电力线路参数与等值模型

#电力系统分析 #郭庆来

要点

1. 理解电力系统稳态分析的基本建模思路
2. 了解电力线路的基本结构
3. 了解输电线相关的电磁现象，以及这种电磁现象使用何种参数表示
4. 掌握线路参数受哪些因素的影响
5. 掌握输电线路的等值电路表达方法

稳态建模的总体思路

建模，是为了用更准确的*数学手段*去描述*物理现象*。因此一定是从物理对象本身出发。
系统：由元件及其连接关系组成。所以系统建模，首先要解决元件建模。
思路：

- 观察、分析电气元件稳态的物理现象
- 元件建模：线路、变压器、负荷、发电机（主要是动态模型）
- 系统建模：如何描述元件之间的连接关系，如何构建网络方程
- 求解：网络方程如何求解

电力线路结构

架空线

基本结构：铁塔、导线、绝缘子、避雷线；

导线型号

- 单股线（较少采用）
- 多股绞线（同材料）：TJ（铜绞）、LJ（铝绞）、GJ（钢绞）
- 多股绞线（两种材料）：主要钢芯铝绞（钢-机械强度好、铝-导电性能好，互补）。常见标号：LGJ（铝-钢-绞）、LGJQ（铝-钢-绞-轻型，铝多一点）、LGJJ（铝-钢-绞-加强型，

钢多一点）

- 型号：标号 + 数字（载流额定截面积 mm^2） 例子：LGJ-150

对称排列与循环换位

思考：线路如何排布，参数才是*完全对称*的？AB-BC-CA之间的互感要相同
-为了保证参数对称，采用循环换位，每隔一定长度，交换ABC三相在空间上的排布顺序，从而整体上保证参数是对称。

分裂导线

超高压输电线路为抑制电晕放电和减少线路电抗所采取的一种导线架设方式，每相导线由几根直径较小的分导线组成，各分导线间隔一定距离并按对称多角形排列，而且布置在正多边形的顶点上。

> *思考1：为何要减少电抗？*
> *思考2：为什么能减少电抗？ （后面讲到）*

电缆

在金属线芯上进行绝缘挤包缠绕，用防护材料进行屏蔽、密封，能够传输电能的特殊导线。
铺设在地下、海底

线路的电磁现象和参数

加入交变电流

- 发热，消耗有功 $\Rightarrow R$
- 交变电流 $\Rightarrow$ 交变磁场 $\Rightarrow$ 感应电势（自感、互感）抵抗电流 $\Rightarrow X$
- 电流带来的效应，表现为串联

加入交变电压

- 绝缘漏电、电压超过一定数值后发光、放电（电晕） $\Rightarrow R'(G)$
- 电场 $\Rightarrow$ 线/线、线/地之间的电容 $\Rightarrow$ 交变电压产生电容电流 $\Rightarrow X'(B)$
- 电压带来的效应，表现为并联

单位长度线路等值电路与参数

用一个小微元表达（相当于是一个分布式参数，每公里对应一个小微元），包括r，x，g，b
如果要分析一条长线，要把这些小微元连成一长串

架空线参数计算

电阻r

> $r = \rho/nS$

- ρ：计算用电阻率，单位为 $\Omega \cdot mm^2/km$ ，随着温度不同需要修正。这个电阻率会略大于直流电阻率，因为：交流作用下的集肤效应（充分利用导线截面积的能力减弱了）、绞线时实际截面积相当于增加了；所以一般 ρ会增加一些，把这些等效作用补偿回来
- S：额定导电截面积，mm^2
- n：每相导线的根数（分裂数）

电抗x

> *本质上是要求解电感 L ，电感 $L = \Psi/I$ ，那么我们就需要知道，当在导线中通过单位电流 I 时，会产生多少磁链Ψ？*

基本的过程：$I \Rightarrow$ 磁场强度 $H \Rightarrow$ 磁感应强度 $B \Rightarrow$ 磁通 $\Phi \Rightarrow$ 磁链 Ψ

首先思考一个最基本的长直圆导线，一去一回，形成回路。那么这里面就会涉及到两个磁链：自磁链（自己电流产生的磁链）和互磁链（另一回电流围绕我产生的磁链），二者方向相反，是去磁关系。
注意磁场会进入到导线内部，所以导线外部有磁场，导线内部也有磁场，区别在于，外部的磁链是1匝，而内部磁链只套住了分数匝，因此，后续才有一个等效的半径缩小。

单相输电线（两根平行长直圆导线组成回路）

> $L_1 = L_2 = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{12}}{r'}$ *(亨/米)*

- D_{12}：两导线之间的距离，单位（米）
- $r' = e^{-\frac{1}{4}} r_0 = 0.779 r_0$，考虑内磁链之后的*等值半径*
- 两个导线之间是*去磁作用*，体现在对数符号中：$\ln \frac{D_{12}}{r'}$

如果想要改变（减小）L，有什么办法?

