基于 Yn/Δ 接线变压器零序纵差保护原理研究

索南加乐，张军民，许立强，谈树峰，焦在滨，杜 斌，赵选宗

（西安交通大学电气工程学院，陕西 西安 710049）

摘要：变压器传统电流差动保护在反映接地故障及匝间故障时灵敏度存在着不足，由此提出了在变压器区内弱故障时仍能可靠动作的基于零序电流的纵差保护方案，不同于目前所说的零序电流差动只是针对变压器 Y 侧绕组应用，利用 Y 以及Δ侧绕组中的零序电流构成差动保护。按照典型的电流互感器配置方案，Δ侧绕组电流未知，采用零序等值电路计算Δ侧绕组中的零序环流，PSCAD 仿真以及动模数据均验证了该方法的正确性。通过变压器各种故障情况下零序纵差保护和传统保护性能的比较表明：零序电流纵差保护在反映单相接地和小匝间短路时灵敏度更高，且受励磁涌流影响更小。

关键词：变压器；零序等值电路；Y-Delta 绕组；零序电流纵差保护

Study of zero-sequence differential protection for transformer withYn/Δ connection

SUONAN Jia-le，ZHANG Jun-min，XU Li-qiang，TAN Shu-feng，JIAO Zai-bin，DU Bin，ZHAO Xuan-zong

（School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University，Xi'an 710049，China）

Abstract：Because conventional differential protection is not sensitive enough to earthing fault and inter-turn fault，a differential protection method based on zero-sequence current is proposed which can still reliably operate when transformer internal weak fault occurs. Different from present scheme, the new protection scheme is constructed by using the zero-sequence current of each side. The zero-sequence loop current in the delta side can be calculated by the zero-sequence equivalent circuit according to typical CT configuration scheme and unknown current in delta side. Simulation with PSCAD and dynamic model data show that the proposed principle is correct. The comparisons between the performance of zero-sequence differential protection and conventional differential protection suggest that the zero-sequence differential protection has higher sensitivity to earthing fault and small inter-turn fault, and suffers less influence from inrush.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China（No.50677051 and No.50877061）and the Major State Basic Research Development Program of China（973 program）(No.2009CB219704).

Key words：transformer；zero-sequence equivalent circuit；Y-Delta connection；zero-sequence current differential protection

中图分类号： TM771；TM773 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2010)16-0054-08

0 引言

变压器在系统中占据着重要的地位，由于电流纵差保护不但能够正确区分区内外故障，而且不需要与其他元件的保护配合，可以无延迟地切除区内各种故障，因而被广泛地用作变压器的主保护[1-2]，但是传统纵差保护在以下几个方面存在着不足。

1）匝间短路

作为匝间短路的故障相电流，它具有内部短路电流的特征，纵差保护应该动作，但是当短路匝数较少时虽然短路绕组的环流很大，而反映到变压器各侧的故障电流并不大，甚至比负荷电流还小。变压器在额定负荷运行时发生轻微匝间短路故障（3%以下匝短路），由于制动电流中包含变压器负荷电流[3]，常规差动保护没有足够灵敏度检出此类故障。

2）单相接地短路

对于 Y_n/Δ 变压器，为保证发生外部单相接地短路时，纵差保护不误动，通过软件计算使高压侧零序电流不再作为故障电流流入继电器，这导致内部接地故障时纵差保护灵敏度降低，不能可靠保护内部单相接地故障。与此同时，Y_n 绕组发生绕组内

基金项目：国家自然科学基金项目（NO.50677051）；国家自然科学基金项目（NO.50877061）；国家重点基础研究发展计划（973计划，NO.2009CB219704）

部单相接地短路时，传统的纵差保护两侧电流可能呈现外部短路的相位特征，单相短路越接近中性点，这种特征就越明显，保护的灵敏度大为降低[4]。针对这个问题，目前在变压器 Y_n 侧绕组中装有零序差动保护，利用 Y_n 侧绕组及中性点零序电流构成保护。虽然可以提高 Y_n 绕组单相接地的灵敏度，但是它不能保护匝间短路和相间短路[5]。

3）励磁涌流

励磁涌流是目前差动保护必须解决但是又难以解决的问题。目前变压器差动保护识别励磁涌流的方法主要是利用励磁涌流波形特征，包括二次谐波制动原理[6]、间断角原理[7]、波形对称原理[8-9]等，其中二次谐波制动原理应用最为广泛。随着电力系统的发展、超高压远距离输电线路对地电容的增大、变压器容量的增大以及静止无功补偿的大容量电容器的广泛使用，二次谐波制动式差动保护动作速度慢和可靠性差的问题日益突出[10]。

本文在分析 Y_n/Δ 接线三相变压器零序等效电路的基础上，提出了利用两侧绕组中零序电流构成的纵差保护方案，其中，Y_n 绕组零序电流可以根据 CT 测量得到，Δ 侧绕组中的零序环流可以采用零序等值电路计算得到。

当前变压器中所提到的零序差动保护是利用 Y_n 侧绕组及中性点零序电流构成保护[4]，对于匝间短路和相间短路并不能提高灵敏度。需要注意的是，这和本文的零序电流纵差保护方案是完全不同的。

