

基于 Simulink 的船用三相变压器联结组分析与仿真

王磊, 黄琦琪

(广东交通职业技术学院, 广东 广州 510650)

摘要: 本研究介绍了船用三相变压器的同名端、绕组连接法以及联结组, 基于时钟序数法分析了三相变压器中 Yy0、Yy6、Yd11、Yd1 四种联结组的绕组接线图以及电压相量图。利用 Simulink 搭建变压器连接组仿真模型, 设置三相电源参数及三相变压器参数, 分别对四种联结组的初级绕组线电压、次级绕组线电压以及初级绕组相电压进行仿真, 仿真结果清楚显示出各电压之间的相位与大小关系。

关键词: 三相变压器; 船舶变压器; 联结组; Simulink 仿真

中图分类号: U665.14

文献标识码: A

Analysis and Simulation of Marine Three-phase Transformer Connection Group Based on Simulink

WANG Lei, HUANG Qiqi

(Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou 510650, Guangdong, China)

Abstract: The same terminal, winding connection method, and connection group of marine three-phase transformers is introduced. Based on the clock ordinal method, the winding wiring diagrams and electromotive force phasor diagrams of the four connection groups Yy0, Yy6, Yd11, and Yd1 of the three-phase transformer are analyzed. Simulink is used to build transformer connection group simulation model, set the parameters of the three-phase power supply and the three-phase transformer, and simulate the primary winding line voltage, secondary winding line voltage, and primary winding phase voltage of the four connection groups. The simulation results clearly show the phase and magnitude relationship between each voltage.

Key words: three-phase transformer; marine transformer; connection group; simulink simulation

船舶变压器(又称船用变压器)是船舶电力系统的重要组成部分,在船舶设备中得到广泛应用,常见应用包括电源变压器、电压互感器、电流互感器等^[1]。船用变压器能改变交流电压等级而不改变频率,也能进行交流电流变换和阻抗变换^[2]。

与单相变压器相比,三相变压器在经济性和效率方面更具优势。三相变压器的制造成本通常比单相变压器低 15%~20%,三相变压器在满载运行时的效率通常比单相变压器高 0.2%~0.5%^[3]。三相变压器在船舶电能的传输分配等方面发挥着重要作用^[4]。在船舶电力系统中,可

将几台变压器连接至同一母线上并联运行。在此情况下,为保证不同变压器并联运行时次级绕组输出电压的相位一致,必须确保三相变压器联结组相同^[4]。联结组不仅用于表示船用三相变压器绕组的连接法,还用于表示变压器初级与次级绕组对应线电压之间的相位关系^[5]。船用变压器的实际运行必须以特定的联结组为基础。通常船用变压器在检修后应重新测试联结组,以保证船舶电力系统能够正常运行^[6]。

此外,三相变压器联结组在减弱三次谐波和三相可控整流触发等方面有较大作用^[7]。因此,研究三相变压器联结组具有重要的理论和实际意义。

收稿日期: 2025-02-09

作者简介: 王磊, 讲师, 硕士, 研究方向为船舶电力推进

1 船用三相变压器的同名端与联结组

1.1 船用三相变压器的同名端

在变压器三相绕组连接成星形或三角形之前,必须先标出初级与次级绕组的同名端,再按一定规则连接,否则,变压器不能正常工作甚至会烧毁。对于船用三相变压器,任意取出其中一相,其初级与次级绕组均交链同一个主磁通。当主磁通交变时,会在初级与次级绕组中产生感应电动势。当初级绕组某一端电位为正时,次级绕组必然也有一端电位为正,这两个正电位端就是同名端。绕组同名端与绕组绕向有关,在变压器中通常用“•”标记同名端。

对于船用三相变压器而言,用 AX 、 BY 、 CZ 表示初级绕组,用 ax 、 by 、 cz 表示次级绕组。分别用 A 、 B 、 C 和 a 、 b 、 c 表示初级与次级绕组的首端,分别用 X 、 Y 、 Z 和 x 、 y 、 z 表示初级与次级绕组的末端,那么 A 和 a 、 B 和 b 、 C 和 c 互为同名端, X 和 x 、 Y 和 y 、 Z 和 z 也互为同名端。

1.2 船用三相变压器的绕组连接法

船用三相变压器绕组连接法如图1所示。图1(a)为星形连接,即 A 相、 B 相、 C 相绕组的末端连在一起,由首端向外引出;图1(b)为第1种三角形连接,即将三相绕组中一相的首端与另一相的末端相连形成闭合回路,再由绕组的三个首端向外引出;图1(c)为第2种三角形连接,即将三相绕组中一相的末端与另一相的首端相连形成闭合回路,再由绕组的三个首端向外引出。

