

文章编号:1001-1609(2004)01-0014-03

# 110 kV 长线供电系统的过电压研究

高亚栋<sup>1</sup>, 杜斌<sup>1</sup>, 张颖<sup>1</sup>, 施围<sup>1</sup>, 刘文泉<sup>2</sup>, 徐强<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 青海省电力试验研究所, 青海 西宁 810008)

## Study on the Overvoltage for 110 kV Power Supply System with a Long Line

GAO Ya-dong<sup>1</sup>, DU Bin<sup>1</sup>, ZHANG Ying<sup>1</sup>, SHI Wei<sup>1</sup>, LIU Wen-quan<sup>2</sup>, XU Qiang<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Qinghai Province Electric Power Testing and Research Institute, Xi'ning 810008, China)

**摘要:** 建立了一个 110 kV 长线供电系统模型, 用软件 EMTF 对该系统进行了工频过电压和操作过电压的计算。结果表明: 如线路长度在 200 km 左右, 系统的工频过电压和操作过电压均在允许范围之内, 除在线路上加装一定容量的并联电抗器外, 不需要采取特别的措施加以限制。

**关键词:** 长线供电系统; 工频过电压; 操作过电压

**中图分类号:** TM86

**文献标识码:** A

**Abstract:** The computation of power frequency overvoltage and switching overvoltage in a model of 110 kV transmission network with a long line by software EMTF is presented in this paper. The results show that the power frequency overvoltage and switching overvoltage are all within the limitation of design criteria if the line is around 200 km, so it needs no special means to limit these overvoltages except some shunt reactors added on the line.

**Key words:** power supply system with a long line; power frequency overvoltage; switching overvoltage

## 1 前言

在我国电力系统中, 110 kV 电压等级的送电距离一般规定在 50~150 km 之间, 如果大于 150 km, 不仅会导致线路末端电压达不到要求, 而且线路损耗增大。但是, 在我国的西北某些地区电力负荷不大, 而供电范围却很大, 在这种情况下, 如果仍然采用规定的供电距离, 毫无疑问需要建造多个变电站, 而每个变电站的供电负荷却很小。为了减少变电站的投资费用, 可能需要建设长线供电系统。这里所指的 110 kV 长线供电系统特指单条线路长度大于 150 km 的系统。

当线路末端的负荷阻抗等于线路的波阻抗  $Z_c$  时, 线路输送的功率为自然功率  $P_N = U_N^2 / Z_c$

当线路上输送的功率大于自然功率时, 若首端

电压恒定, 由于此时单位长度线路上电感消耗的无功功率大于电容所产生的无功功率, 线路上出现无功功率不足, 由首端至末端电压不断下降。当线路输送的功率小于自然功率时, 情况刚好相反, 线路出现无功过剩, 由首端至末端电压不断上升。同一电压等级下, 系统稳态运行电压高, 其内过电压也相应比较高。一般来说, 长距离线路的传输功率为 1.1~1.2 倍  $P_N$ <sup>[1]</sup>。通常线路波阻抗  $Z_c$  约为 400  $\Omega$ , 若采用 35 kV 电压等级送电, 其自然功率约为 3.71 MW, 考虑到 1.2 倍的裕度, 35 kV 长距离线路合适的传输功率为 4.45 MW。结合西北地区现实情况: 若供电负荷 5 MW 并且送电距离达到 200 km 时, 35 kV 电压等级无论在容量上还是送电距离上都不能满足要求; 若采用 330 kV 电压等级, 虽然供电负荷和供电距离都在允许范围之内, 但由于负荷太小, 无论从系统造价还是电网运行考虑都不经济。因此, 选择 110 kV 电压等级, 此时线路长度超过规定范围, 需要采用长线供电系统。

