

长距离特高压交流输电线路单相接地故障过电压研究

李 杨¹, 沈 扬², 周 浩¹, 计荣荣³, 孙 可⁴, 丁 健², 钱 锋²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江省电力设计院, 浙江 杭州 310012;
3. 浙江省电力公司检修分公司, 浙江 杭州 311232; 4. 浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007)

摘要: 分析单相接地故障过电压的影响因素, 得出使单相接地过电压最大的条件, 基于此在不同的线路高抗补偿度以及沿线避雷器的布置方式下, 探讨了不同线路分段方式下单相接地故障过电压不超过限制水平时线路能够达到的最大长度, 并对避雷器和高抗限制过电压的效果进行了对比。研究表明, 避雷器限制长线路单相接地故障过电压的效果不及高抗; 对于分 3 段的线路, 整条线路总长度最大不超过 1 300 km 时, 单相接地故障过电压不会超过限制水平, 单段线路的最大长度可达 500 km; 对于分 4 段和 5 段的线路, 总长度分别不超过 1 400 km、1 600 km 时, 过电压不会超过限制水平, 单段线路的最大长度均为 400 km。

关键词: 特高压交流系统; 单相接地故障; 过电压; 补偿; 特高压输电

中图分类号: TM 41

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.12.016

0 引言

线路出现单相接地故障时, 在健全相上产生的瞬态过电压即为单相接地故障过电压, 它是操作过电压的一种, 也叫接地短路过电压。对于较短的特高压线路, 单相接地故障操作过电压通常不会超过 1.7 p.u. 的限制水平, 但是当线路较长时, 单相接地故障过电压有可能超过限制水平而对系统安全构成威胁。我国能源的不均匀分布以及特高压输电技术的快速发展使得长距离、大容量输电成为必然^[1-9]。因此, 对长距离输电线路单相接地故障过电压的研究具有重要意义。

单相接地故障发生的时间以及在线路上的位置具有很大的随机性, 且该过电压与系统等效电源的阻抗特性密切相关, 因此, 在利用仿真软件计算该种过电压时要充分考虑接地故障产生时刻的随机性、接地位置的随机性以及不同的系统阻抗特性对该过电压的影响, 仿真计算工作量很大。对于特高压长线路, 为了保证沿线电压均匀分布以及限制工频过电压幅值, 一般需对线路进行分段^[9-10]。对于分段的长距离特高压线路, 单相接地故障过电压可能降低至限制水平以下。当线路分段数发生变化时, 若能得到单相接地故障过电压不超过限制水平的线路分段方式, 则进行线路规划设计以及过电压防护计算时可以忽略该过电压的影响, 避免大量的仿真计算, 同时节省防护该过电压所带来的不必要的费用。

鉴于此目的, 本文借助 PSCAD/EMTDC 软件, 在大量仿真计算的基础上, 对分段的特高压长线路单相接地故障过电压进行了详细研究。在得出了求取严酷单相接地过电压的条件的基础之上, 研究了线路分为 3~5 段的特高压长线路单相接地故障过电压问题, 同时对常规限制过电压的措施如加装避雷器(MOA)和高抗补偿的限制效果进行了详细研究, 列出了不同分段方式下整条线路单相接地故障过电压不超过限制水平的最大长度并给出了相应的线路分段方式, 可为特高压输电工程提供参考。

1 仿真参数

1.1 线路参数

本文中特高压线路参数参考我国特高压示范线路参数, 导线采用钢芯铝绞线 8×LGJ-500/35, 分裂间距为 400 mm, 塔形采用猫头塔^[1,8]。线路的序参数如表 1 所示^[11]。

表 1 特高压交流线路参数

Tab.1 Transmission line parameters of UHVAC system

电阻/Ω		电抗/Ω		容抗/Ω	
正序	零序	正序	零序	正序	零序
0.00805	0.20489	0.25913	0.74606	0.22688	0.35251

1.2 避雷器参数

避雷器采用在晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程中使用的 1 000 kV 无间隙金属氧化物避雷器, 型号为 Y20W1-828/1620W, 参数见表 2^[1,8]。

该型号避雷器的伏安特性曲线如图 1 所示, 其中横坐标采用对数坐标。

1.3 线路补偿度

线路补偿度对长线路单相接地故障过电压的影

收稿日期: 2013-01-05; 修回日期: 2013-09-19

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

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2011CB209405)

