

变压器铁芯饱和统一模型建立及其判别方法

郑玉平^{1,3}, 何大瑞¹, 潘书燕^{2,3}

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏省南京市 211106; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏省南京市 211106;
3. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏省南京市 211106)

摘要:建立了变压器铁芯饱和的统一模型,推导出磁链最大值与电压突变时刻、突变前后电压相角差及突变后电压幅值的关系式,铁芯是否饱和与这些参数密切相关。发现电压降低(如系统发生故障或者非同期合闸操作)情况下也会产生铁芯饱和,因而以电压幅值降低作为变压器不会产生励磁涌流的依据并不可靠。进而提出一种基于电压量积分的铁芯饱和判别方法,该方法对空载合闸、故障切除、和应涌流、系统故障或操作等电压突变引起变压器铁芯饱和而产生励磁涌流,都能在半个周期左右的时间完成判别,为差动保护不经涌流闭锁提供了一种有效、快速的实现方法,可显著提高运行变压器发生内部故障时差动保护的動作速度。

关键词:变压器铁芯饱和;励磁涌流;和应涌流;电压突变;非同期合闸;电压量积分

0 引言

变压器空载合闸时因端电压突增会产生励磁涌流,故障切除后电压恢复会产生恢复性涌流,一台变压器空载合闸可能导致另一台正常运行的变压器产生和应涌流^[1-2]。那么在变压器正常运行过程中,系统发生故障导致变压器端电压幅值降低的工况下,变压器是否会产生励磁涌流?或者系统发生某些操作(如非同期合闸^[3]),变压器端电压幅值短时降低,变压器是否会产生励磁涌流?

励磁涌流与故障电流的识别一直是变压器差动保护能否快速切除区内故障的难点,变压器差动保护受励磁涌流判据的闭锁而不能快速动作。目前工程上常用的励磁涌流识别方法有二次谐波原理、间断角原理及波形对称原理等^[4-8],它们本质上都是利用电流量的特征,无论变压器是正常运行,还是发生区内或区外故障、空载合闸等操作,励磁涌流识别判据始终伴随差动保护存在;另外,基于电流量的励磁涌流识别算法本身也需要一个周期的数据,因而当变压器发生区内故障时,差动保护的動作时间均在 20 ms 以上。若能快速判断出变压器不会发生铁芯饱和而产生励磁涌流,则变压器差动保护可不经励磁涌流识别判据闭锁,从而内部故障时可以快速动作。

本文分析励磁涌流的产生机理,建立变压器铁芯饱和的统一模型,研究变压器端电压(包括电压幅值和相角)变化与变压器铁芯饱和的关系,从而在发生故障时快速判别变压器铁芯是否饱和,为不经涌流闭锁的差动保护提供理论依据。

1 励磁涌流产生机理

1.1 空载合闸励磁涌流产生机理

假设变压器投运前,母线电压表达式为 $u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$,忽略变压器漏电抗和电阻,在 $t = 0$ 时空载合闸,合闸后变压器铁芯中的磁链为^[1,9]:

$$\psi(t) = -\psi_m \cos(\omega t + \varphi) + (\psi_r + \psi_m \cos \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

式中: $\psi_m = U_m / \omega$ 为稳态磁链的幅值; ψ_r 为空载合闸前的铁芯剩磁; $\tau = L / R$ 为一次时间常数,其中 R 为一次合闸回路总电阻, L 为一次合闸回路总电感(包括励磁电感 L_m)。

由式(1)可以看出:磁链由“稳态的工频分量”和“衰减的非周期分量”两部分组成;励磁电感 L_m 具有非线性,起初铁芯饱和程度较深, L_m 较小,磁链衰减得较快;随着磁链非周期分量的衰减,铁芯饱和由深变浅,磁链非周期分量的衰减速度由快变慢。

励磁涌流的大小与合闸角 φ 、剩磁 ψ_r 的大小及稳态磁链幅值大小有关。在电压过零点合闸($\varphi = 0$),容易产生励磁涌流;在电压峰值处合闸($\varphi = \pi/2$),是否会产生励磁涌流取决于剩磁 ψ_r 的大小。

1.2 和应涌流产生机理

当一台变压器空载合闸时,可能导致另外一台并联或级联运行的变压器产生励磁涌流,即和应涌流现象。文献[2]通过合理简化并联和应涌流的模型,推导两台变压器的磁链公式,分析和应涌流的产生机理。

