几种变压器励磁涌流判别方法的特点及其内在联系的分析*

唐跃中 刘 勇 郭 勇 刘世明 陈德树
(华中理工大学电力工程系·430074·武汉)

【摘 要】 介绍了近十多年来国内外学者提出的判别变压器励磁涌流的原理和方法，并对各种方案进行了分析和评价；讨论了用微机实现间断角原理的变压器保护的关键问题以及二次谐波原理所面临的几个主要困难；最后对各种判别变压器励磁涌流的方法之间的内在联系作了简要分析。

【关键词】 微机继电保护 变压器 励磁涌流

1 引言

随着超高压远距离输电系统在我国越来越多地建成和运行，大容量变压器的应用日益增多，这不仅对变压器保护的可靠性，而且对其快速性也提出了更高的要求。当前变压器保护的关键问题仍然是变压器励磁涌流判别。由于继电保护实践的需要和微机技术的应用，有必要对目前已经提出的各种新的原理和方法进行深入的研究，分析其特点和局限性，使之能尽早运用于实践；对模拟保护中已经成熟的原理，也要结合微机保护的特点，分析运用微机实现可能遇到的问题和困难。

本文从已经运用于实践以及新近提出的各种励磁涌流鉴别法中，选出有代表性的几种，按照判别励磁涌流时所用的电气量，将其分为以下三类：

(1) 仅利用变压器电流量判别涌流，如间断角原理、二次谐波制动原理；

(2) 仅利用变压器电压量判别涌流，如电压制动原理；

(3) 同时利用变压器电流和电压量判别涌流，如磁通特性原理和等值电路原理。

文章在介绍了每种方法的基本原理的基础上，着重分析各原理的特点、性能及其相互联系，并讨论了用微机实现的可能性。

2 变压器励磁涌流的判别方法及其特点

2.1 仅利用变压器电流量判别涌流

仅利用变压器电流量判别涌流的方法中比较成熟的有：间断角原理和二次谐波制动原理。

2.1.1 间断角原理及其微机实现

间断角原理[6]是根据变压器在励磁涌流时和内部故障时电流波形所具有的不同特征来区分是内部故障还是励磁涌流的。由于间断角原理已广为大家熟悉，且已成功地运用于实践，因此对间断角原理本身不再赘述。这里主要讨论用微机实现间断角原理的几个关键问题。

用微机实现间断角原理必须解决两个问题：(1) 多大的采样率才能准确地测量间断角大小？(2) 多高的采样精度才能正确判断电流是否进入“间断”范围？(3) 如何解决由于 CT 传变引起的涌流间断角的变形问题。

---

* 1994－12－19 收稿。

唐跃中，男，1970 年生，硕士，从事微机继电保护的学习和研究。
刘 勇，男，1970 年生，硕士，从事微机继电保护的学习和研究。

首先分析问题(1)，若设A为变压器励磁涌流时的最小间断角，B为整定的闭锁间断角，N为每工频周期采样点数，为了准确地测量间断角大小，使保护在励磁涌流时可靠闭锁，分析可知N必须满足：

$$\left(\frac{360}{N}\right) \geqslant \frac{A-B}{2} \tag{1}$$

若以常规模拟保护中采用的角度值来分析，取$A=83°$，$B=65°$，解(1)得$N \geqslant 40$。考虑留有一定的裕度，每工频周期采样点数要在40以上，为计算方便可取$N=48$。如此高的采样率，留给微机进行故障计算的时间就非常有限，因此，必须减少计算量并采用功能较强的16位以上的微机。减少计算量的一个有效方法是采用分相差动原理，即采用三个CPU分别计算A、B、C三相的电流，使每个CPU的计算量减少到非分相差动的三分之一。

涌流间断角处电流的特点是绝对值非常小且接近于零，而A/D转换芯片刚好在零点附近的转换误差最大。因此为正确判断电流是否已进入“间断”范围，提高保护灵敏度，需要采用分辨率高的14位A/D，甚至16位A/D。而一般微机保护中的A/D分辨率为10～12位。

