

“三相短路故障分析与计算的算法设计” 电力系统专
业本科课程设计论文

学生姓名：

学 号：专 业：电力系统及其自动化

日 期：

摘要

电力系统发生三相短路故障造成的危害性是最大的。作为电力系统三大计算之一，分析与计算三相短路故障的参数更为重要。本设计是通过两种不同的方法进行分析与计算三相短路故障的各参数，进一步提高短路故障分析与计算的精度和速度，为电力系统的规划设计、安全运行、设备选择、继电保护等提供重要依据。

基于 Matlab 最重要的组件之一 Simulink 中的电力元件库（SimPowerSystems）构建电力系统仿真模型，在 Matlab 的平台下仿真电力系统为工程设计和维修提供依据，同时也为电力研究带来大大的便利，利用 Simulink 中的画图工具搭建电力系统模型也是进行电力系统故障分析的常用方法，它让电力研究者从大量繁琐的理论分析及复杂的矩阵计算中解脱出来，让庞大的电力系统很直观的呈现在研究者的面前，从而将庞大的电力网搬进了计算机，为研究带来了巨大的便利。

关键词： 三相短路计算，Matlab，SimPowerSystems，仿真

目录

1. 绪论

- 1.1 电力系统三大计算.....
- 1.2 电力系统短路故障概述.....

2. 短路电流计算（解析法）

- 2.1 参数数据.....
- 2.2 电抗标幺值定义.....
- 2.3 短路次暂态电流（功率）标幺值计算.....
- 2.4 各元件电抗标幺值.....
- 2.5 三相短路电流及短路功率.....

3. 导纳矩阵形成与计算（Y 矩阵法）

- 3.1 导纳矩阵等值电路.....
- 3.2 导纳计算公式.....
- 3.3 变压器变比的定义.....
- 3.4 导纳矩阵的形成.....
- 3.5 三相短路电流及短路功率.....

4. 计算机算法设计

- 4.1 计算机编程语言.....
- 4.2 程序流程.....
- 4.3 程序清单及说明.....
- 4.4 程序结果及分析.....

5. 基于 Matlab 电力系统模型搭建与仿真

5.1 Matlab 简介.....	
5.2 总体设计.....	
5.2.1 设计内容概述.....	
5.2.2 设计方案简介.....	
5.3 详细设计.....	
5.3.1 电力元件设计.....	
5.3.2 电力系统模型的搭建.....	
5.3.3 电力系统模型三相短路仿真.....	
6. 结论.....	
7. 致谢.....	
8. 参考文献.....	
9. 附录.....	
9.1 系统等值电路图.....	
9.2 计算机算法设计流程图.....	
9.3 计算机算法设计程序清单.....	
9.4 Matlab 电力系统模型仿真图.....	

1. 绪论

1.1 电力系统三大计算

1.潮流计算

研究电力系统稳态运行情况的一种基本电气计算，常规潮流计算的任务是根据给定的运行条件和网路结构确定整个系统的运行状态，如各母线上的电压（幅值及相角）、网络中的功率分布以及功率损耗等。潮流计算的结果是电力系统稳定计算和故障分析的基础。

2.短路故障计算

主要研究电力系统中发生故障（包括短路、断线和非正常操作）时，故障电流、电压及其在电力网中的分布。短路电流计算是故障分析的主要内容。短路电流计算的目的是，确定短路故障的严重程度，选择电气设备参数。整定继电保护，分析系统中负序及零序电流的分布，从而确定其对电气设备和系统的影响。

3.稳定性计算

给定运行条件下的电力系统，在受到扰动后，重新回复到运行平衡状态的能力。系统中的多数变量可维持在一定的范围，使整个系统能稳定运行。根据性质的不同，电力系统稳定性可分为功角稳定、电压稳定和频率稳定三类。

1.2 电力系统短路故障概述

电力系统的短路故障是严重的，而又是发生几率最多的故障。一般说来，最严重的短路是三相短路。当发生短路时，其短路电流可达数万安以至十几万安，它们所产生的热效应和电动力效应将使电气设备遭受严重破坏。为此，当发生短路时，继电保护装置必须迅速切除故障线路，以避免故障部分继续遭受危害，并使非故障部分从不正常运行情况下解脱出来，这要求电气设备必须有足够的机械强度和热稳定度，开关电气设备必须具备足够的开断能力，即必须经得起“可能最大短路的侵扰”而不致损坏。

因此，电力系统短路电流计算是电力系统运行分析，设计计算的重要环节，许多电业设计单位和个人倾注极大精力从事这一工作的研究。由于电力系统结构复杂，随着生产发展，技术进步系统日趋扩大和复杂化，短路电流计算工作量也随之增大，采用计算机辅助计算势在必行。

