

相座标法电力系统稳态分析

徐 政 浙江大学电机系 (310027)

摘要 本文推导了应用相座标法进行电力系统稳态分析的发电机模型、变压器模型和输电线路模型。同时给出了一个应用相座标法进行电力系统复杂故障计算的算例。

关键词 相座标法 数学模型 故障计算

引言

除了潮流计算之外,至少还有如下几个方面属于电力系统稳态分析的范围:(1)电力系统故障计算;(2)潜供电流计算;(3)工频过电压计算;(4)电磁暂态计算所需的初始值计算;(5)谐波渗透计算,即在谐波源已知的情况下,计算谐波电压和谐波电流在系统中的分布;(6)系统中的某些物理量的频率特性计算等。以往,电力系统稳态分析大多以对称分量法为基础。但是在如下几种场合:例如输电线路不换位,系统负荷不平衡,变压器结构不对称,多重复杂故障以及同杆架设的多回线间的跨线故障等情况,使用对称分量法并不一定合适^[1]。而使用直接计算a、b、c各相电压电流的相座标法^[2]却是简单和有效的。用相座标法进行电力系统稳态分析的关键问题是建立相座标下的发电机模型、变压器模型和输电线路模型。

1 相座标系统下的发电机模型

在电力系统稳态分析时,发电机的正序模型可采用E''恒定模型,如图1a所示,而负序模型和零序模型分别如图1b和图1c所示。其中负序电抗 X_2 常近似取 X''_d , X_0 为包含中性点接地电感线圈影响的发电机零序电抗。根据各序模型可立出发电机在(0,1,2)对称座标空间中的方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ j \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} y_0 & & \\ & y_1 & \\ & & y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $j = E''/jx''_d$, $y_0 = 1/jx_0$, $y_1 = 1/jx''_d$, $y_2 = 1/jx_2 = y_1$ 。

把方程1变换到相座标空间中可得

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j \\ a^2j \\ aj \end{bmatrix} - \frac{1}{3} \begin{bmatrix} y_0 + 2y_1 & y_0 - y_1 & y_0 - y_1 \\ y_0 - y_1 & y_0 + 2y_1 & y_0 - y_1 \\ y_0 - y_1 & y_0 - y_1 & y_0 + 2y_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

这里 $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ 。方程2即为同步发电机在相座标系统下的稳态模型。

2 多相变压器模型

变压器模型,是采用相座标法进行分析所遇到的一个首要问题,也是一个关键性的问题。在早期使用相座标法进行计算的文献中,主要篇幅就是论述变压器模型。通用的变压器模型并

本文1994年6月23日收稿

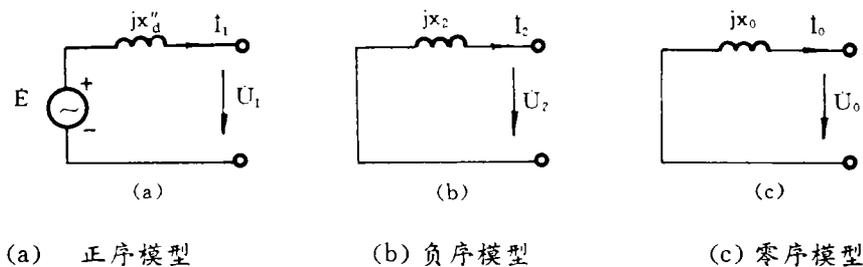


图1 发电机各序模型

不难建立^[3],但其中的大多数参数却是难以得到的。由于通常三相芯式变压器的特性与三相变压器组的特性并没有显著差别^[3],因此我们引入如下一个近似假设:一般的多相变压器可以当作相应的由单相变压器组成的多相变压器组来处理。即假定多相变压器相与相之间没有耦合,从而可以分相单独建立模型。值得指出的是,上述假设等价于假定变压器的零序激磁电抗等于正序或负序激磁电抗。因此,上述假设对于三相四柱式或壳式变压器,实际上是成立的,而对于三相三柱式变压器,可能会引起一定的误差^[4]。根据上述假设,寻求多相变压器模型就归结为寻求单相变压器的模型,由单相变压器的模型是容易得到的。

