

励磁涌流抑制原理及涌流抑制器的应用

(安徽首开电气科技股份有限公司. 安徽省合肥市)

[摘要] 变压器励磁涌流对电力系统安全运行的威胁众所周知, 由其引发的电网电压骤降、谐波污染、操作过电压、和应涌流、保护误动等, 一直是人们极为关注的问题。但是由于更多地使用“识别”涌流的对策, 均因涌流形式的多变性, 使得“识别”正确率难以提高。如果变“识别”为“抑制”为“消除”或“防护”则是解决问题的根本出路, 采取变压器在外施电压骤增时控制磁路不饱和能有效地抑制甚至消除励磁涌流, 这是本文阐述的主题。

[关键词] 励磁涌流 磁路饱和 剩磁 偏磁

0 引言

变压器是一个由若干经磁路耦合的绕组的集合体, 每个绕组本质上是一个电感, 其电感值受磁路铁心饱和程度影响, 当磁路饱和时电感值大幅下降, 电感值下降就意味着电抗下降, 励磁电流随之增加。当变压器任一绕组感受到外施电压突增时, 基于磁链守恒定律, 该绕组将立既产生一个抵御外加磁通“突袭”的反磁通, 如果这一称之为“偏磁”的反磁通和原来磁路中的剩磁极性相同, 则可能导致磁路饱和, 进而产生很大的励磁涌流。如偏磁和剩磁极性相反, 则磁路不会饱和, 励磁涌流将不会出现, 也就是说被抑制了。

理论证明变压器磁路极性和数值与断开电源时的分闸相位角有关, 偏磁的极性和数值则与施加电源时的合闸相位角有关。因此, 通过获取分闸角的数值来决定下次合闸时合闸角的方法, 就完全可以做到电压骤增时励磁涌流的

极性和数值可控, 既可以让它很大, 也可以让它消失。

多年来人们采用数学和物理方法来识别励磁涌流与故障电流的特征差异, 以减少励磁涌流产生继电保护装置误动的概率, 但一直无法彻底解决问题, 甚至以延长保护动作时间、降低保护灵敏度及牺牲可靠性为代价。显然, 在理论上人们不可能对千变万化的励磁涌流都正确识别, 也就是说“识别”并不是万全之策。采取消除励磁涌流的方法可称得上是“上策”。

1 励磁涌流的成因

1.1 偏磁的成因

磁链守恒定律(楞次定律)是任何电感线圈都要遵循的定律, 即变压器任一侧绕组感受电压骤增(如空投充电、出线故障切除等)瞬间, 磁路中的磁链将维持不变。如图1-1, 设 N_1 、 N_2 为初次级绕组的匝数、 Φ 为与初级绕组交链的总磁通(包括主磁通和漏磁通)、 U_1 为初级电压、 i_1 为初级电流, 次级开路。可写出初级绕组的电压方程

$$U_1 = i_1 R_1 + N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

R_1 为初级绕组的电阻

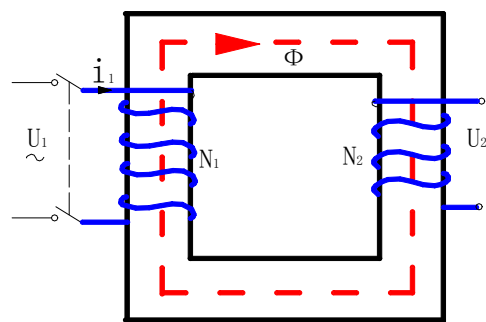


图1-1 变压器示意图

电压 U_1 为正弦函数, 其表达式为

$$U_1 = U_m \sin(\omega t + \alpha)$$

α 为 $t=0$ 时 U_1 的初相角

如忽略电阻 R_1 , 则 U_1 的表达式改写为

$$U_m \sin(\omega t + \alpha) = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

求解微分方程得到磁通 Φ 的表达式为

$$\Phi = \Phi_m [\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha)] \quad (1.1)$$

