含变阻抗变压器的 110 kV 系统继电保护研究

艾绍贵[1],黄永宁[1],李秀广[1],张军[2],马奎[2],卢文华[3],黄棋悦[4]

(1. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院,宁夏 银川 750011;
2. 国网宁夏电力有限公司,宁夏 银川 750001;
3. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司,湖北 武汉 430074;
4. 西安交通大学 电气学院,陕西 西安 710049)

摘　要: 随着电力系统不断发展,电网容量日益增大,电网工作时所带负荷也日益增大。高容量、高负荷导致线路发生短路故障时的短路电流剧增,从而对线路和通信设备造成很大危害。为降低短路电流,分析了含变阻抗变压器的 110 kV 电力系统继电保护可能出现的问题,为提高继电保护的灵敏度,提出了自适应保护的新方法,对变阻抗变压器在空投情况下的励磁涌流识别方法做出了可行性分析。根据仿真结果分析得出,传统的继电保护方法能够适应于含变阻抗变压器的 110 kV 系统,而自适应保护方法能够提高保护的灵敏度。

关键词: 变阻抗变压器;继电保护;励磁涌流;距离保护;差动保护;自适应保护

中图分类号: TM77　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1672 - 3643(2019)03 - 0018 - 09

有效访问地址: http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672 - 3643.2019.03.004

Research on relay protection of 110 kV power system with variable impedance transformer

AI Shaogui[1], HUANG Yongning[1], LI Xiuguang[1], ZHANG Jun[2], MA Kui[2], LU Wenhua[3], HUANG Qiyue[4]

(1. Power Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan Ningxia 750011, China;
2. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan Ningxia 750001, China;
3. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan Nari Co., Ltd., Wuhan Hubei 430074, China;
4. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China)

Abstract: With the development of the power system, its capacity daily increases as well as the load. The large capacity and load lead to the sharp increase of the short circuit when the short faults

收稿日期:2019 - 01 - 22

作者简介:艾绍贵(1960),男,教授级高工,长期从事电力系统分析、高压电气试验与分析工作。

happened, which caused great damage on the transmission line and the communication equipment. So the variable impedance transformer is used to reduce the excessive short - circuit current. The problem was analyzed that may appear in relay protection of 110 kV power system with variable impedance transformer. In order to improve the sensitivity of the relay protection, the new method of self - adapting protection was proposed. The feasibility analysis was made for the excitation inrush current identification method of the variable impedance transformer without commission. It's concluded according to the simulation results that the traditional relay protection method can still adapt to 110 kV power system with variable impedance transformer, and the self - adapting protection method can really upgrade the sensitivity of the relay protection.

Keywords: variable impedance transformer; relay protection; inrush current; distance protection; differential protection; adaptive protection

DOI: 10.3969/j.issn.1672 - 3643.2019.03.004

随着国家发展速度越来越快,经济水平不断提高,居民用电的普及和企业用电量的逐步增大,电网的负荷不断增加,电网的容量也不断提升,日益增长的电网容量使得线路发生短路故障时的短路电流提高,导致设备投资大幅增加,设备选择困难,影响了电力系统的安全运行。目前,短路电流超标已成为电力系统面对的一个重要问题。

近年来,优化系统运行方式及网架结构采用固定电抗器、短路电流限制器以及高阻抗变压器等限制短路电流的方式已经被充分研究并广泛应用。采用高阻抗变压器是目前电力系统中应用较为广泛的一种短路电流限制方式,在解决短路电流超标问题的同时也对电力系统的安全运行带来了其他的新问题[1-2]。文献[3]指出,采用高阻抗变压器后,变压器低压侧系统的过电流保护灵敏度将显著下降,甚至无法满足系统运行的基本要求。文献[4-5]提出,高阻抗变压器在空载合闸励磁涌流的幅值大且衰减缓慢,从而对其主保护及相邻设备的后备保护造成较大的影响。短路电流限制器可以在故障发生后投入限流电抗或电阻,在正常运行时将电抗或电阻退出,是未来短路电流限制的主要方案。短路电流限制器在运行中表现为可变阻抗的特性,对电力系统继电保护存在较大的影响。文献[6]提出的变阻抗变压器的改造思路具有简洁、经济性高、维护改造量小等诸多优点,可以满足现代电力系统对限制短路电流的要求,但其运行过程中的继电保护问题并未得到充分的研究。

以变阻抗变压器接入系统后对电力系统继电保护的影响问题为研究对象,分析了变阻抗变压器动作特性对变压器主保护以及 110 kV 系统保护的影响,提出了一种自适应保护的新方法,解决了变阻抗变压器接入电力系统的继电保护问题,为变阻抗变压器的应用奠定了一定的理论基础[7-8]。

