

文章编号:1674-2974(2016)10-0079-08

# 特高压直流输电系统新型谐波抑制方法研究\*

许加柱<sup>1†</sup>, 董欣晓<sup>1</sup>, 梁崇淦<sup>1</sup>, 罗隆福<sup>1</sup>, 付颖<sup>2</sup>, 梅念<sup>2</sup>, 罗志平<sup>3</sup>

(1. 国家电能变换与控制工程技术研究中心(湖南大学) 湖南长沙 410082; 2. 国网北京经济技术研究院 北京 102209; 3. 国网湖南省电力公司检修公司 湖南长沙 410082)

**摘要:**传统的特高压直流输电系统一般在换流站交流网侧布置滤波兼无功补偿装置. 为了避免谐波对换流变压器的不良影响, 本文提出了一种滤波绕组并联的感应滤波换流变压器的谐波抑制方法, 文中描述了其接线方案, 解释了其滤波机理, 并与传统的滤波方案进行了对比分析. 以酒泉-湖南的±800 kV 特高压直流输电的工程参数为依据, 搭建了所提滤波方案和传统方案的仿真模型. 两个模型的阀侧和网侧电流的对比分析证明, 新型谐波抑制方法效果良好.

**关键词:**新型换流变压器; 特高压直流输电; 感应滤波技术; 谐波抑制; 无功补偿

**中图分类号:** TM4

**文献标识码:** A

## A New Harmonic Suppression Method for UHVDC Transmission Systems

XU Jia-zhu<sup>1†</sup>, DONG Xin-xiao<sup>1</sup>, LIANG Chong-gan<sup>1</sup>, LUO Long-fu<sup>1</sup>,  
FU Ying<sup>2</sup>, MEI Nian<sup>2</sup>, LUO Zhi-ping<sup>3</sup>

(1. National Electric Power Conversion and Control Engineering Technology Research Center(Hunan Univ), Changsha, Hunan 410082, China; 2. State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China;  
3. Maintenance Company of State Grid Hunan Electric Power Corporation, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract:** In traditional UHVDC transmission systems, the filtering and reactive power compensation devices are generally installed at the power grid side of the converter stations. In order to reduce the negative effects caused by harmonic currents on the converter transformers, a harmonic suppression method of inductive filtering converter transformers with parallel filtering windings was proposed. This paper described the corresponding detailed wiring schemes, explained the filtering mechanism and compared it with the traditional filtering solution. Referring to the engineering parameters of the Jiuquan-Hunan ±800 kv UHVDC transmission project, the simulation models of the proposed harmonic filtering scheme and the traditional schemes were established respectively. Based on the comparative analysis of the currents at the grid and valve sides of the two models, it can come to the conclusion that the proposed harmonic suppression scheme has a better operational performance in contrast with the traditional one.

**Key words:** novel converter transformer; UHVDC transmission; inductive filtering technology; harmonic suppression; reactive power compensation

\* 收稿日期: 2015-07-15

基金项目: 特高压直接入 750 kV 交流电网无功平衡和谐波抑制技术研究(14430101001322)

作者简介: 许加柱(1980-), 男, 安徽来安人, 湖南大学副教授, 博士

† 通讯联系人, E-mail: xujiazhu@126.com

在换流变网侧直接接入 750 kV 交流系统的条件下,设备研制的难度进一步加大,对系统运行可靠性的要求也更高,针对不同技术路线换流变接入同一换流器以及降低双极停运率等课题需要提出新的解决方案,以确保工程建设的顺利推进<sup>[1-5]</sup>.同时,须针对网侧直接接入 750 kV 交流系统成套设计关键技术方案与接入常规 500 kV 交流系统时的差异及其带来的影响进行研究.本文主要是依据特高压直流以及 750 kV 交流电网的特性,对特高压直流接入 750 kV 交流电网的无功平衡和谐波抑制技术进行研究<sup>[6-9]</sup>,在已有感应滤波技术方案的基础上提出滤波绕组并联型感应滤波换流变压器接线方案<sup>[10-15]</sup>,并以酒泉-湖南在建的特高压直流输电工程为案例进行实施新方案的可行性研究,基于酒泉-湖南±800 kV 特高压直流输电工程而建立的特高压直流接入 750 kV 交流电网的 PSCAD/EMTDC 仿真模型进行验证,揭示基于新型换流变压器的直流输电系统所具有的独特的谐波抑制机理,能有效地解决上述无源滤波、有源滤波所面临的种种问题.为特高压电网运行的可靠性、安全性和稳定性提供参考.

## 1 新型接线方案和机理分析

感应滤波技术是利用换流变压器的电磁潜能和安匝平衡原理,设计了一种特殊的滤波绕组对谐波进行就近抑制,可有效隔离阀侧绕组谐波对电网的危害,从而缩小谐波的污染范围<sup>[10-15]</sup>.感应滤波换流变压器  $\Delta$  联接的滤波绕组具有零阻抗设计的特点,不仅能够为 3 次及其倍数次谐波提供环路,且通过在滤波绕组处接入无源滤波器,实现对特征谐波的滤除.

结合特高压直流输电系统的特点,本文在已有感应滤波技术方案的基础上,提出滤波绕组并联型感应滤波换流变压器接线方案,如图 1 所示.图 1 中的滤波绕组并联型感应滤波换流变压器接线方案为:(i)三相换流变压器组的滤波绕组为三角形联接形式.(ii)12 脉动换流变压器组的两个滤波绕组采用并联连接方式.

