

特高压半波长交流输电系统稳态及暂态运行特性

周静姝¹, 马进¹, 徐昊¹, 李博²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206;

2. 肥东电力公司, 安徽省 合肥市 231600)

Steady State and Transient Operational Characteristics of UHV Half-wavelength AC Transmission System

ZHOU Jingshu¹, MA Jin¹, XU Hao¹, LI Bo²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China; 2. Feidong Power Supply Company, Hefei 231600, Anhui Province, China)

ABSTRACT: The features of half-wavelength AC transmission (HWACT) are analyzed and the accuracy of sectionalized equivalence of HWACT applied in simulation is verified. Through simulation and analysis the steady state and transient operational characteristics of HWACT connected to UHVAC power grid are obtained, including the influences of transmitted power and power factor on voltage distribution along HWACT line, line loss rate, power flow distribution of transmission network and overvoltage of HWACT line under load shedding, no-load line and fault conditions. Simulation results show that overvoltage appears while the transmitted power exceeds natural load of HWACT line; power factor influences the position where the maximum voltage along the line appears; the line loss rate reaches its minimum value when the transmitted power is equal to its natural load; overvoltages with different maximums appear while load is shed or short-circuit fault occurs, etc. According to simulation results, some suggestions on the design of HWACT line are proposed.

KEY WORDS: ultra-high voltage (UHV); half-wavelength AC transmission (HWACT); steady-state operational characteristics; transient operational characteristics

摘要: 分析了半波长交流输电线路的特性, 验证了在仿真分析中半波长线路的分段等值法的准确性。通过仿真分析, 得出半波长线路接入特高压电网中的稳态及暂态特性: 包括功率以及功率因数对沿线电压分布的影响, 线损率、输电网潮流分布、甩负荷以及故障情况下输电线路沿线过电压情况。仿真结果表明, 沿线在输送超过自然功率时会出现过电压,

功率因数影响沿线最大电压的位置, 线损率在输送自然功率时最小, 在甩负荷以及短路故障情况下, 沿线会出现不同程度的过电压等。基于仿真结果, 提出了半波长交流输电线路接入电网的设计建议。

关键词: 特高压; 半波长交流输电; 稳态特性; 暂态特性

0 引言

当在全国范围内优化能源资源、配置成为一种必然而迫切的选择时, 大容量、远距离、低损耗输电的特高压电网与这种需要紧紧契合^[1]。跨入新世纪以来, 加快建设特高压电网为核心的坚强的国家电网, 具有重大现实意义和历史意义^[2]。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, 约 3 000 km(50 Hz)或 2 600 km(60 Hz)的超远距离三相交流输电技术^[3]。为将分布在距离负荷中心约 3 000 km 处的电能输送至负荷中心并减小输电损耗, 特高压半波长交流输电技术由于其经济性成为很有竞争力的输电方法^[4]。因此, 非常有必要针对半波长交流输电的关键技术开展深入研究^[3]。1940 年由前苏联专家首次提出半波长输电, 有学者认为, 半波长线路输送的功率不应超过 1.2 倍自然功率, 若不加强线路中段的绝缘水平, 则半波长输电线路输送的功率应不超过自然功率^[5], 文献[6]对于半波长线路的 2 种可能的线路参数补偿措施作了比较。本文对半波长线路接入特高压系统后的稳态及暂态运行特性进行分析。

1 半波长交流线路沿线电压和电流特性

线路空载时, 半流长交流线路的沿线电压和电流曲线如图 1 所示。当线路空载时, 沿线电压在首

基金项目: 国家自然科学基金项目(51077049, 50707009); 北京市科技新星计划; “111”引智计划(B08013)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51077049, 50707009).

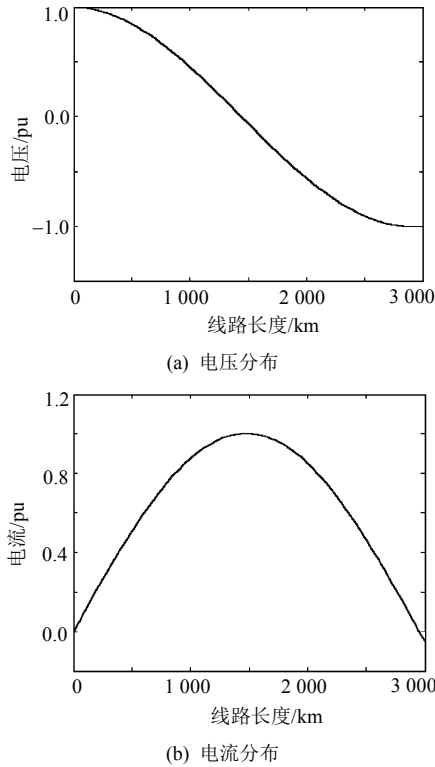


图1 半波长线路空载沿线电压、电流分布

Fig. 1 The distribution of voltage and current along the half-wavelength line while no-load

