

文章编号:1000-582X(2005)10-0036-03

超高压长线的通用相量图与功角特性方程*

林莉,牟道槐,孙才新

(重庆大学 高电压与电工新技术教育部重点实验室,重庆 400030)

摘要:在超高压长线中间加装补偿装置,是提高传输能力和维持系统稳定性的重要手段.正确而简便地表达中间补偿装置的补偿效果,有利于分析和实施控制.为简化分析或因实时控制需要提高运算速度,在500 kV超高压长线的计算中普遍采用集中参数模型,这样必然导致很大误差,因此需要寻求一种既能反应分布参数又较为简单的模型.在均匀长线的电压及电流分布方程基础上绘出了无补偿的长线相量图并推出其功角方程.进而分析了中间补偿的影响,定义出等效阻抗 x_{eq} 和电压系数 K_V 2个特征参数,推出了由2个特征参数表达的各种补偿状态下的长线通用相量图和功角方程.同时还推出了由补偿装置参数计算2个特征参数增量的算式,从而使概念清晰、分析计算简化.

关键词:超高压输电;功角特性;等效阻抗;电压系数

中图分类号:TM761

文献标识码:A

电力系统的发展必然伴随着输电距离的增长与电压的提高.500 kV及以上超高压远距离输电线路(后面简称超高压长线)应采用分布参数电路进行计算^[1-3].为了防止长线中间过电压和提高传输能力,往往需要在中间进行串联补偿、并联补偿或两者兼有的混联补偿^[4-6].目前,在500 kV超高压长线的计算中普遍采用集中参数模型,这样必然导致很大误差,因此需要寻求一种既能反应分布参数又较为简单的模型.

笔者按分布参数模型推出超高压长线的功角特性,其中定义出电压系数 K_V 与等效阻抗 x_{eq} 2个特征参数,可以将各种中间补偿状态下的超高压长线用同一形式的功角特性方程和相量图来描述,从而使问题变得简单明了.

1 均匀长线的电压及电流分布方程

将超高压线路视为均匀长线,其电压、电流分布状态如图1所示.

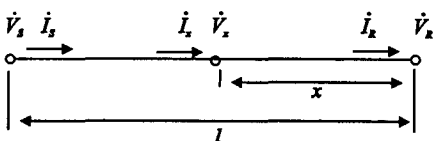


图1 超高压长线

记线路始端为S,末端为R,线路全长为l,则以末端的电压、电流为参考,超高压长线电压、电流的分布方程为^[7]:

$$\dot{V}_x = \dot{V}_R \operatorname{ch}\gamma x + \dot{I}_R Z_C \operatorname{sh}\gamma x, \quad (1)$$

$$\dot{I}_x = \dot{I}_R \operatorname{ch}\gamma x + \frac{\dot{V}_R}{Z_C} \operatorname{sh}\gamma x, \quad (2)$$

式中, \dot{V}_x 为与线路末端距离为x处的电压; \dot{I}_x 为与线路末端距离为x处的电流; \dot{V}_R 为线路末端电压; \dot{I}_R 为线路末端电流; Z_C 为线路的波阻抗; γ 为线路的传播常数.

由于输电线的电阻与感抗之比以及电导与电纳之比均随输电电压的提高而减小,超高压输电线路的正序电抗与电阻的比值一般为10~20倍,通常可以忽略不计,即将其视为无损线^[8].无损线的波阻抗和传播常数表达式分别为:

$$Z_C = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}, \quad (3)$$

$$\gamma = j\omega \sqrt{L_1 C_1} = j\beta, \quad (4)$$

式中, L_1 、 C_1 分别为输电线路单位长度的电感和电容.此时线路的电压、电流分布方程为:

$$\dot{V}_x = \dot{V}_R \cos\beta x + j\dot{I}_R Z_C \sin\beta x. \quad (5)$$

* 收稿日期:2005-06-21

作者简介:林莉(1974-),女,辽宁凤城人,重庆大学讲师,博士研究生,从事电力系统运行与控制研究.

$$\dot{I}_x = \dot{I}_R \cos \beta x + j \frac{\dot{V}_R}{Z_C} \sin \beta x. \quad (6)$$

2 中间无补偿长线的相量图与功角特性方程

设线路全长为 l , 由式(5)可得线路首端的电压方程为:

$$\dot{V}_s = \dot{V}_R \cos \theta + j \dot{I}_R Z_C \sin \theta, \quad (7)$$

式中, θ 为线路角, $\theta = \beta l$.

由式(7)得出超高压长线的相量图, 如图2所示.