式中 $\Phi_m = \frac{U_m}{\omega N_1}$ 为磁通的幅值

式 (1.1) 给出了无损变压器磁路中的磁通与合闸角 (或电压骤增时的电压相位角) α 的关系, 可得出在 $t=0$ 时, 电压初相角 α 与磁通 Φ 的关系如下:

$$(1) \text{ 当 } \alpha = \frac{\pi}{2} \text{ 时} \quad \Phi = \Phi_m \sin \omega t$$

即电源投入瞬间变压器磁路中的磁通 Φ 立即进入与电源电压相同正弦波形的稳态值;

$$(2) \text{ 当 } \alpha = 0 \text{ 时} \quad \Phi = \Phi_m - \Phi_m \cos \omega t$$

即电源投入瞬间变压器磁路中的磁通除了含有余弦波形的稳态值 $-\Phi_m \cos \omega t$ 磁通外, 还有一个数值为稳态磁通幅值 Φ_m 的偏磁 Φ_p 。图 1-2 给出了此时磁路中各磁通的变化曲线, 图中 Φ_{sat} 是变压器的设计饱和磁通, Φ_{sat} 在设计时应大于 Φ_m 。对无损变压器其偏磁 Φ_p 是不会

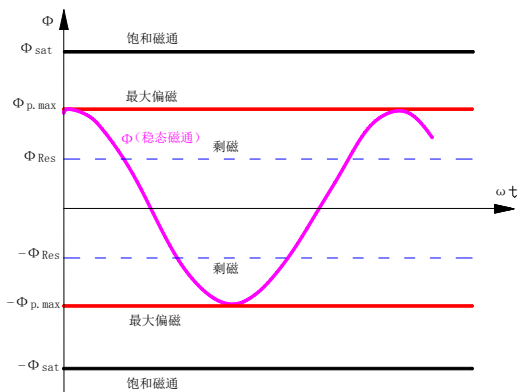


图 1-2 变压器磁路中各磁通分量关系图

衰减的, 有损 ($R_1 > 0$) 变压器则会按绕组的时间常数 $\tau = \frac{L_1}{R_1}$ 衰减, L_1 为初级绕组的电感。图中还标出了剩磁 Φ_{Res} , Φ_{Res} 的大小与极性与变压器断电时的分闸角有关。

1.2 如何测定剩磁

任何铁磁材料在去掉外施的磁势后都

会留有剩磁, 剩磁的数值及极性取决于切断磁势瞬间的磁通数值及极性。当然, 剩磁的大小还与铁磁材料的特性有关。图 1-3 是铁磁材料的磁滞回线, 从曲线中不仅看到磁路的饱和特性, 还可以发现当磁势 H 为零时, 磁通密度 B 并不为零, 而是还有一个值 B_r , 这就是剩磁。要去除剩磁 B_r (或 $-B_r$) 必须在反向施加磁势达 $-H_c$ (或 H_c) 时才能使 B 为零。我们不难看出, 当给变压器绕组施加交流电压时, 由于电压极性正负交变, 因此, 磁路中的磁通极性也是在磁滞回线上来回变化。如果在 1、2 象限时去除磁势, 则剩磁为正或零, 在 3、4 象限时则剩磁为负或为零。所以通过掌握断开交流电源的相位角即可确定剩磁的极性和大致的数值。

1.3 产生励磁涌流的条件

前已述及当磁路进入饱和状态时由于变压器绕组的电抗急剧下降, 进而产生很大的励磁涌流。因此, 在铁心中的各种磁通合成值超过磁路的饱和磁通就是产生励磁涌流的条件。这些磁通是指稳态磁通、偏磁和剩磁。饱和磁通是设计变压器时确定的, 它取决于铁心材料的磁导率、磁路截面及磁路长度等因素。稳态磁通的数值和电源电压有关, 偏磁的大小和极性取决于给变压器施加电压瞬间的电源电压相位角, 即合闸角, 剩磁的大小和极性则取决于切断变压器电源时的相位

