

特高压输电线路端电压控制域的计算方法研究

陈霞¹, 孙海顺¹, 隋先超¹, 文劲宇¹, 李小平², 孙建波², 李淼², 李大虎²

(1. 华中科技大学电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 湖北电力调度通信中心, 湖北 武汉 430077)

摘要: 采用特高压现有无穷大电势源等值法获取端电压二维控制域时, 会得出投入容性无功补偿将降低特高压沿线电压这一“错误”结论, 对此研究证明: 变压器中压侧绕组等效阻抗为负是造成二维电压运行下限上移的主要原因。提出了一种新的等值电势源法, 即将华中电网和华北电网分别等效成含内阻抗的电势源。采用该等值方法时, 无功补偿装置的投切所引起的电压控制域的变化趋势与电压无功理论相符, 同时还可以考虑线路输送功率变化时, 由线路功率和两端母线电压共同形成的三维控制域。

关键词: 特高压输电; 端电压控制域; 母线电压法; 等值电势源法; 三维控制域

Calculation method for terminal voltage control domain across ultra-high voltage transmission line

CHEN Xia¹, SUN Hai-shun¹, SUI Xian-chao¹, WEN Jin-yu¹, LI Xiao-ping², SUN Jian-bo², LI Miao², LI Da-hu²

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Hubei Electric Power Dispatching and Communication Center, Wuhan 430077, China)

Abstract: The two-dimensional control domain of the ultra-high voltage (UHV), formed by the two terminal bus voltage, is commonly calculated by using existing UHV infinite equivalent potential source method, which will lead to decrease of voltage along the UHV line after switching the capacitive reactive power compensation devices. It's found that the minus equivalent reactance on the medium-voltage side winding of the transformer is the main reason. Hence, a novel equivalent potential source method is proposed for the control domain calculation, in which the Central China grid and North China grid systems are modeled as the equivalent potential sources with inner impedance respectively. Comparing with the bus voltage method, the proposed method can not only eliminate the reverse moving of the control domain but also develop a three-dimension voltage control domain formed by line power and two-terminal bus voltage by taking into account of the variation of the transmission power variation.

This work is supported by Key Project of National Natural Science Foundation of China (No.51071185).

Key words: ultra-high voltage; terminal voltage control domain; bus voltage method; equivalent potential source method; three-dimension voltage control domain

中图分类号: TM721.1 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)06-0045-05

0 引言

晋东南—南阳—荆门 1 000 kV 特高压交流试验示范线路于 2008 年底正式投入运行, 作为我国第一条特高压输电线路、同时也是目前世界上唯一一条投入商业运营的特高压线路, 确保其安全稳定和优质高效运行是一个非常重要的问题^[1-2]。

特高压交流输电线路的基本结构如图 1 所示。线路全长 639 km, 其中, 长治—南阳线路长度为 358 km, 线路两侧高抗配置容量为: 长治侧 960

Mvar, 南阳侧 720 Mvar; 荆门—南阳线路长度为 281 km, 线路两侧高抗配置容量为: 南阳侧 720 Mvar, 荆门侧 600 Mvar。线路两侧分别通过荆门和长治两台特高压变压器与华中电网和华北电网的 500 kV 母线相连, 变压器容量为 3 000/3 000/1 000 MVA, 额定变比为 1 100/525/110 kV。变压器低压侧无功补偿装置容量包括 2 组单组容量为 240 Mvar 的低压电抗器及 4 组单组容量为 210 Mvar 的低压电容器。按照运行要求, 特高压线路上的电压运行范围应在 1 000~1 100 kV 之间。

特高压输电具有电压高、充电功率大的特点, 其充电功率约为同长度 500 kV 线路的 4~6 倍^[3-4]。在输送有功功率偏大时容易出现沿线电压偏低的现

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (51071185); 教育部科学技术研究重点项目 (109106); 国家重点基础研究发展 973 计划 (2009CB219701)

