

# 特高压半波长交流输电系统电磁暂态特性分析

韩彬, 林集明, 班连庚, 项祖涛

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## Analysis on Electromagnetic Transient Characteristics of UHV Half-wavelength AC Transmission System

HAN Bin, LIN Jiming, BAN Liangeng, XIANG Zutao

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** The geographical positions of main energy resources in China are far from load centers, and the distances between energy resources and load centers are close to half-wavelength of power frequency. UHV half-wavelength AC power transmission can be regarded as one of the selectable schemes to send large capacity of electric power via long distance. Based on parameters of UHVAC transmission line in China and referring to the UHVAC transmission system being planned, a model to research UHV half-wavelength AC power transmission is built and by which such problems in half-wavelength power transmission as power frequency overvoltage, switching overvoltage, overvoltage caused by grounding faults and secondary arc current are simulated and researched. Based on the results from simulation and research, several measures to suppress these kinds of overvoltages and secondary arc current are proposed.

**KEY WORDS:** half-wavelength transmission; ultra high voltage; overvoltage; secondary arc current

**摘要:** 我国主要能源基地到负荷中心距离较远, 接近工频半波长范围, 特高压交流半波长输电可以作为超远距离、大容量电力送出的一种可选方案。基于我国特高压线路参数并参考规划中的特高压系统, 建立了特高压半波长输电系统研究模型, 对特高压交流半波长输电的工频过电压、操作过电压、接地故障过电压以及潜供电流等问题进行仿真研究, 给出了限制过电压和潜供电流的措施。

**关键词:** 半波长输电; 特高压; 过电压; 潜供电流

## 0 引言

半波长交流输电技术是指输电的电气距离接近 1 个工频半波, 即 3 000 km(50 Hz)或 2 600 km(60 Hz)的超远距离三相交流输电技术, 此项技术由原苏联专家提出, 因当时没有工程需求以及一些关键技术尚未解决, 迄今为止在世界范围内还没有真正投入使用。半波长输电技术作为一种特殊的超长

距离交流输电方式, 与常规交流输电相比, 有一些截然不同特性和优势<sup>[1-9]</sup>:

1) 全线无需安装无功补偿设备。常规的超/特高压输电, 空载线路末端电压随着线路长度的增加而增大, 在最不利的条件下, 可升高到电源电压的数倍以上, 安装大量的无功补偿设备如高压电抗器是必不可少的。半波长输电线路沿线电压的变化规律则完全不同, 当线路长度等于或略大于半波长时, 线路两端电压始终保持或接近相等, 线路中不用安装无功补偿设备<sup>[2]</sup>。

2) 输送能力更强。在 1 个标准半波长的线路中, 其理论上的最大输送容量可以达到无穷大。但是, 从过电压限制、线路容量、电晕损耗等因素考虑, 3 000 km 左右的半波长输电的最大传输容量可以达到 1.0~1.2 倍的自然功率。

3) 全线无需设中间开关站。如果用常规的超/特高压交流输电进行远距离输电, 因为稳定裕度和无功补偿的需要, 长线路需要分段并设开关站; 而半波长输电技术因为没有无功补偿的需要、且具有输送大功率的能力, 从理论上讲不需要设中间开关站, 可以和直流输电一样实现真正的点对点输电或点对网输电<sup>[2]</sup>。

我国能源分布不均匀, 远距离、大容量的输电方式不可避免。一些能源基地到负荷中心距离接近半波长输电要求的工频半波长范围, 特高压半波长输电技术可以作为这些大容量电力送出的备选方案<sup>[10-11]</sup>。我国 1 000 kV 交流特高压试验示范工程已于 2009 年初建成投运, 一直安全、稳定、可靠地运行, 这标志着我国已全面具备特高压输电的科研、制造、设计和运行方面的能力, 这也为特高压半波长输电提供了可能<sup>[12-14]</sup>。

