

DOI: 10.19666/j.rlfd.202111256

# 基于场路直接耦合法的电压互感器匝间短路外特性分析

赵霁恺<sup>1</sup>, 舒进<sup>1</sup>, 都劲松<sup>1</sup>, 杨博<sup>1</sup>, 程成<sup>2</sup>

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2.华能平凉发电有限责任公司, 甘肃 平凉 744032)

**[摘要]** 发电机出口电压互感器(TV)匝间短路将在系统中产生不平衡电压导致发电机基波零序定子接地保护动作, TV故障外特性对机组稳定运行有重要意义。对此, 基于Maxwell和Simplorer软件对单相电压互感器电磁转换过程仿真, 建立可在每一计算步长实现场路间数据交换的场路直接耦合有限元模型, 针对TV一次绕组匝数大难以直接建模, 提出绕组分组技术, 并设计搭建了实验平台, 对有限元仿真模型的准确性进行实验验证。基于有限元特征量计算结果, 分析了TV不同运行状态的电、磁特征量, 并给出了基于绕组分组技术的TV匝间故障解析模型。仿真验证结果表明: TV匝间故障解析模型进行一次电流、环流等故障特征量分析准确有效。

**[关键词]** 电压互感器; 匝间短路; 有限元; 内部磁场; 瞬态响应方程

**[引用本文格式]** 赵霁恺, 舒进, 都劲松, 等. 基于场路直接耦合法的电压互感器匝间短路外特性分析[J]. 热力发电, 2023, 52(1): 132-139. ZHAO Jikai, SHU Jin, DU Jinsong, et al. External characteristics analysis of voltage transformer inter-turn short circuit based on field-circuit direct coupling method[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(1): 132-139.

## External characteristics analysis of voltage transformer inter-turn short circuit based on field-circuit direct coupling method

ZHAO Jikai<sup>1</sup>, SHU Jin<sup>1</sup>, DU Jinsong<sup>1</sup>, YANG Bo<sup>1</sup>, CHENG Cheng<sup>2</sup>

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. Huaneng Pingliang Power Generation Co., Ltd., Pingliang 744032, China)

**Abstract:** Voltage transformer (TV) interturn short circuit at generator outlet will cause unbalanced voltage in system, resulting in zero sequence stator ground fault protection of generator fundamental. The external characteristics of TV fault are of great significance to stable operation of the unit. In order to understand the external characteristics of TV fault, based on Maxwell and Simplorer software, a field circuit direct coupling finite element model for the electromagnetic conversion process of single-phase voltage transformer is established, which can realize data exchange between field circuits at each calculation step. In view of the large number of turns of TV primary winding, which is difficult to model directly, winding grouping technology is proposed. An experimental platform is designed and built to verify the accuracy of the simulation model. Based on the calculation results of finite element eigenvalues, the electrical and magnetic eigenvalues of TV in different operating states are analyzed, and the analytical model of TV inter turn fault based on winding grouping technology is further given. The simulation results show that, the TV turn-to-turn fault model is accurate and effective in analyzing the primary current, circulating current and other fault characteristic quantities.

**Key words:** voltage transformer; inter-turn short circuit; finite element; internal magnetic field; transient response equation

发电机出口电压互感器(TV)具有机端电压、功率、电能测量以及继电保护、励磁系统、调速系  
统电压采集等重要作用<sup>[1]</sup>。发电机出口TV与出口  
母线直接连接, 其发生匝间短路时, 将造成发电机

修回日期: 2022-05-23 网络首发日期: 2023-01-02

基金项目: 西安热工研究院有限公司研发基金项目(TP-21-TYK06)

Supported by: Research and Development Fund Project of Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. (TP-21-TYK06)

第一作者简介: 赵霁恺(1997), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护, zjk18009223819@163.com。

定子接地保护动作,导致发电机组非计划停运<sup>[2]</sup>。2001—2020 年中国某发电集团电厂定子接地保护动作案例表明,机端 TV 故障占引起定子接地保护动作总数的 44%,机端 TV 匝间短路故障引起保护动作占机端 TV 故障引起保护动作总数的 82%,机端 TV 匝间短路故障已成为发电机定子接地保护动作的主要原因。文献[3]分析了 TV 一次绕组匝间短路时对一次系统电气量的影响,匝间短接和单相接地短路都会引起基波零序电压升高,引起定子接地保护动作。文献[4-10]介绍了若干 TV 一次绕组匝间短路导致定子接地保护动作的案例,并且对故障排查和 TV 检验进行了论述。

针对 TV 匝间故障的研究较少,因电磁式 TV 和电力变压器的工作原理类似<sup>[11]</sup>,TV 故障分析可参考成熟的电力变压器内部短路故障研究。实际试验研究中,设置绕组匝间故障十分困难,并且没有有效的 TV 或变压器匝间短路在线检测装置<sup>[12]</sup>,故解析模型计算和数值模拟在 TV 和变压器匝间故障研究中尤为重要<sup>[13]</sup>。目前针对发电机出口 TV 故障的仿真和计算方法主要有理论解析法、场路间接耦合分析法、场路直接耦合分析法 3 类。文献[14]提出了一种研究电力变压器内部故障的等效电路法,基于“一致性”“漏磁系数”“比例性”3 个假设,求解变压器等效电路模型中电阻矩阵和电感矩阵参数,进而计算得到内部故障条件下变压器原、副边电压和电流。这种基于简单假设条件的方法,忽略了绕组首末段磁力线的发散等,准确性有待商榷,并且难以推广应用于绕组结构复杂的变压器。文献[15]采用等效电路法,对其假设条件做了改进。文献[16]对 TV 匝间短路进行建模分析,提出出口 TV 发生匝间短路后,一次电流会明显增加的结论。然而,理论解析方法均存在公式推导复杂、计算琐碎、误差较大、不易推广应用等不足。

