

# 基于对偶原理的三相五柱式Sen变压器准稳态模型

周超, 韩松, 卜亮, 潘宇航

(贵州大学 电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 为了进一步研究不同铁芯结构的Sen变压器(ST)的外部特性,提出了一种基于对偶原理的三相五柱式ST准稳态模型。首先,通过分析三相五柱式ST的磁路模型,采用对偶原理建立了考虑铁芯涡流效应和磁路耦合效应的等效计算模型。其次,根据三相五柱式ST与外接系统的电气连接关系,推导了其各绕组电压和电流的电气解析模型。综合上述模型,可得磁路与电路耦合的三相五柱式ST准稳态模型。将该模型在潮流控制方面与已有文献进行比较,在故障分析方面与MATLAB/Simulink仿真模型进行比较,结果均表明了所提模型的有效性。此外,在不平衡负载功率下比较不同铁芯结构的ST的输出电流不平衡度,结果表明三相五柱式ST更适用于不平衡负载工况。

**关键词:** 对偶原理;三相五柱式Sen变压器;准稳态模型;潮流控制;模型

**中图分类号:** TM 41

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16081/j.epae.202202032

## 0 引言

大规模并网的风电、光伏等新能源的出力波动性、间歇性和不确定性等<sup>[1-2]</sup>给我国电力网络的潮流调控、电压调节带来了越来越大的挑战<sup>[3-4]</sup>。统一潮流控制器(UPFC)是柔性交流输电系统(FACTS)中最具有代表性和综合性的装置之一,但是过高的建设和运行成本限制了其广泛应用。

Sen变压器(ST(Sen Transformer))是由Sen提出的一种改进型移相变压器,其可实现与UPFC类似的有功无功独立调节功能<sup>[5]</sup>。文献[6]详细分析了UPFC与ST的优点和缺点,指出ST具有结构简单、容量大、可靠性高等显著优点,但是其调节的精度和速度有所欠缺。因此,文献[7]提出了一种混合式潮流控制器,该控制器结合了ST容量大、性能好和UPFC灵活调节的优点,提高了潮流控制性能。文献[8]提出了一种ST分接头反相调节的控制策略,通过增加ST副边绕组分接头运行点的数量提高ST的控制精度。从变压器建模的角度,已有的变压器建模方法主要有对偶原理法和统一电磁等效电路法UMEC(Unified Magnetic Equivalent Circuit method)2种,这2种方法都是基于磁等效电路理论。对偶原理法由Cherry最先提出<sup>[9]</sup>,并由Slemon进一步发展,文献

[10-12]采用对偶原理法,对具有不同铁芯结构的变压器进行了详细建模。但目前未见文献基于对偶原理法对ST建模问题进行完整的研究。从ST的铁芯结构角度,已有研究中ST的铁芯结构主要是单相变压器组式结构和三相三柱式结构。文献[13]基于统一迭代法的解算思想,建立了扩展型ST的稳态潮流模型;文献[14]提出了一种ST副边抽头最佳组合的调控策略;文献[15]基于变压器T型等效电路,提出了一种适用于基于电子式有载分接开关的扩展型ST的开关暂态模型。上述文献中的ST模型均由9个单相变压器构成。为了研究ST的内部及外部特性,文献[16]建立了考虑多绕组耦合的ST电磁解析模型剖析ST的内部电磁交互机制;文献[17]建立了ST的电磁暂态模型,主要研究ST的外部特性。文献[16]和文献[17]中的ST均为三相三柱式铁芯结构。然而,在大型电力变压器中,考虑到运输能力、占地面积以及大容量的电力传输,可能更适合采用三相五柱式变压器铁芯结构<sup>[18]</sup>。另外,高压配电网的拓扑结构通常包含大量的站间联络,或存在“220 kV-110 kV-220 kV”等形式的电磁环网,导致其网络拓扑结构呈现多环状态<sup>[19]</sup>。因此,三相五柱式ST可能为一种潜在的应用形式,值得进行深入研究。

本文考虑对偶原理的等效本质以及三相五柱式ST的复杂磁路分布,为简化建模过程,忽略变压器的暂态特性<sup>[20]</sup>,采用对偶原理推导了磁路与电路耦合的三相五柱式ST准稳态模型;利用1台138 kV、160 MV·A的三相五柱式ST及其电气系统,从潮流控制、故障分析、不平衡负载工况适应性三方面对所提模型进行算例分析。

## 1 三相五柱式ST的准稳态模型

### 1.1 ST的工作原理

ST的结构原理如附录A图A1所示。ST的原边

收稿日期:2021-01-07;修回日期:2021-12-31

在线出版日期:2022-02-21

基金项目:贵州省普通高等职业院校科技拔尖人才支持计划(2018036);贵州省科学技术基金资助项目([2019]1100, [2021]277);贵州省优秀青年科技人才项目([2021]5645)

Project supported by the Program for Top Science and Technology Talents in Universities of Guizhou Province(2018036), Guizhou Province Science and Technology Fund([2019]1100, [2021]277) and the Program for Excellent Young Scientific and Technological Talents in Guizhou Province([2021]5645)

侧绕组采用星形连接,并联接入电气系统送端母线,构成励磁单元;副边侧每相由3个带抽头的绕组组成,构成补偿电压单元。其中,副边侧A、B、C相绕组分别为 $a_1-a_3$ 、 $b_1-b_3$ 、 $c_1-c_3$ ;A相串联补偿电压 $U_{ST,A}=U_{ST,a1}+U_{ST,b1}+U_{ST,c1}$ , $U_{ST,a1}$ 、 $U_{ST,b1}$ 、 $U_{ST,c1}$ 分别为副边绕组 $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$ 抽头处的电压。由于 $U_{ST,a1}$ 、 $U_{ST,b1}$ 、 $U_{ST,c1}$ 之间互差 $120^\circ$ ,可以通过调节副边侧抽头位置改变3个补偿电压单元的组合方式达到调控 $U_{ST,A}$ 的目的,从而改变ST的输出电压 $U_{S'A}$ 。同理可得,B、C相的串联补偿电压 $U_{ST,B}$ 、 $U_{ST,C}$ 亦可通过调节抽头的位置进行调控。另外,为了使ST的串联补偿电压三相对称,应保证在任意时刻, $a_1$ 、 $b_2$ 、 $c_3$ 投入运行的绕组匝数相等, $b_1$ 、 $c_2$ 、 $a_3$ 投入运行的绕组匝数相等,以及 $c_1$ 、 $a_2$ 、 $b_3$ 投入运行的绕组匝数相等。

### 1.2 三相五柱式ST的磁路结构分析

三相五柱式ST的铁芯结构及磁通分布如图1所示。图中:实心柱体和斜条纹柱体分别表示三相五柱式ST的三相原边绕组和副边绕组; $\Phi_A$ 、 $\Phi_B$ 、 $\Phi_C$ 为ST的励磁主磁通; $\Phi_{y1}$ 和 $\Phi_{y2}$ 分别为A、B相之间和B、C相之间铁轭的磁通; $\Phi_{g1}$ 、 $\Phi_{g2}$ 分别为铁芯左、右侧旁柱与旁轭的磁通; $\Phi_{a1}$ 、 $\Phi_{b1}$ 、 $\Phi_{c1}$ 为铁芯柱与其相邻绕组之间的漏磁通; $\Phi_{a2}$ 、 $\Phi_{b2}$ 、 $\Phi_{c2}$ 、 $\Phi_{a3}$ 、 $\Phi_{b3}$ 、 $\Phi_{c3}$ 、 $\Phi_{a4}$ 、 $\Phi_{b4}$ 、 $\Phi_{c4}$ 为相邻绕组之间的漏磁通。

