

感应滤波四绕组变压器及其滤波补偿装置分析*

李世军^{1,2,4†}, 罗隆福¹, 李伟栋³, 沈阳¹, 丁立国¹, 张细政²

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南工程学院 风力发电机组及控制湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411101; 3. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014; 4. 2011 湖南省风电装备与电能变换协同创新中心, 湖南 湘潭 411101)

摘要:为改善 220 kV 变电站的电能质量,提出了一种基于感应滤波技术的四绕组变压器,相比传统三绕组变压器,其增加了一个具有零阻抗设计特征的附加滤波绕组.附加滤波绕组接配套的滤波补偿装置,此变压器能够高效抑制 110 kV 和 35 kV 负载侧的谐波,减小 220 kV 侧的谐波电流.对比分析了几种较为常用无功补偿容量的分配方案,确定了采用配系数分配方法设计感应滤波四绕组变压器配套滤波补偿装置的优化方案,从而实现了滤波总电感最小的目的,保证了滤波补偿装置的经济性.利用 PSCAD/EMTDC 软件建立了感应滤波四绕组变压器及滤波补偿装置的仿真模型.仿真结果表明,本文提出方案的滤波效果远远优于传统的三绕组变压器的滤波方案,具有良好的工程应用前景.

关键词:四绕组变压器;感应滤波;无功补偿;滤波器设计;仿真验证

中图分类号:TM402

文献标志码:A

Analysis of Induction Filtering Four-winding Transformer and Filter Compensation Devices

LI Shijun^{1,2,4†}, LUO Longfu¹, LI Weidong³, SHEN Yang¹, DING Ligu¹, ZHANG Xizhen²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Wind Generator and Its Control, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411101, China; 3. Powerchina Zhongnan Engineering Co Ltd, Changsha 410014, China; 4. 2011 Hunan Province Cooperative Innovation Center for Wind Power Equipment and Energy Conversion, Xiangtan 411101, China)

Abstract: In order to improve the power quality of 220 kV transformer substation, a four winding transformer based on inductive filtering technology was proposed. Compared with the traditional three winding transformer, the four winding transformer has an additional filter winding with the characteristics of zero impedance design. The additional filter winding connecting to the set of filter compensation devices can efficiently restrain the harmonic from the 35 kV and 110 kV load sides, and reduce the harmonic currents of 220 kV side. Comparative analysis of several commonly reactive compensation was studied, and match coefficient distribution method was adopted to design transformer matching filter compensation devices in order to realize the purpose of the minimum inductance, which can guarantee the efficiency of filter compensation devices. Finally, through the software of PSCAD/EMTDC, the modules of the four-winding

* 收稿日期:2016-02-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61673164), National Natural Science Foundation of China(61673164); 湖南工程学院资助科研项目(Y Y1720, X J1606), Science Research Project of Hunan Institute of Engineering(Y Y1720, X J1606)

作者简介:李世军(1982-),男,湖南浏阳人,湖南大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: B12090018@hnu.edu.cn

transformer and filters are modeled, and a total simulation goes on with all modules. The results show that the induction filtering four winding transformer and its filter are much better than the traditional three winding transformer, which is applicable to practical engineering.

Key words: four-winding transformation; inductive filtering; reactive compensation; filter design; simulation verification