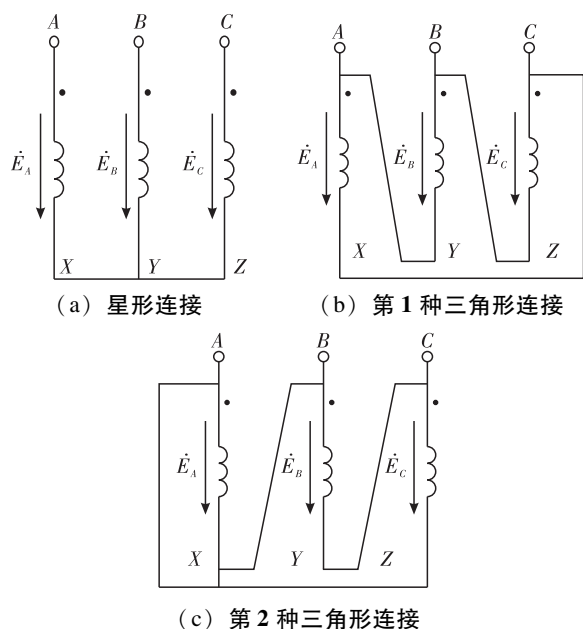


图1 三相变压器绕组连接法

1.3 联结组的表示与判别法

对于船用三相变压器而言,用 Y 和 D 分别表示初级绕组的星形和三角形连接,用 y 和 d 分别表示次级绕组的星形和三角形连接。当采用不同连接方式时,会使初级和次级绕组的对应线电压之间产生不同相位差,形成不同的联结组。

船用三相变压器联结组标号基于“时钟序数法”确定。具体而言,是用时钟钟面上的数字表示初级和次级绕组线电压的相位差,将初级绕组线电压相量当作分针,始终指向12点方向;将次级绕组线电压相量当作时针,时针所指数字乘以 30° 即为初级和次级绕组线电压的相位差。

基于相量图判断联结组标号的主要步骤为:

(1) 画出初级绕组相电压相量图,顶点 A 、 B 、 C 顺时针排列, $\dot{E}_A = E \angle 0^\circ$, $\dot{E}_B = E \angle -120^\circ$, $\dot{E}_C = E \angle -240^\circ$, $\dot{E}_{AB} = \dot{E}_A - \dot{E}_B$ 。

(2) 使初级与次级绕组相电压相量的顶点 A 与 a 重合,基于次级绕组连接方式,画出次级绕组相电压相量 \dot{E}_a 、 \dot{E}_b 、 \dot{E}_c 及线电压相量 $\dot{E}_{ab} = \dot{E}_a - \dot{E}_b$ 。

(3) 由 \dot{E}_{AB} 顺时针转向 \dot{E}_{ab} 的角度就是三相变压器初级与次级绕组的相位差,由于 \dot{E}_{AB} 指向时钟12点方向,可得 \dot{E}_{ab} 所指的数字就是联结组标号。

2 变压器主要联结组分析

2.1 三相变压器的 $Yy0$ 联结组

图2(a)为 $Yy0$ 联结组接线图,从图2可以看出,初级绕组 AX 和次级绕组 ax 在同一铁芯磁极上,两个绕组首端极性相同, \dot{E}_A 和 \dot{E}_a 相量同向。同理, \dot{E}_B 和 \dot{E}_b 、 \dot{E}_C 和 \dot{E}_c 两组相量也分别同向。

图2(b)展示了 $Yy0$ 联结组电压相量图的作图过程。首先,依次作出初级绕组相电压相量 \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C ,各相电压相量彼此间隔 120° ,画出线电压相量 \dot{E}_{AB} 。然后,在相量图上使 A 点和 a 点重合,先画出 \dot{E}_a 相量,再画出 \dot{E}_b 、 \dot{E}_c 相量,并基于 a 、 b 两个点画出向量 \dot{E}_{ab} 。

由作图可知, \dot{E}_{ab} 与 \dot{E}_{AB} 相量方向相同,夹角为 0° ,所以该联结组标号为 0 ,表示为 $Yy0$ 。由图2(b)还可以得知, \dot{E}_{AB} 和 \dot{E}_{ab} 两个线电压相量都超前于 \dot{E}_A 相量 30° 。

