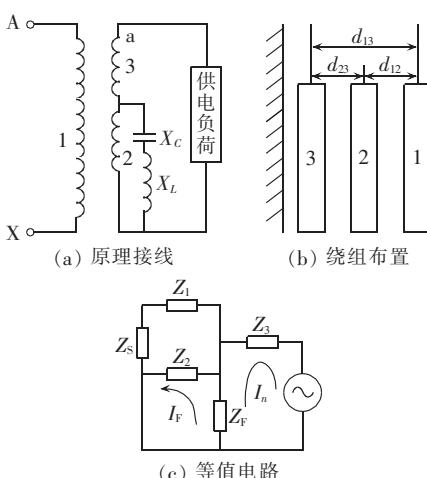


图 1 谐波屏蔽单相变压器

Fig.1 Single-phase harmonic suppressed traction transformer

## 2 感应滤波技术在工业定制电力系统中的应用

### 2.1 一次系统主电路拓扑

根据应用于某化工厂工业定制电力系统中整流供电系统的接线特点，采用感应滤波技术对原系统中 1 号整流机组进行改造，如图 2 所示。图中虚线框内的部分被称之为集成的新型工业直流供电系统，主要由 3 部分组成：新型整流变压器；感应滤波全调谐装置；6 脉波晶闸管整流器 SCR。

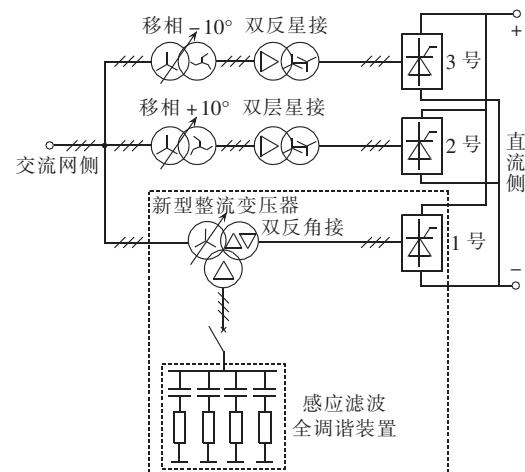


图 2 工业定制系统中整流供电系统的简化一次接线图

Fig.2 Simplified primary wiring diagram of power supply system for rectifier in industrial power system

感应滤波技术应用于实际的工业定制电力系统时，所采用的主要技术参数以及技术特性如下：

a. 新型整流变压器包括调压变压器和主变压器 2 个部分，对外整体表征为三相三绕组结构形式，其中，网侧绕组星接电压 35 kV，阀侧绕组双反角接电压 350 V，滤波侧绕组角接电压 10 kV；

b. SCR 采用同相逆并联 6 脉波晶闸管桥式整流电路，额定直流电压 415 V，额定直流电流 22 kA，控制角理想范围在  $7^\circ \sim 9^\circ$ ；

c. 原整流供电系统是通过 3 台机组分别移相  $-10^\circ$ 、 $+10^\circ$  和  $+30^\circ$  实现 18 脉波整流，改造后 1 号机组的整流变压器采取的  $Y/\Delta$  连接仍然移相  $+30^\circ$ ，新系统与原有系统的工作状态完全一致，不会改变供电系统在交流网侧的汇流状况；

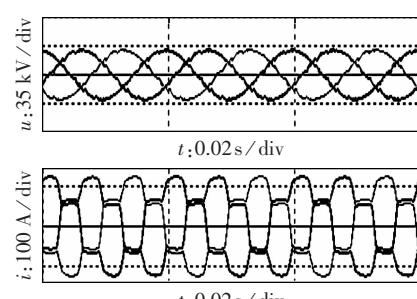
d. 针对含量较重的特征次谐波，感应滤波全调谐装置采用 5、7、11 和 13 次单调谐  $LC$  支路，通过准确调谐实现对相应次谐波的最大限度削弱。

### 2.2 测试结果及其分析

#### 2.2.1 电网侧谐波抑制效果

对图 2 所示 1 号整流机组 35 kV 交流网侧的谐波抑制效果进行了测试。测试工况为：未投入感应滤波装置；投入 5、7 次感应滤波装置；投入 5、7、11、13 次感应滤波装置。所测得的电网侧电压和电流波形如图 3 所示。

