

变压器空载时投入并联电容器可能发生铁磁谐振

自贡电力电容器厂 曹照睿

【摘要】文章论述了空载电力变压器上投入并联电容器时，此一回路可能发生铁磁谐振的原因、条件、可能的危害、防止方法以及处理此类故障的措施等。目的在于提供使用移相电容器运行参考。

随着工业建设的发展，作为电网无功补偿用的移相电容器，近年来日益普遍被各供用电单位采用。这样一来，如果运行不当，就可能发生铁磁谐振，并由此而产生过电流，若不及时加以处理，时间一长，定会造成电容器的热损坏。变压器也可能因温度过高使油质劣化甚至分解造成损坏，带来不必要的损失。

产生铁磁谐振的原因：

所谓铁磁谐振，是在电容和非线性电感电路中，由于铁心线圈的非线性，当电源或回路的电压或电流改变时，电流与电压的基波之间的相角差发生改变符号（俗称翻转）的现象。

图1是变压器与电容器回路的等值电路图。图中L表示变压器线圈的非线性电感，C表示回路电容， r_0 表示回路电阻， g_0 和 b_0 分别表示变压器的电导与电纳，其值分别由铁损电流分量与磁化电流分量决定。

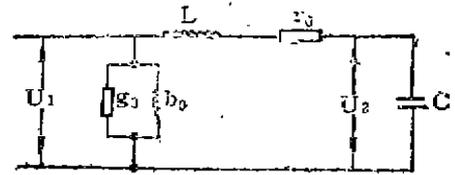
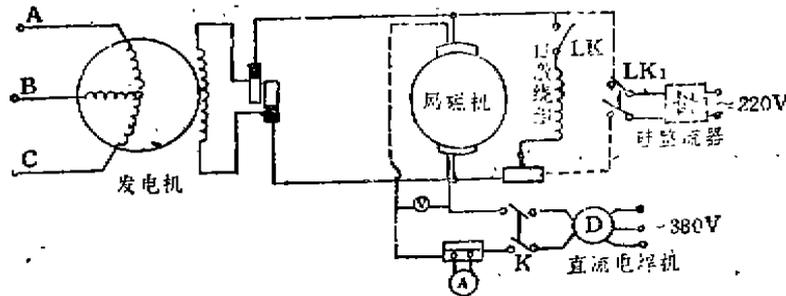


图1

从图1可见，我们所要讨论的是电压铁磁谐振(L、C串联)现象，对电流铁磁谐振本文不加讨论。

图2表示回路中各元件曲线的变化关系(为简化分析，均以等值正弦波代替非正弦波形)。图中L(电感)采用与电流相关的非线性曲线表示。L和C的伏安特性分别用曲线1、2表示，曲线3是两条曲线的差值($U=U_C-U_L$)即整个回路的伏安特性曲线用U'。



改装接线图

油道。

2. 封闭发电机风道，以减少力矩损耗。
3. 合上新装开关k和Lk1，并立即人工盘车。
4. 调整直流电焊机电流和硅整流器电流使输出电流保持在200安，输出电压保持在75伏左右，电焊机从小往大方向调，硅整流器从大往小方向调。
5. 当发电机转速达到1000转/分以上时，断开新装开关k和Lk1，同时合上发电机主油开关和励磁开关，调节磁场变阻器，并网，接带无功负荷。
6. 待发电后，打开发电机风道，断开电焊机硅

整流电源，启动结束。

我们用这一启动方式，几年来经过上百次启动均能一次启动成功，对电网的冲击小。这一机组并网在一条30kW城市供电线路上，线路过流保护时间为0.5秒，从未发现启动时跳闸现象。发电机改调相运行后，线路电压由原来的0.8kV提高到11kV，该线路功率因数由原来的0.65提高到0.80，又加上线路上加装电容器组补偿，功率因数经常保持在0.90以上。利用旧发电机组改调相运行，减少了投资，节约能耗，是行之有效的。

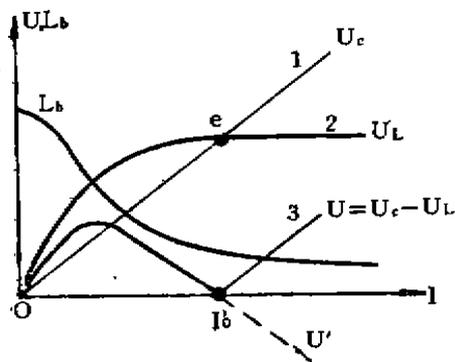
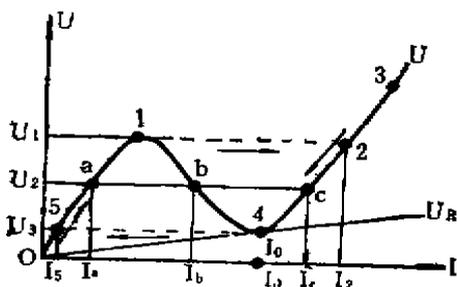