1. 短路故障（横向故障）：电力系统正常运行情况以外的相与相之间或相与地（或中性线）之间的连接。

短路类型：4种。

- 1) 单相接地短路（发生概率最大的短路类型）
- 2) 两相短路
- 3) 两相短路接地
- 4) 三相短路（对称短路、最严重的短路类型）

2. 短路原因及危害

原因：客观（绝缘破坏：架空线绝缘子表面放电，大风、冰雹、台风）、主观（误操作）。

危害：短路电流大（热效应、电动效应）、故障点附件电压下降、功率不平衡失去稳定、不对称故障产生不平衡磁通影响通信线路。

3. 解决措施：继电保护快速隔离、自动重合闸、串联电抗器等。

2. 短路电流计算（解析法）

2.1 参数数据

设基准容量 $S_B=100\text{MV} \cdot \text{A}$ ；基准电压 $U_B=U_{av}\text{kV}$ 。

(1) S_B 的选取是为了计算元件参数标幺值计算方便，取 $S_B=100\text{MV} \cdot \text{A}$ ，可任意设值但必须唯一值进行分析与计算。

(2) U_B 的选取是根据所设计的题目可知系统电压有 110kV、6kV、10kV，而平均额定电压分别为 115、6.3、10.5kV。平均电压 U_{av} 与线路额定电压相差 5% 的原则，故取 $U_B=U_{av}$ 。

(3) I'' 为次暂态短路电流有效值，短路电流周期分量的时间 t 等于初值（零）时的有效值。满足产生最大短路电流的三个条件下的最大次暂态短路电流作为计算依据。

(4) i_M 为冲击电流，即为短路电流的最大瞬时值（满足产生最大短路电流的三个条件及时间 $t_K=0.01\text{s}$ ）。一般取冲击电流 $i_M=\sqrt{2} \times K_M \times I''=2.55 I''$ 。

(5) K_M 为短路电流冲击系数，主要取决于电路衰减时间常数和短路故障的时刻。其范围为 $1 \leq K_M \leq 2$ ，高压网络一般冲击系数 $K_M=1.8$ 。

2.2 电抗标幺值定义

(1) 发电机电抗标幺值

$$X_G = \frac{X_G \%}{100} \cdot \frac{S_B}{P_N \cos \varphi_N} \quad \text{公式①}$$

式中 $X_G \%$ ——发电机电抗百分数，由发电机铭牌参数的 $X_d'' \times 100 = X_G \%$ ；

S_B ——已设定的基准容量（基值功率）， $\text{MV} \cdot \text{A}$ ；

P_N ——发电机的额定有功功率， MW

$\cos \varphi_N$ ——发电机额定有功功率因数。

(2) 负载电抗标幺值

$$X_L = \frac{U^2}{S_L^2} Q_L \quad \text{公式②}$$

式中 U ——元件所在网络的电压标幺值；

S_L ——负载容量标幺值；

Q_L ——负载无功功率标幺值。

(3) 变压器电抗标么值

$$X_T = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_{NT}} \quad \text{公式③}$$

变压器中主要指电抗，因其电抗 $X_T \gg R_T$ ，即 R_T 可忽略，由变压器电抗有名值推出变压器电抗标么值为

$$X_T = \frac{S_B}{U_B^2} \cdot \frac{U_{NT}^2}{S_{NT}} \cdot \frac{U_K \%}{100} \quad \text{公式④}$$

式中 $U_K \%$ ——变压器阻抗电压百分数；

S_B ——基准容量，MV·A

S_{NT} 、 U_{NT} ——变压器铭牌参数给定额定容量，MV·A、额定电压，kV；

U_B ——基准电压 U_B 取平均电压 U_{av} ，kV。

(4) 线路电抗标么值

$$X_w = \frac{S_B}{U_B^2} x_0 l \quad \text{公式⑤}$$

式中 x_0 ——线路单位长度电抗；

l ——线路长度，km；

S_B ——基准容量，MV·A；

U_B ——输电线路额定平均电压，基准电压 $U_B = U_{av}$ ，kV。

输电线路的等值电路中有四个参数，一般电抗 $X_w \gg R_w$ ，故 $R_w \approx 0$ 。由于不做特殊说明，故电导、电纳一般不计，故而只求电抗标么值。

(5) 电动机电抗标么值（近似值）

$$X_{ML} = \frac{1}{6.5} \times \frac{S_B}{P_N \cos \varphi_N} \quad \text{公式⑥}$$