根据图1中的磁通分布可以得到图2所示的三相五柱式ST的等效磁路。图中: $F_{HA}$ 、 $F_{HB}$ 、 $F_{HC}$ 分别为流过三相五柱式ST原边绕组 $a_4$ 、 $b_4$ 、 $c_4$ 的电流所产生的磁动势; $F_{La1}$ — $F_{La3}$ 、 $F_{Lb1}$ — $F_{Lb3}$ 、 $F_{Lc1}$ — $F_{Lc3}$ 分别为流过三相五柱式ST副边绕组 $a_1$ — $a_3$ 、 $b_1$ — $b_3$ 、 $c_1$ — $c_3$ 的电流所产生的磁动势; $R_{am}$ 、 $R_{bm}$ 、 $R_{cm}$ 为三相五柱式ST的三相铁芯柱励磁主磁通路径上的非线性磁阻; $R_{y1}$ 和 $R_{y2}$ 分别为A、B相和B、C相之间铁轭磁通路径上的非线性磁阻; $R_{g1}$ 、 $R_{g2}$ 分别为铁芯左、右侧旁柱和旁轭磁通路径上的非线性磁阻; $R_{a1}$ 、 $R_{b1}$ 、 $R_{c1}$ 为铁芯柱与其相邻绕组之间漏磁通路径上的漏磁阻; $R_{a2}$ 、 $R_{b2}$ 、 $R_{c2}$ 、 $R_{a3}$ 、 $R_{b3}$ 、 $R_{c3}$ 、 $R_{a4}$ 、 $R_{b4}$ 、 $R_{c4}$ 为相邻绕组之间漏磁通路径上的漏磁阻; $R_{q1}$ 和 $R_{q2}$ 分别为空气中A、B相和B、C相之间与铁轭平行的漏磁阻; $R_{d1}$ 和 $R_{d2}$ 分别为空气中与旁柱和旁轭平行的漏磁阻。

### 1.3 三相五柱式ST的计算模型

根据对偶原理<sup>[9]</sup>,主磁通在铁芯、铁轭以及旁柱

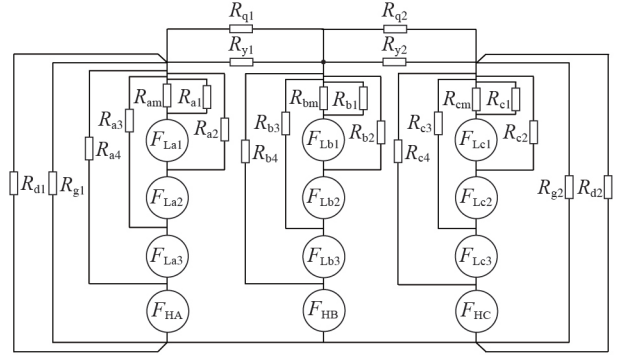


图2 三相五柱式ST的等效磁路示意图

Fig.2 Schematic diagram of equivalent magnetic circuit of three-phase five-limb ST

部分的磁通路径产生的磁阻可等效为非线性电感,漏磁通在空气中的磁通路径产生的磁阻可等效为线性电感。根据对偶原理得到的描述三相五柱式ST基本电磁关系的等效电路模型如附录A图A2所示。在该等效电路模型中,三相五柱式ST的铁芯采用考虑铁磁磁滞及饱和的非线性电感 $L_{am}$ 、 $L_{bm}$ 、 $L_{cm}$ 及与其并联的反映铁芯损耗的电阻 $R_{am}$ 、 $R_{bm}$ 、 $R_{cm}$ 表示;与铁芯部分类似,铁轭部分采用考虑铁磁磁滞及饱和的非线性电感 $L_{y1}$ 、 $L_{y2}$ 以及与其并联的反映铁芯损耗的电阻 $R_{y1}$ 、 $R_{y2}$ 表示,旁柱部分采用考虑铁磁磁滞及饱和的非线性电感 $L_{g1}$ 、 $L_{g2}$ 以及与其并联的反映铁芯损耗的电阻 $R_{g1}$ 、 $R_{g2}$ 表示。根据图A2列写节点电压方程如下:

$$\begin{bmatrix} I_{ST,s1} \\ I_{ST,s2} \\ \vdots \\ I_{ST,s13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{1,1} & y_{1,2} & \cdots & y_{1,13} \\ y_{2,2} & y_{2,2} & \cdots & y_{2,13} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{13,1} & y_{13,2} & \cdots & y_{13,13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ \vdots \\ U_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $I_{ST,s1}$ — $I_{ST,s13}$ 分别为节点 $a$ — $m$ 的注入电流; $y_{1,1}$ — $y_{13,13}$ 为支路导纳,具体公式见附录A式(A1)—(A16); $U_a$ — $U_m$ 分别为节点 $a$ — $m$ 的对地电压。

三相五柱式ST原边侧3个理想变压器 $T_A$ 、 $T_B$ 、 $T_C$ 的电压、电流与匝数的关系为:

$$\begin{cases} I_{ST,p} = I_{ST,p} \\ U_{ST,p} = U_{ST,p} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $I_{ST,p}$ 、 $I_{ST,p}$ 和 $U_{ST,p}$ 与 $U_{ST,p}$ 分别为 $T_A$ 、 $T_B$ 、 $T_C$ 的原边侧电流矩阵、副边侧电流矩阵和原边侧电压矩阵、副边侧电压矩阵,具体表达见附录A式(A17)。

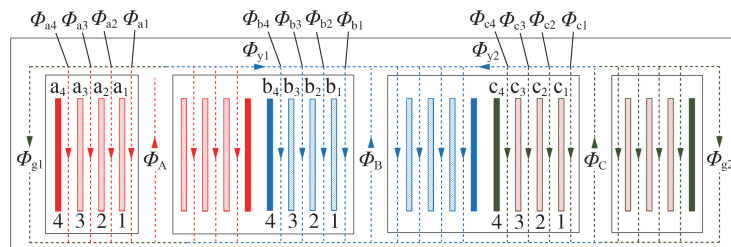


图1 三相五柱式ST的铁芯结构及磁通分布示意图

Fig.1 Schematic diagram of iron-core structure and flux distribution of three-phase five-limb ST

三相五柱式ST副边侧9个理想变压器 $T_{La1}$ — $T_{La3}$ 、 $T_{Lb1}$ — $T_{Lb3}$ 、 $T_{Lc1}$ — $T_{Lc3}$ 的电压、电流与匝数的关系为:

$$\begin{cases} I_{ST,s} = -K^{-1} I_{ST,s} \\ U_{ST,s} = KU_{ST,s} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $K$ 为 $9 \times 9$ 维的对角矩阵, $I_{ST,s}$ 、 $I_{ST,s}$ 和 $U_{ST,s}$ 、 $U_{ST,s}$ 分别为 $T_{La1}$ — $T_{La3}$ 、 $T_{Lb1}$ — $T_{Lb3}$ 、 $T_{Lc1}$ — $T_{Lc3}$ 的原边侧电流矩阵、副边侧电流矩阵和原边侧电压矩阵、副边侧电压矩阵,具体表达式见附录A式(A18)。

此外,12个理想变压器的电压补充方程为:

$$\begin{cases} U_a - U_e = U_{ST,pa} \\ U_e - U_i = U_{ST,pb} \\ U_i - U_m = U_{ST,pc} \end{cases}, \begin{cases} U_b - U_e = U_{ST,sa1} \\ U_e - U_e = U_{ST,sa2} \\ U_d - U_e = U_{ST,sa3} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} U_f - U_i = U_{ST,sb1} \\ U_g - U_i = U_{ST,sb2} \\ U_h - U_i = U_{ST,sb3} \end{cases}, \begin{cases} U_j - U_m = U_{ST,sc1} \\ U_k - U_m = U_{ST,sc2} \\ U_l - U_m = U_{ST,sc3} \end{cases}$$

式中: $U_{ST,pa}$ 、 $U_{ST,pb}$ 、 $U_{ST,pc}$ 分别为 $T_A$ 、 $T_B$ 、 $T_C$ 副边侧的端电压; $U_{ST,sa1}$ — $U_{ST,sa3}$ 、 $U_{ST,sb1}$ — $U_{ST,sb3}$ 、 $U_{ST,sc1}$ — $U_{ST,sc3}$ 分别为 $T_{La1}$ — $T_{La3}$ 、 $T_{Lb1}$ — $T_{Lb3}$ 、 $T_{Lc1}$ — $T_{Lc3}$ 原边侧的端电压。

