

基于多线圈耦合的变压器数学模型及其应用

丁平, 龚庆武, 陈伟, 徐锐, 刘鹏

(武汉大学电气工程学院, 湖北省武汉市 430072)

A Transformer Model Based on Coupling Multi-windings and Its Application Research

DING Ping, GONG Qing-wu, CHEN Wei, XU Rui, LIU Peng

(School of Electric Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China)

ABSTRACT: In commonly used analysis software of steady-state faulted power system, transformer model, which gives the impedance of positive, negative, zero sequence according to its connection difference and whether the neutral point is grounded, causes the impedance of zero sequence networks be different from the positive and negative networks. So it becomes extremely difficult to analysis the lapped fault and specialized fault. Also, people always abandon the inspection of fault inside the transformer to avoid the most complicated computation. A coupling multi-windings-based transformer model with nodal admittance matrix is proposed, which does not have to treat the three sequence networks respectively and can readily describe the interfaces between transformer and other component of power system in sequential model. This new model is useful to accomplish the modulation of analyses software of steady-state faulted power system and cut sharply off the workload of calculation with improved count accuracy if the fault occurs outside the transformer. This paper also gives the approximate algorithm when transformers have a inner fault. In analysis software which simulates fault occur anywhere in power system networks, the algorithm proposed will have extensively application due to the simple programming and relatively high accuracy.

KEY WORDS: transformer model; power system analysis software; algorithm

摘要: 在常用的电力系统稳态故障分析软件中, 变压器模型通常按绕组接线组别、中性点接地方式分正序、负序和零序分别给出, 造成系统零序网络阻抗参数和正负序不同, 因而对多重故障和特殊故障的分析变得困难。而对变压器内部故障, 人们通常避免分析, 以免除极其繁杂的运算。该文构建了一种用节点导纳阵描述的多线圈耦合的变压器数学模型。它无需区别三序网络, 能方便地与用序分量描述的其它系统元件接口, 有利于实现电力系统稳态故障分析软件的模块

化。该模型在提高计算精度的前提下大大减少了变压器外部故障的计算量, 对变压器内部故障, 文中也提出了基于该模型的近似算法。在需要对电力网络中任意位置的故障进行仿真计算的软件中, 该算法由于编程简单、精度较高而有广阔的应用前景。

关键词: 变压器模型; 电力系统分析软件; 算法

0 引言

在现有的电力系统分析软件中, 对于稳态短路故障的算法, 主要是根据故障的位置和性质, 分别列出故障后电力系统的正、负、零各序等值电路, 再运用各种整合和化简的方法进行分析^[1-9]。造成三序网络分列的原因是变压器特殊的元件特性, 随接线组别和中性点接线方式不同, 它呈现不同的零序阻抗。这使各序等值网络不能统一, 给分析计算带来麻烦。

对变压器内部故障, 传统稳态短路故障分析软件一般只对其端口处, 也是最严重的短路情况进行分析, 以避免复杂的磁路耦合计算。当需要分析变压器内部除端口外其它点的短路故障时, 通常需借助其它大型的分析软件。文献[10-11]分别以 ATP-EMTP 和 MATLAB 为平台, 构建变压器内部故障的暂态模型以满足继保整定和暂态分析等的需要。

显然, 在电力系统仿真等应用中, 需要一种移植性好、操作性强的计算方法, 能方便地与其它程序接口, 同时较准确地给出变压器内部故障的稳态值。另外, 随着电网结构日益复杂, 规模不断扩大, 希望采用更直接、简洁的方法对电力系统稳态故障进行分析。本文以变压器多耦合线圈模型为基础, 建立一种只需考虑电力系统中各元件联结关系, 不必区别对待正、负、零序网络, 多重故障, 特殊故

