

变压器电压恢复涌流分析

李立新^{1,2}, 束洪春¹

(1. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650051;

2. 内蒙古工业大学 电力学院, 内蒙古 呼和浩特 010080)

摘要: 在等效电路的基础上, 从磁链变化的角度出发, 对变压器外部故障切除的暂态过程进行了详细的理论分析, 并给出相应的关系式, 指出: 变压器外部故障切除后的铁芯磁链包含 2 个直流衰减分量, 正是这 2 个直流衰减分量与稳态量的共同作用使得变压器铁芯在外部故障切除后出现饱和, 导致恢复性涌流的产生。同时, 在利用分段线性特性考虑磁化特性的情况下, 通过数值仿真的方法证明: 负荷支路的存在使得变压器一次侧电流在外部故障切除产生电压恢复性涌流后的涌流波形特征不明显, 且电压恢复性涌流中的二次谐波含量可能较小, 从而对变压器差动保护及电流保护造成影响, 有可能导致其误动作。

关键词: 变压器; 恢复性涌流; 差动保护; 误动

中图分类号: TM 772

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)10-0059-05

0 引言

近年来, 相继出现了变压器差动保护在外部故障切除时发生误动的现象^[1-9], 这一现象的产生与电压恢复性涌流有关。虽然变压器外部故障切除后的电压恢复过程一直以来被认为与变压器的空载合闸过程一致, 但实际上这是一个有其特殊性的电磁暂态过程。相对于变压器空载合闸, 变压器外部故障的暂态过程更为复杂。对于变压器空载合闸的暂态过程分析已有很多论著和学术论文^[10-13], 但是, 关于变压器外部故障切除后的电磁暂态过程分析却并不多见, 因此, 有必要对这一过程进行详细分析, 进一步揭示电压恢复涌流对变压器保护的影响。

1 电压恢复涌流的产生机理

长期以来, 变压器经历外部故障被其它保护切除, 从而电压恢复的暂态过程被认为与变压器空载合闸现象一致, 但实际上这一过程有其自身的特殊性^[7-9, 14]。下面从磁链变化的角度对其产生的机理进行分析。图 1 是变压器发生外部短路故障切除时的网络图。

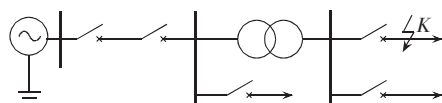


图 1 变压器外部故障接线图

Fig.1 An external fault of transformer

图中假设在 $t=0$ 时 K 点发生三相短路故障, 此时变压器励磁电势降低。在 $t=\tau$ 时故障被切除, 变压器励磁电势恢复正常, 此过程将可能产生恢复性励磁涌流。变压器外部故障切除后恢复供电的暂态过程可以用变压器等效电路进行分析^[11], 其模型结构见图 2。

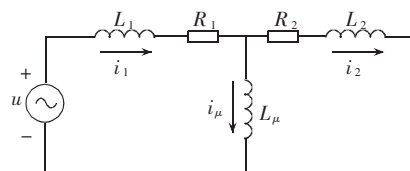


图 2 变压器电压恢复涌流的电路模型

Fig.2 Circuit model of transformer recovery inrush

图中各参数设定如下: 系统侧 u 为一正弦电压源; R_1 和 L_1 分别是变压器一次回路电阻和电感, 流过电流为 i_1 ; R_2 和 L_2 分别是归算后的变压器二次侧回路电阻和电感, 流过电流为 i_2 ; 励磁阻抗设为纯电感 L_μ , 流过电流为 i_μ 。

根据基尔霍夫定律, 可列出方程如下:

$$u = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (1)$$

$$L_\mu \frac{di_\mu}{dt} = \frac{d\Psi}{dt} = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (2)$$

$$e = \frac{d\Psi}{dt} \quad (3)$$

$$i_1 = i_2 + i_\mu \quad (4)$$

式中 Ψ 为变压器铁芯磁链; e 是变压器励磁支路电势。

1.1 变压器正常运行时

变压器正常运行时, 设系统电源电压为

$$u = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (5)$$

式中 α 为 $t=0$ 时 a 相电压相角。

因为变压器正常运行时励磁电流很小, 可忽略不

收稿日期: 2007-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90610024, 50467002, 50347026); 云南省自然科学基金资助项目(2005F0-005Z, 2004E0020M, 2002E0025M); 云南省科技攻关项目(2003GG10)

