

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.09.021

典型外部故障下晶闸管控制移相器绕组电磁力分布特性

蔡祥¹, 姚永乐¹, 李群², 陈实², 王同磊², 庞磊¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049; 2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 211103)

摘要: 晶闸管控制移相器磁路耦合复杂, 系统故障时电磁力冲击是威胁移相器绕组可靠性的关键因素。文中在移相器绕组典型外部故障时电磁暂态特性分析基础上, 建立移相器绕组电磁力计算模型, 研究了故障下移相器漏磁场和电磁力分布特性, 分析了并联变压器档位和绕组排布顺序对电磁力分布特性的影响。结果表明: 对于串联变压器, 在并联变压器网侧单相接地故障下辐向和轴向电磁力最大值分别出现在绕组约1/5和1/2处, 分别达到587.8 kN和994.8 kN, 在外部线路单相接地故障下辐向和轴向电磁力最大值分别出现在绕组约1/2处和端部, 分别达到441.5 kN和938.9 kN, 电磁力在故障发生后数个周期内保持较大值, 并与电流保持同步衰减; 对于并联变压器, 两种故障工况下电磁力分布类似, 辐向和轴向电磁力最大值分别出现在绕组1/3~1/2处和绕组端部, 电磁力在故障发生后集中分布在第一个周期; 移相器档位变化与并联变压器绕组顺序不同均会改变漏磁场分布, 进而影响电磁力, 档位变化可导致电磁力最大值相差达14 kN, 而优化绕组排列顺序可使电磁力合力最大值降幅接近50%。文中研究成果为移相器结构优化提供了参考, 对工程应用具有重要指导意义。

关键词: 晶闸管控制移相器; 典型故障; 电磁力分布; 有限元法

Distribution Characteristics of Electromagnetic Forces in Windings of Thyristor-controlled Phase Shifters Under Typical Fault Conditions

CAI Xiang¹, YAO Yongle¹, LI Qun², CHEN Shi², WANG Tonglei², PANG Lei¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: The thyristor-controlled phase shifter exhibits complex magnetic circuit coupling and, in case of system fault, the electromagnetic force impulse poses a major threat to the reliability of its windings. Based on the electromagnetic transient characteristics analysis of the phase shifter windings under typical external faults, in this paper an electromagnetic force calculation model for the phase shifter windings is established, the leakage magnetic field and electromagnetic force distribution characteristics of the phase shifter under fault conditions is investigated, and the effects of the parallel transformer tap position and winding arrangement sequence on the electromagnetic force distribution characteristics are analyzed. The results show that for the series transformer, under the grid-side single-phase grounding fault of the parallel transformer, the maximum radial and axial electromagnetic forces appear at about 1/5 and 1/2 of the winding, reaching 587.8 kN and 994.8 kN respectively. In case of single-phase grounding fault on the external line, the maximum radial and axial electromagnetic forces appear at about 1/2 of the winding and the end of the winding, reaching 441.5 kN and 938.9 kN respectively. The electromagnetic forces maintain a large value within several cycles after the fault occurrence and decay synchronously with the current. For the parallel transformer, the electromagnetic force distribution is similar under the two fault conditions. The maximum values of the radial and axial electromagnetic forces appear at 1/3~1/2 of the winding and the end of the winding, respectively. The electromag-

收稿日期: 2026-04-08; 修回日期: 2026-06-20

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(5500-202318115A-1-1-ZN)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China Headquarters(5500-202318115A-1-1-ZN).

netic force is concentrated in the first cycle after the occurrence of fault. Variations in the phase shifter's tap position and differences in the winding sequence of the parallel transformer both alter the leakage magnetic field distribution, thereby affecting the electromagnetic forces. Change in the tap position can result in a maximum electromagnetic force difference of up to 14 kN, while optimizing the winding arrangement sequence can reduce the maximum electromagnetic force by nearly 50%. The research in this paper provides a reference for optimizing phase shifter structures and has important guiding significance for engineering applications.

Key words: thyristor controlled phase shifters; typical faults; electromagnetic force distribution; finite element method

0 引言

随着中国的经济发展和新型电力系统的不断建设,大规模分布式能源接入电网,电网的复杂度增加,随机特征愈加明显,潮流变动大且难以控制。移相器作为一种控制输电潮流的有效手段,可实现合理分配线路输送功率、提高输电通道效率、降低输电成本等功能。晶闸管控制移相器(thyristor-controlled phase shifters)利用晶闸管串并联组合代替传统机械式分接开关,增加了相角偏移度,使得能更加灵活地控制电力潮流的分布,实现电力在不同输电线路间的合理分配^[1-3]。

晶闸管控制移相器结构包括串联变压器,并联变压器和晶闸管控制装置。并联变压器从线路中获取电压,经晶闸管控制装置转换为所需电压向量,由串联变压器注入到线路中改善潮流^[4-8]。变压器绕组是电能转换与传输的核心,其运行状态直接影响移相器的性能与可靠性。绕组运行中承受着电磁力作用,发生短路故障时,短路电流骤增至正常电流的数倍乃至数十倍,漏磁场分布也显著变化,二者共同产生的强电磁力可能导致绕组位移、变形甚至损坏,不仅造成局部供电中断,更严重威胁电力系统的稳定性与可靠性^[7]。对于移相器而言,故障产生时串联变压器和并联变压器电磁场的互相耦合使得电磁力分析更为复杂。晶闸管式移相器通过控制晶闸管开断,调节电流流向,组合出不同的电压档位,最终形成所需的电压向量,因此电磁场分布存在差异。综上所述,对晶闸管式移相器绕组电磁力进行仿真计算,深入研究移相器绕组在典型故障下的电磁力分布特性,分析电压档位、绕组顺序对于优化移相器设计、加强其绕组支撑结构,提高移相器运行可靠性,保障电力系统安全稳定运行具有重要意义^[9]。

目前已有学者对晶闸管移相器的研究多集中在参数设计与稳态特性^[10-14]、潮流控制策略^[11, 15]、暂态稳定性^[14, 16-19]等方面,文[15]对一种混合 TCPST 拓

扑模式切换过程中可能出现的绕组短路电流机理进行了分析,提出对应抗绕组短路电流冲击驱动策略并加以验证,通过潮流控制策略提高了 TCPST 稳定性。在晶闸管移相器变压器绕组的优化方面研究较少,针对绕组电磁力的研究也主要集中在电力变压器上。文[18]采用耦合机电有限元法分析了单相变压器短路下暂态电流产生的磁矢势、磁通密度,计算了变压器模型轴向和径向电磁力,并验证了该方法计算的准确性。文[19]采用“电磁-结构”耦合仿真分析了 110 kV 双绕组变压器在多次短路电流下的绕组累计形变。文[20]针对油浸式移相整流变压器复杂的绕组结构,利用有限元场一路方法建立三维漏磁场模型,分析了各种运行工况下变压器的电流分布规律,但对绕组电磁力没有关注。文[18-20]均采用有限元法分析了单个变压器在故障下磁场的分布,但晶闸管移相器包括串并联两个变压器,在短路故障时磁场相互耦合,使得电磁力分析更加复杂。

为研究典型故障下双芯对称离散型晶闸管控制移相器(TCSD-TCPST)绕组电磁力分布特性,文中提出了基于有限元的移相器绕组电磁力仿真计算方法,搭建了变压器电磁暂态仿真模型,在仿真结果基础上分析了移相器漏磁场及电磁力分布特性,并分析了电压档位和绕组顺序对电磁力分布特性的影响。

1 移相器绕组电磁力计算模型的建立

移相器通常由并联变压器与串联变压器两部分构成。在运用场路耦合方法进行研究时,需将两台变压器置于同一模型之中。为获取故障下相对准确的绕组电流,电路中还需体现所在线路参数等细节,这无疑会大幅增加模型的复杂度与计算量。因此文中考虑先构建电磁暂态仿真模型,以此计算典型故障下流经串并联变压器绕组的电流以及绕组两端电压。将计算所得的故障电流和电压作为激励,分别施加于并联变压器与串联变压器的线圈