障方式(如不接地系统单相接地)的直接算法。对变压器内部故障,文中也给出近似的计算模型。本文以两绕组变压器为例进行的分析同样适用于三绕组变压器。

1 变压器正常状态的模型

三相变压器可看作多条支路的电阻、电感串联耦合电路,如图 1 所示的变压器可用如下原始阻抗模型描述(采用标幺制,不考虑变比,以下同):

$$U = ZI = (R + j\omega L)I \quad (1)$$

式中: $U=[U_1 U_2 U_3 U_4 U_5 U_6]^T$ 为各绕组端电压向量; $I=[I_1 I_2 I_3 I_4 I_5 I_6]^T$ 为各绕组电流向量, Z 为绕组阻抗矩阵; R 为绕组电阻矩阵,对角线各元素代表各绕组电阻,其它位置元素为零。

$$R = \begin{bmatrix} R_1 & & & & & \\ & R_2 & & & & \\ & & R_3 & & & \\ & & & R_4 & & \\ & & & & R_5 & \\ & & & & & R_6 \end{bmatrix}$$

L 为绕组电感矩阵,对角线元素代表各绕组电感,非对角线元素代表各绕组之间的互感。

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} & L_{15} & L_{16} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} & L_{25} & L_{26} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{34} & L_{35} & L_{36} \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} & L_{44} & L_{45} & L_{46} \\ L_{51} & L_{52} & L_{53} & L_{54} & L_{55} & L_{56} \\ L_{61} & L_{62} & L_{63} & L_{64} & L_{65} & L_{66} \end{bmatrix}$$

R 和 L 矩阵中的元素可通过正序和零序的短路和空载试验参数计算得到^[12]。根据计算性质有如下事项必须注意:

(1) 不能忽略励磁阻抗但不计饱和的影响。正常运行或外部短路时,励磁阻抗维持在比较大的数值,若将其忽略将得不到图 1 中带耦合支路的模型。

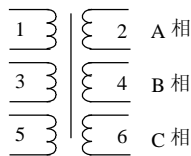


图 1 变压器正常状态多线圈耦合模型

Fig.1 Coupling-winding model of normal transformer

(2) 频率额定。在以后推导中将直接用 X 代替 $j\omega L$, X_{ij} 代替 $j\omega L_{ij}$ 。

与系统接口常用节点导纳矩阵 Y , 表达式为

$$I_m = YU_m \quad (2)$$

$$Y = CZ^{-1}C^T \quad (3)$$

其中 C 为节点和支路间的关联矩阵,对图 1 所示变压器,假定原边绕组为 1、3、5,采用星型连接,副边 2、4、6 绕组三角形连接,超前原边 30° ,则原边节点 A、B、C、N 和副边节点 a、b、c 间关联矩阵为

$$C = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ N \\ a \\ b \\ c \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

$I_m=[I_A I_B I_C I_a I_b I_c]^T$ 为各节点注入电流列向量。

$U_m=[U_A U_B U_C U_a U_b U_c]^T$ 为各节点电压列向量。

如变压器 Y 侧中性点直接接地,节点导纳矩阵中中性点对应的行和列可直接划去;若 Y 侧中性点不接地,采用接点消去法,消去节点导纳矩阵中中性点对应的行和列,具体方法可参照下文消去变压器内部故障节点的操作,相应的 I_m 和 U_m 向量各降一维。最后将该模型转化为序分量以使其它网络元件的导纳矩阵有简洁的形式。具体分析如下:

(1) 事实上,在系统正常稳态运行时该模型和常用的由正序空载、短路试验建立的变压器稳态等值电路保持一致,但是,基于多线圈耦合的变压器数学模型再现了变压器的绕组联结关系,物理概念更为清晰。

(2) 同样由于模型再现了变压器的绕组结构,不论变压器 Δ 侧或不接地 Y 侧发生何种性质的故障,零序电流将被限制在非常小的值。由于计算过程的舍入误差,零序电流不会严格到零,这和实际电力系统中存在零序泄漏电流的情况相似。

(3) 若变压器 Δ 侧或不接地 Y 侧发生单相接地,零序电流同样被限制在接近于零的小值,从而使流经过渡电阻的电流非常小,但已经足够将故障相电压拉低至适当的值,这也和实际电力系统的情况类似,意味着对该种故障不需专门考虑。