采用特高压半波长输电技术的远距离输电线路在系统过电压、潜供电流等电磁暂态特性方面与普通输电线路有明显不同。本文对特高压半波长输电线路的工频过电压、操作过电压、潜供电流等进行研究。

### 1 特高压半波长交流输电系统的工频过电压

结合我国特高压电网规划，选用新疆火电送出到华东电网的假想输电系统作为研究对象，输电线路长度假定为 3 000 km，输电系统示意如图 1 所示。线路为单回架设，线路杆塔采用特高压试验示范工程的杆塔结构。

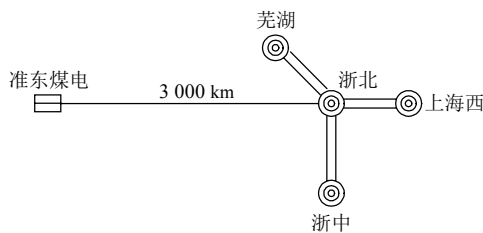


图 1 特高压半波长输电系统示意

Fig. 1 The scheme of UHV half-wavelength transmission system

系统中的工频过电压一般由线路空载、接地故障和甩负荷等引起，对最高电压超过 252 kV 的系统的工频过电压，在设计时应结合实际条件加以预测，通常可取正常送电状态下甩负荷和在线路受端有单相接地故障情况下甩负荷作为确定系统工频过电压的条件<sup>[15]</sup>。结合我国特高压系统的实际情况，研究了特高压半波长输电系统可能出现的最大工频暂时过电压。

1) 正常送电状态下甩负荷。图 2 给出了受端和送端发生无故障甩负荷时，工频过电压的沿线分布。由图 2 可知，发生无故障甩负荷时，线路两侧及沿线工频过电压均不高，都不超过 1.2 pu。

2) 线路发生接地故障三相甩负荷。线路有故障存在时，若继电保护和断路器正常动作，过电压存在时间为两侧断路器跳闸的间隔时间，只有当继

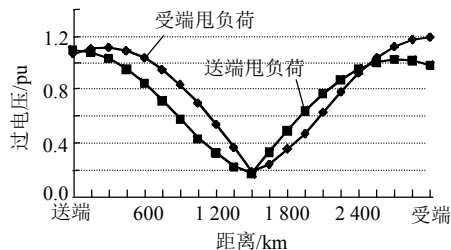


图 2 无故障甩负荷情况下工频过电压的分布

Fig. 2 Profile of power frequency overvoltage after load rejection

电保护或断路器拒动时，才可能出现较长时间带接地故障甩负荷的情况。但系统中一般有多套继电保护装置，多套保护同时拒动的可能性极低，一般只考虑断路器拒动的情况，而特高压断路器是分相操作，不可能三相都拒动，一般只考虑单相拒动。因此，这种线路发生单相故障三相甩负荷过电压存在时间为两端断路器正常动作时间差，实际上为 10~50 ms。由于其存在时间较短，此过电压可按照操作过电压考虑，其过电压限制水平可参考操作过电压水平。考虑发生单相接地故障甩负荷的暂态过程为：发生单相接地故障后一侧断路器首先跳闸，50 ms 后另外一侧断路器跳闸。表 1 给出了特高压半波长线路发生单相接地故障甩负荷时过电压的计算结果。如果仅线路两侧装设金属氧化物避雷器 (metal oxide arrester, MOA)，发生单相故障甩负荷时线路两侧及沿线过电压非常高，沿线最高过电压超过 3.8 pu，线路两端最高过电压超过了 1.7 pu。必须加以限制，其限制方式可按操作过电压考虑并要求 MOA 要有足够的承受能力。

表 1 单相接地故障甩负荷时系统的过电压 (仅考虑线路两端 MOA)

Tab. 1 Overvoltage during load rejection with single-phase ground fault (on condition that only MOA at both ends is considered)

甩负荷侧	过电压/pu			单组 MOA 能耗/MJ
	变电站	线路两端	沿线	
送端	1.64	1.71	3.78	49.9
受端	1.66	1.74	3.88	99.1

