

# 电力变压器励磁涌流和内部故障识别新方法

古斌, 谭建成

(广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

**摘要:** 区分励磁涌流和内部故障时的短路电流, 是变压器差动保护的难点技术之一, 虽然目前已有多种方法, 但每种方法或多或少地存在着一些问题, 空载合闸误动或内部故障时拒动(或延时动作)的情况还时有发生。在引入瞬时无功率理论的基础上, 提出了一种依据变压器两侧三相差瞬时有功功率和瞬时无功率直流分量比值的变化关系来识别变压器励磁涌流和内部故障电流的新方法。该方法不仅简便易行, 而且从平均有功和平均无功的关系出发, 进一步揭示了变压器励磁涌流与内部故障本质上的不同。RTDS 仿真实验结果表明: 该方法简单可靠, 识别效果显著。

**关键词:** 瞬时无功率理论; 励磁涌流; 内部故障; 变压器保护; RTDS 仿真

## A new approach to the discrimination between inrush-current and internal fault current of transformers

GU Bin, TAN Jian-chen

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** The discrimination between internal fault current and inrush current in transformer is very difficult in transformer protection. This paper proposes a new algorithm based on the theory of instantaneous reactive power for the discrimination between internal fault current and inrush current of transformer protection. This algorithm is mainly based on the relationship of DC component between the instantaneous active power and the instantaneous reactive power. There are not only the advantages of simpleness and convenience, but also the advantages, due to considering the relationship between active power and reactive power, of revealing the differences between inrush currents and internal fault currents more deeply in nature. The results of RTDS simulation show that a valid discrimination between internal fault currents and inrush currents in transformer can be made by this algorithm, which is simple and reliable.

**Key words:** theory of instantaneous reactive power; inrush currents; internal fault; transformer protection; RTDS simulation

中图分类号: TM77

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)02-0006-05

## 0 引言

日本学者 H. Akagi 于 1982 年提出了瞬时无功率理论<sup>[1]</sup>, 此后国内外学者也展开了相关的研究<sup>[2, 3]</sup>。该理论主要解决了在三相三线制系统中当电压及电流不对称或畸变时的三相瞬时有功功率及无功功率的计算问题。当电力变压器处于励磁涌流或内部故障等不正常状态时, 其三相电压和三相电流都可能处于不对称或畸变状态, 这时传统功率理论无法计算变压器的有功及无功损耗, 而采用瞬时无功率理论则可计算电力变压器不正常状态下的三相瞬时有功及无功功率且可从瞬时功率中提取出直流分量, 来表征变压器的有功及无功损耗。在基于电流量的变压器差动保护中, 励磁涌流的判别一直是个核心问题。人们不得不长期致力于解决如何正确区分励

磁涌流和内部故障电流的问题。而就本质而言, 变压器是个时变的非线性系统, 单以电流量难以对它进行完全的描述, 宜同时用电压、电流量来进行描述。基于这种考虑, 文献[4]提出了一种基于有功功率差动的变压器保护新原理, 文献[5]在文献[4]的基础上利用变压器在不正常状态下三相差瞬时有功功率所表现出的频谱特性差异来识别励磁涌流和内部故障。本文在引入瞬时无功率理论的基础上, 从变压器在不正常状态下的有功、无功损耗的相对变化关系来判别励磁涌流和内部故障。

## 1 判别励磁涌流的新原理的构造

### 1.1 三相电路瞬时无功率理论简述

设三相三线制系统各相电压和电流的瞬时值分别为  $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$  和  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 。把它们在保持功率

不变的前提下变换到两相正交 $\alpha$ - $\beta$ 的坐标系上, 则有:

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

在 $\alpha$ - $\beta$ 坐标系中 $e_\alpha$ 、 $e_\beta$ 和 $i_\alpha$ 、 $i_\beta$ 可分别合成 $e$ 、 $i$ , 则可定义三相瞬时有功功率 $P$ 及三相瞬时无功功率 $Q$ 如下:

$$P = i \cdot e = i_\alpha e_\alpha + i_\beta e_\beta \quad (3)$$

$$Q = i \times e = i_\alpha e_\beta - i_\beta e_\alpha \quad (4)$$

即 $P$ 为向量 $e$ 、 $i$ 的点积,  $Q$ 为它们的叉积, 把式(1)、式(2)代入式(3)、式(4)可有:

$$P = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (5)$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} [(e_b - e_c) i_a + (e_c - e_a) i_b + (e_a - e_b) i_c] \quad (6)$$