近年来国内外学者利用数值模拟软件对电力变压器绕组匝间短路故障前后的特征参数进行了大量研究,并取得了重要成果,文献[17]利用有限元建立了计及铁心非线性磁特性的单相变压器模型,将漏感参数的解析值与仿真值进行比较,得到有限元法在变压器匝间短路故障检测中具有较高精度的结论。文献[18]建立了配电变压器内部绕组短路的场路间接耦合分析法,可用于接地短路和匝间短路时的故障电流计算。场路间接耦合分析法是一种将场中有限元计算的数据输入到外电路的单向耦

合方法,无法在每个时间步长上实现场路之间数据的双向交换,结果准确性存疑。文献[19]采用场路直接耦合分析法对发生单匝短路变压器的物理特性进行了分析。场路直接耦合分析法可在每一计算步长实现场路间数据交换,大大提高计算准确性。

本文首次将场路直接耦合分析法应用于 TV 匝间故障分析中。TV 与变压器结构不同,变压器一次绕组只有几十至几百匝,而发电机出口 TV 一次侧绕组通常由上万匝串联线匝构成,绕组匝数过大,直接按电力变压器的建模方法将导致计算不收敛。对此,本文提出绕组分组技术,使用 Maxwell 和 Simplorer 软件对单相 TV 电磁转换过程进行了场路直接耦合的建模计算,求解出故障时电、磁特征量的变化情况以及各个绕组的自感值和绕组之间的互感值。结合仿真结果,设计并搭建了实验平台,对有限元仿真模型的准确性进行了验证。提出不同故障方式的一次绕组电压和电流等故障电气量的解析计算模型。结果表明:解析模型的一次电流、故障环流与仿真值一致,解析计算值与仿真值的误差在 1% 以内。

## 1 电压互感器有限元模型及分析

### 1.1 电压互感器内部结构二维有限元建模

某单相双绕组电磁式电压互感器型号和铭牌参数见表 1,其中电压比为  $23(21/19/17/15/13/11/9/7/5/3)/\sqrt{3}/0.1(0.05)/\sqrt{3}$ 。

表 1 某电磁式电压互感器参数  
Tab.1 Parameters of an electromagnetic voltage transformer

项目	参数	项目	参数
TV 型号	JDZX12-24	额定频率/Hz	50
准确级	3P	额定负荷/VA	20, $\cos\theta=0.8$
级性	减	相数	1

图 1 为实验电压互感器铁芯和绕组结构参数。根据图 1 所示铁芯和绕组参数,建立单相 TV 实物模型,并将建好的三维模型导入到 SpaceClaim 软件中进行优化,提高其对 Maxwell 软件的兼容性。实际 TV 铁芯由硅钢片堆积而成。硅钢片尖锐的棱角使仿真时剖分的网格十分密集,极大增加了计算量及收敛难度。实际建模中将硅钢片阶梯状堆叠优化成如图 2 所示的光滑曲面。

TV 与变压器结构不同,变压器一次绕组通常包含几十至几百匝,而 TV 一次侧绕组由一组 18 400 匝串联线匝构成,绕组匝数过大,直接参照

电力变压器建模方法将导致计算不收敛。对此，本文提出绕组分组技术，将一组串联线匝构成的绕组分成多个串联的同心圆筒结构，每一个同心圆筒结构等效多匝绕组，每 2 段同心圆筒间的间隙是多匝绕组间隙总和的平均值。

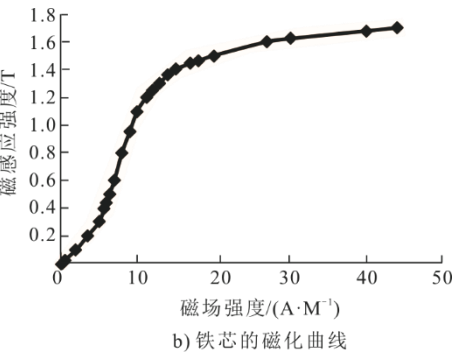
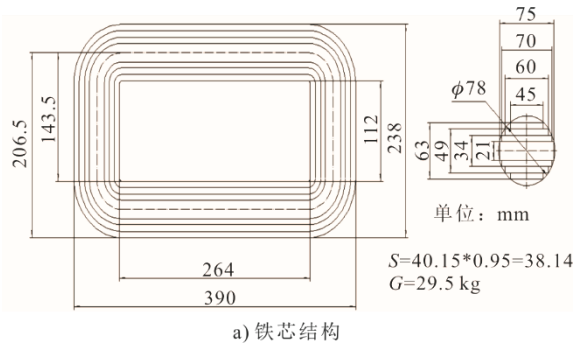


图 1 实验电压互感器铁芯和绕组结构参数  
Fig.1 Experimental voltage transformer core and winding structure parameters