### 2 特高压半波长交流输电系统的操作过电压

#### 2.1 仅在线路两端装设 MOA 时合闸操作过电压

断路器装设合闸电阻、线路两端及变电站装设 MOA 时特高压半波长输电线路的合闸操作过电压计算结果见表 2，图 3 给出了进行合闸操作时操作过电压的沿线分布。由表 2、图 3 可以看出，合闸操作过电压有以下特点：

1) 特高压半波长输电线路合闸操作过电压分布呈线路中间低，两端高的分布。过电压最大值出现在空载线路靠近末端部分。

2) 特高压半波长输电线路合闸操作相对地 2% 统计操作过电压母线侧最高为 1.37 pu，线路侧最高

表 2 特高压半波长输电线路合闸操作过电压

Tab. 2 Closing overvoltage in UHV half-wavelength lines

操作点	相对地 2%统计过电压/pu		
	变电站	线路两端	沿线
送端	1.37	1.58	1.76
受端	1.3	1.58	1.77

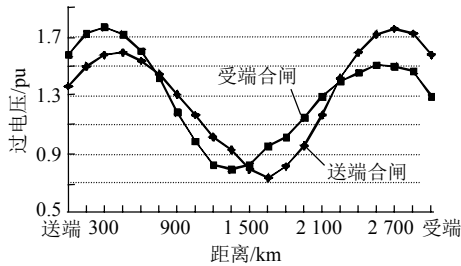


图3 合闸操作过电压沿线分布

Fig. 3 Profile of closing overvoltage

为 1.58 pu, 沿线最高 1.77 pu, 仅在靠近线路末端部分线段过电压超过了 1.7 pu。

## 2.2 仅在线路两端装设 MOA 时接地故障过电压

半波长线路接地故障过电压的特点与普通线路有较大差别。在仅考虑线路两端和变电站装设 MOA 的情况下, 计算了线路不同故障点发生单相、两相、三相接地故障时的过电压。图 4 给出了距送端 2600 km 处故障时, 线路过电压典型波形, 所示波形为断路器在故障后 100 ms 跳闸。半波长线路发生接地故障时, 线路过电压有如下特点:

1) 半波长线路发生接地故障后, 线路过电压与故障点有关; 在线路中部发生故障时过电压相对较低。

2) 短路故障发生后的数个周期内线路电压会不断升高, 直到故障相断路器跳闸后, 线路上过电压会迅速衰减; 因此接地故障过电压还与断路器动作时间有关, 断路器在故障后越早开断, 过电压就越低。

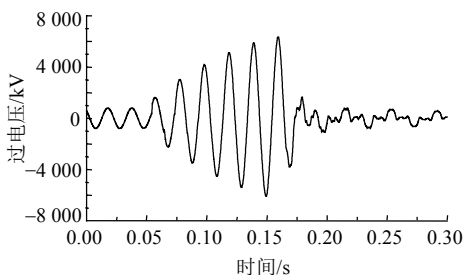


图4 三相接地故障线路电压典型波形(仅两端 MOA)

Fig. 4 Typical waveform of overvoltage during 3-phase-ground fault (with MOA on both side of the line)

特高压半波长线路不同故障点发生单相、两相、三相接地故障时的最大过电压计算结果见表 3。在发生单相接地故障时, 线路两侧过电压最高 1.51 pu, 沿线过电压较高, 故障相可达 4.2 pu, 而健全相也达 2.48 pu, 健全相过电压较高可导致健全相发生对地闪络从而产生多相故障, 因此对此种过电压必须采取进一步措施加以限制; 此外对于两相及三相接地故障过电压, 线路两端过电压超过