如图 2 所示,常规方案的 12 脉动换流变压器通常为高压绕组并联方式,在汇流时由于相位刚好相反,因而 5,7 次谐波各自形成环流而相互抵消,从而可抑制两个 6 脉动换流器产生的 5,7 次谐波电流.然而,该接法却存在不足之处,由铁芯饱和等原因引起 3 次谐波由于绕组中没有 3 次谐波电流流通回路,因而铁芯中谐波磁通较大,从而引起网侧的 3 次

谐波及变压器铁芯振动噪音问题.

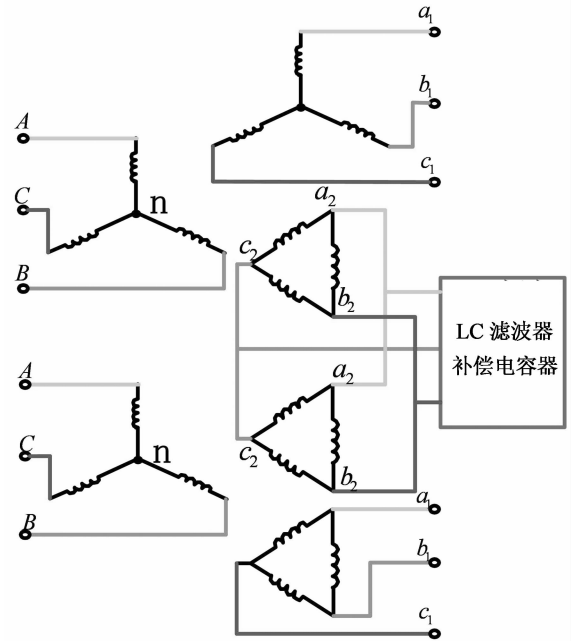


图 1 滤波绕组并联形式的感应滤波换流变压器接线方案

Fig. 1 The connection scheme of inductive filtering converter transformer banks with the parallel filtering windings

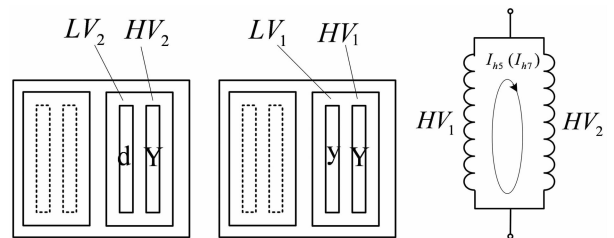
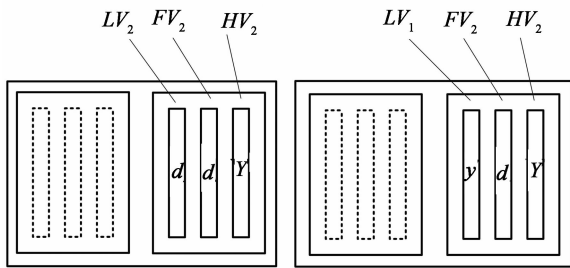


图 2 常规 12 脉波换流变压器对 5,7 次谐波电流的消除作用

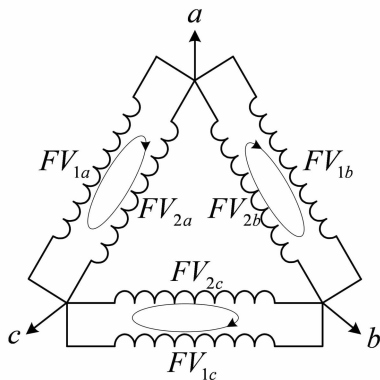
Fig. 2 Elimination of the 5th and 7th harmonic current of the conventional 12-pulse converter transformers

新型 12 脉波感应滤波换流变压器及工作机理如图 3 所示.对于某一变压器本体来说,若有 3 次谐波电流则无 3 次谐波磁通,若有 3 次谐波磁通则无 3 次谐波电流.因此对于 Y-Y 联接的换流变压器,其工作时铁芯中必有 3 次谐波磁通,因而会在一次侧引起 3 次谐波电势,从而形成一次侧流通的 3 次谐波电流.对于 Y- $\Delta$  联接的换流变压器,由于其本身已具有 3 次谐波电流回路,因此其变压器铁芯中的 3 次谐波磁通会小于 Y-Y 联接的换流变压器.相对于传统 Y-Y 联接的换流变压器,感应滤波换流变压器增加了 3 次谐波电流流通回路,能有效削弱铁芯中的 3 次谐波磁通,这样既降低了一次侧的 3 次谐波含量,又降低了由 3 次谐波引起的铁芯振动噪

声.而感应滤波换流变压器采用滤波绕组相互并联的方式,让 5,7 次谐波电流在各相并联线路之间形成环流而相互抵消,因此可以在 12 脉动变压器网侧电流汇流之前便能有效地消除 5,7 次谐波电流,而汇流后可更进一步降低 12 脉动整流系统中所引起的 5,7 次谐波.由于新型方案为 3,5,7 次等谐波电流提供回路,因此能有效地降低换流变压器铁芯中相应的谐波磁通,一方面可阻止这些谐波流通变压器而进入网侧,另一方面还可降低由这些谐波引起的换流变压器铁芯振动噪音.此外,相比于滤波绕组单独连接的方式,采用滤波绕组并联的接线方案还可以减少交流滤波器和并联电容器的分组,以节省设备的占地面积.