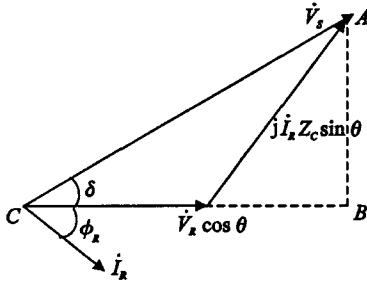


图2 超高压长线的相量图

图2中, δ 为首端电压超前于末端电压的角度, 即输电线的功率角; ϕ_R 为末端电压超前于电流的角度, 即末端负载的功率因数角.

由图2可推出中间无补偿时, 超高压输电线路的功角特性方程为:

$$\begin{aligned} AB &= I_R Z_C \sin \theta \cos \phi_R = V_S \sin \delta. \\ \text{所以 } I_R \cos \phi_R &= \frac{V_S \sin \delta}{Z_C \sin \theta}, \\ \text{所以 } P_R &= V_R I_R \cos \phi_R = \frac{V_S V_R}{Z_C \sin \theta} \sin \delta. \end{aligned} \quad (8)$$

同理可得:

$$Q_R = V_R I_R \sin \phi_R = \frac{V_R}{Z_C \sin \theta} (V_S \cos \delta - V_R \cos \theta). \quad (9)$$

3 中间补偿的影响

3.1 中间有并补的超高压长线的功角特性方程

图3示出中间有并补的超高压长线.

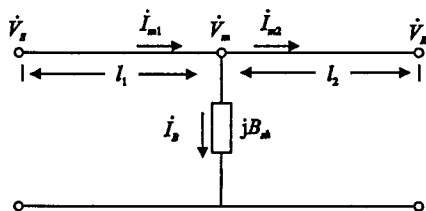


图3 中间有并补的长线

图3中, l_1 、 l_2 分别为补偿装置安装点 m 与线路首、末端的距离 (线路全长 $l = l_1 + l_2$); B_{sh} 为补偿装置的电纳 ($B_{sh} > 0$ 为容性, $B_{sh} < 0$ 为感性).

设 m 点电压及两端电流分别为 \dot{V}_m 、 \dot{I}_{m1} 、 \dot{I}_{m2} , 补偿器电流为 \dot{I}_s . 与 l_1 、 l_2 、 l 相对应的线路角分别记为 θ_1 、

θ_2 、 θ , $\theta_1 = \beta l_1$, $\theta_2 = \beta l_2$, $\theta = \beta l = \theta_1 + \theta_2$. 由式(5)、式(6)可得 m 点电压及右端电流为:

$$\dot{V}_m = \dot{V}_R \cos \theta_2 + j \dot{I}_R Z_C \sin \theta_2. \quad (10)$$

$$\dot{I}_{m2} = \dot{I}_R \cos \theta_2 + j \frac{\dot{V}_R}{Z_C} \sin \theta_2. \quad (11)$$

则补偿器电流为:

$$\dot{I}_B = j B_{sh} \dot{V}_m = j B_{sh} (\dot{V}_R \cos \theta_2 + j \dot{I}_R Z_C \sin \theta_2). \quad (12)$$

m 点左端电流为:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{m1} = \dot{I}_{m2} + \dot{I}_B &= \dot{I}_R (\cos \theta_2 - B_{sh} Z_C \sin \theta_2) + \\ & j \dot{V}_R \left(\frac{1}{Z_C} \sin \theta_2 + B_{sh} \cos \theta_2 \right). \end{aligned} \quad (13)$$

由式(5)、式(10)、式(13)可得始端电压为:

$$\begin{aligned} \dot{V}_s = \dot{V}_R (\cos \theta - B_{sh} Z_C \sin \theta_1 \cos \theta_2) + \\ j \dot{I}_R (Z_C \sin \theta - B_{sh} Z_C^2 \sin \theta_1 \sin \theta_2). \end{aligned} \quad (14)$$

定义等效阻抗为:

$$x_{eq} = Z_C \sin \theta - B_{sh} Z_C^2 \sin \theta_1 \sin \theta_2. \quad (15)$$

电压系数为:

$$K_V = \cos \theta - B_{sh} Z_C \sin \theta_1 \cos \theta_2. \quad (16)$$

则式(14)可改写为:

$$\dot{V}_s = K_V \dot{V}_R + j \dot{I}_R x_{eq}. \quad (17)$$

3.2 中间有串补的超高压长线的功角特性方程

图4示出中间有串联补偿的超高压长线. 图中, $-jx_c$ 为补偿装置的电抗 ($x_c > 0$ 为容性, $x_c < 0$ 为感性).

