

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221305

# 配电变压器低压绕组导线换位处单股匝间短路特征分析

李 智<sup>1</sup>, 咸日常<sup>1</sup>, 崔 川<sup>2</sup>, 胡玉耀<sup>1</sup>, 郭 洋<sup>1</sup>, 郝 艳<sup>1</sup>, 李佳琪<sup>1</sup>

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 国网山东省电力公司淄博供电公司, 山东 淄博 255000)

**摘要:** 为保证电力变压器多股并绕线圈的导体长度一致、电流密度均衡, 通常在其绕制过程中进行结构换位, 实际运行表明导线换位处的绝缘容易损伤并导致匝间短路故障。针对实际试验中故障点难以设置、电气量无法直接检测等问题, 利用“场—路”耦合原理, 以型号为 S13-M-200/10、低压绕组由两股扁铜线并绕、换位点在绕组中部的配电变压器为例, 基于有限元仿真软件建立与实物结构尺寸相同的仿真分析模型, 通过对比性能参数的实际试验值与仿真分析值, 在验证模型正确性的基础上, 研究电力变压器低压绕组在导线换位处发生单股匝间短路时的电气特征及电动力。研究表明, 当变压器低压绕组发生单股匝间短路时, 短路环内部流过数十倍额定电流的环路电流, 故障相电流略有降低, 有功损耗激增; 导线换位引起线圈轴向力与辐向力分布不均, 绕组容易失稳变形, 需要对该导线换位处采取机械和绝缘加强措施。

**关键词:** 配电变压器; 低压绕组; 两股并绕; 导线换位; 匝间短路; 电动力

**中图分类号:** TM411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)05-0211-05

## 1 引言

配电变压器是电力系统中广泛使用的重要电气设备, 其运行状态关系到配电网的安全稳定运行<sup>[1,2]</sup>。为克服大面积导体绕制工艺复杂问题并限制导体内部电流集肤效应, 配电变压器的低压绕组通常采用多股导线并联绕制而成, 为消除并联导线间产生的循环电流的影响, 绕组并联导线需要换位, 而在实际运行中, 导线换位处最容易发生匝间短路故障, 巨大短路电流产生的热量和电动力, 可能导致绝缘老化、绕组变形、局部过热甚至设备整体烧毁事故<sup>[3,4]</sup>。因变压器绕组绝缘的结构特点, 在实际试验研究中设置变压器低压绕组匝间短路故障难度较大, 故有必要通过有限元仿真软件分析其短路故障的电气及电动力特征。目前, 针对匝间短路故障的研究主要集中在绕组由单股导线绕制的电力变压器, 未考虑并联导线及导线换位的影响。由于并联导线单股(相同股)匝间短路对电气设备的危害远大于不同股匝间短路, 为进一步分析变压器并联导线发生单股匝间

短路故障特征, 本文以一台三相油浸式配电变压器为例, 采用有限元仿真软件构建变压器模型, 设置由两股扁铜线并绕的低压绕组某一时刻在导线换位处发生单股匝间短路故障, 分析该低压绕组的电气及电动力特征, 以为配电变压器的防护措施及绕组状态监测提供参考。

## 2 变压器匝间短路特性原理分析

### 2.1 匝间短路电磁耦合模型

配电变压器绕组采用与实际相同的 Dyn11 接线方式, 以 A 相低压绕组导线换位处发生单股匝间短路为例, 故障后简化的等效电路见图 1。图 1 中,  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$  分别为变压器各相高压绕组

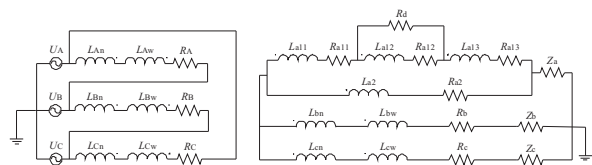


图 1 配电变压器单股匝间短路等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of single-turn short circuit of distribution transformer

收稿日期: 2022-06-23, 修回日期: 2022-08-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51907109)

作者简介: 李智(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电气设备在线监测与故障诊断技术, E-mail: 547806376@qq.com