象，而输送有功功率偏小时由于线路的充电效应，容易出现沿线电压偏高的现象^[5-6]；同时，华中和华北电网 500 kV 母线电压应控制在 500~550 kV，即两端母线有一个正常变化范围，但两端母线电压的变化必将直接影响到特高压沿线电压大小。在上述因素共同作用下势必会增加系统电压调节和无功平衡控制的难度。如何控制特高压变电站 500 kV 母线电压才能使沿线电压保持在 1 000 kV~1 100 kV 之间，在特高压工程投产前后曾做过专门的研究。

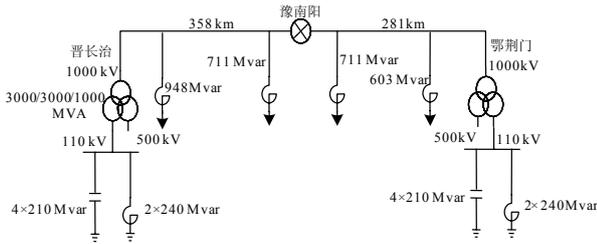


图 1 交流特高压线路示意图
Fig.1 Diagram of UHV transmission line

事实上，尽管华中电网和华北电网的运行方式复杂多变，但由于特高压线路是目前华中和华北电网间的唯一联络线，华中和华北电网对特高压沿线电压的影响主要通过荆门和长治 500 kV 母线电压以及两个系统间的交换功率体现出来。在传输功率一定的情况下，为了使特高压沿线电压保持在 1 000~1 100 kV 之间，两端母线电压就会形成一个运行范围，即形成一个端电压控制域，如图 2 所示，其中灰色区域为控制域，端电压只要在此区域内，就可以保证沿线运行电压在设定范围内。

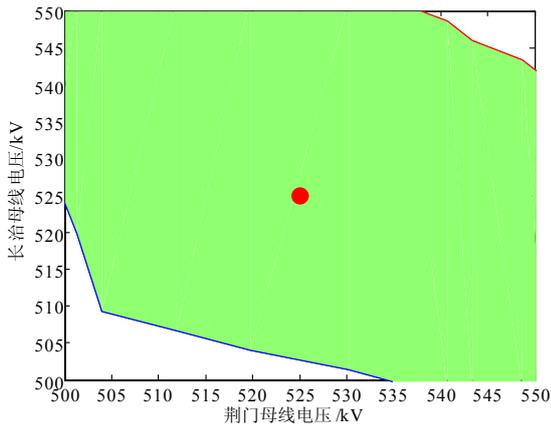


图 2 特高压线路端电压控制域示意图
Fig.2 Terminal voltage control domain for UHV

目前采用的端电压控制域计算方法是不断改变荆门和长治 500 kV 母线电压幅值，计算出特高压对应的沿线电压，根据沿线电压上下限要求得到

控制域的边界，本文将这种计算方法称为母线电压法。研究发现：采用母线法计算控制域将会得出一些错误的结论，本文对其原因进行了分析，提出了一种更加合理的计算方法。

1 母线电压法的问题分析

1.1 母线电压法的问题

荆门和长治 500 kV 母线电压除了受到华中和华北电网的运行方式影响外，还会受到特高压变压器低压无功补偿装置投切的影响。无功补偿装置是按照线路传输功率的大小进行投切的，表 1 为其中的一种投切控制策略。

表 1 低压无功补偿装置投切控制策略

Tab.1 Control strategy for low voltage reactive power compensation device

投入无功补偿装置	线路功率 / MW	投切功率值 / MW
第 1 组低抗	0~900	900
无	900~1500	—
第 1 组低容	1500~1900	1500
第 2 组低容	1900~2200	1900
第 3 组低容	2200~2400	2200
第 4 组低容	2400~2800	2400

