

# 特高压半波长交流输电线路 沿线抽能供电初步研究

李占纯, 王玲桃, 崔翔

(高电压与电磁兼容北京市重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

## Preliminary Research on Power Extraction System Laid out Along UHV Half-wavelength AC Transmission Line

LI Zhanchun, WANG Lingtao, CUI Xiang

(Beijing Key Laboratory of High Voltage and Electromagnetic Compatibility  
(North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China)

**ABSTRACT:** A novel way, which is called power extraction system, to supply power for power load around half-wavelength AC transmission (HWACT) line by energy extraction from HWACT line is proposed, and the energy extraction is implemented in such a way: a certain length of energy extraction conductors, which are parallel with HWACT line, are laid out beneath the HWACT line. The equivalent source of power extraction system is analyzed, thus the parameters of power extraction system under horizontal conductor arrangement and triangle conductor arrangement of UHV HWACT line are obtained. By means of building mathematical models for UHV HWACT line and power extraction conductors, results of numerical analysis on load characteristics of power extraction system is performed and the suggestions on improving load capacity of power extraction system are put forward. Furthermore, the impacts of single-phase earth fault occurred in UHV HWACT line on power extraction system are analyzed.

**KEY WORDS:** UHV; half-wavelength; power extraction; equivalent source; load characteristic

**摘要:** 提出了在特高压半波长交流输电线路下架设抽能导线为线路周边负荷提供电能的新型供电方式。基于对抽能供电系统等效电源的分析, 得出交流输电线路水平和三角排列方式下抽能系统的各项参数。通过建立交流输电线路和抽能导线的模型, 数值分析了抽能供电系统的负载特性, 给出提高其负载能力的方法, 并进一步分析了输电线路单相接地故障对抽能供电系统的影响。

**关键词:** 特高压; 半波长; 抽能供电; 等效电源; 负载特性

## 0 引言

特高压半波长交流输电技术是一种超远距离三相交流输电方式, 在大容量输电领域具有很强的竞争力。与传统交流输电方式相比, 空载时半波长输电线路两端电压相等, 基本上不需要安装无功补偿设备, 也就无需设置中间开关站, 因而工程造价较低, 具有很好的经济性<sup>[1-4]</sup>。

特高压半波长交流输电线路可能经过经济不发达地区, 这些地区负荷量很小, 如果采用常规的变电和供电技术, 需要配置特高压变压器等一次设备, 绝缘成本过高<sup>[5]</sup>。通过绝缘避雷线进行抽能供电, 只能够供给一些负荷量极小的地区或是通信设备用电; 利用抽能电抗器抽取能量成本也比较高, 而且要求特高压输电线路中途有落点或是开关站, 才能够实现抽能<sup>[6-11]</sup>。这些电能的获取方式是不经济的, 必须寻找更加经济和方便的供电方式, 以满足特高压交流输电线路周边用户对电力的需求。

本文提出沿特高压交流输电线路平行架设抽能导线进行抽能供电的方式, 即在途经偏远地区的特高压半波长交流输电线路中心线的正下方平行架设一定长度的抽能导线。根据电磁场理论<sup>[12]</sup>可知, 由于抽能导线与交流输电线路之间的静电感应作用, 抽能导线上势必会感应出一定的对地电压, 再通过变压器降压到用户所需要的电压等级, 从而实现为周边负荷供电的目的。特高压半波长交流输电线路沿线抽能供电的方式供电成本较低, 具有很好的经济效益和社会效益, 有着广泛的应用前景。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(09TG01)。

Project Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (09TG01).

### 1 输电线路沿线抽能供电原理

特高压输电线路沿线抽能导线供电，是将抽能导线放置于输电线路中心线的正下方，图 1 为抽能导线供电系统的等效电路图。图中： $E_s$  为抽能供电系统等效电源的开路电压，即抽能导线通过电磁感应产生的感应电压； $Z_s$  为抽能供电系统的等效电源的内阻抗。这 2 个参数均由抽能导线和导线之间的空间电磁耦合决定。