通讯作者: 咸日常(1966-), 男, 教授、博导, 研究方向为电力系统过电压、电气设备在线监测与故障诊断技术, E-mail: xianrc@163.com

mail: xianrc@163.com

的额定相电压; $R_A, R_B, R_C$  分别为变压器各相高压绕组的电阻; $L_{An}, L_{Bn}, L_{Cn}, L_{Aw}, L_{Bw}, L_{Cw}$  分别为变压器各相高压绕组内层及外层的电感; $R_{a12}, L_{a12}$  分别为 A 相低压绕组故障股故障匝的电阻和电感; $R_{a11}, R_{a13}, L_{a11}, L_{a13}$  分别为 A 相低压绕组故障股非故障匝的电阻和电感; $R_{a2}, L_{a2}$  分别为变压器 A 相低压绕组非故障股的电阻和电感; $R_b, R_c$  分别为变压器 B、C 相低压绕组的电阻; $L_{bn}, L_{cn}, L_{bw}, L_{cw}$  分别为变压器 B、C 相低压绕组内层及外层的电感; $R_d$  为故障匝的绝缘电阻; $Z_a, Z_b, Z_c$  分别为变压器各相的额定负载, 变压器各绕组间存在互感, 未在图中标出。

变压器发生匝间短路后, 仍满足麦克斯韦方程的全电流定律, 其微分形式为:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

式中,  $\nabla$  为哈密顿算子;  $\mu$  为磁导率;  $\mathbf{A}$  为矢量磁位;  $\mathbf{J}$  为电流密度;  $\mathbf{D}$  为电位移矢量;  $t$  为时间。

由于故障时位移电流较小<sup>[5]</sup>, 可将式(1)简化为:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J} \quad (2)$$

利用有限元仿真软件 ANSYS Maxwell 建立变压器电场—磁路耦合模型, 将磁场中绕组设置为外电路激励方式, 并按照图 1 变压器单股匝间短路等效电路引入电路元件, 根据式(2)全电流定律, 即可得到单股匝间短路后的磁场分布和绕组电流波形。

### 2.2 功率损耗计算

配电变压器绕组发生匝间短路后, 由于绕组电流和磁场变化, 导致功率损耗增加, 变压器消耗的总瞬时功率  $p_s$ 、绕组吸收的瞬时功率  $p_{Cu}$  及有功功率  $P$  分别为:

$$p_s = p_1 - p_2 \quad (3)$$

$$p_{Cu} = i_A^2 R_A + i_B^2 R_B + i_C^2 R_C + i_{a1}^2 (R_{a11} + R_{a13}) + i_{a12}^2 R_{12} + i_{a2}^2 R_{a2} + i_d^2 R_d + i_b^2 R_b + i_c^2 R_c \quad (4)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} p dt \quad (5)$$

式中,  $p_1, p_2$  分别为变压器输入、输出的瞬时功率;  $i_A, i_B, i_C, i_b, i_c$  分别为高、低压侧相电流;  $i_{a1}$  为故障股电流;  $i_{a12}$  为故障匝电流;  $i_{a2}$  为非故障股电流;  $i_d$  为短路环电流;  $P$  为有功功率;  $t$  为任意时刻;  $T$  为周期。

### 2.3 绕组电动力计算

根据变压器低压绕组单股匝间短路引起的绕组电流和磁感应强度等电磁参数的变化, 基于电磁力定律, 绕组受力  $F$  为:

$$\mathbf{F} = \int_V \mathbf{J} \times (B_x \hat{x} + B_y \hat{y}) dv = F_x \hat{x} + F_y \hat{y} \quad (6)$$

式中,  $B_x$  为辐向磁感应强度;  $B_y$  为轴向磁感应强度;  $\hat{x}, \hat{y}$  分别为辐向、轴向单位向量;  $V$  为绕组体积;  $v$  为绕组单位体积;  $F_x$  为辐向电动力;  $F_y$  为轴向电动力。

## 3 仿真模型建立与验证

### 3.1 模型建立

某公司一台型号为 S13-M-200/10 的配电变压器的主要技术参数和几何尺寸见表 1、2。

表 1 变压器主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of transformer

参数	参数值	参数	参数值
型号	S13-M-200/10	联结组别	Dyn11
额定容量/kVA	200	频率/Hz	50
额定电压/kV	10/0.4	低压绕组匝数/匝	34
额定电流/A	11.55/288.675	高压绕组匝数/匝	1 452

表 2 变压器主要几何尺寸

Tab. 2 Main geometric dimensions of transformer

名称	尺寸/mm	名称	尺寸/mm
铁心直径	110	低压绕组直径	116.3~150.7
铁心窗高	285	高压绕组直径	161~222
铁轭高度	110	低压绕组高度	241
中心距	230	高压绕组高度	241