两台双绕组变压器并联,变压器 T1 空载运行,变压器 T2 空载投入,电气连接及简化电路如图 1 所示。图中: R_0 和 L_0 分别为系统与变压器之间连接线路的电阻和电感; i_0 为系统电流; R_1 和 R_2 分别为 T1 和 T2 的一次绕组电阻与励磁电阻之和; L_1 和 L_2 分别为 T1 和 T2 的一次绕组漏电感与励磁电感之和。

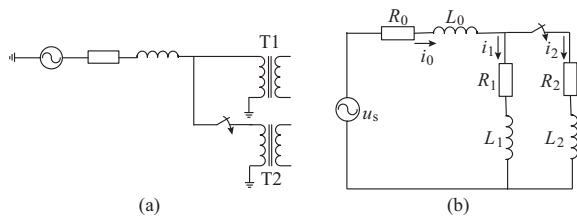


图 1 并联和应涌流电气连接及时域简化电路
Fig.1 Electrical connections and time-domain simplifying circuit of parallel sympathetic inrush

设 $u_s(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$,为了简化分析,将非线性电感 L_1 和 L_2 看作静态电感,并且假设 $L_1 = L_2 = L, R_1 = R_2 = R$,文献[2]中通过拉普拉斯变换及反变换最终得到:

$$\begin{aligned} \phi_1(t) = & \frac{L}{Z_2} U_m \sin(\omega t + \varphi - \alpha_2) - \\ & \frac{1}{2} (\phi_1(0) - \phi_2(0)) e^{-\frac{R+2R_0}{L+2L_0}t} + \\ & \frac{1}{2} (\phi_1(0) - \phi_2(0)) e^{-\frac{R}{L}t} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \phi_2(t) = & \frac{L}{Z_2} U_m \sin(\omega t + \varphi - \alpha_2) - \\ & \frac{1}{2} (\phi_1(0) - \phi_2(0)) e^{-\frac{R+2R_0}{L+2L_0}t} - \\ & \frac{1}{2} (\phi_1(0) - \phi_2(0)) e^{-\frac{R}{L}t} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $Z_2 = \sqrt{(R+2R_0)^2 + (L+2L_0)^2}$; $\alpha_2 = \arctan(\omega(L+2L_0)/(R+2R_0))$ 。

从式(2)可以看出,T1 的磁链包含两个衰减的非周期分量,正是这两个非周期分量使 T1 在 T2 空载合闸后发生偏磁,进而使变压器 T1 铁芯饱和而产生和应涌流。

对比式(2)和式(3)可以发现: $\phi_1(t)$ 和 $\phi_2(t)$ 都包括一个稳态的工频分量和两个衰减的非周期分

量,唯一的差异在于非周期分量的第 2 项符号相反; $\phi_1(t)$ 和 $\phi_2(t)$ 偏向于时间轴不同侧,方向相反,交替达到最大值,即两台变压器交替进入饱和状态,涌流交替出现,间隔半个周期^[1],如图 2(a)所示。

