

[电磁暂态]

500 kV城市输变电工程电磁暂态研究

文/特变电工股份有限公司 陈 骁 董仕镇 张慧婷
北京电力经济技术研究院有限公司 陈 晶

以北京某核心地区一项500 kV输变电工程为研究对象，该站采用500 kV电缆和架空线路混合方式与电源站相连。研究了该输变电工程电磁暂态问题，其中包括工频过电压、单相重合闸过程中潜供电流和恢复电压、感应电压、感应电流及操作过电压等问题，并对各种操作过电压下避雷器的耐受水平进行了校核，为工程设计提供了理论依据。

随着城市的发展，城市中心变电站户内化、架空线路电缆化成为主要趋势。高压电缆及隧道造价昂贵，为了降低造价，在可选择的情况下还是应尽量使用架空线路，这样就产生了长距离高压电缆和架空线路混合的情况。

一般在发生系统操作或接地故障时，产生等于工频或接近工频的且高于系统最高工作电压的过电压即工频过电压。产生工频过电压的主要原因包括：空载长线路的电容效应；不对称接地引起的正序、负序和零序电压分量作用；以及系统突然甩负荷使发电机加速旋转等。

操作过电压是由系统中断路器的动作和各种故障的过渡过程引起的，操作过电压具有幅值较高、高频振荡、阻尼强和持续时间较短等特点。操作过电压在超高压电力系统中对设备的绝缘选择起着重要作用。

由于过电压产生的原因众多，为了满足工程建设和运行的需要，有必要对于北京地区某500 kV输变电项目进行全面的电磁暂态研究工作，为设计及后期运行提供理论依据。

工程概况

北京电网规划建设A站及B站两座500 kV变电

站，A站及B站之间的线路为本文研究对象。A站—B站输变电系统示意图如图1所示。

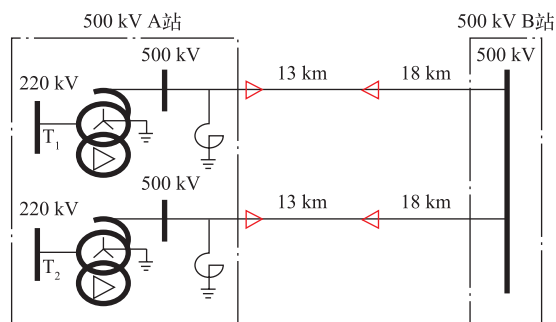


图1 500 kV A站—B站输变电系统示意图

B站为电源站，500 kV侧合母线运行；由B站直出双回500 kV线路至A站架空线路部分长18 km，地下电缆部分长13 km。A站为负荷变电站，正常方式下分列运行。

A站本期安装两组1 200 MV·A无载调压自耦变压器（电压等级500 kV/220 kV/66 kV），4台240 MV·A有载调压变压器（电压等级220 kV/110 kV/35 kV）；本期500 kV出线2回至B站；220 kV出线6回。500 kV混合线路每回装设一组120 Mvar的线路高抗。A站的500 kV侧采用内桥接线，220 kV侧采用双母线双分段接线。

工频过电压研究

500 kV电网的工频过电压水平按照规定，线路断路器变电站（母线）侧不宜超过1.30（pu），线路侧不宜超过1.40（pu）。

采用三相电缆垂直排列时工频过电压见表1。其中，A站侧每回线路各装设一组120 Mvar高抗，其中性点不装设小电抗。

表1 采用三相电缆垂直排列时工频过电压（120 Mvar高抗）（pu）

断路器 跳闸侧	线路运行 方式	工频过电压			
		无故障甩负荷		单相接地甩负荷	
		母线侧	线路侧	母线侧	线路侧
B站侧	双回运行	1.03	1.04	1.02	1.04
	单回运行	1.03	1.03	1.01	1.03
A站侧	双回运行	0.99	0.99	1.02	1.15
	单回运行	0.99	0.99	1.04	1.14