对于问题(3)，模拟式保护中的解决办法是在CT副方加接一个电抗器。由于电抗器使电流相量有一接近90°的相移，可以通过在微机中对电流进行一次微分(相当于移相90°)来近似。但由于电抗器的特性比较复杂，这种方法的效果还须实践来检验。

通过以上分析可以看出，用微机实现间断角原理的保护在技术上是可以实现的，但其硬件复杂性和成本都将比较高，在实用化过程中要作进一步的经济技术分析和现场考验。

2.1.2　二次谐波制动原理

分析表明，励磁涌流中含有较大的偶次谐波分量且以二次谐波最甚，通过计算差动电流中的二次谐波电流可判别是否存在励磁涌流。

当出现励磁涌流时应有：

$$I_{d2} > K \cdot I_{d1} \tag{2}$$

式中　I_{d1}和I_{d2}——分别为差流中基波和二次谐波电流模值；

　　K　　——二次谐波制动比，可调整。

目前国内外投运的微机变压器保护基本上都是采用该原理来实现的，二次谐波制动比常取15%～17%。但是，随着电网电压等级的提高和规模的扩大、变压器单机容量的增大和制造技术的提高，二次谐波原理将面临以下几个问题：

(1) 对大型变压器，特别是500 kV的大型变压器，由于其电压等级高且常在端部接较长的输电线，输电线的分部电容效应十分明显。因此当大型变压器内部严重故障时，由于电感与电容的谐振使短路电流中的谐波含量明显增加，有可能引起二次谐波制动的差动保护延时动作。

(2) 对500 kV系统，为提高系统稳定性常采取无功就地自然补偿措施，往往在变压器低压侧装有(1/4～1/3)倍额定容量的电力电容器组。在低压侧出口差动范围内故障时，电容的反馈电流将流向故障点。文献[4]指出电容的反馈电流中含有幅值较大的谐波成份，该反馈电流作为差流的一部分对差动保护有影响，可能使差动保护延时动作。

(3) 大型变压器差动保护中15%～17%的制动比是按照一般饱和磁通为1.4倍额定磁通幅值时合闸涌流的大小来考虑的[4]，但由于变压器制造技术的提高和制造材料的改进，现代变压器的饱和磁通倍数经常在1.2到1.3，甚至低至1.15，在此情况下涌流的最小二次谐波含量有时可能低至10%以下[11]，此时差动保护会误动。

对于(1)、(2)两问题可以通过采用合适的加速判据加以改善和克服。目前提出的加速判据中典型的有低电压加速[10]。该低电压加速通过动模试验和在WBZ－500型微机大型变压器成套保护装置[8]中的实际应用，表明该加速判据可以较为有效地克服内部故障的误闭锁问题。对问题(3)，

虽然目前国内大型变压器保护的实践表明，我国现有运行中的大型变压器励磁涌流中的二次谐波一般在12%以上，但也应引起足够重视，继续对二次谐波原理进行研究和改进。

利用二次谐波电流鉴别励磁涌流的方法在常规保护中有非常成功的应用和丰富的实践经验，而且目前国内外实际投入运行的计算机变压器保护也都采用该原理，因而在实用化方面相对成熟一些。对于大型超高压变压器的保护，若能加上合适的加速判据，基于二次谐波涌流判据的比率差动微机保护是可以满足系统要求的。

2.2 仅用变压器电压量鉴别励磁涌流的方法[12]

文献[12]提出了一种利用变压器电压鉴别励磁涌流的方法，其基本思想是：当变压器因励磁涌流出现严重饱和时，端电压会发生严重畸变，其中包含较大的谐波分量，可以用来鉴别励磁涌流，其原理简述如下：

