

MOA代替合闸电阻在超特高压输电线路的研究

操作过电压是超高压、特高压电网绝缘水平的决定因素。利用电磁暂态计算程序分别对500 kV、750 kV和1 000 kV电力系统的操作过电压进行仿真计算。计算结果表明：500 kV线路两端装设金属氧化物避雷器（MOA）代替合闸电阻，可将合闸、重合闸过电压限制到1.87(pu)以下，MOA吸收能量最大值为365 kJ；750 kV线路在装设3组MOA代替合闸电阻时，操作过电压水平为1.65(pu)，MOA吸收能量最大值为3 360 kJ；对于长、短特高压输电线路，经仿真计算，必须依靠合闸电阻和MOA共同限制操作过电压，并取得较好的效果。

郭芃君 薛鸿鹏 徐海燕 王世珠/周口供电公司



郭芃君/工程师

输电线路的合闸、重合闸过电压是EHV和UHV电网绝缘水平的决定因素。国内外普遍采用断路器装设合闸电阻的办法来限制合闸和重合闸过电压，同时利用避雷器作为后备保护。但是运行表明，合闸电阻及其操作机构是断路器中最薄弱的环节。另外，合闸电阻接入时间的分散性、开关三相动作时差的分散性，使得合闸电阻限压效果的分散性比较大，这就造成可靠性不高。随着金属氧化物避雷器（MOA）性能的提

高，仅仅依靠避雷器来限制合闸过电压成为可能^[1-2]。本文利用电磁暂态程序（EMTP-ATP）对超特高压电力系统线路进行仿真分析，研究合闸电阻和MOA对线路过电压的影响。

500 kV电力系统的模拟计算

500 kV输电系统中，其操作过电压允许值不能超过2.0 (pu)^[3-4]。以2007年新建辛安—衡水—沧西500 kV输电线路为研究背景，利用EMTP计算合闸、重合闸过电压。线路总长272 km，线路导线水平排列，导线型号LGL-400/35，四分裂，分裂间距450 mm。表1给出了500 kV输电线路的正序、零序参数。

1. 避雷器参数和高压并联电抗器参数

母线侧MOA额定电压为420 kV，线路侧MOA额定电压为444 kV，避雷器最大通流容量为10.28 kJ/kV。线路衡水侧安装150 Mvar高压并联电抗器，补偿度为75%。 $1.0(\text{pu}) = \sqrt{2} \times 550 / \sqrt{3} \text{ kV} = 449.02 \text{ kV}$ 。

表1 500 kV输电线路正序零序参数

线路	正序参数			零序参数		
	电阻/ (Ω/km)	感抗/ (Ω/km)	电容/ (μF/km)	电阻/ (Ω/km)	感抗/ (Ω/km)	电容/ (μF/km)
辛安—沧西	0.019 79	0.275 14	0.013 31	0.228 46	0.870 97	0.008 58

2. 合空载线路过电压和单相重合闸过电压

根据上述给出的参数，利用EMTP中的分布参数模型来建立输电线路的仿真模型，此时用MOA装设在线路两端来代替合闸电阻的情况下，采用统计法，

随机合闸120次，得到统计值 $U_{2\%}$ 和线路MOA最大吸收能量。

3. 仿真结果

在表2中得出辛安侧沿线最大合闸过电压 $U_{2\%}$ 为1.87(pu)，重合闸过电压 $U_{2\%}$ 为1.73(pu)；沧西侧沿线最大合闸过电压 $U_{2\%}$

关键词/Keywords

操作过电压 ·
合闸电阻 ·
金属氧化物避雷器 ·
通流量 ·

为1.76(pu)，重合闸过电压 $U_{2\%}$ 为1.59(pu)。过电压水平都不超过2.0(pu)，对于额定电压444 kV的MOA，吸收能量值远小于允许吸收能量的最大值，所以MOA有足够的通流能力裕度。

表2 线路两端装设MOA时合闸和重合闸过电压

线路	合闸侧	合闸过电压		重合闸过电压	
		$U_{2\%}$ (pu)	MOA吸收能量/kJ	$U_{2\%}$ (pu)	MOA吸收能量/kJ
辛安—	辛安	1.87	365	1.73	252
沧西	沧西	1.76	313	1.59	187