(a) 滤波绕组并联型感应滤波换流变压器示意图



(b) 并联滤波绕组的工作机理示意图

图 3 新型 12 脉感应滤波换流变压器及工作机理  
Fig. 3 Diagrams illustrating the new 12-pulse inductive filtering converter transformers and the operating principal

侧采用新型滤波绕组并联型换流变压器,揭示基于新型换流变压器的特高压直流输电系统所具有的独特的谐波特性.

### 2.1 仿真模型参数

#### 1) 交流系统参数

送电端额定容量 10 000 MVA,额定电压为 770 kV,稳态电压范围 750~800 kV;受电端额定容量为 10 000 MVA,额定电压为 525 kV,稳态电压范围 500~550 kV.

#### 2) 交流滤波器及并联电容器

##### ① 常规模型

送电端交流母线处接入的交流滤波器及并联电容器参数如表 1 所示.

受电端交流母线处接入的交流滤波器及并联电容器参数如表 2 所示.

表 1 送电端换流站无功配置

Tab. 1 The reactive power compensation of the converter station at the power sending end

元件	交流滤波器			并联电容器 SC
	BP11/BP13	HP24/36	HP3	
$C_1/\mu\text{F}$	0.705/0.707	1.421	1.422 7	1.745
$L_1/\text{mH}$	118.69/84.783	8.598	890.22	2
$C_2/\mu\text{F}$	/	8.266	11.3816	/
$L_2/\text{mH}$	/	1.362	/	/
$R/\Omega$	12 000/12 000	300	2 237.4	/
分组数	4	4	3	4

表 2 受电端换流站无功配置

Tab. 2 The reactive power compensation of the converter station at the power receiving end

元件	交流滤波器		并联电容器 SC
	HP12/24	HP3	
$C_1/\mu\text{F}$	2.987	3.002 7	3.002 7
$L_1/\text{mH}$	11.819	421.8	2
$C_2/\mu\text{F}$	5.953	24.0212	/
$L_2/\text{mH}$	5.889	/	/
$R/\Omega$	300	1060.1	/
分组数	8	2	6

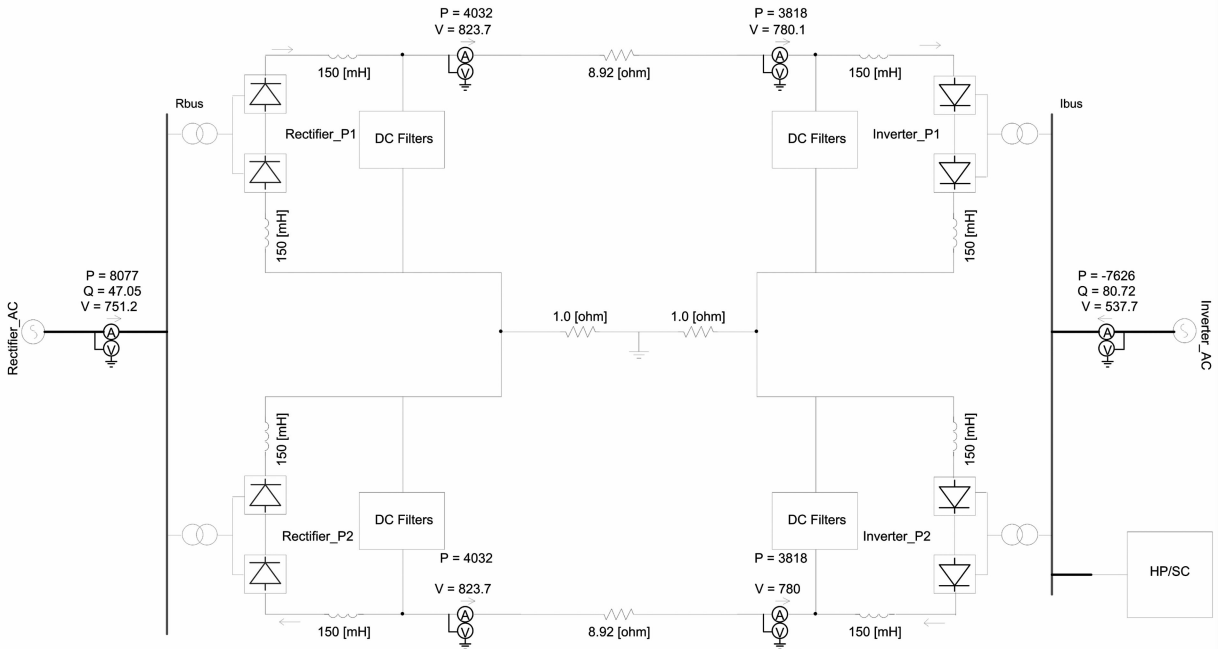
## 2 特高压直流输电系统电磁暂态模型

本文以酒泉-湖南±800 kV 的特高压直流输电工程为案例,揭示基于新型换流变压器的直流输电系统所具有的独特的谐波抑制机理.根据酒泉-湖南±800 kV 特高压直流输电工程的实际参数,采用 PSCAD/EMTDC 仿真软件并参照 CIGRE HVDC 标准模型,建立了±800 kV 特高压直接入 750 kV 交流电网的电磁暂态仿真模型,如图 4 所示.采用网侧滤波功补方案的常规模型及采用感应滤波技术的新型模型进行比较,其中新型模型仅对 750 kV