$Yy0$ 联结组具有较好的绝缘性能和较低的漏抗,能够提高变压器的工作效率和稳定性,在船

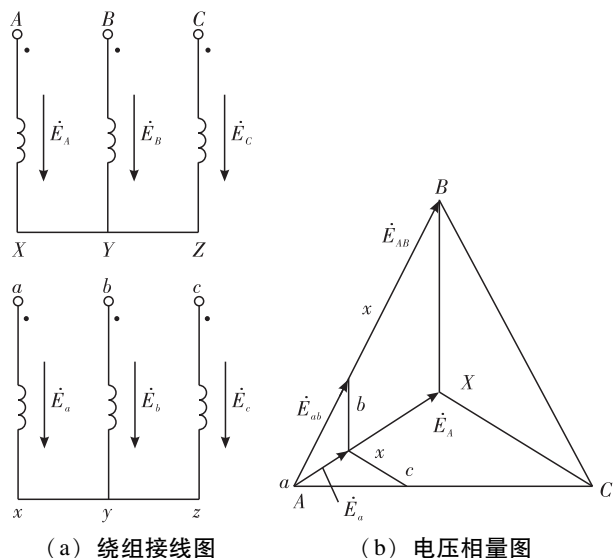


图2 Yy0 联结组

船上一般用作三相动力负载(风机、泵等)的配电变压器。若 Yy0 联结组次级绕组有中线引出,即为 Y,yn0 联结组,为三相四线制供电,因其中性点稳定性较好,常在船舶上用作照明负载或动力负载的配电变压器。

2.2 三相变压器的 Yy6 联结组

图3(a)为 Yy6 联结组接线图,由图可以看出,初级绕组 AX 和次级绕组 ax 在同一铁芯磁极,两个绕组首端极性相反,EA 和 Ea 相量反向。同理,EB 和 Eb、EC 和 Ec 相量也分别反向。

图3(b)展示了 Yy6 联结组电压相量图的作图过程。先依次作出初级绕组相电压相量 EA、EB、EC,各相电压相量彼此间隔 120°,并基于 EA、EB 画出线电压相量 EAB。然后,在相量图上使 A 点和 a 点重合,先画出 Ea 相量,再画出 Eb、Ec 相量,并确定点 b、c 两个点,画出向量 Eab。由图可知, Eab 与 EAB 相量方向相反,夹角为 180°,所以该变压器联结组号为 6,表示为 Yy6。从图3(b)相量图还可以得出, EAB 相位超前 EA 相位 30°。

对于 Yy6 联结组来说,其次级绕组电压相位与初级绕组相反,在需要电压相位一致的系统中(如多台变压器并联运行),Yy6 联结组无法直接使用。将这种相位反转应用于船舶电力系统中可能引发故障,且相位反转还可能导致负载设备工作异常,尤其是电机、电子设备等对相位敏感的设备。

此外, Yy6 联结组在发生单相接地故障或接不对称负载时,中性点电压可能发生偏移,影响系统稳定性。

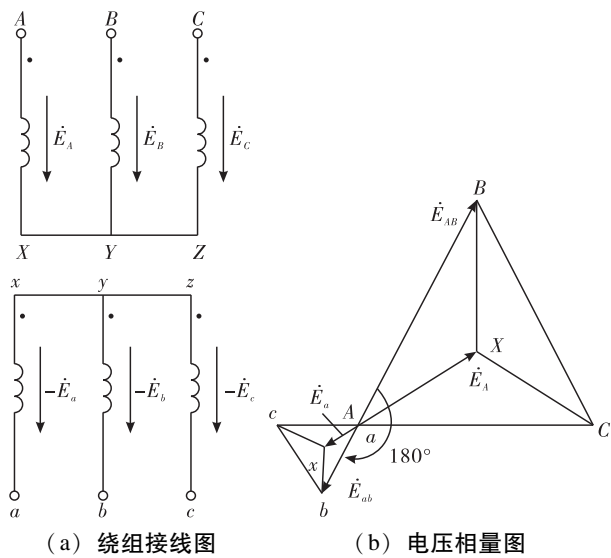


图3 Yy6 联结组

2.3 三相变压器的 Yd11 联结组

图4(a)和(b)分别展示了 Yd11 联结组接线图以及电压相量图的作图过程。先画出初级绕组相电压相量 EA、EB、EC 和线电压相量 EAB;将 A 点和 a 点重合,则初级绕组 AX 和次级绕组 ax 在同一铁芯上,EA 和 Ea 方向相同,先作出 Ea。然后,使次级绕组 x 端与 cz 绕组中的 c 点相连, C 和 c 为同名端,再作出 Ec,与 EC 相量同向。最后作出相绕组 by 的相量 Eb,同时使终点 y 与 a 重合,最后做出相量 Eab。EAB 顺时针旋转 330°得到 Eab,由时钟序数法可知,该联结组标号为 11,表示为 Yd11。EAB 相位超前 EA 相位 30°, Eab 相位滞后 EAB 相位 330°。