#### 1.4 三相五柱式ST的电气解析模型

如图A1所示,三相五柱式ST的原边侧并联接入送端、副边侧串联接入送端,根据外接系统电路和三相五柱式ST的电气连接关系可建立如下方程:

$$\begin{cases} I_{ST,a} = I_{ST,sa} + I_{ST,PA} \\ I_{ST,b} = I_{ST,sb} + I_{ST,PB} \\ I_{ST,c} = I_{ST,sc} + I_{ST,PC} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} U_{sa} = I_{ST,a} Z_s + U_{sA} \\ U_{sb} = I_{ST,b} Z_s + U_{sB} \\ U_{sc} = I_{ST,c} Z_s + U_{sC} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $I_{ST,a}$ 、 $I_{ST,b}$ 、 $I_{ST,c}$ 为系统的送端电流; $I_{ST,PA}$ 、 $I_{ST,PB}$ 、 $I_{ST,PC}$ 和 $I_{ST,sa}$ 、 $I_{ST,sb}$ 、 $I_{ST,sc}$ 分别为三相五柱式ST的原边并联侧电流和副边串联侧电流; $U_{sa}$ 、 $U_{sb}$ 、 $U_{sc}$ 为系统送端电压; $U_{sA}$ 、 $U_{sB}$ 、 $U_{sC}$ 分别为 $a_4$ 、 $b_4$ 、 $c_4$ 的端电压; $Z_s$ 为外接系统的送端阻抗。

三相五柱式ST的原边并联侧和副边串联侧等效电路分别如附录A图A3和图A4所示,由其电气关系可建立如下方程:

$$\begin{cases} U_{sa} = I_{ST,PA} R_A + U_{ST,PA} \\ U_{sb} = I_{ST,PB} R_B + U_{ST,PB} \\ U_{sc} = I_{ST,PC} R_C + U_{ST,PC} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} U_{sa} - I_{ST,a} Z_s + U_{ST,SA1} + U_{ST,SB1} + U_{ST,SC1} - \\ I_{ST,sa} (Z_T + Z_r + R_{L1}) - U_{ra} = 0 \\ U_{sb} - I_{ST,b} Z_s + U_{ST,SA2} + U_{ST,SB2} + U_{ST,SC2} - \\ I_{ST,sb} (Z_T + Z_r + R_{L2}) - U_{rb} = 0 \\ U_{sc} - I_{ST,c} Z_s + U_{ST,SA3} + U_{ST,SB3} + U_{ST,SC3} - \\ I_{ST,sc} (Z_T + Z_r + R_{L3}) - U_{rc} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} R_{L1} = R_{La1} + R_{Lb1} + R_{Lc1} \\ R_{L2} = R_{La2} + R_{Lb2} + R_{Lc2} \\ R_{L3} = R_{La3} + R_{Lb3} + R_{Lc3} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $U_{ST,PA}$ 、 $U_{ST,PB}$ 、 $U_{ST,PC}$ 分别为 $T_A$ 、 $T_B$ 、 $T_C$ 原边侧的端电压; $U_{ST,SA1}$ — $U_{ST,SA3}$ 、 $U_{ST,SB1}$ — $U_{ST,SB3}$ 、 $U_{ST,SC1}$ — $U_{ST,SC3}$ 分别为 $T_{La1}$ — $T_{La3}$ 、 $T_{Lb1}$ — $T_{Lb3}$ 、 $T_{Lc1}$ — $T_{Lc3}$ 副边侧的端电压; $Z_T$ 为线路阻抗; $Z_r$ 为外接系统的受端阻抗; $R_A$ 、 $R_B$ 、 $R_C$ 为原边绕组的电阻; $R_{L1}$ 、 $R_{L2}$ 、 $R_{L3}$ 为副边绕组的等效电阻; $R_{La1}$ 、 $R_{Lb1}$ 、 $R_{Lc1}$ 、 $R_{La2}$ 、 $R_{Lb2}$ 、 $R_{Lc2}$ 、 $R_{La3}$ 、 $R_{Lb3}$ 、 $R_{Lc3}$ 为副边绕组的电阻。

综上所述,式(1)—(9)即为三相五柱式ST的准稳态模型,对式(1)—(9)进行联立求解即可得到三相五柱式ST原边侧和副边侧共12个绕组的电压和电流。

## 2 模型参数计算

图A2中的电路参数,如绕组间的漏抗、反映铁芯损耗的电阻等一般可通过实验计算得到。若没有实际样机,则可以通过变压器设计尺寸对其电磁特性进行模拟<sup>[11]</sup>。

### 2.1 铁芯参数

硅钢片在交变的磁场中会感应出涡流,考虑涡流效应后,可采用复磁导率描述铁芯属性。基于对偶原理,等效磁路中反映铁芯属性的非线性磁阻 $R$ 可用等效非线性电感 $L_{eq}$ 和电阻 $R_{eq}$ 并联表示<sup>[11]</sup>,如式(10)所示。

$$\begin{cases} L_{eq} = \text{Re}(N^2 \mu_r \mu_0 w d \tanh(p)/(ps)) \\ R_{eq} = \text{Im}(N^2 \mu_r \mu_0 w d \tanh(p)/(ps)) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $N$ 为原边绕组匝数; $\mu_r$ 、 $\mu_0$ 分别为相对磁导率、真空磁导率; $w$ 、 $d$ 、 $s$ 分别为硅钢片的宽度、厚度、长度; $p = \gamma d/2$ ,  $\gamma = \sqrt{j\omega \mu_r \mu_0 \sigma}$ ,  $\sigma$ 为硅钢片的电导率, $\omega$ 为角频率。

### 2.2 电感参数

三相五柱式ST绕组的几何排列和尺寸如图3所示,绕组间漏感可以通过绕组的设计尺寸进行计算<sup>[18]</sup>,表达式如式(11)所示。

$$\begin{cases} L_{s12} = \frac{\mu_0 N_1^2}{l_c} \left( \frac{2\pi r_1 d_1}{3} + 2\pi r_{12} d_{12} + \frac{2\pi r_2 d_2}{3} \right) \\ L_{s23} = \frac{\mu_0 N_2^2}{l_c} \left( \frac{2\pi r_2 d_2}{3} + 2\pi r_{23} d_{23} + \frac{2\pi r_3 d_3}{3} \right) \\ L_{s34} = \frac{\mu_0 N_3^2}{l_c} \left( \frac{2\pi r_3 d_3}{3} + 2\pi r_{34} d_{34} + \frac{2\pi r_4 d_4}{3} \right) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $L_{s12}$ 、 $L_{s23}$ 、 $L_{s34}$ 分别为 $a_1$ 与 $a_2$ 、 $a_2$ 与 $a_3$ 、 $a_3$ 与 $a_4$ 之间的漏感; $N_1$ — $N_3$ 为副边绕组匝数; $l_c$ 为磁通路径的平均长度; $r_1$ — $r_4$ 分别为 $a_1$ — $a_4$ 的平均半径; $r_{12}$ 、 $r_{23}$ 、 $r_{34}$ 为两绕组之间几何空间的平均半径; $d_1$ — $d_4$ 分别为



$a_1$ — $a_4$ 的厚度; $d_{12}$ 、 $d_{23}$ 、 $d_{34}$ 分别为 $a_1$ 与 $a_2$ 、 $a_2$ 与 $a_3$ 、 $a_3$ 与 $a_4$ 之间的距离。

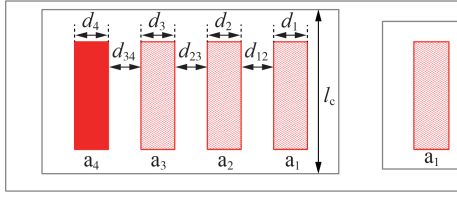


图3 三相五柱式ST绕组的几何排列和尺寸  
Fig.3 Geometrical arrangement and sizes of windings of three-phase five-limb ST

### 3 算例分析

为简化计算,在计算过程中不考虑铁芯饱和特性和磁滞特性,即铁芯磁导率为常数。一般而言, $w$ 的范围为0.23~0.35 mm, $\mu_r$ 的范围为7000~10000,本文取 $w=0.3$  mm<sup>[11]</sup>、 $\mu_r=10000$ <sup>[16]</sup>进行计算。外接系统电路和三相五柱式ST的主要参数如附录B表B1、B2所示。

#### 3.1 算例1:模型验证

##### 3.1.1 三相五柱式ST的功率调节

为验证本文所提模型的有效性,本文利用1台三相五柱式ST进行解析计算。设置三相五柱式ST的串联补偿电压的幅值以0.1 p.u.步长从0.1 p.u.阶跃变化至0.4 p.u.,其相角 $\beta$ 在 $[0^\circ, 360^\circ]$ 范围内变化,则三相五柱式ST受端的有功功率 $P_r$ 和无功功率 $Q_r$ 如图4所示。由图可见,随着串联补偿电压的幅值和相角的变化,本文所提模型的 $P_r$ - $Q_r$ 曲线呈四象限变化,从而验证了所提模型的有效性。然而,该 $P_r$ - $Q_r$ 曲线与正六边形存在一定的差异,这可能是由注入串联补偿电压的过程中,线路中出现的负载波动、抽头位置变化引起的补偿点处的戴维南等效阻