由图 3 可见，在未投入感应滤波全调谐装置时，



(a) 未投入感应滤波全调谐装置

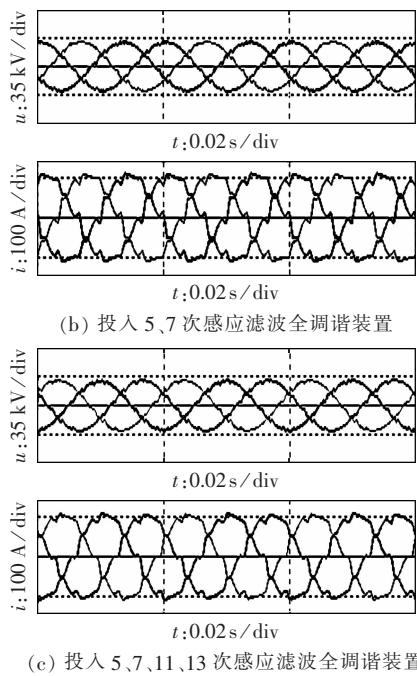


图3 1号整流机组 35 kV 交流网侧电压电流波形

Fig.3 Voltage and current waveforms at grid side of unit No.1

1号整流机组 35 kV 交流网侧电流的畸变十分严重;在 5、7 次感应滤波全调谐装置投入之后, 电流波形有了明显改善, 而在 5、7、11、13 次感应滤波全调谐装置全部投入时, 电流波形则更为接近正弦波。对 3 种情况下的电流进行傅里叶分解可得到各次特征谐波的电压和电流含量, 分别如表 1 和表 2 所示。

表1 3种情况下特征次谐波电压含量

Tab.1 Characteristic harmonic voltages in three conditions

谐波次数	特征次谐波电压含量/kV		
	未投入	投入 5、7 次	投入 5、7、11、13 次
5	0.19	0.15	0.14
7	0.13	0.02	0.04
11	0.55	0.57	0.60
13	0.37	0.35	0.42

表2 3种情况下特征次谐波电流含量

Tab.2 Characteristic harmonic currents in three conditions

谐波次数	特征次谐波电流含量/%		
	未投入	投入 5、7 次	投入 5、7、11、13 次
5	21.21	2.73	3.44
7	10.63	2.79	2.43
11	6.70	6.74	4.79
13	4.44	4.35	3.32

由表可见, 3 种情况下 1 号机组 35 kV 交流网侧各次特征谐波电压变化不大, 这是由于该处的电压主要由所在的电网系统所决定。对于各次特征谐波电流而言, 在感应滤波全调谐装置未投之时, 含量是最大的。在 5、7 次感应滤波装置投入后, 对应的 5、7 次谐波电流含量显著减小, 而 11、13 次谐波电流则基本不变。当 5、7、11、13 次感应滤波装置全部投入后, 11 和 13 次谐波电流含量也有明显降低。另外, 3 种

情况下 1 号机组交流网侧的电压和电流畸变率如表 3 所示, 由表可见, 在逐步投入各次感应滤波全调谐装置之后, 电压的畸变率稍有降低, 而电流的畸变率则稳步下降, 这就充分说明了感应滤波技术的良好滤波效果。

表3 3种情况下交流网侧电压电流畸变率(THD)

Tab.3 THD of characteristic harmonic voltages and currents at grid side in three conditions

3种情况	THD <sub>u</sub> /%	THD <sub>i</sub> /%
未投入	4.58	25.28
投入 5、7 次	4.48	10.46
投入 5、7、11、13 次	4.31	8.33

## 2.2.2 主铁心谐波磁通抑制效果

由感应滤波技术的原理可知, 变压器铁心内的谐波磁通将会被大幅削弱。为了观察铁心磁通的变化情况, 在工程设计当中, 课题组特意在 A 相铁心和 AB 相的铁轭上各绕制了一单匝线圈作为磁通观测器, 如图 4 所示, A 相铁心和 AB 相的铁轭上的线圈绕向相反。

