

中性点经小电阻接地配电网中弧光接地过电压的研究

高亚栋, 杜斌, 赵峰, 施围

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

Study on the Arc-grounding Overvoltage in the Distribution System with Neutral Point Grounded through Low-resistance

GAO Ya-dong, DU Bin, ZHAO Feng, SHI Wei

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 研究了中性点经小电阻接地方式对弧光接地过电压的影响。首先理论分析了弧光接地过电压在中性点经小电阻接地系统中存在的可能性,并用 EMTP 对其进行了过电压计算。研究表明,中性点经小电阻接地方式有效地解决了弧光接地过电压问题。

关键词: 弧光接地过电压; 中性点经小电阻接地; 电磁暂态程序

中图分类号: TM864

文献标识码: A

Abstract: In this paper, theoretical analysis is made firstly about the possibility of arc-grounding overvoltage existing in low-resistance grounding system. Calculations on overvoltage magnitude are performed by EMTP. The results show that the problem of arc-grounding overvoltage is settled effectively with low-resistance grounding method.

Key words: arc-grounding overvoltage; low-resistance grounded neutral system; EMTP

1 引言

为了克服电网结构单薄的弱点,同时提高供电的可靠性,我国 10 kV 配电网过去一直采用传统的中性点非有效接地方式,包括中性点不接地和中性点经消弧线圈接地。这两种接地方式均允许发生单相接地故障时带故障继续运行 2 h,从而极大地提高了供电的可靠性。但是近年来,随着配电网尤其是城市配电网的发展,一方面双电源供电、多回路供电以及环网供电,从电网结构的本身提高了供电的可靠性;另一方面电缆线路的增加使得系统的对地电容电流大幅度增大,原来的接地方式暴露出了很多的弱点:①消弧线圈的补偿容量大、投资高;②由于运行中电缆线路的切合操作,需要及时、正确地调谐,操作麻烦;③电网的过电压高,持续时间长,不利于 MOA 以及绝缘水平相对比较低的进口设备的广泛

应用;④永久性故障发生的概率较架空线高的多,需要瞬时跳闸切除故障;等等。鉴于配电网特别是以电缆出线为主的城市配电网的新情况,近年来中性点经小电阻接地方式在我国开始被采用,并在上海、北京、广州、深圳、珠海、苏州等地率先使用。中性点经小电阻接地可以有效地降低单相接地时非故障相的过电压,消除弧光接地过电压和一些谐振过电压,对以电缆为主的系统可以选择较低的绝缘水平,以利节约投资;并能采用零序电流保护迅速选择故障线路,瞬时跳闸切除故障点,避免使单相接地故障发展为相间故障。

中性点经小电阻接地具有很多优点,笔者着重研究其对弧光接地过电压的影响。在中性点不接地系统中,弧光接地过电压持续时间长,过电压遍及全网,对设备绝缘是一种较大的威胁。而采用中性点经消弧线圈接地方式,并不能降低弧光接地过电压的幅值,但可以使恢复电压大为减缓,从而使得电弧存在的时间大大缩短,重燃次数减少,降低高幅值过电压出现的概率,这在调谐良好的情况下更是如此。但是消弧线圈的存在在某些情况下甚至可以使得过电压值更大,如我国黑龙江某 35 kV 电网装上消弧线圈时,在调谐良好的情况下,非故障相最大过电压为 $2U_{\varphi}$ (U_{φ} 为最大运行相电压);在严重过补偿时,非故障相为 $4.5U_{\varphi}$,故障相为 $4.37U_{\varphi}$,中性点为 $2.75U_{\varphi}$,分别比无消弧线圈时高^[1]。在 TNA 试验中,不接地系统中发生重燃后,测得的最大弧光接地过电压可达 4.76 p.u.^[2]。另据江苏省电力试验研究所 1991 的报告,在中性点不接地或经消弧线圈接地的 10 kV 系统中进行的弧光间隙接地过程中,非故障相过电压最严重时达到了 6.95 p.u.^[3]。由此可见,中性点不接地或者中性点经消弧线圈接地都没有很好地解决系统中的弧光接地过电压问题。