式中 S_B ——设定的基准容量，MV·A；

P_N ——电动机额定的有功功率，MW；

$\cos \varphi_N$ ——电动机额定有功功率因数。

2.3 短路次暂态电流（功率）标幺值计算

(1) 短路次暂态电流标幺值 (I_*'')

$$I_*'' = \frac{E''}{X_{K*}} \quad (\text{取 } E'' = 1)$$

$$I'' = I_*'' \times \frac{S_B}{\sqrt{3}U_B} \quad (\text{kA})$$

公式⑦

基准容量 $S_B = 100\text{MV} \cdot \text{A}$ ；基准电压 $U_B = U_{av}$ (kV)。

(2) 冲击电流 (i_M) 的计算

$$i_M = \sqrt{2} \times K_M \times I'' = \sqrt{2}c(1+e^{-0.01/T}) \times I'' = \sqrt{2} \times 1.8 \times I''$$

$$i_M = 2.55 \times I'' \quad (\text{kA})$$

公式⑧

(3) 短路容量 S_K 的计算

$$S_K = S_B \times I_*'' = \sqrt{3} \times U_B \times I'' \quad (\text{MA} \cdot \text{V})$$

公式⑨

2.4 各元件电抗标幺值

1. 电力系统等值电路如图 2

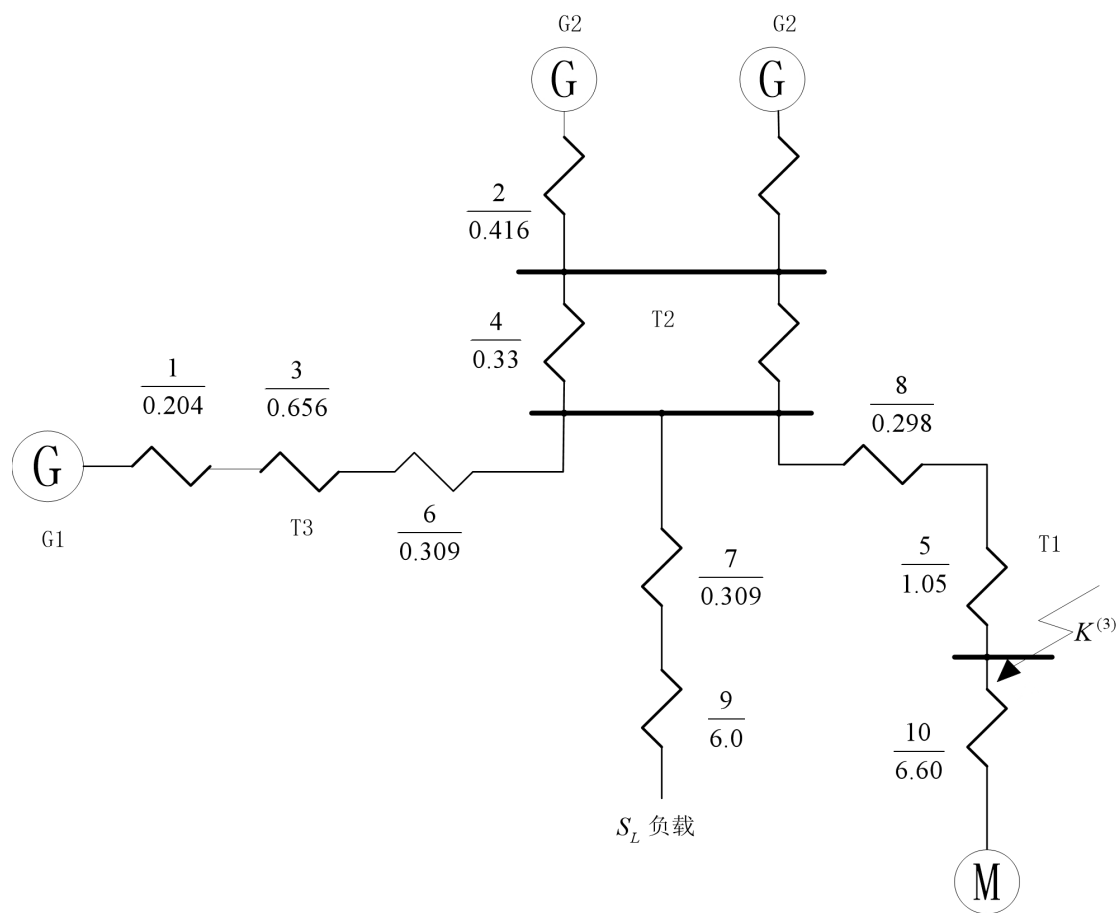


图2 电力系统等值电路

2. 各元件电抗标幺值的计算。

设基准容量 $S_B = 100 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ； 基准电压 $U_B = U_{av} (\text{kV})$ 。

(1) 发电机电抗标幺值由公式①得

$$X_1 = \frac{0.264 \times 100}{110/0.85} = 0.204; \quad X_2 = \frac{0.13 \times 100}{25/0.8} = 0.416$$

(2) 变压器电抗值标幺值由公式③得

$$X_3 = \frac{10.5}{100} \times \frac{100}{16} = 0.656; \quad X_4 = \frac{10.5}{100} \times \frac{100}{31.5} = 0.33; \quad X_5 = \frac{10.5}{100} \times \frac{100}{10} = 1.05$$