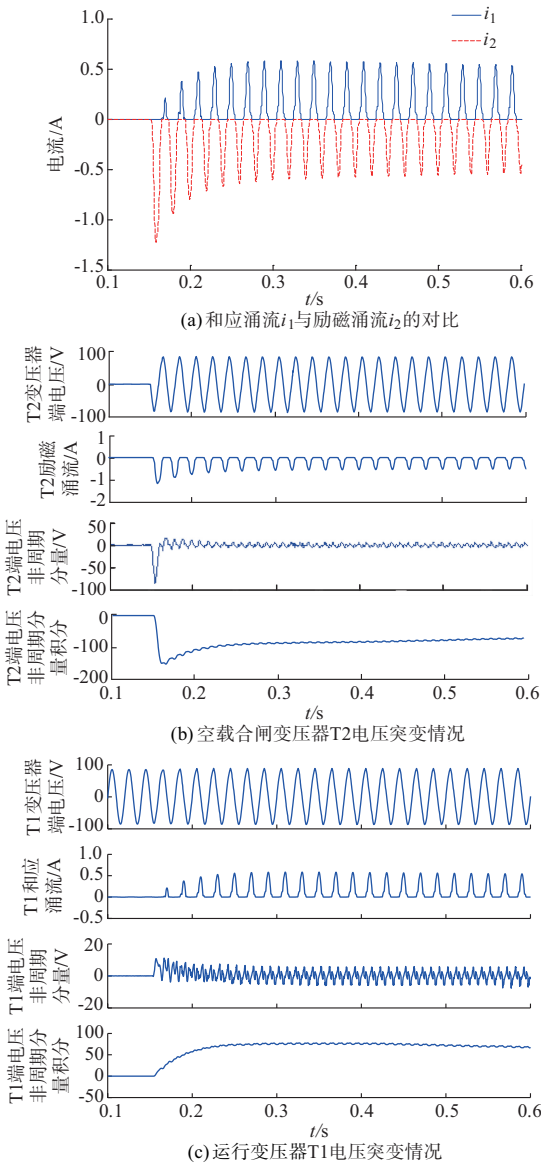


图 2 并联变压器产生和应涌流电气量变化特点
Fig.2 Characteristics of sympathetic inrush for transformers in parallel

由于时间常数 $(L+2L_0)/(R+2R_0) < L/R$,则 $\phi_1(t)$ 和 $\phi_2(t)$ 非周期分量的第 1 项衰减得快些,非周期分量的第 2 项衰减得慢些; $\phi_1(t)$ 的两个非周期分量异号, $\phi_2(t)$ 的两个非周期分量同号,故 $\phi_2(t)$ 先达到最值,即空载合闸变压器先饱和而产生涌流,运行变压器后饱和,和应涌流最大值在合闸后经一段时间才能达到,之后逐渐衰减。

变压器 T2 空载合闸时,端电压突变,磁链稳态

工频分量和衰减的非周期分量相加,导致铁芯饱和而产生励磁涌流,如图 2(b)所示,随着电压非周期分量的积分值增大,变压器 T2 铁芯饱和,产生励磁涌流。

运行变压器 T1 端电压、和应涌流、电压的非周期分量、电压非周期分量的积分如图 2(c)所示。T1 端电压的非周期分量积分值逐渐增加,使变压器 T1 产生和应涌流。

从图 2 可以看出,电压突变所产生的非周期分量是导致铁芯饱和而产生励磁涌流的根本原因。

若线路阻抗为零,即 $R_0=0, L_0=0$,由式(2)和式(3)可得:

$$\phi_1(t)=\frac{L}{Z_2}U_m\sin(\omega t+\theta-\alpha_2) \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \phi_2(t)=\frac{L}{Z_2}U_m\sin(\omega t+\theta-\alpha_2)- \\ (\phi_1(0)-\phi_2(0))e^{-\frac{R}{L}t} \end{aligned} \tag{5}$$

由式(4)和式(5)可知:这时运行变压器 T1 的磁链 $\phi_1(t)$ 保持稳态正弦,不会产生和应涌流;而空载合闸变压器 T2 由于依旧存在衰减非周期分量,还可能产生励磁涌流。级联和应涌流的分析与并联类似,不再赘述。

1.3 电压突变引起的励磁涌流

1.3.1 统一模型的建立

本文将变压器端电压的幅值、相位在某一时刻发生变化定义为电压突变。

为简化分析,将电压突变看作是电压由一个稳定状态突变到另一个稳定状态。铁芯饱和判别方法主要考虑突变后半周期磁链非周期分量对铁芯饱和的影响,由于只是进行半个周期的判断,磁链非周期分量衰减较小,从而忽略衰减的影响,忽略电阻。同时不考虑变压器绕组漏抗,进而可以用图 3 进行励磁涌流的理论推导。

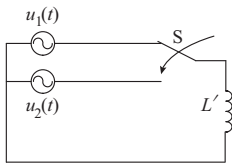


图 3 励磁涌流理论推导简化原理图
Fig.3 Simplified schematic diagram for inrush current theoretical derivation

图 3 中 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 分别为电压突变前与突变后变压器绕组的稳态电压; L' 为变压器的励磁电感。 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 的表达式分别为:

$$u_1(t)=k_1U_m\sin(\omega t+\varphi) \tag{6}$$

$$u_2(t)=k_2U_m\sin(\omega t+\varphi+\theta) \tag{7}$$

式中: $\varphi\in[0,2\pi), \theta\in[0,2\pi), k_1\in[0,1], k_2\in[0,1]$ 。

由图 3 进行开关 S 的转换,当 $k_1=0$ 和 $k_2=1$ 时,表示变压器空载合闸,附录 A 图 A1 为某 500 kV 工程变压器高压侧空充录波图,变压器端电压幅值由 0 突变为额定电压;当 $k_1\in(0,1)$ 和 $k_2=1$ 时,表示故障切除后电压恢复;当 $k_1=1$ 和 $k_2\in[0,1]$ 时,表示运行变压器发生故障或进行操作(如非同期合闸操作)。