表 2 避雷器参数
Tab.2 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	
		$I_{opr}=1\text{ kA}$	$I_{opr}=2\text{ kA}$	$I_{thr}=10\text{ kA}$	$I_{thr}=20\text{ kA}$
828	636	1430	1460	1553	1620

注: I_{opr} 为操作冲击电流的幅值; I_{thr} 为雷电冲击电流的幅值。

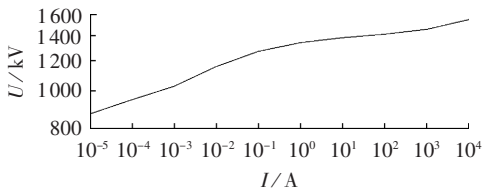


图 1 避雷器伏安特性曲线
Fig.1 U - I characteristic curve of MOA

响较大,线路补偿度越高,过电压下降越多,但是系统产生谐振过电压的概率越高,因此线路补偿度需有一个上限。从避免谐振过电压的角度考虑,同时考虑小电抗偏差、系统频率偏差以及高抗补偿容量偏差等因素的影响,特高压线路高抗补偿度上限取为 90%时,系统基本不可能发生谐振,因此,补偿度上限取为 90%。在我国特高压电网建设初期,补偿度范围为 80%~90%^[8,12]。

1.4 系统参数

影响单相接地故障过电压的系统参数主要是系统等效电源的正序阻抗和系统等效电源的零、正序阻抗比,需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的模式。文献[13]在综合考虑了超高压电网的等效情况、特高压变压器以及低容、低抗后,得出等效后特高压系统等效电源的正序阻抗 X_1 变化范围为 40~180 Ω ,系统等效电源的零、正序阻抗比 X_0/X_1 变化范围为 0.4~1.4^[13],可认为此范围几乎包括了所有 1000 kV 系统等效电源的阻抗。

2 长线路单相接地故障过电压影响因素

本节以图 2 所示分段距离 400km、长度 1200km 的特高压长线路为例,研究单相接地故障过电压的影响因素,得出求取长线路单相接地故障过电压最大值的条件。其中,每段线路采取两端均匀补偿方式,每段线路两端的补偿点均装设避雷器。图 2 中, E_1 、 E_2 为 1000 kV 特高压交流系统等效电源;系统内阻

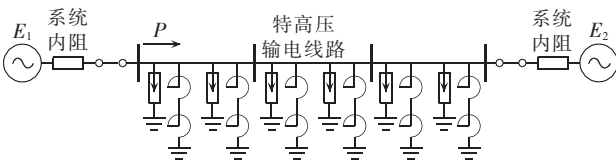


图 2 特高压交流输电线路示意图

包括特高压系统等效电源正序阻抗和零序阻抗,其取值范围参照 1.4 节; P 为特高压线路输送功率。

2.1 接地因素影响

单相接地故障过电压是由接地故障产生的瞬态过电压,接地故障因素主要包括接地位置和接地电阻两方面,保持其他参数不变,当接地位置和接地电阻发生变化时,过电压水平(标幺值)如表 3 所示。

表 3 接地位置和接地电阻发生变化时的
单相接地故障过电压水平

Tab.3 Single-phase grounding overvoltage for different fault positions and grounding resistances						
接地 电阻/ Ω	单相接地故障过电压水平					
	$d=0$	$d=200$	$d=400$	$d=600$	$d=800$	$d=1000$
0	1.472	1.441	1.464	1.538	1.427	1.364
1	1.468	1.431	1.448	1.523	1.414	1.353
10	1.464	1.412	1.423	1.503	1.383	1.347
20	1.461	1.389	1.396	1.474	1.361	1.332
50	1.419	1.357	1.370	1.406	1.314	1.291

注: d 为接地点与首端电源的距离,单位 km。

由表 3 可知,当接地位置不变时,随着接地电阻值的增加,过电压值会减小;当接地电阻值不变时,随着接地点位置的变化,过电压值没有明显的变化规律。从严考虑,在仿真计算该过电压时,接地电阻需取为 0,同时应充分考虑接地位置对该过电压的影响,即在沿线设置多个接地点,选取各接地位置下的过电压最大值作为该种情形下的单相接地故障过电压值。