(4) 在序网中用节点导纳阵进行计算是有益的,因为它能带来一定程度的简化:非故障的变压器和线路模型有简洁的形式,容易获得序分量形式的故障电路导纳阵^[1]。

(5) 由以上分析可见,各序分量在模型中被

自然改变幅值, 转移角度或者基本清除, 正如在实际电力网络中发生的那样: 各序电流流经的是同样的网络设备, 只不过因为网络元件特性使它们相应发生变化。因此各序网络不必分别列出, 只须按各元件的联结关系接入相应的节点导纳阵即可进行故障分析。

(6) 同样由于各序分量被自然对待, 外部故障重数不是问题, 只要能给出故障元件的节点导纳阵, 用其替换该元件原先的正常导纳阵在全系统节点导纳阵中的位置即可。而故障元件的节点导纳阵总可以得到, 文献[1]中有较全面的阐述。

(7) 当变压器空载或其 Δ 侧和不接地 Y 侧无零序阻抗时, 变压器节点阻抗阵主对角线上对应 Δ 侧和不接地 Y 侧零序阻抗的位置上应补入一个非常小的数, 以免矩阵奇异。

(8) 如果缺少零序试验参数, 对常见的五芯变压器或三个单相变压器形成的组合, 可以假设零序试验参数和正序参数相同。

2 变压器内部故障状态的近似模型

2.1 概述

模拟变压器内部故障是非常困难的。在有电源侧经过绕组入地或进入其它相的故障电流是励磁性质的, 将使不同的铁心柱饱和程度不同; 同一铁心柱上的线圈在不同的高度电流不同也使磁场畸变。令人可信的仿真可以先用有限元法求解磁场分布, 再确定电抗参数^[13-14]。然而, 往往缺乏足够的资料形成求解磁场必须的条件, 同时故障分析的研究目的也允许一定的近似。本文采用如下步骤建立近似模型。

2.2 处理励磁电抗

如果短路能量的能量都经过了铁心传变, 则认为励磁电抗不发生变化, 否则认为铁心在故障电流下饱和, 励磁电抗最大不会超过空心电感值, 且挂在靠近铁心的绕组上。如文献[12]所述, 绕组分开的双绕组变压器, 空心电感的典型值为两倍短路电抗; 自耦变压器中心电感典型值为 4~5 倍短路电抗。在无试验数据的情况下, 三绕组变压器的空心电感值可取为 2 倍各侧短路电抗之和。同时励磁性质的故障电流将造成故障相铁心的极度饱和, 部分磁通穿过空气隙和外壳形成回路, 使故障相励磁电抗小于空心电感值。由于故障线圈自电抗的变化, 在一定程度上反映了励磁电抗的变化, 以此为依据, 建立近似修正方法如下:

(1) 单个绕组部分匝被短路。设原绕组自电

抗为 X_i , 未短路匝数和总匝数比为 a , 短路跨接电阻为 R_d , 则对该绕组所在相的励磁阻抗乘系数 m 。

$$m = \{(1-a)R_d / [(1-a)X_i + R_d] + a\}^2 \quad (5)$$

(2) 绕组间短路。设短路点至绕组首端的线匝和总匝数之比为 a , 短路跨接电阻为 R_g , 原绕组自电抗为 X_i , 则对故障绕组所在相的励磁阻抗乘系数 n 。

$$n = \{(1-a)R_g / [(1-a)X_i + R_g] + a\}^2 \quad (6)$$

(3) 复合短路。某相中一个或多个绕组上既有部分线匝被短接, 又有绕组间短路, 则该相的励磁阻抗乘系数 k 。

$$k = 1 / (\sum_{i=1}^p m_i^{-1} + \sum_{j=1}^q n_j^{-1}) \quad (7)$$

式中: p 为发生单个线匝被短接的绕组总数; m_i 为只考虑绕组部分线匝被短接时的修正系数; q 为该相中发生绕组间短路的绕组总数; n_j 为分别单独考虑各绕组间短路的修正系数。