计, 所以有

$$\begin{aligned} i_1(t) &= i_2(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \\ I_m &= U_m / \sqrt{R^2 + X^2} \\ \varphi &= \arctan(X/R) \\ R &= R_1 + R_2, \quad X = \omega L_1 + \omega L_2 \end{aligned} \quad (6)$$

由于现代大型变压器的漏抗非常小, 当合闸侧为大系统时, R_1 和 L_1 都可以取得很小, 所以在变压器正常运行时, 可以忽略变压器一次侧回路电阻和电感, 这样励磁支路电势 e 就与系统电源电压 u 近似相等, 即

$$e \approx u \quad (7)$$

则由式(5)可得:

$$\frac{d\Psi}{dt} = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (8)$$

解此微分方程得铁芯磁链的表达式为

$$\begin{aligned} \Psi(t) &\approx -\Psi_m \cos(\omega t + \alpha) \\ \Psi_m &= U_m / \omega \end{aligned} \quad (9)$$

1.2 变压器外部故障时

依照以上假设 $t=0$ 时变压器外部发生三相短路故障, 此时变压器二次侧回路参数将发生变化, 设为 R_{2k} 和 L_{2k} 。因为变压器外部故障时系统电压下降, 所以此时励磁电流将比正常运行时更小, 可以忽略不计, 则此时同样有 $i_1=i_2$ 成立。因为电感上的电流不能突变, 所以故障电流可以表示为

$$\begin{aligned} i_k(t) &= I_{km} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + [I_m \sin(\alpha - \varphi) - \\ &\quad I_{km} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k)] e^{-t/\tau_k} \\ I_{km} &= U_m / \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \\ \varphi_k &= \arctan(X_k/R_k) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} R_k &= R_1 + R_{2k}, \quad X_k = \omega L_1 + \omega L_{2k} \\ \tau_k &= X_k / (\omega R_k) \end{aligned}$$

式中 τ_k 是故障后系统时间常数。

对照图 2 可知, 此时如果用 h 表示外部故障的严重程度, 则有

$$h = \frac{|R_{2k} + jX_{2k}|}{|R_1 + jX_1 + R_{2k} + jX_{2k}|} \quad (11)$$

此时, 变压器励磁支路电势 e 可以表示为

$$e \approx hu \quad (12)$$

则由式(3)并同时考虑变压器铁芯磁链不能突变, 可得外部故障期间铁芯磁链的表达式为

$$\Psi(t) \approx -h\Psi_m \cos(\omega t + \alpha) - \Psi_m(1-h) \cos \alpha e^{-t/\tau_k} \quad (13)$$

1.3 变压器外部故障切除后

在 $t = \tau$ 时故障被切除, 此时变压器二次侧回路参数又将发生变化, 设为 R_2 和 L_2 。此时, 电压恢复, 此过程将可能产生恢复性励磁涌流。因此这种情况下, 不能再忽略励磁涌流的影响, 对式(1)、(2)和(4)进行拉普拉斯变换, 并考虑在 $t = \tau$ 时的初始条件 $\Psi(\tau^-) = \Psi(\tau)$, $i_1(\tau^-) = i_2(\tau^-) = I_k(\tau)$ 下, 得:

$$\begin{aligned} U_1(s) &= R_1 I_1(s) + sL_1 I_1(s) - L_1 I_k(\tau) + s\Psi(s) - \Psi(\tau) \\ s\Psi(s) - \Psi(\tau) &= R_{2\tau} I_2(s) + sL_{2\tau} I_2(s) - L_{2\tau} I_k(\tau) \quad (14) \\ I_1(s) &= I_{2\tau}(s) + I_\mu(s) \end{aligned}$$

在求解此方程组的过程当中, 为分析简便, 暂取变压器励磁电感 L_μ 为变压器励磁回路的平均电感, 即令 $L_\mu = L_{\mu av}$, 这样可以将一个非线性方程转化为线

性方程进行求解, 同时为了求解容易, 设定 $L_2 \tau = 0$, 将式(14)整理并化简后得:

$$\begin{aligned} s^2 \Psi(s) + \left(\frac{R_1 + R_2}{L_1} + \frac{L_1 R_2}{L_{\mu av}} \right) s \Psi(s) + \\ \frac{R_1 R_2}{L_1 L_{\mu av}} \Psi(s) = \frac{R_2}{L_1} U_1(s) + s \Psi(\tau) + \\ \left(\frac{R_1 - R_2}{L_1} \right) \Psi(\tau) - R_2 I_k(\tau) \end{aligned} \quad (15)$$