图2

(I) 表示。

当回路中的 $|U_L| = |U_C|$ 时, 曲线1、2相交于e点, 即是谐振点, 曲线U' 则与电流交于对应e点的 I_0' 。电压U' 的有效值为正, 所以曲线U 只有在 $I < I_0'$ 时才与U' 重合, 当 $I > I_0'$ 时, 曲线U 是U' 的镜像。线圈的等值电感 $L_s = \frac{U_L}{\omega I}$ 是随电流变化的函数。

由图可见, 当 $|U_L| > |U_C|$ 时电流I 小于 I_0' , 回路呈感性; 当 $|U_L| < |U_C|$ 时, 回路呈容性。



3

实际上回路中存在着很小的电阻压降 U_R , 如图3 所示。交点 I_0' 就移到对应的 I_0 点, 当电路呈容性时, 若电源电压沿 oa 上升或操作过电压等“激发”因素, 使回路电压升到 U_1 时, 回路电流从点1 突然跃变到点2 所对应的 I_2 值, 从落后电压 90° 跃变为超前 90° , 相位角正好翻转 180° 。电压从 U_1 下降到 U_3 时, 电流出现从点4 (I_0) 跳到点5 对应的 I_5 值, 又翻转 180° 。在电发生“翻转”时, 回路中产生非线性铁磁谐振过电压。如果在电压U 与 U_1 对应的点2 以后继续升高, 只能使电流单调增加, 但是在我们所讨论的回路中, 因铁心的饱和限制了回路电流的无限增加, 所以它不具备像L、C 电路的线性谐振那样, 趋向无穷大的特点, 而一旦发生铁磁谐振就可能自保持。若回路的 $G = 1/\omega^2 L$ 时, 可能产生高次谐波谐振 (对高次谐波谐振本文不讨论)

论)。综上所述, 发生铁磁谐振的条件为:

1. 变压器的伏安特性曲线 $U_L(I)$ 与电容器的直线 $U_C(I)$ 之间只要有交点, 就可能发生铁磁谐振;
2. 电感线圈的起始感抗要大于容抗, 而且要可能变到比容抗还小;
3. 外加电压或“激发”电压要大到使感抗变得比容抗小的数值。有资料介绍, 当容抗与感抗之比为 $x_C/x_L = 0.01 \sim 3$ 时, 可能发生铁磁谐振。只要 $C > 1/\omega^2 L$, 在很大范围内都可能谐振。

某单位曾在—台容量320千伏安变压器二次侧 (0.4千伏) 新装两组BW0.4-10-3型移相电容器。其容量分别为: 一组90千乏, 二组120千乏。安装好后, 在变压器空载下投入电容器组。投上一组时一切正常, 当投上二组后, 电容器组的总电流达562安, 为额定值303安的1.85倍; 采取给变压器带上一定负荷后, 电流下降为正常值。这是一种较典型的铁磁谐振现象。其电路的接线原理如图4, 因三相回路基本对称, 视为完全对称。空载有功损耗忽略不计。为方便起见取任一相间回路计算, 以了解发生电压铁磁谐振时的状态。

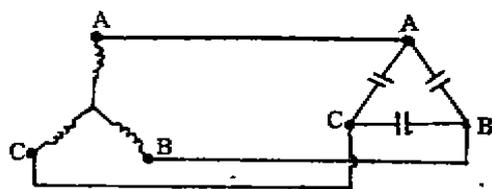


图4

1. 空载变压器相间感抗;

已知 $N_0 = 6.5\%$
 $I_n = 462$ 安
 $U_n = 400$ 伏
 电流 $I_{01} = N_0 I_n$
 $I_{01} = 6.5 \times 462 \times 10^{-2}$
 $= 30.03$ 安
 感抗 $X_L = U_n / I_{01}$
 $= 400 / 30.03$
 $= 13.32$ 欧

式中 N_0 ——变压器空载电流;
 I_n ——变压器副边额定工作电流;
 U_n ——变压器副边额定电压 (线电压);
 I_{01} ——变压器副边空载电流;
 X_L ——变压器任一相间空载感抗。

2. 电容器组相间容抗:

已知 一组 $Q_1 = 90$ 千乏, 二组 $Q_2 = 120$ 千乏, 额定电压400伏, 三角形接线。
 一组电流 $I_{C1} = Q_1 / \sqrt{3} \cdot U_n$

$$= 90 / \sqrt{3} \cdot 400 \times 10^{-3}$$

$$= 130 \text{ 安}$$

一组容抗 $X_{C1} = U_i / I_i$

$$= 400 / 30$$

$$= 3.077 \text{ 欧}$$

式中 Q_1, Q_2 ——分别为二组电容器容量，
 U_n ——电容器额定电压，
 I_c ——电容器组电流（相间=线间）也是I₁线电流，
 X_{C1} ——一组电容器容抗；

