

## 双输出移相配电变压器抑制输出电压畸变特性

郭健<sup>1</sup> 金平<sup>2</sup> 房淑华<sup>2</sup> 金承祥<sup>3</sup> 李宁<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016; 2. 东南大学电气工程学院, 南京, 210096;  
3. 中电电气集团有限公司, 扬中, 212211)

**摘要:**探讨了双输出移相配电变压器抑制输出电压畸变的机理,对变压器谐波阻抗与绕组结构之间的关系进行了研究。通过建立双输出移相变压器的场路耦合模型,对两种不同形式的变压器(双输出移相变压器和Dyn连接变压器)输出电压的谐波特性进行了分析计算,研究表明:由于双输出移相变压器可以抑制3倍次、5和7次谐波电流,因此对应的3倍次、5和7次谐波阻抗较低,在带非线性负载情况下输出电压的畸变得得到明显改善。

**关键词:**移相变压器;谐波阻抗;场路耦合;电压畸变

**中图分类号:** TM41      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2012)04-0445-07

## Reduction Mechanism of Output Voltage Distortion in Dual Output Phase-shift Distribution Transformer

Guo Jian<sup>1</sup>, Jin Ping<sup>2</sup>, Fang Shuhua<sup>2</sup>, Jin Chengxiang<sup>3</sup>, Li Ning<sup>3</sup>

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;  
2. College of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096, China;  
3. Zhongdian Electric Group Co. Ltd., Yangzhong, 212211, China)

**Abstract:** The mechanism of dual output phase-shift distribution transformer (DOPSDT) for reducing the output voltage distortion, and the relationship between the transformer harmonic impedance and windings layout structure are discussed. Based on the field-circuit coupled method, the output voltage distortions of Dyn transformer and DOPSDT are calculated. Results show that since the 3rd, 5th and 7th load current harmonic fluxes are cancelled on the secondary side, the corresponding harmonic impedance of DOPSDT are lower, and the corresponding harmonic voltage distortions of DOPSDT are also greatly lower than the distortions of the Dyn transformer.

**Key words:** shift-phase transformer; harmonic impedance; field-circuit coupled method; voltage distortion

现代电网中,随着非线性电力电子负载应用日趋广泛,流入电网的谐波电流流量大大增加<sup>[1]</sup>。谐波电流流过配电变压器绕组的时候,必然会在变压器内部产生谐波压降,而过大的谐波压降将导致变压器输出电压严重畸变,影响变压器负载侧的供电质量,进而影响到负载的安全可靠运行。

抑制变压器输出电压畸变实际上就是降低变

压器自身的谐波压降。在谐波电流不变的情况下,谐波压降的大小由谐波阻抗决定,因此降低配电系统中主要次谐波(3倍次、5和7次谐波)对应的阻抗是抑制输出电压畸变的必要条件。对于配电系统中广泛采用的Dyn连接变压器,其零序阻抗等于短路阻抗,而曲折连接的变压器的零序阻抗要明显低于短路阻抗,上述两种变压器零序阻抗存在差异的

基金项目:江苏省博士后科研(0902038C)资助项目。

收稿日期:2011-09-08;修订日期:2012-01-06

通讯作者:郭健,男,博士,讲师,1980年生,E-mail:nuaaeelab\_gj@163.com。

主要原因是曲折接线法可以抑制一次侧绕组的零序电流<sup>[2]</sup>,而Dyn连接变压器会按照变比关系在一次侧绕组中感应出零序电流,因此,变压器若要能同时具有较低的5和7次谐波阻抗,该变压器还应能够抑制一次侧绕组中的5和7次谐波电流,文献[3]提出了具有30°移相角的双输出变压器具有抑制5和7次谐波电流的能力。针对非线性负载影响,现有的研究工作更多的是围绕变压器如何抑制谐波电流<sup>[2-10]</sup>,而对于具有较低谐波阻抗变压器的结构设计、谐波阻抗计算方法,以及变压器抑制输出电压畸变性能的研究尚不深入。

作者在前期工作中已经论述了双输出移相变压器的绕组联接形式、输出电压移相角的匝数匹配方法、以及变压器抑制二次侧谐波电流流入一次侧绕组的机理<sup>[11]</sup>。在此基础上,本文将针对双输出移相变压器抑制输出电压畸变的机理,变压器绕组的结构布置特征及零序阻抗计算方法进行分析研究。通过建立双输出移相变压器的场路耦合模型,对带不同非线性负载情况下变压器输出电压的谐波抑制特性进行分析计算,并通过与Dyn连接变压器输出电压的谐波特性进行比较来验证本文理论的实用性。