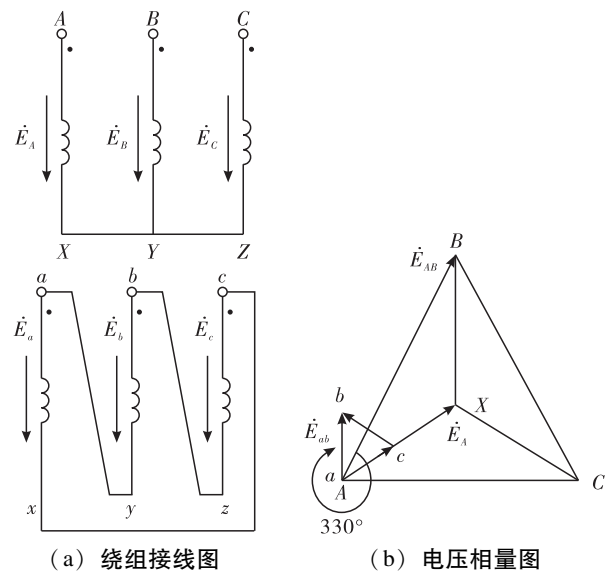


图4 Yd11 联结组

Yd11 联结组中, 次级绕组的三角形连接能够承受较大的不平衡负载, 在船舶上常用于次级电压超过 400 V 的线路中。若 Yd11 联结组初级绕组有中线引出, 即为 YN,d11 联结组, 一般用于 110 kV 以上的高压输电线路。

2.4 三相变压器的 Yd1 联结组

图 5 (a) 为 Yd1 联结组接线图。先画出初级绕组相电压相量 \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 和线电压相量 \dot{E}_{AB} ; 将 A 点和 a 点两个顶点重合, \dot{E}_A 和 \dot{E}_a 方向相同, 先做出 \dot{E}_a ; 低压侧 ax 绕组的 x 端与 by 绕组中 b 端相连, B 和 b 为同名端, 可做出相量 \dot{E}_b , 与 \dot{E}_B 方向相同; 接着做出相绕组 cz 的相量, 最后做出相量 \dot{E}_{ab} 。 \dot{E}_{AB} 顺时针旋转 30° 得到 \dot{E}_{ab} , 由时钟序数法可知, 该联结组标号为 1, 表示为 Yd1。由图 5 (b) 可得, \dot{E}_{ab} 相位与 \dot{E}_A 相位相同, \dot{E}_{AB} 相位超前 \dot{E}_{ab} 相位 30° 。

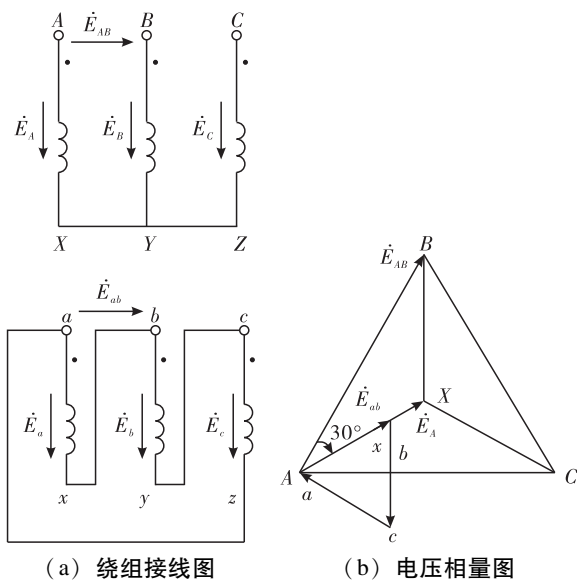


图 5 Yd1 联结组

对于 Yd1 联结组来说, 次级绕组电压相位滞后于初级绕组。该联结组的相位滞后限制了其在相位一致的系统中的应用, 通常仅用于实验研究、特定工业设备以及特殊电力系统。

3 变压器联结组 Simulink 建模仿真

3.1 Yy0 联结组仿真与分析

Yy0 联结组仿真模型如图 6 所示, 模型中使用的元器件模块包括三相 12 端子变压器、三相电源、示波器、数值显示器以及电力系统图形界面等。为了更直观地比较初级绕组线电压 e_{AB} 、

初级绕组相电压 e_A 和次级绕组线电压 e_{ab} 之间的大小及相位关系, 将电压信号通过信号合成器后输出给示波器。

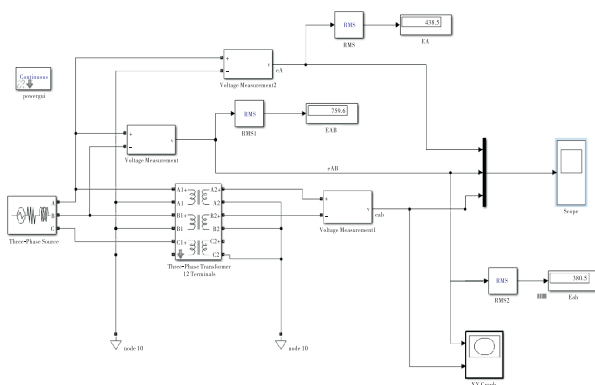


图 6 Yy0 联结组仿真模型

Yy0 组别建模中, 三相变压器中设定初级绕组 A_1 、 B_1 、 C_1 为星形接法, 次级绕组 A_2 、 B_2 、 C_2 也为星形接法, 且初级与次级绕组首端极性相同。Yy0 联结组三相变压器参数设置如图 7 所示。