上,进而分别建立两台变压器在故障冲击作用下的电磁力计算模型。

1.1 移相器典型故障下电磁暂态模型

根据相关单位提供的BPA潮流计算数据文件,以南京大胜关线路为例,首先根据相关线路等值模型参数搭建系统接线,见图1。

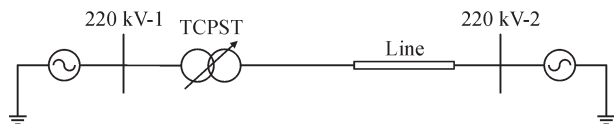


图1 系统接线图

Fig. 1 System wiring diagram

相较于传统电力设备,晶闸管控制移相器因其包含串联变压器、并联变压器以及晶闸管阀,故而系统结构更为复杂,设备类型更为多样。依据故障点的位置,晶闸管控制移相器可能发生的故障可划分为内部故障与外部故障。晶闸管控制移相器的典型故障点见图2,图2中 F_3 属于内部故障,其余故障属于外部故障。由于并联变压器的阀侧匝数比较大,因此相比于 F_1 处的故障, F_2 处同类型的故障产生的故障电流和过电压更为严重,对于 F_3 处晶闸管阀故障,过电流导致的晶闸管损坏使其处于短路状态最为常见,其产生的故障电流和过电压小于网侧同类型故障。对于 F_5 处母线发生故障以及 F_4 处线路发生故障,二者对于移相器设备危害接近,但线路故障发生概率明显超出母线发生故障的概率^[21-26]。综上所述,文中关注并联变压器网侧接地故障 F_2 和交流线路单相接地故障 F_4 两种典型外部故障。

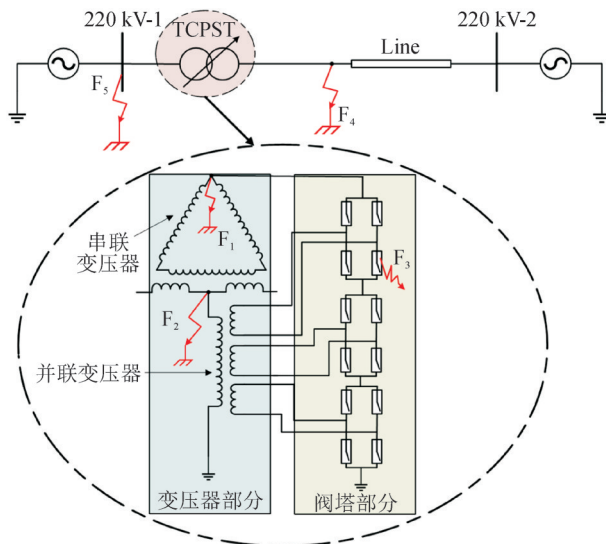


图2 晶闸管控制移相器典型故障点示意图

Fig. 2 Typical fault points of thyristor controlled phase shifter schematic diagrams

基于上述模型,文中采用电力系统电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC平台搭建晶闸管式移相器仿真模型,见图3,计算并联变压器网侧接地故障和交流线路单相接地故障下流经移相器串联变压器和并联变压器绕组的故障电流和绕组两端的电压。

1.2 变压器电磁力计算模型建立

变压器绕组所承受的短路电磁力,主要源于绕组短路电流与绕组所处漏磁场分布之间的相互作用。计算变压器绕组承受的短路电磁力,首要工作是对变压器的磁场分布进行计算。电力系统中与电磁场相关的计算问题本质可归结为在给定边界条件下对麦克斯韦方程组的求解,该问题属于似稳电磁场的范畴,因此将求解该磁场分布问题转化为泊松边值求解问题。

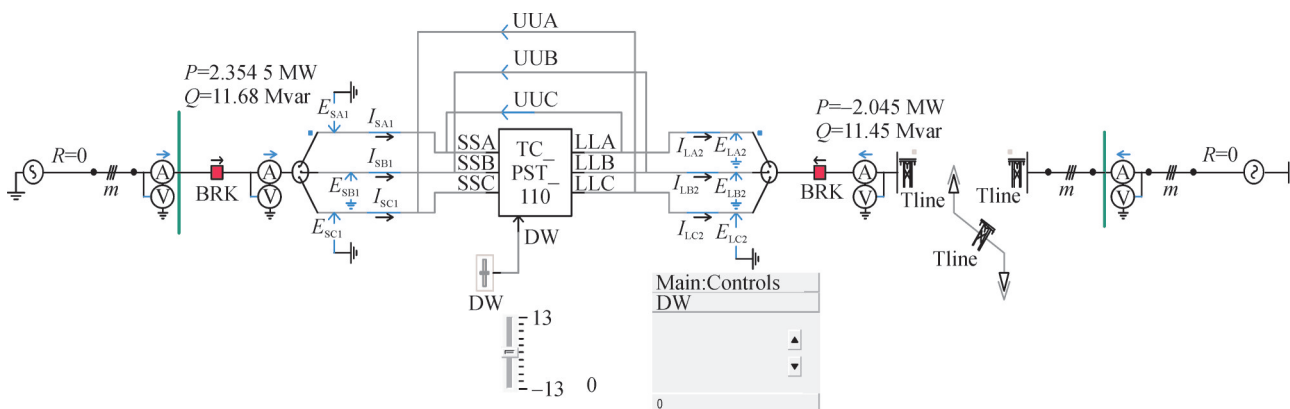


图3 PSCAD电磁暂态仿真模型

Fig. 3 PSCAD electromagnetic transient simulation model

文中采用有限元法计算求解泊松边值问题对应偏微分方程,借助多物理场仿真软件Comsol将电磁暂态模型计算所得的故障电流与电压作为激励

分别施加于两个变压器线圈,计算在故障冲击作用下的瞬态漏磁场分布,根据所获取的漏磁场分布情况,研究典型故障冲击下移相器绕组所受电磁力的

时空分布特性。

变压器绕组整体呈现圆柱壳体形状,由若干个沿轴向排列的圆环形线饼构成。在不考虑细观结构的情况下,绕组可等效为多个内外半径相同且沿轴向均匀排列的圆柱壳体,其结构见图4。



图4 变压器绕组示意图

Fig. 4 Schematic diagram of transformer winding

移相器中的串联变压器铁心采用三相三柱式结构,并联变压器铁心采用三相五柱结构,结构见图5。铁心由硅钢片叠积而成,在不考虑涡流损耗时,叠积效应可忽略不计。铁心柱可近似看作圆柱体,旁轭近似为椭圆柱体,变压器铁轭则近似为长方体结构。移相器的结构参数见表1。绕组等效为多个圆柱壳体,数量与线饼层数保持一致。

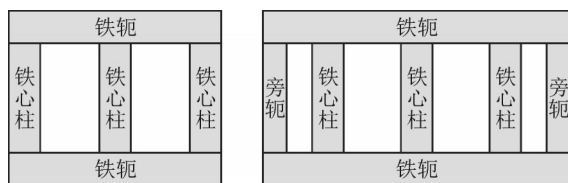


图5 变压器铁心结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of transformer core structure

表1 移相器结构参数

Table 1 Structural parameters of phase shifter

结构参数	串联变压器	并联变压器
网侧(阀侧)匝数	84×2(263)	657(8/24/72)
网侧(阀侧)线圈高度/mm	1 530(1 530)	1 560(1 600, 电抗高度 1 488)
网侧(阀侧)内外径/mm	674.5/809.0	760.5/847.0
网侧(阀侧)层间距/mm	4(4.0)	4(3.5)
网侧(阀侧)线饼层数	84(53)	51(8/24/72)
铁心柱直径/mm	725	875
柱间距/mm	1 745	心—柱 1 820 心柱—旁轭 1 160
铁窗高/mm	1 920	1 865
铁轭高度/mm	710	450
旁轭尺寸/mm	—	短轴 400 长轴 875

对于串联变压器,网侧绕组 B_1 和 B_2 在外侧,阀

侧 B_3 绕组在内侧;对于并联变压器,网侧绕组 E_1 在外侧,阀侧绕组在内侧,分为 E_2 、 E_3 、 E_4 ,自上而下匝数比为1:3:9,绕组二维示意图见图6。