显然，在计算端电压控制域时，必须考虑无功补偿装置的作用，投切一组无功补偿装置会造成控制域边界的移动。例如，当特高压南送 900 MW 时，1 000 kV 变低压侧将由投入 3 组低容变为投入 4 组低容，按图 1 所示等值系统，通过不断改变长治和荆门 500 kV 母线电压，得到端电压控制域如图 3 所示，增投 1 组低容时控制域下边界向右上方移动。

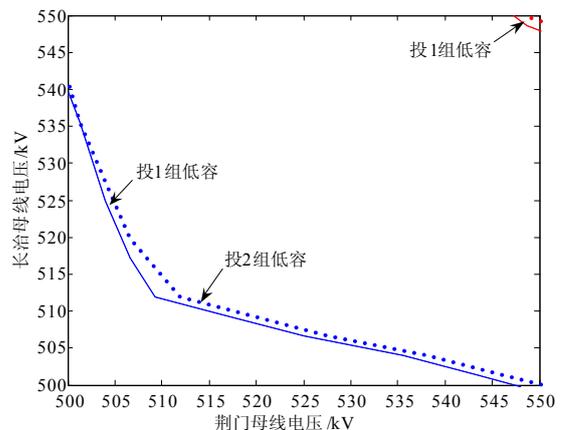


图 3 投切电容对控制域边界的影响

Fig.3 Influence on control domain boundary by switching capacitor on low-voltage side of transformer

从图3可以得到如下结论:增加投入的容性无功补偿装置将降低特高压沿线电压,使得长治和荆门的500 kV电压必须提高才能够满足特高压沿线电压不越下限的要求。这一结论显然不符合电力系统无功越充足电压越高的特点,控制域发生了“逆向移动”,因此有必要分析产生该现象的原因。

1.2 原因分析

基于母线电压法的特高压无穷大电势源等值

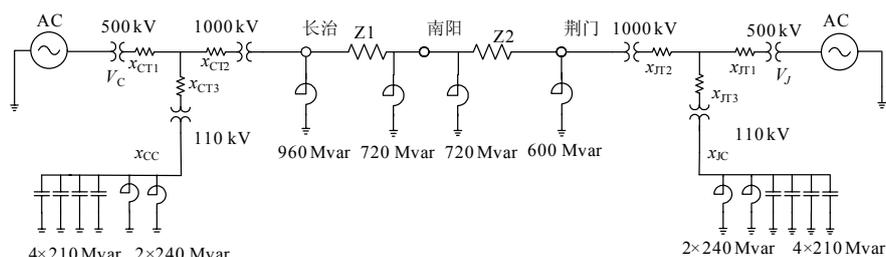


图4 基于母线电压法的特高压等值模型

Fig.4 Bus voltage source equivalent model of UHV system

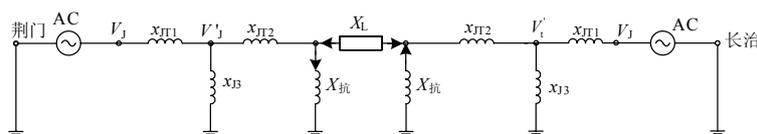


图5 特高压输电线路双端口等值网络

Fig.5 Two-port equivalent model for UHV system

$$V'_J = \frac{V_J}{x_{JT1}} \frac{x_{JT1} x_{J3}}{x_{JT1} + x_{J3}} = \frac{V_J}{1 + \frac{x_{JT1}}{x_{J3}}} \quad (1)$$

式中: $x_{J3} = x_{JT3} + x_{JC}$, 由于 x_{JC} 值为负, x_{JT3} 为正但数值相对较小, 所以 $x_{J3} < 0$ 。当增加投入1组电容器后, $|x_{JC}|$ 变小, 因此 $|x_{J3}|$ 也变小。如果假定 V_J 不变, V'_J 的变化趋势将与 x_{JT1} 即变压器中压侧绕组的电抗值的正负有关, 下面分别讨论。

