

# 特高压交流单相接地故障过电压计算及限制方法

李 杨<sup>1</sup>, 计荣荣<sup>2</sup>, 沈 扬<sup>3</sup>, 周 浩<sup>1</sup>, 易 强<sup>4</sup>, 孙 可<sup>5</sup>

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江省电力公司检修分公司, 浙江 杭州 311232;

3. 浙江省电力设计院, 浙江 杭州 310012; 4. 南京大全电气研究院有限公司, 江苏 南京 211100;

5. 浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007)

**摘要:** 基于系统电源阻抗特性对单相接地故障过电压的影响规律, 提出了综合考虑该过电压的各影响因素后求取单相接地故障过电压最大值的方法, 利用该方法可以在较少的仿真计算量下准确地求出单相接地故障过电压最大值。对不同长度线路的单相接地故障过电压的限制问题进行了探讨, 并从综合考虑工频过电压和操作过电压的角度提出了沿线高抗补偿容量的最优分配方案, 最后对单回线路与双回线路的单相接地故障过电压进行了比较, 提出了相应的过电压限制措施。结果表明线路长度小于 500 km 时, 采用线路两端设置高抗和金属氧化物避雷器(MOA)的措施, 即可有效限制该过电压; 当长度超过 600 km 时, 需在长线路中间进行分段落点, 设置 MOA 及合适的高抗补偿容量来限制该过电压, 分段距离宜控制在 400 km 左右; 相同长度下, 单回线路的单相接地故障过电压较双回线路严重。

**关键词:** 特高压输电; 交流特高压; 过电压; 接地; 故障分析; 阻抗特性; 线路分段; 计算

**中图分类号:** TM 77

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.08.025

## 0 引言

单相接地故障过电压是线路单相接地时在健全相上出现的瞬态过电压, 它是操作过电压的一种。对于 500 kV 系统, 操作过电压的限制水平较高, 达到 2.0 p.u., 一般不重视该种过电压; 但是对于特高压系统, 操作过电压的限制水平降至 1.6~1.7 p.u., 限值下降, 但标准更高、更严, 可能会对特高压系统安全构成威胁, 因此研究接地故障过电压具有重要意义<sup>[1-11]</sup>, 应给予足够的重视。

在对单相接地故障过电压的计算分析中, 文献[12-14]主要考虑负荷、接地位置和补偿度等因素对该过电压的影响, 其中考虑负荷因素时通常以最大运行方式和最小运行方式下的负荷进行计算。但是实际上负荷对单相接地故障过电压影响并不大, 而对该过电压有重要影响的是系统等效电源阻抗特性, 尤其是零正序阻抗比, 其对该过电压的影响并不亚于接地位置和补偿度对该过电压的影响, 但在已有文献中均未考虑电源阻抗特性对该过电压的影响。若同时考虑电源阻抗特性、接地位置和补偿度等因素的变化对单相接地故障过电压的影响, 求取该过电压的最大值将是一个含有多维变量的计算过程, 其计算量非常大, 目前尚未有文献在综合考虑上述 3 个因素后对单相接地故障过电压进行研究。另外, 对于长距离特高压交流分段线路的高抗补

偿容量的分配问题, 已有文献通常根据工频过电压的限制要求确定沿线高抗补偿容量分配<sup>[2,15]</sup>, 忽略了沿线的操作过电压可能超过限制水平进而危及系统绝缘和设备安全的问题。因此, 对于沿线高抗容量的分配问题, 需从综合考虑工频过电压和操作过电压的角度进行研究。

本文借助 PSCAD/EMTDC 软件仿真, 在大量模拟仿真计算的基础上, 较为系统深入地研究了单相接地故障过电压。参考晋东南—南阳—荆门特高压单回示范线路参数, 以特高压交流双端电源输电线路为模型, 研究了单相接地故障过电压的几种主要影响因素, 并重点研究了系统等效电源阻抗特性对该过电压的影响问题, 在得出了系统电源阻抗特性对该过电压的影响规律的基础之上, 提出了综合考虑各影响因素后求取特高压线路单相接地故障过电压最大值的方法, 并将结论推广到一般的特高压输电线路。另外, 对不同长度线路的单相接地故障过电压的限制问题进行了探讨, 并从综合考虑工频过电压和操作过电压的角度对高抗补偿容量的最优分配进行了研究, 提出了沿线高抗补偿容量的最优分配方案。最后对单回、双回线路单相接地故障过电压进行了比较, 可为特高压输电工程实践提供参考。

## 1 模型构建

特高压交流系统双端电源输电模型如图 1 所示, 输电线路长 600 km, 线路两端布置金属氧化物避雷器(MOA)和高抗。导线型号采用钢芯铝绞线 8×LGJ-500/35, 分裂间距为 400 mm, 塔形采用猫头塔<sup>[2,11]</sup>。

收稿日期: 2013-02-02; 修回日期: 2013-12-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2011-CB209405)

Project supported by the Major State Basic Research Development Program of China(973 Program)(2011CB209405)

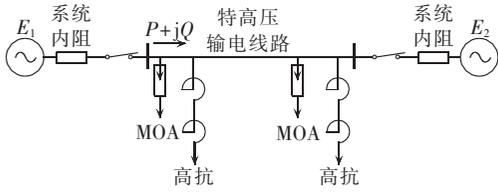


图 1 特高压交流输电线路示意图

Fig.1 Schematic diagram of UHVAC transmission line

采用中国电科院提供的 1000 kV 线路型 MOA 参数,如表 1 所示。表中  $I_m$ 、 $I_n$  分别为操作冲击电流和雷电冲击电流的幅值。

表 1 避雷器参数

Tab.1 Parameters of MOA

额定电压/kV	持续运行电压/kV	操作冲击残压峰值/kV		雷电冲击残压峰值/kV	
		$I_m=1\text{ kA}$	$I_m=2\text{ kA}$	$I_n=10\text{ kA}$	$I_n=20\text{ kA}$
828	636	1 430	1 460	1 553	1 620