零序电流纵差保护以零序电流作为制动量，制动电流中去掉了负荷电流的影响，对于轻微匝间短路故障，保护具有足够的灵敏度。另外零差保护是基于故障分量的纵差保护原理，由文献[6]知道故障分量纵差保护能够可靠区分区内外故障，且在绕组内部发生单相接地短路时灵敏度不会降低。仿真验证表明零序电流纵差保护在反映单相接地和小匝间短路时灵敏度很高，且受励磁涌流影响小。

1　保护原理

如图 1 所示系统：

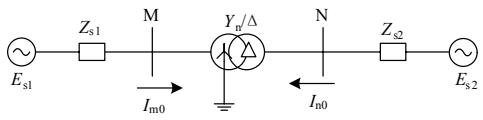

图 1 等效系统接线图

Fig.1 System equivalent circuit

变压器两侧网络等效成图示系统，两侧电势分别为 $\dot{E}_{s1}$、$\dot{E}_{s2}$，系统阻抗分别为 Z_{s1}、Z_{s2}。变压器为 Y_n/Δ 连接，规定变压器两侧的零序电流 $\dot{I}_{m0}$、$\dot{I}_{n0}$ 以流入变压器为正方向，注意其中 $\dot{I}_{n0}$ 为 Δ 绕组中的零序环流，并不会流到绕组外部。

1.1 原理分析

当系统在 Y_n 侧发生区外接地故障时，变压器星形侧流过的零序电流，在三角形侧各相绕组中将感应零序电动势，接成三角形的三相绕组为零序电流提供了通路。但因零序电流三相大小相等，相位相同，它只在三角形绕组中形成环流，从 M 侧看进去的零序电路如图 2 所示。

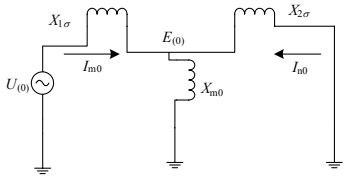

图 2　Y_0/Δ 变压器零序等值电路

Fig.2 Zero-sequence equivalent circuit of the transformer with Y_0/Δ connection

图 2 中：$X_{1\sigma}$、$X_{2\sigma}$ 分别为两侧绕组的漏抗；$X_{m(0)}$ 为零序励磁电抗；$\dot{U}_{(0)}$ 为 Y_n 绕组电压互感器装设处的零序电压；$\dot{I}_{m0}$ 为 Y_n 绕组的零序电流；$\dot{I}_{n0}$ 为 Δ 绕组中的零序环流。

由于 X_{m0} 远大于 $X_{2\sigma}$，认为励磁支路开路[11]。

1）区外故障时，在保护区内没有故障支路，零序等值网络如图 2 所示，$\dot{I}_{m0}+\dot{I}_{n0}\approx 0$。

2）系统正常运行时有 $\dot{I}_{m0}+\dot{I}_{n0}=0$，此时 $\dot{I}_{m0}+\dot{I}_{n0}=0$。以上两种情况下继电器中流过的电流为 0，保护不动作。

3）当变压器内部发生匝间短路或接地故障时，此时系统的零序等值网络如图 3 所示。

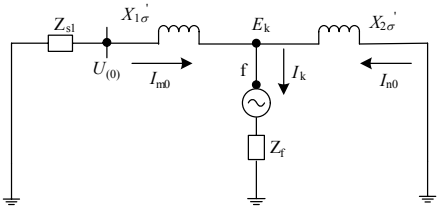

图 3　区内故障时零序等值电路

Fig.3 Zero-sequence equivalent circuit of the transformer when internal fault occurs

图中：f为故障点；$\dot{E}_{\mathrm{k}}$为故障支路零序电压；$\dot{I}_{\mathrm{k0}}$为故障支路零序电流；$X_{1\sigma}'$、$X_{2\sigma}'$分别为内部故障时两侧绕组的等效漏抗。此时$\dot{I}_{\mathrm{m0}}+\dot{I}_{\mathrm{n0}}=\dot{I}_{\mathrm{k0}}$。

根据以上分析，可以选择$I_{\mathrm{op}}=|\dot{I}_{\mathrm{m0}}+\dot{I}_{\mathrm{n0}}|$作为零序纵差保护的动作电流，采用比率制动特性，选取$I_{\mathrm{res}}=|\dot{I}_{\mathrm{m0}}-\dot{I}_{\mathrm{n0}}|$为制动电流，动作判据为

$$|\dot{I}_{\mathrm{m0}}+\dot{I}_{\mathrm{n0}}|>K_{\mathrm{res}}|\dot{I}_{\mathrm{m0}}-\dot{I}_{\mathrm{n0}}| \quad (1)$$

其中，取制动系数K_{res}=0.75。

1.2 零序电流计算

式（1）中$\dot{I}_{\mathrm{m0}}$、$\dot{I}_{\mathrm{n0}}$可由以下方法得到。

$\dot{I}_{\mathrm{m0}}$可根据式（2）得到：

$$\dot{I}_{\mathrm{m0}}=\frac{1}{3}(\dot{I}_{\mathrm{mA}}+\dot{I}_{\mathrm{mB}}+\dot{I}_{\mathrm{mC}}) \quad (2)$$