1　110 kV 系统继电保护适应性分析

由于变阻抗变压器在构造上和普通变压器存在区别,且限流电抗器投切通过快速断路器实现,其接入后对电力系统继电保护的影响值得研究。以变阻抗变压器接入 110 kV 电力系统为例,通过在 PSCAD 上构建模型,对变阻抗变压器接入后对 110 kV 系统继电保护的影响进行了仿真研究。

1.1　电流保护

电流保护主要反映因发生短路故障电流幅值增大而动作的保护,通常这种保护范围不能达到本线路的 100%。电力系统发生故障后,为限制

短路电流,变阻抗变压器中的限流电抗器会通过快速开关投入运行,以达到增大系统阻抗限制短路电流的目的。

采用变阻抗变压器的单电源供电 110 kV 系统的电磁暂态仿真模型如图 1 所示。

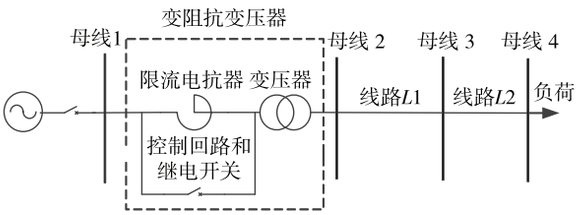


图 1　单端供电 110 kV 系统的电磁暂态仿真模型

图 1 中虚线框内为变阻抗变压器的模型。系统输电线路采用短线路模型,线路电阻为 0.21 Ω,线路电抗为 0.416 Ω;线长 $L1$ 为 30 km,$L2$ 为 15 km。故障分别设在线路 $L1$ 首端、1/4 处、1/2 处、3/4 处、末端和线路 $L2$ 末端处。变阻抗变压器中的串联电抗器正常投切与否会严重影响电流保护的可靠性。如果串联电抗器因故障不投切,由于系统整定电流恒定,而所测电流值有所增大,从而影响电流保护在线路 $L2$ 段首端故障时发生误动作,影响电力系统安全可靠运行。

对电抗器正常投切和不投切 2 种情况下的电力系统进行电流保护分析,得到系统短路电流值,如表 1 所示。

表 1　线路短路电流仿真值

序号	故障位置	短路电流值/ kA	
		正常投切	不投切
1	$L1$ 线路首端	14.65	22.00
2	$L1$ 线路 1/4 处	10.15	13.15
3	$L1$ 线路 1/2 处	7.70	9.30
4	$L1$ 线路 3/4 处	6.20	7.20
5	$L1$ 线路末端	5.20	5.80
6	$L2$ 线路末端	3.00	3.30

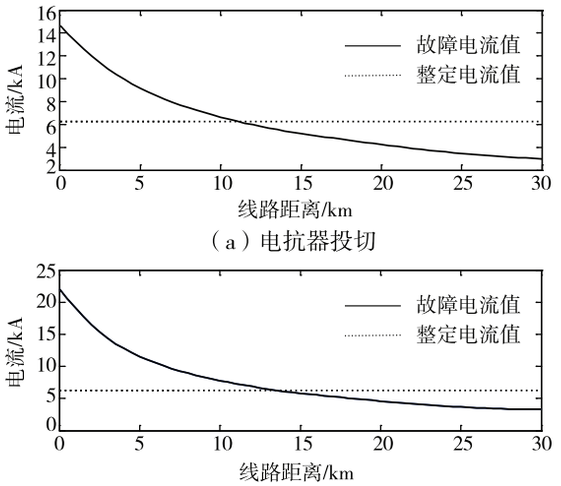
电流保护的保护装置启动电流按照下式进行整定:

$$I_{set} = K_{rel} \times I_{L.max} \tag{1}$$

式中:K_{rel}— 可靠系数,一般采用 1.2 ~ 1.3;

$I_{L.max}$— 正常运行时最大负荷电流;

根据式 1 和表 1,计算出保护装置的启动电流为 6.24 kA,电力系统的过电流保护如图 2 所示。



(a) 电抗器投切

(b) 电抗器不投切

图 2　过电流保护

从图 2 可以看出,当串联电抗器正常投切时,电流保护的保护范围仍能够满足大于被保护线路全长的 15% ~20% 的要求;而当串联电抗器因故障不投切时,也不会因所测电流的增大而引起本段电流保护的误动作。综上可以得出,传统电流保护仍适用于含变阻抗变压器的电力系统。