2 中性点经小电阻接地系统中弧光接地过电压存在的可能性分析

对于中性点经小电阻接地系统中弧光接地过电压存在的可能性,可以从系统出线的组成、接地故障电流值以及故障的切除时间三方面加以分析。

(1)即使是以电缆出线为主的配电网,由于系统中仍旧有架空出线,当接地故障发生在架空线上时,就可能产生间歇性的弧光接地。

(2)根据 DL/T 620-1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》:10 kV 系统当电容电流大于 10 A(钢筋混凝土或金属杆塔的架空线),20 A(非钢筋混凝土或非金属杆塔的架空线)或 30 A(电缆),接地电弧将不能自熄。但对接地电流大于何值,接地电弧将能稳定燃弧(即不发生弧光接地,类似金属性接地的情况)并没有说明,这是因为接地电弧的燃弧情况除了与恢复电压有关外,还与外界气象条件、电弧部位介质等多种因素有关,实际过程极为复杂。但不论接地电弧能否自熄,实验证明,在接地故障电流为数安至数百安的范围都可能产生接地弧光过电压^[1]。而在中性点经小电阻接地系统中发生单相接地时,其故障电流也就是在几百安左右(当然不排除接地故障电流在近千安的情况),这就有可能发生弧光接地过电压。

(3)中性点经小电阻接地系统采用限时零序电流速断保护作为主保护,一旦发生接地故障,要求立即跳闸以切除故障点。其实,所谓“立即”是相对的,其动作时间也有零点几秒,而这相对于工频周期而言并不是立即的,在这段时间内,足以产生弧光接地过电压。

由上分析,在中性点经小电阻接地系统中,仍然可能产生弧光接地过电压,有必要对其进行进一步的研究。

3 系统的建立

为了研究中性点经小电阻接地系统的弧光接地过电压,建立了一个以电缆出线为主的 10 kV 配电网系统,见图 1。根据以前的计算和实测结果,空载系统发生单相接地时系统的过电压最为严重^[2],因而在研究弧光接地过电压时仅对空载系统进行单相接地的 EMTP 仿真计算^[4]。系统各参数如下:

(1)电源电势 $E=6.96 \angle 0^\circ$ kV。

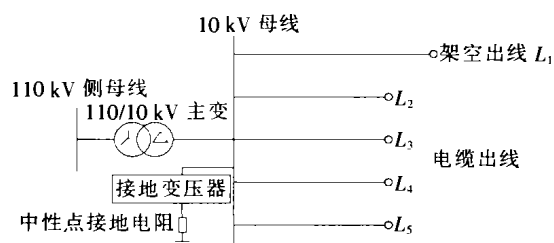


图 1 10 kV 配电网计算电路

(2)系统正序阻抗 $Z_1=j0.606 \Omega$ (包括 110/10 kV 主变阻抗,110 kV 系统至 10 kV 变电站线路阻抗,以及主变出口处的电抗器阻抗等)。

(3)架空线(1×8 km):①正序: $R_1=0.1723 \Omega/\text{km}$; $X_1=0.3276 \Omega/\text{km}$; $C_1=0.008 \mu\text{F}/\text{km}$; ②零序: $R_0=0.3223 \Omega/\text{km}$; $X_0=1.1466 \Omega/\text{km}$; $C_0=0.005 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

(4)电缆线(4×4 km):①正序: $R_1=0.105 \Omega/\text{km}$; $X_1=0.08 \Omega/\text{km}$; $C_1=0.47 \mu\text{F}/\text{km}$; ②零序: $R_0=1.05 \Omega/\text{km}$; $X_0=0.32 \Omega/\text{km}$; $C_0=0.409 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

(5)接地变压器阻抗 $Z_T=2.5+j8.03 \Omega$ 。

4 弧光接地过电压的研究计算

长期以来,人们都认为电弧的熄灭和重燃时间是决定弧光接地过电压最大值的重要因素,关于电弧的熄弧时刻,一般有工频熄弧和高频熄弧两种理论分析方法。下面采用工频熄弧理论对弧光接地过电压进行 EMTP 的仿真计算。

首先分析接地电弧电流 I_f 对接地弧光过电压的影响。为此,在一定的范围内改变接地电阻 R_f 的大小,来模拟接地电流大小的改变(事实上,出线首端接地即变电所内接地时,接地电阻比较小,一般在 0.5Ω 左右,这里取 5.0Ω ,仅是改变接地电流值的需要),计算结果见表 1,中性点小电阻 R_n 取为 10Ω 。