表3 接地故障过电压的计算结果

Tab. 3 Simulation results of grounding fault overvoltage

故障类型	相对地 2%统计过电压/pu			
	观察相	母线侧	线路侧	沿线
单相接地	故障相	1.51	1.51	4.24
	健全相	1.36	1.36	2.48
两相接地	三相	1.69	1.69	6.98
三相接地	三相	1.70	1.70	7.19

1.6 pu, 也必须加以限制。

## 2.3 进一步限制过电压的措施

目前, 我国特高压系统操作过电压限制目标规定为: 对于线路两端变电站、开关站设备相对地统计操作过电压应限制在 1.6 pu 以下, 对于长线路的线路中间部分限制在 1.7 pu 以下。仅采用断路器合闸电阻和线路两端装设 MOA 不能将特高压半波长线路操作过电压限制在允许范围内, 需考虑其他限制措施。

随着 MOA 性能的提高, 使用 MOA 限制短时高幅值的过电压成为可能, 但这会对其能量提出很高的要求, 因此考虑采用多组 MOA 并联。同时由于接地故障时沿线过电压均较高, 考虑在线路沿线也装设 MOA。根据过电压研究结果, 综合了不同的 MOA 沿线布置方案后, 建议可采取沿线每 100 km 装设 2 组额定电压 876 kV 的 MOA, 线路两端各装设 3 组额定电压 828 kV 的 MOA 的布置方案。

表 4 给出了采用上述 MOA 布置方案后, 特高压半波长线路接地故障甩负荷过电压的计算结果。

表4 沿线装设 MOA 后接地故障甩负荷过电压

Tab. 4 Overvoltage during load rejection with single-phase ground fault while multi-MOAs are installed

甩负荷侧	过电压/pu			MOA 能耗/MJ
	变电站	线路两端	沿线	
送端	1.55	1.56	1.62	15.4
受端	1.50	1.57	1.66	28.0

采取沿线装设 MOA 的措施之后, 线路发生单相接地甩负荷时, 沿线过电压均不超过 1.66 pu, 两端过电压不超过 1.57 pu, 单组 MOA 能耗不超过 28 MJ。

表 5 给出了采用上述 MOA 布置方案后, 特高压半波长线路合闸操作过电压的计算结果。采用了上述 MOA 布置后, 如果断路器不装设合闸电阻, 合空线相对地 2%统计操作过电压母线侧最高为 1.45 pu, 沿线最高 1.60 pu, MOA 能耗均较低, 过电压均在我国特高压系统过电压允许水平之内。如断路器装有合闸电阻, 合闸过电压可进一步降低。图 5 给出了进行合闸操作时操作过电压的沿线分

表 5 沿线装设 MOA 后的合闸操作过电压  
Tab. 5 Closing overvoltage when MOAs are installed along the line

合闸 电阻	操作 地点	相对地 2%统计过电压/pu			MOA 能耗/ MJ
		变电站	线路两端	沿线	
无	送端	1.45	1.53	1.6	0.84
	受端	1.41	1.53	1.6	0.87
有	送端	1.34	1.53	1.59	0.66
	受端	1.28	1.52	1.58	0.53

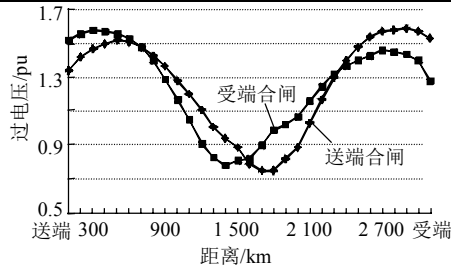


图 5 合空线沿线过电压分布(沿线装设 MOA)

Fig. 5 Profile of closing overvoltage (with multi-MOAs)

布, 与只在线路两端装设 MOA 相比, 沿线过电压明显降低。

表 6 给出了采用上述 MOA 布置方案后, 特高压半波长线路接地故障过电压的计算结果。发生单相和多相接地故障时, 相对地 2%统计操作过电压母线侧最高为 1.57 pu, 沿线最高 1.68 pu。过电压均在目前我国特高压系统过电压允许水平之内, MOA 最大能耗 21.0 MJ。图 6 给出了距送端 2 600 km 处三相接地故障时, 线路过电压电压典型波形, 与图 4 相比较可看出, 过电压得到了明显抑制。

