

基于“错相叠加”法移相变压器研制

张家瑞 肖 珺 刘 珍 刘 黎

国网湖北省电力有限公司超高压公司 湖北 武汉 420000

【摘要】针对传统移相方法的局限性而导致不可实现多脉波技术，研制了一种采用“错相叠加”法的移相变压器，可解决移相角度的局限性问题。本文以移相 10° 为例，进行原理设计，并根据理论设计方法利用MATLAB/Simulink 仿真平台搭建仿真模型，验证了理论的正确性。为进一步验证该变压器在实际应用中的可行性，搭建了实验平台，制作出小容量六重化移相变压器模型，实验结果与仿真效果一致，再次验证了该方法有效可行。

【关键词】“错相叠加”；移相变压器；高脉波

引言

随着电力电子技术飞速发展，以及电力电子产品的大规模使用。导致谐波问题也日益严峻，对电力系统造成较大危害。为解决谐波问题，国内外多采用多脉波技术，通过多重级联来解决谐波危害^[1-3]。而多脉波技术必须使用到移相变压器，目前市面上移相变压器均采用十二时钟法或延边三角形法。这两种方法只能实现 30° 的整数倍，并不能实现任意角度的移相^[4-5]。因此也导致多脉波技术止步于12脉波的研究，不能实现更高的脉波数级联，从而不能通过多脉波法将谐波进一步降低^[6-8]。为解决这一问题，设计了一种称之为“错相叠加”的方法来实现移相变压器的任意角度变换，故可实现更高脉波技术来降低谐波含量^[8-12]。也可将交流移相技术应用更多工业领域，解决技术难题提高效率。

1. “错相叠加”法原理介绍

依据传统技术，通过改变变压器原副边连接组关系可使输出交流电压与输入电压产生 30° 的整数倍相位差。若使两个不同相位的矢量叠加则可得到另一个不同角度的矢量^[12-15]。基于此思想，设计了一种称之为“错相叠加”的移相方法。

此方法需两组变压器配合完成，如图1所示。以图中T31和T32为例，变压器T31和T32原边分别与交流电网A、B、C相连接。T31变压器副边线圈首段与T32变压器的输出端相连。T32原副边均采用星形连接，则T32副边输出电压与原边输入电压同相位。令T31副边每组线圈的首段分别为A1、B1、C1，T32副边输出端分别为A2、B2、C2。若将T32副边输出C2与T31副边的A1相连，则是两个不同相量相叠加，且C2相位超前A1相位 120° 。同理A2与B1相连，B2与C1相连。可通过改变两组变压器各自的变比，从而可实现两个相差 120° 的不同大小相量进行矢量叠加，可得到不同相位的第三相量。将输出电压值选定，就可以根据输出的矢量长度与角度，进行计算得出两个变压器二次侧的匝数

比。

令输出电压大小为U，移相角度为 ϕ° ，1号变压器输出电压为U1，2号变压器输出电压为U2，则有：

$$U_1 = U \times \cos \phi + \frac{U \times \sin \phi}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

$$U_2 = \frac{U \times \sin \phi}{\sqrt{3}} \times 2 \quad (2)$$

根据此方法设计了一台六输出变压器，每一组三相输出相位依次相差 10° ，如图1所示。 $+30^\circ$ 、 $+20^\circ$ 与 $+10^\circ$ 原理相同，只是 -10° 与 -20° 只需将副边连接线的相序更换即可，即将1号变压器的副边A、B、C线圈末端分别与2号变压器的副边B、C、A相连，各变压器的匝数比与矢量关系如图2所示。将每组输出电压大小及每组输出的两台变压器的原边线圈匝数设定，即可根据需要移相的角度通过三角函数及变比关系算出每组输出的两台变压器的副边线圈的匝数。同理，需要移相其他角度，可根据公式1和公式2计算出每组变压器输出电压与该组变压器原副边线圈匝数比关系。

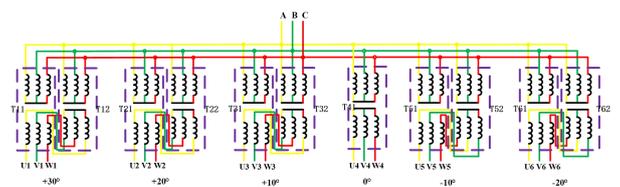


图1 “错相叠加”法移相变压器原理图

Figure1.Schematic diagram of phase-shifting transformer by "staggered-phase superposition" method