## 2 过电压影响因素分析

单相接地故障过电压是线路在发生单相接地故障(故障相两侧断路器还未断开)时,在健全相上产生的瞬态过电压。虽然发生过程简单,但影响因素较为复杂,这里首先分析该过电压的基本影响因素,以选择合适的仿真参数,从而为下文寻找最严重过电压条件建立基础<sup>[2,12-13]</sup>。下文中过电压均为标么值。

### 2.1 接地故障因素影响分析

单相接地故障过电压是由接地故障产生的,接地故障因素主要包括接地位置和接地处的电阻值  $R_g$ ,下面分别就这些因素对过电压的影响程度进行分析。当接地故障因素发生变化时,单相接地故障过电压计算结果如表 2 所示。

表 2 不同接地因素下的单相接地故障过电压计算结果

Tab.2 Calculated single-phase grounding overvoltage for different grounding conditions

$R_g/\Omega$	单相接地故障过电压水平					
	$d=100$	$d=200$	$d=300$	$d=400$	$d=500$	$d=600$
0.1	1.522	1.532	1.496	1.501	1.557	1.497
1.0	1.509	1.521	1.487	1.496	1.531	1.485
5.0	1.491	1.514	1.477	1.489	1.509	1.461
10.0	1.458	1.491	1.463	1.481	1.489	1.459
20.0	1.411	1.455	1.439	1.473	1.441	1.449
50.0	1.271	1.303	1.276	1.334	1.257	1.332

注: $d$ 为接地点与首端电源间的距离(单位 km)。

由计算结果得出如下结论。

**a.** 接地点相同时,接地处电阻值  $R_g$  越小,过电压幅值则越大,这是因为接地电阻越小,接地暂态过程越激烈,过电压也就越高。从严考虑,以下研究中接地处电阻采用 0.1  $\Omega$ 。

**b.** 接地电阻相同时,不同接地点下的过电压幅值有差异,这是由于在不同位置出现单相接地时,从

接地点向线路看进去的阻抗分布存在差异。因此,在研究单相接地故障过电压时,应考虑接地位置的变化对该过电压的影响。

### 2.2 输送功率影响分析

在出现接地故障之前,线路处于运行状态,因此,线路上输送功率的大小对该过电压可能会产生影响。下面分析输送功率  $P$  对单相接地故障过电压的影响程度,计算时保证不同功率下两端母线电压一致,结果如表 3 所示。

表 3 不同输送功率下单相接地故障过电压计算结果

Tab.3 Calculated single-phase grounding overvoltage for different transmission powers

$P/\text{MW}$	单相接地故障过电压水平					
	$d=100$	$d=200$	$d=300$	$d=400$	$d=500$	$d=600$
0	1.556	1.555	1.569	1.533	1.580	1.614
1 000	1.563	1.560	1.573	1.536	1.569	1.611
2 000	1.555	1.554	1.563	1.524	1.572	1.613
3 000	1.550	1.552	1.558	1.519	1.570	1.610

注: $d$ 的单位为 km。

由表 3 可知,随着线路输送功率的变化,相同接地点下线路的过电压改变较小,其最大相差不超过 0.02 p.u.,可忽略。鉴于此,以下研究中采用输送功率为 0 的空载状态。

### 2.3 线路杆塔参数影响分析

分析不同导线型号以及杆塔参数对单相接地故障过电压的影响程度,计算时保证模型其他条件一致,结果见表 4、5,表中的过电压均为该条件下整条线路上不同位置发生接地故障时的最大过电压。

表 4 不同导线型号下单相接地故障过电压计算结果

Tab.4 Calculated single-phase grounding overvoltage for different conductor types

常用导线规格	外径/mm	直流电阻/ $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	过电压水平
LGJ-400/35	26.82	0.073 89	1.531
LGJ-400/50	27.63	0.072 32	1.531
LGJ-500/35	30.00	0.058 12	1.533
LGJ-500/45	30.00	0.059 12	1.537
LGJ-630/45	33.60	0.046 33	1.533

表 5 不同杆塔参数下单相接地故障过电压计算结果

Tab.5 Calculated single-phase grounding overvoltage for different tower parameters

杆塔变化	呼高/m	相邻两相水平间距/m	中、边相垂直间距/m	过电压水平
常用猫头塔	57	15.7	19.6	1.543
呼高减少	37	15.7	19.6	1.569
呼高增加	77	15.7	19.6	1.557
三相间距减少	57	5.7	9.6	1.573
三相间距增加	57	25.7	29.6	1.586

计算结果表明,随着导线型号的变化,单相接地故障过电压幅值变化很小,最大相差不超过 0.006 p.u.,可忽略;当杆塔参数大幅度变化后,过电压幅值改变

也较小,最大相差不超过 0.04 p.u.,对计算结果不会产生本质影响。因此,以下研究中导线型号采用 LGJ-500/35,线路杆塔采用特高压常用猫头塔型。

### 2.4 高抗补偿影响分析

分析不同高抗补偿度对单相故障接地故障过电压的影响程度,计算时保证模型其他条件一致,结果如表 6 所示。

表 6 不同高抗补偿度下单相接地故障过电压计算结果

Tab.6 Calculated single-phase grounding overvoltage for different shunt reactor compensation degrees