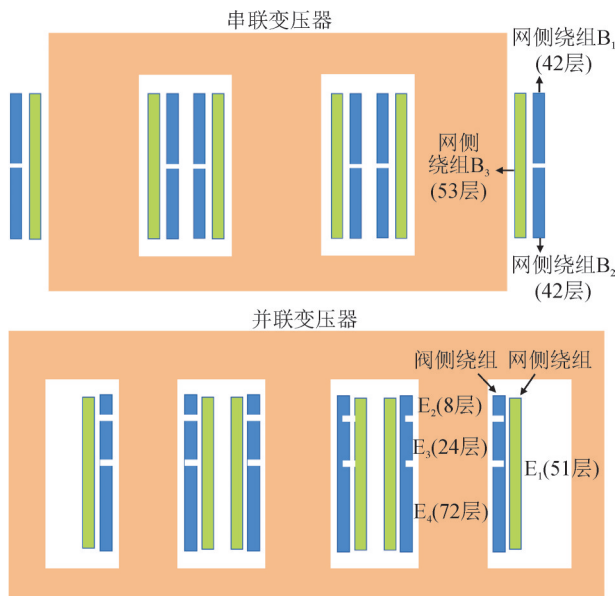


图6 变压器绕组二维示意图

Fig. 6 Two-dimensional diagram of transformer winding

材料主要参数设定上,变压器油和绕组相对磁导率设置为1,电导率分别设置为0 S/m(仿真提高收敛性可以设置非零比如0.1 S/m)和 6×10^7 S/m,铁心硅钢片材料为宝钢取向硅钢 B23P095,根据由厂家提供的硅钢片 $B-H$ 曲线设置, B 为磁感应强度, H 为磁场强度,见图7。

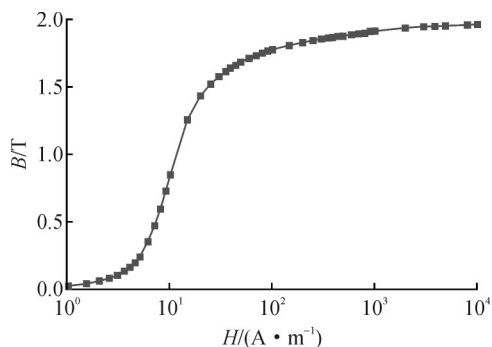


图7 B23P095取向硅钢 $B-H$ 曲线

Fig. 7 $B-H$ curve of B23P095 oriented silicon steel

为了绘制变压器中漏磁场的分布,需要选取变压器所在空间中某一轴向路径进行研究,见图8。轴向路径方向自上而下, X 轴方向平行于铁心窗, Y 轴方向垂直于铁心窗, Z 轴方向是绕组轴向高度方向。因为存在铁轭和其他绕组的影响,铁心窗内的漏磁通要大于窗外,所以将铁心窗内侧(XZ 平面)作为网侧、阀侧绕组的轴向路径。文中主要考虑漏磁通辐向磁感应强度的径向分量 B_r 和轴向磁感应强度分量 B_z ,进而得到变压器绕组故障电流最大所在

相的漏磁场分布。

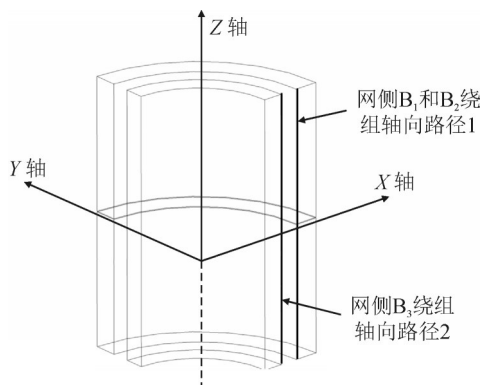


图8 漏磁场绘制路径所在空间位置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the spatial location of the leakage magnetic field mapping path

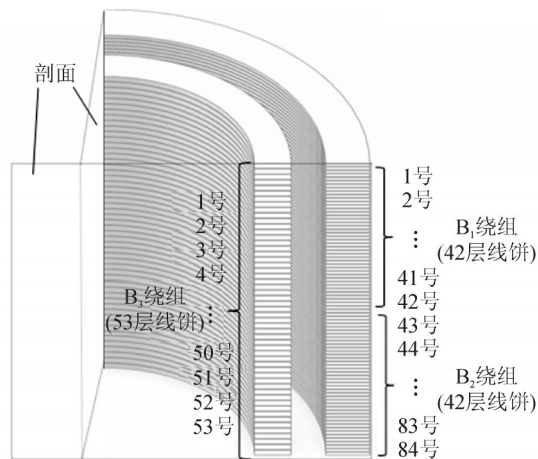
将PSCAD电磁暂态仿真获得的故障电流和电压作为激励施加到绕组线圈上,鉴于系统两端供电条件下,正负档位的故障电流几乎对称,因此文中考虑正档位情况,即故障电压电流选择从1至13档。对于串联变压器而言,档位对故障电流影响不大,对于并联变压器,不同的档位影响阀侧绕组组合进而影响漏磁场,文中首先以典型档位13档进行研究,最后研究档位变化对并联变压器绕组电磁力分布的影响。

串联变压器和并联变压器网侧和阀侧绕组根据绕组层数划分为不同线饼。从绕组顶端至绕组底端,对绕组的线饼进行编号,如图9所示串联变网侧B₁绕组编号为1-42号,网侧B₂绕组为43-84号,阀侧绕组编号为1-53号,并联变网侧E₁绕组编号为1-51号,并联变阀侧绕组E₂/E₃/E₄分别为1-8号,9-32号,33-104号。辐向力由内向外记为正方向,轴向力由下至上记为正方向。根据洛伦兹力公式,单层线饼的径向电磁力通过每个线饼单元的轴向漏磁通分量和瞬态电流密度进行计算,轴向电磁力通过每个线饼单元的辐向漏磁通的径向分量和瞬态电流密度进行计算,即可得到时间—线饼号—径向电磁力/轴向电磁力的分布规律图。

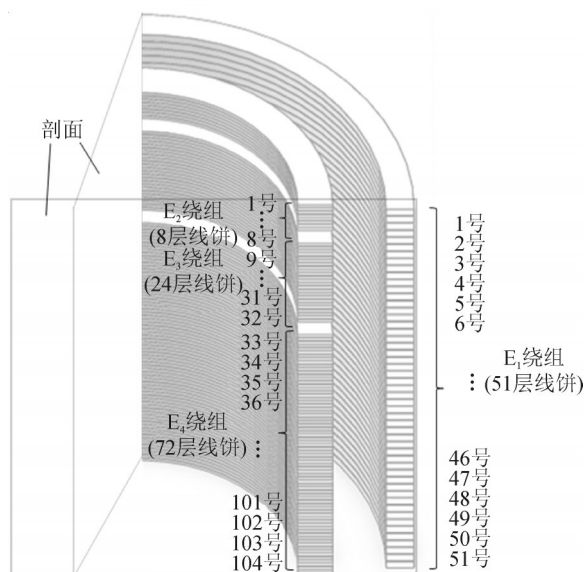
2 移相器漏磁场及电磁力分布特性

2.1 理论分析

漏磁场可以分为轴向B_x与辐向B_y'两个分量,轴向漏磁通产生辐向电磁力F_x,辐向漏磁通产生轴向电磁力F_y。当绕组线圈内存在分接,使得沿轴向高度上安匝不平衡时,还会出现另一辐向漏磁分量B_y''。漏磁场和电磁力分布见图10。



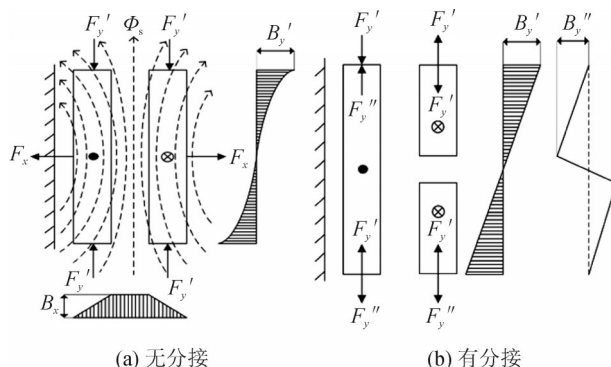
(a) 串联变压器绕组编号



(b) 并联变压器绕组编号

图9 绕组编号示意图

Fig. 9 Winding numbering diagram



(a) 无分接

(b) 有分接

图10 变压器绕组漏磁场和电磁力分布

Fig. 10 Distribution of leakage field and electromagnetic force in transformer windings