变压器感应滤波技术不同于传统的滤波方式^[1],它充分利用特定次谐波频率下变压器的安匝平衡原理^[2-5],将非线性负载侧的谐波阻止于变压器的二次负载侧,防止其进入变压器网侧绕组,具备良好的谐波屏蔽效果;同时,感应滤波技术还能有效降低变压器的铁芯谐波磁通,改善变压器的电磁绝缘环境^[6].感应滤波技术已广泛应用在电解、化工、冶金等领域,应用效果良好.同时,随着新能源、电气化铁道的快速发展,导致某些 220 kV 变电站的谐波含量超标,其 110 kV 和 35 kV 的负载侧都有较重谐波传入电网,谐波治理迫在眉睫.但是,直接在 220 kV 侧治理是不现实的;分别在 110 kV 侧和 35 kV 侧治理,则需要安装两套滤波器,经济性差,也没有现实可行性.采用四绕组变压器感应滤波方案是较为有效可行的方法.感应滤波方案是在 220 kV 之后,安装 35 kV 滤波绕组(也可以为 110 kV,取决于滤波器成本),之后,才是 110 kV 和 35 kV 负载绕组,使得两负载绕组的谐波与 220 kV 绕组被滤波绕组隔离,所以,也称这种变压器为谐波隔离变压器.谐波隔离变压器有两套感应滤波组(三绕组变压器):220 kV 绕组、滤波绕组、110 kV 绕组和 220 kV 绕组、滤波绕组、35 kV 绕组.两套感应滤波组均要求满足感应滤波条件,即:感应滤波绕组等值阻抗趋近于零.经过仿真研究,感应滤波的方案比传统滤波方案好:传统方案无法同时保证 35 kV 和 110 kV 侧谐波负载的滤波要求,从 220 kV 侧观察,就是谐波无法达标.而感应滤波方案,220 kV 侧谐波能够达标.最后,本文采用四绕组谐波隔离(感应滤波)变压器为对象,开展滤波器优化设计研究.通过对比分析 3 种常用的无功补偿分配方案,选择了 $1/n$ 分配方法设计,实现了滤波的经济性.

1 接线方式与滤波原理

感应滤波四绕组变压器的绕组分布以及接线方式分别如图 1 和图 2 所示.感应滤波四绕组变压器相比传统三绕组变压器增加了 35 kV 的滤波绕组,为了实现对中低压负载的谐波屏蔽,将滤波绕组置于 220 kV 绕组和 110 kV 绕组之间.感应滤波四绕

组变压器实物如图 3 所示,目前工程样机已经完成出厂试验,各项指标均满足条件,样机正在现场安装调试.

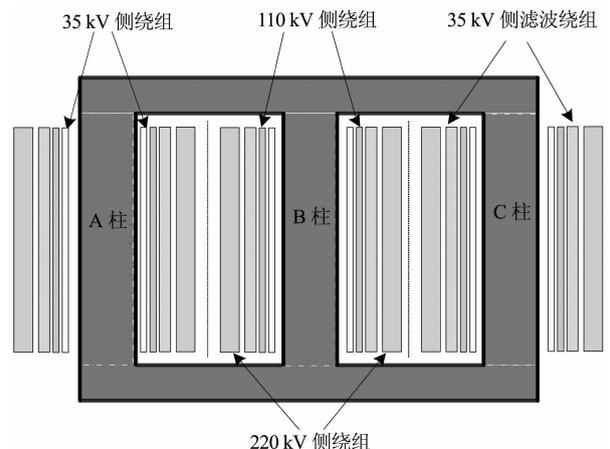


图 1 三相四绕组变压器的绕组分布结构图
Fig. 1 Winding distribution diagram of three-phase four winding transformer

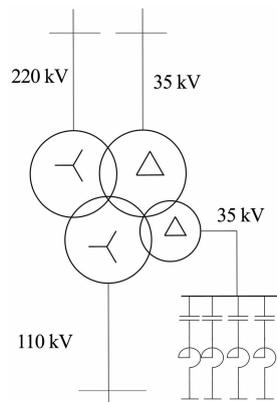


图 2 四绕组变压器的接线方式图
Fig. 2 Connection modes of four winding transformer

本文所研究的感应滤波四绕组变压器参数如表 1 所示.针对实际工作中含有主要次特征谐波电流,感应调谐装置分别采用 5, 7, 11 和 13 次 4 条单调谐波滤波支路.