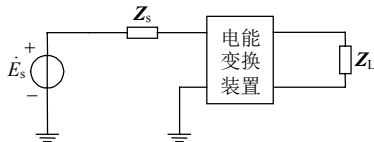
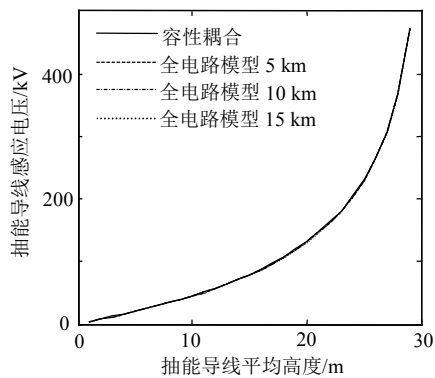


图 1 抽能供电系统等效电路

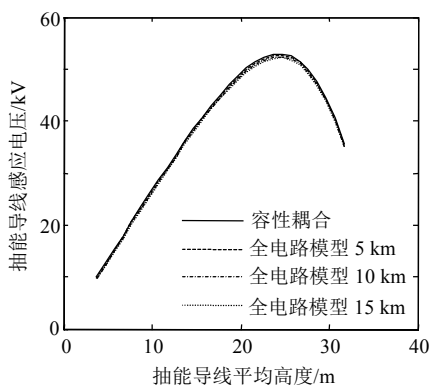
Fig. 1 Equivalent circuit of power extraction system

本文基于特高压半波长交流输电线路，建立特高压输电线路与抽能导线的仿真模型。应用多导体传输线理论<sup>[13-14]</sup>，计算出抽能导线的感应电压，并对抽能供电系统进行戴维宁等效，分析计算了抽能供电系统的等效电源参数。

在输电线路水平和三角排列方式下，特高压抽能供电系统的等效电源开路电压随高度、长度的变化趋势如图 2 所示。由图 2 可知：在输电线路水平



(a) 特高压输电线路水平排列



(b) 特高压输电线路三角排列

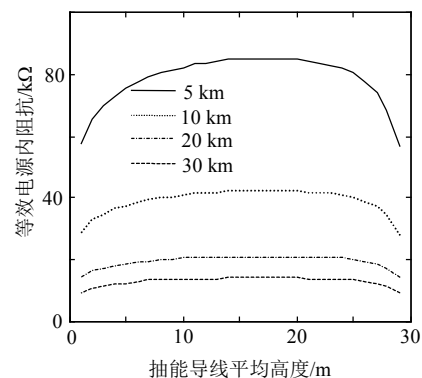
图 2 抽能供电系统等效电源的开路电压

Fig. 2 Open-circuit voltage of the equivalent source in the power extraction system

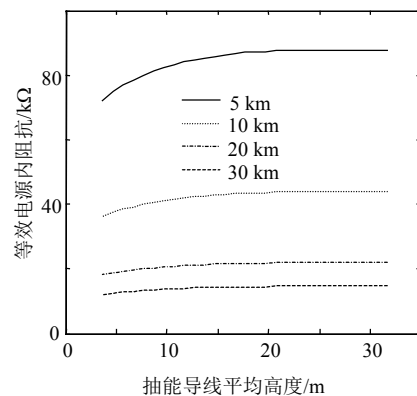
排列方式下，抽能供电系统等效电源的开路电压随抽能导线平均高度的增大而增大；在三角排列方式下，等效电源的开路电压随着抽能导线平均高度的增大呈现先增后减的变化趋势；另外抽能导线的长度对等效电源开路电压的影响不大。

图 3、4 分别为特高压半波长交流输电线路水平和三角排列方式下，抽能供电系统等效电源的内阻抗随抽能导线平均高度、长度以及导线类型的变化趋势。由图 3、4 可知：抽能导线越长、半径越大，抽能供电系统等效电源的内阻抗越小；对于特高压输电线路水平排列方式，抽能导线平均高度为 5~28 m 等效电源内阻抗变化比较平缓；对于三角排列方式，抽能导线平均高度大于 10 m 时，等效电源内阻抗随高度的增加呈现饱和。

考虑抽能供电系统的实用性，选择抽能导线长度为 10 km；等效电源电压等级选用现有的电压等级；导线型号按照所选的电压等级进行选择<sup>[15]</sup>。对于特高压半波长交流输电线路水平和三角排列方式，采用现有的电压等级对应的抽能导线架设高度分别如表 1、2 所示。