3. 一组电容器相间容抗与空载变压器相间感抗之比：

$$X_{C1} / X_L = 3.077 / 13.32 = 0.23$$

比值0.23在0.01~3范围内，但投入一组电容器时没有发生谐振。同理可算出二组的比值为0.174和两组的总值比0.099，都在发生铁磁谐振的范围内。所以，当投入二组电容器组时，在其稳态过电压“激发”和“涌流”的作用下，发生了铁磁谐振。

小结：

1. 由于谐振电流（基波）相位角发生180°的反复翻转，可能导致电动机反转或引起局部系统的相序改变。

2. 铁磁谐振过电流和过电压的产生及其幅值的大小，受回路中的电阻损耗及电感线圈的铁心饱和效应影响很大。因此，一旦发生谐振，采取增变压器负荷，是可行的消振措施。

3. 防止发生铁磁谐振的关键是切忌变压器空载或轻负荷时投入电容器。如果运行中的电容器当系统轻负荷时应及时退出运行。对装有自动投切装置的电容器组，要经常检查其动作是否正常。如发生异常或乱动动作时，立即退出自投装置，以防乱动造成谐振。

电流互感器平衡线圈损坏导致大面积停电

杨木林

互感器进潮后屡屡发生爆炸事故，早已引起人们的高度重视，并采取了积极措施，使其得以有效控制。然而L-110型电流互感器（CT）因其平衡线圈损坏而导致的大面积停电事故仍在不断发生。我区电力系统主网变电站中已发生了与CT相关的事故4次，其中一次使我区的5个县及武汉市部分区域的供电中断，严重地影响了工农业生产和人们生活用电。这几次事故都是因L-110型CT的平衡线圈损坏后，其二次侧无电

流输出，引起保护装置的拒动或误动所致。

L-110型CT为串级式电流互感器，其原理接线见图1。为了减少一次绕组的漏磁通，设计时，在第I级的上、下铁芯柱上分别装有匝数相等的两个平衡线圈。它们的一对同极性端相连对铁芯绝缘，另一对同极性端与铁芯连接。正常运行时一次绕组的漏磁通不大，铁芯回路中主磁通是稳定的，平衡线圈的感应电压不高，能很好地工作。但当有幅值较高的电流通过一次绕组时，情况就不同了。虽然铁芯回路中的主磁通仍基本维持不变，而一次绕组产生的漏磁通将与通过它的电流成线性关系上升。为了消除漏磁通带来的不利影响，在与一次绕组耦合最紧密的平衡线圈上将随之感应出比正常时高得多的电压，使平衡线圈的绝缘面临严峻考验。前面提及的4次事故中有3次就是在短路电流或拉大闸限电后不久又带负荷冲击，一次绕组漏磁通极高的情况下，平衡线圈端部转角处层间绝缘发生击穿的。另一次事故是因制造过程中的疏漏，将上、下平衡线圈与铁芯绝缘的连线直接顶压在铁芯叠片锋利的棱角上，由于运行时铁芯在交变磁力作用下的振动和连线自身的弹力，连线的纱包带被磨破，使平衡线圈的另一端也与铁芯连通了。平衡线圈的层间绝缘击穿或两端连通构成了短路是这类故障的共同之处，且都导致CT二次侧无法感应出相应的电流，从而使二次设备无法正常工作。

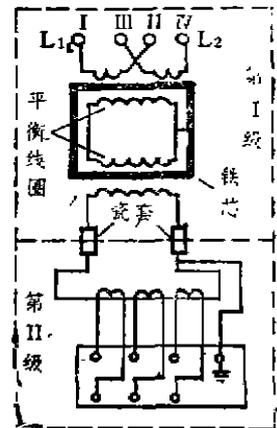


图1 L-110型CT原理接线图

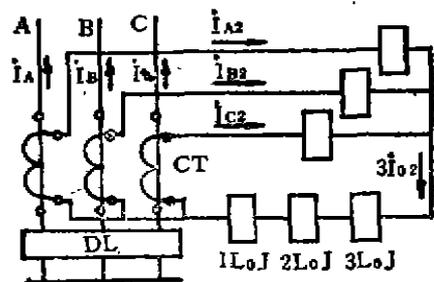


图2 零序保护有关部分原理图

当一组CT中的某台二次侧无电流输出时，受影响最大的是保护装置，其中零序保护的反应最为敏感。图2为一般零序保护有关部分原理图，由图可知，流过