利用 SolidWorks 软件绘制与实物大小一致的配电变压器模型, 见图 2。本模型铁心采用 27RK090 型号的硅钢片, 绕组为长圆形, 高压绕组分为内层和外层, 中部设有油道, 低压绕组为双层圆筒式, 采用两股扁铜线并绕, 共两层。以配电变压器 A 相低压绕组导线换位处发生单股匝间短路为例, 将变压器 A 相低压绕组细化, 并沿绕组高度方向从上至下对每匝导线进行编号, 故障位置为变压器 A 相低压绕组外层内侧股中部(第 9 匝), 即图 2 中圆圈标记位置。

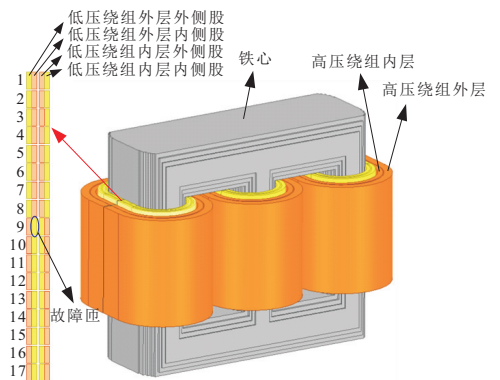


图 2 配电变压器三维几何模型

Fig. 2 Three-dimensional geometric model of distribution transformer

由于配电变压器低压绕组导线中部存在换位,故低压绕组外层外侧 1~8 匝、外层内侧 9~17 匝、内层外侧 9~17 匝和内层内侧 1~8 匝为 一股,即故障股;低压绕组外层内侧 1~8 匝、外层外侧 9~17 匝、内层内侧 9~17 匝和内层外侧 1~8 匝为 一股,即与故障股并联的非故障股。配电变压器低压绕组导线换位示意图见图 3。

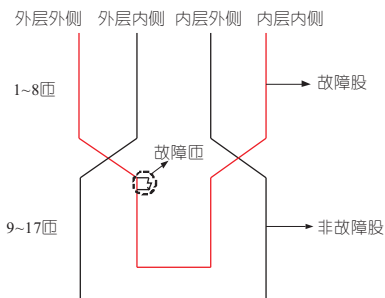


图 3 低压绕组导线换位示意图

Fig. 3 Low voltage winding wire transposition diagram

### 3.2 模型验证

为验证仿真模型的准确性,对配电变压器模型进行空载试验和短路试验,仿真得到的性能参数与实际试验值和额定值对比见表 3。根据表 3 数据对比可知,由于简化了部分配电变压器的绕组结构,铁心硅钢片的设置未考虑剪切毛刺等因素,且忽略了变压器金属夹件、压板等固件的影响,故仿真值与试验值和额定值存在一定误差,最大相对误差不大于 5%,符合工程分析要求,验证了仿真模型的可行性和有效性。

表 3 变压器性能参数对比

Tab. 3 Comparison of transformer performance parameters

项目	空载损	空载电流	负载损	短路阻
	耗/W	/%	耗/W	抗/%
仿真值	228.21	0.190	2 570.58	3.87
试验值	234.60	0.192	2 662.70	3.92
额定值	240.00	0.200	2 700.00	4.00
最大相对误差	4.91%	5%	4.79%	3.25%

## 4 电气特征分析

### 4.1 绕组电流分析

以配电变压器 A 相绕组为例,假设低压绕组外层内侧的第 9 匝在 30 ms 时刻发生单股匝间短路,随着绕组绝缘劣化,绕组匝间绝缘电阻不断减小,根据文献[6],取绝缘电阻为 0.5 mΩ 模拟匝间短路状态。由于 B、C 相低压绕组电流在故障前后无明显变化,仅分析故障相电流变化情况,故障相低压绕组电流见图 4。由图 4 可知,在额定运行工况下,A 相两股导线流过的电流大小基本相等,这是由于低压绕组中部采用导线换位,使得