(a) 特高压输电线路水平排列



(b) 特高压输电线路三角排列

图 3 等效电源的内阻抗随抽能导线高度的变化曲线

Fig. 3 The variety curve of the internal impedance of the equivalent source along with the height of energy extraction conductors

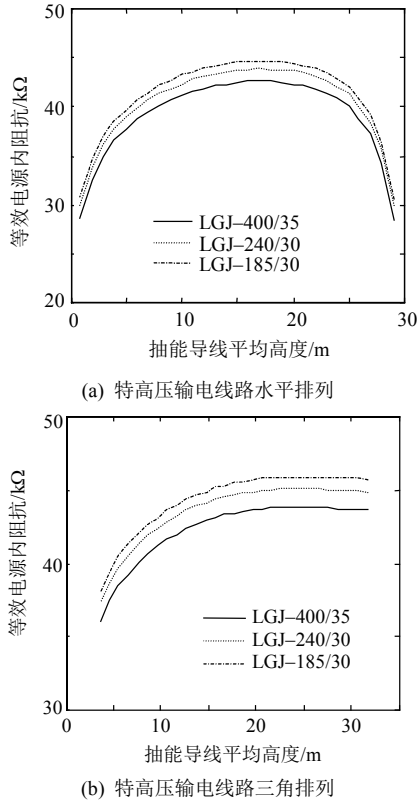


图 4 等效电源的内阻抗随抽能导线截面的变化曲线  
Fig. 4 Variety curve of the internal impedance of the equivalent source along with the cross-section area of energy extraction conductors

表 1 特高压输电线路水平排列方式下抽能导线架设高度  
Tab. 1 The average height of the extraction line in horizontal arrangement

开路电压/kV	平均高度/m	最低点高度/m	备注
66/√3	8.65	4.32	弃用(导线太细)
110/√3	12.92	8.59	可用
220/√3	19.64	15.31	可用

表 2 特高压输电线路三角排列方式下抽能导线架设高度  
Tab. 2 The average height of the extraction line in triangular arrangement

开路电压/kV	平均高度/m	最低点高度/m	备注
66/√3	14.52	10.19	可用
52.50(最大值)	24.60	20.27	弃用(特殊电压等级)

## 2 抽能供电系统的负载特性

抽能供电系统一般建于沿线比较偏僻的地区，工业用电相对较少，故本文仅对纯阻性负荷和功率因数为 0.9 的感性负荷进行分析。图 5 为抽能供电系统的等效电路图。图中： $\dot{U}$  为负荷侧的端电压；

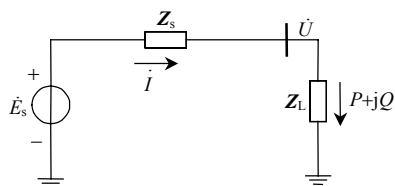


图 5 抽能供电系统等效电路  
Fig. 5 Equivalent circuit of power extraction system

$P+jQ$  为负荷吸收的电功率；系统由等效电压源  $\dot{E}_s$  和等效内阻抗  $Z_s$  以及等效负荷  $Z_L$  组成。通过分析 220/√3、110/√3、66/√3 kV 电压等级抽能供电系统的负载特性，可以知道其变化趋势基本相似，这里仅以 220/√3 kV 抽能供电系统为例进行分析。

220/√3 kV 抽能供电系统的负载端电压以及 PV 曲线分别如图 6 所示。由图 6 可知，抽能供电系统的带负载能力很差，随着所带负荷的增大，负载端电压急剧下降。

