

特高压交流输电模型的建立与经济性优选分析

杨昊¹, 王丹², 刘涤尘¹

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 苏州市供电公司, 江苏 苏州 215000)

摘要: 交流 1 000 kV 和 500 kV 具有不同的适用输电容量与距离范围。针对电源点送出的不同情况, 应合理选择电压等级, 并匹配相应的线路回数、串补度、开关站等。以往多采用 BPA 仿真软件通过连续潮流算法得到, 但该方法计算调整复杂且费时, 需对多种送电需求情况进行分析时计算量尤为庞大。提出一种基于交流线路输电能力的算法, 采用 Matlab 软件编程实现交流输电模型建模及经济性优选方法。该方法可以在考虑电网强度等因素情况下, 采用热限制、电压降落限制、稳定限制等约束条件, 得到交流线路输电能力曲线。在此基础上, 建立超、特高压交流输电模型, 结合单位容量年费用比较法进行经济性优选, 最终得到满足电源点送电任意输电容量和输电距离需求下的经济性最优交流输电电压等级及其输电模型配置, 对于我国输电线路的规划建设具有重要的参考意义和实用价值。

关键词: 交流线路输电能力; 输电模型; 单位容量年费用法; 经济性优选; Matlab

Establishment of UHV AC transmission model and economical optimization strategy

YANG Hao¹, WANG Dan², LIU Dichen¹

(1. College of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215000, China)

Abstract: 1 000 kV AC transmission and 500 kV AC transmission have different applicable transmission capacity and range. According to the different situation of power station, there should be a reasonable choice of voltage level, matching the corresponding circuits, series compensation degree, switch station. The traditional method uses the BPA simulation software to obtain that by continuous power flow algorithm. But this method is complicated and time-consuming. Calculation is particularly large when electricity has a variety of power demand analysis. This paper presents an algorithm based on the AC line transmission capacity, Matlab software programming is used to achieve the establishment of UHV AC transmission model and economical optimization strategy. The method can use thermal limit, voltage limit, landing stability constraints to get the AC line transmission capacity curve by considering the factor of power network strength. On the basis of this method, an UHV AC transmission model can be built combined with unit capacity annual cost algorithm, which can meet the power transmission of arbitrary transmission capacity and the optimal economic of any transmission distance, has an important reference significance and practical value for the planning and construction of electric transmission lines in China.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A119) and Major Projects of State Grid Corporation of China (No. SGCC-MPLG029-2012).

Key words: line transmission capacity; transmission model; unit capacity annual cost algorithm; economic optimization; Matlab

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)03-0091-06

0 引言

我国幅员辽阔, 能源与用电负荷呈逆向分布, 客观上需要能源在大范围内进行优化配置。我国各

各大型能源基地的能源资源构成、地理位置、送电需求、距离我国“三华”负荷中心的距离等情况各不相同。1 000 kV 电网和 500 kV 电网都是电网的重要组成部分, 1 000 kV 电网主要用于远距离大容量送电、跨大区联网送电和更高一级电压等级的网架建设, 500 kV 电网主要作为除西北以外区域内主网架。根据各电源点的实际情况, 针对不同的输送距离与输送容量的目标, 应合理选择交流电压等级,

基金项目: 国家高技术发展计划项目(863 计划)(2011AA 05A119); 国家电网公司重大专项资助项目课题(SGCC-MPLG029-2012)

使其在各自合理的容量和距离范围内发挥电力输送的功能,有利于加强电力系统优化配置,提高我国电网运行的整体经济性,指导我国电网的规划建设^[1]。输电网规划是以电源规划和长期负荷预测为基础,确定何时、何地、扩建多少输电容量的过程,以满足在安全经济传输电能的同时能够灵活适应系统运行方式的多种变化,并有利于电网的进一步发展等要求^[2]。

本文以晋陕蒙宁新开发大型煤电基地送出为基础,采用“点对网”输电模式,基于交流输电线路的输送能力研究,考虑满足不同送电需求、受端电网短路水平、安全稳定、经济性等,建立输电距离、输送容量连续变化时的超、特高压交流输电模型,结合单位容量年费用比较法,得到满足不同输电距离和输电容量需求下的经济性较优的输电模型,并输出相应较优电压等级及其输电模型配置。该方法能够得到不同电网条件下满足任意输电距离与输电容量需求的各电压等级交流输电模型,从而很好地应答了电源点送出情况不同时的电压等级选取问题,验证了该方法的合理性和可行性,对我国交流输电线路的规划建设具有重要意义^[3]。