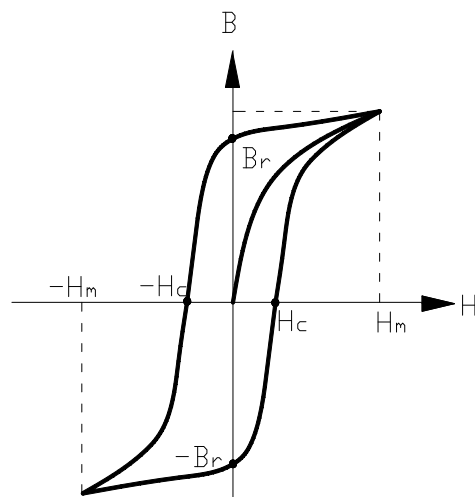


图 1-3 铁磁材料的磁滞回线

角，即分闸角。如果根据前次的分闸角选择合适的合闸角，使偏磁与剩磁极性相反，铁心不饱和就没有励磁涌流，如铁心轻度饱和，则励磁涌流很小，当然，如果选择合闸角不当，使偏磁与剩磁叠加导致铁心饱和，则将产生很大的励磁涌流。

所以，人们在不使用任何手段对变压器进行空投操作时是否会产生励磁涌流？涌流是大是小？是正是负？完全取决于合闸角与分闸角的配合，这就靠“运气”了，“运气”不好，偏磁与剩磁相加，涌流就出来了。“运气”好，偏磁抵消剩磁，涌流就没有。因此，现在对变压器保护的检验使用连续空投五次看是否会误动作标准，这显然是片面的，因为这在很大程度上决定于“运气”。有些发电厂或变电站的工作人员说他们单位变压器的涌流不大，这也是不科学的，涌流不大不是他们的变压器特别好，而是他们在空投操作的时候“运气”好，但又如何能保证次次都运气好呢？彻底解决问题的出路就是用科学的方法抑制励磁涌流。

2 励磁涌流抑制原理

无损变压器的磁通表达式是

$$\Phi = \Phi_m [\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha)] =$$

$$\Phi_m \cos \alpha - \Phi_m \cos(\omega t + \alpha)$$

式中偏磁 $\Phi_p = \Phi_m \cos \alpha$

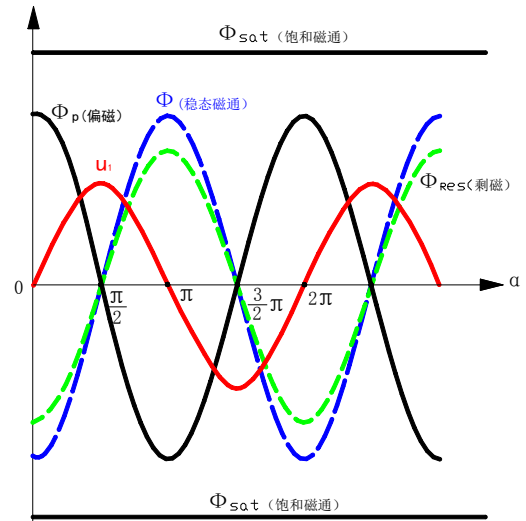


图2-1 Φ 、 Φ_{Res} 、 Φ_p 与 U_1 初相位角 α 关系图

α 是变压器绕组外施电压 U_1 的初相角，图 2-1 画出了各磁通与 U_1 初相角 α 的关系曲线，从图中可以看到总磁通 Φ 滞后电压 U_1 $\frac{\pi}{2}$ ，这就可以找到 Φ_p 和 α 的关系，即在 α 为 0 或 π 时， Φ_p 达到 $+\Phi_m$ 或 $-\Phi_m$ 。 α 为 $\frac{\pi}{2}$ 或 $\frac{3}{2}\pi$ 时， Φ_p 为 0。图 2-1 中还看到了剩磁 Φ_{Res} 与磁路总磁通 Φ 是同相的，只是 Φ_{Res} 的幅值较 Φ 的为小。此外图 2-1 中还标出了变压器的饱和磁通 Φ_{sat} 。为了更直观的描述励磁涌流的产生机理，将剩磁 Φ_{Res} 及偏磁 Φ_p 与切除角或合闸角 α 的关系列于表 2-1 中。

