

「铁磁谐振」

基于ATP-EMTP的110 kV系统铁磁谐振仿真研究

文/国网福建省电力有限公司物资分公司 张育华

基于ATP-EMTP的方法对110 kV系统的铁磁谐振进行仿真研究,对其仿真模型、仿真算法、仿真波形以及对电阻消谐和阻容消谐的方法进行了仿真分析,仿真结果表明增大消谐电阻的阻值,可以使流过PT的电流小于额定电流,从而保护PT。

110 kV系统的铁磁谐振在系统的高压侧发生,通常会给电网造成很大的损失,对电力系统的安全稳定运行有严重的影响,因此有必要对其进行深入分析研究。主要介绍了用ATP-EMTP方法对110 kV系统的铁磁谐振,分断路器和隔离开关两种情况进行了仿真分析,然后对仿真波形进行了分析,最后采用阻容并联的方式提高消谐电阻值,并在ATP-EMTP中进行了仿真,达到了预期的效果。

铁磁谐振的基本原理

在电力系统的振荡回路中,因为带铁心的电力设备的电感的磁路饱和,激发起持续性的并且幅值较高的铁磁谐振。

研究谐振现象时,通常使用图1所示的基本谐振回路,这是一个二阶非线性系统,中性点接地的电力系统发生铁磁谐振,均可简化为图1所示。

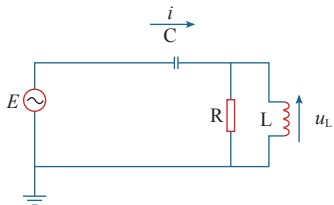


图1 串联铁磁谐振电路

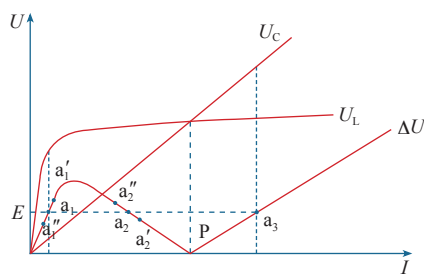


图2 铁磁谐振电路曲线图

图2中分别画出电感和电容上的电压随电流变化的曲线 U_L 、 U_C , 产生基波铁磁谐振的必要条件是

$$\omega L_0 > 1/\omega C \quad (1)$$

式中, L 为未饱和电感值; C 为电容值。

只有满足以上条件, 伏安特性曲线 U_L 和 U_C 才可能会相交。若回路电阻忽略不计, 可得

$$E = \Delta U = |U_L - U_C| \quad (2)$$

根据以上电势平衡条件, 在一定的电势 E 作用下, 可能有三个平衡点, 即图2中的 a_1 、 a_2 、 a_3 三点, 平衡点虽然满足电势平衡条件, 但不一定满足稳定条件, 不满足稳定条件就不能成为实际的工作点。

数学模型和数值分析

在110 kV系统中, 由于PT谐振常常造成严重

的后果,促使人们从各个不同的角度对其进行研究,并得出了一些普遍性的规律。

110 kV系统中,研究谐振现象时,如果不计线路的负荷,由于三相对称,可近似把三相回路简化成三个相同的单相回路,因此所得到的三相的电压和电流波形基本上是一致的,其每相的等效电路如图1所示,可得以 ϕ 和 u_L 为状态变量的状态方程组

$$\begin{cases} \frac{d\phi}{dt} = u_L = f_1(u_L, \phi, t) \\ \frac{du_L}{dt} = -\frac{1}{C} \left[\frac{u_L}{R} + f(\phi) \right] + \omega E_m \cos \omega t = f_2(u_L, \phi, t) \end{cases} \quad (2)$$

非线性电感 L 中得电流 i_L 和磁通 Φ 的关系可表达为

$$\Phi = \begin{cases} k_1 i & i \leq i_0 \\ k_2 i + b & i > i_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, Φ 为电感中的磁通; $i_L = f(\phi)$ 为流过电感的电流; k_1 为分段线性化模型第一段(非饱和段)斜率; k_2 为分段线性化模型第二段(饱和段)斜率; b 为分段线性化模型第二段在 Φ 轴的截距; i_0 为非饱和段与饱和段交点的电流值,即

$$i_0 = \frac{b}{k_1 - k_2} \quad (5)$$

铁磁谐振的仿真

对于铁磁谐振的仿真计算建立一个数学模型,在计算中,通常忽略电源的内部阻抗,并用理想的电压源来计算,采用简化的线路模型,把线路的分布电容用集中电容代替,只考虑线路的对地电容、互感器高压绕组的直流电阻及母线和电气设备的对地绝缘电阻,而不考虑线路电阻 R 、电感 L 、电导 G 。将EMTP和ATP相结合,作为仿真研究的工具。