为研究感应滤波四绕组变压器的工作原理,建立了单相等值电路,如图 4 所示,其中所有变量均折算到变压器一次侧,其中 W_1, W_2, W_3, W_4 分别为 220 kV 侧绕组, 35 kV 滤波绕组, 110 kV 侧绕组和

35 kV 绕组的匝数;绕组电流分别为 $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3, \dot{I}_4$; \dot{I}_f 为感应调谐装置中的电流。

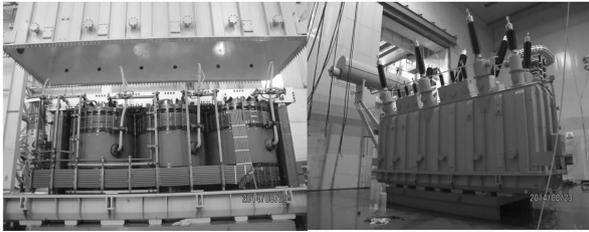


图3 变压器实物图
Fig. 3 Photos of transformer

表1 感应滤波四绕组变压器额定参数

Tab. 1 The rated parameters of four winding transformer

	线电压/kV	容量/MVA	接法
高压绕组(G)	220	180	Y
中压绕组(M)	110	180	Y
低压绕组(D)	35	90	Δ
滤波绕组(L)	35	90	Δ

注:短路阻抗参数如下 $Z_{kGD} = 20.73\%$; $Z_{kGM} = 14.29\%$; $Z_{kMD} = 5.04\%$; $Z_{kGL} = 9.05\%$; $Z_{kLD} = 11.74\%$; $Z_{kLM} = 5.22\%$ 。

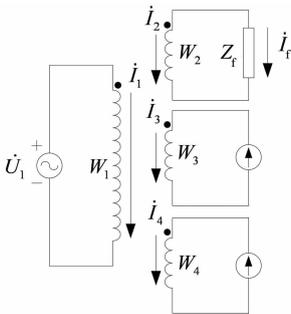


图4 感应滤波四绕组变压器单相等效谐波电路模型

Fig. 4 Single phase equivalent circuit model of four-winding transformer

将变压器各绕组的匝数转换成基准匝数 W , 即:

$$\begin{cases} K_1 = W/W_1 \\ K_2 = W/W_2 \\ K_3 = W/W_3 \\ K_4 = W/W_4 \end{cases} \quad (1)$$

同时由图4中感应滤波四绕组变压器单相等效模型可得以下等式:

$$\begin{cases} \dot{I}_2 = -\dot{I}_f \\ \dot{U}_2 = \dot{I}_f Z_f \end{cases} \quad (2)$$

式中: Z_f 为特定次谐波下感应调谐装置的等值阻抗(折算到单相)。

推得磁势平衡方程,其中忽略其励磁电流:

$$\frac{\dot{I}_1}{K_1} + \frac{\dot{I}_2}{K_2} + \frac{\dot{I}_3}{K_3} + \frac{\dot{I}_4}{K_4} = 0 \quad (3)$$

由多绕组变压器理论可以得到^[7-8]:

$$\begin{cases} K_1 \dot{U}_1 - K_2 \dot{U}_2 = \frac{\dot{I}_1}{K_1} Z'_{K12} + \frac{\dot{I}_3}{K_3} Z'_{213} + \frac{\dot{I}_4}{K_4} Z'_{214} \\ K_1 \dot{U}_1 - K_3 \dot{U}_3 = \frac{\dot{I}_1}{K_1} Z'_{K13} + \frac{\dot{I}_2}{K_2} Z'_{312} + \frac{\dot{I}_4}{K_4} Z'_{314} \\ K_1 \dot{U}_1 - K_4 \dot{U}_4 = \frac{\dot{I}_1}{K_1} Z'_{K14} + \frac{\dot{I}_2}{K_2} Z'_{412} + \frac{\dot{I}_3}{K_3} Z'_{413} \end{cases} \quad (4)$$

公式(4)中有两类阻抗参数,①两两绕组之间的短路阻抗,如 $Z'_{K12}, Z'_{K13}, Z'_{K14}$,它们可以通过绕组的合理布置进行设计。②具有漏阻抗性质的阻抗参数,如 Z'_{213}, Z'_{214} 等,它们可由短路阻抗间接进行计算得出,如 $Z'_{213} = (Z'_{K21} + Z'_{K23} - Z'_{K13})/2$, $Z'_{214} = (Z'_{K21} + Z'_{K24} - Z'_{K14})/2$ 。