一般情况下, 对于 220 kV 及以下电压等级的系统, 把大气过电压限制到比内过电压还低是很不经济的, 因此, 220 kV 以下的系统其电气设备的绝缘水平主要由大气过电压决定, 具有正常绝缘水平的电气设备能够承受内过电压。换句话说, 220 kV 及以下系统的内过电压在绝缘配合中不起决定性作用, 不需要做特别的分析<sup>[2]</sup>。但是, 针对西北地区可能出现的 110 kV 长线系统, 由于线路长度超过了规定的范围, 其内过电压也可能超出规定的范围, 而且考虑到西北的高海拔因素, 可能需要采取专门限制内过电压的措施。因此, 分析计算 110 kV 长线系统的内过电压就具有现实的意义。

## 2 系统模型的建立

基于上述分析, 建立了一个 110 kV 长线供电系统,

系统额定电压  $U_N=121\text{ kV}$ , 模型见图 1。各参数(归算到 110 kV 侧)如下: ①首端电源:  $E_1=77.333 \angle 12.0^\circ \text{ kV}$ ,  $Z_{11}=2.21+j425.92 \Omega$ ,  $Z_{10}=8.84+j153.79 \Omega$ 。②末端等效电源:  $E_2=62.449 \angle 1.0^\circ \text{ kV}$ ,  $Z_{21}=12.01+j160.34 \Omega$ ,  $Z_{20}=85.01+j486.56 \Omega$ 。③110 kV 线路:  $Z_1=0.210+j0.403 \Omega/\text{km}$ ,  $C_1=0.0088 \mu\text{F}/\text{km}$ , 波阻抗  $Z_C=382.12 \Omega$ ,  $Z_0=0.360+j1.209 \Omega/\text{km}$ ,  $C_0=0.0056 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

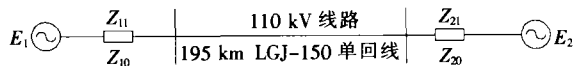


图 1 110 kV 长线供电系统模型

由于该线路过长, 电容效应引起的工频过电压比较高, 因此为限制工频过电压并使稳态运行时首末端电压能够满足要求, 在线路首末端各装了一组 3 Mvar 的电抗器(补偿度约为 76.1%), 其归算到 110 kV 侧电抗值为  $j4880.3 \Omega$ 。

在分析计算中, 采用电磁暂态通用计算程序 EMTP<sup>[3]</sup>作为研究工具。对于该长线供电系统, 线路采用分布参数模型<sup>[4]</sup>。同时为了分析不同长度线路的情况, 还计算了线路长度增加到 210 km(其余所有参数不变, 此时补偿度约为 70.6%)时的过电压情况。

首先对该系统进行工频稳态的潮流分布计算, 计算结果见表 1。可见, 该系统在稳态运行时满足线路首末端电压不超过 1.0 p.u., 也不低于 0.95 p.u. 的要求。这是进行工频过电压计算的首要条件。这里使用标么值, 系统稳态电压和工频过电压采用相电压的有效值  $1.0 \text{ p.u.}=121/\sqrt{3}=69.86 \text{ kV}$ , 操作过电压采用相电压的峰值  $1.0 \text{ p.u.}=121 \times \sqrt{2}/\sqrt{3}=98.80 \text{ kV}$ 。

表 1 系统稳态运行时工况

线路长度/km	线路首端电压/p.u.	线路末端电压/p.u.	线路三相传输功率/MW
195	0.993 0	0.955 6	4.72
210	0.999 9	0.959 6	4.74

### 3 工频过电压

工频过电压本身对电力系统中正常绝缘的电气设备一般没有危险<sup>[2]</sup>, 但它持续时间长, 影响保护电器的工作条件和保护效果, 影响操作过电压的幅值, 对于长线路其值还可能比较大, 必须予以重视。

系统的工频过电压计算结果见表 2。在工频过电压的计算中, 考虑了线路首末端的三相对称开断、单相接地三相对称开断、两相接地三相对称开断 3 类故障方式, 并且三相开关的开断点与故障点相同, 接地电阻取为  $1 \Omega$ 。从计算结果可以看到, 系统的最大工频过电压约在 1.2 p.u., 其值并不高, 符合工频过电压的有关规定。事实上, 该系统中长线路工频过电压不高主要是由于在线路两端加设了并联电

表 2 系统工频过电压 p.u.