当不装设高抗，采用三相电缆垂直排列时工频过电压见表2。

表2 采用三相电缆垂直排列时工频过电压（无高抗）（pu）

断路器 跳闸侧	线路运行 方式	工频过电压			
		无故障甩负荷		单相接地甩负荷	
		母线侧	线路侧	母线侧	线路侧
B站侧	双回运行	1.06	1.07	1.05	1.07
	单回运行	1.06	1.06	1.04	1.06
A站侧	双回运行	0.99	1.00	1.03	1.16
	单回运行	0.99	0.99	1.05	1.15

由计算结果可以看出，工频过电压均不超过1.2（pu），在允许的范围内；在不装设高抗的条件下，该线路的工频过电压仅升高了0.01（pu）。

根据以往工程经验，装设线路高抗后，在断路器的开断过程中，其恢复电压波形呈拍频特性，在此条件下断路器不易发生重击穿。而在无高抗的条件下，断路器恢复电压上升得较快，在某些特殊条件下，可能超出断路器的耐受水平，从而导致断路器的重击穿。运行经验也表明，断路器切断容性电流时重击穿均发生在未装设高抗的线路上。考虑到本站的重要性，且为未来的运行方式提供更多的可能性，本工程在A站每回线路侧各装设一组120 Mvar高抗。

潜供电流和恢复电压

在电力系统中，一般采用快速单相自动重合闸方式来提高供电的可靠性。由于相间互感和相间电

容的耦合作用，被切除的故障相在故障点会以弧光形式出现接地电流，这就是潜供电流。由于相间的耦合作用，在电弧熄灭后弧隙出现恢复电压，这会增加故障点自动熄弧的难度，导致重合闸失败。在线路高抗中性点装设适当阻值的小电抗，会有效地抑制潜供电流和恢复电压的幅值。本工程中，虽然电缆部分无须考虑潜供电流问题，但是为了给运行部门提供更多的运行可能性，与电缆相连的架空输电线路还须考虑单相重合闸过程中的潜供电流和恢复电压问题。

当A站侧每回装设一组120 Mvar的高抗（其中性点不装设小电抗）时，线路架空部分回路的潜供电流和恢复电压见表3；A站侧不装设高抗时的计算结果见表4，单回运行时的最大线路潮流按2 000 MW考虑。

表3 线路（架空部分）的潜供电流和恢复电压（120 Mvar高抗）

运行 方式	高抗容量/Mvar		故障相	潜供电流/A		恢复电压/kV	
	B站侧	A站侧		送端	受端	送端	受端
正常 方式	—	120	A	3.6	3.4	6.9	6.5
			B	3.6	3.4	7.1	6.6
			C	4.0	3.8	7.8	7.4
正常 方式下退 出一回	—	120	A	3.1	3.0	5.9	5.7
			B	3.8	3.6	7.3	6.9
			C	3.5	3.3	6.8	6.5

表4 线路（架空部分）的潜供电流和恢复电压（无高抗）

运行 方式	高抗容量/Mvar		故障相	潜供电流/A		恢复电压/kV	
	B站侧	A站侧		送端	受端	送端	受端
正常 方式	—	—	A	3.8	3.4	4.1	3.7
			B	3.9	3.5	4.2	3.8
			C	4.2	3.8	4.6	4.2
正常 方式下退 出一回	—	—	A	3.2	2.9	3.5	3.2
			B	3.9	3.6	4.3	3.9
			C	3.6	3.3	4.0	3.7

可以看出，在上述高抗配置下，线路潜供电流和恢复电压分别为4.0 A和7.8 kV；A站侧不装设高抗时，相应的潜供电流和恢复电压分别为4.2 A和4.6 kV。二者均可满足快速单相重合闸的要求。由于本期工程在不装设中性点小电抗的情况下就可以满足潜供电流和恢复电压的要求，但为了以后更多的运行可能性，本期不装设中性点小电抗，仅预留安装位置。

感应电压和感应电流

当同塔双回线路一回正常运行，另一回停运检修时，由于回路间存在静电和电磁耦合，在停运线路上感应出电压和电流。根据标准，500 kV接地开关的额定感应电流和额定感应电压的标准值见表5。