750 kV电力系统模拟计算

750 kV输电系统中，其操作过电压允许值不能超过1.8(pu)^[5-7]。以宁夏电网建设的750 kV兰州东—银川东交流输电线路为研究背景，利用EMTP计算其合闸以及重合闸过电压。线路长度为397 km，表3给出了线路正序、零序参数。

表3 750 kV输电线路正序零序参数

正序参数			零序参数		
电阻/ (Ω /km)	感抗/ (Ω /km)	电容/ (nF/km)	电阻/ (Ω /km)	感抗/ (Ω /km)	电容/ (nF/km)
0.012 6	0.266 27	13.813 6	0.322 9	0.918 42	9.584 3

表4 沿线装设MOA合闸和重合闸过电压

MOA数量	MOA装设位置	合闸过电压		重合闸过电压	
		$U_{2\%}$ (pu)	MOA吸收能量/kJ	$U_{2\%}$ (pu)	MOA吸收能量/kJ
0	无	1.93	—	1.96	—
1	线路首端	1.83	2 388	1.84	2 160
	线路中间	1.82	3 042	1.82	2 132
	线路末端	1.75	3 123	1.80	2 017
2	线路首端、末端	1.73	3 176	1.76	2 876
	线路1/4、3/4处	1.72	3 365	1.73	2 932
	线路1/2、3/4处	1.70	3 417	1.70	3 127
3	线路1/4、1/2、3/4处	1.65	3 670	1.67	3 360

由以上仿真结果可知，对于500 kV系统和750 kV系统在一定线路长度内，可用多组避雷器代替合闸电阻来限制过电压。那么，1 000 kV特高压系统对于合闸、重合闸过电压的限制是否与500 kV系统和750 kV系统一致？下面对1 000 kV系统进行仿真分析。

1 000 kV电力系统模拟计算

在1 000 kV特高压输电系统中，对合闸、重合闸操作过电压要求更高，允许值不能超过1.6(pu)^[8-10]。

1. 避雷器参数和高压并联电抗器参数

母线侧MOA额定电压为600 kV、线路侧的额定电压为648 kV，标称放电电流为20 kA，避雷器最大吸收能量允许值为23.4 kJ/kV。线路两侧装设360 Mvar高压并联电抗器，补偿度为76%。 $1 \text{ (pu)} = (\sqrt{2} \times 800 / \sqrt{3}) \text{ kV} = 653.12 \text{ kV}$ 。

2. 合空载线路过电压和单相重合闸过电压

根据上述给出的参数，利用EMTP使用分布参数模型来建立输电线路的仿真模型，此时断路器不带合闸电阻。研究线路沿线装设避雷器的数量和位置对过电压的限制效果。

3. 仿真结果

仿真计算结果如表4所示。当线路中不装设MOA时，合空载操作过电压最大值达到了1.93(pu)，装设一组MOA后，最大过电压降低为1.83(pu)，装设两组MOA后，合闸、重合闸过电压都能降低到1.80(pu)以下，当MOA的数量增加到3组时，这两种过电压降低到1.67(pu)；随着MOA数量的增加，总的通流能量在增加，但是每单相的通流能量在逐渐减少。

以我国新建的晋东南—南阳—荆门特高压输电线路为研究背景，利用EMTP对此电力系统建模，计算其合闸过电压。研究对象分别是100 km和350 km的特高压输电线路，相导线采用8×LGJ—500/35，分裂间距为400 mm。表5给出了线路的正序、零序参数。

1. 合闸电阻参数、避雷器参数、高压并联电抗器参数

合闸电阻阻值选为600 Ω ^[8]；特高压线路的母

表5 1 000 kV线路正序和零序参数

正序参数			零序参数		
电阻/ (Ω/km)	感抗/ (Ω/km)	电容/ ($\text{M}\Omega/\text{km}$)	电阻/ (Ω/km)	感抗/ (Ω/km)	电容/ ($\text{M}\Omega/\text{km}$)
0.008 05	0.259 13	0.226 88	0.204 89	0.746 06	0.352 5