线路长度/km	开断方式	开断点	首端过电压	末端过电压
195	三相对称开断	首端	0.917 7	0.913 0
		末端	1.172 2	1.178 1
	单相接地三相对称开断	首端	1.137 9	1.051 3
		末端	1.101 6	1.157 6
	两相接地三相对称开断	首端	1.170 9	1.083 7
		末端	0.905 5	1.047 7
210	三相对称开断	首端	0.926 0	0.919 4
		末端	1.194 8	1.203 0
	单相接地三相对称开断	首端	1.150 0	1.056 0
		末端	1.123 8	1.185 2
	两相接地三相对称开断	首端	1.182 2	1.088 5
		末端	0.926 6	1.078 3

抗器的缘故。另外还可以看到, 工频过电压随着线路长度的增加而有所增大。

## 4 操作过电压<sup>[5]</sup>

### 4.1 空载线路合闸过电压

线路合闸是电力系统中常见的操作。断路器合闸时, 三相之间一般总存在着一定程度的不同期性, 由于断路器的不同期动作, 使线路处于瞬间不对称运行状态。当一相或两相先合闸, 主要通过相间电容的耦合, 合闸相过渡过程电压使未合闸相孤立导线感应出同极性的电压波形。若该相合闸时, 电源电压极性与感应电压极性相反, 过电压就会升高。模拟试验表明断路器不同期合闸使得合闸过电压的幅值可以升高 10%~30%<sup>[2]</sup>。因此研究空载线路三相不同期合闸过电压, 对于确定系统的过电压水平具有重要的作用。

关于断路器三相合闸时间的分布, 国内外通常有两种意见: 一种认为开关合闸时间服从均匀分布, 另一种则认为服从正态分布。我国的现场测试表明, 开关的合闸时间比较接近均匀分布。正是由于三相合闸时间的随机性, 使得线路上的过电压值是一个随机变量。因此在研究三相不同期合闸过电压时需要用统计计算的方法。一般认为, 在工程计算中, 对 120 次计算样本进行统计分析可以得到足够的准确度<sup>[6]</sup>。结合上述因素, 三相不同期合闸时间样本采用了 120 次的均匀分布随机数, 并且断路器的三相不同期性考虑在 5 ms 以内。

笔者计算了空载长线三相不同期合闸过电压, 其统计计算结果见表 3。需要指出, 在使用 EMTP 仿真计算合闸过电压前, 需要将合闸处的母线电压调为额定相电压(即为 69.86 kV), 这一点非常重要。

由计算结果可以看出, 线路末端相对地以及相间合闸过电压的幅值均比首端高, 尤其是相对地过电压高出约有 30%。98% 概率的相对地过电压 < 3.0 p.u., 相

表3 空载长线三相不同期合闸统计过电压

线路长度/km	统计过电压	最大值/p.u.	平均值/p.u.	标准偏差	98%概率		
195	相对地	首端	2.280 2	1.739 5	0.180 6	0.092 5	
		末端	2.607 6	1.892 9	0.224 0	2.419 9	
	相间	首端	3.476 2	2.879 8	0.352 2	3.416 1	
		末端	3.587 2	2.978 5	0.395 6	3.562 9	
	210	相对地	首端	2.254 0	1.754 6	0.188 8	2.100 8
			末端	2.591 7	1.916 4	0.232 9	2.435 7
相间		首端	3.524 7	2.918 1	0.363 3	3.514 6	
		末端	3.703 0	3.030 9	0.407 2	3.654 3	

间过电压 $<4.0$  p.u.,但均在允许的范围之内,不需要采取额外措施加以限制。随着线路长度的增加,三相不同期合闸过电压增大,所以如果实际线路需要更长的话,空载线路三相不同期合闸过电压可能超过允许范围,这一点要加以注意。