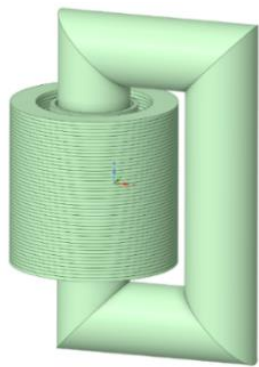


图 2 电压互感器铁芯和绕组的 3D 模型  
Fig.2 3D model of voltage transformer core and winding

进行 TV 匝间短路外特性分析时，不考虑瞬态电磁场的三维空间分布，且二维模型相比于三维模型计算速度具有显著优势，可由三维模型剖分，生成的剖面构成二维模型，结果如图 3 所示。

实验 TV 一次绕组 18 400 匝，分为 46 组，每组 400 匝，二次绕组 80 匝，分为 1 组。TV 空载时仿真外部电路接线如图 4 所示。

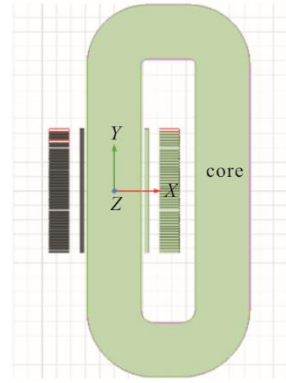


图 3 电压互感器铁芯和绕组的 2D 模型  
Fig.3 2D model of voltage transformer core and winding

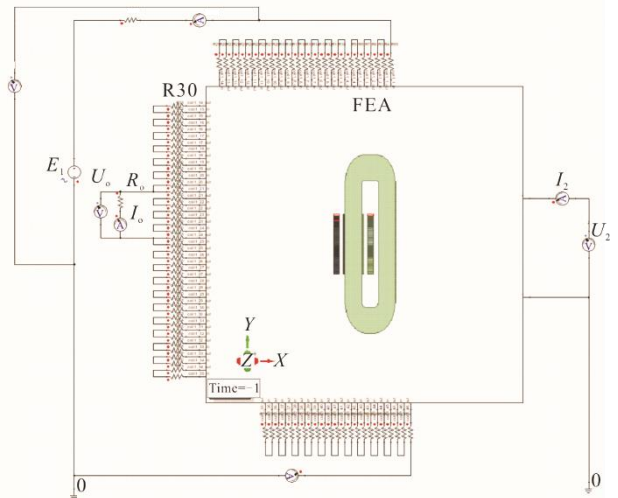


图 4 实验电压互感器空载时仿真  
Fig.4 Simulation diagram of voltage transformer with no load

根据仿真结果，获得的状态参数设计实验方案，进行现场实验。表 2 是对故障在不同位置、不同短路匝比、不同过渡电阻时，一次入口电流、故障环流、二次电压的部分仿真与实验值，发现各个故障情况下实验值和仿真值的误差都较小，均在 9% 以内，验证了 TV 二维有限元仿真模型具有较高的准确性。

### 1.2 电压互感器特征量分析

#### 1.2.1 磁场特征量

正常运行时 TV 内部磁场分布的仿真结果如图 5 所示。由图 5 可见，实验 TV 绕组包围铁芯柱，线圈电流在铁芯中产生主磁通，并且在铁芯和一次、二次绕组间产生较大漏磁通<sup>[20]</sup>。磁力线纵向分布平行于 Y 轴，在绕组顶部和底部分布的磁力线会沿着铁芯形状发生弯曲。绕组附近磁场强度矢量由水平、竖直分量合成。正常运行时磁场能量很小，绝大部分磁场能量小于 10.0 J/m<sup>3</sup>，铁芯内侧端部磁场能量最大，为 11.5 J/m<sup>3</sup>。

表 2 电气量的部分仿真与实验值  
Tab.2 Partial simulation and experiment of electrical quantity

短路类型	一次电流 仿真值/A	一次电流 实验值/A	一次电流 相对误差/%	故障环流 仿真值/A	故障环流 实验值/A	故障环流 相对误差/%	二次电压 仿真值/V	二次电压 实验值/V	二次电压 相对误差/%
A23、A21 抽头经 3 707 Ω 发生匝间短路	0.023	0.025	8.00	0.269	0.280	3.93	0.055 527 84	0.055 595 65	0.1220
A23、A21 抽头经 2 645 Ω 发生匝间短路	0.031	0.033	6.06	0.358	0.372	3.76	0.054 957 12	0.055 047 83	0.1648
A23、A21 抽头经 1 059 Ω 发生匝间短路	0.062	0.064	3.13	0.708	0.728	2.75	0.052 884 32	0.053 156 52	0.5121
A15、A13 抽头经 3 709 Ω 发生匝间短路	0.024	0.023	4.35	0.271	0.285	4.91	0.055 907 84	0.055 947 83	0.0715
A15、A13 抽头经 2 641 Ω 发生匝间短路	0.031	0.031	0	0.359	0.379	5.28	0.055 055 69	0.055 113 04	0.1041
A15、A13 抽头经 1 055 Ω 发生匝间短路	0.062	0.061	1.64	0.710	0.750	5.33	0.052 486 29	0.052 595 65	0.2079
A13、A11 抽头经 3 716 Ω 发生匝间短路	0.023	0.022	4.55	0.269	0.282	4.61	0.055 568 72	0.055 604 35	0.0641
A13、A11 抽头经 2 660 Ω 发生匝间短路	0.031	0.030	3.33	0.355	0.374	5.08	0.054 786 15	0.054 821 74	0.0649
A13、A11 抽头经 1 056 Ω 发生匝间短路	0.062	0.060	3.33	0.711	0.757	6.08	0.052 599 40	0.052 652 17	0.1002
A3、N 抽头经 4 710 Ω 发生接地短路	0.040	0.037	8.11	0.304	0.324	6.17	0.054 076 56	0.054 017 39	0.1095
A3、N 抽头经 3 687 Ω 发生接地短路	0.049	0.046	6.52	0.373	0.399	6.52	0.053 597 91	0.053 521 74	0.1423
A3、N 抽头经 2 626 Ω 发生接地短路	0.063	0.059	6.78	0.484	0.519	6.74	0.052 549 30	0.052 491 3	0.1105