2.3 分割绕组

假定短路阻抗和励磁损耗不变, 根据修正后的励磁电抗, 按文献[12]可以得到式(1)所描述的变压器原始阻抗模型。事实上, 由于故障绕组在短路点前后的电流不同, 必须分割。非故障绕组自、互阻抗不变, 与新增绕组有关的参数按照以下原则计算: 与匝数比一致、考虑漏磁因子、保持与原绕组在相同激励状况下磁链不变。Patrick BASTARD 等在文献[15]中按上述原则研究了变压器内部故障时对各绕组漏磁因子的处理及绕组参数的计算。由于难以获得变压器内部结构和故障点的空间位置, 用以下经验方法近似考虑漏磁的影响:

(1) 绕组对地短路, 被分割成的两部分漏磁因子 s_1 为 0.01。

(2) 绕组内部发生匝间短路, 被短路线圈与未被短路线圈间漏磁因子 s_2 为 0.3, 其它均取 0.01。

(3) 新分割出的线圈与其它不同相或不同侧的线圈间互感按匝数比划分。

不失一般性, 以如图 2 所示 3、6 绕组间经过渡电阻 R_g 短路为例分析对原始阻抗阵的分割。假定 7、3 绕组匝数比为 a , 9、6 绕组匝数比为 b , 则 3、6 绕组被分割成 7、8、9、0 四个线圈, 故障后变压器原始阻抗矩阵 Z_n 增阶为 8×8 , 表达式与式(1)相似, 3、6 绕组参数被 7、8、9、0 绕组参数代替。以绕组 7 为例, 有

$$R_7 = aR_3 \quad (8)$$

$$X_7 = a^2 X_3 / [(1-a)^2 + 2a(1-a)\sqrt{1-s_1 + a^2}] \quad (9)$$

$$X_{78} = X_3 \sqrt{1-s_1} / [(1-2a+2a^2) / (a-a^2) + 2\sqrt{1-s_1}] \quad (10)$$

$$X_{79} = ab X_{36} \quad (11)$$

$$X_{70} = a(1-b) X_{36} \quad (12)$$

$$X_{7i} = X_{i7} = a X_{3i} \quad (i=1,2,4,5) \quad (13)$$

其它受影响的绕组参数比照式(8)~(13)相应导出。

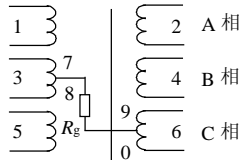


图 2 变压器 3, 6 绕组短路的多线圈耦合模型
Fig.2 Coupling-winding model of transformer short-circuited in winding 3 and winding 6

2.4 导出模型

获得故障状态下的变压器原始阻抗阵 Z_n 后,便可推导增阶的节点导纳阵 Y_n 。仍以图 2 所示模型为例, 设 3 线圈故障点为 K , 6 线圈故障点为 M , 线圈连接方式和式(4)相同, 则节点和支路间的关联矩阵 C_n 为

$$C_n = a \begin{matrix} & 1 & 2 & 4 & 5 & 7 & 8 & 9 & 0 \\ \text{A} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (14)$$

$$Y_n = C_n Z_n^{-1} C_n^T \quad (15)$$

所得节点导纳阵 Y_n 为 9×9 阶, 设其元素为 Y_{nij} ($i, j=1,2,\dots,9$)。再考虑过渡电阻 R_g 的影响, 分别将 Y_{n88} 和 Y_{n99} 加 $1/R_g$, Y_{n89} 和 Y_{n98} 减 $1/R_g$, 形成含故障电路的节点导纳矩阵 Y , 其元素为 $Y_{ij}(i,j=1,2,\dots,9)$ (事实上, 不论故障电路导纳阵具有何种形式, 总能整合进 Y 阵)。由于 8、9 节点为浮游节点, 可将其消去, 过程如下。令