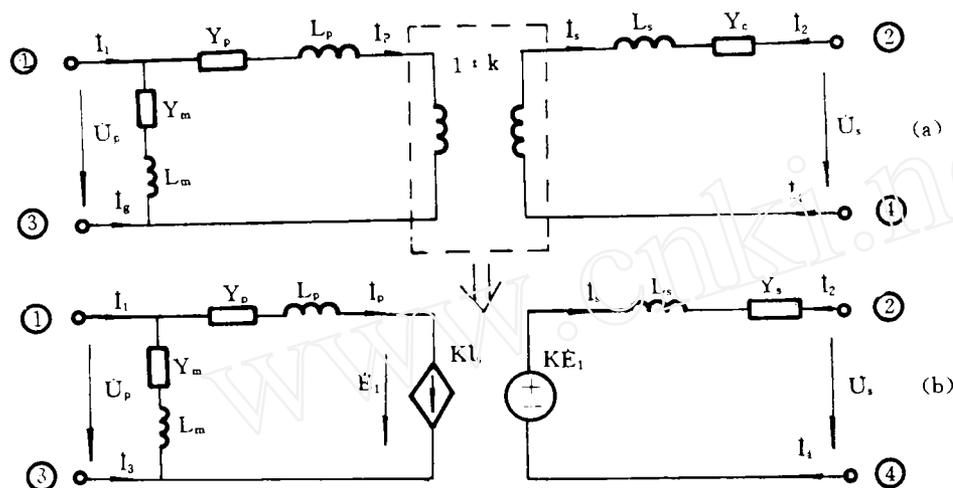


图2 双绕组变压器受控源模型

双绕组变压器的 Γ 型等效电路如图2a所示,将理想变压器用受控源等值,就得图2b的受控源模型。在电力系统稳态分析时,常将变压器的激磁支路忽略。

下面具体导出图2所示双绕组变压器的模型,推导时忽略激磁支路的作用。根据图2b有

$$\dot{U}_p = K\dot{I}_s(r_p + j\omega L_p) + \dot{E}_1 = KZ_p\dot{I}_s + \dot{E}_1 \quad (3)$$

$$K\dot{E}_1 = \dot{I}_s(r_s + j\omega L_s) + \dot{U}_s = Z_s\dot{I}_s + \dot{U}_s \quad (4)$$

$$\text{因此 } K\dot{U}_p = (K^2Z_p + Z_s)\dot{I}_s + \dot{U}_s \quad (5)$$

$$\text{故 } \dot{I}_s = \frac{k}{k^2z_p + z_s}\dot{U}_p - \frac{1}{k^2z_p + z_s}\dot{U}_s \quad (6)$$

$$\text{令 } y = \frac{1}{k^2 z_p + z_s} \quad (7)$$

显然 y 是归算到副边(S)的变压器漏阻抗所对应的导纳。将 \dot{U}_p, \dot{U}_s 写成电位差 $(\dot{U}_1 - \dot{U}_2), (\dot{U}_2 - \dot{U}_4)$ 的形式,可得

$$\dot{I}_s = ky\dot{U}_1 - y\dot{U}_2 - ky\dot{U}_3 + y\dot{U}_4 \quad (8)$$

$$\dot{I}_p = k\dot{I}_s = k^2y\dot{U}_1 - ky\dot{U}_2 - k^2y\dot{U}_3 + ky\dot{U}_4 \quad (9)$$

引入节点的注入电流形式: $\dot{I}_p = \dot{I}_1 = -\dot{I}_3, \dot{I}_s = \dot{I}_4 = -\dot{I}_2$,从而可得节点方程为

$$\begin{bmatrix} k^2y & -ky & -k^2y & ky \\ -ky & y & ky & -y \\ -k^2y & ky & k^2y & -ky \\ ky & -y & -ky & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \\ \dot{U}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \\ \dot{I}_4 \end{bmatrix} \quad (10)$$

