

文章编号:1000-582X(2010)01-0083-05

# 交流特高压输电线的传输特性与无功补偿

成涛<sup>1</sup>, 林莉<sup>2</sup>, 牟道槐<sup>2</sup>, 孙才新<sup>2</sup>

(1. 重庆市电力公司北碚供电局, 重庆 400700;

2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:**特高压输电线的无功/电压控制方式影响其传输能力和运行稳定性。首先建立了用分布参数表达的输电线的功角特性方程, 推导出了输电线的功率-电压特性方程, 用该方程分析了送端恒电压控制、受端恒功率因数控制下输电线的运行特性, 绘出了受端在三种典型功率因数下运行的  $P-V$  特性曲线, 表明输电线的传输能力随受端功率因数的上升而提高, 但其过电压的功率区间也随之扩大, 特别是在受端功率因数超前状态下有很大的超开路电压区间。同时还用功角特性方程推导出了两端恒定电压运行状态下输电线剩余无功功率的算式, 进而推导出了输电线两端恒电压控制所需要的无功补偿量的算式, 并以晋东南(长治)—南阳—荆门 1 000 kV 特高压输电线作为算例, 对两种控制方式下的传输能力和变电站的无功补偿量进行了验证。

**关键词:**特高压输电; 稳定性; 功角特性; 功率-电压特性; 无功补偿

中图分类号: TM614

文献标志码: A

## Transmission characteristic and reactive power compensation of ultra-high voltage AC transmission line

CHENG Tao<sup>1</sup>, LIN Li<sup>2</sup>, MOU Dao-huai<sup>2</sup>, SUN Cai-xin<sup>2</sup>

(1. Beibei Power Supply Bureau of Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400700, P. R. China;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** Transmission capacity and operation stability are affected by reactive power and voltage control modes for ultra-high voltage(UHV) transmission line. This paper presents the power-angle characteristic equations described by the distributed parameters and power-voltage characteristic equations for transmission line. Using power-voltage characteristic equations, it analyzes operation characteristic under constant voltage control at the sending end and constant power factor at the receiving end of transmission line. At the same time, it draws  $P-V$  characteristic curves under three typical power factors at the receiving end. It indicates transmission capacity of transmission line will increase with power factors at the receiving end rising. But power area leading to overvoltage will extend, especially it appears very big over open-circuit voltage area under leading power factor at the receiving end. Using the power-angle characteristic equations, it derives formulas of surplus reactive power and demands of reactive power compensation capacity under constant voltage of each end of transmission line. Taking Jindongnan-Nanyang-Jingmen 1 000 kV UHV transmission line as an example, transmission capacity and demands of reactive power

收稿日期:2009-08-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50807055)

作者简介:成涛(1972-),男,重庆市电力公司北碚供电局高级工程师,主要从事电力系统及其自动化方向的研究,  
(E-mail)chengtao@cqep.com.cn。

compensation capacity are calculated for two control modes.

**Key words:** ultra-high voltage transmission; stability; power-angle characteristic;  $P$ - $V$  characteristic; reactive power compensation

特高压电网指的是由 1 000 kV 交流和 ±800 kV 直流系统构成的电网。20 世纪 60 年代到 80 年代,美国、苏联、意大利及日本等国的电力专家先后开展了特高压输电技术的研究<sup>[1-5]</sup>,苏联和日本建设了特高压输电线路,但都在降压运行。2009 年 1 月,中国晋东南(长治)—南阳—荆门 1 000 kV 特高压试验示范工程正式投入全压运行,标志中国输电技术水平处于世界领先地位<sup>[6-8]</sup>。该线路全长 654 km,其中长治—南阳 363 km,南阳—荆门 291 km,跨越华北、华中电网,对加强华北、华中电网互联,充分发挥水火互济等联网效益,推动区域经济协调发展具有重要的意义。这一示范工程投入运行后,将对之前进行的各项科研项目研究结论的正确性进行验证,为中国特高压电网的进一步发展提供强有力的科学技术支撑,并为世界高压输电领域的技术发展做出贡献。