另外还可分别求出 a、b、c 三相的瞬时有功功率及瞬时无功功率分别 $P_a$ 、 $P_b$ 、 $P_c$ 、 $Q_a$ 、 $Q_b$ 、 $Q_c$ , 且有结论

$$P_a + P_b + P_c = P \quad (7)$$

$$Q_a + Q_b + Q_c = 0 \quad (8)$$

式(7)的结论是很自然的, 而式(8)的结论说明了在三相电路中无功功率是在相与相之间通过电源回路传递而非消耗在负载上的功率, 这与传统的无功功率概念很相似。把 $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ 、 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 的实际表达式代入(5)、(6)可得:

$$P = P_0 + \tilde{P}$$

$$Q = Q_0 + \tilde{Q}$$

其中: $P_0$ 、 $Q_0$ 分别为 $P$ 、 $Q$ 的直流成分,  $\tilde{P}$ 、 $\tilde{Q}$ 分别为 $P$ 、 $Q$ 的交流成分,  $P_0$ 、 $Q_0$ 由电压、电流信号中的同次(即谐波次数)同序成分作用而成, 并且

$$P_0 = \frac{1}{T} \int_{-T}^T P dt \quad (9)$$

$$Q_0 = \frac{1}{T} \int_{-T}^T Q dt \quad (10)$$

$\tilde{P}$ 、 $\tilde{Q}$ 由两部分组成: 一部分由电压、电流信

号中的同次不同序成分作用而成, 另一部分由电压电流中的同序不同次成分作用而成。

由上述分析可知, 可由三相电压瞬时值 $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ 及三相电流瞬时值 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 计算出三相瞬时有功 $P$ 及三相瞬时无功功率 $Q$ , 且可由 $P$ 、 $Q$ 算出它们的直流分量 $P_0$ 、 $Q_0$ ,  $P_0$ 可定义为三相平均有功功率, 其物理意义与传统功率理论的有功功率完全一致,  $Q_0$ 可定义为三相平均无功功率, 可理解为在三相之间流动的平均无功功率。根据电力系统的实际状态, 可分为三种情况: 一是电压电流为对称正弦, 二是电压为对称正弦而电流为畸变(即含谐波分量)或不对称, 三是电压电流均畸变或不对称, 无论是哪种情况, 上述讨论都成立, 对变压器而言, 励磁涌流时近似对应第二种情况, 故障时对应第三种情况。而实际上瞬时无功功率理论的功率计算公式对变压器励磁涌流和故障都是成立的。

## 1.2 判别励磁涌流的新原理的构成

变压器励磁涌流是由无功的磁化电流和有功的铁耗电流两部分组成, 有功电流只占很小一部分, 也即三相变压器发生励磁涌流时其三相平均有功功率与三相平均无功功率比值应较小, 而变压器内部故障时, 故障点的弧光电阻加上短路绕组电阻可与短路绕组等效电抗相比拟, 即此时三相平均有功功率与三相平均无功功率比值应较大, 因而本文设想应用变压器非正常状态时两侧三相差瞬时有功功率及两侧三相差瞬时无功功率的直流分量的比值来构成保护判据。

下面是保护的算法实现, 设一基频周波内采样 $N$ 次, 则第 $K$ 个采样时刻 $P$ 值表示为 $P_k$ ,  $Q$ 值表示为 $Q_k$ , 则:

$$P_k = e_{ak} i_{ak} + e_{bk} i_{bk} + e_{ck} i_{ck} \quad (11)$$

$$Q_k = \frac{1}{\sqrt{3}} [(e_{bk} - e_{ck}) i_{ak} + (e_{ck} - e_{ak}) i_{bk} + (e_{ak} - e_{bk}) i_{ck}] \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} e_{ak} \\ e_{bk} \\ e_{ck} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{abk} \\ e_{bck} \\ e_{cak} \end{bmatrix}^{[3]} \quad (13)$$

其中: $e_{abk}$ 、 $e_{bck}$ 、 $e_{cak}$ 即为第 $K$ 个采样时刻的线电压值(可测),  $i_{ak}$ 、 $i_{bk}$ 、 $i_{ck}$ 为第 $K$ 个采样时刻的线电流值,  $e_{ak}$ 、 $e_{bk}$ 、 $e_{ck}$ 为第 $K$ 个采样时刻的相电压值, 再根据式(9)、(10)

则：
$$P_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N P_k \quad Q_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N Q_k$$

