

弧光接地过电压的分析方法探讨

颜建国, 平绍勋

(江苏如皋供电公司, 江苏 如皋 226500)

摘要: 中性点不接地系统弧光接地产生的过电压国内外有2种不同的理论, 即工频熄弧理论和高频熄弧理论。工频熄弧理论过电压倍数仅为3.5倍, 它不可能危及设备的安全运行, 而高频熄弧理论说明过电压倍数为7.5倍, 它能引发系统故障, 文中对两起弧光接地过电压事故(二相10 kV母线对地事故和10 kV少油断路器C相对地放电事故)进行了分析, 证实高频熄弧理论是正确的。

关键词: 过电压; 工频; 高频; 接地; 弧光

中图分类号: TM864

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2012)02-0062-03

单相接地是电网的主要故障形式, 约占60%以上。在中性点不接地系统内, 发生稳定性单相接地, 这种故障并不改变变压器三相绕组间电压对称性, 即线路之间的电压关系不变。由于接地的故障电流不大, 因而不需要立即切除故障线路, 允许在2 h内可以继续向用户供电, 这是中性点不接地系统所带来的优点。

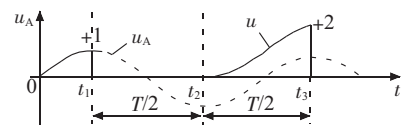
但在单相接地故障中, 绝大部分为电弧不稳定, 处于时燃时灭的状态, 这种间隙性电弧接地使系统工作状态时刻在变化, 导致电感电容元件之间的电磁振荡, 形成遍及全系统的过电压, 这就是间隙性电弧接地过电压, 也称弧光接地过电压。是否在单相接地时产生间隙电弧, 与系统单相接地电流大小直接相关。若系统较小, 线路又不长, 其单相接地电容电流也小, 一些暂时性单相弧光接地电流(因鸟害、雷击等)故障过后电弧可自动熄灭, 系统很快恢复正常。随着电压的提高和系统的发展, 单相接地电容电流会成比例地增长。运行经验表明, 10~35 kV电容电流超过10 A时, 此时的接地电弧将难以自动熄灭。有资料显示在电容电流为5~10 A时, 也曾多次发生因单相弧光接地过电压造成母线设备对地发生闪络扩大为相间短路事故。

1 基于工频熄弧理论分析方法

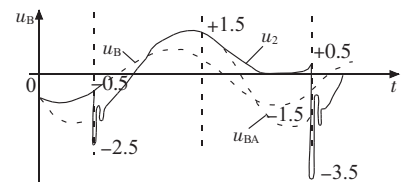
弧光接地过电压产生过程的主要理论有: 工频熄弧理论和高频熄弧理论。

以工频电流过0时熄弧来分析过电压发展过程的, 称为工频熄弧理论; 以高频振荡电流第一次过0时熄弧来分析电压发展过程的, 称为高频熄弧理论。

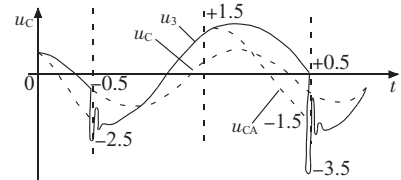
三相交流电压 u_A, u_B 和 u_C 发生A相弧光接地时过电压生成的过程波形如图1所示。



(a) u_A 发生 A 相弧光接地时过电压生成的过程波形



(b) u_B 发生 A 相弧光接地时过电压生成的过程波形



(c) u_C 发生 A 相弧光接地时过电压生成的过程波形

图1 工频熄弧时弧光接地时过电压的发展过程

在 t_1 时, A 相接地燃弧后, B 相、C 相分别发生对地电容的高频振荡的充电过程, 在 t_2 时刻含有工频和高频分量的故障电流 $i(t)$, 其工频分量为 0, 起始阶段 $i(t)$ 中主要是以高频分量为主, 但其衰减很快。工频电流的熄弧要待过 0 时才能发生, 所以要过半个周期后, 即在 $t_2 = t_1 + \frac{T}{2}$ 时, 因此电弧会持续 0.01 s。经过半周波到达 t_2 后电弧熄灭, B 相、C 相电容电压变为 $1.5U_{\text{phm}}$ 。在熄弧过程中, 正常相与故障相的对地电容电荷将重新分配, 直至各相电容上电压相等。这样, 使得不接地系统中性点对地偏移一个直流电位 U_{phm} 。这一电荷重新分配过程实质上就是电容 C_2 (B 相), C_3 (C 相) 通过电源对 C_1 充电的高频振荡过程。熄弧过程中故障相电容电压稳态值为:

$$\begin{cases} u_1(t_2) = -U_{\text{phm}} + U_{\text{phm}} = 0 \\ u_2(t_2) = 0.5U_{\text{phm}} + U_{\text{phm}} = 1.5U_{\text{phm}} \\ u_3(t_2) = 0.5U_{\text{phm}} + U_{\text{phm}} = 1.5U_{\text{phm}} \end{cases} \quad (1)$$