表 1 中性点电阻 10Ω , 出线首端接地时不同接地电流下的一次燃弧过电压最大值

R_f/Ω	I_f/A	母线健全 相电压/p.u.	电缆线末端健 全相电压/p.u.	架空线末端健 全相电压/p.u.	中性点 电压/p.u.
0.2	602	2.420 07	2.605 89	3.130 07	0.901 22
0.5	586	2.359 22	2.522 01	3.009 07	0.872 20
1.0	563	2.274 83	2.415 71	2.839 07	0.830 71
5.0	427	1.977 14	2.022 27	2.229 39	0.621 51

注:1 p.u.= $1.15 \times 10.5 \times \sqrt{2} / \sqrt{3} = 9.8592$ kV

由计算结果可以看到,弧光接地过电压的幅值随着接地故障电流的增大而增大。所以,尽管不知道接地故障电流为多大时电弧会稳定燃烧(也就是说不发生弧光接地),但可以按最严重的情况来考虑,即假定不论接地电流多大均会发生弧光接地,那么接地故障电流越大,弧光接地过电压越高。在这个假设下,要得到弧光接地过电压的最严重情况,可以计算系统接地故障电流最大时的情况。由以前的计算可知,出线首端单相接地时接地故障电流比线路其他位置发生接地时的故障电流大^[2]。因而,对空载系统出线首端接地($R_f=0.5 \Omega$),在小电阻范围内对系统的弧光接地过电压(一次燃弧)进行计算,结果见表 2。

由计算结果发现,在确定的系统中,健全相弧光接地过电压最大值随着中性点电阻的增大而略有增加,但增幅极小,当中性点电阻从 5Ω 增加到 20Ω ,其最大值增加不到 0.05 p.u.;但是随着中性点电阻增大,中性点暂态电压增加却很多,这说明中性点电阻阻值不能取得太大,尽管其对弧光接地过电压最

表2 接地电阻0.5Ω,不同中性点接地电阻时的一次燃弧过电压最大值

R_n/Ω	母线健全 相电压/p.u.	电缆线末端健全 全相电压/p.u.	架空线末端健全 全相电压/p.u.	中性点 电压/p.u.
5.0	2.335 59	2.490 67	2.989 90	0.719 27
10.0	2.359 22	2.522 01	3.009 07	0.872 20
15.0	2.382 55	2.549 40	3.024 69	0.927 17
20.0	2.401 21	2.574 14	3.038 89	0.950 75

大值影响不大。当中性点经小电阻接地后,系统健全相弧光接地过电压低于3.1 p.u.(系统最大的弧光接地过电压出现在架空线末端)。需要说明的是,当过渡电阻为0.5Ω时,接地故障电流将达到数百安培,在这样大的电弧电流下,暂时性的熄弧时间微不足道,电弧稳定燃弧的概率增大,甚至可能不发生弧光接地过电压。

发生接地故障时,在电弧的点燃和熄灭过程中,系统中能量的积聚是产生严重弧光接地过电压的重要原因。在前面只考虑了一次燃弧情况下的弧光接地过电压,还需要分析中性点经小电阻接地的配电网中可能出现的多次燃弧对过电压的影响。在中性点经电阻接地的配电网中,由于中性点电阻的存在,接地电弧熄弧后,零序残余电荷将通过中性点电阻提供的回路进行泄漏,从而在发生下一次的燃弧时,其过电压的幅值能够得到很大衰减。在忽略接地变压器阻抗时,线路电容经 R_n 放电时遵循 $e^{-t/T}$ 的放电规律,回路的放电时间常数 $T=3R_nC_0$,若选取 $R_n=1/(3\omega C_0)$ (以系统对地电容电流200 A计, R_n 可取在30Ω左右,系统对地电容电流减小, R_n 还可取得更大),则 $T=1/(2\pi f)$,在熄弧后的半个周波时间 $t=1/(2f)$,线路电容上的电荷降至 $e^{-\pi}=0.043$,几乎降至零;即使 R_n 取为 $2/(3\omega C_0)$,残荷都能在半个周期降至0.208。因而中性点经电阻接地,在很大的阻值范围内,即使发生多次重燃,弧光接地过电压也不会严重升高(与第1次燃弧情况接近),从而能够很好地抑制弧光接地过电压。图2为 $R_n=10\Omega$ 时2次燃弧情况下的架空线末端健全相弧光接地过电压波形,从中能够清楚地看到,在中性点经小电阻接地以后,发生第2次燃弧过电压的情况基本与第1次燃弧时的相同,中性点电阻有效地起到了释放残荷、抑制多次燃弧过电压幅值的作用。因此,研究中性点经小电阻接地配电网的弧光过电压时,只考虑一次燃弧是能够满足要求的。