表 2-1 剩磁及偏磁符号与 α 的关系

磁通 \ α	$0 \sim \frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2} \sim \pi$	$\pi \sim \frac{3}{2}\pi$	$\frac{3}{2}\pi \sim 2\pi$
剩磁 Φ_{Res}	负最大~0	0~正最大	正最大~0	0~负最大
偏磁 Φ_p	正最大~0	0~负最大	负最大~0	0~正最大

表 2-1 中 α 对于剩磁 Φ_{Res} 为切除角，对于偏磁 Φ_p 则为合闸角。从表中不难看到正确地在已知切除角的前提下选择合闸角，完全可以做到在电压突增时产生的偏磁 Φ_p 恰好去抵消或削弱剩

磁 Φ_{res} ，再加上与稳态磁通 Φ 的配合完全可以控制磁路的合成磁通不超过饱和磁通 Φ_{sat} ，于是产生励磁涌流的土壤被铲除，当然就不会有励磁涌流了。

表 2-1 给人们明确的提示：变压器在某个相位角 α 时磁势被切断，下次就在 α 时合闸，使偏磁完全抵消剩磁。

人们担心在变压器停电后剩磁会慢慢衰减，进而影响对励磁涌流的抑制，事实上，变压器的剩磁除了加温、猛力撞击或是在磁路旁不断有导磁体或导线运动是会被削弱，但我们关心的不是剩磁的大小，而是它的极性，而剩磁的极性是不会改变的。所以即使出现剩磁衰减也不会影响对励磁涌流的抑制效果。其实如剩磁为零才是消除励磁涌流的最佳条件，因此此时即使偏磁达到最大值 Φ_m 也不致使磁路过度饱和。

3 变压器励磁涌流的特点

3.1 涌流含有数值很大的高次谐波分量(主要是二次和三次谐波)，因此，励磁涌流的变化曲线为尖顶波。

3.2 励磁涌流的衰减常数与铁芯的饱和程度有关，饱和越深，电抗越小，衰减越快。因此，在开始瞬间衰减很快，以后逐渐减慢，经 0.5~1s 后其值不超过 $(0.25\sim 0.5)I_n$ 。

3.3 一般情况下，变压器容量越大，衰减的持续时间越长，但总的趋势是涌流的衰减速度往往比短路电流衰减慢一些。

3.4 励磁涌流的数值很大，最大可达额定电流的 8~10 倍。当整定一台断路器控制一台变压器时，其速断可按变压器励磁电流来整定。

4 变压器励磁涌流的应对策略

目前采用速饱和中间变流器；二次谐波制动的方法；间断角鉴别方法等三种方法来防止励磁涌流引起的纵差保护的误动。

4.1 采用差动速断保护

由于差动速断保护有固有动作时间，故动作电流无需避开最大电流，此方案灵敏性低，只适用于小型变压器。差动保护按照躲开最大不平衡电流进行整定时，带速饱和原理的差动保护能够减少非周期分量造成的保护误动，这种差动保护的核心部分是带短路线圈的饱和中间变流器和差动电流继电器。短路线圈的存在使得在具有非周期分量电流时继电器的动作电流大为增加，从而提高了躲避励磁涌流和外部短路时暂态不平衡电流的性能。

4.2 采用带中间速饱和变流器的差动继电器

中间速饱和变流器可以抑制励磁涌流的传变，从而防止保护的误动。但由于内部短路时暂态电流也含有非周期分量，故保护应延时动作。加之由于三相涌流中往往有一相无非周期分量，以致该相速饱和变流器不起作用，这又必须使保护动作值加大，故保护的灵敏性降低。由于这种方法动作迟缓，灵敏性差，只适用于中、小型变压器。

4.3 采用二次谐波制动

在励磁涌流中，除基波、非周期分量电流以外，二次谐波电流为最大，这是励磁涌流最明显的特征，因为在其他工况下，很少有二次谐波产生。这是大型变压器差动保护防止励磁涌流的主要措施。二次谐波制动的差动保护原理是调试简便，灵敏度高，在当前变压器纵差保护中应用广泛。但是，在安装有静止无功补偿装置等电容分量比较大的系统，故障暂态电流中也有较大的二次谐波含量，致使差动保护动作速度受到影响。若空载合闸前变压器已经存在故障，合闸后故障相为故障电流，非故障相为励磁涌流，采用三相或门制动的方案时，差动保护必将被闭锁。由于励磁涌流衰减很慢，保护的動作时间可能会长达数百毫秒。这也是二次谐波制动方法的主要缺点。