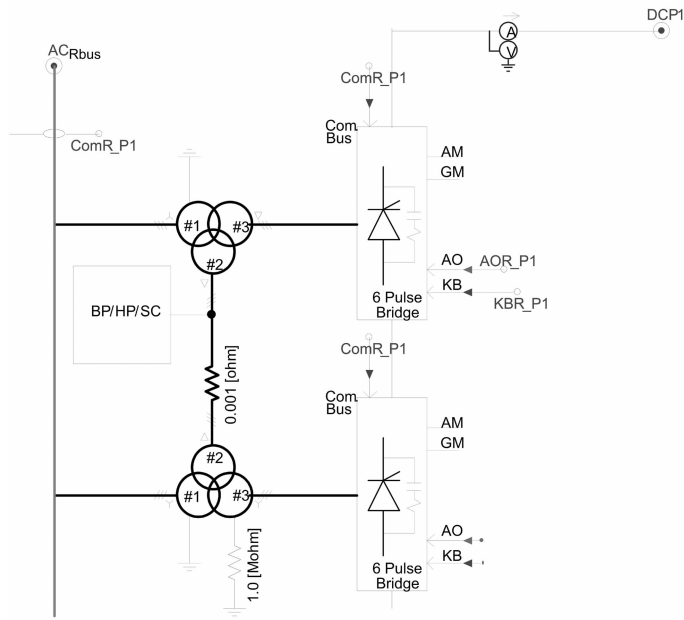
#### ② 新型模型

由于送电端采用了感应滤波技术,因而交流滤波器及并联电容器连接在换流变压器 500 kV 等级滤波绕组上,且由于采用的  $\Delta$  接滤波绕组可对 3 次及其倍数次的谐波有滤除作用而不必投入 HP3 滤波器,因此为保证系统无功平衡,并联电容器需适当增大,相关的参数如表 3 所示.

由于只对送电端采用感应滤波技术,因此受电端交流母线处接入的交流滤波器及并联电容器参数基本维持不变,仍如表 2 所示.



(a) 基于 PSCAD 的特高压直流入 750 kV 交流电网系统仿真模型



(b) 滤波绕组并联型的感应滤波换流变压器接线图

图 4 新型直流输电系统主电路拓扑结构

Fig. 4 The main circuit topology of the new UHVDC system

表 3 滤波绕组并联的感应滤波换流变压器无功配置

Tab. 3 The reactive power compensation for the inductive filtering converter transformers with parallel filtering windings

元件	交流滤波器		并联电容器
	BP11/13	HP12/24	
$C_1/\mu\text{F}$	1.303/1.303	2.603	5.059
$L_1/\text{mH}$	64.75/46.65	3.87	2
$C_2/\mu\text{F}$	/	16.87	/
$L_2/\text{mH}$	/	0.767	/
$R/\Omega$	10 000/8 000	300	/
分组数	4	4	8

### 3) 直流滤波器

仿真模型按实际工程采用的直流滤波器型式及参数建模,即每个换流站装设 12/24 和 2/39 双调直流谐波滤波器各一台,参数如表 4 所示。

### 4) 换流阀

换流站的阀组均采用每极 2 个 12 脉动换流单元串联接线的接线方式,2 个 12 脉动阀组串联电压按  $\pm(400+400)$  kV 分配。

表 4 直流滤波器参数  
Tab. 4 The parameters of the DC filters

元件	直流滤波器	
	12/24	2/39
$C_1/\mu\text{F}$	0.35	0.8
$L_1/\text{mH}$	89.35	11.99
$C_2/\mu\text{F}$	0.810	1.825
$L_2/\text{mH}$	48.86	964.0
$R/\Omega$	10 000	5 700
分组数	4	4

5)换流变压器

①常规模型

实际工程设计中,送电端换流变压器为单相双绕组变压器,单台容量 412.3 MVA,联接成 Y/Y 和 Y/ $\Delta$ 两种接线形式,等效阻抗均为 0.23,网侧绕组额定电压 444.56 kV, Y/Y 接变压器阀侧绕组额定电压 100.99 kV, Y/ $\Delta$ 接阀侧绕组额定电压 174.92 kV;受电端换流变压器也为单相双绕组变压器,单台容量 378.56 MVA,联接成 Y/Y 及 Y/ $\Delta$ 两种接线形式,等效阻抗为 0.18,网侧绕组额定电压 303.11 kV, Y/Y 接变压器阀侧绕组额定电压 92.73 kV, Y/ $\Delta$ 接阀侧绕组额定电压 160.61 kV.

仿真模型中,送电端换流变压器为三相双绕组变压器,单台容量为 1 236.9 MVA,分为 Y/Y 和 Y/ $\Delta$ 两种,等效阻抗 0.23,网侧绕组额定电压 770 kV,阀侧绕组额定电压均为 174.92 kV;受电端换流变压器为三相双绕组变压器,单台容量 1 135.68 MVA,接线形式分 Y/Y 和 Y/ $\Delta$ 两种,等效阻抗 0.18,网侧绕组额定电压 525 kV,阀侧绕组额定电压均为 160.61 kV.

②新型模型

在新型仿真模型中,送电端换流变压器为三相三绕组变压器,单台容量为 1 236.9 MVA,分为 Y/Y/ $\Delta$ 和 Y/ $\Delta$ / $\Delta$ 两种,网侧-阀侧等效阻抗0.23,网侧绕组额定电压 770 kV,阀侧绕组额定电压为 174.92 kV,滤波绕组额定电压 500 kV;受电端换流变压器不变,与常规模型的一样.