1. 仿真

变电站的典型接线如图3所示。

2. 仿真模型

其等效电路图如图1所示,对谐振回路建立仿真模型, $i-\Phi$ 曲线如图4所示。

3. ATP-EMTP仿真算法

ATP-EMTP数值计算采用的是梯形积分法。

假定微分方程式写成状态变量形式

$$\left[\frac{dx}{dt} \right] = [A][x] + [g(t)] \quad (6)$$

写成积分方程式,即

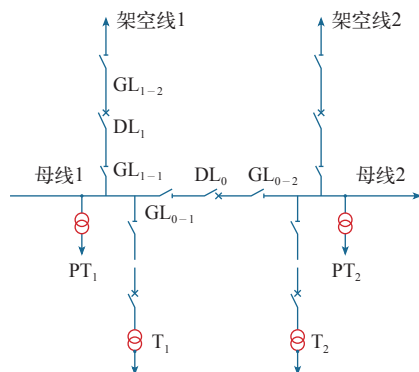


图3 变电站的典型接线

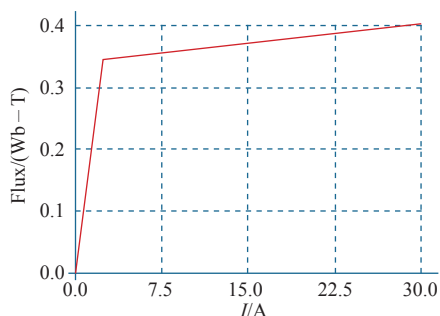


图4 PT励磁特性 $i-\Phi$ 曲线

$$[x(t)] = [x(t-\Delta t)] + \int_{t-\Delta t}^t \{ [A] \cdot [x(u)] + [g(u)] \} du \quad (7)$$

在 $t-\Delta t$ 与 t 间对 $[x]$ 与 $[g]$ 采用线性插值,暂且假设 $[x]$ 在 t 时的值已知,可得

$$[x(t)] = [x(t-\Delta t)] + \frac{\Delta t}{2} [A] \{ [x(t-\Delta t)] + [x(t)] \} + \frac{\Delta t}{2} \{ [g(t-\Delta t)] + [g(t)] \} \quad (8)$$

4. 铁磁谐振仿真结果

(1) 打开断路器ATP-EMTP仿真波形

打开断路器后,系统未能过渡到正常稳态,暂态过程激发了谐振。

由图5看出谐振激发后,过渡到了以工频为主要分量的稳态谐振,其各频率分量大小如表1所示。

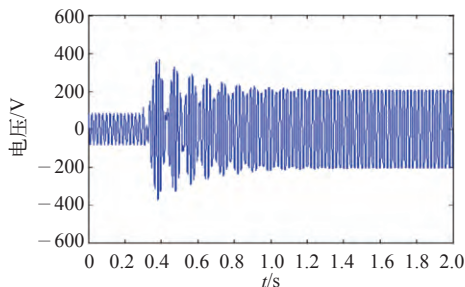


图5 打开断路器铁磁谐振电压波形

表1 铁磁谐振稳态及各频率电压值

频率分量 /Hz	二次电压 /V	一次电压 /kV	占工频百分比 (%)
50	307	338	100
150	21	23.1	6.83
250	5	5.5	1.63
350	1.6	1.76	5.21

(2) 打开隔离开关ATP-EMTP仿真波形

打开隔离开关相当于彻底切断为母线供电的两条110 kV线路中的一条。从图6中可以明显看出暂态过程也激发了谐振,并且出现了持续的、较高幅值的过电压。幅值相对于打开断路器较小。