4.4 利用励磁涌流波形具有明显间断角的特征来避免励磁涌流

前面提到，在最初几个波形中，涌流将出现间断角。而变压器内部故障时流入差动继电器的稳态差电流是正弦波，不会出现间断角。间断角鉴别的方法就是利用这个特征鉴别励磁涌流和故障电流，即通过检测差电流波形是否存在间断角，当间断角大于整定值时将差动保护闭锁。间断角制动的保护整定值一般设为 65° 。对于 Y/d 接线方式的三相变压器，非对称涌流的间断角比较大，间断角闭锁元件能够可靠的动作，并且裕量充足；而对称性涌流的间断角会小于 65° 。进一步减小整定值并不是好的方法，因为整定值太小会影响内部故障时的灵敏度和动作速度。由于对称性涌流的波宽等于 120° ，而故障电流（正弦波）的波宽为 180° ，因此在间断角判据的基础上再增加一个反应波宽的辅助判据，在波宽大于 140° （有 20° 的裕量）时也将差动保护闭锁。间断角原理由于采用按相闭锁的方法，在变压器合闸于内部故障时，能够快速动作。这一点是比二次谐波制动（三相或门制动）方法优越的地方。对于大型变压器，可以同时采用两种原理的纵差动保护，能够起到优势互补，加快内部故障的动作速度，不失为一种好的配置方案。

目前有两种方案，一种是直接鉴别间断角的大小来判断是励磁涌流还是内部短路。另一种是比较励磁涌流和二次短路电流的变化率。

4.5 在变压器各电压侧的绕组上单独装设差动保护，于是励磁涌流不再进入差动回路。

5 开断涌流我们的解决策略

a、选相位关合技术合闸

选相分合闸技术又称相位控制技术或同步开关技术，实质是对断路器的分合闸时间进行分相控制，即合闸时系统电压或电流的初相角，以预感磁通与剩磁相等的时刻为最佳合闸刻，这样可以避免变压器铁芯磁通的饱和，控制励磁涌流的产生。实现无冲击的平滑过渡，能够

有效地削弱开关瞬态电磁效应。减少了开关合闸操作的涌流和过电压，消除分闸重燃过电压，使断路器的开断能力与系统的可靠性、经济性得到提高。选相位关合原则：根据变压器三相绕组内的磁通量变化规律以及初始时刻剩磁的状态，来选择电压的初相角，在预感应磁通和暂态磁通相等时进行合闸操作。

b、快速合闸技术

假设一个比较典型的情况，铁芯剩磁状态为 $\Phi_A = 0$ ， $\Phi_B = -0.7\Phi_m < 0$ ， $\Phi_C = 0.7\Phi_m > 0$ 。这时 A 相首先在最佳时刻（电压峰值处）合闸，磁通不会突变，直接进入稳态。B、C 两相绕组中就会产生一个暂态磁通。以 A 相合闸后的 $1/4$ 工频周期处为最佳合闸时刻，这样能够避免 B、C 两相铁芯中的磁通饱和，从而削弱了励磁涌流。

c、延时合闸技术

准确测量变压器三相中任意一相的剩磁，采用延迟合闸技术，假设 A 相在其最佳合闸相位合闸，B、C 两相内的原始剩磁关系为 $\Phi_{rC} > \Phi_{rB}$ ，在 B、C 两相的感应磁通关系为 $\Phi_C > \Phi_B$ 。当 Φ_C 达到饱和区后， Φ_B 仍处于线性区，由于变压器铁芯的非线性特性，此暂态过程中的 $L_C \ll L_B$ 。因此 B、C 两相绕组上的感应电势也不同，应为 $U_C > U_B$ ，此时 B 相内部磁通的变化比 C 相快，这将使得 B、C 两相铁芯内部磁通很快趋于平衡，相位超前 A 相磁通 180° ，同时也消除了剩磁效应。根据上述铁芯磁通平衡效应可得延迟合闸技术：选择其中一相在其最佳时刻合闸，另两相延迟 $2\sim 3$ 个工频周期后合闸。