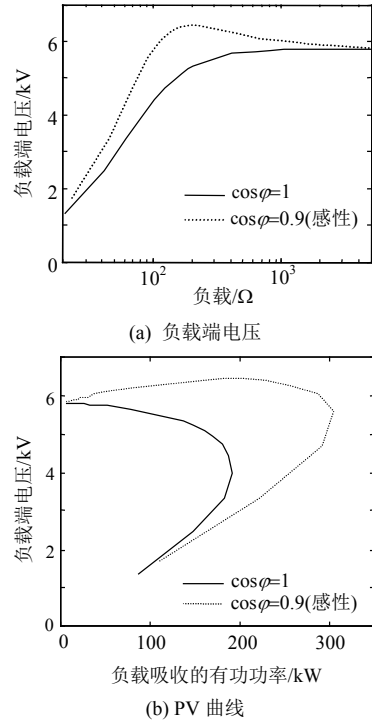


图 6 补偿前 220/√3 kV 抽能供电系统的负载特性  
Fig. 6 The load characteristics of 220/√3 kV power extraction system before reactance compensation

抽能供电系统低压侧标称电压设定为 10 kV，根据 GB/T 12325—2008 《电能质量供电电压偏差》可知，10 kV 供电电压偏差为标称电压的±7%。表 3 列出了不同负载类型下，3 种电压等级抽能供电系统的临界功率和满足电能质量所能抽取的最大有功功率。相对于纯阻性负载，功率因数为 0.9 的感性负载情况下，抽能供电系统所能提供的功率更加有限。因此，应尽可能地提高用户负荷的功率因数，以使抽能供电系统能够获得更大的功率。

表 3 抽能供电系统所能抽取的能量  
Tab. 3 Energy supplied by power extraction system kW

负载类型	220/√3 kV 系统		110/√3 kV 系统		66/√3 kV 系统	
	临界功率	满足电能质量	临界功率	满足电能质量	临界功率	满足电能质量
阻性	192	130	48	30	16	12
cos φ=0.9 (感性)	305	75	76	19	26	6

### 3 提高抽能供电系统负载能力的方法

由于抽能供电系统等效电源的内阻抗较大，系统带负载能力较低。因等效电源内阻抗以容抗为主，故考虑在变压器二次侧加装串联补偿电抗器，如图 7 所示。当补偿电抗器与等效电源内阻抗发生谐振时，可以补偿系统电容，降低系统的阻抗值，从而提高系统的带负载能力。如果对抽能供电系统进行完全补偿，220/√3、110/√3 和 66/√3 kV 电压等级的抽能供电系统所需的补偿电感值分别为 0.279、1.11、3.24 H。

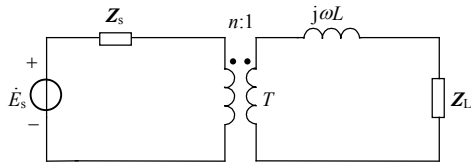
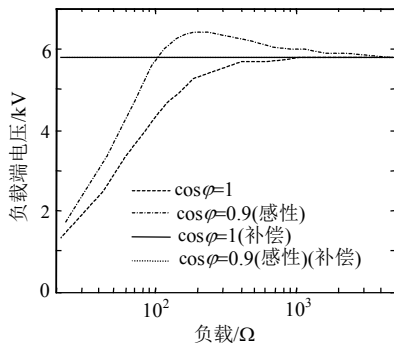


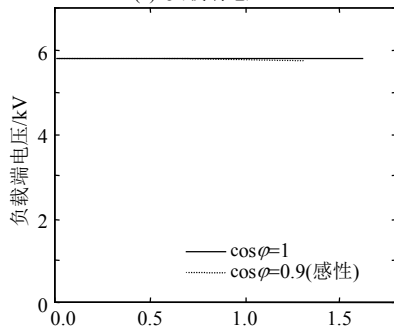
图 7 补偿电抗后抽能供电系统的等效电路

Fig. 7 Equivalent circuit of power extraction system after reactance compensation

220/√3 kV 抽能供电系统进行电感补偿后的负载端电压和 PV 曲线分别如图 8 所示。由图 8 可知，补偿后抽能供电系统的负载端电压有了明显的改善。抽能供电系统负载端电压和功率的改善是以补偿电抗器吸收大量的无功功率为代价的，因此经过串联电抗器补偿的抽能供电系统，负荷不能过



(a) 负载端电压



(b) U-P 曲线

图 8 补偿后 220/√3 抽能供电系统的负载特性  
Fig. 8 The load characteristics of 220/√3 power extraction system after reactance compensation