为方便起见讨论两绕组变压器的保护实现：在变压器两端电压电流正方向取为一致的前提下，令  $P_1$ 、 $Q_1$  为变压器一侧的三相有功瞬时功率及三相无功瞬时功率， $P_2$ 、 $Q_2$  为另一侧的三相有功瞬时功率及三相瞬时无功功率， $P_3$ 、 $Q_3$  为两侧功率差， $P_{30}$ 、 $Q_{30}$  为  $P_3$ 、 $Q_3$  的直流分量， $P_{30}$  即为变压器的有功损耗， $Q_{30}$  为变压器所需要的励磁无功平均功率，判据为  $P_{30}/Q_{30} < K_{ed}$ 。

由上述分析可知，可通过计算发生涌流或故障后第一基频周期内的  $P_{30}$ 、 $Q_{30}$ ，则可通过计算它们的比值大小来判别励磁涌流和内部故障电流。另外无需考虑变压器的结构及接线组别，只需采集变压器两侧三相线电压和三相线电流而无须知道变压器各相绕组电流即可完成算法的实现。

## 2 仿真分析

以下分析中功率皆以标么值表示。

为验证上述算法的可行性，利用RTDS进行了有关变压器的仿真实验，仿真系统如图1所示。

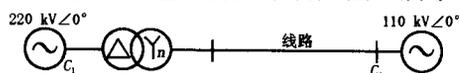


图1 仿真系统图

Fig.1 Simulation system model

### 2.1 变压器发生励磁涌流时的情况

图2是由RTDS仿真得到的变压器励磁涌流波形（角形侧空载合闸，合闸时间为0.02 s）。由变压器两侧电压电流值计算得到的三相差瞬时有功功率  $P_3$  和三相差瞬时无功功率  $Q_3$  波形如图3(a)、(b)所示。

经 RTDS 中 DFT 模块滤波得变压器励磁涌流发生后第一周期两侧三相瞬时有功功率差的直流分量  $P_{30}=0.005$ ，两侧三相瞬时无功功率差的直流分量  $Q_{30}=0.075$ ，两者之比为 0.0667。本文经过多次不同合闸角的变压器励磁涌流仿真，其  $P_{30}$  与  $Q_{30}$  之比皆小于 0.1。

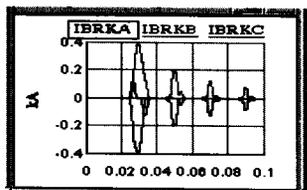
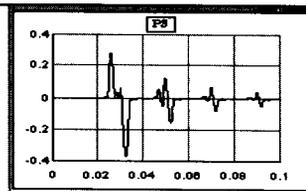
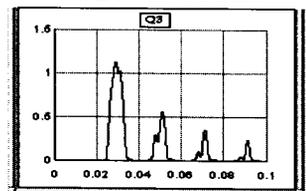


图2 变压器励磁涌流波形

Fig.2 Waveforms of three-phase inrush current



(a) 三相差瞬时有功功率波形



(b) 三相差瞬时无功功率波形

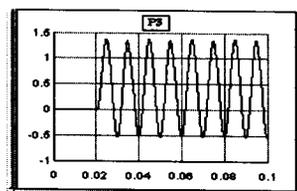
图3 变压器空载合闸时三相差瞬时功率波形

Fig.3 Waveforms of three-phase instantaneous power difference for switching on of an unload power transformer

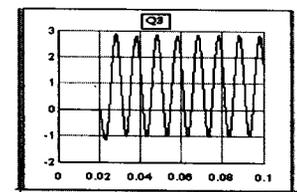
### 2.2 变压器发生内部故障时的情况

以下分析中变压器故障起始时间皆为0.02 s。

变压器星形侧发生单相接地故障（过渡电阻为 5 Ω）时两侧三相差瞬时有功功率  $P_3$  及三相差瞬时无功功率  $Q_3$  波形如图4(a)、(b)所示。



(a) 三相差瞬时有功功率波形



(b) 三相差瞬时无功功率波形

图4 变压器低压侧单相接地时三相差瞬时功率波形

Fig.4 Waveforms of three-phase instantaneous power difference for single-phase earth fault transformer

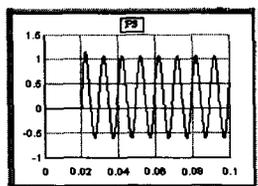
经DFT模块滤波得变压器故障后第一周期两侧三相瞬时有功功率差的直流分量  $P_{30}=0.1$ ，两侧三相瞬时无功功率差的直流分量  $Q_{30}=0.15$ ，两者之比为0.667。经多次不同接地电阻的仿真，其  $P_{30}$  与  $Q_{30}$  之比皆远大于0.15。