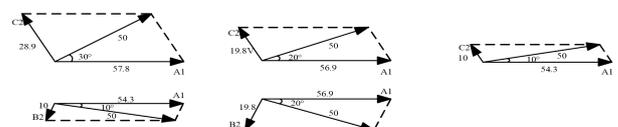


图2 “错相叠加”法矢量图

Figure2. Vector diagram of "staggered-phase superposition" method

2. 仿真分析

为验证“错相叠加”法实现移相功能的正确性和可行性，利用 MATALB/Simulink 仿真平台搭建仿真模型，如图 3 所示。其中每一组三相输出由两台变压器组成，以图 3 中第一组输出变压器 T11 和 T12 为例，其中 T12 为常规的 Y0 连接。另一台 T11 变压器原边采用星形连接，副边三绕组保留首末端接线端子，采用外部连接。将变压器 T11 和 T12 原边均接入交流三相电网，副边分别采用上述“错相叠加”原理连接。其中每组输出的两台变压器变比依据图 2 “错相叠加”法矢量图中变比设置。T21 与 T22、T31 与 T32、T51 与 T52、T61 与 T62 连接方法与参数设置同理。由于 T41 变压器输出为参考，移相角度为 0° ，因此该变压器采用 Y0 连接变压器，变比保持与其他五组输出电压大小相同即可。

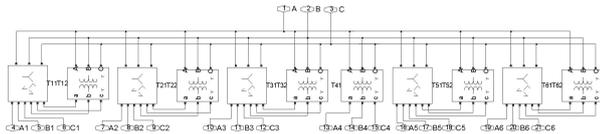


图 3 “错相叠加”法移相变压器仿真模型

Figure 3. Simulation model of phase-shifted transformer by "staggered-phase superposition" method

根据仿真模型设置对应参数：图 3 中所有变压器原边均并联接入三相正弦交流电网 A、B、C 中，根据所需输出电压大小（例如：各重输出电压为 50V），可按公式 1 和公式 2 算出每组变压器副边线圈与原边的匝数比关系，且 T11、T12 原副边匝数比分别为 100: 57.8 和 100: 28.9 可实现移相 $+30^\circ$ ；T21 与 T22 原副边匝数比分别为 100: 56.9 和 100: 19.8 可实现移相 $+20^\circ$ ；T31 与 T32 原副边匝数比分别为 100: 54.3 和 100: 10 可实现移相 $+10^\circ$ ；T41 原副边匝数比为 100:50；T51 与 T52 原副边匝数比分别为 100: 54.3 和 100: 10 可实现移相 -10° ；T61 与 T62 原副边匝数比分别为 100:56.9 和 100: 19.8 可实现移相 -20° 。六重化移相变压器仿真输出电压波形如图 4 所示，可明显看出各组变压器输出电压可实现依次移相 10° ，验证了理论分析的正确性与可行性。

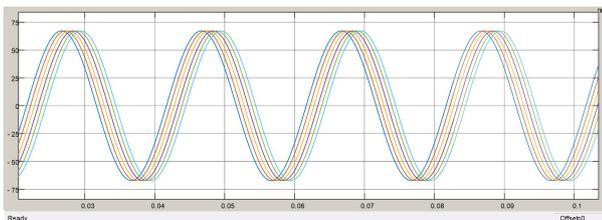


图 4 六重化移相变压器输出电压波形

Figure 4. The output voltage waveform of the sixfold phase-shifting transformer

3. 实验验证

为进一步说明该移相变压器的可行性与有效性，根据理论分析与仿真验证搭建实验平台。依据技术参数，定制了依次移相 10° 的六重化移相变压器如图 5 所示。图 5 所示六台变压器接线方式参照图 1 所示原理图，单台容量 $500V \cdot A$ ，各台变压器原边均并联接入 380V 三相交流市电中，实验结果如图 6 所示。由图 6 可看出相邻两组变压器输出电压波形相位相差 10° ，再次验证了理论与仿真的正确性，以及利用“错相叠加”法可实现任意角度移相的可行性。