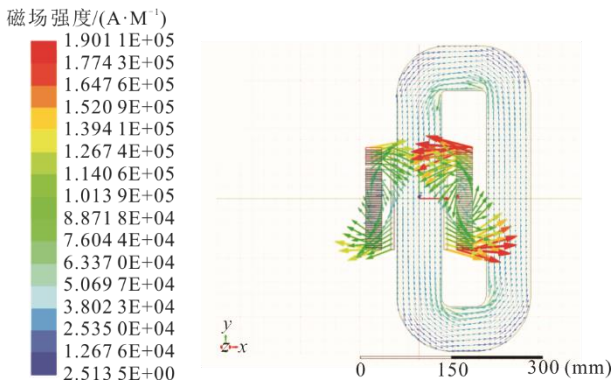


图 5 正常运行时的磁场分布

Fig.5 Magnetic field distribution during normal operation

图 6 为首端短路匝比为 26% 时电压互感器的磁场分布。由图 6 可见，故障发生时，故障环流及一次绕组安匝数都较大，故障绕组周围的故障磁场较强，并产生大量横向漏磁通<sup>[21]</sup>，磁场强度约为正常运行场强的 57 800 倍。磁场能量呈放射状分布，故障绕组附近磁场能量最强，磁场能量约为正常运行

磁场能量的 1 960 倍，非故障点磁场能量与其距故障绕组位置呈反比关系。

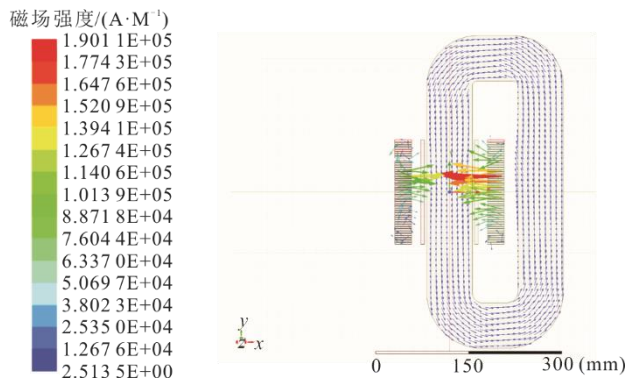


图 6 首端短路匝比为 26% 时电压互感器的磁场分布

Fig.6 The magnetic field distribution of the TV when the initial short-circuit turns ratio is 26%

图 7 为中部绕组发生匝间短路时铁芯和绕组的磁力线分布。由图 7 可见，TV 中部第 21 与 24 组经过渡电阻 2 kΩ 发生匝间短路时，故障绕组周围

磁场较强，短路绕组两端存在较多横向漏磁通，磁感应强度约为正常时的 900 倍，故障绕组中心和正常绕组周围漏磁通减少，破坏了沿绕组高度方向的纵向漏磁场。

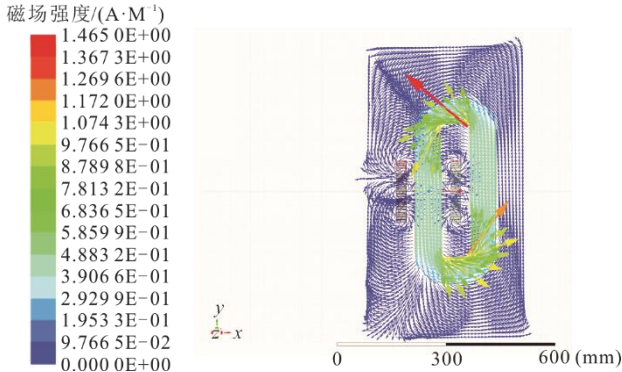


图 7 中部绕组发生匝间短路时铁芯和绕组的磁力线分布  
Fig.7 Distribution of magnetic lines of force when the middle winding is short-circuited between turns

1.2.2 电场特征量

图 8 为一次入口电流。由图 8 可见，正常空载运行时，一次侧电流近似于 0。匝间短路后，一次电流明显增加，且过渡电阻越小，短路匝比越大，一次电流越大，过渡电阻消耗的功率也越大。