2.2 功率影响

单相接地故障产生于正在运行的线路,因此,线路的输送功率可能会对单相接地故障过电压产生影响。保持线路两端母线电压以及系统阻抗不变,当输送功率发生变化时,沿线单相接地故障过电压最大值(标幺值)如表 4 所示。仿真线路输送功率对该过电压的影响时,接地电阻取 0,同时在沿线等间距设置多个接地点,选取各接地位置下的过电压最大值作为该种输送功率下的单相接地故障过电压值。

表 4 输送功率对单相接地故障过电压的影响

Tab.4 Effect of transmitting power on single-phase grounding overvoltage			
功率/MW	过电压水平	功率/MW	过电压水平
0	1.531	1500	1.527
500	1.531	2000	1.524
1000	1.528		

由表 4 可知,当输送功率增大时,单相接地故障过电压值会有略微减小,基本保持不变,因此,输送功率对过电压值影响不大,从严考虑,以下研究中取线路空载状态。

2.3 系统等效电源阻抗影响

系统等效电源阻抗对单相接地故障过电压的影

Fig.2 Schematic diagram of UHVAC transmission lines

响包括等效电源的正序阻抗 X_1 对过电压的影响和等效电源零、正序阻抗比 X_0/X_1 对过电压的影响。在其他条件不变的情形下,当两者发生变化时,长线路的单相接地故障过电压水平(标么值)的变化见表 5。

表 5 系统等效电源阻抗对单相接地故障过电压的影响
Tab.5 Effect of equivalent source impedance on single-phase grounding overvoltage

X_1/Ω	过电压水平		
	$X_0/X_1=0.4$	$X_0/X_1=1.0$	$X_0/X_1=1.4$
40	1.503	1.527	1.578
60	1.483	1.514	1.560
80	1.469	1.501	1.551
100	1.449	1.488	1.547
120	1.461	1.470	1.514
140	1.488	1.494	1.511
160	1.501	1.517	1.531
180	1.520	1.526	1.540

由表 5 可知,当等效电源正序阻抗不变时,随着等效电源零、正序阻抗比的增加,从接地点看进去的系统零、正序阻抗比会增加,发生单相接地故障后,单相接地稳态工频过电压会增加,使得系统在更高的电压基准上发生暂态振荡,因此单相接地故障过电压值增加^[14]。当等效电源零、正序阻抗比保持不变时,随着等效电源正序阻抗的增加,从接地点看进去的系统零、正序阻抗比反而会减小,单相接地故障过电压值减小;当等效电源正序阻抗进一步增加时,相当于增加了线路长度,线路越长过电压越大,此时单相接地故障过电压反而会增加。因此,在这 2 种因素的共同作用下,当 X_1 较小时, X_1/X_0 起主导作用,而 X_1 较大时, X_1 的影响则较为突出。综上所述,单相接地故障过电压会随着等效电源零、正序阻抗比的增加而增加,随着等效电源正序阻抗的增加呈现先减后增的 V 形变化规律。进一步计算研究表明,当线路长度在较大范围内发生变化时,正序阻抗与零、正序阻抗比对该过电压的影响规律类似。

因此,在求取长线路单相接地故障过电压最大值时,系统等效电源零、正序阻抗比需取最大;在此基础上,等效电源正序阻抗需取阻抗范围内的两端点值,求取二者中最大者即为单相接地故障过电压最大值。

3 长线路单相接地故障过电压

单相接地故障过电压是操作过电压的一种,与合闸过电压相比,幅值相对较小,对系统的危害通常不及合闸过电压^[1,4,8]。对于较短的特高压线路,单相接地故障操作过电压通常不会超过 1.7 p.u. 的限制水平,不是系统绝缘水平的决定性因素^[15-17]。当线路较长时,单相接地故障过电压有可能超过 1.7 p.u. 的限制水平,对特高压系统安全构成威胁。但是对于较长的特高压线路,从限制工频过电压以及稳压的角度

考虑,需对线路进行分段,并在每一段线路的两端加装并联高抗,此时单相接地故障过电压可能会降低,甚至降到限制水平以下。

在前面探究单相接地故障过电压影响因素的研究基础之上,下面将分别探究分 3 段、4 段和 5 段的特高压线路的单相接地故障过电压水平,求取分为 3~5 段的线路单相接地故障过电压不超过限制水平时可达到的最大长度以及单段线路的最大长度。