令

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{R_1 + R_2}{L_1} + \frac{L_1 R_2}{L_{\mu av}}, \quad k_2 = \frac{R_1 R_2}{L_1 L_{\mu av}} \\ k_3 &= \left(\frac{R_1 - R_2}{L_1} \right) \Psi(\tau) - R_2 I_k(\tau) \end{aligned}$$

则

$$\Psi(s) = \frac{R_2 U_1(s)/L_1}{s^2 + k_1 s + k_2} + \frac{s \Psi(\tau) + k_3}{s^2 + k_1 s + k_2} \quad (16)$$

分别对上式 2 项进行拉氏反变换, 因为 $s^2 + k_1 s + k_2 = 0$ 的根为

$$p_{1,2} = (-k_1 \pm \sqrt{k_1^2 - 4k_2}) / 2 \quad (17)$$

则式(16)等号右边第 1 项的拉氏反变换为

$$\Psi^{(1)}(t) = \Psi_{0m} \sin(\omega t + \alpha - \delta_0) - \Psi_{1m} e^{p_1 t} + \Psi_{2m} e^{p_2 t} \quad (18)$$

$$\Psi_{0m} = \frac{U_m}{\frac{L_1}{R_2} \sqrt{(\omega^2 + p_1^2)(\omega^2 + p_2^2)}} \quad (19)$$

$$\Psi_{1m} = \frac{U_m \sin(\delta_1 - \alpha)}{\frac{L_1}{R_2} \sqrt{\omega^2 + p_1^2} (-p_1 + p_2)} \quad (20)$$

$$\Psi_{2m} = \frac{U_m \sin(\delta_2 - \alpha)}{\frac{L_1}{R_2} \sqrt{\omega^2 + p_2^2} (-p_1 + p_2)} \quad (21)$$

$$\delta_0 = \arctan \frac{-\omega(1/p_1 + 1/p_2)}{1 - \omega^2/(p_1 p_2)} \quad (22)$$

$$\delta_1 = \arctan(-\omega/p_1) \quad (23)$$

$$\delta_2 = \arctan(-\omega/p_2) \quad (24)$$

再对式(16)等号右边第 2 项进行拉氏反变换, 得:

$$\Psi^{(2)}(t) = \Psi_{3m} e^{p_1 t} + \Psi_{4m} e^{p_2 t} \quad (25)$$

$$\Psi_{3m} = \frac{p_1 \Psi(\tau) + k_3}{p_1 - p_2}, \quad \Psi_{4m} = \frac{p_2 \Psi(\tau) + k_3}{p_2 - p_1}$$

综合以上各项可得变压器在外部故障切除后的铁芯磁链表达式为

$$\begin{aligned} \Psi(t) &= \Psi_{0m} \sin(\omega t + \alpha - \delta_0) + \\ &\quad (-\Psi_{1m} + \Psi_{3m}) e^{p_1 t} + (\Psi_{2m} + \Psi_{4m}) e^{p_2 t} \end{aligned} \quad (26)$$

从式(26)可见, 变压器外部故障切除后的铁芯磁链包含 2 个直流衰减分量, 正是这 2 个直流衰减分量与稳态量的共同作用使得变压器铁芯在外部故障切除后出现饱和, 导致恢复性涌流的产生。图 3 是变压器在以上 3 种运行情况下的磁链仿真波形。

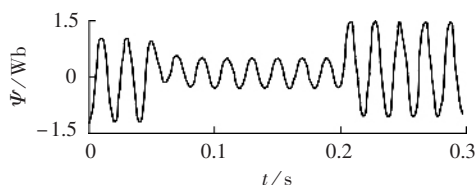


图 3 变压器外部故障前后的铁芯磁链
Fig.3 Flux variation of transformer
before and after an external fault

从图中可以看出,变压器铁芯磁链的变化符合以上的分析,随着外部故障的切除,变压器铁芯可能饱和。

2 电压恢复涌流对变压器保护的影响

以下将通过变压器在外部故障切除情况下的数值仿真来分析电压恢复涌流对变压器保护的影响。

利用 Matlab/Simulink 按照图 1 建立仿真模型,变压器为三相,接线方式 $\Delta/Y0-11$,容量 $150 \text{ MV}\cdot\text{A}$,频率 50 Hz ,额定电压 $220 \text{ kV}/500 \text{ kV}$,以下是以 A 相为例的仿真结果。