如果变压器的三相电压满足：

$$V_1 > V_{\text{th}} \tag{3}$$

或

$$T_{\text{sum}} > T_{\text{th}} \tag{4}$$

判为励磁涌流，保护闭锁。其中 V_1 是变压器端电压的基波分量幅值；V_{th} 和 T_{th} 分别为门坎值；T 是一个监视量，目的是克服在涌流时端电压畸变引起电压 V 的下降导致保护动作，

$$T_{\text{sum}} = \sum_{k=1}^{N_k} R_k \qquad (R_k = |V_{1k} - V_k|)$$

其中 V_k —— 电压原始采样值；

V_{1k} ——V 中基波分量计算采样值。

分析和实验表明：在涌流情况下，虽然某些相别可能出现 $V_1 < V_{\text{th}}$，但均可由对应的 $T > T_{\text{th}}$ 可靠制动。对于各种内部短路，一般总有 $V_1 < V_{\text{th}}$ 和 $T_{\text{sum}} < T_{\text{th}}$，保护能够快速跳闸。与二次电流谐波制动相比，谐波电压制动原理由于对LC振荡的相对不敏感性，二次谐波制动的某些不足得以某种程度的改善。同时，容易发现：电压制动原理的应用与系统阻抗的大小关系密切。因此运用该原理的保护必然要求对系统阻抗有比较精确的了解，存在着整定复杂性。如果采用一个习惯性假设：认为系统阻抗为零（系统为无穷大），那么，在故障时必然满足式(3)，保护拒动。因此在系统阻抗较小时，该原理的保护的动作特性有可能变坏。

2.3 同时利用电压和电流量的原理

上述两类方案都仅用到变压器的一个电量（电流或电压），同时利用变压器的电压量和电流量可望得到较好的鉴别涌流的效果。目前主要分两类：磁通特性原理和等值电路原理。

2.3.1 等值电路原理

文献[14]提出了一种基于变压器导纳型等值电路的励磁涌流判别方法。该方法通过检测对地导纳参数变化来鉴别变压器内外故障，原文作者在分析和实验观测的基础上得到如下结论：

(1) 铁芯线圈的漏抗和空心线圈的漏抗相近，故此时变压器导纳型等值电路中，各节点的互导纳几乎与变压器的铁芯饱和无关。

(2) 铁芯未饱和时，变压器各侧对地导纳几乎均为零；当铁芯饱和时，变压器各侧对地导纳明显增大；严重饱和时变压器各侧对地导纳与空心变压器的对地导纳几乎一致，且是一不等于零的常量。

因此，可以计算变压器各侧对地导纳，通过其值的大小变化来判别故障与否。文献[14]给出了用于区别内部故障与励磁涌流的判据和在模拟变压器上的试验结果。

该算法的优点是快速，对内部故障和涌流可以快速识别。即使内部故障叠加涌流，一般在半个周波内也可以给出正确的判断结果。

2.3.2 磁通特性原理

如何利用磁通量以鉴别励磁涌流是比较活跃的一个研究方向。到目前为止大体有以下三种主要的磁通特性方案[5、13、7]。

磁特性方案一：

文献[5]介绍的磁特性方案的基本原理是基于变压器在不同工况下的励磁特性曲线建立故障判别区。变压器在正常运行和励磁涌流时的励磁特性分别如图 1(a) 中曲线 1 和 2 所示，内部故障时的励磁特性如图 1(b) 所示。如果考虑模型误差留有一定的裕度可以建立图 1(c) 那样的判定区，落在区内为非故障状态，落在区外为故障状态。这里的磁通量可以基于变压器数学模型利用电流和电压计算得到。