1 交流线路输电能力研究

交流输电线路输送能力是指给定热、电压降和稳定极限时,允许线路输送功率的程度^[5]。对此,国内外已开展了一些研究^[4-9]。其中较有代表性的是 St. Clair 在 1953 年总结当前研究成果的基础上进一步提出的一组交流输电线路输送能力曲线,即著名的 St. Clair 曲线^[4-5],文献[5]指出交流线路输送容量的限制因素主要有热、电压降和稳定极限。文献[6-7]初步研究了符合我国电网实际运行特性的交流线路输送能力的计算方法和约束条件设置。文献[7]在仅考虑静态稳定限制的条件下,根据我国电网相关稳定要求初步计算了交流输电线路的输送能力曲线。

通过计算交流输电线路的输电能力曲线,能够确定在具体输电需求和约束条件下的线路输电能力,对输电线路的规划建设具有重要参考意义。

构建输电系统的等值数学模型如图 1 所示,送端系统、受端系统和输电线路均采用稳态运行时的工频正序参数模型,本文基于比较典型的发电机、变压器、输电线路参数。图中, Z_c 为线路波阻抗; β 为相位常数; l 为线路长度; E_s 、 E_r 、 U_s 和 U_r 分别为送端和受端的等值机端电压和线路母线电压; X'_d 、 X_{T1} 和 X_r 分别为送端系统的发电机暂态电抗、送端变压器电抗和受端系统的等值电抗。

输电线路的电阻、电抗、电导和电纳沿线路长度均匀分布,但分析计算时,一般采用集中等效参

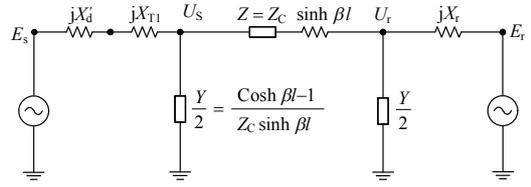


图 1 交流输电系统等值数学模型

Fig. 1 Mathematical model of AC transmission system

数代替分布参数。本次研究中线路阻抗和导纳的等效集中参数通过分布参数特性推导得到,其计算公式如式(1)、式(2)。

$$Z = Z_c \sin \beta l \quad (1)$$

$$\frac{Y}{2} = \frac{\cosh \beta l - 1}{Z_c \sinh \beta l} \quad (2)$$

以图 1 等值后的输电系统的数学模型为研究对象,推导得到的输电能力的计算公式见式(3),该式能够更好地反映“点对网”输电系统的结构和实际运行情况。

$$P \approx \frac{E_s E_r \sin \delta_{sr}}{(X'_d + X_{T1}) \cos \beta l + Z_c \sinh \beta l - \frac{(X'_d + X_{T1}) X_r}{Z_c} \sin \beta l + X_r \cos \beta l} \quad (3)$$

如果 E_s 和 E_r 恒定,输送距离确定,则输送功率 P 将随 δ_{sr} 的增大而增大。显然当 $\delta_{sr} = 90^\circ$ 时,输送功率 P 达到最大值,同时也达到静态稳定极限。出于对暂态稳定的考虑,输送功率 P 通常应限制在明显低于静态稳定极限的水平。

静态稳定储备系数定义为静态稳定极限与实际传输功率的差值与静态稳定极限的比值^[9]。

$$K_p = \frac{P_{\max} - P_{\text{rate}}}{P_{\text{rate}}} \times 100\% \quad (4)$$