大，否则会对补偿电抗器的容量要求很高。

表 4 给出了 220/√3、110/√3 和 66/√3 kV 电压等级的抽能供电系统经过串联电抗器补偿后所能抽取的能量。与表 3 对比可知，此时抽能供电系统的带负载能力有了很明显的提高。

表 4 补偿后抽能供电系统所能抽取的能量

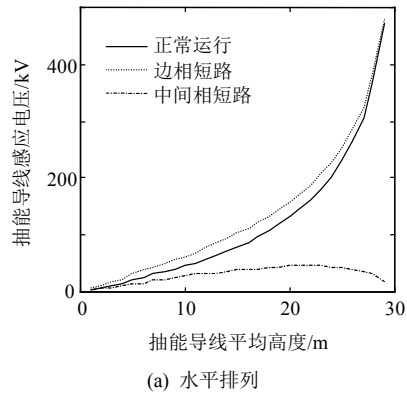
Tab. 4 Energy supplied by power extraction system after reactance compensation MW

负载类型	220/√3 kV 系统	110/√3 kV 系统	66/√3 kV 系统
阻性	1.6	0.4	0.15
cosφ=0.9(感性)	1.3	0.3	0.1

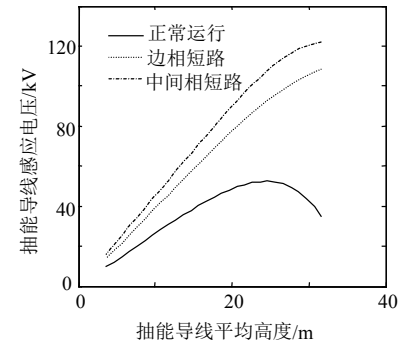
### 4 接地故障对抽能供电系统的影响

#### 4.1 特高压交流输电线路接地故障

特高压交流输电线路发生单相接地故障后，在水平和三角两种排列方式下抽能导线感应电压随抽能导线平均高度的变化曲线如图 9 所示。由图 9 可知：在水平排列方式下，边相接地故障会引起抽能供电系统的等效电源电压升高，中间相接地故障会导致开路电压的急剧下降；三角排列方式下，边相和中间相接地故障均会引起抽能供电系统的等效电源电压升高，并且抽能导线平均高度越高，接地故障对抽能供电系统供电电压的影响越严重。



(a) 水平排列



(b) 三角排列

图 9 特高压半波长交流输电线路发生单相接地故障时抽能供电系统等效电源的开路电压

Fig. 9 The open-circuit voltage of the equivalent source in power extraction system when single-phase earth fault occurred in the UHV HWACT line

## 4.2 负荷线路接地故障

负荷发生接地故障时,电抗器补偿前后抽能供电系统高压侧线路电流分别如表5、6所示。由表5、6可知:补偿前线路电流很小;经电抗器补偿后,负荷接地短路会造成线路电流的大幅度升高。因此,补偿后的抽能供电系统必须加装过电流保护装置,以避免负荷侧发生接地故障损坏变压器等电气设备。

表5 电抗器补偿前高压侧线路的电流

Tab. 5 The line current of high voltage side before reactance compensation

负载类型	220/ $\sqrt{3}$ kV 系统		110/ $\sqrt{3}$ kV 系统		66/ $\sqrt{3}$ kV 系统	
	最大功率	接地故障	最大功率	接地故障	最大功率	接地故障
阻性	1.10	3.01	0.52	1.51	0.33	0.87
$\cos\varphi=0.9$ (感性)	0.58	3.01	0.29	1.51	0.16	0.87

表6 电抗器补偿后高压侧线路的电流

Tab. 6 The line current of high voltage side after reactance compensation

负载类型	220/ $\sqrt{3}$ kV 系统		110/ $\sqrt{3}$ kV 系统		66/ $\sqrt{3}$ kV 系统	
	1.6 MW	接地故障	0.4 MW	接地故障	0.1 MW	接地故障
阻性	12.75	1453.50	6.33	892.10	3.92	247.82
$\cos\varphi=0.9$ (感性)	11.43	1453.50	5.71	892.10	3.42	247.82

## 5 结论

1) 通过研究特高压半波长交流输电线路沿线抽能供电的基本原理,分析抽能供电系统的基本参数,结果表明,在特高压半波长交流输电线路沿线可以建立220/ $\sqrt{3}$ 、110/ $\sqrt{3}$ 、66/ $\sqrt{3}$  kV电压等级的抽能供电系统。