末端最高为 1 pu，线路中点线路最低，为 0 pu，无损半波长输电线路不存在一般线路空载时出现的费仁蒂效应^[5-9]；沿线电流最大为 1 pu，出现在线路中点处，最小为 0 pu，出现在线路两端。

2 半波长交流线路功率传输特性

对任意给定的负荷与送端电压，可求得末端电压，半波长无损辐射线路的末端电压-功率特性曲线见图 2。由图 2 可看出，半波长交流输电线路具有其特殊的性质，即理论上半波长输电线路可传输的最大功率较大。但是，输送过大的功率会导致线路中部正常运行时出现很大的工频过电压，因此，

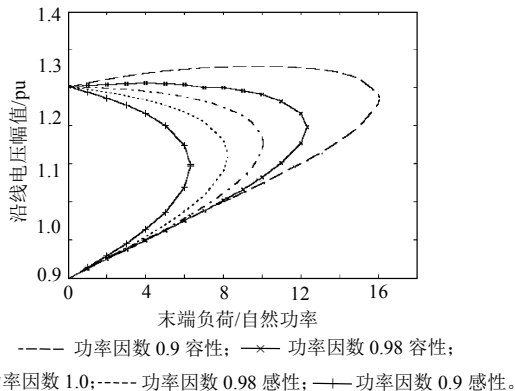


图2 半波长线路末端电压-功率特性曲线

Fig. 2 The voltage-power characteristic curve of the end of the half-wavelength line

半波长交流线路输送负荷极限的限制因素是负荷功率因数，线路绝缘水平以及线路末端设备的耐热性能等。

3 半波长交流输电系统稳态运行特性

3.1 输送功率对沿线电压分布的影响

由于 PSS/E 软件中不包含线路分布参数模型，因此，需将半波长线路分段等值。将每段进行 Π 型等值，分别采用考虑线路分布参数特性的精确 Π 型等值和不考虑线路分布参数特性的集中参数 Π 型等值^[10]。2 种等值方法仿真结果与理论值比较如图 3。

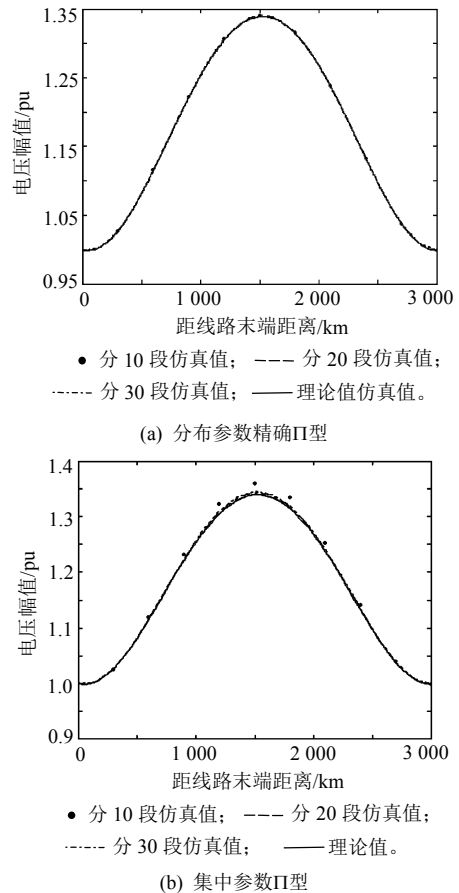


图3 输送功率 6 000 MW 时沿线电压的理论值与仿真值曲线

Fig. 3 Theoretical value and simulation result of the voltage along the line while power flow is 6 000 MW(lumped parameter Π - type equivalent)