过渡电阻为 5 Ω 的变压器两相短路功率差波形如图5(a)、(b)所示。

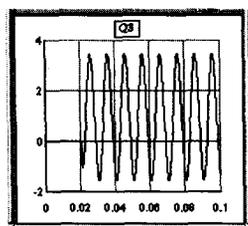
经DFT模块滤波得变压器故障后第一周期两侧三相瞬时有功功率差的直流分量  $P_{30}=0.07$ ，两侧三

相瞬时无功功率差的直流分量 $Q_{30}=0.2$ , 两者之比为0.35。经多次不同过渡电阻的仿真, 其 $P_{30}$ 与 $Q_{30}$ 之比皆大于0.15。

本文也作了变压器三相故障不同过渡电阻时的故障仿真, 结果都验证了 $P_{30}$ 与 $Q_{30}$ 之比大于0.15。



(a) 三相差瞬时有功功率波形

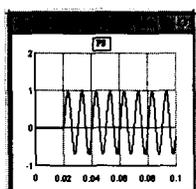


(b) 三相差瞬时无功功率波形

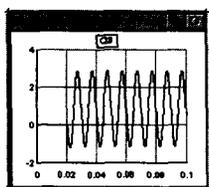
图5 变压器低电压侧两相短路时三相差瞬时功率波形  
Fig.5 Waveforms of three-phase instantaneous power difference for two-phase short circuit transformer

### 2.3 变压器空投于内部故障的情况

传统的二次谐波、间断角等判据在区分单纯的故障和励磁涌流方面没有什么困难, 基本上都能正确判断, 主要是难以区分空载合闸与空载合闸于故障变压器的情况, 本文也对此做了仿真研究, 图6为变压器空投于星形侧单相接地的功率波形,  $P_{30}=0.2$ ,  $Q_{30}=1$ 。



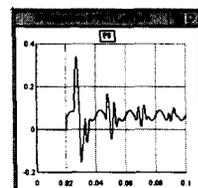
(a) 三相差瞬时有功功率波形



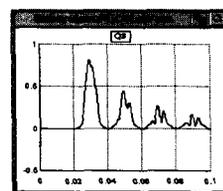
(b) 三相差瞬时无功功率波形

图6 变压器空投于星形侧单相接地三相差瞬时功率波形  
Fig.6 Waveforms of three-phase instantaneous power difference for switching on of an unload power and single-phase earth fault transformer

由于RTDS没有直接的变压器匝间短路模型, 文献[6]提出了一种基于RTDS的工程近似双圈变压器匝间短路仿真方法, 图7为基于该方法的变压器星形侧A相发生7%短路匝比匝间短路的功率波形,  $P_{30}=0.05$ ,  $Q_{30}=0.28$ 。



(a) 三相差瞬时有功功率波形



(b) 三相差瞬时无功功率波形

图7 变压器空投于星形侧A相匝间短路瞬时功率波形  
Fig.7 Waveforms of three-phase instantaneous power difference for switching on of an unload power and turn-to-turn fault transformer

本文做了不同短路匝比的仿真研究, 结果都验证了 $P_{30}$ 与 $Q_{30}$ 之比大于0.15。

### 2.4 新判据的构成

通过上述分析发现: 在变压器发生励磁涌流或内部故障时, 利用三相差瞬时有功功率和三相差瞬时无功功率的直流分量的相对比值, 可以构成区分内部故障电流和励磁涌流的判据如下: 令 $k=P_{30}/Q_{30}$ ,  $P_{30}$ 表示两侧三相瞬时有功功率差的直流分量,  $Q_{30}$ 表示两侧三相瞬时无功功率差的直流分量, 设 $K_{ZD}$ 为门槛值, 则 $k < K_{ZD}$ 时判为励磁涌流, 反之为内部故障。以下对上述判据做一些定性的理论分析。图1系统的星形侧单相匝间故障复合序网如图8(文献[7]), 其中 $Z_C$ 为系统阻抗,  $Z_M$ 为三角形侧线圈漏阻抗,  $Z_S$ 为等效于短路部分线圈的第三线圈的等值漏阻抗, 其电阻分量可与电抗分量相比拟,  $Z_N$ 为故障线圈除短路部分之外的漏阻抗,  $R_d$ 为电弧电阻(图中下标1、2、0分别为正、负、零序阻抗), 由图8可方便地计算变压器故障时的等效总阻抗, 并且由于 $Z_S$ 电阻分量及 $R_d$ 的存在, 使得等效总阻抗的电阻分量可与电抗分量相比拟, 即故障时的有功功率可与无功功率相比拟, 也即 $K$ 值应较大。而励磁涌流时变压器的等值电路可用经典的正序等效网络表示, 此时其等效总阻抗的电阻分量应远小于