在计算输电线路输送能力曲线时,静稳极限考虑取 30% 的静态稳定裕度,对应 44° 的机端相位差角。由于暂态稳定极限理论计算困难,因此通过提高计算时的静态稳定裕度表征暂稳极限,对应的机端相位角 δ_{sr} 取 36° 。考虑线路安装串补,设补偿度为 K_{se} ,则式(3)中波阻抗 Z_c 和相位常数 β 的表达式变为

$$Z'_c = \sqrt{(1 - K_{se}) x_0 / b_0} = \sqrt{(1 - K_{se})} Z_c \quad (5)$$

$$\beta' = \sqrt{(1 - K_{se}) x_0 b_0} = \sqrt{(1 - K_{se})} \beta \quad (6)$$

此外,考虑热稳定限制的交流输电极限输送容量的计算公式为

$$W_{\max} = \sqrt{3} U_e I_{\max} \quad (7)$$

式中: U_e 为线路额定电压; I_{\max} 为导线持续容许电流(kA)。

推导电压降落限制公式如式(8)所示, 该式考虑了传输有功功率、无功功率以及沿线无功补偿, 能够更准确地反映电压降落对线路输电能力制约的实际情况, 通过将 ΔU 限制在一定的百分数, 可以反推得到电压降落限制容许的输电能力。

$$\Delta U = \frac{PR + (Q_2 - Q_{C2})X}{U} = \frac{PR + (\sqrt{(P/\cos\varphi)^2 - P^2} - Y/2U^2)X}{U} \quad (8)$$

基于图 1 所示交流输电系统的等值电路, 以短路电流表示受端电网的强度, 考虑上文分析的热限制、电压降落限制、稳定限制, 运用 Matlab 设计了在不同输电距离下, 各电压等级采用单回输电线路实现点对点送电时的输电能力的计算程序如图 2 所示^[10]。

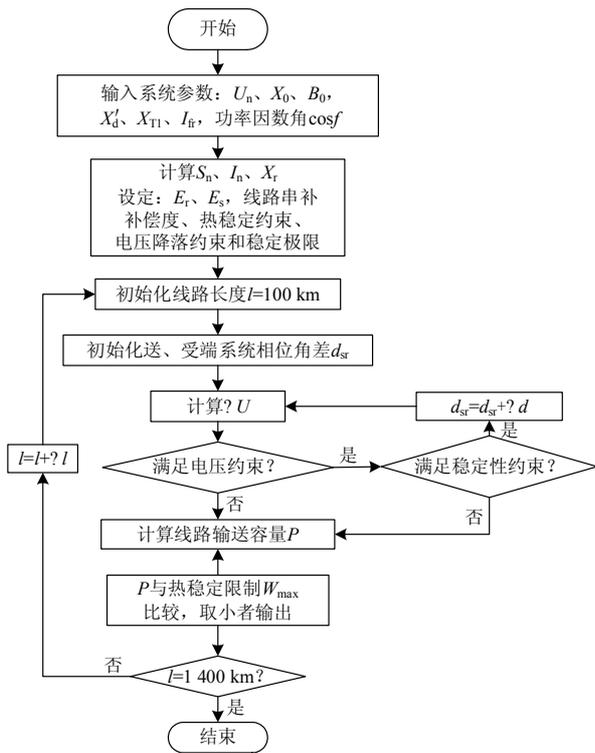


图 2 交流输电线路输电能力算法流程图

Fig. 2 Algorithm flowchart for power transfer capability of AC transmission line

各约束条件及输电能力的计算可通过式(1)~式(8)实现, 此方法更为全面准确地反映了交流输电线路输电能力的各项约束, 计算结果与实际情况比较一致, 适用于我国电网分析计算。

2 交流输电模型的建模及其经济性优选

2.1 交流输电模型建模方法研究

本文基于能源基地送出这一背景, 采用“点对

网”送电工程模式。建立输电模型是为了分析比较其经济性从而进行优选, 为简便计算, 本文研究的输电模型只考虑“点对点”输电系统中的经济性不同的部分, 包括送受端变电站、输电线路、串补以及开关站, 而不考虑送端电源及受端系统这些共性部分。

2.1.1 方案配置

1 000 kV 交流采用 $8 \times 630 \text{ mm}^2$ 导线以及 3 000 MVA 与 4 500 MVA 两种变电容量的变压器, 考虑每 300 km 建设一个开关站; 500 kV 交流采用紧凑型 $6 \times 300 \text{ mm}^2$ 导线以及 750 MVA 的变压器, 考虑每 250 km 建设一个开关站。1 000 kV 送端设开关站, 受端设变电站; 500 kV 送、受端均设开关站。