补偿度	过电压水平	补偿度	过电压水平
0	1.697	50%	1.563
10%	1.595	70%	1.562
30%	1.568	90%	1.557

计算结果表明,高抗补偿对单相接地操作过电压有一定的抑制作用,补偿度越高,单相接地故障过电压越低。当补偿度小于 30%时,过电压随着补偿度的升高明显降低;当补偿度大于 30%时,增加补偿度对过电压的影响较小,但是过电压仍有一定程度的降低。目前,特高压线路高抗补偿度一般在 80%~90%之间<sup>[2]</sup>,从严考虑,以下研究中线路高抗补偿采用 80%的高抗补偿度。

## 3 过电压极大时的电源阻抗分析

### 3.1 电源阻抗范围界定

电源阻抗对单相接地故障过电压影响较大,因此必须界定特高压等效电源阻抗的范围。

目前,我国特高压交流电网处于建设初期,通过在 2 个超高压电网基础上架设特高压线路来进行点对点输电是其主要模式。文献[15]详细研究了该种情况下电源阻抗的等效问题,在综合考虑了超高压电网的等效情况、特高压变压器后,得出等效后特高压系统电源的正序阻抗  $X_1$  变化范围为 40~180  $\Omega$ ,零正序阻抗比  $X_0/X_1$  变化范围为 0.4~1.4<sup>[15]</sup>。

### 3.2 过电压极大值的电源阻抗寻找

针对图 1 所示模型,在上文得出的电源阻抗范围内,研究电源阻抗对单相接地故障过电压的影响情况,寻找过电压最大时的电源阻抗特性,得到求取单相接地故障过电压最大值的方法。

#### 3.2.1 单相接地故障过电压与电源零正序阻抗比的关系

保持端电源  $E_1$  阻抗不变,只改变端电源  $E_2$  的阻抗,计算结果如表 7 所示。计算时在沿线等距设置 20 个接地点,求取各个接地点故障时的沿线最大过电压值,20 个沿线最大过电压值中的最大值即为该种电源阻抗情形下的单相接地故障过电压值。

由表 7 可知,电源阻抗的变化对单相接地故障

表 7 端电源  $E_2$  阻抗发生变化时单相接地故障过电压计算结果

Tab.7 Calculated single-phase grounding overvoltage when impedance of source  $E_2$  changes

$X_1/\Omega$	过电压水平		
	$X_0/X_1=0.4$	$X_0/X_1=1.0$	$X_0/X_1=1.4$
40	1.644	1.701	1.728
60	1.574	1.613	1.648
100	1.531	1.580	1.638
140	1.543	1.615	1.635
180	1.568	1.626	1.664

过电压影响较大,其中阻抗比  $X_0/X_1$  越大,该过电压就越大。另外,在保持端电源  $E_2$  的阻抗不变、仅改变端电源  $E_1$  的阻抗  $X_1$  的情况下进行计算,也得到了类似规律。因此,可以认为,当  $X_0/X_1$  达到最大值 1.4 时,单相接地故障过电压达到最大,原因如下。

单相接地故障过电压是线路产生接地故障后,在单相接地工频过电压的基础上产生的,其与单相接地工频过电压值密切相关。从工频过电压的研究结果可知,发生单相接地时,健全相电压的升高系数  $K$  与系统的  $X_0/X_1$ (从接地点看进去整个系统的零正序阻抗比值)有很大关系,如式(1)所示,而系统的比值  $X_0/X_1$  与电源阻抗又有密切联系。显然电源阻抗的  $X_0/X_1$  越大,系统的  $X_0/X_1$  就越大,故健全相电压的升高系数也越大,如图 2 所示,则在此基础上产生的单相接地时的操作过电压也就越大<sup>[2,18-19]</sup>。

$$K = \sqrt{3} \frac{\sqrt{(X_0/X_1)^2 + X_0/X_1 + 1}}{X_0/X_1 + 2} \quad (1)$$

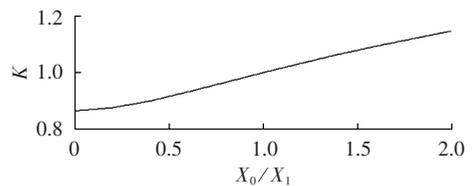


图 2 升高系数  $K$  与系统  $X_0/X_1$  比值的曲线  
Fig.2 Relation between lifting coefficient and  $X_0/X_1$  of system

#### 3.2.2 单相接地故障过电压与电源正序阻抗的关系

在保持两端电源的阻抗比  $X_0/X_1=1.4$  的情况下,分别改变两端电源  $E_1$ 、 $E_2$  的正序阻抗  $X_{1E1}$ 、 $X_{1E2}$ ,计算单相接地故障过电压,结果如表 8 所示,表中的过电压值均为该条件下整条线路上不同位置发生接地故障时的最大过电压值。

由表 8 可知,随着电源正序阻抗从 40  $\Omega$  到 180  $\Omega$  逐渐增加,单相接地故障过电压幅值均呈现先减后增的 V 型趋势,因而在阻抗范围的边界处,出现了过电压的极大值,原因分析如下。

一方面,单相接地故障过电压随系统的  $X_0/X_1$  比值的增加而增大,如图 2 所示,而系统的  $X_0/X_1$  与电源的  $X_0/X_1$  以及线路的  $X_0/X_1$  有关。用  $X_{0\phi}$  表示

表 8 不同电源正序阻抗下单相接地故障过电压的计算结果

Tab.8 Calculated single-phase grounding overvoltage for different source positive impedances