#### 4.2 线路分闸过电压

现在我国生产的各类断路器,其灭弧性能大多比较好,能够确保在分闸操作中电弧基本不重燃,所以在分析分闸过电压时对于电弧的重燃不予考虑。但是在分闸过程中,电弧的熄灭也具有很大的随机性。工频熄弧理论指出,在通过断路器的工频电流过零时,断路器触头间熄弧,达到真正的开断。因此,随着断路器分闸时间的改变,各相的工频电流过零时间也必定随之改变,也就是说断路器各相触头的熄弧时间也随之改变。所以,断路器分闸时间的不同会造成三相开关实际开断时间的不同。

通过在一个周期内递增 $\Delta t$ 改变分闸的时间,对熄弧的随机性进行模拟。仿真模拟中发现,在一个周期内,尽管设定的断路器分闸时间不断变化,但是断路器触头间的熄弧时间只有几种确定的组合,并不是一个随机分闸时间对应一次随机熄弧,而是某一范围内的所有分闸时间对应一次熄弧,而且熄弧时间组合为确定的几种。也就是说,尽管对于给定系统的分闸操作,分闸过电压的值并不唯一,但也仅有数个确定的值。因此对分闸过电压的研究不需要进行统计分析计算,这和分析三相不同期合闸过电压有很大的区别。

##### (1) 正常分闸线路过电压

线路末端正常分闸时线路过电压的计算结果见表4。

##### (2) 切除线路故障过电压

表4 正常分闸线路过电压

线路长度/ km	首端过电压/p.u.		末端过电压/p.u.	
	相对地	相间	相对地	相间
195	1.292	2.217	1.348	2.246
210	1.328	2.312	1.374	2.339

线路末端发生单相接地故障时分闸过电压(接地电阻取 $1\Omega$ )的计算结果见表5。

表5 切除线路故障过电压

线路长度/ km	首端过电压/p.u.		末端过电压/p.u.	
	相对地	相间	相对地	相间
195	1.340	2.306	1.463	2.342
210	1.338	2.340	1.440	2.381

由以上两类分闸过电压计算结果可以看到,线路的分闸过电压无论是相对地过电压还是相间过电压都比空载线路三相不同期合闸过电压小得多。也就是说合空载线路过电压是操作过电压中的主要矛盾(不考虑重合闸),这一点在长线供电系统仍然成立,只要合空载长线过电压不超过允许范围,分闸过电压一定可以接受,但其前提是断路器必须保证电弧不重燃。

## 5 结语

(1)在 $110$  kV等级,如果供电范围比较大而供电的负荷却很小,为了节约变电站的建设,可以考虑采用长线供电系统;当线路长度为 $200$  km左右时,工频过电压以及操作过电压都能满足要求,除在线路上加装一定容量的并联电抗器外,不需要采取特别的措施限制过电压。

(2)在长线供电系统中,随着线路长度的增加,工频过电压、三相不同期合闸过电压都会增大,这一点在需要继续增加线路长度时必须予以重视。

(3)在断路器保证电弧不重燃的前提下,分闸过电压的幅值相对于空载线路三相不同期合闸过电压来说要小得多,合空载长线过电压依旧是长线供电系统操作过电压的主要矛盾。

## 参考文献:

- [1] 王锡凡. 电力工程基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
- [2] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [3] 施 围. 电力系统过电压计算[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [4] H W Dommel. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. (李永庄, 林集明, 曾昭华译), 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [5] ESMOL Subcommittee. Maximum Switching Overvoltages on Systems of 115 kV and Above[A]. IEEE 8th International Conference on Transmission & Distribution Construction, Operation & Live-line Maintenance Proceedings[C], Orlando, Florida, U.S., 1998.
- [6] 王秉钧, 王昌长, 谈克雄. 数理统计在过电压技术中的应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.

作者简介:高亚栋(1978-),男,在读硕士,研究方向为电力系统的计算机仿真及过电压保护。