表5 接地开关的额定感应电流和额定感应电压的标准值

额定电压/kV	电磁耦合				静电耦合			
	感应电流/A (有效值)		感应电压/kV (有效值)		感应电流/A (有效值)		感应电压/kV (有效值)	
	A类	B类	A类	B类	A类	B类	A类	B类
550	80	200	2	25	2	25	8	25

A站侧每回高抗容量为120 Mvar（其中性点不装设小电抗），感应电压和感应电流见表6。

表6 感应电压和感应电流

高抗容量/Mvar		静电耦合		电磁耦合	
B站侧	A站侧	感应电压/kV	感应电流/A	感应电压/kV	感应电流/A
—	120	3.1	1.6	1.5	175.2
—	—	1.9	1.8	1.5	175.5

由计算结果可以看出，A站侧装设120 Mvar高抗条件下，电磁耦合感应电流可达175.2 A，超过了A类开关标准（80 A）。为此，建议接地开关参数可按下列要求选取：静电耦合感应电压25 kV，静电耦合感应电流25 A，电磁耦合感应电压25 kV，电磁耦合感应电流200 A，选用B类接地开关。

操作过电压研究

500 kV线路操作过电压不宜超过2.0（pu）。在计算合闸操作过电压时，考虑了断路器合闸时间的随机性。断路器随机合闸300次，取每次合闸三相中最高过电压值进行统计，线路断路器三相合闸分散性不大于5 ms。

线路及变电站配置金属氧化物避雷器（MOA），母线侧MOA 额定电压为420 kV，线路侧MOA额定电压为444 kV。此外，在架空和电缆线路的连接处，还应每回装设一组MOA。否则，当架空线路上发生雷击时，雷电波就有可能沿架空线路侵入电缆部分，从而导致电缆绝缘的损坏。MOA的最大允许能耗按10 kJ/kV考虑。

1. 混合线路的相对地操作过电压

500 kV混合线路的地下电缆和架空线路部分在合空线或单相重合闸过程中的相对地操作过电压见表7、表8。

表7 500 kV混合线路电缆部分的最大操作过电压

操作地点	线路运行方式	合闸电阻/ Ω	合空线最大操作过电压（pu）			单相重合闸最大操作过电压（pu）		
			首端	沿线	末端	首端	沿线	末端
B站	双回	无	1.75	1.83	1.85	1.46	1.54	1.58
		400	1.16	1.19	1.20	1.03	1.04	1.05
	单回	无	1.70	1.82	1.83	1.45	1.51	1.53
		400	1.16	1.18	1.20	1.04	1.06	1.06
A站	双回	无	1.72	1.73	1.73	1.65	1.67	1.67
		400	1.27	1.27	1.27	1.18	1.18	1.18
	单回	无	1.72	1.73	1.73	1.65	1.67	1.67
		400	1.27	1.27	1.27	1.16	1.17	1.17

表8 500 kV混合线路架空部分的最大操作过电压

操作地点	线路运行方式	合闸电阻/ Ω	合空线最大操作过电压（pu）			单相重合闸最大操作过电压（pu）		
			首端	沿线	末端	首端	沿线	末端
B站	双回	无	1.27	1.54	1.71	1.12	1.39	1.46
		400	1.07	1.12	1.15	0.97	1.02	1.03
	单回	无	1.44	1.56	1.67	1.28	1.39	1.45
		400	1.09	1.13	1.15	0.99	1.02	1.05
A站	双回	无	1.73	1.73	1.73	1.68	1.68	1.68
		400	1.26	1.27	1.27	1.19	1.19	1.20
	单回	无	1.73	1.73	1.73	1.67	1.68	1.68
		400	1.26	1.26	1.27	1.17	1.18	1.19

由计算结果可以看出：

1) 由B站侧操作时，若B站侧线路断路器不装设合闸电阻，仅由线路两侧及电缆两端的MOA限制操作过电压，则合空线和单相重合闸时电缆线路部分相对地最大操作过电压为1.85（pu），架空线路部分相对地最大操作过电压为1.71（pu）。

2) 从A站侧操作时，若A站侧线路断路器不装设合闸电阻，仅由线路两侧及电缆两端的MOA限制操作过电压，则合空线和单相重合闸时电缆线路部分相对地最大操作过电压为1.73（pu），架空线路部分相对地统计操作过电压为1.73（pu）。值得注意的是，由A站侧操作时母线上的过电压较高，这与A站侧的电源容量较小且A站母线上无其他500 kV出线有关。