3.1 分 3 段长线路单相接地故障过电压

3.1.1 平均分 3 段线路过电压

在常规的限制措施如加装高抗和避雷器下,平均分 3 段、每段长度为 400 km 的特高压线路见图 3。

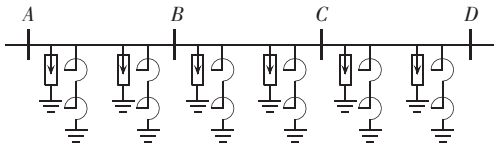


图 3 分 3 段的特高压交流线路

Fig.3 Three-segment UHVAC transmission line

为了研究避雷器对该过电压的限制效果^[18],在沿线改变布置避雷器的方式:

- a. 沿线加装 6 组避雷器,如图 3 所示,在分段线路沿线布置避雷器时通常采用此方式,其中 A、D 处各 1 组,B、C 处各 2 组;
- b. 沿线布置 4 组避雷器,其中 A、B、C、D 处各 1 组;
- c. 沿线布置 2 组避雷器,其中 B、C 处各 1 组;
- d. 沿线不装设避雷器。

平均分 3 段时沿线最大单相接地故障过电压水平(标么值)如表 6 所示。

表 6 平均分 3 段线路的单相接地故障过电压水平
Tab.6 Single-phase grounding overvoltage of UHVAC line with three equal segments

补偿度	过电压水平			
	方式 a	方式 b	方式 c	方式 d
80%	1.667	1.667	1.667	1.669
85%	1.646	1.647	1.648	1.649
90%	1.623	1.624	1.624	1.624

从表 6 可知,当线路补偿度保持不变时,随着沿线避雷器组数的增加,单相接地故障过电压值基本保持不变;当避雷器布置条件不变时,随着线路补偿度的增加,单相接地故障过电压会有明显的减小,因此,高抗较避雷器能够更好地限制长线路单相接地故障过电压。对于平均分 3 段、每段长度为 400 km 的特高压线路,当补偿度在 80%~90% 之间变化时,单相接地故障过电压均不超过 1.7 p.u. 的限制水平,不会对线路构成威胁。

单相接地故障过电压与线路长度呈正比,线路越长,过电压越大,可知对于长度小于 1 200 km、平均分 3 段的特高压线路或长度小于 1 200 km、分段长

度小于 400 km 的特高压线路,单相接地故障过电压均不会超出限制水平,不需考虑其对绝缘构成的威胁。

3.1.2 分 3 段线路单段长度发生变化时的过电压

当分段长度发生变化时,单相接地故障过电压水平(标么值)如表 7 所示,避雷器采用在单段线路两端布置的常规方式。

表 7 单段线路长度变化时的单相接地故障过电压水平
Tab.7 Single-phase grounding overvoltage for different segment lengths

线路分段 方式/km	过电压水平		
	补偿度 80%	补偿度 85%	补偿度 90%
400-400-400	1.667	1.648	1.624
200-600-400	1.725	1.699	1.677
300-500-400	1.708	1.689	1.660
433-433-434	1.688	1.670	1.649
500-400-400	1.694	1.679	1.654
400-500-400	1.719	1.699	1.677
500-400-500	1.762	1.734	1.704
500-500-500	1.785	1.742	1.712

由表 7 可知,对于不平均分段的特高压线路,单段长度较长的线路位于整条线路两端时,沿线单相接地故障过电压值要小于其位于整条线路的中间段时的过电压值。当线路分段数一定时,线路分段越平均,过电压越小,基于通用化结论的考虑,在下面的仿真计算中,线路长度均以 100 km 为单位。采用常规抑制过电压的措施,对于分 3 段的线路,当补偿度在 80%~90%之间变化时,单相接地故障过电压不超过限制水平时线路最大长度可达 1 300 km,单段线路的最大长度可达 500 km,且其中一种过电压较低的合理的分段方式为 400 km-400 km-500 km。