电压突变前,有 $\phi_1(t)=\int u_1(t)dt=-k_1\phi_m\cos(\omega t+\varphi)+\phi_r$;电压突变后,有 $\phi_2(t)=\int u_2(t)dt=-k_2\phi_m\cos(\omega t+\varphi+\theta)+C_2$,其中 C_2 为积分常数。

假设在 $t=0$ 时发生电压突变,由于磁链不能突变,有 $\phi_1(0)=\phi_2(0)$,可求出 $C_2=\phi_m(k_2\cos(\varphi+\theta)-k_1\cos\varphi)+\phi_r$,从而得到电压突变后磁链表达式为:

$$\begin{aligned} \phi_2(t)=-k_2\phi_m\cos(\omega t+\varphi+\theta)+ \\ \phi_m(k_2\cos(\varphi+\theta)-k_1\cos\varphi)+\phi_r \end{aligned} \tag{8}$$

1.3.2 故障切除后电压恢复工况磁链分析

对于故障切除后电压恢复的工况,即 $k_1\in(0,1)$ 和 $k_2=1$,由于变压器在电压突变前已经正常运行一段时间,由 1.1 节的分析可知变压器剩磁为零,即式(8)中 $\phi_r=0$,为简化分析,从而得到:

$$\begin{aligned} \phi_2(t)=-\phi_m\cos(\omega t+\varphi+\theta)+ \\ \phi_m(\cos(\varphi+\theta)-k_1\cos\varphi) \end{aligned} \tag{9}$$

式(9)中 $\phi_2(t)$ 由稳态工频分量和衰减非周期分量两部分组成。如果在 $\varphi=\arctan(\sin\theta/(k_1-\cos\theta))$ 时发生电压突变,那么非周期分量将达到最大值 $\phi_{dmax}=\phi_m\sqrt{1+k_1^2-2k_1\cos\theta}$,从而 $\phi_2(t)$ 的最大值为 $\phi_{2max}=\phi_m(1+\sqrt{1+k_1^2-2k_1\cos\theta})$, ϕ_{2max} 与 k_1 和 θ 的关系如附录 A 图 A2 所示。

在 $\varphi=\arctan((\cos\theta-k_1)/\sin\theta)$ 时发生电压突变,不会产生非周期分量, $\phi_{2max}=\phi_m$,铁芯一定不会饱和。

1.3.3 正常运行变压器发生故障或操作工况磁链分析

同理,对于变压器在正常运行时突然发生故障或进行操作的工况,即 $k_1=1$ 和 $k_2\in[0,1], \phi_r=0$,由式(8)可推导出:

$$\begin{aligned} \phi_2(t)=-k_2\phi_m\cos(\omega t+\varphi+\theta)+ \\ \phi_m(k_2\cos(\varphi+\theta)-\cos\varphi) \end{aligned} \tag{10}$$

若 $\varphi=\arctan((k_2\sin\theta)/(1-k_2\cos\theta))$ 时电压突变,非周期分量将达到最大值 $\phi_{dmax}=$

$\psi_m \sqrt{1+k_2^2-2k_2 \cos \theta}$, 从而 $\psi_2(t)$ 的最大值 $\psi_{2\max} = \psi_m (k_2 + \sqrt{1+k_2^2-2k_2 \cos \theta})$, $\psi_{2\max}$ 与 k_2 和 θ 的关系如图 4 所示。如果在 $\varphi = \arctan((k_2 \cos \theta - 1)/(k_2 \sin \theta))$ 时电压发生突变, 不会产生非周期分量, $\psi_{2\max} = k_2 \psi_m$, 磁链一定不会饱和。

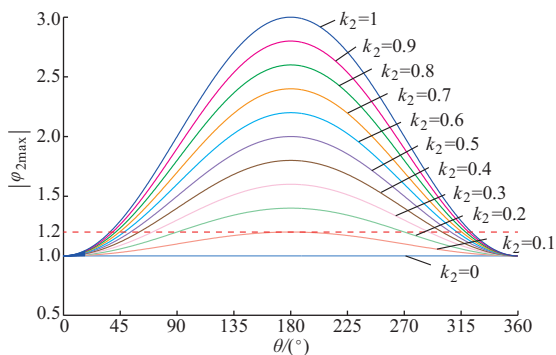


图 4 当 $\varphi = \arctan((k_2 \sin \theta)/(1 - k_2 \cos \theta))$ 时 $\psi_{2\max}$ 与 k_2 和 θ 的关系