上式即为双绕组变压器的模型。实际求解时,可将上式作为一个组件直接插入系统的导纳矩阵中。

3 多相输电线路模型

当采用相座标法进行分析时,不同结构的输电线路皆可作为多相输电线路来处理,例如有耦合的双回线可作为六相输电线路来处理,同杆架设的一回三相输电线路和一回双极直流线路可以当作五相输电线路来处理。对于长度不超过 200 公里的多相输电线路,工频稳态分析时,采用集中参数的等值 π 模型,已能保证足够的精度。而对于长距离的多相输电线路,特别是进行谐波计算和频率特性分析时,通常采用分布参数的多相输电线路模型,当然也可采用多个 π 型等值电路级联来模拟。下面分别导出多相输电线路的集中参数 π 模型和分布参数模型。

3.1 多相输电线路的集中参数 π 模型

多相输电线路的 π 型等值电路如图 3 所示,其中 R, L 分别为线路的串联电阻矩阵和电感矩阵, C 为线路的并联电容矩阵。 \dot{U}_s 和 \dot{U}_T 分别为多相输电线路起点和终点的相电压列向量, \dot{I}_s 和 \dot{I}_T 分别为线路起点和终点的相电流列向量。由图 3 不难写出。

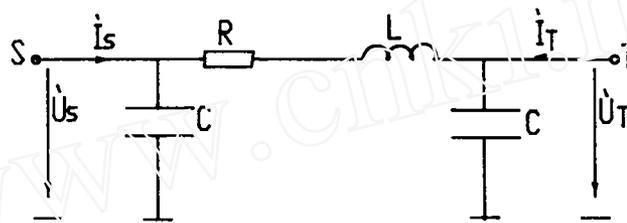


图 3 多相输电线路的 π 型等值电路

$$\dot{I}_s = j\omega C \dot{U}_s + (R + j\omega L)^{-1}(\dot{U}_s - \dot{U}_T) \quad (11)$$

$$\dot{I}_T = j\omega C \dot{U}_T + (R + j\omega L)^{-1}(\dot{I}_T - \dot{U}_s) \quad (12)$$

因此

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_s \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega C + (R + j\omega L)^{-1} & -(R + j\omega L)^{-1} \\ -(R + j\omega L)^{-1} & j\omega C + (R + j\omega L)^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_s \\ \dot{U}_T \end{bmatrix} \quad (13)$$

上式即为多相输电线路 π 型等值电路的稳态分析模型。

3.2 多相输电线路的分布参数模型

描述多相输电线路的频域方程来

$$-\frac{d\dot{U}_{ph}}{dx} = Z\dot{I}_{ph} \quad (14)$$

$$-\frac{d\dot{I}_{ph}}{dx} = Y\dot{U}_{ph} \quad (15)$$

上式中, Z 和 Y 分别为线路单位长度的串联阻抗矩阵和并联导纳矩阵, \dot{U}_{ph} 和 \dot{I}_{ph} 分别为相电压列向量和相电流列向量, 各量的参考方向见图 4。对式 14 再求导一次并以式 15 代入可得

$$\frac{d^2\dot{U}_{ph}}{dx^2} = ZY\dot{U}_{ph} \quad (16)$$

设矩阵 ZY 可通过变换矩阵 S 对角化^[5], 即

$$S^{-1}ZY S = \Lambda \quad (17)$$

其中 Λ 为对角矩阵。作相—模变换

$$\dot{U}_{ph} = S\dot{U}_m, \dot{U}_m = s^{-1}\dot{U}_{ph} \quad (18)$$

可使方程 16 化为

$$\frac{d^2\dot{U}_m}{dx^2} = \Lambda\dot{U}_m$$

由于 Λ 为复对角矩阵, 因此可令 $\Lambda = r^2$

$$(20)$$

这里 Λ 也是复对角矩阵。求解方程 19 有

$$\dot{U}_m = [e^{rx} \quad e^{-rx}] \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

上式中, C_1 和 C_2 分别为待定的常数向量。由上式可得

$$\dot{U}_{ph} = s[e^{rx} \quad e^{-rx}] \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

据 14 有

$$\dot{I}_{ph} = -z^{-1}sr[e^{rx} \quad -e^{-rx}] \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \quad (23)$$