为了更进一步说明中性点经小电阻接地对弧光接地过电压的抑制作用,还与中性点经消弧线圈接地以及不接地时的情况进行了比较。表3是不同中性点接地方式发生一次燃弧时的弧光接地过电压。从中发现,一次燃弧时中性点经小电阻接地系统的健全相过电压最大值只比经消弧线圈接地或不接地系统的低了0.2 p.u.左右,可以说,经小电阻接地并没有明显地降低一次燃弧时的弧光接地过电压幅值。但是一旦发

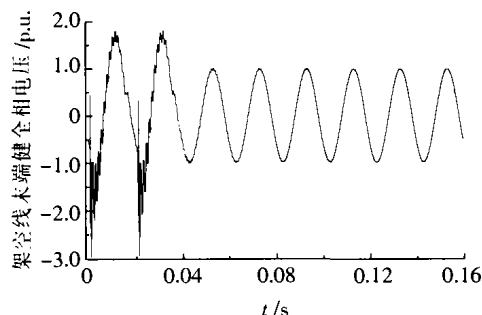


图2 中性点经10Ω电阻接地时2次重燃弧光接地过电压波形
生弧光接地,中性点经小电阻接地系统的中性点暂态电压比经消弧线圈接地或不接地系统低得多。也就是说,经小电阻接地系统能够大幅度降低中性点的过电压水平,这对变压器的制造将是积极的。

表3 中性点经10Ω电阻接地和中性点不接地电网的一次燃弧过电压

中性点接地方式	母线健全 相电压/p.u.	电缆线末端健全 全相电压/p.u.	架空线末端健全 全相电压/p.u.	中性点 电压/p.u.
经10Ω电阻接地	2.359 22	2.522 01	3.009 70	0.872 20
经消弧线圈接地	2.601 32	2.809 74	3.210 55	1.455 68
不接地	2.608 02	2.818 08	3.216 08	1.489 98

另外,由图3中性点不接地系统2次重燃时弧光接地过电压的波形可以看到,尽管一次燃弧时过电压的幅值与中性点经小电阻接地系统的相差无几,但是一旦发生2次重燃,不接地系统的弧光接地过电压将由重燃过程中能量的积聚而大幅度升高。因此,研究中性点经小电阻接地系统的弧光过电压时,小电阻的主要作用不是降低第1次燃弧时过电压的幅值,而是通过泄漏前一次燃弧时线路上的残余电荷,从而极大地降低重燃产生的过电压(当然中性点经小电阻接地后,由于较大的接地电流,电弧稳定燃烧的几率增大,但也不能排除发生重燃的可能)。

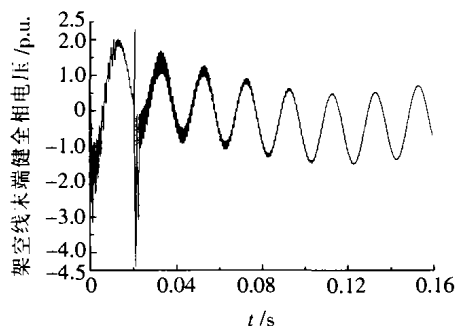


图3 中性点不接地时2次重燃弧光接地过电压波形

最后,对系统空载时出线首端接地的暂态过电压进行了统计计算,接地时间取为半个周波内的120个均匀分布的随机数,其统计计算结果见表4。比较表2和表4可以发现,经小电阻接地的电网,接地弧光过电压的最大值和相同接地情况下系统的暂态过电压基本相同,这不仅说明过电压的最大值产生于熄弧之前,而且其弧光接地过电压可以用单相接地时的暂态过电压考虑,其结果偏于严格(由于大故障电流下可能稳定燃弧,并不发生弧光接地过电压)。