Fig.4 Relationship among $\psi_{2\max}$, k_2 and θ while $\varphi = \arctan((k_2 \sin \theta)/(1 - k_2 \cos \theta))$

从图 4 可以看出, 当电压突变前后相角差 $\theta = 180^\circ$ 时, 突变后电压幅值越高 (即 k_2 越大), 磁链就越大, 铁芯越容易饱和。实际工程现场很少在变压器发生故障或操作工况下出现励磁涌流。变压器正常运行时发生故障, 受故障类型 (故障电压幅值、相角的限制)、故障时刻的影响, 变压器铁芯实际不易产生饱和。

如图 4 所示, $k_2 = 0$ 可以看作各种金属性接地故障, 不会产生励磁涌流。变压器区外母线 AB 相间金属性故障, 其中 $k_2 = 0.5, \theta = -60^\circ$ (如附录 A 图 A3 所示, 其中 $\dot{U}_{2A}$ 为故障时 A 相电压), 对应 A 相故障时刻 $\varphi = \arctan((k_2 \sin \theta)/(1 - k_2 \cos \theta)) = 150^\circ$ 时, 从图 4 中对应的最大磁链标么值约为 1.36 (非周期暂态磁链标么值 0.86 + 稳态磁链标么值 0.5), 会出现励磁涌流, 但因饱和程度较浅, 其涌流特征不明显。在 $\varphi = \arctan((k_2 \cos \theta - 1)/(k_2 \sin \theta)) = 60^\circ$ 时, 磁链无非周期分量, 稳态磁链标么值仅为 0.5, 不会出现励磁涌流。

对于操作工况下, 主要考虑两个系统的合环操作, 正常情况下, 通过检同期合闸后的两系统合环操作前后变压器端电压基本无变化, 变压器不会产生励磁涌流。后文有工程现场误操作, 非同期合闸引起变压器端电压突变时, 变压器产生励磁涌流的案例描述。

1.3.4 影响励磁涌流产生的因素及仿真验证

综上所述, 变压器是否因铁芯饱和而产生励磁涌流取决于以下几点。

1) 电压突变时刻 φ 。对于正常运行变压器发生故障或操作的工况, 在 $\varphi = \arctan((k_2 \sin \theta)/(1 - k_2 \cos \theta))$ 时电压突变, 非周期分量达到最大值, 更易产生励磁涌流; 在 $\varphi = \arctan((k_2 \cos \theta - 1)/(k_2 \sin \theta))$ 时电压突变, 不会产生非周期分量, 无励磁涌流。

2) 电压突变后的幅值 k_2 。突变后电压幅值越高, 越易产生励磁涌流, 如空载合闸、故障切除后电压恢复的工况。

3) 突变前后电压相角差 θ 。突变后相角差越大, 越容易产生励磁涌流, 如相差为 180° 的非同期合闸。

建立附录 A 图 A4 的 MATLAB 仿真模型, 对上述理论分析进行验证。其中变压器为 220 kV/35 kV, Yd11 接线, M_1 为变压器高压侧 (星侧) 区内故障点, M_2 为高压侧区外故障点。采集变压器高压侧 Break1 电流互感器电流。

以区外 M_2 点 AB 相间短路为例, 当 A 相故障触发电角 $\varphi = 60^\circ$ 时, 无励磁涌流产生; 当 A 相故障触发电角 $\varphi = 150^\circ$ 时, 有励磁涌流产生, 如附录 A 图 A5 所示。

区外 M_2 点 AB 相间故障切除电压恢复, 当恢复时刻 $\varphi = 130^\circ$ 时, 有励磁涌流产生; 当恢复时刻 $\varphi = -27^\circ$ 时, 无励磁涌流产生, 如附录 A 图 A6 所示。

在非同期合闸引起变压器端电压降低且发生较大的相位变化时也会产生励磁涌流, 现场录波如附录 A 图 A7 所示。

通过对电压突变工况下励磁涌流产生机理、仿真及工程现场案例的分析可以得出: 电压幅值降低情况下也会发生铁芯饱和, 以电压幅值降低作为变压器不会产生励磁涌流的依据并不可靠; 系统发生故障或非同期合闸等操作也可能使变压器铁芯饱和。