图 4 是在变压器外部故障切除后不考虑负荷电流的情况下得到的仿真波形。这种情况相当于外部故障切除后变压器进行空载合闸,所以变压器低压侧的电流在外部故障切除后具有明显的涌流特征。但实际上变压器二次侧带有不只一个负载,所以这种情况下必须考虑负荷电流的影响。下面是在考虑负荷电流的情况下得到的仿真结果。

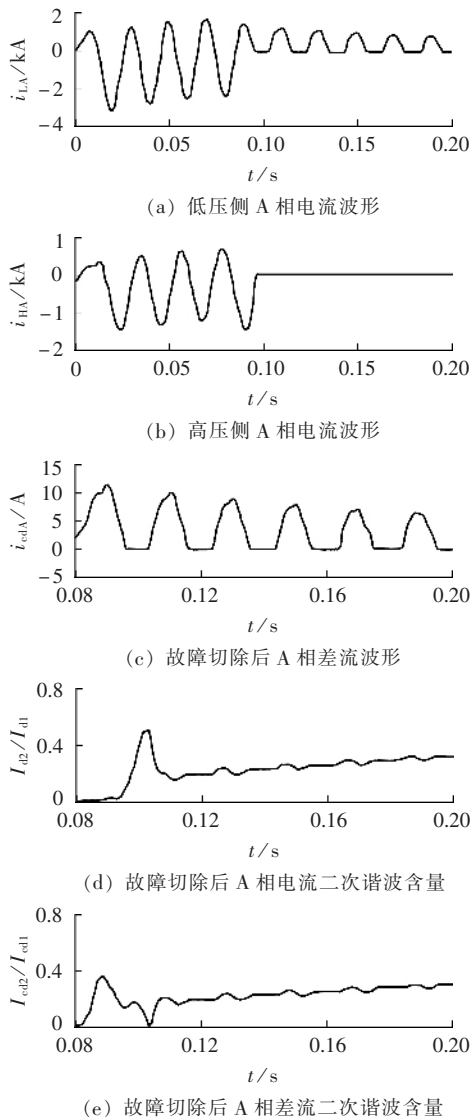


图 4 忽略负荷电流时变压器高压侧和低压侧电流仿真波形

Fig.4 Simulative current waveforms of transformer HV and LV sides, with load current neglected

图 5 是在变压器外部故障切除后考虑负荷电流的情况下得到的仿真波形。从图中可以看出,由于此时变压器一次侧流过的是二次侧负荷电流与励磁电流之和,所以一次侧电流不再具有明显的涌流波形,其波形间断角消失,且从与图 4 的对比可知,由于负荷电流的影响使一次侧电流中二次谐波含量减少。为进一步与变压器空载合闸进行对比,下面给出相同系统条件下空载合闸时的仿真情况。

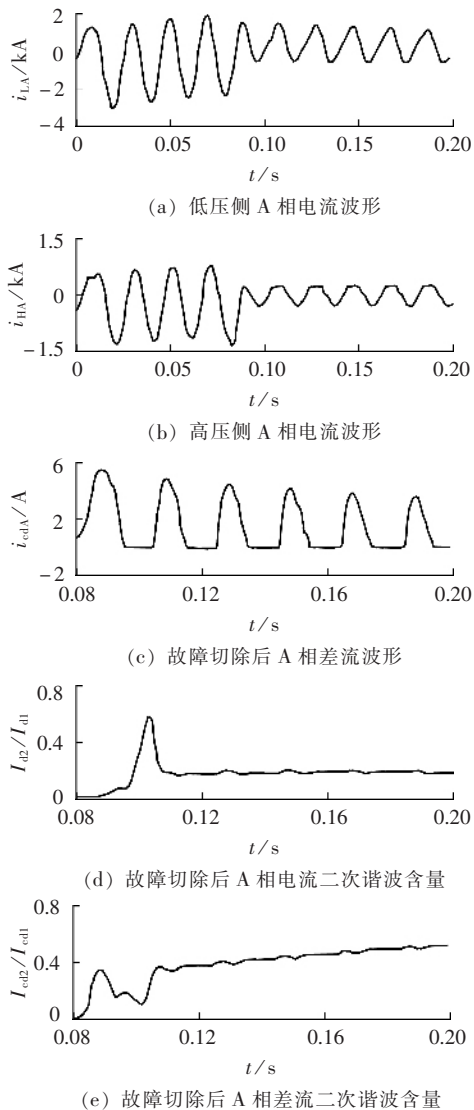
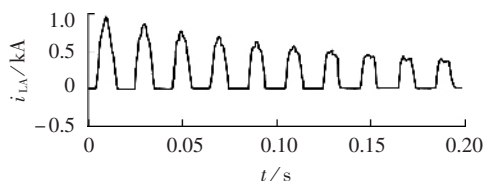