6)直流输电线路

仿真模型的直流输电线路额定功率 8 000 MW,额定电压 $\pm 800$  kV,额定电流 5 000 A,线路长度为 2 381.93 km,直流线路电阻为 8.92  $\Omega$ ,换流站接地电阻均为 1  $\Omega$ .

2.2 方案对比与分析

2.2.1 无功平衡效果对比及分析

对于新型模型,由于 3 次谐波滤波器已不需要装设,因此原方案的并联电容器组的容量需加大,又

由于并联电容器组的占地面积比交流滤波器的要小,因此在节省 3 次滤波器总占地面积的基础上, BP11/13, HP24/36 交流滤波器组和并联电容器组在实际工程中的分组可以更加灵活.从系统稳态的角度,常规模型和新型模型均能较好地实现系统的无功平衡,分别如图 5 和图 6 所示.

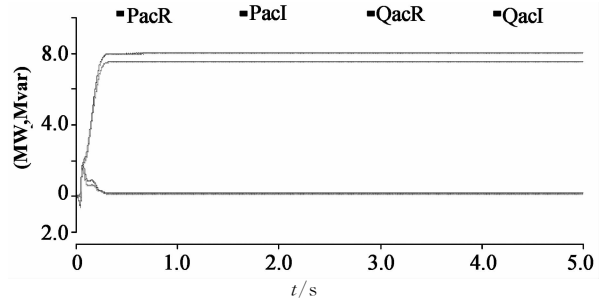


图 5 常规网侧滤波方案:送电端(R)和受电端(I)的三相交流有功及无功功率  
Fig. 5 The conventional grid-side filtering scheme: the three-phase AC active and reactive power at the sending end (R) and receiving end (I)

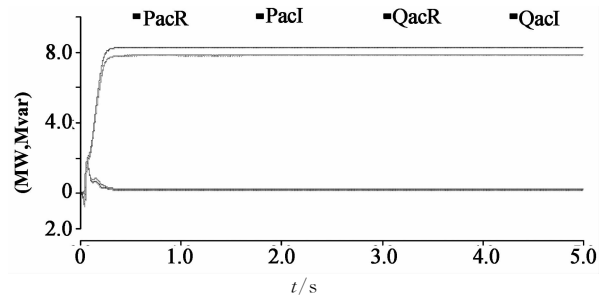


图 6 感应滤波方案:送电端(R)和受电端(I)的三相交流有功及无功功率  
Fig. 6 Inductive filtering scheme: the three-phase AC active and reactive power at the sending end (R) and receiving end (I)

2.2.2 谐波抑制效果对比及分析

对于滤波效果的分析,两个并列,测试点均位于送电端,分别检测 750 kV 总交流电流及单个换流变压器一次侧电流.无滤波器投入、采用常规网侧滤波和采用感应滤波 3 种方案下的电流波形如图 7~图 9 所示.由图 7 可看出,两种方案均对 750 kV 总交流电流滤波产生较好的效果.但是从单个 6 脉动换流变压器一次侧电流波形来看,可知常规网侧滤波效果很差,而感应滤波取得良好的谐波抑制效果,如图 8 和图 9.

为便于分析与对照,将 3 种方案下的电流谐波含量相关数据列于表 5~表 7 中.根据表 5 可求得采用常规滤波与采用感应滤波方案情况下的 750 kV 交流侧总电流谐波滤除率,见表 8.并作出柱状图进行对比,如图 7~图 10 所示.

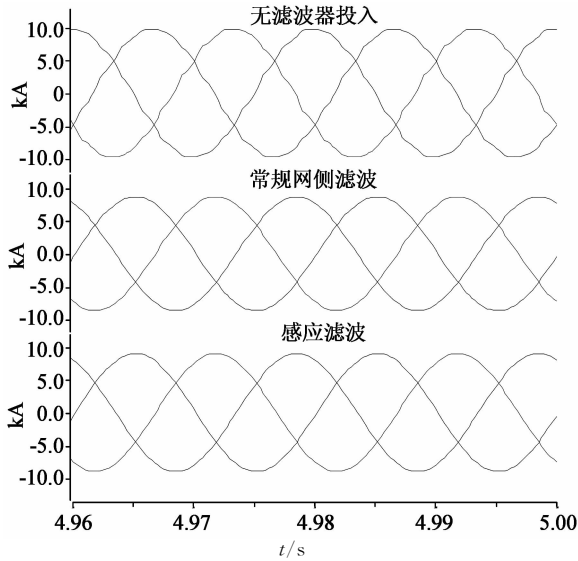


图7 750 kV交流侧三相交流电流波形  
Fig.7 The three-phase current waveforms at the 750 kV AC side

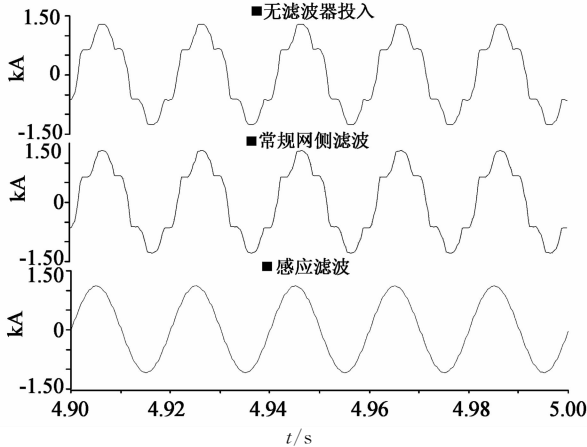


图8 单个6脉动换流变压器(Y/Δ)一次侧A相电流波形  
Fig.8 The phase-A current waveforms at the primary side of a single Y-Delta connected 6-pulse converter transformer in three different situations