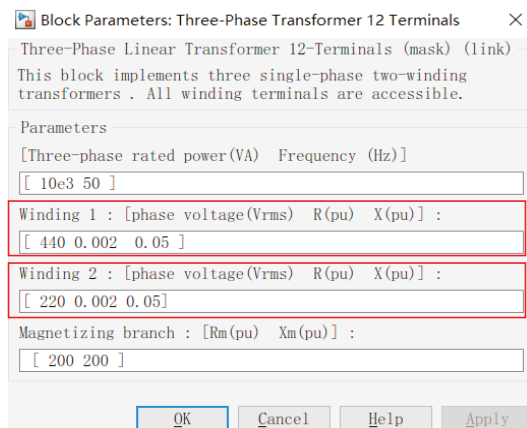


图 7 Yy0 联结组变压器参数设置

在图 7 所示的参数设置对话框中, 设置初级绕组线电压有效值为 760 V, 由于采用星形连接方式, 线电压有效值为相电压的 $\sqrt{3}$ 倍, 因此对应的初级绕组相电压有效值为 $760 \div \sqrt{3} \approx 440$ V。设置次级绕组线电压有效值为 380 V, 同理对应的次级绕组相电压有效值为 $380 \div \sqrt{3} \approx 220$ V, 变压器变比为 2 : 1。

三相电源参数设置如图 8 所示, 设置三相交流电源线电压的有效值为 760 V, 由于正弦交流电压幅值为有效值的 $\sqrt{2}$ 倍, 与之对应的线电压的幅值为 $760\sqrt{2}$ V; 设置 A 相初相位为 0° ; 设置频率为 50 Hz。

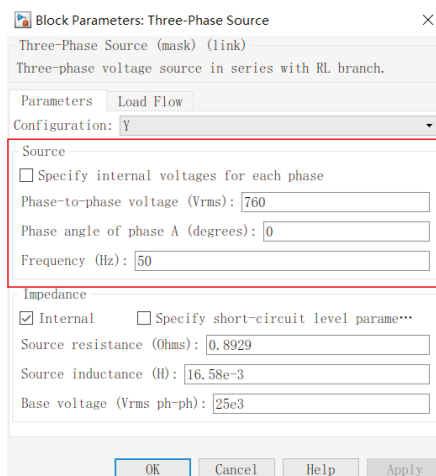


图8 Yy0 联结组三相电源参数设置对话框

设定仿真时间长度为 0.06 s, 运行 Yy0 联结组仿真模型可得到三相变压器初级绕组线电压 e_{AB} 、初级绕组相电压 e_A , 以及次级绕组线电压 e_{ab} 如图 9 所示。

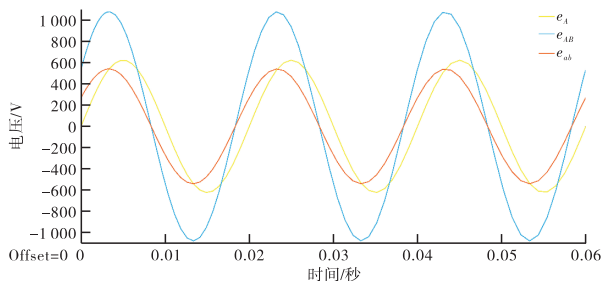


图9 Yy0 联结组电压波形图

从电压波形图中可以看出, 初级绕组线电压 e_{AB} 和次级绕组线电压 e_{ab} 的相位差是 0° , 即 e_{AB} 和 e_{ab} 同相位, 并且均超前初级绕组相电压 30° 。图 6 中仿真模型经均方根处理后的数值, 分别对应各电压的有效值, 初级绕组相电压 e_A 的有效值 E_A 近似为 440 V, 对应的相电压幅值为 $440\sqrt{2}$ V; 初级绕组线电压 e_{AB} 的有效值 E_{AB} 近似为 760 V, 对应的线电压幅值为 $760\sqrt{2}$ V; 次级绕组线电压 e_{ab} 的有效值 E_{ab} 为 380 V, 对应的线电压幅值为 $380\sqrt{2}$ V。