设 $x=0$ 时, $\dot{U}_{ph} = \dot{U}_s, \dot{I}_{ph} = \dot{I}_s$

$x=l$ 时, $\dot{U}_{ph} = \dot{U}_T, \dot{I}_{ph} = -\dot{I}_T$

将电压边界条件代入 22 有

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ e^{rl} & e^{-rl} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} s^{-1} \\ S^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_s \\ \dot{U}_T \end{bmatrix} \quad (24)$$

将电流边界条件代入 23 可得

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_s \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z^{-1}sr & \\ & -z^{-1}sr \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ e^{rl} & -e^{-rl} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \quad (25)$$

由 24 和 25 可得

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_s \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z^{-1}sr \cdot \text{cthr}l \cdot s^{-1} & -z^{-1}sr \cdot \text{sh}^{-1}rl \cdot s^{-1} \\ -z^{-1}sr \cdot \text{sh}^{-1}rl \cdot s^{-1} & z^{-1}sr \cdot \text{cthr}l \cdot s^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_s \\ \dot{U}_T \end{bmatrix} \quad (26)$$

上式即为多相输电线路稳态分析的分布参数模型或称长线模型。一般情况下, 对于特定的输电线路和特定的频率, 必须先求出变换矩阵 S 和对角矩阵 Λ , 然后求出 r , 最后即可求出方程 26 中的系数矩阵。但当线路均匀换位时, Z 和 Y 为平衡矩阵, 变换矩阵 S 是确定的。例如对于三相输电线路, S 可取对称分量变换矩阵或 karebauer 变换矩阵等, 而相应的 r 矩阵则是由正序、负序和零序传播系数构成的对角矩阵。

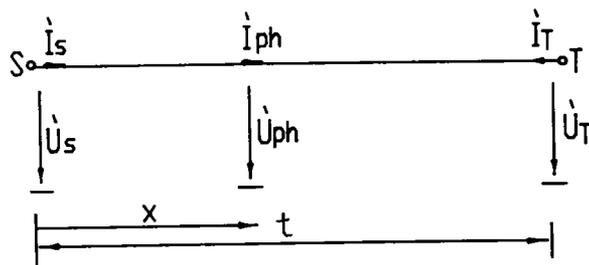


图 4 多相输电线路示意图

4 算例

根据上述模型,作者开发完成了一个采用相座标法的电力系统稳态分析程序。下面给出的算例是利用该程序进行一个二机系统的复杂故障计算。故障计算的原则是,对于断线故障,把断线处分成两个独立节点来处理;对于短路故障,根据不同的短路方式用跨接不同参数的阻抗来模拟。

算例取自文献^[6,7]的例题,原题如下:如图5所示系统,其参数(标公值)为:

发电机 L $Z_{(1)}'' =$
 $Z_{(2)} = j0.12, Z_0 = j0.10,$
 $E_L'' = 1.1 \angle 30^\circ$
 发电机 R $Z_{(1)}'' =$
 $Z_{(2)} = j0.15, Z_0 = j0.13,$
 $E_R'' = 1.0 \angle 0^\circ$



图5 两机系统接线图

变压器 AB $Z_{(1)} = Z_{(2)} = Z_0 = j0.10$

线路 B—C $Z_{(1)} = Z_{(2)} = j0.50, Z_0 = j1.00$

变压器 CD $Z_{(1)} = Z_{(2)} = Z_0 = j0.12$

要求计算当 F_1 处 A、B 相断线, F_2 处 B 相接地时,流经断路器 C 的电流及母线 C 的电压。

从原例题的计算过程可以看出,题设发电机 L 等值电势 E_L'' 的相位是正序网中忽略变压器联结组别所引起的相位移动时的相位角。而使用相座标法进行计算时,必须使用实际相位角,因此 E_L'' 的实际相位角应为 60° 。计算时,两点间短路用阻值 $R = 10^{-8} \text{ pu}$ 的电阻联结该两点来实现。计算结果及文献^[6,7],用对称分量法所得的结果皆列于表1。从表1可以看出,用对称分量法和利用相座标法所得的计算结果两者之间是一致的。