由公式(1)~(4)共同构成了描述感应滤波四绕组变压器的谐波电压、谐波电流、谐波阻抗之间关系的基本数学模型,根据该数学模型,可以得到 220 kV 侧绕组电流与 35 kV 侧和 110 kV 侧绕组电流之间的关系表达式,即

$$\dot{I}_1 = \frac{K_1^2 K_3 K_4 \dot{U}_1 - (Z'_f + Z'_{213}) K_1 K_4 \dot{I}_3 - (Z'_f + Z'_{214}) K_1 K_3 \dot{I}_4}{(Z'_{K12} + Z'_f) K_3 K_4} \quad (5)$$

实际运行时 220 kV 侧因系统容量很大,谐波电压很小,可以忽略,不含谐波分量,即 $\dot{U}_{1n} = 0$,将公式(5)变化为某次谐波频率条件下时,可得网侧感应的谐波电流与两负载侧谐波电流的关系:

$$\dot{I}_{1n} = - \frac{(Z'_{fn} + Z'_{213n}) K_1 K_4 \dot{I}_{3n} - (Z'_{fn} + Z'_{214n}) K_1 K_3 \dot{I}_{4n}}{(Z'_{K12n} + Z'_{fn}) K_3 K_4} \quad (6)$$

在感应滤波四绕组变压器的设计中, $Z'_{213} = (Z'_{K21} + Z'_{K23} - Z'_{K13})/2 = (9.09\% + 5.22\% - 14.29\%)/2 = 0.02\%$, $Z'_{214} = (Z'_{K21} + Z'_{K24} - Z'_{K14})/2 = (9.09\% + 5.22\% - 20.73\%)/2 = 0.1\%$,可见 35 kV 滤波绕组的等值阻抗基本为零阻抗设计,即 $Z'_{213} = Z'_{214} = 0$,且调谐装置在设计时调谐在 5 次、7 次等 n 次,即在 n 次谐振时谐波阻抗为零,即认为 $Z'_{fn} = 0$ 。则对于感应滤波四绕组变压器中,网侧谐波电流,由公式(6)可得 $\dot{I}_{1n} = 0$ 。

则感应滤波四绕组变压器的 220 kV 网侧不存在 n 次谐波电流。式(6)所表达的物理含义可以描述为:当 35 kV 以及 110 kV 负荷侧的谐波电流流入感应滤波四绕组变压器时,35 kV 滤波绕组可对其二者产生屏蔽作用,使 220 kV 的电网侧不存在谐波电流,从而达到改善电能质量的目的。

2 基于感应滤波四绕组变压器的滤波器设计

2.1 确定无功补偿量

感应调谐装置在特定次谐波频率下呈串联谐振状态.对 n 次调谐支路而言,其中电容 C 和电感 L 满足如下关系:

$$n\omega L = \frac{1}{n\omega C} \quad (7)$$

此时感应调谐支路等值阻抗为:

$$X = j\omega L - j \frac{1}{\omega C} = -j \frac{n^2 - 1}{n^2} \frac{1}{\omega C} \quad (8)$$

在装设感应滤波调谐装置前,220 kV 侧系统的功率因数为 $\cos\varphi_1$;在装设感应调谐装置之后系统的功率因数为 $\cos\varphi_2$,由于感应滤波调谐装置的阻抗在基波频率下呈容性,显然有 $\cos\varphi_2 > \cos\varphi_1$,且感应滤波调谐装置需补偿的无功总量为:

$$Q_c = P (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (9)$$

式中: P 为负荷消耗的有功功率; Q_c 为感应滤波调谐装置补偿的三相总无功功率.

