

变压器空投匝间故障特征及机制

郭晓,行武,胡兵,王哲
(南京国电南自电网自动化有限公司,南京 211151)

摘 要:变压器空投于单相匝间故障时,由于闭锁判据直接闭锁三相,导致单相匝间故障无法快速切除,威胁变压器安全运行。通过建立变压器匝间故障等效模型,推导出了空投于匝间故障时励磁绕组磁通的解析表达式,并对系统阻抗及故障匝数对故障特征的影响进行了分析,得出系统阻抗越大空投匝间时越不易发生励磁涌流,以及匝间故障匝数越多空投匝间时越不易励磁涌流的结论。利用 PSCAD 软件进行仿真,验证了结论的正确性,为差动保护闭锁判据及闭锁方案的选择提供了理论依据。

关键词:匝间短路;励磁涌流;系统阻抗;PSCAD 软件

中图分类号:TM 774 **文献标志码:**A **文章编号:**1674 - 1951(2017)04 - 0004 - 04

0 引言

变压器保护一直是电力系统继电保护的重点,关系到整个系统的安全稳定。统计资料显示,变压器匝间短路占电力系统大型变压器故障的 50% ~ 60%。继电保护装置在保证系统安全、稳定和经济运行等方面起着不可替代的作用,差动保护作为变压器的主要保护,可以在故障发生几十 ms 内迅速切除,对变压器进行可靠保护。而作为主保护的差动保护,在由于铁芯非线性而导致合闸时产生励磁涌流的情况下,应尽可能避免误动作。工程上广泛采用二次谐波制动判据、间断角判据和波形对称判据等,在变压器空投时都能可靠地闭锁差动保护,防止保护误动^[1-2];但是,由于存在闭锁判据及闭锁方案不合理,导致变压器在空投于匝间故障时,差动保护被闭锁,无法快速切除故障,只有等到涌流衰减后才能动作切除故障,切除故障时间基本都在上百 ms,使得故障进一步发展,导致变压器严重损坏,威胁电网的安全稳定运行。

目前,国内外对变压器的研究大多集中在励磁涌流产生的机制、励磁涌流的特征以及励磁涌流的识别方法等方面^[3-10];同时,也有大量文献对变压器匝间故障进行了分析,对匝间故障模型及故障特征进行了深入的讨论,并提出了相应的方法和判据^[11-13]。虽然变压器空载合闸励磁涌流及匝间故障都得到了充分的研究和分析,但变压器空载合闸于匝间故障的相关研究较少,更是鲜有文献通过理论公式对其特征进行分析及研究,导致对变压器空载合闸于匝间故障的特征研究不够充分,使得工程

应用中励磁涌流闭锁判据及组合闭锁方案的选择没有可靠的理论依据,大大延长了变压器空投匝间故障的切除时间。因此,对变压器空载合闸于匝间故障的理论分析具有重要的意义。

1 变压器空投匝间故障原理分析

图 1 所示为变压器空投匝间故障模型,图中: R_1 为变压器系统侧电阻; L_1 为系统电感和变压器漏感之和; L_2 为匝间故障漏感; L_μ 为变压器励磁电感; u_1 为系统电压; i_1 为变压器原边电流; i_2 为变压器匝间短路电流; i_μ 为励磁电流。

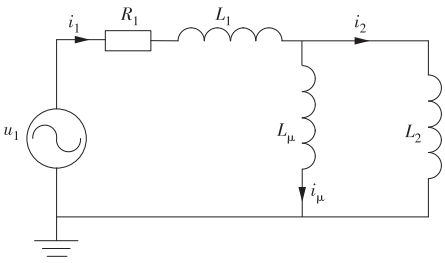


图 1 变压器空投匝间电路模型

由图 1 可以列出以下方程

$$\begin{cases} R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} = u_1 \\ L_\mu \frac{di_\mu}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt} \\ i_1 = i_\mu + i_2 \\ L_\mu \frac{di_\mu}{dt} = \frac{d\Phi}{dt} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: Φ 为磁通。

由式(1)可得

$$R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{d\Phi}{dt} = u_1。$$

(2)