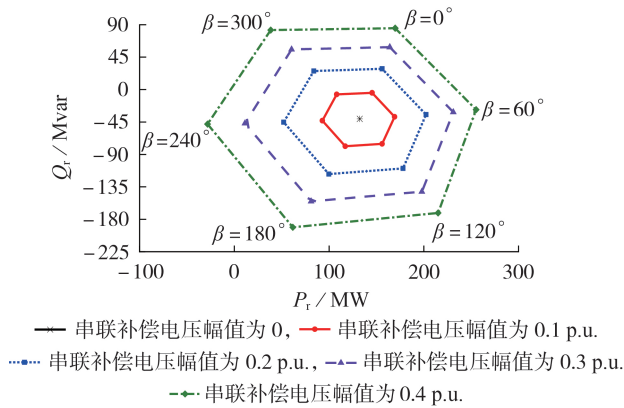


图4 不同的串联补偿电压幅值和相角下,三相五柱式ST的 $P_r$ 与 $Q_r$ 的关系

Fig.4 Relationship between  $P_r$  and  $Q_r$  of three-phase five-limb ST under different amplitudes and phase angles of series compensation voltage

抗变化以及三相五柱式ST励磁单元处并联负载发生变化等因素导致的。

##### 3.1.2 三相五柱式ST的串联补偿电压调节

以A相串联补偿电压的幅值 $U_{ST,A}$ 和相角 $\beta$ 为例,基于本文所提模型,按照文献[14]中的电压调节方式进行电压补偿,即在不同时间段预设理想的串联补偿电压幅值和相角:在 $[0, 5]$  s时段内, $U_{ST,A}=0$ , $\beta=0^\circ$ ;在 $(5, 14]$  s时段内, $U_{ST,A}=0.2$  p.u., $\beta=120^\circ$ ;在 $(14, 23]$  s时段内, $U_{ST,A}=0.2$  p.u., $\beta=60^\circ$ ;在 $(23, 32]$  s时段内, $U_{ST,A}=0.4$  p.u., $\beta=60^\circ$ 。文献[14]在PSCAD/EMTDC平台中搭建三相五柱式ST仿真模型,在 $[0, 32]$  s时段内根据设定的不同补偿电压,得到了分接开关切换过程中的串联补偿电压 $U_{S',sa}$ 和副边绕组电流 $I_{S',sa}$ 的变化过程。本文所提模型和文献[14]得到的三相五柱式ST串联补偿电压幅值和副边绕组电流幅值如图5所示。图中: $U_{S',sa}$ 、 $I_{S',sa}$ 分别为串联补偿电压 $U_{S',sa}$ 和副边绕组电流 $I_{S',sa}$ 的幅值;电压、电流幅值均为标幺值;下标(max)、(min)分别表示最大、最小值。

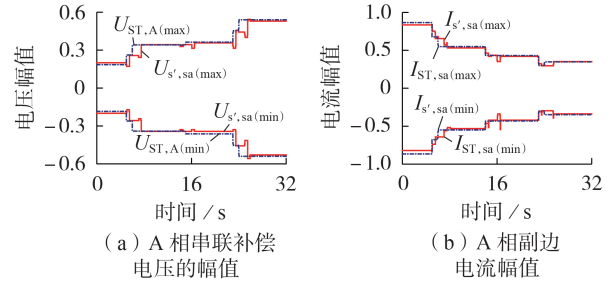


图5 三相五柱式ST串联补偿电压和副边绕组电流的幅值变化

Fig.5 Amplitude change of series compensation voltage and secondary winding current of three-phase five-limb ST

由图5可见,基于本文所提模型,按照文献[14]的电压调节方式得到的 $U_{ST,A}$ 和 $I_{ST,sa}$ 与文献[14]经试验得到的 $U_{S',sa}$ 和 $I_{S',sa}$ 的变化趋势基本相同,进一步验证了本文所提模型的有效性。然而,本文的串联补偿电压结果与文献[14]的串联电压补偿在一定的差异。这是因为文献[14]的ST铁芯由9个单相变压器组成,三相磁路彼此无关,因此没有考虑铁芯磁通之间的相互耦合;而本文所提三相五柱式ST模型不仅考虑了磁路之间的相互耦合,还考虑了铁芯涡流效应的影响。

##### 3.2 算例2:三相五柱式ST在故障下的短路电流

为了进一步研究三相五柱式ST在串联电压补偿状态下发生不同故障时的短路电流,以 $U_{ST,A}=0.2$  p.u.、 $\beta=60^\circ$ 为例,利用本文所提模型以及在MATLAB/Simulink中搭建的仿真模型,分别对三相五柱式ST出口处发生A相接地、AB相接地、AB相间

短路以及ABC相间短路故障进行计算,仿真参数见表B1、B2,仿真时间设为1 s,故障发生在0.5 s,A相接地故障的短路电流的计算和仿真结果见图6,AB相接地、AB相间短路以及ABC相间短路故障的短路电流的计算和仿真结果见附录B图B1。由图6、B1可见,三相五柱式ST出口处发生短路故障前,本文所提模型的计算结果与仿真结果基本一致,其稳态电流的误差不超过0.45%;三相五柱式ST出口处发生A相接地短路、AB相接地短路、AB相间短路以及ABC相间短路故障时,A相短路电流峰值的仿真结果分别为10.353 6、11.708 11、10.388 41、12.625 89 kA,本文所提模型的计算结果与仿真结果基本相同,A相接地短路故障下稳态电流的误差最大,但未超过0.65%。综上所述,本文所提模型与仿真模型得到的短路电流吻合度较好,这进一步表明本文所提模型在串联电压补偿状态下对不同的短路故障情况均是有效的。

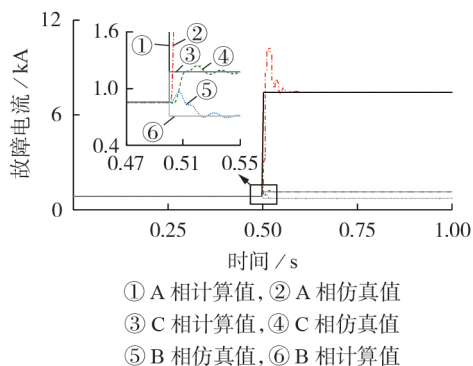


图6 发生A相接地故障时短路电流的计算结果与仿真结果

Fig.6 Simulative and calculative results of short circuit current under phase-A grounding circuit fault

### 3.3 算例3:在不平衡负载情况下比较不同铁芯结构的ST

设置不平衡负载工况  $Z_a = 48 + j12.44 \Omega$ 、 $Z_b = 63 + j12.44 \Omega$ 、 $Z_c = 98 + j12.44i \Omega$ ,串联补偿电压的幅值按步长0.1 p.u.从0.1 p.u.阶跃变化至0.4 p.u.,其相角 $\beta$ 在 $[0^\circ, 360^\circ]$ 范围内变化,基于上述条件对处于不同串联电压补偿状态下的三相三柱式ST和三相五柱式ST的输出电流不平衡度 $r_{ub}$ 进行解析计算,结果如图7所示。

由图7可见,当串联补偿电压的幅值从0.1 p.u.阶跃变化至0.4 p.u.,相角在 $[0^\circ, 360^\circ]$ 范围内变化时,三相三柱式ST、三相五柱式ST的输出电流不平衡度分别在 $[26.04\%, 27.812\%]$ 、 $[22.45\%, 27.086\%]$ 范围内变化,且输出电流不平衡度的差异从0.504%增大至3.895%,这表明在不平衡负载工况下,与三相三柱式ST相比,三相五柱式ST的输出电流平衡度更好。这是因为当ST工作在不平衡负载工况下