2) 加装串联补偿电抗器能够改善特高压半波长交流输电线路沿线抽能供电系统的负载特性,提高系统可抽取的功率。加装串联补偿电抗器补偿后,抽能供电系统应配置相应的电压和电流保护装置。

3) 沿线供电技术具有重要的经济意义和社会效应。与利用绝缘避雷线抽能供电相比,特高压半波长交流输电线路沿线抽能供电系统可以提供相对较大的功率,与利用抽能电抗器抽能供电相比,抽能成本较低,是可供选择的较理想方案,但其对特高压半波长交流输电系统的影响以及技术经济性问题,还需进一步研究。

### 致谢

感谢国家电网公司对“特高压半波长输电技术经济可行性初步研究”项目的支持和资助,本文为该项目的研究结果的一部分。

## 参考文献

[1] Hubert F J, Gent M R. Half-wavelength power transmission

lines[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1965, 84(10): 966-973.

- [2] Iliceto F, Cinieri E. Analysis of half-wavelength transmission lines with simulation of corona losses[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(4): 2081-2091.
- [3] 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.
- [4] Xiang Xinyu, Qi Lei, Cui Xiang. Electromagnetic transient characteristic of 1 000 kV half-wavelength AC transmission lines [C]/The 5th International Conference on Critical Infrastructure. Beijing, China: IEEE, 2010: 1-4.
- [5] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005: 14-33.
- [6] 兰岚, 王伟民. 输电线路避雷线的感应电压利用[J]. 科技广场, 2009(5): 234-266.
- Lan Lan, Wan Weimin. The use of the induced voltage in the ground wire for electric transmission line[J]. Science Mosaic, 2009(5): 234-266(in Chinese).
- [7] 刘炳尧, 肖松兰, 刘持夫. 可抽取能量的避雷线[J]. 现代节能, 1990(2): 42-45.
- [8] 刘炳尧, 储玉凤, 肖松兰, 等. 调谐法抽能及调谐变压器的研究[J]. 电工技术学报, 1991, 6(11): 37-40.
- Liu Bingrao, Chu Yufeng, Xiao Songlan, et al. Study of tuning theory for obtaining power and a tuned transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1991, 6(11): 37-40(in Chinese).
- [9] 刘炳尧, 陈彩屏, 肖松兰, 等. 避雷线调谐抽能的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 1991, 3(1): 115-120.
- Liu Bingrao, Chen Caiping, Xiao Songlan, et al. Study of tuning and power extraction from the lighting conductor[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Automation, 1991, 3(1): 115-120(in Chinese).
- [10] 范荣全. 带有抽能绕组的500 kV并联电抗器在开关站的应用[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 77-79.
- Fan Rongquan. Application of 500 kV shunt reactors with auxiliary winding system in switching station[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 77-79(in Chinese).
- [11] 李慧奇, 崔翔, 李琳, 等. 带抽能线圈并联铁心电抗器的分析[J]. 电工技术学报, 2004, 19(12): 15-19.
- Li Huiqi, Cui Xiang, Li Lin, et al. Analysis of high-voltage shunt reactor with auxiliary winding system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(12): 15-19(in Chinese).
- [12] 倪光正. 工程电磁场[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 92-98.
- [13] Paul C R. Analysis of multi-conductor transmission lines[M]. New York: Wiley Inter-science Publication, 1992: 46-62.
- [14] 吴维韩, 张芳榴. 电力系统过电压数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 1-18.
- [15] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2002: 769-799.



李占纯

收稿日期: 2011-06-09.

作者简介:

李占纯(1985), 女, 硕士, 研究方向为电力系统电磁兼容, E-mail: lizcfly2009@163.com;

王玲桃(1967), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事传输线理论及应用、特高压输电技术方面的研究工作, E-mail: wanglt@ncepu.edu.cn;

崔翔(1960), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电磁场数值计算和电磁兼容、特高压输电技术方面的研究工作, E-mail: x.cui@ncepu.edu.cn.

(编辑 蒋毅恒)