由以上分析可知, 初级绕组相电压 e_A 的表达式为:

$$e_A = 440\sqrt{2}\sin(2\pi \times 50t) \quad (1)$$

初级绕组线电压 e_{AB} 的表达式为:

$$e_{AB} = 760\sqrt{2}\sin(2\pi \times 50t + 30^\circ) \quad (2)$$

次级绕组线电压 e_{ab} 的表达式为:

$$e_{ab} = 380\sqrt{2}\sin(2\pi \times 50t + 30^\circ) \quad (3)$$

Yy0 联结组的电压波形图与电压相量图一致, 仿真结果更加直观。

3.2 Yy6 联结组仿真与分析

Yy6 组别建模中, 三相变压器中设定初级绕组 A_1 、 B_1 、 C_1 为星形接法, 次级绕组 A_2 、 B_2 、 C_2 也为星形接法, 且初级与次级绕组首端极性相反。变压器参数设置、三相电源参数设置、仿真时间长度均与 Yy0 联结组相同。Yy6 联结组仿真模型如图 10 所示。

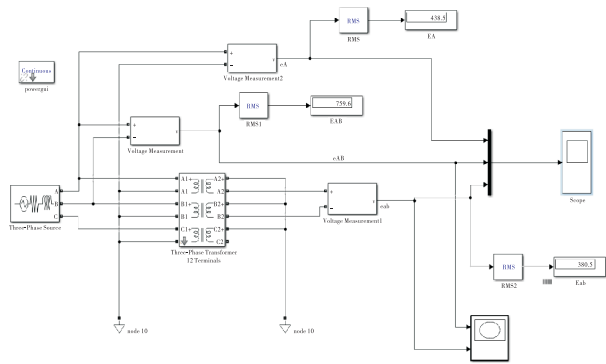


图10 Yy6 联结组仿真模型

运行 Yy6 联结组仿真模型可得到三相变压器初级绕组线电压 e_{AB} 、初级绕组相电压 e_A 以及次级绕组线电压 e_{ab} 如图 11 所示。

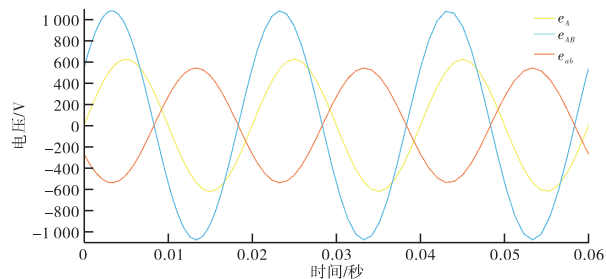


图11 Yy6 联结组电压波形图

从电压图中可以看出, 初级绕组线电压 e_{AB} 和次级绕组线电压 e_{ab} 的相位差是 180° , 即 e_{AB} 和 e_{ab} 反相, 并且 e_{AB} 超前初级绕组相电压 30° 。图 10 中仿真模型经均方根处理后的数值, 分别对应各电压的有效值, 初级绕组相电压的有效值 E_A 近似为 440 V, 对应的幅值为 $440\sqrt{2}$ V; 初级绕组线电压的有效值 E_{AB} 近似为 760 V, 对应的电压幅值为 $760\sqrt{2}$ V; 次级绕组线电压的有效值 E_{ab} 为 380 V, 对应的电压幅值为 $380\sqrt{2}$ V。

由以上分析可知, 初级绕组相电压 e_A 的表达式为:

$$e_A = 440\sqrt{2}\sin(2\pi \times 50t) \quad (4)$$

初级绕组线电压 e_{AB} 的表达式为:

$$e_{AB} = 760\sqrt{2}\sin(2\pi \times 50t + 30^\circ) \quad (5)$$

次级绕组线电压 e_{ab} 的表达式为:

$$e_{ab} = 380\sqrt{2}\sin(2\pi \times 50t + 210^\circ) \quad (6)$$

Yy6 联结组的电压波形图与电压相量图一致, 仿真结果更加直观。

在 Yy0 和 Yy6 联结组中, 三相变压器初级和次级绕组均采用星形连接, 若初级绕组无中性线, 容易产生较大的三次谐波, 会造成一定的谐波影响, 增加系统的损耗和发热, 也可能干扰其他设备的正常运行。

3.3 Yd11 联结组仿真与分析

Yd11 联结组建模中, 三相变压器按照图 4(a) 连接方法, 设定初级绕组 A_1 、 B_1 、 C_1 为星形接法, 次级绕组 A_2 、 B_2 、 C_2 为三角形接法, 将次级三相绕组每一相的首端与另一相的末端相连。Yd11 联结组仿真模型如图 12 所示。