3.2 分 4 段长线路单相接地故障过电压

3.2.1 平均分 4 段线路过电压

在常规的限制措施如加装高抗和避雷器下,平均分 4 段、每段长度为 400 km 的特高压线路见图 4。

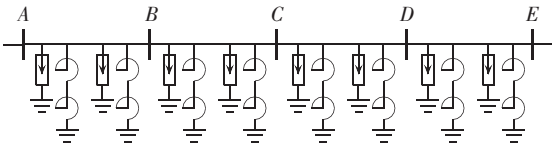


图 4 分 4 段的特高压交流线路

Fig.4 Four-segment UHVAC transmission line

为了研究避雷器对该过电压的限制效果,在沿线改变布置避雷器的方式。

方式 1:沿线加装 8 组避雷器,如图 4 所示,在分段线路沿线布置避雷器时通常采用此方式,其中 A、E 处各 1 组,B、C、D 处各 2 组。

方式 2:沿线布置 5 组避雷器,其中 A、B、C、D、E 处各 1 组。

方式 3:沿线布置 3 组避雷器,其中 B、C、D 处各

1 组。

方式 4:仅在 C 处布置 1 组避雷器。

方式 5:沿线不装设避雷器。

平均分 4 段时沿线最大单相接地故障过电压水平(标么值)如表 8 所示。

表 8 平均分 4 段线路的单相接地故障过电压水平
Tab.8 Single-phase grounding overvoltage of UHVAC line with four equal segments

补偿度	过电压水平				
	方式 1	方式 2	方式 3	方式 4	方式 5
80%	1.820	1.828	1.828	1.837	1.847
85%	1.781	1.785	1.785	1.790	1.794
90%	1.732	1.734	1.734	1.735	1.737

由表 8 可知,避雷器对单相接地故障过电压有微弱的限制作用。当线路补偿度在 80%~90%的范围内变动时,过电压均超过了 1.7 p.u. 的限制水平。因此,对于平均分 4 段的特高压长线路,在常规的限制措施下,为了使单相接地故障过电压不超过限制水平,单段线路长度取为 400 km 不满足限制条件。

3.2.2 分 4 段线路单段长度发生变化时的过电压

当单段分段距离发生变化时,单相接地故障过电压水平(标么值)如表 9 所示,避雷器采用在单段线路两端布置的常规方式。

表 9 单段线路长度变化时的单相接地故障过电压水平
Tab.9 Single-phase grounding overvoltage for different segment lengths

线路分段方式/km	过电压水平		
	补偿度 80%	补偿度 85%	补偿度 90%
400-400-400-400	1.820	1.783	1.732
400-500-300-400	1.885	1.831	1.778
400-400-400-300	1.807	1.769	1.724
300-400-400-300	1.795	1.753	1.711
400-300-300-400	1.712	1.704	1.681
300-400-300-300	1.759	1.726	1.694
400-300-300-300	1.691	1.662	1.646
300-300-300-300	1.683	1.654	1.623
300-200-400-300	1.698	1.669	1.645

由表 9 可知,当线路分段数一定时,线路分段越平均,过电压越小。补偿度越高,过电压越小,对于分 4 段的特高压线路,当线路补偿度取 80%~85%时,整条线路单相接地故障过电压不会超过限制水平的最大长度可达 1 300 km,单段线路最大长度可达 400 km,一种较为合理的线路分段方式为 400 km-300 km-300 km-300 km;当补偿度取 90%时,过电压水平进一步降低,整条线路单相接地故障过电压不会超过限制水平的最大长度增加至 1 400 km,单段线路最大长度可达 400 km,一种过电压较低的较为合理的线路分段方式为 400 km-300 km-300 km-400 km。

另外,比较表 7 和表 9 可知,相同线路长度下,线路分段方式对单相接地故障过电压的影响很大,

增加线路分段数,减小线路分段距离对过电压有一定的削弱作用,当线路分段数一定时,中间段线路长度越短,过电压通常越小。

3.3 分 5 段长线路单相接地故障过电压

3.3.1 平均分 5 段线路过电压

在常规的限制措施如加装高抗和避雷器下,平

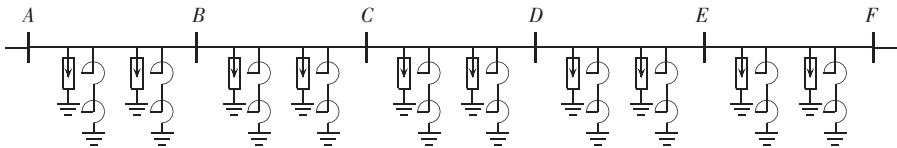


图 5 分 5 段的特高压交流线路

Fig.5 Five-segment UHVAC transmission line

均 1 组, *B*、*C*、*D*、*E* 处各 2 组;

Ⅱ. 沿线布置 6 组避雷器,其中 *A*、*B*、*C*、*D*、*E*、*F* 处各 1 组;