(1) 若 $x_{JT1} > 0$, 则

$$V'_J = \frac{V_J}{1 - \frac{x_{JT1}}{|x_{J3}|}} \quad (2)$$

此时, 如果 $|x_{J3}|$ 变小, 即增加投入1组电容, V'_J 将变大。

(2) 若 $x_{JT1} < 0$, 则

$$V'_J = \frac{V_J}{1 + \frac{|x_{JT1}|}{|x_{J3}|}} \quad (3)$$

此时, 如果 $|x_{J3}|$ 变小, 即增加投入1组电容, V'_J

模型如图4所示, 下标J表示荆门侧, V_J 表示荆门500 kV母线电压值, x_{JT1} 、 x_{JT2} 、 x_{JT3} 分别表示特高压变压器的中压侧、高压侧和低压侧的等值电抗, x_{JC} 为低压侧投入的无功补偿装置等值电抗。分别以两台特高压变压器星型等值电路的星型连接点作为端口, 可以得到如图5所示的特高压输电线路的双端口等值网络。其中, 荆门侧端口等值电势值 V'_J 为式(1):

将变小。

对特高压线路长治侧可以按同样的方法得到类似的结论。

经查, 特高压变压器的中压侧绕组等值电抗为负值, 所以, 增加投入1组电容后, 双端口等值网络两端的等值电势值变小, 相当于系统的整体电压水平下降, 从而得到了如图3所示的结果, 端电压控制域向右移动, 荆门和长治母线电压必须抬高才不会越下限。

但显然上述结果与电力系统的特点是不相符的, 因为一般情况下投入电容都将抬高电压。导致上述结果的根本原因在于: 采用母线电压法计算端电压控制域时隐含了一个假设, 即电容投入前后荆门和长治500 kV母线的电压保持不变, 即式(3)中的 V_J 不变。但在实际电网中, 即使华中和华北电网运行工况保持不变, 在特高压变压器低压侧投入1组电容将会引起这两条母线的变化, 因此, 有必要采用一种更合理的方法来计算端电压控制域。

2 等值电势源法及其分析

2.1 等值电势源法

由于荆门和长治500 kV母线的电压是由互联

的两个电网及特高压变压器低压侧投入的无功补偿容量共同决定的，因此，在计算端电压控制域时应将华中电网和华中电网分别等效成含内阻抗的电势源，如图 6 所示。其中， Z_3 和 Z_4 分别为华北和华中

电网的等值内电抗，可以根据长治和荆门 500 kV 母线短路电流的大小来计算，等值机的电压代表了华北、华中整个电网的电压水平。

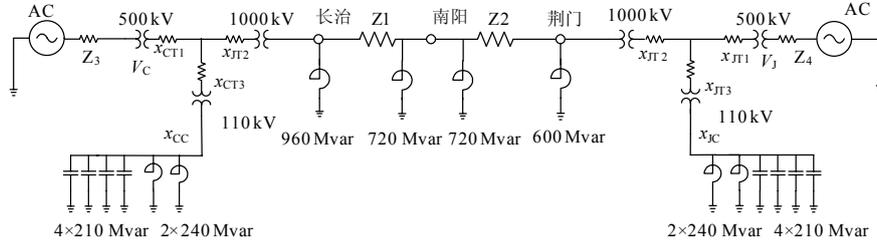


图 6 等值电势源法示意图

Fig.6 Equivalent voltage source model for UHV system

电网运行过程中，荆门和长治 500 kV 母线电压随着华中电网和华中电网的运行工况变化而变化，通过不断改变相应的两个等值电势源的电压值，计算出特高压沿线电压水平，按照电压处于 1 000~1 100 kV 这个范围确定控制域边界，将此时对应的荆门和长治 500 kV 母线电压幅值绘制出来，就可以获得正确的特高压线路端电压控制域。图 7 给出了特高压南送 900 MW 时的端电压控制域，可以看到，如果增加投入 1 组电容，控制域将向左下移动，说明投入 1 组电容使整个系统以及特高压沿线电压水平升高，这与实际情况是一致的。