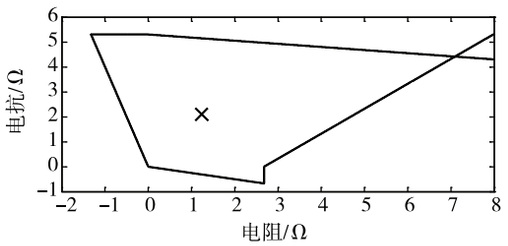
1.2　距离保护

距离保护是利用短路发生电压、电流同时变化的特征,测量电压与电流的比值。该比值反映故障发生处到保护安装处之间的距离,若该距离小于整定值时,距离保护动作。电力系统发生故障后,串联电抗器被投入系统,增加的阻抗会对距离保护产生一定影响,从而可能导致距离保护误动或拒动。因此有必要对采用变阻抗变压器系统的距离保护可靠性进行仿真验证。

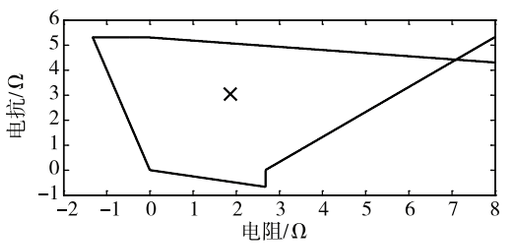
采用变阻抗变压器的双端电源供电 110 kV 系统的电磁暂态仿真模型及参数如图 1 所示。因串联电抗器的阻值是影响距离保护特性的重要因素,所以分别考虑该电抗器正常投入、不投入和 50% 阻抗投入这 3 种情况进行仿真验证。

在距离保护中,阻抗继电器通过测量故障线路的测量阻抗 Z_m,并将它与阻抗复平面动作区域进行比较,从而确定保护动作与否。系统采用的

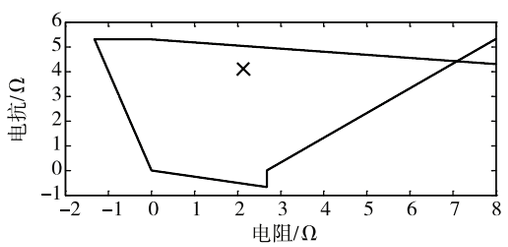
是准四边形特性的阻抗继电器。



(a)线路 1/3 处发生故障



(b)线路 1/2 处发生故障



(c)线路 2/3 处发生故障

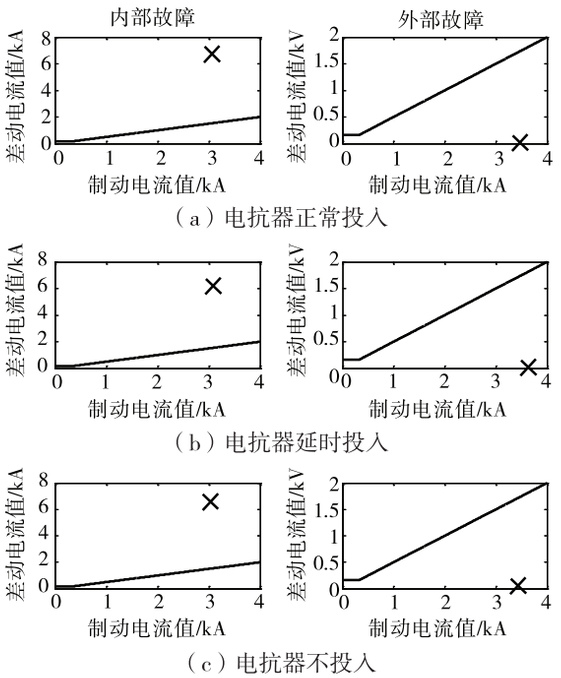
图 3　阻抗继电器在 3 个故障点的准四边特性

图 3 为阻抗继电器在 3 个故障点处的准四边特性,每个图都包含正常投入、不投入和 50% 阻抗投入这 3 种情况。由图 3 可以看出,这 3 种情况对阻抗继电器所得到的测量阻抗基本一致,而 3 个故障位置处测量阻抗均在动作区域内。动作继电器能够正确识别系统短路故障,不会发生距离保护拒动现象,因此,传统距离保护仍适用于含变阻抗变压器的110 kV电力系统。

1.3　纵差动保护

纵差动保护主要是基于基尔霍夫电流定律,具有良好的选择性,能灵敏、快速地切除保护区内的故障。而电力系统发生故障后,变阻抗变压器的控制回路需要一定的反应时间才能够将串联电抗器投入系统,电抗器的投入和短路故障发生的时间差可能会对变压器的纵差动保护产生不利的影响。

采用图 1 所示的 110 kV 系统的仿真模型及参数,对变阻抗变压器接入后的纵差动保护性能进行分析。电抗器投入时间是影响差动保护的重要因素,分别考虑电抗器正常时间投入、延时 0.02 s时投入以及不投入 3 种情况进行分析。系统故障分别设为内部故障和外部故障 2 种情况,得到系统差动保护特性如图 4 所示。