2.1.2 交流输电模型建立方法

基于第 1 节研究的理论计算公式和流程, 得到满足热、电压降落、稳定限制等约束条件的交流线路输电能力曲线。在此基础上, 增加线路输电回数 and 串补度, 多回线路做并联处理, 由于增加串补度的投资比增加一回线路的投资少, 故为满足一定的送电需求时优先增加线路串补度, 直到增加到最大限制值(取 50%), 若仍不满足要求, 则增加一回线路, 循环以上步骤来确定满足任意输电容量和输电距离需求的交流输电模型, 1 000 kV 和 500 kV 输电模型示例如图 3 所示。

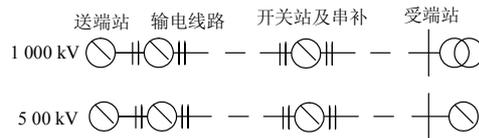


图 3 交流输电模型示例

Fig. 3 Example of AC transmission model

2.2 基于单位容量年费用的经济性最优输电模型优选

单位容量年费用比较法^[11]是一种用于电力建设工程项目方案比较的经济性比较方法, 它是将参加比较的诸方案计算期内的全部支出费用折算成等额年费用后进行比较, 从而确定年费用低的方案为经济最优方案。

本文主要对不同电压等级的交流输电方式进行经济比较, 因此在单位容量年费用法的计算中, 仅需就其中的不同因素进行局部比较, 这些不同因素可概括为投资年费用、线损费用、运行维护费用。

单位容量年费用比较法的计算公式可整理如下:

$$\text{单位容量年费用} = \text{年费用} / \text{输电容量}$$

$$\text{年费用} = \text{投资年值} + \text{运行维护费} + \text{线损费用}$$

$$\text{投资年值} = \text{工程投资} \times \frac{\text{折现率} \times (1 + \text{折现率})^{\text{运营期}}}{(1 + \text{折现率})^{\text{运营期}} - 1}$$

$$\text{运行维护费} = \text{固定资产原值} \times \text{运行维护费率}$$

线损费用=上网电价×线损电量×(1-电厂利润率)
式中：固定资产原值近似为工程投资；线损电量=功率线损×损耗利用小时数^[11]。

以上单位容量年费用法计算公式中所采用的经济计算参数如表 1 所示。

表 1 年费用法经济计算参数
Table 1 Economic parameters of annual cost method

项目	单位	数值
最大负荷利用小时数	h	5 500
运行费率	%	1.80
计算周期	年	30
折现率	%	8.00
上网电价	元/kWh	0.3
电厂利润率	%	8

本体投资造价计及设备包括送受端变电站、中间开关站、线路、串补^[12-14]。

推导年费用计算中所需线路损耗及串补容量计算公式如式(9)、式(10)。

$$I_w = \frac{P_2^2 + (Q_2 - Q_{c2})^2}{U_2^2} R = \frac{P_2^2 + \left(\sqrt{(P/\cos\phi)^2 - P^2} - Y/2U_2^2 \right)^2}{U_2^2} R \quad (9)$$

$$Q_c = \left(\frac{\Delta U + j\delta U}{Z - K_{se} \times X} \right)^2 \times K_{se} \times X \quad (10)$$

综上，交流不同电压等级输电模型进行经济性优选的程序流程图见图 4。

对于满足特定输电需求的 1 000 kV 和 500 kV 交流输电模型，利用以上程序，计算各输电模型的工程造价、线路损耗、运行维护费用等，运用单位容量年费用比较法，优选出单位容量年费用较低的交流输电模型，最终得到满足任意输电需求且经济性最优的交流电压等级及其输电模型配置^[15-16]。

3 仿真结果与实际应用

3.1 交流输电能力研究

设定送、受端系统两端点的静态裕度功角 36°；送端机端电压值取 1.05 p.u.，受端等效机端电压值取 1.0 p.u.，输电线路送受端母线电压降ΔU 设置为 10%，受端短路电流 I_n 设为 50 kA。考虑超、特高压交流输电系统一般运行在较高的功率因数状态，电压降落限制中 cosφ 取为 0.95^[17-18]。以 1 000 kV 为例，得到交流线路输电能力曲线结果如图 5~图 8 所示。