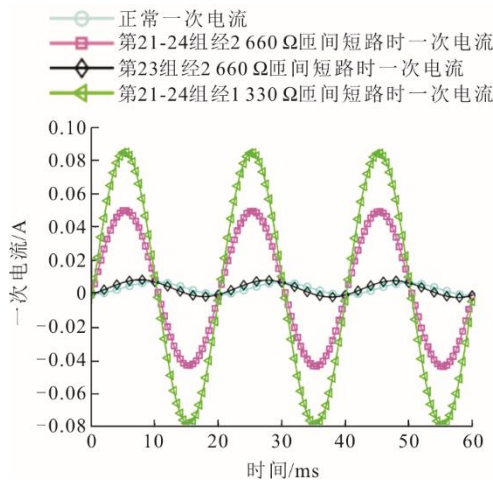


图 8 一次入口电流  
Fig.8 Primary inlet current

图 9 为不同故障方式及过渡电阻的故障换流。由图 9 可见，发生匝间短路时，产生循环电流，且过渡电阻越小、短路匝比越大，环流也会越大。故障环流远高于正常运行时一次绕组流过的电流，匝间短路对一次绕组会产生巨大危害。

2 电压互感器匝间短路解析模型

正常运行的 TV 二次侧可视为空载运行，由有限元仿真模型可得，TV 正常及故障时各绕组自感

及绕组间互感。本节在不同故障方式下，提出基于绕组分组技术的 TV 匝间故障解析模型，并通过解析模型与仿真模型对比，验证解析模型准确性。

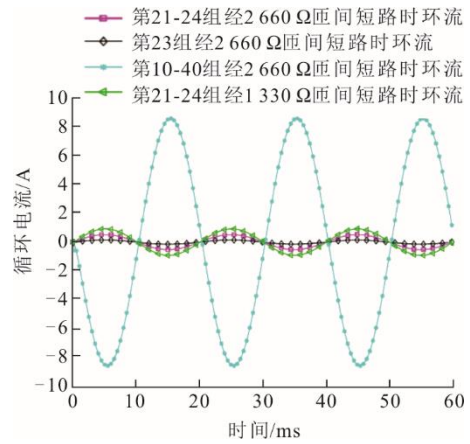


图 9 不同故障方式及过渡电阻的故障换流  
Fig.9 Fault circulating current of different fault modes and transition resistance

2.1 电压互感器正常运行矩阵表达式

采用绕组分组的正常运行 TV 等效电路如图 10 所示。据此，得到正常空载运行 TV 解析模型<sup>[22]</sup>为：

$$u = A \cdot Z \cdot B \cdot i \tag{1}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}^T \tag{3}$$

$$Z = \begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 & \dots & j\omega M_{1i} & \dots & j\omega M_{1(n+1)} \\ j\omega M_{21} & \dots & j\omega M_{2i} & \dots & j\omega M_{2(n+1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ j\omega M_{i1} & \dots & R_i + j\omega L_i & \dots & j\omega M_{i(n+1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ j\omega M_{n1} & \dots & j\omega M_{ni} & \dots & j\omega M_{n(n+1)} \\ j\omega M_{(n+1)1} & \dots & j\omega M_{(n+1)i} & \dots & R_{n+1} + j\omega L_{n+1} \end{bmatrix} \tag{4}$$

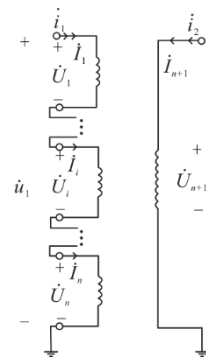


图 10 正常运行时 TV 等效电路  
Fig.10 TV equivalent circuit in normal operation

2.2 第  $i$  组首端接地短路矩阵表达式

接地短路可视为某一绕组端与地构成短路回路<sup>[23]</sup>, 第  $i$  组首端接地短路等效电路如图 11 所示。

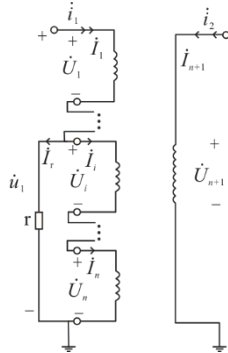


图 11 第  $i$  组首端接地短路等效电路

Fig.11 Equivalent circuit of the  $i$ -th group head end ground short circuit

故障绕组回路故障分流为:

$$\dot{I}_i = k \cdot \dot{i}_1 \quad (5)$$

$$k = \frac{r - \sum_{p=i}^n \sum_{q=1}^{i-1} C_{pq}}{r + \sum_{q=i}^n R_{1q} + \sum_{p=i}^n \sum_{q=i}^n D_{pq}} \quad (6)$$

$$C = \begin{bmatrix} M_{i1} & M_{i2} & \dots & M_{i(i-1)} \\ M_{(i+1)1} & M_{(i+1)2} & \dots & M_{(i+1)(i-1)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ M_{n1} & M_{n2} & \dots & M_{n(i-1)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$D = \begin{bmatrix} L_i & M_{i(i+1)} & \dots & M_{in} \\ M_{(i+1)i} & L_{i+1} & \dots & M_{(i+1)n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ M_{ni} & M_{n(i+1)} & \dots & L_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R = [R_i \quad R_{i+1} \quad \dots \quad R_n] \quad (9)$$

