

# 6~35 kV 配电网铁磁谐振对策初探

程德蓉<sup>1</sup>, 刘启俊<sup>2</sup>

(1 成都电业局龙泉驿供电局, 四川 成都 610100; 2 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:**配电网发生铁磁谐振后, 将产生过电压, 危害极大。基于系统安全运行的需要, 于实践中总结了若干消谐措施, 并逐一进行了比较。

**关键词:**配电网; 铁磁谐振; 过电压; 对策; 电压互感器; 安全运行

**Abstract:** When ferrimagnetic resonance takes place in a distribution network, overvoltage will be produced that is of great harm. According to the requirements of safe operation, some measures of removing ferrimagnetic resonance are summed up in the practice, and the measures are compared with each other.

**Key words:** distribution network; ferrimagnetic resonance; overvoltage; countermeasures; voltage transformer; safe operation

**中图分类号:** TM864 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0036-03

在 6~35 kV 的配电网中, 因变压器、消弧线圈、电压互感器等感性元件的磁饱和和作用常常激发形成较高幅值的铁磁谐振过电压。铁磁谐振可以是工频谐振、也可以是高频谐振或分频谐振, 其具体表现为: ①产生高幅值的零序电压, 出现虚幻接地或接地指示错误; ②系统单相、二相或全相对地电压升高, 出现低频摆动, 引发绝缘闪络或避雷器爆炸; ③工频谐振产生反倾引起变压器负荷侧小电机反转, 变压器绕组电流急剧增加、铁心异音, 导线发生电晕; ④电压互感器保险熔断或爆裂, 使得仪表测量、接地保护等无法正常运作。

据统计, 35 kV 及其以下的配电网, 谐振故障率较高, 已受到业内人士广泛关注, 因此, 于实践中总结出一套便捷、高效的消谐措施, 尤为重要。

## 1 铁磁谐振形成原因

当系统发生铁磁谐振时, 参与谐振的电感呈非线性特性, 铁磁谐振可以分为外激发和自激谐振。实践证明, 产生铁磁谐振的两个必要条件是: ①系统工作在欠补偿状态, 即: 回路参数必须满足  $\omega L > 1/\omega C$ ; ②有激磁作用差, 容易饱和的铁磁材料存在或系统中存在一定程度的扰动, 如: 电网突然合闸、设备故障 (导线折断、熔断器仅一相或两相熔断、断路器操作不同期) 等等。有例为证: 位于四川的国内某巨型水电站, 在一个时期, 其 6 kV TV 先后有 6 台次损坏, 集中

表现为一次绕组匝间短路, 且外壳多处存在环氧树脂爆裂痕迹。究其原因, 无非有三: ①系统频繁投切大功率的感性负荷; ②该电站施工时, 在有限的空间内, 承包商施行立体作业, 因条件较差, 来自施工变电站的电缆常被外物破坏, 单相接地频繁, 造成 TV 铁心饱和; ③因雷击或其他原因, 线路瞬间弧光接地, 暂态过程中产生涌流。如图 1、图 2 所示, 在上述条件①、②、③中, 当满足  $\omega L = 1/\omega C$  回路发生谐振, 具体表现为: 外加电动势  $E$  由零逐渐增大, 回路电流、电容及电感上的电压均突然大幅度上升, 引起 TV 一次绕组绝缘闪络, 形成过流, 最终造成 TV 爆裂。在实际操作中, 当谐振频率等于工频的整数倍时, 将会发生高频谐振, 产生高次谐波谐振过电压; 相应的, 当谐振频率等于工频的分数倍时, 将发生分频谐振, 产生分次谐波谐振过电压。经总结发现: 分频谐振相对于高频谐振、工频谐振, 因其感性元件的励磁电流高达额定值的几十倍, 危害较大。