由于输电距离长、电压高,使交流特高压输电线路在运行特性的分析上具有两个特点:1)由于输电线路很长,必须用分布参数电路来进行分析;2)自然功率为输电线无功状态的分界点:负载小于自然功率时,无功过剩;负载大于自然功率时,无功不足。因此 1 000 kV 特高压输电线路在轻载时是一个很大的无功电源,在重载时是一个很大的无功负荷,按无功就地平衡的原则,必须按不同的有功状况对其进行无功补偿,以保持线路的电压水平,并提高传输能力<sup>[9-15]</sup>。

基于上述特点,笔者首先按分布参数电路建立输电线的功角特性方程,并以此为基础分析交流特高压输电线的传输特性和无功-电压控制方式对静态稳定所确定的极限传输功率的影响。

由输电线的功角特性方程可以导出输电线的功率-电压方程,即  $P$ - $V$  特性方程,用该方程可以绘出送端恒电压控制、受端恒功率因数控制下输电线的功率-电压特性曲线( $P$ - $V$  曲线),由  $P$ - $V$  曲线可以看出功率因数对输电线的传输能力及工频过电压的影响。

在现行的针对 500 kV 及以下超高压变电站制定的无功补偿设计规范中,没有考虑输电线无功的影响,无功补偿容量按变压器的容量进行计算,并规定双向补偿量均不得超过变压器容量的 30%<sup>[16]</sup>。由于特高压输电线路的无功量很大,1 000 kV 特高压输电线路充电无功功率约为 500 kV 线路的 6 倍,

显然套用 500 kV 及以下超高压变电站的无功补偿量的计算原则是不妥当的。因此,笔者提出了同时考虑负荷无功及输电线无功计算变电站无功补偿量的方法,导出了实现恒电压控制所要求的无功补偿量的算式。

## 1 特高压输电线的参数与功角特性方程

### 1.1 特高压输电线的参数与自然功率

波阻抗与传播常数是输电线的两个重要参数。波阻抗的定义式为<sup>[17]</sup>

$$Z_c = \sqrt{\frac{z_1}{y_1}}, \quad (1)$$

传播常数的定义式为

$$\gamma = \sqrt{z_1 y_1}, \quad (2)$$

式中: $z_1 = R_1 + j\omega L_1$ ,  $y_1 = g_1 + j\omega C_1$ , 分别为单位长度的阻抗与导纳。

特高压输电线的阻抗与导纳参数中,有  $R_1 \ll \omega L_1$ ,  $g_1 \ll \omega C_1$ 。因此,在分析特高压输电线的运行特性时,可略去电阻与电导,称为无损线。

无损线的波阻抗与传播常数的表达式为

$$\left. \begin{aligned} Z_c &= \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}, \\ \gamma &= j\omega \sqrt{L_1 C_1} = j\beta. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $\beta = \omega \sqrt{L_1 C_1}$ , 为无损线传播常数的绝对值。

表 1 列出了部分超、特高压输电线的参数<sup>[7]</sup>。

表 1 输电线的参数

电压等级/kV	500	765	1 100	1 500
$Z_c/\Omega$	270.1	259.9	228.8	228.6
$\beta/(\text{rad} \times 10^{-3} \times \text{km}^{-1})$	1.056	1.069 8	1.064 2	1.064 1

输电线运行于额定电压时的自然功率算式为

$$P_N = \frac{U_N^2}{Z_c}. \quad (4)$$

由式(4)可见,提高自然功率的方法是降低输电线的波阻抗和提高运行电压。

中国晋东南(长治)—南阳—荆门 1 000 kV 特高压输电线的参数分别为:

正序阻抗  $Z_1 = 0.007 6 + j0.262 8(\Omega/\text{km})$ ;

零序阻抗  $Z_0 = 0.1919 + j1.0516 (\Omega/\text{km})$ ;

正序电容  $C_1 = 0.014 \mu\text{f}/\text{km}$ ;

零序电容  $C_0 = 0.0096 \mu\text{f}/\text{km}$ 。

按式(3)计算出该线路的波阻抗  $Z_C = 244.5 \Omega$ , 传播常数  $\beta = 6.16^\circ/100 \text{ km}$ 。当输电线运行电压为 1 000 kV 时,其自然功率  $P_N = 4\ 090 \text{ MW}$ 。