由图 3 可看出，采用分段精确 Π 型等值仿真结果与理论值吻合，而采用分段集中参数 Π 型等值仿真结果与理论值有较大误差，因此，后续的仿真结果是建立在第 1 种等值方法的基础上得出的，特高压半波长交流输电仿真系统如图 4 所示。

半波长交流输电线路沿线电压随功率的变化曲线如图 5 所示，图中 S_0 代表线路的自然功率， $S_0=4\ 500\text{ MW}$ 。由图 5 可看出，输送自然功率时，沿线

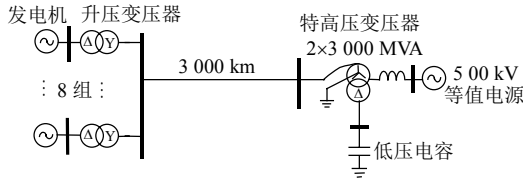


图4 特高压半波长交流输电系统仿真图
Fig. 4 Simulation diagram of UHV half-wavelength AC transmission system

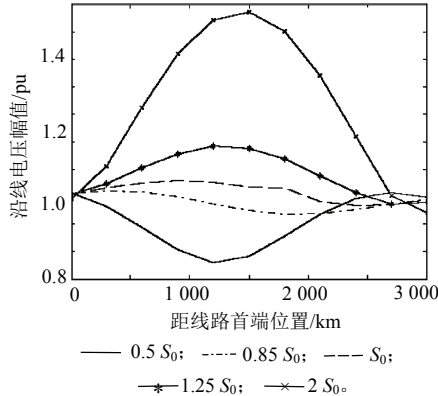


图5 输送功率对半波长交流输电沿线电压的影响
Fig. 5 Effect of power on voltage along the half-wavelength transmission line

电压基本上呈平坦分布；输送功率大于自然功率时，线路电压分布呈两端低，中部高；输送功率小于自然功率时，线路电压分布呈两端高，中部低。且线路末段电压总是低于首端电压，若保持线路送端电压不变，则随着输送功率的增加，末端电压比首端电压下降的幅值也增加。

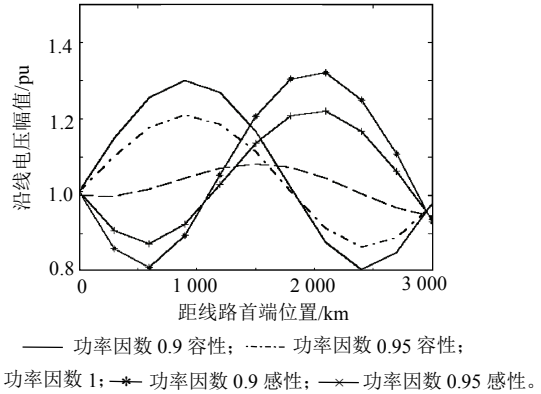
3.2 不同功率因数对沿线电压分布的影响

输送不同功率时，功率因数对沿线电压分布的影响见图6，图中 P 为线路传输的功率。由图6可得：

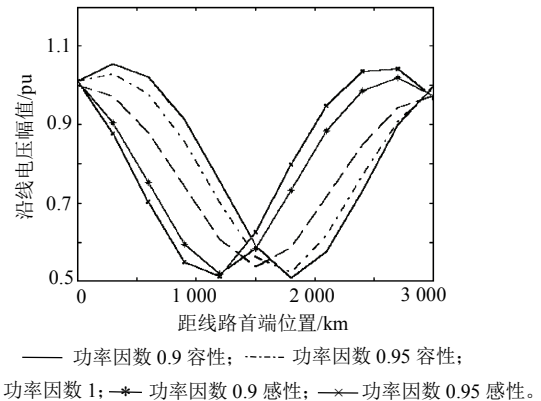
1) 当线路传输功率为自然功率时，半波长交流输电线路沿线电压分布曲线近似三角函数的整周期曲线。当功率因数为1或容性时，沿线电压呈现先升后降的趋势，且随着功率因数的下降，电压上升和下降的幅度也增大；当功率因数为感性时，沿线电压呈现先降后升的趋势，且随着功率因数的下降，电压下降和上升的幅度也增大。

2) 当线路传输功率远小于自然功率时，如 $0.5S_0$ ，半波输电线路沿线电压分布曲线近似三角函数半周期波谷曲线。若负荷功率因数为感性，线路电压最低点会向送端偏移，若负荷功率因数为容性，线路电压最低点会向受端偏移。