再经过半个周波后,即 $t_3=t_2+\frac{T}{2}$, 到达 t_3 时,故障相电压将达到最大值 $2U_{phm}$, 此时如接地点绝缘尚未恢复, 电弧重燃, u_1 再降为 0, 电路再次出现振荡。这次振荡电压起始值为:

$$\begin{cases} u_1(t_3)=2U_{phm} \\ u_2(t_3)=u_3(t_3)=0.5U_{phm} \end{cases} \quad (2)$$

振荡过程中电压最大值可达:

$$U_{2m}(t_3)=U_{3m}(t_3)=2 \times (0.5U_{phm} - 2U_{phm}) - 0.5U_{phm} = -3.5U_{phm} \quad (3)$$

由上述分析可知, 按工频熄弧理论分析得到过电压倍数最大为 3.5 倍, 但由于相间电容和故障点绝缘恢复的影响, 且故障时也不一定在电压最大时刻发生, 因此, 过电压倍数一般小于 3.5 倍。从图 1 可以看出, 过电压波形具有同一极性, 且故障相不会产生振荡过程^[1]。

2 基于高频熄弧理论分析方法

中性点不接地电网 A 相接地, 如图 2 所示。

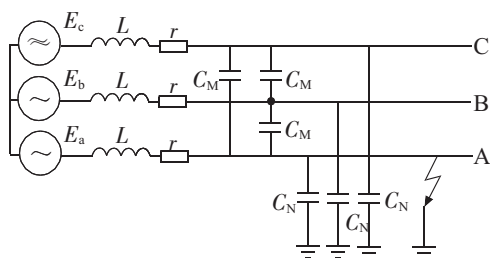


图 2 中性点不接地电网 A 相接地

图 2 中, 电源电动势 $E_a=U_m \sin(\omega t)$, $E_b=U_m \sin(\omega t-120^\circ)$, $E_c=U_m \sin(\omega t+120^\circ)$ 。图中 L 为电源漏电感, r 为系统等值电阻, C_M 为线间电容, C_N 为每相线路对地电容, 导线间电容忽略不计。

设故障 A 相每次在电压最大值时燃弧, 则在接地一瞬间 $t=t_1$ 时, $u_a(t_1)=-U_m$; $u_b(t_1)=u_c=0.5U_m$; $u_{ca}(t_1)=u_{ba}(t_1)=1.5U_m$ 。

此时, 在相间电容 C_M 与对地电容 C_N 上原有的电荷要产生激烈的振荡进行重新分配, 于是使 B 相、C 相对地电压从 $0.5U_m$ 上升到自由振荡的初始电压 U_c , 即:

$$U_b=U_c=\frac{0.5U_m C_N+1.5U_m C_M}{C_N+C_M}=(0.5+K)U_m \quad (4)$$

式(4)中: $K=\frac{C_M}{C_N+C_M}$ 。

经自由振荡半个周期后, $t=t_2=\frac{T_1}{2}=\frac{\pi}{\omega_1}$, B 相、C 相电压瞬时值达到最大。因自由振荡角频率 ω_1 远大于工频角频率 ω , 所以可近似地认为 t_2 时的 B 相、C

相工频电压仍保持不变, 即:

$$U_{bmax}=U_{cmax}=[1.5+(1-K)(1-d)]U_m \quad (5)$$

式(5)中: $d=\frac{\delta_1}{\omega_1}\pi$, δ_1 为自由振荡的衰减系数。一般

配电网 $d=\frac{\delta_1}{\omega_1}\pi \leq 1$ 。

在高频振荡电流第一次过 0 时熄灭, 由此产生的中性点电压 U_N 将比工频半周增大。电弧重燃后, 电荷将通过电弧接地而被泄放一部分, 不会无限制地积累和上升, 由此可求得中性点位移电压为:

$$U_N=C_N(U_{bm}+U_{cm})/3C_N=\frac{2}{3}U_{bm} \quad (6)$$

式(6)中: U_{bm} , U_{cm} 分别为 B 相和 C 相的过电压, 且相等。

在第 n 次重燃时, 尚有 $u_a(t_n)+U_N=-(U_m+\frac{2}{3}U_{bm})$, $u_b(t_n)-u_a(t_n)=1.5U_m$, 将 $U_N=C_N(U_{bm}+U_{cm})/3C_N=\frac{2}{3}U_{bm}$ 代入 n 次, 则得重燃时 B 相最大过电压值, 且高频熄弧理论的最大过电压值为:

$$U_{bm}=\frac{1.5+(1-K)(1-d)}{1-\frac{2}{3}(1-K)(1-d)}U_m \quad (7)$$

当 $K=0, d=0$ 时, $U_{bm}=7.5$ 。从理论上可以得出高频熄弧理论的最大过电压值为 7.5 倍相电压^[1]。

3 分析和讨论

长期以来, 大多数研究人员认为电弧的熄灭与重燃的时间是决定最高过电压的主要因素。根据交流电弧理论, 交流电弧过 0 时电弧熄灭, 而电弧是否重燃, 取决于电流过 0 后弧道的恢复电压与介质恢复强度之间的相对关系。系统单相接地时通过弧道的电流有两个分量: 工频电流(强制)分量和高频电流(自由)分量。燃弧瞬间出现的自由振荡频率远远高于工频, 故接地瞬间弧道中的电流为高频电流为主, 高频电流迅速衰减后, 弧道中的电流为工频电流。在分析间隙电弧接地过电压时主要有两种假设: 以高频电流第一次过 0 熄弧为前提进行分析, 即高频熄弧理论。按此分析, 过电压较高, 因高频电流过 0 时, 高频振荡电压为最大值, 熄弧后残留在非故障相上的电荷量较大, 故电压较高。以工频电流第一次过 0 熄弧为前提进行分析, 称工频熄弧理论。按此分析, 熄弧后残留在非故障相上的电荷量较小, 过电压值较低, 但接近系统中实测的过电压值。虽二者所得出的过电压值不同, 但反映过电压形成的物理本质是相同的。产生弧光过电压的过电压倍数有其概率性, 不能一概而论按工频熄弧理论弧光过电压倍数

不会超过 3.5 倍相电压,这实质上是否认弧光过电压存在危害性。

以两起因弧光过电压造成的事故为例。一次事故是一座 35 kV 农村变电站,10 kV 架空线路约 210 km,线路对地电容电流为 7.5 A。事发当天天气晴朗,因线路发生单相接地时,室内出线柜内少油断路器边相对柜的金属隔板放电,主变压器 10 kV 进线柜过流 1 s 后跳闸。经检查,10 kV 控制室 10 kV 母线单相接地光字牌亮,一出线柜内少油断路器边相有烧伤痕迹,金属隔板烧穿有一直径约 5 cm 的洞,少油断路器边相至金属隔板距离有 18 cm。3.5 倍相电压是不可能击穿的。

另一次事故是一座 110/35/10 kV 的城市变电站,10 kV 架空线路和电缆混合,线路对地电容电流为 9.2 A,事故当天天气晴朗,因是春节期间负荷较轻,10 kV 线路发生单相接地的时候,造成室内 10 kV 母线 4 组隔离开关对地放电,其中三组紧挨一起,另一组与其他三组中间隔一间隔,说明系统发生单相接地时,10 kV 母线都发生过电压。经过检查,控制室 10 kV 母线单相接地光字牌亮,主变压器 10 kV 进线过电流 1 s 跳闸。该变电站的检修才一个月,母线也曾清扫过。后经江苏省电力公司电力科

学研究院专家到场后确认,这是一起弧光过电压事故。综上所述,两起事故说明了弧光接地过电压危害性较大。

4 结束语

目前,在我国现行规程 DL/T 620—1997《交流电气装置过电压保护和绝缘要配合》的提法中,提出间歇性弧光过电压一般不超过 3.5 倍^[2]。根据本文上述的两起事故案例,这一提法不严格,且值得商榷。另外广州局与武高所在《10 kV 城市电网中性点经电阻接地方式的研究》一文中,也对这一提法提出了疑问。为进一步正确表述弧光过电压的理论特性,建议采用 IEEE 的提法,即间歇性弧光过电压一般不超过 3.9 倍的提法。

参考文献:

- [1] 平绍勋,周玉芳.电力系统中性点接地方式及运行分析[M].北京:中国电力出版社,2010.
[2] DL/T 620—1997,交流电气装置过电压保护和绝缘配合[S].

作者简介:

颜建国(1961),男,江苏常熟人,工程师,从事技术管理工作;
平绍勋(1941),男,上海人,高级工程师,从事技术管理工作。

Investigation of the Analysis Methods for Arc Grouding over Voltage

YAN Jian-guo, PING Shao-xun

(Ru Gao Power Supply Company, Rugao 226500, China)

Abstract: There are two different theories about over voltage generated by arc grouding in insulated neutral system, arc extinguishing theories of fundamental frequency and high frequency. With fundamental frequency theory, the over voltage can not endanger the safe operation of equipments because it is only 3.5 times. While with high frequency theory, the over voltage can lead to the system faults because it is 7.5 times than normal one. Two faults had been analyzed to prove the correctness of high frequency act extinguishing theory, one is two phase grounding fault of 10 kV bus and another is C-phase grounding fault of 10 kV oil-minimum breaker.

Key words: over voltage; fundamental frequency; high frequency; grouding; arc

(上接第 61 页)

Study on Voltage Stability Index of Branch Power Flow Based on PMU

ZHANG Hong-xi

(Nari-relays Electric Co.Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: Voltage stability prewarning based on the PMU technology needs to monitor operation of power transmission lines in real-time. The existing branch voltage stability index only can be used in the case of the constant power factor because it ignores the effect of reactive power. A new index considering branch active and reactive comprehensively was proposed in this paper. The index is applicable to various load power factors. Detailed derivation was made on this index. The index was tested in IEEE14 bus system, and the results indicate that it could reflect branch operation and voltage stability conditions better.

Key words: PMU; thevenin equivalent; t-equivalent; branch voltage stability index