其中$\dot{I}_{\mathrm{mA}}$、$\dot{I}_{\mathrm{mB}}$以及$\dot{I}_{\mathrm{mC}}$为$\mathrm{Y_n}$侧绕组处CT测量得到的三相电流。

$\dot{I}_{\mathrm{n0}}$为Δ绕组中零序环流，由于220 kV及以下变压器采用三相三柱式绕制型式，无法配置绕组CT，所以不能采用式（2）所示方法计算零序电流，文中利用变压器零序等值电路可以求得$\dot{I}_{\mathrm{n0}}$。

根据图2，$\dot{U}_{(\mathrm{n0})}$可根据$\mathrm{Y_n}$侧PT测量值计算得到：

$$\dot{U}_{(0)}=\frac{1}{3}(\dot{U}_{\mathrm{mA}}+\dot{U}_{\mathrm{mB}}+\dot{U}_{\mathrm{mC}}) \quad (3)$$

此时有：

$$\dot{E}_{(0)}=\dot{U}_{(0)}-\dot{I}_{\mathrm{m0}}*X_{1\sigma} \quad (4)$$

所以Δ绕组零序电流为：

$$\dot{I}_{\mathrm{n0}}=-\frac{\dot{E}_{(0)}}{X_{2\sigma}} \quad (5)$$

至此零序电流纵差保护的各侧零序电流都可以得到。可以采用制动特性构成保护判据。

注意到，$X_{1\sigma}$、$X_{2\sigma}$分别为变压器两侧绕组的漏抗，无论变压器正常运行、区外故障还是发生变压器励磁绕组饱和，变压器漏抗恒为常数[12-13]，所以Δ绕组中零序环流的计算方法才得以成立。

上述方法可以推广到其他连接类别的变压器。

2 整定计算

采用两折线特性曲线，考虑启动门槛，零序差动保护动作判据可选为式（6）。

$$\begin{cases} I_{\mathrm{op}}>I_{\mathrm{op0}} \\ I_{\mathrm{op}}>K|\dot{I}_{\mathrm{k}}| \\ I_{\mathrm{op}}\geq I_{\mathrm{op0}}+K_{\mathrm{res}}(I_{\mathrm{res}}-I_{\mathrm{res0}}) \end{cases} \quad (6)$$

判据所对应的动作曲线如图4所示。

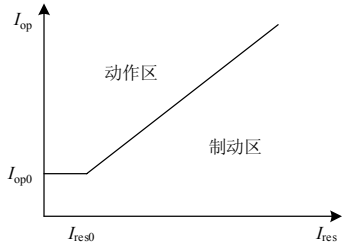

图4 零序电流纵差保护动作特性

Fig.4 Operating curve of zero-sequence current differential protection

式（6）中：

$$\begin{cases} I_{\mathrm{op}}=|\dot{I}_{\mathrm{m0}}+\dot{I}_{\mathrm{n0}}| \\ I_{\mathrm{res}}=|\dot{I}_{\mathrm{m0}}-\dot{I}_{\mathrm{n0}}| \end{cases} \quad (7)$$

$\dot{I}_{\mathrm{m0}}$、$\dot{I}_{\mathrm{n0}}$分别为高压侧和低压侧零序电流。

如果变压器为三绕组变压器，则动作电流和制动电流选取为：

$$\begin{cases} I_{\mathrm{op}}=|\dot{I}_{\mathrm{m0}}+\dot{I}_{\mathrm{n0}}+\dot{I}_{\mathrm{t0}}| \\ I_{\mathrm{res}}=|\dot{I}_{\mathrm{m0}}|+|\dot{I}_{\mathrm{n0}}|+|\dot{I}_{\mathrm{t0}}| \end{cases} \quad (8)$$

式中，$\dot{I}_{\mathrm{t0}}$为中压侧绕组零序电流。

2.1 启动门槛

2.1.1 保证变压器正常状态下不误动

变压器正常负荷状态下，由于$\dot{I}_{\mathrm{m0}}=\dot{I}_{\mathrm{n0}}=0$，此时，动作电流$I_{\mathrm{op}}$、$I_{\mathrm{res}}$恒等于0，此时为了防止出现误动，可以设定一个小阈值$0.1I_{\mathrm{n}}$（变压器高压绕组额定电流）作为启动电流，可以得到

$$I_{\mathrm{op0}}=0.1I_{\mathrm{n}} \quad (9)$$

2.1.2 保证相间短路不误动

在变压器发生相间短路时不存在零序电流，此时理论上有$|\dot{I}_{\mathrm{m0}}+\dot{I}_{\mathrm{n0}}|=0$，考虑到电流互感器的误