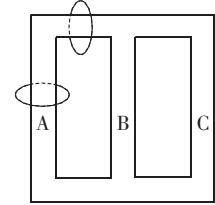


图4 变压器铁心磁通观测器示意图

从线圈上可测得由铁心磁通感应而出的电势, 若绕组的匝数为  $w$ , 感应电势与磁通关系可由式(2)描述:

$$e = -wd\Phi/dt \quad (2)$$

用相量表示为

$$\mathbf{E} = -jw/\sqrt{2} \Phi \quad (3)$$

在数值上有

$$E = 4.44fw\Phi_m \quad (4)$$

式(3)说明, 固定频率的磁通感生出同一频率的电势, 而式(4)说明, 当  $f$  及  $\omega$  一定时, 磁通的大小可由感应电势反映出来。换言之, 谐波磁通完全可以由感生出来的谐波磁势来反映。感应滤波全调谐装置投入前后, 在磁通观测器上测得的感应电势含量如表 4 所示。

将投入感应滤波全调谐装置前后的 A 相铁心和 AB 相铁轭上磁通观测器上的感应谐波电势对比如图 5 所示。由图可明显看出, 投入感应滤波全调谐装

表4 磁通观测器中特征次感应谐波电势含量

Tab.4 Characteristic harmonic voltages of flux observer

谐波次数	特征次感应谐波电压含量/%			
	A 相铁心		AB 相铁轭	
	未投入	投入 5、7、11、13 次	未投入	投入 5、7、11、13 次
5	4.91	2.33	5.66	2.75
7	2.27	0.80	2.59	0.91
11	4.24	1.59	4.76	1.73
13	2.53	0.99	2.90	1.07

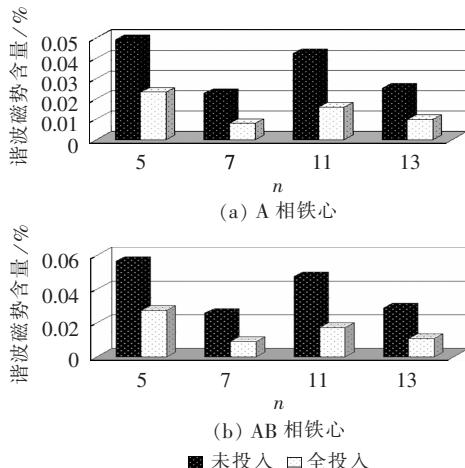


图 5 感应滤波装置投入前后磁通观测器中谐波电势含量对比

Fig.5 Harmonic voltages of flux observer without and with inductive filtering equipment

置后,铁心和铁轭上的谐波感应电势被大幅削弱了,各特征次谐波感应电势较投入前均削减了 50% 以上。换言之,在投入感应滤波全调谐装置后,铁心和铁轭中的谐波磁通被极大削弱了,而这样的效果是其他滤波方式所无法达到的。

### 2.2.3 系统功率

在感应滤波装置投入前后,对 1 号机组 35 kV 交流网侧的功率进行了测量,结果如表 5 所示。

表 5 感应滤波装置投入前后功率对比

Fig.5 Comparison of system power with and without filters

S/(MV·A)	Q/Mvar	P/MW	$\lambda$
未投	5.22	2.48	0.8794
投入	4.66	1.10	0.9717

从表 5 可以看出,由于感应滤波装置兼顾了无功补偿的作用,投入之后 1 号机组 6 脉波整流系统的功率因数由 0.8794 提高到了 0.9717,无功补偿效果良好。同时,在感应滤波装置投入后 1 号机组的输入有功功率下降了 60 kW,占原有输入的 1.3%,节能效果十分可观。

从功率损耗的角度,感应滤波装置跟其他种类的滤波器一样,在投入之后有大量的谐波电流流过,这是需要消耗能量的。但是从实际效果来看,系统的输入功率不仅没有增加,反而有所降低,这结果看似矛盾,实则体现了感应滤波技术的特殊优势。究其原因,有 3 个方面。

a. 经过无功补偿后高压绕组的无功电流含量减小,绕组的无功损耗也随之降低。

b. 变压器绕组中的谐波电流由于其高频特性,集肤效应变得严重,等效的交流电阻也显著增加,谐波电流含量虽然不大,但其流经绕组产生的焦耳热是不可忽略的。感应滤波技术是从阀侧滤波,从谐波源处就近抑制谐波,这样避免了其窜扰至整流变压器的高压侧,降低谐波电流的扩散范围。在这样