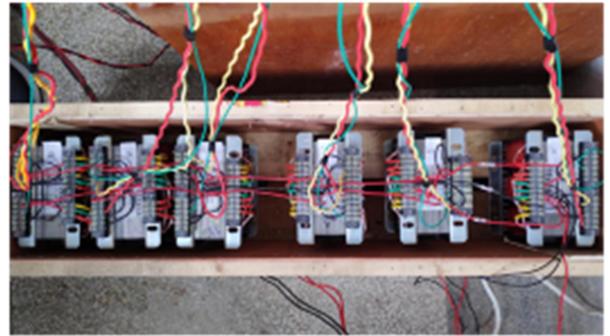


图 5 六重化移相变压器实验平台

Figure 5. Experimental platform of six-fold phase-shifting transformer

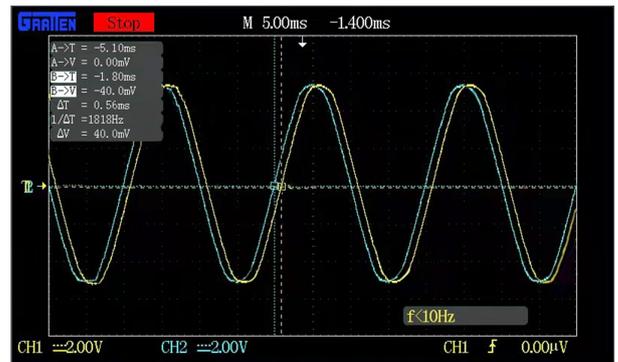


图 6 移相变压器实验输出电压波形

Figure 6. The output voltage waveform of the phase-shifting transformer experiment

4. 结语

为突破 12 脉波的技术难题，实现更高次脉波技术。研制了一种采用“错相叠加”法的移相变压器，突破了传统只能实现固定几个角度的移相方法，仿真与试验均验证该方法的正确性和可行性。该方法可实现任意角度

的移相功能,从而降低电力电子谐波污染问题,也可实现高次脉波整流、逆变技术应用于工业生产应用中。

【参考文献】

[1]许正望,易宇纯,张家瑞,陈铖,梅威,虞家奇.“跳相”思想在三重化交变频电路中的运用[J].科学技术与工程,2018,18(33):66-73.

[2]张家瑞.串联六重化交变频器谐波抑制方法研究[D].湖北工业大学,2020.

[3]叶志军,林晓明,谭锴佳,罗继亮,郝亮亮.sss 高频变压器技术研究综述 [J]. 电网技术,2021,v.45;No.452(07):2856-2870.

[4]杨旗,班国邦,谢百明,曾华荣,文屹,马晓红,谈竹奎,黄欢.移相变压器应用于输电线路在线融冰方法与仿真研究[J].电网技术,2021,45(08):3349-3355.

[5]李东,丁剑,王正风,戴长春,宋云亭,申旭辉.移相变压器的研究现状及工程应用 [J]. 智能电网,2015,3(07):608-616.

[6]王铁军,方芳,姜晓弋,杨律.圆形变压器在 24 脉波

整流系统中的应用 [J]. 电工技术学报, 2016,31(13):172-179.

[7]孙盼,赵镜红,熊欣,吴旭升,高崑.用于多脉波整流的直线式移相变压器[J].电工技术学

[8]佟为明,高蕾,王胤燊.移相变压器不对称对多脉波整流系统的影响[J].电机与控制学报,2012,16(05):62-72.

[9]陈涛,陈小强,王英,刘炯德,赵苗苗.sss 一种新型升压 18 脉波自耦变压整流器的研究 [J]. 电网技术,2021,v.45;No.449(04):1527-1535.

[10]陈生栋,孙海峰.sss 特高压换流站三柱四绕组结构换流变压器谐波抑制研究 [J]. 电网技术,2021,v.45;No.453(08):3155-3165.

[11]Albrechtowicz P . Phase-Shifting Transformer Efficiency Analysis Based on Low-Voltage Laboratory Units[J]. Energies, 2021, 14(16):5049.

[12]原亚雷,钊翔坤,徐高祥,魏静,周娟.sss 兼顾电压波动抑制的级联 H 桥 STATCOM 相间电压平衡控制策略[J]. 电网技术,2022,v.46;No.461(04):1494-1502.