差和其他可能造成的噪声，此时会产生不平衡电流，$I_{op} \neq 0$，有可能出现保护误动，所以应该在发生相间短路时将零序差动保护闭锁。当式 $|\dot{I}_{m0}+\dot{I}_{n0}|>K|\dot{I}_{k}|$ 不满足时，变压器发生相间故障，将零序差动保护闭锁。$\dot{I}_{k}$ 为短路最大相电流，对变压器来说，$\dot{I}_{k}$ 为穿越电流，所以

$$\dot{I}_{k}=|\dot{I}_{m\phi}-\dot{I}_{n\phi}|_{max} \quad (10)$$

其中：$\dot{I}_{m\phi}$ 和 $\dot{I}_{n\phi}$ 分别为变压器两侧的相电流，ϕ 为 a，b，c；系数 K 设定为 0.1。

2.2 拐点电流

根据图 4 和文献[14]可知，过原点的折线斜率即制动系数为 0.75，所以可以取

$$I_{res0}=\frac{I_{op0}}{K_{res}}=0.133I_{n} \quad (11)$$

2.3 性能分析

2.3.1 制动系数 K_{res} 对保护性能的影响

1）外部故障

外部接地短路时，根据图 2 有 $\dot{I}_{m0}=-\dot{I}_{n0}$，理论上，$|\dot{I}_{m0}+\dot{I}_{n0}|=0$，$|\dot{I}_{m0}-\dot{I}_{n0}|=2*|\dot{I}_{m0}|$。我们考虑到电流互感器 ±5% 误差，在最糟糕情况下有差动电流：

$$|\dot{I}_{m0}+\dot{I}_{n0}|=|1.05\dot{I}_{m0}+0.95\dot{I}_{n0}|=0.1|\dot{I}_{m0}| \quad (12)$$

制动电流：

$$|\dot{I}_{m0}-\dot{I}_{n0}|=|1.05\dot{I}_{m0}-0.95\dot{I}_{n0}|=1.9|\dot{I}_{m0}| \quad (13)$$

此时 $\frac{|\dot{I}_{m0}+\dot{I}_{n0}|}{|\dot{I}_{m0}-\dot{I}_{n0}|}=\frac{0.1}{1.9}=0.053<K_{res}$，所以外部故障时考虑电流互感器的最大误差，保护不会误动。

2）内部短路[14]

由图 3 可知，内部故障时变压器两侧零序电流为：$\dot{I}_{m0}=-\frac{\dot{E}_{k}}{Z_{s1}+Z_{x1\sigma'}}$，$\dot{I}_{n0}=-\frac{\dot{E}_{k}}{Z_{x2\sigma'}}$，此时差动电流与制动电流之比：

$$\frac{|\dot{I}_{m0}+\dot{I}_{n0}|}{|\dot{I}_{m0}-\dot{I}_{n0}|}=\frac{|Z_{s1}+Z_{x1\sigma'}+Z_{x2\sigma'}|}{|Z_{s1}+Z_{x1\sigma'}-Z_{x2\sigma'}|} \quad (14)$$

因为 Z_{s1}、$Z_{x1'}$ 和 $Z_{x2'}$ 均为感性阻抗，所以

$$\frac{|Z_{s1}+Z_{x1'}+Z_{x2'}|}{|Z_{s1}+Z_{x1'}-Z_{x2'}|}>1 \quad (15)$$

亦即，$\frac{|\dot{I}_{m0}+\dot{I}_{n0}|}{|\dot{I}_{m0}-\dot{I}_{n0}|}>1>K_{res}$，所以在内部故障时，由 K_{res} 确定的保护原理能够可靠动作。

2.3.2 励磁涌流对保护性能的影响

对于传统变压器纵差保护来说，与励磁电抗并联的支路为系统的负荷阻抗，是一个很大的值，所以在变压器饱和时，励磁电抗降低，励磁支路分流较大，保护受励磁涌流影响较大。

而对于零序纵差保护来说，当变压器三相同时饱和时，变压器的零序等值电路如图 5 所示，此时图中的 X'_{m0} 为饱和情况下的零序励磁电抗，比正常运行情况下的零序励磁电抗值要小，但是由于与 X'_{m0} 并联的电抗为变压器二次侧漏抗 $X_{2\sigma}$，仍然有 $X'_{m0}>>X_{2\sigma}$，所以励磁支路的零序电流 $\dot{I}'_{0}$ 很小，影响可以忽略。

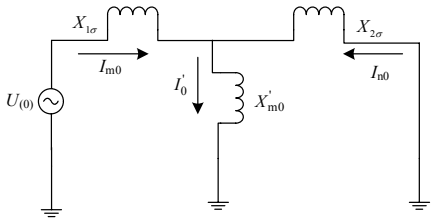

图 5 变压器励磁涌流时零序等值电路

Fig.5 Zero-sequence equivalent circuit of the transformer when magnetizing inrush occurs

实际中变压器在空载合闸或故障后恢复电压时变压器三相不会同时饱和，此时零序电路发生变化，文中通过仿真验证表明零序纵差保护在励磁涌流时不会误动作。

2.3.3 区内故障时漏抗变化对保护性能的影响

区内故障时，由于漏抗会发生变化，所以由式（4）、（5）所得到的 Δ 绕组零序环流并不是真实电流，所以有必要分析内部故障时漏抗变化情况下，保护会不会拒动，限于篇幅原因，具体分析过程见附录。经过分析可知变压器内部发生故障时，零序电流差动保护不会拒动。