(3) 线路电抗标幺值由公式④得

$$X_6 = \frac{0.408 \times 100 \times 100}{115 \times 115} = 0.309 ; \quad X_7 = \frac{0.401 \times 100 \times 100}{115 \times 115} = 0.303 ;$$

$$X_8 = \frac{0.394 \times 100 \times 100}{115 \times 115} = 0.298$$

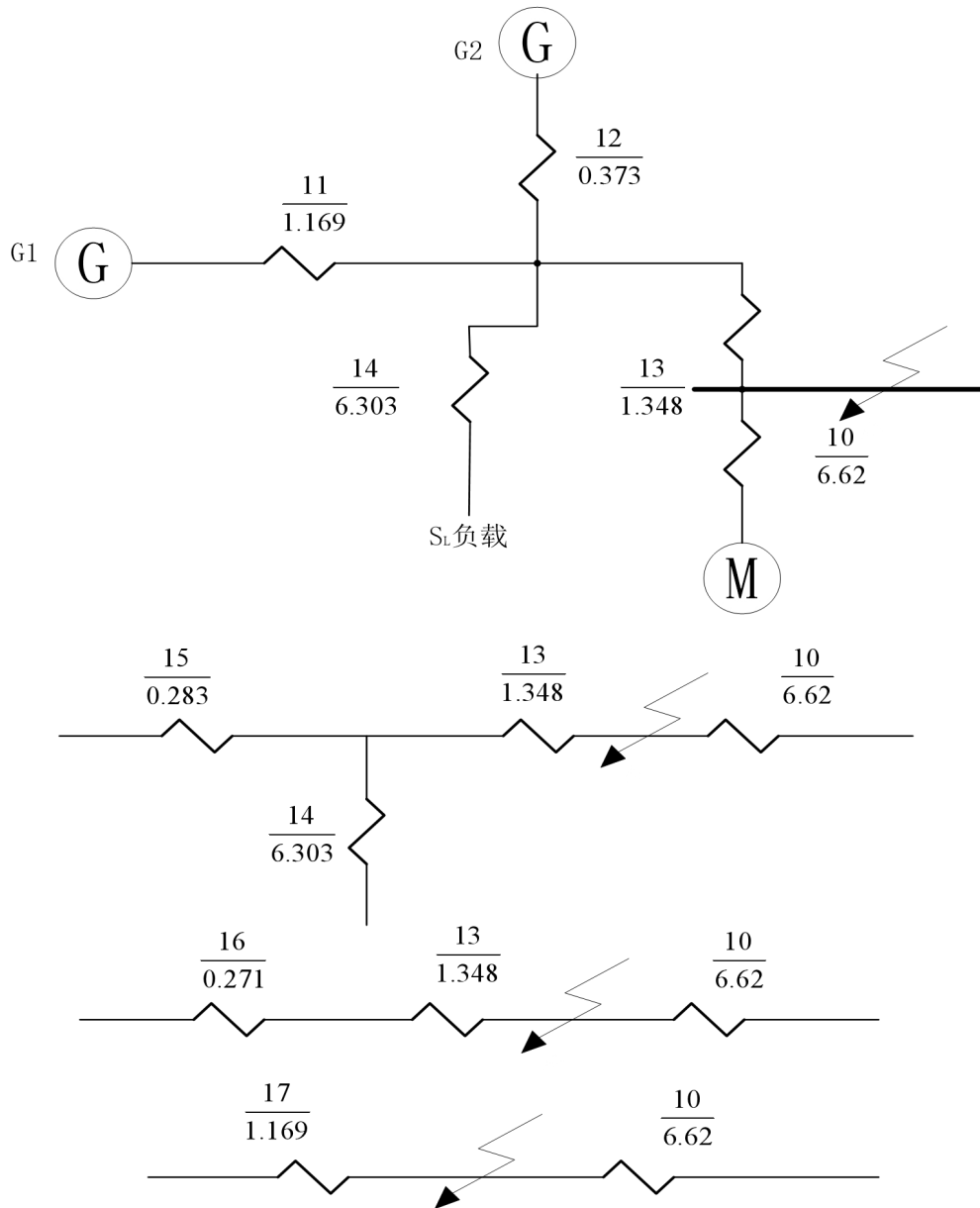


图3 简化等值电路

(4) 负载电抗标么值由公式②得

$$X_9 = \frac{1}{1/100} \times \frac{6}{100} = 6$$

(5) 电动机电抗标么值由公式⑥得

$$X_{10} = \frac{1 \times 100}{6.5 \times 2 / 0.86} = 6.62$$

3. 等值简化电路图。

(1) 等值电路简化过程如图 2 和图 3 所示。

$$X_{11} = X_1 + X_3 + X_6 = 0.204 + 0.656 + 0.309 = 1.169$$

$$X_{12} = \frac{1}{2}(X_2 + X_4) = 0.5 \times (0.416 + 0.33) = 0.373$$

$$X_{13} = X_5 + X_8 = 1.05 + 0.298 = 1.348$$

$$X_{14} = X_7 + X_9 = 0.303 + 6.0 = 6.303$$

$$X_{15} = X_{11} // X_{12} = \frac{1.169 \times 0.373}{1.169 + 0.373} = 0.283 \quad X_{16} = X_{15} // X_{14} = \frac{0.283 \times 6.303}{0.283 + 6.303} = 0.271$$