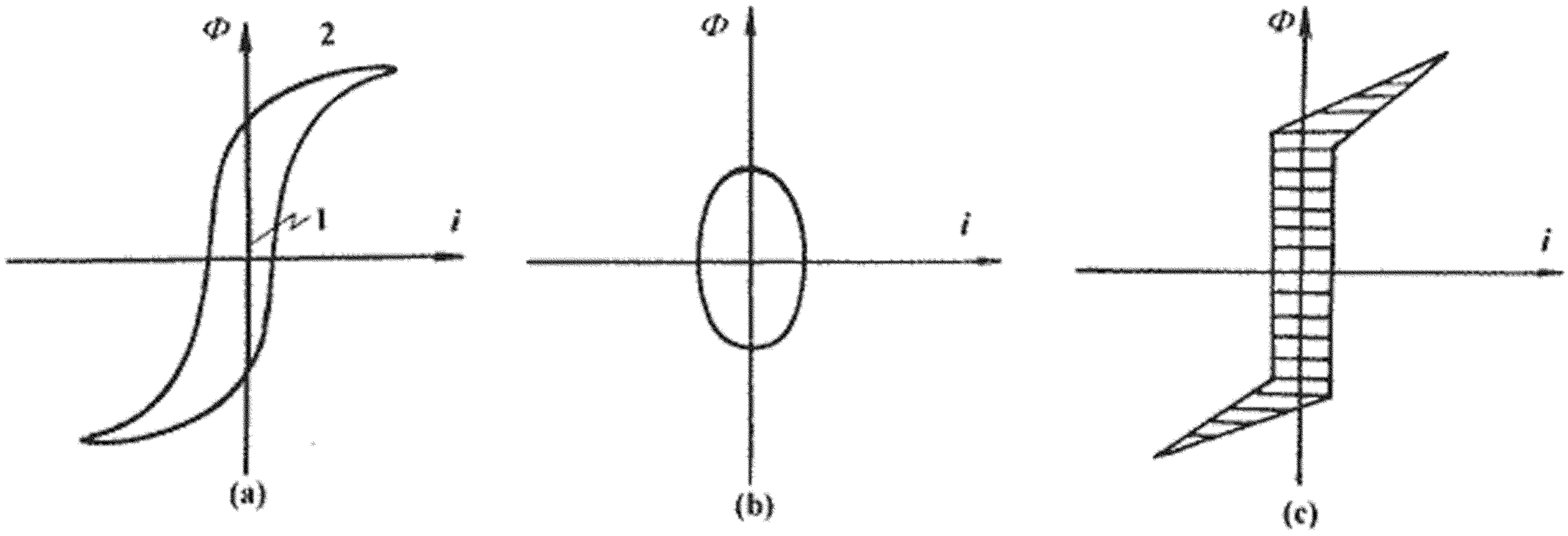

图 1（a）非内部故障时的磁特性（b）内部故障时的磁特性（c）内部故障判定区

Fig. 1　(a) Non fault exciting curves (b) Inner fault exciting curve (c) zone of inner faults

该方案由于判断和计算过程比较简捷，故检测速度较快，同时由于在判定区中已考虑了变压器的磁饱和特性，因此可以取消二次谐波制动，且期望得到较高的灵敏度。

磁特性方案二：

文献[13]提出如下磁制动方案。首先建立图 2(a) 所示的变压器模型，设变压器绕组端电压 u，流进绕组的电流 i 与该变压器的互感磁链之间的关系为：

$$u - L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}t} \tag{5}$$

式中忽略了绕组电阻 R；绕组漏感为 L，且近似视为常数；Ψ 为互感磁链。

在时刻 T_{k-1} 到 T_k 范围内对式(5) 积分，并写成递推形式有：

$$\Psi(k) = \Psi(k-1) + [u(k) - u(k-1)] \cdot \frac{T}{2} - L[i(k) - i(k-1)] \tag{6}$$

将差动电流 i_d 看作变压器的励磁电流 i，算出磁链 Ψ 后，通过比较 Ψ 与 i_d 的关系是否落在空载磁化曲线附近，是则判为涌流，否则判为故障。如图 2(b) 所示。

原文认为空载特性曲线可用忽略磁滞作用的单特性曲线 1 表示，而发生故障时的磁特性如曲线 3 所示，剩磁的存在会改变原有的磁化特性曲线，如曲线 2 所示。由图 2(b) 可见，发生故障时的磁特性曲线 3 斜率较小，且是一个常数。正常状况下变压器的工作点在磁特性曲线 2 的拐点附近，其斜率较大且基本为一常数。在涌流时，变压器的工况随涌流的周期性变化在磁特性曲线 2 的拐点上下两段折线上来回摆动，故其斜率在很小（饱和）和很大(非饱和）周期性变化。据此，作者提出如下判据：在 $\mathrm{d}\Psi/\mathrm{d}i_d - \mathrm{d}i_d$ 平面上，可确定两个区域如图 2(c) 所示。区间 2 为饱和区，区间 1 为非饱和或内部故障区。当运行状态保持在区间 2 时为正常状况，当运行状态跳变到区间 1 并保持不动时表示内部故障，当运行状态在区间 1—2 交替跳变时，则表示在涌流期间。利用 $\mathrm{d}\Psi/\mathrm{d}i_d$ 一个重要好处是可以消除剩磁的影响。