d、同步合闸技术

控制断路器使变压器三相绕组的一相剩磁为零，不为零的两相剩磁大小相等、方向相反，而且保持剩磁幅值相对比较大，采用同步合闸技术。A 相在其最佳合闸相位合闸，在 B、C 两相绕组的预感应磁通与剩磁近似相等。同步合闸技术是变压器三相同时

操作，而前两个合闸技术都需要分相操作，同步合闸技术具有易于控制，误差小，精度高等特点。同时对断路器的要求也比其他技术小。把变压器的剩磁灵活控制在这些特殊情况下进行空载操作，将会使变压器空载合闸更经济、更有效。

对于快速合闸技术、延迟合闸技术略和同步合闸技术，进行了简述。前两种合闸技术要求三相开关能够各极柱独立操动，仿真结果表明该法可把励磁涌流幅值大幅削减。同步合闸技术则需要监测变压器各相剩磁状态，不需要三相独立操动。

e、变压器预充磁

在交流系统中，磁通总是落后于电压 90 度相位角。如果在合闸瞬间，电压刚好达到最大值，则此时磁通的瞬间值正好为零，即在铁芯里一开始就建立了稳态磁通，这种情况下变压器不会产生励磁涌流。但是当合闸瞬间电压值为零时，此时铁芯中的磁通为最大值。

由于合闸前铁芯中没有磁通，此时铁芯中的磁通不能突变，这一瞬间仍要保持磁通为零。所以，在铁芯中就出现了一个非周期分量 Φ_t ，其幅值为 Φ_m 。铁芯里的总磁通是两个磁通叠加而成的。因此，当此合成磁通达到最大值时，由于变压器铁芯材料具有非线性特性以及铁芯中磁通量的饱和现象，将会产生数值很大的励磁涌流。那么如果合闸时在变压器的原边用具有一定电流值的电源进行预充磁，由于有了预充磁产生的磁通去维持铁芯中磁通的初始状态，那么非周期分量 Φ_t 的幅值将大大减小，此时铁芯中的合成磁通将比没有进行预充磁时大大减小，从而达到削减励磁涌流的目的。

原理图如图 1 所示，其中充磁变压器的容量为变压器容量的 1/150~1/200，其变比可以是 1:1，也可以与变压器相同。如果变比是 1:1，那么 U1 和 U2 为同一

电压；如果变比与变压器相同，那么 U1 和 U2 为不同的电压，这时充磁变压器相当于一台升压变压器。充磁变压器与被充磁变压器一定要有相同的相序。工作过程如下：首先合 D1 接通充磁变压器对变压器进行预充磁，当试验变压器的铁芯磁通充到一定程度后断开 D1(实际上这个过程相当短暂)，再迅速合 D2 对试验变压器进行空载合闸。

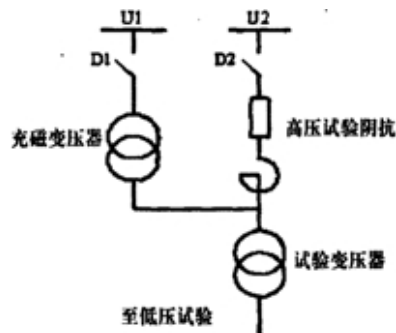


图 1 预充磁合闸原理图

f、变压器一次侧串电阻

目前广泛采用的抑制励磁涌流的有效手段是在变压器合闸绕组中串入合闸电阻。其原理是在变压器空载合闸时在变压器的输入端与电网间串联适当电阻来限制冲击电流，达到稳定运行后再将该限流电阻切除掉，理论分析及实践结果均表明，合闸电阻不仅能降低励磁涌流的峰值，还能使励磁涌流很快衰减。但该方法增加了投资费用和操作的复杂性。