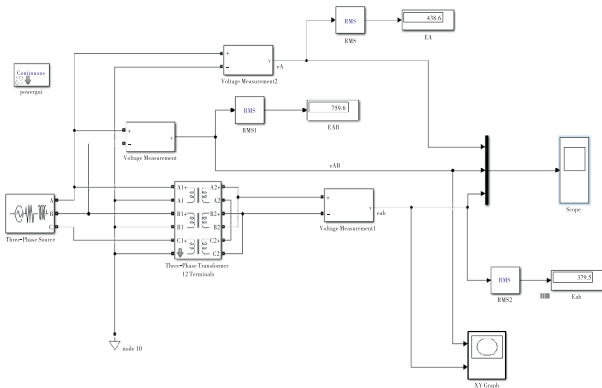


图 12 Yd11 联结组仿真模型

Yd11 联结组三相变压器参数设置如图 13 所示。

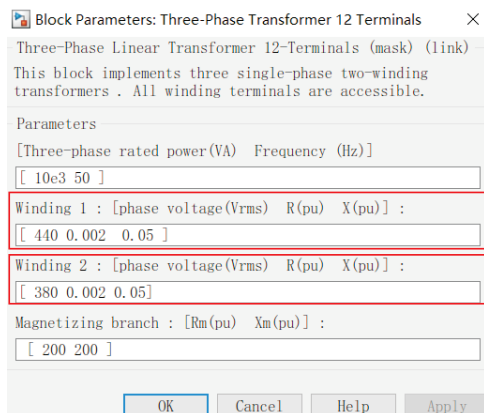


图 13 Yd11 联结组变压器参数设置

在图 13 所示的参数设置对话框中, 设置初

级线电压有效值为 760 V, 由于采用星形连接方式, 线电压有效值为相电压的 $\sqrt{3}$ 倍, 因此对应的初级相电压有效值为 $760 \div \sqrt{3} \approx 440$ V。设置次级线电压有效值为 380 V, 由于采用三角形连接方式, 线电压有效值等于相电压, 因而对应的次级相电压有效值也为 380 V, 变压器变比为 2 : 1。

在 Yd11 联结组仿真模型图中, 由于变压器初级绕组电压、连接方式及变比与 Yy0 联结组相同, 因而三相电源模块参数设置与 Yy0 联结组相同。设定仿真时间长度为 0.06 s, 运行 Yd11 联结组仿真模型可得到三相变压器初级绕组线电压 e_{AB} 、初级绕组相电压 e_A 以及次级绕组线电压 e_{ab} 如图 14 所示。

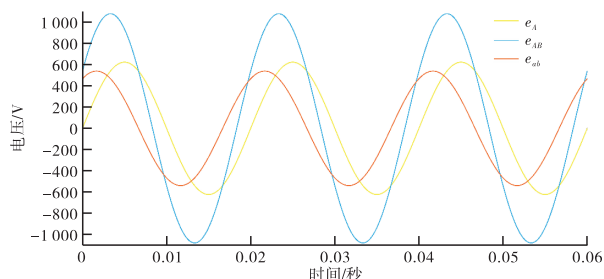


图 14 Yd11 联结组电压波形图

由电压图可知, 初级绕组线电压 e_{AB} 超前初级绕组相电压 e_A 的相位是 30° 。初级绕组相电压的幅值为 $440\sqrt{2}$ V, 初级绕组线电压的幅值为 $760\sqrt{2}$ V。

由以上分析可知, 初级绕组相电压 e_A 的表达式为:

$$e_A = 440\sqrt{2}\sin(2\pi \times 50t) \quad (7)$$

初级绕组线电压 e_{AB} 的表达式为:

$$e_{AB} = 760\sqrt{2}\sin(2\pi \times 50t + 30^\circ) \quad (8)$$

次级绕组线电压 e_{ab} 超前初级绕组线电压 e_{AB} 的相位是 30° , 即 e_{ab} 滞后于 e_{AB} 的相位是 330° , 在相量图中可以看成是由顺时针旋转 330° , 次级绕组线电压的幅值为 $380\sqrt{2}$ V, 因而次级绕组线电压 e_{ab} 的表达式为:

$$e_{ab} = 380\sqrt{2}\sin(2\pi \times 50t + 60^\circ) \quad (9)$$

3.4 Yd1 联结组仿真与分析

Yd1 联结组建模中, 三相变压器按照图 5(a) 的连接方法, 设定初级绕组 A_1 、 B_1 、 C_1 为星形接法, 次级绕组 A_2 、 B_2 、 C_2 为三角形接法, 将次级三相绕组每一相的末端与另一相的首端相连。Yd1 联结组仿真模型如图 15 所示。