## 1 双输出移相变压器结构布置特征

### 1.1 变压器抑制输出电压畸变机理

图1为双输出移相变压器二次侧绕组接线图,移相变压器二次侧采用了两组输出绕组,两组绕组都采用曲折连接。当零序电流(3倍次谐波电流)流过二次侧绕组时,零序磁动势在曲折连接的绕组之间进行平衡,不会产生单独铰链一次侧绕组的零序磁通,零序电流在一次侧绕组中被抑制,因此变压器的零序阻抗较低;另外,移相缓谐波变压器的二次侧两套输出端对应相的相位相差30°,两输出端的5和7次谐波接近反向,两输出端所带的负载越平衡,谐波产生的单独铰链一次侧绕组的磁链就越少,在一次侧感应的5和7次谐波电流亦越少,因此该变压器还具有较低的5和7次谐波阻抗。

### 1.2 变压器绕组结构布置形式

双输出移相变压器两组输出绕组不存在电的联系,在绕组结构布置时可以采用轴向布置或者辐向布置。轴向布置是将第1组输出绕组布置在轴中心的上半部分(或下半部分),第2组绕组布置在轴中心的下半部分(或上半部分),如图2(a)所示;辐向布置结构是将两组绕组沿辐向进行分裂布置,如

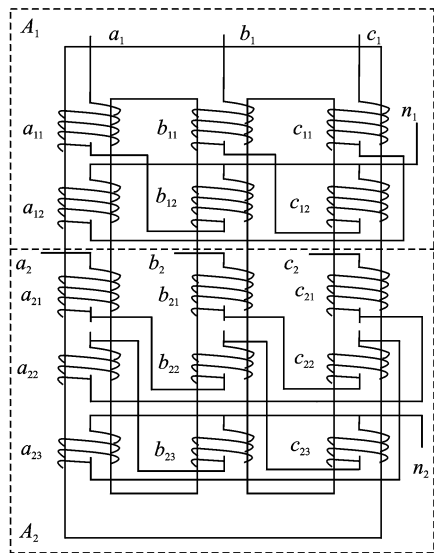


图1 双输出移相变压器二次绕组接线图

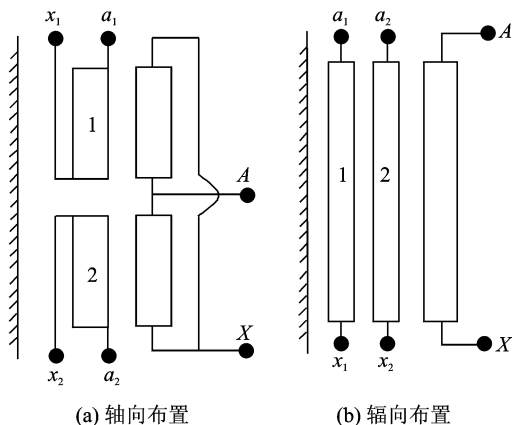


图2 绕组的两种结构布置形式

图2(b)所示。

轴向布置结构可以使得两组输出绕组的半穿越阻抗基本匹配,但是这种布置方式会导致5和7次谐波阻抗相对较大,这是因为当两组输出绕组流过大小相等的5和7次谐波电流时,谐波磁势在两组输出绕组之间进行平衡,由两组绕组谐波磁势建立起来的漏磁场是以辐向漏磁为主,辐向磁通以绕组的辐向厚度作为磁路长度,以轴向高度作为磁路宽度,因此磁路的磁阻相对较小,从而导致谐波阻抗较大。对于辐向布置结构,各次谐波磁动势产生的都是轴向漏磁通,轴向磁通以绕组的轴向高度作为磁路长度,以辐向厚度作为磁通宽度,磁路磁阻相对较大,因而具有较小的谐波阻抗。基于此,本文在双输出移相变压器绕组结构设计时,采用辐向布置的结构,同时,为了尽量减小辐向布置时两组输出绕组与一次侧边绕组之间的半穿越阻抗差异,二