影响互感器铁磁谐振过电压的因素如下。

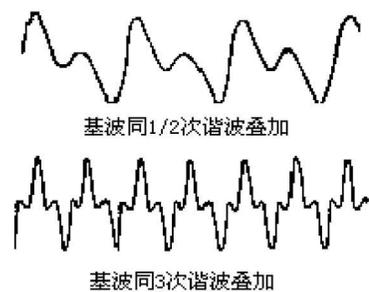


图 1 铁磁谐振波形图

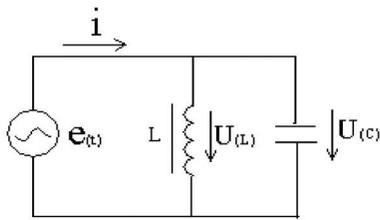


图 2 并联谐振电路图

(1)电压互感器伏安特性的影响。如图形 3 所示,铁心电感的伏安特性愈好,即铁心饱和得愈慢,谐振区愈向右移,也即谐振所需要的阻抗参数  $X_{C0}/XL$  愈大;反之,愈向左移,即谐振所需  $X_{C0}/XL$  愈小。

(2)电压互感器损耗的影响。运行中的互感器,一般损耗较大,例如,35 kV 的互感器其阻尼系数  $r/XL$  为  $>15/10\ 000$ , 损耗电阻大,可以吸收一部分能量,对谐振有一定的抑制作用,特别是对  $1/2$  频谐振,这种抑制作用很明显。

相关科研试验表明:当  $X_{C0}/XL$  一定时,随着互感器高压线圈损耗电阻的增大,激发谐振所需的起振电压随之增加,它意味着谐振区域变窄。

(3)电压互感器结构的影响。单相电压互感器组的起振电压较三相五柱电压互感器的低,也就是说,单相电压互感器组容易激发谐振。这主要是由于两者线路结构的差异,造成零序阻抗不同所致。

## 2 解决方法

1)选用激磁作用较好的电磁式电压互感器或电容式电压互感器,从客观上增强 PV 自身的免疫能力;另外,还须从整体上净化 PV 一次回路及相关线路的工作环境,从而有效地防御因 PT 铁心饱和而造成铁磁谐振。

2)避免非全相操作断路器,空载母线需要送电时,应先投断路器,再投感性元件;因操作不当而诱发谐振时,应立即终止原操作,并将系统及时复归至初态;对已发生的谐振,可采用如下方法:①将变压器中性点临时接地;②投入备用的消弧线圈或规定的线路或其它特定设备等。