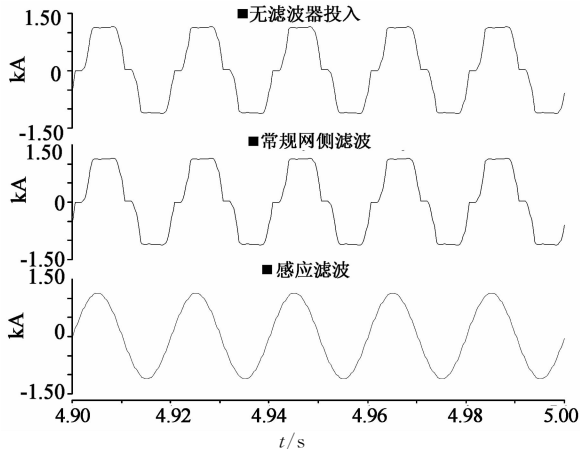


图9 单个6脉动换流变压器(Y/Y)一次侧A相电流波形

Fig.9 The phase-A current waveforms at the primary side of a single Y-Y connected 6-pulse converter transformer in three different situations

表5 3种情况下的750 kV交流侧总电流谐波含量对比

Tab.5 The harmonic current content comparison at 750 kV AC side in three cases

滤波方案	谐波电流次数								
	3 <sup>rd</sup>	5 <sup>th</sup>	7 <sup>th</sup>	11 <sup>th</sup>	13 <sup>th</sup>	23 <sup>rd</sup>	25 <sup>th</sup>	35 <sup>th</sup>	37 <sup>th</sup>
无滤波器投入	3.95	0.975	0.418	126.34	97.15	35.28	31.2	16.32	14.06
常规网侧滤波	5.45	1.18	0.23	35.96	21.83	12.8	12.44	3.81	4.47
感应滤波	0.41	0.4	0.3	24.25	14.32	1.99	1.71	0.12	0.16

表6 3种情况下的单个换流变压器(Y/Δ)一次侧电流谐波含量对比

Tab.6 The harmonic current content comparison at the primary side of the single converter transformer (Y/delta) in three cases

滤波方案	谐波电流/A										
	3 <sup>rd</sup>	5 <sup>th</sup>	7 <sup>th</sup>	11 <sup>th</sup>	13 <sup>th</sup>	17 <sup>th</sup>	19 <sup>th</sup>	23 <sup>rd</sup>	25 <sup>th</sup>	35 <sup>th</sup>	37 <sup>th</sup>
无滤波器投入	1.08	124.87	63.18	15.8	12.17	9.38	6.51	4.42	3.92	2.05	1.76
常规网侧滤波	0	125.17	63.56	16.23	12.41	9.74	6.73	4.45	3.98	2.09	1.84
感应滤波	0	0	0	3.01	1.79	0	0	0.23	0.19	0	0

表7 3种情况下的单个换流变压器(Y/Y)一次侧电流谐波含量对比

Tab.7 The harmonic current content comparison at the primary side of the single converter transformer (Y/Y) in three cases

滤波方案	谐波电流/A										
	3 <sup>rd</sup>	5 <sup>th</sup>	7 <sup>th</sup>	11 <sup>th</sup>	13 <sup>th</sup>	17 <sup>th</sup>	19 <sup>th</sup>	23 <sup>rd</sup>	25 <sup>th</sup>	35 <sup>th</sup>	37 <sup>th</sup>
无滤波器投入	1.98	124.68	63.08	15.78	12.11	9.4	6.48	4.39	3.88	2.03	1.76
常规网侧滤波	1.21	125.02	63.43	16.22	12.36	9.77	6.68	4.45	3.96	2.09	1.85
感应滤波	0	0.29	0	3.19	1.94	0	0	0.23	0.19	0	0

表8 采用常规滤波与采用感应滤波方案情况下的

750 kV交流侧总电流谐波滤除率对比

Tab.8 The comparison of the total current harmonic filtering rate at 750kV AC side using the conventional and inductive filtering schemes

滤波方案	各次谐波电流滤除率/%						
	3 <sup>rd</sup>	11 <sup>th</sup>	13 <sup>th</sup>	23 <sup>rd</sup>	25 <sup>th</sup>	35 <sup>th</sup>	37 <sup>th</sup>
常规网侧滤波	—	71.54	77.53	65.48	60.13	76.65	68.21
感应滤波	89.62	80.81	85.26	94.36	94.52	99.26	98.86

注：“—”表示无明显滤除效果

在不投入任何交流滤波器的情况下,750 kV 交流侧总电流的谐波成分如表 5 中第 2 行所示,该电流含少量 3 次非特征谐波及较多的 11,13,23,25 次等 12 脉动特征谐波;单个换流变压器一次侧的电流的谐波成分如表 6 和表 7 中第 2 行所示,含大量的 5,7,11,13 次等 6 脉动特征次谐波. 本文以不投入交流滤波器和并联电容器的情况为参考基础,对采用常规网侧滤波功补方案与采用感应滤波方案进行对比,主要关注两种方案对上述谐波的滤除率.