表 6 沿线装设 MOA 后的接地故障过电压  
Tab. 6 Ground fault overvoltage while MOAs are installed along the line

接地 故障	观察相	相对地 2%统计过电压/pu			MOA 能耗/ MJ
		变电站	线路两端	沿线	
单相	故障相	1.48	1.48	1.64	7.9
	健全相	1.38	1.38	1.66	
两相	三相	1.56	1.56	1.68	19.7
三相	三相	1.57	1.57	1.68	21.0

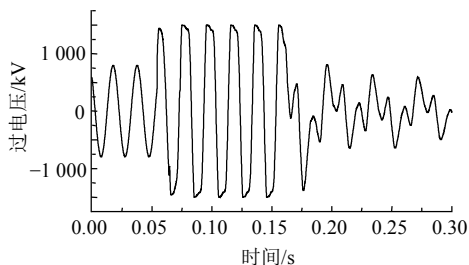


图 6 三相接地故障电压波形(沿线装设 MOA)

Fig. 6 Typical waveform of overvoltage during 3-phase-ground fault (with MOAs along the line)

### 3 潜供电流和恢复电压及其抑制措施

半波长输电线路的潜供电流和恢复电压较常

规线路要大得多。图 7、8 分别给出了特高压半波长输电线路潜供电流和恢复电压沿线分布, 由图 7、8 可知: 不采取限制措施时, 潜供电流和恢复电压都非常高, 恢复电压超过了 600 kV, 潜供电流超过了 500 A, 这样大的潜供电流难以熄灭, 不能满足单相重合闸的要求<sup>[15-20]</sup>。

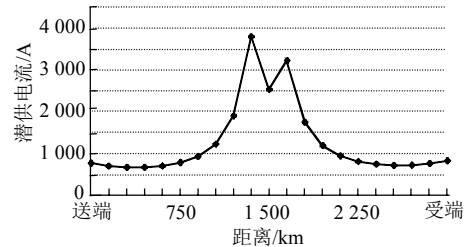


图 7 特高压半波长线路潜供电流沿线分布

Fig. 7 Profile of secondary arc current in UHV half-wave-length lines

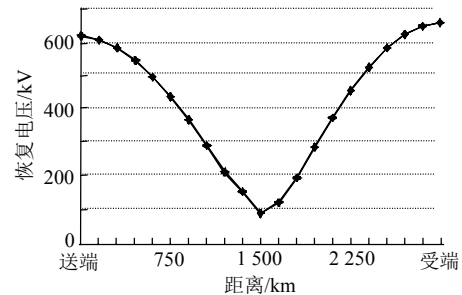


图 8 特高压半波长线路恢复电压沿线分布

Fig. 8 Profile of recovery voltage in UHV half-wave-length lines

限制潜供电流的一种方法为采用高速接地开关, 在线路两端以及沿线装设多组高速接地开关的情况下, 潜供电流和恢复电压较不装设时有较大的降低。在装设 6 组、8 组或 10 组高速接地开关时, 潜供电流分别下降到 111、54、37 A, 虽然潜供电流仍然较大, 但恢复电压分别不超过 15、10.2、6.2 kV, 恢复电压梯度不超过 2 kV/m, 有利于潜供电弧的熄灭。参照我国相关试验结果, 恢复电压梯度 10 kV/m, 潜供电流在 50 A 时, 潜供电弧自灭时间小于 0.8 s, 考虑到恢复电压梯度较小, 熄灭时间可能更短。但需要指出的是, 由于沿线要装设多组高速接地开关, 继电保护控制比较复杂, 并对设备可靠性提出了很高的要求。