3)于 10 kV 及其以下等级的系统母线上,装设中性点接地且呈星形接法的等值并联电容器组或以电缆替代架空线路,以减小电网对地容抗,避免谐振。

4)在 TV 开口三角形侧接入电阻  $R \leq 0.4X_m$ ,  $X_m$  为 TV 每相的励磁电抗归算至开口三角形处的阻

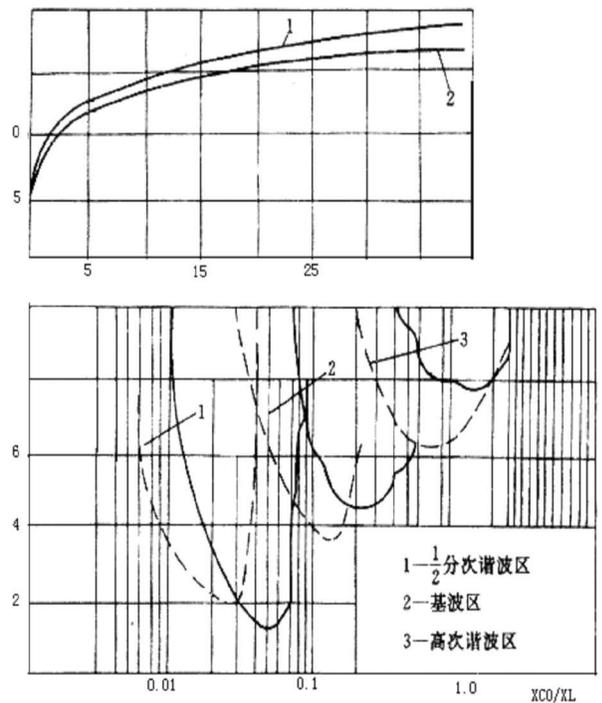


图 3 激磁电感的伏安曲线及谐振区域图

值。35 kV 以下的系统,一般取  $R \leq 100\ \Omega$ , 对于 10 kV 系统可接一级别为 500 W,  $50 \sim 60\ \Omega$  电阻;另外,也可利用钨丝在冷、热态阻值波动大的特点,在开口三角处接入一只 500 W 的灯泡,以增大回路的阻尼电阻,使  $\omega I \neq 1/\omega C$ 。缺点:当线路单相弧光接地时,灯泡易发热,此时,钨丝阻值必将上浮,致使消谐作用处于劣势。就纯理论而言,开口三角形接入的电阻越小越好,但就实际出发,如所接电阻过小,当遇到一次系统发生单相接地的情况时,则 TV 本体必然过热,互感器的安全受到影响。电阻法经济、方便,但阻尼力度不够强大,对一次涌流无限制作用。

5)在 TV 一次中性点处接入电阻  $R_0 = 0.06XL$  并满足热稳定要求,  $XL$  表示每相绕组在额定线电压下的激磁阻抗,其设计思想同步骤 4),也是为了增强回路自身的阻尼作用。 $6 \sim 35\ kV$  系统,常取  $5\ \Omega \leq R_0 \leq 30\ \Omega$ , 对于 10 kV 系统可接一级别为 150 W,  $9\ k\Omega$  的电阻。从理论上出发,TV 一次中性点处接入的电阻越大越好,但若过大,对被测设备进行接地监察时,其灵敏性势必受到影响,同时,由于 35 kV 以下系统属于中性点不接地系统,该系统若单相接地,中性点将发生偏移,非故障相电压将会提高  $\sqrt{3}$  倍,TV 绝缘被威胁。

中性点串入的电阻等价于每相对地接入电阻,能够起到消耗能量、阻尼和抑制谐波的作用。在线路单

相接地时,由于中性点对地带有电位,故能相应减少非故障相 TV 绕组的电压,使 TV 的饱和程度降低,不至于发生铁磁谐振。但是电阻的接入使 TV 开口三角绕组输出电压相应降低,会影响接地指示装置的灵敏性。除了要考虑  $R \geq 6\% X_m$  外,还要考虑电阻的热容量。当直接采用线性电阻时,往往由于电阻元件的容量及绝缘水平选择不当,使引线烧断,电阻烧毁,沿面闪络等。

下面定性地讨论 TV 中性点串电阻对各相绕组电压及开口三角绕组电压的影响。

假设 TV 在线电压时工作在饱和区,励磁电抗  $X / X_m = 1/6$ , R 仍取  $6\% X_m$  即  $60 \text{ k}\Omega$ 。C 相发生单相金属接地时,加消谐电阻时:

$$U'_{\Delta} / U_{\Delta} = 98.4\%$$

实际上由于 TV 的伏安特性一般较差,在加线电压时均会有一定程度的饱和。通过计算说明:在中性点串电阻时开口三角绕组输出电压仅为原来的  $67.9\%$ ,而串消谐电阻时则达到  $98.4\%$ ,比较之下串消谐电阻对接地指示装置的影响较小;同时 TV 中性点串电阻后,非故障相绕组的电压虽有降低,但幅度不大,其中一相绕组的电压更接近线电压,进入饱和区域,其消谐作用不大。

6)在 TV 的一次中性点处接零序电压互感器  $TV_0$ 。当系统发生单相接地时,零序电压基本上均由  $TV_0$  承担,这样,当外部存在激发性因素时,可以最大限度地限制主  $TV_0$  在饱和区运行。另外,由于  $TV_0$  的直流电阻一般为  $10 \text{ k}\Omega$ ,这一大电阻对谐振同样起着很大的阻尼作用。分析如下:

当 TV 中性点串单相  $TV_0$ ,原 TV 的励磁电抗  $X_m = X_{L1} + X_{L0}$ ,优点有三:

(1)  $X_m$  显著增大,比较易实现  $X_{C0} / X_m \leq 0.01$  这个条件,使系统扰动时不致于发生谐振。

(2)  $TV_0$  接入后:  $U_0' = 4.33$ ,  $U_{a0}' = 6.6$ ,  $U_{b0}' = 6.6$ ,亦即加在非故障相 TV 绕组的电压下降至接近相电压,不会饱和,从而杜绝了谐振的发生。

(3)由  $TV_0$  二次绕组电压继电器作接地指示装置,在单相接地时其输出电压为  $75 \text{ V}$ ,可按此值进行整定计算,从而保证了接地指示装置的灵敏性。

若中性点串入  $TV_0$  的励磁电抗  $X_{L0}$  远大于  $X_{L1}$  值,则效果更佳。此时加在非接地相  $L_1$  和  $L_2$ 、故障相  $L_0$ 、中性点  $TV_0$  的  $L_0$  绕组的电压全部等于相电压  $5.77 \text{ kV}$ ,肯定不会饱和,而且接地指示装置可获得的输出

电压可达  $100 \text{ V}$ 。

7)在 TV 一次中性点接入消谐器。同 TV 一次中性点相匹配的消谐器接有 SC 非线性电阻,常态时呈高阻性,可使谐振在“萌芽”初期便遭受较大的阻尼作用,有力地遏制了其向“纵深”发展;如电网单相接地,则消谐器中的 SC 呈低阻性,同时,还能满足开口三角处电压不小于  $85 \text{ V}$  的要求,使接地保护不受影响。另外,在消谐回路中,还接有一线性电阻(同 SC 串联),当电网发生弧光接地时,其固有阻值能有效地限制互感器的低频饱和电流。若采用 RXQ-10 型消谐器,其内部由 SC 非线性电阻片与线性电阻 ( $6 \sim 7 \text{ k}\Omega$ ) 串接,在低压时呈高阻值,使谐振在初始阶段不易发展起来。在线路出现较长时间单相接地时,消谐器上将出现千余伏电压,电阻下降至稍大于  $6 \sim 7 \text{ k}\Omega$ ,使其不至于影响接地指示装置的灵敏性,同时非线性电阻片的热容量相当大,可满足放电电流的要求。据有关资料表明,同 TV 一次中性点相连的 RXQ 型消谐器,业绩较佳,当系统发生弧光接地时,对 TV 一次电流有明显的抑制作用,但也有不足之处:①当三相 TV 的伏安特性存在差异时,即使在正常工况下,TV 仍有可能发生中性点位移,导致电压表读数不准确;②当中性点不接地的变压器向空载母线送电时,有可能诱发谐振。

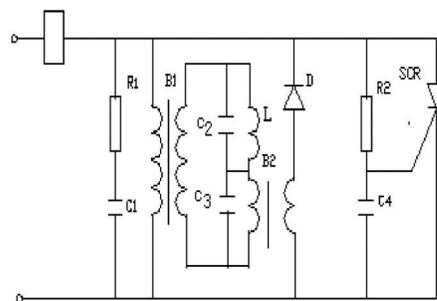


图 4 KFX 型分频消谐器示意图

8)在 TV 开口三角形接入消谐器。同 TV 开口三角形相匹配的消谐器,其消谐电阻也具有非线性特性,常态时工作在线性状态,如系统发生分频谐振,回路阻抗降低,当发生工频或高频谐振时,回路阻抗升高。这样,消谐电阻的非线性特性能够有效地抑制谐振过电压(高频、工频或分频),从而很好地保护了电气设备。

9)在 TV 开口三角形侧接入 KFX 型可控硅分频消谐器。见图 4,当电网发生分频谐振时,在消谐器内部  $L$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  发生串联谐振,产生幅值较高的分频电

(下转第 76 页)