- 减小D_{12}，比如紧凑型线路，但是由于有绝缘问题，不能无限减小
- 增加r'，但成本太高，可以通过分裂导线，等效的增加半径

三相输电线 $D_{12} \Rightarrow D_{eq}$

> *对称排列*
> $L_A = L_B = L_C = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{r'}$
> *其中：D_{eq}是导线间距离（两两相等）*
> *如果是不对称排列，但经过换位，公式同上，但是D_{eq}变成了一个等效后的距离，即几何均距*
> $D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}$

分裂导线 $r' \Rightarrow D_s'$

> *导线分裂且换位*
> $L_A = L_B = L_C = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D_s'}$
> *其中 $D_s' = \sqrt[n]{nR^{n-1}r'}$，表示几何平均等值半径*
> *n为分裂数，R为分裂导线中心所在圆周半径 （$n=1$时，$D_s' \Rightarrow r'$）*

最终公式

> $x = \omega L_A \times 1000$ *欧/公里 （注意单位从前面的米变成了公里，所以要×1000)*
> $x = 0.1445 \lg \frac{D_{eq}}{D_s'}$ *欧/公里 （注意$\ln \Rightarrow \lg$）*
> $r' = 0.779 r_0$
> $D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}$
> $D_s' = \sqrt[n]{nR^{n-1}r'}$

电导g

主要由电晕引起，一般采用实测

> $g = \frac{\Delta P_g}{U^2} \times 10^{-3}$
> *U：kV，线电压*
> *ΔP_g：电晕损耗有功功率 kw/km (三相)*

在工程设计中，会要求晴天不发生电晕，所以一般情况下，可以忽略 g

电纳b

本质上是求解电容C。$C = q/U_{12}$，所以需要分析电位差U_{12}和电荷q的关系。
基于高斯定理： 电荷$q \Rightarrow$ 电力线密度 $D \Rightarrow$ 电场强度 $E \Rightarrow$ 电位差 U_{12}

单相输电线电容（线地）

> $C_{1n} = C_{2n} = \frac{0.0241}{\lg \frac{D_{12}}{r_0}} \times 10^{-6}$

注意，此处是 r_0，而非电抗表达式中的r'，这是因为电场无法进入导体内部，因此不存在压缩半径的问题。

- D_{12}变大，电容变小；
- r_0变大，电容变小；

三相输电线电容（线地）

> *对称排列*：$C_A = C_B = C_C = \frac{0.0241}{\lg \frac{D_{eq}}{r_0}} \times 10^{-6}\ (D_{12} \Rightarrow D_{eq})$
>
> *分裂导线（换位）*：$C_A = C_B = C_C = \frac{0.0241}{\lg \frac{D_{eq}}{D_S}} \times 10^{-6}\ (r_0 \Rightarrow D_S)$
>
> *其中*：$D_S = \sqrt[n]{nR^{n-1}r_0}$

其他与电抗类似。

电力线路的等值参数

> **要点**
>
> 如果在计算中使用r/x/g/b构成的分布式参数，相当于每条线路方程写出来都是偏微分方程，会非常繁琐。在实际中，我们往往不关心线路中间某点的电压，而只关心线路两端的电压，那么，我们就可以通过二端口等值网络，将分布式参数 $\Rightarrow$ 全长集中参数

推导思路：

- 建立分布式参数电路电路
- 建立使用分布式参数表示的网络方程：微分方程
- 求解微分方程，得到两个端口电压和电流的关系
- 利用集中参数构建二端口等值网络

每一个小微元表示成：

$$\begin{cases} d\dot{U} & = \dot{I}zdl \\ d\dot{I} & = \dot{U}ydl \end{cases}$$

两个端口，给定边界条件（比如端口2的电压、电流），那么可以解出线路任一点的电压电流
现在我们只关心端口1，不关心线路中间的点，那么可以得到

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh\sqrt{ZY} & \sqrt{Z/Y}\sinh\sqrt{ZY} \\ \sqrt{Y/Z}\sinh\sqrt{ZY} & \cosh\sqrt{ZY} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

其中：$Z = zL$ 总串联阻抗、$Y = yL$ 总并联导纳， L线路长度。
而*构造 Π 型等值电路*，可以完全得到和上面相同的结果，此时：

$$\begin{cases} Z' &= Z \cdot \frac{\sinh\sqrt{ZY}}{\sqrt{ZY}} \\ \frac{Y'}{2} &= \frac{Y}{2} \cdot \frac{\tanh\frac{\sqrt{ZY}}{2}}{\frac{\sqrt{ZY}}{2}} \end{cases} \tag{1}$$

线路长度 $\geq$ 750km时，分布参数效应不能忽略，使用（1）式计算；
300km $\leq$ 线路长度 $\leq$ 750km时，修正系数级数展开，保留前两项：

$$\begin{cases} Z' &= Z \cdot (1 + \frac{ZY}{6}) \\ \frac{Y'}{2} &= \frac{Y}{2} \cdot (1 - \frac{ZY}{12}) \end{cases} \tag{2}$$

在线路长度 $\leq$ 300km时，可以直接有

$$\begin{cases} Z' &= Z \\ \frac{Y'}{2} &= \frac{Y}{2} \end{cases} \tag{3}$$

若线路长度 $\leq$ 100km，可以进一步忽略并联电纳

$$\begin{cases} Z' &= Z \\ \frac{Y'}{2} &= 0 \end{cases} \tag{4}$$

注意：因为具有分布式参数的电力线路可以用集中参数来等值，所以在实际工程中，如果不知道导线的单位长度参数z,y, 也可以直接对线路进行实验，来通过实测数据间接地求出等值的Π型等值电路。

扩展思考

线路的实际参数是时变的，也就意味着，我们建立的数学模型和真实的物理系统之间有“偏差”，这种偏差对我们做分析有什么影响？实际中，我们有哪些可以应对的手段？