Ⅲ. 沿线布置 4 组避雷器,其中 *B*、*C*、*D*、*E* 处各 1 组;

Ⅳ. 沿线布置 2 组避雷器,其中 *C*、*D* 处各 1 组;

Ⅴ. 沿线不装设避雷器。

平均分 5 段时沿线最大单相接地故障过电压水平(标幺值)如表 10 所示。

表 10 平均分 5 段线路的单相接地故障过电压水平

Tab.10 Single-phase grounding overvoltage of UHVAC line with five equal segments

补偿度	过电压水平				
	方式 I	方式 II	方式 III	方式 IV	方式 V
80 %	1.725	1.730	1.730	1.730	1.768
85 %	1.715	1.719	1.719	1.724	1.739
90 %	1.665	1.668	1.668	1.668	1.674

由表 10 可知,避雷器对过电压的限制作用仍不明显,当线路补偿度取 80% 或 85% 时,沿线单相接地故障过电压超过限制水平,当补偿度取 90% 时,过电压值降低到 1.7 p.u. 以下。

3.3.2 分 5 段线路单段长度发生变化时的过电压

当线路分段方式发生变化时,单相接地故障过电压值如表 11 所示,避雷器采用在单段线路两端布置的常规方式。

表 11 单段线路长度变化时的单相接地故障过电压水平

Tab.11 Single-phase grounding overvoltage for different segment lengths

线路分段方式 /km	过电压水平		
	补偿度 80 %	补偿度 85 %	补偿度 90 %
300-300-300-300-300	1.725	1.710	1.665
300-200-400-300-300	1.756	1.725	1.688
300-200-500-200-300	1.773	1.730	1.695
300-300-300-300-400	1.758	1.718	1.672
300-300-300-400-300	1.773	1.746	1.708
300-300-400-300-300	1.820	1.782	1.731
400-300-300-300-400	1.787	1.751	1.714
300-300-400-400-300	1.828	1.794	1.738

均分 5 段、每段长度为 300 km 的特高压线路,如图 5 所示。

为了研究避雷器对该过电压的限制效果,在沿线改变布置避雷器的方式:

I. 沿线加装 10 组避雷器,如图 5 所示,在分段线路沿线布置避雷器时通常采用此方式,其中 *A*、*F* 处

由表 11 可知,当线路分段数一定时,中间段线路越短,过电压越小,且线路分段越平均,过电压越小;对于分 5 段的特高压线路,当补偿度取 80%~85% 时,表中所列几种线路分段方式下的过电压值均超过限制水平,当补偿度取 90% 时,部分线路分段方式下过电压降至限制水平以内;沿线单相接地故障过电压不超过限制水平的最大线路长度可达 1 600 km,且单段线路长度最大可达 400 km,一种过电压较低的合理的线路分段方式为 300 km-300 km-300 km-300 km-400 km。

3.4 线路中间具有落点的情形

对于较长的特高压线路,除了直接点对点输电的情形外,还有一种线路中间具有 1 个或多个落点负荷或落点等效电源的情形,如图 6 所示,图中省略了线路的分段情况。

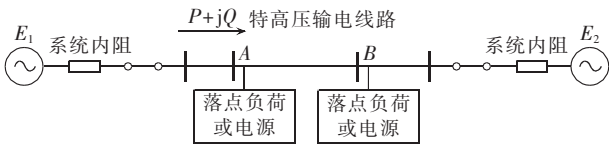


图 6 具有落点负荷或电源的特高压长线路

Fig.6 UHVAC transmission line with loads or sources

对于较长的特高压线路中间具有落点电源的情形,一方面,落点电源出口母线处(图 6 中 *A*、*B* 2 点)的电压被箝制在正常运行的工频电压数值,当整条线路发生单相接地故障时,会导致过电压水平降低;另一方面,电源与电源之间的输电线路长度缩短,过电压水平也会降低。对于较长的特高压线路中间具有落点负荷的情形,负荷对过电压的阻尼作用也会使得过电压水平降低。因此,对于长线路单相接地故障过电压,如果线路中间有落点电源或落点负荷,会导致单相接地故障过电压水平下降。随着特高压电网的发展,特高压长线路交流输电是一个趋势,且线路中间通常会有落点电源或落点负荷,此时,单相接地故障过电压水平会比线路中间没有落点负荷或电源的长线路的过电压水平低。