### 1.2 特高压输电线的功角特性方程

图 1 示出输电线的电流、电压分布。

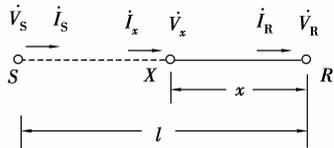


图 1 输电线的电流电压分布图

图 1 中:S 为发送端,R 为接收端,X 为线路中的任意一点,该点与接收端 R 的距离为  $x$ 。

以接收端 R 为参考,得无损线方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_x &= \dot{V}_R \cos \beta x + j \dot{I}_R z_c \sin \beta x, \\ \dot{I}_x &= \dot{I}_R \cos \beta x + j \frac{\dot{V}_R}{z_c} \sin \beta x. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

定义线路角  $\theta = \beta l$ ,它是表征输电线长度的参数。由式(5)得出输电线两端的电压关系方程为

$$\dot{V}_s = \dot{V}_R \cos \theta + j \dot{I}_R Z_c \sin \theta. \quad (6)$$

按式(6)中的电压方程,作出长线两端电压的相量图,如图 2 所示。

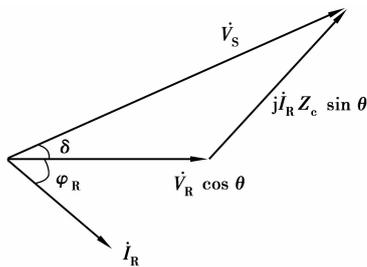


图 2 长线的电压相量图

图中: $\delta = \dot{V}_s \wedge \dot{V}_R$ ,为输电线的功率角; $\varphi_R = \dot{V}_R \wedge \dot{I}_R$ ,为输电线受端的功率因数角。

由图 2 可推出输电线的功角特性方程<sup>[18-19]</sup>。其中,有功特性方程为

$$P_R = \frac{V_S V_R}{Z_C \sin \theta} \sin \delta, \quad (7)$$

无功特性方程为

$$Q_R = \frac{V_R}{Z_C \sin \theta} (V_S \cos \delta - V_R \cos \theta). \quad (8)$$

取基准值: $V_B = V_N, P_B = \frac{V_N^2}{Z_C}$ ,得出以额定电压

与额定自然功率为基准的标么值功角特性方程为

$$\left. \begin{aligned} P_R^* &= V_S^* V_R^* \frac{\sin \delta}{\sin \theta}, \\ Q_R^* &= V_R^* \frac{(V_S^* \cos \delta - V_R^* \cos \theta)}{\sin \theta}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: $P_R^*, Q_R^*, V_S^*, V_R^*$  分别为受端有功、无功及两端电压的标么值。

## 2 受端恒功率因数控制下的传输能力与失步角度

特高压输电线的两端必须进行无功补偿,采用无功/电压的控制方式直接影响输电线的传输能力。

由式(9)可推出此种控制方式下以标么值表示的受端的功率-电压特性方程<sup>[19]</sup>为

$$P_R^* = \frac{V_S^* V_R^*}{\sin \theta} \sin \left( \cos^{-1} \frac{V_R^*}{V_S^*} \cos \theta \cos \varphi_R - \varphi_R \right). \quad (10)$$

令式(10)中的  $V_S = \text{const}, \varphi_R = \text{const}$ ,增加受端功率,得出  $P_R = f(V_R)$  关系曲线,称为 P-V 曲线。

取  $l = 300 \text{ km}, \beta = 6.15^\circ/100 \text{ km}$ ,当  $V_S^* = 1$  时,绘出受端功率因数为  $\cos \varphi_R = 1, \cos \varphi_R = 0.95$  (超前),  $\cos \varphi_R = 0.95$  (滞后) 三种情况下的 P-V 曲线如图 3 所示。

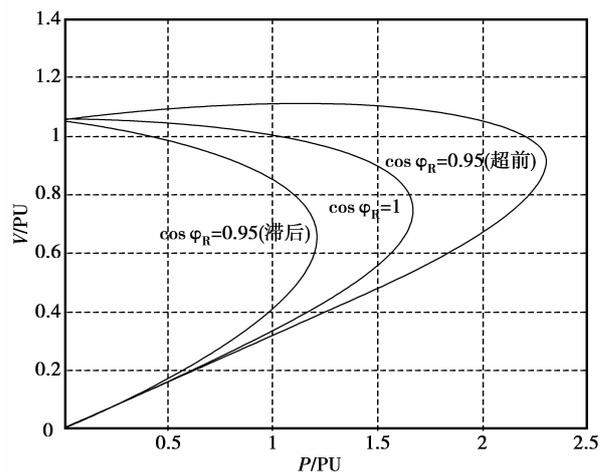


图 3 输电线的 P-V 曲线图

由图 3 可见:1)输电线的传输能力随负荷功率因数的上升而提高;2)受端功率因数超前时,输电线受端出现很大的超过开路电压的功率区间,因此必须防止受端功率因数超前状态的出现。