的情况下,高压侧绕组的谐波电流已经得到明显的抑制,所以高压绕组中的谐波损耗也被减少了。

c. 由于变压器绕组中谐波电流以及铁心中谐波磁通的存在,变压器绕组的振动将会加剧,铁心由磁通引起的磁致伸缩也将增强,整体来看,变压器本体的振动将会更加剧烈,这也将导致变压器的运行损耗增大。而感应滤波技术不仅抑制了高压绕组中的谐波电流,还大幅减少了整流变压器铁心的谐波磁通,所以变压器这部分的损耗也将会减少。

基于以上三方面的原因,即使感应滤波装置要消耗部分能量,由其性能改善所节约的能量也远远超过了其消耗的能量。所以才有前面的结果:系统的输入功率不仅没有增加,反而有所降低,这正是感应滤波技术的特殊优势的体现。

## 3 结论

感应滤波是一种新型的集滤波和无功补偿为一体的新型电力滤波技术,其优势在于能从变压器的阀侧对谐波就近抑制,在理论上能完全消除对应的特征次谐波,同时兼顾无功补偿,并能减少变压器铁心中的谐波磁通,从而达到节能降耗的效果。

对于工业定制电力用户而言,最关心的还是运行效率。相对于其他滤波方式,感应滤波技术的应用在运行效率提升上具有很大的技术优势。本文结合株洲某实际工业定制电力系统,对感应滤波技术在该定制电力系统的应用进行了详细的测试分析,由此表明,感应滤波在工业定制电力系统中的应用不仅改善了电网侧的电能质量,并且降低了整流变压器主铁心的谐波交变磁通以及附加谐波损耗,同时提升了整流系统的功率因数,具有一系列的技术特性与优越性。

## 参考文献:

- [1] 赵勇,沈红,李建华,等. 谐波源的识别及其与非谐波源的分离方法[J]. 中国电机工程学报,2002,22(5):84-87.  
ZHAO Yong,SHEN Hong,LI Jianhua,et al. Approach of identification and separation of harmonic sources[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(5):84-87.
- [2] 王莉娜,付清,罗安. 工厂供电系统谐波谐振的抑制[J]. 电力系统自动化,2001,25(10):41-44.  
WANG Lina,FU Qing,LUO An. Damping harmonic in industry power system[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(10):41-44.
- [3] 李季,罗隆福,许加柱,等. 直流输电谐波不稳定抑制新方法[J]. 电力自动化设备,2008,28(2):6-9.  
LI Ji,LUO Longfu,XU Jiazhui,et al. Suppression of harmonic instability in HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(2):6-9.
- [4] 肖彩艳,文继峰,袁源,等. 超高压直流系统中的换流变压器保护[J]. 电力系统自动化,2006,30(9):91-94.  
XIAO Caiyan,WEN Jifeng,YUAN Yuan,et al. Protection of converter transformer in HVDC[J]. Automation of Electric Po-