以并联变网侧单相接地故障为例,由于串联变压器绕组在网侧存在分接,且并联变压器网侧单相接地故障时网侧B₁和B₂绕组电流方向相反,因此可以大致绘制出绕组辐向漏磁场和轴向漏磁场见图11(a);由于并联变压器阀侧存在3个绕组,相当于2个

分接头,当电压为13档时3个绕组电流相等方向一致,则可以大致绘制出绕组辐向漏磁场和轴向漏磁场见图11(b)。根据绘制出的磁场分布可以定性判断:串联变压器的中部辐向漏磁场较大,而并联变压器两端辐向漏磁场较大,则对应位置的轴向电磁力较大;串联变压器1/4和3/4处轴向漏磁场较大,而并联变压器中部轴向漏磁场较大,则对应位置的辐向电磁力较大。

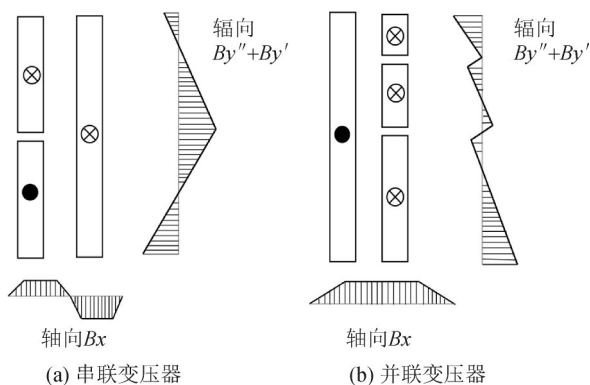


图11 绕组漏磁场分布

Fig. 11 Windings leakage field distribution

2.2 漏磁场分布特性

1)并联变压器网侧单相接地故障下,固定档位选择13档,串联变压器和并联变压器绕组漏磁场计算结果如下。

串联变压器的辐向漏磁场表现出两端方向相反且近似轴对称的特性,见图12。整体的磁感应强度值从两端向中间逐渐减小,随后又逐渐增大,其中最大值出现在绕组的中点位置。在网侧轴向路径1上,磁感应强度的最大值达到3.04 T,而在阀侧轴向路径2上,最大值则为1.74 T。

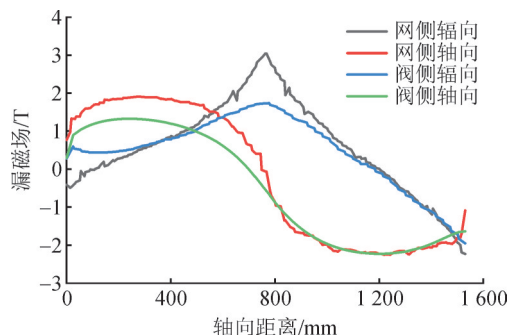


图12 不同轴向路径上的串联变压器漏磁场分布

Fig. 12 Leakage field distribution of series transformer on different coaxial paths

轴向漏磁场在网侧 B_1 和 B_2 绕组中的分布也呈现出近似轴对称的特点。网侧轴向路径1上轴向漏磁场的最大值出现在整个网侧绕组约1/5处,最大值为2.25 T。在阀侧绕组 B_3 中,轴向漏磁场的分布与网侧 B_2 绕组类似,阀侧轴向路径2上最大值为

2.23 T。

如图13所示,并联变压器网侧轴向路径1上的辐向漏磁场表现出中心对称的分布特点,最大值在绕组靠近接地的端部区域,高达0.18 T。而在阀侧轴向路径2上,辐向漏磁场的最大值为0.13 T,且最大值出现在绕组高压端的端部。特别地,在 E_2 、 E_3 、 E_4 绕组端部临近的地方,漏磁场的剧烈变化主要是由绕组中的安匝不平衡引起的。安匝不平衡是指绕组中电流分布的不均匀性,这种不均匀性会导致磁场分布的不均匀,进而在特定区域产生较高的磁感应强度。

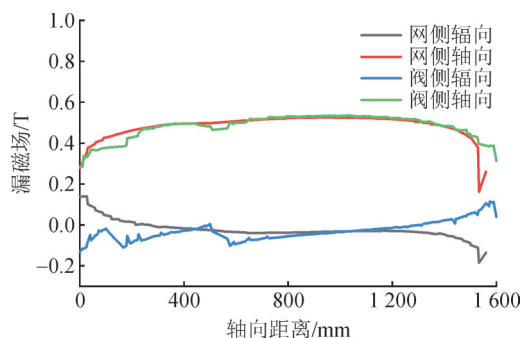


图13 不同轴向路径上的并联变压器漏磁场分布

Fig. 13 Leakage field distribution of parallel transformer on different coaxial paths

对于轴向漏磁场,网侧轴向路径1和阀侧轴向路径2上的分布表现出高度的相似性,都呈现近似轴对称的分布特点,表明轴向漏磁场在绕组靠近中心区域达最大(绕组1/3~1/2处),最大值分别约为0.52 T和0.53 T。

2)外部线路单相接地故障下,固定档位选择13档,串联变压器和并联变压器绕组漏磁场计算结果如下。

如图14所示,串联变压器的辐向漏磁场表现出两端方向相反且近中心对称的特点。磁感应强度值从两端向中间逐渐减小,最大值出现在绕组的端部位置。在网侧轴向路径1上,磁感应强度的最大值达到0.60 T,而在阀侧轴向路径2上,最大值则为1.46 T。轴向漏磁场在网侧绕组和阀侧绕组中的分布均呈现出近似轴对称的特点,最大值出现在绕组1/2处,其中网侧轴向路径1上的最大值为2.87 T,而阀侧轴向路径2上的最大值为1.91 T。

如图15所示,并联变压器的漏磁场分布特点与并联变压器网侧单相接地故障类似。网侧轴向路径1上的辐向漏磁场表现出中心对称的分布特点,最大值达到0.32 T,主要出现在绕组靠近接地的端部区域,而在阀侧轴向路径2上,辐向漏磁场的最大值为0.16 T,主要出现在绕组高压端的端部。对于轴

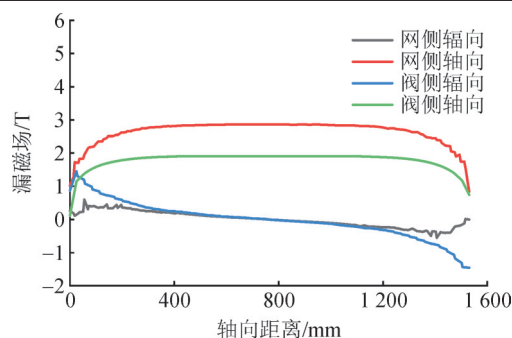


图 14 不同轴向路径上的串联变压器漏磁场分布

Fig. 14 Leakage field distribution of series transformer on different coaxial paths

向漏磁场,网侧轴向路径1和阀侧轴向路径2上的分布近似轴对称,轴向漏磁场在绕组靠近中心区域达最大,最大值分别为0.73 T和0.74 T。

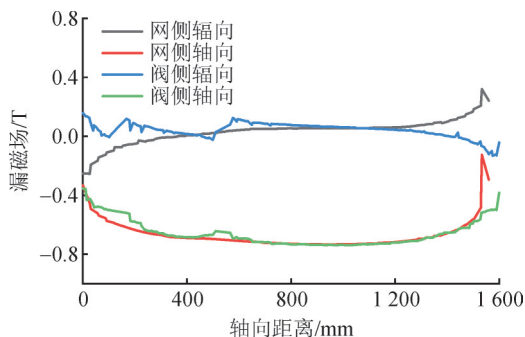


图 15 不同轴向路径上的并联变压器漏磁场分布

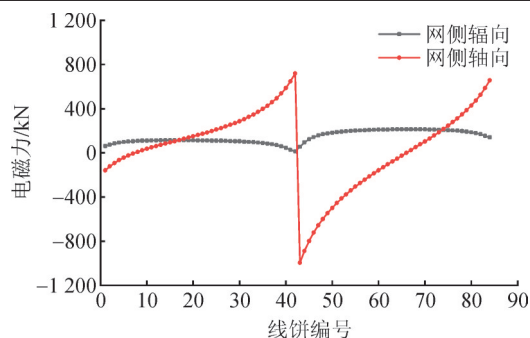
Fig. 15 Leakage field distribution of parallel transformer on different coaxial paths