借助于圆图可以推出由静态稳定性确定的输电线的失步功率角和极限传输功率的算式<sup>[19]</sup>。

其中,失步功率角的算式为

$$\delta_{cr} = \frac{1}{2} (90^\circ - \varphi_R) = 45^\circ - \frac{1}{2} \varphi_R, \quad (11)$$

极限传输功率的算式为

$$P_{R,max} = \frac{V_S V_{R,cr}}{Z_C \sin \theta} \sin \theta_{cr} = \frac{V_S^2}{Z_C \sin 2\theta} \tan(45^\circ - \frac{1}{2} \varphi_R) \quad (12)$$

当  $V_S = V_N$  时, 极限传输功率的标么值算式为

$$P_{R,max}^* = \frac{\tan \delta_{cr}}{\sin 2\theta} \quad (13)$$

按保持受端功率因数为 1 的控制方式, 可得输电线的失步功角为  $45^\circ$ 。

按晋东南(长治)—南阳—荆门输电线的传播常数  $\beta = 6.16^\circ/100 \text{ km}$ 、全线长度 654 km 计算, 全长线路角  $\theta = 40.3^\circ$ , 中间(南阳)不补偿, 保持长治电压为 1 000 kV 时输电线的极限传输功率的标么值近似为  $1(p.u)$ , 即接近为自然功率 4 090 MW。由于中间南阳的电压支撑, 可将极限传输功率提高约 42%。

### 3 两端恒电压控制下的传输能力与无功补偿量

当保持  $V_S^* = V_R^* = 1$  时, 输电线的极限传输功率算式为

$$P_{R,max}^* = \frac{1}{\sin \theta} \quad (14)$$

上述算式表明: 输电线的自然功率不仅是输电线无功状态的分界点, 同时也表征了输电线的传输能力, 对于相同的输电距离, 输电线的传输能力正比于自然功率。

中国长治—南阳—荆门 1 000 kV 特高压输电线静态稳定性的极限传输功率标么值约为 1.55(p.u), 常规单位值为 6 340 MW, 由于中间南阳的电压支撑, 可将极限传输功率提高 70%, 达 10 767 MW。

线路两端的无功补偿量与受端负荷的功率和功率因数相关。应按规划的最大与最小传输功率来计算特高压变电站的无功补偿安装容量, 这时要求的正向和负向的无功补偿安装容量往往不对称。

作为特高压变电站无功补偿量的计算模型电路, 图 4 示出了输电线的受端和变电站的功率状况。

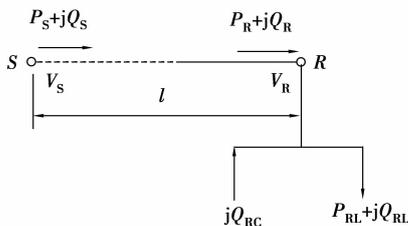


图 4 变电站无功补偿量的计算电路图

图中:  $P_{RL}, Q_{RL}, Q_{RC}$  为受端节点负荷有功、节点负荷无功和节点补偿器的无功。

令式(9)中  $V_S^* = V_R^* = 1$ , 可得

$$Q_{RN}^* = -Q_{SN}^* = \frac{\cos \delta - \cos \theta}{\sin \theta} \quad (15)$$

式中:  $Q_{RN}^*, Q_{SN}^*$  为线路两端同为额定电压时的剩余无功标么值。

式(15)表明:  $\delta > \theta$  时, 两端电网同时向输电线注入无功, 即输电线自身无功不足;  $\delta < \theta$  时, 两端电网同时吸收输电线无功, 即输电线自身无功过剩;  $\delta = \theta$  时, 输电线自身无功平衡。