该方法的特点是实时计算负担比较少并且不受剩磁影响，可以取消二次谐波判据，检测内部故障的速度也比较快，可以在 2/3～3/2 周波做完涌流判别并保证保护出口，但也存在以下不足：

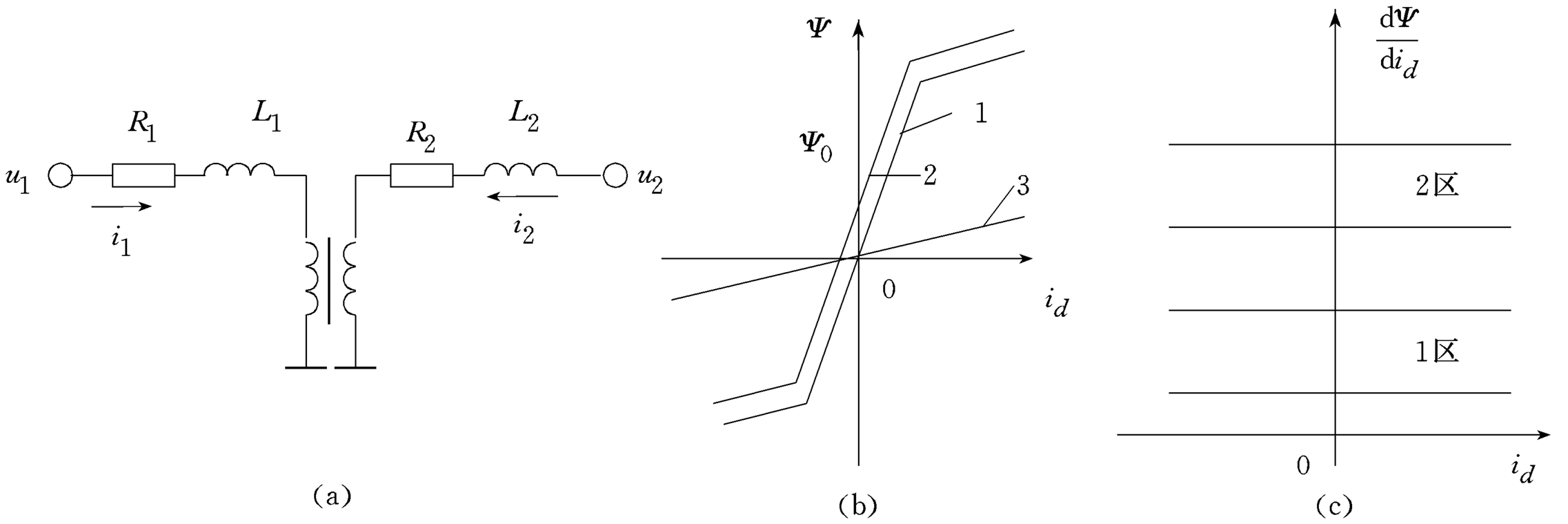

图2 (a)双绕组单相变压器模型 (b)Ψ—i_d 励磁特性曲线 (c)$d\Psi/di_d$—di_d 关系曲线

Fig. 2 (a)Mould of transformer (b)Ψ—i_d exciting curve (c)$d\Psi/di_d$—di_d curve

(1) 为得到磁化曲线上拐点上下两折线的斜率的整定值，需要用具体变压器的较精确的磁化特性曲线，这些参数可能因测量不准对励磁涌流的鉴别产生不利的影响；

(2) 在 $d\Psi/di_d - di_d$ 平面上确定区 1 和区 2 的位置可能遇到困难，特别是内部轻微故障时，由于差流较小，端口电压维持较高，故 $d\Psi/di_d$ 较大，这样必然要求区 1 相当大，甚至可能与区 2 重合。