3　仿真验证

我们利用 PSCAD 进行仿真，仿真系统如图 6 所示。变压器由三个单相变压器连接而成，变压器

变比为 525 kV/230 kV，S=900 MVA，漏抗 10%，绕组为 Y_n/Δ 连接。采样频率为 2 kHz。

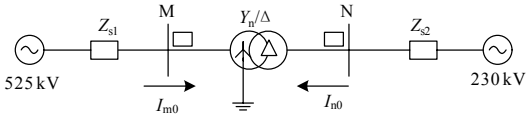

图 6 仿真系统模型

Fig.6 Simulation system model

在表 1 中给出星型侧各种内部故障时的常规差动保护以及零差保护的动作电流和制动电流的比值。

由公式（1）可以得到，在零序纵差保护启动的条件下，当 $\dfrac{I_{op}}{I_{res}}=\dfrac{|\dot{I}_{m0}+\dot{I}_{n0}|}{|\dot{I}_{m0}-\dot{I}_{n0}|}>K_{res}$ 时保护动作。

表 1 内部故障时动作电流与制动电流比值

Tab.1 Ratio between the operating current and restraining current when internal fault occurs

故障类型	常规差动保护（A 相）	零序电流差动保护
A 相金属性接地	1.335 0	1.714 9
A 相经 300 Ω 电阻接地	0.280 0	1.635 5
AB 两相短路	3.537 0	无
AB 短路接地	2.020 9	1.715 8
ABC 三相短路	2.021 0	无
A 相 0.5%匝间短路	0.167 7	1.236 3
A 相 1%匝间短路	0.206 7	1.236 3
A 相 3%匝间短路	0.482 1	1.236 0
A 相 5%匝间短路	1.286 2	1.236 0
A 相 1%匝地短路	0.266 8	1.204 7
A 相 5%匝地短路	1.211 2	1.194 7

从表 1 中我们可以看到，在变压器内部发生区内弱故障时，常规差动保护的 K 值很小，无法正确反映这些故障，而零序纵差保护的 K 值都大于 1，具有很高的灵敏度，可以可靠保护小匝间短路和匝地故障；对于区内的严重故障，零序纵差保护的 K 值同样大于 1，采用零差保护灵敏度同样较高；而对于两相短路和三相短路，由于零序差动电流小于启动电流，保护不会启动。

在表 2 中给出星型侧各种区外故障时常规差动保护以及零差保护的动作电流和制动电流的比值。

从表 2 中可以看出，星型侧发生区外带接地支路故障时，零序纵差保护的动作电流与制动电流之比小于制动系数 0.75，保护不会动作；当故障时不含接地支路时，由于零序动作电流小于启动电流，保护亦不会启动。由以上分析可知，零序纵差保护在变压器区外故障时不会误动。

表 2 外部故障时动作电流与制动电流比值

Tab.2 Ratio between the operating current and restraining current when external fault occurs

故障类型	常规差动保护（A 相）	零序电流差动保护
A 相金属性接地	0.000 8	0.057 1
A 相经 200 Ω 电阻接地	0.002 6	0.046 5
AB 两相短路	0.000 1	无
AB 短路接地	0.000 1	0.058 1
ABC 三相短路	0.000 1	无

下面来验证零序纵差保护躲励磁涌流的能力。文中将变压器低压侧空载，在 0.222 5 s 时将变压器合闸至系统中。励磁涌流波形如图 7 所示。此时可以算得传统保护中动作电流与制动电流比值 K=2.047 7，所以常规保护必须考虑励磁涌流带来的影响。而对于零序纵差保护来说，此时零序动作电流理论上为励磁支路的电流，根据上文分析，此电流是一个很小的值，而仿真所得零序差动电流如图 8 所示，它仅为 0.08 kA 以下，小于最小动作电流，所以零差保护不会启动。

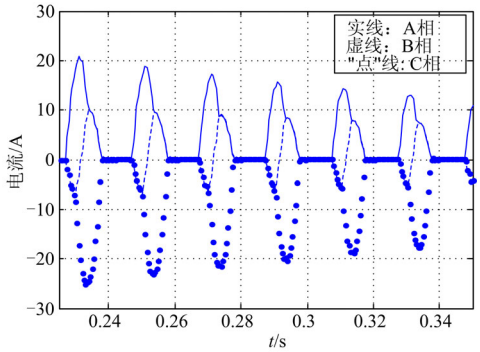

图 7 三相变压器励磁涌流波形

Fig.7 Magnetizing inrush current of the three-phase transformer

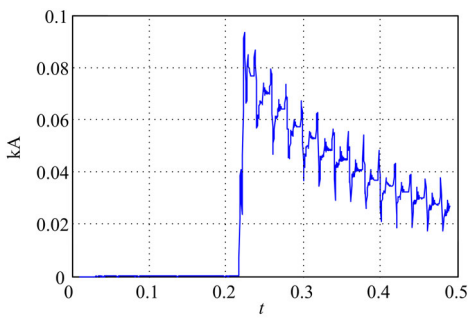

图 8 励磁涌流时零序差动电流

Fig.8 Zero-sequence operating current when magnetizing inrush occurs

4　动模数据验证

采用中科院 750 kV 系统动模数据进行验证，变压器为自耦变，容量为：500/500/150 MVA；电压比为：750/330/66 kV；短路电抗为：高中侧 0.13，高低 0.50，中低 0.40；绕组连接方式为：Yn/a0/d11。采样频率为 2.5 kHz。