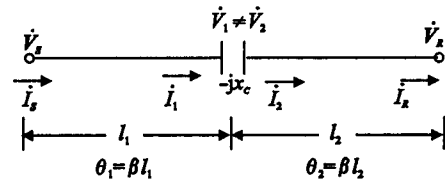


图4 中间有串补的长线

设补偿电容左、右两端电压分别为 \dot{V}_1 、 \dot{V}_2 . 同理, 由 R 端电压、电流向 S 端倒推可得:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_R \cos \theta_2 + j \dot{I}_R Z_C \sin \theta_2. \quad (18)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_R \cos \theta_2 + j \frac{\dot{V}_R}{Z_C} \sin \theta_2. \quad (19)$$

由 $\dot{I}_1 = \dot{I}_2$ 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = (\dot{V}_R \cos \theta_2 + j \dot{I}_R Z_C \sin \theta_2) - \\ j (\dot{I}_R \cos \theta_2 + j \frac{\dot{V}_R}{Z_C} \sin \theta_2) x_c. \end{aligned} \quad (20)$$

由式(5)、式(19)、式(20)可得始端电压为:

$$\begin{aligned} \dot{V}_s = \dot{V}_R (\cos \theta + \frac{x_c}{Z_C} \cos \theta_1 \sin \theta_2) + \\ j \dot{I}_R (Z_C \sin \theta - x_c \cos \theta_1 \cos \theta_2), \end{aligned} \quad (21)$$

将式(21)改写为与式(17)相同的形式, 即

$$\dot{V}_s = K_V \dot{V}_R + j \dot{I}_R x_{eq}. \quad (22)$$

式(22)中的等效阻抗为:

$$x_{eq} = Z_c \sin\theta - x_c \cos\theta_1 \cos\theta_2. \quad (23)$$

电压系数为:

$$K_V = \cos\theta + \frac{x_c}{Z_c} \cos\theta_1 \sin\theta_2. \quad (24)$$

上述推证表明,不同中间补偿状态的线路的差别都可归纳为等效阻抗 x_{eq} 和电压系数 K_V 的不同,补偿的影响反应为对等效阻抗 x_{eq} 和电压系数 K_V 的修正.

4 通用相量图与功角特性方程

由前述推导可以看出,中间有各种补偿的超高压长线总可以由 R 端逐级推向 S 端,最后得到形如式(17)的表达式,由此可以得出适用于各种中间补偿状态的超高压长线的通用相量图,如图 5 所示.

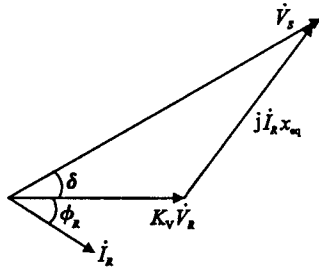


图 5 超高压长线的通用相量图

其功角特性方程均可写成下列形式:

$$P_R = \frac{V_S V_R}{x_{eq}} \sin\delta. \quad (25)$$

$$Q_R = \frac{V_R}{x_{eq}} (V_S \cos\delta - V_R K_V). \quad (26)$$

表 1 列举出超高压长线在中间无补偿、中间并补、中间串补 3 种情况下的等效阻抗 x_{eq} 与电压系数 K_V .

表 1 超高压长线的等效阻抗和电压系数

中间补偿状态	等效阻抗 x_{eq}	电压系数 K_V
无补偿	$Z_c \sin\theta$	$\cos\theta$
并联补偿	$Z_c \sin\theta - B_{\mu} Z_c^2 \sin\theta_1 \sin\theta_2$	$\cos\theta - B_{\mu} Z_c \sin\theta_1 \cos\theta_2$
串联补偿	$Z_c \sin\theta - x_c \cos\theta_1 \cos\theta_2$	$\cos\theta + \frac{x_c}{Z_c} \cos\theta_1 \sin\theta_2$

由式(25)和式(26)可见,在线路两端恒压控制的情况下,等效阻抗 x_{eq} 和电压系数 K_V 是有功和无功传输能力的决定因素:

1) x_{eq} 决定有功和无功的传输能力,线路的极限传输功率随 x_{eq} 的减小而提高.

2) K_V 仅对无功的传输产生影响,传输至 R 端的无功随 K_V 的减小而增加.

因此,在通用传输模型中各种中间补偿的效果均反应为对等效阻抗 x_{eq} 和电压系数 K_V 的修正,从而使概念清晰、分析计算简化.

由表 1 可见,与无补偿相比较, x_{eq} 和 K_V 中的第二项就是中间补偿的效果,其对等效阻抗 x_{eq} 和电压系数

K_V 都要产生影响,并与补偿装置的安装位置 (θ_1 、 θ_2) 有关.