一般来说,变压器空投匝间故障相发生励磁涌流时, i_1 和 i_2 不相等,未发生励磁涌流时可认为 $i_1 = i_2$ 。为了进一步对空投匝间故障进行进一步分析,假设空投瞬间变压器铁芯未饱和,所以可取 $i_1 \approx i_2$,则由式(1)可得

$$R_1 i_1 + (L_1 + L_2) \frac{di_1}{dt} = u_1。 \quad (3)$$

取 $u_1 = u_{1m} \sin(\omega t + \alpha)$ (u_{1m} 为系统电压峰值; ω 为系统角频率; α 为合闸时刻电压的相角),且令合闸时刻 $i_1(0) = 0$,则由式(3)可求得

$$i_1(t) = \frac{u_{1m} [\sin(\omega t + \alpha - \delta_0) - \sin(\alpha - \delta_0) e^{-t/t_2}]}{R_1 \sqrt{(\omega t_2)^2 + 1}}, \quad (4)$$

其中: $t_2 = \frac{L_1 + L_2}{R_1}$, $\tan \delta_0 = \omega t_2$ 。

将式(4)代入式(2),并对其积分,由于磁通不能突变,在不考虑剩磁的情况下,取 $\Phi(0) = 0$,则可求得

$$\Phi(t) = -\frac{u_{1m} \cos(\omega t + \alpha)}{\omega} - \frac{u_{1m} \sin(\omega t + \alpha - \delta_0 - \theta_0) Z_1}{\omega Z} - \frac{Z_2}{Z} \frac{u_{1m}}{\omega} \sin(\alpha - \delta_0) e^{-t/t_2}, \quad (5)$$

其中: $t_1 = \frac{L_1}{R_1}$, $\tan \theta_0 = \frac{1}{\omega t_1}$, $Z_2 = \omega L_2$, $Z_1 =$

$\sqrt{(\omega L_1)^2 + R_1^2}$, $Z = \sqrt{(\omega L_1 + \omega L_2)^2 + R_1^2}$,

式中: Z 为等值变压器总阻抗; Z_1 为等值变压器原边阻抗; Z_2 为等值变压器匝间短路阻抗。

一般来说,系统阻抗多为感性,且系统阻抗角接近 90° ,变压器的漏感远大于电阻,因此取 $\theta_0 = 0^\circ$, $\delta_0 = 90^\circ$;同时 $Z \approx Z_1 + Z_2$,令 $\Phi_m = u_{1m}/\omega$,所以式(5)可化简为

$$\Phi(t) = -\frac{Z_2}{Z} \Phi_m \cos(\omega t + \alpha) + \frac{Z_2}{Z} \Phi_m e^{-t/t_2} \cos \alpha。 \quad (6)$$

2 变压器空投匝间故障特征分析

由上一节推导的磁通计算式可以看出,变压器空载合闸于匝间故障时,铁芯是否会饱和,除了与变压器合闸时电压的相角有关外,还与系统阻抗及匝间故障时故障匝数有关。合闸角对变压器励磁涌流的影响已经有大量的文献对其进行了研究,本文不再赘述,以下主要对系统阻抗与匝间故障时故障匝数对变压器励磁涌流的影响进行分析。

2.1 系统阻抗对故障特征的影响

由式(5)可知 $Z = \sqrt{(\omega L_1 + \omega L_2)^2 + R_1^2}$,因此系统阻抗的大小会直接影响 Z 的大小,而 $Z_2 = \omega L_2$

不会发生变化,因此系统阻抗越大, Z_2/Z 就越小。由式(6)可知: Z_2/Z 越小,变压器空投匝间时铁芯的磁通也会越小,变压器铁芯越不易饱和。

当系统阻抗与 Z_2 接近时,可知 $Z \approx 2Z_2$,这时铁芯磁通可能的最大值为 Φ_m ,而目前大多数大型变压器铁芯的饱和磁通约为 $1.1\Phi_m$,小型变压器的饱和磁通更大,因此可知:当系统阻抗 $\geq Z_2$ 时,变压器空投于匝间故障,故障相变压器铁芯磁通不会大于饱和磁通,变压器不会发生励磁涌流,变压器空投匝间时电流仅为故障电流,无涌流成分。