表1 算例结果及比较

相别	电压			电流		
	文献 ^[6]	文献 ^[7]	本文	文献 ^[6]	文献 ^[7]	本文
a	$0.990 \angle -1.18^\circ$	$0.9883 \angle -1.17^\circ$	$0.9903 \angle -1.16^\circ$	0	0	0
b	$0.016 \angle 60.7^\circ$	0	0	$3.85 \angle 150.1^\circ$	$3.7866 \angle 150.08^\circ$	$3.787 \angle 150.08^\circ$
c	$0.990 \angle 128.7^\circ$	$0.990 \angle 128.55^\circ$	$0.990 \angle 128.55^\circ$	$0.487 \angle -56.1^\circ$	$0.4765 \angle -56.28^\circ$	$0.4768 \angle -56.24^\circ$

5 结论

(1)用相座标法进行电力系统分析不但数学模型简单、适应性广、而且潜力巨大,在很多场合大有替代对称分量法的趋势。

(2)本文导出的相座标系统下的发电机模型,变压器模型和输电线路模型是有价值的,能满足实际工程计算的要求。

参考文献

- 1 关根泰次著,蒋建民等译.电力系统暂态解析论.机械工业出版社,1989,12,第六章
- 2 徐政.对称分量法与相座标法评述.华东电力.1993年第11期,PP1~2
- 3 Chen Mo-shing, W. E. Diuon Power system Modelling, Proceedings of the IEEE vol62 NO 7

July 1974

- 4 南京工学院主编. 电力系统. 电力工业出版社, 1980, 8, 第八章
- 5 H. W. Dommel 著, 李永庄等译. 电力系统电磁暂态计算理论. 水利电力出版社, 1991, 8. 第四章
- 6 P. M. Anderson. Analysis of Faulted Power System Iowa state university Press, 1973, Chapter 9
- 7 华北电力学院主编. 电力系统故障分析. 电力工业出版社, 1980, 6, 第七章

《低压电器》征订启事

《低压电器》杂志为机械工业部部批刊物, 双月刊, 是低压电器专业综合性技术刊物, 曾获 1991~1992 年度上海市优秀科技期刊奖, 1991~1992 年度机电部优秀科技期刊二等奖, 首届全国优秀科技期刊二等奖。主要刊载全国低压电器的研究、设计、工艺、选用、维修、试验、质量管理、节能和国内外标准动态等主要内容, 同时还刊登国外低压电器理论、技术开发动态及国外信息。内容丰富、实用、通俗精练, 适合广大科研、设计、使用人员及专业院校师生、电工阅读, 欢迎单位和个人订阅。代号 4-200, 邮政编码 200063, 公开发行。邮局从 1994 年 11 月起征订 1995 年上半年订户, 截止日期 11 月底, 根据邮局规定, 每半年征订一次, 不能破季订阅, 敬请广大读者注意, 请勿漏订。

《低压电器》编辑部

欢迎订阅 1995 年度《电子与仪表技术》

《电子与仪表技术》创刊于 1973 年, 由杭州市电子仪表工业公司技术情报站与浙江省电子学会、浙江省仪器仪表学会、杭州市电子学会、杭州市仪器仪表学会联合主办。

主要刊载国内外电子仪表专业技术方面的发展动态、新技术、新产品、新工艺、新材料和计算机技术及其应用方面的文章等。

主要栏目设有: 发展与综述、电子技术、仪表技术、自动化技术、计算机技术及应用、工艺、调研报告、讲座、译文、技术市场、新产品介绍、简讯等。

该刊是一份电子仪表行业的专业刊物, 适合于从事电子、仪表、计算机技术领域的研究、设计、制造、应用和教学的工程技术人员、管理人员、技术工人和大专院校的师生阅读参考。

全年订价: 12.00 元(季刊、含邮费)

银行信汇:

帐户: 杭州自动化技术研究院技术信息部

帐号: 455010515000920

开户银行: 中行杭州高新支行

邮局汇款: 杭州市文三路黄姑山路《电子与仪表技术》编辑部

邮编: 310012

《电子与仪表技术》编辑部