(a) 电抗器正常投入

(b) 电抗器延时投入

(c) 电抗器不投入

图 4　系统差动保护特性

从图 4 可以看出,变阻抗变压器的串联电抗器的正常投入与否不会对纵差动保护产生影响,线路内部故障时保护不拒动,外部故障时保护不误动,因此,传统纵差动保护仍适用于含变阻抗变压器的 110 kV 电力系统中。

综上所述,由于在故障发生后需投切限流电抗器,变阻抗变压器接入系统后会对传统电网的继电保护造成一定的影响,但并不会导致电流保护、距离保护以及纵差动保护的不正确动作,仅需在整定过程中考虑其投入后的保护配合关系,即可保证系统的安全运行。

2　变阻抗变压器自适应电流保护

变阻抗变压器由于存在投切电抗器而导致了其后备保护灵敏度不足[9-10],因此提出了一种在线调整整定值的自适应电流保护方案,以提高变阻抗变压器后备保护的灵敏度,保证故障的有效

识别与隔离。自适应保护的基本思路是提出一种能够在线实时监测系统的运行方式和识别故障类型的元件,能够根据运行方式和故障类型自动调整过电流保护整定值,使其性能时刻保持在最优的状态,保证电力系统的安全运行。

2.1　自适应电流速断保护

电流速断保护反应系统故障且无延时跳闸,作为输配电线路及变压器的近后备保护,对于快速识别及隔离故障具有重要的意义。自适应电流速断保护动作电流的整定公式如下:

$$I_{set} = \frac{K_F \times K_K^I \times E_S}{Z_S + Z_L + Z_T} \tag{2}$$

式中:I_{set}— 继电器的动作电流,即变压器高压侧自适应过流保护的整定值;

K_F— 系统低压侧发生故障时的故障类型系数,当发生三相短路故障时 $K_F = 1$,发生相间故障时 $K_F = \frac{\sqrt{3}}{2}$;

K_K^I— 可靠系数,一般取 1.2 ~ 1.3;

E_S— 系统的等效相电势;

Z_S— 系统阻抗;

Z_L— 被保护线路阻抗;

Z_T— 变压器阻抗;

系统阻抗和故障类型系数可以通过在线整定的方式进行实时计算。

短路时流过保护的短路电流可表示为

$$I_d = \frac{K_F E}{Z_S + Z_T + y \times Z_L} \tag{3}$$

式中:K_F— 故障类型系数;

E— 系统等效电源的电动势;

Z_S— 系统等值阻抗;

Z_L— 线路阻抗;

Z_T— 变压器阻抗;

自适应电流速断保护的动作条件为

$$I_d > I_{set} \tag{4}$$

系统等效电势可近似等于系统等效电源的电动势,即 $E = E_S$,令 $I_d = I_{set}$ 可计算出自适应电流速断保护的动作范围为

$$y^I = \frac{1}{K_k^I} - \left(1 - \frac{1}{K_k^I}\right) \times \frac{Z_S}{Z_L} \tag{5}$$

即当短路点到保护安装处阻抗 $Z_d < y^I \times Z_L$ 时,保护可以动作。由式(5) 可知,自适应电流速断保护的动作范围与短路类型系数 K_F 无关,故不受短路类型变化影响。

2.2　自适应限时电流速断保护

自适应限时电流速断保护的整定值可以表示为

$$I_{set} = \frac{K_k K_d E_S}{Z_S + aZ_L} \tag{6}$$

式中:K_k— 可靠系数,一般取 1.2 ~ 1.3;

K_d— 短路故障类型;

E_S— 系统等效电势;

Z_S— 系统阻抗;

Z_L— 被保护线路阻抗;

a— 保护范围系数,一般取 1 ~ 2。

当发生短路故障时,短路电流的计算如下:

$$I_d = \frac{K_d E}{Z_S + yZ_L} \tag{7}$$

式中:K_d— 短路故障类型;

E— 系统等效电势;

Z_S— 系统阻抗;

yZ_L— 短路点到保护安装处的阻抗值。

同理,自适应限时电流速断保护的动作条件和式(4) 相同。

2.3　自适应过电流保护

自适应过电流保护的定义如下:

$$I_{set} = \frac{K_{rel} K_{SS}}{K_{re}} I_{load} \tag{8}$$

式中:K_{rel}— 可靠系数,一般取 1.15 ~ 1.25;

K_{SS}— 自启动系数,数值大于 1,由网络参数决定;

K_{re}— 电流继电器的返回系数,一般采用 0.85 ~0.95;