磁特性方案三：

为克服方案二中的不足，文献[7]提出了一种新型涌流判别法。原文作者实验发现，变压器在正常状况、内部轻微故障和内部严重故障时的 $\Psi - i_d$ 曲线分别如图 3(a) 中的曲线 1、2、3 所示，图 3(c) 是励磁涌流时的 $\Psi - i_d$ 曲线，图 3(b) 是励磁涌流时的差流波形。

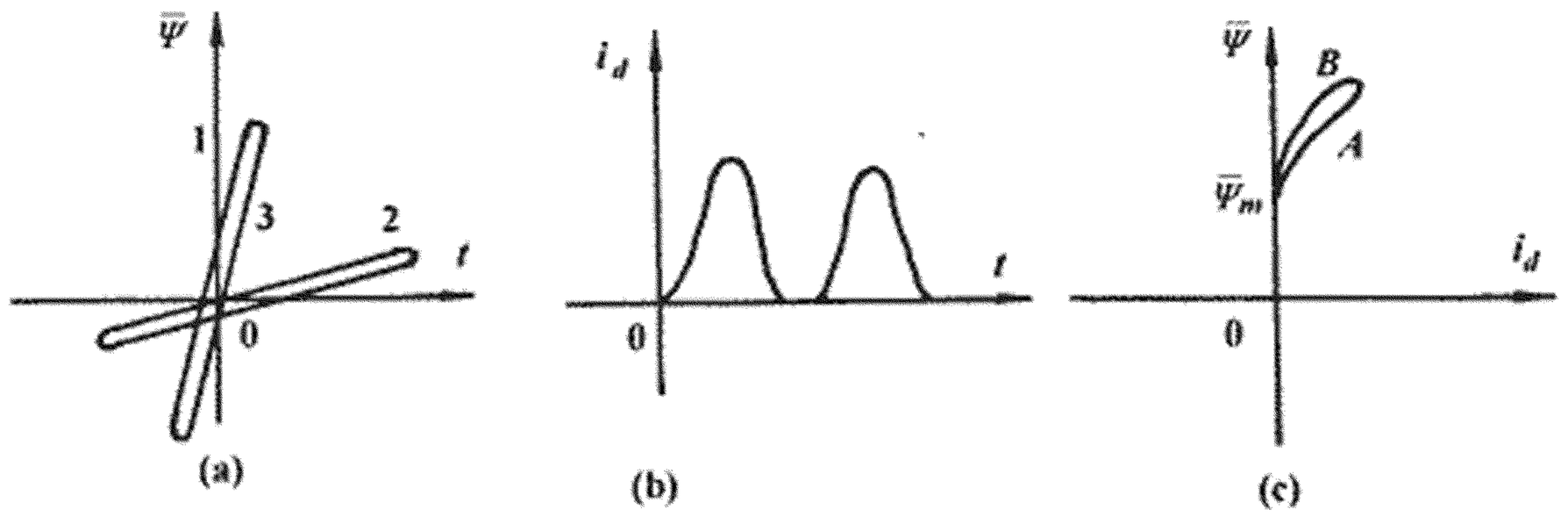

图 3 (a) 非涌流时磁特性曲线 (b) 变压器涌流波形 (c) 涌流时磁特性曲线

Fig. 3 (a) Non-surge exciting curves (b) Surge waveform (c) Surge exciting curve

从图 3(a) 中的曲线 2 和 3 可知，内部故障时 $\Psi - i_d$ 曲线上当前时刻的切线斜率总是与半周波前对应的切线斜率相等，而出现励磁涌流时，则不满足这个条件。

令 $\dfrac{d\Psi(t)}{di_d(t)} = \Psi'(t)$，在离散化后定义一个检测函数 D 为：

$$D = \Psi'(k) - \Psi'(k-1) \tag{7}$$

$$\Psi'(k) = [\Psi(k) - \Psi(k-1)]/[i_d(k) - i_d(k-1)] \tag{8}$$

式中 k 为离散时间标志。因此，内部故障时，$D = 0$；励磁涌流时，$D \neq 0$。只要确定一个合适的门坎值 D_{th}，并建立一个制动计数器 K_d，就可实现励磁涌流的判别。对制动计数器 K_d：