2.3 电磁力时空分布特性

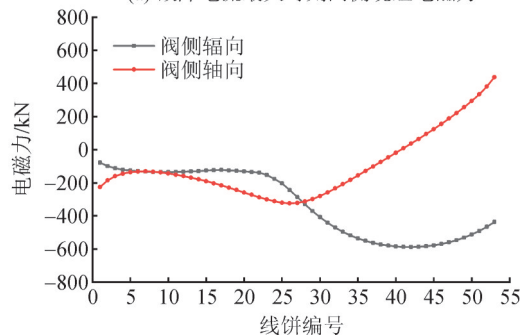
在分别发生并联变压器网侧单相接地故障和外部线路单相接地故障时,固定档位选择13档,则串联变压器和并联变压器绕组电磁力计算结果如下。

2.3.1 电磁力空间分布特性

1)并联变压器网侧单相接地故障下。串联变压器电磁力仿真结果见图16。辐向电磁力的最大值出现在绕组的大约1/5处,与轴向漏磁场的最大值位置相吻合。对于网侧绕组,辐向电磁力始终为正方向,最大值达到212.3 kN,出现在B₂绕组的67号线饼处。对于阀侧绕组,辐向电磁力则始终为负方向,其最大值达587.8 kN,出现在42号线饼处。轴向电磁力的最大值则位于绕组大约1/2处,与辐向漏磁场的最大值位置一致。在网侧绕组中,1-7号和43-66号线饼的轴向电磁力方向为负,而8-42号和67-84号线饼的轴向电磁力方向为正,最大值达到994.8 kN,出现在B₂绕组的43号线饼。阀侧绕组中,1-40号线饼的轴向电磁力方向为负,而41-53号线饼的轴向电磁力方向为正,最大值为323.9 kN,出现在26号线饼处。



(a) 故障电流最大时刻网侧绕组电磁力



(b) 故障电流最大时刻阀侧绕组电磁力

图 16 串联变压器电磁力空间分布

Fig. 16 Spatial distribution of electromagnetic force in series transformer

如图17所示,并联变压器网侧绕组辐向电磁力始终为正方向,在32号线饼有最大值15.3 kN,阀侧绕组辐向电磁力始终为负方向,在59号线饼有最大值为5.8 kN;网侧组轴向电磁力在51号线饼有最大值7.4 kN,且1-7号线饼轴向电磁力为负方向,8-51号线饼轴向电磁力为正方向,阀侧绕组轴向电磁力104号线饼有最大值5.1 kN,且1-31号和33-72号线饼轴向电磁力为负方向,32、73-104号线饼轴向电磁力为正方向。

上述计算结果看出,串联变压器网侧绕组轴向电磁力非常大,分析原因:一方面因为串联变压器部分串联于线路中,一旦串联变压器网侧B₁和B₂绕组之间的并联变压器网侧发生接地时,线路上的短路电流就会穿越串联变压器串联绕组,该方式下串联绕组承受的短路电流比常规变压器短路电流大得多,位于连接线路受端的B₂绕组短路电流值最大几乎达到40 kA;另一方面是因为在发生故障时网侧B₁、B₂绕组电流方向是相反的,且大小相差较大,导致网侧绕组安匝不平衡,使得辐向漏磁场增大。

2)外部线路单相接地故障下。串联变压器电磁力仿真结果见图18。辐向电磁力的最大值出现在绕组的大约1/2处,与轴向漏磁场的最大值位置相吻合。网侧绕组辐向电磁力始终为正方向,在绕组的42号线饼处有最大值241.6 kN,阀侧绕组辐向电磁力始终为负方向,在绕组的27号线饼处有最大值

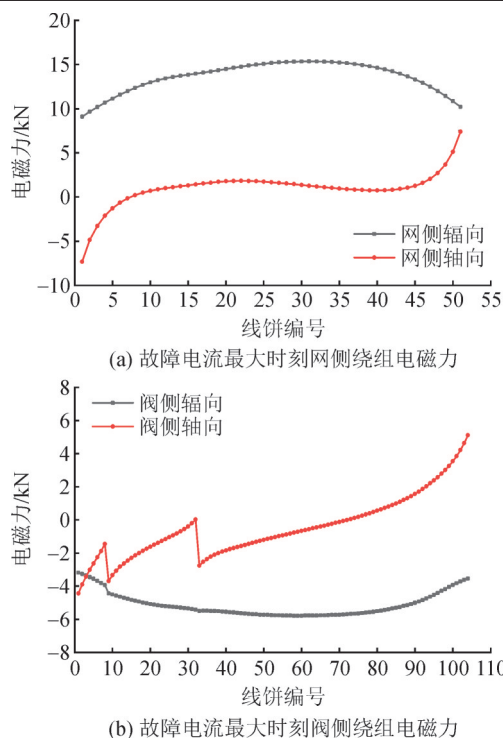


图 17 并联变压器电磁力空间分布

Fig. 17 Spatial distribution of electromagnetic force in parallel transformer

441.5 kN。轴向电磁力的最大值则位于绕组端部,与辐向漏磁场的最大值位置一致。在网侧绕组中,轴向电磁力最大值在 84 号线饼处达到 61.6 kN。阀侧绕组中,轴向电磁力最大值在 53 号线饼处达到 938.9 kN。

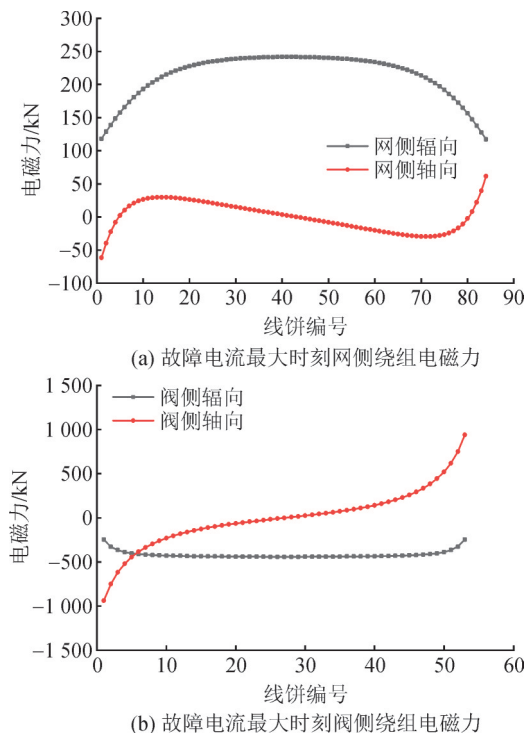


图 18 串联变压器电磁力空间分布

Fig. 18 Spatial distribution of electromagnetic force in series transformer

并联变压器电磁力仿真结果见图 19。网侧绕组辐向电磁力始终为正方向,在 32 号线饼有最大值 15.4 kN,阀侧绕组辐向电磁力始终为负方向,在 59 号线饼有最大值 5.8 kN;网侧绕组轴向电磁力最大值在 51 号线饼处达到 7.4 kN,且 1-7 号线饼轴向电磁力为负方向,8-51 号线饼轴向电磁力为正方向,而阀侧绕组轴向电磁力最大值在 104 号线饼处达到 5.1 kN,且 1-31、33-72 号线饼轴向电磁力为负方向,32、73-104 号线饼轴向电磁力为正方向。