线侧MOA和线路侧MOA额定电压都选为828 kV, 其标称放电电流为20 kA, 2 kA下的操作冲击残压不大于1 460 kV, 避雷器最大吸收能量允许值为48.31 kJ/kV。线路装设的高抗容量为720 Mavr, 补偿度为85%。 $1(\text{pu})=(\sqrt{2} \times 1100 / \sqrt{3}) \text{ kV}=898.04 \text{ kV}$ 。

2. 100 km线路过电压仿真分析

以长度为100 km线路为研究对象, 线路统一在首末两端装设高压并联电抗器。

1) 当断路器没有并联合闸电阻和线路无MOA的装设时, 即无措施方案。输电线路的最大合闸过电压如图1所示。

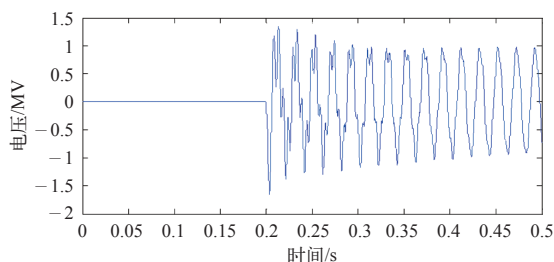


图1 长度为100 km特高压线路沿线最大合闸过电压

2) 当断路器没有并联合闸电阻, 但在线路首末两端、1/2处装设MOA时, 即3组MOA方案。输电线路的最大合闸过电压如图2所示。

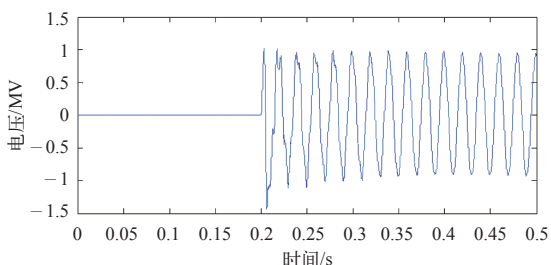


图2 长度为100 km特高压线路沿线最大合闸过电压

3) 当断路器并联合闸电阻无MOA装设时, 即合闸电阻方案。输电线路最大合闸过电压如图3所示。

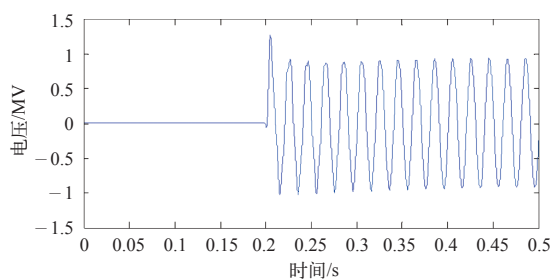


图3 长度为100 km特高压线路沿线最大合闸过电压

表6 长度为100 km的特高压输电线路合空线过电压的沿线分布

方案	沿线过电压分布(pu)				
	$l=0 \text{ km}$	$l=25 \text{ km}$	$l=50 \text{ km}$	$l=75 \text{ km}$	$l=100 \text{ km}$
无措施	1.573	1.747	1.837	1.731	1.635
3组MOA	1.469	1.537	1.592	1.563	1.542
合闸电阻/(Ω/km)	1.247	1.338	1.365	1.431	1.391

结果分析如下: 对于100 km长的特高压输电线路, 若不使用合闸电阻时, 沿线过电压 $U_{2\%}$ 最大为1.837(pu), 超过工程要求的1.6(pu); 当沿线装设3组MOA时, 过电压水平被限制到1.592(pu), 但是过电压裕度较低; 当输电系统采用合闸电阻后, 沿线过电压明显降低, 最高为1.431(pu)。即, 对于100 km的特高压输电线路, 为了满足实际工程的需要, 必须采用合闸电阻。

3. 350 km线路过电压仿真分析

我国现有的特高压工程最长的单段距离为晋东南—南阳段线路, 长度为350 km, 故以长度为350 km的输电线路为研究对象, 线路上统一在首末两端装设高压并联电抗器。