2.2 电容分配方案

根据公式(9)确定的无功补偿总量,由无功补偿量与单调谐滤波支路的关系 $Q = \omega C U^2$,可得单调谐滤波支路上的电容为:

$$C = Q / \omega U^2 \quad (10)$$

将式(7)代入式(10),可得电感表达式:

$$L = 1 / (n^2 \omega^2 \frac{Q}{\omega U^2}) = \frac{U^2}{n^2 \omega Q} \quad (11)$$

针对工程应用实际,本文使用以下3种电容分配方案,分别为等电容分配方案、等电感分配方案和配系数分配优化方案.

2.2.1 等电容分配方案

等电容分配方案是根据变压器中感应调谐装置所需的无功补偿容量,计算出相应的电容 C 后将其4等分,分别用于5,7,11,13次滤波支路,这是常规滤波器设计的方法. Q_5, Q_7, Q_{11}, Q_{13} 依次表示5,7,11,13次感应滤波调谐支路的单相无功补偿容量,得到:

$$Q_5 = Q_7 = Q_{11} = Q_{13} = \frac{1}{12} Q_c \quad (12)$$

C_5, C_7, C_{11} 和 C_{13} 分别为5,7,11和13次滤波支路的电容,其值为:

$$C_n = Q_n / \omega U^2, n = 5, 7, 11, 13 \quad (13)$$

L_5, L_7, L_{11} 和 L_{13} 分别为5,7,11和13次滤波支路的电感,其值为:

$$L_n = U^2 / n^2 \omega Q_n, n = 5, 7, 11, 13 \quad (14)$$

2.2.2 等电感分配方案

等电感分配方案是将感应滤波调谐装置所需的

无功补偿容量分配到5,7,11和13次滤波支路,原则就是使分配到4条支路的无功补偿容量所需的电感相等,然后再根据电感值计算出各支路所需要的电容.由于每相滤波装置中5,7,11,13次滤波支路上的电感值可以用相应的单相无功补偿容量来表示,令5,7,11,13次滤波支路上的电感相等,有

$$L_5 = L_7 = L_{11} = L_{13} \quad (15)$$

$$\frac{U^2}{25\omega Q_5} = \frac{U^2}{49\omega Q_7} = \frac{U^2}{121\omega Q_{11}} = \frac{U^2}{169\omega Q_{13}} \quad (16)$$

各滤波支路上的电容为:

$$Q_5 + Q_7 + Q_{11} + Q_{13} = Q_c / 3 \quad (17)$$

根据公式(13)和(14),可计算出每一条滤波支路所需电容值和电感值.

2.2.3 配系数分配优化方案

配系数分配方案主要是在5,7,11和13次调谐支路上配一个分母为相应次数的系数,系数的分子可由下式计算求得:

$$\begin{cases} Q_5 + Q_7 + Q_{11} + Q_{13} = (\frac{i}{5} + \frac{j}{7} + \frac{k}{11} + \frac{l}{13}) \times \frac{1}{3} Q_c \\ \frac{i}{5} + \frac{j}{7} + \frac{k}{11} + \frac{l}{13} = 1 \end{cases} \quad (18)$$

配系数分配方案其实就是以其谐波次数为分母,自配分子的优化方案.同时配系数方案具有约束条件少和优化空间大的特点.对配系数分配优化设目标函数:

$$y = \frac{U^2}{25\omega Q_5} + \frac{U^2}{49\omega Q_7} + \frac{U^2}{121\omega Q_{11}} + \frac{U^2}{169\omega Q_{13}} \quad (19)$$

y 表示用于调谐支路的总电感量,采用遗传算法迭代求解,迭代初始值用等电容方案的电容值.

根据工程需求,本变压器的无功总补偿容量 Q_c 大约为38 MVar,依据上文中分析的3种补偿方案,计算得到了滤波器的相关参数如表2所示.从工程应用的角度来说,滤波器的投资成本与电容和电感的大小密切相关,但是依据工程经验,滤波器的总电感越小,投资越小,由表2可以看出,感应滤波四绕组变压器配套滤波补偿装置采用配系数方案时(此时,优化结果为 $i=j=k=1$,即5,7,11,13次滤波支路的无功补偿容量之比为 $1/5 : 1/7 : 1/11 : 1/13$),总电感最小,经济性越高.