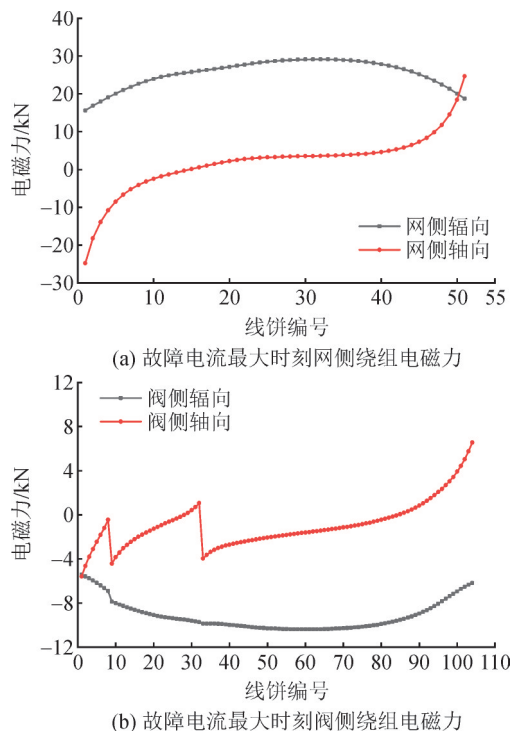


图 19 并联变压器电磁力空间分布

Fig. 19 Spatial distribution of electromagnetic force in parallel transformer

2.3.2 电磁力时域分布特性

在变压器结构参数固定情况下,电磁力的时域分布主要取决于故障电流的时域特征,文中以并联变压器网侧单相接地故障工况为代表进行研究,外部线路单相接地故障工况下结果与之类似,故不进行赘述。

串联变压器和并联变压器轴向/辐向电磁力在时域上的分布分别见图 20、21。对于串联变压器,绕组电磁力在故障发生后数个周期内保持较大的值,并与电流保持同步衰减,而并联变压器电磁力集中分布在故障发生后第一个周期内;串联变压器网侧轴向电磁力最大值始终为负,阀侧轴向电磁力最大值始终为负,辐向电磁力则相反;并联变压器网侧轴向和辐向电磁力最大值始终为正,阀侧辐向电磁力最大值始终为负,阀侧轴向电磁力最大值始终为正。

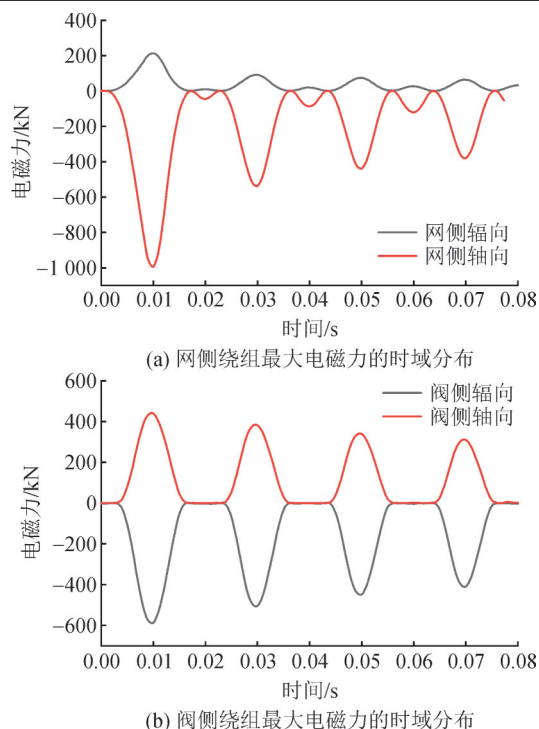


图 20 串联变压器电磁力时域分布

Fig. 20 The time domain distribution of electromagnetic force in series transformers

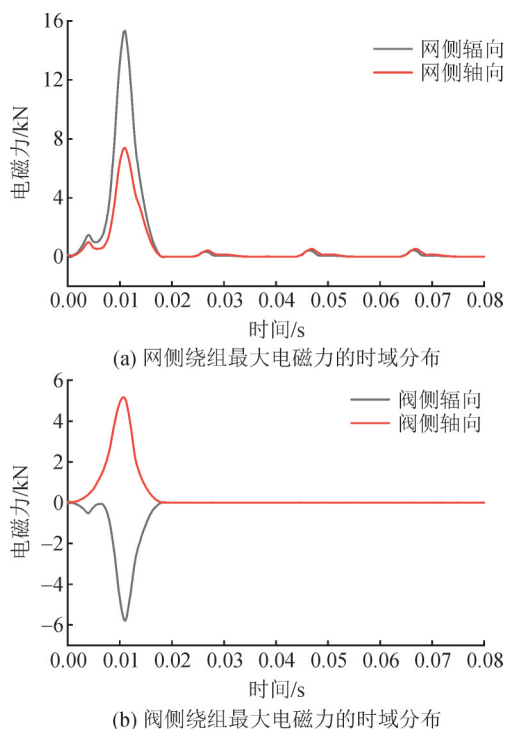


图 21 并联变压器电磁力时域分布

Fig. 21 Spatial distribution of electromagnetic force in parallel transformer

3 电磁力分布特性的影响因素

3.1 档位对电磁力分布特性的影响

由前所述,档位对故障电流的大小影响很小。

在串联变压器中,当结构与激励条件固定时,电磁力基本保持稳定。然而,在并联变压器中,档位的调整会使得阀侧绕组的连接组合不同,在不同档位下,相邻的 E_2 、 E_3 、 E_4 绕组电流方向可能不同,从而影响漏磁场,改变电磁力的分布。另外在系统两端供电条件下,正负档位的故障电流几乎对称,因此只考虑正档位情况。

为了探究移相器工作档位对并联变压器绕组电磁力的影响,文中以并联变压器网侧发生单相接地故障为例进行分析。1~13档时故障电流最大时刻阀侧绕组和网侧绕组辐向和轴向电磁力沿轴向的分布情况分别见图 22、23。

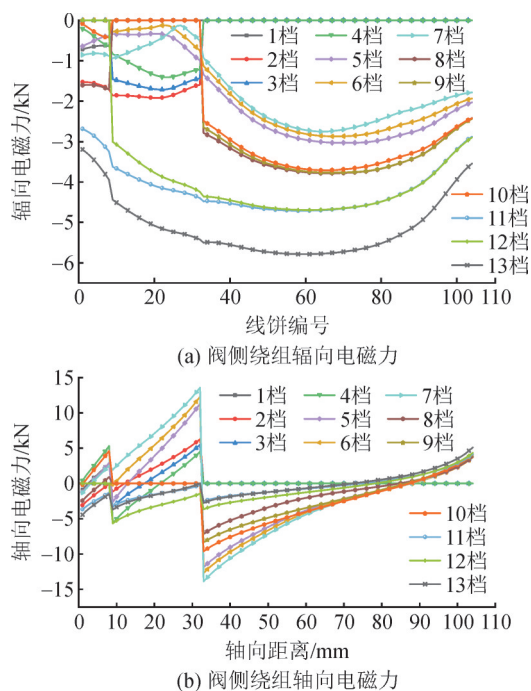


图 22 不同档位下阀侧绕组辐向和轴向电磁力

Fig. 22 Radial and axial electromagnetic forces of the valve side winding at the same gear position

由图 22 可以发现随着档位增大,阀侧辐向电磁力整体逐渐增大;局部呈现不规则变化,如 2~4 档以及 8~10 档最大值逐渐减小,而 5~7 档和 11~13 档位最大值却无明显变化规律;+13 档时辐向电磁力最大。

在阀侧绕组中,根据轴向距离可以判断,轴向电磁力在 E_2 与 E_3 以及 E_3 与 E_4 绕组相邻位置产生极。阀侧绕组的轴向电磁力在档位 7 档时达到最大值 13.9 kN,是在 13 档位时的 2.73 倍。这是因为在 7 档位时, E_3 绕组与相邻的 E_2 和 E_4 绕组的电流方向相反,进而导致了安匝不平衡程度的最大化,辐向漏磁场大幅度增强,与之对应的轴向电磁力也随之增大。由图 23 可以发现随着档位增大,网侧辐向电磁力整体呈逐渐增大的趋势;局部呈现不规则变