$$Y_1 = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} & Y_{16} & Y_{17} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} & Y_{26} & Y_{27} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} & Y_{36} & Y_{37} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} & Y_{46} & Y_{47} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} & Y_{56} & Y_{57} \\ Y_{61} & Y_{62} & Y_{63} & Y_{64} & Y_{65} & Y_{66} & Y_{67} \\ Y_{71} & Y_{72} & Y_{73} & Y_{74} & Y_{75} & Y_{76} & Y_{77} \end{bmatrix} \quad Y_2 = \begin{bmatrix} Y_{18} & Y_{19} \\ Y_{28} & Y_{29} \\ Y_{38} & Y_{39} \\ Y_{48} & Y_{49} \\ Y_{58} & Y_{59} \\ Y_{68} & Y_{69} \\ Y_{78} & Y_{79} \end{bmatrix}$$

$$Y_3 = \begin{bmatrix} Y_{81} & Y_{82} & Y_{83} & Y_{84} & Y_{85} & Y_{86} & Y_{87} \\ Y_{91} & Y_{92} & Y_{93} & Y_{94} & Y_{95} & Y_{96} & Y_{97} \end{bmatrix} \quad Y_4 = \begin{bmatrix} Y_{88} & Y_{89} \\ Y_{98} & Y_{99} \end{bmatrix}$$

$$Y_k = Y_1 - Y_2 Y_4^{-1} Y_3 \quad (16)$$

矩阵 Y_k 即为从变压器外部各端口看进去的故障后节点导纳阵。对不同的故障, 上述处理方法总能实施。根据故障变压器星型侧中性点是否接地, 应消去 Y_k 阵的中性点。如为不接地系统可在应用式(16)降阶时统一处理, 否则直接划去中性点所对应的行和列。然后将降阶后的 Y_k 阵转为序分量放入系统的节点导纳阵进行计算。

由于该模型再现了变压器内部各绕组和故障电路的拓扑结构, 能自动对各序电气量进行变换, 多重故障也只是增加等值线圈的个数及消节点的工作量, 故可直接应用于稳态故障计算。当变压器内、外部同时故障, 该模型也能利用拓扑约束自动分配潮流。

3 电力系统稳态故障计算的方法及算例

建立在多线圈耦合变压器模型上的电力系统稳态故障计算机算法相当简单, 计算步骤如下:

(1) 形成各元件序分量导纳阵模型, 不论是故障元件还是非故障元件。

(2) 按系统的联结方式建立节点和支路的关联矩阵, 每个系统元件的每个端口都对应一个 3×3 的单位阵。用关联矩阵和元件的导纳矩阵形成全系统的节点导纳阵。根据系统的规模, 可分片化简, 消去不需要的子区域。消去节点导纳的方法如式(16)所示, 消去节点注入电流的方法可查阅文献[1], 此处不再列出。

(3) 解方程 $I=YU$, 其中 Y 为化简后的系统节点导纳矩阵; I 为系统各保留节点的注入电流, 是已知量; U 为系统各保留节点的各序电压, 待求。

(4) 利用所得电压和系统节点导纳矩阵, 求解所需的电气量。

为验证本算法, 对图 3 所示简单电力系统进行变压器内外部稳态故障计算。

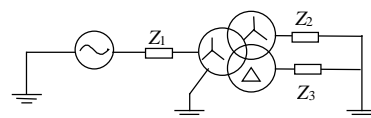


图 3 仿真用简单电力系统模型
Fig.3 Simple power system model for simulation

各元件参数如表 1~2 所示。参数均为以变压器 Y_0 侧电压为电压基准和各绕组匝数比为变比基准的标么值。

采用本文中的算法,针对不同的运行方式进行计算。将部分典型工况下计算结果如表3~4所示,各参数以电源电压A相为相位参考轴。

表中各运行方式描述如下:

方式1为变压器空载同时Y侧端口A相以3.3333的电阻单相接地,Δ侧端口B相以0.1的电阻单相接地。

方式2为变压器Y侧带给定负荷阻抗,Δ侧发

生复合故障,使序分量形式的负荷阻抗阵变为[0.1 0.06 0.02; 0.07 0.05 0.13; 0.08 0.06 0.12]。

方式3为变压器Y侧发生A相断线及B、C两相甩负荷,负荷导纳A相为0,B相为0.48,C相为0.48;Δ侧发生如方式2所描述的复合故障。

方式4指变压器带给定负荷阻抗,Y₀侧A相距首端40%线匝处以0.1的电阻单相接地。

方式5指变压器带给定负荷阻抗,Y₀侧A、B

表1 系统元件阻抗序参数

Tab.1 Sequence impedance of elements

	电源电压	线路阻抗 Z ₁	负荷阻抗 Z ₂	负荷阻抗 Z ₃
正序	1.045 5	0.002 4 + 0.030 7i	4.240 4 + 2.423 1i	3.756 4 + 2.757 0i
负序	0	0.002 4 + 0.030 7i	4.240 4 + 2.423 1i	3.756 4 + 2.757 0i
零序	0	0.032 5 + 0.097 9i	2.317 2 + 1.324 1i	2.052 7 + 1.506 5i

表2 变压器元件阻抗参数

Tab.2 Sequence impedance of transformer

	正序短路	零序短路	正序励磁	零序励磁
Y ₀ -Y	0.005 0 + 0.100 9i	0.005 0 + 0.090 8i		
Y ₀ -Δ	0.009 0 + 0.178 7i	0.009 0 + 0.232 3i	1.101 1×10 ³ + 217.391 3i	1.101 1×10 ³ + 217.391 3i
Y-Δ	0.008 0 + 0.063 4i	0.008 0 + 0.076 1i		

表3 变压器本体无故障,各端口的各序电气量

Tab.3 Ports' sequence value of normal operating transformer

运行方式	Y ₀ 侧电压	Y侧电压	Δ侧电压	Y ₀ 侧电流	Y侧电流	Δ侧电流
方式1	零序	0.000 0 + 0.000 0i	-1.045 0 + 0.000 1i	0.000 1 + 0.603 2i	-0.000 0 + 0.000 0i	0.087 2 + 0.642 9i × 10 ⁻¹⁴
	正序	1.045 3 + 0.000 0i	1.045 0 - 0.000 1i	0.522 4 + 0.301 6i	0.000 9 - 0.004 8i	0.087 2 + 0.642 9i × 10 ⁻¹⁴
	负序	-0.000 0 - 0.000 0i	-0.000 0 - 0.000 0i	-0.000 0 - 0.000 0i	0.000 0 - 0.000 0i	0.087 2 + 0.642 9i × 10 ⁻¹⁴
方式2	零序	-0.000 0 + 0.000 0i	-0.000 0 + 0.000 0i	0.198 0 - 0.260 4i	-0.000 0 - 0.000 0i	0.000 0 + 0.000 0i
	正序	0.932 9 + 0.000 6i	0.538 2 - 0.016 6i	0.144 7 + 0.077 9i	0.267 8 - 3.647 9i	0.091 0 - 0.071 2i
	负序	0.040 1 + 0.021 4i	0.177 0 + 0.104 1i	0.180 0 - 0.000 2i	-0.796 5 + 1.244 4i	0.043 8 - 0.004 5i
方式3	零序	-0.000 0 + 0.000 0i	0.366 5 + 0.048 6i	0.198 7 - 0.256 3i	-0.000 0 - 0.000 0i	0.000 0 + 0.000 0i
	正序	0.935 3 + 0.000 0i	0.548 7 - 0.018 9i	0.152 4 + 0.080 0i	0.280 6 - 3.569 8i	0.087 5 - 0.032 4i
	负序	0.041 8 + 0.024 3i	0.184 3 + 0.116 2i	0.187 1 + 0.002 8i	-0.892 6 + 1.293 6i	-0.087 5 + 0.032 4i