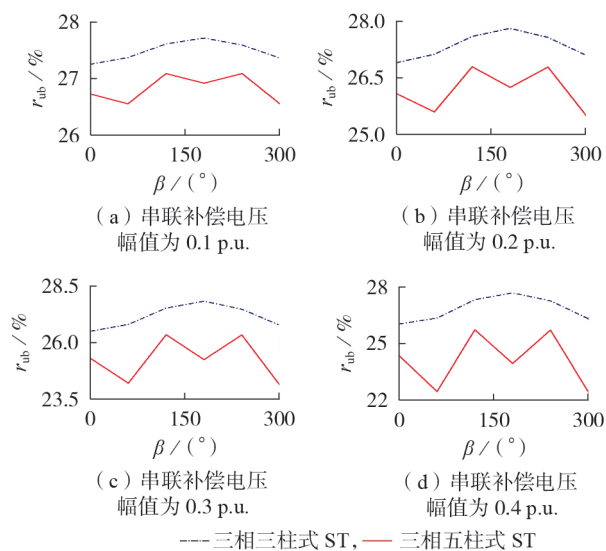


图7 不同铁芯结构的ST的输出电流不平衡度比较

Fig.7 Comparison of output current unbalance degree between ST with different core structures

时,对于三相三柱式铁芯结构,零序磁通只能通过油箱完成它的路径,而对于三相五柱式铁芯结构,零序磁通则可以通过由旁柱和旁轭提供的低磁阻路径形成回路,所以三相五柱式铁芯结构的磁通分布比三相三柱式铁芯结构的磁通分布更加对称,其输出电流不平衡度更低。因此,三相五柱式ST比三相三柱式ST更适用于不平衡负载工况。

## 4 结论

本文采用对偶原理推导了计及铁芯涡流效应和磁路耦合效应的三相五柱式ST准稳态模型。利用1台138 kV、160 MV·A的三相五柱式ST及其电气系统进行算例分析,并与已有文献所得的电压、电流等潮流控制结果,以及MATLAB/Simulink仿真模型所得短路电流结果进行比较,同时比较了不同铁芯结构的ST的输出电流平衡度,得到结论如下:

1)从模型适用性的角度,本文所提模型利用对偶原理,可实现由三相五柱式ST的等效磁路得到其等效电路,能够保证拓扑结构的正确性,对于不同铁芯结构的ST有较强的适用性;

2)从电磁耦合的角度,本文所提模型考虑了三相五柱式ST相间的磁耦合作用、绕组间漏磁通作用以及涡流效应,能够较为准确地反映三相五柱式ST的内在电磁特性。

3)从铁芯结构的角度,不同铁芯结构对ST的输出电流不平衡度有一定的影响,当负载不平衡较为严重时,三相五柱式ST的输出电流不平衡度优于三柱式ST的输出电流不平衡度,但本文算例中两者的差异未超过4%。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 鲍颜红,张金龙,江叶峰,等.考虑新能源出力不确定性的可用输电能力在线评估方法[J].电力自动化设备,2020,40(4):71-76.  
BAO Yanhong,ZHANG Jinlong,JIANG Yefeng,et al. Online assessment method of available transfer capacity considering uncertainties of renewable energy output[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(4):71-76.
- [2] 李乃双,郝丽丽,郝思鹏,等.含分布式电源的配电网电压越限薄弱环节识别方法[J].电力自动化设备,2019,39(4):36-43.  
LI Naishuang,HAO Lili,HAO Sipeng,et al. Identification method of voltage over-limit weak link in distribution network with distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(4):36-43.
- [3] 王杨,向月,刘俊勇.聚类网架拓扑与源荷关联场景生成下配电网分布式电源规划方法[J].电力自动化设备,2020,40(12):49-56,65.  
WANG Yang,XIANG Yue,LIU Junyong. Distributed generator planning method in distribution network based on clustering network topology and source-load correlation scenarios[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(12):49-56,65.
- [4] 陈柏超,田翠华.电磁式特高压统一潮流控制器[J].高电压技术,2006,32(12):96-98,117.  
CHEN Baichao,TIAN Cuihua. Ultra-high voltage unified power flow controller of electromagnetic type[J]. High Voltage Engineering,2006,32(12):96-98,117.
- [5] SEN K K,SEN M L. Introducing the family of "Sen" transformers:a set of power flow controlling transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2003,18(1):149-157.
- [6] KUMAR A,KUMAR J. Comparison of UPFC and SEN Transformer for ATC enhancement in restructured electricity markets[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2012,41(1):96-104.
- [7] 陈柏超,曾永胜,刘俊博,等.基于Sen Transformer的新型统一潮流控制器的仿真与实验[J].电工技术学报,2012,27(3):233-238.  
CHEN Baichao,ZENG Yongsheng,LIU Junbo,et al. Simulation and experimental research of a novel unified power flow controller based on Sen Transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(3):233-238.
- [8] 韩松,荣娜,许逵.变压器副边绕组反相的少级数特征潮流控制装置与方法:CN105262079A[P]. 2016-01-20.
- [9] COLIN CHERRY E. The duality between interlinked electric and magnetic circuits and the formation of transformer equivalent circuits[J]. Proceedings of the Physical Society Section B,1949,62(2):101-111.
- [10] 皇甫成,魏远航,钟连宏,等.基于对偶性原理的三相多芯柱变压器暂态模型[J].中国电机工程学报,2007,27(3):83-88.  
HUANGFU Cheng,WEI Yuanhang,ZHONG Lianhong,et al. A transient model of three phase multi-legged transformer based on duality theory[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(3):83-88.
- [11] 王帅兵,李琳,谢裕清,等.统一潮流控制器中串联耦合变压器特性及仿真模型研究[J].电网技术,2017,41(2):551-557.  
WANG Shuaibing,LI Lin,XIE Yuqing,et al. Research on SCT characteristics and simulation model in UPFC system[J]. Power System Technology,2017,41(2):551-557.
- [12] 段振锋,付鹏武,吴佳芳,等.基于耦合漏感的四绕组变压器暂态模型及短路计算[J].电力自动化设备,2018,38(4):110-117.  
DUAN Zhenfeng,FU Pengwu,WU Jiafang,et al. Transient model and short circuit calculation of four-winding transformer based on coupling leakage inductance[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(4):110-117.
- [13] 冯金铃,韩松,潘宇航.适用于统一迭代潮流计算的扩展型"Sen"变压器模型[J].电力系统保护与控制,2020,48(21):41-48.  
FENG Jinling,HAN Song,PAN Yuhang. Modelling of extended Sen transformer for a unified iterative power flow solution[J]. Power System Protection and Control,2020,48(21):41-48.
- [14] FARUQUE M O,DINAVAH V. A tap-changing algorithm for the implementation of "Sen" transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2007,22(3):1750-1757.
- [15] PAN Yuhang, HAN Song, ZHOU Chao, et al. On switching transient modeling and analysis of electronic on-load tap-changers based Sen transformer[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2021,130:107024.
- [16] 潘宇航,韩松,冯金铃.考虑多绕组耦合的Sen Transformer电磁解析模型[J].高电压技术,2020,46(6):2131-2139.  
PAN Yuhang,Han Song,Feng Jinling. Electromagnetic analytical model of Sen transformer considering multi-winding coupling[J]. High Voltage Engineering,2020,46(6):2131-2139.
- [17] LIU Jiadai,DINAVAH V. Nonlinear magnetic equivalent circuit-based real-time Sen transformer electromagnetic transient model on FPGA for HIL emulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2016,31(6):2483-2493.
- [18] KULKARNI S V,KHAPARDE S A. 变压器工程:设计与诊断[M].陈玉国,译.2版.北京:机械工业出版社,2016.
- [19] 张曦,吕林,金勇,等.基于高压配电网变电单元分组重构的城市电网输电阻塞管控模型及算法[J].中国电机工程学报,2016,36(20):5403-5413,5716.  
ZHANG Xi,LÜ Lin,JIN Yong,et al. Congestion mitigation model and algorithm for urban power grids considering reconfigurability of high-voltage distribution transformer unit groups[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(20):5403-5413,5716.
- [20] 王庆平,董新洲,周双喜,等.基于自适应模型的变压器暂态全过程数值计算[J].电力系统自动化,2004,28(18):54-58.  
WANG Qingping,DONG Xinzhou,ZHOU Shuangxi,et al. Whole transient calculation of transformer based on self-adaptive model[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(18):54-58.