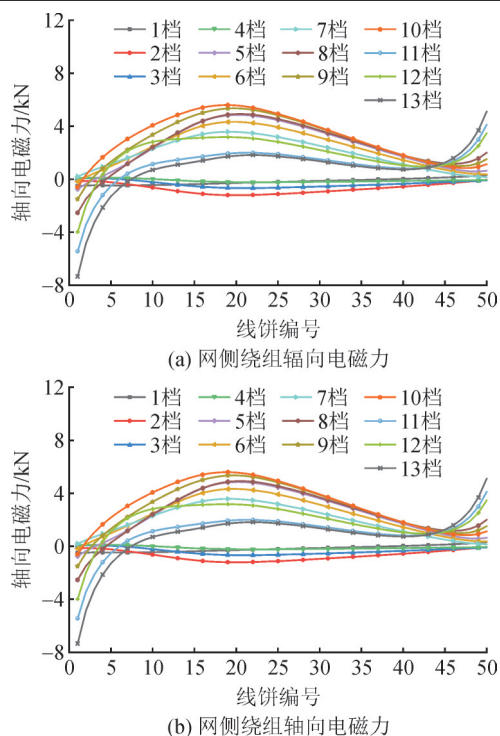


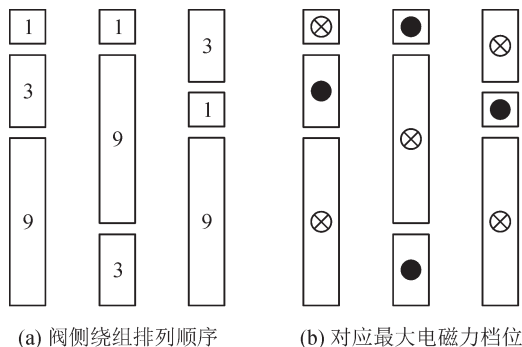
图23 不同档位下网侧绕组辐向和轴向电磁力

Fig. 23 Radial and axial electromagnetic forces in the side windings of the net at different gears

化,如5~7档以及8~10档最大值逐渐减小,13档时辐向电磁力最大。对于网侧绕组轴向电磁力,2~10档网侧绕组轴向电磁力在接近 E_3 和 E_4 绕组相邻处存在最大值;1、11~13档网侧轴向电磁力在绕组端部存在最大值;13档时轴向电磁力最大。

3.2 绕组顺序对电磁力分布特性的影响

并联变压器阀侧绕组的排列顺序对其电磁力分布也有着较大影响。考虑对称性,并联变压器共有以下3种可能的绕组排列顺序,在中间绕组电流方向与相邻绕组电流相反(即产生最大电磁力的档位)时这3种排列的具体结构见图24。图24(a)从左到右分别记为顺序1,顺序2和顺序3,图24(b)从左到右档位分别为7档,5档以及11档。同样考虑并联变压器网侧单相接地故障工况下电磁力的计算。



(a) 阀侧绕组排列顺序 (b) 对应最大电磁力档位

图24 阀侧绕组排列顺序及对应最大电磁力档位

Fig. 24 Valve side winding arrangement sequence and corresponding maximum electromagnetic force gear

阀侧绕组故障电流最大时刻轴向电磁力的空间分布见图25。3种排列顺序下线饼轴向电磁力最大值的排序为:顺序1>顺序2>顺序3,其中,顺序3的最大值较顺序1下降了53.14%,顺序2较顺序1下降了11.83%。轴向电磁力最大值分别位于顺序1的33号线饼、顺序2的80号线饼和顺序3的33号线饼。

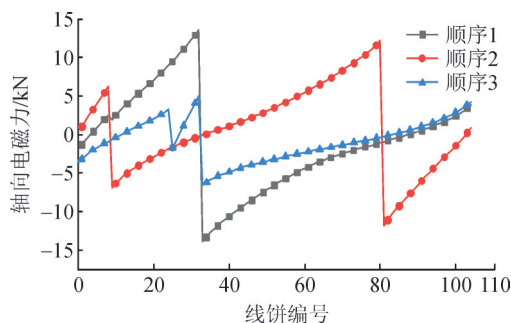


图25 故障电流最大时刻轴向电磁力的空间分布

Fig. 25 Spatial distribution of axial electromagnetic force at maximum time of barrier current

阀侧绕组故障电流最大时刻辐向电磁力的空间分布见图26,3种排列顺序下线饼轴向电磁力最大值的排序为:顺序3>顺序2>顺序1,顺序3较顺序1增大了59.7%,顺序2较顺序1增大了1.57%。

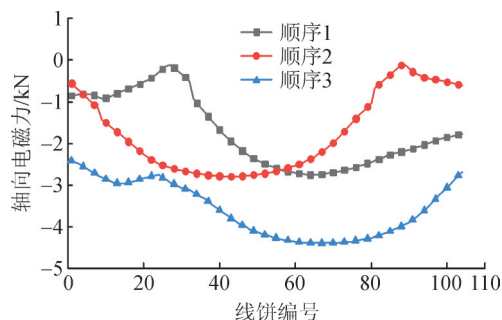


图26 故障电流最大时刻辐向电磁力的空间分布

Fig. 26 Spatial distribution of radial electromagnetic force at the time of maximum fault current

顺序1、顺序2及顺序3各线饼电磁力合力的计算结果见图27。对比分析表明:顺序3相比于顺序1,11-61号线饼电磁力减小,1-10号和61-104号线饼电磁力增大;顺序2相比于顺序1,1号,15-57号以及98-104号线饼电磁力减小,2-14号和58-97号线饼电磁力增大;电磁力最大值的排序为顺序1>顺序2>顺序3。具体而言,顺序3的最大值较顺序1降低了47.95%,顺序2的最大值较顺序1降低了11.74%。

综上所述,顺序2顺序3相比于顺序1轴向电磁力和电磁力合力均明显下降,可基于此通过改变绕组排列顺序的方式以减小电磁力。

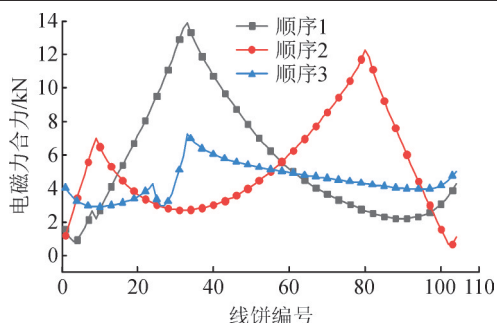


图 27 故障电流最大时刻电磁力合力的空间分布

Fig. 27 Spatial distribution of the resultant electromagnetic force at the time of maximum fault current

4 结论

文中建立了典型外部故障下 220 kV 双芯对称离散型晶闸管控制移相器(TCSD-TCPST)绕组电磁力计算模型,研究了其电磁力分布特性和影响因素,发现:

1)并联变压器网侧单相接地故障下串联变压器中辐向电磁力的最大值出现在绕组的大约 1/5 处,达到 587.8 kN,轴向电磁力最大值出现在绕组 1/2 处,达到 994.8 kN,轴向电磁力更为严重;外部线路单相接地故障下串联变压器中辐向电磁力的最大值出现在绕组的大约 1/2 处,达到 441.5 kN,轴向电磁力最大值出现在绕组端部,达到 938.9 kN,轴向电磁力更为严重;两种故障工况下并联变压器电磁力分布类似,辐向电磁力最大值出现在绕组 1/3~1/2 处,轴向电磁力最大值出现在绕组端部。

2)在并联变压器网侧单相接地故障工况下,串联变压器绕组电磁力在故障发生后保持较大值,并与电流同步衰减,并联变压器的电磁力则集中分布在故障发生后第一个周期内。

3)并联变压器电磁力的分布与档位和绕组顺序有关。档位的变化会引起阀侧绕组连接组合的改变,致使各绕组电流方向出现差异,进而对漏磁场产生显著影响,最终导致电磁力分布发生改变。此外,移相器档位变化与并联变压器阀侧绕组顺序不同均会改变漏磁场分布,进而影响轴向和辐向电磁力,档位变化可导致电磁力最大值相差达 14 kN,而优化绕组排列顺序,可使电磁力合力最大值降幅接近 50%。这一研究结果为并联变压器的优化设计与安全运行提供帮助,在未来的工程实践中,应充分考虑档位与绕组顺序对电磁力的影响,以提升并联变压器的性能与可靠性。