- wer Systems, 2006, 30(9): 91-94.
- [5] 杨君, 王兆安. 并联型电力有源滤波器控制方式的研究[J]. 西安交通大学学报, 1995, 29(3): 97-102.  
YANG Jun, WANG Zhaoan. Study on the control modes of shunt active power filters [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1995, 29(3): 97-102.
- [6] 陈礼义, 粟文义, 陈德生, 等. 配电系统谐波放大的分析与计算[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(8): 15-19.  
CHEN Liyi, LI Wenyi, CHEN Desheng, et al. Distribution system harmonic magnification analysis and calculation [J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(3): 15-19.
- [7] 岳云峰, 蔡旭. 基于故障过程分析的补偿电网接地与串联谐振辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(7): 49-53.  
YUE Yunfeng, CAI Xu. Identification of series resonant and grounding fault based on process analysis of zero sequence voltage in the compensation network [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(7): 49-53.
- [8] 许加柱, 罗隆福, 李勇, 等. 采用新型换流变压器及其滤波系统对换相失败的影响[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(2): 10-14.  
XU Jiazhuh, LUO Longfu, LI Yong, et al. Influence of novel converter transformer and its filter system on commutation failure [J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(2): 10-14.
- [9] 韩晓东, 翟亚东. 高压直流输电用换流变压器[J]. 高压电器, 2002, 38(3): 5-6.  
HAN Xiaodong, ZHAI Yadong. Converter transformer used for HVDC transmission [J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(3): 5-6.
- [10] 张杰, 罗隆福, 李勇, 等. 基于残量变换法的新型换流变压器短路故障计算[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(12): 6-10.  
ZHANG Jie, LUO Longfu, LI Yong, et al. Short-circuit calculation of converter transformer based on remnant conversion [J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(12): 6-10.
- [11] 许加柱, 罗隆福, 李季, 等. 自耦补偿与谐波屏蔽换流变压器的接线方案和原理研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(9): 44-50.  
XU Jiazhuh, LUO Longfu, LI Ji, et al. Principle and connection scheme of self-coupled compensating and suppressing harmonic converter transformers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(9): 44-50.
- [12] ZHANG Zhiwen, WU Bin, KANG Jinsong, et al. A multi-purpose balanced transformer for railway traction applications [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2009, 24(2): 711-718.
- [13] LI Yong, LUO Longfu, REHTANZ C, et al. Study on characteristic parameters of a new converter transformer for HVDC systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2009, 24(4): 2125-2131.
- [14] LUO Longfu, LI Yong, XU Jiazhuh, et al. A new converter transformer and a corresponding inductive filtering method for HVDC transmission system [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(3): 1426-1431.
- [15] SHAO Pengfei, LUO Longfu, LI Yong, et al. Application prospect of a new transformer inductive filtering technology [C]// Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Nanjing, China: [s.n.], 2008: 1847-1852.

(编辑: 李玲)

**作者简介:**

邵鹏飞

邵鹏飞(1982-),男,湖南益阳人,博士研究生,主要从事新型变压器新理论和交直直变换方向的研究(E-mail:herolampard@hotmail.com);

罗隆福(1962-),男,湖南常德人,博士研究生导师,主要从事高压直流输电、电力设备优化设计以及电能质量方向的研究;

宁志毫(1983-),男,河南洛阳人,博士研究生,研究方向为基于新型换流变压器的交直直电能变换系统与装备及其效率分析、谐波抑制技术和无功功率补偿等;

许加柱(1980-),男,安徽来安人,副教授,博士,主要从事现代电器设备的设计、优化及仿真研究,高压直流输电新技术和电能质量管理研究及相关教学工作;

李勇(1982-),男,河南信阳人,讲师,主要从事HVDC与FACTS、电能质量分析与控制等方面的研究工作;

Christian Rehtanz(1968-),男,教授,博士研究生导师,主要从事大电网稳定控制与安全评估、HVDC和FACTS控制技术、电力系统广域监视、控制与保护方面的研究工作。

## Analysis of application experience of inductive filtering technology in industrial power system

SHAO Pengfei<sup>1</sup>, LUO Longfu<sup>1</sup>, NING Zhihao<sup>1</sup>, XU Jiazhuh<sup>1</sup>, LI Yong<sup>1,2</sup>, Christian Rehtanz<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Institute of Power Systems and Power Economics, TU Dortmund, Dortmund 44227, Germany)

**Abstract:** The application experience of inductive filtering technology in industrial power system is analyzed. The single-phase equivalent circuit of inductive filtering, as well as its basic principle and technical characteristics, is introduced and its merits are analyzed. The power circuit topology of primary equipments of an operating industrial power system is shown with main technical parameters and technical characteristics. A detailed field test of power quality of industrial power system is carried out and the results indicate that, the industrial power system applying inductive filtering technology suppresses the harmonic currents at system side and decreases the AC magnetic flux of rectifier transformer core. Consequently, the additional harmonic loss of rectifier transformer is reduced, the power factor is enhanced and the power quality is improved.

**Key words:** inductive filtering; harmonic suppression; harmonic flux