以变压器区内金属性故障为例，此时高压绕组三相电流波形如图 9 所示。

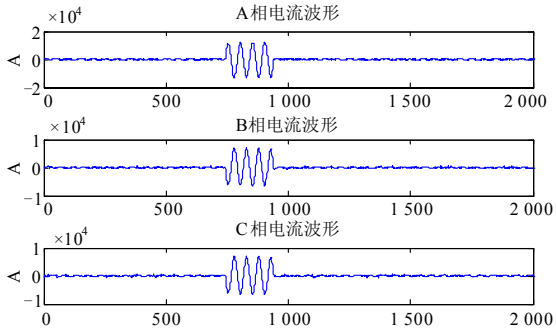

图 9 区内金属性故障时一次侧电流

Fig.9 Primary current of the transformer when internal metal fault ocurrs

图 10 给出故障时变压器传统纵差保护与零序纵差保护的图示。其中虚线代表制动电流，实线代表动作电流。

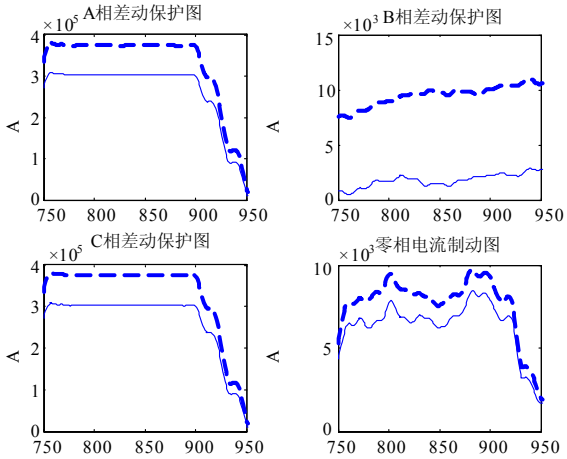

图 10 差动保护动作电流与制动电流

Fig.10 Operating current and restraining current of differential protection

通过计算可知，此时对于传统差动保护来说，动作电流与制动电流比值在 0.79 左右，差动保护能够动作；而对于零序差动保护，此时有

$$\frac{I_{\mathrm{op}}}{I_{\mathrm{res}}}=\frac{|\dot{I}_{\mathrm{m0}}+\dot{I}_{\mathrm{n0}}|}{|\dot{I}_{\mathrm{m0}}-\dot{I}_{\mathrm{n0}}|}=0.8>K_{\mathrm{res}}$$

零序差动保护也会动作。

利用同样的方法给出动模数据的验证结果。

表 3 动模数据：内部故障时动作电流与制动电流比值

Tab.3 Dynamic model simulation data：ratio between the operating current and restraining current when internal fault occurs

故障类型	常规差动保护	零序电流差动保护
高压侧 A 相短路接地	A 相：0.795 7	0.804 2
高压侧 BC 短路接地	C 相：0.799 3	0.857 4
中压侧 C 相接地	C 相：0.690 3	0.821 5
A 相轻载 3%匝间故障	A 相：0.687 1	0.986 5
A 相重载 3%匝间故障	A 相：0.422 6	0.998 9
B 相 2%匝间故障	B 相：0.343 2	0.997 9
B 相 1.5%匝间故障	B 相：0.230 3	0.993 8
C 相 1.5%匝间故障	C 相：0.102 0	0.993 3
中压侧 B 相接地，空投于高压侧	B 相：0.997 1	0.999 7
中压侧 AB 短路接地，空投于中压侧	A 相：0.999 5	0.892 5
高压侧 3%匝间短路，空投于高压侧	A 相：0.991 8	0.948 7
高压侧 3%匝间短路，空投于中压侧	A 相：0.391 1	0.916 4

注：数据中匝间故障是在 750 kV 侧试验得到，匝间短路范围为 1.5%到 3%

从表 3 我们可以得到，对于常规差动保护来说，制动系数一般可以取为 0.5，在区内发生 3%以下匝间故障时，由于动作电流与制动电流比值都小于 0.5，所以保护可靠不动作，而对于 3%匝间故障来说，制动电流中穿越性电流即负荷电流对保护的影响较大，在轻载情况下保护可以动作，而对于重载情况，由于此时负荷电流比较大，所以保护灵敏度不足，常规差动保护不能反映3%匝间短路。而零序差动保护在内部故障时能够可靠地动作，并且对于小匝间故障，保护灵敏度不会降低。另外在手合故障的情况下，零差保护也能可靠地动作，保护具有良好的性能。

5　结论

根据上面分析可知：变压器区内发生匝间故障或接地故障时，零序纵差保护能够可靠地动作，并且具有很高的灵敏度；当变压器区内发生相间故障时变压器回路中不存在零序电流，零差保护不会启动；当变压器发生区外故障时，动作电流与制动电