众所周知,在集中参数输电线模型中,串补电容减小输电线的阻抗的效果与安装位置无关.然而,在分布参数输电线模型中的情况却并非如此.由表 1 可见,在线路长度 (θ) 一定的条件下,等效阻抗 x_{eq} 与串补电容的安装位置 (θ_1 、 θ_2) 相关,当串补电容安装于线路中点 ($\theta_1 = \theta_2$) 时,等效阻抗 x_{eq} 最小,补偿效果最佳.

假定串补与并补装置均为容性并安装在线路的中点 ($\theta_1 = \theta_2 = \theta/2$),由表 1 可以明显地看出并补与串补对等效阻抗 x_{eq} 和电压系数 K_V 产生影响是不相同的:

1) 串补与并补均使等效阻抗 x_{eq} 减小,但当线路很短 (θ 很小) 时,只有串补对等效阻抗 x_{eq} 产生影响;随着线路的增长 (θ 加大),串补对等效阻抗 x_{eq} 的影响减小,并补对等效阻抗 x_{eq} 的影响加大.

2) 容性串补使 K_V 加大,容性并补使 K_V 减小,其影响随线路的增长而加大.

5 结论

1) 超高压长线不论中间是否有补偿,也不论补偿形式如何,都可以由同一形式的功角特性方程和相量图来描述,该模型结构简单,应用方便.

2) 等效阻抗 x_{eq} 和电压系数 K_V 是通用功角特性方程和相量图中的 2 个特征参数,由这 2 个参数可以表达出超高压长线的有功和无功传输能力: x_{eq} 决定有功和无功的传输能力, K_V 仅对无功的传输产生影响.

3) 在通用功角特性方程和相量图中,通过对等效阻抗 x_{eq} 和电压系数 K_V 的修正,即可反应各种中间补偿的效果及中间补偿装置安装位置对补偿效果的影响,从而使概念清晰、分析计算简化.

参考文献:

- [1] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京:中国电力出版社,1995.
- [2] 何利铨. 电力系统有功功率与无功功率控制[M]. 重庆:重庆大学出版社,1995.
- [3] 成涛,林莉. 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(自然科学版),2001,24(4):111-113.
- [4] 李乃湖. 500 kV 远距离交流输电系统的无功补偿[J]. 中国电力,1994,(3):6-8.
- [5] 钟胜. 与超高压输电线路加装串补装置有关的系统问题及其解决方案[J]. 电网技术,2004,28(6):26-30.
- [6] 牛晓民. 超高压串联补偿输电线路的潜供电流和恢复电压[J]. 电网技术,1998,22(9):9-12.
- [7] KUNDUR P 著. 电力系统稳定与控制[M]. 本书翻译组译. 北京:中国电力出版社,2002.
- [8] TAYLOR C W 著. 电力系统电压稳定[M]. 王伟胜译. 北京:中国电力出版社,2002.

Coupled Conduction-convective Heat Transfer in the Louvered Fin Heat Exchanger

QI Bo, LI Long-jian, CUI Wen-zhi, CHEN Qing-hua

(College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The heat transfer process in the louvered fin heat exchanger is analyzed, and the corresponding physical and mathematical models on the coupled conduction-convective heat transfer for the louver fin geometry are proposed. The control volume-based finite element method (CVFEM) is employed to solve numerically the problem. The computed results reveal the flow structure and heat transfer in the geometry in detail. Compared with the empirical correlation of heat transfer and friction coefficients previously proposed, the computed results show better consistency with the experimental results.

Key words: louvered fin heat exchanger; coupled heat transfer; numerical simulation

(编辑 陈移峰)

(上接第 38 页)

General Phasor Diagram and Power-angle Characteristic Equations of Extra High Voltage Long Distance Transmission Line

LIN Li, MOU Dao-huai, SUN Cai-xin

(Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology Under the State Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Installing compensation equipments is a good manner to improve line transmission capacity and maintain power system stability in the extra high voltage (EHV) long distance transmission line. It is of benefit to analysis and control by describing the effect of compensation equipment correctly. At present, for predigesting analysis or increasing real-time calculating speed, concentrated parameter circuit model is widely used to analyze 500 kV EHV long distance transmission line which may cause bigger error. So it is necessary to get a more reasonable model. On the basic of voltage and current distributed equations of even distributed long distance line, this paper deduces phasor diagram and power-angle character equations of uncompensated long line. Then the authors analyze the effect of compensators and define two characteristic parameters, namely, equivalent impedance x_{eq} and voltage coefficient K_V . Any compensating states of EHV long distance transmission line, example installing the compensators in the line or not or which type of compensators, is described by the general phasor diagram and power-angle characteristic equations. Furthermore, increment calculation equations of two characteristic parameters is presented by the compensator parameters which may make the concepts clear and predigests analysis easily.

Key words: extra high voltage transmission; power-angle characteristic; equivalent impedance; voltage coefficient

(编辑 李胜春)