$X_{1E1}$	单相接地故障过电压水平				
	$X_{1E2}=40$	$X_{1E2}=60$	$X_{1E2}=100$	$X_{1E2}=140$	$X_{1E2}=180$
40	1.728	1.648	1.638	1.635	1.664
60	1.647	1.585	1.579	1.554	1.567
100	1.639	1.580	1.516	1.527	1.530
140	1.635	1.553	1.529	1.520	1.540
180	1.662	1.564	1.530	1.542	1.576

注： $X_{1E1}$ 、 $X_{1E2}$  单位为  $\Omega$ 。

电源零序阻抗,  $X_{1e}$  表示电源正序阻抗,  $a$  表示电源零正序阻抗比, 用  $X_{0l}$  表示输电线路零序阻抗,  $X_{1l}$  表示输电线路正序阻抗,  $b$  表示输电线路零正序阻抗比, 且  $a < b$ , 则从故障点看进去整个系统的零正序阻抗比  $X_{0s}/X_{1s}$  为:

$$\frac{X_{0s}}{X_{1s}} = \frac{X_{0e} + X_{0l}}{X_{1e} + X_{1l}} = \frac{aX_{1e} + bX_{1l}}{X_{1e} + X_{1l}} = a + (b-a) \frac{X_{1l}}{X_{1e} + X_{1l}} \quad (2)$$

由于特高压线路的零正序阻抗比  $b$  在 2.6 左右, 故保持电源零正序阻抗比不变的情况下, 由式 (2) 可知, 随着  $X_{0e}$ 、 $X_{1e}$  的成比例增加,  $X_{0s}/X_{1s}$  反而减小, 由此过电压幅值减小。

另一方面, 从操作过电压角度分析,  $X_1$  的存在相当于等价延长了线路长度, 而线路越长过电压就越大, 因此,  $X_1$  越大单相接地故障过电压也就越大。在这 2 种因素的共同作用下, 当  $X_1$  较小时,  $X_0/X_1$  起主导作用, 而  $X_1$  较大时,  $X_1$  的影响则较为突出。因此, 随着  $X_{1e}$  的增加, 过电压幅值呈现了先减小后增大的 V 型趋势。

### 3.2.3 求取单相接地故障过电压最大值的方法总结

3.2.1 与 3.2.2 节的结论是针对长度为 600 km 的线路得出的结果, 进一步计算表明, 当线路长度变化时, 电源阻抗特性对单相接地故障过电压的影响呈现相同的规律, 即电源阻抗的零正序阻抗比越大, 过电压越大; 当电源阻抗的零正序比保持不变的情形下, 过电压随着电源正序阻抗的增加呈现 V 型变化趋势。因此, 对于一般的特高压线路, 单相接地故障过电压的最大幅值出现在两端电源的零正序阻抗比取最大值、正序阻抗取阻抗边界值时的情形。

电源  $E_1$ 、 $E_2$  的正序阻抗  $X_{1E1}$ 、 $X_{1E2}$  取特高压等效电源的正序阻抗  $X_1$  的上、下限  $\bar{X}_1$ 、 $\underline{X}_1$  时, 有 4 种情况:  $X_{1E1} = \bar{X}_1, X_{1E2} = \bar{X}_1$ ;  $X_{1E1} = \bar{X}_1, X_{1E2} = \underline{X}_1$ ;  $X_{1E1} = \underline{X}_1, X_{1E2} = \underline{X}_1$ ;  $X_{1E1} = \underline{X}_1, X_{1E2} = \bar{X}_1$ 。考虑接地因素影响, 求取一定长度特高压线路单相接地故障过电压最大值步骤如下。

a. 参数选取:  $R_g = 0.1 \Omega$ , 线路补偿度取 80%, 输送功率取 0; 电源  $E_1$ 、 $E_2$  的零正序阻抗比取最大值。

b. 设沿线等间距分布  $n$  个单相接地点, 在上述第 1 种  $X_{1E1}$ 、 $X_{1E2}$  取值情况下, 分别求出各接地点故障时的沿线最大过电压值, 从这  $n$  个最大过电压值中取最大者作为该电源阻抗取值情况下的单相接地故障过电压值, 记为  $U_{1max}$ 。

c. 在上述第 2—4 种电源阻抗取值情况下, 重复步骤 b, 求出  $U_{2max}$ 、 $U_{3max}$ 、 $U_{4max}$ 。

d. 令  $U_{max} = \max(U_{1max}, U_{2max}, U_{3max}, U_{4max})$ , 则  $U_{max}$  即为所求一定长度的特高压线路单相接地故障过电压最大值。

### 3.2.4 本文的计算方法与常规计算方法的比较

目前已有文献在求取单相接地故障过电压时主要考虑负荷、接地位置和补偿度等因素对该过电压的影响, 综合 2 节以及 3.2.1 至 3.2.3 节可知, 负荷因素对单相接地故障过电压的影响不大, 而对其起重要作用的是系统等效电源阻抗特性、接地因素和补偿度等。

表 9 示出了线路长度发生变化时, 利用 3.2.3 节所示的计算步骤以及常规的计算方法得出最大单相接地操作过电压幅值。其中, 线路两端母线电压为 1100 kV (偏严考虑), 即线路两端各采用 1 组 MOA 和高抗补偿, 线路采用 80% 高抗补偿<sup>[2-4]</sup>。

表 9 不同线路长度下的单相接地故障过电压幅值

Tab.9 Amplitude of single-phase grounding overvoltage for different line lengths

线路长度/km	单相接地故障过电压幅值	
	常规方法	本文方法
100	1.269	1.379
200	1.305	1.418
300	1.384	1.498
400	1.419	1.542
500	1.503	1.633
600	1.599	1.728