同时可得无功与线路传输的有功的关系式为

$$Q_R^* = \frac{1}{\sin \theta} (\sqrt{1 - (P_R^* \sin \theta)^2} - \cos \theta) \quad (16)$$

无功补偿装置向电网提供的无功量应为变电站的负荷无功与线路剩余无功之差, 其算式为

$$Q_{RC}^* = Q_{RL}^* - Q_R^* = \frac{1}{\sin \theta} (\sqrt{1 - (P_{RL}^* \sin \theta)^2} - \cos \theta) \quad (17)$$

将输电线的最大和最小负荷功率及对应的功率因数代入式(16), 即可算出应该安装的正、负双向无功补偿量。如果在中进行补偿, 将  $(\theta/2)$  代入式(16)算出一半线路的剩余无功, 中点无功补偿装置吸无功量应为计算值的 2 倍。

公式(16)可应用于特高压变电站无功补偿的规划设计, 也可应用于电网的实时调度计算, 按调度给出的运行计划, 在已给出输电线传输功率的情况下, 可提前算出应投入无功补偿量, 指导变电站的运行、操作。

例如, 已知荆门最大有功负荷  $P_{RL}^* = 1.2$ , 功率因数  $\cos \varphi_{RL} = 0.95$ (滞后); 最小有功负荷  $P_{RL}^* = 0.4$ , 功率因数  $\cos \varphi_{RL} = 1$ 。按长治—南阳 363 km, 南阳—荆门 291 km, 用式(16)、(17)计算出的南阳补偿和不补偿两种情况下, 荆门和南阳补偿器应向电网提供的无功量列于表 2。

表 2 荆门与南阳的稳态无功补偿量(计算值)

无功分量	$Q_{RC}^*/(p.u)$	$Q_{RL}^*/(p.u)$	$Q_{RC}^*/(p.u)$	$Q_{MC}^*/(p.u)$
最大负荷	-0.199	0.395	0.549	南阳不补
最小负荷	0.309	0	-0.309	南阳不补
最大负荷	-0.073	0.395	0.468	0.165
最小负荷	0.132	0	-0.132	-0.298

表 2 中,  $Q_{RC}$  为荆门无功补偿量;  $Q_{MC}$  为南阳无功补偿量(视南阳为开关站, 表中未计南阳无功负荷)。

## 4 结 论

送端恒电压、受端恒功率因数控制和两端恒电压控制是输电线的两种控制方式。笔者分析了第1种控制方式下输电线的传输能力和第2种控制方式下变电站无功补偿量的计算方法,得出如下结论:

1)由于输电距离长、电压高,必须用分布参数电路来分析特高压输电线的运行特性,建立了由分布参数表达的特高压输电线的功角特性方程,它是分析特高压输电线运行特性的基本方程;

2)由输电线的功角特性方程推导出了输电线的 $P-V$ 特性方程,说明了绘制输电线 $P-V$ 特性曲线的运行条件是:输电线送端电压恒定,受端在保持功率因数恒定的条件下同时增加有功与无功;

3)绘制了受端在三种典型功率因数下的输电线的 $P-V$ 特性曲线,并由其说明了输电线的传输能力随受端功率因数的上升而提高,但过电压的功率区间也随之扩大,特别是在受端功率因数超前状态下出现了很大的超开路电压的运行功率区间,因此必须防止受端功率因数超前状态的出现;

4)特高压变电站不能套用一般超高压变电站按变压器容量计算无功补偿量的方法,提出了特高压变电站的无功补偿量计算模型,并由输电线的功角特性方程导出了算式:变电站的无功补偿量应为变电站的无功负荷量与线路运行于给定电压时的剩余无功量之差。