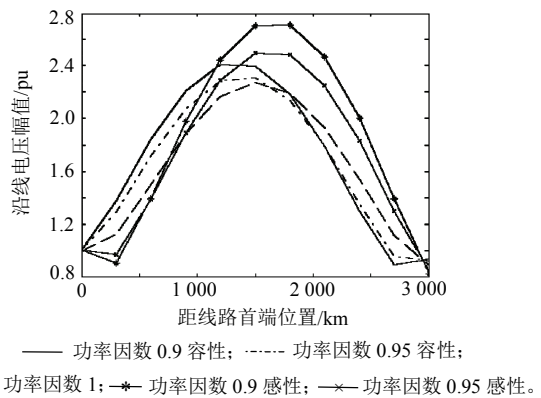
3) 当线路传输功率远大于自然功率时，如 $2S_0$ ，半波输电线路沿线电压分布曲线近似三角函数半周期波峰曲线。若负荷功率因数为感性，线路电压



(a) $P=S_0$



(b) $P=0.5S_0$



(c) $P=2S_0$

图6 功率因数对半波长交流输电沿线电压的影响
Fig. 6 Effect of power factor on voltage along the half-wavelength transmission line

最高点会向受端偏移，若负荷功率因数为容性，线路电压最高点会向送端偏移。

3.3 输电网潮流分布

当线路传输的有功功率大于自然功率时，半波长输电线路吸收无功功率；当线路传输的有功功率小于自然功率时，线路发出无功功率，且发出的无功功率被两端的系统吸收。

3.4 半波长线路损耗率

传输不同功率时，半波长交流输电线路的线损率如图7所示。线路传输自然功率时，线损率最低，当线路传输的功率大于或小于自然功率时，线损率

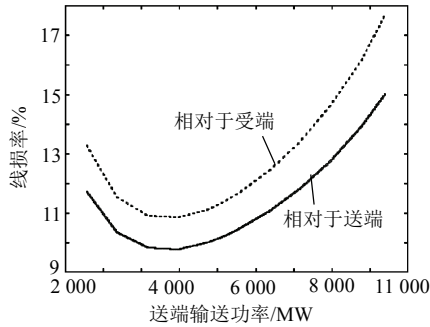


图 7 传输不同功率时线路的线损率

Fig. 7 Line loss rate under different power flow

均上升；相对于送端的最小线损率约为 9.8%，相对于受端的最小线损率约为 10.8%。

4 半波长交流输电系统的暂态运行特性

4.1 故障前半波长交流输电系统的运行工况

半波长交流输电线路采用 Bergeron 模型，发电机采用电磁暂态模型^[11-12]，负荷采用恒阻抗模型^[13]，半波长线路输送的功率为 4 500 MVA。考虑半波长输电线路接入 1 000 kV 特高压电网的暂态特性。

4.2 线路空载及甩负荷引起的过电压

由于特高压系统输送容量大、距离长、自身无功功率大，这使得在甩负荷时可能导致严重的暂时过电压^[14]。通常，过电压的参数对绝缘水平起着决定性的作用^[15]。线路空载时，半波长线路沿线电压

分布如图 1 所示；线路末端甩 50% 负荷引起的工频过电压如图 8 所示。

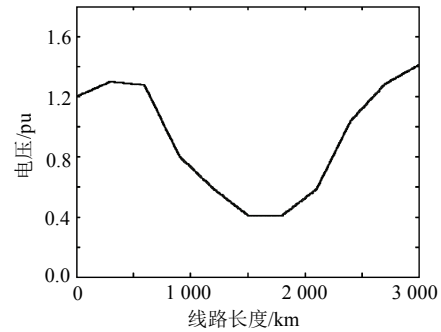


图 8 线路末端甩 50% 负荷引起的过电压

Fig. 8 Overvoltage along the line during 50% load rejection

4.3 线路故障引起的过电压

半波长交流输电系统线路故障引起的沿线过电压如表 1 所示。当故障点不同时，沿输电线路最大过电压的大小以及出现的位置都不同。

4.4 严重故障时半波输电系统稳定性

系统在持续时间较短的严重短路故障情况下可以维持稳定运行。半波长输电系统发生区内单相短路以及更严重的故障时，必须运用重合闸切除故障，若切除故障后不重合闸使系统保持长时间非全相运行，则系统送端发电机功角失稳。