此外, 还可在线路一端装设可控补偿装置以加速潜供电流熄灭, 文献[7]给出了其原理图, 在线路不同故障点故障时, 通过可控的补偿电路向系统中注入或吸收一定的有功和无功, 从而达到限制潜供电流的目的, 其原理如图 9 所示。

表 7 给出了补偿电路补偿后的潜供电流和恢

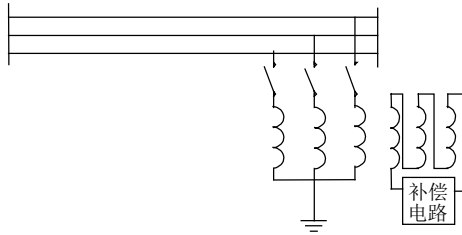


图9 一种可控补偿的方法限制潜供电流的原理图

Fig. 9 Scheme of controllable compensating circuit to suppress secondary arc current

表7 补偿电路的补偿功率和补偿后的潜供电流和恢复电压

Tab. 7 Compensation power and secondary arc current and recovery voltage after compensation

故障点距离/km	潜供电流/A	恢复电压/kV
送端	0.1	1.2
300	0.6	1.1
600	0.1	0.1
900	0.7	0.6
1 200	3.7	0.8
1 500	2.3	0.3
1 800	1.1	0.6
2 100	0.6	0.8
2 400	0.8	1.4
2 700	0.4	0.7
受端	0.1	1.5

复电压, 结果表明: 采用可控补偿电路可以有效地限制潜供电流和恢复电压, 但对于加速潜供电流熄灭的可控补偿装置的具体实现方法还需要进一步研究。

#### 4 结论

1) 特高压半波长输电线路无故障甩负荷时, 线路两侧及沿线工频过电压均不高, 都不超过 1.2 pu; 线路发生单相接地故障三相甩负荷时, 半波长输电线路可能出现高于常规线路的过电压, 根据特高压线路继电保护和断路器三相分相操作的特点, 这种过电压实际持续时间为 10~50 ms。由于其存在时间较短, 该过电压可按照操作过电压考虑, 其过电压限制水平可参考操作过电压水平。

2) 特高压半波长线路合闸操作过电压分布呈线路中间低, 两端高的分布, 过电压最大值出现在空载线路靠近末端部分; 接地故障过电压在线路两端及沿线均较高, 且受故障点影响较大。总体上看, 仅靠线路两端 MOA 无法限制长达 3 000 km 左右线路的操作过电压。

3) 采取线路两端装设 3 组额定电压 828 kV 的 MOA, 沿线每 100 km 装设 2 组额定电压 876 kV 的 MOA 的措施后, 可将单相接地甩负荷过电压、合

闸操作过电压、单相和多相接地故障过电压限制在我国特高压系统过电压允许范围内。

4) 对于特高压半波长线路, 不采取限制措施时, 潜供电流和恢复电压均非常高, 远大于一般的线路, 不能满足单相重合闸的要求。在线路两端以及沿线装设多组高速接地开关的情况下, 潜供电流和恢复电压有较大的降低, 但沿线装设多个高速接地开关的控制较复杂。采用在线路故障相的一端或两端投入附加补偿装置, 也可以有效地限制潜供电流及恢复电压, 对于其具体实现方法还需要进一步研究。