将电容投入前后系统运行点在图 8 中标示出来可对上述现象做出更合理的解释。例如：

假定电容投入前华中等值电势为 510 kV、华北等值电势为 505 kV，如图中的 A 点所示，处于控制域之外。此时对应荆门 500 kV 母线电压为 513 kV、长治 500 kV 母线电压为 509 kV，如图中 B 点所示。

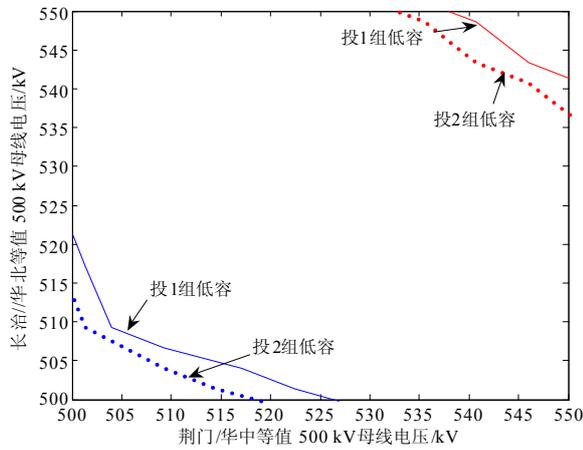


图 7 等值电势源法计算得到的端电压控制域

Fig.7 Control domain by equivalent voltage source model

2.2 端电压控制域的进一步分析

图 7 中控制域的坐标分别为华中和华北等值电势源的电压，所以该控制域并不是真正意义上的端电压控制域。如果采用图 5 所示的电势源等值电路，但以荆门和长治 500 kV 母线电压为坐标，仍会得到与图 3 类似的端电压控制域变化趋势，如图 7 中虚线所示。

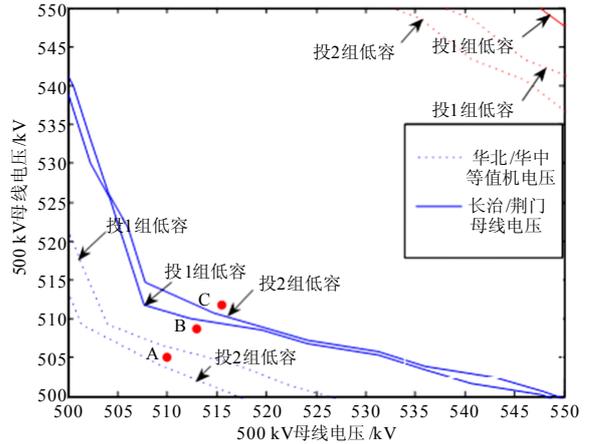


图 8 两类端电压控制域

Fig.8 Voltage control domain comparison

投入 1 组电容后，华中和华北电网的等值电势没有变化，运行点仍然在 A 点，但由于控制域向左下移动，所以特高压沿线电压将满足运行要求；同时，两条 500 kV 母线的运行点转移到了 C 点（荆门 515 kV，长治 512 kV）。

投入低容在改变了端电压控制域的同时也改变了特高压系统的运行状态。虽然以长治/荆门 500 kV 的母线电压作为端电压控制域时投入低容使得控制范围缩小，但实际运行中却提高了长治和荆门 500 kV 的母线电压，使得原本运行于控制范围之外的 B 点移动到了 C 点，进入控制域内。所以，提高无功补偿容量实际上对于提高特高压系统的电压是

有利的。

2.3 三维控制域

以上分析均假定传输功率一定,得到由端电压构成的二维控制域。实际系统中线路传输功率是不断变化的,特高压输电线路的传输功率设计范围是 ± 2800 MW(南送为正),将特高压输送功率在上述范围内不断变化,可以得到特高压线路的三维控制域,如图9所示。它是一个中间粗两头细的C型锥筒,说明当传输功率逐渐变大时,控制域逐渐变小,并且向电压增大的方向收缩。