表4 变压器本体有故障,各端口的各相电气量

Tab.4 Ports' phase value of transformer with inner fault

运行方式	Y ₀ 侧电压	Y侧电压	Δ侧电压	Y ₀ 侧电流	Y侧电流	Δ侧电流
方式4	A相	0.892 0 - 0.122 8i	0.525 9 - 0.032 6i	0.139 3 + 0.173 2i	2.769 2 - 3.984 4i	0.086 9 - 0.072 4i
	B相	-0.487 0 - 0.895 4i	-0.269 8 - 0.651 0i	-0.005 5 - 0.367 8i	-2.012 4 + 1.807 1i	-0.129 3 - 0.078 4i
	C相	-0.487 7 + 0.809 6i	-0.256 2 + 0.683 5i	-0.133 8 + 0.194 6i	1.415 8 + 2.053 1i	0.042 5 + 0.150 8i
方式5	A相	0.827 6 - 0.164 2i	0.458 0 - 0.114 6i	0.068 4 + 0.040 9i	6.135 2 - 4.144 5i	0.064 7 - 0.078 0i
	B相	-0.620 2 - 0.633 1i	-0.233 8 - 0.377 1i	0.013 4 - 0.163 4i	-8.311 3 - 1.355 3i	-0.088 3 - 0.035 6i
	C相	-0.530 7 + 0.824 1i	-0.224 2 + 0.491 7i	-0.081 8 + 0.122 6i	2.915 8 + 2.443 8i	0.023 6 + 0.113 5i
方式6	A相	0.825 3 - 0.147 1i	0.661 6 - 0.052 5i	0.061 5 - 0.256 6i	5.546 1 - 4.266 9i	-0.000 0 + 0.000 0i
	B相	-0.611 0 - 0.612 1i	0.017 6 - 0.282 9i	0.071 5 - 0.293 9i	-9.056 5 - 1.115 2i	0.008 5 - 0.135 8i
	C相	-0.536 9 + 0.780 5i	-0.017 6 + 0.282 9i	-0.069 5 - 0.299 9i	4.300 4 + 2.349 7i	-0.008 5 + 0.135 8i
方式7	A相	1.045 3 - 0.000 0i	1.045 0 - 0.000 1i	0.522 4 - 0.000 0i	0.000 9 - 0.004 8i	0
	B相	-0.522 7 - 0.905 3i	-0.522 5 - 0.904 9i	-0.000 1 - 0.904 9i	-0.004 6 + 0.001 6i	0
	C相	-0.522 6 + 0.905 3i	-0.522 4 + 0.905 0i	-0.522 4 + 0.000 0i	0.003 7 + 0.003 2i	0
方式8	A相	0.961 2 + 0.036 6i	0.991 6 + 0.214 9i	0.503 5 - 0.096 0i	-0.935 7 - 2.815 7i	-0.000 0 + 0.000 0i
	B相	-0.495 5 - 0.791 8i	-0.086 4 - 0.324 0i	0.159 0 - 0.233 5i	-3.711 0 + 0.601 6i	-0.041 5 - 0.155 5i
	C相	-0.466 9 + 0.759 9i	0.086 4 + 0.324 0i	0.030 4 - 0.311 8i	4.607 0 + 2.188 6i	0.041 5 + 0.155 5i

两相故障。A 相故障点距首端 40% 线匝, B 相故障点距首端 50% 线匝, 故障点间跨接电阻 0.2, A 相故障点对地以 0.07 的电阻短接, B 相故障点对地以 0.04 的电阻短接。

方式 6 指变压器内部发生方式 5 的故障, 外部发生方式 3 的故障。

方式 7 指变压器空载, Δ 侧的 AC 绕组中点以 0.1 的电阻接地。

方式 8 指变压器内部发生方式 7 的故障, 外部发生方式 3 的故障。

4 结论

(1) 变压器本体无故障时, 本算法与传统算法(如补偿法^[4-6])计算结果非常接近, 产生偏差的原因是本算法考虑了零、正序参数的不一致, 具有更高的精确度。

(2) 对变压器内部故障, 计算结果符合以下规律: ①不对称短路, 中性点接地侧非故障相电压上升不超过 1.3 倍, 不接地侧不超过 $\sqrt{3}$ 倍。②相同位置的同类故障, 故障电路阻抗越小后果越严重; 被短路匝数越多, 故障也越严重。③故障电路阻抗相同的同类型故障, 故障点越接近中性点危害越小。说明本算法能定性模拟变压器内部故障。