在 750 kV 交流母线处投入常规设计的 750 kV 电压等级的滤波器情况下,750 kV 交流侧总电流的谐波成分如表 5 中第 3 行所示;单个换流变压器一次侧电流的谐波成分如表 6 和表 7 中第 3 行所示. 因此,对于常规设计的滤波方案,除 3 次谐波无较明显滤除效果外(该 HP3 设计在 150 Hz 的阻抗较大,滤波效果受到一定影响),该方案对 750 kV 交流侧总电流的各次谐波的滤除率见表 8 第 2 行,显示出较好的谐波抑制效果. 然而,对于单个换流变压器一次侧的谐波电流滤除情况,常规方案则基本没有滤除效果. 这说明了虽然在交流网侧母线处安装滤波器能够取得良好的谐波抑制效果,但是由换流阀产生的谐波电流却能完全经换流变压器而流至交流母线处,这样换流变压器就完全遭受到了谐波对它的不良影响,包括其损耗增大和铁芯振动噪音增大等.

本文所提感应滤波技术的方案,在原有双绕组换流变压器的基础上增加电压等级为 500 kV 的感应滤波绕组,并将 750 kV 侧的每个 12 脉动单元的两个感应滤波换流变压器的感应滤波绕组连接成并联的形式后,接入 500 kV 电压等级的滤波器及并联电容器. 在此情形下,750 kV 交流侧总电流谐波含量如表 5 中第 4 行所示;单个换流变压器一次侧的电流谐波含量如表 6 和表 7 中第 4 行所示. 与不采取任何谐波抑制方法情况相比较,采用感应滤波绕组并联方案对 750 kV 交流侧总电流的各次谐波的滤除率见表 8 第 3 行. 与常规网侧滤波方案相比,仿真结果表明:采用并联型感应滤波绕组方案在无需安装 3 次滤波器的情况下就能滤除 750 kV 侧总电流近 90% 的 3 次谐波电流. 此外,本滤波方案对各特征谐波的滤除率要比常规方案的高(参见表 8 及图 10 和图 11),分别为:11 次谐波滤除率提高 9.27%,13 次提高 7.73%,23 次提高 28.88%,25 次提高 34.39%,35 次提高 22.61%,37 次提高 30.65%. 而在改善每个换流变压器一次侧电流质量方面,图 12 和图 13 更是清楚地说明了感应滤波绕组并联滤波方案具有常规网侧滤波方案所不具备的优势.

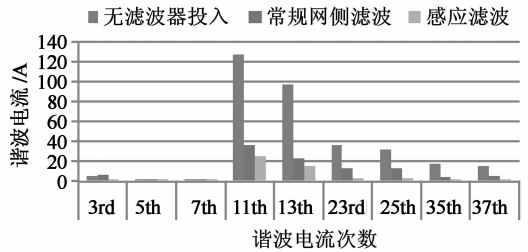


图 10 3 种情况下的 750 kV 交流侧总电流谐波含量对比  
Fig. 10 The harmonic current content comparison at the 750 kV AC side in three cases

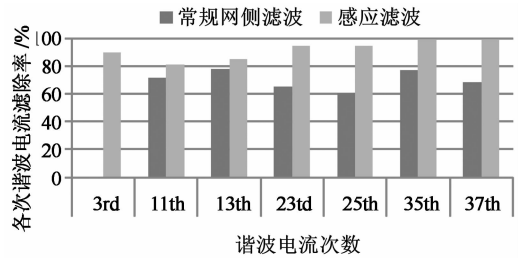


图 11 采用常规滤波与采用感应滤波方案情况下的 750 kV 交流侧总电流谐波滤除率对比  
Fig. 11 The comparison of the total current harmonic filtering rate at 750 kV AC side using the conventional and inductive filtering schemes

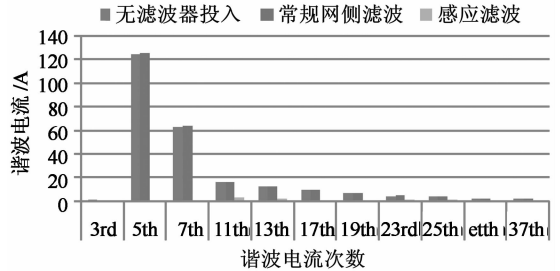


图 12 3 种情况下的单个换流变压器(Y/△)一次侧电流谐波含量对比  
Fig. 12 The harmonic current content comparison at the primary side of the single converter transformer (Y/delta) in three cases

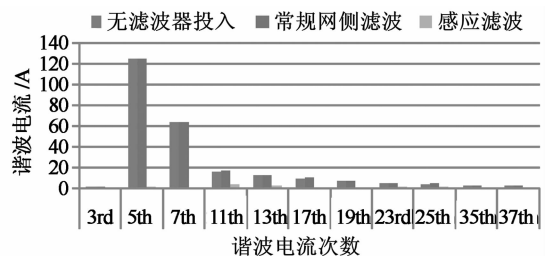


图 13 3 种情况下的单个换流变压器(Y/Y)一次侧电流谐波含量对比  
Fig. 13 The harmonic current content comparison at the primary side of the single converter transformer (Y/Y) in three cases

### 3 结 论

本文以酒泉-湖南在建的特高压直流输电工程为案例进行实施新方案的可行性研究,基于酒泉-湖南±800 kV特高压直流输电工程案例而建立的特高压直流接入750 kV交流电网的PSCAD/EMT-DC仿真模型,采用新型滤波绕组并联的感应滤波技术与常规网侧滤波及功补相比显示出如下的优势:

1) 感应滤波换流变压器的滤波绕组电压等级为500 kV,接入的交流滤波器及并联电容器的500 kV电压等级比常规方案的750 kV要低,可节省滤波器及并联电容器的投资成本。