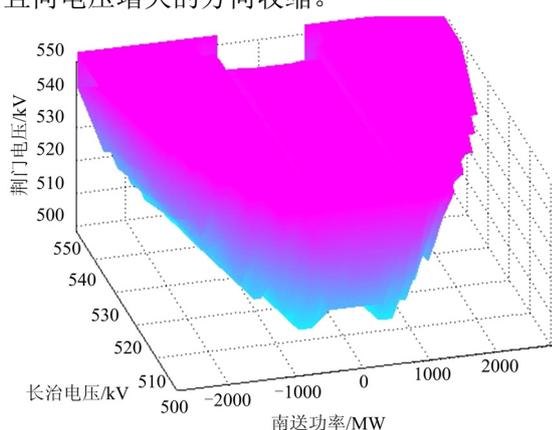


图9 特高压线路三维控制域

Fig.9 Three-dimension voltage control domain for UHV

3 结论

采用特高压现有无穷大电势源等值法获取电压二维控制域时,会得出投入容性无功补偿将降低特高压沿线电压这一结论。本文对此结论进行了分析和验证,证明变压器中压侧绕组等效电抗为负是造成二维电压运行下限上移的主要原因。在此基础上,提出了一种新的等值电势源法,即将华中电网和华北电网分别等效成含内阻抗的电势源。采用该等值方法时,无功补偿装置的投切所引起的电压控制域的变化趋势与电压无功理论相符。

参考文献

- [1] 倪学峰,林浩,盛国钊. 1000kV特高压输电系统无功补偿若干问题[J]. 电力设备, 2005, 6(12): 28-30.
NI Xue-feng, LIN Hao, SHENG Guo-zhao. Some problems of reactive power compensation for 1000 kV UHV power transmission system[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(12):

28-30.

- [2] 王锐,李瑞生. 特高压交流1000kV示范工程故障电流谐波分析[J]. 继电器, 2007, 35(23): 1-4.
WANG Rui, LI Rui-sheng. Fault current harmonic analysis of 1000 kV UHV AC power transmission demonstration project[J]. Relay, 2007, 35(23): 1-4.
- [3] 蒋平,秦昱,顾伟. 特高压交流同步电网的无功电压优化[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(8): 95-99.
JIANG Ping, QIN Yu, GU Wei. Reactive power and voltage optimization of UHV AC synchronized power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(8): 95-99.
- [4] 陈德树,唐萃. 特高压交流输电继电保护及相关问题[J]. 继电器, 2007, 35(5): 1-3.
CHEN De-shu, TANG Cui. Special issues and suggestion on protective relaying applied in UHV transmission line [J]. Relay, 2007, 35(5): 1-3.
- [5] 张建超,刘晓波,张天玉. 特高压输电线路单相自动重合闸过电压的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 71-74.
ZHANG Jian-chao, LIU Xiao-bo, ZHANG Tian-yu. Simulation study of single phase auto reclosing in ultra-high voltage power transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 71-74.
- [6] 盛鸥,李永丽,李斌. 特高压输电线路过电压的研究和仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(6): 13-18.
SHENG Kun, LI Yong-li, LI Bin. Research and simulation of over-voltage in UHV transmission lines[J]. Proceedings of CUS-EPSSA, 2003, 15(6): 13-18.

收稿日期: 2010-03-31; 修回日期: 2010-06-07

作者简介:

陈霞(1983-),女,博士研究生,研究领域为特高压交流输电及多端直流输电;

孙海顺(1971-),男,博士,副教授,研究领域为电力系统仿真分析和运行控制、独立电力系统等;

隋先超(1986-),男,硕士生,研究领域为大电网稳定分析与控制。