图 5 表明，稳定性约束限制了远距离线路的输送能力，交流输电线路的输送能力随输送距离的增加不断减小，中等距离就已无法达到自然功率。

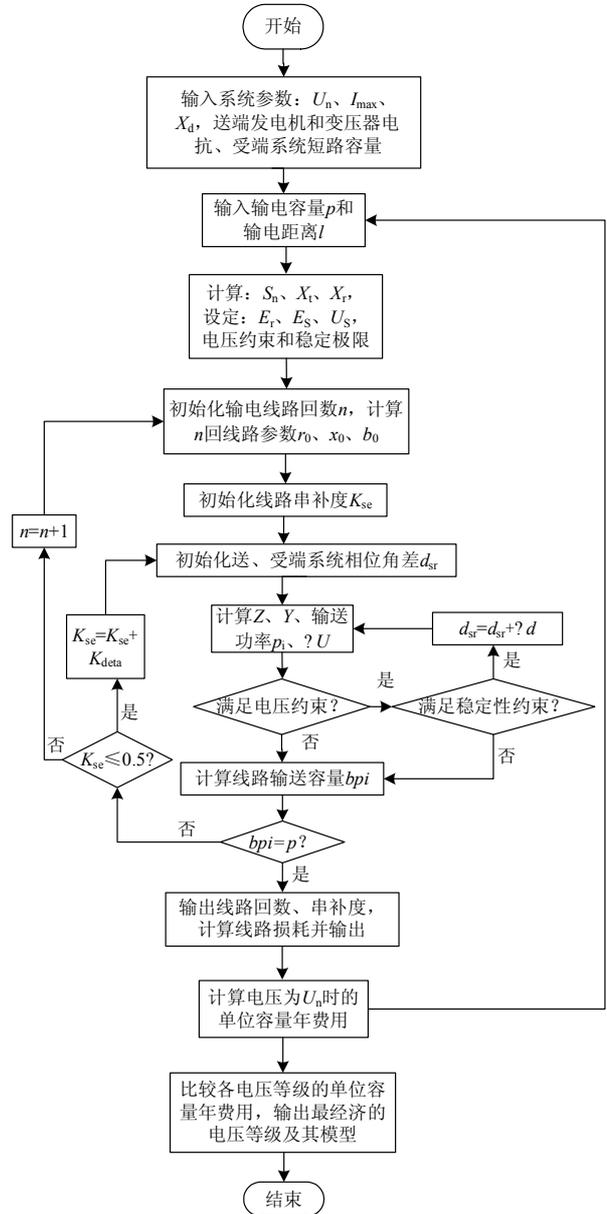


图 4 交流输电模型的经济性优选流程图

Fig. 4 Economy optimization flowchart of AC transmission line models

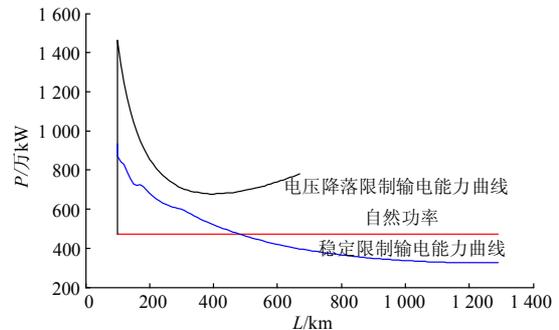


图 5 1 000 kV 交流线路输电能力曲线

Fig. 5 Transfer capacity curve of 1 000 kV AC transmission lines

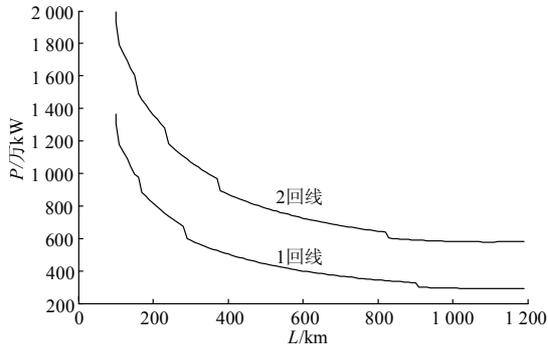


图 6 不同线路回数时 1 000 kV 交流输电能力曲线
Fig. 6 Transfer capacity curve of 1 000 kV AC transmission lines with different line numbers