2 基于电压量积分的铁芯饱和判别技术

变压器差动保护的动作速度受励磁涌流识别判据的制约, 若能从变压器励磁涌流产生的根源入手, 根据变压器运行工况的变化来提前判断变压器是否发生铁芯饱和, 则变压器差动保护可不经涌流闭锁, 实现内部故障时的快速动作。

2.1 判据的理论基础

变压器产生励磁涌流是因为其铁芯饱和, 而铁芯饱和是由电压突变引起的, 也就可以利用电压量来判别铁芯是否饱和。

由式 (8) 可知, $\psi_2(t)$ 包括稳态工频分量与非周

期分量两部分。很难直接求取变压器电压突变后磁链的最大值,因而利用电压量等效表示为:

$$\int_t^{t+\frac{T}{2}} u_2(\tau) d\tau = \int_t^{t+\frac{T}{2}} k_2 U_m \sin(\omega\tau + \varphi + \theta) d\tau = -2k_2 \psi_m \cos(\omega t + \varphi + \theta) \tag{11}$$

$\psi_2(t)$ 的稳态分量可表示为:

$$-k_2 \psi_m \cos(\omega t + \varphi + \theta) = \frac{1}{2} \int_t^{t+\frac{T}{2}} u_2(\tau) d\tau \tag{12}$$

$$\int_0^{\frac{T}{2}} (u_2(t) - u_1(t)) dt = \int_0^{\frac{T}{2}} (k_2 U_m \sin(\omega t + \varphi + \theta) - k_1 U_m \sin(\omega t + \varphi)) dt = 2\psi_m (k_2 \cos(\varphi + \theta) - k_1 \cos \varphi) \tag{13}$$

式中:积分下限 0 表示电压突变时刻;积分上限 $T/2$ 表示电压状态突变后半周期, $T=2\pi/\omega$ 为电压周期。

$\psi_2(t)$ 的非周期分量可表示为:

$$\psi_m (k_2 \cos(\varphi + \theta) - k_1 \cos \varphi) = \frac{1}{2} \int_0^{\frac{T}{2}} (u_2(t) - u_1(t)) dt \tag{14}$$

从而变压器电压突变后的磁链可以由电压量等效表示,据此设计铁芯饱和识别方案:为了尽快计算出磁链所能达到的最大值,磁链的稳态工频分量峰值采用电压的半波积分表示,非周期分量可由电压突变起始时刻开始的半个周期变化量的积分获得。采用此方法,可在电压突变开始的半个周期时判别出是否会发生铁芯饱和。判据的相关公式为:

$$\begin{cases} S_1(t) = \int_{t-\frac{T}{2}}^t |u(\tau)| d\tau \\ S_2(t) = \left| \int_0^t \Delta u(\tau) d\tau \right| \\ S(t) = \frac{S_1(t) + S_2(t)}{S_e} \end{cases} \tag{15}$$

式中: $u(\tau)$ 为电压瞬时值; S_e 为变压器额定电压周期分量积分值。

铁芯饱和判据为:

$$S > S_0 \tag{16}$$

现代大型变压器的饱和磁通倍数经常在 1.2~1.3 间变化甚至低至 1.15,因此式中 S_0 的取值范围为 1.15~1.3。

2.2 判据的仿真验证

1) 空载合闸励磁涌流

以单相变压器空载合闸励磁涌流为例,判据验证如图 5(a)所示,合闸后经半个周期 S 就超过阈值,快速准确地判别出会产生励磁涌流。

2) 非同期合闸励磁涌流

以非同期合闸励磁涌流现场录波 B 相为例来

检验判据,见图 5(b),在电压状态突变后半周期, S 超过阈值,能够有效判别会产生励磁涌流。

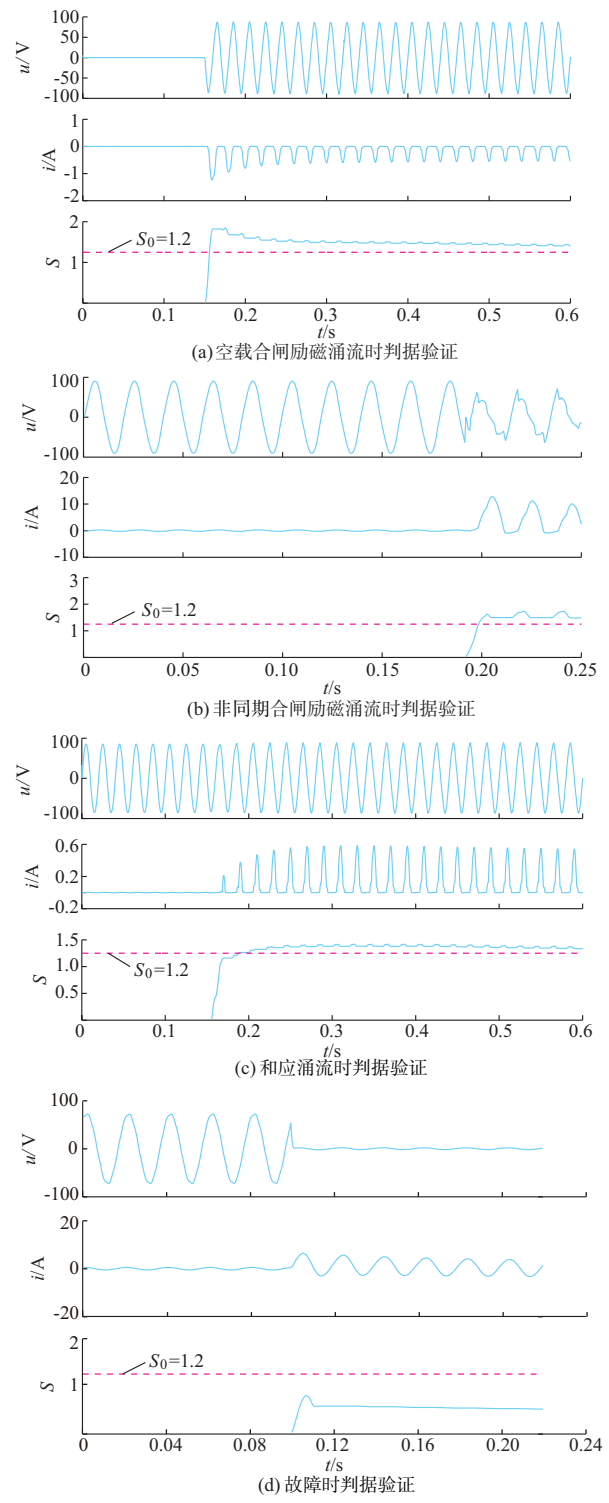


图 5 各种运行工况下铁芯饱和判据验证
Fig.5 Core saturation criterion verification in all kinds of operation conditions

3) 和应涌流

以 A 相为例,和应涌流时判据验证如图 5(c)所

示,和应涌流发生时,式(16)判据可准确判别。

4)故障

以金属性接地故障为例,判据验证如图 5(d)所示,故障时 S 小于门槛值,不会产生励磁涌流。

2.3 差动保护不经涌流闭锁的快速开放判据

基于电压量积分的铁芯饱和判别方法,可在半个周期内完成变压器是否会产生励磁涌流的判别,建立不经涌流闭锁开放差动保护的逻辑,与现有的经励磁涌流闭锁判据差动保护共同保证差动保护动作的快速性、可靠性和灵敏性。差动保护动作简化逻辑如附录 A 图 A8 所示。

不经涌流闭锁判据逻辑图如附录 A 图 A9 所示。其中不经涌流闭锁开放差动保护判据根据变压器故障前后系统各个参数的变化情况,确保区外故障切除产生恢复性涌流以及和应涌流情况下,差动不误开放;基于电压量积分的铁芯饱和判别技术,保证了各种可能产生励磁涌流的工况下闭锁差动保护,从而实现运行变压器发生区内故障时,差动保护不经涌流闭锁快速开放。

下面通过一组录波进一步验证判据的有效性和可靠性。

如附录 A 图 A4 所示,区内 M_1 点发生 A 相接地故障,差动保护不经涌流闭锁判据,有效开放,差动保护动作时间小于 12 ms,录波图如附录 A 图 A10 所示。

附录 A 图 A11 为变压器和应涌流的录波图,基于电压量积分的铁芯饱和判据不开放,保护可靠不动作。

附录 A 图 A12 为恢复性涌流录波图,故障初始阶段,不经涌流闭锁的快速开放判据会短时开放,故障切除时快速开放判据已返回;故障切除时,基于电压量积分的铁芯饱和判据不开放,差动保护可靠不动作。

附录 A 图 A13 为工程现场非同期合闸录波图,非同期合闸时电压幅值降低,相位突变,基于电压量积分的铁芯饱和判据判别出铁芯饱和,可靠闭锁,差动保护不会误动。

3 结语

本文首先分析了变压器励磁涌流产生的机理,建立了变压器铁芯饱和的统一模型,推导出变压器磁链最大值与电压突变时刻、突变前后的相角差及突变后的电压幅值大小的关系式。变压器铁芯是否饱和与电压突变时刻、突变前后的相角差以及突变后的幅值大小密切相关。电压幅值降低时(如故障或非同期合闸)也可能产生励磁涌流,因此以电压幅