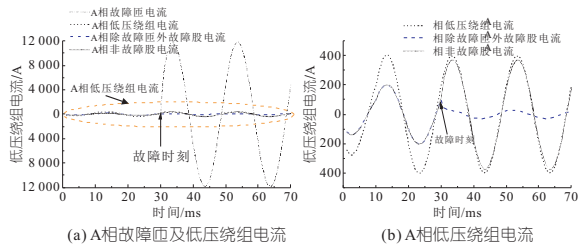


图 4 故障相低压绕组电流

Fig. 4 Low-voltage winding current of fault phase

两股导线的感应电动势和电阻基本相等。当变压器 A 相低压绕组在导线换位处发生单股匝间短路时,由于感应电压作用于极小的绝缘电阻上,使得故障匝电流明显增大,最大值为 11.91 kA,是该匝额定电流的 58.46 倍,故障股电流由 144.04 A 减小至 20.71 A,相位稍有滞后;与故障股并联的非故障股电流由 144.25 A 增大至 266.68 A,远远超过正常运行时该股导线流过的电流,使得导线发热严重,功率损耗增加。

### 4.2 功率损耗分析

假设变压器在第 30 ms 时刻发生单股匝间短路故障,故障前后变压器瞬时功率的变化情况见图 5。结合图 5,变压器匝间短路后,有功损耗激增,绕组铜耗由 2 571 W 增大至 58.952 kW,变压器总有功功率由 3 116 W 增大至 61.012 kW。这是因为变压器有功损耗不仅包括绕组铜耗,还包括铁心损耗和附加损耗。短路匝电流增大,受铁心磁滞特性的影响,铁心局部严重饱和,导致损耗增加;同时,短路匝电流使得变压器内部的漏磁场分布变化明显,进而影响整体附加损耗的大小。因有功损耗在匝间短路前后变化显著且易于测量,故可考虑将其作为变压器状态监测的主要特征量。

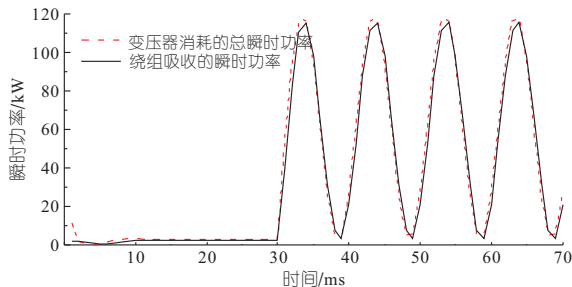


图 5 变压器瞬时功率变化情况

Fig. 5 Changes of instantaneous power of transformer

## 5 绕组电动力分析

### 5.1 低压绕组电动力分析

假设变压器低压绕组外层内侧股第 9 匝在 30 ms 发生单股匝间短路故障,低压绕组外层内

侧股及外侧股受到的电动力随时间的变化情况分别见图 6(a)、(b)。由图 6(a)、(b)可得,在前 30 ms 内,即变压器正常运行时,低压绕组受到的电动力呈周期性变化,且绕组中部受力略大于端部;在 30 ms 后,即发生单股匝间短路后,故障匝受到时间变化的巨大电动力,最大值为 1 426 N,且低压绕组外层内侧股与外侧股的受力不再沿绕组高度方向对称,更易使绕组发生变形而损坏。

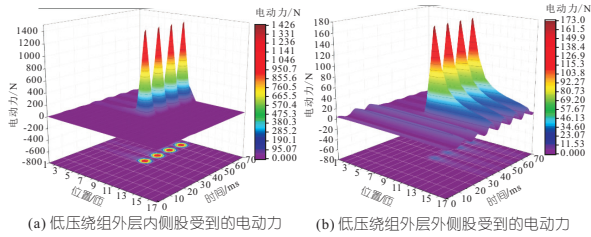


图 6 低压绕组外层受到的电动力

Fig. 6 Electrodynamic force on the outer layer of low-voltage winding

为进一步分析变压器低压绕组在导线换位处发生单股匝间短路时绕组的受力情况,分别对 A 相低压绕组外层两股导线不同匝受到的辐向和轴向受力进行研究。

### 5.2 低压绕组辐向和轴向受力分析

故障后,配电变压器低压绕组外层内侧股与外侧股的辐向力分布见图 7,辐向力指向铁心为正,指向外侧为负。由图 7 可得,在辐向方向上,低压绕组外层的两股导线均受到向铁心的挤压力。其中,故障匝受到的辐向挤压力最大,为 1 425.54 N。根据安培定则,故障位置处的轴向磁感应强度将增大,因此与低压绕组外层外侧股的其他匝相比,第 9 匝所受的辐向力最大。同时,分析可知,两股导线中流过电流大小不同,绕组在辐向方向上受力严重不均,变化浮动明显。此外,应特别注意低压绕组外层的 10~17 匝,外侧股受到的指向铁心的挤压力大于内侧股,若故障未及时消除,将导致股间绝缘破坏,进而发生股间短路故障,扩大短路故障范围。