$$X_{17} = X_{16} + X_{13} = 0.271 + 1.348 = 1.619$$

(2) 考虑电动机的影响后，短路点的等值电抗为 $X_{\Sigma K}$

$$X_{\Sigma K} = \frac{X_{17} \times X_{10}}{X_{17} + X_{10}} = \frac{1.619 \times 6.62}{1.619 + 6.62} = 0.994$$

2.5 三相短路电流及短路功率

短路次暂态电流标么值: $I_K' = \frac{U}{X_{\Sigma K}} = \frac{1}{0.994} = 1.006$

短路次暂态电流有名值: $I'' = I_K' \times \frac{S_B}{\sqrt{3} \times U_B} = 1.006 \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 6.3} = 9.22(\text{kA})$

冲击电流: $i_M = 2.55 \times I'' = 2.55 \times 9.22 = 23.51(\text{kA})$

短路功率: $S_K = \sqrt{3} \times U_{av} \times I'' = \sqrt{3} \times 6.3 \times 9.22 = 105.4(\text{MV} \cdot \text{A})$

3. 导纳矩阵形成与计算 (Y 矩阵法)

3.1 导纳矩阵等值电路

导纳矩阵等值电路如图 4 所示，节点数为⑥，电抗标么值参考图 2。

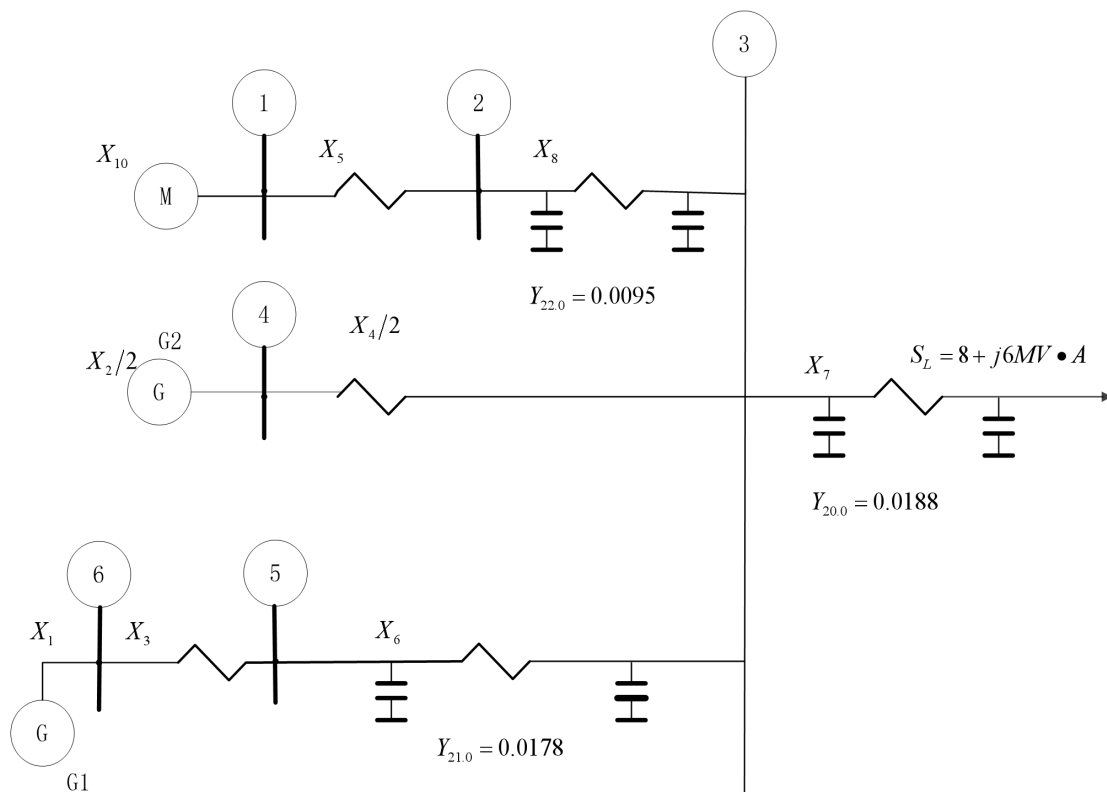


图4 等值电路图

3.2 导纳计算公式

$$\left. \begin{array}{l} \text{对角线元素} \quad Y_{ii} = \frac{I_i}{U_i} = I = \sum y_{ij} (j \in i, U_i = 1, U_j = 0, i = j) \\ \text{非对角线元素} \quad Y_{ji} = \frac{I_i}{U_j} = -\sum y_{ji} (U_j = 1, U_i = 0, i \neq j) \end{array} \right\} \quad \text{公式⑩}$$