由表 9 可知, 随着线路长度的逐渐增加, 单相接地故障过电压幅值明显上升; 且由于充分考虑了电源阻抗特性对过电压的影响, 采用 3.2.3 节中的计算方法求出的过电压值要比常规的过电压计算方法求出的过电压值高 0.1 p.u. 左右。

相比于常规的计算方法, 考虑电源阻抗特性的影响后, 由于两端电源阻抗特性取值的多样性, 计算量将非常大。但是按照 3.2.3 节中的计算方法, 只需选取 4 种运行方式即可计算出一定长度线路的单相接地故障过电压值, 大幅减少了求取过电压的计算量, 同时由于考虑了电源阻抗特性这一重要的影响因素, 使得过电压值较常规计算方法更加精确。

## 4 长线路单相接地故障过电压的限制

由表 9 可知, 采用 3.2.3 节中的方法, 当线路长度为 500 km 时, 过电压为 1.633 p.u., 满足限制要求;

而线路长度为 600 km 时,过电压则大于 1.7 p.u.,超出了规程要求。因此,鉴于所选条件的严苛性,可以认为,当线路长度不超过 500 km 时,单相接地故障过电压能满足规程限制要求,而超过 600 km 时,则可能难以被控制在允许范围内。本节将对较长线路的单相接地故障过电压的控制进行具体分析。

对于较长的特高压线路,限制其单相接地故障过电压通常依靠 MOA 和高抗补偿措施,下面分别进行分析<sup>[20-22]</sup>。

#### 4.1 MOA 的限制

选取 800 km 的长线路,线路两端布置 80% 的高抗补偿<sup>[2]</sup>,下面分析仅采用多组 MOA 的限制效果(多组 MOA 平均分布于线路中)。

##### 4.1.1 偶数组 MOA 对过电压的限制

沿线分别布置 2 组、4 组和 6 组 MOA。布置 2 组 MOA 即线路两端分别自带 1 组 MOA;布置 4 组 MOA 时,另外 2 组 MOA 分别置于线路 1/3 和 2/3 处;布置 6 组 MOA 时,另外 4 组 MOA 分别置于线路 1/5、2/5、3/5 和 4/5 处。当故障点的位置发生变化时,沿线的过电压幅值如图 3 所示。

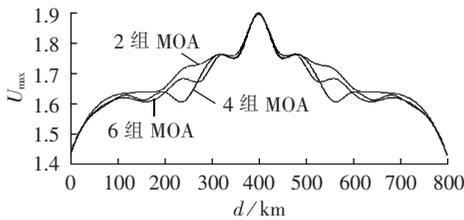


图 3 偶数组 MOA 限制下的单相接地故障过电压幅值  
Fig.3 Amplitude of single-phase grounding overvoltage for even MOA sets

比较图 3 中 3 种情况下的过电压幅值可知:沿线最大过电压幅值与接地点的位置密切相关,同时只有在设置 MOA 的地方,该处接地过电压才得到一定的限制;由于线路中点处未装设 MOA,因此线路中间的接地过电压未能得到有效的限制,当线路中间出现单相接地时,其过电压幅值最大,3 种情况下均超过 1.85 p.u.,且差异不大。

##### 4.1.2 奇数组 MOA 对过电压的限制

沿线分别布置 3 组、5 组和 7 组 MOA。布置 2 组 MOA 即线路两端分别自带 1 组 MOA;布置 3 组 MOA 时,另外 1 组 MOA 置于线路中间;布置 5 组 MOA 时,另外 3 组 MOA 分别置于 1/4、2/4 和 3/4 处;布置 7 组 MOA 时,另外 5 组 MOA 分别置于线路 1/6、2/6、3/6、4/6 和 5/6 处。当故障点的位置发生变化时,沿线的过电压幅值见图 4。

由图 4 知,在沿线布置奇数组 MOA 时,由于在线路中间加装了 1 组 MOA,过电压幅值得到了明显的限制。但在 3 组、5 组和 7 组 MOA 限制下,线路的过

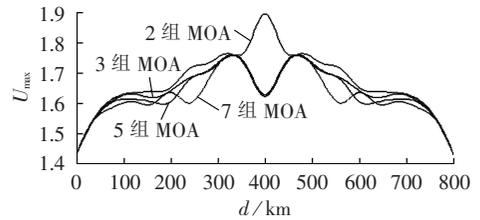


图 4 奇数组 MOA 限制下的单相接地故障过电压幅值  
Fig.4 Amplitude of single-phase grounding overvoltage for odd MOA sets

电压幅值分别达到了 1.745 p.u.、1.744 p.u.、1.740 p.u.,仍不满足限制要求。可见,随着 MOA 组数的增加,过电压幅值有所下降但不显著。

##### 4.1.3 小结

综合图 3、图 4 和 4.1.2 节可知,只有在设置 MOA 的地方,该处接地过电压才得到较好的限制,MOA 只对其装设处附近(大概 80 km 内)出现接地过电压时具有一定的限制作用,对更远处的接地过电压限制效果不明显。随着 MOA 数量增加,过电压幅值减小得越来越缓慢,当线路较长时,布置更多的 MOA 不仅不能起到很好的限制效果,反而会增加经济上的耗费。另外对比图 4、图 5 可知,针对长线路,在线路中间加装 MOA 可显著降低该过电压幅值。

综上,对于采取双端补偿方式的特高压长线路,在线路中间布置 1 组 MOA 能够显著降低单相接地故障过电压,但是仅采用 MOA 来限制单相接地故障过电压具有一定的局限性。