## 作者简介:



周超

周超(1996—),男,硕士研究生,研究方向为多物理场仿真、特种变压器(E-mail:zhou\_chao1996@163.com);

韩松(1978—),男,教授,博士,通信作者,研究方向为交直流电力系统动态分析、新型电力电子装备以及配电网规划(E-mail:shan@gzu.edu.cn);

卜亮(1996—),男,硕士研究生,研究方向为柔性交流输电技术、电力系统稳定性和控制(E-mail:fengde556@163.com);

潘宇航(1994—),男,硕士研究生,研究方向为柔性交流输电技术、多物理场仿真(E-mail:yhpan424@163.com)。

(编辑 任思思)

(下转第211页 continued on page 211)



- [18] CHU W L, LIN C J, KAO K C. Fault diagnosis of a rotor and ball-bearing system using DWT integrated with SVM, GRNN, and visual dot patterns[J]. *Sensors*, 2019, 21(19): 1-23.
- [19] SÁNCHEZ R V, LUCERO P, VÁSQUEZ R E, et al. Feature ranking for multi-fault diagnosis of rotating machinery by using random forest and KNN[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2018, 34(6): 3463-3473.
- [20] LIPINSKI P, BRZYCHCZY E, ZIMROZ R. Decision tree-based classification for planetary gearboxes' condition monitoring with the use of vibration data in multidimensional symptom space[J]. *Sensors*, 2020, 20(21): 1-17.

## 作者简介:



马宏忠

马宏忠(1962—),男,教授,博士,主要研究方向为电力设备状态监测与故障诊断、磁悬浮称重技术、电力系统谐波分析(E-mail: hhumhz@163.com);

侯鹏飞(1991—),男,博士研究生,通信作者,主要研究方向为电力设备在线监测与状态评估、故障诊断、电抗器振动机理分析等(E-mail: 15238349569@163.com)。

(编辑 任思思)

## Chaotic characteristic analysis and feature recognition of mechanical failure of high voltage reactor winding and iron core

MA Hongzhong<sup>1</sup>, HOU Pengfei<sup>1</sup>, YAN Yan<sup>1</sup>, WU Jinli<sup>1</sup>, CHEN Xuan<sup>2</sup>, ZHU Chao<sup>2</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Maintenance Branch Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** Firstly, the chaotic characteristics of the vibration signals of high-voltage shunt reactor are judged according to the Kolmogorov entropy. On the basis of proving the chaotic characteristics of the vibration signals, the vibration signals are reconstructed, and the change law of phase trajectory under different voltage levels, fault types and fault levels is analyzed. Then, the maximum Lyapunov exponent, Kolmogorov entropy and correlation dimension are used as a set of chaotic indices to quantitatively calculate and characterize the chaotic characteristics of the vibration signals before and after the mechanical fault of high-voltage shunt reactor's winding and iron core. Finally, the multiple chaotic indices are used to construct a feature space for fault identification, and the superiority of multiple chaotic feature space in fault identification is verified by comparing with existing fault identification methods. The verification results show that the multi-chaotic feature recognition space can accurately realize unsupervised online fault recognition, and its accuracy rate is at least 5% higher than that of the existing methods.

**Key words:** electric reactors; electric windings; iron cores; fault identification; vibration signal; chaos analysis; feature space

(上接第203页 continued from page 203)

## Quasi steady-state model of three-phase five-limb ST based on duality principle

ZHOU Chao, HAN Song, BU Liang, PAN Yuhang

(The Electrical Engineering College, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** In order to further study the external features of ST (Sen Transformer), the quasi steady-state model of three-phase five-limb ST based on the duality principle is proposed. Firstly, by analyzing the magnetic circuit of the three-phase five-limb ST, the duality principle-based equivalent calculation model considering the eddy current effect of iron-core and the magnetic-circuit coupling effect is established. Then, according to the electrical connection between the three-phase five-limb ST and the external system, the electrical analysis model of the voltage and current of each winding is deduced. Combining the above models, the quasi steady-state model of three-phase five-limb ST with magnetic-circuit coupling is obtained. The proposed model is compared with the existing literature in terms of power flow control, and compared with the MATLAB/Simulink simulation model in terms of fault analysis, both of the results can verify the effectiveness of the proposed model. Besides, the output current unbalance degree of ST with different core structures is compared under unbalanced load conditions, the result shows that the three-phase five-limb ST is more suitable for the unbalanced load conditions.

**Key words:** duality principle; three-phase five-limb Sen transformer; quasi steady-state model; power flow control; models

附录 A

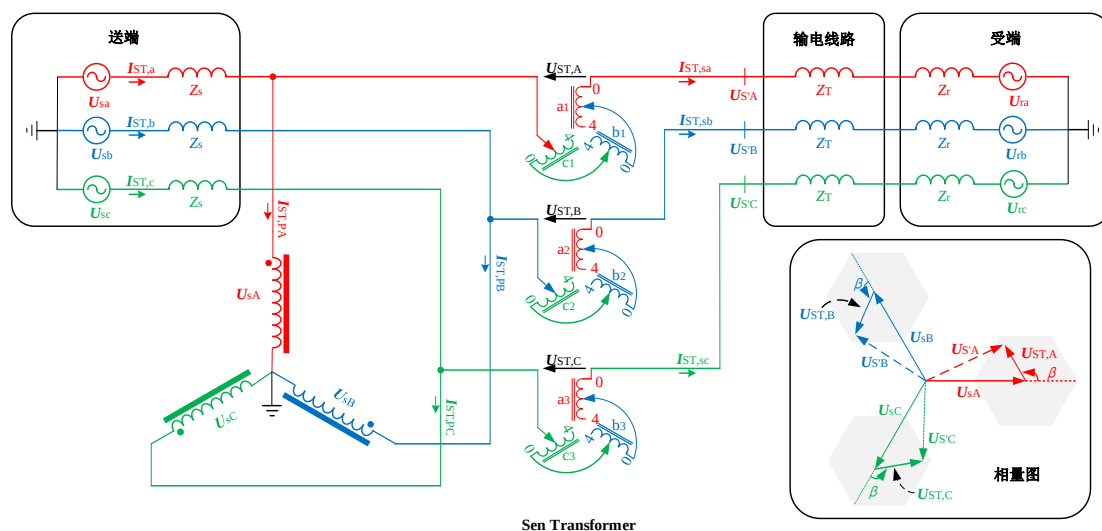


图 A1 ST 电气连接图示意图

Fig.A1 Schematic diagram of ST's interconnection to transmission network



三相五柱式 ST 的等效电路模型如图 A2 所示。图中,  $R_A$ 、 $R_B$ 、 $R_C$  为原边绕组的电阻;  $R_{La1}$ 、 $R_{Lb1}$ 、 $R_{Lc1}$ 、 $R_{La2}$ 、 $R_{Lb2}$ 、 $R_{Lc2}$ 、 $R_{La3}$ 、 $R_{Lb3}$ 、 $R_{Lc3}$  为副边绕组的电阻;  $L_{f12}$ 、 $L_{f23}$ 、 $L_{f34}$  ( $f=a, b, c$ ) 为  $f$  相副边绕组间的漏感;  $L_{d1}$ 、 $L_{d2}$ 、 $L_{q1}$ 、 $L_{q2}$ 、 $L_{a1}$ 、 $L_{b1}$ 、 $L_{c1}$  为铁芯磁通在空气中的漏感;  $N_H$  为原边绕组的匝数;  $N_{La1}$ — $N_{La3}$ 、 $N_{Lb1}$ — $N_{Lb3}$ 、 $N_{Lc1}$ — $N_{Lc3}$  为各相副边绕组的匝数。