式中 i, j — 第 i, j 节点；

I_i, U_i — i 节点电流、电压。

3.3 变压器变比的定义

$$K_{11} = \frac{(1+10\%)U_1/U_{B1}}{(1+5\%)U_2/U_{B2}}$$

式中 U_1 — 高压侧额定电压；

U_2 — 低压侧额定电压。

变压器变比标么值

$$K_3 = \frac{(1+10\%) \times 110/115}{(1+5\%) \times 10/10.5} = 1.05;$$

$$K_2 = 1.05;$$

$$K_1 = \frac{110/115}{(1+5\%) \times 6/6.3} = 0.96$$

3.4 导纳矩阵的形成

$$\text{对地电纳} \left\{ \begin{array}{l} Y_* = \frac{U_B^2}{S_B} \times b_0 \times l \\ Y_{20.0} = Y_{20'.0} = \frac{1}{2} Y_* = \frac{1}{2} \times \frac{115^2}{100} \times 2.92 \times 10^{-6} \times 100 = 0.0188 \\ Y_{21.0} = Y_{21'.0} = \frac{1}{2} Y_* = \frac{1}{2} \times \frac{115^2}{100} \times 2.97 \times 10^{-6} \times 100 = 0.0178 \\ Y_{22.0} = Y_{22'.0} = \frac{1}{2} Y_* = \frac{1}{2} \times \frac{115^2}{100} \times 2.97 \times 10^{-6} \times 50 = 0.0095 \end{array} \right.$$

$$Y_{11} = \frac{1}{jX_{10}} + \frac{1}{jX_5} = -j1.1; \quad Y_{12} = -\frac{1}{jX_5 \times K_1} = j0.992; \quad Y_{13} = 0; \quad Y_{14} = 0; \quad Y_{15} = 0; \quad Y_{16} = 0$$

$$Y_{21} = j0.922; \quad Y_{22} = Y_{22.0} + \frac{1}{jX_8} + \frac{1}{jX_5 \times K_1^2} = -j3.43; \quad Y_{23} = Y_{32} = -\frac{1}{jX_8} = j3.3557;$$

$$Y_{24} = 0; \quad Y_{25} = 0; \quad Y_{26} = 0; \quad Y_{31} = 0; \quad Y_{32} = j3.3557;$$

$$\begin{aligned}
Y_{33} &= y_3 + y_1 + y_2 + \frac{1}{jX_8} + \frac{1}{jX_6} + \frac{1}{jX_7} + \frac{1}{jX_4/2 \times K_2^2} = -j14.324; \\
Y_{34} &= Y_{43} = -\frac{1}{jX_4/2 \times K_2^2} = j5.43; \quad Y_{35} = Y_{53} = -\frac{1}{jX_6} = j3.2362; \\
Y_{36} &= Y_{63} = -\frac{1}{jX_7} = j3.3003; \\
Y_{41} &= 0; \quad Y_{42} = 0; \quad Y_{43} = j0.5270; \quad Y_{44} = \frac{1}{jX_2/2} + \frac{1}{jX_4/2} = -j10.8683; \\
Y_{45} &= 0; \quad Y_{46} = 0; \quad Y_{51} = 0; \quad Y_{52} = j0; \quad Y_{53} = j3.2362; \quad Y_{54} = 0; \\
Y_{55} &= y_2 + \frac{1}{jX_6} + \frac{1}{j(X_3) \times K_3^2} = -j4.601; \quad Y_{56} = 1.452; \quad Y_{61} = 0; \quad Y_{62} = 0; \\
Y_{63} &= j3.3003; \quad Y_{64} = 0; \quad Y_{65} = 1.452; \quad Y_{66} = \frac{1}{jX_1} + \frac{1}{jX_3 \times K_3} = -j6.354
\end{aligned}$$

$$Y = \begin{bmatrix} -j1.1 & j0.992 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ j0.992 & -j3.43 & j3.3557 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & j3.356 & -j14.324 & j5.43 & j3.236 & j3.3 \\ 0 & 0 & j5.43 & -j10.868 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & j3.236 & 0 & -j4.601 & j1.452 \\ 0 & 0 & j3.3 & 0 & j1.452 & -j6.354 \end{bmatrix}$$