#### 4.2 高抗布置方式的限制

高抗补偿对单相接地故障过电压有一定的抑制作用,一般而言,补偿度越高,限制效果就越好。下面分析相同补偿度下高抗的布置方式对该过电压的限制效果。

选取 800 km 的长线路,线路两端分别布置 1 组 MOA,同时保持高抗补偿度为 80% 不变,改变补偿点数目(各点补偿容量平均分配),分析不同数量布置点对单相接地故障过电压的限制影响,结果如图 5 所示。

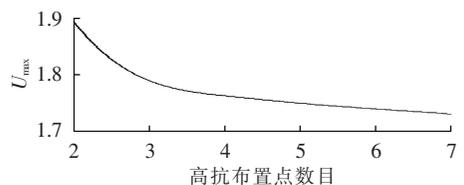


图 5 多点平均布置高抗补偿下的单相接地故障过电压

Fig.5 Single-phase grounding overvoltage for equally distributed shunt reactor compensation

由图 5 可以发现,相同高抗补偿度下,补偿布置点越多,对过电压的限制越有利。其中,3 点分布(即线路中间也有补偿)的限制效果明显好于 2 点

分布(即线路两端补偿);而当分布点更多后,过电压的限制效果逐渐趋向饱和。因此,通过在线路中间设置高抗来限制较长线路的过电压是较为有效的方法。同时也发现,3点补偿下 800 km 线路的最大过电压仍大于规程允许值 1.7 p.u。

那么,3点补偿下,高抗容量的不同分配方式对该过电压会有什么样的影响?仍选择 800 km 线路进行分析,同样保持高抗补偿度为 80% 不变,采用 3 点补偿,但线路首末端与中间补偿容量分配不一致,计算结果见表 10。表中补偿容量比例(线路首端、中间、末端高抗容量之比)1:1:1 即表示 3 点平均补偿。

表 10 不同补偿容量分配时的单相接地故障过电压

Tab.10 Single-phase grounding overvoltage for unequally distributed compensating capacity

补偿容量比例	单相接地故障过电压水平
1:0:1	1.907
2:1:2	1.827
1:1:1	1.783
1:2:1	1.718
1:4:1	1.696

由表 10 可知,线路中间高抗容量比例越大,对过电压的限制效果就越好,这是因为线路中间电压往往较高且过电压较难控制。此外,由于线路较长,该处电压变化更为剧烈,易产生高幅值的过电压。通过在线路中间加装高抗,箝制了该处的电压波动,同时也改善了全线的过电压分布,该处补偿度越高,箝制作用越明显。因此,针对长线路,在线路中间加装高补偿度的高抗有利于该过电压的限制。

然而,进一步计算表明,对于较长特高压线路,从工频过电压限制的角度出发,在线路中间不宜加装过量高抗。以长度为 800 km 的特高压线路为例,线路两端产生单相接地甩负荷工频过电压时,工频过电压最大值如表 11 所示。

表 11 不同补偿容量分配时的工频过电压

Tab.11 Power frequency overvoltage for unequally distributed shunt reactor compensating capacity

补偿容量比例	单相接地故障过电压水平
2:1:2	1.371
1:1:1	1.377
1:2:1	1.380
1:4:1	1.435

综合表 10、11 可知,对于 3 点补偿的较长特高压线路,由于甩负荷工频过电压最大值通常出现在靠近线路两端的部分,因此随着线路中间的补偿容量增加,单相接地甩负荷工频过电压会增加,且线路中间加装较多高抗时,工频过电压可能超过限制要求;而对于长线路单相接地故障过电压,沿线最大

值通常出现在线路中间部分,因此随着线路中间的补偿容量增加,单相接地故障过电压会减小。因此,针对长线路,从同时限制工频过电压和单相接地故障过电压的角度出发,应在线路中间加装适量高抗,由表 10、11 可知,线路中间的高抗补偿容量在 50% 左右时对两者的限制均较为有利。

目前,常见特高压 3 点补偿的分段线路中间的高抗补偿容量在 50% 左右<sup>[2]</sup>,800 km 的长线路过电压可能难以满足规程的限制要求,因此,还应采取进一步措施。

#### 4.3 MOA 和高抗的联合限制

由 4.1 节和 4.2 节可知,对于特高压长线路,当线路中间布置了 MOA 或者高抗之后,过电压值显著降低,但是仅采用沿线布置 MOA 或者高抗的措施无法满足规程对单相接地故障过电压的限制要求。对于采用 3 点限制模式(即线路首端、中间、末端均设置有 MOA 和高抗)的长线路,本节对 MOA 和高抗联合限制该过电压的效果进行研究。

选取 800 km 的长线路,采用 3 点限制模式,过电压计算结果如表 12 所示。

表 12 MOA 和高抗共同作用下的单相接地故障过电压

Tab.12 Single-phase grounding overvoltage for compensation with both MOA and shunt reactor

补偿容量比例	单相接地故障过电压水平
2:1:2	1.704
1:1:1	1.642
1:2:1	1.604

由表 12 可知,在 3 点限制模式下,800 km 的长线路的单相接地故障过电压得到了有效限制,满足规程要求。因此,可以推论,针对 500~800 km 的长线路,在线路中间进行分段落点(分段长度在 400 km 左右),设置 MOA 及合适的高抗补偿时,就能较好地抑制单相接地故障过电压。

事实上,鉴于长线路的单相接地故障过电压难以限制,我国已建成的晋东南—南阳—荆门特高压示范线路以及淮—皖—浙—沪特高压双回线路均采用开关站分段技术,最大分段距离在 400 km 左右,同时在分段处设置了 MOA 与高抗措施来共同抑制过电压。

#### 4.4 小结

综合 4.1—4.3 节可知,对于较长的特高压线路若仅采用 MOA 限制单相接地故障过电压,增加 MOA 的数量总是可以使得过电压降低至限制水平以下,但是此时可能需要在沿线装设较多 MOA,且由 4.1 节的分析可知,过多的 MOA 不仅不能起到很好的抑制效果,反而会增加经济上的耗费,经济性较差。若