表 1 线路故障引起的沿线过电压

Tab. 1 Overvoltage along the line during fault conditions

故障地点/km	最大过电压相			最大过电压位置距送端距离/km			最大过电压幅值/pu		
	A 相接地	BC 两相接地	三相接地	A 相接地	BC 两相接地	三相接地	A 相接地	BC 两相接地	三相接地
0	A	C	C	1 200	1 500	1 500	2.65	3.40	3.63
300	B	C	B	1 500	1 500	1 500	1.30	4.29	5.46
600	B	B	A	1 500	2 100	1 500	1.34	2.74	3.37
900	B	C	B	1 800	1 200	1 500	1.37	1.89	2.49
1 200	B	C	B	2 400	1 500	1 500	1.36	1.62	2.18
1 500	B	C	B	2 700	1 200	1 500	1.39	1.46	1.94
1 800	B	C	C	2 700	1 500	1 500	1.37	1.44	1.82
2 100	B	C	C	2 700	900	1 500	1.28	1.71	2.00
2 400	B	C	B	2 700	900	1 800	1.11	2.99	3.46
2 700	C	C	B	2 100	1 500	1 500	1.02	4.64	6.41
3 000	C	C	A	2 400	1 500	1 500	0.99	4.64	3.09

5 结论

对半波长交流输电线路进行分段仿真时，应采用精确π型等值模型。线路输送的功率大小以及功率因数影响半波长线路沿线最大或最小电压出现的位置。半波长交流线路吸收或者发出无功取决于线路上输送的功率大于或小于自然功率。半波长交流输电线路的线损率在其输送自然功率时最小。在甩负荷以及短路故障情况下，沿线会出现不同程度

的过电压，且当故障点不同时，沿线最大过电压的大小以及出现的位置都不同。因此，在设计特高压半波长交流输电线路时，需要特别注意线路中部的绝缘水平，确定线路的静态及暂态稳定极限时应根据输电线路沿线电压标准来确定。

致 谢

感谢国家电网公司的支持以及中国电力科学院为该课题的研究提出建议和帮助。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压交流输电技术研究成果专辑(2005年)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 4-5.
- [2] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005: 1-10.
- [3] 郑健超. 智能电力设备与半波长交流输电[C]//中国电机工程学会第九次全国会员代表大会学术报告会. 北京, 中国: 中国电机工程学会, 2009: 14-15.
- [4] Tavares M C, Portela C M. Half-wave length line energization case test-proposition of a real test[C]//2008 International Conference on High Voltage and Application. Chongqing, China: IEEE, 2008: 261-264.
- [5] 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.
- [6] Prabhakara F S, Parthasarathy K, Ramachand H N. Performance of tuned half-wave-length power transmission lines[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(12): 1795-1800.
- [7] Gatta F M, Iliceto F. Analysis of some operation problems of half-wave length power transmission lines[C]//Proceedings of the 3rd Africon Conference. Ezulwini Valley, Swaziland: IEEE, 1992: 59-64.
- [8] Iliceto 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.
- [9] 王冠, 吕鑫昌, 孙秋芹, 等. 半波长交流输电技术的研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(16): 13-18.
Wang Guan, Lü Xinchang, Sun Qiuqin, et al. Status and prospects of half-wave AC transmission technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(16): 13-18(in Chinese).
- [10] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 46-53.
- [11] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994: 813-814.
- [12] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 45-59.
- [13] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995: 52-82.
- [14] 黄佳, 王钢, 李海峰, 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): 33-39.
Huang Jia, Wang Gang, Li Haifeng, et al. Study on simulation of fundamental frequency overvoltages for UHV AC transmission lines[J]. Relay, 2007, 35(4): 33-39(in Chinese).
- [15] 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 UHV AC transmission line [J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 1-5(in Chinese).



周静姝

收稿日期: 2011-06-09。

作者简介:

周静姝(1987), 女, 硕士, 主要研究方向为动态电力系统安全稳定分析与仿真, E-mail: jszhou01@163.com;

马进(1975), 男, 博士, 副教授, 研究方向为负荷建模, 电力系统动态分析;

徐昊(1986), 男, 硕士, 研究方向为电力系统

动态分析;

李博(1987), 男, 本科, 研究方向为电力系统动态分析。

(编辑 蒋毅恒)