#### 致 谢

感谢国家电网公司对本项目的大力支持和资助。本项目也得到郑健超院士的指导和帮助, 特此致谢。

#### 参考文献

- [1] Lliceto F, Cinieri E. Analysis of half-wave length transmission lines with simulation of corona losses[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(4): 2081-2091.
- [2] 郑健超. 智能电力设备与半波长交流输电[J]. 动力与电气工程, 2009(3): 12-15.
- [3] Hubert F J, Gent M R. Half-wavelength power transmission lines[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1965, 84(10): 965-974.
- [4] Prabhakara F S, Parthasarathy K, Ramachandra H N. Analysis of natural half-wave-length power transmission lines[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(12): 1787-1794.
- [5] Prabhakara F S, Parthasarathy K, Ramachandra H N. Performance of tuned half-wave-length power transmission lines[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(12): 1795-1802.
- [6] Aredes M, Portela C, Emmerik E L, et al. Static series compensators applied to very long distance transmission lines[J]. Electrical Engineering, 2004, 86(2): 69-76.
- [7] Gatta F M, Lliceto F. Analysis of some operation problems of half-wave length transmission lines[C]//Proceedings of the 3rd Africon Conference. Ezulwini Valley, Swaziland: IEEE, 1992: 59-64.
- [8] Tavares M C, Portela C M. Half-wave length line energization case test-proposition of a real test[C]//International Conference on High Voltage Engineering and Application. Chongqing, China: IEEE, 2008, 261-264.
- [9] Dias R, Santos G, Aredes M. Analysis of a series tap for half-wavelength transmission lines using active filters[C]//IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference. Recife, Brazil: IEEE, 2005: 1894-1900.
- [10] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005: 25-25.
- [11] 王秀丽, 宋永华, 王海军. 新型交流输电技术现状与展望[J]. 中国电力, 2003, 36(8): 40-46.

Wang Xiuli, Song Yonghua, Wang Haijun. Development and

- application of advanced transmission systems[J]. Electric Power, 2003, 36(8): 40-46(in Chinese).
- [12] 吴敬儒, 徐永禧. 我国特高压交流输电发展前景[J]. 电网技术, 2005, 29(3): 1-4.  
Wu Jingru, Xu Yongxi. Development prospect of UHV AC power transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(3): 1-4(in Chinese).
- [13] 张运洲, 韩丰, 赵彪, 等. 直流电压等级序列的经济比较[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 38-41.  
Zhang Yunzhou, Han Feng, Zhao Biao, et al. Economic comparison of HVDC voltage class sequence[J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 38-41(in Chinese).
- [14] 周浩, 余宇红. 我国发展特高压输电中一些重要问题的讨论[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 1-9.  
Zhou Hao, Yu Yuhong. Discussion on several important problems of developing UHV AC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 1-9(in Chinese).
- [15] 中华人民共和国电力工业部. DL/T 620—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, 1998.
- [16] 韩彬, 林集明, 班连庚, 等. 1000 kV 特高压交流试验示范工程单相重合闸研究[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 20-23.  
Han Bin, Lin Jiming, Ban Liangeng, et al. Study on single-phase reclosing issues for 1000 kV UHV AC transmission pilot project [J]. Power System Technology, 2008, 33(6): 20-23(in Chinese).
- [17] 张媛媛, 班连庚, 林集明, 等. 1000 kV 同塔双回输电线路潜供电流研究[J]. 电网技术, 2009, 33(15): 87-92.  
Zhang Yuanyuan, Ban Liangeng, Lin Jiming, et al. Research on secondary ARC current of 1000 kV double-circuit transmission lines on the same tower[J]. Power System Technology, 2009, 33(15): 87-92(in Chinese).
- [18] 林集明, 郑建超. 特高压半波长交流输电技术经济可行性初步研究总结报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2010.
- [19] 秦晓辉, 张志强. 特高压半波长交流输电系统稳态特性及暂态稳定研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2010.
- [20] 韩彬, 林集明, 张翠霞. 特高压半波长交流输电技术电磁暂态及绝缘配合研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2010.



韩彬

收稿日期: 2011-06-09。

作者简介:

韩彬(1983), 男, 工程师, 主要研究方向为电力系统电磁暂态分析与仿真, E-mail: hanbin@epri.sgcc.com.cn;

林集明(1941), 男, 教授级高级工程师, 博士生导师, 从事电力系统电磁暂态分析与仿真研究工作;

班连庚(1960), 男, 教授级高级工程师, 从事电力系统电磁暂态分析与仿真研究工作;

项祖涛(1976), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统电磁暂态分析与仿真。

(编辑 蒋毅恒)