表4 出线首端接地时($R_f=0.5\Omega$),
架空线末端健全相暂态电压

R_n/Ω	最大值/p.u.	平均值/p.u.	标准偏差/p.u.	幅值的98%/p.u.
5.0	2.990 4	2.192 49	0.444 87	2.984 72
10.0	3.009 1	2.207 76	0.445 43	3.002 98
15.0	3.025 3	2.215 08	0.451 53	3.019 01
20.0	3.039 5	2.220 49	0.457 99	3.033 11

5 结语

(1)由于接地故障电流在几安至几百安的范围
内都有可能发生弧光接地过电压,并且中性点经小
电阻接地系统的立即跳闸也需要零点几秒的时间,
因而在中性点经小电阻接地系统中,一旦接地故障
发生在架空线上时,仍然可能发生弧光接地过电压。

(2)中性点经小电阻接地系统中,由于小电阻能
有效释放残余电荷,即使发生重燃,过电压的幅值也
不会因多次重燃而明显增加。因而研究中性点经小
电阻接地系统的弧光接地过电压,只考虑一次燃弧
就能够满足要求,其最大计算值小于3.1 p.u.

(上接第341页)

6 结语

新型消弧线圈调节速度更快,使得故障的检测
和消除的时间大大缩短;运行更加安全可靠,保障了
电网运行的安全性;实时在线测量对地电容电流,结
果准确。随着科技的发展,大功率晶闸管的单管容量
及反向电压逐渐提高,而且价格下降,性能稳定。可
以预测,这种新型消弧线圈具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 要焕年,曹梅月.电力系统谐振接地[M].北京:中国电力出

(上接第344页)

精心设计,系统获得了优良的准确度、稳定性和动态
性能。光纤传输信号可靠性高,抗干扰能力强,和光
供电相结合,简化了绝缘设计,大幅度减轻了系统的
重量、缩小了体积、降低了造价。

参考文献:

- [1] J Ammon, Dr H Huang. Innovations in HVDC Technology

(3)中性点经小电阻接地系统中,相比传统的接
地方式,能够有效地降低系统中性点的过电压水平,
这对变压器的制造是有利的。

(4)10kV配电网中性点经小电阻接地后,不仅弧
光接地过电压发生的几率减小,而且即使发生了弧光
接地,其过电压也在允许范围之内,从而很好地解决
了传统接地方式所不能解决的弧光接地过电压问题。

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] 靳晓东,李谦,王晓瑜,等.配电网弧光接地过电压的仿
真及分析[J].高电压技术,1994,20(3):71-75.
[3] 万善良.上海市区配电网中性点接地方式的技术分析[A].中
性点接地技术研讨会[C],无锡,1999.
[4] 施围.电力系统过电压计算[M].西安:西安交通大学出版
社,1988.

作者简介:高亚栋(1968-),男,在读硕士,研究方向为电
力系统过电压的计算机仿真及保护。

版社,2000.

- [2] 陈伯超.新型可控饱和电抗器理论及应用[M].武汉:武汉
水利电力大学出版社,1999.
[3] 陈玉琴,陈志业.晶闸管投切电容式消弧线圈的设计与应用
研究[J].电力系统自动化,2001(14):38-40.
[4] 曾祥君,于永源.配电网谐振状态与单相接地状态的辨识[J].
电力系统自动化,1998,22(8):41-43.

作者简介:赵志丽(1980-),女,硕士研究生,目前从事配
网自动化和消弧线圈应用方面的研究。

[Z]. Germany: Siemens AG, 2000.

- [2] 揭秉信.大电流测量[M].北京:机械工业出版社,1987.
[3] 吴士普,刘沛,徐雁,等.光电电流互感器中的光供电技
术应用研究[J].高电压技术,2004,30(4):52-53.
[4] IEC60044-8. Electronic Current Transformers[S].

作者简介:毕然(1979-),男,辽宁人,硕士研究生,主
要研究新型互感器及检测方法。

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!