$K_d = K_d + 1$ 当 $|D| \leqslant D_{th}$，

$K_d = K_d - 1$ 当 $|D| > D_{th}$，

$K_d = K_d$ 当 $|D| > D_{th}$，且 $K_d = 0$

确定一个门坎值 $K_{d\,max}$，构成下述判据

$$K_d > K_{d\max} \qquad \text{判为故障}$$

$$K_d \leqslant K_{d\max} \qquad \text{判为励磁涌流}$$

确定门坎值 D_{th} 和 $K_{d\max}$ 可以参考如下原则：

$K_{d\max}$ 一般取为 6 次。其理由是连续判 D 值使 $K_{d\max}$ 达 6 次，此时故障发生将近一个周波，可以用全周波富氏算法进行穿越特性的判断。这样不仅从时间上配合了穿越特性，而且对涌流的判别也留有相当余地，从而提高了可靠性。

D_{th} 的整定要求满足：变压器空投且内部故障时，保护不闭锁。在此前提下对灵敏度和可靠性进行权衡，D_{th} 大则灵敏度相对提高，D_{th} 小则可靠性相对提高。

该方法具有以上两种磁特性原理的优点，利用式(7)可以克服磁特性方案二中的两个不足。利用 WBZ－500 型微机大型变压器成套保护装置在一个 15 kVA 模拟变压器(以 500 kV 变压器为原型)的动模试验表明，该原理的保护在涌流时可靠制动，内部故障时迅速出口，动作时间为2/3～1基频周波，可以反应变压器内部 4％匝间短路。

3　不同原理间的内在关系

仅利用电流量的原理和仅利用电压量的原理间的关系：

如果变压器在任何状态下都可以用一个相同的线性时不变模型来精确表示，那么，电流和电压之间是线性相关的。此时，从任何一侧看都可以将变压器等效为一个等值电抗 Z，根据欧姆定理：$U = Z\,I$，此时 U 和 I 之间仅差一常系数 Z。因此，在这种前提下，电压和电流所包含的信息是等价的，仅一个电量中包含的信息就是充分的。此时仅利用电流量或仅利用电压量的两种原理是等价的。但是变压器在励磁涌流过程中，由于磁路饱和，变成一个较复杂的非线性时变系统，电流和电压就不是简单的线性关系，而是描述变压器状态的两个不同状态变量，它们所含的信息互为补充，只有同时利用电压和电流这两个状态量才能较全面的反映变压器在饱和状态下的实际情况。因而有理由希望通过同时利用变压器的电压量和电流量得到较好的鉴别涌流的效果。从利用的信息量的角度来看，二次谐波原理所用信息最少，间断角原理和电压原理所含信息量相当，磁特性原理和等值电路原理所用的信息最全面。

磁特性原理和等值电路原理的关系：

分析可知，等值电路原理所讨论的变压器导纳模型中对地导纳支路实际上与图 2(a) 所示的变压器阻抗模型的励磁支路相对应。因此对地导纳的变化实际上也就反映了励磁阻抗的变化，因而实质上也就是间接反映了变压器磁特性的变化。可见两原理本质上相通。

磁特性原理和电流原理的关系：

基于变压器磁特性原理的三种方法中，从实用化角度讲后两者相对更成熟些，下面的讨论也主要针对这两种方法。两种方法用到的特征量都是磁链对差流的导数 $\mathrm{d}\Psi(t)/\mathrm{d}i_d(t)$。设变压器涌流时，磁链 $\Psi(t)$ 和差流 i_d 可用下述参数方程表示：

$$\Psi = \Psi_0 + \sum_{k=1}^{n} \Psi_k \sin(k\omega t + \beta_k)$$

$$i_d = I_0 + \sum_{k=1}^{n} I_k \sin(k\omega t + \alpha_k)$$

$$\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}i_d} = \frac{\sum_{k=1}^{n} k\Psi_k \cos(k\omega t + \beta_k)}{\sum_{k=1}^{n} kI_k \cos(k\omega t + \alpha_k)} = \frac{\Psi_{2\Sigma} + \Psi_{1\Sigma}}{I_{2\Sigma} + I_{1\Sigma}}$$