3.5 三相短路电流及短路功率

短路点的电抗标么值为 $X_* = 1/Y_{11} = j0.9091$

短路点次暂态短路电流为 $I_K'' = Y_{11} \times U_1 = 1.1$

短路点次暂态短路电流有名值为 $I'' = I_K'' \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 6.3} = 10.08$ (kA)

短路点冲击电流为 $i_M = 2.55 \times I_K'' = 2.55 \times 10.08 = 25.705$ (kA)

短路点短路功率为 $S_K = \sqrt{3} \times U_{av} \times I'' = \sqrt{3} \times 6.3 \times 10.08 = 109.99$ (MV • A)

两种算法的次暂态短路电流比较误差为 $\Delta I = 10.08 - 9.22 = 0.86$ (kA)

4. 计算机算法设计

4.1 计算机编程语言

C 是一门通用语言，应用的面比较广，而 MatLab 是一门用于特殊用途的语言，提供了专业水平的符号计算，文字处理，可视化建模仿真和实时控制等功能。

Matlab 的基本数据单位是矩阵，它的指令表达式与数学、工程中常用的形式十分相似，故用 MATLAB 来解算问题要比用 C、FORTRAN 等语言完相同的事情简捷得多。在新的版本中也加入了对 C、FORTRAN、C++、JAVA 的支持。可以直接调用，用户也可以将自己编写的实用程序导入到 MATLAB 函数库中方便自己以后调用。

Matlab 是一个高度集成的系统，集科学计算、图象处理、声音处理于一体，具有极高的编程效率。近年来，Matlab 已经从最初的“矩阵实验室”，渗透到科学与工程计算的多个领域，在自动控制、信号处理、神经网络、模糊逻辑、小波分析等多个方向，都有着广泛的应用。

4.2 程序流程

见附录。

4.3 程序清单及说明

见附录。

4.4 程序结果及分析.....

见附录。

5. 基于 Matlab 电力系统模型搭建与仿真

5.1 Matlab 简介

MATLAB 是由美国 Mathworks 公司开发的大型软件。在 MATLAB 软件中，包括了两大部分：数学计算和工程仿真。其数学计算部分提供了强大的矩阵处理和绘图功能。在工程仿真方面，MATLAB 提供的软件支持几乎遍布各个工程领域，并且不断加以完善。在电力系统方面有专门的工具箱——SimPowerSystems，给从事电力研究的工作人员带来了巨大的便利。

Simulink 是 MATLAB 最重要的组件之一，它提供一个动态系统建模、仿真和综合分析的集成环境。在该环境中，无需大量书写程序，而只需要通过简单直观的鼠标操作，就可构造出复杂的系统。Simulink 具有适应面广、结构和流程清晰及仿真精细、贴近实际、效率高、灵活等优点，并基于以上优点 Simulink 已被广泛应用于控制理论和数字信号处理的复杂仿真和设计。同时有大量的第三方软件和硬件可应用于或被要求应用于 Simulink。其中电力行业的专用工具箱 SimPowerSystems 也在电力系统分析与计算中发挥了重大作用。

电力系统元件库 SimPowerSystems 包括 10 类库元件分别是电源元件 (ElectricalSources)、线路元件 (Elements)、电力电子元件 (Power Electronics)、电机元件 (Machines)、连接器元件 (Connectors)、电路测量仪器 (Measurements)、附加元件 (Extras)、演示教程 (Demos)、电力图形用户接口 (powergui) 和电力系统元件库模型 (powerlib_models)。

5.2 总体设计

5.2.1 设计内容概述

用 Matlab 中 Simulink 组件的 SimPowerSystems 工具箱构建设计要求所给的电力系统模型，然后在电动机母线上设置三相短路，运行该系统，通过测量元件获得该母线三相短路的短路电流。

5.2.2. 设计方案简介

- 步骤一：打开Matlab中Simulink组件的SimPowerSystems工具箱；
- 步骤二：在工具箱中找到设计要求所需的电气元件复制到Simulink界面中；
- 步骤三：双击所复制元件打开参数设置选项框，按设计要求设置相关参数；
- 步骤四：将相关元件放置在适合的位置并连线构成一个完整的系统。
- 步骤五：加入测量元件并设置节点的三相短路，然后运行电路，获得短路电流。