2.2 不同故障匝数对故障特征的影响

由式(5)可知,故障匝数会直接影响 Z 及 Z_2 的大小,所以 Z_2/Z 的大小不确定,需要进一步分析。上一节公式推导中 Z_2 均为 Z_2' 等效到绕组 1 的阻抗,如图 2 所示(图中: K 为等效变比, $K = n_1/n_2$; n_1 为非故障匝数; n_2 为故障匝数; Z_2' 为匝间故障绕组漏抗;绕组 1 为非故障线圈;绕组 2 为变压器同一侧的故障线圈)。

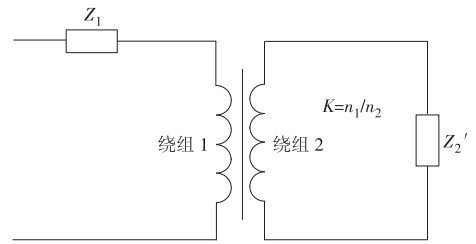


图 2 变压器空投匝间阻抗模型

由图 2 可知:

$$Z_2 = K^2 Z_2' = K^2 \frac{n_2}{n_1 + n_2} Z_T = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \frac{n_2}{n_1 + n_2} Z_T, \quad (7)$$

式中: Z_T 为变压器故障前绕组的总漏抗,因此 $Z_1 = \frac{n_1}{n_1 + n_2} Z_T + Z_s$ (Z_s 为系统阻抗)。

为了定性地分析故障匝数对 Z_2/Z 的影响,以下分析忽略系统阻抗 Z_s 的影响,同时取 $Z_T = 1 \Omega$,虽然系统阻抗会影响 Z_2/Z 的具体数值,但是不会影响数值大小趋势,因此不会对分析结果产生影响。在不同故障匝数情况下对 Z_2/Z 进行分析计算,其结果见表 1。

表 1 阻抗比值分析结果

故障匝数比例/%	K	Z_1/Ω	Z_2/Ω	Z_2/Z
5	19.00	0.95	18.05	0.95
10	9.00	0.90	8.10	0.90
20	4.00	0.80	3.20	0.80
40	1.50	0.60	0.90	0.60
60	0.67	0.40	0.27	0.40
80	0.25	0.20	0.05	0.20

由表 1 可知:随着故障匝数的增加, Z_2 的值迅速减小,衰减时间 $t_2 = (L_1 + L_2)/R_1$ 及 Z_2/Z 的值也随着故障匝数的增加而逐渐减小,导致变压器空载合闸于匝间故障时的磁通最大值也降低,变压器铁芯不易出现饱和,且衰减速度加快,有明显的衰减特征。

表 1 的分析计算结果忽略了系统阻抗,实际情况下加上系统阻抗的影响, Z_2/Z 的值会进一步减小,在系统阻抗与故障匝数的双重影响下,变压器空载合闸于匝间故障时铁芯的磁通大大减小,使得变压器铁芯难以饱和,不易发生励磁涌流。

3 仿真验证

本节通过电磁暂态仿真程序对前述分析和结论进行验证。仿真系统模型如图 3 所示,系统电源参数为:线电压有效值,525 kV;频率,50 Hz;相角,0°;内阻,电阻电感模型。变压器采用统一等效磁路(UMEC)模型,双绕组额定电压为 525 kV/230 kV,容量为 100 MV · A,频率为 50 Hz,短路电抗为 0.2 (标么值),空载损耗为 0.000 07 (标么值),短路损耗为 0.008 (标么值)。

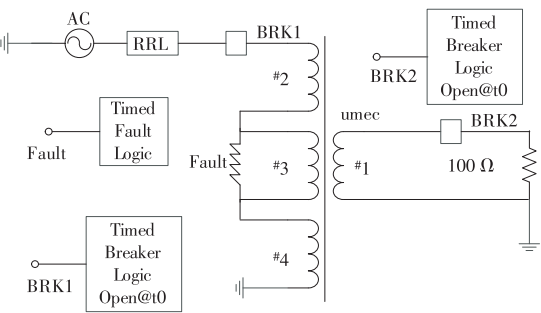


图 3 仿真系统模型

选择电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 中的变压器统一等效磁路模型(UMEC)进行仿真。UMEC 变压器模型是完全基于铁芯的几何结构,计及同相绕组的磁耦合关系、铁芯非线性、铁磁材料的磁滞效应等,与工程实际吻合较好,较适合变压器铁芯饱和特性的研究^[14]。