I_{load}— 保护启动前安装处的实时负荷电流。

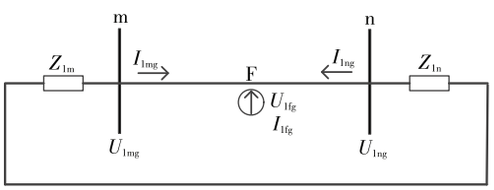
由于传统过电流保护是按照正常运行时最大负荷电流 $I_{L.max}$ 整定,因此自适应过电流保护比传统过电流保护动作灵敏度高。

2.4　确定系统阻抗

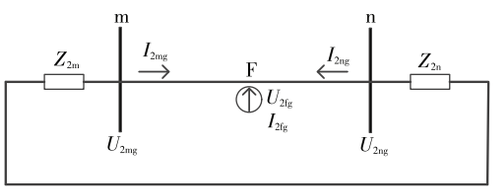
在自适应保护的计算中,系统阻抗和故障类型系数都是需要自适应元件通过实时计算求得,

因此,系统阻抗计算和短路故障类型的判别在自适应保护中显得尤为重要。

自适应电流保护主要通过继电保护装置所测得的实时电压、电流的故障分量计算出系统的阻抗和等效电势。通过在线计算的方法,使得无论短路电流因串联电抗器的投切发生何种变化,都能够得到在该运行方式下的系统阻抗值,从而适应变阻抗变压器的使用对电流保护的影响。通过叠加原理所得到的系统故障附加状态网络,可以做到实时计算系统阻抗。故障附加状态网络如图 5 所示。



(a) 正序状态



(b) 负序状态

图 5　故障附加状态网络

由图 5 可以计算出系统的阻抗为

$$Z_{1m} = -\frac{U_{1mg}}{I_{1mg}} \tag{9}$$

$$Z_{2m} = -\frac{U_{2mg}}{I_{2mg}} \tag{10}$$

式中:U_{1mg}、I_{1mg}— 保护安装处的正序故障分量电压、电流;

U_{2mg}、I_{2mg}— 保护安装处的负序故障分量电压、电流。

当系统正负序阻抗相同时,可只用式(9)、式(10) 其中任意一式进行计算。

2.5　确定故障类型

自适应保护中要求对系统的故障类型进行实时检测,并能够判断短路时的故障类型是三相短路故障还是相间短路故障,这样就可以在自适应电流保护中根据不同的故障类型,采用不同的故障类型系数,使保护在三相故障和相间故障时有相近的保护范围。图 6 为各种类型短路故障时的复合序网。通过复合序网结构,判断发生故障的正负零序电流关系,从而提出故障类型判据。

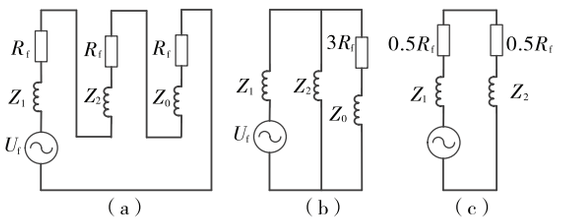


图 6　复合序网

当发生三相短路时,由于系统三相对称,不存在负序、零序电流,实际情况会出现一定的不平衡电流,因此只要负序零序电流低于各自的门槛值时,即可判断为三相短路故障。判据如下:

$$\Delta I_2 < I_{2.\,set},\ \Delta I_0 < I_{0.\,set} \tag{11}$$

式中:$I_{2.\,set}$,$I_{0.\,set}$— 负序和零序电流的门槛值。

当系统发生单相短路故障,单相接地短路序网如图 6(a) 所示。故障点处的各序电流幅值满足:$\Delta I_{f1} = \Delta I_{f2} = \Delta I_{f0}$,因此可以得到保护装置处的各序电流幅值满足:$\Delta I_1/K_{fz1} = \Delta I_2/K_{fz2} = \Delta I_0/K_{fz0}$。而在单相接地短路中,正负序的分支系数近似相等,因此可以得到单相短路故障的判据如下:

$$\Delta I_1 = \Delta I_2 \tag{12}$$

当系统发生两相短路接地故障时的序网如图 6(b) 所示。从图中可以得到各序电流之间满足:$\Delta I_{f1} = \Delta I_{f2} + \Delta I_{f0}$,因此可以得到两相短路故障的判据如下:

$$\Delta I_1/K_{fz1} = \Delta I_2/K_{fz2} + \Delta I_0/K_{fz0} \tag{13}$$

当系统发生两相相间短路故障时的序网如图 6(c) 所示。从图中可以得到各序电流满足:$\Delta I_{f1} = \Delta I_{f2}$,因此可以得到相间短路故障的判据如下:

$$\Delta I_1 = \Delta I_2, \Delta I_0 = 0 \tag{14}$$

通过计算保护装置处各相电流的正负零序值,联合公式(11) - (14),可以对短路故障类型进行精确地识别,从而可以确定自适应保护中的故障系数。

2.6　仿真验证

用系统发生相间短路为例,进行自适应过电流保护灵敏度的仿真研究。由于相间短路的故障

类型系数为$\frac{\sqrt{3}}{2}$,因此,只需要确定系统阻抗就可以得到动作电流。电力系统仿真模型与图 1 相同,用 PSCAD 仿真结果如下:

(1)正常工作时电压电流输出波形如图 7 所示。

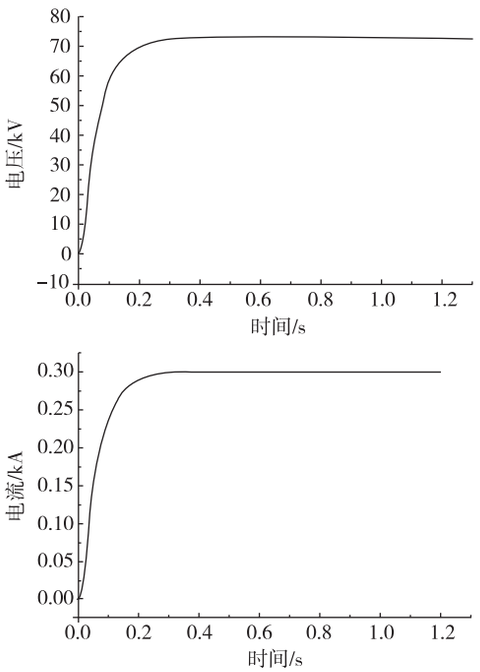


图 7　无故障电压电流输出波形

(2)发生短路故障时的电压电流输出波形如图 8 所示。

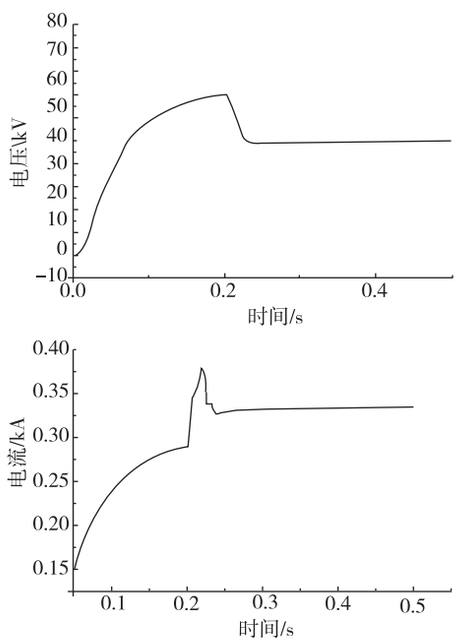


图 8　故障电压电流输出波形

根据图 7 – 图 8,可以得到电压、电流值,见表 2。

表 2　电压、电流值

类型	正序电压/ kV	正序电流/kA
正常运行	70.84	0.3
发生故障	50	0.33

由表 2 可以计算出电压的故障分量和电流的故障分量,带入公式(8)可以计算出:$I_{set}=0.165$。

根据灵敏度公式计算出灵敏度:

$$K_{sen}=\frac{0.340}{0.165}=2.06>1.2。$$

传统过电流保护 $I_{set}=0.545$,$K_{sen}=\frac{0.340}{0.545}=0.624<1.2$。

因此可以得出,自适应过电流保护能够提高过电流保护的灵敏度。

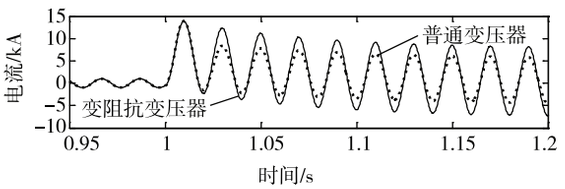
3　变阻抗变压器故障特征

变压器在电力系统中具有不可替代的地位,而其自身故障会对供电可靠性和系统安全运行带来严重的影响,因此在使用变阻抗变压器的电力系统中,变阻抗变压器的保护能否正常动作对系统稳定起着至关重要的作用。使用 PSCAD 进行仿真研究,电力系统模型与图 1 相同,观察系统发生短路故障时电流的暂态过程,研究其在发生故障时短路电流是否会发生显著性变化。当发生故障时,变阻抗变压器的限流电抗器的投入会对电流波形产生什么样的影响,是否会产生波形的畸变。