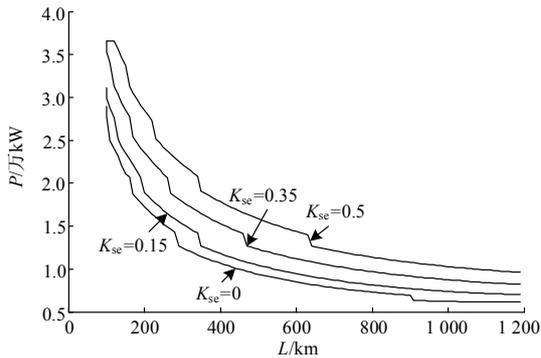


图 7 不同串补度时 1 000 kV 交流输电能力曲线
Fig. 7 Transfer capacity curve of 1 000 kV AC transmission lines under different KSE

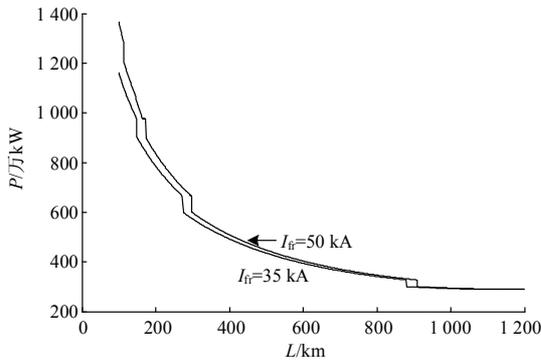


图 8 不同受端强度时 1 000 kV 交流输电能力曲线
Fig. 8 Transfer capacity curve of 1 000 kV AC transmission lines under different receiving grid strength

图 5~图 8 的输电能力曲线上均出现突变的折点, 这是因为输电能力的计算公式(3)中考虑送端变压器电抗, 而变压器台数随输电容量的增加会在某点突然增加一台, 使得各变压器的并联电抗值 X_{T1} 的突变, 造成输电能力的突变。

图 6 表明, 因为考虑了送端系统的发电机暂态电抗 X_d' 、送端变压器电抗 X_{T1} 以及受端系统的等值电抗 X_r , 采用本文推导的输电能力计算式(3), 得到

的多回线路输电能力并不能简化为单回线路输电能力与线路回数的乘积, 表明了采用并联方法对多回线路进行等值处理计算的合理性。

由图 7 可知, 串联电容补偿能明显提升交流线路的输电能力。图 8 表明, 受端电网强度变弱时, “点对网”输电系统的输电能力随之变小, 随着距离的增大这一影响逐渐减小^[19]。

3.2 实际应用交流输电模型建模

基于以上的交流线路输送能力研究, 采用 2.2 节中的单位容量年费用经济计算参数进行经济性优选, 即可得到满足任意输电容量和输电距离需求且经济性最优的交流输电电压等级及其输电模型配置。图 9 中举出了受端系统短路电流为 50 kA、输电容量 700 万 kW、输电距离 300~600 km 时的最优输电模型电压等级、线路回数、串补度、开关站数。

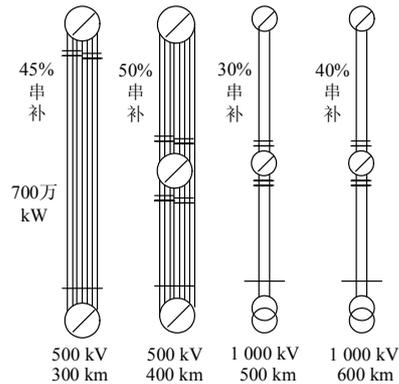


图 9 经济性最优交流输电模型
Fig. 9 Economic optimum AC transmission model

从图 9 可知, 通过理论计算公式和流程, 得到满足电源点送出需求且经济性最优的交流电压等级及其输电模型, 对我国的电网规划建设具有指导意义。有利于解决在交流输电适用范围研究中输电能力的简化计算问题。

4 结论

(1) 本文推导了满足各项约束的交流线路输电能力算法, 更加符合我国电网的实际运行情况, 仿真结果说明了串补及受端电网不同强度对输电能力的影响特性。

(2) 基于输电能力算法, 结合单位容量年费用比较法, 优选出满足任意输电距离和输电容量需求且经济性最优的交流输电模型。与传统方法需要用 BPA 等仿真软件通过连续潮流算法来确定输电能力相比更为简便, 大大提高了计算速度, 且能够验证 BPA 仿真结论, 在指导我国输电线路规划、交流输

电适用范围研究等方面具有现实意义和应用价值,对于根据我国电源点送出的实际情况选取输电电压等级具有重要参考意义。

参考文献

[1] 舒印彪. 我国特高压输电的发展与实施[J]. 中国电力, 2005, 38(11): 1-8.
SHU Yinbiao. Development and execution of UHV power transmission in China[J]. Electric Power, 2005, 38(11): 1-8.