式中:  $r$  为过渡电阻;  $i$  为故障组数;  $n$  为 TV 一次绕组分组数。

TV 第  $i$  组首端接地短路时一次电流  $i$  和流过各绕组电流  $I$  之间的关系为:

$$I = H \cdot i \quad (10)$$

$$I = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 & \dot{I}_2 & \dots & \dot{I}_{i-1} & \dot{I}_i & \dot{I}_{i+1} & \dots & \dot{I}_n & \dot{I}_{n+1} \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & k & k & \dots & k & 0 \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

$$i = \begin{bmatrix} \dot{i}_1 & \dot{i}_2 \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

原边接电源原边电压  $u_1$  恒定, TV 第  $i$  组首端接地短路时一次电压和一次电流之间的矩阵表达式为:

$$u = A \cdot Z \cdot H \cdot i \quad (14)$$

TV 第  $i$  组首端接地短路时一次电流和流过过渡电阻电流的关系式为:

$$I_r = i_1 - k \cdot i_1 \quad (15)$$

2.3 第  $i$  组与第  $j$  组之间发生匝间短路矩阵表达式

图 12 为第  $i$  组首端和第  $j$  组末端之间发生匝间短路等效电路。在故障绕组回路中由基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律可得:

$$\dot{I}_i = m \cdot \dot{i}_1 \quad (16)$$

$$m = \frac{r - \sum_{p=i}^j \sum_{q=1}^{i-1} C_{pq} - \sum_{p=1}^j \sum_{q=j+1}^n E_{pq}}{r + \sum_{q=i}^j R_{1q} + \sum_{p=i}^j \sum_{q=i}^j D_{pq}} \quad (17)$$

$$C = \begin{bmatrix} M_{i1} & M_{i2} & \dots & M_{i(i-1)} \\ M_{(i+1)1} & M_{(i+1)2} & \dots & M_{(i+1)(i-1)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ M_{j1} & M_{j2} & \dots & M_{j(i-1)} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$D = \begin{bmatrix} L_i & M_{i(i+1)} & \dots & M_{ij} \\ M_{(i+1)i} & L_{i+1} & \dots & M_{(i+1)j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ M_{ji} & M_{j(i+1)} & \dots & L_j \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$E = \begin{bmatrix} M_{i(j+1)} & \dots & M_{in} \\ M_{(i+1)(j+1)} & \dots & M_{(i+1)n} \\ \vdots & & \vdots \\ M_{j(j+1)} & \dots & M_{jn} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$R = [R_i \quad R_{i+1} \quad \dots \quad R_j] \quad (21)$$

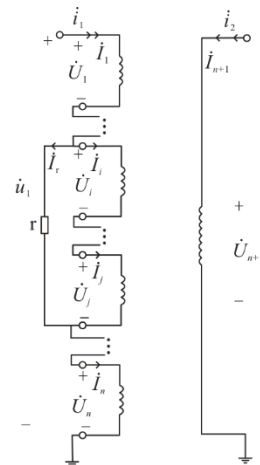


图 12 第  $i$  组首端和第  $j$  组末端之间发生匝间短路等效电路  
Fig.12 Equivalent circuit of the inter-turn short circuit occurs between the head of the  $i$ -th group and the end of the  $j$ -th group

TV 第  $i$  组首端和第  $j$  组末端之间发生匝间短路时, 一次电流  $i$  和 TV 正常空载运行时流过各个绕

组电流  $I$  之间的关系为:

$$I = V \cdot i \quad (22)$$

$$V = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & m & \cdots & m & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (23)$$

TV 第  $i$  组和第  $j$  组之间发生匝间短路时一次电压和一次电流之间的矩阵表达式为:

$$u = A \cdot Z \cdot K \cdot i \quad (24)$$

TV 第  $i$  组和第  $j$  组之间发生匝间短路时一次电流和流过渡电阻电流的关系式为:

$$I_r = i_1 - m \cdot i_1 \quad (25)$$

## 2.4 仿真验证

TV 第 41 组首端经 5 k $\Omega$  过渡电阻接地短路, 有限元模型 TV 入口一次电流有效值为 0.040 2 A, 故障环流有效值为 0.308 2 A, 一次电压有效值为

13 279.1 V, 二次电压有效值为 57.733 8 V。

由 TV 解析模型得一次电流有效值 0.040 4 A, 误差为 0.50%; 二次电流有效值 0, 误差为 0; 环流有效值为 0.308 2 A, 误差为 0。

TV 第 21 与第 24 组经 1 k $\Omega$  过渡电阻匝间短路。有限元模型入口一次电流有效值为 0.070 6 A, 故障环流有效值为 0.811 3 A, 一次电压有效值为 13 279.1 V, 二次电压有效值为 57.7338 V。

由 TV 解析模型得一次电流有效值 0.070 8 A, 误差为 0.28%; 二次电流有效值 0, 误差为 0; 环流有效值为 0.811 9 A, 误差为 0.07%。

部分其他故障方式下有限元仿真验证结果见表 3。由表 3 可知, 解析模型得到一次电流、故障环流与仿真模型一致, 二者相对误差均小于 1%。

表 3 解析模型与有限元模型计算值误差  
Tab.3 Errors between the analytical model and the finite element model