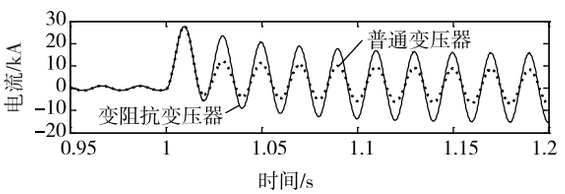
故障点 A 设为线路 $L1$ 的末端,当 A 处发生三相短路故障后,观察线路的电流暂态变化过程。当变阻抗变压器发生内部故障时,电抗器的投切仍会对短路电流的暂态变化产生很大的影响,所以将变压器内部故障分为绕组接地故障和绕组间短路故障 2 种情况进行仿真分析。电流暂态变化过程如图 9 所示。

从图 9 中可以看出,无论发生外部故障还是

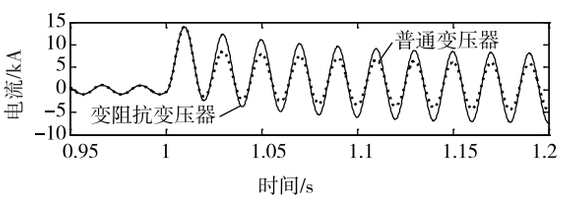
内部故障,变阻抗变压器和普通变压器的电流暂态变化波形都极为类似。由于变阻抗变压器识别短路故障,投入串联电抗器,其电流暂态值会减小,但电流值仍有显著提升,不会影响变压器保护对故障电流的识别。并且从图中可以看出,变阻抗变压器投入串联电抗器时由于电抗器的投切都是在电流过零点进行,因此并没有发生严重的电流畸变的情况。



(a) 外部故障



(b) 绕组接地故障



(c) 绕组间短路故障

图 9　电流暂态波形

4　励磁涌流判别

变压器空投是电力系统中十分常见的现象,而由于铁心可能出现饱和,变压器中会出现励磁涌流。励磁涌流会对变压器的纵差动保护的判别产生影响,会导致保护误动。变阻抗变压器存在高阻抗和投切电抗器的特点,因此对传统励磁涌流的判别产生一定干扰,从而影响变压器保护的可靠性。因此需要对其变阻抗变压器的励磁涌流特征进行仿真研究。

假设变阻抗变压器的励磁涌流判别将采用二次谐波制动的方法[11-12]。通过 PSCAD 构造了 1 个 110 kV 变阻抗变压器空投模型,如图 10 所示。

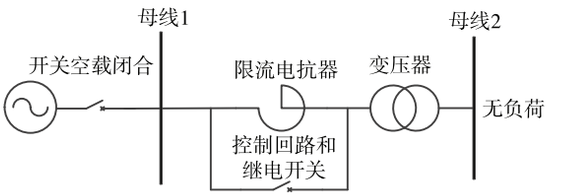
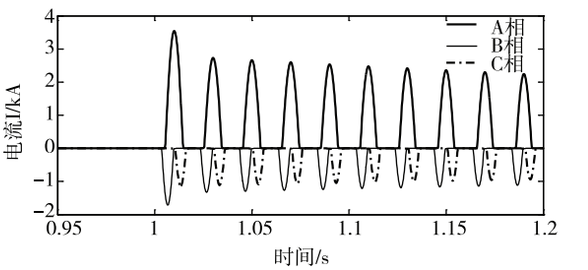
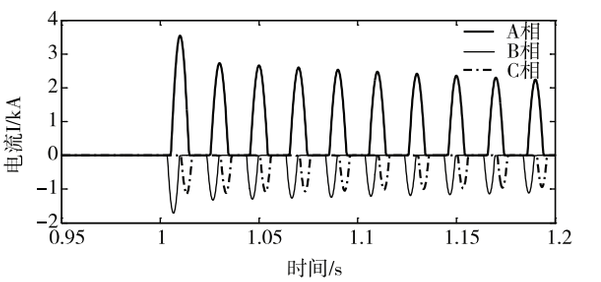


图 10　变阻抗变压器空投

分别测量变阻抗变压器和普通变压器空投时所产生的励磁涌流,其中变阻抗变压器空投时,假设串联电抗器正常投入系统。波形如图 11 所示。



(a) 变阻抗变压器励磁涌流波形



(b) 普通变压器励磁涌流波形

图 11　励磁涌流波形

由图 11 可以看出,2 种变压器空投的励磁涌流波形形状极其相似。

二次谐波制动方法是根据励磁涌流含有大量二次谐波的特点,当检测到电流中二次谐波含量大于整定值的时候就将差动继电器闭锁,以防止励磁涌流引起误动。整定公式如下:

$$I_2 > K_2 I_1 \tag{15}$$

式中:I_1— 差动电流基波分量;

I_2— 差动电流二次谐波分量;