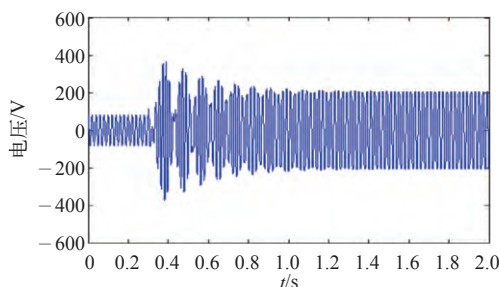


图6 打开隔离开关铁磁谐振电压波形

由图6看出谐振激发后,也过渡到了以工频为主要分量的稳态谐振,其各频率分量大小如表2所示。

表2 铁磁谐振稳态及各频率电压值

频率分量 /Hz	二次电压 /V	一次电压 /kV	占工频百分比 (%)
50	171.3	188.4	100
150	23	25.3	13.43
250	1.6	1.76	0.93
350	0.6	0.66	0.35
350	1.6	1.76	5.21

消谐措施

1. 电阻消谐

(1) 打开断路器 ATP-EMTP仿真

在相-地端并联电阻,从较大阻值开始,依次减小电阻,从图7和图8看出,在8 Ω 时还未能消谐,到6.1 Ω 时达到了消谐效果,即为消谐电阻。

(2) 打开隔离开关 ATP-EMTP仿真

相同的方法,得到临界消谐电阻,从图9和图10看出,9 Ω 时还未消谐,在8.1 Ω 时达到了消谐效果。

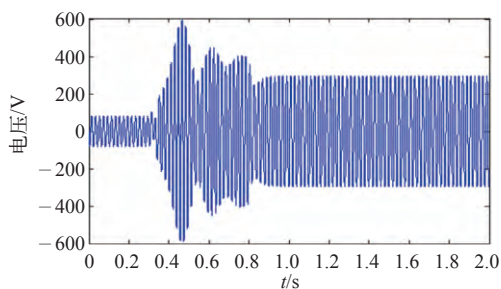


图7 母线PT二次侧并联8 Ω 电阻

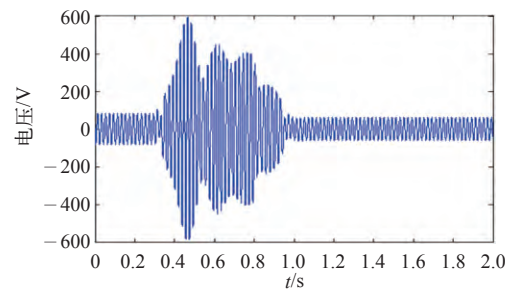


图8 母线PT二次侧并联6.1 Ω 电阻

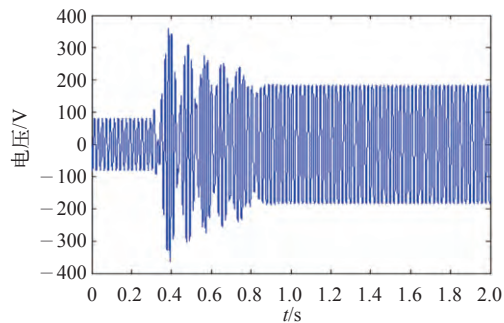


图9 母线PT二次侧并联9 Ω 电阻

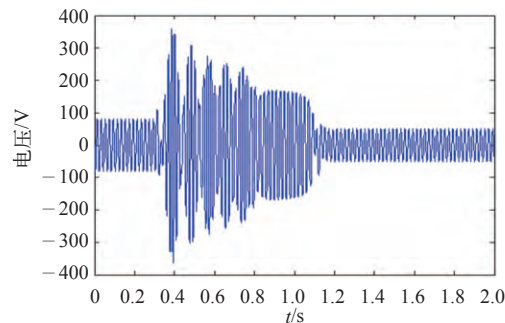


图10 母线PT二次侧并联8.1 Ω 电阻

2. 阻容消谐

采用电阻消谐,切除消谐电阻后还可能重新激发谐振,为此在相-地端并联阻容吸能消谐,能够提高了消谐电阻值,可以使流过PT的电流小于额定电流,从而保护PT,有更好的消谐效果。