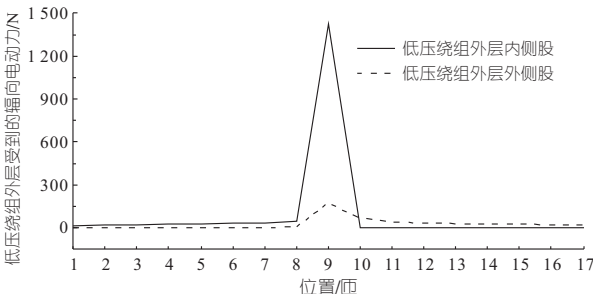


图 7 低压绕组外层外侧股与内侧股的辐向力分布

Fig. 7 The radial force distribution of outer and inner strands of low-voltage winding

变压器低压绕组外层外侧股与内侧股的轴向力分布见图 8,轴向力向上为正,向下为负。由图 8 可得,在轴向方向上,低压绕组受到向内的挤压力,且越靠近故障匝,绕组所受的轴向力越大,而故障匝受到的轴向力较小。这是由于故障匝的辐向磁感应强度最小,而故障匝两侧的辐向磁感应强度最大。低压绕组外层内侧股 1~8 匝受到向下的挤压力远大于内侧股 10~17 匝受到向上的挤压力;而低压绕组外层外侧股 1~8 匝受到向下的挤压力远小于外侧股 10~17 匝受到向上的挤压力。因此,变压器 A 相低压绕组外层内侧股整体将受到向下的轴向力,外侧股整体将受到向上的轴向力,应加强绕组端部夹件的紧固力。

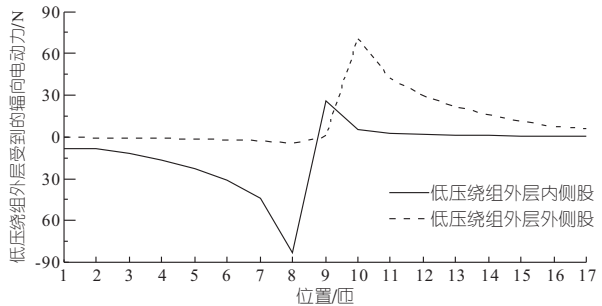


图 8 低压绕组外层外侧股与内侧股的轴向力分布

Fig. 8 The axial force distribution of outer and inner strands of low-voltage winding

由此可见,为分析配电变压器绕组的电动力特征,应综合考虑低压绕组发生单股匝间短路的电磁特征及绕组中部导线换位情况。当低压绕组外层内侧股的第 9 匝发生匝间短路故障时,一方面,根据安培定则,对于同一股导线,在故障位置处,外侧股的轴向磁感应强度大于内侧股,所以除故障匝外,外侧股整体的辐向受力大于内侧股整体的辐向受力;在故障位置两侧,内侧股的辐向磁感应强度大于外侧股,所以内侧股整体的轴向力大于外侧股。另一方面,除故障匝外,故障股导线电流减小,与故障股并联的非故障股电流增加,导致故障股的受力较小,非故障股受力较大,由于导线换位的影响,内侧股 1~8 匝及外侧股 10~17 匝等非故障股所受的轴向力和辐向力均大于同一高度的故障股。此外,由图 7、8 可知,低压绕组故障匝所受的辐向力远大于轴向力。绕组的轴向和辐向受力严重不均,易引发绕组失稳变形。变压器运维检修中类似案例众多。因此,加强导线绝缘强度和撑条机械强度是避免匝间短路的关键。

## 6 结论

a. 短路环内部产生巨大环路电流,故障股电流减小,非故障股电流增大,主回路电流变化不明

显,故障相电流略有降低,而有功损耗变化显著且易于测量,可将其作为主要状态特征量,为变压器状态监测提供参考。

b. 在轴向方向上,故障股与非故障股均受到向中部的挤压力,内侧股整体受到向下的电动力,外侧股整体受到向上的电动力;在辐向方向上,故障股与非故障股均受到向铁心的压缩力。辐向力与轴向力分布不均,绕组更易失稳变形。应注重低压绕组中部导线换位处的绝缘,并加强绕组端部夹件的紧固力及绕组中部撑条的机械强度,必要情况下,可考虑在两股并联导线之间也增设撑条。

#### 参考文献:

[1] 范慧芳, 咸日常, 咸日明, 等. 改进蜂群算法在大型电力变压器故障诊断中的应用[J]. 水电能源科

学, 2021, 39(9):197-200.