2) 感应滤波技术利用换流变压器的电磁潜能和安匝平衡原理,在换流变压器内部对谐波磁通进行清除,可有效地抑制谐波电流对换流变压器本体的危害,降低换流变压器因谐波而引起的损耗和振动噪声。

3) 感应滤波技术在原换流变压器的基础上增加三角形联接的滤波绕组,为3次谐波电流提供回路,不需要3次滤波器组就能有效清除交流电网侧的三次谐波,节省了常规网侧滤波方案的三次滤波器组的投资成本和占地面积。

4) 采用最新的滤波绕组并联方式,一方面,可以为每个6脉动单元换流变压器一次绕组的5,7,17,19次等谐波电流提供环流回路,在汇流之前便能清除上述谐波电流,特别是为Y/Y型换流变压器一次绕组的3次谐波电流提供回路;另一方面,每个12脉动单元只需一个大组的交流滤波器和并联电容器,克服了传统滤波绕组不并联方式下需要单独两组的缺点。

5) 由于不再需要HP3交流滤波器,因而BP11/13,HP24/36交流滤波器和并联电容器的分组容量可以更加灵活。

6) 新型滤波绕组并联的感应滤波技术显示出比常规网侧滤波方案更好的谐波抑制优势。

### 参考文献

[1] 舒东胜,王甜,徐箭,等.湖北电网消纳蒙鄂特高压直流能力研究[J].电力建设,2015,36(3):59-64.  
SHU Dong-sheng, WANG Tian, XU Jian, *et al.* Accommodating power ability of UHVDC transmission lines from mengxi to hubei province[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(3): 59-64. (In Chinese)

[2] 齐旭,曾德文,史大军,等.特高压直流输电对系统安全稳定影响研究[J].电网技术,2006,30(2):1-6.  
QI Xu, ZENG De-wen, SHI Da-jun, *et al.* Study on impacts of UH-

VDC transmission on power system stability[J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 1-6. (In Chinese)

[3] 喻新强. 国家电网公司直流输电系统可靠性统计与分析[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 1-7.  
YU Xin-qiang. Statistics and analysis on reliability of HVDC power transmission systems of state grid corporation of China[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 1-7. (In Chinese)

[4] 黄道春,魏远航,钟连宏,等.我国发展特高压直流输电中一些问题的探讨[J].电网技术,2007,31(8):6-12.  
HUANG Dao-chun, WEI Yuan-hang, ZHONG Lian-hong, *et al.* Discussion on several problems of developing UHVDC transmission in China[J]. Power System Technology, 2007, 31(8): 6-12. (In Chinese)

[5] 陈锡磊,周浩,沈扬,等.溪洛渡-浙西±800 kV/7 500 MW特高压直流输电工程主回路参数设计[J].电网技术,2011,35(12):26-32.  
CHEN Xi-lei, ZHOU Hao, SHEN Yang, *et al.* Study and design of main circuit parameters for 800 kV/7 500 MW DC power transmission project from Xiluodu to Zhexi[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 26-32. (In Chinese)

[6] 邱伟,钟杰峰,伍文城.±800 kV云广直流换流站无功补偿与配置方案[J].电网技术,2010,34(6):93-97.  
QIU Wei, ZHONG Jie-feng, WU Wen-cheng. Reactive power compensation scheme and its configuration for converter station of ±800 kV DC power transmission project from yunnan to Guangdong[J]. Power System Technology, 2010, 34(6): 93-97. (In Chinese)

[7] 殷威扬,杨志栋.特高压直流工程无功平衡和补偿策略[J].高电压技术,2006,32(9):50-54.  
YIN Wei-yang, YANG Zhi-dong. Study on reactive power balance and compensation strategy for UHVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 50-54. (In Chinese)

[8] 杜忠明,费广.第二回直流输电工程换流站无功补偿的研究[J].电网技术,2006,30(10):69-74.  
DU Zhong-ming. Study on reactive power compensation for the secondary HVDC project from guizhou to guangdong[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 69-74. (In Chinese)

[9] 莫丽琼.±800 kV特高压直流输电系统谐波不稳定研究[J].电力自动化设备,2012,32(5):118-122.  
MO Li-qiong. Study of harmonic instability for ±800 kV UHVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 118-122. (In Chinese)

[10] 罗隆福,李季,许加柱,等.基于新型换流变压器的谐波治理研究[J].高压电器,2006,42(2):96-98.  
LUO Long-fu, LI Ji, XU Jia-zhu, *et al.* Study on harmonic treatment based on new type converter transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(2): 96-98. (In Chinese)

[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 Jia-zhu, LUO Long-fu, 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. (In Chinese)

[12] 李勇,罗隆福,许加柱,等.采用新型换流变压器的直流输电稳态模型[J].电力系统自动化,2006,30(21):28-32.  
LI Yong, LUO Long-fu, XU Jia-zhu, *et al.* Steady state model of the DC transmission with new type converter transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21): 28-32. (In Chinese)

[13] LI Yong, ZHANG Zhi-wen, REHTANZ C, *et al.* Study on steady- and transient-state characteristics of a new HVDC transmission system based on an inductive filtering method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(7): 1976-1986.

[14] LI Yong, LUO Long-fu, REHTANZ C, *et al.* Study on characteristic parameters of a new converter transformer for HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 2125-2131.

[15] LI Yong, ZHANG Zhi-wen, REHTANZ C. A new voltage source converter-HVDC transmission system based on an inductive filtering method. [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(5): 569-576.