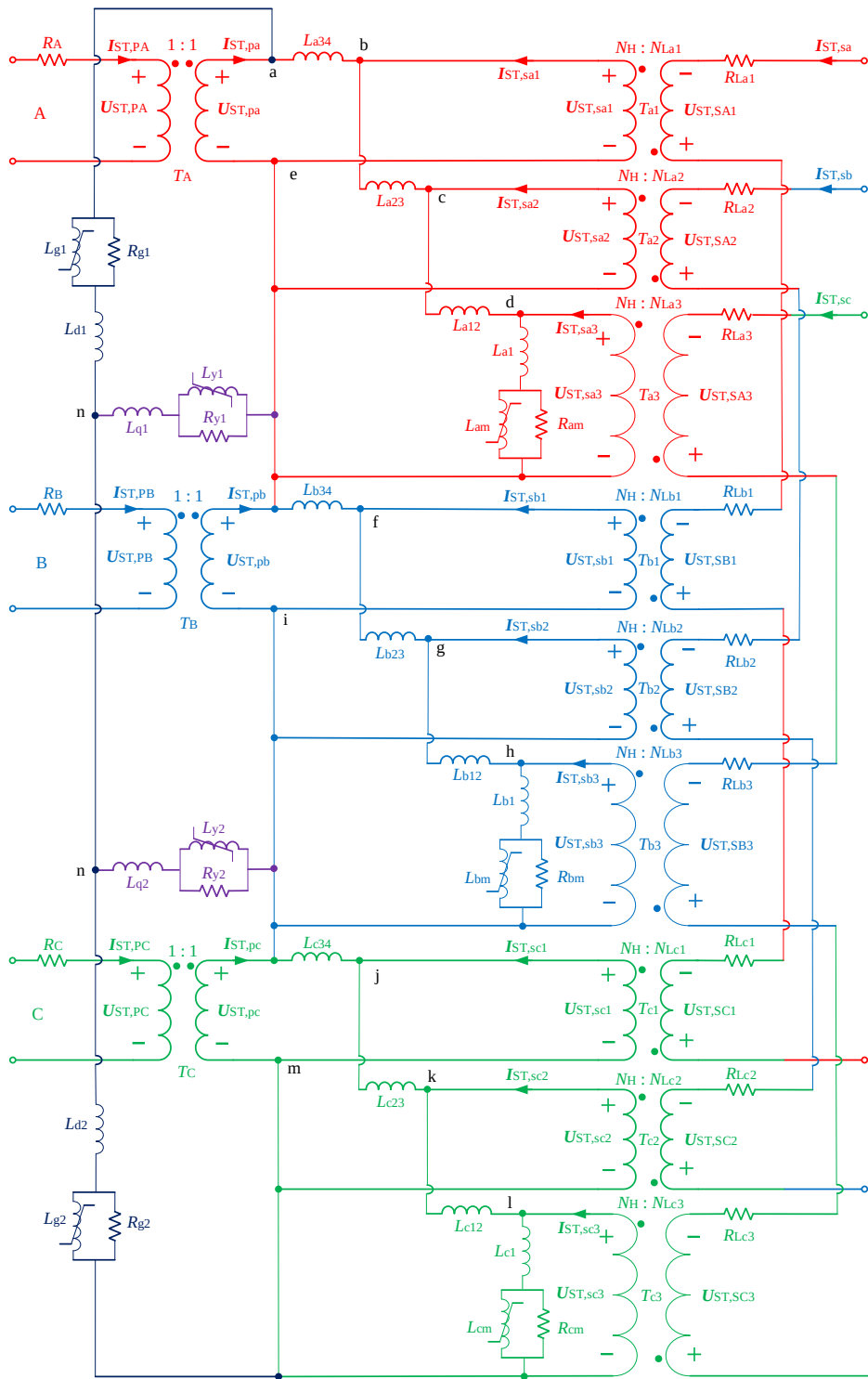


图 A2 三相五柱式 ST 的等效电路模型  
Fig.A2 Equivalent circuit model of three-phase five-limb ST

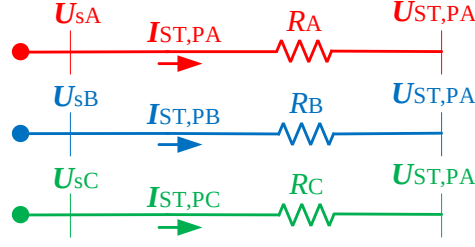


图 A3 三相五柱式 ST 原边侧三相等效电路

Fig.A3 Three-phase equivalent circuit for primary windings of three-phase five-limb ST

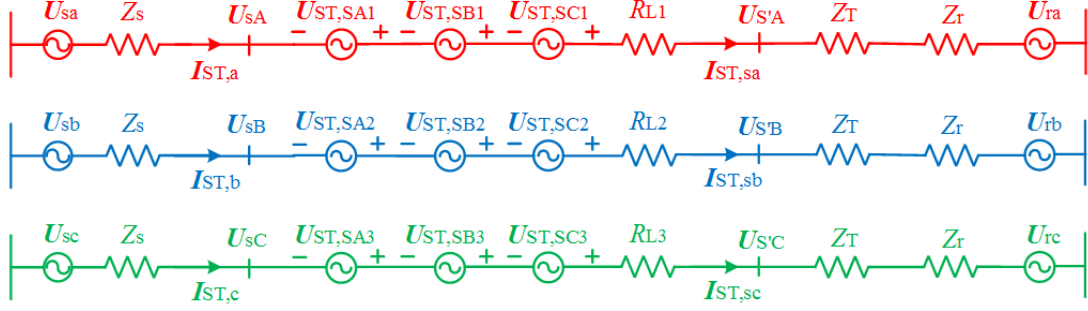


图 A4 三相五柱式 ST 副边侧三相等效电路

Fig.A4 Three-phase equivalent circuit for secondary windings of three-phase five-limb ST

式 (1) 中导纳矩阵的元素如下:

$$y_{1,1} = \frac{1}{j\omega L_{a34}} + \frac{1}{\frac{j\omega R_{g1}L_{g1}}{R_{g1} + j\omega L_{g1}} + j\omega L_{d1}} \quad (A1)$$

$$y_{1,2} = y_{2,1} = -\frac{1}{j\omega L_{a34}}, \quad y_{2,2} = \frac{1}{j\omega L_{a34}} + \frac{1}{j\omega L_{a23}} \quad (A2)$$

$$y_{2,3} = y_{3,2} = -\frac{1}{j\omega L_{a23}}, \quad y_{3,3} = \frac{1}{j\omega L_{a23}} + \frac{1}{j\omega L_{a12}} \quad (A3)$$

$$y_{3,4} = y_{4,3} = -\frac{1}{j\omega L_{a12}}, \quad y_{4,4} = \frac{1}{j\omega L_{a12}} + \frac{1}{\frac{j\omega R_{am}L_{am}}{R_{am} + j\omega L_{am}} + j\omega L_{a1}} \quad (A4)$$

$$y_{4,5} = y_{5,4} = -\frac{1}{\frac{j\omega R_{am}L_{am}}{R_{am} + j\omega L_{am}} + j\omega L_{a1}} \quad (A5)$$

$$y_{5,5} = \frac{1}{j\omega L_{b34}} + \frac{1}{\frac{j\omega R_{y1}L_{y1}}{R_{y1} + j\omega L_{y1}} + j\omega L_{q1}} + \frac{1}{\frac{j\omega R_{am}L_{am}}{R_{am} + j\omega L_{am}} + j\omega L_{a1}} \quad (A6)$$

$$y_{5,6} = y_{6,5} = -\frac{1}{j\omega L_{b34}}, \quad y_{6,6} = \frac{1}{j\omega L_{b23}} + \frac{1}{j\omega L_{b34}} \quad (A7)$$

$$y_{6,7} = y_{7,6} = -\frac{1}{j\omega L_{b23}}, \quad y_{7,7} = \frac{1}{j\omega L_{b23}} + \frac{1}{j\omega L_{b12}} \quad (A8)$$

$$y_{7,8} = y_{8,7} = -\frac{1}{j\omega L_{b12}}, \quad y_{8,8} = \frac{1}{j\omega L_{b12}} + \frac{1}{\frac{j\omega R_{bm}L_{bm}}{R_{bm} + j\omega L_{bm}} + j\omega L_{b1}} \quad (A9)$$

$$y_{8,9} = y_{9,8} = -\frac{1}{\frac{j\omega R_{bm}L_{bm}}{R_{bm} + j\omega L_{bm}} + j\omega L_{b1}} \quad (A10)$$

$$y_{9,9} = \frac{1}{j\omega L_{c34}} + \frac{1}{\frac{j\omega R_{bm}L_{bm}}{R_{bm} + j\omega L_{bm}} + j\omega L_{b1}} + \frac{1}{\frac{j\omega R_{y2}L_{y2}}{R_{y2} + j\omega L_{y2}} + j\omega L_{q2}} \quad (A11)$$

$$y_{9,10} = y_{10,9} = -\frac{1}{j\omega L_{c34}}, \quad y_{10,10} = \frac{1}{j\omega L_{c23}} + \frac{1}{j\omega L_{c34}} \quad (A12)$$

$$y_{10,11} = y_{11,10} = -\frac{1}{j\omega L_{c23}}, \quad y_{11,11} = \frac{1}{j\omega L_{c23}} + \frac{1}{j\omega L_{c12}}, \quad y_{11,12} = y_{12,11} = -\frac{1}{j\omega L_{c12}} \quad (A13)$$

$$y_{12,12} = \frac{1}{j\omega L_{c12}} + \frac{1}{\frac{j\omega R_{cm}L_{cm}}{R_{cm} + j\omega L_{cm}} + j\omega L_{c1}} \quad (A14)$$

$$y_{12,13} = y_{13,12} = -\frac{1}{\frac{j\omega R_{cm}L_{cm}}{R_{cm} + j\omega L_{cm}} + j\omega L_{c1}} \quad (A15)$$

$$y_{13,13} = \frac{1}{\frac{j\omega R_{cm}L_{cm}}{R_{cm} + j\omega L_{cm}} + j\omega L_{c1}} + \frac{1}{\frac{j\omega R_{g2}L_{g2}}{R_{g2} + j\omega L_{g2}} + j\omega L_{d2}} \quad (A16)$$