[2] ASADI N, KELK H M. Modeling, analysis, and detection of internal winding faults in power transformers[J]. IEEE transactions on power delivery, 2015, 30(6):2419-2426.

[3] XIAO L, JIAN L, WANG Y, et al. Simulative and experimental investigation of transfer function of inter-turn faults in transformer windings[J]. Electric power systems research, 2014, 107:1-8.

[4] 李智, 咸日常, 李思毛, 等. 一起变压器调压绕组短路故障分析[J]. 变压器, 2021, 58(11): 69-72.

[5] 张立静, 盛戈峰, 侯慧娟, 等. 基于电热特性融合分析的油浸式变压器匝间短路故障辨识方法[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2473-2482.

[6] 张俊杰, 刘兰荣, 刘东升, 等. 用场路耦合模拟变压器线圈部分短路故障电流的方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 65-70.

## Characteristics Analysis of Single-strand Inter-turn Short Circuit in Low Voltage Winding Wire Transposition of Distribution Transformer

LI Zhi<sup>1</sup>, XIAN Ri-chang<sup>1</sup>, CUI Chuan<sup>2</sup>, HU Yu-yao<sup>1</sup>, GUO Yang<sup>1</sup>, HAO Yan<sup>1</sup>, LI Jia-qi<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. State Grid Shandong Zibo Power Supply Company, Zibo 255000, China)

**Abstract:** In order to ensure that the conductor length of multiple parallel coils of power transformer is consistent and the current density is balanced, the structure transposition is usually carried out in the winding process. The actual operation shows that the insulation at the conductor transposition is easy to damage and leads to inter-turn short circuit fault. Aiming at the problems that the fault point is difficult to set and the electrical quantity cannot be directly detected in the actual test, this paper uses the 'field-circuit' coupling principle to take the distribution transformer with the model of S13-M-200/10, the low voltage winding is wound by two flat copper wires and the transposition point is in the middle of the winding as an example. Based on the finite element simulation software, the simulation analysis model with the same size as the physical structure is established. Through the comparison of the actual test value and the simulation analysis value of the performance parameters, on the basis of verifying the correctness of the model, the electrical characteristics and electro-dynamics of the low voltage winding of the power transformer are studied when the single inter-turn short circuit occurs at the conductor transposition. The results show that when a single inter-turn short circuit occurs in the low voltage winding of the transformer, the loop current of dozens of times the rated current flows inside the short circuit ring, the fault phase current decreases slightly, and the active power loss increases sharply. Conductor transposition causes uneven distribution of axial force and radial force of the coil, and the winding is prone to instability and deformation. It is necessary to take mechanical and insulation strengthening measures at the conductor transposition.

**Key words:** distribution transformer; low-voltage winding; two side by side; conductor transposition; inter-turn short circuit; electrodynamic force

\*\*\*\*\*  
(上接第 206 页)

## Condition Assessment of Peaking Power Source Based on Data Fusion and Parallel Feature Extraction

HAO Feng<sup>1</sup>, FANG Bing<sup>2</sup>, QI Wei-wen<sup>2</sup>, GUO Qin-hui<sup>2</sup>, ZHU Chuan-gu<sup>3</sup>, PAN Wei-feng<sup>3</sup>

(1. Water and Innovation Department, State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China;

2. Shaoxing Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Shaoxing 310000, China;

3. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** For the task of condition evaluation of peaking power equipment, the monitoring indicators are defined as a set of time series, among which the complex coupling relationships need to be considered. Besides, requirements on processing time are introduced by the real-time systems. A new framework is proposed to address these problems via the technology of parallel feature extraction as well as data fusion. The time series are statistically analyzed in parallel where multiple hypothesis testing is used to select the important features. Using a defined hierarchical graph convolutional network, the related information is integrated for the final condition evaluation task. Compared with the existing models, experiments indicate that the proposed method with stronger transferability and shorter processing time has a much higher predication accuracy.

**Key words:** condition assessment of peaking power equipment; parallel time series data processing; graph neural network; feature extraction; data fusion