值降低作为变压器不会产生励磁涌流的依据并不可靠。

其次,利用半周电压变化量的积分来真实反映变压器端电压突变后变压器磁链的非周期分量,据此提出的基于电压量积分的变压器铁芯饱和判别技术,在电压突变后半周期即可判别出铁芯是否饱和,为差动保护不经励磁涌流判据闭锁提供了一种有效、快速的判别方法,可显著提高运行变压器发生内部故障时差动保护的動作速度。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 袁宇波,李德佳,陆于平,等.变压器和应涌流的物理机理及其对差动保护的影响[J].电力系统自动化,2005,29(6):9-14.
YUAN Yubo, LI Dejia, LU Yuping, et al. Physical mechanism of sympathetic inrush of transformer and its influence on differential protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 9-14.
- [2] 毕大强,王祥珩,李德佳,等.变压器和应涌流的理论探讨[J].电力系统自动化,2005,29(6):1-8.
BI Daqiang, WANG Xianghang, LI Dejia, et al. Theory analysis of the sympathetic inrush in operating transformers [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 1-8.
- [3] 杨冠城.电力系统自动装置原理[M].5版.北京:中国电力出版社,2012.
- [4] 郑玉平,刘小宝,张哲,等.基于谐波闭锁涌流的样本电流分析[J].电力系统自动化,2011,35(18):87-91.
ZHENG Yuping, LIU Xiaobao, ZHANG Zhe, et al. Analysis of sample current based on harmonic restraint inrush current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 87-91.
- [5] 潘书燕,郑玉平,吴崇昊,等.变压器新型励磁涌流识别元件[J].电力系统自动化,2011,35(19):63-67.
PAN Shuyan, ZHENG Yuping, WU Chonghao, et al. A new identification component for inrush current of power transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 63-67.
- [6] 王祖光.间断角原理变压器差动保护[J].电力系统自动化,1979,3(1):18-30.
WANG Zuguang. Differential protection based on dead-angle principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 1979, 3(1): 18-30.
- [7] 徐习东,何奔腾.变压器差动保护中 CT 饱和和后间断角的测量[J].电力系统自动化,1998,22(5):22-25.
XU Xidong, HE Benteng. The measurement of dead angle during CT saturation in transformer differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(5): 22-25.
- [8] 承文新,刘志超.变压器差动保护涌流制动原理分析[J].电力系统自动化,2006,30(11):90-92.
CHENG Wenxin, LIU Zhichao. Analysis of inrush restraint theory for transformer differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(11): 90-92.

[9] 贺家李,李永丽,董新洲,等.电力系统继电保护原理 [M].4 版.北京:中国电力出版社,2010.

郑玉平(1964—),男,教授级高级工程师,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: zhengyuping@sgepri.sgcc.com.cn

何大瑞(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: hdr2908@163.com

潘书燕(1971—),女,通信作者,研究员级高级工程师,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: panshuyan@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 孔丽蓓)

Unified Model Development and Identification Method of Transformer Core Saturation

ZHENG Yuping^{1,3}, HE Darui¹, PAN Shuyan^{2,3}

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

2. NARI Technology Co. Ltd., Nanjing 211106, China;

3. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China)

Abstract: A unified model for transformer core saturation is developed. The flux saturation resulting from the changes in voltage, including amplitude change and angle change, is the fundamental cause of inrush current. And the flux saturation is correlated with the moment of voltage leap, the angle difference and the amplitude. Voltage angle changes may also lead to inrush current while the voltage amplitude decreases, hence the reducing of voltage amplitude cannot be used to assert that there's no inrush current. Proceeding from the root causes of inrush current, a kind of iron core saturation criterion based on voltage integration is put forward. The proposed method can produce excitation inrush current because of transformer core saturation, which is caused by no-load closing, fault clearance, sympathetic inrush current, system fault or operation, and other abrupt changes in voltage. This criterion provides an effective and fast method for differential protection without inrush current atresia and will greatly accelerate the operation of differential protection of transformer when internal fault occurs.

Key words: transformer core saturation; excitation inrush current; sympathetic inrush current; abrupt change of voltage; asynchronous closing; voltage integration