K_2— 二次谐波制动比。

按躲过各种励磁涌流下最小的二次谐波含量整定,整定范围为

$$K_2 = 15\% \sim 20\% \tag{16}$$

一般变压器采用 Y－△接线方式，如图 12 所示。为了减小误差，一般采用以下 3 种方法计算差动电流。

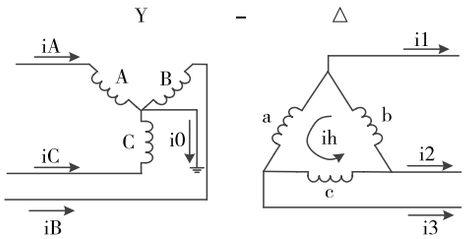


图 12　变压器绕组结构

（1）考虑三角形回路电流计算差动电流。以 A 相为例，差动电流计算值如下：

$$Y_{\mathrm{dif,A}} = i_{\mathrm{A}} - i_{\mathrm{h}} \tag{17}$$

式中：i_{A}— 变压器 Y 侧 A 相电流值；

i_{h}—变压器△侧的回路电流值。

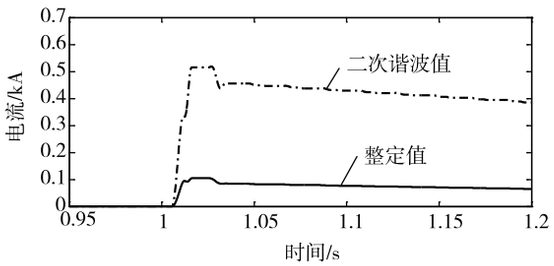


图 13　励磁涌流二次谐波

（2）用一侧相电流差和另一侧电流计算差动电流。差动电流的计算值如下：

$$Y_{\mathrm{dif,A}} = |i_{\mathrm{A}} - i_{\mathrm{c}}| - i_{1} \tag{18}$$

式中：i_{c}— 变压器 Y 侧 C 相电流值；

i_{1} —△侧的电流值。

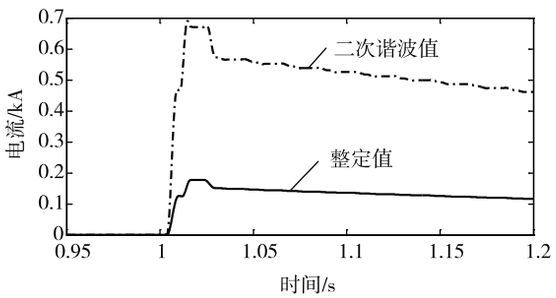


图 14　励磁涌流二次谐波

（3）考虑 0 序电流计算差动电流。差动电流计算值如下：

$$Y_{\mathrm{dif,A}} = i_{\mathrm{A}} - i_{0} - i_{1} \tag{19}$$

式中：i_{0}— 变压器 Y 侧中性点接地的零序电流。

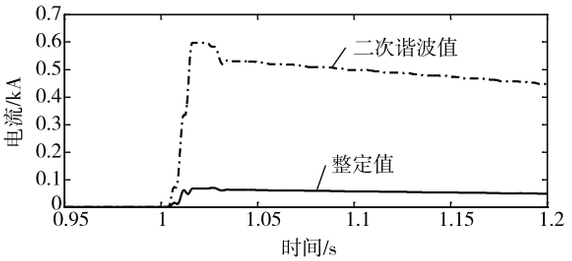


图 15　励磁涌流二次谐波

从图 13－图 15 可以看出，用以上 3 种方法计算差动电流的结果相同。在电抗器投入系统时二次谐波值有一个明显的衰落，即变阻抗变压器空投时，串联电抗器的投入会对二次谐波产生一定影响，但闭锁判据仍然成立，差动继电器被正常闭锁，变压器的纵差动保护不会出现误动作的情况，因此，传统励磁涌流识别算法仍适用于含变阻抗变压器的 110 kV 电力系统中。

5　结　论

综合分析了使用变阻抗变压器的 110 kV 系统的继电保护情况，即变阻抗变压器是一种将电抗器和变压器进行一体化设计的一种特殊变压器，拥有简洁、经济性高、维护改造量小等诸多优点。通过 PSCAD 软件仿真，就电流保护、距离保护、差动保护等传统继电保护方法对含变阻抗变压器电力系统的适用性进行了分析，提出了能够提高保护灵敏度的自适应保护算法。该算法通过对系统运行方式和短路故障类型进行识别，在线实时改变整定值，从而大幅提高系统保护的灵敏度。还对变阻抗变压器的故障特征和励磁涌流的识别方法进行了研究，二次谐波制动方法依然适用于变阻抗变压器。

变阻抗变压器的投入运行不会影响各种继电保护方案的整定，而其对短路电流的限制作用弥补了传统方案的不足，如能在电力系统中得到推

（下转第 34 页）