次侧的各部分绕组按照图3所示的结构进行排列,即第1组绕组的两部分绕组处于靠近铁心和靠近高压绕组的区域,而第2组绕组的3部分绕组处于第1组的两部分绕组之间。

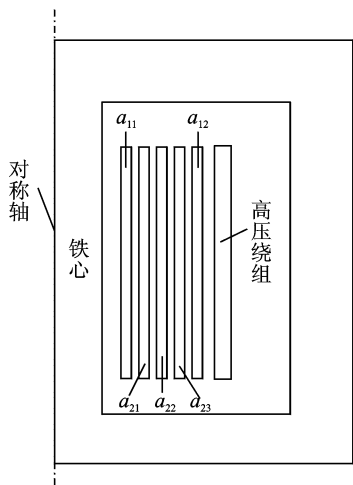


图3 A相铁心柱区域轴对称模型

## 2 变压器输出电压谐波抑制效果验证模型

### 2.1 双输出移相变压器结构参数

本文设计了一台20 kVA的双输出移相变压器,变压器的电磁结构参数见表1。其中 $H_K$ 表示绕组电抗高度; $M_O, H_O$ 表示铁心窗宽和窗高; $\lambda$ 表示绕组辐向厚度; $r$ 表示绕组平均半径。为了验证双输出移相变压器抑制输出电压畸变的效果,本文选取了一台Dyn连接的变压器作为比较,Dyn变压器的容量、变比及短路阻抗与本文设计的双输出移相变压器一致。

表1 双输出移相变压器模型参数

参数	参数值
$S_{1e}, S_{21e}, S_{22e}/\text{kVA}$	20, 10, 10
$U_{1e}, U_{21e}, U_{22e}/\text{V}$	690, 230, 230
$I_{1e}, I_{21e}, I_{22e}/\text{A}$	9.66, 14.49, 14.49
$N_1, W_{11}, W_{21}, W_{22}$	326, 63, 73, 36
$H_{K1}, H_{K2}/\text{mm}$	205, 221
$M_O, H_O/\text{mm}$	213, 245
$\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{22}, \lambda_{23}, \lambda_{12}, \lambda_A/\text{mm}$	4.52, 2.18, 5.2, 1.8, 4.52, 12
$r_{11}, r_{21}, r_{22}, r_{23}, r_{12}, r_A/\text{mm}$	54.8, 58.4, 67.75, 6.79, 2.95, 5

### 2.2 双输出移相变压器场路耦合模型

本文采用ANSYS电磁分析软件基于场路耦合的方法对双输出移相变压器输出电压的谐波抑制特征进行研究。图3即为A相铁心柱区域对应的有限元模型。B相和C相铁心柱区域对应的有限元模型与图3一样,只是铁心柱上所绕制的绕组存在

区别,这种区别需在二次侧绕组等值电路模型(图4)中体现。图5为一次侧绕组的等值电路图。

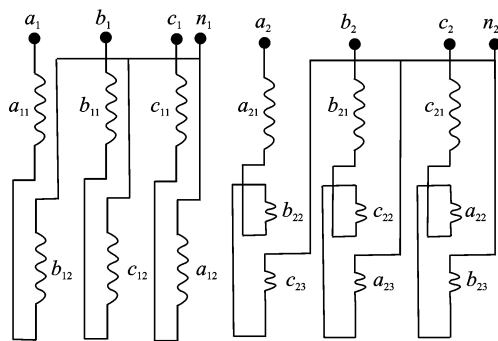


图4 二次侧绕组等值电路

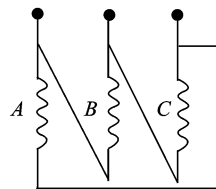


图5 一次侧绕组等值电路

对于在圆柱坐标系 $(z, r)$ 平面上的轴对称交变漏磁场,矢量磁位 $A_\theta$ 满足如下的泊松方程边值问题

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{\mu} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial A_\theta}{\partial r} \right) = -J_\theta & \text{in } \Omega \\ A_\theta = 0 & \text{on } L \end{cases} \quad (1)$$

式中: $J_\theta$ 为绕组中的电流密度; $\mu$ 为磁导率。

对于一、二次侧绕组,感应电势和电流决定了线圈电压,连接的电路方程为<sup>[12-14]</sup>

$$U = \frac{d\Psi}{dt} + RI \quad (2)$$

式中: $U, \Psi, R, I$ 分别为绕组的电压、磁链、电阻和电流。

令 $A_R = rA_\theta$ ,采用伽辽金法对式(1,2)进行离散,并将离散后的方程进行耦合即可以得到式(3)<sup>[15-16]</sup>,此时一次侧加载额定正弦电压为 $U_1$ ,二次侧的输出电压为 $U_{21}$ 和 $U_{22}$ 。