流之比小于制动系数，保护不动作；当发生励磁涌流情况下零序纵差保护可靠不动作。

由于零差保护在反映区内弱故障时的高灵敏度以及不受励磁涌流的影响，并在区内严重故障时也能可靠地动作，为变压器安全运行考虑，零序纵差保护的装设十分有必要。文中提出基于零序等值电路求解Δ绕组零序电流的方法，解决了零序电流纵差保护面临的问题，使变压器的保护更加安全和灵敏。

附录 A

区内故障时漏抗变化对保护性能的影响

由文中分析可知，零序电流纵差保护判据根据变压器区外故障零序等效电路得到，在变压器正常运行或发生区外故障时，保护不会动作。但是在区内故障时，由于变压器短路阻抗发生变化，根据公式（4）、（5）计算的Δ侧绕组中零序电流并不是真实电流。下面分析根据此时算得的电流，保护区内故障时是否拒动。

我们假设变压器一次绕组及二次绕组的漏磁导为 λ_σ，我们知道 $\lambda_\sigma = S/\rho L$，$\rho$ 为漏磁通通过磁路的磁阻率，L 为磁路长度，S 为磁阻的截面积；铁心的磁导为 λ_0，可知，$\lambda_0 >> \lambda_\sigma$。

变压器正常运行时，一次绕组自感[15]：

$$L_1 = (\lambda_0 + \lambda_\sigma)N_1^2$$

二次绕组自感：

$$L_2 = (\lambda_0 + \lambda_\sigma)N_2^2$$

两个绕组间的互感：

$$M = \lambda_0 N_1 N_2$$

一次侧漏抗：

$$X_{1\sigma} = \omega(L_1 - kM) = \omega\lambda_\sigma N_1^2$$

其中，k 为变压器变比，$k = N_1/N_2$。

同理，二次侧漏抗：

$$X_{2\sigma} = \omega\lambda_\sigma N_2^2$$

折算到一次侧之后，$X_{2\sigma} = \omega\lambda_\sigma N_1^2$。

当变压器中有故障存在时，假设故障发生在原边侧，此时铁心绕组如图 11 所示。1 号、2 号绕组为原边侧，3 号绕组为副边侧，2 号绕组为原边侧故障绕组。一次侧与二次侧绕组匝数分别为 N_1、N_2，一次侧故障绕组匝数为 αN_1。此时 1 号绕组漏磁导 $\lambda_\sigma' = S/\rho(1-\alpha)L$，铁心磁导和 3 号绕组漏磁导不变。

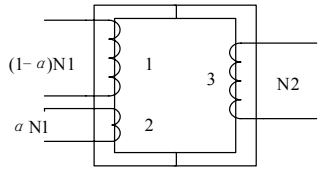

图 11 变压器故障时铁心绕组示意图

Fig.11 Abridged general view of the transformer core winding when internal fault occurs

根据文献[16]可知，双绕组变压器发生故障时，可以将故障部分划分出来成为变压器的第三绕组，此时的故障等效为第三绕组端部发生故障。此时变压器零序等值电路为图 12 所示，图中 $X_{2\sigma}'$ 为等效的第三绕组的漏抗，根据图 11，应该是 2 号线圈的漏抗。

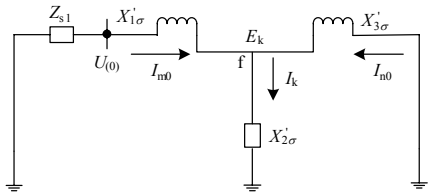

图 12 双绕组变压器故障等效电路

Fig.12 Equivalent circuit of the double winding transformer when internal fault occurs

类似于变压器正常运行时漏抗参数的计算，变压器故障时，由图 11 可知

$$X_{1\sigma}' = \omega(L_1' - kM_{13} - M_{12}) =$$

$$\omega\lambda_\sigma'(1-\alpha)^2 N_1^2 - \omega\lambda_0\alpha(1-\alpha)N_1^2 =$$

$$\omega\frac{S}{\rho(1-\alpha)L}(1-\alpha)^2 N_1^2 - \omega\lambda_0\alpha(1-\alpha)N_1^2 =$$

$$\omega\frac{S}{\rho L}(1-\alpha)N_1^2 - \omega\lambda_0\alpha(1-\alpha)N_1^2 <$$

$$\omega\frac{S}{\rho L}N_1^2 = X_{1\sigma}$$

副边侧的第三绕组漏抗可以同理计算得到，

$$X_{3\sigma}' = \omega(\lambda_\sigma - \lambda_0)N_2^2$$

折算至原边未故障侧，

$$X_{3\sigma}' = \omega(\lambda_\sigma - \lambda_0)(1-\alpha)^2 N_1^2 <$$

$$\omega\lambda_\sigma N_1^2 = X_{2\sigma}$$

故障时，变压器差动电流实际值为：

$$I_{cd} = I_{m0} - \frac{U_0 - I_{m0}X_{1\sigma}'}{X_{3\sigma}'} >> 0$$

我们根据文中图 2 所示正常运行时的等效电路计算的差动电流为：

$$I'_{\mathrm{cd}} = I_{\mathrm{m0}} - \frac{U_0 - I_{\mathrm{m0}} X_{1\sigma}}{X_{2\sigma}} >$$

$$I_{\mathrm{m0}} - \frac{U_0 - I_{\mathrm{m0}} X'_{1\sigma}}{X'_{3\sigma}} = I_{\mathrm{cd}}$$