上式中，$\Psi_{2\Sigma}$、$I_{2\Sigma}$ 是偶次谐波的代数和；$\Psi_{1\Sigma}$、$I_{1\Sigma}$ 是奇次谐波的代数和。

显然，$d\Psi(t)/di_d(t)$ 反映了磁链和差流中奇、偶次谐波的电磁关系。因此可以认为 $d\Psi(t)/di_d(t)$ 间接地反映了差流中的偶次谐波的含量，而且更加全面。

4 结论

(1) 通过以上的介绍和分析可以发现，随着电力系统的不断发展，原来已用于实际的一些原理和方法将面临新的考验。模拟式保护中的原理在继电保护的微机化过程中，应结合微机保护的特点作进一步的分析和研究。

(2) 对基于变压器磁特性的励磁涌流鉴别法，国内外学者已经作了许多深入的研究，从研究的结果来看，他们从不同的角度得出了相似的结论。基于磁特性的励磁涌流鉴别法不但可以克服二次谐波原理的不足，而且适宜用微机实现，研究和实验表明，基于变压器磁特性的励磁涌流鉴别法是一种有前景的方法。

参 考 文 献

1 陈德树主编. 计算机继电保护原理与技术. 水利电力出版社，1992.11

2 陈增田编. 电力变压器保护（第二版）. 水利电力出版社，1989

3 蒋金华等. 500 kV 变压器保护中值得考虑的两个问题. 电力自动化设备，1989，(2)

4 史世文. 大机继电保护. 水利电力出版社，1987

5 王维俭译. 考虑励磁特性的保护新技术.（日）电气计算，49（5）

6 王祖光. 间断角原理的变压器差动保护. 电力系统自动化，1979，(1)

7 郭 勇. 大型变压器微机继电保护的研究. 华中理工大学硕士论文，1987

8 华中理工大学，南京电力自动化设备厂. WBZ－500 型微机变压器保护用户手册，1994.5

9 Sharp R L, Glassburn W E. A Transformer Differential Relay with Second Harmonie Rescruit. IEEE, Trans A, 1958, 12

10 Liu Pei, Malik O P, Chen Deshu. Improved Operation of Differential Protection of Power Transformers for Internal Faults. IEEE Trans on Power Delivary, 1992, 7 (4)

11 Blackburn J L et al. Applied Protection Relay. 1979

12 Thorp J S, Phadke A G. A Microprocessor Based Voltage Restrained Three Phase Transformer Differential Relay. Proceeding of the South Eastern Symposium on System Theory, 1982.4: 312～316

13 Phadke A G, Trop J S. A New Computer－based Flux Restrained Current Differential Relay for Power Transformer Protection. IEEE Trans on Power Aparatus and System, 1983, 102 (11): 3624～3629

14 Inagaki K et al. Digital Protection Method for Power Transformers Based on and Equivalent Circuit Composed of Inverse Inductance. IEEE Trans on Power Delivery, 1988.10, 3 (4)

15 Murty Y V V S, Smolinski W J. A Kalman Filter Based Digital Percentage Differential and Ground Fault Relay for A 3－Phase Power Transformer. IEEE Trans on Power Delivery, 1990.7, 5 (3)

ANALYSIS OF SOME TYPICAL METHODS FOR CHECKING MAGNETIZING SURGE IN TRANSFORMER

Tang Yuezhong, Liu Yong, Guo Yong, Liu Shiming, Chen Deshu

(Huazhong University of Science & Technology, Wuhan)

Abstract This paper analyses some typical methods for checking magnetizing surge in power transformer. These methods are classified as 3 catalogs based on the different electrical variables used. Evaluation and prospect of the methods are discussed. Differences and relations among these methods are also expounded.

Keywords digital protective relay transformer magnetizing surge