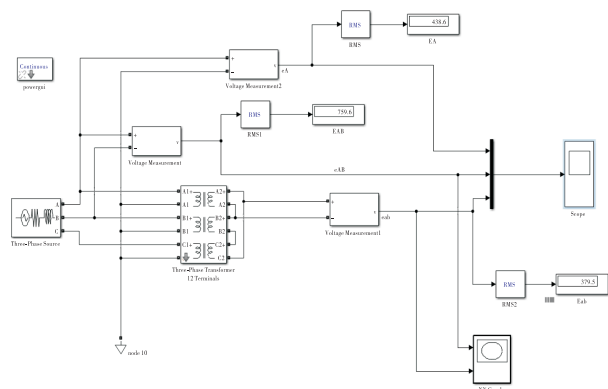


图 15 Yd1 联结组仿真模型

Yd1 联结组中变压器和三相电源的参数设置均与 Yd11 联结组相同。设定仿真时间长度为 0.06 s, 运行 Yd1 联结组仿真模型可得到三相变压器初级绕组线电压 e_{AB} 、初级绕组相电压 e_A 以及次级绕组线电压 e_{ab} 如图 16 所示。

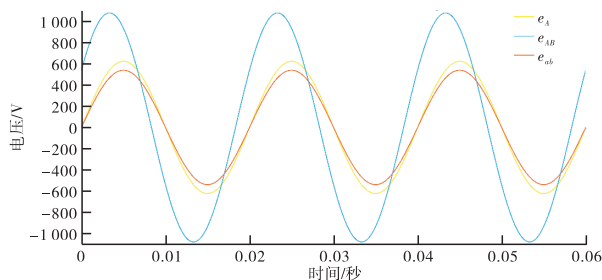


图 16 Yd1 联结组电压波形图

由电压图可知, 次级绕组线电压 e_{ab} 滞后初级绕组线电压 e_{AB} 的相位是 30° , 即 \dot{E}_{AB} 相量顺时针旋转 30° 后与 \dot{E}_{ab} 相量方向重合, 次级绕组线电压 e_{ab} 与初级绕组相电压 e_A 相位一致。各电压幅值均与 Yd11 联结组对应电压相同。

由以上分析可知, 初级绕组相电压 e_A 的表达式为:

$$e_A = 440 \sqrt{2} \sin(2\pi \times 50t) \quad (10)$$

初级绕组线电压 e_{AB} 的表达式为:

$$e_{AB} = 760 \sqrt{2} \sin(2\pi \times 50t + 30^\circ) \quad (11)$$

次级绕组线电压 e_{ab} 的表达式为:

$$e_{ab} = 380 \sqrt{2} \sin(2\pi \times 50t) \quad (12)$$

在 Yd11 和 Yd1 联结组中, 三相变压器采用星形/三角形连接, 能够有效抑制谐波的影响, 避免电压波形发生畸变。

4 结语

本文对三相变压器 Yy0、Yy6、Yd11 和 Yd1 联结组进行建模, 在设置三相电源参数、三相变压器参数的基础上, 通过改变初级与次级绕组的连接方式能够, 即可实现不同联结组的仿真。仿真结果清晰地展示出初级绕组线电压、初级绕组相电压与对应次级绕组线电压大小和相位之间的关系, 与时钟序数法理论分析一致。基于 Simulink 的船用三相变压器仿真研究在船舶应用中面临环境复杂、振动噪声大、负载波动大以及空间限制等实际问题, 在非线性建模和故障诊断方面仍存在不足。未来可结合深度学习技术, 增强深度学习与仿真模型的深度融合, 为船舶变压器乃至电力系统的安全运行提供支持。

参考文献:

- [1] 孙宏光, 杨明. 船舶新型平衡变压器的设计与仿真[J]. 船电技术, 2018, 38(1): 8-12.
- [2] 陶述珍, 白民权. 大容量移相变压器在工程船上的应用[J]. 机电设备, 2023, 40(2): 33-37.
- [3] 姚伟, 张玉良. 三相变压器参数测定与分析实验探究[J]. 河南科技, 2014(24): 143-144.
- [4] 王歌潮. 船舶电力系统谐波抑制技术研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2016.
- [5] 李明. 一种三相变压器联结组别的巧识法[J]. 机电一体化, 2013, 19(2): 78-80.
- [6] 王旭东, 王晓侃. 6~10kV 电力变压器的联结组别及其选择[J]. 机电一体化, 2014, 20(7): 80-82.
- [7] 樊战亭. 基于 Simulink 的三相变压器连接组别仿真与分析[J]. 价值工程, 2022, 41(31): 148-151.
- [8] 易瑞庭. 船舶电力推进系统谐波特性仿真与研究[J]. 机电设备, 2015, 32(3): 23-29.