仿真中变压器采用的磁化曲线如图 4 所示,此磁化曲线为 ODFS-250 MVA/500 kV 变压器的实测磁化曲线,可以更精确地模拟实际情况。仿真中为了消除合闸初相角对变压器空载合闸于匝间故障的影响,合闸角固定为 0°,在变压器铁芯较容易饱和的合闸时刻进行合闸,可以更加明显地体现系统阻抗以及故障匝数对空投匝间故障的影响。

仿真中通过 #2, #3, #4 绕组模拟 500 kV 侧绕组,在 #3 绕组出口设置短路故障模拟变压器匝间故障,对 #3 绕组设置不同的电压,模拟不同故障匝数

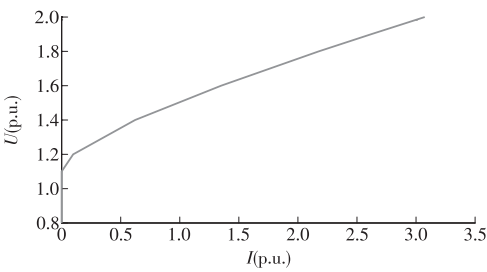


图 4 磁化曲线

的匝间故障。

在实测磁化曲线下,对不同系统阻抗及不同故障匝数对变压器空投匝间故障的影响进行了仿真,由于篇幅有限,文中仅列出 4 种情况下的仿真结果,如图 5 ~ 图 8 所示。

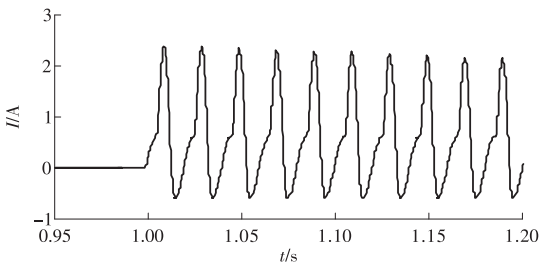


图 5 系统阻抗为 15 Ω 时的故障电流波形

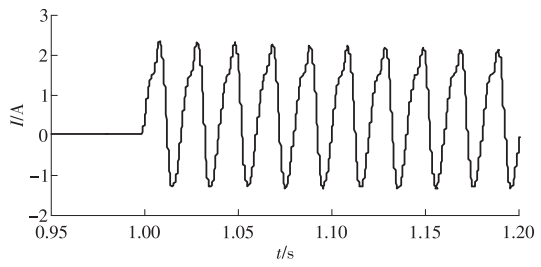


图 6 系统阻抗为 32 Ω 时的故障电流波形

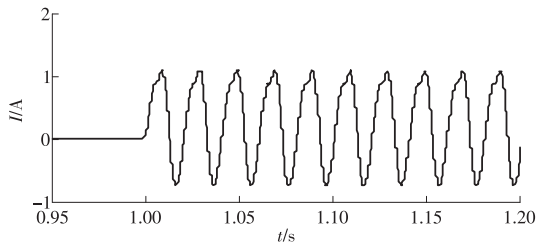


图 7 故障匝数比例为 5% 时的故障
电流波形

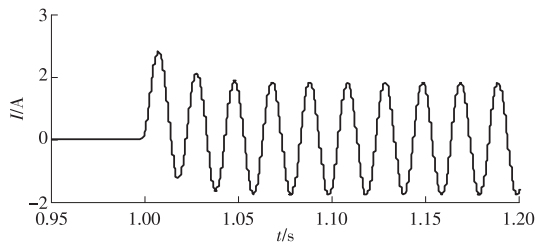


图 8 故障匝数比例为 40% 时的故障
电流波形

由图 5 和图 6 的仿真结果可知:系统阻抗会对

变压器空投匝间故障特征产生一定的影响,系统阻抗越大,变压器空投匝间时涌流越小,涌流特征越不明显,变压器铁芯越不易饱和。

由图 7 和图 8 的仿真结果可知:故障匝数也会对变压器空投匝间故障特征产生一定的影响,故障匝数越多,变压器空投匝间时涌流越小,涌流特征越不明显,变压器铁芯越不易饱和,且衰减速度加快,有明显的衰减特征。