3.5 小结

综合 3.1、3.2、3.3 和 3.4 节可知,对于不同长度的特高压长线路,当线路分段数一定时,单段长度较大的线路位于整条线路中间时的过电压水平高于其位于整条线路两端时的过电压水平,同时线路分段越平均,单相接地故障过电压越小。因此,从限制单相接地故障过电压的角度考虑,在常规的限制过电压的措施下,当特高压线路长度发生变化时,采用如表 12 所示的分段方式,单相接地故障过电压不会超过限制水平,基于通用化结论的考虑,线路长度均以 100 km 为单位。当长线路中间没有落点负荷或落点电源时,该过电压水平会进一步降低。

表 12 线路长度变化时单相接地故障过电压
不超过限制水平的线路分段方式

Tab.12 Line segment modes for different
total line lengths

线路最大长度/km	线路分段方式/km	补偿度
1200	400-400-400	80%~90%
1300	400-400-500	80%~90%
1400	400-300-300-400	90%
1500	300-300-300-300-300	90%
1600	300-300-300-300-400	90%

表 12 中所示的线路分段方式是基于通用化结论的考虑得到的一种过电压较低的线路分段方式,即对于分 3~5 段的特高压长线路,若每段线路的长度均不大于表中所示线路分段方式的情况且补偿度不大于表中第 3 列所示的线路补偿度,则沿线单相接地故障过电压不会超过限制水平,且过电压水平较低。

另外,在实际的工程中,考虑到实际的落点限制和工程实施的方便,表 12 中所示的某种分段方式可能不便于实际施工,此时,则需结合表 7、9 或 11 中的结果和实际落点情况以及工程实际重新确定线路分段方式。例如,线路高抗补偿度为 90% 时,对长度为 1500 km 的特高压交流输电长线路,采用 300 km-300 km-300 km-300 km-300 km 的线路分段方式可能不便于实际施工,结合表 11 和实际落点情况及工程实际可知,当采用 300 km-200 km-400 km-300 km-300 km 的线路分段方式时,其过电压值不超过 1.7 p.u.,且在实际工程中这种方式比平均分段方式时更方便实施。

4 结论

本文通过建立两端输电模型,对分段的特高压长线路单相接地故障过电压问题进行了详细研究,并得出以下结论。

a. 线路输送功率对单相接地故障过电压影响不大;接地电阻越小、补偿度越小,单相接地故障过电压越大;系统等效电源零、正序阻抗比越大,过电压越

大,当零、正序阻抗比保持不变时,过电压随着系统等效电源正序阻抗的增加呈现先减后增的 V 型变化趋势。

b. 高抗和避雷器对单相接地故障过电压有限制作用。随着沿线布置避雷器组数的增加,过电压水平会降低,但是降低幅度微弱,随着高抗补偿度的增加,过电压水平明显降低,因此,高抗较避雷器能够更好地限制该类过电压。

c. 对于特高压长线路,线路分段方式对单相接地故障过电压值影响较大。当线路长度一定时,线路分段数越多、分段距离越小,过电压水平越低;线路分段数一定时,单段长度较大的线路位于整条线路中间时的过电压水平高于其位于整条线路两端时的过电压水平。

d. 当线路分段数一定时,线路分段越平均,单相接地故障过电压越小,因此,结合实际落点负荷或电源情形,尽量对一般的特高压线路进行平均分段。

e. 长线路中间具有落点负荷或落点电源时,沿线过电压水平低于没有落点负荷或电源的情形。

f. 采用常规的抑制过电压的措施,对于分 3 段的线路,整条线路单相接地故障过电压不会超过限制水平的总长度最大可达 1300 km,单段线路的最大长度可达 500 km,一种过电压较低的合理的线路分段方式为 400 km-400 km-500 km;对于分 4 段和 5 段的线路,过电压不会超过限制水平的线路总长度最大分别可达 1400 km 和 1600 km,2 种情形下单段线路的最大长度均为 400 km,过电压较低的合理的线路分段形式分别为 400 km-300 km-300 km-400 km 和 300 km-300 km-300 km-300 km-400 km。

参考文献:

[1] 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,2008:1-8.

[2] 周浩. 发展我国交流特高压输电的建议[J]. 高电压技术,1996,22(1):25-27.

ZHOU Hao. Recommendation for the development of AC UHV power transmission in China[J]. High Voltage Engineering,1996,22(1):25-27.

[3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/Z24842—2009 1000 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.