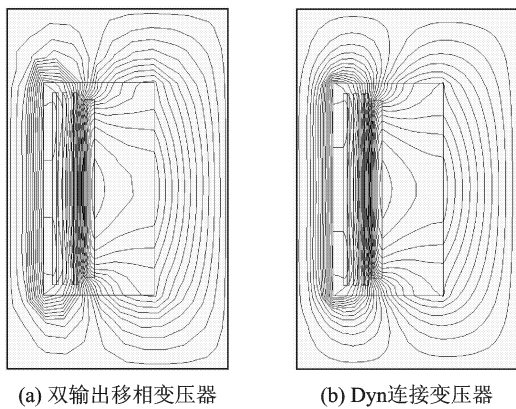
$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ G_1 & 0 & 0 & 0 \\ G_{21} & 0 & 0 & 0 \\ G_{22} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A}_R \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_{21} \\ \dot{I}_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K & D_1 & D_{21} & D_{22} \\ 0 & R_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{21} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_R \\ I_1 \\ I_{21} \\ I_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ U_1 \\ U_{21} \\ U_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： $K$ 为磁位刚度矩阵； $G$ 为感应电势-磁位耦合刚度矩阵； $D$ 为磁位-电流耦合刚度矩阵。

### 3 双输出移相变压器零序阻抗计算

双输出移相变压器阻抗采用标么值表示，短路阻抗定义为一次侧绕组加载额定电流、二次侧两组输出短路时，一次侧绕组的电压降与额定电压的百分比；零序阻抗（3倍次谐波阻抗）定义为二次侧第1组（或第2组）绕组加载额定电流，第2组（或第1组）绕组及一次侧绕组短路，此时第1组（或第2组）绕组的电压降与额定电压的百分比。为了能够在量值上比较各次谐波阻抗的大小，在加载额定电流时，电流的频率与基波频率保持一致，而电流的相位角由谐波次数与电流基波相位角相乘后得到。

在短路阻抗计算时，令式(3)中 $U_{21}=U_{22}=0$ ， $I_1$ 为一次侧绕组额定电流，频率为50 Hz，相位与基波相位角一致。通过矩阵求解可以得到一次侧绕组的电压降 $U_1$ 及漏磁场的分布。图6(a)为双输出移相变压器短路漏磁场的分布，图6(b)为Dyn连接变压器短路情况下的漏磁场分布，可以看出，两种变压器的漏磁场具有相同的分布形式。且漏磁场都是以轴向磁通的形式分别经链一、二次侧绕组。



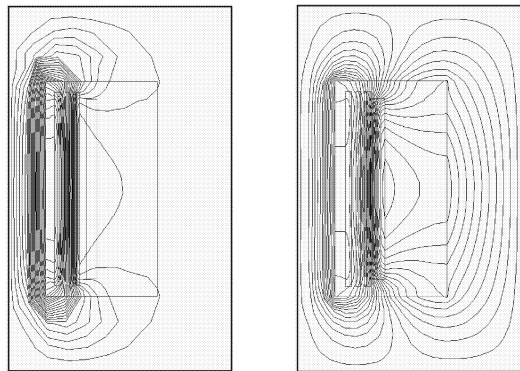
(a) 双输出移相变压器

(b) Dyn连接变压器

图6 短路情况下磁场分布

在计算零序阻抗时，令式(3)中 $U_1=U_{22}=0$ （或 $U_1=U_{21}=0$ ）； $I_{21}$ （或 $I_{22}$ ）为二次侧绕组额定电流，频率为50 Hz，相位为基波相位角再乘以谐波次数。通过矩阵求解可以得到二次侧绕组的电压降 $U_{21}$ （或者 $U_{22}$ ）及漏磁场的分布。图7(a)为双输出移相变压器短路漏磁场的分布，图7(b)为Dyn连接变压器短路情况下的漏磁场分布。由于双输出移相变压器基于了零序磁通消除技术，3倍次谐波磁势在曲折连接的绕组之间进行平衡，因此单独经链一次侧

绕组的磁链很少，绕组区域的磁场能量减少使得变压器具有较低的零序阻抗；对于Dyn连接变压器，漏磁场分布与短路情况下一致，因此零序阻抗与短路阻抗相等。表2列出了两种变压器短路阻抗及零序阻抗的比较。