仿真结果验证了本文分析的正确性,即系统阻抗及故障匝数会对变压器空投匝间故障特征产生一定的影响。

4 结论

本文对变压器空载合闸于匝间故障进行了详细的理论推导和分析,并利用 PSCAD 进行建模和仿真验证,得出了以下结论。

(1)系统阻抗越大,变压器空投匝间时铁芯磁通越小,铁芯越不易饱和,故障电流中涌流成分越小。

(2)故障匝数越多,变压器空投匝间时铁芯磁通越小,铁芯越不易饱和,故障电流中涌流成分越小。

励磁涌流是导致变压器差动保护误动的主要因素,为了防止误动,保护增加了各种闭锁判据,大大延长了变压器空投匝间故障的切除时间,威胁变压器安全运行。本文结论为分析和解决工程应用中励磁涌流闭锁判据及组合闭锁方案的选择提供了可靠的理论依据。

参考文献:

[1]熊小伏,王婧,陈星田.一种基于电流比变化量的变压器匝间短路保护方法[J].电力系统保护与控制,2013,41(9):112-115.

[2]林湘宁,刘沛,刘世明,等.变压器有载合闸的超饱和现象及对变压器差动保护的影响[J].中国电机工程学报,2002,22(3):6-11.

[3]徐宏雷,郑伟,王维洲,等.750 kV 变压器高压侧空载合闸过电压因素分析[J].电力自动化设备,2011,31(8):

148-152.

[4]毕大强,王祥珩,王剑,等.基于非饱和区等效瞬时电感的变压器励磁涌流鉴别方法[J].电力自动化设备,2005,25(10):1-6.

[5]孙向飞,束洪春,于继来.变压器并联与串联和应涌流对差动保护影响的比较研究[J].电力自动化设备,2009,29(3):36-41.

[6]武万才,边疆,吴志勇.变压器和应涌流产生机理及其特性分析[J].电力自动化设备,2011,31(6):112-115.

[7]王树刚,陆钟华,胡兵,等.变压器经济运行及励磁涌流抑制技术研究[J].华电技术,2015,37(8):10-14.

[8]卜紫薇,林西国.过激磁对 RET316 型变压器差动保护的影响[J].华电技术,2013,35(8):31-35.

[9]傅伟,赵莉华,梁勇,等.多台变压器空载合闸励磁涌流及其抑制方案的研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(1):28-33.

[10]郝治国,张保会,褚云龙,等.变压器空载合闸励磁涌流抑制技术研究[J].高压电器,2005,41(2):81-84.

[11]杨理才,孙结中,刘蔚,等.变压器匝间短路建模及其实际应用[J].电力系统保护与控制,2014,42(8):140-145.

[12]王成,黄宏华.电力变压器匝间短路故障分析及处理[J].电力科学与工程,2012,28(1):46-49.

[13]廖洪涛.电流二次回路两点接地引起主变压器差动保护区外故障误动分析[J].华电技术,2015,37(1):55-57.

[14]焦在滨,行武,王钊,等.变压器励磁涌流负序二次谐波特征及机理[J].电力系统自动化,2015,39(11):146-151.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

郭晓(1982—),男,山东淄博人,工程师,工学硕士,从事电力系统继电保护研究(E-mail:xiao-guo@sac-china.com)。

行武(1988—),男,陕西渭南人,工程师,工学硕士,从事电力系统继电保护研究(E-mail:wu-xing@sac-china.com)。

胡兵(1984—),男,江西南昌人,工程师,工学硕士,从事电力系统继电保护研究(E-mail:bing-hu@sac-china.com)。

王哲(1990—),男,江苏南京人,工程师,工学硕士,从事电力系统继电保护研究(E-mail:zhe-wang@sac-china.com)。

统继电保护控制技术的研发及开发工作(E-mail:xiaobo-zhou@sac-china.com)。

陈琦(1985—),男,江苏盐城人,工程师,从事电力系统继电保护控制技术的研发及开发工作(E-mail:carl-qi.chen@sac-china.com)。

王永旭(1991—),男,山东日照人,工程师,从事电力系统继电保护控制技术的研发及开发工作(E-mail:yongxu-wang@sac-china.com)。

(上接第 3 页)

(编辑:刘炳锋)

作者简介:

唐治国(1977—),男,陕西宝鸡人,高级工程师,从事电力系统继电保护控制技术的研发及开发工作(E-mail:zhiguo-tang@sac-china.com)。

周小波(1986—),男,江苏泰州人,工程师,从事电力系