短路类型	一次电流 解析值/A	一次电流 仿真值/A	一次电流 相对误差/%	故障环流 解析值/A	故障环流 仿真值/A	故障环流 相对误差/%
第 5 组经 1 k $\Omega$ 过渡电阻发生接地短路	0.004 600 0	0.004 578 0	0.48	0.045 487 0	0.045 418 9	0.15
第 23 组经 3 k $\Omega$ 过渡电阻发生接地短路	0.000 506 6	0.000 507 3	0.13	0.053 873 5	0.053 835 8	0.07
第 42 组经 5 k $\Omega$ 过渡电阻发生接地短路	0.000 179 6	0.000 180 2	0.33	0.056 038 4	0.056 139 5	0.18
第 1 组和第 5 组经 1 k $\Omega$ 过渡电阻发生匝间短路	0.103 788 7	0.104 362 7	0.55	0.649 519 2	0.651 996 8	0.38
第 22 组和第 27 组经 2 k $\Omega$ 过渡电阻发生匝间短路	0.086 943 0	0.086 338 6	0.70	0.541 265 8	0.539 862 2	0.26
第 38 组和第 44 组经 4 k $\Omega$ 过渡电阻发生匝间短路	0.065 708 9	0.065 933 1	0.34	0.463 941 5	0.464 591 9	0.14

## 3 结 论

1) 采用场路直接耦合法, 建立发电机出口单相电磁式 TV 二维有限元仿真模型, 获得了故障时的电、磁特征量。TV 正常空载运行时, 磁场强度、磁感应强度分布均匀, 磁场能量很小, 绝大部分磁场能量不超过 10 J/m<sup>3</sup>, 铁芯内侧端部可达 11.5 J/m<sup>3</sup>。TV 一次绕组两端或中部发生匝间短路时, 故障绕组内环流及一次绕组安匝数都较大, 故障绕组周围的故障磁场较强, 并产生较多横向漏磁通, 磁通分布发生畸变。故障绕组附近磁场强度矢量方向近似水平, 磁场强度约为正常运行场强的 57 800 倍。故障时磁场能量呈放射状分布, 故障绕组附近磁场能量最强, 增加约 1 960 倍, 非故障点磁场能量与其距故障绕组位置呈反比关系。

2) 正常空载运行时, 一次侧电流近似于 0。匝间短路后, 一次电流会明显增加, 且过渡电阻越小、短路匝比越大, 一次电流会越大, 过渡电阻消耗的功率也越大。发生匝间短路时, 产生循环电流, 且过渡电阻越小、短路匝比越大, 循环电流越大。TV

出现的环流远高于正常运行时一次绕组流过的电流, 匝间短路对一次绕组将产生巨大危害。

3) 由有限元仿真模型可得 TV 正常及故障时各个绕组自感及绕组间互感。在不同故障方式下, 提出了基于绕组分组技术的 TV 匝间故障解析模型, 并在各个故障方式下采用仿真模型验证, 二者相对误差均小于 1%。结果表明, TV 匝间故障解析模型进行一次电流、环流等故障特征量分析准确有效。

### [参 考 文 献]

- [1] 谢玉. 发电机出口电压互感器的故障与对策分析[J]. 集成电路应用, 2020, 37(8): 152-153.  
XIE Yu. Fault of voltage transformer at generator outlet and countermeasures[J]. Integrated Circuit Application, 2020, 37(8): 152-153.
- [2] 巨争号. 发电机电压互感器故障引起停机分析及对策[J]. 山西电力, 2014(3): 39-41.  
JU Zhenghao. Analysis and measurement for generator trip caused by generator VT fault[J]. Shanxi Electric Power, 2014(3): 39-41.
- [3] 陈俊, 陈佳胜, 张琦雪, 等. 发电机机端电压互感器匝间短路导致定子接地保护动作分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 143-147.  
CHEN Jun, CHEN Jiasheng, ZHANG Qixue, et al.