本文提出一种建立在变压器多耦合线圈模型上的电力系统稳态故障算法, 它对发生在输、变、配电网络中变压器外部的任何故障具有编程简单、计算量小、计算精度高、物理概念明确的优点。同时本文也给出变压器内部故障的近似模型, 以消除电力系统稳态故障计算中的死角。在需要对电力网络中任意位置的故障进行仿真计算的软件中, 本文提出的算法由于编程简单、精度较高将有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [2] 刘万顺. 电力系统故障分析[M]. 北京: 北京电力工业出版社, 1980.
- [3] Anderson P M. Analysis of faulted power systems[M]. The Iowa State University Press, 1973.
- [4] 张伯明, 杨健. 一个规范化的计算机故障分析计算方法[J]. 清华大学学报, 1995, 35(2): 32-38.
Zhang Boming, Yang Jian. A canonical fault analysis method based on computer[J]. Journal of Tsinghua University, 1995, 35(2): 32-38(in Chinese).
- [5] 王春, 陈允平, 谈顺涛. 电力系统复杂故障通用算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(6): 417-422.
Wang Chun, Chen Yunping, Tan Shuntao. The study of generalized

- algorithm for simultaneous fault in power system. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(6): 417-422(in Chinese).
- [6] 尹建华, 江道灼, 韩祯祥. 电力系统故障分析的一种新型实用计算机分析算法及在 BPA 暂态程序中的实现[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 71-76.
Yin Jianhu, Jiang Daozhuo, Han Zhenxiang. New practical algorithm and its application in bpa for power system fault analysis. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 71-76(in Chinese).
- [7] 陈青, 江世芳. 一种求解电力系统复杂故障的新算法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 41-43.
Chen Qing, Jiang Shifang. A new algorithm for complicated fault calculation in electric power system. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 41-43(in Chinese).
- [8] 李亚楼, 周孝信, 吴中习. 一种可用于大型电力系统数字仿真的复杂故障并行计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 1-5.
Li Yalou, Zhou Xiaoxin, Wu Zhongxi. A parallel complex fault computation algorithm for large scale power system digital simulation. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 1-5(in Chinese).
- [9] 姜彤, 张伯明, 吕颖. 规范化计算电力系统复杂故障的拓扑描述法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 12-16.
Jiang Tong, Zhang Boming, Lü Ying. A topological description method for canonical analysis of complex fault in electric power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 12-16(in Chinese).
- [10] 周平, 等. 变压器内部故障的仿真模型及特性分析[J]. 江南大学学报, 2005, 4(2): 111-115.
Zhou Ping, et al. Simulation model of transformer's internal fault and its characteristic analysis[J]. Jiang Nan University Transaction, 2005, 4(2): 111-115(in Chinese).
- [11] 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 Zhengping. Simulation model design of transformer's internal fault[J]. Power System Technology, 2004, 28(12): 50-52(in Chinese).
- [12] Dommel H W. Electromagnetic transients program reference manual (EMTP Theory Book)[M]. Portland: Bonneville Power Administration, 1986.
- [13] 梁振光, 唐任远. 采用场路耦合的三维有限元法分析变压器突发短路过程[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 137-140.
Liang Zhenguang, Tang Renyuan. Fault simulation of power transformers using 3d finite element model coupled to electric circuit equation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 137-140(in Chinese).
- [14] 张耀晨, 徐松. 有限元法在电磁计算中的应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996.
- [15] Bastard P, Bertrand P, Meunier Michel. A transformer model for winding fault studies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(2): 690-699.

收稿日期: 2006-05-20.

作者简介:

- 丁平(1974—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向电力系统仿真, 电力系统稳态分析;
 龚庆武(1967—), 男, 博士生导师, 主要研究方向电力系统仿真, 继电保护和自动装置;
 陈伟(1975—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向电力系统潮流计算, 电力系统稳态分析;
 徐锐(1984—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向电力系统潮流计算, 电力系统稳态分析;
 刘鹏(1979—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向电力系统自动化。

(责任编辑 韩蕾)