### 参考文献:

- [1] CIGRE. Electric power transmission at voltages of 1000 kV and above: Plans for future AC and DC transmission, data on technical and economic feasibility and on general design, information on testing facilities and the research in progress[R]. WG 31. 04 Report, 1983,91:83-133.
- [2] CIGRE. Electric power transmission at voltages of 1000kV AC or  $\pm 600$ kV DC and above: Network problems and solutions peculiar to UHV AC transmission[R]. WG 38. 04 Report,1988,122:41-75.
- [3] LINGS R, CHARTIER V, MARUVADA P S. Overview of transmission lines above 700kV [C] // Inaugural IEEE PES 2005 Conference and Exposition in Africa, July 11-15, 2005, Durban, South Africa. [S. l.]: IEEE,2005:33-43.
- [4] WEN J, SHU Y B. Current status and development of national grid of China[C]//2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific, August 14-18, Dalian, China. [S. l.]: Electricity, 2005, 16, (4):1-2.
- [5] 关志成,王国利. 中国特高压输电工程及相关的关键技术[J]. 南方电网技术,2005,1(6):12-18.  
GUAN ZHI-CHENG, WANG GUO-LI. The projects and related key techniques of ultra high voltage transmission in China[J]. China Southern Power Grid Technology Research,2005,1(6):12-18.
- [6] 张文亮,吴维宁,胡毅. 特高压输电技术的研究与我国电网的发展[J]. 高电压技术,2003,29(9):16-18.  
ZHANG WEN-LIANG, WU WEI-NING, HU YI. Research on UHV transmission technology and development of power network in China [J]. High Voltage Engineering,2003,29(9):16-18.
- [7] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京:中国经济出版社,2005.
- [8] CHEN S Y, HUANG F L, ZHANG B H, et al. Fast development of Chinese power industry and its impacts on power system R&D [C] // 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 24-28, 2007, Tampa, America. [S. l.]: IEEE,2007:1-6.
- [9] GLOVER J D, SARMA M S. Power System Analysis and Design [M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [10] JIANG W, WU G N, WANG S X, et al. The survey of insulation problems of UHV transmission system[C]// 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, June 9-12, 2008, Vancouver, Canada. [S. l.]: IEEE, 2008:518-523.
- [11] SUN S Y, SHU H C, YANG Y, et al. Analysis on cascading outages of Yunnan-Guangdong Ultra-high voltage transmission system [C] // Power and Energy Engineering Conference, March 27-31, 2009, Wuhan, China. [S. l.]: IEEE, 2009:1-4.
- [12] FENG G H, SHAO J Y, ZHANG B Y, et al. Study on a novel controllable reactor using in ultra-high voltage system [C] // Power System Technology and IEEE Power India Conference, Oct 12-15, 2008, New Delhi, India. [S. l.]: IEEE, 2008:1-4.
- [13] 唐寅生,盛万兴,蒋凯. 特高压电网无功补偿设计和运行方法研究[J]. 中国电力,2006,39(6):22-25.  
TANG YIN-SHENG, SHENG WAN-XING, JIANG KAI. Research on design and operation methods of reactive power compensation for ultra-high voltage grids [J]. Electric Power,2006,39(6):22-25.
- [14] 谷定燮,周沛洪. 特高压输电系统过电压、潜供电流和无功补偿[J]. 高电压技术,2005,31(11):21-25.  
GU DING-XIE, ZHOU PEI-HONG. Over-voltage, secondary arc and reactive power compensation in UHV AC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2005,31(11):21-25.
- [15] 胡毅. 特高压输电试验线段及相关技术问题的探讨[J]. 高电压技术,2004,30(12):37-39.  
HU YI. Discussion on test line and relevant technique of UHV transmission [J]. High Voltage Engineering, 2004,30(12):37-39.
- [16] 中华人民共和国能源部. 中华人民共和国电力行业标准(DL 5014-92)30~500kV 变电所无功补偿装置设计技术规定[S]. 北京:中国电力出版社,1993.
- [17] 牟道槐,林莉. 电力系统工程基础[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [18] 林莉,牟道槐,孙才新. 超高压长线通用相量图与功角特性方程[J]. 重庆大学学报,2005,28(10):36-38,42.  
LIN LI, MOU DAO-HUAI, SUN CAI-XIN. General phasor diagram and power-angle characteristic equations of extra high voltage long distance transmission line[J]. Journal of Chongqing University,2005,28(10):36-38,42.
- [19] 成涛,林莉,龙启玉,等. 超高压长线在末端恒功率因数下的运行圆图[J]. 重庆大学学报,2001,24(4):111-113.  
CHENG TAO, LIN LI, LONG QI-YU, et al. Operation circle diagram of ultra-high voltage long-distance transmission line with the constant power factor of its end [J]. Journal of Chongqing University,2001,24(4):111-113.

(编辑 王维朗)