此外,文中主要聚焦于静态电磁场和电磁力分布的分析,未涉及绕组在故障工况下的动态形变与

电磁力的耦合过程,后续研究可进一步结合多物理场仿真方法,深入探讨绕组形变对漏磁场及电磁力分布的影响,为移相器的结构设计与安全评估提供更加全面的理论支撑。

参考文献:

- [1] 颜湘武,王 阳,贾焦心. 双芯移相变压器在主动配电网电压和潮流调控中的应用分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2024, 51(3): 20-29.
Yan Xiangwu, Wang Yang, Jia Jiaoxin. Application analysis of dual-core phase-shifting transformers in active distribution network voltage and power flow regulation[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2024, 51(3): 20-29.
- [2] 李 鹏,陈 实,林金娇.晶闸管可控移相器继电保护策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(5): 12-21.
Li Peng, Chen Shi, Lin Jinjiao. Research on the relay protection strategy of TCPST[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(5): 12-21.
- [3] 陈志伟,汪 杰,向念文,等.基于新型混合变压器的配电网暂态电压稳定技术研究[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(4): 282-293.
Chen Zhiwei, Wang Jie, Xiang Nianwen, et al. Research on transient voltage stability in distribution networks based on new hybrid transformer[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(4): 282-293.
- [4] 李 鹏,林金娇,陈 实. 电网故障下晶闸管控制型移相器穿越策略[J]. 电力工程技术, 2025, 44(4): 128-137.
Li Peng, Lin Jinjiao, Chen Shi. Ride-through strategies of thyristor controlled phase shifting transformer under grid faults[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(4): 128-137.
- [5] Iravani M R, Dandeno P L, Nguyen K H, et al. Applications of static phase shifters in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(3): 1600-1608.
- [6] 杨永前,崔 勇,杨增辉,等. 双芯对称离散型可控移相器的数学建模[J]. 陕西电力, 2014, 42(11): 61-67.
Yang Yongqian, Cui Yong, Yang Zenghui, et al. Modeling of two-core symmetrical discrete thyristor controlled phase shifting transformer[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(11): 61-67.
- [7] Thwala M S, Nnachi A F, Moloi K, et al. The effect of a phase shift transformer for power flow control[C]//2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa(SAUPEC/Rob-Mech/PRASA), 2019: 425-430.
- [8] Verboomen J, Van Hertem D, Schavemaker P H, et al. Phase shifting transformers: principles and applications[C]//2005 International Conference on Future Power Systems, 2005: 1-6.
- [9] 黄莉娜,齐金鹏,戴 理,等.基于特征提取和AHC的变压器数据异常检测方法[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(5): 14-23.
Huang Lina, Qi Jinpeng, Dai Li, et al. Transformer data anomaly detection method based on feature extraction and AHC[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(5): 14-23.
- [10] 周展帆,严 宇,于艺盛,等.地铁杂散电流对变压器直流偏磁的

- 影响分析[J]. 电力科学与技术学报, 2024(1): 134-143.
- Zhou Zhanfan, Yan Yu, Yu Yisheng, et al. Analysis of the influence of metro stray current on transformer DC bias[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024(1): 134-143.
- [11] 侯承昊. 新型混合式可控移相器及其控制研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- Hou Chenghao. New mixed thyristor controlled phase shifter transformer and control research[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [12] 于弘洋, 周 飞, 杨增辉. 可控移相器主电路参数设计及稳态特性分析[J]. 中国电力, 2013, 46(11): 36-41.
- Yu Hongyang, Zhou Fei, Yang Zenghui. Parameter design and steady state characteristic analysis of TCPSTs in a EHV-grid[J]. Electric Power, 2013, 46(11): 36-41.
- [13] 尚海昆, 张冉喆, 黄 涛, 等. 基于 CEEMDANTQWT 方法的变压器局部放电信号降噪[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(1): 272-284.
- Shang Haikun, Zhang Ranzhe, Huang Tao, et al. Partial discharge signal denoising based on CEEMDANTQWT method for power transformers[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 272-284.
- [14] 倪尚谦. 特高压静止移相器的基本设计与电磁暂态研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2013.
- Ni Shangqian. Study on basic design and electromagnetic transient of UHV static phase shifter[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2013.
- [15] 王楚扬, 王新颖, 董 莹, 等. 基于混合型晶闸管可控移相器的抗冲击驱动策略[J]. 电网技术, 2024, 48(12): 5179-5188.
- Wang Chuyang, Wang Xinying, Dong Xuan, et al. Anti-surge driving strategy based on the hybrid thyristor-controlled phase-shifting transformer[J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 5179-5188.
- [16] 谢子豪, 杜兆斌, 孙展域, 等. 基于节点功率注入的双芯对称型晶闸管可控移相器机电暂态建模[J]. 南方电网技术, 2023, 17(5): 71-79.
- Xie Zihao, Du Zhaobin, Sun Zhanyu, et al. Electromechanical transient modeling of two-core symmetrical thyristor controlled phase shifting transformer based on nodal power injection[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(5): 71-79.
- [17] 彭咏龙, 王仁洲, 柳 焯. 电力系统暂态稳定的移相器控制[J]. 华北电力大学学报, 1997, 24(2): 8-14.
- Peng Yonglong, Wang Renzhou, Liu Chao. The phase shifter control of the electric power system using transient energy function method[J]. Journal of North China Electric Power University, 1997, 24(2): 8-14.
- [18] Ahn H M, Lee J Y, Kim J K, et al. Finite-element analysis of short-circuit electromagnetic force in power transformer[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1267-1272.
- [19] Wang Shuhong, Zhang Haijun, Wang Song, et al. Cumulative deformation analysis for transformer winding under short-circuit fault using magnetic-structural coupling model[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(7): 1-5.
- [20] 王建民, 王浩名, 周少静, 等. 移相整流变压器漏磁场及电磁参数的工程算法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 8-14.
- Wang Jianmin, Wang Haoming, Zhou Shaojing, et al. Engineering methods of leakage magnetic field and electromagnetic parameters for phase shifting rectifier transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 8-14.
- [21] 胡安龙, 李 敏, 魏 勇, 等. 基于磁场能量法的圆形利兹线绕组高频变压器漏电感解析计算模型[J]. 智慧电力, 2025, 53(1): 24-30.
- Hu Anlong, Li Min, Wei Yong, et al. Analytical model for leakage inductance calculation of high frequency transformer with round Litz wire windings based on magnetic field energy method[J]. Smart Power, 2025, 53(1): 24-30.
- [22] 林智勇, 苏若杭, 黄国泰, 等. 基于等值老化容抗的变压器油纸绝缘状态评[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 140-147.
- Lin Zhiyong, Su Ruohang, Huang Guotai, et al. Evaluation of the oil-paper insulation state of a transformer based on equivalent aging capacitance[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 140-147.
- [23] Liu Jun, Hao Xudong, Wang Xu, et al. Application of thyristor controlled phase shifting transformer excitation impedance switching control to suppress short-circuit fault current level[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(4): 821-832.
- [24] 郑 彬, 项祖涛, 班连庚, 等. 特高压静止移相器应用的电磁暂态仿真分析[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1372-1377.
- Zheng Bin, Xiang Zutao, Ban Liangeng, et al. Electromagnetic transient analysis on static phase shifter applied in UHV power grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1372-1377.
- [25] 郑 涛, 申 由, 于佳旭, 等. 基于单芯移相变压器的差动保护配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 59-70.
- Zheng Tao, Shen You, Yu Jiaxu, et al. Differential protection configuration based on a single core phase shifting transformer[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 59-70.
- [26] 钱国超, 胡 锦, 代维菊, 等. 基于循环神经网络的运行变压器绕组压紧状态检测[J]. 智慧电力, 2024, 52(8): 129-136.
- Qian Guochao, Hu Jin, Dai Weiju, et al. Clamping state detection of transformer windings based on recurrent neural networks[J]. Smart Power, 2024, 52(8): 129-136.
- 蔡 祥(2002—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高电压绝缘技术(E-mail: dq2006cx@126.com)。
- 庞 磊(1981—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为高压电力电子装备及其可靠性、宽频绝缘等方面的研究工作(通信作者)(E-mail: panglei_2013@xjtu.edu.cn)。