(1) 打开断路器 ATP-EMTP仿真

系统仿真采用电容值为4 000 μF ,与验证消

谐电阻的方法相同,得到消谐电阻的临界值为 $11\ \Omega$,如图11所示。

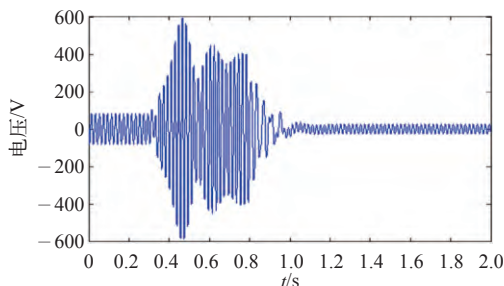


图11 打开断路器11 Ω 阻容消谐

(2) 打开隔离开关 ATP-EMTP仿真

采用与打开断路器相同的方法,得到消谐电阻的临界值为 $13\ \Omega$,如图12所示。

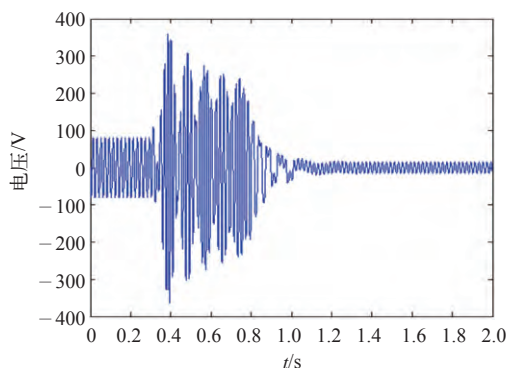


图12 打开隔离开关13 Ω 阻容消谐

仿真模拟打开断路器和隔离开关两种方式的铁磁谐振,并针对两种方式的消谐电阻分别进行了验证。同时,为了避免投入消谐电阻时,引起流过PT的电流超过额定电流,采取在消谐电阻上并联电容的方法,提高消谐电阻值。**EA**

(收稿日期:2017.03.24)

(编辑:刘群彦)

结束语

对110 kV系统进行了ATP-EMTP仿真分析,

(上接第106页)

母线扩建接口处通常应设置为可拆卸装置,如图6b所示。扩建时,在前期设备不停电的情况下,先安装扩建设备,再短时停电对接母线接口。扩建接口安装时,先将内部导体放置于筒内,适当压缩波纹管,将所有外部壳体对接好,之后操作人员由母线盖板处进行导体对接。前期扩建接口(如图6a所示)的屏蔽导体、盖板需拆除,短筒视具体结构决定是否拆除。

2. 扩建设备的绝缘试验

扩建设备在进行绝缘试验前,必须编制耐压试验方案。耐压试验方案通常由试验单位按照试验规程进行编制,耐压试验方案须根据具体的设备,选择合理的试验回路及试验程序,明确试验的施加电压、施加时间、施加频率,判定标准等。

126 kV GIS的绝缘试验通常包括工频耐压试验和局放试验。扩建设备的绝缘试验与新建站要求相同,在额定气室压力下按耐压标准值的百分比(80%~100%)进行试验,试验回路保持合闸状态,试验回路以不带或少带前期设备为宜。进行绝缘试验时,扩建设备的绝缘试验回路与运行设备之间,应保持至少两个隔离断口,且试验回路与运行回路必须为额定气压。

扩建设备的试验条件较新建站的情况复杂,在某些情况下,扩建设备的绝缘试验无法或不便按照规定的试验电压进行,需要特殊对待。通常采用降低试验电压、延长施加时间的方式。图3所示电站,扩建1、2、3间隔时,采取的方案为先安装1、2、3间隔并单独进行绝缘试验,合格后,再短时停电对接3、4间隔之间的母线及进行绝缘试验。1、2、3间隔的绝缘试验按规定的试验电压(耐压标准值的百分比(80%~100%)),在额定气室压力下进行试验。3、4间隔之间的母线的绝缘试验,需要相连接的M甲和M乙1停电,绝缘试验回路所带的前期设备较多,经与用户、试验单位沟通后,根据GB7674的有关规定,现场采取降低试验电压为额定运行电压,延长施加时间为30 min的方式进行绝缘考核。

结束语

GIS建设是一个综合性、系统性的工程,电网、设计院和设备生产厂家协调配合,才能建设合理的电站。分期扩建工作的顺利进行,对电站的运行意义重大,通过对GIS扩建的相关问题的阐述,以期对GIS的设计、实施有所帮助。**EA**

(收稿日期:2017.05.08)

(编辑:刘群彦)