6 开断涌流应用示例

6.1 空投变压器和电容器

通过三相断路器控制变压器空投的原理框图，涌流抑制器接收到合闸令后，根据前次记录的分闸角及预先设置的三相断路器合闸时间，通过电压互感器获得的电压采样测值，第一时间发出合断路器命令。断路器辅助接点是作为向涌流抑制器提供测量断路器分、合闸时间的信号。考虑到辅助接点与主触头的动作有时差，涌流抑制器专门配有 SID-3YL-M 型测量装置，在断路器脱离一次回路电源时测量这一时差的功能，作为修正断路器分、合闸时间之用。

6.2 大量变压器同时空投

在配电线路上常常挂接为数甚多的配电变压器，如图 3-2。在空投电源进线断路器 B 时各配电变压器都同时产生励磁涌流，合成电流 I 可能很大。在断路器 B 上安装如图 3-1 所示的涌流抑制器即可，此时可将 N 台配电变压器等值为一台变压器，它们的特点是断路器 B 控制所有变压器同时分闸或合闸。

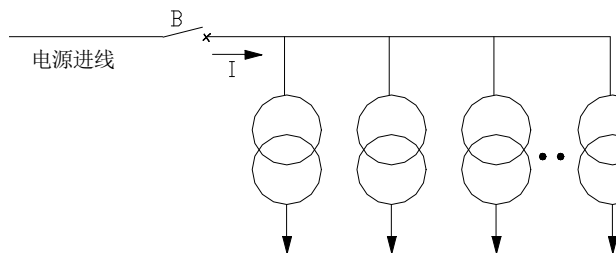


图3-2 配电线路变压器连接示意图

6.3 变压器出线短路故障切除

图 3-3 描述了变压器出线 L1 短路故障被保护切除过程中母线电压 U_1 的变化过程。t=0 时线路 L1 在 K 点发生短路，母线电压下降，t=t₁ 时保护断开 B₂ 切除故障，母线电压很快恢复到额定电压 U_e 。变压器 II 侧在感受到这一电压骤增后将诱发励磁涌流，进而使变压器保护误动而切除断路器 B₁、B₅、B₉，导致变压器各侧全部线路停电。

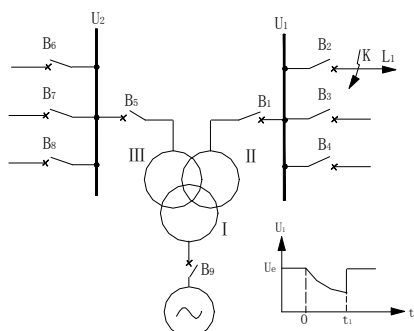


图3-3 变压器出线故障切除电压突增示意图

[2] 王广延;吕继绍。电力系统继电保护原理与运行分析。北京:水利电力出版社, 1995

[3] 陈卓。变压器合闸涌流及保护对策。技术与市场, 2012, 19 (7)

[4] 唐博, 彭安金, 王高丰, 陈本理。采用选相位关合技术消除变压器空载合闸的励磁涌流。电气开关, 2007, 45(3)

[5] 郝治国, 张保会, 褚云龙, 顾丕骥[2]。变压器空载合闸励磁涌流抑制技术研究。高压电器, 2005, 41(2)

[6] 李振强, 谷定燮, 戴敏。特高压空载变压器谐振过电压和励磁涌流分析及抑制方法。高电压技术, 2012, 38(2)

[7] 李占元, 张伟红, 杜秀红。预充磁绕组在抑制变流变压器空载合闸励磁涌流中的作用。2011 中国变压器技术发展论坛论文集。2011 中国变压器技术发展论坛, 长沙, 2011

[8] 张雪松, 何奔腾, 张建松。变压器和应涌流的产生机理及其影响因素研究。2004 全国电力主设备保护学术研讨会论文集。2004 全国电力主设备保护学术研讨会, 南京, 2004

参考文献

[1] 束红春, 贺勋, 李立新。变压器和应涌流分析。电力自动化设备, 2006, 26 (10)