5.3 详细设计

在Matlab的SimPowerSystems工具箱中利用相关的电力元件搭建仿真模型并运行系统，设置短路点得出仿真结果。

5.3.1 电力元件设计

1. 三相电源

(1) 元件模型

三相电源(3-Phase Source)元件的模型如图5-1 所示，见附录。

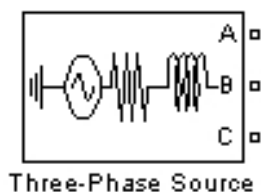


图5-1 三相电源

(2) 功能说明

三相电源是电路设计中常见的电路元件。三相电源是电路中最重要元件，它的运行特性对电力系统的运行状态起决定性的影响。三相电源元件提供了带有串联RLC支路的三相电源。

(3) 参数设置

双击三相电源元件，则弹出三相电源参数设置对话框，如图5-2所示，见附录。

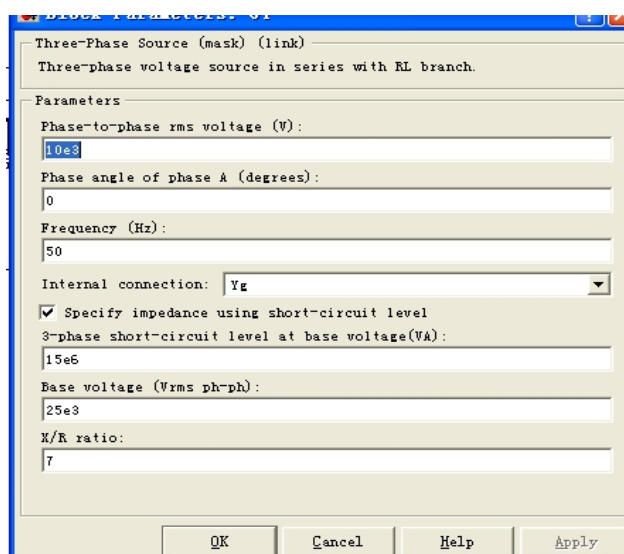


图5-2 三相电源参数设置对话框

2. 变压器元件

在电力系统电路中，变压器元件用来实现各种电路中的变压器。在变压器元件中包括 6 种元件，在本次仿真计算中采用三相变压器（双绕组）元件。

(1) 元件模型，如图5-3所示，见附录。

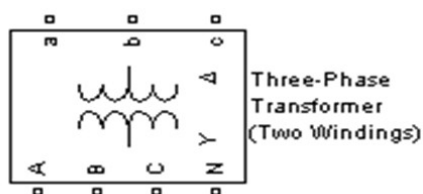


图5-3三相变压器（双绕组）元件

(2) 参数设置

双击三相变压器（双绕组）元件，则弹出参数设置对话框，如图5-4所示，见附录。

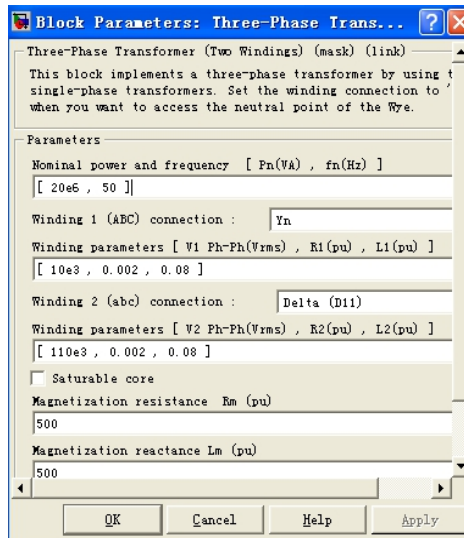


图5-4三相变压器（双绕组）元件

3. 输电线路

输电线路有两种包括双回线和单回线。

(1) 元件模型，如图5-5所示，见附录。

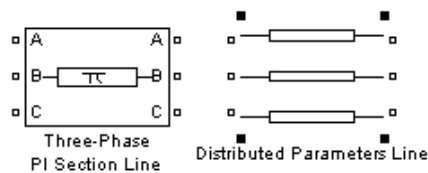
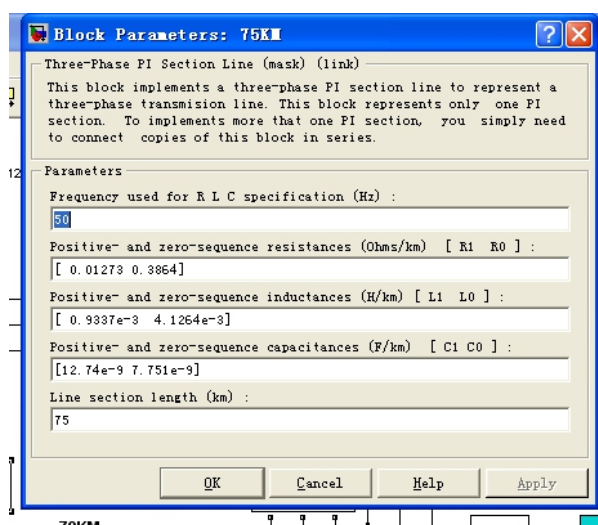


图5-5输电线路元件

(2) 参数设置

双击三相输电线路元件，在三相输电线路元件对话框中进行设置，如图5-6所示，见附录。



以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/235122020114011222>