(a) 双输出移相变压器

(b) Dyn连接变压器

图7 零序磁动势作用下的磁场分布

表2 两种变压器的阻抗比较

变压器 连接形式	Dzn		Dyn
	$U_1/\%$	$U_{21}/\%$	$U_1/\%$
短路阻抗	3.87		3.84
零序阻抗		0.68	0.70

### 4 变压器输出电压畸变抑制特性

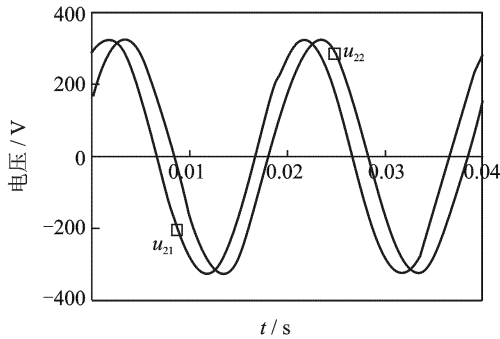
为了验证双输出移相变压器对输出电压畸变的抑制特性，令变压器二次侧的每相每组输出都通过单相整流电路接感性负载 $Z$ ，负载功率因数为0.8。

为了比较变压器对输出电压畸变的抑制效果，定义谐波电压比 $U_{n1}$ ，谐波电压比 $U_{n1}$ 表示第 $n$ 次谐波电压有效值与基波电压有效值的百分比。

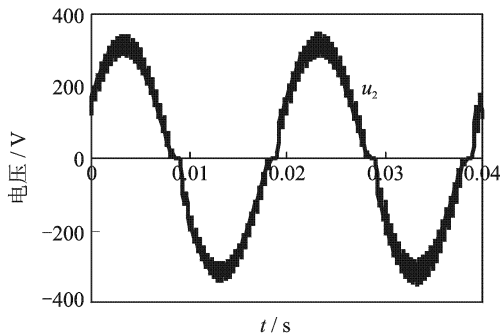
$$U_{n1} = \frac{U_n}{U_1} \times 100\% \quad n = 1, 3, \dots, 21 \quad (4)$$

令双输出移相变压器二次侧两组输出都接额定负载，即 $Z_{21}=Z_{22}=Z_c$ ，Dyn连接变压器二次侧绕组亦接额定负载，即 $Z_2=Z_c/2$ ，同时两种变压器的一次侧绕组加载额定正弦电压，此时，双输出移相变压器二次侧两组绕组的输出电压波形如图8(a)所示，图8(b)为Dyn连接变压器二次侧绕组输出电压波形，由于变压器自身谐波阻抗的存在，输出电压波形存在畸变，通过对输出电压进行傅里叶分析，可以得到输出电压的谐波电压比（见8(c)）。可以看出，其中3倍次，5, 7, 17和19次谐波电压得到抑制，这是由于双输出移相变压器对于3倍次谐波

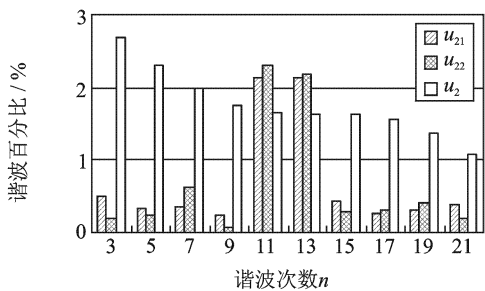
电流具有较低的零序阻抗,对于5,7,17和19次谐波电流,依靠两组输出绕组之间的移相角达到彼此之间的磁势平衡,使得一次侧绕组中不会或者尽可能少地感应出谐波电流,从而使得绕组区域的磁场能量减少,进而降低等效的谐波阻抗,而11和13次谐波电流在两组输出绕组中形成的磁势不能相互平衡,因此会在一次侧绕组中感应出数值相当的电流,其对应的谐波电压无法得到抑制。