2.3 仿真效果分析

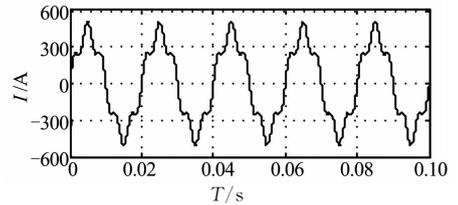
采用PSCAD/EMTDC仿真软件建立感应滤波四绕组变压器及其配套调谐滤波装置的仿真模型,原理图如图5所示.分别对比2种工况下,新型滤波方案和原有传统方案(在35 kV负载侧接滤波器方案)对电能质量的治理效果,220 kV侧谐波电流波

形如图 6 所示。

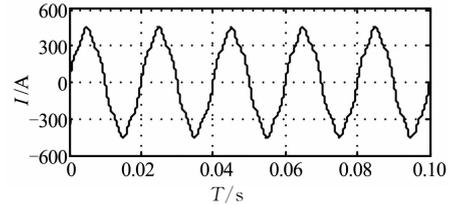
表 2 电容分配 3 种方案的解

Tab. 2 Solutions of three ways of capacitance distribution

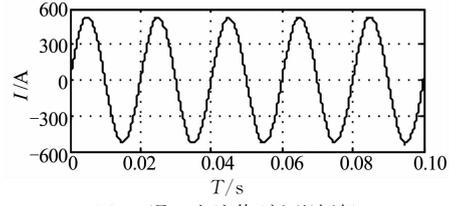
变量	等电容 分配方案	等电感 分配方案	配系数 分配方案
Y/H	0.091 7	0.091 7	0.080 2
L_5 /mH	49.2	22.9	31.41
L_7 /mH	25.1	22.9	22.43
L_{11} /mH	10.2	22.9	14.27
L_{13} /mH	7.3	22.9	12.08
C_5 / μ F	82.38	17.67	12.91
C_7 / μ F	82.38	9.02	9.22
C_{11} / μ F	82.38	3.65	5.867
C_{13} / μ F	82.38	2.61	4.967
R_5 / Ω	0.343 5	0.160 1	0.219 3
R_7 / Ω	0.175 2	0.160 1	0.156 6
R_{11} / Ω	0.071 0	0.160 1	0.098 8
R_{13} / Ω	0.050 8	0.160 1	0.084 3
Q_5 /MVar	3.170 4	6.800 6	4.966 2
Q_7 /MVar	3.170 4	3.469 7	3.547 3
Q_{11} /MVar	3.170 4	1.405 1	2.257 4
Q_{13} /MVar	3.170 4	1.006 0	1.910 1



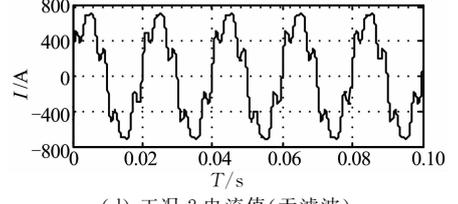
(a) 工况 1 电流值(无滤波)



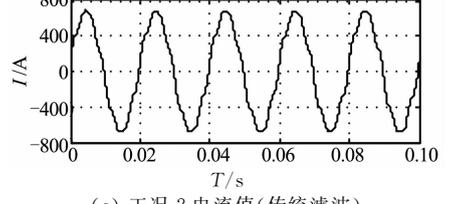
(b) 工况 1 电流值(传统滤波)



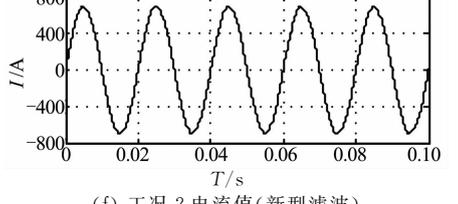
(c) 工况 1 电流值(新型滤波)



(d) 工况 2 电流值(无滤波)