所以在变压器内部发生故障时，零序电流差动保护不会拒动。

参考文献

[1] 葛宝明，王祥珩，苏鹏声，等. 电力变压器的励磁涌流判据及其发展方向[J]. 电力系统自动化，2003，27（22）：4-8，33.
GE Bao-ming，WANG Xiang-heng，SU Peng-sheng，et al. Criterial and developrment trend to identify inrush current of power transformers[J]. Automation of Electric Power Systems，2003，27（22）：4-8，33.

[2] 李海锋，王钢，李晓华，等. 电力变压器励磁涌流判别的自适应小波神经网络方法[J]. 中国电机工程学报，2005，25（7）:146-152.
LI Hai-feng，WANG Gang，LI Xiao-hua，et al. Distinguish between inrush and fault of transformer based on adaptive wavelet neural network[J]. Proceedings of the CSEE，2005，25（7）:146-152.

[3] 黄登峰，郁惟镛. 基于模糊集合理论的变压器匝间短路保护算法及仿真研究[J]. 电网技术，2002，26（1）:13-16.
HUANG Deng-feng，YU Wei-yong. A fuzzy set theory based protection algorithm for turn to turn fault of power transformer and its simulation[J]. Power System Technology，2002，26（1）:13-16.

[4] 朱声石. 变压器零序差动保护的讨论[J]. 电力自动化设备，2003，23（10）：5-7.
ZHU Sheng-shi. Discussion on transformer zero-sequence current differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment，2003，23（10）：5-7.

[5] 罗小莉，赵安国，郭晓冬. 新型变压器零序差动保护方案设计[J]. 电力自动化设备，2007，27（7）：119-121.
LUO Xiao-li，ZHAO An-guo，GUO Xiao-dong. Scheme design of transformer zero-sequence differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment，2007，27（7）：119-121.

[6] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京：中国电力出版社，1998.
WANG Wei-jian. Principle and application of electric power equipment protection[M]. Beijing：China Electric Power Press，1998.

[7] 王祖光. 间断角原理的变压器差动保护[J]. 电力系统及其自动化，1979，3（1）：18-30.
WANG Zu-guang. Transformer differential protection based on the dead-angle[J]. Automation of Electric Power Systems，1979，3（1）：18-30.

[8] 何奔腾，徐习东. 波形比较法变压器差动保护原理[J]. 中国电机工程学报，1998，18（6）：395-398.
HE Ben-teng，XU Xi-dong. Protection based on wave comparison[J]. Proceedings of the CSEE，1998，18（6）：395-398.

[9] 林湘宁，刘沛，杨春明，等. 利用改进型波形相关法鉴别励磁涌流的研究[J]. 中国电机工程学报，2001，21（5）：56-60，70.
LIN Xiang-ning，LIU Pei，YANG Chun-ming，et al. Studies for identification of the inrush based on improved correlation algorithm[J]. Proceedings of the CSEE，2001，21（5）：56-60，70.

[10] 焦邵华，刘万顺. 区分变压器励磁涌流和内部短路的积分型波形对称原理[J]. 中国电机工程学报，1999，19（8）：35-38.
JIAO Shao-hua，LIU Wan-shun. A novel scheme to discriminate inrush current and fault current based on integrating the waveform[J]. Proceedings of the CSEE，1999，19（8）：35-38.

[11] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 二版. 北京：中国电力出版社，1995: 103-106.
LI Guang-qi. Power system transient analysis[M]. Second edition. Beijing： China Electric Power Press，1995: 103-106.

[12] 汤蕴璆. 电机内的电磁场[M]. 二版. 北京：科学出版社，1998.
TANG Yun-qiu. The electromagnetic field in electrical motor[M]. Second edition. Beijing：Science Press，1998，

[13] 王正茂，阎治安，崔新艺，等. 电机学[M]. 西安：西安交通大学出版社，2000.
WANG Zheng-mao，YAN Zhi-an，CUI Xin-yi，et al. Electromechanics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press，2000.

[14] 王维俭. 发电机变压器继电保护应用[M].二版. 北京：中国电力出版社，2003: 84-87.
WANG Wei-jian. Application of electric generator and transformer protection[M]. Second edition. Beijing：China Electric Power Press，2003: 84-87.

[15] 李自良. 变压器等效电路的类型和阻抗参数的分析与变换[J]. 变压器，1997（3）:25-29.

[16] 许正亚. 变压器及中低压网络数字式保护[M]. 北京：中国水利水电出版设，2004.

收稿日期：2009-09-18；　修回日期：2009-10-20

作者简介：

索南加乐（1960-），男，博士，教授，博士生导师，从事电力系统继电保护领域的教学与研究工作；E-mail：suonan@263.net

张军民（1985-），男，硕士研究生，主要从事电力系统继电保护的研究。E-mail：zjmturtle@stu.xjtu.edu.cn