用有选择的转发代替二层广播,达到优化的目的。IP 组播在节省通信带宽、降低服务器和网络负载等方面较单播有许多优越性。

在目前变电站中,为了保证通讯的实时性和减小网络配置的工作量,往往采取单网段广播方式进行通讯,因此广播风暴也就无可避免了。广播风暴经常体现在保护、测控装置系统通信延时大,计算机程序反应慢,报文丢失或时标误差大等现象,甚至导致装置死机,影响变电站自动化系统通讯的实时性和可靠性,成为发生运行事故的隐患和故障分析时的信息盲区。因此根据变电站的实际规模和运行方式,适当地将通讯网络划分为多个网段,充分利用交换机的端口特性和 VLAN 特性,同时辅之以 QoS 及组播等配置,

可以较好挖掘交换机的通讯潜能,改善变电站通信网络的通讯效率。

### 3 结束语

智能交换机目前在电信行业已经进行了广泛的应用,在电力系统也有了逐步的使用,随着其价格的降低和性能的提升,在变电站自动化系统中大量应用智能交换机是具有现实可能性的。这对于电力工程人员在变电站调试和检修工作提出了新的要求,既懂电气又懂网络和通讯将是工程人员基本的素质和要求。

(收稿日期: 2008-12-10)

(上接第 38 页)

压,并经变压器耦合倒相后触发可控硅,此时,开口三角形被短接,产生强烈的阻尼作用使铁磁谐振迅速趋于衰减,其后,可控硅被恢复为阻断状态。可控硅分频消谐器工作原理类似于微电脑消谐器,为消谐工作提供了一种全新的思路。

10)对于线路不长的电网,在开口三角形绕组接 WNX 系列特定型号的微电脑多功能消谐装置,能消除高频、工频、分频谐振过电压。当系统发生单相接地时,给予判断,发接地信号,消谐装置不投,可以避免低值电阻长时间接在开口三角形侧导致互感器因过热而烧毁。缺点:当线路很长时,该装置对互感器瞬时低频饱和电流抑制较弱。

11)在 TV 的开口三角形处接吸能型消谐装置,此装置正由有关单位研制,其采用单片机控制,谐振时可以分析 TV 开口三角形的零序电压,且予以判定:①因系统单相接地而导致故障;② TV 因饱和引起谐振。并通过消能电容吸收能量最终达到消谐目的。见图 5,该装置能正确记录消谐次数,且能有效地区别谐振频率(高频、工频或分频)。

### 3 结 论

(1)对谐振力度不大的电网,可在 TV 一次中性点或开口三角形侧接入消谐电阻,此方法经济、便捷。

(2)对分频谐振频繁的电网,可采用 KFX 型可控硅分频消谐装置,其强有力的阻尼作用可使铁磁谐振迅速趋于衰减。

(3)对谐振频繁且线路不长的电网,可采用特定型号的 WNX 型微电脑消谐器,效果显著。

(4)对开口三角形已装设电阻(灯泡)后消谐效果不佳的电网,可在 TV 一次中性点处接入消谐器,还可以在开口三角形处改接零序 TV 或消谐器。

### 参考文献

- [1] 解广润. 电力系统过电压 [M]. 北京:水利电力出版社, 1985.
- [2] 杨恢宏,等. 单片机控制的吸能型消谐器研制 [J]. 四川电力技术, 2000, (3): 35-36.
- [3] 周泽存. 高电压技术 [M]. 北京:水利电力出版社, 1988.
- [4] 李达坚. 10 kV 电压互感器各种防谐振措施评述 [J]. 广东电力, 1999, 12(1): 34-37.

(收稿日期: 2008-12-07)

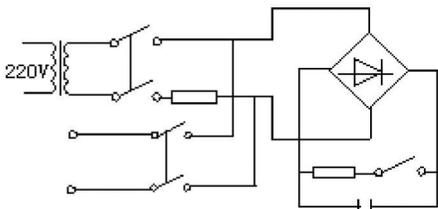


图 5 吸能型消谐器示意图