[2] 韩晓慧, 王联国. 输电网优化规划模型及算法分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 143-148, 154.
HAN Xiaohui, WANG Lianguo. Review of transmission network optimal planning model and algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 143-148, 154.

[3] 李琼慧, 胡兆意, 叶运良. 长距离大容量输电的输电方式/电压等级宏观决策的研究[J]. 电网技术, 1995, 19(8): 1-6.
LI Qionghui, HU Zhaoyi, YE Yunliang. Study on macro-decision of transmission pattern and voltage level for long distance and high capacity transmission[J]. Power System Technology, 1995, 19(8): 1-6.

[4] St Clair H P. Practical concepts in capability and performance of transmission lines[J]. AIEE Transactions, 1953, 72: 1152-1157.

[5] DUNLOP R D, GUTMAN R, MARCHENKO P P. Analytical development of loadability characteristics for EHV and UHV transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1979, 98(2): 606-613.

[6] 徐政. 超、特高压交流输电系统的输送能力分析[J]. 电网技术, 1995, 19(8): 7-12.
XU Zheng. EHV/UHV AC transmission capability analysis[J]. Power System Technology, 1995, 19(8): 7-12.

[7] 柴旭峥, 梁曦东, 曾嵘. 交流输电线路输送能力曲线计算方法的改进[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 20-24.
CHAI Xuzheng, LIANG Xidong, ZENG Rong. An improved calculation method for power-transmitting capability curve of AC transmission line[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 20-24.

[8] GUTMAN R. Application of line loadability concepts to operating studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(4): 1426-1433.

[9] TIWARI S N, BIN SAROOR A S. An investigation into loadability characteristics of EHV high phase order transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3): 1264-1270.

[10] 刘振亚. 国家电网公司输变电工程通用造价, 500 kV 输电线路分册(2010)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 4-16.

[11] 贾沛义. 电力工程方案比较中的年费用法及其简化[J]. 江苏电机工程, 1991, 10(1): 13-16.

JIA Peiyi. The annual cost method and its simplification in power engineering program comparison[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 1991, 10(1): 13-16.

[12] 纪雯. 电力系统设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 146-147.

[13] 电力规划设计总院. 电网工程限额设计控制指标(2009年水平)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 56-59, 77-82, 198-206.

[14] 刘振亚. 国家电网公司输变电工程通用造价, 500 kV 变电站分册(2010)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 4-20.

[15] 刘士利, 王泽忠, 孙静. 基于线-面模型的边界元法计算特高压交流变电站设备附近工频电场[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 162-167.
LIU Lishi, WANG Zezhong, SUN Jing. Calculation of power frequency electric field near equipments in UHV substations with BEM based on line-area models[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 162-167.

[16] 任玉杰. 数值分析及其 MATLAB 实现: MATLAB6.X,7.X 版[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 484 - 485.

[17] 陈霞, 孙海顺, 隋先超, 等. 特高压输电线路端电压控制域的计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 45-49.
CHEN Xia, SUN Haishun, SUI Xianchao, et al. Calculation method for terminal voltage control domain across ultra-high voltage transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 45-49.

[18] 李斌, 李学斌, 丁茂生, 等. 特高压同杆双回线的环流不平衡及其影响[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 202-208, 223.
LI Bin, LI Xuebin, DING Maosheng, et al. Circulating unbalanced current and its influence of double-circuit UHV transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 202-208, 223.

[19] 张宁, 刘静琨. 影响特高压电网运行的因素及应对策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 109-114.
ZHANG Ning, LIU Jingkun. The ultra high voltage grid risk analysis and its assessment framework[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 109-114.

收稿日期: 2014-04-24; 修回日期: 2014-06-11

作者简介:

杨 昊(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制, 灵活交流输电、电力系统运行规划等; E-mail: yhw hdx@whu.edu.cn

王 丹(1989-), 女, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向为电力系统分析与规划;

刘涤尘(1953-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力系统稳定与控制、智能电网、电力系统仿真与分析等方面的研究。