(e) 工况 2 电流值(传统滤波)



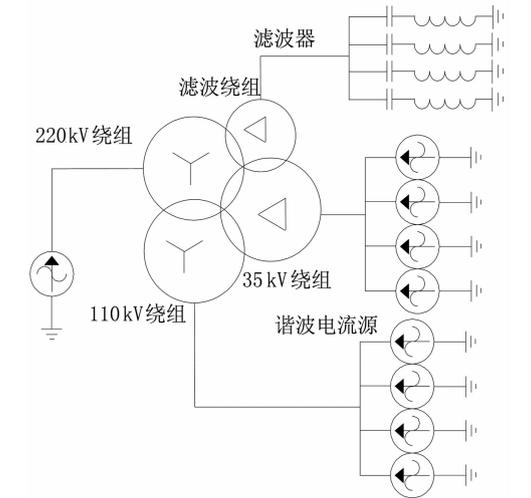
(f) 工况 2 电流值(新型滤波)

图 6 220 kV 侧电流波形图

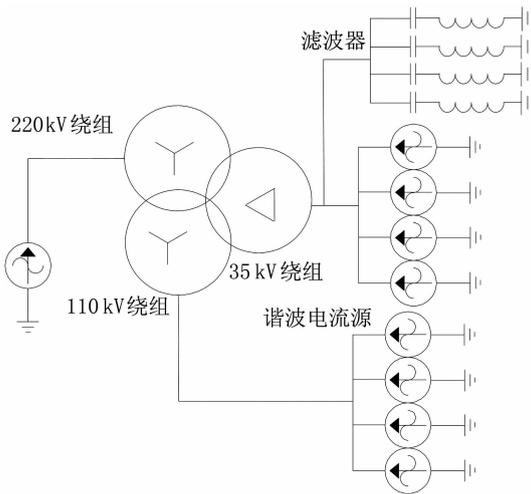
Fig. 6 The current waveform of 220 kV side

工况 1: 35 kV 绕组侧空载; 110 kV 绕组侧基波电流 800 A, 5 次谐波电流 50 A, 7 次谐波电流 40 A, 11 次谐波电流 30 A, 13 次谐波电流 20 A。

工况 2: 35 kV 绕组侧基波电流 1 000 A, 5 次谐波电流 60 A, 7 次谐波电流 50 A, 11 次谐波电流 40 A, 13 次谐波电流 30 A; 110 kV 绕组侧基波电流 800 A, 5 次谐波电流 50 A, 7 次谐波电流 40 A, 11 次谐波电流 30 A, 13 次谐波电流 20 A。



(a) 新型滤波仿真原理图



(b) 传统滤波仿真原理图

图 5 仿真电路原理图
Fig. 5 Simulation circuit

谐波电流值以变电站的实际电能质量数据为参数值,表3和表4分别为2种工况下测得的200 kV侧的谐波电流以及总谐波畸变率,2种工况下的总电流谐波畸变率分别为1.8%和2.0%,大大小于传统变压器的滤波方案电流谐波畸变率6.0%和6.9%,感应滤波四绕组变压器及其配套调谐装置的优化设计对谐波具有良好的治理效果.仿真结果分析如下:

1)由工况1的仿真结果可得,由于变电站110 kV侧存在着大量谐波,其网侧电流呈非正弦波形,且畸变率较大.传统滤波方案其谐波滤除率不到20%,而新型感应滤波四绕组变压器配套的滤波装置经过优化后,其谐波滤除率可达80%.

2)由工况2的仿真结果可得,当变电站110 kV侧和35 kV侧都含有大量谐波电流时,经过优化后的配套调谐装置与感应滤波四绕组变压器配套使用后,220 kV电源侧具有良好的谐波抑制效果.