式(2)中的电流、电压矩阵如下:

$$\begin{cases} \mathbf{I}_{ST,P} = [\mathbf{I}_{ST,PA}, \mathbf{I}_{ST,PB}, \mathbf{I}_{ST,PC}]^T \\ \mathbf{I}_{ST,p} = [\mathbf{I}_{ST,pa}, \mathbf{I}_{ST,pb}, \mathbf{I}_{ST,pc}]^T \\ \mathbf{U}_{ST,P} = [\mathbf{U}_{ST,PA}, \mathbf{U}_{ST,PB}, \mathbf{U}_{ST,PC}]^T \\ \mathbf{U}_{ST,p} = [\mathbf{U}_{ST,pa}, \mathbf{U}_{ST,pb}, \mathbf{U}_{ST,pc}]^T \end{cases} \quad (A17)$$

式(3)中对角矩阵以及电流、电压矩阵如下:

$$\begin{cases} \mathbf{K} = \text{diag}[k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8, k_9] \\ \mathbf{I}_{ST,S} = [\mathbf{I}_{ST,sa}, \mathbf{I}_{ST,sa}, \mathbf{I}_{ST,sa}, \mathbf{I}_{ST,sb}, \mathbf{I}_{ST,sb}, \mathbf{I}_{ST,sb}, \mathbf{I}_{ST,sc}, \\ \quad \mathbf{I}_{ST,sc}, \mathbf{I}_{ST,sc}]^T \\ \mathbf{U}_{ST,S} = [\mathbf{U}_{ST,SA1}, \mathbf{U}_{ST,SB1}, \mathbf{U}_{ST,SC1}, \mathbf{U}_{ST,SA2}, \mathbf{U}_{ST,SB2}, \\ \quad \mathbf{U}_{ST,SC2}, \mathbf{U}_{ST,SA3}, \mathbf{U}_{ST,SB3}, \mathbf{U}_{ST,SC3}]^T \\ \mathbf{U}_{ST,s} = [\mathbf{U}_{ST,sa1}, \mathbf{U}_{ST,sb1}, \mathbf{U}_{ST,sc1}, \mathbf{U}_{ST,sa2}, \mathbf{U}_{ST,sb2}, \mathbf{U}_{ST,sc2}, \\ \quad \mathbf{U}_{ST,sa3}, \mathbf{U}_{ST,sb3}, \mathbf{U}_{ST,sc3}]^T \end{cases} \quad (A18)$$

$$k_1 = \frac{N_{La1}}{N_H}, \quad k_2 = \frac{N_{Lb1}}{N_H}, \quad k_3 = \frac{N_{Lc1}}{N_H}, \quad k_4 = \frac{N_{La2}}{N_H} \quad (A19)$$

$$k_5 = \frac{N_{Lb2}}{N_H}, \quad k_6 = \frac{N_{Lc2}}{N_H}, \quad k_7 = \frac{N_{La3}}{N_H}, \quad k_8 = \frac{N_{Lb3}}{N_H}, \quad k_9 = \frac{N_{Lc3}}{N_H} \quad (A20)$$

## 附录 B

表 B1 电气系统参数

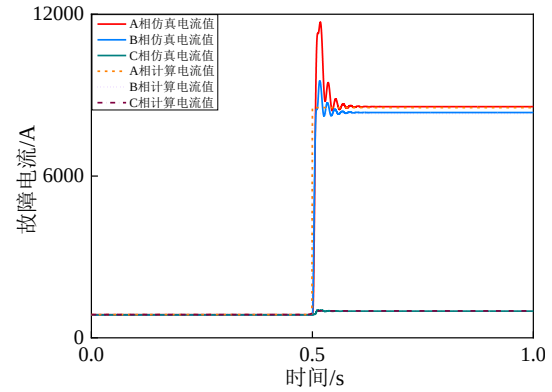
Table B1 Parameters of electrical system

| 系统参数        | 数值                        |
|-------------|---------------------------|
| 基本容量和基本电压   | 160MV · A, 138kV          |
| 送端线电压标么值    | $1 \angle 0^\circ$ p.u.   |
| 受端线电压标么值    | $1 \angle -20^\circ$ p.u. |
| 送端等效电源的串联阻抗 | 1.0053Ω, 19.17 mH         |
| 受端等效电源的串联阻抗 | 0Ω, 0mH                   |
| 输电线路阻抗      | 3.0159Ω, 59.19mH          |

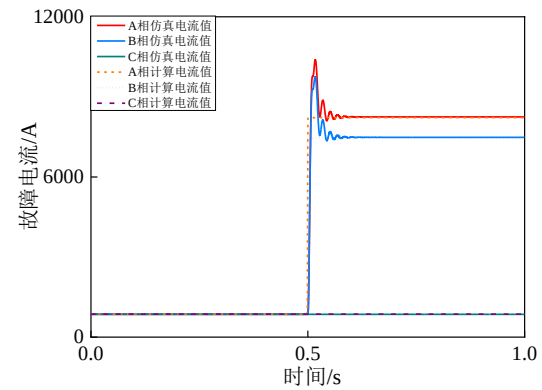
表 B2 三相五柱式 ST 结构参数

Table B2 Structure parameters of three-phase five-limb ST

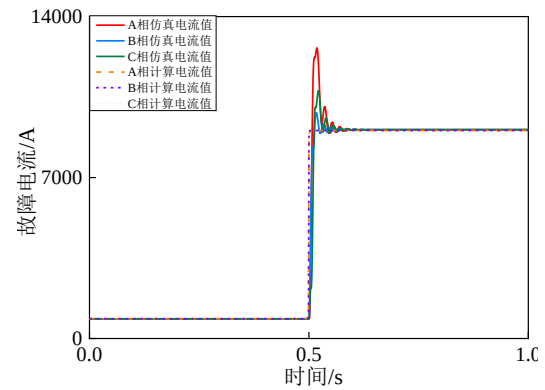
| 系统参数                                                                | 数值                      |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 铁芯/旁柱长度                                                             | 7.18m                   |
| 铁芯/铁轭横截面积                                                           | 0.454m <sup>2</sup>     |
| 铁轭长度                                                                | 2.66m                   |
| 旁轭长度                                                                | 1.33m                   |
| 绕组间的漏感 $L_{f12}/L_{f23}/L_{f34}$<br>( $f=a, b, c$ )                 | 1.1019/0.8629/0.6785mH  |
| 空气中的漏感 $L_{d1}, L_{d2}/L_{q1},$<br>$L_{q2}/L_{a1}, L_{b1}, L_{c1}$  | 32.2/95.26/3.136mH      |
| 饱和电感 $L_{am}, L_{bm}, L_{cm}/L_{y1},$<br>$L_{y2}/L_{g1}, L_{g2}$    | 81.92/40.96/122.88 H    |
| 铁芯损耗的电阻 $R_{am}, R_{bm},$<br>$R_{cm}/R_{y1}, R_{y2}/R_{g1}, R_{g2}$ | 245.76/122.88/368.64 kΩ |
| ST 的电阻和电抗                                                           | 1.7854Ω, 47.4mH         |
| ST 原边/副边匝数                                                          | 64/26                   |
| ST 分接头数                                                             | 4                       |
| ST 分接头调压档位/步长                                                       | 0.1p.u.                 |
| ST 分接头最高档位                                                          | 0.4p.u.                 |
| 分接头动作时间/档                                                           | 1s/step                 |



(a) AB 相接地短路



(b) AB 相间短路



(c) ABC 相间短路

图 B1 不同短路故障下短路电流的计算值与仿真值

Fig.B1 Simulative and calculative value of short circuit current under different short circuit faults