2. 操作过电压下金属氧化物避雷器的工况

在线路断路器不装设合闸电阻, 仅由线路两侧MOA限制操作过电压的情况下, MOA一般要吸收更多的能量。因此, 有必要对MOA在操作过电压下的能耗和电流等工况进行核算。合空载线路操作时MOA的最大能耗和峰值电流见表9。

表9 合空载线路时MOA的工况

操作地点	母线侧MOA		线路侧MOA		连接处MOA	
	能耗/kJ	电流/A	能耗/kJ	电流/A	能耗/kJ	电流/A
B站	3.1	26.1	84.7	811.9	20.3	246.7
A站	449.8	604.1	150.3	180.2	146.5	198.2

由计算结果可以看出: 即使在不投入合闸电阻的条件下, 变电站母线侧和线路侧MOA的最大能耗分别为450.0 kJ和150.3 kJ, 电缆和架空线路连接处MOA的最大能耗为146.5 kJ, 均有较大的裕度。因此, 500 kV输变电系统中断路器的母线侧和线路侧分别选用额定电压420 kV和444 kV的MOA, 电缆和架空线路连接处选用额定电压为444 kV的MOA是可行的。

3. 小结

根据本节的结果, 若线路两侧断路器均不装设合闸电阻, 则500 kV混合线路电缆部分的最大操作过电压为1.85 (pu), 而架空线路部分的统计操作过电压为1.73 (pu)。假如是纯架空线路, 在这样的操作过电压水平下, 线路断路器是没有必要装设合闸电阻的。然而, 电缆线路的绝缘为非自恢复绝缘, 一旦发生绝缘故障, 则可能带来严重的损失, 故其绝缘水平应留比架空线路更大的裕度。考虑到工程的重要性, 为了给未来系统的运行方式提供更多的可能性, 同时考虑电缆和架空线实际设计施工时可能存在的变数, 因此在电缆线路的绝缘配合时, 应留出较大的裕度, 建议装设400 Ω 的合闸电阻。

结束语

通过对A站 500 kV输变电工程的电磁暂态研究, 可以得到如下结论:

- 1) 500 kV侧工频过电压均不超过1.2 (pu),

且在允许的范围内。结合以往运行经验, 考虑到本站的重要性, 且为未来的运行方式提供更多的可能性, 本工程在A站每回线路侧各装设一组120 Mvar高抗。

- 2) 当线路A站侧每回装设一组120 Mvar的高抗(其中性点不装设小电抗)时, 线路潜供电流和恢复电压可满足快速单相重合闸的要求。但为了以后更多的运行可能性, 本期不装设中性点小电抗, 仅预留安装位置。

- 3) 当一回停运且线路潮流不超过2 000 MW时, 电磁耦合感应电流可达175.2 A, 超过了A类开关标准(80 A), 建议500 kV接地开关选用B类。

- 4) 分别在A站和B站侧操作时, 不装设线路断路器合闸电阻, 操作过电压水平可满足要求。但考虑到电缆部分的造价较高, 且存在绝缘老化问题等因素, 为了保证电缆线路的安全运行, 须尽可能地降低沿线的操作过电压水平。为此, 建议在两侧变电站内断路器装设400 Ω 的合闸电阻。

- 5) 为了防止雷电波经由架空线路侵入电缆线路, 应在电缆和架空线路的连接处装设MOA。经过计算, 在A站 500 kV母线侧和线路侧分别选用额定电压420 kV和444 kV的MOA, 电缆和架空线路连接处选用额定电压为444 kV的MOA是可行的。EA

(收稿日期: 2021-10-08)

参考文献

- [1] 夏泉著. 城市户内变电站设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范: GB/T 50064—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [3] 和彦森, 宋杲, 曹荣江, 等. 1 000 kV特高压输电线路潜供电弧试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16): 138-143.
- [4] 中国国家标准化管理委员会. 高压交流隔离开关和接地开关: GB 1985—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.