[4] 中国电力科学研究院. 特高压输电技术:交流输电分册[M]. 北京:中国电力出版社,2012:3-9.

[5] 中华人民共和国电力工业部. 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.

[6] 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.

[7] ALESSANDRO C,ACHILLE T. Overvoltages due to line energ-

- zation and reenergization versus overvoltages caused by faults and fault clearing in EHV systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1970, 89(5): 932-941.
- [8] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [9] 舒印彪. 1000 kV 交流特高压输电技术的研究与应用[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 1-5.
- SHU Yinbiao. Research and practice of 1000 kV AC transmission system[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 1-5.
- [10] 黄佳, 王钢, 李海锋, 等. 1000 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 overvoltages for UHVAC transmission lines[J]. Relay, 2007, 35(4): 32-39.
- [11] 张晓莉, 周泽昕, 王玉玲, 等. 1000 kV 交流输电系统动态模拟研究[J]. 电网技术, 2006, 30(7): 1-4.
- ZHANG Xiaoli, ZHOU Zexin, WANG Yuling, et al. Study on dynamic simulation of 1000 kV AC power transmission system[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 1-4.
- [12] 易强, 周浩, 计荣荣, 等. 交流特高压线路高抗补偿度上限[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 6-18.
- YI Qiang, ZHOU Hao, JI Rongrong, et al. Upper limit of compensation degree of high voltage shunt reactor for UHVAC transmission lines[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 6-18.
- [13] 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 UHVAC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 98-105.
- [14] 谢广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983: 296-299.
- [15] 谷定燮, 周沛洪. 特高压输电系统过电压、潜供电流和无功补偿[J]. 高电压技术, 2005, 31(11): 21-25.
- GU Dingxie, ZHOU Peihong. Over-voltage, secondary arc and reactive power compensation in UHVAC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(11): 21-25.
- [16] 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 UHVAC transmission system between China and Japan[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(6): 1248-1253.
- [17] 易强, 计荣荣. 基于 PSCAD/EMTDC 的交流特高压高抗补偿方式研究[J]. 华东电力, 2011, 39(2): 257-261.
- YI Qiang, JI Rongrong. PSCAD/EMTDC-based research on compensation mode of UHVAC shunt reactor[J]. East China Electric Power, 2011, 39(2): 257-261.
- [18] 陈水明, 许伟, 何金良. 沿线多组避雷器深度限制特高压操作过电压[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 11-15.
- CHEN Shuiming, XU Wei, HE Jinliang. Adopting some arresters to suppress switching overvoltage deeply in 1000 kV UHV transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 11-15.
- [19] 杜林, 李欣, 司马文霞, 等. S 变换模矩阵和最小二乘 SVM 在雷电及操作过电压识别中的应用[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 35-40.
- DU Lin, LI Xin, SIMA Wenxia, et al. Application of S-transform modular matrix and LS-SVM in identification of lightning and switching overvoltages[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 35-40.
- [20] 张明锐, 金鑫, 刘金辉. 一种抑制固态断路器过电压的新方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 37-41.
- ZHANG Mingrui, JIN Xin, LIU Jinhui. Over-voltage suppression of solid-state circuit breaker[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 37-41.

作者简介:

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)。

Single-phase grounding overvoltage of long-distance UHVAC lines

LI Yang¹, SHEN Yang², ZHOU Hao¹, JI Rongrong³, SUN Ke⁴, DING Jian², QIAN Feng²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhejiang Electric Power Design Institute, Hangzhou 310012, China;

3. Overhauling Branch, Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 311232, China;

4. Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310007, China)

Abstract: The influencing factors of single-phase grounding overvoltage are analyzed and the conditions causing the maximum overvoltage are obtained. With different compensation degrees of HV shunt reactor and different disposals of MOA (Metal Oxide Arrester), the maximum length of UHVAC line is discussed for different segment modes, under which the single-phase grounding overvoltage will not surpass the limitation. The effect of MOA on overvoltage suppression is compared with that of HV shunt reactor, which shows the latter has better effectiveness. For three-segment lines, the maximum total line length may reach 1 300 km while that of single segment may reach 500 km. For four-segment and five-segment lines, the maximum total line length may reach 1 400 km and 1 600 km respectively while that of single segment may reach 400 km.

Key words: UHVAC system; single-phase grounding; overvoltage; compensation; UHV power transmission