仅采用高抗限制单相接地故障过电压,对于较长的特高压线路,过电压则可能难以满足规程的限制要求,因此在技术上不可行。若减少 MOA 的数量,同时按照一定的高抗补偿容量分配在沿线加装高抗,可以减少沿线 MOA 的装设数量,节省了较大的开支,且可使工频过电压和操作过电压均满足限制要求。因此,采用 MOA 和高抗联合限制该过电压时,兼顾了工频过电压与操作过电压的限制要求,减少了沿线装设 MOA 的数量,是一种技术上可行、经济上占优的限制方法。

## 5 单回线路与双回线路过电压比较

单回模型和双回模型的线路参数分别参考我国晋东南—南阳—荆门特高压单回示范线路和淮—皖—浙—沪特高压双回线路,同时保持 2 种线路情况下的电源特性、高抗补偿度等参数相同,比较分析单回线路和双回线路的单相接地故障过电压情况。

考虑到双回线路有一回接地(一回运行)和双回运行 2 种运行模式<sup>[12-13]</sup>,下面通过计算分析不同运行方式下的过电压情况,结果如表 13 所示,表中  $l$  为线路长度。

表 13 单回线路和双回线路的单相接地故障过电压比较

Tab.13 Comparison of single-phase grounding overvoltage between single-loop and dual-loop transmission lines

运行方式	单相接地故障过电压水平		
	$l=200$ km	$l=400$ km	$l=600$ km
单回线路	1.407	1.600	1.728
双回线路一回接地	1.291	1.462	1.703
双回线路双回运行	1.276	1.396	1.573

由表 13 可知,同种情况下,单回线路的单相接地故障过电压要比双回线路时严重。这是因为相同长度下,双回线路系统较单回线路系统联系更紧密而更稳定,不易引起剧烈的过电压波动。而且,从波理论角度分析,相同长度下,若回路越多则对过电压波的分散消耗作用就越大,故双回线路过电压幅值较单回线路低<sup>[23-24]</sup>。由此可以推论,若单回线路下单相接地故障过电压能得到有效控制,则同样条件下双回线路的该过电压也能被有效控制。

## 6 结论

本文通过对单相接地故障过电压进行研究,得出了以下结论。

**a.** 接地电阻越小单相接地故障过电压越大,接地位置变化对该过电压影响也较大,故仿真模拟中宜采用较小的接地电阻并应考虑接地位置的影响;而输送功率、杆塔参数与线路型号变化对单相接地故障过电压影响较小,仿真模拟中可忽略简化。

**b.** 等效后的特高压电源阻抗对单相接地故障过电压影响较为显著,过电压随电源  $X_0/X_1$  比值的增

加而增大;当  $X_0/X_1$  保持不变时,过电压随  $X_1$  数值的增加而出现先减后增的 V 型规律。

**c.** 对于特定长度的双端电源模式的特高压线路,在求取该条线路的最大单相接地故障过电压幅值时,应在保证两端电源零正序阻抗比最大的前提下,选取两端电源正序阻抗取边界值的 4 种运行方式下的过电压值的最大值,即为该条线路在两端等效电源取阻抗范围内的任一阻抗值时的单相接地故障过电压的最大值。

**d.** 在严苛的电源阻抗条件下,通过线路两端的限制措施,即仅在线路两端设置 MOA 以及高抗补偿,长度为 500 km 以内的线路单相接地故障过电压能被控制在允许范围内,而 600 km 及以上的线路,则难以得到较好控制。

**e.** 在长线路上单独布置多点 MOA 或单独布置多点高抗来限制单相接地故障过电压,效果不显著;在线路中间加大高抗补偿量有利于该过电压的抑制,但补偿比例不宜过大。

**f.** 针对 500~800 km 的长线路,在线路中间进行分段落点,同时设置 MOA 及合适的高抗补偿,则能较好地抑制单相接地故障过电压,且线路分段长度宜在 400 km 以内。

**g.** 相同长度下,单回线路的单相接地故障过电压较双回线路严重,故若单回线路下该过电压能得到有效控制,则同条件下双回线路的该过电压也能被有效控制。

## 参考文献:

- [1] 孙才新,司马文霞,赵杰,等. 特高压输电系统的过电压问题[J]. 电力自动化设备,2005,25(9):5-9.  
SUN Caixin,SIMA Wenxia,ZHAO Jie,et al. Overvoltage in UHV transmission system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2005,25(9):5-9.
- [2] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京:中国经济出版社,2005:156-158.
- [3] 电力工业部电力科学研究院高压研究所. DL/T620—1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. 北京:中国电力出版社,1997.
- [4] 水利电力总电力科学研究院高压研究所. SD119—84 500 kV 电网过电压保护绝缘配合与电气设备接地暂行技术标准[S]. 北京:中国电力出版社,1984.
- [5] 李杨,沈扬,周浩,等. 长距离特高压交流输电线路单相接地故障过电压研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(12):99-104.  
LI Yang,SHEN Yang,ZHOU Hao,et al. Single-phase grounding overvoltage of long-distance UHVAC lines [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(12):99-104.
- [6] 国家电网公司,国网电力科学研究院,中国电力科学研究院. GB/Z24842—2009 1 000 kV 特高压输变电工程过电压及绝缘配合[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [7] 邢海瀛,陈柏超,张亚迪,等. 快速响应磁控电抗器抑制特高压操作过电压研究[J]. 电力自动化设备,2009,29(1):15-18.  
XING Haiying,CHEN Baichao,ZHANG Yadi,et al. UHV switching overvoltage suppression by quick response magnetically controlled reactor [J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(1):15-18.