(a) 双输出移相变压器输出电压波形



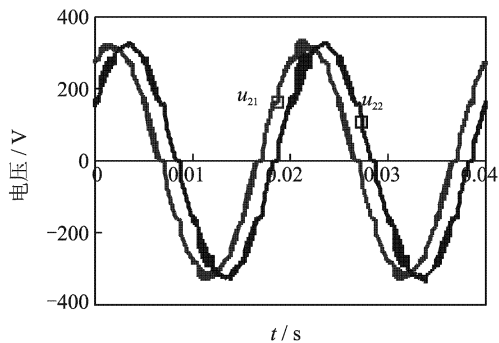
(b) Dyn变压器输出电压波形



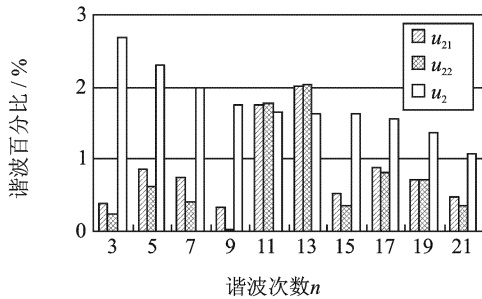
(c) 两种变压器输出电压的谐波电压比

图8  $Z_1=Z_2=Z_c$

图9为二次侧第1组输出接额定负载,第2组输出接50%的额定负载,即 $Z_1=Z_c; Z_2=2Z_c$ 时,输出电压波形及各次谐波电压比。此时两组输出所接负载不平衡,二次侧绕组的5,7,17和19次谐波的合成磁势将不为0,一次侧绕组中会感应出相应的谐波分量,导致对应次谐波的等效阻抗增大。但相对于Dyn连接变压器,3倍次,5,7,17和19次谐波电压仍得到了明显的抑制。



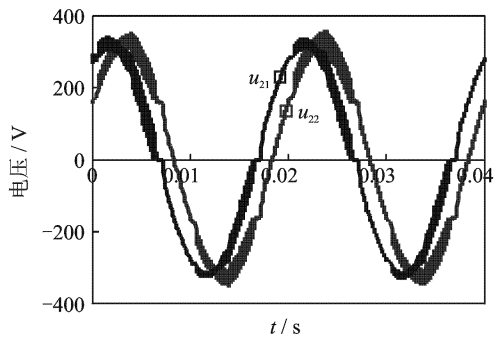
(a) 双输出移相变压器输出电压波形



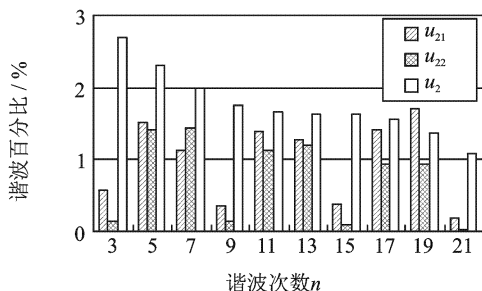
(b) 两种变压器输出电压的谐波电压比

图9  $Z_1=Z_c; Z_2=2Z_c$

图10为二次侧第1组输出接额定负载,第2组输出开路,即 $Z_1=Z_c; Z_2=\infty$ 时,一、二次侧绕组中电压波形及各次谐波电压比。此时变压器处于极端不平衡运行,二次侧的5,7,17和19次谐波磁势需要通过一次侧负载电流进行平衡,其等效的谐波阻



(a) 双输出移相变压器输出电压波形



(b) 两种变压器输出电压的谐波电压比

图10  $Z_1=Z_c; Z_2=\infty$

抗较大,对应的谐波电压无法有效地抑制,而3倍次电流通过二次侧曲折连接的绕组之间进行平衡,其对应的谐波阻抗较小,因而3倍次谐波电压仍然得到明显的抑制。

表3列出了不同工况下,两种变压器输出电压中谐波含量的比较,可以看出,相对于Dyn连接的变压器,双输出移相变压器的谐波含量明显降低,表明了双输出移相变压器在谐波抑制方面的工程应用价值,同时也验证了本文在双输出移相变压器结构设计上的合理性。

表3 不同负载情况的输出电压谐波含量

不同工况	双输出移相变压器		Dyn 变压器
	$U_{21\text{thd}}$	$U_{22\text{thd}}$	$U_{1\text{thd}}$
$Z_1 = Z_c; Z_2 = \infty$	3.6	3.0	5.8
$Z_1 = Z_c; Z_2 = 2Z_c$	3.1	3.3	5.8
$Z_1 = Z_2 = Z_c$	3.2	3.3	5.8

## 5 结 论

本文基于零序磁通消除技术及相移技术,对双输出移相配电变压器的绕组结构布置特征与谐波阻抗之间的关系进行了研究,探讨了变压器抑制输出电压畸变的机理,最后通过建立双输出移相变压器的场路耦合模型,对两种不同形式的变压器(双输出移相变压器和Dyn连接变压器)在带非线性负载情况下输出电压的谐波特性进行了分析计算,研究结果表明:

(1)双输出移相变压器绕组采用辐向分裂结构,可以有效地降低变压器的3倍次,5,7,15和17次谐波阻抗。

(2)对于传统的Dyn连接变压器,各次谐波阻抗与短路阻抗相等,而双输出移相变压器对应的3倍次,5,7,15和17次谐波阻抗小于短路阻抗。

(3)相对于Dyn连接的变压器,双输出移相变压器的输出电压谐波含量降低,电压畸变得明显改善。

### 参考文献:

[1] 俸靖. 公用电网谐波污染的来源、危害及治理措施[J]. 继电器, 2003, 31(S1): 39-41.  
Feng Jing. Source, harm and regulating measure of homonic pollution in the common power net[J]. Relay, 2003, 31(S1): 39-41.

[2] Jou H L, Wu J C, Wu K D. Analysis of zig-zag transformer applying in the three-phase four-wire

distribution power system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005(20): 1168-1173.

- [3] Boudrias J G. Harmonic mitigation, power factor correction and energy saving with proper transformer and phase shifting techniques[C]//Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Niagara Falls: IEEE CS Press, 2004: 133-136.
- [4] Boudrias J G. Power factor correction and energy saving with proper transformer, phase shifting techniques and harmonic mitigation[C]//2004 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering. Halifax: IEEE CS Press, 2004: 98-101.
- [5] 周丽霞, 尹忠东, 肖湘宁. 基于移相电抗器的电力推进船舶电网谐波抑制[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8): 90-94.  
Zhou Lixia, Yin Zhongdong, Xiao Xiangning. Harmonic suppression in the electric propulsive shipping system based on phase-shifting reactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(8): 90-94.
- [6] 时建锋, 罗隆福, 邓淑娟, 等. 新型推进变压器在船舶电网谐波抑制中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 91-96, 102.  
Shi Jianfeng, Luo Longfu, Deng Shujuan, et al. Application of new type of propulsion transformer in harmonic suppression for ship power system[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 91-96, 102.
- [7] 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 Longfu, Li Ji, Xu Jiazhu, et al. Study on harmonic treatment based on new type converter transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(2): 96-98.
- [8] 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 Jiazhu, 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.
- [9] 王凤翔, 耿大勇. 移相电抗器对变流器供电系统谐波抑制的机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 54-57.  
Wang Fengxiang, Geng Dayong. Study on harmonic

- repression of converter-fed power system by using phase-shifting reactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2003,23(2):54-57.
- [10] 许加柱,罗隆福,王桂华,等. 新型交直流输电系统谐波抑制的机理[J]. 高电压技术,2007,33(12):118-123.  
Xu Jiazhu, Luo Longfu, Wang Guihua, et al. Harmonic suppression mechanism in the novel ac/dc transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2007,33(12):118-123.
- [11] 郭健,金承祥. 低零序阻抗缓谐波节能变压器:中国,201110028005.1[P]. 2011-01-26.
- [12] Kumbhar G B, Kulkarni S V. Analysis of sympathetic inrush phenomena in transformers using coupled field-circuit approach [C]//Power Engineering Society General Meeting. Tampa Fl: IEEE Press, 2007:1-6.
- [13] Kumbhar G B, Kulkarni S V. Analysis of short-circuit performance of split-winding transformer using coupled field-circuit approach [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007,22(2):936-943.
- [14] 许加柱,罗隆福,李季. 基于场路耦合法的大电流互感器屏蔽绕组分析[J]. 中国电机工程学报,2006,26(23):167-172.  
Xu Jiazhu, Luo Longfu, Li Ji. Shielding windings analysis of large current transformers based on coupled field-circuit [J]. Proceedings of the CSEE, 2006,26(23):167-172.
- [15] 梁振光,唐任远. 采用场路耦合的三维有限元法分析变压器突发短路过程[J]. 中国电机工程学报,2003,23(3):137-140.  
Liang Zhenguang, Tang Renyuan. Fault simulation of power transformers using 3d finite element model coupled to electric circuit equations[J]. Proceedings of the CSEE, 2003,23(3):137-140.
- [16] Tang R Y, Wang S H, Li Y, et al. Transient simulation of power transformers using 3D finite element model coupled to electric circuit equations[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000,36(4):1417-1420.