- Operation analysis of stator earch protection due to voltage transformer inter-turn short-circuit at generator terminal[J]. Power System Automation, 2016, 40(10): 143-147.
- [4] 吕景顺, 孙亚明, 马建海, 等. 发电机出口电压互感器匝间故障引起机组定子接地保护动作实例分析[J]. 大电机技术, 2009(9): 74-75.  
LYU Jingshun, SUN Yaming, MA Jianhai, et al. Example analysis of stator grounding protection action caused by inter turn fault of voltage transformer at generator outlet[J]. Large Motor Tehnology, 2009(9): 74-75.
- [5] 刘宝华, 杨洪亮, 王福才. 发电机出口 PT 匝间短路故障分析[J]. 电站系统工程, 2013, 29(6): 53-54.  
LIU Baohua, YANG Hongliang, WANG Fucui. Fault analysis of PT turn-to-turn short circuit at generator outlet[J]. Power Station System Engineering, 2013, 29(6): 53-54.
- [6] 赵立新. 一起发电机定子接地保护动作分析[C]//全国发电机组技术协作会. 第二届全国发电厂电气专业技术交流研讨会论文集: 2009 年卷. 北京: 中国电力出版社, 2009: 7-58.  
ZHAO Lixin. Analysis of a generator stator grounding protection action[C]//National Generator Set Technical Cooperation Meeting. Proceedings of the Second National Symposium on Electrical Professional Technology Exchange of Power Plants: Vol.2009. Beijing: China Power Publishing House, 2009: 7-58.
- [7] 赵淼, 赵文炎, 高自伟, 等. 电压互感器一次绕组匝间短路引起发电机运行异常的分析及处理[J]. 黑龙江电力, 2014, 36(2): 160-162.  
ZHAO Miao, ZHAO Wenyan, GAO Ziwei, et al. Analysis and treatment of abnormal generator operation caused by inter turn short circuit of primary winding of voltage transformer[J]. Heilongjiang Electric Power, 2014, 36(2): 160-162.
- [8] 张兵海, 苏艳宾, 马彦河, 等. TV 故障引起的发电机定子接地保护动作分析[J]. 河北电力技术, 2011, 30(4): 5-6.  
ZHANG Binghai, SU Yanbin, MA Yanhe, et al. Analysis of generator stator grounding protection action caused by TV fault[J]. Hebei Electric Power Technology, 2011, 30(4): 5-6.
- [9] 李军保, 焦斌, 潘生华, 等. 一起发电机电压互感器匝间故障导致的跳机事故分析[C]//中国电机工程学会继电保护专业委员会. 继电保护专业年会暨学术研讨会论文集: 2009 年卷. 北京: 中国水利水电出版社, 2013: 42-49.  
LI Junbao, JIAO Bin, PAN Shenghua, et al. Analysis of a trip accident caused by a generator voltage transformer turn-to-turn fault[C]//Proceedings of the Relay Protection Professional Committee of the Chinese Society for Electrical Engineering. Proceedings of the Annual Conference and Academic Symposium on Relay Protection: Vol.2009. Beijing: China Water Resources and Hydropower Publishing House, 2013: 42-49.
- [10] 曹沂, 刘雁宾, 刘爱军. 电压互感器故障引起发电机跳闸原因分析及防范措施[J]. 电力自动化, 2018, 36(12): 127-128.  
CAO Yi, LIU Yanbin, LIU Aijun. Cause analysis and preventive measures for generator trip caused by voltage transformer failure[J]. Electric Power Automation, 2018, 36(12): 127-128.
- [11] 朱宇琦. 浅析变压器与电压互感器的区别[J]. 数字通信世界, 2018, 30(6): 209.  
ZHU Yuqi. Analysis of the difference between trans-
- former and voltage transformer[J]. Digital Communication World, 2018, 30(6): 209.
- [12] 林春耀, 欧小波, 杨贤, 等. 短路冲击状态下的变压器振动特性及匝间短路故障检测[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3569-3576.  
LIN Chunyao, OU Xiaobo, YANG Xian, et al. Transformer vibration characteristics and inter-turn short-circuit fault detection under short-circuit impulse state[J]. High Voltage Technology, 2018, 44(11): 3569-3576.
- [13] 李姗姗, 张建华. 基于等效电流法的变压器匝间短路故障分析[J]. 变压器, 2020, 57(4): 43-46.  
LI Shanshan, ZHANG Jianhua. Analysis of transformer turn-to-turn short circuit fault based on equivalent current method[J]. Transformer, 2020, 57(4): 43-46.
- [14] PATRICK B, PIERRE B, MICHEL M. A Transformer model for winding fault studies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(4): 690-699.
- [15] 王雪, 王增平. 变压器内部故障仿真模型的设计[J]. 电网技术, 2004, 28(12): 50-52.  
WANG Xue, WANG Zengping. Design of transformer internal fault simulation model[J]. Power Grid Technology, 2004, 28(12): 50-52.
- [16] 张建华. 发电机出口电压互感器匝间短路分析及在线检测装置设计[J]. 电气技术, 2020, 11(2): 110-113.  
ZHANG Jianhua. Inter-turn short circuit analysis of generator outlet voltage transformer and design of online detection device[J]. Electric Technology, 2020, 11(2): 110-113.
- [17] EHSANIFAR A, DEHGHANI M, ALLAHBAKHSI M. Calculating the leakage inductance for transformer inter-turn fault detection using finite element method[C]//Iranian Conference on Electrical Engineering, Tehran, Iran: IEEE, 2017: 1372-1377.
- [18] WANG H, BUTLER K L. Finite element analysis of internal winding faults in distribution transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(3): 422-428.
- [19] 张冰倩, 咸日常, 于洋, 等. 匝间短路故障下电力变压器绕组的物理特性分析[J]. 高电压技术, 2021(6): 2177-2185.  
ZHANG Bingqian, XIAN Richang, YU Yang, et al. Analysis of physical characteristics of power transformer windings under inter-turn short circuit fault[J]. High Voltage Engineering, 2021(6): 2177-2185.
- [20] LIU P, DINAVAH V. Real-time finite-element simulation of electromagnetic transients of transformer on FPGA[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(4): 1991-2001.
- [21] KLADAS A G, PAPADOPOULOS M P, TEGOPOULOS J A, et al. Leakage flux and force calculation on power transformer windings under short-circuit: 2D and 3D model based on the theory of images and the finite element method compared to measurements[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1994, 30(5): 3487-3490.
- [22] 邱关源, 罗觉先. 电路[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 518-519.  
QIU Guanyuan, LUO Juexian. Circuit[M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006: 518-519.
- [23] 王泽忠, 潘超, 周盛, 等. 基于棱边有限元的变压器场路耦合瞬态模型[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 146-152.  
WANG Zezhong, PAN Chao, ZHOU Sheng, et al. Transformer field circuit coupling transient model based on edge finite element[J]. Journal of Electrotechnics, 2012, 27(9): 146-152.

(责任编辑 杜亚勤)