- [8] HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, YU Shifeng. Overview of the recent developments of ultra high voltage AC transmission in China[C]//Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, USA; IEEE, 2008; 1-9.
- [9] LINGS R, CHARTIER V, MARUVADA S. Overview of transmission lines above 700 kV [C]//Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa. Durban, South Africa: IEEE, 2005; 33-43.
- [10] FAKHERI A J, BHATT N B, WARE B J, et al. Analysis and control of transient over-voltages on UHV transmission systems [J]. IEEE PAS, 1983, 102(10): 3315-3328.
- [11] 谷定燮, 周沛洪, 戴敏, 等. 中日特高压输电系统过电压和绝缘配合的比较分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(6): 1248-1253.  
GU Dingxie, ZHOU Peihong, DAI Min, et al. Comparison and analysis on over-voltage and insulation coordination of UHV AC transmission system between China and Japan[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(6): 1248-1253.
- [12] 刘振亚. 特高压交流输电系统过电压与绝缘配合[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 30.
- [13] 林集明, 班连庚. 1 000 kV 特高压交流同塔双回线路过电压和绝缘配合研究(第一部分)[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2009.
- [14] 林集明, 班连庚. 1 000 kV 特高压交流同塔双回线路过电压和绝缘配合研究(第二部分)[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2009.
- [15] 易强, 周浩, 计荣荣, 等. 特高压线路高抗补偿方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 98-105.  
YI Qiang, ZHOU Hao, JI Rongrong, et al. Research on high-voltage reactor compensation of UHV AC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 98-105.
- [16] 西安电瓷研究所, 电力部电力科学研究院, 武汉高压研究所. GB11032—2000 交流无间隙金属氧化物避雷器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [17] 刘振亚. 特高压交流电气设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 99-129.
- [18] 黄佳, 王钢, 李海锋, 等. 1 000 kV 长距离交流输电线路工频过电压仿真研究[J]. 继电器, 2007, 35(4): 32-39.  
HUANG Jia, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Study on simulation of fundamental frequency overvoltage for UHV AC transmission lines[J]. Relay, 2007, 35(4): 32-39.
- [19] 陈水明, 许伟, 何金良. 1 000 kV 交流输电线路的工频暂态过电压研究[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 1-5.  
CHEN Shuiming, XU Wei, HE Jinliang. Research on power frequency transient overvoltage in 1 000 kV UHVAC transmission line[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 1-5.
- [20] 朱家骝, 修木洪, 舒廉甫. 我国电网采用特高压送电方案的研究——过电压及绝缘配合部分[J]. 中国电力, 1996, 29(2): 40-44.  
ZHU Jialiu, XIU Muhong, SHU Lianfu. Study on China EHV transmission scheme—overvoltage and insulation coordination[J]. Electric Power, 1996, 29(2): 40-44.
- [21] 谷定燮. 我国特高压输电系统的过电压和绝缘配合[J]. 中国电力, 1999, 32(4): 65-68.  
GU Dingxie. Overvoltage and insulation coordination on UHV transmission system in China[J]. Electric Power, 1999, 32(4): 65-68.
- [22] 谷定燮. 对我国特高压输电系统过电压和绝缘配合的建议[J]. 高电压技术, 1999, 25(1): 29-32.  
GU Dingxie. Overvoltage and insulation coordination on ultra high voltage power transmission system in China[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(1): 29-32.
- [23] 施慎行, 董新洲, 周双喜. 单相接地故障行波分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 29-32.  
SHI Shenxing, DONG Xinzhou, ZHOU Shuangxi. Analysis of single-phase-to-ground fault generated traveling waves[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 29-32.
- [24] 吴维韩, 张芳榴. 电力系统过电压数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 71-81.

#### 作者简介:



李 杨

李 杨(1989-),男,湖北荆门人,硕士研究生,研究方向为电力系统过电压和电磁暂态分析(E-mail: 21110103@zju.edu.cn);  
周 浩(1963-),男,浙江杭州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统过电压(E-mail: zhouhao\_ee@zju.edu.cn)。

## Calculation and suppression of single-phase grounding overvoltage in UHVAC system

LI Yang<sup>1</sup>, JI Rongrong<sup>2</sup>, SHEN Yang<sup>3</sup>, ZHOU Hao<sup>1</sup>, YI Qiang<sup>4</sup>, SUN Ke<sup>5</sup>

- (1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Overhauling Branch, Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 311232, China;
3. Zhejiang Electric Power Design Institute, Hangzhou 310012, China;
4. Nanjing Daqo Electric Institute Co., Ltd., Nanjing 211100, China;
5. Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310007, China)

**Abstract:** Based on the effect of power source impedance on single-phase grounding overvoltage, a method to accurately calculate the maximum single-phase grounding overvoltage with less simulative computation is proposed, which considers various influencing factors synthetically. The suppression of single-phase grounding overvoltage is studied for different line lengths and the optimal allocation of HV(High Voltage) shunt reactor compensation capacity along line is proposed from the aspect of both frequency overvoltage and switching overvoltage. The single-phase grounding overvoltage is compared between single-loop and dual-loop lines, which shows that of former is serious than that of latter, and the corresponding countermeasures are given: MOA(Metal Oxide Arrester) and HV shunt reactor should be installed at both ends for line with length less than 500 km; distributed MOA and HV shunt reactor installed for each segment of line with length greater than 600 km, the length of line segment should be about 400 km.

**Key words:** UHV power transmission; UHVAC; overvoltage; electric grounding; failure analysis; impedance characteristic; line segment; calculations