1) 当断路器没有并联合闸电阻, 但在线路首末两端、1/2处装设MOA时, 即3组MOA方案。输电线路的最大合闸过电压如图4所示。

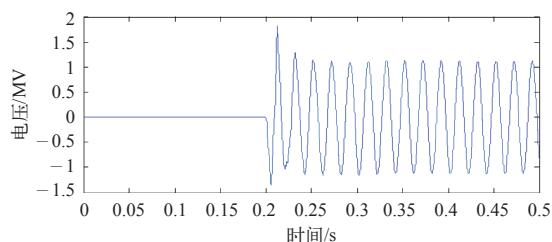


图4 长度为350 km特高压线路沿线最大合闸过电压

2) 当断路器没有并联合闸电阻, 沿线在线路首端、1/4处、1/2处、3/4处和线路末端装设MOA

时,即5组MOA方案。输电线路的最大合闸过电压如图5所示。

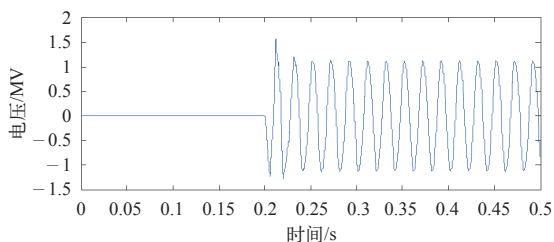


图5 长度为350 km特高压线路沿线最大合闸过电压

3) 当断路器有并联合闸电阻, 并且在线路首末两端、1/2处装设MOA时, 即合闸电阻配合3组MOA方案。输电线路的最大合闸过电压(见图6)。

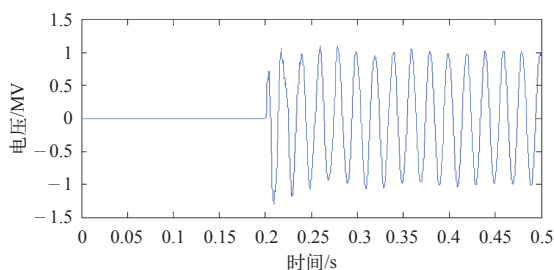


图6 长度为350 km特高压线路沿线最大合闸过电压

由仿真图4可以看出,当线路上只用3组MOA进行限制时,在0.217 s时刻过电压 $U_{2\%}$ 最大达到了2.036(pu)。如图5所示,用5组MOA进行限制时,在0.216 s时刻过电压水平有所降低,但依然很高,达到了1.762(pu)。当采用合闸电阻后,再配合沿线3组MOA进行限制时,如图6所示,在0.214 s时刻过电压水平降到了1.448(pu),满足了工程要求,并且有很大的裕度。从MOA吸收能量角度,合闸电阻和MOA配合使用时,MOA吸收的总能量达到了4 782 kJ,单组MOA最大吸收能量为2 964 kJ,均小于MOA能量承受极限40 MJ。

结束语

500 kV、750 kV电力系统中在单独依靠MOA
保护后,合闸、重合闸操作过电压都能在一定线

路长度下满足工程要求；在1 000 kV特高压电力系统中，必须使用合闸电阻和MOA对合闸操作过电压进行限制。

单独使用MOA时,随着沿线MOA装设数量的增加,总的吸收能量之和逐渐增加,但对于单相MOA的通流容量在逐渐减少,并且远低于不同额定电压等级规定吸收能量最大值。随着沿线MOA装设数量的增加,操作过电压水平逐渐减少。

参考文献

- [1] 潘锡芒, 王晓林, 王秉钧. 500 kV断路器取消合闸电阻问题的探讨 [J]. 西安工业学院学报, 2000, 20 (3) : 187-193.
- [2] 谷定燮, 周沛洪, 李国兴, 等. 取消500 kV断路器合闸电阻有关问题的研究 [J]. 中国电力, 1996, 29 (6) : 28-32.
- [3] 杨鹏程, 陈水明, 周宗川, 等. 避雷器代替750 kV线路合闸电阻 [J]. 高电压技术, 2008, 34 (6) : 1105-1109.
- [4] 杨鹏程, 陈水明, 周宗川, 等. 750 kV沿线避雷器限制操作过电压研究 [J]. 清华大学学报, 2008, 48 (10) : 1545-1548.
- [5] 黄燕艳, 陈梁金, 施围. 750 kV输电系统操作过电压的统计计算 [J]. 高电压技术, 2004, 30 (8) : 6-8.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 盛鹤, 李永丽, 李斌, 等. 特高压输电线路过电压的研究和仿真 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15 (6) : 13-18.

(收稿日期: 2014-11-20) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告