电抗分量, 故此时  $K$  值应较小。

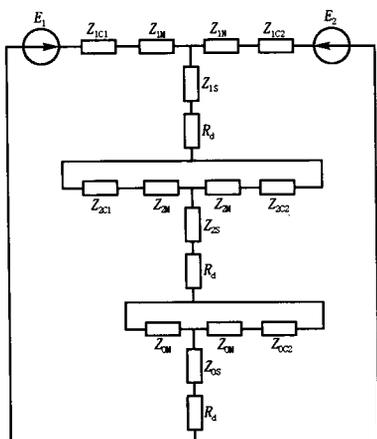


图8 变压器匝间故障复合序网图

Fig.8 Complex sequence networks for turn-to-turn fault transformer

根据大量的仿真实验结果, 可选取  $K_{Z0}=0.15$ , 则无论变压器是发生励磁涌流还是内部故障, 都会有一定的判断裕度, 从而保证判别的可靠性。

### 3 结论

本文提出了一种利用变压器两侧三相差瞬时有功功率和无功率的直流分量的比值来识别变压器励磁涌流和内部故障电流的新方法。该方法从能量守恒的角度出发, 弥补了传统的变压器电流差动保护在理论上的不足。经 RTDS 仿真实验验证, 该方法简单易行, 能够有效区分变压器励磁涌流和内部故障电流。并且该方法另外一个明显的优越性是无需考虑变压器的结构及接线组别, 只需采集变压器两侧三相线电压和三相线电流, 即可完成算法的实现, 具有显著的实用价值。

### 参考文献

- [1] Akagi H, Kanazawa Y, Nobase A. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three Phase Circuits[A]. In: International Conference on Power Electronics[C]. Tokyo: 1983.
- [2] 王兆安, 李民, 卓放. 三相电路瞬时无功率理论的研究 [J]. 电工技术学报, 1992, 7 (3) : 55-59.  
WANG Zhao-an, LI Min, ZHUO Fang. A Study on the

Theory of Instantaneous Reactive Power of Three-phase Circuits[J]. Proceedings of the Electrician Technology, 1992, 7 (3) : 55-59.

- [3] 戴先中, 唐统一, 孙树勤. 非正弦三相电路中瞬时无功量的普通化定义 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 18 (6) : 388-394.  
DAI Xian-zhong, TANG Tong-yi, SUN Shu-qin. A Generalized Definition of Instantaneous Reactive Quantity in Non-sinusoidal Three-phase Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 18 (6) : 388-394.
- [4] Kuniaki Yabe. Power Differential Method for Discrimination Between Fault and Magnetizing Inrush Current in Transformer [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(3): 1109-1118.
- [5] 郑涛, 刘万顺, 吴春华. 基于瞬时无功功率的变压器励磁涌流和内部故障电流识别新方法 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (23): 51-55.  
ZHENG Tao, LIU Wan-shun, WU Chun-hua, et al. A New Approach to the Discrimination Between Inrush Current and Internal Fault Current Based on Instantaneous Power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (23): 51-55.
- [6] 李保福, 周泽昕. 基于RTDS平台进行双卷变压器本体内部故障的仿真[J]. 东北电力技术, 2001, (10): 46-48.  
LI Bao-fu, ZHOU Ze-xin. RTDS Platform Based Simulation for Interior Faults of Two-winding Transformer Body[J]. Dongbei Electric Power Technology, 2001, (10): 46-48.
- [7] 王维俭, 侯炳蕴. 大型机组继电保护理论基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982.  
WANG Wei-jian, HOU Bing-yun. The Theoretical Foundation of Large-Scale Generator-transformer Set Relays[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1982.

收稿日期: 2006-08-25; 修回日期: 2006-10-19

作者简介:

古斌 (1969-), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护的研究; E-mail: gb1108@126.com

谭建成 (1963-), 女, 教授, 博士生导师, IEEE 会员, 主要从事电力系统运行规划及继电保护的研究。