图 5 考虑负荷电流时变压器高压侧和低压侧电流仿真波形

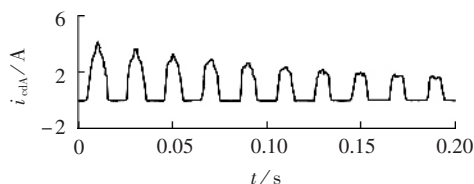
Fig.5 Simulative current waveforms of transformer HV and LV sides, with load current considered

图 6 是变压器空载合闸时的仿真波形。从图中可以看出,此时变压器差动回路中的电流即为变换到 TA 二次侧的合闸侧电流,与图 4、图 5 对比后可知,变压器外部故障切除后出现电压恢复性涌流时,不论是一次侧 A 相电流中的二次谐波含量还是 A 相差流中的二次谐波含量都比变压器空载合闸出现励磁涌流时小,这样在一定的系统条件下,差流中的二次谐波含量就有可能小于二次谐波制动比,从而导致变压器差动保护发生误动作。文献[11]通过对变压

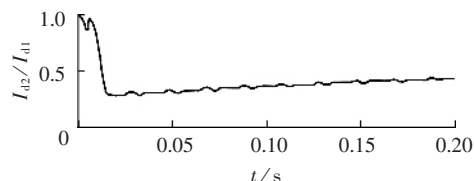
器有载合闸电路模型的分析后指出:负荷支路的存在,导致变压器铁芯可能会出现严重饱和,相应的涌流特征消失,使得任何利用涌流波形特征进行判别的差动保护均存在误动的可能性。



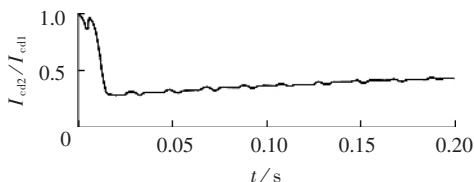
(a) 低压侧 A 相电流波形



(b) A 相差流波形



(c) A 相电流二次谐波含量



(d) A 相差流二次谐波含量

图 6 变压器空载合闸时仿真波形

Fig.6 Simulative current waveforms of transformer during putting into operation without load

变压器外部故障切除后产生的电压恢复性涌流除了可能造成差动保护误动作以外,还会影响到变压器电流保护的正确动作。为了防止励磁涌流导致电流保护误动,目前,很多电流保护均带有二次谐波闭锁功能,而过电流保护(即电流Ⅲ段)的电流定值按躲过最大负荷电流整定,时间定值按阶梯原则逐级配合整定,靠时间躲过励磁涌流。上述措施对变压器空载合闸励磁涌流效果明显,但对于电压恢复性涌流则不一定有效。通过上面的分析和数值仿真知道,由于负荷支路的存在使得电压恢复性涌流中的二次谐波含量可能低于制动比,这将导致带有二次谐波闭锁功能的电流保护发生误动。另外,当变压器所带负荷出线上发生永久性短路故障,线路保护动作将故障切除,同时重合闸重合于该永久性故障导致重合失败保护再次动作的情况下,由于在此过程中变压器会 2 次产生电压恢复性涌流,将有可能使过电流保护发生越级误动,从而给系统造成不必要的损失。

3 结语

首先从磁链变化的角度对变压器外部故障切除

的暂态过程进行了详细的理论分析,然后通过数值仿真的方法证明:负荷支路的存在使得变压器一次侧电流在外部故障切除产生电压恢复性涌流后的涌流波形特征不明显,且电压恢复性涌流中的二次谐波含量可能较小,从而对变压器差动保护及电流保护造成影响,有可能导致其误动作。这一工作对目前研究较少的变压器电压恢复性涌流理论是一种有益的补充。

参考文献:

- [1] 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,2002.
- [2] 王祖光. 间断角原理的变压器差动保护[J]. 电力系统自动化, 1979,3(1):18-30.
WANG Zu-guang. Transformer differential protection based on dead angle philosophy[J]. Automation of Electric Power Systems, 1979,3(1):18-30.
- [3] 孙志杰,陈云岑. 波形对称原理的变压器差动保护[J]. 电力系统自动化, 1996,20(4):42-46.
SUN Zhi-jie, CHEN Yun-lun. Transformer differential protection based on the characteristic analysis of the first and second half cycle of the magnetizing inrush current[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996,20(4):42-46.
- [4] 胡玉峰,陈德树,尹项根,等. 自适应采样值差动在变压器保护中的应用[J]. 电力系统自动化, 2001,25(10):31-34.
HU Yu-feng, CHEN De-shu, YIN Xiang-gen, et al. Sampling value based adaptive differential current protection of transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001,25(10):31-34.
- [5] 周玉兰. 1999-2003 年全国电网元件保护运行情况分析[J]. 中国电力, 2005,38(5):13-19.
ZHOU Yu-lan. Operating statistics and analysis of relay protection for power system in 1999-2003[J]. Electric Power, 2005,38(5):13-19.
- [6] 周玉兰. 2003 年上半年全国电网继电保护运行情况分析[J]. 中国电力, 2004,37(5):43-46.
ZHOU Yu-lan. Operating statistics and analysis of relay protection for power system in the first half of 2003[J]. Electric Power, 2004,37(5):43-46.
- [7] 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):13-18,36.
LIN Xiang-ning, LIU Pei, LIU Shi-ming, et al. Ultra-saturation on state during transformer switch in with load and its influence to transformer differential protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2002,22(3):13-18,36.
- [8] 林湘宁,刘沛. 变压器外部故障切除后差动保护误动的机理分析[J]. 电力系统自动化, 2003,27(19):57-60.
LIN Xiang-ning, LIU Pei. Mechanism analysis of the maloperation of transformer differential protection after external fault clearance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(19):57-60.
- [9] 周云波,曹良. 一起主变压器差动保护误动事故及防止对策[J]. 电网技术, 2001,25(12):71-74.
ZHOU Yun-bo, CAO Liang. Inspection and analysis of a maloperation of transformer differential protection and its preventive measures[J]. Power System Technology, 2001,25(12):71-74.
- [10] VERMA H K, BASHA A M. Microprocessor-based comprehensive relaying for power transformer protection[J]. Electric Power System Research, 1990(19):115-127.
- [11] BRONZEADO H, BROGAN P, YACAMINI R. Harmonic analysis of transient currents during sympathetic interaction[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996,11(4):2051-2056.

[12] THORP J S, PHADKE A G. A microprocessor based three - phase transformer differential relay [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(2): 426-432.

[13] 王维俭. 发电机变压器继电保护应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[14] GUASCH L, CORCOLES F, PEDRA J, et al. Effects of symmetrical voltage sags on three-phase three-legged transformers [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(2): 875-883.

(责任编辑: 李 玲)

作者简介:
李立新(1973-),女,内蒙古呼和浩特人,讲师,硕士研究生,主要研究方向为新型继电保护(E-mail:hexun_dl@163.com);
束洪春(1961-),男,江苏丹阳人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为新型继电保护与故障测距、分布式求解方法在电力系统中的应用。

Research on recovery inrush in operating transformer

LI Li-xin^{1,2}, SHU Hong-chun¹

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China;
2. Electric Power College, Inner Mongolia Polytechnic University, Huhhot 010080, China)

Abstract: Based on the transformer equivalent circuit, the transient process during the isolation of transformer external fault is analyzed according to flux variation and the corresponding formula is obtained. It is pointed out that, the main flux of the transformer consists of two exponentially decaying DC components, which, together with the steady component, cause the transformer saturated and the recovery inrush produced. Considering the piecewise magnetization characteristics are linear, numerical simulation proves that, the feature of recovery inrush is not obvious because of the existing load branch and its small secondary harmonic, which may lead to the misoperations of transformer differential protection and current protection.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China (90610024, 50467002, 50347026), the Natural Science Foundation of Yunnan Province of China (2005F0005Z, 2004E0020M, 2002E0025M), the Foundation of Science and Technology Development of Yunnan Province of China (2003GG10).

Key words: transformer; recovery inrush; differential protection; misoperation