表3 220 kV侧在工况1时的谐波电流

Tab.3 Harmonic current of 220 kV side in the case 1

A			
谐波次数	不滤波	传统滤波	新型滤波
基波	408	408	408
5次谐波	25	16	6
7次谐波	20	14	2.5
11次谐波	15	9	1
13次谐波	10	8	3
THD/%	9	6	1.8

表4 220 kV侧在工况2时的谐波电流

Tab.4 Harmonic current of 220 kV side in the case 2

A			
谐波次数	不滤波	传统滤波	新型滤波
基波	544	544	545
5次谐波	34	28	9
7次谐波	29	21	3.5
11次谐波	21	10.5	1.7
13次谐波	16	9	5.2
THD/%	9.6	6.9	2.0

3 结论

1)本文提出了一种具有感应滤波技术的四绕组谐波屏蔽变压器,其增加一个特殊设计的附加滤波绕组,实现对110 kV和35 kV负载侧谐波的高效统一治理.

2)分析了感应滤波四绕组变压器配套滤波器设计常用的3种方法,在经济上对不同方案进行了比较与分析,得出配系数分配方案比等电容方案与等

电感方案更具有经济优势.

3)通过PSCAD对2种典型工况下的谐波抑制效果进行了仿真,仿真结果表明,使用感应滤波四绕组变压器时,2种工况下测得网侧的总电流谐波畸变率分别为1.8%和2.0%,大大小于传统变压器的滤波方案电流谐波畸变率6%和6.9%,因此,有力地证明了本文所提出的感应滤波四绕组变压器和配套的感应滤波调谐装置具有良好的滤波效果.

参考文献

- [1] 李勇, 罗隆福, 刘福生, 等. 变压器感应滤波技术的发展现状与应用前景[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 86-92.
LI Yong, LUO Longfu, LIU Fusheng, *et al.* Application foreground of transformer inductive filtering technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 86-92. (In Chinese)
- [2] 罗隆福, 李勇, 刘福生, 等. 基于新型换流变压器的直流输电系统滤波装置[J]. 电工技术学报, 2006, 21(12): 108-115.
LUO Longfu, LI Yong, LIU Fusheng, *et al.* Design of HVDC filter device based on new-type converter transformer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(12): 108-115. (In Chinese)
- [3] 赵贺, 林海雪. 单调谐滤波电容器参数选择的工程方法[J]. 电网技术, 2006, 30(20): 52-55.
ZHAO He, LIN Haixue. Single tuned filter capacitor parameters selection method of engineering [J]. Power Grid Technology, 2006, 30(20): 52-55. (In Chinese)
- [4] 罗隆福, 廖闻迪, 许加柱, 等. 基于一种新型磁场-电路耦合的多绕组变压器复合短路阻抗及短路环流计算[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2015, 42(2): 67-73.
LUO Longfu, LIAO Wendi, XU Jiazhu, *et al.* Multi-winding transformer composite short-circuit impedance and circulating current calculation based on a new field-circuit coupling method [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(2): 67-73. (In Chinese)
- [5] 李世军, 罗隆福, 余双翔, 等. 集成滤波电抗绕组变压器数学模型[J]. 电工技术学报, 2015, 14(30): 201-207.
LI Shijun, LUO Longfu, SHE Shuangxiang, *et al.* Mathematical model of the integrated filtering reactor windings transformer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 14(30): 201-207. (In Chinese)
- [6] LI Y, LUO L, REHTANZ C, *et al.* An industrial DC power supply system based on an inductive filtering method [J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2012, 59(2): 714-722.
- [7] 王灿, 罗隆福, 周冠东, 等. 具有滤波功补绕组整流变压器的等值电路计算[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(10): 67-70.
WANG Can, LUO Longfu, ZHOU Guandong, *et al.* Calculation of the equivalent circuit of rectifier transformer [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(10): 67-70. (In Chinese)
- [8] 廖闻迪, 罗隆福, 朱军, 等. 非正交解耦理论与集成于整流变压器的线性电抗器[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3417-3425.
LIAO Wendi, LUO Longfu, ZHU Jun, *et al.* Non-orthogonal decoupling theory and linear reactor integrated in the rectifier transformer [J]. Proceedings of CSEE, 2015, 35(13): 3417-3425. (In Chinese)